CRDS-FY2015-FR-04

研究開発の俯瞰報告書

情報科学技術分野（2015年）

Panoramic View of the Information Science and Technology Field (2015)

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

JST－CRDS
センター長　吉川　弘之
2015 年 4 月 1 日

システム科学技術分野と情報科学技術分野について

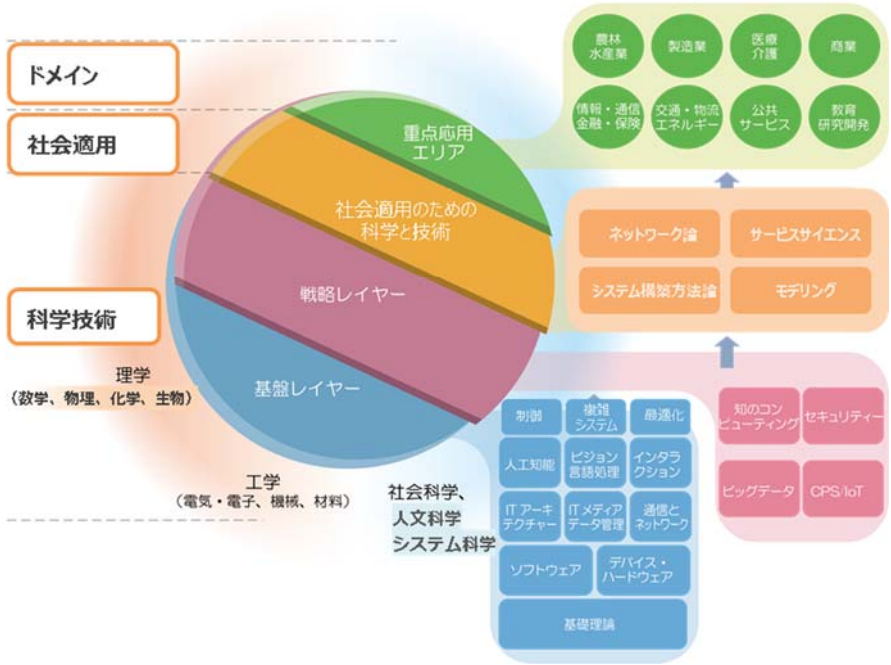
本 2015 年版俯瞰報告書は、2013 年版の発行後、主に 2014 年度にユニットの活動の中心として検討、作成してきたものである。

現在、情報通信技術の発達もあり、社会の構造が大きく変化しつつある。また、国費で行なわれている科学技術研究の成果を効率的に社会に還元することが強く求められている。このような状況の下、科学技術を社会に適用する領域の重要性を鑑み、システム科学技術分野と情報科学技術分野を融合して検討する活動を、新たに設置した「システム・情報科学技術ユニット」において平成 27 年 4 月から開始している。

システム科学技術も情報科学技術も、今後社会の基盤技術となることが期待され、それを社会に適用する過程で両者は切り離して考えられるものではない。実社会に、真に科学技術を適用するには、リアル世界とサイバー世界の関係を明らかにし、それらを統合するための新たな科学技術が必要である。そのために、情報科学技術とシステム科学技術を高いレベルで融合し、各要素および要素技術の統合化、システム化を通じて新たな科学技術を社会に適用する道筋をつけたいと考える。このような戦略的思想に基づき、従来の活動を新しいユニットに再編・強化するものである。

当該 2015 年版俯瞰報告書は、旧システム科学ユニットと旧情報科学技術ユニットで別々に上梓する。なお、新しいシステム・情報科学技術分野の統合俯瞰としては、次の図のように考えており、この俯瞰に沿った報告書は 2017 年版として作成する予定である。

システム・情報科学技術分野の俯瞰図



以　上

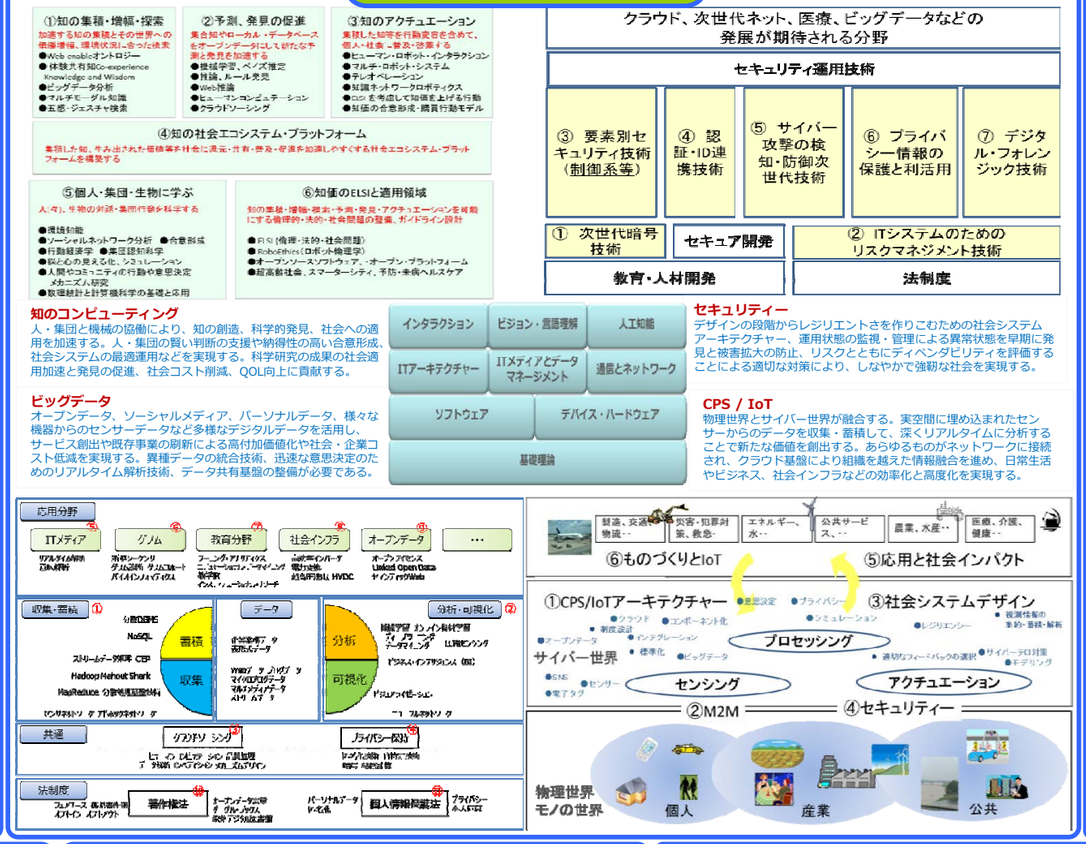
研究開発の俯瞰報告書（２０１５）　情報科学技術分野の概要

JST 研究開発戦略センター
情報科学技術ユニット

トレンドと課題

	トレンド	挑戦課題
技術	● ITの加速度的進歩が続く ● 様々なモノ・人が繋がる ● ビッグデータ処理技術が進む ● クラウド化の進展	● 森羅万象を対象とした処理形態 ● 異種データ、大量データ処理 ● データの信頼性、プライバシー保護 ● 社会基盤に求められるディペンダビリティー
経済	● ITによる新ビジネス創出 ● 市場のグローバル化 ● インターネットを介したサービスの進展 ● ロボットによる効率化 ● 機械による雇用の喪失	● ビッグデータによる社会コスト低減や付加価値の創造 ● クラウド基盤によるサービス経済の進化 ● ITを他の領域の基盤とする ● 社会・経済インパクトの評価とモデル化
社会・環境	● ITの社会浸透（社会インフラ化）の進展 ● 少子・高齢化 ● インフラ老朽化と自然災害の脅威 ● 資源の不足・枯渇 ● 社会的格差の拡大と社会の不安定化 ● セキュリティーの脅威	● 社会システムの統合と再構築 ● 防災・減災・復旧の高度化 ● 社会制度、倫理の研究（ELSI） ● 人間と共存するロボット
人間・文化	● 教育の新たな試み（MOOCs） ● ネット依存症（スマートフォン、ゲーム） ● 人間と機械の融合（ウェアラブル、インプランタブルデバイス） ● グローバル化に伴う稀少文化の消失	● 人と機械の新たな関係 ● 多様性・個別性に対応した質の高い教育・再教育・学習 ● 文化、知の理解と継承 ● 人・集団を賢くするIT

俯瞰と戦略的研究領域



ビジョン

CRDSが考えるビジョン
（出典：社会的期待と研究開発領域の邂逅に基づく「課題達成型」研究開発戦略の立案）

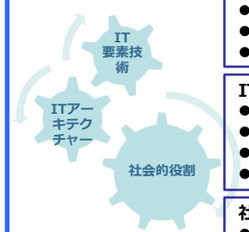
- 国際連携ができる社会
- 地球環境・エネルギー問題への対応力がある社会
- 社会インフラの保守・補修・構築力がある社会
- 心身の健康寿命がのばせる社会
- 一人ひとりが能力を発揮できる社会

ビジョン達成のためにITが社会・経済・文化・人類に影響を与える

- ITの継続的な進展を図る
- ITによる経済発展を本格的にする
- ITを社会基盤の一つとする
- ITの研究フロンティアとして、人・集団の精神や行動原理を探求し、知の向上をめざす

ITの社会的役割

IT要素技術の進化は、ITの使い方（ITアーキテクチャー）の変化を促し、それにより新たなITのアプリケーションが生まれ、社会的役割が拡大する。役割の拡大が、要素技術やアーキテクチャーの重要性を増大させ、それが次の進化に向けた技術革新を加速する。



IT要素技術の進化
- 高性能計算、高速大容量通信
- ビッグデータ、ロングテール、リアルタイム処理
- 数値計算から事務処理、知識処理へ
- モジュール化とミドルウェアの発展

ITアーキテクチャーの変化
- 集中と分散の動的バランス
- 実世界とサイバー世界の融合
- 人がつながる、モノがつながる
- 産業のサービス化を支える

社会的役割の拡大
- ビジネスのクリティカルインフラから社会のクリティカルインフラに
- 森羅万象（人、集団、機械）を支える技術に

社会的･経済的インパクト

社会と産業・経済へのインパクトをコスト削減という守りと、価値創造という攻めからとらえる。

社会システムのデザインと運用による効率的な社会の実現
- デザインの段階からITを意識し、公共サービスの質を向上
- 防災・減災に向けた、柔軟でロバストな社会システムの構築

社会・企業コストの低減による産業競争力の強化
- ITによる見える化や効率的な設計、実装による企業コストの大幅な低減

新しい価値の創造による新産業の育成
- ITによる従来産業の付加価値向上
- 新たなビジネスモデルによる新産業開拓

知の創造と伝播による豊かな社会の実現
- 科学的発見の加速、科学技術研究からイノベーションまでの時間短縮を行い、持続的イノベーションを可能とする
（科学研究→社会的価値の創出→科学研究への還元のサイクル）

諸外国のR&D動向

<米国>
- Cyber Physical Systems（2009年）
NSFを中心にCPSを構築するためのサイエンスと基盤技術の研究開発を支援。
規模：2012年までに73プロジェクトに65百万ドル
- ビッグデータイニシアチブ（2012年）
ビッグデータから知見を引き出すための技術開発。規模：総額200百万ドル
- 製造革新機構と全米イノベーションネットワーク（NNMI）構築（2012年）
産学コンソーシアムとネットワークを通じた新技術の拡散と技術導入を加速
規模：各コンソーシアムに70百万ドルの政府資金と同額の外部資金

<欧州>
- Internet of Things and Platforms for Connected Smart Objects（2014年）
IoTプラットフォームのアーキテクチャと相互運用性に係る研究開発
規模：51百万ユーロ（Work Programme 2014-2015）
- FI-PPP：Future Internet Public-Private Partnership（2011年）
インターネット技術による公共サービスのインフラと業務プロセスのスマート化
規模：5年で総額3億ユーロ
- Digital Catapult （2014年）
私有データの共有促進により、中小企業が迅速かつ低リスクでイノベーションを実現することを可能とするプラットフォームを複数の都市に開設
- Industrie 4.0（2013年）
生産拠点としてのドイツの未来を実現するアクションプラン。規模：2億ユーロ

<中国>
- ハイテク・サービス業の研究開発と産業化に関する通知（2012年）

<韓国>
- スマート国家具現のためのビッグデータマスタープラン（2012年）

エグゼクティブサマリー

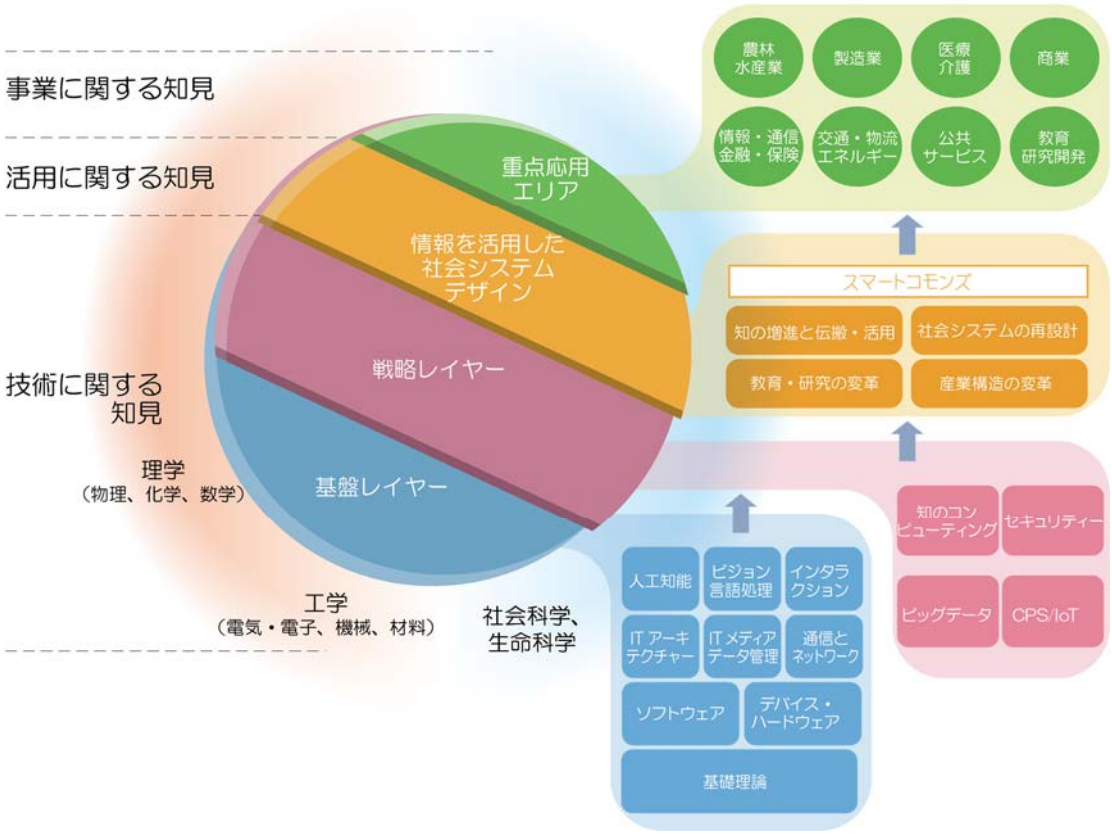
情報科学技術分野は、科学としてよって立つ基礎理論から、その実装としての電子部品・デバイスから情報通信機器や組込み機械、さらには情報システム・情報サービスまでの広範な産業を支える技術分野である。同時に、その汎用ツール的な性質から第二次、第三次産業はいうに及ばず、従来は直接関係ないと思われていた第一次産業や社会インフラ、社会システムの実装にまで深くかかわっている。本書では情報科学技術分野の技術を、社会と IT (Information Technology) の観点から、特に、社会システムをデザインするという観点で戦略的に取り組むべき戦略レイヤーと、それを下支えする基盤レイヤーに整理し、それぞれのレイヤーで今後わが国として注目すべき研究開発領域を特定した。情報科学技術分野の範囲と構造を下図に示す。情報科学技術分野の知見は、要素技術としての技術に関する知見、それを社会システムデザインとして活用するための知見、および重点応用エリアとしての事業に関する知見に大別できる。

技術に関する知見は、学問的に体系化された研究開発領域からなる「基盤レイヤー」と個別の要素技術だけではとらえられない時代の変化に対応するための研究開発領域からなる「戦略レイヤー」の二つに分けた。

活用に関する知見は、当分野の将来展望において、情報科学技術が社会基盤として広く浸透し、その発展が社会に及ぼす影響が非常に大きいことから、情報通信技術そのものだけでなく、社会システムデザインという文脈での研究開発領域からなる「情報を活用した社会システムデザイン」とした。

事業に関する知見は、情報科学技術を重点的に応用すべき事業ドメインでの事業化に関する研究開発領域からなる「重点応用エリア」に整理した。

情報科学技術分野の俯瞰図



情報科学技術は、半導体、回路実装、通信、ソフトウエア等多方面の技術革新により、コスト・性能面で格段の進歩をとげてきた。今日、コンピュータや情報通信ネットワークとして広く社会に浸透し、その技術進歩はあらゆるものを劇的に進歩させ続けている。システムの形態は、メインフレームから、クライアントサーバ型システム、そしてクラウドコンピューティングへと、集中と分散を繰り返し発展してきた。また、SNS (Social Network Service) や Wikipedia では、従来、システムの利用者であったユーザーの役割がプロシューマー（生産消費者)へと大きく変化した。情報サービスは、クラウドコンピューティングの登場によって、計算機環境やアプリケーションを所有することから、インターネット上のものを使用する形態へと移っている。カーナビや携帯電話による位置情報サービスは、ユーザーの所有する端末や、その場所での状況を判断した新しいサービスを普及させた。

20 世紀後半に生まれた情報ネットワーク社会（サイバー社会）は、21 世紀に入り、実世界と有機的に連携、統合化する動きが出てきた。米国では、サイバーフィジカルシステムのプロジェクトが進められ、すべてのモノがインターネットに接続される IoT (Internet of Things) という言葉も生まれた。これらによりもたらされる大量のデジタルデータはビッグデータという新たな潮流を生み出しビジネスや社会に大きな影響を与え始めた。一方で、人間の知的活動に関する研究の成果は、将棋やクイズ番組でトップクラスの人間を打ち負かすレベルにまで向上してきた。そして、その研究のフロンティアが、

脳そのものや知の獲得･発見･伝播の仕組みや集合知の構造などの解明に向かっている。これらの研究が、人類知の質的向上を促し、革新的な進歩を遂げる科学的成果を有効に速く社会に還元することにより､社会的インパクトを適正にもたらすことが期待される。このように、電子情報通信分野の技術開発や研究の対象は、半導体、ソフトウエア、通信ネットワークから人間の行動様式やビジネス活動、社会活動そのもののデザインにまで広がりつつある。

以下に、当該分野における俯瞰調査による日本、米国、欧州、中国、韓国の主な特長について記す。

＜日本＞

2014 年 6 月に改定された世界最先端 IT 国家創造宣言において、ブロードバンドなどのインフラ整備において世界最高水準となったものの、利用者ニーズを十分把握せず、組織を超えた業務改革（BPR）を行わなかったことで、IT の利便性や効率性が発揮できていないという反省を踏まえて、2020 年までに世界最高水準の IT 利活用社会の実現とその成果を国際展開すること、震災からの復興の加速化にも資することを目標に掲げている。そして、革新的な新産業・新サービスの創出及び全産業の成長を促進する社会、健康で安心して快適に生活できる世界一安全で災害に強い社会、公共サービスがワンストップで誰でもいつでも受けられる社会を目指すべき社会の姿として、成功モデルを実証するプロジェクトの推進や取り組みの進捗状況を定量的に評価するための KPI 設定など見える化を重視して取り組むことを掲げている。

＜米国＞

インターネットハイパージャイアントや伝統的 IT 企業が市場と技術開発を世界的にリードしている。政府としても米国イノベーション戦略において、次世代の教育と労働力創出、科学研究のリーダーシップ強化、先進的な社会インフラ構築、先端情報技術のエコシステム構築をイノベーションの基盤と位置づけて積極的に投資を行っている。エコシステムを構築すべき先端情報技術として、高速インターネットへのアクセス拡大、電力グリッドの近代化、高付加価値利用のための無線スペクトルの可用性拡大、セキュアなサイバー空間を挙げている。このような政策のもとで情報科学技術を活用した社会的課題に解決に加えて、基礎研究や人材育成についても国立科学財団（NSF）を中心に継続的に投資を行っている。

＜欧州＞

中長期の成長戦略 Europe 2020 の重要なイニシアチブの一つが情報通信戦略の欧州デジタルアジェンダである。このアジェンダでは高速インターネットと相互運用可能なアプリケーションに支えられた欧州域内のデジタル単一市場により持続可能な経済的・社会的便益を提供することを目的に掲げている。このような戦略を背景として FP7 の後継となる研究開発・イノベーション枠組みプログラム Horizon 2020 において、産官学連携での情報科学技術の発展、社会的課題へ対応するための情報科学技術の活用の 2 つの側面から研究開発への投資を行っている。また、欧州各国においても英国におけるオ

ープンデータ活用、ドイツにおける生産拠点としても競争力確保に向けた情報科学技術の活用（Industrie 4.0）など特色を持った取り組みがなされている。

＜中国＞

中国国内のインターネット上のコンテンツは国内固有のものとなっている場合が多く、グローバルな接続はファイヤーウォールで規制されているものの、百度、アリババ、テンセンなどのインターネット巨大企業が誕生している。2006 年～2020 年の科学技術政策の方針を示す国家中長期科学技術発展計画概要では、2020 年までに世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることを目標に掲げ、情報産業及び近代的なサービス業を重要分野の一つに特定し、優先的に研究開発に取り組むべきテーマとして、近代的なサービス業の情報支援技術及び大型応用ソフト、次世代のネットワークコア技術及びサービス、高効率で信頼性の高いコンピューター、センサー及びインテリジェント情報処理、デジタルメディア・プラットフォーム、高解像度の大スクリーン薄型ディスプレイ、重要システム向けの情報安全を挙げている。また、2006-2020 国家情報化発展戦略において 2020 年までの戦略目標として、総合情報インフラの基本的普及を目指すこと、情報技術の独自開発能力を大きく向上させること、情報産業の構造を全体的に改善すること、情報セキュリティー保護のレベルを大幅に向上させること、国民の経済や社会の情報化で顕著な成果を目指すこと、新しい形の工業発展モデルの基本的確立を目指すこと、情報化の推進に向けた国の制度・環境・政策の基本的整備を目指すこと、国民の情報技術の応用能力を大きく引き上げること、情報社会への移行の基礎づくりをすることが掲げられている。こうした産業的・政策的な背景と海外で経験を積んだ研究者の帰国・招聘により、研究開発の国際化と研究水準の向上が図られている。

＜韓国＞

サムスンを中心とする幾つかのグローバル企業が韓国の経済を牽引している。政府の取り組みとして、国民の創造的なアイデアが科学技術・ICT と結びつき、創業、新産業、新市場開拓につながり、質の高い雇用を生み出す「創造経済システム」の醸成に向けて「創造経済実現計画」を策定している。この計画において、起業しやすい環境づくり、ベンチャー・中小企業支援、成長動力の創出、グローバル創意人材養成、科学技術と ICT のイノベーション革新力強化、創造経済文化の醸成の 6 つの戦略が掲げられている。また、「創造経済ビタミンプロジェクト」において、科学・ICT と既存産業を融合させ、対象産業の高度化と問題解決を支援することが掲げられており、既存産業においても情報科学技術との融合（Convergence）による競争力の強化を目指している。科学技術・イノベーション戦略の主軸となる第 3 次科学技術基本計画において、国家戦略技術として、IT 融合新産業の創出、未来成長動力の拡充、クリーンで便利な生活環境の構築、健康長寿時代の実現、安全安心な社会の構築を掲げ、これらに貢献する重点国家戦略技術として、知識情報セキュリティー技術、知識基盤ビッグデータ活用技術、次世代有無線ネットワーク技術（5G など）、融合サービスプラットフォーム技術、知能型インタラクティブ技術、スマートグリッド技術、健康管理サービス技術、自然災害モニタリング・予測・対応技術などが挙げている。

Executive Summary

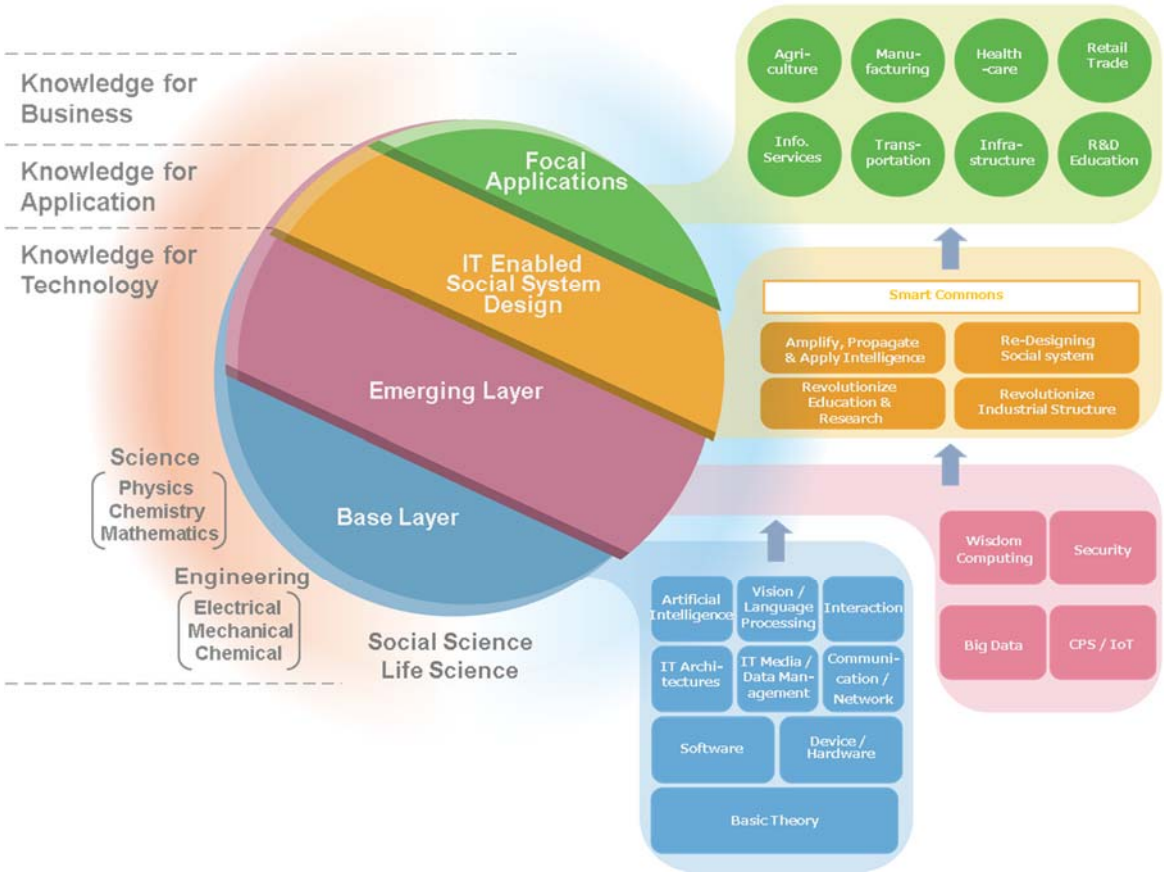
Information Science and Technology (IST) spans from basic theories as scientific bases to their implementations which supports extensive industry areas of electronics, telecommunications, embedded devices, and information systems & services. Not to mention the secondary and tertiary industry, as generic tools, IST is now deeply involved in the systems implementations for the primary industry and society, which are not considered to be directly related to IST so far. This report describes the research areas of IST in two aspects or layers: the emerging layer which consists of strategically important areas in terms of the IST's relationship with society system design, and the base layer which supports the emerging layer as the computer science foundation.

The perspective view of IST and its focal research areas are shown in a figure below. IST body of knowledge is organized of knowledge for element technology, knowledge for application to social system design and knowledge for focal business applications.

Knowledge for element technology is organized of two layers; one is base layer which is consisted of academically organized disciplines, another is emerging layer which is consisted of R&D areas to adapt changing circumstances.

Knowledge for application is organized of R&D areas which include not only IST itself but also some aspects of social system design, because of growing importance of IST as social infrastructure. We defined this knowledge as "IT enabled social system design."

Knowledge for business is organized of R&D areas on implementations in industry domains IST should be intensively applied. We defined this knowledge as "Focal application area."


Knowledge for Business
Knowledge for Application
Knowledge for Technology
Focal Applications
IT Enabled Social System Design
Emerging Layer
Base Layer
Science
Physics
Chemistry
Mathematics
Engineering
Electrical
Mechanical
Chemical
Social Science
Life Science
Agri-culture
Manu-facturing
Health -care
Retail Trade
Info. Services
Trans-portation
Infra-structure
R&D Education
Smart Commons
Amplify, Propagate & Apply Intelligence
Re-Designing Social system
Revolutionize Education & Research
Revolutionize Industrial Structure
Wisdom Computing
Security
Big Data
CPS / IoT
Artificial Intelligence
Vision / Language Processing
Interaction
IT Archi-tectures
IT Media / Data Man-agement
Communi-cation / Network
Software
Device / Hardware
Basic Theory

Owing to the various technological innovations from the semiconductor, circuit mounting, communication, software, to the systems integration, IST accomplished remarkable progress in respect of cost, performance and benefit. Today computers and networks have widely permeated human society. Technical progress is continuously supporting all things' dramatic progress. Systems architecture has been swinging between concentration and distribution, from a mainframe centric system to a client-server distributed system, and now cloud (centric) computing. Social Networking Services or Wikipedia have changed the user role from a consumer to a prosumer who both produces and consumes information. By the emergence of cloud computing the ownership policy of information system is shifting to utilizing computing power and applications on the internet, from possessing them. Location-based services using car navigations or mobile phones spread new types of location and context aware services.

The information and network society, so called "Cyber Society", born in the late 20th century is moving toward the real world in the 21st century; the US initiated "Cyber physical systems" projects, the word "IoT " (Internet of Things) in which all the things are connected to the Internet was also came out. Deluging large scale digital data brought about a new trend called "Big Data", which began to have a big influence on business and society. On the other hand, the research on human intellectual activity has been improved to the level which beats a top-class humans in Shogi, the Japanese chess, or in the quiz show "Jeopardy!". The frontier of the research is going to the elucidation of the brain itself, the mechanism of acquisition, discovery, propagation of intelligence, and the structure of collective intelligence. The achievement of these researches is expected to lead us to the world where human intellectual quality is more improved and the innovative scientific results returns social impact quickly and properly. The research and development area of IST is spreading not only on the traditional disciplines of electronics, software, and network but also to the new areas of human behavior, business activity design and overall social activity.

Major characteristics of Japan, USA, Europe, China and Korea in the IST field are as follows:

〈Japan〉

The Declaration to be the World's Most Advanced IT Nation updated June 2014 noticed that Japan has achieved the world's highest levels in on broadband infrastructure development, but could not allow for IT to exhibit its full benefits and efficiency without an adequate understanding of user needs and adequate undertaking business process reforms that go beyond organizational boundaries. Based on this reflection, the declaration aims that Japan strives to become an IT society at the

world's highest levels in terms of IT use and a developed problem-solving country that can distribute solutions to various problems around the world by 2020. And it also will accelerate the recovery from the earthquake disaster. The declaration adopts carrying out projects to verify successful models and or visualization like KPIs as indices for quantitative measurement of target achievement.

<USA>

Internet hyper giants and traditional IT powers are leading the world in R&D and market share. According to "Strategy for American Innovation", federal government id investing in education of next generation, creation of workforce, enhancement of nation's leadership in science and technology, advanced social infrastructure, and construction of advanced information technology ecosystem, which have great importance as foundations for innovation. Expanding access to broadband, modernizing the electric grid, securing cyberspace, and expanding availability of wireless spectrum are those advanced information technologies of which ecosystem should be constructed. Under these measures, federal government is investing in not only R&D on IT enabled solution of social issues, but basic research and capacity building continuously mostly through the National Science Foundation.

<Europe>

One of important flagship measure in European Union's midterm strategy for growth Europe 2020 is "Digital Agenda for Europe". The agenda aims to deliver sustainable economic and social benefits from digital single market based on fast and ultra-fast internet and interoperable applications. Under R&D and Innovation framework program Horison 2020 following FP7, European Union invests in information science and technology R&D from two perspectives, one is advancing information science and technology by industrial - academic - government cooperation and another is IT enabled solution of social issues. Individual countries in Europe are taking original measures such as promotion of open data utilization in UK and application of information science and technology to maintain competitiveness as a manufacturing in Germany (Industrie 4.0).

<China>

Although domestic internet contents are not allowed to be accessed from abroad and internet accesses are restricted by grate firewall, internet giants such as Baidu, Alibaba and Tencent are founded in China. The guidelines on national medium- and long-term program for science and technology development, which indicate the directions of the nation's science and technology policy from 2006 to 2020, picked up

information industry and advanced service industry as one of important industry areas to achieve world's top level innovative country by 2020. The guideline noticed high priority R&D themes, which include information technology supporting for advanced service industry, large scale application software, next generation network core technologies and services, highly efficient and dependable computer, sensors and intelligent information processing, digital media platform, high resolution large area thin panel display, and information safety for important systems. And the national information development strategy 2006-2020 noticed strategic targets by 2020, which include spreading comprehensive information infrastructures, improving information technology self-development ability, holistic reform of information industry, upgrading information security protection, taking obvious outcome in economy and society by applying IT, establishing new type of industrial development model, preparing national institutions, environment and policies for advancing IT application , improving people's information technology skill, establishing foundations for information society. As outcomes of those measures and invitation or return of researchers abroad, international cooperation and level-up in R&D are being enhanced in China.

〈Korea〉

Some global companies such as Samsung are towing Korean economy. As a national initiative, "Creative Economy Action Plan" was confirmed in order to foster "Creative Economy Ecosystem", in which high quality jobs are created through new industry and markets creation by converging people's creative ideas, science, technology and ICT. In the action plan, environment that promotes the creation of startups, support of ventures and small and medium-sized enterprises (SMEs), creation of growth engines to pioneer new markets and new industries, fostering global creative talent, strong innovation capacity of science, technology and ICT, and promotion of a creative economic culture are pursued. And "Creative Economy Vitamin Project" is pursuing to advance existing industry and support solution of issues with it by converging science, technology, ICT and the industry. And the Third Science and Technology Basic Plan noticed five national strategic area of technologies (IT convergence new industry, future growth engine, clean and comfortable environment, healthy long-living era, and security of society) and 30 major national strategic technologies, which include information security, big data application, next generation wired and wireless network, converging service platform, intelligent interaction, smart grid, health management, natural disaster monitoring, prediction and response technologies.

目　　次

エグゼクティブサマリー

１．目的と構成 ····· 1
1.1　「研究開発の俯瞰報告書」作成の目的 ····· 1
1.2　俯瞰対象分野設定 ····· 1
1.3　構成 ····· 1

２．俯瞰対象分野の全体像 ····· 3
2.1　分野の範囲と構造 ····· 3
2.1.1　分野の範囲 ····· 3
2.1.2　俯瞰の枠組 ····· 3
2.1.3　研究開発領域 ····· 4
2.2　分野の歴史、現状及び今後の方向性 ····· 6
2.2.1　分野の歴史 ····· 6
2.2.2　分野の現状　～社会とのかかわりを深める IT～ ····· 8
2.2.3　分野を取り巻く環境変化と IT のチャレンジ ····· 10
2.2.4　我が国の課題と分野の方向性 ····· 11
（1）ビッグデータ ····· 15
（2）CPS／IoT ····· 16
（3）知のコンピューティング ····· 17
（4）セキュリティー ····· 18
2.2.5　諸外国・地域における研究ビジョンや戦略 ····· 19
（1）米国 ····· 19
（2）欧州 ····· 20
（3）中国 ····· 25
（4）韓国 ····· 26

３．研究開発領域 ····· 29
3.1　基礎理論 ····· 29
3.1.1　情報理論 ····· 33
3.1.2　暗号理論 ····· 41
3.1.3　離散構造と組合せ論 ····· 47
3.1.4　計算複雑度理論 ····· 53
3.1.5　アルゴリズム理論 ····· 59

3.1.6　最適化理論 ····· 68
3.1.7　プログラム基礎理論 ····· 75
3.1.8　データアナリシス ····· 80
3.2　デバイス・ハードウエア ····· 85
3.2.1　集積回路技術 ····· 89
3.2.2　MEMS デバイス技術 ····· 95
3.2.3　フォトニクス ····· 101
3.2.4　プリンテッドエレクトロニクス技術 ····· 108
3.2.5　極超低電力 IT 基盤技術 ····· 118
3.2.6　量子コンピューティングデバイス ····· 124
3.2.7　メモリーとストレージ ····· 131
3.2.8　アクチュエーター ····· 137
3.2.9　センサー ····· 143
3.2.10　アナログ回路 ····· 148
3.2.11　情報処理 ····· 154
3.2.12　通信 ····· 160
3.2.13　エネルギーハーベストデバイス ····· 171
3.2.14　電源 ····· 180
3.3　通信とネットワーク ····· 185
3.3.1　光通信技術 ····· 188
3.3.2　無線通信技術 ····· 193
3.3.3　ネットワーク・エネルギーマネジメント ····· 199
3.3.4　ネットワーク仮想化技術 ····· 208
3.3.5　通信行動と QoE (Quality of Experience) ····· 215
3.3.6　情報ネットワーク科学 ····· 220
3.3.7　新たな情報流通基盤 ····· 226
3.4　ソフトウエア ····· 232
3.4.1　ソフトウエア工学 ····· 234
3.4.2　組込みシステム ····· 240
3.4.3　プログラミングモデルとランタイム ····· 248
3.4.4　システムソフトウエアとミドルウエア ····· 255
3.5　IT アーキテクチャー ····· 261
3.5.1　エンタープライズ・アーキテクチャー ····· 266
3.5.2　ソフトウェア定義型アーキテクチャー ····· 277
3.5.3　クラウドコンピューティング ····· 287
3.5.4　モバイルアーキテクチャー ····· 293
3.5.5　ワークロード特化型アーキテクチャー ····· 303
3.5.6　ハイパフォーマンスコンピューティング（ＨＰＣ） ····· 309
3.6　IT メディアとデータマネジメント ····· 318
3.6.1　ビッグデータの統合・管理・分析技術 ····· 321

3.6.2　ユーザー生成コンテンツとソーシャルメディア ……326
3.6.3　センサーデータ統合検索分析技術 ……332
3.6.4　時空間データマイニング技術 ……339
3.6.5　次世代情報検索・推薦技術 ……345
3.6.6　個人ライフログデータの記録・利活用技術 ……350
3.7　人工知能 ……355
3.7.1　探索とゲーム ……357
3.7.2　機械学習、深層学習 ……365
3.7.3　オントロジーとＬＯＤ ……374
3.7.4　Web インテリジェンス ……385
3.7.5　知能ロボティクス ……392
3.7.6　統合的人工知能 ……401
3.7.7　汎用人工知能 ……408
3.7.8　認知科学 ……416
3.8　ビジョン・言語処理 ……423
3.8.1　大規模言語処理に基づく情報分析 ……425
3.8.2　言語情報処理応用（機械翻訳） ……433
3.8.3　言語情報処理応用（音声対話） ……438
3.8.4　画像・映像の意味解析 ……445
3.8.5　言語と映像の統合理解 ……452
3.9　インタラクション ……457
3.9.1　BMI（ブレイン・マシン・インターフェース） ……459
3.9.2　人間拡張工学 ……468
3.9.3　ハプティクス（触覚） ……473
3.9.4　ウエアラブルコンピューティング ……480
3.9.5　HRI(ヒューマン・ロボット・インタラクション) ……489
3.9.6　グラフィックス・ファブリケーション ……496
3.10　ビッグデータ ……504
3.10.1　ビッグデータ基盤技術 ……506
3.10.2　ビッグデータ解析技術 ……513
3.10.3　クラウドソーシング ……520
3.10.4　プライバシー保持マイニング技術 ……525
3.10.5　IT メディア分野におけるビッグデータ ……533
3.10.6　ライフサイエンス分野におけるビッグデータ ……540
3.10.7　教育とビッグデータ ……545
3.10.8　社会インフラとビッグデータ ……561
3.10.9　オープンデータ ……567
3.10.10 著作権とビッグデータ ……571
3.10.11 ビッグデータとプライバシー ……578
3.11　CPS/IoT ……584

3.11.1　ＣＰＳ／ＩｏＴアーキテクチャー ····· 586
3.11.2　Ｍ２Ｍ ····· 591
3.11.3　社会システムデザイン ····· 598
3.11.4　ＣＰＳ／ＩｏＴセキュリティー ····· 603
3.11.5　応用と社会インパクト ····· 611
3.11.6　ものづくりとＩｏＴ ····· 617
3.12　知のコンピューティング ····· 623
3.12.1　知のメディア ····· 626
3.12.2　知のプラットフォーム ····· 632
3.12.3　知のコミュニティー ····· 638
3.13　セキュリティー ····· 644
3.13.1　次世代暗号技術 ····· 648
3.13.2　IT システムのためのリスクマネジメント技術 ····· 654
3.13.3　要素別セキュリティー技術 ····· 661
3.13.4　認証・ＩＤ連携技術 ····· 668
3.13.5　サイバー攻撃の検知・防御次世代技術 ····· 673
3.13.6　プライバシー情報の保護と利活用 ····· 678
3.13.7　デジタル・フォレンジック技術 ····· 688

（付録 1）　専門用語解説 ····· 694
（付録 2）　検討の経緯 ····· 704
（付録 3）　執筆協力者一覧 ····· 710
（付録 4）　索引 ····· 714
（付録 5）　研究開発の俯瞰報告書（2015 年）
　　全分野で対象としている研究開発領域一覧 ····· 720

謝辞 ····· 734

1．目的と構成

1.1 「研究開発の俯瞰報告書」作成の目的

JST 研究開発戦略センター（CRDS）は、社会ニーズを充足し社会ビジョンを実現させる科学技術の有効な発展に貢献することを目指し、社会ビジョンの実現および科学技術の基盤充実とフロンティアの拡大を目指した研究開発戦略を提案している。「研究開発の俯瞰報告書」（以降、俯瞰報告書）は、CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握している当該分野の研究開発状況に関して、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS 独自の視点でまとめたものである。

CRDS は 2003 年の設立以来、科学技術分野を広く俯瞰し、重要な研究開発戦略を立案する能力を高めるべく、その土台となる分野俯瞰の活動に取り組んできた。この背景には、科学の細分化により全体像が見えにくくなっていることがある。社会的な期待と科学との関係を検討し、科学的価値を社会的価値へつなげるための施策を設計する政策立案コミュニティにあっても、科学の全体像を捉えることが困難になってきている。このような現状をふまえると、研究開発コミュニティを含めた社会のさまざまなステークホルダーと対話し分野を広く俯瞰することは、研究開発の戦略を立てるうえでは必須の取り組みである。

俯瞰報告書は、科学技術に関わるステークホルダーと情報を広く共有することを意図して作られた知的資産である。すでに多くの機関から公表されているデータも収録しているが、単なるデータレポートではなく、当該分野における研究開発状況の潮流を把握するために役立つものとして作成している。政策立案コミュニティでの活用だけでなく、研究者が自分の研究の位置を知ることや、他領域・他分野の研究者が専門外の科学技術の状況を理解し連携の可能性を探ることにも活用されることを期待する。また、当該分野の動向を深く知りたいと考える政治家、行政官、企業人、教職員、学生などにも大いに活用していただきたい。

1.2 俯瞰対象分野設定

CRDS では、研究開発が行われているコミュニティ全体を 5 つの分野（環境・エネルギー分野、ライフサイエンス・臨床医学分野、ナノテクノロジー・材料分野、情報科学技術分野、システム科学技術分野）に分け、その分野ごとに俯瞰報告書を作成した。俯瞰報告書は、２年ごとを目途に改訂している。

1.3 構成

第 2 章「俯瞰対象分野の全体像」では、CRDS が俯瞰の対象とする分野をどのように設定し、俯瞰の枠組をどう設定しているかの構造を示す。CRDS の活動の土俵を定め、それに対する認識を明らかにしている。また対象分野の歴史、現状、および今後の方向性について、いくつかの観点から全体像を明らかにする。この章は、その後の章のコンテンツすべての総括としての位置づけをもつ。

第 3 章「研究開発領域」では、俯瞰対象分野に存在する主要な研究開発領域の現状を概説する。専門家との意見交換やワークショップを通じて、研究開発現場で認識されている情報をできるだけ具体的に記載する。領域ごとに国際比較も行う。

研究開発戦略を立案する際の現状認識に最低限必要なデータおよび主要国の研究開発戦略については、「主要国の研究開発戦略」として別冊で作成した。

「主要国の研究開発戦略」では、主要国の政府機関が公表する文書等の中から、日本の研究開発戦略を作る上で最低限知っておくべき重要な文書等を抽出し概説する。

2．俯瞰対象分野の全体像

2.1　分野の範囲と構造

2.1.1　分野の範囲

情報科学技術分野は、科学としてよって立つ基礎理論から、その実装としての電子部品・デバイスや情報通信機器・組込み機械、さらには情報システム・情報サービスまでの広範な産業を支える技術分野である。同時に、その汎用ツール的な性質から第二次、第三次産業はいうに及ばず、従来は直接関係ないと思われていた第一次産業や社会インフラ、社会システムの実装にまで深くかかわっている。本書では情報科学技術分野の技術を、社会と IT（Information Technology）の観点から、特に、社会システムをデザインするという観点で戦略的に取り組むべき戦略レイヤーと、それを下支えする基盤レイヤーに整理し、それぞれのレイヤーで今後わが国として注目すべき研究開発領域を特定した。

2.1.2　俯瞰の枠組

情報科学技術分野の範囲と構造を図 2.1 に示す。情報科学技術分野の知見は、要素技術としての技術に関する知見、それを社会システムデザインとして活用するための知見、および重点応用エリアとしての事業に関する知見に大別できる。

技術に関する知見は、学問的に体系化された研究開発領域からなる「基盤レイヤー」と、個別の要素技術だけではとらえられない時代の変化に対応するための研究開発領域からなる「戦略レイヤー」の二つに分けた。

活用に関する知見は、当分野の将来展望において、情報科学技術が社会基盤として広く浸透し、その発展が社会に及ぼす影響が非常に大きいことから、情報通信技術そのものだけでなく、社会システムデザインという文脈での研究開発領域からなる「情報を活用した社会システムデザイン」とした。

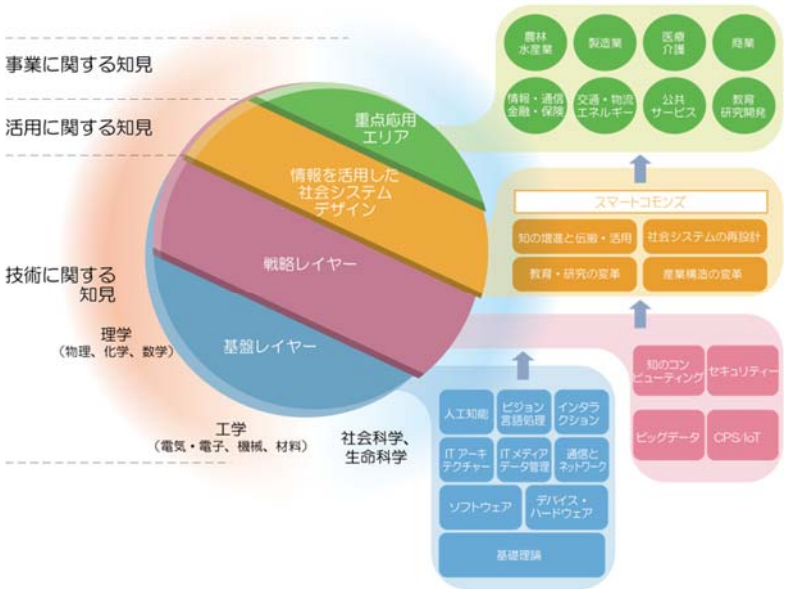


図 2.1　情報科学技術分野の俯瞰図

事業に関する知見は、情報通信技術を重点的に応用すべき事業ドメインでの事業化に関する研究開発領域からなる「重点応用エリア」に整理した。

２．１．３　研究開発領域

戦略レイヤーで抽出された研究開発領域と、それを支える基盤レイヤーにおける研究開発領域を図 2.2 と図 2.3 に示す。

基盤レイヤーは、情報科学技術にかかわる既存の学問領域を俯瞰したものとするために、国内外の学会の組織構造の調査に基づき、基礎理論から、ソフトウエア、デバイス・ハードウエア、IT アーキテクチャー、IT メディアとデータマネジメント、通信とネットワーク、さらに、インタラクション、ビジョン･言語処理、人工知能を積み上げた。

これに加えて、情報科学技術の進展にともない、新しい社会的価値を創造するために出現しつつある重要なコンセプトとして、サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）と IoT (Internet of Things)、知のコンピューティング、ビッグデータ、及び、セキュリティーという区分を新たに定義し、戦略レイヤーとして基盤レイヤーの上位に配置した。

なお、基盤レイヤーにある俯瞰区分の技術は原則として排他網羅的な包含関係にある。一方、上位レイヤーにある俯瞰区分の技術は、他の俯瞰区分と相互に関連しあうことがわかっており、厳密な分類は行わないことにした。

以下、本報告書にて報告する研究開発領域は、技術知に含まれる二つのレイヤーに関して設定している。

図 2.2　戦略レイヤーの研究開発領域

図 2.3　基盤レイヤーの研究開発領域

2.2 分野の歴史、現状及び今後の方向性

2.2.1 分野の歴史

コンピューターは、1960 年代のメインフレームと呼ばれる大型計算機に始まり、1970 年代にはミニコンが実用化され、1980 年代にはマイクロプロセッサーの進展によりワークステーションが登場し、1990 年代にはパーソナルコンピューターが普及した。この進歩は半導体集積回路技術の発展によるところが大きい。この結果、コンピューターとネットワークはコスト、性能面で格段の進歩を遂げ、広く社会に浸透している。

ネットワークでは、ARPANET の研究に端を発するインターネットが、1990 年代の WWW（World Wide Web）により、爆発的な広がりを見せた。その背景には、光通信技術などの進展により高速大容量通信が可能となったことがある。また、無線通信技術により、携帯電話や高速無線 LAN などの普及から、すべての機器がネットワークにつながる時代となってきた。通信速度の飛躍的な向上が、電子メールから動画コンテンツへと変遷を下支えし、放送と通信の融合が始まっている。

システム的観点から見ると、メインフレーム全盛から、ミニコンの登場による分散システム、さらにパソコンとサーバーによるクライアントサーバー型システム、そして今日のクラウドコンピューティングへと、集中と分散を繰り返す歴史となっている。

また、SNS（Social Networking Service）や Wikipedia に代表されるような、ソーシャルコンピューティングと呼ばれる、人々が参加する形でのネットワーク上のコミュニケーション活動が非常に活発になっている。ユーザーの役割が利用者であり、かつ、提供者であるというプロシューマーの形へ大きく変化している。さらに、2011 年の東日本大震災時の迅速な情報共有など新たなメディアとしての役割を生み出した。

情報サービスに着目すると、インターネットやクラウドコンピューティングの登場によってサービスデリバリーの形態が一変してきている。つまり、IT 基盤やビジネスプロセスに基づいたソフトウエアやアプリケーションを所有することから、標準化されたプラットフォーム上に準備されているソフトウエアやアプリケーションを使用する形態へと移っている。これにより、所有することによる技術の陳腐化やセキュリティーの脆弱さから解放されるだけでなく、標準化と組み合わせによるビジネスプロセスの変化への柔軟な対応、品質の担保、さらには、コストの低減など多くのメリットがもたらされる。

クラウドコンピューティングは、サービスデリバリーの形だけではなく、社会におけるコミュニティーのあり方、協業の仕組み、企業活動形態にも影響を与えている。グリッドコンピューティングが提唱した仮想組織を実現化するインフラといってよいだろう。さらに、質の高い新しいサービスを素早く展開するために、コンポーネント化と統合化の技術が 2000 年代に推進されてきた。その一つが、企業のビジネスプロセスを標準化し、コンポーネント化し、それを組み合わせるというサービスオリエンティッドコンピューティング（SOA: Service Oriented Architecture）である。この考えは、後ほどふれる社会システムの構築にも生かされつつある。

カーナビや携帯電話による位置情報サービスは、ユーザーの所有する端末や、その場所での状況を判断したサービス、いわゆるコンテクストアウェアサービスとして広まる状況にあり、ITS（Intelligent Transport Systems）などとも連携し、スマートコミュニティーでの展

開が期待されている。

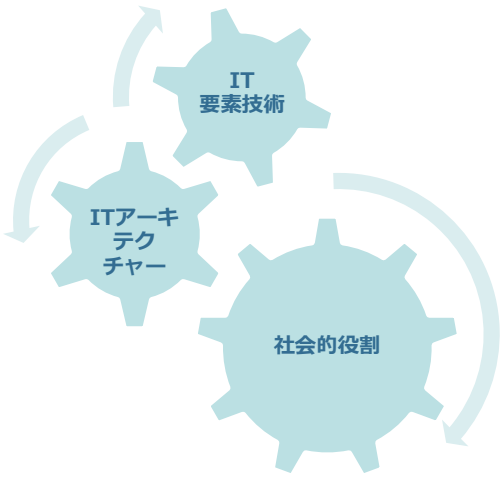
20 世紀後半に生まれた情報ネットワーク社会（サイバー社会）は、21 世紀に入り、実世界と有機的に連携、統合化する動きが出てきた。米国では、サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）のプロジェクトが進められ、すべてのモノがインターネットに接続される IoT（Internet of Things）という言葉も生まれた。

コンピューターとネットワークは、あらゆる社会情報システムを構成し、我々の日々の生活になくてはならない社会インフラとなった一方で、個人情報流出やコンピューターウイルスの流布による従来起こり得なかった事故や、災害、人為の結果発生したシステムの停止や誤動作が社会の機能を大きく停滞させるような事象が発生するようになってきた。このようないわば負の側面に対処できるような研究開発の研究も進んでいるがまだ十分とはいえない。

その昔、コンピューターは、一部の人しか扱えないものであり、クローズドなシステムとして構築・運用されてきた。しかし、今日では複雑で、予測不可能なオープンなシステムとなっている。このように、情報科学技術分野の技術開発や研究の対象は、半導体、ソフトウエア、通信ネットワークから人間の行動様式や社会活動そのもののデザインにまで広がりつつある。

これを、IT の社会的役割の変化という視点で見ると次のように言える。IT 要素技術の進化は、IT を使う仕組み（IT アーキテクチャー）の変化を促し、それにより新たな IT のアプリケーションが生まれ、社会的役割が拡大する。役割の拡大が、要素技術やアーキテクチャーの重要性を増大させ、それが次の進化に向けた技術革新を加速する（図 2.4）。

コンピューターの能力は、IT 要素技術の進化により、より高速により大量の情報を処理できるようになり、その結果、情報処理システムは、企業のクリティカルな業務から、社会を支えるさまざまなクリティカルインフラへと、その領域と重要性を拡大する。新たな需要にこたえるために、時代と要求に合致した新たな情報システムの構造（アーキテクチャー）が考案され実装される。すると、その過程で明らかになった技術的課題が新たなドライバーとなって更なる要素技術の進展を促す。いわば、IT 要素技術、IT アーキテクチャーは社会システムと三位一体となって進化し続けているのである。



IT要素技術の進化
- 高性能計算、高速大容量通信
- ビッグデータ、ロングテール、リアルタイム処理
- 数値計算から事務処理、知識処理へ
- モジュール化とミドルウェアの発展

ITアーキテクチャーの変化
- 集中と分散の動的バランス
- 実世界とサイバー世界の融合
- 人がつながる、モノがつながる
- 産業のサービス化を支える

社会的役割の拡大
- ビジネスのクリティカルインフラから社会のクリティカルインフラに
- 森羅万象（人、集団、機械）を支える技術に

図 2.4　IT の社会的役割の変化

２．２．２　分野の現状　～社会とのかかわりを深めるIT～

社会やビジネスとの関係の観点で、ここ10年の大きな流れを概観する。

まず、ビジネスのグローバル化が進み、迅速かつ柔軟な対応が必要となっている。特にIT企業は国際的な影響力を持たない限り生き残れなくなってきた。また、ハードウエアの低価格化やインターネットの普及に伴い、サービスをいかに統合化するかが重要となっている。

また、これまでの一企業の中で閉じたサービスであったものと、社会的なサービスとして一般大衆を対象として開かれたサービスでは、根本的な違いがある。社会的なサービスにおいては、開かれた系におけるサービスレベルの担保、アカウンタビリティー、社会的責任を持つことが大きな課題となる。

さらに、ストレージやプロセッサー、ネットワークなど様々なリソースがサービスに接続されるようになっており、それらは多様性を持ちつつ様々なところに分散しておかれている。

こうしたことを背景として、2000年代初期に、コンポーネント化と標準化、インテグレーションのためのSLA保証といった技術開発が盛んに行われるようになった。

2000年代後期になると、こうした技術を基盤としてWeb 2.0、SNS、グリッド、クラウドコンピューティングなどが進展し、世界の知恵を集める協調インフラが構築され、グローバルインフラとして広く世界に影響を与えるようになってきた。例えば、企業のあり方もネットワークを介した連携が進んできた。グリッドコンピューティングのもたらした仮想組織（Virtual Organization）の考え方に代表されるように、仮想的に機能を連携させることが可能になり、それがビジネスモデルに大きな変革をもたらしてきた。

さらに、近年、仮想化、コンポーネント化などの考え方が、企業の機能だけでなく社会の機能として位置づけられるようになってきた。サイバーフィジカルシステム、スマータープラネットなどに代表される社会システム・社会サービスへの期待である。このような社会のクリティカルインフラとしての期待に応えるためには、情報技術が単に技術の進展だけを狙うのではなく、社会性、倫理性などにもとづいた社会デザインまで関与しなければならない。また、このようにして情報技術により実現される社会システム・社会サービスを支えるデータ、インフラ、サービスにより構成されたプラットフォームを社会共通資本（スマートコモンズ）と考え、継続的な投資の必要性、セキュリティーに係る問題をはじめとして社会的・経済的に捉えることが急務である。

図 2.5　社会・ビジネスの要請と IT の変遷

このような情報技術の直接的な社会貢献だけでなく、情報技術の進展がライフサイエンス、ナノテクノロジー、マテリアルサイエンス、宇宙科学、地球科学、社会・人文科学など、ほとんどの分野にもたらしている革新的な変化も見逃せない。研究開発の革新的加速、網羅性、シミュレーションなどの影響を捉えることが国力にも影響を与えつつある。また、大量のデータを捕捉し、解釈し、自動的に学習する技術の進展の目覚しさをみると、機械と人間の関係を新たに考え、社会的な仕組みを作り出す必要性がある。

これまで、物理世界を現実世界、サイバーの世界を仮想的な世界として捉え、その関係を議論してきた。その時代感を Reality 1.0 と呼べば、いまや物理世界とサイバー世界が一体となったところに現実があるという認識も必要になってきている。まさに Reality 2.0 の時代の到来であろう。本報告書はこのような時代の潮目の変化を捉えようとするものである。

２．２．３　分野を取り巻く環境変化と IT のチャレンジ

汎用技術として社会とのかかわりを深める IT は当然のことながら取り巻く環境変化の影響を受ける。図 2.6 には環境変化（トレンド）と、その結果として IT に求められるチャレンジ（挑戦課題）をまとめた。

第 1 のトレンドは技術進歩である。加速度的な IT の進歩により IT 機器の小型化・遍在化とクラウドシステムの巨大化・集中化が同時進行している。その結果さまざまなモノや人がネットワークで繋がり、これらが生み出す膨大なデジタルデータ（ビッグデータ）が利用可能となっている。これが意味することは、森羅万象が発する大量の異種データをタイムリーに処理する能力が IT に求められているということであり、その際には、扱うデータの信頼性や個人データの保護などの社会受容や、社会基盤に求められるディペンダビリティが IT にも不可欠になるということである。

第 2 のトレンドは経済への波及である。企業の IT 環境はインターネットを基盤とする大量のユーザー（顧客）ベースを取り込むことで従来とは異なる収益モデルをもつ IT（活用）企業を生み出した。一般の企業も特に米国を中心に、IT をビジネス展開に活用することが事業規模と生産性を劇的に変化させるキーであることに気づき始めている。また、進化を続ける人工知能の機能を取り込んだロボットやソフトウエアが、人間の定型的作業を置き換えるレベルに達しつつある[1]。今後求められるのは、IT を、単に社会コストの削減や付加価値の創造に活用するという視点だけでなく、人間と機械との新たな関係に基づく豊かな社会を実現するという視点である。

第 3 の視点は社会や環境への浸透の進展である。我が国の課題は山積しており、それに対する IT の貢献が強く期待されている。また、社会のあらゆる階層で大きなリスクとなっているセキュリティー問題や、IT の機能不全がインフラサービスの停止に至るといった状態は IT が責任を持って対応すべき課題である。このような中、IT を活用した社会システムの統合や再構築、防災・減災・復旧の高度化などの実現が今後ますます求められる。その際には社会制度の見直しやそのための倫理の研究が必要である、と同時に、社会的・経済的インパクトの評価とモデル化の研究がそのベースとなる。

最後のトレンドは人間・文化への貢献である。IT の最後のフロンティアは人間であるといわれる。IT は人間社会を豊かにするものでなければならない。人間の新たな役割を生み出し、そのために必要なスキルや知識を効率的に人間に提供し続け、個人や集団が今までよりも賢い意思決定ができるよう支援することが IT の究極の役割である。

[1] エリック・ブリニョルフソン、アンドリュー・マカフィー 著、村井章子 訳： 機械との競争、日経 BP 社、p.174, 2013

	トレンド	挑戦課題
技術	● ITの加速度的進歩が続く ● 様々なモノ・人が繋がる ● ビッグデータ処理技術が進む ● クラウド化の進展	● 森羅万象を対象とした処理形態 ● 異種データ、大量データ処理 ● データの信頼性、プライバシー保護 ● 社会基盤に求められるディペンダビリティー
経済	● ITによる新ビジネス創出 ● 市場のグローバル化 ● インターネットを介したサービスの進展 ● ロボットによる効率化 ● 機械による雇用の喪失	● ビッグデータによる社会コスト低減や付加価値の創造 ● クラウド基盤によるサービス経済の進化 ● ITを他の領域の基盤とする ● 社会・経済インパクトの評価とモデル化
社会・環境	● ITの社会浸透（社会インフラ化）の進展 ● 少子・高齢化 ● インフラ老朽化と自然災害の脅威 ● 資源の不足・枯渇 ● 社会的格差の拡大と社会の不安定化 ● セキュリティーの脅威	● 社会システムの統合と再構築 ● 防災・減災・復旧の高度化 ● 社会制度、倫理の研究（ELSI） ● 人間と共存するロボット
人間・文化	● 教育の新たな試み（MOOCs） ● ネット依存症（スマートフォン、ゲーム） ● 人間と機械の融合（ウェアラブル、インプランタブルデバイス） ● グローバル化に伴う稀少文化の消失	● 人と機械の新たな関係 ● 多様性・個別性に対応した質の高い教育・再教育・学習 ● 文化、知の理解と継承 ● 人・集団を賢くするIT

図 2.6　環境変化と IT に求められるチャレンジ

２．２．４　我が国の課題と分野の方向性

IT の大きなトレンドを図 2.7 にまとめた。

IT の発展は指数関数的であり、近年ますますその進歩の度合いを高めている。ムーアの法則に代表される半導体デバイスの進歩だけでなく、ソフトウエアやシステムのレベルにおいても急速な進化を遂げている。従来は困難であろうといわれていた自動車の自律運転が可能になり、チェスや将棋、あるいはクイズでも人間チャンピオンにまさるコンピューターが出現している。これらは、IT の技術的な進歩と、IT の社会浸透の結果としての豊富なデータ、すなわちデータの洪水の結果として現れている。IT が社会にとって十分に役立つレベルになったために、その社会浸透がいたるところで進んでいる。IT なしでは、銀行の業務や航空券の予約、会社の経営などは考えることもできない。このように、IT はますますその存在感が大きくなっている。

しかも、その進歩は情報の世界だけにはとどまっていない。もののインターネットやサイバーフィジカルシステムに代表されるように、従来は情報化とは関連のなかった実世界にも IT の効果が現れるようになってきた。これまでも列車や航空機の運行、製造現場の機械などはコンピューター制御が普通に行われていたが、それらが IT としてネットワーク化され、他の機器やサービスと連携することによって、さらに高度で複雑な機能を果たすようになってきている。

これらのトレンドを踏まえた上で、今後戦略的に取り組むべき技術区分として、「知のコンピューティング」、「セキュリティー」、「ビッグデータ」、「サイバーフィジカルシステム、IoT」の 4 つを挙げている。

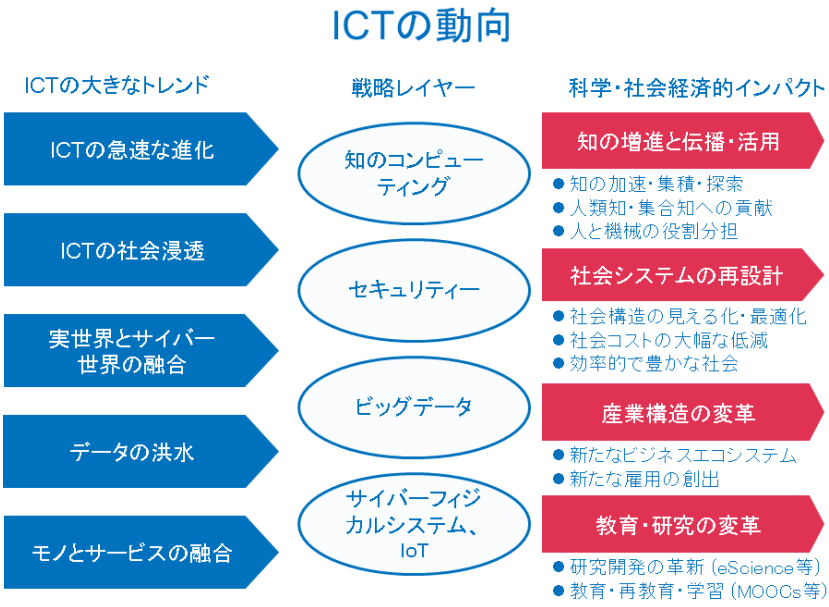


図 2.7　ICT の大きなトレンドと戦略レイヤー

IT の進歩によって、人間がより知的な生活を送ることと、より豊かで効率的な社会を築くことが可能になる。つまり精神的な面と、物理的な面での人類の進化である。精神的な進化を助長するために「知のコンピューティング」を提唱し、人間と機械の創造的な協力関係を打ちたてようとしている。物理的には、「サイバーフィジカルシステム、IoT」によって、サイバーの力によってリアルの世界の進化を実現しようとしている。

これらの動きを支えるものとして、「ビッグデータ」と「セキュリティー」を取り上げている。知の向上のためには、ますます増大するデータを活用し、ビッグデータに関連する情報収集、分析能力を有効に活用しなければならない。また、ものに関する情報も増加の一途をたどるので、ビッグデータが基盤として重要になる。技術の進展は機能の向上、複雑で高度なサービスを提供するが、一方ではいろいろな意味での脆弱性を社会にもたらすことになる。この脆弱性がリスクとして顕在化しないように、セキュリティー技術の進化が期待されている。

以上、述べたように戦略レイヤーの 4 つのテーマを進めることによって、数々の科学・社会経済的なインパクトをもたらすことができる。知の増進と伝播・活用によって、人類はより知を活用し、機械との新たな関係において、創造的な生活を送ることができるようになる。また、従来の社会システムではなく、IT を使うことを前提に社会システムを再設計すれば、社会システムの最適化、社会コストの低減、効率的で豊かな社会が実現できる。現状の社会システムをコンピューター化するのではなく、IT から発想することが重要である。知識の活用や、リアル世界の情報化、ものの情報の利活用が進めば、従来の産業構造にも大きな影響を与えると思われる。よりダイナミックで柔軟なビジネスエコシステムが実現され、新たな雇用や就業形態が生まれる可能性がある。影響は産業界にとどまらず、教育や研究にも波及するであろう。データに基づく新たなサイエンスや、オープンな学習環境が実現する。IT をベースにすることによって、これらの変革が促されるであろう。

IT は基盤的な技術であり、さまざまな分野において、さまざまな効果を発揮し、多様な領域のイノベーションを加速することが期待される。エネルギーや交通などの社会インフラや行政、住民サービスといった社会システムを改善したり、情報通信産業のみならず、製造業やサービス業、農業などの効率化・高付加価値化を実現することも可能である。さらに、ナノテクやライフサイエンスなどの科学技術の発展に大きく貢献する。

その研究開発領域は図に示したように、大きく 4 つの区分で考えるべきであろう。

1. 技術の社会適用や、その効果の計量に係る領域
2. 他分野と情報科学技術の融合領域
3. 情報科学技術そのものに関する領域
4. 大きな変化を引き起こす可能性のある領域

これらの区分に応じて、テーマやゴール、研究期間の設定など、研究開発の進め方や、成果の出し方などを工夫しなければならない。

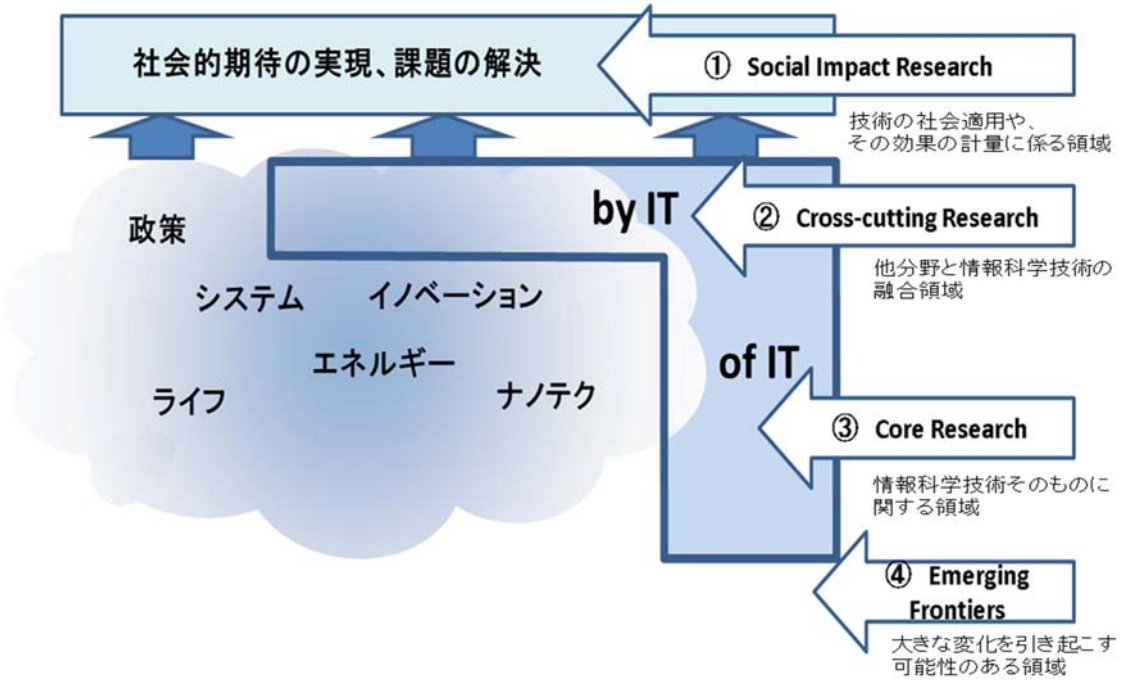


図 2.8　多様な領域に影響を与える IT

IT のインパクトは、それまでの業務をより効率的に行うことによってコストを抑える、という面と、それまでのやり方ではできなかった新たな価値を創造する、と言う面がある。また、インパクトを与える領域として、大別して産業と社会が考えられる。

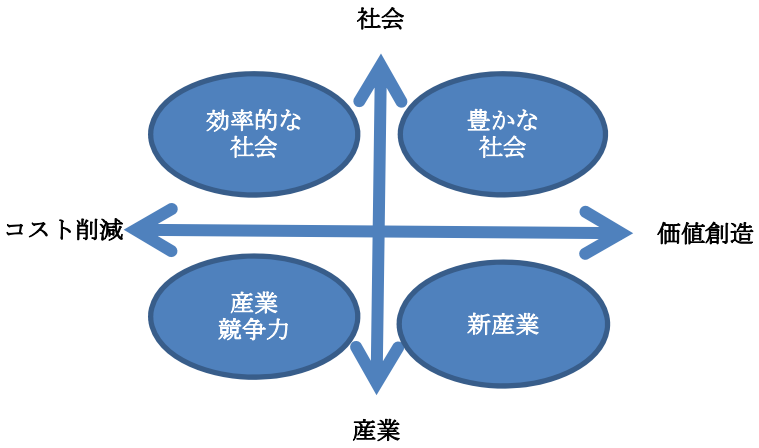


図 2.9　IT のもたらすインパクト

・効率的な社会にむけては、社会システムのデザインと運用が重要である。ここでは、デザインの段階から IT を意識し、公共サービスの質を向上し、社会の成長とともに進化する、柔軟でロバストな社会システムの運用・管理によって、社会的なコストの低減を実現する。
・産業競争力の強化に向けては、IT による見える化や効率的な設計、実装により企業コストの大幅な低減が実現される。
・新産業の育成においては、IT による従来産業の付加価値向上とともに、新たなビジネスモデルへの対応による新産業の開拓が行われる。
・豊かな社会の実現に向けては、科学的発見の加速、科学技術研究からイノベーションまでの時間短縮を行い、科学研究→社会的価値の創出→科学研究への還元という持続的なイノベーションを可能とする

このように、IT の進化はさまざまな影響を社会に与えるであろう。

（1）ビッグデータ

ビッグデータは、デジタル化の進展と実世界との融合、IT の社会浸透が生み出す大量のデータの処理と活用に係る研究開発課題である。

昨今のデータは、指数関数的な増大（Volume：量）、発生の頻度（Velocity：頻度）、構造型、非構造型などのデータ形式（Variety：種類）というＶで始まる３つのベクトルすべてで急激に上昇しており、また、これら大量に発生しているデータの信頼性は、まちまちである。

大量のデータを蓄積し、適切な時間内で処理することは、ハードウエアの処理能力の増大、クラウド、高速ネットワーク通信、分散処理などのインフラを活用することで可能になってきているが、ある目的に特化したデータ分析や、夜間バッチでの処理などに止まっており、多種多様なデータから新たな知見や洞察を抽出することや、リアルタイムでの処理という点は、今後の課題となっている。

オープンデータ、ソーシャルメディアデータ、パーソナルデータ、音楽や動画などのコンテンツデータ、様々な機器からのセンサーデータなど多種多様なデジタルデータを活用することで、新たなサービス創出、既存事業の刷新による高付加価値化、社会・企業コスト低減を実現することができる。

異種データの統合技術、迅速な意思決定のためのリアルタイム解析技術、データ共有基盤の整備、が必要である。また同時に、ビッグデータが広く活用されるための社会受容、ステークホルダー同士の連携を促進するための技術や社会的仕組み、分析対象のデータに関する著作権や個人情報の保護に関する技術面、政策面での整備、が必要である。

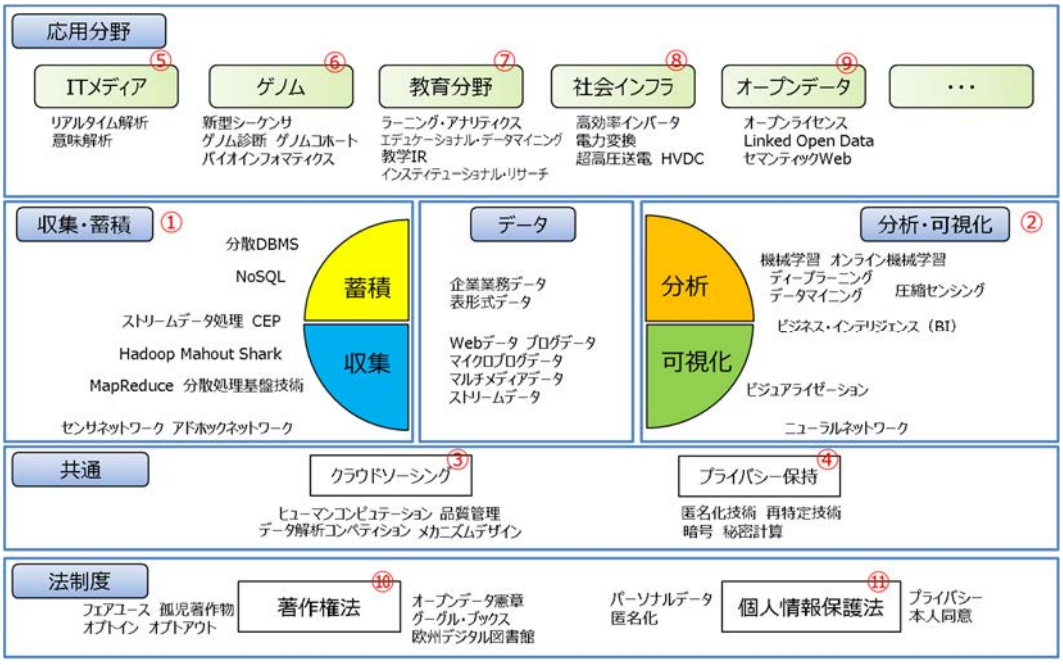


図 2.10　ビッグデータの俯瞰図

（2）CPS／IoT

CPS（サイバーフィジカルシステム、Cyber Physical Systems）とは、ネットワーク化されたコンピューティングによる処理と物理的な要素が統合されたものを指す。実世界や人間から得られるデータを収集・処理・活用し、社会インフラの効率化、新産業の育成、知的生産性の向上などに資すると期待されている。一方、似た概念として IoT（Internet of Things）がある。これは、パソコンやサーバー、携帯電話などの情報・通信機器だけでなく、家電製品や自動車、機械など、様々なモノに通信機能を持たせ、インターネットに接続し、モノの制御や周囲の状況の計測などを行うことである。人、モノ、コンピューターなどが有機的に結合することによって、社会、経済、産業の効率化と付加価値の向上を実現する。

CPS/IoT はすべての産業セグメントに関わる。適用領域を考慮せずに CPS/IoT の研究開発を進めることはできない。このため、CPS/IoT 分野を俯瞰するにあたっては、社会という視点を盛り込みながら、「CPS/IoT アーキテクチャー」、「M2M」、「社会システムデザイン」、「CPS/IoT セキュリティー」、「応用と社会インパクト」、「ものづくりと IoT」に分類した。

これらの項目に応じた研究開発とともに、全体を見通した考え方が重要になる。

図 2.11　CPS/IoT の俯瞰図

（3）知のコンピューティング

知のコンピューティングは、情報科学技術を用いて社会に新たな価値をもたらす「知」の創造を促進し、その知価に関する科学的発見と社会実装を加速することを目指した活動全般に関わる研究分野である。知価創造を促進する知の集積・伝播・探索、知の予測・発見の促進、知のアクチュエーション（社会行動変容を含む）、および、知の社会エコシステム・プラットフォーム、社会への影響・普及促進のための ELSI に関する研究領域を含む（図 2.12）。

知の発見と伝播・活用を促進し、科学的発見や社会への適用を加速するための科学が必要である。それにより、過去と現在行われている科学技術の巨大な研究投資の成果の集積と共有・活用による新たな科学的発見の加速や、最先端の専門知識を効果的に実務家や市民へ提供（例えば、臨床医による最先端の医学的知識の習得支援）、ソーシャルコミュニティーの力で未解決問題の解決や社会コストの削減、QOL（Quality of Life）の向上を図ることが可能になる。

知の集積・伝播・探索のインフラを構築し、そのうえで知の創造、発見の促進を行い、さらに、集合知や人類知の向上を目指す。ここで注意しなければならないのが、いわゆる ELSI（Ethical, Legal and Social Issues）と呼ばれる研究開発を進めるに当たって遭遇するさまざまな倫理や法制度、社会的な課題である。これらの視点についても研究を開始する時点から十分な配慮をしておくことが必須である。

図 2.12　知のコンピューティングの俯瞰図

（4）セキュリティー

現代社会は、ICT システムに深く依存するようになってきており、ICT システムの安全性の確保は非常に重要な課題になってきている。このような問題を解決するために必要となるのが、情報セキュリティーである。情報セキュリティーの研究分野は広く、縦軸に基礎か応用かを、横軸に要素技術的かシステム技術的かをとり、図 2.13 に示すように整理することができる。セキュリティーは多様な技術をベースにしながら、それらが複雑に関連し、社会的な影響も大きくなっている。さらに、技術だけではなく、法制度や教育、あるいは社会システムといった視点での検討も重要である。総合的な取り組みが期待される。

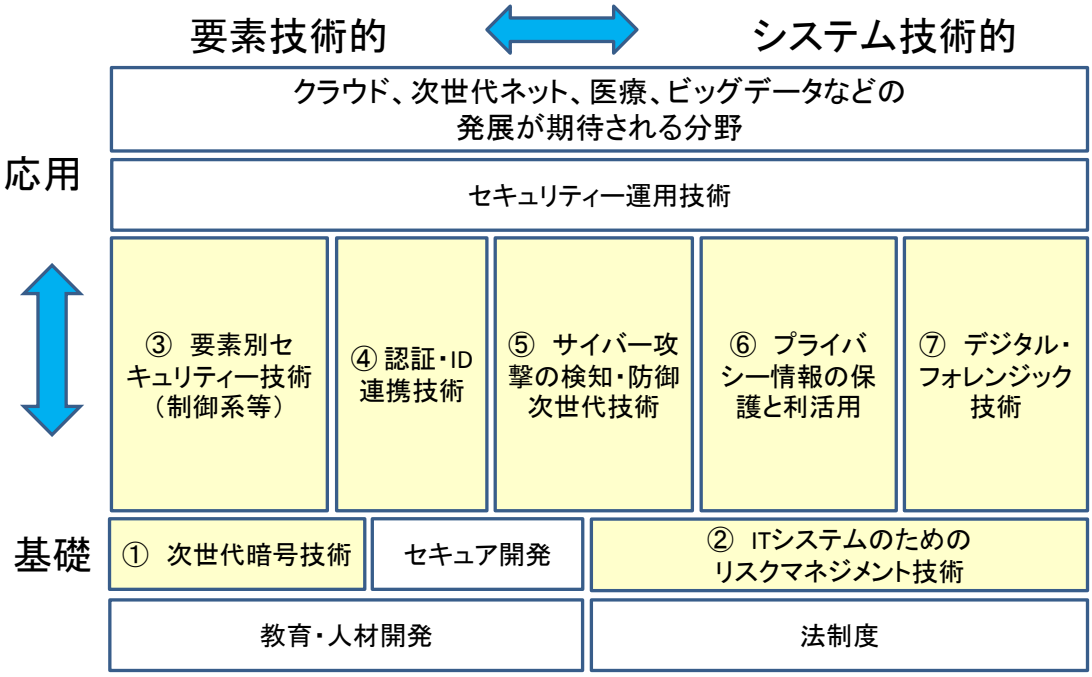


図 2.13　セキュリティーの俯瞰図

２．２．５　諸外国・地域における研究ビジョンや戦略

（１）米国

オバマ政権において 2009 年に策定され、2011 年 4 月にアップデートされた米国イノベーション戦略[1]では、次世代の教育と労働力創出、基礎研究のリーダーシップ強化と拡大、先進的な社会インフラ構築、先端情報技術のエコシステム構築をイノベーションの基盤と位置づけ投資対象に挙げている。また、試験研究費税額控除によるビジネスイノベーション加速、起業支援、イノベーションハブと起業エコシステム育成を通じたマーケットベースのイノベーション促進と同時に、クリーンエネルギー革命、バイオテクノロジー・ナノテクノロジー・先端製造の加速、宇宙空間の利用、ヘルスケア技術、教育技術といった国家的重要テーマにおけるブレークスルー促進を掲げている。エコシステムを構築すべき先端情報技術として、高速インターネットへのアクセス拡大、電力グリッドの近代化、高付加価値利用のための無線スペクトルの可用性拡大、セキュアなサイバー空間を具体的に挙げている。

こうしたイノベーション戦略の下、情報科学技術の研究開発に対する公的投資は、省庁横断の枠組みであるネットワーキング情報技術（NITRD）プログラム[2]を中心に戦略的に取り組まれている。NITRD プログラグラムは国家科学技術会議（NSTC）の NITRD 小委員会により統括されているが、プログラムの進捗と方向性について 2005 年以降は大統領科学技術諮問会議（PCAST）が評価を実施[3]することになっている。PCAST によるプログラムレビュー[4]（2010 年）や米国イノベーション戦略（2011 年）を受け、NITRD 戦略計画[5]が 2012 年に策定されている。戦略計画は研究開発の 5 ヵ年計画であり、米国がリーダーシップを確保しつづけるために強化すべき 3 つの広範な領域を挙げ、省庁連携の一層の推進、新たな産学連携や学際的な取り組みが必要と指摘している。

【強化すべき 3 つの領域】

①拡張された人とコンピューターの連携・協調（WeCompute）

②生活を任せられる安心・安全なシステムの設計・構築（Trust and Confidence）

③サイバー能力を最大限に活用するための教育・訓練の変革（Cyber Capable）

なお、2010 年の更新版となるプログラムレビュー[6]（2013 年）が公表されている。

次に技術領域別に眺めると、NITRD プログラムでは技術領域を 8 つのプログラム・コンポーネント・エリア（PCA）にカテゴライズして、研究開発内容の分析・重要度付けなどを行っている。また、新しい課題に柔軟に取り組むための 4 つの上級運営グループ（SSGs）のほか、参加機関の CIO が実務に関する情報共有を行うための Community of Practice（PoC）が組織されている。

---

1 A Strategy for American Innovation: Securing Our Economic Growth and Prosperity, 2011
https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/uploads/InnovationStrategy.pdf

2 The Federal Networking and Information Technology Research and Development Program: Background, Funding, and Activities, 2013
http://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL33586.pdf

3 Designing the digital future: Federally funded research and development in networking and information technology, 2013
https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd2013.pdf

4 Designing the digital future: Federally funded research and development in networking and information technology, 2010
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd-report-2010.pdf

5 The Networking and Information Technology Research and Development Program 2012 Strategic Plan
https://www.nitrd.gov/Publications/PublicationDetail.aspx?pubid=38

6 Designing the digital future: Federally funded research and development in networking and information technology, 2013
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd2013.pdf

【プログラム・コンポーネント・エリア】
①ハイエンド・コンピューティング基盤とアプリケーション（HEC I&A）
②ハイエンド・コンピューティングの研究開発（HEC R&D）
③サイバーセキュリティーと情報保証（CSIA）
④ヒューマン・コンピューター・インタラクションと情報管理（HCI&IM）
⑤大規模ネットワーキング（LSN）
⑥ソフトウエアの設計と生産性（SDP）
⑦IT が及ぼす社会、経済、労働力への影響と IT 人材育成（SEW）
⑧高信頼ソフトウエアとシステム（HCSS）
【上級運営グループ】
⑨ビッグデータ R&D
⑩サイバーフィジカルシステム R&D
⑪サイバーセキュリティーと情報保証 R&D
⑫医療情報技術 R&D
⑬無線スペクトル R&D

（２）欧州

Ⅰ．欧州委員会

2010 年に発表された欧州の中長期成長戦略 Europe 2020[7]の 7 つのフラッグシップイニシアチブの一つが情報通信戦略である欧州デジタルアジェンダ[8,9]である。デジタルアジェンダは高速インターネットと相互運用可能なアプリケーションに支えられたデジタル単一市場から持続可能な経済的・社会的便益を提供することを目的に掲げ、次の 7 つの行動領域を定めている。

①活気に満ちたデジタル単一市場
②ICT 標準と相互運用性
③信頼性・安全性
④高速・超高速インターネット
⑤研究開発とイノベーション
⑥デジタルリテラシー向上と社会的包摂
⑦ICT を活用した社会的課題への対応

研究開発とイノベーションの行動領域では、米国と比較して欧州における IT 投資、R&D 投資が不充分であり、FP7 の終了する 2013 年までに R&D 予算を年間 20%増とし、公共調達（pre-commercial procurement）や官民連携（public private partnership）により民間投資へ、てこ入れすることを掲げている。

[7] Europe 2020
http://ec.europa.eu/europe2020/index_en.htm
[8] A Digital Agenda for Europe
http://ec.europa.eu/digital-agenda/digital-agenda-europe
[9] EU の情報通信政策動向の整理　－欧州デジタル・アジェンダを中心に
http://www.fmmc.or.jp/pdf/report/report_eutrans_20110302.pdf

さらに、2012 年に公表された欧州デジタルアジェンダ －欧州の成長をデジタルにより促進[10,11]では、2010 年の欧州デジタルアジェンダと相互に補完・強化する 7 つの重要領域を掲げている。

①国境の無いデジタル経済の促進
②公的部門のイノベーションの加速
③超高速ネットワーク接続
④クラウドコンピューティング
⑤信頼性・安全性の保証
⑥Web を用いた起業、雇用とスキル
⑦重要技術に対する産業界の取り組み

こうした戦略を背景として、Europe 2020 のフラッグシップイニシアチブの一つであるイノベーションユニオン（研究の成果をイノベーション・経済成長・雇用につなげる）を推進するものとして、2014 年より FP7 の後継枠組みプログラムとして Horizon 2020[12]がスタートした。Horizon 2020 は、卓越した科学（Excellent Science）、産業界のリーダーシップ確保（Industrial Leadership）、社会的課題への取り組み（Societal Challenges）の 3 つの柱の下で公募の年次計画（Work Programme）が立てられている。2014 年～2015 年の Work Programme における情報科学技術関連のテーマは情報科学技術の研究開発と情報科学技術を活用した社会的課題への取り組みが共に含まれている[13]。

・卓越した科学
　Future Emerging Technologies（FET）
　Research Infrastructure
・産業界のリーダーシップ
　ICT
　Factories of the Future
・社会的課題への取り組み
　Health, Demographic Change and Wellbeing
　Secure, Clean and Efficient Energy
　Smart, Green and Integrated Transport
　Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials
　Europe in a changing world – Inclusive, innovative and reflective societies
　Secure societies – Protecting freedom and security of Europe and its citizens

その他に欧州イノベーション技術機構（EIT）
　知識・イノベーションコミュニティー（KIC）[14]

[10] A Digital Agenda for Europe – Driving European growth digitally
http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/digital-do-list-new-digital-priorities-2013-2014
[11] 【EU】欧州デジタルアジェンダ:2013～2014 年の重点分野
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_7544684_po_02540203.pdf?contentNo=1
[12] Horizon 2020, Bigger Simpler Bolder, Fifth edition of the guide to Europe's innovation strategy and its first work programmes, 2014
http://cpi.asm.md/wp-content/uploads/2014/06/H2020_Guide.pdf
[13] A guide to ICT-related activities in WP2014-15, 2014
https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/sites/horizon2020/files/ICT%20in%20H2020%20WP2014-15_0.pdf
[14] EIT ICT Labs
http://eit.europa.eu/eit-community/eit-ict-labs

欧州委員会や欧州委員会の執行機関以外による Horizon2020 の資金配分[15]

欧州技術プラットフォーム（ETP）[16,17]

バイオ、エネルギー、環境、情報通信技術、生産・プロセス、輸送の 6 分野

情報科学技術に関連の深いものとして、

ARTEMIS：組込みシステムと CPS

ENIAC：ナノエレクトロニクス

EPoSS：スマートシステム

ETP4HPC：ハイパフォーマンス・コンピューティング

euRobotics (NPO) ：ロボティクス

NEM：新メディア・コンテンツ

NESSI：ソフトウエア・サービス・データ

Networld 2020：通信ネットワークとサービス

Photonics21：フォトニクス

共同技術イニシアチブ（JTI）[18]

情報科学技術に関連の深いものとして、

Embedded Computing Systems（ARTEMIS）

Nanoelectronics Technologies 2020（ENIAC）

Ⅱ．英国

2015～2016 年を対象にした複数年度予算計画「スペンディング・ラウンド 2013[19]」が 2013 年 6 月に財務省から発表された。計画では、カタパルトセンターやバイオメディカルカタリスト基金を含めイノベーションの支援を行っている技術戦略会議（TSB、2014 年 8 月より Innovate UK と改称）に対して 185M￡の資源予算を追加配布することが明記されている。また、資本予算を 2012 年～2013 年の 6 億￡から 2015 年～2016 年には 11 億￡に増額することが明記されている。

また、2014 年 12 月にビジネス・イノベーション・技能省（BIS）から科学・イノベーション戦略「成長計画：科学とイノベーション[20]」が発表された。計画のなかで、科学とイノベーションの強みを維持するものとして、8 大技術（Eight Great Technologies）への重点化と産業戦略、デジタルスキルも含む科学的才能の育成、科学研究インフラへの投資、研究へのファンディング、イノベーションの促進、グローバルな科学研究やイノベーションへの参加を掲げている。ここで 8 大技術とは英国が強みを持つと考えられる①ビッグデータとエネルギー効率の高いコンピューティング、②人工衛星と宇宙空間の商業利用、③ロボティクスと

[15] 研究開発の俯瞰報告書　主要国の研究開発戦略（2014 年）
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FR/CRDS-FY2013-FR-07.pdf
[16] Horizon2020 における欧州技術プラットフォームを活用した官民パートナーシップ：EGVI の事例
http://www.ritsbagakkai.jp/pdf/532_03.pdf
[17] European Technology Platforms
http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=etp#etps
[18] JTI
http://ec.europa.eu/research/jti/index_en.cfm?pg=home
[19] Spending Round 2013
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/209036/spending-round-2013-complete.pdf
[20] Our plan for growth: science and innovation
https://www.gov.uk/government/publications/our-plan-for-growth-science-and-innovation

自律システム、④合成生物学、⑤再生医療、⑥アグリサイエンス、⑦先進材料とナノテクノロジー、⑧エネルギーと蓄積である。また、特筆すべきものとして、科学研究インフラへの今後 5 年間（2016 年～2021 年）で 59 億ポンドの投資のなかで、ビジネス利用を目的とした 6 つの新たな投資の一つとして、ハートレーセンターのコグニティブコンピューティング研究センターに 113M£投資し、計算機の専門家でなくてもビッグデータからの知見を得られるようにすることを目指している。また、イノベーションの促進として、Innovate UK が管理運営するカタパルトセンターは産学連携の拠点を形成し、企業、科学者、エンジニアが研究開発を行い、アイデアを新たな製品やサービスに転換することを目指している。①細胞治療、②連結デジタル経済、③未来都市、④高付加価値製造、⑤オフショア再生エネルギー、⑥人工衛星応用、⑦輸送システムのカタパルトセンターに加えて、⑧エネルギーシステム、⑨精密医療のカタパルトセンターを新たに発足させること、④高付加価値製造を強化することを掲げている。②連結デジタル経済カタパルトセンターは、信頼できる手段による私有データの早期の共有を図り、2018 年までに 365M£の経済的付加価値を生み出すことを目指している。このために多くの中小企業が迅速かつ低リスクでイノベーションを実現するためのプラットフォームを構築する。なお、Innovate UK は 2011 年にオープンデータを活用したスタートアップの育成、スキルアップ、経済インパクトの分析とビジネスモデル開発を目標に掲げて 10M£/5 年のファンドにより Open Data Institute[21]を設立している。

Ⅲ．ドイツ

科学技術イノベーション基本計画が 2010 年に更新され、連邦教育研究省（BMBF）より「新ハイテク戦略 2020[22]」として 2014 年に発表された。新ハイテク戦略 2020 では、グローバルな課題である 5 つの重点分野（①気候・エネルギー、②健康・栄養、③輸送、④安全、⑤通信）を掲げるとともに、課題解決型アクションプランとして 11 の未来プロジェクトを策定している[23,24]。11 の未来プロジェクトとは、①CO_2 ニュートラル社会の実現、②エネルギー供給構造改革、③再生可能エネルギー、④個別化医療・よりよい治療、⑤最適な栄養摂取と健康増進、⑥自立した高齢者の生活、⑦持続可能な輸送・電気自動車導入、⑧通信ネットワーク・個人情報の安全、⑨インターネットベースのサービス、⑩世界の知識へのデジタルによるアクセス・体験、⑪明日の労働環境と労働体制であり、⑩⑪は後に統合され Industrie 4.0 のイニシアチブへと発展している。Industrie 4.0 では、製品輸出及び製造技術輸出により生産拠点としての競争力を確保しつづけること、モノとサービスのインターネットの生産過程への活用、Cyber-Physical Systems でネットワーク化された考える工場の実現などを目標に掲げている。

なお、連邦政府のハイテク戦略の重要なプロジェクトである先端クラスターコンペティションのうち情報科学技術に深く関連するものとして、it's OWL（OstWestfalenLippe、イン

[21] Open Data Institute
http://opendatainstitute.org/
[22] ドイツの科学技術イノベーション政策：新ハイテク戦略
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/DE20140916.pdf
[23] ドイツ政府の第 4 次産業革命
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/DE20140917.pdf
[24] 【解題】ドイツ・ハイテク戦略 2020
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3487183_po_20110312.pdf?contentNo=1&itemId=info:ndljp/pid/3487183&__lang=ja

テリジェント技術システム）がある[25]が、「考える工場」のモデル運用を主な研究内容としており、Industrie 4.0 の重要な産学連携拠点の一つとなっている。

一方で、情報通信政策を担当する連邦経済エネルギー省（BMWi）より「ドイツ・デジタル 2015」（2010 年）として 2015 年までに実施すべき取り組み・プロジェクトの重要度付けを行っている。このなかで、①経済活動の全局面で ICT の活用を通じて企業の競争力を強化すること、②将来の課題に応えるため ICT に係るインフラやネットワークを拡大すること、③利用者の個人的な権利を保護すること、④R&D の促進と成果の迅速な商業化、⑤ICT 活用に関する学校教育・職業教育・生涯教育の強化、⑥環境・気候変動・健康保健・モビリティー・行政・市民の QoL 向上に取り組むとしている。また、2014 年には、連邦経済エネルギー省（BMWi）、連邦内務省（BMI）、連邦交通デジタルインフラストラクチャー省（BMVI）の連名による「ディジタル・アジェンダ 2014～2017[26]」が連邦政府より公表されている。アジェンダでは 7 つの主な行動エリアとして、①デジタルインフラストラクチャー、②デジタル経済と職場、③イノベーティブな行政機関、④社会におけるデジタル環境の形成、⑤教育・科学・研究・文化・メディア、⑥社会・経済におけるセキュリティー・保護・信頼の構築、⑦欧州及び国際的協調を掲げている。

Ⅳ．フランス

高等教育・研究法が 2013 年 7 月に施行され、これを踏まえて研究戦略 France Europe 2020[27]が策定されている。戦略では、①社会的課題への取り組み、②研究戦略策定機能の刷新、③技術研究の促進、④デジタル教育とインフラの充実、⑤イノベーションと技術移転の推進、⑥科学文化の涵養、⑦ファンディングプログラムの最適化、⑧研究主体の連携強化、⑨フランスのプレゼンス向上を 9 つの戦略領域として挙げている[28]。上記①社会的課題への取り組みとして、9 つの社会的挑戦（合理的な資源管理と気候変動への対応、クリーン・安全・効率的エネルギー、製造業の復興、健康と福祉、食の安全と人口問題、持続的なモビリティーと都市、情報通信社会、イノベーティブで適応力ある統合社会、宇宙利用）を挙げている。特に情報通信社会に向け、ビッグデータ、サイバーセキュリティー、IoT、インテンシブコンピューティング、ロボティクスが戦略的重要性を持つとしている。また、上記④デジタル教育とインフラの充実のなかで、シミュレーションやビッグデータマイニングは、科学技術研究・イノベーション・競争力にとって重要なキー技術であるとし、研究用 e-インフラの強化、研究データのためのクラウド開発が不可欠だとしている。

[25] 情報科学技術に関連する先端クラスターコンペティションとして他に Software-cluster がある
[26] デジタル・アジェンダ 2014～2017
http://www.bmi.bund.de/EN/Topics/IT-Internet-Policy/Digital-Agenda/digital-agenda_node.html
[27] France Europe 2020
http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/France-Europe_2020/18/3/AgendaStategique02-07-2013-English-Light_262183.pdf
[28] 海外主要国の科学技術イノベーション政策
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu22/siryo/__icsFiles/afieldfile/2014/08/08/1350746_2_1.pdf

（３）中国

2006 年からの 15 年間の科学技術政策の方針を示す国家中長期科学技術発展計画概要では、2020 年までに世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることを目標に掲げており、経済社会の発展、国防にとっての重要分野を特定し、比較的短期間で技術的に解決できる可能性の高い項目を優先テーマに設定している。情報産業及び近代的なサービス業が重要分野の一つとなっており優先テーマは次の通りである[29,30]。

①近代的なサービス業の情報支援技術及び大型応用ソフト
②次世代のネットワークのコア技術及びサービス
③高効率で信頼性の高いコンピューター
④センサーネットワーク及びインテリジェント情報処理
⑤デジタルメディア・プラットフォーム
⑥高解像度の大スクリーン薄型ディスプレー
⑦重要システム向けの情報安全

また、2006-2020 年国家情報化発展戦略[31]では次の項目を 2020 年までの戦略目標として掲げている。

①総合情報インフラの基本的普及を目指す
②情報技術の独自開発能力を大きく向上させる
③情報産業の構造を全体的に改善する
④情報セキュリティー保護のレベルを大幅に向上させる
⑤国民の経済や社会の情報化で顕著な成果を目指す
⑥新しい形の工業発展モデルの基本的確立を目指す
⑦情報化の推進に向けた国の制度・環境・政策の基本的整備を目指す
⑧国民の情報技術の応用能力を大きく引き上げる
⑨情報社会への移行の基礎づくりをする

さらに、国全体の方針を示す国民経済・社会発展第 12 次 5 ヵ年計画（2011 年～2015 年）において、消費者主導型成長への転換、新しい成長産業の育成・サービス業の強化、都市化の推進による地域振興を重視している。さらに、戦略的新興産業として①省エネルギー・環境保護、②新世代情報技術、③バイオ、④最先端の製造業、⑤新エネルギー、⑥新素材、⑦新エネルギー自動車を育成すること、サービス業の強化、都市化の推進による地域振興を重要な目標としている。国民経済・社会発展第 12 次 5 ヵ年計画の科学技術分野の政策は多くが国家中長期科学技術発展計画概要の内容を踏襲している[32,33,34]

[29] 国家中長期科学技術発展計画
http://www.spc.jst.go.jp/policy/science_policy/chapt3/3_01/3_1_1/3_1_1_1.html
[30] 科学技術・イノベーション動向報告　～中国・台湾編～
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2008/OR/CRDS-FY2008-OR-10.pdf
[31] 中国、情報化へ向け今後 15 年間の戦略決定
http://japanese.china.org.cn/japanese/236539.htm
[32] 第 12 次 5 ヵ年計画が示す中国の経済発展戦略
http://www.jri.co.jp/page.jsp?id=19673
[33] CSTI　第 2 回基本計画専門調査会　資料 2　海外の科学技術イノベーション政策　国が推進する研究開発の優先課題の動向
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon5/2kai/siryo2-4.pdf
[34] 研究開発の俯瞰報告書　主要国の研究開発戦略（2014 年）
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FR/CRDS-FY2013-FR-07.pdf

国民経済・社会発展第 12 次 5 ヵ年計画を受け、国務院の科学技術部が国家第 12 次 5 ヵ年科学技術発展計画を公表しており、さらに詳細な分野別の専門計画が策定されている。情報科学技術に関連する専門計画は次の通りである[35]。

①現代サービス業科学技術発展専門計画
②スマート製造科学技術発展専門計画
③サービスロボット科学技術発展専門計画
④スマートグリッド重大科技産業化行程専門計画
⑤新型ディスプレー科学技術発展専門計画
⑥ナビと位置情報サービス科学技術発展専門計画
⑦中国クラウド科学技術発展専門計画
⑧国家ブロードバンドネットワーク科学技術発展専門計画

科学技術部のほかに、工業・情報化部が情報科学技術関連の次のような計画を策定している[36]。

①電子認証サービス業の第 12 次 5 ヵ年計画
②物聯網の第 12 次 5 か年計画
③電子情報製造業の第 12 次 5 か年計画
④集積回路の第 12 次 5 ヵ年計画
⑤ソフトウエア及び情報技術サービスの第 12 次 5 か年計画
⑥情報通信産業の第 12 次 5 か年計画

（4）韓国

国民の創造的なアイデアが、科学技術・ICT と結び付き、創業、新産業、新市場開拓につながり、質の高い雇用を生み出す「創造経済システム」を醸成する計画として「創造経済実現計画[37]」が 2013 年 6 月に国務会議において決定されている。創造経済実現計画では「創造経済を通じて国民の幸福と希望に満ちた新時代を実現する」というビジョンの下、次の 6 つの戦略を掲げている。

①企業しやすい環境づくり
②ベンチャー・中小企業支援
③成長動力の創出
④グローバル創意人材養成
⑤科学技術と ICT のイノベーション革新力強化
⑥創造経済文化の醸成

さらに、この計画の下、科学・ICT と既存産業を融合させ、対象産業の高度化と問題解決を支援する全省庁による「創造ビタミンプロジェクト」が打ち出され、引き続く「創造ビタミンプロジェクト推進計画」において次の重点 7 分野で 2013 年度より模範事業として開始し

[35] 国家第 12 次 5 ヵ年科学と技術発展計画下の科学技術専門計画
http://www.spc.jst.go.jp/policy/main_policy/02/02.html
[36] 世界情報通信事情　中国　より詳細な監督機関・法律・政策等の情報
http://www.soumu.go.jp/g-ict/country/china/pdf/086.pdf
[37] 科学技術・イノベーション動向報告　韓国編　～2013 年度版～
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf

た。2014 年には、対象がエネルギー・交通・環境等にも拡大している[38,39,40]。

１．融合の早期活性化が期待できる分野：農畜水産食品、文化観光

２．融合を通じた戦略産業化が必要な分野：保健医療、主力・伝統産業、教育学習

３．早急な社会問題解決が必要な分野：小商工業創業、災害安全

こうした創造経済システムを実現する中核機関として 2013 年 3 月に未来創造科学部が新設されている。さらに 7 月の臨時国会において「情報通信の振興及び融合の活性化に関する特別法案（ICT 特別法案）」が可決された。この特別法では、ICT の活用を阻害する規制の緩和、未来創造科学部長官が 3 年ごとに ICT 政策に関する基本計画（ICT 基本計画）を策定・実施すること、国務総理の所轄の下に ICT 政策の統合調整機能を担う「情報通信戦略委員会」（未来創造科学部長官が幹事）を設置すること、未来創造科学部によるソフトウエア産業及びデジタルコンテンツ産業の振興や ICT を活用した新しい技術・サービス等への支援などが掲げられている[41,42]。

また、2013 年 12 月には 2017 年までの国家情報化戦略として「国民の幸福のためのデジタル創造韓国の実現」を目標に掲げた第 5 次国家情報化基本計画を発表した。目標実現に向けて 4 大戦略として以下の「CORE」及び 15 個の戦略別課題を提示している。

①情報化を通じた創造経済の牽引（Creative Economy）

②国家社会の創意的情報通信技術の活用（Optimized Society via ICT）

③国民の想像力強化（Renewed Human Capacity）

④デジタル創造韓国のインフラ高度化（Enhanced ICT Infrastructure）

一方、科学技術・イノベーション政策の主軸となる「第 3 次科学技術基本計画（2013 年～2017 年）では創造経済の実現に向け、科学技術と ICT の融合による新産業創出、国民の生活の質向上等のための具体策として次の 5 つの戦略分野を高度化する「High5」を掲げている[43]。

（High1）国の研究開発投資の拡大と効率化

（High2）国家戦略技術の開発

（High3）中長期的な創意力の強化

（High4）新産業創出支援

（High5）科学技術基盤の雇用創出

「High2 国家戦略技術の開発」では研究開発投資すべき分野として 5 大推進分野とその下の 20 推進課題を挙げ、各推進課題を活用するための 30 の重点国家戦略技術、120 の国家戦略技術の研究開発を推進する方針を掲げている。

[38] 韓国、創造ビタミンプロジェクト推進計画を発表
http://ameblo.jp/ktip/entry-11704126683.html
[39] 情報通信の今を届ける　ICT グローバルトレンド
http://www.fmmc.or.jp/ictg/country/korea.html
[40] 情報通信白書平成 26 年版
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc25b140.html
[41] 【韓国】情報通信の振興及び融合の活性化等に関する特別法の制定
http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_8347717_po_02570208.pdf?contentNo=1
[42] 韓国、ICT 産業の競争力強化めざし特別法を制定
http://it.impressbm.co.jp/articles/-/10540
[43] 研究開発の俯瞰報告書　主要国の研究開発戦略（2014 年）
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FR/CRDS-FY2013-FR-07.pdf

①IT 融合新産業の創出
②未来成長動力の拡充
③クリーンで便利な生活環境の構築
④健康長寿時代の実現
⑤安全安心な社会の構築

重点国家戦略技術として、知識情報セキュリティー技術、知識基盤ビッグデータ活用技術、次世代有無線ネットワーク技術（5G など）、融合サービスプラットフォーム技術、知能型インタラクティブ技術、スマートグリッド技術、健康管理サービス技術、自然災害モニタリング・予測・対応技術などが挙げられており、いずれの推進分野においても情報科学技術が重要な役割を果たすものとして位置づけられている。

「High5 科学技術基盤の雇用創出」では、創造経済を支えるものとして、ロボット、情報セキュリティー、ビッグデータ、認知脳科学、老人医療、医工学、文化コンテンツといった新産業分野の専門家・職業群の育成に取り組もうとしている。

3．研究開発領域

3.1　基礎理論

・情報科学技術と社会における基礎理論の役割

計算の基礎理論は情報科学技術の大きな方向性を左右する基盤であり、情報システムや情報社会を構築・評価し、進化あるいは革新させるものである。

古くはチューリングやゲーデルによる計算可能性・不可能性の理論と、それを示すためのモデルであるチューリング機械の提唱が、計算機が単なる学術的な数値計算のみでなく社会のありとあらゆる課題の解決に利用できるという万能性の担保になり、計算機開発の意義と価値を示した。実際にチューリングはその担保を具現化してドイツ軍のエニグマ暗号を破る専用計算機である Bombe 機械を作成し、電子的な計算機開発への道を拓いた。また、情報を計算機が扱う数値や論理式に変換する符号化理論は、シャノンにより情報通信の数学理論として発祥し、その後「情報理論」として発展し、画像や音声などを含む様々な情報を高速に通信・処理するのみならず、Web 検索に代表される高速データ検索などが行える「データ構造理論」へと派生発展し、計算機構やインフラの基盤となった。

その後、実社会の課題解決を数理的にモデル化する「最適化理論」が、フォンノイマンらが提唱したオペレーションズ・リサーチから発祥し、更に数理化された課題を解決する実行手順(アルゴリズム)の設計理論と品質保証理論である「アルゴリズム理論」と一体となって発達し、実社会の多くの課題が計算機によって解決される情報化社会を作りだしている。

現実の問題に対して数理的な定式化を見出し、優れたアルゴリズムや通信プロトコル（通信に関する手順）を開発することは、情報技術の核であり、新規産業を生み出す爆発的な力を持つ。例えば遺伝子検証における Smith-Waterman のアルゴリズムはゲノム産業の出現の大きな要因となり、データの関連性を見つけるアプリオリアルゴリズムはデータマイニングの概念を生んでデータ解析を産業化し、安定結婚マッチングアルゴリズムは物資や人員の配置メカニズムを変革し（ノーベル経済学賞受賞)、ページランクアルゴリズムと呼ばれる Web 検索を補助するアルゴリズムは Google 社を立ち上げて情報検索産業を革新した。また、公開鍵暗号プロトコルは「暗号理論」を変貌させて電子商取引を可能にし、誤り訂正符号やデータ圧縮手法は画像やビデオ等の高品質デジタル配信を可能にしている。いずれの例も産業的・社会的に計り知れない影響を及ぼしている。

また、一つのバグが大きな社会的な影響を与える現代において、プログラムやソフトウエアの正当性・安全性の保証は非常に重要であり、アルゴリズムやプロトコルを安全かつ効果的に実装し、計算機やネットワークで実行するために、プログラムの開発やソフトウエア自動検証に関する「プログラム基礎理論」が大きな役割を担っている。

・計算の本質の追究による IT の先導

情報や計算の構造は、順列やグラフ、論理関数等の「離散構造と組合せ論」を用いて数学的に抽象化され、数理的に定式化されて解析される。理論的に効率よく計算できる（専門的には多項式時間計算可能な）問題の体系が整理され、解法やアルゴリズムが与えられ

て実社会の課題解決の基盤になっている。一方で計算機や IT の応用の変遷に伴って解くべき課題は急速に拡大・進化し、理論的な解法の体系の進歩と整備は常に急務である。

チューリングらに発祥した計算の本質の追究は「計算複雑度理論」として発展し、計算理論全体の基本指針を与えている。現実に求解が切望される問題の中にも現実的な計算時間では計算できそうもない問題群があり、これらを類別し計算の困難性を解明するために、様々な計算モデルによる計算可能性が議論されている。特に非決定性計算というモデルで効率よく解ける問題群は、NP 問題と呼ばれる。これは答えを推理や経験で発見して、それを検証するという、人間が行う典型的な求解のプロセスでの問題解決をモデル化したものであり、計算機を用いて人間の智にどこまで迫れるかという疑問が、『NP 問題を通常の計算モデルでも効率よく解けるか？』という問題（P vs NP 問題）として定式化され、計算理論で最も有名な未解決問題となっている。NP 問題は NP 完全問題と呼ばれる問題群のどれかを解けばすべて解けるという理論（NP 完全性の理論）がクックやカープらによって 1970 年代に確立され、大きな影響を与えた。

実際に、実社会で必要とされる問題の多くは、NP 問題を最適化問題として定式化した NP 最適化問題と呼ばれるものである。最適化問題においては、解の品質という概念がある。例としてカーナビゲーションで要求される、地図上での２点間の最短時間経路を求めよという問題は、典型的な最適化問題であり、経路の所要時間が解の品質になる。NP 完全性理論は、典型的な NP 最適化問題の解法を開発して汎用的なソルバーを作ることの可能性と重要性を示唆しており、その実用的・産業的価値は非常に高い。特に整数計画問題は、それを緩和(整数条件を除去して解く)してできる線形計画問題が効率よく解けるということが判明しているため、多くの場合に品質の良い解を得やすく、現在では産業界において多くの現実問題の解決にソルバーとして利用されている。また、NP の求解モデルをそのまま利用し、(多くは自然や人間の挙動を模倣して)解の候補を発見して、それを検証してよい解を探す発見的手法(ヒューリスティクス)が提案され、局所探索法、焼きなまし法、遺伝アルゴリズムなど数多くの種類が実用化されている。

さらに、人間の行うさらに進んだ求解手法である「多人数で手分けして問題を解く」「教師や専門家に相談する」「サンプル調査した結果を検証して判断する」「熟練を積む」「複数での合議を行う」「過去のデータから予測する」などのモデルに対して、並列・分散モデル、対話証明モデル、確率的検証証明モデル、学習モデル、強化学習モデル、オンラインモデル、統計的学習モデルなど様々な計算モデルが考案され、それぞれの計算力の強力さを理論的に解析・評価し、その評価に基づいて現実にこれらのモデルを活用した計算アルゴリズムや計算機構の構築が行われてきた。これらの計算理論によるモデル構築と理論解析は、IT や情報社会の水先案内人の役割を果たしており、現在の Web ビジネスやクラウド、ビッグデータ活用等の動機を与えている。産業界でも、米国などの情報関連企業では計算理論の研究者を集め、技術開拓の水先案内を担わせている。

・ビッグデータ時代に向けた計算理論の進化

科学において計算の大きな役割として、データの収集・整理・加工と可視化、理論的モデルに従った最適化、人間の作った仮説に対するシミュレーションによる検証が過去における代表的なものである。これらは課題を人間と機械の協業により解決するものであり、

観察・理論・実験の科学の古典的なパラダイムに従っている。一方、グレイにより提唱され近年注目されている新しい科学パラダイムであるデータ駆動型科学では、新しい計算の役割が必要になる。即ち自然や人間生活からセンサーや Web 情報発信などによって収集されるビッグデータと呼ばれる大量かつ非均質なデータを活用して、モデルを自動構築する、あるいはモデルを明示的に提示せずに知識や性質を取り出すビッグデータ技術の重要性が増している。

必然的に計算の基礎理論も対応した進化を要請され、データの統計的表現や隠れたモデルを用いたデータの構造化技術、データからの情報抽出技術であるデータマイニングや機械学習のためのモデル構築やアルゴリズムの設計・解析技術、予測やそれを用いた意思決定支援などを含む、いわゆる「データアナリシス」の計算理論基盤の開拓が重要なテーマになっている。ここでは、データの巨大化に従い、リアルタイム処理のための圧縮データ構造や次元削減手法、限られた記憶領域を用いてストリームデータを処理するストリームアルゴリズム、データの全体を読むよりも早く性質をとらえる劣線形時間アルゴリズム、高次元幾何学データにおける近傍・類似検索構造、クラウド上のデータを共有するためのセキュリティー・プライバシー保護のための理論など、アルゴリズム、データ構造、暗号理論、情報理論などすべての分野を巻き込んだ統合的革新が求められている。これは情報社会の変革につながる革新と考えられており、特に米国では重点的に推進されている。

・我が国の現状

歴史的には、第二次世界大戦および戦後の冷戦時に政策的に行われた、計算機の開発・活用及び最適化に関した数学的研究開発が計算基礎理論の探求・深化の契機であり、研究の最大拠点は米国である。日本においては過去に実施された特定領域研究等の効果で計算理論の研究レベルは全般的に国際的に高く評価され、特にアジアにおいてはトップリーダーの位置にある。一方で上記のデータアナリシスなど、産業界からの要請で爆発的に進化している分野では、我が国の人材育成の対応は遅れがちであると言われている。また、欧米においては応用数学の主要分野として計算理論や最適化理論、データアナリシスがあり、数学を志望する優秀な学生が本分野に参入し、博士を取得して産業界で優遇される。それに対して、我が国では情報科学と数学の協働関係が希薄であり、国際的に高レベルの数学能力を活かせていない。近年は ERATO や新学術領域等のプロジェクトで数学能力の高い学生の啓蒙や勧誘を行い、状況の改善を図っている。

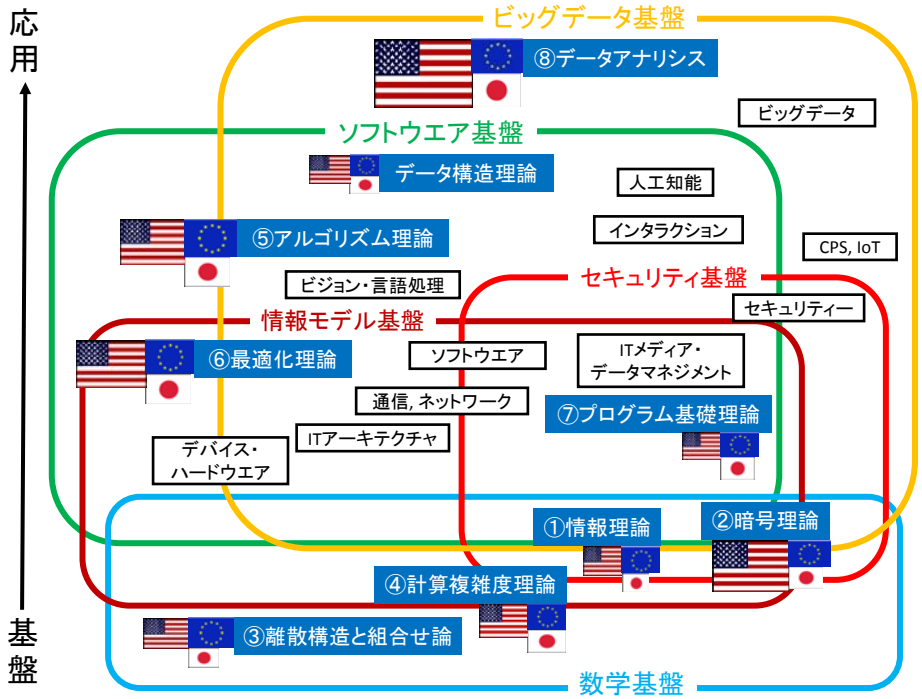


図 3.1.1 基礎理論の俯瞰図

情報科学技術の 5 つの基盤（数学基盤、情報モデル基盤、セキュリティー基盤、ソフトウエア基盤、ビッグデータ基盤）を支える基礎理論における研究開発領域を青色白抜きで示す。国旗は米国、EU、日本における戦略的重点化の現状を模式的に表現。

３．１．１　情報理論

（１）研究開発領域名

情報理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

情報理論は、近年のネットワーク情報社会の急激な技術進歩をささえる基本理論として欠く事はできない。情報理論は情報や情報の変換（情報処理や情報通信等）の本質を数理モデル化し、その数理モデル上で情報変換の性質や限界をエントロピー等の様々な情報量を用い明らかにすると共に、その限界を達成する最適な変換法（符号化，復号化等）を求めている。

物質の運動の本質が物理学によって解明されるように、情報の伝送や変換の本質は情報理論によって解明されており、情報理論は情報技術の基礎理論としての工学的側面のみでなく、科学的側面ももっている。文字、音声、画像はもちろん、知的情報や遺伝子等の生物情報まですべての情報を科学、工学両面から解明する情報理論は、情報通信，情報処理の問題のみならず様々な情報に関連する分野においてその有効性が確かめられている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

情報理論はシャノンの 1948 年の”A mathematical theory of communication”により誕生し、この論文では通信における①情報源符号②通信路符号③暗号の３つの問題を柱としているが、これらの問題は、情報の変換（処理）の基本問題をほとんど網羅しており、論文タイトルの communication の部分は現在では information と読み替えた方が適切であろう。計算の本質がチューリングマシンにより数理モデル化され解明されたのと同様に、情報理論では情報の変換の基本問題を数理モデル化し情報の本質を解明している。情報理論の研究領域は情報全てと言っても過言ではなく、非常に深く多岐に渡っているため、ここでは①と②の中の基礎的研究問題についてのみ説明する。

［情報源符号化問題］

情報源符号化問題はデータ圧縮技術等の基礎理論として有用で，情報源から発生する情報（文字、音声、画像等）をある記号列（符号系列）に変換（符号化）し、その系列を伝送や蓄積した後、受信者（利用者）が受信した系列を元の情報に変換（復号）する過程を数理モデル化することにより、情報とその変換の性質と限界を解明している。復号した情報が伝送したかった情報と一致する（歪みをゼロ）としたもとで、伝送できるレートの限界が情報源のエントロピーであることは良く知られている。

工学的には、エントロピーまで圧縮できる符号と復号法を構成することが目標となり、これは既に情報源の確率構造を巧みに利用したハフマン符号や算術符号等で実現されている。これらの基礎理論をベースに音声や画像に即した圧縮技術が開発され、情報化社会の巨大な情報の伝送、蓄積の効率化に不可欠の技術となっている。

他方、情報の性質を解明すると言う意味では、情報源や情報系列に含まれる情報の量を測る測度としてエントロピーが本質的であることが明確となり、言語や遺伝子等に含まれる情報の量の考察や、乱数をはじめ系列のランダム性の考察等にも無くてはならない理論となっている。

また、情報源の確率構造が未知の場合でも、ベイズ符号等のユニバーサル符号を用いることで、やはりエントロピーまで圧縮は可能であり、符号長がエントロピーに漸近する速度まで精密に求められている。この問題は未知のモデルの学習問題や時系列データ解析の問題等とも密接な関係があり、それらの問題の最適なアルゴリズムの構築やその限界の解明にベイズ符号等の漸近解析の結果が重要な役割を演じている。

［通信路符号化問題と符号理論］

符号理論は、伝送した信号に誤りが生じて受信側に伝送された場合にその誤りを訂正する技術の基礎理論として、すべての情報伝送と蓄積になくてはならない理論となっている。例えば、最も初期に提案された１ビットの誤りまで訂正できるハミング符号は、コンピュータ内部の情報蓄積、通信において欠くことの出来ない技術であり、その後もっと強力な誤り訂正能力をもったリードソロモン符号、畳み込み符号、LDPC（低密度パリティ検査）符号等が開発されている。もしこの技術がなければ、文字、音声、画像情報の携帯電話、地デジ、インターネットによる伝送や、ハードディスク、DVD の記録再生のような日常的な行為が不可能となってしまうほど、現代社会に浸透した技術である。

通信路符号化問題では、情報源から発生する情報を符号化した符号系列を、伝送や蓄積を行なう過程（通信路）で確率的に誤りが生じ、符号系列の一部が変化した系列を受信者が受信したもとで、その受信系列を元の情報に復号する問題を数理モデル上で扱っている。この問題において、誤りをゼロに限りなく近づけるもとで、通信の効率であるレートの上限は，通信路の相互情報量を入力分布で最大化した通信路容量となることが示されている。

相互情報量は二つの情報系列において，一方の情報系列が含んでいるもう一方の系列の情報量を表していると解釈され、二つの情報系列の関連性や距離の尺度として、通信の問題以外でも様々な研究分野で応用されている。例えば、パターン認識における特徴量とクラスの関連性を表す量として、遺伝子間の近さの尺度として等、学習理論や生物情報の分野等でも重要な役割を担っている。

［情報理論独特の研究アプローチ］

情報理論は対象とする問題を抽象化して数理モデル化し、その問題の限界をまず導出する。例えば、情報源符号の圧縮の限界であるエントロピーや通信路符号の伝送の限界である通信路容量等がそれに対応する。そして、その次にその限界を達成する方法（符号や復号法）を構成することをめざす。このような研究アプローチのため、技術者にとっては達成しなければならない目標が明確になり、現時点の技術が最適なものに比べどの程度であるかも定量的に把握できる。また、限界の証明や問題のもつ性質の理論的解析は、限界をめざす技術の開発に深い示唆を与えるものとして非常に役立っている。

例えば、通信路符号化の問題は、誤りなく伝送できるレートの限界として通信路容量があり、それを達成する符号と復号の存在はシャノンによって示された。しかし、それを具体的に構成する方法は示されておらず、達成限界を目指した研究がそれ以後開始され、現在も精力的に続けられている。リードソロモン符号や畳み込み符号は現在も多くの通信で利用される優れた特性を持った符号であるが、そのレートは通信路容量に遠く及ばなかった。ところが近年、ターボ符号や LDPC 符号が通信路容量の限界に迫る符号として注目が集まり、世

界中の研究者によって研究が進められ、急速に実用化されてきている。最近では、通信路容量を達成する符号として空間結合符号やポーラ符号が提案され、限界を達成する目標は、ある条件を満たした通信路に対して到達したが、一般の通信路や有限の符号長での性能向上等、まだまだ多くの問題が残されている。

（４）科学技術的・政策的課題

ここまでは、多岐にわたる情報理論の取り扱う問題の中で，情報源符号化と通信路符号化の問題において、送信者と受信者が１対１の通信を行なう最も基本的な数理モデルの問題について説明してきたが、従来から多対多の通信を扱う多端子情報理論（ネットワーク情報理論）も盛んに研究が行われている。特にインターネットをはじめ、コンピューター、センサー、データ等が大規模に分散するネットワーク情報化社会において、ネットワーク情報理論はこれらの問題の基礎理論として重要視されている。しかし、１対１の問題とは異なり、非常に複雑な数理モデルとなるために多くの問題は未解決であり、圧縮や伝送の限界すら特別な条件のもとでしか求まっていない。ネットワーク上での情報の変換（処理）の技術課題は急速に増加しているにも関わらず。それ支える基礎理論であるネットワーク情報理論の進歩が追いついていないというのが実情である。

また、情報理論において、圧縮や伝送の限界や最適な符号、復号法を求める場合に、情報系列や符号系列を無限長まで延ばした場合の漸近的な解析が多く用いられてきた。この漸近理論による解析結果でも、実用的な符号、復号法や情報処理アルゴリズムを構成するために十分有用であったが、我々は実際には有限長の情報や符号系列を扱っており、さらに厳密な解析が求められていた。近年、今まで漸近的解析を行なっていた問題を有限長でも解析できる理論が提案され、盛んに研究が行われている。しかし、情報理論の多岐にわたる問題のうち、有限長で解析された問題は限られており、実用技術と理論との橋渡しを担うこの有限長解析の理論の更なる発展が望まれている。

このような情報理論の更なる進歩のためには、周辺研究分野との連携は必須であり、各種数学はもちろん、統計理論、最適化理論、計算量理論等、従来から関連していた分野とより一層密接に研究を進めていくことが必要であろう。また、情報の変換、処理の本質を解明する情報理論は、様々な情報を扱う分野の基礎理論として非常に有用であるにもかかわらず、まだまだ通信、情報セキュリティ、学習等の周辺分野の研究者しかその有用性に着目しておらず、情報を扱う研究分野の研究者ですら、情報理論の扱える問題の広さや最近の進歩について十分な理解がされていないのが実情である。これらの分野の研究者や技術者と情報理論研究者のコラボレーションにより、その分野の進歩の加速化やブレークスルーが期待されるので、そのような仕組みづくりが望まれる。

日本の情報理論研究者は、世界的に見ても独自性の高いトップレベルの成果を出し続け、一つのステータスを近年までに築いてきていた。しかし、情報理論のような応用数学の研究者層がもともと薄い日本において、近年、実用研究重視の傾向や、企業の基礎研究に対する予算削減等もあり、世界と比較して相対的な研究レベルの低下が危惧されている。

欧米は情報理論研究の歴史も古く、研究者層がもともと厚い上、近年は中国、インド、韓国等の優秀な留学生や研究者が、欧米の情報理論研究の盛んな主要大学に膨大な数流入し、さらに層が厚くなると同時に研究論文の量、質ともさらに伸びてきている。これらの留学生

や研究者は、各国から、大学や様々な企業から、豊富な研究のサポートを受けられており、最新の研究成果の多くは彼らが担っていると言える。

残念ながらこの分野での日本から欧米への留学生や研究者は最近では減少する傾向にあり、このような世界的潮流にも乗り遅れてしまいつつある。研究者のポテンシャルでは、日本はまだ米国、ヨーロッパに次ぐ３番手と目されおり、日本国内で研究者個々としては精力的に研究活動を行なっているとはいえ、このままでは、あっという間に取り残されてしまう可能性を含んだ危機的状況にある。日本における情報理論のような基礎研究の衰退が、日本の技術、ひいては日本社会に与える影響が非常に危惧される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［通信路容量を達成する符号，復号法］

伝送の限界である通信路容量を達成する、あるいはそれに迫る性能を持った符号、復号法が、(3)でも述べたように近年相次いで発表され、盛んに研究が行われている。また、この研究は多端子通信路や変復調など情報理論の中の研究分野で広がりを見せているだけでなく、周辺分野とも関連が深い。

例えば、ターボ符号、LDPC 符号、ポーラ符号の復号法では、最適な復号である事後確率最大の符号系列を求めるために、符号と通信路の確率構造を表現したグラフ上でメッセージを伝搬させるアルゴリズム（メッセージ伝搬法）を用いて、事後確率を効率的に求められたことが、ブレークスルーの重要な要因となった。データ解析や学習理論等の分野においても、問題の本質が事後確率計算に帰着される問題は多く存在し、それらの問題の解法アルゴリズムとしてもメッセージ伝搬法は有用で、これらの分野とも相互に関連をもって研究が進められている。

［スパース数理モデル問題］

圧縮センシング問題、スパース構造学習問題等，類似の問題がいろいろな呼ばれ方をしているが、推定や符号化する対象が疎な（スパースな）構造であると仮定されたり、ある仮定からスパースな構造が現れるためこのように呼ばれている。自然界の情報や生物情報にはこのような仮定が成り立つと考えられる問題も多く存在し、近年、スパース数理モデルの研究が盛んになっている。

誤り訂正の線形符号において、正しく復号可能な誤りの個数の限界や、効率よい復号アルゴリズムの研究は長い歴史がある。圧縮センシングで扱う、観測された疎なベクトル情報を線形変換で効率よく圧縮する問題と、復号の問題は本質的に同類の問題とみなせ、その限界の導出などで密接な関係をもっている。

また、効率的なアルゴリズムとして、L1 ノルム（ベクトルの各成分の絶対値和）最小化等の正規化項を付加した最適化アルゴリズムが用いられているが、統計学の統計モデル選択問題や正則化項付き学習問題とも密接な関係がある。例えば、代表的統計モデル選択問題である多重回帰分析の変数選択問題（データからどの説明変数を統計モデルに取り込むべきか判断をおこなう問題）において、AIC（赤池情報量規準）や MDL（最小記述長）等のモデル選択基準では、少ない変数で構成されるスパースなモデルが選ばれる傾向（オッカムの剃刀と呼ばれる）がある。さらに L1 ノルム最小化に対応する Lasso や Elastic Net 等の正規

化項付き最適化手法も従来から研究されており、スパース数理モデル推定と密接に関係している。

このようにスパース数理モデル問題は、統計理論、学習理論等、従来から様々な分野で研究されてきた応用的にも重要な問題であると同時に、情報変換（処理）の本質的問題の一つと考えられ、最近、各分野の成果も含め統一的な視点から研究が展開されてきている。今後、周辺分野とさらに密接な関係を保ちつつ研究の進展が期待されている。

［情報変換の限界の有限長解析］

情報理論における解析は、(4)で述べたように情報系列や符号系列を無限長まで延ばした場合の漸近的な解析が多く用いられてきたが、最近、有限長で解析する理論が提案され、情報理論において、今まで漸近的解析しか行なわれていなかった様々な問題に対して、有限長での解析の研究が精力的に行われている。有限長の情報列を扱う、実用的な符号、復号法や情報処理アルゴリズムの性能評価や高性能アルゴリズム構築のためには、この有限長解析の研究がさらに進展していくことが期待されている。

（６）キーワード

エントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量、相対エントロピー、符号化、復号化、通信路容量、符号長、圧縮率、符号化レート、歪み、復号誤り率、シャノン理論、情報源符号化、データ圧縮、確率過程、符号理論、通信路符号化、符号化変調、系列、無線通信、通信方式、光通信理論、検定と推定、暗号、情報セキュリティ、ネットワーク情報理論、情報ネットワーク、ネットワーク符号化、量子情報理論、画像・音声処理、信号処理、圧縮センシング、パターン認識と学習、量子符号・暗号、記録素子用の符号化・信号処理、情報理論応用

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	情報理論研究の歴史は欧米についで古く、通信路容量の効率的計算法、ユークリッド復号法、嵩符号、岩垂符号など歴史的に重要な研究成果をあげ、近年でも、情報理論の成果を一般情報源にまで拡張した情報スペクトル的方法等の研究成果があり、独自性の高いトップレベルの研究を行ってきている。情報通信や情報理論における最高の栄誉であるシャノン賞を欧米以外で受賞しているのは日本のみで、これまでに２名の受賞者を輩出している。また、最大の国際会議であるIEEE ISITはアメリカとヨーロッパで毎年基本的に交互に開催されているが、例外として日本で2回開催されている（韓国で1回開催され，香港では2015年6月開催予定）。国内の情報理論研究者のほとんどが属する電子情報通信学会の情報理論とその応用サブソサエティは、米国のIEEE Information Theory Societyには規模的に遠く及ばないものの、これに次ぐ規模の情報理論コミュニティであり、年次大会である情報理論とその応用シンポジウム（SITA）、隔年ごとの国際シンポジウム（ISITA）を開催する等，活発な活動を行っている。 しかし、(4)の課題でも述べたように、欧米での研究の進展の加速化、中国、インド、韓国の研究者の増加等、相対的な研究レベルの低下は避けられない状況となっている。それは、国際会議への参加者数や、IEEE Trans. Information Theory等の主要論文誌への掲載数の相対的比率の減少などにも見て取れる。
米国	基礎研究	◎	↗	シャノンによって創成された情報理論は、その弟子達をはじめ米国の研究者を中心に発展し、現在でもその層の厚さ、レベルの高さは他国の追従を許していない。MIT、プリンストン大、スタンフォード大等、米国の主要大学には、海外からも優秀な留学生、研究者が集まり、最先端の研究が行なわれており、情報理論の全ての分野で次々と新しい成果が出ている。米国のIEEE Information Theory Societyは世界の主要な情報理論研究者ほとんどが属する情報理論最大の学会で一極集中となっている。最高賞のシャノン賞もほとんどがアメリカの研究者によって占められているのが実情である。また、最近は中国、インド、韓国から優秀な研究者が流入することで、研究の量と質両面でさらなる発展がみられ、米国中心の構造はますます強まりつつある。
欧州	基礎研究	◎	→	歴史的にも、研究者の層の厚さや研究成果の面でも、米国に次ぐのが欧州である。もともと数学が強い東欧では、米国の情報理論の主流の流れとは異なる数学理論を用いた独自の情報理論を発展させ、イスラエルでは、米国と密接な関係を保ちながら画期的な研究を行っている等、様々な分野で重要な研究成果を出している。近年でも、通信路容量を達成またはそれに迫る符号や復号法の提案等、情報理論の根本的発展に寄与する研究はヨーロッパから発信されているものも少なくない。シャノン賞も米国に次ぐ数の受賞者を輩出しているが、欧州を統合する学会がないため、米国のIEEE Information Theory Societyに対抗する極とはなり得ていない。
中国	基礎研究	○	↗	従来から中国系アメリカ人によって、重要な研究成果が発表されていたが、近年、中国から膨大な人数の留学生が、米国の主要大学の有名研究室に籍を置き、様々な分野で最新の研究を行なっている。国際会議での発表件数も恐らく中国系研究者が最多と思われ、情報理論研究の一大勢力となる勢いである。中国の大学自体ではこのような基礎研究は、まだそれほど盛んではないが、2015年6月、情報理論界最大の国際会議であるIEEE ISITが中国（香港）ではじめて開催される等、今後急速な発展をとげることが予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	多くの研究者や留学生が、アメリカの主要大学や主要企業の研究所において研究を行なっており、優れた成果も出てきつつある。2014年まで、最大の国際学会であるIEEE ISITが日本以外のアジアで開催されたのは韓国（ソウル）のみであり、今後ますます研究が発展していくと思われる。

（註 1）フェーズ
　　基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
　　応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
　　産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
　※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
　　◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
　　△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
　　↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

[論文]

C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, (1948).

[主要論文誌，研究報告]

IEEE Transactions on Information Theory
http://www.comm.utoronto.ca/trans-it/
電子情報通信学会技術研究報告（情報理論）

[一部に情報理論の研究成果を含む論文誌，雑誌]

電子情報通信学会(IEICE)論文誌 A
電子情報通信学会誌
IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences
IEICE Fundamentals Review

[主要会議]

IEEE ISIT (International Symposium of Information Theory)
IEEE ITW (Information Theory Workshop)
ISITA (International Symposium of Information Theory and It's Applications)
情報理論とその応用シンポジウム (SITA)

[著名な書籍]

- T. M. Cover and J. A. Thomas, "Elements of Information Theory", (John Wiley and Sons, 1991).
- 有本卓, "情報理論", (共立出版, 1976).
- 韓太舜, "情報理論における情報スペクトル的方法", (培風館, 1998).
- R. E. Blahut, "Thoery and Practice of Information Theory", (Addison-Wesley, 1987).
- I. Csiszár and J. Korner, "Information Theory：Coding Theorems for Discrete Memoryless Systems", (Academic Press, 1981).
- R. G. Gallager, "Information Theory and Reliable Communication", (John Wiley and Sons, 1968).
- 今井秀樹, "符号理論", (電子情報通信学会, 1990).
- W. W. Peterson and E. J. Weldon, "Error-Correcting Codes", (The MIT Press, 1972).

・ T. Richardson and R. Urbanke, “Modern Coding Theory”, (Cambridge University Press, 2008).
・ S. Lin and D. J. Costello, “Error Control Coding”, (Prentice Hall, 2004).
R. E. Blahut, “Algebraic Codes for Data Transmission”, (Cambridge University

３．１．２　暗号理論

（１）研究開発領域名

暗号理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

高度に安心・安全な通信を実現し、その通信の安全性を保証する理論

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

暗号技術の歴史は古く、シーザー暗号、エニグマをはじめ、当初は、軍事的な利用が主であった。1976 年の共通鍵暗号 DES（Data Encryption Standard）の制定、1976 年の公開鍵暗号の概念の提案、1977 年の RSA 暗号の提案を元に、商業的な利用に前進した。当初は、計算機リソースの不足などで、暗号技術は、広く社会に浸透することはなかったが、社会的ニーズや、方式の効率化、計算機能力の進展などにより、徐々に社会に浸透している。

暗号を安全に用いるためには、用いる暗号の安全性評価が必須である。しかしながら、暗号理論の黎明期は、新方式の「提案」と「解読」のイタチごっこの状況であった。現在、社会で用いられている暗号は、安全性が証明された暗号が用いられるべきであるし、実際、そのように理論整備が行われている。妥当な仮定なもとで、ある方式が安全であることを証明すること、および仮定の妥当性の理論的および実験による確認の研究が必要となる。理論的な研究においては、適応的選択暗号文攻撃の導入および安全な方式の提案も行われていたが、その重要性に関して懐疑的な研究者もいた。しかし、証明可能安全性の議論の重要性は、1998 年の Bleichenbacher による PKCS#1 v1.5 に対する攻撃（いわゆるベルコア・アタック）を契機に広く認識されるようになった。これにより、暗号は、単なる創意工夫から脱却し、確固たる理論研究へと進展している。実際に、電子政府推奨暗号リストでは、証明可能安全性を持つ方式が採用されている。

暗号技術が社会に浸透するにつれて、従来の想定よりも、多くの場面で用いられるようになっている。それに伴い、単に秘匿性を確保するだけでなく、より高機能な暗号の必要性が生じている。例えば、復号できる権限を属性の論理式により送信者が指定することができる「属性ベース暗号」や、暗号化したまま複雑な計算を行う「完全準同型暗号」などが、社会的ニーズに対応して提案されている。

その一方で、新たな暗号方式、暗号プロトコルが生み出される過程で、多くの場合、新たな数学的な問題の提起や計算量理論における困難な問題の提起も同時に行われている。このように、暗号理論は、他の基礎理論と密接に関係を持ちながら進展を続けている。

高機能な暗号が必要となる一方で、安価で省電力なデバイス上で暗号技術を用いる状況も増えている。例えば、大量のセンサーを用いてデータを収集し、収集したデータを用いて何らかのサービスを提供することが考えられている。その際、不正なセンサーを排除する目的で、認証を行う際や，取得したデータ自身の秘匿性を担保するために、暗号技術が使われる。このようなリソースの限られたデバイスに特化した軽量暗号技術が必要となる。

現在、広く用いられている暗号方式は、多くの場合、素因数分解、離散対数問題に安全性の根拠をおいている。特に制限のない素因数分解および離散対数問題の理論的な評価は一段落つき、これ以上の進展の可能性は少ないようである。その一方で、どの程度のコストを用

いれば、どの程度の素因数分解が可能となるのか？という評価が、今現在も大規模実験により行われている。さらに、特殊な構造を持った楕円曲線上での離散対数問題は、従来の想定よりも少ない計算量で解くことができることが徐々に明らかになっており、現在、重点的に研究が進行している。

近年考案されている暗号の多くは、LPN(Learning Parity with Noise)問題、LWE (Learning with Error)問題、Ring LWE 問題などの、比較的近年導入された問題の困難さに安全性の根拠をおいている。しかし、これらの問題の困難さは、正確に理解されていないため、実社会で用いるためには、さらなる困難さの理解が不可欠となる。特に、暗号理論においては、暗号方式の効率性自身が要請されるため、それほど大きなセキュリティマージンを取ることができない。そのため、セキュリティパラメターに応じた漸近的な評価と、実際の暗号で用いるパラメータでの評価という 2 種類の評価が不可欠である。

攻撃者の攻撃技術が高度化している現在、公開鍵などの公開情報や、暗号文などの通信路を盗聴することにより得た情報を元にした攻撃だけでなく、実際の暗号化装置から漏洩する情報（電力や電磁波など）を元にした攻撃も考慮に入れなくてはならない。近年でも、（コンピュータの動作中またはシャットダウン後数分以内にコンピュータに物理的にアクセスする攻撃者によって引き起こされる）Cold Boot 攻撃、Heartbleed バグ（オープンソース暗号化ライブラリ「OpenSSL」に混入したソフトウェア・バグ）等に起因する製品化（実装）の不備を元にした攻撃などが発見されており、依然、攻撃者の高度化がもたらす現実的な脅威が続いている。そのためには、事後対策のみならず、事前に脅威を防ぐ技術が必要となっている。

［他の基礎理論分野との連携による進展］

暗号理論は、他の基礎理論分野と連携を取ることにより進展している。1949 年のシャノンによる情報論的な暗号理論の創成は、暗号理論が情報理論とほぼ同時期に学問の道を歩み始めたことを意味している。また、1977 年の RSA 暗号の提案を契機とした「整数論の活用」や、1985 年の楕円曲線暗号の提案により生まれた「より複雑な代数構造の活用」は，数学分野、特に、代数学との密接な連携により生じており、今現在も精力的に研究が行われている。

1985 年のゼロ知識証明の提案は、計算複雑度理論分野からその概念がもたらされている。また、暗号の安全性の根拠となる困難な問題の多くが計算複雑度理論分野からもたらされていると同時に、暗号理論研究から提起された問題が計算複雑度理論分野へ提供されている。

［国内外の動向］

暗号技術は、全般的に、米国、欧州を中心に研究が進んでいる。暗号技術の特徴的な点として、イスラエルでも理論研究、応用研究とも研究が進んでいることが挙げられる。また、アジアでも、シンガポールで研究が進んでおり、優秀な研究者がシンガポールに集まりつつある。

欧州では、2004 年に ECRYPT（European Network of Excellence in Cryptology）project が始まり、欧州全体で仮想的な研究室を構成して研究が進展している。さらに、2008 年に後継プロジェクトである ECRYPT II が始まり、2013 年に終了している。また、世界的

な公募暗号のコンペティションとして、AES、SHA3、CEASER などが行われており、国内からも多くの暗号が提案されている。このコンペティションを通じて、多くの研究成果が生み出されている。

一方、国内では、産学官の研究機関が、必要に応じて連携を取りながら、理論研究から応用研究にいたるまで幅広く進めている。また、日本政府によるプロジェクトとして、暗号技術検討会 CRYPTREC（Cryptography Research and Evaluation Committees）による暗号技術の重点的な調査が行われている。

（４）科学技術的・政策的課題

・属性ベース暗号、関数暗号などの復号者制御可能な高機能暗号：
社会的ニーズの増加に伴い、アクセス制御などのアドホックな技術に頼らず復号権限を柔軟に設定することが可能である暗号（属性ベース暗号，関数暗号など）が提案されている。提案時では、現実的な計算量ではないものや、機能が制限されたものであった方式が、多くの研究者の改良により効率化が行われ、幅広いクラスに対応できるようになっている。しかし、依然、実用に耐えうる効率性や汎用性を有しておらず、さらなる改良や革新的なアイデアに基づくブレークスルーが必要である。

・完全準同型暗号：
社会的ニーズの増加に伴い、暗号化したまま様々な計算を行うことができる暗号（完全準同型暗号）が提案されている。属性ベース暗号、関数暗号と同様に、提案時では現実的な計算量ではなかったものの、多くの研究者の改良により効率化が行われている。しかし、依然、実用に耐えうる効率性を有しておらず、さらなる改良や革新的なアイデアに基づくブレークスルーが必要である。

・素因数分解、離散対数問題などの困難性評価：
現実社会で用いられている暗号技術は、多くの場合は、素因数分解、離散対数問題、および楕円離散対数問題の困難さに安全性の根拠をおいている。RSA 暗号の提案以後、素因数分解アルゴリズムの理論的な改良が継続的に行われている。同様に、世界規模での大規模な数値実験により、より大きな合成数の素因数分解に成功している。特定のビット数（例えば，1024 ビット）の RSA 暗号は、いつまで安全に用いることができるか？という評価を正確に行うことが本研究の目的である。その評価のためには、さらなる大規模な数値実験が必要である。

・LPN、LWE、Ring LWE 問題の安全性評価：
LPN 問題や LWE 問題は、符号理論における復号問題と類似した問題であるが、この問題の困難さを安全性の根拠とした暗号が提案されている。これらの提案により、問題の困難さに関する研究が重点的に行われている。この問題は、計算複雑度理論、情報理論との境界領域に属しており、活発に研究されている。個別の暗号の厳密な安全性を理解するためには、漸近的な計算量の評価だけでなく、現実の利用を想定した安全性評価が必要となる。

・耐量子計算機暗号：
量子計算機が実現すると、現在広く使われている素因数分解や離散対数問題の困難さに安全性の根拠をおく暗号の多くは破られてしまうことになる。そのためには、これらの問題の困難さに依存しない暗号の構成が必要となる。前述の LPN 問題、LWE 問題、Ring

LWE 問題などが、耐量子計算機対策として有望な問題の候補であり、これらの問題の困難さに安全性の根拠をおいた暗号方式の構成が急務である。

・サイドチャネル攻撃に対する対策：
公開情報、暗号文だけでなく、暗号デバイスから漏洩する情報（電力や電磁波など）を元にして、秘密鍵をあばき出す攻撃を総称して、サイドチャネル攻撃と呼ぶ。ハードウェアによる対策と並行して、漏洩情報が秘密鍵に依存しないように暗号化アルゴリズムを改良する研究も行われている。本研究はハードウェア研究とアルゴリズム研究の境界領域にあり、両者の協調が必要となる。

・軽量暗号：
IC チップなどのリソースが制限されたいデバイス向けの暗号技術が必要となる。軽量暗号では、電力などの制限により、高度な暗号プリミティブを用いることができない。そのため、安全なプロトコルを構成することが困難であり、攻撃者のモデルおよび効率性のバランスがとれたプロトコルの構成する技術が必要となる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・大規模プロジェクトとして、国内では、JST CREST において、暗号理論に関連したプロジェクトが複数動いている。そのれらのプロジェクトの研究領域名は、「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」および「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」であり、精力的に研究が進められている。

・新技術として、「難読化」が近年注目を浴びている。ソフトウェアの難読化は、知的財産を確保する上で極めて重要な技術であるが、暗号理論を最大限に活用して難読化を実現する研究が急速に進展している。「難読化」は、さらなる研究の進展と実用化が期待される。

・暗号学的に安全な多重線形写像が、ごく最近に提案され、多くの研究が始まっている。1999 年の双線形写像の暗号構成での活用を契機として、有用な暗号プロトコルの構築が促進されたのと同様に、多重線形写像を用いた暗号プロトコルの構築が盛んである。これまで想定していなかった暗号プロトコルの構成が実現する可能性があり、今後の研究動向に注視する必要がある。しかし、多重線形写像を用いた暗号プロトコルにおける暗号の安全性に関する数学的証明（安全性の根拠となる問題の数学的探求）は、まだ十分になされておらず、証明可能安全性に関して今後の研究が必要となる。

（６）キーワード

公開鍵暗号，証明可能安全性，安全性解析，高機能暗号

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	大学、企業、国研、いずれにおいても精力的に研究を進めている。また、連携もとれており、共同研究も活発である。専門の研究会（情報セキュリティ研究会）および大規模なシンポジウム(SCIS)を通じて、研究者の交流が盛んに行われている。世界的に主要な国際会議（CRYPTO、Eurocrypt、Asiacrypt、PKC、TCC、CHES、FSE）に多くの研究成果を発表しているとともに、会議の誘致を積極的行っている。
	応用研究・開発	○	↗	産業界からのニーズに基づき、高機能暗号の研究が進展している。近い将来、実用化が期待されている。
	産業化	○	→	様々な状況で、暗号技術が使われている。しかし、最先端の理論が、実際の場面で用いられるまでには、依然、タイムラグが存在する。
米国	基礎研究	◎	→	多くの大学の研究者が参画している。また、IBM Watson研究所、Microsoft Researchなどの民間の研究所でも多くの研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	完全準同型暗号の提案や実現に向けての取り組みで、IBM Watson研究所が先行している。
	産業化	◎	→	IBM、マイクロソフトが先行している。
欧州	基礎研究	◎	→	ECRYPT IIプロジェクトを通じて、多くの研究機関が基礎研究に参画しているおり、終了後も、その状況は続いている。フランスが、特殊なクラスの離散対数問題のアルゴリズムに関して、著しい成果を出している。
	応用研究・開発	○	→	企業の研究者が大学等と連携を取りながら、研究を進めている。
	産業化	◎	→	ICカードなどの物理デバイスに関するセキュリティでは、先行している。フィリップス、フランステレコム、ジーメンス、ノキアなどが先行している。
中国	基礎研究	○	↗	中国科学院（Chinese Academy of Sciences)、清華大、上海交通大などで積極的に研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	1999年に商用暗号管理条例が制定されており、中国国内における商用暗号化技術及び商用暗号化製品の科学研究、開発と生産、販売及び使用は、中国政府によって包括的に管理規制されている。応用研究・開発の動向は、外部から状況を伺い知ることができないが、企業による自由な研究・開発は、それほど活発ではないと推測される。
	産業化	△	↘	Huaweiが暗号技術の産業化に向けて先行している。
韓国	基礎研究	○	→	ソウル大、KAISTなどで盛んに研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	目立った活動は、外部からは見受けられない。
	産業化	△	→	サムスン電子が暗号技術の産業化に向けて先行している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ISEC （情報セキュリティ研究会）
http://www.ieice.org/~isec/
2) IACR (International Association for Cryptologic Research)
http://www.iacr.org/
3) NIST (National Institute of Standards and Technology)
http://www.nist.gov/
4) ECRYPT II
http://www.ecrypt.eu.org/
5) CRYPTREC
http://www.cryptrec.go.jp/
6) インテリジェント暗号
http://www.seclab.ecl.ntt.co.jp/project/information-security/intelligent-crypto.html
7) Fully Homomorphic Encryption –IBM
http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_group.php?id=1548
8) CRYPTREC Report 2013 暗号技術評価委員会報告書の付録 7
http://www.cryptrec.go.jp/report/c13_eval_web_final.pdf
9) 平成 21 年度特許出願技術動向調査報告書．平成 22 年 4 月，特許庁発行

３．１．３　離散構造と組合せ論

（１）研究開発領域名

離散構造と組合せ論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

離散構造は情報構造の数理定式化に広く用いられてきた手法である。特に、グラフ探索やネットワークフローなどの組合せ論的アルゴリズム分野の研究成果は，計算機の発祥期から計算機の設計や計算機による問題解決に広く利用されてきた。例えば、IT ビジネスの発展を語る際、Microsoft、IBM、Google、Yahoo、AT&T などの巨大企業で、多くの著名な離散数学者、組合せ論研究者が斬新なソフト開発と様々な問題点の解決に貢献してきた歴史を欠かすことはできない。これらネットワーク解析における離散構造と組合せ論に関する研究の重要性は近年ますます増加し続けており、上記の IT 企業は、現在でも常時 10～20 名の理論計算機科学・アルゴリズム・離散数学を専門とする研究者を抱えている。これは製品開発やシステム構築においては、理論的保障が常に必要不可欠な存在であるからである。また、Web 検索における PageRank や Hits 法などの IT ビジネスにおける発明は、主に理論研究に基づいて生み出されてきたという事実がある [1)]。しかしながら、日本では、理論研究者が日本企業に貢献した例が極端に少ないだけでなく、理論研究者が企業研究所に雇われている例もほとんどない。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【背景と意義】

離散構造と組合せ論は、現代の数学および計算機科学両分野において中核をなしている。これは数学分野では、例えば米国プリンストン大学の Institute of Advanced Study（高等研究所）の数学科において「Theoretical Computer Science and Discrete Mathematics (CSDM)」というプログラムが 2000 年より 15 年近く続いているという事実によく現れている。さらに計算機科学分野でも、歴代ネバンリンナ賞受賞者のほぼ全員が「離散構造と組合せ論」で仕事をしていることを見ても明らかである。

離散構造、組合せ論的解析が実世界のネットワーク解析に大きな役割を果たすことは、かつてより多くの研究者によって指摘されてきた。しかしながら、離散構造で記述されたデータを利用した意思決定や知識抽出をする際に必要な多くの重要な組合せ最適化問題は、計算階層理論的な計算困難性を持ち、巨大データに対しては理論保証を持つアルゴリズム設計が難しいという問題がある。

この困難性を打ち破るには、情報構造を表現する離散構造の特徴を利用した問題解決が必要不可欠である。チューリング賞を受賞した Hopcroft と Tarjan らによる平面性判定や平面グラフ同型問題の解決、またネバリンナ賞を受賞した Kleinberg らによる Web のグラフ理論的特徴を利用した検索エンジンの設計は、これらの困難性に対する解決を試みた新たな挑戦であり、後者は現在インターネット検索の基盤となっている。これらの例からも分かる通り、離散構造、組合せ論的解析が計算機科学において現在、決定的な役割を果たしている。

【これまでの動向】

離散数学が飛躍的に発展した 80 年代には、線形計画法（Linear Programming）に対する単体法、そして Khachiyan による多項式時間アルゴリズムの開発など、多面体的組合せ論（Polyhedral Combinatorics）が急速に発展した。また 1970 年代に開発された Szemeredi の Regularity Lemma が、整数論のみならず、グラフ理論の問題（とくに極値論的グラフ理論）に応用されるようになった。さらに 1980 年代には、群論における「単純群分類の完成」の大事業が終了したことによって、多くの群論研究者が組合せ論的群論、代数的組合せ論に転入してきた時期でもある。

90 年代に入ると、多くの組合せ論的近似アルゴリズムが開発されてきた。これらのアルゴリズムは、70 年代後半から活発に研究されてきた線形計画法の深遠な理解に基づくものであり、確率論的組合せ論が花開いたのもこの時期である。この確率論的解析は、90 年代以降、アルゴリズム分野のハイライトであるランダマイズ（乱択）アルゴリズムの大発展につながっていく。

90 年代以降、急激に進展したグラフアルゴリズムとグラフ理論の最先端の研究成果は、グラフマイナー理論の発展によるところが大きい。グラフマイナー理論は、90 年代、2000 年代における離散数学の最大のハイライトの一つである。また、グラフマイナー理論で開発された「構造的グラフ理論」的手法により、Robertson、Seymour、Thomas が多くの成功を収めた。特にパーフェクトグラフと呼ばれるグラフ特性とその構造に関する予想の解決は、現在までの離散数学における最大の成果の一つである。

2000 年代以降は加法的組合せ論（Additive Combinatorics）が、エクスパンダーグラフの発展とともに、現代数学そして理論計算機科学の中心となっていく。実際、数学からは Terry Tao、Ben Green、Tim Gowers、Van Vu、そして理論計算機科学からは Avi Wigderson などの指導的に立場にある研究者が、数学・計算機科学の垣根を越えて多くの共同研究を行っている。

また 2000 年代に入り、Kleinberg, Page らが Web グラフのグラフ理論的な解析を行い、その研究成果が Google などの検索エンジンに利用されている [3)]。

【日本国内での動向】

組合せ最適化分野において、日本人研究者は多くの重要な仕事を行ってきた。藤重悟（元京都大学数理解析研所長）、岩田覚（東大教授）の劣モジュラー関数最小化に関する研究成果は、2003 年に Fulkerson 賞を受賞するなど世界的に高い評価を受けている。また、室田一雄（東大教授）の離散凸解析理論に関する仕事は、SIAM から出版された本「Discrete Convex Analysis」が当該分野の指導書になるなど、世界的評価も高い。

グラフ理論、グラフアルゴリズム分野では、80 年代より西関隆夫（元東北大教授）、茨木俊秀（元京大教授）らの業績が世界的に高く評価され、両名とも ACM のフェローに選ばれている（日本人の ACM フェローは他分野も含め，現在までのところ 10 人にも満たない）。また 2000 年以降は、河原林健一（NII 教授）のアルゴリズム的グラフマイナー理論に関する研究が、離散アルゴリズム最高峰の国際会議 SODA の論文賞を受賞するなど、当該分野を世界的にリードしている。

また日本人研究者は、現在当該分野のトップジャーナルの Editor も務めている。一例を

挙げると、SIAM Journal on Discrete Mathematics (SIDMA)の岩田・河原林、Algorithmica、Journal of Graph Theory の河原林、Mathematical Programming の岩田などが世界トップクラスの学術誌で中心的な役割を担っている。

さらに若手研究者も数多く育っており、実際に日本のトップクラスの研究機関で准教授、助教として活躍している。一例を挙げると東京大学で三名、九州大学で二名、京都大学数理解析研究所で二名、国立情報学研究所で二名、中央大学で一名の当該分野の若手研究者が研究・教育に取り組んでいる。

以上のように、世界をリードする数名の研究者と有望な若手研究者を多数抱える日本の離散構造、組合せ論分野は、世界的にもその存在感を増しつつある。

【今後必要となる取り組み】

Web 構造や Facebook, Twitter など、我々の身近にある複雑ネットワークは、日々膨張を続けている。これらのネットワークは、年々急速に発達し、数年後には 10 倍のサイズになると予想されている。そのためこれらを解析するアルゴリズムの高速化が現在急務となっている。

この様な巨大なネットワークは、ユーザーに相当する「頂点」と、各ユーザーを結ぶ「辺」からなる離散構造「グラフ」をなしている。したがって、上記のネットワークに対するアルゴリズム的課題は、巨大グラフに対して動作する高速アルゴリズム開発とみなすことが可能である。

実際、このアルゴリズム的課題は、世界的にも注目されている研究テーマである。一例を挙げると、インターネットの原型である ARPANET や全地球測位システムの GPS を開発したことで知られているアメリカ国防省の研究機関である国防高等研究計画局（DARPA）が、2011 - 2012 年の研究テーマ（「Graph-theoretic Research in Algorithms and the Phenomenology of Social networks (GRAPHS)」）として、公募を行ったのはまさにこのテーマである [2)]。この研究公募の主な目的は、Twitter、Facebook 等の超巨大ソーシャルネットワークに対するモデル化、およびそれらのグラフに対する高速アルゴリズムの開発にある。

以上のように、理論研究の視点から実際の巨大グラフを解析する研究は、計算機科学における最先端の次世代チャンレンジの一つであると認識されている。

（4）科学技術的・政策的課題

【科学技術的課題】

10 万「辺」程度のグラフを扱っている場合、計算量が頂点数の 2 乗も必要となるアルゴリズムでも、通常のサーバーで辛うじて計算が可能である。しかし、1 億「辺」以上のグラフを扱う場合、計算量は O(n log n)程度のオーダーが限界である。そのため膨張し続ける現在の巨大グラフに対しては、新しい高速アルゴリズムの開発が急務となっている。現在までのところ、ほぼ線形時間で動くアルゴリズム開発は、ダイクストラアルゴリズムなどの特殊なアルゴリズムを除き、理論的にも困難（不可能）であると考えられてきた。これらの問題を乗り越えるためには、ソーシャルネットワーク、Web グラフ、道路網などのグラフの「特徴」を深く理解し、それらの情報構造に基づいて離散構造の手法を最大限生かした高速アルゴリズムの開発が必要不可欠である。

【政策的課題】

グラフ理論、組合せ論に基づくアルゴリズムは、HITS や PageRank など、最先端の IT 企業で極めて重要な役割を果たしている。これら巨大ネットワークとそれに対する高速アルゴリズムの開発は、現在、全世界が共通して抱える最優先課題であり、その解決にあたっては各国の研究者が理論研究の成果を常に発信し、情報を共有する必要がある。情報学の世界では、これらの研究の担い手である研究者は、すでに 30 代で世界を牽引する業績をあげていることが多い。現代の我々が抱える複雑ネットワークの問題においても、これら 30 代・40 代の研究者が業界をリードし、研究者のみならず IT 企業とともに理論面・実用面両面から解決に取り組むことが不可欠である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

前述の通り、ARPANET、GPS を開発したことで知られているアメリカ国防省の研究機関である国防高等研究計画局（DARPA）が、2011 - 2012 年の研究テーマとして、「Graph-theoretic Research in Algorithms and the Phenomenology of Social networks (GRAPHS)」を公募した [2)]。この研究公募の主な目的は、Twitter、Facebook 等の超巨大ソーシャルネットワークに対するモデル化、およびそれらのグラフに対する高速アルゴリズムの開発にある。

さらにドイツでは、組合せ最適化分野におけるトップ研究者 M.Grotchel 氏を代表に据え、「最適化」研究に特化した ZIB（Zuse Institute Berlin）という研究組織が設立されている [4)]。ZIB は、ドイツ鉄道（DFB）やルフトハンザ航空のスケジュールの効率化を達成するなど、最適化技術を実用的問題に応用し多くの成果をあげている [4)]。

（６）キーワード

グラフ理論、組合せ論、組合せ最適化、巨大グラフ、ソーシャルネットワーク、Web グラフ、高速アルゴリズム

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	上記の通り、世界をリードする研究者を数人輩出し、またそれに続く若手も育ってきている。今後も日本人研究者が、当該分野で非常に大きな役割を担っていくであろう。
	応用研究・開発	○	↗	近年、基礎研究者と応用研究者の共同研究が始まっているものの、大きな成果はまだ出ていない。今後の発展が期待される。
	産業化	△	→	基礎研究が産業化につながっていない。
米国	基礎研究	◎	↗	世界の主要の研究者を抱えている。今後も世界の中心地として当該分野をリードしていくと思われる。
	応用研究・開発	◎	↗	応用数学科、計算機科学科に所属している離散構造と組合せ論の研究者が多くのIT企業と共同研究を行っている。また、MICROSOFT、 GOOGLE、YAHOO、FACEBOOKなどの巨大IT企業は、多くの当該分野の研究者を抱えている。彼らは常に応用研究開発に携わっている。
	産業化	◎	↗	上記の共同研究から、巨大IT企業でいくつかの製品化、サービス化が生まれてきている。Googleの検索エンジンも、基礎研究の技術が決定的な役割を果たした。
欧州	基礎研究	◎	↗	イギリス、フランス、ドイツなどの欧州の大国は、自然科学、特に数学に力を入れてきた。これらの国々では、離散構造、組合せ論も数学分野の一つとして発展してきた。実際多くの数学者がヨーロッパにおいて、当該分野の研究をけん引している。
	応用研究・開発	○	↗	ビッグデータ時代に、巨大企業（主に自動車，携帯電話会社）との共同研究が始まってきている。また、ドイツのZIBなど、最適化を使った応用開発も始まってきている。
	産業化	○	→	企業等共同研究が始まったばかりであるので、まだ目立った成果は出ていない。
中国	基礎研究	△	↘	ほとんどの世界的研究者は、中国国内ではなく米国、欧州で研究している。
	応用研究・開発	△	↘	基礎研究で終わってしまう場合が多い。
	産業化	×	↘	上記と同様。
韓国	基礎研究	○	→	何人かの世界的に著名な研究者を抱えるものの、若手研究者がそれほど育っていない。
	応用研究・開発	△	↘	基礎研究で終わってしまう場合が多い。
	産業化	×	↘	上記と同様。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) PageRank について
http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%82%B8%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF
2) DARPA の Graph-theoretic Research in Algorithms and the Phenomenology of Social networks (GRAPHS)のオープンコール
http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Graph-theoretic_Research_in_Algorithms_and_the_Phenomenology_of_Social_Networks_(GRAPHS).aspx
3) HITS について
http://en.wikipedia.org/wiki/HITS_algorithm
4) ZIB（Zuse Institute Berlin）について
http://www.zib.de/de/home.html

３．１．４　計算複雑度理論

（１）研究開発領域名

計算複雑度理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

与えられた計算問題に対し、どこまで効率の良いアルゴリズムを作ることができるのか、その限界を追求する研究領域である。計算の本質に最も直接的に迫る研究であり、その成果は、革新的なアルゴリズムや新たな計算機構の創出にもつながり、情報セキュリティの安全性の拠り所となる基礎理論も提供する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【背景と意義】

情報科学技術の重要なテーマは、社会の様々な要求にコンピュータ・システムを用いることでいかに応えていくか、という点である。そのようなコンピュータの利用を設計する課程で、必要とされる仕事が具体的な計算問題として明確になったときに、それを効率的に処理する計算方法（アルゴリズム）が、どこまで効率的に成り得るか、その限界を追求する研究領域が計算複雑度理論である。

コンピュータ発祥の元とも言われているのが、ゲーデルやチューリングらによる計算可能性・不可能性の概念の定式化とその探究であった。こうした研究では、与えられた計算問題に対する純粋な計算可能性が主題であった。それに対し、計算時間などの計算資源に対する課せられた制約の下で、与えられた計算問題が計算可能か否かを議論するのが計算複雑度理論である。つまり、より定量的な形での計算限界を探究する分野である。

同じ計算限界に挑む研究領域にアルゴリズム理論（３.１.５）がある。アルゴリズム理論では、与えられた計算問題に対して、より効率的なアルゴリズムの開発を目指す立場から計算限界に迫ろうとしている。それに対し、計算複雑度理論では、効率的な計算の可能性よりも、その不可能性を追求し、そのため、計算の困難さの要因や特徴づけを明らかにしようとしている。その意味で、アルゴリズム理論と対をなす研究分野である。

古来より、角の三等分の作図不可能性や 5 次以上の方程式の解公式の不可能性などの例が示すように、困難性や不可能性の追求から、対象となる概念（たとえば，作図や解公式）の本質が明らかにされてきた。それが、新たな学問分野の誕生や、さらには人類の考え方に関わる変革をもたらす場合もあった。実際、計算不可能性の研究から「計算は単純な処理ステップから構成できる」ことが明らかになり、それが現在のコンピュータの設計思想のもとにもなった。計算複雑度理論でも、効率的計算の重要な側面や、計算の困難さを特徴付けている要因が数多く見出されており、その中から、情報科学技術の新たな分野も生まれてきた。

その重要な例の 1 つが公開鍵暗号プロトコルである。暗号理論（３.１.２）を変貌させ、現代の情報セキュリティ技術の核となった考え方は、NP 問題の困難さの特徴付けの 1 つとして見出された計算の一方向性についての研究から生まれた成果である。また、データアナリシス（３.１.８）の最初の原動力となった規則発見のためのアルゴリズム技法として著名なブースティング技法は、弱学習と強学習の計算論的等価性の研究から生まれたものである。

計算複雑度理論は、情報科学技術の土台であり、様々な分野の基礎となる領域で鍵となる

考え方や技術、そして重要な研究課題を与えてきた。それとともに、そうした各分野の基礎領域で活躍する人材も供給してきた。「計算論的○○学」と呼ばれるような分野の牽引者の中の多くが、計算複雑度理論の研究者からの転進者である。つまり、計算複雑度理論は、人材の育成・輩出という観点からも情報科学技術の土台としての役割を果たしてきたのである。

【これまでの取組み】

効率的なアルゴリズムの開発は、コンピュータの登場の当初から重要な課題であった。チューリング機械などの抽象的な計算モデルを用い、アルゴリズムの計算効率を数学的に議論するための枠組みは、1960 年代の初頭に複数の研究者[1]により整えられていった。そうした研究の上に立ち、1965 年、ハートマニスとスターンズは計算量というアルゴリズムの効率を測る尺度を提案し、さらにそれを用いて計算問題の困難さを議論した。彼らは計算量の異なる計算問題が無数に存在することを示し、計算量クラスという考え方を導入した。この研究から計算複雑度理論が始まったと言ってもよいだろう。コッブハムとエドモンズが多項式時間計算量を現実的に解ける計算の第一次近似的な基準として提唱したのも、この頃であった。なお、多項式時間計算量を持つ計算問題のクラスは現在ではクラス P と呼ばれている。

1960 年代の後半になると、現実問題に対処する中で登場してくる計算問題の中に、似たような特徴を持つものが多数あることが認識されるようになってきた。計算問題を解の探索問題として見たとき、「その解候補の検証は比較的容易」という特徴である。このような計算問題を NP 問題と呼び、その全体をクラス NP という。NP 問題では、解の検証は容易なので、理論上はすべての解の候補を調べれば解は発見できる。しかしながら、その候補数が非常に多いため、単純なしらみつぶし的な計算は実現不可能である。果たして、解の発見を、しらみつぶし的な探索より効率的に、たとえば多項式時間で行う計算方法が存在するか？（記号的に言えば，P＝NP か？）という点が重要である。

クックは 1971 年に、NP 問題の困難さを特徴付ける性質（NP 完全性）を提唱し、NP 完全性を持つ計算問題―― NP 完全問題 ―― の 1 つを具体的に示した。NP 完全問題は、その問題さえ効率的に解く（正確には多項式時間で解く）ことができれば、すべての NP 問題を効率的に解くことができる、といった性質を持つ計算問題である。つまり、P＝NP なのか否かの鍵となる問題であり、NP の困難さを特徴付ける問題である。このクックの発表の翌年にカープが、いろいろな分野で鍵となっている計算問題が、実は NP 完全性を持つことを示した。この 2 つの研究が契機[2]となり、数多くの NP 完全問題が情報処理の様々な分野で見出された。以来、こうした問題群に対する効率的な解法が探究されてきたが、多項式時間で解ける見込みは得られておらず、多くの研究者は、クラス NP の中にはクラス P に入らない問題、すなわち多項式時間では解けない問題があると予想している。これが「P≠NP 予想」である。

この P≠NP 予想の証明（もしくは反証）は計算複雑度理論の最も重要な研究課題である。その根拠として、(i) NP 問題が情報処理の多くの分野で鍵となるため、(ii) 革新的アルゴリズムの発見と計算論的な定式化に結び付くため、さらには、(iii) この予想の証明が非常に

1 その中で日本人研究者（山田尚夫）も重要な成果を出している。
2 実は、当時のソ連でも同じ発見がレビンにより同時期になされていた。クックの場合と異なるのは、レビンの結果に対してカープのように、その重要性を認識して、多くの実例を示す人物がいなかった点である。そのためソ連では、NP 問題の重要性の認識は広まらなかったのである。

難しいため、など複数の理由を挙げることができる。もちろん、P≠NP 予想が正しかったとすると、NP 問題群を完全に、かつ統一的な方法で効率的に解く計算方法は存在しない。そのような否定的なことであっても、それを証明することは情報科学技術の発展に重要である。P≠NP の証明が得られたとすれば、その成果として計算困難さの本質に対して数多くの事実が明らかになる。そうした成果は計算に対する新たな理解であり、それらをもとに革新的なアルゴリズムの構築法も生まれてくるはずだからである。たとえば、ある種の NP 問題に対しては、完璧ではないが十分利用可能な解法の発見の可能性も大きい。実際、これまでにも、NP 問題の計算困難さの特徴付けから、情報セキュリティ技術の基礎となった一方向関数の理論や、後で述べるランダムネスの解析理論が産み出されている。

計算複雑度理論では、この P≠NP 予想だけでなく、非常に多くの計算量とそれに基づく計算量クラスが定義され、その関係について様々な考察がなされてきた。計算量として代表的なものだけでも、領域計算量、乱択計算量、量子計算量、対話型計算モデルでの計算量、論理式計算量、回路計算量、算術回路計算量、通信計算量、証明複雑さ、記述複雑度などがある。これらの中には、通常のコンピュータの計算とは大きく異なる計算モデルに基づくものもある。そうした研究の全貌を簡潔には紹介できない。ただ重要なのは、こうした計算量や計算量クラスは、すべて計算のある特定の本質を理解するために導入され研究されてきた、という点である。たとえば、論理式と論理回路の計算能力の差に関する研究は、「計算の途中結果の再利用が計算効率の向上に本質的か？」という点を明らかにする研究と見なすことができる。こうした研究の成果、あるいは、その研究のために開発された解析手法や理論などが、新たなアルゴリズムや計算の新しい利用方法の基礎となってきたのである。

【今後必要となる取組み】

P≠NP 予想は計算複雑度理論の最も重要な課題ではあるが、情報科学技術の重要な基盤と成り得る計算複雑度理論の研究は、それだけではない。また、計算困難さとは直接関係なさそうに見える研究の中にも計算複雑度理論が深く関わっているものも少なくない。その中でも、今後 5 年間の研究次第で重要な基礎理論となり得る研究課題について述べる。

(a) 計算論的情報理論：計算論的意味を持ったデータ符号化に関する理論

現在、「計算論的○○学」という分野が多くあるが、計算複雑度理論の研究に端を発するものが多い。それにさらにもう 1 つ、計算論的情報理論とでも呼ぶことのできる分野が加わるかもしれない。そのような理論に発展し得る研究テーマがある。意味を持ったデータの符号化に関する研究である。従来の符号理論、情報理論は、どのようなデータも符号化できる技法についてのものであった。それに対し、意味を持ったデータは、その背後にある意味を利用すれば、より高性能でより効率的な符号化・復号化が可能と思われる。「背後にある意味」を定式化する 1 つの方法は、意味を解釈する計算を用いる方法である。たとえば、NP を特徴付ける「解の検証」がそのような計算に対応する。つまり、NP 問題の解のようなものは高度に符号化できる、という考え方である。実は、後述するように、そのような高度な符号化が NP 問題の解に対しては発見されている（確率的検証法）。この考え方を発展させた手法は、局所性質検査というテーマで研究されている。こうした研究を深めれば、背後に意味のあるデータに関する符号化法や、そのようなデータの情報量を解析するための基礎理

論が得られるだろう。それが計算論的情報理論である。背後に意味があるデータというのは、多くの巨大データにも共通する性質である。計算論的情報理論は、そのような巨大データの解析の基盤になることも期待できる。

(b) ランダムネスの計算論的な意味

乱数を使った計算は、シミュレーションなどで非常によく用いられている。それだけではない。1980 年代の中ごろから、乱数（ランダムネス）を使うことで（場合によっては誤ることもあるが）通常のアルゴリズムでは実現できない高速計算を行うアルゴリズムが続々と発見された。それらは乱択アルゴリズムと呼ばれている。一方で、「そうしたランダムネスは計算の効率化に本質的か？」という研究も計算複雑度理論の重要なテーマとなった。そもそも、ランダムネスとは何か？より具体的には、乱数を数学的にはどのように定義したらよいのか？というテーマは、確率論の創始者と言われるコルモゴロフなども研究したテーマであり、計算可能性理論の枠組みでも研究されてきた。その計算複雑度版の研究は、1980 年代の後半から始まり、2000 年には、たとえば、NP の困難さを仮定すれば、計算上のランダムネスを規則化できることが示された。これは脱乱化と呼ばれている。たとえば、乱数不要のシミュレーションが可能なのである。しかし、脱乱化の効率がどの程度期待できるのか、また、どのような計算に脱乱化が可能なのか、など実際への応用の基盤となるには不明な点が多い。さらには、計算の中のランダムネスの脱乱化が、データの中のランダムネスの解析にどのように利用できるか、という研究まで進めば、(a) と合せて、情報を解析するための新たな理論基盤になることが期待できる。

以上が情報科学技術分野の基礎にも成り得る研究テーマであるが、計算複雑度理論そのものを深めるためのテーマも挙げておく。

(c) 計算限界証明技法の統括的な研究

計算複雑度理論では、非常に多くの計算量とそれに基づく計算量クラスが定義され、その関係について様々な考察がなされてきた。その中で計算限界を証明するための重要な解析技法も数多く発見され、洗練されてきた。ただし、それらは、たとえば「P≠NP の証明には、まだまだ不十分である」と思われている。実際、主要な各解析技法に対し、その技法では、P≠NP の証明は不可能である、という技法の限界を示す結果も得られている。一方で、解析技法の解釈や関係については不明な点が多い。場合によっては、複数の解析技法を組合せることにより、より強力な技法に発展させられるかもしれない。あるいは、どのように組み合わせても、この点を解析しきれない、という穴があるのかもしれない。数多くの解析技法の関連を見出せるような統一的な研究が、計算複雑度理論を次のステップへ進めるためには重要と思われる。

（4）キーワード

計算量、アルゴリズム、計算量クラス、多項式時間計算可能性、P≠NP 予想、計算量下界、一方向関数、乱択計算、擬似乱数生成器、近似可能性・不可能性、確率的検査可能証明、局所性質検査

（５）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	新学術領域「計算限界解明」[1]（2012年度～2016年度）を中心に、共同研究が活発に行われるようになるとともに、重要な成果も挙がり、世界的にも注目されている。ただし、理論計算機科学全般で考えても、中国や韓国と比べ、米国で活躍している研究者の数が少ない点が気がかりである。
	応用研究・開発	◎	↗	アルゴリズム理論の大型プロジェクト[2]と上記の計算限界解明プロジェクトの緊密な連携のもとに、上記の研究から得られるアルゴリズム理論の新たな技法や基礎理論が、革新的なアルゴリズムの開発から、その実システムへの展開研究まで切れ目の無い共同研究が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	NSFのプロジェクトとして始まったIntractability Center[3]（2009～2014）では、ネヴァリナ賞（フィールズ賞の離散数学版）の2014年受賞者を出すような重要な研究を数多く行ってきた。それをSimons Foundationの6千万ドルの資金をもとにしてカリフォルニア大に創設されたSimons Institute[4]（2012～）が発展的に受け継ぐ形で、世界の基礎研究をリードする拠点を作ろうとしている。
	応用研究・開発	◎	→	基礎理論の研究からアルゴリズム理論まで、非常に厚みのある研究者層を持っている。また、この2つの領域で最も重要と見なされている3つの国際会議（略称：STOC，FOCS, SODA）の運営母体が米国の学会もしくは米国を拠点としている。また、Google、Microsoftなどが研究拠点を持ち、基礎研究を展開研究に結び付ける活動も活発である。（逆に、展開研究を企業に依存しすぎている点に危うさもある。）
欧州	基礎研究	○	→	基礎研究の歴史があり、世界で唯一の理論計算機科学の学会も欧州を拠点としている（European Associateion of Theoretical Computer Science[5]）。その意味で研究者層は厚い。しかしながら、計算複雑度理論に関しては、個別の研究以上のプロジェクトは現在走っていない。
	応用研究・開発	△	→	研究が個別的であるため、計算複雑度理論の研究成果が、うまく活かされる仕組みができていないように思われる。
中国	基礎研究	◎	→	ヤオ（200年チューリング賞）をプリンストン大学から清華大学に招聘し、基礎理論の強化をはかっている。実際、ヤオは、2010年にInstitute for Theoretical Computer Science（ITCS，理論計算機科学研究所）を、さらにそれを核に2013年には、Institute for Interdisciplinary Information Sciences[6]（IIIS: 学際情報科学院）という高等教育課程を構築し（現在、教員22名、博士学生60名）、優秀な人材を輩出している。ただし、ヤオに続く世代が欠けているため、今後の進展は不明確である。
	応用研究・開発	○	→	Microsoftが中国の豊富な人材を想定して、アジアの研究の拠点として、10年以上も前に研究所[7]を開設している。その意味では、展開研究への連携体制も構築されている。しかしながら、基礎理論は、清華大学のみ、その展開研究はMicrosoftのみ、といった点に少し危うさを感じる。
韓国	基礎研究	△	→	計算複雑度理論の研究はあまり活発には行われていない。ただし、アルゴリズム論など理論計算機科の中の関連分野には優秀な研究者が多い。米国で活躍している研究者もいる。
	応用研究・開発	○	→	アルゴリズム開発の分野の研究者層は比較的厚く、活躍している研究者も多い。

（註 1）フェーズ
　基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
　応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
　産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
　※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
　◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
　△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
　↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（６）引用資料

1) http://www.al.ics.saitama-u.ac.jp/elc/
2) JST ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト
http://www.jst.go.jp/erato/minato/
JST ERATO 河原林巨大グラフプロジェクト
http://www.jst.go.jp/erato/kawarabayashi/
3) http://intractability.princeton.edu/
4) http://simons.berkeley.edu/
5) http://www.eatcs.org/
6) http://iiis.tsinghua.edu.cn/
7) http://research.microsoft.com/en-us/labs/asia/

３．１．５　アルゴリズム理論

（１）研究開発領域名

アルゴリズム理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

プログラムよりは高位の概念であるアルゴリズム（計算機の利用を前提とした効率的な「計算法」）に関する理論的研究領域。アルゴリズムの「良さ」の評価は初期には計算の速度の大きさ、つまり計算時間の少なさという観点からなされてきたが、20 世紀の終頃から大きく様変りし、様々な異った断面から評価されるようになってきた。本稿では、そのような「様々な異った断面」に関して、その現状と今後の課題を述べる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

計算機の黎明期の利用は、「手計算の機械化」に続いて「具体的問題をかなり複雑な手順で自動的に解くプログラムの実行」へと進化した。そこでは、プログラムの正確さが勿論重要であったが、正しいプログラムでも、上手なプログラムと下手なプログラムがあることが分かってきた。つまり、速いプログラムと遅いプログラムである。特に戦時中には、暗号の解読や兵站のためのオペレーションズ・リサーチをいかに高速に実行するかの研究・開発が欧米において大いに発展し、後に、Danzig のシンプレックス法や高速フーリェ変換、最短経路計算等々の画期的な計算法を生み出した。このように計算機の利用を前提とはするが、プログラムよりは高位の概念である「計算法」をアルゴリズムと呼ぶようになった。

初期のアルゴリズムの研究は、ほとんどその速度を議論するものであったと言ってよい。さらには最も都合の悪い入力に対する速度、つまり最悪の場合の速度を議論していた。まもなく、必要記憶容量、つまり領域量も評価尺度として利用されるようになった。この様な尺度の元で、画期的と言ってよい素晴らしいアルゴリズムが数多く発見されてはきたが、評価尺度自体には 1970 年代くらいまで大きな変化は無かった。しかし、1970 年代後半から 1980 年代にかけて、大きな動きが生じた。つまり様々な新しい尺度が現れてきたのである。

その理由を一言で言ってしまえば、計算機の能力の進展とともに扱う問題の範囲が一気に拡大したからである。典型的な例の一つが、経済活動である。従来人間による経験と勘の世界を経済学のモデルで論じてきたが、計算機が急速に進出してくると、アルゴリズム論のモデルによる解析、つまりどのようなアルゴリズムが、どのような理由で勝っているかを議論せざるを得なくなってしまった。そうした要求が自然に数学的に頑健な新しいモデルの提案とその利用による新たな知識の獲得につながっていった。つまり、計算機が進出する多くの場所で、その場所に適合し様々な要求に応えることができるアルゴリズム理論を構築する必要に迫られたのである。この動きは 20 世紀の終わりから 21 世紀にかけて一気に盛んになり現在も発展を続けている。例えばビッグデータでは、アルゴリズムが扱うデータ量に関する従来の仮定、つまりすべてのデータがアクセスできるという仮定を根本から考え直した上でのアルゴリズム理論が求められている。

以下ではアルゴリズム理論のこうした新しい流れに関して、その全体像を整理するとともに、重要なものをいくつか選んで、それらに対する研究の意義、現状、課題等々について述べる。アルゴリズムは、比較的新しい学問分野であるとはいえ既に数十年以上の歴史を有している。従って、多くの基本的なアイデアやテクニックが蓄積されている。上記のような新しい流れに比較的上手く対応して来られたのも正にその蓄積の賜物であって、今後の更なる発展に関しても大きな心配はないと確信している。

以下では、アルゴリズム理論のタイプに関して、いくつかのカテゴリを設けそれに沿って説明していく。

（3-1）最初のカテゴリは、あくまで正解（厳密解）を求めるアルゴリズムのための理論やモデルのカテゴリである。前述の様に、最悪時間計算量の解析がアルゴリズム理論の幕開けになった。ただ、かなり早い時点から「最悪の場合」だけ考えるのは悲観的過ぎるという指摘があり、「平均的時間計算量」や「確率的時間計算量」の研究が活発になった。前者は入力に適当な確率分布を仮定してその分布に対する平均的な計算時間のことで、直観的には、実用的に良く現れる入力に対しては速いアルゴリズムがあることを示すのが目的である。実際頂点間に枝をランダムに引くランダムグラフに対しては多くの問題（彩色問題、ハミルトン閉路問題等）が格段に易しくなることが知られている。

一方で，アルゴリズムの側に乱数を利用させることによっても（平均的な）計算時間が短縮できる数多くの例があることが分かっている。単純な例として、裏向きのトランプのカードが 100 枚あってその内 10 枚が黒だとする。黒いカードを見つけ出すには、最悪の場合 91 枚を調べなければならないが、ランダムに調べることを許せば 10 回ほどで十分である。これらは、共に領域計算量に対しても同様に重要な尺度になっている。

これら平均的計算量と確率的計算量は共に長い歴史があって、最悪計算量と共に現在でもアルゴリズム理論の核になっている。近年このカテゴリに対して、2 つの新しい流れが出てきた。

一つは「穏健指数時間アルゴリズム」である。多くの組合せ的問題は問題のサイズの増大と共に計算時間が指数的に増加してしまう。例えば、頂点数 n のグラフ問題において、単純なアルゴリズムでは計算時間がおよそ n の階乗（n!）や 2 の n 乗（2^n）になってしまう例が数多く存在する。これでは n の値が 30 程度で既に苦しくなって、実用的問題が解けるとはいえない。しかし、アルゴリズム的工夫によって、この計算時間を 2 の(n/3)乗（$2^{n/3}$）まで短縮できたらどうであろうか。n の限界が 30 くらいだった計算が 100 くらいまでのびるので実用的価値は大きい。さらに、この分野は、データ構造に強く依存した従来型のテクニックと本質的に異った様々なアルゴリズム的な工夫が役立つことも知られていて今後も安定的に発展していくと思われる。

もう一つは「パラメータ計算量モデル」である。上と同様に、n 頂点のグラフが与えられて、そこから互いに素（枝が無い）な 10 頂点を（独立集合）見付けたいとする。すべての

10 頂点の組を調べれば良いので，n^{10} の計算時間のアルゴリズムなら自明である。しかし、これも n の限界は 2 桁程度ですぐにきてしまう。しかし、工夫によって、計算量を$(2^{10})n$ に出来たらどうであろうか。2^{10}は、たった 1000 であり、今の計算機なら億レベルの n の値まで全く問題ないので、実用性という面では段違いである。パラメータ計算量の基本は、問題のサイズ n の他に別のパラメータ k を導入することである。上の問題であるなら、サイズ n のグラフのサイズ k の独立集合を見付ける問題ということができ，計算時間が 2^n の自明なアルゴリズムにかえて，計算時間が$(2^k)n$ のアルゴリズムを発見しようというのがゴールである。従来のサイズパラメータ n に関しては極めて高速（線形時間）である。

このモデルの良いところはパラメータ k として多様な選択があることである。上の k は答えのサイズであり、最も標準的ではあるが、様々な他の可能性もある。実社会の重要問題においては、パラメータ計算量が小さい k を探せることは非常に多く、たとえば Web 解析では、通常のモデルで求解困難な問題が、パラメータ計算量モデルでは効率よく解けることが知られている。多様なパラメータから適切なものを選ぶことにより、求解できる課題の範囲は格段に広がりつつあり、将来の発展の余地は大きい。

（3-2） 2 つ目のカテゴリは広い意味での近似計算である。厳密解を求めるのに時間がかかりすぎる（指数時間）時に、厳密解にできるだけ近い近似解で我慢する代わりに計算時間を画期的に改善（多項式時間）しようというのが目的である。例えば、前述した独立集合なら、最適解（厳密解）のサイズは 50 であるが、30 頂点の独立集合で我慢する。この場合の解の近似度は 50/30=1.67 であるという。この近似度を保証する（例えば近似度 2 以内）形でアルゴリズム設計をするのが近似アルゴリズムである。1970 年代に NP 完全性の概念が導入されて、多くの重要な問題が多項式時間で計算するのが不可能に違いないと考えられて以来、近似計算はアルゴリズム理論で最も人気のある分野になった。したがって、既に多くの結果が得られているが。いまだ解決されていない重要な問題（例えば平面上の巡回セールスマン問題の近似度）も相当数残っており、水面下での熾烈な競争が進んでいると言われている。

別の言葉で言えば、このカテゴリでは、要求される解がユニークではないという環境の元で、できるだけ良い解を求めることを目的にしていて、上記の近似計算モデル以外にも 2 つの興味深いモデルがある。 1 つはオンライン計算モデルである。これは、株や通貨の取引きのように、現在の行動（例えば保有の株式を売却する）の良さが将来の入力（その株価が上がる・下がる）によって左右される問題に対するアルゴリズムを議論するためのモデルである。将来の入力は原理的に分からないので推測するのが自然なアプローチではあるが、この「推測」に対する数学的評価が容易でないことは明らかである。しかし、1980 年代に、「競合比」という極めて合理的かつ数学的に扱い易い尺度が導入されて一気にメジャーな研究分野に昇格した。

オンラインアルゴリズムは、将来の入力を見ずに（原理的に見られないので）現在までの入力によって現在の行動を決定する。つまり、株取引なら現在までの株価の情報は全て使えるが、将来の情報はゼロで現在買うか売るかまたその量を決定しなければならない。その結果利得（損失）が得られるがその量 x の多いアルゴリズムが良いアルゴリズムである。その良さを評価するのが競合比で、x を「神様の利得 y」と比較（y/x）するのである。ここで神

様（オフラインアルゴリズム）は将来の入力も全て分かっているとする。つまり、n ステップの動作を考えるなら、株価 $v_1, v_2, \ldots, v_n$ が与えられて、オンラインアルゴリズムはステップ i では $v_1, \ldots, v_i$ までしか見られないが、オフラインアルゴリズムは n 個全ての価格を見て最適な売り買いが出来る。そうして得られた双方の最終的な利得を比較する。オフラインアルゴリズムの方が格段に有利なので、意味のある競合比が得られないのではないかと思うかもしれないが、多くの問題に対して、例えば 2.0 以下という予想以上に良い競合比が得られる。多くの実際の問題がこのモデルの元で議論できることも分かっている。最近は競合比に優れているアルゴリズムを実際の価格変動を使用してシミュレーションを行い、その有用性を確かめるという動きも活発になっている。

より最近（1990 年代終わり）導入された準線形時間計算モデルも大変興味深い。オンラインの場合と同様、全ての入力を見ないで（ただし、オンラインの様に時間的順序の概念はなく、レジスタの中の入力アイテムをそのインデックスを指定して見ることが出来る）線形時間よりも短い（例えば入力長 n に対してその平方根くらい）時間で答えを出さねばいけない。例えば、100 頂点のグラフに対して、そのグラフが連結かどうかの答えを 20 頂点くらい見て出さなければいけない。そのようなことが可能かと思われるが、以下の様に近似の概念を少し強めると多くの非自明な結果が得られる。答えは普通イエスかノーの二者択一を要求されるが（ある性質を満たすかどうかを問われる場合が多く、その場合は性質検査問題と呼ばれる)、イエスか「極端に」ノーの例題しか与えられないと仮定するのである。上のグラフの連結性を判定する問題では、連結でないものを連結にするのには多くの枝を追加しなければならないような例題しか入力されないと仮定するのである（逆にそうでない微妙な例題が与えられたなら答えを間違っても良い)。

この様な設定によって、上のグラフの連結性判定問題を含む多くの性質検査問題が準線系どころか入力のサイズに依存しない定数時間で解ける。ビッグデータの時代にマッチした設定であると言えよう。容易に想像できる様に、上記の入力に対するアクセス法の仮定に様々な自由度があり、それはすなわちモデルの多様性も意味する。したがって、現時点でも未だ発展途上と言っても良いくらい興味深い問題や課題に富んでいる。

ビッグデータとなれば、たとえ全ての入力が得られるとしても、記憶装置の容量をはるかに越えてしまう。その場合は、入力を記憶装置に格納された形で自由に読めるという通常の設定は現実的でない。例えば、大量のデータがネット上を流れていく場合を考えるなら、個々の入力アイテム（例えば数値）を 1 回だけリアルタイムで読むだけで、記憶装置内に取り込むこと無く計算することが要求される。これをストリーム計算と呼び、そのためのアルゴリズムがストリームアルゴリズムである。例えば、数値データの平均を求めるくらいの簡単な問題であれば、記憶装置をほとんど使わずに正しい答えがえられるかもしれないが、一般には（例えば平均ではなくて中央値なら）近似解しか得られない場合が多いのは当然である。実用上の重要性は極めて高く、近似度を上げるために様々なアルゴリズム的手法が使えることが分かってきている。

（3-3）第三のカテゴリは並列分散計算に対するアルゴリズム理論である。並列計算は高速化の切札であるから、その理論的解析も当然活発であった（主に1980年代)。特に、プロセッサ数と計算時間の積を直列計算の計算時間に一致させる並列計算の最適化に関して、多くの興味深い結果が得られた。さらには、この様な最適性をある程度保った上で、計算時間をどこまで速くできるかどうか、出来る問題の種類と出来ない問題の種類に関しても、ある程度網羅的な結果が得られた。つまり、理論的成果を得るための枠組に関しては何の不満もない状態であったが、比較的短時間で研究が下火になってしまった。その原因は並列計算機のモデルである。当時主に使われていたモデルは並列 RAM と言って、入力のサイズにまで匹敵する多数の計算機からこれも同様に大きな共有メモリへのアクセスを自由に許すというモデルである。容易に想像できる様に、このモデルを実機で実現するのは至難である。その意味では、上の様な研究は実際の並列計算とは独立の理論であって、その目的は何かという批判が強くなった。したがって、メッセージ転送を基本とした様々な現実的モデルが各種提唱され、実際の並列計算機との乖離を避ける努力が続いている。

分散計算はどうであろうか。並列計算との違いは、その目的が高速化ではなく、貧弱な通信機能を如何に上手く使って空間的に広く分布した計算機をまとめ上げることである。例えば、素なネットワークで接続された計算機群の中からリーダーを１台決めるという問題である。簡単に見えるかもしれないが、通信が非同期の１対１であったり、各計算機は全体のネットワークの構造が全く分からないといった様々な制約の元では簡単ではない。もっと基本的なデータを多くの計算機から計算機に並列的に移動させる（並列ラウティング）ことさえ限定されたネットワーク上では簡単ではない。一部の計算機が故障していたり、スリープ状態であったり、さらには悪意をもって計算を妨害するという設定もある。このように、この分野は問題と設定の範囲が極めて広範囲であり、利用するテクニックも他のアルゴリズム研究の場合と少し傾向が違うこともあってか、長期間継続して興味深い結果が現れている。例えば、最近になって、グラフの最大次数のみに依存し全体のサイズに(ほとんど）依存しない分散アルゴリズムが開発されており、Web 時代にマッチした方向と言えよう。

（3-4）第四のカテゴリは、計算よりは通信に重きをおいて、如何に通信の手順（プロトコル）を工夫して目的を達成するかを追求する。目的としては、効率を上げる（通信量を減らす）ことや漏洩する情報量を少なくすることなどがある。IT 社会は通信の方がむしろ重要であるという考えもあるくらいであるから、プロトコルの設計はアルゴリズムの設計と同等あるいはそれ以上の重要性を持っているとも考えられる。

数多くの計算機間の通信も対象にすることもあるが、通常は２台の計算機（というよりも２人のプレーヤーと呼ばれることが多い）の間の通信を対象にすることが多く、対話型計算と呼ばれることもある。典型的な問題としては、２台の計算機がそれぞれ整数の集合 X と Y をもっていて、それらの和集合に関して何かを計算したい時、何ビットの通信量が必要かを議論する問題である。これも、「何か」が平均なら易しいが中央値となると難しい（勿論 X あるいはＹの全体を相手に送ってしまえば何でも計算できるので、それよりも本質的に少ない通信量で実現することが大前提である)。

別の目的としては、情報の漏洩を防ぐことがある。2 人のプレーヤーの内、A が自分の偉大さ（計算能力の高さ）をもう 1 人のプレーヤーB に納得させるという問題が有名である（少し奇異な感じがするかもしれないが、実用上の応用もある）。例えば、素因数分解は計算困難な問題として良く知られている。万能の A は、A と B に共通に与えられた整数 N の素因数分解の答え（つまり N=PQ となる整数 P と Q）を知っている。そのことを B に納得させるには P と Q を送ってしまえば良い（それらを掛けて検算することは簡単であるから B にも出来る）が、P と Q を秘密にしておきたいという設定である。この様に、その情報を公開してしまえば簡単であるが、公開しないで何かの目的を達成したいのである。B の計算力の弱さ（多項式計算しか出来ない）と乱数を上手く利用して、P と Q の情報を全く漏らすこと無く目的が実現できることが 1980 年代に初めて証明された時は大きな話題となった。

（3-5）第五のカテゴリはメカニズムデザインやアルゴリズム的ゲーム理論である。メカニズムデザインとは、アルゴリズムだけでなく、あるシステムや枠組を総合的に設計することを目的にする。例えば、オークションである。オークションの目的は勿論オークショニア（競売人）の利得を最大にすることである。ただし、競売の対象の品物は様々であり、例えば希少品 1 点の場合もあれば、限りなくコピー出来る音楽・動画ソフトなどの場合もある。さらには競売人のアルゴリズム（勿論出来るだけ多くの利益を得られるように設計する）は公開されているという前提なので、ビッダー（入札者）に悪用されない様に注意しないといけない。例えば、映画ソフトの競売では入札価格（の集合）から各入札者に売る・売らない、売るならその価格（入札額以下）を提示するわけである。簡単に考えると、全員に入札価格そのもので売るという単純なアルゴリズムが最も売上げが多くなりそうに見えるが、提示価格が入札価格に等しいということが入札者に知られれば、皆極めて低い価格で入札するに決まっている。したがって、競売人はそのアルゴリズムを設計するときに、入札者が「正直に」自分が思っている品物に対する価値に対応する値段で入札するように（そうしないと入札者が損をする）誘導できなければならない。これを「正直さを誘導するアルゴリズム」と呼び、オークションアルゴリズムの基本である。Web 上では、アマチュアのみならずプロが参加する様々な種類のオークションが出現しており、また理論的結果の実用性が比較的高いとも言われているので、将来的にも有望である。

ゲーム理論は長い歴史があるが、様々な場面でアルゴリズム理論が重宝される。例えば、上述のオークションも競売人と入札者の間のゲームであるが、正直さを誘導するアルゴリズムはその様な要求の無いアルゴリズムに比べれば（同じ入力に対しては）もちろん利益が少ない。したがって、アルゴリズムの良さを評価するのに 2 つの利益の比をとることが自然な方法である。これは正に競合比の考え方である。また、あるゲームでナッシュ均衡があるのか無いのか、あるとすればどんな値で均衡するのかは是非知りたいことである。しかし、多くの場合にその計算は困難であることが分かっており、これもアルゴリズム理論のお蔭である。

中央制御が存在しない分散的な環境でのアルゴリズムということで、広い意味では分散アルゴリズムの一種かもしれない。しかし、伝統的な分散アルゴリズムでは全ての参加者が同

じアルゴリズムを使って何かを全体的に実現することを目的にしており、敵対的なゲームの要素がない。この意味で新鮮な分野であり、今後も重要性を増すと考えられる。

（3-6）最後のカテゴリは未だ実現出来ていない計算メカニズムに対するアルゴリズム理論であり、量子アルゴリズムがその代表である。量子コンピュータによって多項式時間で高い確率で解ける量子アルゴリズムが存在する決定問題の複雑性クラスを BQP （Bounded-error Quantum Polynomial time）と呼ぶが，素因数分解がこのクラスに属することが証明されたときは極めて大きな反響があった。素因数分解の通常の計算機上での困難さは、証明されていないとはいえ、強く信じられていて、実際その計算困難性が現在広く利用されている暗号系の原点になっているからである。この結果が出たときは、量子メカニズムが他の計算困難問題に対しても有効ではないかという予想を生み、多くの期待を抱かせた。しかし、それはかなり困難で、逆に量子計算の限界に関するいくつかの興味深い結果が証明されるに至った。

同時期に発見され同様に重要視された探索問題に対する準線系時間量子アルゴリズムは、極めて広い応用があることが分かったが、元々が古典計算機でも高速に解ける問題を対象としていることから、その実用上のインパクトは限定されてくる。最近は量子アニーリング（焼き鈍し）法といった、理論よりもむしろ実験やヒューリスティックを重視した研究も現れてきており、今後の動向に関しては注意深く見守る必要がある。

生物計算も一時期脚光を浴び、最近は計算という観点からよりもむしろ生物学的側面から実験を重視した研究が盛んである。興味深い面はいくつかあるが、アルゴリズム理論という枠からは距離がある。

最後に番外として、学習と暗号に関するアルゴリズム理論を挙げる。これに関しては、それ自体の領域があるので、そこで詳しく議論されるはずであるが、「実用に直結する計算機の理論」という観点からは極めて重要である。例えば、最近急速にその人気を高めているビットコインであるが、その中にはアルゴリズム理論の成果が宝石の様にちりばめられていると言ってよい。

（４）科学技術的・政策的課題

最初の課題が人材確保である。アルゴリズム理論全体では、我が国のレベルは決して低くない。特に、その骨格をなす従来型の時間計算量や近似理論の分野では、世界的研究者を数多く排出している。また、最近では、学部で数学や物理を専門とした優秀な学生を引きつける分野としての力も備わってきている。歴史的に見て、我が国の大学の情報関連学科が主に工学部から派生していること（諸外国では理学部数学科から派生している場合の方が多い）はメリットとデメリットがあるが、デメリットの一つがこのような動きによって確実に解消されつつある。さらに、この動きを加速する手段が高校教育であると言われている。例えば、スイスでは最近小学校高学年から情報教育がシステム化され、中学・高校向けの教科書が他の従来科目と同様の規模で出回っている。その内容はやはりアルゴリズム中心であって、実際この教育改革には一人の著名なアルゴリズム理論の研究者の 10 年以上にわたる献身的努

力が深くかかわっている。

もう一つの重要な政策的課題は研究の新しい流れをタイムリーにプロモートすることである。先に述べた様に、アルゴリズム理論は他の分野に比べて研究テーマの機動性が高い。前節で述べた様に、20 世紀の終わりごろからメカニズムデザイン、アルゴリズム的ゲーム理論、量子計算等々多くの新しい潮流が出たが、その初期における我が国の研究者の貢献は残念ながら大きいとはいえない。原因はいくつかあると思うが、その一つが研究者間の国際的交流の問題である。インターネット時代ということで、情報そのものはどこにいても得られるが、やはり研究者同士の生の交流は何者にもかえがたい。実際、中国・インドの研究者はこの面では非常に積極的であって、その効果は確実に出ていると言われている。もちろん、我が国の研究者の国際性は近年著しく改善されてはいるが、一層の努力が必要と考える。また、長い目でみれば、我が国の留学生数が減少傾向にあることなども改善が必要である。

異分野交流も重要な政策的課題である。例えば、新しい流れという意味では「今の旬」はビッグデータである。アルゴリズム理論の研究者が今まで頼りにしてきたのは離散的・組合せ的な数学（考え方）である。しかし、ビッグデータに対応するにはそれでは不十分で、連続系の数学やそうしたデータを必要とする学問分野との強い融合が必要である。一つの方向として考えられるのは、こうした数学や、経済学、生物学等を専門とする研究者をアルゴリズム理論の世界に引き込むことである。実は、この動きは既に具体化しつつあって、大学における情報関連学科の人気を高める切り札の一つであると言われている。アルゴリズム理論が現実の社会に貢献できる場面として最も期待されている（あるいは既にかなり貢献している）のが金融や経済の分野である。2013 年のノーベル経済学賞は、アルゴリズム研究者が受賞しているし、この流れは今後ますます強くなっていくと思われる.

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

理論研究はアカデミアという先入観があるが、アルゴリズム理論は必ずしもそうではない。豊富な資金力を有する、その時々の IT トップ企業（20 世紀は IBM や AT&T、21 世紀に入って Google やマイクロソフト等）は常に強力な研究組織を有しており、そこでは多くのアルゴリズム研究者が採用され活躍している。このことは、２つの面で重要である。一つは、アカデミアと産業界の研究部門との交流である。たとえ理論研究者の最終的な目標がアカデミアであったとしても、途中段階で経済的に安心感のあるポジションを供給してくれる企業の存在は何者にもかえがたいし、長期的にはそれが人材確保の切札になる。また、企業側のメリットも大きい。その理由は、どんなことであれ新しい動きは抽象的なものからスタートすることが多いし、その意味でアルゴリズムやメカニズムデザインの研究者が新しいビジネスモデルの端著を開くことが期待されているからである。具体的事例（Google のスポンサーサイト等）も豊富である。

現在、アルゴリズム理論を主要テーマにした国家主導の大型プロジェクトが、我が国や米国で複数走っている。最近は、プロジェクトの構成員は海外にも広く門戸が開かれているが、この傾向はさらに押し進めてよい。こうした大規模プロジェクトが予算に見合う成果を上げ

ることができるためには、国外の優秀な人材を活用するべきだからである。アルゴリズム理論は他の分野からの人材を取り込むことが必要であると述べたが、逆もまた真である。幅広い人材を集めた大規模プロジェクトでは既に普通のことになっていて、アルゴリズム理論の研究者が従来の狭い理論コミュニティに閉じることなく、周辺部の応用的要素の強いコミュニティ（AI やネットワーク）に活発に進出している例が目に付く。これは、大変良い流れであると言える。

（６）キーワード

アルゴリズムの設計と解析、計算量理論、近似アルゴリズム、確率アルゴリズム、オンラインアルゴリズム、並列アルゴリズム、分散アルゴリズム、アルゴリズム的ゲーム理論、メカニズムデザイン、量子アルゴリズム

（７）国際比較

個々の事例に関しては既に述べた。総合的な順位としては、米国（＋カナダ)、欧州（＋イスラエル）がほぼ拮抗し、次のグループとして、中国（＋香港)、インド、日本、オーストラリア、韓国、シンガポールといった感じである。

３．１．６　最適化理論

（１）研究開発領域名

最適化理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

与えられた制約の下で与えられた関数を最大化、または、最小化するための手法を開発する。現実世界で生じる多くの問題がこの枠組みで記述できるが、対象とする問題に応じて、連続最適化と離散最適化に大別され、また、必要とする手法に応じて、そのそれぞれが大域最適化と局所最適化に分類される。効率性（計算複雑度）や精度に対する数学的保証を与えることが主な研究課題である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

与えられた制約の下で与えられた関数を最大化、または、最小化するための計算手法を数理的に究明する分野が最適化理論である。現実世界で生じる多くの問題が最適化理論の枠組みで記述される。例えば、医療施設の配置、船舶の航路設計、構造物の部材組合せ、データベースにおける構造発見、金融商品の価格付け等、枚挙に暇がない。このような問題を最適化問題として記述するための方法論が最適化モデリングである。しかし、最適化モデリング自体が研究対象となってきてはいない。実際、現状の最適化理論は、最適化モデリングによって記述された具体的な問題、あるいは、問題群に対する研究に終始している。

最適化理論は決定すべき変数が連続である場合と離散である場合に大きく二分され、前者は連続最適化、後者は離散最適化と呼ばれる。後で述べるように、この分類は現代的な見地から重要性を失いつつあり、従来の連続最適化と離散最適化を渡り歩ける人材が必要とされてきている。

理想を言うと、最適化理論が目指す計算手法は以下の 2 つを兼ね備えているとよい。1 つは「効率性」であり、これは、計算自体が高速に終了すること、そして、それが数学的に保証されていることである。もう 1 つは「最適性」であり、これは、計算が終了したときに最適解が必ず得られること、そして、それが数学的に保証されていることである。連続最適化においては、浮動小数点数を用いて計算を行うため、最適性を厳密に保証することは難しい。そのため、最適解と任意に近い許容解を必ず得ることとして、最適性を述べ直すことが多い。効率性は、現在の最適化理論において「多項式時間アルゴリズムの存在性」として定式化される。計算複雑度理論において P≠NP 予想が未解決であるという現状を鑑みると、多項式時間アルゴリズムの非存在性を証明することは現状の理論において難しいと考えざるを得ないが、その代わりに、問題が NP 困難であることを証明して、多項式時間アルゴリズムが存在しないことの傍証とすることが多い。一方、多項式時間アルゴリズムの存在性を証明するためには、そのようなアルゴリズムを 1 つ設計し、実際に多項式時間アルゴリズムで計算が終了することを証明すればよい。

以下、連続最適化と離散最適化に分けて説明を行う。

【連続最適化における動向】

連続最適化における最も基礎的な研究対象は線形制約のもとで線形関数を最適化する線形

計画問題である。線形計画法に対して、最適性保証を持つ多項式時間アルゴリズムの存在性は昔から未解決問題として認識されていた。それを解決したのは Khachiyan であり、論文が出版されたのは 1979 年のことであった。その後、効率性を大幅に向上させた内点法と呼ばれるアルゴリズムが設計され、現在では、多くの最適化ソルバーに実装されている。その開発に日本人研究者が多く携わり、1992 年に日本人を含む研究グループが ORSA（米国オペレーションズ・リサーチ学会）の Lanchester 賞を受賞した。

21 世紀初頭までの連続最適化研究は以下のように大別できる。(C1) 線形計画法の拡張としての錐線形計画問題に関する研究、(C2) 非線形最適化問題の局所的最適化に関する研究、(C3) 非線形最適化問題の大域的最適化に関する研究。C1 は、1990 年代から興った、線形計画問題に対する内点法を他の凸最適化問題に適用しようとする研究潮流を指し、実際、二次錐計画問題、半正定値計画問題といった問題に拡張できると分かった。究極的には、「Euclid 的 Jordan 代数における対称錐上の線形最適化」にまで拡張可能であることが今では分かっており、現在は、他の錐上の線形最適化問題に対する研究に主眼が移ってきている。その例として、最近注目されているのが、完全正値錐上の線形最適化、共正値錐上の線形最適化である。しかし、この 2 問題は NP 困難であることが知られているため、次に述べる大域的最適化の手法を用いて解く手法が研究されている。C2 は、大域的な最適性は保証しないが局所最適解を高速に得るアルゴリズムに関する研究を指す。多くのアルゴリズムが提案され、理論の成熟を見ている。そのため、現在では、均衡問題や相補性問題といった、最適化問題を含む、さらに広い枠組みにおいて、同様のアルゴリズムを設計・解析する研究が行われている。C3 は効率性を保証しないが、最適性を保証するアルゴリズムに関する研究を指す。分枝限定法のように問題を分割することによって上手に解く手法の他に、緩和法という巧妙な方法が研究されている。緩和法では、問題の制約や目的関数を緩めることで解きやすい問題に変換し、それを解く。そのとき、緩める度合いを調整することで、大域的最適性を保証するのである。緩和法による大域的最適性の保証に関する方法論が急速に進歩しており、特に、変換後の解きやすい問題が C1 で取り扱った対称錐上の線形最適化問題となる場合が現在活発に研究されている話題である。

【離散最適化における動向】

離散最適化における最も基礎的な研究対象は、線形制約と整数制約のもとで線形関数を最適化するもので、通常これを整数計画問題と呼んでいる。整数計画問題は NP 困難であるため、効率性と最適性を共に満たすアルゴリズムの存在を期待できない。そのため、最適性は保証するが、効率性を犠牲にするアルゴリズムの設計と解析が昔から行われてきた。基本的な設計技法は分枝限定法と切除平面法である。また、それらに緩和法や分解法を組み合わせて用いることで、最先端の整数計画アルゴリズムが設計されている。理論的に解析されている側面は最適性がほとんどで、効率性に関する理論的解析はほとんどされていない。

一般の整数計画問題は NP 困難であるが、特殊な構造を持つ整数計画問題は多項式時間で解けることが知られている。その典型例はネットワーク流に関する問題で、特に、最大流問題と最小費用流問題である。これらは、「係数行列の完全ユニモジュラ性」という視点で一般化され、整多面体に対する研究潮流を作った。その一方で、最大マッチング問題や最小全域木問題のように、係数行列の完全ユニモジュラ性がないにも関わらず、効率性と最適性を

兼ね備えたアルゴリズムが設計できる場合も知られている。これらを包括する枠組みとして、マトロイドや劣モジュラ関数といった離散構造を経て、離散凸解析が日本発の理論として発展している。離散凸解析の射程は線形最適化だけではなく、凸最適化も含んでおり、その中で重要な役割を果たす劣モジュラ関数最小化多項式時間アルゴリズムに関する研究に対して、日本人を含む研究グループが Fulkerson 賞を 2003 年に受賞した。

21 世紀初頭までの離散最適化研究のテーマは、今述べたような（D1）一般の整数計画問題に対する最適性保証を持ったアルゴリズムの設計と解析、(D2) ネットワーク流問題に代表される、特殊な構造を持った整数計画問題に対するアルゴリズムの開発とその整多面体理論、離散凸解析への展開、の他に、(D3) 理論的精度保証を持つ近似アルゴリズムの設計と解析、がある。これは、1990 年代から急速に進展を見せたテーマであり、NP 困難である組合せ最適化問題に対して、最適性は犠牲にするが、その逸脱度が抑えられるようなアルゴリズムを設計することを目標としている。特に、急速な進展を見せた背景には、アルゴリズム設計において線形計画法や半正定値計画法という連続最適化の知見を多く用いる方法論が確立したことが挙げられる。近似アルゴリズム設計には、その困難性を導く確率的検査可能証明（PCP: probabilistically checkable proof）定理と呼ばれる計算複雑度理論における大定理が同時期に証明されたこともあって、多くの研究者が魅せられた。また、連続最適化における局所最適化 C2 のように、(D4) 離散最適化における局所探索とその変種が研究されている。その効率性に関して、通常の多項式時間アルゴリズムに関する NP 完全性の理論の類似として、多項式時間局所探索アルゴリズムに関する PLS 完全性の理論が存在する。実際、多くの問題に対する自然な局所最適解探索が PLS 完全であるという結果が示されている。その一方で、アニーリング（焼き鈍し）法と呼ばれる局所探索法の変種に対する漸近的大域収束性のような肯定的理論保証も得られている。しかし、局所探索法の変種であるメタヒューリスティクスや進化的手法については、その理論的解析があまり進んでいないのが現状である。

ここで挙げた事項以外にも、不確実性を考慮した確率計画法やロバスト最適化、入力が漸次的に与えられるオンライン最適化、多主体が関わるゲーム理論や多目的最適化、変数の次元が無限である無限計画や半無限計画や変分問題、より複雑な制約を扱う均衡制約付き数理計画や微分方程式制約付き数理計画など、広範な問題を最適化理論は取り扱っている。

【最適化理論に関わる学術団体】

日本においては、日本オペレーションズ・リサーチ学会に多くの最適化理論研究者が所属している。年に二度行われる研究発表会以外にも、数理計画研究部会（通称 RAMP）が年に一度シンポジウムを主催し、最適化の理論と応用に関する最先端の研究成果について情報交換を行っている。また、情報処理学会のアルゴリズム研究会、数理モデル化と問題解決研究会、電子情報通信学会のコンピュテーション研究会、日本応用数理学会においても、最適化の理論と応用に関する発表が行われている。海外においては、全世界的な学術団体として Mathematical Optimization Society（通称 MOS、旧名 Mathematical Programming Society）が存在し、3 年に一度、International Symposium on Mathematical Programming (ISMP) を開催している。MOS は、ISMP が開催されない年に、連続最適化に関するシン

ポジウムである ICCOPT や、離散最適化に関するシンポジウムである IPCO を開催している。また、米国の SIAM や INFORMS をはじめ、各国の応用数学およびオペレーションズ・リサーチに関わる団体に最適化理論の研究者が多く所属している。その他にも、特に離散最適化については顕著であるが、理論計算機科学に関わる学術団体に最適化理論の研究者が所属していることも多い。具体的には、米国の ACM、IEEE、欧州の EATCS などである。そのため、理論計算機科学に関わる国際会議である STOC、FOCS、SODA、ICALP、ESA などでも最適化理論に関する研究が発表されており、それらの国際会議に参加する日本人研究者も少なくない。

（４）科学技術的・政策的課題

従来のような「連続最適化と離散最適化」という大別が意味を成さなくなってきているという現状があるが、連続最適化と離散最適化の双方が高度な専門性を必要とするために、その 2 分野を渡り歩ける人材の育成も難しくなっている。そのような最適化理論の専門家を育成するためには、専門の教育プログラムや学科を設立するということも考慮する必要がある。実際、米国カーネギーメロン大学では、「Algorithms, Combinatorics, and Optimization Program」という研究教育プログラムが 1990 年代から学部を横断する形で進行しており、多数の優秀な研究者を輩出している。また、カナダのウォータールー大学には、「Department of Combinatorics & Optimization」が 1960 年代から存在し、最適化理論の研究における世界的拠点となっている。また、最適化理論の産業応用が日本において欧米ほど広く行われていないという現状がある。最適化理論の重要性と有用性を広報し、最適化理論の社会的認知度を向上させることも、最適化研究の底上げに資するであろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

先にも述べた通り、連続最適化と離散最適化の間の垣根が低くなり、最先端研究では、両者を融合した視点が重要であるという認識が醸成されてきている。例えば、線形方程式の解の中で、非零成分の数が最も少ないものを発見したいという要求が、圧縮センシングなどの応用から生まれている。これは非零成分数の最小化であるが、非零成分の数は離散的であり、NP 困難な問題として知られている。そのため、基底追跡と呼ばれる発見的解法が使われているが、そこでは、非零成分数の最小化をする代わりに、ℓ_1ノルムの最小化を行う。このように変更した問題は線形計画問題として定式化することができ、効率よく解ける。最近の研究では、その係数行列がある種のランダム行列である場合には、このℓ_1ノルム最小化によって、非零成分数最小化問題が高確率で解けることが証明されている。また、同様な設定として、部分的に成分が欠損している行列を補完する際に、結果として生成される行列の階数を最小化したいという問題がある。これも階数最小化という離散最適化問題であるが、行列の核ノルムを用いた発見的解法では半正定値計画法が使われ、現れる問題の係数行列がある種のランダム行列である場合には、これによって階数最小化問題が高確率で解けることが分かっている。その証明では、ランダム行列の理論など、高度な線形代数の知見が使われている。

また、二次錐計画問題や半正定値計画問題といった連続最適化問題が効率よく解け、ソフトウェアも整備されてきていることを背景として、それらの問題の変数を整数変数とした離散版に関する研究も増えてきている。特に、整数二次錐計画問題に対するアルゴリズムは

CPLEX や Gurobi Optimizer といった有名な最適化ソフトウェアに実装され、実際に使われるようになっている。理論面では、切除平面法や緩和法に関する新たな方法論が提案されてきている。これは C1 と D1 の融合と見ることができる。

一方、C1 と D3 の融合として、精度保証を持つ近似アルゴリズム設計において半正定値計画法を用いる研究潮流が精緻化されてきている。特に、Lasserre 階層や二乗和最適化の枠組みを用いて精度保証の上界を改善するという流れとその整数性ギャップを通して精度保証の下界を導出するという流れがあり、計算複雑性理論における一意ゲーム予想（2014 年のネヴァンリンナ賞）との関連から、多くの研究者が活発に議論している。

最適化問題を定式化する際に、変数の数（次元）を大きくすることでそのサイズを小さくすることができる。これは拡張定式化と呼ばれる概念で、そのサイズに対する研究が現在盛んに行われている。特に、巡回セールスマン問題を線形計画問題として定式化する際のサイズが必ず指数関数的になってしまうことが 2012 年に証明され、完全マッチング問題に対しても同様な結果が 2014 年に証明された。今後は、線形計画問題としての定式化以外に、他の錐線形計画問題、特に、半正定値計画問題としての定式化に関するサイズが研究対象となっていくだろう。

線形計画問題は多項式時間で解けるが、強多項式時間で解けるか？（すなわち、変数の数と制約の数に関する多項式時間で解けるか？）という問題は未解決であり、大きな課題であると認識されている。そのようなアルゴリズムの有力候補は単体法であり、その動きはピボット規則によって定められる。多くのピボット規則に対して単体法が多項式時間アルゴリズムではないことが知られていたが、最近、乱数を用いたピボット規則や探索の履歴を使用するピボット規則に対しても指数時間下界が証明された。

一般化最大流問題と呼ばれるネットワーク最適化問題があり、それは線形計画問題としてモデル化できるため、多項式時間で解けることは知られていたが、それに依らず、組合せ的な手法によって多項式時間（特に，強多項式時間）で解けるかどうかは知られていなかった。しかし、2014 年にこの問題は肯定的に解決された。

最適化理論における効率性は「最悪の場合」に対する効率性として解析されることが多い。しかし、線形計画問題に対する単体法は実際に計算機上では高速に動作することが確認されている。そのような理論と実践のギャップに対する認識は昔から存在し、確率的解析などが提案されてきている。その中で、最近注目されているのが「平滑化解析」である。これは最悪の場合の摂動を考えて解析をする手法であり、これにより、単体法をはじめ、最悪の場合に指数時間かかってしまうアルゴリズムが平滑化解析の意味で多項式時間アルゴリズムとなることが分かってきた。

進化的計算に対する理論的解析の方法論が開発されてきている。特に、ドリフト解析という新しい手法により、厳密な確率的解析が可能になってきている。また、アニーリング（焼き鈍し）法の量子計算版と言える量子アニーリング法が日本発の技術として広く知られている。これに関して、カナダの D-Wave Systems 社が物理的実装を 2011 年に初めて発売し、注目を浴びている。

また、最適化理論は、機械学習、データマイニング、符号理論、情報理論、暗号理論、代数幾何学など、周辺の数理科学分野を巻き込んで新たな展開を見せている。

（６）キーワード

連続最適化、線形計画法、錐線形計画法、半正定値計画法、二次錐計画法、内点法、単体法、非線形計画法、多項式時間アルゴリズム、NP 完全性、NP 困難性、離散最適化、組合せ最適化、整数計画法、分枝限定法、切除平面法、離散凸解析、劣モジュラ関数、整多面体、ネットワーク流、近似アルゴリズム、精度保証、局所探索法、PLS 完全性、基底追跡、拡張定式化、平滑化解析

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	連続最適化、離散最適化ともに基礎的な成果を着実に挙げている。特に、若い世代の成果が顕著であり、世界的に見ても層が厚い。
	応用研究・開発	○	→	半正定値計画法に対する内点法や基礎的なグラフアルゴリズムの並列計算など、特筆すべき成果がある。
	産業化	△	↗	最適化理論の認知度の低さゆえか、企業において最適化理論に関する際立った活動が見えなかったが、最近、機械学習との関連から最適化理論に対する認識に変化が生まれてきたように思える。
米国	基礎研究	◎	↗	MIT、カーネギーメロン大学、ジョージア工科大学など、最適化理論の拠点が多く、理論的成果の質も高い。
	応用研究・開発	◎	→	最適化理論の成果を活かした商用ソフトウェアとして、CPLEXやGurobi Optimizerが開発され、世界の標準として用いられている。
	産業化	○	→	企業研究所においても、最適化理論を専門とする研究者が多く在籍し、重要な成果を挙げている。しかし、最近、MicrosoftがSilicon Valleyの研究所を閉鎖したことを受け、今後、下降傾向に転じる可能性がある。
欧州	基礎研究	◎	↗	ベルリン、ブタペスト、アムステルダム、グルノーブルなど、各国に最適化理論の拠点があり、顕著な成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	↗	ドイツやフランスを中心として、「アルゴリズム工学」に関するプロジェクトが1990年代から興り、理論と実践のギャップをつなぐ研究が新たな潮流となっている。
	産業化	◎	→	ドイツなどでは、産業や公共政策にて最適化理論の成果を用いている事例が数多く存在する。
中国	基礎研究	△	→	中国出身の研究者が欧米の大学および研究所に所属し、顕著な成果を挙げているが、国内の動向としては際立ったものが見えてこない。
	応用研究・開発	×	→	際立った活動が見えてこない。
	産業化	×	→	際立った活動が見えてこない。
韓国	基礎研究	△	→	離散数学分野ではFulkerson賞など顕著な成果があるが、最適化理論における大きな潮流は生み出されていない。
	応用研究・開発	×	→	際立った活動が見えてこない。
	産業化	×	→	際立った活動が見えてこない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

３．１．７　プログラム基礎理論

（１）研究開発領域名

プログラム基礎理論

（２）研究開発領域の簡潔な説明

高品質ソフトウェアの構築のための基礎となる理論。プログラムの意味や動作を数学的に厳密に定義し、さらにそれに基づいてプログラミング言語の設計、コンパイラの作成、プログラムの検証・変換・合成などに関する研究開発を行う。高信頼、高性能なソフトウェアの構築のために不可欠な研究開発領域である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本領域は、アルゴリズム理論とならんで理論計算機科学の二大分野の一つに位置付けられ、「計算とは何か」という根源的な問いに関わる、学問的に深淵な分野であると同時に、技術的には高品質ソフトウェア、特にソフトウェア（ひいてはそれによって制御されている現代の社会システム）の信頼性に直接関わる、社会的に極めて重要な研究開発領域である。プログラム基礎理論のルーツは電子計算機が作られる以前の 20 世紀前半のチャーチによるラムダ計算の理論やゲーデルの不完全性定理などにあり、ラムダ計算は関数型言語に代表される近代的なプログラミング言語の基礎となる計算体系を与え、不完全性定理は、ソフトウェア検証などの形式手法の理論的な限界を与えている。また、不完全性定理に限らず、本領域は論理学と深いつながりがあり、カリーハワード同型に代表されるように、プログラムと証明の間に深い対応関係があることが知られ、しばしば相互に影響を与えあって発展している学問分野である。

プログラム基礎理論の初期においてのホットなトピックは、プログラムに対する数学的な意味を与え、プログラミング言語の設計の指針とすること、また効率のよいコードを生成するためのコンパイラの構成法の確立であった。プログラム意味論およびコンパイラ構成法がある程度確立し、計算機の性能が向上した今日においては、主要なトピックはソフトウェアの信頼性や生産性の向上にシフトしてきており、特にプログラム検証（またはソフトウェアを含むシステム検証）の理論・技術が盛んに研究されている。この背景には、現代社会で交通システム、発電所、金融システム、電子政府など様々な社会インフラがコンピュータによって制御されるようになっており、ソフトウェアの欠陥が重大な問題を起こしうる（また実際に起こしている）ことがある。また、検証技術を応用したプログラム合成技術の研究も盛んになりつつある。

現在研究されているプログラム検証手法は２つに大別され、一つは定理証明支援システムを用いて検証する手法であり、これは膨大な人的コストと専門知識が必要ではあるが、詳細な仕様を検証可能であるため、安全性が極めて重要なソフトウェア（例えば原子力発電所の制御ソフトウェア、飛行機や自動車のエンジン制御ソフトウェア）の検証に有効である。この手法およびそれに用いる定理証明支援システムの研究は欧州を中心に近年盛んに研究され、C 言語のサブセットのコンパイラの検証（フランス）、オペレーティングシステムのカーネルの検証（オーストラリア）などが行われている。定理証明支援システムとして現在最も広まっているのはフランスで開発された Coq であるが、日本では独立行政法人産業技術総合

研究所（産総研）のグループがスウェーデンのグループと共同で Agda の開発に携わっている。また、北陸先端科学技術大学院大学(JAIST)のグループが CafeObj と呼ばれる代数的仕様に基づく検証ツールの開発を行っている。

もう一つの検証手法は、モデル検査や、型推論・抽象解釈などのプログラム解析技法、自動定理証明器などを用いて全自動または半自動で検証する手法である。これは定理証明支援システムを使う手法と比べ、ほとんど人の手を必要としないという点で大きな強みがある。中でもモデル検査は、1970 年代に提唱された技術だが、近年では広くシステム検証に用いられるようになってきており、2006 年には提唱者の Edmund Clarke（エドムンド・クラーク）らが「コンピュータサイエンスにおけるノーベル賞」とされるチューリング賞を受賞している。また、近年では自動定理証明器の進歩もあいまって、検証可能なプログラムのサイズも増大している。本分野においても欧米がリードし、デバイスドライバ用の自動検証器などが開発されている。日本ではこの分野で長らく遅れをとっていたが、最近になって東大のグループがモデル検査の一般化である高階モデル検査についてのブレークスルーを達成し、関数型プログラムの全自動検証ツールを世界に先駆けて構築するなど、高レベルプログラムの自動検証手法の研究の一大拠点になりつつある。

本研究開発全体についての世界的な動向としては、欧州は伝統的に基礎理論に強く、上記の定理証明支援システムやモデル検査などの発展に基礎的な貢献をしている。それに対し、米国は基礎理論を応用し、産業化につなげる能力に長けており、上記のデバイスドライバ用の自動検証ツールの構築、システム検証を専門に請け負うベンチャー企業の創出などの実績がある。日本では、欧州同様、伝統的にプログラム意味論など基礎理論に強く、東大や京大数理解析研究所などに拠点がある。一方、プログラム検証などへの応用・産業化という点では遅れをとってきた。アジアの他の国では、韓国・シンガポールは最近ではプログラム検証などへの応用分野で一定の成果を挙げている一方、基礎理論はあまり強くない。中国はこの分野では全般的に遅れている。

（4）科学技術的・政策的課題

ソフトウェアの信頼性向上は、社会基盤全体の信頼性向上に直結する待ったなしの課題であり、本研究開発分野において、基礎理論から応用、産業化までが有機的に結合することが極めて重要である。

日本では、米国のマイクロソフト、グーグルのように基盤ソフトウェアの開発に直接携わる大企業が少ないこともあり、基礎理論の強みを応用、産業化に十分に生かせていない。このままでは日本のソフトウェア産業の衰退のみならず、自動車などソフトウェアの比重が増している産業への影響も懸念され、産学官を連携させる仕組みの構築が急務である。また、基礎理論に関しても個人ベースの研究が多く、プログラム検証など喫緊の大きなテーマを旗頭に知を結集するための大きな予算措置が必要であると思われる。産学の連携の試みとしては、産総研に平成 16 年から 6 年間にわたってシステム検証研究センターが設置され、一定の成果は挙げたが、学問的に新しい技術の創出や産業化という観点からは道半ばで終わっており、この種の試みをより大きな規模で継続して行うことが重要であると考えられる。また、複数の大学に散らばっている基礎理論研究者や企業の研究所・技術者の連携を促進するため、一センターの設置よりも国家規模のプロジェクトの創出が望ましい。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

プログラム検証に関しては項目（３）で触れたように、大別して(i)定理証明支援器を用いた人手を介在した検証、(ii)モデル検査や型、抽象解釈などのプログラム解析技術、自動定理証明器などを駆使した全自動または半自動検証の研究にわけられる。前者については、フランスで開発された定理証明支援器 Coq が広く使われるようになっており、C のサブセットのコンパイラが検証されるなど、検証対象のシステムの規模も徐々に大きくなっている。後者については、2000 年以降、分離論理(separation logic)、高階モデル検査などのブレークスルーとなる理論、自動定理証明器（SMT ソルバ）の大幅な進歩が牽引役となって自動検証分野全体が大きな進歩を遂げている。自動検証の成果は徐々に産業化につながっており、マイクロソフトなどの大手企業の他に、米 Coverity 社、Facebook に買収された英 Monoidics 社など検証を専門に請け負うベンチャー会社が立ち上がっている。また、フランスの研究グループが Airbus 社と飛行機のエンジン制御プログラムの検証を行うなどの取り組みもある。

プログラム理論のコンピュータセキュリティへの応用も活発になってきており、フランス国立情報学自動制御研究所(INRIA)やスペインの IMDEA Software などが暗号通信プロトコルの全自動検証器などを研究・開発している。

INRIA を中心に開発されている OCaml や、マイクロソフトケンブリッジ研究所等で開発されている Haskell といった、数理論理学的基礎を持つ関数型プログラミング言語の実用・普及も、世界的に急速に進んでいる。日本でも学会等でいくつかの応用事例が報告されているだけでなく、IT 系経営誌で複数の特集が組まれている。また、草の根レベルの技術者らによる多数の勉強会が頻繁に開催され、プログラミング言語理論分野の著名な教科書の和訳が Amazon.co.jp において専門書としては異例の新刊 42 位（漫画や雑誌、小説等を含む）にランクインする等、技術的・商業的に注目が高まっている。

（６）キーワード

プログラム意味論、プログラム検証、モデル検査、定理証明支援器、自動定理証明器、コンピュータセキュリティ、関数型言語

（７）国際比較

「基礎研究」、「応用研究・開発」、「産業化」の３つのフェーズについて、現状およびトレンドを記す。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	プログラム意味論、型システムなど伝統的に強い研究グループが東京大学、京都大学、東北大学などを中心にいくつかあり、国際的な影響力を保っている。ただし、どちらかというと個人ベースの研究に頼っており、研究グループが組織化されていない。
	応用研究・開発	△	↗	基礎研究の成果が検証ツールなどになかなか結び付いていない。ただし本文で述べたように東京大学で実際にプログラム検証ツールの作成などの動きがある。
	産業化	△	→	本文で述べた産総研のシステム検証研究センターなどの取り組みもあるが、全体的に大企業のソフトウェア開発への形式手法の導入の動きが鈍い。ごく一部、フェリカネットワークス社他によるFelica電子マネーの形式的仕様記述や、（形式手法そのものではないが）NTTデータ社によるHaskellを用いたレガシーCOBOLプログラムの解析、（東北大学で開発されている）関数型言語SML#のNECグループによる利用といった、いくつかの応用事例がある。
米国	基礎研究	○	→	どちらかというと応用研究に重点があり、基礎研究の比率が小さい。
	応用研究・開発	◎	→	伝統的に、基礎研究の成果を応用に結び付けることに長けており、大規模プログラムの自動解析ツールなど大学の研究グループでもかなり実践的な研究を行っている。国際会議の発表も、PLDI, CAVなどの実践的なテーマの会議で多い。
	産業化	◎	→	マイクロソフト社がモデル検査に基づくデバイスドライバ検証ツールを作成したり、検証を専門に請け負うベンチャー会社Coverityが立ち上げられるなど、本分野の研究成果が直接産業化につなげられている。
欧州	基礎研究	◎	→	伝統的に基礎理論に強く、LICSやPOPLなど理論重視の国際会議での発表が多い。
	応用研究・開発	○	↗	マイクロソフトケンブリッジ研究所などが本分野のトップレベルの研究者を多く集めていることもあり、最近では応用研究も盛んであり、この傾向は今後も続くと思われる。フランスで開発された定理証明支援器Coqは最近では広く使われるようになってきている。
	産業化	○	↗	上記のマイクロソフトケンブリッジ研究所において研究部門と開発部門が有機的に結びつき、また分離論理に基づく検証を行うベンチャー会社MonoidicsがFacebookに買収されるなど、産業化の動きが活発になってきている。
中国	基礎研究	△	↗	本分野では目立った研究成果はこれまで見られなかった。ただし、最近になって米国などから帰国した研究者を中心に徐々に国際的に見える成果も出現しつつある。
	応用研究・開発	△	↗	本分野では目立った研究成果はこれまで見られなかった。ただし、最近になって米国などから帰国した研究者を中心に徐々に国際的に見える成果も出現しつつある。
	産業化	△	→	特に目立った動きはみられない。
韓国	基礎研究	△	→	あまり目立った成果は見られない。
	応用研究・開発	○	→	プログラム解析の研究など一部グループの成果は見えている。
	産業化	△	→	特に目立った動きはみられない。

（註１）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Proceedings of Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL), http://dl.acm.org/event.cfm?id=RE180
2) Proceedings of ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS), http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=1000420
3) Proceedings of ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP), http://dl.acm.org/event.cfm?id=RE307
4) Proceedings of International Conference on Computer Aided Verification (CAV), http://www.informatik.uni-trier.de/~Ley/db/conf/cav/index.html
5) Proceedings of ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI), http://dl.acm.org/event.cfm?id=RE200
6) 特集「フォーマルメソッドの新潮流」情報処理 Vol.49 No.5 May 2008
7) 「形式手法適用調査 調査報告書」独立行政法人 情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター 2010 年 7 月 29 日
8) 「型システム入門 プログラミング言語と型の理論」オーム社（原著 "Types and Programming Languages", MIT Press）
9) 特集「ソフトウエアは硬い」日経エレクトロニクス 2005 年 12 月 19 日号 http://techon.nikkeibp.co.jp/article/FEATURE/20090204/165183/
10) 特集『Java はもう古い！次の主流は「関数型」』日経コンピュータ 2012 年 9 月 27 日号 http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20130112/449222/
11) 特集『「オブジェクト指向」のウソ 「関数型」のウソ』日経ソフトウエア 2014 年 11 月号
12) 『ホーア論理を拡張しポインタを扱える「Separation Logic」、静的検証ツール「Infer」で Monoidics 社が実用化』英 Monoidics 取締役兼共同創業者 Peter O'Hearn 氏および CTO 兼共同創業者 Cristiano Calcagno 氏インタビュー、聞き手 日経コンピュータ 進藤 智則、2012/09/26, http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Interview/20120926/425324/
13)「静的検証ツールのコベリティ、Web の脆弱性検出ツールでエンタープライズ分野に本格参入」コベリティ共同創業者兼 CTO Andy Chou 氏インタビュー、聞き手 日経コンピュータ 進藤 智則、2012/10/10, http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Interview/20121009/428581/

３．１．８　データアナリシス

（１）研究開発領域名

データアナリシス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

データ解析技術に対する社会からの要請は、ビッグデータの潮流を牽引力としてかつてないほどに高まっている。技術的にはベイズモデリング・スパースモデリングといった理論的な面からの進展や、推薦システム・ネット広告配信といった新しい応用から端を発した発展がみられる。最近特に注目すべき話題は高い性能を理由に爆発的にブームを巻き起こしている深層学習であるが、その理論的な解明は発展途上である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

数年前から始まるビッグデータの潮流は、ビジネス・社会・科学などあらゆる分野を巻き込み、データ解析に対する期待や需要はかつてないほどに高まっている。そして、その基盤技術である統計数理や機械学習・データ工学もまた大きな注目を集めている。当然のことながら、これらの分野はビッグデータが注目されるずっと以前から、それぞれの（統計数理は特に）長い研究の歴史を有しているが、上記の要請に応える形で理論と応用の両面においてますますその発展が加速している状況である。

ビッグデータ時代におけるデータ解析のもつ顕著な傾向のひとつは、仮説検定を中心とした仮説検証型の解析からデータからの帰納的推論を中心とする仮説発見型への重心の移行であろう。大量のデータから有用な知見を発見し、あるいは予測モデルを学習することによって（特に自動的な）意思決定に役立てていくという考え方が、Google や Amazon をはじめとする現在の主要なインターネット企業を支える基盤技術の背景となっている。

統計数理分野では主に理論的な側面からの研究や、小～中規模のデータを対象としたデータ解析技術が発展してきた。特にこの分野で発展してきたベイズモデリングは、現実の様々な制約や知識を柔軟にモデルに取り入れることのできる枠組みであり、マーケティングや生物学など様々な分野で成功裏に用いられている。機械学習分野においてもベイズモデリングは主要テーマのひとつであり、ビッグデータを対象とした効率的なアルゴリズム開発や、ウェブ等の新しい分析対象を扱うための技術が研究されている。

データ解析関連分野において近年特に精力的に研究が進められているテーマのひとつがスパースモデリングであり、疎な信号源を復元する圧縮センシング [1,2]や、予測モデルの疎なパラメータ推定を得るラッソ [2]などがこれら一連の研究の火付け役となった。スパースモデリングとは、スパース（疎）という名からもわかるように、観測されたデータを少数のパラメータだけをもちいて説明するための方法論であり、超高次元のデータからの推論だけではなく、モデルの可解釈性の向上という面からも有用である。また、これらは一定の条件のもと真のパラメータを復元できる保証を与えられるなど理論的な面からも興味深く、その学習理論的解析が進んでいる。

機械学習分野では情報技術の発展とともに現れた様々な形式のデータや、大量データの処理といった問題に対応する形で、新しい問題設定や効率的なアルゴリズムの開発が行われてきた。たとえばオンラインショッピングなど様々なインターネット上のサービスにおいて欠

かせない機能となっている推薦システムは、近年の機械学習キラーアプリケーションのひとつとして認識されている。1990 年代半ばに登場した GroupLens[4]とよばれる推薦システムに端を発する推薦システム研究は、近年米 Netflix 社によって開催されたコンペティションを火付け役に著しい発展を遂げ、現在は行列分解を中心とするアプローチが主流であり [5]、その一般化であるテンソル分解も、さらに高度な分析目的で研究が進んでいる。行列分解は固有空間のスパース性を仮定する一種のスパースモデリングともいえ、これらに対する学習理論的な解析も盛んである。最近ではソーシャルメディアの普及とともに、SNS 等の分析にもこれらの技術が用いられている。

インターネット広告配信も、実世界応用と理論が相互に刺激を与えながら近年大きく発展している領域として挙げられる。インターネット上の広告は多くのインターネット企業にとって依然主要なビジネスモデルであり、その配信精度は企業の収益に結びつく重要な問題である。古くは確率・統計分野で研究されてきた多腕バンティット問題 [6]と広告配信最適化問題との類似性から、これらのアプローチが注目され、現在盛んに研究と応用が進んでいる。

ところで、機械学習分野におけるここ十数年間は、データ解析の問題を凸最適化問題や固有値問題として定式化することによって最適解を保証するアプローチの研究が主流であり、これらを基盤とした学習理論が発展してきた。一方で、近年の応用上の成功を背景として、深層学習 [7]のように複雑な非線形モデルの利用が再び注目を集めている。ここ数年、深層学習の躍進は目覚ましく、コンピュータビジョン・音声認識・自然言語処理など様々な分野において記録を塗り替えつつある。さらに、Google や Facebook といった米国を代表する企業が深層学習に大きな投資を始めたというニュースは深層学習にさらなる注目を集める契機となった。深層学習の成功の背景にあるのは、大量データの出現と、Hadoop などデータを効率的に処理するための並列処理・実装技術、従来のニューラルネットワークで用いられていた誤差逆伝播法に代わる新しい最適化のテクニックなどである。非線形なモデルの複雑さも相まって、深層学習の学習アルゴリズムの多くはまだ理論的な解析が十分ではない状況ではあるが、たとえば深層学習の代表的なテクニックであるドロップアウトなどは従来の学習理論における正則化としての解釈が可能であることが示される [8]など、徐々にではあるが理解は進み始めている。

（４）科学技術的・政策的課題

ビッグデータに関連した種々の取り組みによって、データ解析技術はまさにいま社会へ大きく羽ばたこうとしている状況である。しかし、それは同時にこれらの技術が社会的な問題と無関係ではいられなくなることを意味する。たとえば、プライバシーへの配慮は重要な問題のひとつである。あらゆる種類のセンサーが普及し、これらがネットワークにつながって連携し、一方で多くの人がソーシャルメディアを通じてつながる現在、サービスの利用者がそうとは知らずに自身のプライベートな情報を意図せぬ範囲に晒しているケースが数多くみられ、中には社会的な問題に発展するケースも少なくない。個々のデータとしては一見それほど重要ではないと思えるものであっても組み合わせることで容易に個人情報にたどりつけることも多い。また、結局のところデータを利用したサービスの利便性とプライバシーの保護はトレードオフの関係にあるため、技術的な問題としてだけでは片付かず、扱いは極めて困難である。

個人情報を秘匿した形で公開するための技術は主に統計分野における個票開示[9]の問題として、一方データを秘匿した形でデータ解析を行ういわゆるプライバシー保護データマイニング[10]は機械学習・データマイニングの分野で盛んに研究されている。いずれも技術的にはさまざまな可能性が示されているものの、実際の社会利用における有用性や、制度面との兼ね合いなど、解決すべき課題はまだ多い。

技術的なトレンドとして最も注目されているものはやはり深層学習であろう。応用としては既に多くの成功を収めており、今後もありとあらゆる分野において深層学習の導入が検討されていくものと思われる。その一方で、前述したようにモデルの複雑な非線形性が災いし、その理論的理解が十分になされているとは言い難い。今後、重要な場面において利用される機会が増えれば増えるほど、その礎となる理論的な解析の重要性は高まっていくものと予想される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

やはり最も大きな話題は深層学習であろう。近年 Facebook や Google、Baidu などといった世界的なインターネット企業が深層学習に注力することを発表した。大学で取り組まれていた関連技術が企業に買収されたり、あるいは大学の研究者がこれらの企業に移籍して技術開発に取り組むケースも相次いでいる。

国内ではスパースモデリングを対象とした新学術領域プロジェクト「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」が平成 25 年度より始まっており、基礎理論と応用の両面での進展が期待されている。

（６）キーワード

ベイズモデリング、スパースモデリング、推薦システム、ネット広告配信、深層学習、プライバシー

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	統計数理研究所等をはじめとする国内機関ではベイズモデリング・スパースモデリング等の基礎研究が脈々と受け継がれてきており、また深層学習の源流であるネオコグニトロンは日本初の技術であるなど、研究の地力は高い。
	応用研究・開発	○	→	自然言語処理やマルチメディア処理の分野では日本は一定の地位を得ており、これらの分野では近年では統計的なデータ処理技術に基づくアプローチが主流である。
	産業化	△	↗	国内企業でもデータ解析を主軸に据える機運は高まっている。基礎研究と産業化の結びつきはまだそれほど強くない。
米国	基礎研究	◎	↗	深層学習の研究を牽引している。プライバシー保護データマイニングの研究も米国発祥である。
	応用研究・開発	◎	↗	あらゆる分野で深層学習の応用が進んでいる。
	産業化	◎	↗	研究者自身が産業化まで取り組む。インターネット企業が相次いで深層学習の産業化に取り組んでおり、現在の流れを牽引している。
欧州	基礎研究	◎	→	理論的な研究が強い。
	応用研究・開発	○	↗	米国に準ずる形で発展している。
	産業化	○	→	プライバシーに関する規制が厳しく、産業化の阻害する可能性もある。
中国	基礎研究	○	↗	コンスタントに論文が発表されている。研究者の数も増えており、今後大きな勢力になると予想される。
	応用研究・開発	○	↗	Baidu等の企業が深層学習に積極的に投資を行っており、早晩頭角を現すと予想される。
	産業化	△	↗	現時点では目立った動きは内が、上記理由等により今後産業化が急速に進むと予想される。
韓国	基礎研究	△	→	特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	→	特に目立った動きはない。
	産業化	△	→	特に目立った動きはない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Candes, E. & Tao, T. (2006). Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies?. Information Theory, IEEE Transactions on, **52**, 5406-5425.
2) Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, **52**, 1289-1306.
3) Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society (Series B), **58**, 267-288.
4) Resnick, P., Iacovou, N., Suchak, M., Bergstrom, P. & Riedl, J. (1994). GroupLens: an open architecture for collaborative filtering of netnews. Proceedings of the 1994 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (pp. 175-186).
5) Koren, Y., Bell, R. & Volinsky, C. (2009). Matrix Factorization Techniques for Recommender Systems. Computer, **42**, 30-37.
6) Auer, P., Cesa-Bianchi, N. & Fischer, P. (2002). Finite-time Analysis of the Multiarmed Bandit Problem. Machine Learning, **47**, 235-256.
7) Bengio, Y. (2009). Learning Deep Architectures for AI. Foundations and Trends in Machine Learning, **2**, 1-127.
8) Wager, S., Wang, S. & Liang, P. (2013). Dropout Training as Adaptive Regularization. In C. J. C. Burges, L. Bottou, Z. Ghahramani & K. Q. Weinberger (eds.), Advances in Neural Information Processing (pp. 351-359).
9) 竹村彰通. (2003). 個票開示問題の研究の現状と課題. 統計数理, **51**, 2, 241-260.
10) Aggarwal, C. C. & Yu, P. S. (2008). Privacy-preserving Data Mining: Models and Algorithms. Springer.

