CRDS-FY2012-FR-05

研究開発の俯瞰報告書

電子情報通信分野（2013年）

Panoramic View of the Electronics, Information and Communication Field (2013)

独立行政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

エグゼクティブサマリー

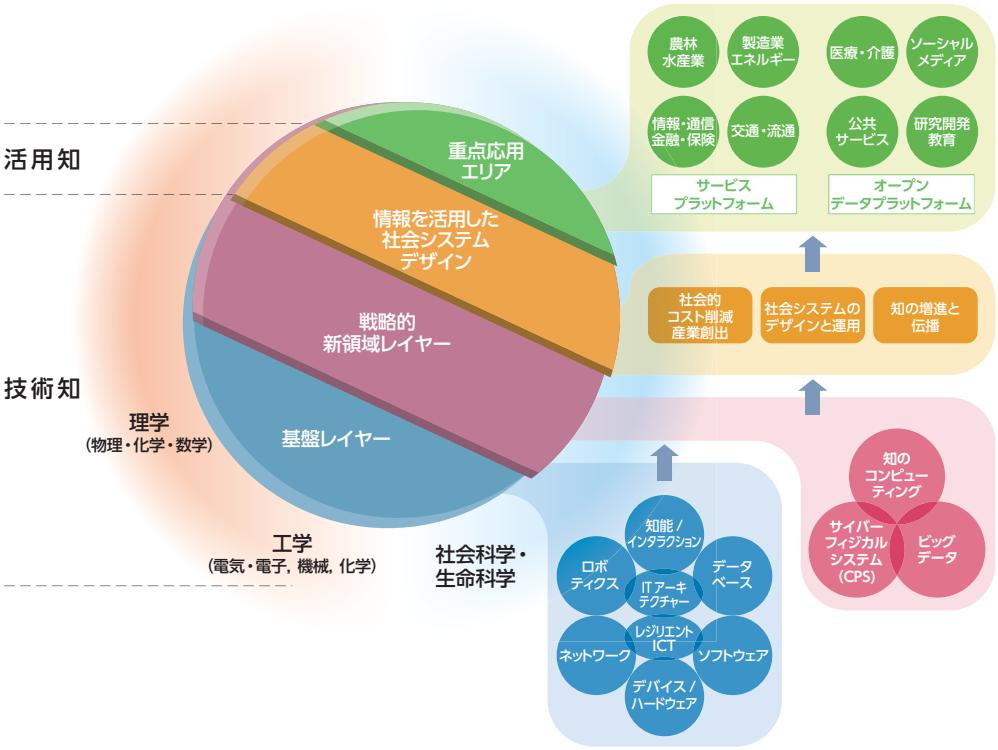
電子情報通信分野は、電子部品・デバイスから情報通信機器や組込み機械、さらには情報サービスまでの広範な事業を支える技術分野である。同時に、その汎用ツール的な性質から第二次、第三次産業はいうに及ばず、従来は直接関係ないと思われていた第一次産業や社会インフラ、社会システムの実装にまで深くかかわっている。本書は、電子情報通信分野の技術を、社会とIT（Information Technology）の観点、とくに、社会システムをデザインするという観点で戦略的に取り組むべき新領域と、それを下支えする基盤レイヤーに整理し、それぞれのレイヤーで今後注目すべき研究開発領域を特定した上で調査した結果をまとめたものである。

電子情報通信分野の範囲と構造を下図に示す。基盤レイヤーは、デバイス／ハードウェア、ネットワーク、ロボティクス、ソフトウェア、データベース、知能／インタラクションなど学問的に体系化された領域と、これらを横断的に関係付ける技術としてのITアーキテクチャー、および、非機能要件としてのレジリエントICTから成る。

今回は、これに加えて、情報を活用した社会システムデザインに資する技術領域として、サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）、ビッグデータ、

および、知のコンピューティングを特定し、戦略的新領域レイヤーとして基盤レイヤーの上位に配置した。

電子情報通信分野の俯瞰図



電子情報通信分野は、半導体、回路実装、通信、ソフトウェアの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、今日、コンピュータとネットワークとして広く社会に浸透している。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の役割が提供者であるという「プロシューマー（生産消費者）」の形へ大きく変化した。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、実世界と有機的に関係、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、人間の知的活動の研究の成果は、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果たし、革新的な進歩を遂げる科学的成果を有効に速く社会に伝播することにより、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、ソフトウェア、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＞

2011 年 6 月と 11 月に世界最高速コンピュータシステムにランキングされた「京」、各種組込みソフトウェア、大規模データ処理、自然言語処理、ロボットなどの技術は、世界でも最高水準にある。2011 年 8 月に閣議決定された第四期科学技術基本計画では、情報通信技術は「科学技術の共通基盤の充実、強化」の一部に位置づけられている。一方で、2012 年 7 月に総務省が公開した Active Japan ICT 戦略では、ICT 開発指標や電子政府発展指標での韓国に対する大きな遅れ、世界における日本 ICT 企業の輸出額シェア及び存在感の低落など、下げ止まらない ICT 国際競争力が指摘されている。

＜米国＞

全ての情報通信技術分野で世界をリードし、市場を牽引するリーダーでもある。CPS や Big Data という言葉も米国から生まれた。政府としては、教育、科学研究、インフラ整備をイノベーション戦略の基盤に据え、情報通信分野においては、「先進的情報技術エコシステムの開発」を米国のイノベーションの構成要素の一部に掲げ、「国家規模で先端通信ネットワークの開発」「ブロードバンドアクセスの拡大」「配電網の近代化」「サイバー

スペースの安全化」「次世代情報通信技術の研究支援」の 5 つを投資対象に挙げている。

＜欧州＞

携帯機器の組込みプロセッサの世界標準となっている ARM コアのほか、Kinect センサ、触覚インタフェース等、基礎研究の分野で世界的に知られる研究開発成果がある。言語も文化も異なる複数の国家から成る欧州連合は、高速インターネットに支えられたデジタル単一市場から持続可能な経済的・社会的利益を提供することを目標に、産・官・学の協働が欧州委員会のファンディングの枠組み (FP7: the 7th Framework Program) で活発に行われている。

＜中国＞

スーパーコンピュータ天河一号 A の世界最速記録等、政府主導で情報通信技術分野の研究開発成果を着実に挙げている。自然言語理解や意味処理の研究水準も高い。温家宝首相がコンセプトを示した「物聯網（ウーレンワン）」（Internet Of Things；モノのインターネット）は、第 12 次五カ年計画にて戦略的新興産業の次世代情報技術の目玉の一つとされており、政府による政策誘導の下、北京、天津、武漢、上海等各地に産業連盟が次々と設立され、交通や物流など急激に成長する都市の問題を解決するための活動が各地で行われている。

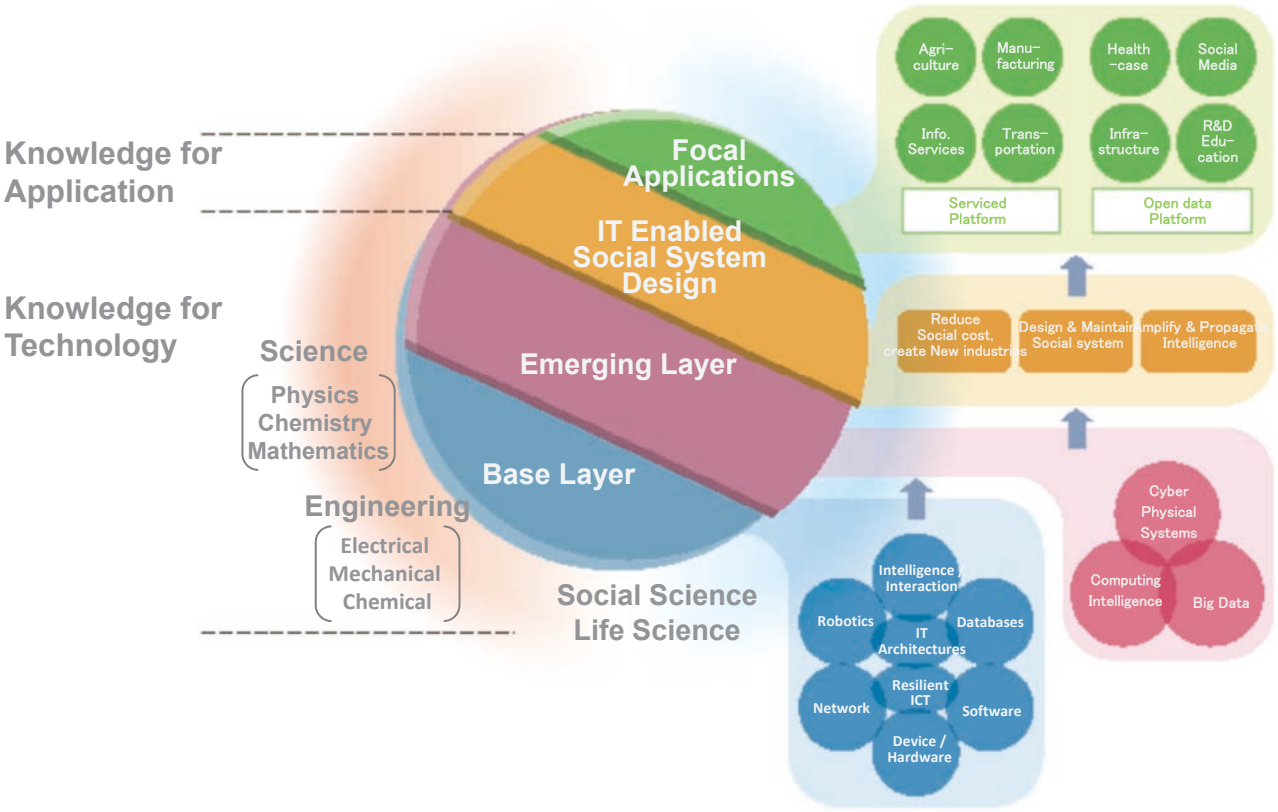
＜韓国＞

サムスンを中心としたグローバル企業が、半導体チップ、スマートフォン、フラットパネルディスプレイの分野で高い世界シェアを確保し、基盤技術の競争力が急速に向上している。ロボット試験普及事業や大規模スマートグリッド実験等、知識経済省を中心とした政府の強いリーダーシップの下、新しい市場の開拓にも精力的に取り組んでいる。韓国の情報通信技術の成長戦略におけるキーワードは「IT Convergence」である。既存の産業技術と IT との融合を IT Convergence と呼んでいるが、これは中国の「物聯網」や米国の CPS にも共通する概念である。

Executive Summary

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

The perspective view of ICT and its focal research areas are shown in Fig.1. The base layer is a collection of existing disciplines of Device / Hardware, Network, Robotics, Software, Databases, and Intelligence / Human Interaction, as well as the IT Architecture which associates technologies across boundaries, and the Resilient ICT which is non-functional requirements for all of them. In the strategic emerging layer, three disciplines are identified as the new technologies which contribute especially to the ICT enabled social system design: Cyber Physical Systems (CPS), Big Data, and Intelligence Computing.



Owing to the various technological innovations from the semiconductor, circuit mounting, communication, software, to the systems integration, ICT accomplished remarkable progress in respect of cost, performance and benefit. Today computers and networks have widely permeated human society. Technical progress is continuing progressing all things dramatically. 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 System 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. Explosion large scale of 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 structure 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, the innovative scientific results propagate quickly into society, and the ICT impact society properly. The research and development of ICT is essential and vital not only in the traditional disciplines of electronics, software, and network but also in the new areas of human behavior, business activity design and overall social activity.

Major characteristics of Japan, US, EU, China and Korea in the ICT field are as follows:

<Japan>

Japanese levels of fundamental technologies have been internationally very high. The typical examples are high performance computing, where the super computer system "K-computer" won the top ranking in 2011, embedded systems, big data processing, natural language processing, and robotics. In the 4th Basic Plan for Science and Technology endorsed by the Cabinet, ICT has been promoted as a part of "Enrich and Strengthen the common platform of the science and technologies". On the other hand, the Ministry of Internal Affairs and Communications sounds the warning for the decay of the Japanese competitiveness in terms of ICT development indicators, e-government promotion indicators (behind Korea), and the export share and presence among global ICT industries ("ICT strategy for an Active Japan", July

2012).

<US>

US is the world leader in all fields of ICT research and development in as well as the market leader. The hot keywords (concepts) like CPS (Cyber Physical Systems) or Big Data came from US. US government enforces education, fundamental research, and physical & virtual infrastructure as the foundations of its innovation strategy. In order to develop advanced information technology ecosystem, as one of the building blocks of American Innovation, they took five investment areas of "Develop a nationwide, state-of-the-art communication network", "Expand access to broadband", "Modernize the electric grid", "Secure cyber space", and "Support research for next-generation information and communications technology".

<EU>

EU has many world-famous achievements in applied and basic researches, i.e. ARM CPU core that is the world standard of embedded processor for mobiles, Kinect sensor or haptic interfaces. EU consisting of many nations with different languages and cultures aims to deliver sustainable economic and social benefits from the Digital Single Market based on ultra fast internet and interoperable applications. EU has promoted cooperation actively among industries, public bodies and academia with its own funding scheme (FP7: the 7th Framework Programme).

<China>

China has been achieving steady results in ICT research and development projects led by the government as seen in the world record of a processing speed of Tianhe-I (Milky Way Number One) in 2010. The research levels of natural language processing and semantic processing are high. The concept of "Wu Lian Wang" that Chinese Premier Wen Jiabao presented is one of the highlights of the next-generation information technology for strategic emerging industries in the "12th five year plan" in China. Under the concept, many industry confederations are founded successively in Beijin, Tianjin, Wuhan, and Shanghai, to challenge various problems concerning the rapidly growing city.

<Korea>

Korea's competitiveness of the fundamental technologies in ICT is increasing rapidly. Global companies as represented by Samsung are keeping high shares of the world market in the fields of semiconductor chips, smart phones, and flat panel displays. Korea is also striving new markets in the fields of robotics, smart grid services etc. under the strong leadership of the Ministry of Knowledge Economy. A keyword of the Korean growth strategy in ICT field is "IT Convergence", the integration of conventional industrial technologies and IT, which is a similar concept with "Internet of Things" in China or "Cyber Physical Systems (CPS)" of US.

目　　次

エグゼクティブサマリー

1．目的と構成 …… 1
1.1　俯瞰報告書作成の目的 …… 1
1.2　構成 …… 1

2．俯瞰対象分野の全体像 …… 2
2.1　分野の範囲と構造 …… 2
2.1.1　分野の範囲 …… 2
2.1.2　俯瞰の枠組 …… 2
2.1.3　研究開発領域 …… 3
2.1.4　分野の歴史 …… 4
2.2　分野の歴史、現状、及び今後の方向性 …… 7
2.2.1　分野を取り巻く環境変化 …… 7
（1）進歩し続ける IT と産業創出に向けて …… 7
（2）膨大化するデジタルデータ …… 8
（3）融合する物理世界とサイバーの世界 …… 9
（4）社会システムに浸透する IT(光と影) …… 10
（5）我が国の直面する課題 …… 10
2.2.2　分野の方向性 …… 12
（1）注目すべきトレンド …… 12
（2）社会・経済的インパクト …… 12
（3）戦略的新領域レイヤー …… 14
（4）基盤レイヤー …… 16
2.3　ファンディング、研究コミュニティ、諸外国の状況 …… 26
2.3.1　ファンディングの実態と今後 …… 26
（1）第 3 期科学技術基本計画までの戦略、成果 …… 26
（2）第 4 期科学技術基本計画における位置づけ …… 26
2.3.2　研究コミュニティ …… 27
2.3.3　諸外国・地域における研究ビジョンや戦略 …… 28
（1）米国 …… 28
（2）欧州委員会 …… 32
（3）中国 …… 36
（4）韓国 …… 37

3. 研究開発領域 …… 40
3.1 デバイス／ハードウェア …… 40
3.1.1 アンビエント・アジャイル・プラットフォーム …… 42
3.1.2 極低電力 ICT 基盤技術 …… 47
3.1.3 ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術 …… 53
3.2 ネットワーク …… 58
3.2.1 エラスティックネットワーク …… 60
3.2.2 グリーンネットワーク …… 65
3.2.3 フィールド指向ネットワーク …… 70
3.3 ソフトウェア …… 74
3.3.1 ソフトウェア工学 …… 76
3.3.2 プログラミングモデルとランタイム …… 83
3.4 ロボティクス …… 89
3.4.1 リアルワールドにおける機能提供技術 …… 95
3.4.2 QoL を向上させるためのロボット技術
（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）…… 103
3.4.3 ロボット技術の社会的受容 …… 110
3.5 知能 / インタラクション …… 118
3.5.1 ヒューマンインターフェイス・インタラクション …… 121
3.5.2 データ認知科学またはソーシャル e サイエンス …… 129
3.5.3 言語、メディア理解 …… 133
3.5.4 知能システムの基礎 …… 141
3.6 データベース …… 149
3.6.1 モバイル・センサデータベース …… 152
3.6.2 トレーサビリティ、データプロヴェナンス、
不確実データのためのデータベース技術…… 158
3.6.3 グラフ・ストリームマイニング …… 164
3.6.4 データのセキュリティとプライバシー …… 169
3.6.5 ソーシャル・クラウドソース …… 176
3.7 IT アーキテクチャ …… 182
3.7.1 社会システムアーキテクチャ …… 185
3.7.2 柔軟なアーキテクチャ …… 191
3.7.3 CPS アーキテクチャ …… 198
3.8 CPS（Cyber Physical Systems） …… 204
3.8.1 センシング …… 206
3.8.2 アクチュエーション …… 212
3.8.3 プロセッシング …… 218
3.9 CHS（Cyber-Human Systems） …… 224
3.9.1 人間・社会のモデリング …… 226
3.9.2 ソーシャルコンピューティング …… 233

3.9.3　ポリシー（プライバシー） …… 239
3.9.4　ポリシー（著作権） …… 244
3.10　ビッグデータ …… 248
3.10.1　大量データ処理プラットフォーム技術 …… 250
3.10.2　データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術 …… 255
3.10.3　ライフサイエンス分野におけるビッグデータ …… 263
3.10.4　天文科学分野におけるビッグデータ …… 269
3.10.5　IT メディア分野におけるビッグデータ …… 274
3.11　人工知能 …… 280
3.11.1　統合的人工知能 …… 282
3.11.2　強い人工知能 …… 289
3.12　レジリエント ICT …… 292
3.12.1　レジリエント・システムソフトウェア …… 295
3.12.2　レジリエントネットワーク …… 303
3.12.3　レジリエントデバイス …… 308
3.12.4　レジリエント情報社会 …… 312

専門用語説明 …… 319

（付録 1）　検討の経緯 …… 327
（付録 2）　執筆協力者一覧 …… 329
（付録 3）　索引 …… 332
（付録 4）　研究開発の俯瞰報告書（2013 年）
全分野で対象としている研究開発領域一覧 …… 335

1．目的と構成

1.1　俯瞰報告書作成の目的

この報告書は、電子情報通信分野の俯瞰結果を取りまとめたものであり、JST研究開発戦略センター（CRDS）が作成する俯瞰報告書（全7冊）の一部をなすものである。

俯瞰報告書は、CRDSが政策立案コミュニティ及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研究開発の大きな流れを、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。

俯瞰報告書は、各分野における研究開発の方向性や主要な研究開発領域、更に国際的なわが国のポジションを把握するのに役立つ。また、複数分野の報告書を使うことで、複数分野にまたがる新しい切り口からの研究開発戦略を立案することにも役立つ。俯瞰報告書は、一義的には、CRDSにおける研究開発戦略立案に活用されるが、当該分野の動向を深く知りたいと考える政策決定者、行政官、企業人、大学・独法関係者、学生などに大いに役立つはずである。また、研究者にとっても、自身の専門分野を超えた範囲の状況を知る上で有益である。

1.2　構成

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するためには、科学技術に関する様々な研究開発全体の俯瞰が必要である。CRDSでは、研究開発が行われているコミュニティ全体を便宜的にいくつかの分野に分け、その分野ごとの研究開発状況を整理し可視化した俯瞰報告書を作成した。

具体的には、①環境・エネルギー分野、②ライフサイエンス・臨床医学分野、③電子情報通信分野、④ナノテクノロジー・材料分野、⑤システム科学技術分野、以上の5分野である。これらは、CRDSの内部組織であるユニットに対応している。「システム科学技術分野」は、これまで、わが国の科学技術政策において、特に重視されてこなかったが、CRDSとしてその重要性に着目し、1分野としてとりあげた。

俯瞰報告書本編は、上記5分野別に作成される。更に、本編のほか、データ編として「データで見る俯瞰対象分野」、「主要国の研究開発戦略」が付随し、合計で7冊からなる。

以下、本報告書の「2．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し、そこから当該分野の主要研究開発領域をどう導出したかを説明しており、いわば我々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している。この章は、その後の章のコンテンツ全ての総括としての位置づけを持つ。

「3．研究開発領域」では、俯瞰対象分野に存在する研究開発領域の現状を網羅的にリストアップして概説する。専門家との意見交換やワークショップを通じて、研究開発現場で共有されている情報をできるだけ具体的に記録する。また、研究開発領域ごとに主要国（原則、日本、米国、欧州、中国、韓国）を対象とした国際比較も行っている。

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

電子情報通信分野は、電子部品・デバイスから情報通信機器や組込み機械、さらには情報サービスまでの広範な事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。本書では電子情報通信分野の技術を、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新領域と、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注目すべき研究開発領域を特定した上で調査した。

2.1.2 俯瞰の枠組

電子情報通信技術分野の範囲と構造を図1に示す。電子情報通信分野の知見は、要素技術としての技術知、それを活用するための社会システムデザインとしての活用知、および重点応用エリアとしての事業知に大別した。

技術知は、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「戦略的新領域レイヤー」の二つに分けて整理した。

活用知は、当分野の将来展望において、電子情報通信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」に整理した。

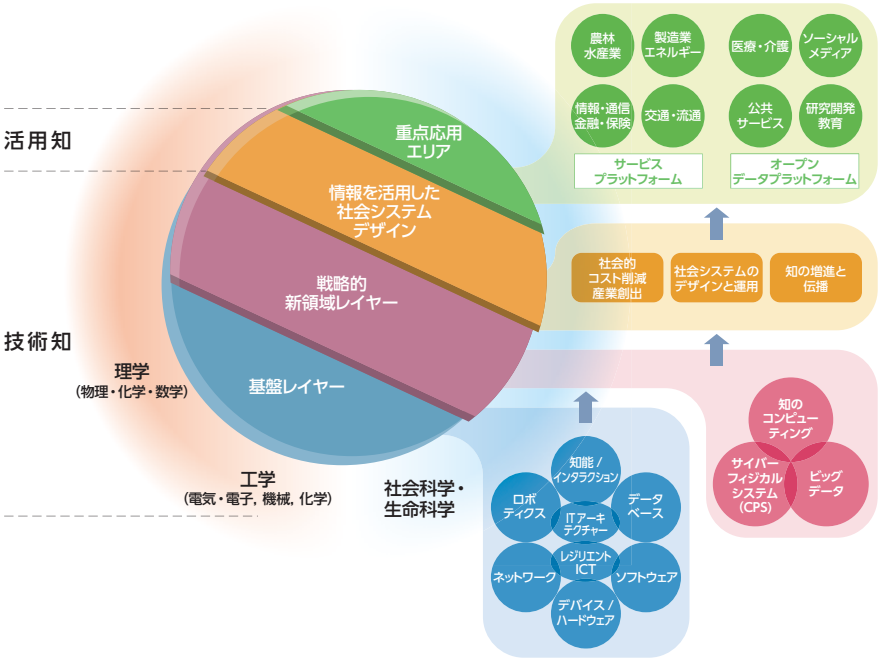


図1 電子情報通信分野の俯瞰図

事業知は、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。

基盤レイヤーは、デバイス／ハードウェア、ネットワーク、ロボティクス、ソフトウェア、データベースの上に、知能／インタラクションというカテゴリを明示し、人工知能の研究や、機械と人間とのインターフェイスを意識した研究にも注目が集まり始めていることを考慮した。最後に、これら基盤技術に横断的に関係付ける技術としてITアーキテクチャにて要素技術を組み合わせてシステム化するための技術を、また、非機能要件としてのレジリエンスにかかわる技術をレジリエントICTに集約した。

これに加えて、電子情報通信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技術開発単位として、サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）、知のコンピューティング、およびビッグデータという区分を新たに定義し、戦略的新領域として上位レイヤーに配置した。

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。

2.1.3 研究開発領域

戦略的新領域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と図3に示す。

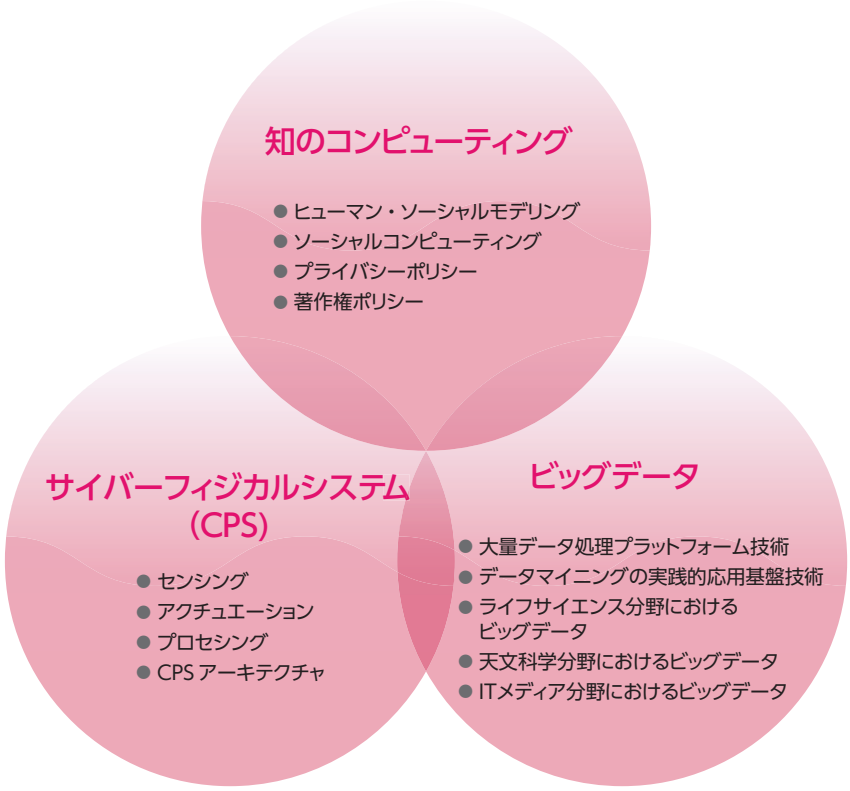


図2 戦略的新領域の研究開発領域

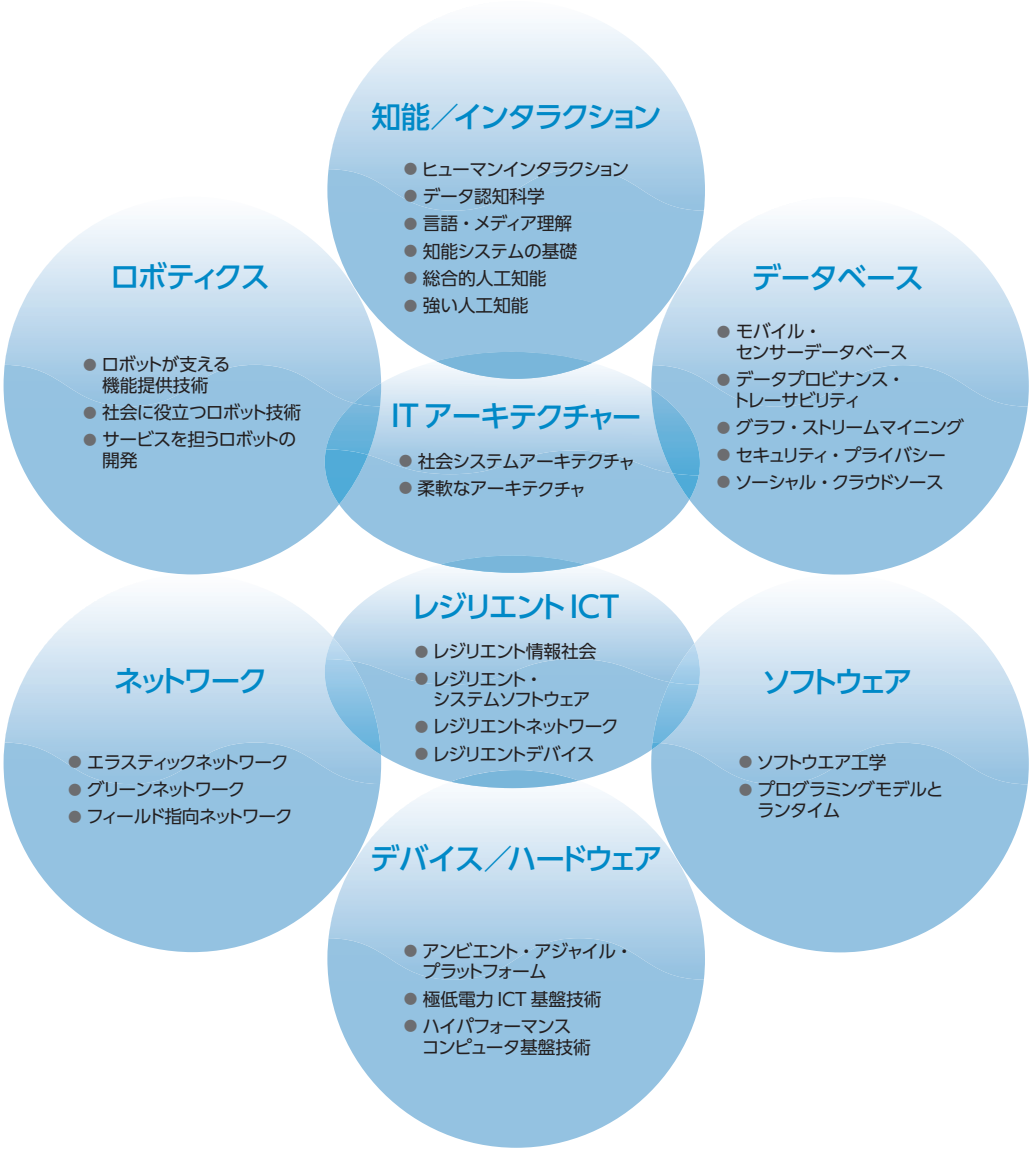


図３ 基盤レイヤーの研究開発領域

2.1.4 分野の歴史

コンピュータは、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 Network 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ェ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ェ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、のち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、実世界と有機的に関係、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、電子情報通信分野の技術開発や研究の対象は、半導体、ソフトウェア、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。

この一連の流れを示したものが図4である。

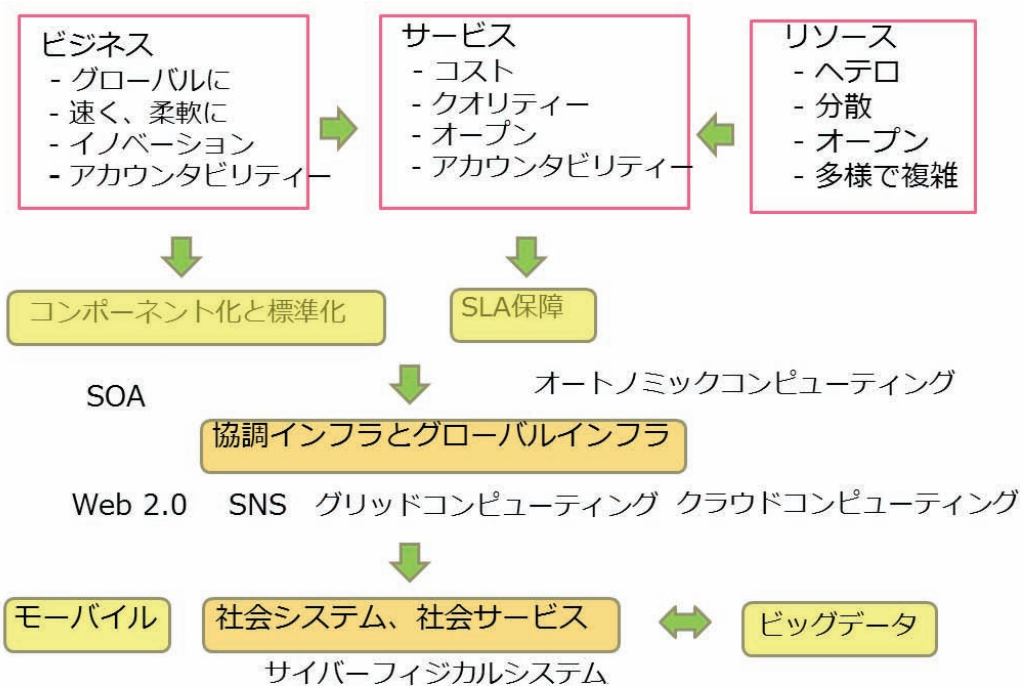


図4 社会・ビジネスからの要請と情報技術の流れ

2.2　分野の歴史、現状、及び今後の方向性

2.2.1　分野を取り巻く環境変化

電子情報通信分野はその技術進歩のスピードもめまぐるしいが、同時に、分野を取り巻く環境の変化も速い。図5に特に注目すべき変化をビッグトレンドとして示す。



図5 電子情報通信分野

私たちが着目するべき点として、(1) 進歩し続けるITと新しい産業創出に向けて、(2) 膨大化するデジタルデータ、(3) 融合する物理世界とサイバーの世界、(4) 社会システムに浸透するIT（光と影）、(5) 我が国の直面する課題、以上の5つをあげた。

(1) 進歩し続けるITと産業創出に向けて

ムーアの法則で価格性能比を向上し続けるマイクロプロセッサやメモリ、ハードディスクの高速低価格化のデバイスの進歩、大容量化と無線化を推進し続けるネットワークの進歩、それらを内蔵した小型情報端末の高性能、高機能化などのハードウェアの進化に加え

て、大規模並列計算や大規模データ処理のアルゴリズムやプログラミング技術が発展し続けている。また、このような指数関数的な進歩が永続的に続くわけではなく、Moore の法則が満たされなくなる事態を見越した More Moore, More than Moore と呼ばれる研究も盛んである。

このような進歩し続ける IT の成果を用いて、様々な領域への挑戦が見られる。

2011 年には、人間の脳の処理能力（10 ペタフロップスとされる）を超えたスーパーコンピュータ京[1]や、2012 年には米国ローレンスリバモア研究所で稼働する SEQUOIA は最大 20 ペタフロップスの性能を発揮する[2]。

2010 年にはコンピュータ将棋が女流プロ棋士と対戦して勝利し、2011 年には IBM の Watson[3] がクイズ番組 Jeopardy! で人間のクイズ王を破ったなど、従来ではなしえなかった快挙が続いている。Watson のもたらす意味は大きく、専門知識の集積をいかにうまく世の中に広げていくかという点の一つの解になると思われる。実際、Watson は医療の教育現場への応用などが模索されている。Microsoft Research が中心になってまとめた Fourth Paradigm[4] によれば、医学的発見は指数関数的に集積されているが、医学の発見から実務家がその結果を適用するまでの時間は、線形で減っていっており、このままだと 2025 年には 0 時間になるという。しかし、現在、典型的な家庭医がこの医学的進展に追いつこうとすると毎日 21 時間も勉強しなければならないそうである。このようなギャップを埋めることが IT の課題にもなるであろう。知の集積と伝播の高度化が必要とされる。

さらに、コンピュータの研究の最前線の一つに脳のシミュレーションがある。ここでは、国際的な競争が起きている。例えば、スイスの EPFL と IBM の Blue Brain 共同プロジェクト[5]などである。さらに、脳や人間に学ぶコンピューティングの形も模索されてきている。例えば、IBM のコグニティブコンピューティング[6]がある。

（2）膨大化するデジタルデータ

（1）で述べた進歩し続ける IT のもたらした影響の一つに膨大な数のデバイスがネットワークにつながり、デジタルデータが加速度的に増加していることである。Cisco の Dave Evans によると 2020 年までに 500 億もの機械やデバイスがネットワークにつながると予測されている[7]。

IDC の Digital Universe Study[8] は、2005 年から 2020 年までに、世の中のデジタルの量は 130 エクサバイトから 40,000 エクサバイトに 300 倍になると予測している。今後、2020 年に向けて毎年倍増していく。さらに、2020 年までに、40% の情報は、その生成から消費の過程で、クラウドに“ふれている”とされる。このことは、クラウドが社会のインフラとして大きく位置づけられてくることの証左である。そして、そのうちの 1/3 はなんらかの方法で守られなければならないが、現在では、ほんの 20% しか守られていな

1 http://www.aics.riken.jp/
2 http://www-06.ibm.com/jp/press/2011/11/1802.html
3 http://www-03.ibm.com/innovation/us/watson/
4 http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/
5 http://bluebrainproject.epfl.ch/
6 http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35251.wss
7 http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/Top_25_Predictions_121409rev.pdf
8 http://idcdocserv.com/1414

いと推定されている。

このような、データ量の爆発において、デジタルデータをいかにビジネスや社会コストの削減に活用するのか、さらに、これらの膨大なデータをどのように処理し、人類の知の向上に活かすのかは喫緊の課題となっている。これがビッグデータが重要視される所以である。

ビッグデータという言葉の起源は明らかではないがGoogle起業の10周年にあたる2008年9月にNatureは表紙に"BIG DATA"という文言を掲げた上で、特集記事[9]にて新しいデータの奔流に対応した新しい科学と探索の研究に取り組むことの必要性を主張している。2011年にはマッキンゼーはビッグデータの経済的インパクトに関するレポートを公開し[10]、ビッグデータの解析が今後の生産性向上、イノベーションや消費活動を支える基礎的な競争力になり、すべてのセクターのリーダーはビッグデータの意味するものに正面から取り組む必要があると説いた。一躍脚光を浴びたのは2012年3月29日に米国オバマ政権がBIG DATA INITIATIVEで2億ドルの予算をつけると発表したことである[11]。一方、日本においては、膨大化するデジタルデータに対して比較的早い段階で、文部科学省「情報爆発時代に向けた新しいIT基盤技術の研究」（2006年）や経済産業省「情報大航海プロジェクト」（2007年）にて産学連携の大型プロジェクトを立ち上げ、推進している。

（3）融合する物理世界とサイバーの世界

（1）、（2）で述べたようにすべてのモノ（森羅万象）がつながる世界ができ、その上での諸サービスが展開される世界がやってくる。この時、モノは、人、生物、物理的な品物、構造物、お金、エネルギーなどすべてである。そのモノとモノの関係でつかさどられる諸活動や状態が把握され、解析され、そのフィードバックがなされる系ができる。つまり、それが物理世界とサイバーの世界の融合である。

米国科学財団（National Science Foundation）のHelen Gillは2006年に、サイバーフィジカルシステム（CPS, Cyber Physical Systems）として、この両世界の融合を提唱した。具体的には、物理世界とサイバーの世界のコンポーネントを統合して新しいサービスを作り出す仕組みである[12]。

このためには、アーキテクチャ、クラウドコンピューティング、コンポーネント化とその統合、ポリシー、サービスデリバリー、センサネットワーク、エンベッディッドシステム、セキュリティなど様々な技術の統合が必要である。さらには、サイバーフィジカルシステムを通して集められる膨大なデータはビッグデータとして活用される。2009年に同財団が年間6500万ドル（50億円）の予算をつけたことで注目された。組込み機器の分野で劣勢であった米国が世界で競争力を保つにはCPSで優位に立つことが鍵とのレポートが背景にある。対象は、いわゆる組込み機器よりも広く、交通、防衛、エネルギー/産業、健康/バイオ、農業、重要社会インフラなど。

9 http://www.nature.com/news/specials/bigdata/index.html
10 http://www.mckinsey.com/insights/mgi/research/technology_and_innovation/big_data_the_next_frontier_for_innovation
11 http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/big_data_press_release.pdf
12 http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS-Executive-Summary.pdf

欧州連合もFP7（第7次Framework Programme、2007年～2013年）においてARTEMISプロジェクトを立ち上げ、産業、個人空間、モバイル環境、公共インフラの4ドメインを対象とした。

産業界もこれに呼応して大きな流れを作り出している。IBMは2008年にSmarter Planetのinitiativeを開始し[13]、都市、ビル、水、交通、エネルギーなど広範囲に、物理インフラとサイバーのインフラの融合が生み出す世界でのビジネス展開を図っている。

日本では、2012年度NEDOから「IT融合による新社会システムの開発・実証プロジェクト」として公募を行い、フィージビリティスタディなどを実施するものとして4分野計18件のテーマを採択（2012年10月）。IT融合プロジェクトとして、「都市交通」、「ヘルスケア」、「農商工連携」およびこれらを支える基盤的技術である「データ処理基盤」の4分野で開発に取り組むとしている。

この世界は、新しい社会システム、社会インフラの構築や再構築を、ITを組み込んで行っていくものである。

（4）社会システムに浸透するIT（光と影）

ITは、我々の日々の生活になくてはならない社会インフラの重要な基盤であることは日々ITと無縁にすごすことが実質的に無理なことで明らかである。非接触ICカードによるキャッシュレスの小額決済やETCシステムなどの新たな付加価値に加え、ゲームやエンターテインメントにも応用が広がり、人々の生活のITへの依存度は高まる一方である。また、Yahoo!やGoogleなど広告収入に基づいた検索サービス事業、Amazonを代表とするネットワーク通信販売事業など新しいビジネスモデルを武器とした企業が次々と出現してきており、携帯情報端末の普及に同期するように加入者を増やすTwitterやFacebookなどのソーシャルネットワーキングサービスなど、我々の社会生活のすみずみにまでITは浸透しているといっても過言ではない。一方で、個人情報流出やコンピュータウイルスによる核燃料工場への侵入[14]など従来起こり得なかったセキュリティ事故や、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。

このように、ICTに基づくサービスが開かれた系で、社会全体に及ぶとき、プライバシー、著作権、コンプライアンス、セキュリティ、ディペンダビリティなど様々な観点で、安全・安心を追求する必要がある。

さらに、サイバー・セキュリティは、社会システムだけではなく、サイバースペースの観点で、国家安全保障の点で各国で最重要課題になってきている。米国は、2005年にサイバー軍を陸、海、空、宇宙に次ぐ第5の軍として活動を始めた。同じような動きは、中国を含め、見られる。サイバーウォーやテロに対するサイバー空間の防衛は、喫緊の課題である。

（5）我が国の直面する課題

以上見てきたようにITは社会基盤として必須のものになってきていると考えられる。

13 http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/index.html

14 http://www.nytimes.com/2012/06/01/world/middleeast/obama-ordered-wave-of-cyberattacks-against-iran.html?pagewanted=2&_r=2&seid=auto&smid=tw-nytimespolitics&pagewanted=all&

しかし、現在、ITが社会システムの設計などに十分に活かされる状況になっているわけではない。いくつかの考察をここにまとめる。

(a) 我が国のIT産業の国際的競争力の低下

我が国のITベンダー、システムインテグレーターなどの国際的な競争力の低下が見られる。国民やメディアの興味が、ITといえば、モバイルやゲームやスーパーコンピュータ、組み込みソフトウェアに集中してきたきらいがあるので、システム、ミドルウエア、ソフトウェア、アプリケーション、インフラ技術などの、ITを社会のクリティカルインフラとするための必要な技術やコンセプトで、国際的には後塵を拝しつつある。

(b) IT人材のポートフォリオ変化がうまくいっていない

クラウドコンピューティングの登場やインド、中国のソフトウェア開発者の激増にともなって、ITにおいて必要とされる人材は、コンポーネント群をいかに組み合わせてビジネスモデルを設計するか、および、サービスの運用・維持に移ってきている。一方、国内のIT人材の多くがソフトウェア開発、システムインテグレーションの分野におり、産業構造が壊れつつある。さらに、ビジネスモデルや社会システムをデザインできるプロデューサー的な人材が不足している。またサービスの運用・保守を高度にビジネス化していくためには、国際的なクラウドコンピューティングによるインフラをもち、しかもデータの分析などが必須になってくるが、この変化にも対応できていない。

(c) IT人材育成と国際的人材の集積の低さ

前項で述べたように、求められるIT人材像が、社会課題を発見し、他の専門家とともにそれを解決する方法をデザインし、実装することができる国際的なレベルの人材が求められている。これらの方向に産業界も一緒に動き始めているがまだ十分ではない（経団連の高度情報通信人材育成部会[15]やCEFIL高度情報通信人材育成センター[16]の低減や活動が参考になる）。さらに、ITに関して、国際的な人材が集まる構造になっていない。

(d) 我が国のITリテラシーの低さ

政治家、経営者、国民、メディアのITに対する理解が低い。ITのもたらす社会・経済的インパクトの認識が弱い。したがって、我が国がITによる社会への本質的なインパクトを生み出すのに十分でない。例えば、大きな社会コストの低減であったり、クラウドコンピューティングやビッグデータなどの運用による産業構造の変化ができていない。さらに、ITが社会基盤になるという認識の低さのために、制度や投資が縦割りになっており、十分なITの効果を出せていない。国の安全に対する認識が十分でない。

(e) ITによる新しい産業創出が不十分である

ITの影響が、ともすればコスト削減に目がいきがちであり、新しい産業創出を起こせる力をもっていることに焦点がいっていない。例えば、3Dプリンティング技術の台頭とITインフラの融合によるモノづくりの新産業革命がうたわれている。このような分野における我が国の戦略が必要になる。さらに、社会基盤を支えるITの分野での日本のスタートアップ企業の創出が弱い。

15 http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2011/096/honbun.html
16 http://www.cefil.jp/

2.2.2 分野の方向性

前項で述べた我が国および我が国のIT分野の直面する課題から抽出したITの大きなトレンドから、それがどのような社会的・経済的インパクトをもたらすべきか検討した。さらに戦略的新領域をインパクトを実現するために必要な科学技術課題と位置づけた。

（1）注目すべきトレンド

ビッグトレンドから重要かつ一過性でない非可逆的なトレンドとして、ITの進化、物理世界とサイバーの世界の融合、データの洪水、ICTの社会浸透、および新産業創出とものづくり産業革命[17]を切り出した。

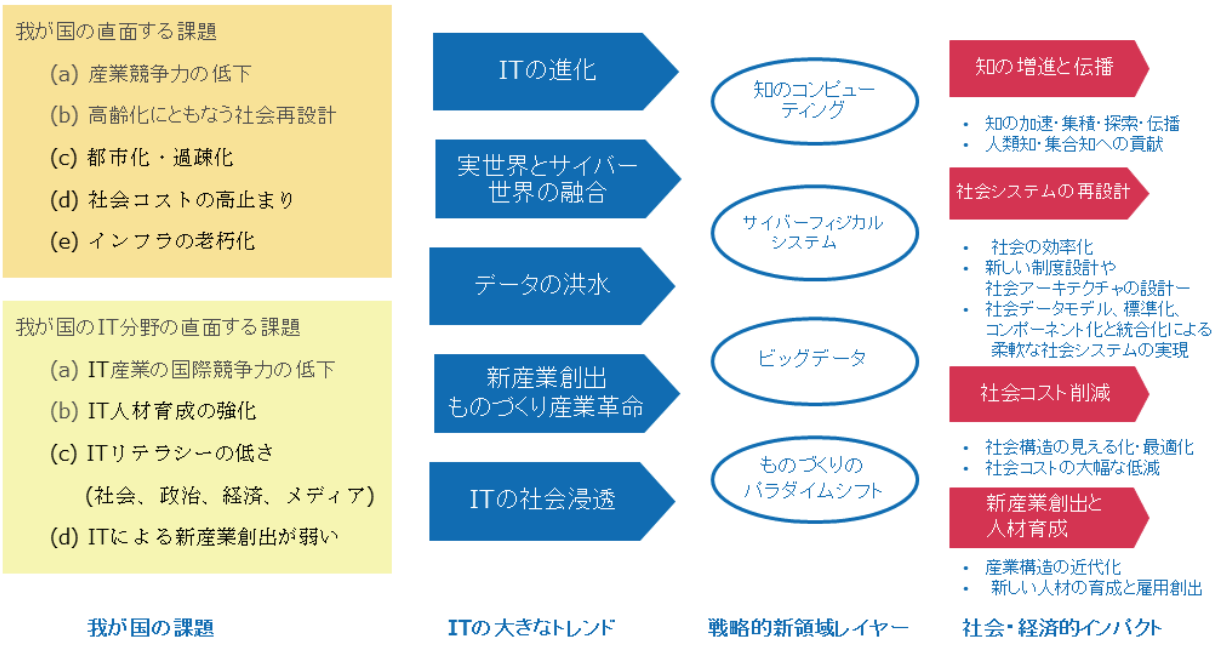


図６　我が国の課題、トレンド、戦略的新領域、および社会・経済的インパクト

（2）社会・経済的インパクト

電子情報通信技術を取り巻く環境の変化、およびIT技術そのものの発達により、実現できる社会的・経済的なインパクトを以下にまとめた。

・社会的コスト削減

物流やエネルギーマネージメントなど、ビッグデータを集めたものを、どう制度設計して変えていくかというところまで踏み込んだ研究開発を行い、社会実装することで社会コストの大幅な低減が期待できる。医療・介護についても、徹底的に見える化を進めることで、どれだけの有効性があり、どこを改善すべきかが見えてくることにより、大幅なコスト低減につながる。

17　クリス・アンダーソン「MAKERS―21世紀の産業革命が始まる」（2012）では、3Dプリンタなどのデジタル工作機械とCADデータを使ったデスクトップ製造業が紹介されている。特に注目すべきトレンドとして詳細な調査を行う予定。

・社会システムのデザインと運用

適切な社会モデルに基づくダイナミックプライシングによる電力・交通などの公共サービスの質の向上、データ流通などのための戦略的な制度・法律整備による日本の競争力向上が期待される。

・知の増進と伝播

新興国の産業、科学技術研究における存在感が増す中、科学的発見の加速、および科学技術研究からイノベーションまでのタイムラグをいかに短縮するかが競争力の重要な鍵となる。これにより、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が可能となる。

・新産業創出

データにまつわる今後の制度改正により、ビッグデータの流通、加工により付加価値を提供するビジネスの発展が期待される。これらのビジネスの基盤となるデータのトレーサビリティ確保などの技術開発により、新たな産業の展開を促す。

新興国が安価な労働力を背景として、マスプロダクションを中心としてものづくりの産業競争力を高めるなか、我が国の中小企業は、いわゆるロングテールの少量多品種生産で競争力を保っている。今後、3D プリンティング技術などによりロングテール生産の形態が大きく変わってくることが予想される。ICT を活用した新たなものづくりのパラダイムの先取り、サービスの中でとらえたものづくりにより、産業競争力の維持・強化が期待される。

（3）戦略的新領域レイヤー

戦略的新領域レイヤーは社会的・経済的インパクトを実現するための研究課題である。研究開発課題は、個別要素技術として、基盤レイヤーに属するすべての技術領域、および、他の戦略的新領域レイヤーの技術領域を活用する。

・サイバーフィジカルシステム（CPS）

CPS は、ICT の社会浸透、デジタル化の進展、実世界との融合がもたらす、様々なハードウェアを構成要素とする社会インフラシステムの構築と運用に係る研究開発課題である。CPS は狭義には物理世界のハードウェアとそれを動かす組込みソフトウェアであるが、広域ネットワークの発展により個々の機器がネットワーク側のサイバーシステムと高度に融合することで ITS やスマートグリッドなど従来実現できなかった新たな価値を生み出す。図 7 にこのような広義の CPS の全体像と取り組むべき研究課題を示す。ここでの課題は複数の社会システムにまたがる社会実験と学際的分野融合であり、制度設計、社会アーキテクチャ、データモデル、標準化、コンポーネント化と統合などが重点領域となる。

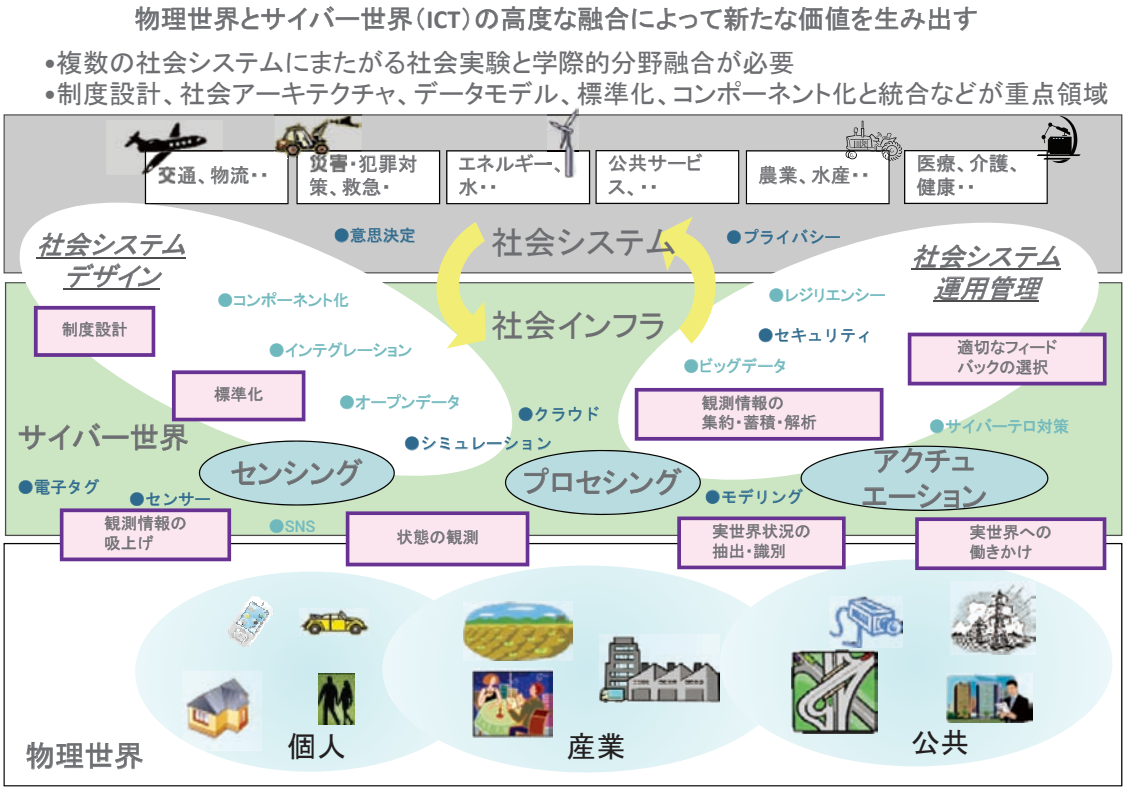


図 7　サイバーフィジカルシステム

・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、ICT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。指数関数的に増大するデータは、発生の頻度も形式、信頼性もまちまちであり、現状ではデータを蓄積することはできても、大量データを適切な時間内で処理したり、そこから新たな知見や洞察を抽出することはできない。ビッグデータの様々な分野への応用や新産業の創出を目指した価値創造のための研究開発と、活用するための基盤、および量的な変化に対応した新たなデータの科学の確立が必要である。