3.2 デバイス・ハードウエア

微細化から物理世界とのインターフェースへ

ここ数十年間、情報通信技術（IT）の根幹となるデバイスの主流は MOS トランジスタであり、その基幹研究要素はトランジスタの微細化（スケーリング）であった。微細化すれば、機能あたりのコストは低減し、速度は向上、消費電力は低下するため、コスト・パフォーマンスの急速な向上に寄与するためである。

現在の微細化は 20nm 程度の線幅が量産加工できるところまで来ており、さらに 5nm 程度までは進展するだろうと考えられている。このような微細化を推進する従来型の努力も依然重要であることはいうまでもない。しかし、このところ、研究のパラダイムシフトも起こり始めている。第一に、その微細化も永遠には続かないことが認識され始めた。第二に、今後 IT が人々の暮らしを支え、社会課題を解くためには、MOS トランジスタを主体とした半導体集積回路、半導体チップだけでは不足していることも認識され始めた。

例えば、今後の高齢化社会をより豊かで効率的にするヘルスケアサービスやロボットなどのソリューションを考えた場合、デジタルプロセッサーに代表される仮想空間情報処理だけではなく、物理世界とのインタラクションがより高度になる必要があることは言うまでもない。センサー、アクチュエーター、電源、エネルギーなど情報ではない物理実体との直接的な関与がエレクトロニクスデバイスレベルで求められる。これは、微細化トランジスタだけで解決できる問題ではない。

このように、次世代の IT 社会を支えるデバイス技術の研究開発は、微細化だけ、あるいはデジタル化だけの競争ではなく、それ以外の部分により多くの研究付加価値を求める時代に移行してきている。

内向きの努力から外向きシステム指向に

このような事情を反映して、集積エレクトロニクスも半導体チップをいかに設計し、いかに製造するかというのが研究対象だった時代を終え、半導体チップ以外のシステム要素を含めて最適化するという研究が世界的に注目を集め始めている。内向きの努力から外向きの努力に、チップだけの最適化から、システム全体としての最適化が重要な時代に突入している。従って、各論で示す各種のエレクトロニクス要素研究も、システム的な観点からの研究をより盛り込みながら推進する必要が出てきている。

例えば、パワーエレクトロニクスデバイスを考えた場合、パワー素子そのものの低ロス化や低コスト化に加え、システムを低ロス化、低コスト化するためには、インダクターの小型軽量化に資するシステム高速化が重要になってくる。また、システムをより安全に動作させるためには、パワー素子のみならず、パワー素子の制御などにより大きな付加価値や差別化要因があることが認識されてきている。システム指向の研究が必要になっている理由である。

IoT：個々の要素技術とアジャイル・プラットフォーム技術

このように、微細化やデジタルプロセッサーだけで今後の IT 技術を支えきれず、また社会課題も解けないことが意識され始めているが、従来の集積エレクトロニクスのもう一つの弱点も認識され始めている。それは開発費の高騰である。先端チップの開発には数十億円の

研究開発費がかかると言われている。一方、今後の実空間を相手にした Internet of Things（IoT）などの ICT サービスなどでは、デバイスが使われる環境が多種多様であるため、IoT ノードの構成要素も多種多様である。センサーも多様、アクチュエーターも多様、エネルギー環境も多様、無線仕様も 4G/5G、Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee などと多種多様だからである。

このような多種多様なシステムでは、開発費が数十億円となる集積回路開発をすべてのシステムで行うわけにはいかない。一方で、ソフトウェアで多様性に対応することは可能かと言えば、デジタルだけが問題ではなく、電源、センサー、アナログ、通信などシステム全体が問題であるため、デジタルプロセッサーやメモリーをソフトウェアでカスタマイズするだけで対応することは不可能になっている。

現在では残念ながら多種多様なシステム要求を満足させる高性能なエレクトロニクス集積技術は存在していない。そのため、新しいアプリやサービスを多くの方々が独自の創意工夫で立ち上げるためのハードウエア提供には限界があり、従って新しいアプリケーションが生まれず、このところのエレクトロニクス技術の閉塞感の一因になっている。これは日本だけの状況ではなく、多くの国際学会で集積エレクトロニクスは踊り場にいることが認識されている。次の成長過程に入るためには、このような多種多様なアプリを育む集積プラットフォームの構築が重要になってきている。

プラットフォーム化というのは、ある技術のユーザーに対して、その技術の難しい理論や製造過程などを知らなくても使えるようにし、ユーザーはその中にあるコンポーネントを自由に選んで組み合わせ、カスタマイズして各自のサービスを実現できるような「場」を提供することである。そのような「場」を提供したものが技術競争に打ち勝つ時代になってきている。例えば、TSMC（Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.）は CMOS 技術のプラットフォームを築きあげた。そこでは、難しい半導体物理を知らなくても、設計ができる「場」が提供されている。Apple は難しい通信理論やハードウエアの詳細を知らなくてもアプリケーションをプログラムできるスマートフォンのプラットフォームを提供している。Arduino はボードを組み合わせると、ソフトウェアが自由にダウンロードして使える「場」を作り上げ、まだ大型で消費電力も大きいが、IoT ノードのプラットフォームを目指している。

競争力のある個々のとがった技術や要素の研究や開発はもちろん重要である。しかし、それだけではユーザーに技術を提供できないことも明白になってきている。社会課題もそれだけでは解けない。個々の素晴らしい技術をユーザーに「お届けする」技術の研究、プラットフォーム化の研究も求められているのはこのためである。

例えば、電源、センサー、アナログ、通信などもすべてソフトウェア・カスタマイズできるようにするという研究なども重要である。また、日本には、集積回路技術、実装技術、リアルタイムソフトウェア技術を含め超小型化、超低消費電力化を実現させる新しい競争力あるアジャイルなマイクロ集積プラットフォームを作る潜在能力もあると考えられる。

本俯瞰区分ではエレクトロニクスやフォトニクスデバイスを進化させるための技術研究分野の俯瞰をまとめている。しかしながら、このような個々の技術の基盤研究を推し進めるのみならず、上述のような状況に鑑み、システム指向やプラットフォーム化などを指向しつつ、当該分野の研究開発投資を行うことが期待される。

計算エネルギー効率の格段の向上

物理世界とのインターフェースが重要な課題になる一方で、得られたデータを処理するために一段と強力な計算能力も必須となってくる。スーパーコンピュータのようなシステムでは処理能力の限界は発熱で決まるようになっており、性能を上げるには計算エネルギー効率を向上させることが必要になる。発熱を抑えるために、より大きな施設にすると、今度は計算機間の通信が遅くなって性能が上がらなくなる。また、IoT 応用では、エネルギー供給は電池などで制限されていることも多く、計算エネルギー効率のさらなる向上が求められている。もちろん、自動運転や、センサーノードに認識動作を付加し、通信が限られた場合もシステムとして低電力でセキュアな動作を提供するといった例でも計算エネルギー効率の向上は不可欠である。計算エネルギー効率の向上には、微細化が効果的だが、それにも限界が見え始めた現在、微細化以外の方策が検討され始めた。

顕著なものは脳型コンピューターに代表されるような非ノイマン型のアーキテクチャー探究である。Deep learning などニューラルネット系のアーキテクチャーでは IBM がチップやシステムを使った検証で実績を上げ始めた。これらの系では、不揮発性記憶素子も必要となり、メモリー材料や新規メモリー原理なども研究として重要となっている。また、D-Wave なども非ノイマン型ハードウエアの例となる。その他、ノイマン型のコンピューターを駆使して脳のモデルを作り、その動作を理解した上で、非ノイマン型のアーキテクチャーを考えるといった研究も始まっている。また、脳は 0.1V 以下の電圧領域を使った動作をしていることが知られており、ノイズにも負けずにこのような極低電圧で動作する素子やシステムなどにも期待が集まる。このような一連の脳型コンピューターあるいは非ノイマン型コンピューターの研究も世界各所で始まっており、この俯瞰の各種の技術を組み合わせた形で、次世代の IT の基礎を作る可能性がある。

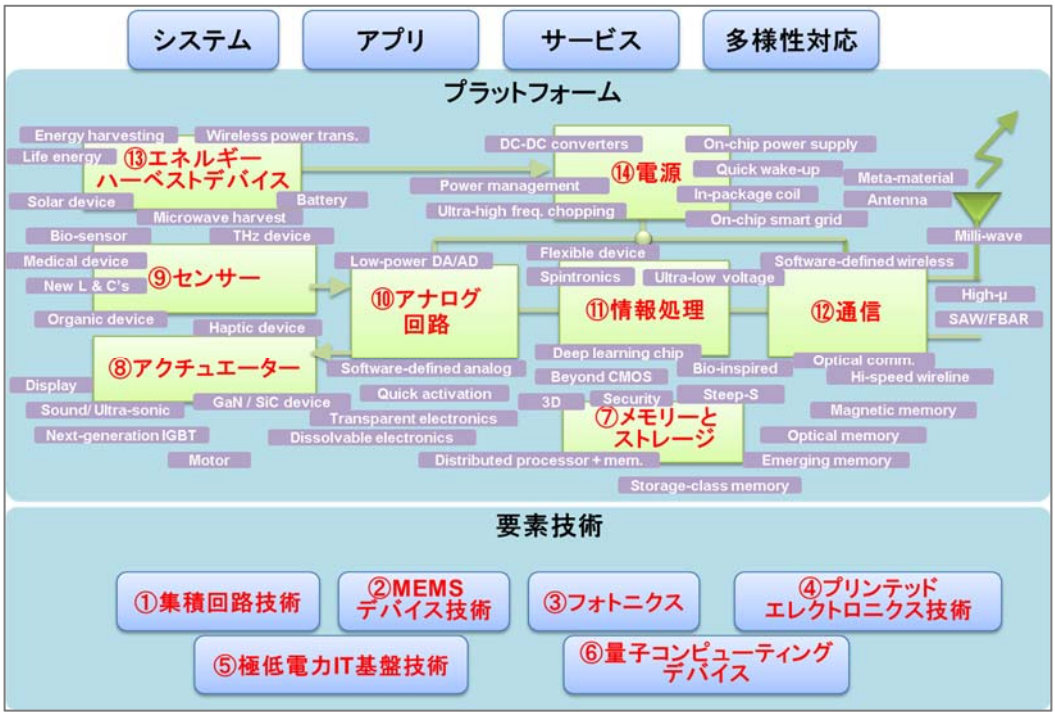


図 3.2.1 デバイス・ハードウエアの俯瞰図

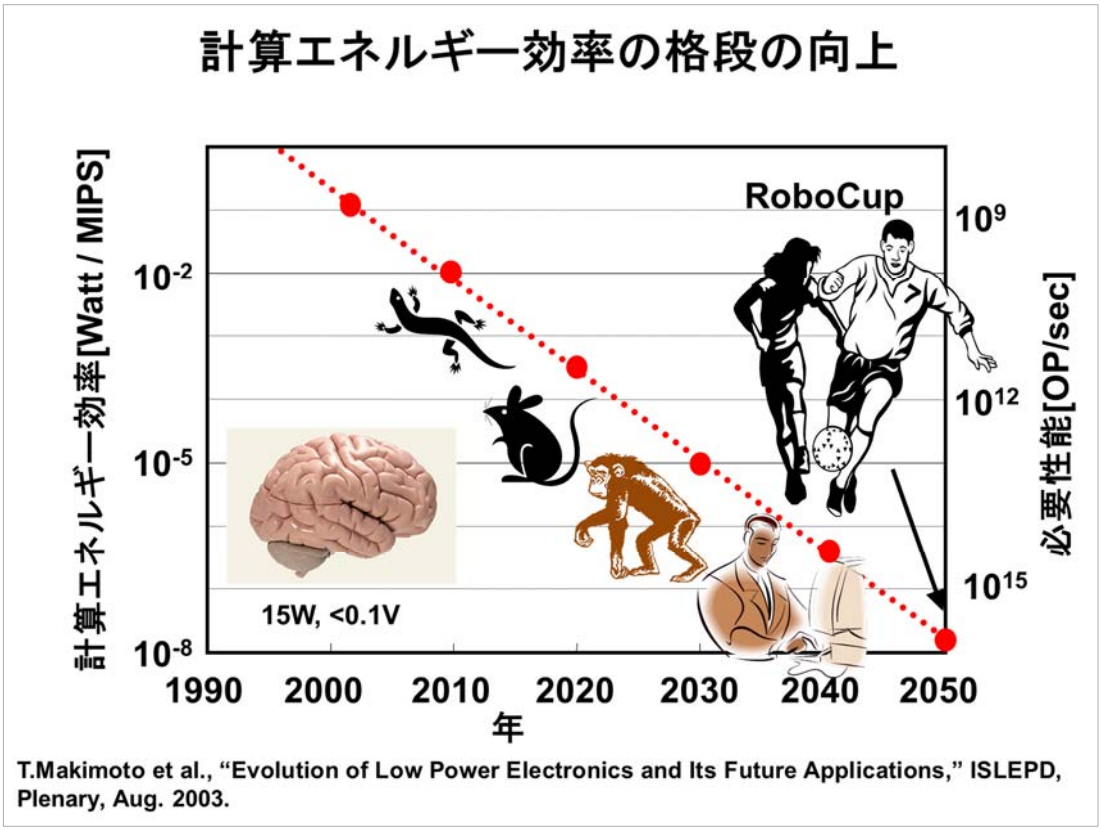


図 3.2.2 計算エネルギー効率の格段の向上

３．２．１　集積回路技術

（１）研究開発領域名

集積回路技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

集積回路技術は、デバイス技術・プロセス技術・集積化技術などを含むハードウエア技術、回路設計技術、システムアーキテクチャー技術など、幅広い研究開発領域を含むが、本項では、集積回路を実現するためのハードウエアに絞って、その動向について述べる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

集積回路は、大まかには、ロジック LSI とメモリーLSI に分けられる。これらの LSI を実現するためのハードウエア技術としては、ロジック LSI やメモリーLSI の両方に使われる、リソグラフィーなどの微細素子形成技術や 450mm 大面積ウエハー化技術などの高集積 LSI 共通技術と、ロジック LSI、メモリーLSI それぞれに固有に使われる集積化デバイス・プロセス・材料技術がある。

ムーアの法則に従って経済合理性のある集積システムを実現する上では、微細素子形成技術が最も重要である。しかしながら、現在リソグラフィー技術は大きな問題を抱えており、次世代のリソグラフィー技術である極端紫外線リソグラフィー（EUV：Extreme Ultraviolet Lithography）も、光源の寿命や信頼性を含め、多くの課題に直面している。露光装置だけではなく、レジスト、マスク、欠陥検査など多様な技術体系を含むことから、現在、各国で研究開発の支援がされている状況にある [1),2)]。しかし現段階では、まだ EUV を用いた量産技術のめどが立たないことから、延命技術として、既存のリソグラフィー装置を用いたダブルパターニング、トリプルパターニングなどの技術が使われているが、コストの増加を含めて、将来の微細化の大きな制限要因となっている。

リソグラフィー技術の停滞と高コスト化の中で、Si の 450mm 大面積ウエハー化は、製造コストの削減と集積回路の経済的限界を乗り越える上で切り札となりうる技術と考えられている [2)]。ただし、装置を購入する LSI メーカーの寡占化が進む中で、半導体装置メーカーにとっては、巨額の研究開発投資を担うリスクがあるため、非常に積極的とは言えない面があるが、米国や欧州では、コンソーシアムなどによる 450 mm 化技術に対する支援が行われており、LSI 製造技術上、今後予想される大きな技術変革の一つと捉えられる。

一方、ロジック LSI、メモリーLSI それぞれに固有な集積化技術に関しても、微細化の原理的な限界が見え始めている。一方、各 LSI を製造する企業の寡占化が進行中であることから、従来のように、その集積化技術が学会などで開示されることが少なくなりつつあるため、そのデバイス・プロセス技術を、各技術世代の共通技術として捉えにくくなっている。特に、大規模集積メモリーLSI は、これまで、コモディティ製品を中心に、企業ごとの垂直統合型集積化技術により、実現されており、共通技術としての課題を抽出しにくいが、主力製品である DRAM・NAND フラッシュ共に、平面内での微細化の限界が明確になっている。このため、特に NAND フラッシュメモリーでは、3 次元構造のセルが提案されており、すでに一部製品化されつつある。今後も、3 次元セル構造の追及により、高集積化が実現されていくものと考えられる。

メモリーLSIの最近の期待は、MRAM、ReRAM、PRAMなどの新規不揮発メモリーの進展と、これらの新メモリーLSIによる既存メモリーの置き換えやストレージクラス・メモリーなどの新しい用途の拡大である。これらの新メモリーは、現状で、セルに用いられる新材料・新構造などに多様な選択肢が存在しており、活発な研究開発が国際的に進められている。

一方、ロジックLSIの集積化デバイス技術に関しても、リソグラフィーの行き詰まりと経済性の壁により、微細化の限界が見え始めており、平面内での微細化は、10nm 以下の技術ノードで、早晩、停滞する可能性が高い。また、MOSFET のチャネル長は、厳しい短チャネル効果の顕在化により、近年では、技術ノードのサイズよりはむしろ長くなっており、10 nm を切ることは容易ではないと考えられている。

ロジック LSI の MOSFET においては、各技術世代におけるデバイス構造や特性に関する共通の課題を解決するため、デバイス・プロセス・材料技術は標準化されやすい傾向がある。近年の微細 MOSFET における最大の課題は、低消費電力化である。低消費電力動作を実現するためには、待機時のオフ電流を低減することと電源電圧の低下により動作時の電力を抑制することの両方が必要である。この目的に対し、短チャネル効果の抑制によるSファクターの改善とオフ電流低減は、極めて効果的であり、立体型素子として、極薄 SOI MOSFET、FinFET、Tri-Gate MOSFET、ナノワイヤ MOSFET などが精力的に研究されている [2]。Intelは、22 nm技術ノードにおいて、FinFETを実用化し、14 nm技術ノードにおいても、このデバイス構造を拡張している [3]。一方、ST マイクロエレクトロニクスは、IBM や Leti などとの共同研究により、極薄 SOI を用いたプラットフォームを提供している。

また、電源電圧の低減のためには、MOSFET の電流駆動力の向上と素子特性ばらつきの低減も極めて重要であり、多くの研究開発が進められている。電流駆動力向上のために、Si に代わる高移動度の材料を用いたMOSFETが精力的に研究されており、高Ge濃度SiGeチャネル、Ge チャネル、InGaAs などの III-V チャネル材料などを用いた MOS トランジスタの研究やこれらの異種材料を Si 基板上に高品質で形成するための研究開発が、先端ロジック LSI を開発している企業に加え、欧州の imec や米国 Sematech などのコンソーシアムで精力的に研究が進められており、現在の先端 MOS デバイス研究の最大のトピックとなっている [4,5]。

ポスト MOSFET スケーリングの方向性としては、MOSFET の動作原理を越えて急峻にオンオフ電流を変化できるデバイス（steep slope デバイスと呼ばれる）による集積回路とチップの 3 次元集積化が挙げられる。MOSFET の低電源電圧動作・低閾値化に対して、有限のSファクター（ドレイン電流を1桁変化させるために必要なゲート電圧であり、室温でおよそ 60 mV）が、その物理的限界を与えている。この限界を超えることを可能にする steep slope デバイスの研究が、世界的に活発化している。米国では、大学を中心としたsteep slopeデバイスに関する国家プロジェクトが進められており、先端LSI企業やimecなどのコンソーシアムでも、精力的に研究が行われている。現在最も有望と考えられている steep slope デバイスは、半導体中のトンネル電流をゲート電圧で制御するトンネル FET（TFETと呼ばれる）である。

3 次元集積化は、Si 貫通ビア（TSV）などを用い、バックエンドプロセスや実装技術の革新によって実現する方法から、NAND フラッシュで進められているフロントエンド・プロセスで実現するものまで、多様なアプローチが考えられる [2]。また、3 次元集積技術は、異

種材料や異種デバイスを Si ウエハー上に集積するヘテロジニアス・インテグレーションを含めて、多様なシステムの実現を可能にすると期待されている [4]。具体例として、光配線のためのフォトニクス部品を Si ロジック LSI と集積するシステムなどが注目されている。以上のように、3 次元集積技術は、多様な技術を用い、かつ多様なシステムブロックの組み合わせが可能であり、ポスト微細化世代において、集積システムに付加価値をもたらす技術として注目されている。

（４）科学技術的・政策的課題

集積回路ハードウエア技術開発全般に言えることとして、技術体系が極めて高度化し、かつ研究開発および工場の投資が莫大であるため、技術開発を推進できる企業が世界的に見て極めて少数に限られている点にある。先端メモリー分野では、三星・東芝・Hynix など、先端ロジック分野では、インテル・TSMC・三星などの一部の巨大企業のみで遂行可能な状況にある。

この状況の中で、日本では、多くの企業が産業競争力を失いつつある。また、先端集積デバイス関連の国家プロジェクトが相次いで終了し、その後の計画のめどがたっていないため、これまで保有してきた技術優位性を急速に失う危機にひんしている。特に、この傾向が顕著なロジック LSI 分野では、産業力を回復すると共に、将来に向けての技術開発を継続していくために、微細化だけに頼らない新しいデバイス技術の創成とこれを用いた新しい集積システムの構築、その産業的出口の探索が重要と考えられる。

一方、欧州では、半導体技術の継続的重要性をよく認識しており、欧州全体として半導体分野への研究開発投資を維持しており、450mm 化技術や 3 次元集積技術に対しても研究投資が進められている [2]。このような支援の後押しもあり、imec における国際的共同研究が活性化しており、世界のコンソーシアムの中で、最も活発な共同研究開発を展開している点は注目すべきである。日本においても、優れた基礎・応用研究能力を生かし、国際的共同研究開発拠点化を図るなどの努力を進めることが必要と思われる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

ロジック LSI では、今後のセンサーネット分野などの新しい市場を見据えると、極低消費電力化の要求が、一層重要になると考えられ、これに対応できる steep slope デバイスの研究が活発である。また、高移動度チャネル MOSFET や光電子集積システム実現などの多様な応用を目指して、異種材料集積や 3 次元集積のための研究プロジェクトも活発に進められており、欧州では、大面積 Si 上の III-V 層貼り合わせとその上のデバイス技術に関する研究プロジェクトが進行中である。

新電子材料の観点では、Graphene などの 2 次元材料デバイスの研究が、米国・欧州を中心に活発であり、特に米国の大学では、バンドギャップを有する 2 次元半導体である遷移金属カルコゲナイドの研究プロジェクトが、極めて活発に進められている。

更に、ビッグデータ処理や認識機能などの向上を目指して、脳型コンピューティングなどの新しいアーキテクチャーの集積回路の研究が活発化しており、IBM など企業においても研究プロジェクトが進行中である。脳型コンピューティングや認識チップに適したハードウエア、新デバイス・新材料の研究も今後活発化していると予想される。

（６）キーワード

EUV、450mm ウエハー、MRAM、RRAM、PRAM、FinFET、Tri-Gate MOSFET、ナノワイヤ MOSFET、Ge チャネル MOSFET、III-V チャネル MOSFET、steep slope デバイス、トンネル FET、3 次元集積、ヘテロジニアス・インテグレーション、遷移金属カルコゲナイド半導体、脳型コンピューティング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	近年の半導体産業全体の不振により企業での基礎研究は大きく減退している。一方、基礎研究を支えてきた国家プロジェクトは、2013-2014年に相次いで終了する一方、当該分野の新規プロジェクトは立案されないため、研究アクティビティに急ブレーキがかかっている。事情は国研や大学でもほぼ同様であり、文科省を含めて研究ファンドがほとんど枯渇しており、研究分野の変更を余儀なくされる状況となっている。現状では、これまでの研究投資により、あるレベルの研究が確保されているが、今後、基礎部分の研究アクティビティの急激な低下が危惧される。
	応用研究・開発	△	↘	近年の半導体産業全体の不振や企業再編に伴い、東芝のフラッシュメモリーを含むメモリー技術の一部を除いて、技術開発力は大きく低下している。特にロジック集積回路の先端技術開発の拠点が、国内では極めて乏しく、研究開発の空洞化がすでに起こっている。現状では、半導体装置メーカーが先端技術の応用研究をけん引している。企業では、人材の国外流出や、同じ社内でも他分野への転換も進んでおり、技術開発水準の低下が顕在化している。
	産業化	×	↘	製品化技術に関しても、近年の業績不振により、生産拠点が急速に縮小しており、東芝のフラッシュメモリー分野を除くと、産業技術力の大幅な低下がみられる。先端製造設備への投資が、長期にわたり、行われていないことから、ロジックLSI分野での競争力は、大きく失われている。我が国の産業競争力は、現状では、半導体装置メーカーに移行しているが、身近に半導体メーカーがないことに伴い、装置メーカーの競争力の維持も、長期的には難しいことが危惧される。
米国	基礎研究	○	↘	IntelやIBMなどの企業やSematechなどのコンソーシアムでは、引き続きある水準の基礎研究を維持している。ここ数年、半導体集積回路技術に関する大学への投資は極端に絞られてきている一方、２次元材料やナノバイオ分野などの研究ファンドが多く提供されているため、大学では、従来の集積回路技術とは異なる研究分野への転出が顕著であり、大学での当該分野における研究アクティビティは低下している印象がある。
	応用研究・開発	◎	→	インテルの開発力は引き続き強力であり、応用研究のリーダーシップを取っている。一方、IBMはロジック開発の世界的開発拠点の位置づけが弱まりつつある。コンソーシアムの拠点であるAlbany Nanotechnology Centerは、450 mmウエハー技術やEUV技術などを含め、引き続き、当該分野の世界拠点の一つの位置づけにある。生産拠点が、次第にアジアにシフトする中で、産業界を中心に、引き続き、国際的技術開発をリードする役割を担っている。
	産業化	○	→	世界的にプレーヤーの数は絞られている中で、インテルは、引き続き高い水準を確保している。その他にも、メモリーの製造技術やファウンダリーの立場で、競争力のある企業が　引き続き、競争優位性を保持している。ただし、先端ロジックLSIビジネスモデルが変化していく中で、今後の動向には流動的な面がある。
欧州	基礎研究	○	→	引き続き、imec、Leti などの機関が、研究拠点として研究開発を主導している。特に、国際的共同研究機関としてimecの存在感が高まっており、基礎研究から応用研究までをカバーしている。EUのファンドによるプロジェクトや共同研究も継続されている。
	応用研究・開発	○	→	先端LSIメーカーとimecとの活発な協業、薄膜SOIのプロジェクトでのLetiとSTマイクロエレクトロニクスとの協業など、研究開発拠点としてのIBMや日本の後退を受けて、欧州内での研究・技術開発は、むしろ活性化している印象がある。また、More than Mooreなどの新応用技術などにも積極的であるように見える。
	産業化	△	→	生産拠点としての競争力に不安定要素はあるものの、STマイクロエレクトロニクスでは、最先端技術ノードを維持している。得意とする製品に特化した戦略的経営と独自技術確保に成功しており、日本よりも、産業戦略上優れた立場を保持しているように見える。

中国	基礎研究	△	↗	先端的学会や論文誌での発表件数、論文件数は順調に増えてきており、徐々に実力を備えつつあるように見える。大学や研究所では、海外から多くの教員を迎えて、国際化を図っており、このような研究グループでは、研究水準も高い。
	応用研究・開発	×	→	企業レベルでの先端的技術開発は、まだ顕在化していないように見える。
	産業化	×	→	企業的には、先端的材料や技術を開発とする段階には、まだ至っていないように見える。
韓国	基礎研究	○	↗	企業の数は限定されるが、豊富な資金力と人材で高い研究水準を保っている。また、大学も力をつけており、海外での経験を積んだ教員を多く迎え、国際化も進んでおり、学会活動は、より活発になっている。
	応用研究・開発	◎	↗	製品化を意識した研究開発を、トップダウン型の指導力と豊富な資金力の下で、強力に進めている。国外の優秀な人材を、積極的に集め、効果的な技術開発が行われており、また先端分野への研究投資にも貪欲であることから、高い技術開発水準が実現されている。
	産業化	◎	→	引き続き、高い産業技術力を有している。特に、Samsungは、極めて強力な産業技術力をもつメモリー製品に加え、ロジックLSI分野でも着実に力をつけており、マーケティング力の強さも際立っている。ロジックLSIの分野で、インテル、TSMCと並ぶ世界の第三極の力をつけているが、先端ロジックLSIビジネスモデルが変化していく中で、今後の動向には流動的な面がある。
台湾	基礎研究	○	↗	国家的に半導体分野に注力しており、国研や大学での研究開発や産学連携が非常に活発である。大学の成果は、多少玉石混交の部分もあるが、質・量ともに充実している。企業においても、TSMCを中心に、豊富な資金力と人材により、意欲的に先端半導体デバイス開発を進めており、研究水準は大きく向上している。
	応用研究・開発	◎	↗	TSMCなど、企業は限定されるものの、豊富な資金力と人材により、技術開発水準をますます拡大している。Intelと共に、微細化技術、先端デバイス・プロセス技術導入に、最も積極的かつ貪欲であり、多くの海外パートナーとの連携にも意欲的である。
	産業化	◎	↗	TSMCを中心に、ファウンダリービジネスの大きな成功の結果として、豊富な資金力をベースとして、産業規模を大幅に拡大しており、追随を許さない高い産業技術力を有するに至っている。世界最大規模の半導体生産拠点としてプレゼンスは、ますます増している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1) ITRS ロードマップ, http://www.itrs.net/
2) 津田健二（監修）, 半導体 2014-2023、日経 BP 社 (2013)
3) Intel's Newest Microarchitecture and 14nm Manufacturing Process, http://newsroom.intel.com/docs/DOC-5677
4) 高木信一, “ポストスケーリング時代の CMOS デバイス技術”, 電子情報通信学会誌, vol. 92, no. 1 (2009) pp. 43-48
5) New materials for post-Si computing, MRS Bulletin, vol. 39, Issue 8 (2014)

３．２．２　MEMS デバイス技術

（１）研究開発領域名

MEMS デバイス技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

MEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）とは、半導体集積回路技術にマイクロ・ナノメカトロニクス的な高付加価値をもたらす More-than-Moore 技術の総称である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

近年の半導体エレクトロニクス分野においては、ウエハー口径が増大する一方でトランジスタの設計ルールの微細化が進み、同一性能の LSI であればウエハー１枚から取り出せるチップ数が急速に増大している。しかしながら、そのような超微細加工に必要な設備投資に伴って LSI の製造コストが上昇しており、それに見合った応用先を見つけることにもまた苦慮している。この点において、MEMS 技術はエレクトロニクスにマイクロ・ナノメカニクス的な高付加価値をもたらす More-than-Moore 技術として注目されており、国内外の大学・研究機関・企業において、実用化を目指したさまざまな MEMS 応用素子の研究開発が進められている。

その例として、加速度センサーやジャイロスコープ、高度計（気圧計）などの物理センサー以外にも、携帯電話用のシリコン・マイクロホン、自動車のタイヤの圧力・温度センサー、ボロメタ方式の赤外線撮像素子、各種ガス・匂いセンサーの研究が挙げられる。また、画像プロジェクター用のデジタルミラーアレイ（一般にはライトバルブアレイ）、水晶振動子を置き換えるシリコン振動子、インクジェット・プリンター、カメラの自動焦点機構・シャッター、光ファイバー通信素子、高周波無線通信素子などのアクチュエーター系の MEMS も、半導体にメカ的要素を盛り込む手法として実用化研究が進められている。さらには、マクロな世界と分子原子のナノスケールの世界を橋渡しするマイクロ理工学ツールとして、DNA チップ、タンパク識別のための μTAS（Micro Total Analysis System）、Lab-on-a-Chip などのセンサーの研究が進められている。また、これらの応用分野としては、多種多様なセンサーを必要とする自動車応用が最もけん引力が大きく、スマートフォンやディスプレーなどのコンシューマー・エレクトロニクスがそれに続いており、将来的にはバイオ・医療への飛躍が期待されている。

現在実用化されている MEMS デバイスには、主にシリコン系の材料が用いられている。特に単結晶シリコンは微細化することで機械的な柔軟性が高まり、共有結合性のバネ材であるためにクリープ現象も少なく、信頼性の高い材料である。最近では、集積回路プロセスの後工程（配線）で使用するアルミとシリコン酸化膜を構造体とした MEMS や、アモルファスシリコンをバネ材に用いる例なども開発されており、半導体シリコンプロセスだけでなく液晶フラットパネル分野で開発された TFT（Thin Film Transistor）技術による MEMS デバイスの開発も進んでいる。ただし、従来の MEMS 技術では半導体プロセスを使用してはいるものの、回路とのモノリシック集積化はいまだに標準化技術が完成しておらず、高度な

集積化 MEMS 素子を開発する際の懸案課題となっている。

［これまでの取り組み］

MEMS 分野は米国 DARPA プログラムが立ち上げた経緯もあり、UC バークレー校、スタンフォード、MIT 等の米国の大学とその周囲の企業が 1980 年代から産学連携を積極的に推進している。米国発の主な製品として、アナログデバイセズ社の加速度センサーやテキサスインスツルメンツ社の画像プロジェクター素子 DMD などが知られている。ただし、後発の ST マイクロ社が多軸の加速度センサー・ジャイロを開発してスマートフォン応用に供給し、Qualcomm 社によるミラー型以外の画像ディスプレー素子が開発されるなどの新たな動きもある。米国発 MEMS の特徴は、大学スピンオフやスタートアップ企業がファブレスで試作した製品から出発した例が多い。

欧州においては、CMP や MEMS CAP 等が MEMS のファウンダリサービス事業を展開しており、大学・研究機関がファブレスで研究開発することを支援している。また、フィンランド VTT 技術研究所やオランダ・トゥエンテ大学 MESA+、スイス EPFL 等に MEMS 系の研究開発拠点が整備されており、産学連携研究を推進している。

一方、我が国においては一般財団法人マイクロマシンセンターが中心となって経済産業省系の産学官連携型の国プロを主導してきており、これまでに、「マイクロマシン技術研究開発プロジェクト」（1991～2000）、「MEMS 用設計・解析支援システム（MemsONE）開発プロジェクト」（2004～2006）、「高集積・複合 MEMS（ファイン MEMS）製造技術開発プロジェクト」（2006～2008）、「異分野融合型次世代デバイス（BEANS）製造技術開発プロジェクト」（2008～2012）、「グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト」（2011～2014）等を実施している。これらを歴史的に俯瞰すると、材料、プロセス、デバイス、システム、通信・データ解析、サービスに至る一連の技術レイヤーに関わるプロジェクトとして発展しつつあることが分かる。現在で主に、MEMS センサーをビッグデータ・クラウドコンピューティングの入り口として位置づけて、MEMS 技術によって初めて可能となる新しいサービスへの研究開発を推進している。

また、2011 年度から 2013 年度にかけて、最先端研究開発支援プログラム「マイクロシステム融合研究開発」（東北大・産総研）、最先端・次世代研究開発支援プログラム「超高性能ポリマーエレクトレットを用いた次世代環境振動・熱発電システムの開発」（東大）、「集積化 MEMS 技術による機能融合・低消費電力エレクトロニクス」（東大）が実施されている。

［今後必要となる取り組み］

MEMS デバイスの製法は製造技術の完成度に大きく依存する。過去にも高アスペクト比ドライエッチング装置（DRIE：Deep Reactive Ion Etching）がシリコンの結晶異方性に基づくウェットエッチング技術を駆逐して SOI（Silicon on Insulator）ウエハーを使った MEMS デバイスの応用範囲を飛躍的に拡大したように、基盤的製造技術の研究開発への継続的な支援が望まれる。例として、DRIE の他にも常温ウエハー接合技術、レーザーを用いたダイシング技術、マスクレス露光器、ALD（Atomic Layer Deposition）製膜や圧電材料などの新材料成膜装置などが挙げられる。

［関連する学会］

MEMS 分野の学術発表は、国内では電気学会センサ・マイクロマシン部門が開催する研究会が規模として最大である[1)]。また、国際会議としては IEEE が毎年主催する International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)[2)]と、隔年で開催する International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)[3)]が重要学会として位置づけられる。また、Transducers が開催されない年には、そのアジア・パシフィック版である Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT)[4)]が開催される。

（４）科学技術的・政策的課題

従来型のエレクトロニクス産業が少品種大量生産型であるのに対して、MEMS 市場のほとんどは多品種少量生産型である。我が国のエレクトロニクス産業は大企業主導型であったため、年間１００億円以上の市場に対しては積極的に投資するのに対し、年間数億～20 億円程度の MEMS 市場に対しては本格的に着手していなかった。この間、米国・台湾では多くのスタートアップ企業がチャレンジングな製品開発に着手し、多産多死ではあるものの、多くの企業研究者が技術・ノウハウを蓄積して、現在のシリコン・マイクロホン、加速度センサー、画像ディスプレー、シリコン共振子等の成功例につながっている。この点を挽回するためにも、我が国でも技術者・研究者を育成するという観点から、小規模 MEMS 研究・事業が数多く成立せしめる支援対策が必要であろう。

ただし、ナノメートルに達しようとする高度な最先端エレクトロニクス微細加工技術と、現在ではたかだかサブミクロン程度の設計精度で十分に対応可能な MEMS との整合性が良いかどうかは議論が分かれるところである。ファンディング制度においては、数年後に必要な研究開発・設備への投資と、その先を目指した学術研究のための人材育成への投資を区別した議論が必要であろう。

MEMS 分野は異分野由来の技術を融合した新たなデバイスの創成を特徴としており、いわゆる技術のすり合わせが得意な我が国の文化を有効に生かせる分野である。この点で、国プロ等を通して当該分野の研究開発を活性化し、短期長期の両面で我が国の国際的産業競争力を強化することが望まれる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

エレクトロニクスの大規模生産能力を背景にして、年間１兆個もの分散無線センサーを消費すると言われるトリリオン・センサー社会のあり方に関する議論が国内外で進められている。主にはセンサー、無線通信機器の小型化・分散化により、人間の周囲のあらゆる情報（気温、圧力、照度、騒音、ガス、匂い、振動等）を計測し、これを時間と位置の情報にひも付けて社会インフラの監視やヘルスケア、食品・流通管理などのビッグデータ分野に応用するものである。トリリオン・センサー社会の実現には、MEMS センサー以外にも、それらの超小型無線センサーノードに対する電源供給方法の研究開発が必須の課題となる。近年では、太陽光、熱、電磁波、風、環境振動などをエネルギー源として、そこから電力を回収するマルチモーダル型のエネルギーハーベストの研究開発が急速に進みつつあり、将来的には分散型無線センサーから電池を駆逐することを目標にしている。現在、市販あるいは研究

開発されている MEMS エネルギーハーベストの発電能力は数十μW 程度であり、水晶時計の LSI をようやく駆動できる程度である。しかしながら、MEMS 分野の微細加工技術の発展とその他の周辺技術の成熟を考慮して発電能力を外挿すると、2030 年には現在の 1000 倍以上の 10mW 程度の発電が予想される。

また、集積化 MEMS 技術分野では、これまでは高性能センサーの信号処理や高周波 MMIC と MEMS の融合、DNA チップなどのマイクロ流体型 MEMS と回路の集積化が主な課題であった。一方、スマートフォン用の加速度センサーに代表されるコンシューマ・エレクトロニクス MEMS においては、加速度などの物理環境下でのチップ検査に要する費用割合の上昇が問題となっている。そこで、加速度や回転、音響入力などの物理量をチップ内部の静電的な力で模擬することで、チップの自己診断・解析を実施する BIST（Built-In Self Test）や BISD（Built-In Self Diagnosis）機能に集積化 MEMS 技術を活用する等の新たな検討が ITRS 等で進められている。

（６）キーワード

- MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）
- 集積化 MEMS
- マイクロアクチュエーター、マイクロセンサー、マイクロマシン

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	（一財）マイクロマシンセンターが中心となって、NEDO系の産学官連携プロジェクトを1991年から継続して実施しており、材料・プロセス・デバイス技術レイヤーでの蓄積が大きい。また、電気学会センサマイクロマシン部門（Ｅ部門）にMEMSに関する学術研究のコア研究者が集結しており、東北大学、東京大学、東京工業大学、豊橋技術科学大学、京都大学、立命館大学、兵庫県立大学、九州大学ほかで活躍している。参加人数的には、電気学会のセンサ・マイクロマシンシンポジウム[1)]には毎回500名を超える参加者があり、国内最大規模の会議である。ほかには、応物・集積化MEMS（数十名）、機械学会（数十名）がある。ただし、どの学会も若手の会員数が伸び悩んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	上記のマイクロマシンセンター関連の産学官連携研究により、応用を目指した国プロが盛んに実施されている。ただし、これまではコンソーシアム的な研究開発色が強く、実際に製品につながった例は少なかった。例外的には、東北大学のグループがMEMS系ファウンダリーとの連携により活発に製品開発を支援している。光ファイバ分野では、富士通が2000年前後に大規模光クロスコネクトを実現した。半導体エレクトロニクス企業の製造ラインをMEMSに転用し、外部からの製品開発・生産を実施するファウンドリ企業が複数あり、開発を支援している。つくばイノベーションアリーナの施設もMEMSファウンドリ機能を有しており、ユーザー数が増えている。トリリオン・センサー分野にMEMS技術を展開する機運が高まっており、無線センサー関連技術の産学連携研究が活発になりつつある。
	産業化	○	↗	WAKO社がMEMS加速度センサーに関する包括的な特許を取得している。RF-MEMS分野では、OMRON社とアドバンテスト社が高周波用途、半導体自動計測装置用のスイッチを製品化した。中規模の企業では、サンテック社が光ファイバVOAと可変波長光源によるOCTを、MEMS技術を用いて製品化した。最近になって、シャープ社がMEMSディスプレーの製品化に着手した。
米国	基礎研究	△	↘	DARPAの研究支援が一段落しており、基礎研究分野としてのMEMSはプレゼンスが低下しつつある。現在では、MEMS・ナノテクをキーワードとした研究費は非常に獲得しづらく、大学においても産業化を意識した研究にシフトしつつある。
	応用研究・開発	○	→	2000年前後には光ファイバ関連のMEMSスタートアップ企業が50社程度あったが、現在ではほとんど消滅したか、あるいは、有望な技術を持っているスタートアップは大企業に買収された。画像ディスプレーに関してはTI社がビジネスを維持し寡占状態にあり、似たようなデバイスの開発は停滞している。
	産業化	◎	↗	Pixtronix社がTI社のDMDや液晶に代わるシャッター型のMEMSディスプレーを開発し、QUALCOMM社に売却し、同技術をSHARPが導入している。携帯電話用のシリコン・マイクロホン、加速度センサー、シリコン共振子を製品化した。
欧州	基礎研究	△	→	EU-FP7関連予算は５カ国以上の連携研究に重点的に配分されており、一研究機関あたりの外部資金は伸び悩んでいる。ただし、分野・領域・地域で共同利用できる研究施設への投資は進んでおり、MESA+（オランダ）、EPFL（スイス）、LETI（フランス）などでMEMS研究拠点の整備が進んでいる。フランスCNRSのMEMS研究は、東大との国際連携研究によるところが大きい。
	応用研究・開発	○	↗	ドイツにおいてボッシュ社が中心となってMEMSプロセス装置の開発が進められている。フォルクスワーゲン社が自動車部品の規格化を進めており、その中に圧力センサー、加速度センサー等のMEMSセンサーが組み込まれている。フラウンホーファー研究所において、画像ディスプレー用の光スキャナーをITS用のレーザーレンジファインダーに転用する研究を進めている。
	産業化	◎	↗	携帯電話用の加速度センサー（６軸以上）はSTマイクロ社の寡占状態にある。

中国	基礎研究	△	↗	現状では特に見るところはないが、米国大学で博士号を取得した研究者が中国に帰国して、米国・欧州と国際共同研究を開始するケースが散見される。国際会議論への論文投稿件数が急速に伸びている。MEMS、トランスデューサなどの国際会議の招致件数が多い。
	応用研究・開発	△	→	中国オリジナルのMEMS製品はほとんど無い。
	産業化	◎	↘	MEMS製品の組み立てを中国で実施しているケースが多い。ただし、人件費の高騰により他国に移転するケースや、日本企業が撤収するケースが多い。
韓国	基礎研究	△	→	ソウル国立大学の半導体研究グループがMEMS研究を手がけている。また、テジョンのKAIST、光州科学技術院にもMEMS研究グループがあるが、研究者人口は少ない。MEMS研究者のほとんどは、米国で博士号を取得している。
	応用研究・開発	△	↘	LGエレクトロニクスがディスプレー応用のMEMS研究を実施していたが、数年前に停止した。サムソン電子がマイクロ流体型の画像ディスプレーを開発しているが、製品化には遠い。
	産業化	×	→	韓国発のMEMS製品開発例はおそらく無い。

（８）引用資料

1）国内研究会　電気学会「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
2）国際会議 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)、毎年開催
3）国際会議 Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems (Transducers)、西暦奇数年開催
4）国際会議 Asia Pacific Conference on Transducers (APCOT)、西暦偶数年開催

３.２.３　フォトニクス

（１）研究開発領域名

フォトニクス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

フォトニクスとは、光の発生、制御、検出などに関する物理、それを実現するための材料やデバイスなどの基盤要素技術と、それに立脚した応用分野の研究を包含する研究開発領域である。情報の取得・表示、伝送や処理など、CPS/IoT サービスのさまざまな場面で、今後フォトニクス技術の活用が期待されている。ここでは、特にデータセンターやサーバー等の IT 施設・機器で活かされる情報処理フォトニクス技術を取り上げる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

フォトニクスとは、光の発生、制御、検出などに関する基礎物理・基盤技術とその広範な応用分野を研究開発対象とする技術開発領域である。また、同じ電磁波として、光と電波に共通するコンセプトや物理は多く、電波工学とも密接に関係する技術開発領域である。

図 3.2.3 は、物理や材料、デバイスに関する基盤技術を基礎とした、研究開発領域としてのフォトニクスの広がりを、主にその機能に着目して示したものである [1)]。われわれの生活に大きな恩恵をもたらしている光通信はもちろん、光を用いたセンシングや各種の高精度計測技術、照明・ディスプレー技術や、太陽電池などの環境エネルギーフォトニクスなども、フォトニクスを形成する重要な研究領域である。また、加工や３D プリンターなどの造形技術、農業生産や医療応用も含めたバイオ技術などにおいても、フォトニクスが広く浸透しつつある。さらに、プロジェクションマッピングなどのエンターテインメントや芸術の分野においても、今後フォトニクス技術がさらに活用されていくものと思われる。また、図 3.2.3 のいくつかの機能領域にまたがる研究展開も活発に進められている。エンジンのレーザー点火や先進運転支援システムに関係する各種光技術などを扱う「カーフォトニクス」や、光の量子的性質を活用した通信や計測・加工技術などを含む「量子フォトニクス」などはその例といえる。

これらのフォトニクス技術は、われわれの身の回りで欠かせないものとなっているが、実空間をカバーし発展する将来の IT 社会インフラのさまざまな場面でも、高機能化の実現、新たな可能性の創出に貢献すると期待されている。中でも、CPS/IoT サービスやビッグデータにおいて、情報の処理に関係するサーバーなどの IT 機器との関連が深い領域が情報処理フォトニクスである。

情報処理フォトニクス

図 3.2.3 研究開発領域「フォトニクス」のイメージ

スマートフォンなどのモバイル端末の普及、ビッグデータの活用、CPS/IoT の進展や高齢化など社会構成の変化による IT サービスの多様化に伴い、処理すべき情報量は 2030 年には２YB（ヨタバイト）(2012 年の 1000 倍)に達すると予想されている [2]。この膨大な情報量を、消費電力の爆発的増大を抑えつつ、高速かつ省スペースで処理することが求められている。そのためには、エレクトロニクスとフォトニクスが両輪となり、データセンターやサーバーなどの情報処理システムにおける技術革新をけん引することが必要である。「情報処理フォトニクス」は、データセンターやサーバー等の IT 施設・機器・情報処理システムにおける、情報の演算、記憶、伝送、蓄積などの各要素で活かされる光技術を扱う領域であり、2030 年代に向け進展が期待される技術分野の一つと位置づけられている [3]。中でも、情報の伝送を担う光インターコネクト・光配線技術は、上記課題の解決に直結する重要な研究開発分野である。

光インターコネクト・光配線とシリコンフォトニクス

爆発的に増大する情報量を高速低消費電力で処理するために、CPU 内のメニーコア化やマルチ CPU 化、サーバークラスタ化など、情報処理システムの全ての階層で並列化アーキテクチャーの導入が必要と考えられており、インターコネクトの性能が今後ますます重要となる。その中で、特にサーバーラック間、ボード間、CPU-CPU 間やメモリー／ストレージとロジックを結ぶチップ間の情報伝送において、光インターコネクション・光配線への期待が高まっている。ラック間やボード間通信についてはデータコムとして以前から技術開発が進んできたが、チップ間の高速高密度光配線についても、その必要性が認識され研究開発が加速している。また、将来的にはチップ内配線も視野にいれた野心的取り組みも、基礎研究のレベルで進行している。

ラック間、ボード間の光インターコネクトについては、アクティブ光ケーブルが利用されている。100Gbps クラスの提供も始まり [4]、400Gps を超える高速・大容量化を目指した研究開発が進んでいる。また、データセンター規模の拡大などを視野に、伝送距離の長距離化も望まれている。高速大容量化に加えて、光モジュール、トランシーバーの小型化・低コスト化・低消費電力化も重要な課題であり、シリコン光導波路を基礎に各種光機能の小型集積化を可能にするシリコンフォトニクス技術の積極的活用が進んでいる。さらに、データセンター間通信に対する需要もますます高まっており、低消費電力大容量な小型光トランシーバーの開発競争が加速している [5,6]。ここでもシリコンフォトニクス技術の適用が進みつつある [6]。このように、ボード間より長い距離における光インターコネクトについては、実装技術をはじめとする実用化を強く意識した内容が研究開発の中心となっている。市場導入も急速に進んでおり、米国との開発競争が近く激化することが予想される。

チップ間の光インターコネクトでは、電気信号の劣化を抑制するため CPU の直近で光信号に変換し伝送することが重要であり、それを可能にする光インターポーザ技術の研究開発が注目されている。我が国においては、大型国家プロジェクトのもとで世界最高伝送帯域密度(30Tbps/cm^2)を有するシリコン光インターポーザの実現 [7]、シリコン光インターポーザにおける 125℃での光リンク実証 [8]など、顕著な成果が達成されており、世界的な認知度・競争力も高い。この成果は、いわゆるハイブリッド実装で実現されたものであるが、IBM 等が推進するモノリシック実装 [9]についても、今後の進展を注視する必要がある。また、ポリマー導波路などのボード上光配線技術も、その材料探索も含めて重要な研究課題である。

欧米やシンガポールでは、シリコンフォトニクス向けファウンドリーサービスが確立されつつあることにも注目したい。プロセスデザインキット（PDK）などの各種ツールの準備も進みつつあり、プラットフォーム化が加速すると思われる。シリコンフォトニクスは、光配線以外にもさまざまな応用の可能性が検討されており、それらの研究開発の加速にも貢献すると思われる。

（4）科学技術的・政策的課題

フォトニクス全般について、我が国は国際的に高い研究レベルを有している。将来にわたりこの優位性を確保するため、主に光インターコネクト・光配線、シリコンフォトニクスに関連し重要と思われる点を述べる。

① 適用可能性の明確化

ボード間より長い距離におけるインターコネクトについては、光技術の利用が浸透しつつあり、市場を意識した取り組みが求められる段階にある。一方で、チップ間については、技術の進展により、光配線のシステム導入の可能性が真剣に議論されるべき段階にきた。電気配線やシステム技術の専門家とともに、多角的視点での比較・議論を通して、その将来像を描き出すことが望まれる。

② 技術力の維持・活用

他国でのシリコンフォトニクスファウンドリーサービスの状況も考慮したうえで、我が国の有する高い作製技術を今後いかに維持・発展させ、有効に活用していくかについて、検討･判断が必要な時期にあると思われる。

③ 次なる技術革新につながる基盤要素技術

光インターコネクト・光配線の研究開発は、全体としては、システム化・産業化を意識した応用研究、実用化のフェーズに移行している。当該分野において、我が国が引き続き高いプレセンスを示すため、極低消費電力化や超高密度化を可能にするデバイス・回路技術、３次元集積化などの極限実装技術のほか、スイッチング／バッファリング／同期など、光配線の革新的高機能化や新たなアーキテクチャ（チップ内配線も含む）の構築につながる基盤要素技術の研究が継続的に推進することが不可欠である。また、IV 族系半導体光源などの挑戦的研究も重要である。なお、これらの基盤要素技術の進展は、光インターコネクト・光配線のみでなく、将来の IT インフラのさまざまな部分に革新をもたらすと期待できる。

④ 基盤技術の芽となる基礎研究への継続的支援

フォトニクス全般において、欧米および我が国がけん引している部分が多い。しかし、真に新しい概念などは、残念ながら欧米から発表されることが多いようである。フォトニクスの根幹である光と物質の相互作用に立ち返った基礎研究、新たなフォトニクス材料の探究、光を究極的に制御し利用しようとする試みなど、近視眼的評価にとらわれることなく、自由な発想に基づく基礎研究が行われる（行える）風土の醸成が必要である。これらの基礎研究が基盤要素技術へと展開し、我が国発の新たなフォトニクスの創成につながるはずであると確信する。また、個々の研究支援のみではなく、これら基礎研究を有機的に結びつける体制についても、検討が必要である。

⑤ 若手研究者の育成

フォトニクス全体に共通して、将来を担う人材の育成は極めて重要な課題である。特に情報通信やデバイス技術に関係する若手研究者（学生含む）の数は減少しているように思われる。2014 年のノーベル物理学賞はフォトニクスの進展に貢献した日本人研究者が受賞した。また、2015 年は国際光年である。このような機会も活用し、産学官がそれぞれの立場でフォトニクスの魅力と重要性を若い世代に示していく必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

本稿で扱った光インターコネクト・光配線およびシリコンフォトニクスに関連する国内大型プロジェクトとして、最先端研究開発支援プログラム（2013 年度終了）、その成果を継承した NEDO「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」がある。また、米国、欧州でも大型プロジェクトが終了・進行中である。最近の動きとしては、米国では製造イノベーション研究所の一つとしてフォトニクス統合製造研究機関（Integrated Photonics Manufacturing Institute）の設立が宣言され、プロジェクト公募が行われた。マッチングファンド形式で２億ドルを超える巨額の投資が予定されている[10]。一方、欧州ではシリコンフォトニクスの量産市場化を意識した EPSRC プログラム”Silicon Photonics for Future Systems”が、2013 年 12 月よりサザンプトン大学で始まっている[11]。ここには KAIST（韓国）も参画している。中国国内でもプロジェクトが進行中である。また、最近、Mentor Graphics がシミュレーション環境の統合、シリコンフォトニクス向け次世代 PDK の開発を発表[12]しており、注目される。

（６）キーワード

情報処理フォトニクス、光インターコネクト、光配線、シリコンフォトニクス、光インターポーザ、ファウンドリーザービス

（７）国際比較

ここでは、「応用研究・開発」、「産業化」の二つのフェーズについては、本稿で詳しく扱った光インターコネクト・光配線、シリコンフォトニクスに関連する研究開発を対象に、「基礎研究」については、フォトニクス全般の基盤研究（物理・材料・デバイスなど）も対象に含めて、その現状とトレンドをまとめた。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	フォトニクス全般において、高いレベルにある。しかし、新しいアイデア、概念の提案は残念ながら、まだ少ないのが現状のように思われる。2014年のノーベル物理学賞を契機に、自由な発想に基づく基礎研究の重要性が再認識されることを期待。
	応用研究・開発	◎	↗	大型国家プロジェクトに主導される形でここ数年目覚ましい進歩を遂げている。シリコン光インターポーザでは世界トップの成果を達成している。また、小型光トランシーバーなどにおいても、成果が得られている。
	産業化	△	↗	一部の技術については、産業化を目指しての本格的活動がスタートしており、米国との激しい開発競争・市場獲得競争にいかに勝ち抜くかが課題。標準化などに関する戦略も重要。
米国	基礎研究	◎	→	ファンディングに左右されるところが大きいが、おおむね堅調である。おもしろいコンセプトなどの提案も多い。大学での光配線関連デバイス研究も充実。
	応用研究・開発	◎	↗	大型プロジェクトやIntelやIBMなどの企業の研究開発により、大きく進展。最近では、IP-IMIが設立され、産学官をあげた応用研究の確立とその産業展開を強力に推進する動きがみられる。
	産業化	◎	↗	実用化、市場化を意識したMellanoxやCiscoなどによりシリコンフォトニクスベンチャー企業買収が進んでいる。今後の動向に注視が必要。
欧州	基礎研究	◎	↗	米国とは対照的に、地道な基礎研究が行われている印象。量子フォトニクスなども含めて、いくつかの注目すべき成果が見られる。
	応用研究・開発	◎	↗	FP７の枠組みで複数の大型プロジェクトが進行。全般にアクティビティは高い。ザザンプトン大学ではシリコンフォトニクスの量産市場化を意識したEPSRCプロジェクトも始まった。LETIではハイブリッド実装型でのインターポーザ開発も進行中。
	産業化	○	→	米国に比べて、産業化展開での進展はあまり見えていない印象。IMECやCEA-LETIでのファウンドリーサービスの存在は重要であり、今後の動向を注視したい。
中国	基礎研究	○	↗	論文数は出ているが玉石混交。米国・欧州帰りの若手研究者が材料研究関係で頑張っている印象。新規のアイデアの発表はまだ少ない。
	応用研究・開発	○	↗	国家プロジェクトでの研究推進が進められている。日本、欧米に追随する形で独自の研究はまだ少ないように思われる。また集積チップなどの研究開発の成果はまだ見当たらない。
	産業化	×	→	現状では、独自での量産化などの動きは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	米国帰りの若手が活躍している印象。新規のアイデアの発表はまだ少ない。 シリコンフォトニクス関係でのアクティビティは低いようである。
	応用研究・開発	△	↘	光インターコネクションの研究ではあまり成果が見えてこない。KAISTがサザンプトン大学の受託しているEPSRCに参加。
	産業化	×	↘	目立った動きはない。

シンガポール	基礎研究	○	↗	新規のアイデアの発表は少ないが、米国の著名研究者のもとで学位を取得して帰国した若手が活躍している印象。NTU、Astarが中心。シリコンフォトニクスデバイスなどの研究成果の報告は見られる。
	応用研究・開発	○	→	デバイスレベル、いくつかの要素を組み合わせた光回路などの報告はみられるが、産業化につながるような集積化技術に関する報告は見られない。
	産業化	◎	↗	具体的な製品の量産などはみられないが、IMEのファウンドリーサービスなどで存在感を示している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 本稿では、紙面の都合などのため、広範な「フォトニクス」のごく一部分にフォーカスしたものである。全般の動向については、光産業技術振興協会が毎年発行する光技術動向調査報告書などが参考となる。
2) 光テクノロジーロードマップ報告書 ー情報処理フォトニクスー,光産業技術振興協会, 2012。光配線以外の情報処理フォトニクスについても議論されている。
3) 光産業技術振興協会: 2030 年代に向けた光テクノロジーのロードマップ策定に関するプレスリリース http://www.oitda.or.jp/main/press/rm-j.pdf
4) http://www.japanese.molex.com/molex/products/family?channel=products&chanName=family&key=quatroscale_zqsfp_aoc
5) S. Yamanaka et al., “100 Gb/s CFP coherent transceiver enabled by pow-er-optimized DSP”, THPDP1-3, OECC/ACOFT 2014, Melbourne, Australia (2014).
6) http://acacia-inc.com/acacia-advantage/silicon-photonics-integration/
7) Y. Urino et al., “Demonstration of 30-Tbps/cm2 Bandwidth Density by Silicon Optical Interposers Fully Integrated with Optical Components”, Mo.4.B.2, ECOC 2013, London, UK (2013).
8) Y. Urino et al., “First Demonstration of A thermal Silicon Optical Interposers with Quantum Dot Lasers Operating up to 125 °C”, Tu.1.1.5, ECOC 2014, Cannes, France (2014).
9) http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/39641.wss
10) http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/10/03/fact-sheet-president-obama-announces-new-manufacturing-innovation-instit
http://manufacturing.gov/ip-imi.html
11) http://sotonfab.co.uk/index.html
http://www.southampton.ac.uk/mediacentre/news/2014/jan/14_14.shtml
12) http://www.mentor.com/company/news/mentor-lumerical-optical-design

３．２．４　プリンテッドエレクトロニクス技術

（１）研究開発領域名

プリンテッドエレクトロニクス技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

最適な材料を、最適な位置に、最適な量だけ配置する「コーティング＋パターニング」技術の代表例が印刷技術である。この印刷技術を用いてエレクトロニクスを構築する技術が、プリンテッドエレクトロニクス技術と称され、Si テクノロジーでは作製が困難な大面積、フレキシブルなエレクトロニクスを作製できることから、Si テクノロジーと相補関係にある技術として期待されている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスは、Si テクノロジーだけでは実現が困難な大面積かつ自由な形状へも電子機能を持たせることができるため、相補の関係の中で、利用されることが期待されている。プリンテッドエレクトロニクスはその機能のみならず、製造の観点からもさまざまな優れた側面を有する。例えば、現在の Si テクノロジーを支えているフォトリソグラフィー技術は、20nm 以下の微細化を実現しており極めて優れた技術であるが、「材料を削る工程」であるため、材料の消費量が大きい。それに対して、印刷技術は、「アディティブ工程」であり、材料消費量は最低限に抑えられる。我が国は、材料や印刷技術、および印刷装置において世界最先端の技術を保有しており、これを活かしたものづくりは、極めて重要である。

その一方で、エレクトロニクスを作製するとなると、単なる材料の“印刷”だけでなく、電気伝導性や絶縁性など、電気的な性能を確保しなければならない。印刷性と電気的性能の両立は材料やプロセスに大きく依存し、両立することが極めて難しい。このような状況の中で、プリンテッド技術を用いたさまざまなエレクトロニクス開発が進められている。その代表例が、ディスプレー、発光素子（LED など）、個体識別タグ（RFID タグ）、センサー、アクチュエーター、太陽電池などがある。ディスプレー、LED などはすでに印刷技術が多用されており、マーケットを形成している。その一方で、近年では、センサー技術の開発に注目が注がれている。

少子高齢化社会、災害、エネルギー、食料など社会における課題を最適な答えにより解決へと導くことを目的とした「サイバー空間と実空間をシームレスにつなぐ取り組み（Internet of Things（IoT）、または、Cyber-Physical Systems（CPS））」が注目を集め、多種多様で膨大な数の無線、有線のセンサーノードが生活環境へ浸透し始めている。多くの場合、シリコンテクノロジーによるセンサーがこの空間にちりばめられることでセンサーネットワークを形成する。ところが最近では、実空間の大きさに合わせた大きな面を覆う形で、かつ精度の高い情報収集が必要とされ始めている。これを実現する技術として大面積、かつコスト効率の高いセンサーネットワークの構築が不可欠と考えられるようになってきている。特にインターネット技術の普及に伴い、容易に情報を得ることができる様になり、その情報をインターネットで共有し、データマイニング、モデリングを通して、実世界をより快適に、

より最適化された空間へと導くためのフィードバックまでを可能にし、ハードウエアとソフトウェアの両面から研究開発が進められている。日々の生活が多様化している中、人々の生活の中で活躍しているエレクトロニクスも多様化し、実空間の情報を的確に獲得するためのインターフェースとしてアンビエント（環境）エレクトロニクスが盛んに開発されている。現代社会を支えるシリコンテクノロジーはフォトリソグラフィー技術による微細化に伴って「高度集積化、超消費電力化、高速動作化」を実現し、猛烈な進化を遂げてきた。その一方で、生活スタイルが多様化した昨今では、これらの高性能化とは異なる性能指標、すなわち「軽い、丈夫、人々に使いやすい」、など新たな性能指標が生まれ、人々の生活に浸透し始めている。このようなシリコンテクノロジーを補完する新しい技術が“プリンテッドエレクトロニクス技術”、“フレキシブルエレクトロニクス技術”である。

シリコンテクノロジーを補完する特徴とは、一体何であろうか？プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスを実現する技術の一つとして注目されている有機トランジスタを例に挙げるが、有機半導体以外の分子性電子材料にもほとんど共通する。すなわち、①プラスチック基材上に低温プロセスで製造できるため、軽量性・曲げやすさ、耐衝撃性、大面積性（大面積基材への製造の容易さ）を有する。②印刷プロセスによって、低環境負荷でかつ高スループットに製造できる。この特長を活かした新しい技術領域がまさにプリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、と呼ばれており、新たな応用分野の発展への期待も高まりを見せている。

では、シリコンテクノロジーを補完する特徴を活用すると、どのようなアプリケーションが実現できるのか？印刷で実現する大面積性や有機物の柔らかさを活かして、どのように機械を人にとって使い易くできるのか？分子性電子材料を使って、どのように地球環境と調和するエレクトロニクスを実現するのか？今、これらの問いに対する解を求めるための研究活動が世界中で競争となっている。

ウェアラブルエレクトロニクス

プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの出口の大本命として研究をされてきたのが、ディスプレー、個体識別素子（RFID タグ）、そして太陽電池であろう。シリコンテクノロジーが苦手とする大面積性が重要であり、かつ面積あたりのコスト効率が高いデバイスであるため、盛んな研究が行われてきた。

ところが最近では、その大面積性や柔らかさを活かす新しい応用例が注目され始めている。その代表例が、身に着けるエレクトロニクス、すなわちウェアラブルエレクトロニクスが、特に 2014 年に入り注目を集めている。ウェアラブルエレクトロニクスはより身近に生体信号や動作を獲得するためのデバイス総称として使われており、Google Glass やインテル Mimo がその代表例であろう。これらはあらゆるヒトを対象としており、いわゆる Population health（公衆衛生）を目的としているため、適応範囲が極めて広い。少子高齢化という社会背景のみならず、来る 2020 年東京オリンピックに向けてヒトを高い確度で計測するためのウェアラブルエレクトロニクスへの期待は高まっている。

ヒトを正確に計測するためには、よりヒトに近い位置にセンサーを取り付けることが求められる。また硬いセンサーを柔らかい体表に付けると、硬さの違いから違和感が生じるため、柔らかいセンサーが好ましい。エレクトロニクスを柔らかいプラスチックフィルムやゴムと

いった機械的特性に優れた基材に作製する研究開発は、国内のみならず世界各国で精力的に進められており、フレキシブルエレクトロニクス、ストレッチャブルエレクトロニクスと総称されている[1)-13)]。エレクトロニクスにおいて最も重要な「フレキシブル半導体層」の代表例として、InGaAs/InAlAs[14)]、単結晶シリコンナノ薄膜[15)]、金属酸化物 IGZO[16)]、MoS_2[17)]、グラフェン[18)]、ナノチューブ、アモルファスシリコン[19)]、有機半導体[4),5),8),10)]などが用いられている。この技術を用いて、フレキシブルディスプレー、フレキシブルセンサー、フレキシブル個体識別（RFID）タグへの応用が検討されており、市販され始めたものもある。このようなフレキシブル、ストレッチャブルエレクトロニクス技術は、生体計測用のウェアラブルエレクトロニクス技術へも応用展開され始めている。

印刷技術の産業応用

大きな面積、複雑な形状でも低コストでデバイスを作製するための印刷技術が注目されており、エレクトロニクスから医療の分野に至るまで幅広くその技術が広がり始めている。印刷技術は、必要な材料を、必要な場所に、必要量のみ塗布することができることから、低環境負荷・低エネルギープロセスである。従来の半導体製造装置などと比べても装置コストが比較的安価であることから容易に導入することができるため、その波及効果が極めて大きい。プリンテッド技術を用いた産業界の新たな取り組みを以下の通りまとめた。

プリンテッドエレクトロニクス

大面積プラスチック基材の上に、トランジスタ素子のような高精度のパターニングを要する素子をいかにして高スループットで製造するか？インクジェットなど印刷プロセスをエレクトロニクスの製造に応用することを目指したプリンテッドエレクトロニクスに近年大きな期待が寄せられている。

印刷とは、コーティングとパターニングを同時に行う技術であり、材料効率が極めて高い。一方、シリコンテクノロジーを中心とする現在のエレクトロニクスを支えているフォトリソグラフィー技術は、ナノレベルまでの微細化を実現する一方で、削るプロセスであるため、材料効率が良くない。そのため、資源に乏しい我が国において、持続可能な産業構造への改革を推し進める上で、プリンテッドエレクトロニクスの技術は、極めて重要である。

印刷で作製するプリンテッドエレクトロニクスは、（1）大面積に作製しても低コストであること、（2）フォトリソグラフィーと整合性の良くない分子性ナノ材料のパターニングを行うことができること、（3）インクジェットのようなデジタルファブリケーションを使った新しい製造手法であること、という大きな特徴を有している。これら既存のエレクトロニクス作製で多用されるサブトラクト工法の代表格であるフォトリソグラフィープロセスとは全く異なり、アディティブ工法であるため、材料効率、生産効率が極めてよい。さらに、印刷技術では、インク材料から、印刷版、印刷装置までの整合性が必要であり、いずれにおいても我が国が最先端の技術を持っている。

有機材料はバラエティーに富み、さまざまな官能基や修飾を施すことで、多様な性質を示すだけでなく、溶剤に溶かし、インクやペーストとして印刷することが容易である。このためプリンテッドエレクトロニクスを実現する上で有機材料は欠かすことはできない。リソグラフィー技術に頼ることで微細化の一途をたどり成長してきたシリコンテクノロジーとは異

なり、印刷技術が得意とする数十ミクロンから数ミクロンまでのパターニングで、低コストに大面積にエレクトロニクスを作製することを目標としている。大面積エレクトロニクスの代表はディスプレーと太陽電池であろう。実際、昔のディスプレーは奥行きのある大きな電化機器であったが、薄くなることで、大型化（大面積化）に成功してきた。最近では、薄膜化にとどまらず、フレキシブル、ローラブルといった機械的な柔軟性を目指し新たな研究開発が進められている。

プリンテッドエレクトロニクスは、インク材料、インクの基材への転写、乾燥、溶剤を含む材料同士の界面制御など、これまでのデバイス作製プロセスにはなかった新たな挑戦がある。国内では NEDO プロジェクトにおいて「次世代プリンテッドエレクトロニクス（JAPERA)」を中心に精力的な研究が進められている。

フレキシブルエレクトロニクス

印刷により大面積製造する際に求められるのが、信頼性である。エレクトロニクスが大きくなると信頼性が損なわれることは容易に想像できる。このような大面積エレクトロニクス、プリンテッドエレクトロニクスをプラスチック基材に製造することによって、軽量・薄型性、落下時の耐衝撃性を改善できる。例えば、フレキシブルなディスプレーは、プラスチックシートを持ち運ぶ感覚で容易に携帯することができ、場所によらず情報を得るツールとして期待できる。家庭用テレビは大面積化が進んでいるが、今後さらに大きくなれば、玄関を通ることが困難になったり、エレベーターに乗せることが困難になることも容易に想像できる。もし、大面積ディスプレーであっても、フレキシブルであれば丸めて持ち運ぶことができ無理なく運搬、設置することができる。このような魅力に動機付けられ、企業を中心にフレキシブルディスプレーの実用化に向けて、活発な研究が行われている。

表示素子として有機 EL や電気泳動素子などが知られており、プラスチックフィルム上に作製された薄膜トランジスタ駆動回路で制御することでディスプレーながら柔軟性を兼ね備えることができる。これまでに、精細度、発光輝度などの観点から優れたフレキシブルディスプレーや電子ペーパーが数多く報告されている。例えば、リコー（株）ではオール印刷プロセスで作製した 200 ppi の高精細ディスプレーを報告しているほか、大日本印刷（株）ではカラー・フレキシブル有機 EL ディスプレー、凸版印刷（株）では電気泳動型の大型高精細フレキシブルディスプレーを実現している。

フレキシブルディスプレーを駆動するフレキシブルバックプレーンには、金属酸化物半導体（In-Ga-Zn-O：IGZO）トランジスタ、薄膜 Si トランジスタ、有機半導体トランジスタが用いられてきたが、2014 年に開催されたディスプレー最大の国際会議 Society for Information Display: Display Week においては、フレキシブルディスプレー関連の成果報告の内、実に 60%が IGZO を用いたトランジスタに関するものであった。また駆動方式においては、アクティブマトリックス型有機 LED ディスプレー（AMOLED）が６０％、電子ペーパーが 25%、アクティブマトリックス型液晶ディスプレーが 5%と、次世代フレキシブルディスプレーの研究としては、AMOLED が圧倒的に研究されていることが分かる。フレキシブルディスプレーの開発動向を国別で見ると、日本は 31.4%、アメリカと台湾が 22.9%、その後、中国、韓国、オランダ、ベルギーと続き、この分野では日本の存在感が際立っている。

フレキシブルディスプレーのバックプレーンとして多用され始めている金属酸化物半導体

IGZO は通常はスパッタにより成膜されているが、近年では塗布型による IGZO 成膜も始まっており、プリンタブルエレクトロニクスとの整合性についても検討が進んでいる。

フレキシブル RFID タグ、センサー、特にウェアラブルエレクトロニクス

フレキシブルディスプレーのみならず、フレキシブル個体識別素子（RFID）やフレキシブルセンサー、アクチュエーターに関しても研究が進んでいる。フレキシブルディスプレーと並んで応用が期待されているのが RFID（Radio Frequency Identification）タグ、すなわち電波により個体識別する微小チップである。Si をベースとした RFID タグは非常によく知られており、さまざまな物流に利用されることで、近年トレーサビリティにおいて重要な役割を果たしている。最近では、プラスチックや紙などフレキシブル基材上に RFID タグを作製することで、さらに多くの用途へ活躍の場を広げつつある。材料、プロセス技術、回路技術などあらゆる側面から研究開発が行われ、実用化に向けて飛躍的に高性能化している。近い将来は、バーコードに置き換わる技術として期待されている。

フレキシブル太陽電池

ディスプレー、センサー、RFID とならび、プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの大きな柱の一つは太陽電池である。色素増感型太陽電池で 11.9%（シャープ）、バルクヘテロ型有機太陽電池で 10.7%（三菱化学）のエネルギー変換効率が報告される中で、近年大きな注目を集めているのが鉛ペロブスカイト型太陽電池であり、初めての報告から短期間で効率が改善され、現在では 17.9%が報告されている。寿命やコストの観点から閉塞感があったフレキシブル太陽電池においては大きなブレークスルーといえる。

印刷技術による生体造形、３D プリンターの活用

必要な材料を必要な箇所に必要量だけ対置できるという「印刷技術のオンデマンド性」は、医療の現場で大きな注目を集めている。代表的な例は、手術前にＸ線ＣＴやＭＲＩにより患部、内臓部の形状データを取り出し、３Ｄプリンターにより造形することで質の高い手術を提供する取り組みである。骨、臓器、血管に至る微小な形状も再現できるため、医療の現場で大きな反響を呼んでいる。単なる形状のみならず、異種材料を配置できることから臓器の硬さなども制御できる「生体質感造形」なども取り組まれている。今後は、フレキシブル電子デバイスと組み合わせることにより電気的な生体信号を模倣する取り組みなどが検討されている。

また、デジタルデータから造形することで、鋳型を必要としたさまざまなものづくりが根本的に変化する。経済産業省は 2020 年時点での経済波及効果は約 21.8 兆円と予想している。製品が人に合わせるのではなく、人に合わせたものづくりが行われる中で、あらゆる製品が少量多品種化する傾向にあるため、３D プリンターの活用の場は医療や産業のみならず、あらゆる場で見いだされていくとみられる。

（４）科学技術的・政策的課題

＜科学技術的課題＞

材料の信頼性・安定性の向上

プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの実用化に向けての最大の課題は、材料の信頼性と安定性と考えられている。主要材料として使用されている有機材料はファンデルワールス力による弱い結合で形成されているため機械的な柔軟性を有するが、電気的な特性を考慮した場合には電気的特性の不安定性、イオンなどの不純物の効果など、課題が多い。しかしながら、近年の材料技術の進展によって、機械的柔軟性と電気的特性、安定性を兼ね備えた材料も開発されており、大気による劣化がほとんど問題にならないレベルまで低減されつつある。材料の本質的な安定性に加えて、酸素や水など外因的要因も無視できない。

プリンテッドエレクトロニクスの実用化を考えればさらに今後は、溶解性の高い半導体材料においても、より高い電気特性、信頼性、安定性が期待されている。一方で、これらの有機半導体材料の性能や安定性は、トランジスタ構造にしたとき絶縁膜や電極の組み合わせによっても異なってくる。すなわち、絶縁膜/半導体/電極との界面制御などより高度な材料間のすりあわせを進めてより高い安定性を実現する必要がある。

また、単なる保管時の安定性だけでなく、通電時の安定性、曲げたときの信頼性、動作温度の向上、静電放電対策などの信頼性試験など、実用化に向けたより高度な信頼性、耐久性試験が行われる必要がある。さらに、フレキシブルデバイスの場合、プラスチックフィルム上に作製しているため、機械的に折り曲げることが可能であるが、曲げとともに各層間には大きな歪がかかる。電気的特性のみならず各層の密着性が、フレキシブルデバイスの信頼性を決める重要な要素となるであろう。

要素技術開発からプロセスの高度化とすり合わせへ

プリンテッドエレクトロニクスにおけるプロセスについては、既にオール印刷で 200 ppi のアクティブマトリックスが試作されるなど、要素技術はかなりのレベルにまで到達していると言える。今後は要素技術開発からプロセスの高度化とすり合わせへの開発にシフトしていくであろう。

例えば、印刷で高精細化を進める一方で、タクトタイム、均一性、良品率、位置合わせ精度などのすべての所望の性能を同時に達成する必要がある。また、高機能デバイスを作製するためには、薄い膜や厚い層を効率よく使い分ける必要があるが、一種類の印刷プロセスで実現するのは極めて困難である。そこで、将来的には、一種類の印刷プロセスではなく、複数の印刷プロセスが使われることになるであろう。異なる印刷プロセスで、どのように品質をそろえていくかが重要となる。

また、印刷技術とロールツーロールプロセスとの融合は重要である。最近では、ロールツーロールのスクリーン印刷が、フレキシブル基材やディスプレー用の配線に使用されており、量産ラインで 100 μm 以下の解像度が実現されている。今後、配線などの受動素子だけではなく、薄膜トランジスタのような能動素子もロールツーロール印刷プロセスで製造する技術の開発を目指して、世界中で競争となっている。

プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスを実用化する上でのもう一つの課題が、SiLSI との接続である。大面積を覆うセンサー、柔らかいセンサーなどはインターフェースであり、それだけではサイバー空間（外部）との情報通信ができない。その

ため、プリンテッドセンサーやフレキシブルセンサーにはSiLSIテクノロジーにより作製された情報処理回路（CPU）、無線通信回路を接続する必要がある。電圧などの電気的な接続はもとより、柔らかいセンサーと硬いSiLSIをどのように安定して接続するかなど、機械的な接続においても、すなわち実装技術でも大きな課題を抱えている。実際に、折り曲げ時のトランジスタなどアクティブ素子における信頼性試験は、これまでのSiテクノロジーで培われてきた知識だけでは網羅できず新しい学術領域とも言える。

その困難な一例をウェアラブルエレクトロニクスの開発で垣間見ることができる。人が身につけるエレクトロニクスは極力存在感、装着感を無くしたいため、フレキシブルセンサーは理想的な形であると言える。その一方で、人が常時身につけるため、絶えず動き、振動、熱、発汗に伴う湿度変化、そして外部に衝突したときの衝撃が加わる可能性があり、その信頼性試験が行われている。この際には、上述したとおり、柔らかい部分と硬い部分の接続部に大きな負荷がかかり、信頼性を低下させる要因となる。今後、産学官が連携した取り組みが必要である。

＜政策的課題＞

経済産業省の調べによると、我が国の3Dプリンターの累計出荷台数はわずか3%と、アメリカや欧米諸国と比べて大きく出遅れている。この理由として、繊細な製造ノウハウが生かせる装置になっていない、高価な材料を輸入しなければならない、メンテナンスに長時間かかる等が挙げられている。アメリカ、ドイツ、中国では産学官が連携して、国の重要技術と位置づけて研究開発がなされている。我が国においても、装置の技術力、材料の技術力を結集した国を挙げての取り組みが必要であると言える。

医療機器における訴訟（PL法訴訟）は、フレキシブル技術、プリンテッド技術を医療機器へ実装していく際に意識しなければならない点になる。国内ではフレキシブルエレクトロニクスやプリンテッドエレクトロニクスをウェアラブルエレクトロニクスへ応用する研究が精力的に進められている。目下、生体に貼り付けたときの信頼性試験を行っているフェーズである。その一方で、体内埋め込み型の研究は、欧米で精力的に進められているが、国内では大学や国の研究機関に限られており、産業界での取り組みは目立っていない。これはPL法訴訟を懸念することに起因すると考えられている。国内の医療機器に関するPL訴訟に関しては、一般社団法人　電子情報技術産業協会（JEITA）
医療機器分野へ参入のための医療機器への電子部品供給ガイド(2014年3月出版)より
（主査：梶田　栄　氏（株）村田製作所）に詳しく取りまとめられている。フレキシブルエレクトロニクスやプリンテッドエレクトロニクスを体内埋め込み型のエレクトロニクスへと展開していくためには、法律の整備も含めて取り組んでいく必要があると指摘されている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

３Dプリンターを用いた個別化医療に関しては医学において新たな知見と新技術をもたらしている。国内では新たなイノベーションを創出する大型プロジェクトとしてJST /Center of Innovation（COI）が進められており、ウェアラブルエレクトロニクスを用いた生体計測に着目したプロジェクトが東京大学、大阪大学、名古屋大学などで進められている。大阪大学では柔らかいエレクトロニクスを用いて日本人を元気にするという目標に次世代の生体イ

ンターフェースの開発が進められている。JST/ERATO 染谷生体調和プロジェクトにおいては、有機トランジスタ技術を用いたフレキシブル有機エレクトロニクスセンサの開発が進められており、次世代のウェアラブルエレクトロニクスを目指した取り組みが注目を集めている。2014 年度に発足した次世代脳研究プロジェクト「革新脳」プロジェクトにおいてもフレキシブルセンサーにより高度な社会性を持つ霊長類の脳活動を計測するプロジェクトが発足している。

国内におけるプリンテッドエレクトロニクス開発では、NEDO の次世代プリンテッドエレクトロニクス研究組合（JAPERA）が中心と精力的な研究開発が進められている。

（６）キーワード

プリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、３D プリンティング、ウェアラブルエレクトロニクス

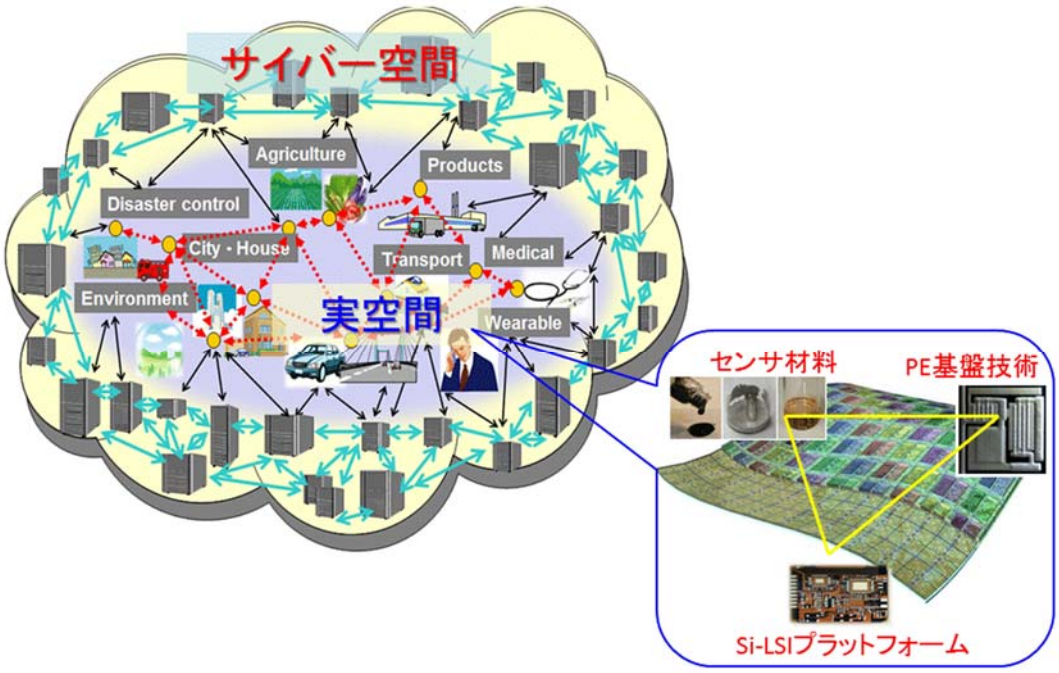


図 3.2.4 IoT（CPS）で活躍するプリンテッドエレクトロニクスの概念図

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	印刷解像度や生産性、耐久性においても印刷技術では世界を圧倒する技術があると言える。さらに有機材料やナノ材料開発がけん引する形で高機能インク、フレキシブル材料など最先端のエレクトロニクス材料が開発されており、世界に誇る材料群を形成している。
	応用研究・開発	◎	↗	材料にけん引されて、優れたプリンテッドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス技術および材料の高機能化、デバイスの高性能化に関する研究が進められている
	産業化	◎	↗	大面積センサー、ウェアラブルエレクトロニクス、RFIDタグ、ディスプレー、ＬＥＤ照明など応用研究から産業化への流れが進んでおり、その技術力は世界トップレベルにあるといえる。
米国	基礎研究	○	↗	印刷技術、インク開発能力においては日本が勝るが、日本の技術力を導入する形で今後大きく伸びていく可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↗	DARPAなどの大型プロジェクトがけん引する形で、生体・医療に関連する極めて大規模な研究が進められている
	産業化	◎	↗	応用研究・開発と一体となり、産業化が進められている。
欧州	基礎研究	○	↗	フレキシブル材料、伸縮材料やその構造などの研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	フレキシブルではないが、ウェアラブルセンサーにおいてはベルギーのimecやオランダのHolstセンターがけん引役となり、優れた生体計測技術を提供している。
	産業化	◎	↗	応用研究・開発と一体となり、産業化が進められている。
中国	基礎研究	△	→	目立った活動は報告されていない
	応用研究・開発	△	↗	目立った活動は報告されていないが、重要なフィールドであることから、関連する国際会議などを積極的に誘致しており、今後大きな展開が見込まれる。
	産業化	△	↗	ディスプレーやスマートフォンの技術を背景に、量産技術や製品展開力には十分な力があるものと考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	
	応用研究・開発	○	↗	フレキシブルディスプレーを中心に、積極的な研究開発が行われている。
	産業化	○	↗	ディスプレーテクノロジーの次の出口として精力的に産業化が検討されていることから、量産技術・製品展開にも注力している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) H. Gleskova et al,. Appl. Phys. Lett. 75, 3011 (1999).
2) T. Sekitani et al., Appl. Phys. Lett., 86, 073511 (2005).
3) T. Sekitani et al., Appl. Phys. Lett., 87, 173502 (2005).
4) T. Kodaira et al., Journal of the Society of Informatin Displays 16, 107 (2008).
5) K. Nomura et al., Nature 432, 488 (2004).
6) T. Takenobu, et al., Appl. Phys. Express 2, 025005 (2009).
7) F. Nihey, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 41, L1049 (2002).
8) S.-H. Hur et al., Appl. Phys. Lett., 86, 243502 (2005).
9) H. Gleskova et al,. J. Appl. Phys., 92, 6224 (2002).
10) L. Han et al., Appl. Phys. Lett. 96, 042111 (2010).
11) A. Jedaa and M. Halik, Appl. Phys. Lett. 95, 103309 (2009).
12) Y. Watanabe and K. Kudo, Appl. Phys. Lett. 87, 223505 (2005).
13) Y. Kato et al., Appl. Phys. Lett., 84, 3789 (2004).
14) T. Sekitani, et al. Nature Materials, 9, 1015 (2010).
15) K. Ishida, et al., IEEE Journal of Solid State Circuits, 45, 249 (2010).
16) K. Ishida, IEEE Journal of Solid State Circuits, 46, 285 (2011).
17) Y. Zhou, et al., Nano Letter, 4, 2031 (2004).
18) L. Han et al., Appl. Phys. Lett., 94, 162105 (2009).
19) M. Takamiya et al., IEEE J. Solid-State Circuits 42, 93 (2007).

３．２．５　極超低電力 IT 基盤技術

（１）研究開発領域名

極超低電力 IT 基盤技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

極超低電力 IT 基盤技術は、エネルギー効率の極めて高い極超低消費電力回路・システムを実現するための統合的 IT 基盤技術である。エネルギー効率の追究には、デバイスから回路・システム、さらにソフトウェアとサービスまで含めた広範な技術の連携が求められ、アプリケーションを具体的に見据えた研究開発が重要になる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ムーアの法則の減速に伴い、研究開発の主な領域は、デバイスの微細化とそれに伴う課題の解決から、さらに回路とシステムが連携しエネルギー効率を追究する新時代に入った。エネルギー効率の高い回路・システムの研究開発なくして、これまでのように 10 年後に IT の性能が 100 倍に改善されることは望めない。以下では、回路設計、システム設計、見据えるべきアプリケーション領域、高効率回路、高効率システム、プロセス・デバイスと回路・システムの連携について、最重要課題と研究動向を述べる。

回路設計の最重要課題

回路設計の最重要課題は以下の 5 点である。

① 低エネルギー・低遅延のデータ転送技術：
データ転送は演算に比べて数桁大きなエネルギーを消費するため優先順位が高い。

② ロジックと SRAM の極低電圧動作と電源回路：
エネルギー消費を最小とする電源電圧は素子特性の揺らぎやばらつきで決まる。この下限電圧をさらに下げるための回路上の工夫が求められる。特に SRAM は低電圧動作が難しい。ロジックも大規模になるほど低電圧化が困難になる。一方、効率の高い電源変換回路があれば、アナログやインターフェースの回路も効率改善できる。したがって電源回路の研究も重要である。

③ 素子特性の揺らぎやばらつきを考慮した回路設計手法：
揺らぎやばらつきの原因を探り削減することが求められる一方で、例えば統計確率を用いて無駄な設計マージンを削るなどの新しい設計手法も求められる。設計自動化(EDA)やデバイス・プロセス技術との連携も重要である。

④ クロック分配やフリップフロップなどの低エネルギー同期設計技術：
同期のための電力が総電力に占める割合は少ない。クロック分配およびフリップフロップの高効率化は重要な研究課題である。

⑤ 異種技術 3 次元集積設計技術：
パッケージ内にシステムを集積することで、データの転送効率を高めエネルギー効率を改善できる。ロジック、メモリー、アナログ、センサー、発電素子などのチップを積層集積する技術の研究開発が課題である。

システム設計の最重要課題

システム設計の最重要課題は以下の 3 点である。

① エネルギー効率の高いネットワーク・オン・チップ：
従来のバス接続ではエネルギー効率が低い。効率の高いネットワーク・オン・チップの研究が重要課題である。

② エネルギー効率の高いメモリーシステム：
メモリーのアクセスは演算よりも数桁大きなエネルギーを消費する。メモリーアクセスをできるだけ低減するシステムが求められる。

③ 無駄のない制御方式：
例外処理のためにエネルギーを無駄にしていることが多い。目標性能を処理速度からエネルギー効率に変えたときの制御方式の見直しが必要である。

今後関心が高まるアプリケーション領域

今後の研究開発で見据えるべきアプリケーション領域は以下の 5 点である。

① 医療・ヘルスケア：
日本は先進国の中で最も早く少子高齢化社会を迎える。

② グリーンエネルギー：
日本のエネルギー政策見直しに伴い検討が急務である。

③ 異種技術集積：
センサー端末など、実世界とのインターフェースで求められる。

④ サイバーフィジカルシステム：
ビッグデータ取得のためのセンサネットワーク。

⑤ スマート社会システム：
高度情報化社会のインフラストラクチャーになる。

高効率回路の研究動向

高効率回路の研究において、日本は世界をリードしてきた。

1995 年から 2005 年にかけて、産業界が中心となり、電源の遮断・導通やトランジスタのしきい値電圧を制御する回路技術の研究開発が世界に先駆けて行われた。

2005 年から 2012 年にかけては、学術基盤の構築を目指して、JST の CREST 研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」において、回路の電源電圧をトランジスタのしきい値近傍にまで下げる研究や磁界結合を用いて 3 次元集積する研究が行われた [1)]。

実用化と産業育成を目指して、2009 年から 2012 年にかけては、NEDO の「極低電力回路・システム技術開発（グリーン IT プロジェクト）」において、極低電圧で問題となる素子特性の揺らぎやばらつきを解明しそれを考慮した設計技術の研究が行われた [2)]。ばらつき要因の物理的理解とばらつきを考慮した設計の知見が得られ、0.5 V で動作するプロセッサやメモリー、電源回路が開発された。

2010 年には超低電圧デバイス技術研究組合（LEAP）が設立されて、「低炭素社会を

実現する超低電圧デバイスプロジェクト」において、電源電圧 0.4 V 以下で動作し電源を遮断しても情報が失われないデバイスとプラットフォーム化の研究が行われた[3]。

また、2008 年から 2014 年にかけては、JST の CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」において、極低電圧でも環境ノイズの中で確実に動作するフリップフロップの開発や、素子がたまに誤動作することを認めながらもシステムの信頼性を保障するディペンダビリティーの研究が行われている[4]。

一方、3 次元集積の研究においては、シリコン貫通電極 TSV の研究開発に日本は早くから着手した[5]。TSV を代用する回路技術として、誘導結合を用いた低エネルギーなデータ転送技術の研究でも大きな成果が得られた[1]。

高効率システムの研究動向

高効率システムの研究においてはアメリカが世界をリードしてきた。エネルギー効率を飛躍的に高める電子工学を創出するための基礎科学の研究が産学連携で複数の研究領域にわたり展開されている[6]。「Center for Energy Efficient Electronics Science (E3S)」では、IT のエネルギー消費を数桁低減する新しい科学技術の創出を目的に、アメリカ NSF の研究資金で、カリフォルニア大学バークレー校、スタンフォード大学、マサチューセッツ工科大学などの主要大学と、IBM や Intel、HP などの産業界が連携した研究活動を 2010 年から行っている。

日本では、2007 年から 2009 年にかけて、NEDO の「メニーコア・プロセッサ技術（グリーン IT プロジェクト）の先導研究」において、メニーコア・プロセッサ基幹技術の先導研究と次世代オンチップ・ネットワーク方式の先導研究が行われた[7]。

また、2011 年から 2015 年にかけて、不揮発性素子を用いた低消費電力システムの実現のための基盤技術の確立を目指して、NEDO の「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」において、アーキテクチャー、ソフトウェア技術、システム化技術の一体研究が行われている[8]。

プロセス・デバイスと回路・システムの連携

日本の材料物性工学やデバイス工学は世界の最先端レベルにある。例えば、カーボンベース・デバイスやトンネル FET、3 次元集積技術などは、CMOS の極低電力化の限界を超える技術として高く評価されている。しかし継続的な微細化の努力で指数関数的な性能改善を期待できる時代は終わった。新型デバイスの特性を引き出す回路とシステムの技術力が求められる。これまで以上に、プロセス・デバイスと回路・システムの連携が重要である。アメリカやヨーロッパではそのような連携が強化されている。

2013 年に始まった JST の CREST 研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」[9]は、まさにこの連携を重視した研究プロジェクトである。情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成を目指している。

（4）科学技術的・政策的課題

極低電圧回路設計の研究において日本は世界をリードしてきたが、高効率システムの研究

においてはアメリカが世界をリードしているのが現状である。学術領域間の連携、産学の連携はますます重要になる。アメリカでは、エネルギー効率を飛躍的に高めるエレクトロニクスを創出するための基礎科学的研究が産学連携で複数の研究領域に渡り展開されており [6]、日本も知を結集し、科学技術力・産業競争力の強化を図るべきである。

日本のカーボンベース・デバイスやトンネル FET、３次元集積技術などは、現在の CMOS の極低電力化の限界を超える技術として高く評価されており、世界の最先端レベルにある。そのような最先端技術を有するプロセス・デバイスの研究と回路・システムの研究の強力な連携を加速させ、新型デバイスの特性を最大限に引き出せるような回路・システム技術力の強化が求められる。すでに、アメリカやヨーロッパではそのような連携の強化が始まっており、日本の科学技術や産業競争力の低下を食い止めるためにも重要な科学技術的・政策的課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

脳型コンピューターを IBM が発表した [10][11]。54 億トランジスタを使って非同期の神経回路網を集積している。Deep Learning などの機械学習の技術進歩と相まって、新たな潮流となっている。ヒトの脳は、15W の消費電力で 60PFLOPS の演算性能と言われる。一演算あたりのエネルギー消費は 0.3fJ である。一方、今日のプロセッサの演算あたりのエネルギー消費は 0.3nJ 程度で、ヒトの脳よりも 6 桁効率が悪い。ヒトの脳は約 220 億個の神経細胞を集積しているが、IC の集積度がこれを超えることは確実である。1 個の神経細胞の消費電力は 0.7nW 程度だが、1 個のトランジスタの消費電力も 1nW 程度でそれ程変わらない。つまり素子の使い方が違うことになる。脳波を調べると、周波数成分は 1～100Hz で信号電圧は数 0.1mV である。IC のクロック周波数(1GHz)や電源電圧(1V)より格段に遅くて低い。もし電源電圧を 1V から 1mV に下げることができれば、エネルギー消費は 6 桁低くなる。非常に遅い周波数で動作して高度な情報処理ができる新しい計算機原理（非フォンノイマン型）の研究に関心が集まるのはこのためである。

（６）キーワード

エネルギー高効率、極低電力、More than Moore、3 次元集積、人工知能

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↘	・90年代から低電力技術は日本の基礎研究が世界をリードしてきた。 ・CREST研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」で電力を1/1000に低減する先導研究が行われた[1)]。 ・NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーンITプロジェクト）」で実用的な0.5 V回路技術が研究開発された[2)]。 ・LEAP「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」で0.4 Vデバイス・回路技術が研究開発されている[3)]。 ・CREST研究領域「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」でフリップフロップの誤動作に対する対策などが先導研究されている[4)]。 ・NEDO「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」でTSVを用いた3次元積層技術が研究開発された[5)]。 ・NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」で待機時電力ゼロのコンピューターを目指した研究が行われている[7)]。 ・産業力の低下から基礎研究力も低下し始めている。
	応用研究・開発	○	↘	・低電力が求められる携帯機器分野は日本市場が世界のリーダーである。 ・製品競争力の低下から応用研究にも陰りがみられる。
	産業化	○	→	・高い品質や使い勝手の良い機能では高い国際競争力を有するが、新製品の提案力や国際標準を作る力は欧米より弱い。ヒット商品が出ない。 ・円高による経営環境の悪化や国際競争力の低下には歯止めがかかった。
米国	基礎研究	◎	↗	・企業も大学も研究者の層が厚く高い研究水準を維持している。 ・活躍する若手研究者が継続的に現れている。 ・Center for Energy Efficient Electronics Science （E3S） で産学連携して基礎研究が行われている[6)]。
	応用研究・開発	◎	→	・システムではAppleやGoogleが、携帯用プロセッサやデジタル信号処理ではQualcommやBroadcomが世界をリードしている。 ・世界中から優秀な頭脳が競争力の高い会社に集合している。 ・開発費の増大に伴いFPGA（XilinxやAltera）の市場が広がり、プロトタイプ品がそのまま最終製品に使われる場合が増えている。
	産業化	◎	→	・スマートフォンや携帯端末など、システム力と併せてVLSIの開発力が非常に高い。世界への発信力が力強い。
欧州	基礎研究	◎	↗	・IMECの存在感が高まっている。医療・ヘルスケア・スマート社会など、応用を見据えた基礎研究および上位概念での研究が強い。
	応用研究・開発	△	→	・EU経済圏で技術開発連携も進んでいるが、世界をリードするレベルにはない。
	産業化	△	→	・ARMコアは携帯機器の組込みプロセッサの世界標準になった。 ・車載用半導体以外は特筆すべきものが少ない。
中国	基礎研究	△	→	・中国本土は発展途上。教育の成果が現れるのには時間がかかる。 ・台湾は製造からシステムに転換し、医療・ヘルスケアの分野に注力。
	応用研究・開発	○	→	・米国帰りの技術者が原動力になり、メディアテックなど台湾の技術レベルは高いが、研究開発力はやや陰りが見え出した。

	産業化	◎	↗	・パソコンや通信用LSI、LCDを中心に競争力がある。特に最先端から少し遅れた分野で強みを発揮している。
韓国	基礎研究	○	→	・企業も大学も研究者の層が薄い。
	応用研究・開発	○	→	・携帯電話に注力し、プロセッサ技術が蓄積されている。 ・サムスンやKAISTが活発だが、少し陰りが見えだした。
	産業化	◎	→	・海外戦略が明確である。発展途上国への進出・市場開拓に積極的である。 ・産業成長力に陰りが見えだした。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) CREST 研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」: http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoikiarchive/ulp/intro/index.html
2) NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーン IT プロジェクト)」: http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00130.html
3) 経済産業省「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」: http://www.leap.or.jp/index.html
4) CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」: http://www.dvlsi.jst.go.jp/
5) NEDO「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」: http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00385.html
6) Center for Energy Efficient Electronics Science : http://www.e3s-center.org/
7) NEDO「メニーコア・プロセッサ技術（グリーン IT プロジェクト）の先導研究」: http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201012/20100000001819.html
8) NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」: http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100016.html
9) CREST 研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」: http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-2.html
10) Paul A. Merolla *et al.* “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” Science 8 August 2014: Vol. 345 no. 6197 pp. 668-673.
11) Robert F. Service, “The brain chip,” Science 8 August 2014: Vol. 345 no. 6197 pp. 614-616.

３．２．６　量子コンピューティングデバイス

（１）研究開発領域名

量子コンピューティングデバイス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

量子コンピューティングデバイスとは、”量子力学的な効果を用いて行う複雑な計算”（量子コンピューティング）を実現するデバイスである。量子コンピューターは、現在のスーパーコンピューターが数千年もかかって解く問題を、数秒かつ超低消費電力で計算できるようになると期待されている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

乱数の素因数分解や最適化（例えば巡回セールスマン問題）といった問題では、計算時間（ステップ数）が問題の規模に対して指数関数的に伸びるものがあり、それらは計算不可能な問題とされる。そこで、現在のコンピューターの不可能の一部を可能にする計算手法として量子コンピューティングが期待されており、それを実現するデバイスの開発が望まれている。また、現在のハイパフォーマンスコンピューティングで多大な時間と消費電力を有する問題の一部も量子コンピューティングによって短時間で解ける可能性があり、スーパーコンピューターセンターの省電力化への寄与が期待される。

最近は、量子コンピューティングを実現する装置として、量子ゲート方式（個々の量子ビットに対するゲート操作によって成り立つ方式）の量子コンピューターに加えて、量子イジングマシン方式の（量子現象を利用した）最適化装置も含めるようになった。よって本稿ではそれらを合わせて、量子コンピューティングの観点から俯瞰する。

量子コンピューターの分類

現時点で、量子コンピューティングを実現できるデバイスと総称される形態は大きく 3 種類に分類される。

① 量子ゲート方式の量子コンピューター

量子ビットを用意し、プログラムに沿って量子ビットにユニタリ演算や測定を施す事により解を求める計算機である。素因数分解等が超高効率で実行できるコンピューターで、量子力学的重ね合わせやエンタングルメントに基づく量子並列性によって既存の計算機での不可能の一部を可能にする装置である。ただし、素因数分解でハイパフォーマンスコンピューター（HPC）の進化を上回るためには 10^7 個以上の量子ビットを有する量子コンピューターが必要とされる。

集積化可能な量子ビットの候補として、超伝導のジョセフソン接合を用いる巨視的量子状態を利用するもの（以下、超伝導量子ビット）と、半導体中の電子スピンを利用するもの（以下、スピン量子ビット）が有力視されている。

世界初の超伝導量子ビットは、1999 年に当時 NEC の蔡・中村らによって実現され、その後、我が国では NEC・理研、NTT、海外では Delft 工科大（蘭）、ETH（瑞）、サックレー研（仏）、Yale 大、NIST、UC Berkeley、UC Santa Barbara（米）などがしのぎを削りながら発展を続けてきた。当初は、量子情報が保持できる時間（コヒーレンス

時間）が短く、1 回の演算に対するデコヒーレンス（量子情報の損失）も深刻であったが、現在はコヒーレンス時間が 100μ秒まで伸び、1 回の演算に要する時間が数 10n 秒とすると、コヒーレンス時間内に1000回を上回る演算ができるまでに至った。しかし、既存の HPC を凌駕するためには 10^7 個以上の量子ビットを用いた計算が必要なため、各々の量子ビットの情報は少なくとも 1 時間といった長さで正確に保つことが望まれる。そこで導入されるのが誤り訂正で、ここでは多数の量子ビットの集合体を実効的に 1 つの量子ビットとして定義し（以下、実効量子ビット）、そこで誤り訂正アルゴリズムを実行し続けて 1 つの実効量子ビットの量子情報を保つ。すなわち、量子メモリーでは量子情報を保持するために誤り訂正という量子演算を継続的に実行する必要がある。この量子メモリーの実現に向けて注目されているのが、表面コードと呼ばれる手法 [1]で、量子ビットを 2 次元に配置し、最近接量子ビット同士（2 量子ビット）の演算と測定に基づき情報を保つ。そこで集積化技術を用いてシリコン基板上に超伝導量子ビットを 2 次元に配置し、大規模量子コンピューターを開発する事業を米 Google 社が UC Santa Barbara の Martinis の協力を得て開始した [2]。現状では1つの実効量子ビットを構成するために 100 個以上の量子ビット集合体が必要とされる。これを 10^7 個用意するのであるから気が遠くなるように映るが、100 万個以上のトランジスタが集積された現在の集積回路を得る道のりと同じと考えればよい。

世界初の半導体スピン量子ビットは、1996 年に当時 NTT の樽茶らによって実現され、その後、我が国では NTT、東大、東工大、理研、海外では Delft 工科大（蘭）、ETH（瑞）、Copenhagen 大（丁）、Oxford 大（英）、Harvard 大、MIT、Princeton 大、Wisconsin 大（米）、New South Wales 大（豪）などがしのぎを削りながら発展させてきた。四半世紀前には、半導体中で 1 個の電子を初期化し、操作（演算）し、読み出すことは夢物語であったが、半導体微細加工技術の進歩と半導体物性への理解の深化が共鳴して、化合物半導体をテストベッドとした単一電子スピンの閉じ込め・初期化方法の開発、読み出し手法の確立、複数量子ビットの結合といった夢物語が次々と実現されていった。しかし、化合物半導体は、核スピンをもつ安定同位体のみで構成されるため、電子スピンのコヒーレンス時間が核スピンの揺らぎにより短くなってしまう問題が顕在化した。そこで母体核スピンの割合が化合物半導体の 100%に対して、わずか 4.7%であり、微細加工技術も進んでいるシリコンが着目され、New South Wales 大の Morello と Dzurak らがシリコン中でリンドナーに束縛された 1 つの電子スピンを量子ビットして初期化、演算、読み出しを実施することに 2012 年に成功した [3]。ただし、この量子ビットはコヒーレンス時間が 55n 秒と短く、0 と 1 の間を往復するべきラビ振動も 0.3 と 0.6 程度の間を行き来するという実用化には全く耐えない状況であった。この結果、単一スピン量子ビットがシリコン表面から数 10nm に配置されると、表面酸化膜に起因するスピン欠陥や、表面の電極（金属）に起因するデコヒーレンスが避けられなく使い物にならないという悲観論が主流となった。この状況を覆したのが、慶應義塾大が作製した 4.7%の ^{29}Si 核スピンをほぼ完全に除去したシリコンウエハーを用いた実験で、New South Wales 大が前出と同じリンドナー量子ビットを作製したところ、1 ミリ秒ものコヒーレンス時間と、0 と 1 の間のほぼ完全なるラビ振動が得られた [4]。さらに、化合物半導体によって確立された指針に基づき、微細加工によるゲート電極のみでシリコン上に量子ド

ットを作製したところ、^{29}Si が除去されたウエハーによって単一電子スピンビットのコヒーレンス 1 ミリ秒以上と量子演算精度 99%以上が得られた [5]。さらにゲート電圧操作に工夫を加える事で、微細加工により形成された導波路から生じるマイクロ波による量子演算に対して、共鳴（演算）するしないをそれぞれの量子ビットで自在にスイッチできることが示された。この成果により ^{29}Si 核スピンが除去されたウエハーに作製されるシリコン量子ビットが一気に注目され、これらを微細加工技術により 2 次元に高集積化して表面コードによる量子計算を開発する機運が一気に高まっている。シリコンを用いても量子情報保持時間が十分に長い 1 つの実効量子ビットを構成するためには 100 個以上の量子ビットが必要となるであろう。これを 10^7 個用意するということは、現在のシリコンチップの 100 万個トランジスタよりさらに千倍の量子ビットを集積化することになる。しかしシリコン量子コンピューターは現在のワンチップほど小さくする必要がないので、面積を千倍（正方形の一辺を 30 倍）にすれば現在の集積回路と同じ程度の集積化となる。

動作温度は、超伝導、半導体スピンともに 1K（ケルビン）以下と低い。しかし、既存のコンピューターの不可能を可能にするというスーパーな HPC という観点から低温動作は問題にならない。むしろ、対象とする問題の難しさで規格化すれば既存の HPC よりはるかに低い電力での動作が期待されている。超伝導量子ビットの利点は作製と読み出しが容易なことであり、シリコンスピン量子ビットの利点はコヒーレンス時間が十分に長いために個々の演算精度があがり実効量子ビットを形成するための量子ビット数が少なくすむ可能性があることである。

② 量子アニーリング装置

量子効果を制御して最適化したい問題の目的関数の最小値を探す装置である。量子コンピューティングが威力を発揮すると期待される問題群のなかで離散的最適化問題のみが解ける装置である。2 次元に量子ビットを配置し、すべての量子ビットの間の相互作用を切り、その上で個々の量子ビットを 0 と 1 の重ね合わせ状態に設定し、次に最近接量子ビット間の相互作用を断熱的に徐々に強めていく。このとき、相互作用をどの量子ビット間でどこまで強めるか（強めないか）がプログラミングに相当し、あとはスピン間の相互作用に任せてスピンが最低のエネルギー状態に落ち込むのを待つだけである。最適化の標準的手法であるシミュレーテッドアニーリングでは、系全体を高温からゆっくりと冷やしながら熱揺らぎを利用して基底状態への到達を目指すが、量子アニーリングでは系全体を可能な限り低温に保つことで熱揺らぎを抑え、そこに量子揺らぎを与えることでトンネル効果を利用して基底状態に落ちるのを待つ。スピングラスとして知られる多数スピン間の相互作用を利用する本手法は物理用語のイジングモデルで記述でき、巡回セールスマン問題といった離散的最適化問題がイジングモデルにマッピングできることから、その有用性が期待されている。量子アニーリングは東工大の門脇と西森が発案し [6]、それを MIT の Lloyd らが断熱量子計算という用語で発表してから広く知られるようになった。通常、量子ビットで 2 値を表すためには一方が基底状態でもう一方が励起状態になってしまう。すなわち励起状態の場合でもそれを保たなければならないという点に困難が生じ、位相の保持という量子特有の状況も相まって、実効ビットの情報を

維持するために量子誤り訂正による大規模な量子操作が必要となる。量子アニーリングは基底状態に落ち込むのを待つという点において自然に逆らわないのがよい。しかし、位相を保つコヒーレンスは別問題で、コヒーレンスが失われると量子アニーリングは効果を発揮しない。

近年、量子アニーリングに世界中の注目が集まっているのは、カナダの D-Wave 社が量子アニーリング装置を開発し販売を開始したからだ [7]。 ついに市販の量子コンピューターが登場したということで、一部科学者がその性能をテストしたところ、最新の 512 ビット装置では量子性による増速が確認できないという結論を導き、それに対して D-Wave 社が強く反論をする状態が続いている。焦点は 512 ビットまで増やした D-Wave 量子アニーリング装置においても量子ビット間のコヒーレンスが基底状態に緩和するまで保たれているか？である。現在、D-Wave 社の量子アニーリング装置は超伝導量子ビットの 2 次元アレイで構成されているが、シリコン中のスピン量子ビットの長いコヒーレンスを利用した方がよいという見方もある。一方、正常に動作する量子ビット作製のスループットの高さや読み出しの簡便さに関しては超伝導量子ビットに分があるという見方がある。

③ コヒーレントイジング装置

既存のデジタルコヒーレント通信技術を発展させ、組み合わせ最適問題を超高効率で解く手法である [8]。光を用いるため高速で、室温で動作し、頂点数 2 万の完全グラフ問題を解くために、現代の精度保証付きのコンピューターで 20 日間かかるような問題を、1 ミリ秒で近似解が得られるとされる最適化装置である。2 万パルスのレーザーが 2 万頂点数と 1 対 1 の対応となり、レーザーのコヒーレンスをフルに活用するという点において量子コンピューターに分類されるが、実際にはエンタングルメントといった量子性は使わない点において現在の古典的レーザー技術をフル活用できるのが長所である。

（4）科学技術的・政策的課題

① 基礎研究

固体中でたった 1 個の電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンが量子力学的に扱えるようになった現在、この量子ビットを用いた応用をシームレスに開発するプログラムが必要である。1 つまたは少数個の量子ビットの活用となれば、現在のセンサーの不可能を可能にする量子センシングが最も現実的かつ魅力的な課題である。量子センサーは磁場、温度、歪みなどを比類なき精度と感度で測定できる可能性を有するコンセプトであり、黎明期である今こそ我が国が科学政策的に推進すべき分野である。並行して、中規模の量子アニーリングおよびコヒーレントイジング装置の開発を支援すべきであろう。その必要性の根拠は後述のとおりであるが、最適化を目的とするからには、古典的なシミュレーテッドアニーリングを中心とした最適化問題全体の開発を理論・実験の両面で支援することも望まれる。一方、10^7 量子ビットの集積化を目指す量子コンピューティングデバイス研究は極めて長期的な課題であるため、表面コードで 1 実効量子ビットの情報が 1 時間程度以上保つことができるか？といった確認を経て、その後の投資を判断するのがよい。

② 産業化

ムーアの法則に頼るシリコンチップの高性能化が曲がり角にさしかかり、また、最新のチップはすべて海外に外注生産という状況を鑑みると、我が国は新しい発想に基づく素子のデザインと知財化に注力すべきフェーズを迎えている。量子アニーリングというコンセプトが日本で発明され、米国の研究者がそれに少しだけひねりを利かせて広めることに成功し、そこに価値を見いだしたカナダの D-wave 社がやはり日本で発明された超伝導量子ビット、磁束量子パラメトロンといった手法を組み合わせて製品化に成功した過程を解析する事が重要であろう。1980 年代に電子立国として君臨した日本は、米国で発明されたトランジスタ、酸化膜、プレーナー型接合、集積回路技術を引き継ぎ、高度な製造技術で向上させた一方、時には人まねと非難された歴史がある。量子アニーリング装置の要素技術の多くは日本の発明ということで大きく前進したが、製品化は北米が先んじた。コヒーレントイジング装置も我が国の発明であるだけに、これからが産学共同の腕の見せ所である。いずれにせよ高度な基礎科学的成果をどのように組み合わせるかがイノベーションである。よって世界初の製品化を一途の目標として高度な基礎科学的成果を理解し、組み合わせることができる人材の育成が急務である。世界に通用する工学博士の育成といってよいであろう。そのような人材育成は、我が国の大学で実行するものと、一人でも多くの日本人を世界に飛び立たせる 2 本立てで実行すべきであり、そのような政策の企画・実行が期待される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

量子アニーリング装置はカナダの D-wave 社が製品化に成功し販売している [7]。 米国の Google 社も超伝導量子ビットを用いた量子コンピューター開発を発表した [2]。 米国 IBM も超伝導量子ビットを用いた量子コンピューター開発を進めている。

基礎研究分野においては英国が quantum technologies に関して 460 億円の巨大プロジェクトを 2014 年に開始し [9]、オランダ、ドイツ、デンマークにおいても数十億円レベルの支援が行われている。

（６）キーワード

ハイパフォーマンスコンピューティングデバイス、量子コンピューティングデバイス、最適化、グラフ問題

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・CREST研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」で我が国の量子情報基礎研究が総合的に立ち上がった。 ・最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「量子情報処理プロジェクト」で我が国の基礎研究が世界のトップを走るようになった。 ・ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の一部で量子最適化装置の開発が開始している。
	応用研究・開発	○	↘	・産業力の低下から企業における基礎研究が不振である。特に製品開発に結びつける力が低下している。
	産業化	×	↘	・製品開発が行われていない。
米国	基礎研究	◎	↗	・研究者の層が厚く、さまざまな基礎研究へ支援策が講じられている。
	応用研究・開発	◎	↗	・GoogleやIBMといった主要企業が量子コンピューターの開発に取り組んでいる。
	産業化	◎	↗	・D-Wave社が世界に先駆けて量子コンピューターの生産・販売を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・英国、オランダ、ドイツ、デンマークなどで基礎研究に対する多額の支援が行われている。
	応用研究・開発	×	↘	・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↘	・製品開発が行われていない。
豪州	基礎研究	◎	↗	・New South Wales大学がシリコン量子コンピューター研究で世界をリードしている。
	応用研究・開発	×	↘	・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↘	・製品開発が行われていない。
韓国	基礎研究	○	→	・米国・欧州で学んだ研究者を活発にリクルートし、基礎研究の裾野を広げている。
	応用研究・開発	×	↘	・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↘	・製品開発が行われていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) G. Fowler, M. Mariantoni, J. M. Martinis, and A. N. Cleland: Surface codes: To-wards practical large-scale quantum computation, Physical Review A 86, 032324 (2012).
2) Google 社ホームページ：https://plus.google.com/+QuantumAILab/posts
3) J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton, D. N. Jamieson, A. S. Dzurak and A. Morello: A single-atom electron spin qubit in silicon, Nature 489, 541 (2012).
4) J. T. Muhonen, J. P. Dehollain, A. Laucht, F. E. Hudson, R. Karla, T. Sekiguchi, K. M. Itoh, D. N. Jamieson, J. C. McCallum, A. S. Dzurak and A. Morello: Storing quantum information for 30 seconds in a nanodelectronic device, Nature Nanotechnology 9, 986 (2014).
5) M. Veldhorst, J. C. C. Hwang, C. H. Yang, A. W. Leenstra, B. de Ronde, J. P. De-hollain, J. T. Muhonen, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello and A. S. Dzurak: An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control fidelity, Nature Nanotechnology 9, 981 (2014).
6) T. Kadowaki and H. Nishimori：Quantum annealing in the transverse Ising model, Physical Review E 58, 5355 (1998).
7) D-wave 社ホームページ：http://www.dwavesys.com
8) K. Takata, S. Utsunomiya, and Y. Yamamoto：Transient time of an Ising machine based on injection-locked laser network, New Journal of Physics 14, 013052 (2012).
9) 英国 EPSRC のホームページ：
http://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/themes/quantumtech/

３．２．７　メモリーとストレージ

（１）研究開発領域名

メモリーとストレージ

（２）研究開発領域の簡潔な説明

小型・高速・高信頼性・低電力の利点からスマートフォンやパソコン、サーバーなどの記憶装置（ストレージ）のみならずエンタープライズストレージでも使われるようになってきているフラッシュメモリーを用いたソリッド・ステート・ドライブ（SSD）と SSD を使いこなすための周辺技術について説明する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ビッグデータの活用には実世界の膨大な情報をセンサーを通じてリアルタイムに収集、即座に解析・検索を行うストレージが必要になる。ストレージがハードディスクドライブ（HDD）からソリッドステートドライブ（SSD）になることで、リアルタイムのデータ処理の実現が期待されるが、現在のデータベースは HDD に対して最適化されており、高速な SSD を活かし切れていない。今後は不揮発性メモリー（フラッシュメモリーやストレージ・クラス・メモリー）の特徴に合わせ、データベースのアプリケーションソフトウェアやストレージエンジンなどのミドルウエア、OS、メモリーコントローラと言った多様な階層が密接に連携し、全体で最適な性能を実現することが必要になる。すなわち、データのサイズ、属性、書き換え頻度など、ストレージに対するデータのアクセスパターンがアプリケーションによって大きく異なるため、アプリケーションに応じた、ミドルウエア、OS、およびメモリーコントローラのメモリー制御アルゴリズムの最適化が重要になる [1)]。

SSD で必要とされる高信頼性や小さい書き込み単位（ランダムライト）での高速動作を実現するため、フラッシュメモリーデバイスの研究に加え、メモリーの不良をシステム的に救済する誤り訂正符号技術、フラッシュメモリーを制御するコントローラー技術、OS の最適化、などのシステム技術の重要性が増している。また、現在のコンピューターシステムでは、DRAM（メインメモリー）とストレージ（HDD・SSD）の間に大きな性能のギャップがあり、システム全体の性能を決めるボトルネックとなっている。性能ギャップを埋めるために、DRAM に近い性能をもちつつストレージに近い大容量を実現する SCM(ストレージクラスメモリー)を使った新しいメモリーアーキテクチャーが必要となっている。SCM としては ReRAM、PRAM、MRAM などがある [2)]が、従来のストレージクラスメモリーデバイスの研究に加えて、誤り訂正技術や、フラッシュメモリーとのハイブリッドメモリーシステムなど、ソフトウェアやシステムの研究も必要になっている。ビッグデータを収集するセンサーでは、バッテリーレスなどの超低電力動作を実現する、低電力なマイコンに混載できる不揮発性メモリーが求められている。

ストレージの高信頼化に関しては、複数のサーバーの間・複数の SSD の間・各 SSD 内といった、各層で独立した高信頼技術が用いられている。各階層が独立に RAID、ECC、リダンダンシーといった高信頼性技術を用いているために、機能が重複し性能やコスト面で非効率であるのに加え、十分に高い信頼性を確保できていない。今後はメモリーセルの位置や蓄えるデータの内容によってエラーの確率が異なるといった、フラッシュメモリーの不良の特

徴を把握した上で、各層を一元管理する統合ストレージシステムが必要になる。

新しい不揮発性メモリーの有力な用途として、ビッグデータを格納するストレージに加えて、データを収集するセンサーネットワークの端末側に使われるメモリーがある。IoT（Internet of Things）と言われるように、道路、橋、トンネル、鉄道、ビルなどの社会インフラの老朽化診断や農林水産業の最適制御、気象モニターなど社会の至る所にセンサーが配置されデータの取得が行われる。現在のクラウドシステムでは端末で取得したデータをセンターのサーバーに転送する場合が多いが、データ量の増大とともに、データをサーバーに転送するネットワークの負荷が増大している。その結果、アクセス時間や電力が増大する。今後は端末側でも溢れかえるデータを取捨選択する分散処理型のネットワーク（エッジヘビーアーキテクチャー、フォグコンピューティング、エッジコンピューティング等）が進むと考えられる。現在でも監視カメラで取得している画像データの全てが必ずしもセンターに送られるわけではなく、一定時間後に端末でデータが捨てられる場合もある。こうした分散コンピューティングに適したストレージ技術が必要になる。

IoT 用途ではインフラの寿命（10 年以上）に匹敵する長時間に端末がメンテナンスフリーであることが求められる。すなわち、メモリーに関しても携帯電話や PC などの情報端末に比べて極めて長い信頼性が求められる。また、端末のバッテリーの持続時間が長いほどメンテナンスコストが下がることから、メモリーにも極めて低い電力が必要とされる。センターのストレージほど大容量が必要とされないこと、スタンバイ電流が削減できることから低電力、高速、大容量な不揮発性メモリーとして MRAM、ReRAM、PRAM などの新しい不揮発性メモリーの実用化が必要とされる。こうしたセンサーネット端末ではメモリー単体だけでなく、小容量のメモリーとロジックが混載されるマイクロコントローラ（マイコン）の形でメモリーが使用されることが多い。MRAM、ReRAM、PRAM などは CMOS を試作した後の製造のバックエンドで作成でき、CMOS ロジックプロセスとの親和性が高い。すなわち、新メモリーは IoT のロジック混載デバイスとして使えるメリットがある。IoT において長時間のバッテリー保持、電池フリーを実現するには、既に実用化の段階に入ったエネルギーハーベスト技術を用いて発電することが想定される。例えば端末の周辺に存在する環境電波を用いて発電する場合は得られる電力は数 10μW 程度であり、メモリーには μW クラスの低電力動作が必要とされる。MRAM、ReRAM、PRAM などの不揮発性メモリーの書き換え電力は 100μW 以上であり、材料・デバイス・回路技術を駆使した極限までの低電力化が望まれる。

以上のようなストレージやセンサー端末で使われるフラッシュメモリー、ストレージ・クラス・メモリーの研究は材料探索からシステムまで幅広い領域で研究が行われている。従来は、ReRAM、PCRAM、MRAM などの物性・材料やデバイスの研究が日本・米国・韓国を中心に行われていたが、メモリーの潜在力を活かし実用化するためには、物性、材料、デバイス研究のみならず、SCM の特長を生かすためのメモリーアーキテクチャーや OS などのシステム技術の革新が重要になってきている。

（４）科学技術的・政策的課題

データセンターで使われるストレージデバイスは汎用的なデバイスというよりは、アプリケーションの特性に合わせて多様な構成になる。例えばチケットの購買や金融取引など、頻

繁にデータを更新し、リアルタイムの応答が必要とされるトランザクション処理を実行するリレーショナルデータベースのストレージでは、高速でリアルタイム性に優れたストレージが必要とされる。一方、ソーシャルネットワークサービス（SNS）でユーザーが画像を格納する場合は、データ量は大きいが更新頻度は低く、より低コストなストレージが必要とされる。更に、10 年、100 年といった、超長期にデータを高信頼に保管する安価なアーカイブメモリーも必要になる [3]。このように用途によってストレージへの要求が多様になることから、メモリー自体の開発に加えて、メモリーの組み合わせ方（アーキテクチャー）やメモリーを制御するソフトウェア（ファイルシステムやメモリーコントローラ）のアルゴリズムもアプリケーションに合わせて最適化する必要がある。

すなわち、データセンターのストレージは多様な構成となることに伴い、アプリケーションソフトウェア、ファイルシステム（OS）も各アプリケーション、ストレージの構成に最適化したものが必要になる。また、従来の DRAM にデータを格納する高速なインメモリーデータベースは記憶媒体として DRAM を使用するために扱えるデータサイズに制約があり、大きな電力を消費する。また DRAM は揮発性メモリーのために電源遮断時にはデータを失うという問題がある。高速な不揮発性メモリーであるストレージ・クラス・メモリーとフラッシュメモリーで構成するストレージの出現により、データ量の制約がほぼなくなり、リアルタイム性を持った新しいアプリケーションが切り拓かれると期待される。すなわち、自動車の無人自動運転、動画像をやり取りするソーシャルネットワークサービス、台風や竜巻など気象災害の予測、廃棄物・欠品ゼロの食品流通システムなど、高速でリアルタイム性に優れたビッグデータのサービス実現をもたらすと期待される。

このように日本が強みを持つ、自動車や社会インフラ事業の競争力を高めるためにも、高速で高信頼なストレージ、データ処理基盤が必要になる。この分野ではメモリーメーカー（Micron）やマイクロプロセッサメーカー（Intel や Qualcomm）、IT システム・ソフトウェアの IBM、Microsoft、Google、Amazon.com、Oracle、Apple などの企業や米国西海岸の大学・ベンチャー企業など、米国で研究開発が盛んになってきている。また、当該分野の国際会議では、韓国の大学や企業（Samsung、Hynix）からの論文も急増しており、日本としても産官学をあげて強化すべき分野である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

ビッグデータや IoT のアプリケーションでは、データの量が膨大なものになり、データが DRAM からストレージにあふれ、従来のインメモリーデータベースでは対応できない。また、同時多発的に膨大な端末（クライアント）から同時にストレージアクセスされる。このように膨大なデータを膨大な端末から同時にアクセスする時には、従来のフォンノイマン型のコンピューターでは対応できなくなる。すなわち、ストレージのデータにアクセスする時間でシステム全体の性能が決まるため、CPU の高速化やマルチコア化では対応できない。メモリーやストレージのアクセスのボトルネック（フォンノイマンボトルネック）を解消、超並列に演算する新しいコンピュータ・アーキテクチャーの研究が米国や韓国を中心に盛んになってきている。IBM 社の提唱する Data Centric Model [4]、HP 社が提唱する The Machine [5]のように、フラッシュメモリーやストレージ・クラス・メモリーを使い、メモリーのアクセスの高速化を狙った新しいコンピューター、ストレージの研究が盛んになっている。

研究対象はメモリーデバイス、データベースソフトウェア、OS（ファイルシステム）、ストレージシステムと多岐にわたるため、各分野に強みを持つ産学が連携したプロジェクトが行われるようになってきている。HP 社は「30 年ぶりのコンピュータ・アーキテクチャーの変革」と提唱しているように、クラウド IT システムの次の時代のビッグデータ、IoT のデファクトスタンダードとなる、新メモリーを活用した情報処理システムの研究の取り組みが盛んになってきている。

（６）キーワード

SSD、ストレージ・クラス・メモリー、IoT、データセントリック、フラッシュメモリー、ReRAM、PRAM、MRAM

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	MRAM、ReRAM、PRAMなどの主に材料の研究には強いものの、新メモリーを使ったストレージシステムやメモリー制御ソフトの研究の層が薄い。
	応用研究・開発	○	→	３ビット以上のデータを蓄える超多値化や３次元メモリーなど、メモリーの開発では先行しているものの、ストレージシステムの開発では遅れている。
	産業化	◎	→	東芝のフラッシュメモリーは市場シェアは33%で世界2位だが今後成長が見込めるストレージでは存在感は薄い。SSD販売に注力しており、今後の挽回が期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	メモリーデバイスからストレージシステム、OS（ファイルシステム）まで、全ての研究領域において研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	応用研究や開発もメモリーデバイスからストレージシステム、OS（ファイルシステム）まで、全ての研究領域において強力である。
	産業化	◎	↗	Intel、Micronの合弁会社IM Flashはフラッシュメモリーの市場シェアは17%と横ばい（世界第３位）。ストレージやデータベースではEMC、オラクル、HP、IBMなど世界で最も強力。
欧州	基礎研究	○	→	IMECを中心にメモリーデバイスの基礎研究を盛んに行っている。
	応用研究・開発	△	↘	事業化という意味では成果が顕在化していない。
	産業化	×	↘	半導体メーカーはメモリー事業から撤退し、ロジック混載メモリーが残るのみ。ストレージに関しても存在感は無い。
中国	基礎研究	○	↗	台湾工業技術研究院(ITRI)で新不揮発性メモリーの研究アクティビティが上がっている。
	応用研究・開発	○	↗	台湾ではメモリーの自社開発力は弱いものの、外国企業からファンドリへのメモリーの技術移転が行われており、技術水準が上がっている。
	産業化	○	↗	台湾のファンドリ（TSMC、UMC）ではMRAMやReRAMなどの不揮発性メモリーを混載したロジックプロセスが開発されてきており、実用化に近づいている。また台湾のフラッシュメモリーコントローラーの開発も盛んである。
韓国	基礎研究	◎	↗	すべての種類のメモリーデバイスに対して多方面からアプローチしている。メモリーシステムやOS、メモリー制御ソフトの研究も盛んになってきており、学会で多くの発表が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	特筆すべき技術ブレークスルーは無いが、メモリーの微細化レースや3次元メモリーの開発でトップ集団につける。
	産業化	◎	↗	SamsungとHynixの市場シェアをあわせると、DRAM、フラッシュメモリーでともに世界の半数を占めトップ。ストレージではまだ存在感は無い。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

半導体メモリーおよびストレージの総論に関しては以下の文献を参考とした。

1）半導体ストレージ 2014, 日経 BP 社
2）ITRS ロードマップ, http://www.itrs.net/home.html
3）JST CRDS 戦略プロポーザル「デジタルデータの長期安定保存のための新規メモリ・システムの開発」http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-07.pdf
4）Data Centric Systems: A new paradigm for computing,
http://ibmresearchnews.blogspot.jp/2014/11/data-centric-systems-new-paradigm-for.html
The Machine: A new kind on computer,
http://www.hpl.hp.com/research/systems-research/themachine/

３．２．８　アクチュエーター

（１）研究開発領域名

アクチュエーター（特に情報制御されたパワーエレクトロニクスデバイスに特化）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

本格的な電気の時代に、情報通信と密接に関係付けられたパワーエレクトロニクスのキーデバイスであるパワー半導体デバイスと関連する技術は、21 世紀の主要課題であるエネルギー融通、省エネルギー化、ネガワット、さらにサイバーフィジカルシステム、制御と電力およびアクチュエーションを関連付ける制御技術とパワー半導体デバイス技術、さらにデバイス関連材料技術にわたる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

21 世紀は情報と電力によるアクチュエーションが融合する高度電力化の時代である。LED や携帯機器のディスプレー、CPU への電力供給から工場の大型モータやロボットの駆動および制御、風力発電、電力潮流制御などさまざまな電気電子機器やシステムで、センシング、プロセッシング、アクチュエーションのリアルタイム化、広域化、高度化が確実に進んでいる。

高度電力化社会の実現には、インターネット等を構成する IT 技術とモータ駆動や電力ネットワーク制御等を行うパワーエレクトロニクス（PE）技術の融合によるサイバー世界と実世界（フィジカル世界）の融合が必要不可欠である。特にパワー半導体チップとデジタルチップの高度な電子的結合による一体化、さらに一体化された PE ユニットの莫大な数の普及を促す、集積化を前提とした量産技術の確立、それらのネットワーク化と結合プロトコルの確立が重要となる。また半導体材料技術、実装・パッケージの材料技術、革新的な放熱技術、250℃動作を視野に入れたパワー半導体高温動作技術、集積化技術、高周波スイッチング技術による超小型化と普及拡大で重要となる高信頼化技術とノイズ抑制技術（新しい試験方法およびその国際標準化も含む）、信頼性およびノイズに関連する技術は従来の対症療法的な手法から、CAD による設計に組み込む手法へと急速に変化している。

パワー半導体デバイスでは、ワイドバンドギャップ半導体の技術開発が進み高性能化が期待されている。シリコンパワー半導体はパワーMOSFET および IGBT で、数十Ｖから数 kV の電圧域において、15 年間で単位面積当たりの抵抗が 10 分の 1 に低減されており、確実に高性能化が進んでいる。またシリコンパワー半導体デバイスの製造インフラが急速に 300mm ラインに移行し始めており、量産性が飛躍的に拡大する。パワー半導体デバイス用の 300mm シリコンウエハーの高品質化も進んでいる。特に IGBT 用ウエハーの品質向上はデバイスの基本特性改善に欠かせない、戦略的コア技術である。ＭＥＭＳや微細加工技術など、シリコン半導体の新しいプロセス技術、材料技術がパワー半導体に応用されることにより、従来では考えられなかった高性能化が実現されてきている。

［技術分野を構成するフレーム］[1),2),3)]

上に述べた複合技術を構成する 3 つの技術領域：

1．基本技術レイヤー
- CPS（サイバーフィジカルシステム）を志向したパワー（エネルギー）ネットワーク
- 極限電力変換技術
- 極限材料・デバイス技術

2．レイヤー間融合技術
- パワーエレクトロニクス制御用の新プロトコル技術
- イミュニティー化技術（電圧絶縁、ノイズ耐性）
- パワーエレクトロニクス多重化回路・制御技術
- 信頼性設計、ノイズ設計を含む統合設計技術

3．レイヤー固有技術
- 高品質ウエハー、高機能ウエハー技術
- 受動部品材料技術
- ミクロレベル信頼性評価技術と標準化

［新しいパワー半導体デバイスならびにパワーエレクトロニクスの指標の必要性］

21 世紀の高度電力化社会では「効率改善」技術と「普及」によるネガワット（省エネ、節電）の拡大が必須でありネガワット・コスト削減を、環境調和型発電と同じ指標で研究開発ビジョンの柱として導入する可能性の検討が必要である。ネガワット・コスト指標に基づく研究企画および研究成果の評価、さらに指標の国際標準化が必須。ECPE などが中心となって欧州もインデックスの立ち上げについて検討を始めている様子であり、日本主導によるネガワット・コストの指標化とネガワット革命の方向付けが重要。

［業界動向］

ABB、シーメンス等欧州企業が重電分野では世界を席巻している。彼らはエンジニアリングによる摺合わせ技術での差異化と、標準化によるプラットフォーム化を組み合わせて市場を拡大している。欧州企業はアカデミアを含めて競合他社間で前競争領域での研究連携を強力に進めており、パワー半導体用ウエハーから送配電用のパワーエレクトロニクス回路方式まで領域をまたいだＥＵプロジェクト、国プロジェクトによる研究が行われている。

旧シーメンスから分離した半導体部門インフィニオン社は、現在パワー半導体に特化しており、さらに最近米国のパワー半導体大手のインターナショナル・レクティファイア（IR）を買収した。圧倒的にシェアを拡大したパワー半導体巨大企業が成立した。高耐圧が得意なインフィニオン社と、低耐圧・制御・集積化が得意な IR の一体化は日本企業にとって非常に脅威である。インフィニオンも IR もいずれも R&D 性の高い企業であり、日本のパワー半導体企業のポジショニングを完全に取り囲む形になっている [4)]。標準コモディティーはフェアチャイルド社や Vishay 社（アジアファウンドリも活用）、R&D 性の高い製品はインフィニオン社。電力ネットワークや CPS では ABB、シーメンスが先頭を走っている。

（４）科学技術的・政策的課題

［エンジニアリングの価値を最大化した欧米のアカデミアと無視してきた日本のアカデミア］

2014 年 1 月 16 日のノースカロライナ州立大学でのオバマ大統領演説は 1984 年以来続く米国 NSF[5]のエンジニアリングリサーチセンター（ERC）制度のパワーエレクトロニクス分野での成功を印象付けた。ERC では、エンジニアリングの下に基礎研究と技術を集結したシステム志向（System motivated）な仕組みを前提としている。欧米はエンジニアリングを技術革新の中核に置き、我が国が得意とする「成長の木」モデルから「コンカレント」モデルにいち早く移行していた [6),7),8)]。ERC 制度で生み出された人材（エンジニア）の雇用状況のサーベイを行い ERC の人材育成面での制度設計へフィードバックしている。過去に設立された多くの ERC が NSF 資金終了後も、企業等からの資金により世界をリードするセンターとして活動を続けている [9)]。コンカレントモデルのため、産業化出口を明確にした研究がなされており、多くの企業がアカデミアに研究資金を提供している。また、それを可能にする契約方法の研究も進んでいる。欧州の場合は、ECPE[10)]などの企業主導のコンソーシアム法人が成立する前から、大学と企業の間での人材交流が盛んであることはよく知られている。また、世界的なコンソーシアムの設立と維持に地方自治体が積極的にかかわっている。政府、自治体の関わり方も含め、世界的な取り組み状況の比較調査が強く望まれる [11)]。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［欧州］

独インフィニオン社が米 IR（インターナショナルレクティファイア）社を買収し、世界最大のパワー半導体メーカーが出現した。買収の目的は、多くのマスコミが伝えている化合物パワー半導体技術の確保ではなく、インフィニオン社が得意とする比較的大容量のパワー半導体と IR が得意とするコントロール IC および小中容量パワー半導体の相互補完および、以下に述べる莫大な 300mm 生産インフラに対するマーケットチャンネルの確保であろうと考えられる。EU 資金も確保し、100 億円以上の規模によるシリコンパワー半導体製造の 300mm 化研究を進めている。パワー半導体用の高品質シリコンウエハー基礎研究も進む。アカデミアも連携して超高電圧直流送電用高性能シリコン IGBT の研究企画も始まっている。

［米国］

米政府、140M$をパワーエレクトロニクスおよびパワー半導体（化合物）へ投資することを決定した。多くのベンチャー企業が資金獲得に動いている。シリコンパワー半導体では日、欧に後れを取っており、化合物パワー半導体に研究資金を集中している。パワーエレクトロニクス技術全般の方向付けは FREEDM12)、CPES9)などの NSF/ERC コンソーシアムが先導している。また ARPA-E(DoE)によるプロジェクト（例えば SWITCHES：パワー半導体による米国の対中国モノづくりコスト競争力強化）が進んでいる。

［中国］

ワイドバンドギャップ半導体の国プロがいくつも進んでいる。また、新幹線向けの 3.3kV の IGBT は試作が完了している。主要な学会等への論文投稿が急速に伸びている。国内需要だけで莫大な市場がある。主要な国際学会を誘致。

［台湾］

政府研究資金による化合物パワーデバイスの研究開発が企画されている。GaN は 8 インチによるファウンドリービジネス化を狙っている模様。車載用パワーIC 等はファウンドリービジネス化を完了。高耐圧 IGBT も企業ならびに大学で開発。

［韓国］

台湾と同様。サムソン、現代系の企業がパワー半導体に参入を狙う。90 年代から米フェアチャイルド社のパワー半導体工場（IGBT 主力工場）が仁川にあり、8 インチ化はすでに完了。

（６）キーワード

CPS（サイバーフィジカルシステム)、パワーエレクトロニクス用通信プロトコル、新世代シリコンパワーMOSFET, 新世代 IGBT、信頼性設計、ノイズ設計、統合設計技術、コンカレントモデル、高品質・高生産性パワー半導体用ウエハー、信頼性評価技術、ネガワット・コスト

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	パワー半導体、パワーエレクトロニクスの新規コンセプト発表が、欧州に一歩遅れている。
	応用研究・開発	○	→	高耐圧シリコンデバイス技術は欧州と肩を並べ世界をリード。低耐圧は徐々に後退が始まっている。システム化研究は欧州に遅れが始まっている。CPU電源など低電圧系では米国に遅れが始まっている。新材料パワー半導体では米国、欧州に遅れ。
	産業化	◎	→	パワー半導体の300mm化に対応できる企業の不足。大容量・高電圧パワーエレクトロニクス産業が世界トップ企業になりきれていない。CPU電源などでは、米国、台湾に遅れ。水平分業では台湾・韓国に遅れ。
米国	基礎研究	◎	→	化合物パワー半導体が突出して高い研究レベルを維持。市場の大半のシリコンでは欧、日に遅れ。CPSではMITなどが研究を始めており、今後先頭を行くポテンシャルあり。人材の排出には力を入れており、低電圧・小容量パワーではベンチャーが多く生まれている。次の世代が育ちつつある。
	応用研究・開発	◎	→	GEなどが本格的にパワー半導体からシステムまでを再構築。GEが得意としている分野、航空機、PC、防衛、宇宙などで研究が盛ん。CPU電源は依然として強い。インテルなどが先導。
	産業化	○	↗	水平分業を活用したデザインベンチャーは活性化だが、現状コモディティーのみ。最近はクリーンルームを買収する例も増えており、インフラや自動車への参入の機会を狙い始めている。化合物の市場自体はまだ小さい。
欧州	基礎研究	◎	↗	シリコンパワーデバイス、化合物、パワーエレクトロニクス回路、ネットワークすべての領域でバランスよく研究が行われている。この20年間でコンカレント型研究が定着。コンソーシアムなどを通じてロードマップ構築を世界的にリード。
	応用研究・開発	◎	↗	EUのフレームワークプログラム（FP）等の支援で、多岐にわたる研究を行っている。パワーエレクトロニクスコンソーシアム（ECPE）によるロードマップでも先導。応用から信頼性までいち早く標準化を行っている。
	産業化	◎	↗	ABB、シーメンスといった大手が堅調。インフィニオンはEU資金も獲得し、パワー半導体に特化した300mmウエハー試作工場を世界で初めて整備。
中国	基礎研究	△	↗	新幹線や発電などインフラの輸出を考えており、キーデバイスの一つであるパワー半導体およびパワーエレクトロニクス研究を国プロで活性化（化合物、シリコンパワー（特にIGBT））。拠点大学が研究を加速。基礎研究での米国との結びつきが強い。３kV級のデバイス試作は完了。
	応用研究・開発	○	↗	企業が拠点大学と連携して研究を行っており、基礎研究と応用研究・開発が一体化。
	産業化	○	↗	外国企業の誘致も含め活性化。コモディティーでは生産拠点になっている。インフラ系、CPSでは日米欧に遅れ。
韓国	基礎研究	△	↗	方向性が見えにくいがパワー半導体およびパワーエレクトロニクスの重要性は認識。海外の研究者を呼び情報収集。
	応用研究・開発	○	→	状況が見えにくいが、大手企業内で研究・開発が進んでいる模様。
	産業化	○	→	フェアチャイルドの工場があり、米国とのチャンネルも強固。

台湾	基礎研究	△	↗	TSMCおよびその傘下の企業が一部非公開で研究開発。清華大学、台湾国立大学が中心に研究が活発化。ITRIも積極的に先導。韓国に比べ研究者間の連携が強い印象。化合物には政府資金が入る。
	応用研究・開発	△	↗	コモディティー電源で非常に強い企業があり、それらが米国大学や企業と連携して研究を進めている。
	産業化	○	↗	コモディティー電源等での強みを生かしつつ、今後確実に中国の産業用、自動車用市場を狙ってくる。

（８）引用資料

1) 「2050 年における省エネルギー社会の実現に向けた電気エネルギー有効利用に関わるエレクトロニクス技術の調査」NEDO 平成 19 年度調査報告書
2) 「2050 年における省エネルギー社会の実現に向けた電気エネルギー有効利用に関わるグリーンエレクトロニクス技術」に係る調査研究、NEDO 平成 20 年度調査報告書
3) 「2030 年に向けた低炭素社会実現のためのエレクトロニクスの役割」NEDO 平成 23 年度調査報告書
4) 「次世代パワーエレクトロニクスとそのシステム」SIIQ PRESS、VOL. 22, 2012
5) Science The Endless Frontier-A Report to the President by Vannevar Bush, Director of the Office of Scientific Research and Development, July 1945, United States Government Printing Office, Washington: 1945.
6) National Innovation Initiative, “Innovate America”, Council on Competitiveness (CoC), 2005
7) “Best Practical Manual”, NSF/ERC, erc-assoc.org.
8) 大橋弘通「日本型オープンイノベーション」、科学技術未来戦略ワークショップ「革新電池オープン・イノベーション」報告書、CRDS-FY2012-WR-17, 2013
9) CPES, http://www.cpes.vt.edu/ (Center for power electronics and systems, NSF-ERC)
10) ECPE, http://www.ecpe.org/ (European center for power electronics)
11) 「(鼎談) 日米欧に見るパワーエレクトロニクスの新潮流」オーム社 技術総合誌 OHM 2007 年 10 月号(Vol. 94 No.10) 2007.
12) FREEDM, http://www.freedm.ncsu.edu/ (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management Systems Center, NSF-ERC)

３．２．９　センサー

（１）研究開発領域名

センサー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

半導体デバイスを基盤とするセンサー技術開発は、インターネットにすべてのものがつながり（IoT：Internet of Things)、大量のデータ解析に基づくビッグデータビジネスの情報の入口としてますます重要性は増している。特に実空間に埋め込まれるセンサーは、災害リスク、健康維持などをはじめとする様々な地球的課題解決に資すると考えられるが、少量多品種であるセンサーに関する用途に合わせた製作技術、並びに用途開拓などに研究開発課題がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

“センサー”デバイスは、インターネットにすべてのものがつながり（IoT：Internet of Things)、大量のデータ解析に基づくビッグデータビジネスの情報の入口として、その重要性は、今後益々重要性を増すと考えられる。特に、WSTS (WORLD SEMICONDUCTOR TRADE STATISTICS：世界半導体市場統計) 2014 において、半導体市場はドルベースで前年比+4.8%の堅調な伸びである一方、センサー市場は+9.1%と顕著な成長が予想されている[1)]。その要因として、センサーが IT 機器、ロボット・車などへの情報入力装置として重要であることは広く知られているが、今後は、医療・ヘルスケア、農業・環境、インフラ（橋梁、道路、トンネル等）その他、全てのものにセンサーを設置しばらまくことで大きな市場規模で利用することが予想されるからである。その重要性は産業界・研究者の皆が認めるところであるが、新規デバイス（センサー）開発・製品化に向けた国内の産業界の動きは一部を除いて鈍い。その原因としてセンサー自体の既存マーケットが多品種・少量という特性に起因している。一方その概念を打ち破るようなビジネスモデルが国内外で出てきている。日本の産業競争力の強化に深い関心を持つ産業界の有志が集まる産業競争力懇談会の 2013 年度の報告書でも、「社会的課題の解決」や「人と環境との調和」へ向けた「機能」の追求が求められはじめており、異業種とのアプリドリブンの研究開発が必要であるとの提言がなされている。今後センサー技術開発は、アプリケーション分野との縦型連携プロジェクトによる社会実装が益々重要となる[2)]。その世界的に代表的な動きが“トリリオンセンサーユニバース”という、1 兆個のセンサーをばらまいて、様々な情報を取得するというコンセプトが生まれてきたことであろう[3)]。そのコンセプトでも課題とされているのが、低価格化と新規センサーの開発である。低価格化については、フレキシブルエレクトロニクスによる解決法が期待されている[4)]。また、新規センサーの必要性は誰もが考えていることであるがセンサー事業化には約 20 年必要とされており、“普及が先か低価格化が先か”という問題に直面しており、その活動は国内外でも鈍い。最近の注目動向については、（５）を参照されたい。

（４）科学技術的・政策的課題

今後、様々なセンサーが社会に実装されることを考えると科学技術的課題として個々のセンサーの長寿命化と電源開発、さらには生産技術が考えられ、それらの革新的な技術開発が

必要となる。土砂崩れ、自然災害、インフラの寿命、さらに我々の健康が損なわれるなどの社会的課題の前兆を捕らえるためには、ビッグデータ解析技術と共に、複数種類のセンサーを、インフラに埋め込んだり、非侵襲（さり気なく）に取りつけたりする必要がある。しかしながら、一度埋め込んでしまうとケースバイケースではあるが 10 年以上、インフラであれば 50 年以上そのセンサーが壊れないか、もしくは壊れたときはそのアラートを出す必要がある。自立的にセンサーが長期間駆動するためにエネルギーハーベストデバイスと組み合わせるなど、電源に関する研究開発が今後重要となる。さらにビッグデータ技術を元にした前兆のセンシングの為には、微小チップに複数種類のセンサーを集積化した、少量多品種のセンサーにおける問題の解決にもつながるマルチモーダルセンサー製作技術など生産技術の検討が必要である。

マイクロ流体デバイス、ナノポア技術など活用した、バイオセンサーの基礎開発など、国内の一部の機関で研究は開始されているが、基礎研究を行っている工学分野研究者と医療分野開発者（臨床医師を含む）との連携による異分野融合開発体制の構築が必須である。異分野・許認可（倫理委員会、プリミティブな成果を検証するための仕組み。医学部などの医者に加えて看護系の研究者との連携など）に関する支援が必要となる。また、製作技術の面から考えると従来のセンサーは、半導体 MEMS 基盤技術を基に、車や電気製品，IT 関連での使用を想定して開発されてきた。しかしながら、今後開発すべき IT とヘルスケア・生命・環境をつなぐセンサーは、土壌、河川、生体内、医療環境分野において Wet 環境での使用が必須となり、革新的な製作技術の誕生が必要である。これまでのセンサーは半導体微細加工技術を基盤に進められており、Wet 環境での信頼性、耐久性を含めた技術的な課題が存在している。欧米において 10 年ほど前から MEMS・バイオセンサーデバイスをプラットフォームとした細胞・生体高分子の研究用デバイス、細胞・組織両方を対象とする再生医療用センシングデバイスが重要と考えられ研究が続けられているが、マーケットが不明確なため基礎研究の域を出ることができない。また、再生医療の重要性が急激に高まることを予想すると、細胞・生体と IT（情報化社会）をつなぐためのプラットフォームの研究開発を政策的に行うことが必要である。さらにこれらが実現できれば生体分子や細胞と電子デバイスを融合したハイブリッドセンサー（感受部は生体分子、信号処理部は電子デバイス）が実現可能である。その実現のためには、半導体・MEMS 等に代表される半導体（無機物）と生体との界面について学問的に捕らえるための基礎研究が必要と考える。

低コスト、少量多品種製造技術、例えばプリンテッドエレクトロニクス技術、モジュール式、低コストロールツーロールプロセス、インクジェット、。CMOS イメージセンサーや加速度センサーを除いたセンサーのマーケットの特性は“少量・多品種”といえる。それを解決する方法として、国内外での印刷技術やロールツーロールプロセスにより低価格で製作するプロセス技術の検討やセンサーに必要な様々な部品をモジュール化して組み立てる技術、ラミネート加工によるパッケージ技術の開発が始まっているが、産業化を見据えた製造技術の検討が今後ますます必要となる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

アプリケーションドリブンでセンサー業界の市場拡大を図る急先鋒が Dr. Janusz Bryzek が提唱する現在の 100 倍規模、年間 1 兆個を上回るセンサーを活用する社会を作るという、“トリリオンセンサーユニバース”というコンセプトに基づいた動きである。このビジョンに日米欧の産業界・研究機関を巻き込み、数ヶ月に 1 度の、“TSensors Summit”という会議で頻繁に情報交換を行いながら、2023 年を目標に 1 兆個のセンサーが出荷され、社会に実装されるというシナリオに基づいたロードマップ作成に取り組んでいる。コンセプトが先行し具体的な方策については今後の課題ではあるが、これまでセンサー業界の課題であった“少量多品種”を製造プラットフォームの共通化、標準化によって打破することを考えている。大量のセンサーをばらまいて情報を取得するという概念は、UC バークレイ校が提唱した“Smart Dust”が IoT 社会、ビッグデータ処理・ビジネスが顕在化した現在ならではの提案であると考える。

国内では JST（科学技術振興機構）の COI プログラムにおいて、アプリケーションドリブンなプロジェクトが展開されている [5]。このプロジェクトは国内の企業と大学・公的研究機関が連携して進めるプロジェクトであり、センサーを活用した医療・ヘルスケア関連のサービスを目指して健康長寿社会を実現することに注力されている。中でも東北大学が中心となり進めている課題は、従来のセンサーに加え超小型センサーの開発とそれを用いた個人行動、ゲノム情報を一元に管理することを目指しており、その成果に注目したい。また、内閣府が主導する科学技術施策である戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において、インフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関するプログラムが立ち上がり、社会インフラの老朽化対策に IT で貢献する上で、センサーを活用し老朽化対策に寄与するための検討が開始されているが、具体的な課題抽出は今後の課題となっている [6]。一方、農林水産省においては、“攻めの農林水産業の実現に向けた、革新的技術緊急展開事業”の中で、センサーを活用し革新的な生産技術の確立を目指したプロジェクトが始まっている。農業に関しては、通信事業者、大手電機メーカー、機械メーカーなど国内の企業の参入が活発化している [7]。また、新たな医療センシングシーズとして、人体から放出される臭いやガスなどの気体や、生体中のイオンなどの不可視情報の可視化技術についての研究が活発化している。

（６）キーワード

トリリオンセンサー、インフラセンサー、フレキシブルセンサー、オンサイトモニタリング用センサー、センサーの長寿命化、エナジーハーベストセンサー、生体センシング、再生医療用センシング、CMOS 集積化センサー技術

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・MEMS技術を利用としたセンシングデバイスに関する研究は、米国に並んで活発に研究が進んでいる。米国に比べて、バイオセンシング、生体埋め込みセンサーに関する研究が後発的ではあるが、慣性力センサーやイメージセンサーに関しての優位性は保っている。
	応用研究・開発	○	↗	・NEDOのグリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト、JSTのCOIストリーム、SIP等で検討開始 ・IT農業関連への応用研究が活発化
	産業化	◎	→	・自動車関連センサー、携帯電話用センサーなどの開発に力点が置かれているが、10-20年後に必須となる生体埋め込みセンサー、バイオセンサーに関連の事業化が遅れている。現在農業に関する動きが活発化
米国	基礎研究	◎	→	・体内埋め込みセンサーに関して生物とロボットとのインターフェースに向けたセンサー開発は依然活発 ・ナノ材料とシステムを集積化したナノ材料の本格的な実用化がNSFのプロジェクトとして始まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	・印刷技術やロールツーロール、モジュール化により、安価で大量にセンサーデバイスをつくるプロジェクトが進んでいる。 ・トリリオンセンサーユニバースをはじめとするビジネスモデルの検討が活発化（標準化をねらう）
	産業化	◎	→	・CMOSによりアレイ化したバイオセンサー（水素イオンセンサー）とこれまで米国の研究グループが行ってきたマイクロ流体デバイス技術ならびにDNAシーケンシング技術が結びつき、100ドル、20分で個人のDNAシーケンシングができる装置の販売が始まっている。（Life Technology社）
欧州	基礎研究	○	→	・欧州のセンシングに関するプロジェクトはEPoSS：European Technology Plathome on Smart System Integration のプロジェクトの一つとして展開されている。
	応用研究・開発	○	→	・EPoSSプロジェクトによる応用を目指す企業、研究機関とプラットフォームを持つ機関との共同研究を推進している。 ・IMECにおいてシリコン技術を基盤した複数種類のセンサーと集積回路を一体化するウェアラブルセンサー端末検討
	産業化	◎	→	・STMicronが進めているMEMSセンサー事業（加速度センサー、圧力センサー、慣性力センサー）は堅調に行われており、さらに健康、バイオセンサー事業への展開を進めている。
中国	基礎研究	△	→	・バイオセンサーに関するセンサー開発については、国際会議などの発表を見る限りレベルも低く古典的な手法にとどまっている。
	応用研究・開発	○	↗	・中国の課題にソリューションを与える社会基盤を構築するためにセンシングネットワーク研究について、国を挙げた研究が進められている。
	産業化	○	↗	加速度センサーなど生産拠点が日本から中国に移行している。携帯電話、車などへの搭載が主な市場のため。

韓国	基礎研究	△	↘	韓国研究機関でのセンサーデバイスの研究者人口は増えていない。理由はディスプレー、LED関連に注力しているため。
	応用研究・開発	△	→	ベンチャー中心、グルコースセンサーなどの開発が行われているが大きな動きはない。韓国大手企業は米国などのシーズを取り入れる傾向。
	産業化	○	→	サムソンを中心としてセンサーの産業化が進んでいるが、その中心的なテーマはイメージセンサーになる。
台湾	基礎研究	○	→	台湾の研究機関によるバイオセンサー関連の研究が少数ではあるがすすんでいる。
	応用研究・開発	△	→	センシングを中心として大きな動きは認められない
	産業化	○	↗	センサー・MEMSデバイスを作製するためのプラットフォームとして、台湾CMOSファンダリー大手（TSMC）が力を入れている

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）産業競争力懇談会 2013 報告書： http://www.cocn.jp/report/index.html
2）JEITA 半導体技術部会報告，WSTS 2014 年春季半導体市場予測について：
http://semicon.jeita.or.jp/statistics/docs/20140603WSTS.pdf
3）TSensor Summit for Trillion Sensor Network：http://www.tsensorssummit.org/，日経エレクトロニクス，4-28 （2014） “1 兆個のセンサー社会，始動”
4）https://www.parc.com/services/focus-area/flexible-and-LAE/ （印刷技術）
5）センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム：http://www.jst.go.jp/coi/site/site.html
6）戦略的イノベーション創造プログラム（SiP）： http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/
7）“攻めの農林水産業の実現に向けた，革新的技術緊急展開事業：（例えば）
http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/131226.htm,
http://www.delica.co.jp/data/20140623.pdf，日経エレクトロニクス 9-1 (2014) 農業と作る電機の未来.

３．２．10　アナログ回路

（１）研究開発領域名

アナログ回路

（２）研究開発領域の簡潔な説明

実世界（Physical）と計算機（Cyber）の間の取り持つインターフェースとなるアナログ回路の重要性が増してきている。たとえば、今後発展が期待されているセンサーネットワークの構成要素であるセンサーノードにおいては、極低電力動作や種々のセンサーデバイスに対応するためにチップ製造後に特性をフレキシブルに変えることができるアナログフロントエンド回路の実現が期待されている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景］

近年の技術動向として、種々の情報端末で収集したビッグデータをクラウドコンピューティングで解析し様々な分野で応用する試みが大きな注目を集めている。現状は、例えば PC やスマートフォンが情報収集端末の主役であり、検索エンジン等で人が入力したデータを収集しているが、将来、無線インターフェースを有するさらに小型のセンサー端末が実用化されると、自然界や人間の活動に関するこれまでとは桁違いに大量の信号を人の手の介在なく収集することが可能となる。これらのデータを活用することで、医療、教育、農業、環境、交通、防災、等々の分野において新たなサービスが提供され社会システムが大きく変わると考えられている。最近、Trillion sensors universe[1)]というキーワードが良く使われるようになってきているが、将来年間 1 兆個のセンサーデバイスが流通すると考えられている。より小型のセンサー端末が普及するためには、端末の中で太陽電池や振動発電といった環境発電素子を使って動作する、超小型、極低消費電力のインターフェース回路の実現が鍵を握る。また、センサー端末にはセンシングする信号に応じて様々なセンサーデバイスが用いられるが、その信号を読み取るためのインターフェース回路であるアナログフロントエンド回路に要求されるスペックも多岐に渡る。これらの要求仕様に応じたセンシング回路の専用設計は、開発期間やコストの増大につながり普及の阻害要因となる。低消費電力動作を実現しつつ、様々な要求仕様にフレキシブルに対応できるようなアナログ回路、究極的にはソフトウェアで動作を定義できるようなプログラマビリティを有するアナログ回路技術が必要となる。また、センシングする信号の周波数は信号の種類により大きく異なるため、対象信号の帯域に応じて回路の動作速度も変え、常に最適な消費電力で動作させることができるパワースケーラブルな特性が重要となる。さらに、センサーノードではセンシングをするときのみ端末を起動し、それ以外の時間はスリープ状態に入れることで消費電力の削減を図ることが期待されるが、そのためにはできるだけ短時間で回路を起動できなければならない。このような高速起動も要求される重要な特性の一つである。

［これまでの取り組み］

プログラマブルなロジック回路として用いられる FPGA（Field Programmable Gate Array）は、特にラピッド・プロトタイピングや少量多品種製品において不可欠なデバイスと

なっている。

アナログ回路においてもプログラマビリティを有するデバイスとして、FPAA（Field Programmable Analog Array）が 1991 年にトロント大学の Lee らのグループから提案され実験結果が報告されている [2]。提案では、差動対、電流源、スイッチから構成される CAB（Configurable Analog Block）がアレイ状に配置され、スイッチ等の接続状態を再構成することで特性可変性が実現されていた。アクティブフィルタの構成で頻繁に現れる Gm セル間の信号帰還のトポロジーを効率よく構成できる六角格子上に CAB を配置する方法が考案され、100MHz 程度で動作する帯域通過フィルタも実現されている [3]。ただし、消費電力は 70mW と大きい。製品レベルでは米モトローラが 1997 年に発表した製品の技術を引き継ぎ、英 Anadigm 社から FPAA の製品が販売されている。信号帯域は 2MHz 程度であり、増幅、加減算、乗算、フィルタリングの機能が実現されている。消費電力は Small circuit mode で 15mA 程度、High Power mode で 73mA 程度である。

一方で、FPAA よりも粒度を荒くして、再構成の自由度を狭める代わりに、性能の改善を図るアプローチとして PSoC（Programmable System-on-Chip）と呼ばれるものがある。可変ゲインアンプ、フィルタ等の特性可変な多種アナログ IP コアとマイコンを混載している場合が多い。米 Cypress Semiconductor 社が 2002 年に製品販売を始めている。また、同様のアプローチを用いてルネサスエレクトロニクスから Smart Analog と呼ばれる製品ラインナップが 2012 年から販売されている。DAC（Digital to Analog Converter）の消費電流は 1.5mA,利得帯域幅（GB：Gain Band width product）積が 2MHz 程度の可変ゲインアンプが 0.5mA で動作する。センサーデバイスの型番を設定するとそのセンサーに最適なゲイン、遮断周波数が設定され、ユーザーが煩雑な設定をしなくても、多種類のセンサーに対応したアナログフロントエンドを使えるようになっている。アナログにおいても、プログラマブルなデバイスの普及には、このようなユーザービリティを向上されるためのプラットフォーム、開発環境をセットで提供することが重要となる。

［今後の取り組み］

前述のとおり、プログラマブルアナログの研究は早くから行なわれており、2000 年前後からは実際に製品の販売も始まっている。ただし、プログラマビリティを得る代償として、消費電力、帯域、回路面積のオーバーヘッドが生じることもあり、デジタルにおける FPGA のように広く普及しているとは言いがたい。しかしながら、今後特にセンサーネットのような少量多品種に対応でき短期間に開発することが必要となるアプリケーションが有望視される中、FPAA や PSoC のような製品の普及が進むものと思われる。一方で、環境発電デバイスでの駆動を狙ったような微小センサー端末においては、プログラマビリティを確保しつつ、やはり消費電力を極限にまで低減することが不可欠であり、当分野での研究開発のいっそうの加速が必要となる。

FPAA においてはブロック間を接続する配線の寄生容量等で、帯域が制限される。初期の頃は連続時間系回路の実装が主流であった。これは、離散時間系ではスイッチトキャパシター回路におけるセットリング時間に要する時間が長くなり、扱える信号帯域が連続時間系よりも狭くなるためである。しかし、最近、米 MIT の Lajevardi らがコンパレーターによる Zero-Crossing 方式を用いた、再構成可能な AD 変換器、スイッチトキャパシタフィルタ、

可変ゲインアンプを提案してテストチップによる実証を行なった [4]。ポイントは従来のオペアンプのような消費電力の大きな回路ブロックを排し、コンパレーターのような比較的シンプルな回路で実現している点であり、テクノロジースケーリングへの親和性の観点からも有効な手法である。いずれも離散時間系のアナログシステムである。AD 変換器有効分解能が 8bit、サンプリング周波数が 50MS/sec の AD 変換器と、遮断周波数 1MHz、3 次のバターワース特性を有する低域通過フィルタの構成が 3mW 程度の消費電力で実現できており、まだ専用設計した場合に比べて電力は大きいとはいえ、消費電力の削減および帯域の拡大が図られている。また、センサー用のアナログフロントエンドではないが、2004 年に米 TI から発表された、主に受動素子（キャパシタとスイッチ）で構成された離散時間フィルター[5]もその低電力動作、特性可変性、広帯域動作の観点から、再構成可能なアナログフロントエンド回路への適用が期待できる手法である。 初段のアクティブ回路以外は DC 電力を消費しないため、パワースケーラブルな特性を出しやすい。

（４）科学技術的・政策的課題

周知のとおり、FPGA の分野では米国の企業がほぼ全てのシェアを占めており、ゆるぎない技術的な優位性を有している。FPGA においては、単にデバイスの開発だけではなく、ユーザーにとって使いやすい開発環境等のプラットフォームを提供することも極めて重要である。これまで FPGA は消費電力やコストのオーバーヘッドがある程度許容されるニッチな分野、例えば、プロトタイプ品の開発や通信系の基地局等での適用が主であったが、近年は LSI 製造コストの高騰に加え、少量多品種のアプリケーションに短期間で製品を開発する必要に迫られるケースが増えてきていることもあり、これまでは ASIC が用いられてきた分野でも FPGA に置き換えられるケースが増えてきている。例えば、最近では米 Lattice Semiconductor の FPGA が腕時計に使用されるに至っている。

FPAA や PSoC においても、専用回路に対して、消費電力、コスト（回路面積）、動作帯域のオーバーヘッドが大きく適用範囲は限られてきた。特にデジタルに比べて、アナログはプログラマビリティを持たせることによる、性能へのしわ寄せが大きく FPGA よりも普及は進んでいない。しかしながら、産業、社会に対する波及効果の極めて大きな将来のアプリケーションと目されるセンサーネットワークにおいては、センサーノードは多種多様の信号をセンシングするため、必然的に少量多品種の性格を持つ。一方で、低消費電力や低コストに対する要求は非常に厳しい。これらのトレードオフをうまく両立させることができる、再構成可能なアナログ回路の実現が必要となる。再構成可能なアナログ回路の研究開発においても独創的なアイデアは米国発であるケースが多い。また、開発環境を含むプラットフォームの構築、提供能力も優れている。一方、日本は低電力回路技術の分野で先行しており、また、新たなアプリケーションを使用することに対する国民の興味関心も高い。これからは、専用回路での低電力回路技術を突き詰めるだけではなく、たとえば再構成可能な回路における低消費電力の技術体系を構築すること、さらに、それらのハードウエアをユーザーが簡便に使えるようにする環境の開発に注力することが重要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国は、2000 年よりも前にワイヤレスセンサーネットワークの概念である Smart dust[6]

が UCB から提唱されているように、以前から低電力回路の研究が盛んに行なわれてきた。技術的な課題から実用化はされていないが、2013 年に The Trillion Sensors Universe が UCB および Fairchild から提唱され、以降 TSensors Summits が頻繁に開催されるなど、センサーネットワーク普及の機運が高まってきている。極低電力センサーノードの実現に向けた大学、企業の取り組みも非常に活発である。また、2013 年に BRAIN イニシアチブが発表され、その中に Brain Machine Interface(BMI)の研究が組み入れられているが、インターフェースにアナログ回路技術が重要な位置をしめる。

欧州では EU の FP7 (Framework Programme 7)の枠組みで研究プロジェクト予算がつき、センサーネットや低電力回路技術に関しても多額の研究資金が提供されている。例えば、Zero Power Sensor Systems を目差した Guadian Angels[7]プロジェクトの準備が進められている。また、EURO-DOTS (European Doctoral Training Support in Micro/Nano-electronics)という仕組みが存在し、博士課程学生のトレーニングがなされている。

（6）キーワード

極低電力回路、極低電圧動作、アナログフロントエンド、　再構成可能、プログラマブル、ソフトウェア定義、無線センサーネットワーク、環境発電、間欠動作、高速起動

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーンITプロジェクト）で0.5V回路技術が開発された。東大、東工大、慶大、神戸大、静岡大等から継続的に研究報告が行なわれているが、学術としての体系的化が弱い。
	応用研究・開発	○	→	低電力技術が求められる応用分野が日本には多いが、現状、大学での研究と実用化の間に距離がある。
	産業化	○	↘	ルネサスなどの半導体メーカーに一定の技術力はあるが、全体としてはプレゼンスが弱い。
米国	基礎研究	◎	→	UCB, Stanford, MIT, Oregon大学など低電力アナログ回路においてユニークな提案がなされ、さらに体系的な研究が継続し、学会発表も盛んである。
	応用研究・開発	◎	→	高周波での離散時間アナログ信号処理やなどが、いち早く製品化されるなど、基礎研究から応用への移管がうまく行っているケースが多い。
	産業化	◎	→	Analog Devices, Texas Instrumentsのようなアナログ回路技術の強い大手の老舗企業が大きなシェアを維持する一方で、ベンチャー企業が多数起こされている。1980年代以降に設立されたベンチャーで現在では大手の一角を占めるQualcommやBroadcom、中堅のMaximやLinear Technologyなどアナログに強みを持つ企業が多く競争力は抜き出ている。
欧州	基礎研究	◎	→	IMEC, KUL, Delft, Eindhoven, Twente工科大学等、ベルギー、オランダの大学、研究機関で継続的にトップクラスの性能の回路の報告がなされている。特にIMEC (Eindhoven)は無線センサーノード用の低電力回路に力を入れて研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	IMECが世界各地の企業と研究プロジェクトを行なっており、応用を意識した研究を行なっている。
	産業化	○	→	STマイクロエレクトロニクスがMEMSセンサーに力を入れており、センサー用のアナログフロントエンドICのラインナップも多く揃え、常に一定のシェアを確保している。
中国	基礎研究	△	↗	中国本土では、目立った研究が継続的に報告される域には達していない。台湾では、国立台湾大学やMediaTekから性能ではトップクラスの低電力データコンバータの報告が頻繁になされるようになっている。
	応用研究・開発	○	↗	ECG等で実用化を意識した完成度の高いチップの報告がなされるようになってきた。
	産業化	△	↗	低コスト向けスマホのチップセットでシェアを拡大しているMediaTekが無線トランシーバチップの提供を始めるなど、アナログ技術にも力を入れきている。
韓国	基礎研究	○	→	KAISTでBody Area Network(BAN)やヘルスケア用の低電力アナログ回路の研究が継続的になされ、学会発表件数も増加している。PostechやSamsungからのPLL等の研究報告も多い。
	応用研究・開発	○	↗	実用志向であり、回路の独創性というよりは実装力が強い。大学の研究においてもデモが可能なレベルのSoCに仕上げてくる。
	産業化	△	→	個別ICでの製品は少ない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) http://www.tsensorssummit.org/
2) E.K.F.Lee and P.G. Gulak, "A CMOS field-programmable analog array," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 26, No.12, pp.1860-1867, (1991).
3) Joachim Becker, et.al., “A Field-Programmable Analog Array of 55 Digitally Tunable OTAs in a Hexagonal Lattice,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 43, No.12, pp.2759-2768, (2008).
4) Payam Lajevardi et.al., “Zero-Crossing Detector Based Reconfigurable Analog System,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 46, No.11, pp.2478-2487, (2011).
5) K. Muhammad et.al., “A Discrete-Time Bluetooth Receiver in a 0.13µm Digital CMOS Process,” ISSCC 2004
6) J. M. Kahn, R. Katz and K. Pister: “Next century challenges: mobile networking for “Smart Dust””, Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 271–278 (1999).
7) Zero Power Sensor Systems http://www.ga-project.eu/

３．２.11　情報処理

（１）研究開発領域名

情報処理

（２）研究開発領域の簡潔な説明

様々な情報・データを目的・用途に合わせて処理するプロセッサーやコンピューターやその方式に関する研究開発。また単なるデータだけでなく、多様で多層の意味を含む情報に対してその認識や判断、理解といった高度な処理を行なう方式の研究開発も含む。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

情報処理は、ソフトウェアを実行することによって各種様々な情報・データを柔軟に処理するプロセッサーやコンピューターの研究開発領域である。言うまでもなく、サーバーや情報通信機器、ロボットや自動車・産業機器の自動制御・自動運転の中核として欠かせない領域である。この領域では、情報処理の高速化、即ち大量のデータや大規模なソフトウェアをいかに短時間で処理するかが基本的な研究開発課題である。また、プロセッサーやコンピューターがパーソナル・モバイル機器や産業機器、自動車、通信ネットワークなどに組み込まれて大量に社会に導入された結果、情報処理エネルギーの総合的な低減も極めて重要な研究課題となっている。

従来のプロセッサー、コンピューターでは、データやデータ・ストリームを入力し、これをソフトウェア実行により処理した結果を新たなデータやデータ・ストリームとして出力する、いわゆるフォン・ノイマン型が基本構造（アーキテクチャー）となっている。これに対して、主に半導体技術の革新により更に大量の入力データの高速処理が可能になる技術トレンドを踏まえて、単なるデータやデータ・ストリームではなく、多様な意味を含んだ情報を直接入力し、その認識や判断などのより高度な情報を出力する新たなプロセッサー・アーキテクチャー、コンピューター・アーキテクチャーの可能性が高まっている。このような研究課題もこの領域に含まれる。このように情報処理は、コンピューター開発の歴史と未来そのものと言うべき研究開発領域である。

現在、この領域は単一のコンピューターによる情報処理からネットワークに接続された大規模なコンピューター群による情報処理へと大きな転換点を迎えている。今まさに、従来のコンピューター・アーキテクチャーより上位の新たなレイヤーで、省エネルギー化や産業・自動車・社会システム応用に多くの実績を持つ日本の特色を生かしたプロセッサー・アーキテクチャー、コンピューター・アーキテクチャーの研究開発の可能性、重要性が高まっている。また他の領域の基盤として、この領域の研究開発を強化して日本の持つ課題やニーズ、日本がこれまで積み上げてきた問題解決の枠組みや概念、実績を反映させることが、日本の産業競争力の強化や影響力の拡大につながるものと期待される。

この領域は、主として次の３つの技術トレンドによって研究開発が牽引されている。

・ 微細化による高集積化

半導体の微細化製造技術により、チップ上の信号伝播は高速化し、低電力化する。

これはプロセッサーの高速化と低電力化に直結する。更に、チップ上に占めるプロセッサーの面積は縮小し、その結果、フォン・ノイマン・アーキテクチャーの最大の課題であるプロセッサー・メモリー間ボトルネックの緩和のために大容量のメモリーをチップ上に集積することが可能になる。これもまた、ソフトウェア実行の高速化と低電力化につながる。

更に半導体の微細化が進んだ結果、2003 年頃からこの 10 年間、1 つのチップ上に多数のプロセッサー＋メモリーの組合せ（コア）が搭載されるようになった。1 チップ化されたマルチコア・プロセッサーである。マルチコアでのソフトウェア実行には、1 つのソフトウェアの処理を各コアにバランスよく割り当てて分担、協調させるソフトウェア制御技術の研究開発が必須だが、その結果、マルチコアもまたソフトウェア処理の高速化につながる。このようなマルチコアのコンピューター・アーキテクチャーと、マルチコアで幅広いソフトウェア処理をいかに高速化するかの研究開発が重要であり、その発展がしばらく続く。

・ ダウンサイジング、パーソナル化、モバイル化

半導体の微細化によるもう一つの大きな効果がコンピューターの小型化・低コスト化、いわゆるダウンサイジングである。以前は大型のコンピューターでしか実現できなかったソフトウェア処理が、今や PC やスマートフォンでごく普通に実現され、加えてパーソナル・ユースに即した多数の新たなソフトウェアが開発されている。更に、微細化による低電力化に支えられた情報処理機器のモバイル化もこのトレンドの一側面である。

ダウンサイジングのトレンドに沿った研究開発として今後ますます重要になるのが、ユーザーという「人」だけでなく社会や家庭、自然界の環境下の「もの」とのインターフェースをとるプロセッサー「組込みプロセッサー」と、これらを有線・無線のネットワークでクラウドとつないだ大規模でオープンなコンピューター・システム、「IoT（Internet of Things）」や「CPS（Cyber Physical System）」と呼ばれるシステムである。このようなシステムでは、社会の中に大量に存在する IT 機器や産業機器、ディスプレーや表示装置、各種のカメラやセンサー、情報インフラをネットワークで接続し、クラウド上のソフトウェア処理と連携することによって大局的な最適化や総合的なサービスを実現する。そのため、「もの」に内蔵された組込みプロセッサーは 24 時間常時「もの」とのインターフェースをとるとともに、その一つ一つは「人」の数より圧倒的に多く存在するので、消費エネルギーや動作管理、更にセキュリティや安全性の面での自律性を実現する研究開発がますます重要になる。

また、IoT や CPS では、ネットワークでつながれたプロセッサーやコンピューター一つ一つだけでなく、ネットワーク接続のプロトコルやネットワークでつながれたコンピューター群全体の制御、管理によってサービスを実現する。このように、コンピューター群全体を制御することによって機能を実現したり、消費エネルギーをコンピューター群全体というマクロ視点で削減したりするようなコンピューター・アーキテクチャーの研究開発が重要になっている。

・ ソフトウェア化

コンピューターによるソフトウェア処理の高速化の結果、必要な機能・性能を実現するソリューションの中でソフトウェアによって実現できる領域が格段に広がった。その結果、すべてソフトウェアで実現できる機能や、ハードウエア化による性能向上が少ない機能では、専用ハードウエア開発の意義は薄れ、より柔軟で開発期間・開発コストの点で優位なソフトウェアに置き換わってきた。

一方、IoT や CPS では、組込みプロセッサーは「もの」が発信する物理信号、アナログ信号と直接インターフェースをとる。センサーと組込みプロセッサーを組み合わせたノードをネットワークでつないだ「センサーネットワーク」である。センサー自身やセンサーとのインターフェースはどうしてもハードウエアになる。「人」とは異なり「もの」は用途に応じて多種多様な物理信号を発信するため、センサーに関するハードウエアは多種多様である。しかし、多種多様なハードウエアの開発は開発期間・開発コストの点でますますハードルが高い。このような課題に対し、機能や性能、基本パラメータをソフトウェアで変更できるリコンフィギュラブルなハードウエア、フレキシブル・デバイスの研究開発の意義がある。

［これまでの取り組み］

情報処理領域の研究開発、またプロセッサーやコンピューターのアーキテクチャーの研究開発は、これまで欧米が先行し、日本が追いかけてきた。PC やサーバーで先行し、市場を開拓してきた Intel や IBM、携帯電話やスマートフォンの ARM や Qualcomm、グラフィックス・イメージ処理プロセッサーの NVIDIA や Imagination Technologies はこのような欧米の例である。

これに対して日本は、市場競争力が強かったコンシューマ、自動車、産業機器市場向けの組込みプロセッサーの研究開発で欧米を追いかけてきた。組込みマイクロコンピューターのルネサスエレクトロニクスがその例である。研究開発という意味では、富士通のスーパーコンピューター用プロセッサーの開発もその例に加えることができる。

情報処理に関して、韓国、台湾、中国などの新興国は明確にターゲット市場を志向した応用研究に重点をおき、政府や大学、国立研究所もそれを支援してきた。MediaTek や Samsung がその例である。情報処理領域の研究開発に大きな影響を与えるようになったのが研究開発資産のオープン化、ライセンス化の加速である。ARM のプロセッサー・アーキテクチャー、Linux や Android の OS、各種のソフトウェア開発ツールがライセンス化、フリー化された結果、研究開発の重点はこれらを構成要素として使ったアプリケーション技術やインテグレーション技術に移ってきている。これにより、プロセッサーやコンピューターの基盤技術を独自開発できる日本の強みが相対的に薄れ、欧米だけでなく、新興国とのアプリケーション技術の研究開発競争が激しくなっている。

［今後必要となる取り組み］

情報処理の研究開発では、マルチコアや IoT、CPS といったプロセッサー群やコンピューター群で、産業分野や生活環境、社会インフラに必要な機能やサービスを如何に実現するかが今後ますます重要になる。例えば、ロボットや自動車の安全で効率的な自動運転や、セン

サーネットワークで社会環境や生活環境から集められた 24 時間リアルタイムの膨大な情報「ビッグデータ」の分析による様々な社会的サービス、個人へのサービスの実現である。

このためのプロセッサーやコンピューターは、高速で大容量なネットワークにつながれたプロセッサー群、コンピューター群として有機的に動作することが必須となる。またネットワークとしては、マルチコアのようにチップ上やモジュール、クラスタに近接して配置されるものもあれば、センサーネットワークのように無線で広範囲に展開されるものもある。いずれにしてもネットワークに接続されるプロセッサーやコンピューターの数は増える一方で、それにスケーラブルに対応できるネットワークの研究開発が不可欠である。更に、1 つ 1 つのプロセッサーやコンピューターでのソフトウェア処理を制御するだけでなく、群としてのプロセッサーやコンピューターの全体を高性能化や省エネルギー化、高信頼化に向けてマクロに管理する技術の研究開発が今後ますます重要になる。

（4）科学技術的・政策的課題

欧米では、自動車の自動運転やロボット、CPS など戦略的なターゲット分野を定めて国レベルで IoT 世代の情報処理システムのアーキテクチャーの研究開発を推し進めており、これをスマートに効率よく実現するためのプロセッサーやコンピューターに関する研究開発もあわせて推進している。また韓国、台湾などの新興国は、従来、デバイス製造の低コストの強みを生かしたプロセッサーやコンピューターの高集積化や多機能のインテグレーションに集中してきたが、今や PC やスマートフォンだけでなく、自動車や医療&ヘルスケア、電力、交通といった社会インフラなど戦略的な応用分野を設定した情報処理の研究開発投資を進めている。

日本は、製造業からサービス業まで幅広い産業インフラを持ち、それを実現するデバイス技術、ハードウエア技術、アーキテクチャー技術、ソフトウェア技術など、欧米以外ではほぼ唯一、独自技術を生み出す研究開発基盤を有している。しかし、日本の国家プロジェクトの多くは個別のデバイス技術やハードウエア技術、あるいは特定の応用に対するソフトウェア技術やシステム技術の研究開発に重点を置いてきた。IoT 世代の研究開発で重要な、戦略的ターゲットを設定し、センサーなどのデバイスから組込みプロセッサーでの情報処理、ネットワークやクラウド上でのソフトウェアなど多次元の研究開発を連携させる取り組みにおいて、欧米だけでなくアジアの新興国に対しても遅れてきている可能性がある。あわせて、IoT 世代の日本の競争力強化には、大学や公的研究機関、産業界、地方公共団体など、情報処理のデバイスから応用、サービスの研究開発の連携の場作りと活発化、発展の仕組みを支援することが重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

2014 年 8 月、IBM が SyNAPSE チップ [1)]と呼ばれる新しい非フォン・ノイマン型のコンピューター・チップを発表した。このチップは、人間の脳の情報処理からヒントを得て神経回路網での信号伝播を模擬した情報処理を行ない、明示的なプログラミングをしなくても機械学習（Machine Learning）によって物事や対象物の認識や識別を行なう人工知能的な情報処理を実行する。チップ自体は 100 万個のニューロンとこれを結合する 2 億 5600 万個の

シナプスを搭載した一種のマルチコア・プロセッサーで、１つ１つのコアはニューロンの機能を模擬し、マルチコア全体で神経回路網の機能を模擬するように構成されている。その結果、画像イメージのように多層の情報を持ったデータをそのまま入力し、神経回路網にあたるマルチコア全体で総合的に処理し、イメージに含まれた物事や対象物という意味情報を出力するという情報処理を目標としている。また、このチップのソフトウェアは、個々のコアで実行されるニューロンの機能のレベルとは別に、既存の膨大な画像イメージからの機械学習の結果としてマルチコア全体にプログラミングされたものが一種のソフトウェアとなる。同じく脳の神経回路網を模擬した技術として、最近、Deep Learning[2)]という機械学習の技術が画像認識で高い成果を上げたと注目を集めている。このように半導体の高集積化、高速化、低電力化を生かし、人間や生物の信号処理や情報処理からヒントを得て新たな情報処理の方式やコンピューター・アーキテクチャーを構築する研究開発に最近、成果が出始めており、新たな情報処理方式の性能を追求する方向とともに、この新たな技術の応用として産業的に何が可能になるのか、どんな技術分野の応用に適しているのか、汎用性はどこまであるのかといった方向での研究開発の活発化が期待される。

（６）キーワード

- マルチコア
- IoT（Internet of Things）、CPS（Cyber Physical System）、センサーネットワーク
- フレキシブル・デバイス、リコンフィギュラブル・デバイス
- スーパーコンピューター、ビッグデータ、クラウド、クラウド・コンピューティング
- 非フォン・ノイマン（非ノイマン）
- ニューラルネットワーク、ニューロコンピューター
- 機械学習（Machine Learning）、ディープラーニング（Deep Learning）

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・組込みプロセッサーや組込み制御用OSでオリジナルな研究開発と技術開発基盤を有し、大学・企業研究機関の研究レベルは高い。 ・ またスーパーコンピューター用のプロセッサーやソフトウェア開発技術でも高い研究開発、技術開発レベルを保っている。
	応用研究・開発	◎	→	・コンシューマ・通信機器、自動車・産業機器、社会インフラ（電力、交通、ホームなど）の各分野で幅広く応用研究、応用開発が実施されている。ただし、医療分野では医療と情報処理の連携が不足。 ・また、IoTやセンサーネットで応用、サービスとデバイス、情報処理を連携させる取り組みがまだ足りない。
	産業化	○	↗	・機器の産業化は活発だが、サービスと組み合わせたビジネスモデルの開発を活性化する必要あり。
米国	基礎研究	◎	↗	・オリジナルのプロセッサーやOSを有し、大学・公的機関・国防省・企業などの研究レベルは総合的に高い。
	応用研究・開発	◎	↗	・自動車、ロボット、医療、サービス、社会インフラ（電力、交通等）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。
	産業化	◎	→	・インターネットに基づくサービスのビジネス化が活発。
欧州	基礎研究	◎	→	・オリジナルのプロセッサー（ARM）やOSを有し、大学・公的機関・企業などの研究レベルは総合的に高い。更に、EUプログラムやiMECで、関連する研究開発の相互連携を適切に図っている。
	応用研究・開発	○	↗	・自動車、医療、社会インフラ（電力、交通等）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。
	産業化	○	→	・機器の産業化は活発だが、サービスと組み合わせたビジネスモデルの開発を活性化する必要あり。
アジア(台湾、韓国、中国)	基礎研究	○	→	・ARM等のライセンス技術をベースにした応用研究が中心。国家プロジェクトの支援を受けて大学・公的機関・企業の研究レベルは高い。
	応用研究・開発	○	↗	・スマートフォン・デジタル家電(韓国)、PC・デジタル家電（台湾）をベースに自動車、医療、社会インフラに応用市場を拡大する研究開発が活性化。
	産業化	○	→	・個別機器、半導体のビジネスが中心。

（８）引用資料

1) http://www-06.ibm.com/jp/press/2014/08/0801.html
2) 連載解説「Deep Learning（深層学習）」, 人工知能学会誌, Vol. 28 No. 3 (2013 年 5 月)から隔月連載

３．２．12　通信

（１）研究開発領域名

通信

（２）研究開発領域の簡潔な説明

インターネットの進展、スマホに代表されるモバイル機器のリッチコミュニケーション、さらに今後は Internet of Things への展開と、通信にかかる負荷はこれまで以上に大きくなることが予想される。そのニーズに応えるために通信領域では、大容量通信を支えるデバイスから方式まで幅広い技術の集積が求められる。本項では、その中から光通信の鍵を握るシリコンフォトニクス、無線通信の重要技術であるメタマテリアルアンテナ、ミリ波デバイス技術に関して現状の技術動向、課題などについて述べる。

(a)シリコンフォトニクス

(a)－1. 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

シリコンフォトニクスは、電子集積回路(LSI)で用いられるシリコンプロセスを用いて、光機能回路を実現する技術や実現された光機能回路をさす。光機能回路としては、たとえば光ネットワーク機器で使われる光信号の複数分岐、異なる波長の多重や分離、光信号経路のスイッチング、電気信号から光信号あるいは光信号から電気信号への変換などである。光回路の素材にシリコンを採用することで、小型な光回路と、安価な製造を実現する。

現在は石英素材で実現されている光機能回路に、シリコンを用いることで光の閉じ込めが強くなり、導波路（光の通り道）をきわめて細くできたり、急激に曲げたりでき、回路を大幅に小型化できる。さらに、成熟した CMOS シリコンプロセスで作ることができるため、製造コストの削減が期待される。シリコンフォトニクスの研究領域では、以上の小型、低コスト性を活かしながら、ユーザーが必要とする性能を実現するために必要となる導波路の設計・製造技術や光回路の設計・製造技術の確立を目的として進められている。研究開発は、当初石英を用いた光回路の置きかえを目的としたテレコム向けの活動が見られたが、現在ではシリコンによる低価格性に期待したデータセンター内外の数 10 ギガビット級での超高速接続への応用が期待されている [1)]。特に、電気通信では実現の厳しい大容量の通信を必要とするボード間、CPU 間などの高速接続に対する技術開発での期待が大きい。シリコンフォトニクスの研究開発は、国内外ともに活発に行われている。わが国は、欧州と同様に、大学や企業研究所における基礎研究を、複数の研究機関が連携した国家プロジェクトで応用実用化する動きが進められている。米国では、同様な動きに加えてベンチャー企業を軸とする実用化の動きがみられる。中国（台湾）は、シリコンファブ機能をシンガポールとともに担っているが、回路設計については特徴的な動きは見られない。韓国では、かつて取り組みが見られたものの、現在のところ顕著な動きは見られない。

(a)－2.科学技術的・政策的課題

シリコンフォトニクスでは、これまでの垂直統合を軸とした光デバイス産業と異なり、システム要求、デバイス設計、製造、実装が分業すると想定されている。しかし、分業体制が確立している電子回路と異なり、アナログ性能が必要される領域であるため、分業の境界に

おける協同スキームの確立がカギとなる。これにむけては、企業間努力を超えた枠組みが不可欠であり、そのような背景から各国で国家プロジェクトを軸とした投資が行われ、国家競争力の源泉への育成が期待されている。

(a)－3.注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

シリコンフォトニクスの製造については、一部を除きこれまで研究開発機関による小規模製造が中心であったが、ここへきて大規模シリコンファブの参入が開始されている [2)]。その１つにフランス STmicroelectronics がある。国内では、実用化に向けた技術研究組合 PETRA（Photonics Electronics Technology Research Association）が結成され、データセンター向け高速光接続技術の研究開発を大規模に進めている。米国では、DARPA がチップ間やチップ内の高速光接続、欧州では FP7 がデータセンター内のラック間、ボード間の高速光接続やシリコンフォトニクス製造に関わるプラットフォーム整備などの国家プロジェクトとして積極的な支援が行われている。

(a)－4.キーワード

シリコン、導波路、光ネットワーク、高速光接続

(a)－5.国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	東大（光源）、横浜国大（ナノフォトニクス）、東工大（化合物とのハイブリッド技術）、京大（フォトニック結晶）などの活動が顕著
	応用研究・開発	◎	↗	PETRA、NTT、NEC、富士通、沖電気、日立、産総研などでの取組が見られる
	産業化	△	→	製造の主要となるファブはまだ登場していない
米国	基礎研究	◎	↗	MIT（シリコンゲルマ光源）、UCSBなどの活動が顕著。その他多数のナノフォトニクス研究機関の活動が見られる
	応用研究・開発	◎	↗	コンピューター系のIntel、IBM、Oracle、HP、通信系のALU、Ciscoが継続的に活動。
	産業化	◎	↗	Luxtera（短距離トランシーバー）、Molex（パッケージ）FreeScale、BAESystems（FAB）など活発な活動が見られる。
欧州	基礎研究	○	↗	ナノフォトニクスで多数。
	応用研究・開発	◎	↗	ベルギーimec（研究用ファブ）、フランスLetiの活動が非常に顕著。ドイツIHP等も研究用ファブ活動を活発化。
	産業化	◎	↗	STMicrosystemsがファブとしての活動を本格化
中国	基礎研究	○	↗	CAS、清華大、北京大（ナノフォトニクス）など多数の活動あり。
	応用研究・開発	○	↗	CASはスパコン向けインターコネクトに取り組み。通信系ベンダーでも興味を示しているとの動きがみられる。
	産業化	○	↗	SMIC（ファブ）、TSMC（ファブ、台湾）の活動が顕在化しつつある。
韓国	基礎研究	－	－	目立った動きは見られない。
	応用研究・開発	△	→	Samsung、ETRI（チップ間接続）の研究発表は見られるが、全体として少数。
	産業化	－	－	目立った動きは見られない。
シンガポール	基礎研究	△	→	IME（ナノフォトニクス技術）の活動が非常に顕著
	応用研究・開発	◎	↗	IMEが、研究拠点、研究用ファブとて顕著に活動
	産業化	○	↗	ファブとしてGlobal Foundriesが継続的に活動。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(a)－6.引用資料

1)一般社団法人レーザー学会、「シリコンフォトニクスの最新の研究動向」特集号、レーザー研究、第 42 巻第 3 号 （2014 年 3 月）
2) 一般財団法人光産業技術振興協会、「光技術動向調査報告書」、2014 年 3 月

(b)メタマテリアルアンテナ

(b)－1.研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

メタマテリアルとは、広義には、波長よりも小さなスケール（例：マイクロ波帯では数ｍｍから数ｃｍのスケール）の金属・誘電体などの構造体を配置することにより、媒質の実効的な誘電率、透磁率を制御した人工的な材料である。無線通信の必須コンポーネントであるアンテナにメタマテリアルを適用することにより、アンテナの小型化や高機能化が可能となるため、産業界への応用を見据えた研究開発が各国で進展している。

適用領域としては、携帯端末や無線 LAN 機器などのコンシューマ用途、また、基地局や衛星・航空通信用のインフラ・パブリック用途などがあり、主にマイクロ波、ミリ波領域において取り組みがなされている。

メタマテリアルアンテナは、電磁波を放射するアンテナ素子そのものにメタマテリアルを用いた構成、もしくはアンテナ素子の周囲にメタマテリアルを配置した構成に大別される。前者の代表例としては、左手系右手系複合線路(Composite Right/Left Handed Transmission line: CRLH-TL)を用いた漏れ波アンテナ、物理長に依存しない０次共振現象を用いたアンテナ、波長と周波数の関係（分散関係）を人工的に制御したマルチバンドアンテナなど[1, 2)]が挙げられる。後者の例としては、アンテナ反射板の反射条件を制御した低背化アンテナ、誘電率・透磁率を人工的に制御したレンズの配置による指向性アンテナ[3)]などが該当する。

近年の無線機器の小型化や、無線通信のマルチバンド化に伴い、小型・高機能なアンテナへの需要は高まり、メタマテリアルアンテナの研究開発への期待が高まっている。米国では、DARPA が主催のメタマテリアルワークショップ(2000 年開催)を契機として、大型の研究プロジェクトが開始され、基礎研究を中心とした研究開発が進んでいる。現在では、主にベンチャーや企業を中心に応用研究も進展しており、衛星通信用アンテナへの応用など、商用化への動きが見られ始めている。欧州では、通信機器のベンダーにおいて、基地局・携帯端末向けのメタマテリアルアンテナ研究の取り組みがなされている。日本においては、基地局向けアンテナ研究として、企業と大学が産学連携を進めており、また、産業化としてコンシューマ向け無線機器製品へのアンテナ搭載が進んでいる。

(b)－2.科学技術的・政策的課題

メタマテリアルアンテナにおける技術的な課題の一つはアンテナ素子における電力損失の低減である。電力損失は、アンテナ性能の重要な指標である利得や放射効率に影響を与えるため、低損失化は重要なファクターとなる。

低損失化のアプローチとしては、最近では、厳密にはメタマテリアルとは異なるが、メタマテリアルの一部構造のみをアンテナの放射素子として活用したメタマテリアル応用小型・低損失アンテナ[4), 5)]の取組みがなされている。また、メタマテリアルを形成する低損失材料の開発も期待が高まっている。

メタマテリアル技術は、周波数に応じて構造の大きさを変えるスケーリング則を適用できるため、新たに設定した周波数でもスケーリングによりアンテナを実現できる。したがって、政策的に無線周波数が新たに追加、変更されても、対応は可能である。ただし、波長の長いマイクロ波領域に比べ、ミリ波、テラヘルツ波領域では、波長が数 mm～数百μｍオーダー

と極小なため、メタマテリアルの構造体形成には高い寸法精度が要求され、安価で高い精度で加工可能な製造プロセスが必要となる。

(b)－3.注目動向

マイクロ波・ミリ波領域では、近年、産業応用の動きが数多く見られる。米国のベンチャー企業であった Rayspan のメタマテリアルアンテナが、2008 年に NETGEAR(米国)のワイヤレスルータに、2009 年に LG(韓国)のスマートフォンに使用された。以降、数年の間、産業への展開に対しては表立った動きは見られなかったが、2012 年より、NEC(日本)からメタマテリアル応用の小型アンテナが無線機器製品に搭載、商用化されている。また、米国の Kymeta は、衛星との通信用途向けにメタマテリアルアンテナを開発したことを発表している[6]。

研究関連の新たな注目動向としては、メタマテリアルアンテナの動作帯域を広帯域化するため、アクティブ素子を用いて帯域を大幅に広げる試みがなされている[7]。また、マイクロ波領域で確立した設計技術を、テラヘルツ波や光の領域へ拡張した研究についても新たな試みがあり、メタマテリアル研究の大きな潮流となっている[8),9)]。

なお、アンテナ分野に限定されたものではないが、メタマテリアル分野としてみると米国、欧米の各国では、数億円規模の予算が継続的に投入されており、技術革新に対する期待度が高いと言える。日本においても、科研費新学術領域研究「電磁メタマテリアル」として、2010 年より今年度まで研究プロジェクトが進行中である。

(b)－4.キーワード

メタマテリアル、左手系、アンテナ、マイクロ波、ミリ波

(b)－5.国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	企業と大学が共同研究を行うなど産学連携の動きが見られる。基地局向けアンテナなどの研究が進んでいる。
	産業化	◎	↗	NECから無線モジュール、無線LANルータへの搭載事例あり。
米国	基礎研究	◎	→	メタマテリアル分野で著名な研究グループを多く擁し、UCLA、Arizona大をはじめ、メタマテリアルアンテナの基礎研究でも世界をリードしている。
	応用研究・開発	○	↗	衛星・航空・防衛分野の企業を中心に衛星通信向け等の応用研究の事例が目立つ。
	産業化	○	↗	過去には、無線LANルータへの適用事例がみられる。最近では、衛星通信用アンテナへの応用に向けた活動が活発化してきている。
欧州	基礎研究	○	→	インペリアル大を中心にメタマテリアル研究をリードしているが、アンテナそのものの研究では米国ほどの成果は見られない。
	応用研究・開発	○	→	通信機器ベンダーにおいて、メタマテリアルアンテナの基地局・携帯端末向けの研究を行っている。
	産業化	×	→	メタマテリアルアンテナの実用化では、目立った動きは見られない。
中国	基礎研究	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は数多く行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	中国最大のメタマテリアル研究開発機関であるKUANG-CHIグループが衛星通信向けアンテナの関連特許を多数出願。但し他の機関からは目立った動きは見られない。
	産業化	×	→	メタマテリアルアンテナの実用化では、目立った動きは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	Samsungなどにより、主に端末向けアンテナの開発が行われている。
	産業化	×	→	過去にLG electronicsによる携帯端末への搭載実績あり。ただしそれ以後実用化では、目立った動きは見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(b)－6.引用資料

1) Lai, C. Caloz, and T. Itoh, “Composite Right/Left-Handed Transmission Line Met-amaterials”, Microwave Magazine, 34-50, 2004
2) A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, “Novel Zeroth-order resonance in composite right/left handed transmission line resonators”, in Proc. Aisi-Pacific Microwave Cnference, 1588-1592, 2003

3) C. Mateo-Segura, A. Dyke, S. Haq, and Y. Hao, "Flat Luneburg Lens via Transmission Optics for Directive Antenna Applications", IEEE Trans. Antennas Propag., vol.62, pp.1945-1953, 2014
4) M. Antoniades and G. Eleftheriades, "A Broadband Dual-Mode Monopole Antenna Using NRI-TL Metamaterial Loading", IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol.8, 258-261, 2009
5) M. Antoniades and G. Eleftheriades, "A Compact Multiband Monopole Antenna With a Defected Ground Plane", IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol.7, 652-655, 2008
6) http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/intellectual-ventures-invents-beamsteering-metamaterials-antenna
7) H. Mirzaei, and G. Eleftheriades, "A Resonant Printed Monopole Antenna With an Embedded Non-Foster Matching Network", IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 61, 5363-5371, 2013
8) N. Liu, F. Wen, Y. Zhao, Y. Wang, P. Nordlander, N. Halas, and A. Alù, "Individual nanoantennas loaded with three-dimensional optical nanocircuits", Nano Lett., vol. 13, 142-147, 2013
9) A. Alu, and N. Engheta, "Wireless at the Nanoscale: Optical Interconnects using Matched Nanoantennas", Phys. Rev. Lett., vol. 104, 213902, 2010

(c)ミリ波デバイス技術

(c)－1.研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

スマートフォンの普及や、動画伝送などの無線サービスの出現により無線トラフィックは年率約 70%で増大しており、10 年で 500-1000 倍に増大すると予想されている。こうした背景のもと大容量無線通信の需要が高まっているが、6GHz 以下の周波数は逼迫しており、広い周波数帯域を確保できるミリ波帯（30-300GHz）を用いたギガビット級通信への期待が高まっている。特に、60GHz 帯を用いた高速無線 LAN（WiGig/IEEE802.11ad）や 70/80GHz 帯を用いたモバイルバックホール（MBH）向け固定無線システムなどの市場拡大が期待されている。

ミリ波通信用のデバイスとして、かつては高周波特性に優れる GaAs や InP 等の III-V 族化合物半導体が主流であった。しかしながら、近年の半導体製造ルールの微細化によって、SiGe や CMOS などの Si 系デバイスでもミリ波帯での動作が十分可能になっている[1),2)]。無線 LAN 等のコンシューマ機器では、大量生産時の低コスト化に有利なことや、デジタル回路との集積が可能であることから、65-40nm 級の CMOS が主流になっている。一方、MBH 向けなどのインフラ機器では、依然として GaAs IC が使われているが、今後は、SiGe や CMOS による集積化も進むと考えられる。ただし、インフラ機器向け高出力増幅器に関しては、化合物半導体が使われ続けると予想され、特に GaN FET の微細化によるミリ波領域への適用が期待される。

米国では、無線 LAN 用 IC で実績のある Broadcom 社[3)]やミリ波専業の Wilocity 社（Qualcomm 社が買収）等が、既に WiGig/11ad 対応の CMOS IC を製品レベルで開発済みである。日本では、パナソニック[4)]、東芝[5)]、東工大[6)]などが 60GHz 帯無線通信用 CMOS IC の学会発表を行っているが、産業化の観点では、前述の米国のチップベンダーほど積極的な動きは見えていない。

(c)－2.科学技術的・政策的課題

コンシューマ機器向けのミリ波 CMOS IC における技術的な課題の一つは消費電力の低減である。現状、ミリ波 CMOS IC は 1W 前後の電力を消費しており、バッテリー駆動のモバイル機器に搭載するには大きすぎる。また、高い周波数特有の基板や配線に起因する損失を最小にするために、アンテナと IC を一体化したモジュールや実装技術も重要になる。ミリ波は直進性が強く、遮蔽物のない見通し内でしか通信できないという電波としての使いにくさの克服という課題もある。こうしたミリ波の欠点を考慮したうえで、ミリ波の大容量通信の利点を活かせる通信機器設計と、アプリケーション開発の両方がミリ波通信の普及に向けて重要である。

周波数政策もミリ波通信の普及に大きく影響する。日、欧では 57G~66GHz が、米、韓、加では 57G~64GHz が通信向けに免許不要で使用することができ、コンシューマ向けは 60GHz 帯を中心に実用化が進んでいる。一方、固定無線システムについては、2012 年に国際電気通信連合（ITU-R）が 70/80GHz、90GHz の勧告を制定し、各国で法整備が進んでいる。これらの周波数は、普及を促進する目的で簡易型の免許の導入が進んでおり、70/80GHz 帯の固定無線システムは小セル用の MBH として実用化が進んでいる [7]。今後も、さらなる高周波帯の開拓が必要と考えられ、各国の事情を踏まえたうえで、適正かつ速やかな制度化が望まれる。

(c)－3.注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

今後、注目すべき技術動向として、100GHz を超える周波数を利用して 10Gbps を超える大容量通信を目指す動きがある。日本では NTT[8]、海外では Fraunhofer 研究所（独）[9]などが 120-300GHz 帯で 10-100Gbps 級の通信デモを行っている。さらに、300GHz を超えるテラヘルツ帯の開拓も進んでいる。これらの超高周波数でも化合物半導体から Si 系デバイスに移行する動きがある。

60GHz 帯を用いた高速通信に関して注目すべき業界動向は、2013 年に無線 LAN の業界団体である WiFi Alliance と、60GHz 帯を用いた高速無線通信の業界団体 Wireless Gigabit Alliance が合併したことである [10]。WiFi Alliance は、WiGig の相互接続認証プログラムを 2014 年末にも開始することを発表し、ミリ波通信を搭載したコンシューマ機器とデバイス市場が急速に成長する可能性がある。

ミリ波通信で注目すべき別の業界動向として、第 5 世代携帯電話（5G）がある。5G では、大容量通信を行うために、ミリ波もしくは準ミリ波（10G~30GHz）を導入することが議論されている。周波数割り当てが決まるのは、2018-19 年の世界無線通信会議（WRC18/19）と予想されるが、エリクソン、サムソン、ノキアといった大手通信機器ベンダーは、それに先立ってミリ波通信デモを行っている。欧州では、MiWEBA など 5G 向けのミリ波技術開発を推進する国家プロジェクトが発足しており、日本の総務省とも連携している。巨大産業である携帯電話でミリ波通信が標準化されると、デバイス技術も一気に進展する可能性がある。

(c)－4.キーワード

＜キーワード＞
ミリ波、CMOS、無線 LAN、WiGig、IEEE802.11ad、固定無線システム、第５世代携帯電話

(c)－5.国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	60GHz帯までのミリ波通信は実用化フェーズ。基礎研究は、100GHz～テラヘルツ通信向けのデバイス、IC、システムに移行。
	応用研究・開発	○	→	パナソニック、東芝、東工大などがミリ波CMOS ICの学会発表を行っている。総務省の国プロでも、様々なミリ波応用研究を進めている。
	産業化	○	→	コンシューマ向けCMOS ICの産業化の動きは、やや停滞している感あり。MBHインフラ向け固定通信システム機器では、一定の世界シェアを確保。
米国	基礎研究	◎	→	ミリ波通信は軍需もあり、GaNなど化合物半導体の微細化や新材料・デバイス開発、テラヘルツなどの基礎研究も、産学で手厚く行っている。
	応用研究・開発	◎	→	複数の大学や企業において、ミリ波CMOS ICの低電力化やビームフォーミング技術に関する応用研究が継続して進んでおり、産学の距離も近い。
	産業化	◎	↗	ミリ波無線LAN市場が急速に立ち上がる気運が盛り上がっており、有力無線チップベンダーにおいてCMOS IC製品化の準備が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	Fraunhofer研究所（独）をはじめ、高周波デバイスやICの基礎研究では伝統的に存在感を示しており、100GHz超の高速通信の研究でも主導。
	応用研究・開発	◎	→	大学や研究機関(IMECなど)からミリ波ICやモジュールの発表は継続してある。大手通信機器ベンダーは第5世代携帯電話向けのミリ波活用にも積極的。
	産業化	○	→	コンシューマ向けミリ波通信の産業化の目立った動きはない。ミリ波に関しては、通信よりも自動車レーダーの方が盛り上がりを見せている。
中国	基礎研究	×	→	高周波の新デバイスや、100GHz超の新技術など基礎研究では目立った活動なし。
	応用研究・開発	○	→	台湾の大学から、ミリ波CMOS ICに関する発表は一定数、継続してある。
	産業化	○	→	CMOS、化合物半導体共に世界的なファウンダリー企業あり。Huaweiはミリ波通信機器を製品化。MediaTek等は、ミリ波無線LANに参入すると予想。
韓国	基礎研究	×	→	高周波の新デバイスや、100GHz超の新技術など基礎研究では目立った活動なし。
	応用研究・開発	△	↘	ミリ波CMOS ICの発表は少ない。サムソンは第5世代携帯電話向けの準ミリ波通信のデモを行うなど、インフラ向けミリ波通信を強化。
	産業化	△	↘	サムソンは、かつてWiGigやWireless HD等の製品開発に積極的であったが、現在、コンシューマ向けの製品化の動きは下火である。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(c)－6.引用資料

1）丸橋建一 「ミリ波デバイス技術の新展開」 電子情報通信学会誌 Vol.93, No.2, p.100-

105(2010)
2) 藤島 実、永妻忠夫、渡邊 祐、岡田健一　「ミリ波・テラヘルツハハードウエア最新動向」Microwave Workshops & Exhibition (MWE2013) Digest, p.121-134, (2013)
3) M.Boers et al., “A 16TX/16RX 60GHz 802.11ad chipset with single coaxial interface and polarization diversity,”2014 IEEE Solid-State Circuits Conference Digest, p. 344-345(2014)
4) T. Tsukizawa et al., “A PVT-variation tolerant fully integrated 60 GHz transceiver for IEEE 802.11ad ,”2014 IEEE Symposium on VLSI Circuits Digest, p.1-2 (2014)
5) S. Saigusa et al., “A fully integrated single-chip 60GHz CMOS transceiver with scalable power consumption for proximity wireless communication ,” 2014 IEEE Solid-State Circuits Conference Digest, p. 348-349(2014)
6) K. Okada et al., “A 64-QAM 60GHz CMOS transceiver with 4-channel bonding,” 2014 Solid-State Circuits Conference Digest, p.346-347(2014)
7) 大槻信也、植田由美、平田明彦　ITU-R 新報告「固定無線方式の利用と将来動向」ITU ジャーナル　Vol.44, No.3, p.6-13(2014)
8) H. Takahashi, et al., “120-GHz-Band Fully Integrated Wireless Link Using QPSK for Realtime 10-Gbit/s Transmission” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.61, no.12, pp.4745-4753(2013)
9) I. Kallfass, et al., “All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz,” IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol.1 no.2, pp.477-487(2011)
10) 「滑走路にたどり着いた 60GHz 帯の民生活用」日経エレクトロニクス 2013 年 12 月 9 日号　p.30-43

３．２．13　エネルギーハーベストデバイス

（１）研究開発領域名

エネルギーハーベストデバイス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

環境中に存在する光、振動、温度差、電波などの様々なエネルギーを電気エネルギーに変換するデバイス。無線センサーノード等のインテリジェントな分散ノードの無給電化を実現するキーデバイスとして期待される。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

モノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーなどの言葉で表現される、高度にネットワーク化、インテリジェント化された世界を実現するためには、リアルな世界とサイバー世界との接点となる膨大な数のインテリジェントな分散ノードが、世界のあらゆる場所で長期間機能し続ける必要がある。それらの分散ノードは必ず電源を必要とする。あらゆる場所への電源配線敷設や電池交換がコスト的にすべて正当化される可能性は低いため、代替となる低コストで普遍的な電源技術の確立は急務である[1)]。

このような代替電源技術は、大きく分けて3種類に分類される。第1のカテゴリは、インテリジェントノードが敷設される環境中にもともと存在する各種のエネルギー（光・電波などの電磁波、振動などの力学的エネルギー、温度差、ポテンシャル差、生化学物質等）を、その場で電気エネルギーに変換して利用する技術である。これがエネルギーハーベスティング技術と呼ばれている。周りの環境中に利用可能なエネルギーが存在する限りは、電気エネルギーを生み出し続けるポテンシャル（可能性）がある。第2のカテゴリは、インテリジェントノードに対して、外部からワイヤレスでエネルギーを供給する技術である。このカテゴリに含まれる技術としては、RFID を含む電磁波・電磁界による無線給電技術、超音波などの振動やレーザー・LED などによるエネルギー供給技術がある。第 3 のカテゴリは、インテリジェントノードの稼働時間中に必要なエネルギーをすべて内包し、そのまま使い捨てられる技術である。このカテゴリに含まれる技術としては、放射性物質などを利用した完全にクローズドな系の技術、胃酸や尿、樹液などを電解質として取り込んで利用する開放型の技術などがある。これらは、一次電池の一種ではあるが、エネルギーハーベスティングという言葉で表現されていることがある。本項の「エネルギーハーベストデバイス」は、第1のカテゴリのみを対象とする。

エネルギーハーベストデバイスの発電量を決める要因は、大きく分けると2つある。ひとつは、環境からデバイスに供給されるエネルギー流速密度である。デバイスの大きさ、重さや設置場所が決まると、エネルギー流束密度から、最大発電可能量が決まる。実際の発電量をいかにこの理論的な最大値に近づけるかが、研究開発の目標となる。もうひとつは、インテリジェントノードの消費電力である。ノードの消費電力が下がれば下がるほど、エネルギーハーベストデバイスの活用可能領域・アプリケーションは広がり、さらなるデバイスの小型化も可能となる。これらの2要因に影響をおよぼす条件は非常に幅広く、目標値等が一意に定まるものではないが、おおまかな目安、たとえば 10 マイクロワットというような発電

目標量の数値が、インテリジェントノードの無給電化を目指す研究開発の方向性を大きく規定するものとなっている。

一方、電力の安定供給、温室効果ガス排出量削減といった環境・エネルギー問題を克服するための技術のひとつとして、いわゆる自然エネルギー、再生可能エネルギー技術（太陽電池、水力発電、地熱発電、風力発電、波力発電、潮力発電等）の研究開発・実用化が進められている。エネルギーハーベストデバイスは、コスト的にも発電量的にも、これらの技術の範疇に含まれるものではなく、発電によって直接的な省エネルギー効果をもたらすものではないが、インテリジェントノードの普及を促進することによって、エネルギー生産・流通・消費の効率を改善し、間接的に大きな省エネルギー効果を生み出すことが期待される。

モノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーを実現するためのキーデバイスとなるエネルギーハーベストデバイスにおいて、我が国が研究開発や製品化・事業化の主導権をとることができれば、日本の産業の活性化・競争力強化につながることが期待される。一方、その取組みが諸外国に遅れることがあれば、日本の産業の競争力低下につながることが危惧される。

［これまでの取り組み］

エネルギーハーベストデバイスが実用的な意味を持つのは、それを利用する機器の消費電力と発電量とのバランスが取れるときであり、トランジスタの低消費電力化、とくにCMOS 回路の発明～普及がその契機となった。クォーツ式腕時計の実現（1969 年　セイコー）により、1970 年代には早くも太陽電池駆動の腕時計が発売され、1980 年代には手首の動きで発電する腕時計、1990 年代には体温と外気温の温度差で発電する腕時計が国産メーカーにより次々と商品化された。他にも 1970 年代に発売された太陽電池駆動の電卓、1980 年代に発売されたトイレの自動水栓（水流で発電し、赤外センサーと電磁バルブに給電）など、20 世紀終わり頃には、我が国の民生品がエネルギーハーベストデバイスを活用した製品で世界をリードしていた。このような製品化が実現するためには、発電技術の開発のみならず、電源回路・蓄電技術、低電圧駆動 IC、各種の低消費電力技術との統合が必要であり、半導体技術を含め我が国のものづくりの強みが発揮された結果であった。

一方、米国においては、軍事技術としてのエネルギーハーベスティング技術研究開発の歴史が長く、DARPA や NASA がスポンサーとなって各種の要素技術の開発が行われてきた。一時期、1990 年頃にエネルギーハーベスティング技術への注目が高まったが、当時の電子デバイスに要求される発電量とのギャップもあり、実用化は進まなかった。その後、最近は再び DARPA 等を通じて多くの資金が研究開発に供給されるようになっており、多くの大学や大学発のベンチャー企業を中心に、各種関連技術の研究開発が盛んに行われている。また、一部民生転用された製品も販売されている。1999 年にカリフォルニア大学バークレー校の J. M. Kahn らによりスマートダスト（無給電の数ミリ角のセンサーノードによる無線センサーネットワーク）が発表され、当時実用化されることはなかったが、このコンセプトが現在のモノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーの原点となっている。

欧州のエネルギーハーベスティング技術への取り組みは、米国よりも遅かったが、環境問題への注目が高まる 21 世紀に入ってからは、EU で大規模な研究開発資金の供給が続けら

れているばかりでなく、さらにEU各国も独自に自国の大学・企業向けに研究開発の支援を行っており、現在、エネルギーハーベストデバイス研究の層の厚さと幅広さでは、米国をも凌駕している。例えば、2014年4月の時点で調べたところ、EUの研究開発プログラムのうち、エネルギーハーベスティング関係のプロジェクトが、少なくとも51本、同時に実施中であった[2)]。材料開発や新規原理のデバイス開発から、無給電ネットワークアプリケーションの開発実証まで、様々なプロジェクトが産官学の連携で進められている。欧州にはエネルギーハーベストデバイスの開発や利用を進める企業も多い。

アジア地域においては、中国（香港を含む）、台湾、韓国、シンガポールなどでエネルギーハーベスティング技術開発の取り組みが進められている。中国では、物聯網（モノのインターネット）の推進が国家戦略となるなど、政府としての取り組みがみられる。アジア諸国の大学が欧州や米国との共同プロジェクトに参画することも増え、論文の発表数も増えてきている。

［今後必要となる取り組み］

エネルギーハーベストデバイスの実用化・事業化が進展するために必要となる研究開発面の取り組みとしては、単体デバイスとしての効率向上、入力変動に対する動作安定化、信頼性・寿命の向上、用途に応じた形状等の最適化、低コスト化などがある。

エネルギーハーベストデバイスの効率向上については、3つの要素に分解できる。まず、外部環境のエネルギーをデバイスに取り込むときの効率を向上させることが必要である。例えば光発電であれば、表面の反射率を低下させる表面加工技術、複数波長を吸収するマルチジャンクション（多接合）技術、色素増感太陽電池のラフネスファクター（実表面積の倍率）を増大する技術、フレネルレンズなどの集光技術などにより、光エネルギーをデバイスに取り込む効率を向上させることができる。力学的エネルギーを利用した発電であれば、てこ構造、風レンズのような増速機構、ジャイロ構造などを利用して機械的インピーダンスのマッチングをとることで、デバイスに力学的エネルギーを取り込む効率を向上させることができる。温度差を利用した発電であれば、ヒートシンクの高性能化や適切な熱設計によって、熱インピーダンスのマッチングをとることで、デバイスに熱エネルギーを取り込む効率を向上させることができる。

次に、デバイスに取り込んだエネルギーを電気エネルギーに変換する効率を向上させることが必要である。例えば光発電であれば、バンドギャップの最適化、再結合の抑制、電気抵抗の低減など、力学的エネルギーを利用した発電であれば、バネ等内部構造の最適化やエネルギー変換材料の電気機械結合係数等の特性向上など、温度差を利用した発電であれば、熱電変換材料の性能指数等の特性向上などによって、電気エネルギーへの変換効率を向上させることができる。

さらに、発電した電気エネルギーを二次電池やキャパシターなどの蓄電デバイスに蓄積する効率を向上させることが必要である。単に、電気的インピーダンスのマッチングをとるだけでなく、発電機構にフィードバックをかけるSSHI（Synchronized Switch Harvesting on Inductor）技術などによって、さらに効率が向上する。

環境中のエネルギーは常に一定しているとは限らないため、入力変動に対する動作安定化の技術を開発していくことも重要である。エネルギー源の変動に対応する技術としては、例

えば光発電では光源の移動などに対応できる静的・動的機構、力学的エネルギーを利用した発電では周波数チューニングや広帯域化機構、温度差を利用した発電ではバイメタル等を利用した構造最適化技術などがある。さらに、各種インピーダンスのマッチング状態を維持する制御技術（MPPT：Maximum Power Point TrackingやMPTT：Maximum Power Transfer Tracking など）、変動する発生電圧や蓄電電圧に応じて充電回路を最適制御する制御技術なども挙げられる。エネルギーハーベストデバイス側で環境のエネルギー変動を完全に吸収できない場合、あるいはそのような制御が全体コストを上昇させる場合には、電力消費側のアプリケーションに発電・蓄電状態を伝えてアプリケーション動作を最適化するエネルギーアウェア技術も必要となる。

信頼性・寿命の向上のためには、材料、構造、製造プロセスなどの研究開発の他に、試験方法の確立も必要となる。用途に応じた形状等の最適化も利用可能性を拡大するためには重要であり、小型化・軽量化・薄型化・フレキシブル化等も求められる。普及のためには低コスト化も必須であり、一次電池等の競合技術に対する価格優位性の確保が求められる。

以上のように、エネルギーハーベストデバイスが低コストで信頼性のある電源として広く活用されるためには、多くの取り組みが必要となる。特に、単体の技術開発だけでなく、それらを統合した全体最適化の観点からの取り組みが必要とされる。

（4）科学技術的・政策的課題

欧米中韓等の諸国が国主導でエネルギーハーベスティング技術の研究開発を推進している状況にあって、我が国の政策的取組みの遅れは顕著である。20 世紀の終わり頃には、我が国は民生用途でのエネルギーハーベスティング製品展開で諸外国に先行したが、その後、電子機器の消費電力の低下がさらに進み、特に低消費電力無線技術と組み合わせた無線センサーネットワーク技術等への適用可能性が急速に拡大する近年、我が国では政策的な取り組みがほとんど行われてこなかった。個別の要素技術においては、我が国にも優れたシーズが存在するが、エネルギーハーベストデバイス全体としての研究開発や製品化・事業化の取り組みでは、欧米に対する遅れは顕著であり、その要因のひとつは、政策的な取り組みの差であると考えられる。

腕時計への適用で象徴されるように、エネルギーハーベストデバイスは、潜在的には我が国産業の強みが発揮できる分野である。まだモノのインターネット市場の立ち上がりが顕著ではない現時点において、強力な政策的取り組みを立ち上げることで、市場が顕在化する時期において我が国のエネルギーハーベストデバイスの普及をはかり、もって我が国産業の競争力を向上させることができると期待される。

個別の要素技術の開発ばかりでなく、それらを統合化・最適化する技術の開発、さらには製品化につなげるためのプロセス改善や量産技術の確立まで、産学連携によりシームレスにつなげる体制の構築、そして政府の需要喚起策による市場創造とグローバル展開の支援を一体として進めることができれば、先行する諸外国へのキャッチアップと国際競争力の強化が期待できる。

エネルギーハーベストデバイスの標準化については、諸外国においても試行錯誤が続いている。性能や信頼性の評価基準については、米国の Energy Harvesting Workshop における

標準化委員会、欧州の Metrology for Energy Harvsting プロジェクト、ISA（the International Society of Automation）の 100.18WG などでも研究開発や議論がされているが、国際標準化されたものはない。IEC の TC47 において、韓国から圧電式振動発電、熱電発電、電磁誘導式振動発電の標準化提案がなされ、審議中であるが、内容としては不十分なものである。実環境における性能・信頼性を評価できる基準の有無は、研究開発や実用化、普及の鍵となるものであり、早期の取り組みが望まれる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］[3)4)5)]

光発電では、2013 年に最も注目されたのはペロブスカイト型太陽電池の急速な効率向上であり、Science や Nature が取り上げることとなった。2009 年に桐蔭横浜大学で発明された技術ではあるが、現在は欧州や韓国が効率競争を進めている。

振動発電では、実環境にある広帯域の振動に対応できる技術の研究開発が非常に盛んになっている。振動発電デバイスが広く普及するかどうかの鍵となる技術である。

有機系の熱電材料が注目されている。理論的に性能指数 ZT が 15 を超える可能性があると発表されて以来、研究が活発化してきた。ここ数年で ZT が 15 の材料が実現する可能性は低いと考えられるが、もしも実現すれば体温等の熱源からヒートシンク不要で発電できるようになり、ウェアラブル用途への展開が期待される。

ハーベスティングデバイスと組み合わせる電源回路の研究も活発である。SSHI（Synchronized Switch Harvesting on Inductor）関連技術をはじめとして、電源回路の工夫によってハーベスティングデバイスの性能を向上させられることが実証され、実用化に向けた研究が加速している。

エネルギーハーベスティングデバイスと組み合わせるのに適した蓄電デバイスの開発は遅れている。低い内部抵抗、低い自己放電率、良好な充放電サイクル特性と長寿命、温度範囲の広さなどを兼ね備えた新たな蓄電デバイスの開発・実用化が期待される。具体的には、電気二重層キャパシターの低リーク化・大容量化、リチウムイオン二次電池の充放電サイクル性能向上・内部抵抗低下、リチウムイオンキャパシタなどの新規蓄電デバイスの改良などの方向性が考えられる。現在、スマートグリッドや交通システム向けに大容量の蓄電デバイスの開発が盛んに行われており、それらの技術成果のエネルギーハーベスティング用途への転用にも期待がかけられている。

［大規模プロジェクトの動向］

我が国においては、太陽電池や熱電材料の研究開発プロジェクトは実施されているが、エネルギーハーベストデバイスという切り口での大規模プロジェクトはほとんど実施されていない。「ナノエネルギーシステム創生の研究」（学術創成研究費、平成 18 年度～22 年度）が実施されている程度である。

一方、米国や欧州では、多くのプロジェクトが実施されている。米国は軍関係の予算の場合実態が明らかでないが、年間 100 億円程度の研究開発支援が継続的に行われているという（英国 Perpetuum 社の Roy Freeland 氏による）。欧州では、50 件以上のエネルギーハーベスティング技術研究開発プロジェクトが同時並行で実施されている。大規模なプロジェクト

（ここでは仮に、200 万ユーロ以上の支援が行われているプロジェクトとする。）の一部を以下に挙げる[2)]。

・NEMESIS（Novel Energy Materials: Engineering Science and Integrated Systems）
強誘電体材料及び圧電材料を利用した、広帯域環境振動、温度変動からの発電技術開発、水分解技術開発（EU 支援額：2,266,020€）

・MANPOWER（Energy Harvesting and Strage for Low Frequency Vibration
低周波（100Hz 以下）でチューニング可能な振動発電デバイスと高エネルギー密度の小型スーパーキャパシタを開発し、人体に埋め込み可能な永久自立電源エレクトロニクスシステムの実証を行う。（EU 支援額：3,946,939 ユーロ）

・SINAPS（Semiconducting Nanowire Platform for Autonomous Sensors）
周囲の光からエネルギーをハーベストし、単体で動く塵サイズ（立方ミリ未満）の化学センシングプラットフォームを開発する。（EU 支援額：2,369,999 ユーロ）

・MESOLIGHT（Mesoscopic Junctions for Light Energy Harvesting and Conversion）
色素増感太陽電池の効率向上と多接合化（EU 支援額：2,046,000 ユーロ）

・SOFT-MAP（Stretching soft matter performance: From conformable electronics and soft machines to renewable energy）
柔構造のエレクトロニクス、ソフトマシン、エネルギーハーベスタを開発する。ハーベスタとしては水を誘電体とした可変容量コンデンサ構造に注目する。（EU 支援額：2,494,800 ユーロ）

・DSENSY（Doping, Charge Transfer and Energy Flow in Hybrid Nanoparticle Systems）
異種材料を単一のハイブリッドナノシステムへ組み合わせるナノ結晶科学分野でフロンティアを狙う。光発電、生物の標識付け、センシング、などへのインパクトが期待される。（EU 支援額：2,499,000 ユーロ）

・ THERMOMAG （ Nanostructured energy-harvesting thermoelectronics based on MG2Si）
ナノ構造のバルク Mg2Si をベースとした新しい熱電材料の開発とモジュール化、実証を行う。（EU 支援額：3,986,980 ユーロ）

・WIBRATE（Wireless, Self-Powered Vibration Monitoring and Control for Complex Industrial Systems）
自動車製造、航空宇宙および鉄道産業分野において、振動発電を自立電源とした振動の無線モニタリング・制御システムを開発・実証する。（EU 支援額：2,849,883 ユーロ）

・SENSATION（Self Energy-Supporting Autonomous Computation）
エネルギーハーベスティングと消費電力のバランスをとる製品レベルの無給電システムの開発を目指す。（EU 支援額：2,100,000 ユーロ）

・POLYWEC（New mechanisms and consepts for exploiting electroactive POLYmers for Wave Energy Conversion）
波力発電のための電気活性エラストマ材料の最適化、構造設計、シミュレーション、小規模プロトタイプ開発、経済的・環境的アセスメントを実施する。（EU 支援額：2,059,156 ユーロ）

・MATFLEXEND（MATerials for FLEXible Energy harvesting Devices）

逆エレクトロウェッティングの原理によるエネルギーハーベスタ技術・蓄電技術を開発する。（EU 支援額：3,849,050 ユーロ）

・DYNXPERTS（Plug and Produce Components for Optimum Dynamic Performance Manufacturing Systems）
スマート材料を使用し、環境条件に適応するインテリジェントな振動発電センシングシステムを開発する。（EU 支援額：3,449,195 ユーロ）

・MERGING（Membrance-based phononic engineering for energy harvesting）
フォノン工学に基づき薄膜熱電材料と小型熱電モジュールを開発する。ZT=2.5 が目標。（EU 支援額：2,849,654 ユーロ）

・PILOTMANU（Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials）
メカニカルな合金化設備および粉末材料製造設備を試験ラインにアップスケールする。代表的アプリケーションは、水素貯蔵用の Mg 水素化物、熱電材料、難燃性繊維、急速プロトタイピング用のポリマーナノ合成物。（EU 支援額：4,014,465 ユーロ）

・MSP（Multi-Sensor-Platform for Smart Building Management）
CMOS とセンサーの３D 統合技術開発。高効率なハーベスタ（太陽光発電、圧電発電）、各種センサー（ガス、パーティクル、IR、光、UV-A/B）を低コストで大量生産できるプラットフォーム技術を開発する。（EU 支援額：12,505,467 ユーロ）

・CONVENIENT（CompleteVehicle Energy-saving Technologies for Heavy-Trucks）
長距離貨物輸送車両の燃料消費を 30%削減する。トラックやセミトレーラーのルーフに取り付けられた太陽電池のようなエネルギーハーベスティングデバイス、セミトレーラーの新しいハイブリッド動的エネルギー回収システムなどを含む。（EU 支援額：9,897,169 ユーロ）

これらのように、材料開発からシステム開発実証まで、さまざまな大規模プロジェクトが実施されている状況である。さらに、国のレベルでもプロジェクトが実施されており、我が国との格差は大きい。

（６）キーワード

太陽電池、レクテナ、振動発電、電磁誘導、圧電効果、静電誘導、エレクトレット、逆磁歪効果、熱電発電、熱光発電、熱電子発電、熱音響発電、焦電発電、バイオ燃料電池、バイオ微生物電池、無給電、自立電源、無線センサーネットワーク、モノのインターネット、IOT、サイバーフィジカルシステム、CPS、インダストリアル・インターネット、トリリオンセンサー

（７）国際比較 3),4),5),6)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	欧米と比較すると全体的に研究者の層は薄い。エレクトレット材料、圧電材料、磁歪材料など、材料分野では一部優位性がある。発電機構や回路技術でも、特定研究者の研究に見るべきものはあるが、研究者が少なく、広がりに欠ける。
	応用研究・開発	○	↗	企業でのプロトタイプ開発は増えており、海外と比較して技術的な優位性がみられるものもある。
	産業化	△	→	応用研究・開発が大企業中心であり、顕在化した市場がない現状で産業化は停滞している。
米国	基礎研究	◎	→	DARPAやNASAの支援による研究開発の歴史が長く、研究者層・技術シーズが厚い。 MIT、スタンフォード、ジョージア工科大、バージニア工科大などは研究者も多く、多様なシーズ開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	大学発のベンチャー企業が多く、プロトタイプの開発は活発である。MicroGen Systemsなど量産間近の企業もある。
	産業化	◎	↗	ベンチャー企業中心に、製品化が進む。市場拡大にともなって、ベンチャー企業を、より大きな企業が買収し始めている。（Linear Technology、Laird tech、Lordなど）
欧州	基礎研究	◎	↗	EUレベルや国レベルの積極的な支援もあり、基礎研究は非常に盛んである。発電技術だけでなく、電源回路技術やトータルなシステム最適化の研究も厚みがある。英国、フランス、ドイツ、イタリア、スイスに研究者が多い。
	応用研究・開発	◎	↗	産学連携のプロジェクトによるプロトタイプ開発・実証も盛んに行われている。自動車会社、航空会社なども実用化に取り組む。
	産業化	◎	↗	製品を販売するベンチャー企業は増えており、市場は拡大傾向にある。大企業の取り組みも増えてきた。（ABB、Philips、ST Microelectroicsなど）
中国	基礎研究	△	↗	政府からの潤沢な資金供給が行われている模様（清華大学研究者より）。論文発表数は増えている。
	応用研究・開発	△	→	ASTRI（香港）などでのプロトタイプ開発は行われているが、近年大きな動きは見られない。
	産業化	△	→	熱電材料や圧電材料のメーカーが活動しているが、エネルギーハーベストデバイス市場での存在感は薄い。
韓国	基礎研究	△	↗	発表論文数は顕著に増えつつある。
	応用研究・開発	△	↗	サムスンやLGなどが研究開発を加速している。国際標準化に向けた活動も活発である。
	産業化	×	→	未だ製品化には至っていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）調査報告書（IDTechEx、Winter Green Research、Yole など）
2）EU の FP7 プロジェクトについては CORDIS（Community Research and Development Information Service）ウェブサイト（http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html）で検索可能
3）国際会議報告（PowerMEMS、Transducers、SENSO Conference など）
4）Energy Harvesting Network（http://eh-network.org/）
5）Energy Harvesting Journal（http://www.energyharvestingjournal.com/）
6）海外イベントでの発表（Energy Harvesting & Storage USA、Energy Harvesting & Storage Europe、Sensors Expo など）

３．２．14　電源

（１）研究開発領域名

電源

（２）研究開発領域の簡潔な説明

バッテリー等のエネルギー源から供給される直流または交流電圧を電子機器が必要とする直流電圧に変換するデバイス・回路・システムに関する研究開発。ただし、100W 以上を扱うパワーエレクトロニクスは本研究開発領域の対象外とする。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

電源回路技術は電子機器の多機能化・低電力化・小型軽量化を実現する上での基盤技術として、近年、重要さを増している。図 3.2.5 に、今後、重要になると考えられる電源回路の 5 つの技術トピックを示す。

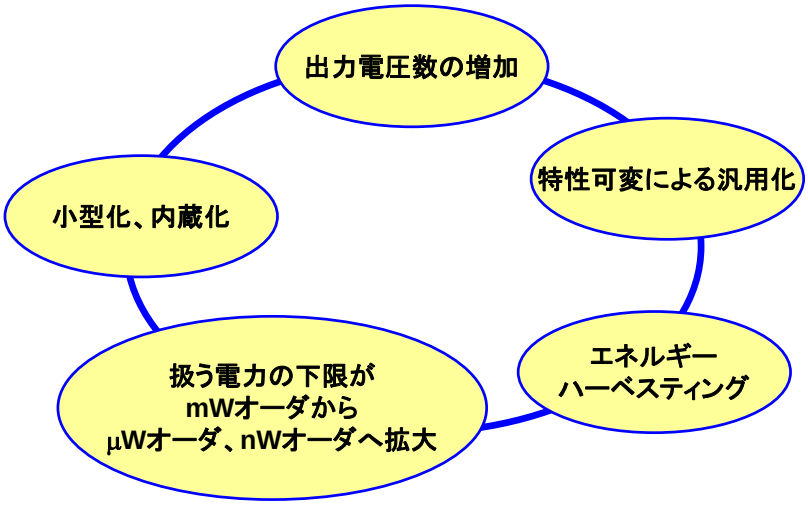


図 3.2.5 電源回路の 5 つの重要な技術トピック

①出力電圧数の増加

電子機器の低消費電力化はアプリケーションを問わず共通課題であるが、低消費電力化を実現するためには、多数種類の電源電圧が必要となる。そこで、電源回路をプリント基板上または LSI 上に多数個搭載することが求められる。また、時々刻々変化する電子機器の要求性能に応じて、電源電圧を動的に変化させることにより低消費電力化することができるため、電源電圧を俊敏に（例えば ns オーダーで）変化させることも重要となる。

②小型化、内蔵化

前述の電源回路の個数を増やすのはコスト・スペースの観点から通常は許されない。そこで、複数種の電源電圧を実現するためには、電源回路の小型化が必須となる。一般に電源回路の大きさ（体積）を決めるのは、インダクター、キャパシターのようなディスクリートの受動部品である。従来、インダクターは、プリント基板上にチップ

部品として実装されてきた。チップ部品は体積が大きいため、電子機器の小型化の障害となっている。そこで、インダクターを小型化する手段として、スパイラルインダクターをパッケージに内蔵する方法がある。パッケージ内蔵のスパイラルインダクターを利用した DC-DC コンバーターを搭載した例として、電源業界にインパクトを与えたのがインテルの 22nm CMOS を用いた Haswell プロセッサー[1)]である。プロセッサーのパッケージ外部からは 1 つの電源供給で、パッケージ内部で 12 種の電源電圧を生成している。これを用いてプロセッサーのコア毎に電源電圧をきめ細かく制御することによりプロセッサー全体としても低消費電力化を実現するだけでなく、プリント基板上のインダクター、キャパシターの搭載数を減らすことによりプリント基板の電源回路領域の面積を削減することにも成功している。将来技術として究極の小型化としては、スパイラルインダクターを LSI 上に内蔵する方法がある。しかし、LSI 上の配線の厚さは約 1μm と薄く寄生抵抗が高いため、インダクターの抵抗損による電源回路の効率低下が課題である。

③扱う電力の下限が mW オーダーから μW オーダー、nW オーダーへの対応

現在、市販されている典型的な降圧型 DC-DC コンバーター（Buck コンバーター）の出力電圧は 0.6V 以上、出力電流は 1mA 以上であるので、扱う電力の下限は 1mW 程度である。しかし、今後は電源回路が扱う電力の下限を μW オーダー、nW オーダーにする必要性が高まる。理由は 2 点ある。第 1 には、スリープモードへの対応である。低消費電力技術として、機器が使われていない場合に回路をスリープさせる技術が重要である。スリープ時には消費電力が mW オーダー以上から μW オーダーへと下がるために、μW オーダーでも高効率な電源回路が求められる。第 2 には、μW オーダー、nW オーダーで動作する無線センサーノードへの対応である。IoT（Internet of Things）の世界を実現するためには、超低消費電力で小型の無線センサーノードを実現する必要があるが、これらの無線センサーノード全体の消費電力は典型的には μW オーダー、要素回路の学会レベルの報告としては nW オーダーである。

④エネルギーハーベスティングへの対応

バッテリーで動作する多数個の無線センサーノードを設置した場合、バッテリーの交換・充電コストが運用上の問題となる。そこで、光、振動、温度差などの環境エネルギーを電気エネルギーに変換して利用するエネルギーハーベスティング技術が、バッテリー交換不要の無線センサーノードを実現する技術として注目されている。現在、多種多様なエネルギーハーベスティング源が研究開発されているが、得られる電力が不安定で、扱いにくい電圧・電流であることが多いのが問題である。そこで、これらの問題を電源回路と蓄電素子（バッテリー、キャパシター）を含むパワーマネジメント技術で解決することが重要な研究課題である。

⑤広範囲動作または特性可変による汎用化

③で述べたように、今後、電源回路の電圧範囲・電力範囲は拡大していく。また、④で述べたように、エネルギーハーベスティングのような新しいアプリケーションに

対応した電源回路も増えるであろう。ここで問題になるのが、電源回路の品種数の爆発である。現在は、ユーザーのニーズに細やかに応えるために電源回路の品種数は多い。例えば、Texas Instruments の web にてパワーマネジメント IC の品種数を調べると、DC/DC スイッチング・レギュレーターで 1213 品種、リニア・レギュレーター(LDO)で 1362 品種ある（2014 年 10 月時点）。これまでに述べてきた電源回路の将来のニーズに対応するために、電源回路の品種数をさらに増やすことはビジネス上好ましくない。そこで、今後は、電源回路の動作電力範囲を広げたり、FPGA のようにソフトウエアによって電源回路の特性を可変にすることによって 1 つの電源 IC で多種多様のニーズに応えることが期待される。

（４）科学技術的・政策的課題

・パワーエレクトロニクスの分野では日本でも海外でも大規模研究開発プロジェクトが多数実施されているが、電子機器向けの電源回路の分野にフォーカスした大規模研究開発プロジェクトは見当たらない。
・日本としては、(1)世界的シェアの高いキャパシター・インダクターなどの部品メーカー（京セラ、村田製作所など）、(2)材料分野の研究開発力（インダクター向けの磁性材料など）、(3)世界トップクラスのパワーエレクトロニクス・パワーデバイス（GaN、SiC、Si）の 3 つの強みを生かして電子機器向けの電源回路の技術力を高める必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・Brain Machchine Interface (BMI)や人工臓器、カプセル型内視鏡などの応用に向け、人間の脳や人体に埋め込んだ小型の医療機器に対する体外からのワイヤレス給電や、体内でのエネルギーハーベスティング向けの電源回路の学会発表が米国・台湾・香港の大学から相次いでいる。高齢化先進国の日本において医療・ヘルスケアは重点分野であるため、医療・ヘルスケア分野の電源回路技術の強化は急務である。

（６）キーワード

・電源、パワーマネジメント IC、DC-DC コンバーター
・エネルギーハーベスティング
・ワイヤレス給電

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	電源回路を研究対象とする大学研究室はあるが、数は少ない。
	応用研究・開発	○	→	電源ICを扱う半導体メーカー各社が開発を行っているが、特筆すべき成果は見当たらない。
	産業化	◎	→	リコー、セイコーインスツル、トレックス・セミコンダクター、ローム、新日本無線、東芝 セミコンダクター&ストレージ社、旭化成エレクトロニクス、新電元工業、ルネサス エレクトロニクスなど電源ICを扱う半導体メーカーの数は多いが、各社の製品ラインアップは広くない。
米国	基礎研究	◎	→	マイクロプロセッサー向けのオンチップ電源、超小型無線センサーノード・生体埋め込み機器向け電源回路など様々なアプリケーションの観点から電源回路を研究対象とする大学研究室があり、研究の多様性に富んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	マイクロプロセッサー向けのオンチップ電源としてIntelがBuckコンバーターを、IBMがスイッチトキャパシター電源回路の研究開発を精力的に推進している。
	産業化	◎	→	世界的に著名な多くの電源ICメーカー（Texas Instruments、Linear Technology、Maxim Integrated Products、Analog Devicesなど）が存在し、産業化の観点では世界をリードする。エネルギーハーベスティング向け電源回路の分野ではLinear Technologyが著名である。
欧州	基礎研究	◎	→	IMEC、フライブルク大学において、エネルギーハーベスティング向け電源回路の研究が活発に行われている。
	応用研究・開発	○	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	◎	→	パワーエレクトロニクスの分野で世界シェア1位のドイツのInfineon（Siemensから1999年にスピンオフして設立）が電子機器向けの電源回路の分野でも一定の存在感を示している。同じくSiemensからスピンオフして2001年に設立されたEnOceanはエネルギーハーベスティング向け電源回路と無線回路をセットで提供し、エネルギーハーベスティング分野で著名である。
中国	基礎研究	◎	→	香港理工大の電源回路、ワイヤレス給電の研究レベルは非常に高い。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
台湾	基礎研究	◎	↗	電源回路を研究対象とする大学研究室の数が日本よりも多い。Richtekと産学連携した台湾交通大学の研究活動が目立っている。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	○	↗	台湾の電子産業の上昇に伴い、電源ICメーカー（Richtek、Taiwan Semiconductor）の活動も活発化している。
韓国	基礎研究	○	→	KAISTの電源回路、ワイヤレス給電の研究レベルは非常に高い。しかし、KAIST以外の研究グループの活動は見えない。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	△	→	Samsungが電源回路、ワイヤレス給電の開発を行っている。Samsungで以外の活動は見えない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) N. Kurd et al., "Haswell: A Family of IA 22nm Processors," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 112-113, 2014.