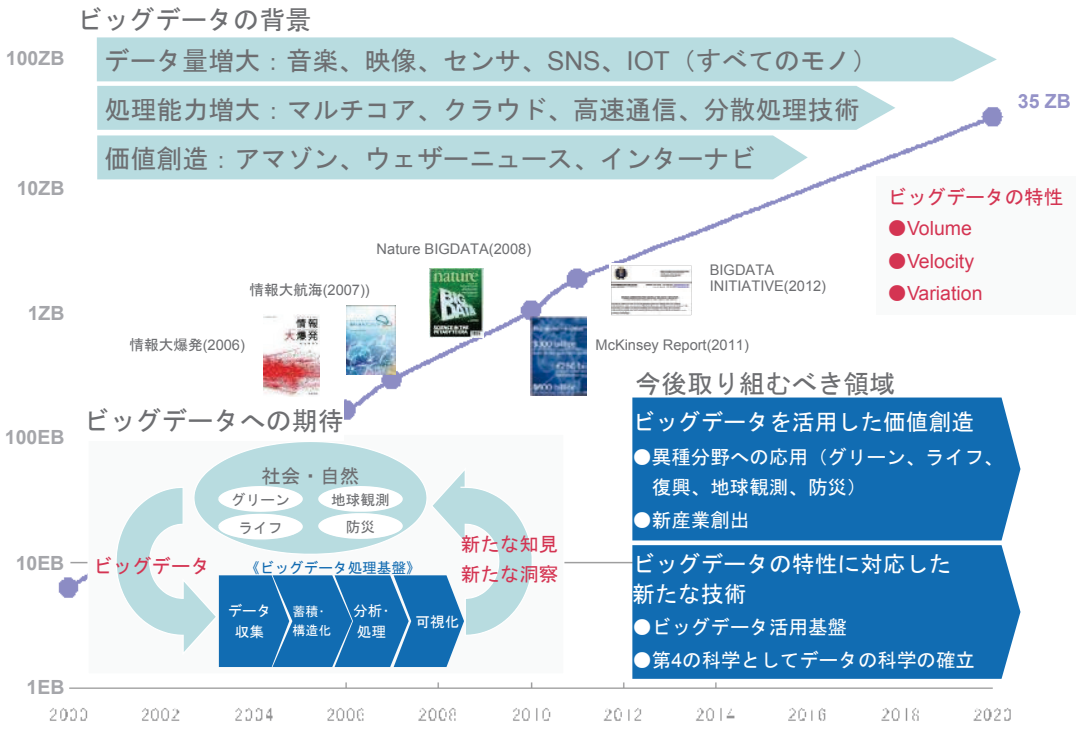


図８　ビッグデータ

・知のコンピューティング

知のコンピューティングは、ICTの社会浸透とその背後にあるIT技術の進歩により可能になるであろう人間とコンピュータの新たな形態のコラボレーションに係る研究開発課題である。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の力で未解決問題の解決や社会コストの削減、QOLの向上を図ることが可能になる。



図９　知のコンピューティング

（4）基盤レイヤー

基盤レイヤーに属する研究開発領域の一覧は前掲の図3に示したとおり。研究開発領域の選定にあたっては、特に、網羅的に切り出すのではなく、分野および環境の変化を踏まえて、今後注目すべき技術を抽出するという観点で有識者と議論のうえ決定した。ただし、シーズ指向もしくは局所的にならないよう以下の観点で俯瞰区分ごとの俯瞰図（ミクロ俯瞰図）を作成した。

表１ ミクロ俯瞰図で表現するもの

・分野を取り巻く環境、流れ、必然性
・Bird’ s eye（流れの中に今が見えるように）
・日本が強い／弱い／エマージングな領域／重要な領域

・戦略的領域、そのなぜやインパクト
・短期的な課題とグランドチャレンジ
・提言（科学技術論、政策的）

・IT アーキテクチャ

IT アーキテクチャは、ICT の社会浸透にともなう IT の果たすべき役割と責任の重さへの要求に対応した研究開発課題である。図 10 に示すように、IT は発達の段階において社会システムの要求に対応することにより、計算する機械としての機能から、多用途への展開、コモディティ化など自分自身を進化・拡張させてきた。社会システムが IT を前提として構築されるようになると、社会インフラに求められるディペンダビリティ、社会アーキテクチャとの同期や、多様で変化するワークロードへの速やかな対応が求められるようになっている。

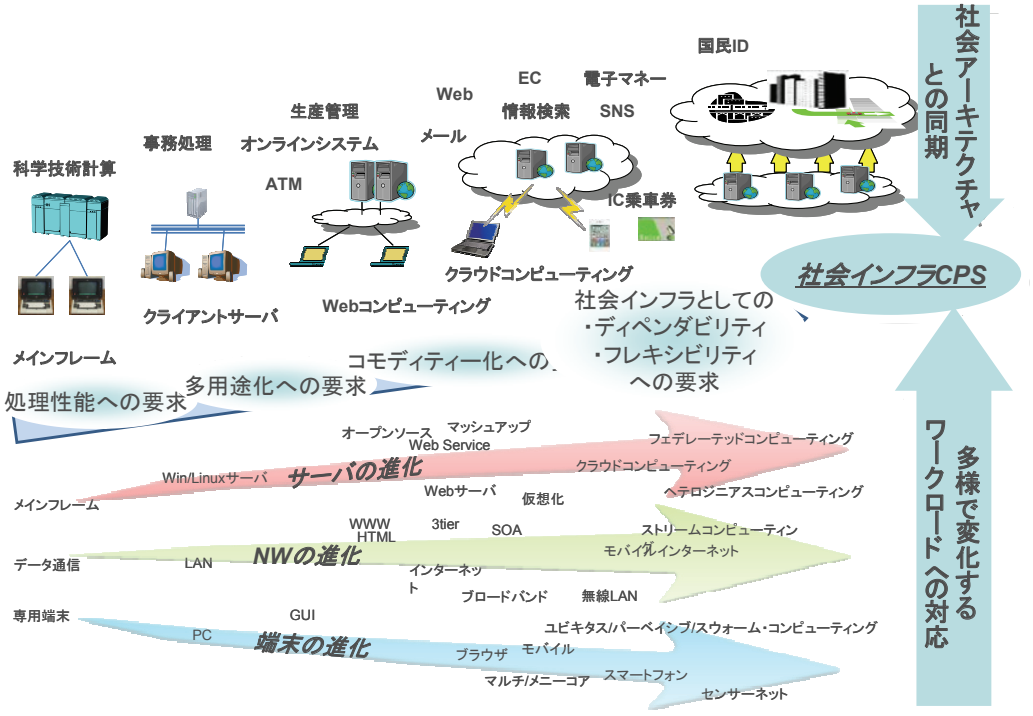
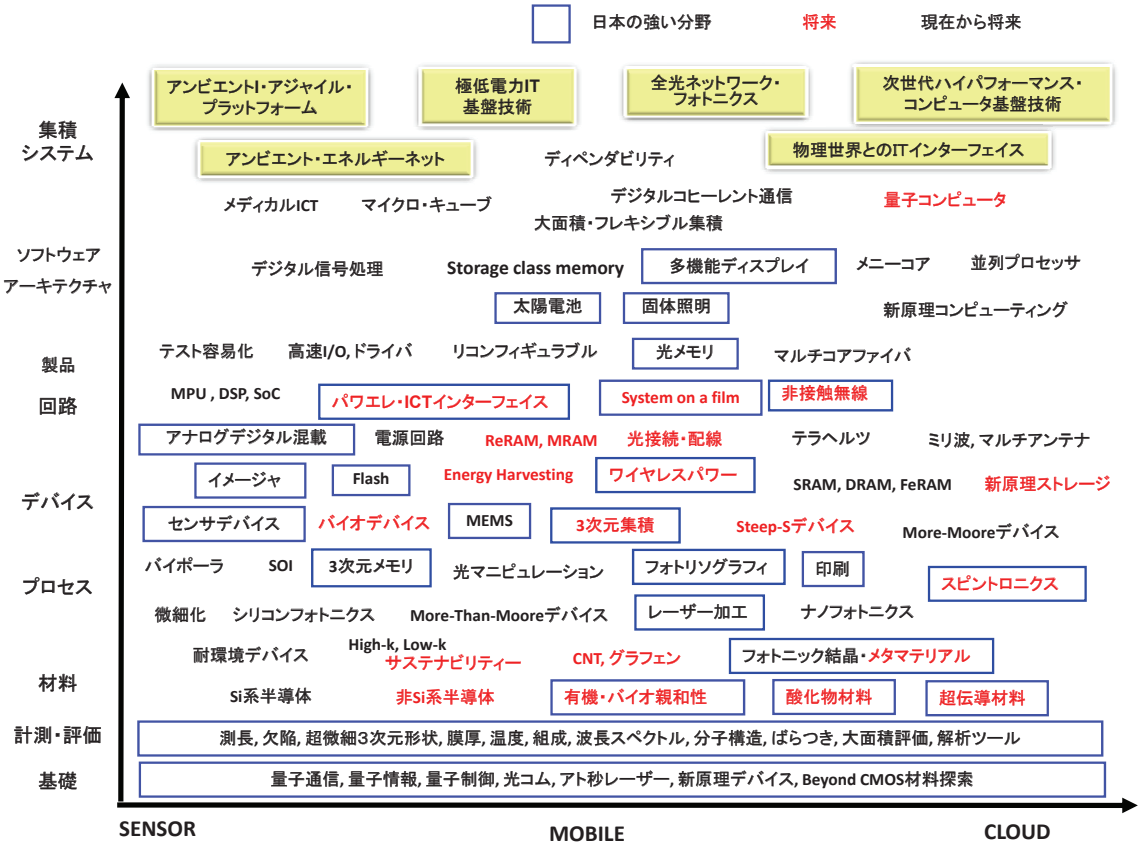


図 10　IT アーキテクチャ

・デバイス／ハードウェア

ICT は、多くの社会課題に対してのソリューションを与えるとともに、他の産業を支える基盤となる重要な分野である。その ICT を実現・発展ならしめているのがデバイス／ハードウェア領域といえる。ICT がインターネットに代表される仮想空間から、より物理的な空間に応用領域を広げ、人間の身の周りに意識されずに空気のように存在（アンビエント化）している現在、デバイス／ハードウェアも二つの方向で研究開発が行われようとしている。一つは、従来のアプリケーションやサービスをより発展させるため、ハードウェアの性能や消費電力性を飛躍的に向上させるといった方向である。もう一つは、物理空間により密着したようなアプリケーション領域を新たに創出するデバ

イス／ハードウェア領域で、ヘルスケア、スマートグリッド、スマートコミュニティ、カーエレクトロニクス、ロボットなどに応用される。



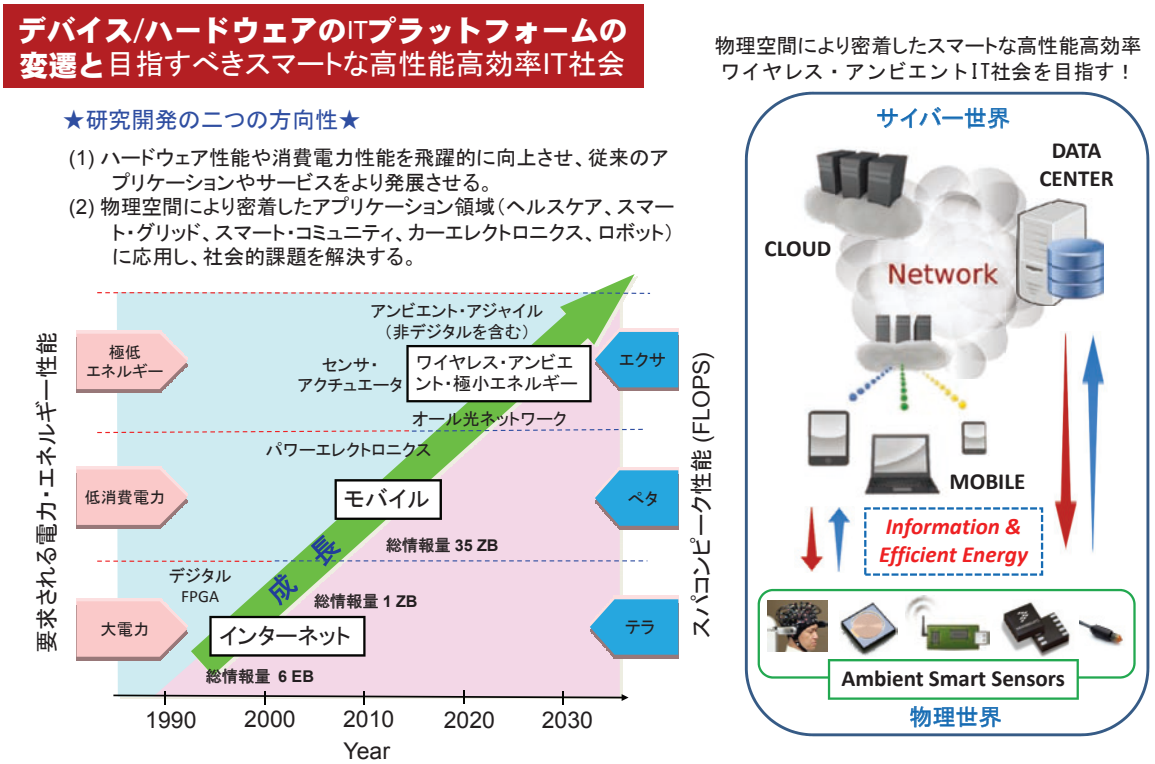


図 11　デバイス／ハードウェア

・ネットワーク

ネットワーク分野の研究開発を俯瞰するにあたって、光ネットワーク、ワイヤレスネットワーク、新世代インターネットなどの従来区分で分類するのが一般的であろうが、従来区分では新しい流れを的確に記すことが難しいこともあり、出口指向で「エラスティックネットワーク」、「グリーンネットワーク」、「フィールド指向ネットワーク」の3つに分類した。ネットワーク技術が全般として成熟しつつあるという状況をも踏まえると、このような課題解決型の研究開発が盛んになりつつあるのは当然であり、ネットワーク研究の第二世代に入りつつあるという見方も可能である。エラスティックネットワークは、硬直した設計がなされてきたネットワークをより柔軟に設計し直すことで、運用・管理の手間の削減などを目指すものである。グリーンネットワークは、ICT領域での消費電力量が大幅に増大しつつあることを踏まえ、低炭素化、低消費電力化を目指すものである。フィールド指向ネットワークは、情報通信が利用されるフィールドに出向き、情報通信に課せられる要件を明らかにしながら、ネットワーク技術の研究開発を行うものである。

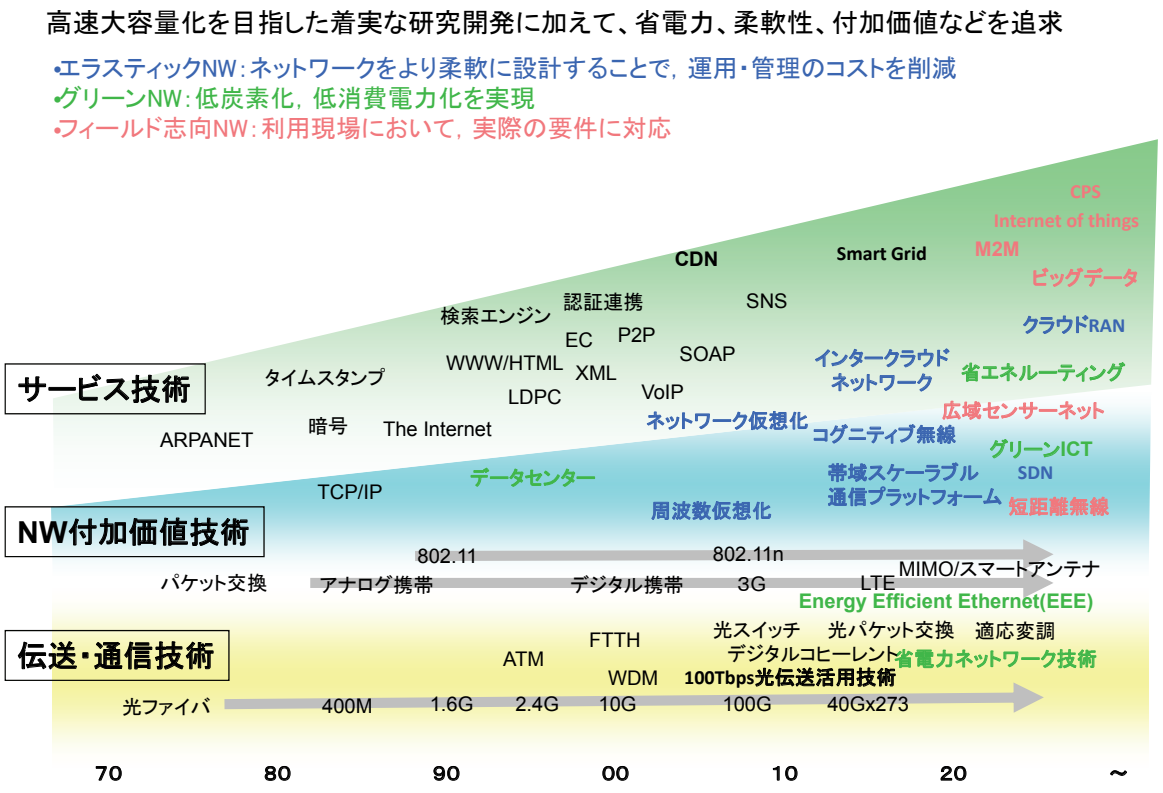


図12　ネットワーク

・ソフトウェア

ソフトウェアは情報・通信技術の中核であると同時に、また、現代においては様々な組込みシステムを含め、ほとんどすべての科学技術分野において、競争力の維持のためには高度なソフトウェア開発のスキルが欠かせない。このため、ソフトウェアの研究開発戦略は、情報･通信分野にとどまらず、我が国の科学技術の発展において、極めて重要である。ソフトウェアの研究開発領域を上流から下流まで全体として俯瞰したとき、二つの大きなトレンドが見られる。一つは、ソフトウェアの大きさ・複雑さが拡大し、さらに社会システムなど多くのステークホルダーの複雑な要件が満たす必要のあるアプリケーションが増加するにしたがって、上流におけるソフトウェア工学の重要性が今までにまして増大していることである。もう一つは､クラウドやスマートフォンなど新たなプラットフォームや、ビッグデータなどの新たなワークロードに対応して、それらのベースになるプログラミングモデル・ランタイム・ミドルウェアが出現しつつあることである。この観点から、本俯瞰報告書においては、ソフトウェア研究開発のコアである以下の二つの研究開発領域を設けた。ソフトウェア工学は拡大する適用領域の要求と的確に実装するための技術であり、IT プラットフォームは、増大するワークロードやデータを確実に処理する技術である。

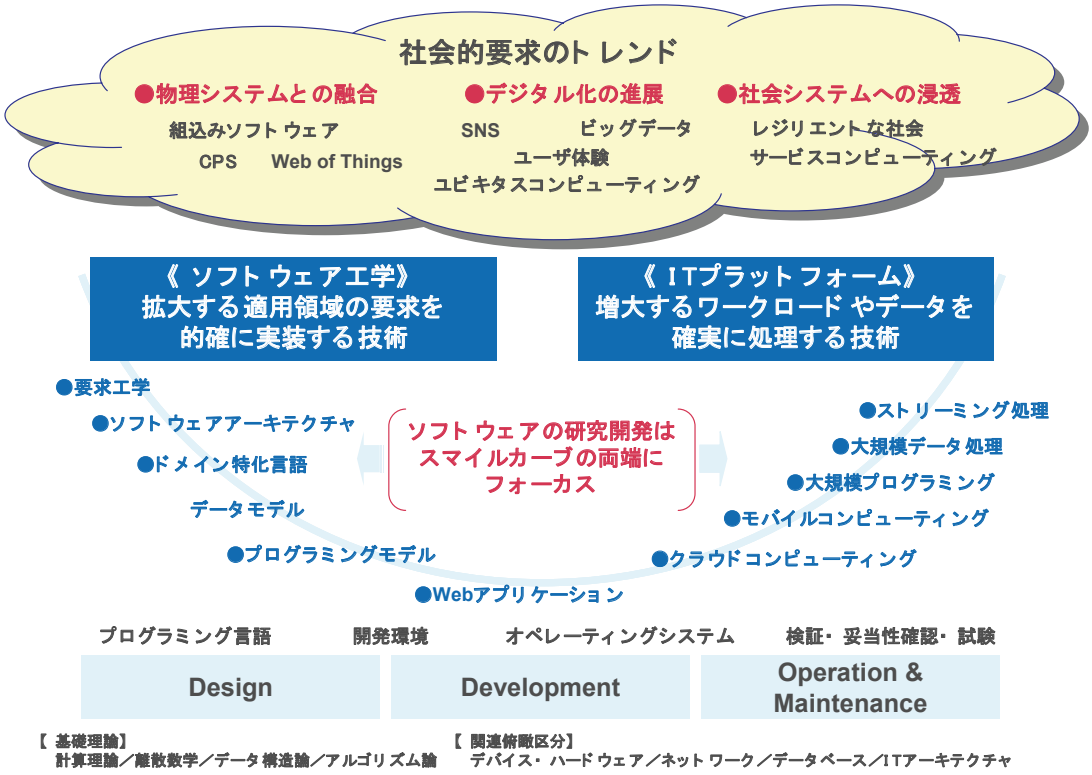


図 13　ソフトウェア

・データベース

データベースの世界は、コンピューティング環境の発達・変化に密接に関係しながら大きな進展を遂げてきた。特に、データの利用形態が多様化した1990年代以降は、モバイルデータベース、センサデータベース、さらにはユビキタス、アンビエント情報環境におけるデータベースなど、利用形態に応じたデータベースに関する研究開発が活発に行われるようになった。また、データそのものの多様化にともない、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も盛んに行われている。さらに、近年のクラウド化・ソーシャル化においては、クラウドソーシング、ソーシャルソーシングといった、実世界での人間活動を扱う研究が登場するに至っている。当然ながら、データの信頼性や安全性も重要な課題であり、セキュリティやプライバシー保護に関する研究開発は継続的に推進されており、データの信頼性という観点からは、データの系統管理、トレーサビリティの研究が近年活発に行われている。このような状況を背景に、本俯瞰区分では、データベース分野において現在特に重要と考えられる、モバイル・センサデータベース、系統管理・トレーサビリティ、グラフ解析・ストリームマイニング、セキュリティ・プライバシー、およびクラウド・ソーシャルソーシングという5つの研究開発領域を取り上げた。

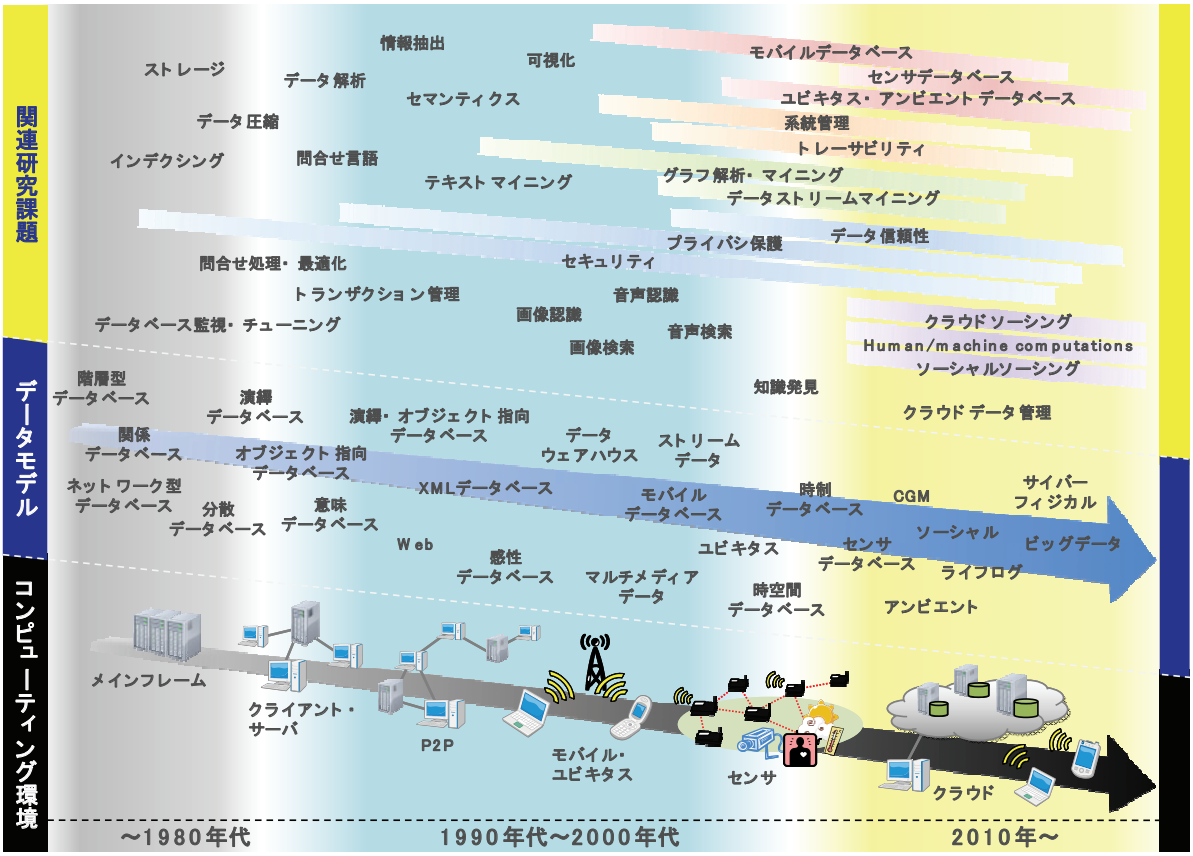


図14　データベース

・知能／インタラクション

人間の知的な振る舞いを人工物の上で実現する人工知能の研究は、数値計算のような機能とならびコンピュータが社会へ貢献するための重要な研究である。ここでは、人工知能の研究のうち、特に、認知科学、言語・メディア理解、ヒューマンインターフェイス・インタラクション、および知能システムの基礎を扱う。人工知能の実現には必ずしも人間の認知構造を模倣する必要はないが、人工知能の研究において多くのインプリケーションを得てきており、認知科学や脳科学といった分野と深く関連しつつ発展していくと考えられる。また、大量データの統計処理による知識処理の高度化が進んでいるが、より深い知識処理を実現していくためには、新たなパラダイムを追究する研究が不可欠である。一方､人工知能の技術の応用を考えるとコンピュータが外界を理解したり、人間とインタラクションするための研究開発が重要となる。このような理由から、知能システムの基礎、認知科学、言語・メディア理解、ヒューマンインターフェイス・インタラクションを重要な研究開発領域として選択した。

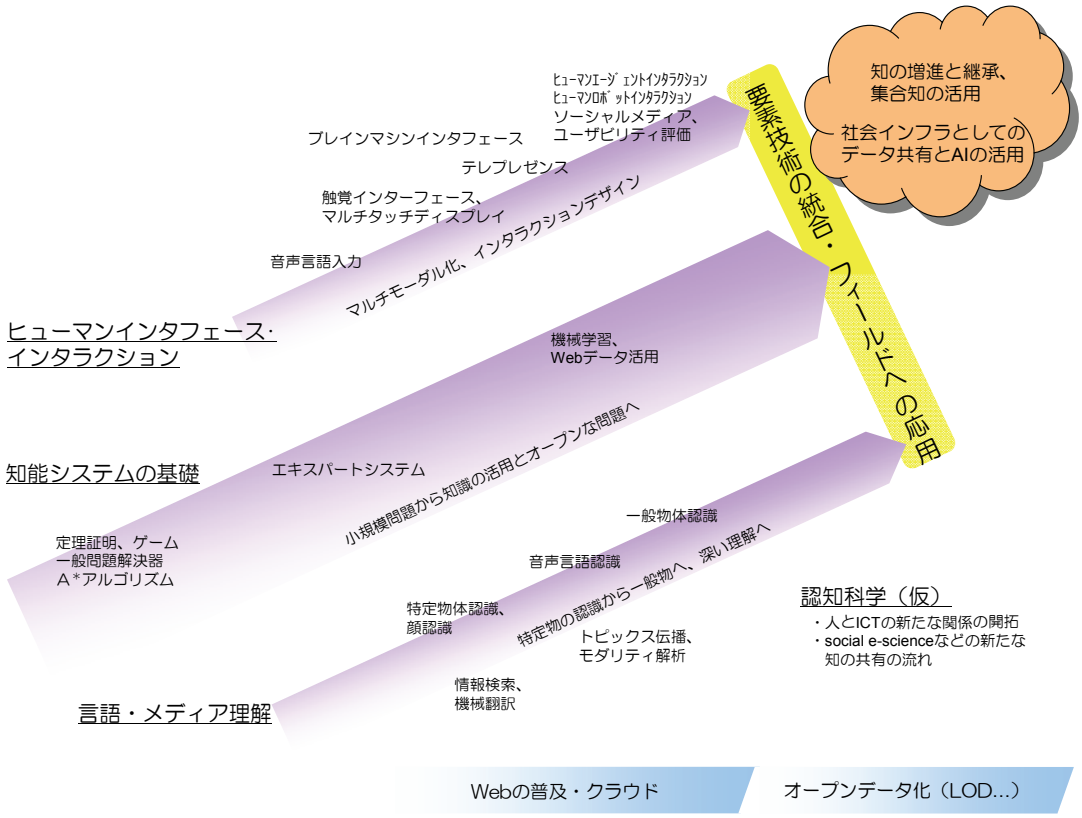


図 15　知能／インタラクション

・人工知能

コンピュータ・サイエンスの歴史において、解法がわかっていない問題領域は人工知能と呼ばれることが多かった。探索アルゴリズム、知識表現、推論、自然言語処理、音声認識、画像認識などはいずれも、かつては人工知能の分野と考えられていたものである。これらの技術は、現在ではそれぞれ独立の研究開発分野と考えられていて、これまでの俯瞰報告書においても、いずれかの俯瞰区分における個別の研究分野として取り上げられている。また、機械学習は今でも人工知能の分野として考えられているが、本報告書では、主に俯瞰区分「ビッグデータ」で扱う。では、なぜ人工知能を情報・通信分野の俯瞰区分として独立に扱うのだろうか？一つは、人間のように自律的に考え、成長するいわゆる「強い人工知能」である。多くの研究者は、いずれは強い人工知能が実現されるだろうが、それは数十年先の話であり、現在の人工知能研究の延長上にあるとは考えていない。ただし、このような強い人工知能が実現された暁には、科学技術が急速に発展する可能性がある。また、現在手に入る技術を統合することによって、米国のクイズ番組で人間のチャンピオンを破ったIBMのWatsonのように、いままで不可能あるいは極めて困難と思われていたアプリケーションが現れつつある。これらいわば統合型人工知能は、医療・法律など、今まで人間のエキスパートの知識・経験に大きく依存してきた業種において、大きなブレークスルーになることが期待されていて、産業応用の観点からも無視できない。このため、強い人工知能に加えて、統合型人工知能の研究開発動向もこの俯瞰区分で扱う。

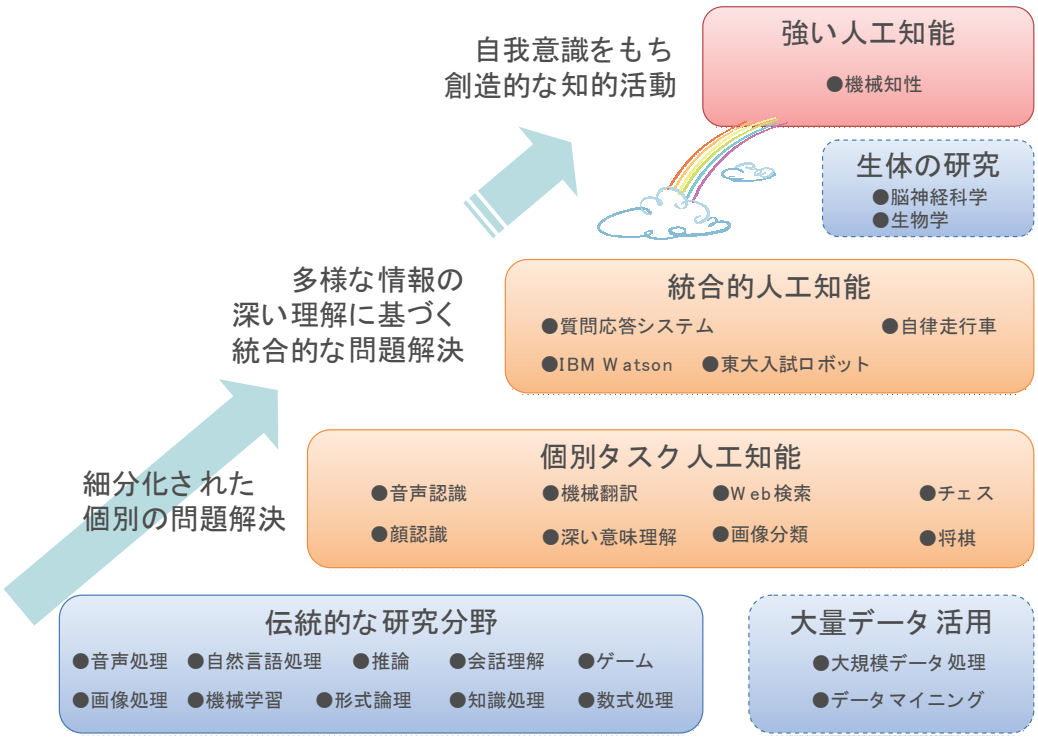


図16　人工知能

・ロボティクス

日本はロボットの研究開発を世界に先駆けて進めてきた。産業用ロボットに関する導入支援から始まり、1980 年代後半には極限作業用ロボットを、そして、1990 年代後半からはヒューマノイドの技術で世界のリーダーであった。日本社会は科学技術への期待として、ロボット技術を常に掲げている。しかしながら、2010 年代になり、日本のロボット技術は EU や米国に比較して遅れ気味になっているのではないかと危惧される。いま日本が必要としているのは、(1) 少子高齢化社会に役立つロボット、(2) 日本の次世代産業の中核となるロボット、(3) 一般市民の QoL を豊かにするロボット、であろう。そのようなロボットを研究開発していくには、従来からの研究開発方法だけでは不十分である。本俯瞰報告では、図 17 ロボティクスに示すロボット技術と社会との関係を、三層に分割して論ずる。まず、社会からの要求を掌握して、機能に変換する技術を準備しなければならない。これを「ロボットが支える機能提供技術」として展開する。次に、機能を時間的・空間的に組み合わせて、サービスとして利用可能とする。これを「社会に役立つロボット技術」として研究開発する。ロボットによるサービスの受け手が人ならびに社会であることを再認識することが今求められている。それゆえ、日本社会がロボット技術をいかに受け入れ、産業化するかを目標に、そのために必須の技術要素と方法とを「ロボット技術の社会的受容」として検討する。

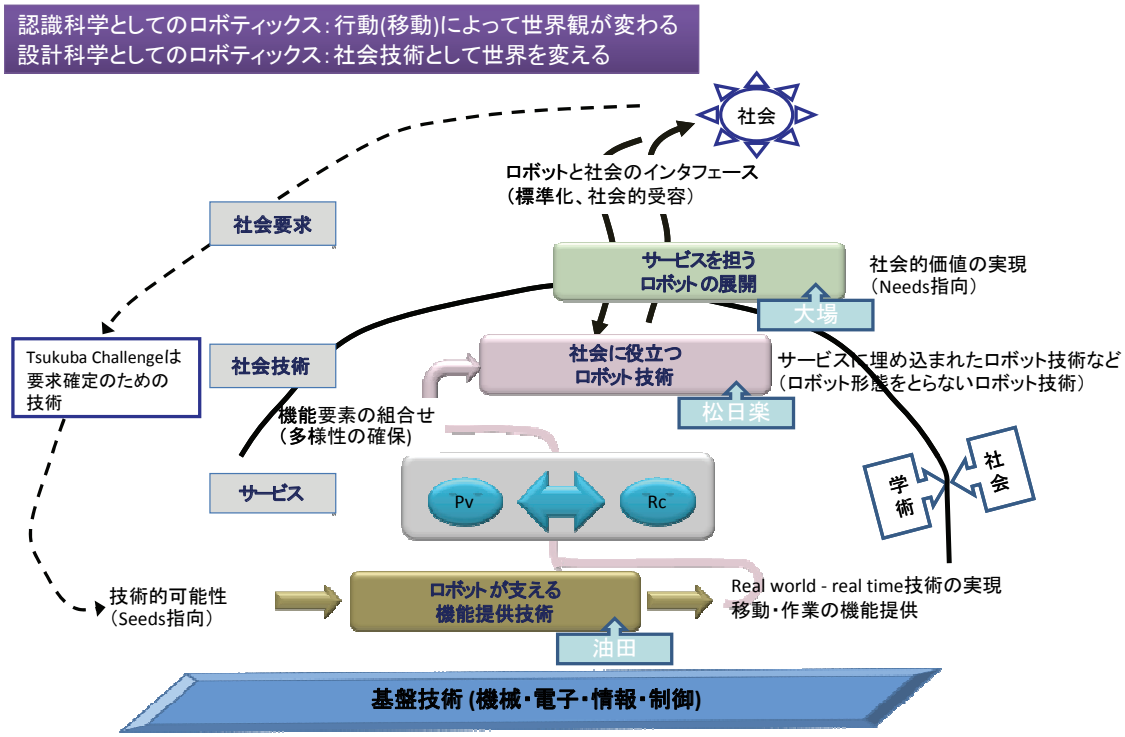


図 17　ロボティクス

・レジリエントICT

現代社会は様々な業務が複雑に依存しあうことにより成立している。そのため、一部の機能が停止あるいは障害に見舞われただけでもその影響が広範囲に及ぶ場合が多く、また、その影響範囲を事前に正確に把握できていない場合も多い。さらに、災害時における紙ベースの書類の紛失や流失に備えて電子化や情報化が進めば、その電子的な保護も必要不可欠となる。レジリエントICTとは、このような状況において、一部のシステムに問題や障害が生じたとしても、その影響を最小限に抑える強靭さと、それらの問題や障害を特定・排除し速やかに定常状態に回復するためのしなやかさとを提供する情報処理技術を指す。問題や障害の原因には、不具合、人的ミス、災害、サイバー攻撃など複数の要因が考えられるが、悪意をもって行われる攻撃は従来の対策を迂回したり無効にしたりする方向で日々進化を続けており、従来の対策を適用し続けるのみでは十分な強靭さとしなやかさを確保できなくなってきている。そのため、新たな視点に基づく革新的な対策が求められており、そのための研究開発に期待が寄せられている。本レジリエントICT分野では、領域をICTの構成要素とコミュニティに応じて「レジリエント情報社会」、「レジリエント・システムソフトウェア」、「レジリエントネットワーク」、「レジリエントデバイス」を研究開発領域として選定し、それらの動向についてまとめた。



図18　レジリエントICT

2. 3　ファンディング、研究コミュニティ、諸外国の状況

2. 3. 1　ファンディングの実態と今後

我が国の電子情報通信分野の研究開発戦略（2012 年）は、俯瞰報告書「主要国の研究開発戦略 2012」[18] にて調査した。我が国の第 3 期科学技術基本計画の下では、2006 年 3 月総合科学技術会議決定の「分野別推進戦略」において、政府が取り組むべき「重要な研究開発課題」として 273 課題を選定するとともに、課題ごとに研究目標および成果目標を明記し、その中から重点投資する対象として 62 の戦略重点科学技術を選定した。同戦略に基づき、8 つの分野ごとに戦略重点科学技術をはじめとした重点投資すべき対象への選択と集中の徹底などにより、研究開発が実施された。フォローアップについては、総合科学技術会議基本政策専門調査会の下に、重点推進 4 分野（ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料）および推進 4 分野（エネルギー、ものづくり技術、社会基盤､フロンティア）ごとにプロジェクトチームが設置されて進められた。近年では、関連施策について府省横断的な連絡会などが開催されることも多く、指針の策定、研究の進捗などに係る情報交換、研究者交流の促進が図られてきた。

以下に電子情報通信分野について、第 3 期科学技術基本計画までの戦略、成果と、第 4 期科学技術基本計画における位置づけについて記載する。

（1）第 3 期科学技術基本計画までの戦略、成果

第 2 期～ 3 期科学技術基本計画において、「情報通信」分野は、重点推進 4 分野の一つとして取り上げられ、「継続的イノベーションを具現化するための科学技術の研究開発基盤の実現」、「革新的 IT 技術による産業の持続的な発展の実現」、「すべての国民が IT の恩恵を実感できる社会の実現」の 3 つの戦略が進められてきた。

これらの施策の実施状況について、第 3 期科学技術基本計画のフォローアップでは、概略以下とされている。

（主な進捗状況）

・スピントロニクス技術による高性能不揮発性デバイス実現に向けた技術開発の進展
・IP 技術を利用した次世代ネットワークの研究開発の進展
・スーパーコンピュータの開発が進展。システム構成の見直しを含めた検討が必要

（今後の取り組み）

・情報機器全体で省エネ化を目指す技術開発の推進
・巨大で複雑な情報空間から信頼できる情報を収集、検索、解析する技術の開発

（2）第 4 期科学技術基本計画における位置づけ

第 4 期科学技術基本計画が、課題達成型の構成を採ったため、電子情報通信分野は、これまでのように重点推進分野として、まとまった形では特定されていない。しかし、それぞれの課題達成に不可欠な技術として、情報通信技術の重要性は認識されている。総合科学技術会議においても、グリーンイノベーション、ライフイノベーションなどに関する戦略協議会とは別に、ICT 共通基盤技術検討ワーキンググループが設置され、電子情報通

18　CRDS-FY2012-FR02 研究開発の俯瞰報告書「主要国の研究開発戦略（2012 年）」

信分野全体としての検討が進められている。このようないわばマトリックス的な戦略が有効に機能するか、注視が必要である。

2.3.2 研究コミュニティ

電子情報通信分野の研究コミュニティについては「電子情報通信分野俯瞰プロジェクトV」（CRDS-FY2011-RR-05）にて分析した[19]。まず、当分野における会員数1000人以上の学会において設置されている研究会・研究委員会を、研究会の名称だけではなく、研究発表で扱われているテーマを考慮しつつ、作業者の主観で研究テーマが近いと思われるもの同士を近くに配置した（図19）。ピンクの部分は主な関連学会である。

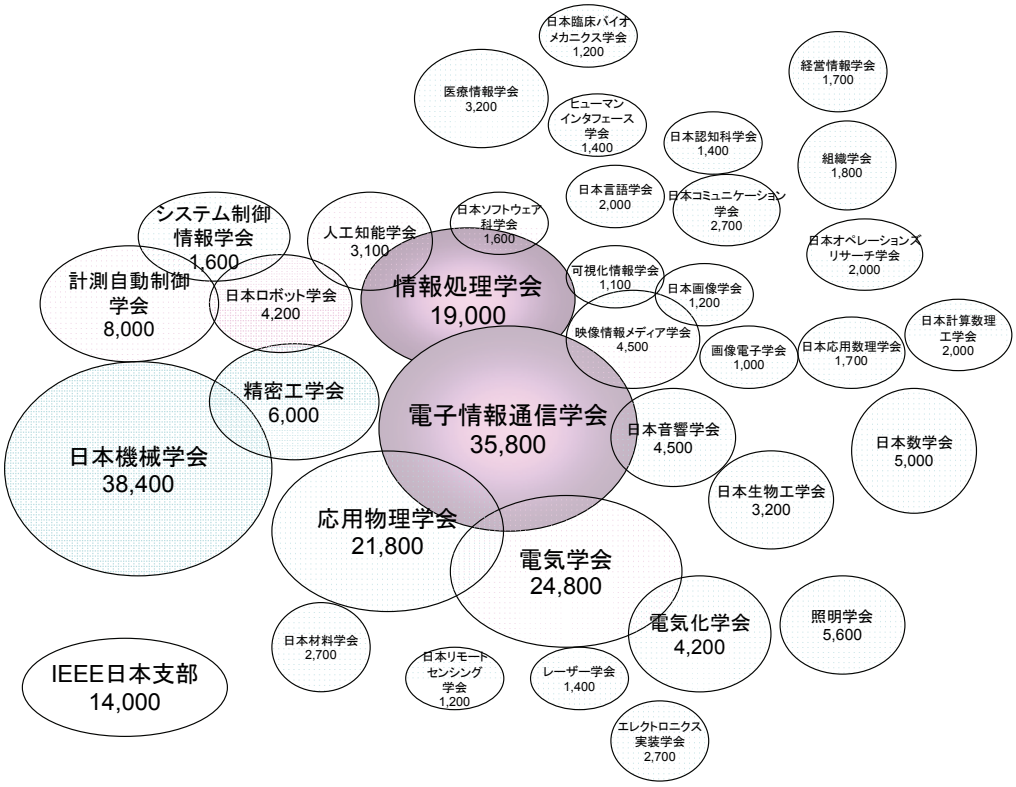


図19　会員数1,000名以上の主要学会

主要は学会員の会員数推移を以下の表に示す。

学会名	発足年	会員数		
		2000年度	2007年度	2011年度
電気学会	1888年	27,544	24,556	23,221
電子情報通信学会	1917年	33,962	34,117	33,922
情報処理学会	1960年	25,269	21,096	19,390

表2 主要学会の会員数推移

19　CRDS-FY2011-RR-05「電子情報通信分野俯瞰プロジェクトV」（2012年）

次に、各研究会が扱う個別要素技術を抜き出し、複数の研究会のクラスタリングを実施した。作業者の専門知識の差異による結果の偏りを補正するために複数人で平行したものを統合するアプローチを採用した。結果を図20に示す。

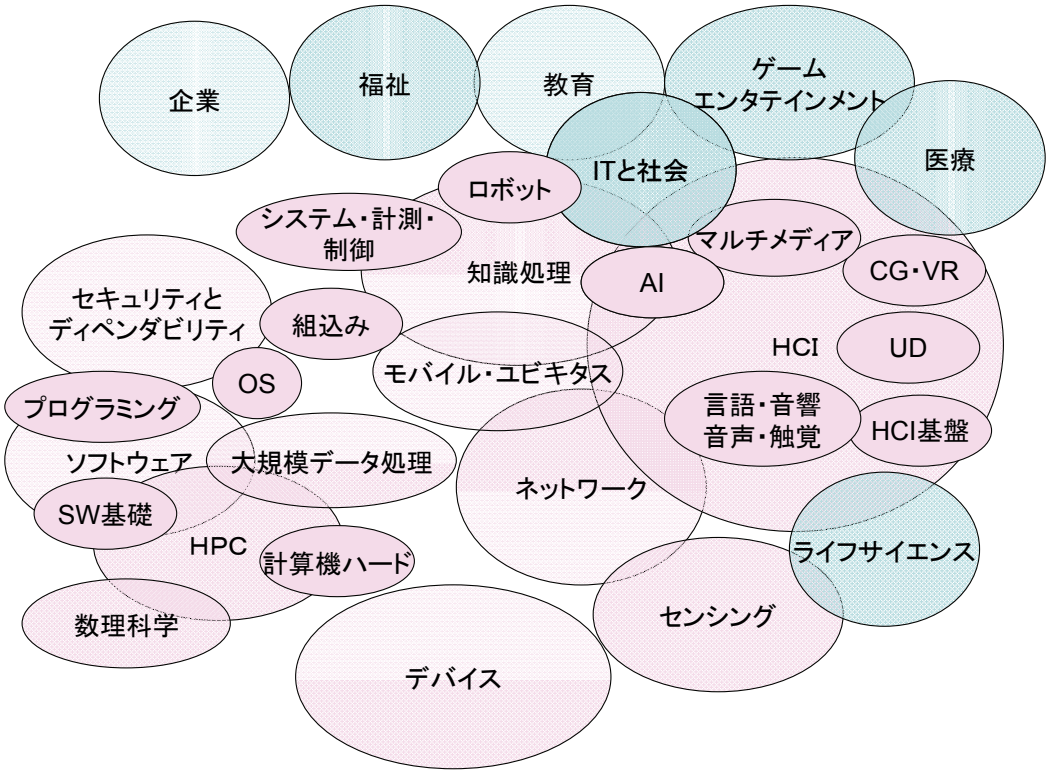


図20　情報通信分野の個別要素技術クラスターのマップ

2.3.3　諸外国・地域における研究ビジョンや戦略

（1）米国

米国の情報通信技術に関する重要な方針は、「A Strategy for American Innovation[20]」（米国イノベーション戦略）の一部、「NITRD Program 2012 Strategic Plan[21]」（次期五ヵ年計画）、「NITRD Program Supplement to the President's Budget FY2013」（2013年度の大統領予算要求の解説）などに示されている。

A Strategy for American Innovationは、オバマ大統領により2009年9月に策定され、2011年4月にアップデートされている。教育、科学研究、インフラ整備をイノベーション戦略の基盤に据え、情報通信分野においては、「先進的情報技術エコシステムの開発」を米国のイノベーションの構成要素の一部に掲げ、「国家規模での先端通信ネットワークの開発」、「ブロードバンドアクセスの拡大」、「配電網の近代化」、「サイバースペースの安全化」、「次世代情報通信技術の研究支援」の5つを投資対象にあげている。

1991年以来、米国の情報通信分野の研究開発は、科学技術政策局（OSTP）の省庁

20　A Strategy for American Innovation: Securing Our Economic Growth and Prosperity http://www.whitehouse.gov/innovation/strategy

21　NITRD Program 2012 Strategic Plan http://www.nitrd.gov/PUBS/strategic_plans/2012_NITRD_Strategic_Plan.pdf

横断イニシアティブ「ネットワーキング情報技術研究開発（NITRD）」[22]の下で戦略的に取り組まれている。現在、NITRDは情報通信分野の投資対象をCyber Security and Information Assurance（CISA）, High-Confidence Software and Systems（HCSS）, High-End Computing Infrastructure and Applications（HEC I&A）, High-End Computing Research and Development（HEC R&D）, Human Computer Interaction and Information Management（HCI&IM）, Large-Scale Networking（LSN）, Social, Economic, and Workforce Implications of IT and IT Workforce Development（SEW）, Software Design and Productivity（SDP）の8つのProgram Component Area（PCA）にカテゴライズしている。このほかに、新しい課題に柔軟に取り組むため、Big Data R&D, Cybersecurity and Information Assurance R&D, Health Information Technology R&D Wireless Spectrum R&Dの4つのSenior Steering Groups（SSGs）が組織されているほか、参加機関のCIOにより、クラウドコンピューティング、セマンティックウェブとオントロジー技術などに関する研究の方法論、標準、ベストプラクティス、技術評価、テストベッド、研究技術の実装の加速について情報共有を行うCommunity of Practice（CoP）が構成されている。

緊縮財政下の2013年度予算案におけるNITRDは、ビッグデータから価値や知見を引き出す技術に焦点が当てられ、前年度比1.8%増の38億ドルが要求されている。NITRDに参加している16省庁における予算配分では、これまで通り最大分担機関であるNSFが約3分の1（12億ドル）を占め、DOD、DOE、NIH、DAPRAがそれに続いている。これら5機関でNITRD予算の9割を占めている。PCA別に見ると、トップ3はこれまで通りHEC I&A（11億ドル）、HCI&IM（7.7億ドル）、CSIA（6.7億ドル）となっており、特にサイバー・セキュリティに関する予算が増加している。

2012年7月に発表された「NITRD Program 2012 Strategic Plan」では、情報技術分野で米国が主導権を確保し続けるために強化すべき分野として、①人、コンピュータ、データの相互作用による知的創造性を拡大させる新しい理解や技術（WeCompute）、②生活を依拠させられる安全安心なシステムの設計・構築能力（Trust&Confident）、③サイバー能力をフル活用するための教育・訓練の変革（Cyber Capable）、といった長期的な戦略目標を提示している。また、NITRDはさらに省庁連携を強化し、新たな産学連携のあり方や学際的取り組みを追求し続けるべきとしている。

オバマ政権は、米国の製造業を再活性化するため、ロボティクスを「先進製造パートナーシップ」の柱の一つと位置づけており、次世代ロボット研究への投資促進のために「国家ロボティクスイニシアチブ（NRI）」[23]を立ち上げた。NRIは、NSFが主導し、NASA、NIH、USDAの全4省庁が総額7,000万ドルを出資する省庁横断型の研究イニシアティブで、人間の行う作業をサポートできる最先端ロボットの開発を目指している。

また、2012年3月、膨大なデジタルデータを最大限に活用することを目指して「ビッグデータ研究開発イニシアティブ」[24]を立ち上げた。膨大かつ複雑なデジタルデータ群を

22 NITRD: Networking and Information Technology R&D　http://www.nitrd.gov/Index.aspx
23 NRI: National Robotics Initiative　http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503641&org=CISE
24 Big Data Research and Development Initiative プレス・リリース：http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/big_data_press_release_final_2.pdf

有効利用することで、米国が抱える課題解決への一助となることが期待されており、「膨大な量のデータを収集・保存・管理・分析・共有するために必要な最先端技術を進歩させること」、「それらの技術を科学・工学における発見や国家安全保障の強化、教育や学習の変革を加速させるために用いること」、および「ビッグデータ技術の開発と利用に必要な労働力を拡充すること」という 3 つの目標を掲げている。NSF、NIH、DOD、DARPA、DOE、USGS の連邦 6 機関が、ビッグデータ関連事業へ合計 2 億ドル超を拠出することが発表されている。OMB･OSTP の「2014 年度予算覚書 [25]」においても、NITRD においてビッグデータ革命がもたらす課題に取り組むと明示されている。

米国は、情報通信技術のあらゆる分野で世界をリードしている。ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術では、Intel 社のマイクロプロセッサ、NVIDIA 社のグラフィックプロセッサに代表されるように、スーパーコンピュータ以外の商用コンピュータで用いられる技術をスーパーコンピュータにも利用する形態で、産業応用と密接に関連した開発が行われている。また、スタンフォード大学発のパケットネットワークを主対象とする OpenFlow から始まったネットワーク制御のオープン化の波は、Software-Defined Network（SDN）としてあらゆるネットワーク制御技術やネットワークサービス制御を対象とすべく対象を広げている。

データセンターに関する省電力化では、Google および Facebook、Amazon 以上の知見をもつ所はないと考えられる。ソフトウェア工学では、NFS を中心に CIF21（Cyber Infrastructure Framework for 21st century science and engineering）[26] 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。

人工知能分野では、2011 年 2 月、IBM の人工知能システム Watson がクイズ番組で人間のチャンピオンを破った。これは、並列計算環境と、Wikipedia を中心とする高品質な電子テキストの利用によって実現された質問応答システムであり、自然言語処理の成熟に世界が驚嘆した。自然言語処理の分野では、DARPA による巨額の研究費によって継続的に研究が推進されており、音声翻訳を中心とする BOLT（Broad Operational Language Translation）[27]、因果関係認識や推論に焦点を当てた DEFT（Deep Exploration and Filtering of Text）[28] などがある。

ロボット分野では、Willow Garage 社が主導するオープンソースのロボット用ソフトウェア「ROS（Robot Operating System）」[29] は同社のロボット PR2 と合わせてソフトウェアとハードウェアのプラットフォームにより世界的に広がりつつあり、ROS を採用したロボットが増えている。手術ロボット「ダビンチ」[30] は全世界で約 1,500 セットが普及しているなど、医療を含めたサービスロボットの実用化が進んでいる。

情報セキュリティの分野では、米国国防総省が、陸軍・海軍・空軍・海兵隊が個別にもっていたサイバー部隊を統合し、Cyber Command（USCYBERCOM）を 2010 年 10 月に設置した。2011 年 7 月には、国防総省が国家のサイバー空間に関する防衛戦略を公

25 http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/m-12-15.pdf
26 US NSF, Cyberinfrastructure Framework for 21st Century Science and Engineering（CIF21）: http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504730
27 http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Broad_Operational_Language_Translation_（BOLT）.aspx
28 http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Deep_Exploration_and_Filtering_of_Text_（DEFT）.aspx
29 ROS ロボットプラットフォーム http://www.ros.org/wiki/、http://www.willowgarage.com/
30 手術ロボット daVinci http://www.intuitivesurgical.com/company/

表している[31]。また、米国 NIST では 2007 年より開始された新たなハッシュアルゴリズム SHA-3 の選定が 2012 年 10 月に完了した[32]。アルゴリズムの選定ではサイドチャネル攻撃への耐性も検討されたため、今後、標準暗号アルゴリズムが更新される際にはサイドチャネル攻撃やフォルト攻撃への耐性も追加される可能性が高い。 著作物の取り扱いについては、クリエイティブ・コモンズ・ライセンスをはじめとする自由利用ライセンスの活用が進んでおり、大学教材の二次利用を促進するオープンコースウェアの取り組みをはじめ、公共情報の活用に向けた動きが活発である。

社会システムアーキテクチャの分野においては、IBM が環境、エネルギー、食の安全など、地球規模の課題を IT の活用により解決し、地球をよりスマートにしていくというコーポレートビジョン「Smarter Planet」[33] を提唱し、リオデジャネイロのインテリジェント・オペレーション・センターの計画などに参画している。この概念は同社の主唱する “Autonomic Computing” と共鳴し、各地で進む “Smart City” や “Smart Grid” プロジェクトにおける技術開発のインセンティブを生み出している。

大規模データ処理技術では、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。Google は成果を論文として発表しているがソフトウェアをオープンソースとして公開しているわけではなく、それに対し、Yahoo! は同等のソフトウェアをオープンソースとして成長させる方策をとり、エコシステムを構成している。

大規模データの分散処理を支援するソフトウェアフレームワークとして、2004 年に Google 社が MapReduce[34] をリリースしたこと、およびこれに触発されて、Apache ソフトウェア財団が Hadoop[35] をフリーソフトウェアとしてリリースしたことが、ビッグデータの分析に大きな貢献を果たした。ストリーム処理技術においては、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。米国の IBM の Splash プロジェクト[36] では、統計モデルとサンプリング技術を駆使して、データベースを一種のシミュレーションエンジンとして用い、what-if 問合せ（未来を予測する問合せ）の実現を図っている。

ワシントン大学においては、Fold it[37] と呼ぶシステムを開発し、コンピュータゲームを通じたクラウドソーシングによるタンパク質の構造解析の仕組みを開発している。DARPA では近年クラウドソーシングを用いた問題解決の実験を（Network Challenge[38]、Adaptive Vehicle Make[39] など）積極的に推進している。

クラウドコンピューティングの分野でも、NSF や DARPA による投資が積極的に行わ

31 「平成 23 年度情報セキュリティ産業の活性化方策に係る調査」http://www.nisc.go.jp/conference/seisaku/strategy/dai21/pdf/21sankou03.pdf
32 http://csrc.nist.gov/groups/ST/hash/index.html
33 http://www-06.ibm.com/innovation/jp/smarterplanet/
34 MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters: http://research.google.com/archive/mapreduce.html
35 Hadoop Wiki: http://wiki.apache.org/hadoop/ProjectDescription
36 Splash. http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_project.php?id=3931
37 foldit. http://fold.it/portal/
38 DARPA Network Challenge. http://archive.darpa.mil/networkchallenge/
39 DARPA Adaptive Vehicle Make: http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Adaptive_Vehicle_Make__%28AVM%29.aspx

れている。NSFのComputing in the Cloudプログラムにおいて Microsoftが Windows Azureを基礎研究、応用研究プロジェクトに無償提供するとともに、研究に必要なツールを共同開発した[40]。Facebook、Google、Microsoft、Verizon、Yahoo!など6社が Open Networking Foundationを2011年に設立し、スタンフォード大学の Clean Slateプログラムの成果である OpenFlow規格の策定を推進している。

（2）欧州委員会

欧州委員会の情報通信技術に関する重要な方針は、「Digital Agenda for Europe」、「Work Programme 2013」などに示されている。

欧州全体の重要な戦略として発表された「欧州2020」[41]の7つのフラグシップイニシアティブの一つに、「デジタルアジェンダ」[42]と呼ばれる情報通信技術分野の戦略がある。この戦略は、高速インターネットに支えられたデジタル単一市場から持続可能な経済的・社会的利益を提供することを目標に掲げ、「Digital Single Market」、「Interoperability and standards」、「Trust and Security」、「Fast and ultra fast internet access」、「Research and innovation」、「Enhancing digital literacy, skills and inclusion」、および「ICT-enabled benefits for EU society」の7つの柱（行動領域）と国際関係の下に、100のアクションプランが設定されている。

「Research and innovation」の行動領域では、「公共部門の研究開発努力の脆弱さと分散化」・「市場の細分化と拡散」、そして「ICTに基づくイノベーション取り込みの遅れ」の3つの問題点が指摘され、欧州委員会は、少なくとも2013年までの第7次研究枠組計画（FP7）の期間中は民間への投資を年間20%のペースを維持して増大させるとしている。また加盟国は、2020年までにICTにおける研究開発への公共支出の年間総額を55億ユーロから110億ユーロへと倍増させ、大規模なパイロットプロジェクトを実施し、公共に利益のある分野における革新的かつ相互運用可能なソリューションを開発しなくてはならないとしている。例として、エネルギーや資源を節約するためのICT、持続可能な保健医療、尊厳のある独立した生活のためのICTを基盤とした支援、文化的多様性と創造的コンテンツの推進、電子政府、効率的な輸送とより優れたモビリティのためのインテリジェント輸送システムなどがあげられている。

FP7では、欧州産業の競争力を向上させる（同時に、情報通信技術の発展を主導し社会や経済が直面する要請に応える）ため、2007年から2013年の7年間で情報通信分野の研究に91億ユーロ（9.1B €）の投資がなされる予定であり、その64%が Cooperation Programとして、欧州委員会の戦略投資分野に投資される。

Cooperation Programの資源配分方針がまとめられた文書が Work Programmeである。2013年の12月に改訂された Work Programmeでは、クラウド技術の出現、マイクロ・ナノエレクトロニクスの発展によるデバイスのクラウドへの接続、先進的なインターフェイス、知的情報環境の発展をあげ、イノベーションへの新しいアプローチが必要

40 The sky is no limit: 13 research teams compute in the clouds http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=119248

41 EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF

42 Digital Angeda for Europe: http://ec.europa.eu/information_society/digital-agenda/index_en.htm

であると唱えている。資源配分は、技術とインフラへの継続的な投資として「pervasive and trusted network and service infrastructures（344.9 M € ）」、「cognitive systems and robotics（90 M €）」、「alternative paths to components and systems（229.5 M €）」、および「technologies for digital content and languages（78 M €）」の4つの挑戦課題、主要な社会経済的課題への貢献として「ICT for health, aging well, inclusion and governance（142.9 M €）」、「ICT for a Low Carbon Economy（173 M €）」、「ICT for the Enterprise and Manufacturing（70 M €）」、および「ICT for Creativity and Learning（68 M €）」の4つの挑戦課題がそれぞれ掲げられ、この挑戦課題ごとに行われている。これに加えて、未来の情報通信技術を新しく開拓する探索研究「Future and Emerging Technologies（210 M €）」や、国際協力を通じて欧州の競争力を向上させ、グローバルな課題に協力して取り組むための「International Cooperation（22 M €）」などのカテゴリでの投資もある。International Cooperationでは、ネットワーク・通信分野（光通信、無線通信、サイバー・セキュリティ、モノのインターネットなど）で日本との協力が行われている。

極低電力ICT基盤技術では、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。ARMが低消費電力プロセッシングコアのIP化とファブレス戦略により、携帯電話用では寡占状態にあるなど、ASIC市場において世界的に大きなシェアをもっている。

ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術では、最新（2012年6月）のTOP500[43]では、TOP10に欧州の研究機関に設置された4つのコンピュータ（4位と8位にドイツ、7位にイタリア、9位にフランス）が入っていることからわかるように、欧州でも予算措置がなされ、高い性能を有するスーパーコンピュータが設置され、活発に研究がなされている。

無線通信技術の省電力化に関するプロジェクトが多く目立ち非常に活発に活動している。EU FP7 EARTHプロジェクトでは高いエネルギー効率のLTE技術を、英国MVCE GreenRadioではインダストリ／アカデミックが協力し100倍の効率を目指している。その他、GREEN-T（CELTIC）、OPERA-Net（CELTIC/EUREKA）も無線通信の効率化を主眼としている。

2013年までのFP7で、サービスコンピューティングやアンビエントインテリジェンス（環境知能）などの枠組みで、新分野に対して多面的に研究プロジェクトを展開し、基礎研究面では米国と肩を並べる成果を上げつつある。

ロボットの分野では、ドイツ、フランス、イタリアが中心となり、オープンソースプロジェクトiCub[44]が進み、今後の成果が期待される。介護福祉分野ではデンマークと日本との連携が進められている。ECHORD（European Clearing House for Open Robotics Development）[45]では、FR7の一つのプロジェクトとして多数の産学連携のロボット応用研究により底辺が拡大されている。また、Robo Earthプロジェクト[46]でロボットのWWW化を進めている。

触覚インターフェイスでは、フィンランドSenseg社が開発した「静電気による触覚ディスプレイ」が注目を集めている。タッチパネル表面に帯電させ、皮膚に吸着させることで

43 TOP 500 Supercomputer Sites: http://www.top500.org
44 iCub ロボットプラットフォーム http://www.icub.org/
45 ECHORD http://www.echord.info/wikis/website/home
46 RoboEarth http://www.roboearth.org/

摩擦力を呈示する。

2013年から10年間、10億ユーロの規模でビッグデータ関連のプロジェクト、FuturICT[47]が立ち上がろうとしているが、知識処理関係では現在のところSemantic Webがフォーカスされている。欧州勢は依然として世界のトレンドメーカーの一角を形成している。画像圧縮のMPEG標準化技術への貢献度が高く（ドイツHHIなど）、今後も継続的な参画が予想される。映像技術ではDisney Research Europe（Zurich）、画像認識技術においては、Microsoft Research（Cambridge）といった企業研究所の活動も存在感があり、例えば昨今注目を集めたKinectセンサによる距離画像からのユーザのジェスチャ認識は、MSRケンブリッジ研発の技術である。大学からのスピンオフを含め、画像処理・技術に基づく製品がベンチャー（MobileEye（車載画像処理）[48]、Im-sense（画像のHDR色彩補正技術））により市場に送り込まれている。

英国エジンバラ大学[49]では、科学分野、特にバイオインフォマティクスにおけるキュレーションおよびデータプロヴァナンス技術について先駆的な研究を行っている。この領域においては世界的な拠点となっている。英国サザンプトン大学のLuc Moreauが中心となり、データプロヴェナンスの標準モデルOpen Provenance Model（OPM）[50]の構築を行っている。

データベースのグラフ・ストリームマイニング分野では、グラフデータモデル、知識ベース、RDFなどの研究が盛んに行われており、グラフマイニングと関連付けた高い水準の研究が数多く行われている。ストリームマイニングについては、StreamCloudプロジェクト[51]などにより研究が活発に行われた。また、IBMチューリッヒによる大規模な匿名署名プロジェクト、各種暗号アルゴリズムの国際標準の保有（ISO/IECなど）、英国政府による個人情報活用プロジェクトの開始（mi-data）、Digital Enterprise Research Institute（DERI）やGerman Research Center for Artificial Intelligence（DFKI）、Max Planck研究所など、アイルランドやドイツでは、Webにおける知識処理の強力な研究拠点が形成されている。

レジリエント・システムソフトウェアでは、欧州ネットワーク情報セキュリティ庁（ENISA）のリスクメトリックスや車載OSの規格など標準関係では強みが見られる。フランス国研INRIA発の形式的検証技術をベンチャーにしてAirBusで使うなどの連携した応用研究開発事例がある。また、ドイツなどを中心に自動車の情報セキュリティに関する研究開発で先行しており、EVITA（E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications）[52]やPRESERVE（Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems）[53]といったプロジェクトにおいて安全な車載ネットワークや車車間通信、路車間通信を実現する技術の開発が進められている。プライバシーの取り扱いは、1995年のデータ保護指令が全体的な基調をなし、それに基づいて各国政府がプライバシー保護法制を定

47 http://www.futurict.eu/
48 http://www.mobileye.com/
49 University of Edinburgh DB Group http://www.lfcs.inf.ed.ac.uk/research/database
50 The OPM Provenance Model. http://openprovenance.org/
51 StreamCloud: http://www.streamproject.eu/
ICML: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/icml/
52 EVITA（E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications）: http://evita-project.org/
53 PRESERVE（Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems）: http://preserve-project.eu/

めている。それに加えて、特に情報通信分野については、2002 年に採択された電子プライバシー指令が、通信の秘密などの取扱を定めている。EU のプライバシー保護法制は総じて消費者の権利を強く保護するものであるが、一方で産業界からは、柔軟なビジネス展開を阻害するものであるという批判も存在する。

著作権の取り扱いについては、2003 年に「公共セクター情報の再利用指令」が採択され、各国において公共機関の保有する情報の公開と二次利用促進のための作業が進められている。

ビッグデータ分野は、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 [54]。ストリーム処理については処理モデルや高性能化の研究で成果を上げている。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。フィンランドでは Data to Intelligence（D2I）と称する Strategic Research Agenda が始まろうとしている。10 の大学・公的機関と 30 の民間企業が参加し、初年度 10M €投じてビッグデータ活用を図る。

ライフサイエンス分野におけるビッグデータの活用では、英国ウェルカム財団が出資する Wellcome Trust Sanger Institute（旧 Sanger Centre）[55] が中心になり、健康と疾患にかかわるゲノムの理解をミッションとして、いくつかのプロジェクトを進めている。測定機器の開発も行われている。そのデータの解析は、数百名の人員を擁する EBI（European Bioinformatics Institute）[56] が欧州の中核センターとなって進めている。その上に、前述の ELIXIR プロジェクトも計画されており、米国に伍してこの分野を牽引するものと思われる。

英国では早くから 50 万人規模のコホート研究 [57] を計画しており、バイオバンクとしてはほぼ準備を終えた。スウェーデンでは同じく 50 万人規模の LifeGene プロジェクトが立ち上がりつつある。さらに、海洋微生物のプロジェクト [58] なども進行中である。欧州ではもともと産業界との結びつきが強く、情報産業も乗り出すなど、活発である。米国と類似の個人ゲノム解析サービスもアイスランドで行われている [59]。

Chorus+[60] 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を主導する MediaEval プロジェクト [61] を支援している。

54 総務省 H24 年度版 情報通信白書 : http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc121440.html
55 http://www.sanger.ac.uk/
56 http://wwWebi.ac.uk/
57 http://www.ukbiobank.ac.uk/
58 http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t155-1.pdf
59 http://www.decodeme.com/
60 Chorus+: http://avmediasearch.eu/
61 MediaEval: http://www.multimediaeval.org/

（3）中国

中国の情報通信技術に関する重要な方針は、国家中長期発展計画および第 12 次五カ年計画（12・5）に示されている。国家中長期発展計画（2006 年～ 2020 年）では、「近代的なサービス業の情報支援技術および大規模アプリケーションソフト」、「次世代ネットワークの重要技術・サービス」、「高効率で信頼性の高いコンピュータ」、「センサネットワークおよ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テレビ」、および「重要システムの情報安全」の 7 つの優先テーマを掲げている。

また、第 12 次五カ年計画（2011 年～ 2015 年）では、新世代移動通信、次世代インターネット、三網融合（電気通信網、ラジオ・テレビ放送網およびインターネットの融合）、物聯網（Internet of Things; モノのインターネット）、クラウドコンピューティングを含む新世代情報技術産業が重点産業分野として列記されている。

電子情報通信技術の基盤については、2010 年 11 月では中国天津の NUDT（National University of Defense Technology）のスーパーコンピュータが世界最高速となったことからわかるように、中国の台頭が著しい。この開発では、特にソフトウェア技術において格段の進展を遂げたと考えられる。また、純国産のマルチコアプロセッサを使ったスパコンの開発などにも着手 [62] しており、急速に技術レベルを上げている。

モバイル・無線ネットワーク領域においても、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うえで、ベースバンド部をクラウド化し、複数セルや周波数間で共有する新しい無線アクセスネットワークアーキテクチャの提案 [63] が、チャイナモバイル（中国移動通信）から行われている。

自然言語理解や意味処理の分野では、精華大学、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。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研究が精力的に進められているほか、中国語意味辞書 HowNet が整備され [64]、中国語理解や質問応答システムの基盤となっている。上海交通大学や精華大学などでは、意味処理に関する高度な研究が進められ、国際的な評価も高い。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。中国国内の検索最大手百度（Baidu）の検索エンジンは、国内シェア 1 位にあり、音声検索、音声翻訳などのサービスも広まりつつある。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ている。

高度な画像処理を基盤にして Deep-Sea Robot Jiaolong という深海探査ロボットが研究開発され、資源探査に利用される予定という [65]。知能ロボットへの注力など [66]、タスク指向型の応用研究開発を国家全体で推進する姿勢が見られる。

中国のサイバーフィジカルシステムへの取り組みで特筆すべきものは、2009 年に温家宝首相がコンセプトを示した「物聯網」である。政府による政策誘導の下、北京、天津、

62 中国、国産プロセッサを搭載したスーパーコンピュータの存在を明らかに ; http://www.computerworld.jp/topics/568/201024

63 China Mobile, C-RAN: The road towards Green RAN; http://labs.chinamobile.com/cran/wp-content/uploads/CRAN_white_paper_v2_5_EN.pdf

64 http://www.keenage.com/

65 http://spectrum.ieee.org/green-tech/mass-transit/chinas-research-sub-to-attempt-record-dive

66 http://www.peoplechina.com.cn/zhuanti/2010-04/21/content_265114.htm

武漢、上海など各地に物聯網に関する産業連盟が次々と設立され、各種センサやRFIDを利用したセンサ群と情報ネットワークの融合により、交通や物流など急激に成長する都市の問題を解決するための活動が各地で行われている。中国初の国家レベルの大規模環境都市開発プロジェクト「天津エコシティ」はよく知られている。

物聯網の実現・規格化に向けた標準化チームが2009年に設立され、中国科学院や中国移動通信集団公司など多くの研究開発機構・企業が参画し、国家戦略上の最重要テーマの一つとして物聯網の規格化、応用に向けて活発に活動を行っている。2011年より欧州連合（EU）との連携もなされている[67]。2010年10月に発表された「戦略的新興産業の育成・発展の加速に関する国務院の決定」においても、物聯網は次世代情報技術産業の一分野として盛り込まれている。多くの都市で同時に様々な研究開発が競い合って推進されている状況であり、統一のアーキテクチャがあるようには見えない。

ビッグデータ関連研究では、大学が中心となって基礎研究において多く成果を上げている。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、MapReduce系の高速化の取り組みもある。中国では、Googleに代わる検索エンジンを提供する百度（Baidu）社がビッグデータを保有する中核企業として存在する。

ビッグデータの産出、解釈に関する研究は、BGI（旧 Beijing Genomics Institute）[68]を中心に急速に立ち上がりつつある。データ産出のためのシークエンサーの台数、それを解析するための計算機の数ともに、世界で最高水準を誇る。また、バイオインフォマティクスの専門家も数百名を擁し、我が国を凌ぐ。BGIを中心に様々な植物ゲノムの解析プロジェクトが多数実施されている。欧米からの委託も多いが、世界のゲノムデータ生産拠点としての地位を確立しつつある。また、中国では、英国バイオバンクに関係した研究者がChina Kadoorie Biobank[69]を立ち上げ、2008年には研究参加者が50万人に達した。

インフラ整備については、2010年3月、工業･情報化部など7関係政府部門が、光ファイバ網整備の推進目標として3年間に1,500億元（約1兆8,600億円）以上を投じ、新規加入者5,000万の獲得を目指すなどの方針を発表している。第12次5か年計画では、超高速、大容量かつインテリジェントな国家基幹伝送ネットワークの構築、ブロードバンド無線都市の構築の推進、都市のFTTHの推進、農村地区でのブロードバンドネットワーク建設の加速などにより、ブロードバンド普及率およびアクセス帯域幅を全面的に向上させるとしている。三網融合に関しては、2010年7月より、北京、上海、深セン、大連など12都市が、テスト実施のためのモデル都市となっている。

（4）韓国

韓国の情報通信技術に関する重要な方針は、「科学技術基本計画」、「新成長動力ビジョンおよび発展戦略」、「ITコリア未来戦略」、「IT産業ビジョン2020」などに示されている。韓国政府の分野別研究開発支出を見ると、IT分野への支出がもっとも高く、全体の1/3を占める。

科学技術基本計画においては、7つの重点分野のうち知識基盤サービス（ソフトウェア、

67　中国通信社，無錫に中国ＥＵ「物聯網」専門家グループ発足；http://www.china-news.co.jp/node/67799
68　http://www.genomics.cn/en/index
69　http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t155-1.pdf

デザインなど）と基礎基盤融合技術（バイオチップセンサー、知能型ロボットなど）が情報通信技術に関する。

新成長動力ビジョンにおいては、3大課題のうち先端融合産業と高付加価値サービス産業の一部（先端融合産業の放送通信融合産業、IT融合システム、ロボット応用と、高付加価値産業のコンテンツ・ソフトウェアが該当）が、情報通信技術に関する。

李明博政権の国家総合IT戦略として、未来企画委員会、放送通信委員会（KCC：Korea Communications Commission）および知識経済部は、2009年9月、「ITコリア未来戦略」を発表した。ITが未来の成長エンジンとして発展するべく、[1]IT融合産業、[2]ソフトウェア、[3]主力IT機器、[4]放送・通信、[5]インターネットを5大中核戦略として育成し、2009年から13年までの5年間で189兆3,000億ウォン（政府14兆1,000億ウォン、民間175兆2,000億ウォン）を投資するとしている。

電子情報通信技術の基盤では、ゲート長30nmのDRAM製造や、世界最高速の光通信技術（10G GPON）の実証、第四世代移動体通信システム（LTE-Advanced）の開発など、世界水準の成果を確実に上げてきている。サムスンを中心としたグローバル企業が、半導体チップ、スマートフォン、フラットパネルディスプレイの分野で高い世界シェアを確保し、その豊富な研究開発資金力に支えられた基盤技術の競争力は高い。サムスン電子の研究開発投資額は、2000年代後半には日本企業を抜き、韓国全体の投資額の1/4を占めるまでに至っている。なお、サムスン電子は、新たな成長の柱として、太陽電池、LED、自動車用二次電池、バイオ医薬、医療機器の5つの事業を掲げ、2020年までに26兆ウォンの投資を行うという（Vision2020）。

大学での研究活動も堅調である。ソフトウェア工学では、KAISTや1997年に開学したICU（Information and Communications University）などでは、米国で学位を取得した教員を呼び戻し基礎研究の充実を図っている。家電、自動車などの組込みソフトウェアの研究においても質の高い研究成果が見られる。ロボット分野では、知識経済部のリーダーシップのもと、ロボット産業支援プロジェクトが進められている。ヒューマン・ロボット・インタラクションのサービスフレームワークの標準化は日本と韓国が共同で取り組んでいる。また、サムスンのバックアップのもと、触覚機能付きタッチパネルの研究が精力的に進められている。KAISTなどの国立研究機関においても強力な研究開発体制がある。また、省電力を考慮したグリーンICT技術などに重点を置き、研究開発を推進している[70]。韓国の携帯電話通信業者と大学が開発した無線ネットワーク上の通信規格「WiBEEM」がISOの国際標準規格となるなど、センサネットワークやユビキタスネットワークに関連する標準化活動にも力を注いでいる。

度重なる国家規模のサイバー攻撃被害の経験から、情報システムのセキュリティに対する政府の危機意識は高く、政府主導の対策技術、システム開発が実施されている。例えば、KISAはボット感染ホストの検知から駆除までを一貫して行うシステムを構築し国内ベンダーの協力のもと、サービス提供を行っている。Ahnlabをはじめとして情報セキュリティ企業が数百程度存在し国産の技術を開発している。これらの企業が扱う製品の韓国国内シェアは高く、SECUIのUTM製品など日本を含む海外での導入実績が増えている例がある。

70 http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n4080000.pdf

知識経済部のIT産業振興年度報告書（Annual Report on the Promotion of IT Industry[71]）によると、韓国の情報通信技術の成長戦略におけるキーワードは「IT Convergence」である。既存の産業技術とITとの融合をIT Convergenceと呼んでいるが、これは中国の「物聯網」や米国の「Cyber Physical Systems」と共通する概念である。

知識経済部は、2010年10月、10年後の韓国のIT産業の青写真である「IT産業ビジョン2020」を発表した。具体的には、3大政策方向として[1]IT産業の躍動性強化、[2]全産業の成長活力再充電、[3]創意的成長基盤拡充をあげ、それを実現するための10大政策アジェンダを用意した。2020年までにIT分野で輸出3,000億ドルを達成し、米国と中国に続く世界3大IT輸出国に跳躍するとともに、四大IT融合市場リーダーとなるという目標を掲げている。

例えば、2011年の大規模な停電の影響もあり、李明博政権のリーダーシップのもと、済州島での大規模なスマートグリッド実証実験が開始されている。また、スマートシティ新松島プロジェクトも注目すべきである。また、国連の電子政府ランキングによる、政府活動の電子化において、韓国は2010年から世界一位である[72]。知識経済部や保健福祉部を中心に、がんなどのゲノム解析を実現するプラットフォームの整備[73]が進みつつある。また、コホート調査でも、韓国では25万人規模を目指すKorea Genome and Epidemiology Study（KoGES）[74]が実施されている。

近年では、2020年までに現在のLTEの40倍高速なワイアレス通信環境の実現等を目指すGiga Koreaプロジェクトの推進[75]、国家最高性能超高速コンピュータの活用と育成に関する法律の策定[76]等がなされている。

なお、2013年2月に発足した朴槿恵（パク・クネ）政権では、情報・通信・放送の融合による新たな成長エンジン創出をはかるべく、知識経済部のICT及び郵政関連業務、教育科学技術部の科学技術関連業務等と合わせた機能を持つ「未来創造科学部」が設置されることが予定されている。未来創造科学部は、科学技術と情報通信を産業全般に融合させ、雇用を創出するという朴槿恵大統領最大の政策アジェンダである「創造経済」の中核を担う予定だ。廃止予定の国家科学技術委員会の機能も、未来創造科学部に継承される予定である（2013年3月時点の情報）[77]。

71 2011 Annual Report on the Promotion of IT Industry (Summary) , Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea; http://www.nipa.kr/board/boardView.it?boardNo=79&contentNo=38&menuNo=294&gubn=board&page=1

72 http://www2.unpan.org/egovkb/global_reports/12report.htm

73 http://pgm21.or.kr/

74 http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t155-1.pdf

75 http://www.industrykorea.net/BCS_Com/Project/PDF/ % EC % 9E % 91 % EC % 97 % 85 % EC % A4 % 91/121016-MKE_% EC% 98% 88% EC% 82% B0.pdf

76 http://japanese.joins.com/article/j_article.php?aid=145883&servcode=servcode

77 http://crds.jst.go.jp/singh/wp-content/uploads/13as01.pdf

3. 研究開発領域

3.1 デバイス／ハードウェア

ICTは、多くの社会課題に対してのソリューションを与えるとともに、他の産業を支える基盤となる重要な分野である。そのICTを実現・発展ならしめているのがデバイス／ハードウェア領域といえる。ICTがインターネットに代表される仮想空間から、より物理的な空間に応用領域を広げ、人間の身の周りに意識されずに空気のように存在（アンビエント化）している現在、デバイス／ハードウェアも二つの方向で研究開発が行われようとしている。

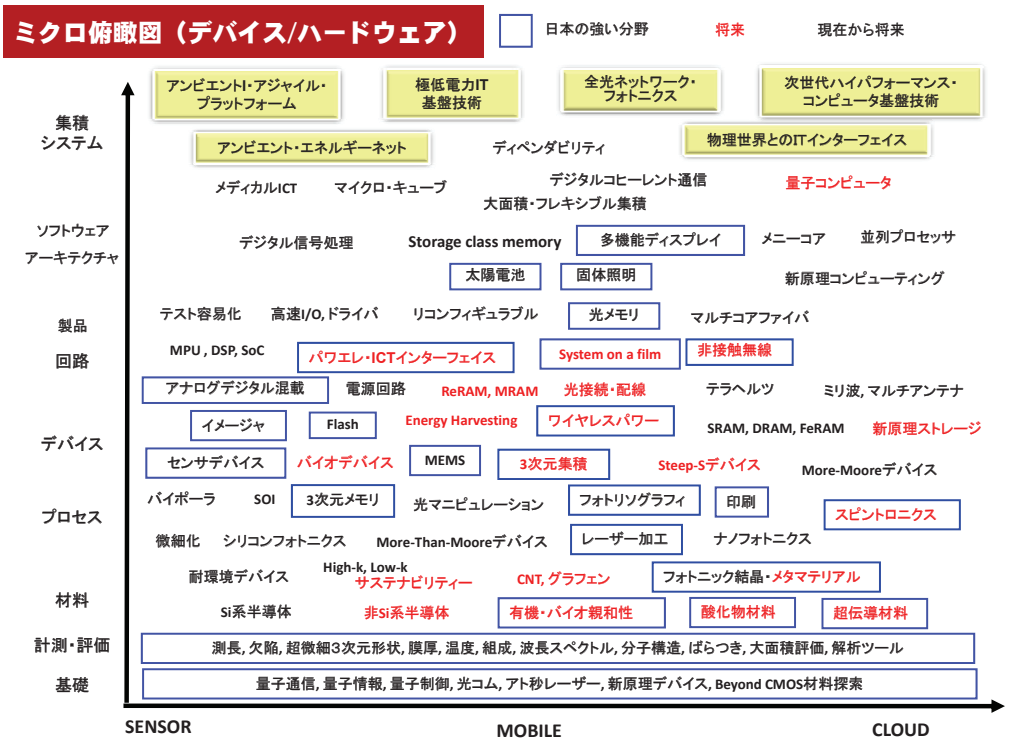
一つは、従来のアプリケーションやサービスをより発展させるため、ハードウェアの性能や消費電力性を飛躍的に向上させるといった方向である。特に、低消費電力性の大幅な向上なくしては、熱の壁に阻まれて、性能向上も計れないという危機的な状況になってきている。そのため、極低電力を実現する新たなデバイス／ハードウェアの研究開発は喫緊の課題である。ナノ材料技術やデバイス単体レベルでの、次世代ICTをねらった研究投資は行われているものの、最近では、デバイス／回路／システム連携といった観点からの研究から新たな進展が生まれる状況になっており、世界的にも連携分野の研究強化が始まってきている。わが国は広い分野にわたって、科学技術や産業が充実しており、広範な分野の連携で研究を推し進めることにより、世界的な競争でも差別化が計れるものと期待される。特に、炭素系の材料をベースにしたトランジスタやトンネルFET（Field Effect Transistor）、3次元技術、スピンデバイス、フォトデバイスなどナノエレクトロニクス分野での世界的なリードを、極低電力ICTに生かしてゆく先駆的な連携研究は、わが国の将来のICTを支えるとともに、わが国が世界的な競争でも優位に立てる源泉となりうる。

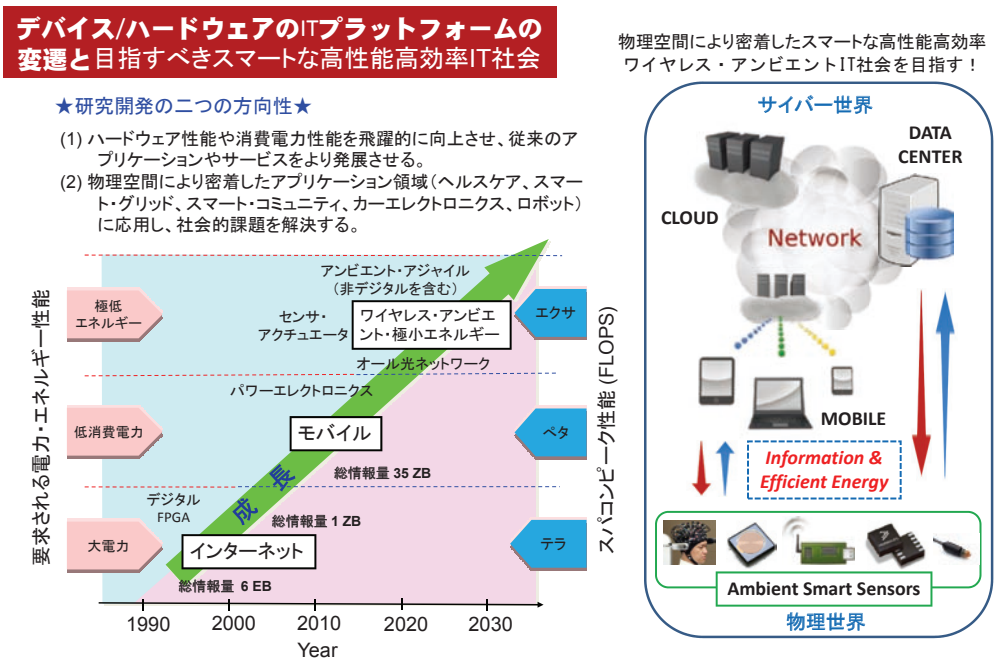
もう一つは、物理空間により密着したようなアプリケーション領域を新たに創出するデバイス／ハードウェア領域で、ヘルスケア、スマート・グリッド、スマート・コミュニティー、カーエレクトロニクス、ロボットなどに応用され、社会課題の解決に資するものと考えられている。ここでは、センサやアクチュエータを介して物理空間とインターフェイスするといった機能や、エネルギーの流れを制御する機能など、情報処理だけではないハードウェア機能が重要となる。このような機能の飛躍的な発展が望まれており、新たなデバイス／ハードウェア研究分野が台頭してきている。新たなハードウェアは環境の中に溶け込んだ形で人々の安全で豊かな生活を支えるものと考えられ、アンビエント・エレクトロニクスなど新たな分野の発展を促している。

アンビエント系ICTのハードウェアには、取り扱う物理量が多岐に渡ることや、使われる環境が多様であることなどから、形態が多種多様であるといった特徴がある。そのため、一つのシステムを大量に製造するだけでなく、多種多様な要求に合わせて迅速に対応できる出荷後の柔軟性が求められる。このような新たな要求を満たすアンビエント・アジャイル・プラットフォームは未だ研究の端緒に着いたばかりであるが、わが国が世界に貢献できる分野であると期待される。物理空間と密着した応用なので、きめ細かさや信頼性、すり合わせなどが重要となり、我々の国民性とも合致する。また、機器組み込み用のハードウェアで培ったハードリアルタイム技術や極低消費エネルギー技術、レジリエンシーな

ど技術的な蓄積の観点からも有利に研究開発を遂行できよう。その他、わが国が社会的課題先進国として老齢化問題などアプリに近いといった観点からも優位であると考えられる。アンビエント系ICTでは、エネルギー・ハーベスティングや無線給電など、研究の萌芽はあるものの、まだイノベーションに到達するためにはシステマティックな研究が必要な領域が多く存在する。

ICTデバイス／ハードウェア領域への研究投資は、情報解釈の飛躍的な向上と相まって、社会課題解決への新たなツールやサービスを提供するとともに、産業基盤を確固たるものとし、安心・安全で豊かな国民生活を支えるものと期待される。





3.1.1 アンビエント・アジャイル・プラットフォーム

（1）研究開発領域名

アンビエント・アジャイル・プラットフォーム

（2）研究開発領域の簡潔な説明

サイバー空間と実世界（物理的空間）をつなげることにより、新しい社会システムやビジネス機会を提供する「サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical Systems）」において、キーとなるのは、実世界の情報を収集するセンサネットである。センサネットにおいては、多種多様な多数個の無線センサノードが人間の身の周りに意識されずに空気のように（＝アンビエント（ambient））存在する。これらの多種多様なセンサノードを小型・低消費電力・短納期・低コストに提供する枠組みを「アンビエント・アジャイル・プラットフォーム」と定義する。なお、アジャイル（Agile）の意味は、「機敏な、素早い」である。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

これまで、ICTはコンピュータやWebに代表されるバーチャルな世界におけるアプリケーション（仮想空間アプリ）を中心として発展してきた。今後は、ICTのアプリケーションがより人間の身の回りの現実世界（実空間アプリ）に浸透していくことが予想される。図1に仮想空間アプリと実空間アプリから構成されるサイバーフィジカルシステムを示す。仮想空間アプリの中核をなすのがクラウドである。一方、実空間アプリの中核をなすのがセンサネットである。センサネットで収集された実空間の情報を仮想空間で処理・分析して、実世界にフィードバックすることにより、人間生活の安全・安心・快適・健康などに貢献する。実空間アプリとしては図1に示すように多種多様なアプリケーションが期待されているが、各アプリケーションの有効性やビジネスモデルに関しては不透明な点が多い。また、無線センサノードに対する要求仕様も多種多様である。実空間アプリの有効性を示すためには、例えば、無線センサノードの試作品を用いた実証実験を行う必要がある。この場合、図2に示す二つの問題が生じる。

(a) 各サービス提供者の仕様に応じた汎用デバイスを組み合わせてセンサノードを試作した場合、サイズ・消費電力が大きいため、センサネットとしての実用性が実証できない。
(b) 一方、センサノードの小型化・低消費電力化を実現するために各サービス提供者が専用デバイスの開発を希望する場合、センサネットの実証実験で用いられるセンサノードは一般に数100個程度である。しかし、デバイスメーカーは採算がとれないため受注しない。従って、実空間アプリのサービス提供者は仕様に応じた小型で低消費電力なセンサノードを入手できない。

このように、実空間アプリのサービス提供者が必要とする「少量多品種」なデバイスと、デバイスメーカーが望む「大量少品種」なデバイスのギャップが実空間アプリの実用化を妨げている一因である。

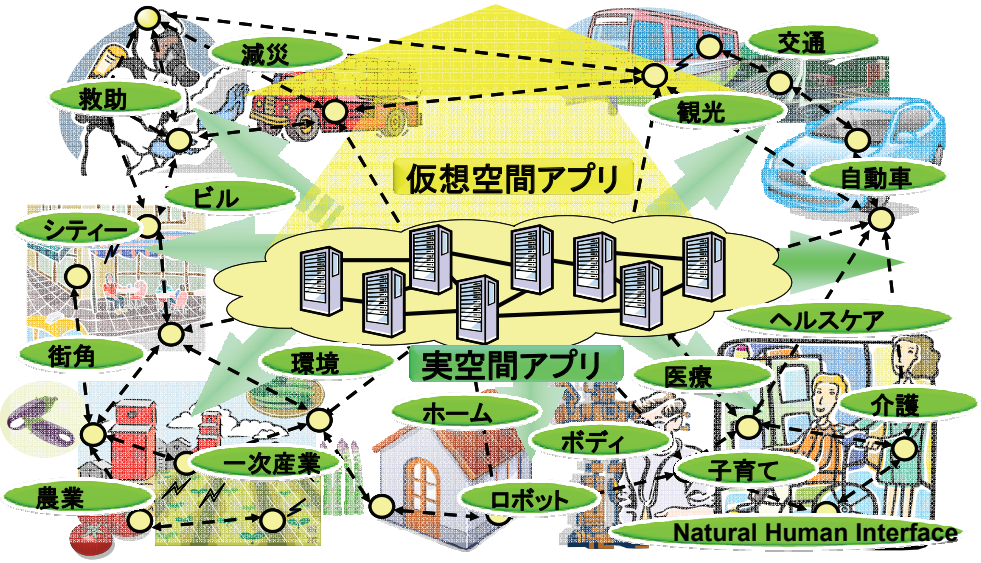


図１　仮想空間アプリと実空間アプリから構成されるサイバーフィジカルシステム

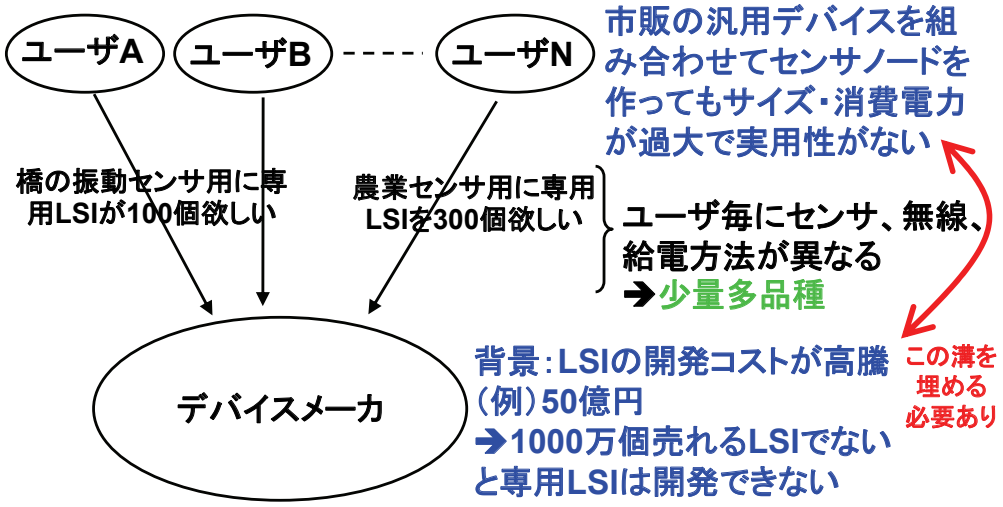


図２　従来のセンサネットにおけるサービス提供者（デバイスユーザ）とデバイスメーカーのギャップ

そこで、このギャップを埋めるために、多種多様なセンサノードを小型・低消費電力・短納期・低コストに提供する「アンビエント・アジャイル・プラットフォーム」が必要となる。アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術としては、次のようなものが考えられる。

- 製造後にプログラム可能なデバイス（例：FPGA（Field-Programmable Gate Array）デバイス）
- デバイスの知識がなくてもサービス提供者がデバイスを使いこなせるソフトウエア環境
- 少量生産を低コストに実現する技術（例：印刷エレクトロニクス、3次元プリンタ）

・異種デバイスの集積技術（例：センサ、アンテナ、MEMS、光デバイス）
・小型化技術（例：3次元実装、1 mm角以下の極小チップ）
・低消費電力技術（例：低電圧回路、メニーコア）

（4）科学技術的・政策的課題

日本はアンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関しては、高い技術レベルを有している。しかし、それらを統合したアンビエント・アジャイル・プラットフォームを形成するためには、新たな学問体系を構築する必要がある。また、従来の異分野連携よりさらに深いレベルでの異業種・異分野連携が求められる。

アンビエント・アジャイル・プラットフォーム自体は潜在ニーズの高い重要テーマである。しかし、図1に示す多種多様なアプリケーションに向けての、多種多様なデバイスからそれらを使いこなす設計環境までを包含した非常に広い技術領域である。しかも、現時点では大きな市場が立ち上がっていない。従って、これらの研究開発をリードできる省庁や企業を一つに絞り込むことができず、複数の省庁・企業の連合体で研究開発を推進する必要がある。

（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）

アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関しては世界中で研究開発が行われているが、アンビエント・アジャイル・プラットフォームのビジョンのもとで行われている研究開発は現時点ではどこにもない。

3次元プリンタの低価格化に伴い、誰もが自由にものづくりを行えることを目的として、「ファブラボ」[1)]と呼ばれる、3次元プリンタやカッティングマシンなどの工作機械を備えた一般市民のための工房が日本を含め、世界中に展開しつつある。ファブラボは米国のマサチューセッツ工科大学発の活動である。

（6）キーワード

プログラマブル、少量多品種、印刷エレクトロニクス、3次元プリンタ、異種集積、センサ、アンテナ、MEMS、光デバイス、小型化、3次元実装、低消費電力

（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	◎	↗	・印刷エレクトロニクス、異種デバイス集積、MEMS、光デバイス、小型実装、3次元実装、低消費電力など、アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関して、研究レベルが高い。関連する国プロも行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	・印刷エレクトロニクス、異種デバイス集積、MEMS、光デバイス、小型実装、3次元実装、低消費電力など、アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関して、世界最高レベルの企業が集積しており、開発レベルも高い。
	産業化	○	↗	・大手IT企業が、サイバーフィジカルシステムの事業化に積極的に取り組んでいる。
米国	基礎研究	◎	↗	・印刷エレクトロニクス、異種デバイス集積、MEMS、光デバイス、小型実装、3次元実装、低消費電力など、アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関して、研究レベルが高い。 ・超小型の無線センサノードの例として、米国のミシガン大学から人間の目に埋め込む眼圧モニタ用の1 mm立方の無線センサノード[2)]が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・IT系の分野では世界最高レベルの企業が集積しており、開発レベルも高い。
	産業化	◎	↗	・IBMに代表される大手IT企業が、サイバーフィジカルシステムの事業化に積極的に取り組んでいる。 ・マイクロプロセッサにおけるIntel、FPGAにおけるザイリンクスのように業界1位の企業が世界をリードしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術に関して、ベルギーのIMEC、フランスのCNRSの研究レベルが高い。
	応用研究・開発	○	↗	・アンビエント・アジャイル・プラットフォームに関連する目立った有力企業は少ない。
	産業化	○	↗	・超小型の無線センサノードの例として、スイスのSensimedから眼圧モニタ用のコンタクトレンズ[3)]が市販されている。
中国	基礎研究	×	→	・特記すべき動きは見当たらない。
	応用研究・開発	×	→	・特記すべき動きは見当たらない。
	産業化	△	→	・「大量少品種」なデバイスの低コスト生産を得意としており、「少量多品種」なデバイスを志向するアンビエント・アジャイル・プラットフォームとは方向性が異なる。
韓国	基礎研究	○	↗	・Body area network、低消費電力など、アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関して、KAISTの研究レベルが高い。
	応用研究・開発	○	↗	・韓国の大手電機メーカーが印刷エレクトロニクス、異種デバイス集積、MEMS、小型実装、3次元実装、低消費電力など、アンビエント・アジャイル・プラットフォームを構成する要素技術それぞれに関して、積極的に開発を行っている。
	産業化	○	↗	・韓国の大手電機メーカーは「大量少品種」なデバイスの低コスト生産を得意としており、「少量多品種」なデバイスを志向するアンビエント・アジャイル・プラットフォームとは方向性が異なる。

（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://fablabjapan.org/what-is-fablab/
2）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.
3）http://www.sensimed.ch/en/products/sensimed-triggerfishr.html

3.1.2 極低電力ICT基盤技術

（1）研究開発領域名

極低電力ICT基盤技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

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、回路とシステムの設計によるエネルギー効率追究の新時代に入った。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ICTの性能が100倍に改善されることは望めない。

エネルギー効率の追究には、デバイスから回路・システムのみならず、さらにソフトウェアからサービスまでの広範な技術の連携と体系が求められる。したがって、アプリケーションを具体的に見据えた技術の研究開発がより重要になる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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・低遅延にデータをチップ内・パッケージ内・モジュール内で転送できるデータ転送技術。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、その効率改善が何より優先される。

② ロジックとSRAMの極低電圧動作回路と電源回路。低電圧化は電力効率改善のための最も有効な手段である。しかし素子特性の揺らぎやばらつきのために、それ以上電源電圧を下げてもエネルギー効率を改善できない限界がある。この限界を下げるための回路上の工夫が求められる。特にロジックとSRAMは同じチップの同じ電源下で使えることが望ましく、ロジックに比べてSRAMは低電圧動作が難しいので、まずはSRAMの低電圧動作が先決である。次にロジックも大規模になるにしたがってより低電圧化が困難になるので、大規模なロジックの低電圧動作が求められる。一方、効率の高い電源変換回路があれば、各回路に固有の最適電源電圧を多用でき、アナログやインターフェイスの回路も含めて、さらなる効率改善ができる。したがって電源回路の研究も重要課題である。

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。従来設計手法で必要となる設計マージンが今後急増する。統計確率を用いたより精緻なモデルを用いて無駄な設計マージンを削る新しい設計手法が重要になる。同時に揺らぎやばらつきの原因を探り、低減することも求められる。設計自動化の研究やデバイス・プロセス技術の研究との連携が求められる。

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の半分を占めることが多く、クロック分配およびフリップフロップの高効率化が優先課題となる。

⑤ 異種技術3次元集積設計技術。システムをボード上からパッケージ内に集積することは、データの転送効率を高め、システムのエネルギー効率を高めることに大きく寄与する。ロジック、メモリ、アナログ、センサ、発電素子などのチップを積層集積してパッケージ内にシステムを構築することにより、エネルギー効率を高める

ことが課題である。

システムの最重要課題

システム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く、より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システム。メモリのアクセスは演算に比べると数桁大きなエネルギーを消費する。メモリ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 無駄の少ない制御方式。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く、最高性能の追求からエネルギー効率の最適化へ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。More Moore に対し More than Moore と称される技術領域。
④ サイバーフィジカルシステム（ビッグデータ取得）のための無線センサネットワークや人体周辺ネットワーク。
⑤ スマート社会システム。

高効率回路の研究動向

高効率回路の研究、特に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。その背景には、省エネ・低電力な商品に対する市場の関心の高さがある。

電源電圧をトランジスタのしきい値近傍まで下げて回路を動作させる研究では、世界をリードしている[1)]。

また、その際に問題となる素子特性の揺らぎやばらつきを考慮した実用的な設計技術の研究でも日本は最先端の研究成果を上げている[2)]。0.5 V で動作するプロセッサやメモリ、電源回路が研究開発されている[2)]。ばらつき要因の物理的理解と、それに基づく知見を設計に導入するシステムが求められる。物理モデルについては不十分な点も多く、大学を中心とした基礎研究が引き続き重要である。また、遅延時間などのばらつきを考慮した統計的な設計手法が求められる。しかし自動設計技術は米国に独占されている点が懸念点である。

電源電圧 0.4 V で動作するデバイスとそのデバイスを使いこなす回路設計の研究も始まっている[3)]。

また、極低電圧でも環境ノイズに耐えて確実に動作するフリップフロップの開発や、あるいは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の研究が始まっている[4)]。

一方、パッケージの外をアクセスするのは非常に大きなエネルギーが必要になる。3次元集積の研究開発の第一歩として、システム・イン・パッケージ（SiP）技術が注目される。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ていた[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にも注目が集まる[1)]。

アメリカでは、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点が特筆される[6)]。（3.1.2.3の注目動向を参照）

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いる。

国内では、メニーコア・プロセッサ技術の低消費電力化を目指す研究開発が行われた[7)]。

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で成果を上げている。また、ノーマリーオフコンピューティング[7)]の研究開発を目指すプロジェクトが始まっている。

プロセス・デバイスの研究と回路・システムの研究の連携の重要性

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、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時代になっている。これまで以上に、プロセス・デバイスの研究と回路・システムの研究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。

（4）科学技術的・政策的課題

エネルギー効率の最適化が可能なシステム（ネットワーク・オン・チップ、極低エネルギー・メモリシステム等）を実現するために、ハードウェア性能や消費電力性能を飛躍的に向上させ、従来のアプリケーションやサービスをより発展させる必要がある。高効率回路の研究、特に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。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・システム技術力の連携強化が求められる。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）

Center for Energy Efficient Electronics Science（E3S）[6]：ICT 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 年から開始した。

（6）キーワード

エネルギー高効率、極低電力、回路・システム設計、More than Moore、3 次元集積

（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「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)]。 ・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」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「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などの実用的な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を目指した研究が始まっている[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	○	↘	・極低電力技術が求められる携帯民生機器の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よい機能設計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に比べて弱い。ヒット商品が出ない。 ・円高が経営環境を損ない国際競争力を削いでいる。
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（Apple、Google、Qualcomm、Broadcomなど）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。 ・他には目立つ技術が少ない。
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。 ・台湾では大学でのLSI設計教育が改革され、技術レベルの向上が著しい。回路からシステムの研究に転換を始めた。医療・ヘルスケアを見据えた研究に注力している。
	応用研究・開発	○	↗	・メディアテックなど台湾のレベル向上が進んでいる。米国帰りの技術者が原動力になっている。
	産業化	○	↗	・パソコンや通信用LSI、LCDを中心に台湾の台頭が著しい。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	○	→	・サムスンや KAIST が活発。サムスンの研究発表が減少しているが、技術流出を防ぐため発表を控えているとの見方もある。
	応用研究・開発	◎	↗	・携帯電話に注力して、マルチメディアや無線通信用の信号処理の技術力が高い。携帯用のプロセッサ技術が蓄積されている。 ・サムスンの研究投資が突出している。
	産業化	◎	↗	・海外戦略が明確である。 ・発展途上国への進出・市場開拓にも積極的。