3.3 通信とネットワーク

ネットワークは情報通信分野の発展の基盤をなすとともに、近年では特に、さまざまな社会課題を解決するために、関連分野からの要請に応えながらさらなる発展を遂げつつある。その結果、ネットワークは情報通信産業の発展に寄与するのみならず、新たな社会価値を創出するコア技術として我が国の科学技術や関連する産業の発展においてますます重要になっている。そのために、情報流通の基盤技術が重要になるが、これまで発展してきたクラウドサービスとは異なる視点に基づいた情報流通基盤も近年、検討が開始されている。また、ネットワーク分野において今後の研究開発の新たな方向性を示す、いくつかの重要な基礎的研究が最近開始されつつある。

本報告書においては、これら４つの視点に基づき、７つの科学技術領域について俯瞰する。

(1) ネットワーク通信基盤技術

我が国が得意とする光通信技術、無線通信技術についてまず俯瞰する。トラヒック需要は、新しいサービスが繰り返し登場することによって、依然として爆発的な増大を見せている。光通信技術、無線通信技術はトラヒック需要の増大に対応すべく、今後もそれらの大容量化・高速化が必要である。しかし、このようないわば直線的な研究開発だけではなく、多様な発展を見せるさまざまな要素技術を組み合わせることによって、より柔軟な通信形態をエンドユーザーに提供しようという試みがすでに始められている。例えば、光通信技術を用いたエラスティックネットワーク、無線通信技術において、複数の通信メディアを状況に応じて使い分けるコグニティブネットワークやマルチホップ通信も含めた D2D (Device-to-Device) ネットワークなどである。移動体無線技術については第５世代の実現に向けた検討もすでに始められたが、そこでもこれまでの延長線上にない新たな技術開発が視野に入れられている。すなわち、光通信技術、無線通信技術においても、大容量化や高速化だけでなく、それらの新しい機能やサービスが重要な研究開発課題になっている。また、ユーザー端末の無線化は大きな流れであり、アクセスの無線化に伴う無線通信技術と光通信技術の融合をなお一層進め、無線アクセスユーザーに対するエンド間の帯域保証などが今後の課題として挙げられる。

(2) 新たな社会価値を創出するネットワーク技術

ネットワーク技術はさまざまな社会問題の解決や新たな社会価値の創出に貢献するものである。そのようなポテンシャルを有する領域をすべて網羅することは紙面の制限上、困難なため、ここでは特にエネルギーマネジメントに対象を絞る。情報通信分野における消費電力の問題は喫緊に解決すべき課題であるが、ネットワーク技術は社会のさまざまな活動における消費電力を低減するための基盤技術としても必須であり、その重要性はますます高まりつつある。これまで、デバイスやルータ・スイッチなどの単独機器の省電力化に関する研究開発が精力的に行われてきた結果、現在、家庭や街、オフィスなどシステム全体の省電力化にネットワーク技術をいかに活用するかに焦点が移りつつある。また、クラウドサービスを提供するデータセンターについても、大量の消費電力を伴う故、その省電力化技術は重要な課題であり、クラウドサービスの広がりに伴って地球規模の取り組みが必要になっている。

また、ネットワーク仮想化技術は最近、急速な展開を見せつつある。SDN (Software-Defined Network) 技術だけでなく、それを活用した NFV (Network Functions Virtualization) 技術は最近急速に研究開発が進んでおり、ネットワークの運用管理コストの低減が期待されるだけでなく、ユーザーに対するネットワークサービスの提供形態を大きく変化させる可能性がある。その結果、光通信技術、無線通信技術においても、それらを用いたネットワーク仮想化に関する研究開発が積極的に行われている。また、仮想化技術の導入はハードウエア機器のコモディティ化を促すことを意味するため、今後、ネットワークビジネスを大きく変革させ、ひいては産業社会の構造にも影響を与える可能性を有している。技術的側面から見ると、ネットワークの仮想化技術は計算資源の仮想化技術と不可分のものであり、ネットワーク資源と計算資源を含めたシステム全体の最適化が必要になるものであって、新たな研究開発の必要性を示すものである。

(3) 新たな情報流通基盤技術

ポストインターネットの取り組みとして重要なものに、将来の情報流通基盤としてのネットワークに関する課題がある。特に、今後、IoT (Internet of Things) や M2M (Machine-to-Machine Communication) など、人ではなく、数多くのデバイスがネットワークに接続される結果、これらを支えるネットワーク技術が必要になる。これまでもセンサーネットワークやモバイルアドホックネットワークに関する研究開発は積極的に行われてきた。しかし、今後、ネットワークに接続される端末数は、スマートフォンの普及やセンサー等のネットワークへの接続によって 2020 年には数百億台に達し、その後、兆を超えると予測されている。これらの数値は、現在に比して１桁から２桁超の端末数の増大が見込まれるものであり、そのような端末数の増大に対応しながら、センサーネットワークやモバイルアドホックネットワークを収容するネットワークシステム全体のアーキテクチャーが今後必要になる。従来技術の延長線上には分散サーバー技術による CDN (Contents Delivery Network) があるが、ネットワーク内部のルータ（またはそれに付随するサーバー）で情報処理まで行うアーキテクチャーとしてフォグコンピューティングやエッジコンピューティングなどの概念がすでに提唱されている。さらに、ポストインターネットアーキテクチャーとして、ネットワークアドレスではなく、コンテンツの名前あるいは情報の名前に基づいたアクセスを可能とする CCN (Content-Centric Network)/ICN (Information-Centric Network) に関する研究開発が活発化しつつある。これらも、ネットワーク内での情報のキャッシュや処理まで含んだ、コンテンツを主体としたネットワークへの転換を図る概念であり、今後、情報流通基盤としてのネットワークの大きな変革を促すことが期待される。

(4) ネットワーク分野において重要な萌芽的研究開発項目

ネットワーク分野において今後の研究開発の方向性を示唆する取り組みは多くあるが、ここでは特に重要と考えられる以下の二つについて俯瞰する。

ユーザーに対する通信サービス品質 (QoS: Quality of Service) 保証はこれまでもネットワーク分野の重要な課題であった。そのために、パケットレベルの指標（パケット遅延や棄却率）の保証がネットワークに与えられた課題となっていた。しかしながら、メディアやサービスの多様化によって、最近 QoE (Quality of Experience) と呼ばれるように、エンドユ

ーザーが経験する品質の保証に対する議論が活発になっている。もちろん、言葉の置き換えでは意味がない。ユーザーの立場に基づいて認知科学や心理学などの観点からの取り組み、ユーザーインターフェース技術との融合、集団も含めたユーザー行動やソーシャルサービスとの関わりなど、今後取り組むべき課題は多い。

最後に、上述の新しい基盤技術を含むネットワークにおいて、その設計や運用の規範となる基盤科学の創出は重要な課題である。待ち行列理論／トラヒック理論や最適化アルゴリズムなどネットワーク分野における伝統的な学術的基礎が有効となる領域は今や極めて限られており、ネットワークの設計・運用現場では経験的手法に基づいた管理が依然として行われている。その結果、ネットワークサービスの利便性は高まってはいるものの、例えば、ネットワーク自体の信頼性は他の社会生活を支えるシステムに比して低いレベルにとどまっている。これまでは、光ファイバ通信技術、無線通信技術の大容量化、高速化の発展に支えられ、いわば物量作戦による対策が講じられてきたが、それも限界に近づきつつあり、今後、上述のような学術的基礎との乖離はネットワークの大規模化・複雑化によってますます大きくなることが容易に想像される。大規模複雑なネットワークの設計・運用を支える新たな学術基盤の創出は極めて重要な課題である。上に述べたユーザー行動と QoE の関係解明も含めて、新たな情報ネットワーク学術基盤の創出には、物理学や生命学も含めた他の学術分野との融合が有望と考えられ、ネットワーク分野のイノベーション創出におけるブースターとなることが期待される。

なお、ネットワーク分野においてもセキュリティーに関する課題は重要であり、喫緊の解決を必要とするものも数多いが、3.13 セキュリティーにまとめられているため、ここでは割愛する。

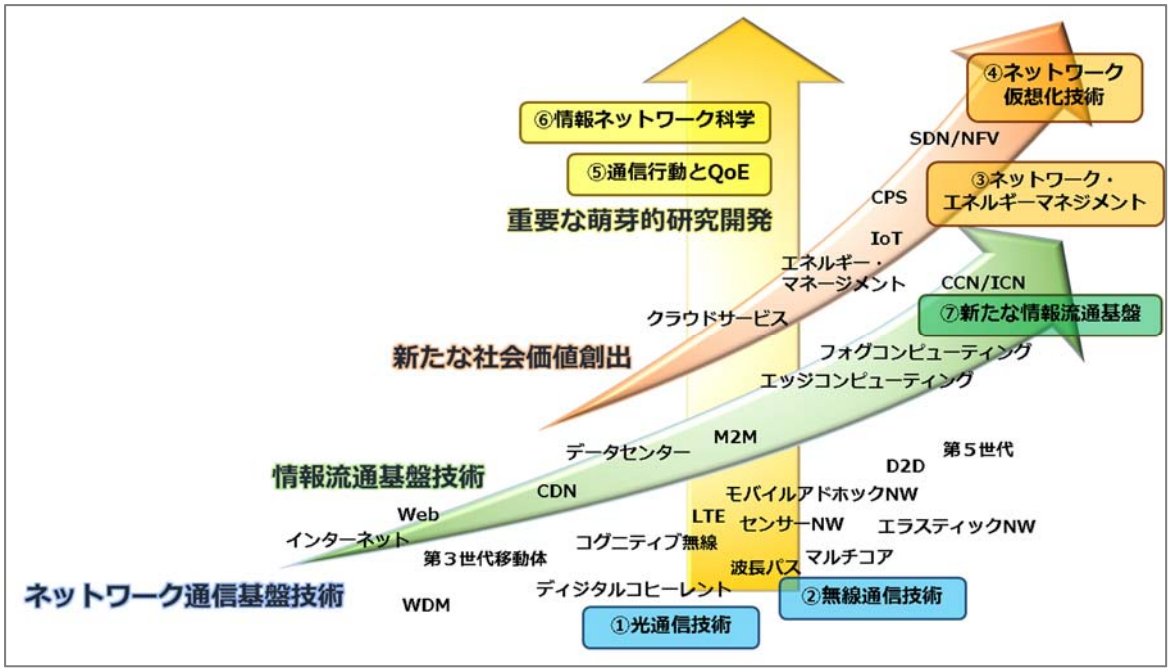


図 3.3.1 通信とネットワークの俯瞰図

３．３．１　光通信技術

（１）研究開発領域名

光通信技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

光ファイバや光スイッチの広帯域性を活かした大容量で長距離の通信をエネルギー効率良くするための基本技術。全国幹線から家庭まで広範囲な領域に普及する技術であり、近年では、サービス要求にあわせ通信の速度と距離を調整する弾力性にも期待が高まっている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

光通信技術は「通信速度」「通信容量」「通信距離」を指標として進展が示される分野である。それは、光ファイバの広帯域・低損失性により、電気通信より飛躍的に多くの量の信号を相手に送ることができることによる。通信速度は 2000 年頃の光通信の一つの指標であった 10 Gbit/s をはるかに超え、0、1 の強度変調・検波の方式から位相や偏波を用いた変調、デジタル信号処理により 100 Gbit/s 超を志向する時代になった。光ファイバ通信は敷設済みのシングルモードファイバや分散シフトファイバにいかに大容量の信号を流すか、だけではなく、新しいファイバを開発し 1 Pbit/s の大容量通信の時代に入っている。一方、エンドユーザーやサービス提供者の視点にたつとこのような高速・大容量通信はオーバースペックとなり、インフラサービス提供者は、それらに合った速度での通信を提供するという観点も必要となる。以上の観点から、ここでは、デジタルコヒーレント通信、マルチコア光ファイバ通信、エラスティック光ネットワークに関する動向を述べる。

・デジタルコヒーレント通信：

従来、光通信は、1 または 0 で表されるデジタル信号を光信号の ON、OFF に関連づけて変調し、強度を検波する方法で行われる。すると、一般に、伝送速度が増加するほど光信号の歪み補償は難しくなり伝送距離が制限される。デジタルコヒーレント技術ではデジタル信号処理回路により、位相や偏波を用いた 4 値位相変調の信号を処理できるようになってきた。NTT らは、総務省や NEDO の研究開発を通じて 100 Gbit/s 回路技術を開発し、2012 年以降 100 Gbit/s LSI の製品の市場が開かれた[1),2)]。現在、総務省プロジェクト「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」では、NTT、NEC、富士通により、1 波長あたり最大で 400 Gbit/s 級の光伝送速度を実現する技術の研究開発が、デジタルコヒーレント技術をキー技術の一つとして実施されている。2014 年 9 月には、位相と振幅を用いて信号を変復調する 8 値 QAM（Quadrature Amplitude Modulation）と 16 値 QAM 等の成熟により 400 Gbit/s の伝送に成功し、かつ、光伝送路の特性に応じて適切な変調方式を選択できるようになっている[3)]。

・マルチコア光ファイバ通信：

従来の波長多重技術や多値変調技術の進展とともに、１本の光ファイバで通信できる容量は増加してきた。一般に、光通信において通信量を増加させる際には光信号の強度増加が伴うが、近年、光信号の歪みやファイバの熱破壊の可能性が指摘されていた。１本の光フ

ファイバに複数の芯を備えるマルチコア光ファイバはそれらの問題を解決する技術として期待されている。2011 年に 100 Tbit/s の壁を初めて超える 109 Tbit/s・16.8 km の伝送実験に NICT が成功し[4]、その後大容量化、長距離化の研究が進み、2012 年 9 月に NTT らにより、デジタルコヒーレント技術も含めた 1.01 Pbit/s・52.9 km の伝送[5]、2013 年 9 月に KDDI 研らにより、大陸横断可能な 7,300 km・140 Tbit/s の伝送に成功した[6]。現在は、マルチコア光ファイバの一括増幅技術、融着技術などを含めたネットワーク構築に向けた諸技術の研究開発に広がっている。海外では、米国アルカテルルーセントや米国 OFS 等でマルチコア光ファイバ通信の研究がなされている。欧州では、マルチモードファイバを用いた MIMO 通信による大容量通信の研究が、サザンプトン大らによる FP7 プロジェクト MODE-GAP 等で実施されている。マルチコア、マルチモードなどの多重技術は空間分割多重（SDM）に分類され、それらの組み合わせによる伝送の研究開発も行われている。

・エラスティック光ネットワーク：
波長帯域幅を自在に変更できる弾力性、および、微小時間でのデータ転送（パケット）を軸にした弾力性の研究開発。光ファイバの帯域は広く、現在、10 Tbit/s の大容量通信が商用ネットワークで利用されている。今後も容量は増えるが一方、そこにサービスプロバイダーが要求する通信速度の回線や、エンドユーザーのパケットを効率よく収容するために、網内パスの提供では波長帯域幅を変更できる光技術や、パケットごとに交換するための光技術が期待されている。NTT により提唱された波長帯域幅を変更するアーキテクチャー[7]は爆発的に研究開発の裾野が広がり、世界の通信事業者において研究開発が進んでいる。中心波長単位 6.25 GHz、帯域幅単位 12.5 GHz の ITU-T 勧告が誕生した 2012 年頃は波長割り当てに関する研究開発が多く志向されていた。近年のデジタルコヒーレント技術や部品の共通化などの方向性とともに、現在は 100 Gbit/s を越す通信の技術開発とそれを支えるネットワーク設計が中心になっている[8]。時間方向の弾力性となる光パケット交換技術に関して、2014 年 9 月に NICT は、伝送路あたり 12.8 Tbit/s・50 km・光バッファ付きの光パケット交換実験に成功している[9]。これらのエラスティック光ネットワークを一元管理する Software-Defined Networking の光ネットワーク適用の研究開発も進んでいる。KDDI 研、英国ブリストル大、スペイン CTTC、アルカテルルーセントなどが早くから光ネットワークの SDN/OpenFlow 対応化技術に着手し、経路計算、障害復旧、波長幅制御などの実証を行っている。また、KDDI 研らは、100 Gbit/s 光伝送装置、100 Gbit/s 光パケット交換装置、光アクセス装置等を一元管理する光トランスポート SDN の実験に成功している[10]。

（4）科学技術的・政策的課題

光通信・ネットワーク技術は、世界ナンバーワンの技術を継続的に創出している。例えば光伝送装置における近年の標準的な速度である 100 Gbit/s 光通信については、総務省プロジェクト「超高速光伝送システム技術の研究開発（デジタルコヒーレント光送受信技術）」等の成果が社会実装されたものである。本分野では、米国、欧州、中国らが継続的に研究開発に投資をしており、本分野における国力を維持・増強するためにも継続した政策重点化が必

要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・総務省プロジェクト「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」により、1 波長あたり最大で 400 Gbit/s 級の光伝送速度を実現する技術の研究開発が、デジタルコヒーレント技術をキー技術の一つとして実施されている。
・総務省戦略的情報通信研究開発推進事業における日欧共同公募にて、「スライサブルな超 100 G イーサネットシステムを実現するための大規模プログラマブル光ネットワークの研究開発（STRAUSS）」が実施中[11]。
・欧州 FP7 では、光空間多重通信に関して MODE-GAP、エラスティックネットワークに関して IDEALIST, LIGHTNESS などのプロジェクトが実施されている。
・ONF (Open Networking Foundation) における Optical Transport Working Group にて、光トランスポートネットワークにおける、SDN/OpenFlow 標準ベースの制御適用検討を実施。ユースケースの作成、OpenFlow を用いた制御参照モデルの定義、OpenFlow プロトコルの拡張仕様の定義等を実施している[12]。

（６）キーワード

デジタルコヒーレント、多値変復調、DSP (Digital Signal Processing)、マルチコアファイバ、SDM (Space Division Multiplexing)、エラスティック光ネットワーク、光パケット交換、OpenFlow、光トランスポート SDN (Software-Defined Networking)

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	NICTらによるマルチコアファイバ300 Tbit/s伝送および一括増幅技術、12.8 Tbit/s光パケット交換技術など。
	応用研究・開発	◎	↗	NTTらによる1Pbit/s 、KDDI研らによる7000 km、マルチコアファイバ通信世界記録達成、NTTらによる1波長400 Gbit/s伝送技術成功など。光ファイバメーカーがマルチコアファイバを製造。NICTがIP over 光パケット交換装置開発。
	産業化	◎	↗	100 Gbit/s デジタルコヒーレントLSIが世界トップシェア (2012年12月のNTTプレス)。富士通、NEC、三菱等で上記デジタルコヒーレントを持つ光伝送装置製造。
米国	基礎研究	◎	→	UCSB, UCD等でテラビット志向通信、エラスティック、SDN等の研究開発が精力的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	CIENAがプログラマブルなデジタルコヒーレント通信技術を開発。ALU・OFS・米NEC等でマルチコアファイバ通信の研究。ALU等でエラスティック網研究開発。全米にまたがった100 Gbit/s級研究開発ネットワークが展開済み。
	産業化	◎	→	CIENAやInfineraによるデジタルコヒーレント通信を用いた光伝送装置は安定したシェアを持っている。
欧州	基礎研究	◎	→	英ブリストル大にてマルチコアファイバ通信、エラスティック等総合的な優位性を持つ。西CTTCや伊サンタナ大にて標準化にも絡みつつSDN、エラスティックネットワーク制御等の研究開発を推進。
	応用研究・開発	◎	→	英ブリティッシュテレコム、西テレフォニカ等でエラスティックネットワーク、SDN等の研究開発、標準化が進んでいる。各国で全国規模の100 Gbit/s級研究開発ネットワークが敷設中。仏ALU、独ADVAなどの光伝送装置が欧州FP7プロジェクトの検証で用いられ、ネットワークシステム安定性が増している。
	産業化	◎	→	ALU、ADVA などがシェアを持つ。
中国	基礎研究	○	↗	ECOC、OFC 等欧米の先端国際会議への成果投稿が増加している。
	応用研究・開発	○	↗	H25情報通信白書によると、Huawei、ZTE等の研究開発額は、アップルや日本の企業の開発額を上まわっている。今後の成果創出が見込まれる。
	産業化	◎	↗	Huawei 社の伝送装置の市場占有率（世界）が高くなっている。
韓国	基礎研究	△	→	ECOC 2013、2014の配布プログラム上の一般講演は7件、1件。
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	○	→	平成26年情報通信白書によるとFTTH比率が34.8%であり、依然高い水準。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) NTT エレクトロニクスが低消費電力 100G 用デジタルコヒーレント DSP-LSI を製造・販売開始 2012 年 2 月 29 日 http://www.ntt-electronics.com/new/information/2012_02_29.html
2) NTT エレクトロニクス社、20nm 低電力コヒーレント DSP を世界初出荷 2014 年 9 月 22 日 http://www.ntt-electronics.com/new/information/2014/9/20nm-low-power-coherent-dsp.html
3) NTT, NEC, 富士通, 世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術の実用化に目処, 2014 年 9 月 4 日 http://www.ntt.co.jp/news2014/1409/140904a.html
4) NICT, 光ファイバ 1 本の伝送容量 109 テラビットの世界記録を樹立, 2011 年 3 月 10 日. http://www.nict.go.jp/press/2011/03/10-1.html
5) NTT, フジクラ, 北大, DTU 毎秒 1 ペタビット、50km の世界最大容量光伝送に成功 2012 年 9 月 20 日 http://www.ntt.co.jp/news2012/1209/120920a.html
6) KDDI 研, 古河電工, NICT, 世界最大容量の大洋横断級光ファイバ伝送実験に成功～毎秒 1 エクサ（百京、10 の 18 乗）ビット×キロメートルの容量距離積で世界記録達成～ 2013 年 09 月 25 日 http://www.kddilabs.jp/press/2013/0925.html
7) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spec-trum-efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, pp. 66—73, 2009.
8) O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. J. B. Yoo, “Elastic Optical Networing: A New Dawn for the optical Layer?” IEEE Communications Magazine, Vol. 50. No. 2, pp. s12—s20, Feb 2012.
9) S. Shinada, J. D. Mendinueta, R. Luís, and N. Wada, “Operation of a 12.8 Tbit/s DWDM Polarization Division Multiplexing 16-QAM Optical Packet Switching Node after 50-km of Fiber Transmission,” ECOC 2014 Technical Digest (We.3.5.4), September 2014.
10) KDDI 研, 三菱電機, NICT, 慶応大, イクシア, 東陽テクニカ, 100 ギガビット級コア・メトロ・アクセス光ネットワークの Software Defined Transport Network 技術による相互接続に成功, 2014 年 5 月 21 日 http://www.kddilabs.jp/press/2014/0521.html
11) STRAUSS: Scalable and efficient orchestration of Ethernet services using soft-ware-defined and flexible optical networks, http://www.ict-strauss.eu/en/
12) Open Networking Foundation, https://www.opennetworking.org/

３．３．２　無線通信技術

（１）研究開発領域名

無線通信技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

飛躍的にトラフィックが増大している携帯電話・スマートフォンを収容するだけでなく、今後の IoT や M2M などの効率的なサービスを可能とするための低コストで柔軟な特性も兼ね備えた無線通信技術である。将来の社会生活を支える通信基盤として高速・大容量・低遅延・低コストを目標に世界各国で急速に研究開発が立ち上がりつつある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

携帯電話として発展した移動体無線通信サービスは、音声通話サービスにとどまらずむしろ近年はインターネットへのアクセス手段としてその存在価値が高まり急激に通信トラヒックが増大している。今後は、人が意識的に通信を行う用途だけでなく M2M(Machine-to-Machine)通信や Internet of Things (IoT) と呼ばれる機械制御やセンシング、モニタリング用途、没入型バーチャル・リアリティーなどに本格的に対応することが考えられており [1)]、その通信トラヒックの増大は今後 10 年で 1000 倍が想定されている。この多様な需要増に対応するための新たなシステムについて、2020 年の初期サービス開始を目標として極めて活発な議論が世界各地で展開されており、急速に技術開発が行われている。この新システムは、現在の携帯電話システムである LTE(Long Term Evolution)やその発展形である LTE-A(Long Term Evolution-Advance)の次の世代として、第 5 世代(5G)と呼ばれている。

世界中の各団体において 5G に関して議論が開始された段階であり、その明確な定義はまだ存在しないが、代表的には、これまでの 1000 倍のトラヒックの収容、100 倍のユーザースループット、100 倍の端末数、ミリ秒程度の伝送遅延、M2M や IoT に向けた省エネルギー性、高速鉄道など高速移動のサポート、が特徴として挙げられる [2-4)]。

今までの携帯電話システムはおおむね 2.5 GHz 以下の周波数帯が利用されてきたが、これらの目標を達成するために 5G では 6 GHz 以上やセンチ波、ミリ波帯の利用が考えられている。減衰の大きいこれら高周波数帯を屋内のみならず屋外等でも利用するための技術開発が活発化している [5)]。 例えば、基地局側に 100 を超えるアンテナを実装する Massive MIMO 等が盛んに研究されている。Massive MIMO では、アンテナビームパターンを適応的に狭域化することによりアンテナゲインを得る手法であり、端末の移動等の伴う伝搬環境変化への追随技術が重要となる。

また、高周波数帯の利用シナリオと関連して、基地局がカバーする範囲を縮小することによって周波数帯域を空間的に高密度に利用し、また、通信距離が短い高周波数帯の利用をも可能とする「スモールセル」が有力なアプローチとされている。この場合、端末の移動に伴う接続先基地局の切り替え処理（ハンドオーバー・ハンドオフ）が増大してしまうため、対策として制御信号とユーザーデータの通信路を分離し、比較的低い周波数で安定して制御信号を伝送して接続を維持しつつ、高周波数帯などが利用可能な場所においては高速にユーザーデータを伝送する技術(コントロールプレーン・ユーザープレーン分離、C/U 分離)が必須技術となる。

さらに、2020 年サービス開始を目標に LTE-A をベースとしつつ順次発展させるアプローチと平行して、新しい無線通信方式の研究開発も世界各地において研究が活発化している。これまで広く利用されてきた直交周波数分割多重（Orthogonal Frequency Division Multiplexing：OFDM)方式を基本としつつ、その単位波形を変更する例 [6] や、LOS（Line of Sight）環境を前提とした SC(シングルキャリア)方式を基本とした例が検討されている。この他、ネットワーク制御のバーチャル化や周波数帯域利用の柔軟化、各種の周波数利用効率改善技術が検討されている。特に、これまでの無線通信では送信と受信を同じ周波数で同時に行うことはできず、必ず周波数や時間がそれぞれに割り当てられてきたが、5G ではこの送受信を同一周波数で同時に行うことも検討されている。その成否と実用的な利点が得られるかが注目される [7]。

世界的な動向

日本では一般社団法人電波産業会 ARIB 高度無線通信研究委員会において 2020 and Beyond Ad Hoc グループが 2013 年 9 月に設置された。このグループでは 2020 年以降の地上系移動通信についてサービスおよびシステムコンセプトならびに技術トレンドの調査・検討が行われ、ホワイトペーパーが発行された [1]。引き続き第 5 世代モバイル推進フォーラム(The Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum：5GMF)が 2014 年 9 月に発足しており、技術、アプリケーション、ネットワークに関して広く検討している。

米国では 4G Americas が活動しており、2014 年 10 月に 5G の要求条件等に関する文書が公開された [7]。その他、マサチューセッツ工科大学における Wireless@MIT (MIT Center for Wireless Networks and Mobile Computing)などが知られる。また、ニューヨーク大学科学技術専門学校 NYU-Poly が年に 1 度 Brooklyn 5G Summit を主催しており、5G に向けた伝搬モデルを中心に検討している [8]。

欧州では EU の欧州プロジェクトとして METIS（Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty (20 20) Information Society）が 2012 年 11 月世界に先駆けて設立され [9]、この他にも 5GNOW (5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signalling)が活動しており全般に欧州の活動が目立つ。2015 年からは METIS II が活動を開始する予定である。特に METIS は強力に活動を推進しており、欧州が通信分野における主導権を確保する狙いが見てとれる。この他、英国サリー大学にも 5G イノベーションセンターが設立され研究開発を実施している [10]。また、産業界としては、2013 年 12 月に欧州の主要オペレーター、ベンダーにより構成される 5G PPP（5G Infrastructure Public-Private Partnership）が組織され、また、世界の多くの携帯電話事業者が参加する業界団体「NGMN」（Next Generation Mobile Networks）も 2014 年末を目標に 5G 要求条件を定義している。

中国では IMT-2020 (5G) Promotion Group が 2013 年 2 月に設立され、韓国でも未来創造科学部が 2013 年 5 月に 5G Forum を設立し活動を開始している。

（４）科学技術的・政策的課題

5G では信号が広帯域化するため、携帯デバイスに搭載可能な低コストかつ低消費電力の高周波部品やアナログ・デジタル変換器類、低位相雑音局部発振器、信号処理プロセッサが

重要となる。デバイス開発自身はこれまでにも広く行われてきたが、消費者向け製品に搭載できるかが重要である。

高速通信に必要となる周波数帯域幅を確保するため、障害物での減衰が大きく直進性が強いミリ波帯を用いた通信が考えられているが、携帯デバイスで本格的に利用されたことはこれまでなく、利用者の移動や姿勢の変化によって通信の途絶が多く発生することが危惧される。移動体環境におけるミリ波帯等の利用は未知のことが多く、この通信チャネルを活かしつつ、利用者に良好な体験を実現する制御技術が重要である。

広い帯域幅が利用できる高周波数帯の活用は 5G の特徴となるが、具体的な周波数帯域は定まっていない。現状では各国、研究開発機関ごとに異なる周波数帯域において研究開発が進められている。ITU-R（International Telecommunication Union Radiocommunications Sector）の WRC（World Radiocommunication Conference）などで国際的な調整が行われるものの 4 年に一度の開催であり、需要の急激な増大を背景に進展する 5G に向けタイムリーに世界共通帯域を見いだすことが極めて重要となっている。2015 年に開催される WRC-15 にて 6 GHz 以下の周波数帯、2019 年に開催される WRC-19 にて 6 GHz を超える周波数が定義される。これに向け、ITU-R Working Party 5D (WP5D) でも各国より積極的な提案、議論が実施されている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

この研究開発領域では、今後の急激なトラヒック増加を支えるために現時点で考えられる限りの技術が投入されると言える。代表的なものとして、これまで移動体通信では利用されることのなかったミリ波やセンチ波などの高周波数帯の利用と、それを可能とする大規模アレイアンテナ技術(Massive MIMO)がある。街の至る所に 100 素子を超えるアレイアンテナが設置され、移動する利用者に向けて電波のビームの方向を維持するものであり、無線通信技術の大きな飛躍といえる。このような技術が実用化され、利用者に安定した通信を提供できるのかは学術的にも興味深い。

この分野における大規模プロジェクトとしては特に欧州に注目する必要がある。5G の研究プロジェクト METIS が 2012 年 11 月に世界に先駆けて設立されたのみならず、 5GNOW など、それぞれ性格が異なる多数のプロジェクトが推進されている。欧州委員会では、2020 年の 5G の実用化に向け大規模な予算を投じて技術開発などを支援している。その予算は年々増加しており、5G 関連の研究に対し 2020 年までに合計 14 億ユーロを投じる。このように、将来の無線通信において主導権獲得を目指す欧州の動きは特筆に値する。

韓国においては 2013 年 5 月に産官学連携による 5G Forum が設立されたが、韓国政府は Creative 5G Mobile Strategy と題した計画において、今後 7 年間で合計 15 億米ドルを投入して 5G の研究開発を進める。韓国は世界で最も早期の 5G 実用化を考えており、2020 年よりも早く試験サービス等を実施する方針である。

日本においては 2014 年 9 月に 5G の産学官の推進体制である第 5 世代モバイル推進フォーラムが設立されたところであり、平成 27 年度予算概算要求における 5G 関連の研究開発には総額 28 億円を要求している。制度が異なるため一概に比較できないが、欧州や韓国に比べてその予算額は 2 桁程度少ないものである。

（６）キーワード

第 5 世代移動通信システム、5G、スモールセル、Massive MIMO、Very Large MIMO、C/U 分離、ファントムセル、ミリ波、センチ波、高周波数帯

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	全般に弱い。一部携帯電話オペレーター企業の取り組みが目立つ。
	応用研究・開発	○	↗	産業界や行政の取り組みが本格化しつつあるが、若干の出遅れは認められる。
	産業化	○	→	2020年を目標とした取り組みが本格化しつつある。
米国	基礎研究	△	→	一部の大学で活発な活動があるが、その他の成果は見えにくい。
	応用研究・開発	△	→	欧州等に比べての出遅れが認められる。
	産業化	△	→	欧州等に比べての出遅れが認められる。
欧州	基礎研究	◎	→	大学や企業による強力な活動が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	多くの取り組みがあり、大変活発である。
	産業化	○	→	産業化については他国同様特に顕著なものは見られない。
中国	基礎研究	○	→	特に目立ったものは感じられない。
	応用研究・開発	◎	↗	各種会合でも活発に活動しており、今後も伸びていくと思われる。
	産業化	○	→	産業化については他国同様特に顕著なものは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	特に目立ったものは感じられない。
	応用研究・開発	◎	→	サムスンがミリ波帯アダプティブ・アレイ・トランシーバーを開発した他、伝送実験も行っており活発である。
	産業化	◎	↗	2018年に世界最初の実用化を目指す方針であり活発である。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group White Paper, Mobile Communications Systems for 2020 and beyond
http://www.arib.or.jp/english/20bah-wp-100.pdf
2) Thompson, J. ; Ge, X. ; Wu, H.-C. ; Irmer, R. ; Jiang, H. ; Fettweis, G. ; Alamouti, S., “5G wireless communication systems: prospects and challenges [Guest Editorial]”, IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 2, Feb. 2014.
3) Thompson, J. ; Ge, X. ; Wu, H.-C. ; Irmer, R. ; Jiang, H. ; Fettweis, G. ; Alamouti, S., “5G wireless communication systems: prospects and challenges part 2 [Guest Editorial]”, IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 5, May 2014.

4) Andrews, J.G. ; Buzzi, S. ; Wan Choi ; Hanly, S.V. ; Lozano, A. ; Soong, A.C.K. ; Zhang, J.C., “What Will 5G Be?”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 32, Issue: 6, June 2014.
5) ドコモ 5G ホワイトペーパー
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf
6) Banelli, P. ; Buzzi, S. ; Colavolpe, G. ; Modenini, A. ; Rusek, F. ; Ugolini, A., “Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency”, IEEE Signal Processing Magazine, Volume: 31, Issue: 6, Nov. 2014.
7) 4G アメリカ　ホワイトペーパー
http://www.4gamericas.org/documents/4G%20Americas%20Recommendations%20on%205G%20Requirements%20and%20Solutions_10%2014%202014-FINALx.pdf
8) Summary of Brooklyn 5G Summit
http://brooklyn5gsummit.com/wp-content/uploads/2013/10/Brooklyn-5G-Summit-Summary.pdf
9) METIS Web サイト
https://www.metis2020.com
10) The 5G Innovation Centre
http://www.surrey.ac.uk/5gic/

３．３．３　ネットワーク・エネルギーマネジメント

（１）研究開発領域名

ネットワーク・エネルギーマネジメント

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ネットワークを利活用して社会の種々のエネルギーを制御する ICT システム（xEMS：Energy Management System）は、スマートコミュニティを実現する重要な技術である。

相互接続性（Interoperability）、QoS(Quality of Service)制御技術、サイバーセキュリティー技術、M2M(Machine to Machine)通信技術、IoT(Internet of Things)技術、エネルギー最適化（ポートフォリオ）技術など、ネットワーク技術に関する多様な研究開発課題がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

高信頼性サービス提供（事業継続性/BCP：Business Continuity Planning）の観点での一極集中の電力供給からの脱却、CO_2 排出削減、および経済性を同時に満足するエネルギーマネジメントシステム（EMS）が注目されている[1)]。

中でも、民生部門でエネルギー消費が増大している家庭（HEMS: Home EMS）、ビル（BEMS: Building EMS）、コミュニティ（CEMS: Community EMS）、あるいは近年消費電力が急増しているデータセンター（DEMS: Data center EMS）で消費される電力を、ネットワーク技術を利活用して削減する技術の研究開発（xEMS）が活発化している[2)]。

そのうち、HEMS、BEMS、CEMS については、総使用電力が時間帯によって大きく変化し、系統電力網（グリッド）への負担が大きい利用シーンに対して、ピーク電力を抑えるために、需要をシフトさせる DR（Demand Response）などのピークシフト策として適用が検討されてきた。そのために、地域に大量に分散配置された電力メータとの通信を行うための研究開発や標準化が進んでいる。ビルにおける空調機器の最適制御に関する研究開発なども進んでいる[3)]。

加えて、各家庭、商業ビル、あるいは地域においては、太陽電池、風力発電などの再生可能エネルギー機器や燃料電池などの代替エネルギー機器に加え、蓄電池や電気自動車などのエネルギーを蓄積する機器の大規模な普及に備えて、系統電力への逆潮も含めた電力バランスを最適化するグリッド制御技術（スマートグリッドやマイクログリッドなど）等のエネルギーポートフォリオに関する研究開発が進められている[4)]。

また、エネルギーマネジメントを支えるネットワーク技術の研究開発として、多種多様なデバイスとの通信を可能にするため、通信制御プロトコルの観点での相互接続性（Interoperability）を保持しつつ、セキュリティーの向上、普及した際のネットワークシステムと情報処理基盤のスケーラビリティーの向上、および QoS 制御技術等がある[5)]。

一方、データセンターにおいては、そのエネルギー消費のうち、サーバーなどの ICT 機器（50%）、空調（30%）や電源のロス（15%）がほとんどを占めており、ICT 機器以外で最も大きな電力を消費する空調の電力を削減する目安として PUE（Power Usage Effectiveness：ICT 機器電力の占める割合／総電力と ICT 機器の電力が等しい時に１となる）が提案され、その指標を下げる試みがなされてきた。しかしながら、PUE は必ずしもデータセ

ンターの総電力を反映していない事が課題となっている。加えて、ICT 機器や空調などの個別構成要素の電力を下げたとしても全体の消費電力を下げることにはならない事が課題となっている。データセンターの制御については、従来の温度制御でなく、総電力の直接制御を行う技術の開発が強く求められている[6]。

このように、エネルギー制御技術（xEMS）は、個別エネルギー機器の制御のみならず、社会システムとして、需要と供給のバランスを制御するエネルギーポートフォリオ技術、スケーラブルでセキュアな情報通信技術、リアルタイム通信技術、など多種多様なネットワーク関連技術の研究開発を伴っており、日本の産業の競争力強化につながることが期待される。

［これまでの取り組み］

xEMS に関しては、特に系統電力を対象としたスマートグリッドにおいて、通信の相互接続性の観点で通信プロトコルの開発と標準化が進められてきた。特に、米国では、老朽化した電力網（グリッド）の改善をモチベーションとして、NIST(National Institute of Standards and Technology)による標準化が強力に推進されてきた[7]。このため、研究開発だけでなく、実用化においても米国が先行しており、ヨーロッパ、日本、中国、韓国がキャッチアップする構造になっている。例えば、エネルギー機器制御プロトコルとして、米国では SEP(Smart Energy Profile)、欧州では、インテリジェントビルのための OSI(Open Systems Interconnection)ベースのネットワーク通信プロトコル KNX(管理母体：Konnex Association)、日本では経済産業省を中心として通信ミドルウエアとしての Echonet Lite などが取り上げられ、積極的に標準化されてきた[8]。また電力逼迫時の電力調整プロトコルとして OpenADR(Automated Demand Response)等が提案され、標準化が進んでいる[9]。

同時に、IEEE で Transactions on Smart Grid が新たに発刊されるなど、標準化と並行して研究開発に関する取り組みも活発化している[10]。このように、世界的に xEMS に関する研究開発や標準化が活発化している。

また、家、ビル、コミュニティにおいては、太陽電池、風力発電などの再生可能エネルギー機器や燃料電池などの代替エネルギー機器に加え、蓄電池が急速に普及してきた事もあり、商用系統電力とのバランスや系統電力の消費ピークをシフトする研究開発も行われている。種々のエネルギー供給と電力需要のバランスを考慮しつつ、全体のコストや CO_2 の排出を最小化する柔軟な体系的ポートフォリオ技術の基礎的な研究開発が活発化している。一方、日本では、実証実験などの種々の取り組みがされてはいるものの、依然として政府資金による実証実験にとどまっている。

一方、民間部門の中で最も消費電力の増大が顕著なデータセンターでは、2006 年に米国環境庁(EPA)がその消費電力の上昇に関して警告を発し、目標 PUE を明示した後も、依然として総電力は年々増大し続けており、抜本的な消費電力の抑制が望まれている[11]。その原因の一つは、Mid Tear や Enterprise と呼ばれる大型のデータセンターについては、それぞれ個別の省エネ策を講じているが、大型データセンターの 4 倍の市場規模となっているプライベートクラウドなど中小規模のデータセンターの効率向上策が大きく遅れている事とされている[6]。

これまで、サーバーやルータなどの ICT 機器、空調システム、電源のロスなど、それぞれの構成要素の消費電力を削減する技術革新がなされてきたところであるが、それぞれの要

素の消費電力が最小となる条件が必ずしも全体の電力を最小化する事にはならない事も指摘されており、連携制御による全体最適化の必要性が認識されはじめた[6)]。

さらに、クラウド研究における多くの学会において、“省エネルギー:Green”をセッション名にするなど、エネルギーマネジメントが世界的に研究開発の重要なポイントになっている[12)]。

［今後必要となる取り組み］

エネルギー情報は、社会のインフラ情報であるだけでなく、重要な個人情報でもある事から、ハッキングなどへの対策が重要である。そのため、物理的なセキュリティーだけでなく、サイバーセキュリティーに対して頑強なネットワーク技術の構築が不可欠となっている。

さらに、災害時には、震災情報や重要制御信号の優先配信を実現するための優先制御技術や帯域制御技術、遅延やジッターを抑制する技術、あるいは QoS（CoS: Class of Service）制御技術の開発と標準化が不可欠である。

多種多様なプロトコルやデバイスを収容するための相互接続性を確保する研究開発も継続的に必要となる。通信制御用のプロトコルの標準化が進んではいるものの、依然として課題は多い。

xEMS は、スマートシティー実現のための中核技術として位置づけられているため、各種センサーや、エアコン、照明、分散エネルギー機器などのアクチュエーターなど、多種多様で大量の端末が接続される。しかしながら、現時点では、それら大量の機器を接続して同時に通信制御するだけの十分なスケーラビリティーが検証されてはいない。例えば、高精細映像配信などのリッチコンテンツを送受信する場合と異なり、M2M 通信の特徴である、小さくて大量のパケットの処理が、ネットワーク処理に負担をかけてしまう。その結果、ネットワーク遅延の原因になる。

電力メータの値など、情報を一方的に送信・収集する場合は別として、センサー情報を基にアクチュエーターをリアルタイムに制御する双方向のリアルタイム通信が要求される場合も多い。すなわち、大量で高頻度のトラフィック制御技術、シグナリング技術の開発が急務である。あるいは、そうした大容量・高頻度の通信に対するセキュリティーについても取り組む必要があり、新たなプロトコルの開発や、ネットワーク構成やその仕組みの研究開発が必要である。

さらに、通信システムにとどまらず、小さくて大量な情報を処理するための情報処理基盤にも工夫が必要となる。リアルタイム分析・処理技術、認証やログ管理技術の研究開発である。

上記の様に、xEMS の大規模な普及のためには、ネットワーク負担を解消し、情報処理負担を解消する低コストな技術の研究開発が不可欠となっている。

さらに、今後のスマートコミュニティにおいては、モビリティ（EV など）も含めてあらゆる機器がネットワークに接続され、エネルギーマネジメントの対象となる。その結果、エネルギーの側面でモビリティネットワークを統合させた社会インフラが構築されることになり、環境クラウド（制御基盤）によって統合制御されるようになる。上記のように、xEMS は IoT や WoT(Web over Things)、あるいは Cyber-Physical Systems(CPS)と言われる、大規模 M2M 技術分野の典型的な利用シーンであり、そのためのネットワークや情報処理基盤

の研究開発が急務となっている。

一方、xEMS の普及は、ネットワークの“向こう側“で制御するクラウドとしてのデータセンターに与えるインパクトも大きい。大量で小さなパケットを処理するためには、これまでの一極集中型のデータセンター構成は必ずしもふさわしいとは言えない。一極集中したデータセンターでは、大量の情報を送受信し、処理できないばかりか、データセンターが消費するエネルギーの側面でも、限界がある。

このため、処理単位（Workload）を段階的に分けて処理する新しいアーキテクチャーと、新しい分散処理手法を開発せざるをない。そのために、すでに Fog(Edge) Computing などの、これまでの一極集中型の処理基盤ではない新たな構成やデータセンター間の連携が提案されており[13]、さらに本格的な取り組みが必要である。また、通信の相互接続性と同じ意味で、処理データの相互接続性を担保するためには、処理データのフォーマットを共通化する必要がある。

このように、xEMS は日本の産業競争力の源泉になる可能性を秘めており、その普及には、個別課題ごとのプロジェクトではなく、xEMS に焦点を絞った省庁横断、産官学連携の体系的な国家プロジェクトが必要である。

一方、データセンター自体の消費電力を削減する DEMS については、各省庁による委託や補助事業の例はあるものの、大型のデータセンターに焦点をあてたものが主体で、そのほとんどが、全体の 80%を占める中小規模のデータセンターを対象としておらず、日本全体の CO_2排出削減に貢献できるまでには至っていない。また、個別構成要素の省エネ策は進んでいるものの、データセンターの全体最適化（CO_2 最小化、電力最小化）がなされていない。先に記載した通り、個別要素の消費電力を抑制するだけでなく、それら全体で消費電力が最小になるように、統合最適化技術が強く望まれている。空調システムや ICT 機器の消費電力特性は多次元のパラメータに対する非線形特性を示すため、それらを統合制御する事は容易ではない。

そこで、近年、データセンターをソフトウェアで管理するシステム（SDDC: Software Defined Data Center）として DCIM(Data Center Infrastructure Management System)が、商用化され始めた[14]。ネットワークシステムの構成手法として注目されている SDN(Software Defined Network)と連携したシステムとの整合性が良いシステムとして提案がなされている。

さらに、一部の国家プロジェクト（環境省、CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業）では、市場の 80%を占める中小規模のデータセンターに焦点を当て、総エネルギーの最適化のためのプロジェクトを発足させた。機械学習によって各要素の動作条件を最適化し、結果として総電力を最適化する動作条件でデータセンターを運用するという新しい試みが開始されている。そのアルゴリズムを拡張 DCIM（A-DCIM：Augmented DCIM)として実装し効果を得ている[15]。このように、データセンターの規模によらずデータセンターの抜本的な省エネを実現する試みも始められた事で、日本の産業力向上が期待できる。

さらに、データセンターにおいても、再生可能エネルギーを利用するシーンが確実に拡大し、BCP (Business Continuity Planning)の観点や省エネの観点でも、エネルギーポートフォリオの技術が必要となっている。実際、データセンターで消費される電力を、スマートグリッドやマイクログリッドとの連携で制御する取り組みも始まっており、今後データセンタ

一単体でなく、コミュニティ全体として取り組む施策が必要である。

また、データセンターにおける制御インターフェースの標準化は極めて遅れている。ICT機器、空調機器、電源機器、それぞれの分野で独自の取り組みがなされてきたため、統一的な通信制御プロトコルの開発ができていない。特に、空調や電源などのセキュア通信プロトコルの開発や標準化が遅れており、セキュリティー上も脆弱性が指摘されている。セキュアでリアルタイム制御が可能な、スケーラビリティーに富んだ通信制御プロトコルの開発と標準化が急務である。産官学の、業界を超えたオープンイノベーションがこれほどふさわしく、また必要とされるフィールドはない。

（４）科学技術的・政策的課題

xEMS（x: H, B, C）ではすでに経済産業省、総務省、環境省など多くの省庁が種々の側面で取り組んできたところである。特区の形成などで、制度障壁の撤廃や制度上の課題も明確になりつつある。国際標準化についても、日本として貢献するところが大きい。電力メータなどの通信プロトコルの標準化も進みつつある。一方で、日本では、欧米に比較して、先に記述した通り、業界を超えた連携が進んでいるとは言い難く、産官学の業界を超えたオープンイノベーションを推進する政策的な取り組みが強く望まれる。

EV や燃料電池車の普及により、充電システムがコミュニティに配置されることになれば、電力ネットワークのアーキテクチャーに対する考え方や運用手法が刷新されるばかりでなく、搭載した蓄電池がコミュニティやホームのエネルギー蓄積デバイスとして位置付けられるようになる。そのため、モビリティが、ホーム、ビルあるいはコミュニティの xEMS の対象機器として位置付けられるようになる。その結果、地理ネットワーク（道路網)、電力ネットワーク（電力網)、モビリティネットワーク（車)、情報通信ネットワークなど、すべての社会インフラとしてのネットワークが相互に連携しながらスマートコミュニティが構成されていく事になる。情報通信ネットワーク一つの側面でさえも、現在想定されるよりもさらに大規模な M2M を包含するシステムが必要になるなど、これまで以上に省庁の垣根、業界の垣根を越えて、種々の技術的課題を解決する研究開発が強く求められる。

データセンターもこれまでの構成とは違ったイノベーションが必要である。クラウド技術がますます進歩する事は疑いようがないが、前項で記載した Fog Computing など、日本としても強力に推進するべきである。

他の EMS と一見異なる DEMS についても、コミュニティに配置した分散発電機器の利用や、余剰電力をコミュニティに還元する事も想定する必要がある。他の EMS との連携も加速されていく必要がある。その際、法的、制度的が問題となる。省庁のファンディングにおいても、縦割りでなく、体系的な取り組みが重要となる。

欧米においては、老朽化した電力グリッドの更新策として位置付けられたという経緯はあるものの、NIST を中心として発展したスマートグリッドに関する標準化活動（SGIP: Smart Grid Interoperability Panel）が、すでに NPO に移行されるなど、確実に民間主導の取り組みとして根付き始めている。日本でも、引き続き国家的で業界を超えた連携や研究開発が期待される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

xEMS に関しては、NIST が Smart Grid における相互接続性に関するフレームワークとロードマップを更新した（NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0）。特にサイバーセキュリティーの Guideline を示し今後の方向性を現実に即して示唆した事が注目される [16]。さらに、前項で記載した通り、2009 年に NIST を中心に設立された SGIP が 2013 年には Non-profit private-public partnership organization として SGIP 2.0 Inc. として再構成され、着実に民間主導に移行しつつある [17]。

標準化の側面では、種々の通信制御プロトコルが ITU-T の SG5 での議論が加速されつつあるが、日本でも標準化活動と並行してプロトコルを実証する地域実証プロジェクトが開始されるなど、多方面の活動が行われている。

DEMS では、すでに記載の通り、通常、Mid Tier や Enterprise などと分類される大手のデータセンターが自社独自の省エネの取り組みを行ってきたところであるが、Facebook が主導した標準化活動（Open Compute Project）を精力的に推進し続けるなど、省エネに対する取り組みが活発化している。

これに対して、日本でも、大手のデータセンターに限らず、中小規模のデータセンターにも利用でき抜本的な省エネが実現できる統合エネルギー制御技術への取り組み（オープンイノベーションコンソーシアム形式の業界連携事業）が始まるなど、注目すべき動きも始まっている [15]。

［注目すべきプロジェクト］

・ EU の FP7/HORIZON2020 には種々のスマートコミュニティプロジェクトが含まれる
・Facebook によるデータセンターの省エネプロジェクトの拡大（Open Compute Project）
・ 環境省による「CO_2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」における業界連携のオープンイノベーションコンソーシアムによる抜本的省エネ技術の開発と普及活動など。

（６）キーワード

xEMS（Energy Management System）、スマートグリッド、相互接続性(Interoperability)、通信プロトコル、エネルギーポートフォリオ、M2M、IoT、WoT、サイバーセキュリティー、データセンター、SDDC(Software Defined Data Center)、DCIM(Data Center Infrastructure Management)、A-DCIM(拡張 DCIM)

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	○：xEMSは、米国NIST主導によるInteroperability確保のための通信制御プロトコルの標準化をキャッチアップする形で、総務省を中心に積極的に活動されてきたが、一部の標準化を提案したのち、国際標準化の場での新たな基礎的な取り組みの動きが見えにくい。
		◎	↗	◎：DEMSは、機械学習を取り入れた消費エネルギー全体最適化の取り組みが開始されるなど、新たな提案がなされている。
	応用研究・開発	○	→	○：xEMSは、機器制御プロトコルとして、米国のSEP2、欧州のKNX等に対して、日本独自のミドルウエアであるEchonet Liteの策定と標準化が一段落し、地域実証のフェーズに入っている。 IoTサービスへの対応を見越して、セキュアで双方向のリアルタイムウェブサービス化の取り組みが開始され、IEEE1888を活用した双方向でセキュアな通信プロトコル開発など、新たな動きが出てきている。
		◎	↗	◎：DEMSは、インテル等による米国主導のSDDC(Software Defined Date Center)の発想に基づくDCIM(Data Center Infrastructure Management)をキャッチアップしてきたが、エネルギマネジメント(DEMS)を組み合わせた拡張DCIMを提唱し、日本独自の提案もなされ始めた。 空調や電源などの通信制御インターフェースが、セキュリティー上最も遅れた（あるいは対応していない）インターフェースであるとの認識から、共通インターフェースへの対応や標準化の動きが開始された。
	産業化	○	→	○：xEMSは、政府資金による実証実験にとどまっており、市場原理に基づいた取組が十分とは言い難い。日本発の通信制御ミドルウエアEchonet Liteについては、国際市場への普及が課題である。 電力メータのインターフェースの一部がオープンになってはいるものの、種々の技術（電力ポートフォリオ技術やデマンドレスポンスなど）が十分に生かせる環境（適用の場）が構築できているとは言い難い。
		◎	↗	◎：DEMSは、大手データセンターに偏重していた取り組みが、中小規模のデータセンターにも適用できる技術の取り組みが開始されたところ。今後の商用展開が期待できる。データセンターでのリアルタイム双方向インターフェースプロトコルの開発など、標準化技術の投入によって、普及の可能性がある。
米国	基礎研究	○	↗	xEMSは、メータネットワークの開発と標準化が一段落し、Fog Computingなどの大規模化対応技術の研究開発やセキュリティー対策技術の研究開発に移行している。 DEMSは、基礎研究のフェーズではなく、大手のデータセンター事業者が自らの消費電力を削減するために取り組むという状況。
	応用研究・開発	◎	↗	xEMSは、NISTの発表によるロードマップに反映されるように、通信制御プロトコルの標準化の活動が一段落し、サイバーセキュリティー対策のフェーズに入った。 DEMSは、大手のデータセンターの自社の取り組みが活発化している。ネットワークセキュリティーの脆弱性が指摘されており、標準化の観点で日本との連携があり得る。
	産業化	◎	↗	xEMSは、すでに商用化のフェーズに入った。これから各都市に水平展開される段階。 スマートメータは電気、ガスなど広範囲で市場導入されている。電力逼迫時のDemand Responseを支えるプロトコルOpenADRが実用化されているなど、確実に市場へ反映されている。 通信制御プロトコルSEP2.0については対応デバイスも含め、今後の発展が期待される。 DEMSは、インテル等による米国主導のSDDC(Software Defined Date Center)の発想に基づくDCIM(Data Center Infrastructure Management)の商用化が進んでいる。エネルギー最適化も含めた拡張DCIMは日本先行。 新しい空調制御システムが発表されるなど、ベンチャー企業の動きが活発化。

欧州	基礎研究	◎	↗	xEMSは、米国主導によるスマートグリッドに加え、風力や太陽電池などの再生可能エネルギーとの連携制御に極めて積極的である。 FP7/Horizon2020などによるスマートコミュニティ関連の多くのプロジェクトが動いている。 DEMSは、空調方式で新しい提案がなされてはいるが、EMSの観点で継続的な動きとして表面化していない。
	応用研究・開発	◎	↗	xEMSは、米国主導のスマートグリッドや再生可能エネルギーの利活用、あるいはそれらのネットワーク制御技術の開発に積極的である。EU主導(FP7/Horizon 2020)の大規模な実証が行われている。通信制御プロトコルも、欧州独自のKNXを策定して欧州内のデファクトとするなど、政策的にもアクティブである。標準化についても積極的。日本との連携によるスマートコミュニティ関連要素技術の研究やテストベッド連携が期待される。 DEMSについては、米国や日本に比べて大きな成果が表面化していない。
	産業化	◎	↗	xEMSは、EU主導で進んでおり、産官学の連携が強い。 DEMSは、米国や日本に比べて大きな成果が表面化していない。
中国	基礎研究	△	→	xEMSは、テレコム企業を中心に標準化にも力を入れている。 DEMSは、ネットワークのアーキテクチャーについては積極的な提案がなされているものの、エネルギーを制御する取り組みについてはほとんど明らかにされていない。
	応用研究・開発	○	↗	xEMSは、標準化の観点で、テレコムを中心に積極的な取り組みを行っている。スマートグリッドに関して活発化。 DEMSは、ほとんど明らかにされていない。
	産業化	○	↗	xEMSは、テレコムを中心に積極的な取り組みを行っている。スマートグリッドの採用について活発な動き。 DEMSは、ほとんど明らかにされていない。
韓国	基礎研究	△	→	xEMSは、応用研究中心。 DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。
	応用研究・開発	△	→	xEMSは、政府、電力、テレコム系による実証実験が先行。 DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。
	産業化	△	→	xEMSは大規模な産業化には至っていない印象。 DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）経済産業省資源エネルギー庁
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/iso50001/など

2）経済産業省商務情報性策局平成 26 年度情報処理振興課概算要求概要：
http://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2014/pr/pdf/ene_syojyo_01.pdf など

3）経済産業省デマンドレスポンス（Demand Response）について：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sougou/denryoku_system_kaikaku/002_s01_01_05.pdf など

4) 経済産業省スマートグリッド・スマートコミュニティ：
http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/など
5) 総務省報道資料：http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02tsushin04_000017.html などの国家プロジェクト以降、多くの研究開発および標準化事業が発足している。
6) インプレス社 Smart Grid ニューズレター, Vol.3, No.2, pp. 24-33, 2 月号, 2014.など
7) National Institute of Standards and Technology(NIST), http://www.nist.gov/
8) Consortium for SEP 2 Interoperability, http://www.csep.org/など
9) open ADR, http://www.openadr.org/
10) IEEE Transaction on Smart Grid, http://www.ieee-pes.org/ieee-transactions-on-smart-grid
11) 経済産業省：http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100701a03jc.pdf など
12) IEEE CloudNet, http://www.ieee-cloudnet.org/など
13) Cisco Fog Computing with IOx, http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/cisco-fog-computing-with-iox.pdf など
14) Intel Exploring DCIM for Intel's Data Centers, http://www.intel.com/content/www/us/en/it-management/intel-it-best-practices/exploring-dcim-for-intels-data-centers.html など
15) 環境省" 平成 25 年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業"
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local/25_01/
16) NIST, "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0",
http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NISTDraftFrameworkOct_2013.pdf
17) Smart Grid Interoperability Panel, http://www.sgip.org

３．３．４　ネットワーク仮想化技術

（１）研究開発領域名

ネットワーク仮想化技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ネットワークサービスやネットワーク構成の制御を抽象化・モデル化することにより、データ処理量やトラヒック量の変化・変動にあわせて、通信処理能力を柔軟に融通・制御可能とするネットワークアーキテクチャーやネットワーク制御技術

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

人口の増大をベースにした経済成長が期待される一方で、環境（エネルギー）、資源、都市化、交通等のさまざまな社会課題が顕在化しつつある。このような背景のもと、ICT 技術の利活用により、安全・安心な暮らしや、効率的な資源活用を可能とする新しい社会インフラの実現が強く期待されている。また、総務省 ICT 成長戦略会議 [1]（2013 年 6 月）では、データの利活用範囲の拡大やネットワークにつながるモノの拡大を考慮し、従来型のビジネスモデルを、利用者視点で付加価値の高いサービスと技術製品とを一体で提供するモデルに変革する「ICT コトづくり」を、新しい価値創造産業の創出による成長戦略の１つとして提言している。

一方、技術トレンドに関しては、クラウドやモバイルインターネットの普及により、ネットワークに接続されるデバイスが増加の一途をたどり、2020 年には 500 億のデバイスやモノがネットワークに接続されることが予測されている。多種多様なセンサーデータから取り込まれる実世界情報をサイバー空間において活用し、スマートグリッド、ITS、スマートシティー等のさまざまな社会システムを構築するための基盤として、ネットワークは変革を求められている。この新しいネットワークでは、従来のブロードバンドネットワークが実現してきたような情報通信の高速・広帯域化という価値のみならず、ビッグデータ分析技術との融合を図りながら社会課題の解決に直結する高度化・高機能化により新しい社会価値を創出することが望まれている。

ネットワーク仮想化技術 [2]は、要求の異なる様々な社会システムを実現するために、通信処理能力を柔軟に融通・制御可能とするネットワークの新しいアーキテクチャー、および制御方式である。本技術により、通信資源の利活用最適化の視点からは通信事業者のコスト削減による収益拡大を、様々な通信サービス創造の視点からは業務プロセス改革によるサービス事業者の経営資源効率化を、利用者にはアプリケーション機能の連携による新サービス構築の容易化を、価値として提供可能となる。総合科学技術・イノベーション会議では、ICT で新たな価値を創造するための視点として、基盤・ネットワークに関しては、バーチャルコミュニケーションや実世界シミュレーション等の、これまでにはない要求仕様のアプリケーションやサービスを実現するネットワークおよびネットワーク制御が期待されており、ネットワーク仮想化技術はまさに、これを実現するための基盤技術であり、さらなる研究開発の強化が、国際競争力強化の視点からも重要である。

［これまでの取り組み］

ネットワーク接続の柔軟性を向上させるため、新しいヘッダ構造の導入により LAN セグメントや IP ドメインを論理的に拡張するトンネリング方式やオーバレイ方式が、ネットワーク仮想化を既存ネットワークの拡張として実現する技術として発展してきた。一方で、既存ネットワークの制約に縛られることなく、新しいアーキテクチャーを再設計する技術革新の潮流が、SDN（Software Defined Network）である。技術標準化を推進する ONF（Open Networking Foundation）において SDN は、ネットワーク制御メカニズムを、転送処理機能から分離し、ソフトウェアにより直接プログラム可能とするネットワークアーキテクチャーと定義されている。SDN によるネットワーク仮想化技術では、ネットワークの構成やサービス機能の制御を、抽象化・モデル化することが重要であり、抽象化・モデル化されたネットワークへのソフトウェア制御を、実ネットワークの制御と連携させる方式の研究開発が行われてきた[3), 4)]。

データセンター、企業ネットワーク、モバイルコアにおいては、SDN を実現する１つの方式である OpenFlow が、実用段階にきており一部商用化もされている。さらには、OpenFlow の光トランスポートやモバイルネットワークへの適用に向けた仕様拡張[5)]の検討が始まっており、大規模な実証実験が予定されている。無線アクセスへのネットワーク仮想化技術の適用に関しては、セル間干渉制御等を含む無線ネットワークの統合管理・制御や、Wi-Fi オフロードに代表されるモバイルトラヒックの運用管理に関する研究開発の成果が、論文として多数報告されている。

上述した、ネットワーク構成や制御の仮想化に加え、NFV（Network Functions Virtualization）と呼ばれる通信サービス機能の仮想化を実現する取り組みが、欧州の標準化団体である ETSI（European Telecommunications Standards Institute）を中心に始められている。具体的には、宅内装置やセットトップボックスにおける認証や品質制御機能の仮想化、映像配信のキャッシュやトラヒック制御を行う CDN（Contents Delivery Network）サービスの仮想化、等のユースケースを想定した研究開発が進められている

モバイル・無線ネットワークにおいてもアーキテクチャーの変革が起こりつつある。例えば、欧州が主導する 3GPP（Third Generation Partnership Project）等で検討が進められており、基地局の運用パラメータの設定や最適化を自動化する SON(Self Organizing Network)や、３G と LTE（４G）、Wi-Fi（無線 LAN）が混在する異種無線ネットワーク間をシームレスにハンドオフする方式、等の研究開発が進められている。更に、基地局をアンテナ部とデジタル信号処理を行うベースバンド部に分離した上で、ベースバンド部をクラウド化し、これを複数セルや周波数間で共有するクラウド RAN（Radio Access Network）と呼ばれる無線アクセス方式のアーキテクチャー検討が、チャイナモバイル（中国移動通信）を中心に行われている。

［今後必要となる取り組み］

ネットワーク仮想化技術のさらなる進展に向けては、ソフトウェアによるトラヒックオフロード・平滑化等のネットワーク機能の高度化から、新しいサービス・アプリケーションの導入・運用プロセスを変革するサービス開発の効率化や、社会インフラサービスへの適応に向けたレジリエンス（信頼性、耐故障性、耐障害性）を実現するための新しい技術開発が必

須となる。特に、今後の成長市場として注目される、IoT、エッジコンピューティング、Crowd ソーシング、パーソナルデータ・オープンデータ、CCN（Content Centric Network）等の新しい情報流通基盤サービスを支える通信インフラ基盤として、ネットワーク仮想化技術の高度化・実用化を進め、サービス提供形態やビジネスモデルの変革、さらには ICT を利活用する様々な社会インフラ産業の構造変革をけん引・加速化することが期待されている。

これらを実現するために、ネットワーク仮想化技術は、様々な通信環境に適用可能とするためのヘテロジニアスなネットワーク環境への対応、ネットワーク資源と計算資源を含めたシステムやサービス全体の性能や資源利用効率の最適化、仮想ネットワークを用いたサービス設計・構築・運用方式の確立、システム状態の変化・変動が激しい環境下においても信頼性やサービス品質を維持するための制御の自律化、安心・安全な情報通信環境を維持するためのセキュリティー機能のビルトイン、等に関する研究開発が必須となる。

（４）科学技術的・政策的課題

今後必要となる取り組みで述べたネットワーク仮想化技術の高度化を実現するためには、様々な特性を有するヘテロジニアスなネットワークに跨る仮想ネットワークの構築・検証方式や性能モデル化方式、仮想ネットワークを利活用するサービス設計・構築・運用方式、利用状況の変化や変動をネットワークに関するビッグデータを活用して解析する予知・予測方式、予知・予測結果に基づきプロアクティブかつリアルタイムな最適化を実現するフィードバック制御方式などの基盤技術確立が科学技術的な課題となる。

更に、これらの新しい研究開発ならびに早期の社会実装を実現するためには、研究開発成果の技術検証や実用性実証を、想定されるサービス提供時の環境で実施可能なテストベット環境を整備し、社会課題を解決するサービスやアプリケーションのテストベッド環境を活用した研究開発を促進し、様々なステークホルダを巻き込んだ大規模実証実験を加速化するフレームワーク（競争的資金によるビジネス創出を加速化する支援体制）を整備することが重要である。

国際競争力の強化、オープンイノベーションを通じた波及効果の拡大に向けては、国際連携を研究開発を早い段階から推進し、標準化活動や社会実装に向けた様々なノウハウを共有するための施策が重要である。例えば、研究成果のソフトウェアを誰もが利用可能とするためのオープンソースソフトウェア（OSS）開発やコミュニティ活動を活性化する支援などが考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

ネットワーク仮想化技術の高度化、高機能化に向け大きな影響を与える注目すべき技術動向として、第５世代移動体通信システム（５G）とサイバーセキュリティーへの対策技術を挙げる。

2020 年までに大きく成長すると注目される IoT 時代への変革を、加速化するのがモバイルネットワーク（移動体通信）技術の進展であり、第 5 世代移動体通信システム（５G）の議論が活発になっている [6]。今後 10 年で、1000 倍の通信容量、最大 10 G レベルの通信速度、1msec の通信遅延が、様々な周波数帯・無線メディアを融合して実現されていくことが

予測されている。５G に向けた要求を実現するためには、無線通信技術の大変革のみならず、無線アクセスからコアネットワークまでの統合運用管理や統合制御をも考慮したモバイルインフラ全体の大変革が必須であり、ネットワーク仮想化技術の中核である SDN や NFV の果たす役割が大きくなる。

一方で通信インフラの安心・安全を脅かす存在としてサイバー攻撃リスクが近年深刻化してきている。サイバー攻撃手法は、この 10 年で複雑化・巧妙化しており、DDoS（Distributed denial of Service）攻撃によるオンラインサービスの停止、マルウェアによる情報漏えいやシステム破壊から、ソーシャルエンジニアリングの活用やゼロデイ脆弱性を組み合わせた標的型攻撃による情報漏えいが深刻化している。これを検知・防御・対策を行うためには、広域かつ動的なアプリケーションレベルでのトラヒック監視や未知プロトコルの検出、膨大量の監視情報に基づく攻撃プログラムの挙動や侵入経路・感染経路の分析、状況に応じた適応型の攻撃対策自動化などの技術確立と実用化が重要な課題である。ネットワーク仮想化技術を応用した新しい攻撃防御方式の確立が求められている。

ネットワーク仮想化技術によるネットワークの新しい価値創造に向けては、欧州の Future Internet PPP や北米の US Ignite が、アプリケーション指向の社会実装を目指す取り組みとして注目されている。特に US Ignite は、Gigabit to end user、SDN/Virtualization、Local Racks（GENI Racks）環境で構築される、将来ネットワークの利活用アプリケーションの研究開発を推進するホワイトハウス主導の研究開発プロジェクトであり、5 年計画で、遠隔医療、ヘルスケア、教育を主対象とする 60 の先進アプリケーション、200 の実証実験を目標としている。

また、社会課題を解決するインフラ構築という視点からは、GE が提唱するインダストリアル・インターネット構想が注目されている [7]。インダストリアル・インターネットでは、インテリジェント機器、高度な分析、働く人をつなぐことにより、従来の社会インフラを構成する業務用機器のサービスとメンテナンスの在り方を変革することを目指すものである。人、プロセス、データ、モノを組み合わせ、ビッグデータの利活用により新しい価値を創造する取り組みの一つであり、インダストリアル・インターネットの実現においても、ネットワーク仮想化技術の担う役割が大きい。

［注目すべきプロジェクト］

ネットワーク仮想化に関連する研究開発は、北米 NSF や欧州委員会（EC）が、FIA（Future Internet Architecture）や FP7 等のフレームワークを運用しており、様々な研究開発プロジェクトが推進されている。どちらも、基礎研究から実用化研究のフェーズに入っており、欧州では FP7 に続くフレームワークとして Horizon2020 を開始しており、ネットワーク仮想技術の基盤に加え、IoT や５G との連携を視野にいれた標準化や応用研究プロジェクトの推進に力を入れている。

一方で、エコシステムの構築により産業界に大きなインパクトを与えつつあるオープンソース開発活動にも注目しなければならない。広域ネットワークにおける SDN の実用化加速を行う ODL（OpenDayLight）、ネットワークサービス機能仮想化である NFV の標準化や実証評価を加速化する OPNFV [8]（Open Platform for NVF）、クラウド環境における IT 環境と NW 環境の統合仮想化の実用化を推進する OpenStack 等、世界各国の通信事業者、ベ

ンダー、大学が参画する大きな潮流となっている。

国内においても、欧米に匹敵する精力的な取り組みが行われており、世界の動きをけん引あるいは貢献する技術開発成果があがりつつある。例えば、総務省が委託研究として推進する「新世代ネットワーク基盤技術に関する研究開発」では、ネットワーク仮想化を実現する仮想化ノード開発と実証実験のプロジェクトが 2010 年より進められている。また、2013 年からは「ネットワーク仮想化技術の研究開発」に基づき、オープンイノベーションのためのネットワークプラットフォームを構築・実証・展開する O3 プロジェクト（３つの O は、「Open：オープン」「Organic：有機的」「Optimum：最適化」を意味する）が活動している。更に、社会課題の解決、産業競争力の強化に向けては、科学技術イノベーション総合戦略 2014 にある様々な施策が実施されている。

（６）キーワード

ソフトウェアデファインドネットワーク（SDN）、ネットワーク機能仮想化（NFV）、インタークラウドネットワーク、自己組織化ネットワーク（SON）、クラウド RAN（Radio Access Network）

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・新アイデアや時代をけん引するコンセプトに関しては、欧米に遅れがち ・脳や生物の自律性に学ぶロバストなネットワーク構築に関する基礎研究は、大阪大学などを中心に、海外連携も含めて行われている
	応用研究・開発	○	→	・ITUにおけるネットワーク仮想化の要求条件の定義ドキュメントについては日本が中心にとりまとめ・勧告化 ・JGN-XにおいてOpenFlowを用いたネットワーク仮想化基盤（RISE）を全国展開、またAPAN/GENI/FIRE等と相互接続を運用 ・メジャーな国際学会での論文採択数が少ない
	産業化	◎	↗	・OpenFlowスイッチ・コントローラについてはNECが世界初の製品化 ・SDNの広域ネットワーク適用はNTT Communicationsが世界初の実用化
米国	基礎研究	◎	→	・かなり幅広く行われており、人材が豊富 ・コンセプト発祥の地となる、OpenFlowやSDNはスタンフォードから、Big DataやCyber Physical System(CPS)、M2Mなども北米より創出。
	応用研究・開発	◎	→	・SDNに関しては、スタンフォード大学、カリフォルニア大学バークレイ校、プリンストン大学、ジョージア工科大学などが研究開発の中核 ・将来ネットワークに関しては、GENIによる北米テストベッド構築と実証がほぼ完了、ホワイトハウス主導で社会実装を推進するUS Igniteを開始
	産業化	◎	↗	・AT&TやVerizonが次期ネットワークでのSDN採用をアナウンス、実用化に向けた実証実験を開始 ・CiscoやJuniper等がSDN対応製品の開発を本格化
欧州	基礎研究	◎	→	・FP7やHorizon2020において様々な領域の研究開発を推進中 ・研究コミュニティの結束も強く、ICN/CCN等の萌芽的研究にも注力
	応用研究・開発	◎	↗	・日本に比べると研究者層はかなり強い ・テストベッドPjにも投資を行っており、北米と同等レベルの研究開発を実施 ・移動通信（３GPP）における成功体験が強みであり、ネットワーク仮想化やNFVを含む５Gのプロジェクトを開始
	産業化	◎	↗	・社会実装やイノベーション創出については、FI-PPPと呼ばれるパートナーシッププログラムが整備されており、産業化・実用化に向けた活動も精力的 ・DT、Telefonica、FT、BT等の通信事業者がSDNを採用、NFV実用化をけん引
中国	基礎研究	△	→	・チャイナモバイルはクラウドRAN実用化に注力
	応用研究・開発	◎	→	・ITU等では将来ネットワーク等の標準化議論に積極的に参加 ・データセンター技術領域では、IBMやマイクロソフトの中国拠点の研究者が精力的に活動しており、プレゼンスを維持
	産業化	◎	→	・Cloud-RANプロジェクトにおいてはZTEが機器を実用化する予定 ・Huaweiは、ONF/NFVの標準化活動に積極的に対応、欧州研究所を強化 ・スマートシティープロジェクトへの投資が活性化、国内技術のみならず、場合によっては国外技術もとりいれ最先端化を推進
韓国	基礎研究	△	→	・ETRI等が情報収集を行うも、学会レベルコミュニティでのプレゼンスは低下
	応用研究・開発	○	→	・AsiaFI等での活動を推進 ・GENIに対して運用管理技術（フェデレーション）に関する研究をETRIが推進、インディアナ大学等の連携
	産業化	△	→	・主たる活動は見られない

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ICT 成長戦略会議、“ICT 成長戦略 ～ICT による経済成長と国際社会への貢献～”、2013 年 6 月、http://www.soumu.go.jp/main_content/000236560.pdf
2) N. M. Mosharaf Kabir Chaowdhury and Raouf Boutaba, “A Survey of Network Virtualization”, University of Waterloo, Technical Report: CS-2008-25, October 2008
3) Raj Jain and Subharthi Paul, “Network Virtualization and Software Defined Networking for Cloud Computing: A Survey”, IEEE Communications Magazine, November 2013, pp24-31
4) Bruno Astuto A. Nunes, et. al., “A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks”, IEEE Communications Surveys and Tutorial, Vol:16. Issue:3, http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/93/29/82/PDF/hal_final.pdf
5) ONF white paper, “OpenFlow-Enabled Mobile and Wireless Networks”, https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-wireless-mobile.pdf
6) Horizon 2020 Advanecd 5G Network Infrastructure for Future Internet PPP, http://ec.europa.eu/digital-agenda/futurium/en/content/horizon-2020-advanced-5g-network-infrastructure-future-internet-ppp-creating-smart-network
7) GE 解説レポート、“インダストリアル・インターネット “、2012 年 11 月、http://www.ge.com/jp/docs/1389000498785_Japan_IndustrialInternetatWork_0106s.pdf
8) OPNFV white paper, “An Open Platform to accelerate NFV”, https://www.opnfv.org//sites/opnfv/files/pages/files/opnfv_whitepaper_092914.pdf

３．３．５　通信行動と QoE (Quality of Experience)

（１）研究開発領域名

通信行動と QoE (Quality of Experience)

（２）研究開発領域の簡潔な説明

通信サービスの高度化は、その利用行動の多様化を引き起こしており、サービスの基盤である通信ネットワークシステムの効率的な設計や制御に大きな影響を与えている。本領域では、通信ネットワークを利用者の行動や心理を分析し、その特徴を理解することで、利用者を系に含めた新しいネットワークの設計・開発手法の創生を目指す。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

急速に進化を遂げる通信環境下において次々と創生される通信サービスは、人やモノのコミュニケーションのあり方を変えている。特に移動通信の高度化により、ユーザーは時間と場所の二つの束縛から解放され、自らの生活様式に適したコミュニケーションの形を選択して多様な行動を取るようになった。こうした複雑化する利用環境の中で、より効率的な通信ネットワークの設計・制御・運用を行うには、人がどのように通信サービスを利用し、何を体験し、どのように感じて行動をしているのかを分析して理解する必要がある。本研究開発領域は、こうした通信トラヒックを発生させる行動（通信行動）を理解して、その経験の質（Quality of Experience: QoE）を定性・定量的に評価し、通信ネットワークの改善や新しいネットワーク技術の創出に資する知識を提供することを目指している。使う人の立場や視点に立った、人間中心設計（Human-Centered Design: HCD）[1)]の考え方よるネットワーク研究である。

通信サービス利用者の心理評価は、音声や映像を対象とした主観品質評価の分野で歴史が長い。国際機関である ITU（International Telecommunication Union）において評価手順の標準化が活発に行われている。QoE の評価についても、その定義が ITU でなされている [2)]。QoE に基づく品質評価では、実際に経験した状況をユーザーがどのように受け入れるかを主観的に評価することで、品質を規定することとしている。さらに QoE 評価においては、ユーザーが持つ期待や、ユーザーの置かれている状況の影響も考慮に入れることとされており、ユーザーを取り巻く環境や心理的状況をも考慮した品質評価基準へと拡張することが考えられている。

こうした主観品質評価の結果を利用したネットワーク設計手法についても検討が行われている [3)]。定量化された体感品質に基づきネットワークの設計を行う場合、まず QoE をネットワーク上で測定可能な遅延やパケット損失、スループットなどの QoS（Quality of Service）値に変換（マッピング）する。これにより得られた QoS 値を品質基準値として、ネットワークの容量設計や各機器の設計を行う。QoE は、設計に用いる品質基準値の精緻化に寄与し、より柔軟なネットワークの設計を可能にし、品質とコストの適切なバランスを取ることができる。更に、ネットワーク利用者の体感品質については、ユーザーインターフェースとの連携により不満を減少させる方法についても研究がなされている。人が感じる時間は、心理的時間と呼ばれ、認知的過程からの影響を受けて絶対時間に対して過大もしくは過小に時間を見積もる現象を引き起こす。こうした人の特徴を利用して、プログレスバーや文字・

音声・映像コンテンツなどの提示により待ち時間をより短く感じさせることで、不満を低減する手法についても研究[4]が進められている。

通信行動の分析は、主として工学以外の分野で進められてきている。社会学や社会心理学の分野においては、CMC (Computer Mediated Communication)を利用するユーザーの動機や行動傾向・心理状態を、アンケート調査などによる内観指標を用いて評価して、ユーザーの社会的な行動にどのような影響を与えているかを検討する研究が行われている。認知科学・認知心理学の分野では、ICT 端末やソフトウェアのユーザーインターフェースに対する反応を、内観指標と行動指標の両面を用いて評価し、その認知的特性を分析している。近年では、ネットワーク利用のユーザビリティを認知的アプローチで分析する手法についての研究[5]も始められている。また、文化人類学の研究手法であるエスノグラフィを用いて、通信行動を把握する研究[6]も進められている。

こうした工学以外の分野で行われている通信行動の分析結果を工学的に応用することも可能である。例えば、トラヒック量の変化がユーザー群の価格弾性等に依存するならば、その特性を基に生成される通信トラヒック量を推定し、ネットワーク側の設備容量や要求されるサービス品質等を考慮して適切な料金設定を行う等の運用形態が考えられる。また、放送番組内でのアンケート回答やオンラインショッピング、災害情報等の放送を契機にユーザー群の集団行動が変化し、通信トラヒックの生成に影響を与える場合には、通信料金の設定情報や放送番組の内容に対するユーザー行動の反応を利用してトラヒック量を制御することも可能と考えられる。

通信に関連した品質を扱う国際会議としては、QoMEX[7]や CQR[8]などがあり、従来の通信サービスやコンテンツの主観品質評価に加えて、様々なコンテキストを考慮した QoE に関わる研究発表が多くなされている。また、工学以外の分野での知見を工学応用する研究も、近年増加傾向にある。例えばヒューマンコンピュータインタラクションに関連する国際会議（CHI[9]、HCI International[10]、MobileHCI[11]など）においては、新しいインターフェースに対する心理評価だけでなく、利用行動の分析に関する報告がなされている。また、エスノグラフィの産業応用について議論を行う国際会議（EPIC[12]）においても、通信行動に関する調査について結果が報告されている。国内においては、電子情報通信学会のコミュニケーションクオリティ研究会[13]やイメージ･メディア･クオリティ研究専門委員会[14]で、通信やコンテンツに関する品質の研究が行われてきた。また最近では通信行動工学研究会[15]が発足し、通信以外の様々な分野の研究者が分野横断的な活動を行っている。

（４）科学技術的・政策的課題

通信ネットワークに関する研究は、長年にわたり工学分野で進められており、既に成熟した研究分野と言える。しかし、上記の通り、既存の研究の枠組みでは対応が難しい課題が顕在化してきており、ブレイクスルーが必要である。このためには、人の行動や心理に関わるデータ分析を軸にして、他の研究分野との連携に向けた共通の研究課題の設定が必要となる。

通信ネットワークは巨大なシステムであり、アーキテクチャー、プロトコル、容量設計、インターフェースなど扱っている対象が多岐に亘る。このため、他の研究分野だけでなく、通信ネットワークに関連する研究領域の境界においても、有機的な連携を行うための共通した活動の基盤が必要である。それぞれの研究領域で扱っている対象は、個々のインタラクシ

ョン（相互作用）から集団としての特性、ミリ秒オーダーから数日/年にわたる変動特性の分析など、レイヤにより様々なアプローチがなされる。このため、特にモデル化やシミュレーションの手法についての共通基盤の作成が連携においては重要な技術的課題である。

通信行動や QoE の評価・分析は、既に様々な分野において研究が進められているが、より効果的な活動とするためには、上記の通り分野横断的な取り組みが必要となるため、異分野との連携を前提としたプロジェクトの推進が必須である。人文科学系の研究は企業ではほとんど行われていないことから、大学と企業の連携を積極的に推し進める必要がある。また、ヒューマンファクターに関わる研究は市場の成熟と共に重要性が増すため、通信市場の継続的な発展のためには、分野連携の研究を推進可能な研究者の育成を大学で行うと共に、通信サービスに関わる企業での工学以外の研究・開発者の人材活用に対する政策的な後押しも有効である。

分野連携の研究を行う際には、データの取り扱いについて個人情報保護の観点から注意が必要である。既に商用化されているサービスから得られるデータを、研究に利用するための枠組みを整備し、利用者の不安を引き起こさずにデータを有効活用する仕組みが必要となる。また、誰でも利用可能なオープンデータを増加させることも必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

QoE に関する標準化は、ITU-T SG12 が中心となって、ETSI、TIA、TTC、IETF、3GPP 等の世界各国の機関と調整しながら進められてきた[16]。ITU-T SG12 において、新勧告 G.QoE-Web、P.STMWeb の作成に向けた活動などが進められており、QoE に関する標準化が継続的に進められている。また、映像コンテンツの QoE 評価については、VQEG (Video Quality Experts Group)においても継続的な活動が行われている。また欧州では、QoE 全般に関わる大型研究プロジェクト QUALINET が実施された。

スマートフォンの普及にともない、様々なアプリケーションにおいて行動データの取得が行われている。取得されたデータに基づきユーザーの行動を変容させる取り組みが進められており、通信行動に影響を与える可能性がある。また、M2M トラヒックの増加により、人が生み出すトラヒックとは異なる特徴を持つデータが増加しており、今後新たな対処が必要になる可能性がある。

（６）キーワード

QoE、QoS、通信行動、インタラクション、心理評価、行動分析

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・新たな研究会の発足[15]など、分野連携に向けた活動が進められている。 ・高機能移動通信サービスの普及が他国に先駆けて行われたことから、通信行動の社会学的分析について先進的な研究成果が得られている。
	応用研究・開発	○	↗	・ネットワークのQoEを可視化する技術（富士通）や、QoEに基づくネットワークの制御を行うQoE－Centricオペレーション（NTT）など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（NEC、富士通など）
米国	基礎研究	◎	→	・HCDなどユーザー視点でのサービス・システム開発について、先進的な研究が行われている。 ・エスノグラフィの産業応用に関する国際会議（EPIC）が2005年に発足するなど、産業化を意識した行動分析の方法論に関する研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	・通信サービスから収集されたログを活用したネットワークの設計手法など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（シスコシステムズなど）
欧州	基礎研究	◎	→	・QoE全般を対象とする大型研究プロジェクトが推進されていた。(QUALINETなど) ・北欧における携帯電話サービスの普及率が極めて高いことから、通信行動の社会学的分析について先進的な研究成果が得られている
	応用研究・開発	○	→	・通信サービスから収集されたログを活用したネットワークの設計手法など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	・通信品質を考慮したネットワークの構築技術が、ネットワークベンダにより提供されている。（アルカテルルーセント、エリクソンなど）
中国	基礎研究	△	→	・幾つかの研究機関内での個別の研究以外、目立つ研究成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	・目立つ研究成果は見られない。
	産業化	○	→	・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（ファーウェイなど）
韓国	基礎研究	△	→	・幾つかの研究機関内での個別の研究以外、目立つ研究成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	・目立つ研究成果は見られない
	産業化	△	→	・通信キャリアや端末ベンダー通信設備の品質維持以外の目立った活動は見えていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ISO 9241-210, “Human-centred design for interactive systems”, ISO, 2010.
2) ITU-T Appendix I to P.10/G.100, “Definition of QoE,” 2007.
3) 福元 徳広、新井田 統、上村 郷志、中村 元、“バックボーンネットワーク設計のための Web 体感品質評価”、電子情報通信学会技術研究報告、109(221), 1-5, 2009
4) Harrison, C., Yeo, Z., and Hudson, S. E., “Faster Progress Bars: Manipulating Perceived Duration with Visual Augmentations,” Proc. CHI 2010, ACM Press (2010), 1545-1548.
5) 新井田統, 原田悦子. "高度情報化社会におけるコミュニケーションの分析と理解." 電子情報通信学会誌 94.3 (2011): 226-231.
6) Kimura, Tadamasa. "Keitai, Blog, and Kuuki - wo - yomu (Read the atmosphere): Communicative Ecology in Japanese Society." Ethnographic Praxis in Industry Conference Proceedings. Vol. 2010. No. 1. Blackwell Publishing Ltd, 2010.
7) International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) 2014, http://www.qomex2014.org/
8) 2015 Annual IEEE CQR International Workshop, http://www.ieee-cqr.org/
9) SIGCHI, http://www.sigchi.org/
10) HCI International Conference, http://www.hci.international/
11) Mobile HCI, https://personal.cis.strath.ac.uk/mark.dunlop/mobilehci/
12) Ethnographic Praxis in Industry Conference, http://epiconference.com/
13) コミュニケーションクオリティ研究会、http://www.ieice.org/~cq_ac/jpn/
14) イメージ・メディア・クオリティ研究専門委員会、http://imqa.jp/
15) 通信行動工学研究会、http://www.ieice.org/~cbe/
16) 高橋玲、“ユーザ体感品質（QoE）関連技術の国際標準化動向～ITU-T SG12 の活動を中心に～”、ITU ジャーナル、Vol.44, No.9, 2014.

３．３．６　情報ネットワーク科学

（１）研究開発領域名

情報ネットワーク科学

（２）研究開発領域の簡潔な説明

情報ネットワークの設計、制御、管理、運用のための学術基盤を確立する。情報ネットワークはますます大規模かつ複雑化しつつあり、さらに他の人工システムとは異なり、常に変化する多様なサービスの通信需要に応える必要のある動的開放系である。その結果、従来、当該分野の基礎科学とされてきた待ち行列理論やトラヒック理論の他、最適化理論等はもはや用をなさず、新たな学理を開拓し、そのデザインプリンシプルを確立する必要がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【背景と意義】

情報ネットワークは社会のすみずみまで浸透しつつあり、電力、交通、物流、経済取引など他の重要な社会システムもネットワークに強く依存するようになっている。すなわち、ネットワークは人類の生命や財産に関わる重要な社会活動にも強く影響を与えるクリティカルな社会基盤になりつつある。しかし、ネットワークそのものについてはその学術的基礎が十分に展開されないまま現在の興隆を招いているという現実があり、その信頼性は極めて低いレベルにとどまっている。例えば、平成 26 年 9 月に発表された総務省「電気通信サービスの事故発生状況」においても平成 25 年の「事故」（大部分は障害）の発生件数は、電気通信事業法の規程に基づいた報告義務のあるものに限っても約 45,000 件に上る。携帯電話網の機能不全は日常活動に大きな影響を与える故、マスコミ等でも大きく取り挙げられるが、ネットワークの障害発生は携帯電話網だけでなく、もはや日常茶飯事である。その結果、ネットワークの障害が大きな社会的問題を引き起こすだけでなく、ネットワーク障害が他の社会システムに波及し、障害のさらなる拡大によって甚大な被害を各所にもたらすという事態も頻繁に起きている。

それにも関わらず根本的な対策が講じられていないのは、情報ネットワークがこれまでの工学的システムにみられなかった大規模複雑な、かつ、新しいサービスが常に付加的に開発されている動的開放系であるからに他ならず、既存の学術基盤による取り扱いがますます困難になっているためである。情報ネットワークに接続されるコンピュータ数は数億台に達し、端末数は移動体なども併せて数十億台、2020 年には 500 億台に達すると言われている [1)]。また、モバイル利用など種々のサービス利用や用途に応じた制御が行われており、秒～日オーダの短期的な情報流の変動が絶えず起きているシステムである。さらに、長期に亘る変動、すなわち、利用者の増加に伴って情報流は増大しながら、かつ、新しい利用法の創出によって劇的な変化も頻繁に発生している。これらの変化の中には設計時の想定を超えたものが多くあり、新たな価値と同時に特にネットワークの運用・管理において対応が困難な問題を生み出している。これまで情報ネットワークは、その基本技術である光通信技術や無線通信技術の絶えまない変革によって、情報流の量的拡大への対応がなされてきた。しかし、エネルギー効率やコスト、規模等を考慮すると、量的拡大による手法ももはや限界に近づきつつある。また、そもそも、これまでのネットワークは、利用端末（コンピュータやスマートフォ

ンなど）の仕様に基づいて機能を階層化・分割して全体を組み上げるという要素還元論的手法によるシステム設計が行われてきたが、そのような手法自体を見直す時期が来ていると言える。

情報ネットワークは、(1) さまざまな通信要求を処理する開放系であり、その要求は日々増大、多様化し、かつ、利用者の要求の変化に依存して大きく変動する動的システムであること、(2) ネットワーク自体、多くの構成要素から成り立ち、それらの相互依存性がますます高まっていること、(3) 電力制御等さまざまな社会システムが情報ネットワークに依存するようになり、ネットワークが制御フィードバックループの一部に組み込まれるようになりつつあること、などの特性を持つ。既存の学術基盤における根本的問題は、実世界や人・社会との調和を十分に考慮しないまま「情報ネットワークのみ」を対象として、その性能や通信品質に関する研究開発がなされてきたところにある。例えば、航空機はその部品数が数百万点に達する複雑なシステムであるにも関わらず、利用者が一定の信頼感を持つのは、長年に亘る信頼性理論や安定性理論など確固たる学術基盤の発展によって事故率が低く抑えられているからに他ならない。一方、ネットワークは航空機のような閉じたシステムとは異なり、情報流が絶えず変動しながら、成長を続ける動的開放系である。このような大規模複雑な、かつ、外的環境／内的環境が変動する動的な情報ネットワークの根底を成す科学の創成なくして利用者の安全・安心、さらには信頼の実感は有り得ない。そのためには、人と情報ネットワークの関わりも欠かせない視点であるが、それについては別項（「通信行動と QoE」）に譲る。

【国内外の動向】

近年、さまざまな自然および人工のネットワークに関する研究が盛んに行われるようになっている。いわゆるネットワーク科学 (Network Science) として、現状では、電力ネットワーク (Power Grid) や生物の遺伝子ネットワーク、脳機能ネットワーク、さらにソーシャルネットワークなどを対象にそのモデル化、特性分析などが主たる目的になっている [2]。しかし、情報ネットワークを対象に、その成果を活用した設計／制御までをも含めた研究は世界的に見ても極めて少ない。一方、複雑適応系における研究としては、システム設計の観点からマルチエージェントシステムが従来から研究されているが、特に生物の群知能 [3] など要素間のインタラクションに着目した研究はソフトウェアシステムへの応用などを念頭に欧州を中心に取り組まれてきた。これらの例からも明らかなように、新たな情報ネットワーク学術基盤の観点からは、物理学や生物学、社会学などとの融合が不可欠である。

国内においては、これまでその学術基盤的性格から、情報ネットワークの学術としての体系化、統合化を目指したものや、プロジェクトなど組織だったものは極めて少ない。例外的に、(独) 情報通信研究機構と大阪大学による脳情報通信融合研究センター [4] において、脳機能の解明とその情報通信への応用が融合研究として取り組まれているのみである。緩やかな研究者連携として、平成 23 年に情報ネットワーク科学基盤の議論を行うために電子情報通信学会通信ソサイエティに「情報ネットワーク科学時限研究専門委員会（NetSci 研究会)」[5]が設立され、ネットワーク分野を中心に他領域との融合も狙った議論がなされている。また、同時期に電子情報通信学会基礎境界ソサイエティに「複雑コミュニケーションサイエンス時限研究専門委員会（CCS 研究会)」が設立されている。CCS 研究会は、非線形理論・複

雑系理論・生体システム分野とネットワーク分野との融合を進めることを目的としている。

【アプローチ】

これまでのネットワーク設計手法の多くは、全体として要求される機能を定義し、それを分割して個々の機能を設計し、その後にそれらを組み合わせて全体を完成させるという要素還元論的手法によるものであった。しかし、情報ネットワークを含めた大規模複雑系の本質は、要素間のインタラクションにより新たな構造や機能が創発されることにあり、要素還元論的手法によらない設計・制御手法が必要である。このような創発を促すシステムに関する研究は、応用数学や物理学において、また生物システムの理解を進めるために生物学を中心に、特に複雑システムを対象に進められてきている。大規模複雑システムの理解とモデル化を行う上での基本的な概念としてインタラクションが注目されている。近年、それらの知見に基づいて、故障耐性に優れたシステムとしての自律分散システムや自己組織化システムへの応用が活発に行われるようになり、情報ネットワークへの応用も精力的に進められるようになっている。今後、情報ネットワークにおける階層内構成要素や階層間などを含めたインタラクション、ソーシャルネットワーク上でのインタラクション、人とのインタラクションなどの理解とモデル化、それらに基づいた工学応用が重要である。

（４）科学技術的・政策的課題

イノベーションの源泉として最先端科学技術の融合が言われて久しいが、情報ネットワーク科学の基盤創成においてもそのような取り組みは必須である。特に、物理学分野や生物学分野等、日本が強みを持つ科学領域との融合は、我が国の技術力を発展させる上でも重要である。情報ネットワークを含む情報科学の分野では、概念設計においてそのフィロソフィーを根幹としたデザインプリンシプルが重要で、特定の技術のチャンピオンデータ自体にさほどの意味はない。その結果、米国流のプラグマティズムに沿った概念設計に基づいた研究開発競争をすることは、我が国の研究者・技術者にとって、言語の壁や日本人の特性などから圧倒的に不利な状況になっている。そもそも人材育成の観点としてグローバル化は当然のことであるが、我が国の優秀な人材にとって不利な状況で競争を強いることは賢明でない。我が国の競争力強化のために、まず、比較的コミュニケーションが容易な共通言語としての理論基盤を確立し、それに基づいたデザインプリンシプルを用いて優れたシステムを設計していくことが重要で、それが世界に通用する人材の育成にもつながる。

もちろんこれは、ガラパゴス化につながりかねない「我が国の一人勝ち」を狙うものではあってはならない。米国流のプラグマティズムに沿ったシステム化と理論基盤にのっとったシステム化は相補的なものであり、その連携によって世界的な情報ネットワーク技術、ひいては情報ネットワークが支えるさまざまな社会システムのさらなる発展を促すことが可能になる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

【期待される効果】

多くの社会システムはその基盤としてネットワーク利用を前提としており、信頼性の高い情報ネットワークを実現することができれば、関連する技術分野に対する波及効果は大きい。

交通システムや物流システム、ロボットシステムなどへの直截的な貢献の他、今後、発展が期待される CPS (Cyber-Physical Systems) や IoT (Internet of Things) など新しい社会システムに対しての基盤となりうる。

【注目すべき大規模プロジェクト】

国外では、情報ネットワークの技術開発だけでなく、より挑戦的・先導的研究への積極的な投資が戦略的になされている。関連の深いプロジェクトとして、欧州の第 7 次枠組計画（FP7）における ICT Work Program では技術とともに科学を重視した FET (Future and Emerging Technologies) プログラムが「Future Network」などの研究開発に重点をおいたプログラムと並行して大規模に推進されてきている（約 3 億ユーロ／年)。例えば、物理学者が主導する ICT を含んだ複雑系に関する研究が FET プロジェクトとして 2011 年から 4 年間プロジェクトとして推進され、次期計画に継続される予定である。一方、米国では、米国科学財団（NSF）による FIA（Future Internet Architecture ; 今年から FIA-NP (Next Phase)として 3 プロジェクトに絞られて継続中）プロジェクトや GENI (Global Environment for Network Innovations) プロジェクトなど技術開発を中心としたものが進行中であるが、同時に基礎理論の重要性も強く認識されるようになっている。特に、ネットワーク技術においても異分野融合の重要性は強く認識され、Cross-Cutting Programs として “Network Science and Engineering” が重視される状況になっている。これらから明らかなように、情報ネットワーク科学の基盤研究を統合的なシステム研究開発とともに推進することが、重要視される時代状況にある。残念ながら、国内では同種のプロジェクトは数少ない。

（6）キーワード

情報ネットワーク学術基盤、開放系、信頼性（レジリエントシステム)、デザインプリンシプル、自己組織化、環境適応、

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	個々の研究者レベルではさまざまな取組が行われ、研究者連携のための学会活動も研究会レベルでは活発に行われるようになっている。
	応用研究・開発	○	↗	数少ないものの、実証実験レベルの取り組みも産学連携によってなされている例がある。
	産業化	×	↗	実証実験レベルの取り組みが今後、産業化として取り組まれる可能性はある。
米国	基礎研究	○	↗	複雑系の研究においてはサンタフェ研究所が有名で、個々の研究者レベルではさまざまな取組が行われているが、情報ネットワークを対象とした研究は少ない。
	応用研究・開発	△	→	プラクティカルな研究開発は盛んに取り組まれているものの、ネットワークの科学基盤に関する取り組みについてはその重要性が認識されつつある段階である。
	産業化	×	→	現状、産業化まで目指した取り組みはない。
欧州	基礎研究	◎	↗	個々の研究者レベルでの取り組みだけでなく、EUを中心とした大規模プロジェクトが進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	情報ネットワークへの応用に関する取り組みも積極的に行われている。
	産業化	×	↗	産業化には至っていないが、プロジェクトとしての取り組みが結実する時期も遠くないものと考えられる。
中国	基礎研究	○	↗	一部の研究者によって取り組まれている。
	応用研究・開発	×	→	取り組みはみられない。
	産業化	×	→	取り組みはみられない。
韓国	基礎研究	△	→	少数の研究者による取り組みがあり、日韓合同ワークショップ等も開催されている。
	応用研究・開発	×	→	取り組みはみられない。
	産業化	×	→	取り組みはみられない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）Dave Evans, “The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything -,” CISCO Cisco Internet Business Solutions Group White Paper, April 2011.

2) Albert-László Barabási, and Jennifer Frangos, Linked: The New Science of Networks, Perseus Publising (2002)
3) Eric Bonabeau, Marco Dorigo and Guy Theraulaz, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Medicine & Health Science Books (1999)
4) 脳情報通信融合研究センター, http://www.cinet.jp/
5) 電子情報通信学会 情報ネットワーク科学時限研究専門委員会, http://www.ieice.org/~netsci/

注：文献２）、３）はパイオニア的著作。関連して、多くの著書、論文が出版されている。

３．３．７　新たな情報流通基盤

（１）研究開発領域名

新たな情報流通基盤

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ポストインターネットにおいて、人とモノがシームレスに相互接続、協調動作し、新しいサービスの創出を実現する、情報流通ネットワーク基盤の確立を目標とする。桁違いのデバイスから構成されるネットワークにおいて効率的な情報探索および伝送を実現する新たなネットワークアーキテクチャーの研究開発を行う。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年インターネットは人を中心としたコミュニケーションツールだけにとどまらず、モノと人、モノとモノ同士を相互的に接続し、協調動作させるための情報インフラとしての役割を担いつつある。IoT（Internet of Things）やM2M （Machine to Machine）ではさまざまな計測機器（センサー）がネットワークにより接続され、センサーデータを収集、集約、分析し、その結果を用いて機器の遠隔制御を行う。IoT や M2M は特に工場の遠隔制御、物流、医療、スマートシティーへの応用が期待されている。IoT や M2M の本格運用を考えた場合、あらゆるセンサーがネットワークを介して通信することが予想され、その接続数は人の所有にもとづく現在のインターネット接続端末数と比較して桁違いであることは想像に難くない。シスコは 2020 年までに M2M デバイス数が約 500 億まで到達すると予想している[1)]。また、IoT や M2M では個々のセンサーが生成する情報量はそれほど大きくないが、多量のセンサーが接続されたネットワークにおいてセンサーデータ取得の即時性、データの継続性、可用性を達成するためには、従来とは大きく異なる通信特性を実現する必要がある。特に、遠隔機器のセンシングおよび制御では、組み込みセンサー、無線ネットワークなど資源制約が大きい条件下での運用が想定される。

現在 IoT および M2M では、通信プロトコルの策定と標準化について進められているものの、上記の膨大なデバイスが生成するセンサーデータを効率よく伝送する方法、スケーラビリティーへの対応、データの即時性、継続性、可用性などの品質を確保するネットワーク制御等、これからの研究課題であるものも多い。

一方、インターネット誕生から約 50 年が経過し、当時では想定し得なかったほど大規模化している。その過程において IP アドレス枯渇やセキュリティーなどさまざまな問題が顕在化し、その解決のため抜本的なネットワークアーキテクチャー再構築の必要性が指摘されている。このため現在ポストインターネットアーキテクチャーに関する研究が活発に進められており、その一つとして大きく注目されているのが情報指向ネットワーク（ICN; Information-Centric Networking）あるいはコンテンツ指向ネットワーク（CCN; Content-Centric Networking）である。

インターネット通信は端末（ノード）識別子である IP アドレスによって通信経路の決定とパケット伝送処理が行われており、ノード指向型通信ともいえる。一方現在のインターネット利用形態の多くは、利用者（ユーザ）がサービスあるいはコンテンツの利用を主目的としたコンテンツ指向型通信であり、一般的にどのノードがサービス・コンテンツを提供する

かはユーザー興味の範疇外である。このように現在のインターネットにおけるユーザーの利用形態と実際の通信形態には乖離があり、これを解消しコンテンツ指向型通信を実現することを目的としたICN研究が現在活発に推進されている。

コンテンツ指向型通信の実現は、2000年代前半にCDN（Content Delivery Network）あるいはP2Pなどの研究により行われてきた。CDNは特にWebコンテンツを対象として、同一コンテンツを複数のサーバーに分散配置させ、DNS（Domain Name System）の負荷分散機能を用いて近隣サーバーからコンテンツの取得を行うことで、通信性能の向上とネットワーク資源の効率化を実現している。P2Pでは、ピア同士が接続されたオーバレイネットワークを用い、ピアが保持するコンテンツを効率的に発見・取得するアルゴリズムが実装されている（例えばDHT（Distributed Hash Table）など）。ICNはこれらをネットワークレイヤで実現する技術であり、Webサーバーあるいは参加ピアに限定されていたコンテンツ指向型通信をネットワークの標準機能とすることで、広くその効果を享受するだけでなく、信頼性・可用性の向上、管理者によるネットワーク運用ポリシの適用などが実現可能となる。

ICN/CCNはいずれもコンテンツ指向型通信を実現するネットワークアーキテクチャーの総称であり、本質的には同一の理念に基づいている。CCNは米国を中心に、ICNは欧州を中心にその名称が用いられてきたが、ICNは広義の概念を表し、CCNはICNを具現化する実装であるというのが世界的な共通認識となりつつある。

ICNでは、一般的にコンテンツの名称（あるいはコンテンツごとに区別可能な数値）を識別子とし、コンテンツ指向型通信を実現する。経路制御は多くの場合コンテンツ識別子が直接用いられるが、経路集約やルーティングの効率化から別にロケーション識別子を持つ場合もある。ICNによるコンテンツ指向型通信の実現により次に挙げる効果が期待されている。

1. コンテンツ発見にかかるオーバヘッドの分散化および効率化：現在コンテンツの取得は(1)検索エンジンを用いたキーワードによるコンテンツの検索、(2)DNSによるホスト名解決、(3)IPアドレスによる通信、の手順が一般的である。これらの手順はいずれも処理オーバヘッドがかかるだけでなく、検索エンジン、DNSがネットワーク全体の単一障害点になる、コンテンツへの誘導がネットワーク管理者ではなく検索エンジンのポリシに左右されるなど、ネットワークアウェアネスではない、などの問題がある。ネットワークレイヤの標準機能としてコンテンツ指向型通信を実現するICNは上記問題を抜本的に解決するものである。
2. 動的なコンテンツ情報更新への追従：上記の通りコンテンツ取得には多くの処理オーバヘッドが発生するため、時間変化の少ない静的なコンテンツの取得に用いられるのが一般的である。一方で、IoTやM2Mなどにおけるセンサーデータに代表される動的コンテンツはリアルタイム性が非常に高く、また時系列で生成されるセンサーデータの情報それぞれを簡便に取得するためには、より軽量なコンテンツ取得機構が必要となる。ICNでは動的コンテンツそれぞれについてもコンテンツ識別子を割り当て可能であり、さらにシーケンス番号についても対応しているため、時系列データの部分取得も可能など、情報取得におけるコンテンツ指定の柔軟性が高い。
3. ネットワーク内キャッシングの実現：ICNでは、コンテンツによる経路制御が行われるため、コンテンツをどのノードが保持すべきかは問題とならない。すなわちコ

ンテンツをネットワーク内のルータが保持することも可能であるため、ICN では標準でネットワーク内キャッシュが導入されている。ネットワーク内キャッシュとは、ICN 内のルータが一度要求されたコンテンツのキャッシュを自身の記憶領域に格納時、将来の要求に対してルータのキャッシュコンテンツを返送することで、通信の短絡化と帯域消費の削減が可能となる。

4. ICN のコンテンツ指向通信とネットワーク内キャッシュによるコンテンツへの通信に対する空間的・時間的制約からの解放：従来のインターネットではコンテンツ取得を達成するためには (1) コンテンツを保持するノードがあらかじめ固定化されていること（空間的制約）、(2) コンテンツ取得時に保持ノードが通信可能であること（時間的制約）が共に満たされなければならないが、両制約がない ICN では、ネットワークの状況に応じたより柔軟なコンテンツ配置の戦略を考えることが可能であり、資源利用効率が高い。
5. 柔軟なコンテンツの取得：アプリケーション側から見た場合、より柔軟なコンテンツの取得がコンテンツ名を用いるだけで可能となる。例えば CCN アプリケーションである VoCCN では、SIP シグナリングに相当する通信をコンテンツ名の組み合わせにより実現している。また、ICN によるビデオ伝送の一手法である NDN Video [2)]ではビデオコーデック、解像度などもコンテンツ名として指定している。このようにコンテンツ名は単なるコンテンツの名称にとどまらず、付随する属性、パラメータなども指定することが可能であり、柔軟なコンテンツ指定が名前のみで実現可能である。特に IoT や M2M における計算資源の乏しい組み込み機器において複雑な制御プロトコルを実装することなく高度な情報取得が実現できる。

ICN の研究はこれまで米国および欧州が主体となって推進されてきた。2009 年に CCN が V. Jacobson [3)] により発表されて以降、Xerox parc による CCN 実装である CCNx [4)]、米国 NSF が FIA – Future Internet Architecture Project として、NDN (Named Data Networking) [5)]、MobilityFirst [6)]を 2010 年から支援、欧州では第 7 次欧州研究開発フレームワーク (FP7)において、PURSUIT、SAIL、COMET、CONVERGENCE などが 2010 年から推進されている。これらの詳細についてはサーベイ論文 [7)]を参照されたい。

一方、中国および韓国では一部大学において（例えば北京大学が NDN プロジェクトに参加など）個別に参加しているのはあるが、国家プロジェクトとして現在推進されているものはない。

国際的な活動として、国際的権威の高い ACM sigcomm および IEEE Infocom において ICN を特集したワークショップが開催されている（sigcomm ICN Workshop が 2011 年から、Infocom NOMEN/MON が 2010 年から）。また、IEEE の代表的国際会議である ICC/GLOBECOM などでも毎回独立したセッションが組まれている。さらに、2014 年 9 月には国際会議 ACM ICN が開催された。国際標準化活動については、IRTF (Internet Research Task Force) ICNrg (Information Centric Networking Research Group)、ITU-T SG13 Question 15/13 (Data-aware networking in future networks) が活動中である。

ICN の実用化によりコンテンツの柔軟な配置と効率的な伝送が期待されるが、コンテンツの範疇にとどまらず計算資源をも含めた柔軟な構成を実現する研究が登場しつつある。ここでは計算資源を包括したネットワーク全体を一つの大きなクラウドと見なし、要求に応じ

たコンテンツと計算資源の配置により、負荷の低減と QoE の向上の両立を目指している。2014 年 NTT がエッジコンピューティング構想を発表、シスコも同様にフォグコンピューティングプラットフォームを発表している。ここでは、クラウドでの処理の一部をユーザーに近い計算資源で行うことで、体感速度を大幅に向上させることを目標としている。

（４）科学技術的・政策的課題

・インターネット接続端末数と比較して膨大になる IoT、M2M、ICN で取り扱うべき名前をどのように処理するか。例えば、1 兆を超えるユニーク URL は（Google）、400 億以上の Web ページ数（http://www.worldwidewebsize.com/）、10 億の FQDN 数（http://www.isc.org/services/survey/）、500 億を超えると予測される M2M デバイス数[8]など。特に名前数の増加に対するスケーラビリティーの確保が重要な課題となる。
・柔軟な名前アーキテクチャーをどのように決定するか。特に動的なコンテンツに対する命名規則は ICN における情報取得効率に影響する。また ICN の場合、マルチメディアサービスにおいてどのような情報取得および制御を実現するかは、命名規則と密に関わることになる[9]。
・ルーティングおよびルータの性能向上。ICN は IP と比較してルータの処理が多く発生するため、ワイヤスピードで処理するためのハードウエアアーキテクチャーの再検討が求められる。
・ネットワーク内キャッシュの最適化。さまざまなアクセス要求パターンに対してコンテンツの有効なキャッシングとそれによるユーザーQoE の向上、ネットワーク資源の最適化をどのように行うかが重要課題である。
・コンテンツに対するセキュリティー・プライバシの確保およびアクセス制限。特に秘匿性の高いコンテンツをどのように取り扱うかについては慎重な検討が必要である。
・広域テストベッドの構築と大規模検証。前述で述べた膨大なコンテンツ・名前数に対するスケーラビリティーの検証には、大規模テストベッドによる広域実証実験が必要である。各国のテストベッドの連携による広域テストベッドの構築が重要となる。
・コミュニティの拡充。特に ICN 分野では、米国および欧州のコミュニティ交流が盛んになりつつあるが、我が国においても国際競争力強化の観点からコミュニティを早急に立ち上げる必要がある。単に ICN だけでなく応用としての IoT、M2M、エッジコンピューティングも含め、垂直統合的な連携が今後必要になる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

FIA については、2014 年から FIA-NP (Next Phase)として、NDN-NP、MobilityFirst-NP が引き続き進行中である。我が国においては、欧州 FP7 との共同研究プログラムとして、IoT および ICN の研究課題が 2013 年より開始されている。さらに欧州では、2014 年から FP7 の次フェーズとして HORIZON 2020 が開始し、そのうち ICT-5 において ICN/CCN に関する研究開発の公募が行われた。

実装が広く利用されている CCNx/NDN では、毎年 CCNx (NDN) Community Meeting が開催されており、ユースケースや最適化に関する議論、デモが行われている。

（６）キーワード

コンテンツ指向ネットワーク、センシング、ルーティング、情報検索、キャッシング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・ITU-T SG13 Q15/13 Data-aware networking in future networks においてラポータを担当するなど、ITU-T標準化に主導的立場 ・総務省およびNICTがEU/Japan Collaborative Researchにおいて ICN/IoT研究を支援
	応用研究・開発	◎	→	・NICTが中心となり、大規模スマートICTサービス基盤 テストベッド（JOSE）を構築、多くのプロジェクトが推進中 ・経済産業省が中心となりスマートシティー・スマートコミュニティ実証実験が推進中
	産業化	○	↗	・家電メーカーが中心となりスマート家電の開発が増加 ・NTTがエッジコンピューティング構想を発表
米国	基礎研究	◎	→	・FIA-NPにより、ICN/IoT 基礎研究を重点的にサポート ・CCN/NDN Community Meeting などを主催し、コミュニティの拡大に尽力
	応用研究・開発	◎	↗	・CCN 実装の一つであるCCNxは 1.0 となり着実に進捗 ・アジア、欧州を含む19機関が参画したNDNテストベッドにより実証研究が推進中
	産業化	○	↗	・Ciscoがフォグコンピューティング構想を発表
欧州	基礎研究	◎	→	・FP7においてICN/IoT分野で数多くのプロジェクトを採択し、積極的に支援。HORIZON 2020 においても ICT-5 を中心に継続的に支援 ・IRTF ICN WGに積極的に関与しICN標準化の主導権を狙う ・国際会議 ICN 2014 第一回開催を主催するなど、ICN 研究の主導的な役割
	応用研究・開発	◎	→	・ETSI (European Telecommunications Standards Institute) M2M TCが中心となり、標準化を推進。oneM2M設立に貢献
	産業化	○	→	・欧州主要キャリアが主体となりGMA (Global M2M Association) を設立、M2M基盤としての移動体通信網の拡充 ・M2M デバイスの市場シェアの多くが欧州企業
中国	基礎研究	○	↗	・ICNについては欧州および米国の個別プロジェクトへの参画にとどまる
	応用研究・開発	◎	↗	・国家プロジェクトとして物聯網を推進。ITU-TへのM2M標準化にも積極的に関与
	産業化	△	→	
韓国	基礎研究	○	→	・ICNについては欧州および米国の個別プロジェクトへの参画にとどまる
	応用研究・開発	○	→	・IoT/M2M について、未来創造科学部が中心となり「事物インターネット標準化協議会」を設立
	産業化	○	↗	・サムソンを中心として、多くのスマートデバイスを開発

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Cisco Connections Counter
http://blogs.cisco.com/news/cisco-connections-counter/
2) D. Kulinski, et al., “NDNVideo: Random-access Live and Pre-recorded Streaming using NDN,”
http://www.named-data.net/techreport/TR007-streaming.pdf
3) V. Jacobson, et al., “Networking Named Content,” ACM CoNEXT 2009.
4) CCNX ホームページ
http://www.ccnx.org/
5) L. Zhang, et al., “Named Data Networking,” ACM SIGCOMM CCR, July 2014.
6) D. Raychaudhuri, et al., “MobilityFirst: A Robust and Trustworthy MobilityCentric Architecture for the Future Internet,” ACM SIGMobile MC2R, October 2012.
7) G. Xylomennos, et al., “A Survey of Information-Centric Networking Research,” IEEE Communication Surveys and Tutorials, no. 99, 26 pages, July 2013. DOI: 10.1109/SURV.2013.070813.00063
8) D. Evans, “The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything,” Cisco White paper, available at:
http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
9) Giuseppe Piro, et al., “Information-centric networking and multimedia services: present and future challenges,” Trans. Emerging Tel. Tech., 2013.

3.4 ソフトウエア

さまざまな計算機上で動くプログラムの開発、実行、運用、保守に関わる技術分野。

ソフトウエアは、情報通信技術（ICT）を実装するために不可欠なものである。このことは、汎用コンピューターのみならず、マイクロコントローラーを内蔵するすべての機器が、ソフトウエア制御で動作している事実からも明らかであろう。そして、学術、産業などのICTに依存するあらゆる活動において、その競争力を維持・強化するためには、より優れた機能・性能を有するソフトウエアを、より迅速かつ低コストで開発する能力が必要になる。ソフトウエアの研究開発戦略が、わが国の発展のために極めて重要な意味を持つゆえんである。

逆に、ソフトウエアの研究開発戦略を立案するにあたっては、重要な応用分野で求められる要件を把握し、競争優位に結びつく新技術の開発につなげていく必要がある。本俯瞰報告書では、応用分野の新しいトレンドとして、物理システムとのインタラクション、知的でスマートな情報システム、大規模情報処理に特に注目して分析を行う。

まず、物理システムとのインタラクションに関しては、センサーやアクチュエーターを制御するソフトウエアへの需要が増大している。CPS、IoT、M2M、Trillion Sensors Universeなどのキーワードが注目され、医療、ヘルスケア、農業などへのICT応用、ロボット、自動運転車なども今後急速に発展する可能性がある。このような分野では、物理システムのモデリングや従来型ソフトウエアとは異なる安全性基準への適合などに関する研究開発が重要となる。

知的でスマートな情報システムに関しては、スマートグリッドのような社会インフラをICTにより高度に最適化するもの、スマートシティーのような知的社会資本の蓄積と活用を支援するもの、高度な自然言語処理やパターン認識の技術を用いて優れたユーザー体験をもたらすものなどがある。このような分野では、高度な可用性や耐攻撃性が求められることもあれば、社会システムのモデリングが必要なこともある。また、ユーザーインタラクションの設計方法が従来とは根本的に変わる場合もある。要件定義、設計、実装、テストなどのソフトウエアライフサイクルの各段階で、このようなトレンドに対応した新しいモデルや手法の研究開発が重要となる。

大規模情報処理に関しては、ビッグデータ解析や大規模シミュレーションで従来とは異なるタイプのワークロードが発生する。また、大規模情報処理のために、多数の機器で構成される計算システムが必須となり、用途によっては広域的に分散した計算システムが用いられる。このようなワークロードやシステムの特性を反映したプログラミングモデルやシステムソフトウエアの研究開発が重要となる。

以上のようなトレンドを考慮し、俯瞰区分「ソフトウエア」では、以下の四つの研究開発領域を設けた。

1. ソフトウエア工学

ICTの斬新な応用が生まれるときには、従来とは異なるソフトウエア開発のモデルや手法が必要になる。また、ソフトウエア開発のプロセス自体もICT支援により高度化され、従来とは異なる手法が生まれる。現在のトレンドを反映しつつ、ソフトウエアライフサイクルの各段階において重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

2. 組込みシステム
   物理的機器に組み込まれ、その機器を制御するソフトウエア（組込みソフトウエア）の重要性が増している。組込みソフトウエアの開発において重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。
3. プログラミングモデルとランタイム
   新しい応用分野で初期に用いられるソフトウエアのモデルや表現には、開発者から見た了解性とコンピューターによる効率的処理を両立できないものが多い。主要な応用分野において、これらの両立を高いレベルで図るために重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。
4. システムソフトウエアとミドルウエア
   ソフトウエアが利用する各種リソースの抽象化と保護の機能は、リソースの高度な利用のためにも、またセキュリティーやディペンダビリティーの基盤としても重要である。これらの機能を提供するレイヤーのソフトウエアで重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

なお、個々の応用分野の問題を解決するソフトウエアの具体的な構成については、原則として、本俯瞰区分では触れない。本俯瞰区分で取り上げるのは、安全性、信頼性、セキュリティー、利便性、実行性能、正確性などに優れたソフトウエアを開発・運用するための技術とそれを容易とするような実行環境に関する技術である。

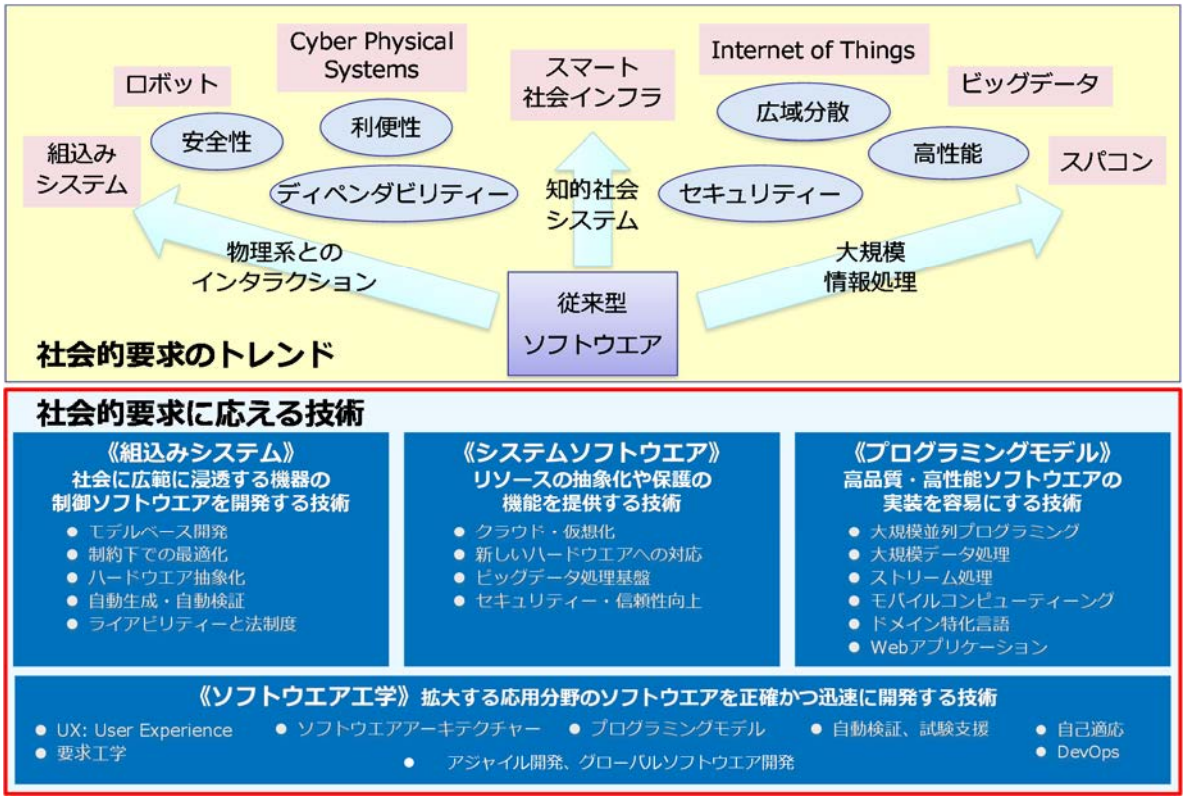


図 3.4.1 ソフトウエアの俯瞰図

３．４．１　ソフトウエア工学

（１）研究開発領域名

ソフトウエア工学

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ソフトウエアの要求定義、開発、利用、進化に関する諸技術

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1)　研究開発領域の動向

ソフトウエア工学はソフトウエア開発を通して、あらゆる科学技術分野の研究開発、ならびに、産業競争力の基盤となる。ソフトウエア工学は、開発対象によらない基礎技術と特定の対象の特性に着目した応用技術に大別できる。基礎技術としては、ソフトウエアで実現すべき要求を獲得する要求工学、ソフトウエア全体の構成を設計するアーキテクチャ技術、プログラムとして実現するプログラミング言語やそれを用いて開発を支援する開発支援環境、ならびに、ソフトウエアの正しさを確認する検証、妥当性確認、試験などの技術がある。この分野ではシステムの規模と複雑度の増大、顧客要求や市場の変化への俊敏な対応、安全性や信頼性の向上のために、コンピューターによる検証など、コンピューターの性能向上を生かした自動化、支援の技術の研究が活発である。

対象の特性に着目した応用研究は Web やクラウドコンピューティング上でソフトウエアの機能をサービスとして遠隔利用を可能とするサービスコンピューティング技術と自動車やスマートフォンなどのモバイル機器やウェアラブル機器などに組み込まれた組込みソフトウエアを対象とする組込みソフトウエア技術がある。また、新分野として SNS（ソーシャルネットワーキングサービス）のソフトウエア技術が急速に発展している。

2)　国内外の動向

米国：基礎研究から応用研究、産業化のいずれにおいても世界をリードしている [7) 8)]。特に、クラウドの台頭など情報処理の基盤が転換期にあり、新たな研究分野が創出され、NFS を中心に Software Infrastructure for Sustained Innovation[8)] などの包括的な研究の枠組みを設け、活発な研究開発が進められている。

EU：2014 年から 2020 年まで The Digital Agenda for Europe（DAE）などの包括的な枠組みで、情報技術による社会へのインパクトを主題に、サービスコンピューティングなどの技術を社会生活や産業創成につなげる研究が展開されている [2) 3)]。一方、自動車などの組込みソフトウエア分野では、産業面でも世界の主導的位置にあり、戦略的な標準化活動を通して影響力の獲得に成功している。

中国：急速に基礎研究力を高めており、世界トップレベルの国際会議にもわが国より多くの研究論文が採択されるまでになっている。一方、応用研究や産業化も急速な成長にある。ソフトウエア産業も高い成長を続け、市場規模は 2013 年に前年比 23.4 ポイント増の 3 兆元に達している [1)]。

韓国：家電や自動車などの組込みソフトウエアに研究が注力され、幾つかの分野で国際的な成果を挙げているが、ソフトウエア全体としては基礎研究、応用研究、産業化のいずれの面でも成果は限定的である。韓国政府の Ministry of Science、ICT and Future Planning では

Strategy & Vision の下でソフトウエア産業とコンテンツ産業の育成を支援している[6]。

インド：インドのソフトウエア産業は欧米主要企業からのソフトウエア開発やビジネスサービスのアウトソーシングで成長し、約 5 兆円の規模である。今後も 25%程度の成長を見込んでいるが[5]、国内ソフトウエア市場は未成熟である。基礎・応用研究も発展途上であり、国際的な研究成果は乏しい。

日本：わが国では、いずれの分野でも一定の成果を挙げている。しかし、ソフトウエア工学の基礎やプログラミングなどの旧来のソフトウエア工学の研究に偏り、クラウドや SNS などの新分野では先導的な位置にあるとはいえない。ソフトウエア産業も高品質な社会基盤ソフトウエアの受託開発に強みがある。また、組込みソフトウエア分野では競争力が高いが、欧州連合（EU)やアジア諸国の研究の活発な状況に対して今後リードを保てるか予断を許さない。

（４）科学技術的・政策的課題

1） ソフトウエア工学の研究開発戦略ビジョンの確立

米国、EU、中国では、ソフトウエア技術があらゆる産業の競争力の源泉であり、かつ、社会の生活の質の向上、ならびに、Web によるグローバルな影響力の観点から戦略的技術と位置づけられ、研究開発ならびに、当該分野の世界的な研究者の獲得と育成に多額の投資を継続的に行っている。わが国でも、このようなソフトウエア技術への戦略的ビジョンの策定と、ソフトウエア技術への戦略的な研究開発の予算化などの措置を講じる必要がある。

2） 新しい計算モデルに基づく情報システム開発技術の研究

クラウド上で、ビッグデータなどの非構造データ処理に関する新たなプログラミングモデルやアーキテクチャーの研究が活発になっている。今後の情報システム開発の基礎技術として、クラウド上でのソフトウエア技術の基礎から応用へ至る幅広い研究体制の確立が必要である。

3） 情報システム開発の価値を創出できる技術の研究

従来、わが国のソフトウエア工学は製造業の知見から出発し、いかに開発するかに主眼が置かれてきた。しかし、情報システムの利用が成熟するにつれ、何を提供するか、すなわち、顧客のビジネスやユーザー経験（UX: User experience）などの要求を獲得し、その価値を高める要求工学などが差別化の鍵となっている、このような要求工学や、それをシステムとして実現するためのソフトウエアアーキテクチャの技術の組織的な研究が必要である。

4） 変化に対応できる情報システムを実現するアジャイルなソフトウエア開発・提供モデルの研究

クラウドを基盤環境とすることにより、家庭でスイッチを入れると照明が点灯するように、必要なソフトウエアを必要な時に、必要なだけ提供、利用できる情報システムの構築が進んでいる。さらに、ソフトウエアの提供する機能を環境の変化に応じてアジャイル(Agile)、すなわち、俊敏に変更できる必要がある。これに対して、欧米ではアジャイル開発や、それをユーザーにおける運用まで展開した DevOps の研究開発に注目が集まり、実践における成果も上がっている。わが国でも、社会の変化に対応できるソフトウエアの新しい開発、提供、利用の基盤技術と応用技術の研究、開発を立ち上げる必要がある。

5) 情報システムの高度な安全性、セキュリティーを保証する技術の研究

金融、電力、交通などの社会基盤システムや自動車など、情報システムの安全性やセキュリティーが社会全体に及ぼすリスクの増大への懸念が高まっている。今後、クラウドの普及により、システム障害などの影響がより広範囲に影響する。一方、自動車の自動運転など、人命にかかわるセイフティクリティカルなシステムの開発も急務である。また、このような情報システムの規模や複雑度は増大の一途である。このような点から、コンピューターを応用した情報システムの自動検証や試験支援などの高度な安全性、信頼性を実現する技術の研究を推進する必要がある。

6) ソフトウエア技術の社会的インパクトに関する研究

情報システムは Web、クラウドや SNS などを介して広範な影響を及ぼす。さらに、モバイル/ウェアラブルシステム、IoT、センサー技術の進化などにより、影響はシステム、社会に深く浸透するようになっている。このような、ソフトウエアシステムの社会への浸透を理解し、社会への影響や効果を学術的に扱う新たな学問分野の研究への組織的な取り組みが必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・全米科学財団(NSF)の Software Infrastructure for Sustained Innovation プログラム [7)]
・EU の Horizon 2020[2)]と Networked European Software and Services Initiative[2)]などの活動。ドイツにおける Smart Service Welt[4)]などの Industrie 4.0(第 4 次産業革命)を実現するソフトウエア/サービスの研究戦略.
・韓国政府 Ministry of Science、ICT and Future Planning の Strategy & Vision [6)]

（６）キーワード

クラウドコンピューティング、サービスコンピューティング、ソーシャルネットワークサービス (SNS)、組込みソフトウエア、CPS (Cyber Physical Systems)、ユビキタスコンピューティング、モバイルソフトウエア、ウエアラブル、ビッグデータ、コンテキストアウエア、IoT (Internet of Things) [モノのインターネット]、ビッグデータ、ユーザー経験 (UX: User Experience)、要求工学、ソフトウエアアーキテクチャー、アジャイル開発、リーン開発、DevOps、自己適応、ソフトウエアエコシステム、グローバルソフトウエア開発 (GSD: Global Software Development)、クラウドソーシング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・プログラミングなどの従来の研究分野においては幾つか世界水準の研究成果が見られるが、クラウド、モバイル、SNSなどの新しい研究分野における基礎研究は限られている。
	応用研究・開発	○	→	・クラウドなどの分野において企業を中心に応用研究、開発が行われているが、米国の主要企業に比べて立ち遅れが見られる。 ・自動車、家電などの分野で企業を中心に活発な応用研究、開発が行われて、世界水準の成果も見られるが、自動運転などの先進的な応用研究では競争が激化している。
	産業化	◎	→	・一定の国内市場がある。高品質な社会基盤システムの受託開発に強みを持つが、世界的競争力のあるパッケージソフトウエアを育成できていない。 ・クラウド、SNSなどのWeb上で地域によらない分野は国内で海外企業の攻勢にさらされている。 ・自動車などの組込みソフトウエア分野は、電子化と電動化があいまって需要が急増大し、かつ、世界水準の競争力を保っている。 ・携帯電話分野はスマートフォンへの参入遅れから劣勢に立たされている。
米国	基礎研究	◎	↗	・世界を主導する分野として位置づけられ、大学・公的機関における基礎研究のレベルは一貫して高い。 ・PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology)のリポートなどでNITRD (The Networking and Information Technology Research and Development)プログラムなどにより戦略的な研究計画の推進を継続し、特に、社会と融合した研究の推進が重点テーマとして打ち出されている。 ・はCIF21 (Cyberinfrastructure Framework for 21st Century Science and Engineering)などの包括的研究プログラムにより戦略的な研究を継続。
	応用研究・開発	◎	↗	・世界を主導する企業の研究所などにおいて基礎研究に近い領域から応用研究に至る幅広い研究が進められて、世界を主導している。 ・クラウドやビッグデータ処理などの新分野で世界をリードしている。
	産業化	◎	↗	・米国内にとどまらず、世界の市場のあらゆる分野で事業を展開している。 ・クラウド、ビッグデータ処理、SNSなど、新産業分野が創出され、急速に発展している。特に、Web上では国境を越えてサービスが提供できることから、世界市場で大きなシェアを占めている。 ・ベンチャー企業育成システムが機能し、新技術の産業化に寄与している。
欧州	基礎研究	◎	↗	・2014年から2020年までに800億ユーロの予算で開始したHORIZON 2020において、Digital Agenda for Europe (DAE)の枠組みの下に、サービスコンピューティング、クラウドなどの新分野で積極的な研究開発が計画されている。
	応用研究・開発	○	↗	・HORIZON 2020やその中のDAEにおいては、ITの社会へのインパクトが重視され、社会の変化に対応する研究が計画されている。 ・自動車に搭載されるソフトウエアアーキテクチャーの標準であるAUTOSARの標準化など、応用技術の研究、開発から標準化までを主導し、影響力の保持に成功している。
	産業化	○	↗	・自動車、電力、医療などの分野で世界をリードする企業が中心となって組込みソフトウエアの旺盛な開発と製品化が進められている。 ・ドイルのIndustrie 4.0やSmart Service Weltなど、産官学によるソフトウエア技術の産業化へ戦略的に取り組んでいる事例が見られる。

中国	基礎研究	○	↗	・近年では世界トップレベルの国際会議に研究論文が採択され、その数はわが国を上回るまでになっている。 ・中国科学院、精華大学、北京大学など主要な大学・公的研究機関にソフトウエア工学のKey Laboratoryが設置され質の高い研究成果が見られる。欧米で学位を取得した研究者を呼び戻し、研究の質の組織的な向上に成功している。
	応用研究・開発	○	↗	・多くの大学でInstitute of Softwareを設置し、世界水準の研究成果が表れはじめている。今後、質の高い研究成果が期待される。
	産業化	△	↗	・中国のソフトウエアとIT産業は高い成長段階途上にあり、2013年には前年比23･4ポイント増の約3兆元の市場規模に達した。これに伴い、ソフトウエアとIT産業のR&Dへの投資も旺盛で2013年には約2.6億元に達した。 ・海外からのアウトソーシングが引き続き活発である、IT特区などで海外大手企業の参画を得て、人材育成に注力している。
韓国	基礎研究	×	→	・組込みソフトウエアの研究で質の高い研究成果が見られるが、ソフトウエア工学全般としては、世界水準の研究は限定的である。 ・KAISTや1997年に開学したICU (Information and Communications University)などで組織的な取り組みが行われ、米国で学位を取得した教員を呼び戻し、英語で講義をするなど、基礎研究の充実を図っている。
	応用研究・開発	△	→	・家電、自動車などの組込みソフトウエアの研究において質の高い研究成果が見られる。
	産業化	△	↗	・家電、自動車、ゲームなどの分野で特定の企業が世界トップレベルに成長すると共に国内で需要も増大しているが、その分野は限定的である
インド	基礎研究	×	↗	・IIT (Indian Institute of Technology) などにソフトウエア工学の研究者がおり、近年、国際会議への積極的な研究発表が行われておいることから、今後、世界水準の研究成果が期待できる
	応用研究・開発	△	↗	・世界を主導するIT企業が設置した研究所や開発部門が世界水準の研究成果を出しはじめている。研究開発が活発になっていることから、今後、世界水準の研究・開発の成果が期待できる
	産業化	○	↗	・幾つかのソフトウエア企業が欧米からのアウトソーシングから世界規模の企業へと成長している。今後の成長が期待されている ・欧米の世界を主導する企業が開発部門を設け、クラウドなどの最新技術をいち早く吸収し、主要な開発拠点となっている

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）China: Ministry of Industry and Information Technology, People's Republic China, China's IT industry Statistical Data 2013, http://wap.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858477/15974912.html.

2）EU: Framework Programme for Research and Innovation, HORIZON 2020,

http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en.

3) EU: Networked European Software and Services Initiative, Software Engineering: Key Enabler for innovation, White Paper, Jul. 2014, http://www.nessi-europe.eu/Files/Private/NESSI_SE_WhitePaper-FINAL.pdf.
4) German National Academy of Science and Engineering (Acatech), Smart Service Welt WG, Smart Service Welt, Mar. 2014, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Projekte/Laufende_Projekte/Smart_Service_Welt/BerichtSmartService_engl.pdf.
5) India: Department of Electronics and Information Technology, Ministry of Communications & Information Technology, Government of India, R & D in Information Technology, http://deity.gov.in/content/r-d-information-technology.
6) Korea: Ministry of Science, ICT and Future Planning, Vision & Strategies, http://english.msip.go.kr/english/msipContents/contents.do?mId=Mjcw.
7) US , Software Infrastructure for Sustained Innovation - SSE & SSI, http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504865
8) US PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology), Report to the President and Congress, Design a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information technology, Jan. 2013, http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd2013.pdf

３．４．２　組込みシステム

（１）研究開発領域名

組込みシステム

（２）研究開発領域の簡潔な説明

組込みシステムを、電力、コスト、リアルタイム性、ディペンダビリティーなどのさまざまな制約条件の下で効率よく動作させるためのソフトウエアおよびその設計技術に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

組込みシステムとは、各種の機器に組み込まれてその制御を行うコンピューターシステムのことである。自動車、ロケット、ロボット、産業機器、携帯機器、家電機器、プラントや社会インフラシステムの制御システム、各種センサーやセキュリティー機器など日本の産業を支えるさまざまなシステムの多くは、その付加価値の重要な部分を内部に組み込まれたコンピューターシステムによって実現しており、その意味で組込みシステムは日本の電子情報通信産業を支えていると言っても過言ではない。

機器に組み込まれているコンピューターシステムという性格上、その機器の持つ機能に特化したハードウエアを追加といった最適化が可能であり、パソコンやサーバー等の汎用コンピューターシステムと比較すると、多種混在のハードウエア構成を採用可能である。また、特別に設計された計算機室に置かれるサーバー等と異なり、機器が使用される環境条件により、電力制約、リアルタイム制約、価格制約等に関して強い制約が課せられることが多く、その中で最適化していく必要があることも組込みシステムの特徴である。

近年では、CPS、M2M、IoT などと呼ばれるように、多数の組込みシステムがネットワークに接続し、大きなシステムを形成するようになった。組込みシステムは、個々人の身近に存在するものがあり、生活のさまざまな局面で利用されるものがあり、または、社会に遍在するものもある。それらがネットワークで接続され、人間との相互作用もからめて大きなシステムを構築するため、今後は、より大きなシステムの中での一機能として、組込みシステムの設計検証を考える必要がでてきている。

組込みシステム単体も高機能化、複雑化している。ソフトウエア量は増大し、従来と比較してハードウエアコストとソフトウエアコストのバランスが大きく変わっている。高い処理性能かつ省エネルギーという点では機能に特化したハードウエアが有利である一方、専用設計のハードウエアは生産台数が少なくなると機器１台あたりで考えたときに価格性能比が見合わないことがある。従って組込みシステムでは、高い処理性能かつ省エネルギーのハードウエアをソフトウエアによって多種機器で使いまわし価格性能比を最適化することが多くなる。

単体の組込みシステムにおけるソフトウエアの研究開発課題は、一般的なコンピューターシステム上のソフトウエア研究と基本的には変わるところがないが、前述した組込みシステムならではの特徴をふまえた課題が存在する。例えば、多種ハードウエアを使いこなすソフトウエアであること、そして個々の機器の動作環境に依存した多種多様な制約の下での最適化があげられる。ターゲットシステム内におけるハードウエアの種類は近年ますます多くな

ってきており、ソフトウエアは機器内において汎用 CPU 上で動作するだけではなく、グラフィックプロセッサのようなアクセラレータ上で動作する場合や、最終的にはハードウエア化されることも想定する必要がある。

基本ソフトウエアに関しても、単純な機器制御の場合には基本ソフト（OS)を使う必要がなかったが、複雑な機能や状態遷移を持つようなシステムになって OS が使われるようになり、日本では iTRON 仕様の OS が広く使われている。最近の高機能組込みシステムでは、ネットワーク接続や GUI、仮想空間によるアプリケーション保護などの技術的要望、ソフトウエアのオフショア開発との親和性等の理由により Linux のような高機能 OS が利用されるようになっている。基本ソフトウエアにおいては、今後ますます増加する複数プロセッサやアクセラレータを仮想化し、上位ソフトウエアから使いやすくする手法の研究が重要である。

そしてさらに、多数の組込みシステムにより構成される大規模システムに対する設計検証、特にモデル化が重要である。中には世界規模のものもあるが、例えば自動車業界では、以前はエンジンなど部品ごとのシミュレーションであったが、最近では車全体のシミュレーションが行われるようになり、さらには道路モデル、人間モデルなどを組み合わせてシミュレーションし、モーターのような部品から、高度道路交通システム（ITS)のような社会システムまで設計検証を行うようになってきている。

以上により、組込みシステム向けソフトウエア研究は、①ネットワーク化された複数組込みシステムによって構成されるシステムモデル化、制約下での全体最適化、設計方法論、②ターゲットハードウエア非依存のシステム要求分析やシステムアーキテクチャ設計、モデル化、制約下での最適化、③ターゲットハードウエアを抽象化した段階でのソフトウエア設計、制約下での最適化、④ターゲットハードウエアに向けての詳細化および制約下での最適化、それらの実行環境、ソフトウエア自動生成および検証等が進められている。また、プロセッサのコア数が増える中、制約条件の下での並列化や仮想化技術の研究、さらに、機器直接もしくは接続するクラウドシステムからの侵入、機器操作などに対するセキュリティー技術についても活発な研究が進められている。

今後は、ハードウエアからソフトウエア、人間や周囲環境、部品から装置レベルまで、さまざまなものがさまざまな抽象度でモデル化され、組み合わせられて大きな社会システム、情報システムとしてモデル化されると考えられる。その中で、自らの設計対象（例えばモータ制御ソフトウエア）の抽象レベルを段階的に下げ、詳細化していくことにより実装や検証が行われることになろう。

また、スマート社会や自動車の自律走行に代表されるように、組込みシステムの「判断」が人間、社会、自然に及ぼす影響がますます大きくなることが想定されており、そのための仕組みづくりが急務である。組込みシステムの「判断」に対する責任の所在に関する議論、組込みシステムの安全性（より広くディペンダビリティー）の担保、遍在する組込みシステムに対しネットワークを通した安全な不具合対応等、多くの課題がある。

米国では 2000 年代後半より全米科学財団（NSF)の重点テーマの一つとして、高信頼組込みシステムの活動から CPS (Cyber Physical Systems)が提案された[1) 2)]、例えば Quadrotor やヘリコプターの自律飛行など、各大学、研究機関において活発に研究が進められており、実用化されているものと考えられる。これにスマートグリッドやクラウドシステムのベンダ

ーも参加し始め、大きな研究分野となっている。

欧州では、FP5 の頃より重点領域として検討が進められており、2004 年に ARTEMIS (Advanced Research & Technology for EMbedded Intelligence and Systems)[3]が発足、以来精力的に活動している。車全体のモデル化（MODELISAR[4]、 FMI[5]）、マルチコア向け（AMALTHEA[6]、 ARAMiS[7]）等さまざまな活動がある。

（４）科学技術的・政策的課題

・組込みシステムのインテリジェンスに対する法整備

組込みシステムが持つ知能、判断の結果責任に対する考え方の整理、法的対応が急務である。上述した自律走行に関しては、例えば米国ネバダ州等において Google による自動運転車が公道で走行可能になったなど整備が進んでおり、日本は遅れていると言わざるを得ない。スマート家電やさまざまなセンサー等における個人監視問題、設置したすべての地点を巡回することがコスト的に困難な場合の問題発生時の責任、ネットワークを通した故障監視やバージョンアップに関わる責任、不具合対応責任、技術悪用防止も含め、大きな課題である。

・先端技術の戦略的展開

組込みシステム分野は、複雑な機能を持つ携帯機器や情報家電、車載機器等のハイエンド製品・技術分野と、簡易な機器制御のようなローエンド分野が混在し、これに伴い国内企業も二極化していると考えられる。また、それぞれ出荷台数が少ない製品も多数存在し、ロングテールを形成している。

産業競争力という面からはハイエンドをより高く鋭くする方向と、ローエンドの部分を底上げしていく方向をバランスよく進めていくことが重要で、これがうまく回らないと、組込み産業の多くは体力のない中小企業であることを考えると、一部の勝ち組企業と多数の負け組企業が生まれてしまうことになる。

ソフトウエア技術においても、最先端技術を、より多くのローエンド分野や関連企業に咀嚼して持っていき、多種類製品へ展開していくための戦略が必要である。例えば技術情報共有、非競争領域のオープンソース化、プラットフォーム化を推進するコンソーシアムなどが考えられる。

・社会情報システムシミュレーションのための抽象化、モデル化

社会学、心理学など、従来は組込みシステムとの関係は認識されていても連携はあまり考えられてこなかった分野の情報化、モデル化を行い、その中に組込みシステムを位置づけ、社会情報システムとしてシミュレーション、設計していく新しい分野間連携が必須である。上述したように、例えば自動車業界では、従来の部品シミュレーションをもとに、車全体のシミュレーション、さらには道路モデル、人間モデルなどを組み合わせて、一つの小さな社会をシミュレーションするようになってきている。そのようなシミュレーションの結果、ITS (Intelligent Transport System)のような社会システムへのフィードバックもあるが、ものづくりにも生かされるようになると言われている。そのためには「社会」「人間」「もの」をそれぞれ抽象化し、シミュレーション可能なモデルとした上で協調動作させることが重要であり、かつシミュレーション結果を「社会システム」「もの」に反映し、具体化できるモデルである必要がある。今後はさまざまなレベルにおける抽象化、モデル化

が極めて重要な課題となり、かつ、従来は異分野と考えられていた学問間での産学官連携が重要となる。

・モデルベース開発における支援ツールの研究開発

上述したようなモデル化をもとにした、モデルベース開発が注目されている。モデルベース開発を適用するためには、ツールによる支援が必要となり、モデルベース開発支援ツールの市場規模はますます成長していくと見られる。しかし、国内ベンダーのツール市場における位置づけは欧米のベンダーに比べるとまだ低く、市場における国内ベンダーの国際競争力の向上が課題である。

・ネットワーク連携する組込みシステムを有する工場、スマートシステム

ドイツ政府主導で行われている次世代の工場「インダストリー4.0 （Industrie 4.0）[8)]」が注目されている。これは、従来工場内の組み込み機器が、単体で正確な動作を求められていた時代から、多数の工場内組み込み機器間、および複数の工場間にてネットワークで連携し、正確かつ堅牢に動作することを求められる時代へと変化していることを示唆している。

複数の組込みシステムがネットワークを介して協調し、サプライチェーンの最適化も併せ、高い生産性、コスト効率を実現することなど、工場のみならずさまざまなスマートシステムへの適用が可能である。複数の組込みシステムを社会情報システムと協調させるモデル化や最適化、高いセキュリティーを確保した堅牢なリアルタイムシステムの応用研究、開発については、喫緊の課題である。

・クラウド連携する組込みリアルタイムシステムのリアルタイム保証

CPS (Cyber Physical Systems) においてはクラウドシステムと組込みシステムが連携する。M2M ではそのようなシステムを通して組込みシステム間で連携する。電話回線網のように特定の企業群が保証するサーバーシステムと組込みシステムとの連携は以前から存在する。これに対して、クラウドシステムが巨大化した複数のオープンシステムの複合体である場合、組込みシステムにおけるリアルタイム制約は考え方が大きく異なるため、組み合わせることは困難であるが、今後の組込みシステムにおいては、クラウドシステムの連携も前提とした組込みシステム、あるいは M2M のリアルタイム保証の仕組みを確立していくことが課題である。

・多種ハードウエアを使いこなすソフトウエア技術

再構成可能デバイス、不揮発メモリーのような新しいデバイスが登場している。また、組込みシステムも多機能化し、SoC (System on Chip) の中に多種多様なハードウエアが搭載されることも多くなった。多種ハードウエアの性能を引き出すようなソフトウエア開発が重要であり、かつ、多種ハードウエアを管理する基本ソフトウエア技術は必須である。さらに、可能な限りハードウエア非依存のシステム設計とするための設計検証環境の研究開発は大きな課題である。

・マルチ・メニーコアプロセッサーに向けたソフトウエア技術

動作周波数向上に期待できない時代となり、性能向上はプロセッサー数増加に依存するようになった。汎用 CPU では数十から数百、汎用グラフィックスプロセッサーでは数千を超える計算ユニットが搭載されるようになった。当然ながら、それらのプロセッサーを有効に使うことができなければ性能向上は期待できないため、ソフトウエアによる並列化技

術が重要であり、特に自動並列化が期待される。また、数百から数千ものプロセッサーを管理する基本ソフトウエアも重要である。

・省エネルギーのためのソフトウエア技術

エネルギー削減のためには、トランジスタの消費エネルギー削減のように一様に効果のある削減方法もあるが、不要な機能の電源遮断のようなシステム的なエネルギー削減方法も効果的であると言われている。また、周波数可変、電源電圧可変のような機能を持つハードウエアもある。組込みシステムの要求仕様、例えばリアルタイム制約を満たしながら最小エネルギーになるよう必要最小限の機能を実行させるソフトウエア技術が望まれている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・自動車の自動運転技術について世界的に注目度が高まっており、国の威信にも関わることとして、欧米で大きな投資が始まっている。また、米国では複数の自律飛行物体の連携などにも投資されている。日本でも 2020 年の東京五輪を目標に SIP 等で投資されようとしている。

これは利便性の向上だけではない。自動車の安全性向上のためには、コンピューター支援による自律走行に移行していく必要がある。その背景として、交通事故死亡の多くの割合が、人為的ミスが原因となっており、特に高齢者の加害、被害事故が増えていることがあげられる。

従来ドライバー責任であったものに対して、製造メーカーが事故の責任を問われることもあり、製造メーカー側は、取り組みに積極的なわけではない。国主導での法整備および開発投資が必要であると考える。

さらに、これを自動車のみの潮流として見るべきではないと考える。将来社会の持続可能性は、組込みシステムの知的連携により支えられる面が大きい。社会のインフラともいえる大規模システムとなるため、一朝一夕には整備できず、投資額も大きいが、逆にそのようなシステムの整備状況が将来社会の持続可能性の差となることも考えられる。将来利用可能性の低いシステムへの大規模投資は難しいが、医療・介護等の領域における、人間が関わる組込みシステム間連携や、人間が立ち入ることのできない場所での複数ロボット、自律飛行物体連携など、今後、将来ニーズの大きい実証の場に対し、各国で投資が行われていくことが予想される。

・ネットワーク連携する複数組込みシステムの動的協調：上述したドイツの Industrie 4.0[8] に続き、2014 年に GE、 IBM、 Cisco、 Intel、 AT&T が産業インターネット・コンソーシアム Industrial Internet Consortium (IIC)[9]を設立し、物質的な工業生産とインターネット技術との融合が急速に注目されている。

また、米国ではネットワーク連携する複数 Quadrotor の協調飛行の研究なども進んでいる。

欧米では、このように、ネットワーク連携する複数組込みシステムの動的な協調動作についての研究を加速している。この分野で遅れると、今後の工業生産力、産業競争力に大きな影響を与えると考えられるため、国を挙げての取り組みが緊要である。

・本報告書にも項目として挙げられているように、新しいデバイス／ハードウエア技術が次々と生まれている。計算速度、消費エネルギーの源泉はデバイス／ハードウエアである

が、半導体が 10 ナノメートルの時代に向かっている中、新しいデバイス／ハードウエアをソフトウエアで使いこなすことがますます難しくなっている。従って、デバイス／ハードウエアの現在および注目動向がそのまま組込みシステム向けソフトウエアの注目動向でもある。

・前項同様に、IoT、M2M 時代の通信技術、特に無線、セキュリティー技術は組込みシステム向けソフトウエアの注目動向である。

・ソフトウエア領域に共通する諸問題、要求分析とモデルの関係、形式手法、人材育成などの動向も、当然のことながら組込みシステムにおいても重要である。

（6）キーワード

CPS、M2M、IoT、HEMS 他、組込みシステムに関する下記のキーワード：

要求定義・分析手法、開発プロセス、設計手法、開発環境、ツール、EDA 技術、協調設計・検証、プログラミング言語。コンパイラー、低消費エネルギー技術、高信頼システム技術、検証、テスト、デバッグ手法・ツール、性能評価、アーキテクチャ、プロセッサ、DSP、リアルタイム OS、ミドルウエア、ネットワーク、通信、分散システム、セキュリティー、ユーザーインターフェース、ユーザビリティ、メディア処理・認識、開発事例、新しい応用分野、教育、技術者養成、スキル標準、産官学連携、プロジェクトマネジメント、アプリケーション（自動車、ITS、OA 機器、情報家電、 産業機械、スマートシステムなど）

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	少数の研究者を除くと、基礎研究における国際的位置づけは高いとはいえない。
	応用研究・開発	○	↗	産業の強みを背景に、自動車などの分野で活発な応用研究、開発が行われており、世界水準の成果も見られる。
	産業化	◎	↗	自動車、産業機械などの分野で世界をリードする企業が中心となって組込みソフトウエアの開発と製品化が進められている。
米国	基礎研究	◎	↗	著名な国際学会は米国中心のものが多く、CMU、MIT、Stanford等トップ大学や企業の研究所が主導している。基盤研究から産業化まで軍事、航空宇宙技術がけん引している。
	応用研究・開発	◎	↗	大学や企業の研究所などにおいて基礎研究に近い領域から応用研究に至る幅広い研究が進められており、世界を主導している。
	産業化	◎	↗	米国内にとどまらず、世界市場のあらゆる分野で事業を展開している。
欧州	基礎研究	◎	↗	FPxの中の重点領域の一つと位置づけられ、米国とは独立に、組織的、精力的に進められている。国際学会の発表件数も多い。
	応用研究・開発	◎	↗	車載ソフトウエアアーキテクチャの標準であるAUTOSARの標準化など、標準化を主導し、研究・開発への影響力の保持に成功している。
	産業化	◎	↗	自動車、電力、医療などの分野で世界をリードする企業が中心となって組込みソフトウエアの旺盛な開発と製品化が進められている。
中国	基礎研究	○	↗	従来は世界トップレベルの国際会議に研究論文が採択されなかったが、近年では定常的に採択され、その数はわが国を上回るまでになっている。
	応用研究・開発	○	↗	同上
	産業化	○	↗	価格競争力を背景とし、さまざまな製品開発を進め、現場の実力は発展途上だが、特に大量生産品に関して実力を高めている。
韓国	基礎研究	△	→	KAIST Real-time and Embedded Systems Lab.等においてある程度の活動がある。どちらかと言えば応用研究の比重が高い。
	応用研究・開発	○	→	同上
	産業化	○	→	家電、自動車、ゲームなどの分野で特定の企業が世界トップレベルに成長してきたが、組込み分野に限らず、近年は産業の停滞感が広まっている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 例えば国際学会 RTSS (Real-Time System Symposium)2007 に Cyber Physical Systems のセッションが見られる。
http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/rtss/rtss2007.html
2) Helen Gill: “CPS: A View from the HCSS Agencies,” CPSWeek, 2008.
3) ARTEMIS: http://www.artemis-ju.eu/home_page
4) MODELISAR: https://itea3.org/project/modelisar.html
5) FMI: https://www.fmi-standard.org/
6) AMALTHEA: https://itea3.org/project/amalthea.html
7) ARAMiS: http://www.projekt-aramis.de/
8) 永野: ドイツ政府の第 4 次産業革命 Industrie 4.0－日本のモノ作り産業へのインパクトー, 日本機械学会, 2014,
http://www.jsme.or.jp/msd/html/92/msd_seminar_140724_speaker02.pdf
9) 産業インターネット・コンソーシアム IIC:
http://www.iiconsortium.org/index.htm
国際学会 ESWEEK (Embedded Systems Week): http://www.esweek.org/
国際学会 RTSS (Real-Time System Symposium)

３．４．３　プログラミングモデルとランタイム

（１）研究開発領域名

プログラミングモデルとランタイム

（２）研究開発領域の簡潔な説明

プログラムの表現手段およびプログラムの実行環境に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プログラミングモデルとはプログラムの構成要素とそれらの関係を規定するもので、プログラムの生産性を一義的に決定するものである。プログラミング言語、ライブラリ、フレームワーク等の形で具体化されるものである。一方、ランタイムとは、プログラミングモデルに従って表現されたプログラムの実行環境であり、プログラムの実行性能を一義的に決定するものである。一般にプログラミングモデルが高水準であればあるほどプログラムの生産性は向上するが、ランタイムに対する要求は増大しその開発にはより多くの時間と労力が必要になる。

大規模並列プログラミング

プログラミングモデルとランタイムにおける革新は、新しいハードウエアおよび新しいソフトウエアの登場によって惹起されるのが常である。2003 年頃よりコンピューターアーキテクチャは一大画期を迎え、いわゆるマルチコア時代に突入し、さらにはマルチコアからメニーコアへと拡大しつつあるが、これにより大規模並列プログラミングが一部の専門家だけのものではなく一般のプログラマーがなすべきものになるであろうと予測され、大規模並列プログラミングのための新しいプログラミングモデルの研究開発が活発となった。米国防総省の国防高等研究計画局（DARPA）によるプロジェクトである High Productivity Computing Systems（HPCS）[1] では、プログラミングモデルの革新は新たなプログラム言語の設計という形で追求され、IBM は X10 を、Cray は Chapel を、Sun Microsystems(当時)は Fortress をそれぞれ提案した。一方、Intel および Microsoft は、カリフォルニア大学バークレー校とイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校のそれぞれに Universal Parallel Computing Research Center を設立し産学協同研究を推進しているが、プログラミングモデルの革新は C++や Fortran といった既存言語を拡張する方向で追求されている。国際的に次なる大きな目標である Exascale コンピューターについては、米国ではエネルギー省の高等科学計算諮問委員会（ASCAC)を中心に進められており、ハードウエアからランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションに至るまでを包括した協調的アプローチが必要だとしている。

ビッグデータ：大規模データ処理

いわゆるビッグデータの処理のためのプログラミングモデルでは MapReduce への関心が際立っている。Google の研究員が 2004 年に論文 [2]を発表したことで注目を集め、2007 年にオープンソースの実装である Apache Hadoop がリリースされたことで産学での実際的取り組みが加速した。モデルがシンプルであるにも拘わらず応用範囲は広く、転置インデック

ス作成、文書クラスタリング、機械学習、統計的機械翻訳、グラフアルゴリズム等、多くの問題の記述に使われている。より高水準のプログラミングモデルを提供するために新たにプログラム言語を設計する試みがあり、例えば、Apache Pig における Pig Latin、Apache Hive における QL、IBM 社の Jaql などであるが、いずれもランタイムは Hadoop 上で動作する。

MapReduce とは別のプログラミングモデルとしては Bulk Synchronous Parallel があり、グラフアルゴリズムを簡潔に記述できることから注目されている。Google の Pregel、Apache の Hama といった実装がある。

最後に、最近注目を集めている Apache Spark は、もともとカリフォルニア大バークレー校の AMP (Algorithms、Machines、and People)ラボで開発されたものであるが、インメモリーコンピューティングに訴えることにより、Hadoop MapReduce に比べ 10 倍から 100 倍の高速化が達成されるとしている。プログラミングモデルとしては、80 を超える高水準のオペレーターが用意されており、プログラムの記述量は 1/2 から 1/5 になるとしており、また、SQL、ストリーム処理、機械学習、大規模グラフのためのライブラリが用意されている。

ビッグデータ：ストリーム処理

ビッグデータのもうひとつの側面が、ストリーム処理で、時々刻々と発生するデータを即時に処理しようというものである。近年、CPS (Cyber-Physical Systems) あるいは IoT (Internet of Things) と呼ばれる研究領域が活発になり、社会インフラへのセンサー網構築が進行しているが、ストリーム処理は中核技術のひとつとして利活用されている。

ストリーム処理は、2000 年代初めに米国有力大学で研究が始まり、マサチューセッツ工科大学ブラウン大学フランダイズ大学の協同プロジェクトである Aurora、スタンフォード大学の STREAM などが知られる。プログラミングモデルとしては、両者とも SQL を拡張するアプローチを取り、Aurora では StreamSQL、STREAM では CQL(Continuous Query Language)というプログラミング言語が設計されている。今日、商用システムとしては、TIBCO の StreamBase CEP、IBM の InfoSphere Streams、日立の uCosminexus Stream Data Platform などがある。StreamBase CEP は Aurora プロジェクトを商業化したものである。InfoSphere Streams は、プログラミングモデルとして独自の言語 SPL（Streams Processing Language）を採用し、データフローグラフを宣言的に記述する。uCosminexus Stream Data Platform はプログラミングモデルとして前記 STREAM の CQL を用いている。オープンソースでは S4 (Simple, Scalable Streaming System)がある。もともとは Yahoo!のプロジェクトであったが、2011 年 9 月に Apache Incubator プロジェクトとなった。プログラミングモデルとしては、Actor モデルに基づいた API を用いて Java で記述する。さらに、最近では、PaaS (Platform as a Service)として提供される例も見られる。例えば Amazon 社は、2013 年 11 月に Amazon Kinesis を発表しているが、ストリーム処理のための API およびライブラリが提供され、Java あるいは Python にてアプリケーションを記述する。

モバイルコンピューティング

モバイルコンピューティングでは、スマートフォンの普及が急速に進行しており、iPhone と Android が二大勢力になっている。iPhone のプログラミングモデルであるが、2014 Worldwide Developers Conference にて新しいプログラミング言語 Swift が発表された。フレームワークとしては、これまでの主力言語である Objective-C によって書かれたものをそのまま利用することができ、ユーザーインターフェース構築、オーディオ再生、地図表示のためのフレームワーク等、豊富に用意されている。 Android の場合は、プログラミング言語に Java Standard Edition ベースのものを採用し、同様に豊富なアプリケーションフレームワークが提供されている。いずれも開発環境は無償で入手することができ、開発したアプリケーションを公開するマーケットがそれぞれに整備されている。

ドメイン特化言語

ドメイン特化言語（Domain Specific Languages)とは、特定のドメインの問題を解くために設計されたプログラム言語で、そのために特化したプログラミングモデルを提供し、汎用言語に比べ生産性は著しく高いとされる。ドメイン特化言語の歴史は古く、現存するものも多種多様であり、例えば、grep で使用される正規表現を記述するための言語、Web のドキュメントを記述するための HTML、デジタル回路を設計するための VHDL、関係データベースにおいてデータの操作や定義を行うための SQL、等々枚挙にいとまがない。先にビッグデータのプログラミングモデルのところで言及した Pig Latin、QL、Jaql、StreamSQL、CQL、SPL、などもドメイン特化言語であるといえる。最近では、IT 業界における数理科学への関心の高まりもあり、統計解析向けの R 言語、統計解析ソフトウエア SPSS で使用される言語、特に組み込み系のモデリング言語としての利用が高まっている MATLAB/Simulink、などにも産学からの注目が集まっている。また、Exascale コンピューターにおけるプログラミングの複雑さを克服するために、ドメイン特化言語を活用しようとする動きもある。

Web アプリケーション

最後に Web アプリケーションに関して論ずれば、これは今日最も典型的なジャンルのソフトウエアであり、いくつかのプログラミングモデルが割拠しているが、いわゆる動的スクリプト言語(Dynamic Scripting Languages)の台頭が目覚しい。プログラミングモデルの生産性が高いこと、ランタイムがオープンソースとして提供されていることがその主因であろう。例えば、PHP は 1995 年に動的 Web ページ作成のために新たに設計された言語であり、今日 80%近い Web サイトで用いられているといわれており、 著名サイトには Facebook や Wikipedia などがある。一方、Perl は汎用の言語であるが、1990 年代後半に CGI スクリプトを記述するための言語として普及が進み、Amazon.com や Priceline.com などで利用されている。Python は、Google、Yahoo!、YouTube、Facebook などで使用されている。Ruby は国産の汎用動的言語であり、その言語仕様は 2012 年に国際標準として採択されている [3)]。著名サイトでは GitHub において用いられており、今後のさらなる伸長が期待される。また、元来クライアント側の web ブラウザー中で用いられる JavaScript を、サーバー側のネットワークプログラミングに用いるフレームワーク Node.js も急速に普及しており、著名サイト

では LinkedIn、PayPal 等で使用されている。

（４）科学技術的・政策的課題

・プログラミングモデルの研究開発は、その性格上単独で実施されるべきものではなく、なんらかのアプリケーションの研究開発と一体化して実施されるものである。とすれば、見方を変えるならば、CPS (Cyber-Physical Systems)やビッグデータなどの大規模 IT 応用研究開発プロジェクトにおいては、プログラミングモデルの革新の好機であると考え、プログラミングモデルの研究開発およびそのランタイムの研究開発を包含することを常に検討すべきであろう。
・Exascale コンピューターについては、ハードウエア、ランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションの各層の研究開発を包括的に実施すべきであろう。その際、アプリケーションが最も重要であり、医療・環境・エネルギーなど国家として重要な応用領域を少数決定し、それらに導かれる形でプログラミングモデルとランタイムの研究開発を行うべきであろう。
・ドメイン特化言語については、プログラムの開発生産性を劇的に向上させうることから、わが国の産業構造上重要な組込みシステムや、CPS におけるセンサーデータの処理などの分野において、特に注目すべきであろう。新しいプログラミング言語については、良好に設計できたとしても、ランタイムの開発に要するコスト、プログラマーが習得に要する時間が技術的課題になるが、この方面の研究開発により緩和することが可能であると考える。
・今日サイバー攻撃は大きな社会問題になっているが、攻撃にはさまざまなソフトウエアの脆弱（ぜいじゃく）性が巧妙に利用されている。特に、急速に発展しつつあるスマートフォンや SNS(Social Networking Service)のプラットフォームは、攻撃者にとって魅力的な攻撃対象であり、新しい機能と共に新たな脆弱性を生み出している。こうした脆弱性をプログラミングモデルあるいはランタイムのレベルで排除しようとする試みもなされおり、例えば、Java 等のメモリーセーフ言語の設計、Perl や Ruby 等における汚染チェック(taint checking)の導入、等がある。プログラミングモデルあるいはランタイムにおいては抜本的な排除が可能であるだけに、この方面の研究開発を加速進展すべきであり、また、普及にあたっては政策的関与も検討すべきであろう。
・ビッグデータにおけるプログラミングモデルの研究開発については、大量のデータを所有する米国企業に勢いがあり、大きな利得となっている。他者からみればビッグデータへのアクセスが研究開発のボトルネックになっているといえる。Open Data が解消に大きな役割を果たす可能性もあるが必ずしも現時点で行方は定まっておらず、国としてもボトルネック解消に積極的に関与すべきであろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・Exascale コンピューターの構築を視野に、米国では DARPA が 2010 年に Ubiquitous High Performance Computing [4]および Ominipresent High Performance Computing [5]の二つのプログラムを相次いで開始したが、前者は第 1 フェーズの 2 年間で中絶し、後者は採択決定後に中止となった。現在は、エネルギー省が Exascale コンピューターの推進主

体であり、2011年にX-Stackプログラム [6]、2012年8月にFastForwardプログラム [7]、2013 年 11 月に DesignForward プログラム [8]、2014 年 11 月には規模も大きく本格的な CORAL プログラム [9]を開始している。ハードウエア、ランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションを包括したアプローチを採る。また、DOE にとって重要なアプリケーションを三つ選定し、それぞれにコデザインセンターを設立していることは注目すべきであろう。プログラミングモデルに着目すれば、例えば、X-Stack においてはドメイン特化言語ないしドメイン特化言語構成子が論じられており、FastForward では生産性高く GPU を利用するためのプログラミングフレームワークやコアモデルが追求されている。

- 日本も 2020 年をめどに Exascale コンピューターを構築することを目指しており、2014 年 10 月に理化学研究所より富士通が基本設計を受託した。生命科学、社会科学、製薬等の分野における重点アプリケーションを決め、ハードウエアとソフトウエアを協調設計するとしている。プログラミングモデルでは、分散メモリー環境を対象とした指示文ベースの並列言語 XcalableMP を開発しており、高性能の並列アプリケーションを容易に作成することができるとしている。
- ビッグデータにおけるプログラミングモデルについては、米国 IT 企業の研究開発が極めて活発であるが、こうした企業では、応用研究・開発と産業化がほぼ一体化している感があり、注目すべきである。また、先行牽引する Google は成果を論文として発表しているがソフトウエアをオープンソースとして公開しない場合もあるのに対して、Yahoo!は同等のソフトウエアをオープンソースとして成長させる方策を取り、エコシステムを構成して追撃している点も興味深い。モバイルコンピューティングにおける、Apple(iPhone)とGoogle(Android)の構図も同様に捉えることができるであろう。
- 動的スクリプト言語においては、ランタイムはインタープリターベースのもので普及が進んできた。Python や JavaScript においては、コンパイラーによる高速化が行われているが、それ以外の言語では実用的なコンパイラーが登場しなかった。仕様が極めて柔軟であるためコンパイラーの開発に多大なコストを要するのが理由と思われるが、そのような中、Facebook 社が 2010 年 2 月に PHP から C++へのトランスレーターを公開し、さらに、2011 年 12 月には動的コンパイラーをもつ HipHop Virtual Machine をリリースしたことは注目すべきであろう。

（6）キーワード

マルチコア、Exascale、ビッグデータ、大規模並列処理、大規模データ処理、データストリーム処理、モバイルコンピューティング、ドメイン特化言語、動的スクリプト言語

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ある程度の規模の研究者コミュニティーがあり、主要国際会議において一定の存在感を示している。
	応用研究・開発	○	→	・動的スクリプト言語に見られるように、ある程度の応用研究が行われている。
	産業化	○	↗	・ビッグデータあるいはモバイルコンピューティングにおいて見られるように、米国発のものではあるが産業化が積極的に推進されている。
米国	基礎研究	◎	→	・研究者の層は厚く、主要国際会議でも圧倒的存在感を示している。
	応用研究・開発	◎	↗	・ビッグデータあるいはストリーム処理において特に顕著であるが、産学が主体となり応用研究レベルは非常に高く、世界を牽引している。GoogleおよびYahoo!等の新興IT企業では応用開発と産業化は一体化している感がある。
	産業化	◎	↗	・モバイルコンピューティングにおいて特に顕著であるように、産業化の水準は極めて高く、他国の追随を許さない水準である。
欧州	基礎研究	◎	→	・欧州全体で見れば、研究者の層は厚く、主要国際会議でも米国に次ぐ存在感を示している。特に、理論的研究では拮抗している。
	応用研究・開発	○	↗	・プログラム言語の設計実装に伝統的な強みを持ち、近年では、エリクソンのErlang、スイス連邦工科大学のScala等、注目すべき成果がある。
	産業化	○	↗	・上記ErlangおよびScalaといった欧州発の技術の産業展開が進行している。 ・モバイルコンピューティングにおいても産業化は高い水準にある。
中国	基礎研究	○	↗	・主要国際会議での発表が見られるようになってきた。 ・2012年にはPLDIとECOOPが北京で開催されている。
	応用研究・開発	△	→	・新たなプログラミングモデルないしランタイムということでは注目されているものはないようである。
	産業化	○	↗	・大規模SNSサイトが存在することから、ビッグデータ等において、おそらくは米国発の技術の産業応用が進行しているものと思われる。
韓国	基礎研究	○	↗	・主要国際会議での発表が見られるようになってきた。
	応用研究・開発	△	→	・新たなプログラミングモデルないしランタイムということでは注目されているものはないようである。
	産業化	○	↗	・モバイルコンピューティングにおいて顕著であるが、米国発のものであるが産業化が貪欲に推進されている。

（註１）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル
（註２）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註３）トレンド
↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) High Productivity Computing Systems
http://en.wikipedia.org/wiki/High_Productivity_Computing_Systems
2) Jeffrey Dean and Sanjay Ghemawat, “MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters”, Proceedings of the 6th conference on Symposium on Opearting Systems Design & Implementation (OSDI’04), http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1251264
3) ISO/IEC 30170:2012　Information technology -- Programming languages – Ruby
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=59579
4) Ubiquitous High Performance Computing
https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=cbc05c86eb555a334708b570564dddca&tab=core&_cview=0
5) Omnipresent High Performance Computing
https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=f9690cdd66d51b00eda9eba2e16015d6&tab=core&_cview=1
6) X-Stack Program
http://www.xstack.org/
7) FastForward Program
https://asc.llnl.gov/fastforward/
8) DesignForward Program
https://www.nersc.gov/research-and-development/design-forward/
9) CORAL Program
http://www.energy.gov/articles/department-energy-awards-425-million-next-generation-supercomputing-technologies

３．４．４　システムソフトウエアとミドルウエア

（１）研究開発領域名

システムソフトウエアとミドルウエア

（２）研究開発領域の簡潔な説明

アプリケーションソフトウエアの実行環境や開発環境を提供する基盤ソフトウエアに関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システムソフトウエアおよびミドルウエアは基盤ソフトウエアともよばれ、あらゆるアプリケーションソフトウエアに対して動作基盤を提供するものである。基盤ソフトウエアはハードウエアとアプリケーションの中間に位置し、ハードウエアの提供する諸機能を抽象化し、アプリケーションによって利用しやすい形で提供している。そのため、ハードウエアが進化すれば基盤ソフトウエアも進化する必要があり、新たなアプリケーションが出現すれば基盤ソフトウエアも変化する必要がある。ハードウエアとアプリケーション双方の変化に影響を受けるため、その研究対象となる分野は多岐に亘る。

ハードウエアの進化という視点から見れば、GPU などのメニーコア・プロセッサの出現、ストレージクラスメモリーの出現などがドライビングフォースとなり、オペレーティングシステムを含めた基盤ソフトウエアのさまざまなレイヤーで著しい進化と変化が起きている。一方、アプリケーションの変化という視点で見れば、ビッグデータやそれに関連した新たな応用分野の出現により、基盤ソフトウエアそのものも大きな変革が迫られている。

多岐にわたる基盤ソフトウエア研究をまとめることは容易ではない。現在、主流となっている基盤ソフトウエア研究を分類すると、おおよそ次の 4 本の柱から構成されている [1)]。

クラウド環境および仮想化

クラウド環境では多数の計算機を運用・管理する必要があり、その管理・運用コストを削減するためのキーテクノロジーとして位置づけられるのが仮想化技術である。仮想化技術を用いると、複数の仮想マシンを集約し管理コストを削減したり、高負荷時には利用する計算機の台数を増加させたり、柔軟な運用・管理が可能となる。また、ライブマイグレーションを用いることによりサービスを停止せずに計算機の保守が可能となる。

仮想マシンを実現するためのソフトウエア階層を仮想マシンモニターと呼び、オペレーティングシステムより下位のレイヤーで動作する。米国 VMware 社、英国の研究プロジェクトに端を発する Xen、Linux に組み込まれている KVM など、多くの商用およびオープンソースの仮想マシンモニターが実用に供されている。従来仮想化可能ではないといわれていた Intel 社の x86 系 CPU の基本的な仮想化方式が 1990 年代末に確立し、2000 年以降から現在に至るまで I/O 仮想化の最適化、仮想マシン間の資源共有、ライブマイグレーションおよびその最適化といった多くの提案が活発に行われ、実用技術として次々と採用されている。

一方、PaaS (Platform As A Service) 型のクラウドではコンテナ型のオペレーティングシステムの利用も盛んになっている。さらに、クラウド環境に特化したオペレーティングシス

テムの開発も行われている。仮想マシンモニターの提供する保護機能等は、仮想マシン内のオペレーティングシステムも類似した機能を提供している。そこで、仮想マシンモニターが動作しているということを前提とし、オペレーティングシステムの機能を絞り込んだ OSv[2)] や Unikernels などが開発されている。

また、仮想化のためのハードウエア支援機構が他の目的に応用されている。例えば、Arrakis はネットワークサーバーに特化したオペレーティングシステムであり、デバイス仮想化のための機構を活用し、ネットワーク通信のオーバーヘッドを大きく削減することに成功している。

マルチコア・メニーコアやストレージクラスメモリーなど新しいハードウエアへの対応

ハードウエアの進化もシステムソフトウエア研究の起爆剤のひとつである。マルチコア・メニーコアといわれるプロセッサ、相変化メモリーなどのストレージクラスメモリーなど、新しいハードウエアへの対応も活発に行われている。

従来のオペレーティングシステムもマルチコアに対応しているものの、多数のコアを搭載するマルチコア環境にはスケールしにくい。米国マサチューセッツ工科大学で開発された Corey ではオペレーティングシステム内のデータ構造を工夫しスケーラビリティを向上させている。マイクロソフト・リサーチとスイス連邦工科大学チューリッヒ校で開発されている Barrel fish[3)]は、コア数に対するスケーラビリティ、GPU などのメニーコア・プロセッサを含むヘテロジニアスな環境への対応などを目指している。

GPU や Xeon Phi のようなメニーコア・プロセッサを第 1 級の資源として抽象化する試みも活発である。通常、GPU は外部デバイスとして扱われており、GPU 上で動作するプログラムからオペレーティングシステムの機能を利用できない。Guff's では GPU からファイルシステムを直接利用可能にし、シームレスな統合を目指している。

他にも、例えばストレージクラスメモリーに適したファイルシステムの研究なども行われている。従来のファイルシステムは、バイト単位でアクセス可能な低遅延デバイスであるストレージクラスメモリーには適さない。並行性制御という古典的な課題に対して、一連の命令列を不可分に実行するトランザクショナル・メモリーによるアプローチも研究されている。

ビッグデータの処理基盤

ビッグデータ処理では多量のデータをリアルタイムに処理する必要があり、そのための処理基盤の構築が求められている。ビッグデータ処理基盤はいくつかのソフトウエア階層から構成されており、機械学習や統計処理の並列化という上位層、そのためのプログラミング環境やプログラミング言語の整備、さらにそれらを支える大規模ストレージ、大規模分散並列処理のための資源管理、タスクのスケジューリングなどの低レイヤーでの処理もある。

システムソフトウエア研究は低レイヤーでの処理基盤から基本的なプログラミングモデルの提供までを守備範囲としており、その研究開発内容は 3.4.3「プログラミングモデルとランタイム」で述べられている事項と大きく重なっている。そのため、この項目に関しては 3.4.3「プログラミングモデルとランタイム」を参照されたい。

セキュリティーおよび信頼性向上技術

オペレーティングシステムやミドルウエアには高い信頼性が求められる。サンドボックスや Stack Guard などの動的な安全性対策の研究から、現在は、基盤ソフトウエアの不具合（いわゆるバグやセキュリティー・ホール）をコードレベルで検出するという手法へと研究開発の方向性がシフトしている。これはコードの検証・解析のために手法が発達してきたため、大規模ソフトウエアに対しても適用可能になってきたためである。さまざまなヒューリスティックスを併用しつつ、モデル検査、データフロー解析、ソフトウエアの疑似実行などの手法を、オペレーティングシステムなどの大規模なソフトウエアに適用するというアプローチが多い。

（４）科学技術的・政策的課題

・アプリケーションの実行を支える基盤という役割ゆえ、システムソフトウエアやミドルウエアに関する研究開発の成果は第三者からは見えにくい。しかし、新たな市場開拓につながるような斬新なアプリケーションの背後には、必ずシステムソフトウエア研究のイノベーションが潜んでいると認識しておくことが重要である。例えば、Google のような検索エンジン、Facebook のようなソーシャルネットワーキングサービスの背後には、システムソフトウエアの研究開発成果があるということを明確に意識すべきである。情報産業におけるイノベーションを生み出すためには、見えやすくわかりやすいアプリケーションにばかり注力するのではなく、そのイノベーションを支えるシステムソフトウエア分野にも注力する必要がある。

・システムソフトウエア研究の原動力のひとつは新しいハードウエアの出現である。日本のデバイス研究は世界的に見ても高い水準にあることを生かし、実用化研究の段階に入りつつある新たなデバイスを想定した研究開発を支援する体制が必要である。ストレージクラスメモリーのためのシステムソフトウエア研究などは強く支援すべきテーマである。システムソフトウエア研究という立場からすると、実用化に至る前のデバイスを対象に研究を行うことはリスクも大きく、政策的な支援がない限り積極的には取り組みにくい。特に、秘密保持の観点から新デバイスについての詳細情報を、組織を超えて共有することは難しく、組織をまたいだ有機的な研究チームによる研究開発が難しい。

・システムソフトウエア分野の研究開発には、ソフトウエアに関する知識や経験だけではなくハードウエアについての深い理解も必要となる。また、高度なプログラミング・スキルを必要とするため、システムソフトウエアの研究開発に携わることのできる人材を育成することは容易ではない。システムソフトウエアの分野は技術の進歩が早く、一線で必要となるスキルを大学等の教育機関単体ですべてカバーすることは現実的ではない。企業との連携による教育はすでに部分的に行われているものの、より踏み込んだ形での連携等も検討する必要がある。例えば、高等教育機関におけるカリキュラム策定や講義内容等について企業等が積極的に関与するような方向性も考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

クラウドの基礎技術は大きく進展をとげており、OSv などの新しいスタイルのオペレーティングシステムについて注目しておく必要がある。また、国産仮想マシンモニター

BitVisor やその派生技術にも注目しておく必要がある。

ビッグデータのための基盤技術は、Hivemall などの国内動向や Apache Spark[4]の今後の動向に注目しておきたい。ストレージクラスメモリーなどを利用した OLTP (online transation processing)[5] 技術も重要である。

マルチコアやメニーコア向けのオペレーティングシステムに関しては Barrelfish や GPU を活用したオペレーティングシステムやその仮想化などに注目しておきたい。

ソースコードやバイナリの解析技術は、一般のソフトウエア開発者が活用できる段階まで成熟していくにはまだ長い時間がかかると思われるものの、LLVM/Clang や S2E、Klee などのツール群の動向を見守る必要がある。

（６）キーワード

仮想化技術、クラウド環境、マルチコア・メニーコア、ストレージクラスメモリー、トランザクショナル・メモリー、大規模データ処理、ソフトウエア信頼性、セキュリティー

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	主要な国際会議等での発表件数等をみると、やや見劣りのする面がある。しかし、VPN Gate、Gum などの基礎研究の成果が評価の高い国際会議で発表されており上昇傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	Linux 等のオープンソースへの貢献が著しい。公的な研究機関における Hivemall 等のオープンソース活動は活発である。国際的にも一定の存在感を示している。
	産業化	○	→	システムソフトウエアは組込みシステムや制御システムとも深い関係があり、自動車やデジタルカメラなど世界的に大きなシェアを持つ製品や、鉄道等の社会基盤における存在感は大きい。
米国	基礎研究	◎	→	基礎研究における存在感は圧倒的である。MIT、 Stanford 大、Wisconsin大、UCSDなどにおける基礎研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	大学主導の研究がベンチャー企業等を通じて実用化される事例(Coverity など) や、Google、Amazon、Facebook 等の実運用経験から得られた知見に基づく応用指向の研究まで幅広い。
	産業化	◎	↗	情報産業を牽引する企業が次々と登場しており、骨太の基礎研究に支えられた新しいサービスの展開も活発である。
欧州	基礎研究	○	→	米国に比べると見劣りはするものの、国際会議等では一定の存在感を保っている。Xen や Barrelfish などの基盤ソフトウエア、S2E、Coccinelle などのツール群に強みがある。
	応用研究・開発	○	→	ソフトウエアの安全性基準策定などにおいて大きな影響力を有している。そのような背景から、ソフトウエアの検証技術に強い。
	産業化	○	→	自動車の組込みソフトウエアなどの技術開発は活発である。基盤ソフトウエア研究の成果が直接、大きな産業として成長しているようなケースはあまり見られない。
中国	基礎研究	○	↗	多くの論文が一流の国際会議に採択されるようになり存在感を増している。上海交通大学、MSRA などが強い。米国で学位を取得した研究者が帰国するようになりレベルの向上は著しい。
	応用研究・開発	△	↗	Baidu や Alibaba などのサービスが運用されており、応用研究がすすんでいる可能性は高い。上海交通大学発のソフトウエアが中国内のクラウドで利用されているという事例もある。
	産業化	○	↗	検索エンジンや電子商取引などの大規模なサービスが運用されており、産業化は順調に進んでいるといえる。
韓国	基礎研究	○	↗	最近になって急激に基礎研究のレベルが向上している。 SSLShader などの論文が一流の国際会議に採択されている。 Samsung からの支援もあり SSD 関連の層が厚い。
	応用研究・開発	△	→	スマートフォンなどの携帯端末向けの基盤ソフトウエア開発は活発に行われている。しかしシステムソフトウエア分野からみて特筆すべき応用研究や開発の話は特に見えていない。
	産業化	○	↗	スマートフォンなどの携帯端末に関連した産業は活発である。米国発の基盤ソフトウエアではあるものの、産業活性化のためにうまく活用している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド

↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) システムソフトウエア関係の国際会議報告（ACM Symposium on Operating Systems Principles, USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, USENIX Annual Technical Conference, ACM European Conference on Computer Systems など）
2) OSv – the operating system designed for the cloud. http://osv.io /
3) Barrelfish. http://www.barrelfish.org/
4) Apache Spark – Lighting-Fast Cluster Computing. https://spark.apache.org/
5) OLTP Database Systems for Non-Volatile Memory . http://istc-bigdata.org/index.php/oltp-database-systems-for-non-volatile-memory

3.5 IT アーキテクチャー

IT アーキテクチャーとは、外部的な要求や要件に応じて、最適な IT システムを構成するための設計思想と構成されたシステムの構造である。ハードウエア、OS、ネットワーク、アプリケーションなどのさまざまな要素技術や計算資源を有効に利用して要求された機能を実現し、性能や保守性などに関する要件を満足することが重要である。

IT システムは多くの互いに連携しあう構成要素からなり、またその設計・運用に多くのステークホルダーが関わる複雑なシステムである。そこでは「システムの構造・働きに関する共通理解」としてのアーキテクチャーの概念が極めて重要である。アーキテクチャーとは、IEEE 1471 2000 によれば、「コンポーネント、それらの相互のまたは環境との関係、およびその設計と発展をガイドする基本原則によって具体化されたシステムの基本的な構造」である（図 3.5.1）。

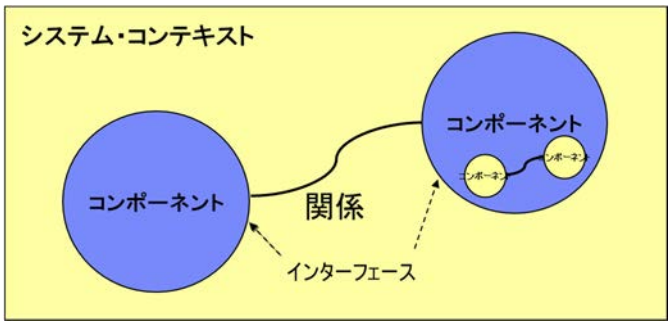


図 3.5.1 アーキテクチャーとは環境またはコンテキストとその関係を記述したもの

IT システムには、様々なレイヤーが存在し、そのそれぞれにアーキテクチャーが存在する（図 3.5.2）。コンピューターのハードウエアのレイヤーにおいては、メモリー、ストレージ、I/O などのアーキテクチャー、それらをつなぐチャネル・アーキテクチャー、バス・アーキテクチャーなどがある。ハードウエアとソフトウェアの界面はコンピューター・アーキテクチャーと呼ばれ、S/370 アーキテクチャーや、X86 アーキテクチャーなど、主に機械の命令セットによって特徴づけられる。ソフトウェアのレイヤーでは、Unix や Windows のような OS のアーキテクチャー、.NET や J2EE などのミドルウエア、ユーザーインターフェースをつかさどるフレームワークなども広い意味でのアーキテクチャーと考えられよう。現代では、IT は単体システムではなく、多くの場合に複数ノードからなるネットワーク・システムで構成されるが、このようなシステムにおけるアーキテクチャーとして分類されるものとしては、クライアント・サーバーや、Web アーキテクチャーなどがある。さらに上位のレイヤーとしては、ハード・ソフト・開発・運用などを含めた、組織レベルの IT 全体のアーキテクチャーとしてエンタープライズ・アーキテクチャーがあり、それはビジネス・アーキテクチャー、データ・アーキテクチャー、アプリケーション・アーキテクチャー、技術アーキテクチャー、ガバナンスなどから構成される。いずれのレイヤーにおいても、複数の構成要素と複数のステークホルダーからなる複雑なシステムにおいて、全体がシステムとしてスムーズに機能できるようにするための、共通の理解・取り決めを行うのが「アーキテクチャー」という概念である。

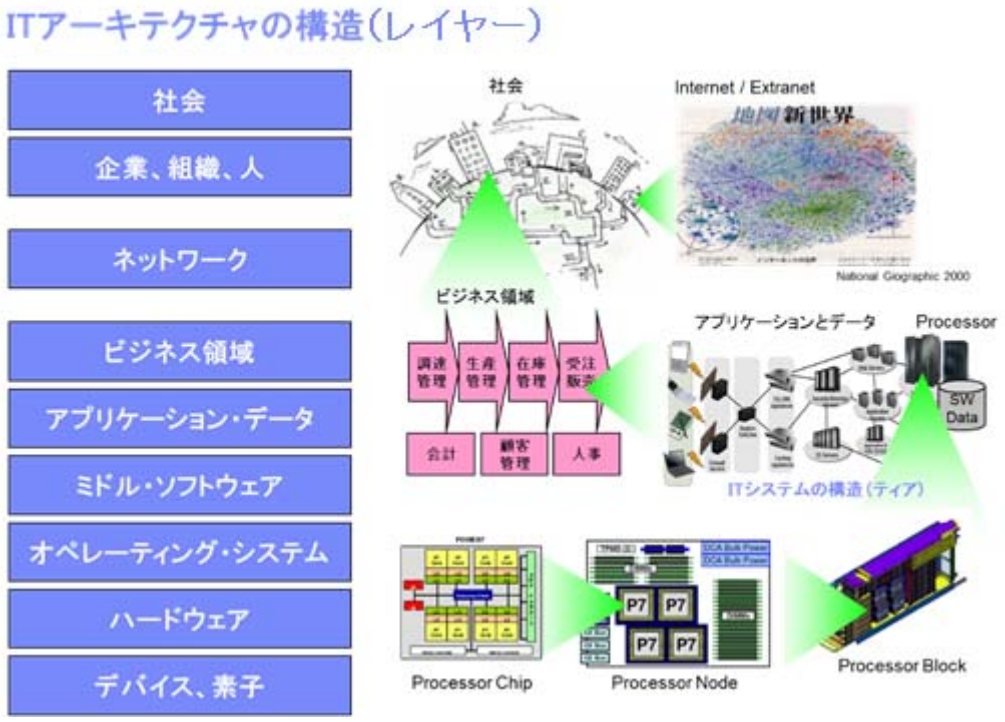


図 3.5.2 IT に関わるアーキテクチャーのレイヤー

良いアーキテクチャーは、わかりやすく見通しがよい。ステークホルダー間の誤解が少ないために、信頼性が高く、柔軟で高性能なシステムが構築できる。また、良いアーキテクチャーは接続する機器やソフトウェア提供者などの新たなプレーヤーを引きつけ、その結果周囲にエコシステムを形成する。したがって、良いアーキテクチャーを持つことは、産業競争力の上からも重要である。にもかかわらず、IT 業界で主流になったアーキテクチャーのほとんどは米国発である。今までの我が国における研究開発の主眼は差別的な要素技術の開発にあり、アーキテクチャーへの研究開発投資が軽視されていたきらいがある。

アーキテクチャーに関する研究開発投資が積極的になされてこなかった理由の一つは、「アーキテクチャー」という抽象的な概念が研究分野（ディシプリン）として成り立ちにくいことにあるかもしれない。要求分析、機能の分割とモジュール化、細部の隠蔽、利用方法の再利用としてのデザインパターン、非機能要求の実現など、レイヤーやドメインによらず有効とされる共通の方法論は存在するし、レイヤーやドメインに依存するものの、アーキテクチャーを記述する言語や、それを検証するツールなども研究の対象となってきた。しかし、アーキテクチャーの成功・失敗は、そのアーキテクチャー自体の良しあしだけでなく、産業上の力関係や政治力も関係するため、個別のアーキテクチャーの事例研究は可能だとしても、アーキテクチャーという抽象的な概念だけを対象にした科学的な研究は成り立ちにくい。

このため、本俯瞰区分においては、現在重要性を増しつつある６つの具体的アーキテクチャーに焦点を当て、それらの研究開発動向と課題を俯瞰する。アーキテクチャーという概念

を網羅的に捉えるものではないが、IT 分野全体のアーキテクチャーの流れを捉えようとしたものである。

IT 分野全体の歴史を俯瞰したとき、アーキテクチャーという概念が適用される領域は、IT が世の中に広く行き渡るにつれて大きく拡大していることに気づく。

IT 分野で「アーキテクチャー」という語が最初に使われたのはメインフレームの System/360 であり、それはハードウエアとソフトウェアの界面、すなわちコンピューター・アーキテクチャーを指していた。従って、IT 分野で「アーキテクチャー」というと狭義でコンピューター・アーキテクチャーを指すことも多い。その後、アーキテクチャーの概念は複雑化するハードウエアの部分アーキテクチャーに適用されるとともに、ソフトウェアや複数システムからなるクライアント・サーバーや３ティアとも呼ばれる Web コンピューティングと発展してきた（図 3.5.3 中段）。現代のコンピューター・アーキテクチャーは、急速に高密度化・高速化する半導体技術と、ますますバンド幅を増すネットワーク技術に大きく影響されている。いわゆる「ムーアの法則」により指数関数的に性能が上がってきた半導体技術であるが、電力消費密度などの限界により、1 コアの性能向上は頭打ちになってきている。そのために、高い性能を必要とするコンピューターシステムは、マルチコア化し、さらに複数のノードを高速に結ぶことによってクラスタ化してきている。仮想化や高度なシステム管理技術と組み合わせることにより、現代の典型的なデータセンターは、数千、数万を超える大量のノードから構成される巨大な計算機複合体となっている。その一つの具体例は Amazon Web Services に代表されるクラウドコンピューティングである。

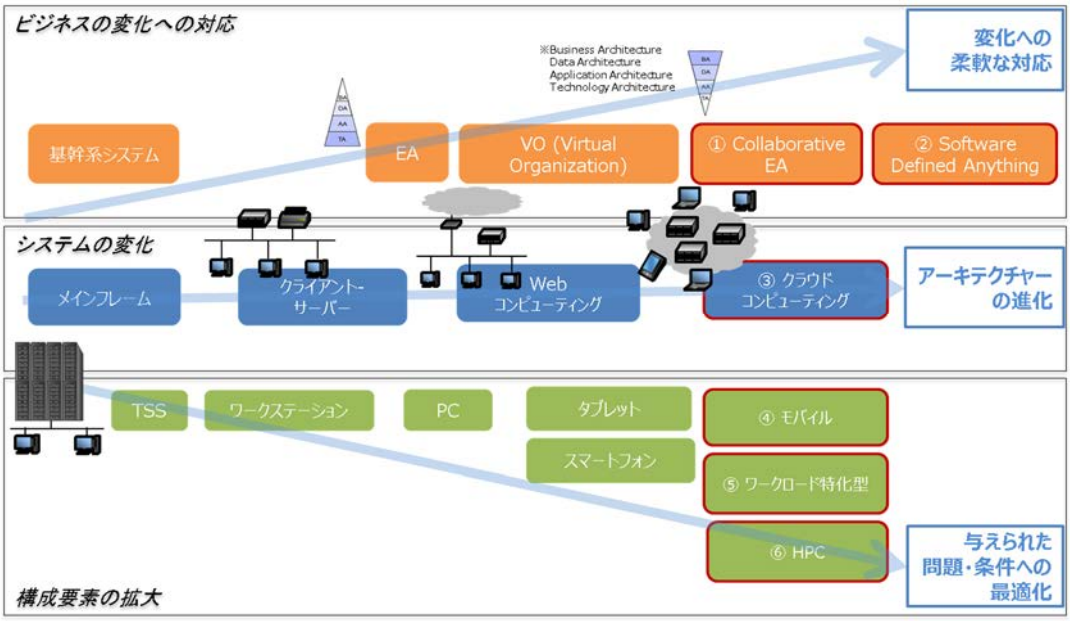


図 3.5.3 IT アーキテクチャー俯瞰図
（最適化と適応という２つのドライバーによるアーキテクチャーの進化）

加えて、アーキテクチャーの概念の多様化がなぜ起きてきたのかを考えてみると、最適化と適応という２つのドライバーが見えてくる。

まず、最適化からドライブされるアーキテクチャーについて考えてみよう（図 3.5.3 下段)。多様化した計算機構により、端末側では、2014 年現在において、今までの PC に変わって端末の主要なプラットフォームになりつつあるのがスマートフォンに代表されるモバイルプラットフォームである。この世界では、Apple の iOS と Google の Android が主要な勢力であり、これらのプラットフォームの上で動くローカルアプリとネットワーク上のバックエンド（クラウドサービス）とを組み合わせたシステムの構成が典型的になりつつある。

IT 利用領域の多様化に呼応するアーキテクチャー上の一つの大きな流れは、1 種類の汎用計算機で多様なワークロードを処理するのではなく、ワークロードごとに特化したアーキテクチャーのあり方である。ハードウエアのレイヤーでは、グラフィックス処理に特化した GPU とそれの汎化である GPGPU、信号処理に特化した DSP などがあり、またソフトウェアのレイヤーでは大量のデータセットを並列処理するための MapReduce、特定のデータ検索パターンに特化したデータベースである KVS (Key-Value Store)、イベントのストリーミング処理に特化した CES (Complex Event Processing)などのアーキテクチャーがある。

ワークロード特化型アーキテクチャーの一分野として特に科学技術計算においては、「第 4 の科学」と呼ばれるデータ中心科学がサイエンスの方法論として定着しつつあり、このために必要なスーパーコンピューターの必要性が高まっている。このようなハイパフォーマンスコンピューティングのアーキテクチャーも、それぞれが主に対象とする分野によって、異なる最適化が行われていて、アーキテクチャーの多様性が高まっている。

一方、IT のアーキテクチャーは同時に、ビジネスの変化に対応できるものでなければならない（図 3.5.3 上段)。IT は 1960 年ころから企業の給与計算や会計処理に使われるようになり、そこではバッチ処理に基づくトランザクションが主なワークロードであった。このような応用においては環境の変化は相対的に遅く、いったん開発されたシステムは長期にわたって安定運用することが求められた。しかし現代の IT は急速に変化するビジネス環境への対応が挙げられる。これをアーキテクチャーの観点から取り組もうとしたものがエンタープライズ・アーキテクチャーで、IT をビジネスの主力ツールの一つとして位置づけるためには、現代では必須の考え方である。

また、計算機システム自体が、要求の変化に柔軟に対応できるように考えられたアーキテクチャーとして、クラウドコンピューティングに加えてソフトウェア定義型アーキテクチャーという考え方が台頭している。

以上の観点から、本俯瞰区分においては、現在重要性を増しつつある以下の 6 つの研究開発領域に絞ることにする。

1. エンタープライズ・アーキテクチャー（EA）
2. ソフトウェア定義型アーキテクチャー
3. クラウドコンピューティング
4. モバイルコンピューティング
5. ワークロード特化型アーキテクチャー
6. ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）

現代の IT が抱える主要な課題が、その裾野の広がり（多様化）と、変化する環境への対応にあるとするならば、これら６つのアーキテクチャーを横串に見ることにより、関連する研究開発の方向性を俯瞰できるものと考える。

なお、本区分領域において考える「システム」とは、機能特化した構成要素を組み合わせて構築する還元論的なアプローチによるが、生体のように基本的には同一の能力を持つ構成要素が多数集まることによって創発的に全体機能を発揮するようなシステム構築のアプローチも今後研究されていくであろうことを付記する。

３．５．１　エンタープライズ・アーキテクチャー

（１）研究開発領域名

エンタープライズ・アーキテクチャー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

企業や府省自治体など社会的な役割を果たしている組織（エンタープライズ)の業務(またはビジネス)とそれを支える IT システムにおいて、現在の構造(アーキテクチャー)とあるべき構造をモデルにより可視化することで、相互のギャップを減らし、組織におけるアーキテクチャーの全体最適を実現、維持し続けるための方法論の研究、構築、実践

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

エンタープライズ・アーキテクチャー（以下 EA）は、米国 IBM のビジネス・システムズ・プランニング(BSP)コンサルタントであった John A. Zachman(ザックマン)によって 1987 年ごろ提唱されたといわれている。Zachman は EA の父といわれており、氏の EA フレームワーク [1]は、マトリクスの縦に組織内の利害関係者(Stakeholder)であるプランナー、経営者、設計者、開発者、作業担当者などを列挙、横には情報、機能、場所、組織、時間、動機などを 5W1H 的に配置し、各交差した場所には最適なモデルが存在するとしたものであった。氏の主張は、一つの組織の中にはさまざまな関心事(concerns)を持つ利害関係者がおり、業務と IT システムをそれぞれの立場(View Point)にとって最適なモデルで可視化しコミュニケーションしなければ、組織全体の最適化は困難だということであった。

その後、米国では 1996 年に、政府 IT 調達で各府省に EA の策定が義務化(Clinger-Cohen Act)され、調達先企業にも EA の構築が必要となり広く普及した。また 2002 年の SOX 法(米企業改革法)による内部統制強化施策も普及に対する大きな推進力となった。EA フレームワークの例として、米国連邦政府の CIO カウンシルが提唱している FEAF（Federal Enterprise Architecture Framework）[2]や、米国防省の DoDAF（US Department of Defense Architecture Framework）[3]が広く知られている。

2011 年にはグローバル標準化団体の The Open Group（TOG)が EA の構築方法論 TOGAF（The Open Group Architecture Framework）の新版 V9.1 [4]を公開している。TOG は、TOGAF をベンダー非依存でオープンな EA 方法論であるとしており、定期的にコンファレンスを開催、SOA(Service Oriented Architecture)やクラウドコンピューティング、セキュリティーにも言及している。また、EA のモデルを拡張 UML（Unified Method Language：統一モデリング言語）で表記することも推進している。日本にも TOG 支部 [5]が活動しており EA の普及を継続している。

日本では、不適切な政府調達（１円入札など）の改善や e-Japan 計画、そして 2002 年の某金融機関統合における大規模システム障害などから IT ガバナンスの重要性が大きく認識され、FEAF を参考にした政府の EA である「業務・システム最適化計画」[6]が 2003 年より開始された。その後、EA は多くの日本企業でも採用が進んでおり、特に金融機関 [7]、大手製造業などで盛んに推進されてきている。また、2013 年には政府 CIO 法の成立により IT 総合戦略室、政府 CIO が正式に設置され、府省横串での業務・システム最適化に貢献しており、マイナンバー制度の実現、オープンデータ活用なども推進されている。総務省による

自治体 EA 業務・システム刷新の推進もおこなわれている。

昨今さらに EA が重要になってきたのは、業務やビジネスと IT システムの機能を一致させることがますます困難な時代になってきたためである。ビジネス環境は急激に変化し、それに対応するため経営者は朝令暮改で方針を変更する機会が増している。かたや IT 技術は日進月歩であり、ますますそのスピードを上げている。例えば数年前、Linux は Web のフロントシステム程度しか使用できなかったものが、いまや基幹系の DB システムでも利用され、さらに自らは資源を保有しないでよいクラウドコンピューティングも急速に普及している。加えて、業務を支えるアプリケーション・システムはますます複雑化してきている。そのため、システム構築に長い時間がかかり、機能の追加修正も大きな負担がかかる。しかし「良いアーキテクチャーは時代の変化に強い」。例えば汎用計算機 IBM S/360 アーキテクチャー(1964 年発表)、某金融機関の基幹系システム[7](1987 年稼働)、IT ではないが新幹線(1964 年開業)やジャンボジェット機(1969 年就航)など、良いアーキテクチャーを構築したことで数十年に亘って、ビジネス要求の変化、適用する技術の変化をすばやく吸収することができている。「良いアーキテクチャー」に基づくシステムは、場当たり的な増改築やスクラップ・アンド・ビルドに比べ、費用、期間、トラブルを大幅に削減することが可能である。EA を用いることで長期に亘って業務・IT システムの「良いアーキテクチャー」を構築し、あるべき姿に向けて各プロジェクトをアーキテクチャー統制(ガバナンス)することで、ビジネスや IT 技術の激変に対応し、全体最適を実現できる。

EA におけるアーキテクチャー・モデルは図 3.5.4 左に示すように、ビジネス・アーキテクチャー(BA)、データ・アーキテクチャー(DA)、アプリケーション・アーキテクチャー(AA)、テクノロジー・アーキテクチャー(TA)の 4 階層構造として関心事を分離して構築していく。また、それぞれの現時点(As Is)モデル、あるべき理想(To Be)モデルを策定、そして中期計画などで達成しえる(Can Be)モデルを設定することもある。この 4 階層 3 世代全てを一度に可視化し統制することはなかなか困難であるため、喫緊の経営課題にふさわしい領域から着手し、他へ広げていくことが行われている。EA を実践するための最低条件は、エンタープライズの課題領域のモデル化、あるべき姿と移行計画、そして移行を推進するため各プロジェクトに対してのアーキテクチャー統制(ガバナンス)の仕組みである。

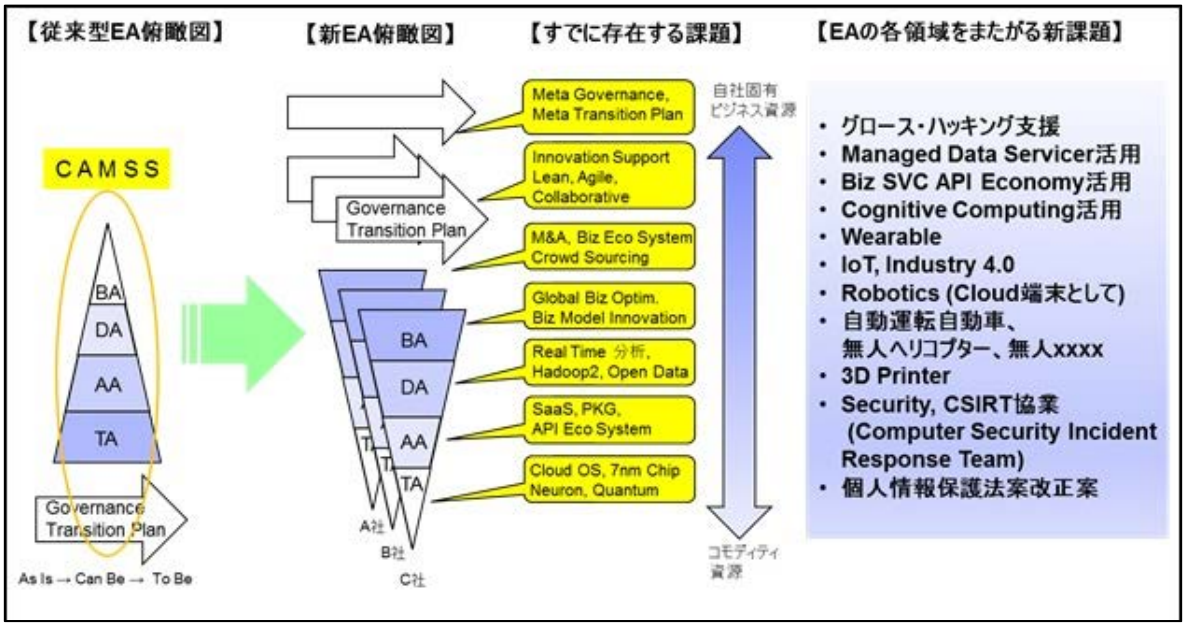


図 3.5.4 EA 俯瞰図

ビジネス・アーキテクチャーでは業務のアーキテクチャーを業務機能コンポーネントとそれらの相互関係で表現し重複や最適化を見いだす手法(CBM [8]：Component Business Model)や、変化に強く最適なビジネス・プロセス・モデル (BPM)を構築し、BPMN (Business Process Modeling Notation)などを用いてシームレスに IT システム化していく手法 [9]が注目されている。BABOK [10]や BIZBOK [11]などの各 BOK (Body of Knowledge: 知識体系)、OMG の BMM (Business Motivation Model) [12]との連携も模索されている。

データ・アーキテクチャーでは従来の基幹系システムを念頭においた概念エンティティ関連図(ER Diagram)やデータフロー図に加え、DMBOK [13]との連携も必要となっている。さらにはソーシャルネットワーキングサービス(SNS)の「つぶやき」や CRM(Customer Relationship Management)の音声記録など非定型のいわゆるビッグデータをどのように可視化し最適に扱うべきかが注目されている。

アプリケーション・アーキテクチャーは、業務アプリケーションをコンポーネントとして扱い、機能ポートフォリオの把握や、アプリケーションの乱立を防ぐために総数の削減をモデルで検討することが鍵となる。さらには各部門がかってにクラウドコンピューティング上のアプリケーションを API(Application Programming Interface)経由で活用する時代に、どう対応するかが求められてきている。

テクノロジー・アーキテクチャーではサーバー、端末、ソフトウェア、データベース、ネットワークなど IT コンポーネントの配置や接続トポロジーを管理する。またテクノロジー動向調査を定期的に実施し、昨今注目されている CAMSS といわれているクラウドコンピューティング(C)、ビッグデータ分析(A)、モバイル(M)、ソーシャル技術(S)、セキュリティー(S)など多面的な領域の技術革新をいかに最適に採用していくか、その時期はいつなのかの判断を行う。

アーキテクチャー・ガバナンスと移行計画では、その組織がどのような方針に基づいて EA を構築し推進していくのかを示す原理原則 (Principles)を文書化し利害関係者が共通認

識に立つことが重要である。そして経営戦略や IT 戦略から想定される「あるべきアーキテクチャーの姿」を可視化し、各プロジェクトに対して全社最適に近づけるためのアーキテクチャー統制を行うことでその移行を実現していく。従来から課題となっている部門個別最適からの脱却、共通仮想サーバーへの集約、SOA による共通サービス活用の推進に加え、新規事業創出、急速なグローバル化、統合、合併、分割などにおける貢献、さらにはブレーキ役の統制からイノベーションを推進するアクセル役となるための新たな EA イニシアチブと EA 人材育成も求められている。

（４）科学技術的・政策的課題

従来型の EA では一組織内の基幹系システムと部門分散システムを前提として全体最適を目指した。しかし、図 3.5.4 左のように CAMSS の適用で全体最適を図ろうとすれば EA の 4 層全体に同時に影響を与えることになる。加えてこれからの EA は図 3.5.4 右に示すような大きな変化にさらされると考えられる。各層では、それぞれ新たな変化を必要としており、TA 層はますますコモディティ化し、自社自組織固有のビジネス資源は DA、BA 層にシフトしていく。さらには CAMSS だけでなく EA の 4 層をまたがる新課題がすでにいくつも見えてきている。これらは従来型の EA だけでは対処しがたく、したがって、移行計画も、それを実現するためのアーキテクチャー統制も変わっていかねばならない。しかし新時代の EA は方法論化やパターン化がまだ確立されておらず、ベストプラクティスすらこれから収集する段階にある。今後の 4 層の重要度を図に反映すると、従来の EA の単一の三角形俯瞰図は、複数組織の逆三角形の俯瞰図に変わっていかねばならない。EA 自身が変化できずイノベーションのジレンマ[14]を引き起こすことがないよう、従来型の EA 方法論やベストプラクティスに加えて、以下のような 7 つのテーマを研究し、その構築と実践が必要である。

① ビジネス形態の多様化への EA 支援

従来型の EA では一組織の全体最適をスコープにしていた。しかし昨今では企業のグローバル化が一気に進み、企業買収(M&A)もグローバルレベルで頻繁に行われている。さらには、従来のケイレツやサプライチェーンとは異なった緩やかなビジネス・エコシステムの構築や、CSV (Creating Shared Value) [15]として「企業の事業活動を通じて社会的な課題を解決していく経営理念」も推進され、他の企業や社会との関係も劇的に変化してきている。M&A 時点の EA[16]や、一時的に企業が連携しあう仮想企業(Virtual Enterprise)における EA の研究[17]もなされてきている。これらを加速し、グローバル企業買収における EA 自身の速やかな統合や、複数社をまたがるビジネス・エコシステム全体の仮想 EA(Virtual EA)のあり方など、一段上位(メタレベル)の EA ガバナンスと移行の考え方、パターン化を新たに構築していく必要がある。

② 統制型からイノベーション支援型への EA 変革

近年の IT イノベーションのスピードは目を見張るものがある。クラウドコンピューティングとして Amazon S3 が市場に登場したのは 2006 年、iPhone によってスマートフォンが急拡大を始めたのは 2008 年、そして SNS がブレークしたのは 2010 年頃で、どれもがわずか数年前に始まったことである。また、従来型の EA では、アーキテクチャー全体最適とし

て SOA が大きなテーマであったが、クラウドコンピューティングの時代にあって他社の共通サービスを API 経由で素早く連携してイノベーションを起こすようにするためには、SOA 自身も Web Services 形態から REST 形態に移らざるをえない[18]。EA 自身がプロアクティブに変革をおこなえる必要がある。

IT イノベーションが加速する時代にあって、EA は従来のブレーキ役としての「文鎮」型アーキテクチャー統制から、さまざまなチャンスで組織に刺激を加える「ガスレンジ」型、かつ沢山のイノベーションの種を撒いて育てる「農業」型へ自身を変革していかねばならない。そのために EA に組み込むべき IT パラダイムシフトとしては、1) 仮想化やモバイルによる場所の非依存 2) インターネットによるグローバル障壁の破壊 3) クラウドコンピューティングによる「作る」から「借りる」への変化 4) SNS や App Store のようにトップダウンからボトムアップへの力の変化 5) オープンで相互操作性が高いことの重要性（TOG では Open Platform 3.0 [19]としている）などを挙げることができる。これらはすでに MoT(Management of Technology) やイノベーション自身のアーキテクチャー[20]とプロセス[21]で研究されていることであり、早急に MoT の考え方やイノベーション・アーキテクチャーとイノベーション・プロセスを EA 方法論に組み込んでいく必要がある。この時に重要なのは、MoT でよく話題にされるモジュール型(新結合による素早いイノベーション)とインテグラル型(擦り合わせによる独自の付加価値の埋め込み)の考え方 [22]である。なぜなら TA、AA はますますモジュール型、DA、BA はますますインテグラル型に価値をシフトしていくと予想されるからである。

③ EA の 4 層をまたがった方法論

従来の EA であれば比較的穏やかな業務・システムの進化のなかで、TA 中心のみでアーキテクチャー統制をおこなうこともでき得た。しかし、前述のように急激に進化している CAMSS では TA 一層だけでは満足に対応できない。4 層の領域をまたがった(Interdisciplinary な）方法論や、同時にアーキテクチャーを表現し設計できる方法論が必要となってきている。オランダの産学官プロジェクトで開発された EA モデリングツールである ArchiMate [23]を TOG の元で進化させ、BA、DA、AA、TA を同時に拡張 UML でシームレスに表現しようという試み [24] も始まりつつある。

④ 経営への EA 効果のさらなる可視化

EA の費用対効果の経営への説明責任は従来の EA でもある程度確立されており、そのベストプラクティスも企業レベルの SOA の領域では公開 [25]されてきている。しかし昨今では各組織の自主性と企業全体が目指す方向を調和させるホロニック・マネジメント(革新的総合経営: 日本能率協会 岡田潔)も提唱されており、すべてがトップダウンで指示される時代ではなくなってきている。トップダウンによる朝令暮改の経営戦略への素早い対応と、各部門の変革を同時に予測し、あるべきアーキテクチャーのロードマップをプロアクティブに策定推進することが経営から求められている。そして、その成果を EA 効果として測定し、経営にアピールするための方法論が新たに必要とされている。

⑤ 重厚長大な EA から、Lean、Agile、Collaborative な EA への変革

従来から EA の構築は高度な人材と時間を大量消費とするといわれており、例えば数年がかりで全社のデータを洗い出し、整理し、詳細にモデル化することも行われてきた。しかしビジネスも IT も大きく変化している時代にあっては、いったん整理されたモデルも日々大きく変化していかざるを得ない。今後、Lean、Agile、Collaborative な EA[26] を目指す必要がある。

Lean はトヨタ生産システムにおける「KANBAN を用いて川下から川上へプッシュし、無駄をなくす」思想である。EA で活用する価値のある成果物とルールのみ構築し、無駄な成果物や中間成果物に時間と人材を費やさない仕組みを必要としている。例えば KANBAN 方式を TOGAF V9 の ADM (Architecture Development Method) に取り入れた EA KANBAN メソッドを策定し、アーキテクチャー・バックログを見ながらジャストインタイム・モデリングをおこなうことも提案されている。

Agile はアジャイル開発方法の SCRAM や Sprint の思想をアーキテクチャー構築に取り入れアーキテクチャー・スクラムをおこなうことで、待ち時間やアーキテクチャー・レビュー時間を大幅に削減し、モデルと実装の整合性を常に確保する試みである。

Collaboratibe EA は、EA 専門家や経営からのトップダウンの指示に従う流れを変えて、ソーシャル的にボトムアップで自己組織型(self-organizing forces)の EA を実現する方式である。例えば 社内 SNS や社内ポータルサイトを活用して全利害関係者間で、それぞれの立場の違いや専門分野の深い知識を(週一の会議ではなく)素早く交換し、新たなアーキテクチャー課題を検討しあう仕掛けがあり得る。社内の多くのスペシャリストに開かれた EA-CoE(Center of Excellence)を構築する方法論が必要である。

⑥ EA の進化に直接貢献できる、EABOK(EA Body of Knowledge)の充実

2004 年に米国の企業 MITRE 社[27]が EABOK を構築し Web 公開した。しかし自社の社員への普及啓発が主目的であったため、だれでもがその更新に参加できるわけではなかった。しかし 2012 年、これをベースに EABOK コンソーシアム[28]が新たに設立され理事会や提案規則などが決定された。EABOK の定義として”A guide to and collection of ready-to-use knowledge that describes the essence of enterprise architecture.”とうたってはいるが、内容の充実は今後の課題であり、2014 年 5 月のワークショップではそのために参加者の協働を求めている。この活動に期待するかどうかは別としても、今の時代に適合した EABOK を至急構築し、体系立って本節の①～⑤、⑦を実現させることは EA の進化に必須である。

⑦ エンタープライズ・アーキテクトの育成

この EABOK コンソーシアムでは EA 専門職(Profession)のあるべき姿もディスカッションされつつある。EA 人材育成は EA 関連誌でも話題[29]となっており、また IT アーキテクトを体系づけた ITABOK[30]でもエンタープライズ・アーキテクトの位置づけを示している。専門領域がますますサイロ化される中、ビジネスと IT の両面に精通し、鳥瞰的な視野で将来を見通せるエンタープライズ・アーキテクトの育成はなかなか困難であり、育成方法確立と実践は重要な課題となってきている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

以下のような、ベストプラクティスやモデルの創出、投資対効果の明確化、標準化、人材育成、政策などに、今後注目する必要がある。

・海外進出、M&AにおけるEA統合、現地適用、統制と自治のベストプラクティス
・ビジネス・エコシステムにおけるメタレベルEA、仮想EAのベストプラクティス
・イノベーション支援型EAの研究、構築とベストプラクティス
・CAMSSの時代にふさわしい新たなEAの確立とEA投資対効果の可視化
・The Open Group における Open Platform 3.0 の標準化動向
・TOGとArchiMate によるEA4層間のシームレスなモデル表現の普及
・TOGAF V9.1 の普及状況と次期バージョン
・EABOKコンソーシアムなどによるEABOKの充実
・エンタープライズ・アーキテクトの育成（教育カリキュラムやシラバスへの組み込み）
・政府IT総合戦略室および政府CIOの活動、総務省による「自治体EA 業務・システム刷新」の推進、マイナンバー制度の開発、オープンデータの活用

（６）キーワード

エンタープライズ・アーキテクチャー、全体最適、部分最適、ビジネスと IT のギャップ、ビジネス・アーキテクチャー(BA)、データ・アーキテクチャー(DA)、アプリケーション・アーキテクチャー(AA)、テクノロジー・アーキテクチャー(TA)、移行計画(Transition Plan)、アーキテクチャー統制(ガバナンス)、投資対効果、クラウドコンピューティング、ビッグデータ分析、モバイルコンピューティング、ソーシャルネットワーキングサービス(SNS)、情報セキュリティー、CAMSS、Lean、Agile、Collaborative EA、センター・オブ・エクセレンス(CoE)、ビジネス・エコシステム、仮想 EA、メタレベル EA、イノベーション、マネジメント・オブ・テクノロジー(MoT)、サービス指向アーキテクチャー(SOA)、M&A、グローバル進出、EABOK、BABOK、BIZBOK、BMM、DMBOK、ITABOK、TOG(The Open Group)、TOGAF、EA 人材育成、政府 CIO

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究・応用研究・開発	△	→	・EAはMoTや専門大学のカリキュラムに若干組み込まれている程度 ・TOG日本支部でのTOGAF V9 普及活動 ・IIBA日本支部の活動として、IASA(An Association for all IT Architects)日本支部を2014年9月に立ち上げ、EAを含むITABOKを普及開始
	産業化	◎	↗	・金融機関、自動車製造業、電機機器製造業、IT関連企業など大手企業を中心に構築運用がなされている。三菱東京UFJ銀行、トヨタ自動車、日産自動車、パナソニック、SONY、オムロン、エーザイ、日揮など多数がWeb、公開セミナー、IT関連誌でEAの実践を公表している ・しかしTA、AAが中心でDA、BAを手掛けている企業はないわけではないが少ない。全4層にわたって最適化を図るための経営の理解、および費用と人材が不足している ・CAMSS時代のEAはまだ模索の段階である ・2013年政府CIO法成立。IT総合戦略室、政府CIOが法的に設立され、各府省のITを横串で管理し、全体最適に貢献 ・総務省による「自治体EA 業務・システム刷新」の推進 ・マイナンバー制度の開発、オープンデータの活用が開始されている
米国	基礎研究・応用研究・開発	◎	↗	・米国政府主導でさまざまなEAガイドラインやレファレンスモデル、EA成熟度モデルが存在し、積極的に活用されている ・EABOKコンソーシアムが設立され、BOKとして充実し始めている
	産業化	◎	↗	・米国政府のIT関連調達の前提となっており、構築運用が盛んである ・2009年政府CIO制度を公式発表。CIOカウンシル(CIO.GOV)ではクラウド等国民のイノベーション支援を、ペーパー公開などを通じて行っている ・IBM、HP、Intel、NASA、Bank of America、Fidelity、Boeing、Ford、Coca Colaなど多数の企業が公開セミナーやIT関連誌でEAの実践を公表している
欧州	基礎研究・応用研究・開発	◎	↗	・TOGはグローバル標準化団体であるが標準化に熱心である欧州や英国などの力が大きく働いている ・オランダの産学官で開発されたEAツール ArchiMateはTOGAF認定のもと拡張UMLでBA、DA、AA、TAをシームレスに表現できるよう進化 ・2012年にはドイツとタタのコンサルタントによるEnriching EA with Lean、Agile、and Enterprise 2.0 Practices[26]が提唱されはじめた
	産業化	◎	↗	・欧州ではEAの重要なアーキテクチャー・パターンであるSOAで早い段階からEnterprise SOA[31]の考え方が実践されている。UK StandardLif、Deutsche Post、Winterthur、Credit Suisse、英国Halifax Bank of Scotlandなどで全社最適化のためのSOA事例が公開されている ・上記SOA事例をはじめ、デンマーク商業企画庁、Volvo、DuPontなど多数の府省、企業が公開セミナーやIT関連誌でEAの実践を公表している
中国	基礎・応用・開発・産業化	△	↗	・大手企業ではスタディーされているが、金融機関などでは超巨大な基幹系システムを維持しなければならないこと、近年IT産業に民間資本投入が可能になったこと等から、今後活用されていくものと考えられる[32]
韓国	基礎・応用・開発・産業化	◎	↗	・Government-wide Enterprise Architecture(GEA) は政府一体でEAを活用しe-Government戦略を実現する力強い活動となっており[33] 1,400の政府系機関が保有する15,000のシステムをマネージしている ・例として、多くの府省で共通して活用される「立法支援システム」は2009年にはすでに完成しており、広く国民にも開放されている[34] ・早稲田大学電子政府・自治体研究所による2014年5月の「2014 年世界電子政府 ランキング」[35]の調査結果では１位 米国、2位 シンガポール、3位 韓国、4位 イギリス、5位 日本 となっている ・国連電子政府ランキングにおいて韓国は3期連続首位を維持している[36]

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ZACHMAN INTERNATIONAL、About the Zachman Framework、(Oct. 9、2014)、
http://www.zachman.com/about-the-zachman-framework
2) Office of Management and Budget、Federal Enterprise Architecture、(Oct 9、2014)、
http://www.whitehouse.gov/omb/e-gov/fea
3) U.S. Department of Defense、DoDAF、(Oct. 9、2014)
http://dodcio.defense.gov/TodayinCIO/DoDArchitectureFramework.aspx
4) The Open Group、TOGAF V9.1、(Oct. 8、2014)、
http://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/
5) The Open Group、オープン・グループ・ジャパン、(Oct. 9、2014)、
http://www.opengroup.or.jp/
6) 総務省、業務・システム最適化の推進、(Oct. 9、2014)、
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/gyoukan/kanri/a_01-02.html
7) 日本アイビーエム株式会社、お客様事例　三菱東京 UFJ 銀行、(Oct. 9、2014)、
http://www-06.ibm.com/jp/solutions/casestudies/20121002btmu.html
8) WIKIPEDIA、Component Business Model、(Oct. 9、2014)、
http://en.wikipedia.org/wiki/Component_business_model
9) Oscar Barros; Alejandro Quezada、Integrated Modeling of Business Architecture and Process Design with BPMN: Application to Hospitals、Journal of EA、2014 Vol.10 Number 1、pp. 7-15.
10) IIBA、A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge® (BABOK® Guide) Version 2.0、2010.
11) BUSINESS ARCHITECTURE、BizBOK Guide、(Oct. 9、2014)、
http://www.businessarchitectureguild.org/
12) OMG、Business Motivation Model (BMM)、(Oct. 9、2014)、
http://www.omg.org/spec/BMM/
13) DAMA International、DAMA DMBOK、(Oct. 9、2014)、
http://www.dama.org/i4a/pages/Index.cfm?pageid=3364
14) クレイトン・クリステンセン; 玉田俊平太監修、イノベーションのジレンマ、翔泳社、2001 .
15) WIKIPEDIA、Creating Shared Value、(Oct. 9、2014)、
https://en.wikipedia.org/wiki/Creating_shared_value
16) Luisi、L.、PRAGMATIC ENTERPRISE ARCHITECTURE、MK、2014、pp. 173-175.