（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「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.ulp.jst.go.jp/
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「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/koubo/ZZ3_0251.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

3.1.3 ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術

（1）研究開発領域名

ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

超高性能計算能力を有するスーパーコンピュータのハードウェアシステム技術、およびスーパーコンピュータが有する計算能力を実アプリケーションの処理において活用するソフトウェア技術の研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

スーパーコンピュータの動向は、世界の性能上位500位までのコンピュータをリストアップするTOP500[1)]から多くの情報を得られる。性能の測定にはLINPACKベンチマーク（連立一次方程式を解くベンチマーク）が用いられる。TOP500は半年ごとに更新されるが、2012年6月に発表された最新のリストでは、世界最高速のスーパーコンピュータは米国ローレンス・リバモア国立研究所に設置されているIBM Blue Gene/Qであり、16.324 PFLOPSの性能を達成している。その前の、2011年6月と2011年11月は日本の京コンピュータが世界最高速であった。これまではTOP1の座を米国と日本が争っていたのだが、その前の2010年11月では中国天津のNUDT（National University of Defense Technology）にインストールされたマシンが世界最高速となったことからわかるように、中国の台頭も著しい。このマシンはハードウェアとしては米国NVIDIA社のGPU（Graphics Processing Unit）を用いており、中国が独自ハードウェア開発能力を備えているわけではないにせよ、TOP1のマシンをインストールすることで、スーパーコンピュータのソフトウェア技術において格段の進展を遂げたと考えられる。スーパーコンピュータの性能はこれまで3～4年で10倍程度の性能向上を達成しており、1 ExaFLOPS=1000 PFLOPS（1秒間に10の18乗回の浮動小数点演算を実行できる性能）のスーパーコンピュータが2018年頃に実現されると期待されており、米国[2)]、日本[3)]、欧州[4)]など1 ExaFLOPSを目指した技術開発にしのぎを削っている。

ハードウェアの中心となるプロセッサ開発においては米国の技術が進んでいる。現在のTOP500のリストを見ても世界のスーパーコンピュータの多くがIntel社、AMD社、IBM社のマイクロプロセッサ、NVIDIA社のグラフィックプロセッサなど米国の製品を採用している。これに対し、日本の京コンピュータでは富士通が開発したマイクロプロセッサを採用しているが、TOP500にみられるスーパーコンピュータの中での採用率は低い。スーパーコンピュータの高性能化は今後も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の処理能力向上に頼ることになるが、最先端の微細加工技術を製品として実用化する技術は米国の方が進んでおり、日本の技術はやや遅れている。また1チップに多数のプロセッサコアを搭載するメニーコアプロセッサ技術でも、Intel社はMICアーキテクチャをいち早く投入するなど、先んじている。

しかし、現時点でもスーパーコンピュータの性能向上を妨げる大きな要因となっている、消費電力の問題とメモリバンド幅の問題は、半導体の集積度向上だけでは解決しない。例えば、グラフィックプロセッサがここ数年で広く使われるようになったのは消費電力当たりの性能（電力効率）が高いのが大きな理由である。しかし、グラフィックプロセッサ

の電力効率向上にも限界が見えてきており、ExaFLOPSを目指すには、極低電圧（Near Threshold Voltage）半導体技術、メモリバンド幅を確保するための3次元実装や新メモリデバイス技術など、様々な技術の新規技術開発が必要となると予想されている。

また、ハードウェアの能力を最大限活用するソフトウェア技術も重要である。ハードウェア構成はその時々の実装技術に依存するが、ハードウェアが提供する超並列の処理装置を活用し、ハードウェア構成に合わせてアプリケーションの実効性能を向上するソフトウェアの開発は、デバッグや生産性などを含めて大きな課題である。またシステム全体の信頼性も深刻な問題である。これらの困難を克服するためには、ハードウェアとソフトウェアが両輪となって技術開発をする必要がある。

（4）科学技術的・政策的課題

世界共通の技術課題は、消費電力の問題。冷却可能な熱量が4年で10倍は向上しないため、消費電力当たりの性能をこれまでよりも格段に向上する必要がある。例えばEU Mont-Blanc Projectレポート[4]では、消費電力当たりの性能を30倍に向上させないと1ExaFLOPSは達成できないと指摘している。電力効率に優れる組込みシステム用プロセッサの技術を活用することも検討されているが、問題の解決には更なる革新的な技術が必要とされている。

数万～数十万オーダのプロセッサを接続するインターコネクト部、および、プロセッサ～主記憶間のデータ移動の実効バンド幅の向上も世界的な技術課題である。データ移動のバンド幅向上は消費電力を増加させるので、この点でも大きな課題となっている。

システムの大規模化と複雑化に伴い、その信頼性保証も世界的な技術課題である。

政策的には、継続的なスーパーコンピュータの開発計画が重要となる。最先端の半導体技術を利用してプロセッサを開発しシステムとして組み上げる必要があるため、システムの完成までには長い年月を要するからである。米国や中国では、これまでの開発の多くは国防関係の予算が使われており、継続的な開発計画策定という面では優位性がある。一方日本では、京コンピュータが事業仕分けでいったん開発中止となった経緯がある。

（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）

米国では[5]で開発すべき課題となる技術の整理がなされ報告されている。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、システムレジリエンシー（直訳では回復力、広義の信頼性）、運用技術、プログラミングモデルと言語、が取り上げられている。

日本でも、今後のHPCI（High Performance Computing Infrastructure）技術開発に関する報告書の取りまとめが行われている[6]。アプリケーション側のロードマップ（計算科学研究ロードマップ白書）とコンピュータシステム側のロードマップ（HPCI技術ロードマップ白書）の両方あるのが特徴である。

半導体微細化技術では新しいリソグラフィ（露光装置）が必要となるがEUV（Extreme Ultra Violet）露光装置で技術をもつオランダのASML社に米国Intel、台湾TSMC、韓国サムスンが出資[7]。EUV露光装置を用いた半導体微細加工技術はスーパーコンピュータのプロセッサの開発・製造に不可欠と思われる。

ソフトウェアに関しては、IESP[8]などに見られるように、国際協力のもとで新しいフ

レームワークを作ろうという動きが見られる。

（6）キーワード

TOP500、低消費電力化技術、高信頼化技術、メニーコアプロセッサ、インターコネクト技術、プログラミングモデル、ランタイムシステム

（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	◎	↗	・スーパーコンピュータに関する研究費が手当てされ、大学、国立研究機関を中心に活発に研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	・京コンピュータの完成・稼働でアプリケーション開発、システムソフトウェア開発が進展している。
	産業化	○	→	・スーパーコンピュータ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、産業との連携という意味では進展していない。
米国	基礎研究	◎	↗	・DoD, DoEを中心に研究費の手当がされ、多くの研究者がスーパーコンピュータに関する基礎研究に携わっている。
	応用研究・開発	◎	↗	・世界においてスーパーコンピュータの計算能力は米国に最も多く存在し、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、ハードウェア開発技術も、米国が最先端を走っている。
	産業化	◎	↗	・Intel社のマイクロプロセッサ、NVIDIA社のグラフィックプロセッサに代表されるように、スーパーコンピュータ以外の商用コンピュータで用いられる技術をスーパーコンピュータにも利用する形態でシステムが開発されており、産業応用と密接に関連した開発が行われている。
欧州	基礎研究	○	↗	・最新（2012年6月）のTOP500リストでは、TOP10に欧州の研究機関に設置された4つのコンピュータ（4位と8位にドイツ、7位にイタリア、9位にフランス）が入っていることからわかるように、欧州でも予算措置がなされ、高い性能を有するスーパーコンピュータが設置され、活発に研究がなされている。
	応用研究・開発	○	↗	・高い計算能力を有するスーパーコンピュータの設置をうけ、応用研究が進んでいる。
	産業化	○	→	・欧州独自の技術は少ない。スーパーコンピュータの市場はそれほど大きいわけではないので、米国以外は産業化では厳しい状況である。
中国	基礎研究	△	→	・次のスーパーコンピュータ設置の動きはあるが、基礎研究よりは応用研究に資源を投入しているように思える。
	応用研究・開発	○	↗	・中国が有するスーパーコンピュータの計算能力は以前よりも飛躍的に高まっており、それらを利用したソフトウェア技術、特にプログラム最適化技術と運用技術は進展している。
	産業化	×	→	・産業界へ影響を及ぼすには至っていない。
韓国	基礎研究	×	→	最新（2012年6月）のTOP500リストに入っている、韓国に設置されたコンピュータは3つだけであり、それほどの進展は見られない。
	応用研究・開発	△	→	韓国が有するスーパーコンピュータの計算能力はそれほど進展しておらず、応用技術の進展も比較的緩やかだと考えられる。
	産業化	△	→	スーパーコンピュータの市場はそれほど大きいわけではないので、米国以外は産業化では厳しい状況である。しかし、サムスン社は低消費電力を指向するVLSI技術では世界的にも大きな市場を有している。それらの技術がスーパーコンピュータに適用される可能性も十分あるので、今後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）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）
3）文部科学省「将来のHPCI（High Performance Computing Infrastructure）システムの在り方についての調査研究」http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1320290.htm
4）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
5）ExaScale Computing Study: Technology Challenges in Achieving Exascale Systems http://users.ece.gatech.edu/mrichard/ExascaleComputingStudyReports/exascale_final_report_100208.pdf#search='Exascale%20computing%20study
6）http://www.open-supercomputer.org/workshop/sdhpc/
7）Market Watch
http://www.marketwatch.com/story/asml-completes-rd-funding-Samsunginvests-2012-08-27
8）IESP: International Exascale Software Project:
http://www.exascale.org/iesp/Main_Page

3.2 ネットワーク

ネットワーク分野の研究開発を俯瞰するにあたって、光ネットワーク、ワイヤレスネットワーク、新世代インターネットなどの従来区分で分類するのが一般的であろうが、従来区分では新しい流れを的確に記すことが難しいこともあり、出口指向で「エラスティックネットワーク」「グリーンネットワーク」「フィールド指向ネットワーク」の3つに分類した。

光ネットワークやワイヤレスネットワークでの主流の研究開発は、大容量・高速化を目指した従来の延長線上のものである。情報爆発の時代を迎え、ネットワークに求められる要求はとどまるところを知らない。光ネットワークであれば、無線技術で蓄積されてきた位相変調技術や等化技術を導入しての大容量化の研究開発が盛んである。ワイヤレスネットワークにおいては、スマートアンテナ技術や適応変調技術などを導入しながらの高速化が継続してなされている。これらの研究開発は、従来の延長線上であるとも位置づけることができるが、社会を支える基盤でもあり、今後も継続して推進していくことが必要である。

新世代インターネットは、現在のインターネットが抱える課題を打破する目的で10年くらい前から諸外国で活発な研究開発がなされている。ネーミングやアドレシングに着目したコンテンツ指向ネットワークなど、種々のアイデアが提案されている。しかしながら、現時点においても大きな方向感が定まっているとは言い難く、多様なアイデアを産み出していくフェーズにあると認識できる。そのため、基礎研究としての位置づけで国がしっかりと幅広く支援していくことが重要である。

これらに対して、エラスティックネットワーク、グリーンネットワーク、フィールド指向ネットワークは、現在のネットワークが抱える問題を解決するという明確な目的をもった研究開発である。ネットワーク技術が全般として成熟しつつあるという状況をも踏まえると、このような課題解決型の研究開発が盛んになりつつあるのは当然といえば当然であり、ネットワーク研究の第二世代に入りつつあるという見方も可能である。

エラスティックネットワークは、硬直した設計がなされてきたネットワークをより柔軟に設計し直すことで、運用・管理の手間の削減などを目指すものである。Software-Defined Network（SDN）に代表される仮想化技術はワイヤレスネットワークにも入りつつある。コグニティブ無線は、周波数の有効利用に資する技術でもあり、厳格な周波数割当を不要とする技術である。ネットワーク分野の大きな方向性の一つが、柔軟性を指向するこの「エラスティック」である。

グリーンネットワークは、ICT領域での消費電力量が大幅に増大しつつあることを踏まえ、低炭素化、低消費電力化を目指すものである。デバイス単体での低消費電力化から、システム全体での低消費電力化に研究開発の流れが移りつつある。低消費電力化は、わが国が得意な分野の一つでもあり、着実に推進していくことが望ましい。

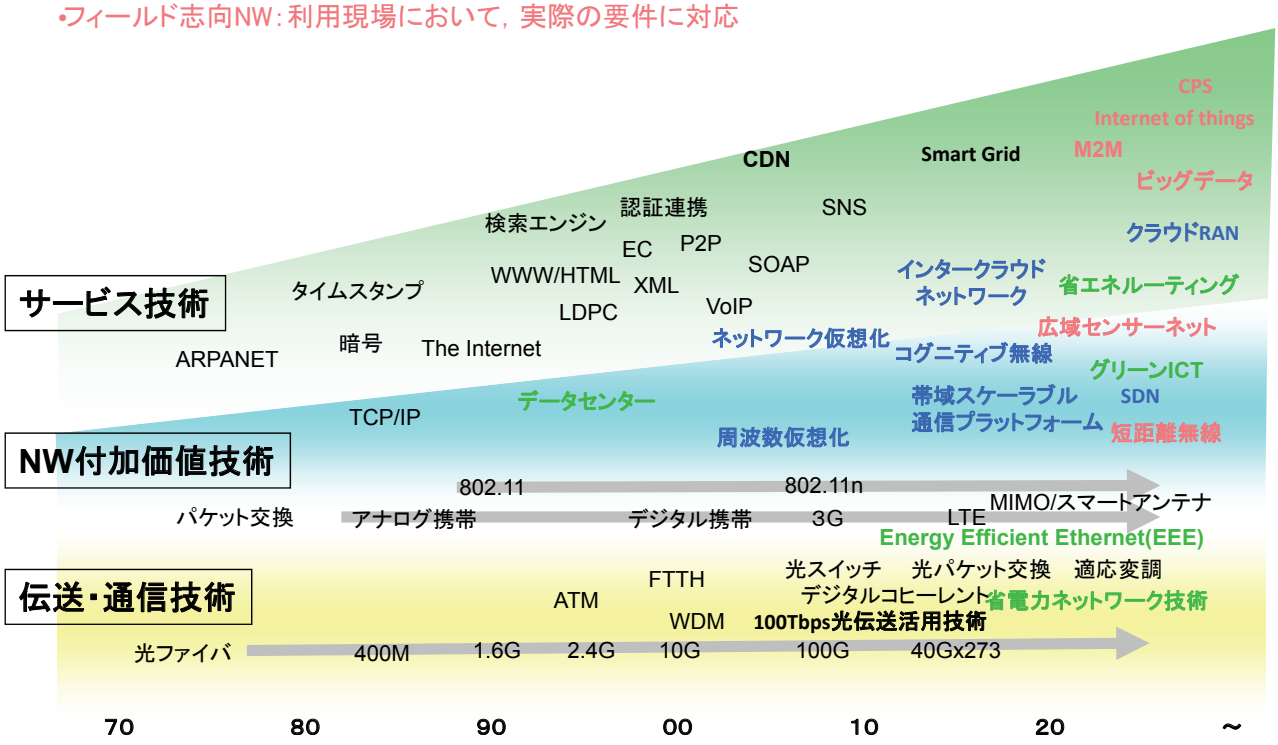
フィールド指向ネットワークは、情報通信が利用されるフィールドに出向き、情報通信に課せられる要件を明らかにしながら、ネットワーク技術の研究開発を行うものである。例えば、地震モニタリングをセンサネットワークで行うにあたっては、バーストデータ収集機構や時刻同期機構などが新たに必要となる。工場内の通信を無線にするにあたっては、制御向けのリアルタイムワイヤレス技術が必須となる。動植物のモニタリングにおいては、低頻度小容量指向センサネットワークが必要である。フィールドに出かけていって、情報

通信に課せられる要件を明らかにし、ネットワーク技術の研究開発を行うことは、Cyber Physical Systems（CPS）の研究開発にも通じる点があり、新たな社会デザインに向けて今後一層推進していくことが望ましい。

ミクロ俯瞰図（ネットワーク）

高速大容量化を目指した着実な研究開発に加えて、省電力、柔軟性、付加価値などを追求

- エラスティックNW：ネットワークをより柔軟に設計することで，運用・管理のコストを削減
- グリーンNW：低炭素化，低消費電力化を実現
- フィールド志向NW：利用現場において，実際の要件に対応



3.2.1 エラスティックネットワーク

（1）研究開発領域名

エラスティックネットワーク

（2）研究開発領域の簡潔な説明

弾力性や融通性のあるネットワーク、およびこれを実現する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

ビッグデータ時代においては、2020年までにデータ量は2009年の44倍の35ゼタバイト、かつそのデータの80%は実世界やWebサイトなどから生成される非構造化データとなることが予測されている[1), 3), 4)]。2010年でのRFIDタグ数が300億、2011年でのインターネットユーザが20億人、2011年での携帯電話数46億台を考慮すると、通信トラフィック全体では2020年までに100倍以上（1年で2倍以上の増加率を想定）の増加となることが予想されている。

ビッグデータ時代の到来を、これまで技術的に支えてきたのが、数百万～数千万台規模の汎用サーバーを配備する大規模データセンターであり、サーバー仮想化技術を用いて統合管理される資源プールの制御により、負荷変動、品質劣化、障害に柔軟に対応し、信頼性やサービス品質の向上ならびに投資コスト削減を実現している。まさにサーバー仮想化技術は、データセンターにおける情報処理能力のエラスティック性を高めている技術の一つである。

上述のように、2020年までデータ処理量やネットワークトラフィック量は増加の一途をたどるため、これに対応するには、膨大数の大規模データセンターがネットワークを介して協調・連携するような超分散型のクラウド環境への変革が必須と想定される。このような環境下においては、ネットワークもサーバー機器と同様に、変化・変動の激しい環境において、通信処理能力を柔軟に融通・制御可能とする新しいアーキテクチャ、制御方式が必要となろう。このような概念を実現する新しいネットワークアーキテクチャやネットワーク制御方式を、エラスティックネットワークと定義する。これは、設備投資を必要とするトラフィック増加と収益が乖離する通信業界[2)]における投資コスト最適化の視点からも、必須の変革であるといえる。

エラスティックネットワークの実現に向けた、一番大きな潮流はSoftware-Defined Network（SDN）である。Open Networking Foundation（ONF）のホワイトペーパー[11)]では、ネットワーク制御メカニズムを、転送処理から分離し、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であると定義されている。SDNでは、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・モデル化することが重要であり、モデル化されたネットワークシステムをソフトウェアにより制御することにより、実ネットワークが制御される仕組みを確立する必要がある。これは、スタンフォード大学から発信されたコンセプトであり、2011年、2012年と1000人近くの専門家が集まるOpen Networking Summit（ONS）[10)]が開催され、注目を集めている。まだ議論は始まったばかりではあるが、例えば、北米通信事業者ベライゾンでは、アプリケーションサービスの特性に応じてセキュリティ機能や応答性能をカスタマイズするトラフィックステアリングサービスを、またドイツテレコムでは、従来専用システムとして構築されてきた移

動通信網での呼制御機能（IMS: IP Multimedia Subsystem）やパケット制御機能（EPC: Evolved Packet Core）をクラウド環境で実現するサービスを、SDNとして実現するための研究開発に着手している。

ネットワーク技術領域でSDNなどのソフトウェアによるオープン化・汎用化に基づく変革が進む一方で、IT領域でも変革が起きている。例えば、実世界とITが緊密に結合されたシステムであるCPSにおける新しいシステムアーキテクチャとして、データ価値の多くが発生源（エッジ）に存在することに着目し､必ずしもすべてをクラウド内の集中サーバーに転送・蓄積させないエッジ・ヘビー・データ[5]が注目に値する。さらに、これまでの技術変革を牽引してきたサーバー仮想化を不要とする、スモールコアサーバー[6]の実用化も間近となりつつある。モバイル機器向けのプロセッサ（モバイルチップ）を数百個搭載するスモールコアサーバーの到来はクラウドシステムのアーキテクチャを根本から変える可能性がある。この変革が、ネットワークアーキテクチャ・ネットワーク制御方式のさらなる変革を誘発する可能性も秘めている。

モバイル・無線ネットワーク領域においてもアーキテクチャの変革が起こりつつある。例えば、2007年より欧州が主導する3GPP（Third Generation Partnership Project）やNGMN（Next Generation Mobile Networks）で検討が進められているSON（Self Organizing Network）は、基地局の運用パラメータの設定や最適化を自動化し、移動通信網の構築と運用の負担を軽減しながらも安定した通信品質を提供するための機能群である。また、複数セルの利活用や周波数の2次利用による品質最適化や収容トラフィック増加を可能とするコグニティブ無線も移動通信網のエラスティック性を向上させる取組みであるといえる。2011年には、ノキア・シーメンス・ネットワーク[7]やアルカテル・ルーセント[8]が製品リリースを始めている。さらには、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うえで、ベースバンド部をクラウド化し、複数セルや周波数間で共有する新しい無線アクセスネットワークアーキテクチャの提案[9]が、チャイナモバイル（中国移動通信）から行われている。

国際比較については、ICT領域全般の傾向でもあるが、コンセプト発信については北米がリード、研究・標準化・実用化に関するバランスのとれた研究開発のマネジメントについては欧州がリード、これを、日本、韓国、中国が独自路線でフォローアップしているという状況である。日本の強みである光・無線ネットワーク技術や携帯端末実装技術を武器としたエラスティックネットワークの青写真（アーキテクチャの青写真）およびその要素技術課題を早急に確立し、グローバルR&Dに貢献することが急務である。

（4）科学技術的・政策的課題

新しいハードウェア・ソフトウェア技術の革新：スモールコアサーバーでの新しいITハードウェア・アーキテクチャ、クラウドRAN（Radio Access Network）での新しい無線ネットワークノードアーキテクチャなどのコストパフォーマンスを最大化する研究開発が不可欠である。また、SDNにおいては、ネットワークやネットワークサービスを抽象化するモデリング技術、そのモデルにしたがってネットワーク制御ソフトウェアを設計・仕様検証・実装検証する新しいソフトウェア技術の研究開発が必須である。

新しいネットワーキングアーキテクチャの構築・実証・実用性検証：エラスティックネットワークは、ビッグデータ時代の超大規模分散環境での動作を目標としているため、研究

開発の成果・効果を実証するとともに、実アプリケーションの動作・検証を可能とするグローバル規模のテストベッドシステムの構築・運用・連携が不可欠となる。

大規模な実証実験プロジェクト：実世界に適用可能なユースケース・サービスシナリオを具現化するアプリケーションまで含めた実証実験が、成果の実現性を検証するには必要不可欠である。

通信事業全体のビジネスモデル・エコシステムの構築：技術面のみならず、通信事業者の収益モデルを支える可能性をもつ新しいビジネスモデルや業界連携などのエコシステムの明確化・詳細化を進める必要がある。通信事業者を取り巻く法律に依存した制約があるか否かの確認も含めた官主導の検討が必要になると考えられる。

（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）

スタンフォード大学発のパケットネットワークを主対象とするOpenFlowから始まったネットワーク制御のオープン化の波は、Software-Defined Network（SDN）としてあらゆるネットワーク制御技術やネットワークサービス制御を対象とすべく対象を広げている。SDNの研究開発を牽引するOpen Networking Research Center（ONRC）が設立され、また標準化推進にあたってはOpen Networking Foundation（ONF）がすでに活動を始めている。

サーバー資源の共用化によるコスト削減というクラウドのコンセプトを移動通信網の基地局に適用し、分散アンテナとデジタル信号処理機能のクラウド化を実現するチャイナモバイルのクラウドRANが2011年に発表され、ZTE（中興通迅）などを中心とした研究開発が進められている。また、移動通信網の周波数資源利用効率向上という観点からノキア・シーメンス・ネットワークスやアルカテル・ルーセントなどからコグニティブ無線を実現する製品発表が行われている。

将来ネットワーク技術のテストベッドシステムについては、欧州がFIRE、北米がGENI、日本はJGN-Xとして研究開発と運用を進めてきており、相互接続実験も行われている。これらの資産を活用しつつ、SDNひいてはエラスティックネットワークの実証実験を進める必要がある。

北米ではNSF、欧州ではECのFP7のフレームワークにより大規模な国家プロジェクトが実施されている。NICTが日米ならびに日欧の連携を強化する目的での共同研究委託公募を始めようとしている。

アプリケーションを意識した大型実証実験に関しては､将来ネットワークをヘルスケア･物流・交通などのアプリケーション・サービスへの適用・実証実験を推進するホワイトハウス主導のUS Igniteプロジェクトが2012年から開始され注目を集めている。欧州ではFI-PPPと呼ぶ同目的のプロジェクトを2010年より実施中である。さらに、中国各地で立ち上げられているスマートシティプロジェクトは、新しい役に立つ最先端技術を集めてトータルソリューションを構築しようと実務作業が進められている。

（6）キーワード

Software-Defined Network（SDN）、インタークラウドネットワーク、ネットワーク仮想化、コグニティブ無線、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	○	→	・新アイデアに関しては、欧米に遅れがち。 ・脳や生物の自律性に学ぶ基礎研究は、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における将来ネットワーク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による仮想化機能を全国展開、APAN/GENI/FIREなどと相互接続を実施している。 ・従事する研究者数（特に博士課程の学生）が、欧米に比べて圧倒的に少ない。 ・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が世界で初めて製品化、市場プレゼンスを向上。
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、ビッグデータやCyber Physical System（CPS）, M2Mなど。
	応用研究・開発	◎	→	・すでにSDNに関しても、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で様々な研究開発が推進中。 ・将来ネットワークに関しては、GENIが着実に発展中であり、世界の中心的な存在である。
	産業化	○	↗	・CiscoやJuniperなどは､OpenFlowやSDNの動向を重要視しながらも、既定路線を継続する方向で、大きな変革はまだ様子見の状態。 ・ベンチャー支援の制度は社会システムとしてまわっており、かなり脅威。
欧州	基礎研究	◎	→	・アイデア浸透力は北米にリードされるも、FP7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い。
	応用研究・開発	◎	↗	・日本に比べると研究者層はかなり強い。 ・テストベッドプロジェクトについても豊富な資金を提供しており、北米と同等レベルの研究開発を実施中。 ・移動通信における成功体験が強みであり、移動通信網の領域では標準化戦略を梃子に世界にプレゼンスをアピール。
	産業化	◎	↗	・将来ネットワークについては、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。
中国	基礎研究	○	→	・チャイナモバイルはクラウドRANコンセプトを発表。
	応用研究・開発	◎	→	・ITUなどでは将来ネットワークに関する要求条件などの議論に積極的に参加している。 ・データセンター技術領域では、IBMやMicrosoftの中国人研究者が精力的に活動しており、プレゼンスは上がっている。
	産業化	◎	→	・クラウドRANプロジェクトにおいてはZTEが機器を実装予定。 ・Huaweiなどが OpenFlow市場に参入、フローテブル数・性能を大幅に強化し、ハイエンドスイッチ市場をねらっている。 ・スマートシティ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取り入れ最先端化を進めている。

韓国	基礎研究	△	→	・ETRIなど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あまりない
	応用研究・開発	○	→	・AsiaFIなどでの活動が活性化してきている。 ・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、インディアナ大学などとの連携。
	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）IBM ビッグデータ時代のビジネス変革
http://www-06.ibm.com/innovation/jp/smarterplanet/adv/pdf/biz_transformation_bigdata.pdf
2）IBM Global Business Services, Executive Report, 2015年の通信業界
http://www-06.ibm.com/services/bcs/jp/industries/telecom/pdf/telco2015.pdf
3）総務省 2020年頃に向けたICT総合戦略の検討状況について
http://www.soumu.go.jp/main_content/000157971.pdf
4）総務省 ビッグデータの活用に関するアドホックグループの検討状況
http://www.soumu.go.jp/main_content/000157972.pdf
5）Edge-Heavy Data: CPS・ビッグデータ・スマホがもたらす次世代アーキテクチャ
http://www.gictf.jp/doc/20120709GICTF.pdf
6）日経 Itpro スモールコアサーバーの衝撃
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20120706/407691/?ST=system
7）NSN, Liquid Radio: Let Traffic waves flow most efficiently
http://www.nokiasiemensnetworks.com/portfolio/liquidnet/liquidradio
8）Alcatel-Lucent, Light Radio: Portfolio White paper 1: Technical Overview
http://www.siliconrepublic.com/reports/partner/63-alcatel-lucent/report/228-lightradio-portfolio-whit/
9）China Mobile, C-RAN: The road towards Green RAN
http://labs.chinamobile.com/cran/wp-content/uploads/CRAN_white_paper_v2_5_EN.pdf
10）ONS: Open Networking Summit 2011/2012
http://opennetsummit.org/past_conferences.html
11）ONF White Paper
https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf

3.2.2 グリーンネットワーク

（1）研究開発領域名

グリーンネットワーク

（2）研究開発領域の簡潔な説明

少ない消費電力で動作可能な通信ネットワーク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

地球温暖化という世界的問題を背景に、多様な産業が低電力化と低炭素化の実現を求められ、将来のインターネットにおけるトラフィック増加という見通しや データセンターの消費電力問題などから、「ICT技術自体のグリーン化」が注目されている。

経済産業省は、環境保護と経済成長が両立する社会の実現に向けて「グリーンITイニシアティブ」を提唱し、2008年に産学官のパートナーシップによる「グリーンIT推進協議会」を設立した。この中で、2025年にはインターネット内の情報流通量は、2006年比で約200倍にもなり、IT機器の増加による消費電力の急増が深刻な問題となると指摘している[1)]。

このような背景から世界的に幅広い関連領域で省電力化に関する研究開発が行われている。一言で省電力化といっても、データセンターやルータ、ネットワークなど様々な対象があり、それぞれに対する多様な手法が考えられる。（独）産業技術総合研究所が主導するVICTORIESプロジェクト[2)]のような、ルータを対象に低消費電力かつビットレート非依存な光スイッチを適用することで消費電力を極限まで抑える手法もあれば、Green Grid[3)]のようなデータセンターを対象とし、空調やAC-DC変換／DC-DC変換を効率化させる手法を検討するコンソーシアムもある。本研究開発領域では、国主導による研究開発よりも、グローバルなコンソーシアムにおける国際協調による研究開発が目立つ。

主要な研究プロジェクトおよびコンソーシアムとしては、VICTORIES（産業技術総合研究所・日本）、ECHONET（EU FP7・欧州）、EARTH（EU FP7・欧州）、GREEN-T（CELTIC・欧州）、OPERA-Net（CELTIC/EUREKA・欧州）、Cool Silicon（BMBF, ドイツ）、GreenRadio（MVCE・英国）、Institute for Energy Efficiency（UCSB・米国）、GreenStar Network（Canarie, カナダ）、The Green Grid（グローバル・コンソーシアム）、GreenTouch[4)]（グローバル・コンソーシアム）などがあげられる。

一方で2010年に規格化された省電力Ethernetの規格IEEE 802.3az Energy Efficient Ethernet（EEE）[5)]のように製品として広く使われている手法も存在する。また、AC-DC変換およびDC-DC変換で30%程度電力ロスを起こすサーバーの電源ユニットを、変換効率80%以上であることを認証する80 PLUS[6)]という規格も存在し、データセンターでは広く使われている。

サーバーやネットワーク機器を収容するデータセンターの省電力化という面では、すでに実用または成熟レベルに到達しており、米国GoogleおよびFacebook社が最先端を走り、ベンダーがそれを参考に製品化する動きとなっている。GoogleやFacebookは、通常であれば50%近くの電力を消費する空調を、外気空調または川などから取水した水を用いる水冷方式にすることで大きな省電力効果をもたらしている。停電対策設備であるUPS（Uninterruptible Power Supply）に関しては、内部はDCで電力を保持するため、通常

であるとAC-DC変換およびDC-AC変換の二回の変換を経て20%程度の電力を消費するが、Googleなどはサーバーの電源ユニット内に12 Vバッテリを装備することでUPSを必要としないデータセンターにしている。変換効率が高いUPSに関しては、富士電機ホールディングスやスズデンなど日本企業が強みをもっている。Google/Facebookに追従して、富士通、NEC、東芝などはバッテリ内蔵電源ユニットを用いたサーバー製品を売り出している。

ネットワークレベルの取り組みとしては、大きく（1）リンクタイプごとの省電力化手法（無線LANやEthernetに特化した手法）、（2）ルータやスイッチの消費電力効率化、（3）ネットワークアーキテクチャや経路制御による手法、（4）光デバイスを活用した光ネットワーク技術の適用による省電力化、に分けることができる。（1）に関してはIEEE 802.3az、（2）に関してはAlaxala、Ciscoなどの未使用ポートの電力供給カットや機能集約による省電力化など、すでに製品化されたものもあるが、それ以外に関してほぼ研究開発領域となっている。最も大きな目標を定めているのがGreenTouchであり、ICTネットワークの電力消費を1000倍効率化させるとしている。

（4）科学技術的・政策的課題

世界的にITの省電力化は重要課題の一つとなっている。

長期的視点に立つと、省電力な光ネットワーク技術を広く実現するためには、エンドエンドでの光信号強度や分散保証などの光ネットワークならでは制約が大きな制約となる。技術面、コスト面で今の電気ルータ／スイッチと同様の手軽さでネットワーク構築できる光デバイス技術群の研究開発が不可欠である。

いかに既存ネットワーク管理手法に対して大きな制約を課さないようにするかが大きな課題点である。既存手法では、冗長設備をスリープさせる、冗長リンクへの電源供給を止めるなどが提案されているが、冗長度を下げた際のサービスレベルの保証や、管理手法／運用手法まで見通した議論が必要である。

現状では多くが局所最適を目指した研究開発を行っているが、ネットワーク全体としていかに最適化を図るのかを考慮し、いかに統合して行くかを議論する必要がある。

ネットワークやシステムのどの部分がどの程度電力を消費しているのか、また各技術によりどの程度省電力化が図れたのかを効果的に見せる「見える化」が今後必須の技術になると考えられる。

（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）

企業や大学など約60組織から構成されるGreenTouch（2010年設立）が最も有力なコンソーシアムとなっている。ネットワークエネルギー効率を1000倍向上させることを大きな目標とあげ、アンテナなどを含むモバイル通信技術、光デバイスやネットワークアーキテクチャを含む有線／アクセスネットワーク技術、アプリ分類などの標準化などの活動を行っている。

カナダCANARIEから2百万ドルを得たGreenStar Networkプロジェクト[7]では、世界初のクリーンな再生可能エネルギーだけで動作するネットワークを構築している。本ネットワークはカナダを横断する規模であり、太陽光および風力で動作する。GeoChronosなど他のCANARIEのプロジェクトで2011年以降、実際に利用されている。

Facebookはエネルギー効率のよいハードウェア設計を公開する”One Compute Project”を2010年から始めている。Open Compute Projectには、ストレージサーバーの他、管理ソフトウェア、マザーボード、サーバーシャーシ、電源装置などの設計仕様が含まれており、各仕様はGitHubで公開されている。

（6）キーワード

省電力ネットワーク技術、グリーンICT、Energy Efficient Ethernet（EEE）、光ネットワーク技術、データセンター

（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	◎	→	・光デバイス、光通信分野での研究レベルは世界最高水準である。産総研の VICTORIES のような光回線交換を基礎にした省電力ネットワークに関しては今後とも世界の先端を行くと考えられる。
	応用研究・開発	○	→	・グリーンネットワーク技術に関しては、大学・企業共に精力的に研究開発を進めているが、トップカンファレンスへの採録はあまりなく、国際的な競争力はあまり高くない。東京大学 浅見研究室・江崎研究室・森川研究室、慶応大学 山中研究室、九州工業大学 尾家研究室などがこの分野では目立っている。
	産業化	△	→	・Alaxala などの一部のベンダーで、製品化に繋がっているが、コアコンピタンスとなる機能ではないので今後の見通しは不明である。 ・UPS などの競争できる製品は出ているものの、コスト的な面で APC などの米国ベンダーが選ばれることが多い。一方で、先進的なデータセンターで UPS 自体を無くす設計を取っている場合もあり、戦略的な面から再考する必要がある。
米国	基礎研究	◎	↗	・米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの分野において世界をリードしている。グリーンネットワークの発端となった ACM SIGCOMM 2003 の”Greening the Internet”も米国発となる。 ・UCSB が中心となって、Institute of Energy Efficiency を設立させ、無線通信および光通信のエネルギー効率を飛躍的に向上させることをねらっている。 ・GreenTouch においても、ベル研を中心に、巨大なアンテナを用いる省電力無線通信技術（LSAS プロジェクト）や、ラインカードをシリコンフォトニクス基盤に実現する技術（SCORPION プロジェクト）が研究開発されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・応用研究の研究レベルも非常に高く、多くの大学や企業で幅広く研究が行われている。
	産業化	◎	↗	・データセンターに関する省電力化では、Google および Facebook、Amazon 以上の知見を持つ所は無いと考えられる。 ・Cisco や Juniper、またはシリコンバレーのスタートアップが技術が確立した直後には製品化／産業化させるため非常に強い。
欧州	基礎研究	◎	↗	・無線通信技術の省電力化に関するプロジェクトが多く目立ち非常に活発に活動している。EU FP7 EARTH プロジェクトでは高いエネルギー効率の LTE 技術を、英国 MVCE GreenRadio ではインダストリ／アカデミックが協力し 100 倍の効率を目指している。その他、GREEN-T（CELTIC）、OPERA-Net（CELTIC/EUREKA）も無線通信の効率化を主眼としている。 ・ドイツ Cool Silicon プロジェクトでは、CPU、GPU、メモリなどのチップレベルから効率化を見直すという動きもある。
	応用研究・開発	◎	↗	・EU FP7 ECHONET では、使っていないときに電源供給を止める smart sleep と、負荷に応じたクロックなどを変更させる dynamic power scaling などを抽象化／標準的なインターフェイスで操作できる基盤を中心に、制御プロトコルやモニタリング手法などを研究開発している。 ・GreenTouch において、英ケンブリッジ大、英リーズ大などが中心となり、光ネットワークの資源確保最適化や、伊トリノ工科大や伊トレント大による同期パイプライン転送技術などが研究されている。伊トリノ工科大などの成果は、Green Communication では著名な GreenComm09 にてベストペーパーに選ばれている。
	産業化	△	→	・研究レベルの動きは盛んであるが、産業化に関してはあまり目立った動きはない。

中国	基礎研究	○	↗	・GreenComm などの学会を見る限り、2010 年以降 Huawai や北京郵電大学などの投稿があり、また清華大学に関してもトラフィックに応じたネットワーク設計および省電力な運用手法などを研究しており、国が助成し基礎的な研究も活発に行っているように見える。 ・China Mobile は Green Communication Research Center（GCRC）を設立し、energy efficiency oriented theory, revolutionary network architecture, green transmission などを研究している。
	応用研究・開発	△	→	・GreenTouch にてスマートスリープを用いた有線通信技術の研究開発を Huawai が行っている。 ・Huawai は MVCE GreenRadio にも参画し、無線技術に関する省電力化技術に関しても研究開発を行っている。
	産業化	○	→	・産業化には至っていないが、Huawai が積極的に動いているため、そう遠くない内に産業化されるものと考えられる。
韓国	基礎研究	○	↗	・GreenComm などの主要学会への投稿はあまり見ない。 ・KAIST などでは携帯基地局の省電力化手法を研究開発している。
	応用研究・開発	△	↗	・サムスンが GreenTouch にて、Massive MIMO という無線技術に関して研究開発を行っている。 ・その他の動きはあまり明らかではない。
	産業化	△	→	・まだ産業化には至っているようには見えない。

（註 1）フェーズ［研究水準：大学・公的機関での研究（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、”グリーン IT イニシアチブ”、2007
2）産総研、光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点、http://www.aist-victories.org,
3）The Green Grid, http://www.thegreengrid.org
4）GreenTouch, http://www.greentouch.org
5）IEEE P802.3 az Energy Efficient Ethernet, http://www.ieee802.org/3/az/index.html
6）80 PLUS, http://www.plugloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx
7）GreenStar, http://www.greenstarnetwork.com
8）今泉英明、”グリーンインターネットに向けた技術動向”、
http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/attachment/file/176/an2010-imaizumi.pdf
9）A. P. Bianzino, et al., “A Survey of Green Networking Research”,
http://arxiv.org/pdf/1010.3880.pdf
10）X. Wang, et al.,, “A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges”, Journal Mobile Networks and Applications archive, Vol. 17 Issue 1, Feb. 2012

3.2.3 フィールド指向ネットワーク

（1）研究開発領域名

フィールド指向ネットワーク

（2）研究開発領域の簡潔な説明

フィールドに存在する課題の発見・解決を目指す模索型研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ネットワーク技術の成熟に伴い、大容量化、低遅延化、消費電力効率向上などの純粋な性能向上では、さらなる市場の拡大に限界がみえてきている。このような背景のもと、様々な研究機関・民間企業において「フィールド指向」のアプローチによって、研究開発が模索的に進められている。フィールド指向とは、農場・工場・都市・医療・新興国など、ネットワーク技術が新たに寄与できる「フィールド」を模索することを目的に、研究者・技術者が実際にフィールドに出向き、ネットワーク技術への新たなニーズを吸い上げる方法論のことを指す。ここでは、「フィールドのニーズの洗い出し」を重視することによって研究開発が進められたネットワーク技術を「フィールド指向ネットワーク」と呼ぶ。

フィールド指向のアプローチによって、これまでのネットワーク技術が対象としていた領域には存在しない新たなニーズが明らかになりつつある。フィールド指向ネットワークでは、このようなニーズを正確に抽出し、コストとのバランスを考慮しつつ、技術開発を進めることが課題となる。例えば、工場内の機器制御向けにはリアルタイム性・高信頼性を実現するために、プリアンブルレスの無線通信方式が提案されている[1)]。新興国向けアクセス網として、10 km 程度の長距離通信を WiFi で行う際の性能劣化を防ぐための MAC（Media Access Control）プロトコルが開発されている[2)]。ペースメーカーのクラック対策では、すでに人に埋め込まれた認証技術を備えていないペースメーカーを防御するために、シングルチャンネル全二重通信が活用されている[3)]。

フィールド指向ネットワークにおいて、最も大きな潮流となっている技術領域は、実世界情報を活用することでネットワーク技術の応用先を開拓する M2M（Machine-to-Machine）/ IoT（Internet-of-Things）/ CPS（Cyber Physical Systems）である。例えば、橋梁のモニタリングでは、高精度な加速度データのサンプリングとバースト型の高速収集プロトコルが開発されている[4)]。トンネル内の照明制御では、センシングだけでなく、安定したクローズドループ制御が可能なようにシステムの設計・評価を行っている[5)]。

M2M/IoT/CPS の領域の基礎的研究は、ユビキタスネットワークや無線センサネットワークなどの分野で培われた短距離無線の無線ネットワーク技術、省電力技術、信号解析技術などを活用しながら、継続して研究が推し進められている状況にある。近年は、実社会への展開により着目し、IP ネットワークとの親和性を重視しているものが多い。例えば、TinyOS[6)]、Contiki OS[7)] などの無線センサネットワーク向けのプラットフォームに、IETF ROLL（Routing over Low power and Lossy networks）[8)] によって策定された RPL（The Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks）が実装されている。また、TinyOS と Contiki OS を混在させた際の性能評価・性能改善[9)] などの取り組みもなされている。

（4）科学技術的・政策的課題

フィールド指向のアプローチは、ネットワーク技術の市場拡大に向けて有効と考えられる。フィールド実験や異分野との連携を必須とするプロジェクトを設けるなどにより、本アプローチを推進することが重要である。

M2M/IoT/CPSの領域では、実世界情報の収集が重要な課題となる。長期的な視点での重要性は認知されているものの、実世界情報の収集には膨大な投資が必要となる。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、政策的な支援が有効である。

データ収集の信頼性や省電力性能などもさらなる向上が求められており、フィールドで利用することを前提とした基礎研究も重要である。基礎研究の実証を低コスト・簡易に可能とするための国内共有フィールドを構築するなどにより、大学の参画を促すことも重要である。

フィールド指向ネットワークでの通信に求められる要求は多岐に渡る。他システムとの共有が前提となる2.4 GHz近辺のISM（Industry-Science-Medical）バンドではこれらの要求を満たせない可能性がある。ホワイトスペースの利用など、新たな通信方式を許容する周波数資源を有効利用するための技術開発も重要となると考えられる。

M2M/IoT/CPSなどによって発生するトラフィックは、膨大かつ新たな形のトラフィックとなると予想される。近年スマートフォンの普及によって発生した通信障害のように、新たな形のトラフィックは、基幹網やアクセス網に甚大な影響を与える可能性がある。このようなトラフィックを収容するためのネットワーク技術についても検討が必要である。

（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）

2012年7月、M2Mの標準化に向けて、日本（ARIB、TTC）、米国（ATIS、TIA）、中国（CCSA）、欧州（ETSI）、韓国（TTA）の世界主要標準化機関が集まり、oneM2M[10]が発足した。

実世界情報の取得に向けて、Arduino、Raspberry Piのような安価なデバイスが登場しており、フィールド指向のアプローチで重要となる高速なプロトタイピングや、膨大なノード数を必要とするシステムの構築も容易となっている。

M2Mを支える無線センサネットワークにおいては、米国を中心にTinyOS、欧州を中心にContiki OSなどのプラットフォーム開発が進められている。これらのOS／プラットフォームは多くのユーザを巻き込み、強力な開発コミュニティを形成している。

実世界データの蓄積・共有・流通のプラットフォームとしてcosm（旧pachube）が展開されている。

（6）キーワード

M2M、IoT、CPS、短距離無線、省電力技術、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	○	→	・目立った研究事例は少ないものの、学会レベルでは、大学・企業ともに継続して研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	・農研機構により開発されたフィールドサーバーが商用化されている[11]。 ・構造モニタリングに無線センサネットワークを適用した事例が報告されている[12]。
	産業化	○	↗	・2011 年に新世代 M2M コンソーシアム[13] が設立されるなど、M2M への期待は高まっている。 ・大きな市場開拓には至っていないが、NEC・富士通・日立などが異分野フィールドへの ICT 応用について検討を進めている。 ・NTT データが開発した光ファイバによる橋梁モニタリングシステム BRIMOS は東京ゲートブリッジに実際に導入されている。
米国	基礎研究	◎	↗	・無線センサネットワークのプラットフォームとして TinyOS の開発がオープンソースで進められている。 ・ソフトウェア無線用フロントエンドである USRP が開発／発売され、新しい符号化やシングルチャンネル全二重通信の検討が行われるなど、基礎研究も強い。
	応用研究・開発	◎	↗	・途上国向けの長距離向け WiFi である WiLD を開発し、ガーナおよびインドに実際に設置している。 ・ゴールデンゲートブリッジでの計測[4] をはじめとして、多くの研究が進められており、トップレベルのカンファレンスにも多く採録されている。
	産業化	◎	↗	・IBM は「Smarter Planet」というビジョンを提唱し、都市・交通・教育・食料など様々な現場のニーズの洗い出しやソリューションの開発を積極的に進めている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・Arduino（イタリア）や Raspberry Pi（英国）が開発されるなど、多くのハードウェアプラットフォームが開発されている。 ・無線センサネットワークのプラットフォームとして Contiki OS の開発がオープンソースで進められている。大学などの基礎研究においては、TinyOS に次いで利用されている。
	応用研究・開発	○	↗	・トンネルの照明制御は、イタリア、トレント大などの研究チームによるものである。英国ケンブリッジ大学などにおいても、土木分野と ICT との連携がなされている。
	産業化	◎	→	・ETSI では、2009 年 1 月から M2M に関する専門技術委員会が設立されるなど、比較的初期から標準化が進められている。
中国	基礎研究	△	→	・基礎研究で目立つものは報告されていない。
	応用研究・開発	○	↗	・森林の林間閉鎖モニタリング[14] が行われるなど、事例が報告され始めている。 ・香港科技大学のチームによる、無線センサネットワークを利用した海洋モニタリングプロジェクト（OceanSense）[15] が報告されている。
	産業化	△	→	・産業化に関してはあまり目立った動きはない。

韓国	基礎研究	△	→	・基礎研究で目立つものは報告されていない。
	応用研究・開発	△	→	・学会レベルでのプレゼンスはあまりない。
	産業化	△	↗	・あまり目立った事例は存在しないが、近年政策的方針により、スマートグリッド関係の実証実験などが報告されている。

（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）H. Okui, et al. Preambleless TDD/TDMA OFDM System for Real-Time Wireless Control Networks. Proc. of ACM SenSys’12.
2）R Patra, et al. WiLDNet: Design and Implementation of High Performance WiFi Based Long Distance Networks. Proc. of USENIX NSDI'07,.
3）S Gollakota, et al. They can hear your heartbeats: non-invasive security for implantable medical devices. Proc. of ACM SIGCOMM'11.
4）S Kim, et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. Proc. of ACM IPSN'07.
5）M. Ceriotti, et al. Is there light at the ends of the tunnel? Wireless sensor networks for adaptive lighting in road tunnels. Proc. of ACM/IEEE IPSN'11.
6）TinyOS Home Page, http://www.tinyos.net/
7）Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things, http://www.contiki-os.org
8）IETF ROLL, http://datatracker.ietf.org/wg/roll/charter/
9）J. Ko, et al. Industry: Beyond Interoperability - Pushing the Performance of Sensor Network IP Stacks. Proc. of ACM SenSys'11.
10）oneM2M, http://www.onem2m.org
11）フィールドサーバー , http://www.elab-experience.com/fieldserver
12）N. Kurata, et al. Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks. Proc. of 14WCEE, 2008.
13）新世代 M2M コンソーシアム , http://ngm2m.jp/m2m/home/
14）L. Mo, et al. Canopy Closure Estimates with GreenOrbs: Sustainable Sensing in the Forest. Proc of ACM SenSys'09.
15）OceanSense, http://www.cse.ust.hk/~liu/Ocean/

3.3 ソフトウェア

ソフトウェアは情報・通信技術の中核であると同時に、また、現代においては様々な組込みシステムを含め、ほとんどすべての科学技術分野において、競争力の維持のためには高度なソフトウェア開発のスキルが欠かせない。このため、ソフトウェアの研究開発戦略は、情報･通信分野にとどまらず、我が国の科学技術の発展において、極めて重要である。

ソフトウェアの研究開発領域を上流から下流まで全体として俯瞰したとき、二つの大きなトレンドが見られる。一つは、ソフトウェアの大きさ・複雑さが拡大し、さらに社会システムなど多くのステークホルダーの複雑な要件が満たす必要のあるアプリケーションが増加するにしたがって、上流におけるソフトウェア工学の重要性が今までにまして増大していることである。もう一つは、クラウドやスマートフォンなど新たなプラットフォームや、ビッグデータなどの新たなワークロードに対応して、それらのベースになるプログラミングモデル・ランタイム・ミドルウェアが出現しつつあることである。

この観点から、本俯瞰報告書においては、ソフトウェア研究開発のコアである以下の二つの研究開発領域を設けることとした。

1. ソフトウェア工学：

ソフトウェアは複雑度が極めて高く、また多くのステークホルダーに関わるものであり、要求工学、ソフトウェア開発手法、仕様検証、運用など、その設計・構築・運用に関する工学的手法やベスト・プラクティスが重要である。また、ソフトウェアライフサイクル全般に関する技術は、情報・通信分野だけでなく、システム科学など他の分野にも大きな知見を与えるものであり、その観点からも戦略を考えるべきである。

2. プログラミングモデルとランタイム：

ソフトウェアの根幹にあるのは、アルゴリズムをどのように記述し、実行するかというプログラミングモデルの考え方である。プログラミングモデルは、情報技術の進展にしたがって大きく変化している。また、そのプログラミングモデルを実行するランタイム環境（オペレーティング・システム、プログラミング言語、ミドルウェアなど）などもハードウェア技術の進歩や応用分野の多様化によって、変化している。これらの技術の研究開発動向を俯瞰する。

ソフトウェア工学やプログラミングモデルが、問題領域によらない一般的なソフトウェアの問題を扱うのに対して、情報検索、機械学習、ユーザ・インターフェイスなど特定の問題領域の解法の研究開発は、分化してきている。このため、通常「ソフトウェア」研究領域の一部として考えられる以下のものについては、対象とするそれぞれの研究開発領域に任せるものとし、本俯瞰区分では深くは扱わなかった。

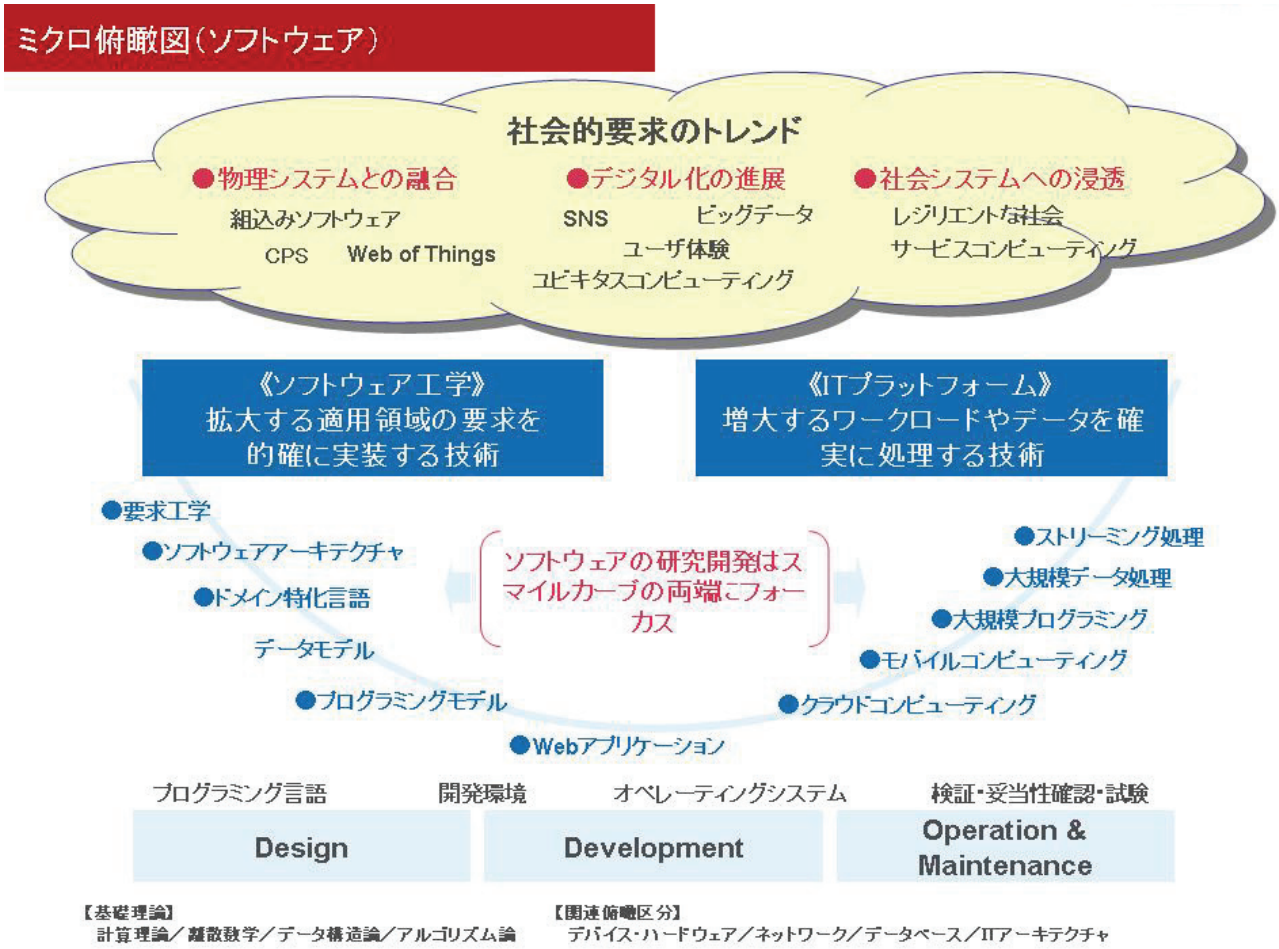
- データベース、ビッグデータ、機械学習、統計分析など:「ビッグデータ」または「データベース」へ
- 知識マネージメント・人工知能・HCIなど：「知識 / ヒューマン」へ
- コンピュータアーキテクチャ・並列計算など：「IT アーキテクチャ」へ
- 金融アプリケーション・エネルギー管理システムなど応用分野：「IT アーキテクチャ」へ
- セキュリティ・システムマネジメント →「レジリエント ICT」へ

ただし、ビッグデータや並列計算など、プログラミングモデルやソフトウェア工学の観

点で重要な潮流については、必要に応じて本俯瞰区分でふれてある。

全体として、新たなプログラミングモデルなどのソフトウェアの基礎研究では米国が主流であり、多くの新しいアイデアは米国から発信されている一方、組込みシステムを含む産業化においては、我が国も健闘しているといえる。

ミクロ俯瞰図（ソフトウェア）



3.3.1 ソフトウェア工学

（1）研究開発領域名

ソフトウェア工学

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ソフトウェアの要求定義、開発、利用、進化に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ソフトウェア工学は対象によらない基礎技術と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、ソフトウェアで実現すべき要求を獲得する要求工学、ソフトウェ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言語やそれを支援する開発環境、ならびに、ソフトウェ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安全性や信頼性を向上するために、コンピュータによる検証など、コンピュータの性能向上を活かした自動化、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ェアの機能をサービスとして遠隔利用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携帯電話など機器に組み込まれた組込みソフトウェア技術がある。

サービスコンピューティング技術では、クラウドの利用やビッグデータと呼ばれる日常のビジネス活動に伴う多量のデータの利用など、まったく新しい応用分野が開拓され、世界的に活発な研究が行われ、今後、ますます広がると予測される。また、企業活動のグローバル化やSNS（ソーシャルネットワーキングサービス）、スマートグリッドなど社会全体へ様々なソーシャルネットワークが浸透していることから、ソーシャルネットワークを基盤とする情報システムの構築や利用に関する新たな研究も立ち上がってきた。関連して、情報セキュリティ、プライバシーなどの研究も活発に行われ、大きな研究分野となっている。

一方、組込みソフトウェアは、わが国における自動車や家電などの基幹産業の競争力を左右する中核技術となっている。自動車分野では、電気自動車やハイブリッド車など自動車の中核制御が転換期にあり、その制御技術としてソフトウェアの重要性が増している[1)]。また、自動停止や自動操縦など、高度なソフトウェア技術が実用段階に入り、開発競争が激化している。さらに、自動車が通信機能を備え、交通網と共に情報通信網のシステムとして働くようになり、新たな研究と応用分野が創出され、活発な研究が行われている。

国際比較においては、米国が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[4), 12), 14), 15), 16)]。特に、クラウドコンピューティング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、NSFを中心にCIF21（Cyber Infrastructure Framework for 21st century science and engineering）[15)]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では、2013年までのFP7で、サービスコンピューティングやアンビエントインテリジェンス（環境知能）などの枠組みで、新分野に対して多面的に研究プロジェクトを展開し、基礎研究面では米国と肩を並べる成果を上げつつある。2014年から2020年までのFP8では、”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の展開が検討されている。これは、EUにおける産業化が米国に比べ進んでいないことが背景にあると思われる。一方、自動車などの組込みソフトウェア分野では、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。

中国は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で我が国よりも多くの研究論文が採択されるまでになっている[9]。しかし、応用研究や産業化はまだ発展の途上である。ソフトウェア産業は今後2015年まで､年率25%の成長が見込まれている[3]。

韓国は家電や自動車などの組込みソフトウェアに研究が注力され、幾つかの分野で国際的な成果をあげているが、ソフトウェ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。韓国政府はIT Future Vision 2020の下で、2012年に4兆ウォンのIT産業支援を行う[5]．

インドのソフトウェア産業は欧米主要企業からのソフトウェ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[11]、国内ソフトウェ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。

わが国では、いずれの分野でも一定の成果をあげている。しかし、ソフトウェア工学の基礎やプログラミングなどの旧来のソフトウェア工学の研究に偏り、クラウドコンピューティングなどの新分野では先導的な位置にあるとはいえない。ソフトウェア産業も高品質な社会基盤ソフトウェアの受託開発に強みがあるが[10]、Web上でのコンピューティング、ソーシャルネットワークなどの展開は米国のリーディング企業をキャッチアップしている状態である。また、組込みソフトウェア分野では競争力が高いが、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

・ソフトウェア工学の研究開発戦略ビジョンの確立

米国、EU, 中国では、ソフトウェ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によるグローバルネットワークの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[6), 14), 15)]。しかし、我が国では、このような戦略的ビジョンが明確になっているとは言い難く、ソフトウェア工学への研究費も欧米に比べて極めて少ない。

・新しい計算モデルに基づく情報システム開発技術の基礎研究の必要性

クラウドコンピューティング上で、ビッグデータなどの非構造的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の研究が活発になっている[7), 16)]。しかし、わが国では、このような分野における基礎研究は極めて限られている。今後の情報システム開発の基礎技術として、クラウドコンピューティング上でのソフトウェ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。

・情報システム開発の価値を創出できる技術研究の必要性

従来、我が国のソフトウェ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、顧客のビジネスや経験（UX: User Experience）などの要求を獲得し、その価値を高めることが差別化の鍵となっている、このような要求獲得を工学的に行う要求工学や、それをシステムとして実現するためのソフトウェアアーキテクチャの技術がソフトウェアの差別化の鍵となる。要求工学やアーキテクチャの組織的な研究が必要である。

・Web 上でのアジャイルなソフトウェア提供モデル

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、必要なソフトウェアを必要なときに、必要なだけ提供、利用できるモデルの構築が進んでいる。さらに、ソフトウェアの提供する機能を環境の変化に応じてアジャイル（Agile）に変更できる必要がある。このようなソフトウェアの開発、提供、利用の基盤技術と応用技術の研究、開発は喫緊の課題である。

・情報システムの安全性と信頼性の保証

金融、電力、交通などの社会基盤システムや自動車など、情報システムの信頼性や安全性が社会全体に大きな影響を及ぼすことは、幾つかのシステム障害事例により認識されてきた。今後、クラウドの普及により、システム障害の影響がより甚大になると予想されている。一方、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、コンピュータを応用した、情報システムの自動検証や試験支援などの安全性、信頼性を科学的に保証する研究の推進が必要である。

・情報セキュリティ、プライバシーなどの負の側面に対応する研究と新たな社会規範の創出

情報セキュリティに関する研究は暗号などの要素技術からシステム全体の情報セキュリティの保証などのシステム技術へ発展している。我が国では、暗号などの要素技術に関する高い成果はあるが、システム技術での研究、開発が限られている。今後は、システムの視点からの研究を強化する必要がある。また、プライバシー面では、スマートフォンやWeb から個人が公開する情報の扱いに関する新たな社会的枠組み作りが必要である。

・ソフトウェア技術の社会的インパクトの認識と位置づけの必要性

ソーシャルネットワーキングサービス（SNS）やビッグデータ、さらには、ユビキタスコンピューティングなどのソフトウェア技術は日常の社会生活に深く浸透し、あわせて、SNS が意見の形成などを通して人々の社会的活動にも影響を及ぼすようになっている。このような、ソフトウェア技術の社会的深化を理解し、社会への影響や効果を学術的に扱う新たな学問分野の萌芽が見られる。しかし、我が国では、このような新しい学際的研究への組織的な取り組みの必要性が認識されているとはいえないため、組織的研究の枠組みが欠如している。

（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）

- 米国 NSF の CIF（Cyber Infrastructure）イニシアチブ [2), 13)]
- 米国 National Science and Technology Council の The Networking and Information technology Research and Development（NITRD）Program 2012 で提示されている 3 つの重点研究計画である、WeCompute, Trust and Confident, Cyber Capable[15)]。
- EU の Europe 2020 のビジョンの下で Digital Agenda for Europe（DAE）と Horizon 2010 の枠組みにおいて 2014 年から 2020 までの FP8 におけるソフトウェア、サービスの研究戦略 [6)] である Future Internet Assembly Research Roadmap[7)]、The

Future of Cloud Computing Plan、Pervasive Adaptation.
- ビッグデータを基礎とする科学技術研究のグローバルなデジタルエコシステムの基盤を構築するGRDI（Global Research Data Infrastructure）2020 Consortium[8)]
- 韓国政府のIT Future Vision 2020[5)]

（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キングサービス（SNS）、組込みソフトウェア、CPS（Cyber Physical Systems）、ユビキタスコンピューティング、アンビエントインテリジェンス（AmI: Ambient Intelligence）、WoT（Web of Things）、ビッグデータ、ユーザ経験（UX: User Experience）、要求工学、ソフトウェアアーキテクチャ、アジリティ、情報セキュリティ、ソフトウェアエコシステム

（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	△	→	・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、クラウドコンピューティング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	○	→	・クラウドコンピューティング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やや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。
	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もつが、世界的競争力のあるパッケージソフトウェアを育成できていない。 ・クラウドコンピューティング、SNS（ソーシャルネットワーキングサービス）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ェア分野は、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レベルは一貫して高い。NSF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が継続されている。 ・2012年6月に公表されたNITRD（The Federal Networking and Information Technology Research and Development）の向こう5年間の戦略計画において、今後、社会と融合した研究の推進が重点テーマとして計画されている。
	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。 ・クラウドコンピューティング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	◎	↗	・米国内に留まらず、世界の市場のあらゆる分野で事業を展開している。 ・クラウドコンピューティングやSNS（ソーシャルネットワーキングサービス）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、世界市場を寡占している。 ・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	◎	↗	・2007～2013年のFP7で、Software & Service Architectures and Infrastructuresなどの研究の枠組みを設け、サービスコンピューティングなどの新分野で多くの研究プログラムを立ち上げ、世界をリードする研究成果と研究コミュニティの形成に成功している。 ・2014年から開始予定のFP8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、クラウドコンピューティングなどの新分野で引き続き、積極的な研究開発が計画されている。
	応用研究・開発	○	↗	・FP8のDigital Agenda for Europe（DAE）の枠組みにおいて、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ェ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	△	→	・SAPなどの世界的企業へ成長した成功事例はあるが、米国企業が中心となっており、ソフトウェアの産業化に成功しているとはいえない。 ・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ェ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	○	↗	・10年前ま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なかったが、近年では定常的に採択され、その数は我が国を上回るまでになっている。 ・中国科学院、清華大学、北京大学など主要な大学・公的研究機関にソフトウェア工学の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	△	↗	・基礎研究に比べ成果が乏しいが、世界を主導する企業が研究所を設け、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	△	↗	・発展途上にあり、中国政府は情報産業を重要産業と位置づけ、2015年までに市場が年率24.5%成長し、4兆元（約60兆円）に成長するとしている。 ・海外からのアウトソーシングが主体で約20%を占め、現段階では技術力は高いとはいえないが、多くの大学でInstitute of Softwareを設置し、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	×	→	・組込みソフトウェアの研究で質の高い研究成果が見られるが、ソフトウェア工学全般としては、世界水準の研究は少ない。 ・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され、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ェ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、新興企業が誕生する状況にはない。
インド	基礎研究	×	→	・IITなどにソフトウェア工学の研究者はいるが、大学における世界的な研究は極めて限られている。
	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的な水準の研究成果を出し始めている。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	○	↗	・幾つかのソフトウェ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。 ・世界を主導する企業が開発部門を設け、クラウドコンピューティング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
※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）M. Aoyama, Computing for the Next-Generation Automobile, IEEE Computer, Vol. 45, No. 6, Jun.2012, pp. 32-37.
2）A. Blatecky, Cyberinfrastructure Framework for 21st Century Science & Engineering（CIF 21）, NSF-Wide Cyberinfrastructure Vision, http://www.renci.org/wp-content/pub/presentations/CIF21-3-4-11.pdf.

3) China Daily, China's Software, IT Service Revenue to Boom, Apr. 7, 2012, http://www.chinadaily.com.cn/business/2012-04/07/content_14997608.htm.
4) W. Emmerich, M. Aoyama, and J. Sventek, The Impact of Research on Middleware Technology, ACM Trans. on Software Engineering and Methodology, Vol. 17, No. 4, Article 19, Aug. 2008, pp. 1-48
5) Enterprise Innovation, South Korea to Strengthen Software Industry, Launch IT Future Vision 2020 Plan, Jan. 10, 2012、http://www.enterpriseinnovation.net/content/ south-korea-strengthen-software-industry-launch-it-future-vision-2020-plan.
6) EU, ICT for Societal Challenges, Digital Agenda 2020, Jul. 2012, http://ec.europa.eu/information_society/digital-agenda/.
7) EU FIA Research Roadmap Working Group. Future Internet Assembly Research Roadmap-Toward FP 8: Research Priorities for the Future Internet, Version 1.2（Final Version）, May 2012, http://fisa.future-internet.eu/images/9/9a/Future_Internet_Assembly_Research_Roadmap_V1.2_-_NEW_VERSION_MAY_2012-FINAL.pdf.
8) EU GRDI（Global Research Data Infrastructure）2020 Consortium, Global Research Data Infrastructures: Toward a 10-Year Vision for Global Research Data Infrastructure, Final Roadmap, Mar. 2012, http://www.grdi2020.eu/.
9) International Conference on Software Engineering, Proceedings of, 2008-2012, ACM/IEEE Computer Society.
10) 一般社団法人情報サービス産業協会、情報サービス産業白書 2011-2012, 日経 BP, 2011 年 11 月。
11) P. Malik, An Overview of the Indian Software Industry: Profile, R&D features and Future, Int’l Conf. on Global ICT Industry: Changing Landscape?-The Future of European ICT R&D, EU Joint Research Centre, Oct. 2011、http://is.jrc.ec.europa.eu/pages/ISG/PREDICT/Conf2011.html.
12) L. J. Osterweil, C. Ghezzi, J. Kramer, and A. L. Wolf, Determining the Impact of Software Engineering Research on Practice, IEEE Computer, Vol. 41, No. 3, Mar. 2008, pp. 39-49.
13) US NSF, Cyberinfrastructure Framework for 21st Century Science and Engineering（CIF21）, Advanced Computing Infrastructure: Vision and Strategic Plan, Feb. 2012, http://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf12051.
14) US Executive Office of the President, Report to the President and Congress, Designing the Digital Future: Federally Funding Research and Development in Networking and Information Technology, Dec. 2010, http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/ pcast-nitrd-report-2010.pdf.
15) US National Science and Technology Council, The Networking and Information technology Research and Development（NITRD）Program 2012 Strategic Plan, Jul. 2012, http://www.nitrd.gov/pubs/strategic_plans/2012_NITRD_Strategic_Plan.pdf.
16) US NSF, Computer and Network Systems, http://www.nsf.gov/div/index.jsp?org=CNS.

3.3.2 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表現手段であり、プログラムの生産性を一義的に決定するものである。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、ライブラリないしフレームワークである場合もある。一方、ランタイムとは、プログラミングモデルにしたが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、新しいハードウェアおよび新しいソフトウェアの登場によって惹起されるのが常である。近年、コンピュータ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ているが、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である。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、新しいプログラミングモデルは新しい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、新しいプログラミングモデルは 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 コンピュータについては、米国では 2020 年の実現を目指してエネルギー省の高等科学計算諮問委員会（ASCAC）を中心に精力的に進められているが、ハードウェアからランタイム、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

次に、巷間喧しいビッグデータであるが、大規模データ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 [3] 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組みが加速した。モデルがシンプルであるにもかか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など、多くの問題の記述に使われている。最近の動向としては、より高水準のプログラミングモデルを提供するためプログラム言語を設計する試みがある。Apache Pig における Pig Latin、Apache Hive における QL、IBM の Jaql などであり、いずれもランタイムは Hadoop 上で動作する。また、中小規模データ処理のために MapReduce のランタイムを最適化する試みもある。例えば、大規模データ処理であるがゆえに必要な耐障害性を実装せず、分散ファイルシステム介在をできるだけ回避するというものがある。最後に、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。

ビッグデータ：ストリーム処理

ビッグデータのもう一つの側面が、ストリーム処理である。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、社会インフラへのセンサ網構築が進行する中で、次世代送電網、高度道路交通システム、水資源管理、など様々な分野での適用が期待されている。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とり、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、StreamBase 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 は同社の研究プロジェクトであった System S が製品化されたものであり、プログラミングモデルとしては、SPL（Streams Processing Language）という独自の言語を用いて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 を採用している。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、Actors モデルを基づいた API を用いて Java で記述する。

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 2 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、プログラミング言語に Objective-C を採用し、ユーザインターフェイス構築、オーディオ再生、地図表示などのためのフレームワークが提供されている。ランタイムは iOS という。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、等々枚挙に暇がない。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、CSQL、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、統計解析ソフトウェア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ェアであり、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などで使用されており、Googleの提供するPaaS（Platform as a Service）クラウドであるGoogle App Engineにおいて利用可能な3つの言語のうちの一つになっている。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[2)]。著名サイトではTwitterにおいて用いられており、今後のさらなる伸張が期待される。

（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、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コンピュータについては、ハードウェア、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、それらからトップダウンにプロジェクト全体を構築していくべきと考える。

- 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、我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、攻撃には様々なソフトウェアの脆弱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のプラットフォームにおいては、攻撃者にとって魅力的な攻撃対象であると同時に、新しい機能と共に新たな脆弱性が生み出している。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は研究レベルではなされているが、必ずしも広く採用されているとはいえない。すでに普及してしまっているものに後から採用されるのは困難ということなのであろう。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、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、ビッグデータを所有する米国企業に勢いがあり、ビッグデータの所有が大きな利得となっているといえる。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。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コンピュータの構築を視野に、米国ではDARPAが2010年にUbiquitous High Performance Computing[3]　および　Omnipresent High Performance Computing[4]の二つのプログラムを相次いで開始したが、前者は第一フェーズの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コンピュータの推進主体であり、2011年にX-Stackプログラム[5]、2012年にFastForwardプログラムを開始している。ハードウェア、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とる。また、DOEにとって重要なアプリケーションを3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。
- 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ェアをオープンソースとして公開しているわけではなく、それに対し、Yahoo!は同等のソフトウェアをオープンソースとして成長させる方策をとり、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では、そのランタイムはインタープリターベースのものが主流である。コンパイラを導入して高速化を図る試みは少なからず行われているが概ね実験的なものに留まっている。これらの言語が高水準であるため最適化コンパイラの構築に多大な労力を要するのが主たる理由であるが、そのような中、2010年に、いわゆるコンパイラではないが、FacebookがPHPからC++へのトランスレーターを公開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!などの新興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もち、近年では、エリクソンのErlang、スイス連邦工科大学のScalaなど、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、ビッグデータなどにおいて、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み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。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
※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）High Productivity Computing Systems
http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/High_Productivity_Computing_Systems_%28HPCS%29.aspx
2）ISO/IEC 30170:2012 Information technology -- Programming languages – Ruby
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=59579
3）Ubiquitous High Performance Computing
https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=cbc05c86eb555a334708b570564dddca&tab=core&_cview=0
4）Omnipresent High Performance Computing
https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=f9690cdd66d51b00eda9eba2e16015d6&tab=core&_cview=1
5）X-Stack Program
http://www.xstack.org/

3. 4　ロボティクス

（1）はじめに

日本はロボットの研究開発を世界に先駆けて進めてきた。産業用ロボットに関する導入支援から始まり、1980 年代後半には極限作業用ロボットを、そして、1990 年代後半からはヒューマノイドの技術で世界のリーダーであった。日本社会は科学技術への期待として、ロボット技術を常に掲げている。しかしながら、2010 年代になり、日本のロボット技術は EU や米国に比較して遅れ気味になっているのではないかと危惧される。米国は医療用と軍事用のロボットを中心に、実世界に適用できるロボット技術を展開している。EU は産業用ロボットの基本技術からの見直しを進め、安全認証の標準策定で一歩先を行く。これに対して、日本は従来型の産業用ロボットにおいては、改善によるゆっくりとした進展が見られるものの、時代を画する展開は見られない。一方、サービスロボットやパーソナル・ビークルなどの一般生活に密着する応用においては、視覚系による自動停止装置あるいは自動回避装置が自動車技術として実用化されている。これを除けば、ロボット技術が社会技術としての育成に成功しているとは言い難い。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災は日本のロボット技術に実用性が欠落しているのではないかとの印象を国民に与えた。実際には、日本発の災害用ロボットが、その後、原子炉建屋やその周辺で情報収集などに活躍しており、日本発の災害用ロボットも研究段階から実用性を獲得しつつある [1)]。加えて、今後、原子炉を廃炉にするための技術が開発されることで、特定環境での特定作業に特化したロボット技術が日本発で展開されることが予想される。しかし、全体として、ロボット技術の展開方法を見直す時期にあるとの意見が強まっている。

（2）現状の認識

(2)-1　ロボット技術の歴史

いま日本が必要としているのは、(1) 少子高齢化社会に役立つロボット、(2) 日本の次世代産業の中核となるロボット、(3) 一般市民の QoL（Quality of Life）を豊かにするロボット、であろう。そのようなロボットを研究開発していくには、従来からの研究開発方法だけでは不十分であるとの認識に立たざるを得ない。

ロボット開発の黎明期である 1970 年からのロボット技術要素に関して、技術発展傾向を表 1 に示す。過去部分はロボットハンドブックとロボットに関する技術ロードマップの記述を中心に、現状は 2011 年度の科学技術研究開発の国際比較報告 [2)]、2012 年度以降については筆者らの予測で記入した。

	1970 年～	1980 年～	1990 年～	2000 年～	2010 年～	2020 年～
移動技術	→	↗	↗	↗	↗	↗
操作技術	↗	↗	→	→	↗	↗
知覚技術	→	→	↗	↗	↗	↗
知能技術	→	↗	↗	↗	↗	↗
通信網技術			→	↗	↗	↗
統合技術			↗	↗	↗	

表 1 ロボット技術要素の発展傾向

ロボットが登場した当初はマニピュレーション技術（物体操作技術）が開発の中心であったが、ここ 20 年間、移動技術が急速に発達してきた。結果、物体操作技術の遅れが相対的に目立ち、物体操作技術が遅れを取り戻す形で今後、進展する。一方、1990 年代中頃まで発達がゆっくりであった知覚技術（センシングデバイスとセンサ融合技術）においては、視覚認識系だけが大きく進歩してきた。今後、多様なセンサからの大量データ、すなわち ビッグデータという形での知覚技術が加わる。ICT 技術の進展により、POS（Point Of Sale）データ、GPS（Global Positioning System）データ、あるいは家庭内のエアコン使用履歴、スマートフォン利用履歴など生活に密着したデータが大量に蓄積されている。加えて、個人の行動履歴や健康管理履歴など極めてプライバシー性の高いデータも大量に存在している。これらのビッグデータを外覚センサとして有効に利用できるならば、ロボットの行動を高度化できる可能性がある。データから行動と環境条件とが組み合わさった主要パターンが抽出される。加えて、ロボット利用者の意図の推定、あるいはロボット周辺環境への操作の影響が測定可能となる。これらは従来、目前の即時データだけで行動してきたロボットの行動が、過去の経験、環境内での典型行動などに規定された行動、すなわち、常識的な行動に変わることであり、ロボットが社会的存在となる画期的な時代を迎えることを意味する。

このような時代的特徴を考えるなら、ロボット技術の俯瞰は、従来から定義されている要素技術の発展に対する鳥瞰図では不十分であり、発展方向をより先鋭に選択し、そのため、従来のロボット技術に加えて、外側から取り込むべき必須技術が見えるように、より高い、かつ方向性の強い視点での鳥瞰が求められる。

(2)-2　ロボット技術の進展方向

本俯瞰報告書には、新規隆盛する領域として、CPS（Cyber Physical Systems）や CHS（Cyber Human Systems）があげられている。ロボット技術領域はこれらと強く関係するので、本節ではロボット技術の特徴を示す。まず、ロボットの目的を「サービス、そして、最終的に社会的価値（地球レベルの価値、コミュニティレベルの価値、そして個人レベルの価値）」を提供する方法論と広く捉え、「実世界で、対象の状態を知覚し、実時間で対象に効果を与える物理的存在」と定義する。「実世界」とは、自然世界・人工世界に関わらず、目的遂行のための特別な変更を加えていない状況である。「実時間」とはその作業に

求められる反応時間であるが、多くの場合、重力場内での落下を基準とする時間を想定する。それはロボットが状況をセンサで知覚してから、アクチュエータを動かして対処するまでの情報処理時間であり、CPSに比較してロボット技術領域はここに強い制約条件が存在する。

CPSが仮想的な情報世界内での論理を重視するのに対して、ロボット技術は実際に発生した物理的変化を重視する。実世界はロボットの効果器によって変化させられるが、ロボット以外の働きかけによっても変化する。また、ロボット効果器による働きかけにも、意図した作用以外の効果、すなわち副作用を残す。副作用はできる限り、ロボットにより知覚されるべきであろうが、その保証は一般にない。それゆえ、ロボットは常に周囲の環境を知覚し続けるのが一般的である。

現状におけるロボットが社会で使われている応用範囲は狭い。人間世界ではすでに人間が作業を担当しているから、特殊環境を除いてロボットの必要性は低いのである。米国におけるロボットのキラーアプリケーションは外科手術と戦闘用である。手術であるいは敵を倒すことで「人間を救う」がゆえに、急速な成長を可能とした。同様に、自動車の衝突防止技術は「人間を救う」可能性が高いので、社会的に必要性が認知されて、急速に広まるであろう。大量生産時代には産業用ロボットが過重労働から労働者を救ったが、今では品質確保の一方法である。サービスロボットは利便性の要求でしかなく、展開は遅い。長期的な目的である「人間環境を整備して地球を救う」についての研究はほとんど進んでいない。

以上の議論は、日本で必要とするロボット技術を本当に研究開発するためには、すなわち、「(2) 日本の次世代産業の中核となるロボット」技術の構築を目的とするなら、(A) 人間が基本的に働けない特殊環境で作業するロボット、(B) 作業者がしばしば生命的危機を受けている職場での単純作業支援、の二つを課題とする技術構築をまず進め、その過程で、中長期的目標であるサービスロボットを受け入れる社会構造を準備するしかない。すなわち、ロボット技術をロボット必須課題で進め、一方、「サービス」の向上をロボットで実現することを並行的に進める。この方法は技術的には特定分野に焦点を絞るので、結果的にガラパゴス的進化に陥る危険性がある。後追いする多くの国々がより簡素化したビジネスモデルを提案し、日本より退化した低廉ロボット技術で利益を上げようとすることが予想される。その場合でも「サービス技術」として開発しているので、それらの国々の状況を解析し、製品サービスシステムの輸出として対応できるはずである。すなわち、ロボット要素技術を使った社会技術としてサービスを適用することができるからである。

このような時代認識を受け、いかにロボットを使った必須サービスを開発し、それを社会に定着させるかを中心に新しい研究領域を提案する。

(3) ロボット技術の構造

すでに述べたように、ロボット技術の基本構造は、図1に示すように、「感覚器 - 情報処理 - 効果器」であると捉える。CPSと同じ構造である。ロボット技術では大多数が単体で行動するのに対し、CPSでは集合体が多いと予想される。CPSとロボットとは大枠では同一構造であるが、現状では、CPSの方が、処理情報量が大きい、処理時間が長い、効果器が多様であることが相違点である。例えば、実世界と仮想的な世界のエッジに存在する大量データは、多様な因子の影響を受けているため、データマイニングを適用しても

支配的な論理を探し出すことは難しい。そこである種の意味あるデータ解釈や目的達成のための意味あるデータ収集をする必要があろう。ロボット技術の歴史を眺めれば、サブサンプション構造、行動プログラミングなどのプログラム構造と、その中で用いる制御モジュールの切り方について、粒度選択と接続方法標準化に長い努力が払われてきた。生活支援ロボットでは、より作業を多様な環境の中で実行する必要があるため、標準化は必須であるが、上述の理由で単一の標準的方法が成立する可能性は低いと考えるべきである。

CPS であってもロボット技術であっても、「実世界に安全に働きかける効果技術」としてどの効果器を選択するかは、完全に設計問題である。従来は、腕、指、脚といった人間をモデルとした物理系効果器を定番としており、対象に対する直接的な働きかけが多数を占めていたが、CPS では冷熱制御機器、照明、交通信号制御などが入るので作用が間接的になる。

以上の議論から、ロボティクス分野の技術俯瞰では、ロボット技術の現状を俯瞰するとともに、社会技術として今後研究開発すべき方向性を明らかにすることを目的とする。特に、多数のセンサ、多数のアクチュエータが社会に組み込まれた状況である CPS で有効となるロボット技術を検討する。

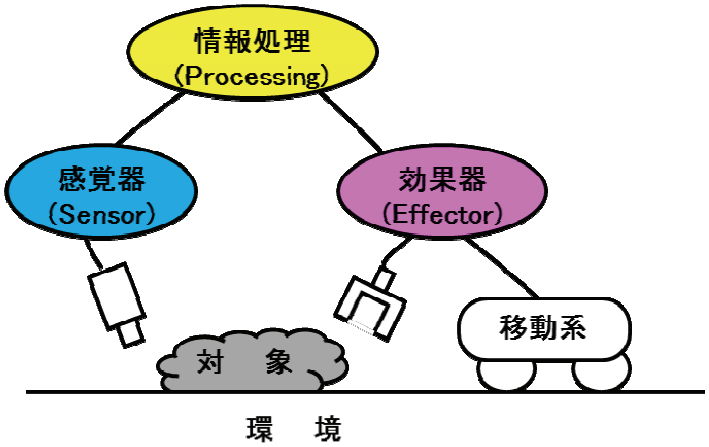


図 1　ロボットの基本構造

（4）研究開発領域

従来、ロボティクスは表 1 のように対象作業と技術要素とに分解して議論してきた。この方法は技術開発の常道であるが、結果的に細かく分化した要素が開発できてもシステム構築は別課題であり、かつまた、実世界への適用までの期間が長すぎる問題が指摘されている。対象作業別に課題に取り組めば、一見、開発速度は高まるが、特定機能に限定される。この問題を解決するために、本俯瞰報告では、図 2 に示すロボット技術と社会との関係を、表 2 に示す 5 層に分割して論ずる。

	階層名	サービス度合	研究開発領域名
社会↑↓部品	社会システム構築層	サービス	ロボット技術の社会的受容
	サービスロボット層		社会に役立つロボット技術
	単位サービス機能層		(サービス関連研究として推進するため扱わず)
	ロボット機能提供層		ロボットが支える機能提供技術
	部品層		(すでに開発済みであるとして扱わず)

表２ 研究開発領域の構造

すでに述べてきたように、地球そして地域社会のためにロボット技術が必要とされるのであり、それゆえ、我々は社会からの要求を掌握して、機能に変換する技術を準備しなければならない。これを「ロボットが支える機能提供技術」として展開する。この段階では時々刻々と変化する環境のセンシング技術、作業を実行するハードウェア、そして、目的を遂行するシステム・インテグレーション技術が必須である。

次に、これらの機能を時間的・空間的に組み合わせて、サービスとして利用可能とする形、すなわち「社会に役立つロボット技術」として研究開発する。ロボット技術を利用可能なサービス単位として定義し、サービスの受け手が人ならびに社会であることを再認識するなら、この段階での中心課題はサービスの受け手の多様性に適応可能とすることである。すなわち、多様なデータを扱ってロボットの行動計画を作成する技術、QoLを向上させるサービスのためのプラットフォーム技術、人との共存技術などがその中心となる。「社会に役立つロボット技術」の研究開発には、従来型のロボット関連学問領域では不足し、サービス工学、行動科学などとの融合によりイノベーションの実現が期待される領域である。

最後に求められる研究開発対象は、ロボット技術を社会技術と定着させるための方法論そのものである。日本社会がロボット技術をいかに受け入れ、産業化するかを目標に、そのために方法論を「ロボット技術の社会的受容」として検討する。その中には、コミュニティが持つ要求の獲得方法、ソリューションを提供するシステム・インテグレータの育成、などを含み、法制度・金融システムに関する解析と設計を含む。この段階では、ロボット技術を利用者が自発的に利用し、相互に巻き込み、その結果、イノベーションが発生するメカニズムを明らかにすることである。

以上、表２に示した５つの階層のうち、３つを研究開発領域として選択する。

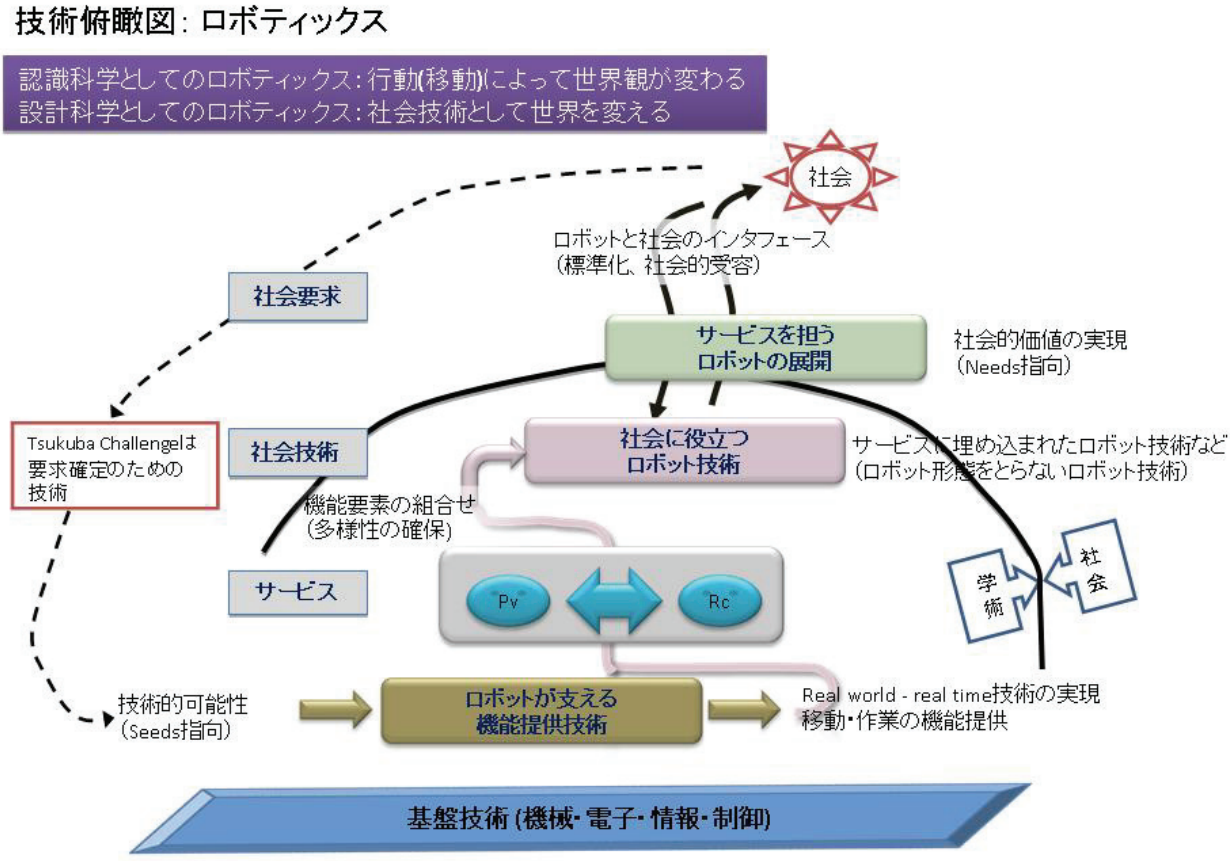


図 2 社会との関係として定義する 3 層ロボット技術

引用資料

1）ロボット学会誌 第 24 回日本ロボット学会学術講演会
2）科学技術振興機構 研究開発戦略研究所、電子情報通信分野　科学技術・研究開発の国際比較、2011

3.4.1　リアルワールドにおける機能提供技術

（1）研究開発領域名

リアルワールドにおける機能提供技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

（自動機械、または、遠隔操作機械としての）ロボットのために準備された環境ではなく、現実の（動的な）世界の中で、指示された作業を遂行するロボット機能を、ユーザに対して提供すること。

このためには、ロボットは遂行するべき作業の内容を把握していると同時に、環境の状況を時々刻々認識することができ、その中で必要な動作を決定して、自らを制御しなければならない。作業を遂行するべき各々のリアルワールドにおいて、作業を遂行するためにどのような情報が必要であるかの抽出、および、その情報の獲得法に並んで、それを実行する統合システムの構築法が、研究開発すべき重要な事項である。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ロボティクスを、人間や動物が有する、与えられた目的の作業・仕事を遂行する能力を人工物である機械の上に実現する技術体系と定義する。このとき、その作業を、その機械（ロボット）のために整備され準備された環境でない現実の世界の中で、時々刻々の状況に対応しながら行うという機能を実現し、それをユーザに提供するのが、本研究開発領域が目的とする技術である。

目的とする作業を達成するためには、まず、その作業を実行するためのハードウェア（メカニズム、センサ、アクチュエータ、および、情報処理系）と、行うべき作業の情報をもち、時々刻々の環境の状況を理解し、メカニズムの動きを計画・制御して、適応的に作業を進めるソフトウェアが不可欠である。さらに、ここでは、それらの各要素以上に、過不足のない要素が統合されて、全体として機能を実現することがフォーカスされる。

さて、伝統的には、自動的に働く機械（ロボット）は、十分に段取りがなされてよく整備された工場内で予め与えられた作業を繰り返し遂行する産業用ロボットなど、機械のために必要なだけ整備された環境で働くことで、高い精度や生産性が実現されてきた。そのような機械やその働きのために準備された環境ではなく、自然環境、あるいは、人々が普段生活している環境を実世界（リアルワールド）と呼ぶ。本研究開発領域は、機械（ロボット）にこのリアルワールドで所定の機能を発揮させることを目的とする。

リアルワールドにおける機能の提供のためには、ロボットは、時々刻々変化しうるリアルワールドの状況を常に認識できていなければならない。ロボットにリアルワールドで作業を行わせるためには、たとえ、その作業を大幅に限定したとしても、環境を簡単なモデルで扱えると仮定することはできない。特に、環境中の物体が動いている場合の、時々刻々変化する動的環境の認識は、それ自体、技術的にも極めてハードルが高い。

一方、リアルワールドは、当然ながら広く多様であり、これをすべて知ろうとすると、まさしく、フレーム問題に直面することになる。このため、ここでは、達成するべき作業に必要な情報は何かを的確に把握することが必要である。

認識系と同様に、物理的な対象物を操作するための制御系にも、同様な問題がある。ここでは、元より、重力や摩擦などの物理学的なパラメータを考慮しなければならないが、

それ以上に、現実的な雑音・誤差や工作精度などの制約の下で物体操作がなされなければならず、その制約や物体操作に対する要求は、まさしく、遂行するべき作業や環境の条件に依存する。それらの情報は、多くの場合、必ずしも陽に作業条件として意識はされず、暗黙知として存在するその作業に関する常識の中にある

ロボット学においては、人間のような働きをする機械の実現という視点から、この問題は、歴史的にも古くから重要な課題として認識されてきた。すなわち、複雑なメカニズムを有する機械に、複雑で多様な環境で、求められた動作を実現させ所定の目的の達成させることは、ある意味で常にロボット学の目的とされており、「不整備環境（Unstructured Environment）におけるロボット動作の実現」は、1990 年より前から常にロボット学における重要な課題として扱われている。

しかし、今までに実現されたロボットが働く環境は、ほとんどが限定された環境において、例えば対象物や障害物だけの位置が既知でないというように、対象とする環境をモデル化したときのいくつかのパラメータだけが未知であるという条件を設定するなどに留まっているのが普通であった。このため、実際の「リアル」な環境で作業を実現するという視点でモデル化するためにはどれだけの次元が必要か、などの課題に着いても十分な議論はなされていない。また、多くの場合、実現させる機能の高度化に目が向いて、機械を働かせる環境を、むしろ限定してしまう傾向もあった。

さて、従来の多くの技術の方法論である要素技術還元型のアプローチでは、ロボットの機能を実現するための技術開発をするとき、実際に実現すべき作業と働くべき環境をイメージしても、まずそこに必要となる複数の要素技術を定義して、これを個別に研究開発することになる。個別の要素技術の研究開発においては、その技術をできる限り単独で評価できるパフォーマンスメジャーが定義され､それによってその研究が深化する。しかし、一般に、それらの要素技術の単純な寄せ集めでは目標とするリアルワールドでの機能は実現できない。このため、改めてシステムを統合すること（システムインテグレーション）に関する研究開発の必要性が叫ばれ、例えば、計測自動制御学会（SICE）には 2000 年にこれを研究するためのシステムインテグレーション部門が発足している。

「与えられた環境で求められる機能を提供する機械」の実現を図るためには、システムの統合の技術に力を入れるべきという考え方は、特に我が国においては、学術的にも先端技術としても、1990 年代以前から認識されており、1990 年代における我が国のロボット技術プロジェクトにおいても、要素技術のみでなく目的に沿って働くトータルなシステムの構築が行われていた。したがって、複雑な動作・作業を達成するシステムをまとめ上げる技術という点では、我が国の伝統的な技術レベルは高く、1980 年～ 1990 年代にロボット技術については我が国が他の国々と比して優れていると評価を受けたのは、まさしくこの点によるところが大きかったと考えられる。

しかし、我が国では、むしろ、先端技術のブームによって視点が要素技術に向かってしまい、我が国の研究開発動向としては、システム統合の部分にフォーカスする程度は弱くなってしまった。

この視点の研究開発に改めて大きな石が投じられたのは、DARPA によって 2004 年と 2005 年に行われたグランドチャレンジ、および、それに引き続き 2007 年に行われたアーバンチャレンジであった。

グランドチャレンジは、砂漠の中に設定された 132 マイルのコースをロボットカーに

自律的に走行させるチャレンジであり、個別の要素技術でなく、環境と目的動作がセットで定義された「課題」を達成することが目的であった。この課題では、ロボットカーは単に走行するだけでよく、求められた動作は決して複雑なものではない。ロボットカーに求められたのは、現実の状況下で自ら走行すべき道からはずれることなくそこを走り抜くことだけが要求された。ただし、132マイルの長距離区間を走行する間には、極めて多くの細かい事象が発生する。この課題では、ロボットカーはそのすべてに対して自律的に対処することが求められている。

グランドチャレンジにおいては、環境は動的に変化しうるとは言ってもその変化は緩やかであり、走行可能な道が時々刻々変わる訳でない。これに対し、2007年に行われたアーバンチャレンジでは交差点などのある模擬市街地が環境として選ばれ、一般の車両を模して走行している他の車がいる中で、指定された60マイルのコースを自律走行することが課題とされた。

これらの課題は、要素技術を直接の目標とはせず、リアルワールドで働く統合された自動化システムの研究開発を目的としたものであり、ロボット技術の研究上、エポックメイキングなものであった。

この課題の研究開発の一部は、その後、Google社によるグーグルカーの研究開発に継承され、カルファオルニア州の一般道路における自動運転が実現されている。

この種の実際に与えられた環境で働くロボットの統合システムの実現を課題とする研究開発には、いわゆるロボットコンテストがある。これも要素技術ではなくシステムのまとまった機能の実現に焦点を当て、そのパフォーマンスを競うものである。ロボットコンテストは、主に学生や若手のエンジニアが、必要性は高いが体系化が難しい技術を経験によって身につけること、すなわち、教育や人材育成をその存在目的としていることが多く、特に我が国で活発である。しかし、ロボットに限らずこの種のアクティビティが新しい技術の研究開発にインパクトを与えることも少なからず存在する。

本研究開発領域も、これらのコンテキストの延長上にある。本領域の究極の目標は、機械（ロボット）が環境によらず求められる機能を提供することである。しかし、環境に目をつむってそれに無関係に働く技術を開発するのでは、実際にリアルワールドで働く機械の実現は不可能であり、ロボットが提供するべき機能との関わりにおいて対象とする個別のリアルワールドがどのような性質をもっているかを具体的に理解することをベースとするアプローチをとる。

すなわち、エレガントな抽象的一般論より、具体的なリアルワールドの構造と性質に目を向け、その上で目的に沿って働く機械を構成する経験を積むことこそ、リアルワールドで役立つ機能を提供するためのキーである、と考えるのである。

このように実際の応用や適用の場面をハッキリさせて、それにドライブされる研究開発は、一般に企業における製品や商品の開発において行われている。しかし、企業の活動が比較的短い時間で「売れる」製品を作り上げることを指向せざるを得ない我が国の現状では、通常の企業における製品開発などの活動は、複雑多様なリアルワールドにおいて、必要な機能を提供する技術の開発、あるいはそのための経験を積む場とはなっていない。

一方、世界的には、リアルワールドでの適用場面がドライブされる研究開発の例として、軍事技術の研究開発があげられる。これが、米国などがこの分野に強い理由ではある。しかし、機械（ロボット）が人々の通常の生活空間で意味のある機構を提供するためには、

対象とするリアルワールドを、戦争の現場ではなく、人々の普通の生活環境として研究開発を進める方が、技術の波及や研究開発の効率という視点で優れていることは明らかである。DARPA がアーバンチャレンジにおける問題設定を一般の市街地としたのも、その視点によると考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

上に記したアプローチによる、リアルワールドにおける機能の提供技術は、まさしく以下に例をあげる現在の社会的な問題を解決するための技術として求められている。

・高齢化問題

国民の年齢構成が急速に高齢化に向かうことにより、我が国は近いうちに、生産人口の減少と、支援や介護を必要とする人口の増加に直面する。これに対処するために、生産とサービスのための作業の自動化は不可欠である。特に、生産工程においては、機械による作業のために環境を整備して画一化することが難しい、農林水産業や建設業、さらには各種のサービス業における作業量の軽減や自動化が求められる。また、人間に対する支援や介護の現場では、被支援者などにとってできる限りそれまでと同じ生活環境を維持しつつ、確実に支援や介護のための機能を提供することが求められる。

・社会的インフラストラクチャのメンテナンス

20 世紀に整備され、現在の我が国の経済活動や市民生活の基盤となっている、電力などのエネルギー供給システム、道路や鉄道などの輸送システム、鉄鋼などの基礎的な素材・材料の生産供給システム、通信網などの社会的インフラストラクチャは、現在、原子力発電所を例とするまでもなく、耐用期限を気にしなければならない時期に達している。これらの基幹網をよい状態に維持（メンテナンス）し続けることは我が国の今後の経済や市民生活にとって極めて重要であるが、これを社会が負担できるコストで実現しなければならない。そのためには、ロボットに、現実の環境下（リアルワールド）で人間に代替していわゆる 3K に属する仕事を達成させるための技術が不可欠である。ここで求められる個別のシステムのメンテナンスという具体的な問題は、技術の研究開発を進める上で適切な課題ということができよう。

なお、これらの現実的な環境で自動的に、または、人に替わって 3K 作業のために働く機械の技術は、まさしく従来の機械技術の延長上にある。一方、この種の社会のニーズにドライブされたサービス機能の実現を図ることは、そこに使われる情報処理技術や、センサ・アクチュエータ、構造・機能材料、エネルギー源などに具体的な目標を与えることになり、ややもすると乖離しつつある先端技術と、実際に役立つ技術を再度結びつけるパスとなる。

（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）

1. 自動車のロボット化の視点による研究開発

米国では Google 社がグーグルカーの開発をさらに積極的に進め、カリフォルニア州以外の州でも実験を開始している。また、欧州でもアウディ社が無人の自動車に山岳道路をダイナミックに自律走行させる実験を進めている。これらは、いずれもリアルワールドで自動車を自律的に走行させようとするものであり、いろいろな道路環境というリアルワールドの性質に対する深い理解と並行して技術開発が進められている。

2. EUにおけるRobotics and Cognitive Systemsプロジェクト

EUでは産業目的や市街地・家庭内で働くロボットのプロジェクトが進められており、ここでは特に、ユースケースに基づいた研究開発に力点があると説明されている。

3. ROBOCUP

ROBOCUPは、2050年にロボットのチームが人間のチームと対等にサッカーのゲームをすることを目指して始まり、何種類かの実機やシミュレーションなどの課題に沿って働くロボットが研究開発されている。ロボットが人や他のロボットと対戦型で働く以上、環境は極めてダイナミックとなるため、リアルワールド・リアルタイムの環境認識や動作計画が不可欠となり、この機能を含む実ロボットの実装が試されている。

また、目標をもった具体的システムを構築して、その目的に沿った機能のパフォーマンスを評価するという主旨にしたがって、レスキュー環境における要救助者の探索と保護という課題が設定され、RoboCup-Rescueとして世界的な広がりをもって競技会形式により技術の進歩が図られている。

4. 福島原子力事故への対応

我が国では、福島第一原発の事故における冷温停止のための注水や人が立ち入れないところの状況把握、あるいはそれらのために環境の整備の課題に対して、緊急的な遠隔操作ロボットの開発や適用が行われた。ここでは、1990年代半ばから雲仙普賢岳の火山活動対応などで開発・利用されてきた遠隔操作による建設機械を用いた無人化施工のシステムも適用された。また、2000年代初期から東北大学や研究開発NPOであるIRS（International Rescue System）を中心に、文部科学省大都市大震災軽減化プロジェクトやNEDOの戦略的ロボット要素技術開発プロジェクトなどで進めてきたレスキューロボット研究開発も一つのベースとなっている。

また、今後の原子炉廃炉のためには放射線環境下における作業が不可欠であり、その方式や必要な技術開発も進める必要がある。

5. つくばチャレンジ

DARPAのグランドチャレンジに触発されて、いろいろな動作課題を設定してそれに対するロボットの動作・機能を研究開発する試みが、世界各国でなされている。

我が国では、つくば市で「つくばチャレンジ」と称して人々が普通に使っている市街地の遊歩道や駅前広場で、その環境を制限することなく、自律ロボットが市民と共存しつつ1 km+ αの規定コースを走行する、という課題が定義され、国内の多くの研究チームがこの課題に対してロボットの研究開発を行った。2007年～2011年に毎年10日程度の日が設定され、この日に公開の実験が行われた。つくばチャレンジの特徴は、つくば市民が普通に歩き、自転車を走行させている遊歩道などを、何ら制限せずにロボットの走行環境としていることである。ロボットの開発者は、このリアルワールドで、人々がロボットに対してどのように振る舞うかを考え、実験結果を観察しつつロボットの機能を開発・テストすることにより、この種のリアルワールドで働くロボットの技術が開発されてきた。なお、つくばチャレンジは2011年でその第1ステージが終了したが、2013年より第2ステージとして同様の市街地のリアルワールドを対象としてロボットの実験が計画されている。

6. DARPA Robotics Challenge

DARPAはグランドチャレンジのシリーズの次のチャレンジとして、Robotics Challengeと称して新しい課題に対する研究開発を実施に移している。計画では2012年

10月よりスタートし、フェーズ1は2013年末まで、フェーズ2は2014年末までとしている。

課題は、原子力発電所における事故時などを模した環境において、

1）作業車の運転
2）がれき内の移動
3）通路のがれき除去
4）建物へのドアの開閉と侵入
5）はしごの移動と工場内通路の横断
6）工具によるコンクリートパネルの破壊
7）ガス漏れパイプのバルブ閉め
8）冷却ポンプなどの交換

を遠隔と自律の組み合わせで行わせようとするものである。課題の説明にはヒューマノイドが描かれているが、ルール上では、機能が実現されればその必要はないとしている。これは、極めて高いレベルの機能のインテグレーションを目指したものであり、このプロジェクトにおける具体的なシステムの開発は、リアルワールドにおけるロボット機能の提供という点で世界に与えるインパクトは極めて大きい。ただし、反面、設定されたロボットの動作環境はこの課題のために作られた環境であり、競技形式のチャレンジとしては仕方がないとしても、課題そのものは本当のリアルワールドへの切り込みとはなっていないという特徴がある。

（6）キーワード

当該研究開発と関連の深い重要な専門用語を複数記載する。情報検索などでの活用が想定される。

（7）国際比較

この領域においては、研究開発におけるアプローチとして具体的なユースケースを対象とするため、応用研究が基礎研究の後に来るという構造ではない。したがって、基礎研究と応用研究の間で線を引くのは適切でない。

このため「基礎研究・応用研究開発」と「産業化」の2つのフェーズに分けて、現状およびトレンドを記す。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。