17) Amit Goel; Sumit Kumar Jha; 他 3 名、A Survey of Approaches to Virtual Enterprise: Modeling Language、Reference Models and Architecture Framework、2011 Vol.7 Number 4、pp. 42-51.
18) Jason Bloomberg、The Agile Architecture Revolution、WILEY、2012、pp. 149-176.
19) The Open Group、Open Platform 3.0、(Oct. 9、2014)、http://www.opengroup.org/openplatform3.0/docs/
20) ヒューゴ・チルキー; ティム・ザオバー、イノベーション・アーキテクチャー、同友館、2009 .
21) IT コーディネーター協会、プロセスで解き明かすイノベーション、日経 BP、2014 .
22) 柴田友厚、モジュール・ダイナミクス、白桃書房、2008 .
23) The Open Group、ArchiMate、(Oct. 9、2014)、http://www.opengroup.org/subjectareas/enterprise/archimate
24) The Open Group、Open Platform White Paper、(Oct. 9、2014)、https://www2.opengroup.org/ogsys/catalog/w147
25)IBM、Service-oriented architecture: Measuring SOA's ROI in the new economic environment、(Oct. 9、2014)、http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?infotype=PM&subtype=XB&appname=GBSE_GB_TI_USEN&htmlfid=GBE03202USEN&attachment=GBE03202USEN.PDF#loaded
26) Stefan Bente; Uwe Bombosch; Shailendra Langade、Collaborative Enterprise Architecture、MK、2012.
27) The MITRE Corporation、EABOK 2004、(Oct. 9、2014)、https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/04_0104.pdf
28) eabok、EABOK consortium、(Oct. 9、2014)、http://www2.mitre.org/public/eabok/
29) Arvin Levine PhD.、The Architect as a Salesman within the Enterprise、Journal of EA、2014 Vol.10 Number 1、pp. 36-41 .
30) IASA、ITABOK、(Oct. 9、2014)、http://www.iasaglobal.org/iasa/Foundation_ITABoK.asp
31) Dirk Krafzig; Karl Banke; Dirk Slama、ENTERPRISE SOA、PRINTICE HALL、2005、pp. 311-374.
32) The Open Group、China Conference、(Oct. 9、2014)、http://blog.opengroup.org/2013/06/24/enterprise-architecture-in-china-who-uses-this-stuff/
33) YouTube、Government-wide Enterprise Architecture (GEA) in Korea、(Oct. 9、2014)、http://www.youtube.com/watch?v=VZbRbTdaId
34) 角田篤泰; 齋藤大地; 関根康弘、韓国における立法支援システムの調査報告、名古屋大学法政論集、第 244 号、2012 年 6 月.
35) 早稲田大学 大学院アジア太平洋研究科 小尾敏夫研究室、2014 年度　第 10 回　電子政府世界ランキング、(Oct. 9、2014)、http://www.e-gov.waseda.ac.jp/ranking_jp.htm
36) UNDESA、United Nations E-Government Survey 2014、(Oct. 11、2014)、

http://www.un.org/en/development/desa/publications/e-government-survey-2014.html

３．５．２　ソフトウェア定義型アーキテクチャー

（１）研究開発領域名

ソフトウェア定義型アーキテクチャー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

SDE(Software Defined Environment)は、クラウドを前提にして開発を進めてきた先進の WEB 企業におけるインフラストラクチャーの動的な自動運用システム [1)]をモデルにして、IT ビジネスの自律的な運用を目指した環境である。これらはパターン実装によってシステム全体を一括実装する単純なオーケストレーション機能だけにとどまらず、オートリカバリーやオートスケーリングなど非機能要件の自律運用コンポーネントが組み込まれた仮想アプリケーションパターンまで実現される。この研究開発領域ではクラウドの発展形を構成するテクノロジーの進化が IT アーキテクチャーにどのような影響を与えているのかを分析し、将来の IT 環境に対する影響を考察する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

技術の矮小化は通用しない

クラウドコンピューティングの本質は価格ではなく、企業や業務の改革（transformation)により、新しい技術やサービスを迅速にスケーラブルに提供することである。クラウドの日本市場では仮想統合と従量課金（資産の簿外化）だけを構成要素としているクラウドもどきが先行した。「何も変えたくない、このままクラウドに移行したい」というニーズに対応するために提供される IT サービスは、標準化できず自動化も不可能なので手作業による非標準サーバーの管理を続けなくてはならない。こうしたタイプのクラウドもどきは、パブリッククラウドの特徴である従量課金と自社の非標準運用を組み合わせた哀れな非標準仮想サーバーの集合である。中でも最悪なのは「富山の薬売り方式」である。低価格化したコモディティサーバーをプロバイダーが企業内データセンターに在庫しユーザーが使っただけ課金する、というものである。サーバーの無価値化が進むが、データセンター運用はなにも改善しない。Google、Amazon Web Services、IBM、Microsoft などのグローバルのクラウドプレーヤーは仮想化、自動化、標準化 [2)]を徹底して推進し、さらに SDE 環境による PaaS 領域に進出することで、広く一般企業が先進の WEB 技術を簡単に利用できるサービスを提供している。国内でもようやく OpenStack[3)]や CloudStack[4)]などのクラウドミドルウエア機能が自動化、標準化のプラットフォームとなって、データセンター専業プロバイダーを中心に Docker[5)]などへの取り組み [6)]が始まりクラウドの高度化が進んでいる。

グローバル CDN の影響と SDN（Software Defined Network）技術

Google や Facebook、Twitter といったようなグローバルに展開しているインターネットの巨人プレーヤーたちはインターネットの国際回線をバイパスする自社の専用回線を各国の国内サービスプロバイダーとピアリング接続することでコンシューマへのリーチを寡占化している [7)]。CDN（Contents Delivery Network）を中心とした新しいインターネットの接続形態が生まれ、キャッシュがインターネット通信の中心となったことで、動的なコンテンツを生成するアプリケーションも変化している。JavaScript などのブラウザー側のフロント

エンド処理とサーバーのバックエンド処理は分離され、解析処理、外部のアドテクなどの埋め込み処理などがマッシュアップ型に組み合わされることで実現され、ほとんどのアプリケーションコードとコンテンツがキャッシュ経由で実行できる環境を実現するようになっている。

インターネットをバイパスする技術 [8]の活用は、WEB 企業の寡占化から広く一般企業の利用が可能になるように、ネットワークオーバーレイのバーテラ社 [9]やクラウドサービスの IBM Softlayer 社 [10]などのサービス提供へと広がっている。こうしたネットワーク上ではグローバルに展開するコンテンツをダイナミックに移動したり、計算資源の最適配置を行ったりするために SDN 技術の活用が期待できる。グローバルネットワークを統合的に管理する SDN が必要とされている背景であり、SDN が「これまでと同じネットワークを安いスイッチで作れるようになる」[11]というような矮小化されたニーズが背景ではない。企業データセンターの戦略的なグローバル展開をクラウド環境と統合するために SDN のイーサネットオーバーレイ技術とネットワーク機材のソフトウェア実装である NFV(Network Function Virtualization)を組み合わせる技術等が開発されている [12]。SDN と NFV 技術によりこれまでエンタープライズ内部に設置されていたプライベートなネットワーク空間をグローバルなクラウドに展開することが可能になっている。

クラウド技術は運用と開発の統合されたプラットフォームに進化する

インフラストラクチャーの仮想化、標準化、自動化によって実現されたクラウド技術を基礎にすることで、ソフトウェアによるデータセンターの運用制御が可能となった。先進の WEB 企業を中心にオープンソースによる Infrastructure as Code の実装が進み、ソフトウェア化の動きは発展している。なにも変えずにクラウドに移行するのではなくクラウドがあることを前提に IT アーキテクチャーを設計するという動きは Netflix[13]などに代表されるように、システムの構築から運用、改善に至るまですべてをクラウド API プログラミングで実装するという先進事例に現れている。こうした DevOps と呼ばれる環境では最新のクラウドプラットフォーム上でトヨタ流改善 [14]を繰り返すリーンサイクル [15]を実現している。さらに改善プロセスを高速化するために、障害の自然発生による改善の繰り返しではなく意図的に障害を発生させる機能がアーキテクチャーに組み込まれることもあり、高速なリリースサイクルを実現している [16][17]

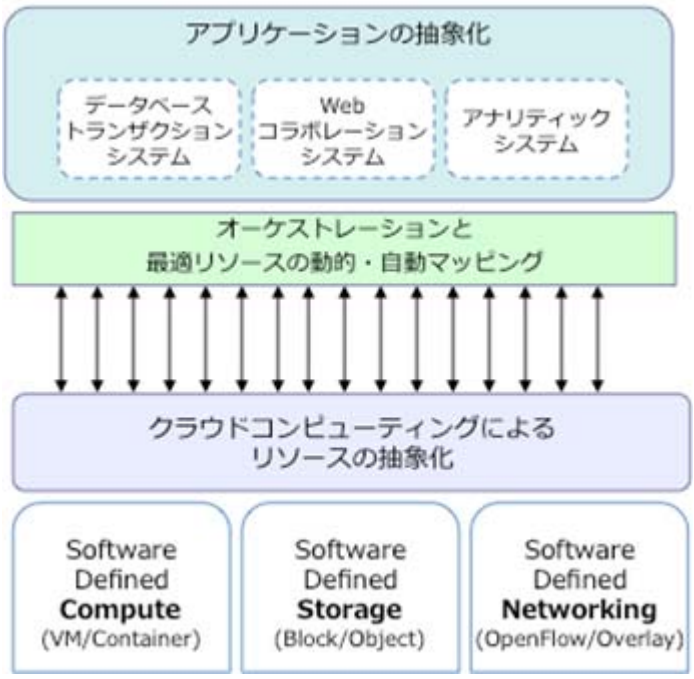


図 3.5.5 Software Defined Environment

エンタープライズ分野でもクラウドのミドルウエアは単純な標準サーバーイメージの導入自動化だけではなく、システム間の接続や組み合わせをパターンとしてひとまとめにして実装するシステムパターンのオーケストレーション技術へと進化している[18]。さらにシステムパターンは、オートリカバリーやオートスケーリング、認証などの非機能要件をポリシーベースで実装できる高度なSDE環境を提供している。SDEではワークロードを抽象化して実行環境の可用性、連続稼働支援、パフォーマンスおよびセキュリティーの動的運用ポリシーが組み込まれアプリケーションの稼働環境全体が抽象化できる仮想アプリケーションパターンが実装できる環境が実現されている[19]。仮想アプリケーションパターンの可搬性を実現するためにOASISはパターン記述のTOSCA規約[20]を開発し社会的に共有しようとしている。

これまではアプリケーションごとに個別最適化されたインフラストラクチャーのアーキテクチャーが設計されてきたが、アプリケーションパターンから高速にリリースが繰り返される工程を設計する必要が高まっている。これは、個別の製品の設計の前に多品種混流の生産工程を設計するのと同様であることからIT サービスの工業化という側面を生み出し、サービス品質を管理するリリースエンジニアリングが注目を集めている。リリースエンジニアリングはアプリケーション・システムの企画、開発、リリース、改善のサイクルを連続的に行うContinuous DeliveryやContinuous Integrationを可能にする[21]。

これまでのクラウド環境の多くは実行環境を仮想マシンで切り出す仮想化を基礎としてきたが、さらなる進化を遂げてより軽量で高速なLinuxコンテナ技術が注目されている。IBM Bluemix[22]はPivotal社[23]の開発したオープンソースCloud Foundry[24]を基盤としたPaaS環境をSoftlayer上で実装し、典型的なWebシステムのパターンをあらかじめ定義しアプリケーションの開発実行環境を 30 秒程度で実装するサービスを展開している。Cloud FoundryはNTTコミュニケーションのCloudn[25]やHPのHelios[26]にも採用され広がりを見せている。Cloud Foundryは実行環境に仮想マシンより軽量でポータブルなLinuxコンテナである Warden[27]を利用し、環境の隔離、リソースの配分管理などを実装している。また、同じコンテナ技術である Docker[5]は CoreOS[28]という削ぎ落とされた Linux クラスタOSとともに注目を集めている。

冪等性の限界とアプリケーション・アーキテクチャーへの影響

これまでのInfrastructure as CodeはChefやPuppetなど同じスクリプトからは同じ成果が得られるという冪等性を利用したシステム導入、構成の自動化を中心技術としてきた[29]。しかし、頻繁なリリースが行われるリーンサイクルの運用において一度リリースした環境を変更するためにはサーバーの状態を管理しなくてはならず、一度作った Chef レシピがシステム変更によって使えなくなっていることが見落とされたり、失敗したリリーススクリプトが修正できていなかったりトラブルの種になっていた。軽量なコンテナ型の実行環境では、テストが完了したビルドのテスト環境を負荷分散装置によって一斉に本番に切り替えることでリリースを完了する「ブルー・グリーン・デプロイメント」など、現行のサーバーの状態に変更を加えないで作り直すという意味で、Immutable Infrastructure という「稼働環境にノータッチな運用方針」がとられている[30]。前の実行環境が捨てられてもクラウド環境ではリソースプールに返却するだけなので、簡単に本番環境を廃棄できることから実現できている。この Immutable Infrastructure という運用方針はアプリケーション・アーキテクチ

ャーにも影響している。Heroku の CTO であった Adam Wiggins は”The Twelve-Factor App”[31]というアプリケーション・アーキテクチャーのプリンシパルを開発者から収集し公表している。これはクラウドプラットフォーム上への実装に適しており、OS への依存関係を明確化し、実行環境間での移植性を最大化することを目的にしている。ここでは、プロセスはステートレスかつ Shared Nothing であること、状態を持たないこと、特定のサーバーの中だけでしか持っていない情報がないようにすること、また設定をコードから厳密に分離し、全ての依存関係を完全に宣言的に定義することを要求している。そうすることで実行環境とアプリケーション環境を完全に切り離して動かせるようになり、容易なブルー・グリーン・デプロイメントが可能になる。

（4）科学技術的・政策的課題

国内市場ではクラウドの高度化の兆しは見えているものの、価格競争によるコモディティ化も激しい。Google や Amazon Web Services、 IBM Softlayer などのクラウドプレーヤーはグローバルな規模を背景にしてスケールを活かした価格戦略で攻勢を強めており、国内需要だけで新規の技術開発に向かう環境を国内勢が手にすることは難しい。国内では従来型のワークロードの移行を中心としたエンタープライズのニーズは依然として一定の市場規模が存在している。高度化に挑戦する安定した運営基盤を手にするためには、コモディティ市場の取り込みが課題である。

クラウド環境に適した人材の枯渇は著しい。デフレ期に IT 投資が抑制された結果就職先としての IT 分野の魅力が低下し、IT 産業に就く人材が需要に見合っていない状況にある。対してシステムサイエンスを修めた大卒人材が 2007 年以降回復した[34]米国における IT 基礎技術の発展は WEB 企業のグローバルな成功に現れていると見ることができる。

クラウドのスケール的な展開は Systems of Engagement 領域[32]で発展してきた。この領域のビジネスのほとんどは広告と広告提供のプラットフォームであり、バイラルメディアや SNS など限定領域にとどまってしまう傾向にある。そのために広告市場だけでは、国内のエンタープライズ分野での IT テクノロジーのさらなる発展は望めない。国内エンタープライズ分野には SoE アプリケーションの領域は深い関係性はなく、その裏側にある物流、生産、設計などの企業の基幹業務における IT のイノベーションが進むべきである。サプライチェーンの高速化や設計作業の効率化などが企業の枠を超えて連携して実装されるには、企業内プロセスの外部化が必要となる。企業のプロセスが WEB の API マッシュアップでコールされることで起動するというような API エコノミーの実現が新しいビジネスモデルを構築し、社会全体のイノベーションにつなげるべきである。伝票が電文になっているだけの従来の E マーケットプレースではなく、販売や契約を含めたビジネスプロセス全体が自動化される可能性があり、これが Industrial Internet や Industrie4.0 [33]などの高度化したサプライチェーンの基礎技術となる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

SDN はネットワークを作り替える OpenFlow 技術と既存のネットワークを活用したイーサネットオーバーレイ技術がある。これまでイーサネットオーバーレイ技術はデータセンター事業者内部の VLAN 数制約などの課題対応が中心であった。SDE 環境におけるオーケストレーション機能がオーバーレイ型の SDN を組み込んでいくことで、エンタープライズ分野ではハイブリッドクラウドにおける活用、サービスプロバイダー分野ではネットワーク機能を同時にオーケストレーションする NaaS(Network as a Service)分野での活用が予想される。

クラウドのオープン化は OASIS TOSCA のような標準化活動と OpenStack や Cloud Foundry のようなオープンソースのデファクトスタンダードという二つの活動によって支えられている。クラウドのオープン化が進むことで、ユーザー企業はベンダーロックインのリスクを回避しながらも高度なクラウド機能を活用することが可能になる。クラウド事業者における標準採用の広がりに注目が必要である。実行環境のオープン化については、Linux コンテナ技術が環境を跨がって広がる兆しがある。Windows および Azure 環境や Cloud Foundry のアプリケーション実行環境など Docker を採用する動きが活発である。次世代の稼働環境標準となりうるか、注目が必要と考える。

Immutable Infrastructure の影響が、分散コンピューティングのアーキテクチャーに影響が及ぶと考えられる。現在はフロントエンドの処理を Shared Nothing な特性にするように変化が起こっているが、今後はデータストアに対しても堅牢で高性能な Massive Parallel Database が採用され、データストアも含めた形で Immutable な運用体制に変化していく可能性がある。これは地域的に広く分散したトランザクションの処理の可能性を示しており、順序性の確保がどのように解決されていくのか注目が必要である。

ビジネスプロセスが API 起動されることから、これまでは内部処理であったビジネスプロセスの外部化が進んでいく。中古車検索と保険とローンを組み合わせたビジネスの構築というような組み合わせビジネスが IT システムとして設計できるようになる。こうした新たなビジネスが高速に市場投入されるようになるか、またそこに既存のエンタープライズの IT が追従できるかどうかが注目される。また、こうしたサービスが発展していくためには、IT セキュリティーのみならず信用や信頼というような非機能要件の実現が不可欠である。

（６）キーワード

OpenStack、 OASIS TOSCA、 SDN、 NFV、 SDE、 Chef、 Puppet、 冪等性、 LEAN start-up、 DevOps、 Release Engineering、 Cloud Foundry、 Docker、 Warden、 Linux Container、 Immutable Infrastructure、 The Twelve-Factor App、 Systems of Engagement、 API Economy

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	クラウドやSDEの技術そのものが、米国発信のものが多く日本のソフトウェア技術が多く利用されているとは考えられない。情報科学を修める学生数にも復調は認められず、基礎研究分野で目立った動きはない。企業側ではオープンソースへの参画などで基礎的な技術開発が進んでいると思われる。
	応用研究・開発	◎	↗	SDNの分野ではいくつかのスタートアップ[35]が優れたネットワークオーバーレイ機能やNFVをリリースしている。 インターネットの利用は極めて自由で、またプライバシーやセキュリティーなどの議論も行われている。トランジット接続とともにピアリング接続の拠点も多く、インフラ面では充実している。また、クラウド事業者を中心に応用技術の開発が進み、OpenStackやCloud Foundry、Dockerなどを活用する研究開発が進んでいる。
	産業化	○	→	米国のインターネットハイパージャイアンツの上陸が続いている。強大なデータセンターとバックボーンネットワークで日本のユーザーにリーチしている。国産WEBスタートアップはバイラルメディアなどサービスの無料化とアドテクを中心に発展しており、成功した事例ではスケールアウトも始まっており、開発スタイルも変化している。大きなスケールで拡大しているのは、オンラインゲームやモバイルゲームのインフラである。独自の開発フレームワークやプラットフォームが出現しており、発展が期待される。 国内クラウドサービスプロバイダーは米国から数テンポ遅れて自動化、標準化に取り組み始めたところであり遅れが目立つ。その中であっても先進的な事例が散見でき、PaaSレイヤーへ進出しているプロバイダー[36]もある 一般の企業においては、東急ハンズ[37]やすかいらーく[38]など一部でAmazon Web Servicesのユーザーを中心にクラウドであることを前提にしたシステム開発が広がりを見せている。その他大勢のIT部門ではいまだにクラウドに対する誤解や研究不足があり、積極利用の戦略を立案できない。
米国	基礎研究	◎	↗	クラウドを構成する技術、利用する技術、マーケティング技術などあらゆる面で技術をリードしている。オープンソースやクラウド事業にも積極的に基礎研究投資[39]が行われている。また、情報科学を修める学生の数も2007年を境に復調しており[34]情報科学の発展が市場のリーダーシップをもたらしている。
	応用研究・開発	◎	↗	必要な機能は自分で作り積極的にオープンソースとして公開するなど応用研究・開発は活性化している。サービスプロバイダーを中心にオープンソースを活用したプラットフォーム開発が進み、先端技術の実装が加速している。 開発フレームワークや開発スタイルなどの応用研究も盛んでソフトウェア開発、サービス開発、ビジネス投入という全てのサイクルでイノベーションが起こっている。応用研究の中心はマーケティング分析等で活用されてきたデータの集計と相関レベルの利用から機械学習[40]、知識ネットワーク[41]などへと発展しクラウドサービスが飲み込まれて行く勢いである。
	産業化	◎	↗	クラウドを利用するスタートアップが増加しており、クラウドでなくては成功できないという時代になっている。また、製造業を中心にメーカーズ革命も引き起こされており、Industrial Internetというようにインターネットクラウドを中心に製造業が変化し始めている。ここでは3DプリンターとEMSというようなものづくりスタートアップがWEBスタートアップのように製造業を変化させようとしている。

欧州	基礎研究			情報無し
	応用研究・開発	○	→	インターネットの利用は非常に活発であるがデータセンターや検索サービスにおけるプライバシー問題について米国発のハイパージャイアンツとの対決姿勢[42]が目立つ。またデータセンターの立地についてもプライバシー問題に特別な配慮[43]が必要で、ほとんど制約の無い米国やアジア、日本などと違いがある。 OpenStackなどのクラウドの基礎的なソフトウェアの研究は、日本と同様に米国を追従する動きと思われる。
	産業化	○	→	製造業がサプライチェーン全体をインターネット化しようとするIndustrie4.0[33]が進められている。ここでは自動車のような最終製品に至るまでの全てのサプライチェーンと製造工程がインターネット化して、柔軟で高速な製造を実現する試みである。長期にわたる取り組みとなるがビジネスプロセスの外部化は進むと思われる。
中国	基礎研究			情報無し
	応用研究・開発	◎	→	OpenStackの開発者が世界400都市以上に散らばる中で、最も開発者が多い都市が北京であり、上海もトップ10に入っている。応用事例も多く、iQIYIやQihoo 360、Ctripなどのスタートアップ利用者がOpenStack Summit Hong Kong 2013で報告されている[46]。
	産業化	◎	↘	インターネットモバイル市場はゲームやソーシャルメディアを中心に発展している。バイドゥ、アリババ、テンセントなどの巨大企業（頭文字をとってBATと呼ばれている）が生まれている。コンテンツには様々な特有な事情があり、中国国内のコンテンツは中国国内固有の物となっている場合が多い。中国でインターネット人口が拡大し、国内の会社が世界的な大企業になるのに伴い、中国当局は検閲などを強化している。インターネットのグローバルの接続はファイヤーウォールで規制されており、実質的には利用できない。
韓国	基礎研究			情報無し
	応用研究・開発	○	→	韓国初のパブリッククラウドKT uCloudではOpenStackの先進的採用が研究されている。[45]
	産業化	○	↘	オンラインゲームを中心にインターネットベースの産業は発展している。韓国のモバイルゲーム市場は日本の7分の1にとどまるものの、世界で最も活発なゲーム市場の一つである[44]。カカオトークやLineなどのメッセージングソフトウェアの市場投入も発展している。インターネットのピアリングも進んでいると思われる。一方でインターネットを通じた国民一般の監視や報道や表現の規制などの面で政府の関与があり、ユーザーの流出などが相次いでいる。産業の発展に影響を与えることが考えられる。また、セキュリティー対策意識は遅れている事例も見受けられる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) David Mitchell Smith：Hype Cycle for Cloud Computing、 2011、Gartner、
http://www.gartner.com/id=1753115
2) NIST によるクラウドコンピューティングの 定義 - 情報処理推進機構
https://www.ipa.go.jp/files/000025366.pdf
3) OpenStack
http://www.openstack.org
4) CloudStack
http://cloudstack.apache.org
5) Docker https://www.docker.com
6) 中津川 篤司(MOONGIFT)さくらのナレッジ
http://knowledge.sakura.ad.jp/tech/2322/
7) Katsushi Yamashita(IBM Japan) グローバルネットワークの発想で世界に飛び出す
https://www-304.ibm.com/connections/blogs/ProVISION76_80/resource/no80/80_article3.pdf?lang=ja_jp
8) Internet Exchange データシート
http://www.equinix.co.jp/resources/data-sheets/equinix-internet-exchange/
9) Virtela an NTT Communications Company
http://www.virtela.net
10) Softlayer an IBM Company
http://www.softlayer.com
11) Junichi Niino(Publickey) NTT データ、OpenFlow 技術のコモディティ化促進などで NCLC と提携
http://www.publickey2.jp/2012/08/nttopenflownclc.html
12) Katsushi Yamashita(IBM Japan) 独立行政法人 情報通信研究機構 第 6 回新世代ネットワークシンポジウム講演資料
http://www.nict.go.jp/nrh/4otfsk00000xjwk3-att/a1407291912807.pdf
13) Netflix：Adrian Cockroft、
http://www.slideshare.net/adrianco
14) ジェフリー・K・ライカー（著)、 稲垣 公夫（翻訳）ザ・トヨタウェイ(上）日経 BP 社 (2004/7/22) ISBN-10: 4822244156
15) エリック・リース(著) リーン・スタートアップ 日経 BP 社 (2012/4/12) ISBN-10: 4822248976
16) Richard Seroter、 Netflix が Chaos Monkey をオープンソースに
http://www.infoq.com/jp/news/2012/08/chaos-monkey
17) Netflix Open Source Center
http://netflix.github.io/#repo
18) Etsuji Nakai (Redhat Japan) クラウドオーケストレーション「OpenStack Heat」に迫る!
http://www.slideshare.net/enakai/open-stack-heat20140207
19) Akimitsu Shiseki(IBM Japan) 標準仕様「TOSCA」

http://it.impressbm.co.jp/articles/-/10606

20) OASIS Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA) TC
https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=tosca

21) ケント・ベック(著)「XP エクストリーム・プログラミング入門 : ソフトウェア開発の究極の手法」ピアソン・エデュケーション、2000。ISBN 489471275X

22) IBM Bluemix
https://ace.ng.bluemix.net

23) Pivotal
http://www.pivotal.io/jp

24) Cloud Foundry
http://cloudfoundry.org/index.html

25) NTT Communications Cloudn PaaS
http://www.ntt.com/cloudn/data/paas.html

26) HP プレスリリース
http://h30507.www3.hp.com/t5/HPJapan-Enterprise-Topics/HP-クラウド新戦略を発表-HP-Helion/ba-p/160756#.VGr7eL7ho9Z

27) Yudai Iwasaki(NTT SIC)、すごくわかる WARDEN
http://www.slideshare.net/i_yudai/warden

28) CoreOS
https://coreos.com

29) Yosuke Hiraishi(ドリコム) ドリコムの Infrastructure as code
http://www.slideshare.net/y05_net/infrastructure-as-code-35373108

30) Naoya Ito(KAIZEN platform Inc.)Immutable Infrastructure が開発プロセスに与える影響
https://speakerdeck.com/naoya/immutable-infrastructureregakai-fa-purosesuniyu-eruying-xiang-jia-number-immutableinfra

31) Adam Wiggins(Heroku)、 The Twelve-Factor App
http://twelve-factor-ja.herokuapp.com

32) Geoffrey Moore(TCG Advisors)、A Sea Change in Enterprise IT
http://www.aiim.org/~/media/Files/AIIM%20White%20Papers/Systems-of-Engagement-Future-of-Enterprise-IT.ashx

33)ドイツ「Industrie4.0」と EU における先端製造技術の取り組みに関する動向
http://www.jetro.go.jp/jfile/report/07001735/07001735.pdf

34) IBM 100 Years、 The Origins of Computer Science
http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/compsci/

35) Midokura
http://www.midokura.jp、

36) NTT Communications PaaS Cloudn
http://www.ntt.com/cloudn/data/paas.html

37) クラウドへ基幹システムを移行する東急ハンズ

http://www.publickey1.jp/blog/13/aws_summit_tokyo_2013.html
38) すかいらーく、約 3000 店舗の POS データ分析基盤を Amazon Redshift で構築
http://it.impressbm.co.jp/articles/-/11056
39) 米 IBM、「全クラウドサービス、ソフトウェア」を OpenStack ベースに
http://cloud.watch.impress.co.jp/docs/news/20130305_590366.html
40) IBM WATSON UIMA
http://it.impressbm.co.jp/articles/-/10235
41) Google ナレッジグラフ
http://www.google.co.jp/intl/ja/insidesearch/features/search/knowledge.html
42) Google がプライバシー問題で欧州 6 カ国の当局と対立
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20130403/468221/
43) 欧州議会、EU データ保護規則改正案を可決、 セーフハーバーを停止へ
http://www.bakermckenzie.co.jp/material/dl/supportingyourbusiness/newsletter/intellectualproperty/ClientAlert_140410_EUDataProtection_J.pdf
44) 右肩上がりの韓国ゲーム市場
http://thebridge.jp/2013/11/south-koreas-gaming-market-worth-916-billion
45) KT と OpenStack について
http://research.sakura.ad.jp/2013/11/18/tdr14/
46)【OpenStack Summit 基調講演】中国の導入事例
http://cloud.watch.impress.co.jp/docs/event/20131108_622751.html

３．５．３　クラウドコンピューティング

（１）研究開発領域名

クラウドコンピューティング

（２）研究開発領域の簡潔な説明

クラウドコンピューティングは、仮想化技術に基づき、インターネットやイントラネット内にプールされたリソースを自動的に配置するサービス提供基盤技術を使用している。従来のコンピューターを所有する形態から、サービスの形で必要に応じて利用する形態へと、ビジネスモデルも大きく変わっている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2006 年にクラウドコンピューティングという言葉が生まれて以来、この技術は IT サービスの提供基盤として着実に発展を続けている。2014 年現在、ガートナーグループが毎年提供している先進テクノロジーのハイプ・サイクルにおいて、クラウドコンピューティングは、過度の期待の後に来る幻滅期の底に位置している [1)]。しかし、これは必ずしも、この技術が今後消え去ることを示唆しているのではない。クラウドコンピューティングの萌芽期から根強く存在しているのは、クラウドを導入しさえすれば IT コストが軽減できるという特に価格に関する過度の期待や、セキュリティーや可用性などの課題に対する潜在的な不安である。しかし、クラウドの導入が進み、利用者側にも現実的な理解が深まりつつあり、サービス提供基盤として、今後安定期に向かって進んでいくと思われる。

国際市場においては、米国を中心に、Amazon、Google、Microsoft、IBM といった主要なクラウドベンダーがクラウドに対して引き続き多大な投資を行っている。競争も激化しており、特に IaaS 領域に関しては各社が値引きを繰り返し、価格競争に陥っている。Amazon や Google といったいわゆる Web 由来の企業は、エンタープライズ領域への浸透に注力を始めている。これに対し、伝統的な IT 企業、例えば IBM は、IaaS 提供ベンダーであった SoftLayer を買収し、Web ベースの技術を手にいれると共に、OpenStack、 Cloud Foundry といったオープンソースの IaaS/PaaS 基盤を活用したオープンクラウドを前面に押し出し対抗しようとしている。大手ベンダーの攻勢の中で、Rackspace のように、利用者に環境に応じたマネージドサービスを提供することで、他との差を強調する戦略をとるベンダーもある。クラウドコンピューティングは物理層からサービス層まで広範囲をカバーしているため、各組織がどのようなビジネス戦略をとるかによって必要となる技術も変わってくる。

国内市場に目を向けると、日立や富士通といった IT 企業系ベンダー、さくらインターネットのようなホスティング系ベンダーなどが、きめ細やかなサービスや国内データセンターの充実を謳いつつ、海外ベンダーとも一部協業する形でサービスを提供している。また、NTT コミュニケーションズや KDDI などのキャリア系クラウドも、ネットワークを含めた高価値のクラウドサービスを展開し、注目を集めている。

上述したようにクラウドコンピューティング導入の最初の動機は、IT 固定費の削減であった(特に日本ではいまでもその傾向が強い)。しかし、クラウドがもたらす本質はそこにはない。クラウドという新しい IT サービス提供基盤を元にした業務や業界の改革こそに意義

がある。そのためには、より高価値なサービスを迅速かつ柔軟に提供することが必要となってくる。これまでのクラウドコンピューティングの代名詞は、Amazon EC2 に代表されるIaaS、すなわち仮想化された計算機の提供であったが、今後は、IaaS を土台に、いかにして高価値のサービスを構築し、業界や一般ユーザーに提供するかが鍵となるであろう。IaaS、 PaaS、 SaaS、 そして、Business as a Service、 Solution as a Service のような複合サービスへとスタックを上がっていく流れである。また、開発者や利用者に対してサービスの可搬性 (mobility)や標準化をもたらすオープンクラウドを提供するベンダーが増えてきている。さらに、業界特有の要件や規制に対応するための取り組みも活発になってきている。

高価値クラウドサービスが、ビジネス視点でのクラウドの方向性であるとすると、注目すべき技術的視点での方向性の一つは、クラウドを前提としたソフトウェア設計と開発のための基盤の進化である。クラウドの典型的な使用法は、既存の計算機環境やアプリケーションの移行、あるいは既存の資源をベースにした新規開発であった。しかし、このやり方は、大規模分散型の計算機資源を迅速に柔軟に使用することができるクラウドの特長を十分に活かしたものではない。新規アプリケーションを設計する際に、まずクラウド上で運用することを念頭に設計を行い、クラウドの利点を最大限に享受するという動きが広がっている(この動きを裏付けるデータとして、現在新規ソフトウェアの 85%がクラウド上で構築されつつあり、また、72%の開発者がクラウドベースのサービスあるいはAPIを使ったアプリケーションを設計あるいは開発している、との報告がある [2)]。この考え方は、クラウドファースト (Cloud First)と呼ばれており、今後のアプリ開発の主流になっていくと思われる。クラウドファーストな設計および開発の促進と、モバイル、ソーシャル、アナリティクスなどの技術との融合によって、企業のITが、迅速さと柔軟さを備えた「Webスケール IT」へと進化していくことが予測される。クラウド環境をベースとしたDevOps環境の普及と相まって、クラウドがIT基盤のデフォルト要素になっていくであろう。

「クラウドファースト」や「Web スケール IT」を支える重要な要素の一つが、マイクロサービス (Microservices)の考え方である [3)]。マイクロサービスは、Martin Fowler とJames Lewis氏によって提案された概念であり、コンポーネントが強固に結びついた一枚岩のアプリケーションではなく、軽量のサービスや API を組み合わせてアプリケーションを構築するためのアーキテクチャースタイルである。従来のサービス指向アーキテクチャー(SOA)との差異については議論があるが、迅速なサービスのプロビジョニング、個々の API やサービスの可用性など、クラウド環境をベースにした理念となっている。

クラウド環境を支えるミドルウエア、ハードウエア技術の進化も注目に値する。例えば、次世代の仮想化技術である Docker は、開発環境やアプリケーションをコンテナと呼ばれる仮想空間内にパッケージすることで、従来の仮想マシン(VM)より、軽量でかつメモリーや領域効率性に優れた環境を提供するオープンソース技術である [4)]。

コンテナ技術がもたらす別の重要な側面がある。現在、ソフトウェア開発運用のやり方が大きく変わろうとしている。例えば、最近注目されている Immutable Infrastructure という概念は、既に稼働しているアプリケーションとシステム環境をバージョンアップするのではなく、VM あるいはコンテナ単位で環境を「使い捨てる」という新しい開発運用の仕組みをもたらす。この概念とクラウド技術とを組み合わせると、大規模システムの更改において、

従来システムを同規模のシステムをクラウド上に別途構築し、更改に合わせて切り替える(新システムの稼働が確認されれば、従来システムは廃棄される)ことが可能なる。さらに、分散されたシステム環境であれば、システムを一気にバージョンアップするのではなく、少しずつ入れ替えていく(ブルー・グリーン・デプロイメントと呼ばれる)ことも可能である。

Docker の他にも、Open Stack [5]、 Cloud Stack [6]、 Cloud Foundry [7]といったオープンソースのクラウド環境の技術開発が今後加速すると思われる。

より物理インフラに近い層では、クラウドデータセンターの自動化や高効率化が進められている。例えば、ソフトウェア定義型データセンター (Software Defined Data Center、SDDC)では、ネットワーク、ストレージ、コンピューティング (CPU やメモリーを含む)、セキュリティーなどを仮想化し、ポリシーに応じてプロビジョニングし管理する機能を有している。また、Hadoop [8]などの分散処理ミドルウエアやマイクロサービスの普及により、データセンター内の仮想マシン間、ハイパーバイザ・ストレージ間の「水平な (East-West)」トラフィックの増大が課題となっている。これを解決するために、従来の階層型ネットワークではなく論理的にフラットなネットワークを構築する技術が注目を集めている。さらに、効率の良いデータアクセスのためのストレージのフラッシュ化や、点在しサイロ化しているデータを統一的に扱うデータサービスが提案されている。ネットワークを含め、あらゆる機器がソフトウェア化する Software Defined Anything (SDx)の流れに沿った動きである。

（４）科学技術的・政策的課題

・上述したように、クラウドコンピューティングの本質は価格ではなく、企業や業務の改革(transformation)により、新しい技術やサービスを迅速にスケーラブルに提供することである。欧米の企業はこれに気がつき始めている。この観点にたてば、クラウドがもたらすものは、いわゆる「イノベーションのジレンマ」の促進であろう。日本国内においては、この流れを看過することなく、クラウド技術を用いた企業や組織の改革、改革を促進するためのクラウド技術の蓄積を行う必要がある。

・従来のビジネスモデル、業務手順に技術をはめるのではなく、クラウドファーストを前提にしたサービスパターンを体系化し、積極的に活用していく必要がある。各月（例えば月末）や季節（期末、クリスマスシーズンなど）で変動するワークロードに柔軟に対応できるのはクラウド技術の特徴の一つである。また、DevOps やマイクロサービスを組み合わせて、新しいサービスを迅速に市場に出し、ユーザーの反応を基に継続的な開発を行い、需要に合わせてスケールさせていくパターンもクラウドならではのパターンである。

・IaaS レベルのクラウドサービスは、コモディティ化が進んでおり価格競争の波に飲まれようとしている。一方で、各業界のプロセスやビジネスモデルを改革するための高価値クラウドサービスの領域は、まだキラーアプリが存在しておらず、我が国がこのエリアのリーダーシップを取ることができる可能性は残されている。IT 業界が産業界と連動しながら、ソリューションの設計とそれを下支えする技術の開発を行う必要がある。

・現在、ソフトウェアの開発と運用のやり方が大きく変わろうとしている。この分野はイノベーションのライフサイクルが短いために具体的なロードマップを描くのは困難であるが、この流れの中心に位置していくための戦略が必要である。例えば現在、Docker に代表されるコンテナ技術や Chef などの自動デプロイメント・運用技術が注目されているが、コ

ミュニティの継続的な努力や、従来技術を確かな見識で組み合わせるセンスによって、これらのイノベーションが生まれている。グローバルな標準化活動、技術コミュニティでの貢献、産業界を巻き込んだ早期検証などに投資を行う必要がある。
・ソフトウェア定義型データセンターの研究開発や実証によって、技術の蓄積を行うと共に、国内データセンターを高付加価値化することで国際的な競争力とリーダーシップを獲得していく必要がある。
・企業内あるいはユーザー保有のデータやプロセスをいかにクラウドに移行できるかを行う上で問題となる各種規約や制限事項を精査し、現時的な解法を探していくことで、クラウドの利用を促進することが大事である。また、そのために必要なセキュリティーやプライバシー、システム可用性、事業継続性などの技術開発に注目していく必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・大規模並列処理を行うプラットフォームである Hadoop のコア技術である Map Reduce は、当初は限られた形態の処理を想定していたが、現在は、様々なワークロードの処理へと応用されている。また、MapReduce を提唱した Google は、Cloud Dataflow と呼ばれる後継技術を今後使っていくことを表明している [9]。
・Docker に代表されるソフトウェアコンテナ技術に大きな注目が集まっており、IT 各社がこぞって参入を表明している。例えば Amazon は、もともと AWS Elastic Beanstalk でコンテナをサポートしていたが、2014 年 11 月に発表した Amazon EC2 Container Service においてより戦略的な Docker のサポートを表明した。Google は、社内の開発環境がコンテナベースになっていることを公開しており、Docker インスタンスを実行できる Google Container Engine の提供を開始している。また、IBM, Redhat, Microsoft と共に、コンテナ管理基盤である Kubernetes の開発に参加を表明している。Docker のホスト OS には Linux が用いられるが、Microsoft は、2014 年 10 月に Docker 社との提携を発表し、次期 Windows Server や Microsoft Azure で Docker をサポートすることを表明した。
・Web 上でサービスを行う企業を中心に、継続的な開発およびデリバリーを行う企業が増えてきている。例えば、amazon.com サイトにおいて、最大で 1 時間に 1000 回以上のデプロイ(ソフトウェアの配置)が行われたと報告されている [10]。
・オープンソースや標準技術をベースにしたオープンクラウドの動きが広がりつつあり、日本企業の参入も始まっている。オープンソース IaaS の実装である OpenStack のコミュニティ OpenStack Foundation には、NEC と日立が Gold Member に、富士通、ビットアイルが Corporate Sponsor に名前を連ねている。オープンソース PaaS の実装である Cloud Foundry のコミュニティである Cloud Foundry Foundation に、NTT は Gold Member として参加している。

（６）キーワード

仮想化技術、コンテナ技術 (Docker など)、マイクロサービス、オープンクラウド、ソフトウェア定義型環境、API、DevOps、運用の自動化 (Chef など)、継続的デリバリー

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・暗号技術を用いたクラウドセキュリティー、ソフトウェア定義型ネットワーク、高信頼データ転送技術など、従来から蓄積のある分野を中心に、研究開発が行われている。 ・クラウド環境を考慮したISO/IEC 27002に基づく情報セキュリティー管理のための規範など、標準化活動にも活発に貢献している。
	応用研究・開発	◎	→	・クラウドサービスを展開する企業を中心に自社のクラウドサービスの差別化を計るための技術開発を行っている。 ・グローバルクラウド基盤連携技術フォーラム(Global Inter-Cloud Technology Forum、 GICTF) においてクラウド連携技術の連携や標準化を行った。 ・OpenStackやCloud Foundryなどのオープンソースにも継続して貢献を行っている。
	産業化	◎	↗	・IT系、通信系、データセンター系など多数の企業が様々な層のクラウドサービスを展開している。
米国	基礎研究	◎	↗	・現在使用されているクラウドの基礎技術の多くが米国で生まれており、その層の厚さと投資額は依然として他を圧している。
	応用研究・開発	◎	↗	・Amazon、 Google、 Microsoft、 IBMなどの業界をけん引する企業が、クラウドインフラとサービスの提供のために多大な投資を行い、研究開発を行っている。仮想化技術からコンテナ技術へ、従来型のソフトウェア開発と運用から、アジャイル開発、継続的デリバリー、運用の自動化などの技術の過渡期をけん引している。
	産業化	◎	↗	・クラウドを早くから迅速なサービス開発や業界プロセスの革新のために使用しており、結果として主要なサービスの多くを提供している。
欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州議会のテクノロジー・アセスメント機関であるSTOA (Scientific and Technological Options Assessment)がクラウドコンピューティングに関するアセスメントを公開しており、技術、規制、ガバナンスを考慮した総体的な(holistic)なアプローチが肝要であると報告している [11)]。 ・EU FP7の後継であるHorizon 2020プログラムに含まれるICT 7において、先進的なクラウドインフラストラクチャーとサービスがトピックとして採択され、いくつかのプロジェクトが開始されている [12)]。
	応用研究・開発	○	↗	・EUおよび英国において個人データに対して、十分なレベルのデータ保護ができない第3国へのデータの移動を禁止するEUデータ保護指令の存在により、データセキュリティー、プライバシー、トラストなどの議論が盛んである。
	産業化	○	→	・2014年5月、EU司法裁判所が、個人が「忘れられる権利」を有すると判断し、Googleに対して、リンクの削除を命じる判決を言い渡した。この動きはクラウド提供者と利用者に大きな影響を与える可能性がある。
中国	基礎研究	△	→	・国民経済・社会発展 第12次5カ年計画（2011-2015年）において、クラウドコンピューティングは、優先して実行される戦略的新興産業の一つとなっている。
	応用研究・開発	○	↗	・アリババは事業戦略の重大要素の一つとクラウドコンピューティング技術の強化を掲げており、ストレージ技術やモバイルOSの技術開発や企業買収を行っている。
	産業化	○	↗	・チャイナモバイル、チャイナユニコム、チャイナテレコムなどの通信業者によるクラウドへの投資が加速している。

韓国	基礎研究	△	→	・2013年に策定された創造経済実現計画の６大戦略の一つである「成長動力の創出」を促す技術としてクラウドコンピューティングがあげられ、取り込みが始まっている。
	応用研究・開発	△	→	・韓国ＫＴは非営利研究法人のゲノム研究財団、バイオ企業のテラジェンイーテックスと共同で、韓国人のゲノム解析を行っている。
	産業化	○	→	・韓国KTとソフトバンクが提携し、日本より電気料金が安く地震リスクが低い韓国にデータセンターを活用したIaaSサービスを提供している。また、韓国LG CNSやSamsung SDSが、IaaSサービスやVDI(Virtual Desktop Infrastructure)などのサービスを提供している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ガートナー、「先進テクノロジーのハイプ・サイクル： 2014 年」を発表
http://www.gartner.co.jp/press/html/pr20140903-01.html
2) IBM Annual Report 2013
http://www.ibm.com/annualreport/2013/strategy-cloud.html
3) Microservices
http://martinfowler.com/articles/microservices.html
4) Docker、
https://www.docker.com/
5) OpenStack、
http://www.openstack.org
6) CloudStack、
http://cloudstack.apache.org
7) Cloud Foundry、
http://cloudfoundry.org
8) Hadoop、
http://hadoop.apache.org
9) Google Cloud Dataflow、
http://googledevelopers.blogspot.jp/2014/06/cloud-platform-at-google-io-new-big.html
10) http://www.publickey1.jp/blog/12/amazon11000_aws_reinventday2_am.html
11) Potential and Impacts of Cloud Computing Services and Social Network Websites、 Science and Technology Options Assessment (STOA) Report、
http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2014/513546/IPOL-JOIN_ET(2014)513546_EN.pdf
12) HORIZON 2020 WORK PROGRAMME 2014 - 2015、 EU、
http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/h2020-sections

３．５．４　モバイルアーキテクチャー

（１）研究開発領域名

モバイルアーキテクチャー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

様々なモバイル機器がネットワークに接続され、広く社会インフラの一部になりつつある。そのスマートフォンやタブレットの普及の背景にあるのは、ネットワークの進化や組み込みに利用されるプロセッサーの進化（高速化、省電力化、小型化）があり、それがウェアラブル・コンピューターや車載システムで利用されつつある。このようなモバイル機器の進化は、モバイル機器単独で行われてきたものではなくバックエンドの IT の技術を共用しながら、あるいは協調しながら進化してきた。

本研究開発領域では、ウェアラブル・コンピューターやネットワーク接続可能な自動車という新たに生まれつつあるモバイル機器に関してバックエンドの IT システムも含めた End-to-End でのモバイルアーキテクチャーの開発に関して今後必要な取り組み課題を明らかにする。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

モバイル OS の変遷と将来

モバイル機器は初期の音声が中心であった携帯電話のようにある特定用途のための比較的単純な機器として生まれたのだが、それを飛躍的に進化させたのがパケットデータ通信網である。これによりモバイル機器から様々なデータがやり取りできるようになり、メールから始まり様々なインターネットサービスが受けられるようになった。

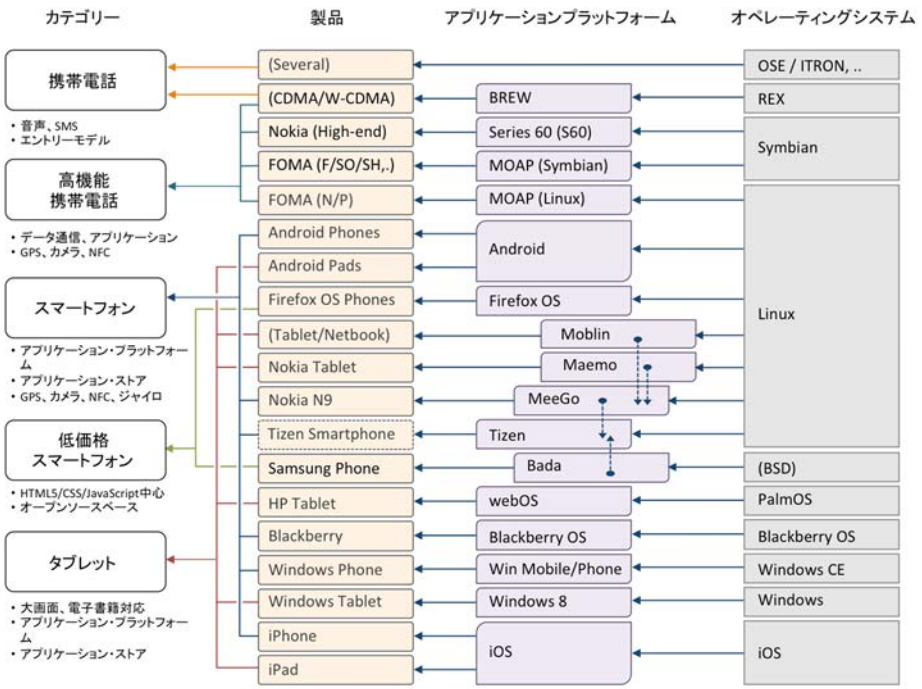


図 3.5.6 モバイル OS の変遷

当初は音声通信と単純な電話帳機能のみであったため、図 3.5.6 にあるように日本では TRON (iTRON)、欧米では OSE のような軽量なリアルタイム OS が利用されていた。ところがアプリケーションの多様化により仮想メモリーやスケジューラーが必要となり、サーバーで利用されている高機能 OS である Linux を組み込み用に拡張したものが利用されるようになり、その上にアプリケーションプラットフォームが構築され様々なアプリケーションが実装されてきた。またアプリケーションの多様化により、アプリケーション用のプロセッサーと通信用のプロセッサーを実装したマルチプロセッサーアーキテクチャーが採用され、アプリケーションの多様化に対応してきた。この進化の過程において、広く普及はしなかったが注目に値する OS がある。それは HP 社が PalmOS の後継としてタブレット用に開発した webOS[1]である。これはクラウドに特化した OS とも言え、様々な機能がクラウドと連携して実現される。まさにモバイル機器と IT インフラが統合されたシステムであった。（webOS はオープンソース化の後に韓国 LG Electronics 社に買収され、2014 年に LuneOS と改名された。）Apple 社の iPhone や Google 社の Android の出現によりスマートフォンと呼ばれるエリアが確立されたが、大きな進化は iTunes や Google App Store のようにアプリケーションのマーケットが出現し、モバイル・アプリケーション・プラットフォームと密接にリンクし始めたことにある。今や Android は全世界での出荷数の 80%以上を占めるようになり後述の米 Qualcomm 社の Snapdragon[2]との組み合わせで中国・韓国勢が市場の多数を占めるようになってしまった。

プログラミングモデルは、オペレーティングシステムやアプリケーションプラットフォームに依存するいわゆる”Native”と言われるモデルとプラットフォームに依存しないプログラミングモデルがあり、前者は iOS の場合は Objective-C、Android の場合は Dalvik と呼ばれる言語である。一方、プラットフォームに依存せず、ほとんどすべてのスマートフォンや携帯端末、および新しい車載システムである IVI(In-Vehicle Infotainment System)で利用できるものが HTML5[3]である。ここでは広義の HTML5 を意味し、CSS3、JavaScript を含み、オフラインでも利用できる機能やドラッグ＆ドロップの機能等、Native アプリケーションでしかできなかった機能が実現されている。ここで注目されるプログラミングモデルが JavaScript であり、この HTML5 の広がりが IT インンフラ側にも影響を与えており、後に述べる JavaScript Everywhere とつながっていく。

一方、そのハードウエアは ARM 社のプロセッサーとグラフィック機能をもつチップ、および様々な通信プロトコルをサポートしたチップを統合して作られた米 Qualcomm 社の Snapdragon が広く利用され、その機能のカバレージと利便性より多くの会社に利用され、ハードウエアもコモディティ化が進んでしまったと言えよう。ウェアラブル・コンピューターの世界も ARM 社のプロセッサーの組み合わせで実現される場合が多い。 クロック数が高く、メモリーの管理機能が実装されている ARM Cortex-A[4]シリーズは一般的なアプリケーションの実行に、Cortex-R[5]シリーズはリアルタイムの応答が求められるシステムに、クロック数は少ないがダイサイズと呼ばれる半導体チップの面積が極めて小さい Cortex-M[6]シリーズは様々なセンサーの制御や非常に小さなウェアラブル・コンピューター器に利用されることが多い。またシステムによっては Cortex-A シリーズと Cortex-M シリーズを組み合わせて最適な制御をそれぞれのコアに分散させ、省電力と高速化を実現している。

JavaScript Everywhere

モバイル機器をサポートする IT インフラのプログラミングモデルも変わりつつある。以前から広く利用されている Java のプログラムに加えて、大量のトランザクションをイベント駆動型で処理する Node.js[7]が広く利用されだしている。Node.js は Google Chrome 等で使われている V8 JavaScript エンジンで実行されるサーバー側の JavaScript である。これは、モバイル機器用のアプリケーション開発者が JavaScript に精通しているという事実と、モバイル機器からの REST API を大量に処理するためのイベント駆動処理への強い要求より生み出されたものであると言えよう。これにより、JavaScript のプログラマーがモバイル機器とサーバー側の両方のプログラム開発が行えるようになった。

仮想化の技術とコンテナの考え方

仮想化の技術は IT インフラ側では広く使われており、リソースの効果的な利用法として認識されている。また、OS 全体を仮想化したパーティションで稼働させるのではなく、Linux コンテナ(LXC) [8]技術から派生した Docker[9]のように一つのカーネルを共有する形でユーザープロセスのみをコンパクトにまとめたコンテナの考え方も広がりつつある。OS を含む仮想化に比べて Linux に依存はするがコンテナ自体は軽量であるので必要な機能の移送や再現に優れている。一方、モバイルにおいても仮想化の技術が利用されてきており、米 Redbend Software 社はスマートフォンを仮想化し、プライベートでの利用と企業での利用をそれぞれ別のパーティションとしてハイバーバイザー上に実装し[10]、プライベートでの利用時に企業データが流出しないシステムをスマートフォンで実現している。また、前述の Docker によるコンテナの利用によりユーザー環境を容易に移送できるため、携帯機器間や IT インフラとの間でのユーザープロセスの移送も将来は行われるであろう。

次世代のモバイル　-　Connected Car（つながる車）

スマートフォンに続くモバイル端末としてウェアラブル・コンピューターとともに自動車があげられる。日欧米では事故減少・防止のために様々な技術が開発され ADAS (Advanced Driver Assistant System)として実装されている。これらはレーダー、カメラ、センサー等で取得されたデータを即時分析し、衝突防止やレーン逸脱防止を行うものである。また、車車間通信を通じて移動する車の大きさ・速度・方向等をお互いに通知しあい、事故の防止等に役立てようとしている。米国運輸省道路交通安全局（DOT　NHTSA）においては 2017 年の義務化に向けて様々な取り組みがされている[11]。この安全のためのメッセージは、将来は車のみならずスマートフォンともやりとりが行われ、歩行者の安全も実現されるようになる。モバイル機器を利用し IT インフラを通じて協調型の社会を作りだそうとしている[12]。このような世界での大きな課題としてあげられているのは、モバイル機器から IT インフラも含めた End-to-End でのセキュリティー・アーキテクチャーの設計と実現である。例えば、協調型の車車間通信の場合、悪意のあるメッセージを流し続けて交通を混乱させることも可能であろうし、緊急自動車と偽りながら渋滞時にも走行し続けることも可能であろう。スマートフォンに対しても、車が近づいてきているという偽りの警報を送ることもでき、社会を混乱させる可能性もある。

このように、モバイル機器の進化は単にモバイル側のみの進化ではなく、IT システムを

含めた全体の進化であり、新たな技術やサービスをシステム全体として捉えていかなくてはならない。ここにあげたように新たなモバイル機器が出現しつつあり、それに伴い新たなサービスも出現しつつある。テクノロジー自体は透過的にモバイル側でも IT インフラ側でも利用される場合が多くそれぞれ個別の領域と捉えるのではなく End-to-End で IT 全体のアーキテクチャーを考えていかなくてはならないのである。

（４）科学技術的・政策的課題

政策的課題

国家戦略としてはモバイル機器におけるプライバシーの課題に積極的に取り組まなくてはならない。スマートフォンのみならずウェアラブル・コンピューターや自動車の位置情報やそれから派生する様々なデータの所有権と利用方法についてのガイドラインを早急に作成する必要がある。欧米においては自動車から取得された様々なデータが個人や他の事業者に利用されつつある。すべての保険会社はテレマティックスと呼ばれる自動車からの位置情報や運転方法を取得する仕組みの利用を検討・実現しており、これは IT インフラ全体のアーキテクチャーと分析技術等の要素技術の進化を促すものである。

科学技術的課題

End-to-End でのモバイルシステムアーキテクチャーを検討するためには、ウェアラブル・コンピューター自体の目的（医療用、娯楽用、作業補助用等）と必要とされるサービス、車からのデータの理解と共通化およびそれに伴うサービス等、各ドメインの知識と IT の知識の融合が必要である。

また、IoT (Internet of Things)と言われる様々なセンサーや機器が出現し、Connected Car のように移動体として社会インフラの一つとなってくる。この場合にはネットワークの課題もある。今のネットワークの進化はブロードバンド化に向かっており、複数のアンテナを利用し、複数の周波数帯を統合し、いかに一人のユーザーに対して大量のデータをやりとりできる帯域を確保するかという点が主となっているが、車のような移動体の IoT の場合には、一度に送られるデータはそれほど大きくはなく、大量の数の車から頻繁に（それこそ毎秒から数十秒おきに）少量のデータが送出されてくるナローバンドのチャネルを数多く準備するモデルである。交差点の渋滞時等は電車事故の際のスマートフォンからの大量のネットワークアクセスを彷彿させるものである。このようなネットワークのキャパシティーも含めた全体のアーキテクチャーの研究が必要となってくる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

以下のような新デバイス、政策、標準化に関する動向が、今後注目される。

- Google Glass を始めとするウェアラブルコンピューティング
- 米国運輸省道路交通安全局（NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration）による車車間通信の推進と義務化
- Industrial Internet Consortium (IoT 技術の標準化) [13)]
- Industrie 4.0 (Cyber Physical System による製造業の変革) [14)]
- oneM2M (M2M標準の策定を目指す ARIB ら 7 つの標準化開発機関) [15)]

（６）キーワード

モバイル、スマートフォン、タブレット、iPhone、Android、HTML５、JavaScript、Node.js、ウェアラブルコンピューティング、Connected Car、車車間通信、Internet of Things、IoT、プライバシー

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・総務省　平成26年度戦略的情報通信研究開発推進事業（国際連携型）（１）ビッグデータ、モノのインターネット（IoT）の融合をクラウド環境で実現する技術の研究開発[16)] ・oneM2M（ARIB：Association of Radio Industries and Business、TTC：Telecommunication Technology Commitee)[15)]
	応用研究・開発	○	→	・官民 ITS 構想・ロードマップ ~世界一安全で円滑な道路交通社会構築に向けた自動走行システムと交通データ利活用に係る戦略[17)] ・特定非営利活動法人ウェアラブル・コンピューター研究開発機構[18)]
	産業化	◎	↗	・ムーブバンド[19)]、Sony SmartWatch[20)]、 EPSON MOVERIO[21)]、Sony SmartEyeglass[22)]
米国	基礎研究	◎	↗	・IEEE Standard Association P2413 - Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT)[23)] ・TIA-4940.005 、 “Smart device communications 、 ” Reference Architecture、 Dec. 2011[24)] ・Wearable Computing in MIT Media Lab[25)] ・oneM2M（ATIS ： Alliance for Telecommunications Industry Solutions、 TIA：Telecommunications Industry Association)[15)]
	応用研究・開発	◎	↗	・DOT HS 812 014 Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application[26)]
	産業化	◎	↗	・Industrial Internet Consortium[13)] ・NIKE+Fuelband[27)]、 Fitbit[28)]、 Apple Watch（iWatch）[29)]、Jawbone[30)]、 Google Glass[31)]
欧州	基礎研究	◎	↗	・European Research Cluster on the Internet of Things[32)] ・Internet of Things Global Standards Initiative[33)] ・ETSI TS 102 690 V1.1.1、 “Machine-to-machine communications (M2M)、” Functional architecture、 Oct. 2011.[34)] ・oneM2M (ETSI：European Telecommunications Standards Institute)[15)]
	応用研究・開発	◎	↗	・Industrie 4.0[14)] ・New connected car standards put Europe into top gear （European Commission Press Release)[35)]
	産業化	○	↗	・Industrie 4.0 Platform[36)]
中国	基礎研究	◎	↗	・China IoT New Developments and EU- China Cooperation、 China Academy of Telecommunication Research (CATR)、 Ministry of Industry and Information Technology(MIIT)[37)] ・oneM2M (CCSA：China Communications Standards Association)[15)]
	応用研究・開発	◎	↗	・China and Germany to Carry Out Cooperation in "Industrie 4.0”[38)] ・Why China will leapfrog the world in Internet of Things[39)] ・China looks to lead the Internet of Things[40)]
	産業化	◎	↗	・At the end of 2013、 China had 50 million M2M connections、ahead of the U.S. with 32 million and Japan with 9.3 million” - Sylwia Kechiche、 Senior Analyst M2M、 GSMA Intelligence[41)] ・China's most promising smartphone maker reveals first LTE phone、 $13 fitness band[42)]

韓国	基礎研究	○	→	・Busan Selected for IoT Promotion and Development Project [43)] ・oneM2M (TTA: Telecommunications Technology Association) [15)]
	応用研究・開発	○	→	・The Korean Government has proposed a goal to achieve 40% share of the global wearable device market by 2020. - 'Next-generation Device Korea 2020' strategy. [44)] ・ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institutesmart) phone app controls parking[45)] ・Automobile + IT、 Korean cars drive smart[46)]
	産業化	◎	↗	・Samsung Galaxy Gear[47)]、 LG G Watch R[48)]

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) HP webOS
http://ja.wikipedia.org/wiki/HP_webOS (Oct、2014)
2) Snapdragon
http://www.qualcomm.co.jp/products/snapdragon (Oct、2014)
3) W3C HTML5
http://www.w3.org/TR/html5/ (Oct、2014)
4) ARM Cortex-A
http://www.arm.com/ja/products/processors/cortex-a/index.php (Oct、2014)
5) ARM Cortex-R
http://www.arm.com/ja/products/processors/cortex-r/index.php (Oct、2014)
6) ARM Cortex-M
http://www.arm.com/ja/products/processors/cortex-m/index.php (Oct、2014)
7) Node.js
http://nodejs.org (Oct、2014)
8) LXC – Linux Containers
https://linuxcontainers.org/jp/ (Oct、2014)
9) Docker
https://www.docker.com (Oct、2014)
10) Red Bend モバイル仮想化
https://www.redbend.com/ja/mobile-virtualization (Oct、2014)
11) U.S. Department of Transportation Announces Decision to Move Forward with Vehicle-to-Vehicle Communication Technology for Light Vehicles
http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/2014/USDOT+to+Move+Forward+with+Vehicle-to-Vehicle+Communication+Technology+for+Light+Vehicles (Oct 、

2014)
12) 「第 20 回 ITS 世界会議 東京 2013」Honda 出展概要
http://www.honda.co.jp/news/2013/4131008.html (Oct、2014)
13) Industrial Internet Consortium
http://www.iiconsortium.org (Oct、2014)
14) Project of the Future: Industrie 4.0
http://www.bmbf.de/en/19955.php (Oct、2014)
15) oneM2M
http://www.onem2m.org (Oct、2014)
16) 総務省
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000065.html (Oct、2014)
17) 官民 ITS 構想
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/kanminits_140603.pdf (Oct、2014)
18) 特定非営利活動法人ウェアラブル・コンピューター研究開発機構
http://www.teamtsukamoto.sakura.ne.jp (Oct、2014)
19) ムーブバンド
http://www.d-healthcare.co.jp/products/moveband/ (Oct、2014)
20) Sony SmartWatch
http://www.sonymobile.co.jp/product/accessories/smartwatch2/ (Oct、2014)
21) EPSON MOVERIO
http://www.epson.jp/products/moverio/ (Oct、2014)
22) Sony SmartEyeglass
http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201409/14-090/ (Oct、2014)
23) IEEE P2413
http://standards.ieee.org/develop/project/2413.html (Oct、2014)
24) TIA
https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=TIA-4940.005 (Oct、2014)
25) Wearable Computing in MIT Media Lab
http://www.media.mit.edu/wearables/index.html (Oct、2014)
26) DOT HS 812 014 Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application
http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/V2V/Readiness-of-V2V-Technology-for-Application-812014.pdf (Oct、2014)
27) NIKE+Fuelband
http://www.nike.com/jp/ja_jp/c/nikeplus-fuelband (Oct、2014)
28) Fitbit
http://www.fitbit.com/ (Oct、2014)
29) Apple Watch (iWatch)
http://www.apple.com/jp/watch/ (Oct、2014)
30) Jawbone

https://jawbone.com (Oct、2014)

31) Google Glass
https://www.google.com/glass/start/ (Oct、2014)

32) European Research Cluster on the Internet of Things
http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/rfid-iot_en.html (Oct、2014)

33) Internet of Things Global Standards Initiative
http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx (Oct、2014)

34) ETSI TS 102 690 V1.1.1、 (M2M) Functional architecture
http://www.etsi.org/de-liver/etsi_ts/102600_102699/102690/01.01.01_60/ts_102690v010101p.pdf (Oct、2014)

35) New connected car standards put Europe into top gear
http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-141_en.htm (Oct、2014)

36) Industrie 4.0 Platform
http://www.plattform-i40.de (Oct、2014)

37) China IoT New Developments and EU- China Cooperation
http://euchina-ict.eu/wp-content/uploads/2014/06/Xueli_Zhang.pdf (Oct、2014)

38) China and Germany to Carry Out Cooperation in "Industrie 4.0
http://www.fmprc.gov.cn/mfa_eng/zxxx_662805/t1200148.shtml (Oct、2014)

39) Why China will leapfrog the world in Internet of Things
http://venturebeat.com/2014/10/04/why-china-will-leapfrog-the-world-in-internet-of-things/ (Oct、2014)

40) China looks to lead the Internet of Things
http://www.stofficeseoul.ch/19-march-2014-korea-to-push-global-wearable-device-market/ (Oct、2014)

41) At the end of 2013、 China had 50 million M2M connections、 ahead of the U.S
http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2014/06/china-report.pdf (Oct、2014)

42) China's most promising smartphone maker reveals first LTE phone、 $13 fitness band
http://www.theverge.com/2014/7/22/5925759/xiaomi-mi-4-mi-band-specifications-release-date (Oct、2014)

43) Busan Selected for IoT Promotion and Development Project
http://english.busan.go.kr/BoardExecute.do?pageid=BOARD00119&com-mand=View&idx=2159 (Oct、2014)

44) Next-generation Device Korea 2020' strategy
http://www.stofficeseoul.ch/19-march-2014-korea-to-push-global-wearable-device-market/ (Oct、2014)

45) ETRI phone app controls parking
http://www.korea.net/NewsFocus/Sci-Tech/view?articleId=116396 (Oct、2014)

46) Automobile + IT、 Korean cars drive smart、
http://www.rvo.nl/sites/default/files/Korean%20cars%20drive%20smart.pdf (Oct、2014)

47) Samsung Galaxy Gear
http://www.samsung.com/jp/consumer/mobilephone/gear/gear/SM-V7000ZKADCM （Oct 、2014）
48) LG G Watch R
http://www.lg.com/jp/press-releases/20140828-lg-g-watch-r (Oct、2014)

３．５．５　ワークロード特化型アーキテクチャー

（１）研究開発領域名

ワークロード特化型アーキテクチャー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

コンピューターのハードウエア、ソフトウェアのアーキテクチャーのうち、汎用ではなく、特定のワークロードに特化したもの。インターネット検索、ビッグデータなど、今までのアーキテクチャーでは十分に性能が出ないワークロードに対して、出現してきた。

（３）研究開発領域の簡潔な説明と国内外の動向

［背景と意義］

コンピューターのアーキテクチャーは主に２つの要因によって変化する。一つは、新しい革新的な技術であり、例えば記憶装置の性能が劇的に変化したりすることで起きる。もう一つは、コンピューターで処理する負荷のパターン（ワークロード）によって変化する。

コンピューターの黎明期、コンピューター・アーキテクチャーは、商用計算用、科学技術計算用というように、ワークロードによって分化していた。商用計算においては、固定小数点で可変長のデータが主に用いられるのに対して、科学技術計算においては、浮動小数点・固定長のデータが主に用いられていたからである。

その後、ハードウエアの性能の進歩と共に、ソフトウェアの開発コストの問題が浮上してきて、特定のワークロードに特化したコンピューターを作るよりも、汎用のハードウエアにしてソフトウェア資産を継続利用できるようにすることが重要になってきた。このため、IBM System 360 に代表される汎用コンピューターという概念が登場した。その後、1980年代に、Lisp マシンや Prolog マシンなどのワークロード特化型アーキテクチャーが現れたが、半導体を始めとするデバイスの性能向上が著しく、ニッチマーケットのワークロード特化型マシンは、デバイス性能の世代交代に付いて行けずに姿を消して行った。2000 年ころまでは、インテル x86 アーキテクチャーに代表される汎用マシンが市場をほぼ支配していたのである。

その状況は、IT がより深く社会に浸透するにつれて変化しつつある。特定のワークロードだけでも十分に大きな市場ができてきて、専用アーキテクチャーを設計することがコスト的に見合うようになってきたためである。ゲーム機である PlayStaion3 は、高度なグラフィックス機能を実現するために Cell という独自アーキテクチャーを持っているが、全世界で 8000 万台以上を売り上げたとされている。サーバーの分野では、Google のデータセンターは、数百万台のカスタムメードのサーバーを持つとされている。これらは、いずれもゲームや検索という特定のワークロードに特化したアーキテクチャーを持っている。

今後、さらに IT が社会の隅々まで浸透するにつれて、個別のワークロードに特化したアーキテクチャーが現れるだろう。新しいワークロードのデマンドをいち早く捉え、それに特化したアーキテクチャーの研究開発で先陣を切ることが大切である。

［これまでの取り組み］

1. Web 検索

インターネット上の大規模ワークロードとして典型的なものは、検索である。Google は、インデックスだけで 100 ペタバイトのデータを持っていて、各検索リクエストに対して、これらのインデックスを並列に検索する。これらの検索インデックスは、現在は主記憶上に保持されている。Google のデータセンターは、検索、クローリングなど、それぞれのワークロードに特化したサーバー構成を持っている。また、これら大規模並列なアーキテクチャー上で動くソフトウェアプラットフォームとして、Map/Reduce を利用している。Map/Reduce のアイデアは、その後オープンソース化され、Hadoop として世の中で広く使われるようになった。

2. ゲーム・マルチメディア

家庭用の据え置きゲーム機（コンソールと呼ばれる）は高度なグラフィックス処理が必要とされる。2006 年に発売されたソニーPlayStaion 3 は、GPU。PlayStation 3 の Cell プロセッサーは、Power Architecture コアに、8 個の SPE と呼ばれるコプロセッサーを 1 チップのパッケージに収めたものであった。このアーキテクチャーは、当時のゲーム市場において要求された、高度なインタラクティブグラフィック性能を実現するために設計された。ゲームを主眼としていたために、浮動小数点演算の精度は単精度に抑えられていた。

また、パソコンやスマートフォンでは、グラフィック用に GPU を装備することが標準になっている。

3. ネットワーク

ルーターやファイヤーウォールなどのネットワーク機器は、より柔軟な機能をソフトウェアで実現するために、ネットワークプロセッサーと呼ばれる専用アーキテクチャーを持つプロセッサーが使われることが多い。ネットワークプロセッサーは、異なる複数の処理をパイプラインで行うプロセッサーを中心に、パケットのビット演算、パターンマッチ、暗号化などの専用ハードウエアを組み合わせたものである。ネットワーク機器の市場はサービスプロバイダールータ/スイッチ市場だけで年間 200 億ドルに達するとされていて [1]、専用のプロセッサーの市場も十分に大きい。

4. トランザクション

電子商取引などのインターネット上のトランザクションは、トラフィックのピークが非常に鋭いため、通常の関係データベースではピーク時の負荷を処理しきれないという問題があった。このため、NoSQL と呼ばれる、関係完全性を犠牲にしたワークロード特化型のデータベースが現れてきた。これらの NoSQL データベースの多くは並列化に伴う整合性保証の困難さのために、従来トランザクション処理で必須とされてきた ACID 特性を犠牲にしている。例えば、amazon Dynamo においては、一時的に複数ノードのデータの不整合を許す。ショッピングカートなどのワークロードにおいては、チェックアウト時に整合性を検査すれば良いからである。

5. アナリティクス

あるデータセット全体から予測モデルを作ったり、データマイニングするなど、いわゆる

アナリティクスと呼ばれるワークロードが増加している。このようなアプリケーションは、主にランダムなアクセスを行う通常のトランザクションとは異なり、（アルゴリズムにも依存するが）ほぼ全域のデータを対象としたアクセスになることが多い。例えば代表的なクラスタリングアルゴリズムである、k-平均法は、各イテレーションにおいてすべてのデータに逐次的にアクセスする。IBM 社の Netteza はこのようなワークロードに特化したデータベースであり、ハードディスクから逐次的にデータを読み出す速度を最大化するためにハードウエア・ソフトウエアを専用設計したものである。

また、ソーシャルメディアなど Web 上のデータや、遺伝子の発現情報のデータ等、グラフ構造として表現されるデータが増えてきている。このようなグラフ構造は、ノード数が何十億という巨大なものになる。このため、Google 社の Pregel、 オープンソースの Sinall/Collect など、並列計算機上でグラフ構造の分析を行うためのソフトウェアツールが現れ始めている。

6. HPC

現代の科学技術計算には、巨大なスーパーコンピュータが使われる。これらのスーパーコンピュータも、ワークロードによって様々なアーキテクチャーを持つ。HPC の詳細については、研究開発領域 3.5.6「ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC)」を参照のこと。

7. モバイル

スマートフォンなどのモバイルプラットフォームは、マルチメディアなどの信号処理のワークロード要求に加えて、消費電力やダイサイズなどの他の要件も考えなければならない。モバイルアーキテクチャーについては、研究開発領域 3.5.4「モバイルコンピューティング」を参照のこと

8. 分散システムの運用管理

Google や amazon など、大規模なデータセンターにおいては、仮想化とそれに伴う運用管理のアーキテクチャーが極めて重要である。仮想化については、ハードウエアレベルでの仮想化を行う VMWare や KVM などのテクノロジーが主流であったが、最近はより軽量で運用管理のしやすい CoreOS/Docker などの技術が急速に注目を浴びている。またその管理のアーキテクチャーとして、 Vagrant や kubernetes などのテクノロジーが現れ始めている。その他データセンターの運用管理に関わる技術動向については研究開発領域 3.5.3「クラウドコンピューティング」を参照のこと。

［今後必要となる取り組み］

今後明らかに増加するワークロードに対して、いち早くそれらのワークロードに最適化したアーキテクチャーの研究開発を進めることが大切である。特に、(1)センサーデータなどリアルタイムに発生するビッグデータへの対応と、(2)研究開発から応用までの展開が著しい機械学習への対応が重要である。

1. センサーデータなどリアルタイムのビッグデータ

IoT (Internet of Things)や CPS(Cyber-Physical Systems)など、実世界のセンサーからのデータに基づいて社会基盤をインテリジェント化する動きが加速している（研究開発領域3.10.8「社会インフラとビッグデータ」参照)。これらのセンサーから得られるデータは、リアルタイムのストリーミングデータであり、これらを効率よく処理するアーキテクチャーが求められる。現在知られているのは、CEP (Complex Event Processing)と呼ばれるもので、ルールベースでイベントを処理するものであり、IBM 社の InfoSphere Streams など商用のツールや、Apache S4 などのオープンソースツールが知られている。また、通常のバッチスタイルの処理とストリーム処理を統一的に扱うアーキテクチャーとして Lambda Architecture が提唱されていて、その実装として Storm がある。

2. データ分析・機械学習

近年進歩が著しいデータ分析や機械学習のアルゴリズムは、今までのトランザクションとは大きく違ったワークロードを持っている（前述のクラスタリングアルゴリズム k-平均法はその一つである)。特に注目が必要なのは、粒子フィルターに代表される任意の確率分布をランダムサンプリングで表現する手法と、ディープラーニングに代表されるニューラルネットワークのワークロードである。どちらも細粒度の並列計算に向いたアルゴリズムであり、FPGA などの専用ハードウエアによる性能向上が大きく期待できるものである。

（4）科学技術的・政策的課題

1. ワークロードの動向の見極め
   ワークロードにドライブされるアーキテクチャーの研究開発を成功させるためには、第一に今後重要となるワークロードをいち早く見極める活動が必要である。このためには、情報技術の専門家を交えて、広く産業界の動向情報を交換し、将来に現れるワークロードを予測する活動を行うべきである。特に、我が国において競争力のある製造業、サービス業などの分野において発生する新たなワークロードを見過ごすことの無いようにすべきである。
2. ソフト・ハード・ネットワーク・運用管理を包括的に設計する手法開発および人材育成
   本領域で取り上げたアーキテクチャーはいずれも、該当するワークロードに対して、ハードウエアの構成とソフトウェアの機能を同時に設計して最適化してものである。多くのアーキテクチャーは高度の並列計算を前提としていて、さらにネットワークや運用管理を含めた最適化が行われている。このようなアーキテクチャーを設計するためには、運用管理までを含めた包括的な観点でアーキテクチャーを設計できる人材が必要である。
3. アーキテクチャーの普及に関する取り組み
   技術的にどんなに良いアーキテクチャーができたとしても、広く使われなければ商業的には失敗である。このため、標準化の支援や規制の見直しなど、政策的に提案されたアーキテクチャーの普及を推し進める活動も欠かせない。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

1. データセンター、サーバー
   データセンターで生じるワークロードについては、Googleやamazon.comが世界最大級のワークロードを実際に持っていて、またそれらに対して十分に大きなアーキテクチャー的な投資ができる。従って、彼らの動向を常にウオッチすることは欠かせない。特に近年注目されるのは、高並列な計算を行うために必要な運用管理のインフラに関するアーキテクチャーであり、CoreOs、kubernetesなどである。
   また、これらのテクノロジーは、オープンソースとして社外に出てくることも多く、Apacheなどのオープンソースコミュニティの動きは見ておく必要がある。
2. ストリーミングビッグデータ向け処理基盤。
   ストリーミング向けの処理基盤はまだ黎明期であり、決定版が無い。その中で、Twitterの基盤を開発したNathan MarzによるLambdaアーキテクチャーは注目すべきものの一つである。重要な概念の一つは、データのimmutablilityであり、獲得されたデータがその後書き換えられないことを指す。このimmutabilityは、個別ノードの障害が避けて通れない高並列計算において、重要性が認識されつつある。

（６）キーワード

・ワークロード、検索、ソーシャルネットワーク、ゲーム、HPC、ネットワークプロセッサー、アナリティクス
・並列アーキテクチャー、Map/Reduce、 Hadoop
・ストリーミング処理、CEP、Lambda アーキテクチャー
・データ分析、機械学習、粒子フィルター、ディープラーニング
・Immutability

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	HPCの分野においては、一定の地位を占めているが、その他のワークロード特化型アーキテクチャーにおいては、日本の存在感は小さい。
	応用研究・開発	△	→	オンライン分散機械学習フレームワークJubatusをいち早くオープンソースで世に出していて、この分野では一定の存在感があるが、特にサーバー側のアーキテクチャーについては、人材も含めて米国とは勝負にならない。
	産業化	△	↘	Sony Playstationなどゲームコンソールの領域や、組み込みの分野で独自アーキテクチャーを持っていたが、市場の変化によって他国の後塵を拝するようになってきている。
米国	基礎研究	◎	→	Map/Reduce、 GPU、 ネットワークプロセッサーなど、ほとんどのアーキテクチャーは米国発であり、層が厚い。
	応用研究・開発	◎	→	Googleなどネット上でサービスを提供する企業では、基礎研究から応用までの期間が極めて短い。基礎研究での成果は直ちにWeb上のサービスとして提供され、その結果が研究現場にフィード・バックされるという好循環を生んでいる。
	産業化	◎	→	GoogleやamazonはⅠ、巨大なワークロードに対して独自のアーキテクチャーをいち早く産業化し、そのメリットを享受している

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）http://ex-press.jp/previous/lfwj/news2013/news_20131127_02.html

３．５．６　ハイパフォーマンスコンピューティング（ＨＰＣ）

（１）研究開発領域名

ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)

（２）研究開発領域の簡潔な説明

(a) 超高性能計算能力を有するスーパーコンピューターのハードウエアおよびソフトウェアのシステム技術、および(b)スーパーコンピューターが有する計算能力を科学や産業などに活用するアプリケーション技術の研究開発、さらに(a)(b)全体のコ・デザイン。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2020 年代においてエクサ(10^{18})フロップス(FLOPS=毎秒あたりの浮動小数点演算数)を達成するスーパーコンピューター実現に向けて、日米欧中の各国がしのぎを削っている。主にデナードスケーリングの終焉により、必要な並列性が億単位とも予想され、その際に消費電力を約 20~30MW に抑えるには 1 ワットあたり 33~50 ギガフロップスと、現時点の世界最高値を 10 倍程度改善しなくてはならず、2008 年に達成されたペタ(10^{15})フロップスよりはるかに困難である。2014 年度時点では、各国の当初の計画に若干の遅れが生じており、エクサの達成は 2018~2020 年から、2020 年代前半頃、と後退している。

ただし、2015-2020 年にかけて、(a)に関して各国はエクサへの橋渡しとして数百ペタフロップスに至る中間的な性能のマシンを計画しており、数十万～数百万のプロセッサーを内包するハードウエアを、厳しい電力制約化で実現するために、メニーコア・ヘテロジニアス型アーキテクチャーや、積層メモリー・不揮発性メモリー、超高速光ネットワーク、高効率冷却など、IT における最先端のデバイスやハードウエアを IDC (Internet Data Center) 等に先行して採用する傾向が高まっている。加え、巨大な電力を消費する大規模システムの高度な信頼性の達成、数億の並列性の有効なプログラミングなど、大規模スパコンの各種システムソフトウェア技術の研究開発にも多くの投資がなされている。

(b)に関しては、新たな数値的な手法やアルゴリズムにより、現行の数十ペタフロップスのトップスパコンにて数百万から一千万以上の並列性を有効に活かしたアプリケーション群が多く出現している。だが、エクサへ到達する事の技術的な困難さから、アプリケーション・システムソフトウェア・ハードウエアの共同の研究開発「コ・デザイン」の重要さが強調され、各種プロジェクトに取り入れられている。

世界のスパコンの性能の上位 500 位までのコンピューターを LINPACK ベンチマーク（密行列の大規模連立一次方程式を解くベンチマーク）でランキングし、半年ごとに更新される TOP500[1)] リストでは、最新の 2014 年 11 月版で再び中国防衛大学の Tianhe-2 が 33.87 ペタフロップスで世界一位となり、2013 年 6 月以来 4 連続を記録した。Tianhe-2 はメニーコアプロセッサーである Intel Xeon Phi を各ノードで 3 基、通常の Xeon を 2 基集約したヘテロジニアスアーキテクチャーの計算ノードを 1 万 6000 基備えており、総合演算コア数は 312 万個、ピーク性能は 54.9 ペタフロップスに達する。その際の電力は 17.8 メガ W と報告されており、エクサにおける全体消費電力目標限界値に近いが、その際の電力効率は 1.9 ギガフロップス/W であり、50 ギガフロップス/W の目標値には 27 倍の開きがある。

近年の IDC(Internet Data Center)におけるクラウドやビッグデータ基盤の出現により、

HPC もそれらへの対応や、IDC インフラとの統合化の流れも始まっており、クラウドに関しては米国 DoE や NSF の試験的な導入を初めとして、Amazon HPC Instance[2]や Penguin Computing[3]が商用クラウド HPC サービスを開始している。また、各国のエクサの計画にはビッグデータも重要な項目として記載されており、ハードやソフトのシステムレベルの対応も要求され、シミュレーションが発生する莫大なデータの処理や、一般 IDC では扱えない規模や複雑さのビッグデータを処理するための基盤として期待されている。

以下それらの詳細を述べる。

半導体におけるデナードスケーリングの終焉により、大規模スパコンの演算プロセッサーは、一つのチップに複数の演算コアを備えたマルチコア型から、さらに大量のコアを備え、演算に対する電力効率が良いメニーコアプロセッサーによる超並列型と進化しており、米社である NVIDIA Tesla GPU や Intel Xeon Phi などが代表的である。一般にメニーコア型は、大量の連続的なデータをベクトル処理するスループット演算にアーキテクチャーが最適化されており、反面逐次処理などのレイテンシーが重視される演算性能が弱く、プログラム実行の中でも十分な並列性が確保できない状況では大幅なオーバーヘッドが生じ、性能向上が困難になる。これはいわゆる「アムダールの法則」の問題であり、近年ではその解決のために Tianhe-2 のようにスループット型のメニーコアプロセッサーとレイテンシー型のマルチコアプロセッサーを組み合わせ、処理の性質によって切り替えるヘテロジニアス型のアーキテクチャーが主流であり、Tianhe や世界二位の米国 DoE オークリッジ研の Titan を初め、Top500 のトップ 20 位の内 9 台がヘテロジニアス型である。

今後、電力制約により主流はさらにメニーコア型・ヘテロジニアス型に移っていくが、その際に種々の問題があり、100 ペタフロップス級から将来のエクサに向けての研究開発の課題となっている。一つはメニーコアプロセッサーが要求する莫大なメモリーバンド幅を満たすメモリーシステムであり、2015-16 年から DRAM を三次元積層し、新しい高速インターフェースを付加した High Bandwidth Memory[4]、 あるいはその対抗馬である Hybrid Memory Cube[5]に移行していく事が予定されている。これらは現状の GDDR5 から 2-4 倍のバンド幅向上・1 テラバイト/秒のバンド幅が低電力で実現できるとされているが、計算パワー向上に見合ったメモリー容量の向上は困難である。短期的には DDR4 に代表される従来型・低速だが大容量なメモリーとの組み合わせでメモリー階層を構成する方向性が追及され、長期的には DRAM に代わる大容量・高密度・高速な ReRAM や STT-MRAM などの不揮発性メモリーデバイスに置き換わって行く可能性もある。

関連する問題として、メニーコアとマルチコアのプロセッサー間通信が、現状では PCI-e であり、今後の HBM 等で実現されるバンド幅の 1/100 程度と大幅に制約され、プログラミングの観点からも双方のメモリー間にコヒーレンシがなく、ユーザーは明示的にデータをプロセッサー間で転送する必要があった。この点、米 AMD 社ではコンシューマ CPU で推進している GPU・CPU 統合型のアーキテクチャーである HSA[6] (Heterogeneous System Architecture)をサーバーや HPC 用の大規模プロセッサーにも導入し、一つのダイにスループットとレイテンシーコアを統合し、かつそれらが OS やコンパイラからもメモリー共有などなるべく単一の環境になるようにする計画である。一方米 NVIDIA 社は組込みでは統合を進めるものの、サーバー・HPC では同社が開発し、標準化を目指す高性能プロセッサー間結合網である NV-Link を CPU ベンダーに採用を働きかけ、柔軟な組み合わせの構成を目指

す。既にIBM社がPower 9など、将来の同社のレイテンシープロセッサーにNV-Linkの採用をアナウンスしており、サーバーARM 系のベンダーもこれに続くことが見込まれている。NVIDIAの2016年に登場する次世代HPC用GPUであるPascalは、メモリーとしてHBMを採用し大幅にバンド幅を上げると共にNVLink[7]を搭載し、PCI-e 3の5倍の80ギガバイト/秒のバンド幅を実現し、その次の世代ではさらに大幅に性能向上する事をアナウンスしている。Intelは Xeon Phi(MIC)において、次世代の Knights Landing ではヘテロジニアス化せず、均質なメニーコアだが、並列性が低い時は一部のコアだけを用い、周波数を上昇させる Turbo Boost で補うとともに、数百ギガバイト/秒のパッケージメモリーを搭載し、かつ容量確保のために DDR4 メモリーのインターフェースを備え、階層的なメモリーアーキテクチャーを実現するとアナウンスされている。

実際、多くの実アプリケーションではメモリーの容量やバンド幅、さらにはネットワークのバンド幅が重要だが、それがあまり結果に影響しなかった Linpack/Top500 への反省が進んでおり、それらを指向する HPCG ベンチマーク [8]やビッグデータベンチマークのランキングである Graph500 [9]の開発が進み、Linpack に並び重要な指標なりつつある。今後は厳しい電力制約下でフロップスのみを追求せず、実アプリケーション加速のためにメモリーやネットワークのバンド幅をバランス良く確保する傾向が強まるであろう。

もう一つの問題は、メニーコアプロセッサーやヘテロジニアスなアーキテクチャー向けのシステムソフトウェアやプログラミング基盤、さらにはそれらに適したアプリケーションやその内在するアルゴリズムの開発である。これらに関しては、ハードウエアよりライフサイクルが長く、かつより普遍的でもあり、より重要な研究開発とも言える。これらに関しては多くの研究が米国中心に行われており、欧州もそれに近く追随している。多くの事例があり全てを紹介するのは困難だが、OS、省電力を含む資源管理、種々の実行ランタイム、数値ライブラリ、耐故障性機能、性能計測・チューニング、プログラミング言語処理系およびそのコンパイラ、I/O ライブラリなど、多岐に亘る。特にメニーコア・ヘテロジニアス型のプロセッサーに対しては、OpenCL や CUDA、TBB のような低レベルのものだけでなく、既存のプログラムにディレクティブ宣言を追加するタイプの OpenACC2.0 [10]や OpenMP4.0 [11]が進展し、多くのアプリケーションの移植が達成され、アプリケーションによってはCUDA 等で記述したのと同等の性能を得ることに成功しており、今後のさらなる進展が望まれる。

今後は我が国の TSUBAME2 のような不揮発性メモリーのスパコンにおける積極採用が見込まれ、I/O 性能の向上、さらに将来はメモリー階層の深化と容量の拡大が実現される。多くのスパコンのアプリケーションは広大なメモリー空間を必要とするが、近年ではバンド幅を確保するためにその容量が大幅に犠牲になっており、2015 年に配備予定の富士通FX100 では、プロセッサー性能が 1 テラフロップス、メモリーバンド幅が 480 ギガバイト/秒に対し、メモリー空間はわずか 32 ギガバイトと、FX10 から基本性能は 5 倍だがメモリー空間は増えていない。汎用の DDR4-DRAM も、消費電力とコストの面で大きくは増やせない。そこで、将来はより密度が高く、消費電力が低い不揮発性メモリーに下位のメモリーレイヤーは置き換わって行くものと考えられる。

ただし、現状では不揮発性メモリーの主流はフラッシュであり、高容量・低コストだがメモリーバスに直接接続するには低速すぎ、書き込み可能回数が著しく低く、現状では主に

I/O の加速に用いられている。その中で注目を浴びているのがバーストバッファ技術で、スパコンやビッグデータ処理の集中する I/O 操作を一度フラッシュ中心のバーストバッファで蓄え、後に平均化した形で連続してバックエンドの並列ファイルシステムに書き込み、性能向上だけでなく、I/O サーバーのインフラの大幅な削減が可能となる。

更に、厳しい電力制約での性能確保のために、マシンの電力や冷却に関しても、最先端の技術によりその効率を大幅に高める研究が進んでいる。Green500 [12]ベンチマークは Linpack 実行時の電力効率をランキングしているが、2014 年 11 月一位は GSI Helmholtz Center の L-CSC の 5.27 ギガフロップス/W である。上位は全てメニーコア・ヘテロジニアス型のマシンであるが、エクサの目標からはまだ 10 倍近い開きがあるのが現状で、半導体の演算部分の微細化だけでなく、システムソフトウェアによる電力のきめ細かな制御など、さらなる消費電力削減の技術開発が重要である事を示している。

ネットワークに関しては、BlueGene/L や京/FX10 に代表されるスパコン専用のネットワークが多次元トーラスの直接結合網、クラスタ型のスパコンでは Infiniband や 10/40GbE に代表される汎用の高性能ネットワークが主に Fat Tree の間接結合網であった。しかし、Cray 社が 2012 年に発表したスパコン XC30 で専用の DragonFly 間接結合網に移行し、さらに Intel 社が Cray 社のネットワーク部門と技術と Infiniband の専業であった QLogic 社を買収し、2016 年以降 Xeon、 Xeon Phi のハイエンドプロセッサーに Omni Scale 結合網を内蔵するとアナウンスした。後者も基本 DragonFly や Fat Tree がトポロジーの中心であり、必要な長距離結合も光ネットワークの大幅な低コスト化と相まって、今後は多くのアプリケーションで要求される全対全通信性能や短い通信レイテンシーに有利な間接結合網が主流になっていくものと予想される。

（４）科学技術的・政策的課題

我が国では「フラッグシップ 2020」という名称で、ポスト京コンピューターの開発が 2014 年度より開始された。最終的な性能は技術および予算的な状況で流動的だが、2020 年度までに数百ペタフロップスが実現される予定である。しかし後に述べるように、米国や中国の動向から楽観視できないのが現状で、その中では日米欧でシステムソフトウェアやアプリケーションを共同開発しようという動きも始まっている。

米国では、エクサを目指した DoE FastForward[13]プロジェクトに Intel、 NVIDIA、AMD、IBM などが参加するが、それらは各社がターゲットとしている組み込みからサーバー・HPC の IT マーケット全体の製品ポートフォリオの中での、ハイエンドのプロセッサーに HPC に適した機能を多く入れ込むためのプロジェクトであり、現状でも Top500 でのプロセッサーはこれら各社のものが独占している。一方日本の京コンピューターや、その商用版の FX10 では富士通が開発した SPARC-fx、また SX-ACE では NEC が開発したマイクロプロセッサーを採用しているが、TOP500 の中でのシェアは 1%未満である。

今後のスーパーコンピューターの高性能化は、微細加工技術の進展による半導体の高集積化を活用したプロセッサーの処理能力向上だけでなく、三次元メモリーや不揮発性メモリー・光ネットワーク・各種省電力技術、さらにはそれらを活かすシステムソフトウェアやアプリケーションの進化やコ・デザインが重要である。当然このような総合的な開発法は、従来の微細化のみに頼るスパコン開発法と比べて遥かにコストがかかり、他のスパコンや IDC

サーバーから組み込みに至る他の IT エコシステムに対する技術的なレバレッジによる開発コストの分散が総合的なコスト削減、および迅速な進化の鍵となる。その点、他のマーケットにレバレッジが期待できず、かつ国際的にシェアが伸びない我が国のスパコンに特化した開発法は圧倒的に不利になると言える。この中で京コンピューター/FX10 においては米国の並列ファイルシステムである Lustre を採用するなど、レバレッジを確保する事に一部成功しており、今後はアプリケーションやシステムソフトウェアの汎用性を担保するハードウエア開発を目指すと共に、コ・デザインのためには国際共同開発を含めた体制を確保する事が重要となる。この点、米 DoE と文部科学省間のエクサスケールスパコンのシステムソフトウェアに関する日米協力取極 [14]が締結されており、その具体化が今後望まれる。

政策的には、継続的なスーパーコンピューターの開発計画が重要となる。今まで我が国では国家プロジェクトとして単一頂点のフラッグシップマシンを 10 年程度のインターバルで開発してきたが、進化の早いスパコンでは十分国際的な動向に追従できず、我が国のスパコンのシェア凋落を招いてきた。そこで「今後の HPCI 計画推進の在り方について」委員会の報告書 [15]では、それに加えて複数のリーディングマシンの開発と配備を提案している。特にフラッグシップマシンの開発では、スパコン技術全体の発展・維持のため、垂直統合的にシステム開発を行うのが通例であるが、このためシステムの完成までには長い年月を要し、登場が予想される最新技術を完成時に just-in-time で用いるリスクを背負いきれない故、技術的に保守的になる傾向がある。そこで、フラッグシップを運用時に補完するだけでなく、技術的にリスクを負った、開発先行的なマシンとしてのリーディングマシンが求められる。その点、リーディングマシンの役割、特にどの部分の研究開発に注力すべきかの議論を今後早急に行う必要があろう。

更に、エクサを達成する 2020 年代前半から半ばにかけ、半導体プロセスの微細化も限界を迎えると予想されている。その後もどのように継続的に速度向上を果たすのか、いわゆる「ポスト・ムーア」時代のための基礎研究も今後重要になるであろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国はメインのエクサ実現に向けては、DoE の各研究所に多くのマシンおよび研究資源が集約される形になっている。一方ビッグデータやクラウドの動きは NSF など、大学中心のセンターにもみられる。2016 年登場の DoE Los Alamos/Sandia 研の共同調達の Trinity、および Lawrence Brerkeley 研の Cori は Xeon Phi を用い、30~50 ペタフロップスの性能を達成する。一方 2017-2018 年に配備される DoE の 3 研究所の Coral 共同調達プロジェクト [16]では、2014 年 11 月の IEEE/ACM Supercomputing 国際会議直前に、Oak Ridge 研(Sierra)、および Lawrence Livermore 研(Summit)が NVIDIA の 2017-2018 年の GPU である Volta を IBM Power9 と接続したヘテロジニアス型のスパコンとし、150 ペタ級のマシンを二台実現すると発表した(それぞれのマシンの名称はカッコ内)。もう一つの研究所である Argonne 研の詳細は現時点でまだ発表されていない。

これらをベースに、2020 年初頭には Trinity のアップグレード、さらには 2020 年代前半にはエクサフロップスのマシンを実現するのが現状の米国のロードマップである。このために、2016 年度の予算化を目指し、総合的なエクサスケールの国家プロジェクトを DoE 中心に立ち上げる試みが続いている。すでに開発すべき課題となる技術の整理がなされ報告され

ており [17]、技術ロードマップの章では、演算処理を行う論理、主記憶、ストレージ、インターコネクト、パッケージングと冷却、耐故障性、運用技術、プログラミングモデルと言語、などが取り上げられている。

欧州では Mont-Blanc[18]、 DEEP、 CRESTA のエクサスケールの開発プロジェクトの後継として Mont-Blanc2、 DEEPER プロジェクトが立ち上がり、それぞれの「低電力組み込みプロセッサーの活用」「メニーコアプロセッサーに対し専用設計の EXTOLL インターコネクトの結合」というテーマを継続している。また、新たなプロジェクトとして Human Brain Project [19]が 2013 年に立ち上がり、欧州 Horizon 2020 科学技術政策の中で 10 年間で 10 億ユーロの投資が見込まれているが、その中で脳の機能シミュレーション用に 2017 年に 100 ペタ級のマシン、引き続きプロジェクトの終盤にはエクサ級のマシンの配備が見込まれ、さらにポスト・ムーア時代に向けニューロモーフィックコンピューティングの研究開発がプロジェクト内の重点項目として行われる。

中国では 2015-2016 年に Tinhe-2 の Xeon Phi を、最新の Knights Landing に置き換える事によりアップグレードし、世界初の 100 ペタフロップス級のマシンを実現する予定である。更に、自国開発のマシンを 2016-2017 年頃に開発・配備するという噂もあるが、詳細は不明である。さらにエクサフロップスも、米国製のメニーコアプロセッサーの活用と、自主開発の両輪で、世界で一番乗りを目指すという可能性も示唆されている。

米国側のアセスメントでも、ハードだけでなく、ソフトウェアに関する莫大な開発コストが示唆されている。その中で、ハードウエアは各国・地域の独自性のある開発体制を保持しつつも、持続性のあるソフトウェア部分の共通化を促進化す方向性が示唆されている。その点、IESP や、後継の BDEC [20]のように、国際協力のフレームワークが重要であり、先の日米協力も実効性のある施策につなげることが重要である。また BDEC ではビッグデータとの協調も中心的なテーマとなっており、スパコンと IDC・ビッグデータ技術の統合化も重要な方向性である。

（6）キーワード

大規模システム、低消費電力システム・冷却技術、三次元積層メモリー・不揮発性メモリー、メニーコアプロセッサー・ヘテロジニアスアーキテクチャー、光ネットワーク・インターコネクト技術、超並列プログラミングモデル、耐故障性、高性能ストレージ・ビッグデータ、高性能アプリケーション、計算科学

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・スーパーコンピューターに関する基礎研究は産官学で行われているが、米国には質・量とも劣る。今後の基礎研究の方向性が不透明である。
	応用研究・開発	○	↗	・京コンピューターが稼働し、対応する超並列アプリケーションの開発が進展し、ポスト京の開発もスタートしている。
	産業化	△	→	・スパコン市場における日本メーカーの国際的なシェアは伸びておらず、他のIT産業とのレバレッジがない。産業応用は少しずつ進みつつあるが、独自の産業レベルのアプリケーションは弱い。
米国	基礎研究	◎	→	・DoEを中心に研究費の手当がされ、大学・メーカーにも手厚く研究費が渡り、多くの研究者がスパコンに関する基礎研究に携わっている。
	応用研究・開発	◎	→	・Top500において圧倒的なシェアを握っており、それらを利用したアプリケーション開発、システムソフトウェア開発、ハードウエア開発技術も、米国が最先端を走っている。
	産業化	◎	→	・Intel・NVIDIAに代表されるように、スパコンと他のIT分野とのレバレッジが盛んに行われており、ハード・ソフト共に新会社の参入も盛ん、ビッグデータ等との統合化も示唆されている。産業応用も盛んである。
欧州	基礎研究	○	↗	・Horizon2020で欧州でもビッグデータ等と共に予算措置がなされ、高い性能を有するシステムも各所に設置、アプリケーションやシステムソフトウェア中心に競争力の高い研究がなされている。
	応用研究・開発	△	↗	・一部の特殊なスパコンを除き、独自のスパコンのシステム研究は弱いが、ARMプロセッサーやExtollなどを含む一部の技術を中心に、新たな開発の試みが試みられている。
	産業化	○	→	・近年ではBullなど一部のメーカーは国策的に台頭してきているが、独自技術は少ない。アプリケーションや産業応用では強みはある。
中国	基礎研究	△	↗	・基礎研究はハード・システムソフトウェア・アプリケーションの全領域でまだ日米欧に比べて弱いが、急速に力をつけつつある。
	応用研究・開発	○	↗	・Tianheシリーズだけでなく、米国技術を買った上で追加開発にて独自開発したShenweiなど、大規模スパコンを構築する力は日米に匹敵する。比較して大規模アプリケーション技術はまだ弱いが、最適化・運用技術は急速に向上しつつある。
	産業化	△	↗	・Inspur、 Huaweiなどのメーカーが台頭しつつあるが、中国国内市場がまだメインである。アプリケーションでは産業界へ影響を及ぼすには至っていない。
韓国	基礎研究	×	→	・韓国におけるスーパーコンピューターの基礎研究は見るべきものがほとんどない。
	応用研究・開発	×	→	・韓国が有するスーパーコンピューターの計算能力は進展しておらず、応用技術の進展もない。
	産業化	×	→	・システム・アプリケーションとも産業化や利用は乏しい。しかし、サムスン社は大規模な最先端ファブを有し、SK Hynixと共に次世代メモリーでは世界的なリーダーでもある。これらが、スパコンがクラウドやビッグデータインフラと統合と共に、産業化が進展する可能性はある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) TOP 500 Supercomputer Sites:
http://www.top500.org/
2) Amazon AWS HPC instance:
http://aws.amazon.com/hpc/
3) Penguin Computing:
http://www.penguincomputing.com/
4) JEDEC High Bandwidth DRAM Memory Standard:
http://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd235
5) Hybrid Memory Cube Consortium:
http://www.hybridmemorycube.org/
6) HAS Foundation:
http://www.hsafoundation.com/
7) NVLink:
http://www.nvidia.com/object/nvlink.html
8) HPCG Benchmark:
http://hpcg-benchmark.org/
9) The Graph 500 List:
http://www.graph500.org/
10) OpenACC Standard:
http://www.openacc-standard.org/
11) OpenMP 4.0 Specifications:
http://openmp.org/wp/openmp-specifications/
12) The Green500 List:
http://www.green500.org/
13) The DoE FastForward:
https://asc.llnl.gov/fastforward/
14) 「スーパーコンピュータに関する協力取極」:
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu109/siryo1-2_part15.pdf
15) 文部科学省「今後の HPCI 計画推進の在り方について」委員会の報告書
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/gaiyou/1348991.htm

16) “Department of Energy Awards $425 Million for Next Generation Supercomputing Technologies”:
http://www.energy.gov/articles/department-energy-awards-425-million-next-generation-supercomputing-technologies
17) U.S. Department of Energy、 Office of Science、 Advanced Scientific Computing Research（ASCR）:
http://science.energy.gov/ascr/（多くのドキュメントが掲載）
18) MONT-BLANC Project: http://www.montblanc-project.eu/、あるいは European scalable and power efficient HPC platform based on low-power embedded technology、
http://www.exascale.org/mediawiki/images/6/6b/Talk11-Ramirez.pdf
19) Human Brain Project:
http://www.humanbrainproject.eu/
20) Big Data and Extreme Computing:
http://www.exascale.org/bdec/

3.6 IT メディアとデータマネジメント

本俯瞰区分ではウェブ、ソーシャルメディア、センサーの多種多様で超大量なデータを統合、管理、検索、分析するための技術に関する研究開発を扱う。

モバイル技術の発展・普及によりスマートフォンなどの利用者が移動しながら情報の発信や利用を行うようになり、個人適応技術に支えられた SNS などプラットフォーム上にテキストや画像映像などのユーザー生成コンテンツ（Consumer Generated Media, CGM）が大量に生成されている。こうした CGM は Wikipedia のような知識の蓄積を生み出すだけでなく、人々が社会の状況を主観的に捉え情報発信する Twitter などは速報性の高いソーシャルセンサーと考えることができる。最近では位置情報が付加された CGM も増えており活用に向けた期待が一層高まっている。

もう一方で、工業生産設備の稼働状況のセンシングによる生産設備の最適運用や生産された工業製品の稼働状況をモニタリングにより適切なメンテナンスなどのサービスを組み込んだ付加価値づけといった流れが、社会インフラなどにも対象を拡大していくなかで、様々なセンサーから得られるデータの時間的・空間的な動態を把握し、解析する技術の重要性が高まっている。

このような背景から本俯瞰区分では次の 6 つを重要な研究開発領域として採りあげる。

1. ビッグデータの統合・管理・分析技術
   スマートフォンや自動車のテレマティクスなど様々な応用領域で移動を伴う情報の発信や利用がデフォルトとなりつつあり、異なる場所で生成したデータを連携するための分散データベース技術、データセンター仮想化技術などは重要な研究領域となっている。データセンターの消費電力低減化も重要である。また、異なるステークホルダの保有するデータを連携させることで新たな知識を抽出できる可能性が高まっており、このための ID 連携やプライバシー保護技術も重要な研究領域となっている。
2. ユーザー生成コンテンツとソーシャルメディア
   SNS などに発信される情報は人々が社会の状況を主観的に捉えたソーシャルセンサー情報と考えることができる。これらは、専門家の手を経ずとも人々が活用できる情報源となり得ること、スマートフォンなどを介した Crowd-sourced sensing により空間的に固定された専用センサーの捕捉エリアを補える可能性があることなど、特に突発的な災害など非常時におけるセンサーデータ収集の手段として注目されつつある。しかし、こうした情報や知識の信頼性・信憑性に対する問題も浮上しており、センチメント分析、関連する言説との意味的関係の可視化、画像・映像、放送メディアなどとのクロスメディア分析などにより、信頼性・信憑性を評価・保証・検証する技術は重要な研究領域となっている。
3. センサーデータ統合・検索・分析技術
   IoT に接続された多種・多量なセンサーや SNS などソーシャルセンサーからアプリケーション要求を満たすセンサーを検索し、必要な要件を満たすデータを収集するセンサーネットワークを動的に構築する技術は重要な研究領域である。また、収集されるセンサーのストリームデータを構造化し、特定の条件を満たすデータをイベントと

して検索する技術、複数のイベントが組み合わさった複雑な状況をリアルタイムに検出する複合イベント処理などは、現在盛んに研究開発が進められているが、今後はこうした処理を数値データのストリームだけでなく動画像や SNS など異なる種類のデータに拡張する技術は重要になってくる。さらに、異分野のセンサーデータを統合して、より複雑な分析を行う試みが進んでいる。

4. 時空間データマイニング技術

Web 上の情報伝播や SNS におけるユーザー間のリンク構造の変化、実社会の車・人・モノの位置情報、地域や時間の情報とともに蓄積される医療データなどは、時空間データといえる。近年、時系列データマイニング、ストリームマイニング、グラフマイニングが特に注目されている。時系列データマイニングの応用として、ソーシャルネットワーク上の情報の拡散力や興味を持つ潜在的ユーザー数の推定、医療データの時系列解析による医療サービスの質の向上や効率化などがある。時系列データをリアルタイムに分析するストリームマイニングの応用として、センサーデータの解析の他、ネットワークセキュリティー、人や自動車など移動物体の監視、ソーシャルネットワークへの応用などがある。グラフマイニングとしては時間発展グラフデータへの適用が近年特に注目を集めている。

5. 次世代情報検索・推薦技術

モバイル環境における効果的な情報提供を実現するために、ユーザーの位置、運動状況、生体情報などのユーザーの状況や、ランドマーク、気温、湿度など周囲の状況などのコンテクストを把握し、情報要求の明確化、移動時やコンテクストが突然変化した時などに明示的な情報要求がない場合でも適切なタイミングで有用な情報をシステム側から能動的に提供する技術などが重要な研究課題となっている。また、必要な情報をコンパクトに適切な方式で提示したり、インタラクションを通じて必要な情報を明確化と確実な情報提供を行う技術が求められている。

6. 個人ライフログデータの記録・利活用技術

例えばロケーションログ、活動ログ、ビジュアルログ、食事の記録、読書の記録、睡眠の記録、スマートフォンのアプリ利用履歴などのユーザー自身の生活のありさまを蓄積・可視化することが主として行われている。現状では、健康、ヘルスケアに関連した情報提供などが直接的な活用領域である。多様なセンサーやアプリケーションにより計測されたデータを共有管理・利用できるプライバシーにも配慮したプラットフォーム構築やデータの標準化、魅力的なアプリケーションの開発、ウエアラブルデバイスを含む生体情報等のセンシング技術の開発などが重要な研究領域である。健康やヘルスケア以外に個人の体験を伝えるといった活用も重要になってくると考えられる。

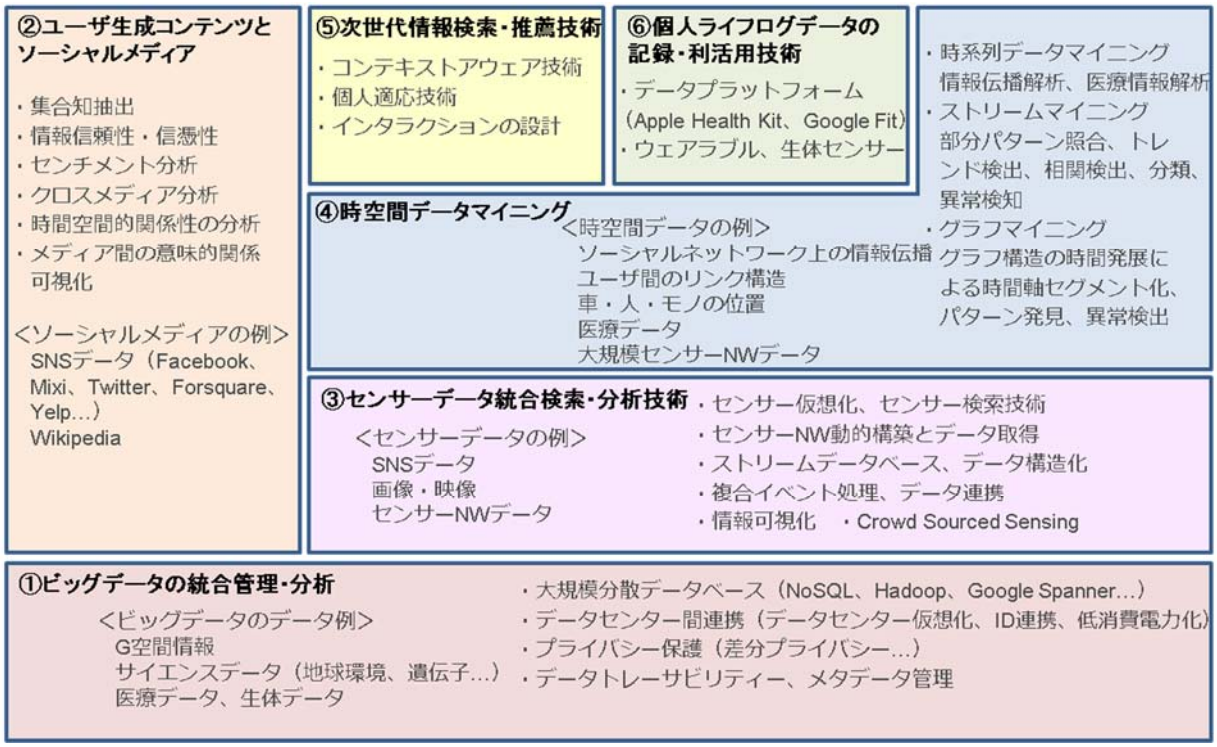


図 3.6.1 IT メディアとデータマネジメントの俯瞰図

３．６．１　ビッグデータの統合・管理・分析技術

（１）研究開発領域名

ビッグデータの統合・管理・分析技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

各種センサー技術、観測技術の発達に伴い自然、社会の広い領域において大規模データを取得できるようになってきている。ビッグデータ処理のための情報データ基盤として、複数データセンターの一括管理やその上での Hadoop の展開、地球規模のトランザクション処理を可能とする大規模分散データベースなどの研究開発がされている。各国ともビッグデータ応用のための政策を展開しているが、米国の民間企業および大学が圧倒的な研究開発力を有する。最近の動向としては、健康・医療ビッグデータの取り扱いが注目される。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［対象ビッグデータの広がり］

対象となるビッグデータは、当初、購買、決済などのトランザクション履歴、Web アクセス履歴などが主要なものであった。しかし、現在ではこれらに加え、以下のような広い分野のビッグデータを対象とする応用開発が急速な発展を見せている。(1) 地理空間情報の整備が進められ、GPS データが広く利用可能になるとともに「G 空間情報」（人や物の位置情報とそれに関連づけられた情報）、(2) 地球環境データ、遺伝子データ、大規模実験データなどのサイエンスビッグデータ、(3) 電子カルテデータやレセプトデータなどの医療データ、およびウエアラブルセンサにより取得される生体データなどを含む健康データ。

［ビッグデータ処理のための情報システム基盤］

最近の重要な研究開発課題としては、複数データセンターに跨る情報システム基盤がある。データセンターの規模によるコストメリット、データ発生源の地理的分散化、対象データの大容量化などの理由により、複数のデータセンターを高速ネットワークなどで接続し一括運用する。SDN (Software Defined Network)などによるデータセンターの仮想化も活発に研究開発が進められている。データセンター運用コストにおいて大きい比重を占める電力消費低減化も重要な課題である [1)] 。

ビッグデータの情報システム基盤をデータベーストランザクション機能により大きく分類すると、伝統的なデータベース管理システムのような ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability)特性を遵守しない、いわゆる NoSQL やバッチ解析処理のために広く使われている Hadoop のようなシステムと、ACID 特性に基づくトランザクション機能を提供するものに分けることができる。前者に関する複数データセンター化に関する研究としては、例えば Hadoop を複数データセンターに跨って実行するための性能改善（予測に基づくジョブ局所化、再構成可能な Hadoop 分散ファイルシステム HDFS データ配置、データプリフェッチなどシステムソフトウエア層の改善 [2)]）の研究開発を挙げることができる。一方、ACID 特性に基づくトランザクション機能を地球規模で提供する大規模分散データベースとしては、Google の Spanner [3)]が注目される。従来、地球規模の分散システムでは時刻の同期を取ることは困難であるとされてきたが、Spanner では、各データセンターに設置した原

子時計と GPS データによりサーバー間の時刻同期を行い、地球規模のトランザクション実行を可能としている。これにより、一貫性を保ったままデータをデータセンター間で自動的に移動し、負荷分散や障害回復を実現している。

［諸外国の政策と研究開発の動向］

米国では、2012 年にオバマ政権が Big Data Research and Development Initiative を発表し、NSF, NIH, DOD, DOE, DARPA, USGS の六つの連邦政府機関に対して 2 億ドルの研究開発資金を投資している。2013 年にはこの Initiative から生まれた産学官のビッグデータパートナーシップによる共同研究プログラムが始まっている。その例としては、NASA と Amazon Web Services の協力による地球観測データの公開 [4]やノースカロライナ大学を始めとする州内の大学や IT 企業が参画するコンソーシアムなどがある。EU では、各国政府が研究開発を主導すべき分野を明確化した上でそれらの分野に重点投資を行う European Innovation Partnerships (EIPs)が、健康高齢社会、農業持続性と生産性、スマートシティーおよびコミュニティーなどの分野を対象とし、これらの分野におけるビッグデータの応用研究が進められている。

（４）科学技術的・政策的課題

ビッグデータ管理においてプライバシー保護は重要な課題である。基礎研究としては、データベースに格納されているプライベートデータがどの程度特定され得るかを理論的に定量化しその定量化の基でプライベートデータが特定され得る確率をある閾値以下にする差分プライバシー [5]が提案され活発に研究されている。しかし、現実の応用場面では閾値をどの程度に設定すべきかの指針がなく広く実用化されるには至っていない。一般にプライバシデータの利活用とプライバシーの保護は相反するため適切な均衡点を見いだす必要があるが、技術の進展やプライバシー情報開示の受容性に対する個人差により議論の前提自体が固定的ではなく、継続的な見直しが必要となる。また、個人のデータを異なるプロバイダーが収集した場合にそれらを統合することにより利用価値は高まるが、一方では漏洩時の損失は大きくなる。プライバシー情報を保有する複数の組織が相互に必要なプライバシー情報のみを交換する ID 連携の技術開発と運用も必要になる。

また、我が国の場合は、新規技術開発当初から国際標準化を見据えることや、交通、医療・健康を始めとする分野において規制緩和により新規技術開発を促進することや特区の有効利用を行うことが重要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

センサーの小型化、スマートフォンの普及などを背景とし、近年多くの IT 企業が健康・医療ビッグデータの収集、管理、分析に乗り出している。例えば、Apple は HealthKit と呼ぶモバイルヘルスプラットフォームを iOS8 に搭載し、心拍センサーを持つ Apple Watch のようなウエアラブル機器から収集する生体情報を一元管理できる環境を整えている。Google も同様に、各種センサーやサードパーティーのアプリで計測した健康データを共有管理できるプラットフォーム Google Fit をリリースした。Google は、ベンチャー企業

MC10 と共同で、直接肌に貼ることのできる伸縮する電子回路であるバイオセンサーBio-Stamp を開発し、脈拍数、体温、紫外線吸収量、脳の活動などをモニターすることを構想している。また、無線チップとセンサーを搭載する医療用スマートコンタクトレンズを開発し涙の成分から血糖値の変化を検出する構想を発表している。さらに、Baseline Study プロジェクトでは、多数の協力者から生体データを取得、解析することにより人間の健康状態の基準値を定義し、そこからの逸脱をいち早く検出することにより病気の兆候を早期発見することなどを構想している。また、個人向け遺伝子解析は、Google や Yahoo!JAPAN などが手掛けている。

また、IBM は、クイズ番組で人間のチャンピオンに勝ったことで有名になった Watson を医療分野向けにチューニングし、医療データから心臓病患者を予測分析する取り組みを行っている[6)]。

このような動向から、健康・医療ビッグデータの収集、管理、分析は今後規模の大きい産業へと発展する可能性がある。自動車保険の場合は、カーナビなどの車載機器から得られた情報を基に安全運転の度合いに応じて保険料が変動するテレマティクス保険が英米で普及し始めているが、将来的には健康データを利用し同様の考えに基づく生命保険や健康保険が普及する可能性も考えられる。しかし、遺伝子情報は究極の個人情報と言われ、健康・医療情報と共に機微情報であり、プライバシー情報の十分な保護が前提となることは言うまでもない。

（６）キーワード

ビッグデータ、Hadoop、データマイニング、データセンター、分散データベース、健康・医療データ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	グラフアルゴリズムやソーシャルネット系データ解析など一部の分野では研究が進展しているが、大規模データ管理の基盤技術などは米国に比べ研究力が見劣りする。
	応用研究・開発	○	→	人口規模、経済力の面から多様な応用分野の研究を同時並行的に進める研究力を持つが、米国に比べた場合、大規模データ管理基盤技術に基づく応用研究が脆弱である。
	産業化	○	↗	技術展開力はあるが、交通や健康・医療などの分野における規制が産業化の足枷になっている場合もある。
米国	基礎研究	◎	→	大学や民間企業研究所による研究は質、量ともに群を抜いており、この傾向は続くと予想される。
	応用研究・開発	◎	→	産官学が多様な連携の元でプロジェクトを立ち上げている。特にIT系企業の豊富な資金力を背景にした中長期を見据えた研究に厚みがある。
	産業化	◎	→	アイデアが生まれてから産業化までの時間が短い。政府による規制が少ないことも一因であると考えられる。
欧州	基礎研究	○	→	セマンティックウェブやそれをWikipediaに応用したdbpedia、LOD(Linked Open Data)などの研究では世界をけん引している。
	応用研究・開発	○	→	イノベーション・ユニオン(Innovation Union)および欧州イノベーション・パートナーシップ(European Innovation Partnership)[7]の枠組みの下で研究機関や企業などの共同研究が計られている。
	産業化	○	→	P2P型音楽配信サービスであるSpotifyなど特徴のある商用サービスが生まれている。大規模製造業では、IoT (Internet of Things)の概念を融合し、部品、製造過程、製品のデータをすべて統合管理する高度化が推進されている。
中国	基礎研究	◎	↗	大学、企業研究所による研究が国際的にも顕著であり、この傾向は続くことが予想される。
	応用研究・開発	○	↗	国家レベルで工業分野におけるビッグデータの利活用が推進されている。また、研究所や企業と日本など外国企業との共同研究もいくつかの事例が見られる。
	産業化	○	↗	国内ネット企業が人口のスケールメリットを背景に業績を拡大している。ビッグデータ解析が各種産業に浸透するにはしばらく時間を要すると考えられる。
韓国	基礎研究	△	↗	一部の大学等では国際レベルの研究が行われている。米国大学での博士号取得者が帰国後大学教員となっている事例が増えており、研究の質が向上すると予想される。
	応用研究・開発	○	↗	政府の産業通商資源部が国民の健康管理サービスを強化し、スマートヘルスケア産業の輸出を拡大するための支援を行うなど、政府がいくつかの事業に対し重点的に政策的な取り組みを進めている。
	産業化	△	→	中小企業およびソフトウエア産業育成の基盤が脆弱である。

（註 1）フェーズ
　基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
　応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
　産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
　※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
　◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
　△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
　↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) K. Rajamani, C. Lefurgy, S. Ghiasi, J. Rubio, H. Hanson, and T. Keller, "Power management solutions for computer systems and datacenters." In Low Power Electronics and Design (ISLPED'08), ACM/IEEE International Symposium on, Bangalore, India, 2008, pp. 135-136.
2) Qi Zhang, Ling Liu, Kisung Lee, Yang Zhou, Aameek Singh, Nagapramod Mandagere, Sandeep Gopisetty, Gabriel Alatorre, "Improving Hadoop Service Provisioning in A Geographically Distributed Cloud," 2014 IEEE Seventh International Conference on Cloud Computing (CLOUD 2014).
3) Corbett, James C; Dean, Jeffrey; Epstein, Michael; Fikes, Andrew; Frost, Christopher; Furman, JJ; Ghemawat, Sanjay; Gubarev, Andrey; Heiser, Christopher; Hochschild, Peter; Hsieh, Wilson; Kanthak, Sebastian; Kogan, Eugene; Li, Hongyi; Lloyd, Alexander; Melnik, Sergey; Mwaura, David; Nagle, David; Quinlan, Sean; Rao, Rajesh; Rolig, Lindsay; Saito, Yasushi; Szymaniak, Michal; Taylor, Christopher; Wang, Ruth; Woodford, Dale, "Spanner: Google's Globally-Distributed Database", Proceedings of OSDI 2012.
4) NASA NEX, http://aws.amazon.com/jp/nasa/nex/
5) Cynthia Dwork, "Differential Privacy,"
http://research.microsoft.com/pubs/64346/dwork.pdf
http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/43231.wss
6) European Innovation Partnerships
http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=eip
7) 平成 26 年度版　情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/pdf/n3100000.pdf
8) 特許庁 平成２５年度特許出願技術動向調査報告書（概要）ビッグデータ分析技術，平成２６年２月

この分野の重要な会議としては以下がある.

・IEEE International Conference on Big Data
・IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE)
・IEEE 13th International Conference on Data Mining (ICDM)
・ACM International Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR)
・ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)
・ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)
・International Conference on Very Large Data Bases (VLDB)
・International World Wide Web Conference (WWW)

３．６．２　ユーザー生成コンテンツとソーシャルメディア

（１）研究開発領域名

ユーザー生成コンテンツとソーシャルメディア

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ユーザー個人から発信されるデータとそれら個人ならびにデータに興味や関連あるユーザー同士のソーシャルネットワークを構成し、情報を共有・拡散配信することで新たな知識を創出する基礎・応用技術に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ユーザー個人が配信するメディアは Consumer Generated Media（CGM）と呼ばれ、不特定多数あるいは限られたコミュニティー内のメンバが情報（テキスト、画像、音声、動画）へアクセスできる。CGM の特徴として、ユーザーの匿名性の低さがあげられ、そのため匿名性の高い掲示板サイトと比較すると、情報の質が高く、信頼性が高い。また、2000 年初頭に創業された Facebook（米国） や Mixi（日本）は、ユーザー同士の関係性からコミュニティーを形成するソーシャル・ネットワーキング・サービス（SNS）を特徴としており、信頼性だけでなく、速報性も高い。これら信頼性、速報性の高い情報共有が可能である SNS は、2014 年には世界の 18.2 億人が利用しており、今後 2017 年までには 23.2 億人になると予想されており、特に SNS の代表的なものとして近年台頭している Twitter と Facebook の利用者は世界で約 14 億人、2009 年からの年平均成長率は Twitter が 70.5%、Facebook が 35.9%となっており[1)]、情報通信のグローバル市場でも国際競争力の強化が進んでいる。また、2009 年以降には、Forsquare（米国）や Yelp（米国）にみられる位置情報に基づく SNS が普及し、ユーザーが情報を posting（送信）すると場所情報（緯度経度や店舗名等）がメタデータとして付与され（Forsquare ではチェックインと呼ばれる）、推薦や検索技術の研究開発の重要なプラットフォームとなっている。2014 年には Forsquare のチェックイン機能と特定の場所に関する情報検索機能とを分離し、チェックイン機能専用のアプリケーションである Swam が提供された。

Wikipedia に代表される一般ユーザーが編集可能なソーシャルメディアは、機械的に抽出・集約されたデータとは異なり、人手により編集されて知識ベース化された集合知である。この知識ベースには極めて大量で幅広い分野のデータが蓄積されており、これらのデータを基にして、言語処理、情報検索、あるいはデータマイニングなどの手法により、より高度な知識の抽出や集約を行うアプローチが世界的に数多く提案されている。また、これらの知識ベースやその利活用が活発化する一方、それらに含まれる情報や知識に対する信頼性・信憑性に関する問題も浮上している。情報の信頼性や信憑性、あるいはデータ品質に関する研究はネットワークなどの分野をはじめこれまでに多くのアプローチが提案されてきた。しかしながら、与えられた知識ベースからコンテンツの内容や知識そのものに対する判断を機械的に導くための手法は、わが国では総務省の情報信憑性検証技術プロジェクト[2)]など極めて数が少ない。

テレビや新聞といったマスメディアと異なり、ソーシャルメディアは参加者同士の双方向通信が可能である。近年では、ソーシャルメディアとマスメディアが融合したメディア横断

的知識共有が行われているが、マスメディアは公共性、信頼性の高い情報発信を行わなければならないため、ソーシャルメディアの個人から発信される情報の信頼性判定やノイズ判定が課題となっている。これらについては、NHK や民放テレビ局でいくつかの取り組みがある。

（４）科学技術的・政策的課題

・知識ベースとしての集合知の収集・抽出技術については近年数多くの研究プロジェクトが遂行されているが、情報の信頼性・信憑性を保証する技術や検証のための手法などの研究は緒に就いたばかりであり、今後重点的に取り組むべき課題のひとつである。
・マスメディアにより Twitter 等のソーシャルメディアを利用したメディア横断的知識共有が行われているが、ソーシャルメディアの個人から発信される情報の信頼性判定やノイズ判定が課題となっている。
・位置依存情報や地理情報サービスに関する技術については、他の主要国と比較して先進的な研究やサービスが多いが、映像メディアや音声メディアなどの他メディアと連携・融合したクロスメディア環境における先行技術開発が我が国の優位性を保つために必要である。
・ソーシャルデータ解析、集合知分析を含む当該分野では、他の主要国と比較して研究者の絶対数が少なく、国際トップコミュニティで活躍している研究者は非常に少ない。トップレベルの人材育成が急務である。また、本分野の国際標準化に寄与できる技術者を育成することはわが国の国際競争力を高める上でも急務である。
・我が国ではソーシャルメディアを含むビッグデータに対する集合知分析、知識抽出や信頼性・信憑性向上に対する戦略的なファンディングが他の主要国と比較して十分ではなく、大規模なプロジェクトを推進できていない。
・データベース、ビジョン、センサーネットワーク、モバイルコンピューティング分野でデータ取得から分析に至るまでそれぞれが独立して研究を行っており、また、多種多様なデータや分析結果は個々の研究者により独立して管理されており、分野を横断して連携した研究開発を進めることが課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・iPhone やアンドロイド端末等のモバイル端末には、GPS や加速度等の各種センサーが搭載されており、ユーザーがソーシャルデータを配信する際にそれらセンサーデータをメタデータとして取得・付与することができ、モバイル端末の各種アプリケーションを開発するためのプラットフォームとして急速に整備されている。
・ソーシャルメディアに関する研究開発としては、学会活動では SocialCom (IEEE International Conference on Social Computing) や SocInfo (International Conference on Social Informatics)などの国際会議が開催されている。
・コンテンツやサービスの信頼性・信憑性を保証する研究開発としては、総務省の「電気通信サービスにおける情報信憑性検証技術等に関する研究開発」(2007-2011)などの研究プロジェクトなどが挙げられる。学会活動としては、WICOW (Workshop on Information Crediblility on the Web)[3] や World Wide Web Conference における WebQuality Workshop [4]、IEEE TrustCom (International Conference on Trust, Security and Privacy in

Computing and Communications)などが開催されている。

（６）キーワード

ソーシャル・ネットワーキング・サービス、集合知、Facebook、Twitter、Consumer Generated Media

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・データマイニング、機械学習に関する基礎研究は長年取り組まれており、ソーシャルメディアという新たなユーザー生成コンテンツに対する取り組みが、専門の学会（情報処理学会 [5][6][7]、電子情報通信学会 [8][9][10]、人工知能学会 [11]など）で行われている。 ・国内の研究会では、情報検索（情報基礎とアクセス技術 [5]、データベースシステム研究会 [6]）、自然言語解析（自然言語処理研究会[7]）、人工知能（人工知能と知識処理研究会 [8]）、画像処理（パターン認識・メディア理解研究会 [9]）の分野で多くの発表 [12][13]が行われているが、主要ジャーナルや国際会議に貢献できる研究成果は、米国や欧州に比べるとまだまだ少ない。
	応用研究・開発	△	↗	・FacebookやTwitter、Forsquare等のソーシャル・ネットワーキング・サービスのデータ解析から知識創出まで取り組まれているが、海外の主要ジャーナルやトップカンファレンスでのプレゼンスは、米国や欧州に比べると非常に低い。 ・データベース、ビジョン、センサーネットワーク、モバイルコンピューティング分野を横断した研究開発の連携がなされてない。 ・ソーシャルデータ解析、集合知分析を含む当該分野では、他の主要国と比較して研究者の絶対数が少なく、国際トップコミュニティで活躍している研究者は非常に少ない。トップレベルの人材育成が急務である。
	産業化	△	↗	・Mixiなど世界展開を行っているサービスもあるが、主要国のサービスの利用者数を比較すると評価が低い。 ・ソーシャル・ネットワーキングのサービスの基盤にはユーザー生成コンテンツ分析技術が必要であり、つまりサービスの規模がデータの質に関わるが、主要国のサービスと比較して規模が小さい。
米国	基礎研究	◎	↗	・UC Berkeley、University of Illinoisなどの大学におけるソーシャルメディアのデータマイニング、機械学習、ソーシャルネットワーク分析の基礎研究は、WWW [14]、ICDE [15]、KDD [16]、WSDM [17]、CHI [18]のトップカンファレンスでのプレゼンスが高く、研究成果はトップレベルである。
	応用研究・開発	◎	↗	・NISTなど公的機関、Stanford、UC Berkeleyなどの大学、Google、Yahoo!Labs、IBMなどの企業との産官学連携が非常に強く、基礎研究から応用研究、さらにサービスへの展開までのモデルが構築されている。
	産業化	◎	↗	・Google、Yahoo!Labs、Twitter、Facebook、Microsoftなどシリコンバレーを中心とした企業では、優秀なエンジニアを世界各国から集め、多様なサービスを展開しており、世界規模のサービスとなっている。 ・若手の優秀なエンジニアを世界各国から集め、開発だけでなく技術研究にも取り組ませており、人材育成の面でも高く評価できる。
欧州	基礎研究	◎	↗	・ソーシャルネットワーク分析、ソーシャルメディアのデータマイニングなど、Hannover大学、Amsterdam大学における基礎研究は、トップカンファレンスであるECML/PKDD2014 [19]やSIGIR2014 [20]のsocial mediaセッションでプレゼンスが高く、研究成果はトップレベルである。
	応用研究・開発	◎	↗	・INRIA、CNRS、DFKI、DERIなど公的機関、EC各国の大学、IBM Research、Google、Yahoo!Labsなどの企業との産官学連携がEU各国内外で形成されており、基礎研究から応用研究への展開が成されている。 ・EU圏内での人材交流が活発になされており、人材の育成の面でも高く評価できる。
	産業化	○	↗	・IBM Research、Yahoo!Labs、Microsoftなどで主要ジャーナル、トップカンファレンスでのプレゼンスは高いが、米国と比較すると世界規模のサービスの構築が成されているとはいい難い。 ・EU圏内で若手の優秀なエンジニアを集め、技術研究や開発に取り組んでおり、EU各国間での人材交流が活発になされており、人材の育成の面でも高く評価できる。

中国	基礎研究	○	↗	・清華大学、中国科学院、香港大学、香港技術大学等では、ソーシャルメディアのユーザー生成コンテンツに対してデータベース、機械学習、ネットワーク、ユーザーインターフェースに関する基礎研究に取り組んでおり、VLDB [21]、CIKM [22]、PAKDD [23]、ICDM [24]等のトップカンファレンスにおいて高いプレゼンスを保っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・Microsoft Research Asia（MSRA）は清華大学や中国科学院、香港大学等の国内の優秀な学生や国外の優秀な研究者が多く、主要ジャーナルやトップカンファレンスにおいてもプレゼンスが高い。
	産業化	△	↗	・中国国内では、Facebook等の利用規制のため、騰訊が開発した微信（別名：WeChat）が国内の代表的サービスとして普及している。 ・MSRAでの応用研究のプレゼンスは高いが、国内外のサービスへの制限が顕著なため、応用研究がサービスとして十分な活用がされていない。
韓国	基礎研究	○	↗	・Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）では、ソーシャルメディアのユーザー生成コンテンツに関するデータベース、機械学習によるデータマイニングの基礎研究に取り組んでおり、ICDE [15]、CIKM [22] 等のトップカンファレンスにおいて高いプレゼンスを持っている。
	応用研究・開発	△	↗	・Korea Institute of Science and Technology Information（KISTI）では、SNS等のビッグデータの応用研究が推進されている。
	産業化	△	↗	・NAVERなど世界展開を行っているサービスもあるが、主要国のサービスの利用者数を比較すると評価が低い。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）総務省　平成 26 年版　情報通信白書（第 1 部、第 1 節：全世界での ICT の急速な浸透）
2）総務省　情報の巨大集積化とその活用に向けた基盤技術の開発（情報集積活用基盤技術）「電気通信サービスに関する情報信憑性検証技術等に関する研究開発」
3）Proceedings of the 6th International Conference on Social Informatics (SocInfo 2014)
4）Proceedings of the 4th Joint WICOW/AIRWeb Workshop on Web Quality (WebQuality 2014)
5）情報処理学会 情報基礎とアクセス技術研究会：http://ipsj-ifat.org/
6）情報処理学会 データベースシステム研究会：http://www.ipsj.or.jp/katsudou/sig/sighp/dbs/
7）情報処理学会　自然言語処理研究会：http://www.nl-ipsj.or.jp/
8）電子情報通信学会　人工知能と知識処理研究専門委員会：http://www.ieice.org/iss/ai/jpn/
9）電子情報通信学会　パターン認識・メディア理解研究会：http://www.ieice.org/~prmu/jpn/
10）電子情報通信学会 データ工学研究専門委員会：http://www.ieice.org/iss/de/jpn/
11）人工知能学会：http://www.ai-gakkai.or.jp/
12）第 6 回 集合知シンポジウム
13）第 6 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
14）Proceedings of the 23rd international conference on World wide web（WWW2014）

15) Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Data Engineering（ICDE2014）
16) Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining（SIGKDD2014）
17) Proceedings of the 7th ACM international conference on Web search and data mining（WSDM2014）
18)Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems（CHI2014）
19) Proceedings of the 2014 European conference on Machine learning and knowledge discovery in databases（ECML/PKDD2014）
20) Proceedings of the 37th international ACM SIGIR conference on Research & development in information retrieval（SIGIR2014）
21) Proceedings of the 40th International Conference on Very Large Data Bases（VLDB2014）
22) Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Conference on Information and Knowledge Management（CIKM2014）
23) Proceedings of the 18th Pacific-Asia conference on Advances in knowledge discovery and data mining（PAKDD2014）
24) Proceedings of the IEEE International Conference on Data Mining series (ICDM2014)

３．６．３　センサーデータ統合検索分析技術

（１）研究開発領域名

センサーデータ統合検索分析技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

実世界に埋め込まれたセンサーなどから生み出されるバイナリデータから、人間によって生み出される SNS のテキストデータ等の異種・異分野のデータの収集・管理・分析をシームレスに実施できる統合的な分析技術の研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

20 世紀においては、地球科学などの科学分野における研究や企業における製品の開発や生産設備の自動制御のために、実環境の状況を計測する目的でセンサーが設置され、ある特定の現象を捉えるために計測・分析されてきた。21 世紀になり、ユビキタス技術が社会に浸透するに従い、実世界の隅々までネットワークとセンサーが配置される事によって、多様な情報がネットワークを通じて計測・収集・分析できる環境が整備されつつある。この技術動向は、ネットワーク基盤技術に近い分野では、データを計測する大量のセンサーと、そのデータを処理する大規模計算機を結び合わせる M2M(Machine to Machine)技術や、実世界のモノをネットワークに接続させるモノのインターネット技術(IoT: Internet of Things)として見られ、情報処理分野においてはビッグデータ処理技術の発展として見られる。

その一方で、実世界の状況を分析する新たなデータ収集対象も生まれている。それが、Twitter や Facebook 等のソーシャルデータや Web サービスログ等である。このような SNS から発信される情報は、社会の活動を各個人が観察して発信されたものであり、それらはソーシャルセンサーと呼ばれる新たなセンサーからのデータである。

これまでのセンサーデータは、実世界の物理現象を計測した数値データであったが、新たなソーシャルデータは人間の知識や要求、活動が現れている。前者はセンサーの計測誤差を除けば、正確に実世界の物理現象を捉えた数値データであるが専門家の手を経なければ一般の人々が活用できる情報源とはなり得ない。一方、SNS 等の情報は一般の人々でも理解しやすい情報源であるが、個人の主観が含まれているため、客観性がなく信頼性が低い場合がある。これらは性質が全く正反対のデータであるが、それ故、両者を統合的に検索・分析する事ができる様になれば、データから新たな価値が生まれる可能性が高い。センサー統合検索分析技術は、まさにこの新たな価値創造を作り出すための技術であり、大別すると以下の 3 つの研究領域が存在する。

超多様なセンサーデータの発見と収集技術

IoT 技術等によって接続された大量のセンサーや、Web や分散データベース等ネットワークに接続された大量の情報源を探索し、さらに必要なデータを検索して選択的かつ透過的に種別の異なるデータを収集するための技術である。気温や湿度などの単純な環境計測データから、マイクロブログ上の特定のハッシュタグやユーザーアカウントに紐付いたテキストデータまで透過的にアクセスし統一的に収集・管理するために、各種センサーの機能や能力、提供するデータの属性や特徴量などをセマンティクに記述しソフトウエアサービスを介して

統一的にアクセスするセンサー仮想化技術や、SDN(Software Defined Network)等に基づき既存のセンサーネットワーク資源を有効活用し様々なアプリケーション要求を満たすセンサーネットワークを動的に構築する技術、どこからでもセンサーデータを蓄積し共有できるクラウドサービスを提供したりする技術等が注目されている。さらに、モバイルセンサーやスマートフォンの普及により、人々の手によって収集したデータを使って物理センサーを効率的かつ効果的に補完する Crowd-sourced sensing [8] も、特に突発的な災害など非常時におけるセンサーデータ収集の手段として注目されつつある。

異種センサーデータの構造化と検索技術

実世界の物理情報を取得するセンサーは、人手を介さずにデータを定期的に生産する。また、その多くが数値バイナリデータであるため、サイズの小さな数バイトのデータが大量に生み出される。このようなデータは個別に取得される場合よりも一定期間のまとまったストリームデータとして活用される事が多い。こうしたストリームデータから時々刻々と変化する特徴量を抽出しオンライン処理でデータを構造化し、継続的に問い合わせを行うことにより、膨大なストリームデータから必要な部分のデータのみをリアルタイムに検索するストリームデータベースの研究開発が盛んに行われている [9]。さらに、こうしたデータストリームから特定の条件を満たすデータをイベントとして検出するとともに、複数のイベントを組み合わせ複雑な状況をリアルタイム性高く検出する複合イベント処理(complex event processing, CEP)技術の研究開発も盛んに行われている [10]。一方、これらの技術を、物理センサーから発信される数値データのストリームだけでなく、監視カメラの動画像や、SNS から発信されるテキストや写真など、異なる種類のデータストリームにも拡張する技術も次第に開発され始めており、今後は、こうした異種センサーデータストリームから検出された様々なイベントを横断的に処理し、より広い分野にまたがる複雑なイベントをリアルタイムに発見できるようにする技術の必要性が高まってくる。

異分野センサーデータの統合と分析技術

従来、気象や機械、自動車、交通、健康、株価など、各分野の応用ごとに決められたセンサーデータの分析を高いパフォーマンスとスケーラビリティで行うことに重点が置かれてきたが、様々な種類のセンサーデータが利活用できる環境が広まるとともに、分野ごとのセンサーデータを統合し分析を連携させ、より総合的で複雑な分析を行おうという試みが進められている。例えば、スマートシティーでは、環境や交通、治安など街の中で起こる様々な状況を網羅的にセンシングし、公共サービスの効率化や非常時への迅速な対応を実現することを目指している。また、スマートヘルスケアでは、人々の健康状態だけでなく、日常の行動生活環境までセンシングし、継続的な健康管理を行おうとしている。さらに、近年では、スマートファクトリーに代表されるように、製造機械のセンサーデータ分析だけでなく、作業員の行動や物流の状態まで幅広いセンサーデータを横断的に統合分析し社会全体での生産性向上を目指している。こうした中で、各分野のセンサーデータに特化した分析だけではなく、それらを横断的に統合し、分野をまたがる相関性を網羅性高く発見する分析手法の研究開発が今後ますます重要になってくる。従来の蓄積データを対象としたデータウエアハウス構築技術や多次元データ分析技術をセンサーデータに応用発展させる研究や、異分野センサーデ

ータの相関関係を試行錯誤的で直感的に分析する情報可視化技術、さらにこれらをリアルタイムに処理する技術などが必要になってくる。さらに、近年では、異種センサーデータやスマートフォンを組み合わせ、人々の行動や群衆の動きをリアルタイム性高く分析し各種のスマートサービスをより高度化するための研究開発も注目されつつある。

（４）科学技術的・政策的課題

センサーデータ統合技術の技術的なボトルネックとしては、計測の精度も頻度も異なるデータをいかに正確かつリアルタイムに取得するかの問題や、数値からテキストまで多種多様なデータフォーマットをいかに利活用に適した形式に変換し相互に連携させるか、また、ネットワーク上に遍在する各種データやサービスをいかに発見し統合するか等が挙げられる。また、個別のデータには含まれないものの、複数のデータを統合する事によって見えてくる個人情報の管理などが課題となる。監視カメラや携帯電話、ソーシャルネットワークサービス等で得られた利用者の行動情報などを活用することは、社会の動きを明らかにするソーシャルセンサーとしての期待が大きい反面、個人のプライバシー情報にも深く関係するため、我が国では利用許諾や利用者へのインセンティブ提供等のガイドライン等が確立していない。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

＜注目動向＞

センサーデータ統合検索分析技術は、実世界に埋め込まれたセンサーデータや企業における販売データ、携帯端末などによる利用者の行動履歴などのデータを統合的に活用して社会の動きを明らかにすることが目的であり、昨今では、いわゆる CPS(Cyber Physical Systems)として、企業を始め大学・研究機関などで広く研究が行われている。また、当該技術は内閣府の科学技術イノベーション総合戦略 2014[1)]において記述されている「世界に先駆けた次世代インフラの構築」等における中核技術として注目を集めている。

具体的な我が国の大規模プロジェクトの動向としては、総務省が独立行政法人情報通信研究機構（NICT）に M2M 技術の研究開発を推進するためにモバイルワイヤレステストベッド [2)]を整備した上で、ソーシャルビッグデータの利活用・基盤技術の研究開発プロジェクトを推進している。このプロジェクトにおいては、NICT のみならず公募にて 22 件の研究課題が採択され、医療・保健分野、防災・減災分野、観光分野、交通・運輸分野、農業分野、教育分野、インフラ保全分野、スマートシティー分野等の課題について研究が進められている。

センサーネットワークにおいては、スマートシティー等に必要不可欠なスマートメーターの通信インフラとして WiSUN 規格 [3)]が注目を集めており、様々なセンサーネットワークが構築されつつある。WiSUN 規格は IEEE802.15.4g/4e や IPv6 にも対応しており、広く普及していくことが予想されている。

また、空間と通信技術を融合させる目的で G 空間プロジェクト [4)] が推進されている。このプロジェクトにおいては、「G 空間オープンデータプラットフォームの構築」や「G 空間防災システムの構築」、「G 空間シティの構築」などが目標としてあげられており、位置情報を核として、各種センサーデータの統合利用を可能とする事を目指している。平成 26 年度には、内閣府のアクションプランにも「G 空間プラットフォームの高度化に関する研究開発」

[5] が挙げられている。さらに科学技術振興機構（JST）では、社会から生み出されるビッグデータを統合利活用するための「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化プロジェクト」[6]や「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化プロジェクト」[7]が推進されている。

（６）キーワード

M2M、Cyber-Physical Systems (CPS)、SNS、WiSUN、センサーネットワーク、Semantic Sensor Network、ソーシャルセンシングデータ、スマートヘルスケア、センサーデータ統合、異種・異分野データ統合、センサーデータウエアハウス、スマートシティー、センサークラウド、Internet of Things (IoT)、Participatory Sensing、Crowed-sourced Sensing

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・センサーネットワークやセンサーデータベース、モバイル情報システム等の研究開発が個別に行われている。特に、自動車や工場、ロボットなどを対象にしたセンサーデータのリアルタイム処理や機械学習などで、世界的に高い水準の基礎研究が行われている。また、異種・異分野のセンサーデータの統合や可視化などでも、世界に先駆けた基礎研究が行われている。 ・研究の競争力を強化するための共通基盤（テストベッドやデータセット）の整備や産官学連携が主要国と比べ遅れており、日本から国際的にインパクトのある研究成果として世界最高峰の国際会議、論文誌に公表される論文数が少ない。
	応用研究・開発	○	↗	・情報通信研究機構のモバイルワイヤレステストベッドや各省庁の委託研究・研究助成などを利用して、実証実験を目的とした応用研究・開発のプロジェクトが活発化してきている。 ・主要国と比較すると小規模なプロジェクトが個別に行われ、依然国際的な認知度を十分に得るに至っていない。国家的戦略の下で、これらを有機的に連携させることが必要不可欠である。
	産業化	○	↗	・フィールドセンサーや、組込みセンサー、モバイル端末、スマートフォンなど、センサー技術はあらゆる分野において世界最高水準である。 ・国内の隅々にまで普及したモバイル通信網、高機能なカーナビの普及、交通系ICカードの普及などを背景に、人や車の動きに関する膨大かつ高精細なセンサーデータを収集・分析し、高度交通システムや人口統計、モバイルサービスへの応用が活発化してきている。 ・産業界から得られる各種の膨大なセンサーデータは、依然各分野や企業内で閉じた利活用にとどまり、欧米のように社会インフラの共有財産（ソーシャルビッグデータ）として横断的に利活用しスマートシティーなど革新的な産業を生み出すまでには至っていない。オープンデータ化などへの一層の取り組みが必要である。
米国	基礎研究	◎	↗	・IT分野での世界的なリードを背景に、センサーネットワークやセンサーデータベース、モバイルデータ管理などの分野で世界最高水準の論文誌や国際会議に多数の論文を発表している。特に、メモリデータベース技術や時空間データベース、ストリームデータ処理などの基礎研究が盛んである。 ・近年、センサーネットワークとクラウドコンピューティングを融合したSensor Cloudの研究開発が注目を集めており、仮想化によるセンサーネットワーク資源の有効活用や、分散協調によるセンサーデータ収集と共有、センサーデータの集約・統合などの基礎研究が盛んに行われている。また、スマートフォンやソーシャルメディアを活用し人々(crowd)がセンサーデータ収集に協力するCrowd-sourced sensingが近年注目を浴びており、環境問題や災害対応などで物理センサーを補完する有力な手段として研究開発が進められている。 ・サイバーフィジカルシステムを国の重要課題の一つと位置付けており、NSFなどの支援を得ながら、科学や医療分野と連携したIT基盤の研究開発が行われている。代表的なものとして、生態学を対象とした全国規模のセンサーデータ収集統合基盤（NEONプロジェクト）やヘルスケアを対象とした異種センサーデータ分析基盤(DELPHIプロジェクト)などが挙げられる。
	応用研究・開発	◎	→	・電力網や高度道路交通システム、ヘルスケア分野を対象に、様々なセンサーや監視カメラなどのデータを利用したスマートサービスの応用研究が行われており、実用サービスも多数開発されている。 ・サイバーフィジカルシステムの基礎研究の成果を応用し産業化につなげることを目的とした数百万ドルに上る新たなファンドがNSFによって設立され、センサーデータなどのビッグデータ利活用によるサイバーフィジカルシステムのリアルタイム制御も重要課題の一つに位置づけられている。

	産業化	◎	↗	・Google, Apple, Oracle, Microsoft, IBMなど、米国に拠点を置くIT分野のトップ企業の多くが、センサーデータの収集や分析に関する製品やサービスの研究開発を積極的に行っている。 ・特にヘルスケア分野への応用が著しく、GoogleやAppleは自社のスマートフォンアプリと連携し、個人の健康情報を一元化するためのサービスを提供している。 ・国立標準技術研究所(NIST)が、様々なセンサーを横断的に組み合わせてスマートサービスを開発する技術の標準化を産業界と連携して行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州連合では、FP7を始め、社会システム構築のための先端的基礎研究に莫大な予算を投じており、”もののインターネット” (Internet of Things, IoT)関連の研究開発が多数実施されている。その結果、世界最高水準の論文誌や国際会議において多数の論文が掲載されるようになってきており、当該分野における基礎研究のレベルは非常に高い。 ・FuturICTプロジェクトでは、10年間で数百人のトップレベルの研究者を動員し、環境や社会、経済活動にまで至るグローバルなセンサーネットワークを構築し、様々な科学モデル、データを統合し大規模な社会シミュレーションを行うための基盤技術の研究開発を行っている。 ・スマートシティーを対象に様々なセンサーデータを統合し分析する技術の基礎研究が盛んに行われている。さらに近年では、ソーシャルメディアやマルチメディアも統合し、様々な種類のデータストリームを横断的に統合し人や社会の活動を分析する研究も活発になってきている（FP7 MultisensorプロジェクトやSocialSensorプロジェクトなど）。
	応用研究・開発	○	↗	・ヘルスケア分野でデジタル・ソリューションの活用を図る「eヘルス行動計画」が2014年に欧州議会で承認され、ほぼ同時期に、米国との間で患者データの共有を図るeヘルス関連のプロジェクト「Trillium Bridge」の設立が公表された。 ・欧州委員会のスマートシティー戦略的実践計画に対して、研究・イノベーション資金配分プログラム(Horizon 2020)から2億ユーロを拠出する意向を示すとともに、スマートシティーとスマートビジネスの構築を支援するアプリケーションに、賞金総額で40万ユーロを提供する欧州史上最大のアプリ・コンテストの開催を計画するなど、応用研究・開発に向けた取り組みを加速している。
	産業化	◎	↗	・産学官が一体となりスマートシティーへの取り組みを活発に進めており、環境センサーや交通センサーと連動した各種公共サービス（交通規制や防犯対策、市民生活支援など）の実証実験を行っている。 ・製造機械だけでなく、作業者や物流サービスとの間でもデータをやり取りし製造業全体をスマート化するインダストリー4.0への取り組みがドイツを中心に進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	・欧米に留学し学位を取得した優秀な大学教員や留学生が多数帰国し、これらの人材を中心に基礎研究の水準が急速に上昇している。研究分野の多くは米国と重なっており中国独自のものは少ないものの、世界最高水準の論文誌や国際会議に多数の論文を発表している。
	応用研究・開発	△	→	・クラウドコンピューティングやビッグデータの国家戦略的な推進により、北京、上海、深圳、杭州、無錫をモデル都市として、各種コンピューティング資源を統合し、国レベルのインフラ構築を加速させている。 ・膨大な人口をカバーする高速無線通信網の整備が急速に進んでおり、今後センサーやモバイルデータを利用する応用研究・開発が進展してくると思われる。
	産業化	○	→	・PM2.5など環境問題への関心の高まりを背景に、センサーデータの収集・分析や公開を行うサービスが登場し始めている。 ・論文としての研究成果を重視する習慣が根強く残っており、産業化は未だ発展段階と思われる。

韓国	基礎研究	○	↗	・欧米に留学し学位を取得した優秀な大学教員や留学生が多数帰国し、これらの人材を中心に基礎研究の水準が急速に上昇している。地理情報システムやモバイル分野の研究に力を入れ、世界最高水準の論文誌や国際会議でのプレゼンスが上昇してきている。
	応用研究・開発	△	↗	・科学・ICTと既存産業の融合によるスマートな社会の実現をめざす「創造ビタミンプロジェクト」を韓国政府が打ち出し、農畜水産食品、文化観光、保健医療、主力製造業、教育学習、小商工業創業、災害安全を対象とした産業の高度化と問題解決を支援する。
	産業化	○	→	・サムスン電子の世界スマートフォン市場での躍進に加え、他国と比べて高いスマートフォン普及率とブロードバンド、LTEなどのICTインフラの高度化が進んでおり、モバイル分野で大変注目度が高い

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 科学技術イノベーション総合戦略 2014
http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2014/honbun2014.pdf
2) モバイルワイヤレステストベッド
http://www.nict.go.jp/press/2014/01/29-1.html
3) WiSUN アライアンス
http://www.wi-sun.org
4) G 空間×ICT 推進会議
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/gkukan-ict_suishin/
5) 平成 26 年度　科学技術関係アクションプラン
http://www8.cao.go.jp/cstp/budget/h26gaisan2.pdf
6) ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化プロジェクト
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html
7) 科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化プロジェクト
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-5.html
8) Lane, N.D. Miluzzo, E. ; Hong Lu ; Peebles, D. ; Choudhury, T. ; Campbell, A.T.: A Survey of Mobile Phone Sensing, Communications Magazine, 48(9), IEEE, pp. 140 – 150 (September, 2010).
9) Golab, L., Özsu, M. T.: Data Stream Management, Synthesis Lectures on Data Management, 2(1), Morgan and Claypool, pp. 1-73 (2010).
10) Gupta, A., Jain R.: Managing Event Infroamtion: Modeling, Retrieval, and Applications, Synthesis Lectures on Data Management, 3(4) pp.1-141 (2011).

３．６．４　時空間データマイニング技術

（１）研究開発領域名

時空間データマイニング技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

センサーデータのような時系列データ、GIS のような地理情報、Web アクセス履歴のような時刻付きレコードデータ、ソーシャルネットワークにおける時間発展グラフデータなど、時空間情報を分析し、知識発見を行う技術に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

時空間データ

時系列データとは、ある現象の時間的な変化を計測して得られた値の系列である。従来の時系列解析は、物体の動き、株価や経済指標のような金融データ、温度や湿度などの気象データの解析が中心であった。しかし近年、取り扱う情報が飛躍的に増大しており、またデータの種類も多様化している。そのようなビッグデータ時代においては、多様な時系列データ、もしくは空間情報を含む大規模な時空間データの解析が極めて重要な課題となっている。

時空間データに関しては、特に Web 空間におけるデータが増大の一途をたどっている。例えば現在、Facebook や Twitter などの巨大なソーシャルネットワーク上では日々大量の情報が高速に流通している。Facebook のユーザー数は 2008 年の 1 億人から現在は 10 億人を超え、ユーザー間のリンク数は 1400 億を超える。2 億人以上のユーザーを持つ Twitter では毎日 2 億件以上のツィートが投稿されている。これらの情報はネットワーク上を刻々と流れており、時間変化の伴う時系列データと言える。また、ソーシャルネットワークにおけるユーザー間のリンク構造、あるいはユーザーと組織間の関係を表現したリンク構造も時間経過とともに変化しており、Web 空間の変化を表現した時空間データと言える。

Web 情報やソーシャルネットワーク以外にも様々な分野で時空間データマイニングが注目されている。GPS 付き携帯端末や高度交通システムの導入、普及により、実社会での車や人、物の位置情報がリアルタイムに把握できるようになっている。また、センサノードのような超小型デバイス技術の発達により、大規模なセンサーネットワークが様々なところで構築されている。そのような位置データやセンサーデータの時系列解析技術も必要不可欠となっている。さらに近年、電子レセプトの普及に伴い、電子カルテからの診察記録や症例登録など、様々な医療データが収集、蓄積されるようになっている。医療データは、地域や時間に関する情報とともに蓄積されるため、時空間データとしての解析が求められている。それら時空間データに対する解析技術として、最近特に注目されているのが、(a) 時系列データマイニング、(b) ストリームマイニング、(c) グラフマイニングである。

時系列データマイニング

時系列データから有用な情報を検索あるいはマイニングするために様々な処理が必要とされる。従来は、ARIMA（Autoregressive integrated moving average）のような回帰モデルを用いた時系列解析が行われていたが、データの大規模化によって、時系列データベースに対する問い合わせパターンの検索、頻出パターンの探索やモデル化、時系列シーケンスの分

類、時系列の部分パターンの照合、情報予測などに関する高速処理技術の研究開発が行われている。さらに、時刻付きイベントデータ、すなわち購買データのようなトランザクションデータも時系列データの一つと考えられ、例えば Web アクセス履歴のような時刻付きの多項目のレコード集合からなるデータもこれに含まれる。このように時系列データマイニングの内容は多岐にわたる。

それら時系列データマイニングの応用として、近年注目を集めているのがソーシャルネットワークにおける情報伝搬の解析である。ブログや Twitter をはじめとするインターネットメディアの普及により、オンライン上でのニュースや噂の伝播速度が増している。情報は緩やかに拡散してゆっくりと減衰していくのか、それとも急激に伝わると同時にすぐに消えていくのか、ニュースをはじめとする情報がオンラインメディア上でどのように伝わり、減衰していくかに着目した解析技術の開発が行われている。そして、ソーシャルメディア上における情報伝播の解析によって、特定の情報に関する拡散力、興味を持つ潜在的なユーザの数などを推定し、さらには外れ値検出や時系列予測などの実用的なタスクを処理することができる。

時系列データマイニングにおいて、もう一つの注目すべき応用として医療情報解析を挙げることができる。医療データは検査や診断、投薬などの医療サービスの内容が患者毎に、そして時間情報とともに蓄積される。従来、医療データは個々の医療機関内で管理されていたが、EHR（Electronic Health Record）に関する取り組みは、医療機関連携ネットワークを利用して個人の医療健康情報の共有を目指すものである。医療データの時空間解析は医療サービスの質の向上および効率化を図り、医療分野における様々な問題を解決できる重要なアプローチとして期待されている。

ストリームマイニング

データストリームとは、ネットワークから連続的かつ高速に流れてくる大量の時系列データのことである。センサーネットワークの普及に伴い、大量のセンサーから送られてくるデータストリームを高速に監視、分析するストリーム処理技術が重要となっている。

データストリームに対する問合せ処理を目的としたストリーム処理エンジンが、主にアメリカ主導でこれまで開発されてきた。STREAM（スタンフォード大学）や TelegraphCQ（カリフォルニア大学バークレー校）などの研究開発プロジェクトから、InfoSphere Streams（IBM）や Gigascope（AT&T）などの商用システムまで幅広くある。日本国内では研究開発プロトタイプとして StreamSpinner（筑波大学）が、商用システムとして uCosminexus Stream Data Platform（日立）や M2M ソリューション CONNEXIVE（NEC）がある。

そしてストリームマイニングとは、ストリームから有用なパターンを見つけ、特徴を捉えるための解析技術である。時系列データに関しては、データベースに蓄積された有限長の時系列データの解析のみならず、継続的に増え続ける時系列データをリアルタイムに分析し、監視するためのストリームマイニング技術が必要となっている。センサーデータの解析処理、ネットワークセキュリティー、人や自動車のような移動物体の監視、ソーシャルネットワークなどへの応用がある。増え続ける大規模なデータを分析するため、また利用者に情報をリアルタイムに提供するため、ストリームマイニングの技術は高速化と省メモリ化を図ってい

る。ストリームマイニングの技術として、部分パターン照合、トレンド検出、相関検出、分類、異常検知などが挙げられる。例えば、大規模なセンサーネットワークにおいて、類似した傾向のパターンを出力するセンサノード群をリアルタイムに検出、もしくは故障や経年劣化によって異常値を出力するセンサーを即座に発見することが可能になる。

グラフマイニング

グラフ構造とは、ノードおよびノード間のつながりを表現したエッジで構成されるものであり、分子生物学におけるタンパク質間の相互作用、タンパク質の立体構造、Web におけるリンク構造、さらにソーシャルネットワークにおけるユーザー間の関係を表現したソーシャルグラフもその例として挙げられる。クラスタリングや異常ノードの発見、部分グラフの探索、PageRank や HITS（Hyperlink induced topic search）に代表される重要ノードの発見など多くの取り組みがある。

そして、近年特に注目を集めているのがグラフ構造の時間的変化を示す時間発展グラフデータである。例えばソーシャルネットワークにおいては、ユーザー間のリンク構造の変化を表現することができる。グラフの構造変化に基づいた時間軸のセグメンテーション、パターン発見、異常検出などの技術開発が行われている。また、時間発展グラフの効率的なデータの格納・管理技術、さらにはストリーム処理を指向したグラフストリームに関する研究も行われている。

（４）科学技術的・政策的課題

・ソーシャルネットワークデータには多くの場合個人情報が含まれるため、これを広く利用するためにはプライバシー保護技術の適用が不可欠である。これは医療においても同様であり、個人の健康医療情報を解析するため、プライバシー保護は重要な課題である。
・ビッグデータ解析は医療において、リソース配分の適正化、現場業務の効率化、サービスの質の向上を図る重要なアプローチとして期待されている。そして、その効果を高めるため、医療情報連携基盤である EHR の普及が期待される。
・我が国において、自動車などの組込・制御機器分野で強みがある点を鑑みれば、センサーデータの時系列マイニングは重要な課題である。特に今後、我が国の製造業において付加価値を高めるためには、データマイニングをはじめとするソフトウエア技術が極めて重要になると考えられる。
・我が国では基礎研究と応用開発が個別に進められている感がある。競争的研究資金に基づくプロジェクトにおいて、産学が連携する試みもあるものの、多くの場合、製品化のような産業展開にはつながっていない。産学連携と産業展開をより一層重視した投資が適切であると考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・データマイニングのトップ国際会議である KDD (ACM SIGKDD Conference)において、2014 年に最も発表数が多い研究テーマは、情報伝搬と医療情報解析である。その中には、時間発展グラフを含めた時空間データ解析の研究が数多く含まれる。

・近年注目されているグラフデータの応用として、RDF (Resource Description Framework) がある。これは機械処理可能な知識をグラフとして表現するためのフレームワークである。また、RDF 形式でデータを公開する動きとして、Linked Data / Linked Open Data がある。今後はこの種のデータが急増することが予想されるため、グラフマイニング技術の発展が期待される。
・オープンソースの大規模分散処理フレームワーク Hadoop は世界的に広く普及しており、大規模グラフ処理にも利用されている。例えば、Apache Giraph は Hadoop によるオープンソース大規模グラフ処理フレームワークである。
・医療情報システムの開発と医療データベース構築については、諸外国でも様々な試みがなされている。アメリカのダートマス大学では医療のレセプトデータを用いた Dartmouth Atlas Project、イギリスの National Health Service (NHS)では公的医療サービスの利用履歴データを活用した Right Care Program、カナダのオンタリオ州におけるトロント大学とウォータールー大学の協同による州内の医事管理データを活用した Health System Performance Research Network Project などが挙げられる。また、わが国でも厚生労働省のレセプトなどの National Database (NDB)が構築されている。これらは先駆的な取り組みであるが、医療データの管理と活用に主眼を置いており、医療データから価値を引き出すためのビッグデータ解析技術の開発が望まれる。
・製造業においては、センサーデータを対象としたビッグデータマイニング技術が製品の付加価値を高めるために重要視されている。先進的な例として以下が挙げられる。
    - テレマティクス（トヨタ自動車）：リモートメンテナンス、安全・セキュリティーに関するエマージェンシーサービスなど、顧客へ新たな自動車運転サービスを提供するための ICT インフラを構築している。
    - KOMTRAX（コマツ）：建機を監視し、建機の位置や稼働情報など、データに基づいた顧客への保守サービスの強化と効率向上を図っている。
    - インダストリアル・インターネット（GE）：ジェットエンジンやガスタービンなど、様々な機械から多数のセンサーデータを収集し、データ解析に基づく新たな産業サービスを提供している。

（6）キーワード

時空間データ、時系列データマイニング、ストリームマイニング、グラフマイニング、ソーシャルネットワーク、センサーデータ、医療情報

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	・大学、研究所、企業などにおいて研究が行われているが、全般的に国際的なイニシアチブをとるには至っていない。 ・ソーシャルグラフマイニングの研究はかなり活発に行われている。また、時系列データマイニングに関しては世界トップレベルである。 ・2014年におけるデータベースおよびデータマイニング分野のトップ国際会議 3)6)の論文採択数は7件（全体の約3%）であり、依然として件数は少ないものの、若干ではあるが全般的に研究レベルは上昇傾向にあると思われる。
	応用研究・開発	△	→	・データマイニングにおいてはGoogleなどの米国企業が強みを有するため、応用研究については日本がいかに伍していくか早急な検討が必要である。 ・分散オンライン機械学習フレームワークであるJubatusが現れるなど、一定の進展が見られる。
	産業化	△	→	・データストリーム処理のための商用システムとして、uCosminexus Stream Data Platform（日立）やM2MソリューションCONNEXIVE（NEC）がある。
米国	基礎研究	◎	↗	・データマイニングについては、米国の大学、研究機関における基礎研究のレベルは高い。 ・2014年におけるデータベースおよびデータマイニング分野のトップ国際会議 3)6)の採択数は147件（全体の約57%）であり、件数は極めて多い。その中には世界をリードする研究も数多く見られる。
	応用研究・開発	◎	↗	・医療情報解析に関する研究開発が本格化している。国際会議KDD2014では11件の医療情報解析に関する発表があり、その中で9件が米国の企業、大学からの発表である。また、IBMは基礎研究と応用研究の両面で医療情報解析の技術開発をリードしている。
	産業化	◎	↗	・Google、Facebook、IBM、AT&Tなどの企業によって、各社のために有用なデータマイニング技術が研究開発され、様々な商用製品がリリースされている。 ・著名なグラフデータベースNeo4jは米国発である。
欧州	基礎研究	○	↗	・データマイニングについては、特にドイツの大学、研究機関における基礎研究のレベルが高い。またデータベース技術に関してはドイツのみならず、スイスの研究レベルも高い。 ・2014年におけるデータベースおよびデータマイニング分野のトップ国際会議 3)6)の採択数はドイツ11件（全体の約4%）、スイス7件（約3%）、イギリス4件（約2%）、フランス4件（約2%）、イタリア3件（約1%）となっている。その中にはインパクトのある研究も見られる。
	応用研究・開発	○	↗	・StreamCloudプロジェクトなどデータストリームの研究開発、さらにグラフデータ処理の研究も盛んに行われている。
	産業化	△	→	・時空間マイニングについては、応用研究・開発の動きは見られるものの、全体的に産業化が進んでいることを示す明確な情報は見当たらない。
中国	基礎研究	○	↗	・2014年におけるデータベースおよびデータマイニング分野のトップ国際会議 3)6)の論文採択数は35件（全体の約14%、香港の11件を含む）であり、件数は急増している。また、米国の大学との共同研究が多いことも特徴である。
	応用研究・開発	○	↗	・グラフデータ処理の研究が盛んに行われている。 ・地理情報を用いたソーシャルネットワークマイニング、移動軌跡データ解析など、位置情報を用いたデータマイニングに関する応用研究も盛んである。また、大気汚染に関する研究も行われている。
	産業化	△	↗	・Baiduをはじめとして、IT企業の発展が目覚ましい。研究所の拡充も積極的に行われている。

韓国	基礎研究	△	↘	・2014年におけるデータベースおよびデータマイニング分野のトップ国際会議 3)6)の論文採択数は1件と大幅に件数は下がっている。しかし、韓国はこれまで質の高い研究成果を長年に亘って出してきており、また若手の研究者の台頭もあり、一時的なものと思われる。
	応用研究・開発	△	→	・グラフデータの問合せ処理において質の高い研究が行われているものの、応用研究・開発が進んでいることを示す明確な情報は見当たらない。
	産業化	△	→	・時空間マイニングについては、応用研究・開発の動きは見られるものの、全体的に産業化が進んでいることを示す明確な情報は見当たらない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Yasushi Sakurai, Yasuko Matsubara, Christos Faloutsos: ``Mining and Forecasting of Big Time-series data”, ACM SIGMOD Conference, Tutorial, 2015.
2) Christos Faloutsos, Gary L. Miller, Charalampos E. Tsourakakis: ``Large Graph-Mining: Power Tools and a Practitioner's Guide”, ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), Tutorial, 2009.
3) SIGMOD: http://sigmod.org/
4) VLDB: http://vldb.org/
5) ICDE: http://tab.computer.org/tcde/
6) KDD: http://www.kdd.org/
7) ICDM: http://www.cs.uvm.edu/~icdm/

３．６．５　次世代情報検索・推薦技術

（１）研究開発領域名

次世代情報検索・推薦技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ウェブブラウザで検索エンジンを訪れ、クエリを入力してウェブページのリストを得るデスクトップ型ウェブ検索に代わる技術として、モバイル環境におけるスマートフォンなどを利用した検索・推薦技術の確立が求められている。(I) モバイル環境におけるコンテクストの利用 (II) クエリ入力を待たない能動的な情報の提示 (III) 小画面における必要最小限の情報提示 などの研究開発課題がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

1990 年代に始まったウェブ検索のサービスは今日では日常生活と切っても切り離せないものとなっている。中国で百度 (Baidu)、韓国で Naver が国産検索エンジンとして国内トップシェアを堅持していることや、米国などで Microsoft の Bing が健闘していることを除けば、世界の検索エンジン市場は事実上 Google の支配下にある。我々は検索窓にクエリを入力し、URL (ウェブページ) のリストを出力として受け取り、この結果を順番に調べていくという検索スタイルに慣れ親しんでいる。大手検索エンジン会社は、ユーザーがどの URL をクリックしどれくらいの時間閲覧していたかといった詳細な行動記録を収集しており、クリックデータと呼ばれるこのようなデータを検索結果の質の向上に役立てている。

しかし今や、検索はデスクトップパソコンよりもスマートフォンなどのモバイル端末を通して行うのが主流である。モバイル検索では、デスクトップ型検索とは異なる以下のような重要な研究課題がある。

(I) モバイル環境におけるコンテクストの利用：ここで、コンテクストとは例えばユーザーの絶対的位置 (緯度経度)、相対的位置 (ランドマークや他の通信機器などとの距離)、ジャイロセンサによる運動状況、生体センサーによる生体情報、気温、湿度など、モバイル端末で収集しうる情報全般をいう。モバイル検索ではこのような情報を利用してユーザーの情報要求を高精度で推定できる可能性がある。

(II) クエリ入力を待たない能動的な情報の提示：モバイル環境においては、システムがユーザーからの詳細なクエリ入力を待つという前提が崩れる。クエリの入力手段が貧弱であるという問題だけであれば音声入力によりある程度解決されるが、移動時やコンテクストが突然変化した時など、情報要求をクエリとして表現する、もしくは情報要求自体を自覚する余裕がない場合がある。このような場合、システム側から能動的に役立つ情報を適切なタイミングで提供することが求められる。

(III) 小画面における必要最小限の情報提示：デスクトップパソコンとは異なり、モバイル端末では一度に提示できる情報の量に制限がある。また、情報を閲覧する時間にも制限がある場合が多い。従って、従来のウェブ検索のようにウェブページをひとつひとつ精査して情報を探すという形態ではなく、システムが必要最小限の情報をコンパクトにまとめて提示することが求められる。ユーザーとシステムの間でインタラクショ

ンが必要な場合も生じるが、この場合のユーザーの入力および操作も最小限にとどめるよう工夫する必要がある。

［これまでの取り組み］

2012 年 2 月、国際的にアクティブな情報検索研究者が豪 Lorne に集結し、情報検索技術の今後の課題について議論を行い報告書 [1]をまとめた。この中で特に、モバイル検索を想定した文書単位ではなく情報単位の要約型検索や、クエリ入力を待たない検索の重要性が指摘された。以下の TREC (Text Retrieval Conference) および NTCIR (NII Testbeds and Community for Information Access Research) [5] における最近の取り組みはこの流れを汲むものである。

＜＜米 TREC の取り組み＞＞

TREC [7]は米 NIST (National Institute of Standards and Technology) が主催する情報検索に関するコンペティション型国際会議である。ここでは様々な情報検索の問題（研究種目）が設けられており、これは今後の技術発展を占う判断材料となる。TREC では 2012 年にコンテクスト型推薦トラック（Contextual Suggestion Track）がスタートしており、モバイル環境においてユーザーのクエリ入力の代わりにユーザーの嗜好データを利用し、コンテクストをもとに情報推薦を行うシステムの試作が始まっている。TREC のその他の種目が常にクエリ入力を前提としてきたのに対し、クエリ入力なしの状況を扱っている本種目は注目に値する。

＜＜アジアにおける NTCIR の取り組み＞＞

NTCIR は NII (国立情報学研究所) が主催する「アジア言語を対象とした TREC」に相当する国際会議である。NTCIR では 2011 年より、スマートフォン上の検索ボタンを一度押すだけで所望の情報が画面に表示されることを狙った One Click Access という種目が行われており、これは 2014 年に MobileClick という名前に変わっている。対象言語は英語および日本語である。また 2015 年には、モバイル端末上でユーザーとシステムが必要最小限の対話を行うことを狙った Short Text Conversation という種目がスタートしている。こちらの対象言語は中国語である。

［今後必要となる取り組み］

前述の三大課題 (I) モバイル環境におけるコンテクストの利用 (II) クエリ入力を待たない能動的な情報の提示 (III) 小画面における必要最小限の情報提示 は、それぞれ多くの未解決問題を有している。まず (I) および (II) についてであるが、個々のモバイル端末にどのようなセンサーを盛り込んでコンテクスト情報を収集し、各種コンテクスト情報をどのような情報要求に対しどのように組み合わせて活用すべきかは明らかになっていない。また、ユーザー端末からのコンテクスト収集には常にプライバシーの問題がつきまとうので、この点に関してフェイルセイフな戦略が必要である。さらに (II) については、何をユーザーに提示すべきかだけではなく、どのようなタイミングで提示すべきかが重要課題である。(III) については、これまで行われている研究がもっぱらテキスト情報を対象としたものが中心で

あることから、テキスト以外のメディアや情報提示方法（例えばグラフによる簡潔かつ直観的な可視化）を含めた検討が必要である。さらに、最小限のインタラクションによりユーザーを所望の情報に導く手法の体系化も必要である。

（４）科学技術的・政策的課題

デスクトップ型検索においては米 Google や Microsoft がユーザーから大量のクリックデータを収集し、これを検索の質の向上に役立てている。中国には百度（Baidu）、韓国には Naver という国内トップシェアを維持しているウェブ検索エンジンがあり、同様の取り組みを行ってきたと考えられる。一方、巨大市場を抱える中国では Weibo, Weixin などの国産ソーシャルメディアが普及しており、韓国の Naver は LINE をアジアのみならずグローバルレベルで展開している。このようにソーシャルメディアにおいて大規模ユーザベースをもつことは、デスクトップ型検索がそうであったように、今後のモバイル検索の質の向上のキーとなると考えられる。

ユーザーからのコンテクスト収集には Apple の iPhone、Google の Android Phone といったスマートフォンや、将来的には Google Glass（これ自体の一般向け販売は 2015 年 1 月で終了）、Microsoft SenseCam のようなウエアラブルデバイスとの連携が不可欠である。この点でも上記米国企業や、韓国のスマートフォンメーカーなどは有利である。

上記を鑑みると、大規模ユーザベース、魅力的なデバイス、いずれの観点からも日本は次世代モバイル検索分野において不利である。日本の成熟したモバイルユーザを活用し、例えば「災害時に命を救うモバイル検索」のように頑健な通信インフラの構築から末端ユーザーの満足度向上までを包括的にとらえた大規模研究プロジェクトが急務であると考える。さらに、このとき開発する技術は日本国内のみならずグローバルにインパクトを与えうるものにすることが必須である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

モバイル検索においてユーザーを満足させるには、ユーザーからの暗黙的フィードバックの収集（ユーザーが満足しているかどうかの手がかりをユーザーに意識させずに収集すること）が重要である。ウェブ検索におけるユーザーからの暗黙的フィードバックは主にウェブページのクリックデータであったが、モバイル環境ではよりリッチな情報を利用できる可能性が高い。例えば、スマートフォンにおけるタッチインタラクションの履歴や、小さい画面に表示されるウェブページの領域情報、心拍数や脳波などの生体情報をモバイル検索に活かそうという研究が始まっている。

（６）キーワード

モバイル検索、情報検索、情報アクセス、コンテクスト、暗黙的フィードバック、レコメンデーション、パーソナライゼーション、スマートフォン、ウエアラブルディバイス

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	国立情報学研究所が主催するアジア言語を対象としたコンペティション型の国際会議NTCIRでは、スマートフォンの小さい画面に必要最小限の情報を提示することを前提としたMobileClickという研究種目が設けられており、基礎研究レベルでの今後の発展が期待できる。
	応用研究・開発	△	→	例えばモバイル端末向けに2つのレストランの特徴を比較するインターフェースなどの試作がある。しかし、個々のプロトタイピングレベルである。
	産業化	×	→	上記のような基礎・応用研究が産業に活かされることが期待されるが、デスクトップ型ウェブ検索（Google, Bing）の知見やモバイルOSをもつ米国、携帯端末およびLINEのようなアプリケーションをもつ韓国、国産アプリケーションと大規模ユーザベースをもつ中国のような際立った強みが日本には見当たらない。
米国	基礎研究	○	↗	米NISTが主催するコンペティション型国際会議TRECでは、ユーザーの嗜好を用いてモバイル環境における推薦を行うContextual Suggestion Trackという研究種目が設けられ、クエリ入力を必要としないモバイル推薦の研究が始まっている。
	応用研究・開発	○	↗	デスクトップ型ウェブ検索に関する研究で多くの成果を発信しつづけているMicrosoftなどの企業がモバイル検索にも着手しており、今後も応用研究が加速すると考えられる。
	産業化	△	↗	例えば米AppleはiPhone、GoogleはAndroid Phone、MicrosoftはWindows Phoneを有しており、これらの製品を活用したモバイル検索・推薦の産業化が展開しやすい状況にある。特にGoogleとMicrosoftはデスクトップ型ウェブ検索において深耕した技術を応用できるという強みもある。
欧州	基礎研究	△	→	アジアのNTCIR、米TRECに対応する欧州のコンペティション型会議CLEF（Conference and Labs of the Evaluation Forum）[2] では本研究分野に直接インパクトを与える研究種目が設定されていない。
	応用研究・開発	△	↗	例えばDublin City大学はライフログ収集の研究を長期間に亘って行っており、もしこのようなコンテンツに効率的にアクセスする技術が確立できれば応用研究の道が開ける可能性がある。ただし、ライフログ収集のために用いている技術はGoogle GlassやMicrosoft SenseCamなど、米国のものが目立つ。
	産業化	×	→	上記の状況により、明確な産業化への糸口が見えているとは言えない。
中国	基礎研究	×	→	本分野に関する基礎研究レベルでの存在感は大きくない。
	応用研究・開発	△	↗	研究レベルでの存在感は大きくないものの、中国のIT企業は国産ソーシャルメディア（Weibo, Weixin）などを発展させており、これらの基盤を利用したモバイル検索・推薦の研究開発が今後発展する可能性はある。また、通信機器メーカーである華為技術は香港に研究所を新設し、モバイル分野の研究開発に取り組んでいる。
	産業化	△	↗	上記の状況と、国内市場が極めて大きいことから今後の発展が見込まれる。また、中国語のデスクトップ型ウェブ検索で大成功を収め、最近では日本国内でもユーザログ情報無断送信の件で話題となった百度（Baidu）も、モバイル検索への展開を進めている。
韓国	基礎研究	×	→	本分野に関する基礎研究レベルでの存在感は大きくない。
	応用研究・開発	△	↗	研究レベルでの存在感は大きくないものの、LINEを運営するNaverがアジアにとどまらずグローバルに展開している例もあり、このような企業が今後大規模ユーザデータを活用した応用研究開発で存在感を増す可能性はある。
	産業化	△	↗	上記の状況より、産業レベルでも今後の発展が見込まれる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Allan, J. et al. Frontiers, Challenges, and Opportunities for Information Retrieval: Report from SWIRL 2012 The Second Strategic Workshop on Information Retrieval in Lorne. SIGIR Forum. 2012. Vol.46, No.1, pp.2-32 http://www.cs.rmit.edu.uu/swirl22/
2) CLEF (Conference and Labs of the Evaluation Forum) オンライン予稿集. http://www.clef-initiative.eu/publication/working-notes
3) Dean-Hall, A. and Clarke, C.L.A. Assessing Contextual Suggestion, EVIA 2014. pp.29-32
4) Jin, H. et al. ReviewCollage: A Mobile Interface for Direct Comparison Using Online Reviews. Proceedings of ACM MobileHCI 2014. pp.349-358
5) NTCIR (NII Testbeds and Community for Information Access Research) オンライン論文集. http://research.nii.ac.jp/ntcir/publication1-ja.html
6) Sakai, T. et al. Click the Search Button and Be Happy: Evaluating Direct and Immediate Information Access. ACM CIKM 2011. pp.621-630
7) TREC (Text Retrieval Conference) オンライン論文集. http://trec.nist.gov/pubs.html
8) 情報検索関係の国際会議論文集（SIGIR, CIKM, WWW, WSDM など）
9) 情報推薦関係の国際会議論文集（RecSys など）
10) モバイルインタフェース関係の国際会議論文集（CHI, MobileHCI, Ubicomp など）
11) 酒井哲也. 情報アクセス評価方法論～検索エンジンの進歩のために～. コロナ社. 2015.

３.６.６　個人ライフログデータの記録・利活用技術

（１）個人ライフログデータの記録・利活用技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

個人の行動をデジタル記録・アーカイブし、そのデータの解析や可視化を行う技術であり、自分自身の体験や活動の把握に利活用することで、日常の記憶や健康の増進など、様々な目的へ資することが期待されている。なお、必要に応じ行われる新しいウエアラブルデバイスの開発も含まれる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ライフログの記録と利活用の取り組みはいまだに未成熟な状態にあり、メインストリームの一つになるかどうかの分岐点をこれから迎える。ライフログの意味するものの実態も明確には定まっていない。生活で生じたことすべての記録というのが究極ではあろう。しかしながら、現実の技術、サービスとしてライフログが論じられる場合は、滞在・移動を示す位置の記録（ロケーションログ）であったり、運動や活動、心拍の記録（活動ログ）、ウエアラブルカメラで取得する画像映像の記録（ビジュアルログ）、食事の記録、読書の記録、睡眠の記録、スマホのアプリ利用履歴と様々である。そのため生活の一側面を記録し、アーカイブすることが主として行われている。最終的なライフログは、それら個々のものの複合体となると考えられる。

また、ユーザー個人の記録からユーザー自身の生活の有様を定量化して把握することは、quantified self とか personal informatics とも称され、ライフログの利活用の一面をあらわしている。なお、最も身近なデバイスとして広く普及したスマートフォンを用いたアプリとして、ライフログを銘打つものが増え、その内蔵デバイスやウエアラブルデバイスと連動して情報収集するものが中心になっている。

学術活動

ライフログと称するアプリやサービスは増加するものの、まだ、学術領域として十分に確立されている状況に至っていないように感じられる。そのため、中国や韓国など確立した学術領域での充実を図る傾向の強い国からの学術的な活動はほとんど見られない。これまでの研究は、欧米、日本に依存していると思われる。現状の研究発表は、マルチメディア系会議、ユビキタスコンピューティング系会議等に散見される。なお、ライフログを主要課題とした学術集会を列記すると以下があげられる。

＜国内＞

・電子情報通信学会ライフインテリジェンスとオフィス

＜海外＞

・ACM Workshop on Personal Informatics[1)]

・Quantified Self Conference & Expo[2)]　なお、この会は学術集会というより発表イベントに近いように思われる。

また、過去には、次のような学術集会が開かれてきた。

＜海外＞
・ACM CARPE (2004-06): Workshop on Capture, Archival and Retrieval of Personal Experiences
・SenseCam Conference (2009-2013)
・IMAPA (2010-11) Information Access for Personal Media Archives
・International Workshop on Lifelogging for Pervasive Health (2013)

ウエアラブルデバイス、アプリ

ウエアラブルデバイス、スマホアプリとして、現状、多くのものが現れている。人の活動量計が最もにぎやかであり、FitBit、JawBone UP などが先行し、2014 年には東芝、ソニーからもリストバンド型のウエアラブルデバイスがでている。なお、ソニーの場合には、ライフログと称するアプリを提供し、活動量、位置、スマホアプリの使用履歴の記録をとり、可視化するツールを提供している。

スマホアプリでの記録としては、位置（FourSquare 他）、食事記録（FoodLog 他)、睡眠(Sleep Cycle 他)、消費（Mint 他)と多彩なものがすでに一般利用に提供されている。

カメラに関しては、SenseCam というマイクロソフトの開発したウエアラブルカメラが、Vicon から売り出されていたが、現在、生産は終了している。クラウドファウンディングからスタートした Narrative が、Clip カメラ（もともと、Memoto Lifelogging Camera と称した)を発売し、GPS も内蔵した位置記録を有している。同様のものとして、SnapCam も 2015 年に新たに出た。

その他、様々な Personal Informatics、Quantified Self のアプリやツールが多数存在する。

（４）科学技術的・政策的課題

・「ライフログ」という個人の生活の中で生み出されるデータを扱うには、プライバシーへの十分な配慮がかかせない。取得したデータを、安易に共有することができないことは、この分野の進展を阻む大きな要因である。
・プライバシーに関しての議論では、カメラはその場に居合わせた他人を映してしまうために最も敏感なものになる。ウエアラブルカメラとして、Google Glass が存在するが、このプラバシーの問題があり、一般への販売を取りやめ、法人利用に特化するとの報道も 2015 年 1 月に行われた。
・「ライフログ」については、学術研究よりもアプリケーションが先行している。学術研究のためには、十分な量のデータを用い、目的に対しての評価が必要になるが、それを満たすためには、多人数のデータの取得を長期間行う必要があり、困難が多い。
・アプリケーションが先行しているため、例えば、活動量に至っては、多くのウエアラブルのデバイスが利用可能である一方、データそのものは企業のクラウドに蓄積される。データ処理の観点からは、それらのデータを直接利用できない限り、何もすることができない。ライフログの研究では、データ取得のデバイスやアプリの構築を行うことから始める必要がある。
・ライフログのデータを共有することが可能となるならば、そのためのデータの標準化を

行うことは大いに価値がある。ただし、現時点では、共有すること自体への問題がクリアされていない。
・ライフログの社会的な目標は、個人の体験を伝えることにあるとも言える。そのためには、プライバシーも考慮しながら共有のための議論が一層必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・ウエアラブルデバイスが大きな進展をみせつつある。それらと連携したスマートフォンアプリが提供されている。2014 年には、ソニーからも「ライフログ」アプリ、連動して利用するリストバンド型の活動量計がでている。現状では、ヘルスケア、健康分野が、ライフログのもっとも直接的な活用領域である。
・ウエアラブルカメラでは、スウェーデンの Narrative Clip (2014)、英国の Snap-Cam(2015)とライフログカメラと称するものが市場にあらわれた。その一方、Google Glass は一般販売を取りやめることが報じられた。なお、ビジュアルライフログの医療系への応用では、人の短時間記憶の補助やリハビリへの利用が論じられてきた。短時間記憶への効果についても論じられている [3]。
・アイルランドのダブリンシティ大学のグループが 2006 年より継続して、ウエアラブルカメラで記録するビジュアルライフログを用いたライフログ研究のプロジェクトを継続している。2014 年には個人ライフログについてかなり網羅的に記述した本 [4]を出版した。
・国内の比較的大きなプロジェクトとしては、次のものがあげられる。
JST CREST「“食”に関わるライフログ共有技術基盤（H21-26)」研究代表者　相澤（東大）FoodLog という食事記録のためのツールを構築し、アプリの提供、WebAPI の提供を行った
・ダブリンサイエンスギャラリーにて、2015 年 2 月～4 月に「Lifelogging Lab」と称する展示が行われる。自分自身を知るためのツールを用いた分析と可視化の体験が提供される。

（６）キーワード

Lifelog、Lifelogging、Quantified Self、Personal Informatics、Wearable

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	ライフログの黎明期から、研究がおこなわれていた。国内の電子情報通信学会に研究会[5]も設けられた。
	応用研究・開発	○	→	同上。
	産業化	○	↗	ウエアラブルデバイスへの取り組みが活発化している。また、スマートフォンアプリへの取り組みも行われている。
米国	基礎研究	○	→	黎明期に、Microsoft ResearchにてMylifeBitsといった試みが見られたものの、アカデミアからの技術的な貢献はその後発展しているように見えない。
	応用研究・開発	○	→	同上
	産業化	◎	↗	ウエアラブルデバイスで先行し、なおかつ活発化している。Quantified Selfの記録、分析のためのアプリも数多く出ている。
欧州	基礎研究	◎	→	継続的に研究を続けるグループがあり、医療系への応用も含めて、幅広い取り組みが行われてきた。
	応用研究・開発	◎	→	同上
	産業化	○	→	現時点での産業化のタネは、ウエアラブルデバイスであろうが、顕著なものが見えない。
中国	基礎研究	×	→	学術分野で、ライフログへの取り組みは、見たことがない。
	応用研究・開発	×	→	同上
	産業化	△	→	ウエアラブルデバイスなどへの取り組みはあると思われる。
韓国	基礎研究	×	→	学術分野で、ライフログへの取り組みは、見たことがない。
	応用研究・開発	×	→	同上
	産業化	△	→	ウエアラブルデバイスなどへの取り組みはあると思われる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）ACM Workshop on Personal Informatics
http://www.personalinformatics.org/

2）Quantified Self Conference & Expo
http://quantifiedself.com/

3）A. R. Doherty t al., Wearable Cameras in Health The State of the Art and Future Possibilities, Am J Prev Med. 2013 Mar;44(3):320-3.

4) C.Gurrin, A.F.Smeaton, A.R.Doherty, Lifelogging, Personal Big Data, Foundataions and Trends, Volume 8, Issue 1, ISSN: 1554-0669, 2014.
5) 電子情報通信学会　ライフインテリジェンスとオフィス情報システム研究会
http://www.ieice.org/iss/ois/jpn/

3.7 人工知能

人工知能は、コンピューターにより人の知的な振る舞いを実現することを目標にする研究分野である。

1956 年頃から人工知能（AI: Artificial Intelligence）の研究が始まって以来、隆盛期と幻滅期を繰り返しながらも、現在、確実に第 3 次 AI ブームが到来している。以下、話題によくあがる AI を取り上げながら、AI を、探索型、知識型、計測型、統合型に分類して説明する（図 3.7.1）。

探索型 AI の代表格がチェス・将棋・囲碁で人間と対戦するゲーム AI である。チェスでは、1997 年、IBM が開発した Deep Blue が当時の世界チャンピオンに勝利し、将棋では、2013 年と 2014 年、5 人のプロ棋士と 5 種類の将棋ソフトウエアが対戦するチーム戦が行われ、コンピューターの 7 勝 2 敗 1 分で、圧倒的に優位になっている（囲碁はまだアマチュア 6-7 段レベル）。

知識型 AI の代表格は、IBM が開発したクイズ AI「ワトソン」である。ワトソンは百科事典（CYC）、辞書、書籍、ニュース記事など 2 億ページの知識情報を構造化し、クイズに対して、数百の答え候補を生成し、検査して候補を得点付けして 1 位を答えとして返す。当初は、正解率 30%にも満たなかったが、過去のクイズ解答データを使って機械学習により正解率を 80%以上に向上させた。そして 2011 年 2 月、ワトソンは、米国人気クイズ番組ジェパディ！のグランドチャンピオン 2 名に挑戦し、見事に勝利した。現在、ワトソンは IBM の事業部門となり、医療分野などに応用されている。臨床医は手術で忙しく、論文を読む時間がない。そんな臨床医のために、ワトソンは最新の医療論文から新しい知見を教えてくれる。日本においても、国立情報学研究所が、大学の入試問題を自動解答する東ロボ君の開発に取り組み、2014 年の代々木ゼミナールのセンター模試では私立大学 480 校以上で、合格可能性 80%以上の A 判定を獲得し、受験関係者を驚かせた。

計測型 AI としては、どのルートで掃除すれば一番効率的か毎日学習するお掃除ロボット「ルンバ」、そして、グーグルが開発を進める自動運転車に大きな注目が集まる。グーグルカーは既に公道で 80 万 km 以上を走行し、自らの過失による事故は皆無である。法的な問題があるが、10 年後、自動運転車が普及すれば、視覚障害者も利用可能なモビリティーが実現、また人間に起因する交通事故の激減による医療費の削減や交通渋滞の緩和など、多大な経済効果が期待できる。スマートフォンがハード（入れ物）の競争からソフト（中身）の競争へと転換したように、自動車の価値は、エンジンから情報を活用したアプリケーションに推移し、車のハードに関わる利益率は一気に下がるなど、自動車の産業構造は根本から変わる可能性があり、産業界から大きな関心が寄せられている。

統合型 AI は、上述の探索型、知識型、計測型を統合した AI であり、知能ロボティクスの研究が代表的である。ただ、上述の知識型 AI であるワトソンや東ロボ君は、知識・推論に関連した多くの AI 要素技術を統合しているので、要素技術統合型 AI ともいえ、3.7.6 統合的人工知能では後者の意味で統合という用語を使っている。

本節では、探索型 AI に関連して 3.7.1 探索、知識型 AI(知識・推論・機械学習)に関連して 3.7.2 機械学習、3. 7.3 オントロジーと LOD、3.7.4 Web インテリジェンス、3.7.6 統合

的人工知能、計測型 AI および統合型 AI に関連して 3.7.5 知能ロボティクスについて説明し、長期的な研究課題ではあるが、特定の問題を解決する弱い AI ではなく、解決対象問題を限定せず、意識までも持ちうる強い AI として 3.7.7 汎用人工知能、AI と関わりの深く大きな影響を与えている人間の知能に関わる研究領域として 3.7.8 認知科学をとりあげて説明する。図 3.7.1 の左上にこれらの研究開発領域間の相互関係を示す。

問題は限定されるといっても、AI は人の知能に迫ってきており、AI と人・組織・社会の関わりを議論する時代が到来し、AI が社会性の高い学問に成長してきた。今後、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues)、すなわち、倫理、法律、社会的な観点から AI を設計する必要性も高くなるであろう。

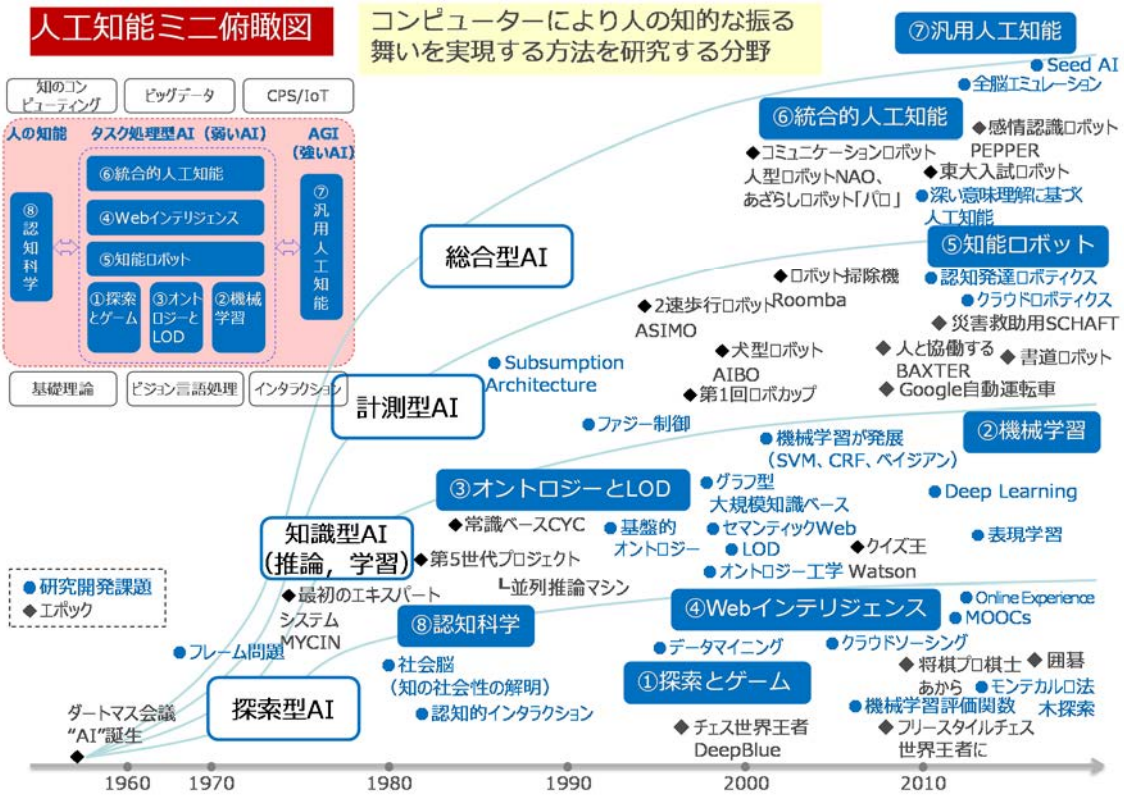


図 3.7.1 人工知能の俯瞰図

３．７．１　探索とゲーム

（１）研究開発領域名

探索とゲーム

（２）研究開発領域の簡潔な説明

知能の基本的な機能である、多数の候補の中から適切なものを選択するという探索と、その探索の研究の代表的な例題であるゲーム（ここでは特に思考ゲーム）に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

探索の研究は 1950 年前後に Shannon と Turing が相次いでチェスのプログラムの研究を行ったことから本格的に始まったと言える [1)]。多数の候補の中から適切なものをできるだけ早く見つけ出す探索という行為は知能の基本的な機能の一つである。ゲームに勝つには多数の候補手の中から勝ちにつながるいい手をなるべく早く見つけ出すことが必要なので、探索の研究にとってとてもよい例題である。ゲームは勝ち負けによって手法の良しあしが明確に評価できる点も優れている。中でもチェスは西欧で知性の試金石とされている（初めてそう言ったのはゲーテとされている）ので、人工知能そして探索の例題としてチェス（の世界チャンピオンに勝つコンピューターを開発すること）はその後 50 年間ずっと中心的な例題となっていた。ちなみにチェスの場合の数はほぼ10^{120}である。ある局面でルール上指せる合法手の数を分岐数というが、チェスの平均分岐数は約 35 である。チェスは平均 80 手で勝負がつくので、35 の 80 乗すなわち10^{120}が場合の数となる。

ゲームは、

・何人でプレイするゲームか（何人ゲームか）
・勝ちをプラス、負けをマイナスとして全体として零になるか（零和ゲームか）
・理論上いつか終わるゲームか（有限ゲームか）
・敵の情報がこちらに全部わかっているか（完全情報ゲームか）
・偶然性がはいらないゲームか（確定ゲームか）

という性質によって分類される。チェスは、２人・零和・有限・完全情報・確定のゲームの代表格である。チェッカー、オセロ、五目並べ、将棋、囲碁などは同じ性質を持っている。これらのゲームには理論上必勝法が存在すること（先手および後手が最善を尽くせば先手必勝か後手必勝か引き分けになることが決まっていること）がゲーム理論によって証明されている。コンピューターにとって完全情報ゲームの方が扱いやすいので、その探索の研究が先に進んだが、バックギャモン、コントラクト・ブリッジ、ポーカー、麻雀、大貧民など不完全情報ゲームの探索の研究もその後盛んに進められている。不完全情報ゲームの方が現実の社会と近いので、傾向としては完全情報ゲームから不完全情報ゲームへと研究は進んでいくものと予想される。

Shannon と Turing はチェスの探索にゲーム理論で von Neumann らが開発したミニマックス法を使うことを提案し、このミニマックス法がその後のゲームの探索の基本となった。ゲームのプログラムを強くするには、

１）ミニマックス法を基本とした探索手法の改良
２）局面を点数化する（静的）評価関数の精緻化

の二つが求められる。理論的には例外が存在するものの、経験的にほとんどの場合、ゲームはより深く先読みした方が強くなるので、同じ時間でできるだけ深く先読みできる探索手法が望ましいことになる。

チェスのプログラムを強くすることを目指してさまざまな工夫が試みられた。ミニマックス法は探索の末端の局面のすべての評価値をしらみつぶしで求めなくてはならないので時間がかかってその分深く読めないという欠点がある。ミニマックス法と探索結果は同じでそれより効率がいい手法が経験的に開発された。それがアルファベータ法である。チェスのプログラムで経験的に使われていたヒューリスティックをアルゴリズムとしてまとめたのがKnuth である。Knuth は末端の局面の数がN個のときにアルファベータ法は最も効果が高い場合に$\sqrt{N}$個だけ評価値を求めればいいことを明らかにした[2)]。

アルファベータ法の効果が高くなるのは展開した探索木が評価関数の値の大きい順番になっているときである。したがって 1 手先を読むたびに評価値を計算して大きい順に並べ替えておくのがいいことになる。チェスのプログラムで経験的にそのことがわかり、それがのちに反復深化（iterative deepening）という探索手法として定式化された。

新しい探索手法の多くはチェスを例題として開発されたと言ってよい。例えば、ある指し手の評価値だけが他の評価値とかけ離れているときにその指し手に注目してその指し手だけをより深く読むという選択的深化（selective deepening)、評価値がどの程度信頼できるかを表す共謀数（conspiracy number)とそれを拡張した証明数（proof number)・反証数（disproof number）などが有名である。

直接には探索ではないが、探索を効率的に行うためのハッシュ表、ビットマップなどデータ構造の工夫もチェスを通して確立した。チェスは（アルファベータ法を使って）ルール上、指せるすべての手を読むという全数探索が有効だったので、スーパーコンピューターやチェス専用マシンを使うことによって探索の速度を上げようという試みが盛んになされた。また並列に探索するアルゴリズムもチェスを例題にして盛んに研究された（アルファベータ法は探索全体をアルファ値、ベータ値によって制御するので並列に探索するには困難があった)。またチェスは駒の再利用ルールがないのでゲームの進行に伴って駒の数が単調に減少していく。駒が盤面に数個しか残っていない局面になると、コンピューターは（ほぼ）しらみつぶしの探索によってその局面を解く（双方が最善手を続けたら先手が勝つのか後手が勝つのか引き分けになるかを求める）ことができる。この探索をあらかじめ行ってデータベース化したものが終盤データベースである。コンピューターはこれを持っていればこのデータベースに含まれる局面で最善手を指すことができる。1980 年代には盤面残り 5 駒のすべての局面の終盤データベースが作られた。1990 年代から 2000 年代にかけて盤面残り 6 駒のほとんどの局面の終盤データベースが作られた（その間にコンピューターが世界チャンピオンに勝ってしまったので、終盤データベースを作る意味が薄くなったと言える)。

チェスはコンピューターにとってかなりむずかしいゲームであったので、チェスよりも場合の数が小さいチェッカー（場合の数は 10^{30})、オセロ（場合の数は 10^{60}）なども例題として取り上げられた。チェッカーは 1994 年に、オセロは 1997 年にコンピューターが世界チャンピオンに勝利した（チェッカーはその後 2007 年に引き分けのゲームであることが判明した)。

チェスは何度も人間との対戦を経たのちに 1997 年に Deep Blue が世界チャンピオンの

Garny Kasparov に勝利した。6 回戦で 5 回戦が終わった時点では 1 勝 1 敗 3 引き分けのイーブンであったが、最終戦で Kasparov が緊張のあまり序盤で大悪手を指して負けてしまった。これはフロック勝ちで、この時点ではまだ Kasparov の実力が Deep Blue に勝っていたと思われる。その後の進歩によりコンピューターは人間より明らかに強くなっている。Deep Blue はスーパーコンピューターにチェス専用マシンを数百台並べた構成であったが、もはやパソコン 1 台でも人間が敵わないまでになっている。

チェスよりも場合の数が大きいゲームに中国将棋（10^{150}）、将棋（10^{220}）、囲碁（10^{360}）が存在する。中国将棋は探索問題として見るとチェスに近い（すでに人間よりもコンピューターの方が強くなっている）が、将棋と囲碁はチェスよりはるかに場合の数が大きく、チェスとは異なる手法が必要なので、チェスに続く例題として適切である。将棋はチェスと同じように敵の重要な駒（玉あるいはキング）を捕まえるゲームであるが、チェスが敵から取った駒が使えないのに対して将棋では敵から取った駒が再利用できる（「持ち駒」制度と呼ばれる）ため、終盤は序盤より分岐数が大きくなる。チェスは収束型ゲームであるが、将棋は発散型ゲームなのである。

チェスを対象とした探索手法はほぼすべてが欧米で研究され、日本を含むアジアの貢献はほとんど存在しない。将棋はチェスよりも場合の数がはるかに大きく、チェスで有効であった探索手法がそのままでは使えないので、チェスの次の探索研究のよい対象になった。将棋は日本固有のゲームなので、将棋を対象とした探索の研究は当然のこととして日本が中心になった。このことが日本における探索研究を活発にして、世界の中で探索とゲームにおいて日本が主要な立場を占める原動力になったと思われる。

将棋のプログラムの開発は 1970 年代に始まったが、当時のコンピューターの能力では将棋はチェスのような全数探索は到底無理だったので、前向き枝刈りの探索手法が盛んに研究された。ミニマックス法（アルファベータ法）、反復深化などチェスで有効だった手法で将棋でも使える手法はおよそすべて使った。将棋は発散型ゲームなので、チェスで有効だった終盤データベースの手法は使えない。その代わりに詰め将棋という将棋から派生したパズルを解くアルゴリズムの研究が盛んになされた。詰め将棋の研究は 1990 年前後から本格的に進められ、その中でさまざまな探索の手法が試された。有効だったのはチェスで提案された（そしてチェスではあまり有効でないとされた）証明数・反証数を用いた手法である。詰め将棋のプログラムは 2000 年前後にはすでにプロ棋士を超える能力を示した [3]。

評価関数はチェス同様に手作業で作成と改良を行っていたが、チェスの評価関数は駒の損得という明快な基準があったものの、将棋の評価関数は複雑でなかなか強くならなかった。2000 年代の半ばに登場した保木のボナンザによってコンピューター将棋は革命的な進歩を果たした。保木の工夫は、

(1)それまで将棋は前向き枝刈りの探索をしていたのをチェスのように全数探索に、
(2)それまで評価関数は手作業で作っていたのを棋譜からの機械学習で作るように

したことの２点である [4]。この工夫をしたボナンザが圧倒的な強さでコンピューター将棋のトップに立ったので、他の研究者開発者もこぞってこれらの方法を取り入れた。特に上記の(2)の方法は強豪のプログラムすべてが取り入れており、「ボナンザ・メソッド」と呼ばれている。保木はボナンザのアルゴリズムをすぐに公開し、またプログラムのソースコードも無償で公開した。これは後述するようにコンピューターチェスの文化を引き継いだものである

が、研究成果を公開するという習慣がこの研究領域の発展を支えているものと思われる。

2010 年代になってコンピューターとプロ棋士が対戦するようになった。2013 年、2014 年と電王戦と称してプロ棋士５人とプログラム五つが対戦したが、３勝１敗１分け、４勝１敗とともにコンピューターが圧勝した。すでにコンピューターはトップクラスのプロ棋士（竜王、名人）のレベルに達したと思われる。2015 年以降にトッププロ棋士とコンピューターが対戦すれば勝率的にはコンピューターが勝ち越す可能性が高い。対戦はすぐには実現しないことが危惧されるが、実力としては 2015 年に追い越したと言ってよいであろう。

囲碁は中国発祥のゲームであるが、中国では廃れて日本で盛んになった（いま中国で盛んになったのはいわば日本からの逆輸入である）。囲碁は、他に似たルールのゲームが存在しない、漢字を使っていないので親しみやすい、などの理由で世界的に普及している。最初にコンピューター囲碁の研究がなされたのは 1960 年代のドイツである（チェスよりは遅いが将棋より早い）。囲碁もチェスのように探索によって次の手を決めようとしたが、囲碁の場合の数は 10^{360} とチェスや将棋よりはるかに大きく、ふつうの探索によっていい手を見つけるには候補手が多すぎて強くならなかった。2000 年代になってもまだとても弱い状態であった（初心者レベルよりはましでもせいぜい初級者レベルであった）。

囲碁も将棋のボナンザ・メソッドのような革命的な手法が現れた。それがモンテカルロ木探索である。この元となったモンテカルロ法は von Neumann の命名と言われるシミュレーションによって解を求める方法である。1990 年代にこれを囲碁に適用するというアイデアが発表されたものの、そのときは成功しなかった。2000 年代になって Coulom が Crazy Stone という囲碁プログラムの中で、モンテカルロ法を応用した（UCT: Upper Confidence bounds applied to Trees というアイデアを付け加えた）モンテカルロ木探索を採用し、Crazy Stone は圧倒的な強さを示した [5]。囲碁にモンテカルロ法を適用するということは、ある局面から白と黒が交互にランダムに終局まで打ち進めるというシミュレーションを多数行って勝つ確率が一番高い手を選ぶということである。そこには囲碁の知識はほとんど何もはいっていない。この一見単純な方法（実は UCT など細かい工夫が重要なのではある）で強くなることに驚き、その後の囲碁プログラムはみんなこの方法を取り入れている。その結果、囲碁プログラムは一気にアマチュアの 6 段程度の実力に達した。現在は日本の ZEN（これもモンテカルロ木探索を用いている）が Crazy Stone を抜いて最も強い囲碁プログラムである。プロとまだ互先（ハンディなし）で戦うのは無理であるが、トッププロ棋士と 4 子（初期局面に 4 個の石をあらかじめ置く）のハンディで勝つまでになっている。このモンテカルロ木探索の手法だけでトッププロ棋士に勝つのは無理で、更なるブレークスルーが一つか二つ必要と思われるが、これから十数年で囲碁もコンピューターがトッププロ棋士に勝つようになるはずである [6][7][8]。

２人・零和・有限・完全情報・確定のゲームで世界的に有名なものの中では囲碁の場合の数が最も大きい。したがって、もし囲碁で人間よりもコンピューターの方が強くなってしまえば、もはや残っているゲームは存在しない。前述したように流れとしては完全情報ゲームよりもコンピューターにとって扱いがむずかしい不完全情報ゲームに関心は移りつつある（囲碁は完全情報ゲームであるが場合の数が 10^{360} と圧倒的に大きく、その点で完全情報ゲームと不完全情報ゲームの橋渡しの役割を担っていると言える）。

不完全情報ゲームとしてはバックギャモン、コントラクト・ブリッジ、ポーカー、麻雀な

どが研究の題材として取り上げられている。バックギャモンは強化学習（試行錯誤で成功したら正の報酬、失敗したら負の報酬を与えることによって環境に適応させる学習の手法）によって世界チャンピオンに勝つようなプログラムが開発された（強化学習の成功例として有名である）。コントラクト・ブリッジはトランプのゲームとして世界でもっともプレイされているゲームで探索を含めてさまざまな研究がされているがまだ人間に追いついていない。ポーカーはさまざまなルールが存在するが、その一部のルールのポーカーについてはプログラムが世界チャンピオンを破っている（後で述べるようにあるルールのポーカーは「解かれて」いる）。麻雀は日本や中国などで非常に盛んで、敵が 3 人もいる 4 人ゲームで現実の社会に近く例題としてすぐれているが、ギャンブル性が高く不健全な雰囲気がある（麻雀というゲーム自体に罪はないが賭けることが日本では非合法である）、世界的にさまざまなルールがあって統一されていない（標準となるルールを仮定しにくい）などの理由で以前は研究が少なかった。最近インターネット上で（賭けない）標準ルールの麻雀が盛んになってきたので、それを対象とした麻雀の研究が盛んになってきた。例えば多数の牌譜（麻雀のプレイ記録）のデータをインターネット麻雀から集めていわゆる格言の妥当性を統計的に調べる研究がおこなわれている[9]。

ゲームを解く（一般的な言い方であれば「必勝法を見つける」）のも探索のよい例題である。（最強の）人間に勝つよりもそのゲームを解く方が一般に探索問題としてはむずかしい。

五目並べ（連珠）はハンディなしだと先手がとても有利なので後手にハンディを与えて対戦するのがふつうであるが、ハンディなしの五目並べは先手必勝であることが 1990 年代に解明されている。オセロの盤面は 8x8 であるが、それを 6x6 に小さくした「ミニオセロ」は後手必勝であることが同じく 1990 年代に解明されている。8x8 の本当のオセロは現在解く試みがなされているが、まだ解かれたという報告はない（おそらく 6x6 と同様に 8x8 も後手必勝と想像されている）。チェッカーは 1990 年代にコンピューターが世界チャンピオンに勝った後に解く試みがなされ、2007 年に解かれている（引き分けであることがわかった）。不完全情報ゲームは偶然性があるので完全情報ゲームと同じ意味では解けない（いわゆる「必勝法」は存在しない）が、最適戦略を見つけることを解くと見なせば解くことは可能である。最近掛け金に上限のある 2 人のテキサス・ホールデムというポーカーが解かれている。統計的に必ず勝ち越す最適戦略を見つけたという論文がサイエンスに載った。[10]

（4）科学技術的・政策的課題

この研究開発領域はゲームを例題としているために日本では長いこと疎外され続けてきた。ゲームという遊びを研究の例題にするなどもっての外であるという風潮が強かったためである。一方でアメリカとヨーロッパはチェスを中心としたゲームを例題にして探索を中心とした手法の研究開発を盛んに進めてきた。例題はゲームであるが、その研究成果はゲーム以外の多くの現実の社会の問題に対して広く使われている。「チェスは人工知能のハエである」という言葉もあるほどである（これはハエによって生物学特に遺伝学の研究開発が大きく発展したことにちなみ、チェスによって人工知能の研究開発が大きく発展したことを言っている）。Shannon と Turing というコンピューターのパイオニアがチェスを例題にした研究をしたことも大きかったと思われる。日本のコンピューターのパイオニアは、日本には将棋と囲碁というゲームの中でもコンピューターにとってとてもむずかしい、すなわちとてもよい

例題が存在するのに、長い間、見向きもしなかった。探索は地味な研究開発領域であるが、人工知能の基本中の基本であり、人工知能のすべての応用の元となっている。日本は長い間それを疎外し続けてきたために、人工知能の極めて大事な部分で大きな出遅れをしてしまったことを認めなくてはならない。

幸い 2000 年前後に情報処理学会にゲームをテーマにした研究会（ゲーム情報学研究会）が発足し、ゲームの中心がチェスから将棋と囲碁に移行してきたこともあって日本にも探索とゲームの研究者が増えてきていい研究成果を出しつつある。かつてチェスがそうであったように、将棋と囲碁を例題とした研究からゲーム以外の現実の社会に適用される研究成果が日本から出ることが強く期待される（例えばボナンザ・メソッドを将棋以外の対象に適用する試みが始まっている)。しかしこの研究開発領域の研究者はまだ質も量も不十分である。これからの人工知能において日本がリーダーシップを発揮するためには、例えば「囲碁でトッププロ棋士にコンピューターが勝つ」などという 10 年後を目標にしたグランドチャレンジのプロジェクトを始めることも有効と思われる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

世界的に対象とするゲームが完全情報から不完全情報に移行しつつある（囲碁がちょうどその中間にある)。前述したように不完全情報ゲームの方が現実の社会に近いので、この研究領域が基礎から徐々に応用の方にシフトしていくと思われる。例えばシミュレーション技術やＶＲ技術などと結びついて人生のシミュレーションを行うことも視野にはいってくるであろう（例えば、「人生ゲーム」というボードゲームを精緻かつ遊びではなく人生の分岐点での意思決定を支援する道具として実現するなど)。またこの研究開発領域はデジタルゲームのビジネスに深く関係する。いまデジタルゲームは韓国、中国、シンガポールなどが盛んに研究開発を進めている。

いま将棋プログラムでは Stockfish というチェスのプログラムで使われている探索手法を応用することが盛んに行われている。これはこの研究開発領域がオープンで Stockfish のアルゴリズムだけでなくソースコードも公開されていることが大きいが、異なるゲーム間での技術の転移が進んでいることも示している。これまでチェスのプログラムはチェスだけ、将棋のプログラムは将棋だけ、であったが、あるゲームのルールを入力すればそのゲームをプレイする（できるだけ強い）プログラムを出力するという汎用ゲームプレイの研究が盛んになりつつある。これは最近盛んになりつつある汎用人工知能(artificial general intelligence)の一つの例であり、今後の人工知能の研究開発の流れを示すものとして注目される。

（６）キーワード

ボナンザ・メソッド、(静的）評価関数、モンテカルロ木探索、チェス、将棋、囲碁、機械学習

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	将棋や囲碁を例題とした研究が盛んになり、強いプログラムが開発されている
	応用研究・開発	△	↗	ボナンザ・メソッドやモンテカルロ木探索のゲーム以外への適用が盛んに試みられている
米国	基礎研究	○	→	潜在能力は高いが、チェスが終わってからやや勢いに陰りがみられる
	応用研究・開発	◎	→	思考ゲームの研究成果をデジタルゲームに生かすのが盛んで毎年開催されるGDC(game developers conference)は世界中から関係者が集まる。
欧州	基礎研究	○	→	この研究領域はオランダが非常に強い。フランス、イギリス、ドイツなども盛んである。ゲームの国際的な学会誌は欧州が中心である。
	応用研究・開発	○	→	ゲーム研究の成果を意思決定の支援に生かす試みが活発である。
中国	基礎研究	×	→	以前の日本同様に応用志向で基礎が軽視されている印象を受ける
	応用研究・開発	△	↗	一方で諸外国で開発された技術をデジタルゲーム開発に生かす研究は非常に盛んになっている。
韓国	基礎研究	△	↗	囲碁を例題とした研究などが盛んになりつつある。
	応用研究・開発	○	↗	デジタルゲーム研究が非常に盛んである。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Shannon, Claude E.: "Programming a Computer for Playing Chess" , Philosophical Magazine, Ser.7, Vol. 41 (1950)
2) Knuth, D. E., and Moore, R. W. : "An Analysis of Alpha-Beta Pruning". Artificial Intelligence 6 (4): 293-326 (1975)
3) 松原仁編著：コンピューター将棋の進歩１－６，共立出版(1996-2012)
4) 保木邦仁：局面評価の学習を目指した探索結果の最適制御，ゲームプログラミングワークショップ 2006, 情報処理学会(2006)
5) Coulom,R.: Efficiet selectivity and backup operators in Monte-Carlo tree search, Computers and Games 2006 (2006)
6) 山下宏・美添一樹著　松原仁監修：コンピューター囲碁　モンテカルロ法の理論と実践，共立出版（2012）

7) Gelly, S. et al.: The grand challenge of Computer Go: Monte Carlo tree search and extensions, Communcations of ACM, vol.55,no.3, pp.106-113 (2012)
8) Brownw,C. et al.: A survey of Monte Carlo tree search methods, IEEE Transactions on computational intelligence and AI in games, vol.4, no.1 ,pp.1-49 (2012)
9) とつげき東北：麻雀を科学する、講談社現代新書(2004)
10) Bowling et al.: Heads-Up limited Hold'em poker is solved, Scienc,347, pp.145-149,2015

３．７．２　機械学習、深層学習

（１）研究開発領域名

機械学習、深層学習

（２）研究開発領域の簡潔な説明

機械（コンピューター）がデータから知識やルールを自動獲得するための学習アルゴリズムを中心とした領域である。データが存在する分野に適用することが可能なため、データ種類としては言語、画像、ログ、遺伝子、センサー、利用領域としてはウェブ、金融、バイオ、ロボティクス、宇宙科学、化学などで利用されている。基礎研究ではパターン認識、データマイニング、確率論、統計、情報理論、分散並列処理、データベース、アルゴリズム、数値最適化領域と深く関係している。また、本研究開発領域の中でも特に深層学習と呼ばれる分野がこの数年急拡大しており、研究だけではなく産業領域での利用が急速に進んでいる。深層学習は幅、深さともに大きいニューラルネットを利用した機械学習である。これまでの機械学習と比べて多くの優れた特性があるため、かなり広い分野でこれまでの機械学習の手法から深層学習ベースの手法に置き換わっている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

機械上に人と同様の知能を実現しようとする人工知能の試みは 1950 年代にはじまった。この研究の中心となったのは知識・ルール・記号ベースの人工知能であった。しかし、このアプローチは人が意識的に解いている問題についてはうまくいくが、無意識的に解いている問題については総じてうまくいっていないことがわかり限界がみられた。言語/画像理解や高度な判断など後者の例である。

意識的に解いている問題については、人はどのような手順で実現すればよいかを理解しているため、それらの知識を機械上でプログラムやルールとして表現しやすい。一方で無意識的に解いている問題については機械上でどのように表現すればよいかが分からない。人は与えられた文や画像が正しいか間違っているかを無意識に判断できるが、なぜそうなのかと説明することは難しい。

こうした背景から、機械自身に人と同様に経験（データ）を通じて学習させる機械学習という分野が急速に成長してきた。機械学習では人が明示的にルールや知識を教えるのではなく、データを与えそれを元に機械自身に学習させる。スパムメールの分類問題の場合、機械にはどのメールがスパムかどうかを与え、機械自身にどのように判断するかを学習させる。この学習のほとんどは数値最適化問題として解かれる。

有限のデータからその背景にある規則性を推定するという点で機械学習は統計と似ている。機械学習が従来の統計と大きく違う点として、機械学習はアルゴリズムに重点をおき、大量のデータをいかに効率的に処理するかに興味がおかれる。また、機械学習はよりタスクに特化し、そのタスクを達成することに重点が置かれる。これは統計的学習理論の創始者である Vapnik による原則「ある問題を解くために、その途中段階でより難しい問題を解いてはならない」にも現れる。例えば与えられた画像に人が含まれているのかどうかを推定するにあたって、一般的には人の（生成）モデル、画像のモデル、人がどのように画像で表現される

のかのモデルを作った上で、ある画像に人が写っているのかを推定するが、機械学習では入力が画像、出力が人かどうかであるかを求める関数を直接推定する。

また、統計の場合はデータが無限大に増えた場合の漸近的な挙動に興味が置かれるのに対し、機械学習の場合は学習データが有限の場合に、いかにうまくその知識を一般化するかに興味がおかれる。ただし、この境界は両者が技術をお互い取り込む中で曖昧となっている。

機械学習は必ずしも複雑な問題を解くだけではなく、完全に自動で解けることも重要である。金融取引においてはアメリカで 6 割弱、欧州でも 4 割弱を機械が行うアルゴリズム取引が支えている。このアルゴリズム取引では人では把握しきれない大量の因子を考慮した上で高速（数ミリ秒）で取引を判断する必要があり、機械学習が積極的に利用されている。

今後はモバイルデバイス、センサーの普及によってコンピューターが解釈できるデータが爆発的に増加するにつれ機械学習の重要性はさらに増してくる。機械学習は学習に利用するデータ自体の量、質に応じて学習能力を増すことができるため、データが大量に得られる環境下では機械学習に基づく単純なシステムが、専門家が構築した複雑なシステムを凌駕することも多い。

機械学習は次のような問題に適している。(1)人にはできるがプログラムをするには複雑すぎるタスク、例えば自動運転、音声認識、言語理解、画像認識などである。この場合人が学習データを作ることが可能である。(2)人（専門家）の能力を超えたタスク、例えば天文データの解析、医療解析データからの情報抽出、ゲノム解析、ウェブ検索、広告自動最適化などである。(2)の場合の能力は複雑なことを実現する能力以外にも、人には処理することができない大量のデータを高速に処理する場合も含まれる。

［これまでの取組み］

近年の有名な事例として完全情報ゲームにおいてコンピューターは人を凌駕しつつある（将棋や囲碁に関しても数年以内に人のトップを超すことは確実と思われる）。コンピューター将棋はプロ棋士同士、またはコンピューター将棋同士の対戦記録を元に盤面評価を機械学習によって推定している。毎年開催されるコンピューター将棋選手権、およびプロ棋士とコンピューター将棋が対戦する将棋電王戦は機械学習の良いベンチマークとなっており、機械学習における最新研究成果が利用されている。

IBM Watson はクイズ世界王者を同じ環境下で破っている。これらはいずれも内部で機械学習の技術を積極的に用いている。前者では局面の評価関数に利用し、後者では質問文とデータベースのマッチングに利用している。

機械学習を利用して最も成功している企業は Google である。Google の収益の 95%以上が広告収入であるが、それを支えているのが広告配信の自動最適化であり Google の広告配信による年間売上は 6 兆円にも達する。機械学習と広告配信の領域は急速に発展しており、ワークショップなども開かれている。顧客の行動や属性および広告内容にもとづいてどの広告をどの顧客にどのタイミングで配信するのが最適かといった問題を機械学習によって解いている。

1990 年代後半から 2000 年代にかけて、カーネル関数を利用した SVM（サポートベクトルマシン）が大きなブレークスルーを起こし自然言語処理や画像解析などさまざまな研究領域で利用された。一方でカーネル関数を利用した SVM は学習、推定時に必要な計算量が非

常に大きいという問題があり、実用的ではない問題があった。しかし、この数年、乱択化アルゴリズムを用いることでカーネル関数を線形分類器と同程度に高速に学習、推定できるようになり、大規模なデータに対してもカーネル学習が可能となっている。また、多くの機械学習が損失関数と正則化関数の和の最小を求める最適化問題として捉えられる（SVM はヒンジ損失関数と L-2 正則化の和の最小化）ことが分かり、これを元にした理論解析およびさまざまな拡張が研究されている。

ほぼ同時期に CRF（conditional random field、条件付確率場）やベイジアンネットを利用した機械学習も広く利用されるようになった。これらは問題の構造や制約、事前知識をグラフィカルモデルとよばれるグラフ構造で表し、その上で学習、推定、サンプリングなどの処理を行う。また、パラメータ間の依存関係を、各パラメータを他のパラメータの生成モデルとして表す LDA（Latent Dirichlet Allocation）を代表とするような階層ベイズモデル、ディリクレ混合過程（Dirichlet Process Mixture）を代表とするようなノンパラメトリックベイズの分野も大きく広がった。

これらの実用的な機械学習は既に多くの産業分野でも利用されている。またこれらの機械学習を利用するさまざまなオープンソース・ソフトウエアや R や Python などのプログラミング言語から簡単に使えるようなライブラリ、また機械学習を行うウェブサービスなども徐々に広がりつつある。

近年機械学習の中でも深層学習と呼ばれる分野が急速に成長している。深層学習は深さ、幅ともに非常に大きなニューラルネットである。ニューラルネットは 1950 年頃一度盛り上がったが 1960 年頃に人工知能の中心人物であった Minsky による痛烈な批判（Perceptron という本の中でニューラルネットは図形が連結かという単純な問題すら解けないことを指摘）を受けた後、研究は下火となり注目されてこなかった。

しかし、2006 年にトロント大の Hinton らが巨大なニューラルネットの学習に成功し研究が再燃した。それが決定的となったのが 2011 年から 2012 年にかけて、多くの分野で同時多発的に深層学習が既存手法を大きなマージンで上回ったことが報告されたことである。2011 年に音声認識において深層学習を利用した手法が既存手法を大きく上回り、2012 年に深層学習を利用したチームが画像認識、音声認識、化合物活性化予測など全く異なる分野のコンペティションで既存手法に大きなマージンを持って優勝した。また教師無しの画像だけから猫や人といった高次の表現も学習もできることが報告され、メディアなどに大きく報道された。これを受けて産業界での深層学習の利用も急速に広がり、Google、Microsoft は音声認識システム、画像認識システムを全て深層学習ベースの手法に置き換えている。

深層学習の研究は現在も急速に進んでおり、1 年前に正しいと思われたことが塗り替えられるということがしばらく続いている。現時点で深層学習に対して何らかの仮定を置くことは不可能である。2012 年当初は教師無しデータによる Pre Training が注目されたが、2013 年には ReLu（Rectified Linear Unit）、Dropout という技術が登場し教師有りで直接巨大なニューラルネットを学習する手法が主流になりニューラルネットの各構成要素がニューラルネットである、Network in Network (NiN)が注目され、2014 年現在は Recurrent Neural Net と呼ばれるループを含むようなニューラルネットでトランジスタのように短期記憶が可能なニューラルネット（LSTM: Long Short Term Memory）を使うことで記憶をしながら認識できることに注目が集まっている。（コンピューターサイエンスの分野としては）深層

学習の分野は研究のスピードが非常に速く、論文が発表された数週間後に別グループがそれを改良した手法を発表するという速度感である。そのため、1 年ごとに開催される国際会議では情報共有が間に合わないため、arXiv などで論文（プレプリント）を共有するサービスでの論文発表が多くみられる。

現時点での深層学習の特長は次の三つである。(1) 表現学習：従来の機械学習においてデータの表現方法は各分野の専門家が設計した特徴関数（による特徴量）に頼っていた。一方、深層学習の場合、データの表現方法も学習により決定する。これにより人が設計した特徴関数が優れている場合や、特徴関数を設計することも難しいデータ（例えばセンサーデータ）に対するデータ表現も行えるようになった。(2) マルチタスク学習：関連するタスクにおいてはデータ表現や各特徴の重要度は共通していることが多い。深層学習においては下層（入力に近い層）を共有し、タスクごとに上位の層を分岐させることで、マルチタスク学習を自然に実現することができる。これにより、あるタスクの学習データの量・質が不十分だったとしても関連するタスクの学習データを利用することで、十分な学習ができるようになる。(3) マルチモーダル学習：出力層を分岐させることでマルチタスク学習が実現できていたが、入力層を分岐させることで、異なるタイプの入力を同じシステムで扱うことができる、マルチモーダル学習を実現することができる。テキストと映像を分岐した別の入力から受け取り、中間層、出力層を共有したような深層学習を用いることで、テキストと映像の意味解釈を同時に学習するといったことが実現できる。

深層学習がどの程度のインパクトを与えたかの例として画像認識の例をあげる。ImageNet LSVRC[3]では毎年、一般画像認識コンペティションを行っている。各画像について 1000 クラス中の一つのラベルがつけられ、システムは 5 個、推定候補を提出し、そのいずれかに正解ラベルが含まれている場合は正解とする（このような方式をとっているのは正解をつける際のコストを抑えるため曖昧性を許容して一つしかつけていないためである）。この 2014 年のタスクについて、訓練された人による認識エラー率は 5.1%でありこれが人による認識率の上限だと考えられる。タスク設定は微妙に変わっているので直接比較はできないが認識精度の推移をみてみると、2010 年、2011 年の 1 位のチームの認識エラー率は 28%、26%だったのに対し、2012 年に深層学習を利用したチームが登場し、エラー率が 16%まで改善された（2 位以下のチームは 26%とそれまでと同様）。次の年から上位のチームのほとんどが深層学習を利用した手法に置き換わった。その後も改善は続き 1 位のチームの認識エラー率は、2013 年は 11%、2014 年は 6.7%となった。この問題設定においてはほぼ人と変わらない精度を達成できたことになる。なお 2012 年は Hinton のチーム、2013 年は Matthew Zeiler（当時 LeCun の学生、その後画像分類を行うウェブサービス Clarify を創業）、2014 年は Google のチームが優勝した。

深層学習の有力な研究者の多くが Google、Facebook、Microsoft、Baidu において深層学習の実用化に携わっている。Hinton は 2013 年企業を設立した直後に Google に買収される形で Google に加わり、LeCun は Facebook AI Lab、A.Ng は Baidu に所属することを表明している。有力な研究者の中で Bengio のみがアカデミックに残ることを表明している。

機械学習が強いのはアメリカ、中国、イスラエルである。日本国内でもコミュニティーは存在するが、パターン認識、データマイニングといったグループと機械学習を研究する新しいコミュニティーは比較的独立して存在していた。しかし近年コミュニティーは急速に集結

し、電子情報通信学会の情報論的学習理論と機械学習研究会（IBISML:Information-Based Induction Sciences and Machine Learning）など中核となるコミュニティーができつつある。

国内で機械学習の利用は各分野で急速に進んでいる。自然言語処理での適用は世界と比べてもかなり初期の段階から進んでおり、これら黎明期の頃の研究は世界的にも注目され機械学習普及の先陣を切った。また、この頃に機械学習を研究していた若手の研究者たちが現在、各大学で研究室を持つようになり、機械学習を専門に研究する人は急速に増加している。

また現在の深層学習の研究も甘利氏らによる情報幾何や、福島氏らによる Neo Cognitron を元にしたニューラルネットなどが源流となっているものも多い。一方で現在の深層学習の研究の中心は以前よりニューラルネットの研究を続けていたトロント大、モントリオール大、ニューヨーク大、スタンフォード大、およびその卒業生を多く抱える Google によるものが多い。

国内の企業においては Preferred Infrastructure（Preferred Networks の関係会社）が NTT 研究所と共同で Jubatus とよばれる大規模分散機械学習フレームワークを開発し OSS として公開している。Jubatus は世界初の大規模分散、リアルタイムに機械学習を行うフレームワークであり 2011 年に OSS として公開されて以降、国内外の研究者や企業に利用されている。

Preferred Networks と NTT は 2014 年 9 月に資本業務提携を行い IoT 時代の数エクサバイト級のビッグデータを処理するためのプラットフォームの開発を進めている。また 2014 年 9 月、Preferred Networks はトヨタ自動車と自動運転領域における機械学習、深層学習の応用の可能性をさぐるための共同研究を開始したと発表した。

［今後必要となる取組み］

機械学習はまだ成熟していない技術分野であり、機械学習を活用している企業（Google、Facebook）は主に自社の事業内で利用している、あるタスクをある精度で実現するためにどの程度のコストがかかるのか（学習データを作るのか既存の学習した結果を組み合わせるのか）といった問いに答えることができていない。

また、現在の機械学習の水準では利用者に機械学習のアプローチやアルゴリズムに関する知識を要求する、うまく学習できていない場合にその原因を追究することはこれらの知識無しには困難である。そのため、現在は機械学習や統計などの知識を備えたデータサイエンティストが必要である。しかし今後技術が進展していく中でこれらの知識を必要とせずに利用できるようになると考えられている。Google Spreadsheet（Excel のような表計算サービス）には機械学習を利用した自動補完が実現されている。

（４）科学技術的・政策的課題

機械学習においてはアカデミアでの研究が成熟・応用段階に入ったため、手法のみで差別化することは困難となりつつあり、学習に利用するデータをいかに作るかが重要となる。Google は音声認識システムを構築するために最初に音声検索サービスをはじめ、それにより集めた音声データを元に膨大な量のデータを短期間かつ低コスト（運用費、開発費以外は無料）で集めることができ、音声認識の精度をあげることができた。今後ウエアラブルデバ

イスが普及するにつれ数億人単位の行動ログ、画像、映像、音声データなどを集めることも可能になると考えられる。

このような大量のデータを元にした大企業の機械学習の研究にアカデミアや小企業が対抗するためには低コスト（できれば無料）なデータ構築、およびデータのオープン共有の場が必要になると考えられる。また、プライバシーは日本や欧州で特に問題となる。プライバシーを保ったまま統計処理をするプライバシー保護データマイニング（PPDM: Privacy Preserving Data Mining）といった技術も急速に進展している。ただ、プライバシーの問題があるのであれば無理にその国で進めるのではなく、障壁の少ない別の国でデータを収集することが進むと考えられる。

機械学習においては個人のデータを扱うことが多くなるのでプライバシー保護も問題となる。一方で機械が自動的に決定していることから人が処理するよりも心理的抵抗が低いことも例として挙げられる。Gmail や Facebook の広告は内容に基づいて自動的に配信されているが、最初は問題視されることもあったが現在は広く受け入れられている。

通信事業者が“通信の秘密“のために通信内容を見ることができない中でデバイス、サービス提供者である Google、Apple、Amazon らは個人がどのようなサービスやアプリ、嗜好を持っているのかをためることができ差がどんどん広がっている。また技術的にもデバイスとサービスの間は暗号化されているだけでなく、サービス提供をするサーバーも仮想化され接続先を見ても何をしているのかが分からないため、通信事業者は個人が何をしているのかはわからなくなりつつある。

一方個別のタスクについての学習データを作ることに関してはクラウドなどで安価、大量、即時にデータを構築できるクラウドソーシングを利用する動きが多い。しかし、クラウドソーシングで最も進んでいるサービスである Amazon Mechanical Turks は米国在住の人しか利用することができない（これはマネーロンダリングの問題および日本国内の労働法などと関係すると思われる）。そのため、米国の研究者はクラウドソーシングを利用して研究を進められる一方、国内の研究者は直接行うことができず、米国在住の関係者にお願いをするというように手間がかかり負担が大きくなっている。

機械学習は境界領域であるため、さまざまな分野との連携による研究が望まれる。特に機械学習の第一人者である Michael Jordan[5]はコンピューターサイエンスの各分野との協調の重要性を説いている。現在でも既に自然言語、テキスト、画像、音声、センサーなどの各領域で機械学習を用いたコミュニティーとの交流が続けられている。

機械学習は「総合格闘技」であり、さまざまな分野の専門家が集結することが求められる。カリフォルニア大学バークレー校の AMP Lab では、データベース、分散処理、統計、機械学習の専門家が同じ研究チームで研究を行い、次々と成果を生み出している。現在注目を集める Apache Spark も AMP Lab の成果である。また、Google Brain チームは機械学習の専門家に加え、Google のインフラの開発ほぼ全てに関わった Jeff Dean や技術特異点に関する著書で有名な Ray Kurzweil などがチームとなり研究している。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

深層学習周辺に現在非常に注目が集まっている。Google Brain や Google DeepMind など

は非常に多くの研究成果を上げつつある。

また、機械学習においては、モデルパラメーターはデータから自動で求めることができるが、自動で決めることができないモデルの選択やパラメーター（ハイパーパラメーターと呼ばれる）の選択などがボトルネックとなっている。これに対して、機械学習タスクをブラックボックス最適化として、これらを自動決定するような研究も急速に進んでいる。

（６）キーワード

深層学習（deep learning）、表現学習（representation learning）、ベイジアンネットワーク（Bayesian network）、データサイエンティスト（data scientist）

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ゲームAI（将棋AI、囲碁AI）が元名人やプロ棋士に勝利し、急激に実力は向上しており、数年以内にプロのトップを追い抜くことは確実とみられている。 ・ERATOの離散情報構造プロジェクト、情動情報プロジェクトでAI基礎研究がされている。 ・機械学習のコミュニティーは育っており、IBISMLは700人、人工知能学会は1000人を超える参加者がいる。 ・Top Conference（ICML、NIPS、AAAIなど）に採択される人数は数が限られている。
	応用研究・開発	○	→	情報学研究所において「人工頭脳プロジェクト-ロボットは東大に入れるか？」が2012年より開始されている。
	産業化	○	↗	機械学習の“ユーザー“として既存のサービスが付加価値をつける動きは、ウェブ広告自動配信、セキュリティー、ソーシャル分析で進められている。またロボットなどで機械学習や深層学習を利用する動きも増えつつある。 特にウェブ広告自動配信、レコメンドなどに力を入れており、Yahoo、Recruit、楽天などが力を入れている。 一方で機械学習の“メーカー”は少なく、海外発OSSや、ソフトウエア、サービスを利用している場合がほとんどである。国内の産業化の動きとしてはNTTとPreferred Infrastructure（PFI）が共同で開発しているJubatusなどが挙げられる。PFIからIoTと深層学習に特化したPreferred Networks（PFN）2014年3月にスピンオフした。PFNは2014年10月にトヨタ自動車と自動運転領域における機械学習、深層学習の共同研究を行うと発表。
米国	基礎研究	◎	→	理論・解析・大規模化、また機械学習と他領域との多方面にわたる研究開発が行われている。 また、Google、Facebook、Microsoftが積極的に機械学習、深層学習の基礎研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	→	DARPAにより機械翻訳に十分な研究資金を投入し、Google Translateをはじめ、実用化レベルに達しているものもいくつかみられる。 IBM Watsonが質問応答を実用レベルまで高精度化することに成功した。現在の深い言語処理の成功例である。現在医療診断への応用が研究されている。
	産業化	○	→	・Googleの収益のほとんどを占める自動広告配信（年間売上6兆円）が機械学習によって実現されている。Googleの研究部門のトップであるPeter Norvigは人工知能の第一人者であるが、彼は機械学習を社内の一部門ではなく全部門に浸透させると表明している4) 2014年1月、Googleはスマートホームを機械学習で実現するNestを32億ドルで買収。 ・主要IT企業（Google、Facebook、Microsoft）は画像認識、音声認識などを深層学習ベースの手法に全て置き換えたと発表。各社、深層学習の人材獲得に力を入れている。 ・Googleは2013年、深層学習の中心人物である、G. Hinton, A. Krizhevsky、I. Sutskeverが所属するDNN researchを買収。 2014年1月 深層学習の研究者が多く所属するDeepMindを5億ドルで買収。DeepMindはGoogleに買収された後、オックスフォード大の深層学習のベンチャーを次々と買収している。 ・Yahooは画像認識スタートアップIQ Engine、Lookflowを買収 ・FacebookはFacebook AI Labを設立、深層学習の中心人物である、NYUのY. LecunとM. Ranzatoが所属している。 ・このように機械学習を社内の事業に利用する動きは非常に盛んである。 ・一方で機械学習自身をビジネスとする動きはまだ萌芽の段階である。例えばGoogle Predictionなどがサービスを行っているが利用は限定的であり、大きく成功している事例はまだみられない。データベースと同様に機械学習の技術がまだ成熟しておらず、産業のように使われるにはまだ技術的障壁は大きい。しかし、今後10年間の間にIoTの分野を中心に利用は急速に進むと考えられる。

欧州	基礎研究	○	→	欧州は多言語コミュニティーであるため、言語解析の研究に関してEUを中心に多くのファンディングが存在し、基礎研究のレベルが高い。 自然言語処理や深い意味理解に関してドイツ、イギリスを中心に大規模予算が割り当てられており、活発な研究がされている。 機械翻訳に関する研究は継続的に活発である
	応用研究・開発	△	→	知識ベース、ルールベースに基づく手法が主流であり、機械学習ベースの研究は限定的である（University College LondonのCentre for Computational Statistics and Machine Learningなどは強い）
	産業化	△	→	機械学習を利用した企業はまだ成功していない。 人工知能に関しては知識ベース、ルールベースに基づく手法が主流である。
中国	基礎研究	◎	→	清華大、Microsoft Research Asia（北京）などを中心に機械学習の国際学会で中国からのグループの論文が非常に多く採択されている（国別で米国に次ぐ）。
	応用研究・開発	○	↗	BaiduがInstitute of Deep Learningを設立。最初の研究者としてKai Yuを迎え入れ、またDeep Learning研究の中心人物であるAndrew Ngを迎え入れる予定。Google Brainの約100倍のニューラルネットを構築する予定。また、Baidu international R&D をシリコンバレーに設立し、200人の研究者を迎え入れる予定。
	産業化	○	↗	Baidu、Alibaba、Tensentなどが積極的に機械学習技術を利用している。
韓国	基礎研究	△	→	KAISTのNLP labやSemantic Web Centerなど、自然言語処理や知識処理を研究しているグループがいくつか見られるが、数は少ない。 深い自然言語処理や深層学習を対象とした大規模プロジェクトはみられない。
	応用研究・開発	△	→	KAISTを中心にテキストマイニングの研究が推進されている。
	産業化	△	→	情報産業は活発であるが、機械学習、深層学習を応用する動きはみられない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）引用資料

1）国際会議報告（ICML, NIPS, AAAI, COLT, KDD, ICLR）
2）国内会議報告（IBISML, 人工知能学会全国大会）
3）LSVRC 2014 http://image-net.org/challenges/LSVRC/2014/results
4）グーグル ネット覇者の真実, 阪急コミュニケーションズ
5）http://www.reddit.com/r/MachineLearning/comments/2fxi6v/ama_michael_i_jordan/

３．７．３　オントロジーとＬＯＤ

（１）研究開発領域名

オントロジーとＬＯＤ

（２）研究開発領域の簡潔な説明

「オントロジー」とは、基盤的概念の意味を計算機的に定義した「概念体系」を指し、知識・データ・テキストの意味的処理を可能にするものである[1)]。「Linked Open Data」とは、オントロジー／スキーマ情報に基づいて、大規模な Web 上で公開されたオープンデータを、意味的関係に基づいて結合し利活用する技術である[2),3),4)]。近年の大規模で多様なデータ・Web ページなどを、意味レベルにおいて知識処理する基盤技術の実現へ貢献する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

人間の知的能力の源泉のひとつは知識であり、計算機による人間の知的活動の支援のためには、計算機が多くの豊かな知識を持ち、推論する能力を備えることが必須である。近年の Web を中心とする IT 技術の進展により、計算機がアクセスできる情報資源は飛躍的に増大している。しかしながら、それらの多くは、独自のデータベース(DB)、自然言語文で記述されたドキュメント、半構造化ドキュメントである Web ページであり、計算機処理のためには、その「多様性」と「意味的暗黙性」を克服することが必要である。

「多様性」とは、データやドキュメントなどが情報源によって異なるスキーマ（データ構造）や語彙によって記述されていることであり、そのために複数の情報資源を結びつけて串刺し的に計算機処理を行うことが容易ではない。「意味的暗黙性」は、その原因でもあり、計算機による一般的な情報検索においては、データやドキュメントをコード列としてしか扱っておらず、「意味的関係」を扱うためには（自然言語処理などの）なんらかの処理によって意味のレベルへ情報とその処理を持ち上げることが必要である。

人工知能分野における「オントロジー」と「Linked Open Data (LOD)」はこのような問題を解決することを目指す基盤的技術である。まず、オントロジーは、計算機システムに人間の持つ知識を記述・格納・利用する際に共有される基盤として用いられる「概念体系」を指す[1)]。オントロジーで明確に関係性が定義された概念群を語彙と意味制約として用いて計算機上で知識を記述することで、知識の明確性、一貫性、再利用性などの質が向上する。また、オントロジーをメタデータスキーマとして用いて、Web ページなどの情報資源に計算機的な意味情報（メタデータ）を注釈（アノテーション）として付加することで、情報資源の意味的処理が可能になる。これはセマンティックウェブ (Semantic Web、SW)[2)]と呼ばれる枠組みであり、Web の特徴である分散性・非均一性・オープン性に適合するように技術要素がデザインされており、LOD と共通する技術基盤を構成している。

次に、Linked Open Data (LOD) は、Web 上で公開された大規模なオープンな情報（オープンデータ）を共有し構造的に結合することで、世界規模の「データの Web」における意味的関係に基づく処理の実現を目指している[3)]。技術的には、大規模なデータを意味的関係を表すグラフ構造で構造化する Linked Data (LD) 技術が基盤となる。これは人工知能分野の知識表現形式としては新規性があるものではないが、シンプルな形式で大量のデータ

（知識ソース）に関係に基づく意味付けを行うことに意義があり、Knowlege Graph とも呼ばれることがある。Linked “Open” Data (LOD) は、その技術基盤に基づいて、オープンデータを結合する枠組みである。提供側は、まず、情報リソースに対して URI (Uniform Resource Identifier) または IRI (Internationalized Resource Identifier) を用いてグローバルでユニークな ID を与える。次に、そのリソースに関する情報を（後述する RDF: Resource Description Framework 言語で）グラフ構造化し、外部に公開されたレポジトリに格納する。その際にオントロジーやスキーマ情報が、記述語彙や意味的関係の構造を規定する。利用側は、その URI に基づいて情報にアクセスでき、レポジトリのアクセスポイントに標準化された問い合わせ言語（後述の SPARQL など）でクエリをかけることで、データを取り出し、他の情報源からのデータなどと結合や統合などを行うことができる。

一般にオープンデータ (OD) には五つのレベルがあり、Web 上で公開されている（第 1 レベル)、データが構造化されている（第 2、第 3 レベル)、URI でアクセス可能（RDF によるグラフ構造化, 第 4 レベル)、他と関係づけられている（第 5 レベル）という条件を満たしていくことで、よりメリットが増える [4]。LOD はその第 5 レベルに対応する。

これらに共通する根底または理想としての思想は、従来の集中的に厳密に管理された一様で無矛盾な孤立的知識ベースから、分散的に弱く管理された（集合知的アプローチで集積されたものを含む）大量で多様な情報資源に対して、オントロジーやスキーマが関係性の意味的情報を与え、それに基づいて関係づけられたデータを用いて、大量で異種の情報を用いた知的処理、共有・再利用・相互運用を可能にすることである。そのような技術は” Semantic Technology” とも総称される。

［これまでの取組み（歴史的発展)］

オントロジーという概念は、元来、哲学用語で「存在論」という意味であるが、知識工学の分野には、1990 年前半に、知識モデリングの際に用いられる概念体系の明示的記述という意味で導入された [1]。統一された定義はないが、Tom Gruber（当時、スタンフォード大学。近年では Siri を開発している）による “an explicit specification of a conceptualization” [5]（概念化の明示的規約）がポピュラーである。90 年代にはエージェント間の通信プロトコルとしての利用や、エキスパートシステムの知識獲得ボトルネックを解消するための基盤的知識としての研究が行われた。また、人間が用いている「常識知識」を計算機に格納することを目指して、大規模知識ベースの開発も行われた。言語的オントロジーである Wordnet や、上位レベルオントロジーを含む常識知識ベースである Cyc が代表的である。その後のオントロジー研究は、哲学の知見を踏まえた非常に深い基盤的研究から、各領域における実用的なオントロジーの開発まで、学際的で幅広い研究がなされている。米国とヨーロッパを中心に研究が発展しており、国際学会 [6]のもとで権威ある国際会議や国際論文誌が開催・発刊されている。

次に、2001 年に、WWW の提唱者である Tim Berners Lee により、前述のセマンティックウェブが次世代の Web として提唱された [2]。Web を人間のみが理解できるものから計算機に理解できるものに変える試みとして大きな研究の流れとなり、米国・ヨーロッパ・日本・韓国などで盛んに研究が行われた。特に、標準化団体W3C によって、Web 上でのグラフ型知識表現言語RDF、RDF 用スキーマ言語RDFS、RDF 知識問い合わせ言語 SPARQL、

オントロジー記述言語 OWL[2]、ルール記述相互運用言語 RIF などの主要な要素技術の標準化が行われ[7]、その後の LOD 技術的基盤が整備された。一般的な Web ページに対するアノテーションは、schema.org [8] などのシンプルなスキーマに基づいて、2013 年に全ページの 15%、約 250 億ページにいたるなど普及が進んでいる。

次に、2006 年に、再度 Tim Berners Lee により、データを基盤にした Linked Open Data[3]が提唱された。LOD は前述したように LD や OD とも関連しつつ研究と実際のデータの構築が活発に行われ[9,10,11]、近年、実用段階であると認識されている[12]。2014 年 4 月段階で収集された約 800 万リソースに関する LOD データの広がりを LOD Cloud Diagram 2014[13]で概観することができる。その結合の中心的ハブは Wikipedia を LOD 化した DBpedia[14]であり、日本においても DBpedia Japanese[15]や日本語 Wikipedia オントロジー[16]、LODAC プロジェクトの各種データ [17]がハブとなりつつある。前述した常識知識のモデリングも、集合知アプローチ・Web ページからの自動抽出・グラフ的意味表現に基づいて、OpenCyc、Wordnet、DBpedia とも結合された大規模常識知識ベース ConceptNet[18]、ゲームに基づく集合知収集サイト [19]、英文からの関係的知識抽出ツール [20]に基づいた 50 億を超える大規模関係的知識ベース [21]などに進化している。

分野ごとにみると、特に行政の情報のオープンデータ化が、透明性・市民参加・協働を目指して、2013 年の G8 サミットでオープンデータ憲章 [22]が制定されるなど、国際協調の上で展開されている。各国政府の情報公開度を評価する Global Open Data Index[23]によれば、英国 1 位、米国 2 位、日本 14 位、韓国 23 位などとなっている。日本政府の取り組み [24]も進んでおり、データカタログサイト [25]が 2014 年 10 月から本格運用されている。バイオ・医療分野は以前から先進的であり、オントロジーの開発・集積[26,27]や LOD の構築が進んでいる。後者では、例えば、ヨーロッパの EMBL-EBI が 2013 年 10 月から UniProt や ChEMBL などの生物学データベースを LOD として公開している[28]。日本でも、DBLCS による統合データベースプロジェクト [29]や NBDC によるデータベースポータル事業 [30]が行われている。地理的空間情報分野では、オープンデータ化がスマートシティーと関連して発展しており [31,32,33]。日本でもアーバンデータチャレンジ [34]などが行われている。放送情報では、英国 BBC が番組情報をクラウドソーシングなども用いて LOD データとして公開しており [35]、オントロジーライブラリも整備している [36]。日本では、NHK が 2014 年 1 月から NHK 番組表 API[37]を公開し、番組情報データハブが開発されている [38]。

このように、(Linked) オープンデータは、データの構築・公開に加えて、どのように利用するのかというアイデアの集積やアプリケーションの研究・開発を通して、LOD を活用した価値あるサービスや新たな IT ビジネスの創出への期待が高まっている。

［各国の動向］

米国は Google に代表される Web 検索技術、Siri に代表される自然言語処理、Wordnet や Cyc、ConceptNet に代表される基盤的オントロジーや大規模知識ベースなどの技術の蓄積を生かして、特に産業応用において、先駆的存在となっている。特に、IBM Watson はそれらを統合して医療診断支援などの現実的問題解決サービスへの応用を試み始めている[39]。Google は検索の際の情報提示の背後に、Google Knowledge Graph と呼ばれるグラフ構造の大規模知識ベースを用いている [40]。同様に、Yahoo、Microsoft、Facebook などの多くの

Web サービス企業はグラフ構造でデータを結びつけた Knowledge Graph を用いていると言われており[12]、これらの Web サービスの競争力の根源となっている。また多くのベンチャー企業、例えば、オントロジー構築ツールなどの TopQuadrant[41]、メタデータ統合ツールの Meta Integration Technology[42]などが活発に活動している。また、Lisp で有名な Franz 社も大規模 RDF ストアの AllegroGraph[43]を製品化している。

欧州は伝統的に論理に基づく理論的研究が強く、特に、オントロジーの基礎分野においては英国・ドイツ・イタリアなどが先導的な成果を挙げている[6]。オントロジー、Semantic Web、LOD などの “semantic technology” 研究は、2013 年までの EU FP7[44]によって、中核的テーマとして大規模な支援が行われた。例えば、LOD2[45]など、ICT 分野のプロジェクト成果の要約に”Semantic”を含むプロジェクトは 78 件もある[44]。近年の ISWC[11]の採録論文など、SW/LOD 分野におけるドイツ・英国・アイルランドの存在感は非常に大きい。例えば、ドイツのライプツィヒ大学やカールスルーエ工科大学 AIFB[46]、アイルランドの DERI[47]（現在、INSIGHT[48]の下部組織）などであり、英国では Open Data Institute[49]が Berners-Lee と Nigel Shadbolt (サザンプトン大学) によって設立されている。また、ベンチャーとしての産業化もドイツを中心に OntoText[51]、Fluid operations[52]、Semafora systems[53]（1999 年に設立されたオントロジーに関する草分け的ベンチャー Ontoprise を 2012 年 に継承）、Openlink Software[54]（英国）、Semantic Web Company[55]（オーストリア）などが活動している。

日本でも前述したように (Linked) オープンデータの開発の機運が非常に高まっており、一般社団法人[56][57]、NPO 法人[58]、コンペティション[59]、民間マッチング支援[60]などが運営されている。民間においても、富士通研究所が上述の欧州 INSIGHT[48]などとの共同研究によって LOD の活用基盤[61]を開発・提供しており、東芝が社内で適用[49]、プラットフォーム製品[62]など、産業化に向けた動きが出てきている。一方で、オントロジーに関する研究は基礎理論・半自動構築・マッピングなどに関して大学を中心に着実に行われるとともに、さまざまな領域においてオントロジーが構築され、現場への適用などが行われている[63]。また、トップカンファレンス ISWC の 2016 年の日本開催が決定している[11]。

韓国では、ソウル大学と Korea Institute of Science and Technology Information (Kristi) が、上述の欧州の DERI[47]と共同研究を行うなど積極的に国際共同研究を進めている。KAIST は上述の LOD2 にも参加しており、活発に研究が行われている。開発レベルでは気象情報や高齢者のモニタリングなどへの SW 技術の適用[11]などが行われている。また、意味処理に関するベンチャーSALTLUX[64]が設立されている。

中国では、学術分野では、ISWC[11]に連続的に採録論文を発表するなど優れた研究グループが出現している。しかし、実用レベルでは独自の LOD ハブとして Zhisi.me が 2011 年に構築され[65]、2014 年に統合的スキーマ Zhishi.shema が提案された[66]といった初期段階のようである。

また、アジア地区では、共同で国際会議 Joint International Semantic Technology (JIST) Conference シリーズを 2011 年から中国、日本、韓国、タイ[67]で順次開催するなど、地域内の機運も高まっている。

［今後必要となる取組み］

これまでの知識処理の実用における大きな課題は、エキスパートシステムの知識獲得ボトルネックやセマンティックウェブにおけるアノテーションの労力など、意味的記述の付加におけるコストであった。近年の LD/LOD 技術の実用化は、比較的簡単な知識表現形式やスキーマに基づく意味記述と、大量の Web 上のデータや半構造化情報源である Wikipedia に対して、自然言語処理や機械学習技術を用いて、半自動的に意味付けを行う技術[68]が発達したことが大きい。その代表例が、DBpedia、Watson、Google Knowledge Graph、ConceptNet などのグラフ型大規模知識ベースである。

今後は、その意味レベルの深化によって、より多様なデータの意味的な結合と相互運用性の向上が求められている。現在の LOD は、主にデータ構造を表す簡素なスキーマに基づいているが、概念間のより多様な関係性(RDF property)をより形式的(formal)で一貫性(consistent)をもって定義したオントロジーに基づくことで、より深い意味的なギャップを超えたデータ検索／結合が期待できる。また「データの意味的結合」のレベルから「知の集積・伝播・探索」レベルへの深化によって、「知のコンピューティング」[69]の基盤技術となる。そのためには、スキーマやオントロジーを、領域から独立した基盤的なものと領域固有のものが結合された体系として扱う必要がある。これは従来それぞれ一般上位レベルオントロジーとドメインオントロジーと呼ばれてきたものに対応するが、LOD に基づいた構築技術のさらなる進展と実際の構築が今後求められている。

（４）科学技術的・政策的課題

まず、基礎的研究のより一層の推進が課題である。オントロジーや LOD の基礎的研究は、上述したように、深い意味レベルにおける「知」の集積・流通のための基盤的研究であると位置づけられる。特に、社会における多様な価値観に基づいた異種の知の集積と流通を可能にするオントロジー／LOD に関する研究の推進が求められる。

次に、日本における LOD の応用研究と開発が幅広い産学官連携によって活発に行われているが、その産業化が課題である。LOD の基礎技術の研究と実験的構築のさらなる推進とともに、それを社会（特に地方社会）におけるデータと結びつけて、新規な IT サービスとして産業化を進める必要がある。そのために、人材の育成、科学技術研究の振興、産業化パイロット事業の支援などを府省連携によって適切に支援していくことが望まれる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

近年のビックデータに基づくデータドリブンな科学技術において、LOD 技術とオントロジー工学は、データの多様性を意味的明示性に基づいて乗り越えて統合し利活用するための基盤技術と位置づけられる。実際、オントロジーに基づくデータアクセス技術は“Ontology-based data access and management (OBDA)” [70][71]と呼ばれる研究分野を構成しており、例えば EU FP7 の Optique Project [72] の主要なテーマである。これまではSPARQL クエリの最適化などが主な研究課題となっているが、今後は形式論に加えて、実際のオントロジーをどのように構築していくかが重要なテーマとなるであろう。

Web マークアップ用の de facto 的な標準スキーマは、Microsoft や Google などとの協

同のもと schema.org [8]などで進められている。2014 年には Action（行為）や Role（役割）概念が導入されるなど深みを増している [8]。一方、政府系データ統合のための基盤づくりは政府によっても推進されている。特に人、場所、組織といった共通的なプリミティブな概念に関するデータ構造を定めることが、米国 NIEM [73]、欧州 Joinup [74]、日本では共通語彙基盤（Infrastructure for Multilayer Interoperability: IMI）[75]として進められている。Joinup の一部は W3C で Registered Organization Vocabulary [76]として WG ノートとして規定されている。IMI においては語彙を前述のように Core、Cross Domain、Domain-Specific という三つの階層に分けて定義しようとしている [75]。現在は、共通するデータに関する構造を定めることが中心となっているが、今後、抽象的な概念や他の概念との関係性を定義することが望まれる。

参考となるのは、オントロジー工学の先進的分野であるバイオ／医療分野の取り組みである。WHO による ICD11 [77]などの現場のニーズに基づく大規模なオントロジーの開発とともに、OBO foundry [27]を中心に哲学的な深みを持った基盤的オントロジーの標準化とそれに基づくオントロジー群の開発が進められている。今後は、Ontology Summit 2013 のコミュニケの「オントロジーの評価基準」[78]が推奨するように、しっかりした基盤的オントロジーとの明示的関係性のもとで分野ごとのオントロジーやデータを積み上げていくことが、大規模なデータの意味的な相互運用性の確保のために重要であろう。

（６）キーワード

知識、意味、多様性、結合、相互運用性、Web、セマンティックウェブ、Open Data、Linked Open Data、Wikipedia、政府、情報公開、地方自治体

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・オントロジーに関する基盤研究が着実に進められている
	応用研究・開発	○	↗	・オントロジーについて、さまざまな領域において応用レベルのものが構築され、現場への適用などが行われている。 ・LOD について、産学官の協同で、データ公開やアプリケーションの開発が盛んに行われている。
	産業化	△	↗	・オントロジーに基づく応用がいくつかの領域で行われている ・特にLODについて民間企業の動きが活発になっていることなど、産業化に向けて進展が進んでいる。
米国	基礎研究	○	→	・バイオ分野のオントロジーを中心に基礎的研究に厚みがある。
	応用研究・開発	◎	→	・Wordnet、CYC、ConceptNetなどの大規模知識ベースが構築され、一部は公開されている。 ・バイオ分野におけるオントロジー群の構築にもNCBO や OBO foundory が大きな役割を果たしている。
	産業化	◎	↗	・IBM によって Watson の技術の医療診断といった分野への産業応用が進められている。 ・Google など大手サービス業ではKnowlegde Graphに基づくサービスが行われている。 ・多くのベンチャー企業が活発に活動している
欧州	基礎研究	◎	→	・オントロジーやLODの基礎分野において、英国・ドイツ・イタリアなどが先導的な成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	↗	・2013年までのFP7において、LOD2、PlanetDataなどの意味処理に関わる多くのプロジェクトが行われた ・ドイツ・英国を中心にLOD の応用研究・開発が精力的に行われている。
	産業化	○	↗	・ドイツを中心に、オントロジーとLODに関するベンチャーなどが設立されている。2014年から開始されているEUの Horizon 2020によって産業化の支援が行われる予定である。
中国	基礎研究	△	↗	・中国語の意味処理基盤が構築され、近年、トップカンファレンスでも研究論文を発表している。
	応用研究・開発	△	→	・独自のLODハブや統合的スキーマが開発された段階であり、未成熟である。
	産業化	×	→	・まだ顕著な産業化は見えてこない。
韓国	基礎研究	△	→	・複数の共同機関が欧州のDERI と共同研究を行うなど積極的に国際共同研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	・気象情報や高齢者のモニタリングなどへのSW技術の適用などが行われている。
	産業化	△	→	・意味処理に関するベンチャーが設立されている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 溝口理一郎：オントロジー工学，オーム社 (2005)
2) Berners-Lee, T., Hendler J., Lassila, O.: The Semantic Web, Scientific American, 284, 5 (2001), 34-44. 自分で推論する未来型ウェブ，日経サイエンス, 31, 8 (2001) 54-65.
3) Tom Heath and Christian Bizer, Linked Data: Evolving the Web into a Global Data Space, Morgan & Claypool (2011), 武田 英明（監訳），Linked Data: Web をグローバルなデータ空間にする仕組み，近代科学社，2013.
4) 5 つ星オープンデータ，http://5stardata.info/ja/
5) Gruber, T. R..: A translation approach to portable ontologies, Knowledge Acquisition, 5(2):199-220, 1993
6) The International Association for Ontology and its Applications, http://iaoa.org/, The Conferences on Formal Ontology in Information Systems, http://iaoa.org/fois/, Applied Ontology, An Interdisciplinary Journal of Ontological Analysis and Conceptual Modeling, http://www.iospress.nl/journal/applied-ontology/, IOS Press
7) W3C セマンティックウェブ関連標準規格, W3C：Semantic Web Standards, http://www.w3.org/standards/semanticweb/
8) https://schema.org/
9) Linked data - Connect Distributed Data across the Web, http://linkeddata.org/
10) http://datahub.io/
11) The Semantic Web Science Association (SWSA), http://swsa.semanticweb.org/, The International Semantic Web Conference (ISWC), http://swsa.semanticweb.org/content/international- semantic-web-conference-iswc, Journal of Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, Elsevier. http://www.journals.elsevier.com/journal-of-web-semantics
12) Mika, P., et al., Preface, Proc. of ISWC 2014, Springer, 2014.
13) Schmachtenberg, M., Bizer, C., Jentzsch A., and Cyganiak, R.: Linking Open Data cloud diagram 2014, http://lod-cloud.net/, http://linkeddatacatalog.dws.informatik.uni-mannheim.de/state/
14) DBpedia, http://dbpedia.org/
15) 日本語版 DBpedia, http://ja.dbpedia.org/
16) 日本語 Wikipedia オントロジー，http://www.wikipediaontology.org
17) LODAC, http://lod.ac/
18) Commonsense Computing Initiative, ConceptNet 5, http://conceptnet5.media.mit.edu/
19) 「空気が読めるコンピューターをつくろう」プロジェクト，ナージャとなぞなぞ，http://nadya.jp/，中原和洋，山田茂雄，日本でのコモンセンス知識獲得を目的とした Web ゲームの開発と評価, UNISYS Technology Review,第 107 号，2011, http://www.unisys.co.jp/tec_info/ tr107/10702.pdf
20) Reverb: Open Information Extraction Software, http://reverb.cs.washington.edu/
21) Open Information Extraction, http://openie.cs.washington.edu/

22) G8 オープンデータ憲章， http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page23_000044.html https://www.gov.uk/government/publications/open-data-charter/
23) Global Open Data Index, http://global.census.okfn.org/, 2014 年 11 月 27 日におけるデータを参照
24) 世界最先端 IT 国家創造宣言における「オープンデータ・ビッグデータの活用の推進」, 2013 年 6 月 14 日閣議決定
25) 日本政府，データカタログサイト，http://www.data.go.jp/
26) The National Center for Biomedical Ontology, http://www.bioontology.org/, BioPortal, http://bioportal.bioontology.org/
27) OBO Foundry, http://www.obofoundry.org/
28) RDF Platform , EMBL-EBI, http://www.ebi.ac.uk/rdf/, Redaschi, Nicole and Consortium UniProt: UniProt in RDF: Tackling Data Integration and Distributed Annotation with the Semantic Web. Nature Precedings, http://dx.doi.org/10.1038/npre.2009.3193.1, 2009
29) ライフサイエンス統合データベースセンター(Database Center for Life Science： DBCLS), http://dbcls.rois.ac.jp/, ライフサイエンス統合データベースプロジェクト, http://lifesciencedb.jp/
30) JST バイオサイエンスデータベースセンター (National Bioscience Database Center: NBDC), http://biosciencedbc.jp/
31) 世界銀行グローバル・ファシリティ, http://www.opencitiesproject.org/
32) 米国 地理空間情報プラットフォーム, Geoplatform, https://geoplatform.gov
33) 英国 リアルタイム都市情報， http://citydashboard.org/
34) (一社）社会基盤情報流通推進協議会，アーバンデータチャレンジ 2014, http://aigid.jp/?p=825
35) BBC, World Service Radio Archive Prototype, http://worldservice.prototyping.bbc.co.uk/
36) BBC, Ontologies, [E-2] http://www.bbc.co.uk/ontologies/
37) NHK, 番組表 API, http://api-portal.nhk.or.jp/
38) 宮崎勝，浦川真，山田一郎，三浦菊佳，住吉英樹，藤沢寛，中川俊夫：番組情報データベースの LOD 化の検討，人工知能学会セマンティックウェブとオントロジー研究会，SIG-SWO-A1402-01, 2014.
39) IBM Watson, http://www.ibm.com/smarterplanet/jp/ja/ibmwatson/
40) Google Knowledge Graph, http://www.google.com/insidesearch/features/search/knowledge.html, http://googleblog.blogspot.co.uk/2012/05/introducing-knowledge-graph-things-not.html
41) http://www.topquadrant.com/
42) http://www.metaintegration.net/
43) http://franz.com/agraph/allegrograph/
44) EU, The Seventh Framework Programme for research and technological development (FP7), http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html.
45) LOD2: “Creating Knowledge out of Interlinked Data” Project, http://lod2.eu/
46) http://www.aifb.kit.edu/web/AIFB/en
47) The Digital Enterprise Research Institute (DERI), http://www.deri.ie/

48) The Insight Centre for Data Analytics, http://www.insight-centre.org/
49) Kawamura T., Nagano1 S., and Ohsuga A., Deployment of Semantic Analysis to Call Center, In Extended Abstracts of ISWC2014 Industry Track, 4 pages.
50) http://opendatainstitute.org/.
51) http://www.ontotext.com/
52) http://www.fluidops.com/en/
53) http://www.semafora-systems.com/en/
54) http://www.openlinksw.com/
55) http://www.semantic-web.at/
56) 一般社団法人オープン＆ビッグデータ活用・地方創生推進機構（旧オープンデータ流通推進コンソーシアム）, http://www.vled.or.jp/
57) 一般社団法人リンクデータ，http://linkData.org
58) 特定非営利活動法人リンクト・オープン・データ・イニシアティブ, http://linkedopendata.jp/
59) Linked オープンデータチャレンジ, http://lod.sfc.keio.ac.jp/
60) 経済産業省，オープンデータを活用したビジネス創出のためのマッチング支援サイト Knowledge Connector（β版），http://idea.linkdata.org/
61) 富士通, LOD4ALL, http://lod4all.net/
62) インフォコム（株），InfoLib-LOD, http://www.infocom.co.jp/das/product/infolib/lod.html
63) オントロジーの普及と応用，來村徳信（編著），人工知能学会（編），オーム社, 2012.
64) http://www.saltlux.com/
65) Nju, X., Sun, X., Wang, H., Rong, S., Qi, G., Yu, Y.: Zhishi.me - weaving chnese linking open data. Proc. of ISWC 2011, pp. 205-220 (2011).
66) Wang, H., Wu, T., Qi, G., Ruan, T., On Publishing Chinese Linked Open Schema, In Proc. of ISWC 2014, pp. 293-208, 2014.
67) The 4th Joint International Semantic Technology (JIST2014) conference: JIST 2014, http://language-semantic.org/jist2014/, Chiang Mai, Thailand, November 9 to 11, 2014.
68) 森田武史，山口高平，オントロジー学習の現状と動向，オントロジーの普及と応用，pp. 39-65, オーム社, 2012
69) JST，戦略プロポーザル：「知のコンピューティング」，http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/SP/CRDS-FY2013-SP-07.pdf
70) Poggi, A., Lembo, D., Calvanese, D., De Giacomo, G., Lenzerini, M., Rosati, R.: Linking data to ontologies. In: Spaccapietra, S. (ed.) Journal on Data Semantics X. LNCS, vol. 4900, pp. 133–173. Springer, Heidelberg (2008)
71) Gottlob, G., Orsi, G., Pieris, A.: Ontological queries: Rewriting and optimization. In: Proc. of ICDE, pp. 2–13. IEEE Computer Society (2011)
72) Optique, Scalable Data Access to BigData, http://www.optique-project.eu/
73) The National Information Exchange Model (NIEM), http://www.niem.gov/, Version 3 (https://www.niem.gov/technical/Pages/version-3.aspx), 2013 年 11 月公開
74) Joinup: Share and reuse interoperability solutions for public administrations, http://joinup.ec.europa.eu/

75) 共通語彙基盤プロジェクト(Infrastructure for Multilayer Interoperability: IMI), http://data-meti.go.jp/goikiban, http://goikiban.ipa.go.jp/
76) W3C, Registered Organization Vocabulary, http://www.w3.org/TR/vocab-regorg/
77) WHO, The International Classification of Diseases 11th Revision (ICD 11), http://www.who.int/classifications/icd/revision/en/
78) OntologySummit2013 Communique, http://ontolog.cim3.net/file/work/OntologySummit2013/OntologySummit2013_Communique/
79) EU, Horizon 2020, http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/

３．７．４　Webインテリジェンス

（１）研究開発領域名

Webインテリジェンス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

Web インテリジェンスとは、人工知能に代表される知的処理技術を用いることにより、Web 上の情報基盤を発展させようという研究領域である。研究内容としては、多岐にわたるが、情報推薦、情報検索、ソーシャルネットワークやソーシャルメディア、コミュニティー抽出や情報伝搬、感情分析やイベント検出等のコンテンツ分析、ユーザー行動分析やユーザーモデリング、固有表現抽出や関係抽出、オントロジー抽出、セマンティックウェブ、エージェント技術、E コマースやオークション、広告技術等に関する研究が挙げられる。

これらは、ひとことで言うと、Web をより知的に、使いやすいものにするという目的に向けた技術である。その技術が、Web 上の新しいサービスの発展や、人々の Web の使い方の変化、人工知能技術等の基礎技術の発展といった、さまざまな環境要因の変化とともに進展しており、研究テーマが波状的に進化するという特徴を持っている。例えば、Facebook などのソーシャルネットワークが世の中で多くのユーザーに使われるようになったがゆえに、ソーシャルネットワークにおけるデータを用いた情報伝搬の研究が行われ、それが数理モデルの形で抽象化され、そして、最近注目を集めているクラウドソーシングの研究に活用される、といった具合である。

また、研究内容が、サービスの提供、データの分析と密接に関わることが多いため、産業界とも密接な関係を持っているというのも領域の特徴である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

Web は今日ではなくてはならない情報基盤である。物理的なインターネットの層から、そのイノベーションは時代とともにより上位に移っており、検索や推薦、あるいはコミュニケーション、さらには意味を扱う世界に徐々にシフトしている。Web 上での情報流通が、より意味のレベルに近くなると、これまでに蓄積されてきた人工知能による知的処理技術が大いに役に立つ。実際、検索エンジンを高度化しようとすると、現実の世界を表現する固有表現をいかに抽出し、その属性をいかに取得するか、さらにはそういった概念を記述するオントロジーをいかに抽出するかという問題にすぐにぶつかるが、それらは人工知能の領域で長らく研究されてきたテーマである。また、コミュニケーションを高度化しようとすると、ユーザーの意図は何か、コミュニケーションのパターンから何が読み取れるかという話になり、人工知能におけるインタラクションやコミュニケーション、あるいは意図理解などの文脈で、長く研究されてきたテーマとつながる。このように、知的処理技術が Web という新しい環境と出会うことで大きな発展を遂げているのがこの Web インテリジェンスの研究領域である。

Web インテリジェンスという言葉自体は、前橋工科大学の鐘、早稲田大学の大須賀らが、2000 年代初頭に用い始め、Web インテリジェンスという国際会議が 2001 年から開かれている（その後、IEEE を冠した国際会議となった。）国内でも、Web インテリジェンスとい

う名前の研究会（WI2（Web Intelligence & Interaction）研究会）が、2004 年から 2012 年までは電子情報通信学会のもと、その後、独立して運営されている。科研費の細目では、平成 20 年度から、ウェブ情報学のなかの 1 項目として、推薦システムやウェブマイニング、社会ネットワーク分析と並んで、「ウェブインテリジェンス」と定められている。

こうした Web インテリジェンスという名前を冠した学会や研究会は、Web 全体の研究領域の中ではごく一部であるが、Web インテリジェンスを Web という基盤における知的処理と捉えると、より広い範囲の研究コミュニティーが該当する。例えば、ICWSM（International Conference on Weblogs and Social Media）という国際会議では、ソーシャルメディアにおける情報の流通やユーザーの行動等について研究されており、Web インテリジェンスのひとつと考えられる。WSDM（International Conference on Web Search and Data Mining）も、検索やユーザー行動の分析を扱う国際会議であり、広い意味で Web インテリジェンスに該当する。ISWC(International Conference on Semantic Web)も同様で、セマンティック Web という切り口から、Web における意味の世界を取り扱っている。Web 領域で最も大きな会議である WWW(International Conference on the World Wide Web)では、セキュリティーやソフトウエアエンジニアリングといった一部のトピックを除けば、多くの領域が Web をより知的に便利にしようというものであり、Web インテリジェンスの分野に該当する。

［これまでの取組み］

Web インテリジェンスの研究領域は、複数の要素が重層的に積み重なっているため、きれいに切り分けることは難しいが、いくつかの研究分野としてのかたまりがある。

コミュニティーに関わる研究は、ソーシャルメディアやソーシャルネットワーク、あるいは Web のリンク構造を扱う。コミュニティー抽出というテーマは、Web の研究の初期から行われており、グラフ構造から密なクラスタを抽出する。コミュニケーションが密に行われている背景や中心的なトピックを知ることができる。これを時系列に捉えたコミュニティーの変化や、またコミュニティー内でどのように情報が伝搬するかという研究も活発に行われている。

推薦の研究では、古くからの協調フィルタリング、コンテンツベースの推薦という手法に、さまざまな新しい要素（例えば友人関係や位置情報）や外部知識（商品の情報やその売れ方の時系列変化）などを入れたモデルが考案されている。また、レビュー文の分析も活発に行われており、テキストの分析とユーザーのログの分析、意味構造が一体となって進展している領域である。

検索の研究は、初期においてはインデックスの作り方や情報の貯め方が重要な課題であった。そこから、例えば、Learning to Rank というランキングを機械学習で行う方法や、Entity Search のようなウェブページではなく、組織や人物などのエンティティを検索しようという方向にも進んでいる。

以上は、基本的に、Web インテリジェンスの研究の初期から行われているものであるが、近年ではその発展の方向として、i) 意味処理に近づけるもの、ii) ユーザー個人の情報を取得しようというもの、iii)社会全体の動きを捉えようとするもの、に大別される。

最初の意味処理に近づけるものとしては、検索の発展系としてエンティティの情報を取得

する研究がある[1,2,3]。さまざまなウェブマイニングの手法が有効であり、固有表現抽出、関係抽出といった研究テーマが、広くはオントロジー抽出という文脈で行われている。Wikipedia などの構造化されたコンテンツも、題材として扱いやすいためよく用いられる。Semantic Web や Linked Open Data（LOD）の研究とも関連している。

一方、ユーザー個人の情報を取得しようという研究[4,5]は、ユーザーモデリングやユーザープロファイリングと呼ばれる。この研究は、広告の提示や検索結果の提示等において Web の世界では非常に重要性を増している。ユーザー行動からユーザーの次の行動を推測すること、そのためにユーザーの興味の移り変わり等を的確に捉えることは重要な課題である。応用サイドを見ると、パーソナルエージェントや Web サービスの発見といったテーマとも関連がある。

社会全体の動きを捉えようとする研究としては、ウェブからのイベント抽出や、場所の特徴の抽出、選挙結果の分析等がある[6,7]。また、ソーシャルメディアを用いて、センチメント分析がよく行われるが、特定の商品や特定の企業に関しての評判を抽出しようというものもある。

Web を知的にするという活動においては、米国企業である Google や Facebook、Microsoft などが大きなプレゼンスを保っている。研究者も、こうした企業に所属しながら、社内のデータ（検索履歴やユーザー行動）を使って研究をすることも多い。データおよび計算機のリソースなどの点で、有利な状況にある。

［今後必要となる取組み］

意味処理や知識表現に関わる分野は、時代を問わず重要である。最近では、Google が公開した、単語をベクトルで表現する word2vec という技術が注目を集めている。手軽に単語同士の加減等の演算を行うことができるものであるが、古くから同様の技術があり、例えば 2000 年前後にジャストシステムの開発したコンセプトベースが挙げられる。これを Web の規模で行ったところが画期的である。また、公的機関が、情報を LOD として出すといった試みも増えている。こうした研究は、時代に流されずに継続していくべきである。こうした地道な努力が、いつしか一定の閾値を超え、新たな価値を生み出すことになるだろう。

一方で、産業界においては、ここ 1、2 年で、リソースのマッチング技術が本格的に実用化されている。例えば、宿泊の AirBnB や、タクシーの UberX などである。これは従来遊んでいたリソースを、必要な人と結びつけることで有効活用しようというものであり、Web インテリジェンスが社会的なリソースの余剰の問題に適用されたものと考えることができる。マッチングの精度を高める技術、ユーザーのコンテキストを読み取る技術は今後、さらに重要になってくるだろう。

リアルな世界や人間系との連携も重要である。位置情報の分析では場所に関するさまざまな知見を得ることができたが、これが Internet of Things（IoT）の世界になり、さらにさまざまな文脈情報を取得することができるかもしれない。ソーシャルメディアはとどまることなく進展しており、新しいコミュニティーの形、さらには、クラウドソーシングのような仕事の分担や、クラウドファンディングのような資金調達など、目的を特化したコミュニケーションがさらに生まれてくる。そうした事象の分析や活動は今後も重要性を増してくるだろう。

（４）科学技術的・政策的課題

日本の Web インテリジェンス領域における課題は、極端に言えば、産業界が弱いという一点に尽きていると言えるかもしれない。Web の世界では、サービスの利用においてユーザーが国境を意識する必要がない。検索やソーシャルメディアでは、「世界で最も良い」ものが使われるのは当然である。残念ながら国内の検索やソーシャルメディアのサービスは、世界的には存在感を示していない。したがって、国内の Web インテリジェンスの研究コミュニティーは、グローバルな研究コミュニティーに貢献し、それがシリコンバレーを中心とする産業界にも貢献しているものの、国内の研究コミュニティーが、直接、国内の産業界に貢献しているという構図になっていない。

このような問題は、以前から指摘されており、国外のサービスを締め出した政策をとる中国のような例は別にすると、米国以外のほとんどの国が直面している課題でもある。国内でも、国産の検索エンジンの議論は以前から行われており、日本発で世界に通用する Web ビジネスの出現は国内でも長年の願望である。しかしながら、国内のユーザー数や消費の規模が比較的大きいこと、一方で、世界に打って出たときに競合が極めて多く、言語や文化の差異によるハードルが高いことから、国内から世界に通用するサービスが生まれるのは難しい状況が続いている。

しかしながら、Web の産業もその規模の拡大とともに成熟し、その知見を科学技術として蓄積し、構造化し、新たな競争力とする必然性が徐々に高まっている。最近では、機械学習やユーザーモデリング、意味処理を競争力としたサービスも少しずつ増えてきた。時代を超えても変わらない普遍性に抽象化し、方法論を蓄積していくのは科学技術コミュニティーの役割であり、その役割に適切に応えていくことが必要であろう。

さらに長期的な方向を見据えると、Web インテリジェンスは、徐々にしかし確実に意味処理の世界に近づいていると見ることもできる。そして昨今の人工知能技術の進展は、Web と組み合わされる形で速やかに社会にインパクトをもたらす。したがって、人工知能技術と連携させながら、知的処理やコミュニティーの分析といった研究の基盤を強化していくことが重要であると考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

ここ数年、注目を集めている技術のひとつが、クラウドソーシングである。グローバルには Amazon Mechanical Turk、国内ではクラウドワークスやランサーズといったサービスがある。クラウドソーシングによって、例えば、機械学習の正解データを作るといった簡単だが膨大にやる必要があるタスクを簡単に実現できるようになった。WWW2014 では、Crowdsourcing というセッションが組まれ、関連したワークショップ等も開催されている。クラウドソーシングによるタスクを組み合わせて、より高次なタスクを実現するとか、ゲーム性を取り入れて、より生産性を上げるといった方向性も可能であろう。クラウドソーシングの上位の概念として、制度やシステムをどのように設計するかというメカニズムデザインの研究も以前から経済学と計算機科学の融合領域で行われている。オークションの研究がその代表例だが、人間系が Web のシステムのなかに組み込まれていくなかで、今後重要性が

高まると考えられる。

二つ目に重要なのが、教育に関する技術である。特に、MOOC（Massive Open Online Course）あるいは Education technology と呼ばれることもある。Cousera や Khan Academy、edX などが有名であるが、従来の教育用の動画等のコンテンツに、ユーザーとのインタラクションの仕組みをつけたものである。例えば、機械学習に関する良い教育コンテンツが提供されていることから、ユーザーが急速に増加しており、そのデータを使ったさまざまな分析が行われている。ここ１年で、MOOC に関する発表やワークショップも急に増えている。

三つ目に、Online experiment と呼ばれる技術が進展している。これは、A/B テストあるいは多変量テストと呼ばれるような、オンラインで複数のバージョンをテストし、どちらが良いかをデータによって決めるものであり、ウェブサービスの構築や広告の配信ではよく用いられてきた。これが技術的に発展することで、より大規模なデザインがデータに基づいてできるようになる可能性がある。

最後に、深層学習を起点とする機械学習の進展は、まだ Web インテリジェンスの世界には大きく波及していないが、少しずつ、深層学習を活用した研究も出てきている。特に、関係抽出やオントロジー抽出といった研究テーマにおいて、従来、ルールの塊になって精度が向上せずに止まっていた部分が飛躍的に進歩する可能性がある。いまでは、ほとんど技術的進展が飽和しているような検索エンジンの領域においても、より意味処理に近いレベルで、再度、技術的な競争が起こる可能性がある。

（６）キーワード

ソーシャルメディア、ソーシャルネットワーク、コミュニティー、推薦、検索、ユーザーモデリング、ユーザープロファイリング、行動分析、関係抽出、オントロジー抽出、セマンティック Web、ウェブサービス、マルチ・エージェント

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	検索や推薦、意味処理や自然言語処理に関わる研究は以前から強い。しかし、Web産業が弱いことが出口の制約となって、どうしてもこの領域の研究の重要性が社会的に認識されづらい傾向にある。大学で作られた先進的な技術を維持、改善し続ける仕組みが属人的で、どうしても個人技に頼っており、恒常的な競争力の維持が難しい。
	応用研究・開発	○	→	インタラクション、モバイル等においての応用の試みはよく行われている。アイデアも非常に幅広い。しかしながら、産業と結びつくことがほとんどなく、出口がない。
	産業化	×	↗	検索やソーシャルメディアは、Google、Facebook、Twitterなど米国の企業が強い。国内でも、Yahoo、楽天などが自社で技術を開発しているが、ローカライズ（現地化）といった側面が強い。昨今、スタートアップの環境が整ってきたことで、独自のサービスが少しずつ出てきたことは明るい材料である。
米国	基礎研究	◎	→	検索や推薦など、一見すると応用研究に思えるような領域を、早い時期から基礎研究としてしっかりと取り組んでいる。ソーシャルネットワークの分析に関しても数理モデルを使った基礎研究が行われている。スタンフォード大学、CMU、MITなどのトップ校を初めとして、州立大学や企業の研究所でも良い成果を多数挙げている。
	応用研究・開発	◎	→	産業からのデータが活用できることに起因して、応用に関する研究も幅広く行われている。
	産業化	◎	→	単一のアイデアで一点突破を試みるベンチャーが数多く存在し、またAppleやMicrosoft等の大企業もWebインテリジェンス分野に対する投資を怠っておらず、強い競争力を維持し続けている。近年では、Microsoft Researchが最もアカデミア的な環境（純粋にトップ国際会議の論文業績でのみ評価）を構築している。
欧州	基礎研究	○	→	伝統的にセマンティックWeb分野は強い。米国が、産業をドライブとして基礎研究、応用研究が力強く進められているのに対し、欧州では、Tim-Berners Leeを中心とするW3コンソーシアムや、それに伴うセマンティックWeb、古典的なAI（論理や知識表現）の研究領域が、ウェブに進出しているという意味合いが強い。
	応用研究・開発	○	→	ドイツDFKIや、アイルランドのセマンティックWebの研究所等、応用を志向した研究は行われている。
	産業化	○	↗	日本と同じく、GoogleやFacebookといった企業のローカライズによって産業化が行われてきた。近年では、ドイツのベルリン等で、新しくスタートアップが多数誕生するような流れになりつつある。
中国	基礎研究	◎	↗	数年前は、論文の量は多くとも必ずしも質は高くなかったが、昨今では、質量ともに急激にレベルを上げている。特に、トップ国際会議に採択される研究も、米国に留学している中国の学生だけでなく、清華大学や香港大学などの論文が目立つようになってきている。北京にあるMicrosoft Research Asiaは、多くの論文を輩出し続けている。
	応用研究・開発	○	↗	中国ならではの言語やWeb環境にあわせた応用研究も多数行われている。

	産業化	○	↗	国策として、グレートファイアウォールを維持しており、GoogleやFacebook、Twitterが中国国内から使えない。したがって、検索、ソーシャルネットワークサービス、ミニブログ、Eコマース、ゲームなどあらゆる領域で、シリコンバレーの企業をミラーするような企業が存在する。そういった企業が、着実に技術力を上げており、すでに日本との彼我の差は大きい。
韓国	基礎研究	○	→	ソウル大学、KAISTを中心に研究が行われている。韓国国内での研究は、研究機関が多くないこともあって量的にはそれほど高くないが、米国内にいる韓国出身の研究者との連携が強く、影響力は高い。
	応用研究・開発	△	→	自国内の産業規模が大きくないため、あまり韓国内での応用研究や開発は活発ではない。
	産業化	×	→	自国内の産業規模が大きくなく、目立ったイノベーションは起きていない。検索大手のネイバーが、Hanゲームを運営しており、また日本のLineも生み出したが、連続的なイノベーションには至っていない。Lineは広告、決裁、Eコマースと着々とその領域を広げている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Soumen Chakrabarti. 2007. Dynamic personalized pagerank in entity-relation graphs. In Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web (WWW '07).
2) Limin Yao, Sebastian Riedel, and Andrew McCallum. 2012. Unsupervised relation discovery with sense disambiguation. In Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL ’ 12)
3) Robert West, Evgeniy Gabrilovich, Kevin Murphy, Shaohua Sun, Rahul Gupta, and Dekang Lin. 2014. Knowledge base completion via search-based question answering. In Proceedings of the 23rd international conference on World wide web (WWW '14).
4) Quan Yuan, Gao Cong, Zongyang Ma, Aixin Sun, and Nadia Magnenat- Thalmann. 2013. Who, where, when and what: discover spatio-temporal topics for twitter users. In Proceedings of the 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '13)
5) The Dynamics of Viral Marketing. 2007. J. Leskovec, L. Adamic, B. Huberman. ACM Transactions on the Web (TWEB), 1(1)
6) Daniel Gayo-Avello, A Meta-Analysis of State-of-the-Art Electoral Prediction From Twitter Data, Social Science Computer Review
7) Takeshi Sakaki, Makoto Okazaki, Yutaka Matsuo, 2010, Earthquake shakes Twitter users: real-time event detection by social sensors, Proceedings of the 19th international conference on World Wide Web (WWW2010)

３．７．５　知能ロボティクス

（１）研究開発領域名

知能ロボティクス

（２）研究開発領域の簡潔な説明

知能ロボティクスとは、人工知能とロボットを融合した研究領域であるが、見て聞いて（知覚）考えて（知能）動く（操作）の 3 研究要素の力点の置き方により、知能ロボティクスの幅も広い。歴史的には、SRI(スタンフォード研究所)で、知能ロボット Shakey の開発が 1966 年に開始されて以来、2015 年は半世紀が経過する節目の年となる。Shakey は、STRIPS と呼ばれるプランナーにより移動経路を計画立案するとともに、自然言語理解、画像処理、運動（マニピュレーション）を統合した、人工知能とロボティクスの要素技術を統合した世界初のロボットであった。しかしながら、各要素技術の性能が不十分なため、限定された物理世界でも Shakey はスムーズに動作できなかったことから、1970 年代以降、知能ロボットの研究は、推論、自然言語理解、知識処理、機械学習のように、身体性を伴わない記号世界のみを扱う人工知能研究、および、知覚系と運動制御系を中心に身体性と実世界の相互作用を扱うロボットティクス研究に分かれて、独自に進展してきた。このような状況下で、Brooks（MIT）は、1986 年に身体性を考慮する人工知能の重要性を説き、1994 年に低次レベルから高次レベルの認知までを目指したヒューマノイド Cog プロジェクトを開始して以降、人工知能とロボティクスの統合領域が復活し、ICT の進展をもとに新たな融合研究が登場してきた。本項では、人工知能（および認知科学のような関連分野）とロボティクスの統合型研究について概説する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ロボティクスの研究 3 要素が「記号に基づく知能」と「知覚、感覚、感情」と「動作・運動制御」であるので、人工知能とロボットの統合研究は、統合要素と統合方向（例えば、記号から動作に連携させるか、動作から記号に連携させるかで研究成果は異なる）によって、さまざまな研究に分かれる。以下、長年、基本的課題になっている(1)記号接地(Symbol Grounding)、(2)人とロボットのインタラクション・コミュニケーションを重視する HRI (Human Robot Interaction)、(3)認知発達メカニズムとロボットの融合研究である認知発達ロボティクス、(4)WWW とロボットの融合研究であるクラウドロボットの統合研究について述べ、その後に、(5)ロボティクスの知能化に関わりの深い人工知能技術について述べる。

記号接地とは、Stevan Harnad によって 1990 年に提唱された課題であり、物理世界における記号の意味づけ問題であり、換言すれば、異なるモダリティー（視覚、人の表情、聴覚、声の抑揚など）がどのように結びついて記号の意味（あるいは語意）が形成される仕組みを解明する問題であり、さまざまな研究が展開されている。Shakey で採用された STRIPS では、ロボットによる積み木の移動方法について、記号操作のみで推論し、詳細なレベルで物理パラメータを処理する組込みソフトウエアとは切り離されているため、記号は物理世界に接地されていないと言われる。ロボットに積み木をうまく移動させるには、記号上の推論だけでなく、例えば「大きな積み木を押して動かせ」という文章（記号列）に対して、大きい、積み木、押す、動かすという記号が、物理世界でどのように表現されるのか、物理パラメー

タレベルの表現形式を理解し処理できる必要がある。例えば、Linda Smith らは、2005 年、階層型ニューラルネットワークを利用して、形が明確な物体とそうでない物体（例えば、小麦粉）を分離するパターンを学習させ、知覚情報から記号的パターンが形成される事を示しているが、語意形成過程が明確になったとは言えない。Luc Steels は、2003 年に、２体のロボット間のコミュニケーションゲームにおいて、ロボットが物体を指さし、その物体の色を学習できる事を示し、記号接地問題は解決できたとしたが、色を判別するアルゴリズムが事前に準備されていたため、記号接地問題を解決した事にはならないと指摘されている。Luciano Floridi は、2004 年に、記号接地に関して、(1)ロボットは直接的な意味生成の仕組みを持っていない、(2)ロボットは、外部から直接的に意味が理解できる情報を得ない、(3)ロボットは、語意形成につながる基本的な計算機構やデータを利用できる、という 3 要件を示したが、現状では、これら 3 要件をすべて満足する研究はない。また、知覚情報と記号の結びつけの研究が多いが、人の感情、表情、態度など、知覚以外の多様な非言語情報への記号接地、語意の関係、語意の社会性までも含めて、記号接地から、単語から文まで含めて物理世界に接地させる言語接地(Luc Steels)へと研究が展開されている。

語意形成を扱う記号接地から、語意共有・社会性を基軸にした、構成論的アプローチ（研究対象を作って動かして理解するアプローチの総称であり、ここでは、知能の仕組みをロボットにより設計・実装・実行してみて、その挙動から、知能モデルを研究する）としてヒューマンロボットインタラクション(Human Robot Interaction, HRI)がある。1992 年に安西祐一郎が Human-Robot-Computer Interaction という新しい研究領域を提唱して以来、近年、HRI の研究は増加し、語意の共有や社会性にアプローチする有効な方法論となっている。

人の認知機構と深く関連させた研究が、認知発達ロボティクスである。これは、乳児・幼児・児童がさまざまな未知の環境において、新しい振る舞い・知識・スキルを学んで獲得していくように、ロボットを認知発達させるための研究分野であり、1990 年代後半頃より研究が開始された。認知ロボティクスでは、事前に想定されていない未知のタスクにおける学習が求められ、特定タスクではなくさまざまな（とは言っても無限ではなく、制限は加わる）タスクで実行可能で、継続的な学習が求められる。従って、認知心理学が研究されている、乳児の発話模倣、幼児の動作模倣と言語能力、体験からの概念化などの発達過程、大人における熟達化過程まで、人の生涯すべての発達過程をロボットで実現することを目指しているとも言え、ロボットが自我を見いだす可能性から、汎用人工知能との関わりも議論されている。

Web とロボットの統合を目指した研究が、クラウドロボティクスである。ロボットが所与のタスクを処理できないとき（例えば、目の前の物体が認識できない)、クラウドに問い合わせて解を得るという枠組みで、高度なロボティクスアプリや複雑なロボット連携を実現する枠組みである。2009 年から開始された欧州の研究プログラム RoboEarth の Rapyuta という研究プロジェクトでは「ロボット向けの WWW 構築」が提案され、ソフトウエアコンポーネント/マップ/オブジェクトなどが存在する「RoboEarth Database」と「RoboEarth Cloud Engine」で構成されている。日本では ATR、米国では Google が Android OS とオープンソースのロボット OS「Robot Operating System（ROS)」の統合を目指している。

上述の 4 研究領域は、機械学習との関わりが深い。パターン情報処理的には、記号はパタ

ーン情報空間を切り出した（分節した）空間へのラベルと捉えられるが、あらかじめ、分節方法は定まっているのではなく、人を含めた環境とのインタラクションから動的に形成される（これを創発と呼ぶ)。谷口忠大らは、このプロセスを記号創発と呼び、人工知能学会全国大会では 2011 年度からセッションが組まれ、活発に議論されている。この記号創発は、パターン情報からの要素記号の創発と言語データからの記号構造の創発に分かれ、前者では、クラスタリング、自己組織化、次元圧縮、ベイズ推定、確率モデリング、多層階層型パーセプトロンや RBN(Restricted Boltzmann Machine)などの深層学習による内部表現獲得、後者では、CRF(Conditional Random Field)によるタグ付け、係り受け、格解析、単語多義性解消、および、確率的に文法規則を推定する研究が実施されている。また、強化学習(Reinforcement Learning)とは、エージェントが環境状態を観測して行動し、その結果、ゴールに近づけば高い報酬を与えるというプロセスを繰り返し、最良の行動連鎖を学習するものであり、ロボットの動作の学習によく使われる。

以下、上述した 4 研究領域に関する国内外の動向について述べる。

［日本の動向］

わが国の大学を中心にした研究活動については、JST ERATO 淺田稔（大阪大学）共創知能システムプロジェクト(2005.10 - 2011.3)がある。本プロジェクトでは、胎児・新生児の筋骨格・神経系発達シミュレーションを実現し、運動機能重視の Neony、対人機能重視の Kindy、コミュニケーション実験用の Synchy、全身感覚運動学習用認知発達ヒューマノイドの Noby、石黒浩（大阪大学）が開発した幼児ロボット CB2(Child-robot with Biomimetic Body)などの認知発達研究用プラットフォームが開発された。

NEDO「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」（プロジェクトリーダー:佐藤知正（東京大学)、2007-2011)では、ロボット知能ソフトウエアプラットフォームの開発、モジュール型知能化技術の開発、有効性の検証を目標にして進められ、ROS（Robot Operating System）との連携システムの構築、安全認証取得 RT ミドルウエアの開発などの成果があった。

文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究（研究領域提案型）「人ロボット共生学（人とロボットの共生による協創社会の創成)」（領域代表者：三宅なほみ（東京大学)、2009-2014）では、ロボティクスと学習科学（教育工学）の研究者らが協力し、教育・学習の場面で、人とインタラクションするロボットの実践を目標とし、対話が起きている場所と音声・話者の高速高精度同定技術、脳波計測を利用したロボットが備えるヒト性の計測技術などを開発し、教育現場において遠隔操作によるロボットが生徒から学習仲間として認められた。

北野宏明（Sony CSL)、浅田稔（大阪大学)、松原仁（はこだて未来大）らが中心となり、ロボティクスと人工知能を融合し、1995 年に RoboCup 構想が提唱された。「2050 年に、ロボットのサッカーチームが、ワールドカップ優勝チームに勝つ」という壮大な目標に向かって、さまざまな研究領域の要素技術を育成することを目的としたランドマーク・プロジェクトである。現在は、ロボカップサッカー以外に、災害現場で救助に役立つ自律型ロボットの開発をめざしたロボカップレスキュー、台所や居間でロボットと人間が協働作業を遂行するための技術を競うロボカップ@ホームなどが発足し、研究者も数千人いると言われ、ジュニ

ア部門も発足し、青少年の育成にも貢献している。

産業技術総合研究所の知能システム研究部門では、1993 年からアザラシ型メンタルコミットロボット「パロ」が研究開発され、2004 年より知能システム株式会社が事業化している。また、NEDO の支援を受け、産業技術総合研究所（産総研）と川田工業と安川電機などが協力して実施した「人間協調・共存型ロボットシステム」（プロジェクトリーダー:井上博允（東京大学）、1998-2006）において、ヒューマノイドロボット研究開発プラットフォーム「HRP」シリーズの研究開発を進め、2009 年には、女性型ヒューマノイドロボット「HRP-4C（愛称は未夢（ミーム））」を開発し、高いエンターテインメント性を示した。近年は、知覚・運動を中心にして、社会貢献型ロボットの研究開発に注力している。例えば、生活支援ロボットの安全性評価技術を確立するために、ISO13482 を正式に発行し、生活支援ロボット安全検証センターを立ち上げている。また、福島原発内部調査のための高所調査用ロボット、災害現場で機能する人型ロボットなど、社会に貢献するロボットの開発が進められている。

ATR（国際電気通信基礎技術研究所）の知能ロボティクス研究所（萩田紀博所長）が知能ロボットの研究をリードしており、1998 年にコミュニケーションロボット Robovie-0 を開発し、その後、さまざまな Robovie シリーズを開発している。また、近年、クラウドロボットに注力し、2013 年「買い物支援ロボット」の社会実験を実施した。本実験では、高齢者が IT 端末のバーチャルロボットと対話して品物を注文し、高齢者の移動情報が、随時、店舗内の案内ロボットに伝送され、高齢者が店舗に到着すると、案内ロボットがお年寄りに近づき、声をかけて店舗へと誘導しながら、買い物中は、お年寄りと会話しながら、買い物カゴなどもロボットが運搬するクラウドロボットである。

一方、民間企業においては、ホンダは、1996 年に、世界初の本格的な二足歩行ロボット P2 を開発し、P3 を経て、2000 年に Asimo が発表され、2011 年の 3 代目 Asimo では、身体能力として、最高時速 9km 走行、両足ジャンプと片足ジャンプが可能となり、凹凸のある路面を踏破可能となり、知的能力としては、3 人が同時に発する言葉を聞き分け、人の歩く方向を予測して、ぶつからないように進むことが可能となり、作業機能として、水筒を握り、ふたを開け、紙コップに水を注ぐことが可能になった。

川田工業(株)は、上述したように、ヒューマノイドロボット「HRP」シリーズの研究開発に参画し、技術力を高め、2009 年には双腕型産業用ロボット「NEXTAGE」を販売するに至り、多くの製造業から注目を集め、既に 150 台以上販売している。

ソニーは、1999 年から犬型ロボット AIBO シリーズを販売し、2006 年 3 月で生産・販売を終了したが、総販売台数は 15 万台を超え、ペットロボットというジャンルを確立した。また、試作機にとどまったが、2003 年に開発された小型二足歩行ロボット QRIO （キュリオ）は、ダンスを踊り、集団でシンクロするエンターテインメントロボットであったが、2006 年にやはり生産が中止された。仏のアルデバラン社は、この QRIO を開発目標として、2009 年に小型人型ロボット NAO を誕生させ、現在、既に 7000 台以上の販売実績がある事を考えると、ソニーのロボット事業からの撤退は誠に残念である。

現在、人型ロボットの事業化については、ソフトバンク社が、2015 年 2 月に、感情認識ロボットと称される Pepper を 19.8 万円という戦略的価格で販売を開始することが決まっており、社会から大きな関心が寄せられている。

［米国の動向］

米国では、SRI で開発された世界初の知能ロボット Shakey(1966-1972)は、国防高等研究事業局（DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency)から支援を受けたが、その他、国立科学財団（NSF: National Science Foundation)と航空宇宙局（NASA: National Aeronautics and Space Administration)も知能ロボット研究を支援してきた。

Shakey 以降、知能ロボットは、感覚－モデル化―計画―行動サイクル（SMPA: Sense-Model-Plan-Act cycle）という古典的制御アーキテクチャーにより研究開発が進んだが、SMPA では、実時間処理や環境変化への動的対応などが困難である事が判明し、1986 年、Brooks は SA(包摂アーキテクチャー: Subsumption Architecture)を提案した。SA では、多数の非同期プロセスが並列かつ緩やかに結合し、低位（レイヤーの）タスクは、高位タスクとは独立に動作可能であるが（例えば、人の動作を認識し続ける)、高位タスクは低位タスクの結果を更新可能なアーキテクチャーであり、高位レイヤーが低位レイヤーを包摂(subsume)することから、SA と命名された。Brooks は、記号処理や表象を扱う高次レベルの認知だけを扱うだけでは、人工知能は不十分であり、実環境との相互作用の重要性を説き、身体性を考慮する人工知能の重要性を主張した最初の研究者と言える。Brooks は、高次レベルの認知を目指したヒューマノイド Cog プロジェクトを実施した(1994-2003)。Cog は、認知（Cognitive)と歯車の歯（Cogs of a Cogwheel)を同時に意味しており、人工知能は、低次知能から高次知能までを統合する必要性を示唆しており、今までに述べたさまざまな知能ロボティクスの研究領域に影響を与えた知能ロボティクスの先駆的研究である。Brooks の MIT AI ラボからは、准教授 Cynthia Breazea が、豊かな表情で感情表現する小型パーソナルロボット Kismet を開発し、それらの研究成果をもとに、2015 年末に 499 ドルという低価格で JIBO というパーソナルロボットの販売が予定されている。また、Brooks 自身は、1990 年に iRobot 社を設立し、掃除ロボット「ルンバ」を商品化し、世界中で販売され、既に 1000 万台以上の販売実績を持つ。さらに、同社を退社後、Rethink Robotics 社を設立し、2012 年、産業用の双腕ロボット Baxter を商品化している。

宇宙開発において、地球外の天体の表面を移動し、観測するために使われる車両をローバー(rover)と呼び、自律型ロボットとして設計されている。航空宇宙局（NASA）が多くのローバーを開発支援しており、現在、キュリオシティは 2012 年 8 月に火星に着陸し、生命の可能性について調査をしている。

DARPA は、2004 年～2007 年まで、自律走行車のグランドチャレンジを実施してきたが、2013 年に、災害救助用のロボット競技大会である、ロボティクスチャレンジ予選を実施し、16 チームが参加して、東京大学発のロボットベンチャーSCHAFT（シャフト）が首位で通過した（決勝は 2015 年 6 月実施予定)。

SCHAFT、四足歩行ロボットを得意とする Boston Dynamics、ROS (Robot Operating System)を開発した Willow Garage から派生したロボットベンチャーなど、8 社をグーグルが 2013 年末までに買収し、大きなニュースとなった。グーグルは、ロボット用 Android を開発中と言われ、いずれは、コンピューター、スマートフォン、自動車、ロボット、ウエアラブル機器、家電など、あらゆる人工物をネットワークにつなげる IoT (Internet of Things)の実現を目指している事が予想される。

米 Amazon は、倉庫内の発送業務自動化のために Kiva システムの導入を開始し、業務効率化が達成されている。また、無人機ドローンによる配達業務の自動化実験も開始している。

［欧州の動向］

米国では、Brooks が身体性を考慮する人工知能の重要性を主張したが、欧州では、チューリッヒ大学の Pfeifer（ファイファー）らがその先導的役割を果たし、EU FP7 の支援を受けて、認知ロボティクスの研究開発を行った。

Luc Steel (ポンペウ・ファブラ大学、Sony CSL Paris)は、記号接地をさらに発展させて、人とロボット間の言葉遊び実験 (Language Game Experiments)を通して、ロボットが実世界と言葉の対応付けを学習する方法を研究しており、統合型 AI の必要性を主張している。

人ではなくロボットが知識・情報共有するための Web を構築するために、アイントホーフェン工科大学(オランダ)、シュトゥットガルト大学（ドイツ)、ミュンヘン工科大学（ドイツ)、チューリッヒ工科大学 (スイス)、サラゴサ大学 (スペイン)らの研究者が RoboEarth プロジェクトを 2009 年に立ち上げ、EU FP7 の支援を受けている。RoboEarth は、データベースとクラウドエンジンとクライアント（ロボット）の 3 層構造であり、クラウドエンジンは、知識情報処理を担う KnowRob とクラウドエンジンである Rapyuta（この名前は、日本のアニメ「天空のラピュタ」に由来している）から成る。RoboEarth は、クラウドをロボット分野に活用する「クラウドロボティクス」の先駆的な取り組みであり、その意義は大きい。

一方、民間では、既に述べたように、仏のアルデバラン社が、ソニーの QRIO を開発目標として、2009 年に小型人型ロボット NAO を誕生させ、既に 7000 台以上の販売実績をあげ、さらに、ソフトバンク社が 2015 年 2 月に販売を開始する Pepper を設計し、ロボットがパソコン、スマートフォンに続いて、新しいコミュニケーションメディアとして定着できるか否かが注目される。

（4）科学技術的・政策的課題

わが国では、人工知能と同様、ロボットの研究開発についても隆盛期と幻滅期を繰り返してきた。特に、2005 年愛知万博では、63 種類のロボットが展示され、サービスロボット市場形成が期待されたが、結局、その市場は拡大しなかった。機能・コスト・安全性など、さまざまな条件が総合的に満足されないと市場は形成されない。

一方、米国では、サービスロボットの市場形成が始まっている。米国では、軍事用のロボット市場があり、その技術が民生用に転換され、サービスロボットの市場形成が始まるケースがある。例えば、iRobot 社の掃除ロボット「ルンバ」のコア技術は、元来、地雷撤去に由来しているが、掃除機に転用されて、ヒット商品になった。また、多くのロボットスタートアップ企業が誕生し、例えば、物流センター向け自律運搬ロボット Kiva は、大手量販店に採用されつつあり、また、オープンロボットミドルウエアの IROS を開発した Willow Garage は解散したが、多くのエンジニアが Suitable Technologies に移籍し、移動式ビデオ会議システムといえるテレプレゼンスロボット Beam+が 10 万円程度で販売され注目されている。

2013 年 9 月ロボット革命実現会議が発足し、また、平成 27 年度予算として、次世代ロボ

ットに必要な人工知能やセンサーなどの中核技術を研究開発するための予算として 111 億円が計上されており、わが国でもサービスロボット市場形成に期待が集まっている状況である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2013 年に米国は From Internet to Robotics というロボティクスロードマップを発表したが、今後は、クラウドロボティクスの流れがさらに加速するであろう。Google が開発を進めるロボット用 Android、ソフトバンクが進めるインターネットを活用した感情認識ロボット Pepper の機能拡大など、今後、さまざまな動きが出てくることが予想される。

また、ロボットの個性化も進むと予想される。人型ロボットだけでなく、人の話し相手になる小型パーソナルロボット JIBO、在宅勤務している人が映し出されるテレプレゼンスロボット、救急活動に活躍するマルチコプター「ドローン」などが登場し、クラウドネットワークを通して、多くの場面で活躍する事が期待される。

（６）キーワード

Shakey、記号接地、HRI、認知発達ロボティクス、クラウドロボティクス、言語接地、共創知能システム、次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト、人ロボット共生学、RoboCup、パロ、HRP シリーズ、生活支援ロボット安全検証センター、Robovie シリーズ、Pepper、SA アーキテクチャー、ヒューマノイド Cog プロジェクト、ルンバ、JIBO、Kiva、DARPA ロボティクスチャレンジ、SCHAFT 、RoboEarth、NAO、ロボット革命実現会議、From Internet to Robotics

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	共創知能システム、次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト、人ロボット共生学、RoboCup、
	応用研究・開発	◎	↗	ATR、産総研、エミュー2(日立)、ロボット革命実現会議
	産業化	○	↗	パロ、Nextstage、介護ロボット、Pepper
米国	基礎研究	◎	↗	From Internet to Robotics
	応用研究・開発	◎	↗	Google
	産業化	◎	↗	ルンバ、Baxter、Kiva、Suitable Technologies
欧州	基礎研究	◎	↗	Robert, cube
	応用研究・開発	○	↗	EU FP7
	産業化	○	→	NAO
中国	基礎研究	△	→	画像処理研究が多い
	応用研究・開発	○	↗	タコ型ロボット（上海交通大学）、 可佳（中国科学技術大学）
	産業化	○	↗	愛楽優（ILU）(紫光優藍)
韓国	基礎研究	△	↗	ロボット未来戦略
	応用研究・開発	△	↗	ロボット未来戦略
	産業化	○	→	DARWIN

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 石黒浩，宮下敬宏，神田崇行：コミュニケーションロボット―人と関わるロボットを開発するための技術，オーム社（2005）
2) 浅田稔：ロボットという思想~脳と知能の謎に挑む，日本放送出版協会（2010）
3) R. Pfeifer, J. Bongard 著，細田耕，石黒章夫訳：知能の原理 ―身体性に基づく構成論的アプローチ―，共立出版（2010）
4) 谷口忠大：コミュニケーションするロボットは創れるか―記号創発システムへの構成論的アプローチ，エヌティティ出版（2010）
5) 今井むつみ，佐治伸郎編：言語と身体性（岩波講座 コミュニケーションの認知科学）,岩波書店（2014）

6) 麻生英樹: 確率モデルからの記号の創発, 人工知能学会誌, 27 巻 6 号, 546-554 (2012)
7) http://www.robocup.or.jp/original/about.html
8) http://www.nedo.go.jp/content/100509656.pdf
9) http://www.aist.go.jp/pr2004/pr20040917_2/pr20040917_2.html
10) ロボット革命を駆動する産総研のテクノロジー, 産総研 TODAY, 14 巻, 11 号 (2014)
11) http://www.irc.atr.jp/research_project-2/unr/shopping/
12) http://j-net21.smrj.go.jp/develop/digital/entry/001-20130925-01.html
13) http://www.honda.co.jp/ASIMO/history/honda/index.html
14) http://www.sony.jp/products/Consumer/aibo/index.html
15) http://nextage.kawada.jp/
16) R.A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23 (1986)
17) http://www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/kismet/kismet.html
18) http://www.ai.mit.edu/projects/sociable/baby-bits.html
19) http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1407/17/news057.html
20) Luc Steels: Grounding Language through Evolutionary Language Games, In Luc Steels and Manfred Hild (Eds.), Language Grounding in Robot (2012)
21) http://roboearth.org/
22) https://robotics-vo.us/sites/default/files/2013%20Robotics%20Roadmap-rs.pdf
23) 爆発前夜 ロボット社会のリアルな未来、日経 BP ムック、日経 BP 社 (2014)
24) 今日から始めるロボット事業、月刊事業構想 2015 年 1 月号、事業構想大学院大学出版部 (2015)

３．７．６　統合的人工知能

（１）研究開発領域名

統合的人工知能

（２）研究開発領域の簡潔な説明

人間の問題解決タスク（例：大学入試問題、司法試験問題）をベンチマークとした統合的人工知能の研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間並みの問題解決能力をもつ人工知能の実現は、人類の夢の一つであると同時に、複雑化した高度情報化社会において効果的な問題解決を行うための強力な武器となる。1980 年代以降、人工知能の研究は諸分野（音声処理、自然言語処理、画像処理、ゲーム、形式論理、機械学習など)、さらには個別タスク（音声認識、ウェブ検索、機械翻訳、画像分類、顔認識、チェス、将棋など）に細分化され、現在は大規模データを用いた機械学習により個別タスクは実用レベルまで高度化されつつある。一方で、「人間らしい統合的問題解決能力」の探求は忘れ去られてきたのが実情である。

人工知能の研究が個別タスク主導となった背景には、個別タスクであれば実用化の希望があり、個別タスクを結合すれば人工知能が実現できる、という仮定がある。今のところ前者はある程度正しいといえるが、後者については全く見通しが立っていない。個別タスクをどうやって結合するのか、現在のタスク設定は人間の問題解決能力を十分カバーしているのか、全く不明である。個別タスクを追及するだけでは人間らしい問題解決能力の実現は期待できず、統合的人工知能の実現を目指す新たな枠組みが必要である。

細分化した諸分野・個別タスクを横断し統合的人工知能の研究を推進するためには、多様な問題解決技術を統合しなければならないベンチマークを設定することが必要である。近年、IBM Watson や国立情報学研究所人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか？（略称：東ロボ)」といった人間を対象とした問題解決タスク（クイズや大学入試）をベンチマークに設定したプロジェクトが現れ始めていることは注目すべきである。クイズや大学入試は人間の知的能力を測定するために注意深くデザインされたタスクであり、人間社会で求められる多様な知的処理・問題解決能力が盛り込まれている。主に自然言語で出題されるため自然言語処理は必須であるが、現在主流の浅い解析技術（検索や情報抽出）だけでは正確に答えることはできない。自然言語の深い意味理解、知識に基づく論理的推論や数学的推論、さらに入試問題では図、グラフ、写真などで与えられた非言語情報を統合的に理解し、答えを導かなければならない。このように多様な人工知能技術を内包する複合的タスクである一方で、だれもが納得する答えが存在することが保証されているため、ベンチマークとして客観的評価がしやすいメリットもある。また、一般社会に対してアピールしやすいことも特筆すべきである。東ロボは 2013 年、2014 年に大手予備校によるセンター模試をベンチマークとするタスクを公開、文系 7 科目において偏差値 47 をマークし、私立大学 8 割以上について合格可能性 80%以上との判定を得て国内外で大きく報道された。これに触発される形で、司法試験や医師国家試験を題材に、自然言語処理と知識に基づく論理的推論を融合する試み等が提案されている。

世界的には、ビッグデータをはじめとして大規模データを対象とした研究が主流である。本研究開発領域はこの流れとは対照的な関係にあるといえる。大規模データを活用するアプローチは、コンピューターの圧倒的な計算能力を生かして人間では実現できない価値創造を目指している。一方、本研究開発領域は、対象とするデータ空間は必ずしも大きくないが、人間に匹敵する統合的かつ深い理解を実現することを目的としている。ここで開発する技術は知識の大きさには本質的に無関係であり、大規模データに基づく技術と統合することで新たな価値創造の道が開けると期待される。

自然言語、画像、その他多様な情報の深い理解に基づき問題解決を行う技術は、人間社会において限りない可能性を秘めている。現代社会におけるほとんどの知的活動が包含されるといっても過言ではなく、その応用先は、企業活動、ヘルスケア、研究開発、政策決定などさまざまな場面における問題認識・解決や意思決定にわたる。無論、新しいアイデアを生み出す創造性や、想定外の問題を柔軟に解決する能力は本研究領域でカバーできるものではない。しかし、基本的な情報分析や複雑な情報下での問題解決は統合的人工知能でサポートされるため、人間はより創造的な知的活動にフォーカスすることができる。

統合的人工知能の実現は、細分化・複雑化する科学技術研究自身にとっても有用である。人工知能に限らず現代の科学技術研究は細分化が進み、個々の研究成果の意義や価値が見えづらくなっている。統合的人工知能を応用することで、膨大な学術論文や特許文書から個々の研究の意義や価値を客観的に認識・理解することができる。ある分野における技術を効率的に他分野・実応用へと拡散することができ、研究活動の成果を最大化するための新たな枠組みとなると期待される。これは、トップダウンのリソース集中投下によって技術シードの育成を狙う従来型のハイリスクな科学政策と好対照をなすものである。

このような技術の重要性は欧米ではすでに認識されており、実際、ビッグデータに関するプロジェクトと並行して自然言語などの深い意味理解を目指す大規模プロジェクトが推進されている。米国 DARPA では、自然言語や画像の深い意味理解技術の研究開発に対して大規模な予算が割り当てられており、欧米の有力研究グループの多くが参画している。また IARPA では、深い言語処理技術の応用として世界中の学術論文や特許文書から技術動向を発見し、効率的な技術移転を目指すプロジェクトが進められている。欧州では EU/EC による大規模なファンディングが行われており、The Seventh Framework Programme (FP7) では言語解析技術 (Language Technology) が 1 項目にあげられ、自然言語を中心とした深い意味理解の研究に対して大規模な予算が割り当てられている。また、欧米ではヘルスケア分野や生命科学分野の質問応答やテキストマイニングの研究が盛んであり、多くのベンチャー企業が生まれ、一つの産業領域となりつつある。実際、IBM Watson は医療診断や市場分析への応用のために大規模投資を行っており、具体的応用において成果を挙げつつある。IBM Watson 以外でも Apple の SIRI、NTT ドコモのしゃべってコンシェル、ソフトバンクのパーソナルロボット Pepper など、人間的インターフェースに基づく問題解決技術の研究開発が目立っている。

（４）科学技術的・政策的課題

・大規模テキストデータからの知識獲得技術が成熟しつつあり、大規模な言語知識、常識的知識、その他知識リソースが整備されつつある。しかし、これらの知識を組み合わせて意

味理解や問題解決を行う枠組みは全く未開拓であり、現在のボトルネックである。
・自然言語処理、画像処理、形式論理、定性的・定量的推論、知識処理、数式処理、会話理解など関連分野はほぼ分断されている。一般性を保ちつつこれらの分野を横断・統合する枠組みは全く未知の領域である。
・現在の人工知能技術はタスク依存的に開発されており、個別タスクごとに技術やツールが実装されている。基盤技術がさまざまな分野に応用されるためには技術やツールの再利用性を高めることが必要である。例えば IBM Watson では要素技術はすべて UIMA (Unstructured Information Management Architecture) Framework に統合され、さまざまなツールの接続や再利用が容易に行えるような設計がなされている。
・想定される応用の一つである医療診断や法的判断は、人間による判断を前提として法整備が行われているため、実際の利用には規制の見直しや責任の所在の明確化が必要である。特に統計的手法を多用する人工知能技術に関しては、エラー分析の手法を充実させ、機械学習に基づく判断に伴うリスクに関する研究を深める必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・自然言語解析は長年困難な問題であったが、現在は高精度な構文解析が実現され、述語論理や談話表示理論に基づく意味表現が高精度で計算できるようになった。これら基盤技術の向上により、機械翻訳などの応用技術の性能が飛躍的に向上している。
・構造的機械学習、ベイズ統計に基づく教師なし・半教師あり学習、深層学習など、機械学習理論の高度化により、曖昧性の困難に対する効果的な解決策となりつつある。
・以前にも増してウェブ上のデータが多様化・大規模化している。Wikipedia や Twitter など、非均質なテキストだけでなく構造化された知識や非言語情報がより整理された形で入手できるようになり、これらを活用して大規模知識を学習する手法が提案されている。
・深い意味理解に基づく統合的人工知能技術は、複雑化するいっぽうの現代社会において客観的かつ効果的な問題解決をサポートすることが期待される。期待される応用先として、現在は人間のエキスパートに依存せざるをえない高度な情報分析・判断がある。医療診断や法的判断のように古くから人工知能の応用とされているものに加え、細分化・複雑化した学術研究の成果の効率的な把握・利用、多様な利害関係の中でコストと利得を客観的に考慮する政策判断、といった応用が考えられる。
・IBM Watson プロジェクトでは、深い自然言語解析や機械学習を応用することで、米国の人気クイズ番組 Jeopardy!において歴代チャンピオンに勝利するという快挙を成し遂げた。クイズという極めて限定されたタスクであるが、完全にオープンかつ非構造的知識を人間を超える速度・精度で検索できる技術を実現した。現在は医療診断や市場分析への応用が進められており、大規模な投資が行われている（10 億ドル)。クイズという実用性が明らかでないタスクを設定しながら、そこで開発された技術が極めて実用的な応用に有用であることを示している。
・DARPA は以前から機械翻訳に対して大規模なファンディングを行っている(現在は年間 6000 万～7000 万ドル)。特に最近では深い自然言語処理（Deep NLP）が一つのテーマとなっており、2013 年からは Deep Exploration and Filtering of Text (DEFT) プロジェクトが始まる予定である。これは、深い言語理解と人工知能技術を統合することでテキスト

に暗黙的に書かれた情報を獲得することを目指しており、下記の Machine Reading Program とあわせて、テキストの深い理解を目指す研究が集中的に進められている。

・DARPA の人工知能関連のファンディングにおいても、自然言語や画像の深い意味理解が重要な目標に位置付けられている。Machine Reading Program（年間 2000 万ドル）は、コンピューターがテキストを読み、自動的に知識を蓄積することを目指すプロジェクトである。Mind's Eye Program（年間 1600 万ドル)は、画像からイベントを認識しイベントに関する質問応答技術を構築することを目指しており、画像と言語をつなぐ点でも興味深いプロジェクトである。

・IARPA は深い言語処理技術の応用として Foresight and Understanding from Scientific Exposition Program（FUSE）を推進している。このプロジェクトは世界中の学術論文や特許から科学技術の動向を自動的に発見することを目指しており、深い言語理解と大規模テキスト処理を融合した応用の可能性を示している。

・EC の The Seventh Framework Programme（FP7）では、2011 年に自然言語解析技術（Language Technologies）を Work Program の一つにあげており、年間 5000 万ユーロの予算を割り当てている。代表的なプロジェクトとして、欧州地域のさまざまな言語リソースや言語解析ツールを相互運用することを目的とした META-NET、欧州言語を中心とした機械翻訳の大規模プロジェクト EuroMatrixPlus、世界的に使われている統計的機械翻訳ツール Moses の研究開発プロジェクト MosesCore などがあげられる。

・Apple の Siri、NTT ドコモのしゃべってコンシェル、ソフトバンクの Pepper など、一般ユーザー向けの産業でも自然言語インターフェースが実用化されつつある。技術的には従来の質問応答や音声認識を応用したものだが、一般向けに提供できるまでに高精度化・安定化を実現している。今後、モバイルデバイスの普及にともない同様のサービスが世界的に求められると考えられる。

・2011 年から国立情報学研究所が人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか？」を推進している。目標タスクとして東大入試を設定し、自然言語理解に加えて画像、グラフ、数学的知識、オントロジーなどさまざまな情報を統合的に利用して問題に解答する技術の開発を進めている。自然言語の深い理解に加えて多様な知識の統合的利用を目指す試みであり、今後の進展が注目される。

（6）キーワード

人工知能、自然言語処理、画像処理、知識処理、数式処理、深い意味理解

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか？」は、自然言語、画像、数式など多様な知識を統合して問題解決を行う技術の開発を目指しており、統合的人工知能のグランドチャレンジとして注目される。 ・深い自然言語処理や意味理解の研究は研究室レベルでは行われているが、大規模プロジェクトは上述のもの以外にはない。 ・大規模テキストからの知識獲得の研究は世界をリードしており、ALAGIN Forumを中心に日本語の知識リソースは英語に次いで整備が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	・NICTが開発したWISDOM、東北大学の言論マップなど、深い自然言語処理を応用した情報分析システムが開発されている。これらの実応用を目指して耐災害ICT研究センターが設置され、応用研究が進められている。
	産業化	○	→	・NTTドコモのしゃべってコンシェルは、音声認識と質問応答を応用した代表的なサービスであり、AppleのSiriと並んで注目を集めている。 ・機械翻訳の研究や産業化は欧米と並んで世界をリードしていたが、近年は欧米と比べて研究規模が小さく、後れをとっている。
米国	基礎研究	◎	↗	・米国は情報技術や人工知能の研究において世界をリードしているが、深い言語理解や意味理解の研究についても、DARPAやIARPAの大規模予算に支えられ多くの有力研究グループにより先進的な基礎研究が行われている。 ・DARPAによるMachine Reading Program、IARPAによるMetaphor Programなど、深い言語処理・意味理解を目指す大規模プロジェクトが複数進められ、産業応用を視野に入れた研究が行われている。 ・2013年から、深い言語理解と人工知能技術を統合しテキストに暗黙的に書かれた情報を獲得することを目指すDEFT Program 1 やProject Aristoが開始された。上記のプロジェクトとあわせて、統合的人工知能の研究がさらに進展すると考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	・DARPAにおいて機械翻訳はICT分野の四つのプログラムのうちの一つであり、大規模予算のもとで音声翻訳からインフォーマルテキストの翻訳まで幅広い研究開発が行われている。 ・IARPAは深い言語処理技術の応用として、世界中の学術論文や特許から科学技術の動向を自動的に発見することを目指すFUSEプロジェクトを推進している。深い言語理解と大規模テキスト処理を融合した一つの応用を提示している。 ・医療や生命科学分野を中心に、今までの検索・質問応答を超えた深い情報抽出や推論を行う技術の研究開発が行われている。
	産業化	◎	↗	・IBM Watsonを医療診断や市場判断へ応用するために大規模な投資が行われており、すでに具体的成果を挙げつつある。また、自然言語テキストや画像の意味解析によりさまざまなサービスを提供するベンチャー企業が多数生まれており、産業化が急速に進んでいる。 ・Appleが発表したSiriのように、自然言語インターフェースで機器操作や質問応答を行うソフトウエアが実用化され、注目されている。同様のスマートフォンアプリがさまざまな企業から提供されている。

欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州は多言語コミュニティーであるため、言語解析の研究に対してEU/ECを中心に多くのファンディングがあり、基礎研究のレベルは高い。 ・2011年に設定されたFP7 Work Programmeでは、Language Technologyが1項目にあげられている。大規模予算が割り当てられ、自然言語処理を代表する多くのプロジェクトが推進されている。 ・言語処理や深い意味理解に対してはEU/EC以外にもドイツとイギリスを中心に大規模予算が割り当てられており、活発な研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	・FP7の元で進められているEuroMatrixPlusは、欧州言語を中心とした機械翻訳の大規模プロジェクトで、世界の機械翻訳研究をリードしている。FP7では他にも機械翻訳に関する研究がサポートされており、例えば世界的に使われている統計的機械翻訳ツールMosesの開発プロジェクトがある。 ・医療および生命科学分野を中心に、複数の研究機関でテキストマイニングや高度な情報抽出の研究が行われている。
	産業化	○	↗	・機械翻訳支援やローカライゼーションは多国籍企業を中心に需要が高く、多くの企業が参入している。大学などの研究機関との連携も盛んに行われている。
中国	基礎研究	○	↗	・検索や自然言語処理の研究は盛んに行われているが、大規模データに基づく機械学習を応用したものが主であり、深い意味理解や統合的人工知能を目指す基盤研究は少ない。 ・国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクトを参考にして、大学入試等のベンチマークを設定した人工知能プロジェクトを立ち上げる動きがあり、今後研究が活発化する可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	・大学や企業の研究グループを中心に検索や自然言語処理の研究が盛んに行われており、特にウェブ検索や機械翻訳などでレベルの高い研究が見られる。国際学会におけるプレゼンスも年々高くなっている。
	産業化	○	↗	・Microsoft Research AsiaやBaiduでは検索と自然言語処理の研究に多くの投資がされており、レベルの高い研究が行われている。Academic Searchなどテキストマイニングを応用した実用サービスがすでに行われており、言語処理技術を応用したより高度なサービスが提供される可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↗	・KAISTのNLP labやSemantic Web Centerなど、自然言語処理や知識処理を研究しているグループは複数あるが、欧米や中国と比べるとかなり少ない。 ・統合的人工知能やそれに基づく質問応答技術の研究開発を目指すプロジェクトを立ち上げる動きがあり、今後研究が活発化する可能性がある。
	応用研究・開発	△	↗	・医療や生命科学分野におけるテキストマイニングの研究が活発に行われている。例えば、KAISTでは生命科学論文から自動的に知識を獲得するプロジェクトが推進されている。今のところ情報抽出やテキストマイニングの応用にとどまっているが、より深い処理の応用が今後見られる可能性がある。
	産業化	△	→	・情報産業は活発であるが、深い意味理解や統合的人工知能を応用する動きは見られない。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) DARPA Information Innovation Office.　http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/.
2) Strassel, S., et al. The DARPA Machine Reading Program - Encouraging Linguistic and Reasoning Research with a Series of Reading Tasks. LREC 2010.
3) Foresight and Understanding from Scientific Exposition （FUSE） Broad AgencyAnnouncement （BAA）. http://www.iarpa.gov/solicitations_fuse.html.
4) Understanding the Seventh Framework Programme. http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm?pg=understanding.
5) EC ICT Work Program.　http://cordis.europa.eu/fp7/ict/.
6) The DeepQA Project.　http://www.research.ibm.com/deepqa/deepqa.shtml.
7) 新井, 松崎. ロボットは東大に入れるか 国立情報学研究所「人工頭脳」プロジェクト. 人工知能学会誌. （2012）

３．７．７　汎用人工知能

（１）研究開発領域名

汎用人工知能

（２）研究開発領域の簡潔な説明

汎用人工知能は、人間のように十分に広範な適用範囲と強力な汎化能力を持つ人工知能の開発を目指す領域。従来は困難と見られていたが、最近の深層学習技術の進展などを契機として今後のイノベーションが期待される領域である。本技術は任意の分野に適用可能であり、そこでの研究開発を加速することで、結果として経済成長および生活レベルの向上に大きく資する。そして今世紀半ば頃には、人間個人の知能全般を凌駕し、われわれの生活を支える生産者とその管理者の役割をおおむね担う技術となる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

人間の知能を包括的に凌駕する人工知能技術は、人類社会の多岐にわたる生産活動・科学技術研究・問題解決等において、人間の活動を代替し効率化できる。汎用人工知能は、こうした人工知能を実現するために、人が経験を積むことでさまざまな課題やタスクに対処できる汎用能力をもたせることを目標とする研究開発領域である。なお 1960 年頃の黎明期における人工知能研究は、楽観的に上記のような汎用の知能技術を目指したが、その実現は容易ではなく、現在実用化されている人工知能は特定の問題領域に限定されて使用される「特化型人工知能」である [1)2)]。

比較的短期間に想定しうる汎用的な知能技術の意義とは何だろうか。明らかに、汎用技術に対して領域に依存した何かを付け加えれば、専用技術は常に汎用技術を性能面で上回れる。しかし開発や運用等のコストを考慮すればその形勢は逆転する。例えば今日、日本語ワープロソフトに特化した配列をもつキーボードを選ぶ人はいない。多様なニーズにとって十分な性能をもつ汎用技術が存在すれば、しばしば専用技術は駆逐される。今後、ホームロボットにおける複雑な行動決定を担う知能ソフトウエア開発等において、汎用人工知能は威力を発揮すると予想される。こうして汎用人工知能は、広範な知能技術開発のためのインフラ（OS のようなもの）になってゆくため、この分野で後れを取ることは、将来あらゆる分野の知能技術開発において不利になると思われる。

長期的には、今世紀の半ば頃に想定される汎用人工知能の実現は、実質的に人間レベルを超えた人工知能に直結する。なぜならば、すでに多くの特化型人工知能の能力は個別には人間を超えており、現状の人工知能に最も不足している能力がさまざまな問題領域に柔軟に対応する汎用性だからである。いったん、人間レベルの人工知能が作られれば、それ自身を使って新たな人工知能を設計・製造（再帰的自己改修）することが可能になる。すると生物の進化とは比較にならない速度で自己再帰的に発展し、人類がこれまで行ってきたペースに比べると格段に速い速度で、知を蓄積することができる。この大きな変化は、しばしば「技術的特異点（Technological Singularity）」と呼ばれる。

つぎに歴史的経緯を追って、今日、汎用人工知能が再度注目されつつある背景を説明する。このためにはまず、あらゆる人工知能システムにおいて、適用する問題を記述する何らかの

知識表現を設定し、その上で知識表現上のデータを用いて推論や予測を行う必要があることを知っておく必要がある。

初期の人工知能研究は、ゲームなどのトイプロブレムを題材として主に推論技術の開発に力が注がれたため適用範囲が非常に限定されていた。 1980 年代に入り、主に専門家が記述した知識に基づいて推論を行うエキスパートシステムがブームとなった。しかし専門家が知識を明示的に書き下しうる問題領域は限定的で、知識の設計や更新（特に変化の速い分野で）のコストが大きいという知識獲得のボトルネックがあった。このため従来の人工知能は、設計者が扱い得る程度に限定された範囲で機能する「特化型人工知能」にならざるを得なかった。最近の 20 年間を通じて、インターネットによる知識の共有や、オントロジーによる記述表現の体系化などによりこの問題は大幅に改善され、IBM のワトソンがクイズチャンピオンを打ち負かすなど、特化型人工知能はその成熟の度合いを高めてきた。しかし最終的には、人間が知識を記述しなければならないという意味でのボトルネックは解消されていなかった。この課題に対して近年、大脳新皮質の計算機構を模した深層学習と呼ばれる汎用性の高いパターン認識技術（機械学習技術）が現れた [3]。この技術は、データから表現を生成する、表現獲得課題に対して大きな可能性を示した点において、人工知能におけるクリティカルなイノベーションである。 現時点においては深層学習の表現獲得能力は、主に知覚処理でその有効性が示されている段階であり、静的かつ単一のモダリティ（例えば静止画など）しか扱うことができない。今後、ロボットなどの制御に本格的に適用してゆくためには、複数の情報モダリティーを扱えるように、また時系列情報を扱えるように拡張された機械学習技術を開発してゆく必要がある、さらに言語処理や意味処理レベルにおいて人間を凌駕する機能を発揮するには［今後必要となる取組み］で述べるような記号接地に関わる課題を克服する必要がある。そうでありつつも、今後さらに深層学習技術を進展させながら、多様な既存技術と統合することで、汎用人工知能が実現される可能性は必ずしも否定できない段階といえる。こうした技術状況に鑑み、汎用人工知能の研究を本格的に進める時期に来ている。

なお、問題領域ごとの特化型人工知能を積み上げることで、あらゆる問題領域に対応しうる人工知能を実現するアプローチも広い意味での汎用人工知能ということもできる。このアプローチは本報告書における統合型人工知能（3.7.6)に近く、長大なスイッチ文（Big switch statement)と呼ばれることもある。これに対して、ここで取り上げる汎用人工知能は、設計者があらかじめ想定していないタスクに対して柔軟に適応する能力を持たせることを目指すため、特化型人工知能とは一線を画し、その開発とは本質的に異なっている。

［これまでの取組み］

汎用人工知能を目指す技術のいくつかのアプローチについて述べる。

認知アーキテクチャー

外界から情報を取り入れて、何らかの意味で適切な意思決定や行動や制御（もしくはその支援）を行うための認知アーキテクチャーの研究がある。認知アーキテクチャーでは、人間の総合的な認知機能をモデル化しており、人工知能の創成期よりさまざまなモデルが研究・開発されており次のようなものがある。

カーネギーメロン大学の John Anderson らによって作られた ACT-R [4]では、人間の認知機能を外界のオブジェクトを認識するための視覚モジュール、目標と意図を記録している意

図モジュールなどに分解し、それらが協働することによって、人間と同じような機能を実現する。記号ベースの伝統的なアーキテクチャーとしてはこの他に、Soar、ICARUS、PRODIGY などが有名である。なお従来は、心理実験などを通して、認知アーキテクチャーの妥当性が測られることが多かったが、近年の脳計測技術の発展により、脳を直接分析することで認知アーキテクチャーを構成しようとする、生物からヒントを得た認知アーキテクチャー(BICA: Biologically Inspired Cognitive Architectures)も注目を浴びており、代表的なアーキテクチャーとして LEABRA、Micro PSI、LIDA 等がある[5]。

認知ロボティクス

汎用人工知能を実現するために、人間の身体性の観点からアプローチする研究である[6]。人間のような知能をもつ機械を作るためには、ロボットに人間並みの汎用的な知能をもたせることであり、そのためには汎用人工知能の研究を伴う。このような研究分野は、認知（発達）ロボティックスと呼ばれている。ロボットは、知識や能力が組み込まれていない状態で、ある環境下に置かれ、そこから世界を探索することによって、うまく動作できるようになっていく。そのような機構を研究することがこの分野での焦点となる。欧州における iCub (http://www.icub.org/)等が知られている。

機械学習

汎用人工知能へのアプローチとして、学習からのアプローチも重要である。機械学習は、人工知能研究の中心トピックとして、近年、特に注目を浴びている（前述した、深層学習もその一つ)。機械学習技術が実用的になった理由の一つは、多様な現実的なデータが収集され、容易に利用できるようになったことである。それにより、さまざまな事象の間の微妙な関係性を機械が取り扱うことができるようになった。

［今後必要となる取組み］

汎用人工知能の実現に向けて、今後さらに必要となる取り組みは多岐にわたるが、以下では、不可避と思われる重要な研究開発項目として四つあげる。

領域固有知識の学習技術

すでに述べたように、特化型人工知能が実用的な性能を持つことを踏まえれば、その性能を支えるのは問題領域ごとに個別に存在する領域知識である。それゆえそうした領域知識自体を自動獲得する技術の開発を進める必要がある。このためにはより汎用的な事前知識と入力データから領域固有知識を学習する必要がある。

この種の先進的研究として例えば、時間変化の小さな特徴量を抽出しようする Slow Feature Analysis や、視覚的な不変性（回転不変性／並進不変性）を担う表現等を獲得する等価性構造抽出、Group Invariant Representation といった技術、さらに深層学習の表現獲得能力を拡張する方向が考えられる。

記号接地問題の解決

汎用人工知能はデータから得られた知識表現を、言語的なシンボルに結びつける記号接地の問題を解決する必要がある。現段階では、画像情報に対する深層学習により個物についての概念を得ることには見通しが得られた。しかし人間が扱う言語のレベルに到達するには、少なくともさまざまな物理的関係（時間、空間など)、概念間関係（クラスとインスタンス、カテゴリー等）などを含む多くの関係概念を利用できる必要がある。よって作りこむ事前知

識を適切な範囲に限定しつつ、関係概念を獲得する技術開発が必要となる。

脳に学んだ認知アーキテクチャー

人工知能技術では、本来的には人間の脳を参考にする必要はなく、脳の模倣は時として足かせにもなる。しかし人間のレベルを凌駕するまでの人工知能技術開発においては、技術的な突破口をえるためのヒントが脳から得られた実績は有り、今後も期待される。特に今日、神経科学が長足の進歩を遂げ、膨大な知見が蓄積されつつある背景を考えれば、そこから得られる情報処理に関わるエッセンスを効果的に拾い上げる仕組みが必要である。このために人工知能と神経科学などの分野の情報交換を活性化しうる研究所の設立、さらには人工知能研究者が膨大な神経科学の知見を情報処理機能の側面から総合的に理解・整理する事を可能とするニューロ・インフォマティクスの開発が望まれる。例えば神経科学の知見についてのIBM ワトソンのような質問応答システムの出現が望まれる。

また認知アーキテクチャーは、歴史的には問題領域ごとに設計されてきたために、多種多様になってしまっている。人間のように、経験を積むことで汎用的な課題に対応できる能力をもたせる研究開発が必要である。こうした課題意識からわが国において 2013 年より活動が開始された全脳アーキテクチャー [7]は、急速に蓄積しつつある神経科学の知見をガイドとして、脳器官に対応する機械学習装置の統合を目指す国内の活動である。

汎用知能の評価基準の構築

特定の問題領域に特化した特化型人工知能であれば、基本的にその評価は特化した問題についてのパフォーマンスを測定すれば良い。しかし汎用人工知能の場合には事前には必ずしも想定されないさまざまな問題を解決する能力を評価する必要がある。複数の人工知能システムの性能を比較するには評価方法を何らかの問題に固定化したいが、固定化した瞬間にその問題に特化した特化型人工知能が有利になり、汎用性を評価できないというジレンマを抱える。こうした評価における困難さを克服するために、評価する時点まで詳細を明らかにしないゲームを用いてパフォーマンスを競ったり、人間の認知発達過程を追った研究開発ランドマークの設定などが行われたりしている [8]。

（４）科学技術的・政策的課題

この分野では特に2013年以降、潤沢な資金をもつ米国IT企業等が、世界中から好待遇で研究者を招聘して強力に研究を加速している。一方で国内の IT 企業等は、これらに対抗しうる状況にない。よって、将来において日本が世界的に主導的な地位を確保するためには、戦略的な政府支援が必要になる。

幸い日本には、20 世紀後半の人工知能やニューロコンピューティングのブーム時に実施されていた、第５世代コンピューターやリアルワールドコンピューティングなどの大型プロジェクトを通じた人材育成により、50～65 歳のシニアは層が厚く、国外への人材流出も少ない。技術的にみても、以前に開発されていた技術を、増大した計算リソースに組み合わせることで実効的な威力を発揮する例が多く、このシニア層に強みがある。例えば、近年成功した深層学習は、日本の福島邦彦氏が 1980 年台に、基本的アイデアを提案している。しかし現在、こうした研究者らは、国内の各所の大学などに分散しており密な連携ができないという現状がある。

一方で、21 世紀に入ってからは、基礎研究に関わる投資が減少し、45 歳以下の中堅では

国内の研究者層はやや薄い。また 30 歳前後の優秀な若手研究員の海外 IT 企業への人材流出が問題である。特に汎用人工知能は総合技術分野であるために、人工知能、機械学習、認知科学、発達科学、ロボティクス、さらには神経科学などといった多様な分野の知識を必要とするが、これらの分野を跨いだ知識をもつ中堅・若手研究者が少ないことが課題である。

研究ペースを最大限に加速して世界をリードすることを目指す方策としては、高価な実験装置等を必要としないこの分野において、多彩なタレントを持つハイレベルな研究者を集結させ（40 人程度)、日常的に議論を行える場を長期間安定して維持することがキーになる。このための具体案は、10 年程度の長期間にわたり国内トップレベルの研究者が集う、海外への交通アクセスの良い、世界的にみても求心力のある研究拠点を一気につくり上げ、その中で次世代を担う若手研究者を育成することである。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

プログラミングするプログラム(Seed AI)

優秀な人工知能研究者のレベルの創造性をもってさらに高度な人工知能をプログラミングできる人工知能が造られれば、人工知能自身による自己再帰的な改良が可能になる。そのレベルに達した最初の人工知能は、Seed AI と呼ばれ、その出現が技術的特異点の起点となる可能性が高い。1980 年代頃までに行われたプログラミングを行う人工知能研究はその後収束していた。しかし Google が買収した DeepMind のチームが本年 10 月に深層学習にメモリを結合した Neural Turing Machine を提案し、ソートアルゴリズムを自動学習しうることを示すなど、Seed AI につながりうる研究成果を示したことから、今後はプログラミング機能に注目した人工知能研究が再燃する可能性もある。

ニューロモーフィック・コンピューティング

人と同様な知能を創造するアプローチとして、学習機能を担う分子レベルを起点として、脳の神経回路をエミュレートする研究もはじめられている。これは、人間の脳の全てに対して再現を行う全脳エミュレーション（WBE: Whole Brain Emulation）と呼ばれ、実現に向けたロードマップも作製されている。この種の研究としては H. Markram の主導により欧州の Human Brain Project 内で大規模に進められている。関連して、脳をまねたニューロモーフィック・チップという計算デバイスは、1980 年台に提案されたが、近年、この分野の研究も再燃している。IBM が 2014 年 8 月に発表した非ノイマン型のアーキテクチャーを採用した TrueNorth チップは 100 万個のニューロン、2 億 5600 万個のシナプス（ニューロン間結合）を備えたニューラルネットワークとして機能し GPU と比べても低消費電力であるとのこと。

ヒューマノイドロボット

人間に近い環境で動作するヒューマノイド・ロボットは、汎用人工知能の応用先および評価プラットフォームとして有用である。欧州における iCub というオープンなロボットプラットフォームの開発はすでに 10 年目を迎えており、記号創発の研究プロジェクト ITALK project にも利用されている。また米国では人工的な感情に応じて顔の表情を詳細に再現できるヒューマノイド・ロボットを Hanson robotics が開発している。国内関連では 2014 年に、ソフトバンクモバイルとアルデバランロボティクスの共同開発により感情認識に力点をおいたヒューマノイド・ロボット Pepper が発表された。

関連組織の動向

国内では、2013 年より、汎用人工知能研究会が当分野の調査を開始しておりその成果をウェブページや人工知能学会などで発表している [9]。これと連携した前記の全脳アーキテクチャ勉強会はすでに 8 回の勉強会を開催し毎回 200 名近くの集客があり、若手の会も結成されるなど、この分野に対する興味の高まりを示している。

一方でこうした汎用人工知能と人類が歩んでゆくべき未来を見据えた活動としては、シンギュラリティ大学 , Future of Humanity Institute, Humanity+等がある。国内では 2012 年に W3C が主催するトポス会議で取り上げられ、人工知能学会が他分野の専門家も交えた倫理委員会の活動を開始したほか、AIR (Acceptable Intelligence with Responsibility) では人工知能が浸透する社会についての議論を行っている。

（6）キーワード

汎用人工知能、技術的特異点（シンギュラリティ）、人間レベルの人工知能、特化型人工知能、ノー・フリーランチ定理、事前学習、表現獲得、フレーム問題、記号接地問題、知識獲得ボトルネック、認知アーキテクチャー、機械学習、深層学習

（７）国際比較

「基礎研究」、「応用研究・開発」、「産業化」の３三のフェーズについて、現状およびトレンドを専門家としての見識に基づき、主観的に記す。また、これらの根拠について、エビデンスなどと併せて文章にて記す。日本、米国、欧州、中国、韓国について記載するが、他の国についても当該技術について重要な国については行を挿入して記載する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	AGI国際会議では１％程度の発表だが、かつての大型プロジェクト投資などを通じてシニア人材には強みがある。発達ロボティクスの研究の歴史も長い。また最近に入り全脳アーキテクチャ勉強会、汎用人工知能研究会などの活動も活性化。 また汎用人工知能の開発評価環境になりうるRobocup@Home研究も世界的に認知されている。
	応用研究・開発	×	↗	要素技術である深層学習の応用を目指するPreferde Networksが設立され、研究が加速されると思われる。
	産業化	△	↗	周辺技術として感情認識に力点をおいたPepperがソフトバンクモバイルらから発表された。ロボット革命の動きから、汎用人工知能への期待が高まると思われる。
米国	基礎研究	◎	↗	認知アーキテクチャーの実装や、理論の両面において研究が盛んである。AGI国際会議では4割の発表を占めやや伸びている。
	応用研究・開発	○	→	IBMによるSynapseプロジェクトや、DARPAを中心とした軍事利用にむけた認知アーキテクチャーなどの応用開発が進んでいる。
	産業化	×	→	要素技術としての深層学習は、GoogleやFacebookなどのマーケティングなどに利用されている。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州は理論的な研究に強みがありつつ、Micro PSIなどアーキテクチャーや、ITALKなどの言語獲得のプロジェクトもある。AGI国際会議の約半分の発表を占めているが、ここ数年の発表件数はやや低調気味。Human Brain Projectの主要出口は医療だが、知能技術についても一定の後押しがあり、今後はこの分野の研究もある程度加速すると思われる。
	応用研究・開発	×	→	Human Brain Projectで開発されるNeuromorphic Computingを利用した応用や開発の準備が進められている。
	産業化	△	→	特筆すべき産業化事例はみあたらない。
豪州	基礎研究	○	→	AGI国際会議の７％程度の発表をしめる。理論的研究に強みがあり、Googleが買収した英国のDeepMindとの繋つながりある。
	応用研究・開発	△	→	海馬のナビゲーション機能をヒントとして、ナビゲーションを行うRatSLAMという認知アーキテクチャーの研究などがある。
	産業化	×	→	特筆すべき産業化事例はみあたらない。
その他アジア	基礎研究	？	？	中国・韓国などを含めてAGI国際会議の４％程度の発表をしめるが、現段階では米国との共同で、研究が根をおろしている段階ではない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき応用研究・開発事例はみあたらない。
	産業化	×	→	特筆すべき産業化事例はみあたらない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ベン。ゲーツェル，“汎用人工知能概観，”，人工知能, vol.29, no.3, pp. 228-233, May, 2014.
2) 荒川直哉，山川宏，市瀬龍太郎，“汎用人工知能の研究動向，”人工知能学会全国大会(第 29 回), 2C4-OS-22a-1, May, 2014.
3) Yoshua Bengio, Aaron Courville, Pascal Vincent, “Representation Learning: A Review and New Perspectives”, IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 35, No. 8, pp. 1796-1828, 2013.
4) John R. Anderson, Daniel Bothell, Michael D. Byrne, Scott Douglass, Christian Lebiere, Yulin Qin, “An Integrated Theory of the Mind”, Psychological Review Vol 111, No. 4, pp. 1036-1060, 2004.
5) The Biologically Inspired Cognitive Architectures Society: http://bicasociety.org/
6) Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui,Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. 2009, Cognitive Developmental Robotics: A Survey. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development. 1(1), (MAY 2009), 12-34.
7) 全脳アーキテクチャ勉強会，http://www.sig-agi.org/wba/
8) アダムズ サム S.・アレル イタマール・バッハ ヨシャ・クープ ロバート・ファーラン ロッド・ゲーツェル ベン・ストアズ ホール ジョシュ・サムソノヴィッチ アレクセイ・ショイツ マティアス・シュレジンガー マシュー・シャピロ スチュアート・ソワ ジョン, 監訳：篠田孝祐,共訳：市瀬龍太郎・ラファウ・ジェプカ・寺尾敦・船越孝太郎・松島裕康・山川宏”，”人間レベルの汎用人工知能の実現に向けた展望,”人工知能, vol.29, no.3, pp. 234-250, May, 2014.
9) 山川宏他，“特別企画「シンギュラリティの時代:人を超えゆく知性とともに」，”人工知能学会誌, vol.28, no.3, pp.424-471, May. 2013.

３．７．８　認知科学

（１）研究開発領域名

認知科学

（２）研究開発領域の簡潔な説明

認知科学は人間、動物、機械、社会にさまざまな形で実現されている知の構造、機能、発生を扱う研究領域である。方法としては、心理実験、脳計測、コンピューターシミュレーション、統計解析、エスノグラフィーなど多様な方法を用いる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

歴史的背景

認知科学は 1950 年代後半に米国における認知革命をその起点とする。それ以前に主流であった行動主義は刺激と反応との間の関数関係の同定のみを行い、内的情報処理過程についての言及を避けてきた。しかしこの時期に G. A.Miller による短期記憶の研究、Chomsky による生成文法、A. Newell や H. A. Simon による問題解決の計算モデルなどの提案がこの時期に行われ、入力情報を加工、精緻化し、内的表象を作り出すものとして知性を捉える立場が一挙に普及した。

この後、認知科学は情報科学、特に人工知能との密接な関係を築き、人間の知性の基盤となる構造（アーキテクチャー）の解明、知識の表現と利用に関わる研究を、主に認知（知覚、記憶、言語、思考等）領域において行ってきた。この過程において、D. Rumelhart や J. L. McClelland によるニューラルネットワーク、認知神経科学、進化心理学、ロボティクスとの共同などを通して、その研究領域を拡大してきた。また、コンピュータービジョン、翻訳を含む自然言語処理、経済活動における意思決定、学校教育プログラム、ユーザーインターフェース分析、改善などに大きな影響を与えてきた。

近年の学術的動向

他研究領域との協働を行うことで認知科学はさまざまな展開を遂げた。これらの中で実社会での応用の可能性を含むものを四つ取り上げる。

1. 感情・情動的知性：

初期の認知科学では知覚、記憶、思考など知的機能の研究が焦点化されていたため、感情、情動を扱う研究は限られていた。しかし、神経科学および脳機能計測を含むさまざまな生体計測が用いられるようになり、この分野の研究は認知科学の重要な研究対象となった。その結果、感情、情動は決して認知と対立するものではなく、認知が適切に働くためのパートナーであることが徐々に明らかになっている(Damasio, 2003; 藤田, 2007; Ledoux, 1996)。

さまざまな感情状態と認知（知覚、記憶、思考）との間の関係の解明は、この分野の中心的な研究テーマである。ポジティブ状態（快、喜、楽など）の時には全体的、創造的な処理が促進される一方、ネガティブ状態（不快、悲、不安）の時には分析的、アルゴリズミックな処理が促進される。また JST 戦略的創造研究推進事業として展開された岡ノ谷情動情報プロジェクトでは、情動が伝える情報の規則性、その進化、発達過程が研究されている。特

に乳児の人見知り行動が伝達する情動情報、および謝罪が相手の攻撃性、不快感に与える影響などを生理指標を用いて検討した成果は注目を集めた。

2. 知の社会性：

近年、ヒトの知性、およびそれを支える脳の進化が、われわれ人間の社会性に由来すると言う考え方が広まってきている。つまりヒトの知性は比較的大きな社会集団においてその規範を守りつつ、協力し合うことから生じたという考え方である（苧阪, 2013; 開・長谷川, 2007; Tomasello, 2010）。

こうした流れは乳幼児発達研究、人の近縁種を用いた比較認知科学研究、また進化心理学、社会心理学分野の研究者と認知科学者との協働を促し、その知見は知の社会性という仮説の確実性を高めている。この分野、特に比較認知研究は、京都大学霊長類研究所、東京大学進化認知科学研究センターなど世界有数の研究機関を有する日本が国際的にも先導集団の一角を占めている

また、1990 年代から活発に進められている共同認知（collaborative cognition）も知の社会性を強く意識したものとなっている。ここでは人同士の共同が学習、問題解決にどのような影響を与えるのかをパフォーマンスレベルではなく、プロセスレベルで解明することに成功している（植田・岡田、2000）。この成果は 21 世紀型スキルの育成と深く関わる学習科学の理論的支柱の一つとなっている。また近年設立された MIT の Center for Collective Intelligence では、こうした知見をベースにしながら、新規で魅力的な商品開発や市場での成功を生み出す組織の知性の特性の解明も行っている。

一方、L. S. Vygotsky などの思想の流れを現代的に展開した状況的認知も認知の社会的側面を前提とした研究を勧進めてきた(Lave & Wenger, 1991）。この立場では共同体における人同士の関係のあり方、人と環境内の人工物との関係のあり方から、認知を捉えるという立場を取る。

3. 知の身体性：

従来、身体は脳、あるいは中央制御系のシステムの命令を受けて受動的に働く器官であると考えられてきた。しかし生態心理学、ロボティクスなどの研究領域との共同により、脳や中央制御系は身体の動きや働きを前提としたコントロールを行う、ある意味で折衷的な機能を果たしているに過すぎないという見解が主流である（Barrett, 2011; Pfeifer & Bongard, 2007）。

生態心理学の研究は、人間の行為を微視的に分析し、環境情報、各身体部位の協調関係を明らかにしてきた（佐々木, 2013）。またさまざまな環境下で運動、行為を行わさせつつその入力と運動情報を組み合わせながらシンボル、概念の学習を行う記号創発ロボティクス、乳児様のロボットにさまざまな経験をさせ、そこから人間の発達過程を探る認知発達ロボティクスなどが展開している（谷口, 2014）。加えて、視覚、聴覚等さまざまなモダリティーからの情報を統合する仕組み、それらが相互に与える影響を検討する多感覚統合研究は認知科学において急激に発展を遂げているが、これも知の身体性の流れの一つと考えられる（特集「多感覚コミュニケーション」、2011; Special Issue: Action and language integration, 2014）。

4. 知の創造と創発：

最後に知の創造と創発についての研究分野が挙げられる。知性は蓄えた知識を利用するだけでなく、与えられた環境の制約の中で、新たな知を絶えず作り出している。こうした活動が顕著な形で現れているのは、科学的な発見、工学的な発明、芸術、スポーツなどの分野においてである。これに加えて問題発見などの創造的能力を含む 21 世紀型スキルを育成する学習科学研究も展開している（Griffin、et al. 2011; 特集「批判的思考」、2012; 特集「ヒューマン・ロボットラーニング」、2012)。

この分野では実験室における研究、フィールド調査に加えて、脳計測、モーションキャプチャーなどの新しい技法による研究も行われている。この分野での研究センター、大型プロジェクトは存在しないが、日本の研究者は先端的な研究成果を残している。その結果、創造的活動においては、ローカルなレベルでの揺らぎが組織化され、システム的に共鳴する過程が含まれることが明らかになってきている。特に意識的な思考とは別の系の思考が先行的に働き、両者の相互作用が創造の核に存在するという知見が提出されている（特集『高次認知過程における意識的、無意識的処理』, 2013)。

諸外国に比べて研究活動が活発な領域である芸術の認知科学も、まさにこの知の創造と創発に深く関わる。この分野では、音楽、美術などに加えて、日本の伝統芸能の研究も活発に行われ、そこでは「息」、「間」など暗黙知とされてきたものへの科学的アプローチも始められている（特集「芸術の認知科学」， 2014)。

応用、社会との関わり

グローバル化に伴い、日本は戦後の労働集約的な産業形態から、知識集約型のそれへの転換が強く求められている。特に新たな価値を生み出すイノベーションのメカニズムの解明とそれを生み出す環境の設計は急務である。これについては経営学の一部の分野での研究がなされているが、基本的に事例研究にとどまっており、応用、再利用可能な形の知が蓄積されているとは言い難にくい。こうした現状を打破し、持続可能なイノベーション社会を築き上げるためには、人の思考、学習、発見についての認知科学の知見をベースにした、さらなる研究の展開が必要となる。

現代日本は超高齢化社会への突入に伴う問題（介護、認知症、独居老人等々)、また発達障がいの顕在化などさまざまな医療、福祉上の問題を抱えている。この分野の充実においても、認知科学の貢献は多岐に亘る。まず自閉症スペクトラムに代表される発達障がいについては、自己、他者認知について長年の知見を積み重ねてきた発達認知科学の知見が診断、支援に大きな役割を果たしてきたし、今後もさらにその役割は大きくなると考えられる(Baron-Cohen、1995)。また人とロボットの関係の構築についての研究を行ってきた HAI の研究は、介護の現場においての利用が期待されるロボットの開発にとって重要である（山田、2007)。

今後の教育に関する認知科学の役割は極めて大きい。特に新世代の持つべき能力として注目されている 21 世紀型スキルの育成については、問題解決、創造、批判的思考などについて蓄積を行ってきた認知科学の知見を抜きに進めることは困難である。またその教育の実施の形態についても従来の講義型の一方向的な伝達ではなく、学習の場のデザインを共創とい

う側面から探究してきた学習科学の知見も不可欠である。

日本は古来さまざまな文化のエッセンスを巧みに吸収し、独自の価値を持つ文化、芸術を生み出してきた。こうした文化、芸術の伝承、そして新たな創造は今後もその重要性を失うことはないだろう。認知科学ではデザインや芸術に関する研究が他国と比べても非常に活発に行われており、その研究コミュニティーも作り出されている（日本認知科学会における『デザイン・構成・創造』、 『芸術と情動』分科会等)。こうした知見を集約し、今後の展開につなげる取り組みが必要である。

（４）科学技術的・政策的課題

これまでに述べてきたように、認知科学がこれまでに蓄積した知見は産業、医療・介護、教育、文化・芸術などさまざまな分野の発展に重要な役割を果たす可能性がある。ただし、これらは認知科学内部だけで完結するものではない。関連分野との連携、協力が不可欠である。残念ながらこの連携、協力は現時点まで十分な形で行われているとは言えない。

そこでこの現状を改善し、関連分野との連携の強化を行い、今後の日本社会の維持、発展につなげるために必要な取り組みについて述べる。

イノベーションに向けた取り組み：日本企業の国際競争力を高め、付加価値の高いプロダクトを生み出すために、認知科学、心理学、経営学、企業の相互交流を促進するための研究プログラムの設置、また研究センターの設立が急務である。特に企業の中で育まれている潜在的な知、暗黙知を明らかにし、その構造、機能、発生、伝達を一貫した形で明らかにすることは科学的にも社会的にも重要性が高い。この取り組みにおいては、(3)で挙げた知の創造、創発の研究が大きな役割を果たすであろう。

教育改革に向けた取り組み：21 世紀型スキルの実質の解明および教育カリキュラムの策定のために、認知科学、学習科学、教育工学などの連携を強化する必要がある。従来の知識伝達型の教育から、知識創造の教育への移行のための教育の具体的な姿を明らかにするプロジェクトが必要である。効率的にたくさん覚え、それを上手に使うための教育だけでなく、新たなアイデアを生み出し、意外性に関する好奇心を持ち、適切な評価眼を備えた人材を作り出す必要がある。またこうした研究の展開は、新たな大学入学者選抜方法の策定にも極めて重要である。

超高齢化社会に向けた取り組み：高齢者の介護、リハビリ、社会適応を促進するために、認知科学、ロボット科学、医学、理学療法など関連分野の交流が必要である。ここでは単に自動化された、効率的な介護システムではなく、高齢者が安心し、豊かな生活をおくれる、温かいシステムの開発を目指すことが重要である。この取り組みにおいては、(3)で挙げた感情・情動的知性、知の身体性に関わる研究の役割が期待される。

芸術・文化を伝承、発展させるための取り組み：新たな価値の創出は産業界だけではなく、芸術、文化においても必要となる。この分野は各芸術領域の専門家の独占物となっているが、これをより活性化させ、次世代へとつなげる取り組みが必要であり、認知科学はその中核に位置すると考えられる。この取り組みにおいては(3)で挙げた知の創造、創発に関わる研究が大きな役割を果たす。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・社会脳：新学術領域研究『共感性の進化・神経基盤』（代表：長谷川寿一）では、共感に着目した人間の知の社会性を探究する試みが行われている。基盤研究（S）『社会脳を担う前頭葉ネットワークの解明』（代表：苧坂直行）では、前頭葉ネットワークに注目し、さまざまな脳計測手法を用いて知の社会性の解明のための研究を行っている。

・デザイン：新学術領域『認知的インタラクションデザイン学』（代表：植田一博）では、人間同士、人間と動物の相互適応のメカニズムの解明に基づき、ロボットや人工物のデザインへその成果を応用する取り組みを始めている。また科学技術振興機構の助成を受けた『みんなの使いやすさラボラトリー』（代表：原田悦子）では、さまざま人工物の使いやすさを高めるために、ユーザー心理、製品デザインの観点からの研究を進めている。またここでは新しい製品への適応に困難を覚えやすい高齢者を対象とした研究も行われている。

（６）キーワード

情動知能、知の社会性、知の身体性、創造と創発、イノベーション、21 世紀型スキル、文化と芸術、医療と介護

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↘	研究テーマが細分化する傾向にあり、「人間の知の理解」などの基礎的研究に取り組む研究者は少ない。
	応用研究・開発	○	↗	人間行動の理解（消費者行動や災害時の避難行動など）に基づく、サービス工学研究が立ち上がりつつある。
	産業化	○	→	工業製品のユーザビリティを反映した製品開発が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	認知科学は心理学や脳科学、工学の融合分野に位置づけられており、企業を含め基礎研究は充実している。
	応用研究・開発	◎	↗	脳活動を計測することで人間行動の情動面での理解を目指した研究が立ち上がりつつある。消費者の購買行動や政治活動（投票行動など）を脳活動から推測するニューロマーケティングが盛んになっている。
	産業化	◎	↗	認知科学的視点に基づくコンサルタント専門の企業も立ち上がり、製品展開している。
欧州	基礎研究	◎	↗	認知科学は特に医学分野との連携を深め、医療分野での基礎研究が盛んである。
	応用研究・開発	○	↗	自閉症の早期発見・治療プロジェクトを代表として、認知科学の成果を応用した治療法の開発が盛んである。
	産業化	△	→	基礎研究に重点が置かれ、特筆すべき産業化の事例は見当たらない。
中国	基礎研究	△	→	fMRIやPETを利用した脳機能計測に基づく認知科学的基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	×	→	ベンチャー企業を中心にさまざまな認知科学の知見を応用した教材や知育玩具は開発されているが、特筆すべき活動は見えていない。
	産業化	×	→	認知科学分野において特筆すべき、産業化の事例は見当たらない。
韓国	基礎研究	×	→	韓国科学技術院を中心に基礎研究が行われているが、特筆すべき活動・成果が見えていない。
	応用研究・開発	△	↗	自動車運転時の行動解析の大型プロジェクトが進行している。
	産業化	×	→	認知科学分野において特筆すべき、産業化の事例は見当たらない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 安西祐一郎他（編）(2014).『コミュニケーションの認知科学 1−5』岩波書店
2) Baron-Cohen, S. (1995). Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind. MIT.

3) Barrett, L. (2011). Beyond the brain: How Body and Environment Shape Animal and Human Minds. Princeton University Press.
4) Damasio, A. R. (2003). Looking for Spinoza: Joy, Sorrow, and the Feeling Brain. Harcourt.
5) 藤田和生（編） (2007). 『感情科学』京都大学学術出版会.
6) Griffin, P. et al. (Eds.) (2011). Assessment and teaching of 21st century skills. Springer.
7) 開一夫・長谷川寿一（編）(2009). 『ソーシャル・ブレインズ：自己と他者を認知する脳』東京大学出版会.
8) Lave, J. & Wenger, E. (1991). Situated learning: Legitimate, peripheral participation. Cambridge University Press.
9) LeDoux, J. (1996). The Emotional Brain: The Mysterious Underpinning of Emotional Life. Simon & Schuster.
10) 苧阪直之（編）(2013).『社会脳シリーズ 1-3』 新曜社.
11) Pfeifer, R. & Bongard, J. (2007). How the Body Shapes the Way We Think. MIT Press.
12) 佐々木正人他（編）(2013). 『知の生態学的展開 1−3』東京大学出版会.
13) Special Issue: Action and language integration: From humans to cognitive robots. Topics in Cognitive Science (2014). Vol. 6, No. 3.
14) Special Issue: The cognitive science of visual-spatial displays: Implications for design. Topics in Cognitive Science (2011). Vol.3. No. 3.
15) Special Issue: Collective behavior. Topics in Cognitive Science (2009). Vol. 1, No. 4.
16) Special Issue: Does cognition deteriorate with age or is it enhanced by experience? Topics in Cognitive Science (2014). Vol. 6, No. 1.
17) Special Issue: Music cognition and the cognitive sciences. Topics in Cognitive Science (2012). Vol. 4, No. 4.
18) 谷口忠大 (2013). 『記号創発ロボティクス』講談社.
19) 特集『デザイン学』日本認知科学会（編）(2010). 『認知科学』vol.17, No.3.
20) 特集『芸術の認知科学』日本認知科学会（編）(2013). 『認知科学』vol.20, No.1.
21) 特集『批判的思考』日本認知科学会（編）(2012). 『認知科学』vol.19, No.1.
22) 特集『ヒューマン・ロボット・ラーニング』日本認知科学会（編）(2012). 『認知科学』vol.19 No.3.
23) 特集『高次認知過程における意識的，無意識的処理』日本認知科学会（編） (2013). 『認知科学』vol.2 0, No.3.
24) 特集『社会性認知のメカニズム』日本認知科学会（編）(2011). 『認知科学』vol.18, No.1.
25) 特集『多感覚コミュニケーション』日本認知科学会（編）(2011). 『認知科学』vol.18, No.3.
26) Tomasello, M. (2010). The Origins of Human Communication. MIT.
27) 植田一博・岡田猛（編）(2000). 『協同の知を探る：創造的コラボレーションの認知科学』. 共立出版.
28) 山田誠二（編）(2007). 『人とロボットの間をデザインする』東京電機大学出版会.

3.8 ビジョン・言語処理

人間同士や人間と知能機械のコミュニケーションを行うための表現メディアの解析・理解、その検索・変換・編集、これらを支える知識情報処理に関する研究開発分野をビジョン・言語処理と呼ぶ。

人の知的な振る舞いをコンピューター上で実現することを目指す、いわゆる人工知能の研究は 1950 年代から始まった。しかし、視聴覚から入力される知の源泉となる情報、すなわち、映像・画像や音声言語・文字言語などの処理(ビジョン・言語処理)が極めて難しいことから、その研究は容易ではなかった。そのため、初期の人工知能研究は、意味や知識処理のモデルに関する議論や、チェスに代表されるような単純で明確な規則を持つ問題を対象とした。

これに対して、近年、コンピューター環境の劇的進展、ウェブを始めとする大規模データ、いわゆるビッグデータの出現、さらに、データに正解を与えて解析器を学習する機械学習の発展があり、初期には非常に困難であった物体認識、音声認識、構文解析など、ビジョン・言語処理の基本処理の精度が劇的に改善した。そこで、このような基本処理の上で、いよいよ意味や知識の問題に取り組めるようになり、本格的な人工知能の研究が可能となってきた。また、人の知的活動を支援し、さらには社会を変革する可能性のある応用システムも生み出されつつある。最近では人工知能の発展に対する懸念の声が聞かれるようになってきたほどであるが、これは主にビジョン・言語処理の進展に対するものである。

このような研究開発分野は前回の俯瞰報告書では区分「知能/インタラクション」の一領域であったが、当該分野の急速な進展を背景として、今回は「ビジョン・言語処理」という区分をたて、その中でいくつかの領域について報告を行うこととした。

ビジョン・言語処理のミニ俯瞰図を図 3.8.1 に示す。ビジョン・言語処理の基本処理においても、厳しい実環境、例えば強い雑音下の音声認識やネット上のくだけた言い回しの解析などにはまだまだ改善の余地がある。しかし、本報告書では、今後の社会へのインパクトや政策的課題などを考慮し、比較的上位レイヤーの研究開発領域について俯瞰を行った。

まず、意味や知識の取り扱いに関しては、文字言語、すなわちテキストの処理からアプローチしやすい。コンピューターによって大規模テキストから知識を抽出し意味解析を行うことは、膨大なウェブ情報の利活用支援にもつながる。このことから、「大規模言語処理に基づく情報分析」領域をたてた。さらに、言語処理の応用として、近年の発展がめざましい「機械翻訳」と「音声対話」を項目とした。これらの応用システムは 2020 年の東京オリンピック・パラリンピックを契機に社会に大きなインパクトを与えるものと予想される。

ビジョン関係では、車の自動運転など既に社会実装レベルの応用システムも存在するが、本報告書ではいわゆる一般物体認識などをターゲットとする、より一般的・普遍的な「画像・映像の意味理解」を項目とした。さらに、言語の基本処理の高精度化と、一般物体認識の実現が視野に入りつつあることを受けて、「言語と映像の統合理解」の項目をたてた。この研究開発領域は現時点ではまだ萌芽的であるが、今後、このあたりをハブとして、認知科学、脳神経科学、ロボティクスなどの関連領域との本格的連携が生まれてくることが期待される。

ビジョン・言語処理は、いわば「地に足がついた」形で、データをきちっと集積して解析

するということをベースに発展してきており、わが国は国際的にも高い競争力を有している。今後もこの発展を持続・加速させ、わが国の競争力を維持・発展させるためには、各領域の報告でも共通して述べられているように、データの収集と研究利用を妨げない法律等の整備、さらに、HPC 基盤やデータ基盤の共有を含む研究連携や共同プロジェクトを推進する政策などが必要であると考えられる。

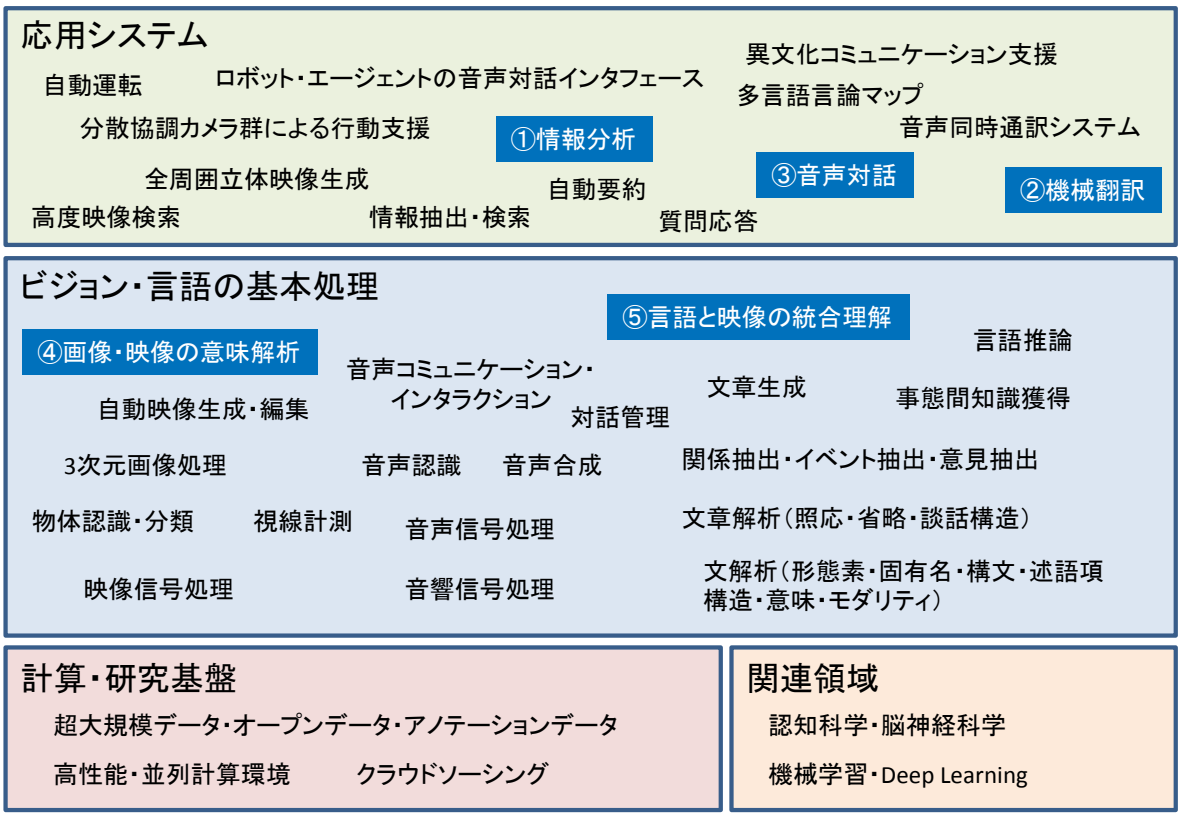


図 3.8.1 ビジョン言語処理の俯瞰

３．８．１　大規模言語処理に基づく情報分析

（１）研究開発領域名

大規模言語処理に基づく情報分析

（２）研究開発領域の簡潔な説明

Web、SNS、各種の論文アーカイブ等に存在する大量のテキストに言語処理技術を適用し、それらのテキストに書かれた膨大な情報や知識を抽出する。さらに、それらに現れる社会、コミュニティーの大域的な動向や、情報、知識の間の相関、関連、書かれた知識を組み合わせて作られる新たな仮説など、さまざまな価値ある分析結果をユーザーに提供できる情報分析技術を開発する。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

大量のテキストは、仮に有用な情報を含むことが事前に分かっていたとしても、有効活用が困難である。これは人が読めるテキストの量には限りがあることによる。インターネットの出現以前にはそもそも人が入手できるテキストの量も少なく、この単純な事実は取り沙汰してもしょうがないことであった。ところがネットの出現により大量の電子可読のテキストが容易に入手可能になると状況は変わり、計算機がそうしたテキストを「自動的に読みこなして」有効活用につなげることが期待されるようになった。この有効活用を可能にする第一段階の技術が検索エンジンであるが、現在の課題の一つは、検索エンジンのように提示されたテキストの意味解釈をユーザーに任せるのではなく、計算機自身が意味解釈を行って、ユーザーの負担を可能な限り減らすことである。別の言い方をすれば、計算機にユーザーの知的活動をより広範に代行してもらい、ユーザーの介入を重要な最小限のポイントに限定することである。例えば、災害時に Twitter や各省庁、自治体の報告書等に膨大な災害関連テキストが出現するが、検索エンジンを利用したとしても、その有効活用は救援側のマンパワー、時間的制約の中では極めて困難である。また、分野をある程度限ったとしても、膨大な科学技術論文や Web 等に書かれた専門的知識をすべてカバーできる専門家、研究者はまずいない。この結果、被災状況や新たな科学的発見のチャンスを見落とすと言ったことが起こり得るし、また実際に明確に認識されることがないだけで至る所で起きているであろう。こうした状況において、システムが Web や SNS のものも含め膨大なテキストを「読みこなし」、重要なポイントだけを人が容易に理解可能な形、量で提示してくれるとすれば、社会全体の知的活動が多いに活性化し、より適切な意思決定が行われるようになるであろう。

本稿では「情報分析」という用語を、上述のような意味でのテキストの知的処理をターゲットとする自然言語処理の（機械翻訳を除いた）さまざまなタスク、システム、および、それらの組み合わせの総称として用いる。なお、情報分析を支える基盤として、構文解析などの基盤的な自然言語処理技術が必要であるが、これらに関してはいまだ改善の余地はあるものの、既により高次の情報分析技術の研究が可能な完成度が既に実現されている。

情報分析技術のはしりとしては、1980 年代後半から情報抽出というタスクの研究が開始された。これは、例えば特定のタイプの出来事（例：殺人事件）に関する記述を新聞記事等から自動的に発見し、その出来事の属性（例：犯人、被害者、犯行場所）をやはり自動的に抽出するといったものである。こうしたタスクをこなせるシステムは蓄積された膨大なテキ

ストの有効活用につながるとされ、米国では、DARPA などの支援により、多数の大学、企業が参加したコンテスト等が継続的に行われ、さまざまな基礎技術が開発された [1)]。また、その後、この技術の変種として、例えば「タバコ」と「肺がん」といった単語の組を因果関係に関する知識として大量のテキストから抽出するといった、知識獲得といったタスクも盛んに研究された。同様に、テレビのクイズショーで人間のチャンピオンを破り、大変有名になった IBM の Watson [2)]のように膨大なテキストをもとに自然言語で書かれた質問に回答する質問応答、あるトピックに関して書かれた評判を抽出して、肯定的評判／否定的評判等に分類する sentiment analysis、評判分析といった技術も開発が進んでいる。さらに、以上の技術でも必要となる、テキスト間の同義性や含意関係を認識する含意関係認識といった技術も研究開発されている。また、これらの技術についてもやはり DARPA の支援等により、性能に関するコンテストが実施されてきた [3)4)5)6)]。

ここで重要なポイントは、これらの技術も現在のところは入力となるテキスト中の単語、フレーズなどの短い断片を抜き出してそのまま出力としているものがほとんどであることである。IBM の Watson のような質問応答の成功例は、多くがテキストから抜き取った単語一語を回答とするタイプのものである。一方で、ある出来事の理由など、文章を回答とするタイプのより高次な質問応答で、一つの単語、一つの文の意味解釈だけで処理が終わらず、文章全体の解釈が必要なタスクにはいまだ課題が多い。本来、文章の解釈というのは非常に知的な作業であり、それを計算機が広範に代行するにはまだまだ課題が多いといっても良い。例えば、将来的には「大規模言語処理の研究開発動向は？」といった質問を受け取ると、大量の文章を分析し、その結果を論理的に整合性が取れるようにマージ、要約して、本稿のようなサーベイを出力するシステムも開発のターゲットとなろうが、現在の技術だけではこうした処理は到底不可能である。そうした意味で今後の発展の余地は非常に大きく、また、大きな社会的インパクトも予想される。

以上の技術はテキストに書かれた情報を抽出するものであるが、テキストに書かれていない知識を推論によって求める技術の開発も始まっており、生命科学において有力な仮説を提示して研究を加速するケース [7)]や、Web 上の情報から導かれた仮説が著名な科学ジャーナルの内容を先取りするケース [8)]なども一部で報告され始めている。よく「行間を読む」といった言い方がなされるが、これはまさに仮説を生成しながらテキストの解釈を行うといった状況を指すものと考えられ、上記の仮説生成技術も仮説生成自体を目的とするアプリケーションにとどまるのではなく、将来的にはテキスト解釈の必要不可欠な基礎的処理として、本来、仮説生成を陽に目的としないタイプの情報分析の高度化にも貢献する可能性がある。

なお、(5)注目動向の項で詳述するが、IBM の Watson、Google Knowledge Vault [9)]など、情報分析技術の実用化は急速に進展している。 また、こうした実用化の動きの中で、特に Web、SNS に関して問題となってきたのが情報の信ぴょう性である。東日本大震災ではネット上に大量のデマが出回ったことが記憶に新しい。これに関連し、信頼度の低い情報を検出する手法に関する研究も既に始まっている [10)11)12)]が、いまだ決め手となる手法等は出現しておらず、今後さらなる展開が待たれる。

（４）科学技術的・政策的課題

言語処理技術は個別言語に依存し、大規模な情報分析システムの研究開発にはターゲット

となる言語に精通した多くの研究者が必要である。世界的に見た場合、研究者が最も多いのは英語に関してであり、また、大手検索エンジンなども英語のサービスから開発、公開するのが通常である。こうした状況は日本語で書かれた情報が英語の情報に比べて有効活用されにくくなるという可能性を意味し、日本の国際競争力をそぐ可能性すらある。こうした点に鑑み、日本語に通じた多くの優秀な言語処理研究者を育成する必要がある。

一方で、研究実施に際しては、大規模な計算リソース上に、大量の文書を配置して処理を行う必要がある。米国の大手ネット企業ではそうした環境が身近に存在するが、日本の大学の研究室レベルではこうした計算リソースの確保は困難であり、大学、研究機関等でそうした計算リソースを共有する枠組みがまずは必要である。また、計算リソースが実際に利用可能であっても技術的なハードルがあり、Hadoop 等のツールも実際に使いこなせている言語処理研究者は少ない。今後 High Performance Computing と言語処理を橋渡しするさらに進化した枠組みが必要となろう。また、研究開発で利用できるデータに関していえば、米国においては大量の Web ページを収集してまとめた ClueWeb [13]といったデータセットが利用可能であるが、日本においては法的問題もあり、Web 文書を異なる組織間で共有することが難しく、研究開発の障害となっている。

以上は研究リソース、技術的課題についてであるが、研究者のスキルアップも課題である。例えば、戦略的に大規模実験のプランニングを行い限られた時間内で成果を挙げる、あるいは、大規模な情報分析のための柔軟なアーキテクチャを設計する、さらにはリーダーシップを取って大規模な情報分析プロジェクトをマネージメントするといったスキルを持つ人材は特に日本では極めて少ない。これは大学等の教育・研究が小規模なリソースで実施可能な要素技術に関するものに偏っているためと考えられ、そうした課題を視野に入れての人材育成が待たれる。また、大規模な情報分析システムを社会実装する上では著作権、プライバシー等、法律に関わる問題も無視できない。技術とそうした社会的、法的問題の両方に精通した人材の育成も急務である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

現在、最も脚光を浴びているのは、各種情報分析技術の実用化の試みである。まず、IBM の Watson による医療応用等が開始され、日本語で会話を行う家庭用ロボットへの組み込みの検討も開始されたとの報道もある [2)14)]。Apple の Siri [15)]、NTT ドコモの「しゃべってコンシェル」[16)]も一定規模のデータに対して情報分析を行っているシステムと考えられる。さらに、入力されたトピックに関する評判を sentiment analysis を用いて Web 等から抽出するサービスはさまざまな企業によって実用に供されており [17)]、大規模な知識獲得の結果をユーザーに提供する Google Knowledge Vault [9)]なども実用に供され始めている。

一方で、前述したように技術の潜在的可能性はいまだ膨大なものがあり、大学や公的研究機関での、より基礎研究指向の研究プロジェクトも多数存在する。例えば、米国 DARPA の支援によって DEFT [18)]、SMISC [19)]等のプロジェクトが実施されている。日本国内においては、NICT において数十億件規模の Web ページを用いて、仮説生成や質問応答を行う大規模システム WISDOM X の開発が進んでいる [20)21)8)]。また、SNS に関しては、NICT が Twitter からデータの提供を受け、災害時の情報に関して質問応答を行う対災害 SNS 情報分析システム DISAANA [22)23)24)]を開発している他、ソーシャルメディア等での社会的な動きを把握、

活用するための大規模な情報分析研究のため、Twitter が MIT に 1000 万ドルの資金援助をするといった動きも出ている[25]。

（６）キーワード

自然言語処理、情報分析、情報抽出、質問応答、知識獲得、関係抽出、sentiment analysis、評判分析、含意認識、矛盾認識、情報信ぴょう性、仮説生成、Big Data、Textual Big Data

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	言語処理学会[26]という学会を中心に基礎研究が進められており、年次大会には毎年３００件前後の発表がある。また、NICTが中心となって設立したALAGINフォーラム[27]においても言語資源等の共有が進められている。日本語の情報分析技術を中心に研究成果が出ており、英語に関する研究が圧倒的に多数であるトップカンファレンスACL[28]などでも一定数の発表がなされている。
	応用研究・開発	○	↗	JST CREST等において、具体的な応用を指向した情報分析の研究が進んでいる[29]。NICTにおいて、大規模Web情報分析システムWISDOM[10]が2010年に一般公開された。現在その後継として前述したWISDOM Xの開発が進んでおり、2014年度に一般公開予定である。また、やはり前述した災害関連情報を分析するシステムDISAANAも試用版が既に公開されている。NEC等の民間企業でも、例えば、含意関係認識技術に関して、ビジネス化を意識した開発が進んでいる[30]。
	産業化	○	→	前述したように、NTTドコモの「しゃべってコンシェル」がサービスインした他、企業等の評判をWeb等からマイニングするサービスもさまざまな企業から提供され、ビジネス化されている。また、2015年に発売予定のソフトバンクの家庭用ロボットもバックエンドは情報分析技術と呼んでよいと思われる[14]。
米国	基礎研究	◎	→	Stanford、CMU、MIT、ペンシルバニア大学、ワシントン大学等の有力大学のみならず、Google等の有力企業はそれぞれ強力な研究チームを持っており、基礎研究を遂行している。ACL、EMNLPなど有力な国際会議等での発表の多くは米国発である。
	応用研究・開発	◎	→	上述した基礎研究が比較的短期間に有力企業で応用研究・開発に回るサイクルが確立している。また、有力大学の優秀な大学院生が有力企業のインターンに行き、良い成果を挙げることも多い。
	産業化	◎	↗	もともとは大学発のベンチャーであったGoogleを始め、産業化の実例には枚挙に暇がない。最近ではIBMがWatsonの産業化に10億ドルを投じ、世界各国の企業とプロジェクトを開始している[14]。
欧州	基礎研究	○	→	欧州における言語処理研究は、欧州連合(EU)が多数の国から構成されていることもあって、機械翻訳に重点が置かれており、情報分析に関してはイスラエル等の例外を除き、突出した研究は少ない。
	応用研究・開発	○	→	European CommissionのFP7等のファンディングにより3年程度の期間で予算総額が300万EURO前後のプロジェクトが一定の数存在する。例えば、PHEME project[31]では、ソーシャルメディア上で広がっているうわさを検出・把握することを狙っており、また、NewsReaderプロジェクト[32]では複数言語のニュース記事等を用い、さまざまな事象の時系列的な展開を追跡し、未来予測まで行って意思決定の支援を行うことを目標としている。
	産業化	○	→	Google等グロバール企業の研究所が存在し、一定のアクテビティはあるが、米国の主導のもと産業化が行われている側面が強い。
中国	基礎研究	○	↗	北京大学、清華大学等の有力大学やMicrosoft Research Asia、Baidu等の民間企業の研究所を中心に基礎研究が進められている。また、ACL、WWW等のトップコンファレンスでは中国発の論文が多数発表されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Microsoft Research Asiaでは、Webを用いる質問応答システムを開発している[33]。Baiduは、米国Silicon valleyに人工知能研究所を設立し、Deep Learning分野に3億ドルを投資すると発表した[34]。大規模な情報分析への応用が考慮されていると思われる。
	産業化	○	→	Microsoft、IBM等のグロバール企業におけるアジア地域の研究所が集中している。また、Baiduは検索エンジンの改良、音声処理技術の改良等を目指して大規模プロジェクトを進めている。

韓国	基礎研究	△	→	KAIST、ETRI、KISTI等の有力大学、国研を中心に基礎研究が進められている。BORA（言語資源銀行）[35]というコンソーシアムにおいて音声・言語資源等の共有が進められている。ただACL等のトップコンファレンスでの韓国発の発表は減少している。
	応用研究・開発	○	↗	ExoBrain[36]というプロジェクトでは、進化する知能を持つ質問応答システムに関し研究開発を進めている。また、InScite[37]という科学技術文献の情報分析プロジェクトも進行している。
	産業化	○	→	90年代末から2000年代初までに生まれたNaver、Daum等、情報分析技術が産業化された実例は多い。最近もカカオ社などベンチャー企業の創業が増加している。また、有力企業であるサムソン社、LG社等での製品化の事例もある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) TIPSTER Text Program,
NIST, http://www.itl.nist.gov/iaui/894.02/related_projects/tipster/
2) “Computer Wins on ‘Jeopardy!’: Trivial, It’s Not”, New York Times, Feb. 16, 2011.
http://www.nytimes.com/2011/02/17/science/17jeopardy-watson.html?pagewanted=all&_r=0
3) Ellen M. Voorhees, “The TREC-8 Question Answering Track Report”, in the Proceedings of TREC 8, pp.77-82, 1999.
4) NIST Text Analysis Conference, http://www.nist.gov/tac/
5) PASCAL Textual Entailment Challenge, http://pascallin.ecs.soton.ac.uk/Challenges/RTE/
6) NTCIR、国立情報学研究所、http://research.nii.ac.jp/ntcir/index-ja.html
7) W. Scott Spangler, et al., “Automated hypothesis generation based on mining scientific literature”, In the Proceedings of KDD 2014, pp.1877-1886, 2014.
8) Chikara Hashimoto, et al., “Toward Future Scenario Generation: Extracting Event Causality Exploiting Semantic Relation, Context, and Association Features”, In the Proceedings of ACL 2014, pp.987-997, 2014.
9) Xin Luna Dong, et al., “Knowledge Vault: A Web-Scale Approach to Probabilistic Knowledge Fusion”, In the Proceedings of KDD’14, pp. 601-610, 2014.
10) 情報分析システム WISDOM -Web の健全な利活用を目指して
http://kc.nict.go.jp/project1/WISDOM_TR.pdf
11) Carlos Castillo, et al., “Information credibility on twitter”, In the Proceedings of WWW’11, pp.675-684, 2011.
12) Yusuke Yamamoto, et al., “Enhancing credibility judgment of web search results”, In the Proceedings of CHI’11, pp.1235-1244, 2011.
13) The ClueWeb12 Dataset, http://www.lemurproject.org/clueweb12.php/

14) “人工知能「ワトソン」、日本語版開発　ソフトバンクと”、日本経済新聞、2014 年 10 月 9 日、http://www.nikkei.com/article/DGXLASGM0900J_Z01C14A0EAF000/
15) “To Siri, with Love”, New York Times, Oct. 17, 2014, http://www.nytimes.com/2014/10/19/fashion/how-apples-siri-became-one-autistic-boys-bff.html?_r=0
16) しゃべってコンシェル、株式会社 NTT ドコモ、https://www.nttdocomo.co.jp/service/information/shabette_concier/
17) 口コミ係長、　株式会社ホットリンク、 http://www.hottolink.co.jp/service/kakaricho
18) DARPA DEFT, http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Deep_Exploration_and_Filtering_of_Text_(DEFT).aspx
19) DARPA SMISC, http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Social_Media_in_Strategic_Communication_(SMISC).aspx
20) Masahiro Tanaka, et al., “WISDOM2013: A Large-scale Web Information Analysis System”, In The Companion Volume of the Proceedings of IJCNLP 2013: System Demonstrations, pp.45-48, 2013.
21) Jong-Hoon Oh, et al., “Why Question Answering using Intra- and Inter-Sentential Causal Relations”, In the Proceedings of ACL 2013, pp.1733-1743, 2013.
22) NICT 対災害 SNS 情報分析システム DISAANA 試用版、http://disaana.jp
23) “NICT が対災害 SNS 情報分析システムを Web 上で試験公開”、ITPro by 日経コンピューター、http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/14/110501766/
24) Istvan Varga, et al., “Aid is Out There: Looking for Help from Tweets during a Large Scale Disaster”, In the Proceedings of ACL 2013, pp.1619-1629, 2013
25) “MIT Launches Laboratory for Social Machines with Major Twitter Investment”, MIT Media Lab, http://socialmachines.media.mit.edu/2014/10/01/mittwitter-launch-announcement/
26) 言語処理学会ホームページ http://www.anlp.jp
27) ALAGIN フォーラムホームページ http://alagin.jp
28) Association for Computational Linguistics (ACL) ホームページ http://www.aclweb.org
29) 知識に基づく構造的言語処理の確立と知識インフラの構築、JST、http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/45/45_01.html
30) “分析エンジンの強みを生かす NEC のビッグデータクラウド”、ITPro、2012 年 11 月 8 日、ASCII.jp、http://ascii.jp/elem/000/000/742/742011/
31) PHEME Project, http://www.pheme.eu/
32) NewsReader Project, http://www.newsreader-project.eu
33) “Microsoft Research Asia: A Celebration of 15 Years of Innovation”, Microsoft Research Asia, http://www.msra.cn/zh-cn/um/events/innovationday/2013/english.html
34) A Chinese Internet Giant Starts to Dream, MIT Technology Review, Aug.14, 2014, http://www.technologyreview.com/featuredstory/530016/a-chinese-internet-giant-starts-to-dream/

35) BORA(言語資源銀行)、http://semanticweb.kaist.ac.kr/org/bora/
36) ExoBrain Project, http://exobrain.kr/
37) InScite、 KISTI、 http://inscite.kisti.re.kr/

３．８．２　言語情報処理応用（機械翻訳）

（１）研究開発領域名

言語情報処理応用（機械翻訳）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ある言語から別の言語への翻訳を自動的に行う技術の研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

機械翻訳は初期の計算機のアプリケーションとして 1940 年代から研究開発が行われてきており、異なる言語で書かれた文書からの情報収集、外国への特許出願やプレスリリースなどの情報発信、母国語が異なる人間同士の多言語による円滑なコミュニケーションを実現する上で非常に重要な技術である。初期の機械翻訳は構文解析、構造変換、生成といった過程でモデル化され、各モジュールを言語の専門家が知識を記述することで実現されていたが、コストが非常にかかるのが問題であった。これに対し、現在主流である統計的機械翻訳は、統計モデルに基づき二言語の対訳データから自動的に機械翻訳システムを構築する技術であり、新しい言語対や分野への適応を短期間かつ低コストで実現可能になった。

［これまでの取組み］

統計的機械翻訳は 80 年代後半からの IBM による単語アライメントモデルから始まり、句単位に翻訳を生成するモデルを実現、さらに構文知識を導入することで統語的に正しい翻訳が可能となった。同時に BLEU などの客観的かつ容易な翻訳評価手法およびその評価尺度を直接最適化する機械学習手法が開発された。

この機械翻訳の発展に寄与したのが DARPA によるファンディングであり、2001 年の TIDES に始まり、GALE [1)]では IBM および BBN、SRI の三つのチームによる競争的な研究開発が行われ、規模は縮小したものの現在の BOLT [2) 3)]につながっている。競争的な研究開発と同時に、世界各国からの参加が可能なオープンな評価型ワークショップを開催 [4)]することで機械翻訳の研究開発を促した。また、90 年代後半から、National Science Foundation (NSF)をスポンサーとして JHU Workshop [5)]が毎年開催され、機械翻訳を含む、音声認識および言語処理の先進的な研究課題に対し、学部生や院生、研究機関の研究者などさまざまなバックグラウンドを持つ人材でチームを組み、その問題解決に取り組んできた。

欧州では 2006 年から FP6 の EuroMatrix [6)]の下で、オープンソースの統計的機械翻訳ツール Moses の開発が始まった。Moses は研究のためのツールとして広く使われるだけでなく、実際のサービスに応用されている。また、定期的にハッカソン（MT Marathon）を行い [7)]、最先端の機械翻訳の研究成果を実装するだけでなく、新しい機能を提案して継続的に開発が進められている。

日本では、欧米と比較して大きなファンディングはなく、研究所あるいは大学の研究室レベルでしかなかった。また、特に日英翻訳では、対訳データが少ないという問題に加え、日本語および英語が文法的に非常に異なる言語対であるという難しさもあった。NTCIR-7 および8、9の特許翻訳タスク [8)]では、日英で同時に出願された特許から対訳データを作成し、

非常に大きな対訳データを自動的に構築可能となった。また、文法の違いを吸収するため、構文情報を利用し、あらかじめ原言語の入力文を目的言語の語順に並び替えることで性能向上を果たしている。

機械翻訳の応用として、音声認識と音声合成の技術を組み合わせた音声翻訳の研究開発は古くから行われ、C-STAR の枠組みにより日米欧共同で試みられてきた [9]。各国の研究機関で協力して多言語音声翻訳を実現する枠組みは、FP6 の TC-STAR [10]や A-STAR [11]、U-STAR [12]へと受け継がれている。同時に 2004 年より評価型ワークショップ IWSLT を開催し、特に音声翻訳技術への発展に貢献している [13]。

［今後必要となる取組み］

機械翻訳はある特定の分野で大量の対訳データがあれば精度の高い翻訳を実現可能であることが示されている。ところが他の言語や別の分野へと適用するたびに対訳データを必要とする。今後、機械翻訳システムの多言語化および多分野化を進めていく時、量による高精度な翻訳を追求すると同時に、構文解析や意味解析などの、より深い解析技術を組み合わせた、量によらない翻訳技術が必要となる。また、構文解析器や意味解析器が存在しない言語に対しても高精度な翻訳を実現するため、教師なし学習などの機械学習を取り入れ、翻訳に必要な情報を自動的に抽出する技術が求められる。

現在は文単位に翻訳を行っているが、文単位では意味の曖昧性を解消できない。今後は文章全体から参照関係を捉え、文章の意味を解析した上で、各文へと反映させることによる高精度な機械翻訳が求められる。また音声翻訳の延長線上では、同時通訳を可能とする逐次翻訳の技術開発が必要とされる。

（４）科学技術的・政策的課題

大規模対訳データから翻訳のための知識を抽出する手法が確立されてきており、日英など言語資源が豊富な言語対では精度の高い機械翻訳が実現されつつある。ところが多言語化あるいは多分野化を進めるとき、言語資源が乏しい言語、あるいは分野では高精度な翻訳が難しく、今後の課題である。

機械翻訳は構文解析などの自然言語処理の基礎技術だけでなく、機械学習やデータ構造など数多くの要素技術から構成されており、新たに機械翻訳の研究を始めるには非常に多くのことを勉強しないといけない。この複雑さのため全体像を把握して研究開発を進めることができる研究者は限られ、例えば大学の研究室レベルでの研究は非常に限定的とならざるをえない。このため、欧米にならい、強いファンディングおよびリーダーシップのもとで各大学の研究室や研究所等が何らかの形で連携を強める必要がある。

評価型ワークショップ等により最先端の技術をシステマティックに評価するだけでなく、オープンソース化などでその技術を幅広く普及する仕組みの充実が求められる。また、情報収集や情報発信、同時通訳など、機械翻訳システムが実際に使われる現場を想定し、翻訳結果の評価手法について吟味する必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

日英など大幅に文法が異なる言語対に対して機械翻訳の性能は限定的であったが、原言語の入力文を構文解析し、あらかじめ目的言語の構造へと並び替える手法により大幅な性能向上を果たすことが可能になった。ただし、構文解析の精度に依存した手法であり、口語体など、文法を逸脱した文に対して効果は限定的であるため、今後の発展は限定的と思われる。

近年、ニューラルネットワークの技術を応用した深層学習が音声認識や画像認識などの人工知能の分野で大幅な性能向上に貢献している。深層学習の利点の一つとして自動的な特徴量の抽出にあり、ベクトルで表された単語の意味表現を大規模データから学習することで、曖昧性の解消などへと応用可能であり、今後、機械翻訳の分野でも大きく発展する余地があると思われる。

［注目すべきプロジェクト］

DARPA は古くから機械翻訳に対して大規模に投資を行ってきたが、現在実施されている BOLT [2]では、過去の TIDES や GALE と比較してその予算規模は縮小されている。機械翻訳プロジェクトを実施している NIST は、研究開発を進めるために、同時に機械翻訳システムのオープンな評価を行う評価型ワークショップ OpenMT [4]を主導してきた。この数年、実施されていないが、2015 年に久しぶりに実施されることになり、今後の発展が興味深い。

欧州の FP7 で実施されてきた EuroMatrixPlus [14]、およびその後継 MosesCore [7]は 2015 年に終了する。このプロジェクトではオープンソースの統計的機械翻訳ツール Moses の研究開発を行うと同時に、ヨーロッパ言語間の翻訳を中心とした評価型ワークショップ WMT (Workshop on Statistical Machine Translation) を運営し、研究開発を促している。Moses は実際のサービスにも応用されており、今後もプロジェクトは引き継がれると思われる。EU-BRIDGE は音声翻訳に重点をおいたプロジェクトであり、現在 IWSLT を主体的に運営している [15]。

中国では CWMT (China Workshop on MT) [16]を通して、特に中国語の翻訳を重点的に大学や企業での活発な研究開発を継続的に行ってきた。このような評価型ワークショップでは言語資源を集め、同じ条件で各機械翻訳システムを評価すると同時に、最新の技術を共有することでさらに基礎研究が進むと考えられる。

情報通信研究機構では「先進的音声翻訳研究開発推進センター」を立ち上げ、最先端の音声翻訳技術の研究開発を開始した [17]。2020 年の東京オリンピックに向けて多言語による円滑なコミュニケーションを目指す試みであり、今後の進展が注目される。

（６）キーワード

統計的機械翻訳、自然言語処理、機械学習、人工知能

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	機械翻訳の基礎研究に関しては、NICTおよびNAISTが突出して強く、トップ国際会議や論文誌などに数多く採択されている。
	応用研究・開発	○	→	NICTはB2Bに特化し、特許庁など他の企業と共同で機械翻訳システムの研究開発を継続的に行っている。JSTは日本、中国の研究機関と協力し日中・中日機械翻訳実用化プロジェクトを推進している。NTTドコモは他の企業と共同出資した「みらい翻訳」によりさらに高精度な翻訳を目指して開発を行っている。
	産業化	◎	↗	NTTドコモによる携帯端末や、NICTによるVoiceTraやTexTraなどのスマートフォンのアプリで音声翻訳のサービスを実施中。
米国	基礎研究	○	→	BOLTで予算規模が縮小したものの、ISI (Information Sciences Institute)やCMU、UMDは継続的に機械翻訳の基礎研究を行っている。また、JHU Workshop (Frederick Jelinek Memorial Workshopへ名称を変更)により研究機関が連携し積極的な研究活動を行っている。
	応用研究・開発	○	→	BBN、IBM、SRIは継続的にDARPA向けの機械翻訳システムの開発行っている。また、SDLはB2Bでカスタマイズされた機械翻訳システムの提供をしている。
	産業化	◎	→	Googleは2007年より統計的機械翻訳のサービスを開始したパイオニアであり、アプリの提供も行っている。MicrosoftはBingだけでなくSkypeにも機械翻訳を提供している。
欧州	基礎研究	○	→	統計的機械翻訳ツールキットMosesを中心に継続的に基礎研究を行っている。
	応用研究・開発	○	→	MosesCore[7]によりMosesの宣伝および普及活動をするとともに、評価型ワークショップ WMTやハッカソン MT Marathonなどを主催し、積極的に応用研究を進めている。EU-BRIDGEではIWSLTを主催し、音声翻訳技術の開発を行っている。
	産業化	○	→	Mosesは商用のシステムとして実際のサービスに用いられている。
中国	基礎研究	◎	↗	中国科学院やMSRAなどの研究機関はトップ国際会議に数多く採択され、最先端の機械学習技術を取り入れると同時に、評価型ワークショップCWMTを中心に最先端の研究の普及活動をしている。
	応用研究・開発	○	→	MSRAは継続的に機械翻訳の研究開発を行ってきている。Baiduは2013年に北京、2014年にシリコンバレーに人工知能の研究所を立ち上げ、機械翻訳の研究開発を始めた。 各大学の研究室では応用研究を行っているものの、その成果は外からはわかりにくい。
	産業化	○	→	Baiduは機械翻訳のサービスを行っている。
韓国	基礎研究	△	→	KAISTなどが基礎研究を行っているが特に活発な研究発表はない。
	応用研究・開発	△	→	基礎研究同様、特に活発な応用研究は見られない。
	産業化	△	→	欧州で古くから機械翻訳の開発を行ってきたSystranを韓国のベンチャー企業CSLiが買収した。CSLiは携帯端末での機械翻訳アプリを提供しているが、Systranはアジアの言語に特に強いとはいえず、今後どのように発展するかは未知である。

（註 1）フェーズ
　　基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
　　応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
　　産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
　※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
　　◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
　　△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
　　↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) http://www.itl.nist.gov/iad/mig/tests/gale/
2) http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Broad_Operational_Language_Translation_(BOLT).aspx
3) http://www.nist.gov/itl/iad/mig/bolt.cfm
4) http://www.nist.gov/itl/iad/mig/openmt.cfm
5) http://www.clsp.jhu.edu/workshops/
6) http://www.euromatrix.net/
7) http://www.statmt.org/mosescore/
8) http://ntcir.nii.ac.jp
9) Takezawa, Toshiyuki, Morimoto, Tsuyoshi, Sagisaka, Yoshinori, Campbell, Nick, Iida, Hitoshi, Sugaya, Fumiaki, Yokoo, Akio and Yamamoto, Seiichi. 1998. "A Japanese-to-English speech translation system: ATR-MATRIX.." In the Proceedings of the ICSLP.
10) http://tcstar.org
11) http://www.mastar.jp/AStar/
12) http://www.ustar-consortium.com
13) http://www2.nict.go.jp/univ-com/multi_trans/WS/IWSLT2004/
14) http://www.euromatrixplus.net
15) http://www.eu-bridge.eu
16) Sitong Yang, Heng Yu, Hongmei Zhao, Qun Liu and Yajuan lv. 2014. “Review and Analysis of China Workshop on Machine Translation 2013 Evaluation”. In the Proceedings of AMTA2014.
17) http://www.nict.go.jp
18) 国際会議 ACL や NAACL、EMNLP あるいは論文誌 TACL (http://anthology.aclweb.org を参照)
19) http://www.nict.go.jp/press/2014/07/28-1.html
20) http://foresight.jst.go.jp/jazh_zhja_mt/
21) https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2014/09/29_01.html
22) http://www.darpa.mil/opencatalog/BOLT.html
23) http://www.sdl.com
24) http://ir.baidu.com/phoenix.zhtml?c=188488&p=irol-newsArticle&ID=1931950
25) http://www.systransoft.com/download/press-releases/systran-pr-csli-acquisition-20140425.pdf

３．８．３　言語情報処理応用（音声対話）

（１）研究開発領域名

言語情報処理応用（音声対話）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

人間同士の音声コミュニケーションの分析や人間とコンピューターの音声による自然なやり取りを実現するための研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間のコミュニケーション手段で最も古くから用いられているものは音声によるやり取り、すなわち、音声対話である。情報、意思、感情の伝達など、人間は音声対話をさまざまな用途に用いている。音声対話をコンピューターで処理可能にすることは、人間同士の膨大なやり取りの情報にコンピューターがアクセスできるようになることのみならず、人間と共同で知的活動を行うシステムの構築につながる。

音声対話を行うコンピューターを実現するためには、まず、相手の音声を音声認識によってコンピューターが理解可能なシンボル列（例えば，認識文字列）に変換する必要がある。そして、そのシンボル列がどのような意味を持つかを解釈しなくてはならない。発話は単独で意味を持つ場合もあるが、一般には文脈によって解釈が変わる。そのため、発話は文脈に基づいて解釈する必要がある。相手に応答するためには、コンピューターは自身の意図に基づき発話を生成して、相手に音声で伝える必要がある。このとき、意図が的確に反映されるように、声の大きさや抑揚も調整する必要がある。音声対話分野は、人工知能の主要分野である信号処理、音声処理、自然言語処理だけでなく、音声知覚や感情理解に関わる脳科学や人間科学、物理的なインターフェースを実現するためのロボット工学や人間工学、社会において人間と円滑にやり取りを行うための社会学・心理学・認知心理学など複数の分野の融合領域である。

研究の歴史をひもとくと、音声認識技術が一定のレベルに達する 1990 年頃まで、研究の中心は対話理論の構築であった [1)]。例えば、対話で起こる現象を議論する上で必要な基本概念や人間同士の対話のモデル・理論が提案された。発話を物理的な行為とみなす発話行為論、対話を意図のレベルで構造化する談話構造理論などが有名である。1990 年代に音声認識の性能が改善されると、国内外で音声対話システムが構築され始めた。最も大きなインパクトを与えたのは、米国の DARPA 主導による、ATIS や Communicator といった巨大プロジェクトである。この成果により、フライト情報案内などの所定のタスクを遂行するタスク指向型音声対話システムの技術が確立された [2)3)]。同時期に、音声対話技術の IVR（音声自動応答）への適用も開始された [4)]。

2000 年代に入り、教師データからコンピューターに判断を学習させる機械学習が流行し、データさえあれば研究者でなくてもタスク指向型の音声対話システムが構築できる環境が整った。2010 年代には、スマートフォンの普及とクラウド型の音声認識により、商用の音声エージェントサービスが次々とリリースされるようになった [5)6)]。

現在、パーソナルロボット、車載、医療などの分野において音声対話への期待は高く、国内外で産業界から巨額の資金が投入されている。利用者増によるデータの集積は精度改善に

重要であるため、シェア争いが今後ますます激化すると予想される。大量の音声対話データを対象とした分析や情報抽出の研究も進められている。一般話者の自由発話（コンピューターに向かって話すようなコマンド発話ではなく人間同士の自由な発話）に対する音声認識精度はいまだ低く、実用にはまだ遠いと考えられているが、家庭内の会話や、通話、ミーティングの分析など幅広い用途が考えられ、この分野はこれから重要になると予想される。

（４）科学技術的・政策的課題

音声対話は人間にとって自然なコミュニケーション手段であるため、コンピューターにとっての難しさが理解されにくいが、人工知能の困難な課題を扱う分野である。しかし、ひとたび実用化のめどが立てば、人間同士のやり取りのほぼすべてに関わる分野であり、その適用範囲は非常に大きい。2020 年の東京オリンピックにおける外国人観光客の対応だけでなく、産業用ロボットの入出力、教育支援、介護ロボット、認知症予防、独居世帯のコミュニケーション支援など、少子高齢化が進む日本において音声対話システムの役割はますます大きくなると予想される。音声対話はわれわれの生活を根底から変える可能性のある分野であると認識して投資を行う必要がある。

音声対話サービスは乱立しているが、キラーアプリはまだ手探りの段階であり、日本が世界での競争に勝てる可能性は十分ある。ただ、音声対話システムは非常に多くの部分からなる複雑なシステムであり、商用レベルのシステムを構築し運用するためには、大量の学習データ、計算機資源、コンテンツ、高度な学習ソフトウエアが必要である。ブレークスルーの可能性を高めるためには、国内の多くの研究者がこれらのリソースを安価に使えるための施策が必要である。

音声対話システムがパターン認識の研究と大きく異なるのはその評価の難しさである。例えば、音声認識であれば、音声データとその書き起こしからなる評価データを用いて音声認識精度を計算できる。しかし、音声対話システムはやり取りを扱うため、評価をしようと思うと「やり取り」とその「良さ」を対応づけた評価データが必要となる。ここで、やり取りはシステムとユーザーの複数の発話であるため、やり取りが長くなればなるほど組み合わせが爆発し、適切な評価データが作れないという問題が起こる。これはビッグデータを用いても解決することが難しい。また、対話の良さについても、主観の入る要素が大きいという問題がある。現状、音声対話システムを評価するためには、ユーザーに実際に使ってもらい主観評価を積み重ねていくしかない。実ユーザーによる評価実験を行うのは多大なコストがかかる。実サービスを行う機関でなくても実証実験が可能となるような仕組み作りが必要である。なお、音声対話データは個人の声であることや話されている内容がプライベートであることが多いことから、インターネットのクロールデータよりも扱いが困難である。実サービスや実証実験によって得られるデータを複数の機関で利用しやすくするための法整備も必要である。

音声対話を用いたシステムが既に商用でサービスされていることから、音声対話の多くの問題が既に解決したと考えがちであるが、それは誤りである。コールセンターやミーティングにおける音声認識率が低いことからも分かるとおり、人間同士の自由発話はまだまだ処理が難しい [7]。また、現状の音声対話システムは決まり切ったタスクしか実行できないタスク指向型対話システムであり用途には限界がある。人間同士の会話を、文脈を踏まえて適切に

理解したり、人間の知的活動を支援したりできる音声エージェント実現のためには、依然、基礎研究から応用研究まで幅広い支援が必要である。なお、音声対話の研究は分野横断的であるが、複数の分野の研究者が共同で研究を行う営みは少ない。複数の分野の研究者を共同研究させる政策が必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

音声対話ビジネスが急速に勢いを増している。法人向けでは、Nuance を主要ベンダとして、車載、医療、IVR、CRM（顧客関係管理）、speech analytics (音声データの分析)の分野が活発である。IBM の人工知能である Watson もコールセンターの会話分析に用いられ始めた [8]。個人向けでは、Apple の Siri、Google の Google Now、Microsoft の Cortana、NTT ドコモの「しゃべってコンシェル」などの音声エージェントが一定の支持を得ている。Amazon は Amazon Dash や Amazon Echo という、日常生活を会話によってサポートしたり、商品名を話すだけで注文ができたりするデバイスを販売している。家庭用ロボットの商用化も始まっている。国内ではシャープが会話できる掃除機である COCOROBO を販売している。また、ソフトバンク社がパーソナルロボット Pepper を 2015 年に発売する。 MIT 発のベンチャーは 2015 年末に家庭用アシスタントロボット Jibo [9]を発売予定である。音声対話技術が日常に入り込みつつある。

研究面では、産業界の動きを反映して、実用的な音声対話システムに向けた動きが多い。Dialogue State Tracking Challenge [10] と呼ばれる共通タスクが Microsoft やケンブリッジ大の研究者を中心に開催され、タスク指向型対話システムにおけるロバストな意図理解の手法が競われている。また、Real Challenge [11]では、実ユーザーに実際に利用される音声対話システムのアイデアが競われている。GPS、スマートフォン、Google Glass、Kinect、iWatch などのデバイスから得られるセンサー情報を用いてユーザーの状況を適切に理解し、高度な対話処理を実現する研究も増加している。この分野は Situated Dialogue と呼ばれ、国際ワークショップ [12]や国際会議の特別セッション [13]も開かれている。扱われるアプリケーションとしては、カーナビゲーションや歩行者の案内システムが多い。

国内では、ヒト型ロボットの研究が盛んなこともあり、コンピューターとの自由な会話を実現するシステムの研究が増加している。Project Next NLP[14]と呼ばれる自然言語処理のプロジェクトの中では、産学合わせた 15 の機関が人間とコンピューターの雑談の分析を共同で行っている [15]。また、NII 主催のグランドチャレンジとして「ロボットは井戸端会議に入れるか」プロジェクトが立ち上がっている [16]。CREST や ERATO が支援する対話関連プロジェクトにおいても雑談の実現が目的に含まれている。なお、2014 年 6 月、チューリングテストに Eugene と呼ばれるチャットボットが始めて合格したと大きく報じられたが [17]、このシステムは数分間の対話を人手による膨大なルールで実現するものであり、本質的なブレークスルーではない。海外では、雑談よりも実際的な、交渉や議論といったやり取りが可能な音声対話システムを実現しようとする動きが強まっている。米国では軍がこの取組みを支援している [18]。

（６）キーワード

音声対話システム、音声エージェント、音声認識、自然言語処理、人工知能、パーソナルロボット、雑談、Situated Dialogue

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・大学・公的機関における基礎研究のレベルは高い。主要な国際会議では、米国とは差があるものの、英国、ドイツと並ぶ論文数が採択されている。NTT、NICT、HRI-JP（ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン）、京大、阪大、奈良先端大が有力機関である。 ・対話システムシンポジウム、人工知能学会における特別セッション、「知的対話システム」の論文特集が企画されるなど、本分野の学会活動は活性化している。 ・CRESTのuDialogue、ERATOの石黒共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト、Project Next NLPにおける対話タスク、NIIのグランドチャレンジの「井戸ロボ」などの対話関連プロジェクトが立ち上がっている。
	応用研究・開発	○	↗	・トヨタ・ホンダなどの自動車メーカー、シャープや東芝などの家電メーカー、NTTドコモやソフトバンクなどの通信会社が音声関連サービスの研究開発を進めている。CEATEC Japan 2014でも関連展示が多く見られた。 ・2020年に向けて、NICTが多言語観光案内音声対話システム開発のための取組みを始めている[19]。
	産業化	○	↗	・NTTドコモの「しゃべってコンシェル」、Yahoo!の「音声アシスト」など、音声エージェントが一般に広く利用されるようになっている。特に、しゃべってコンシェルでは数百のキャラクターとの音声対話が可能となっており若年層からも人気を集めている。 ・シャープのCOCOROBOやソフトバンクのPepperなどのパーソナルロボットが一般に販売されている。
米国	基礎研究	◎	→	・主要な国際会議における論文数では米国はトップである。 トップカンファレンスであるSIGDIAL2014[20]では論文の約半数が米国の研究機関によるものであった。カーネギーメロン大学、南カリフォルニア大学、Microsoftなどが有力機関である。 ・Dialogue state tracking challenge や Real challenge などの共通タスクは米国が牽引しており研究トレンドを生み出している。
	応用研究・開発	◎	↗	・医療分野では、DARPAが兵士やその家族の精神的サポートを行うSimSensei [18]と呼ばれるシステムを巨額なファンドで支援しており、実ユーザーを用いた実証実験が行われている。また、病院において看護師を支援するシステムの実証実験も進められている[21]。 ・Google、Microsoftなどの検索大手は自社サービスに向けた音声認識・音声理解技術の研究開発を進めている。Microsoftは Skype通話の解析も進めており、通話の自動翻訳サービスを予定している[22]。
	産業化	◎	↗	・Amazon によるAmazon DashやAmazon Echo、Nuanceによる車載・医療・ウェアラブル・IVR向けサービス、家庭用アシスタントロボットJiboなど多くの商品が発売されている。 ・音声ベンダのエキスポであるSpeechTEK 2014では400名を超える関係者が集まった。Nuanceの売り上げは17億ドルにも上り[23]、音声ビジネスを牽引している。 AT&T、SpeechProなどの多くの音声SIベンダが活発に活動している。 ・AppleのSiri、GoogleのGoogle Now、MicrosoftのCortanaなどの音声エージェントが出そろい、シェアの獲得競争を行っている。

欧州	基礎研究	◎	↗	・SIGDIAL 2014では欧州が米国に次いで発表件数が多い。特に、英国とドイツの発表が多く、英国ではケンブリッジ大学、ヘリオットワット大学、ドイツではビーレフェルト大学、ウルム大学が有力研究機関である。 ・欧州は、対話のモデル化、ドメイン適応、強化学習を用いた統計的対話制御などの基礎理論に関する研究が強い。近年の統計的対話制御に関する文献の大部分はケンブリッジ大のSteve Young教授、ヘリオットワット大のOliver Lemon教授の研究室から発表されている。 ・FP7が基礎研究を強く支援しており、ここ数年で10件近いプロジェクトが進行している。European Research Counselも先駆的な音声対話システムのプロジェクトを支援している[24]。2015年からはHORIZON2020の枠組みで同様の支援が継続される見込みである。
	応用研究・開発	○	→	・FP7のプロジェクトは企業も多く参画する。大規模な対話ストリームの分析を行うSENSEI[25]ではエリクソンやSAPを始め多くの企業が参画している。FP7ではシステム開発に資するプロジェクトも一定数あり、Port dial[26]は多言語化、DIRHA[27]は家庭内音声対話、PARLANCE[28]は実用性のある音声対話システムの構築が目標である。 ・ドイツでは、車載関連やユーザビリティ評価についての研究が多い。ダイムラーはウルム大と共同で運転中でも安全に利用できる音声エージェントの開発を行っている[29]。また、TU-Berlinは音声サービスの評価に関わる研究を積極的に進めている[30]。
	産業化	△	→	・欧州では産業界が米国ほど活発ではなく、産業化について目立った動きはない。しかし、基礎研究が強く、また、公的なファンドが安定して供給されていることから、今後産業化の動きが活発化する可能性がある。
中国	基礎研究	△	→	・公的ファンドとしてNational Natural Science Foundation of China (NSFC) のExcellent Young Researcher Project が音声対話研究を支援している。 ・国際会議でのプレゼンスは低いが、海外に留学している研究者も多く、基礎研究のレベルが低いとはいえない。 ・主要な研究機関としては、上海交通大学のKai Yu教授の研究室とChinese Academy of Sciencesがある。
	応用研究・開発	△	→	・BaiduやiFlyTekが音声エージェントの研究開発を進めている。Microsoft Research Asiaも対話システムの検討を進めている[31]。
	産業化	○	↗	・Baidu Voice Assistant とiFlyTekのYuDianが一般に利用されている。iFlyTekの中国語の音声認識性能は高く、YuDianの評判は非常に良い。
韓国	基礎研究	△	↗	・浦項工科大学校と西江大学校が主要研究機関である。浦項工科大学校のLee教授は韓国の音声対話を牽引する人物で国際的な知名度も高い。 ・公的ファンドによるプロジェクトDeveloping Personal assistant Software Platform with Multi-domain Dialogue Interfaceが進行中である。西江大学校のSeo教授が研究代表者である。 ・国際会議においては、韓国の発表件数は多くないが一定のプレゼンスは保っている。
	応用研究・開発	○	↗	・Samsung、LG、SK telecom、KT、NAVER、Daum がそれぞれの業務分野において音声を用いたアプリケーションの研究開発を活発に進めている。
	産業化	○	↗	・音声対話が可能なデバイスとして、SamsungはSmart TVやS-Voice をサービスしている。LGはSmart Watchを発売している。

（註1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註2）現状

※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 石崎雅人、伝康晴：談話と対話、東京大学出版会、2001。
2) 河原達也、荒木雅弘：音声対話システム、オーム社、2006。
3) 河原達也：音声対話システムの進化と淘汰-歴史と最近の技術動向-、人工知能学会誌、vol.28、No.1、pp.45-51，2013。
4) http://www.corp.att.com/attlabs/reputation/timeline/01hmihy.html
5) https://www.apple.com/jp/ios/siri/
6) https://www.nttdocomo.co.jp/service/information/shabette_concier/
7) 島津明、堂坂浩二、川森雅仁、中野幹生：話し言葉対話の計算モデル、電子情報通信学会、2014。
8) http://www-06.ibm.com/jp/press/2014/11/0602.html
9) http://www.myjibo.com/
10) http://research.microsoft.com/en-us/events/dstc/
11) https://dialrc.org/realchallenge/
12) http://www.uni-ulm.de/in/iwsds2014.html
13) http://www.interspeech2014.org/public.php?page=special_sessions.html#open-domain-situated
14) https://sites.google.com/site/projectnextnlp/
15) 東中竜一郎、船越孝太郎：Project Next NLP 対話タスクにおける雑談対話データの収集と対話破綻アノテーション、人工知能学会研究会資料 SIG-SLUD-72，2014。
16) http://research.nii.ac.jp/~bono/ja/aboutus/theme03.html
17) http://www.reading.ac.uk/news-and-events/releases/PR583836.aspx
18) http://ict.usc.edu/prototypes/simsensei/
19) 水上悦雄、岡本拓真、堀智織：多言語音声翻訳・対話システム構築ツールの公開に向けて、人工知能学会研究会資料 SIG-SLUD-72，2014。
20) http://www.sigdial.org/workshops/conference15/
21) http://relationalagents.com/projects/2.html
22) http://research.microsoft.com/en-us/about/speech-to-speech-milestones.aspx
23) http://www.nuance.com/company/company-overview/fast-facts/index.htm
24) http://www.irit.fr/STAC/
25) http://www.sensei-conversation.eu/
26) https://sites.google.com/site/portdial2/
27) http://dirha.fbk.eu/
28) https://sites.google.com/site/parlanceprojectofficial/
29) Hansjörg Hofmann, Mario Hermanutz, Vanessa Tobisch, Ute Ehrlich, André Berton, Wolfgang Minker: Evaluation of In-Car SDS Notification Concepts for Incoming Proactive Events,

Proc. IWSDS, 2014.
30) http://www.qu.tu-berlin.de/menue/qu/parameter/en/
31) http://www.msxiaoice.com/

３．８．４　画像・映像の意味解析

（１）研究開発領域名

画像・映像の意味解析

（２）研究開発領域の簡潔な説明

画像・映像等の視覚情報を対象とした、人間と知能機械のコミュニケーションを行うための表現メディアの解析・意味処理とその検索・変換・編集に関する研究開発。マルチメディアコンテンツのメタデータ付与、検索、利活用等を含む。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