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	○	→	・リアルワールドで働くロボット技術は、各分野の自動化等の牽引力となるべき技術であるが、研究者は多くない。 ・リアルワールドで働く技術の開発は、システムの試作と実験が重要であるが、必要な研究費が不足しており、リアルワールドを指向しても何らかの他のプロジェクトに依存せざるを得ない状態にある。 ・移動技術や環境認識技術については、NEDOの戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトなどにおいて、精力的に進められたため、これについては、現在、世界最高水準にある。 ・建設作業を対象とした機能としては、災害時に遠隔操作する無人化施工技術やホイールローダによる土砂搬送作業の自律化など、レベルは高い。
	産業化	△		・建設機械の遠隔操作による無人化施工については、災害復旧等のための先端的研究開発が行われ、その実用性は世界最高水準にある。しかし、それも露天掘り鉱山における無人ダンプトラックなどの輸出を除くと、直接には大きな産業には結びついていない。 ・農業用自律ヘリコプター（ヤマハ）など、先端的な製品はあるが、継続して技術開発されているものは少ない。
米国	基礎研究・応用研究・開発	◎	↗	・軍事への応用目的が背景にあり、リアルワールドを指向したいろいろな機能の開発がDARPA等のプロジェクトとして進められている。このため、我が国と比較すると予算額は桁違いに大きく、研究のアクティビティは極めて高い。特にFuture combat systemなど、ロボット技術の軍事目的への研究はきわめて活発で、そこから産業用に転移される技術も多い。 ・軍事以外にもテキサス大学Prof .Murphyのレスキューロボット、CMU FRC（Field Robotics Center）の各種ロボット、Woods Holeの水中ロボット、NASAJPLの火星探査ロボットなど、フィールドロボットに関する研究や技術開発が多くの研究機関において実施されており、この分野の技術力は名実共に世界トップである。
	産業化	◎	↗ →	・iRobot社製のPACKBOTやNEGOTIATOR、Foster-Miller社のTALONは、主に軍事用途を目的としたものである。これらのロボットは、不整地走行性能、防塵、防水性能に優れ、小型不整地移動ロボットの市販品として、非常に高い性能を有している。 ・また、John Deer社の農業用トラクターなどの農業機械の自律化や高度自動化の研究開発意欲も高い。
欧州	基礎研究 応用研究・開発	◎	↗	・宇宙ロボット関連については、ESAが中心となり、火星探査ロボットや軌道上マニピュレータなどを利用した多くのミッションが予定されており活発に研究が進められている。 ・自動車の自律化・知能化の研究は活発で、様々な研究チャレンジが行われている。 ・宇宙、自動車を除くと、フィールドロボット全体としては低調。
	産業化	○	↗ →	・自動車については、研究成果が徐々に産業に使われている。また、宇宙のために開発された技術の産業転用がある。

中国	基礎研究 応用研究・ 開発	△	↗	・現状でのロボットの研究レベルは、台湾と香港で高いが、フィールドロボットの研究アクティビティは高くない。 ・中国本土におけるフィールドロボット研究も、先進国より、10年以上遅れていると考えられる。しかし、この分野への研究の指向性は高い。例えば、ハルピン工科大学では、広大な敷地において数多くの実験装置が模倣され、多数の研究者により、これらを用いた研究が進められていると聞くなど、現在、各大学がフィールドロボット関連に投入している人員と予算は大きく数年以内に、技術レベルで追いつかれる可能性が大きい。
	産業化	△	↗	・建機についてはマーケットが大きく、先端的な自動化システムが、すぐに真似される状態になってきた。また、自らの技術開発意欲も高い。
韓国	基礎研究 応用研究・ 開発	○	↗	・ロボットの研究はサービスロボットに偏り、家庭内など環境を整備する方向にむいており、自然環境などのリアルワールド指向の研究はあまり盛んではない様子。 ・原子力発電所のための検査メインテナンスロボットは、過去において活発に技術開発されていたが、最近は学会で見る限りそのアクティビティは小さい。
	産業化	○	↗	・ロボットの名の産業はきわめて活発になりつつあるが、リアルワールドを指向したものとしては、低調である。 ・ただし、自動機械を開発する技術力はあり、造船所の重量物ハンドリングなど、産業におけるロボットへの指向性は高い。

（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

3.4.2 QoLを向上させるためのロボット技術（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）

（1）研究開発領域名

QoLを向上させるためのロボット技術（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

少子高齢社会においては多様な対象者に対して、QoLを向上するサービスを提供しなければならず、サービス内容の明確化、および、大量かつ多様なデータを基にサービスを実現するロボット技術が必要となり、これまでとは違った新しい視点での研究が必要である。

個々のロボット技術の研究開発は多数行われているが、ロボットの目的や用途が曖昧であり、デモのレベルのものが多く、ロボット技術として解決すべき課題が残されているために実作業を実現するに至っていない。そのためにはロボットの用途を明確にし、実作業までをプロジェクトの中で実施していくことが重要である。

大量かつ多様なデータを処理しロボットの行動計画を作成する技術、QoLを向上させるサービスやシステムを検証するためのプラットフォーム技術、人との共存技術がその中心となる。

（3）研究開発領域の詳細の説明と国内外の動向

研究開発領域の詳細

1）サービス創出とサービス構造決定技術

QoLを向上させるサービスを考え、それを実現するための入口から出口までのシステムを設計する必要がある。その中で必須となるロボット技術を研究開発していかねばならない。これまでの研究開発においては、完結するサービス、循環するサービスまでを視野に入れて開発された例がほとんどない。

単なる市場調査によらずに、サービス創出、商品開発、商品コンセプト設計など、サービス工学、要求工学などに基づく設計がより重要である。DFACE（Define-Focus-Analyze-Create-Evaluate）などは上流設計の一開発手法であるが、大量のデータまでを含めたものではない。サービスを考え、その中でロボットシステムを構築し、ロボット技術を研究する。研究開発された技術はロボットシステムで検証され、サービスとして検証する必要がある。さらにその結果がフィードバックされることで、よりよいものとなるような循環型の研究開発が必要である。

ロボットの用途を明確にしようとする努力はこれまでも多くあったが、ロボットの作業でできるレベルと要求のレベルとがあっていないこと、ニーズがあるがコストが見合わないこと、ニーズがあるがロボットの能力が追い付かないこと、一連作業の中の一部しかできていないこと、要求が多様で真のニーズが見つからないなどの理由で新しい分野へのロボットの応用が進んでいない。仕様が明確化されれば集中して開発ができ、産業用ロボット、自動車、家電などのように開発が可能であることは明確である。どのようなサービスが求められているのか、サービス工学的手法に基づき、まずサービスを明確にする必要がある。

次に、そのサービスを実現するロボット技術の技術開発を行う。多様な要求の中からデータを抽出分析し、サービスを抽出する。また、現状のロボット技術をデータ化して、どの技術をどのレベルまで開発すれば目的が達成できるか、を解析する手法が必要である。また、実現されるサービスは、常に変わるものであり、現状での最新データを利用して、最適なサービスを実現する必要がある。物流ロボットシステム、検体搬送システム、薬剤払出システムなどはすべてをロボット化するようなコンセプトの中で考えられており、実用化されている。

このような背景の中、データ工学に基づくロボット技術など関連するテーマが学術講演会のオーガナイズセッションとなり始めている。これまでのシステムに加えて必要となってくるのは、大量、多様なデータに基づく作業計画であり、作業実施における作業者とロボットとの共存技術であり、多様なニーズに応えるためのロボットが必要である。

2）プラットフォーム技術

特に一連のサービスやシステムとして実証しながら研究開発するためには研究開発プラットフォームが必要である。内閣府の次世代ロボット共通プラットフォームの研究では、施設外、施設内、テーブル上をターゲットとしてデータセンシングからアクチュエーションまでを扱える3つの環境プラットフォームのプロトタイプが構築された。施設内で人の行動計測を行う環境プラットフォームではロボットでサービスを提供する基本的な枠組みが開発された。環境情報を構造化した環境において、蓄積されたデータをセンサデータ層、セグメント層、プリミティブ層、サービスアプリ層の4層構造でセンシングからアクチュエーションまでを繋げた。多数のデータからリアルタイムでロボットサービスまで体系化した最初の例である。しかし、アプリケーションが広がるまでには至っていない。集まったデータをどのように活用するのかの方法論ができていないこと、このような人と共存する環境下で動けるロボット技術ができていないために使えるロボットが少ないこと、サービス自身のニーズが不明確であることなどの課題があり、結果としてサービスの完成度が上げられていない。人の行動計測データについては、ショッピングセンターのタイムセールや商品などの展示レイアウト設計につながるが、ロボットによるサービスはあまり進んでいない。

3）共存ロボット技術

組立作業においてもロボットとの共存作業は増えていき、ロボットアームの領域で作業者が作業を行うことは必然である。このためにロボットとの接触に関わる技術が必要となる。また、無人搬送車AGV（Automatic Guided Vehicle）や搬送システムにおいても、沢山の商品データに基づく仕分けが必要となり、作業者とロボットとが混在したシステムとなる。分散システムなど単なる複数ロボットの動作計画だけでなく、大量のロボットを扱うスワームロボティクス（swarm robotics）においても人も混在した環境での研究が必要となる。人の間をすり抜けるような移動ロボットの技術や人と混在する場合には混雑状況によりダイナミックに動作計画するようなプランニングの技術も今後ますます必要となって来る。人のいる多様な環境下で移動できるロボット技術、多様な商品を扱えて人のそばでハンドリングできるロボットアーム技術、およびこれらロボットを実現するためのセンサ、アクチュエータ技術が必要である。以下に技術項目をあげる。

展開分野（農業作業、家庭内・施設内サービス、組立）の構造決定技術
- サービス創出の手法、サービスの定量化
- システム的なサービス構築
- サービスを実現するロボット技術（作業レベル、要素技術レベル）

ロボットデータベース利用技術
- 多数の情報のセンシング技術とデータベース技術、多種データとの連携技術
- サービスとネットワーク・データベース、およびデータベースとロボットの連携技術
- ロボット作業オントロジー、作業対象の登録、ロボット作業の登録
- 大量、多様なデータからリアルタイムでロボットの行動計画を作成する技術

ロボット作業環境技術
- 環境も含めたハードウエア、ソフトウエアのプラットフォーム技術
- 環境からの知識を活用する空間知、環境知能化技術

ロボット共存技術
- 人のいる多様な環境下で移動できるロボット技術
- 多様な商品を扱え、人のそばでハンドリングできるロボットアーム技術
- 上記、ロボットを実現するためのセンサ、アクチュエータ技術

国内外の動向

1）プラットフォーム技術

米国では、カーネギーメロン大学の生活支援 QoLT（QcL Technologies）プロジェクトや ROS（Robot Operating System）を用いたプラットフォームロボット PR3 で多くのタスクが研究開発されている。日本においては、多くのデータの活用としてデジタルヒューマンによる子供事故予防のためのデータベースが開発され遊具などの評価に利用されている。また、ロボット用ミドルウエア RTM を活用した知能ロボット用ソフトウェアが開発された。NEDO 知能化ロボットプロジェクトにおいては、沢山の知能化ロボットのためのソフトウエアコンポーネント RTC が開発され公開されている。ユビキタスネットワークロボットプロジェクトではサービス提供を支援するためのソフトウエアプラットフォームが開発された。RSi ではロボットサービスの普及を図り、共通の通信プロトコル RSNP を利用したコンテストも試行された。EU では FP7 などのプロジェクトの中で、オープンソースのプロジェクトとしてロボットプラットフォームである iCUB や NAO の活用や、ロボットのための World Wide Web を構築する RoboEarth プロジェクトも進んでいる。

特にロボット用の環境やネットワークのプラットフォームとしては世界にも例はあまりなく、内閣府次世代ロボット共通プラットフォーム、総務省ユビキタスネットワークロボットプラットフォームの研究開発が先行している。ソフトウェアのプラットフォームに関しては、OMG や ISO において国際標準化が進められている。また、個々のロボット技術に関してはソフトウェア開発の仕組みができつつあり、今後はサービス提供のために、大量のデータ活用技術、プラットフォーム（環境、ネットワーク）で開発されたソフトウェア、共存ロボット技術をシステムインテグレーションしていく必要がある。

特に物流ロボットに関しては eCommerce など大量のデータに基づき動作計画が必要

で、リアルタイムなセンシングに関しては、ダイナミックな人物認識システム、タグを使用しないダイレクトな商品認識システムなどが開発され、今後は、工場生産システムやスマートコミュニティなどへのアクチュエーションが結び付くものと考える。

2）共存ロボット技術

ドイツ航空宇宙センター（DLR）では軽量ロボットアームで人に安全に接触するようなロボットアーム制御の研究を行っており、DLRのロボットはKUKA社にて商品化されている。韓国でも同様なロボットアームの制御技術の研究を行っている。生活支援用ロボットアームとしてはオランダのiARMは実績があるが、カナダの軽量ロボットアームJACOも優れた操作性を有している。日本でも産業技術総合研究所が車椅子に搭載可能な小型軽量ロボットアームRAPUDAの実用化を目指している。障害者が操作するタイプではヒューマン・インターフェイスの多様化が必要で、そのため国際電気通信基礎技術研究所（ATR）やDLRなどではBMI（Brain Machine Interface）の研究が行われている。ROSのプラットフォームロボットPR3やDLRなどの共存型ロボットアームではコンプライアントな機構が採用されている。装着型の支援ロボットとしては、筑波大学発ベンチャー企業サイバーダイン社において、ロボットスーツHALの実用化研究が加速されている。抱き上げるロボットとしては理化学研究所が中心となって分布型触覚センサを装着したRIBAの研究が進められており、いろいろな研究開発が実施されている。2015年から介護ロボットが介護保険の対象になることから開発が加速されると考えられる。

共存型のロボットはドイツで開催されたAUTOMATICA2012でも、DLR、ABB社など複数の共存型ロボットアームの展示が行われた。日本でも組立作業用に共存を意識した低出力のロボットNEXTAGEが開発された。搬送対象が重量0.1 kg場合で200回/min以上のピッキングを可能にした最速のスカラロボットや、いくつかのパラレルロボットによる高速ハンドリングの展示も見られたが、現在の動向は高速化から共存化へとロボットの技術は移行しつつある。また、部品の搬送などでは軌道自在のコンベヤ技術やハンドに頼らないマニピュレーション（Nonprehensile manipulation）技術もシステム化にとって重要で再認識が必要である。

なお、人との共存環境下でのロボットの運動に関わる技術とともに、安全の規格、制度、安全で信頼性の高いハードウェア、ソフトウェア技術も研究されていくべきであり、NEDO生活支援ロボットプロジェクトの一環として生活支援ロボット安全検証センターが世界に先駆けてつくばに設立された。

特に介護、福祉においては、QoL向上においていろいろな局面で人との接触が考えられる。混在、搭乗、接触、装着など多様なニーズに対応できるロボット技術が必要である。

（4）科学技術的・政策的課題

これまでの施策を見てわかるように短期間では研究開発の効果は現れない。開発されたものを改造していきながら、実作業に適用させていくまでを支援するような継続的な取り組みでなければ、結局は研究開発のみで終わってしまう。したがって、この仕組み自体も大変重要な課題である。重点施策であればある程、市場を育てていくという観点で制度も

見直しながら、段階を経た施策を立てることが望ましい。

また、サービス的な視点で考えていくことで、これまで開発されて使われていないようなロボット技術も重要な構成要素として取り込まれていくものと考えられる。よい技術はこれまでも多数開発されているので、それらを活かす仕組み、枠組みもサービスを提供するために必要となってくる。

（5）注目技術（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）

BMIによるロボット制御技術、人への干渉力制御技術

（6）キーワード

プラットフォーム技術、共存技術、BMI、ビッグデータ、サービス工学、Robotics Challenge

（7）国際比較

1）米国：ROSはPR2と合わせてソフトウェアとハードウェアのプラットフォームにより世界的に広がりつつあり、ROSを採用したロボットが増えている。実用面ではKIVAシステムズの物流ロボットシステムやIn Touch Healthの病院内テレプレゼンスロボットが実用化されている。手術ロボット「ダビンチ」は全世界で約1500セットが普及しているなど、医療を含めたサービスロボットの実用化が進んでいる。生活分野ではQoLTの研究プロジェクトが進められている。2011年にオバマ大統領により、製造業強化のために次世代ロボット開発への宣言、さらに福島原子力災害を受けてDARPA Robotics Challengeが推進され、2012年10月に開始された。

2）日本：プラットフォーム技術や標準化の研究開発がNEDO、総務省を中心に進められている。生活支援ロボット安全検証センターが設置されるなど総花的なロボット研究が継続されているが、研究レベルでは進んでいる。まだ小規模であるが薬払出システムなどサービス的観点から開発されたものが少しずつ実用化されている。原子力災害後、迅速に国内外のロボット研究者による対災害ロボティクス・タスクフォースROBOTADが立ち上がり、災害対応ロボットの知識や情報の集約化が進み始めた。

3）韓国：URC（Ubiquitous Robotic Companion）のプロジェクトが終わったが実用化されているものはない。現在、教育向けにRobot-learningのプロジェクトが進められ普及を目指している。

4）EU：ドイツ、フランス、イタリアが中心となり、オープンソースプロジェクトiCubが進み、今後の成果が期待される。介護福祉分野ではデンマークと日本との連携が進められている。ECHORD（European Clearing House for Open Robotics Development）では、FP7の一つのプロジェクトとして多数の産学連携のロボット応用研究により底辺が拡大されており、IROS2012などでワークショップが開催されている。また、次のEUプロジェクトとしてHORIZON2020が2014年から2020年に計画されている。

以上を考慮し、知能化、ヒューマン・ロボット・インタラクション（HRI）、システムインテグレーション（SI）の観点から次表にまとめる。

＜知能化・HRI・SI＞

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	研究水準	○	→	・RT ミドルウエアや RSi の RSNP によるロボットサービスコンテストで応用例の拡大を計画している。 ・ROBOTAD による情報集約が進んだ。
	技術開発水準	○	→	・NEDO 知能化プロジェクトが終了し、これからが普及への課題である。 ・生活支援ロボットのための安全検証センターが設立された。災害対応関連のロボット技術のあり方が見直されている。
	産業技術力	○	→	・NEXSTAGE によるセル生産ラインの構築など、少しずつ成果が現れてきた。 ・クリーナロボットの製品化では東芝、シャープが販売するようになり、市場が形成されてきた。 ・介護ロボットに介護保険が 2015 年より適用されるようになることで市場の活性化が期待される。
米国	研究水準	◎	↗	・オバマ大統領により産業強化として次世代ロボット開発、災害対応の DARPA の Robotics Challenge が推進されている。 ・Boston Dynamics の Petman やマサチューセッツ工科大学 Cheeta などチャレンジングな研究が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	・ROS の応用研究が継続的に進められている。 ・マサチューセッツ工科大学からスピンアウトした Meka Robotics では研究用の Compliant Arm が開発されている。
	産業技術力	○	↗	・KIVA の搬送システムや In Touch Health などベンチャーを中心としたロボット技術の実用化が進んでいる。ROS も Bosch などで利用され広がりつつある。 ・モーションセンサ KINECT は低価格ながら高性能で世界的に広がりつつある。
欧州	研究水準	◎	↗	・FP7 や HORIZON2020 にて研究施策が推進されている。 ・Robo Earth プロジェクトでロボットの WWW 化を進めている。
	技術開発水準	○	→	・ECHORD（European Clearing House for Open Robotics Development）により技術水準が引き上げられている。 ・DLR と KUKA で共存型ロボットの研究を進めている。
	産業技術力	◎	↗	・AUTOMATICA2012 では、KUKA は FANUC に並ぶほどの展示規模と内容になっている。Staubli は最速の産業用ロボットを展示しており、急速に発展している。 ・ECHORD の研究成果が広がりつつある。
韓国	研究水準	○	→	・MIKE での URC のプロジェクトが一段落し、R-Learning として教育用に応用が進められている。 ・高麗大学校では干渉力制御のロボットアームの研究が進められている。
	技術開発水準	○	→	・OMG 関連の活動もやや停滞気味。
	産業技術力	○	→	・産業化はクリーニングロボットが進んでいる。Robot Land は開発が止まっている。
全体コメント： 米国と EU の勢いが出てきている。特にオバマ大統領による推進、HORIZON2020 に向けた研究施策など、強く方向性を出して来ている。日本では原子力災害以降、ロボット研究･開発のあり方が議論されるようになっている。				

（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
※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）ROS ロボットプラットフォーム http://www.ros.org/wiki/、http://www.willowgarage.com/
2）OpenRTM プラットフォーム http://www.openrtm.org/
3）知能化ロボットコンポーネント https://sites.Google.com/site/nedointelligentprj/
4）次世代ロボット共通プラットフォーム
http://www.jara.jp/platform/robot/index.html#%283%29
http://www.irc.atr.jp/ptStructEnv/research-j.html
5）ユビキタスネットワークロボットプラットフォーム
http://www.irc.atr.jp/std/UNR-Platform.html
6）ロボット・サービス・イニシアチブ http://www.robotservices.org/
7）iCub ロボットプラットフォーム http://www.icub.org/
8）RoboEarth　http://www.roboearth.org/
9）QoLT センター http://www.cmu.edu/qolt/
10）生活支援ロボット安全検証センター http://robotsafety.jp/wordpress/
11）ロボットスーツ HAL http://www.cyberdyne.jp/
12）物流ロボットシステム：eCommerce とロボットシステムの連携（KIVA システムズ）
http://www.kivasystems.com/amazon-press/
13）薬剤払出ロボットシステム：薬剤の搬入から投与までを管理、病院まるごとロボット化（パナソニック）
http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn090709-1/jn090709-1.html
14）病院テレプレゼンスロボット http://www.intouchhealth.com/
15）手術ロボット daVinci http://www.intuitivesurgical.com/company/
16）DLR ロボティクス http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3758/
17）ROBOTD http://roboticstaskforce.wordpress.com/about/
18）ECHORD http://www.echord.info/wikis/website/home
19）HORISON2020 http://www.robotics-platform.eu/cms/index.php?idcat=41&idart=536

3.4.3 ロボット技術の社会的受容

（1）研究開発領域名

ロボット技術の社会的受容

（2）研究開発領域の簡潔な説明

日本社会がロボット技術をいかに受け入れ、産業化するかを目標に、そのために必須の技術要素と受容推進方法とを検討する。顧客の積極的な参加によるロボットの利用がその例である。概念的にはCPSと共通する部分が多く、特に情報処理技術はCPSとして準備される部分が大きい。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

社会技術としてロボットは、サービスを提供する物理的存在である。すなわち、個々人の生活の中に入って活躍するロボット、いわゆる生活支援ロボットが中心であり、マニピュレータ付き個人用移動車をも含む。それ以外に、ロボットルームなど、いわゆるロボットのイメージを持たない形態の汎用物理的効果器が含まれよう。

ロボットによる物理的な働きかけは、人間に危害を加える可能性があり、安全性が問題となる。特に介護作業では、高齢者が高齢者の面倒を見る「老老介護の問題」が日本の中心的課題であり、たとえ介護能力において導入可能なロボットが開発されても、被介護者周辺で実質的にロボットを操作する者が高齢者であることを考えると、極めて簡明かつ安全な機器が要求されていることがわかる。すなわち、この領域における研究開発テーマは、簡明かつ安全なロボット開発とその社会的受容の制度作りである。

この研究開発領域ではロボット操作技術、すなわち、マンマシンインターフェイス技術が重要である。マンマシンインターフェイスとしては、パソコン、スマートフォンなどの機器が普及し、かつ、利用者層が拡大している。特に、スマートフォンは情報サービス提供端末として定着しているだけでなく、その一部はマンマシンインターフェイスとしての地位を今や確保しているので、積極的な活用が求められる。

生活支援ロボットの世界的な動向

生活分野でロボットは、移動支援立ち乗り型ロボット、介護者支援ロボット、高齢者のリハビリ支援ロボットなどが研究されているが、市場を確立したとは言えない。形態的にはヒューマノイドロボット「アシモ」や「HRP」が生活支援への適用の候補であるが、社会的受容の議論には至っていない。

米国では、実用志向の軍事ロボットが戦線に数多く投入される。これは社会的な受容とは異なるが、産業的に成立する域に達している。手術支援ロボット「ダビンチ」が開発され、世界的に広がりを見せている。これら2種のロボットは生活支援ではないが、同等の実用性をもち、かつ、ユーザを確保している。最先端のロボット技術を扱ってきた研究者が起業し、ロボット技術を簡単化して清掃用小型ロボット「ルンバ」を開発した。これは100万台を超える大きな市場を構成している。そこには専門家集団で特殊作業での技術を一般家庭に焦点を絞って技術移転をした例が見られる。

ロボットの機能構築には膨大なソフトウェア開発を必要とする。米国ではソフトウェアの技術をここ10年、様々なプレーヤーが登場することで継続的な開発を可能にしてきた。

Microsoft社はロボットシミュレーションソフト「Robotics Studio」を開発、Google社の創始者の一人はWillow Garageを立ち上げ、ロボット用オペレーションソフト「ROS（Robot Operating System）」を開発し、世界からロボット技術者を集めるなど、非常に精力的に動いている。日本においても、標準的なプログラムがロボット用オペレーションソフト「RTM（RT Middleware）」として取りまとめられ、世界標準を目指している。

技術的側面での進展は見られても、技術の社会的受容に関する研究開発は極めて遅れている。生活支援ロボットあるいは生活内に組み込まれた物理的効果器は、暴走や誤動作により事故を起こす可能性がある。これらの物理的効果器の多くはインターネットに接続されているであろうから、パソコン乗っ取りと同様の危険性が潜む。アシモフのロボット3原則の「第一条 ロボットは人間に危害を加えてはならない。また、その危険を看過することによって、人間に危害を及ぼしてはならない。」が実際的には実現不可能であることを考慮するなら、開発者・販売者・所有者・利用者・被利用者間で、ロボットによる危害に関する責任の考え方についての指針を早急に取りまとめるべきである。自動車の社会的受容の歴史は前例となる[1)-7)]。

（4）科学技術的・政策的課題

生活支援ロボットの開発は、単に技術的課題だけではなく、次に掲げるような事業化に至る問題を含む。

① サービスインテグレータの育成（顧客要求獲得方法）
② システムインテグレータの育成
③ 特区などを利用した実証による性能評価
④ ロボット利用マネージメント制度（ロボット利用者教育機関の推進ならびにロボット利用者免許制度の確立）
⑤ 国や自治体のポリシー

産業用ロボットが広く使われるようになったのは、ロボット製造会社がユーザ企業の要求を聞きながら、製造ラインとしてソリューションすることで事業化されてきた。この場合､かかわる企業はユーザ企業とソリューション企業の二社であった。谷江和雄は｢ロボット市場を立ち上げるために｣[8)]の中で、システムインテグレータの重要性を説いていた。この考え方は、製造業者とユーザの間を取り持つ製品を媒体としたソリューションビジネスにおいて成り立つモデルであると考える。これに対し、生活支援ロボットなどのサービスロボットを事業化するためには、産業用ロボットのビジネスモデルでは不十分である。ソリューション企業とユーザだけでは、ユーザの本当の需要を聞きだし、解決策を作り出すことが難しい。もともとユーザは、ロボットによるソリューション（サービス）が必要なのではなく、何らかの付加価値を有するサービスを求めているだけである。サービスロボットの場合、ソリューション企業とサービス事業体とは業種が大きく異なり、ユーザ、サービス事業体、ソリューション企業のもつそれぞれの要求を満たすことが必要となってきている。さらに難しいのは、ユーザは欲求（デマンド）はするものの、ソリューション企業がソリューションできる形での要求（ニーズ）を表現するに至っていない場合が多い。加えて、間を取りもつべきサービス事業体が、サービスの効率化は意識するものの、ユーザのデマンドを解析し、ソリューション企業が実現できるニーズまでコンサルすることは

求められていない。すなわち、産業用ロボットの普及ではユーザが技術の専門家であったのに対し、サービスロボットではユーザが非専門家であることが技術展開に困難をきたす。

このような業態で、今必要とされているのは、ユーザのデマンドから、ソリューション企業が実現できるニーズまで昇華させることができる、コンサルテーション企業であると考える。逆にいうと、今までのロボット開発のように、システム・インテグレーション（ソリューション）企業が、市場が求めていると思っているニーズに対応するロボットを開発し、そのロボットを実証しながら、使われるところを模索するという従来のプロセスでは、時間と経費が膨大となり、ほとんどの企業は事業化までたどり着かないというジレンマに陥っている。なお、モノはあくまでもサービスの媒体であり、サービスそのものの設計・実装ができる新しいサービスインテグレータの必要性が求められている。

以上、①と②について論じた。

一方、「③特区などを利用した実証による性能評価」については、ここでは扱わない。「④ロボット利用マネージメント制度」は、ロボット技術の社会的受容を進める上で重要であることは言を待たないが、ロボットの形態、マンマシンインターフェイスの技術などがまだ確定していない段階では教習内容も定まらず、まだ研究対象にもなっていない。

また、「⑤国や自治体のポリシー」については、例えば、オーストラリアでは、介護者が被介護者を人力で抱えてはいけないという“ノーリフトポリシー”があることで、リフターの普及率が高い。またデンマークでは、高齢社会のための待ったなしの対応を日本同様に迫られる中で、三原則（生涯現役指向、自己決定権の尊重、残存能力の活用）を打ち立て、そのための技術的な解決策としてロボットの導入の筋書きを描いている。基本には被介護者も高齢者も人としての人格を有するべきであるという理想から出ているものであり、ロボットを導入するためにこれらの理念ができたわけではない、ということである。

以上議論してきた問題点は、ある技術がマーケットを獲得する過程の問題と認識されるが、生活支援ロボットの場合、先に述べた利用者像あるいは物理的危害から、この問題が複雑化することは明らかである。日本がロボット産業を次世代の中核産業に育成するなら、経済的ならびに法律的な制度設計が早急に研究されることを望む。

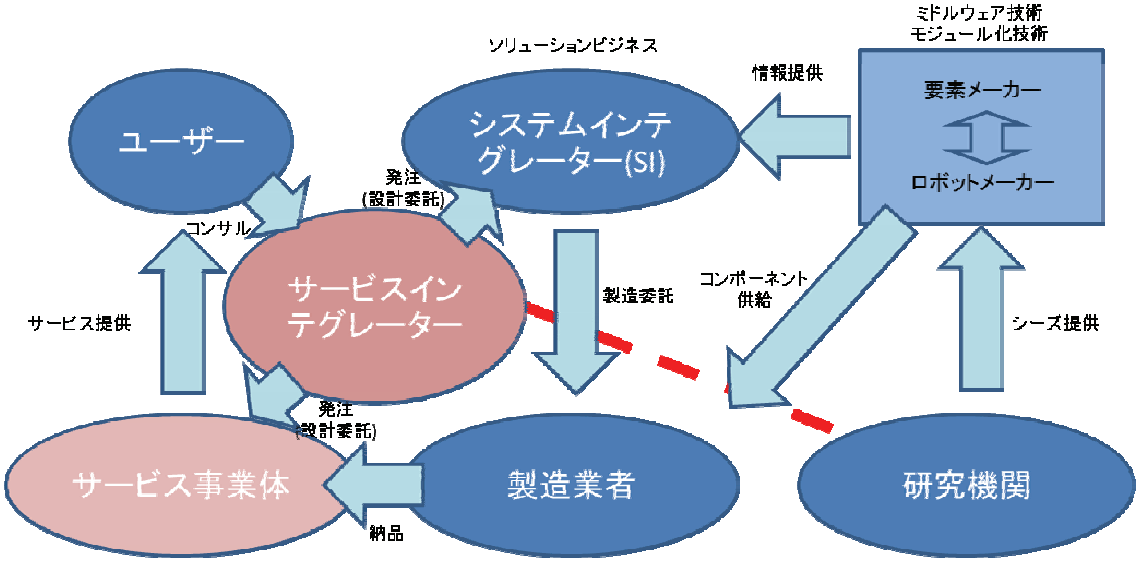


図１　サービスインテグレータの必要性

（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）

国内における生活支援ロボットへの展開の取り組みとしては、平成21年度から25年度の5年間“NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト”がある。本プロジェクトは基本的に安全性を検証・認証するための試験方法などの開発を行うコンソーシアムと、安全技術を実装したロボットを作る企業コンソーシアムとからなる。後者には、移動作業型（操縦が中心）、移動作業型（自律が中心）、人間装着（密着）型、搭乗型のそれぞれ「安全技術を導入した」生活支援ロボットを開発している。前者の一つである「生活支援ロボット安全検証センター」の取り組みを紹介する。

生活支援ロボットの安全性を評価する手法としては、世界的にその評価基準や試験方法などが決められているものはない。本プロジェクトで開発し、国際標準化ISO TC184/SC2へ提案をしながら、ロボット企業と安全技術を実装したロボットの開発とその試験方法などを同時並行に進めている。通常の規格・認証と、生活支援ロボットの規格・認証との相違点は、「新しいロボット（技術）ができるたびに、その安全性をどうやって試験・評価し、認証としてユーザとロボット企業の間の安全についての合意を形成するか」を、リスクアセスメントに基づき考えている。

日本は、生活支援ロボットの実用化に取り組む企業はあるものの、安全についての理念や合意形成については、欧州に10年程度、遅れているといわざるを得ない。日本において「完全でない安全」について、たとえそのベネフィットはあるものの、リスクがゼロではないものを、ユーザとロボット企業が合意形成して使うということについては、非常に保守的で、このままでは日本が優位に立つ生活支援ロボットの技術も、海外で実証され、逆輸入される可能性があることを危惧する。生活支援ロボットの産業の成否は、国民全体が安全に対して、リスクとベネフィットのバランスが重要であることの早期理解が必要不可欠である。ロボット企業に過度な企業リスクを覆いかぶせることのない社会「安全に対して成熟した社会」を目指すことが必要であり、そのための研究開発が求められている。

（6）キーワード

安全の概念が東日本大震災以降、変化している。信頼性や回復性の重要性も議論されている。例えば、“ディペンダビリティ Dependability”とは、AVAILABILITY（可用性、稼働率）、RELIABILITY（信頼性）、SAFETY（安全性）、CONFIDENTIALITY（機密性）、INTEGRITY（完全性）、MAINTAINABILITY（保全性）の 6 つの概念を含んだ言葉で、主にロボットでは、Availability, Reliability, Safety が重要で、情報システムで取り上げられている“セキュリティ Security”は機密性、完全性、可用性を対象とすることからも、ディペンダブルの部分集合といえる。

ロボットシステムのディペンダビリティでは安全性 Safety が最重要であることは既述の通りである。安全を考慮した設計は、「本質安全設計」と「機能安全設計」に分けられる。前者は、産業用ロボットがそうであったように、人とロボットの間は隔離され、どのような場合でも人の安全が本質的に保たれるように設計するものである。しかしながら、生活支援ロボットのように、隔離が困難な場合には機能的に安全を保つ「機能安全設計」があり、国際規格では IEC61508 などで規定されている。IEC61508 では、システムがもつリスクの重篤度などにより SIL レベル（System Integration Level）が規定され、重篤度が高いシステムにおいては、多重系を組むなどして、その方策を講じなければいけない。このように、想定リスクに対して行われるリスクアセスメントを基盤としている。

安全科学の中で先端技術としてのロボットは、一つの安全基準を作ればすべての安全性の評価ができるというものではなく、その環境や、人とのインタラクション、ロボットの機能などによって、安全のレベルをどこに置くかが異なるため、都度コンサル的な安全性評価手法が必要となる。このような新しいコンサルベースの安全性評価技術は、日本では数少ないが、ドイツなどでは民間の認証機関が広く進めており、安全性評価技術に対する理解も必要である。

（7）国際比較

「電子情報通信国際比較 20110606（ロボティクス）2.6.2 中綱目ごとの比較」から、(5) システム・インテグレーションの内容を再掲する [9]。

総じて、日本はシステム・インテグレーション技術に関しての、研究、技術開発、産業技術は高いと言える。しかしながら、Apple や Amazon などの事例を見てもわかるように、サービスを作るサービスインテグレーションは欧米に比べて遅れているといわざるを得ない。

また、新しい技術に対しての社会受容に関する研究は、主に社会科学の領域で行われているものであるが、ヨーロッパはドイツのプロジェクト“Development of Humanoid and Service Robots: An International Comparative Research Project - Europe and Japan”などにおいて、社会科学者がロボットを対象に様々な比較文化論を論じているが、日本の社会科学者は残念ながら人数も少ないためか、ロボットの社会受容などについて議論している例はない。

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	研究水準	○	↘	・OMG（Object Management Group）でヒューマン・ロボット・インタラクションのサービスフレームワーク標準化を日本と韓国で共同提案が進行中。Willow Garage や EU に比べ、継続的に研究推進するための人件費の確保がしにくい環境が、研究の高度化継続が阻まれる大きな要因となっている。研究者が個別に取り組んでいるため、資金も場も十分なものが得られない。インテグレーションを意識せず、個別の小さなテーマしかできていない。
	技術開発水準	○	→	・NEDO 知能化プロジェクトで、ソフトウェアのモジュール化、オープンソース化を推進し、再利用性で一定の成果をあげている。統合の観点からは、ロボットテクノロジミドルウェア（RT ミドルウェア）の概念はあるが、現在はソフトウェアコンポーネントのインターフェイス仕様を定めた段階。ロボットが提供できる共通サービスの定義が必要だが、十分な検討がなされていない。OMG にて DDC4RTC などコンポーネントを統合する規約を策定開始。個々の会社が個別の技術開発は行っているが、標準をリードしそれを国の共通技術基盤に仕上げていくアクティビティは不十分。スピードが不十分。
	産業技術力	○	→	・パナソニックが大阪大学に寄付講座を作った。医療現場にロボットを入れていくために、ロボットを扱う技師も一緒に育てる考え。NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトで、適用現場の具体的課題を解決する取り組みを実施し、2010 年度で完了予定。水平展開が期待される。
米国	研究水準	◎	→	・世界中から優秀な研究者が集まる。国の重点施策化とともに、民間ファンドからも支援資金は多く出ている。Willow Garage は会社であると同時に研究機関である。PR2（ロボットソフトウェアプラットフォーム）を配布する過程で様々な需要が喚起され、研究がさらに進む環境ができている[10]。研究者たちは「収益のことは考えなくてよい」と言われている。Google の創業者がスポンサー。研究の場と機会を与えて、世界中のロボットに関する知恵を集めようとしている。世界中から学生をインターンシップで集めている。
	技術開発水準	◎	↗	・6 月に the Office of Management and Budget and the Office of Science and Technology Policy がロボットを 2012 年予算の優先 R&D 項目に指定[11]。軍の FCS（Future Combat System）に基づく、Grand Challenge や Urban Challenge などで、実環境へ適用技術、SAE（アメリカ自動車技術会）と合同で JAUS（Joint Architecture for Unmanned Systems）の自律ロボットの構成規格の策定に基づき、SDK（OpenJAUS）の公開など、インターオペラビリティに関するフレームワークが着々と整備されている[12]。コンピュータビジョンライブラリ OpenCV やロボットシミュレータ Player も ROS に取り込まれており、活用が容易になっている。ユーザにとって、やりたいことができる環境が整いつつある。
	産業技術力	○	→	・Willow Garage の ROS が著名[10]。オープンソースライブラリの整備と ROS の配布パッケージ C Turtol の公開（2010 年 8 月）、conformance test を実施し、ソフトウェアを登録、動作保証するシステムをもっている。メンテナンスをするための仕組みを将来にわたって誰が保証できるかは不明である。

欧州	研究水準	○	→	・FP7（7th Platform Programme）を2007-2013で実施中[13]であり、巨額の投資が行われている。
	技術開発水準	○	→	・ロボット分野では、過去10年120以上のEUプロジェクトを実施、参加組織900以上、総予算4億ユーロ。2010年から産学ユーザ一体となり、過去の研究成果を産業に結びつけ3カ年プロジェクトeuRobotics（European Robotics Technology Platform）を開始[14]。
	産業技術力	○	↗	・BRICS（Best Research in Robotics）プロジェクト（2009-2013）で産業における開発プロセスを強化。ECHORD（European Clearing House for Open Robotics Development）では、大学・研究機関から、企業への技術移転促進を行っている[15]。
中国	研究水準	△	↗	・国外の中国人研究者とのネットワークを生かして、急速にキャッチアップしてきている。中国国内に、優秀な人材の豊富なことは強みである。
	技術開発水準	○	↗	・昆山市工業技術院（KSITRI）では、教育用の安価なロボットモジュール、モップがけや窓ふきのロボット、架線作業用ロボット、手術用ロボットなどの開発が積極的に行われている。 ・新しいアイデアではないが、考えたものを形にできる技術力は高い。
	産業技術力	○	↗	・新松では、産業用ロボット、パーソナルロボットの開発の進展がめざましい[14]。
韓国	研究水準	○	→	・コンセプトを形にして示すスピードが速い。実際に技術を適用して具体的な課題を解決するというアプローチは強み。
	技術開発水準	○	→	・OMG（Object Management Group）でヒューマン・ロボット・インタラクションのサービスフレームワーク標準化を日本と韓国で共同提案が進行中。韓国では、様々な分野の現場で実証実験が始まっている。
	産業技術力	○	↗	・韓国では、幼稚園や保育園でロボットを使う試みが始まっている。標準化には、国策としてデファクト、デジュール、アカデミアをすべてスコープに入れ、積極的に活動をしている。産業化を目指し、多くのベンチャーが活動中。
全体コメント： インテグレーションの基礎研究は、フレームワークの設計である（システムをインテグレーションするためのインターフェイス仕様の設計）。 フレームワークにしたがって作られたソフトウェアのインターフェイスは開示される。オープンソース化により、知識が共有され、コミュニティの財産として活用が期待できる。ソフトウェア工学の手法をロボットインテグレーションにもち込まないと、個別のロボット開発になり、再利用性、設計資産の継承性が損なわれる。ソフトウェア工学手法を適用すると、ユーザ要求分析から入り、ロボットの機能をデザインする。そのときに、ロボットのモジュールやミドルウェアの利用が必要になる。フレームに基づいて、ロボットの機能デザインを行い、調達可能なロボット技術を調達し、効果的なインテグレーションを行うことが可能となる。ソフトウェアのプラットフォーム化は要。ROSとRTミドルウェアは共存しうる。台湾もロボティクスセンターをNational Taiwan Univ.に設立するという噂。				

（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）日本ロボット工業会：“21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書”、2001.
2）日本ロボット工業会：“21 世紀におけるロボット産業高度化のための課題と役割に関する調査研究－ロボット産業の長期ビジョン－”、2000.
3）日本ロボット工業会：“マニピュレータ、ロボットに関する企業実態調査報告書”、2007.
4）経済産業省：“「次世代ロボットビジョン懇談会」報告書”、2004.
5）経済産業省：“新産業創造戦略”、2004.
6）経済産業省：“ロボット政策研究会報告書”、2005.
7）総合科学技術会議：“ロボット総合市場調査報告書”、2007.
8）谷江和雄、“ロボット市場を立ち上げるために”、東芝レビュー、Vol.59、No.9、pp.9-14、2004.
9）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、“科学技術・研究開発の国際比較 2011 年版”、pp.157-158、2011
10）http://www.willowgarage.com/
11）http://www.whitehouse.gov/blog/2010/09/15/rtd2-research-robotics
12）http://www.openjaus.com/
13）http://cordis.europa.eu/fp7/ict/programme/home_en.html
14）http://www.robotics-platform.eu/cms/index.php?idcat=5
15）http://www.echord.info/wikis/home-wiki/home

3.5 知能 / インタラクション

1. 概観

日本の電子情報通信分野の産業は、1970 年～ 1980 年代に大きく成長し、それに伴って学術研究レベルも向上した。これは日本経済の成長とも軌を一にしたものだった。しかし、1990 年代初めのバブル崩壊以来、日本経済の成長は停滞し、電子情報通信の産業分野もグローバル化の遅れ、韓国、中国、台湾の台頭などの要因から、停滞が続いている。産業界での基礎研究の減少が見られるが、学術研究に関しては米国に次ぎ、欧州とは肩を並べるレベルは保っているものの、特に情報技術分野での米国の強さは揺るがず、産業競争力強化につながる技術的成果を生み出しているかというと、十分でないといわざるを得ない。

社会のサービスや製品におけるソフトウェアの比重は増大し続けているが、ソフトウェアの革新は米国が起点となっており、我が国はイノベーションという面で影が薄い。米国は製造業は他国に譲っても、情報技術（IT）は重点分野と認識し（金融も）、海外からも有能な人材を集めて活力を発揮し、イノベーションをリードしてきている。この 20 年、あるいは 10 年でも情報技術は大きく変化したが、大半が米国発の革新であり、今日も続いている。米国は情報分野で層が厚く新企業が育つ環境があることも強みとなり、大学発のベンチャー企業も多数生まれて育ち、学術研究と新情報産業が相互に関わり情報技術イノベーションの好循環構造を生んでいる。欧州は伝統的に情報の基礎研究に強みを有しており、今日でも継続しており、オリジナルなソフトウェアを一部で生み出しているものの、情報の実用技術革新の面では日本と同様、全体的に米国に大きく遅れをとる状態となっている。

グローバル競争の時代であり、グローバルな革新を起こすような技術を生み出さなければ、競争力は得られない。また、昨今の情報分野の技術革新を見ると、単に学術研究としてだけでなく、新産業の成長とも相互作用しスパイラル的に新技術として大きく成長、普及することが多い。韓国、中国およびそれに続く国々の躍進を考慮すると、我が国はソフトウェアの比重の高い先進的サービスや製品でグローバルな競争力を得る必要があるが、米国の壁は厚く全般的に凌ぐことは非現実的であることから、米国で関心が薄いが必要性がある領域に焦点を当てて、グローバル優位性を獲得する戦略をもって研究推進を行う必要があろう。必ずしも成果が実っているとはいえないが、欧州はそのような戦略的指向性をもって研究を推進しているのに対し、我が国はグローバルな視点での戦略性が希薄だったようである。

研究のグローバルなピークを生み出すには、広範な裾野となる技術領域の充実も不可欠であり、また、我が国の先導性がなくても重要トレンドとして、一定の競争力確保のためフォローしなければならない領域も存在する。したがって、国の研究投資を以下の 3 カテゴリにカテゴライズし、目標を明確にして適正な配分を定め、戦略的に進めることが肝要となろう。

➢独自性のある技術で、グローバル優位性を獲得する戦略的領域
➢欠かせない重要トレンドを逃さず、次世代で必要な技術で競争力を得る領域
➢広範な裾野となる領域で、強化、発展させるべき領域

我が国は研究・技術のポテンシャルは失った訳ではなく、情報技術分野でも米国とは差

があるものの、これに次ぎ、欧州と肩を並べる位置にいる。メリハリのある戦略性をもって、このポテンシャルを発揮させる仕組みにより、グローバル優位性を有する領域、技術を生み出すことが必要とされている。

本章はこのような戦略を立案するための素材として、情報技術の中の、「メディア」、「知能」、「ヒューマン・インターフェイス / インタラクション」、そして、共通的基礎としての「認知」を切り口として、「知能 / インタラクション」と名称でくくり、専門研究者の視点で世界における現状と展望、世界の中での日本の位置を俯瞰している。

2. 俯瞰区分内の各領域

ここでは、「メディア」、「知能」、「ヒューマン・インターフェイス / インタラクション」、「認知」を注目すべき切り口として、「知能 / インタラクション」をくくりの名称としている。

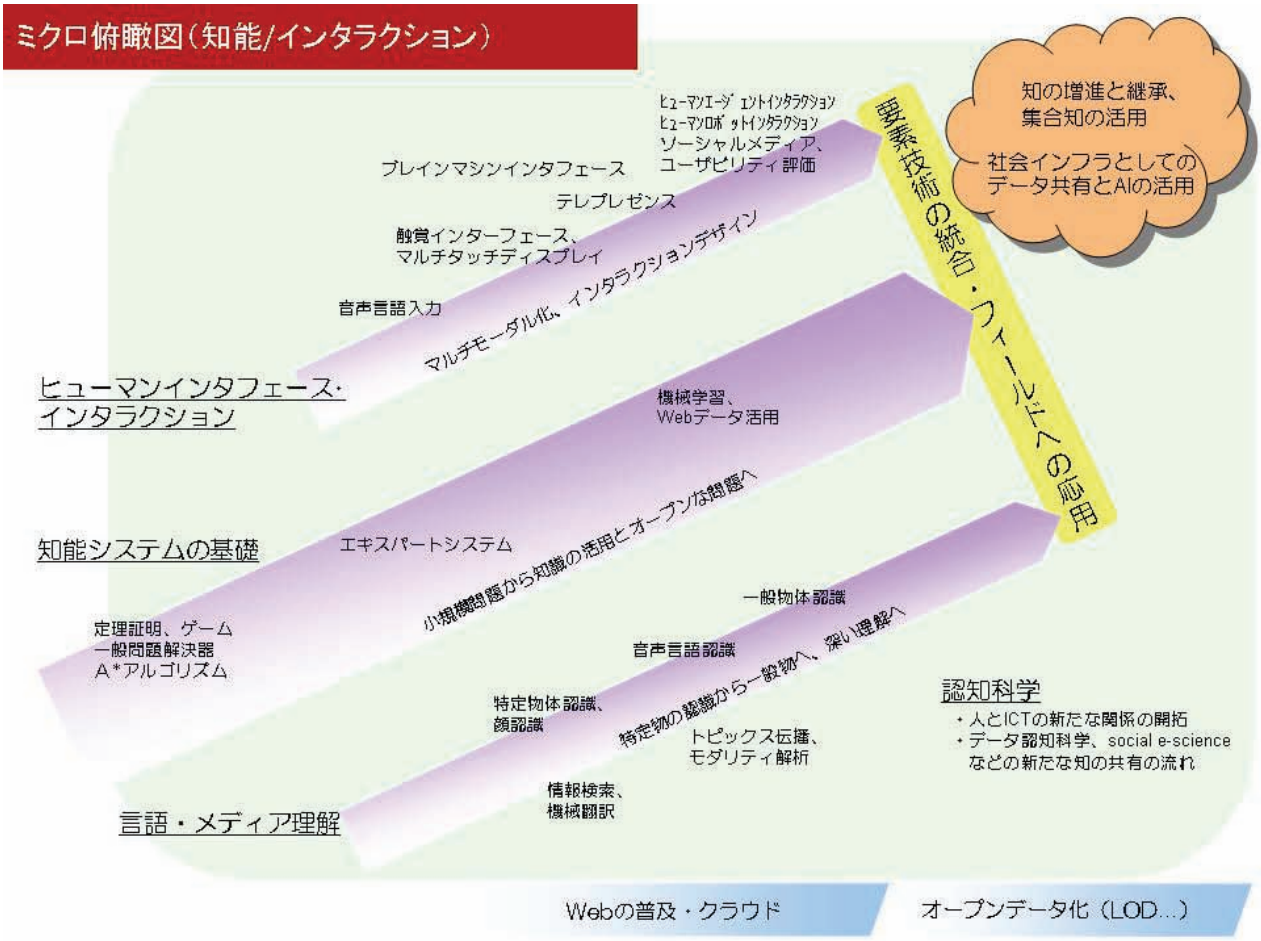


図１「知能 / インタラクション」のミクロ俯瞰図

「メディア」は大別すると、技術的には「画像映像」領域と「音声言語」関係になるが、この両者を含むマルチメディア、さらに情報環境や仮想現実（VR）、知能の技術と融合したシステムへと広がっている。Web やスマートフォンの新サービスが育ってきており、これに伴って新技術が生まれてきている。また、ビッグデータが利用できる環境が整いつつあり、これによる新技術が生まれつつある。日本はメディア技術で高レベルにあるが、

新サービス、特にグローバルに展開する新サービスの創出の点では弱く、米国に水をあけられている。自然言語処理領域も、機械翻訳やビッグデータからのマイニングなどを始めとして、世界で研究は継続的に活発である。日本のレベルは以前より高く、日本語という特有の対象については特に優位であった訳であるが、最近では外資企業もグローバル展開の中で、日本語についても人材、技術および情報サービス面で伸びてきている。

「知能」に関しては、分かり易い面で、1997 年にコンピュータ・チェスプログラム（IBM の DeepBlue）が当時の世界チャンピオンに勝利し、また日本では 2011 年に将棋プログラムが女流プロに勝利するなどの進歩が見られている。これは主に探索性能の向上に因るものだが、2011 年には米国クイズ番組 Jeopardy! で IBM の Watson が人間のチャンピオンに勝利して、Web などから獲得した大量の知識利用の面でも人間の能力を凌ぐようなシステムが現れてきている。Web 上の情報 / 知識の構造化による利用も進展しており、欧州は熱心に Linked Open Data（LOD）を推進しており、米国では例えば Google 社の Knowledge Graph などが進んでいる。機械学習においては、最近、これまでは不可能だった有効な特徴の自動獲得を可能にする Deep Learning の手法が生まれ、ブレークスルーをもたらしつつある。知能領域は可能性が広い領域であり、独自の視点を定め、戦略的にグローバルな優位性を獲得できる日本発のアイデア・技術を育てる必要がある。

「ヒューマン・インターフェイス / インタラクション」は、スマートフォン、タブレット PC、仮想現実などのように情報環境は変化しつつあり、この変化に伴い新しい多彩な形態が登場してきている。関連技術の開発も活発であり、この傾向は続くと考えられる。多様なアイデア、技術の可能性があるのだが、本報告では以下の項目に注目して記している。

- テレプレゼンス
- 一人称視点による環境認識（First Person Vision）
- 触覚インターフェイス
- ヒューマンエージェントインタラクション（HAI）
- ブレインマシンインターフェイス（BMI）

同時に、ユーザビリティ評価法の確立の重要性を指摘している。また、インターフェイス / インタラクション設計の基礎として、関連分野（認知心理学、社会学、人類学、経済学など）とも連携した統合的研究体制によるデザイン学の確立の重要性を指摘している。

「認知科学」は以上に関係する人間などの認知主体の行動原理の解明を目指す基礎領域となるが、ここではその活用を含む最近の「データ認知科学、またはソーシャル e サイエンス」の視点から、世界の現状と動向を俯瞰している。

3.5.1　ヒューマンインターフェイス・インタラクション

（1）研究開発領域名

ヒューマンインターフェイス・インタラクション

（2）研究開発領域の簡潔な説明

コンピュータとユーザのインターフェイス、あるいは、それを介した人や社会のインタラクションに関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本領域は、コンピュータと人間の関わりを研究する領域である。使いやすいコンピュータを実現するための技術開発を目指す工学的側面、コンピュータシステムに関わる人間の心理・行動を明らかにする科学的側面、ユーザの体験を総合的に構築するデザイン的側面を有する学際的な領域である。コンピュータの利用が深く日常生活に浸透している現代社会において、国内外において重要性が増してきている研究領域である。以下、特徴的な研究開発項目と動向を述べる。