画像・映像処理とは、画像・映像をデータとして計算機で処理する技術のことを指し、特にその意味解析とは、画像・映像の意味内容を計算機により推定する等、画像・映像の意味内容に基づいた計算機処理を指す。そもそも画像・映像は、「百聞は一見にしかず」というように、人間にとっては、極めて情報豊富で、包括的な情報源であって、その意味内容も容易に理解可能であり、コミュニケーションにおける表現メディアとしても極めて有効である。加えて、画像・映像処理、特に意味解析への要望は強く、顔による入退室管理、郵便番号を含む紙ドキュメントの文字認識、Web 上の画像・映像検索、e-コマースや画像・映像提供サービスにおける検索や推薦、放送映像やオンデマンド番組提供における検索、市場調査における特定商品の放送映像・ネット（ブログやツイッターを含む)における画像としての露出調査、監視カメラ映像解析、農場における作物生育状況の自動監視等、その応用は極めて多岐にわたる。計算機処理により高速化・大規模化が可能となり、画像・映像の意味解析技術への期待が高まっている。

しかしながら、数値やテキストデータに比べ、画像・映像の計算機処理は一般に困難で、特に意味解析は極めて困難であり、人間が行うような柔軟な画像・映像の意味理解には通常遠く及ばない。現状の技術では、特定の対象に対する特定のタスクについて研究開発を行い、成果を挙げている。特に、視線方向の変動による透視投影変換歪み、照明条件の変動、物体の運動や変形等による視覚情報の不定性に対応した視覚特徴量の開発と、機械学習技術の応用により、当該対象・タスクに対応した大規模学習データに基づいた戦略的な技術開発が、いくつかの対象において功を奏している。

［これまでの取組み］

まずは、社会的要請の高さから、画像・映像中の顔の検出・照合・認識、ならびに（印刷と手書き両方を含む）文字画像の認識に関する研究が突出して進んでいる。入退室管理から、iPhoto や Picasa のような個人用写真管理ツールでも顔認識技術は実用化されており、文字認識も古くは郵便番号の自動読み取りシステムから、名刺管理システムや Evernote のような個人用情報管理ツールでも文字認識技術が利用されており、実用レベルにある。わが国の技術レベルも世界トップクラスである。顔認識については、そもそも画像入力から認識まで首尾一貫して計算機で実現した世界最初のシステムは CMU の金出武雄による京大博士論文の研究（1973 年）であるといわれている。現在も、米国標準技術局(NIST)による顔認証技術ベンチマーク(Face Recognition Vender Test: FRVT [8])において、2013 年に NEC が世界

第１位の認識性能を達成している。オムロンは１万人の顔をさまざまな表情・方向・照明条件等で撮影した大量の画像データベースをもとに顔認識関連技術 OKAO Vision を開発し、トップレベルの性能ならびに世界トップレベルのシェアを達成している[9]。

顔・文字の解析における研究黎明期には NIST 等による研究用データの整備（顔データベース FERET[10]、文字データベース MNIST[11]等）、大学も含む研究の進展が見られ、特に日本においても政府によるプロジェクト推進（1971 年より 10 年間、通産省工技院を中心としたパターン情報処理大型プロジェクト）、電子技術総合研究所（現、産業技術総合研究所）等によるデータ整備（ETL 文字データベース[12]）等により、特段の技術の進展があった。やがて、産業としての価値が認められると、各企業による独自のデータ整備と研究が進展するようになり、大学等は追従しにくくなる。日本でも、顔・文字については、このようにして企業による技術の進展が見られる。

一般の画像・映像を対象とした意味解析では、映っている事物の認識、シーンの分類、動作の認識等が目的であり、インターネット上の画像・映像の検索、e-コマースにおける物品画像の検索・推薦等を始め、さまざまな応用がある。こうした研究開発のため、Caltech(米)[13]、PASCAL VOC(欧)[6]、TRECVID(米)[4]、ImageNet(米)[1]等、大学や公的資金援助による大規模データセットが構築され、大学も含み研究が進展してきている。日本でも PASCAL や TRECVID において東大、東工大、国立情報学研究所、NTT 研究所等により世界的にも競争力のある技術が開発されている。日本においては、一般画像の意味解析を利用する産業応用(画像検索等)の素地ができておらず、企業の参加が鈍い。海外においては、Microsoft (Bing)、Yahoo!、アリババ・グループ、Baidu 等においてこうしたビジネスが立ち上がっており、画像検索のクリックログ等の独占利用データができつつあり、大学等こうしたデータを持たない研究機関による追従が難しくなりつつある。一般画像・映像の意味解析でも deep neural network (DNN)により高性能が達成されてきているが、DNN の先導的な研究者もこうした企業による囲い込みが進んでいる(DNN 生みの親の Geoffrey E. Hinton 教授は Google に、Yann LeCun 教授は Facebook に所属)。欧州においては、米国等による技術の独占先行を阻むために重要であるとの考えから、FP6/FP7 において画像・映像等のマルチメディア内容解析技術の特段の推進が図られ、多くの研究機関において特段の技術的な躍進が図られた。日本においては、この点でも弱い。

［今後必要となる取組み］

今やインターネットにおける通信量も大部分が映像であり、いわゆるビッグデータにおいても、現状では数値ならびにテキストデータの解析がほとんどであって、画像・映像のビッグデータ的な解析は未開拓の領域といえる。また、画像・映像は人間には理解しやすいが計算機には「理解」できないので、感知されないように情報をやり取りするメディアとしては最適であり、米国では画像・映像意味解析をホームランドセキュリティーのための重要な技術と位置付けていると考えられる。画像・映像の意味解析技術は、ビッグデータ、Web 検索、監視カメラ映像解析等、安心安全のための IT、農場自動調査等グリーンイノベーション、ライフサイエンス等、ありとあらゆる分野で必要とされる基盤技術である。今後、特に顔・文字に限らない一般の画像・映像の意味解析技術の研究開発の推進が重要と考えられるが、わが国においては、こうした技術を主として扱う産業の素地が脆弱であり、加えてそれ

を補完するような、画像・映像の意味解析を中心に据えた国プロ等の施策が少ない。当該技術の推進のためには、こうした点に対する対策が必要である。

（４）科学技術的・政策的課題

・大規模データの収集: 多様性を有する画像・映像解析の研究開発には、実際の対象と同等の特性を持ち、実際の多様性を反映する十分大規模な研究開発用データの収集が重要となる。昨今は、特に、インターネットから容易に収集可能なデータも多く、技術的には研究開発用の大規模データの収集は容易になってきているが、こうして構築したデータを研究コミュニティーに公開するのは、著作権・肖像権・個人情報保護法等の問題により難しい。米国ではフェアユース規定によりこうした活動が広く行われているが、日本においては一般により困難である。その一方、検索エンジンや e-コマース、SNS 等を有する企業による独自のデータを用いた開発も進んできている。例えば、DNN を用いた顔認識技術 deepface が Facebook の研究者らにより開発され、人間が行うのと同等の認識性能が報告された[14]が、その学習には Facebook が保有するデータから得た 440 万顔画像が利用されている。

・政策的な研究開発の底上げ: IT メディア分野の産業においては、特に研究開発から展開までの速さ、世界的な展開の容易さ等から、一つないしはごく少数の企業のみが「勝ち残る」ケースが多い。こうした「勝者」が米国に集中している状況では、米国以外では当該分野の研究開発が、自然発生的に世界的にも存在感を示すほど進展することは考えにくい。これを打破するためには、欧州における FP7 のマルチメディア内容解析技術への取組み、中国・韓国における国家的な研究推進戦略の一定の成功を見るに、日本でも政策的な研究開発の底上げが重要と思われる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・ImageNet [1]は、米国スタンフォード大 Li Fei-Fei 教授らが構築している画像意味解析用のデータセットであり、1 万オーダーの。規模、品質ともに群を抜いており、当該研究分野の研究ならびに評価のデファクトスタンダードとなっている。

・フランス国立視聴覚研究所 (INA) [2]は、1974 年制定のラジオやテレビ放送を含む視聴覚資料の保存に関する法律に基づき、1975 年に設立された機関であり、現在までフランス国内のラジオ・テレビ放送を原則すべて蓄積し続けている。コンテンツは商用・研究用に提供されている。オランダにも視聴覚研究所(Netherlands Institute for Sound and Vision) [3]があり、オランダ国内のテレビ放送を含む視聴覚情報を蓄積し、研究用の提供も行っている。

・米国標準技術局(NIST)では、TRECVID [4]プロジェクトにより、映像解析・検索プロジェクトの推進を図っており、大規模データセットの構築・配布、研究マイルストーンの策定を行い、世界中の研究グループを主導している。顔認識に関しての取組みでは、FERET [10]は NIST により構築・配布された顔認識評価用のデータセットであり、FRVT [8]は NIST により主催されている主として産業界を対象とした顔認証技術ベンチマークである。

・Labeled Faces in the Wild(LFW) [15]は、より「ワイルド」な状況、すなわち、顔の向き、

表情、照明条件等に制限が一切ない顔画像データセットであり、インターネットから収集された 1680 人分 1 万 3000 枚以上の画像からなる。FERET よりも挑戦的であり、顔認識技術の評価のための新たなデファクトスタンダードとなっている。

・米国 IARPA ALADDIN プロジェクト[5]では、2011 年から 5 年計画で、インターネット上の映像を含む任意の映像中の動作等のイベント情報を極めて高い精度で検出する技術の実現に取り組んでいる。IARPA 主導のプロジェクトであることから、米国において、この挑戦的な研究開発が国家安全上重要な課題として認識されていると考えられる。

・欧州では、FP6/FP7 等を通じて、Web、検索、マルチメディア解析等を含むさまざまなプロジェクトを支援している。PASCAL VOC (Visual Object Classes) [6]は、FP6 の援助による PASCAL プロジェクトの一部であり、ImageNet と比較して小規模ながら極めて高品質の画像意味解析向けデータセットならびに研究マイルストーンを構築し、研究コミュニティーを主導している。Chorus+1 [6]は、FP7 の援助による、多数のプロジェクトを携えた巨大プロジェクトであり、マルチメディア検索エンジンの構築を主目標としている。Theseus や Quaero も含んでおり、Petamedia プロジェクトではマルチメディア解析のベンチマークにより研究コミュニティーを主導する MediaEval プロジェクト [7]を支援している。

・タスクが決定された状態における日本の技術水準は世界的に見ても高い。顔認証技術については、NEC の技術が 2013 年の FRVT [8]において世界第 1 位の精度を達成している。画像・映像意味解析・検索技術については、ImageNet [1]データを利用した PASCAL VOC [6]における大規模画像意味解析コンペティションにおいて、東京大学原田達也教授のチームが 2012 年に世界一位の認識精度を達成している。また、TRECVID [4]の SIN(映像意味分類)タスクにおいて東京工業大学篠田浩一教授のチームが 2011、2012 年に世界一位の認識精度を達成している。また、同 INS(物体検索)タスクにおいて、国立情報学研究所佐藤真一教授のチームが 2011、2013、2014 年に世界一位の検索精度を達成している。

（6）キーワード

大規模学習データ、マルチメディア、検索、内容解析、意味解析

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・データセット構築・公開については△ ・わが国においては、著作権・肖像権・個人情報等の問題により、大量に収集され、研究用途に広く公開されている画像・映像データセットはまれである。 ・研究については○ ・顔・文字について、技術水準は世界的に見ても高く、基礎技術におけるブレークスルーについては落ち着いている感があるが、まだ広く研究が進められている。 ・一般の画像・映像の意味解析・検索等についても、大学・国研等において盛んに研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・顔・文字については広く応用研究・開発が進んでいる。 ・一般の画像・映像の意味解析・検索等の応用についても研究・開発が進められている。
	産業化	○	→	・顔・文字については産業化も進んでおり、世界的にも存在感を示している。 ・一般の画像・映像の意味解析・検索に関する産業化については、特にインターネットにおける検索エンジンやe-コマース等において、こうした技術を核とした産業化が遅れている。
米国	基礎研究	◎	→	・研究を戦略的に振興するため、研究用データセットの構築ならびに配布、研究すべきタスクの設定ならびに研究コミュニティーへの発信等、積極的に世界でも中心的な役割を果たしてきている。NIST等がその中核的な機関となっている。 ・NSF等により、上記のような機関とも呼応して、米国内での基礎研究を特段にサポートしており、顕著な研究成果を挙げている。実際の研究コミュニティーにおいても、米国の大学等の研究者が主導的な役割を担っている。 ・IARPA ALADDINプロジェクトにおけるインターネット上の映像のイベント解析等、より挑戦的な画像・映像意味解析研究への政府主導の動きが見られる。 ・ディープラーニング等新たなブレークスルーについても、主導している。
	応用研究・開発	◎	→	・Google、Facebook、Microsoft等の米国内の巨大ITメディア企業でも研究部門を有し盛んに応用研究・開発を行っている他、大学とこうした企業との連携も盛んであり、加えて大学において、起業を目指した応用研究・開発も極めて盛んである。
	産業化	◎	→	・今後の研究開発において重要となる、画像・映像意味解析におけるビッグデータを実際に保有する企業は、Google、Facebook、Microsoftなど、ほとんど米国に集中している。基礎研究、応用研究・開発の層の厚さとも相まって、今後とも画像・映像意味解析研究の産業化においても米国は主導的な役割を果たすと思われる。
欧州	基礎研究	◎	→	・EUを母体とし、欧州内の複数の国家にまたがる共同研究が非常に盛んであることから、大規模データセットを共有したオープンな研究について非常に積極的である。 ・マルチメディアを対象とした研究にもこうしたアプローチをとっており、MUSCLE、Chorus、Quaero等のプロジェクトがある。 ・Image CLEF、PASCAL VOC、MediaEvalにおいては、実際の研究用マルチメディアデータセットを構築し、研究コミュニティーに公開している。
	応用研究・開発	○	→	・FP6/FP7ならびにHorizon2020において、産官学の連携によるプロジェクトの推進も振興されており、基礎研究の成果を応用するプロトタイプの開発なども盛んに行われている。
	産業化	○	→	・産学官連携コンソーシアムとしてのQuaeroにおける参画企業の積極的な活動等、産業化にも積極的であり、実際にExaleadの起業等の例もある。しかし、世界的に顕著な存在感を示すまでには至っていない。

中国	基礎研究	○	↗	・データセットの構築・配布、タスク設定による行うべき研究の方向性の提示等の例はほとんどない。 ・研究は極めて盛んに行われている。特にマルチメディア分野においては、中国の大学は、特に近年顕著に能力を上げてきており、トップ会議にも採択論文が散見されるようになってきている。 ・中国の大学において、米国や欧州の有力研究者との連携を図り、研究能力の飛躍的発展を実現できている例が多く見られる。
	応用研究・開発	○	↗	・Microsoft Research Asiaや、Baidu、アリババ・グループ等ならびにこうした企業と連携した大学等において、画像・映像の検索等の応用研究が盛んに行われている。
	産業化	○	↗	・Baiduやアリババ・グループ等、大量のデータも保有し世界的な存在感を急速に上げている企業が出てきている。
韓国	基礎研究	○	→	・データセットの構築・配布、タスク設定による行うべき研究の方向性の提示等の例はほとんどない。 ・研究は盛んに行われている。画像・映像圧縮、コンピュータービジョン等の分野では顕著な成果が見えている。一方、画像・映像の検索や応用を主としたマルチメディア分野の研究はあまり盛んではない。
	応用研究・開発	△	→	・基礎研究から応用に結びついた例はまだ多くは見られないが、基礎研究の進展を見るに、今後は応用研究・開発の進展も見込まれる。
	産業化	○	→	・サムスングループ等において研究開発が行われている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) ImageNet
http://www.image-net.org/
2) フランス国立視聴覚研究所(INA)
http://www.ina.fr/
3) オランダ視聴覚研究所(Netherlands Institute for Sound and Vision)
http://www.beeldengeluid.nl
4) TRECVID
http://trecvid.nist.gov/
5) IARPA ALADDIN プロジェクト
http://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/aladdin-video
6) PASCAL VOC
http://pascallin.ecs.soton.ac.uk/challenges/VOC/
7) MediaEval
http://www.multimediaeval.org/
8) Face Recognition Vendor Test (FRVT)
http://www.nist.gov/itl/iad/ig/frvt-home.cfm

9) OMRON OKAO Vision
http://plus-sensing.omron.co.jp/technology/
10) FERET
http://www.itl.nist.gov/iad/humanid/feret/feret_master.html
11) MNIST
http://yann.lecun.com/exdb/mnist/
12) ETL 文字データベース
http://etlcdb.db.aist.go.jp/?lang=ja
13) Caltech 画像データベース
http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech101/ http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech256/
14) Yaniv Taigman, Ming Yang Marc'Aurelio Ranzato, Lior Wolf, DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition, 2014.
15) Labeled Faces in the Wild (LFW)
http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/
16) Chorus+
http://avmediasearch.eu/

３．８．５　言語と映像の統合理解

（１）研究開発領域名

言語と映像の統合理解

（２）研究開発領域の簡潔な説明

文字・音声等の言語情報と画像・映像等の視覚情報の融合的な処理による相互の対応の認識・学習、またそれに基づく言語・視覚情報の統合的な理解・編集に関する研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

言語情報および画像・映像情報の意味解析技術がそれぞれ長足の進歩をとげつつある今日、これら異なるメディアの情報の間の意味的な対応関係を認識・学習し、両メディアの情報を統合的に解析・理解する次世代の研究への関心が次第に高まってきている。画像・映像データの意味内容を言語でより精緻に記述できるようになれば、例えば画像・映像データの検索や分類において、物体のカテゴリや名称だけでなく、物体間の関係や事象・情景といった高次の意味的情報が利用できるようになる。画像・映像データに対する要約やマイニング等の自動編集にも現実性が出てくる。言語処理の観点からも、画像・映像付きの言語データの意味内容が画像・映像と対応づく形で解析できるようになれば、言語だけでは伝わりにくい物理的位置関係や動作、物体の質感等の情報を含めたデータ解析につながる。モバイル端末からの情報検索、質問応答等の言語情報サービスにおいても、ユーザーの周囲の視覚情報を質問のコンテキストとして利用することによって、高度に文脈適応的な情報提供が可能になると期待できる。また、ロボットとの自然言語対話、言語による制御においても言語・視覚情報の統合理解は必須の技術である。

言語と画像の統合理解はもともと 1970 年代の初期の人工知能研究から想定されてきた目標であるが、わずか数年前まではまだ遠い目標と考えられていた。統合理解のための基本条件と考えられる画像・映像の意味解析、すなわち画像・映像中のどこに何があり、どのように動いているかの一般的な解析が言語の意味解析に比べてはるかに困難であったことが主な理由である。しかし、そうした見方が今大きく変わりつつある。第一に、「3.8.4 画像・映像の意味解析」領域の報告にもあるように、大規模学習データに基づく戦略的な技術開発、深層学習等の機械学習技術の発展などにより、一般の画像・映像を対象とする意味解析が徐々に現実味を帯びてきている。第 2 の変化は、キャプションなどの言語情報が付与された膨大な量の画像・映像データが Web から入手できるようになったことである。従来の画像認識研究では研究用に統制された学習データを用いるのが一般的であった。こうしたデータに比べ、Web から入手できるキャプション付きの画像・映像データは規模の面でも多様性の面でもはるかに大きく、事象・行為・情景などの高次の視覚情報と言語による記述の対応を学習できる研究環境が出現しつつある。こうした状況の変化を受けて、「言語による画像・映像の意味記述（キャプション生成）」、「実世界にグラウンドされた言語学習（grounded language learning）」などの切り口で言語と画像・映像を統合する萌芽的研究が一つの学際領域を形成し始めている。

米国では、画像認識、言語解析、機械学習をリードするいくつかの大学の研究グループに加え、Google、Microsoft、Baidu 等の企業研究所がこの分野の基礎研究を牽引する勢力に

なりつつある。欧州では、英国の研究助成機関 EPSRC に支援された研究コミュニティー（V&L Net [1]）が同分野に関する国際会議を 2011 年から 3 回開催するなど、関心が高まっているが、学術的に強いインパクトを持つ動きはまだあまり見られない。日本は、言語解析、画像認識それぞれの要素技術において高い国際競争力を有しており、統合理解に向けた取組みでも東大、国立情報学研究所等がキャプション生成で先駆的な研究成果を挙げるなど、潜在的な競争力は十分にある。

重要な点は、いずれの地域においてもまだ萌芽的な基礎研究の段階にとどまっており、当該技術の応用開発・産業化によって将来大きな市場の開拓が見込めるにもかかわらず、どの地域もそこに踏み出せていないことである。わが国が戦略的にこの分野の技術開発を行えば、学術界・産業界の両方において強力な主導権を確保できる可能性が高い。

（4）科学技術的・政策的課題

・言語・画像解析の研究分野ではこれまで、共通の問題設定と研究開発用データセットをもとに技術評価型の会議を組織し、戦略的な技術開発振興を成功させてきた面がある。しかし、言語と画像の統合理解についてはまだ極めて萌芽的段階にあり、研究者が共有できる問題設定もデータセットも存在しないのが現状である。画像・映像解析の技術評価で中心的な役割を果たしている米国の TREC/TRECVID [2]においても、キャプション生成を含め、言語・視覚情報の統合に踏み込んだ課題は見られない。今後、日本の研究機関がこの分野の標準となり得る問題設定と大規模なデータセットを早期に構築し、公開することができれば、わが国が同分野の主導権を握れる可能性もある。それには、国立情報学研究所が主体になって開催している評価型会議 NTCIR [3]など、わが国の言語・画像解析技術の強みを支える既存の枠組みを活用する他、言語処理・画像処理・機械学習等の第一線の研究者の領域横断的な連携を促進するプロジェクト型研究振興施策が有効であると考えられる。

・画像・映像の意味内容を言語で記述するという課題は、単なる物体や動きの検出を大きく超えて、究極的には例えば登場人物がどのような状況で何のために何をしようとしているかといった理解を目指すものである。しかし、現在のキャプション生成の代表的な方法は、入力画像の個々の断片から単語を生成し、それらを統計的な言語モデルで並べ替えているにすぎない。一方、言語処理の側では、大量の言語データから多様な世界知識・領域知識を獲得する研究が発展してきており、そこで得られる知識を用いてどのように言語の深い意味理解（事象間の因果関係や意図の構造の解析など）を実現するかが最先端の課題になっている。京大、東北大、奈良先端大、NICT など、わが国の言語処理研究チームはこの点で先進的な研究を展開しつつあり、こうした言語理解の研究をどのように画像・映像の深い意味理解につなげるかが今後の大きな課題になると予想される。

・静止画の意味解析についてはディープ・ニューラルネット等の近年の技術開発で大きな発展をとげた。一方、映像の意味解析は静止画の解析よりも困難であり、映像をディープ・ニューラルネットでうまく解析できたという例も現時点では報告がない。しかし、人間の認知機構から見ても時系列情報の処理は極めて重要であり、この問題でのブレークスルーが言語・視覚情報の統合理解への重要な鍵になると考えられる。

・言語・視覚情報の統合理解はヒューマノイドを指向するロボット研究の文脈でも重要なテーマの一つである。ロボットを人間と同じ環境に置き、実世界や周囲の人間とのインタラ

クションから言語と画像を統合的に学習するといった実験がヒューマノイドロボット等の技術革新により可能になってきている。こうした試みはまだ実験室レベルを出ないが、「実世界にグラウンドされた言語学習」の実現をテクノロジーの立場から目指す研究としても、またロボットを使ったシミュレーションによって人間の知能のモデル化を目指すサイエンスの研究としても重要な意味を持っており、今後の発展が期待される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・欧州の V&L Net が過去 3 回開催した Workshop on Language and Vision の他、言語処理分野 NAACL-2012、画像認識分野 CVPR-2013、人工知能分野 AAAI-2011、AAAI-2012、機械学習分野 NIPS-2011 などの国際会議でそれぞれ言語情報と視覚情報の統合に関するワークショップが開催され、また本会議で同分野の論文の受賞が相次ぐなど、新しい学際領域を形成しつつある。
・当該領域の研究開発推進に焦点を当てた大規模プロジェクトや大型の研究助成プログラムなどは国際的にも現時点ではまだ出てきていない。

（６）キーワード

画像・映像からのキャプション生成、実世界にグラウンドされた言語学習

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・キャプション生成等で先駆的で影響力のある研究を行っている。 ・言語処理、画像処理のおのおのの要素技術で強い国際競争力を持っている。 ・課題設定・データの共有など研究推進の共通基盤は未整備。NTCIR等でも言語と画像の統合までは踏み込んでいない。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき動きはまだ見えておらず、企業の動きも弱い。
	産業化	×	→	・特筆すべき動きはまだ見えていない。
米国	基礎研究	◎	↗	・数カ所の大学の研究グループ、およびGoogle、 Microsoft等の研究所で研究に着手。大学と企業の連携も見られる。 ・課題設定・データの共有など研究推進の共通基盤は未整備。TRECVID等も言語と画像の統合までは踏み込んでない。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき動きはまだ見えていない。
	産業化	×	→	・特筆すべき動きはまだ見えていない。
欧州	基礎研究	○	↗	・英国EPSRCの支援で研究コミュニティーV&L Netを構築。ワークショップを開催。 ・課題設定・データの共有など研究推進の共通基盤は未整備。Horizon2020等の大型研究助成の枠組みでもカバーしていない。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき動きはまだ見えていない。
	産業化	×	→	・特筆すべき動きはまだ見えていない。
中国	基礎研究	△	→	・画像・映像の意味解析の研究は活発になってきているが、言語との統合処理については目立った動きは見られない
	応用研究・開発	×	→	・特筆すべき動きは見られない
	産業化	×	→	・特筆すべき動きは見られない。
韓国	基礎研究	△	→	・画像・映像の意味解析の研究は活発になってきているが、言語との統合処理については目立った動きは見られない
	応用研究・開発	×	→	・特筆すべき動きは見られない
	産業化	×	→	・特筆すべき動きは見られない。

（註１）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註２）現状
※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註３）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) The EPSRC Network on Vision and Language
http://www.vlnet.org.uk/
2) TRECVID
http://trecvid.nist.gov/
3) NTCIR
http://research.nii.ac.jp/ntcir/index-en.htm

3.9 インタラクション

インタラクション研究分野は、人間と人間を取り巻く環境との相互作用をより快適に設計するための分野である。従来は、情報機器（例えばコンピューターや携帯電話など）とのインターフェース要素技術（狭義のユーザーインターフェースやインタラクションデザイン、対話技法、インプットデバイス）が主に検討されてきた。近年ではそれに加え、われわれをとりまく現実世界と情報世界との相互交流 （CPS、IoT）の発展、情報世界に蓄積される大量のデータ（ビッグデータ）とその解析技術の進展を背景に、インタラクション研究に求められるものもより拡大している。

本章では今後さらに重要性が増すと思われる以下の項目について取り上げる。

(a) 人間に密接するインタラクション：

コミュニケーションの手段として、従来の視覚中心のインタラクションに加え触覚（ハプティックス）など他のモダリティを取り込むことが期待されている。情報機器の新たな形態としてウエアラブルコンピューティングは人間の能力を常に増強し、身体状態のモニタリングなどヘルスケア分野への展開も期待されている。BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）は脳機能を補綴（ほてい）するための研究に加えて、健常人の身体行為の増強(オーグメンテーション、エンハンスメント)の基礎的な技術として発展する可能性がある。

(b) 人間の能力を拡張するインタラクション：

上記の BMI、 ウエアラブルコンピューティングも密接に関係するが、人間の知的あるいは身体的な能力を補綴・拡張するためのインタラクションを人間拡張工学と総称しとりあげる。電子義足のような身体機能を直接補綴するもの、テレプレゼンスやテレイグジスタンスのように人工物と人間の機能を融合して総合的に能力を高めるもの、など多くの可能性が想定される。

(c) 知的な人工物とのインタラクション：

人間の能力の延長としてだけではなく、ロボットのように独立して知的に振る舞う人工物とのインタラクションも重要性が増してくる。HRI（ヒューマンロボットインタラクション）では、ロボットの構成技術のみならず、ロボットと人間が共生するための社会的要因などの研究の展望についても取り上げる。

(d) 情報へのインタラクション・情報を物質化するインタラクション:

情報そのものへのインタラクションも、CPS や IoT の進展にともない重要性がさらに増して行く。コンピューターグラフィックスは現実のグラフィックスによる再現、シミュレーションなどの視覚化、映像表現などを包含し産業的な要請も大きい研究分野であるが、近年ではさらに 3D プリンターのようなファブリケーション技術と Computer Graphics(CG)分野で培われて来たシミュレーションやインタラクションが融合し急速に発展している。これは情報を物質化し現実世界へ還元するためのインタラクションととらえることができ、現実世界をセンシングして情報世界に取り込む IoT などの技術を補完するものと考えることがで

きる。

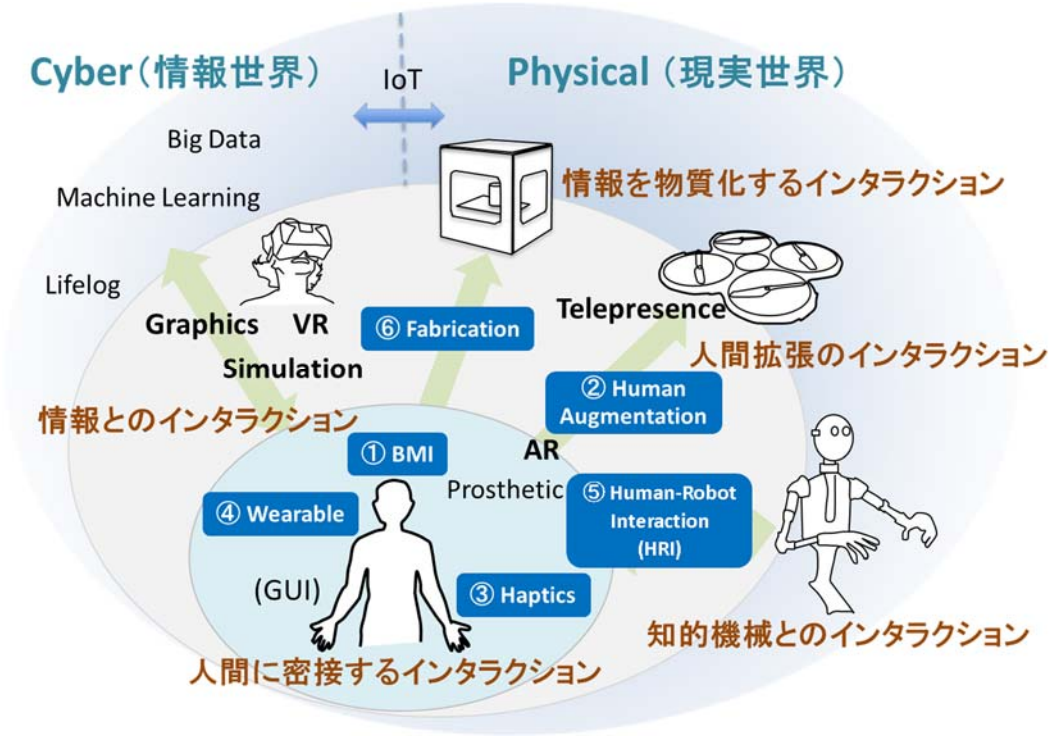


図 3.9.1 インタラクションの俯瞰図

３．９．１　BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）

（１）研究開発領域名

BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

BMI とは、脳内情報を直接読み取って外部機器の制御信号として用いたり、センサーによって取得された環境情報に基づいて脳の特定部位を刺激したりする、脳と機械の直接的なインターフェース全般を指す用語である。これまでの BMI 研究は主に、けがや疾病によって失った脳機能（身体運動、五感、認知機能など）を補綴（ほてい）するために、ロボットアーム、センサー、メモリーを脳に接続し、それらを身体化させる研究が進められてきたが、今後はその発展系として、健常成人に対する身体行為の増強や知的情報活動の支援をする開発が進む（エンハンスメント、オーグメンテーション）。さらには、人間の意識には上らないが脳は検知できる「ミリ秒」「ミリメートル」オーダーでの機械応答を系統的に設計して、潜在的な脳機能の拡張や、異なる脳内処理プロセスの併存と切替を支援する研究が広がる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[BMI の種類と開発目的]

BMI の種類には、大きく三つのものがある。すなわち、感覚機能を機械（センサー）に代行させ、センサー信号を脳神経に送り込む「感覚入力型 BMI」、脳の認知機能や情報処理過程に機械が介入し、脳内演算を修飾する「中枢型 BMI」、身体運動の企図を機械が読み取り、読み取った信号に基づいてロボットアーム等が動作する「運動出力型 BMI」である。BMI の目的には、病気やけがで失った脳神経機能を機械によって補綴する「サイボーグ治療」と、BMI を脳の機能的トレーニング装置として用い、脳の状態をチューニングする「ニューロリハビリテーション治療」の二つがある [1)]。

感覚入力型 BMI のなかで代表的なものに、聴覚障害者のための聴力補綴技術である「人工内耳」がある [2)]。人工内耳は、マイクロホンで取得した音波をマイクロチップ内で電気刺激パルス列に変換し、信号強度に応じて聴覚神経を刺激するもので、医療の世界では人工内耳システムと呼ばれている。人工内耳の研究は、1960 年代から 1970 年代にかけて重点的に実施され、1978 年にはヒトへの初の施術がおこなわれた。1980 年代からは多チャンネル化が進み、その有効性も明らかになったことから、世界各国で導入が進んでおり、現在国内でも保険適用の下で施術が受けられるようになっている。

感覚器機能の補綴を目指した BMI の第二の例は、視覚障害者のための視力回復技術である [3)]。これは、網膜や 1 次視覚野に電極を留置し、カメラ映像を二値化、輪郭強調化させたドットパターンに基づいて電気刺激を与え、視力を復元させるもので、人工視覚あるいは人工眼と呼ばれている。1968 年に専用の刺激装置を脳内に完全埋植した実験が、ヒトへの初の施術例と考えられている。最近になって臨床に耐えうるシステムが構築されるようになり、欧州では 2011 年、米国では 2013 年に販売承認がおりている。

このほかの五感については、いまだ基礎研究の段階か、基礎研究自体がはじまっていない段階にある。触覚や体性感覚については、2010 年代からようやく系統だった研究が開始された。これは、後述する運動出力型 BMI が一定の成功を収めたことを受け、より精度のよ

いロボットアーム制御を実現するために、感覚フィードバック研究が今後重要になると認識されたことによる。嗅覚や味覚については、その生理学的なメカニズムが十分に解明されていないため、それらに対する機械的介入方法がデザインできないでいる。なお、開発されている感覚入力型 BMI は、いずれのタイプも、「サイボーグ的治療」を目的としていることに留意されたい。

中枢型 BMI としては、パーキンソン病やジストニアによって生じる不随意運動を治療する目的で、脳の深部にある基底核へ針電極を外科的に埋植し、電気刺激によって異常な神経活動を選択的に阻害する脳深部刺激療法（Deep Brain Stimulation, DBS）が実用化している [4]。1987 年にパーキンソン病の治療としておこなわれた DBS が初めての臨床報告だと考えられている。当該疾患に対する第１選択療法はＬドパという薬剤の経口投与だが、長期服用にともなう副作用があるため、DBS は第２選択療法として確立している。DBS は、異常な脳内情報処理過程をメカニスティックに遮断する、という発想のため、「サイボーグ的治療」を目的とした BMI に分類できる。

中枢型 BMI の別の例としては、痛み知覚を鈍麻させる BMI トレーニングがある。これは、機能的磁気共鳴画像装置（MRI)とよばれる、磁気共鳴現象を使って脳の血流応答を計測する技術を用いて、痛みの知覚と調節の座である前帯状皮質の活動をリアルタイム計測して本人に視覚的なフィードバックを与えるものである [5]。被験者は、自身の前帯状皮質の活動量をみて、その大きさを自分の意志で増減するように努力する。継続的にこのシステムを使って訓練することで、被験者は痛みを感じにくい脳状態を自分の意思で作り出すことができるようになる。このほか、頭皮上から計測される電位である脳波をリアルタイムにモニタリングしながら、注意に関する脳活動のセルフコントロールを促進させる訓練法は「ニューロフィードバック」とよばれ、2006 年以降、てんかんや薬物依存に加え、パーキンソン病病、不眠症、うつ病、パーソナリティー障害、統合失調症、注意欠如多動性障害、自閉症スペクトラム障害など、多種多様な精神神経疾患や発達障害に試みられている。これらは全て、「ニューロリハビリテーション治療」としての BMI に属する。

運動出力型 BMI の研究は、前述の２つのタイプの BMI よりも後発である。これは、基礎研究領域において、運動をつかさどる脳部位の情報表現の理解が不十分であったことに起因する。しかしながら近年では、運動情報の表現様式について機械論的な体系化が一定水準に達したことにより、脳内の運動生成プロセスの一部を機械に代替させる研究開発が進められている [6]。電極を外科的に埋め込むタイプの侵襲性システムに関しては、生体親和性素材の開発、電極の微細化や高密度化技術、脳の皺にフィットする立体成型技術の発展により、脳を傷つけずに電極を親和させ、長期間にわたって安定的に留置できるようになりつつある。これにより、より複雑な身体運動をロボットアームに代替させる運動出力型 BMI が出現している [7]。感覚入力型 BMI の説明で述べたとおり、近年では、ロボットアームの指先で計測した圧力信号に基づいて感覚神経を刺激することで、身体運動と体性感覚のクローズドループを人工構築し、高い身体性と正確なロボットアーム制御を実現する試みが盛んになっている。

運動出力型 BMI の特徴は、脳と機械のコンタクト面である電極を脳内に埋植する上述の

システムだけではなく、非外科的な（非侵襲的な）脳計測を利用した研究も数多く存在する点にある。1980 年代ごろになって、脳信号の発生プロセスに関する応用物理的な理解が進み、計測技術や計算機の処理能力が飛躍的に伸展したことによって、EEG（脳波）、MEG（脳磁図）、NIRS（近赤外分光法）、fMRI （機能的磁気共鳴画像法）といった、さまざまなタイプの非侵襲脳活動計測の多チャンネル化（100 オーダー）、リアルタイム化（ミリ秒～秒オーダー）が進んだ。これにより、従前に必要だった 100～1000 回オーダーでの計測信号の加算平均が不要になり、リアルタイムな脳情報のデコーディングが可能となった。非侵襲の脳計測を使った BMI は外科的作業を必要としないことから、POC（Proof-of-Concept、 概念実証試験）と FIM （First-in-Man, 臨床試験）が早期に行えるため、ロボットアームやマウスカーソルを動かすようなサイボーグ的 BMI だけでなく、脳卒中片麻痺、脊髄損傷、書痙（しょけい）といった運動障害を生じさせる病態脳の異常活動を検出し、その状態を正常化させるために視覚フィードバックや体性感覚フィードバックを与える、ニューロリハビリテーションとしての BMI が盛んに研究されている[1)]。

［産業的な動向］

EEG や NIRS については安価、ウエアラブル、実環境計測可能、本人の意思で装脱着が可能、といった利点があり、健常成人をユーザーとしたアプリケーションの開発が盛んである。上述のような医学領域での急速な成功体験を踏まえて、一般向けの運動出力型 BMI に関する実用化研究が加速している。両手両足がふさがっていても、念じるだけで機械操作が可能であることから、自動車の電装系スイッチを入れる研究や、念力ゲームコントローラの開発が、大学や民間企業で進められており、後者については米国の少なくとも二つのベンチャー企業（NeuroSky[8)]、 Emotiv[9)]）が精力的に活動しており、製品を市場に供給している。国内では、米国ベンチャー企業が供給する脳波センサーを組み込んだ感性評価システムやエンターテインメントシステムなどが産業展開されている[10)]。一方で、脳信号が正しく検出されているかどうか十分な検証のないまま産業化しているとの批判や、長期使用によって脳に生じる悪影響も懸念されており、BMI の産業化に際しては、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues、倫理的・法的・社会的問題）の迅速かつ実効的な検討が望まれる[11)]。

中枢型 BMI の一般応用としては、脳状態をより適切な状態へ誘導する「機能増強（エンハンスメント）」を目指したものがある。睡眠時に記憶定着が起きる際に生じる特徴的な脳波（睡眠紡錘波）を BMI によって検知し、音刺激によってこれを増進させることによって、記憶定着率を高めるものが 2000 年代以降に相次いで報告されている[12) 13)]。現在は、2015 年内の販売を目指して、睡眠支援デバイスとしての産業化が進んでいる[14)]。また、ゴルフのパターのように、的を狙うスポーツ動作の際の脳波を解析すると、ハイスコアになる時にだけ特徴的な脳波パターンが出現することが知られており[15) 16)]、「本人の意識にはのぼっていないが、脳が高い集中状態にある」ということを本人にアラートし、トレーニングを支援する研究が進められている。

［国内外の動向］

感覚入力型 BMI の一つである人工視覚に関しては、Second Sight 社の製品である Argus 2 が欧州での CE マークを取得し、アメリカ食品医薬局の承認も得たところである。電極の

生体親和性を高めることと、高密度に電極を配置して解像度を高めることが次の技術課題として掲げられており、物性研究と微細加工技術分野との連携研究が進んでいる。日本では、より低侵襲な方式の人工視覚研究が、株式会社ニデック、大阪大学、奈良先端科学技術大学、九州大学らのチームによって進められ、文部科学省橋渡し研究加速ネットワークプログラムなどによって推進されている。

中枢型 BMI の一つである DBS は、腋窩に埋植するバッテリーに対して、経皮的に給電するシステムが実用化するところである。これにより、外科手術による数年ごとのバッテリー取り替えが不要になる。また、長期間にわたって脳を電気刺激することによる副作用を予防することと、症状の日内変動に対応した至適刺激を実現するために、脳活動や筋活動から病状をリアルタイムに同定し、その結果に基づいて刺激強度を調節するクローズドループ型の DBS の検討が進められている[17]。DBS を精神疾患治療に応用する試みは欧米を中心に進められているほか[18]、fMRI を用いて脳領域間の機能結合性を評価し、これをチューニングし直すことで精神疾患を治療する試みが、ATR、東大、昭和大などのチームによって開始されている（文部科学省脳科学研究戦略推進プログラム[19]）。

運動出力型 BMI は、ピッツバーグ大学やブラウン大学による医工連携チームが世界をリードしており[20, 21]、ブラウン大学からスピンオフしたベンチャー企業 BrainGate 社の製品がアメリカ食品医薬局の承認を得るところまで臨床研究が進められている。本邦では、欧米における BMI 研究との差別化を図り、これに対抗する目的として、医療応用を見据えた原理実証型研究が文部科学省主導により政策的に推進されている（脳科学研究戦略推進プログラム[19]）。これによって、長期に安全な埋め込み ECoG 電極を用いた、サイボーグ治療としての BMI 研究が大阪大学で進展するとともに、脳卒中やジストニアなどによる運動障害に対するニューロリハビリテーション治療としての BMI が慶應義塾大学で大きく成長している。またその果実の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 （NEDO）主導の産学連携プロジェクト[22]に移管され、薬事承認の取得をともなう医療機器の販売までを目指して開発が行われている（未来医療を実現する先端医療機器・システムの研究開発プロジェクト）。本プロジェクトは、2015 年 4 月に発足した日本医療研究開発機構 （AMED）に移管されることとなっており、政策的医療機器開発に関しては、これが AMED 発足後初の試金石となる。

米国や日本における医療応用としての BMI 研究とは別に、欧州では非侵襲的脳計測に基づいた BMI をバーチャルリアリティーと組み合わせたり、他の生体センサーと組み合わせたりすることで、高い没入感や身体性をユーザーに提供し、高齢健常人の能力や生活の向上や拡張、障害者の能力改善に応用する試みが盛んである。BrainAble（認知機能のトレーニング法を開発する）、BETTER（高齢者の運動機能の維持向上を目的として BMI を活用する）、ALIAS（BMI を通じて高齢者とロボットのインタラクションをうながして、動作介助やヘルスモニタリングを実現する）、PRESENCCIA（BMI をバーチャルリアリティー技術と統合して感覚認知機能を高める）、VERE（BMI を使ってヒューマノイドロボットに自己意識を投影し、テレプレゼンスを構築する）など、複数の欧州多施設プロジェクトが推進されており、当該分野における存在感を強めている。

（４）科学技術的・政策的課題

BMI は今後も、ロボット技術、テレプレゼンス技術、バーチャルリアリティー技術と融合しながら、身体行為の回復や増強が進むと思われる。早期に衰えを検出してそれを復調させる未病対応システムや、すぐに回復が促せなくても BMI が動作をアシストするサポートシステム、あるいはより強力に脳へ働きかけを行って積極的な脳のチューニングを行う治療システムといった、ヘルスケアと医療が連続的なスペクトラムとして提供される。超高齢化にともなう病院対応の限界が言われているなか、疾病予防をしたり、軽度の疾患をヘルスケア側で対応したりできるシステムが構築されることは、我が国の医療健康問題にも大きく資する。

一方、情報系（知能ロボティクス、インタラクション研究）が BMI を使いこなすためには、脳の特性を熟知し、その情報を読み出す部位や方法、そして情報を読み出すタイミングの「目利き」ができる神経科学者との共同が必要になる。脳は多自由度複雑系であり、その特性を理解しないままでは、十分に情報技術を活用することができない。

また、「意識に上らなくても、脳は外界情報をセンシングし、それに応じて脳内のプログラムを自動更新する」という、この 10 年で飛躍的に研究が進んだ神経科学上の発見や、その検証手段としての計算論的神経科学の方法[23]を取り入れることができれば、これまでの論点にはない新しい知のコンピューティングが実現できる。ロボティクスや計測工学分野においては、脳にこのような特性があることが、まだ十分に知られていない。個人の脳が学習し、新しい能力を脳内に蓄えるプロセスにおいて、ヒトの知覚に上らない「ミリ秒」「ミリメートル」オーダーの世界で機械が介在し、修飾をすることで、「意識しながら物事を学習する」というプロセスにともなう困難を回避することができる。意識的な学習が問題になる例としては、余計なことを考えて学習効率が悪くなる、苦手意識や恐怖が先行して取り組めない（あるいは正しく行為を遂行できず、学習する段階に入れない）、思い込みが邪魔をしてこれ以上は伸びないと思って止めてしまう、といったことが挙げられる。ヒトの状態を常時モニタリングし、その状態に応じて、本人の意識に上らないわずかな負荷を漸次的に提示し続けることで、無意識のうちに能力が熟達したり、このような方法なしには起き得ないほどの脳機能の適応が進んだりすると考えられる。このような取り組みが進むことによって、BMI の応用先は、ヘルスケアや医療にとどまらず、身体芸術、スポーツ、音楽演奏、手工芸といった、高度な身体技能の獲得や伝承プロセスを高効率化させたり、通常では生活や作業が困難な特異環境に対して、苦もなく自然に適応したりすることが可能であると思われる。このようにして、文化文明を支える活動行為の進化をアシストしたり、初学者もプロアマレベルになってともに楽しみあえるような支援ができたりする。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

技術面では、BMI と他の生体情報センサーを組み合わせる試みが一部で拡大してきており、両者の欠点を補い合う実用的なシステムが具現化しつつある。具体的には、建物の壁、天井、床などに組み込まれた環境センサーでユーザーの行動軌跡を分析したり、ユーザーのめがねに組み込んだ視線トラッキングシステムを使って見つめている方向を分析したりして、ユーザーがこれから実行としているアクションの種類をあらかじめ絞り込み、BMI による家電制御や電動車椅子の操作を確実に実行させるといった精度向上方法が研究されている

（総務省　脳の仕組みを生かしたイノベーション創成型研究開発 [24]）。

また、ヘッドフォンやヘッドマウントディスプレーといった、聴覚や視覚に対して高い没入感のあるポータブルデバイスと統合する技術基盤ができ始めており、脳の活動状態に応じて脳へ刺激を与える、人工的なクローズドループを形成することが実現しつつある。これにより、BMI によって脳の持つ能力を書き換えたり、脳の中に異なる複数の入出力関係を並列共存的に生成したりすることができる可能性がある。聴覚や視覚に対する刺激だけでなく、頭皮上から電流刺激を脳に向かって与えることで、脳の特定機能を直接高めるニューロモジュレーション法を、BMI に対して組み込んだ State-Dependent Cortical Stimulation も一部で研究が始まっている。ニューロモジュレーション技術に関してはすでに、「脳をオーバークロックする」と称して米国ベンチャー企業がデバイスを発表しており [25]、今後も産業化が加速する可能性がある。一方、前述のとおり ELSI に課題があることはすでに学術界から警告が発せられており [26]、慎重な民生展開が望まれる。

（6）キーワード

機能補綴、サイボーグ、機能回復、エンハンスメント、オーグメンテーション、センサーフュージョン、計算論的神経科学、技能獲得、技能伝承

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	高度埋め込み技術によるロボット操作、多関節複合運動を治療するBMI、精神疾患の脳状態のチューニング（脳プロ（文科省）） 脳を傷つけず、長期に安定的な脳計測を多チャンネルで実現する技術革新が進んでいる。非侵襲型についても、情報統計と次元縮約を駆使して、1000を超える多次元脳データが少ないサンプル数しかなくてもモデルに落とし込む脳情報解読技術が着実に構築されている。脳卒中やジストニアといった神経疾患の脳状態をBMIでチューニングし、従来の医療では治療できなかったタイプの運動障害を克服することに成功している。 また、スマートハウスによる環境センシングデータとの統合により、複数人のユーザーがBMIを使って生活する実証実験が進みつつあり、脳以外の情報で統制をとりつつ、自発脳活動のデコーディングをすることに成功している。
	応用研究・開発	○	→	ロボットスーツHALによる高齢者運動介助、歩行訓練などのなかにBMI機能を搭載し、脳からしか信号が取得できない重度運動障害者のための動作支援やコミュニケーション支援を視野に入れた研究が進んでいる。
	産業化	○	↗	BMIによる脳卒中片麻痺の治療について、パナソニック、日本光電をはじめとした企業グループと慶應義塾大学をはじめとした医療グループが実用化研究を推進している。 電通が米国の脳波センサーを組み込んだおもちゃを発売（ネコミミ）、7万台のセールスを達成している。脳活動をデコーディングできるかどうかの検証が十分でなく、基礎研究サイドとの距離はある。
米国	基礎研究	◎	→	針電極を脳へ埋植することによって高品質な信号を取得し、多自由度なロボット操作がピッツバーグ大学とブラウン大学で実現されている。圧力センサーからの出力に基づいて、脊髄や脳の神経を刺激することで感覚機能を再建し、これによって運動制御の性能を高める研究に歩を進めている。またサルを用いて、脳と脳を人工的に電気接続し、その後の適応過程や能力増強性を調べる研究が、University of Washingtonで体系的に研究されており、理論と実証の両面で研究が発展している。 一方で、研究トピックとしては10年前とほぼ変わらず、コンセプトのリノベーションはやや遅い印象がある。
	応用研究・開発	◎		脳信号が筋肉に伝わってきたところで信号を計測することで、高い即応性と自由度を実現したロボットアーム技術がResearch Institute of Chicagoで開発され、大規模な臨床研究が進められている。日常生活に十分耐えられる時間空間精度を持ち、手首のひねり、肩の挙上、リーチング運動、つまみ動作、握り動作などが実現できる。
	産業化	○	→	BMIによるロボットアーム制御は、ベンチャー企業GrainGateがFDA承認を得るための知見を推進中である。 Neurosky、 Emotivといった複数のベンチャー企業が、数万円オーダーの価格で脳波計測モジュールを一般販売しており、複数のゲームメーカーがおもちゃを販売している。 アスリート養成のために、アーチェリー米国オリンピックチームがシューティング時の脳波解析を行い、脳の熟達化支援を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	デンマークCopenhavn大学やドイツTubingen大学などで、脳に電流を与えて脳機能を修飾する研究が盛んであり、そのためのデバイス開発が進んでいる。具体的には、リアルタイムに脳内情報を推定する逆問題解法と、脳計測装置の中でノイズの発生なしに脳電流刺激を行えるデバイスが確立している。一部は、日本の研究所や大学に技術移転が進んでいる。

	応用研究・開発	○	↗	また、BMIを使ってロックトイン症候群の患者のコミュニケーションを実現したり（ドイツTubingen大学）、リハビリテーション応用にも力を入れている（イタリアUniversity of Padova、スペイン、ドイツ）。 健常者あるいは要介護者を対象とした生活支援、ヘルスケアを目指した欧州プロジェクトが複数進行中であり、そのなかでバーチャルリアリティーやヒューマノイドロボット研究との融合が進められている。
	産業化	◎	→	基礎研究用のBMIの産業化として、オーストリアのGuger TechnologiesがBMI用の脳波計測デバイスや各種信号処理用ツールボックスを開発、販売しており、BMI研究の標準ツールとして全世界的なシェアを誇っている。その一方で、応用志向の産業化を手がけている目立った企業は存在しない。
中国	基礎研究	△	→	脳波を時系列信号と考えて、その信号構造のなかから特徴量を抽出したり、機械学習などによってその状態分類をしたりするような、信号処理研究が盛んである。また、脳波電極表面を微細加工技術によって処理し、皮膚電極間の接触性を高めるような工学的検討も行われている。 その一方で、系統だった戦略の下に要素技術を開発している感はなく、個別的な技術改善研究にとどまっている。
	応用研究・開発	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	産業化	×	→	特に特筆すべき事例はない。
韓国	基礎研究	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	応用研究・開発	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	産業化	×	→	特に特筆すべき事例はない。

（８）引用文献

1) 牛場潤一. 神経リハビリテーションにおける非侵襲的 brain-machine interface の可能性、神経内科、79 巻、4 号、513～518 ページ、2013 年.
2) Mudry A, Mills M. The early history of the cochlear implant: a retrospective. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*, 139(5), 446-453, 2013.
3) Lewis PM, Ackland HM, Lowery AJ, Rosenfeld JV. Restoration of vision in blind individuals using bionic devices: A review with a focus on cortical visual prostheses. *Brain Res*, in press.
4) Miocinovic S, Somayajula S, Chitnis S, Vitek JL. History, applications, and mechanisms of deep brain stimulation. *JAMA Neurol*, 70(2), 163-171, 2013.
5) deCharms RC, Maeda F, Glover GH, Ludlow D, Pauly JM, Soneji D, Gabrieli JDE, Mackey SC. Control over brain activation and pain leaned by using real-time functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 102(51), 18626-18631, 2014.
6) Green AM, Kalaska JF. Learning to move machines with the mind. *Trends Neurosci*, 34(2), 61-75, 2010.
7) Hirata M, Matsushita K, Suzuki T, Yoshida T, Sato F, Morris S, Yanagisawa T, Goto T, Kawato M, Yoshimine T. A fully-implantable wireless system for human brain-machine interfaces using brain surface electrodes: W-HERBS. *IEICE Trans Commun*, E94-B, 2448-2453, 2011.
8) NeuroSky, Inc. 125 S Market St – #900, San Jose, CA 95113, United States.

9) Emotiv, Inc. 490 Post St. Suite 824, San Francisco, CA 94102, United States.
10) 株式会社電通サイエンスジャム、東京都港区赤坂 4-2-28 TRES 赤坂。
11) 河野哲也、暴走する脳科学 ~哲学・倫理学からの批判的検討~、光文社新書、2008 年。
12) Cousins JN, El-Deredy W, Parkes LM, Hennies N, Lewis PA. Cued memory reactivation during slow-wave sleep promotes explicit knowledge of a motor sequence. *J Neurosci*, 34(48), 15870-15876, 2014.
13) Ngo HV, Martinetz T, Born J, Mölle M. Auditory closed-loop stimulation of the sleep slow oscillation enhances memory. *Neuron*, 78(3), 545-53, 2013.
14) neuro:on, Intelclinic, 180 Sansome St. San Francisco, CA 94104, United States.
15) Kao SC, Huang CJ, Hung TM. Frontal midline theta is a specific indicator of optimal attentional engagement during skilled putting performance. *J Sport Exerc Psychol*, 35(5), 470-478, 2013.
16) Babiloni C, Del Percio C, Iacoboni M, Infarinato F, Lizio R, Marzano N, Crespi G, Dassù F, Pirritano M, Gallamini M, Eusebi F. Golf putt outcomes are predicted by sensorimotor cerebral EEG rhythms. *J Physiol*, 586(1), 131-139, 2008.
17) Carron R, Chaillet A, Filipchuk A, Pasillas-Lépine W, Hammond C. Closing the loop of deep brain stimulation. *Front Syst Neurosci*, 7, 112, 2013.
18) 高木 美也子、脳深部刺激法(DBS)をめぐるドイツとフランスの事情、生命倫理、19 巻、1 号、44～51 ページ、2009 年.
19) 文部科学省 脳科学研究戦略推進プログラム、http://brainprogram.mext.go.jp/missionBMI/
20) Homer ML, Nurmikko AV, Donoghue JP, Hochberg LR. Sensors and decoding for intracortical brain computer interfaces. *Annu Rev Biomed Eng*, 15, 383-405, 2013.
21) BrainGate Co. Ponte Vedra Beach, FL 32082, United States.
22) 未来医療を実現する先端医療機器・システムの開発 プレスリリース文、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ、
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100073.html
23) Shadmehr R, Krakauer JW. A computational neuroanatomy for motor control. *Exp Brain Res*, 185(3), 359-81, 2008.
24) 総務省 脳の仕組みを生かしたイノベーション創成型研究開発、
http://www.soumu.go.jp/main_content/000161790.pdf
25) Transcranial Ltd. Unit 22A, 10-12 Marshgate Lane, London, E15 2NH, UK.
26) Fox D, Neuroscience: Brain buzz, *Nature*, 472, 156-159, 2011

３．９．２　人間拡張工学

（１）研究開発領域名

人間拡張工学

（２）研究開発領域の簡潔な説明

人間が生得的に有する感覚機能、運動機能、知的処理機能を物理的、情報的に補償・拡張することを目指す研究開発領域。人がやりたくない作業を代替する自動化技術に対し、自らやりたいことを身体能力に関わらず自由自在に行うための技術を確立することを目標としている。機器や情報システムを自らの手足のように自然に利用する「人機一体」を実現するため、身体像獲得の機序の解明、生体インターフェースの開発、感覚刺激技術などの研究開発課題がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

産業革命以降の機械技術の発達により、人は苦役から開放された。極度な肉体的疲労や健康を損なう危険な環境など、本来望ましくない作業は自動機器により代替されつつある。

今後は機器による完全な代替が困難である作業や、人が自らの望む行動を自由自在に行えるよう支援するような技術開発も、従来行われている自動化技術開発と並行して行う必要があり、そのために必要となる技術体系を人間拡張工学と位置づけることができる。

少子化、高齢化の進む我が国において、人間拡張工学が普及することにより身体的能力を補綴（ほてい）し強化することで、高齢者の持続的な社会参画を可能となる。

人間拡張工学は、メカトロニクス、ロボット工学、センサー工学、ディスプレー技術、人間工学、ウエアラブル技術、インタラクション技術を有機的に統合した技術領域であり、我が国が得意とするハードウエアとソフトウエアの融合技術に分類され、分野横断的な研究開発により、日本の産業の活性化・競争力強化につながることも期待される。

［これまでの取組み］

米国科学研究開発局長官として第２次世界大戦に関わる科学技術開発を指揮した Vannevar Bush は、終戦目前の 1945 年 7 月、Atlantic 誌に ”As We May Think” と題した論文を発表し、その中で超小型のカメラをメガネや頭部に取り付け、主観視点映像を記録し共有することや、神経を介して五感を記録・制御するといったアイデアを提案している。その後 Ivan Sutherland が 1968 年に世界初の頭部搭載型ディスプレー (HMD)を開発したが、それは巨大で実験室内でしか用いることのできないシステムであった。

Douglas Engelbart は 1962 年に” Augmented Human Intellect”（人間の知性の拡張)と題した論文を発表した。コンピューターにより人間の知性を拡張することを目的としており、1968 年にサンフランシスコで自ら発明したマウスを使った一大デモンストレーションをした。ビデオ会議やワードプロセッサなど、集合知により諸問題を解決できると説いた。

1990 年代に当時マサチューセッツ工科大学 （MIT）メディアラボの学生であった Steven Mann や Thad Starner らによって、小型・軽量のカメラや HMD を用いたシステムが登場し、ウエアラブル技術として人間の知的能力の拡張の研究開発は根付きつつある。

一方人間の肉体能力を拡張するための研究として、ハンディキャップを持つ人の身体能力を補綴することを目的としたアプローチと、健常者の肉体能力を拡張することを目指したアプローチに大別される。前者は補綴工学と呼ばれ、セルビアの科学者 Rajko Tomović により 1963 年に開発された人工義手”The Tomović Hand / Belgrade Hand”を嚆矢（こうし）として世界各国で研究が進められており、近年では MIT Media Lab の Hugh Herr、Ken Endo らがロボット義足を開発している。後者としては、1959 年に Robert A. Heinlein の SF「宇宙の戦士」に外骨格型ロボットスーツが登場し、1965 年に米軍および GE により”Hardiman”として研究が行われた。近年では筑波大学/Cyberdyne 山海嘉之らによるロボットスーツ”HAL” [3)]、Raytheon/SARCOS による”XOS”、Lockheed Martin による” FORTIS Exoskeleton”、Honda による”体重支持型歩行アシスト”、北海道大学 田中孝之による”軽労化スーツ”など、日米を中心として実用化に向けた研究開発が進められている。なお、電気通信大学 野嶋琢也らによる”SmartTool”などのように、作業時の倍力ではなく作業の器用さを補助するための技術開発や、Skeletonics によりパフォーマンス用の動作拡大外骨格スーツなどの開発が行われている。

［今後必要となる取組み］

「人機一体」を実現するためにはユーザーの意図を適切にセンシングし、作業対象の情報をユーザーの身体に適切にフィードバックする必要がある。そのためには視線計測、筋電計測、脳計測などの生体センシング技術、機械学習等による意図推定・行動予測技術、触覚フィードバック技術を統合することで、身体図の変容を容易にする手法の研究開発が肝となる。

またユーザーを知的に支援するため、Computer Vision 等による環境・行動認識技術、知的メディア処理技術、ウエアラブル技術などの研究開発の進展が望まれる。

（４）科学技術的・政策的課題

米国では軍が主導しつつ大学や民間と連携し人間拡張工学の研究開発を行っている。歩兵や工兵を支援することにターゲットを絞っており、” Warrior Web”計画などが DARPA により行われている。

これに対し、日本国内では福祉や工場での作業や農作業の軽労化に向けた開発が主体となっている。日本におけるロボット工学やヒューマンインターフェースの開発水準は世界を先導しており、人間拡張工学においてもサイバーダイン社が内閣府・最先端研究開発支援（FIRST）など国の研究支援を受けロボットスーツ”HAL”の製品化に成功し 2014 年 3 月 26 日には東京証券取引所マザーズに上場するなど当分野における存在感は高い。一方でリハビリテーションへの応用がドイツ国内では労災保険が認められるなど、日本国内での認可、規制のハードルの高さ故に海外での応用が先行しているのが現状である。

標準化に関してはサイバーダイン社が ISO の医療用ロボットの安全性に関する基準策定に係るなど一定の存在感を有している。今後はさまざまな応用分野での標準化に関わる取り組みが必要となると考えられる。

今後人間拡張工学という新たな融合領域に対する研究開発支援を行うだけでなく、人間拡張工学特区の策定と特区での社会実験により、研究開発と市場開拓を促進するための政策的配慮が必要となるであろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

人間拡張工学に関わる国際会議 Augmented Human Conference が日米欧の研究者らにより 2010 年に仏ムジェーヴにて開催され、日本国内でも 2011 年東京、2014 年神戸などで開催されている。国際会議を経年的に運営する Steering Committee は 7 名中 5 名が日本人であり、我が国の研究者が中心となりつつ国際的な研究コミュニティーが形成されている。

［注目すべきプロジェクト］

筑波大学では平成 25 年度より文部科学省博士課程教育リーディングプログラムとして「人の機能を補完し、人とともに協調し、人の機能を拡張する情報学」として岩田洋夫教授をプログラムリーダーとし、サイバーダイン社 CEO を兼務する山海嘉之教授ら 33 名の教員らと「エンパワーメント情報学プログラム」を行っている。なお、山海教授は FIRST プログラム中心研究者を務めた後、革新的研究開発推進プログラム （ImPACT）のプログラムマネジャーとして、人と技術と社会が密接に連携し、工学・医学・法律・倫理の融合により、人の能力を支援・増幅・拡張する 21 世紀の人間支援型テクノロジーとして「サイバニクス」を位置づけ、継続的に研究開発を行っている。

2014 年には介入的な神経科学手法を用いることで身体認知、運動制御など、脳内の身体表現の解明とリハビリテーションへの応用を目指した東京大学 太田順教授を領域代表とする文部科学省科学研究費補助金 新学術領域「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」が採択され、人間拡張工学に応用可能な基礎的な知見に関する研究成果が期待できる。

北海道大学 田中孝之准教授は「軽労化研究会」を発足し、Secure Assist、Sustainable Assist、Subliminal Assist の 3 項目に着目することで疲労・労力の軽減に関する研究開発に取り組んでいる。

2014 年 10 月 10 日に慶應義塾大学稲見昌彦教授、中村伊知哉教授、東京大学暦本純一教授らを共同代表とし、「人機一体」の新たなスポーツの創成を目指した「超人スポーツ委員会」が発足し、人間拡張工学のスポーツへの応用を模索している。

2014 年 10 月 12 日に六本木ニコファーレにて、ウエアラブル機器を装着したプロ棋士がコンピューターソフトと連携しつつ対戦する「電王戦タッグマッチ」が開催され、西尾明六段＆ponanza タッグが優勝した。チェスでは「アドバンストチェス」と称する人機一体の戦いが行われ、コンピューターは人単独よりも強いタッグが誕生しつつあるが、将棋においても同様の試みが行われ始めた点は人間拡張工学の文化的側面としてインパクトがある。

（６）キーワード

Augmented Human、Transhumanism、 Posthuman、Human Computer Integration、Assistive Technology

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	人間拡張工学基礎研究として身体性に係るスポーツ科学、人間工学、生理学などがあるが、理化学研究所の入來篤史、藤井直敬らやATR川人光男、神谷之康ら、東京大学中村仁彦ら、産総研持丸正明が身体運動や身体図式に関し活発に研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	人間拡張工学の応用研究領域としてウエアラブル技術やBrain Machine Interface[4]を含むヒューマンインターフェース技術（Human Computer Interaction）は研究者層が厚く、例えばACM Computer Human Interaction Conferenceにおける2009年から2014年の論文数は世界6位、アジアでは1位となっている。なお、Augmented Human Conferenceでは世界で1位となっており、今後当分野の周知が進むに連れ相対的に日本からの発表数は減ると考えられるが、数年は上昇傾向のトレンドが続くと想定できる。
	産業化	○	↗	パワーアシスト技術としてはロボットスーツに関連して、サイバーダイン社のHALが2014年に上場し、パナソニック子会社のアクティブリンクは、2015年から装着型のロボットの量産化を計画するなど産業化の芽は出つつある。またホンダも工場での作業員の補助を目指し体重支持型歩行アシストの開発を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	1945年のVannevar Bushによるコンセプトの提案以来、サイバネティクスの一分野として連綿と研究開発が行われている。ロボットスーツとの連携のためのセンシングとしては力センサーを用いているものが多く、日本のサイバーダイン社の有する筋電センサーとの連携のノウハウに関しては日本に一日の長がある。しかしながら、マイクロニューログラムや脳計測技術、油圧サーボを中心とするアクチュエーター技術に関し米国の優位性は高い。
	応用研究・開発	◎	→	DARPAが音頭を取る産学軍の連携が密接に行われている。ロボット工学や自動運転技術に関するDARPAチャレンジの人間拡張工学版はいまだ行われていないが、ユタ大発のSARCOS社など大学発のスタートアップ企業が続々と誕生している
	産業化	○	→	日本のような工場や介護福祉用途ではなく、歩兵の強化を目的とした軍用技術として応用する試みが古くは1965年にGEによりプロトタイプが作成されたHARDIMAN以降継続的に行われている。
欧州	基礎研究	○	↗	特にフランスINRIAなどを中心として、Brain Machine Interface[4]に関する研究が活発に行われている。また、スイスETHのSensory-Motor Systems Lab[5]は、Assistive Technologyに関するEUでの拠点の一つとなっている。
	応用研究・開発	○	↗	ETHのProf. Robert Rienerが中心となり、Assistive Technologyに関する競技会Cybathlonの2016年開催を目指し、活動を行っている。このイベントがハブとなり、当該技術の応用に関する国際的な共同研究がなされることが期待される。
	産業化	△	→	人間拡張工学に関する取り組みは欧州では基礎的な研究が中心となっており、産業化への取り組みは緩やかである。なお、日本のサイバーダイン社のHALはドイツで事業を開始し、欧州で医療機器として認可されている。ドイツおよび米国は医療機器に産業化に関しては豊富なノウハウを有しており、人間拡張産業も同様のスキームを適用可能であると考えられる。自動車の電子化と同様人間拡張産業に関しても一気に巻き返しを図られる可能性が高い。しかしながら国内での社会展開は制度上の製薬が大きく進んでいない。よって我が国の法制度等の整備の遅れが人間拡張産業の空洞化につながる懸念がある。

中国	基礎研究	×	→	基盤技術のうち、ロボット工学に関する部分では研究例が散見されるものの、当該分野に関する研究は国際会議等の発表ではほとんど見られない。
	応用研究・開発	×	→	現状で応用に向けた研究開発事例はほとんど見られない。
	産業化	×	→	現状で産業化に向けた事例はほとんど見られない。
韓国	基礎研究	○	↗	ロボット工学、ヒューマンインターフェースに関する分野でKAISTを中心に活発に研究が行われている。2015年には当該分野のトップカンファレンスであるACM CHIのアジア初の招致に成功する[7]など研究者層、アクティビティ共に高い。
	応用研究・開発	○	↗	Samsung社は米国パロアルトの研究所にMIT Media Labなどから著名な研究者を多数招聘し、当該分野に関する応用開発を行っている。MIT Media LabにてSixth Senseを研究し当該分野のトップ研究者の一人であるPranav Mistryが本社の研究担当副社長に就任するなど応用研究は一層活発化すると考えられる。
	産業化	△	↗	現状で人間拡張工学に分類可能な製品カテゴリの実用化は行われていない。しかしながら、SamsungやLGを中心として、ウエアラブル技術、VR技術の延長として人間拡張工学に関し産業化も見据えた取り組みが行われていることが推察される。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△ ：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 産総研デジタルヒューマン工学研究センター http://www.dh.aist.go.jp/jp/
2) Daisuke Sakamoto, Asian Researchers at the CHI Conference http://daisukesakamoto.jp/articles/Asian-Researchers-at-the-CHI-Conference/3)
3) ロボットスーツ「HAL」の今後 http://www.asset-alive.com/report.php?mode=show&rpid=3106
4) Brain Machine Interface (BMI) Grouphttps://www.linkedin.com/groups/Brain-Machine-Interface-BMI-Group-4336499?split_page=5
5) Sensory-Moter Systems Lab, ETH http://www.sms.hest.ethz.ch/
6) Cybathlon http://www.cybathlon.ethz.ch/
7) CHI2015 http://chi2015.acm.org/
8) India-Born Pranav Mistry Named Samsung Electronics Vice-President; Key Facts of New Company Chief http://www.ibtimes.co.in/india-born-pranav-mistry-named-samsung-vice-president-616536

３．９．３　ハプティクス（触覚）

（１）研究開発領域名

ハプティクス（触覚）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

皮膚に対して人工的に与えた刺激がどのような感覚・体験を惹起し、人間のリアルタイムでの行動、思考、情動と相互作用するかを明らかにし、人間と情報環境およびその先にある実世界とのインタラクションに埋め込んでいく研究開発領域である。2000 年初頭までは遠隔操作ロボットの触感伝送や、VR の触感生成を主な目的としていたが、近年はモバイル機器の操作性を高めるための振動フィードバックをはじめ、エンターテインメント、コミュニケーション、スポーツ、健康支援など、幅広い応用への関心が高まっている。3 次元の世界を操作したり、身体的な体験を共有・支援したりする今後の情報メディアにおいて、ハプティクスは不可欠な要素である。

ハプティクスの研究領域は、人間の動作や意図を計測する計測技術、装着負荷が小さく、日常生活の中でも使えて身体の各部を刺激できる触覚刺激デバイス、人間の運動と同期しながら効果的な刺激を行うための刺激パターン合成技術、それらを人間支援技術としてまとめあげるシステム化技術から構成される。これらの成果はウエアラブルデバイスや道具・機械の中に実装されたり、人間が生活する環境の中に埋め込まれたりして活用される。また、情報環境と人間がインタラクションするだけでなく、遠隔操作される機械が実世界とインタラクションする場合には、機械と環境との接触の状況をセンシングする技術も重要になる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義・これまでの取組み］

人間の触覚に関する工学的な観点からのハプティクス研究は、バーチャルリアリティー（VR）やテレイグジスタンス研究の黎明とともに 1980 年代から始まり、2000 年ごろから徐々に活発化し始めた。2005 年にハプティクス研究に特化した国際会議 World Haptics が始まり、2008 年に IEEE Transactions on Haptics が創刊、さらに、アジア地域を主体とする Asia Haptics の第 1 回大会が開催されたのは 2014 年 11 月のことである。このように、ハプティクスが学術分野として認知されるようになってきたのは比較的最近のことである。

ハプティクスの研究領域は、(1) 人間の触覚の物理的特性や、触覚の刺激に対して人間の脳や身体がどのように反応するかを解明する科学的研究、(2) 人間の触覚を効果的に刺激するデバイスや、その駆動方法についての技術的研究、(3) 触覚フィードバックを人間の活動に役立てるアプリケーション研究、を軸として進められてきた。

科学研究としては、物理的刺激に対する受容器の発火を神経電極によって観察し、特性を解明する研究や、皮膚表面の変形パターンと触感についての対応関係について 2000 年初頭ごろまでにおおむねその概要が明らかになった。触覚の空間的な解像度と時間的特性の解明、ファントムセンセーションや、実際の力学的刺激とは異なる触像をイメージしてしまう種々の錯覚現象、ゴムでできた手の模型を自分の手のように錯覚してしまうラバーハンドイリュージョンなども 2000 年前半までに報告されている。近年は、触覚単体での知覚特性だけで

なく、自身の運動や視覚刺激と触感との相互作用や、触覚刺激のもとでの脳活動計測、触覚を使ったBCI研究なども関心を集めているように思われる。

人間の触覚を刺激する工学的研究としては、Optaconのように視覚障害者に皮膚を介して記号情報を伝達する研究や、設置型の力提示デバイスによってVRの触感を本物らしく提示する研究が主要な研究分野を形成していた。PHANTOMやSPIDARに代表される設置型の力提示デバイスとは、環境に設置されたアームの先端部などを手に持ちながらユーザーがそれを自由に動かし、触体験を行うタイプのデバイスである。これを手術シミュレーターに応用するための仮想臓器のモデリングと、アームが手に与える力学的フィードバックの計算方法などが主要研究テーマであり、現在においても重要な研究項目である。

これらの項目に加え、最近の10年間で活発に研究されたのが、小型振動体による振動刺激である。低周波から数百Hzを超える周波数までをカバーする広帯域の振動体によって、クリック感やテクスチャだけでなく容器の中の小物体の存在や、ラケットの打撃感などもリアルに再現されることがデモされ、注目を集めた（TECHTILE）。また皮膚表層への電気刺激によって触覚を惹起するデバイス（電気触覚ディスプレー）や、タッチパネル表面と指の間に電圧を印加し、静電吸着力を変化させることでテクスチャ感を提示するデバイス（Tesla touch）など、可動部をもたずさまざまな装置に容易に組み込める触覚提示法が提案されている。

2000年代前半までのハプティクスの現実的なアプリケーションは、前述のような手術の訓練用シミュレーターや操作ハンドルなどの操作性向上であり、その他はリアルタイムフィードバックを前提としない製品表面の触感設計などが主要応用分野であった。単発的に触覚フィードバック付のマウスが発表されたことはあったが（2000～2001年、米国および日本）、広く普及することはなかった。学術的なVR研究以外で、一般の人々が触覚フィードバックに注目した最初の例は、2006年に発売された任天堂社のWiiのリモコンにおいてであろう。リモコンからの振動フィードバックがゲームの楽しみを高め、ボタン選択などの操作性も向上させることを多くの人が体験した。学術的な振動触覚研究とも同期し、このころから実用的な情報メディアの中での触覚の活用が真剣に議論されるようになった。2007年のWorld Hapticsでは、タッチパネルの映像と同期して振動が伝達することの効果がEdward Colgateらのグループによってデモされ、スマートフォンやタブレット端末の表面に触覚刺激を重畳する技術開発（サーフェイスハプティクス）が各国で行われるようになった。

［今後必要となる取組み］

以上見てきたように、主にテレロボティクスやVRの基礎研究の一部として研究されてきたハプティクスは、2000年後半からその活用領域の模索が始まり、現在その具体的な姿が明確になりつつある。以下に今後重点的な研究開発が必要と考えられる研究項目をまとめる。

1. 能動触動作の支援

タッチパネル型デバイスは、ボタンの配置などをプログラム次第で自由に変更できる点が最大の特長であるが、操作中いつも画面を見ていなければならない。これをブラインドタッチも可能な操作しやすいものにすることに対するニーズは大きく、低消費電力で効果の高い

触覚フィードバックを確立することは喫緊の研究開発課題である。操作性向上だけでなく、接触時に指に振動を与えることによって接触物体の触感を伝達し、感性的価値を高めることも研究課題である。

さらにタッチパネルの次のインターフェースとして、空中映像を操作する3次元インターフェースが関心を集めており、実用的な空中映像結像技術も利用できるようになってきた。２次元面上のボタン位置を特定するのであれば触覚フィードバックは必須ではないが、自分の指と空中ボタンの奥行き方向の位置関係を正確に把握したり、空中映像を3次元空間の中で移動・回転する操作を直感的に行ったりするためには触覚の活用が不可欠であると考えられる。Touchable Holography が示したように、空中映像に超音波による非接触触覚刺激を重畳することで、手に何も装着しなくても触覚つきの3次元インターフェースを実現することが原理的には可能である。触覚フィードバックデバイスを指に装着するタイプも含め、3次元映像との触覚インタラクションは、今後の発展が期待される研究項目である。

2. 身体的体験の伝達・共有

例えば振動子を内蔵したデバイスを把持し、ゴルフあるいはテニスなどの試合の映像を見ながら選手と一緒に手を振ることを考えてみる。このときゴルフクラブやラケットがボールに当たる瞬間に選手と同じ打撃感が感じられる、という体験ができれば、スポーツ観戦がより楽しくなる（TECHTILE）。また、上手な選手の打撃タイミングなどを追体験することで、正しいイメージをつかみやすくなり、スポーツトレーニングにも活用できると考えられる。これらのシステムは、技術的には実現可能な段階にあり、今後はその普及のシナリオが重要となる。基礎研究においては、伝送可能な触感の幅を球技の打撃感以外にも広げていくことが課題である。

なお、手に対する局所的な刺激だけでなく、Vybe Haptic Gaming Pad のように椅子の座面・背面などの広範囲にわたって振動を与える安価な全身型デバイスも商品化されている。触覚を伴う身体的体験を伝送・共有することで新たな体験を楽しんだり能力拡張に利用したりする時代はすぐそこまで来ていると思われる。

3. コミュニケーション

接触の感覚を伴う親密なコミュニケーションの実現もハプティクスの重要なアプリケーションである。Intouch で示されているように、必ずしも皮膚と皮膚との接触を忠実に再現しなくても、何らかの道具を介した運動や力の相互作用を伝達することで視聴覚だけでは得られない親密さを感じることができる。ハプティクスコミュニケーションだけを目的とした専用デバイスが普及した例はまだないが、ハプティクスの機能が埋め込まれた何らかのウエアラブルデバイスが普及した後であれば、それがコミュニケーション目的に活用される可能性は高い。ハプティクスコミュニケーションの普及のためには、その基礎技術を高めると同時にアプリケーション全体の可能性を俯瞰した上での普及のシナリオが重要である。

4. 健康支援

皮膚に対するマッサージは精神的なリラックス効果や血行の改善、身体的疲労の低減などの効果を有しており、すでに生活の中に定着している。ウエアラブルな装置を用いた皮膚刺

激によって、緊張や疲労を伴う仕事の中で心身の状態を整えることができれば、自動車運転時の居眠り防止にとどまらず、仕事のパフォーマンス向上や、病気を未然に防ぐ予防医療としての効果も期待できる。これらを実現するためのデバイス技術・システム化技術の課題は、他のゴールを目指したハプティクスデバイスとおおむね共通していると考えられる。

5. リアルタイムの行動支援

把持した振動体を非対称に振動させ、触覚の非線形を用いて振動体からの引力を錯覚することで進行方向を指示する「ぶるなび」は、ハプティクスデバイスに身を任せるだけで正しい方向に歩行を導いてくれるナビゲーションが可能であることを示した。さらに Gyrocube や Traxion は、同様の把持型デバイスで手や指の運動を支持することを提案している。正しい動作や作業のコツは言葉や映像ではなかなか伝えられない。特に一つ一つを確認できない素早い動作中のコツは、自分自身の試行錯誤で見つけ出すしかないが、ハプティクスはそれらの伝達・教示を容易にしてくれる可能性がある。日常のナビゲーション、危険回避の伝達、操作方法の教示、スポーツやスキル伝達まで幅広い応用が考えられるが、特に高齢者になってからも新しい体験を継続し、健康長寿を達成するための支援技術としても期待が大きい。

以上の項目のほか、ロボットの遠隔操作支援のためにも新しい形でハプティクスが必要とされる状況が出現しつつある。日常生活の中にさまざまなロボットが入り込んでくるようになると、それを遠隔で操作して多目的に活用したくなる場面が多くなると考えられる。そのときのロボットのナビゲーションや簡単な操作の際に、物体との接近を触覚刺激として提示することで、経路の指示や外界の操作が容易になる。

このように、3 次元の世界を操作したり、身体的な体験を共有・支援したりする近未来の情報メディアにおいて、ハプティクスは不可欠な要素であり、今後の発展が期待される研究領域である。

（４）科学技術的・政策的課題

ハプティクスは、その重要性が近年認識され始めてきた研究領域であり、産業的にはデファクトスタンダードがまだ確立していない段階である。基礎的なハードウエア技術がシステム全体の成否を大きく左右するため、モノづくりを得意とする日本の強みを存分に生かすことができる技術領域であり、今後国内企業の優位性を確立すべき分野であると考える。ハプティクスの基礎研究においてこれまで日本が果たした役割は非常に大きいが、その先の産業化においては、各企業の個別的かつ小規模な活動にとどまっているのが現状である。今後ハプティクス分野において国際的なイニシアティブを確保していくためには、デバイス技術開発から普及シナリオ策定まで、既存企業の枠を超えて強固に連携するための仕組み作りと、早期の重点的研究開発投資が不可欠であると考える。

ハプティクスデバイスはその要素技術として、かさばらず、装着が容易で効率のよいアクチュエーターを必要としている点では共通しているが、その利用目的、利用形態ごとに優先すべき要求仕様が異なってくるため、ハードウエアの基礎技術のみを切り離して研究開発するのではなく、最終的な利用形態と全体システムを常に意識しながら開発を進めることが肝

要である。

ハプティクスは、実際に体験してみないとその効果を実感することはできず、文書や映像・音声による成果共有が難しい。そのため、基礎技術開発を行う研究者から商品企画担当者まで、さまざまな役割をもつ開発者が常に触体験を共有しながら情報交換できる開発環境を整備することが肝要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・学術における動向としては、前述のように 2005 年に World Haptics が始まり、2008 年に IEEE Transactions on Haptics が創刊、2014 年 11 月に Asia Haptics が開始されている。
・触覚活用技術については、世界の情報技術をリードする企業がすでに活発に活動している。Microsoft、Apple をはじめ、ディズニーリサーチなども大学と共同しながら研究チームを立ち上げて活動している。欧州は伝統的に触覚の基礎研究が盛んであり、2009 年には欧州宇宙機関（ESA）内に Telerobotics & Haptics Lab が設立された。日本では各大学の研究室や、携帯電話関連メーカー、自動車関連メーカーなどが個別的に研究している段階であり、それらの組織化が急務と考えられる。
・世界の中でも韓国は早い時期から触覚関連技術に対する重点的な投資を行っており、サムスンをはじめ KAIST、 ETRI、 KoreaTech 等の研究機関においても活発な研究開発が行われている。

（６）キーワード

ハプティクス、触覚、力覚、身体性

（７）国際比較　（特に触覚インターフェースについて）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・1980年以降、ロボット触覚の研究を中心に多くの研究者が活動。 ・CRESTプロジェクト「さわれる人間調和型情報環境の構築と活用」 ・ハプティクスの新しい応用を示唆する独創的な研究の多くは日本から発信されている。
	応用研究・開発	○	↗	・携帯端末メーカー、自動車関連産業による研究が活発化しつつある。 ・活動が個別的で、世界をけん引する力は生まれていない。
	産業化	△	↗	・触覚フィードバック付カーナビゲーションシステムなどが商品化され始めている。 ・産業としての規模はまだ小さい。産業化を促す国家的支援が必要。
米国	基礎研究	○	↗	・2000年初頭までは MIT Touchlabo が触覚基礎研究をけん引。外科手術シミュレーターの力覚提示技術開発などで世界をリード。
	応用研究・開発	◎	↗	・触覚研究における世界標準デバイス Fantom を生み出した SensAble Technologiesや、情報機器における触覚インターフェース開拓した Immersion などの企業が応用研究をけん引。
	産業化	○	↗	・企業間の買収などの動きは見られるが、本格的な産業化はこれから。 ・Micorsoft やDisney などが研究を活発化している。
欧州	基礎研究	◎	↗	・触覚の心理物理などに関する古典的基礎研究の多くは欧州で行われている。近年も Immersence Project (2010年まで)など欧州共同のプロジェクトが展開されている。2009年には ESAに Telerobotics & Haptics Lab が設立された。
	応用研究・開発	○	↗	・Senseg (フィンランド) などベンチャー企業の活発な活動が見られる。 ・ロシアでも触覚研究が始まっている。
	産業化	○	↗	・携帯端末用の触覚フィードバック付タッチパネルなどの産業化は始まっているが、本格的な展開はこれから。
中国	基礎研究	－		・国際学会への論文投稿は見られるが、どれだけ本格的な研究が行われているかは不明。
	応用研究・開発	－		・Microsoft Research Asia (北京)において応用研究を展開。
	産業化	－		・不明
韓国	基礎研究	○	→	・KAISTなどが中心となり基礎研究を展開。
	応用研究・開発	◎	→	・SAMSUNG を中心として研究開発が行われている。
	産業化	○	→	・すでに触覚フィードバック付の携帯電話が普及しているが、その先の本格的な産業化においてはやや停滞感もある。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ　：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ　：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ　：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
Δ　：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗　：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

文中にあげた事例の詳細は、文中のキーワードで検索可能。

現在までの触覚関連技術の多くは以下の書籍にまとめられている。

・ 下条，前野，篠田，佐野 編：増補版 触覚認識メカニズムと応用技術 ―触覚センサ・センサディスプレー―，S&T 出版（2010 年初版、2014 年増補版）

３．９．４　ウエアラブルコンピューティング

（１）研究開発領域名

ウエアラブルコンピューティング

（２）研究開発領域の簡潔な説明

コンピューターを身体に装着して利用するウエアラブルコンピューティングは、コンピューターをポケットやカバンに入れて持ち運んで利用するモバイルコンピューティングと違って、日常生活や業務の中で常時利用するものである。便利・快適、安全・安心、さらには豊かで楽しい生活や業務が新たにもたらされるものと期待される。現時点ではまだ普及しておらず、具体的な使い方や必要なスペックが明らかでないと同時に、利用者の側の利用技術の向上も必要である。コンピューターの小型化、軽量化、バッテリーの持続性、インターフェース、コンテキスト推定、汎用プラットフォームの構築などの研究開発課題がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

ここ 20 年の間のインターネットとモバイルデバイスの浸透によりいつでもどこでも情報環境を用いてコミュニケーションや情報利用を行えるようになってきた。それにはコンピューターの小型化、高性能化が重要な役割を果たしてきたといえるが、コンピューターはこれからさらに小さくなる。これまで、コンピューターはその出現以来、サイズが小さくなって使い方が変わってきた。軍事利用、科学技術利用から業務利用、個人利用へと変わり、今さらに小さくなろうとしている。このとき、スマホに代表されるモバイルの次のステップとして、身体にそのコンピューターを装着して利用するウエアラブルコンピューティングを考えることは自然である。ウエアラブルの形態でコンピューターを利用できるようになると以下のようなメリットがもたらされる。

・活動時利用：何かをしながらコンピューターが利用できる。情報提示など。

・常時利用：一日中コンピューターが利用できる。ライフログなど。

これらのことから、これまでのスマートフォンやパソコンとは異なる、人々の暮らしや仕事などの実世界での活動に深く関わる新しい情報利用が可能となる。典型的なデバイスとしては、ヘッドマウントディスプレー （HMD）をはじめとするめがね型デバイス・カメラ、腕時計型デバイス、チェストベルト型デバイス、指輪型デバイス、帽子型デバイス、イヤホン型デバイス、靴型デバイス、皮膚貼り付け型デバイス、シャツ型デバイス、ベルト型デバイスなどがある。

暮らしの中での利用目的として以下の３点が重要である。

・便利・快適

・安全・安心

・豊か・楽しさ

これらにより、人々の普段の生活の中の何気ないところで頻繁にウエアラブルコンピューターが利用されるようになり、その結果として人々のくらしが根幹から変革する可能性がある。

一方、仕事の中での利用方法としては、現在机の前でコンピューターに向かっている人以

外のすべての人、主として現場で業務を行っている人が利用することになる。土木・建築作業、保守点検、製造、流通、小売り、農林水産業、消防、医療・介護などがそれに含まれる。ウエアラブルコンピューティングの導入により現場業務の効率が革新的に改善される可能性がある。

［これまでの取組み］

ウエアラブルコンピューティングには長年にわたる歴史がある。HMD の出現は 1960 年代にまでさかのぼる [1]。HMD を含めてそれ以降の長い期間にわたって、米国では軍事用のデバイス、システムが開発されてきた。戦闘機やヘリコプターの操縦士や陸軍兵士などが現場で活動しながら暗視カメラ映像や司令部からの指示、現地の地図などの情報を得たり、現地映像を司令部に送ったりするのに用いられてきた。

1980 年代になって米国 MIT で Pentland 教授率いるウエアラブル研究グループが立ち上がった [2]。当時の学生には、後にアカデミックにおけるウエアラブル分野の先導者となっている Georgia 工科大の Thad Starner 教授や Tront 大の Steve Mann 教授が含まれる。1990 年前後には、ウエアラブルコンピューターの Xybernaut 社や HMD の MicroOptical 社が設立され、ウエアラブルコンピューティングをビジネスとして立ち上げる兆しが見られた [3] が、いずれも大規模な販売に至らなかった。HMD やウエアラブルインターフェースなどに関する基本特許が多数とられたのもこの時期であるが、2010 年ごろから 20 年の存続期間の期限を迎え、いくつかの基本的なものは徐々に失効している。1995 年には任天堂が HMD に似た卓上型の覗き込み型 3D ディスプレーを備えたゲーム機「バーチャルボーイ」を販売したが販売が香ばしくなく失敗に終わった [4]。1996 年にソニーの HMD「Glasstron」、1998 年にオリンパスの HMD「Eye-Trek」が発売され [5] [6]、携帯型 DVD プレーヤーなどのビデオソースにつなげて新幹線などで映像視聴ができることを売り文句に数年間にわたって販売が行われたが、市場が拡大せず 2000 年を超えて両社とも撤退している。

2000 年代になってからも数々のアプローチがとられている。2001 年には島津製作所が単眼 HMD「DataGlass 2」を発売し [7]、NPO ウエアラブルコンピューター研究開発機構でそれを用いたオートバイレース支援やウエアラブルファッションなどのプロジェクトが行われ [8]、テレビや雑誌などのメディアでも新しいコンピューターの利用スタイルとして騒がれた。2002 年にはそれを用いて端末を付け加えた業務機「WIA」を日立製作所が発売した [9] が、販路を拡大できず撤退している。2008 年にはニコンが民生製品として単眼ビデオビューア UP（ユーピー）を発売した [10]。宣伝やコンテンツ拡充がはかられたものの功を奏せず、2 年程度で撤退している。海外でも欧米、台湾などからいくつかの HMD が出されている。

このような数々のアプローチに反してウエアラブルビジネスが立ち上がってこなかった理由は、デバイスの問題、システムの問題、インターフェースの問題、バッテリーの問題、アプリケーション・コンテンツの問題、安全性の問題など、数多くの問題があったためであり、これらたくさんの課題の解決が実用レベルとは程遠かったためであると考えられる。

2012 年に Google Glass が発表されて状況が一変した [11]。従来の問題の多くを一気にクリアし、驚くほどの超小型、高性能、高機能なデバイスに Google のもつ Android、クラウド技術などを統合してきたのである。Google Glass は 2013 年にデベロッパー向けに販売され、2014 年には限定的に一般販売されたが、レストランや映画館でのカメラの利用の社会問題

や発熱の問題、バッテリーが持たないという問題などが露呈し、2015 年 1 月に販売が終了となっているが、子会社 Nest の Tonny Fadell の監督下で再生が図られるという[12]。

一方では 2015 年 1 月に Microsoft が Windows 10 の発表を行い、その中で HoloLens というヘッドマウントディスプレーとそれを用いた AR プラットフォームの発表を行った[13]。シースルーめがね型デバイスとそれを用いた屋内 AR 環境が示されており、高度な AR を実現するのに必要ないくつかの API が提供される見込みである。Windows と Xbox、Kinect という Microsoft のキラー技術を引っ提げてウエアラブルと HMD の世界に切り込んできたという印象である[13]。

腕時計型デバイスも古い歴史がある。1980 年代から、セイコーやカシオ、シチズンなどの腕時計メーカーからさまざまな機能を持った腕時計型コンピューターが開発、発売されている[14]。スマートウオッチと呼ばれる高性能な腕時計型コンピューターが発売されるようになったのは 2012 年ごろからである。一方で同じころからブレスレット型活動量計という機能を絞ったウオッチデバイスが出現し、短期間で数百万台規模のマーケットを立ち上げた。

2014 年には Google がスマートウオッチを主なターゲットとした Android ベースの OS である Android Wear を発表し、サムスン、LG などから数種類の対応ウオッチが出された[15]。2014 年の秋には Apple Watch が発表され、2015 年 4 月に大規模に発売される見込みとなっている[16]。

［今後必要となる取組み］

Apple Watch の成否にもよるが、2015 年はウオッチの実用化が本格的に進む年となりうる。現時点ではバッテリーの寿命が最重要課題の一つである。アプリケーションとしてはスマホ連携による通知機能が主なアプリケーションとなっているが、次に立ち上がるべき健康系のアプリケーションがキーとなる。さらにその先には街角での情報サービスがあり、どのようにしてそれを立ち上げていくかがビジネスとしてのポイントとなりうる。

めがね型デバイスも 2015 年内に徐々に立ち上がってくる可能性がある。前述の Microsoft の動きのほか、米国では Recon、 Vuzix が新機種を出してくる可能性が高いのと同時に、ヨーロッパ勢も Optinvent や GlassUp などの商品が発売される見込みである。日本では、ウエストユニティス、テレパシー、ソニー、ブラザーなどがこの分野に積極的である。大手コンピューター企業である日立、東芝、富士通は業務用の HMD を投入してくることを表明している。一度失敗している NEC も再び参入してくる可能性がある。いずれにしても、どのような利用方法をターゲットにしてどのようなデバイスを出していくかということが重要である。Google Glass の高機能、高性能なスペックはポテンシャルな用途を広げるのに有効であったが、実際の現場で使われていくためにはバッテリーの寿命や操作方法、装着性などの実用性を高めることが必要であり、スペックの「落としどころ」が難しいというのが現状である。

最近はウオッチ、めがね以外のウエアラブルデバイスもたくさん出現している。前にも述べたとおり、帽子、イヤホン、指輪、ネックレス、絆創膏、靴、チェストベルトなどである。これらはセンサーと無線通信を内蔵した専用品が多い。よいところに目を付けてさまざまなウエアラブルデバイスを生み出していく必要がある。

過去にもたくさんの先行研究や開発事例があるものの、それらはそのときどきのデバイス

や計算環境を用いたものであったため、現在とは取り巻く環境が異なるため、あらためて同じようなシステム、インターフェース、応用研究を現行の環境下でうまく進める必要がある。システムプラットホームやインターフェースは特に重要であり、これからさまざまなトライアルが行われ、少しずつ淘汰されて、群雄割拠の時代へと突入することが想定される。

ウエアラブルコンピューターは現場で利用されるものであるため、ノウハウや継続性も重要である。ウエアラブルデバイスやその実際的な使い方に関するノウハウを持つ熟練者の養成が必要である。企業にとっては継続的な取り組みが何よりも重要であり、これまで経験の少ない一発勝負が失敗している。低リスク、低コスト、短サイクルで回収しながらビジネスを回していくことが重要であろう。

また後述のように、ウエアブルコンピューティングにはさまざまな技術的、社会的な課題があり、そのすべてが立ち上げのためのポイントとなりうる。問題はどのレベルのものでどれくらい売れるかという点にある。たくさんのトライアルの中から成功シナリオが出てくる上、それがベースとなってさらに次々と新たな成功が積み重なってゆく展開が見込まれるため、KickStarter をはじめとする米国におけるクラウドファンディングの仕組みはこのようなさまざまな新しい取り組みを評価し選別していくビジネススキーマとして非常に適合している。Moff バンドやログバーRing などの日本発のベンチャー企業も世界から注目されている。クラウドファンディングで成功し商品化にたどり着くケースは、これからも増えていくのではないだろうか。大企業もたくさんの矢を打つことができれば本来は成功しやすいはずである。

材料、光学、機械、エレクトロニクス分野ではもともと日本企業は高い技術を有するので、それらをうまく活用しながら完成度の高い完成品を作ることもまた日本企業の強みである。ブロードバンド基盤、消費者レベルなどの点で日本にはまだまだ優位性はあり、この分野に積極的に取り組んでいくことが望まれる。

ウエアラブルを日本から立ち上げる上で重要な点として、国全体のムードが挙げられる。スポーツ、産業用などで国策、あるいは地域から立ち上げていくことが有効である。実際、自治体の政策のなかでは、産業振興、産業誘致、観光、行政サービス、交通、農林水産業、工業、サービス業、医療、福祉などさまざまな側面でウエアラブルデバイスの活用は有効性があるものと考えられ、そちらのほうからも積極的な取り組みが望まれる。これまで、福井県・鯖江市、鳥取県、島根県、神戸市、広島市、福岡市、大阪市などがウエアラブル関連事業に積極的な取り組みを見せている。

（4）科学技術的・政策的課題

ウエアラブルコンピューティングにおいて最も難しい課題は展開シナリオである。アプリケーション、サービスの波及範囲は膨大であるが、どこからスタートしてどのように展開するかはビジネス的な問題としては最も重要な点である。それが実は技術的な側面と密接に関連性があり、技術で可能な範囲でうまくアプリケーションを構築していくデザインの問題であるとも言える。

具体的な技術課題のなかでもバッテリーおよび充電方法は最も重要なものの一つである。小さく、しかもバッテリーが持つようにすることがのぞまれるがそれは相反する要求である。充電もいつどのタイミングでどのように充電するのか、充電器の大きさや重さも重要なポイ

ントとなる。

次にセンシング技術が注目されている。先にも述べたが生体情報センシングはウエアラブルコンピューティングにおける健康系のキラーアプリケーションを構築する上では必須の技術となるが、その精度をどこまで高められるかが課題である。特に最近注目されているのが血中酸素飽和度、血圧、血糖値である。非侵襲で小型のセンサーであれば、医療レベルの精度になくても生活する上で有益なサゼスチョンを生成することができる可能性がある。

３番目に装着性の問題がある。重さ、装着方法、素材などは日常装着する上では重要なポイントとなる。長期間にわたって装着しないと不具合がわからない場合もあり、使い方によって結果が変わってくる点などが難しいところである。

４番目に操作方法が挙げられる。究極的にはセンサーなどを用いて操作なしに必要なコンピューティングが勝手に行われることが望ましいが、ユーザーの意図が正しく推定できる技術レベルに至るまでの間は、ユーザーによる操作が必要となる。ハンズフリーのものから片手で入力するもの、両手で入力するものなど、シーンに応じて使い分ける必要がある。

５番目に、システムプラットホームの問題がある。デバイスやアプリケーションに依存しないシステムプラットホームで、まだ見えていないウエアラブルアプリケーションの共通部分を効率的にサポートし、異なるアプリケーション間で必要なデータを共有し、プライベートやセキュリティーを考慮して情報管理できるものが求められている。複数のデバイス間で情報や通知が必要に応じて必要な精度で交換され、クラウド上で適切に管理されなければならない。さらに、広域的な AR 空間を構築する場合には複雑な分散空間情報管理が必要となるが、そのようなシステムはまだない。

最後に、社会問題と安全性の問題も解決すべき問題である。HMD に関しては、目や脳への人体影響に懸念がある。眼精疲労、注意の転導、転倒時の危険なども考慮する必要がある。ウエアラブルカメラに関しては、プライバシーの侵害という非常に重要な社会問題がある。HMD、カメラに共通の問題として不正利用、犯罪利用（盗撮、カンニング等）が挙げられる。社会の制度やビジネスとして解決することが考えられるが、それと同時に、技術によって解決できるものはそうしていく必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

Apple Watch の成否は今後のウエアラブルデバイスの方向性を特徴づけるものと考えられる。本稿執筆時点ではまだ十分には公開されていない具体的なスペックやアプリケーションとしてどのようなものが備えられているかはこの分野の展開を見る上では非常に重要である。それを見て Android Wear などのほかのウオッチも変化してくることが考えられる。

Google Glass の次バージョンが出てくるかどうかも注目すべき点の一つである。開発者バージョンで得られた知見をもとに、大きく改良されたバージョンが広く一般販売されるようになれば、サービスも増え、この分野が一気に加速すること可能性がある。Intel がこの分野への進出を図っており、北米企業の Recon、 Vuzix への Intel の出資も重要なニュースである。Google Glass で Intel CPU が使われるかもしれないというううわさもある。HMD 分野で Intel の CPU が広く使われるようになると状況は変わってくる。Intel は Quark というローエンド CPU も発表している。ウオッチやセンシングなどを行うその他のウエアラブル

デバイスをターゲットにしているようである。

前述のように日本の大手コンピューター企業である日立、東芝、富士通がそろって産業用HMDに名乗りを上げている点も注目すべきである。産業用HMDの展開は日本で急速に進む可能性がある。

［注目すべきプロジェクト］

ヘルスケア系のプラットフォームとしてAppleのHealthKitが発表されている。多数のヘルスケアデバイスで取得されたデータを多数のアプリケーションで共有する共通プラットフォームであり、ヘルス系のアプリケーションの急峻な立ち上がりが予見される。Googleはかねてより実施していたGoogle Healthサービスを終了し、新たなヘルスケアサービスとしてGoogle Fitを発表している。Microsoftは以前よりHealthVaultというヘルスケアサービスを実施しており、3社によるプラットフォーム争いの激化が想定される。

2015年1月14日~16日に東京ビッグサイトでウエアラブルEXPO（主催：リードジャパン）が開催された。世界初のウエアラブルに特化した展示会であり、100以上企業の展示があった。2016年も同じ展示会が規模を拡大して開催される見込みであるとのことである。2015年9月には博報堂や朝日新聞などの運営でウエアラブルテックエキスポが開催される。今後、日本での展示会などでウエアラブルデバイスの出展には注目すべきである。

2015年9月に大阪でISWC/UbiComp2015が開催される。ISWC(International Symposium on Wearable Computers)は20年近くにわたって開催されているウエアラブル関連のトップカンファレンスであり、内外のウエアラブル関連のトップ研究者が集まるため、ウエアラブル産業への注目が高まるこのタイミングの新たな研究成果には注目すべきである。

NPOウエアラブル環境情報ネット推進機構（WIN）は、東京大学名誉教授の板生清氏が中心となって10年以上にわたり活動しているNPOでさまざまなウエアラブル関連のプロジェクトを始動している[17]。人間情報学会、ネイチャーインターフェース株式会社と連携して活動しており、講演会や雑誌発行などの活動を行っている。NPOウエアラブルコンピューター研究開発機構（チームつかもと）はウエアラブルコンピューティングの普及推進を目指して会合や展示などを行っている[18]。日本ウエアラブルデバイスユーザー会（WUG）は2014年に立ち上がった。ユーザコミュニティーとして規模拡大を狙っていると同時に、NPO設立を目指している[19]。

（6）キーワード

ヘッドマウントディスプレー、透過型・非透過型、導光板、マイクロディスプレー、スマートウオッチ、非侵襲型生体センサー（センサー脈波、血中酸素飽和度、血糖値、体温、発汗、心電、筋電、脳波）、IoT (Internet of Things)、CPS (サイバーフィジカルシステム)、M2M (Machine to Machine)、i ビーコン、NFC、IMES、GPS、加速度センサー、ジャイロセンサー、人体通信、非接触充電、Qi（チー）

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	行動認識やユーザーインターフェースの分野など、国際会議での発表は多い。ISWC2015が大阪で開催されるため研究コミュニティーは盛り上がっている。神戸大、東大、大阪大、名古屋大、NTT、NTTドコモ、日立など。装着向けの材料研究としてERATO染谷プロジェクトがある。
	応用研究・開発	○	→	健康、スポーツ、産業用などの応用分野において国際会議での発表は多い。アップル横浜研究所が設立される予定でありさまざまな応用技術の開発が行われるものと見られている。神戸大、名古屋大、NTT、日立など。慶応大・東大を中心に超人スポーツ委員会が立ち上がった。
	産業化	◎	→	中小、ベンチャーとしてはTelepathy、ウエストユニティス、ブリリアントサービスのHMD、Moffの腕輪型デバイス、ログバーのRingなど。大手ではエプソン、ソニーは積極的に民生用商品を手掛ける。産業用で富士通、東芝、日立。Google Glassやウオッチの部品は多数。化学材料、金属材料、光学部品、受動部品等の要素技術を持つ。NPO WIN、NPOチームつかもと、WUGなどNPO等の産業振興活動も目立つ。
米国	基礎研究	◎	→	古くから研究は盛んであり、世界をリードしている。ジョージア工科大、トロント大、CMU、UCBなど多くの大学が関与している。Google Glassのプロジェクトには多数の米国の大学関係の研究者が関わっている。Google、 Microsoftのメディア処理などは世界的に先進的である。
	応用研究・開発	◎	→	健康管理、産業用、軍事用も含めて研究盛ん。Google Glassを用いた応用研究などが多数行われている。MicrosoftのHoloLensはAR分野の展開に拍車をかけるものと思われる。DARPA（米国防総省）では30年以上にわたって軍事用ウエアラブルコンピューターの研究を進めているが、ここ2、3年はウエアラブルロボットスーツの研究開発が目立っている。
	産業化	◎	→	Google Glass、 Apple Watchは業界のけん引役となっている。シリコンバレーを中心にベンチャーの立ち上がりやクラウドファンディングも盛ん。MicrosoftやIntelも研究分野では古くから参入しており、ビジネスとしても最近力を入れ始めている。広くプラットフォームを握っているのでビジネス的な影響力が大きい。
欧州	基礎研究	◎	→	ファブリックの研究が盛ん。画像処理、行動認識、ユーザーインターフェースなども。スイスETH、イギリスランカスター大、ドイツカールスルーエ工科大、ダームシュタット工科大、アーヘン工科大、パッサウ大など。
	応用研究・開発	○	↗	医療、ヘルスケアなどの分野がスイスETHなどで盛んに行われている。EUのHORIZON2020はFP7の後継としていくつかの研究分野を促進しているが、なかでも個人向けヘルスケアシステム・サービス分野(PHC27、PHC28)ではウエアラブルデバイスを視野に入れ、注力しているようである。
	産業化	◎	→	ウオッチやスポーツを中心にファッション的な取り組みが盛んである。フランスやイタリアではHMDも盛ん。
中国	基礎研究	△	↗	画像処理、インターフェース、行動認識などはMicrosoftアジア研究所で行われている。大学等の研究機関での研究はまだまだ弱い。
	応用研究・開発	×	↗	健康分野などはMicrosoftアジア研究所で研究が行われている。大学等の研究機関での研究はまだまだこれからのようである。
	産業化	◎	↗	レノボ、ファーウェイ、シャオミなどウオッチ、リストバンド系で低価格市場を立ち上げている。台湾ではTSMC、ホンファイ、ASUS、クアンタコンピュータ、Acer、HTC、NVIDIAなど、デバイス、製造、完成品など幅広くこの分野をリードしている。

韓国	基礎研究	○	↗	行動認識やユーザーインターフェースの研究がKAIST、中央大学院、韓国電子通信研究院などで行われている。
	応用研究・開発	○	↗	コンテキストアウェアサービス。KAISTなど。
	産業化	◎	↗	サムスン、LGがスマートウオッチ市場でリードしている。

（８）引用資料

1) Ivan Sutherland <<Head-Mounted-Dislay>>, MediaArtNet,http://www.medienkunstnetz.de/works/head-mounted-display/
2) Meet the Godfather of Wearables, The Verge, http://www.theverge.com/2014/5/6/5661318/the-wizard-alex-pentland-father-of-the-wearable-computer
3) MicroOptical and Xybernaut Partner to Create Wearable Computing Solutions for Mobile Workers, Business Wire, http://www.businesswire.com/news/home/20030320005389/en/MicroOptical-Xybernaut-Partner-Create-Wearable-Computing-Solutions#.VNxuQvmsV8E
4) VirtualBoy, 任天堂, http://www.nintendo.co.jp/n09/vue/
5) 新製品「場所をとらずに５２型相当の迫力ある映像が楽しめるパーソナル LCD モニター“グラストロン”発売」, ソニー報道資料、 http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press_Archive/199606/96CI-075/
6) Eye-Trek Q&A, オリンパス、 http://www.olympus.co.jp/jp/support/cs/HMD/support/faq_index.html
7) 「単眼ヘッドマウントディスプレー」販売終了のお知らせ、島津製作所、 http://www.shimadzu.co.jp/hmd/
8) プロジェクト紹介（鈴鹿 8 耐)、NPO ウェアラブルコンピュータ研究開発機構（チームつかもと)、 http://www.teamtsukamoto.sakura.ne.jp/project/suzuka8h/suzuka8h.html
9) 業務用ウェアラブル・インターネット・アプライアンスを日本国内向けに発売、日立の概要・ニュースリリース、http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/2002/0115a/
10) メディア ポート「UP300x」、「UP300」の発売について、ニコン報道資料、 http://www.nikon.co.jp/news/2008/1007_up_01.htm
11) Google Glass, http://www.google.com/glass/start/
12) リストラ後の Google Glass はトニー・ファデルの監督下に、WIRED.jp、 http://wired.jp/2015/01/19/google-glass-graduates/
13) Microsoft「HoloLens」の第一印象--かつてない AR 体験を実現するヘッドセット、CNET Japan、http://japan.cnet.com/news/commentary/35059369/
14) Digital Watch、 http://www.dentaku-museum.com/hc/computer/degitalwatch/degitalwatch.html
15) Android Wear, Google, http://www.android.com/wear/?brand=CHMA&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=jp-wear-bkws&utm_content=search-bkws

16) Apple Watch, Apple,
http://www.apple.com/jp/watch/?cid=wwa-jp-kwg-watch-com
17) 特定非営利活動法人ウエアラブル環境情報ネット推進機構、http://www.npowin.org/j/
18) 特定非営利活動法人ウェアラブルコンピューター研究開発機構、
http://www.teamtsukamoto.sakura.ne.jp/
19) 日本ウェアラブルデバイスユーザー会
http://w-ug.jp/

３．９．５　HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）

（１）研究開発領域名

HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）

（２）研究開発領域の簡潔な説明

人とロボットの間のインタラクションについて研究する分野。Human-Computer Interaction、認知科学、人工知能、ロボット工学、自然言語処理、デザイン、社会科学などの知見や手法の融合分野。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

研究の立場

HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）の研究は、工学的視点に立って人間と共生できるロボットシステムの構築を目指す立場と、科学的視点に立って人間のコミュニケーションにおける行動規範を明らかにする立場とがある。前者は、ロボットに必要とされる機能と、その実現方法を明らかにすることを目指し、後者は、ツールとして（ヒューマノイド）ロボットを用いながら人間の機能を探る。このような特性から、本領域は、認知科学、人工知能、ロボット工学、自然言語処理、デザイン、社会科学などの広範な研究領域が融合している分野となる。基礎的研究としては、コミュニケーションに利用される言語・非言語（視線、姿勢、ジェスチャー、対人距離、等）の理解と生成方法の検討や、さまざまな言語・非言語行動の間に存在する制約・相互関係の解明に関する研究が継続的に行われている。アプリケーションの視点に立った研究では、ロボットが社会に進出していくことを念頭において、高齢者支援や教育、公共スペースでの案内など、実際の用途やその際の問題について扱っている研究などが多く行われている。また、それぞれの立場からインタラクションの評価方法そのものを議論する研究や、文化ごとのロボットの社会的受容の違いの分析などの研究も多い。代表的な学会としては、IEEE/ACM Human-Robot Interaction[1)]、ICSR[2)]、またマルチモーダルな情報処理を扱う ICMI[3)]、バーチャルエージェントに関する IVA[4)]、対話処理を扱う SIGDIAL[5)]なども関連する学会として挙げられる。

基礎的研究

人とロボットが共存し自然なインタラクションを行う上での必須の機能として、視線や表情、ジェスチャーなどの非言語情報の理解と生成について詳細に検討されている。特に、インタラクション中の視線制御の機能分析に関する研究は伝統的に多い。例えば、複数人のユーザーとユーザーとロボットが会話的インタラクションを行っている状況において、ロボットの視線配布による発話対象の意図表出や、物の手渡しタスクなどの状況における視線の機能などが古くから検討されている。また言語と非言語行為の組み合わせによる意図の理解・生成についても検討が進んでいる。早稲田大学においては、ロボットを用いた会話プロトコルの研究が行われている。すなわち、会話システムが人と同じ身体を持つことを物理レイアのプロトコルに位置づけた上で、うなずきや、視線、姿勢などをトランスポート、セッションレイア相当の役割を与え、効率的な会話が行われるための約束事を明らかにしている。同大学は多人数で構成されるグループ会話に参加できるロボットの草分け的存在であり、近年

では単にグループ会話参加するにとどまらず、グループ会話のファシリテーションを行う機能を実装している[6]。Microsoft Research は、Open-World Dialogue プロジェクトにて、会話参加者が動的に変化する環境で多人数会話を実現している[7]。また欧州でも、英エディンバラ大学を中心にした国際的共同研究プロジェクト JAMES（Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems）が進行中である[8]。JAMES では、発話権の授受のモデル言語理解、会話戦略、話題（ニュース等）推薦、相互イニシアティブ（Mixed-Initiative）モデルなどがより詳細に検討されている。また、主に公共スペースおいて人間とロボットが同伴歩行するような状況を想定して、適切な対人距離の制御なども検討されている。

ロボットのパーソナリティー（ロボットのパーソナリティーに基づく言語・非言語生成方法、等）や身体性（ロボットの身長の影響、言語的行為と自由度の数の関係、等）に関しての考察なども行われている。また、それらの社会的受容の違いについても議論されている。またそもそもロボットが人間のような存在として認識されているか、あるいは単に道具として認識されているかを文化ごとに分析している研究なども行われている。 これらの基礎的検討については、HRI 学会等において特に米国のカーネギーメロン大学 Human-Computer Interaction Institute および Robotics Institute[26]、ウィスコンシン大学マディソン校の Human-Computer Interaction Group[28]などからの発表が近年多く見られる。また EU（Paris Tech 他）、日本 （ATR 他）、韓国（ソウル大他）の研究機関からも継続的に報告されている。

応用的研究

応用的研究としては、主に子供のための教育支援や高齢者支援、人とロボットの物理的共同作業などに関して検討している研究が多く見られる。また、テレプレゼンス・ロボットに関する研究や、飛行ロボット（ドローン）と人のインタラクションに関する研究も増えてきている。また、一つのロボットで獲得された対人スキルを他のロボットと共有できるようなクラウド・ロボティクスの研究も行われている。

教育に関しては、ロボットに教師役を担わせて子供に学習の動機付けを試みるものが多い。例えば、ロボットがその身体性を生かして何らかのインストラクションを行ったり、共感的行動やユーザーごとのパーソナライゼーション（言語や非言語のスタイルをユーザーに合わせる等）を行うことで学習意欲を向上させるなどの試みがされている。高齢者支援に関しては、ロボットを用いてケアスタッフと高齢者間の交流を促進するものや、ロボットとのインタラクションを通して創造的な思考を喚起するようなものがある。また、高齢者に物理的に薬を渡すための安全な動作制御の検討なども行われている。この物理的共同作業については、新しい動作軌跡の教示の方法や、安全な動作制御の検討、協調作業のための動作計画、作業達成のための効果的な視線配布やジェスチャーの検討などがされている。

テレプレゼンスに関しては、主に遠隔にあるロボットを直感的に扱うためのインターフェースが検討されている。最近登場した飛行ロボットは、上空から景色を撮影するなどに用いられることが多いが、低空を飛ぶ飛行ロボットと人との社会的なインタラクションを試みるものも出てきている。クラウド・ロボットについては、EU の RoboEarth プロジェクトが継続されている[9]。ロボットの動作モデルや周辺環境の知識に関するデータベースを蓄積し、あらゆるロボットでそれらの知識を共有できることを目指しており、ロボット間の知識共有

や、協調作業のデモシステムも報告されている。

（４）科学技術的・政策的課題

・ロボットを用いたアプリケーション・デザインの重要性

ロボット・プラットフォームが一般向けに多く販売されるようになり、数年前まで基礎研究レベルだったことも廉価で高性能なセンサーデバイスで容易に実現できることも多くなった（ユーザー位置推定、視線認識等）。応用的な研究を行うのに十分な環境はそろってきていると言え、今後は、実際のタスクも想定した研究テーマの策定が重要である。ビジネスとしても参入障壁はかなり下がってきているため、広く利用されるサービスのデザインが真剣に検討されなければならないだろう。

・HRI 関連の事業化支援

EU では、Horizon2020 経由で巨額のロボット関連研究開発・事業化予算が投入されている（SPARC robotics project：28 億ユーロ規模）[10]。米国はもとよりシリコンバレーを中心にベンチャーキャピタルを元手にした研究機関からのスピンアウトが多いが、HRI 関連分野も例外ではない。日本のロボット技術は世界トップレベルと言われて久しいが、このように長期的視点に立った大規模な事業化支援についてはすでに欧米に後れをとっていると言え、今後の政策的課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・企業がプラットフォームを本格提供開始

2014 年は、いくつかの企業が人間との社会的インタラクションを目的としたロボットの開発プラットフォームを本格提供開始した。日本ではソフトバンク・ロボティクス社の Pepper（仏アルデバラン社との共同開発）[11][12]、米国 MIT Media Lab からスピンアウトした Jibo 社の Jibo が 2014 年夏に相次いで発表された [13]。Pepper は 30 自由度の機構を有し、3D センサー、タッチセンサー、ジャイロセンサー、レーザーセンサーなど、人間とインタラクションする上で必要なセンサーが実装されている。一方 Jibo は 30 センチ弱の身長で 3 自由度の機構と顔部にディスプレーを持ち、従来のヒューマノイドとは違って社会的なインタラクションに最適化されたミニマムデザインになっている。それらのハードウエアデザインの違いとそれに起因するサービスの違いがどのように社会に受容されていくのかは、今後も注目である。これらのプラットフォームは、それぞれに開発環境を提供するとともに、ロボット用アプリケーション・ストアを開設し、新規開発者の参入障壁を下げ、また独自のマーケットを開拓する可能性を秘めていると言え、2015 年以降、本格的なロボットアプリビジネスが広がる可能性がある。研究機関におけるプラットフォームとしては、認知発達ロボティクス用ヒューマノイド icub は引き続き Italian Institute of Technology を中心に開発されており [14]、研究開発ネットワークは EU 全域に広がり、日本では大阪大学を中心に共同研究が進んでいる。以前からロボット用ミドルウエアとして広く利用されてきた ROS（Robot Operating System）は 2013 年から Willow Garage 社から Open Source Robotics Foundation に管理が移管している [15]。

・欧米での HRI 関連ファンド

EU は Horizon2020 のもと、180 の企業と研究機関が集結して世界最大の民間のロボット

開発計画 SPARC を 2014 年に開始した[10]。2020 年までに 6000 億ユーロ規模の市場と 24 万人の雇用創出を目指している。ロボットの主要な応用分野として、製造、ヘルスケア、ホームケア、農業、セキュリティー、環境、交通、エンターテインメントなどが挙げられてが、HRI 関連技術はほとんどの分野で重要な技術であり、本プロジェクトの中でも重要な位置を占めている。

・自然言語・対話処理技術と HRI 分野の接近

これまで別々に発展してきた自然言語・対話処理技術とロボット技術の今後より急速に接近し発展していくものと考えられる。Apple Siri [16]に代表されるような音声を用いたパーソナルアシスタントシステムは本格的な事業化が進んでいる（Microsoft Cortana [17]、Google Now [18]他）。米 IBM が 2011 年に発表した質問応答システム Watson は、ニューヨークに専用の拠点を設置し本格ビジネス化の段階に入っており、他業種との連携が始まっている。Softbank は、 Pepper 用に Watson の日本語対応版を 2015 年にも事業展開すると発表した。学術界ではこれらに先立って 2010 年に AAAI （米国人工知能学会）にて「Dialog with Robots」と称したシンポジウムが開催され[19]、Microsoft Research や ATR、カーネギーメロン大学などの研究者が中心となり双方の分野の研究者が介し、ロボットと対話するための研究の方向性が議論され、各所で融合的な研究が進んでいる。

・高性能センサーデバイスの普及

人間とロボットのインタラクションではマルチモーダルな情報を処理しなければならないが、Microsoft Kinect（ジェスチャー認識）[20]や、 Leap Motion（指先のジェスチャー）[21]、EyeX（視線認識）[22]などの廉価な認識デバイスの登場以来、ユーザーの位置推定、姿勢認識（身体方向、姿勢）、ハンドジェスチャー認識、顔画像処理、顔表情認識、顔向き認識、視線認識などの視覚的情報が比較的取得しやすくなってきている。また、聴覚的情報については、実環境下での音声認識を実現するために音源定位や音源分離などの技術が極めて重要になるが、これについてはホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン、京都大学、東京工業大学などが中心になって開発したロボット聴覚オープンソースソフトウエア HARK が 2010 年より公開されており [23]、現在も活発に更新されている。HARK は ROS 等のロボットミドルウエアとの親和性も高く、Kinect 等の市販のデバイスにも標準対応しているため、世界各国のロボット研究者に利用されている。

（６）キーワード

言語・非言語的インタラクション、クラウド・ロボティクス、インタラクションの評価手法、ロボットの社会的受用、エンターテインメントロボット、高齢者支援ロボット、学習支援ロボット

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	➚	・ATR [24]や大阪大学を始めとして、HRI学会でのプレゼンスが非常に大きい（HRI学会での日本人の口頭発表件数は全体の16%を占める）。日本からの発表の内およそ6割がATRからの研究が占めており、この分野で大きな存在感を持っており、国際的な共同研究の拠点にもなっている。 ・早稲田大学は、ロボットを用いた会話プロトコル研究の草分け的存在であり、会話ファシリテーション等、先進的な研究を行っている[6]。
	応用研究	◎	➚	・実用化を見据えた公共スペースでのロボットの運用に関する研究や高齢者支援、教育目的の研究が多く行われている。 ・ATR知能ロボティクス研究所では、ショッピングモールのような人が行き交う公共空間において、環境に埋め込まれたセンサーネットワーク等も用いながら（街角環境理解技術）、ロボットが人間を案内したり神話的に話しかけたりするためのインタラクション技術の研究を行っている（街角環境調和型のインタラクション技術）。
	産業化	○	➚	・SoftbankがパーソナルロボットPepper [11]を発表、IBMと共同でWatsonの日本語化を進め、Pepperのための対話に利用することが発表された。また、吉本興業はPepperなどのためのロボット・コンテンツ企画・開発会社「よしもとロボット研究所」[25]の設立を発表した。
米国	基礎研究	◎	➚	・HRI学会での米国からの口頭発表件数は全体の57%を占める。もともとHRI研究に活発だったカーネギーメロン大学[26]やMIT[27]で訓練を受けた若手研究者がウィスコンシン大学マディソン校[28]やジョージア工科大学[29]などに移り研究室を開いて活発に研究を行っている。産業界からはWillow Garage（ロボット用ミドルウエアROSの開発元）社、また米国海軍系の研究所（Naval Research Laboratory）[30]などからも継続的に研究発表がされている。
	応用研究	◎	➚	・教育（子供とロボット）に関する研究や、テレプレゼンス・ロボットのインターフェースに関する研究が行われている。 ・軍事用の捜索・探索ロボットの操作を簡便にするためのインターフェースの研究なども行われている。
	産業化	◎	➚	・MIT Media LabからスピンアウトしたスタートアップJibo社がパーソナルロボットJiboを発表した（クラウドファンディングで開発費を調達した）[13]。実際に発売されるのは2015年後半以降の予定だが、発売前から予約が殺到していることから、パーソナルロボットへの期待の大きさが伺える。 ・パーソナルアシスタントエージェント Apple Siri [16]、Microsoft Cortana [17]、Google Now [18]は社会に定着してきたといえ、高度な質問応答システムIBM Watsonも本格事業化され他業種との連携が図られ始めていることから、今後自然言語・対話技術とHRI分野との接近が進むものと考えられる。 ・テレプレゼンス・ロボットは、Double Robotics社のDoubles [31]、Suitable Technologies社のBeam [32]、またiRobot社のAva500 [33]など、次々と発売され人気を博している。2012年の報告には、600万人以上の米国人が自宅で仕事を行っているとあり、テレプレゼンス・ロボットのニーズは極めて大きいと考えられる。

欧州	基礎研究	◎	➚	・HRI学会でのEUからの口頭発表件数は米国に次いで全体の20%を占める。ドイツのビーレフェルト大学のCITEC（Center of Excellence Cognitive Interaction Technology）[34]、ポルトガルのINESC[35]などの活躍が目立つ。 ・Horizon2020が2014年より本格開始。HRI関連分野への支援も進むものと考えられる。 ・ヒューマノイド型認知発達ロボット・プラットフォームcubは、イタリア工科大学を中心に開発が続けられており[14]、現在EU各国で各認知モジュールの開発やHRI研究が進められている。特に、外界とのインタラクションを通した言語や道具の獲得、安全な制御等に関する基礎研究が目立つ。 ・クラウド・ロボティクスの代表例として、EUのファンドで支援されているRobert [9]が2009年から継続されており、2014年には複数のロボット間で現実世界の知識が共有・利用されるデモが公開された。これらの知識が増えていくことで、高齢者や身体障害者の支援も可能になると期待される。
	応用研究	○	→	・教育や高齢者支援のための研究が散見される。 ・英エディンバラ大学を中心にした国際的共同研究プロジェクトJAMES（Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems）[8]では、ロボットに複数の人間を相手にするバーテンダーの役を担わせている
	産業化	○	➚	・Aldebaran Robotics（仏）が先行するNao、Romeoに続いてソフトバンクと共同でPepperを開発。多くの研究機関での利用が進んでいる[33]。今後、従来のHRI分野以外からの参入も増え、ロボットのアプリケーション開発が盛んになっていくものと考えられる。 ・Horizon2020のもと、180の企業と研究機関が集結して世界最大の民間のロボット開発計画SPARCを2014年に開始し[7]、2020年までに産業化を加速し6000億ユーロ規模の市場と24万人の雇用創出を目指している。このプログラムの中で、ロボットのアプリケーションとしてHuman-Robot Interactionも重要な位置を占めており、人間の内的状態も加味したインタラクションの実現を目指すとしている。
中国	基礎研究	×		・HRI関連学会でのアクティビティは非常に低い。
	応用研究	×		特になし
	産業化	×		特になし
韓国	基礎研究	△		・HRI関連学会でのアクティビティはかなり低い。
	応用研究	×		特になし
	産業化	×		特になし

（８）引用資料

1) Human-Robot Interaction　http://humanrobotinteraction.org/
2) ICSR (International Conference on Social Robotics)　http://icsr2014.org/
3) ACM ICMI（International Conference on Multimodal Interaction）http://icmi.acm.org/
4) IVA (International Conference on Virtual Agents) http://www.ccs.neu.edu/iva2014/
5) SIGDIAL (Special Interest Group on Discourse and Dialogue of the Association for Computational Linguistics) http://www.sigdial.org/

6) 早稲田大学知覚情報システム研究室 http://www.pcl.cs.waseda.ac.jp/
7) Microsoft Research Situated Interaction Project
http://research.microsoft.com/en-us/um/people/dbohus/index.html
8) JAMES（Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems
http://homepages.inf.ed.ac.uk/rpetrick/projects/james/
9) RoboEarth http://roboearth.org/
10) SPARK http://sparc-robotics.eu/
11) Softbank Pepper http://www.softbank.jp/robot/special/pepper/
12) Aldebaran Robotics (Nao, Romeo, Pepper) http://www.aldebaran.com/
13) Jibo https://www.myjibo.com/
14) iCub http://www.iit.it/en/research/departments/icub-facility.html
15) ROS (Robot Operating System) http://www.ros.org/
16) Apple Siri https://www.apple.com/ios/siri/
17) Microsoft Cortana
http://www.windowsphone.com/en-us/how-to/wp8/cortana/meet-cortana
18) Google Now http://www.google.com/landing/now/
19) AAAI 2010 Fall Symposium “Dialog with Robots” http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/
20) Microsoft Kinect http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/
21) Leap Motion https://www.leapmotion.com/
22) Tobi EyeX http://www.tobii.com/eye-experience/
23) ロボット聴覚オープンソースソフトウエア HARK http://www.hark.jp/
24) ATR 知能ロボティクス研究所 http://www.irc.atr.jp/
25) よしもとロボット研究所 http://www.yoshimoto.co.jp/yrl/
26) CMU Human-Computer Interaction Institute，Robotics Institute
http://www.hcii.cmu.edu/ https://www.ri.cmu.edu/
27) MIT Media Lab Personal Robots Group http://robotic.media.mit.edu/
28) ウィスコンシン大学マディソン校 Human-Computer Interaction Group
http://hci.cs.wisc.edu/
29) ジョージア工科大学 Socially Intelligence Machine Lab
http://www.cc.gatech.edu/social-machines/
30) Naval Research Laboratory Intelligent Systems Section
http://www.nrl.navy.mil/itd/aic/IntelligentSystems
31) Double Robotics http://www.doublerobotics.com/
32) BeamPro https://www.suitabletech.com/beam/
33) iRobot Ava500 http://www.irobot.com/For-Business/Ava-500
34) ビーレフェルト大学 CITEC（ドイツ） https://www.cit-ec.de/
35) INESC-ID（ポルトガル）http://www.inesc-id.pt/

３．９．６　グラフィックス・ファブリケーション

（１）研究開発領域名

グラフィックス・ファブリケーション

（２）研究開発領域の簡潔な説明

画像や映像といった視覚的情報、図形や 3 次元（3D）データといった形状情報などを扱う研究開発領域。画像処理や画像認識などと異なり、主に生成（synthesis）を対象とする。グラフィックスとしては主にディスプレーなどによって光学的に出力する情報を、ファブリケーションとしては 3 次元プリンターなどによって物理的に出力する情報を対象とする。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

計算機を用いた映像表現や形状処理は、現代社会においてなくてはならない技術の一つである。テレビや映画、ゲームといった動的なメディアにとどまらず、印刷物やポスターといったすべての画像情報が今日では計算機を用いて生成されている。また、医療・科学計算におけるデータの可視化などを通じて、医学や科学の発展に必要不可欠な技術となっている。さらに、計算機を用いた形状処理技術は、いわゆる CAD (Computer-Aided Design) と呼ばれる技術であり、家電製品や衣服から車や建築物にいたる工業製品の設計に利用されている。

研究領域としてのグラフィックスは、米国計算機学会（ACM）の SIGGRAPH を中心として発展を続けている。1970 年代から 1980 年代における研究の目標は 3 次元グラフィックスによる実写と区別できないリアルな映像の生成であったが、その目的は 1990 年代には一定の成功をおさめ、現在では、実写映画の中にコンピューターグラフィックスが普通に使われるようになってきている。そのような状況のもと、3 次元グラフィックスの研究開発の主眼は、より物理的に正しい映像の生成、より多様な現象をより高速に（リアルタイムに）生成する技術、などへと移ってきている。また、3 次元グラフィックス以外にも、画像処理や入出力デバイスに関する研究も広く行われている。

従来型の CAD 技術はすでに完成された技術として認識されており、道具としては広く利用されているものの、新たな研究開発は活発とはいえない。自動車をはじめとする製造業における関心事は、さまざまな部署間におけるデータ共有を推進する PDM (ProductData-Management) や、工場のライン計画やロボット配置などを行う CAPE (Computer Aided Process Engineering) に移ってきている。残されている課題としては、スタイルデザインには依然として 2 次元のドローイングが使われており、3 次元的なデザインシステムや後工程の CAM (Computer-Aided Manufacturing) との連携が求められている。

一方、ファブリケーションと呼ばれる領域は、3 次元プリンターをはじめとするラピッドプロトタイピング機器の普及を背景として最近活発に研究開発が行われているものであり、計算機の中にある情報を物理的な形状として出力することを対象とした形状生成・処理技術を扱うものである。従来の一般的な CAD や CAM が伝統的な製造業における専門家の間の分業を前提としていたのに対し、多様なユーザーがユーザー技術を目指している点に特徴があるといえる。

最後に、形状処理技術における大きな技術的進展として、3D スキャナー（3 次元形状計測装置）の高度化と普及が挙げられる。工業製品や人体などを精密にスキャンする技術が近

年急速に発展して実用化が進んでいる他、Microsoft の Kinect に見られるようなリアルタイムで 3 次元形状を取得する技術も出てきている。産業分野では、足形をスキャンして個人に最適化した衣服や靴などをデザインするサービスや、来場者の顔をスキャンしてフィギュアを制作するサービスなどが実用化されている。

（4）科学技術的・政策的課題

グラフィックスおよびファブリケーションに関わる技術は、我々の生活の利便性快適性を向上するために非常に重要であり、またコンテンツ産業やモノづくりといった我が国の産業の根幹を支える技術でもある。これらの技術を発展させていくことは、科学技術的な観点からも産業的な観点からも非常に重要と考えられる。

より魅力的な映像コンテンツをより効率よく生成するための技術

映像表現の質の向上に伴い、映像コンテンツの制作の人的コストが上昇を続けており、製作者側にとって大きな負担となっている。この問題を解決するために、高度な映像コンテンツを低コストで効率よく生成するための技術が求められている。具体的には、スキャニングによって実際の環境を取り込む技術や、過去の資産を効率よく蓄積して再利用する技術、トレーニングを受けていないユーザーでもコンテンツ生成を行えるようにするインタラクション技術などが重要である。特に米国に比べ日本の映像制作は低予算で行われることが多く、低コスト化は競争力の維持のために必須である。

また、日本のアニメに見られる非写実的な表現においては、現実の光の反射や屈折を正確に再現する事を目的とした光伝搬シミュレーションによる計算でなく、従来型のアーティスト主導の制作が行われているのが現状である。しかし、このようなアーティスト主導の制作はコストがかかるため、非写実的な映像においても計算による制作支援は非常に有効であると考えられ、この方向での技術開発が求められる。

カメラからの実写との合成のための技術の研究

レンダリング技術は、本質的には光のシミュレーションである。そのため、カメラやその他光学機器から得られる画像と CG とは、計算機上のデータか現実の物体かの違いはあるが、光の伝搬による結果を見ているという事は変わらない。この特性を踏まえると、実写に対する CG の合成による情報の付加（Argumented Reality、AR）において、非常に自然なアプローチであると考えられる。近年では、安価な HMD （ヘッドマウントディスプレー）や、3 次元形状計測器（Microsoft の Kinect など）が普及し始めており、それらとレンダリングにおける研究成果を組み合わせる事によって、従来の AR の研究では得られなかった、自然な情報の付加が可能になると考えられる。これは、日本の光学機器の強い国際競争力を生かす事ができる研究テーマである。

多様なニーズに対応したものづくりのためのデザイン・ファブリケーション技術

個人の価値観や生活スタイルの多様化が進んでおり、これらに対応したロングテールなものづくりが求められている。また、少子高齢化の進展により、体の不自由な人が今後増えていくことが予想され、これらの人々の生活を支えるための技術が求められている。特に、

個々人の持つハンディはすべてバラバラであるため、個別対応が必要である。また、介護のような福祉の現場においても、容易にカスタマイズ可能な介助補助器具へのニーズは非常に高い。このような多様化したニーズに応えることは、同じデザインを大量に生産する従来の工業生産のモデルでは対応できない問題であり、近年発展しているインタラクティブなデザイン技術やファブリケーション技術を活用した解決が期待される。

国内における産業界との結びつきの強化

本領域における、日本での産業と学術界の結びつきは非常に弱い。コンテンツ産業の国際的な展開に比べ、国内における CG 制作ソフトウエアや CAD ソフトウエアは欧米のソフトウエア会社のものが主流である。その背景には、そもそも日本の産業界に高度な技術を持った人材が定着していないという問題がある。米国の Pixar や AutoDesk をはじめ、国内のそういった人材は海外に流出している。また、米国の NVIDIA、Microsoft などの奨学金プログラムやインターンシップなどによる、学術界と産業界の連携がまったく行われておらず、学生の就職先としての日本の CG や CAD 業界の魅力は非常に低いと言わざるを得ない状況にある。そのような状況を改善する一歩として、既存のコンテンツ産業や製造業の強みを生かし、しっかりとした産学連携による研究所の共同設立を行い、国内のみに限らず、海外からも優秀な人材を呼び込める研究環境づくりが重要であると思われる。

関連研究分野との学術的・技術的交流の促進

グラフィックスやファブリケーションは本質的に学際的な研究分野であり、例えばレンダリングにおいては、計算機科学を中心として、計算統計、宇宙物理、解析学、認知科学などとの深い関連が度々指摘されて来ている。例えば雲や煙などの不定形の物体のレンダリングについて、放射性粒子の伝搬シミュレーションとの関連が指摘されている。また、衣服のシミュレーション技術は服飾産業や織物産業に役立つものであり、都市や建物のモデリングは実際の都市計画や建築設計や災害対策などに応用可能である。しかしながら、これらの分野間の成果や研究者同士の交流は限定的であり、他分野で既知の技術が再発見される事も起こっている。このような現状を踏まえ、グラフィックス・ファブリケーションの研究者が他分野の学会で講演を行うなどの活動も始まっているが、もっと本質的な学術交流が必要である。これは、研究成果の応用領域を広げるためにも重要であり、どのような応用が存在するかについて分野を超えた議論が求められる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・2008 年ごろから光の物理に基づいたレンダリング技術が盛んになってきており、学術的にも産業的にも注目を集めている。例えば人間の肌や大理石など、半透明の物体の反射特性についての研究が、宇宙物理や計算統計・信号処理における理論の応用によって大きく進み、有機的な物体が非常に写実的にレンダリングできるようになった。学術分野では、フォトンマッピング法を開発した UCSD のグループなどが有名である。産業分野では、映画での応用が著しく、デジタルダブルとよばれる、俳優やスタントマンを CG によって完全に置き換える技術がハリウッドで使われ始めている。
・さまざまな入力データに対して「破綻」しないような光の伝搬シミュレーションについて

の研究が大きく注目を集めており、計算統計や応用数学の知識を組み合わせた学際的な研究の競争が起こっている。比較的新しい研究成果が米国の Pixar などで実際に利用されるなど、産業界全体として、新たな研究成果をいち早く導入する競争が激化している。

・並列計算プラットフォームを用いた高速並列計算は円熟期にあり、産業的応用が著しい。特に米国において、GPU メーカー各社（NVIDIA、Intel、AMD）が、レイトレーシングと呼ばれるレンダリングの基盤技術についての基本ソフトウエアを提供しており、市場での競争が激化している。

・CG 技術と 3D プリンターを組み合わせた次世代のモノづくりに関する研究が、近年加速してきている[1)]。例えば 3D プリント結果に特定の力学的特性を持たせるもの、少ない素材で高い強度を実現するもの、対象を 3D プリントしやすい形に加工するもの、などさまざまな研究がある。インタラクティブなデザインと物理シミュレーションを統合するモノづくりの研究も注目されており、衣服・家具・バルーン・紙飛行機等のさまざまな対象についての研究がある。

・ファブリケーションのもう一つの側面として、特定の見え方を持つモノを作り出すという研究もある。例えば物体表面に複雑な反射特性を持たせるものや、アクリル板を通る光の屈折によって複雑な画像を描き出すもの等が研究されている。

・3 次元形状の計測技術も近年著しく進展しており、現在では人の顔の微細な皺（しわ）や眉毛等をも計測することが可能となっている。こういった技術の用途は CG 制作だけにとどまるものではなく、例えば 3D プリンターと組み合わせることで、被写体のフィギュア人形を作ることが可能になってきている。また Microsoft Kinect に代表される深度カメラを用いたリアルタイムな形状計測に関する研究も盛んであり、特に仮想空間または遠距離コミュニケーションへの応用が期待されている。Intel は最近ノート PC に内蔵できるほど小さい深度カメラ RealSense を発表しており[2)]、この分野が今後ますます発展することが予想される。

・グラフィックス技術を建築分野に応用する研究も最近注目を集めている。例えば有機的な形をしたビルの壁面をガラスのパネルで構成したい場合に、最適なパネルの配置を決める方法が研究されており、それを実際の建築プロジェクトに適用する試みもある[3)]。もう一つのトピックとして、石造りのアーチのような、ブロック同士が重力のみで支え合うような構造を求める研究もあり、低コストで頑健な建築の新しいアプローチとして、大いに期待されている。ウィーン工科大学の Helmut Pottmann 教授がこの分野の第一人者として有名である。

・カメラと計算機の高性能化に伴い、Computational Photography と呼ばれる新しい写真撮影法に関する分野が、ここ数年で急速に発展している[4)]。例えばフォーカスを撮影後に変えたり、ピンぼけや手ブレを修正したり、暗所でフラッシュを用いないで撮影したり、といったことが可能になっており、一部の技術は既に商業化され、広く使われている[5)]。CG 以外の産業や医療への応用を目指した研究として、数メートル以上離れた場所からでも読み取れるバーコードや、白内障を始めとする目の病気の診断を低コストで行えるようにする方法といったものもある。

・新しい入出力の方法も CG 分野のトピックの一つである。カメラで手の動きを撮影しその姿勢と形をリアルタイムに計算することで 3 次元的な入力を可能にする MIT の研究は、

その後ベンチャー事業として商用化されている [6]。また、3D キャラクターの姿勢を自在に操るための、実際に手で触って動かせる入力装置も最近提案された。出力方法に関しても、回転する鏡によって 3D 映像（ホログラム）を表示する装置や、落下する水滴にプロジェクタから映像を投影するディスプレー装置、空中に浮遊する紛体を制御するものなど、斬新で実験的な研究が多くなされている。

・クラウド技術の進展に伴い、多数のユーザーが生み出した大量のデータを活用する研究が増えている。例えば既に存在する大量の 3D モデル群に対し機械学習を行うことで、ユーザーが新しい 3D モデルを制作する過程を手助けする手法、大量のスケッチ画像を利用してユーザーが新しいスケッチを描くのを手助けする手法、観光地等で多数のユーザーが撮影した大量の写真から 3 次元空間を再構築する手法、等が研究されている。

（6）キーワード

物理ベースレンダリング、光の伝搬シミュレーション、3D プリンター、3 次元計測、深度カメラ、Computational Photography、情報可視化、3D（ステレオ）ディスプレー、クラウドコンピューティング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・1980~1990年代にはラジオシティ法を始めとするCGの基盤的な技術の研究が盛んだったが、その後CGの範疇がより多様化し、使われる技術が高度化するにつれ、新しい領域を作り出すような画期的な基礎研究はあまり見られなくなってきている。 ・SIGGRAPHでの発表はほぼ東京大学からのみであり、中国と比べると研究者の層が非常に薄い。また、コンテンツ産業の台頭に比べて、CGの基盤の技術の研究は非常に弱く、日本の国際学会におけるプレゼンスは非常に小さい。
	応用研究・開発	○	→	・日本で特に盛んに研究されているトピックとしては、マンガ風などの非写実的描画、自然現象のシミュレーション、デザインのためのユーザーインターフェース、顔のモデリング、3次元形状検索、等がある。 ・Microsoft Research Asiaなどのような、学術界への貢献が顕著な企業の研究所も存在せず、学生や研究者の就職先としても、大学との共同研究先としても、市場規模はかなり小さい。産業と研究両面からの支援が望まれる。
	産業化	○	→	・国内の映像制作において高度なCG技術をふんだんに使うケースは少ない。例えばスタジオジブリでは基本的に全てを手描きで制作している。NHKには比較的大きなCGチームがあり、ニュースの解説映像や大河ドラマなどでCGを積極的に利用している。OLMデジタルはCGによる映画制作で有名であり、学術的な研究もある程度行っている。 ・任天堂を始めとする日本のゲーム産業は伝統的に世界をリードしてきたが、CG表現の重要性が高まった昨今は、CG技術に関して欧米メーカーに後れを取っている。スクウェア・エニックスはCGに力を入れており、学術的な研究もある程度行っている。 ・一般にCG関連の企業における学術的な研究の比重は小さく、産業界と学術界の連携は弱い。学生が国内企業でのインターンでCG分野の研究をして学位を取るケースはほとんど無い。

	基礎研究	◎	↗	・MITやStanfordを始めとする名門校が、CG分野の黎明期から基礎研究で世界をリードしてきており、ブレイクスルーとなる画期的な研究を今も生み出し続けている。 ・大学における研究は、産業界とのつながりが強い。企業と共同で実用性に重きを置いた研究を行うことが多い他、大学発の研究をもとにベンチャー企業を立ち上げるケースも多い。 ・研究予算は主要な大学（Cornell University、 University of California、 MIT、 Stanford）などに集中しており、他大学では研究予算の取得が以前に比べると困難になっている。これは、企業における研究が盛んになってきたためであり、著名な研究者が企業の研究者に移籍する例も多い。
北米	応用研究・開発	◎	↗	・Microsoftにはコンピューター科学の大規模な研究所があり、その中に強力なCGのグループがある。Windows OSに将来的に役立つ可能性のある画像・動画処理等に関する技術や、自社製品のKinectを用いた技術等の研究が多いが、製品化には必ずしも直結しないような基礎研究も多い。 ・Intelは、並列計算ハードウエアを用いたレンダリングの高速化の研究を盛んに行っている。メニーコアCPUの主な応用領域の一つとして、レイトレーシングを推進しており、産学連携も非常に盛ん。 ・AdobeはPhotoshopやIllustratorに代表されるグラフィックデザインソフトの会社だが、それらに搭載する新機能の開発を目指して、画像・動画処理等に関する研究を精力的に行っている。一方で3Dモデルの分析・可視化など、実験的な性質の基礎研究も行っている。 ・GPUメーカーのNVIDIAは、ハードウエアの開発と並行して、その性能をうまく引き出すためのソフトウエアに関する研究を行っている。CGの中でもレンダリングやシミュレーションなど計算コストの高いトピックに関する研究が多い。またGPUをCG以外の目的に利用するGPGPUという技術は、医学や金融など高度な計算が必要とされる専門分野で広く利用されている。 ・AutodeskはMayaとAutoCADというCGとCADの両分野でそれぞれ非常に有名なデザインソフトの会社であり、それに関する基盤的技術（レンダリングやシミュレーション）やユーザーインターフェースの研究開発を行っている。 ・Disneyは多数の子会社を擁する巨大グループだが、映画制作・遊園地・テレビ局など多くのセクターでCG技術を必要としているので、CG専門の研究所を設立し、精力的に研究を行っている。またPixarを始めとするDisney傘下の映画会社も、それぞれ中規模の研究グループを有する。 ・NVIDIA、Intel、Microsoft Researchなどの大企業は学生向けの奨学金制度（年間350万円ほど）を持っており、コンピューターグラフィックスに関わる学生のインターンシッププログラムも非常に活発である。インターンシップは、通常数ヶ月のスパンで研究開発を行い、研究成果を学術論文として発表することが多い。インターンシップを経由後、その後企業に就職する例も非常に多く、産業と大学の結びつきが非常に強い。
	産業化	◎	↗	・ハリウッドをはじめとし、米国は依然として世界的にみて映画産業の中心であり、そこで多数のＣＧ技術（スペシャルエフェクト）が使われ、高度な技術を持った研究者・学生の就業先として最大の市場を持っている。ゲーム産業も世界をリードする立場にあり、多くの最新のＣＧ技術が投入されている。 ・AdobeやAutodeskに代表されるＣＧ制作用ソフトも世界的なシェアを抑えているのは北米の企業である。 ・3Dプリンターを利用したビジネスも盛んになってきており、オンラインで3Dプリントを発注したり、形状データを売買したりするネットサービスなどがでてきている。(shapeways、 ponokoなど)
欧州	基礎研究	◎	↗	・ドイツのMPI、フランスのINRIAなど、伝統のある国立の研究所で、外部の大学から学生を受け入れて指導し、多くの基礎研究を行っている。 ・大学における研究はヨーロッパ各国に、中心となる研究者とともに分散している傾向にある。米国に比べると、研究予算の規模は少ないが（EUのプロジェクトを除く）研究費獲得が容易な傾向がある。特にINRIAはフランスの国営研究所として、コンピューターグラフィックスにおいても一定のプレゼンスを保っている。北米に比べると、応用がやや弱い分、学術的な基礎研究では台頭し始めている。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	・英国のMicrosoft Research Cambridgeは、CGとコンピュータービジョンの研究で有名である。Kinectはここで開発されたものであり、現在もKinectを用いた研究で世界をリードしている。 ・米国に比べると小規模ではあるが、IntelやNVIDIAと大学の共同運営が行われている研究所が存在する。MPIとLund Universityは両者ともIntelとの共同研究グループを持ち、特に前者については、Stanford Universityとの研究協定も持っている。 ・Disney ResearchのZurich研究所は、レンダリングに限らずコンピューターグラフィックス全般の研究において非常に活発であり、ETH Zurichとの産学連携も含めて、成功を収めているといえる。
	産業化	◎	↗	・映画スタジオ（Double Negative)やゲーム会社（Unity、Crytek）などでCGの利用が盛んであり、北米に次ぐ市場として国際的に注目を集めつつある。 ・世界最大の家具メーカーであるIKEA はCGを多用しており、カタログ写真の大部分はＣＧで制作されている。 ・ドイツでは自動車産業におけるCG利用(設計や宣伝)が多い。
中東	基礎研究	◎	↗	・イスラエルの複数の大学で、盛んに研究が行われている。特に高度な数学的素養が必要とされる形状処理に関する基礎研究で有名。
	応用研究・開発	◎	↗	・サウジアラビアのKAUSTでは、最近巨大な予算を投じてCGの研究グループが設立された。特に建築とCGの融合に関する研究で有名。
	産業化	◎	↗	・イスラエルを中心に、最先端の技術を産業化するベンチャー企業が多数生まれている。
中国	基礎研究	○	↗	・Zhejiang UniversityやUnivesrity of Hong Kongなど、米国で研究者として確立した後に、母国に戻るケースが見られ、特に中国からの研究発表は非常に盛んになってきている。 ・ただ、どちらかというと、基礎研究に対する比重は小さく、欧米のトレンドに追従する研究も目に付く。
	応用研究・開発	◎	↗	・北京のMicrosoft Research Asiaは、清華大・浙江大など中国の名門大学から大量にインターンの学生を雇い、大人数のチームで研究を行っている。特にGPUをフル活用した、リアルタイム計算（レンダリングやシミュレーション）の研究が多い。 ・香港の存在感が大きい。複数の有名校から、多数の良質な論文が出ている。また、浙江大学には大規模なグラフィックスとCADの研究所がある。
	産業化	○	↗	・映画やゲームといったコンテンツ産業が成長してきている。
韓国	基礎研究	△	→	・特にキャラクターアニメーションに関する研究が活発である。
	応用研究・開発	○	→	・米国型のような研究を活発に行う企業は見られない。 ・サムソンがCGを含むコンピューター科学全般の研究に対するファンディングを行っている[7)]。
	産業化	○	→	・オンラインゲームや映画やドラマといった映像作品が海外にも輸出されている。国としても振興に力を入れている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Bickel, Computational Aspects of Fabrication: Modeling, Design, and 3D Printing, CGF, 2013
2) RealSense: http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-depth-technologies.html
3) Schiftner, Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions, AAG, 2012
4) Computational Photography Comes into Focus, CACM, 2014
5) https://www.lytro.com/
6) http://www.threegear.com/
7) The SAMSUNG Global Research Outreach (GRO) Program
http://www.sait.samsung.co.kr/saithome/Page.do?method=main&pagePath=01_about/&pageName=ag_going

3.10 ビッグデータ

計算機やセンサー装置が低価格化し、性能が向上するに従って、膨大なデータが急速に生成され格納できる環境が整いつつある。例えば、Facebook 社で扱うデータ量は日々600 テラバイトの規模で増加しており、全体で 300 ペタバイトのデータを管理している [1)]。また、ハードディスクの価格は 1 テラバイト当たり数千円程度であり低価格化が進んでいる。大量のデータを生成・格納できる環境が整う一方で、データを活用する観点においては、コンピュータ将棋や IBM 社の質問応答システム Watson などに代表されるように、膨大なデータ（将棋の棋譜の記録やクイズの過去問、Wikipedia や新聞等のデータなど）を活用することで、高度な分析処理が可能なシステムが実現されている。このように急速に生成・管理される大量データはビッグデータと称され社会的に注目されている。

ビッグデータと一口に言っても、それを構成するデータは様々な種類がある。

各種のネット接続端末から上がって来るデータは、今までコンピュータが扱ってきた企業内の業務データのように構造化されたデータとは違い、SNS のテキスト、画像・音声・動画データ、IC カードや RFID 等の各種センサーで検知され送信されるデータなど、非構造化データがかなりの割合を占める。技術の進歩は、これらのデータを収集・蓄積・分析し、大量で多種多様なデータを扱うことを可能にしている。

ビッグデータは、大量かつ多種・多様なデータを、許容できる時間内に効率的に収集・蓄積・処理・分析し、活用するための技術 [2)] といえる。量的に増大する様々な種類のデジタルデータに埋もれている未知の知識や洞察を抽出し、研究やビジネスに活用したいという期待がある。しかしながら、活用したいデータが、従来のログや SNS データなどのテキストデータから、画像、音声、動画などの、サイズのより大きなデータや、IoT などの進展に伴うリアルタイムのセンサーデータに変わってきており、現状の技術レベルではビッグデータ活用の要件を満たすには不十分であるため、ビッグデータに対応した新たな研究開発が必要である。

また、データを活用するという点においては、データの収集、データの解析結果の表示、解析結果の活用の際に生じる著作権の問題、個人情報の取得、パーソナルデータを匿名化することによって利活用をはかりたいという要望とプライバシー保護の要請をいかにして調和させつつ活用を図るかという個人情報保護の問題、のふたつが発生する。これらは、技術開発だけでは解決することが難しく、対応する法律の整備、運用において対処する必要があり、他国も含めた法律問題などの調査研究が必要である。

本俯瞰区分では、様々な分野のビッグデータの統合解析を可能にするデータ処理基盤、必要な知識を効率的に取り出すための技術、ビッグデータが広く活用されるための社会受容やステークホルダ同士の連携を促進するための技術と社会的仕組みを対象とする。このような観点から、ビッグデータに対応した研究開発領域として 4 つの基盤技術、5 つの応用分野、著作権法や個人情報保護法など 2 つの法律面を含む合計 11 のテーマを取り上げた。基盤技術は、ビッグデータの収集・蓄積・処理を効率的に実行する技術、ビッグデータを分析して有用な知見を引き出す技術、それらの収集や分析にクラウドソーシングを効率的に活用する技術、データの処理において秘密性を担保できる技術について、現状と今後必要となる課題をまとめた。応用分野は、すでに大量のデータ蓄積がありビッグデータとしての活用が始ま

っている分野から、IT メディア、ゲノム、教育分野、社会インフラ、オープンデータを選択し、分野ごとの取り組み状況を説明する。

基盤技術：

(1) ビッグデータ基盤技術
(2) ビッグデータ解析技術
(3) クラウドソーシング
(4) プライバシー保持マイニング技術

応用分野：

(5) IT メディア分野におけるビッグデータ
(6) ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
(7) 教育とビッグデータ
(8) 社会インフラとビッグデータ
(9) オープンデータ

法律面：

(10) 著作権とビッグデータ
(11) プライバシーとビッグデータ

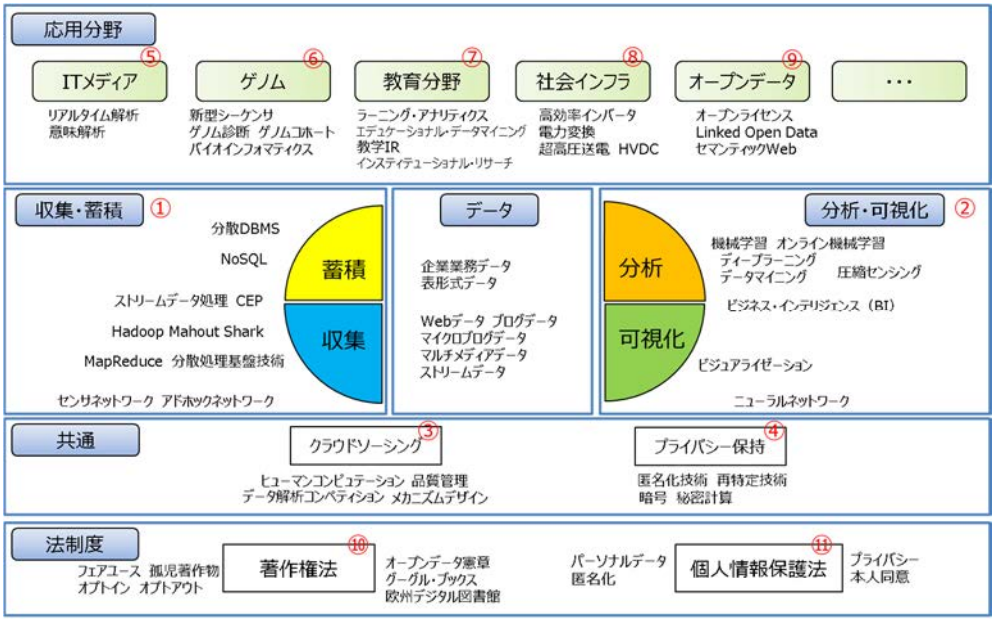


図 3.10.1 ビッグデータの俯瞰図

1) How Facebook Compresses Its 300 PB Data Warehouse, http://www.enterprisetech.com/2014/04/11/facebook-compresses-300-pb-data-warehouse
2) ビッグデータ時代におけるアカデミアの挑戦～アカデミッククラウドに関する検討会提言～, 2012

3.10.1　ビッグデータ基盤技術

（1）研究開発領域名

ビッグデータ基盤技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

大量なデータを管理・分析するためのベースとなる基盤技術に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ビッグデータの活用において、実際のビジネス業界では、会員カードを活用して消費者の購買履歴を取得・分析することで、商品の在庫管理を最適化してコストダウンを図り、また消費者が求める新たな商品を開発することで利益を上げる例が挙げられる。特に Web スケールの大量のビッグデータを扱う事業者は、Warehouse-Scale Computers（WSCs）[1]と称されるように、数 1000 台規模の計算機をデータセンターに設置し、WSCs の環境に適したソフトウエアおよびハードウエアから成るビッグデータ基盤を構築することで、大規模なデータ処理を実現している。このようなビッグデータ基盤に関する技術は、処理の対象となるデータが蓄積されたデータであるか／時々刻々と生成されるデータであるかの観点から、2 つの技術領域に分類することができる。

蓄積されたデータを対象とする領域: 技術を細分化すると、数 10 台規模のハイエンドな計算機を用いる分散データベース管理技術（分散 DBMS）と、分散 DBMS の機能を簡略化して 1000 台を超える大量のコモディティ計算機を用いる NoSQL および MapReduce に代表される分散処理基盤技術がある。前者の分散 DBMS については Oracle、IBM、Microsoft 社などの米国企業が商用化を主導している。また低価格が進む主記憶を活用した分散 DBMS として、欧州の SAP 社や米国のスタートアップである VoltDB 社の製品が注目を集めている。研究フェーズの取り組みにおいては、大量の主記憶・メニーコア・SSD・高速ネットワークなどの最新ハードウエアを活用した分散 DBMS の研究が特に欧州の大学で顕著であり、日本においてもディスク装置における非順序型実行原理に基づく超高性能データベースエンジンが開発され、データ分析系の性能ベンチマークにおいて世界最高性能を達成している。

一方、後者の分散処理基盤技術に関しては、米国の Google、Facebook、Twitter 社などの Web 系の企業が技術開発を先導しており、各社の用途に応じて研究開発を進めている。データベースの問い合わせ言語である SQL を高速に処理する基盤技術としては、Google 社がクラウドサービスとして提供している BigQuery や Amazon 社の Redshift がある。BigQuery では、数 1000 台のディスクを同時に利用することで、数億レコードを数秒で検索処理することが可能である。大学においては、主に機械学習処理を高速化する基盤技術に関する研究が進められており、MapReduce の後継となる基盤技術が多く提案されている。例えば、主記憶を活用した Spark や、グラフデータ処理の専用エンジンとして GraphLab が研究開発されている。大規模グラフデータの高速化アルゴリズムについては、香港・韓国・日本などアジア勢が研究をリードしている。また、計算機が低価格化するに従って開発コストが重要視されつつあり、開発コストを削減するため、抽象化言語から最適な実行コー

ドを生成するシステムとして Hive や Flink などが出現している。

今後の研究開発の動向としては、最新ハードウエアを利用した分散 DBMS 系の技術が分散処理基盤技術に融合され、さらなる高速化と低コスト化の観点で技術が発展するとともにデータ構造や応用ごとに専用化された基盤技術が今後も発展するものと考えられる。

時々刻々と生成されるデータを対象とする領域: 時々刻々と生成されるデータを対象とする技術として、一定量の限られた主記憶を利用して高速に検索要求を処理するストリームデータ処理技術がある。ストリームデータ処理は DBMS とは対称的な技術であり、DBMS が事前に登録された過去のデータに対して入力される検索要求を処理するのに対して、ストリーム処理では事前に登録された検索要求に対して入力されるデータストリームを処理する。ストリームデータ処理技術の商用化については、米国および日本の DBMS ベンダから製品が出ており産業での利用が進みつつある。Web 系の企業においても、Twitter 社はストリーム処理エンジンである Storm を開発して公開している。研究フェーズの取り組みについては、蓄積されたデータ処理と時々刻々と生成されるデータの処理を統合的に処理する技術が出現しつつある。またストリームデータを対象とした機械学習エンジンとして日本で開発された Jubatus があり、新たに映像認識の応用向けに Deep Learning の機能開発が開始されている。

今後は M2M 等に代表されるようにストリームを生成するセンサー装置が普及することで、ストリームデータ処理技術の応用が増加して、応用ごとにさらに技術が発展するものと考えられる。

国際比較: 国際比較については、技術の各論については上述した通りであるが、国家施策という観点では、日本では H21-26 年の期間に最高速データベースエンジンの開発をテーマとして、数十億規模の予算を獲得してデータベースエンジン技術および機械学習技術の研究開発を実施してきた。米国・中国・韓国でも H24 年度から具体的な応用先と連携したビッグデータ基盤技術に対して莫大な予算が投資されており、例えば米国では科学技術政策局が、ビッグデータ研究･開発イニシアチブを発表して、ビッグデータ活用に向けて 2 億ドル以上の投資をする戦略を打ち出している [2)]。EU におけるビッグデータに関する主な取組としては、Horizon2020（2014 年から 7 年間の計画で総額 770 億ユーロを投じる計画）においてビッグデータの管理・研究のインフラの整備・データのオープンアクセスについて計画している [3)]。

産業主導の動向については、Web 系の企業を中心として米国が先行している。欧州では製品開発では SAP 社が強く、システム開発は米国の企業が欧州に進出している。分散 DBMS については欧州の大学と研究機関が世界に先駆けて先進的な成果をあげている。中国では E コマースの企業であるアリババ社がニューヨーク市場で上場して、NY 市場、時価総額 25 兆円の資金を調達したことが注目を集めている。中国・韓国については、ビッグデータ基盤技術の中でもアルゴリズム系の研究開発が強い。

（４）科学技術的・政策的課題

・ビッグデータ基盤技術に関する研究分野では、実データおよび大規模な計算機環境を有している企業が研究開発を進める上で大学より有利な状況にある。欧米ではデータのオープン化が進んでおり、例えばAmazon社の Public Data Sets では50億ページのWebアーカイブやゲノムプロジェクトデータが公開されていて学術の進展に貢献している。対比的に日本はパーソナルデータの議論が途上であることも影響してデータの利用がまだ進んでおらず、大学でビッグデータを利用した研究促進を阻む1要因となっていると考えられる。米国では一部の医療データを病院が公開することを義務づけている州もあり、同様の制度を日本でも行政主導で進めビッグデータが共有できる環境を構築することが重要である。

・ビッグデータ基盤の領域を含めて IT の技術領域では、優れたシステムを開発して容易に世界に公開することが容易であり、実際に日本からもトレジャーデータ社がスタートアップとして起業し、ガートナー社にCool Vendors in Big Data、2014 として認定されるに至っている。しかし、米国と比較して日本では技術主導のスタートアップ企業は少なく、産業をけん引する力が不足している問題がある。この問題を改善するためには、1)学部生レベルの講義においてOSやデータベースなどのシステム技術を設計して実装する能力を育成する講義を増やす、2)大学院レベルの学生向けに海外企業でインターンシップを受けられる支援プログラムを増やす、3)大学に勤めながら企業と兼業がしやすい制度を大学に導入する等が考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

・大量の主記憶・メニーコア・SSD・高速ネットワーク・GPUやFPGAなどの最新ハードウエアを活用した分散 DBMS やビッグデータ基盤技術が、産業界を含めて注目されている。

・SNS などの多様なサービスが増加しスマートフォン端末が普及することで多様な情報が急速に増加し、人・物・場所といった多様な情報のつながりを表現・分析するのに適したグラフ構造を扱うデータベースと分析アルゴリズムが世界的に研究されている。

・ビッグデータの分析工程を効率化するため、ビッグデータ基盤と分析結果の可視化の連携技術や分析の試行錯誤を自動化する技術などが、近年増加しつつある。

［注目すべき国家プロジェクト］

・米国では科学技術政策局（OSTP）が平成24年3月29日、ビッグデータ研究・開発イニシアチブ（Big Data Research and Development Initiative）を発表して、政府として2億ドルの投資を行い戦略的に取り組む姿勢を明確にしている。中核技術として同イニシアチブでは、機械学習、クラウドコンピューティング、クラウドソーシング等が挙げられている。

・欧州では2010年5月に策定された「欧州のためのデジタルアジェンダ」において、3億ユーロの予算をかけ、2011年から5年計画のFI-PPP（次世代インターネット官民連携）プログラムが実施されている。FI-PPP プログラムでは、インターネット技術との強い統合を通じ、交通、医療またはエネルギー等の公共サービスのインフラと業務プロセスの競

争力強化と、それらのアプリケーションの出現の支援を目的としている。
・中国では 2011 年 3 月に「国民経済・社会発展第 12 次 5 カ年計画綱要」が採択されており、2011～2015 年の重点技術としてクラウドコンピューティングや Internet of Things などが盛り込まれている。
・韓国では 2009 年 9 月に「IT コリア未来戦略」を発表しており、その中で成長が有望視される 10 サービスを集中育成するとしている。この政策の中には M2M 技術などのストリームデータ処理に関係する項目も含まれている。

（6）キーワード

分散データベース管理システム(分散 DBMS)、ストリームデータ処理、NoSQL、MapReduce、分散処理基盤技術、クラウドコンピューティング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・非順序型実行原理に基づく超高性能データベースエンジンはベンチマーク結果で世界トップの結果を達成 ・大規模なグラフデータ処理の高速アルゴリズムは先端的である ・分散基盤技術については、分析処理の高速化について一定の取り組みがある。
	応用研究・開発	○	→	・ストリームデータを対象とした機械学習エンジンとして日本で開発された Jubatus があり、映像認識の応用向けにDeep Learning の機能開発が開始された ・ストリームデータ処理については、多くの企業でプロダクトが開発され、検証が実施されている。代表的なものでは、NECや富士通がデータセンターの省電力化や交通渋滞予測などのトライアルを実施したと報告がある。
	産業化	○	→	・大手の情報・通信系企業からクラウドサービスが提供されている ・分散基盤技術についてはWeb系の企業やSI系企業を中心に開発事例が増えている。 ・ストリーム処理については、日立・NEC・富士通は自社開発のストリーム処理エンジンの販売・SI事業を行っている
米国	基礎研究	◎	→	・米国の大学・企業における基礎研究レベルは高く、アルゴリズム系とシステム系の両面で世界をリードしている。 ・分散DBMS・分散処理基盤技術については、高速な分散トランザクション処理、分散処理における処理の最適化（ロードバランス・負荷予測・ワークフロープランの最適実行計画・応用ごとの最適な分散処理）が特徴的である。 ・ストリームデータ処理系については不確実性の導入などのストリーム処理の高度化（CEP的なパターンマッチオペレーターの導入、不確実ストリームへの対応、各種マイニングアルゴリズムの応用など）などがある。
	応用研究・開発	◎	→	・分散処理基盤技術の取り組みについては、Web系の企業がOSS開発を先導しており米国が圧倒している。OSS開発コミュニティでは大学との連携を行っていて、基礎研究成果を取り込む土壌も備えている強みもある。 ・ストリームデータ処理についても、企業が中心となりOSS版のストリーム処理エンジンが開発されている。代表的なプロダクトとしてTwitter社(Storm)、Yahoo(S4)、EsperTech(Esper)、Streambase、HStreaming、Drools Fusionなどがある。
	産業化	◎	↗	・クラウドサービスについて、特にAmazon社が世界市場で活躍している。Google は超高速なSQLサービスであるBigQueryを投入して巻き返しを図っている。 ・分散処理基盤技術の取り組みについては、応用研究・開発と同様に米国が優位な立場にある。 ・ストリーム処理については、Microsoft社(StreamInsight)やIBM社(InforSphere streams)、Oracle社、Progress社(Apama)、TIBCO社ではストリーム処理エンジンの販売や、それらを利用したSI事業を展開している。

欧州	基礎研究	◎	↗	・大量の主記憶・メニーコア・SSD・高速ネットワーク・GPUやFPGAなどの最新ハードウエアを活用した分散DBMSが産業界を含め注目されている。 ・分散処理基盤技術については、分散処理の最適化（データ配置・インデックス構築・テーブル結合最適化）の取り組みがある。 ・ストリームデータ処理については処理モデルや高性能化の研究で成果を挙げている。特にFPGAや分散並列環境を用いた高性能化についての取り組みや、地理情報のストリーム処理などが特徴的である。米国と共同で研究開発を行う場合もあり、ストリーム処理エンジンの開発において多くの先導的な成果を生み出している。
	応用研究・開発	△	→	・米国やアジアに比較して商業規模が小さい欧州では、目立った活動はない。
	産業化	○	→	・SAPのHANAなどのカラム指向インメモリDBMSやストリームデータ処理エンジンの取り組みが目立っている。
中国	基礎研究	◎	→	・大学が中心となって基礎研究において多く成果を挙げている。難関国際会議への採録も米国・欧州に次いで3番目に多い。グラフデータ処理などのアルゴリズム系が中心であり、分散処理基盤技術の高速化の取り組みもある。
	応用研究・開発	○	→	・IBM中国研究所ではハイブリッドクラウドやクラウド間でのマイグレーションの取り組みがある。
	産業化	○	↗	・クラウドサービスについては、Baiduなど国内企業の他、日本企業も各社中国に進出している。 ・Baidu社でNoSQLを利用した開発事例があり、Eコマースの企業であるアリババ社がニューヨーク市場で上場して、NY市場、時価総額25兆円の資金を調達した
韓国	基礎研究	○	→	・大学が中心となって基礎研究において成果を挙げている。フラッシュメモリを利用したDBMSの高速化などの超高速DBMSの取り組みが盛んである。RFIDやセンサーネットワーク上におけるストリームデータ処理の高性能化、高度化に関する研究もある。
	応用研究・開発	△	→	・ビッグデータ基盤技術に関しては目立った活動はない。
	産業化	○	→	・Amazon に続いて、新たにGoogle、Microsoft が相次いで韓国のクラウドサービス市場に参入し、国内企業としては LG CNS 社がデータセンター等を運用している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, Second edition, Luiz André Barroso (Google), Jimmy Clidaras (Google), Urs Hölzle (Google), Morgan & Craypool Publishers.
2) 総務省 H25 年度版 情報通信白書,
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/pdf
3) Horizon 2020 and the Big Data issue
http://www.scienceonthenet.eu/content/article/giacomo-destro/horizon-2020-and-big-data-issue/january-2014

３.10.２　ビッグデータ解析技術

（１）研究開発領域名

ビッグデータ解析技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

データの背後に潜む規則性や特異性を学習することにより、人間と同程度あるいはそれ以上の学習能力の実現を目指す。大量、高次元、多様なデータからいかに効率よく学習を行うかが重要な研究課題であり、理論的な性能保証の追求、および、実用的なアルゴリズム開発の両面から、当該分野は非常に盛んに研究されている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

機械学習(Machine Learning)とよばれるデータからの学習に関する研究は、古くは人間の脳の学習機能をコンピュータで実現しようという 1950 年代の研究に遡る。パーセプトロン(Perceptron) [1]とよばれる単純なニューラルネットワークモデルが提案され、任意の線形分離関数を学習できることから 1960 年代に一大ブームを巻き起こした。しかし、単純なパーセプトロンでは XOR のような入り組んだ関数を学習できないことが明らかになり [2]、1970 年代には関連する研究は下火になった。

しかし、1980 年代に入って、バックプロパゲーション(Backpropagation) [3]とよばれる、階層構造を持つニューラルネットワークモデルの勾配学習アルゴリズムが提案され、第２次ニューラルネットワークブームが到来した。ニューラルネットワークは、画像や音声の認識、ロボットの制御など、様々な問題に適用され、優れた性能を示した。しかし一方では、モデルの階層性に起因する非凸性(Non-convexity)のため、学習に非常に時間がかかり、一般に大域的な最適解を求めることができないという弱点が明らかになった。実際、複雑なニューラルネットワークをうまく学習するためには、学習パラメータの初期値をうまくチューニングするためのノウハウや、学習を高速に実行するための様々なヒューリスティックが必要であり、信頼性の高い学習システムを構築することは極めて困難であった。

そこで 1990 年代に入り、階層性を持たないサポートベクトルマシン(Support Vector Machine)とよばれるカーネル学習器が提案された [4]。サポートベクトルマシンの学習は凸最適化として定式化されるため、容易に大域的な最適解を求める事ができる。その後、大規模データに対する超高速学習アルゴリズムなどの開発を経て、21 世紀初頭にはカーネル法を中心とする機械学習の一大ブームが到来した。カーネル法は音声・画像・自然言語などの処理や、生命情報の解析など、様々な分野で優れた性能を発揮した。しかし、カーネル法の性能を十分に引き出すためには、特徴抽出に対応するカーネル関数をうまく設計する必要があり、さらなる学習性能の向上のために、特徴抽出も自動化したいというニーズが高まってきた。その後、カーネル関数の学習法が盛んに研究されているが、いまだ決定打に欠ける状況である。

このようなカーネル法の全盛期の 2006 年に、多層ニューラルネットワークの新しい学習アルゴリズムが発表された [5]。これは、教師なし手法によって事前学習(Pre-training)した単層ニューラルネットワークを順々に積み上げていく(Layerwise Training)ことによって多層ニューラルネットワークを構築するという手法であり、特徴抽出を自動化する新たな可能

性を切り開いた。また、この流れとは独立に、カーネル法が全盛だった 1980 年代後半～1990 年代前半にも、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network) [6]とよばれる特殊な構造を持つ多層ニューラルネットワークが画像認識の分野で研究されていた。これは、1970 年代後半に提案されていたネオコグニトロン(Neo-cognitoron) [7]とよばれる人間の脳の視覚野をモデル化したニューラルネットワークと本質的に同等である。カーネル法が一層の学習器であるのに対して、ニューラルネットワークは多層構造を持つ。そのことから、これらのニューラルネットワーク技術は、ディープラーニング(Deep Learning)とよばれるようになった。

ディープラーニングの技術は、2010 年代に入ってから画像認識や音声認識のコンテストで既存手法を大幅に上回る世界最高性能を達成するに至った。現在は第 3 次ニューラルネットワークブームの真っただ中であり、ドロップアウト(Dropout) [8]とよばれる特殊な学習技術が提案されるなど、当該分野は大きく発展しつつある。

国際的には、現在のディープラーニングブームの火付け役であるトロント大学の Geoffrey Hinton 教授、モントリオール大学の Yoshua Bengio 教授、ニューヨーク大学の Yann LeCun 教授、スタンフォード大学の Andrew Ng 教授らなどの北米の大学教員がディープラーニングの基礎技術開発の中心的な役割を担っている。産業界でも北米の企業がディープラーニング技術の産業応用をリードしている。特に、Ng 教授と Google 社が 2012 年 6 月に発表したディープラーニングによる画像認識の研究成果 [9]は、ニューヨーク・タイムズ紙に取り上げられるなど、世界的な注目を集めた。

また、Hinton 教授らが起こした DNNResearch というベンチャー企業は 2013 年 3 月に Google 社に買収 [10]され、Hinton 教授も Google 社の Distinguished Researcher に就任した。Bengio 教授と LeCun 教授は International Conference on Learning Representations というディープラーニングに特化した国際会議 [11]を 2013 年に開始し、LeCun 教授は 2013 年 12 月に Facebook 社に新設された AI 研究所の所長に就任 [12]した。Baidu 社は 2013 年 1 月に Deep Learning 研究所 [13]を設立し Ng 教授が 2014 年 5 月に Chief Scientist に就任した。Yahoo! 社は 2013 年 10 月に LookFlow という Deep Learning のベンチャー企業を買収し [14] 、Google 社は 2014 年 1 月に Deep Mind というロンドンのディープラーニングのベンチャー企業を買収 [15] した。

一方、ヨーロッパでは北米ほど盛んにディープラーニングが研究されているわけではないが、イギリス、ドイツ、フランス、スイス、イタリア、スペインなどの大学、研究機関にて基礎研究が行われている。特に、スイスの IDSIA 人工知能研究所の Jürgen Schmidhuber 教授のグループ [16]が活発に学術研究を行っている。アジアでは、中国の Baidu 社がディープラーニングの研究開発をリードしているが、大学、研究機関やその他の企業では、ではこれまでのところ目立った活動は行われていない。

国内では、2013 年 11 月の情報論的学習理論ワークショップ [17]にてディープラーニングに特化した招待セッションが組まれ、400 名もの参加者を集めるなど、ディープラーニングに対する注目が高まりつつある。産業界でもディープラーニング技術の活用が進みつつあり、ＮＴＴドコモ社が音声認識サービス「しゃべってコンシェル」[18]にディープラーニング技術を用いた。

（４）科学技術的・政策的課題

ディープラーニングはすでに音声や画像の認識の分野で従来法を寄せ付けない圧倒的な性能を達成しているが、これらの成果は、様々なノウハウやヒューリスティックの積み上げ、および、大量のデータと計算リソースによって実現されている。学習の性能を保証する理論の構築、および、ビッグデータを効率よく処理するための超高速学習技術の開発が、ディープラーニングの科学技術的な重要研究課題である。

カーネル法に代表される従来の凸最適化学習手法では、最適解の一意性が保証されることを用いて、様々な統計的理論解析が行われてきた[19]。一方、ディープラーニングは非凸最適化学習手法であり、そもそも得られた解が何らかの誤差を最小にしている保証すらない。そのため、既存の統計解析手法が適用できず、新しい数学的な道具立ての登場が望まれている。

高速学習技術に関しては、多数の CPU コアを用いた分散学習技術や GPU を用いた並列計算技術が盛んに研究されている[20]。また、ディープラーニングを直接実行するハードウエアを開発しようという研究も行われている[21]。システムレベルとアルゴリズムレベルの研究を融合した高速化技術のさらなる発展が期待されている。

政策的な課題としては、産学官による基礎理論から実世界応用までを広範に含む大型プロジェクトの登場が切望される。国際的には、前述した Google、 Facebook、 Amazon、 Yahoo!、 Baidu などの大企業が、機械学習を専門とする博士学生、ポスドク研究員、さらには、テニュアの大学教員までをも大量に囲い込もうと躍起になっている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

多層ニューラルネットワークのような複雑なモデルでは、学習データへの過適合(Overfitting)が起こりやすい。カーネル法などの従来の学習法では、正則化項(Regularizer)とよばれる罰則項を学習の目的関数に追加することによって過適合を軽減させることができたが、多層ニューラルネットワークではさらに強力な過適合回避技術が必要だと言われている。そのような背景のもと、ドロップアウト(Dropout) [8]とよばれる特殊な学習技術が近年提案された。これは、学習時にニューラルネットワークのユニットをある一定の確率でランダムに取り除くという手法であり、強い正則化効果が得られる。また、ドロップアウト法を用いて学習したニューラルネットワークのテスト時には、出力を定数倍することによって整合性をとるが、これによって多数の微妙に異なるモデルのアンサンブル(Ensemble)を取る効果があり、ディープラーニングのさらなる性能向上につながっていると言われている。また、従来のニューラルネットワークではシグモイド(Sigmoidal Function)関数とよばれる、ヒトのニューロンの動作を模した滑らかな関数を活性化関数として用いていたが、それを修正線形関数(Rectified Linear Function)という簡単な関数に変更することにより、学習性能を低下させること無く、学習スピードを大幅に向上させられることが示された。

大規模プロジェクトの動向としては、上述したように国際的な巨大 IT 企業が巨額の資金をディープラーニング研究に投じている。例えば、Google 社は、社員数わずか 75 名の、産業的な意味で特段の業績を持たない小さなベンチャー企業 Deep Mind 社の買収に、5 億ドル以上も投じたと言われている[15]。

ディープラーニングに関連する最新イベント情報、技術情報、ソフトウエアなどが、deeplearning.net に掲載されている[21]。

（６）キーワード

機械学習、ニューラルネットワーク、ディープラーニング、データマイニング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・機械学習の基礎研究全般に関しては、電子情報通信学会の情報論的学習と機械学習(IBISML)研究会[22]が国内の学術界を主導しているが、これまでのところ、ディープラーニングに関する研究発表はわずかである。
	応用研究・開発	○	↗	・画像処理、音声認識、自然言語処理などを専門とする研究者、エンジニアがディープラーニング技術に対する強い興味を示している。これまでのところ、北米で開発された技術の勉強会や、それらの技術の実証実験などが盛んに行われている。
	産業化	○	↗	・海外の企業の成功を受け、同様の技術を自社に取り込もうと、多くの企業がディープラーニング技術の習得に力を入れている。 ・ＮＴＴドコモが音声認識サービス「しゃべってコンシェル」にてディープラーニング技術を実用化[18]。 ・デンソーアイティーラボラトリが歩行者認識技術を開発[23]。
米国	基礎研究	◎	↗	・元来、機械学習の研究が非常に盛んであり、これまでのディープラーニングに関するほぼすべての技術は、米国とカナダの大学や企業から発信されている。 ・もともとは、Neural Information Processing Systems [24] やInternational Conference on Machine Learning [25]という機械学習全般の国際会議にてディープラーニングの研究情報が発信されていたが、2013年よりInternational Conference on Learning Representations [11]というディープラーニングに特化した国際会議が開始され、今後も北米が中心となってディープラーニングの基礎研究がけん引されていくものと考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	・Facebook社がディープラーニングを用いたほぼ人間レベルの顔認識技術DeepFace [26]を発表。 ・Microsoft社が画像認識技術Project Adam [27]を発表。
	産業化	◎	↗	・Google社が画像検索にディープラーニングを採用[28]。 ・Apple社がSiriの音声認識にディープラーニングを採用[29]。
欧州	基礎研究	○	↗	・イギリス、ドイツ、フランス、スイス、イタリア、スペインなどの大学や研究機関にて機械学習の研究が行われており、ディープラーニングの基礎研究も活発に行われつつある[16]。
	応用研究・開発	○	↗	・Google社、Amazon社などのヨーロッパのブランチが、ディープラーニングの応用研究を行っている。
	産業化	○	↗	・欧州に特化した産業化が行われているわけではないが、北米の企業が欧州にも進出している。
中国	基礎研究	○	↗	・機械学習の主要な国際会議であるInternational Conference on Machine Learning [25]を2014年に北京でホストするなど、研究者人口が爆発的に増加している。北米とのコラボレーションも活発で、アジアの機械学習研究をけん引しつつある。ディープラーニングの研究も盛んになりつつある。
	応用研究・開発	○	↗	・Baidu社にて、ディープラーニングに関する応用研究が活発に行われている[13]。
	産業化	○	↗	・Baidu社を中心として、ディープラーニングの産業化が行われていく模様である。
韓国	基礎研究	×	→	・ソウル大学、KAIST、POSTECHなどの主要大学にて機械学習に関する研究は行われているが、ディープラーニングに関する基礎研究はほとんど行われていない。
	応用研究・開発	△	↗	・Samsung社がディープラーニングに関する研究開発に力を入れつつある[30]。
	産業化	△	→	・今のところ、韓国発のディープラーニング産業は見当たらない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Rosenblatt, F. “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”. Psychological Review 65 (6): 386-408, 1958.
2) Minsky, M. & Papert, S. Perceptron, Cambridge, MA: MIT Press. 1969
3) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. “Learning representations by back-propagating errors”. Nature 323 (6088): 533–536, 1986.
4) Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. “A training algorithm for optimal margin classifiers”. In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory, 144-152, 1992.
5) Hinton, G. E. and Salakhutdinov, R. R. “Reducing the dimensionality of data with neural networks”. Science, 313(5786), 504-507, 2006.
6) LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., & Jackel, L. D. “Backpropagation applied to handwritten zip code recognition”. Neural Computation, 1(4):541-551, 1989.
7) Fukushima, K. “Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position”. Biological Cybernetics 36 (4): 193–202, 1980.
8) Srivastava, N., Hinton, G. E., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R., “Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting”, Journal of Machine Learning Research, 15, 1929-1958, 2014.
9) RBB Today, 2012 年 6 月 27 日号,
http://www.rbbtoday.com/article/2012/06/27/90985.html
10) Cnet Japan, 2013 年 3 月 13 日号,
http://japan.cnet.com/news/business/35029415/
11) International Conference on Learning Representations 2013,
https://sites.google.com/site/representationlearning2013/
12) IT media ニュース, 2013 年 12 月 10 日号,
http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1312/10/news076.html
13) Wired, 2013 年 4 月 16 日号,
http://wired.jp/2013/04/16/baidu-research-lab/
14) IT Pro, 2013 年 10 月 24 日号,
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20131024/513342/

15) Techcrunch, 2014 年 1 月 28 日,
http://jp.techcrunch.com/2014/01/28/20140127why-google-bought-deepmind/
16) IDSIA 人工知能研究所, Prof. Jürgen Schmidhuber,
http://www.idsia.ch/~juergen/
17) 第 16 回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2013),
http://ibisml.org/ibis2013/
18) 朝日新聞 DIGITAL, ２０１４年６月７日,
http://www.asahi.com/articles/ASG666TGTG66UHBI02G.html
19) Vapnik, V. N., Statistical Learning Theory, Wiley, 1998.
20) ディープラーニングに関する情報サイト,
http://deeplearning.net/
21) Techcrunch, 2014 年 4 月 22 日号,
http://jp.techcrunch.com/2014/04/22/20140421nervana/
22) 電子情報通信学会　情報論的学習理論と機械学習研究会
http://ibisml.org/
23) Car Watch, 2014 年 4 月 17 日号,
http://car.watch.impress.co.jp/docs/news/20140417_644713.html
24) Neural Information Processing Systems,
http://nips.cc/
25) International Conference on Machine Learning,
http://machinelearning.org/icml.html
26) ニューズウィーク日本版, 2014 年 3 月 31 日,
http://www.newsweekjapan.jp/stories/business/2014/03/post-3230.php
27) IT media ニュース, 2014 年 7 月 15 日,
http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1407/15/news039.html
28) NTT データ 技術＆レポート,2013 年 11 月 7 日
http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/trend_keyword/2013110701.html
29)日本経済新聞 2014 年８月 24 日号
http://www.nikkei.com/money/invest-
ment/toushiyougo.aspx?g=DGXLASFZ21H13_25082014000000
30) サムソン社ホームページ,
http://job.samsung.ru/MainPage/Vacations/Software-Engineer-for-Object-Recognition-by-Us-
ing-.aspx

3.10.3　クラウドソーシング

（1）研究開発領域名

クラウドソーシング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

クラウドソーシングを利用して不特定多数の人間の力を合わせて問題解決を行うという考え方が広く受け入れられつつある。 計算機科学の技術はその実現において本質的な役割を果たす一方、現在の計算機科学において解決困難な課題を人間の力をかりて解決するヒューマンコンピュテーションのアプローチも注目されている。ビッグデータ領域においてクラウドソーシングの利用はデータ収集や解析など様々な場面で活躍が見込まれる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

クラウドソーシング [1]は「(インターネットを通じて）不特定多数の人に仕事を依頼すること、もしくはその仕組み」を意味する比較的新しい考え方であり、米 Wired 誌の寄稿編集者ジェフ・ハウ氏によって名づけられた。この言葉は企業内の業務の一部を外部に委託する「アウトソーシング」に由来したものであり、これが素性の知れた特定の相手に対して仕事を依頼するのに対して、クラウドソーシングは不特定多数の相手に依頼する点が特徴である。クラウドソーシングの実施形態には報酬の有無や雇用方式の違いなど様々なバリエーションがあり、実施の目的もビジネス、科学、社会への貢献など多様である。

自社での解決が困難な課題を広く一般に公開し革新的な解決策を募る InnoCentive や、oDesk、 Amazon Mechanical Turk 等のオンライン労働力市場の出現により、クラウドソーシングはデザイン・翻訳・システム開発などあらゆる分野に適用され、様々なビジネスが生み出されている。仕事の発注側にとっては必要に応じた労働力調達の手段として、働き手にとっては場所や時間に囚われない新しい働き方として急速に拡大しつつあり、労働市場のグローバル化のけん引力としてその動向に注目が集まっている。一方、公共の目的をもったボランティアベースのものも多く登場しており、NASA や DARPA 等の公的機関もクラウドソーシングを積極的に活用している。国内でも先の震災では安否情報や医療情報の構造化にその力を発揮した。Wikipedia もまた不特定多数の人間がその編集に関わるという意味で、公共の目的をもったクラウドソーシングであるとみることができる。

情報処理技術分野、特に知能関連分野においてクラウドソーシングの利用は増加している。例えば自然言語処理における言語理解や翻訳、コンピュータービジョンにおける画像理解、データベースにおける SQL 評価や参照解決などのように完全な解決が困難な問題において、人間の助けを借りてこれを行うアプローチがしばしばとられる。これらは人間を計算資源の一部として用いることで、コンピューターと人間の両方を適切に組み合わせて問題解決をはかることからヒューマンコンピュテーション [2]と呼ばれており、従来の計算機を中心とするパラダイムに変革を起こしつつある。ヒューマンコンピュテーションでは人間に繰り返し作業を依頼することによって計算を進めることになるが、その労働力の供給源としてクラウドソーシングは有力な手段となる。

ヒューマンインターフェースや検索などのシステムの性能評価においてもクラウドソーシングは用いられる。従来は少数の人間による小規模な評価が主流であったものが、クラウド

ソーシングを用いることで大規模な評価が可能になった。同じことはアンケート等のサーベイにも当てはまる。

その他のクラウドソーシングの利用方法として非常に重要なもののひとつがデータ収集である。データ駆動システムの構築にあたり最も重要なことのひとつがデータ量の確保である。効果的で効率的なデータ収集のために人間の知覚能力や判断をデータ収集に用いるクラウドセンシングあるいは参加型センシング [3]と呼ばれるアプローチがとられている。一方、機械学習などのデータ解析技術の利用にあたり大きなボトルネックとなるのがメタデータの収集、特に機械学習アルゴリズムに与える正解データの収集である。データに対して意味を付与するメタデータの獲得には多くの場合人間の手が必要であり、高い金銭的・時間的コストが生じる。クラウドソーシングを利用することでそのコストを低減させることが可能となる。クラウドソーシングによって収集されたデータ・メタデータは質のばらつきが大きいため、これをいかに抑えて有効な解析やモデル構築を行うかは現在盛んに研究が進んでいる分野のひとつである [4]。

データ解析そのものにおいてもクラウドソーシングは利用される。最も典型的な例はいわゆるデータ解析コンペティションと呼ばれるものであり、共通のデータを用いて参加者がその予測精度を競うものである。コンペティションの中には解析したいデータを提供するスポンサーによって勝者に対して賞金が支払われるものもあるが、最近ではこのような賞金付きのコンペティションを組織的に運営する「データサイエンティストのクラウドソーシング」が出現している。最も良く知られたものが Kaggle[5]であり、世界中から 10 万人以上が参加している。コンペティションの形式をとることにより少数精鋭でデータ解析に取り組むよりも、短期間で高精度のモデルが得られることが実証されている。

2012 年に米国政府が打ち出したビッグデータ研究開発イニシアチブの中では、クラウドソーシングは機械学習やクラウドコンピューティングと並び注力すべき情報技術分野としてその名が挙がっており、今後ますますその重要性は高くなると思われる。

（4）科学技術的・政策的課題

クラウドソーシングにおける重要な技術的課題 [6]のひとつは、クラウドソーシングの駆動力が不確定要素の大きい人間であることに起因する品質と効率の保証の問題である。クラウドソーシングで得られる成果物の品質は、仕事を行う人間の能力ややる気に依存して大きく左右されるため「同一のタスクを複数の働き手に割り当て多数決をとる」冗長化による品質保証などの仕組みが必要であり、統計的手法を用いた品質保証や非均一な質のデータの解析手法は重要な課題である。例えば、クラウドソーシングでやり取りされる仕事の多くを占めるのが文章（記事作成や翻訳）、デザイン、プログラムなどの複雑な構造あるいは非定型の成果物を求めるものであるが、これら非定型成果物を伴うクラウドソーシングの品質保証は重要な未解決課題である。一方、結果の処理という受け身の対応にとどまらず、ワーカーから情報を正しく引き出し、あるいはタスクを適切に実施させるための仕組みを設計するメカニズム設計も重要な課題である。

多数の人的資源に同時にアクセスできるクラウドソーシングであるが、そのキャパシティーは無尽蔵でなく、必要な時に必要な質をもった必要な量の労働力が安定して得られる保証はない。また、人間の処理速度は機械のそれと比して遥かに遅いため、可能な限り自動化す

るのが望ましい。人的資源の動的な調達、タスクの最適な割り当て、作業フローの状況に応じた制御、可能な部分については機械学習による置き換えを図る等、積極的な効率化の方策が必要である。

別の観点からは、クラウドソーシングを利用してデータ収集を行う際、企業や個人が積極的にデータ供出するインセンティブを与えることが重要である。例えば、企業においてクラウドソーシングを自社の主要ビジネスにおいて利用することを、あるいは医療や健康の向上といった目的に利用するといったことを考えた時、実用化への大きな壁となるのがセキュリティーとプライバシーの問題である。クラウドソーシングを通じて人に作業を依頼する際には、具体的な依頼内容をクラウドソーシングワーカーに対して開示する必要があるが、これはすなわち（しばしば不特定多数の）ワーカーに対してタスク情報を公開することになり、タスク情報を通じた情報漏えいリスクが懸念される。このことが企業・行政がクラウドソーシングの本格的な利用に躊躇する一因となっている。クラウドソーシングにおけるセキュリティーやプライバシーを扱った研究は少なく、今後一層の研究開発が必要となるだろう。

クラウドソーシングは比較的新しい考え方・ビジネスモデルであるため、必ずしも現在の倫理的・社会的規範に沿っているとは言えない部分も多い。例えばしばしば指摘されるように、マイクロタスク型のクラウドソーシングでは経済的格差を利用してワーカーが極めて低賃金での作業を強いられたり、報酬が支払われなかったりなどの問題がある。技術的な課題解決と同時に制度的な整備も必要となるであろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

クラウドソーシングとこれを利用した計算パラダイムであるヒューマンコンピュテーション分野は近年急激な成長をとげる新しい研究領域であり、これらの研究を対象としたコミュニティが形成されつつある。特に 2013 年からはクラウドソーシングとヒューマンコンピュテーションをテーマとした国際会議である HCOMP[7]が開催されており、本研究分野の中心的コミュニティとしての役割を果たしている。

情報技術関連企業の研究所でもこの分野の研究に力を入れる所は多いが、特に Microsoft Research はこの分野に注力しており、毎年多くの重要な研究成果を発表している。

ヒューマンコンピュテーションの概念を唱えた CMU の von Ahn 氏は、クラウドソーシングを言語学習に利用する DuoLingo[8]プロジェクトを開始し、その今後の動向が注目されている。

（６）キーワード

クラウドソーシング、ヒューマンコンピュテーション、品質管理、メカニズムデザイン、セキュリティー、プライバシー、データ解析コンペティション、

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・米国に後れをとる形であるが、国内での研究コミュニティ[9]が育ってきており、トップレベルの研究も生まれている。
	応用研究・開発	○	↗	・企業における応用研究も増えている。大学と企業の結びつきも強まりつつある。
	産業化	○	↗	・国内クラウドソーシング企業は成長しており、研究成果の産業利用も見られる。
米国	基礎研究	◎	↗	・MechanicalTurk等のプラットフォームを利用したクラウドソーシング研究が初期から盛んである。ヒューマンコンピュテーションの考え方も米国で誕生したこともあり、分野をけん引している。
	応用研究・開発	◎	↗	・大学と産業界の距離が近く、両者が密接に連携をとりながら、様々な先進的試みを行っている。
	産業化	◎	↗	・産業的な問題意識が研究に直接結びついている。von Ahn氏に代表されるように、研究者自身がビジネスを手掛けるケースもある。
欧州	基礎研究	○	↗	・欧州独自の目立った動きは見られないが、Microsoft Research Cambridgeを中心に多くの研究成果がある。
	応用研究・開発	△	↗	・欧州独自の目立った動きは見られないが、トレンドとしては上向き。
	産業化	△	↗	・欧州独自の目立った動きは見られないが、トレンドとしては上向き。
中国	基礎研究	○	↗	・Microsoft Research Asiaや有力大学から着実に研究成果が出ている。
	応用研究・開発	△	↗	・特に目立った動きはないが、早晩頭角を現すと予想される。
	産業化	△	↗	・特に目立った動きはないが、早晩頭角を現すと予想される。
韓国	基礎研究	△	→	・特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	→	・特に目立った動きはない。
	産業化	△	→	・特に目立った動きはない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Howe, J. The Rise of Crowdsourcing. Wired Magazine, 2006.
2) Law, E. & Von Ahn, L. Human Computation.Morgan & Claypool Publishers, 2011.
3) Ganti, R. K., Ye, F., & Lei, H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges. IEEE Communications Magazine, 49(11):32-39. 2011
4) 鹿島久嗣, 梶野洸. クラウドソーシングと機械学習. 人工知能学会誌, 27(4): 381-388, 2012.
5) Kaggle.
http://www.kaggle.com/
6) Kittur, A. et al. The future of crowd work. In Proceedings of the 2013 Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW), 2013.
7) Conference on Human Computation & Crowdsourcing (HCOMP)
http://www.humancomputation.com
8) DuoLingo.
https://www.duolingo.com/
9) クラウドソーシング研究会.
https://sites.google.com/site/crowdsourcingresearch/

３.10.４　プライバシー保持マイニング技術

（１）研究開発領域名

プライバシー保持マイニング技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

個人データ活用において求められるプライバシー保護技術の研究開発

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

様々なオンラインサービスの発展とともに、個人の生活や行動にまつわる情報が収集されつつある。大規模・高解像・多様な個人に関わるこのような情報は、ビッグデータ利活用の中心的な課題の一つであるが、このような個人情報の利用においてはプライバシー保護上の配慮が欠かせない。個人情報・パーソナル情報の利活用と保護の問題は、我が国の法制度、諸外国との法制度との整合性、社会倫理、産業応用上の価値など、技術上の問題にとどまらない様々な側面を総合的に考慮する必要がある。

ビッグデータ時代を迎えた現在では、プライバシーの概念は二面的に捉えられる。個人情報を継続的に取得する国家や企業側からは、個人情報の流通と深い活用を望んでいる。一方で、情報を取得される個人は、詳細な個人情報の無制限の流通や利用に関する不安感を強めつつある。個人に関する情報の利活用と保護は、本質的に矛盾した要請であり、両立は困難である。データプライバシー保護技術は、この矛盾した要請をトレードオフの関係として捉え、理論的・技術的に健全な「落としどころ」を確立する手段と理解することができる。データプライバシー保護は、「個人データ利活用のシナリオ」と「個人データ保護の方法」を両輪として同時に考察する必要がある。

［これまでの取り組み］

(データ匿名化)

個人データの収集においては、目的とする個人データ(例：購買履歴、Web 閲覧履歴、移動履歴)とともに、その個人に関する情報(例：年齢、性別、居住地、職業)などが同時に収集されることが多い。このような個人データの収集者が保持する個人データの集合が、収集者以外の第三者に提供された際に、第三者がある個人データを特定の個人のデータと結びつけることを特定と呼ぶ。個人データの集合が第三者に適用されたときに、このような特定が発生する確率をプライバシー上のリスクと捉え、個人データの集合を第三者に提供する前に適切にデータ内容を変更することによってこのような特定が発生する確率を低めるk-匿名化の概念が 2002 年に Sweeney によって提案された [1]。

k-匿名性とはデータの正確性を犠牲にして個人データを改変し特定を困難にする手法である。具体的には、 表形式データについては、個人データの属性値の組み合わせが同じであるデータが、個人データ集合中に少なくとも k(> 1)個存在している状態として定義される。

アカデミアでは、2000 年以降、主にデータ工学やデータマイニング分野においてデータ匿名化について多くの研究が発表された。具体的には、先に述べたk-匿名性を基礎概念として、匿名化対象を表形式データからグラフや時系列データに拡張する研究や、k-匿名性モデ

ルにおいて十分にプライバシーを保護できない状況下におけるより強力な匿名性定義の研究などが提案された。ただし、2014 年現在ではトップ国際会議においては匿名化技術についての発表はほとんど見られず、データ匿名化の研究がアカデミアにおいて活発に行われているとは言えない。k-匿名性をベースとしたプライバシーモデルにおいては、特定を試みる者(攻撃者)が持つ背景知識に依存して、攻撃者に漏えいする情報が変化することから、特定のリスクに関して一般的な理論的保証を与えることが困難であることがその理由の一つである。一方、k-匿名性の概念は技術者以外にも直感的な理解が容易であることから、我が国における個人情報保護法改正に向けたデータプライバシー保護における技術的検討においても k-匿名性の概念が広く検討されたことは注目に値する。

(差分プライバシー)

個人情報や機密情報を含むデータベースを利活用するための一方式として、データベース問い合わせにおけるプライバシー保護についての理論とモデルが整備されつつある。差分プライバシーとは、データベース問い合わせとその応答に関わる情報漏えいを理論的に評価し、その対応策を与える技術である。

差分プライバシーが想定する状況は以下の通りである。データ収集者は、多数の個人に関するデータをデータベースに保存している。また収集者以外の第三者が、データ収集者に、そのデータベースの内容について統計的なクエリ(例：ある数値属性に関する平均値や、ある離散属性値の組み合わせにマッチするレコード数のカウント)を問い合わせ、その応答値を得る。差分プライバシーでは、「その応答値から、問い合わせ対象としたデータベースに、ある個人が含まれているか否かが判定可能である」ことをリスクと捉え、このリスクを低めるために、統計値を雑音によって摂動させ、開示するアプローチを取る。より具体的には、差分プライバシーの理論は与えられた母集団数と対象クエリについて、その応答値に加えるべき雑音の分散の上限を理論的に与える。

差分プライバシーの問題はデータベースに対するクエリとその応答で定式化されるが、必ずしもデータベースとの対話的操作を介しなくとも、個人に関する情報についての統計値の開示におけるプライバシー保護の問題は、差分プライバシーの問題として解釈することができる。例えば、ある地方自治体に在住する住人の平均所得や、所得の頻度分布などの統計量の開示などが該当する。

一般に、統計的クエリの応答値の開示は個人情報の開示とは見なされにくい。例えば、母集団数十万人を対象とした平均所得が特定の個人の所得の開示を引き起こすことはないであろうと考えられるためである。この直感は、母集団数が大きい場合には正しいと言えるが、「X 町 Y 丁目在住の 60 代独身女性の平均所得」といったように、母集団数が少ない場合の統計値の開示(例えば母集団数 5 人)は、個別の個人の所得の推測をある程度可能にすることから、その公開にはプライバシー上の配慮が必要であろう。差分プライバシーは、このような統計量の開示におけるプライバシー上のリスクを、母集団数や対象とする統計的クエリについて、定量化することができる。

差分プライバシーの研究は 2006 年の Dwork らの研究 [2)]に端を発し、以降、理論計算科学、暗号理論、データ工学、機械学習等、多数の理論分野にわたり、主に理論的アプローチの下で複合的に発展しつつある。現在では、上記複数分野において、分野を代表する一流の

国際会議において、コンスタントに数本ずつ研究発表が見られ、徐々に増加している。差分プライバシーのモデルは、暗号理論における標準的な安全性定義として用いられている「識別不可能性」の議論を下敷きとしていることから、従来から積み上げられてきた理論的な安全性解析との親和性が高い。また、その安全性が攻撃者(差分プライバシーにおいてはクエリを発行する者)の背景知識によらないことから、k-匿名性等に比べより現実的な状況下における安全性を保証できる。ただし、差分プライバシーを達成するためには、クエリ応答値に非常に分散の大きい確率分布から得た雑音による摂動を与えることが必要な場合があることから、実用に耐えないケースも多く、現実的な状況において差分プライバシーの保証と実用性のバランスを取るための研究上の試みが現在も続いている。

(秘密計算)

秘密計算とは複数の者が互いに相手と共有することができない秘密の入力を所持しているときに、その秘密入力を互いに他者に開示することなく、これらの秘密データを入力に取る関数を評価し、その出力をいずれかの者あるいは第三者のみに報告する分散計算の総称である。

秘密計算はこれまでに大きく分けて、秘匿回路評価、準同型性暗号系による暗号プロトコル、秘密分散に基づく秘密計算、の三種類の実現方式が知られており、それぞれの方式には計算効率性や計算モデルの自由度の観点において、長所と短所がある。

秘匿回路評価(Yao's garbled circuit)とはブーリアン回路の秘密計算を構成要素とした秘密計算の技法であり、1986 年に Yao によりその基礎が築かれた [3]。

秘匿回路評価は、 紛失送信とよばれる暗号理論上の要素技術が利用可能であることを前提として設計されている。紛失通信とは、送信者が複数項目からなるリストを保持し、受信者がそのリストのインデクスを保持しているときに、送信者に受信者が持つインデクスを与えることなく、受信者が送信者からリスト中のそのインデクスに対応する値を得るプロトコルである。秘匿回路評価は、論理回路で記述可能な任意の関数を秘密計算として実装することが可能であり、汎用性の高い手法である。大規模な入力を引数に取る関数の評価には膨大な時間がかかるため、データマイニングのようなデータ解析の用途には不向きであると考えられていたが、近年は高速実装の技術が進み、文字列操作等の離散的な処理については実用性が高まりつつある。秘密計算の歴史は長く、 Yao による発表からすでに四半世紀が経つが、主に暗号理論・システムセキュリティー分野の国際会議ではコンスタントに研究発表が続いている。秘匿回路評価の実装系は米国・イスラエルなどの大学によるものが著名である [4][5]。

準同型性暗号系とは、二つの整数値の平文に対応する二つの暗号値について、これを暗号化したままである二項演算を行うことで、その整数に対して加法や乗法などの算術演算の結果を暗号化した暗号値を、復号なしで(秘密鍵の知識なしに)得ることができる性質を持つ暗号系である。加法あるいは乗法のどちらかに対応した準同型性暗号系は以前から知られていたが、2009 年には Gentry[6]によって加法と乗法の両方について準同型性を同時に有する暗号（完全準同型暗号）が発表された。これがブレイクスルーとなり、いくつかの完全準同型性暗号を実現する方式が続いて発表された。完全準同型暗号は計算時間や空間計算量が膨大

であることが知られており、現在その削減の努力が続いているが、大規模データ解析における実用性は現段階では低く、もう一段のブレイクスルーが必要であるといえる。これに付随し、加法と乗法の両方をある有限な回数を上限として許す準同型性暗号系を somewhat 準同型暗号とよび、時間計算量や空間計算量において、より実用性の高い方式の研究開発も近年増えている。準同型性暗号系に基づく秘密計算は、算術演算を基に構成されるため、秘匿回路評価との比較でいえば、数値を入力に取るデータ解析や、行列演算をベースとするアルゴリズムに適しているといえる。

準同形暗号に基づく秘密計算は主に 2000 年代からセキュリティー分野、データ工学分野、データマイニング分野等で研究されたが、Gentry らによる完全準同型性暗号の考案が発端となって、完全準同型性暗号自体の開発が現在暗号理論分野で非常に活発に行われ、今後、そのデータ解析応用が増加すると考えられる。

暗号系を用いない秘密計算手法として、秘密分散に基づく秘密計算が知られている [7]。秘密分散では、秘密情報を複数のシェアと呼ばれる情報の断片に分散させる。単独のシェアからは秘密情報を復元することはできないが、複数のシェアを集めることで秘密情報を復元することができる。秘密分散に基づく秘密計算は、複数の秘密情報をランダムシェアとして複数の者に分散させ、ランダムシェア同士の演算によって、所望の計算を行い、これらの秘密情報を入力とするあるクラスの計算は、ランダムシェア同士の演算から実現可能であることを利用して秘密計算を実現する。この方式は、暗号演算や暗号プロトコルの実行を含まないため、一般に計算効率的である。ただし実現可能な関数のクラスは限定される。また、秘密分散を基礎とする方式であることから、3 以上の互いに独立な計算主体の存在を仮定する必要がある。このことは、秘密計算をシステムとして実装した場合には、安全性が保証された多数の計算資源の運用が要求されることを意味している。

秘密分散に基づく秘密計算は、近年の暗号理論の国際会議などにおけるプレゼンスは高くないが、エストニアの企業から開発環境が提供されており、実用化を目指した動きもみられる [8]。

［今後必要となる取り組み］

(高機能暗号)

関数型暗号や完全準同型性暗号などの高機能暗号の基礎研究は、近年発展の速度が速く、今後も継続した取り組みが必要である。高機能暗号に関連する研究は理論の構築に比して実装技術やライブラリの構築がこれに追いついていないため、その整備が必要である。

(秘密計算)

秘密計算を利用したプライバシーデータの活用については、準同型暗号や Garbled circuit の活用については多くの研究例がすでにあるが、高機能暗号の活用はこれまでにほとんどない。データ解析と暗号理論分野の両方に精通した研究者・技術者が少ないことがその理由の一つであると考えられ、分野間の交流等人材開発が必要である。また「ビッグデータ解析」と「個人データのセキュリティー・プライバシー保護」を個別的な研究開発課題でなく、両者を両輪としたソリューション型の研究開発を進める必要がある。

(差分プライバシー)

差分プライバシーは理論計算科学分野ではすでにデファクトスタンダードのプライバシーモデルとして定着した感がある。実用上、今後普及するか否かは現段階では明確ではないが、この分野に精通した研究者・技術者は諸外国に比べ日本には極めて少なく、少なくとも研究者レベルではこの分野の専門家の養成が必要であろう。

（４）科学技術的・政策的課題

(ソリューション開発)

ビッグデータ活用の機運が高まる中、プライバシー保護の重要性も同様に強く認識されつつある。データ工学やデータマイニング・機械学習に代表される「データ活用技術」および暗号理論・システムセキュリティーに代表される「情報セキュリティー」等の個別の要素技術においては我が国には厚い蓄積があるが、個人データ活用におけるプライバシー保護は、法制度との整合性を維持しつつ両技術を適切に組み合わせる複合的なソリューション開発の技術が必要である。このような複雑な課題に取り組むことができる組織・人材の育成は科学技術・政策上の課題であろう。

(技術の進化に柔軟な法制度整備)

米国はサービス利用者の理解を得つつ個人情報を深く解析し、これをサービスの高度化に活用するとともに利益を生み出す源泉とするサービスのあり方を構築してきた。一方で我が国は、法制度が現実の個人データ活用に追いついていなかったこともあり、そのようなサービスが大きく発展したとは言えない。デバイス・通信技術の発展や、新種のサービスの普及に伴い、プライバシー保護のあるべき姿は急速に変容していくとともに、個人情報活用に対する個人の受容度も変化していく。技術の進歩に柔軟に対応できる法制度の整備も重要な課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・(米国のプライバシー保護政策) ホワイトハウスは 2014 年 5 月にビッグデータ解析におけるプライバシー保護・差別の撤廃・自己情報のコントロール等を主題とした報告書”Big Data: Seizing Opportunities、 Preserving Values”を公表した。この報告書は、2012 年２月に公表された　　オバマ大統領による「消費者プライバシー権利章典」(A Consumer Privacy Bill of Rights) が定める消費者(データ提供者たる個人)の権利保護の方針を明確にしつつも、プライバシーデータの収集・流通・活用が生み出す知識の経済的価値・公共の利益を強く認識し、データに基づくイノベーションの促進を目指す提言となっている。

・(欧州の EU データ保護指令) 2014 年 3 月に EU データ保護指令が欧州議会によって可決された。これには、データ元の個人から削除の請求があった場合にはその削除を義務づける「忘れられる権利」が明文化されている。Google は、スペインにて個人情報を含む Web ページへのリンクを検索結果から削除する義務があるという「忘れられる権利」を認めた判決を受け、リンク削除に応じた。

・(日本の個人情報保護法改正) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部は、個人情報

保護法の改正にむけ、2014 年 6 月に、データを取得した個人の同意無しでデータを流通・利活用するための新しい枠組みの創設や、プライバシーの保護のためのデータの加工方法などについて判断を示す第三者機関の設立などを含めた「パーソナルデータの利活用に関する 制度改正大綱」を示した。

・中国では「第１２次五カ年計画」（2011 年～2015 年の五カ年）において、セキュリティーが重要分野として挙げられている
・韓国では 2009 年 9 月に「IT コリア未来戦略」を発表しており、その中で世界最高の情報保護対応センターの構築が挙げられている

（６）キーワード

プライバシー保護、暗号、秘密計算、ビッグデータ解析、データマイニング

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・暗号理論に関する基礎研究は、企業、大学、国立研究所ともに高いレベルにある。国際的にも競争力があり、優れた成果を挙げている ・プライバシー保護技術・システムセキュリティーについての基礎研究は、トップ国際会議等での発表は数が多くなく、国際的に競争力があるとは言えない
	応用研究・開発	◎	↗	・秘密計算の応用技術については、産総研・筑波大による化合物検索のプロトタイプ構築や、NTTによる疫学の実証実験など、応用研究のアクティビティが高い。
	産業化	○	→	・各種暗号アルゴリズムの国際標準の保有（ISO/IECなど）
米国	基礎研究	◎	↗	・暗号理論分野・データベース分野・データマイニング分野、いずれの研究領域においても、多くの理論的アイデアはほとんど米国の大学・企業の研究者から提案されている(差分プライバシー、完全準同型暗号など)
	応用研究・開発	◎	→	・マサチューセッツ工科大学のCryptDBをはじめとする、暗号のデータベース分野への応用 ・バージニア大の高速秘密計算の開発環境FastGCを初めとする秘密計算研究
	産業化	◎	→	・NISTによる暗号規格の実質的な世界標準化 ・民間企業による高度な個人履歴情報の活用
欧州	基礎研究	○	→	・暗号理論に関する基礎研究は、企業、大学、国立研究所ともに高いレベルにある。国際的にも競争力があり、優れた成果を挙げている ・プライバシー保護技術についての基礎研究は、匿名化技術などにおいては複数名著名な研究者が活動している
	応用研究・開発	○	→	・オランダ統計局による匿名化ツールARGUSの開発
	産業化	○	→	・各種暗号アルゴリズムの国際標準の保有（ISO/IECなど）
中国	基礎研究	○	→	・秘匿回路評価の提案者を排出するなど学者を生み出しているが、活躍の場は米国などが主である
	応用研究・開発	○	↗	・データ工学分野を中心に、複数名のデータプライバシー研究者が活動している
	産業化	◎	↗	・国策として4G携帯電話用の暗号アルゴリズムの国産化を目指し開発と標準化を進めている
韓国	基礎研究	○	→	・各種の暗号アルゴリズムの基礎的な研究を行い、国際標準に提案活動を行っている
	応用研究・開発	△	→	・特に目立った活動は見られない
	産業化	○	→	・各種暗号アルゴリズムの国際標準の保有（ISO/IECなど）

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Sweeney, Latanya. "k-anonymity: A model for protecting privacy." International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 10.05 (2002): 557-570.
2) Dwork, Cynthia, et al. "Calibrating noise to sensitivity in private data analysis." Theory of Cryptography. Springer Berlin Heidelberg, 2006. 265-284.
3) Yao, Andrew Chi-Chih. "How to generate and exchange secrets." Foundations of Computer Science, 1986., 27th Annual Symposium on. IEEE, 1986.
4) Malkhi, Dahlia, et al. "Fairplay-Secure Two-Party Computation System." USENIX Security Symposium. Vol. 4. 2004.
5) Huang, Yan, et al. "Faster Secure Two-Party Computation Using Garbled Circuits." USENIX Security Symposium. Vol. 201. No. 1. 2011.
6) Gentry, Craig. "Fully homomorphic encryption using ideal lattices." STOC. Vol. 9. 2009.
7) Bogdanov, Dan, Sven Laur, and Jan Willemson. "Sharemind: A framework for fast privacy-preserving computations." Computer Security-ESORICS 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 192-206.
8) Bogdanov, Dan, Sven Laur, and Jan Willemson. "Sharemind: A framework for fast privacy-preserving computations." Computer Security-ESORICS 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 192-206.

3.10.5　IT メディア分野におけるビッグデータ

（1）研究開発領域名

IT メディア分野におけるビッグデータ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

IT 技術を用いて蓄積・伝送が可能な膨大なデジタルデータ（数値、テキスト、音声、画像、映像など）に共通する性質を抽出し整理することで、新たな情報を得ることを目的としている。例えば、画像認識、映像解析、メタデータ付与などの基礎研究から、社会分析に至るまで幅広い研究開発がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

IT メディアの種類は、金融・国勢などの統計情報を主とした数値情報、各種文書などに代表されるテキスト情報、音響・画像・映像などのマルチメディア情報に大別できる。本研究開発領域では、こうした IT メディア情報に対するビッグデータ処理の観点から、ビッグデータ処理に特化した解析技術について述べる。

数値およびテキスト情報については、十分な研究開発が行われ、技術的に成熟している。ただし、テキストについては、Web 情報、特に blog や microblog にみられるような、話し言葉に近い、あるいは短すぎて従来の自然言語処理が機能しないテキストについてはまだ解析が困難である。また、マルチメディア情報については、単一話者・背景無音の音声認識や、文字認識、顔検出・認識など、一部の例外を除いては、その解析は極めて困難である。一方で、blog や microblog は一般市民の意見や日々の生活の情報から社会動向や風俗を、マルチメディア情報は実世界の情報をそのまま表現できるという利点があり、その効果的な解析技術の実現が強く要望されている。しかしこうした情報は、実世界・社会・生活により近いが故に、多様性が高く、解析が困難であり、その研究開発はまだ発展途上にある。現在最も有望視されているのは、実際の解析対象と同等の特性・多様性を有する大規模な研究開発用データセットを構築し、機械学習などの技術により頑健性の高い解析技術を研究開発していく手法である。

国内外の状況としては、IT メディア分野の基礎研究では、NSF や IARPA などからの資金援助、ならびに Google、Microsoft、Facebook、Yahoo!など、IT メディアの対象そのものを大量に有する企業の存在にも支えられた米国が、研究開発の先導ならびに実際の推進の両面で世界をリードしている。欧州では、Horizon 2020 において、EU Open Data portal のさらなる整備と共に、IT メディアを対象とした研究開発が複数国家間かつ産学官を含む複数のパートナー間の連携によって進んでいる。

日本においては、研究の立ち上がりは早く、例えばマルチメディア分野では米国とともに最も早くから当該分野の研究を開始した国の一つであった。加えて、日本語コンテンツという特殊性、microblog の中で最も利用者の多い Twitter に占める日本語の割合が英語に次いで第二位であるという事実、映像コンテンツ制作のプロフェッショナルとしての NHK が世界第二位の規模の放送事業者であるという事実 （1 位は BBC） など、IT メディアにおける存在感からは、日本が当該研究分野を主導する一翼を担うべき立場にあると考えられる。しかし、米国においてはフェアユース規定により研究用データセットの構築・配布がなされ

ているのに対し、日本では著作権・肖像権・個人情報保護など様々な制約からこれができず、研究開発においても主導的な役割を果たすことができないでいる。ただし、基礎研究自体は盛んに行われている。

中国・韓国においては、オープンデータ構築が徐々に進んではいるものの、研究用データセットの構築・配布や研究開発の先導という動きは見えない。しかし、優秀な留学生や欧米で実績を上げた研究者を多数自国に迎え、加えて国内の大学などと欧米の有力研究拠点との共同研究が多く見られ、有力ジャーナルやトップ国際会議などにおける存在感を急速に増しており、一部の分野ではすでに日本を凌駕していると考えられる。

応用研究・開発においても、層の厚い米国が先導的立場にある。日本においても、産学官の研究などで盛んに研究開発が行われており、日本語であるなど特殊性の高い IT メディアについては特に盛んである。産業化においては、Google、Microsoft、Facebook、Yahoo!などを擁する米国が圧倒的に強い。

（４）科学技術的・政策的課題

・大規模データの収集と配布の重要性: 多様性を有する IT メディアの解析の研究開発には、実際の対象と同等の特性や多様性を反映するだけの十分大規模な研究開発用データの収集と配布が重要となる。特に、インターネットから容易に収集できないデータについては、そのニーズが高い。さらに、研究開発の効果的な推進のために、解析結果として望ましい正解データが付与されている必要がある。こうしたデータを多くの研究者が共通して用いることで、研究成果の比較が可能となる。米国ではフェアユース規定によりデータ公開が広く行われているが、我が国においては、著作権・肖像権・個人情報保護法などの問題により難しくなっており、本分野の研究開発推進において障壁となっている。

・研究開発のマイルストーンの設定: IT メディア分野の研究開発の特段の推進のためには、研究開発用データセットの公開とあわせて、適切な研究開発マイルストーンを設定・発信し、研究開発活動を戦略的に振興することが重要である。米国では TREC/TRECVID や、NSF/IARPA などのプロジェクトでこうした戦略が多くみられ、欧州においても Image CLEF や MediaEval などの例がみられる。日本でも研究開発の適切なマイルストーンの独自の設定が重要となると考えられる。

・政策的な研究開発の底上げ: IT メディア分野の産業においては、特に研究開発から展開までの速さ、世界的な展開の容易さなどから、一ないしはごく少数の企業のみが「勝ち残る」ケースが多い。こうした「勝者」が米国に集中している状況では、米国以外では当該分野の研究開発が、自然発生的に世界的にも存在感を示すほど進展することは考えにくい。これを打破するためには、欧州における FP7 や Horizon 2020 での ICT 分野への取り組みの一定の成功を見るに、日本でも政策的な研究開発の底上げが重要と思われる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・欧州では、FP7 に続く Horizon 2020（2014～2020）の枠組みを通じて EU Open Data portal のさらなる整備を進めている。2015 年予算では「ICT 16-2015:Big data – research」において、Web、マルチメディアを含むビッグデータを対象とした革新的解析技術（データストラクチャー、アルゴリズム、ソフトウェアアーキテクチャー、最適化、言語理解を

含む）に関する研究開発が公募される（予算総額37MEUR）[1]。特に注目すべきは、多種多様なデータストリーム（多言語、マルチモーダル）に対するリアルタイム解析技術について、公募文書中で特に明示している点である。

- xLiMe[2]は、様々なメディアデータ（テキスト、音声、映像）から複合的な知識抽出をリアルタイムで行うとするものであり、FP7のプログラムとして2016年10月までの3年間で44MEURが支出される。その他、FP7では、CUbRIK[3]、MICO[4]などマルチメディア検索システムのための基盤構築が進められている。
- EU 個人データ保護規則案第17条「忘れられる権利」に関連し、FP7においてForgetItプロジェクト[5]が2013年から開始され、ITメディアデータの保存をさらに進めるためのForgetting modelの研究が開始されている。
- Chorus+[6]は、FP7 の援助による、多数のプロジェクトを携えた巨大プロジェクトであり2012年末にプロジェクト自体は終了した。しかし、avmediasearch.euのサイトを通じ、多くの成果にアクセスすることが可能となっている。
- フランス国立視聴覚研究所 （INA）[7]では、フランス国内のラジオ・テレビ放送を原則すべて蓄積し続けており、商用・研究用に提供されている。オランダ視聴覚研究所（Netherlands Institute for Sound and Vision）[8]でも、オランダ国内のテレビ放送を含む視聴覚情報を蓄積し、研究用の提供を行っている。
- 米国では、2014年5月のPCASTによる報告「ビッグデータとプライバシー」[9]において、ビッグデータにおける各種メディアデータ（ソーシャルメディア、画像、映像などを含む）の解析が新ビジネスを生み出すのは勿論のこと、プライバシー保護のための研究が重要であることが指摘されている。
- NSFの援助により、2013年から5年計画でBrownDogプロジェクト[10]が10MUS$の予算でイリノイ大学を中心に進められている。画像、動画、音声などのあらゆるインターネット上のBorn Digitalデータに対してタグを付与し利用可能にすることを目指している。
- ImageNet [11]は、米国スタンフォード大学Li Fei-Fei教授らが構築している画像意味解析用のデータセットであり、2.1 万の概念数、1.4 千万の画像を含む。規模、品質ともに群を抜き、同分野の研究、ならびに評価のデファクトスタンダードとなっている。同大学の他、AmazonやGoogleのサポートを受けている。
- 米国 Internet Archive [12]は、1996年に設立された非営利のデジタル図書館であり、世界中の Web 情報を定期的に収集し、検索などのサービスを提供している。研究などの用途にデータセットとしての一般公開は行われていない。
- 米国標準技術局 （NIST） では、TREC[13]ならびにTRECVID[14]プロジェクトにより、情報検索ならびに映像解析・検索プロジェクトの推進を図っており、大規模データセットの構築・配布、研究マイルストーンの策定を行い、世界中の研究グループを主導している。
- 米国 IARPA ALADDIN プロジェクト[15]では、2011年から5年計画で、インターネット上の映像を含む任意の映像中の動作などのイベント情報を高精度で検出する技術の実現に取り組んでいる。IARPA 主導のプロジェクトであることから、国家安全上重要な課題として認識されていると考えられる。
- 韓国では、情報通信研究振興院から先端融合コンテンツ技術開発の公募が 2014 年に実施（総額230億ウォン）[16]され、コンテンツ、プラットフォーム、ネットワーク、機器の融

合を目指したコンテンツに関わる研究開発が行われている。2013 年度の同公募では、韓国データベース振興院を中心としてビッグデータコンテンツサービスのためのマルチメディアコンテンツ内オブジェクトデータ抽出に関わる研究[17]が進んでいる（4.34 億ウォン）。

・文部科学省受託研究「多メディア Web 解析基盤の構築および社会分析ソフトウエアの開発」[18]は、2009 年から 4 年間のプロジェクトであり、東大においてアジア域最大の 200 億 URL に及ぶ Web 時系列アーカイブ、国立情報学研究所において 20 万時間に及ぶ放送映像アーカイブを実現しているが、著作権などの問題のため、内部利用にとどまっており、研究コミュニティ一般への公開には至っていない。

（６）キーワード

Web、blog、microblog、マルチメディア、内容解析、意味解析

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・データセット構築・公開は、著作権、肖像権・個人情報などの問題により、研究用途に広く公開されている例はまれである。特に画像・映像を主としたデータセットはほとんど存在しない。 ・再配布まで可能な権利を有した機関が配布する場合には、データセットが公開されている場合がある。毎日新聞社は研究用に毎日新聞テキストデータを配布しており、日本語自然言語処理の発展に顕著に貢献した。 ・blogやTwitterなどのデータは、産学で大規模に収集されているが、著作権問題等により一般には公開されない状況が続いている。 ・blog、Twitterを対象とした解析、画像・映像の解析も産学官において盛んに研究されている。 ・テキスト情報検索を主対象とした共同研究プロジェクトNTCIRでは、大量のテキスト情報を研究グループに配布しているが、研究覚書を取り交わし配布するなど、特段の配慮が必要となっている。 ・研究会等の発表件数の推移から、基礎研究は引き続き活発に行われていることがわかる。また、日本語自然言語処理や日本語音声認識については、実用レベルの技術が広く利用可能となっている。
	応用研究・開発	○	→	・基礎研究の成果を利用し、日本語という特殊性に基づく独自の応用研究、国内のニーズに対応した応用研究・開発が盛んに行われている。
	産業化	○	→	・応用研究・開発と同様であり、日本語という特殊性や国内の特有のニーズに対応した産業は国内に多く存在する。
米国	基礎研究	◎	→	・研究の戦略的な振興のため、研究用データセット構築・配布と、研究すべきタスクの設定など、世界でも中心的な役割を果たしている。NIST、LDCなどがその中核的な機関となっている。 ・NSFやDARPAは、上記機関とも呼応し、米国内での基礎研究を特段にサポートしており、顕著な研究成果を上げている。 ・米国立議会図書館によるTwitterデータを含むウェブデータ収蔵、IARPA ALADDINプロジェクトにおけるインターネット上の映像のイベント解析など、より挑戦的なITメディア解析研究への政府主導の動きがみられる。 ・BrownDogプロジェクトが目標とするBorn Digitalデータに対するタグ付与は、あらゆるインターネット上のメディアコンテンツの利用推進を促すものであり、NSFはその重要性を認識していると思われる。
	応用研究・開発	◎	→	・Google、Facebook、Microsoftなどの米国内の巨大ITメディア企業でも研究部門を有し盛んに応用研究・開発を行っている他、大学とこうした企業との連携も盛んであり、加えて大学において、起業を目指した応用研究・開発も極めて盛んである。
	産業化	◎	→	・今後の研究開発において重要となる、ITメディアにおけるビッグデータを実際に保有する企業は、Google、Facebook、Microsoftなど、ほとんど米国に集中している。基礎研究、応用研究・開発の層の厚さとも相まって、今後ともITメディア研究の産業化においても米国は主導的な役割を果たすと思われる。
欧州	基礎研究	◎	→	・Horison 2020の「Leadership in Enabling and Industrial Technologies」の項目では、ITメディア分野の基礎研究として、EU Open Data portalへのデータの集約、および、それらのデータを活用するプラットフォームの研究開発の公募が盛んである。 ・FP7において、ITメディア分野のパーソナルデータ、組織データの保存をより進めるための忘却に基づくForgetItプロジェクトが2013年から開始されていることからも分かるように、時代のニーズに沿った基礎研究にも力点が置かれている。 ・Image CLEF、PASCAL VOC、MediaEvalでは、実際の研究用マルチメディアデータセットを構築し、研究コミュニティに公開している。

欧州	応用研究・開発	○	↗	・Horison 2020の「Social Challenge」では、高度道路交通システムのさらなる高度化や警察等の取り締まり機関における証拠抽出において、インターネットやソーシャルメディア上のデータ活用を含む公募がある。 ・同基礎研究公募においても、プラットフォームの研究開発に重きが置かれ、SMEにおける利用促進を狙っている。
	産業化	○	→	・産学官連携コンソーシアムとしてのQuaeroにおける参画企業の積極的な活動やExaleadの起業などの例もある。しかし、世界的に顕著な存在感を示すまでには至っていない。
中国	基礎研究	○	→	・オープンデータの収集、公開がOpendataChinaで開始されているものの、データ設置の構築・配布やタスク設定による行うべき研究の方向性の提示例はほとんどない。 ・研究は極めて盛んに行われている。特にマルチメディア分野においては、中国の大学は、特に近年顕著に能力を上げてきており、トップ会議にも採択論文が散見されるようになっている。 ・中国の大学において、米国や欧州の有力研究者との連携を図り、研究能力の飛躍的発展を実現でいる例が多く見られる。
	応用研究・開発	△	→	・基礎研究から応用に結びついた例はまだ多くは見られないが、基礎研究の進展を見るに、今後は応用研究・開発の進展も見込まれる。
	産業化	○	→	・Baidu、Sina Weiboなどの起業例もみられるが、世界的に存在感を示すまでには至っていない。 ・言語の特殊性や国内の特有のニーズに対応した産業は国内に多く存在する。
韓国	基礎研究	○	→	・Government 3.0(2013.6)の一環として、オープンデータの収集が積極的に行われているものの、データセットの構築・配布、タスク設定による行うべき研究の方向性の提示例はほとんどない。 ・先端融合・複合コンテンツ技術開発事業（情報通信研究振興院）において、ITメディアを含むコンテンツに関わる研究が開始されている。 ・データベース、コンピュータービジョン （画像・映像解析） などの分野では顕著な成果が見えている。一方、画像・映像の検索や応用を主としたマルチメディア分野の研究はあまり盛んではない。
	応用研究・開発	△	→	・基礎研究から応用に結びついた例はまだ多くは見られないが、基礎研究の進展を見るに、今後は応用研究・開発の進展も見込まれる。
	産業化	○	→	・オープンデータ利用の成功事例として、バス情報を利用したサービス構築などがある。 ・Naverの起業などの例もみられるが、世界的に存在感を示すまでには至っていない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）HORIZON 2020 WORK PROGRAMME 2014-2015
http://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/h2020/h2020-ict-2015.zip
2）xLiMe – crossLingual crossMedia knowledge extraction
http://www.xlime.eu/
3）CUbRIK
http://www.cubrikproject.eu/
4）MICO: Media in Context
http://www.mico-project.eu/
5）ForgetIT
http://www.forgetit-project.eu/
6）Chorus+
http://avmediasearch.eu/
7）フランス国立視聴覚研究所 （INA）
http://www.ina.fr/
8）オランダ視聴覚研究所 （Netherlands Institute for Sound and Vision）
http://www.beeldengeluid.nl/
9）Report to the President: BIG DATA and PROVACY
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/micro-sites/ostp/PCAST/pcast_big_data_and_privacy_-_may_2014.pdf
10）CIF21 DIBBs: Brown Dog
https://opensource.ncsa.illinois.edu/confluence/display/BD/CIF21+DIBBs:+Brown+Dog
11）ImageNet
http://www.image-net.org/
12）Internet Archive
http://archive.org/
13）TREC
http://trec.nist.gov/
14）TRECVID
http://trecvid.nist.gov/
15）IARPA ALADDIN プロジェクト
http://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/aladdin-video
16）先端融合コンテンツ技術の開発
http://www.nipa.kr/biz/biz.it?bizId=00602&menuNo=815&boardId=info
17）2013 年度コンテンツ産業技術支援事業（指定公募）2 次発表
http://iacf.kw.ac.kr/index.php?mid=iBizNotice&document_srl=2839&listStyle=viewer&page=22
18）文部科学省受託研究「多メディア Web 解析基盤の構築及び社会分析ソフトウエアの開発」
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/006/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2011/08/31/1310172_01.pdf

3.10.6　ライフサイエンス分野におけるビッグデータ

（1）研究開発領域名

ライフサイエンス分野におけるビッグデータ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ライフサイエンス分野においては、これまでは主に、純粋な生物学的興味から、ある生物種（例えば、ヒト）の動作原理に関する研究が主であった。しかし、シークエンサ（DNA配列解読装置）の発達により、個別のヒト・患部・細胞の違いを解析することが可能となった。このような研究には、多数の対象から、大量のデータを取ることが必要であり、その情報学的・統計的解析の必要性が高まっている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2000 年代前半にヒトゲノムが解明されたことにより、生物学の方法論は、かなり情報学的手法を駆使したものに生まれ変わったが、それでも、扱うデータの量は限られており、最先端の統計学・機械学習の手法が用いられることも、あまりなかった。疾病の原因として、一塩基変異(SNP)のような単純な原因が簡単にみつかるだろうという楽観論に基づけば、基本的には、病例が数例あれば、特に複雑なデータ解析をすることなく原因を発見し、それに基づき治療法を開発することができるだろう。しかし、現実はより複雑である。例えば、同じ人のがんであっても、違う部位を取ってゲノムを比較すると差異が存在し(intra-tumor heterogeneity)、どれか一つに効く薬が完成したとしても、他の種類のがんが生き残ってしまい、命を救う事はできない [1]。同時に、抗がん剤の効き目、副作用は、投与される人のゲノム変異に大きく影響される。従って、がん制圧の具体的な姿というのは、非常に多数の薬剤を用意し、それを、患者、患部のゲノム変異に基づいてカクテルを作成し、薬剤耐性に考慮しながら時系列で変化させていくという形にならざるを得ない。このような医療を個別化医療(personalized medicine)、あるいは、精密医療(precision medicine)と呼ぶ [2]。現在、HIV の治療においては、このような医療がほぼ実現されており、HIV の体内での変異をシーケンサでモニタリングし、適切な投薬を行う事で、AIDS を発症することなく生存することができる [3]。このような医療を、生活習慣病・精神病・がんなどにおいて実現することが、これからの課題である。このように複雑な医療を実現するには、データ解析、また、治療の設計に情報学の優れたアルゴリズムが欠かせない。個別化医療では、これまでの生物学の原理理解に向けたアルゴリズムの延長線上にはない、全く異なる高度なアルゴリズムが必要である。

米国 NIH が 2012 年に開始したプロジェクト Big Data to Knowledge (BD2K)は、このような生物学の情報化の流れを最も良く表している [4]。このプロジェクトは、2020 年までに 6.56 億ドルを投じるという非常に大規模なものであり、13 カ所の研究機関に研究センターを立ち上げるなど、従来から強い米国のバイオインフォマティクスの力をさらに盤石にする効果があると考えられる。このプロジェクトでは、生物情報学を、これまでのような生物学のおまけではなく、主役として位置づけている。つまり、この巨額の資金は、生物学実験に使われるのではなく、もっぱら、情報学的な目的、すなわち、データベース作成・新手法開発・人材育成などに用いられるという点で、これまでの ENCODE[5]、1000 Genomes[6]など

の大型プロジェクトとは異なる。

2015 年には、オバマ政権が Precision Medicine Initiative を発表した [7]。これは、2016 年だけで 2.15 億ドルを投じて個別化医療を実現しようというプロジェクトである。その内の 1.3 億ドルは NIH によって、100 万人のゲノム情報をシークエンシングするために使われる。0.7 億ドルは、National Cancer Institute (NCI)に配分され、がんのドライバー変異を含む遺伝的原因を発見するために用いられる。残りの 0.5 億ドルは、情報集約のための予算とされている。このような巨大な国家プロジェクトだけではなく、個別化医療のスタートアップとしては、Patrick Soon-Shiong による NantHealth[8]、Craig Venter の Human Longevity[9]、 あるいは、Regeneron[10]が活発に活動しており、このようなデータを Pfizer などの製薬企業が利用することで、創薬や疾病治療のあり方が、根本的に変わる可能性がある。これに対し、日本では、特筆すべき動きはなく、彼我の差がさらに拡大することが懸念される。

このように、ビッグデータによる科学への投資が拡大する一方、論文に出版された結果に誤っているものが多いという指摘もなされている。例えば、Ioannidis らによる Lancet の論文に詳しいが、製薬会社による追試の結果、ほとんどの論文に再現性がなかったという信じられない結果もある [11]。STAP 細胞に関する騒動などで、一般社会にも明らかになった通り、生物学においては、非常に意外な現象が報告されても、理論の積み上げが未熟なため、すぐに真偽を明らかにすることができない。それをいいことに、自らに都合のいいストーリーを考えて、それに合うように実験を進めるといった望ましくない態度で研究を行う傾向がある。本来であれば、自らに都合のいい仮説はできるだけ疑ってかかり、石橋をたたいてわたる態度が重要であるが、現状では全く逆と言わざるを得ない。例えば、実験を行う際には、期待される効果を事前設定し、それに見合うサンプルサイズをあらかじめ決めておかなければ、統計検定は意味を成さないのであるが、そのような手順は無視されるのが一般的である。このままでは、生命科学への巨額投資が、誤りだらけの論文を生み出すだけで、全く無駄になってしまう恐れすら考えられる。米国でも、研究の再現性の問題は深刻に受け止められている [12]。その対策として、全てのデータとプロトコルを、信頼できるタイムスタンプをつけた状態で、公共のレポジトリにアップロードさせることや、論文の著者でないオブザーバーの研究への関与を義務づけること、また、再現された論文の著者を表彰する仕組みなどが提案されている。再現性問題に関しては、これまでの統計学が低次元データを仮定しており、現在の状況に追いついていないという問題も指摘されているので、新たな数理的アイデアによる革新的な統計手法が求められている。

中国 BGI(Beijing Genome Institute)[13]は、純粋な公的研究機関ではない。大量のシークエンサと、大勢の若い技術者(大半が 20 代)を背景に、自らも研究を行う一方、世界中の研究機関・企業から、サンプルを集めて、商業的にシークエンシングサービスを行っている。価格競争力も高く、日本をはじめとする各国に支社も存在し、人気を集めている。中国の基礎的な生物学のレベルはまだ高くないが、請負仕事を大量にこなすことによって、ノウハウが蓄積され、今後は急速にレベルが向上するのではないかと予想される。これは、半導体において、台湾メーカーが、海外の仕事を請け負うことを通して結果的に世界トップに上り詰めた過程と類似している。

個人の細胞から DNA を抽出し、その変異を解析することによって、生活習慣病などのリ

スクを評価する商用サービス（ゲノム診断）が世界中で一般化している。最大手は、米国の23andMe[14]であるが、日本でも、DeNA[15]、 Yahoo![16]などの企業が参入し、一つの産業として成立しつつある。それ自体は喜ばしいことであるが、多数の個人ゲノムが一企業に蓄積されることは、プライバシー保護の意味ではあまり好ましいことではない。匿名化・秘密計算などの情報技術を生かして、ゲノム診断や個別化医療におけるプライバシー保護技術を確立させることが求められる。

（４）科学技術的・政策的課題

・大量のデータを解析し、信頼性ある結果を得ることができるアルゴリズムの開発が急務である。非常に多くの変数が観測可能になると、そこから疾病の原因となる変数を選び出す際に、誤発見の確率が高くなるという問題がある。論文の再現性問題を無視し続けていると、ビッグデータによる科学そのものの存立基盤を脅かしかねない。
・統計的なデータ解析結果には、どうしても誤りが含まれるため、それらをスムーズに検証実験に移行させる枠組みが必要である。現状では、各研究者の恣意的な判断に基づいている。
・個別化医療に不可欠な個人データの利用を促進するために、プライバシー保護技術の開発と普及が必要である。
・日本では、バイオインフォマティクス人材の絶対数が不足しているため、人材育成への取り組みが必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・米国 Precision Medicine Initiative、 BD2K は、最も注目を集めているプロジェクトである。
・欧州では、域内でのデータを流通されるため、European Life Sciences Infrastructure for Biological Information （ELIXIR）[17]がスタートしている。
・日本では、東北メディカルメガバンク[18]などのコホート研究がスタートしている。産出されるビッグデータがどのように生かされるか注目である。
・ゲノムのプライバシーに関しては、JST CREST「ビッグデータ基盤」[19]において研究が行われている。

（６）キーワード

新型シーケンサ、ゲノム診断、ゲノムコホート、バイオインフォマティクス、プライバシー保護

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・iPS細胞の発見や、それに基づく再生医療の研究など、ライフサイエンスそのもののアクティビティは高い。ただし、情報学に詳しい人材の不足から、データ解析のレベルは高いとはいえない。この事実が、ライフサイエンス研究の質そのものを悪化させるかどうかは、まだ不明である。
	応用研究・開発	△	→	・欧米に比べて、大規模な研究プロジェクトが少なく、人材が不足している。これは、数十年にわたって投資を怠ってきたことが原因であり、すぐに好転するとは考えられない。長期的な視点に立って、トレンドを好転させる努力が必要である。
	産業化	△	→	・欧米に比べると低調といわざるを得ない。
米国	基礎研究	◎	↗	・すべてに関して世界をリードしている。基礎的な生物学、シークエンサなどの測定機器、情報学に関してすべて圧倒的な力を持つ。NCBI[20]には世界中の情報が集まる。
	応用研究・開発	◎	↗	・現状では世界一の力を持つ。Googleが、Google genomics[21]というクラウドプラットフォームを開始した。
	産業化	◎	↗	・米国の強みは、新技術が開発されるとすぐにベンチャーによって事業化される点である。ゲノム診断に関しても23andMeを始めとする多くの企業がある。
欧州	基礎研究	◎	↗	・Wellcome Trust Sanger Institute[22]、EBI[23]、ドイツのMax Planck[24]などが強力なゲノム関係のプロジェクトを推進している。基礎的な生物学のレベルも高い。
	応用研究・開発	○	↗	・イギリスにおいては、50万人規模のUK Biobank[25]が進行中である。また、スウェーデンでも、同様に50万人規模のLifeGene[26]プロジェクトが立ち上がりつつある。
	産業化	○	→	・DecodeMe[27]などのゲノム診断サービスが存在する。ただ、米国に比較すると広がりとしては小さい。
中国	基礎研究	△	↗	・前述のBGIを中心に、ハイインパクトジャーナルに多くの論文を出版している。ただし、基礎生物学のレベルは高くない。
	応用研究・開発	○	↗	・コホート研究では、UK Biobankと同規模のChina Kadoorie Biobank[28]がスタートしている。
	産業化	△	↗	・BGIによるゲノム解析の受託解析サービスが世界的に展開されている。
韓国	基礎研究	△	↗	・今のところ特筆すべき点はない。
	応用研究・開発	△	↗	・今のところ大きな動きはない。
	産業化	△	↗	・特筆すべき点はない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22469128
2) http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23361103
3) http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22673150
4) http://bd2k.nih.gov/
5) http://www.genome.gov/encode/
6) http://www.1000genomes.org/
7) http://www.whitehouse.gov/blog/2015/01/30/precision-medicine-initiative-data-driven-treatments-unique-your-own-body
8) http://nanthealth.com/
9) http://www.humanlongevity.com/
10) http://www.regeneron.com/
11) http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24411645
12) http://www.nature.com/news/policy-nih-plans-to-enhance-reproducibility-1.14586
13) http://www.genomics.cn/
14) https://www.23andme.com/
15) https://mycode.jp/
16) http://medical.yahoo.co.jp/hdl/gene/
17) http://www.elixir-europe.org/
18) http://www.megabank.tohoku.ac.jp/
19) http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html
20) http://www.ncbi.nlm.nih.gov/
21) https://cloud.google.com/genomics/
22) https://www.sanger.ac.uk/
23) http://www.ebi.ac.uk/
24) http://www.molgen.mpg.de/
25) http://www.ukbiobank.ac.uk/
26) https://www.lifegene.se/
27) http://www.decode.com/
28) http://www.ckbiobank.org/

3.10.7　教育とビッグデータ

（1）研究開発領域名

教育とビッグデータ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

学習者の学びの向上、あるいは教育機関や教育行政における意思決定のために、教育に関わる様々なデータを組み合わせて行うデータ解析に関わる研究開発を指す。

ビッグデータという用語は、学習マネジメントシステム（LMS）やオンライン教育、特に大規模公開オンライン講座（MOOCs）により蓄積される学習ログやその他のライフログ等の、大規模データの有する可能性への期待から特に用いられるようになったが、広く、各種教育統計や学生の属性等管理情報なども含む多様な教育データの組み合わせを指す場合もある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

a)　研究開発領域の詳細な説明

「教育とビッグデータ」という研究開発分野には、二つないし三つのルーツがある。

一つは、認知科学や学習科学、人工知能、機械学習等の分野にルーツをもつ「エデュケーショナル・データマイニング（EDM)」である。LMS や各種の e-ラーニング・システム、学習端末等を通して学習者の学習状況に関わるデータが大規模に集まるようになり、2000 年頃から各種の国際会議でワークショップが開催され、2008 年には初の EDM 国際研究集会（モントリオール）の開催、2009 年には初の EDM の学術雑誌（”Journal of Educational Data Mining”）の創刊、2011 年には初の学会設立（”International Educational Data Mining Society (IEDMS)”）につながった。

EDM とほぼ同様の研究開発領域ではあるが、解析結果を応用することに、より重点を置いた「ラーニング・アナリティクス（LA)」という分野がある。こちらは、ICT の活用推進を通して高等教育を発展させることを目的とする米国の業界団体「EDUCAUSE」が、重要な技術トレンドを紹介するために毎年発刊する”Horizon Report”の 2011 年版（HR2011）に取り上げてから急速に発展し、同分野の学会（”Society for Learning Analytics Research (SoLAR)”）と 2011 年からの会合開催（” Learning Analytics and Knowledge Conferences （LAK)”)、そして 2014 年からの学術雑誌（” Journal of Learning Analytics”）の発刊につながった。

EDM と LA の研究開発内容はほぼ同様であるが、その違いを説明することも試みられている [1)2)]。EDM は人工知能や機械学習をルーツとすることから、人が介入することのない機械学習により、学習者の学習モデルを見いだすことに重きがあるのに対して、LA は教育工学や学習デザイン、LMS 等の大規模 e-ラーニング・システムを基盤として、教育者や学習者への教育・学習支援や、教育機関や教育行政における意思決定の支援などの応用的側面に重きがあるとされる。しかし両者ともカバーする領域は同じであり、EDM においても学習支援や意思決定支援といった応用が試みられるようになっており、一方で LA においても各種の支援情報を提供するために、学びのプロセスに関する理解の精緻化に取り組むという動きがあり、両者歩み寄っていると言える。SoLAR の発起人である G. Siemens は、両者の歩

み寄りと連携を提唱している[1)]。

一方、EDM と LA とは別に、G. Siemens は LA と対比させるかたちで、”Academic Analytics (AA)”という概念を提示している。”Open Learning Analytics”を呼びかけた SoLAR のパンフレット[3)]によると、LA が学習者や教育者を支援するのに対して、AA は機関レベルや行政レベルの執行部の意思決定を支援する。また、そのようなことから、LA は学習者の学習ログやライフログなど、学習プロセスレベルのミクロなデータを扱うのに対して、AA は教育統計や学習者の属性等管理情報など、よりマクロなデータを扱うとしている。なお、AA は狭義には、ビジネスインテリジェンス（BI）を機関レベルの意思決定に用いる際の解析を指すこともある。

AA は日本において（そしておそらく米国を含む他国においても）十分浸透している用語ではなく、データ解析等を専門とする情報科学分野等の研究者の用いる用語である。これに対して、高等教育機関においては伝統的に、「インスティテューショナル・リサーチ（IR)」という用語を使用している。IR とは、情報収集やデータ解析等を通じて執行部等の意思決定を支援するための機関レベルの調査・研究活動を指し、米国では 1960 年代から取り組まれ、米国の各高等教育機関等においては IR のための専門部署が常設されている場合が多い。伝統的には、大学の財務に直結する入学者管理等や、外部への説明責任を問われる評価報告書の作成を中心に、財務や企画関連部署内に置かれていたが、近年は高等教育のマス化に伴うラーニング・アウトカム重視の傾向から、在学生一人一人の学習等を分析し、学習支援をすることも行われている。

日本においては 2008 年ごろから IR の重要性が中教審等において指摘[4)]されるようになり、各高等教育機関において学内に IR 担当や IR の機能を有する部署の設置、あるいは設置の検討が進められている。しかし日本の大学においては大学運営が事務の各担当部署にて行われてきていたことから、データを一つの部署に集約し、これを意思決定に用いるという体制を敷くことが容易ではなく、日本の大学における IR は、高等教育における教育重視の傾向を受け、学生の学習支援を主眼とするいわゆる「教学 IR」を中心に展開されている場合が多い。これは学内に設置された教育開発センター（Center for Teaching and Learning (CTL)）などで行われている。

AA や IR は、教育機関の機関レベルの意思決定を主眼とし、伝統的に教育統計や学習者の属性等管理情報などのマクロなデータを用いていたが、高等教育における世界的な教育重視の流れから「教学 IR」への注目が高まり、学生の科目の履修状況や成績など、学生一人一人を対象とした分析と学習支援が行われ、LA や EDM などへの歩み寄りが見られる。一方で、LA や EDM においても、学習ログ等の学習プロセスそのものに関わるデータだけでなく、学生の属性等管理情報が解析精度を上げる上で極めて重要なファクターとなることが確認されていることから、よりマクロなデータも用いることが行われており、両者歩み寄っていると言える[1)]。

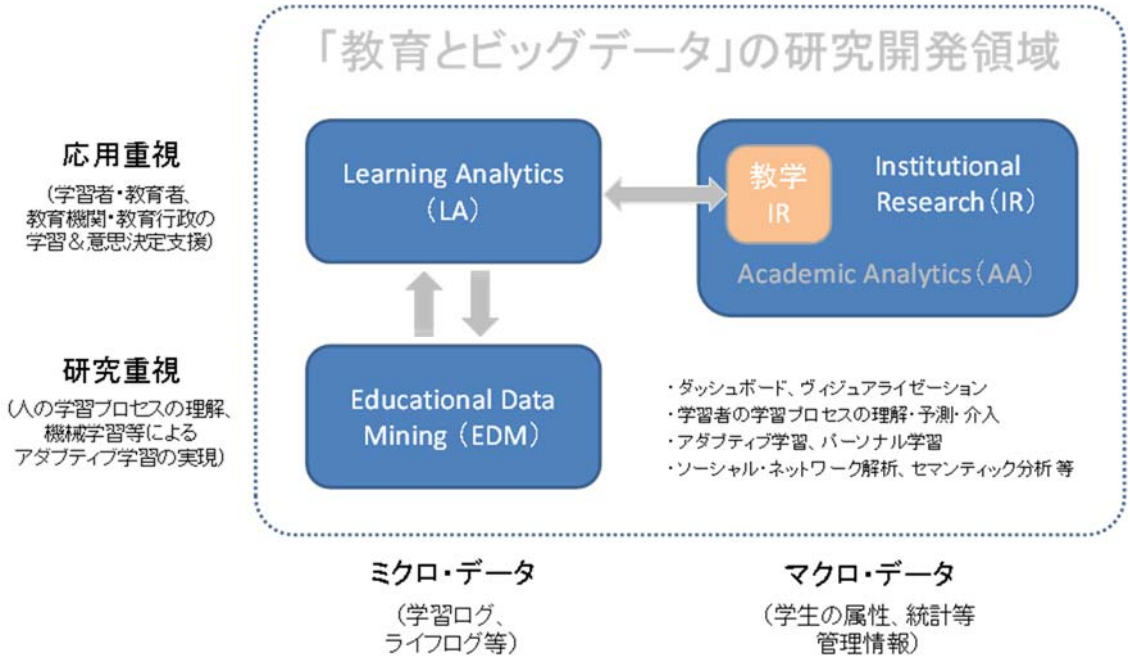


図 3.10.2 「教育とビッグデータ」の研究開発領域

なお、EDM や LA などの研究開発分野が出現したのは、LMS や各種の e-ラーニング・システムを通した学習者の学習ログや学習者の位置情報等ライフログなどの、学習状況に関わるデータが大規模に集まるようになったこと、ビッグデータへの一般的な関心が高まったこと、専門家でなくとも簡易にデータ解析や解析結果のヴィジュアライゼーションを可能とするビジネス・インテリジェンス（BI）などが普及だしたことなどが背景にある[3)5)6)]。一方、大規模公開オンライン講座（MOOCs）が世界的にブレークしたのは LA が提唱された翌年の 2012 年であり、MOOCs は必ずしも EDM や LA 形成の直接的な要因ではない。他方、MOOCs は同一のオンライン教育モジュールを数万名の学習者が学び、同じ条件下の均質なデータを大規模に提供する媒体となったことから、EDM や LA の絶好の解析対象となり、同分野の研究が飛躍的に伸びる材料を提供したと言える[7)8)]。

b) 国内外の動向

全般に機運は盛り上がっており[9)10)]、EDUCAUSE の HR2011 で LA が紹介されたときは 5 年以内にブレークするとあったものが、HR2012 では 2-3 年以内となり、HR2014 では 1 年以内となるなど、進展のスピードも感じさせる。ユネスコでは 2012 年 11 月に LA を紹介する政策文書をリリースし[6)]、米国では教育省が EDM と LA の動向に関する調査報告書を 2012 年 10 月にリリースしている[11)]。EU では「(5)注目動向」で詳しく述べるように、第 7 次研究枠組み計画（FP7）のもと、LA や EDM に関連して既に 3 つのプロジェクトが走っている[12)13)14)]。

国別で見ると、北米が大きく世界をリードしており、これに次いで欧州が研究開発を行っている。欧州では、オープン・ユニバーシティ（OU）が比較的普及しており、特にスペインと英国の OU が成功していると言われ、このためか、EDM をけん引しているのはスペイン・コルドバ大学の S. Ventura と C. Romero[15)]、LA をけん引しているのは英・OU の教育工学研究所（”Institute of Educational Technology”）の R. Ferguson である[16)]。

アジア諸国においては、台湾やシンガポール、香港、そして韓国などが各種 e-ラーニン

グ・プログラムの開発・提供という観点では極めて進んでいるが、これら学習データを解析し、学習支援や意思決定支援に役立てるという点ではそれほど多くの取り組みは行われていない模様である。ただし、これら諸国はデータ解析対象となるデータがこれらシステムから取得可能であるという意味で、これから本分野の研究が飛躍的に進む土壌を有している。他方、日本については、LMS の利用も含め、e-ラーニング等が伝統的なキャンパスを有する大学において普及していないこともあり、このデータ解析となるとさらにおぼつかない。

米国は、いくつかの要因により、この分野の研究開発が活発かつ産業化も進んでいる。第一には、オンライン教育や LMS など、デジタル時代における学習環境がすでに普及している。米国ではインターネット普及以前から、州立大学が州の農業や工業の発展のために遠隔教育を提供する機能を有しており、これが技術の発展とともにインターネットを媒体としたオンライン教育も提供するようになっている。こうしたノウハウやインフラが存在したことが、キャンパスで提供される正規の教育課程においても e-ラーニングが早い段階から導入される環境条件につながった。米国の大学では一科目以上オンラインで受講している学生の比率は 2011 年ですでに 32%に達し [17]、遠隔教育を受講する生徒のいる高校の割合は 96%にものぼる [18]。

第二に、米国では高等教育のマス化、ユニバーサル化が世界に先駆けて進み、学力面も含め多様な学生を高等教育で受け入れていることから、ドロップアウト等の問題が深刻で、学生一人一人への学習支援に対する必要性が高い。しかし高等教育財政の枯渇から、こうしたきめ細かい学習支援を提供するための人件費の予算は割けないため、電子システムで自動的に学生の学習支援を行う eAdvising などへの需要が生まれた。結果として、Knewton などの教育のパーソナル化やアダプティブ学習に対応可能な製品が民間において開発されている。アリゾナ州立大学は全米でも特に先駆的な大学で、来る人口増に備え、オンライン教育を全学的に展開し、eAdvising 等の学習支援も全学的に提供している（「注目動向(5)」に詳説）。

更に、2007 年のリーマンショック以降、高等教育予算の削減に伴う授業料の高騰、それと同時に提供科目数の縮小とそれに伴う在籍期間の長期化により、学生の借り入れる学生ローンが 10 万ドル以上で卒業後も返済しきれないほどと報道され [19]、大きな社会問題となり、さらに同時期に MOOCs が一大旋風を巻き起こしたことから、オンラインのみの無償もしくは安価な高等教育の提供に社会および行政から注目が集まった。オンラインのみの教育はドロップアウトの危険性が対面授業以上に高く、学生一人一人に対応したアダプティブ学習やパーソナル学習等を実装した eAdvising 等の必要性がさらに高い。

こうした社会・経済的要因なども背景とするため、米国は現在研究開発面だけでなく、産業化や実用化の面でもこの分野で世界断トツ 1 位のフロントランナーである。

なお、カナダは、カナダのオープン・ユニバーシティであるアタバスカ大学技術拡張知識研究所（Technology Enhanced Knowledge Research Institute (TEKRI)）に 2013 年 12 月まで在籍していた G. Siemens が、デジタル環境における学習ネットワークや技術、解析、ビジュアル化、オープン性、組織効率性などに関わる世界的な第一人者であり、「デジタル時代における学習理論：コネクティビズム」を提唱、LA の学会である SoLAR の発起人ともなっていたことから、（同国の国土が広く遠隔教育がもともと盛んであったこともあるが）、この分野で注目すべき存在であった。他方、G. Siemens が 2013 年 12 月にテキサス大学オ

ースティン校の学習革新とネットワーク知識研究ラボ（Learning Innovation and Networked Knowledge Research Lab（LINK Lab））に移籍したことから、LA の発信源がテキサスに移る可能性はある。

（４）科学技術的・政策的課題

（一般的な課題）

- **学習支援のリアルタイム性：**2011 年になって LA が大きく取り上げられるようになったのは、e-ラーニングや LMS 等を通じて学習者の学習ログや学習端末等を通じたライフログが大規模に取得可能となり、リアルタイムの学習支援も可能となってきたことによる。一方、リアルタイムで質の高い適切な学習支援をするためのデータの蓄積や解析はまだ開発途上であり、現在機械学習による方法等も含め、多様な研究開発が進められている [5)20)]。
- **データの質、解析に加えるデータセットの選定、重み付けの難しさ：**この分野では、「取得できたデータをもとに分析するのか、それとも分析したい事項をベースに分析するのか」が問題として指摘されるほど、解析対象とするデータの質やデータの取捨選択が問題となっている [6)16)]。オンライン教育や LMS 等から学習ログ、学習端末や ID カード等からの位置情報等ライフログなどの膨大なデータが取得可能とはなったが、それら解析対象となるデータが真の意味で「学習プロセスの理解」につながる情報を内在していないのであれば、解析をいくら精緻化しても、存在しない情報は引き出せない。学習者がクリックをしたり、講義ビデオを再生したりしていても、真の学びにつながっているかはその行為だけからは推し量ることはできないのである。さらに、LA ではこうした学習ログやライフログの解析だけでなく、学習者の属性等管理情報やその他の情報（学習者のその日の体調や性格、生活リズム等）も合わせて解析することが解析の精度を上げる上で重要とされているが、これら付帯情報をどこまで入れるべきか、またそれぞれをどのような重みでいれるべきかなども問題となっている。
- **データの取得可能性と紐付けの難しさの問題：**教育面のビッグデータの解析では、複数のデータを組み合わせることに大きな期待が寄せられている [11)16)]。例えば、科目の履修状況や成績だけでなく、学習者の属性情報や入試の点数、出身校における成績や家庭環境、趣味等も解析に含めた方が解析精度は上がる。しかし、これらのデータを教育機関が保有していない場合もある上、取得可能あるいは保有していたとしても、これらが別々の部署やデータベースで管理されていて、これらを統合できない、あるいは紐付けができないことが多いことも指摘されている。
- **プライバシーと倫理の問題：**プライバシーとデータ使用に関わる倫理の問題も強く指摘されている [5)6)11)]。こうしたデータを取得すること自体がプライバシーの侵害であるという考え方があるのはもちろんのことであるが、仮に在学期間中はそれらデータを用いてきめの細かい学習支援を行ったとしても、学習者が卒業後にどの程度の期間、それらデータや解析結果を保有し、かつ利用に供するかの問題がある。保管するデータ容量の問題という以上に、こうした過去の学習記録が人生を通じてつきまとうことに対して疑義が呈されている。ある教育課程で、たまたま健康状態や人間関係等により学業面で振るわなかったとしても、次の教育課程に進んだり、就職したりしたときに、気分を切り替えリセットして、新しい人生に新しい気持ちで挑むという権利を人は有するべきであるし、それがあるから

こそ発展もありうるのに、過去の事実が常につきまとうことが人生に大きくマイナスに作用する危険性が危惧されている。また、そこまでいかなかったとしても、学習支援情報を学習者に全て知らせるべきであるか、また担当教員にどこまで知らせるべきかについても、慎重を要するという意見が出ている。他方、プライバシーや倫理を危惧する余り、データの提供を渋ると、適切な学習支援を得られず、教育格差が拡大する危険性も指摘されている。

・**学習支援を自動化して行うこと自体の適切性に関する問題**：LA は学習者の学習支援に役立つことが重要な目標となっているが、コンピューターでいくつかのパターンに応じて機械的に学習支援を行うことが果たして適切であるかについても疑義が呈されている。数学に弱い学生が心理学を専攻する際、必須である統計学の単位を落とす確率が高いことを過去の類似の学生のデータから割り出し、同学生の適性から心理学以外の例えば英文学や異文化理解などの専攻を勧めるといったことがなされているが、それが当該学生にとって長い目で見たときに本当に最適な進路であったのか、また人類にとってそのようにパターン化された行動を生み出すことが良いのかといったことが問題となっている。一方で米国のように、ドロップアウト率が高く、4 年以内に卒業する大学生は 39%、6 年以内に卒業する大学生は 59.2%（社会人学生等を除く、いわゆる大学入学適齢の 2006 年度入学者の、それぞれ 2010 年度、2012 年度卒業時の統計 [21]）という事態を改善することが喫緊の課題の場合、人手を割けないのであればコンピューターによるパターン化されたアドバイスでも良い結果を生むことも事実である。

（日本特有の問題）

・**e-ラーニングの普及不足による解析対象データの不足**：国内においては、e-ラーニングやオンライン教育が十分に浸透していない。統計上はオンラインで授業を行っている大学の割合は 39.3%、LMS を導入している大学は 57.2%であるが（2012 年）[22]、これは全学に一科目でも導入されていればカウントされるため、大きく水増しされていると推測される。運用が活発な大学においても、語学等一般教育の限定的な科目や ICT 教育等が好きな教員が実践している場合が多く、組織的な取り組みは皆無である。
日本ではこのように、LA の解析対象となるデータを取得できるインフラの整備・利用が大きく遅れているため、この分野の研究開発を伸ばすためにはまず e-ラーニング等オンライン教育を拡大することが大前提である。同時に日本はプライバシー等の問題から、教育機関が LA 研究者と協力することを躊躇うことが多く、これも解析対象となるデータが不足する要因となっている。

・**研究者、周辺産業の発達不足**：e-ラーニング等が全般にそれほど普及していないこともあり、これに関わる研究者や周辺産業の発達が他の先進諸国と比較して少ない。LA 等の研究者は一般に教育工学あるいは人工知能等の分野から取り組むことが多く、こうした基盤となる分野が十分に発達しないと、これをベースにデータ解析する LA 等にまで至らない。

・**研究者と教育提供者の断絶**：国内における LA 等の研究開発は解析対象となるデータの取得の難しさから、研究者が自身の提供する科目において e-ラーニング等に取り組み、そこで得たデータを解析することが多く、研究開発のスケールが総じて小さい。また教育提供主体の協力が得られた場合においても、LA 研究者の提供する解析結果が技術的すぎてそ

の意味するところが教育提供者に十分に理解されず、また逆に、教育提供側のニーズを研究者が十分にくみ取れず、教育や学習の改善につながらないことが多いことが指摘されている。e-ラーニングに関する研究開発が極めて活発な台湾などにおいては、数多くの研究者が地元の初等中等教育機関の協力を得て、共同でe-ラーニング・システムを開発したり、改善の工夫を行ったりしており、優れた研究開発につながる土壌が形成されている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・**Next Generation Learning Challenges：** Bill & Melinda Gates Foundationが、特に生徒の大学入学準備を図るための、テクノロジーを通じた教育革新について2011年に1000万ドルの資金を提供し、さらにWilliam and Flora Hewlett FoundationやEli and Edythe Broad Foundation も追加の資金提供をしている。米国はこうした巨大財団が、連邦政府とともに、全米の課題解決に乗り出すケースが近年多く、巨大財団の政策形成に関わる影響力の強さが指摘されている。

このイニシアチブにおいて LA も重点分野の一つとされており、初等中等教育段階ではInnovate EDU Inc.が、高等教育段階ではRio Salado CollegeとBryn Mawr Collegeが資金を得ている[23]。Rio Salado Collegeはアリゾナ州にあるコミュニティ・カレッジで、広域の学生を対象として遠隔教育が以前から展開しており、そうしたインフラをもとに今回のプロジェクトでは特に、低所得者の卒業率向上をターゲットとしたLAの研究開発を行い、実用化を進めている。なお、Rio Salado Collegeと次に説明するアリゾナ州立大学は近接している。

・**アリゾナ州立大学：**アリゾナ州では2000-2025年の間に人口が86%増加することが予想されており[24]、アリゾナ州立大学では”A New American University”という包括的な全学戦略を打ち立て、想定される高等教育人口の拡大に対応しようとしている[25]。産学連携等を通じた人員・施設の拡充等も想定されているが、それだけでは対応しきれないことから、教育面についてはオンライン教育を全学的に整備する方向性を打ち出している。世界最大規模の教育サービス企業であるピアソン社と協力し、同社に入学者募集から入学者管理、学習管理、学習支援等を全て任せ[26]、2009年に1200名程度であった受講生を2014年には1万名に拡大し、2015年には2.5万名達成見込み、2020年には10万名を受け入れ予定である。

高等教育人口の拡大に伴う学生が多様化によりドロップアウト率が現状以上に悪化することも懸念されるため、アリゾナ州立大学ではeAdvisingという仕組みを導入し[27]、履修科目の選定等も含め、過去の類似の学生のパターンから、どの科目であれば卒業に至る可能性が高いかを割り出しレコメンドするといった仕組み等も導入した。またリメディアル教育についてもアダプティブ・テクノロジーを用いてパーソナライズド学習を可能とするKnewton 社と協力し、数学やその他の科目について学習モジュールを開発、学生に提供している[28][29]。eAdvisingおよびこの先進的なリメディアル教育を通じて、ドロップアウト率の改善や、4 年より多くの期間を要していた卒業までの期間の短縮も見られた。アリゾナ州立大学は、オンライン教育の全学的導入も含めたこれらの取り組みにより、全米で最も先駆的な大学とされている。

・**スタンフォード大学 LyticsLab：**複数の学部基礎科目について、認知科学を用いた無償の

オンライン教材を高等教育機関向け開発した Open Learning Initiative をカーネギーメロン大学で率いた Candace Thille を 2013 年に引き抜き、大学院ゼミや研究会などを多数開催している。周辺シリコンバレーの IT 企業も参加しており、共同研究も活発に行われている。LA については Bill & Melinda Gates Foundation から資金提供を得て、2012-2014 年にかけて特別の WG（”The Learning Analytics Workgroup (LAW)”）が立ち上がった。LA に関わる米国の有識者 40 名前後の参加を得て、ワークショップやサマースクール（”Learning Analytics Summer Institute (LASI)”）を開催したり、LA に関わる各種の白書を作成したりした [30]。

スタンフォード大学の Lytics Lab で特筆すべきなのは、その研究開発内容だけでなく、解析対象となるデータの入手可能性である。この LyticsLab はスタンフォード大学のオンライン担当副学長室（”Vice Provost for Online Learning Office（VPOL Office)”）のもとにある。VPOL はスタンフォード大学におけるオンライン教育モジュールや MOOC の開発・提供を一手に担い、2011 年から 2014 年 5 月現在までにすでに 246 科目も提供をしている [31]。ここで蓄積されたデータは VPOL の管轄下にあるため、Lytics Lab の研究者や大学院生等がこれらデータを用いて研究をしたい場合は、VPOL が利用許諾や権利関係等の仲介をし、データ利用の便宜を図ることができる。この分野で優れた研究開発を行う上で肝要なのは質の高いデータを大規模に入手できることであり、スタンフォード大学ではそのような環境条件が整っていると言える。

- **edX 上の MOOCs「Data、 Analytics and Learning」**：注目動向というほどではないが、LA の第一人者で SoLAR の発起人である G. Siemens 他が LA 等の分野について解説する MOOCs。G. Siemens がカナダ・アタバスカ大学からテキサス大学アーリントン校に移籍したため、テキサス大学により提供されている。MOOCs は数万名の受講者、数千名の修了者を得ることが多いため、宣伝効果は大きく、ここで説明された体系が世界の流れとなる可能性はある。
- **欧州**：EU では第 7 次研究枠組み計画（FP7）のもと、LA や EDM に関連して既に 3 つのプロジェクトが走っている。１）LA と EDM の研究開発や実践を共有するためのコミュニティ形成のためのプロジェクト「The Learning Analytics Community Exchange（LACE）[12]」（2014.1-）、２）LA の解析用ツールを学習者および教育者に提供しようとする「LEA's BOX: A Learning Analytics Toolbox[13]」（2014.3-）、３）企業等の従業員が過去のパフォーマンスと自己学習の成果をもとに、現在直面している課題をリアルタイムに創造力をもって解決できるためのツールを提供しようとする「Mirror: Reflective Learning at Work[14]」である。
- **台湾・デジタル・ラーニング・イニシアチブ**：データ解析に特化している訳ではないが、台湾はデジタル学習に国策として力を入れ、初等中等教育から高等教育までを包含する「デジタル学習イニシアチブ」が教育部主導で推進されている。これはネットワークインフラだけでなく、「教育クラウド」やクラウド上に乗るアプリケーション「MOOCs」「モバイル学習」「デジタル読書」「デジタルチューター」「4G モバイルアプリケーション」なども含めて整備するものである。台湾の国立師範大学が e-ラーニングで進んでいることから、初等中等教育における教師のデジタル・リテラシーも高く、独自にソフト開発が可能であったり、e-ラーニング等の研究開発を行う大学の研究者との連携も進んでいたりする。

データ解析という観点では、「教育クラウド」を用いてアプリケーションを教育機関間で共有することが想定されており、解析対象となりうるデータが蓄積されつつある。またこの分野の研究者が国立中央大学ほか多くの大学にまたがって多数存在することから、台湾はこの分野で大きく伸びる可能性がある。

（６）キーワード

ラーニング・アナリティクス（LA）、エデュケーショナル・データマイニング（EDM）、教学 IR、インスティテューショナル・リサーチ（IR）、ビジネス・インテリジェンス（BI）、ヴィジュアライゼーション

（７）国際比較

以下の国際比較表は、本分野に関わる各種の取り組み事例とともに、LA および EDM に関わる論文サーベイにより行った。図 3.10.3、図 3.10.4 は九州大学情報基盤研究開発センター廣川研究室の検索システムにより得た、学術論文にみる本分野の俯瞰図である。キーワードとともに、国および著者の関係性をマインドマップで示してある。なお、検索に用いた論文は SCOPUS に含まれる LA および EDM に関わる 2200 件の論文である（一部他のデータベースより補完した論文あり）。

図 3.10.3 LA および EDM 分野における学術論文の KW および国の関係性と論文数

（出典）九州大学情報基盤研究開発センター廣川研究室の検索システムによる
使用データ：SCOPUS 等に含まれる LA および EDM に関係する論文 2200 件

図 3.10.4 LA および EDM 分野における学術論文の KW および著者の関係性と論文数

出典）九州大学情報基盤研究開発センター廣川研究室の検索システムによる
使用データ：SCOPUS 等に含まれる LA および EDM に関係する論文 2200 件

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	・2004-2014年にこの分野で投稿された論文数は53件あり、世界第10位である。ただし、米国が827件でダントツ一位で、その後にスペイン（163）、イギリス（163）、ドイツ（116）、カナダ（114）、豪州（102）が続き、少し離れて中国（84）、インド（80）、そしてまた少し離れてオランダ（54）、日本（53）、台湾（50）という順番である。 ・3件以上論文を執筆している研究者が7名で、うち5名が同じ研究グループで基本的にEDMの分野である。その他の研究者については、それぞれ個人ベースで個別のテーマを追っている。 ・ただし、この分野をテーマとした特別セッションが学会等において組まれるなど、興味関心の芽生えは見られる[32]。また、この分野の動向を紹介する試みは行われている[33][34]。 ・なお日本は、もともとe-ラーニングやオンライン教育等の実践や研究が他国に比べて立ち遅れているなか、そこから取得/解析できるデータが少なく、この分野が発展する障害となっている。
	応用研究・開発	△	↗	・（同上）
	産業化	◎	→	・この分野を高等教育に限定すると、産業化はほとんど行われていないに等しい。オンライン教育を積極活用する株式会社大学のBBT大学やサイバー大学は、学生の履修や学習状況確認のためのシステムを導入しているが、これら大学以外ではキャリア教育やジェネリック・スキルの開発、リメディアル教育、そしてLMS等の提供において民間企業が若干、入り込みつつある程度である。 ・一方、この分野を初等中等教育に拡大すると、受験産業が発展している日本においては、生徒一人一人の学力判定や志望校への合格確率の算出、適切な志望校の提示等など、研究開発だけでなく実用化も含め、既に成熟しているとも言える。
米国	基礎研究	◎	↗	・すべての面で世界をリード。この分野をけん引するG. SiemensやR.S. Bakerもいる一方、LAやEDMの要素技術を研究・開発する研究者も充実している。 ・研究グループとしても、Open Learning Initiativeで有名なカーネギーメロン大学、同大学からC. Thilleを引き抜きリティクス・ラボを擁するスタンフォード大学、社会と技術の関係を探るということを研究の中心におき、教育面の研究ではR.S. J.d. Bakerを擁するWorcester Polytechnic Institute の Department of Social Science and Policy Studiesなど充実している。MOOCsにより、edXを設立したMITやハーバード大学も、MOOCsデータのビジュアル化やこれを用いた教育・学習支援に乗り出している[35]。
	応用研究・開発	◎	↗	・（同上）。 ・米国における深刻なドロップアウト対策のために、研究開発という意味ではなくても、全学的にLAやEDM、IR等を用いた学生の学習支援に乗り出す大学は多く、アリゾナ州立大学などは全米でも有名である。また、こうしたドロップアウト率削減対策についてオバマ大統領も積極的に乗り出しており、ゲイツ財団やルミナ財団等も多額の資金を提供している。
	産業化	◎	↗	・アダプティブ学習あるいはパーソナライズド学習のためのプラットフォームを提供するKnewton社は有名である。 ・その他、BlackboardやCheggなどのLMSプラットフォーム等を提供する企業もこれに乗り出している。Pearson社も、学生のエンロールメント・マネジメントから始まり、学習支援、卒業までの一連のサービスを手がけ、このなかで技術開発やテクノロジーを用いたサポートの提供も行っている。

欧州	基礎研究	○	↗	・欧州では、スペイン（163）、イギリス（163）、ドイツ（116）、オランダ（54）などの論文数が多い。特にEDMの分野をけん引してきたRomero C.とVentura S.の業績が突出し、次にLAの分野をけん引するR. Fergusonの業績が突出する。
	応用研究・開発	○	↗	・EUにおいて、１）コミュニティ形成のため「The Learning Analytics Community Exchange（LACE）[12]」、２）LA解析用ツールを提供する「LEA's BOX: A Learning Analytics Toolbox、[13]」、３）企業等向けの学習ツール「Mirror: Reflective Learning at Work[14]」などのプロジェクトを2014年から開始している。
	産業化			・（詳細は不明） ・ただし、EUがスポンサーする企業等向けの学習ツール「Mirror: Reflective Learning at Work[14]」において複数の協力企業が名乗りを上げている[36]。
中国	基礎研究	△	↗	・LAとEDMに投稿された論文数という観点では、日本の1.6倍程度であるが、2011年から論文数の急成長が見られ、かつ2013年以降はそれまではデータマイニング等情報科学の技術的論文が主流であったのに対して、e-ラーニング・システムで取得されたデータ等を用いた、より教育の現場に近い論文が見られるようになっており、これからの伸びを感じさせる。 ・特別に論文数の多い研究者あるいは研究グループは存在せず、論文数3件以下の研究者が100名以上存在するような状況である。
	応用研究・開発	△	↗	・（同上）
	産業化		↗	・詳細は不明であるが、中国においてビッグデータに向けての注目は大きく、教育面も含め大きなイベントが開催されるなど、これに向けての動きは活発化している模様である[37]。
韓国	基礎研究	△	↗	・意外なことではあるが、LAとEDMに投稿された論文数を見ると、日本は2004-2014年に53件あるのに対して、韓国は17件しかない。韓国はe-ラーニングやサイバー大学なども活発で、国立・韓国教育学術情報院（KERIS）なども設置されているが、e-ラーニングの提供は活発でも、そのデータの活用やオンライン上の学習支援という観点ではそれほど進んでいない模様である。 ・米国中心のジャーナルに投稿がなされていないということも考えられるが、現地の研究者にヒアリングしたところ、実際、それほど研究はなされていない模様であった。
	応用研究・開発	△	↗	・（同上） ・ただし、韓国は日本と違い、オンライン教育やLMS等が普及しているため、データ解析を開始すれと一気に伸びる可能性はある。 ・また、ソウル大学内には2014年4月にビッグデータ研究所が設置され、これは様々な分野に対応できるように学内横断的に各学部から教員が兼任で担当をし、一方で研究資金を政府や産業から、それぞれのニーズに対応するかたちで得るという仕組みを取っているため、研究開発をする体制は整備されつつある。同所長のサン・キュン・チャ教授は教育分野のビッグデータについても、2014.10の訪韓時に高い関心を示していた。
	産業化			・（詳細不明）

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Siemens, G., R. S. Baker (2012) “Learning Analytics and Educational Data Mining: Towards Communication and Collaboration”
http://www.columbia.edu/~rsb2162/LAKs%20reformatting%20v2.pdf
2) Baker, R., G. Siemens “Educational Data Mining and Learning Analytics”
http://www.columbia.edu/~rsb2162/BakerSiemensHandbook2013.pdf
3) SoLAR (2011) “Open Learning Analytics: an integrated & modularized platform”
http://solaresearch.org/OpenLearningAnalytics.pdf
4) 中央教育審議会（2008)「学士課程教育の構築に向けて（審議のまとめ)」
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2013/05/13/1212958_001.pdf
5) Picciano A.（2012)” The Evolution of Big Data and Learning Analytics in American Higher Education”
http://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ982669.pdf
6) UNESCO Institute for Information Technologies in Education (2012) “Policy Brief: Learning Analytics”
http://iite.unesco.org/pics/publications/en/files/3214711.pdf
7) Eisenberg, M. and Fischer, G.（2014） “MOOCs: A Perspective from the Learning Sciences" in J. L. Polman et al. (Eds.), Learning and Becoming in Practice: 11th International Conference of the Learning Sciences (ICLS), Boulder, pp. 190-197
http://l3d.cs.colorado.edu/~gerhard/papers/2014/ICLS-MOOCS.pdf
8) Siemens, G., Dillenbourg, P., et al.（2014） "Where Are the Learning Sciences in the MOOC Debate?" in J. L. Polman et al. (Eds.), Learning and Becoming in Practice: 11th International Conference of the Learning Sciences (ICLS), Boulder, pp. 15-17
http://l3d.cs.colorado.edu/~gerhard/papers/2014/ICLS-panel.pdf
9) Chatti, M.A., et al. (2012) ” A reference model for learning analytics”, Journal International Journal of Technology Enhanced Learning, vol 4 issues (5/6), pp. 318-331
http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2434498
10) Hirsh, L., DELTA (2013) ” Learning Analytics - Annotated Bibliography”
http://delta.ncsu.edu/assets/Learning_analytics_annotated_bibliography.pdf
11) U.S. Department of Education, Office of Educational Technology (2012) “Enhancing Teaching and Learning Through Educational Data Mining and Learning Analytics: An Issue Brief”
12) EU（2014)” The Learning Analytics Community Exchange（LACE)”
http://www.laceproject.eu/lace/
13) EU（2014)” LEA's BOX: A Learning Analytics Toolbox”
http://leas-box.eu/
14) EU（2014)” Mirror: Reflective Learning at Work”
http://www.mirror-project.eu/aboutus/about-mirror
15) Romero, C. S. Ventura (2007) “Educational data mining: A survey from 1995 to 2005”,

Expert Systems with Applications, Volume 33, Issue 1, July 2007, pp. 135-146
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417406001266

16) Ferguson, R. (2012) "Learning analytics: drivers, developments and challenges", International Journal of Technology Enhanced Learning 4 (5/6) pp. 304-317
http://oro.open.ac.uk/36374/1/IJTEL40501_Ferguson%20Jan%202013.pdf

17) Online Learning Consortium（2012)" Changing Course: Ten Years of Tracking Online Education in the United States"
http://onlinelearningconsortium.org/publications/survey/changing_course_2012

18) National Center for Education Statistics（2011)" Distance Education Courses for Public Elementary and Secondary School Students: 2009-10"
http://nces.ed.gov/pubsearch/pubsinfo.asp?pubid=2012008

19) Andrew Martin and Andrew W. Lehren (2012) "A Generation Hobbled by the Soaring Cost of College," New York Times,
http://www.nytimes.com/2012/05/13/business/student-loans-weighing-down-a-generation-with-heavy-debt.html?pagewanted=all&_r=o

20) Ifenthaler, D. et al (2014) "−Introduction to the Inaugural Special Issue of Technology, Knowledge and Learning", Tech Know Learn vol 19, pp. 121-126
http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10758-014-9228-2

21) National Center for Education Statistics（2013)" Table 326.10. Graduation rates of first-time, full-time bachelor's degree-seeking students at 4-year postsecondary institutions, by race/ethnicity, time to completion, sex, and control of institution: Selected cohort entry years, 1996 through 2006"
http://nces.ed.gov/programs/digest/d13/tables/dt13_326.10.asp

22) 平成 25 年度文部科学省先導的大学界各推進委託事業「高等教育機関等における ICT の利活用に関する調査研究」
http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/itaku/1347642.htm

23) Next Generation Learning Challenges "Learning Analytics"
http://nextgenlearning.org/topics/learning-analytics

24) Arizona Board of Regents（2008） "2020 VISION: The Arizona University System Long-term Strategic Plan 2008-2020"
http://usenate.asu.edu/files/ABOR_2020.pdf

25) Arizona State University（2008） "A New American University"
http://newamericanuniversity.asu.edu/docs/NAU_Dec10.pdf

26) Buzz Feed News（2014)" The New American University: Massive, Online, And Corporate-Backed"
http://www.buzzfeed.com/mollyhensleyclancy/the-new-american-university-massive-online-and-corporate-bac#27mjga3

27) The Chronicle of Higher Education（2012)" College Degrees, Designed by the Numbers"
http://chronicle.com/article/College-Degrees-Designed-by/132945/

28) Inside Higher Ed（2013)" The New Intelligence"

https://www.insidehighered.com/news/2013/01/25/arizona-st-and-knewtons-grand-experiment-adaptive-learning

29) Campus Technology（2014）” The Great Adaptive Learning Experiment”
http://campustechnology.com/Articles/2014/04/16/The-Great-Adaptive-Learning-Experiment.aspx?Page=1

30) Lytics Lab（2014） “LAW Report”
http://lytics.stanford.edu/law-report/

31) Stanford Online（2014）” Stanford Online 2013 in Review−Harnessing New Technologies and Methods to Advance Teaching and Learning at Stanford and Beyond”
http://web.stanford.edu/dept/vpol/vpol-files/2013_Report/Stanford_Online_2013_In_Review.pdf

32) 日本教育工学会第 29 回全国大会（2013）「課題研究 K03-2-103 教育・学習支援システムにおける Learning Analytics 的アプローチ」
https://www.jset.gr.jp/taikai29/program/program_session.php?tp=K

33) 阿部圭一（2014）「Column：Learning Analytics とは」情報処理学会『ぺた語義』第 36 回
http://www.ipsj.or.jp/magazine/9faeag0000005al5-att/5505.pdf

34) 安武公一（2012）「ライフログの教育活用における海外動向 −Learning Analytics and Knowledge (LAK) 2012 −Learning Analytics and Knowledge (LAK) 2012 報告−」サイエンティフィック・システム研究会 2012 年度教育環境分科会 第 2 回会合
https://www.ssken.gr.jp/MAINSITE/download/newsletter/2012/20121024-edu-2/lecture-02/SSKEN_edu-2012-2_yasutake_paper.pdf

35) MIT News（2014）” MIT and Harvard release working papers on open online courses”http://newsoffice.mit.edu/2014/mit-and-harvard-release-working-papers-on-open-online-courses-0121

36) EU（2014）” Mirror: Reflective Learning at Work, Consortium Partners”
http://www.mirror-project.eu/aboutus/consortium-partners

37) 新浪教育（2013）「新浪 2013 教育盛典：中国教育进入大数据时代」
http://edu.sina.com.cn/l/2013-11-28/1731236680.shtml

3.10.8　社会インフラとビッグデータ

（1）研究開発領域名

社会インフラとビッグデータ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギー、交通、都市、医療、金融など社会インフラを、IT を前提として再設計する動きが加速している。ここでキーになるのは、大量のセンサーから発生するビッグデータの解析であり、このために必要な技術・手法をカバーする。センサーやネットワークなど汎用の基盤技術から、分野特有の応用技術、また社会受容のための文理融合研究など、幅広い研究開発領域となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

エネルギー、交通、通信、都市、医療、金融、教育、社会保障制度など現在の社会システムのほとんどは、IT やインターネットが普及する前にデザインされたものである。IT が普及し始めてからほぼ 60 年の間に、電力の検針と支払い、鉄道や航空機の予約、オンラインバンキングなどに IT が取り入れられてきたが、これらは基本的に今までのデザインを踏襲しながら、そのプロセスの一部を IT によって効率化したものと言える。これらは、より複雑化し、グローバル化によってスケールする社会において、必要なものであり、これからも多くの IT 化が進むだろう。しかしながら、これらの社会システムを、ビッグデータを前提として再設計するならば、はるかに効率が良く、安心・安全で、社会の要請により応えるシステムになる可能性があるだろう [1)]。社会システムを根本から変革する可能性のあるという意味で、本研究開発領域には、社会的に大きな意味があり、多くのステークホルダを巻き込んだ、議論が必要である。

技術の観点から社会システムのビッグデータ化を見ると、CPS (Cyber-Physical Systems)[2)]あるいは IoT（Internet of Things）のような言葉で特徴づけられる。社会のあらゆる要素にセンサーが埋め込まれ、情報の流れがスムーズになることによって、より効率的で適切な判断ができるようになる。CPS の世界では、センサーからのリアルタイムのデータが大量に発生する。このため、CPS における IT は、必然的にビッグデータ処理に主眼を置いたものになる。

［これまでの取り組み］

1. スマート・グリッド

電力網は、IT を導入することによって効率の大きな向上が期待できる社会インフラである。特に、今後風力・太陽光などの自然エネルギーが電力グリッドに接続されるようになると、これらの不安定な電力ソースを無駄なく利用することは、複雑な最適化と制御の問題になり、ビッグデータの役割が大きい。例えば、デンマークで行われている EDISON プロジェクトでは、風力発電機で生成された余剰電力を一時的に電気自動車に蓄えることによって、生成された電力利用の効率化を図ろうとしている。

2. 交通システム

道路交通は、IT の利用によって、社会制度を含めた大きな変革が期待できる分野である。ロンドンや、ストックホルムなどで行われている道路課金の仕組みは、個別の車両が課金エリアに入ったことをセンサーで検出できるようになって、初めて可能になった。もし、個々の車両の行動の把握とその予測は、リアルタイムなビッグデータ処理であり、これが実現できれば、きめ細かい課金の調整など、柔軟な交通政策を実現できる。

3. スマートシティー

アブダビ首長国で行われている、Masdar プロジェクトは、人口 9 万人の都市をゼロから設計することによって、二酸化炭素を排出しない街をつくろうという壮大な試みである。都市には様々な活動があり、それらを総体的にコントロールできなければ、都市全体のグリーン化はできない。人々の移動や活動に基づく交通・エネルギーの予測を行い、また、気象など、非常に多様なソースからのビッグデータを統合し、全体状況を把握し、需要や生産の将来を予測し、最適なエネルギーの生成・分配計画を立てる必要がある。

ロンドンやニューヨーク、シカゴなどは、ビッグデータを用いて犯罪捜査や犯罪防止に役立てている。防犯カメラなどの大量のセンサーデータと、犯罪の発生データから犯罪を予測し未然に防止したり、センサーデータに基づいてテロリストを早期に発見したりする試みである。

4. センサーとしての人々の活動

社会インフラのセンサーとしては、人間活動に基づくものがあってもよい。国内の事例で面白いのは、コマツ製作所の KOMTRAX である。これは、コマツ製作所の建機に内蔵されている GPS とセンサーから、統合的な車両管理を行うシステムである。このセンサーデータは、単に建機の車両管理に使えるだけでなく、全世界 10 万台を超える建機からの信号を統合することによって得られたビッグデータにより、世界各地域の経済活動指標を得るなど、新たな利用も模索されている。

また、発熱などの検索キーワードからインフルエンザの流行を検出する Google の Flu Trend や、メンバーからの通報によって、きめ細かい気象情報を集めて天気予報に利用する、ウェザーニュース、スマートフォンなどモバイル機器の位置情報を利用して人の混雑状況を予測する Skyhook 社の SpotRank なども、広い意味でのビッグデータに基づく社会インフラと言えるだろう。

［今後必要となる取り組み］

社会インフラは多くの要素技術の統合であり、個別にすべてを網羅することはできないので、特に必要と思われる 4 点の技術について述べる。

1. デバイス・通信・位置情報

ビッグデータに基づく社会インフラには、まずデータを集める仕組みが必要である。これには、センサーデバイス技術とそのセンサーからデータを送る通信技術を含む。センサーは、道路、橋梁やビルなど固定的な構造物に設置されるもの、自動車やウェアラブルセンサーのように移動体に伴うものがある。末端のセンサーで使われる通信は、多くの場合、アドホックネットワークなどの無線通信である。これも非常に低消費電力でかつ低コストなものが求められる。移動体に設置されるセンサーでは、特に位置情報に関するセンサー技術が重要で

ある。自動車等では、GPS が普及しているが、建物内や地下街にいる人の位置情報の把握などについては、まだまだ十分とは言いがたい。

2. アクティブセンサーとしてのロボティクス

ロボティクスを、アクチュエータを持ったセンサープラットフォームと考えると、このアクチュエータを利用して現実世界に影響を与えながら観測することで、パッシブなセンサーでは得られない情報を得ることができる。例えば、交通においては、交通信号のタイミングを変えてドライバーの反応を計測することにより、個々の車両のより精緻なモデル化・予測ができ、それによって、より精密な交通の把握が可能になる。Web マーケティングなどでは、A/B テスティング、品質管理などでは実験計画として知られている手法である。ロボティクスにおいては、周囲の状況を把握するのに実際に動いてみて、あるいは触ってみるということが一般的に行われているが、センサーネットワークにおいてはまだ普及しているとはいえない。

3. オンライン機械学習

社会インフラから発生するビッグデータで特徴的であるのは、それらのほとんどすべてが時系列データであり、それをオンラインで処理しなければならない点である。電力や交通など多くの場合、リアルタイムのセンサーデータに基づいて予測モデルを常にアップデートし、将来の予測を行わなければならない。新たなデータに基づいて逐次的にモデルを更新する技術には、オンライン学習やデータ同化があり、これらの分野の進歩は目覚ましい。これらの技術が上述のアクティブセンサーと結びついて、動的に最適な観測計画を立てられるようになるのは、これからであろう。

4. アーキテクチャーとプログラミングモデル

IT の応用分野と見た時に、社会インフラのビッグデータはユニークなチャレンジとなる。センサーからは大量のデータが発生するが、それらは必ずしも信頼できるものではない。センサーの取り付け不良、経年変化、環境の変化などあらゆる理由でノイズの乗ったものになる [3]。また、センサーだけでなく通信などの障害により欠測値が出ることも多い。さらに、センサーからの生データをすべてクラウドなどのサーバーに送ることは、データ量の点で現実的でない。すなわち、ほとんどのデータがネットワークのエッジで蓄積・処理されるエッジ・ヘビー・データ [4]のアーキテクチャーが必要とされるだろう。

（4）科学技術的・政策的課題

社会インフラに関する議論は、自治体などの政府関係者、電力会社などの事業者、それに利用者たる市民や企業などの多くを巻き込んだ議論にならざるを得ない。このため、科学技術的課題、政策的課題は、どちらも包括的な議論の必要なものである。

1. 分野横断・システム思考・ライフサイクル

社会システムは単独の技術や手法だけで実現するものではない。多くの要素技術を統合し、継続的に運用していく包括的な視点が必要となる。このため、ビッグデータに基づく社会インフラの推進のためには、情報分野の研究者だけでなく、交通・都市・医療などの個別分野の研究者、また社会インフラの受益者に与える影響などを考えると、社会科学の研究者との分野横断的な研究開発体制を取らざるを得ない。

また、我が国においては、個別技術は重視するがシステム思考に関してはその重要性が十

分に理解されているとは言い難い。特に、社会インフラにおいては個別技術の優位性ではなく、システム全体のバランスのとれた設計をすることが肝要である。このため、システム科学の研究を推進すると同時に、システム的思考のできる研究者・開発者の育成が急務である。

さらに、社会インフラは設計されてから何十年も利用されるのが普通であるので、その運用・ライフサイクルに関する手法の研究開発が欠かせない。社会インフラがビッグデータ化するということは、社会インフラがソフトウエア化するということであり、そこではシステムの仕様が刻々と変化していくということでもある。今までの設計・製造と運用が分離された「ものづくり」パラダイムではなく、DevOps など IT で培われた継続的運用のパラダイムを社会インフラに持ち込む必要がある。

2. オープンデータとプライバシー保護

政策・制度的な観点からは、社会インフラでビッグデータを利用することの最大の困難は、データの利活用をいかに促進するかである。特に、プライバシーに関する議論は十分に行わなければならない。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［新たな技術動向］

1. ディープラーニング

機械学習の分野では、コンピュータの処理速度の向上によって初めて可能になった多段ニューラルネットワークによる機械学習手法「ディープラーニング」[5]が注目を浴びている。ディープラーニングの応用は特に画像理解の分野でめざましく、センサーから得られた画像から、そこに写っている車や人、その他の物体を認識することが高精度で行えるようになっている。

2. ストリーミングビッグデータ向け処理基盤

社会インフラに埋め込まれたセンサーから生成されるビッグデータは必然的にストリーミングデータであり、これらのほとんどはオンライン処理されなければならない。このための処理基盤として、CEP (Complex Event Processing)と呼ばれるイベント駆動型のプログラミングモデルがある。オープンソースでは、Apache S4 があるほか、IBM、Oracle なども CEP 製品を出荷している。

CEP はルールに基づく演繹的処理を行うものだが、帰納的な処理を行う基盤として、上述のオンライン機械学習がある。分散オンライン機械学習を行う日本発のプラットフォームとして、オープンソースの Jubatus[6]がある。

［注目すべきプロジェクト］

NEDO の IT 融合プロジェクト

ビッグデータ処理に基づく社会インフラとして注目すべきプロジェクトが、自動運転に関するものである。Google の自動運転車を始め、各国の自動車会社が力を入れている。

（６）キーワード

センサーネットワーク、アドホックネットワーク、ディープラーニング、圧縮センシング、オンライン機械学習、CEP、高効率インバーター、電力変換、超高圧送電、HVDC

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	大規模データベース、機械学習、データ同化などの基礎研究において、世界レベルの研究がある。
	応用研究・開発	○	→	オンライン分散機械学習フレームワークJubatusをいち早くオープンソースで世に出しており、この分野では一定の存在感がある。NEDOのIT融合プロジェクトは2年で打ち切りになった。柏の葉キャンパスシティプロジェクトなどの実証実験は行われているが、注目度はあまり高くない。
	産業化	△	→	日立製作所などが積極的だが、大きなビジネスとしてはまだ育っていない。オープンデータに関しては流山市などの一部の自治体が取組[7]を始めているが、まだ大きな流れにはなっていない。国レベルでは、総務省のe-Statがあるが、統計データであり、個別データの利用促進はまだ緒についたばかりである。
米国	基礎研究	◎	→	機械学習、 CPSなど広い分野で底力のある基礎研究を続けていて、層は厚い。ディープラーニングや圧縮センシングなどの新しいアイデアも米国発である。
	応用研究・開発	◎	→	CPS、ビッグデータではそれぞれNSFが巨額の研究資金を投じている。Googleは自動運転車を通してそのビッグデータの知見を社会インフラに適用しはじめている。
	産業化	◎	→	GEのIndustrial Internetなど、インフラ系産業がビッグデータに乗り出している。また、CISCO、 IBM、 Intel、 OracleなどIT系ベンダも、IoTに力を入れていて、CEPなどのプロダクトをいち早く商業化している。
欧州	基礎研究	◎	→	
	応用研究・開発	○	↗	FP7
	産業化	◎	→	ABB、 シーメンスなどのインフラ系産業が強い
中国	基礎研究	○	↗	学会でのプレゼンスは急速に増えている。
	応用研究・開発	○	↗	北京市の人流データ(Microsoft) 吉林市、ビッグデータを活用した渋滞予測・信号制御シミュレーションの実証実験(NTT Data)
	産業化	△	↗	インフラ系産業の成長はまだこれから。したがって、そこにおけるビッグデータ利用にも時間がかかるものと思われる。
韓国	基礎研究	△	↗	
	応用研究・開発	△	↗	松都（ソンド）市におけるスマートシティーの取組
	産業化	△	→	住民登録番号が普及していて、個人のマッチングがとりやすい。スマホは競争力あるが、インフラ系は？

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) McKinsey Global Institute, Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity, http://www.mckinsey.com/insights/mgi/research/technology_and_innovation/big_data_the_next_frontier_for_innovation, 2011.
2) The National Science Foundation, "Cyber-physical systems (CPS): Program Announcements & Information," http://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf08611, 2008.
3) Candès, Emmanuel J.; Romberg, Justin K.; Tao, Terence (2006). "Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements". Communications on Pure and Applied Mathematics 59 (8): 1207.
4) Daisuke Okanohara, Shohei Hido, Nobuyuki Kubota, Yuya Unno, and Hiroshi Maruyama, “Krill: An Architecture for Edge-Heavy Data,” Third Workshop on Architectures and Systems for Big Data, Tel Aviv, June, 2013.
5) Bengio, Yoshua (2009). "Learning Deep Architectures for AI". Foundations and Trends in Machine Learning 2 (1).
6) http://jubat.us/en/
7) 柏の葉スマートシティ, http://www.kashiwanoha-smartcity.com/

３.10.９　オープンデータ

（１）研究開発領域名

オープンデータ

（２）研究開発領域の簡潔な説明

オープンデータとは、最小限の制約のみで誰でも自由に利用、加工、再配布ができるデータのことである。インターネットの普及に伴い、各分野でデータの利活用が行われるようになっているが、特にインターネットとの親和性が高いデータ公開のあり方として前述のような定義がなされている。オープンデータにおける公開の方法は、政策面、法律・社会制度面、技術面において整備される必要があり、それぞれの分野において解決すべき課題があり、これが研究テーマである。政策面では公的組織や学術組織におけるオープンデータの位置づけや制度化が課題である。法律・社会制度面では、オープンデータのためのライセンスの確立が課題である。技術面では、再利用性を高める機械可読フォーマットやその処理、また活用のプラットフォームなどが課題である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

オープンデータという概念はいくつかの異なる領域での活動が収斂する形で現在ある。ひとつは政策としてのオープンガバメント（開かれた政府）を実現するための 1 方策として現れている。アメリカのオバマ大統領は電子政府のあり方として 2009 年 12 月に Open Government Directive を発表して、アメリカ政府がオープンガバメントを進めることを宣言した。このオープンガバメントは主に透明性（Transparency）、参加（Participation）、協同（Collaboration）の３つの政策からなる。この中で特に透明性の実現には政府が盛っている情報をできるだけ生のまま公開することが必要であると考え、これをオープンデータとして実現するとした。Web2.0 を提唱したティム・オライリーはこの考えを単に Web が我々の生活世界が変わるだけでなく、政府も同じように変わるべきだととらえ、Goverment2.0 を提唱したことと軌を一にしており、彼は Government 2.0 と読んだ。実際、アメリカ政府は data.gov をというサイトを立ち上げ、そこで様々なデータを公開していった。これは政策面から定義されるオープンデータである。

一方、オープンソースソフトウエアは Linux を初めとする数々の社会的に重要なソフトウエアを生み出し、技術者において基本的な考え方として広く受け入れられてきた。この考え方の延長にソフトウエアだけでなくデータもオープンになるべきだと考えるようになった。データはだれでも使えて再利用できるべきだと考える。これは技術から定義されるオープンデータである。また、オープンソースソフトウエアに関わる人々が実際にオープンデータの活動にも関わることもできてきた。

これとは別に学術界では学術成果は社会で広く共有すべきであるというオープンアクセス（OA）という考え方が近年広まってきた。これは有料でしか読めない論文では学術成果は共有できないので、自由に読めるようなオープンな形で論文を公表すべきだという考え方である。有名なものとしてはブダペスト・オープン・アクセス・イニシアチブで、これは 2002 年に発表されたもので、学術文献をインターネット上で自由に利用できるようにすることを目的とした宣言である。学術論文は特にこの OA の方向で、無料で自由に閲覧できる

という方向に進んでいる。さらには近年のデータ科学の発展に伴い、研究成果は単に文献としての論文ではなく、データとして公開・利用するという方向に向かっており、オープンデータと同じ方向にある。

現在のオープンデータに関わる活動は研究から社会まで多様なセクターの人を巻き込んだ複合的な活動である。これを俯瞰するのは容易ではないが、ここでは政策、技術、コミュニティの３つの視点からまとめる。

（３－１）政策

アメリカおよびイギリスが先行している。アメリカは最初に政府のオープンデータポータル data.gov を公開している。イギリスはそのあとに data.gov.uk を開設している。ただし、そのあとイギリスは国を挙げてオープンデータに積極的に取り組んでいる。特に Open Data Institute を産官で設立して、国内外でのオープンデータを推進している。ヨーロッパは EU が公共セクター情報(Public Sector Information)の再利用について 2000 年前半から取り組んでおり、歴史は長い。日本は 2012 年に内閣官房 IT 戦略本部が「電子行政オープンデータ戦略」を発表している。

（３－２）技術

オープンデータに関する技術開発はアカデミア研究とオープンソースコミュニティにおける開発と標準化の３つに大別されるが、相互に関係し合っている。アカデミア研究では主にセマンティック Web の分野で行われている。特に高可用性に有用な Linked Open Data (LOD)/Linked Data はこの分野である。LOD に関係する技術としては、RDF(Resource Description Framework)、 RDFS(RDF Schema)、 OWL(Web Ontology Language)といった記述言語、問い合わせ言語 SPARQL、RDF データベースマネジメントシステム（triple store）などがあげられる。これらは多くは World Wide Web Consortium (W3C)に標準として提案、採択されている。

LOD に関しては欧州の研究グループが特出している。中でもドイツの研究者、研究グループが活発である。EU の IST 7th Framework では多くのセマンティック Web 関連のプロジェクトがあり、研究開発を進めている。重要なものでは、LOD プロジェクトや LOD2 プロジェクト [1)]がある。LOD2 プロジェクトでは LOD のライフサイクル（生成から蓄積、利用など）を支える技術・ソフトウエアを開発している。Wikipedia を LOD 化した DBpedia やその利用ツール DBepdia Spotlight、Silk などがこのグループおよびその周囲で作られている。

オープンデータに関わるソフトウエア開発はほとんどがコミュニティベースで行われている。特にイギリスに本拠をもつ Open Knowledge Foundation (OKF)は様々なオープンデータ関連のソフトウエア開発の中心となっている。例えば、データカタログサイトのソフトウエア CKAN や税金の可視化の openspending.org などがその例である。

（３－３）コミュニティ

このような政府の動きおよび技術開発をつなぐのに重要なのがコミュニティである。主に非営利組織を母体に技術者や市民を募り、オープンデータ化の推進や利用促進の活動を行っている。イギリスでは先にあげた OKF が組織としては著名である。日本でも OKF Japan やリンクト・オープン・データ・イニシアチブ、Linkdata といった組織が活動をしている。例えば、これらはハッカソン、アイデアソン、コンペティションなどを企画、運営し、オー

プンデータを広める活動をしている。

（４）科学技術的・政策的課題

・各国において政府自身のオープンデータ政策が大きな要素となる。よいオープンデータ政策がオープンデータに関わる研究活動を活性化しうるし、また逆によい研究活動は国のオープンデータ政策を左右する。例えば、イギリスは Tim Berners-Lee がオープンデータ政策に関わっており、ODI 設立に至り、また ODI がオープンデータ政策に影響を与えている。
・Linked Open Data はまだ early adaptor 的位置づけでそれほど一般化していないが、オープンデータの技術として期待されている（他に対抗的技術はない）。欧州では引き続き研究投資は続けられる。ここにどうキャッチアップするかが課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・RDA(Research Data Alliance)は科学におけるデータ共有がテーマであるが、オープンデータとも強く関わる。RDA の動きに注目する必要がある。
・イギリスの ODI は各国に Node という形で関連組織を増やしている。日本では大阪、アジアでは他にはソウルにあり、ODI の影響に注意が必要である。
・IBM の Watson も Web 上のデータを使っており、オープンデータと近い位置にある。今後、つながってくることが予想される。

（６）キーワード

オープンフォーマット、オープンライセンス、Linked Open Data、Linked Data、セマンティック Web

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	セマンティックWeb研究は一通りあるが、オントロジー研究以外は、相対的に弱い。
	応用研究・開発	△	↗	これまでは散発的であったが、多くの人が興味を持ち始めている。
	産業化	△	↗	コミュニティ活動は盛んになっている。これからは実用化事例も期待できる。
米国	基礎研究	○	→	人工知能研究やWeb研究の強みがあるので、興味深い研究もでてくるが、全体としての動きにはなっていない。
	応用研究・開発	○	→	オープンソースのコミュニティとの連携が強み。
	産業化	◎	↗	ビジネス化の例がいくつかできつつある。
欧州	基礎研究	◎	↗	セマンティックWeb分野の研究の本拠。EUのISTプロジェクトで多くの研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	OKF主導によるソフトウエアやサービスが多数生み出されている EuropeanaのLOD版といった公的セクターがオープンデータ化を産官学で進めている
	産業化	◎	↗	英国のODIを中心に産業化がなされている。
中国	基礎研究	△	→	セマンティックWebの研究は少しある。
	応用研究・開発	×	→	政治体制的にオープンデータはそぐわない
	産業化	×	→	政治体制的にオープンデータはそぐわない
韓国	基礎研究	△	→	セマンティックWebの研究は少しあるが、特出するものはない。
	応用研究・開発	△	→	特段の活動は見受けられない。
	産業化	△	↗	ソウル市の例など実用的な展開があるが、まだ点的広がり。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）http://lod2.eu/

3.10.10　著作権とビッグデータ

（1）研究開発領域名

著作権とビッグデータ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ビッグデータの収集や解析結果の表示に伴う著作権問題

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ビッグデータ解析に伴う問題は、①ビッグデータ収集時に問題となる「元データと著作権」の問題と　②解析結果を表示する時に問題となる「解析結果と著作権」の問題に二分される。以下、条文は特にことわらないかぎり日本の著作権法の条文である。

ビッグデータを収集する際に問題となる元データと著作権の問題

・元データに創作性がなければ、著作物にあたらないので、著作権はない（2 条 1 項 1 号、6 条)。このため許諾を得ずに利用しても著作権上の問題は発生しない。行動履歴（ライフログ）などがこれにあたる。創作性があれば、著作権があるため、原則として許諾が必要となる。ただし、著作権法は許諾を得ずに利用できる権利制限規定を列挙している。この権利制限規定に該当すれば許諾はいらない。ビッグデータに関連する権利制限規定としては以下の規定があげられる。
・検索サービスのための複製等（47 条の 6）：検索サービスを提供するにあたり、検索エンジンがウェブサイトの情報を収集するために行う複製等
・情報解析のための複製等（47 条の 7）：電子計算機による情報解析を行うための記録媒体への記録等 [1)]
・情報通信技術を利用した情報提供の準備に必要な情報処理のための利用（47 条の 9）：例えば SNS などのサービス・プロバイダーがユーザーの投稿したコンテンツを配信する際、サーバー上で分散処理するために行う複製等

ビッグデータ解析結果を表示する際に問題となる解析結果と著作権の問題

ここでも二つの側面がある。①成果物が元データの著作権を侵害しないかという問題と②成果物に著作権が発生するかという問題である。

・成果物が元データの著作権を侵害しないかは、成果物が元データの表現を利用する際に問題になる。元データに創作性があれば、著作権が発生するため、権利制限規定で認められている「引用」にあたらないかぎり著作権者の許諾を得る必要がある。引用は、「公正な慣行に合致するものであり、かつ、報道、批評、研究その他の引用の目的上正当な範囲内で行われるものでなければならない。」（32 条①項)。
・成果物に著作権が発生するかについては、編集著作物に該当すれば著作権が発生する。編集著作物は「編集物（データベースに該当するものを除く）でその素材の選択又は配列によって創作性を有するもの」（12 条)。編集物のうちデータベースについては、「情報の選択又は体系的な構成によって創作性を有するものは、データベースの著作物として著作権が認められる」（12 条の 2　①項)。創作性がなければ著作物ではないので、著作権は認め

られない。具体例として裁判例を紹介すると、京都大学学位論文事件 [2]で、「実験結果等のデータ自体は、事実又はアイデアであって、著作物ではない以上、そのようなデータを一般的な手法に基づき表現したのみのグラフは、多少の表現の幅はあり得るものであっても、なお、著作物としての創作性を有しないものと解すべきである」とされた（知財高判平成 17.5.25）。

・以上はビッグデータ解析に伴う著作権問題だが、解析結果の活用に伴う著作権問題もある。著作権で保護されるには何らかの創作性が必要で、単なる事実では著作権は発生しないが、企業が解析結果に対して、著作権などを理由に契約上の権利を主張して囲い込みを図る傾向がみられる。著作権法がわかりにくいこと、企業の法令遵守・コンプライアンス意識が高いことなどから、日本ではこうした「疑似著作権」の主張がまかり通りやすい土壌があることもビッグデータ解析結果の活用を妨げている。

（4）科学技術的・政策的課題

・「知のビッグデータ」ともいえる図書館・公文書館・博物館・美術館の収蔵品をデジタル化して、保存するデジタル・アーカイブが欧米で進んでいる。デジタル・アーカイブ化する際の大きな障害が孤児著作物（Orphan Works）問題である。孤児著作物は権利者の死亡などにより、著作権者が不明の著作物。欧州連合は 2012 年に、「孤児著作物の利用に関する指令」を採択した。この指令が画期的なのは、著作権者を探す努力をして見つからない場合、非営利目的であれば使えるところにある。著作物を使用する際は著作権者の許諾を得る、つまりオプトイン（原則禁止）が著作権法の大原則である。これをひっくり返して、著作権者が反対しないかぎり、つまりオプトアウトしないかぎり使用を認める（原則自由とする）わけである

・日本でも孤児著作物の二次利用をしやすくするため、文化庁に供託金を支払い、文化庁長官が著作者に代わって許諾する制定制度がある。この制度をより使いやすくするための改正が 2009 年にも行われたが、その後の年間裁定件数も 20～30 件にすぎない。オプトインの限界ともいえる。

・米国では孤児著作物を利用しやすくする法案が 2000 年代に二度にわたって議会に提案されたが、成立に至らなかった。その間隙をついたのが、私企業のグーグルである。グーグルは 2004 年に書籍検索サービスを発表した。出版社や図書館から書籍を提供してもらった書籍をデジタル化し、全文を検索して、利用者の興味にあった書籍を見つけ出すグーグル・ブックスとよばれるこのサービスに対して、2005 年に全米作家協会などが著作権侵害訴訟を提起した。グーグルは書籍をスキャンして、検索サービスのデータベースを作成するが、これを著作権者の同意なしに行うことは、著作権者の持つ複製権を侵害すると主張した。検索結果は「抜粋（スニペット）表示」とよばれ、ウェブ検索同様、検索語を含む数行だけしか表示されない。グーグルはこの抜粋表示は米国著作権法に定めるフェアユースであると反論した。

・著作権法は著作物の利用と保護のバランスを図ることを目的とした法律である（1 条）。著作物の利用には著作権者の許諾を要求して保護する一方、許諾がなくても使用できる権利制限規定を設けて利用に配意している。わが国の著作権法はこの権利制限規定を「私的使用のための複製」（30 条）、「引用」（32 条）など個別具体的に列挙しているが、米国は

使用する目的がフェア（公正）であれば、許諾なしの使用を認める権利制限の一般規定として、「フェアユース」規定（米著作権法 107 条）を置いている。フェアな使用であるかどうかは、使用目的や使用される著作物の市場に与える影響（市場を奪わないかどうか）などの４要素を総合的に考慮して判定するよう定めている。

・2008 年に全米作家組合とグーグルは和解案を発表した。和解案は当初、全世界の著作権者を対象にしたため、日本の出版業界にも電子書籍の黒船騒ぎが起きた。その後、米国以外の対象国を英国および旧英領諸国に絞ったため、日本は対象外となった。その修正和解案も 2011 年に裁判所が承認しなかったため、訴訟に復帰した。ニューヨークの連邦地裁は 2013 年にグーグルのフェアユースの主張を認める判決を下した [3]。まだ地裁段階だが、グーグルに書籍を提供した図書館が訴えられた訴訟では、控裁でもフェアユースが認められた。このようにグーグルはフェアユース規定を使ってオプトアウトを実現し、孤児著作物問題を解決しつつあるといえる。

・英語圏の書籍を多量にデジタル化するグーグル・ブックスは、英語文化の世界支配にもつながる。これに脅威を抱いた欧州は、グーグル・ブックスの発表直後にフランスのジャンヌネー国立図書館長がこの問題を指摘。それに応えてシラク大統領が 5 カ国の首脳に呼びかけ、欧州委員会がデジタル・ライブラリー計画を策定、2008 年に欧州デジタル図書館（Europeana）を一般公開し、現在までに 3000 万冊以上をデジタル化した。2012 年には「孤児著作物の利用に関する指令」[4]を採択。この指令は上記のとおり、オプトアウトの発想を採用している点でグーグル・ブックスと共通するが、書籍以外の著作物（画像、動画、音楽など）も対象にしている点ではグーグル・ブックスを上回る「知のビッグデータ」であり、孤児著作物の利用に関しても世界をリードしている。このように米国の一民間企業のプロジェクトにすぎないグーグル・ブックスが、欧州に与えたインパクトは大きかった。

・日本でも必要の都度、権利制限規定を個別に追加する方式では法改正に時間がかかり、著作物の利用形態が急激に変化するデジタル・ネット時代に追いつけないとの認識が 2000 年代後半に高まった。このため、知財本部は知財計画 2008 で「包括的な権利制限規定」の導入を提言、これを受けて文化庁が検討した。検討結果をまとめた 2011 年の文化審議会著作権分科会報告書 [5]は、3 類型の利用行為を権利制限の一般規定による権利制限の対象とするよう提言した。3 類型の中にはビッグデータに関連する「ネットワーク上で複製等を不可避的に伴う情報ネットワーク産業のサービス開発・提供行為のような『著作物の表現を享受しない利用』」のような類型も含まれていた。

・報告書の内容は内閣法制局の審査を経て条文化され、2012 年の法改正に盛り込まれ、「情報通信技術を利用した情報提供の利用」（47 条 9、上記（３）参照）を含む二つの条文に落とし込まれた。その過程で「著作物の表現を享受しない利用」という表現も削除された。この文言が生きていれば日本版フェアユース規定とよぶにふさわしい規定が誕生したわけだが、落とされてしまったために「権利制限の一般規定」というより、これまでの法改正でも追加してきた「個別の権利制限規定」と大差ない改正に終わってしまった。

・文化審議会著作権分科会は 2009 年度報告書 [6]で検索エンジンの法制上の課題について検討、権利制限を講ずることが適切であると報告した。これを受けた 2009 年の法改正で、検索サービスのための複製等（47 条の 6）（上記（３）参照）の権利制限規定が追加され

た。同報告書はコンピューター・プログラムのリバース・エンジニアリングについても、相互運用性の確保や障害の発見等の一定の目的のための調査・解析についての権利制限措置の必要性については概ね意見の一致が見られたと報告した。ところが、2009 年の法改正には盛り込まれず、その後、2 度にわたる法改正でも実現していない。

・2008 年に文化庁が実施した関係者からのヒアリングでは、リバース・エンジニアリングの法的扱いが不明であることを認知している企業の中には、コンプライアンスの観点から、海外で解析している企業もあり、わが国に情報セキュリティー技術者のスキルが高まらず、世界の情報セキュリティー・ビジネスの中で、日本が比較劣位に置かれる一つの要因にもなっているとの指摘もあった。米国では 1990 年代はじめの 2 件の控裁判決でリバース・エンジニアリングのフェアユースが認められた。その米国に 20 年遅れてもいまだにリバース・エンジニアリングを合法化できないようでは、秒進分歩の IT の世界ではビジネス化を断念せよと宣告されるようなものである。

・かつて検索エンジンも、フェアユース規定のないわが国では、著作権侵害の恐れを回避するため、事前に検索するウェブサイトの了解を取る「オプトイン方式」を採用した。これに対して米国では、自分のウェブサイトを検索されたくない場合には、その旨を意思表示すれば、検索を技術的に回避する手段を企業側が用意する「オプトアウト方式」で対応した。検索サービスは情報の網羅性、包括性が命であるだけに、オプトインしたサイトしか検索できないサービスとオプトアウトしないかぎり、検索可能なサービスとの差は決定的で、日本も 2009 年の上記法改正で個別権利制限規定を追加し、検索エンジンを合法化したが、時すでに遅し。日本の著作権法の適用を逃れるため米国内にサーバーを置き、日本にサービスを提供した米国勢に日本市場まで制圧されてしまった。

・ビッグデータの宝庫といえる国や自治体の持つデータをネットで公開し、利用できるようにするオープンデータについても著作権の制約がある。米国では連邦政府が作成した著作物には原則として著作権は発生しない（米著作権法 105 条）。国民の税金を使って作った著作物は国民のモノという考え方に根ざしている。日本では政府情報の中でも法令や裁判所の判決などは著作権の対象にはならないが（12 条）、白書などの著作権は政府にある。政府も国税を使って作成したものは国有財産であるとの考え方から、契約で著作権を国に帰属させようとしてきた。このため、宝の山といわれる行政データを活用してオープンデータ政策を推進するにあたっても、専用サイトで膨大なデータを公開している米国（後記（5）参照）などに大きく水をあけられている。

・知財計画 2008 が最初に包括的権利制限規定の検討を提言してから 6 年経過した。この間、デジタル・アーカイブ、リバース・エンジニアリング、オープンデータなどの取り組みで欧米に遅れを取っていることが判明するなど、その後の情勢も急激に変化しているため、こうした問題の有効な解決策でもあるフェアユース規定の導入を再考すべきである。

・著作権法とともにビッグデータ活用の鍵を握る個人情報保護法については改正の動きが具体化しつつある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・2013 年の Ｇ８で「オープンデータ憲章」が発表される [7]など、各国のオープンデータに対する取り組みが活発化しているが、欧米の取り組みは早かった。EU は 2003 年に「公的機関の情報の再利用に関する指令」を公表。2013 年にはその改訂版 [8]を、2014 年にはガイドラインを発表した。米国では 2008 年の大統領選でオープンガバメントを公約に掲げたオバマ大統領が、その一環として就任直後からオープンデータに取り組み、行政データ公開専用サイトの「data.gov」サイトを世界で最初に立ち上げた [9]。

・日本では 2012 年に IT 総合戦略本部が公表した「電子行政オープンデータ戦略」で、公共データの活用促進について定め、関係省庁の取り組みが活発化した。2013 年には「世界最先端 IT 国家創造宣言」[10]を閣議決定し、2020 年までに「世界最高水準の IT 利活用社会を実現する」ことを目標にした。IT 総合戦略本部も「電子行政オープンデータ推進のためのロードマップ」[11]を発表した。これに従って、行政データ公開専用サイト「data.go.jp」が 2014 年 10 月から本格的にサービスを開始した。

（６）キーワード

権利制限規定、情報解析、編集著作物、データベースの著作物、デジタル・アーカイブ、フェアユース、孤児著作物、オプトイン、オプトアウト、裁定制度、グーグル・ブックス、欧州デジタル図書館（Europeana）、孤児著作物の利用に関する EU 指令、オープンデータ憲章、オープンガバメント、世界最先端 IT 国家創造宣言

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・情報解析のための複製等を認める個別の権利制限規定がある。
	応用研究・開発	○	↗	・2013年に「世界最先端IT国家創造宣言」を閣議決定、2020年までに「世界最高水準のIT利活用社会を実現する」ことを目標に掲げた。
	産業化	○	↗	・上記により、自治体などのオープンデータへの取り組みが活発化、ビジネスへの波及が期待される。
米国	基礎研究	◎	→	・フェアユース規定、連邦政府が作成した著作物には原則として著作権を認めない規定などがある。
	応用研究・開発	◎	↗	・オバマ政権は2012年にビッグデータ研究開発イニシアチブを発表、研究機関に総額2億ドル（220億円）の補助金を投入。 ・オープンデータについては2008年の大統領選でオープンガバメントを公約に掲げたオバマ大統領が、その一環として就任直後から取り組み、行政データ公開専用サイトの「data.gov」サイトを世界で最初に立ち上げた。
	産業化	◎	↗	・「data.gov」を活用したビジネスが多数出現。 ・グーグル・ブックスも書籍ビッグデータの活用例。
欧州	基礎研究	◎	→	・EU は2003年に「公的機関の情報の再利用に関する指令」を公表。2012年には「孤児著作物の利用に関する指令」を採択。 ・英国は2014年の著作権法改正で情報解析のための個別権利制限規定を導入。
	応用研究・開発	◎	↗	・EUはIT業界が設立した非営利団体ビッグデータバリュー協会とともにPublic Private Partnership（PPP）を2015年に立ち上げ、2020年までに民間のビッグデータ関連投資に25億ユーロ（3400億円）を拠出予定。 ・英国は2005年に「公共データの再利用に関する規則を制定。
	産業化	○	↗	・上記により、ビッグデータ活用ビジネスの本格化が期待される。
中国	基礎研究	○	→	・フェアユース規定も情報解析のための個別の権利制限規定もないが、フェアユースについては検討した判例がある。ただし、認めた判例は今のところない。
	応用研究・開発	○	↗	・2012年に中国共産党第18回大会で「工業化・情報化・都市化・農業の近代化」の推進の方針が示され、ビッグデータやオープンデータの利活用が取り上げられた。 ・これを受け、2013年に工業・情報化部によって「情報化及び工業化の深度融合プロジェクト・アクションプラン（2013～2018年）」が発表された[12)]。
	産業化	○	↗	・上記により、ビッグデータ活用ビジネスの本格化が期待される。
韓国	基礎研究	◎	→	・2011年の著作権法改正でフェアユース規定を導入。
	応用研究・開発	◎	↗	・2012年に国家情報化戦略委員会が「スマート国家具現のためのビッグデータ・マスタープラン」をまとめ、公共分野主導でビッグデータ活用を促進する方針を発表。 ・同プラン実施のための予算は2016年までに官民合わせて5000億ウォン（520億円）と発表され、これを受け、2013年から次々と各省がビッグデータ戦略を策定。
	産業化	○	↗	・上記により、ビッグデータ活用ビジネスの本格化が期待される。

（註１）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註２）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、　○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 末吉亙「情報解析と著作権」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/johokanri/55/6/55_434/_article/cited-by/-char/ja/
2) 安東 奈穂子「著作権法のもとでの情報解析」
http://ci.nii.ac.jp/naid/110007731101
3) グーグルの書籍検索サービス合法判決でますます拡大する日米格差
（その 1）http://agora-web.jp/archives/1569233.html
（その 2）http://agora-web.jp/archives/1570001.html
4) EU Orphan Works Directive
http://ec.europa.eu/internal_market/copyright/orphan_works/index_en.htm
5) 文化審議会著作権分科会報告書（2011 年 1 月）
http://www.bunka.go.jp/chosakuken/singikai/bunkakai/33/pdf/shiryo_4_2.pdf
6) 文化審議会著作権分科会報告書（2009 年 1 月）
http://www.bunka.go.jp/chosakuken/pdf/21_houkaisei_houkokusho.pdf
7) Ｇ８サミットにおけるオープンデータに関する合意事項
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/densi/dai4/sankou8.pdf
8) Directive 2013/37/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 amending Directive 2003/98/EC on the re-use of public sector information.
http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0037&rid=1
9) 米国オープンデータの動向調査
http://www.ipa.go.jp/files/000033718.pdf
10) 世界最先端 IT 国家創造宣言（2014 年 6 月　改訂版）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20140624/siryou2.pdf
11) 平成 26 年版　情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/pdf/index.html
12) 上原伸一・馬鉄「中国著作権法第３次改正案（2014 年 6 月 06 日公表）中日対訳検討表」(発行元：あみのさん,2014 年)

3.10.11　ビッグデータとプライバシー

（1）研究開発領域名

ビッグデータとプライバシー

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ビッグデータに含まれるパーソナルデータの利活用とプライバシー・個人情報の保護

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ビッグデータの中でも、個人に関する情報ないしパーソナルデータを活用する場合には、プライバシー・個人情報保護に関する課題が発生する。そのようなパーソナルデータとしては、例えば、大量のネット上の閲覧履歴、購買履歴、アプリケーションの利用履歴、書き込み内容や、現実空間における位置情報、移動履歴などがある。

ここでは、まず、プライバシー・個人情報保護法制の基本的な動向について述べる。我が国では、2003 年に個人情報保護法を含む個人情報保護関連 5 法が制定された。最近では、2013 年から IT 総合戦略本部の「パーソナルデータに関する検討会」が中心になって [1]、個人情報保護法の改正に向けた議論が行われている。また、EU では、1995 年に制定されたデータ保護指令が存在するが、2012 年以降、一般データ保護規則の制定に向けた検討が進められるようになっている [2]。データ保護指令は、各国に一定の法律の制定を義務付けているが、指令が各国に直接適用されるわけではない。それに対し、一般データ保護規則は、各国に直接適用される点で異なっている。そのほか、データ保護規則は、「忘れられる権利」ないし「消去される権利」の導入、罰則の強化などの点が特徴になっている。そして、米国では、公的部門については、1974 年のプライバシー法が存在するものの、民間部門に関する包括法は存在していない。そこでは、個別領域ごとに個別法が存在するにすぎず、いわゆるセクトラル方式がとられている。もっとも、米国では、2012 年に「ネットワーク化された世界における消費者データプライバシー」という政策大綱が公表され [3]、その中で「消費者プライバシー権利章典」が提案されている点が注目される。

ビッグデータのプライバシー問題については、主として、以下のような観点から議論がなされている [4]。第一に、パーソナルデータを取得する際の本人同意が形骸化してしまっているため、いかにして分かり易い表示・説明をすることによって、実質的な本人同意を実現するかということである。多くの場合、プライバシーポリシーは、長文で難解な文章になっているため、多くの消費者が中身を全く読まずに盲目的に同意してしまっているというのが実態になっており、本人同意が形骸化してしまっている。この課題については、我が国でも経済産業省などによって様々な取り組みがなされているが、その点は後述することにする。

第二に、ビッグデータに含まれるパーソナルデータを匿名化することによって利活用をはかりたいという要望とプライバシー保護の要請をいかにして調和させるかということである。この点については、我が国では、「パーソナルデータに関する検討会」などで議論されてきたが、海外でも活発な議論がなされている。EU では、イギリスの ICO が 2012 年に匿名化に関する行動規範を策定し [5]、2014 年には、29 条作業部会が「匿名化技術に関する意見書」を公表している [6]。また、米国では、2014 年にホワイトハウスが、「ビッグデータ：機会の獲得、価値の保持」と題する報告書を公表し [7]、それと同時に、大統領科学技術諮問委員会

（PCAST）が、「ビッグデータとプライバシー：技術的視点から」という報告書を公表している [8]。これらの報告書でも匿名化技術についての記述があるが、再特定技術が発達しているため完全な匿名化が難しいことにも触れられている。

なお、ビッグデータの利用については、上記二つの課題のほかにも、いわゆるプロファイリングの問題も指摘されている。2013 年のデータ保護プライバシーコミッショナー国際会議では、プロファイリングを実施する際の条件を定めた「プロファイリングに関する決議」が採択された [9]。また、EU の一般データ保護規則案でも、プロファイリングを規制する条文が盛り込まれている。

（４）科学技術的・政策的課題

・パーソナルデータをユーザーから取得する際には、取得する情報項目や利用目的などを記載したプライバシーポリシーを明示したうえで本人同意を取得することが望ましい。しかし、現状のプライバシーポリシーは、長文で難解なものになっているため、多くのユーザーは中身を全く読まずに盲目的に同意してしまっており、本人同意が形骸化してしまっている。

そこで、実質的な本人同意をいかにして実現するかが課題となっているが、これを実現するためには、ユーザーに対して分かり易く簡潔にポリシーの内容を提示する必要がある。そのために、食品表示ラベルに類似した「情報共有標準ラベル」や「アイコン」などによる表示が検討されるようになっている。しかし、様々な表示方法などが提案されているため、ルールの明確化や標準化などの課題が残されている。

・ビッグデータに含まれるパーソナルデータを匿名化することによって利活用をはかりたいという要望が産業界を中心に出されているが、匿名化に関するルールが不明確なために利活用が進まない状況になっている。また、ポール・オームなどによって指摘されているように [10]、匿名化された情報とネット上に散在する情報などを照合することによって再特定化を行う再特定技術が発達しているため、完全な匿名化を行うことが技術的に難しいということが問題になっている。そこで、再特定行為を法的に禁止するなどの政策が提案されているが、このような政策に対しても、そもそも再特定行為を検知することが難しいため規制が難しいといった問題が残されている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・パーソナルデータの利用について、いかにして分かり易い表示・説明をすることによって実質的な本人同意を実現するかという課題については、総務省の「パーソナルデータの利用・流通に関する研究会」の活動も関係するが、直接関係するものとしては、経済産業省の一連のプロジェクトがある。

まず、2012 年から 2013 年に行われた経済産業省の「IT 融合フォーラム・パーソナルデータワーキンググループ」によって、基本的な問題提起がなされた [11]。同 WG では、消費者と事業者の間の信頼関係の構築が重要であるという観点から、分かり易い表示とするために求められる要素や、具体的な手法などが検討された。具体的手法としては、「平易で簡潔な表示」、「ラベルによる一覧表示」、「アイコンによる一覧表示」があげられている。そして、この活動を引き継ぐ形で、2013 年から 2014 年にかけて、パーソナルデータの利

活用に関する事前相談評価の試行が実施された。これは、消費者に対する分かり易い表示・説明を中心に、消費者との信頼関係構築のための取り組みについて、事業者の相談に乗り、評価しようとする試みである。その成果として、「事前相談評価・評価基準書」が公表されている[12]。さらに、最近では、これらの活動の流れを受けて、国際標準化に向けた取り組みが開始している。2014 年に、経済産業省内に検討委員会が設置され、「消費者向けオンラインサービスにおける通知と同意・選択に関するガイドライン」が策定された[13]。今後、このガイドラインを ISO/IEC JTC1 SC27WG5 において国際規格化することを目指した活動が行われることになっている。

・ビッグデータに含まれるパーソナルデータを匿名化し利活用をはかる際のプライバシー保護の問題については、国内でも様々な委員会やプロジェクトにおいて検討されてきた。まず、医療分野については、2012 年に「社会保障分野サブワーキンググループ及び医療機関等における個人情報保護のあり方に関する検討会の合同開催」において議論がなされた[14]。そして、2013 年には、規制改革会議「創業等ワーキンググループ」での議論や [15]、「世界最先端 IT 国家創造宣言」の公表を経て[16]、IT 総合戦略本部の「パーソナルデータに関する検討会」において、本格的な検討が開始された。同検討会は、2014 年にも引き続き実施されたが、特に同検討会のもとに設置された「技術検討 WG」において、匿名化技術に関する詳細な検討がなされたことが注目される。

また、匿名化の課題については、前述したように海外でも活発な議論が行われている。すなわち、ICO の匿名化に関する行動規範、29 条作業部会の意見書、ホワイトハウスや PCAST の報告書などである。我が国の議論では、これらの海外動向が十分に検討されていないところがあるが、今後も海外の最新動向に注視し、それらを十分に踏まえたうえで、検討を行うことが重要である。

・国内外で、ビッグデータを活用した新しい情報サービスが展開されるようになっているが、中には、プライバシー・個人情報の保護が不十分であるとして、消費者からの反発を受けたり、社会的批判を受けたりしているものもある。このような事態を防止するためには、新しい情報サービスや情報システムを導入する前に、それがプライバシーに対してどのような影響を与えるのかを評価するプライバシー影響評価（PIA）を実施することが有効である。PIA は我が国では、まだあまり馴染みがないが、アメリカ、カナダ、イギリス、オーストラリアなどの諸外国ではすでに実施されているものである。この PIA については、現在、ISO/IEC JTC1 SC27WG5 において国際標準化の作業が進められている[17]。

（６）キーワード

パーソナルデータ、プライバシー、個人情報保護法、本人同意、匿名化技術、再特定技術、一般データ保護規則、消費者プライバシー権利章典

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・2003年に個人情報保護法を含む個人情報保護関連5法が整備された。最近では、「パーソナルデータに関する検討会」における議論を経て、個人情報保護法の改正に向けた検討が進められている。
	応用研究・開発	○	→	・パーソナルデータを利活用する際の消費者に対する分かり易い表示・説明については、経済産業省による一連のプロジェクトがある。IT融合フォーラム・パーソナルデータWG、パーソナルデータの利活用に関する事前相談評価試行、国際標準化に向けた活動などである。 ・匿名化の問題については、「パーソナルデータに関する検討会」が中心となって議論が進められてきた。2014年には、「パーソナルデータの利活用に関する制度改正大綱」が公表された[18]。そこでは、パーソナルデータの利活用を促進するための枠組みとして、「個人特定性低減データ」に関する規律が提案されている。
	産業化	○	→	・日本情報経済社会推進協会（JIPDEC）、次世代パーソナルサービス推進コンソーシアム、インターネット広告推進協議会（JIAA）などが産業界を巻き込む形で様々な活動を行っている。
米国	基礎研究	○	→	・民間部門を規制する包括的な個人情報保護法は存在せず、いくつかの個別法が存在するにすぎない。基本的には企業の自主規制に委ねられている。 ・消費者のプライバシー保護については、FTC（連邦取引委員会）が重要な役割を果たしている。FTCは、企業によるプライバシー保護に向けた自主規制を促進しつつ、プライバシーポリシーに対する違反があった場合は、FTC法5条による制裁を科すことによって、実効性を担保している。
	応用研究・開発	◎	↗	・2012年に「ネットワーク化された世界における消費者データプライバシー」という政策大綱が公表され、その中で「消費者プライバシー権利章典」が提案されている。 ・2014年に、ホワイトハウス「ビッグデータ：機会の獲得、価値の保持」、PCAST「ビッグデータとプライバシー：技術的視点から」が公表されている。これらの報告書は、匿名化について言及しているが、再特定技術が発達しているため完全な匿名化が難しいことにも触れられている。
	産業化	○	↗	・米国では、民間部門に関する包括的な個人情報保護法が存在しないため、企業による自主規制が重要になる。そのため、様々な分野において、自主規制のためのガイドラインの制定など、ルール形成の努力が行われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・1995年にデータ保護指令が成立し、これに基づいて各国が個人データ保護に関する法制度を整備している。また、2002年には、電子通信の分野について、e-プライバシー指令が成立している。この指令では、通信の秘密保持、Cookieやロケーションデータを利用する際のオプトインによる本人同意取得などが定められている。
	応用研究・開発	◎	↗	・2012年に、データ保護指令を大幅に改正することを目的とする一般データ保護規則提案が公表されている。この一般データ保護規則案では、「忘れられる権利」ないし「消去される権利」の導入や、企業に対する罰則の強化などが特徴になっている。 ・パーソナルデータを匿名化する際のプライバシー保護の問題については様々な動きがある。2012年にICOが匿名化に関する行動規範を策定し、2014年には29条作業部会が意見書を公表している。同意見書は、様々な匿名化技術を取り上げて検討を加えているが、いずれの匿名化技術にも限界があるので、特定の匿名化技術に依存しないことを推奨している。
	産業化	○	→	・イギリスでは、2011年以降、midataと呼ばれるプロジェクトが進行している。このプロジェクトは、消費者が民間企業の持つ自己に関するデータに自由にアクセスしコントロールできるようにすることを目指すものである。このプロジェクトには、情報通信、金融、エネルギーなど様々な分野の企業が参加している。

中国	基礎研究	△	→	・中国では、2006年に個人情報保護法草案（「中華人民共和国個人情報保護法（専門家意見版）及び立法研究報告書」）が公表されたが、現在までのところ成立していないようである。そのため、包括的な個人情報保護法は存在しないが、「消費者権益保護法」、「電信及びインターネットユーザー個人情報保護規定」などの法規において個人情報保護に関する規定が定められている[19]。
	応用研究・開発	△	→	・2012年に、国家標準化委員会は、「公共及び商業用サービスに関わる情報システムの個人情報保護のガイドライン」を定めている。
	産業化	○	↗	・2008年より大連ソフトウエア産業協会が、個人情報保護の水準を認証する個人情報保護評価制度（PIPA）の運用を開始している。そして、このPIPAと日本のプライバシー・マーク制度の間で相互承認プログラムが行われている。
韓国	基礎研究	○	↗	・韓国では、かつては、米国類似のセクトラル方式がとられていたが、2011年に、民間部門と公的部門の両方を対象とする包括的な個人情報保護法が制定され、施行された。
	応用研究・開発	○	→	・ビッグデータの活用については、大量のユーザーに関する位置情報の活用とそれに伴うプライバシー保護の課題が取り上げられることがあるが、韓国では「位置情報の保護及び利用等に関する法律」が存在することが注目される。
	産業化	○	→	・韓国では、未来創造科学部と情報化振興院（NIA）が、2013年に「ビッグデータ分析活用センター」を開設した。同センターは、民間企業や大学とも連携しながら実証実験などの様々なプロジェクトを進めている[20]。また、2014年には、民間企業がビッグデータを活用する際の指針として「個人情報の識別化事例集」が公表されている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) パーソナルデータに関する検討会
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/pd/index.html

2) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the protection of individuals with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data （General Data Protection Regulation）
http://ec.europa.eu/justice/data-protection/document/review2012/com_2012_11_en.pdf

3) Consumer Data Privacy in a Networked World: A Framework for Protecting Privacy and Promoting Innovation in the Global Digital Economy
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/privacy-final.pdf

4) 村上康二郎：ビッグデータ時代におけるプライバシー・個人情報の保護と法的問題点（ビッグデータ・マネジメント, 2014, 269-279 所収）

5) Anonymisation: Managing Data Protection Risk Code of Practice
http://ico.org.uk/for_organisations/data_protection/topic_guides/~/media/documents/library/Data_Protection/Practical_application/anonymisation-codev2.pdf

6) Opinion 05/2014 on Anonymisation Techniques
http://ec.europa.eu/justice/data-protection/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2014/wp216_en.pdf
7) Big Data: Seizing Opportunities, Preserving Values
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/big_data_privacy_report_5.1.14_final_print.pdf
8) Big Data and Privacy: A Technological Perspective
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_big_data_and_privacy_-_may_2014.pdf
9) Resolution on Profiling, adopted on 24 Sep. 2013
https://privacyconference2013.org/web/pageFiles/kcfinder/files/2.%20Profiling%20resolution%20EN%281%29.pdf
10) Paul Ohm: Broken Promises of Privacy: Responding to the Surprising Failure of Anonymization, UCLA Law Review, Vol.57, 1701-1777
11) パーソナルデータ利活用の基盤となる消費者と事業者の信頼関係の構築に向けて
http://www.meti.go.jp/press/2013/05/20130510002/20130510002-2.pdf
12) パーソナルデータ利活用ビジネスの促進に向けた,消費者向け情報提供・説明の充実のための「評価基準」と「事前相談評価」のあり方について
http://www.meti.go.jp/press/2013/03/20140326001/20140326001-2.pdf
13) 消費者向けオンラインサービスにおける通知と同意・選択に関するガイドライン
http://www.meti.go.jp/press/2014/10/20141017002/20141017002a.pdf
14) 社会保障分野サブワーキンググループ及び医療機関等における個人情報保護のあり方に関する検討会の合同開催
http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000000ai9a.html#shingi129272
15) 規制改革会議・創業等ワーキンググループ
http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kaigi/publication/p_index.html
16) 世界最先端 IT 国家創造宣言について
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20130614/siryou1.pdf
17) 村上康二郎：プライバシー影響評価（PIA）に関する国際的動向と我が国における課題, 情報ネットワーク・ローレビュー13(2), 2014, 33-56
18) パーソナルデータの利活用に関する制度改正大綱
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/info/h260625_siryou2.pdf
19) TMI 中国最新法令情報―(2014 年 1 月号)―
http://www.tmi.gr.jp/global/legal_info/china/2014/january-2.html
20) 韓国 IT 事情第 29 回『ビッグデータ活用政策の動向』
http://www.jpc-net.jp/cisi/mailmag/m220_pa5.html

3.11 CPS/IoT

CPS（サイバーフィジカルシステム、Cyber Physical Systems）とは、ネットワーク化されたコンピューティングによる処理と物理的な要素が統合されたものを指す。実世界や人間から得られるデータを収集・処理・活用し、社会インフラの効率化、新産業の育成、知的生産性の向上などに資すると期待されている。一方、似た概念としてIoT（Internet of Things）がある。これは、パソコンやサーバー、携帯電話などの情報・通信機器だけでなく、家電製品や自動車、機械など、様々なモノに通信機能を持たせ、インターネットに接続し、モノの制御や周囲の状況の計測などを行うことである。人、モノ、コンピューターなどが有機的に結合することによって、社会、経済、産業の効率化と付加価値の向上を実現する。

CPS/IoTが社会に与える影響は、PLC（Programmable Logic Controller）が社会に与えた影響と同じように考えることができる。PLC が登場したことより、製造過程の自動化が進み、生産性の格段の向上につながった。

同じように、CPS/IoTは、すべての産業セグメントの生産性を向上させ、新たな価値を創出する分野であり、成長戦略の一丁目一番地とも言える領域である。Industrial Internetを推進している米国のGE社によると、CPS/IoTは2030年に世界のGDPを約15兆ドル押し上げるとのことである。ドイツが製造業の復活を期して進めている Industrie 4.0 は、製造業に特化したCPS/IoTである。

CPS/IoTにより、生産性が相対的に低いと言われている我が国の多くの産業セグメントにおいても生産性向上につなげることが期待できる。

CPS/IoT はすべての産業セグメントに関わる。適用領域を考慮せずに CPS/IoT の研究開発を進めることはできない。このため、CPS/IoT分野を俯瞰するにあたっては、社会という視点を盛り込みながら、「アーキテクチャー」「M2M」「社会システムデザイン」「IoT セキュリティー」「応用と社会インパクト」「ものづくりとIoT」に分類した。

「CPS/IoTアーキテクチャー」は、クルマの運転支援や高速デマンドレスポンスなどといったリアルタイムかつ低遅延な性能が求められるアプリケーションやサービスが登場してくることを踏まえ、新たに必要となるコンピューティング／ネットワーク／ストレージアーキテクチャーである。

「M2M」は、センサーなどのモノからデータを収集するネットワーク基盤である。センサーネットワーク、膨大な数のノード管理機構、シグナリングトラヒックを削減する仕組みなど、多角的に検討を進めながら、フィールドへの展開を進めていかなければいけない。

「社会システムデザイン」は、CPS/IoTならではの領域であり、CPS/IoTを支える技術を用いて社会をデザインしていくことを目的とする。このためには、社会で何が求められているのかをフィールド指向で把握した上で、技術課題に落とし込んでいく研究アプローチが必要である。

「CPS/IoTセキュリティー」は、膨大な数のモノがネットワークにつながる世界において切り離して考えることのできない重要な領域である。CPS/IoTにおいてネットワークに接続されるノードの資源には制約があることも踏まえた上で、かつアプリケーション／サービスの特性をも踏まえた上で、セキュリティーを考えていかなければならない。

「応用と社会インパクト」は、CPS/IoT の具体的な適用領域に軸足を置きながら研究開発を進める「フィールド指向型研究開発」である。CPS/IoT の適用領域は、環境、エネルギー、医療、ヘルスケア、農業、防災などすべての産業セグメントにわたる。IT/ICT 研究者がそれぞれの産業セグメントのフィールドに出向いて、課題やニーズを抽出しながら研究開発を行う領域である。

「ものづくりと IoT」は、昨今の製造業に対する期待の高まりに応じて、スマートな製造業を実現するための領域である。ドイツの Industrie 4.0 をはじめとして、米国においても雇用の観点からものづくりの重要性が強烈に意識され始めている。ものづくりに強い我が国の強みを発揮できる領域である。

生産性を高め付加価値を創出できる CPS/IoT は、製造業に強いことからもわかるように、我が国に優位性があると考えることのできる領域である。しかしながら、従来の研究領域と異なり、CPS/IoT を推進していくためには、多様なプレーヤーの参画の促進、基礎技術から実用化につなげるリニアモデルではなく社会課題から技術課題につなげるトップダウン型の研究開発、ビジネスとして成立させることが可能なエコシステムの考案など、従来型の研究開発と異なる推進方策が求められる。

具体的には、多様なプレーヤーが参画するアンブレラプロジェクト、地域それぞれにニーズが存在することから地方大学や高専などをネットワーキングさせるプロジェクト、ハッカソンやアイデアソンなどといったイベントを介して多様なアイデアを吸い上げるプロジェクト、新たなエコシステムをもあわせて考えるプロジェクト、市場創出ということを前面に押し出したプロジェクトなど、従来とは異なる新たな形態のプロジェクトも必要となる。

図 3.11.1 CPS/IoT の俯瞰図

【重要な研究開発領域】

・物理世界とサイバー世界をつなぐ M2M と、安全性を担保するセキュリティー
・社会と IT をつなぐ IoT アーキテクチャーと社会システムデザイン
・実世界への適用を進める応用開発とそのインパクト評価、特に製造業への影響

３.11.１　ＣＰＳ／ＩｏＴアーキテクチャー

（１）研究開発領域名

CPS/IoT アーキテクチャー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

CPS/IoT は、自動車、エネルギー（スマートグリッド)、環境、防災、農業、土木、物流などさまざまな分野に適用される。膨大な数のセンサーがネットワークに接続される世界であり、従来のコンピューティング／ネットワーキング／ストレージパラダイムではサポートされない新たな要求が出現される。これらの新たな要求に対処するパラダイムが CPS/IoT アーキテクチャーである。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

Cyber Physical Systems (CPS)、 Internet of Things (IoT)、 M2M (Machine-to-machine)などと呼ばれる言葉は、従来の PC やスマートフォン以外のモノがネットワークに接続される世界を示している。クルマがネットワークに接続される Connected Vehicle、スマートグリッドにおける高速デマンドレスポンス(Fast DR)、橋梁などの社会インフラモニタリングなど、多様なアプリケーション／サービスが出現する世界である。センサーやクルマなどといった新しいモノがネットワークに接続されることで、以下に示すような新たな要件が出現する。

【エッジコンピューティング】

膨大な数のモノがネットワークに接続されるようになると、クラウドコンピューティングでは遅延や性能の観点で対応することが難しくなる。モノがクラウドに接続される形態に加えて、「エッジ」に機能追加することが必要となる。

例えば、スマートグリッドにおける高速デマンドレスポンスでは、数秒オーダーの速度で需要側に設置されたスマートメーターと需給調整を行うことが必要となる。膨大な数のスマートメーターからデータを収集して、需給調整方法を計算し、需給側に対して制御を行うことを考えると、集中管理のクラウドでは遅延の制約を満たすことが難しくなる。「エッジ」と「クラウド」が連携しながら処理を行う仕組みが必要となる。

また、Connected Vehicle においても同様である。安全・安心を実現するためには、クルマと歩行者との間での連携も必要となるが、このためには物理的なネットワーク遅延を極限まで小さくしなければいけない。また、信号機の制御を動的に行うためにも、局所的なクルマの位置を把握した上で、信号機間での自律分散制御が求められる。

現在の CPS/IoT の研究開発は、手元にある技術の延長線上でどのようなアプリケーション／サービスを実現することができるのかを主目的としたものが多く、エッジコンピューティングの研究開発まで踏み込んでいるものはほとんどない。しかしながら、CPS/IoT では、アプリケーションやサービスを見据えながら研究開発を進めていくことが必須であり、現在の研究開発の次のフェーズにおいてはエッジコンピューティング的な視点を考慮する必要がある。

【ストリームコンピューティング】

CPS/IoT の世界では、リアルタイム／オンライン処理が求められる。現在でも、ツイートをリアルタイムに処理・分析することが行われているが、CPS/IoT の世界では多様なセンサーからストリームデータがエッジ／クラウドに流れ込んでくることになり、今まで以上にストリームコンピューティングに頼らざるを得なくなる。

例えば、防災向けでは、人の位置データや雨量、水位、風量、気圧などの環境データに基づいてリアルタイムに避難指示を出さなければいけない。また、渋滞制御においても、クルマの位置データと現在の道路状況を勘案してリアルタイムに信号機などの制御につなげていかなければならない。さらに、公共映像監視にしても、危険人物の素早い検知が求められる。原子力発電所や新生児病棟などでの異常検知も、敷地内や病院内に張り巡らせた多様なセンサーからのデータに基づき迅速に異常を検知しなければならない。

大規模データ蓄積においては Hadoop など、バッチ機械学習においては Mahout など、米国が先陣を切って開発をしてきた。これに対して、ストリームコンピューティングが視野に入ると、ストリーム処理、分散機械学習、オンライン機械学習など新たな軸での研究開発が必要になる。

現在のビッグデータ処理基盤は Google などをはじめとした米国の独壇場と言わざるを得ないものの、ストリームコンピューティングはこれからの研究開発であり、米国以外の国々も同じ土俵で戦うことができる分野である。

【自律分散協調】

CPS/IoT には、膨大なモノが自律分散協調で動作するアプリケーションやサービスもある。信号機制御、高速デマンドレスポンス、車々間通信、複数ドローンでの協調監視、センサーノード協調によるノード省電力化など、自律分散協調が必要となる場面は増加する。

自律分散協調に関しては、理論的には人工知能やエージェント分野などで以前から研究が進められてきた。今後は、既に得られている視点を活用して、具体的な出口に展開することが求められる。現場（フィールド）で何が求められているのかをしっかりと把握した上で、自律分散協調に求められている要件を明らかにしながら研究開発を進めていくことが求められる。

自律分散協調は、人工知能やエージェントの分野に限定されるものではない。CPS/IoT では、ネットワークにおいても自律分散協調が必要となる。例えば、火山監視や山火事監視など人の手が届かないエリアにおいては、センサーノード自身が自律分散協調機能を有し、トラヒック管理や故障管理などを自律的に行わなければならない。今まで、ネットワークはアプリケーションとは個別に議論されてきた。しかしながら、CPS/IoT におけるネットワークは、アプリケーション／サービスとは独立に議論することができない。要件自体が多様になるためである。アプリケーション／サービスで求められる要件を把握しながら、具体的な自律分散協調機能を明らかにし、ネットワーク研究開発を進めていくことが求められる。

（４）科学技術的・政策的課題

・CPS/IoT アーキテクチャーの研究開発において重要なことは、出口となるアプリケーションやサービスをしっかりと把握した上で、どのような要件が求められるのかを明確にする

ことにある。これを経ずして構築したアーキテクチャーは机上の空論になってしまう。そのため、出口となるアプリケーションやサービスに出向く「フィールド指向」を推進することが必須である。

・コンピューティング、ネットワーク、ストレージと、多岐にわたる分野を考えていくことも必要である。そのため、プロジェクト組成においては、アーキテクチャーのレイヤーにとどまらず、「アンブレラプロジェクト」など幅広いレイヤーからの参画を促し、レイヤー間での情報の流れを滑らかにすることが望ましい。

・アーキテクチャーの有用性を明らかにするためには、「データ収集」を避けて考えることはできない。データがなければ、評価さえ何もできないためである。データの収集には膨大な投資が必要となることや、ニーズが明確ではない状態で模索的にデータを収集することが必要となるため、政策的な支援が必須である。

・地方には生産性の低い産業セグメントが多く、CPS/IoT が果たすべき役割は極めて高い。そのため、研究開発推進においては、地方大学や高専などをも巻き込みながらプロジェクトデザインしていくことも効果的である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・NSF Cyber-Physical Systems

2006 年から NSF は CPS に継続的に財政支援を行っている [1)]。2015 年 1 月に発出された新しいプログラムでは、「Breakthrough projects」（基礎研究）：$500,000／3 年、「Synergy projects」（学際研究）：$500,001～$1,000,000／3～4 年、「Frontier projects」（大規模研究）：$1,000,001～$7,000,000／4～5 年の 3 つに分けて募集をかけている。 分野としては、System design、 System verification、 real-time control and adaptation、 Manufacturing、 Smart cities、 IoT などのキーワードが挙げられている [2)]。

・NSF Cyber-Innovation for Sustainability Science and Engineering (CyberSEES)

NSF は 2014 年に、持続可能性をテーマにしたプログラムを開始した [3)]。「持続可能性」をテーマにしているが、プログラムの実態は「社会課題型の CPS/IoT プログラム」であり、Large-scale Data Analysis and Management、Robust Observation, Sensing, and Inference、Modeling of Complex Systems、Dynamic and Intelligent Decision Making、Control and Management of Infrastructure をテーマとして挙げている。

・NSF Cyber Physical Systems Virtual Organization[4)]

CPS 研究を推進するための産官学の「集まる場」。CPS/IoT の推進にあたっては、いろいろなバックグラウンドを有する人たちが有機的に連携することが重要であり、このような「場」の提供の仕方は参考になる。

・DARPA Cyber Physical Systems

2014-2014 の Adaptive Vehicle Make program や 2012-2017 の High Assurance Cyber Militaly Systems など、CPS/IoT 関連のプログラムを継続して推進している。

・Industrie 4.0

ドイツでは製造業の産業競争力強化を目指して、Industrie4.0 が推進されている。Industrie4.0 は生産から小売りまでのすべてのフェーズから得られるデータを活用して生

産性向上を図ることを目的とした意欲的なプロジェクトである。

・Industrial Internet
米国 GE 社が製造業の将来のあり方を示したビジョンであり、コンソーシアムを構成して、Industrial Internet を推進している。

・EU
EU においても、CPS/IoT は重要テーマとして認識されており、Digital Agenda においても強調されており、さまざまなプロジェクトが進められている [5)]。

（6）キーワード

Cyber Physical Systems、モノのインターネット、M2M、ビッグデータ、データ駆動型経済

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	世界に伍する能力を有するベンチャー企業等のアクティビティが上昇している。
	応用研究・開発	○	↗	産業界を中心に、研究・開発が活発になっている。
	産業化	○	↗	産業界を中心に、研究・開発が活発になっている。ただ、個別企業での取り組みにとどまっており、業界全体としての取り組みはこれから。
米国	基礎研究	◎	→	DARPA、NSFの支援により、大学や公的機関での研究成果が蓄積されつつある。
	応用研究・開発	◎	↗	産業界を中心に、官と学を巻き込んだ動きが活発である。
	産業化	○	↗	GEやシスコなど、大きなビジョンを掲げ、エコシステムを構築し、実ビジネスにつなげる動きが活発になりつつある。
欧州	基礎研究	○	→	EUのプロジェクトが継続的に支援している。ただ、日本、米国と比べ産業界側の動きが弱い（ドイツを除く）
	応用研究・開発	○	↗	EUプロジェクトを中心に、産学でさまざまな動きがなされている。ただ、ビジネスにつながるような動きには結びついていない（ドイツ除く）
	産業化	△	↗	EUプロジェクト以外に大きな動きはみられない（ドイツを除く）
中国	基礎研究	△	→	物連網など、トップダウンのプロジェクトに大きな予算が投下されているものの、大きな成果は見えない
	応用研究・開発	△	→	相対的に近視眼的なテーマが多い
	産業化	△	→	産業界が弱いこともあり、大きな動きは見えない
韓国	基礎研究	△	→	大学は産業界との接点が弱いこともあり、出口を見据えた基礎研究はこれから。
	応用研究・開発	△	→	スマートシティーなどの政府主導のプロジェクトはあるものの、研究開発の視点からの大きな成果は見えない
	産業化	△	→	これから一気に動き始めるように思われる

（８）引用資料

1）NSF Cyber Physical Systems, http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286
2）NSF Cyber Physical Systems, Program Solicitation, http://www.nsf.gov/pubs/2015/nsf15541/nsf15541.htm?WT.mc_id=USNSF_25&WT.mc_ev=click
3）NSF Cyber-Innovation for Sustainability Science and Engineering (CyberSEES), http://www.nsf.gov/pubs/2014/nsf14531/nsf14531.htm
4）NSF Cyber Physical Systems Virtual Organization, http://cps-vo.org/
5）EU Digital Agenda for Europa, Cyber Physical Systems, http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/cyber-physical-systems

3.11.2 M2M

（1）研究開発領域名

M2M

（2）研究開発領域の簡潔な説明

M2M 研究開発の目的は、環境、都市、農業、流通、土木、医療といった各種産業構造の変革に向けたエコシステムの構築である。センサーや産業設備からのデータを収集・分析することで、各産業ひいては社会基盤の高度化・高効率化が可能になる。

M2M は Machine-to-Machine の短縮語であり、様々な捉え方や定義がなされている。本節では、M2M を Machine-to-Machine Communication (マシン間通信)として、M2M デバイス(ヒトではなくモノ)が通信ネットワークを介してサービスアプリケーションとの間で双方向の情報を交換するための通信技術を研究開発分野として取り扱う。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

・M2M 通信の特徴と要件

M2M が様々なサービスや産業においてビジネスとして機能するには、M2M デバイスが通信ネットワークを介し、クラウド上のサービスアプリケーションとの間で双方向情報をやりとりするための条件を提供することが不可欠となる。その関係を仲介するために通信ネットワークが重要な役割を担っている。

M2M 通信の特徴は、将来予想される膨大な端末数と、多様なサービスアプリケーションの利用形態、そして厳しいコスト環境にある。欧米通信機器ベンダの予測では、2020 年の M2M デバイス数は、500 億端末まで増加するとも見込まれている。従来、M2M の用途としては各種センサーを用いた情報収集系が主体であったが、Cyber Physical Systems (CPS)や拡張現実 (Augumented Reality)の動向にもみられるように、より即時性が求められる制御 (アクチュエーター)系にまでその応用が拡大していく可能性がある。

M2M では、サービスアプリケーションごとに設置場所やモビリティ、消費電力などが多様であり、M2M に適したネットワークの要件も多様である [1]。従来の人による通信の場合は、電話、メール、動画像視聴などランダムに数 Kbps～数十 Mbps の大容量通信トラヒックが発生するのに対し、モノによる通信、特にセンサーを用いる情報収集系においては数十～数百 Kbps と、必ずしも大容量を必要としないものが多い。一方、機械的に定期間隔で通信を発生させるなど、M2M 特有のトラヒック特性を特徴としている。

・M2M のアーキテクチャー

M2M のアーキテクチャーは、M2M アプリケーション、M2M プラットフォーム、M2M ネットワーク、M2M デバイスの 4 層構造として考えることができる [2]。M2M アプリケーションは、個々の M2M サービスに対応して、クラウド上のアプリケーションサーバー上で動作するソフトウェアとして実装される。M2M プラットフォームは、複数アプリケーションが様々なネットワークを介してデバイスと接続するための共通基盤機能を提供する。M2M ネットワークとしては、移動網 (GSM、3G、LTE、WiMAX 等)や固定網 (FTTH、DSL 等)に代表される広域公衆網や、さらにゲートウェイ機器を介して接続される自営系ローカルネットワーク (WiFi、ZigBee、Bluetooth、Z-wave、PLC 等)が利用され、さらにセンサーや

アクチュエーター群に対応するM2Mデバイスへと接続される。

・M2Mネットワーク技術

現在のM2Mソリューションでは、固定網よりも移動網を活用したものが多い。これは、M2Mサービス構築に移動網の既存機能を、容易に活用できるためである。例えば、SIMカードを組み込んで移動デバイスとして機能させたり、SIMカードを別途用意する必要のないE-SIM（埋め込み型SIM)を利用した認証やセキュリティーを利用したりと、既存機能を活用した普及や展開が容易である。特に、M2Mにおいては、携帯電話機能の一つであるSMS（ショートメッセージ)を用いたサービスが主流である。第2世代（GSM)や第3世代携帯電話はほぼ世界中をサービスエリアとしてカバーしており、グローバルなサービス展開が可能である。M2M通信モジュールの価格も20US$を切る価格帯となってきており、今後LTEモジュールの低価格化も進むと考えられる。

一方で、M2M端末の移動網への直収は、エンドーエンド間での接続コストに課題があり、移動網の最適化が課題となる。既存の通信ネットワークは無数のデバイスが少量のデータ通信を行うことを想定しておらず、例えば移動しないM2M端末に対しては、ユーザーデータよりもシグナリングの増大が問題となる。そこで、携帯電話の技術仕様を策定する3GPPにおいてマシンタイプ通信（MTC)の検討が進められており、特に制御プレーンを活用したアーキテクチャーやシグナリングなどの検討が活発である。また、M2Mの接続遅延時間要求はVoIPなどに比べて一桁以上小さいなど、既存の通信ネットワークとは異なる要求条件に基づく最適化が必要になる。従来とは異なる通信トラヒック特性に柔軟かつ低廉に対応するため、移動パケットコア網（EPC等)へのネットワーク仮想化技術（NFVやSDN)の適用などが検討されている。

M2Mデバイスは、その通信や処理に関する能力や消費電力等が限定されるため、M2Mデバイスとサービスアプリケーションとをゲートウェイで中継する構成も想定される。ゲートウェイ構成により、近傍の複数デバイスを収容し、さらに広域の移動網・固定網に接続することで、通信モジュールのデバイスコスト増大や通信回線費用の削減が期待できる。ゲートウェイより先の自営系ローカルネットワークを総称してM2Mエリアネットワークと呼ぶ。Wi-Fi、ZigBee、Bluetooth、Z-wave、PLC、特定小電力無線等が代表的なM2Mエリアネットワークである[5)]。これらは、サーバーからの設定変更や監視を行う遠隔管理機能を想定しておらず相互互換性もない。そこで、OMA-DM（主に移動網端末)やTR-069（主にホームゲートウェイ向け)などの遠隔管理プロトコルを適用し、ゲートウェイでのプロトコル変換を組み合わせて、M2Mアプリケーション－M2Mデバイス間のエンドーエンド間通信を実現している。

・M2Mプラットフォーム技術

従来のM2Mサービス（ソリューション)は、サービス事業者が既存の広域通信インフラ等を活用し、個別のサービスアプリケーションに特化したシステム構築を行う垂直統合型のM2Mであった。しかし垂直統合型M2Mは、他の産業とは分離された垂直統合型のアプリケーションとして開発され、相互運用性については殆ど考慮されていない。よってシステム構築にコストを要し、複数サービス間での相互連携や複数のアクセスネットワークの切り替え、ソフトウェア共用・再利用が困難である。そこで、様々なM2Mサービスを単一プラットフォームに集約するアプリケーションの水平統合と、既に上述した様々なM2Mネットワ

ークを集約するネットワークの水平統合とを実現するため、アプリケーションとネットワークとの間にミドルウエアが必要となる[4]。これを M2M プラットフォームと呼ぶ。各サービスアプリケーションは、M2M プラットフォームが API として提供する共通プラットフォーム機能を利用し、M2M デバイスからの情報収集や制御を容易に行うことができる。かつて ETSI (欧州電気通信標準化機構)にて上位サービスレイヤーの M2M サービスプラットフォーム標準化が先行して行われてきたが、現在は日米欧中韓が参加する oneM2M (3GPP 同様のパートナーシッププロジェクト)において、標準化が引き継がれており、2015 年 1 月に初版仕様がリリースされた。

・M2M セキュリティー技術

M2M サービスアプリケーションでは、例えば eHealth やスマートグリッドのように安全性が重要で、多数のセキュリティーに関する脅威に対して堅牢である必要がある。M2M ネットワークは、時に低消費電力&高パケット損失ネットワーク (LLN：Low Power and Lossy Network)としての特徴を備える。インターネット関連技術の標準化を行う IETF では、DTLS (Datagram Transport Layer Security)の検討が行われている。インターネット上で安全に個人情報やクレジットカード番号などを送受信する技術として TLS が知られるが、 TLS は信頼性が確保されたパケットを対象にした技術であり、データグラム(着信確認などを行わず信頼性より転送速度を優先した分割データ)に対しては適用が困難である。そのため、TLS の仕組みを一部変更し、データグラムでも実質的に TLS と同じような安全性確保を目指した技術開発が行われている。

・各国の M2M 技術開発の動向

各国とも、M2M 通信ネットワークが国の将来にとって重要なインフラであり、特に国家産業活性化の観点から、M2M/IoT に関する技術開発の重要性を認知している。米国オバマ政権によるスマートグリッド提唱や NIST(国立標準技術研究所)を中心とした研究開発・標準技術検討、欧州の欧州委員会によるスマートメータや e-Call 義務化に関する欧州指令の発令やフレームワークプログラムの実施、日本でも各省庁の M2M/IoT 関連の様々な研究開発プロジェクトに資金が投入されている。

【米国】国の科学技術推進施策である「ネットワーキング及び情報通信技術開発(NITRD)計画」に基づき、各省庁・機関が連携してプロジェクトを実施している[1]。特に M2M アプリケーションの一つであるスマートグリッドを取り組みとして掲げており、NIST (国立標準技術研究所)、NSF (国立科学財団)等の取り組みとして、スマートグリッドのセキュリティーや相互接続・運用に関する研究開発・標準化に取り組んでいる。

【欧州】欧州委員会が、スマートメータや電気自動車の充電、e-Call 等に関する標準化指令を発出している[1]。また、2009 年には Internet of Things (IoT)行動計画を発表し、IoT を健康、環境、交通等の社会的課題を解決する手段と位置づけて検討を行っている。また、欧州委員会の研究開発助成プログラムである第 7 次フレームワークプログラム (FP7) では、RFID や IoT に関わる研究開発プロジェクトを多数実施し、スマートシティーの高信頼化、スマート化、セキュリティー強化等に関するテーマに取り組んでいる。

【中国】第 12 次 5 カ年計画(2010～2015 年)の中で、「省エネ、環境保護」「新エネルギー」「次世代情報技術」「新材料」「バイオ」「新エネ自動車」「ハイエンド設備製造」の 7 大産業の高度化を打ち出し、重点政策として物聯網（IoT）と、スマートシティー、スマートグリ

ッド、スマートコミュニティー等のスマートICT推進を掲げている[6]。

【韓国】2009年に政府が「モノの通信基盤構築基本計画」を発表。2011年から「モノのインターネット支援センター」を運営して中小ベンチャー企業の技術開発と試験環境を支援している。2013年6月にはIoTの中長期発展計画を盛り込んだ「インターネット新産業育成方案」を発表し、2017年までにM2M・クラウド・ビックデータなどの新産業を育成し雇用を創出する方針を打ち出している。

【日本】2012年7月に閣議決定された「日本再生戦略」で、環境変化に対応した新産業・新市場の創出に向け、ビッグデータビジネスの創出に向けたM2M通信等の技術の検討・確立を掲げている。2020年までにビッグデータの利活用等により約10兆円規模の関連市場の創出を目標とする[5]。経済産業省・総務省・農林水産省・国道交通省等々において、ICT技術を活用した産業振興・研究開発プロジェクトが実施されている。

（4）科学技術的・政策的課題

従来のM2Mアプリケーションでは、状態の遠隔監視やセンサー情報の収集自動化など、省力化によるコスト削減を目的としたものが多かった。しかし今後は、遠隔センシングのような通信部分に閉じた局所的なコスト改善ではなく、米国のIndustrial Internetやドイツの Industrie 4.0に代表されるように、産業全体のモノやカネの流れと結合してエコシステムを変えるコスト構造変革がより一層期待される。そこで、科学技術的な課題として、ネットワークの提供事業者や接続形態が複雑多様化する中でも、要件の厳しい産業応用やCPSの実現のため、エンド-エンド間の全体を通して通信品質(容量や遅延など)を担保する技術や、低能力なM2M端末にも適用できるセキュリティー・プライバシー技術の研究開発の重要性が増してくると考えられる。

一方、政策的課題としては、電波利用料制度や通信料金制度、電波割り当て等が考えられる。ライセンスバンドを用いる移動網では、一端末あたりに課せられる電波利用料はスマートフォンもM2M端末も事実上同じだが、通信頻度や通信時間・容量等の特性が両者で大きく異なることから、例えば、実際の通信量に応じた電波利用料とするなど、より柔軟性の高い制度への転換も考えられる。また、移動網・固定網等の利用料金は、数々の規制緩和が図られてきたが、通信回線のボリューム契約や卸提供、複数事業者間の回線共有、季節的な回線利用など、多様化するM2Mの利用形態に対応可能な柔軟な料金体系導入を可能にする更なる規制緩和等が考えられる。また、電波の割り当てに関して、特にアンライセンスバンドでは、我が国でのM2M活用に支障を来すことのないよう、グローバル共通バンドの確保に引き続き配慮していく必要がある。さらに、ビッグデータ時代を控えて、利用者と事業者の双方が安心して各種サービスを利用するためのプライバシー関連の法規制の整備・充実が期待される。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

M2Mデバイス通信・管理プロトコルに関する業界アライアンスが2013年終盤から2014年にかけて続出している。スマートホーム向けプロトコルとしてGoogleのNest Labが推進するThread Group、オープンソースであるAllJoin技術をベースにIoT標準を目指しQualcommが主導するAllSeen、AllSeenとは異なる立ち位置でセキュリティー等を強化し

て Intel などが主導する OIC (Open Interconnect Consortium)、産業界向けに GE などが推進している IIC (Industrial Internet Consortium)、iOS デバイスを軸とした Apple の Homekit など、多種多様な業界アライアンスが乱立している。それらの中でも、特に Google の Thread は実際に利用可能なソリューションを提供しており、国家や複数の参加社の思惑で標準を策定していくスタイルと一線を画し、デファクトスタンダードとして IoT 標準プロトコルの定着を図る動きとして今後が注目される。

（6）キーワード

M2M、IoT、M2M プラットフォーム、水平統合、スマートメーター、スマートグリッド、スマートシティー、スマートホーム、マシンタイプ通信、SIM、E-SIM、仮想化、NFV、SDN、セキュリティー、HEMS、ビッグデータ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学等の研究機関で、M2Mエリアネットワーク(Wi-Fi、920MHz帯無線、Bluetooth等)に関する要素技術研究の取り組みあり
	応用研究・開発	○	↗	・日本再生戦略において、新産業・新市場の創出や、ビッグデータビジネスの創出に向けたM2M通信等の技術の検討・確立を掲げる ・経済産業省・総務省・農林水産省・国道交通省等において、ICT技術を活用した各種産業振興・研究開発プロジェクトを実施 ・HEMS向けにEchonet Lite等の国産標準を推進
	産業化	○	→	・HEMS向けをはじめ、国内家電/通信機器ベンダが技術開発に注力。ただしグローバルベンダとしての存在感の向上に努める
米国	基礎研究	○	→	・欧州同様、M2Mに関しては、大学などの場で長く揉まれてきており、基礎研究としては既に成熟段階と想定
	応用研究・開発	◎	↗	・NITRD計画等に基づき、各省庁・機関が連携しプロジェクトを実施 ・NIST、NSF等が、スマートグリッドのセキュリティーや相互接続・運用に関する研究開発・標準化を推進
	産業化	◎	↗	・有力な大手通信機器ベンダやM2M/IoTに関するトップベンチャーが存在感を示す ・三大通信キャリアがいずれもM2Mに関する取り組みに意欲を示す ・有力なM2Mプラットフォームベンダを多数擁する
欧州	基礎研究	○	→	・米国同様、M2Mに関しては、大学やETSIなどの場で長く揉まれてきており、基礎研究としては既に成熟段階と想定
	応用研究・開発	◎	↗	・スマートメータや電気自動車、e-Call等に関する標準化指令を発出 ・フレームワークプログラム(FP7等）で、スマートシティーの高信頼化、スマート化、セキュリティー強化等に関する研究開発を実施
	産業化	◎	↗	・スウェーデンやフランスなど、有力な大手通信機器ベンダがM2M分野でも存在感を示す ・イギリス・ドイツ・フランス・イタリア・スペイン等のフラッグシップ通信キャリアが、ネットワーク仮想化をはじめ技術開発に熱心 ・SIMカードベンダを多数擁し、セキュリティー技術レベルも高い
中国	基礎研究	△	→	・基礎研究レベルのアクティビティは見えにくい
	応用研究・開発	◎	→	・第12次5カ年計画の中で7大産業の高度化を打ち出し、重点政策として物聯網（IoT）、スマートシティー、スマートグリッド、スマートコミュニティ等のスマートICT推進を掲げる ・標準化等では独自規格路線を貫く
	産業化	○	↗	・Huawei、ZTE等の通信機器ベンダがグローバルに力をつけて存在感を増している
韓国	基礎研究	○	↘	・国策として、センサーネットワークやRF-IDの取り組みに熱心
	応用研究・開発	△	↗	・中小ベンチャー企業の技術開発と試験環境を支援。ただし、財閥系大企業は力があるものの、中小企業は層が薄く底力に欠ける
	産業化	○	→	・M2M・クラウド・ビックデータ等の新産業育成・雇用創出を標榜

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) デビッド・ボスワーシック他, 「M2M 基本技術書 ETSI 標準の理論と体系」, リックテレコム, 2013.
2) 森川 博之, 鈴木 誠, 「M2M が未来を創る」, 電子情報通信学会会誌, Vol.96, No.5, pp.292-298, May 2013.
3) 布施田 英生, 「M2M の国際標準化活動と我が国の取組み」, 電子情報通信学会会誌, Vol.96, No.5, pp.299-304, May 2013.
4) 藤田 隆史, 後藤 良則, 小池 新, 「M2M アーキテクチャと技術課題」, 電子情報通信学会会誌, Vol.96, No.5, pp.305-312, May 2013.
5) 堀 賢治, 服部 雅晴, 吉原 貴仁, 井戸上 彰, 山崎 徳和, 「M2M エリアネットワーク」, 電子情報通信学会会誌, Vol.96, No.5, pp.299-304, May 2013.
6) 平成 23～26 年版 情報通信白書, 総務省, 2011～2014.

3.11.3　社会システムデザイン

（1）研究開発領域名

社会システムデザイン

（2）研究開発領域の簡潔な説明

交通・物流、エネルギー、公共サービス、医療・介護、第一次産業といった社会システム全般が対象となる課題である。実世界である社会システムの全ての領域において、インターネットにより形成されるサイバー世界との融合により、我々の日常生活全般におけるスマート化・効率化・高度知的化などが実現されることが期待される。鍵となる技術が CPS/IoT とソーシャルメディアである。CPS/IoT においては、導入が遅れている第一次産業への積極的な展開と、モノから人へのより能動的な働きかけを実現するアンビエント情報基盤技術の進展が課題であり、後者の課題の本質はソーシャルメディアにおける課題と同じく「個人適応」にある。そして、個人適応のための鍵となる情報が CPS/IoT やソーシャルメディアを始めとするインターネットを介して得られる、日常生活における各個人レベルの膨大な活動情報から各個人の行動パターンや行動の意図を抽出・推定するビッグデータマイニング・機械学習技術である。

社会システムを構成する最小単位であると同時に、社会システムの対象であるのが「人」であり、CPS/IoT やソーシャルメディアの浸透と、人工知能技術の高度化、そしてクラウドコンピューティングや並列コンピューティング技術の急速な発展に伴い、個人レベルの振る舞いを考慮した社会システムデザインを可能とする段階に入りつつあると考えられる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

国内における CPS/IoT への取り組みとしては、2011 年に経済産業省にて中間報告としてまとめられた「融合新産業の創出に向けて　～スマート・コンバージェンスの下でのシステム型ビジネス展開～」において、農業や医療、交通などの社会システムと IT との融合による新しいシステム産業創出を目指すとした提言や、それを受けての 2012 年の NEDO による「IT 融合による新社会システムの開発・実証プロジェクト」として、都市交通、ヘルスケア、農商工連携を例とした取り組みが現在実施されている。また、環境センシングや、バイタルセンシングやスマホを介したユーザーの様々な行動情報、店舗での POS データや、PASMO を始めとする電子マネーの利用履歴など、我々の日常生活における多種多量な時系列データが容易に収集かつ、利用可能となりつつある。ビッグデータ化する膨大なセンサーデータのためのデータマイニングにおいても、MapReduce を始めとする分散処理技術や Jubatus [4)]といった新しいストリームマイニング技術の台頭などを背景として、大学や企業、国家プロジェクトを始め様々な応用先かつ規模にて研究開発が行われている。

米国における CPS への取り組みは 2009 年から NSF が研究支援を開始しており、企業においては IBM が「Smarter Planet」という、環境・エネルギー・食の安全といった地球規模の課題を IT 活用により解決することを目的とするビジョンを立ち上げるなど、「smart」をキーワードとした展開を加速させている。また、DARPA ロボットチャレンジを通したロボット技術の向上を目指す実践的なプロジェクトも開始されている。米国での研究開発速度は速く、Google が買収した Boston Dynamics 社の BigDog ロボットを海兵隊がリムパック

でテストを実施する段階にあり、Amazon と Google が 2015 年開始のドローンによる宅配サービス構想を発表し、これは欧州においては DHL が同様のサービスを 2014 年度中の開始を発表している。また、同じく Google においては、ソーラーエネルギーにて駆動する無人機を開発するタイタンエアロスペース社を買収し、ネット接続サービスや地理情報収集用途に利用することが発表されるなど、欧米では日本に比べて企業による CPS/IoT に関する新規サービスに向けた進化が急加速している。

欧州では、FP7 による ICT への戦略的投資を始め、FP5 における ARTIST プロジェクトによる組み込みシステムに関する研究開発への投資など、CPS/IoT を意識した投資がなされている。また、FP7 においては、Ambient Intelligence 研究プロジェクトも実施されており、大学・企業・公的研究機関が参加するなど精力的な研究開発が行われている。

中国においては、物聯網（ウーレンワン)という名称にて、RFID やセンサーネットワークを利用したセンシングと情報ネットワークを融合により、交通や物流の効率化を目指す活動が広く都市間にて競争的に行われている。

韓国においては、サムソンがけん引役であり、2014 年 7 月に家庭内機器の IoT の標準化に主眼を置く非営利団体 Thread Group [2)]に参画するなど、積極的な展開を見せているが、国レベルの活動という点では日米欧に比べて注目度が低いように見受けられる。

（4）科学技術的・政策的課題

・CPS/IoT の導入に向けた活動においては、SUICA や電子マネーなど、主として都市部における日常生活への導入速度は向上しつつあるが、第一次産業への展開が相対的に遅れているように見受けられる [3)]。農業試験場といった研究拠点では IT 導入に向けたセンシングやロボット活用といった試みが盛んになりつつあるが、それ以外の一般の農家に対しての本格的な展開についてはまだ時期尚早というレベルである。都市部に野菜を安定供給するための野菜工場の駆動に向けた展開は加速しつつあるが、国内における農作業現場の大半は従来通りの屋外にて自然と相対する環境である。屋内と異なり天候の影響を直接受ける環境であることから、センサーなどの設置と管理が容易であることが必須である。また、圃場に電源とネットワークのためのケーブルを敷設することも困難であり、これらの要求に対応したセンシングデバイスの更なる開発が急務である。
加えて問題となるのがセンサー等の価格である。現状では個々の農家がこれらのデバイスを購入するしかなく、抜本的な助成などの政策が必要であろう。そもそも、一般農家がセンサーシステムを導入するだけで生産性や農作物の質が向上することはなく、熟練農家や農業試験場でのノウハウを一般農家に反映させるための「暗黙知抽出」や個々の農家の農作業の仕方に対応してノウハウを伝授する仕組みの確立のための研究・開発も急務である。第一次産業に関する社会システムデザインは国の基盤を成す重要な課題であり、農産物に関しては TPP 問題を鑑みるに「量」に加えて「質の向上」が求められる。

・社会システムは大規模かつ動的な複雑システムであり、現在の社会システムもすべてが計画通りに設計されたものではない。大規模複雑系では多数の自律的なシステムが複雑に影響し合い、様々な階層が構成されている。社会システムであれば、自律システムの最小単位が人であり、様々な人々の振る舞いの集合として社会や国家が形成される。従来の工学的なシステム構築方法、すなわち大問題を小問題に分化して再構成する還元的手法では大

規模複雑システムを構築することは困難であり、大規模複雑系を理解・制御・構築する理論体系を構築する必要がある。この課題に対して、センサーや RFID などを介して様々な実世界の情報が容易かつ大量に収集可能となる CPS/IoT 基盤は極めて重要である。

・CPS/IoT は今後の社会システムデザインにとって基盤となるものであり、CPS/IoT を社会全般に偏在させることが必要であろう。そのためには、センシングデバイス同士での通信プロトコルや収集されるデータの管理方法に対する社会全般レベルでの標準化も必要となる。例えば、現在は、家電ネットワークと ITS における車内 LAN や、上記農作業でのセンシング機器の通信方法などはすべて独立した研究開発となっており、これら全てにまたがる標準化が必要となる。そのための産官学の積極的な連携が必要であろう。

・CPS/IoT とソーシャルメディアとの関係においては、特に情報拡散の観点からのセキュリティー対策が課題であろう。アカウント情報の不法取得やデータの不法入手といったシステムに関連する脆弱性に対する防衛は無論のこと、デマや流言・個人情報の拡散といった、人為的に起こされる問題に対応するための技術開発が急務である。CPS/IoT の浸透により、より詳細な個人情報や環境情報が流出する事態は避けなければならない。難しいのは、デマや流言といった事象が、必ずしも悪意で発生するわけではないということであろう。最初は善意から発信された情報が結果的に間違った情報であるにも関わらず拡散されてしまうというケースも多々存在する。情報が拡散するパターンからのこれらの異常な現象の早期検出と拡散を早期に収拾するための技術開発が急務であろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・農林業など熟練者の暗黙知の形式知化に向けた取り組みが、様々なバイタルセンサーや環境センサーによる CPS/IoT を基盤として加速しつつある。

・CPS/IoT にて収集されるデータは多様かつ多量であり、時系列性のあるデータも含まれる。まさにビッグデータと呼ぶべきデータであるが、ビッグデータに対するデータマイニング技術・機械学習技術において深層学習といったニューラルネットワーク型手法の進展が見られる。また、様々なデータに対しても対応可能な汎用性を持つ人工知能研究についても注目され始めている [5]。

・関連予算
  - NEDO「IT 融合による新社会システムの開発・実証プロジェクト」
  - 文科省「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システム構築」
  - JST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」
  - JST CREST「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」
  - JST CREST「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化
  - JSPS 課題設定による先導的人文・社会科学研究推進事業「リスク社会におけるメディアの発達と公共性の構造転換～ネットワーク・モデルの比較行動学に基づく理論・実証・シミュレーション分析 [1]」

（６）キーワード

CPS、IoT、センサーネットワーク、社会システム、複雑系、ビッグデータ、RFID、ロボット、インターネット、自律分散システム

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	NEDO、JST、JSPSなど、基礎研究への予算配分も積極的に行われている。 科研費における関連研究も多く採択されている。国内研究会も活性化されている。
	応用研究・開発	○	↗	標準化など、産業化に向けた動きは基礎研究に比べて遅いように見受けられる。主として都市部での展開に比重が置かれている。
	産業化	△	↗	第1次産業への展開が遅れている。国の基盤をなす部分でもあり、積極的な展開が望まれる。CPS/IoT 導入に向けた抜本的な助成なども必要であろう。
米国	基礎研究	◎	↗	NSF, DARPAなど、精力的に研究が展開されている。
	応用研究・開発	◎	↗	軍事への応用という観点からもロボット研究と並び開発に向けたサポートが積極的に展開されている。
	産業化	◎	↗	日本と異なり、農場は大規模であり、ロボットやセンサーといったCPS/IoTの導入の必要性が特に高く、産業化も進んでいる。都市部での導入・産業化については日本と同等のレベルにあると考えている。
欧州	基礎研究	◎	↗	FP5, 7 などにおいて助成も活発であり、従来理論主導である欧州において基礎研究は活性化されている。
	応用研究・開発	○	↗	日本と同等レベルであると思われる。
	産業化	◎	↗	ドイツ、フランスなど、ID管理によるレンタル自転車サービスや、RFDIによるバス・メトロ・トラムの共通利用など利便性を感じることが多い。
中国	基礎研究	○	↗	近年、CPS/IoT関連の国際会議を多く誘致するなど、基礎研究に対しての積極性が見られる。
	応用研究・開発	○	↗	国内において競合が乱立しており標準化がボトルネックとなっている。また知的財産問題も課題。
	産業化	×	↗	都市部と農村部での乖離が激しく産業化はこれから。
韓国	基礎研究	×	↗	基礎研究においては日米欧に遅れていると感じる。際だった論文も少ないと感じられる。
	応用研究・開発	○	↗	韓国における/IoT のけん引役はサムソンであり、2014年7月に家庭内機器に主眼を置いたIoTの標準化を目指すThread Groupに参画するといった展開を見せている。
	産業化	○	↗	開発に呼応して産業化にも積極的である。

（８）引用資料

1）課題設定による先導的人文・社会科学研究推進事業：
http://www.jsps.go.jp/ryoiki/saitaku.html
2）Thread Group: http://threadgroup.org/Home.aspx
3）AI 農業：http://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/sosyutu/aisystem/aisystem.html
4）Jubatus：http://jubat.us/ja/
5）汎用人工知能研究：http://www.sig-agi.org/

3.11.4 ＣＰＳ／ＩｏＴセキュリティー

（１）研究開発領域名

CPS/IoT セキュリティー

（２）研究開発領域の簡潔な説明

CPS は、交通・エネルギー・製造業・ヘルスケアといった様々なセクターのスマートデバイスやシステムに、今までにない方法でサイバー世界を接続し新たな機会を生む。IoT も同様であり、モノが新たにインターネットに接続することで新たな機会が生まれる。新たな機会が生まれることで、サイバー攻撃（ハッキング）などによるプライバシー・データ保護などセキュリティーに関しても新しいリスクや懸念が生まれる。

このような新しいリスクに対してのセキュリティー対策が必須である。今後の CPS/IoT の発展における重要性を考え、CPS/IoT に関するサイバー攻撃からの予防、軽減、対応技術についての研究開発が欠かせない。なお、データ保護・プライバシーについては別の節にゆずる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

CPS/IoT には多くの利点もあるが、悪意のあるハッカーにもメリットがあり、人々の生活に容易に潜り込めるようになる。ハッカーたちは既に色々なモノを支配できることを証明している。また、セキュリティー研究者たちも特別な知識とツールを入手し新たなハッキング手法を見つけている。セキュリティーの動向を事例に基づいて説明する。まずは悪意のあるハッカーが起こした事故事例を紹介し、次に研究者の発表事例を紹介する。

さらに、制御システムの重要な要素である SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)について述べ、分野別動向についても解説する。

悪意のあるハッカーが起こした事故事例

・冷暖房管理用のセットトップボックスから DDoS 攻撃（韓国）[1)]
2014 年、韓国インターネット振興院（KISA）によると、ゲーム会社のヨーロッパ支社のゲームサーバーが、DDoS 攻撃の対象となっていた。DDoS の送信元は、韓国内の複数の大学に設置された冷暖房管理用のセットトップボックスであった。

・胎児モニターがマルウエア感染（米国）[2)]
2013 年、ボストンにおいて、高リスク妊娠の女性向けの胎児モニター装置がマルウエアに感染し、装置のレスポンスが遅くなったことが報告された。患者に直接の被害はなかった。装置は Philips 製とされている。

・アイロンがウイルスをまき散らす（ロシア）[3)]
中国製のアイロンの中に、近隣 200m 以内の無線 LAN にアクセスし、同 LAN 上の PC にマルウエアをまき散らすチップが埋め込まれていることが発見された。

・核燃料施設の遠心分離器が稼働不能（イラン）[4)]
2011 年、イランの核燃料施設のウラン濃縮用遠心分離機を標的としてサイバー攻撃が実施された。遠心分離機を制御する PLC が乗っ取られ、周波数変換装置が攻撃されたことにより、約 8400 台の遠心分離機の全てが稼働不能に陥った。またブーシェフル原子力発

電所においても被害が生じたとされている。

・病院の冷暖房管理システムや顧客情報管理のコンピューターへ侵入(米国)[5]
2009 年、テキサス州の病院の警備員が、同病院の冷暖房管理（HVAC システム）や顧客情報のコンピューターに侵入し、HVAC システムのスクリーンショットをオンラインで公開。公開された画面では、手術室のポンプや冷却装置を含め、病院の様々な機能のメニューが確認できる。さらに、病院内の PC にマルウエアをインストールする様子なども動画で公開された。逮捕により未遂に終わったものの、警備員は、乗っ取った病院のシステムを使って独立記念日に大規模な DDoS 攻撃を仕掛ける計画を立てていた。

・26 万 4000 ガロンの未処理水が近隣の川に流される（オーストラリア）[6]
2000 年、制御システムの一つである SCADA ソフトウエアを開発する企業の元従業員が、上下水処理場の運営会社の職に応募した。しかし不採用とされたことに恨みを抱き、2 カ月の間 46 回にわたって同社の下水処理の制御システムに侵入し、下水排水施設のデータを書き換えたりオペレーションを妨害。26 万 4000 ガロンの未処理水が近隣の川に流された。

研究者の発表事例

・ホテル内の任意の部屋の電源、温度管理などが操作される（中国）[7]
2014 年、中国・深圳市のホテル St Regis Shenzhen で、各客室に備え付けられた iPad（室内の照明やテレビ、ブラインドの開閉、温度管理などを制御）のプロトコル(KNX/IP)を解析し、任意の部屋のテレビ等の電源を入れるなどのハッキング事例を報告。

・飛行機の機内システムがハッキングされる（米国）[8]
2014 年、IOActive 社のサイバーセキュリティー専門コンサルタントが機内システム用の機器を製造する Cobham、Harris、Hughes Network Systems、Iridium Communications、そして JRC 日本無線の機器をリバースエンジニアリングの手法を用いて検証し、脆弱性をあぶり出すことに成功した。

・信号機がハッキングされる（米国）[9]
2014 年、ミシガン大学の研究チームが、無線ネットワークにつながった交通信号をハッキングできないか試みたところ、100 カ所ほどの交差点の信号機のハッキングに成功。この自動車の交通量に応じて信号機を自動制御するシステムは、アメリカや日本で導入されている。

・刑務所のドアが囚人によって開かれる（米国）[10]
2011 年、刑務所（連邦刑務所施設）をコントロールするために使用されているコンピューターシステムのドアやゲートをリモートで開閉するために使われている SCADA システムの PLC に脆弱性が発見された。この脆弱性を悪用すると、監獄のドアをリモート操作で開閉したり、内部通信システムをシャットダウンできることが明らかになった。

・インスリンポンプがハッキングされる（米国）[11]
2011 年、糖尿病患者にインスリンを持続的に注入するコンピューター制御の携帯型医療機器であるインスリンポンプや、体内に植え込んで使うペースメーカー・ICD（植え込み型除細動器）について、無線機能の脆弱性により、インスリンポンプを停止に追いやったり、投与するインスリンの量を外部から操作し致死量まで増やすことができるという研究

が発表された。

・スマートメーターがハッキングされる（米国）[12)]

2009 年、認証の不備を利用し、1 つのスマートメーターに悪質なプログラムを仕掛けると、隣接するメーターを次々と感染させ、エリア内のすべてのデバイスをこの悪質なファームウエアに感染させることができると発表された。

SCADA

M2M 製品として、世界で最も使用されているシステムが SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)である。SCADA とは産業制御システムの一種である。用途は幅広く、製造・生産・発電・組み立て・精錬などを含む工業プロセス、水処理・水道・排水・下水処理・石油やガスのパイプライン、送電網・大規模通信システムなどのインフラ、ビルディング・空港・船舶・宇宙ステーションなどの設備に使用される。

2013 年に ICS-CERT は、ユーザーやパートナー経由にて産業システムの 256 件の事件に対応したと発表している。共通の初期感染方法は、インターネットからの不正アクセス、USB 接続のリムーバブルメディア経由のマルウェアの転送、ソフトウエア/ハードウエアの脆弱性の悪用、および標的型攻撃であった。これらの事件の報告は自主的に行われるため、この報告以上の事件が発生していると考えられる。

最も多く攻撃対象となったシステムは SCADA である。次点ではユーザー・インターフェースをつかさどる HMI。その後 PLC、Hardware、Software、Interface/Protocol と続く。割合として 50%が一位である SCADA が占める。SCADA と HMI で 75%、PLC を合わせると 90%をも占める。[13)]

分野別 SCADA 動向

・水道分野

オランダ政府と TNO Defence, Security and Safety 社が、上水道分野用 SCADA のセキュリティー水準向上のために「上水道分野用の SCADA セキュリティー グッド・プラクティス」を 2008 年 3 月に公開。ここには 39 の対策項目がチェックリストとして掲載されており、内 11 件が企業経営者向け、28 件が重要インフラシステムの管理に関する技術者向けとなっている。

・石油分野

2004 年に米国石油協会が「API Standard 1164」を策定。

SCADA システムセキュリティーのための実践策を提供するとともに、SCADA システムによるパイプラインオペレーションのセキュリティーを向上する手段として「SCADA システムのインシデント発生可能性の識別と分析のためのプロセス」「コアとなるアーキテクチャーの堅牢化のための実践策」「推奨実践策の提示」を提供。

・発電システム分野

2006 年に North American Electric Reliability Council が、発電設備と伝送システムに対するセキュリティーリスクを低減するために NERC Cyber Security Standards を策定。

（４）科学技術的・政策的課題

CPS/IoT システムにおいてセキュリティーを確保するためには、以下のような取り組みやリスクを踏まえたシステム設計が必要である。

・技術的問題解決のためにまずはセキュリティーテストを実施する
CPS/IoT にのみ言えることではないが、まずはセキュリティーテストをきちんと実施すべきである。一般的な製品の出荷プロセスと同様に、品質のチェックという意味でのテストのみならずセキュリティーの観点からのテストが必要である。
現在では完成品に対して、脆弱性調査やペネトレーションテストという手法が使われている。この手法の問題点は、表面からテスト（擬似攻撃、解析）を行うことであり、テスト項目が網羅的ではない上に、仮に問題点が検出されてもその部分だけを修正するいわばもぐらたたき的な修正アプローチとなり、潜在的な問題点が残り続ける原因となる。また、完成品の入手や検証施設（テストベッド）の準備も技術者の負担となるため、大規模なものは十分に評価されない可能性がある。製品としての網羅性を考えたテストを実施しなければならない。

・サプライチェーンリスクを考慮する
各種製品は世界中の複数のベンダーによって組み立てられて輸送されるが、それが安全だとは限らない。悪意のある当事者が製品の改ざんや妨害行為をしたり、最終的にはシステムインテグリティーや信頼性、安全性を危険にさらされるなど、多くの危険性が存在する。ハードウエアやソフトウエアそしてサービスを不正に入手する組織については完全に解明されていないことに加えて、これらの製品やサービスに関係するセキュリティーリスクの適切な管理もできていない。従来の、納期や障害時の回復に加えて、製品に脆弱性があった場合のリスクや情報が不正に抜き取られるものを埋め込まれていないかなどのリスクマネジメントが必要である。

・リスクはコンテキストアウェア（context aware）である
多くの個人がプロセスに関わるほど、プライバシーの考慮やポリシーがコンテキストアウェアとなる。プライバシーやデータ保護、セキュリティー保護については、考慮するオブジェクト（ヘルス系なのか、位置情報系なのか等）の目的によって変わる。例えば、スマートホームやスマートグリッドといった電力管理アプリケーションでは、プライバシーとデータ保護をどう確保するのかを考慮しなくてはならない。

・データ保護、プライバシーとコンプライアンス教育が必要である
データ保護の権利とデータ保護の基本方針をどのように受け入れるかを教育することが必要である。裏で IoT アプリケーションが動いていても、個人情報が処理されていることに気付かない可能性がある。さらには、データを収集するための権限とデータ収集の最適な頻度も慎重に対処すべき問題である。

・プライバシーとデータの保護
IoT 環境の特徴は、デバイス、センサー、リーダーそしてアプリケーションが環境内でやり取りする様々なタイプの個人情報を収集することである。このような情報は、ID やセンサーデータそして IoT システムへの接続機能から収集した情報によって、個人の趣味、位置情報が露呈するかもしれない。こういった懸念は、電子認証の欠陥や ID の盗難にも

関連する。この問題に関する最近の事例は、コンタクトレスなクレジットカード（非接触型クレジットカード）に見られる。このクレジットカードは、認証せずに名前やカード番号を読み取ることできるので、カードデータを悪用した攻撃者がカード所有者の ID と銀行口座から買い物ができてしまう。従って、プライバシーの保護と同時にデータの保護にも配慮する必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際動向

・欧州 Cyber-Phisical Systems of System(CPSoS)

EU が出資するプロジェクト[14]。CPSoS は、System of System(SoS)関連のプロジェクトやコミュニティ向けのエクスチェンジプラットフォームを提供している。これは、大規模で複雑な Physical System に関係するコンピューティングシステムやコミュニケーションシステムのエンジニアリングやオペレーションがもたらす課題に焦点を当てている。CPSoS のアプローチは、異なる SoS 関連のコミュニティから知識を集めると同時に、アプリケーションを動かすという方法である。また、欧州委員会（European Comission）ではセキュリティー分野として、データ保護とプライバシーについて述べている[15]。トレーサビリティ（追跡可能性）/プロファイリング/違法な処理、個人向けのデータ保護の権利に関する教育と組織へのコンプライアンス教育、ユーザーコントロールの喪失と決断の困難さなどが検討されている。

・米国 IEEE　CPS Testbeds

Smart Grid、CPS のテストベッドについてセキュリティーが述べられている。セキュリティーテストの手法、評価システムについてテストベッドを中心として検討が行われている。この CPS のテストベッドによって、スマートグリッド研究開発におけるセキュリティーや技術転換のペースは加速するという認識である。このようなニーズは NIST Smart America Challenge（SAC）によって国家の優先事項として位置づけられている[16]。SAC では、セキュリティーとして、プライバシーの問題と安全な通信について検討する必要があると指摘している。アーキテクチャーとして、セキュリティーセンターを一カ所用意し、既存技術と同じく、認証・証明書サービス、認証局、ID 管理の機能が定義されている。

・サプライヤー関連の情報セキュリティーマネジメント

世界的な適用を目指した国際基準であり、アクワイアー（ベンダー）とサプライヤー両方に対応する情報セキュリティーマネジメントとして ISO/IEC27036 が存在する。対象は商業、公共セクター、非営利やその他すべてのサプライヤー関係に関連する組織である。システムやソフトウェアエンジニアリングや情報セキュリティーに関する ISO 基準と一致させることとしている。現在、パート 1 から 3 は現在の国際基準のドラフトで、パート 4 は作業草案である。 基準として ISO/IEC JTC1 SC27 を発展させたものである。

・米国連邦政府の情報システム向け国家サプライチェーンリスクマネジメント

政府機関では NISTIR7622 が存在する。目的は連邦政府関係機関のガイダンスとサプライチェーンリスクマネジメントを調達機関のプロセスに統合させることである。サプライチェーンにおける 3 つの役割に対処している。

- Acquirer－政府の部門や機関が製品やサービスを入手する

- Integrator－要員やプロセス、システムをカスタマイズする特別な組織
- Supplier－Acquirer や Integrator との合意や COTS 製品の供給のためのインテグレーターを結ぶための組織や個人

（6）キーワード

セキュリティーテスト、データ保護、プライバシー、データ収集、SCADA、サプライチェーンリスク、セキュリティー運用

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	事例の収集、NEDOにてセキュリティーベンダーとメーカーにて実証実験 JNSAにてIoTセキュリティーWGの発足 サイバーセキュリティー2013
	応用研究・開発	△	→	事例の収集中心であり、特筆すべき事例は存在しない JAISTや東京電機大学にてセキュリティーコース開設予定、今後に期待
	産業化	×	→	CPS/IoTに限らず製品開発においては特筆すべき活動が見当たらない 一部のセキュリティーベンダーにて警鐘が鳴らされている
米国	基礎研究	◎	↗	BlackHatなどのセキュリティーカンファレンスにて研究者が問題と課題について発表 NIST IR 7628, Smart America Challenge
	応用研究・開発	○	→	スマートメーターを中心に、テストベッドを利用して議論を行っている
	産業化	○	↗	CPS/IoT製品専用の攻撃ツールの販売 既存セキュリティーベンダーによる、CPS/IoT向けのマルウエア対策
欧州	基礎研究	○	→	BlackHatなどのセキュリティーカンファレンスにて研究者が問題と課題について発表
	応用研究・開発	○	↗	データプライバシーとデータ保護について活発に議論 IoT Privacy, Data Protection, Information Security
	産業化	◎	↗	SCADA専用のIDSの製品開発
中国	基礎研究	×	→	特筆すべき事例は存在しない
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき事例は存在しない
	産業化	×	→	特筆すべき事例は存在しない
韓国	基礎研究	×	→	事例の収集中心であり、特筆すべき事例は存在しない
	応用研究・開発	×	→	事例の収集中心であり、特筆すべき事例は存在しない
	産業化	△	→	IoTデバイス自体にセキュリティー機能を盛り込んだ製品発表

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) http://m.etnews.com/20140516000085
2) http://www.ipa.go.jp/files/000038223.pdf
Hospital medical devices riddled with malware :
http://www.fiercehealthit.com/story/hospital-medical-devices-riddled-malware/2012-10-18
3) 英国 BBC サイト（「TV 番組ロシア 24」の放映内容より）:
http://www.bbc.co.uk/news/blogs-news-from-elsewhere-24707337
4) http://www.globalresearch.ca/israeli-intelligence-report-us-drone-downed-by-iran-cyber-attack/28114
5) Feds: Hospital hacker's 'massive' DDoS averted :
http://www.theregister.co.uk/2009/07/01/hospital_hacker_arrested/
6) http://www.css-center.or.jp/pdf/about_CSSC_20140929.pdf
7) Here’s How Easy It Could Be for Hackers to Control Your Hotel Room :
http://www.wired.com/2014/07/hacking-hotel-room-controls/
8) Hacker Says He Can Break Into Airplane Systems Using In-Flight Wi-Fi :
http://www.npr.org/blogs/alltechconsidered/2014/08/04/337794061/hacker-says-he-can-break-into-airplane-systems-using-in-flight-wi-fi
9) Researchers Demo Hack to Seize Control of Municipal Traffic Signal Systems :
http://www.eecs.umich.edu/eecs/about/articles/2014/Green-Lights-Forever.html
10) SCADA & PLC VULNERABILITIES IN CORRECTIONAL FACILITIES :
http://www.wired.com/images_blogs/threatlevel/2011/07/PLC-White-Paper_Newman_Rad_Strauchs_July22_2011.pdf
11) Black hat hacker can remotely attack insulin pumps and kill people :
http://www.cbsnews.com/news/black-hat-hacker-can-remotely-attack-insulin-pumps-and-kill-people/
12) IOActive Unveils Smart Grid Security Research :
http://www.ioactive.com/services_grid_research.html
13) http://www.ptsecurity.com/download/SCADA_analytics_english.pdf
14) A European Roadmap on Cyber-Physical Systems of Systems
http://ercim-news.ercim.eu/en97/special/a-european-roadmap-on-cyber-physical-systems-of-systems
15) IoT Privacy, Data Protection, Information Security
http://ec.europa.eu/information_society/newsroom/cf/dae/document.cfm?doc_id=1753
16) CPS Testbeds: Energizing a Cybersecure Smart Grid
http://smartgrid.ieee.org/march-2014/1055-cps-testbeds-energizing-a-cybersecure-smart-grid

3.11.5　応用と社会インパクト

（1）研究開発領域名

応用と社会インパクト

（2）研究開発領域の簡潔な説明

スマートフォンや、Wi-Fi・Bluetooth を搭載した低価格の組み込みデバイスと Web サービスが連携することにより、実空間の情報を巧みに取り込んだリッチなサービスが展開され始めている。ウエアラブル、スマートホーム、ヘルスケア分野においての期待が大きい。キラーアプリケーションと呼べるものはいまだ不在ではあるが、プラットフォームや標準のイニシアチブをとることで当該研究分野の主導権を握ろうとする動きが加速している。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

従来ユビキタスコンピューティングであったり、センサーネットワークといったコンセプトで提唱されていた様々なが、CPS/IoT の応用技術として実際の製品に採用され始めた。スマートフォンの普及が果たした役割は大きく、近距離無線で到達する数メートルの範囲を超えなかった実空間に配置されたセンサー情報を、ユーザーのスマートフォンを通じてネットワーク上のクラウドにアップロードすることが低コストで可能になってきた。

CPS/IoT の研究領域は多岐にわたり、両者の専門領域が存在するというよりも、MEMS やセンサーデバイスの素子、回路技術、システムエレクトロニクス技術、通信ネットワーク、ミドルウエア、ユーザーインターフェース技術などの従来から存在する技術分野における新たな潮流として位置づけられている。したがって、CPS/IoT の主要な応用事例はあらゆる業種において見つけることができる。一般的な CPS/IoT のアプリケーションを定義することは難しいが、特に 2014 年から 2015 年にかけて注目の大きかった領域はウエアラブル、自動車、そしてスマートホームである。

ウエアラブル分野で 2013 年にもっとも注目が高かったのはゴーグル型の表示装置である。Google Glass [1)]のようなスマートフォンなどの情報提示装置のほか、Oculus Rift [2)]のような没入感のある映像を手軽に提示するための表示装置としての商品が多く提案された。日本ではソニーやエプソンが製品を販売している。2014 年にはスマートウオッチの新製品が多く登場した。ソニーやサムスンのほか、Apple が開発する Apple Watch [3)]への期待は大きい。多くのスマートウオッチはスマートフォンと連携して利用するものであり、小さなスクリーンにスマートフォンへの各種通知を表示する機能を備えている。Adidas や Nike、Fitbit [4)], Jawbone [5)]などはよりスリムなデザインを導入し活動量計としての機能を前面に打ち出している製品もある。3 軸加速度センサーが小型低消費電力になり、信号処理を行うことで歩数以上の複雑な活動状態や睡眠を推定できることになったことが大きい。必ずしも腕時計型でないものも含めればさらに製品は増える。

スマートホームのコンセプトは数十年前から存在し、現代でも基本的なアイデアに変わりはない。ただ 2011 年 11 月に発表された Nest 社のスマートサーモスタット [6)]などスマートホームは IoT 技術を巧みに利用した代表的な商品として紹介されることが多い。セントラルヒーティングが主流の米国では、ユーザーが細かな室温調節などを行うことは習慣に無かった。Nest のサーモスタットは住んでいる人の行動パターンや設置されている家の気象情報、

部屋の室温上昇・低下の傾向を学習して約２割から３割の光熱費を削減することができる。スマートフォンとの連携により、外出先から戻る前にサーモスタットを ON にすることもできる。１台 249 ドルの製品で、平均的な家庭では半年から１年で機器購入コストを償却できることを売りにしている。同社が開発する火災報知器 Protect のほか、サードパーティー製の機器やデバイスとも API を通じて連携可能である。単なるサーモスタットというよりは IoT 時代のスマートホームのハブとなることが期待されており、同社は Google によって 32 億ドルで買収されたことも、同社が話題になった原因の一つである。

スマートロックも主に米国で需要と注目度の高いアプリケーションである。ルームシェアや AirBnB [7]といった個人での部屋の貸し借り、シェアオフィスを対象として既存のドアにデバイスを付加し、スマートフォンを用いて鍵の開け閉めを行うことができる。モバイルアプリによって動的に登録者を細かく制御できるため、友人家族、訪問者のアクセス権を細かく制御できる。Bluetooth を搭載した機種では接近を検知しただけでキーコードなしで解錠されるものもあり、利便性も向上する。また解錠した人の顔写真をとることができる機種もある。Goji [8], Lokitron [9], Augst [10]といった製品が代表的な物である。

自動車も IoT により、ユースケースが変わりそうな分野の一つである。LTE 技術により、高速移動時でも無線でブロードバンド通信が可能になってきた。カーナビゲーションの地図情報や、交通情報のオンラインからの取得に加え、車内のエンターテインメントコンテンツのダウンロード配信が期待されている。車載インフォテイメント分野では、Windows Embedded Automotive 7、QNX、Tizen、iOS 7 in the car、OAA など、各自動車会社がソフトウェア企業等を巻き込んでプラットフォームの構築にしのぎを削っている [11]。IoT により新たに登場した車関連のサービスとしてはカーシェアを挙げることができる。米国の zipcar や日本の Times や Orix のカーシェアサービスにおいては、無線通信可能な車載機により、ユーザーが携帯する IC カードなどで車の鍵の開け閉めをするのが一般的である。サイクルシェアリングについても同様である。また、自動車分野では自動操縦技術も盛んである。Google など自動車産業以外の会社も同技術を積極的に開拓しており、ビジネス展開の方向性について注目度の高い分野である。

（４）科学技術的・政策的課題

前述したように、IoT や CPS の近年の注目の理由は、各種無線通信技術の進展にあろう。4G LTE 技術が広範囲で低コストに使えるようになり、広い範囲に展開されたデバイスがクラウドに用意にアクセスできるようになったこと、MVNO (Mobile Virtual Network Operator)が普及することで、通話が無い代わりに通信料が比較的安い通信プランなどが提供されるようになったことが、各種のサービスの実現に貢献している。また、広域の無線のみならず、ユーザーの周り数メートルといった近隣のデバイスとの通信をつかさどる Personal Area Network の通信仕様も多いに改善した。かざすだけで使える NFC、ペアリングが容易な Bluetooth 4.0 (BLE) は従来の Bluetooth 3.0 よりもシンプルで低消費電力の通信が可能になっている。iBeacon と呼ばれる位置情報システムでは FMP “Find me” profile という無くした端末を別のデバイスから探すためのプロファイルや、PXP (proximity profile)と呼ばれる受信信号強度からだいたいの位置を求め対象の物が付近にあるかどうかを調べるためのプロファイルが用意されるなど、3.0 以前と比べてもより多様なデバイスのネットワーク化

を意識したプロファイルが用意されている。

IoT や CPS のアプリケーションは膨大に存在し、IoT や CPS を統一的に取り扱うミドルウエア技術や通信標準は存在し得ないと考えるのが妥当である。ただし、ある程度アプリケーションドメインが絞られた業界においてはプラットフォームの標準化に向けての動きがいくつか見られる。前述した車載インフォテイメントの分野以外では、センサーやスマートホームにおけるエンターテインメントやホームセキュリティー等を対象にしたコンソーシアムが林立している。通信会社や ARIB などが関わる oneM2M、サムスン、インテル等がリードする Open Interconnect Consortium [12]、Linux foundation が中心となり Qualcomm や電機系の企業、シスコが関わる AllSeen Alliance [13]、Google 傘下の Nest や Samsung など 7 社が結成した Thread [14] などがある。私的な企業が形成した物では、Apple の Home kit、iControl、ドイツテレコムの QIVICON、AT&T の Digital Life 等も存在する。こうしたプラットフォームの研究開発は今後も激化すると考えられる。

基礎研究で活発なのは、センサーや有機エレクトロニクスの開発である。特にヘルスケア用のセンシング技術は日米欧の高等研究機関で活発に研究が進められている。センシング技術の進展により、これまで離散的にしか測れなかった生体情報（例えば血圧や血糖値）を連続的かつ非侵襲に計測する技術などが多く提案されているほか、医師が不足している発展途上国においてスマートフォンなどを活用することで遠隔診断を行う技術なども盛んに研究されている [15]。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

魅力的な IoT 製品が数多くの米国のスタートアップ企業から提案、実用化されている。これには、IoT 分野における投資が過熱しているというだけでなく、クラウドファンディングプラットフォームが身近になってきたという影響が大きい。クラウドファンディングとは、Web 上でプロジェクトへの出資者を募るサービスのことを呼ぶ。米 Kickstarter [16]などは目標額が集まるとキャンペーンが成功と見なされ企画者へ現金が振り込まれる。昨今では出資者への見返りとしてプロダクトを現物支給するようなキャンペーン形式も定着し、事実上の事前購入サイトとして機能している。通常の EC サイトと異なりキャンペーンには成功しても、プロダクトの開発自体には失敗することもある。はソフトウェア開発と異なり、製品の開発にまとまった金額の現金が必要になるほか、部品の調達の都合から注文台数の正確な読みが求められる。したがって、こうしたクラウドファンディングのサイト上でアイデアを先行公開し、ユーザーに対して需要を正確に評価して生産計画をたてられるようになったことでより少ないリスクで新製品開発野チャレンジが可能になった意義は大きい。製品化に成功した場合には、Google など大手資本に買収されるというケースも見られる。

欧米では私企業やコンソーシアムによる IoT の製品開発が盛んであるが、国からの支援が大きいのが中国と韓国である。中国は 2012 年８月に「IoT 発展省庁横断会議」を発足し、国を挙げて標準制定、技術開発、方向付けに力を入れている [17]。センサーの開発や無線通信のほか、スマートグリッド分野における送電施設の監視技術やスマートメーターに IoT 技術を用いることに熱心であるという。

一方の韓国は 2014 年に EU と共同宣言を採択し、5G 関連の技術開発、周波数政策などで、緊密な協力体系を構築している。韓国側には 2018 年の平昌冬季オリンピックにおいて

5G 関連技術を披露し、2020 年には世界に先駆けて商用化するもくろみがある模様である。

ドイツ政府が掲げる「Industrie 4.0」では IoT を第四次産業革命を実現しうる技術として期待を集めている。工業製品の生産工場をセンサー技術でスマート化し、適応性が高く、高効率で生産性の高い工場の実現を目指している[18]。

Fairchild Semiconductor は Trillion Sensors Universe プロジェクトを立ち上げ米国の大学を巻き込んで 1 兆個のセンサーにより生活を豊かにする新ビジョンを押し進めている[19]。

（6）キーワード

センサーネットワーク、スマートホーム、スマートメーター、コネクテッドホーム

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	センサーネットワークを用いた実空間情報の取得を行う研究については基礎研究が一通り終了しているという印象がある。デバイス系の研究は強い。
	応用研究・開発	○	→	実際に利用可能なセンサーが多く市販されるようになったことやスマートフォンが普及したことにより研究開発が容易になった。アプリケーションやシステムの研究ではプレゼンスがあるが、センサー自身の研究コミュニティ等は必ずしもIoT、CPSを強調している訳ではない。
	産業化	○	↗	元来、家電などのハードウエアに強いメーカーが、ネットワークサービスと連携する様々なハードウエア製品を積極的に出している。ハードウエア製造を手がけるスタートアップ企業も増加している。
米国	基礎研究	○	→	基礎研究を巡る動向に関しては、日米欧でそれほど大きな違いは見られない。
	応用研究・開発	◎	↗	応用研究についてはセンサーやMEMS、回路系の研究分野からネットワーク、ヒューマンコンピュータインタラクションに至るまであらゆる分野でIoTやCPSを意識した研究が増加している。ヘルスケア分野でのイノベーションの期待が特に大きいのも米国の特徴。
	産業化	◎	↗	デバイスからシステム、アプリケーションに至るまで様々な分野での産業化へのチャレンジが進んでいる。大企業だけでなくベンチャー企業の参入も活発であり、IoT、CPS分野への投資も活発である。
欧州	基礎研究	○	→	基礎研究を巡る動向に関しては、日米欧でそれほど大きな違いは見られない。
	応用研究・開発	○	↗	センサー技術、デバイス技術に関してユニークな技術を有する研究所が欧州には点在する。
	産業化	○	→	電気、自動車関係の企業が産業化をけん引している。スタートアップでは独シーメンスのスピンオフであるEnOceanなど、IoT機器向けのエネルギーハーベスティングを手がける会社が存在する。
中国	基礎研究	△	↗	国家としてIoTやCPSを推進する施策を積極的に打ち出している。当該分野の基礎研究についての期待は非常に大きい。標準制定、技術開発に対して非常に積極的である。
	応用研究・開発	◎	↗	応用分野としては、スマートグリッドが大きなアプリケーションの柱の一つである。
	産業化	◎	↗	世界中のIoTやCPS機器の製造に深センの工場群が深く関わっている。
韓国	基礎研究	△	↗	基礎研究を巡る動向に関しては、日米欧同様の状況であるが、大企業が中国同様に標準制定等に熱心である。
	応用研究・開発	◎	↗	特にサムソン電子やLGといった電気系企業がM2M標準規格の制定に熱心に関わっている。大企業はアプリケーションよりも、標準技術の制定に熱心である。
	産業化	◎	→	スマートフォンと連携するサービス等についてサムソン、LGなどが積極的に打ち出している。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) Google Glass, https://www.google.com/glass/
2) Oculus Rift, https://www.oculus.com/ja/
3) Watch, https://www.apple.com/jp/watch/
4) Fitbit, http://www.fitbit.com/jp
5) Jawbone, https://jawbone.com/
6) Nest, https://nest.com/
7) AirBnB, https://www.airbnb.jp/
8) Goji, http://www.gojiaccess.com/
9) Lockitron, https://lockitron.com/
10) Augst, http://august.com/
11) シリコンバレーにおけるイノベーション Connected Cars と Autonomous Cars 調査報告, NEDO シリコンバレー事務所委託調査 http://www.nedosv.org/wp-content/uploads/2014/05/Connected-Cars-and-Autonomous-Cars 調査報告書.pdf
12) http://openinterconnect.org/
13) Allseen Alliance, https://allseenalliance.org/
14) Thread, http://www.threadgroup.org/
15) David Robson, Should we diagnose rare diseases with smartphones?, BBC, World-changing ideas, 2014, http://www.bbc.com/future/story/20141017-the-ebola-detector-in-your-pocket
16) Kickstarter, https://www.kickstarter.com/
17) 工業情報化部電信研究院、http://www.catr.cn/
18) 高野敦、Industry 4.0 ドイツが目指す第四次産業革命、日経テクノロジーオンライン, http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20140107/326061/
19) Janusz Bryzek, Roadmap for the trillion sensor universe, iNEMI Spring member meeting and webinar, 2013.

３.11.６　ものづくりとＩｏＴ

（１）研究開発領域名

ものづくりとＩｏＴ

（２）研究開発領域の簡潔な説明

センサーネットワーク、ウエアラブルデバイス、データ分析などの IoT(Internet-of-Things)関連の技術・サービスを製造業および周辺産業において活用し、製品の品質や機能の向上、製品やビジネスモデルの高付加価値化、あるいは設計や製造プロセスにおけるイノベーションを実現することによって、モノづくりに関わる産業の競争力を強化することを目的とする応用技術領域。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

従来、企業情報システムの役割は、電子化による業務の記録と効率化、ルーティンワークの自動化、大量データの集計や検索、ワークフローなどによるビジネスプロセスの制御・管理などが主であった。現在では、情報システムがビジネスにおいて不可欠なものとなったが、情報システムに対する期待は、データ分析や最適化などの機能による業務上の意思決定の支援や、診断・分析・設計・計画などの高度な知的作業を必要とする業務の支援や自動化など、ビジネスに対する直接的な価値をもたらす領域に移りつつある。また、個々の業務のみならずビジネスモデル全体が情報技術を核としたものに変化していくデジタル化と呼ばれる動きも活発である。

一方で、スマートフォンやタブレットなどのスマートデバイスの普及と進化によって、高性能なセンサーデバイスなどが急速に広まってコモディティ化している。また、ソーシャルネットワーキングサービスやオンラインショッピングの普及によって、ビジネスにおいて有益な情報が抽出できる可能性のある多量のデータがネット上に蓄積されている。それらのデータを扱うために、統計解析・機械学習などのデータを扱う技術、またそれらの処理を効率よく並行化して実行するプラットフォームも発展してきている。これらのビッグデータと呼ばれる動きにおける関連技術は、一般消費者向けのネットビジネスや実店舗の小売業においての活用が進みつつある。

提供される商品やサービスにおいては、モノ（物理的実体のある製品）のサービス化、あるいはサービスのモノ化と呼ばれる、サービスとモノとが一体となる方向性も見られる。従来モノとして売られていた製品がネットワークにつながるようになり、その製品が得るデータをクラウドサービスに吸い上げて処理をすることによって、高い付加価値を持つ情報やサービスを、スマートデバイスなどを通じて提供することが可能になってきた。このように従来は個々の独立したモノとして扱われていた、PC やスマートデバイス以外の様々なモノがネットワークに接続されていく姿としての IoT (Internet of Things)と呼ばれる方向性が注目されている。現実世界の様々なリアルなモノがネットワーク上の仮想的なサイバー空間に密に接続されていく姿は、サイバーフィジカルシステム (CPS)とも呼ばれる。

これらの一般消費者向けの製品やサービスにおいて使われる要素技術とその利用技術の進化の傍ら、製造業においてもそれらの活用が求められるようになってきた。例えば、米国や欧州においては製造業の再強化が重点政策となっていて、その手段として、いずれにおいて

も IoT 関連技術などの IT の活用あるいは IT との融合が共通して挙げられている。すなわち、「モノづくりと IoT」は政策的なコンセプトとシーズ技術が先行する領域である。

製造業においては、設備そのものの自動化に加えて、生産管理やエネルギー最適化など様々な領域において情報技術の活用が進められてきたが、IoT によって従来より細かい粒度（対象、時間間隔）でのモニタリングや制御が可能になることで、生産性・品質・歩留まり・エネルギー消費などの観点において、設計や製造プロセスの更なるイノベーションを起こすことが期待されている。一方で、長期にわたる設備投資の抑制傾向による設備老朽化への対策として、異常検知や故障の予兆診断の高度化のニーズがあり、センサーネットワークやデータ分析・機械学習技術の適用などが期待される。また、現場技能者の高齢化や若年層の労働力不足に備えて、現場の安全確保や技能伝承を目的としたスマートデバイスやウエアラブルデバイス、あるいは拡張現実 (AR)の適用も進むであろう。

また IoT は、製品そのものの高付加価値化（モノのサービス化、サービスのモノ化）への動きも加速する。産業向けの重機から一般消費者向けの靴に至るまで、様々なものにセンサーが組み込まれてネットワークに接続されつつある。これらの方向性は、モノづくりの際の製品設計の考え方を大きく変えていく。生産ラインの製造装置、工場全体のエネルギー・リソース消費量、運送手段（クレーン、車両など）に加えて、作業者や製造対象物そのものもセンシング対象となり得る。これらの情報が蓄積されて、生産ラインや工場間、あるいは企業間で共有できると、生産・在庫・出荷・物流などのサプライチェーンの効率向上に加えて、個々のプロセス自体の改善やイノベーション、製品設計に対する生産工程や利用者（部品・部材としての利用、最終製品としての利用の双方を含む）からのフィードバックなどが期待できる。

（４）科学技術的・政策的課題

製造現場には、ネットワークや管理の観点から、製造機器などを制御するファクトリオートメーション (FA)あるいはオペレーショナルテクノロジー (OT)と呼ばれる領域（以下 FA/OT 領域)と、生産管理システムなどが稼働する情報システム領域（以下 IT 領域）の階層がある。日本の製造業においては、個別の工場や生産ライン、すなわち FA/OT 領域においては自動化を始めとする高度なオペレーションが実現されていることも多い。IT 領域においては、個別の工場や生産ラインのレベルでは高度なシステム化がされていることも多いが、工場や生産ライン間のシステムの標準化・共通化、サプライチェーン全体の最適化、設計情報のライフサイクル管理や、設計と生産ラインの統合などの観点では、まだシステム化が十分ではない。

製造現場におけるビッグデータや IoT 関連技術の活用はまだ緒に就いたばかりである。「モノづくりへの IoT」については、基本的にはコンセプトとシーズ技術が先行しているが、個別に見れば先進的な取り組みの事例も少なくはない [1)]。事例の収集と整理によって、現時点の IoT 関連技術を利用して実現できることが何か、どのような対象領域に適用できるのか、そこでどのようなメリットが享受できるか、そのコストはどの程度か、といった情報を企業間で共有することが有効であろう。

FA-IT 連携と呼ばれる FA/OT 領域と IT 領域のそれぞれのネットワークを、プロトコル変換などの機能を介して連携させる手段は提供されているが、現時点では製造指示と実績デー

タ収集などの必要最小限の接続のみが実現されていることが多い。FA/OT 領域において取得・蓄積されている操業データを IT 領域のシステムで活用するには、この連携機能とネットワークを強化する必要がある。一方で、インターネットとの接続性が比較的高い IT 領域との接続は、外部からの FA/OT 領域への侵入の可能性を高めることになるので、従来よりもなお一層強固なセキュリティー対策が必要となる。

既存設備に対して IoT を適用する場合は、データを収集するセンサーノードに対する電源や電波環境の課題がある。省電力で信頼性の高いセンサーネットワークやノードが安価に提供されることが前提となるだろう。また、センサーからのデータが膨大な量となる場合は、ネットワークの帯域やデータの蓄積が課題になる。また移動体や製品自体にセンサーを仕込む場合には、センサーからの情報に加えて、センサー自体の位置や測定対象などのメタデータの管理が重要になってくる。様々な観点からの分析を可能にするには、センサーデータそのものに対する情報であるメタデータを格納し、柔軟なクエリを受け付けられるデータベースが必要となる。

作業者が身に着けたウエアラブルコンピューターなどによって状況をモニタリングすることで、安全面や作業効率面においての効果を狙うことも考えられる。作業効率面では、インダストリアルエンジニアリングやエスノグラフィーなどの行動観察的なアプローチとセンサー情報とを組み合わせた進め方も研究開発の対象となるだろう。

FA/OT 領域と IT 領域とでは技術担保やシステム化を主管する組織が異なる場合が多い。例えば FA/OT 領域は生産管理部の管轄、IT は情報システム部の管轄であり、IoT を活用したスマートな工場の実現においては、企画・予算などのオペレーション上の課題も大きい。さらに、経営層の理解度も米国に比べると著しく低いのでトップダウンでのアプローチも難しい[1)]。モノづくりと IoT に対する推進体制や経営陣に対する啓蒙活動が必要である。

また、本領域のように、メリットやコストが十分確認できていない新しい対象においては、IT 領域と FA/OT 領域および生産現場の関係者とが協調して漸進的・反復的に試行錯誤を進めていくアイデア共創の仕組みが必要となる。そのような仕組みの確立と共に、異なる領域の橋渡しができる人材の育成も課題であろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［注目すべきプロジェクト］

Industrial Internet

米国 GE 社の提唱するコンセプト[2)3)]。デジタルな世界と機械の世界との融合によってイノベーションと経済的利益をもたらす。具体的には、ジェットエンジンや発電機などの工業製品や製造設備をセンサーなどからの情報を活用してインテリジェント化し、高度な分析によって予防保全などによる経済的価値を得ると共に、作業者の働き方を変えていくものである。Industrial Internet Consortium には GE の他に AT&T、CISCO、Intel、IBM などが参画し、イノベーション事例の収集・整理、相互接続性を担保するための参照アーキテクチャーの構築、国際標準策定プロセスへの意見反映などを中心に活動している。

Industrie 4.0

Industrie 4.0 はドイツ政府と産業界が推進しているプロジェクトであり、産業界からは SIEMENS、ABB、BMW、ThyssenKrupp、ドイツテレコムなどの企業が、そして多数の大学や研究機関が参加している [4)5)6)7)]。Industrie 4.0 は、第一次産業革命としての機械化、第二次の電気化、第三次の自動化に次ぐ第四次の産業革命を意味していて、その本質はサイバーとリアルの融合 (=CPS、Cyber-Physical Systems)であるとされている。具体的には、生産・物流に関わる様々な機械や施設などを個別に自動化・インテリジェント化すると共に、グローバルなネットワークで接続して相互に情報をやり取りできるようにする。これによって、生産プロセスの上流から下流までの垂直方向と、同列の企業や生産ラインを水平方向のネットワーク構造において、リアルタイムで生産ラインおよび製品の管理が可能になる。また、顧客の個別要請へのフレキシブル対応、生産ラインのエネルギー効率の向上、ネットワークを介した遠隔地からのサービスなどによる専門家リソースの有効活用、あるいは冗長なサプライチェーンによるリスク低減などが期待できる。さらに自動化によって人間が創造的な仕事に集中できること、生産計画を動的に調整して柔軟な勤務条件を可能にすることによって、ワークライフバランスの実現にも寄与するとされる。

ワーキンググループによる勧告 [4)]においては、優先すべき取り組みとして、

・参照アーキテクチャーの構築に向けての標準化とオープンスタンダードのアプローチ
・複雑なシステムのマネジメント
・産業からの包括的な要求に応えるブロードバンド基盤
・Industrie 4.0 の成功に不可欠な安全とセキュリティー
・デジタル時代の労働組織とワークデザイン
・Industrie 4.0 に必要なトレーニングと継続的なプロフェッショナル養成
・規制のフレームワーク
・エネルギー・資源の効率性

などが挙げられている。

Industrie 4.0 に着目すべき理由は、新産業創出だけでなく既存産業のリフォームを狙っている点と、標準化への取り組みにみられるトップダウンのアプローチによって関係省庁の壁を越えてドイツ産業界全体のグローバル競争力を強化しようとしている点である。

ドイツにおいては製造装置産業や製造現場がソフトウエア企業や IT 部門に比して強い立場にあるので、IoT などのトレンドに乗り遅れるのではないかとの危機感があったとの見方もある [5)]。また、ドイツは伝統的に中小製造企業が強く、グローバル競争力がある中小企業（グローバルニッチトップ）も少なくない。大企業だけでなく、これらの個別に強みを持つ中小製造企業を含めた動的かつ有機的なサプライチェーンが構築可能になれば、あるいは、この巨大な仮想サプライチェーンがグローバルな拠点でのサービスや人材リソース供給などの仕組みと一体化すれば、相当の競争力を有することになるだろう。

（６）キーワード

IoT、CPS、Industrial Internet、Indistrie 4.0

（７）国際比較

本領域は領域自体が応用領域であるので、基礎研究については IoT の要素技術（センサー、無線通信、データ分析など）の動向を参照のこと。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	応用研究・開発	○	↗	個々の要素技術についての応用研究・開発は進んでいる。
	産業化	○	↗	個々の企業での取り組みには先進的なものも散見されるが、業界や産業界全体としての取り組みはこれからの段階。
米国[2)3)]	応用研究・開発	○	↗	国立標準技術研究所（NIST)への資金拠出。3Dプリンターや ITを活用した新しい製造業などを対象としたInstitute of Manufacturing Innovation (IMI)の設立。
	産業化	◎	↗	国際競争力強化や米国製造業への投資増加のための地域ハブとしての機能を持つNational Network for Manufacturing Innovation Institutes (NNMII)の創設、Industrial Internet 普及を促進するIndustrial Internet Consortium (IIC)の設立など。どちらかと言うとボトムアップ的なアプローチであって、実際的で役立つユースケースを重視しているように感じる。
欧州[4)]	応用研究・開発	○	↗	ドイツにおいてはIndustrie 4.0の枠組みにおいて要素技術の応用研究・開発が進められていて、通信プロトコルの標準化や異なる製造機器同士の相互接続性の検証などが先行している。他にもEUのHorizon 2020において、「未来の工場」に関する提言（Vision for Manufacturing2.0)が支援対象選定の議論の材料となっている。
	産業化	◎	↗	ドイツのIndustrie 4.0のコンセプトと、そこで策定が進められている参照アーキテクチャと標準化の動きについては注視する必要がある。
中国[5)]	応用研究・開発	○	↗	IoTやスマートシティーなどを含む物聯網（ウーレンワン）と呼ばれるコンセプトの下、市や省などの地方政府単位で様々なアクションプランの策定やプロジェクトが進んでいる。
	産業化	○	↗	2011年11月に策定された物聯網第12次五カ年計画における重点分野の一つとして工作機械、生産プロセス、サプライチェーンのスマート化が挙げられている。
韓国[8)]	応用研究・開発	△	↗	様々な産業がITと融合していくとする“IT Convergence”の旗印の下に研究開発が進められている。
	産業化	△	↗	上記以外の目立った取り組みは見られない。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 経済産業省、2014 年版ものづくり白書（ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告）
http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2014/index.html
2) GE 社ホームページ：Industrial Internet
http://www.ge.com//jp/company/industrial_internet/index.html
3) Industrial Internet Consortium ホームページ
http://www.iiconsortium.org/
4) Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance:Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Apr. 2013
http://www.plattform-i40.de/finalreport2013
5) 国際社会経済研究所, ドイツの「Industrie4.0」戦略について, Oct. 2014
http://www.i-ise.com/jp/information/report/pdf/industrie40_04.pdf
6) 科学技術振興機構　研究開発戦略センター, ドイツ政府の第４次産業革命 Industrie4.0, Sep. 2014
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/DE20140917.pdf
7) 日本貿易振興機構（ジェトロ）,ドイツ「Industrie4.0」と EU における先端製造技術の取り組みに関する動向, Jun. 2014
http://www.jetro.go.jp/world/europe/de/reports/07001735
8) 韓国 IT Convergence：
http://itce.postech.ac.kr/

3.12　知のコンピューティング

知のコンピューティングとは、情報科学技術を用いて、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速することである。知のコンピューティングにより、人々のくらしや社会システムの質的変革が促され、人と機械が共創した、より高度な知的社会が実現される。知のコンピューティングの開発により次のような成果が得られることを期待する。

・知の発見と伝播・活用を促進し、科学の発展と社会への浸透と富の再配分を加速
・最先端知識や技術の社会的適用の促進を図ることによる社会サービスの質の向上
・新しいソーシャルコンピューティングの開拓による発見の加速
・新しいコンピューティングパラダイムの開拓

知のコンピューティングを構成する研究開発領域を図 3.12.1 に俯瞰する。全体で 6 個の研究開発領域に既存の学術分野と新たな学術分野を含めた。ここで、上段の 3 領域、①知の集積・増幅・探索、②予測・発見の促進、③知のアクチュエーションは、知のコンピューティングの最終的な目的となる領域を示す。④知の社会エコシステム・プラットフォームは、集積した知、生み出された価値を社会に還元して、共有・普及・促進を加速しやすくするための基盤となるソフトウエアとデータを含む。以上が新しい学術分野である。

下段の 2 領域、⑤個人・集団・生物に学ぶは、既存の学術分野を知のコンピューティングの文脈で整頓したものである。また⑥知価の ELSI と適用領域は、知の集積・増幅・伝播・検索・予測・発見・アクチュエーションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。

図 3.12.1 知のコンピューティングの俯瞰図

CRDS では、知のコンピューティングという新しい研究分野を立ち上げるために、サミットと一連のワークショップを開催して、分野の方向性や研究コミュニティーの形成を図った。本報告書では、主に、サミットならびに一連ワークショップでの議論に基づき、知のコンピューティングの概要を報告する。

（1）Wisdom Computing Summit 2013

Wisdom Computing Summit 2013 は、JST 科学技術未来戦略ワークショップの１つとして「知のコンピューティング－人と機械が共創する社会を目指して－」というテーマで開催した。サミットのねらいは、「知のコンピューティング」について、有識者と共にその分野を創出し、日本発の研究開発イニシアチブとして確立することである。さらに、イニシアチブのゴール、方向性、分野そのものの定義、分野内の重点テーマ、グランドチャレンジなどについても幅広く、活発な議論を進めるとともに、研究コミュニティーの形成や醸成についても議論した。この結果、知のコンピューティングという新たな分野が目指すべき方向性として、従来の人工知能やロボティクスをさらに一歩推し進めた、「人間と機械の共創を目指したコンピューティング」という新たなコンセプトが得られた。

（2）知のメディアワークショップ

「知のメディア」ワークショップでは、対話・知識・動作（振る舞い）というマルチモーダルによる、人とコンピュータのインタラクションを通して、古い知識が新しい知識に更新されていく、あるいは、形式知が実践知に変換されていくという、「知る」というダイナミックなプロセス「Knowing」を実現することが、学術的にも社会貢献的にも重要であるという考えのもとに、自然言語理解、知識理解、メディア理解、Web インテリジェンス、AI チャレンジに関する研究者が一堂に会し、重要な研究課題と 2020 年チャレンジについて議論した。特に、6 種類の具体的な 2020 年チャレンジが浮上し、各参加者から、そのチャレンジを実現するための多様な要素技術が関連づけられ、社会貢献と学術研究課題が融合できた事は大きな成果である。要素技術単独ではチャレンジの実現は難しく、それらの要素技術を統合することが、チャレンジの実現に大きく貢献するのであり、未来社会デザインのための青写真の枠組みを明らかにした。

（3）知のプラットフォームワークショップ

「知のプラットフォーム」ワークショップでは、先に開催された「知のメディア」ワークショップで設定されたチャレンジテーマのレビューやチャレンジテーマ達成に向けて必要な知識、技術、社会制度の抽出を行い、それらの現在の姿、2020 年にあるべき姿、そのギャップを埋めるための研究開発課題を整理した。知のプラットフォームの狙いを「価値の創造」を促進するプラットフォームととらえたり、ダイナミックな関係知、インタラクションによって得られる知の取り扱いが重要であるという指摘や、インタラクションによる知の共創に注目するといった視点などが指摘された。これらを実現するための知識の表現や獲得、状況認識と状況に応じた推論、知の評価・エコシステムなど多様な研究課題を抽出した。

（4）知のコミュニティワークショップ

「知のコミュニティ」ワークショップでは、メカニズムデザイン、ヒューマンインタフェ

イス、クラウドソーシング、マルチエージェントシステム、社会ネットワーク分析など、コミュニティーの形成に関る分野の研究者も含めて議論した。まず、「知のコミュニティ」の定義について議論し、「知のコミュニティ」とは「系」や「場」であって、人と人を媒介するものであるという共通認識を得た。そのうえで、「知のコミュニティ」によって 2020 年頃に実現すべき複数のチャレンジと、それらを実現するための知識、技術、社会制度（ビジネスモデル）の現状と 2020 年のあるべき姿、研究課題を明らかにした。

（5）知のコンピューティングと ELSI/SSH ワークショップ

「知のコンピューティングと ELSI/SSH ワークショップ」では、人文社会科学（SSH: Social Science and Humanities）および情報科学関連の有識者が集い、戦略プロポーザル「知のコンピューティング」の描き出す未来像に対して、人文社会科学／情報科学の双方からプロジェクトの推進において必要となる ELSI に関する論点を議論した。図 3.12.2 に、ワークショップで提示、議論された論点を、倫理・法・社会の視点にマッピングした結果を示す。なお、右下の角にはこれら視点におさまりきらない SSH や政策的課題を配した。

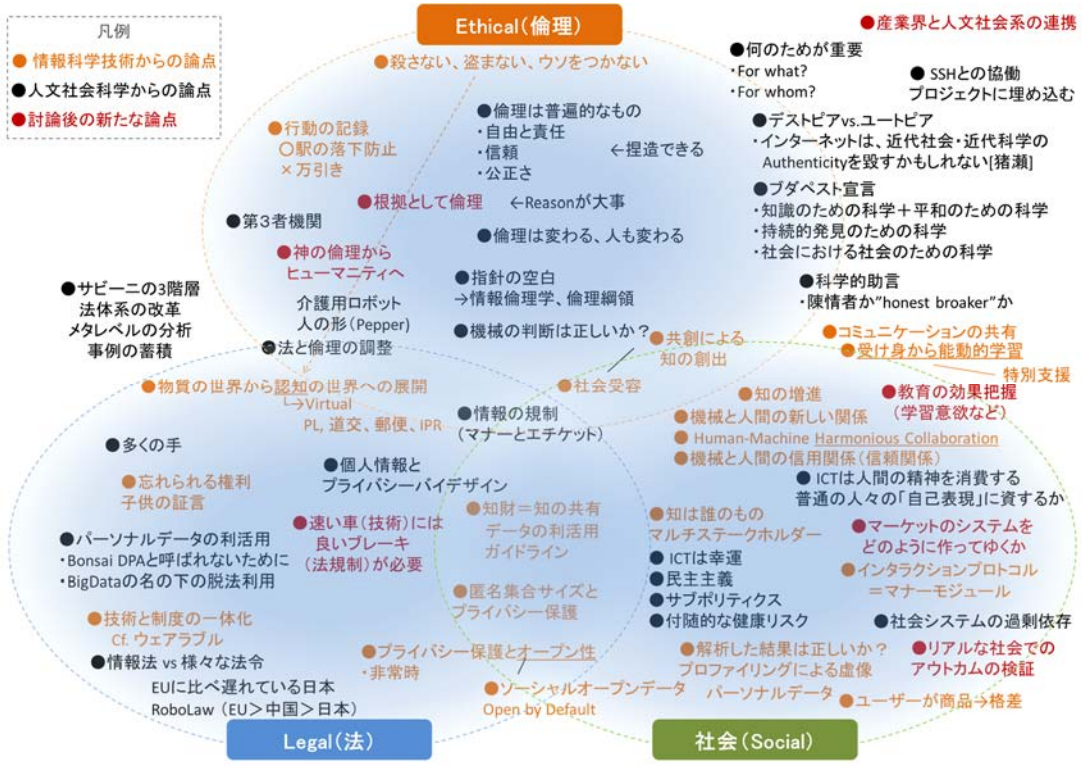


図 3.12.2 知のコンピューティングと ELSI/SSH 論点マップ

３.12.１　知のメディア

（１）研究開発領域名

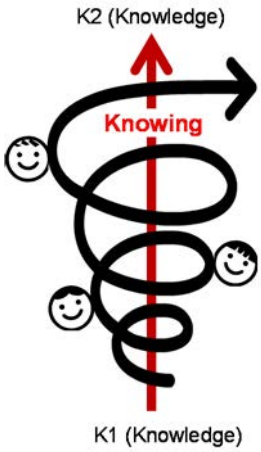
知のメディア

（２）研究開発領域の簡潔な説明

Knowing のダイナミックなプロセスを実現するための対話、知識、振る舞いと、そのインテグレーションに関する技術

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

知を「知識を更新していく"Knowing”をダイナミックなプロセスにするもの」と捉えることで新たな社会貢献の可能性が拓ける。そのためには、独立型 AI ではなく、様々なレベルでのインタラクション（音声・ジェスチャーからセンサ・記号レベルの情報・データを含む）を利用することが前提となる。



Knowledge から Knowing への転換が重要である。人と人とのインタラクションで Knowing が起こるのが、野中郁二郎の SECI モデルであるのに対して、人と機械とのインタラクションで Knowing が起こるのが知のコンピューティングである。

技術のインテグレーションが鍵になる。この考えを SOA（サービス指向アーキテクチャー）に基づいて概観すると、データ／構造化技術／オントロジーパターンモデル／要素技術／サービス合成／ユーザのレイヤーで捉えられる。SOA の考え方で様々な技術を活用してサービス合成を行うことで、生活支援、教育支援、業務支援、地域活性化支援が実現できる。

知のメディアを構成する研究分野と研究課題を下表にまとめる。

表 3.12.1 知のメディアの研究分野と研究課題

研究分野	研究課題
言語処理・音声対話処理	・ 言語意味解析 ・ テキストからの知識獲得 ・ 意見分析 ・ 音声認識、音声合成
メディア処理	・ 画像理解 ・ 動画理解（行動理解） ・ 内容検索
知識処理	・ リンクトデータ、オントロジー、ルール ・ Web インテリジェンス ・ 情報（記号とメディア）統合 ・ Deep Learning ・ 汎用人工知能からの知見
知の活用	・ AI インテグレーション、AI ルネッサンス （PIQANT から Watson へ、ES から BRMS へ） ・ ヒューマンプロセスとマシンプロセスの摺り合わせ ・ インタラクションデザイン ・ コンテキスト判断、管理 ・ 知の個人への適用（創造支援、助言、行動支援） ・ 知の社会への適用（病院、行政、企業）

具体的なターゲットを設定することで、個別の要素技術の達成度と統合も含めた技術的課題を明らかにすることができる。ワークショップでは、2020 年の向けたチャレンジを抽出した。

表 3.12.2 知のメディアの 2020 チャレンジ

No	*チャレンジ*	*説明*
1	動き認識	映像から人間動きを認識する技術。たとえば、フィギュアスケートや体操の技の認識、評価（定量化）など。
2	実践知継承	熟練者の知を、言語・知識・動作を連携させて継承させる技術。例えば、トマト名人、落語、介護者など。
3	病院情報システム	治療方針決定ためのメディエーション技術。例えば、カンファレンスにおける手術プランの検討など。
4	観光情報コンシェルジェ	その場、その時、その人に合わせた観光案内の技術。例えば、旅行プランニング、観光スポット案内など。
5	新サービス/新ビジネス創出	新サービスや新ビジネスを創出するためのコンサルティング技術。例えば、アイデアのネタだし、検証など。
6	見守り・助言・支援	人間をじっと観察して、困ったときだけうまく助けるシステム。例えば、子供・年寄りの見守りや料理のアシストなど。

たとえば、動き認識では、図に示すような複雑な動作や行動の質の解析と定量化をターゲットとして定めた。

図 3.12.3 動き認識における複雑な動作・行動の質の解析と定量化

＜研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向＞

当該研究開発領域の具体的な内容と諸外国の政策および研究開発の動向をまとめる。

（４）科学技術的・政策的課題

知のメディアとして取り組むべき中心的な研究課題を以下に列挙するが、個々の研究分野における既存の研究課題の進歩ではなく、複数のメディア処理と知識処理といった異分野の研究を統合させるための研究が必要である。そのためには、チャレンジに挙げられたような達成目標を実際にひとつずつ実現するようなアプローチが有効である。

①言語処理における重要な技術テーマ

- 複数のメディアを横断する言語（シンボル）とのアンカリング
- （ネット上などでの）人のインタラクションを知識の関係づけも含めて捉える

②知識処理における重要な技術テーマ

- Deep learning などの AI 技術を発展させてシンボルとリンクするような内部表現（サブシンボル）を作りだす
- 事例ベース推論のような技術
- オントロジーアライメントにより推論と統計をつなぐ技術
- データからボトムアップに関係性やすきまを発見する技術

③画像・映像処理における重要な技術テーマ

- 画像・映像から複雑な動きを分節化するためのモデリングと特徴量の決定
- 動きのある種の質の認識（上手、美しい）

④音声・対話処理における重要な技術テーマ

- 人間とシステムの自然な対話（チューリングテスト）

⑤インテグレーション

- 推論と統計的な手法の組み合わせを含む広い意味での Integration 技術
- サービスレベルやディペンダビリティを確保するコンポーネントの粒度やコンポーネン

ト間のインタフェースの定義

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・2003～ IBM, PIQUANT プロジェクト
（Practical Intelligent Question Answering Technology）
一般常識の知識ベース Cyc を中心にシステム化した。30%程度の正解率に留まる。

・2006～ IBM, Watson プロジェクト
大規模知識の獲得（100 万冊、2 億ページ）がポイント。百科事典、辞書、シソーラス、ニュース記事、著作物などを情報源。動的にコーパスを拡大。しかしながら、突出した一つの AI 技術ではなく、言語理解、情報検索、不確実性推論、仮説生成、仮説統合とランキング、機械学習、オントロジー、構造化データなど、100 以上の従来 AI 技術の集大成精度、確信度、速度を考慮した AI インテグレーションであった。

・PAL/CSS Freestyle Tournament 2005
人のみ、コンピュータのみ、人＋コンピュータの混成による 48 チーム参加したが、優勝した ZackS チームは、Zackary Stephen（統計学修士、24 歳、レーティング 1381）と Steven Cramton（現職・予備校講師、28 歳、レーティング 1685）とコンピュータソフトの混成チームだった。なお、ここで、レーティングの目安は、初心者 800、中級者 1500、日本チャンピオン 2300、グランドマスター2500、世界チャンピオン 2800)。
勝敗のポイントは、コンピュータチェスを深く研究して（大会前に 10000 試合以上)、各コンピュータチェスの特徴を把握していることで、彼ら自身は、タクティクス（駒取りの筋）を読む能力が低いことは影響を与えなかった。

（６）キーワード

言語処理、音声対話処理、言語意味解析、テキストからの知識獲得、意見分析、音声認識、音声合成、メディア処理、画像理解、動画理解（行動理解)、知識処理、リンクトデータ、オントロジー、ルール、Web インテリジェンス、Deep Learning、汎用人工知能、AI インテグレーション、AI ルネッサンス、PIQANT、IBM Watson、エキスパートシステム、BRMS、インタラクションデザイン、コンテキスト判断

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・自然言語処理に関する大学・公的機関における基礎研究レベルは高く、研究成果も多い。
	応用研究・開発	◎	↗	・国立情報学研究所（NII）の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか」が2011年に立ち上がり、この中で自然言語処理の中核技術である知識推論に関する研究が推進されている。
	産業化	○	→	・モバイル端末を用いた音声質問応答システム（NTTドコモ「しゃべってコンシェル」、Yahoo!「音声アシスト」など）や音声翻訳システムが実用に近いレベルとなり、普及しつつある。
米国	基礎研究	◎	→	・NSFにサポートされた評価表現解析、自動要約、知識獲得などの研究も活発である。 ・ペンシルベニア大学の構文・文脈解析、ISI（南カリフォルニア大学）の機械翻訳など、世界を牽引する研究成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	→	・DARPAによる巨額の研究費によって継続的に研究プロジェクトが推進されている。 ・AT&Tにおける音声理解/対話、IBMにおける質問応答システムWatson、Googleにおける機械翻訳と多言語固有名解析、Microsoftにおける機械翻訳・評価表現解析・自動要約など、産業界の研究所のアクティビティも世界トップレベルである。
	産業化	◎	→	・MicrosoftによるOSやOfficeにおける言語処理、GoogleのWebサーチ、Appleの音声質問応答システムSiriなど、枚挙にいとまがない。
欧州	基礎研究	◎	→	・機械翻訳に関する研究は継続的に活発であり、FP7においても20を越えるプロジェクトが推進されている。
	応用研究・開発	○	→	・FP7のFET Flagship Polot Project（2011年～2012年）となったビッグデータ関連のプロジェクトFuturICTでは知識処理としてSemantic Webがフォーカスされている。 ・2012年Googleが1000台のコンピュータで構築した大規模ニューラルネットワークに1000万枚の画像を入力したところ猫の写真に反応するニューロンができた。Deep Learningの成果で猫認識として有名になった。
	産業化	○	→	・古くから機械翻訳システムの開発が盛んで、代表的なものとしてSYSTRANがある。また、最近ではオープンソースの統計翻訳システムMoses をベースとしたシステムの開発も盛んである。
中国	基礎研究	◎	↗	・清華大学、中国科学院などを中心に、近年、基礎研究のレベルが大幅に向上している。国家プロジェクトとしてもウィグル語、チベット語などを含む多言語翻訳、多言語検索に関する多数の課題が採択されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・Microsoft Research Asia（北京）をはじめ、応用研究のレベル向上も目覚ましい。また、2011年からはBaiduを中核として多数の大学、公的研究機関が参加する機械翻訳研究が立ち上がった。
	産業化	◎	↗	・国産検索エンジンBaiduが国内シェア1位であり、他にも中国独自の検索エンジンが種々開発されている。音声検索、音声翻訳などのサービスも広まりつつある。
韓国	基礎研究	○	→	・KAIST、POSTECHなどを中心に基礎研究が推進されている。欧州との連携でSemantic Web関係の研究が盛んであり、ビッグデータのプロジェクトも立ち上がっている。
	応用研究・開発	○	→	・知識経済部（Ministry of Knowledge Economy）がプロジェクトを推進しており、音声対話システムのプロジェクトが始まっている。
	産業化	○	→	・国産検索エンジンNaverが国内シェア1位であり、文書インデックス構築や、Eコマースや選挙などでの評判分析など、ネット系の言語処理企業が堅調である。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) G. Chen, H. Ghaed, R. Haque, M. Wieckowski, Y. Kim, G. Kim, D. Fick, D. Kim,M. Seok, K. Wise, D. Blaauw, and D. Sylvester, "A cubic-millimeter energy-autonomous wireless intraocular pressure monitor," IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp. 310-311, Feb. 2011.
2) SENSIMED Triggerfish®
http://www.sensimed.ch/en/sensimed-triggerfish/sensimed-triggerfish.html

3.12.2　知のプラットフォーム

（1）研究開発領域名

知のプラットフォーム

（2）研究開発領域の簡潔な説明

知のプラットフォームとは、図 3.12.1 の知のコンピューティングの俯瞰図のうち④に相当し、知の蓄積、伝播、探索、予測・発見、作用をつかさどる実体である[1)]。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

知のコンピューティングは、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速することを目的としている。ここで、知とは人間（複数）が賢く生きるための力であり、知のコンピューティングは、知の発見、創造、集積、伝播、探索、影響を実現し、加速することである。図 3.11.2.2 に知のコンピューティングの成果実装イメージを示す。

最下層に情報・状況を把握するレイヤーがある。ここで、実世界やインターネット、人間などから知識を抽出し、構造化する。得られた知識は中間にある知の集積・伝播のレイヤーにおいて適切に選択され、上位の社会へ影響を与えるレイヤーへと伝えられ、人間や集団に向けて人々が賢く生きるために利活用されたり、あるいは機械や社会システムに伝えられ、人々の暮らしを賢く変えることに使われたりする。

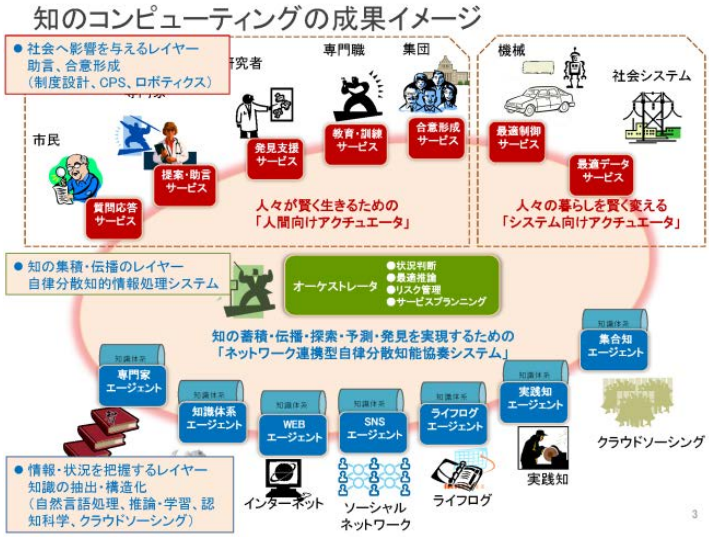


図 3.12.4 知のコンピューティングの成果イメージ

EU においては、FuturICT プロジェクトにおいて、地球規模のコンピュータプラットフォームを構築し、複雑で世界的で社会的な相互作用のシステムを理解し管理しようとしている。自然科学、社会科学、工学を IT で統合する研究を推進。21 世紀の課題への挑戦に必要な相乗効果を狙っている。プラットフォームとしては、あらゆるデータを収集する地球規模のセンサネットワーク、得られたデータを利用して複雑な人間社会のシミュレータ、市民の社会・経済・政治参加の促進をターゲットとしている。ヨーロッパを中心に、すでに数十の大学が参加している。EU で推進中の 7 つの Flagship Initiatives の一つであり、パイロット段階では最高票を得ていたが、FET には採択されなかった。Horizon2020 などでプロジ

ェクトは継続されると思われる。

（４）科学技術的・政策的課題

「知のプラットフォーム」ワークショップを開催し、知のメディアワークショップ [2]で抽出されたチャレンジテーマ（表 3.12.2）から科学技術的課題と、政策的課題を抽出した。

科学技術的課題

知のプラットフォームの狙いを「価値の創造」ととらえ、特に個人の生活の向上をターゲットとすると、生きがいの定義や感情表現モデル、生きがいを表すデータの抽出、対話技術などが課題となる。具体的には、生きがいデータ抽出、行動認識、本人のメタ認知、フラグメンテーション知の表現とその再結合、感情の観測・評価尺度、マルチモーダルな対話技術などである。

また、ダイナミックな関係知、インタラクションによって得られる知に着目すると、状況に応じた知識の獲得や推論、状況を理解するための表現モデル、人間の行動モデル、知識の表現や新たな学習方法、知の所有権や価値の再配分などの課題があげられる。

またプラットフォームの機能として、膨大な知識を背景とし、人間とインタラクションすることによって問題点を明らかにし、それらを解決するためのシナリオを作るということを考慮すると、そのためには、リンクトデータの利活用、知の評価、知のエコシステム、状況依存解析、シナリオ共創などの技術が研究課題である。

政策的課題

個人の生活に着目すると、個人の趣味、生きがいなどのデータに関する Ownership や共有できる制度の実現が待たれる。例えば、匠の技など質の高い専門知を集めて提供することによりコミュニティーが拡大、さらに一般の人々の知（料理、工作など）の集積と流通へと進むような状況が想定される。

また、相手の状況に合わせてアダプティブにサービスを提供するプロセスが競争力となるような状況では、多様なインセンティブの提供や多様な寄与を評価し人々の知を集積するための枠組みが必要になる。

これらの状況において、データ・知の取引の仕組み（経済モデル、ビジネスモデル）、データ所有権、データの権利と義務、倫理・法的、社会的課題との関連性を評価する仕組みが必要になる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国内では、国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか？」[3]は、自然言語、画像、数式など多様な知識を統合して問題解決を行う技術の開発を目指しており、統合的人工知能のグランドチャレンジとして注目される。

アメリカでは、IBM の Watson[4]が Jeopardy!のグランドチャンピオンに勝利し、その後医療への応用が開発されている。また、API が公開された。

ヨーロッパでは、FuturICT において、自然科学、社会科学、工学を IT で統合する研究を推進。21 世紀の課題への挑戦に必要な相乗効果を狙っている。

（６）キーワード

価値の創造、生きがいデータ抽出、行動認識、本人のメタ認知、フラグメンテーション知の表現とその再結合、感情の観測・評価尺度、マルチモーダルな対話技術、状況に応じた知識の獲得や推論、状況を理解するための表現モデル、人間の行動モデル、知識の表現や新たな学習方法、知の所有権や価値の再配分、リンクトデータの利活用、知の評価、知のエコシステム、状況依存解析、シナリオ共創、知の集積と流通、インセンティブ、データ・知の取引、データ所有権、データの権利と義務、倫理・法的、社会的課題との関連性