- テレプレゼンスは、地理的に離れたインタラクションのための透過的なメディアを作り出す技術で、主に米国において製品化が始まっている[1)]。
- 一人称視点による環境認識（First Person Vision もしくは Egocentric Vision）は、映像や音声を安価に長時間記録できるデバイスの出現で研究が加速している。Google Project Glass が発表され、技術が一般に知られるようになった[2)]。
- 触覚インターフェイスは、iPhone に代表されるマルチタッチインターフェイスの普及で重要性が認識され、国際企業間の開発競争が激化している[3)]。
- ヒューマンエージェントインタラクション（HAI）とヒューマンロボットインタラクション（HRI）は、人、擬人化エージェント、ロボットの円滑なインタラクションを研究する領域で[4)]、社会的インタラクション、力覚インタラクションなど、多様な研究が行われている。ショッピングセンター、博物館、医療、教育、災害支援などをフィールドとする研究が増えている。
- ブレインマシンインターフェイス（BMI）は、脳とコンピュータを人工的に接続する技術である。医療分野で実用化され応用範囲を広げる一方で、倫理的な問題が指摘されている[5)]。
- ユーザビリティ評価については、社会的コンテキストの理解が必要との認識が高まり、観察や分析、参加型による質的・定性的なアプローチへと移行している。

これまでは、新技術を応用したシステムを開発し、技術革新が生活に及ぼす影響を調べる研究が多かった。しかし近年では、技術革新を必要とする現場（フィールド）に研究者が入り込み、調査を行うことによって、現場の社会的期待を抽出し、技術を特定して提供する研究が増えている。すなわち、(1) 画一的ではなく多様なニーズ（文化、コミュニティ、先進国と発展途上国など）にカスタマイズした技術開発、(2) 情報技術が浸透していないユーザ（高齢者、障がい者、ホームレスなど）を対象とした技術開発が重要となりつつある。

（4）科学技術的・政策的課題

インタラクション研究は、コンピュータ利用に関わる根幹的な技術開発である。企業の生産活動から家庭生活に至るまで、社会は深く情報技術に依存しているため、その利用可能性を向上させることは、経済的にも国民福祉の観点からも重要と考えられる。

創造的な社会のためのインタラクション研究の推進

科学技術分野において、情報技術の利用は日常となった。CTスキャンデータの可視化による臨床研究、反応シミュレーションを使った創薬研究、メタンハイドレード鉱床のシミュレーションを用いた次世代エネルギー研究など枚挙にいとまがない。人文社会科学においても、デジタルヒューマニティーズと呼ばれる研究が勃興し、情報技術が新たな知見の導出を支えている。研究に限らず、多くの知的生産活動の従事者が、コンピュータを使って実験を行い、結果を分析し、創造的活動を行っている。したがって、コンピュータの利用可能性を決定するインタラクション研究が、日本のあらゆる分野のクリエイティビティの鍵を握ると認識する必要がある。

情報をどのように見せたり変えたり比較できるようにするかが、創造的活動のパフォーマンスを決める。米国NSFでは、創造性につながる情報技術のデザインと利用、評価の枠組みを研究するCreative ITという動きがあった[6)]。我が国においても、視覚、聴覚、触覚といった利用者の知覚を通して「知る」ことを可能とする、創造的活動のためのインタラクション研究を推進すべきである。

生命・生存のためのインタラクション研究の推進

東日本大震災では、停電や故障などハードの問題に加えて、使う側の問題の深刻さが明らかになった。震える手でキーボードが打てない、著しいトンネルビジョン（思い込んだことしか見えなくなる）に陥ったなどの事例が報告されている。また、ソーシャルメディアユーザの非常時の振る舞いもわかりつつある。ハード機能の保全だけではなく、パニックになっても使えるインターフェイスや、非常時に発動するソーシャルメディアのモードの研究などを進めるべきである。

一方、少子高齢化を迎える我が国では、不治の病や遺伝子診断など、知りたくない情報をどのように伝えるかなど、人に寄り添うインタラクション研究が必要となる。障がい者や高齢者のためのインターフェイスを開発するには、視覚、聴覚、触覚などの五感、認知、運動などを含め、人間を知る基礎研究を加速する必要がある。高福祉社会を生み出す研究は病歴や診療情報の管理などを含み、非常時のための研究ともつながる。生命・生存のためのインタラクション研究を、未曾有の災害に直面した我が国が支え、諸外国を先導すべきである。

デザイン学を軸とする統合的研究体制の確立

インタラクション研究は日常生活に密接に関わるため、研究者が様々な研究領域・研究プロジェクトに分散してしまう傾向にある。そのため海外では、マサチューセッツ工科大学やスタンフォード大学などの有力大学で、本領域に取り組むための研究組織が設立されている。一方、国内では、個々の研究者による取り組みに留まり、本領域にフォーカスした研究組織は存在しない。その結果、研究室内に閉じた研究が多く、提案システムを研究

室内で実験評価するものが中心で、現場の実態調査を行い、問題を抽出し、他分野と連携して解決を図る研究は稀である。また、提案されるシステムの多くは、家庭的なもの（料理、食事、恋愛など）や身近な会議を扱ったものが多く、このままでは世の中を革新する骨太の研究が行われにくい状況にある。

この事態を打破するには、インタラクション研究者を結集し、関連分野（認知心理学、社会学、人類学、経済学など）の専門家とも連携できる統合的研究体制を構築することが重要である[7)]。統合の軸としては、技術と利用の接点に位置するデザイン学が有望で、こうした研究組織を各大学、研究所に創設していくべきである。インタラクション研究の成果の普及は、社会の文脈に影響を受けやすい。研究成果を産業に結びつけるのは、先進的な事業者との産学連携が必要である。

（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）

ソーシャルメディアやスマートフォンから得られるデータをもとに、様々な応用を開発したり、利用者行動を分析する研究が増えている。例えば、角度・速度センサやタッチパネルを利用した効率的な情報入力手法、常に身に着けて持ち歩けるという特性に着目した提案が増えている。また、インタラクション研究には人間の行動や環境の計測が重要であるが、Microsoft 社の Kinect に代表される 3 次元形状計測の低価格化が研究を加速している。こうした研究環境の変化を背景とする技術動向を以下に列挙する。

- テレプレゼンスでは、ベル研究所がビデオ会議とロボットを組み合わせる Nethead プロジェクトを開始し、2 年以内で製品化を目指している。米国国防高等研究計画局（DARPA）では、兵士の分身となる半自律型二足歩行テレプレゼンスロボットを開発する Avatar プロジェクトを 2013 年から開始する（初年度予算は 7 百万ドル）。
- 一人称視点による環境認識で注目すべきは、Google の提唱する Project Glass（小型のディスプレイ、マイクとカメラを備えたウェアラブル端末）である。音声対話による操作、GPS による場所に応じた支援、物体認識技術が盛り込まれ、来年の早い時期に開発者向けに販売される。動きの激しい映像を認識するためには、認識対象知識や映像を大量に蓄積し解析する必要がある。Google では、16,000 個のプロセッサと YouTube から得られた 1,000 万枚の画像を用いて、多層ニューラルネットワークによるカテゴリ認識を実現している。
- 触覚インターフェイスでは、フィンランド Senseg 社が開発した「静電気による触覚ディスプレイ」が注目を集めている。タッチパネル表面に帯電させ、皮膚に吸着させることで摩擦力を呈示する。同様の原理は米国 DisneyResearch によっても開発され、次期マルチタッチデバイスの有力候補と見なされている[8)]。また、情動に訴えかけるリアリティの高いコンテンツ生成に向けて、オランダ Philips が 2010 年に「映画鑑賞時の全身触覚呈示による情動増幅」を提案した[9)]。今後は、超小型で皮膚を十分な力で駆動できるアクチュエータと、アクチュエーションと視覚提示と融合する技術が必要で、米国 NineSigma 社が開発の呼びかけを行っている[10)]。
- HAI については、サブカルチャー分野でのソフトパワー、ロボティクスを含めた統合技術など、潜在的なアドバンテージが日本に存在するが、研究活動は様々な領域に分散しており相互交流がない。研究領域横断的な連携や産業界との結び付きによって、商用化を含めたスピード感のある研究開発サイクルが望まれる。HRI は、日本が先

行していたが、韓国でパーソナルロボット開発プログラムや、その他サービスロボットに関するプロジェクトが始まり、リードタイムは縮小してきている。

- BMI では、脳活動から情報を抽出し脳にフィードバックする研究が始まっている。脳の一部の活動を制御する新しい治療法の開発（慢性疼痛、鬱病など）や、非侵襲的技術による新しいリハビリテーションに発展すると考えられる [11]。
- ユーザビリティ評価は、欧州を中心に、家庭での情報システム利用経験に基づく評価軸など、現場の状況に依存するユーザビリティ評価軸が研究されている。

（6）キーワード

ソーシャルメディア、マルチタッチディスプレイ、テレプレゼンス、触覚インターフェイス、ヒューマンエージェントインタラクション（HAI）、ヒューマンロボットインタラクション（HRI）、ブレインマシンインターフェイス（BMI）、ユーザビリティ評価

（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	○	↗	・新しいハードウェアを提案し、それらを使って新しいアプリケーションを提案する研究が多い。新しい理論的なモデルを提案したり、斬新なインタラクション手法をデザインする研究は弱い。 ・基礎研究は、触覚の生理学、錯覚現象から脳機能計測まで重要な研究が多い。 ・触覚の研究は盛んで、研究者数は米国と比肩する。新しい原理に基づいた触覚呈示手法（例えば空中超音波を用いた触覚ディスプレイ）が提案されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・Computer Supported Cooperative Work（CSCW）では、ビデオ技術やロボットを利用した遠隔コミュニケーション、異言語コミュニケーションの研究が活発である。 ・一人称視点からの環境認識をゴーグルに応用する試みがある。 ・共食、会議録のデータマイニング、相互行為分析の自動化、医療･福祉（自閉症、高齢者）などが研究されている。 ・HRIでは、ヒューマノイド研究やソーシャルロボティクスに関する研究が活発。 ・対話型エージェントは、Galatea Toolkit Projectなどがある[12]。
	産業化	○	→	・CSCWでは、サイボウズなどのグループウェアが商業的に成功している。 ・家電製品やエンタテインメントでの触覚ディスプレイへの関心は高いものの、携帯電話のようなニーズにフォーカスした触覚呈示研究は不得手である。 ・NTTドコモ、富士通、東芝、SONY、NEC、セガトイズ、バンダイなどが、エージェント技術を家庭用機器、福祉、おもちゃ、ゲーム分野に応用している。 ・スマートフォン上の対話エージェント「iコンシェルジュ」などの成功がある。 ・HRIではATR、大阪大学の研究が産業化されつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	・新しい研究分野を切り開く研究は米国発であることが多い。 ・Cross-cultural、inter-culturalコミュニケーションなどの研究も活発である。 ・マサチューセッツ工科大学Media Lab、スタンフォード大学iSchool、カーネギーメロン大学Human Computer Interaction Institute、ジョージア工科大学Graphics Visualization and Usability Center、カリフォルニア大学バークレー校The Berkeley Institute of Designなど、本領域に特化した研究組織が数多く設立されている。 ・HRIでは、倫理に関する研究が始まっている。 ・マサチューセッツ工科大学のTouchLabは触覚研究の最高峰である。他にカーネギーメロン大学、ペンシルバニア大学、ハーバード大学など、ロボティクスで著名な大学には触覚研究者が在籍している。
	応用研究・開発	◎	↗	・エージェントの感情応用に関しては、マサチューセッツ工科大学Media LabのRosalind Picardらが提案するAffective Computingなどがあげられる。 ・高齢者の機能改善や自閉症児の治療など、医療分野で取り組みが行われている。 ・触覚研究は、特に遠隔手術関係の予算が多い。 ・一人称視点による環境認識・情報支援技術はGoogleが精力的に行っている。これは基礎的技術、応用研究、開発、産業化まで広範に渡る[13]。

米国	産業化	◎	↗	・企業における研究開発が盛んである。特にMicrosoft、Google、Intel、Disney、Adobeといった企業から数多くの研究発表が行われている。 ・HRIでは、iRobot、Willow Garageなどがインタラクションロボットを販売している。 ・触覚の産業化についても取り組んでおり、遠隔医療ロボットのダビンチ、力覚ディスプレイのPHANToM、振動ディスプレイのImmersionなどがある。 ・CSCWでは、Google、Microsoft Messenger、SNS、Twitter、Wikiなど、多種多様なグループウェアが存在する。バーチャル共有空間の商用サービスも存在する。 ・Appleの対話型エージェントSiriなど、IT企業がエージェント技術を手がけている。 ・テレプレゼンスロボットのベンチャー企業が存在する。
欧州	基礎研究	◎	↗	・分析的な研究、社会学的観点からの研究が多い。感性主導のデザインやユーザビリティの評価軸の構築、理論の構築が進められている。 ・カメラ映像からの認識技術はINRIA[14]、Xerox Europe、オックスフォード大学[15]などが高い技術を有している。 ・HRIでは、Hertfordshire大学のDautenhahnらによるロボット研究が有名。国際会議IVAを中心に、バーチャルエージェントに関する研究発表が多い[16]。 ・福祉に力を入れている北欧諸国では、基盤技術のユーザビリティ向上、要素技術の産業化に向けて数々の産官学の協同研究が進められている。九州発のTMUSK社のヒューマノイドロボットが、デンマークと協力してユーザビリティ向上のための実証実験を進めている。 ・参与観察などを中心とした分析アプローチにより、家庭や病院など、特定の状況におけるICTのユーザビリティ向上に努める研究が見られる。
	応用研究・開発	○	↗	・基礎研究と比較して、応用研究は目立たない。大型プロジェクトも遠隔医療などを中心に散発的に存在するが目立った成果はない。 ・ゲーム、芸術分野、社会福祉分野において、CSCW研究の応用が見られる。 ・社会のインフラとして用いられる情報システム（例えば、市民情報ポータル、医療システム、投票システム、教育システム）を対象として、ユーザビリティ向上への取り組みが広く行われている。 ・参加型デザインや、その他、様々なデザイン手法が導入されている。
	産業化	○	↗	・応用研究が産業と直結している。国立研究機関と業界が直結している。 ・Skypeは、もともとルクセンブルグの企業である。 ・オランダPhilipsが音響の拡張としての研究を開始している。フィンランドNokiaがタッチパネル用の触覚インターフェイスを開発している。 ・ITシステムのユーザビリティ向上に特化したデザイン企業が増えている。従来は、工業デザインの分野を中心に活動していたが、近年は、社会状況におけるインタラクションのデザインを広範囲に受注している。 ・病院におけるIT化が促進されている。院内に張り巡らされるICTネットワークを、ユーザのニーズに合わせて提供する研究が進められている。
中国	基礎研究	◎	↗	・Microsoftの研究所が北京にあり、活発な研究活動を行っている[17]。トップコンファレンス（CHI、SIGGRAPH）で10～20%をも占め、その中からBest Paperが採択されるなど質も高い。インタラクション分野のリーダーは元米国Purdue大学のProf. Hong Tanで触覚インターフェイスの権威。 ・かつては三菱のMERL（Mitsubishi Electric Research Laboratories）があり、重要な研究が多数出たが、2007年の縮小に伴い存在感を失っている[18]。
	応用研究・開発	△	↗	・福祉ロボットの研究が行われている。
	産業化	△	↗	・ロボットに関連した分野で産業化が行われている。

韓国	基礎研究	△	→	・国内での研究は様々に行われているが、国際的に活躍している研究者は限られている。基礎研究の面で目立ったものはない。 ・サムスンなどの企業がスポンサーとなっている。
	応用研究・開発	◎	↗	・サムスンのバックアップのもと、触覚機能付きタッチパネルの研究が精力的に進められている。韓国は研究者の層は日本と比べて薄いが、米国留学組の活躍が顕著で、触覚系の学会（Haptics Symposium）における投稿数が日本と同等となり、また学会運営におけるプレゼンスは日本よりも高くなっている。 ・KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）を中心に、英語教育用のロボットの研究開発が行われている。
	産業化	○	↗	サムスンがスマートフォン向け触覚研究を積極的に進めている。

（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）IEEE Spectrum（テレプレゼンス）
http://spectrum.ieee.org/static/telepresence/
2）Project Glass（プロジェクトグラス）
https://plus.Google.com/111626127367496192147/posts
3）NineSigma. Tangible User Interface that Conveys Realistic Sensation.
https://www.myninesigma.com/sites/public/_layouts/RFPs/NineSigma_RFP_67731.pdf
4）HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）
http://dl.acm.org/event.cfm?id=RE285&CFID=96164520&CFTOKEN=34695206
5）川人光男：ブレイン・ネットワークインターフェイス . 電子情報通信学会誌 , 91,2,123-130, 2008.
http://www.ieice.org/jpn/books/kaishikiji/2008/200812.pdf
6）National Science Foundation. Creative IT. http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=501096
7）デザインとデザイン型人材：「学」の考えるデザイン
http://www.ai.soc.i.kyoto-u.ac.jp/design2/lecture13pm_ac.html
8）Olivier Bau et al. TeslaTouch: Electrovibration for Touch Surfaces. UIST2010.
9）Lemmens, P. Crompvoets, F. Brokken, D. van den Eerenbeemd, J. deVries, G.-J. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. Haptics Symposium 2009.
10）NineSigma. Request for Proposal.
https://www.myninesigma.com/sites/public/_layouts/RFPs/NineSigma_RFP_67914.pdf
11）里宇明元 . BMI が拓くリハビリテーションの新たな可能性 , Vol. 15,No.1, 2010.
12）Galatea Project
http://hil.t.u-tokyo.ac.jp/~galatea/index-jp.html
13）Google の大量画像を用いた認識技術
http://www.dailytech.com/Googles+Unsupervised+SelfLearning+Neural+Network+Searches+For+Cat+Pics/article25025.htm
14）INRIA
http://www.irisa.fr/texmex/people/jegou/

15）オックスフォード大学
http://www.vlfeat.org/~vedaldi/
16）European Robotics Technology Platform
http://www.robotics-platform.eu/cms/index.php
17）Microsoft Research Asia
http://research.microsoft.com/en-us/labs/asia/default.aspx
18）Mitsubishi Breaks Up Famous Computer Science Lab
http://science.slashdot.org/story/07/07/31/2336232/mitsubishi-breaks-up-famous-computer-science-lab

3.5.2　データ認知科学またはソーシャルｅサイエンス

（1）研究開発領域名

データ認知科学またはソーシャルｅサイエンス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

多くの個人の行動履歴のデータやバイタルデータを社会的に広く流通させ二次利用などを容易にする体制を構築することにより、人間や社会の挙動に関する研究・開発とその成果の社会還元を長期的に促進する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

認知科学とは、人間などの認知主体の行動を解明しようとする研究分野である。その行動は、個体と集団（家族、コミュニティ、組織、社会など）の両面にわたる。解明の対象は行動の意味であり、そこで用いるツールは行動の意味に関する計算モデルである。そのモデルは、物理レベルの因果関係などではなく、生存や繁殖の文脈における「意味」の計算（形式的な、つまり文脈に依存しない記号操作）によって捉えたものである。

その計算は、古典的な認知科学においては認知主体の内部で生じていると想定されていたが、現在の認知科学においては認知主体の内部と外部環境の両方にわたることもあると考えられている。特に、多数の認知主体からなるコミュニティや社会の行動を対象とする場合には、その集団や組織およびそれらが置かれた環境にわたる計算を措定するのが自然であろう。このように考えると、経済学、経営学、政治学、サービス科学などが広義の認知科学に含まれることになる。本稿ではそのような広い意味での認知科学を扱う。それは、個体や社会を認知主体と考えてその行動の意味や価値を計算モデルによって解明しようとする試みである。

情報技術の進歩と普及により、日常の生活や業務において大規模なデジタルデータが生成・蓄積され、そのようなビッグデータを企業の経営やマーケティングに役立てようという気運が高まっている。同じく大規模なデータの分析に基づく科学の方法はデータ科学（data science）と呼ばれている。以下では、データ科学の方法による認知科学（データ認知科学 data cognitive science）について述べる。ただし、データ認知科学は今後発展すべき研究分野であり、まだ本格的に立ち上がっていない。したがってここでは、データ認知科学そのものの内容というよりもむしろ、その研究を推進するための基盤整備について主に論ずる。

データ科学においては普通の日常的な生活や業務の中ではなされないような特別な実験や観測やアンケートなどの非日常的なデータも用いるが、素粒子物理学や分子生物学などのいわゆるビッグサイエンスでなければそのような大規模な非日常的データはほとんど入手できない。それに対していわゆるビッグデータは、日常的に生成され蓄積される大規模なデータを対象として想定することが多い。このような日常的データの二次利用によってビッグデータの利用が持続可能になる。同じくデータ認知科学も、非日常的データよりはむしろ大規模な日常的データを二次利用することによって持続可能性を担保することが望ましい。

持続可能ということは社会の日常的な営みに無理なく埋め込まれているということである。つまり、一般社会における日常の生活や業務において自然に生成されるデータを使っ

て研究ができれば、わざわざ非日常的なデータを生成する必要がなく、したがってコストを抑制できる。また、その研究は社会と密接に関わっているので、研究成果が社会に環元される可能性も高く、したがって経済的・人的リソースを研究に投入することの正当性が担保しやすい。

データ認知科学の研究に用いるデータは人間の行動などに関するものと考えられる。人がどのような状況で何を認知し何を考えてどのように行動しているかに関する大規模で詳細なデータがあれば、認知科学の研究が大いに進展するだろう。例えば、学校教育などの場面で、学習者がいかなる教材をどのように用い、教師や他の学習者とどのように相互作用し、それに応じて知識や技能がどのように変化するかに関するデータがあれば、学習に関する実証的な知見が得られるはずである。また、さまざまな期待利得やリスクの下での購買などの選択行動に関するデータがあれば、不確実な状況の下での意思決定に関する豊かな知見が得られ、それが社会的な価値の向上に役立つと考えられる。

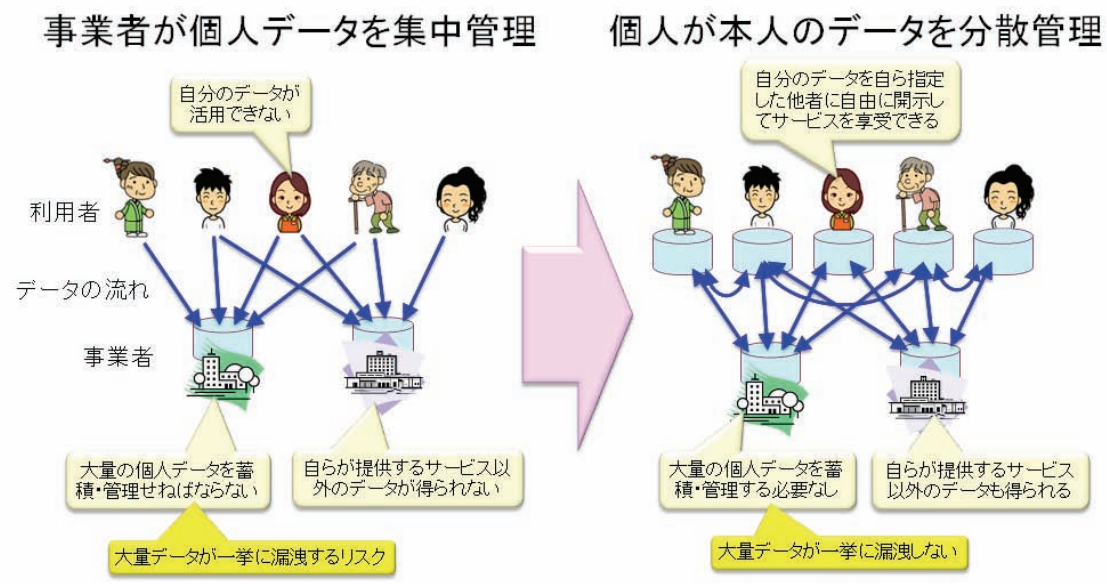
このようなデータによって可能になるのは狭義の認知科学に限定されず、さまざまな製品やサービスの開発、政策立案、疫学的な調査・研究などにも及ぶ前記のような広義の認知科学の研究である。例えば、病院での治療や投薬や検査結果などのデータを多数の患者から大量に収集して分析できれば、各種の傷病について、その重症度に応じた病院のコストパフォーマンスを比較評価することができ、患者がそれを参照して病院を選び、こうして病院の間での競争とそれによる医療の質の向上が促されるだろう。

このようにデータ認知科学は、日常の生活や業務から得られるデータに基づき一般市民を含む多くの人々が参画する仮説検証による知識創造と考えられる。その意味において、データ認知科学をソーシャルeサイエンス（social e-science）と呼んでもよいだろう。従来のeサイエンスは専門の研究者による先端的なビッグサイエンスにほぼ限られていたが、ソーシャルeサイエンスは狭義の研究者のみならず多くの一般市民が参画する科学研究であり、はるかに大きな社会的波及効果を持つと期待される。

しかしながら、データ認知科学を推進するために十分なデータが得られるようにはまだなっていない。Google や Amazon.com や鉄道会社や大手の小売業者は個人のサービス利用履歴のデータを蓄積・分析しており、また、多くの企業で業務の改革や効率化のために情報技術が導入されることにより業務に関する大量のデータを蓄積してその分析結果を経営に使うようになりつつある。だが、認知科学に必要な人間の行動などに関するデータが大量に生成・蓄積されて流通する仕組みは未整備である。

ところがここ数年、スマートフォンや通信機能付きセンサなどの情報機器が普及しつつあり、個人の行動履歴のデータやバイタルデータを簡単に取得し蓄積することができるようになってきた。まだ普及には至っていないが、ライフログなどの研究も進んでいる。健康センサなどのデータをメーカーが利用者から預かって分析などのサービスを提供するケースも多いが、たいていの場合は各利用者が本人のデータを自由にダウンロードできるようになっている。

こうしたデータを広く社会的に共有できればデータ認知科学が本格的に推進できるはずだが、その社会的共有が非常に難しい。最大の問題は、次の図の左側のように事業者が顧客などの個人データを集中管理していることである。



この状態では、個人のデータが本人の手もとにないので個人は自分のデータを自由に使えない。事業者にも、大量の個人データを保管するコストとそれが漏洩するリスクが重くのしかかるだけでない。また、自らが提供するサービスに直接関係のないデータを取得するのが困難である。例えば、各患者のA病院での診療記録をB病院が参照できるような医療機関の間での連携体制が機能している地域はまだ少ない。

この問題を根本的に解消するには、上図右側のように個人のデータを本人が分散管理する必要がある。そうすれば、各個人は自分のデータを自由に使える。特に、範囲（相手とデータの種類）を自由に選んでデータを限定的に共有することによりサービスを受けたりコラボレーションしたりすることができる。また事業者も、大量の個人データの保管に伴うコストとリスクを免れるのみならず、自ら提供するサービス以外のデータを個人と共有することができる。

このように個人が本人のデータを自ら蓄積・管理し、他者と自由かつ安全に共有して活用できる仕組みをPDS（personal data store）という。データ認知科学の本格的な展開にはPDSの普及が必要と考えられる。PDSにはさまざまな実現形態があり、これまで主に構想されてきたものは集中型PDS、つまり多数の個人のデータを事業者が集中管理するモデルである。集中管理であっても、個人が本人のデータの用途や開示先を簡単に管理できるような方式であれば、上図左側のような問題を解消することができる。一方、分散型PDSでは、各個人がパーソナルクラウド（Dropboxや Skydriveなど）やホームサーバで本人のデータを管理する。集中管理方式ではOpenIDやOAuthなどのIDの共有管理の技術が必要になるが、分散管理方式ではそれが不要である。一方、集中型PDSではサーバ側に豊富なデータ処理機能を持たせられるが、パーソナルクラウドを用いる分散型PDSではデータ処理をほぼすべて個人の端末で行なう必要がある。こうした技術的課題を探究するには、PDSを実装して実際にサービスを運用する必要があるだろう。

（4）科学技術的・政策的課題

企業や政府が蓄積している個人データを本人が自由にダウンロードして利用できるようにすることの法制化と、ダウンロードしたデータを簡単に利用できるようにするための技

術の開発。

個人に帰属すべきデータを本人がデジタルデータとして簡単に入手できる仕組みの構築。例えば病院や薬局から患者に文書を電子的に配信する体制の整備。

多数の個人が分散的に管理している大規模なデータを、プライバシーを担保しつつ集約・分析する方法の開発。

（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）

ハーバード大学のBerkman Center for Internet and Societyでは2006年以来VRM（業者関係管理；vendor relationship management）の研究プロジェクトを推進している[1]。

PDSやVRMの概念は産業界で提唱されたものであり、民間企業のコンソーシアム[2]もあるが、アカデミアにおいてはほとんど顧みられておらず、産学連携が不足している。

日本のJIPDECが「情報銀行」というPDSの一種を構築することを目指して活動している。

欧米では個人データの保護と自己決定権を保証しようとする動きが法制化されつつある[3, 4, 5]。

（6）キーワード

ビッグデータ、個人データ、PDS（personal data store）、ライフログ、ソーシャルeサイエンス

（8）引用資料

1）Project VRM（2012）http://cyber.law.harvard.edu/projectvrm/Main_Page
2）PDEC（2012）Personal Data Ecosystem Consortium. http://pde.cc/
3）BIS（2011）The midata vision of consumer empowerment. http://www.bis.gov.uk/news/topstories/2011/nov/midata
4）EU（2012）Commission proposes a comprehensive reform of data protection rules to increase users' control of their data and to cut costs for businesses. http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/12/46&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en
5）The White House（2012）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

3.5.3　言語、メディア理解

（1）研究開発領域名

言語、メディア理解

（2）研究開発領域の簡潔な説明

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・意味処理とその検索・変換・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

人間のコミュニケーションは、情報を音声、画像、映像、言語などの表現メディアに表現して行われる。音声、画像、映像などはセンサから入力される信号を時空間的にサンプルした信号（光や音の強さなどを表わす数値；パターンデータ）として表現されている。パターンデータからシンボル（画像に犬がいる、音声から犬という単語を抽出；意味）を抽出するためには信号をある塊に区切ってシンボルに変換するパターン認識処理が必要となる。これにより、画像に映っている物体を認識したり、音声から言語への変換が実現できる。これに対して言語は文字を基本単位としてその連なりで意味を表現しており、自然言語処理は構文構造や文法を利用して文字の連なりを語・句・文として区切りその意味を抽出する処理である。言い換えれば、双方とも人間がコミュニケーションをするために発する様々な表現を機械が理解できるようになることを目指している。

メディア理解に関する研究開発は、音声言語分野と画像映像分野に分かれて進められている。研究の歴史は古く、1940年代のコンピュータの誕生と当時に始まっている。当初は、コンピュータの性能が不足し、表現のもつ多義性、同義性、文脈などをうまく取り扱うモデルの欠如、コンピュータに常識・知識などをどう蓄積してゆくかなどが大きな問題となっていた。1990年代後半以降、コンピュータ・ネットワーク環境の劇的進展、Webの誕生、社会全体の情報流通が電子化されたことなどが主要因となり、技術的進展と普及が進んでいる。

自然言語は思考・コミュニケーション・記録など人間の知的活動の根幹を支えるメディアであり、情報社会の進展とともに自然言語処理への期待と需要は増大していくものと予測される。最近の傾向としては、教師ありの機械学習による処理の高精度化と、Web上の大規模テキストデータからの知識獲得技術の進展が目覚ましい。音声認識の向上とも相まって、自動翻訳、情報分析、対話的質問応答など人間の知的活動を支援する応用技術もあと一歩で実用という段階であり、自然言語処理の研究開発は今後ますます活発化すると予想される。

画像・映像などの視覚メディアは人間が外界から取り入れる情報の80%程度を占めており、人間にとっての重要な情報源である。この分野の研究は、コンピュータに眼をもたせようとする研究であり、ロボット研究の進展とも相まって、重要な研究分野となっている。最近は、一般物体認識、映像認識などの研究が盛んであり、Webに蓄積された膨大な言語情報の付加された画像映像データをサンプルとして統計的学習手法による識別器の学習という形で進められている。データ数が十分にあれば、かなり性能が上がることが示されており、実用化に近づいている。その一方で、画像映像処理研究の裾野が広がってきており、様々な研究分野で画像映像処理が情報抽出の道具として利用されている。今後は、

実用化を目指した研究と基礎的な研究が並行して活発に進められると予想される。

ビッグデータのいわれの一つは言語情報だけでなく、画像、映像、音声などのパターンデータがセンサ情報として自動的に蓄積できるようになってきたことである。これにより、蓄積されるデータが爆発的に増えてきている。今後は映像などのストリームデータが増えてくることを考えれば、映像や音声のリアルタイム処理などが重要になってくる。このように、ビッグデータの処理においてはメディア処理技術の重要性はますます増大するものと考えられる。特に、画像映像処理の分野はアメリカにおいてもアジア系の研究者が多く、文化的にはアジアの研究者が主導権を握れる立場にいると考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

言語・メディア理解の研究は、人間がなんの意識もせずに簡単にできることを機械に実現しようとしている点でその困難さが理解されないことが多い。しかし、この研究分野で研究開発が進み研究成果を実用化できれば、その応用範囲は広く、その影響は社会的にも経済的にも甚大である。この研究分野の重要性を理解し、世界との競争に勝てるように投資をしなければならない分野である。

今後の自然言語処理の研究開発を進める上では、大規模テキストデータ、大規模計算環境をもつことが必須であるが、少数の企業を除いて、特に大学などの研究機関ではこの点がボトルネックとなる。著作権法改正によってクロールデータの研究利用は可能となったが、国家プロジェクトなどでその収集を行ってもその共有は認められておらず、法整備も含めた対応が必要である。

また、形態素解析（単語区切りや品詞付与）、構文解析（主語述語や修飾関係の解析）などの基礎的解析に一定の進展はあったが、blog や Twitter などの CGM における崩れた表現や新語・専門用語の処理、教師データと異なるドメインのテキスト解析、さらに、省略照応処理などの、より高次の解析には課題が多く、継続的な基礎的研究の支援が必要である。

画像映像処理の基本的なところはソフトウェアツールとして整備されているので、他分野の研究者が簡単に利用できる環境はできている。しかし、この分野の研究者が共同研究という形で研究に参画すると、用意されているツールのもつ効果が十分に発揮されるだけでなく、必要な場合はツールを改良することも可能である。データから抽出される情報はツールの良し悪しに依存していることを理解した上で、メディア処理の研究者を積極的に応用分野の研究者と共同研究させる政策が必要である。

また、カメラ映像には人間が映ることが多く、情報の扱いに関して個人情報保護の問題やプライバシー問題が生じる。データ収集も目的を決めて行わざるを得ず、監視カメラ系の新たな実証実験は海外でやる方が簡単だという認識が広まっている。これでは、今後の経済に大きなインパクトを与えるであろうこの分野の研究が日本で進められないという事態に陥る。運用面で過度に制限的な解釈をしないように法制度、政策面での改善が必要である。

（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）

オバマ政権がビッグデータの処理はインターネットやスーパーコンピュータと並ぶ国策として重要な分野であると宣言し、多額の研究費を投資するプランを発表している。ビッ

グデータ処理の本質は、文字で書かれた情報ではなく、パターンとして収集される情報からその意味を抽出し社会に役立てようとする点であり、情報システム関係の技術と同等の力点がメディア処理に置かれている。

2011 年 2 月、米国の国民的クイズ番組、Jeopardy! において、IBM の人工知能システム Watson が人間のチャンピオンを破った。これは、並列計算環境と、Wikipedia を中心とする高品質な電子テキストの利用によって実現された質問応答システムであり、自然言語処理の成熟に世界が驚嘆した。なお、誤解が多いが、問題文は電子テキストとして Watson に送られており、音声認識は行われていない。さらに、米国では、機械翻訳、テキスト理解の高度化を目指して継続的に自然言語処理関連の大規模プロジェクトが進行している。

Microsoft、Google などの IT 系の巨大企業が画像映像分野の大学の中堅、若手の優秀な研究者を引き抜いており、莫大な投資をして実用化に向けて基礎研究と応用研究を同時に推進していると推測される。

日本においては、情報大航海（2007 年～ 2010 年）、情報爆発（2005 年～ 2011 年）などの大規模プロジェクトの中で自然言語処理、情報検索などの研究開発が推進され、領域の進展に少なからず寄与した。大規模情報処理の流れは「ビッグデータ」というキーワードに引き継がれたが、残念ながら現在のところ言語・メディア理解に焦点を当てた大規模プロジェクトはない。

（6）キーワード

画像認識、映像認識、知能ロボット、視覚情報処理、機械翻訳（自動翻訳）、情報検索、情報分析、音声対話システム

（7）国際比較

＜言語理解分野＞

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。 ・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。 ・大規模知識ベースの構築・共有の枠組みとして、2009 年に情報通信研究機構が中心となって「高度言語情報融合フォーラム（ALAGIN）」が立ち上がり、活発な活動を継続している。
	応用研究・開発	○	↘	・以前は大手電機メーカーの中央研究所の研究レベルが高く、国際会議でのプレゼンスもあったが、産業界の低迷とともに研究がシュリンク傾向にある。 ・情報検索、機械翻訳などでは大規模計算環境、大規模データが必要であるが、大学研究室や現在の産業界の研究所ではそれらの環境整備が難しい状況にある。
	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	◎	→	・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。 ・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。
	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おり、最近立ち上がったものとして、音声翻訳を中心とする BOLT（Broad Operational Language Translation）[1]、因果関係認識や推論に焦点を当てた DEFT（Deep Exploration and Filtering of Text）[2]などがある。 ・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	○	→	・2013 年から 10 年間、10 億ユーロの規模でビッグデータ関連のプロジェクト、FuturICT[3] が立ち上がろうとしているが、知識処理関係では現在のところ Semantic Web がフォーカスされている。
	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 Reseach 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

＜メディア理解分野＞

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	○	↗	・トップカンファレンスであるICPRの1988-2008の国別著者数で、日本は米国に次いで2位[4]、ICPR2010の国別著者数では中国、米国に次いで3位と活発な研究発表が行われている。 ・大学、家電メーカー、通信会社などで多くの研究が行われている。国内の学会（MIRUなど）には500人以上の研究者が参加しており、情報分野の中でも比較的大きな研究コミュニティが形成されている。
	応用研究・開発	◎	→	・NTTやNTTドコモ、KDDIなどの通信会社や、NEC、富士通などの家電メーカーで、視線やジェスチャを使って機器を操作する技術が開発されている。 ・自動運転車に関しても、CEATEC Japan 2012で日産自動車が展示をするなど、世界的に見ても今後の技術トレンドを形成する一角となっている。
	産業化	◎	↗	・顔認識技術の実用化においては、オムロン、NECなどが世界トップレベルの技術をもち､多くの機器に組み込まれ､実用化されている。指紋や掌紋、虹彩といった生体情報を使った認証技術の実用化も進んでいる。 ・文字認識に関して伝統的に強く、NEC、東芝、日立、富士通、リコーなどの企業の技術が郵便物の仕分けや手書き文字入力、印刷文書のデジタル化などで実用化されている。 ・車載カメラの映像処理は、富士重工が早くから実用化を行っており、現状でも高度な技術力をもつ。 ・4Kや8Kと呼ばれる高解像度テレビ向けに、映像の画質改善を行う超解像技術が開発され、東芝により世界に先駆けて製品に搭載されている。
米国	基礎研究	◎	→	・マサチューセッツ工科大学、カーネギーメロン大学、カリフォルニア大学バークレー校といった有力機関において基礎研究が精力的に行われている。 ・SIGGRAPHやCVPRにおいては、地理的な理由や映画産業との関わりもあるが米国勢の比率が高い。 ・マサチューセッツ工科大学Media Labのカメラカルチャーグループは、毎秒1兆フレームで光の進行を捉えるカメラを設計するなど、画像キャプチャの仕組みを研究対象としており特筆に価する。
	応用研究・開発	◎	↗	・DARPAなどの予算で国策として推進されるプロジェクトの存在感が大きく、ロボット産業に関連する画像・映像技術もこれに含まれる。過去には自動走行車のGrand challenge、顔認識のFERETなども支援を受けた。 ・自動走行車では、カーネギーメロン大学が1995年にアメリカ横断を実現した（障害物回避は一部手動）。近年はGoogleが実用的なシステムの開発に成功し、カリフォルニア州では公道走行が可能となっている。 ・顔認識は画像認識技術が実用化を見た好例で、坂井研究室（京都大学）の金出による博士論文（1973年）が先駆し、カーネギーメロン大学、マサチューセッツ工科大学、南カリフォルニア大学などの機関で活発な研究が続いた。標準とされているものとしてViola&Jonesの（2001年の）技術があげられる。
	産業化	◎	↗	・米国は新しい産業を生み出す力で圧倒しており、画像の分野においてもMicrosoft、Googleなどが多くのリソースを投じ、その結果として大規模なサービスが立ち上がっている。 ・最近ではGoogleがMountain viewに加えてSeattleに研究拠点をもち、ワシントン大学との産学連携でGoogle Mapsを3次元的に表示するサービスの提供を開始した。 ・Microsoftの Kinectセンサは、安価な装置で簡単に距離画像が得られるため、学術・産業界双方に大きなインパクトを与えている。 ・Instagramのように既存の技術を新しいビジネスに結びつけたケースも出てきている[5]。 ・スタンフォード大学からのスピンアウト企業であるLytroは、computational photography技術により、撮影後にピント合わせが可能なカメラを実用化している[6]。

欧州	基礎研究	◎	→	・近年の一般物体認識への回帰や、それ以前の画像の3次元幾何解析を含め、オックスフォード大学、フランス国立情報学自動制御研究所（INRIA）、チューリッヒ工科大学（ETH）など基礎研究を先導する機関が多数存在する。 ・ICCVやECCVといったトップカンファレンスでの発表にも見られるように、欧州勢は依然として世界のトレンドメーカーの一角を形成している。 ・EUの研究予算（FP7、2014年以降はHorizon）による支援も概ね継続される見通しである。
	応用研究・開発	○	→	・画像圧縮のMPEG標準化技術への貢献度が高く（ドイツハインリッヒ・ヘルツ通信技術研究所（HHI）など）、今後も継続的な参画が予想される。 ・映像技術ではDisney Research Europe（Zurich）、画像認識技術においてはMicrosoft Research（Cambridge）といった企業研究所の活動も存在感があり、例えば昨今注目を集めたKinectセンサによる距離画像からのユーザのジェスチャ認識は、MSRケンブリッジ研究所発の技術である。
	産業化	◎	↗	・大学からのスピンオフを含め、画像処理・技術に基づく製品がベンチャーなどにより市場に送り込まれている。例として以下のようなものがあげられる。 ・MobileEye（車載画像処理）[7)] ・Im-sense（画像のHDR色彩補正技術。Appleにより買収されiPhoneに採用） ・SAAB（地図作成用の3Dマッピング技術）[8)]
中国	基礎研究	◎	↗	・トップカンファレンスであるICPR 2010において、国別著者数が最大となっている。また、ICCV、CVPRなどのトップカンファレンスにおいても、中国系の登壇者が多く、中国に帰国後も研究を続けることで、技術力の向上につながっている。 ・中国科学院、清華大学、Microsoft Research Asiaなどの研究拠点で、幅広い研究活動が活発に行われている[9)]。
	応用研究・開発	△	↗	・蘇州工業園区などのハイテクパークが設置され、優遇措置を受けた企業が大学と提携し、高度な技術の実用化を目指す研究が進んでいる。
	産業化	△	↗	・本分野に関連する中国発の産業化の目立った情報はないが、基礎研究、応用研究の充実につれて、産業化の動きも進展すると考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	・Korea Advance Institute of Science and Technology（KAIST）、ソウル大学校、高麗大学校などの大学で、画像・映像処理を中心に、活発な研究が行われている[10)]。 ・国際学会での発表数は比較的少ない。また、トップコンファレンスのエリアチェアなどの人材も限られており、本分野における国際的な認知度はそれ程高くない。
	応用研究・開発	○	→	・CES2012においてサムスンは、スマートTV対応の端末にカメラなどのセンサを装備し、手の動きで機器操作ができるジェスチャ認識技術を発表している。また、IFA2012においては、カメラを搭載した自動掃除ロボットの展示を行うなど、家電分野での応用に向けた研究が進んでいる。
	産業化	○	↗	・サムスン製のスマートフォンでは、顔認識技術を用いて、利用者が画面を見ている間はスリープ状態に入らないという機能を実現している。 ・LG電子は、超解像技術を開発し、自社製品に搭載して発売している。

（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
※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.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Broad_Operational_Language_Translation_（BOLT）.aspx
2）http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Deep_Exploration_and_Filtering_of_Text_（DEFT）.aspx
3）http://www.futurict.eu/
4）Alexandra B. Albu, David Kerr: "Looking back at 20 years of ICPR conferences", IAPR Newsletter, vol.32, no.3,（2010-07）
5）http://instagram.com/
6）http://www.lytro.com/
7）http://www.mobileye.com/
8）http://www.saabgroup.com/en/Campaigns/Rapid-3D-Mapping/
9）Microsoft Academic search（http://academic.research.microsoft.com）
10）「研究者国際流動性の論文著者情報に基づく定量分析」, 科学技術政策研究所、調査資料-199（2011-08）http://data.nistep.go.jp/dspace/handle/11035/932

3.5.4　知能システムの基礎

（1）研究開発領域名

知能システムの基礎

（2）研究開発領域の簡潔な説明

知能システムの基礎は、人の知的な振る舞いを人工物（コンピュータなど）上で実現することに焦点を当てた工学的要素技術である。必ずしも、人間の認知構造を模倣する必要はないが、ここでは、探索、制約充足、プランニング、論理、知識表現、知識モデリング、オントロジー、推論、機械学習、進化計算、データマイニング、自然言語処理などの、記号処理を中心とした要素技術を対象とする。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

AIの研究は、1956年のダートマス会議から開始され、早や、半世紀以上が経過した。

1950年～60年代は、AIへの期待は大きく、数学の定理証明やチェスを対象にして、一般問題解決器（GPS）やA*アルゴリズムのような探索の研究、および、コンピュータ上での三段論法を実現する導出原理（Resolution Principle）のような演繹推論の研究は進展したが、定理証明やゲームのような閉じた小規模問題（Toy Problemと呼ばれる）から脱却できず、実世界の開いた複雑な問題をAIに解決して欲しいという産業界からの期待には応えられず、AIはToy Problemを扱うだけと批判され、1970年代、AIの研究開発は沈滞していった。

1977年の人工知能国際会議（IJCAI）で、ファイゲンバウム教授（スタンフォード大）が“There is power in the knowledge!”という、知識重視のAIを提唱し、1980年代、AIの研究は、知識工学（外部世界から知識を獲得し、コンピュータ上で知識を表現し、その知識を利用して推論し、問題を解決する）の研究開発に移行し、日本の第5世代コンピュータプロジェクト、米国のMCC（Microelectronics and Computer Technology Corp.）コンソーシアム、欧州のESPRIT（欧州情報技術研究開発戦略計画）のような国家プロジェクトが発足し、産業界では、専門家の知識をコンピュータに移行して活用するES（エキスパートシステム）、AIベンチャーの勃興など、AIの研究は、基礎研究、応用研究、産業化ともに大きく進展した。

しかし1990年代に入り、人間のもつ知識の奥深さや幅広さをコンピュータ内で表現することの困難さ、質のよい知識を獲得することに大きなコストがかかること、獲得された知識を維持することも大変であることが次第に認識され、世界で5,000程度開発されたESの2/3以上は動かくなり、産業からのAI研究開発への期待は薄れていった。

ただし、1990年代以降、大規模データ分析法としてのML/DM（機械学習とデータマイニング）、モデリング基礎としてのONT/SW（オントロジーとSemantic Web）など、AIの基礎研究は着実に進展した。

ML/DMでは、1990年代後半に、カーネル関数によるSVM（サポートベクトルマシン）が登場し[1)]、高次元特徴ベクトルをさらに高次元空間に非線形写像して線形識別関数を学習する方法が提案され、次元圧縮して非線形識別関数を学習する従来の方法と比べて、学習能力が格段に向上した。さらに2000年以降、CRF（Conditional Random Filed、条件付確率場）による学習[2)]、ノンパラメトリックに基づくベイズモデル、劣モジュラー関数

による離散最適化理論、不確実環境におけるロバストネス最適化に基づく機械学習など、ML/DMの理論が大きく進展した。さらに、マルチラベル学習、半教師あり学習、転移学習など、テスト分類や推薦システムなど、特定タスクに適したML/DMが進展し、これらの理論的かつ実践的進展が、現在のビッグデータブームの技術基盤を与えている。

一方、ONT/SWでは、1990年前半に、知識工学の分野で、概念化の明示的仕様という意味で「オントロジー」用語が使用され[3]、2001年に、Web提唱者であるTim Berners Leeにより、Webにメタデータを付与して、オントロジーを利用して、そのメタデータの意味をソフトウェアが理解できる次世代Web「Semantic Web」が提唱された[4]。しかしながら、インテンシブが小さいために、Webページ作成者がWebページにメタデータを付与する作業が普及せず、Semantic Webの実用化は難しいと思われたが、2006年に、再度Tim Berners Leeにより、Webテキスト情報ではなく、データを基盤にしたSemantic Web（LOD: Linked Open Data）が提唱された[5]。その後LODは、オープンガバメントの基盤として位置付けられ、米国政府と英国政府が中心となり、2007年頃より、LODによる行政データの公開が始まり、昨秋までに、行政、地理、書籍、メディア、生命科学など、領域を越えた形でLODが連携され、310億トリプルまで規模が拡大されてきており、実用化の期待が膨らんできている。

これらのML/DMとONT/SWの研究開発は、この20年間、コンピュータの高速化、記憶装置の大容量化、ネットワークの広帯域化というハードウェア基盤の進展と相まって、大きく進展するとともに、自然言語／画像／音声理解のような応用AI技術の進展も加速させ、AI技術基盤が整備される時代を迎え、AI要素技術を統合したグランドチャレンジ的なタスク指向AI、および、AI要素技術と情報技術を統合した、生活支援型AIサービスが登場する時代を迎えたといえる。以下、国内外の動向について述べる。

日本では、一昨年、あから2010が女流将棋王将に勝利し、今年になって、将棋AIが元名人に勝利した。これは、6万もの棋譜データを利用して評価関数の大規模パラメータの自動調整に機械学習を適用し、コンピュータ将棋の棋力を大幅に向上できたことが大きな要因である[6]。また、コンピュータ囲碁Zenが4子のハンディで九段のプロ棋士に勝利し、Zenがアマ五段以上の実力をもつことが示された。チェスの探索空間が10^{120}、将棋の探索空間が10^{220}であるの対して、囲碁の探索空間は10^{360}といわれ、チェスや将棋では局面の優劣を決める評価関数で対処できたが、囲碁では、探索空間が広すぎるために評価関数が機能しない時代が続いたが、モンテカルロ法にUCB（Upper Confidence Bound）と呼ばれる最適化手法を組み合わせたモンテカルロ木探索がRemi氏（フランス）によって提案され[7]、日本の研究者によって改善されながら、コンピュータ囲碁の実力は急激に上昇している。また、創造科学技術推進事業ERATOでは、湊離散構造処理系プロジェクトにおいて[8]、システム検証、制約充足、ML/DMなどのAI基礎研究が推進され、岡ノ谷情動情報プロジェクトでは[9]、喜び、悲しみ、驚き、怒りといった心の状態を他者に伝達する表情や音声、体の動きに関する情動情報の研究、認知科学寄りのAI基礎研究が推進されている。

以上のように、日本では、ゲームと探索、離散構造、情動情報などのAI基礎研究が推進され、応用研究では、世界に向けた日本発のAIグランドチャレンジとして「ロボカップ」が1997年に開催され、現在、世界各国で大きな広がりを見せ、レスキューリーグ、家庭用ホームリーグなども誕生している。また、知識・常識と推論の統合的な応用研究として、

「人工頭脳プロジェクト―ロボットは東大に入れるか？―」[10]（情報学研究所）が2011年12月から開始された。

産業化に目を向けると、音声IFによる総合案内サービス「しゃべってコンシェル」がリリースされ、日本初のAIサービスといえる[11]。また、ソーシャルゲーム業界においては、ユーザのログ／クリックデータから、ユーザの行動（ボス挑戦、応援、仲間申請、種まき、アイテム取得...）系列がゲームの活性化にどのように寄与するかをリアルタイムで学習し、不活性パターンが見出されれば、数時間単位でゲーム内容を変更するという、オンラインデータマイニングが実践されている。さらに、電力制御や家電商品において、制御系AIが開発されている。

米国では、1997年にIBMのチェス専用AIマシンDeepBlueが当時の世界チャンピオンに勝利し、2011年、IBMのクイズAI Watsonが長寿クイズ番組Jeopardy!のグランドチャンピオンに挑戦し勝利した[12), 13)]。Watsonでは、出題されたクイズに対して、オントロジーを利用してアンサータイプを決め、タグ付けされた2億Webページの情報を利用しながら、数十種類以上のAI要素技術が実行され、数百の解候補を生成し、さらに、別の数十種類のAI要素技術がそれらの解候補群を得点付けし、一位となった候補を解として答える。当初、正解率は10%程度であったが、機械学習により、その正答率は80%を超えるまでになり、人間のグランドチャンピオンに勝利した。Watsonでは、新しいAI要素技術は全く考案されず、100種類以上のAI要素技術の統合に成功の要因があったといえる。現在、Watsonは、医療分野の最新論文成果のQAに利用されようとしており、IBMは、自ら学習しデータの意味を解釈できる「コグニティブ・コンピューティング」というコンセプトを新しいコンピュータのあり方として提唱している。また、Apple社から、スマートフォンアプリの音声アシスタントコンシェルジュ「Siri」がAIサービスとして提供された。Siri開発のCTOはTom Gruberであり、彼は、20年前に、オントロジーを情報科学の分野に導入した先駆者である。また、Siriは、DARPA（米国国防省）のAIプロジェクトCALO（2003-2008）[14)]、その後PAL（the Personalized Assistant that Learns）プログラムに継承されて発展したものであり、自然言語処理、推論、機械学習など、様々なAI要素技術が統合されている[15)]。さらに、Googleは、2012年8月より、米国で、Knowledge Graphサービスを開始した[16)]。Knowledge Graphは意味検索エンジンであり、500万の人・もの・ことに関するデータと35億以上の事実が蓄積され、文脈を考慮して、より適切な結果を検索するとともに、検索結果の要約を提示することもできる。また、16,000台のプロセッサを利用したニューラルネットワークに基づく半教師学習により、動画サイトから猫の画像を自律的に学習できたと報告されている[17)]。さらに、Google Driverless Car[18)]のように、大規模データを基盤にして、生活を支援するリアルな知能サービスも発表されている。