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか？」は、自然言語、画像、数式など多様な知識を統合して問題解決を行う技術の開発を目指しており、統合的人工知能のグランドチャレンジとして注目される。[5)] ・2013年11月時点で模擬試験の偏差値60程度。 ・ERATOの離散情報構造プロジェクト[6)]、情動情報プロジェクト[7)]などでAI基礎研究が推進されている。
	応用研究・開発	△	→	・AIグランドチャレンジのロボカップが日本発で1997年に開催され、世界的な広がりを見せている。 ・主だった自動車メーカーが自律運転に取り組んでいる。衝突防止などは実用化されている。
	産業化	○	→	・NTTドコモのしゃべってコンシェル[8)]は、音声認識と質問応答を応用した代表的なサービスであり、AppleのSiri[9)]と並んで注目を集めている。 ・機械翻訳の研究や産業化は欧米と並んで世界をリードしていたが、近年は欧米と比べて研究規模が小さく、遅れをとっている。
米国	基礎研究	○	→	・米国は情報技術や人工知能の研究において世界をリードしているが、深い言語理解や意味理解の研究についても、DARPAやIARPAの大規模予算に支えられ多くの有力研究グループにより先進的な基礎研究が行われている。 ・DARPAのCALO（自然言語理解研究）がSiriのAIサービスに発展している。 ・IEEE Computational Intelligence Societyが活発に活動。理論、アプリケーション、生物学や言語学、遺伝的アルゴリズムやプログラミングなど様々な領域の研究を推進。 ・コーネル大学を中心にComputational Sustainabilityの研究を進めている。環境、経済、社会的要求を持続可能な未来とバランスさせることを目標にしている。
	応用研究・開発	◎	↗	・IBMのWatsonがJeopardy!のグランドチャンピオンに勝利し、その後医療への応用が開発されている。また、APIが公開された。 ・Google Driverless Carの公道走行が認可されるなど、社会実装に向けた研究開発が進んでいる。
	産業化	◎	↗	・DARPAの支援も受けつつIBMが自律的に学習するコグニティブ・コンピューティングの研究開発を進めている。 ・Appleが発表したSiriのように、自然言語インターフェイスで機器操作や質問応答を行うソフトウェアが実用化され、注目されている。 ・UAVなどの軍事技術においては、かなり先行している。
欧州	基礎研究	○	↗	・FuturICTにおいて、自然科学、社会科学、工学をITで統合する研究を推進。21世紀の課題への挑戦に必要な相乗効果を狙っている。 ・言語処理や深い人工知能に対してはEU/EC以外にもドイツとイギリスを中心に大規模予算が割り当てられており、活発な研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・FP７において、意味処理に基づく知識コンテンツプロジェクトがいくつか推進されている。 ・BenzやAudi, Volvoなどの自動車メーカー、Boschなどの電装品メーカーなどが共同で自律走行の研究開発を行っている。隊列走行から完全な自律走行、あるいは道路情報システムとの連携など、幅広く堅実なアプローチをとっている。
	産業化	○	↗	・運転支援という枠組みで、自律走行車の一部の機能が実用化されている。

中国	基礎研究	×	→	・中国語意味辞書HowNetが整備され、中国語理解や質問応答システムの基盤となっている。 ・純粋なAI基礎研究よりは、画像処理やパターン認識の研究開発が多い。 ・機械学習、言語処理技術の研究が盛んでポテンシャルが高い。
	応用研究・開発	△	↗	・深海ロボットDeep-Sea Robot Jiaolongが研究開発され、マリアナ海溝付近7000m以上の潜水に成功。 ・UAVなどの軍事技術の研究は進んでいる。ウォッチする必要がある。
	産業化	×	↗	・2010年の上海万博、2012年の中国インテリジェントエキスポでは、車いすロボットなど、知能ロボットが多く展示され、2013年に人工知能国際会議が開催され、国家がAIに注力し始めているが、具体的な企業の設立などはまだ見えてこない。 ・Microsoft Research AsiaやBaiduでは検索と自然言語処理の研究に多くの投資がされており、レベルの高い研究が行われている。Academic Searchなどテキストマイニングを応用した実用サービスがすでに行われており、言語処理技術を応用したより高度なサービスが提供される可能性がある。
韓国	基礎研究	×	→	・ソウル大学が人工知能研究を推進し、DERI （Digital Enterprise Research Institute） のソウル研究所を設立。 ・機械学習やパターン認識などによい研究もあるが、基本的に後追いの感は否めない。
	応用研究・開発	△	→	・DERIのソウル研究所において、医療分野の意味処理など応用研究も推進。 ・ベンチャーにおいて、意味処理アプリケーション、知能ロボットなどの応用研究が推進されている。
	産業化	△	↗	・SALTLUX（意味処理技術）、ROBOTIS社（知能ロボット）などベンチャーが設立され、サムソンにおいては、音声アシスタントなどの研究が着手されている。 ・情報産業は活発であるが、深い意味理解や統合的人工知能を応用する動きは見られない。 ・大企業による産業力があり、一度普及すれば急速にキャッチアップすると考えられる。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティング　ー人と機械が共創する社会目指してー」Wisdom Computing Summit 2013, CRDS-FY2013-WR-15、平成 25 年 10 月、独立行政法人　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　電子情報通信ユニット
2) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティング：知のメディア」,CRDS-FY2013-WR-07、平成 25 年 12 月、独立行政法人　科学技術振興機構研究開発戦略センター　情報科学技術ユニット
3) 国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか」で、代々木ゼミナールの模試に挑戦！

http://www.nii.ac.jp/news/2013/1125
4) IBM Watson
http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/ibmwatson/
5) ロボットは東大に入れるか
http://21robot.org/
6) 湊離散構造処理系プロジェクト
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/mrk_PJ.html
7) 岡ノ谷情動情報プロジェクト
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/ojj_P-j.html
8) しゃべってコンシェル
https://www.nttdocomo.co.jp/service/information/shabette_concier/
9) Siri
http://www.apple.com/jp/ios/siri/

3.12.3　知のコミュニティー

（1）研究開発領域名

知のコミュニティー

（2）研究開発領域の簡潔な説明

関心を共有する人々が ICT を媒介として、知の発見、創造、集積、伝播、探索、影響などを通じて価値を生み出す系や場の理解とデザイン・構成するための技術

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

世界中の人々が容易にインターネットにアクセスできるようになり、人々が定常的あるいは ad hoc にコミュニティーを形成し、科学的な発見など様々な領域で知の創造、集積、伝播、探索、影響が加速している。

例えば、オンライン辞書 Wikipedia は世界中のボランタリーな参加者がコミュニティーを形成しながら知識を集約することで構築されているが、成長しつづける世界規模の百科事典の構築の維持の実現にはコミュニティーの力が不可欠である。また、市民科学の取り組みにおいては、専門科学者自身が担うには膨大な費用や時間がかかり達成が困難なタスクが大規模なボランティアネットワークの参加により達成可能になるだけでなく、市民が新たな視点での疑問を投げかけることによる新たな科学的発見、市民の科学的知識の向上などが実現しつつある。

これらは「知のコミュニティー」のさきがけ的な例であり、このような傾向は、今後より一層加速し、新たなコミュニティーや価値を生み出していく。従って、今後の社会のありかたを考え、より良い社会を実現していくためには、コミュニティーの構造を理解し、デザイン・構成する方法論を考えていくことが非常に重要である。

このため、本領域では関心を共有する人々が ICT を媒介として、知の発見、創造、集積、探索、影響などを通じて価値を生み出す系や場を「知のコミュニティー」と定義して、重要な研究開発領域として取り挙げる。

まず、「知のコミュニティー」の構造としては以下が考えられる。

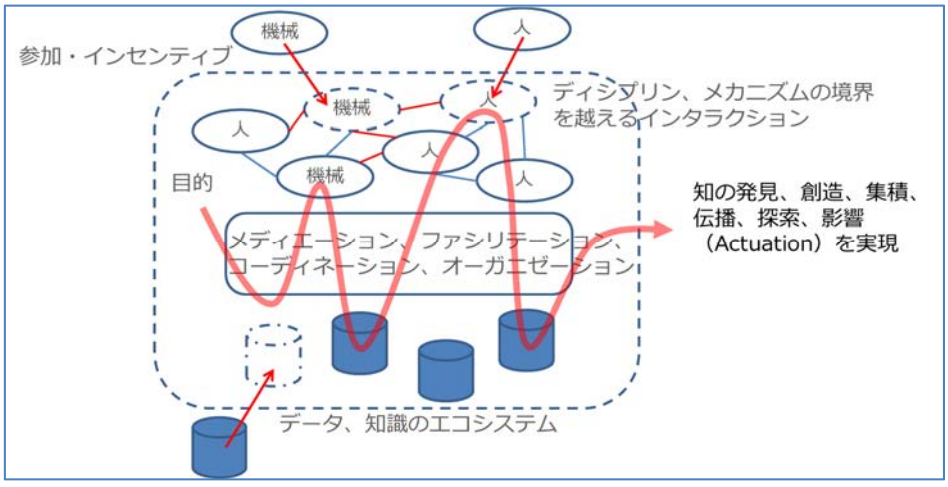


図 3.12.5 知のコミュニティーの構造

①コミュニティーへ参加を促す、インセンティブを提供する
②データや知識のエコシステムを構築する
③ディシプリン、メカニズムの境界を越えるインタラクションを実現する
④コミュニティーの参加主体（人や機械）間のメディエーション、ファシリテーション、コーディネーション、オーガニゼーション

さらに、コミュニティーのなかで与えられた問題を解く過程だけでなく、その前段となる新しいアイデアや問題を見出すこと、後段である具体的なコミュニティーとしての行動に結びつけることも「知のコミュニティー」の重要な機能である。

＜国内外の動向＞

米国には、Wikipedia、Zooniverse、InnoCentive など、知のコミュニティーのさきがけとなる事例が多数存在する。クラウドソーシングという表現自体も 2006 年 6 月に WIRED 誌で Jeff Howe が提唱したものである。彼の著作[1]によるとクラウドソーシングは主に 3 つのタイプに分類される。

1）予測市場あるいは情報市場
選挙の当選者やアカデミー賞の受賞作などの予想を投資家が購入する。
2）問題解決ネットワークあるいはクラウドキャスティング・ネットワーク
なんらかの課題を解決者になりうる不特定多数の大規模ネットワークに公表する。
3）アイデアジャム
オンラインで大々的に行うブレインストーミング。特定の問題を解決しようとするのではなく、種類を問わず、新しいアイデアを求める際に使われる。

こうした分類は知のコミュニティーの重要な側面を捉えていると考えられる。

科学的・学術的な観点の取り組みとしては、例えば、MIT Center for Collective Intelligence[2] が 2006 年に設立され、集合知の計測やデザインパターン”the genomes of collective intelligence”の特定など学問的体系化が試みられている。また、集合知を主要テーマとした学術的な会議 Collective Intelligence が開催されている。

人や集団の行動を対象とした例としては、Computational Behavior Science などの分野に対して NSF がファンディングを行っている。

感情や行動を変容させる研究としては、必ずしも集団を対象としたものではないが、MIT Media Lab の Affective Computing Group[3]、Stanford の Persuasive Tech Lab[4] などが存在する。

欧州では、米国ほどではないが、特に英語圏を中心としてクラウドソーシングなどのサービスが数多く存在すると推察される。

EU の研究プロジェクトとしては、FP7 の FET（Future Emerging Technology）のなかで 2011 年～2012 年にかけて FuturICT の Pilot project が実施された。参加型センシング、可視化、シミュレーションのプラットフォームを構築して、複雑な社会システムを理解・管理し、社会のサステナビリティとレジリエンスを高めることを目的としたものである。Pilot の後、Flagship project には採択されなかったが研究としては継続しており、複雑系の科学をコアに政策決定支援や教育支援などの応用も想定されている。

また、FP7 の SOCIENTIZE プロジェクト[5]（2012 年～2014 年）では、市民科学を促すためのステークホルダ間の交流や組織化、プロモーション、情報共有などの取り組みに加え、市民科学の可能性と政策提言が WhitePaper として取りまとめられた。

コンピュータサイエンスよりの研究としては、例えば、チューリッヒ大では大規模な Human Computation System を構築するプロジェクト[6]が進められており、プログラミング言語やフレームワーク、ヒューマンリソースの割り当てや契約・支払いのためのインフラとしての OS などが提案されている。また、チューリッヒ工科大ではヒューマンリソースをデータベースシステムに取り込んだ新しいクエリの実現を目指している。

我が国でも 2008 年頃より商業的なクラウドソーシングサービスが始まっている。

科学的・学術的な取り組みとしては、科学的なアプローチによるクラウドソーシングのデザインを目指してクラウドソーシング研究会[7]が 2012 年に発足している。具体的には、クラウドソーシングや Human Computation のプログラミング言語、統計的品質管理、参加と品質向上のためのインセンティブデザイン、メカニズムデザインなどの取り組みが行われている。また、非営利・公益・学術目的のクラウドソーシングプラットフォーム[8]が運営されており、言語学研究や図書館の書誌情報のクレンジングなどに活用されている。

（4）科学技術的・政策的課題

CRDS が主催となり 2013 年 12 月 17 日に「知のコミュニティ」ワークショップ[9]を開催して、「知のコミュニティー」の実現に必要な知識、技術、制度の洗い出しを行った結果を下記に記載する。

必要な知識、技術としては、コミュニティーに参加する人々同士や人と機械のインタラクションのセンシング、周囲の状況のセンシングを、行動の意図、情動や社会性を含む深いレベルで行う必要がある。研究分野としては、生体計測技術、画像情報技術、自然言語処理のほか、コミュニティーの構造や動態把握のためのネットワーク分析、シミュレーション技術とコミュニティーを理解するベースとなる社会認知科学などが関連する。センシングされた主観的な知、暗黙知を外在化する技術も必要である。

そして、価値を生み出すための適切な系や場を構築するためには、参加者のリクルーティングやミクロなコミットメントの評価や交換の仕組みが必要となる。特にインターネット上に構築されたコミュニティーにおいては、コミュニティーが不安定にならないように、取引のメカニズムや意思決定のやり方に理論的な頑健性が求められる。研究分野としてはミクロ経済学、ゲーム理論、行動経済学の知見にもとづくインセンティブ設計、マーケットデザイン・制度設計、コミットメントを評価するための統計的品質保証などが関連する。また、多言語環境などインタラクションのためのプラットフォームも必要である。さらに、より複雑で困難な目標に対して知のコミュニティーが取り組んでいくためには、集合知創出メカニズムと問題構造の解明が重要である。

必要な制度としては、生み出された知の社会還元に向けて、知の所有権や責任、公正性や健全性を担保する知の評価といった創造的な活動を妨げない法制度や、新たな知の社会適用が人間や集団の行動に与える影響の倫理的側面など ELSI（Ethical, Leagal and Social Issues）の観点から人文社会系研究者を巻き込んだ議論が必要であるとした。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

Comuputational behavioral Science、Computational Social Science といった分野で用いられる人や集団の活動の精密な計測とデータ処理、脳科学的な計測手法の進展などが相俟って、コミュニティーを形成する人間の社会性の仕組みを解明する試みである社会認知科学、社会生物学、発達心理学などの研究が世界的に進展している。今後、これらの研究から様々なアイデアやインプリケーションが得られるであろう。

さらに、我が国においては以下のような取り組みが進んでいる。

最先端・次世代研究開発プロジェクト「環境社会最適化シミュレーションを可能にする社会最適化アルゴリズム創出とその応用」[10]、CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」などにおいてエージェントシステムの最適化アルゴリズムやシミュレーション基盤高度化の取り組みが進められており、大規模な社会シミュレーションが可能になりつつある。また、日本ソフトウェア科学会、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会の各関連研究会の共同により、2002 年より合同エージェントワークショップ&シンポジウム[11]が継続的に開催されている。

社会的なつながりをネットワークとして分析する手段については、最先端研究開発支援プログラム「複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用」[12]、ERATO「河原林巨大グラフプロジェクト」[13]など理論的基盤や高速に解析するためのアルゴリズムが整備されつつある。

（６）キーワード

市民科学、クラウドソーシング、ネットワーク分析、社会認知科学、ミクロ経済学、メカニズムデザイン、社会ネットワーク、グラフ理論、複雑ネットワーク、行動経済学、ゲーム理論、インセンティブ設計、集合知、Human Computation

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・科学的アプローチによるクラウドソーシングのデザインの研究会[8]などが発足している ・HumanCompuatationのプログラミング言語の研究開発、非営利・公益・学術目的のプラットフォーム運営[9]などの取り組みがある
	応用研究・開発	○	↗	・産学の共同研究の取り組みがはじまている ・音声認識のための語彙収集にクラウドーソーシングを活用するなど企業でも研究開発の取り組みが活発化している
	産業化	○	↗	・Lancers、クラウドワークス、Yahoo!クラウドソーシングなど商業的サービスが立ち上がっている ・日本初のクラウドファンディングREADYFOR?など新たなタイプの取り組みも始まっている
米国	基礎研究	◎	↗	・科学研究にコミュニティーの力を活用する取り組みが数多く存在する。（Citizen Scienceという表現はCornel大の鳥類学教授 Rick Bonney が初めて使ったといわれている） ・MITのCenter for Collective Intelligence[2]などで集合知の計測やデザインなど学問的体系化が試みられている ・ MIT Media Lab の Affective Computing Group[3] 、 Stanford の Persuasive Tech Lab[4]など人間の感情や行動の変容技術の研究が行われている
	応用研究・開発	◎	↗	・ACMのSGCHIなど水やエネルギーなどの省資源や健康的なライフスタイルへ行動変容を起こすための研究開発などの取り組みが数多く行われている ・MITのCenter for Collective Intelligence[2]では地球温暖化問題へ取り組むための新しいWebベースの議論と意思決定の場の構築を目指している
	産業化	◎	↗	・マイクロタスク型のAmazon Mechanical Turk、企業がR&Dを委託するInnoCentive、画像映像の共有を通じたコミュニティー形成と取引のプラットフォームiStockphotoなど多様なビジネスが存在する
欧州	基礎研究	◎	↗	・FP7 FETのFuturICTで参加型センシングとシミュレーションにより複雑な社会技術システムを理解・管理しようとする取り組みがある
	応用研究・開発	◎	↗	・EUのICTを活用した科学研究プラットフォームとして市民科学が注目されつつあり、政策提言のためのWhite Paper[6]が取り纏められた
	産業化	○	↗	・仏のeYekaなどクラウドソーシングビジネスが立ち上がってきている ・クラウドファンディングではFundeByMe（スウェーデン）などが立ち上がっている
中国	基礎研究	○	↗	・発表論文数が米国や欧州を越える勢いで伸びている
	応用研究・開発	○	↗	
	産業化	◎	↗	・猪八戒（zhubajie）などのクラウドソーシングビジネスが存在しており、人口に連動して世界最大規模の参加者数を擁している ・中国の他にインド、オーストラリアなど英語圏でクラウドソーシングのビジネスが活発化している
韓国	基礎研究	△	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	↗	・クラウドソーシングの翻訳サービスのFlitto、デザインを提供するLoud Sourcingなどのビジネスが立ち上がってきている

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) みんなのパワーが世界を動かす クラウドソーシング ジェフ・ハウ 中島由華訳ハヤカワ新書
2) MIT Center for Collective Intelligence
http://cci.mit.edu/index.html
3) MIT Media Lab Affective Computing Group
http://affect.media.mit.edu/
4) Stanford Persuasive Tech Lab
http://captology.stanford.edu/
5) Socientize citizen science project
http://www.socientize.eu/
6) CrowdLang and CrowdOS
http://www.ifi.uzh.ch/ddis/research/CrowdLang.html
7) クラウドソーシング研究会
https://sites.google.com/site/crowdsourcingresearch/
8) Crowd4U
http://crowd4u.org/index
9) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティング：知のコミュニティ」報告書
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/WR/CRDS-FY2013-WR-12.pdf
10) 環境社会最適化シミュレーションを可能にする社会最適化アルゴリズム創出とその応用（マルチエージェント技術による社会の最適化）
http://www.itolab.nitech.ac.jp/next/
11) JAWS：Joint Agent Workshops & Symposium
http://jaws-web.org/jp/
12) 複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用
http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/
13) 河原林巨大グラフプロジェクト
http://www.jst.go.jp/erato/kawarabayashi/index.html

3.13　セキュリティー

現代社会は、ICT システムに深く依存するようになってきており、ICT システムの安全性の確保は非常に重要な課題になってきている。このような問題を解決するために必要となるのが、情報セキュリティーである。情報セキュリティーの研究分野は広く、縦軸に基礎か応用かを、横軸に要素技術的かシステム技術的かをとると図 3.13.1 に示すように整理することができる。ここでは、そのうち特に重要性が高いと考えられる次の 7 つの項目について動向をまとめた。

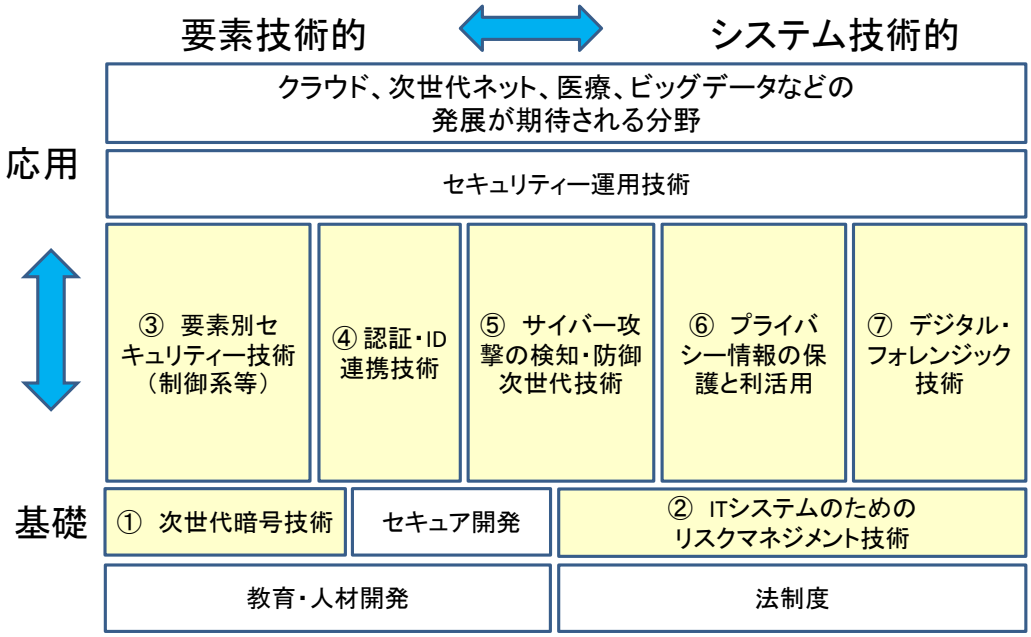


図 3.13.1 セキュリティーの俯瞰図

（１）次世代暗号技術

暗号技術は、データの秘匿性（情報を部外者に見られないこと）、完全性（情報が書き換えられていないこと）、真正性（通信相手やデータの提供元が意図した相手であること）などを確保する上で欠かせない基本技術である。最近では、様々なニーズに応えるための研究開発が重要となりつつあり、具体的には次のような動向が注目されている。

1. データを暗号化したまま演算や情報処理を可能とする暗号化状態処理の研究開発
2. 暗号鍵漏えいからの回復力（レジリエンス）や使い勝手の向上などに関する研究開発
3. 物理的な特性を盛り込んだ暗号技術および暗号プロトコルの研究開発
4. 暗号技術および暗号プロトコルの軽量化の研究開発

この分野の日本の基礎研究・応用研究のレベルは、学会活動の状況などから判断して、十分高く、国際的にもよいポジションにあると考えられる。産官学が協力してうまく産業応用に結び付け、製品競争力の向上に結び付けられるようにしていくことが、大きな課題であると考えられる。

（２）IT システムのためのリスクマネジメント技術

高度化、複雑化する標的型攻撃や、内部犯罪への対策を適切に実施するためには、ハードウエアやソフトウエアの導入などの個別の技術的対策だけでは不十分で、リスクアセスメント、リスクコミュニケーションを含むリスクマネジメントのための理論から実務までの体系化やそのための技術の高度化が不可欠となってきている。

この実現のためには、次のような項目の実施が必要になる。

（ａ）リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立

（ｂ）リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化。ここでは、リスク対策が必要かどうかだけでなく、どのような対策の組み合わせが望ましいのかの検討も可能とする必要がある。

（ｃ）リスクに関与する人たち（例えば経営者、従業員、顧客など）がいろいろいる中で、提案された対策案やその組み合わせを実行するに当たってのリスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成

これらの技術の開発は、各国において試みられてきているが、まだ十分な成果を上げているとはいえない状況である。今後は、単に情報システム等の脅威を考えたり、技術的な研究をするのみならず、国際政治、法律、安全保障、危機管理、経済学、心理学等の社会科学的視点も含めさまざまな領域の研究とも連携して行われることが求められる。

（３）要素別セキュリティー技術（制御系、その他（情報家電、各種機器、自動車等））

セキュリティー対策が必要な対象は、従来の PC やサーバーだけでなく、制御システムや、情報家電、自動車などに拡大している。ここでは、制御系と、その他に分けて動向を整理する。

（ａ）制御系

技術的には、制御分野の特性から、アンチウイルスを適用できない装置に対するホワイトリスト技術、不正侵入に対する検知技術や一方向性ファイアウォールなどが、必要となっている。また今後の深刻なリスクに備えて、評価認証制度を国内の制御システム事業者や重要インフラ事業者および国産製品に普及させるとともに、電力や交通や製造ラインなどの様々ある制御システム分野に固有の要件をまとめていくことが必要である。

（ｂ）その他（情報家電、各種機器、自動車等）

情報家電機器や通信機能を備えた医療機器（インスリンポンプやペースメーカー等）や自動車に対する攻撃による深刻な事故の可能性が指摘されている。また現実に情報家電機器やホームルータを踏み台にした DDoS 攻撃や、これらの機器からの情報漏えいなども多数報告されるようになっている。

技術的なセキュリティー対策は、基本的には、情報通信の分野で培われてきたものを活用していけると考えられるが、対象固有の新たな脅威の出現に対抗する技術開発を続けていくことが必要になる。また、政策的な課題としては、どのレベルの情報セキュリティー対策を各業界や各製品分野で搭載していくのかの基準の確立が重要な課題となっている

（４）認証・ID 連携技術

ユーザーが安全かつ簡便に、さまざまなサービスを利用するためには、確実な認証と、複数サイト間での認証と、認証の対象となるユーザーが持つ属性情報の集合体（アイデンティティー）を連携（フェデレーション）して利用するためのフレームワークであるアイデンティティー連携（ID 連携）が必須である。

世界各国で頻発するサイバー攻撃や ID 窃盗等に対処するため、さまざまな認証方式が研究開発されている。インターネット上で提供されるサービスにおいては、ユーザーID とパスワードの単純な組み合わせによる認証方式から、ハードウエアトークンを用いた認証方式、複数の要素を組み合わせた多要素認証、過去の利用環境等との差分を分析するリスクベース認証等、さまざまな認証方式が研究開発されている。日本では、静脈認証や顔認証といった生体認証は実用化されており、技術レベルは高く今後もそれを継続していくことが期待される。より高い安全性と使いやすさと低価格を実現できる方式の普及が今後の課題であろう。

複数のサイトを連携しサービスを提供するために ID を連携し、一度のサイトへのログインで複数のサイトが利用可能になるシングルサイン・オン（Single Sign On：SSO）の技術が開発され、ブラウザーベースの SSO だけでなく、スマートフォン等のデバイスや、ブラウザーを利用しない方式も開発・実装されている。ＩＤ連携は世界で広く採用される方式の確立が必要であり、応用活動や標準化活動が重要になっていくと考えられる。

（５）サイバー攻撃の検知・防御次世代技術

2014 年ソニー・ピクチャーズエンターテインメントへの攻撃に見られるようにサイバー攻撃はますます巧妙化、悪質化しており、その対策技術はますます重要性を増すと考えられる。このサイバー攻撃の検知・防御次世代技術の研究課題としては下記を挙げることができる。

（ａ）標的型攻撃対策技術
（ｂ）大規模感染型マルウエア対策技術
（ｃ）ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃対策技術
（ｄ）DDoS 攻撃対策技術
（ｅ）マルウエア対策技術
（ｆ）サイバー攻撃可視化技術
（ｇ）サイバー攻撃情報共有技術

この分野は、「データオリエンテッド」な研究分野であり、研究の成否は、いかに大規模な“実データ”を定常的に収集できるかにかかっていると言っても過言ではないが、大学等においてこれらのデータをとるのに日本の公的資金取得・利用の仕組みが適していない等の問題がある。また、学と産の連携も不十分であり、国内大学の研究成果が実際の製品やサービスに結びついた例は、非常に限定的であり、米国などに大きく遅れをとっている。今後も新しい技術が必要となる分野なので、状況の改善が期待される。

（６）プライバシー情報の保護と利活用

個人情報保護法の改正時の検討でもっとも重要な課題として検討されているのがプライバシー情報の保護と利活用の両立である。この実現のためには、プライバシーを保護したままでデータベースから共通の傾向や固有のパターン等の有益な知識を抽出する技術が重要となる。大きく分類すると、（ａ）個人を識別不能な様にデータベースを匿名化して公開する技術（Privacy-Preserving Data Publishing)、（ｂ）プライベートなデータを暗号化したままで任意の計算を実行する秘匿計算の技術（Secure Multiparty Computation)、（ｃ）分散されたサーバーに格納されたデータベースを暗号化してデータマイニングを実施する技術（Privacy-Preserving Data Mining)、（ｄ）抽出された知識からプライベート情報が漏洩しない様に精度を落としたりノイズを加えたりする技術（差分プライバシーなど）がある。

現在、学会レベルでいろいろな研究が実施されているが、計算コストや技術が成熟していないことを理由にまだ普及の兆しが見えないのが実情である。技術の開発とともに、社会的合意形成の努力をする中から、実用性のあるシステムの実現が待たれている。

（７）デジタル・フォレンジック技術

フォレンジック（Forensics）とは本来、法科学などと訳される語であり、科学的な知見を犯罪捜査や法廷の場における法的紛争の解決に役立てることを目的に発達した研究領域を指す。民間でも、巧妙化する標的型攻撃や、2014 年「ベネッセ個人情報流出事件」に見られるような内部からの個人情報の漏洩問題で、ログとデジタル・フォレンジック技術を利用して侵入経路や、情報の流出経路を明確化する努力がなされている。また、警察でもデジタル･フォレンジック技術無しには適切な捜査が行えない時代になってきており、「PC 遠隔操作事件」おける裁判に見られるようにデジタル・フォレンジックの専門用語が法廷で飛び交うようになっている。

また、デジタル・フォレンジック技術は、情報インフラとそれが支える物理的な社会インフラについて、不具合、人的ミス、災害、サイバー攻撃による問題や障害の発生の防止、問題や障害が発生した場合でも影響を最小限に抑えるためにも有用である。

主要な技術動向として以下のようなものがある。

（ａ）ハードディスクの大型化やＳＳＤの普及に対応した電磁的記録の消去や改ざん、偽造の検出や分析技術
（ｂ）インターネットの追跡困難性や通信の暗号化および匿名性に対する対策技術
（ｃ）ウイルス対策ソフトウエアでは検知できないマルウエアの対策技術
（ｄ）主記憶装置など従来は扱えなかった揮発性メモリー領域のデータを利用するライブフォレンジック（メモリーフォレンジック）
（ｅ）大規模データから必要情報の高効率抽出などのための機械学習などの応用

デジタル・フォレンジックに関する製品に関しては、米国などが先行しており、一部を除いて日本の国際競争力は低いといわざるを得ない。また、技術力のある専門家の育成も不十分で今後の重要な課題である。特に、研究人口の不足は深刻で、画像処理や言語処理や人工知能などの分野からの参入を促進していく必要がある。

3.13.1　次世代暗号技術

（1）研究開発領域名

次世代暗号技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

新たに発生する多様な要求に応えるための暗号技術および暗号プロトコルの確立を目的とした研究開発。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

暗号技術は現代の ICT 社会においてデータの秘匿性（情報を部外者に見られないこと）、完全性（情報が書き換えられていないこと）、真正性（通信相手やデータの提供元が意図した相手であること）などを確保する上で欠かせない技術となっている。一方、ICT の適用範囲も従来のパソコンやサーバーを中心とする情報処理産業から、周辺機器を含み、より社会に密接した社会インフラ、交通、農業、医療などより多様で多彩な分野に広がりつつある。それに伴い、暗号技術や暗号プロトコルも各応用先の様々なニーズに応えるための研究開発が重要となりつつある。具体的な動向としては以下が挙げられる。

1. データを暗号化したまま演算や情報処理を可能とする暗号化状態処理の研究開発
2. 暗号鍵漏えいからの回復力（レジリエンス）や使い勝手の向上などに関する研究開発
3. 物理的な特性を盛り込んだ暗号技術および暗号プロトコルの研究開発
4. 暗号技術および暗号プロトコルの軽量化の研究開発

1 の動向はクラウドの普及や情報漏えい対策のためにデータを暗号化してサーバーに保存する機会が増えたことに起因する。通常、暗号化されたデータを処理する際には、復号鍵を持っているノードに一旦データを送り、暗号文を復号し、必要な演算や情報処理を行った後、再び暗号化してサーバーに戻す。そのため、データ復号時の漏えいリスクや、通信量、計算量の増大などの問題がある。この問題に対処するための研究開発として、データを暗号化したまま情報処理可能な暗号化状態処理に注目が集まっている。暗号化状態処理の実現方法には幾つかの方法があるため、各動向について以下でまとめる。

・完全準同型暗号を利用する方法：

完全準同型暗号は、暗号化した状態で平文（暗号化される前のデータ）の加減乗除の四則演算を可能とする暗号方式である。計算量や鍵、暗号文のサイズが大きいという欠点があるが、それらを削減するための基礎理論研究が進められており、主要な研究成果が欧米を中心に創出されている。安全性の根拠となっている格子上 SVP (Shortest Vector Problem) を解くために必要となる計算量の見積もりについては日本からも貢献がある [1)]。研究については、米国のメンバーを中心に完全準同型暗号のライブラリ実装 HElib [2)]が進められている。

・セキュアマルチパーティコンピューテーション(SMC: Secure Multiparty Computation)を応用する方法：

SMC は関係者間で通信を行うことにより互いの入力を相手に秘匿しながら任意の値を計

算する暗号プロトコルである。SMC の基礎理論研究は 1980 年代頃から行われているが、近年、計算能力の増加に伴い実装と応用が進みつつある。例えば欧州では、エストニアの Sharemind を使ったロケットの衝突リスク計算[3]やイタリアの SecureSCM を使ったサプライチェーンマネジメント(SCM: Supply Chain Management)[4]などの応用研究が行われている。日本でも、医療統計分析[5]や化合物検索[6]などの応用研究が行われている他、各社産業化に向けた研究開発を加速させている[7]。SMC の構成要素である準同型暗号や秘密分散、また、その一応用例である匿名エンティティ認証は、それぞれ ISO/IEC 18033-6、19592、20009 として標準化も進められている。

2 は、暗号鍵漏えいへの対処方法や暗号技術をより使い易くするための動向である。前述のとおり暗号技術は現代の産業界にとって欠かせない技術となっており、その解読し難さは当然ながら、それに加えて使い勝手の向上も求められつつある。また、長年の基礎理論研究の結果、解読困難な暗号技術の設計手法もほぼ確立し、解読困難な暗号技術も多数市場に提供されている。そのため、現在においては、暗号アルゴリズムが破られる危険性より、暗号鍵が漏れたり、実装上の問題が突かれたりする危険性の方が高まっており、それらへの対応が求められている。米国では、RKI (Relational Key Infrastructure)[8]という新たな概念が提唱され、産業化が進められている。RKI では、PKI（Public Key Infrastructure）を使いつつ、PKI において運用負荷の大きい証明書発行時や秘密鍵漏洩時における実世界での事務処理の手間を軽減する工夫が加えられている。その概要は以下のとおりである。RKI の各エンティティは、自分の公開鍵 PRK 秘密鍵 PK 対を生成し、PK を GA(Group Authority)に送り、それに対して verinym V というランダムな ID を発行してもらう。GA は V と PK に対する証明書 CERT を発行し、レポジトリ R に登録する。このように、RKI では PK の所有者が誰であるかの確認を省略することにより、実社会での事務処理の手間を省いている。次に、そのエンティティは、V の Ownership Contract (OC) である VOC を生成し、VOC に V の PRK で電子署名を付加し、各認証局 CA に送る。VOC には V に紐づけられている PK を変更する際に必要となる署名鍵などの情報が記述される。各認証局 CA はその V に対する VOC がまだ登録されていなければ、それを保存する。PRK が漏洩した場合には、新たな PRK/PK 対を生成し、新たな PK に VOC の条件を満たす電子署名を付けてもらい CA に渡す。CA は VOC の条件が満たされていることが確認できれば、V に対応する PK が新たな PK であることを示す公開鍵証明書 CERT を発行する。これにより、公開鍵証明書の無効化手続きも自動で行えるため、オフラインでの事務処理を省略することができる。

日本における鍵漏洩へのレジリエンス（回復力）と利便性を両立するための研究開発動向としては、利用者に短いパスワードの利用を許可し利便性を高めながら、鍵漏えいに対して回復力を持たせた相互認証・鍵管理基盤 LR-AKE (Leakage-Resilient Authenticated Key-Establishment)が実用化され産業化が進みつつあることが挙げられる[9]。

3 の物理的な特性を盛り込んだ暗号技術および暗号プロトコルの研究開発動向としては、まず、量子力学の不確定性原理を応用した量子鍵配送が挙げられる。欧米の企業により商用サービスも提供されているが、前述の通り、暗号技術に求められるニーズは一つの側面の高い安全性より、実装や鍵の保護などを含めたトータルでの安全性や利便性とのバランスに移行しつつあり、通信路の盗聴のみに対する高い安全性だけで他の方式との優位性を認めても

らうことが難しくなってきている。一方、不確定性原理を乱数生成器に応用するという新たな展開も出始めている。ここ数年、公開鍵生成時のエントロピー不足による秘密鍵の特定[10)11)]が現実的な社会問題となっており、また、スマートカード、IoT (Internet of Things)、M2M (Machine to Machine)、CPS (Cyber Physical Systems)などにおける乱数生成時のエントロピー確保の問題[12)]もあり、問題解決の一つの方法となる可能性がある。

デバイスから消費電力や漏えい電磁波などのサイドチャネル情報を使って暗号鍵を抜き出す方法の研究開発動向としては、解読コンテスト[13)]が行われており、現実的な側面から解析技術、防御技術の検証が行われている。他には、シリコンチップ用の物理複製困難関数(PUF：Physically Unclonable Function)に関する基礎および応用研究が国際会議 CHES (Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems) [14)]などを中心に盛んになりつつあり、欧米では産業化も進みつつある。シリコンチップ用の PUF とは電子回路のパスの微妙な長さの違いや電子素子の不純物の微妙な違いなどに応じて出力が異なるように設計された回路であり、シリコンチップの不正な複製の検出や、暗号鍵の生成や保存の用途としての期待が高まりつつある。

4 は安全性を犠牲にすることなく計算機への負担を軽減するための研究開発である。前述の通り、暗号技術は現在様々な用途で利用されており、中には計算資源が乏しかったり、遅延が許容できなかったり、バッテリーの持ちを長くするため消費電力量を抑えなければならなかったりする場合もある。このような環境に適した暗号技術の研究開発は従来、欧州の Framework Programme において盛んに行われ[15)]、日本からもアルゴリズム提案や安全性評価について貢献が行われていた。現在では、それらの成果も踏まえながら標準化作業が進んでおり、ISO/IEC では 20192 Lightweight cryptography として、そのパート２においてブロック暗号、パート３においてストリーム暗号、パート４において公開鍵暗号技術、パート５においてハッシュ関数の検討が進められている。また、パスワード (weak secret)のみを使ってクライアント、サーバー間で相互認証を行う PAKE (Password Authenticate Key Exchange) の標準規格 ISO/IEC 11770-4 Key management -- Part 4: Mechanisms based on weak secrets の見直しも進められており、より軽量でかつ安全性証明の付いた方式の標準化に向けた検討が行われている。さらに、米国においても 2015 年 7 月に NIST で light-weight cryptography のワークショップ[16)]が計画されており、その重要性が増しつつある。

（４）科学技術的・政策的課題

暗号技術には従来より高い解読困難性が求められていたが、最近では、その高い解読困難性に加えて、産業界からの多様な要求に応えることの重要性が増しつつある。これは、暗号技術が産業を支える要素技術の一つになったことにより、暗号解読耐性以外の価値も重要視され、特定の攻撃のみに対して過度な耐性を追求するより、実装上の安全性や鍵管理、使い勝手、処理速度、消費電力量などが全体として応用先に合致する方が重視されるようになったからである。

したがって、科学技術的・政策的にも、一部の攻撃のみに対してずばぬけた耐性を求めるのでなく、応用先の多様なニーズを先取りしながら、それらに応えるための研究や、そこに新たな科学技術的、学術的な課題を見いだすことが重要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

従来、暗号技術や暗号プロトコルと連携するには、暗号アクセラレータ、耐タンパーモジュール（TRM：Tamper Resistance Module）、TPM (Trusted Platform Module)、物理乱数生成器などがあったが、新たなハードウエアとしてシリコン PUF (Physically Unclonable Function：物理複製困難関数) が注目されつつある。PUF は忠実なコピーが困難となる物理的な特性のことであり、この特性を用いることによりデバイスや商品などの真贋判定を行える他、方式によっては、乱数生成、サイドチャネル攻撃に強い鍵生成や鍵共有プロトコルなどを構成することが可能となる。欧米では商用展開も始まっており、学会での技術改良の議論も盛んになりつつある。今後、IoT (Internet of Things)、M2M (Machine to Machine)、CPS (Cyber Physical Systems)向けの新たなセキュリティーモジュールとして広がりを見せる可能性がある。

（６）キーワード

暗号化状態処理技術、秘匿検索、秘匿計算、物理複製困難関数、乱数生成、軽量暗号

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	国内会議SCIS (Symposium on Cryptography and Information Security：暗号と情報セキュリティシンポジウム)、 CSS (Computer Security Symposium：コンピュータセキュリティシンポジウム) などを中心に次世代方式の提案、改良、安全性の議論が定常的に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	秘匿計算、秘匿統計分析、秘匿検索、量子鍵配送システム、PUFシステムなどのプロトタイプ開発が進む。
	産業化	○	↗	検索可能暗号、秘匿計算、秘匿統計分析、漏えいにレジリエントな認証・鍵管理基盤などの産業展開実績あり。
米国	基礎研究	◎	→	CRYPTOなどの国際会議を中心に次世代方式の提案、改良、安全性の議論が定常的に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	Helib など完全準同型暗号の実装と改良が進む。NISTが Lightweight 暗号のワークショップを2015年7月に開催予定。
	産業化	◎	→	量子鍵配送システム、PUFの産業展開実績あり。RKI (Relational Key Infrastructure) の提案と産業展開。
欧州	基礎研究	◎	→	EUROCRYPTなどの国際会議を中心に次世代方式の提案、改良、安全性の議論が定常的に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	秘匿計算の応用実績あり。
	産業化	◎	→	秘匿計算、量子鍵配送システム、量子乱数生成器、PUFの産業化実績あり。 Sharemind（エストニア）、量子鍵配送システム（id Quantique (ジュネーブ)、SmartQuantum (フランス)、そしてQuintessence Labs (オーストラリア)）、量子乱数生成器、SRAM PUFが産業展開中。
中国	基礎研究	△	↗	今後増加が見込まれる。
	応用研究・開発	△	↗	従来技術の応用や開発が主。
	産業化	△	→	従来技術の産業化が主。
韓国	基礎研究	△	↗	今後増加が見込まれる。
	応用研究・開発	△	→	従来技術の応用や開発が主。
	産業化	△	→	従来技術の産業化が主。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) "SVP Challenge" http://www.latticechallenge.org/svp-challenge/index.php
2) "HElib" https://github.com/shaih/HElib
3) "Sharemind" https://sharemind.cyber.ee/
4) "SecureSMC" http://sesar.di.unimi.it/Sesar/securescm
5) NTT "秘密計算システム" http://www.ntt.co.jp/inlab/blabo/forum2014/pdf/C-1.pdf
6) AIST "秘密計算による化合物データベースの検索技術" http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2011/pr20111101/pr20111101.html
7) 清藤、四方 "高機能暗号を活用した情報漏えい対策「暗号化状態処理技術」の最新動向" http://www.imes.boj.or.jp/research/papers/japanese/14-J-10.pdf
8) ENT Foundation "Entity Network Translation (ENT) + Relational Key Infrastructure (RKI)" http://www.ent.net/mcms_site/images/pages/20140906_mapping_full.png
9) 今井 秀樹 "情報セキュリティと「想定外」" https://www.jstage.jst.go.jp/article/essfr/5/3/5_3_198/_pdf 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol. 5, No.3, pp.198-204, 2012.01
10) Nadia Heninger, Zakir Durumeric, Eric Wustrow and J. Alex Hlderman "Mining your Ps and Qs: Detection of Widespread Weak Keys in Network Devices" In Proc of the 21st USENIX Security symposium, 2012.8
11) Arjen K. Lenstra, James P. Hughes, Maxime Augier, Joppe W. Bos, Thorsten Kleinjung and Christophe Wachter "Public Keys" Advances in Cryptology - CRYPTO 2012, LNCS 7417, pp 626-642, 2012.8
12) Daniel J. Bernstein, Yun-An Chang, Chen-Mou Cheng, Li-Ping Chou, Nadia Heninger, Tanja Lange, Nicko van Someren "Factoring RSA Keys from Certified Smart Cards: Coppersmith in the Wild" Advances in Cryptology - ASIACRYPT 2013, LNCS 8270, pp 341-360, 2013.12
13) "DPA contest" http://www.dpacontest.org/home/
14) "Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems" http://www.chesworkshop.org/
15) "European Network of Excellence in Cryptology II" http://www.ecrypt.eu.org/index.html
16) NIST " Lightweight Cryptography Workshop 2015 " http://www.nist.gov/itl/csd/ct/lwc_workshop2015.cfm

3.13.2 IT システムのためのリスクマネジメント技術

（1）研究開発領域名

IT システムのためのリスクマネジメント技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

重要性を増す IT システムの安全を確保するためのリスクマネジメント(リスクアセスメント、リスクコミュニケーションを含む）技術の高度化を行うために、(a)リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立、(b)リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化、（ｃ）リスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成技術の高度化などを行う。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

現代社会は、IT システムに深く依存するようになってきており、IT システムの安全性の確保は非常に重要な課題になってきている。そのような中で、高度化、複雑化する標的型攻撃や、内部犯罪のための対策を適切に実施するためには、ハードウエアやソフトウエアの導入などの個別の技術的対策だけでは不十分で、リスクアセスメント、リスクコミュニケーションを含むリスクマネジメントのための理論から実務までの体系化やそのための技術の高度化が不可欠となってきている。

この実現のためには、次のような項目の実施が必要になる。

（ａ）リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立

（ｂ）リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化。ここでは、リスク対策が必要かどうかだけでなく、どのような対策の組み合わせが望ましいのかの検討も可能とする必要がある。

（ｃ）リスクに関与する人たち（例えば経営者、従業員、顧客など）がいろいろいる中で、提案された対策案やその組み合わせを実行するに当たってのリスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成

これらの技術の開発は、各国において試みられてきているが、まだ十分な成果を上げているとはいえない状況である。

［これまでの取り組み］

（ａ）リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立：

近代の組織では、マネジメントシステムによりいろいろな対象を、適正に管理をしようと試みてきた。1960 年代には米国のエドワーズ・デミング（Edwards Deming）による PDCA サイクル（plan-do-check-act の略で計画、実行、評価、改善を繰り返す）の概念を用いて、事業の生産管理や品質管理が効果的に行われるようになった [1)]。

IT 分野では、2000 年に情報セキュリティーマネジメントが標準化の対象となっている(ISO/IEC27001)。しかし、この段階で情報セキュリティーのリスクマネジメン

トで扱う対象は、次の 3 つの階層のうち第 2 階層が中心で、情報資産をマネジメントの対象として扱ってきた。

第 1 階層　ＩＴシステムそのものの安全
第 2 階層　ＩＴシステムが扱う情報の安全
第 3 階層　ＩＴシステムが行うサービスの安全

そして、第 1 階層の IT システムそのものの安全性のうちハードウエアの安全性はほとんど扱われてこなかった。またネットショッピングの安全などの第 3 階層のＩＴシステムが行うサービスの安全問題もほとんど対象外であった。さらに、この段階では、関与者間のリスクコミュニケーションの問題も明示的には扱われてこなかった。

2009 年になると一般化されたリスクやリスクマネジメントの定義が標準化された（ISO 31000）[2)]。ここでは、図 3.13.2 に示すようなリスクマネジメントプロセスが提案され、リスクマネジメントの中に、リスクアセスメントだけでなく、リスクコミュニケーションが位置づけられるようになった。また ISO/IEC27001 の 2013 年改定では情報資産でなく、広く無体物としての情報を対象とするようになった [3)]。

このように概念としては整理されてきたが、リスクコミュニケーションを図 1 において具体的にどのように扱うかの検討は（ｃ）で述べるように不十分のままである。

企業全体のリスクの中に情報システムのリスクをどう位置づけるかなどの検討のため情報セキュリティーのリスクを経済学的に扱う試みが 21 世紀になって行われ始めた [4)5)6)]。現在も小規模ではあるがいろいろな研究がなされており、さらなる研究の進展が期待されている。

また、ＩＴシステムのリスクマネジメントの概念をさらに広くとらえ、整理していくことも必要となっている。

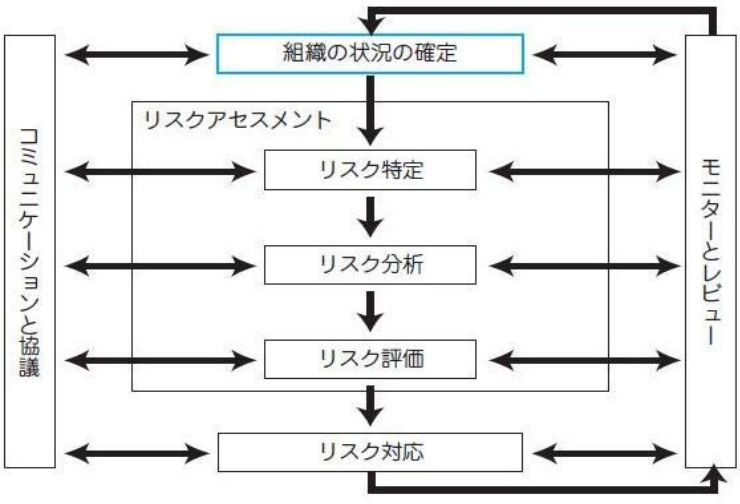


図 3.13.2　リスクマネジメントのプロセスの流れ（ISO31000）

（ｂ）リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化。

リスクマネジメントの中心となるリスクアセスメントは、次の２つのフェーズに分けて考えることができる。

① 対策を必要とするリスクの明確化

② そこで必要となる対策の検討とそのプライオリティ付け

上記の①に対しては、下記のようにすでにいろいろな方法が提案されている[6]。

（イ） ブレーンストーミング法（非形式的アプローチ）

（ロ） チェックリスト利用法（ベースラインアプローチ）

（ハ） ランク値付けマトリックス法（詳細リスク分析アプローチ）

（ニ） フォールトツリー分析法（詳細リスク分析アプローチ）

ランク値付けマトリックス法に関しては、EU においてクラウドのセキュリティー等に対し、優れた適用が行われている[7]。また、Bruce Schneier がセキュリティー評価に適するようにフォールトツリー分析法を改良したアタックツリー分析法[8]の適用などもいろいろ行われている（例えば引用資料 9)）。

2012 年には、米国の NIST（National Institute of Standards and Technology）より SP800-30 Rev.1（リスクアセスメントの実施の手引き）が出版され、リスクアセスメントのための具体的手順が示された。しかし、一般的な方法であり、目的や対象によっていろいろな手法が必要とされるが、これらに関する研究は限定的である。

上記の②のどのような対策をとるべきかを明確にするため、Bistarelli らは、アタックツリーに脆弱性への対策を適用したディフェンスツリーを定義し、対策のリスク低減率と運用コストを考慮した ROI（Return on Investment）と、攻撃者が再攻撃を仕掛ける割合を考慮した ROA（Return on Attack）を用いた最適な対策選定手法を提案している[10]。

また、標的型攻撃のように複雑で種々の方法を組み合わせた攻撃に対し、イベントツリー分析法とフォールトツリー分析法を組み合わせ、派生リスクやコストを考えたうえで最適の対策案の組み合わせを求める方法の提案と適用が実施されている[11]。

しかし、いずれも大規模な問題に、容易に適用できるものにはなっていない。

（ｃ）リスクに関与する人たちがいろいろいる中で、提案された対策案やその組み合わせを実行するに当たってのリスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成

リスクコミュニケーション自体の研究は１９８０年代から本格的に実施されるようになってきており、米国のナショナル･リサーチ・カウンシルは１９８９年にリスクコミュニケーションを、「個人とグループ、そして組織の間で情報や意見を交換する相互作用的過程である」と定義しており、リスクのタイプとレベルに加えて、リスクマネジメントの方法に関する議論が必要であるともいう[12]。しかし、IT システムに関するリスクコミュニケーションの研究は、国内外でほとんど行われてこなかった。

佐々木らは、IT システムのリスクコミュニケーションの目的を①個人的選択、②組織内合意形成、③社会的合意形成の 3 つに分けられることを示すとともに、組織内合意のために多重リスクコミュニケータ MRC の開発を行った[13]。これは、リスク間の対立や、関与者間の意見の相違を考慮しつつ、リスクコミュニケーションにより対

策案の最適な組み合わせを求められるようにするものである。

現状の MRC は、モデリングに専門知識を必要とし、しかも、時間がかかるという問題がある。

［今後必要となる取り組み］

（ａ）ＩＴシステムのリスクマネジメントのためのより広いフレームワークの確立

従来のリスクマネジメントは経験に基づく手順の提示が中心で、理論に基づく技術の体系化がなされておらず、ＩＴ分野以外のリスク管理と連携した、統合的なリスク管理も不十分であった。このような状況は国内だけでなく海外でも同様であると考えられる。

このため、佐々木らは「ＩＴリスク学」[14] の名のもとにＩＴリスクを広くとらえたうえで、学の確立を図ってきたが進展は限定的であり、さらに多くの研究者が参加した上でのこのような研究の深化が期待される。

また、情報セキュリティ大学院大学ではＩＴリスクに対し、経済学・経営学・法学などを総合的に組み合わせた研究を行ってきたが（引用資料 14）の 7 章）、さらに多くの研究者が参加して、研究を行うべきテーマであると考えられる。

（ｂ）リスクアセスメント技術の適用範囲の拡大と適用容易化

今後、ＩＴシステムの各種サービスを対象としたリスクアセスメントが重要となってくると考えられる。例えば、クラウドのリスクアセスメント、サプライチェインのリスクアセスメント、制御システムのリスクアセスメント、内部犯罪のリスクアセスメントなどが重要になると考えられており、一部実施されているが、リスクアセスメント技術を向上させる中からさらに高度な分析ができるようにしていく必要がある。

また、リスクの本質である、1 つのリスク対策が新たなリスクを生み出す問題や、リスク対策により、攻撃側が動的に変化する問題などを考慮した新しいリスクアセスメント技術の開発が期待される。

さらに、対策案の組み合わせを選ぶためのリスクアセスメント技術については、大規模なシステムに適用できるようにするとともに、多くの人が適用できるようにしていく必要があると考えており、さらなる改良が期待されている。

（ｃ）ＩＴシステムのためのリスクコミュニケーションに関する研究の深化

ＩＴシステムの適用に関する社会的合意形成（例えば青少年のための情報フィルタリング）のためのリスクコミュニケーション技術が重要になっていくと考えられる。

また、組織内合意形成においても多くの人が容易に適用できるようにする方向での改良が期待されている。

さらに、合意形成を可能にする要因等の分析等の理論化を通じた、リスクコミュニケーション手段の高度化なども重要なテーマになっていくと考えられる。

（４）科学技術的・政策的課題

内閣サイバーセキュリティーセンター（NISC）が指摘するように、情報セキュリティーや IT リスクの問題を考えるにあたっては、単に情報システム等の脅威を考えたり、技術的な研究をするのみならず、国際政治、法律、安全保障、危機管理、経済学、心理学等の社会科学的視点も含めさまざまな領域の研究とも連携して行われることが求められる[15]。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

（ａ）セキュリティー経済学については、ENISA(European Union Agency for Network and Information Security)で 2011 年より、WG が作成され、必要なアプローチ方法に関する分析結果が 2012 年に報告されている[16]。最近では、プライバシーの経済学の研究もおこなわれるようになってきた[18]。

（ｂ）米国のミシシッピー州立大学では将来のセキュリティー研究の方向を検討し、①Separating insider deviant behavior from insider misbehavior、②Unmasking the mystery of the hacker world、③Improving information security compliance、④Cross-cultural InfoSec research を含むものになるだろうと推定している[17]。

（６）キーワード

リスクアセスメント、リスクコミュニケーション、リスクマネジメント、リスク対リスク

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	ITシステムに関するリスクコミュニケーションなどの研究が大学などで積極的に進められているが層は薄い。
	応用研究・開発	○	↗	IPA等でセキュリティー経済学やリスク心理学的アプローチが進み始めているが層は薄い。
	産業化	—	↗	—
米国	基礎研究	◎	↗	リスクアセスメントに関する大学における研究は多い。また、理論的研究に関するアプローチが開始されている。
	応用研究・開発	◎	→	NISTを中心に、リスクマネジメントに関する基準やガイドを策定して公開している。国の組織の安全性評価に積極的に適用している。
	産業化	—	↗	—
欧州	基礎研究	○	→	ディフェンスグラフを用いる対策案選定法などのリスクアセスメント技術が大学などで積極的に進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	セキュリティー経済学については、ENISAで2011年より、WGが作成され研究が強化されている。また、クラウドのセキュリティー評価などが適切に実施されている。
	産業化	—	↗	—
中国	基礎研究	△	→	大学などにおいてリスクアセスメントに関する研究は行われているようであるが目立たない。
	応用研究・開発	△	→	目立った動きが見えない
	産業化	—	→	—
韓国	基礎研究	○	→	大学などにおいてリスクアセスメントに関する研究は行われている。
	応用研究・開発	○	→	政府機関などにおいてリスクアセスメントが実施されている。
	産業化	—	→	—

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) W. デミング、NTT データ品質保証研究会訳、デミング博士の新経営システム論、NTT 出版 1996
2) ISO, ISO31000:2009, Risk Managemeent – Principles and guidelines, 2009
3) ISO/IEC27001:2013, Information technology -- Security techniques -- Information security management systems -- Requirements

4) R. Anderson: “Why information security is hard---An economic perspective,” Proc. 17th Annual Computer Security Appliations Conference, 2001.
5) L. A. Gordon and M. P. Loeb: “The economics of information security investment,” ACM Trans. Info. Sys. Security, vol.5, no.4, pp.438-457, 2002.
6) ISO/IEC TR 13335-1~5, Guidelines for the Management of IT Security(GMITS)
7) ENISA： Cloud Computing: Benefits, risks and recommendations for information security, 2009
8) Bruce Schneier, "Attack trees," Dr. Dobb’s journal, vol. 24, pp. 21-29, 1999.
9) Pinchinat, Sophie, Mathieu Acher, and Didier Vojtisek. "Towards Synthesis of Attack Trees for Supporting Computer-Aided Risk Analysis." Workshop on Formal Methods in the Development of Software (co-located with SEFM). 2014.
10) S. Bistarelli, F. Fioravanti, and P. Peretti, "Defense trees for economic evaluation of security investments," in Availability, Reliability and Security, 2006.
11) 石井亮平， 佐々木良一，金子紀之:「イベントツリーを用いたリスク評価ツールの実装と標的型攻撃最適組み合わせ問題への適用」， コンピュータセキュリティシンポジウム 2013 論文集,4号,pp 147-154
12) National Research Council (U.S.). “Improving Risk Communication”, The National Academies Press,1989
13) 佐々木良一, 日高悠, 守谷隆史, 谷山充洋, 矢島敬士, 八重樫清美, 川島泰正, 吉浦裕, 「多重リスクコミュニケータの開発と適用」, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.9, pp.3180-3190, 2008
14) 佐々木良一編著「ＩＴリスク学　情報セキュリティを超えて」共立出版，２０１３
15) 情報セキュリティ政策会議「情報セキュリティ研究開発戦略（改定版）」2014
16) ENISA , Working Group on Economics of Security https://www.enisa.europa.eu/activities/risk-management/working-group/WG%20EoS
17) Robert E. Crosslera, Allen C. Johnstonb, Paul Benjamin Lowryc, Qing Hud, Merrill Warkentina, Richard Baskervillee; Future directions for behavioral information security research, Computers & Security, Volume 32, February 2013, Pages 90–101
18) S. Romanosky, D. Hoffman, A. Acquisti. "Empirical Analysis of Data Breach Litigation." WEIS2012. http://weis2012.econinfosec.org/papers/Romanosky_WEIS2012.pdf
19) K. Matsuura. “A Derivative of Digital Objects and Estimation of Default Risks in Electronic Commerce.” LNCS 2229, pp.90-94, Springer, 2001.

3.13.3　要素別セキュリティー技術

（1）研究開発領域名

要素別セキュリティー技術（制御系、その他（情報家電、各種機器、自動車等））

（2）研究開発領域の簡潔な説明

これまでの情報通信系システムだけでなく、組込み系システムという分野に象徴されるように、あらゆる「もの」が、ソフトウエアで制御されるようになり、更にネットワークと接続する時代となってきている。それに伴って、これまでは情報セキュリティーへの脅威を考慮してこなかった分野でもその対策が不可欠となっている。しかも近年、標的型サイバー攻撃と呼ばれる攻撃対象や目的（機密情報窃取やシステム破壊等）を特定した攻撃が深刻な脅威となってきている。それぞれの分野固有の情報セキュリティー上の脅威の明確化と、それに対する技術面や運用管理面での対策、参照する基準や標準、ガイドなどの整備に加え、業界ごとにおける普及啓発が重要となっている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

①制御系システムのセキュリティー[1)]

［背景と意義］

制御系システムは、従来、固有のプラットフォーム、固有のソフトウエア、固有のプロトコル、更に、基本的には外部とのネットワーク接続はなされない環境で使われるものと考えられ、情報セキュリティー的な配慮はほとんどなされてこなかった。しかし、近年、Windows や UNIX 系の汎用プラットフォームや標準プロトコルの採用が進んでおり、更にメンテナンスや管理、上位の情報系システムとの連携などの目的で外部ネットワークに接続され、サイバー攻撃の対象になってきているという課題に直面している。2010 年にはイランの原子力施設へ侵入し誤動作を起こさせたマルウエア Stuxnet は大きな衝撃を与えたが、以降も、石油会社での多数のワークステーションのディスク破壊や交通制御装置の誤動作など、サイバー攻撃による事件、事故が多数報告されている。社会や組織にとって影響の非常に大きい分野であり、この４、５年大きな脅威となってきている標的型サイバー攻撃の対象となって大きな混乱や被害を招かないように、早急に備えていく必要がある。

一方で、サイバー攻撃の糸口となる産業用制御システムのソフトウエアの脆弱性の報告件数も大幅に増加しており、その対策や対応も急務である。しかし制御系システム分野では、24 時間 365 日の稼働（可用性）が重要な要件であるためアンチウイルスワクチンの使用の制約やセキュリティーパッチの適用が困難といった課題がある。しかも 10 年以上の稼働が前提のシステムのためセキュリティーパッチが提供されないなど、この分野固有の課題も抱えている。

こうした中で、重要インフラや製造ライン等で用いられる制御系システムのセキュリティー対策、そのための基準や標準の整備と普及、さらには、それに基づく評価認証制度などが必要となってきている。

［これまでの取り組み］

制御系システムのセキュリティーの基準や標準は欧米を中心に策定が先行しているが、そ

のカバー範囲は、組織やシステムや装置等の各セキュリティーレイヤに対応したもの、業種や業界に対応したもの等、様々な基準や標準が提案されている。このような状況下において、全てのセキュリティーレイヤをカバーし、業種に依存せず汎用的な基準・標準であるIEC62443（工業用プロセス計測制御のセキュリティ規格）が注目されてきており、一部の事業者の調達要件に引用する動きもでてきている。

IEC62443 は以下の 4 階層、13 の基準から構成されている：

IEC62443-1：用語、コンセプト、モデルの定義について記した技術仕様

IEC62443-2：事業者や運用者の組織管理を対象としたセキュリティ要求事項等の規格

IEC62443-3：制御システムを対象としたセキュリティ要求事項等の規格

IEC62443-4：制御システムを構成する個別装置のセキュリティ要求事項等の規格

一方で、制御系システム分野では、ある団体によって策定された基準を用いた第三者評価認証が ISCI [2]、WIB [3]等で実施されている。ISCI では 2010 年より制御系システムを構成する個々のコントローラ等の装置製品の認証制度を運用しており、重要な要件となる装置の通信機能に対する堅牢性（ロバストネス）のテスト技術を実用化している。WIB では、事業者によるシステムの調達の際のセキュリティー要件を広く規定しており、石油・化学等一部の業界でその認証が利用されてきている。一方で、この評価認証で先行していた ISCI や WIB の要求事項（評価基準）が、IEC62443 のシリーズ(-4 と-2 のレイヤ)に標準案として提案されてきている。換言すると、組織から装置やコンポーネントまでのレイヤをカバーする汎用の制御系システムセキュリティーに対する国際標準が、評価認証スキームを兼ね備えることになり、その適用や普及が進むものと考えられる。

国内では、2011 年より、制御系システムセキュリティーにおける基準や評価認証の検討に着手し、IEC62443 の審議中のドキュメントに対しての寄書を行うとともに、発行済みのパートに対して日本語訳を（財）日本規格協会より発刊し、また、評価認証として、2014 年に、CSSC [4]にて装置やコンポーネントに対して ISCI と相互承認される評価認証スキームを立ち上げ、更に JIPDEC [5]にて IEC62443-2-1 に準拠した組織のセキュリティーマネジメントの評価認証スキームを世界に先駆けて立ち上げた。

［今後必要となる取り組み］

技術的には、制御分野の特性から、アンチウイルスワクチンを適用できない装置に対するホワイトリスト技術、不正侵入に対する検知技術や一方向性ファイアウォールなどが必要となっている。

また今後の深刻なリスクに備えて、評価認証制度を国内の制御系システム事業者や重要インフラ事業者および国産製品に普及させるとともに、電力や交通や製造ラインなどの様々ある制御系システム分野に固有の要件をまとめていくことが必要である。例えば、電力業界ではスマートグリッドの敷設が進んでおり、その基準として、NIST7628 や IEC61580 他、様々提案されているが、業界や事業者として、真に有効となる基準の選定や拡張など、その検証を進めていく必要がある。

②その他のシステムのセキュリティー（情報家電、各種機器、自動車等）

［背景と意義］

情報家電をはじめとして、IoT や IoE という用語に象徴されるように、利便性や高付加価値化を実現するために、様々な機器にネットワーク機能やサービスが備えられてきている。その反面、情報家電機器やホームルータを踏み台にした DDoS 攻撃や、逆に機器からの情報漏えいなども多数報告されるようになっている。

また将来的な攻撃の可能性として、通信機能を備えた医療機器（インスリンポンプやペースメーカー等）に対して、研究ベースではあるが、無線からの攻撃の可能性が 2011 年より学会で発表されてきている。[6)]

更に、現在の自動車は 100 近い CPU を内蔵し、ソフトウエア制御が中心となってきている。また、車体内部の診断情報を外部に取り出すためのデバイスの接続口を備え、ネットワークを経由した情報の授受なども可能になり、さらにスマートフォンと情報をやり取りすることもできるようになってきている。その一方で、2010 年には、研究ベースであるが、ネット経由での攻撃が可能である事例が学会で公表される、引き続いて毎年新たな攻撃の試行実験例が発表されるようになってきている。[7)]

このように、機能の高付加価値化や利便性の向上のもとで、想定される脅威に対しての検討が急務となってきている。

［これまでの取り組み］

情報家電においては、基準等が国際的に定まっていない中で、日本においては 2010 年に、先行する主要な家電メーカーが参画し、IPA においてガイドを策定した [8)]。ガイドにおいては、搭載する情報機能、外部との接続口、提供されるネットサービスを前提に、想定される脅威と対策を抽出したものである。技術的には、これまで PC や情報通信で培ったセキュリティー技術の適用が可能である。しかし業界における利用は各社に委ねられたレベルにとどまっている。

自動車においては、欧州が先行して業界を束ねた基準作り（リスク分析手法など）や技術開発（セキュリティーチップ等）のプロジェクトを推進してきている。国内においては、業界の中にセキュリティー部会等を設置して検討を進めているとのことだが、詳細については公開されていない。2012 年に、IPA において自動車関連各社の参画の下、ガイドを策定した [7)]。ガイドは、自動車の仮想的なネットワーク構成の下で、情報家電のアプローチと同様に、想定される脅威と対策を抽出したものである。ただ、業界における利用は各社に委ねられたレベルにとどまっている。

両者とも難しい側面は、セキュリティーは製品の機能やサービスと表裏一体となっており、各社の事業戦略に深く関わってくるため、縦横な議論や合意が進まないという背景がある。

［今後必要となる取り組み］

技術的には、ソフトウエアに内在する脆弱性をいかに出荷前に低減するかが重要で、そのためのコーディング規約やセキュアコーディング技術、また、未知の脆弱性を発見するファジング技術などの活用が必要となってくる。また、出荷後の利用時に発見される脆弱性のパッチの流通技術の確立も不可欠である。

業界団体が中心となって、業界におけるセキュリティー脅威の共通認識の下で、セキュリティー基準やレベルを定めていくことが望ましい。様々なものが相互に接続する中で、業界横断的な基準も将来的に必要になってこよう。また、特に人命に関わる自動車等においては、機能安全（セーフティ）の基準は先行して国際標準 ISO26262 となっていることを受け、機能安全も左右するセキュリティーをそこに取り入れていくことが重要である。

（４）科学技術的・政策的課題

技術的なセキュリティー対策は、これまで情報通信の分野で培われてきたものを活用していける。ただ、もちろん新たな脅威の出現や攻撃手法も巧妙化していくので、それに対抗する技術開発を続けていくことになる。サイバー攻撃の検知技術、防御技術、攻撃情報の共有フレームワークなどの確立が核になってくる。

政策的な課題としては、どのレベルの情報セキュリティー対策を各業界や各製品分野で搭載していくのかの基準が制定されていない点にある。非機能でありコストのかかるセキュリティー対策をどのレベルまで対応するかは、業界や製品分野に応じて、大枠のコンセンサスを作っていくのが重要な課題である。社会インフラとなっている制御系システム分野においては、国としての基準やガイドを制定していくことも必要な時代になってきていると考える。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

技術的な動向としては、サイバー攻撃自体をいかに入り口で検知するかという技術として、アプリケーションレイヤでの高度なファイアウォールや仮想実行するサンドボックスタイプのツールの開発で各社しのぎを削る。ホワイトリスト方式でマルウエアを実行させないツールの開発も、組込み系での用途を視野に進んでいる。ますます巧妙化するマルウエアの挙動解析研究を通して、システムでの不審な動きを検知する技術の研究開発も続いている。標的型サイバー攻撃間の相関分析から、攻撃者像の特定などの研究開発も重要となっている。更に、ネットワークの仮想化技術（SDN: Software Defined Network）のセキュリティー対策への活用の研究が期待されている。

運用管理面での動向としては、攻撃者に対して、業界や集団で対抗する手段の一つとして、攻撃情報やインシデント情報の組織間での情報共有の重要性が主張されている。組織の事業上の機密や個人情報の取り扱いの壁があるが、そこを解決するスキームが各国や業界分野ごとで取り組まれている。また、その情報を共有・交換するためのデータ形式やフレームワーク（STIX、CyBox など）の提案や議論も進んでいる。[9)]

国の施策として重要インフラシステムの情報セキュリティー向上を図ろうとする動きも一部では進んでいる。米国では、国家の安全保障、経済活動維持等の一環として重要インフラシステムのサイバーセキュリティー向上を目的に、2013 年 2 月 12 日に大統領令（Executive Order）第 13636 号「Improving Critical Infrastructure Cybersecurity（重要インフラのサイバーセキュリティーの向上)」を発布し、2014 年 2 月 12 日に NIST より「Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity」の第一版が公開され、各重要インフラ業界に、このフレームワークに沿ったセキュリティー対策のレビューや業界ガイドラインを作ることを提言している。[10)]

（６）キーワード

脆弱性、サイバーセキュリティー、サイバー攻撃、標的型攻撃、情報家電、IoT、IoE、組込み系、制御システム、重要インフラ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	認証技術や検知技術を進めている
	応用研究・開発	◎	↗	業界や国研で分野を特定して進めている
	産業化	◎	↗	事業で先行している分野では、セキュリティーの必要性を業界団体内で議論を進めている。セキュリティー評価認証制度の確立や普及で先行している
米国	基礎研究	◎	↗	検知技術や防御技術、脅威情報流通技術など、先行的にすすめている
	応用研究・開発	◎	↗	NISTや業界団体を中心に、基準やガイドを策定して公開している。国家施策として、取り組みをけん引している
	産業化	◎	↗	先端的なセキュリティーツールの製品投入や、調達要件となる評価認証などで先行している。スマートグリッド事業などでも先陣を切っている
欧州	基礎研究	○	↗	カードやチップなど、特定分野で頭角を現している
	応用研究・開発	◎	↗	業界のガイドや、国際標準化委員会で活躍がみられる
	産業化	◎	↗	カードや、自動車やスマートグリッド分野などで、戦略的に進めている
中国	基礎研究	△	→	表立って、基礎研究は見えてこない
	応用研究・開発	○	↗	ウイルス検知やフィルタリング技術などを実施しているレベルで、先行製品はほとんど出てきていない
	産業化	△	→	制御や重要インフラで、情報収集を進めているレベルで、国際的な発信はほとんど確認できない
韓国	基礎研究	○	→	検知技術を進めている
	応用研究・開発	○	→	一部のセキュリティー分野で先行的な製品が出されているが、市場を獲得するにはいずれも至っていない
	産業化	△	→	余りセキュリティーを考慮されていない情報家電製品などが市場投入されており、産業界のセキュリティーへの取り組みはみえていない

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1）制御システムの情報セキュリティに関する調査（2012 年度）
http://www.ipa.go.jp/security/fy24/reports/ics_sec/ics_report.pdf

2）ISCI：ISA Security Compliance Institute（米国の ISA セキュリティー適合性協会）
http://www.isasecure.org/

3) WIB：http://www.wib.nl/
4) CSSC（制御システムセキュリティセンター）：http://www.css-center.or.jp/
5) JIPDEC（日本情報経済社会推進協会）：http://www.jipdec.or.jp/
6) 医療機器における情報セキュリティに関する調査（2013 年度）
http://www.ipa.go.jp/files/000038223.pdf
7) 自動車の情報セキュリティ動向に関する調査 （2012 年度）
http://www.ipa.go.jp/files/000027274.pdf
8) 情報家電におけるセキュリティ対策 検討報告書（2010 年度）
http://www.ipa.go.jp/files/000014114.pdf
9) STIX、CyBox： http://stix.mitre.org/
10) Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity：
http://www.nist.gov/cyberframework/upload/cybersecurity-framework-021214.pdf

３.13.４　認証・ＩＤ連携技術

（１）研究開発領域名

認証・ＩＤ連携技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ユーザーが安全かつ簡便に、さまざまなサービスを利用するためには、確実な認証を行う必要がある。また、インターネット上では、サービスを提供するサイト間での情報連携を確実に行う必要がある。そのためには、複数サイト間での認証と、認証の対象となるユーザーが持つ属性情報の集合体（アイデンティティー）を連携（フェデレーション）して利用するためのフレームワークであるアイデンティティー連携（ID 連携）が必須である。また連携した際、認証されたユーザーが利用可能となる範囲、例えば利用可能時間帯や利用可能アプリケーションを厳格に認可することが必要である。本領域では、このような多様な利用環境とサービス連携への対応に必要となる認証・ID 連携のアーキテクチャーの研究開発を行う。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

PC だけでなく、スマートフォンやウエアラブル・デバイス等のさまざまなデバイスをユーザーが利用する環境が進化する一方、インターネット上での単独運用によるサービス提供サイトだけでなく、複数のクラウドコンピューティング環境上で、さまざまな情報を連携したサービスが増加している。連携されるさまざまな情報の中には、漏洩してはならない機微な属性情報も数多くあり、サービスを利用しようとするユーザーを確実に特定することが必要である。すなわち、さまざまなデバイスに対応した高度な認証技術が必要である。また、認証技術の範囲は、人やモノの特定と確認だけではない。人の場合、本人の存在性の確認に加えて、本人に対する権限付与も必要である。例えば、「社員として認められる（本人の存在性確認）が、一般社員なので機密情報にはアクセスできない（権限付与）」といった認証プロセスが必要である。一般に、存在確認のための行為を狭義の「認証」（Authentication）と呼び、権限付与行為を「認可」（Authorization）と呼ぶ。認証と認可は、本人が保有する様々な属性情報（Attribute）すなわちアイデンティティーによって決定される。

一方サービスにおいては、インターネット上の単一のサイトのみによって提供されるのではなく、直接サービスを提供するサイト以外で認証を行うような複数のサイト間における認証連携が増加する。そのために、サービスを提供するにあたっても複数のサイトに散在する属性情報を流通させる技術が必要となっている。ID 連携技術は複数サイト間で認証情報を連携させ、属性情報を流通させるために必要な技術である。

認証技術の世界的動向

世界各国で頻発するサイバー攻撃や ID 窃盗等に対処するため、さまざまな認証方式が研究開発されている。インターネット上で提供されるサービスにおいては、ユーザーID とパスワードの単純な組み合わせによる認証方式から、ハードウエアトークンを用いた認証方式、複数の要素を組み合わせた多要素認証、過去の利用環境等との差分を分析するリスクベース認証等、さまざまな認証方式が研究開発されている。

IC カードを利用した認証は全世界的に非常に幅広く適用されている。接触型だけでなく

NFC のような非接触型も適用が進んでいる。

スマートフォンを中心としたモバイルデバイスでは、内蔵のカメラや音声を利用した認証方式が研究・開発されている。指紋認証は、iOS のようなスマートフォン OS の最新版では、標準認証方式としても実装されている。一方、NFC を内蔵したスマートフォンも多く出荷され、一部では IC カードの代替としても利用が広がっている。

ID 連携技術の世界的動向

複数のサイトを連携しサービスを提供するために ID を連携し、一度のサイトへのログインで複数のサイトが利用可能になるシングルサインオン（Single Sign On：SSO）の技術が開発され、ブラウザーベースの SSO だけでなく、スマートフォン等のデバイスや、ブラウザーを利用しない方式も開発・実装されている。SOAP（Simple Object Access Protocol）を利用し XML で記述されたセキュリティー情報を複数サイト間で交換する SAML（Security Assertion Markup Language）の技術 [1]は、SSO 機能を実装することが可能であり、2000 年代前半に標準化団体 OASIS で開発された。現在は高い信頼性を必要とする企業間 ID 連携やクラウド間 ID 連携において、多くのクラウドベンダーが SAML をサポートしている。また、REST（Representative State Transfer）ベースのプロトコルを利用した実現技術としては、2000 年代後半に登場した OpenID [2]や OAuth [3]を利用した方法、さらには OAuth をベースに発展させた OpenID Connect はここ数年で研究・開発され、コンシューマ向けサービスやソーシャルアプリケーションを中心に、クラウド上でも実装されている。

また、ID 連携を発展させ、複数のサイトに散在するユーザーの属性情報を流通する技術も研究・開発され、サービスへの実装も行われている。

認可技術の世界的動向

サービスを提供するのにあたって、必要な情報を構成する複数のサイト間で認可情報をやりとりする技術は、2000 年代の早いうちに標準化が図られ、SOAP プロトコル上に XACML（eXtensible Access Control Markup Language）[4]として仕様が策定され今日でも引き続き拡張が行われている。一方、ネットサービスが広がるにつれ、REST 方式で認可情報のやり取りが必要になり、策定された技術仕様が OAuth である。OAuth の仕様を組み合わせることによって、認証を行うことも可能となっている。 認可を与えるには認証を受けたユーザーに関連した属性値を利用して判断する。

（４）科学技術的・政策的課題

認証技術は、モバイルデバイスの進化による技術的進展がさらに期待できる。特に日本では、静脈認証や顔認証といった生体認証は実用化されており、より高精度な認証を行うべく技術の深みの追求をすべきであろう。また、スマートフォン内蔵のカメラを利用した虹彩による認証技術の研究等も行われており、モバイルデバイスを利用した認証技術は、国際的にも先を走り続けることが期待される。

一方、ID 連携技術の場合、技術的目標は「他のサービスと連携できること」であり、独自技術仕様を提供できる企業や機関は「他を凌駕した当該サービス市場において占有率（シ

ェア）を持つこと」である。しかし最近では、Facebook や Twitter 等でも、ID 標準技術をベースに拡張する傾向にあり、全く新しい技術をゼロから基礎研究して開発を行っていない。従って、ID 連携技術の場合は、短期においては、応用研究・開発に重点を置く方向にある。

（５）注目動向

FIDO (Fast Identity Online) [5)]

認証デバイス間での相互運用性や、パスワード管理の煩わしさを排除すべく、パスワード認証に代わる新たな認証方法の開発に取り組む組織として、2012 年 7 月に設立された非営利団体。執筆時点（2014 年 12 月）で UAF (Universal Authentication Framework)、U2F(Universal 2nd Factor)の２種類のプロトコルが開発されている。

トラストフレームワーク [6)]

異なる組織間での ID 情報の交換は、個人情報の悪用や漏洩のリスクがある。そこでポリシーやルールを明確にした上で、信頼できる組織を認定し、それらを連携させることによって、企業ごとのユーザーの登録・認証を別々に行うことなく、アイデンティティー情報を異なる組織や機関間で交換することを可能にする。

マイナンバー[7)]

わが国において、社会保障と税の一体改革を実現する手段として、国民に唯一無二の個人番号を付与し、行政手続きの効率化を行う。さらに将来の民間との連携等を視野に入れた制度である。個人番号を利用するために、耐タンパ性の高い IC カードの配布が予定されている。将来的には IC カードのみならず、スマートフォン内臓の NFC による認証手段や、トラストフレームワークによる民間等他の認証フレームワークとの相互接続も課題としている。

学術認証フェデレーション [8)]

我が国において、学術 e-リソースを利用する大学、学術 e-リソースを提供する機関・出版社等から構成された連合体。米国で開発された Shibboleth をベースに連携ネットワークの構築・運用を行う他、 ID 連携に関する技術の研究・開発を行い、国際学会での発表も活発である。

クラウドコンピューティング

さまざまなサービスがクラウドベースで提供され始めている中で、クラウド間やオンプレミスの企業との ID 連携が必要である。また、認証・認可・属性管理等のサービスを提供するクラウドである IDaaS（IDentity as a Service）も広がり、日本でも提供する企業がでてきている [9)]。

（６）キーワード

アイデンティティー、認証連携、フェデレーション、強固な認証、生体認証、プライバシー、マイナンバー

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・認証分野：生体認証では顔認証等の研究のように、世界に先んじて進んでいる分野がある。また国内外への論文投稿も活発であり研究が進んでいるとみられる。 ・ID連携分野：日本独自の基礎研究は進んでいない。
	応用研究・開発	○	↗	・認証分野：顔認証の実証実験等、認証精度向上・問題点克服のための研究・開発・実証が進んでいる ・ID連携分野：学術認証ネットワーク（学認）によるIDおよびサービス連携のための応用研究・開発が進んでおり、国際学会での発表も多く行っている。学認が開発したuApprove.jpは本人同意による属性提供を実装している。 ・認証とID連携の広範囲の適用として期待されるものに、将来医療等を含み、広範囲の用途が考えられているマイナンバーとそれを支えるシステムがあり、さまざまな実証が行われている[10)]。
	産業化	○	↗	・認証分野：ATMでの指紋認証・静脈認証[11)] 等をはじめとして、先端認証技術の実社会への適用が進んでいる。 ・ID連携分野：米国が中心となって標準化された技術の適用によるネットサービスが提供されている。日本独自の仕様による産業化はほとんど見受けられない。
米国	基礎研究	◎	↗	・認証分野：国防関連を含め生体認証の研究が進んでいる。 ・ID連携分野：ネット企業を中心に民間での研究が進んでいてる。
	応用研究・開発	◎	↗	・認証分野：官民の重要施設や安全保障対策を優先として、応用研究・開発を行っている。 ・ID連携分野：ネット企業を中心に民間での応用研究が進んでいて、積極的に技術標準化のイニシアチブをとる。IETFやW3Cのようなインターネット中心の規格に大きな影響力を行使している。
	産業化	◎	↗	・認証分野：官民の重要施設や安全保障対策を優先して、応用研究・開発を行った技術や製品を積極的に導入している。 ・認証分野：民間のネットサービスにおいても、生体認証だけでなくリスクベース認証等も導入のスピードが非常に速い。 ・ID連携分野：ネット企業が最新の技術を非常なスピードで実サービスに実装・提供している。他国の追随を許さない。
欧州	基礎研究	△	→	・認証分野：欧州の通信会社を中心とした研究が以前は多かったが、最近は特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない。 ・ID連携分野：EUのプライバシー保護の動きと併せ、プライバシーと併せた関連研究が散見される。
	応用研究・開発	○	→	・認証分野：EUのeIDやEU諸国の電子政府を中心としたシステムのための認証技術に関する応用研究・開発が進んでいる[12)]。 ・ID連携分野：EUのTAS3プロジェクトでは2011年までに大規模なID連携実証実験を行った[13)]。
	産業化	○	→	・認証分野：EU諸国の電子政府進展に伴い、ICカード等を中心とした社会生活における活用は広範囲に広がっている。 ・ID連携分野：EU諸国同士のID連携によるサービスが提供されている。主に社会生活を補助するEU諸国を通しての情報提供等が特徴と思われる[14)]。
中国韓国	基礎研究	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない。 ・中国に関しては軍需、サイバー攻撃の両面から調査が必要。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない。 ・中国に関しては軍需、サイバー攻撃の両面から調査が必要。
	産業化	△	→	・特筆すべき顕著な産業化が見受けられない。 ・中国に関しては軍需、サイバー攻撃の両面から調査が必要。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル
（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) OASIS Security Services (SAML) TC
https://www.oasis-open.org/committees/security/
2) OpenID http://openid.net/developers/specs/
3) OAuth http://tools.ietf.org/html/rfc6749
4) XACML https://www.oasis-open.org/committees/xacml/
5) FIDO Alliance https://fidoalliance.org/
6) ID 連携トラストフレームワーク
http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/id_renkei/
7) 社会保障・税番号制度 http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/bangoseido/
8) 学術認証フェデレーション https://www.gakunin.jp/
9) 法人向け IDaaS http://cloudblog.kddi.com/tag/idaas/?v=block
10) 医療健康共通基盤
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/innovation/ict/6kai/siryo2-3.pdf
11) 静脈認証技術
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Active/20131128/521244/?ST=activesmart
12) Trust Services and eID
http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/trust-services-and-eid
13) Trusted Architecture for Securely Shared Services
http://vds1628.sivit.org/tas3/
14) CLARIN http://www.clarin.eu/

3.13.5　サイバー攻撃の検知・防御次世代技術

（1）研究開発領域名

サイバー攻撃の検知・防御次世代技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

サイバー攻撃を迅速に検知し、有効な防御を行うための次世代技術の確立

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

インターネットの進歩・発展の陰で、インターネットを経由したサイバー攻撃も日々高度化を続けており、重大な社会問題となっている。サイバー攻撃に対抗するため、サイバー攻撃の観測技術、分析技術、防御技術の研究開発への投資が世界各国で進められている。

米国の 2015 年大統領予算教書[1)]によると、研究開発全体に関する年間予算は約 1350 億ドルであり、国防総省、エネルギー省、国立科学財団、商務省、国土安全保障省等の予算概要の中でセキュリティーあるいはサイバーセキュリティーに関する言及がある。それに加え「OGSI: Opportunity、 Growth and Security Initiative」と呼ばれる 560 億ドルの追加予算案が盛り込まれているなど、セキュリティー分野への重点投資が進められている。

日本の情報セキュリティ政策会議が 2014 年 7 月に公表した情報セキュリティ研究開発戦略（改定版）[2)]よると、米国の情報セキュリティー研究開発予算は大幅な増加傾向にある一方、日本の政府の情報セキュリティー研究開発予算は当初予算ベースでは全体としては減少基調にあり、情報セキュリティー研究開発予算の GDP 比率は、2007 年度においては約 1.2 倍、2014 年度では約 12 倍と拡大している。

欧州では EU の FP7（第 7 次研究枠組み計画）の後継として、2014 年 1 月より Horizon 2020 [3)]が開始されており、2014～2020 年までの 7 年間の研究開発の方向性を示すとともに約 770 億ユーロの予算が計上されている。Horizon 2020 ではプログラムセクション「Societal Challenges」の中で 7 つの社会的課題を抽出しており、その中に「Secure societies - Protecting freedom and security of Europe and its citizens」としてセキュリティー関連の課題が挙げられている。この課題の研究予算は、全体予算の 2.2%にあたる約 17 億ユーロを占めている [4)]。

サイバー攻撃の検知・防御次世代技術の研究課題としては下記が挙げられる。

標的型攻撃対策技術：

特定組織をターゲットとした長期に亘る執拗な攻撃であり、典型的な標的型攻撃では周到に準備された電子メールに添付されたマルウエアによって組織内に侵入する。標的型攻撃では従来型の境界防御技術（入口対策、出口対策）が有効に働かないケースも多い。したがって、標的型攻撃対策技術として、組織内部の観測・分析・検知技術（内部対策）の確立が重要となっている。さらに、組織内のログマネジメント技術や、インシデント発生後のフォレンジック技術の高度化も必要となっている。

大規模感染型マルウエア対策技術：

大規模感染型マルウエア（ワーム等）はインターネット上で依然猛威を振るっている。また、数年前より、Windows 端末だけではなく、Linux 組み込み機器であるブロードバンドルータや Web カメラなどがマルウエア感染する事例も多くみられる。大規模感染型マルウエア

対策技術として、大規模ネットワーク観測・分析の高度化と、その観測結果を活用した対策技術の開発が重要となっている。また、P2P 型の通信を行うマルウエアも多く存在しており、P2P 型マルウエアの観測・分析技術も重要となっている。さらに、組み込み機器やモバイル機器に感染するマルウエアを想定した新しいハニーポット技術の確立も課題となっている。

ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃対策技術：

Web を介した攻撃であるドライブ・バイ・ダウンロード（DBD）攻撃は、ハニーポット等の受動的観測では捉えられない攻撃である。DBD 攻撃に加担する悪性サイトを Web クローリングで検知する取り組みもあるが、クローリングのシード選択の問題や、数時間で生滅する悪性サイトを捉えられないなど課題が多い。DBD 攻撃対策技術として、ユーザーの Web ブラウザーや組織の Web プロキシ等を観測点として取り込んだ大規模観測・分析技術の確立が必要となっている。

DDoS 攻撃対策技術：

特定のサーバーに通信を集中させ、外部からのアクセスを不能にする DDoS 攻撃は、サービス提供者や通信事業者にとって依然重要な課題となっている。2013 年初頭から DDoS ツールやボットネットを利用した従来型の DDoS 攻撃に加え、DNS や NTP 等による通信の増幅を悪用したリフレクター攻撃が台頭しており、対策を一層困難にしている。DDoS 攻撃対策技術として、リフレクター攻撃観測用ハニーポット技術、大規模ネットワーク観測技術、さらにそれらと被害サーバー側の DDoS 攻撃観測情報を用いた DDoS 攻撃の予測・早期検知・早期対策技術の確立が重要となっている。

マルウエア対策技術：

膨大な亜種マルウエアや解析回避機能を有するマルウエアの出現によって、シグネチャベースのマルウエア検知手法の効果が低下している [5]。マルウエア対策技術として、サンドボックス解析技術の高度化や、カーネルモードで動作するマルウエアの解析技術、マルウエアの長期動的解析技術、マルウエアの解析回避機能への対策技術の確立が求められている。また、組み込み機器やモバイル機器に感染するマルウエアの収集・解析技術の確立も重要となっている。

サイバー攻撃可視化技術：

サイバー攻撃は元来不可視であるが故に検知や防御が難しく、また対策の重要性を組織のトップマネージメントが正しく理解することを阻んでいる。サイバー攻撃可視化技術はセキュリティーオペレーションの迅速化・効率化や、トップマネージメント層を含めたセキュリティーアウェアネスの向上を図る上で重要となっている。

サイバー攻撃情報共有技術：

サイバー攻撃は容易に国境を跨いで行われる。したがって、サイバー攻撃対策には国際的なサイバー攻撃情報の共有が有効であるが、多くの場合、人手による情報共有が主流となっており、また機微な情報の共有は困難となっている。サイバー攻撃情報共有技術として、サイバー攻撃に関連した情報のグローバルなリポジトリの構築（そのための国際標準化）、機微情報のサニタイズ技術、高速な検索技術、異なる攻撃キャンペーン間の相関分析技術等の確立が重要となっている。

（４）科学技術的・政策的課題

サイバーセキュリティーは「データオリエンテッド」な研究分野であり、研究の成否は、いかに大規模な“実データ”を定常的に収集できるかにかかっていると言っても過言ではない。実データを定常的に収集するためには、収集技術の開発のみならず、システムの安定稼働や長期運用体制の構築、関係組織（例えば大学の場合は学内情報センター）との折衝等々、人的コストの非常に高い作業を継続的に行う必要があり、有用なデータの収集が始まるまでに数年単位の時間を費やす事も珍しくない。しかしながら、わが国においては公的な競争的資金は数年程度の年限で設定されており、大規模なデータ収集基盤の構築に多くの時間を割くことが難しく、そのためオリジナルな“実データ”を用いた研究環境を構築できている国内大学は数えるほどしか存在しない。また、公的な競争的資金では研究の新規性やデマケーション（他の研究との差別化）が重視されるため、既に構築したデータ収集基盤の長期運用という重要な項目に予算計上することが難しい。

また、サイバーセキュリティーは実践的な研究分野であり、常に実用化を目指した研究開発が重要である。米国の例をみると、ミシガン大学の研究グループが設立した Arbor Networks 社（DDoS 対策製品でトップシェア）や、カリフォルニア大学サンタバーバラ校等の研究グループが設立した Lastline 社（標的型攻撃対策製品で成長株）など、大学の学術研究が実用化に直結している。さらに、それら企業の製品が集めた実データを学術研究にフィードバックすることで、新たな研究を生み出しており、実データを中心とした研究のライフサイクルが確立している。一方、サイバーセキュリティー分野において国内大学の研究成果が実際の製品やサービスに結びついた例はほぼ皆無であり、産業界と学術界の間で大きなギャップが存在している。

さらに、日本の公的な研究資金ではデマケーションが重要視されるため、類似の研究課題に関して複数の研究グループが研究資金を獲得して同時並行的に研究開発を進めることは、ほぼ起こり得ない（そして、研究資金獲得後は競争が発生しない）。米国では、前述の通り複数の省庁がサイバーセキュリティーに関する研究予算を計上しており、その全体調整は NITRD（The Networking and Information Technology Research and Development）が受け持っているが、省庁間のデマケーションを行うのではなく、ある程度の重複は許容しつつ、年度ごとの評価を厳正に行い、高い研究成果を上げている研究グループが生き残る仕組み（つまり資金獲得後の競争の仕組み）を構築している。そのために、研究資金提供側の組織も各分野の専門家を擁しており、技術的な評価を行える体制を敷いている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・海外のセキュリティー関連予算の動向は前述の通り。
・国内では 2014 年 11 月にサイバーセキュリティ基本法が成立。第十九条および第二十条に当該分野における研究開発の推進について定められている。
・2020 年の東京オリンピック開催に向けて、情報セキュリティーの確保が最重要課題の一つとなっており、国内企業複数社がセキュリティー事業の強化を表明。

（６）キーワード

サイバーセキュリティー、サイバー攻撃、標的型攻撃、ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃、DDoS 攻撃、マルウエア、サイバー攻撃可視化、サイバー攻撃情報共有

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	・国内シンポジウム等でのサイバーセキュリティーやマルウエア解析に関する発表件数は大学、企業とも増加傾向にある。一方、著名な国際会議での発表件数は多くはないものの、RAID 2013ではNTTからの投稿が複数件採録される等、国際的な成果も伸びつつある。 ・総務省戦略的国際連携型研究開発推進事業とFP7との日欧 ICT 協調課題である「サイバー脅威に対する回復性強化のためのサイバーセキュリティ」（NECOMAプロジェクト）では、日欧の研究機関が集結して国際共同研究を行っている。
	応用研究・開発	○	→	・総務省が主導する「国際連携によるサイバー攻撃予知・即応プロジェクト」（PRACTICE）や、「官民連携による国民のマルウエア対策支援プロジェクト」（ACTIVE）、「実践的サイバー防御演習」（CYDER）の中で、実践的な応用研究が進められている。 ・情報通信研究機構は日本最大規模のサイバー攻撃観測・分析・対策システムNICTERを中心とした研究開発を推進しており、特にそのリアルタイム分析・可視化技術は世界をリードしている。
	産業化	△	↗	・国産のセキュリティー製品は非常に少なく、大部分を海外ベンダに依存している。大手企業の多くも、海外製品のSI業に徹しており、自社製品が普及している例は少ない。 ・その中でもFFRI社のアンチウイルス製品（Yarai）等、国産製品の普及が徐々に進んでいる事例が出て来ている。 ・情報通信研究機構が開発した対サイバー攻撃アラートシステムDAEDALUSは、クルウィット社により商用サービス化（SiteVisor）される等、公的機関の研究開発が産業化される事例も出て来ている。
米国	基礎研究	◎	→	・米国の大学・公的研究機関による基礎研究レベルは非常に高く、著名な国際会議でのプレゼンスも高い。 ・NSF、DoD、DHS等からの豊富な研究資金に基づく大小のプロジェクトが継続的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	・大学での研究が実用を目指した応用研究であるものが多く、ミシガン大学発祥のArbor Networksや、カリフォルニア大学サンタバーバラ校発祥のLastline社等、起業につながっている例も多い。
	産業化	◎	→	・Palo Alto Networks（ファイアウォール）、Sourcefire（IDS）、FireEye（サンドボックス）等のセキュリティー企業による製品や、CiscoやJUNIPER NETWORKS等のネットワーク機器ベンダによる製品等、セキュリティー市場における支配的立場にある。 ・航空機製造で有名なBoeing社は収益の4割を防衛事業で得ており、その一翼としてCyber Engagement Centerを立ち上げ、サイバーセキュリティーサービスを展開している。

欧州	基礎研究	○	→	・ウィーン工科大学（オーストリア）やEurecom Institute（フランス）等、マルウエア解析技術やサイバー攻撃観測技術等で高い研究成果を上げている。 ・一方で、優秀な研究者が米国等の研究機関に移籍する事例も多く、研究人材の確保は容易ではないように伺える。
	応用研究・開発	○	↗	・FP7の後継のHorizon 2020で、セキュリティーは7つの社会的課題の1つにあげられており、応用研究はさらに進むものと思われる。 ・ECはACDC（Advanced Cyber Defense Center）を設立。14カ国28組織（ISP、CERT、Law Enforcement、ITプロバイダー、学術ネットワーク、学術機関、重要インフラ事業者）で構成されており、応用研究から実運用まで情報共有が進んでいる。
	産業化	○	→	・Kaspersky（ロシア）、F-Secure（フィンランド）、Sophos（イギリス）、Panda Security（スペイン）等、アンチウイルスやセキュリティー製品で国際的に高いシェアを有している。
中国	基礎研究	△	↗	・中国国内のトップクラスの大学の学生が米国等に留学し、研究成果を上げているが、中国国内の大学における研究成果が著名な国際会議に採録されるまでには至っていない。
	応用研究・開発	△	→	・これまで国際的に注目される大規模研究プロジェクトは公表されているレベルでは見られない。
	産業化	△	↗	・金山毒霸、瑞星殺毒軟件、江民瑞星殺毒軟件等のアンチウイルスソフトの国内シェアが高いが、国際的な普及には至っていない。
韓国	基礎研究	○	↗	・KAISTやPOSTECH等のトップクラスの大学の研究成果がACM CCSやNDSS等の著名な国際会議に採録される等、基礎研究の国際的な評価は上がりつつある。
	応用研究・開発	○	→	・国家的なセキュリティーインシデントを多数経験しており、政府主導のセキュリティー対策を実践している。 ・KISA、ETRI、KISTIといった公的機関が、サイバーセキュリティー技術の研究開発や、モニタリング、インシデント対応を行っており、特に政府機関に導入されているセキュリティー機器は100%国産と言われている。
	産業化	○	↗	・Ahnlabをはじめ大小の情報セキュリティー関連企業が数百社存在し、国産のセキュリティー技術の研究開発および産業化を行っている。

（８）引用資料

1) The White House, “FISCAL YEAR 2015 BUDGET OF THE U.S. GOVERN-MENT,” http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2015/assets/budget.pdf
2) 情報セキュリティ政策会議, “情報セキュリティ研究開発戦略（改定版）,” http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/kenkyu2014.pdf
3) European Commission, “Horizon 2020,” http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/
4) European Commission, “Factsheet: Horizon 2020 budget,” http://ec.europa.eu/research/horizon2020/pdf/press/fact_sheet_on_horizon2020_budget.pdf
5) The Guardian, “Antivirus software is dead, says security expert at Symantec,” http://www.theguardian.com/technology/2014/may/06/antivirus-software-fails-catch-attacks-security-expert-symantec

３.13.６　プライバシー情報の保護と利活用

（１）研究開発領域名

プライバシー情報の保護と利活用

（２）研究開発領域の簡潔な説明

プライバシーを保護したままでデータベースから共通の傾向や固有のパターン等の有益な知識を抽出する。大きく分類すると、(1) 個人を識別不能な様にデータベースを匿名化して公開する技術(Privacy-Preserving Data Publishing)、(2) プライベートなデータを暗号化したままで任意の計算を実行する秘匿計算の技術 (Secure Multiparty Computation)、(3) 分散されたサーバーに格納されたデータベースを暗号化してデータマイニングを実施する技術(Privacy-Preserving Data Mining)、(4) 抽出された知識からプライベート情報が漏洩しない様に精度を落としたりノイズを加えたりする技術（差分プライバシーなど）がある。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

多くの企業が顧客の情報や購買履歴を管理して、ビジネスに活用する動きが加速している。いわゆる、ビッグデータと呼ばれる、大規模で機械的に収集される多量のデータがあらゆる分野で注目を集めている。例えば、わが国において特定機能病院を対象に導入されている、疾患と治療の記録からなる DPC (Diagnosis Procedure Combination)データセットは、700 万人患者のデータを格納し、急性入院の約 50%を電子化している。また、Facebook では一日 30 億回の「いいね」がクリックされ、Twitter のツィートは日に 4 億を超えるという。これらの多量で多様な電子化データに基づいて、疾病や債券市場の動向の予測、都市計画や防災対策などの従来考えられなかった新しい価値が創造されようとしている。

その一方で、ビッグデータの活用から生じるプライバシーの課題も浮き上がってきた。2013 年 7 月には、JR 東日本が交通系 IC カード Suica4300 万枚の乗降履歴を市場調査を目的として利用者の同意なく日立製作所に販売していたことが報道されて、大きな批判を浴びた。氏名や連絡先などの個人を特定する情報は除外されていたが、カードに割り当てられた ID は一月単位で保存されており、乗降駅の履歴を積み上げることで個人を識別されるリスクが残っていた。自分の情報が再識別されることを懸念した多くの利用者が利用停止を求めることとなった。2014 年 7 月には、ベネッセホールディングスが、「進研ゼミ」や「こどもちゃれんじ」などで知られる教材の受講者の氏名や生年月日などの 760 万件の個人情報を外部に流失したことを明らかにした。データベースの管理をしていた委託先の技術者がスマートフォン経由で情報を抜き出して、名簿業者に販売していた。漏洩対策のための倫理教育やマネジメントシステムを整備しても、悪意のある内部者による不正行為を防止することが困難であること、そして、漏えいした顧客情報を流通させるマーケットが存在していることが認識された事件であった。

現行の個人情報保護法は、2003 年に制定されたものであり、制定当時は存在していなかったスマートフォンや Suica の様なデバイスから個人が識別されることを想定していなかった。従来の仕組みでは個人情報ではないが、ビッグデータの普及に伴って、個人が識別されたり利用者が意図しない追跡が行われたりする可能性のある情報、いわゆる、グレーゾー

ンの存在が顕在化してきた。そこで、2015 年の法改正を目標として、政府の IT 総合戦略本部に「パーソナルデータに関する検討会」が組織され、ビッグデータを活用するためのルール作りが進められた。2014 年の 6 月に発表された大綱では、個人情報の監視や検査権限を有する第三者機関を設けることを条件として、利用者の同意を得なくても別の目的に利用できるようにする道筋が示された。問題となっていたグレーゾーンとされていた身体の特徴に関する情報や携帯電話や免許証などのデバイスの番号なども取り扱いの対象として広げる一方で、個人を再識別するリスクを低減するためのプライバシー保護技術の活用も想定している。

海外でもビッグデータの活用のための法整備は進んでいる。ビッグデータという概念を産んだ米国では、2012 年に企業が行う個人情報の収集に対して、利用者が主張できる権限をまとめた「消費者プライバシー権利章典」を公表している。企業が収集している情報の種類やその活用方法の情報は、消費者に正しく提供されるべきである。企業に追跡されることを拒否できる Do-Not-Track 原則などの権利も認められるべきことがうたわれている。欧州委員会は、データが国境を越えて流通する時は、データの保護が十分であるかどうかを認定することを定めた EU データ保護規制を 2012 年に提案し、2015 年の成立を目指している。

このように、プライバシーを保護することと、ビッグデータを活用するという二つの大きな要請があり、国内外の法整備は着々と進んでいる。しかし、技術的には両者を完全に満足することはそれほど容易ではない。ビッグデータとひとくくりにするにはデータは多様であり、その粒度、頻度、アクセスの方法は様々である。個人を識別しようとする攻撃者にも様々なタイプがあり、匿名化されたデータと照合できるどんな情報を持っているかを事前に決めることはできない。例えば、クレジットカード運用会社にとって、カード番号から個人を特定することは容易であるように、照合性の容易性には一様な基準はない。更に、単に乗車駅と利用日時を知られても気にしない利用者もいれば、ストーカーに追われている利用者にとっては深刻な情報であったりするように、プライバシーの感じ方には主観的な曖昧さが避けられない。

［これまでの取り組み］

ここでは、プライバシー保護技術を(1) 匿名化技術、(2) 秘匿計算技術、(3) プライバシー保護データマイニング技術、(4) 出力プライバシー技術に分類して、それぞれの取り組みを示す。

(1)　匿名化技術

匿名化の処理は、ISO/TS 25237 (Health informatics - Pseudonymisation)の中で、データとデータ主体（所有者）との間の相関を取り除くプロセス、と定義されている。最も簡単なものは、氏名などの情報を仮の疑似 ID と置き換える仮名化である。しかし、2001 年に Samarati が、氏名を削除しても、性別や年齢、郵便番号などの本人に関する静的な属性情報を束ねることで、本人を識別する疑似 ID (QI:Quasi Identifier)として利用できることを指摘し、集合として評価した個人識別の度合いを与える k-匿名性 (k-anonymity)[5]の概念を初めて提唱し、その後の様々なアルゴリズムの研究が行われた。Sweeney による定式化[1]が行われ、QI の数で定義した k-匿名性を発展させ、最頻度のアイテムが 1/*l*の確率でしか識別できないことを保証した *l*-多様性（*l*-diversity)[2]、それに加えてセンシティブ属性が閾値 t より

離れていることを保証した t-近似性（t-closeness)などの研究が行われた。

匿名化の評価指標にはいくつもの定義があるが、それらを保証する匿名化の方法は一意ではない。属性を削除したり、値を一般化したりする組み合わせがあり、Yao らによりその匿名化問題は NP-完全問題に属する困難な問題であることが証明されている [5]。従って、大規模な問題に対して誤差を最小化する匿名化を求めることは現実的ではなく、事前に閾値を用意して枝刈りを施したり、トップダウンにデータセットを分割したり、ボトムアップに分割されたデータセットを統合することで匿名性の保証を得るアルゴリズムがいくつか開発された。Incognito [3]や Anatomy [7]などが知られている。製品の開発も盛んであり、オープンソースにも、例えば University of Texas, Dallas 校の UTD Anonymization Toolbox [8]などが知られている。ここでは、前述の Incognito に加えて、Datafly, Mondrian Multidimensional k-Anonymity, l-diversity, t-closeness, Anatomy の 6 つの代表的なアルゴリズムが実装されている。

理論的な匿名化の指標やアルゴリズムの定義、それらの効率的な実装が行われ、今後はそれらを様々なビッグデータに適用する際に生じる様々な応用研究が進むとみられる。例えば、GPS などの位置情報の時系列データである、いわゆる trajectory data（移動経路データ）から個人が特定されないようにする要求は大きく、ITS の普及と相まってこれから盛んになることが予想される。Peloponnese 大学(英)のグループは、多次元になる GPS の時系列データを匿名化する閾値ベースの研究 [9]を行い、疑似位置データを用いた実験を重ねている。Facebook などの Social Network におけるプライバシー保護も重要な課題である。多くのサービスではアカウント作成が無料で行われるために、偽の利用者を容易に許してしまい、それらを用いた個人情報の抜き取りが深刻な脅威になっている。これらに対して、自然言語処理を用いて投稿に対して匿名化のレベルを制御したりする研究が今後盛んになるとみられる。Illinois 大学 Chicago 校(米)の Yu らのグループはグラフ理論を用いて、仲介者の数を制御することで、そういった脅威を抑制する研究 [10]を試みている。

(2) 秘匿計算技術

秘匿計算、あるいは秘匿回路計算（SFE: Secure Function Evaluation)とは、入力値を秘匿したままで任意の関数（回路）を評価する技術である。入力の一部を持つ複数の入力者と回路評価者との間で関数評価が行われるので、マルチパーティープロトコル（Multi Party Protocol)とも呼ばれる。(1)の匿名化には、匿名性の強さに応じた再識別のリスクが残っていたのに対して、この技術では暗号化や秘密分散を用いて平文の情報を 1 ビットも漏洩させないことを試みる。プライバシー情報を秘匿したままで、いかなる解析アルゴリズムも実行することができる理想の技術である。

後に Turning 賞受賞者となる Andrew Yao がこの理論を最初に提案したのは、まだ公開鍵暗号が提案されて間もない 1986 年のことであった [11]。しかし、任意の回路を秘匿計算できるというその自由度の代償として、ビットレベルで信号を暗号化しなくてはならず、膨大な計算コストのために実用性はなく、長い間理論研究者の興味の対象であった。この間、暗号化の代わりに秘密分散を用いるプロトコルなどの多くの理論整備が行われた。

計算機技術の発達とプライバシー保護の強い要請に押されて、ようやく実装されたのは当初の提案より 18 年後の 2004 年、イスラエルの Malkhi らによる研究グループが Usenix

Security で発表した Fairplay である。Fairplay は高級言語レベルで記述されたプログラムソースをゲートレベルの回路記述言語にコンパイルし、それらを 2 台の仮想マシンの間で暗号化と復号化を繰り返して回路での実行をする。基本的な算術計算と限定された条件分岐機能しかなく、例えば乗算でさえ加算の繰り返しを用いて自分で実装しなくてはならなかった。それでも、試験実装したシステムを公開しており、その後の本分野の研究を活性化する原動力となった。

Fairplay 以降も多くのシステム開発が続いている。Fairplay の 2 者を複数プレーヤー間で実行するような拡張 Fairplay-MP や、SEPIA、TASTY、VIFF などの多くの SFE 実装系が発表されている。置換ネットワークと呼ばれる専用回路のアイデアを用いて高速に秘匿積集合を計算するシステムの開発 [13]や、Virginia 大学のグループによる新しいコンパイラー(Billion-gate)は従来のメモリーの制約を取り除き、SFE の技術をより実用レベルに近づけた。中でも、Tartu 大学(エストニア)の Dan Bogdanov が開発した Sharemind [15]は、秘密分散を要素技術にした汎用の SFE コンパイラであり、ソフトウエア開発キット（SDK:Software Development Kit）を提供したりライセンシングを進めたりしており注目されている。ソートや統計処理などの Sharemind ベースの研究にもつながっている。Sharemind プロジェクトのウェブ [16]からデモンストレーションを行っている。

国内の秘匿計算の試みとして、NTT セキュアプラットフォーム研究所の MEVAL[17]がある。MEVAL は、暗号ではなく、秘密分散型の秘匿計算の処理系であり、100 万件の加算、乗算、大小比較、ソートをそれぞれ、1.5 ミリ秒、135.1 ミリ秒、286.8 ミリ秒、6875 ミリ秒で実行できることが報告されている。2013 年のデータで、乗算は Sharemind の 10 倍高速である。

(3) プライバシー保護データマイニング

プライバシー保護データマイニング (Privacy-Preserving Data Mining, PPDM)は、水平または垂直に分割されたデータセットを保有する複数の組織が、それぞれのデータを漏らすことなく協力し、各種のデータマイニングを実行する技術である。加法準同型を満たす公開鍵暗号などを用いて、それぞれのデータを暗号化して送りあい、暗号化したまま内積計算などを繰り返すことで、決定木学習や相関ルールなどのデータマイニングされた結果だけを共有する。利用者のプライバシーを保護してビッグデータの活用を実現する最も有力な技術であるといえよう。

PPDM 研究の原典は、2000 年に発表された二つの全く同名の論文である。一つは、イスラエルの Lindel と Pinkas によって暗号理論のトップカンファレンスである CRYPTO で発表された "Privacy Preserving Data Mining" [18]であり、もう一つも機械学習のやはりトップ会議の一つである ACM SIGMOD で発表された "Privacy-preserving data mining"[19]である。前者は公開鍵暗号を用いて秘匿しながら対数計算を実行し、後者はランダムなデータを入力に加えてマイニング処理を行い、ベイズの定理に基づいてノイズを除去する再構築アルゴリズムを提案している。興味深いことに、両者とも同一の情報エントロピーに基づく決定木学習アルゴリズム ID3 を秘匿しながら実行するものであった。

この二つの論文を出発点として、多くの研究が行われ、一つの分野の様に発達している。データマイニングアルゴリズムには様々な種類があるので、そのそれぞれをプライバシー保

護する試みが 2000 年代初頭には行われた。ナイーブベイズ学習、決定木学習、クラスタリング、相関ルール抽出[25]、情報推薦、協調フィルタリングなどである。これらのアルゴリズムの解説については、Aggarwal と Yu によるサーベイ "Privacy-Preserving Data Mining: Models and Algorithms" [20]が良書である。

PPDM の主な要素技術には、加法準同型性を満たした公開鍵暗号アルゴリズムとそれを用いた秘匿内積プロトコル[27]や(2)で述べた秘匿計算 SFE がある。条件を満たす準同型性暗号として、Paillier 暗号[26]や楕円曲線暗号がよく知られている。デファクト標準の RSA 公開鍵暗号は、乗法の準同型性を満たしているが、平文が同じならば暗号文も同じになる性質を持っているために利用できない。一般に、秘匿計算部分はビット長に応じて大きなコストがかかるので、秘匿内積で計算できるところは極力そちらで行い、比較や等号処理等の準同型性暗号を用いると困難なところだけを SFE で行うことが多い。このスタイルの代表例に、Vaidya と Clifton の相関ルール抽出[25]がある。一方、秘匿内積を使わないで、分散管理された複数の集合の積集合を秘匿して求める問題もよく用いられる。積集合の大きさを求めれば、クロス集計や頻出アイテムの評価を与えるからである。この秘匿積集合には、入力する値と多項式の係数をそれぞれ異なるパーティーが保有し、秘匿したままで関数の出力値のみを求める秘匿多項式評価プロトコルが要素技術として構成される。Freedman らによるプライベートマッチングプロトコル[28]が代表例であり、Camenisch らによって更なる効率化[29]が行われている。

これらの要素技術の研究開発や安全性評価は 2000 年代にほぼ完成していて、実現可能性は確認されている。しかし、ビット長に比例してかかる暗号化のコストが大きく、実用化のレベルには至っていない。改良されたアルゴリズムや小規模のデータセットに、適用範囲は限定されている。この技術的な困難さを改良するために、加法準同型性だけでなく乗法の準同型性も保証する環準同型性暗号などの暗号要素技術の改良が重ねられている。

暗号要素技術のブレークスルーを待つ間は、たとえ大きな処理コストと時間をかけても見合うだけの、極めてプライバシーの要求が強い分野から PPDM の適用が進むものと予想される。あるいは、k-匿名性などで失われる精度が許容できないほど高い精度を必要とする分野にも適用の可能性がある。これらの例には、ゲノムデータの解析や臨床疫学などの医療分野があげられる。文献[21]では、健康診断の結果により得られたピロリ菌に感染した患者リストと、地域がん登録で得られた胃がん患者のリストを秘匿したままマッチングすることで、ピロリ菌のがん罹患に関する相対危険度を求める実験が行われた。

クラウドに委託したデータの漏えいを防止してそのサービスを活用するために、様々な検索可能暗号方式が提案されている。Boneh らは、データ所有者が公開鍵を用いてデータを暗号化してクラウドに保管し、秘密鍵を持つ利用者が検索用のタグを生成して、クラウドに検索を実行させる公開鍵検索可能暗号(Public Key Encryption with keyword Search: PEKS)を提案した[22]。これを元にして、キーの連言検索や範囲検索を可能とする方法[23]などいくつもの改良が試みられている。松田らは、階層型 ID ベース暗号を用いてマルチユーザーへの対応を可能とする方式を提案し、ブラウザーと Web サーバー間で SQL 文による検索を可能とするシステムを実装している[24]。

(4) 出力プライバシー

データマイニングされた知識から漏洩するプライバシー情報を秘匿するために、マイニング出力の結果に対して必要十分なだけのノイズを追加することが研究されている。Dwark によって提唱された差分プライバシー (Differential Privacy)は、加えるべきノイズの確率分布とその大きさを決める技術である。提供されるプライバシーの度合いを理論的に保障している点で多くの注目を集めている。

［今後必要となる取り組み］

現在のプライバシー保護技術を実サービスに適用するにあたって、今後次のような取り組みが求められると考える。

・利用者の同意を取る仕組み
データの所有者とデータを紐づけて、利用目的の変更や第三者提供に対して同意や利用停止などの制御を可能とする仕組み。

・匿名化されたデータを交換するためのフォーマットの標準化
XML や JSON などの標準的なフォーマットの上で、データの種類と形式、匿名化措置の方法や程度、利用条件などのポリシーなどを記述する標準フォーマット。

・要求する匿名化レベルや提供するためのポリシー記述言語の標準化
プライバシー情報の所有者が自分の情報を誰にどこまで提供するかを定めたり、第三者に情報提供のための条件、提供先において受け取るための条件など、様々な論理的な条件を十分に表現するための記述言語。ポリシーを宣言することで、機械的な条件の判断や交渉を可能にする。

・PPDM でデータを交換するための通信プロトコルの標準化
プロトコルに従って暗号文を交換するためのデータ形式や制御メッセージの交換のための汎用的なプロトコル。暗号鍵や公開鍵証明書などの既存のフォーマットや TLS など通信プロトコルを応用して、PPDM で必要なマルチパーティーで行われる非同期通信を可能とする枠組みが必要である。

・匿名化されたデータやその提供者に対して、評判や信頼の度合いを提供するためのトラストフレームワーク
匿名化によって低減された個人識別のリスクやその情報発信者の評判などを交換するためのプロトコルや表現形式の標準化。

・漏洩したデータを早期に検出する技術
P2P などで公開されているデータに違法なものや漏洩している情報がないかを機械的に判断して、検出する技術の開発。

・SNS などへ情報を発信する際に、ポリシーに応じてプライバシー情報の検査をする機構
不用意な個人情報の公開を防止するために、自身で設定したポリシーに整合しない情報を発信する前に警告を与えるサービスや技術の開発。

・漏洩した情報を失効させる仕組み
やむなく漏洩してしまったプライバシー情報や個人情報に対して、認証された管理者の元で迅速に失効させる技術とその制御プロトコル等の開発。

（４）科学技術的・政策的課題

2015 年度には我が国の個人情報保護法の改定を計画している。しかしながら、そこで検討されているのは、プライバシー保護レベルとしては最も低い仮名化や匿名化などを想定しており、単純な匿名加工データとするだけで本人同意不要の第三者提供が行われる可能性がある。匿名化は現実的なプライバシー保護技術の一つではあるが、措置の手順や加工の履歴を知る悪意のある攻撃者による内部犯行に対しては十分ではない。一方、安全性の高い PPDM などの暗号化によるプライバシー保護はその存在が知られてはいるが、計算コストや技術が成熟していないことを理由にまだ普及の兆しが見えない。匿名化だけで十分であるという制度が定着すると、暗号化を用いる動機付けが低下してしまい、この技術の普及が一段と遅れてしまうことが懸念される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［注目すべきプロジェクト］

・Geographic Privacy-aware Knowledge Discovery and Delivery (GeoPKDD) [31)]
車や人等の動きのデータ(trajectory data)をプライバシーに配慮して現実的な知識抽出サービスを実現しようとするプロジェクト。イタリア Pisa 大学、スイス EPFL、 ベルギー Hasselt 大学などの共同プロジェクト。

・MIT、CryptDB [32)]
SQL データベースにおけるクエリーとデータそのものを暗号化することで、不正なサーバー管理者に対して格納されているデータのプライバシーを保障するシステムの開発プロジェクト。通常の非暗号化された SQL データベースと遜色内ほどのパフォーマンスを実現している。

・University of Texas Dallas 校、UTD Anonymization Toolbox [33)]
匿名化アルゴリズムのツールボックスの開発プロジェクト。k-匿名性などの多くのアルゴリズムをサポートして、Windows 版、Linux 版のツールボックスを公開している。

・独立行政法人産業技術総合研究所セキュアシステム研究部門「プライバシー保護データベース検索技術」プロジェクト [34)]
化合物データ、ゲノムデータ、地質データなどのデータベース提供者に対して、検索クエリーを知らせないで検索を実現するプロジェクト。生命情報工学研究センターと共同して、製薬開発分野における応用を検討している。

・JST CREST プロジェクト、自己情報コントロール機構を持つプライバシー保護データ収集・解析基盤の構築と個別化医療・ゲノム疫学への展開 [34)]
暗号技術を適用して、ゲノム塩基配列中の塩基の変異(SNP)とその影響を秘匿したままで評価する技術の研究プロジェクト。ゲノムの影響を考慮した個人に特化した治療等への応用を目標としている。筑波大学、東京大学、名古屋工業大学、三重大学、産業総合研究所による共同プロジェクト。

（６）キーワード

匿名化、仮名化、集合匿名化、k-匿名性、l-多様性、 マルチパーティー計算、Gabbled Circuit、 Secure Function Evaluation、加法準同型性暗号、水平分割、垂直分割、プライバシー保護データマイニング、プライベートマッチング、差分プライバシー、ラプラスノイズ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・暗号要素技術の論文発表や理論的な提案等は活発に行われている。
	応用研究・開発	○	→	・ゲノムのプライバシー保護プロジェクト等、応用を意識したプロジェクトが増えてきている。NTTや三菱等は実装を発表している。
	産業化	×	↘	・企業におけるプライバシー技術開発はそれほど盛んではない。
米国	基礎研究	○	→	・多くの学術論文が発表されている。差分プライバシーやビッグデータに対する試みも多い。
	応用研究・開発	○	→	・MITのCryptDBやSFEの実装等、高い技術力で提案された概念の実装が先行している。
	産業化	△	→	・調査不十分。プライバシー保護を目的としたベンチャーはまだ盛んではない。
欧州	基礎研究	○	→	・論文レベルではコンスタントに発表が続いている。差分プライバシーや暗号理論の研究も強い。
	応用研究・開発	○	→	・EUのプロジェクトなどで、ユビキタスネットワーク等の多くの分野を統合する動きが見られる。EUデータ保護指令などの法整備も先行している。
	産業化	○	↗	・Sharemindなどの商用ベースのプロジェクトの登場。高い技術力、強い法整備、大きな市場などがかみ合ってきている。

（註 1）フェーズ
基礎研究フェーズ ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド
↗ ：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（８）引用資料

1) LATANYA SWEENEY, Int. J. Unc. Fuzz. Knowl. Based Syst., 10, 557 (2002)
2) Ashwin Machanavajjhala, Daniel Kifer, Johannes Gehrke, and Muthuramakrishnan Venkitasubramaniam. 2007. L-diversity: Privacy beyond k-anonymity. ACM Trans. Knowl. Discov. Data 1, 1, Article 3 (March 2007).
3) Kristen LeFevre, David J. DeWitt, and Raghu Ramakrishnan. 2005. Incognito: efficient full-domain K-anonymity. In Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on

Management of data (SIGMOD '05). ACM, New York, NY, USA, 49-60.

4) Samarati, P., "Protecting respondents identities in microdata release," Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on , vol.13, no.6, pp.1010,1027, Nov/Dec 2001
5) Chao Yao, X. Sean Wang, and Sushil Jajodia. 2005. Checking for k-anonymity violation by views. In Proceedings of the 31st international conference on Very large data bases (VLDB '05). VLDB Endowment 910-921.
6) Vanessa Ayala-Rivera, Patrick McDonagh, Thomas Cerqueus, Liam Murphy, A Systematic Comparison and Evaluation of k-Anonymization Algorithms for Practitioners, Transactions on Data Privacy 7:3 (2014) 337 – 370.
7) Xiaokui Xiao and Yufei Tao. 2006. Anatomy: simple and effective privacy preservation. In Proceedings of the 32nd international conference on Very large data bases (VLDB '06), Umeshwar Dayal, Khu-Yong Whang, David Lomet, Gustavo Alonso, Guy Lohman, Martin Kersten, Sang K. Cha, and Young-Kuk Kim (Eds.). VLDB Endowment 139-150.
8) UTD Anonymization Toolbox (http://cs.utdallas.edu/dspl/toolbox/)
9) Giorgos Poulis, Spiros Skiadopoulos, Grigorios Loukides, Aris Gkoulalas-Divanis, Apriori-based algorithms for km-anonymizing trajectory data, Transactions on Data Privacy 7:2 (2014) 165 – 194.
10) Chongjing Sun, Philip S Yu, Xiangnan Kong, Yan Fu, Privacy Preserving Social Network Publication Against Mutual Friend Attacks, Transactions on Data Privacy 7:2 (2014) 71 – 97.
11) Andrew C. Yao. How to generate and exchange secrets. In Proc. of the 27th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Toronto, Canada, pages 162-167. IEEE Computer Society, 1986.
12) Dahlia Malkhi, Noam Nisan, Benny Pinkas, and Yaron Sella. Fairplay - a secure two-party computation system. In In USENIX Security Symposium, pages 287-302, 2004.
13) Y. Huang, D. Evans, J. Katz, and L. Malka. Faster secure two-party computation using garbled circuits. In Proceedings of the USENIX Security Symposium, 2011.
14) B. Kreuter, a. shelat, and C. Shen. Billion-gate secure computation with malicious adversaries. In 22nd USENIX Security Symposium USENIX Association, Proceedings of the USENIX Security Symposium, 2012.
15) D Bogdanov, S Laur, J Willemson, Sharemind: A framework for fast privacy-preserving computations, Computer Security-ESORICS 2008, 192-206.
16) Sharemind プロジェクト (https://sharemind.cyber.ee/)
17) 濱田 浩気, 他, 実用的な速度で統計分析が可能な秘密計算システム MEVAL, 3C2-1, 情報処理学会, コンピュータセキュリティシンポジウム CSS 2013.
18) Lindell, Y., Pinkas, B., Privacy Preserving Data Mining Advances in Cryptology -, CRYPTO 2000 Lecture Notes in Computer Science 1880, Springer, pp. 36-54, 2000.
19) Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant. 2000. Privacy-preserving data mining. In Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data (SIGMOD '00). ACM, New York, NY, USA, 439-450.
20) C.C. Aggarwal and P.S. Yu. A General Survey of Privacy-Preserving Data Mining, Models and

Algorithms. Privacy-preserving data mining, pages 11–52, 2008.

21) Hiroaki Kikuchi, Jun Sakuma, Bloom Filter Bootstrap: Privacy-Preserving Estimation of the Size of an Intersection. JIP 22(2): 388-400 (2014).

22) Boneh, D., Crescenzo, G.D., Ostrovsky, R. and Persiano, G., “Public key encryption with keyword search”, EUROCRYPT 2004, LNCS, vol.3027, pp. 506-522 (2004).

23) Boneh, D. and Waters, B., “Conjunctive, subset, and range queries on encrypted data”, TCC 2007, LNCS, vol.4392, pp. 535-554 (2007).

24) 松田規, 伊藤隆, 柴田秀哉, 服部充洋, 平野貴人, “検索可能暗号の高速化と Web アプリケーションへの適用方式に関する提案”, マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2013) シンポジウム, pp. 2067 - 2074, 2013.

25) Vaidya, J. and C. Clifton, “Privacy preserving association rule mining in vertically partitioned data”, The Eighth ACM SIGKDD Intl. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, SIGKDD, ACM Press, Edmonton, Canada, pp. 639-644, 2002.

26) Paillier, P.: Public-key cryptosystems based on composite degree residuosity classes, IN ADVANCES IN CRYPTOLOGY – EUROCRYPT 1999, Springer-Verlag, pp. 223–238 (1999).

27) Goethals, B., Laur, S., Lipmaa, H. and Mielikainen, T.: On private scalar product computation for privacy-preserving data mining, Proceedings of the 7th Annual International Conference in Information Security and Cryptology, Springer-Verlag, pp. 104–120 (2004).

28) Freedman, M. J., Nissim, K. and Pinkas, B.: Efficient private matching and set intersection, Advances in Cryptology–EUROCRYPT, Springer-Verlag, pp. 1–19 (2004).

29) Camenisch, J. and Zaverucha, G.: Private intersection of certified sets, Financial Cryptography and Data Security, pp. 108–127 (2009).

30) Cynthia Dwork. Differential privacy. In ICALP, pages 1–12. Springer, 2006.

31) https://www.risec.aist.go.jp/project/dbscoop-ja.html

32) http://css.csail.mit.edu/cryptdb/

33) http://cs.utdallas.edu/dspl/cgi-bin/toolbox/

34) https://www.risec.aist.go.jp/project/dbscoop-ja.html

35) http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/45/45_02.html

3.13.7　デジタル・フォレンジック技術

（1）研究開発領域名

デジタル・フォレンジック

（2）研究開発領域の簡潔な説明

デジタル・フォレンジック（Digital Forensics）とは、情報セキュリティー上の事故や不正行為・犯罪行為（これらをインシデントと呼ぶ）への対応、および情報システム上での人の行為に関する法的紛争・訴訟時に行われる電磁的記録の証拠保全および調査・分析、電磁的記録の改ざん・毀損等についての分析、情報収集を行う技術の総称である。狭義にはインシデントの発生後や訴訟時の対応に使われる技術を指すが、より広義には平時の情報システム運用時の各種記録（ログ）の確実な保管等の予防的技術や、不正行為等の発見のための電磁的記録分析技術等も含めることが多い。さらに近年では、画像や文書、電子メールの分析の自動化など、より広い意味でのセキュリティー対応のための電磁的記録の処理技術も含む概念と捉えられている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

フォレンジック（Forensics）とは本来、法科学などと訳される語であり、科学的な知見を犯罪捜査や法廷の場における法的紛争の解決に役立てることを目的に発達した研究領域を指す。我が国では法医学や法化学、鑑識学などが良く知られている。近年では人々の生活や産業活動、経済活動が情報通信技術に依拠するようになったため、犯罪捜査や法的紛争の解決においても電磁的記録の収集、証拠保全と調査分析が不可欠となっており、デジタル・フォレンジックはそのような社会的要請に呼応する形で発達してきた。最近ではカタカナ表記のフォレンジックがデジタル・フォレンジックを指す例も多い。

デジタル・フォレンジックは当初、情報通信技術の発達が早く、かつ訴訟や法的紛争の多い米国で発達してきた。米国では、民事訴訟において相手方に証言や証拠の提出を求めることができる「ディスカバリー」と呼ばれる制度があり、請求された側は連邦民事訴訟規則に沿って余さず証拠を開示したことを示すことが求められる。この証拠に電磁的記録が該当することが増加するとともに、訴訟対応のためのデジタル・フォレンジック技術や製品、そして関連事業が拡大した。また、特に企業間の訴訟においてはディスカバリーの過程で文書ファイルをはじめとする膨大な電磁的記録を効率的に分析することが求められるため、関連する技術開発が進んでいる。さらに、サイバー犯罪の高度化に伴い、不正アクセスやマルウエアの供用による犯罪が急速に増加しており、これらの犯罪行為の早期検出と対応、追跡・分析そして捜査の技術の研究開発が盛んである。

我が国では、2000 年に警察庁に専門の組織が置かれるなどサイバー犯罪への対応力が強化されてきたことに伴い、デジタル・フォレンジックへの需要が高まり、民間部門における研究開発も進んできた。2004 年頃から頻発した企業からの個人情報持ち出し事件、およびマルウエアによる P2P ファイル共有システムへの情報流出事件は、内部不正行為、セキュリティーポリシー等への違反行為の調査に必要な技術の研究開発を盛んにした。近年では、マルウエアを用いた官公庁や企業に向けた高度標的型サイバー攻撃が急速に増加しているため、これらの組織における通信ログやファイアウォール・IDS (Intrusion Detection System

不正アクセス監視システム / 侵入検知システム)のログの相関分析から迅速に不正アクセス行為や内部に侵入したマルウエアの活動を検出する技術の研究開発が進み、事業展開も進んでいる。さらに、発見されたマルウエアの解析、検出された犯罪行為・不正行為の詳細の分析、事故原因を調査分析するための技術の需要が大きく、研究開発が盛んである。

（４）科学技術的・政策的課題

デジタル・フォレンジックが対象とする電磁的記録は、文書や写真、音声記録のように従来物理媒体として生成、流通されていたものがデジタルデータとして流通するようになったものと、情報通信機器のオペレーティングシステムやアプリケーション等が生成する動作記録（ログ）や通信記録などの情報通信機器固有のもの、そしてプログラムに大別できる。これらの情報は消去や改ざん、偽造、暗号化などによる隠蔽が容易であること、情報量が膨大になり分析が困難であること、インターネットの匿名性により行為者の追跡が困難になる場合が多いこと、プログラムに関しては特にバイナリ形式において静的な動作解析が困難であることが共通かつ本質的な技術課題である。

デジタル・フォレンジックでは企業文化、市民感情および社会制度や法制度が実装の障害になる例も多い。例えば情報システムにおいてはインシデントに備えて通信内容や利用記録、操作履歴を記録し保存しておくことが望ましいが、記録は通信の秘密やプライバシーを含むことから厳重な管理を要すると考えられるため、一般化していない。通信記録等の保存を制度的に義務付ける場合には、保存期間や安全管理に関して電気通信事業法や個人情報保護法との関係整理が必要である。また、デジタル・フォレンジックにはインシデントの経緯を詳細に分析し公表することにより原因を明らかにし、再発防止策を社会に共有させる効果があるが、現時点では情報システムのインシデントの際に原因を調査した結果を進んで公表する企業や組織は一部にとどまっている。このインシデント事例の公表が進まず事例の収集が十分行えないことは、デジタル・フォレンジックの研究開発の上での障害ともなっている。

サイバー犯罪は国境を跨いで行われる場合が多いことや、企業活動の国際化によって法的紛争も海外の裁判所で行われることも増加化しているため、捜査や裁判において証拠となる電磁的記録の取得プロセスや分析技術などについて国際的な共通認識の確立も重要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

以下、個別の技術要素に関する動向や課題、近年のトピックについて述べる。

① 電磁的記録の消去や改ざん、偽造の検出や分析技術

削除ファイルの復元はかつてデジタル・フォレンジックの中心的技術だったが、情報漏洩対策を目的とした完全消去技術の普及や、ハードディスクを代替しつつある SSD における Trim 技術（消去してもよい領域をあらかじめ通知することによって書き込み速度の低下を抑える技術)の普及、記憶媒体に直接アクセスできないクラウドサービスの普及で困難になりつつあり、対応技術の研究開発が望まれる。写真や動画、音声データの自然な改ざんは市販のツールで容易に行えるようになったため不正行為にも使われる例が増えており、信号処理などの技術を駆使して改ざんの痕跡を検出する技術の研究開発も進んでいる。

② インターネットの追跡困難性、通信の暗号化および匿名性に対する対策技術
IPv4 における CGN (キャリアグレード NAT)の普及、IPv6 における匿名 IP アドレス導入、Tor や Freenet などの匿名強化技術の普及により、今後 IP アドレスによる通信元追跡は不可能になるため、その対応技術の研究開発が求められている。また、米国 NSA による国際的な通信傍受活動が明らかになって以来急速に各種通信が暗号化される傾向が強まり、ウイルス対策やフィルタリング、IDS をはじめとする通信監視の障害になる例が増えているため、対応するための技術が求められている。しかしこれらの技術は本質的に対応が困難であり、暗号化・匿名化された通信を検出して状況に応じて禁止するなどシステム的な対策技術の提案が多い。さらに、我が国では通信の秘密を遵守する立場から法制度との関係の整理が必要である。

③ マルウエア対策の高度化とマルウエア分析の自動化
企業や組織に対するサイバー攻撃では、ウイルス対策ソフトウエアでは検知できないマルウエアが中心的役割を果たしている。このため、マルウエアの挙動、特に通信に着目した検出手法や、難読化されたマルウエアの分析技術の高度化が求められる。前者に関しては、企業情報システム内の機器からの情報セキュリティーに関する警告や通信ログなどを一元管理し分析することによってインシデント検出を行うセキュリティー情報イベント管理（SIEM）が普及しているが、そのインシデント検出の自動化、高精度化に関する研究開発が進んでいる。マルウエア分析については VM を活用した動的解析の効率化・自動化技術の開発と標的型攻撃対応ファイアウォールとしての製品化も進んでいるが、攻撃側の進化により検出できない例も少なくないため引き続き開発が必要である。

④ ライブフォレンジックとファストフォレンジック
フォレンジック関連事業者からは、不正行為に使われたアプリケーションやマルウエアがまだ動作中に主記憶を含め電磁的証拠を収集して分析するライブフォレンジックや、さまざまな時間的制約を受ける環境内でできるだけ迅速にインシデント対応を行うファストフォレンジックの必要性が高まっており、関連技術の開発が求められている。前者に関しては、機器で動作中のアプリケーションが未知である場合にいかに迅速に主記憶上のデータの意味を解析するかが研究課題であり、暗号鍵の自動検索などについての研究がある。後者は、従来記憶媒体を完全に複製してからその内容の解析を行うことが一般的であったのに対し、記憶媒体の大容量化に伴いそれが困難となってきたことから、必要最小限の複製と解析で済ませるための研究が求められている。

⑤ 大規模データへの対応のための機械学習などの応用
一般に情報システム内における電磁的記録の量は膨大になっており、全てを人力によって分析することは現実的ではない。そこで詳細な分析が必要でない部分をあらかじめ選り分けるため、機械学習など人工知能分野の研究成果を応用する研究が盛んである。特に、大量の文書ファイルに対し、インシデントとの関係の有無を機械学習技術を利用して選り分ける予測コード付技術（Predictive Coding）は実用化され、米国においては民事裁判でディスカバリーにおける証拠の分析を大幅に効率化した。東アジア圏の言語に対しても同技術が応用され、日本企業による事業化がなされている。この他、前述の SIEM におけるインシデント分析自動化も機械学習の応用例が多い。ま

た、監視カメラの映像や大量の写真画像などからインシデントに関わるものを検出する際には、顔認識や物体認識などのロボットビジョン関連技術の応用研究が行われており、一部は製品化されている。さらに、近年ビッグデータ関連研究によって盛んになった大規模データに対する傾向分析技術も応用されている。

⑥ 新たなデバイスやクラウドへの対応

タブレットやスマートフォンの利用が広がってきたこと、制御機器、パソコン周辺機器のコントローラなどがマルウエアに感染する例などが発見されたことから、これらにおける電磁的記録もインシデント対応において収集、分析が必要となり、関連技術の研究開発が盛んに行われるようになった。さらに、クラウドサービスの普及への対応の研究も盛んである。IaaS 型クラウドサービスに対しては仮想計算機に直接アクセスできる場合が多いため、従来の電磁的証拠の収集技術を生かすことができるが、SaaS 型クラウドサービスでは一般には困難であるため、クラウド事業者にどのような電磁的記録の証拠保全を求め、その真正性をどのように確保するかのフレームワークに対する研究提案が多い。

⑦ デジタル・フォレンジックの人材育成

デジタル・フォレンジックは法曹関係者や実務者との連携が欠かせない学際的領域であり、研究活動や産業化には技術と法律の両方に通じた人材が必要となることから、人材育成カリキュラムや両分野の相互の啓蒙活動が米国や英国を中心に多く見られる。大学や大学院修士課程における人材育成も米国、カナダ、英国、オーストラリアなどでは盛んであり、Computer Forensics Program などの名称でコースを設ける例が多い。しかしそのカリキュラムについてはまだ議論があるようで、カリキュラムそのものを扱う研究論文がいくつか見られる。

我が国では、大学におけるデジタル・フォレンジックの人材育成プログラムはそれほど盛んではないが、東京電機大学が 2014 年度から文科省「高度人材養成のための社会人学びなおし大学院プログラム」として社会人向けに科目を開講する。また、政府の支援を受けた一般の人材育成プログラムとしてはコンテスト形式を取るものがいくつかあり、総合的インシデント対応力を競う「危機管理コンテスト」（サイバー犯罪に関する白浜シンポジウム実行委員会主催）や、脆弱性検査やインシデント対応に必要な知識や技術を競う SECCON 全国大会（SECCON 実行委員会）などがある。

（6）キーワード

デジタル・フォレンジック、証拠保全、マルウエア解析、機械学習、ビッグデータ、通信の秘密、プライバシー、サイバー犯罪、サイバー刑法

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	関連研究は行われているが分野に特化した国内研究集会がなく、セキュリティー研究やサイバー法研究、法科学研究に付随した存在という位置づけ。
	応用研究・開発	△	↗	アジア語圏向け予測コード付技術の開発、マルウエア解析技術の開発などを一部企業が先導。
	産業化	○	↗	セキュリティー監視事業、インシデント対応事業は一定の産業に。全通信を記録する企業内情報システム向け証拠保全機器や、端末管理ソリューションも国産製品が普及。ディスカバリー対応のための予測コード付技術は海外展開も行われているが、監視の自動化技術は海外に先行されている。主要地域で唯一世界的マルウエア対策ソフトウエア会社が存在しない。
米国	基礎研究	◎	→	主要な国際学会と論文誌は米国に集中しており、最も層が厚い。
	応用研究・開発	◎	↗	暗号応用技術は大学で研究が行われており、ディスカバリー対応をはじめとするシステム応用研究開発は企業が主導。
	産業化	◎	↗	ディスカバリーやシステム監査などは大きな産業に。マルウエアの動的解析技術を応用した次世代ファイアウォールやSIEM製品はほぼ独占。
欧州	基礎研究	◎	↗	大学では英国を中心に研究が盛ん。英国計算機学会が各大学にコースを提供し人材育成も行う。英国外ではドイツ、フランス、スイスなど暗号研究が盛んな地域で関連研究が行われている。 NATOがサイバー防衛の基礎研究部門をエストニアに置き、同分野の世界的中心地に。Interpolでも関連する調査研究。
	応用研究・開発	○	→	携帯電話の規格化の中心であることから関連応用研究が先行。暗号応用も強み。マルウエア関連やVPN技術などの研究開発も盛ん。
	産業化	◎	→	世界的マルウエア対策企業がドイツ、ルーマニア、スペイン、フィンランド、ロシアなどにありインシデント対応産業は盛ん。
中国	基礎研究	○	→	セキュリティー研究者の層の厚さを背景に国際学会でも活動は活発。香港大学を中心にこの分野で研究コミュニティを形成、警察とも協働。しかし分野特化した国際学会ICDFIは2013年、2014年と開催したが一旦休止に。
	応用研究・開発	○	↗	文化的背景から企業の学会研究発表は少ない。しかしハッカーコミュニティの活動が盛んで技術者の層の厚さを伺わせる。
	産業化	○	↗	政府が情報セキュリティーに関する企業への規制を急速に進めた結果、企業を中心に製品導入が進んでいる模様。国内に複数のマルウエア対策企業も持つ。
韓国	基礎研究	○	→	高麗大学や順天郷大学が専門の研究所を設置。関連国際会議でも活発に発表。しかし研究者人口規模は大きくはない。
	応用研究・開発	○	↗	情報セキュリティー産業が発達しているのを背景に研究は盛んだが、独自技術に基づくものが少ない。
	産業化	◎	↗	多くの関連企業があり、製品を展開。大規模な事故の発生を背景にインシデント対応の重要性も認知されてきている。

（８）引用資料

1）デジタル・フォレンジック事典（日科技連）
2）Digital Forensic Research Workshop（DFRWS）http://www.dfrws.org/
3）IFIP WG 11.9 Annual Conference on Digital Forensics
http://www.cis.utulsa.edu/ifip119
4）The Association of Digital Forensics, Security and Law http://www.adfsl.org/
5）デジタル・フォレンジック研究会 http://www.digitalforensic.jp
6）情報処理学会コンピュータセキュリティ研究会 http://www.iwsec.org/csec/
7）株式会社 UBIC「Predictive Coding」
http://www.ubic.co.jp/technology/predictive-coding.html
8）高麗大学校 Digital Forensic Lab http://forensic.korea.ac.kr/
9）Journal of Digital Investigation (Elvevier)
10）IEEE Trans. on Information Forensics and Security
11）Guidance Software Encase Forensics https://www.guidancesoftware.com/forensic.htm
12）AccessData E-discovery and Forensics http://accessdata.com/
13）Purdue Cyber Forensics http://cyberforensics.purdue.edu/
14）Hong Kong Legal Information Institute http://www.hklii.hk/eng/

（付録 1）専門用語解説

本報告書における重要な用語について解説する。なお、見出しに＊をつけた用語は、本報告書における造語である。

2．俯瞰対象分野の全体像

Reality 2.0*

現在の物理世界を Reality1.0 と呼ぶとすると、物理世界とサイバー世界の融合の進展により、二つの世界が融合して一つの有機体として機能する新しい実体世界を Reality2.0 と呼ぶ。Reality2.0 の社会においては、社会・産業の構成要素が機能コンポーネントとして提供され、動的にそれらの機能コンポーネントを構成し、仮想的な経済単位や社会構成要素が形成される。さらに価値の所在がモノから、モノと融合したサービスやどのエコシステムに位置づけられるかという関係性に存在するようになる。

スマートコモンズ（Smart Commons）*

Reality2.0 の社会において IT により実現される社会サービスを支えるサービスプラットフォームは社会共通資本（commons）と位置づけられる。この社会共通資本を社会インフラとして開発・維持・管理・運用していくことが必要になる。プラットフォームを実現するためには機能のサービス状況を常時モニターし、その使われ方によって精算された価値の再配分を行うモデルやシステム構築の研究が必要になる。

オープンデータ（Open Data）

行政機関、大学、企業等の保有するデータのうち企業や一般の市民まで広く活用ができるよう公開されたもの。これらの活用により、行政の透明性の向上、他のデータとも組み合わせることによる新ビジネス創出、企業活動の効率化などを目指している。科学データのオープン化も進みつつあり、論文等の科学的知見の第三者による検証、異分野融合による新たな知の創出などを目的としている。

ソーシャルネットワーキングサービス（Social Networking Service, SNS）

インターネット上で個人や組織が相互に交流する場を提供するサービスやサイトのこと。米国発祥の Twitter や Facebook などが全世界を席巻しているが、微博（中国）や、mixi（日本）など、特定の国でシェアの高いサービスもある。当初は趣味や興味など限定された使われ方が主流であったが、東日本大震災時の災害情報の流通、あるいは、アラブ社会での情報伝達など、社会に大きな影響を与える存在になっている。また、スマートフォンの普及に伴い、生成されるコンテンツもテキストだけでなく画像や動画などへと種類が拡大している。

知のコンピューティング（Wisdom Computing）*

知の発見と伝播・活用を促進し、科学的発見や社会への適用を加速するための活動全般を指す造語。過去と現在行われている科学技術の巨大な研究投資の成果の集積と共有・活用による、新たな科学的発見の加速や、最先端の専門知識の効果的な実務家や市民へ提供、ソーシャルコミュニティの力で未解決問題の解決や社会コストの削減、さらには、人類知の向上を図る。H26 年度には JST にて戦略的創造研究推進事業（CREST）が開始した。

IoT（Internet of Things）

パソコンやサーバー、携帯電話などの情報・通信機器だけでなく、家電製品や自動車、機械など、様々なモノに通信機能を持たせ、インターネットに接続し、モノの制御や周囲の状況の計測などを行うこと。人、モノ、コンピューターなどが有機的に結合することによって、社会、経済、産業の効率化と付加価値の向上を実現する。

CPS（サイバーフィジカルシステム、Cyber Physical Systems）

ネットワーク化されたコンピューティングによる処理と物理的な要素が統合されたもの。実世界や人間から得られるデータを収集・処理・活用し、社会インフラの効率化、新産業の育成、知的生産性の向上などに資すると期待されている。

ELSI（Ethical, Legal and Social Issues/Implications）

科学の進歩に伴って生じる倫理的、法的、社会的課題。知のコンピューティングでは、例えば、機械が下した判断に対する責任の所在、人々の心や思想を本人の意思とは無関係に勝手にモニタリングすることに対するプライバシーの取扱い、人々の思想や行動を恣意的に特定の方向に誘導する危険性にどのように対応して回避していくかといった課題などが考えられる。

仮想化（Virtualization）

仮想化とは、ひとつの物理リソース（プロセッサやメモリー、ディスク、通信回線など）を複数の論理リソースに見せかけたり、また逆に、複数の物理リソースをひとつの論理リソースに見せかけたり、することで、コンピューターのリソースを抽象化することである。ディスクやＰＣ、サーバーなどのコンピューターの仮想化技術の普及が進み、SDN (Software Defined Network)などのネットワークの仮想化、SDDC (Software Defined Data Center)などのデータセンターの仮想化、SDE (Software Defined Environment)などのＩＣＴインフラストラクチャー全体の仮想化など、仮想化がＩＣＴシステム全体に広がってきている。

第４の科学（the fourth paradigm of science）

ネットワークを介して収集される大規模で複雑なデータに基づく実証的な科学的研究手法であり、データ中心科学（Data-centric Science）とも呼ばれる。従来の科学研究であった実験科学、理論科学に対し、20 世紀後半にシミュレーションを中心とした計算科学（第３の科学）が確立したが、21 世紀に入り ICT 技術の飛躍的進歩やビッグデータの出現によって、新しい科学研究の方法論が確立されつつある。

3D プリンティング（Three-dimensional Printing）

3 次元の形状データを設計図として断面形状の積層や切削により立体的な形状を成型するプロセスの総称。積層プロセスには、液状の樹脂の紫外線硬化や溶融樹脂の積層など多様なバリエーションがある。近年、3D プリンティングのための機器（3D プリンタ）や形状データが市場に安価あるいは無料で出回り、個人が複雑な形状の製品を簡単に製造できるようになりつつある。

3.1 基礎理論

離散構造（Discrete Structure）

集合、関係、論理、証明、グラフ（点とそれらを結ぶ線によって表される対象）、組合せ、順列などの離散的な数学的概念の総称。現代のコンピューターのハードウエアおよびソフトウエアは、0/1 の二値に代表されるような離散構造を基礎として構成されている。コンピューターが扱うあらゆる問題は、単純な基本演算機能を要素とする離散構造として表現することができるので、情報構造の数理定式化に広く用いられている。例えば、組合せ最適化問題はある離散構造の中で特定の条件を満たすものを探索する問題であるが、探索空間（対象となる離散構造の集合）が非常に大きいため、効率的な高速アルゴリズムの開発が望まれている。

計算複雑度（Computational Complexity）

与えられた計算問題に対し、どこまで効率の良く計算できるかを示す尺度のこと。計算アルゴリズムの性能を評価する基準のひとつとして用いられており、計算時間に関する問題の難しさ（どの程度の計算コストで計算可能か？）を計る指標である。計算複雑度を探求することは、計算の本質としての「計算限界」を追求することであり、その成果は、革新的なアルゴリズムや新たな計算機構の創出にもつながるだけでなく、情報セキュリティーの安全性の拠り所となる基礎理論を提供することになる。

巨大グラフ（Large Graph）

10 億人程度のユーザーが利用している巨大なネットワーク（インターネットの Web や Facebook、Twitter などのソーシャルネットワーク）を膨大な「頂点（ノード）」と「辺」の接続構造（グラフ）として表現したもの。ネットワークの中にいるユーザーは「ノード」であり、各ユーザー間に生まれた人間関係は「辺」として表現される。巨大グラフを解析することにより、ネットワーク内での「情報伝達」が明らかになり、「コミュニティー形成の動向」が明らかになるが、巨大グラフはリアルタイムで変化・膨張し続けているので、その解析には効率的な高速アルゴリズムが必要である。

3.2 デバイス／ハードウエア

Trillion Sensors Universe

毎年 1 兆個のセンサーを活用する社会のこと。米国シリコンバレーの起業家が提唱し、2013 年に米国で本格的な活動が始まっている。あらゆるものにセンサーを取り付け、取得されたデータを解析することにより、日常的なヘルスケア、流通・物流の効率化、社会インフラの効率的な運用など、社会や経済活動に役立てることを目的としている。

エネルギーハーベスト（Energy Harvest）

光、電磁波、振動、熱などの微小エネルギーを電力に変換し、活用する技術のこと。容易にアクセスや交換することが困難な体内埋め込み、構造物埋め込み型などのセンサーネットワークの自立電源などへの利用が期待されている。米国 GE 社の予測によると、エネルギーハーベスト関連産業が 2012 年からの 20 年間に世界で 1200 兆円超の付加価値をもたらすと報告されている。

量子コンピューティング（Quantum Computing）

物理状態の重ね合わせという量子力学の基本原理を利用して高速に計算する次世代コンピューティング技術のこと。理論的なアイデアは 1982 年に R. P. Feynman によって提案されたが、1990 年代に入ってから実用化に向けた基礎研究が急速に発展した。最近、量子アニーリング法を用いて組合せ最適化問題を効率的に解くことのできる世界初の商業用量子コンピューターをカナダのベンチャー企業 D-Waves 社が開発し注目を集めている。

3.3 通信とネットワーク

SDN（Software Defined Network）

ネットワークの構成、機能、性能などをソフトウエアの操作だけで動的に設定、変更できるネットワーク、あるいはそのためのコンセプトのこと。ネットワーク仮想化（Network Functions Virtualization: NFV）はその応用の一つ。SDN によって、機器の制御機能とデータ転送機能を分離し、制御機能をソフトウエアによって集中管理することで、機器ごとの動作を柔軟に設定することが可能になる。アウトカムとしては、提供するサービスごとにネットワーク機能を切替えたり、障害が発生した場合でも一定の機能を維持したりといったことが実現可能となる。

QoE（Quality of Experience）

情報通信技術の急速な進歩により多様性を増している様々な通信サービスに対して、ユーザーが感じるサービス品質のこと。国際機関である International Telecommunication Union（ITU）において、2007 年 1 月に QoE の定義が定められた。多様なサービスの品質を確保しつつより効率的な通信ネットワークの設計・制御・運用を行うには、ユーザーがどのように通信サービスを利用し、何を体験し、どのように感じて行動するかを分析・理解することが重要となっている。

3.4 ソフトウエア

プログラミングモデル（Programming Model）

コンピューターのプログラムの表現手段。アルゴリズムをどのように記述し、実行するかということを規定する。具体的にはプログラミング言語そのものである場合もあれば、ライブラリーないしはフレームワークである場合もある。時代と共に変化しており、近年では、大規模並列計算のためのプログラミングモデルや、大規模データ処理のためのプログラミングモデルの研究が盛んである。

DevOps（Development and Operation）

環境変化に応じて情報システムの提供する機能を俊敏に変更できるソフトウエア開発手法の一種。開発（Development）と運用（Operation）の担当者が協力して開発に当たることで変化に対応した非常に頻度の高いシステム変更が可能となる。デブオプスと読む。

UX（User Experience）

製品やシステム・サービスを使用するときのユーザーの知覚や反応。ユーザー経験とも言う。ユーザインタフェースという言葉が製品やシステムの視点でそれらを把握するのに対し

て、UX ではユーザー個々人の視点で製品やシステムの使い勝手や満足度の総体を捉える。

3.5 IT アーキテクチャー

Software Defined X*

「Software Defined」とは、手作業ではなく、ソフトウエアで定義・制御する環境を実現する、という意味で、より柔軟かつ迅速に、制御可能な ICT インフラストラクチャーを実現できる。ソフトウエア定義が実現できれば、これまで利用までに数日かかっていたコンピューターをすぐに利用でき、また、管理者が手作業で行っている煩雑な変更作業を自動化し運用負荷を低減できる。これにより、ビジネス環境の変化への更なる対応力を実現できる。

クラウドコンピューティング（Cloud Computing）

アプリケーションの実行を、インターネットなどのネットワーク上のサーバーで行うシステムの利用形態のひとつ。システム構成図においてインターネットを雲（クラウド）形で表現することからこう呼ばれる。それ以前の利用形態と比べて計算機資源が所有から利用へ変化したといわれる。米国アマゾンが自社のデータセンターを Amazon Web Service として一般向けに安価に賃貸するサービスを開始したことから急速に全世界に広まった。

HPC（High Performance Computing）

高性能計算。単位時間当たりの計算量が膨大で、高い性能を必要とする計算処理。自然科学分野のシミュレーションに用いられることが多い。「高性能」は単に高速度であるという意味に留まらず、精度、利用技術、表現技術などといったコンピューティングシステムの高度な要素技術をすべて含むものと考えられ、計算科学のために必要な数理からコンピュータシステム技術にまで及び、これらの処理を行うコンピューターはスーパーコンピューターまたはハイパフォーマンスコンピューターと呼ばれる。

3.6 IT メディアとデータマネジメント

ユーザー生成メディア（Consumer Generated Media, CGM）

不特定多数あるいは限られたコミュニティーのメンバーが発信する情報(テキスト､画像､音声､動画)で不特定多数あるいはコミュニティーのメンバーがアクセスすることができる。かつての消費者は企業から提供される商品やサービスを一方向的に消費する存在であったが、誰もが参加でき双方向的な情報発信技術により、商品やサービスに対する評価を行ったり、自らの創作物を発信したりするようになった。匿名性の高い掲示板から比較的匿名性の低いソーシャルネットワーキングサービス（SNS）まで様々なものがあるが、情報の信頼性や速報性などの点で情報の質の比較的高いものもあり、社会の活動を捉えたソーシャルセンサーとして、そこから新たな価値を生み出そうとする取り組みも進められている。

コンテキスト（Context）

情報科学技術の活用により「いまだから、ここだから、あなただから」という適時適切なサービスの提供を実現するためには、利用者からの明示的なサービスの要求だけでなく、利用者のおかれている状況（位置、運動状況、気分、その他の生体情報など）や周囲の状況（ランドマーク、他の人の存在、気象など）を把握し、状況にあわせて提供するサービスを選択

することが必要となる。こうした明示的な要求以外のサービス選択の根拠となる情報をコンテキストという。コンテキストの取得には、受動的にセンシングするだけでなく必要に応じて利用者とインタラクションして曖昧性を低減・顕在化させることも重要である。

データマイニング（Data Mining）

大量のデータから、それまで知られてなかった特定の意味や情報を発掘（マイニング）すること。具体的には、典型的なパターンやクラス分け、そこに含まれない外れ値の検出、回帰分析など。古典的には、数値や文字列を対象にしていたが、データの多様化に伴い、グラフ解析・マイニング、データストリームマイニングなど、様々な形態のデータを扱う研究開発が盛んに行われている。

3.7 人工知能

IBM Watson

IBM が開発した人工知能コンピューター。自然言語で記述された問題に対して短時間で回答する。2011 年にクイズ番組（Jeopardy!）で人間のチャンピオン二人と対戦して勝利を収めたことで有名になった。深い言語処理の成功例である。医療診断支援などの現実的問題解決サービスへの応用が進められている。

機械学習（Machine Learning）

あらかじめルールやプログラムを明示的に与えるのではなく、具体例などをデータとして与えることで、具体例に含まれない新たなデータに対してもコンピューターが適切な処理を行えるようにする技術。ニューラルネットや分類器など多様な技術がある。近年ではスマートフォンの音声アシスタントなど様々なサービスに組み込まれて活用されたり、大量データからのルール発見といった目的にも使われようになっている。

LOD（Linked Open Data）

大規模な Web 上で公開されたオープンデータを意味的関係を表すグラフ構造で構造化したもの、あるいは、その利活用技術。世界規模の「データの Web」における意味的関係に基づく処理の実現を目指している。Knowledge Graph とも呼ばれる。

汎用人工知能（Artificial General Intelligence, AGI）

人間のように十分に広範な適用範囲と強力な汎化能力を持つ人工知能。現在実用化されている人工知能が「特定」の問題領域に限定されて使用されるのに対して、あらゆる問題領域に対応しうるため「汎用」と呼ばれる。これまで困難と見られていたが、最近の深層学習技術の進展などを契機として今後のイノベーションが期待される領域である。

3.8 ビジョン・言語処理

深い意味理解（Deep Understanding）

事象間の因果関係や意図の構造の解析に関する研究。現状では、コンピューターで比較的扱いやすい言語を対象にした情報分析、特にソーシャルメディア等での社会的な動きや言論を把握、活用する研究が盛んである。一方で、「百聞は一見にしかず」いうように、人間にとって情報豊富で意味内容も容易に理解可能な画像・映像を対象とした意味理解は、コンピュ

ーターにとってはいまだに大きな課題である。

音声エージェント（Voice Assistant）

質問応答など人間と音声による自然なやり取りを実現する音声対話システムの一種。近年、スマートフォンの普及とクラウド型の音声認識により、Apple の Siri、Google の Google Now、Microsoft の Cortana、NTT ドコモの「しゃべってコンシェル」など商用の音声エージェントサービスが次々とリリースされ一定の支持を得ている。

統計的機械翻訳（Statistical Machine Translation）

統計モデルに基づき二言語の対訳データから自動的に機械翻訳システムを構築する技術。初期の機械翻訳は、構文解析、構造変換、生成といった過程をモデル化し、言語の専門家が知識を記述することで実現したためコストがかかった。これに対し、統計的機械翻訳は、自動的に機械翻訳システムを構築するので、新しい言語対や分野への適応が短期間かつ低コストで実現可能になった。

3.9 インタラクション

BMI（Brain Machine Interface）

脳内情報を直接読み取って外部機器の制御信号として用いたり、センサーによって取得された環境情報に基づいて脳の特定部位を刺激したりする、脳と機械の直接的なインターフェース全般。これまでは主に、けがや疾病によって失った脳機能を補綴（ほてい）するために、ロボットアーム、センサー、メモリーを脳に接続し、それらを身体化させる研究が進められてきたが、今後はその発展系として、健常成人に対する身体行為の増強や知的情報活動の支援をする開発が進む。

触覚（Haptics）

人間の触覚に関する研究。当初は遠隔操作ロボットの触感伝送や、仮想現実の触感生成を主な目的としていたが、近年はモバイル機器の操作性を高めるための振動フィードバックをはじめ、エンターテインメント、コミュニケーション、スポーツ、健康支援など、幅広い応用への関心が高まっている。ウエアラブル機器やロボティクスへの応用も期待される。

ウエアラブルコンピューティング（Wearable Computing）

身体にコンピューターを装着して利用する情報機器の新たな形態。ヘッドマウントディスプレーや眼鏡、腕時計、指輪など様々なデバイスが検討されてきたが実用には遠かった。2012年に Google Glass が発表された状況が一変した。超小型、高性能、高機能かつスマートなデザインで従来の課題を解決したものの、新たにカメラ利用の社会的問題を引き起こし販売中止となった。今後は Apple Watch や Google Wear などの動向が注目される。

人間拡張工学（Human Augmentation Engineering）*

人間が生得的に有する感覚機能、運動機能、知的処理機能を物理的、情報的に補償・拡張することを目指す新たな研究開発領域。機器や情報システムを自らの手足のように自然に利用する「人機一体」を実現するため、メカトロニクス、ロボット工学、センサー工学、ディスプレー技術、人間工学、ウエアラブル技術、インタラクション技術を有機的に統合した技術領域であり、我が国が得意とするハードウエアとソフトウエアの融合技術でもある。

3.10 ビッグデータ

ストリームデータ処理（Stream Data Processing）

センサーや GPS 情報など、刻一刻と生成されるデータを対象として高速な処理を行う技術。従来、データベースなどに保存された過去のデータを処理していたのに対して、ストリームデータ処理は、リアルタイムに発生し、爆発的に増加する大量のデータを、リアルタイムに処理する。複合イベント処理（Complex Event Processing）とも呼ばれ、ビッグデータの出現により重要性が高まり研究開発と産業化に向けた開発が盛んである。

圧縮センシング（Compressed Sensing）

圧縮センシングは、対象となる信号をできるだけ少ない観察から復元する技術である。圧縮技術の多くは、一旦観察信号を大容量のデータとして取得した後に圧縮するが、圧縮センシングは観察と圧縮を同時に行い、効率的にデータの取得を行うため、大容量で冗長なデータ取得を制限できる利点がある。

分散処理基盤技術（Distributed Processing Platform Technology）

ビッグデータを活用するためには、分析手法だけでなく、分析するためのデータを収集・蓄積する仕組み（基盤）が必要になる。ビッグデータは既存のデータと比べて量が多いだけでなく、生成頻度が高く、データの種類・形式が多様であるという特徴がある。こういった特徴のあるデータは、従来のデータベースなどでは扱うことが困難である。蓄積されたデータを対象にするのか、時々刻々と生成されるデータを対象とするのか、によって分散処理基盤技術が異なっており、代表的な技術として、前者では NoSQL、BigQuery、 MapReduce、Spark、GraphLab などが、後者では Storm や Jubatus などがある。

オプトイン、オプトアウト（Opt-in, Opt-out）

「オプトイン」とは"同意しない限り拒否していると見なす"という意味で、一方、「オプトアウト」は"拒否しない限り同意しているものと見なす"という意味である。日本はオプトインの国であるが、米国のようにオプトアウト方式であれば、著作物を使用する場合、フェアユースと絡めて、許諾の範囲、引用の範囲と判断できれば、直接著作者に当たらなくても使用でき、著作物の２次利用の自由度が増すことになる。

3.11 CPS/IoT

M2M（Machine to Machine）

Machine-to-Machine Communication (マシン間通信)のこと。人間ではなく、モノ同士が通信し、情報を交換する。センサーによる情報収集が多かったが、モノの制御にも使われるようになってきた。さまざまな機械の制御や、自動車などからの情報収集、電力使用状況のモニタリングや制御に使われる。比較的少量のデータが頻繁にやり取りされるなど、人間同士の通信とは異なった特性を持つことが多い。

センサーネットワーク（Sensor Network）

周囲の状況を把握するために、温度や湿度、圧力などさまざまなセンサーが接続されたネットワークのこと。人々の行動や生産活動、経済活動などを円滑かつ効率的に行なうことが可能になる。電気やガスの自動検針、農作物の環境、人間の見守り、地球環境のモニタリングなどさまざまな分野で用いられる。

Industrie 4.0

ドイツで実施されている、製造業高度化に向けた産官学共同のアクションプランのこと。生産拠点としてのドイツの未来を確実なものにするため施策であり、製品輸出、および製造技術輸出のデュアル戦略であり、CPS (Cyber-Physical Systems)でネットワーク化された「考える工場」の実現を目指している。

Industrial Internet

情報と機械を融合させ、製造業のイノベーションをもたらそうとするコンセプト。米 GE 社が提唱している。ジェットエンジンや発電機などの工業製品、製造設備などをインテリジェント化し、高度な分析によって高い経済的価値を得ようとしている。多数の企業がコンソーシアムに参加し、IoT のリファレンスアーキテクチャの策定などを行なっている。

3.12 知のコンピューティング

集合知（Collective Intelligence）

意識的あるいは意識されない形での人々の共同作業により生み出される知。Wikipedia は変化し続ける事物についての集合知を活用して形成された巨大な百科事典である。また、市民参加による銀河の分類など科学的発見へ貢献する取組みなどもある。オープンソフトウェア開発も集合知を活用する例といえる。参加を促す仕組み、知の集積と構造化の手法などが研究対象となっている。

クラウドソーシング（Crowd Sourcing）

IT を活用して不特定多数の人（群衆）に仕事を委託すること。群集（Crowd）と外部委託（Outsourcing）を合成した言葉である。WWW 上に構築されてソーシャルメディアと通じたクラウドソーシングをソーシャルソーシングと呼ぶこともあるがほぼ同義である。事例としては、Wikipedia（百科事典）に代表される非営利活動から、Amazon が提供する産業向けのプラットフォーム上の営利活動まで多数出現してきた。また、東日本大震災のときに災害関連情報の収集がボランティアベースで行われたがこれもクラウドソーシングの一例といえる。

メカニズムデザイン（Mechanism Design）

ミクロ経済学やゲーム理論からの知見を活かして、現実の市場や社会制度など複数の自律的な主体が異なる目的を持って相互作用する場における主体間の合意形成のルールなどを設計すること。社会実装の例として、検索連動広告の第二価格オークション、周波数割当の組合せオークションなどが挙げられる。

3.13 セキュリティー

デジタル・フォレンジック（Digital Forensic）

例えば、コンピューターへの不正侵入が有った場合に、その侵入手口や経路の捜査に必要な情報を明らかにする技術。またそれらの情報の保全や、改ざんなどに関する分析や情報収集も行なう。法的紛争や訴訟あるは捜査において、事実を解明するために有用な技術である。

サイバー攻撃（Cyber Attack）

攻撃目標となるコンピューターに侵入し、不正にデータを入手したり、改ざんや破壊を行なったりすること。あるいは、相手のシステムを機能不全に落としいれ、業務を妨害することもある。最近は、特定の標的を狙ったり、経済的な目的を持っていたり、あるいは、制御システムを対象とした攻撃が現れている。

ID 連携（Identity Federation）

インターネット上のサービスは単一のサイトのみによって提供されるのではなく、直接サービスを提供するサイト以外で認証を行うような複数のサイト間における認証連携が行なわれる。そのために、複数のサイトに散在する属性情報を流通させる技術が必要となる。ID 連携技術は複数サイト間で認証情報を連携させ、属性情報を流通させるための技術である。

レジリエンシー（Resiliency）

環境の大きな変動に対して、システムが抵抗してその機能を維持するとともに、万一機能を失った場合でも早急にその障害から柔軟に回復することができる、強靭でしなやかな能力のこと。その能力が情報システムに備わることにより、障害を未然に予測してシステム障害に至る致命的なエラーを回避するとともに、万一障害に陥った場合でも早急にシステムを復帰させることが可能となる。

（付録 2）検討の経緯

俯瞰報告書 2015 年版は報告書全体としての打ち出すべきメッセージ、各俯瞰区分における技術の流れやそれぞれの研究開発領域の抽出に至った必然性を表現することを重視して検討・編集を行った。

このため 2013 年版を検討・編集の際に行った社会的期待・課題の抽出を発展させ、技術、経済、社会・環境、人間・文化の多面的観点からトレンドを抽出するとともに、そうしたトレンドの下での情報科学技術における挑戦課題の明確化を行った。これら挑戦課題に取り組むとともに社会的・経済的インパクトをもたらす重要な研究開発のポートフォリオとして戦略レイヤーを定義して、情報科学技術の全体像を捉えた。このような方針を検討の初期段階で明確にして編集を進めた。一方で基盤レイヤーにおける萌芽的な取り組みの中で、今後、科学技術、社会経済、日本に大きな影響を与える可能性のあるものを抽出するための試みとして俯瞰インプリケーションワークショップを開催した。

また、同時期に第 10 回未来科学技術予測のとりまとめが NISTEP により進められており、第 5 期科学技術基本計画の策定も見据え、情報科学技術分野の今後の方向性に係るメッセージが整合性のあるものとなるよう俯瞰区分の設定などについて連携しながら検討・編集を進めた。

以下に具体的な検討の経緯を記す。

1）特任フェロー会議

2014 年度は特任フェロー会議を 4 回開催し、識者の意見を踏まえ俯瞰報告書を取り纏めた。

①第 1 回特任フェロー会議

2014 年 6 月 24 日（火）15 時～18 時　東京本部別館 2 階 E 会議室

俯瞰区分（案）を議論。NISTEP 未来科学技術予測と連携することとした。

②第 2 回特任フェロー会議

2014 年 8 月 26 日（火）15 時～18 時　東京本部別館 2 階 F 会議室

俯瞰区分の定義、取り扱う研究開発領域、区分俯瞰図の議論。

③第 3 回特任フェロー会議

2014 年 11 月 20 日（木）15 時半～18 時　東京本部別館 4 階 A 会議室

第 2 章 分野の全体像の構成案を議論。また、俯瞰インプリケーションワークショップの実施計画を議論。

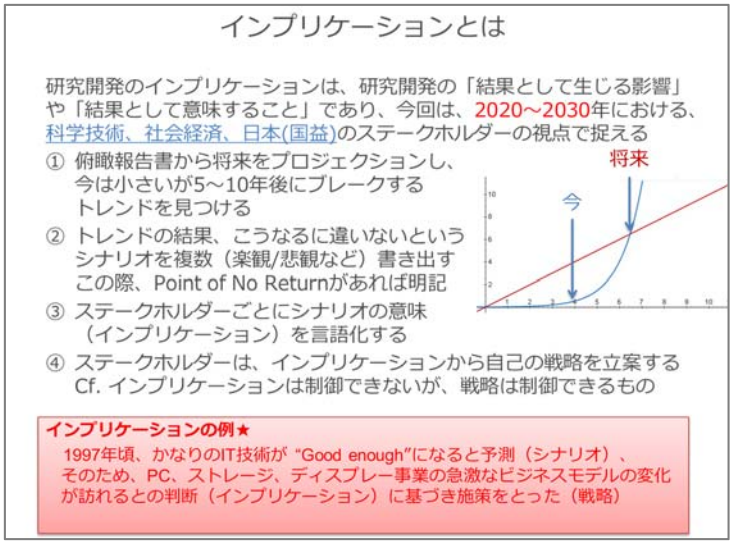
④第 4 回特任フェロー会議

2015 年 2 月 5 日（木）13 時～18 時　東京本部別館 2 階 A1 会議室

下記 2 の俯瞰インプリケーションワークショップを実施。

2）俯瞰インプリケーションワークショップ

研究開発の「結果として生じる影響」や「結果として意味すること」を”**研究開発のインプリケーション**”と呼び、2020～2030 年における、科学技術、社会経済、日本の３つのステークホルダーの視点で捉えることで、俯瞰から今後の戦略立案に向けた橋渡しを試みた。



日時：2015 年 2 月 5 日（木）13 時～18 時　東京本部別館 2 階 A1 会議室
オーガナイザー：岩野和生（CRDS）
【プログラム】
13:00～13:15　趣旨説明とオリエンテーション
13:15～14:20　ポジショントーク
　CRDS 作成の各俯瞰区分のインプリケーション例の発表（15 分）
　特任フェロー、区分総括からの発表（各 5 分）
　NISTEP からの発表（10 分）
14:30～16:00　グループワーク（90 分）
　グループごとに重要トレンドとそのインプリケーションを討議。具体的には以下のように議論を進めた。
　①俯瞰報告書から将来をプロジェクションし、今は小さいが 5～15 年後にブレークするトレンドを見つける
　②トレンドの結果、こうなるに違いないというシナリオを複数（楽観・悲観など）書き出す。この際、Point of No Return があれば明記する
　③ステークホルダーごとにシナリオの意味（インプリケーション）を言語化する
　④ステークホルダーは、インプリケーションから
　自己の戦略を立案する
　＜グループ分け＞
　①人工知能＋ビジョン･言語＋インタラクション＋
　知のコンピューティング
　（リーダー：山口高平、黒橋禎夫、萩田紀博）
　②ビッグデータ＋CPS / IoT＋IT メディアとデータ管理＋
　基礎理論
　（リーダー：田中克己、喜連川優、森川博之、岩野和生）

③IT アーキテクチャー＋ソフトウエア＋セキュリティー
（リーダー：丸山宏、徳田英幸、柴山悦哉）
④デバイス・ハードウェア＋通信とネットワーク
（リーダー：村田正幸、志度昌宏、竹内健）
16:00～17:50　グループワーク発表と全体討議
各グループの発表と質疑応答（15 分[発表 10 分、質疑 5 分]×4 グループ）
全体討議（50 分）
17:50～18:00　まとめ

議論の結果は、今後、CRDS 内部メンバーおよび外部有識者により議論を深め、戦略プロポーザルとして発刊するなど、政策立案者および各研究者コミュニティーへのインプットとすることを目指していく。

【参加者】

	氏名	所属	役職
1	喜連川 優	国立情報学研究所	所長 / CRDS 特任フェロー
2	志度 昌宏	インプレス IT Leaders 編集部	副編集長 / CRDS 特任フェロー
3	竹内 健	中央大学 理工学部電気電子情報通信工学科	教授 / CRDS 特任フェロー
4	徳田 英幸	慶應義塾大学 環境情報学部	教授 / CRDS 特任フェロー
5	丸山 宏	統計数理研究所	副所長 / CRDS 特任フェロー
6	森川 博之	東京大学 先端科学技術研究センター	教授 / CRDS 特任フェロー
7	山口 高平	慶應義塾大学 理工学部管理工学科	教授 / CRDS 特任フェロー
8	黒橋 禎夫	京都大学大学院 情報学研究科	教授
9	柴山 悦哉	東京大学 情報基盤センター	教授
10	田中 克己	京都大学大学院 情報学研究科	教授
11	萩田 紀博	国際電気通信基礎技術研究所(ATR) 知能ロボティクス研究所	所長
12	村田 正幸	大阪大学大学院 情報科学研究科	教授
13	田中 宏	内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)付	参事官
14	谷上 博栄	内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付参事官付	上席政策調査員
15	兵藤 守	内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付参事官付	政策調査員
16	田中 伸彦	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	企画官
17	高橋 孝一	経済産業省 商務情報政策局情報 セキュリティ政策室	室長補佐
18	小笠原 敦	科学技術・学術政策研究所 科学技術動向センター	センター長
19	七丈 直弘	科学技術・学術政策研究所 科学技術動向センター	上席研究官
20	稲上 泰弘	JST 経営企画部 イノベーション企画グループ	研究監
21	宮田 裕行	JST 経営企画部 イノベーション企画グループ	研究監補佐
22	高杉 秀隆	JST 情報企画部 企画課	課長
23	山下 泰弘	JST 情報企画部 新規事業グループ	主任調査員

24	関 浩一	JST 知的財産戦略センター 知財集約グループ	主任調査員
25	江森 正憲	JST 研究プロジェクト推進部	副調査役
26	小山 健一	JST 研究プロジェクト推進部	主任調査員
27	私市 光生	JST CRDS 政策ユニット	上席フェロー
28	吉川 誠一	JST CRDS イノベーションユニット	上席フェロー
29	松井 くにお	JST CRDS イノベーションユニット	特任フェロー
30	岩野 和生	JST CRDS 情報科学技術ユニット	上席フェロー
31	鈴木 慶二	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー
32	高島 洋典	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー
33	土井 直樹	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー
34	的場 正憲	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー
35	宮下 哲	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー
36	茂木 強	JST CRDS 情報科学技術ユニット	フェロー

3）科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」

知のコンピューティングに含まれるような知的情報処理技術の研究開発が進展し、実社会への適用が進むにつれ、情報科学技術の研究者・技術者においても、倫理的・法的・社会的（ELSI: Ethical, Legal, and Social Issues）視点での考慮が不可欠になることから、人文社会科学（SSH）および情報科学関連の有識者を集め、知のコンピューティングが描く未来像に対して、必要となる ELSI に係る論点を明確化するワークショップを実施した。

日時：2014 年 9 月 8 日（月）13 時～18 時　東京本部住宅棟 1 階会議室
オーガナイザー：岩野和生（CRDS）
【プログラム】
13:00～13:05　開会挨拶　岩野和生（CRDS）
13:05～13:30　ワークショップの趣旨説明
　知のコンピューティングと本 WS のねらい　　岩野和生（CRDS）
　CREST 知的情報処理の概要　　萩田紀博（ATR）
13:30～16:30　各分野からの論点提供（各講演 15 分+議論 5 分）×9
＜情報科学＞
13:30　情報科学、認知科学の観点から　　安西祐一郎（日本学術振興会）
13:50　ユビキタスサービスとオープンデータ　～いくつかの事例と課題～
　　徳田英幸（慶應義塾大学）
14:10　ヒューマンインタフェースの観点から　土井美和子（情報通信研究機構）
14:30　情報システム、プライバシー管理の観点から
　　佐藤一郎（国立情報学研究所）
14:50～15:00　休憩
＜人文社会科学＞
15:00　情報倫理学の視点から　　大谷卓史（吉備国際大学）
15:20　情報法、個人情報保護の観点から　　新保史生（慶應義塾大学）

15:40　法と倫理の観点から　小林正啓（花水木法律事務所）
16:00　科学技術社会論の観点から　神里達博（大阪大学）
16:20　人と機械の創造的協働とは？　―科学技術政策からの幾つかの視点―
有本建男（政策研究大学院大学、CRDS）
16:40～16:50　（休憩）
16:50～17:50　総合討論　岩野和生（CRDS）
ディスカッサント：藤山知彦（三菱商事）、黒田昌裕（CRDS）
論点 1　情報科学の科学者の役割
論点 2　SSH の科学者の役割
17:50～18:00　総合コメント　萩田紀博（ATR）
18:00　閉会　岩野和生（CRDS）

【参加者】

	氏名	所属	役職
1	有本 建男	JST CRDS	副センター長
2	安西 祐一郎	日本学術振興会	理事長
3	岩野 和生	JST CRDS 情報科学技術ユニット	上席フェロー
4	大谷 卓史	吉備国際大学 アニメーション文化学部	准教授
5	神里 達博	大阪大学 コミュニケーションデザインセンター	特任准教授
6	小林 正啓	花水木法律事務所	弁護士
7	佐藤 一郎	国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系	教授
8	新保 史生	慶應義塾大学 総合政策学部	教授
9	土井 美和子	情報通信研究機構	監事
10	徳田 英幸	慶應義塾大学 環境情報学部	教授
11	萩田 紀博	国際電気通信基礎技術研究所(ATR) 知能ロボティクス研究所	所長
12	黒田 昌裕	JST CRDS	上席フェロー
13	藤山 知彦	三菱商事	常勤顧問
14	茂木 強	JST CRDS	フェロー
15	岡本 洋平	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	課長補佐
16	笠川 満	JST 戦略研究推進部	主任調査員
17	茅 明子	JST 社会技術研究開発センター	アソシエイトフェロー
18	私市 光生	JST CRDS	上席フェロー
19	工藤 真由美	JST 戦略研究推進部	主査
20	芝池 玲奈	フューチャーセッションズ	セッション・プロデューサー
21	鈴木 慶二	JST CRDS	フェロー
22	高島 洋典	JST CRDS	フェロー
23	田中 信彦	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	企画官
24	土井 直樹	JST CRDS	フェロー
25	野村 恭彦	フューチャーセッションズ	代表取締役社長

26	福井 克樹	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	専門職
27	前澤 いずみ	JST 戦略研究推進部	調査員
28	前田 さち子	JST 社会技術研究開発センター	副調査役
29	前田 知子	JST CRDS	フェロー
30	松尾 浩司	JST 戦略研究推進部	調査役
31	的場 正憲	JST CRDS	フェロー
32	宮下 哲	JST CRDS	フェロー
33	吉川 誠一	JST CRDS	フェロー

（付録 3）執筆協力者一覧

※五十音順、敬称略、所属・役職は本報告書作成時点

■基礎理論

徳山　豪　東北大学大学院　情報科学研究科　教授【総括責任者】
岩間　一雄　京都大学大学院　情報学研究科　教授
岡本　吉央　電気通信大学大学院　情報理工学研究科　准教授
鹿島　久嗣　京都大学大学院　情報学研究科　教授
河原林健一　国立情報学研究所　情報学プリンシプル研究系　教授
國廣　昇　東京大学大学院　新領域創生科学研究科　准教授
小林　直樹　東京大学大学院　情報理工学系研究科　教授
住井英二郎　東北大学大学院　情報科学研究科　准教授
松嶋　敏泰　早稲田大学　理工学術院　基幹理工学部応用数理学科　教授
渡辺　治　東京工業大学大学院　情報理工学研究科　教授

■デバイス・ハードウェア

桜井　貴康　東京大学生産技術研究所　教授、CRDS 特任フェロー【総括責任者】
石黒　仁揮　慶應義塾大学　理工学部電子工学科　教授
伊藤　公平　慶應義塾大学　理工学部物理情報工学科　教授
岩本　敏　東京大学生産技術研究所　准教授
大村　一郎　九州工業大学　工学研究院　電気電子工学研究系　教授
黒田　忠広　慶應義塾大学　理工学部電子工学科　教授
澤田　和明　豊橋技術科学大学　電気・電子情報工学系　教授
清水　徹　慶應義塾大学　理工学部電子工学科　特任教授
関谷　毅　大阪大学産業科学研究所　教授
高木　信一　東京大学大学院　工学系研究科　教授
高宮　真　東京大学生産技術研究所　准教授
竹内　敬治　（株）NTT データ経営研究所　社会・環境戦略コンサルティング
ユニット　シニアスペシャリスト
竹内　健　中央大学　理工学部電気電子情報通信工学科　教授、CRDS 特任フェロー
田原　修一　NEC(株)中央研究所理事兼スマートエネルギーBU　主席技術主幹
年吉　洋　東京大学先端科学技術研究センター　教授

■通信とネットワーク

村田　正幸　大阪大学　大学院情報科学研究科　教授【総括責任者】
阿多　信吾　大阪市立大学大学院　工学研究科　教授
桐葉　佳明　NEC（株）クラウドシステム研究所　技術主幹
中村　元　KDDI（株）　技術統括本部　技術開発本部　技術戦略部長
新井田　統　（株）KDDI 研究所　開発センター　開発マネージャー

原井　洋明　　情報通信研究機構　光ネットワーク研究所　室長
松岡　茂登　　大阪大学大学院　情報科学研究科　教授
村田　英一　　京都大学　大学院情報学研究科　通信情報システム専攻　准教授

■ソフトウエア

柴山　悦哉　　東京大学　情報基盤センター　情報メディア教育研究部門　教授【総括責任者】
青山　幹雄　　南山大学　情報理工学部　教授
枝廣　正人　　名古屋大学大学院　情報科学研究科　教授
小野寺民也　　日本 IBM（株）　東京基礎研究所　部長
河野　健二　　慶應義塾大学　理工学部情報工学科　教授

■IT アーキテクチャー

丸山　　宏　　統計数理研究所　教授・副所長、CRDS 特任フェロー【統括責任者】
浅井　信宏　　日本 IBM（株）ソフトウェア開発研究所　ディスティングイッシュト・エンジニア（技術理事）
浦本　直彦　　日本 IBM（株）東京基礎研究所クラウド・テクノロジー　部長
松岡　　聡　　東京工業大学　学術国際情報センター　教授
山下　克司　　日本 IBM（株）グローバルテクノロジーサービス事業本部ディスティングイッシュト・エンジニア（技術理事）
山下　眞澄　　情報システム構造設計（株）客員研究員　エンタープライズアーキテクト

■IT メディアとデータマネジメント

田中　克己　　京都大学大学院　情報学研究科　教授【総括責任者】
相澤　清晴　　東京大学工学部　教授
河合由起子　　京都産業大学　コンピュータ理工学部　准教授
木俵　　豊　　情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所　所長
是津　耕司　　情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所情報利活用基盤研究室　室長
酒井　哲也　　早稲田大学　理工学術院　准教授
櫻井　保志　　熊本大学大学院　自然科学研究科　教授
角谷　和俊　　関西学院大学　総合政策学部メディア情報学科　教授
吉川　正俊　　京都大学大学院　情報学研究科　教授

■人工知能

山口　高平　　慶應義塾大学　理工学部管理工学科　教授、CRDS 特任フェロー【総括責任者】
新井　紀子　　国立情報学研究所　社会共有知研究センター　センター長・教授
岡田　浩之　　玉川大学　工学部機械情報システム学科　教授
岡野原大輔　　（株）Preferred Infrastructure　取締役副社長
來村　徳信　　大阪大学　産業科学研究所　准教授

鈴木　宏昭　　青山学院大学　教育人間科学部教育学科　教授
松尾　　豊　　東京大学大学院　工学系研究科　准教授
松原　　仁　　公立はこだて未来大学　教授
宮尾　裕介　　国立情報学研究所　コンテンツ科学研究系　准教授
山川　　宏　　(株)ドワンゴ　人工知能研究所　所長

■ビジョン・言語処理
黒橋　禎夫　　京都大学大学院　情報学研究科　教授【総括責任者】
乾　健太郎　　東北大学大学院　情報学研究科　教授
佐藤　真一　　国立情報学研究所　コンテンツ科学研究系　教授
鳥澤健太郎　　情報通信研究機構　情報分析研究室　室長
東中竜一郎　　NTT（株）メディアインテリジェンス研究所
渡辺　太郎　　情報通信研究機構　ユニバーサルコミュニケーション研究所

■インタラクション
暦本　純一　　東京大学大学院　情報学環　教授【総括責任者】
五十嵐健夫　　東京大学大学院　情報理工学系研究科　教授
稲見　昌彦　　慶應義塾大学大学院　メディアデザイン研究科　教授
牛場　潤一　　慶應義塾大学　理工学部生命情報学科　准教授
小林　哲則　　早稲田大学　理工学術院情報理工学科　教授
篠田　裕之　　東京大学大学院　新領域創成科学研究科　教授
塚本　昌彦　　神戸大学大学院　工学研究科　教授
松山　洋一　　早稲田大学　理工学術院情報理工学科　次席研究員

■ビッグデータ
喜連川　優　　東京大学生産技術研究所　教授／国立情報学研究所　所長【総括責任者】
鬼塚　　真　　大阪大学大学院　情報科学研究科　教授
鹿島　久嗣　　京都大学　情報学研究科　教授
城所　岩生　　国際大学　グローバル・コミュニケーション・センター　客員教授
佐久間　淳　　筑波大学大学院　システム情報工学研究科　准教授
杉山　　将　　東京大学大学院　新領域創成科学研究科　教授
武田　英明　　国立情報学研究所　情報プリンシプル研究系　教授
津田　宏治　　東京大学大学院　新領域創成科学研究科　教授
船守　美穂　　東京大学　教育企画室　特任准教授
丸山　　宏　　統計数理研究所　教授・副所長
村上康二郎　　東京工科大学　教養学環　准教授
山名　早人　　早稲田大学理工学術院　教授

■CPS / IoT
森川　博之　　東京大学先端科学技術研究センター　教授【総括責任者】

川原　圭博　　東京大学大学院　情報理工学系研究科　准教授
草場　英仁　　東京大学　先端科学技術研究センター　森川研究室　協力研究員
栗原　　聡　　電気通信大学大学院　情報システム学研究科　教授
藤田　隆史　　NTT ネットワーク基盤技術研究所　主任研究員
南　　悦郎　　新日鉄住金ソリューションズ(株)　執行役員

■セキュリティー
佐々木良一　　東京電機大学　教授、サイバーセキュリティ研究所　所長【総括責任者】
井上　大介　　情報通信研究機構　ネットワークセキュリティ研究所
　　サイバーセキュリティ研究室　室長
上原哲太郎　　立命館大学　情報理工学部情報システム学科　教授
菊池　浩明　　明治大学　総合数理学部　先端メディアサイエンス学科　教授
古原　和邦　　産業技術総合研究所　セキュアシステム研究部門
　　制御システムセキュリティ研究グループ　研究グループ長
金野　千里　　情報処理推進機構　技術本部　セキュリティセンター
　　情報セキュリティ技術ラボラトリー　ラボラトリー長
下道　高志　　東京電機大学　サイバーセキュリティ研究所　研究員

（付録４）索引

2次元材料デバイス ……91
3Dスキャナー ……496
3Dプリンター ……114, 282, 457, 499, 500, 501, 621
3Dプリンティング ……695
3次元インターフェース ……475
3次元形状計測 ……497
3次元集積化 ……90
3次元プリンター ……496
3ティア……263
A/Bテスト ……389
ACID特性 ……304, 321
Augmented Human ……468, 470, 471
Augmented Reality (AR) ……482, 486, 497, 618
Body of Knowledge (BOK) ……268, 273
Brain Machine Interface (BMI) ……5, 151, 182, 459ー463, 465, 466, 700, 722
BISD (Built-In Self Diagnosis) ……98
BIST (Built-In Self Test) ……98
Business Process Model (BPM) ……268
CAMSS ……268ー270, 272, 273
Complex Event Processing (CEP) ……306, 307, 333, 510, 564, 565, 701
Component Business Model (CBM) ……268, 274
Computational Photography ……499, 500, 503
Computer-Aided Design (CAD) ……137, 496, 498, 501, 502
Conditional random field (CRF) ……367, 394
Consumer Generated Media (CGM) ……318, 326, 328, 698
Content Delivery Network (CDN) ……186, 209, 227, 277
Content-Centrics Network (CCN) ……186, 210, 213, 226ー230
Crowd-sourced sensing ……318, 333, 336
Data Center EMS (DEMS) ……199, 202ー206
DDoS攻撃対策技術 ……646, 674
Deep Neural Network (DNN) ……446, 447
DRIE (Deep Reactive Ion Etching) ……96
DevOps …235, 236, 238, 281, 288, 289, 290, 564, 697
Education technology ……389
ELSI ……17, 356, 461, 464, 623, 625, 640, 695, 707
FA-IT連携 ……618
Field Programmable Analog Array (FPAA) ……149, 150
Hadoop分散ファイルシステム (HDFS) ……321
High Performance Computing (HPC) ……5, 124ー126, 265, 305, 307ー312, 424, 698, 722
Human Robot Interaction (HRI) ……392, 393, 398, 457, 489ー494, 722
IBM Watson ……45, 366, 372, 376, 832, 401ー403, 405, 493, 629, 637, 699
ID連携 ……4, 18, 318, 644, 646, 668ー672, 703, 723
IGBT ……137, 139ー141
IGZO……111, 112
Industrial Internet ……244, 280, 282, 296, 298, 300, 565, 584, 589, 594, 595, 619ー622, 702
Industrie 4.0……23, 24, 237, 296, 298, 300, 301, 584, 588, 594, 614, 619ー622, 702
Information-Centric Network (ICN) ……186, 213, 226ー230
Infrastructure as a Service (IaaS) ……287ー290, 292, 691
Internationalized Resource Identifier (IRI) ……375
Knowing ……624, 626
Knowledge Graph ……376ー378, 382, 699
k-匿名性 ……525ー527, 679, 682, 684, 685
Linked Open Data (LOD) ……5, 324, 355, 374ー378, 380, 387, 568, 570, 699, 722
Long Sort Term Memory (LSTM) ……367
l -多様性 ……679, 685
M2Mセキュリティー ……593
M2Mネットワーク ……591ー593
M2Mプラットフォーム ……591ー593, 595, 596
Massive MIMO ……193, 195, 196
Massive Open Online Course (MOOC) ……389, 552
MEMS ……5, 95ー100, 144, 146, 147, 152, 611, 615, 721
Network as a Service (NaaS) ……281
Network Function Virtualization (NFV) …186, 209, 211ー213, 278, 281, 282, 592, 595, 697
Network in Network (NiN) ……367
Neural Turing Machine ……412
NoSQL……304, 321, 506, 509, 511, 701
NP完全問題 ……30, 54, 680
Online experiment ……389
Ontology-based data access and management (OBDA) ……378
OpenFlow ……189, 190, 209, 213, 281, 284
P≠NP予想 ……54ー56, 68
personal informatics ……350ー353
Physical Unclonable Function (PUF) ……650ー652

Platform as a Service (PaaS) ……249, 255, 277, 279, 282, 287, 288, 290
Privacy-Preserving Data Mining ……247, 678, 681, 682
Privacy-Preserving Data Publishing ……647, 678
Programmable System-on-Chip (PSoC) ……149, 150
Quality of Experience (QoE)…5, 186, 187, 215ー219, 221, 229, 697, 721
Quality of Service (QoS) ……186, 199, 201, 215, 217
Quantified Self ……350ー353
Reality 2.0 ……9
Recurrent Neural Net ……367
Resource Description Framework (RDF) …341, 342, 375, 377, 568
Secure Multiparty Computing (SMC) ……648, 649
Semantic Web ……373, 374, 377, 381, 387, 406, 630
Single Sign On ……646, 669
SLA保証 ……8
SOA……6, 266, 269, 270, 272, 273, 288, 626
Software as a Service（SaaS） ……288, 691
Software Defined Anything (SDx) ……289
Software Defined Data Center (SDDC) ……202, 204, 205, 289, 695
Software Defined Environment (SDE) ……277ー279, 281, 282, 695
Software Defined Network (SDN) ……186, 189ー191, 202, 209, 211ー213, 277, 278, 281, 321, 333, 592, 664, 695, 664, 695, 697
Software Defined X ……698
Solid State Device (SSD)……131, 134, 135, 259, 506, 508, 511, 689
SSH ……625, 707, 708
steep slopeデバイス ……90ー92
Storage Class Memory (SCM) ……131, 132, 649
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) ……603ー605, 608ー610
Systems of Engagement ……280
Trillion Sensors Universe ……151, 232, 614
t-近似性 ……680
Unified Resource Identifier (URI) ……375
User Experience (UX) ……235, 236, 697, 698
Webインテリジェンス……5, 355, 385ー390, 624, 627, 629, 722
Webコンピューティング ……263
xEMS ……199ー206
アジャイル・プラットフォーム技術 ……85
アジャイル開発 ……235, 236, 271, 291
圧縮センシング ……36, 37, 71, 80, 564, 565, 701
アナログフロントエンド回路 ……148, 150
アプリケーション・アーキテクチャー ……267, 268, 272, 279, 280
アムダールの法則 ……310
誤り訂正 ……29, 34, 36, 125, 127, 131
アルゴリズム的ゲーム理論 ……64, 66, 67
アルゴリズム理論 ……5, 29, 32, 53, 57, 59ー61, 63ー67, 75, 721
アルファベータ法 ……358, 359
暗号理論 ……5, 29, 31, 32, 41, 42, 44, 53, 72, 526ー529, 531, 681, 685, 721
イベント抽出 ……387, 424
意味解析 ……405, 423, 424, 434, 445ー449, 452, 453, 455, 535, 536, 627, 629
意味的暗黙性 ……374
インスティテューショナル・リサーチ (IR) …546, 553
ウエアラブルエレクトロニクス……109, 110, 112, 114ー116
ウエアラブルコンピューティング ……457, 480, 481, 483ー485, 700, 722
エキスパートシステム ……375, 378, 409, 629
エッジコンピューティング ……132, 186, 210, 229, 230, 586
エデュケーショナル・データマイニング (EDM) ……545, 553
エネルギーハーベスト ……97, 98, 132, 144, 171ー175, 178, 696, 721
エラスティック光ネットワーク ……188ー190
オープンアクセス ……507, 567
オープンガバメント……567, 575, 576
オープンソースソフトウエア ……492, 495, 567
オープンデータ ……23, 334, 374ー377, 534, 564ー570, 574ー577, 694, 699, 723
オプトアウト ……572ー575, 701
オプトイン ……572, 574, 575, 581, 701
音声エージェント ……438, 440ー442, 700
音声対話 ……5, 423, 424, 438ー443, 627, 629, 630, 700, 722
音声翻訳 ……405, 434ー436, 443, 630
オントロジー ……5, 355, 374ー383, 385, 387, 389, 404, 409, 570, 627, 629, 722
オンラインアルゴリズム ……61, 62, 67
オンライン機械学習 ……343, 563, 564, 587
カーフォトニクス ……101
顔認識 ……401, 445ー448, 517, 691
顔認証 ……445, 447, 448, 646, 669, 671
仮説生成 ……426ー428, 629
画像・映像処理 ……445
画像検索 ……446, 517
仮想組織 ……6, 8

仮想マシン ……255ー257, 279, 288, 289, 681
含意関係認識 ……426, 429
環境エネルギーフォトニクス ……101
関係抽出 ……385, 387, 389, 424, 428
感情・情動的知性 ……416, 419
完全準同型暗号 ……41, 43, 45, 527, 531, 648, 652
完全情報ゲーム ……357, 360, 361, 366
完全性 ……644, 648
機械学習 ……80ー82, 121, 157, 202, 305ー308, 355, 359, 365ー373, 394, 401, 403, 409ー413, 423, 433ー436, 438, 445, 452ー454, 506ー508, 513, 515ー517, 521, 545, 549, 563ー565, 587, 600, 647, 690, 699, 722, 726
機械翻訳 ……5, 372, 373, 401, 403ー406, 423ー425, 429, 433ー436, 630, 635, 700, 722
記号接地 ……392, 393, 397, 398, 409, 410, 413
記号創発 ……394, 399, 412, 417, 422
技術的特異点 ……408, 412, 413
機能補綴 ……464
キャプション生成 ……452ー455
強化学習 ……30, 361, 394, 442
共同認知 ……417
極端紫外線リソグラフィー ……89
巨大グラフ ……49, 50, 58, 641, 643, 696
近似アルゴリズム ……48, 61, 67, 70, 72, 73
組合せ最適化 ……47, 48, 50, 70, 73, 696, 697
組合せ論 ……5, 29, 32, 47ー51, 271
組込みシステム ……5, 22, 240ー245, 251, 259, 721
クライアント・サーバー ……6, 261, 263
クラウドコンピューティング ……6, 8, 21, 234, 264ー270, 277, 287ー289, 508, 509, 668, 670, 698, 722
クラウドセンシング ……521
クラウドソーシング …4, 236, 370, 376, 385, 387, 388, 424, 504, 508, 520ー524, 636, 640ー643, 702, 723
クラウドロボット ……392, 395
クラウドロボティクス ……393, 397, 398
グラフアルゴリズム ……48, 74, 249, 324
グラフィックス ……156, 243, 264, 303, 304, 457, 496ー499, 501, 502, 722
グラフマイニング ……319, 339, 341ー342
グラフ理論 ……47, 48, 50, 641, 680
クロスメディア分析 ……318
計算複雑度 ……5, 30, 32, 42, 43, 53ー57, 68, 70, 696, 721
計算論的情報理論 ……55, 56
計測型AI ……355, 356
軽量暗号 ……41, 44, 651
ゲームを解く ……361
検索エンジン ……47, 48, 227, 257, 345, 347, 385, 388, 389, 425, 427, 447ー449, 571, 573, 574
検索可能暗号 ……652, 682, 687
高移動度チャネル ……91
極超低消費電力回路 ……118
極低電圧回路 ……120
孤児著作物 (Orphan Works) ……572
個人適応 ……318, 598
コヒーレントイジング装置 127, 128
固有表現抽出 385, 387
コンテキスト 216, 387, 452, 480, 627, 629, 698, 699
コンテクスト ……319, 345ー347
コンテクスト型推薦 ……346
コンテナ ……255, 279, 281, 288ー291, 295
コンテンツ指向ネットワーク ……266, 230
サービスオリエンティッドコンピューティング ……6
サービス指向アーキテクチャー ……272, 230
再帰的自己改修 ……408
再特定化 ……579
サイドチャネル ……44, 650, 651
サイバー攻撃 ……211, 251, 603, 644, 646, 647, 661, 664, 673, 674, 688, 690, 703, 723
サイバー攻撃可視化技術 ……646, 674
サイバー攻撃情報共有技術 ……646, 674
サイボーグ的治療 ……460
サプライチェーンリスク ……606ー608
差分プライバシー ……322, 526, 527, 529, 531, 647, 678, 683, 685
サポートベクトルマシン (SVM) ……366
識別不可能性 ……527
時空間データマイニング ……5, 319, 339, 722
時系列データマイニング ……319, 339, 340, 342, 343
システムソフトウエア ……5, 232, 255ー257, 259, 260, 321, 721
次世代暗号 ……4, 18, 644, 648, 723
質問応答 ……372, 402, 404ー406, 411, 424, 426ー430, 452, 492, 493, 504, 630, 635, 636, 700
市民科学 ……640ー642
集合知 ……iii, 17, 326ー330, 375, 376, 468, 639ー642, 702
集積プラットフォーム ……86
出力プライバシー ……679, 683
準線形時間計算モデル ……62
状況依存解析 ……633, 634
条件付確率場 ……367
常識知識 ……375, 376
情報検索・推薦 ……5, 319, 345, 722
情報源符号化 ……33, 35, 37
情報指向ネットワーク ……226

情報処理フォトニクス……101, 105, 107
情報セキュリティー……18, 25, 28, 529, 574, 607, 644, 645, 654, 655, 658, 661, 664, 673, 675, 677, 688, 690, 696
情報理論　…5, 29, 31, 39, 42, 43, 55, 56, 72, 365, 721
証明可能安全性……41, 44
触覚……iii, 5, 457, 459, 469, 473ー479, 700, 722
シリコンフォトニクス……103ー107,160ー162
自律分散協調……587
人機一体……468ー470,700
シングルサインオン……669
真正性……644, 648, 691
深層学習　……80ー83, 159, 365, 367ー373, 389, 394, 403, 408ー414, 435, 452, 600, 699, 722
ストリームアルゴリズム……31, 62
ストリームコンピューティング……587
ストリーム処理……249, 252, 253, 306, 340, 341, 343, 507, 510, 511, 587
ストリームデータ処理……336, 507, 509ー511, 701
ストリームマイニング……319, 339ー342, 598, 699
ストレージシステム……132, 134, 135
ストレッチャブルエレクトロニクス……110
スパース数理モデル……36, 37
スパースモデリング……80ー83
スピン量子ビット……124ー127
スマートコモンズ……8, 694
スマートホーム……372, 594, 595, 606, 611ー614
スマートロック……612
スモールセル……193, 196
整数計画問題……30, 69, 70
生体認証……646, 669ー671
セキュアマルチパーティコンピューテーション　…648
セマンティックWeb……386, 689, 390, 568ー570
セマンティックウェブ……324, 374, 375, 378, 379, 381, 382, 385
線形計画問題……30, 69, 71, 72
センサー仮想化……333
センサーネットワーク……25, 108, 132, 148, 150, 151, 156ー158, 172, 174, 186, 318, 333ー337, 339ー341, 563, 584, 599, 611, 617ー619, 696, 701
センチメント分析……318, 387
全脳エミュレーション……412
相互情報量……34, 37
ソーシャルセンサー……318, 332, 334, 698
ソーシャルネットワーキングサービス……234, 257, 268, 272, 617, 694, 698
ソーシャルメディア　……81, 305, 318, 326, 327, 340, 347, 385ー390, 427, 598, 600, 699, 702, 722
属性ベース暗号……41, 43
ソフトウエア工学……5, 232, 234, 235, 238, 721
第4の科学……264, 695
第5世代移動体通信……210
大規模データ処理……iii, 248, 252, 258, 697
大規模並列プログラミング……248
大面積エレクトロニクス……111
耐量子計算機暗号……43
多端子情報理論……35
多変量テスト……389
探索型AI……355
知識型AI……355
知能ロボティクス……5, 355, 392, 395, 396, 463, 493, 495, 706, 708, 722
知のエコシステム……633, 634
知のコミュニティー　……639, 640, 723
知のコンピューティング……4, 12, 378, 383, 463, 624, 632, 636, 643, 694, 695, 702, 707, 723
知の社会性……417, 420
知の身体性……417, 419, 420
知の創造と創発……418
知のプラットフォーム　……624, 632, 633, 723
知のメディア　……624, 627, 633, 636, 723
長大なスイッチ文……409
超伝導量子ビット　……124ー128
通信路符号化……34, 35, 37
通信路容量……34ー38
データ・アーキテクチャー……267, 268, 272
データ圧縮技術……33
データアナリシス　……5, 31, 32, 53, 80, 721
データセンター仮想化……318
データ匿名化……525, 526
データベース管理システム……321
テクノロジー・アーキテクチャー……267, 268, 272
デジタル・フォレンジック……18, 644, 647, 688, 689, 691, 693, 702, 723
デジタルコヒーレント通信……127, 188, 191
デジタルファブリケーション……110
テレプレゼンス……457, 462, 463, 490
電源回路　……118, 119, 172, 175, 178, 180ー183
統計的学習理論……365
統計的機械翻訳……249, 404, 406, 433, 435, 436, 700
統合型AI……355, 397
統合的人工知能　……5, 355, 401ー403, 403, 406, 633, 636, 722
動的スクリプト言語……250, 252, 253
特徴抽出……513
ドメイン特化言語　……250ー252
ドライエッチング装置……96

付録

ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃対策技術 ……646, 674
トラストフレームワーク ……670, 672, 683
トリリオン・センサー ……97, 99
ドロップアウト ……81, 514, 515, 548, 550, 551, 556
トンネルFET ……90, 92, 120, 121
ニューラルネット……81, 306, 365, 367, 369, 393, 412, 416, 435, 453, 513ー516, 564, 600, 699
ニューロフィードバック ……460
認可 ……469, 471, 635, 668, 669, 670
人間拡張工学……5, 457, 468ー472, 700, 722
認証……41, 167, 201, 209, 279, 445, 447, 448, 592, 605, 607, 644, 646, 649, 650, 661, 662, 668ー672, 683, 703, 723
認知アーキテクチャー ……409ー411, 413, 414
認知ロボティクス ……393, 397, 410
ネットワーク仮想化 ……5, 186, 208ー213, 592, 596, 697, 721
ネットワーク情報理論 ……35, 37
脳型コンピューター ……212
脳型コンピューティング ……91, 92
パーソナライゼーション ……347, 490
パーソナルアシスタントシステム ……492
ハプティクス ……5, 473ー478, 722
パワーエレクトロニクス……85, 137ー142, 180, 182, 183
反復深化 ……358, 359
汎用ゲームプレイ ……362
汎用人工知能 ……5, 362, 393, 408ー415, 602, 627, 629, 699, 722
光インターコネクト ……103ー106
光インターポーザ……103, 105, 106
光配線 ……91, 102ー107
光パケット交換 ……189ー191
ビジネス・アーキテクチャー……267, 268, 272
非侵襲的脳計測 ……462
秘匿計算 ……647, 651, 652, 678ー682
秘匿性 ……41, 229, 644, 648
秘密計算 ……527, 528, 530, 531, 542, 653, 686
秘密分散 ……527, 528, 649, 680, 681
ヒューマンコンピュテーション……520, 522, 523
ヒューマンロボットインタラクション…393, 441, 457
表現学習 ……368, 371
表現獲得 ……394, 409, 410, 413
標的型攻撃対策技術 ……646, 673
評判分析 ……426, 428, 630
秘匿回路計算 ……680
ファストフォレンジック ……690
ファブリケーション ……5, 110, 457, 496ー499, 722
フィールド指向 ……584, 588
フェアユース……447, 533, 534, 572ー576, 701
フォグコンピューティング ……132, 186, 229, 230
フォトニクス …22, 86, 81, 101, 103ー107, 160ー162, 724
フォンノイマンボトルネック ……133
深い意味理解 ……373, 401ー404, 406, 453, 636, 699
不完全情報ゲーム ……357, 360ー362
複合イベント処理 ……319, 333, 701
物理複製困難関数 ……650, 651
プライバシー影響評価（PIA） ……580, 583
プライバシー保護データマイニング ……82, 83, 370, 679, 681, 685
プリンテッドエレクトロニクス …108ー116, 144, 721
ブレイン・マシン・インターフェース（BMI） ……457, 459, 722
フレキシブルRFIDタグ……112
フレキシブルエレクトロニクス ……108ー116, 143
フレキシブル個体識別素子 ……112
フレキシブル太陽電池 ……112
フレキシブルディスプレー ……110ー112, 116
フレキシブル半導体 ……110
プログラマブルアナログ ……149
プログラミングモデル ……5, 232, 235, 2482ー53, 256, 294, 295, 314, 563, 564, 697, 721
プログラム検証……75ー78
プロシューマー ……6
プロセスデザインキット（PDK） ……103
分散アルゴリズム ……63, 65, 67
分散処理基盤技術 ……506, 507, 509ー511, 701
分散データベース ……318, 321, 323, 332, 506, 509
ベイジアンネット ……367, 371
ベイズモデリング ……80, 82, 83
並列アルゴリズム……67
ヘッドマウントディスプレー（HMD） ……464, 480, 482, 485, 487, 497, 700
ヘテロジニアス・インテグレーション ……91, 92
包摂アーキテクチャー ……396
補綴工学 ……469
ボナンザ・メソッド ……359, 360, 362, 363
マルウエア対策技術……646, 673, 674
マルチコア光ファイバー ……188, 189
マルチタスク学習 ……368
マルチパーティープロトコル ……680
マルチモーダル学習 ……368
ミドルウエア …… 131, 200, 255, 257, 277, 279, 288, 289, 394, 397, 491ー493, 593, 611, 613, 721
ミニマックス法 ……357ー359
ミリ波デバイス……160, 166, 169

メインフレーム ……6
メカニズムデザイン ……64, 66, 67, 388, 522, 624, 640, 641, 702
メタマテリアルアンテナ ……160, 163ー165
メモリー LSI ……89, 90
文字認識 ……445, 533
モデルベース開発 ……243
モバイルコンピューティング ……5, 250, 252, 253, 265, 272, 305, 327, 329, 480, 722
モバイルヘルスプラットフォーム ……322
モンテカルロ木探索 ……360, 362, 363
ユーザー経験 ……235, 236, 697
ユーザー生成コンテンツ ……318, 326, 329, 330, 722
ユーザー生成メディア ……698
ユーザープロファイリング ……387, 389
ユーザーモデリング ……385, 387ー389
要求工学 ……234ー236, 727
要約型検索 ……346
ラーニング・アナリティクス (LA)……545, 553
ライブフォレンジック ……647, 690
ライフログ ……5, 319, 348, 350, 351, 353, 480, 545, 546, 549, 560, 571, 722
ランダムネスの脱乱化 ……56
離散構造 …5, 29, 32, 47, 49, 51, 58, 70, 637, 696, 721
離散最適化 ……68ー71, 73, 74
離散凸解析 ……48, 70, 73
リスクアセスメント ……645, 654ー659
リスクコミュニケーション ……645, 654ー659, 725
リスクマネジメント ……4, 18, 606, 607, 644, 645, 654ー659, 723
量子アニーリング ……65, 72, 126ー128, 697
量子アルゴリズム ……65, 67
量子イジングマシン ……124
量子鍵配送 ……649, 652
量子ゲート ……124
量子コンピューティング …5, 124, 126ー128, 697, 721
量子フォトニクス ……101, 106
レジリエンシー ……703
連続最適化 ……68ー71, 73, 74
レンダリング ……497ー502
ロジックLSI……89ー91, 93, 94
ロボカップ ……394, 395, 635
ワークロード ……5, 232, 264, 265, 279, 280, 289, 290, 303ー308, 722

（付録 5）研究開発の俯瞰報告書（2015 年）全分野で対象としている研究開発領域一覧

1．環境・エネルギー分野（CRDS-FY2015-FR-02）

俯瞰区分	研究開発領域	
エネルギー供給	化石資源利用の高効率発電（省化石資源消費・高効率化）	高効率火力発電
		高効率固体酸化物形燃料電池
	化石資源利用における二酸化炭素排出削減（低炭素化・温暖化抑制）	二酸化炭素回収・貯留システム（CCS）
	再生可能エネルギー導入による低炭素化の推進（低炭素化・温暖化抑制）	太陽光
		風力
		バイオマス（固体燃料、液体・気体燃料、生物設計）
		地熱
		海洋エネルギー（波力、潮流、海流、海洋温度差）
	高品位エネルギーの安定供給（エクセルギー、セキュリティ、負荷平準化、環境負荷低減）	重質油の高度利用
		低品位石炭資源の革新的な改質・輸送・転換技術とエネルギー・製鉄分野への利用
		天然ガスの高度利用（超高効率発電・天然ガスからのコプロダクション（トリジェネレーション）・LNG 冷熱利用技術による高効率化）
		非在来型石油・天然ガス資源の採掘技術
		全負荷帯での超高効率発電による CO_2 排出量抑制
		中温作動の固体電解質による新規プロセス
		分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム
		エネルギーネットワーク技術
	ものづくりの高効率化（製造業高効率化、低位熱高度利用）	排熱利用低温吸熱反応（吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒、低温排熱の高質化技術－エクセルギー再生）
		産業分野における熱利用、未利用熱の効率的利用
		新規石油化学製品製造ルート
	輸送用燃料の低炭素化	バイオマス利活用とバイオ燃料製造技術

エネルギー利用	多様な社会的要請に応えるエネルギーサービス	安全安心を支えるエネルギー利用
		労働、雇用や生活スタイルとエネルギーサービス
		健康、医療、介護、高齢者支援におけるエネルギーサービス
		省エネ対策がもたらすコベネフィットの評価と見える化
	エネルギー効率の高いサービスの提供	エネルギー消費実態の把握
		ネットワークとビッグデータの活用
		需要側資源を活用したエネルギー需給マネジメントシステム
		消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化
		熱利用実態を踏まえた機器高効率化
		建物躯体と建築設備の統合的高効率化
		次世代交通・運輸システム
		新しいエネルギー利用を社会に定着させる技術
	低炭素化を実現するエネルギー利用	次世代自動車の利用拡大と高効率化
		未利用中低温排熱源の効率的活用
		建築物における太陽エネルギー活用
		水素エネルギーの利用浸透
原子力	原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題	リスク評価と管理の手法
		原子炉の設計・建設・維持
		原子炉の保全学
		原子力に関する防災
		過酷事故への対応
		原子力基盤技術の開発
		新型炉（核融合含む）の研究・開発
		核燃料サイクルの技術
	原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題	高レベル放射性廃棄物の管理・処分
		低レベル放射性廃棄物の管理
		使用済み核燃料の管理
		プルトニウムの管理手法
		ウラン廃棄物の管理手法
		原子炉の廃止措置（デコミ）
		福島第一原子力発電所事故への対応

		環境修復の手法
		環境・人体への放射線影響（防護含む）
		原子力に関するリスクと人間・社会
		原子力に関する規制
		3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）
		原子力に関する国際的視野
		原子力の政治経済学
	原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題	国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略
環境	持続可能な人間居住	建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）
		都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）
		モビリティとその管理
		安全な水の供給（水道と安全性確保）
		水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）
		人間居住による環境負荷（GHG 排出、水、大気への排出、緑地の喪失）
		都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）
		開発途上国の人間居住と適正技術
	生態系サービスの適正管理	生物多様性の保全と持続的利用
		陸域資源と生態系管理（含む陸水）
		沿岸域および海洋の資源と生態系管理
		流域レベルの生態系管理（森林から海まで）
		生物多様性及び生態系サービスの評価
		生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理
	持続可能な生産と消費	製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）
		サプライチェーンの環境マネジメント
		LCA に基づく生産と消費管理
		廃棄物の発生抑制
		リサイクル技術（都市鉱山含む）
		水の循環利用技術
		有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS 含む）

		元素の循環と利用（リン・窒素）
		開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）
	災害による環境への影響低減と環境の再創造	自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク
		人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク
		災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策
		災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法
		災害廃棄物処理と利活用
		自然環境の回復過程の促進
		社会環境の再創造手法
	観測・計測とその情報に基づく環境管理	地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）
		地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）
		環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

2．ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2015-FR-03）

俯瞰区分	研究開発領域
基礎生命科学	ゲノム
	バイオインフォマティクス
	エピゲノム
	老化
	免疫
	代謝
	発生・再生科学
	脳科学
	臓器連関
	生物時計
	バイオメカニクス
	分子イメージング
次世代基盤技術	*in silico*創薬技術
	構造生命科学
	システムズバイオロジー（創薬）
	トランスオミクス（統合オミクス解析）
	新規バイオマーカー
	マイクロバイオーム
	創薬スクリーニング技術
	メディシナルケミストリー
	ドラッグ・リポジショニング
	剤型技術（徐放化など）
	ゲノム編集
	モデル細胞
	モデル動物
	生体イメージング
医薬品など	低分子医薬品
	中分子医薬品
	高分子医薬品（抗体医薬）
	高分子医薬品（核酸医薬）
	がん免疫治療
	治療ワクチン

	遺伝子治療
	再生医療
	レギュラトリーサイエンス（医薬品）
医療・介護・福祉機器	診断機器
	治療機器
	介護・福祉機器
	ウエアラブルデバイス
	レギュラトリーサイエンス（医療機器）
健康医療全般	疫学・コホート
	循環器疾患
	がん
	免疫疾患
	感染症
	精神疾患
	神経疾患
	感覚器疾患
	運動器疾患
	小児疾患
	希少疾患
	医療情報
	臓器シミュレーター
	個別化医療
	予防
	医療経済評価、医療技術評価
	健診・健康管理
	医療保障制度
グリーンバイオ	作物増産技術
	持続型農業
	高機能高付加価値作物
	食料安全保障概念の変遷と政策対応の課題
	バイオリファイナリー
	化成品原料／バイオ化学品（再生可能化学品ならびにバイオプロセス製造品）
	バイオ医薬品・食品原料

	資源・レアメタル回収
	生物多様性・生態系
	生態適応
	環境浄化
ヒトと社会	ヒト由来試料
	幹細胞・再生医科学に伴う倫理的、法的、社会的課題
	脳・神経倫理
	デュアルユース、バイオセキュリティ、生物化学兵器、バイオテロ対策、など
	研究倫理
	リテラシー・アウトリーチ
	被験者保護
	終末期医療・ケア

3．情報科学技術分野（CRDS-FY2015-FR-04）

レイヤー	俯瞰区分	研究開発領域
基盤	基礎理論	情報理論
		暗号理論
		離散構造と組合せ論
		計算複雑度理論
		アルゴリズム理論
		最適化理論
		プログラム基礎理論
		データアナリシス
	デバイス・ハードウエア	集積回路技術
		MEMS デバイス技術
		フォトニクス
		プリンテッドエレクトロニクス技術
		極低電力 IT 基盤技術
		量子コンピューティングデバイス
		メモリーとストレージ
		アクチュエーター
		センサー
		アナログ回路
		情報処理
		通信
		エネルギーハーベストデバイス
		電源
	通信とネットワーク	光通信技術
		無線通信技術
		ネットワーク・エネルギーマネジメント
		ネットワーク仮想化技術
		通信行動と QoE（Quality of Experience）
		情報ネットワーク科学
		新たな情報流通基盤
	ソフトウエア	ソフトウエア工学
		組込みシステム
		プログラミングモデルとランタイム
		システムソフトウエアとミドルウエア

	IT アーキテクチャー	エンタープライズ・アーキテクチャー
		ソフトウエア定義型アーキテクチャー
		クラウドコンピューティング
		モバイルコンピューティング
		ワークロード特化型アーキテクチャー
		ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）
	IT メディアとデータマネジメント	ビッグデータの統合・管理・分析技術
		ユーザー生成コンテンツとソーシャルメディア
		センサーデータ統合検索分析技術
		時空間データマイニング技術
		次世代情報検索・推薦技術
		個人ライフログデータの記録・利活用技術
	人工知能	探索とゲーム
		機械学習、深層学習
		オントロジーと LOD
		Web インテリジェンス
		知能ロボティクス
		統合的人工知能
		汎用人工知能
		認知科学
	ビジョン・言語処理	大規模言語処理に基づく情報分析
		言語情報処理応用（機械翻訳）
		言語情報処理応用（音声対話）
		画像・映像の意味理解
		言語と映像の統合理解
	インタラクション	BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）
		人間拡張工学
		ハプティクス（触覚）
		ウエアラブルコンピューティング
		HRI（ヒューマン･ロボット・インタラクション）
		グラフィックス・ファブリケーション

戦略	ビッグデータ	ビッグデータ基盤技術
		ビッグデータ解析技術
		クラウドソーシング
		プライバシー保持マイニング技術
		IT メディア分野におけるビッグデータ
		ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
		教育とビッグデータ
		社会インフラとビッグデータ（交通、ヘルス、防災など）
		オープンデータ
		著作権とビッグデータ
		ビッグデータとプライバシー
	CPS/IoT	CPS/IoT アーキテクチャー
		M2M
		社会システムデザイン
		CPS/IoT セキュリティー
		応用と社会インパクト
		ものづくりと IoT
	知のコンピューティング	知のメディア
		知のプラットフォーム
		知のコミュニティー
	セキュリティー	次世代暗号技術
		IT システムのためのリスクマネジメント技術
		要素別セキュリティー技術
		認証・ID 連携技術
		サイバー攻撃の検知・防御次世代技術
		プライバシー情報の保護と利活用
		デジタル・フォレンジック技術

4．ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2015-FR-05）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー	太陽電池
	人工光合成
	燃料電池
	熱電変換
	蓄電デバイス
	パワー半導体
	グリーン触媒
健康・医療	生体材料（バイオマテリアル）
	再生医療用材料
	ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）
	バイオ計測・診断デバイス
	イメージング
	バイオイメージング
	生体イメージング
社会インフラ	構造材料
	構造材料（金属系）
	構造材料（複合材料）
	水処理用分離膜
	高温超伝導送電
	センシングデバイス・システム
	放射性物質の除染・減容化など基盤的技術
情報通信･エレクトロニクス	超低消費電力ナノエレクトロニクス
	二次元機能性原子薄膜（グラフェンなど）
	スピントロニクス
	フォトニクス
	有機エレクトロニクス
	ＭＥＭＳ／ＮＥＭＳ
	異種機能三次元集積チップ

基盤科学技術	界面制御	
	空間・空隙構造制御	
	分子技術	
	バイオミメティクス	
	分子ロボティクス	
	元素戦略・希少元素代替技術	
	データ駆動型材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）	
	トップダウン型プロセス（半導体超微細加工）	
	ボトムアップ型プロセス	
	ナノ計測	
		走査型プローブ顕微鏡（SPM）
		電子顕微鏡
		放射光・X 線・粒子線
		超高速時間分解分光
	物質・材料シミュレーション	
	ナノテクノロジーのリスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容	

５．システム科学技術分野（CRDS-FY2015-FR-06）

俯瞰区分	研究開発領域
モデリング	先端的数理モデリング
	先端的統計モデリング
	行動のモデリングとソフトコンピューティング
	エージェント・ベース・シミュレーション
	データ設計
	データ同化
	モデルの正則化・最適化
	機械学習・データマイニング
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価
制御	学習制御／適応制御
	ロバスト制御
	最適制御／予測制御
	分散協調制御
	確率システム制御
	ハイブリッドシステム制御
	大規模ネットワーク制御
	異常検出
	環境エネルギーとシステム制御
	都市インフラとシステム制御
最適化	最適化コアモデルと関連諸技術
	連続的最適化
	離散的最適化
	最適化計算
	最適化モデリング
	最適化ソフトウェアと応用
ネットワーク論	複雑ネットワークおよび総論
	機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析
	ネットワークに関する離散数学
	ネットワーク解析用ソフトウェア

複雑システム	複雑系生命科学
	複雑系脳・神経科学
	複雑系数学
	複雑系物理学
	複雑系数理モデル学
	複雑系社会学
	複雑系経済学
サービスシステム	サービス価値創造基盤システム
	サービスシステムモデル
	価値共創過程のモデリング
	サービスデザイン
	価値共創の測定・評価
	製品サービスシステム（Product-Service Systems）
	地域・コミュニティサービスシステム
	対人サービスシステム
	IT サービスシステム
システム構築方法論	合意形成
	問題構造化技法
	高信頼要求工学
	システムアシュアランス
	コンセプトエンジニアリング
	System of Systems（SoS）アーキテクチャ
	ライフサイクルマネジメント
	プロジェクトマネジメント
	品質マネジメント

謝　辞

本報告書を作成するにあたっては、研究開発戦略センター（CRDS）内外の多くの方々の継続的なご協力を賜った。分野全体を俯瞰し、区分を設定するに当たっては、情報科学技術ユニット在籍の特任フェローの方々から数々の有益な助言や示唆をいただいた。区分総括の方々からは有益なご助言をいただき、また建設的な議論によって区分内の研究領域の設定を行なうことができた。各領域における現状と課題、国際比較などに関する調査分析については、多くの有識者の方のご協力をいただいた。さらには、CRDS 関係者には、俯瞰作業の各段階において常に適切なアドバイスを賜った。紙面の都合でこれらの方々すべてのお名前を挙げることができないが、ここに深く感謝の意を表すとともに厚く御礼を申し上げる。

研究開発戦略センター
情報科学技術ユニット一同

■研究開発の俯瞰報告書作成メンバー(2015 年 3 月時点)■

岩野　和生	上席フェロー
喜連川　優	特任フェロー
木村　康則	特任フェロー
桜井　貴康	特任フェロー
志度　昌宏	特任フェロー
竹内　　健	特任フェロー
徳田　英幸	特任フェロー
西野　壽一	特任フェロー（～2014 年 8 月）
丸山　　宏	特任フェロー
森川　博之	特任フェロー
山口　高平	特任フェロー（2014 年 12 月～）
嶋田　一義	フェロー（～2014 年 3 月）
鈴木　慶二	フェロー
高島　洋典	フェロー
土井　直樹	フェロー
的場　正憲	フェロー
宮下　　哲	フェロー
茂木　　強	フェロー

※お問い合わせなどは下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2015-FR-04

研究開発の俯瞰報告書

情報科学技術分野(2015年)

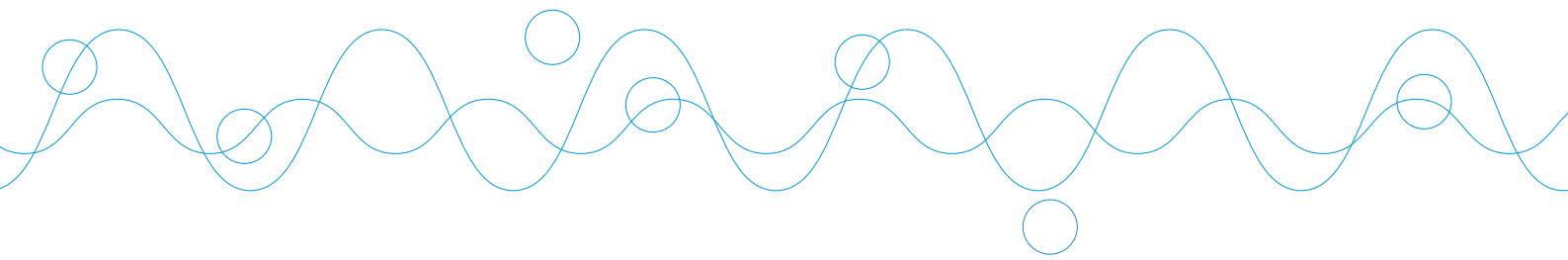
Panoramic View of the Information Science and Technology Field (2015)

平成 27 年 4 月　April 2015
ISBN 978-4-88890-453-7

国立研究開発法人　科学技術振興機構　研究開発戦略センター
システム・情報科学技術ユニット
Systems/Information Science and Technology Unit, Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076　東京都千代田区五番町７番地
電　　話　03-5214-7481
ファックス　03-5214-7385
http://www.jst.go.jp/crds

©2015　JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN978-4-88890-453-7