欧州では、伝統的に、論理と推論に関する研究が盛んであり、古くは、マルセイユ大学でPrologインタープリタ、エジバラ大学でPrologコンパイラが開発され、最近では、論理的側面から、Semantic Webにおけるオントロジー言語OWLの標準化に大きく貢献している[19)]。EU全体では、FP7プログラム（第7次研究技術開発のための枠組み計画）のICT（Content and Knowledge）において、AI研究が進められている[20)]。特に、意味処理の研究開発が盛んで、2004年に、意味処理の研究所DERI（Digital Enterprise Research Institute）研究所が設立され[21)]、DERIはFP7の多くの意味処理プロジェクト

へ参画をしている。また、Semantic Webの新しいパラダイムであるLODは、ドイツのベルリン自由大学やライプツィヒ大学で精力的に進められ、注目されている[22]。

中国では、1981年に人工智能（知能ではなく智能と記されている）学会が設立され[23]、20世紀中は、それほど研究は活発でなかったが、21世紀以降、研究が推進されていく。自然言語理解や意味処理の分野では、中国語意味辞書HowNetが整備され[24]、中国語理解や質問応答システムの基盤となっている。また、上海交通大学や清華大学などでは、意味処理に関する高度な研究が推進され、採択が困難とされるISWC（International Semantic Web Conference）で論文採択数が増加している。また、高度な画像処理を基盤にしてDeep-Sea Robot Jiaolongという深海探査ロボットが研究開発され（マリアナ海溝付近で7,000メートル以上の潜水に成功）、資源探査に利用される予定らしい[25]。上海万博2010では、車いすロボットなどの生活支援ロボットが展示され、知能ロボットに注力している[26]。2013年には北京でIJCAI（人工知能国際会議）が初めて開催される予定でもあり[27]、タスク指向型の応用研究開発を国家全体で推進する姿勢が見られ、今後、注視していく必要がある。

韓国ではソウル国立大学が人工知能研究を推進し、前述したDERIのソウル研究所を設立し[28]、医療分野におけるオントロジーの利用など、意味処理の応用研究が進められている。また、知識コンテンツや知能ロボットの分野で、ベンチャーが登場しており[29),30]、韓国も中国同様、応用研究開発重視の傾向が見られる。

（4）科学技術的・政策的課題

・AIグランドチャレンジ（AI要素技術の統合）

クイズAI Watsonは、IBM研究所内プロジェクトであったが、Jeopardy!のグランドチャンピオンに勝利するという明確な目標の下に、4年間、25名のAI研究者が議論に議論を重ね、個々のAI技術を改良していき、チームワークにより成された成功といえる。わが国では、情報学研究所において、東大入試プロジェクトが開始され、同様の成果が期待されるが、より大規模で開いた問題に対して、国策としてのAIグランドチャレンジを始めることが、AI要素技術の多様なインテグレーションを生み出し、次世代コンピュータの姿を明らかにしていくものと考えられる。

・AIサービス（AI要素技術と周辺情報技術との連携）

上述のAI要素技術の統合により、次世代コンピュータの姿が明らかになると考えられるが、サービス化するには、周辺情報技術との統合が不可欠である。SiriのようなAIサービスは、今後、急速に増加していくと予想されるが、AI要素技術とソーシャルメディアサービス、位置情報サービスなどとの効果的な連携をサービスの視点から洞察していくプロジェクトの支援も必須である。

・AIリテラシ

様々なAIサービスが適用されてくると、ゲーム依存症やインターネット依存症と同様に、AI依存症が問題化されてくる可能性があるため、健全なAIの使い方を教育するためのAIリテラシを準備する必要があるかもしれない。

（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）

米国では、国家プロジェクトや大手企業研究所の基礎研究成果が、AIサービスとして結実し始めている。

中国や韓国では、特定の問題に特化して、AI要素技術と情報技術を連携させる傾向があり、問題特化型AIにも注力すべきである。

ソーシャルネットのつぶやきや位置情報による行動履歴データがビッグデータと呼ばれ、データサイエンティストが不足するとともに、AI技術による支援が望まれている。

Semantic Webの新しい潮流であるLODは、米国政府、英国政府がともに、オープン政府の一環として強力に推進しており、情報サービスの基盤になりうるので、我が国も早急に対応が必要である。

（6）キーワード

AIグランドチャレンジ、AIサービス、AIリテラシ、基礎研究から実用化へ、問題特化型AI、ビッグデータとAI技術、LODとオープン政府

（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するなど急激に実力が向上している。 ・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。 ・情報学研究所において「人工頭脳プロジェクトーロボットは東大に入れるか？ー」が2011年12月より開始される。 ・はこだて未来大学を中心に、ショートショート（掌編小説）の自動作成プロジェクトが2012年9月より開始される。
	産業化	○	↗	・音声IF総合案内サービス「しゃべってコンシェル」がリリースされている。 ・ソーシャルゲーム業界においてゲームを活性化するためにユーザの行動系列からのオンラインデータマイニングが行われている。 ・電力制御や家電商品において制御系AIが開発されている。
米国	基礎研究	○	→	・新しい機械学習（SVM、CRF）などML/DM理論の進展に大きく寄与。 ・IBMのDeepBlue（チェスAI）が世界のチャンピオンに勝利。 ・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。
	応用研究・開発	◎	↗	・WordNet、CYC（大規模オントロジー）など一般常識の知識ベースが構築され、一部は公開されている。 ・クイズAI「Watson」がJeopardy!のグランドチャンピオンに勝利した。 ・Google Driverless Carの公道走行がネバダ州で認可されるなど、社会実装に向けた研究開発が進んでいる。
	産業化	◎	↗	・ルンバ（お掃除AI）など生活支援ロボットが実用化されている。 ・スマートフォンの音声アシスタント「Siri」がリリースされている。 ・DRAPA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。 ・文脈を考慮して適切な検索、要約を行うKnowlegde Graphサービスがリリースされている。
欧州	基礎研究	○	→	・モンテカルロ木探索と呼ばれる効果的な探索法がフランス人により開発され、将棋AIや囲碁AIの急激な実力向上にも結びついている。 ・伝統的に論理と意味に関する研究が盛ん。最近ではSemantic Webにおけるオントロジー言語OWLの標準化に貢献。また、意味処理の研究所DERI（Digital Enterprise Research Institute）が設立されている。
	応用研究・開発	○	→	・FP 7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。 ・LOD（Linked Open Data）の研究がドイツのベルリン自由大学やライプツィヒ大学で精力的に行われている。
	産業化	△	↗	・ドイツ中心に、オントロジーのベンチャーであるOntoText、LODのベンチャーであるfluid Operationsなどが設立されている。

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。
	応用研究・開発	△	↗	・深海ロボット Deep-Sea Roboto Jiaolong が研究開発され、マリアナ海溝付近 7,000m 以上の潜水に成功。
	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予定であり、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。
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。
	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。

（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）Cortes, Corinna; and Vapnik, Vladimir N.: Support-Vector Networks, Machine Learning, Vol.20, pp.273-297（1995）.
2）John Lafferty, Andrew McCallum, and Fernando Pereira: Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data, International Conference on Machine Learning（ICML）, pp.282-289（2001）
3）Thomas R. Gruber（1993）: A Translation Approach to Portable Ontology Specifications, Knowledge Acquisition, 5（2）, pp.199-220（1993）.
4）Tim Berners-Lee, James Hendler and Ora Lassila: The Semantic Web, Scientific American, May 2001, pp.29-37（2001）
5）Tim Berners-Lee: Linked Data -Design Issue – at http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html（2006）
6）保木邦仁、渡辺明：ボナンザ VS 勝負脳―最強将棋ソフトは人間を超えるか、角川書店（2007）
7）Rémi Coulom: Computing Elo Ratings of Move Patterns in the Game of Go, Computer Games Workshop 2007（2007）
8）http://www-erato.ist.hokudai.ac.jp/index.php
9）http://okanoya.jst.go.jp/
10）http://21robot.org/
11）http://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2012/02/27_00.html
12）http://www.nhk.or.jp/zero/contents/dsp342.html
13）http://www.nhk.or.jp/zero/contents/dsp343.html
14）http://www.ai.sri.com/project/CALO

15）https://pal.sri.com/Plone/framework
16）http://Googleblog.blogspot.co.uk/search?q=knowledge+graph
17）http://www.nytimes.com/2012/06/26/technology/in-a-big-network-of-computers-evidence-of-machine-learning.html?pagewanted=all
18）http://www.nytimes.com/2011/05/11/science/11drive.html?_r=2&emc=eta1
19）http://www.w3.org/2007/OWL/wiki/OWL_Working_Group
20）http://cordis.europa.eu/fp7/ict/content-knowledge/projects_en.html
21）http://www.deri.ie/
22）http://lod2.eu/
23）http://www.caai.cn/
24）http://www.keenage.com/
25）http://spectrum.ieee.org/green-tech/mass-transit/chinas-research-sub-to-attempt-record-dive
26）http://www.peoplechina.com.cn/zhuanti/2010-04/21/content_265114.htm
27）http://www.ezconf.net/ijcai13/
28）http://bike.snu.ac.kr/
29）http://www.saltlux.com/jp/
30）http://www.robotis.com/xe/

3.6 データベース

データベース分野の重要研究領域のミクロ俯瞰図を文末に示す。横軸はデータベース研究の黎明期から今日に至るまでの年代を表しており、図の下部はコンピューティング環境およびデータモデルの変遷を、図の上部は各年代におけるデータベース関連研究課題を示している。

1980年代に至るまでは、企業の基幹業務などがコンピュータの主な用途であり、大量のデータ処理能力や高度な信頼性・可用性をもつ大型コンピュータであるメインフレームの利用が一般的であった。特に、1970年前後は基幹系の業務をいかに効率化するかが重要視され、そのためのデータモデルとして、階層型データベースおよびネットワーク型データベースが提案された。また、現在でも広く利用されている関係データベースのデータモデルが、1970年に当時米国IBM社に所属していたE.F. Codd博士によって提案され、その実装が急速に進んだのもこの時期である。この頃の研究開発課題としては、ストレージやインデクシング、問合せ最適化をはじめとして、「ユーザの要求されたデータをいかに高速にデータベースから検索してユーザに提供するか、ユーザが求めるデータをいかに容易に記述できるか」などに注力した内容が多く見受けられる。

1980年代になると関係データベースの研究開発も一段落し、その次のステップとして、関係データベースの構造的な硬さに柔軟性をもたらすためのオブジェクト指向データベース、また、関係データベースに推論機能を付加して知識化を目指す演繹データベース、さらには、それら両方の優れた機能を有する演繹・オブジェクト指向データベースなどに関する研究開発が活発に行われた。

1990年代に入ると、コンピュータの製造にかかるコストの低減およびネットワーク技術の発展に伴い、特定の役割を集中的に担うサーバーと利用者が操作するクライアントがネットワークで接続するクライアント・サーバー型のコンピュータ利用が一般化した。また、1990年代後半には、サーバーとクライアントの区別なくネットワークを構築するPeer-to-Peer（P2P）のアーキテクチャに基づくコンピュータ利用も普及し、さらにコンピュータの小型化や無線通信技術の発展などに伴って、いつでもどこでもコンピュータが利用可能なユビキタスコンピューティング環境が急速に広まっていった。

この頃になると、データの利用形態も多様化し、XMLデータベース、モバイルデータベース、データウェアハウスなど、利用形態に応じた様々なデータモデルが提案された。学術の世界においても、テキストマイニング、画像や音声の認識・検索など、マルチメディアデータを扱う様々な研究開発が推進された。

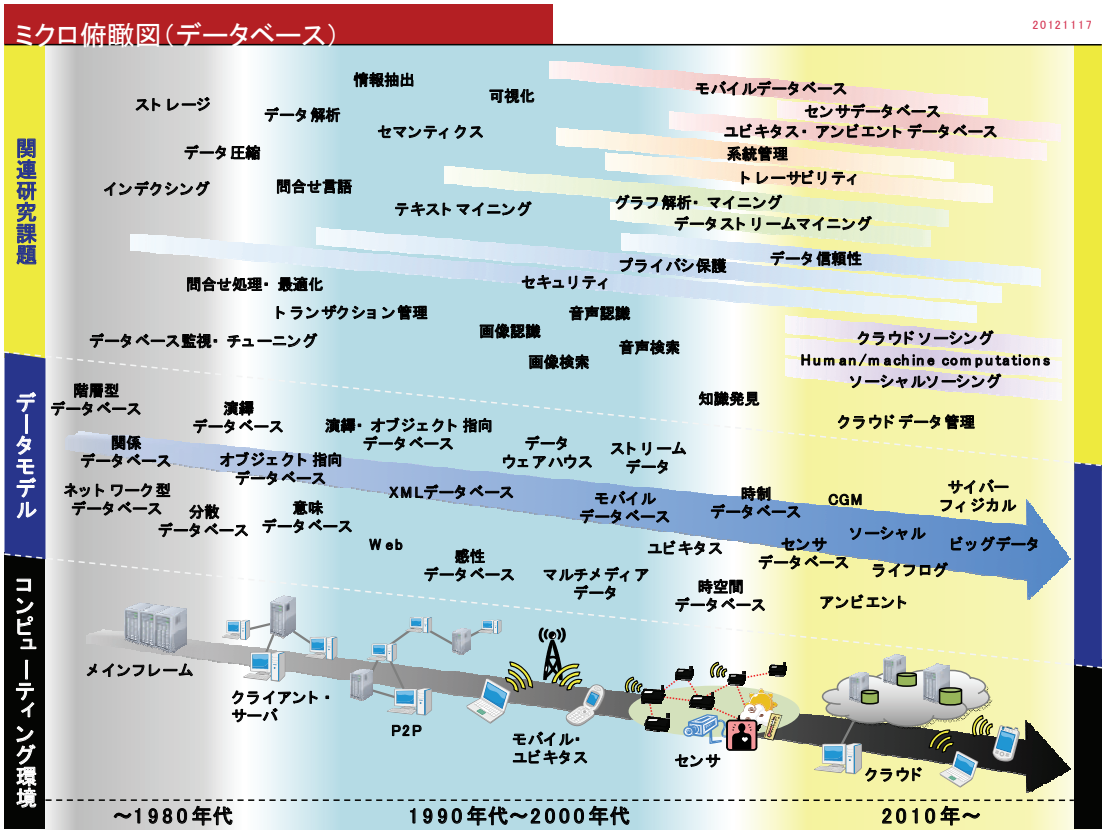
2000年代には、監視カメラや気象観測装置をはじめとする多様なセンサデバイスがネットワークに接続するようになった。これに伴い、これらセンサデバイスを発生源とするデータの利活用に対する期待が高まり、センサに特化したデータモデルが提案された。また、学術の世界においても、センサデータベースやデータストリームマイニング、あるいはセンサデータからの知識発見など、センサデータを利活用する研究開発が盛んに行われるようになった。

さらに近年では、ネットワーク越しに様々なサービスが提供されるクラウドコンピューティング環境が広く利用されるようになった。これにより、多様かつ大量のデータがクラウド上に蓄積されることとなり、現在ではビッグデータという言葉が一般的に用いられる

に至っている。また、人と人とのつながりや交流をインターネット上に投影したソーシャルネットワーキングサービスが数多く登場し、これらのつながり・交流も重要なデータとして扱われることとなった。このように、実世界と仮想世界の境界線があいまいとなりつつあり、これらを融合させるサイバーフィジカルシステムも近年注目を集めている。学術の世界でも、ソーシャルソーシング・クラウドソーシングなど、人々の活動をネットワーク上で行う研究が盛んに行われている。

このように、データベースの世界は、コンピューティング環境の発達・変化に密接に関係しながら大きな進展を遂げてきた。特に、データの利用形態が多様化した 1990 年代以降は、モバイルデータベース、センサデータベース、さらにはユビキタス、アンビエント情報環境におけるデータベースなど、利用形態に応じたデータベースに関する研究開発が活発に行われるようになった。また、データそのものの多様化に伴い、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も盛んに行われている。さらに、近年のクラウド化・ソーシャル化においては、クラウドソーシング、ソーシャルソーシングといった、実世界での人間活動を扱う研究が登場するに至っている。当然ながら、データの信頼性や安全性も重要な課題であり、セキュリティやプライバシー保護に関する研究開発は継続的に推進されており、データの信頼性という観点からは、データの系統管理、トレーサビリティの研究が近年活発に行われている。このような状況を背景に、本俯瞰区分では、データベース分野において現在特に重要と考えられる以下の五つの研究開発領域を取り上げ、領域ごとの現状と今後必要となる課題をまとめた。

(1) モバイル・センサデータベース
(2) トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術
(3) グラフ・ストリームマイニング
(4) データのセキュリティとプライバシー
(5) ソーシャル・クラウドソース


ミクロ俯瞰図（データベース）
20121117
関連研究課題
データモデル
コンピューティング環境
情報抽出
可視化
ストレージ
データ解析
セマンティクス
データ圧縮
インデクシング
問合せ言語
テキストマイニング
モバイルデータベース
センサデータベース
ユビキタス・アンビエントデータベース
系統管理
トレーサビリティ
グラフ解析・マイニング
データストリームマイニング
プライバシ保護
データ信頼性
問合せ処理・最適化
セキュリティ
トランザクション管理
音声認識
データベース監視・チューニング
画像認識
音声検索
画像検索
クラウドソーシング
Human/machine computations
ソーシャルソーシング
知識発見
クラウドデータ管理
階層型データベース
演繹データベース
演繹・オブジェクト指向データベース
関係データベース
オブジェクト指向データベース
データウェアハウス
ストリームデータ
ネットワーク型データベース
分散データベース
意味データベース
XMLデータベース
モバイルデータベース
時制データベース
CGM
サイバーフィジカル
Web
感性データベース
ユビキタス
センサデータベース
ソーシャル
ビッグデータ
マルチメディアデータ
ライフログ
時空間データベース
アンビエント
メインフレーム
クライアント・サーバ
P2P
モバイル・ユビキタス
センサ
クラウド
～1980年代
1990年代～2000年代
2010年～

3.6.1 モバイル・センサデータベース

（1）研究開発領域名

モバイル・センサデータベース

（2）研究開発領域の簡潔な説明

センサデバイスや携帯型（モバイル）端末が生成・所持する大量のデータを効率的に管理・再利用するためのデータベース技術の確立に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年、インターネットおよびIT機器の発展が目覚ましく、従来の据え置き（デスクトップ）型のコンピュータだけではなく、スマートフォンなど携帯電話を始めとするモバイル端末や気象センサ、監視カメラなどのセンサデバイスなどがインターネットに接続する「Internet of Things（IoT：もののインターネット）」の時代が到来している。さらに、モバイルユーザが現在位置の周辺の情報やサービスにアクセスする「地理情報システム」の注目が高まっており、GPSや各種センサからユーザの多様な状況を把握し、それを考慮したデータアクセスを提供する技術の確立が期待されている。このような流れに伴い、従来のWWWなどの電子文書を始めとするサイバースペース上のデータと、モバイル端末やセンサ端末が生成・所持するデータ、つまり現実社会（フィジカルスペース）に関連するデータを統合的に解析・利用し、社会に有益なサービスを展開する試みが盛んに行われている。特に、サービスおよびシステム的な側面からは「サイバーフィジカルシステム」、基盤技術的な側面からは「ビッグデータ」というキーワードで、様々な研究プロジェクトが推進され始めている。

このような背景のもとで、フィジカルスペースのデータを効率的に扱うための基盤技術としてモバイルデータベースやセンサデータベースの重要性が増している。モバイルデータベースは、モバイル端末を所持するユーザによって所持および生成されるデータから構成されるデータベースを指しており、複数のユーザが協調して作業する際の共有データや作業の状況を管理する情報、さらにはユーザの位置や移動軌跡などもその対象となる。特に最近では、スマートフォンをはじめとする携帯電話の普及により、一人が一台以上のモバイル端末を所有し、ネットワークにいつでもどこで接続するとともに、モバイル端末に搭載されたGPSや各種センサから大量かつ多様な位置・センサデータが生成される時代が到来している。さらに、モバイルデータベースでは、モバイル端末自体がネットワークを構成する要素となるため、端末の移動やネットワークからの離脱・接続に伴い、ネットワーク構成が動的に変化するという特徴がある。このような多種・大量のデータを、動的に変化するネットワーク上で効率的に管理する基盤技術の確立が急務となっている。さらに、モバイル端末以外にも防犯カメラや気象センサなど、多種多様なセンサデバイス・端末がインターネットに接続されており、これらを統合的かつ効率的に利用することも必要不可欠となっている。

そこで、モバイル環境やセンサネットワーク上のデータ管理に関する学術分野における研究開発は、従来の理論研究だけではなく、スマートフォンなどのモバイル端末が生成するデータの効率的な処理やプライバシー保護・セキュリティ技術、地理情報システムにおける問合せ処理技術・ユーザの移動解析技術、クラウド技術を活用した大規模データ解析

など、大規模システムや応用システムを意識した実用性の高い研究へと重点が移行している。

大規模なモバイルデータベースおよびセンサデータベースに関連する国外の研究開発の動向としては、米国政府が2012年3月29日に"ビッグデータ Research and Development Initiative"[1)] を発表するなど、ビッグデータに関する研究開発がNSF（National Science Foundation）などの支援で盛んに行われており、世界をリードしている。さらに、欧州においては、欧州委員会の第7次研究枠組計画（FP7）[2)] においてビッグデータに関する多数の研究プロジェクトが推進されている。中国では、2009年頃からIoTが非常に注目され、2009年にはセンサネットワーク標準化作業チームが発足するなど、国家戦略上の最重要テーマの一つとしてIoTの研究開発に力をいれている[3)]。また、韓国では国家政策として、2009年からユビキタスセンサネットワークを重要な課題と捉え、省電力を考慮したグリーンICT技術などに重点おき、研究開発を推進している[4)]。これら、各国の研究プロジェクトにおいて、モバイルデータベースおよびセンサデータベースに関連する技術は、重要な基盤技術として研究開発されている。一方、我が国の大規模プロジェクトとしては、文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究「情報爆発プロジェクト」（2005年度～2010年度）[5)] などがあるが、センサデータとサイバーデータのように多様性の高いデータの統合利用までは十分にカバーされていない。他の主要国と比較すると、モバイルデータベースおよびセンサデータベースに関する日本の研究開発は、規模および質の両方の観点から遅れをとっている感があり、その充実が急務となっている。

（4）科学技術的・政策的課題

- 世界的には、ビルの省電力化のためのセンサデータ管理および制御技術や、モバイル端末（ユーザ）の分布や移動状況を考慮したナビゲーション技術など、特定の応用を想定した研究開発が主流であり、汎用性の高い技術やプラットフォームの開発には至っていない。この問題が、モバイルデータベースやセンサデータベースを含むビッグデータなどの実応用が普及する上で障壁となる可能性が高い。
- 他の主要国と比較して、わが国では当該分野を含むIT分野の戦略的なファンディングが十分ではなく、大規模なプロジェクトを推進しにくい。
- 我が国では、モバイデータベースおよびセンサデータ管理の研究者の絶対数が他の主要国と比較して少なく、国際コミュニティのトップで活躍している研究者は非常に少ない。そのため、トップレベルの研究者の人材育成が急務と思われる。
- わが国では、センサネットワーク分野、モバイルコンピューティング分野、データベース・大規模データ解析分野などの研究者がそれぞれ独立に研究を行っており、分野横断的な研究開発の連携において課題がある。さらに各種センサデータやモバイルユーザのGPSデータなどの多種多様なデータが個々の事業者もしくは研究者で独立して管理されており、大規模な共有の体制が確立されていない。
- 我が国では、産業界で様々なセンサデバイスやモバイル機器の開発が行われており、技術的な優位性があるにも関わらず、産学の連携はそれほど盛んではなく、学術研究に生かし切れていない。

（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）

- Windows Phone や iPhone、アンドロイド端末など、GPS や各種センサを搭載した携帯電話の普及が目覚しく、それらセンサ群を利用してアプリケーションを開発するためのプラットフォームも急速に整備されている。
- 2006 年頃から、モバイル端末などを所持する一般のユーザがセンサ情報の収集に参加する Participatory Sensing[6] というコンセプトが注目されており、様々な研究プロジェクトや応用システムの開発が進められている。例えば、米国の Sense Networks 社では、2006 年から、携帯電話ユーザの位置情報を収集し解析することで人間の行動を定量的に理解することが可能な MacroSense technology platform[7] という技術基盤を確立しており、Participatory Sensing の応用として注目されている。
- 中国において、IoT の実現・規格化に向けたセンサネットワーク標準化チームが 2009 年に設立され、中国科学院や中国移動通信集団公司など多くの研究開発機構・企業が参画し、IoT およびセンサネットワークの規格化、応用に向けて活発に活動を行っている。その一環として、無錫市に感知中国センターが設置され、研究開発、産業化、人材育成など様々な観点からセンサネットワークの取り組みが行われている。
- IoT に関して、中国と欧州連合（EU）が連携して、国際標準化、産業化などを行う専門家グループが 2011 年に発足した[8]。
- 我が国の文部科学省において 2012 年度より、「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」として、実世界と IT との連携に関する委託研究が開始されている。

（6）キーワード

センサネットワーク、モバイルコンピューティング、もののインターネット（IoT）、スマートフォン、Participatory Sensing、地理情報システム、アンビエント環境

（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・公的機関における当該分野の研究者の数は十分ではなく、基礎研究は質・量ともに他の主要国に遅れをとっている。実際に当該分野の世界最高峰の国際会議、論文誌における日本からの論文公表数は非常に少ない。 ・分野横断的な連携を必要とする大規模な基礎研究連携プロジェクトの確立が急務である。
	応用研究・開発	△	→	・総務省のユビキタス特区の制度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プロトタイピングなどの応用研究は小規模ながら、ある程度活発に行われている。 ・主要国と比較すると、個々のプロジェクトが小規模である。そのため、学術研究としての十分な成果を達成したり、産業化に向けての大規模実証実験を行う上では規模が十分ではない。世界最高水準の成果を達成し、国際的な認知度を上げるためには、予算的・機能的に十分な支援が必須と思われる。
	産業化	○	→	・スマートフォンの端末や搭載センサ、アプリケーションなど、技術革新は目覚ましく、世界最高水準である。 ・世界的なシェアは大きくないが、日立製作所による Entier など、組み込み向けのデータベースソフトウェアの技術は世界最高水準である。さらに、複数の企業が、センサデバイス、データ検索技術、高性能無線チップ、アプリケーションの開発を進めており、その水準は高い。 ・企業間、企業と大学・公的機関の間で、情報や技術の共有、共同研究などが十分に行われていないため、企業の技術水準の高さというアドバンテージを学術的な研究開発に十分生かせていない。
米国	基礎研究	◎	↗	・米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高く、IT 関連のあらゆる研究分野において世界をリードしている。 ・ビッグデータを国の重要課題の一つと位置付けており、NSF や国防省の予算に支えられ、センサデータベースやモバイルデータベースの基礎研究も急速に進展している。 ・Participatory Sensing の概念を提唱し、大学・公的機関と企業による連携プロジェクトを多数推進している。
	応用研究・開発	◎	↗	・大規模数のセンサを街中や車両に設置した大規模なテストベッドを構築し、長期運用による実証実験を行うなど、様々な応用研究が実施されている。例えば、NSF による 2002 年から 2012 年の 10 年間の援助で UCLA に設立された CENS（Center of Enbedded Networked Sensing）では、複数機関の連携により、Participatory Sensing などに関する様々なプロトタイプシステムが構築された。 ・スマートフォンなど携帯電話からユーザの位置情報を収集し、Web などの他のデータも利用した異種情報統合技術に関する研究プロジェクトが盛んに実施されており、実サービスも多数開発されている。
	産業化	◎	↗	・Microsoft、Apple、IBM、Google など IT のトップ企業の多くが米国を主要拠点とし、研究開発を積極的に行っている。また、大学などとの連携も積極的に実施しており、研究開発された技術の多くが自社製品などに活用されている。 ・世界トップシェアのオラクルを中心に複数のデータベースベンダーを有しており、各社の製品にはモバイル向けのパッケージが含まれている。 ・応用研究などによって開発されたモバイルユーザの位置情報追跡・解析などの技術は、起業されたベンチャー企業によって製品化されているものも多い。

欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州連合では、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、ビッグデータ、センサ関連の研究開発も多数推進されている。その結果、当該分野における基礎研究のレベルは非常に高い。 ・グリーンIT、スマートシティ、アンビエント情報システムなどの研究に関して、世界をリードし、重要な研究成果を上げている。 ・ドイツ、イギリス、フランス、スイスなどをはじめとして、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た。
	応用研究・開発	◎	↗	・Framework Programme（FP）の枠組みで、社会システムを構築するためのプロジェクトを推奨しており、様々なプロトタイプシステムが構築されている。 ・スイスのEPFLにおける研究プロジェクトでは、大気汚染を監視するために、設置型のセンサだけではなく、バスなどの車両にもセンサを設置して大規模なデータを収集・解析するシステムを構築している。
	産業化	○	↗	・組み込みデータベースを始め、データベースの市場は米国の企業が主流となっており、データベース製品の技術力では米国などに遅れを取っている。 ・ノキアなどの携帯電話関連企業において、スマートフォンなどの携帯電話上のセンシング技術について研究開発・製品化が活発に進められている。 ・環境モニタリングや地理情報サービスを対象としたシステム開発を行うUbisenseという企業がイギリスに設立されている。
中国	基礎研究	◎	↗	・中国では、欧米に留学し学位を取得した優秀な留学生や大学教員が多数帰国し、国際共同研究を進めるなど、基礎研究の水準が急速に上昇し、世界最高レベルに近づいている。 ・IoTを最重要課題の一つと位置付け、国家戦略的に研究開発・産業化が推進され、この分野をリードする主要国の一つとなっている。それに伴い、当該分野の研究成果も急速に増えつつある。
	応用研究・開発	○	↗	・IoTの国家戦略的な推進により、研究成果の規格化・産業化が重視されており、様々な取り組みが行われつつある。 ・Microsoftやノキアなど、携帯電話やデータベースに関連する主要企業の研究所があり、基礎研究のみではなく、産学連携や国際連携よる実応用を意識した研究開発も積極的に行われている。
	産業化	△	↗	・研究成果の産業化にも力を入れているが、論文としての研究成果を重視する慣習も根強く残っており、産業化はいまだ発展段階と思われる。 ・IoTに関しては、無錫市に感知中国センターを始め、大規模な研究開発機関が設置され始めており、産業化に力を注いでいる。しかし、現状では明確に産業化された成果・事例は特に見当たらない。
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。 ・世界最高水準の論文誌や国際会議をターゲットにしている場合が多く、理論研究やプロトコルに関する研究に力を入れている場合が多い。
	応用研究・開発	△	↗	・他の主要国と比較すると、基礎研究により重点がおかれていると思われる。 ・ユビキタスセンサネットワークを重要課題と位置付け、政府の主導の下、様々な大規模プロトタイプシステムの開発が進められている。その一例として、仁川市には、u-City広報体験館が建設されている。 ・韓国の携帯電話通信業者と大学が開発した無線ネットワーク上の通信規格「WiBEEM」がISOの国際標準規格となるなど、センサネットワークやユビキタスネットワークに関連する標準化活動にも力を注いでいる。
	産業化	○	↗	・自国で開発されたデータベース製品も存在するが、国際的な認知度は高くなく、国内シェアもオラクルやMicrosoftに次ぐ3番目となっている。組み込み向けデータベース製品にもめぼしいものは見当たらない。 ・センサおよびモバイル関連では、サムスンを中心に高水準のモバイル端末、アプリケーションが開発されている。

（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）Big Data Research and Development Initiative.
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/big_data_press_release.pdf
2）欧州委員会 CORDIS FP7
http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
3）SciencePortal China, 中国、センサネットワーク標準化へ
http://www.spc.jst.go.jp/news/090903/topic_2_04.html
4）総務省平成23年版　情報通信白書（第3部、第8節：海外の動向）
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n4080000.pdf
5）情報爆発時代に向けたIT基盤技術の研究（科学研究費「特定領域研究」）
http://www.infoplosion.nii.ac.jp/info-plosion/
6）J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy, M. B. Srivastava. Participatory Sensing, Proceedings of International Workshop on World-Sensor-Web（WSW'2006）. 2006.
7）Sense Networks, MacroSense Technology Platform
http://www.sensenetworks.com/products/macro sense-technology-platform/
8）中国通信社 , 無錫に中国EU「物聯網」専門家グループ発足
http://www.china-news.co.jp/node/67799

3.6.2 トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術

（1）研究開発領域名

トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

データベース技術を用いたトレーサビリティ実現や、データの出所を管理しデータの質を保証するためのデータプロヴェナンスに関する研究開発、および、実世界に現れる不確実なデータを表現・活用するためのデータベース技術の研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

トレーサビリティは、サプライチェーンマネジメントや製品のライフサイクル管理などにおいては、すでに実用段階にある技術である。トレーサビリティを実現する上では、対象物に電子タグ（RFIDタグなど）を用いる方式が一般的である。RFIDタグに関しては非営利団体EPCglobal[1]による標準化が進められている。RFIDタグによるトレーサビリティの技術的課題についてまとめた文献もある[2]。なお、大量の電子タグを追跡するためには、ストリーム的に得られるデータを効率的に処理する技術（データストリーム処理）が求められる。米国を中心に2000年代初頭から研究開発が盛んとなり、今日では商用化も進んでいる。

物流以外の分野にトレーサビリティの概念を拡大する動きもある。例えば、医療事故を防ぐために医薬品・血液・医療廃棄物などの追跡を行うことや、医療行為の履歴を管理することなどはトレーサビリティの一種であるといえる。対象がより複雑であり、プライバシーなどの問題を含み課題は多いが、すでに国内でも実証実験が行われている[3]。

トレーサビリティの考え方をデータ管理に拡張したものとして、データプロヴェナンス（data provenance）[4, 5]がある。provenanceは「来歴」、「系譜」、「典拠」などと訳される。リネージ（lineage）もほぼ同じ意味で用いられる。これは、データベース中のデータがどこから来たかといった情報も含めて管理しようとする考え方であり、データの信頼性の向上を目指すものである。この分野については米国・欧州の取組みが先んじている。

e-サイエンスの分野でもデータプロヴェナンスが着目されている。科学における研究プロセスを情報システムにより管理し、後々の検証を可能とし再現性を高めるねらいがあり、情報科学の領域に閉じない広がりを見せている。特に実験・シミュレーションの行程を管理する科学ワークフロー（scientific workflow）にこの機能を盛り込む試みが見られる[6]。

関連して科学データのキュレーション（curation）がある[7]。例えば遺伝子データベースの個々のデータについては日々新たな知見が得られるため、キュレーターによりデータにアノテーション（annotation, 注釈）が付与される。アノテーションの管理も科学の信頼性の向上を目指すものであり、欧米において積極的な取組みが進んでいる。

次に不確実データ（uncertain data）のためのデータベース技術[8]について述べる。ウェブから抽出されるデータ、センサ機器からのデータ、科学分野のデータなど、必ずしも正確ではないデータを扱う必要性が背景となり、不確実データベースの開発が進んでいる。1980年代からファジィデータベースなどの研究があったが、2000年代に入りデータに確

率を付与する確率的データベース（probabilistic database）[9] の研究が盛んになった。情報科学分野における確率情報処理の技術が進んだことと、計算能力の向上による。問合せ結果のデータに付与された確率は、そのデータの信頼度と解釈できる。

さらに、確率的モデリング技術とデータベースを融合する試みも進んでいる。確率的知識を表現・抽出する手法は人工知能や機械学習の分野で急速に進展してきたが、その技術をデータベースシステムの中に取り込み、データベースシステムを一種の推論エンジンとして用いることを指向している。別の流れとして、確率モデルに基づくシミュレーション技術とデータベース技術を融合しようというアプローチも存在する。データベース分野の知識のみならず確率的モデリングの深い知識も必要となるため、米国を中心として限られた最先端の研究グループが中心に推進しているというのが現状である。

（4）科学技術的・政策的課題

- トレーサビリティのサービス開発に関しては、日本ではもともと流通の品質が高く、電子タグの貼付けやシステム導入のコストを上回る便益を得ることが鍵となっている。
- 医療におけるトレーサビリティは、医療現場における負担軽減、コスト削減、安全性の向上などに有効と期待されている。しかし、高度な個人情報が扱われるため、プライバシーの保護機構を含めたシステム構築が必要であり、大きな技術的課題となっている。
- 電子タグを用いたトレーサビリティの実現は、分散環境におけるイベント処理との技術的関連が深い。近年、イベント処理を中心とした情報処理アーキテクチャである複合イベント処理（CEP: complex event processing）[10] が研究・実用の双方で着目されているが、トレーサビリティにおけるCEP技術との連携は今後重要となる。
- データプロヴェナンスに関しては、e-サイエンスの分野における取組みが今後ますます重要になる。複雑化・大規模化が進む科学のプロセスを検証・再現可能にするには当該分野の研究者とデータベース分野の研究者が連携して技術開発を行う必要がある。未だ日本では研究分野間の交流が少ないのが現状であり、政策面での支援も必要である。
- ビッグデータの時代を受け、膨大かつ複雑でノイズを含むデータをどう扱うかがたいへん重要な課題となっている。そのため、不確実データベース技術の開発は今後ますます重要になっていくと考えられる。現時点では理論的立場からの研究が主体であるが、より実応用に向けた展開が求められる。
- 不確実データは、不確実データを生み出す根源ともなるセンサ情報処理やウェブなどからの情報抽出とも関連が深い。各対象ドメインの特徴を取り込んだ形での技術開発も必要である。特にセンサ関係については、米国において先端的な取り組みが見られる。
- 確率的データベースに関しては、ビッグデータに基づく大規模推論エンジンの構築という観点から、大いに将来性がある分野である。しかし、データベースのみならず確率・統計や学習理論などに関する深い知識が必要となるため、分野間の緊密な連携が必要とされており、何らかの施策が求められる。

（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）

- 米国スタンフォード大学 InfoLab[11] は、データベース分野におけるデータプロヴェナンスの研究では先駆的であり、Trio や Panda と呼ばれるプロジェクトを実施している。
- 科学分野におけるデータプロヴェナンスに関しては、米国ペンシルベニア大学（科学ワークフロー）[12] や英国エジンバラ大学（アノテーション）[13] が有名である。
- 米国ではテキサス大学などからなるグループが、サイバーセキュリティにおけるデータプロヴェナンスについて、NSF より 5 年間 300 万ドルの予算を獲得している[14]。このように、セキュリティ分野におけるデータの信頼性にもデータプロヴェナンスは関連する。
- 確率的データベースに関しては、米国のワシントン大学[15]、メリーランド大学[16]、ウィスコンシン大学[17] が有力である。ウィスコンシン大学の Hazy プロジェクト[17] では、機械学習技術と連携した大規模データ分析（data analytics）を目指しており注目に値する。
- 米国の IBM の Splash プロジェクト[18] では、統計モデルとサンプリング技術を駆使して、データベースを一種のシミュレーションエンジンとして用い、what-if 問合せ（未来を予測する問合せ）の実現を図っている。ヘルスケアを対象として、実データをもとに予測に基づくアドバイスを大規模スケールで行う応用が想定されている。

（6）キーワード

トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データ、確率的データベース

（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	○	→	・トレーサビリティ実現のための基盤技術となるデータストリーム処理については、筑波大やNTTなどでの継続的な技術開発が存在する。 ・科学分野におけるデータプロヴェナンスに関しては、京都大学でのアノテーションに関する研究が見られる[19]が、国内では盛んといえる状況ではない。学際的領域であることから、異分野連携の施策が求められる。 ・確率的データベースに関しては、データベースと機械学習の研究分野の連携が求められている。両分野に精通した研究者の育成が急務である。
	応用研究・開発	○	↗	・医療分野におけるトレーサビリティに関しては実証実験も行われている[3]。産業レベルにもっていくには、技術開発のみならず、法律の整備なども必要である。 ・トレーサビリティの実現に関連の深い複合イベント処理（CEP）については、産業界からも注目されており、今後急速に応用研究・開発が進むと期待できる。
	産業化	○	↗	・高いデバイス技術があることや、物流システムが高いレベルで実現されており、電子タグを用いたトレーサビリティ技術は高いレベルにある。また、食品などの質に対する意識が高いことも、質の高さに大いに貢献している。 ・データストリームの処理については、国内でも産業化が進んでおり[20]、米国に追従する形で発展を続けている。
米国	基礎研究	◎	↗	・データプロヴェナンスに関するデータベース技術については、スタンフォード大学などで先駆的研究が実施されるなど[11]、米国が圧倒的な成果を上げている。 ・科学ワークフローにおけるデータプロヴァナンスに関しては、ペンシルベニア大学[17]が、高い成果を生み出している。 ・不確実データや確率的データベースに関する基礎技術に関しては、米国が大きく先行しており、いくつかの拠点がある。 ・ワシントン大学のRFID Ecosystemプロジェクトでは、RFIDによる環境モニタリングと確率的データベース技術を連携したプロジェクトを実施している[21]。
	応用研究・開発	◎	↗	・科学ワークフローについては、実際にシミュレーションや実験を行う研究グループによる実装が進んでおり、データプロヴェナンスの機能を有するプロトタイプも開発されている[6]。特に、VisTrailsシステム[22]は良く知られている。 ・IBMのSplash[18]は大規模シミュレーション技術とデータベース技術を統合し推論エンジンを開発しようとするプロジェクトだが、他に類を見ないものである。
	産業化	○	↗	・産業という観点から見ると、トレーサビリティに関連する複合イベント処理（CEP）はインパクトの大きい技術である。オラクル[23]をはじめ、各種ベンダーにおいて、CEPの機能を取り込んだ商品が続々と現れている。 ・データプロヴェナンスは、データベースやセキュリティなどの分野における信頼性向上の手段として産業に貢献すると考えられるが、技術開発の余地は多い。

欧州	基礎研究	○	↗	・英国エジンバラ大学[13]では、科学分野、特にバイオインフォマティクスにおけるキュレーションおよびデータプロヴァナンス技術について先駆的な研究を行っている。この領域においては世界的な拠点となっている。 ・不確実データ・確率的データベースに関しては、英国オックスフォード大学においてもプロトタイプ開発などの取組みがある[24]。
	応用研究・開発	○	↗	・ウェブ関連の技術の標準化団体であるW3Cでは、セマンティックウェブ技術を用いてウェブ上の資源を記述し関連づける仕組みについて規格の議論を行っている[25]。ウェブ資源の情報の出所をどのように記載するかが一つの課題となっており、そのためのデータプロヴェナンスに関する記述モデルの議論・提案がなされている。W3Cは国際的な団体であるが、セマンティックウェブは欧州に研究者が多く、欧州から多くのメンバーが議論に参加している。 ・英国サザンプトン大学のLuc Moreauが中心となり、データプロヴェナンスの標準モデルOpen Provenance Model（OPM）[26]の構築を行っている。
	産業化	○	↗	・データストリーム処理や複合イベント処理などについては、日本と同様、米国に追従する形で産業化が進んでいる。
中国 韓国	基礎研究	△	↗	・トレーサビリティ技術に関しては、韓国ではある程度研究が見られる。 ・在米の中国・韓国の研究者と連携して、データプロヴェナンスに関する研究を行っている事例はあるが、おおむね低調である。 ・不確実データに関しては、アルゴリズムの開発など、比較的取り組みやすい領域については研究が見られる。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果や大規模プロジェクトは特に見当たらない。
	産業化	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果や大規模プロジェクトは特に見当たらない。

（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）EPCglobal. http://www.epcglobalinc.org/
2）Yanbo Wu et al. RFID Enabled Traceability Networks: A Survey. Distributed and Parallel Databases. 2011, 29（5–6）, 397–443.
3）秋山昌範（研究代表者）。科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進 補完的課題 事後評価「医療分野における電子タグ利活用実証実験」、2007年。
http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-strategy/index.htm
4）Wang-Chiew Tan. Provenance in Databases: Past, Current, and Future. IEEE Data Engineering Bulletin, 2007, 30（4）, 3–12.
5）Yogesh L. Simmhan et al. A Survey of Data Provenance Techniques. Technical Report, TR618, Computer Science Department, Indiana University, 2005.
6）B. Ludaescher and C. Goble（eds.）Special Issue on Scientific Workflows. ACM SIGMOD Record, 2005, 34（3）, 3–62.
7）Peter Buneman et al. Curated Databases. Proceedings of ACM Principles of Database Systems（PODS 2008）, 2008, 1– 12.
8）Charu C. Aggarwal（ed.）Managing and Mining Uncertain Data. Springer, 2009.

9）Nilesh Dalvi et al. Probabilistic Databases: Diamonds in the Dirt. Communications of ACM, 2009, 52（7）, 86–94.
10）Complex event processing http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_event_processing
11）Stanford InfoLab: Projects http://infolab.stanford.edu/db_pages/projects.html
12）Susan Davidson Homepage. http://www.cis.upenn.edu/~susan/
13）University of Edinburgh DB Group http://www.lfcs.inf.ed.ac.uk/research/database
14）ProvSec（Provenance Security）http://www.provsec.org/
15）Dan Suciu Homepage. http://www.cs.washington.edu/homes/suciu/
16）Managing and Querying Large-scale Uncertain Databases（Maryland University）. http://www.cs.umd.edu/~amol/PrDB/
17）Hazy Project Homepage. http://hazy.cs.wisc.edu/hazy/
18）Splash. http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_project.php?id=3931
19）高橋慧ほか。地球観測データ統合解析のためのデータ系譜とアノテーションのモデル化。情報処理学会研究報告「データベースシステム」、2008, 2008（88）, 25–30.
20）日立 クラウドサービスプラットホーム Cosminexus: uCosminexus Stream Data Platform. http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/soft1/cosminexus/sdp/
21）The RFID Ecosystem. http://rfid.cs.washington.edu/
22）VisTrails. http://www.vistrails.org/index.php
23）Oracle Complex Event Processing. http://www.oracle.com/technetwork/jp/middleware/complex-event-processing/overview/
24）SPROUT Project（Oxford University）http://www.cs.ox.ac.uk/projects/SPROUT/
25）First Draft of a Provenance Data Model Published. W3C, October 2011. http://www.w3.org/blog/SW/2011/10/18/first-draft-of-a-provenance-data-model-published/
26）The OPM Provenance Model. http://openprovenance.org/

3.6.3 グラフ・ストリームマイニング

（1）研究開発領域名

グラフ・ストリームマイニング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

グラフ構造としてモデル化可能なデータや、センサデータのように時系列的に連続的に取得されるストリームを分析し、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

グラフマイニング

グラフは、ノードとエッジを用いて対象オブジェクトの間に存在する関連を自由に記述可能なことから、広範な応用に利用されている。例えば、コンピュータネットワークはコンピュータをノード、コンピュータ間の接続関係をエッジで表現することによって、グラフとして自然に表現することができる。また、WWWにおけるページ間のリンク構造（Webグラフ）や、分子生物学においてタンパク質間の相互作用（代謝ネットワーク）、タンパク質の立体構造などの記述にグラフが用いられる。近年特に注目を集めているのは、ソーシャルネットワークにおける参加者同士、あるいは参加者と組織の関係を表現したソーシャルグラフである。

グラフとして記述された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種々の処理が行なわれる。単純なグラフパターンの探索をはじめ、2ノード間の到達可能判定、直径やモジュラリティなど様々な指標の計算といった処理などは代表的なものである。さらに、グラフ中のノードの重要度を計算する（PageRankやHITSなどに代表される）ランキング処理、頻出部分グラフ探索、グラフ要約、グラフ分類など、その内容は多岐にわたる。

グラフマイニングの重要なポイントの一つは、基本的に多大なコンピュータ資源と処理コストを要するという点である。これは主に、グラフの記述能力と構造的な自由度の高さに起因する。処理の過程において考慮すべき組合せが爆発的に増加してしまうため、膨大なメモリ空間コストと計算コストが必要となる。このため、組合せが爆発を起こさないようなアルゴリズム上の工夫や近似計算が鍵となる。

この理由から、これまでは大規模なグラフに対する処理は現実的ではなかった。しかし、近年のコンピュータの高速化および大容量化、ならびに超並列コンピュータの出現により、これまでは不可能であった超大規模グラフに対する処理やマイニングが可能となった。例えば、GoogleではMapReduceと呼ばれる分散処理フレームワークによって、Webスケールの超大規模グラフに対して現実的な時間での処理を可能にしている。

データベースやマイニングの分野では、グラフ処理は過去10年程で最もホットなトピックの一つである。これは、コンピュータの高性能化によって大規模データ処理が現実的となってきたことと、WWWやソーシャルネットワークの普及により、グラフマイニングが現実のニーズをもつようになったことが大きな要因である。今後も基礎研究が各国で活発に進められることが予想される。

国際比較については、基礎研究、応用研究とも米国が世界をリードしている。基礎的なアルゴリズムの開発に加えて、研究用プロトタイプシステムの実装、商用システムの

開発などが活発である。日本においても、学術研究においてJST CREST「ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤」において予算が投じられており、国際コンペティション「The Graph 500」ランクにて世界3位と4位を取得するなど、一定のレベルを維持している。（「HPCI資源提供機関を利用した日本チームがスパコンの世界ランキング『The Graph 500』にて世界3位と4位！」http://www.gsic.titech. ac.jp/node/570）また、中国、韓国では、欧米で実績をあげた研究者が多数帰国して、トップクラスの国際会議や学術雑誌などにおいて多数の論文を発表しており、その研究水準は極めて高い。

ストリームマイニング

ストリームとは、情報源から時間的に連続的に送信されるデータである。ネットワークの普及に伴い、様々な情報がリアルタイムで取得可能になった。例えば、ネットワーク監視、株価の取引データ、環境モニタリング、プラント監視などが主要な例である。

ストリームデータに対する従来型の処理ではこれらをいったん二次記憶上に格納した上で分析していたが、これでは結果を得るまでに時間を要するだけでなく、データを格納するためのコストが必要となる。これに対し、ストリーム処理では、データを二次記憶に蓄積することなく、主記憶上でオンライン処理を行なう。これにより、到着レートの極めて高いデータに対しても処理が可能となる。

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、主に米国主導でこれまで開発されてきた。STREAM（スタンフォード大学）、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トタイプから、InfoSphere Streams（IBM）、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uConsminexus Stream Data Platform（日立）やM2Mソリューション CONNEXIVE（NEC）がある。

ストリームマイニングは、問合せ処理をさらに一歩進めて、連続的に到着するストリームデータから効率的にマイニングを行う技術である。分析対象ストリームデータとしては、マイクロブログ（Twitter）、Webコンテンツ、金融データ、RFID、ネットワークパケット、セキュリティなど多岐にわたる。基本的なアルゴリズムにはインクリメンタル計算（中間結果を保持しておき、それを用いることで遅延を削減）やサンプリングに基づく学習（オンライン学習）などがあげられる。インクリメンタル計算についての研究には、DTW距離計算、スカイライン計算、ハウスドルフ距離計算などがあげられる。オンライン学習についてはクラスタリング・分類について幅広く研究が行われている。

有力国際会議[2)～9)]の2010年から2012年に関する研究報告についての各地域からの発表数は次の通りである。北米：67、アジア（日本を除く）：26、ヨーロッパ：23、オセアニア：9、中東：5、日本：5。日本からは異常検出、オンライン学習、DTW距離計算などに関する研究成果がある。

（4）科学技術的・政策的課題

グラフマイニング

- グラフについては、データの不確定性を考慮した確率的なグラフ処理の研究が進んでいる。現在は基礎研究が主であるが、今後は実応用への適用が期待されている。

・ソーシャル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。また、個人情報を含むデータの利用を促進するための法整備が期待される。

ストリームマイニング

・ストリームデータは種類・量ともに増大の一途を辿っている。特に、我が国が自動車などの組込・制御機器分野で強みがある点を鑑みれば、センサデータなどのストリームデータの分析基盤は重要課題である。しかし、我が国からの研究発表は調査対象会議[6)～13)]において5件しか見当たらなかった。重要だが未開拓である当該分野への投資は適切だと考えられる。
・我が国においては、基礎研究、要素技術開発、応用開発が個別に進められている感がある。基礎研究に立脚した産業展開の視点からは、コミュニティ形成など、これらの活動の連携を促進する取組みが重要だと考えられる。

（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）

・米ホワイトハウス科学技術政策局（OSTP）のビッグデータResearch and Development Initiativeでは2億ドルが投じられている。
・マサチューセッツ工科大学のコンピュータ科学・人工知能研究所（CSAIL）において「ビッグデータ@CSAIL」というプロジェクトが開始した。これに関連してIntel科学技術センター（ISTC）がCSAILに開設された。ISTCは毎年250万ドル（最長5年間）の研究費を受ける予定である。
・大規模データを扱う会議としてXLDB, XLDB-Europe, XLDB-Asiaが開催されている。

グラフマイニング

・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、グラフマイニング処理を応用した知識発見が期待されている。
・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。
・日本発の大規模データ分析基盤技術であるJubatusがオープンソースソフトウェアとして公開された。分析対象としてグラフデータも含まれており、世界的に注目されている。

ストリームマイニング

・IBM社は1億ドルを大規模データ解析に投じるという報道がされた。これにはストリームデータ処理も含まれる。
・EUは400万ユーロをStreamCloudプロジェクト（2011年4月終了）に投下した。
・欧米をはじめとして、センサネットワークやプローブカーを利用した都市交通のリアルタイムモニタリングを活用した交通制御に関する実験が行われている。

（6）キーワード

データマイニング、知識発見、グラフ、ストリーム、機械学習、ソーシャルネットワーク、オンライン学習、インクリメンタル計算

（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、国際的な研究の盛り上がりに比べると、広がりや深さが十分とはいえない。 ・グラフマイニングについては、特にソーシャルグラフに対する応用的なマイニング研究は増加しており、一定の水準に達しつつあると考えられる。 ・ストリームマイニングについては、有力国際会議[6)～13)]における過去3年間で5件程度発表が見られるが件数は少ない。オンライン学習に関する発表が主である。
	応用研究・開発	△	→	・マイニング全般に関しては、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、一定の進展が認められる。 ・しかし、オンライン学習についてはGoogleなどの米国企業が強味を有するため、応用研究について日本がいかに伍していくか早急な検討が必要である。
	産業化	△	→	・機械学習を核としたベンチャー企業（PFIなど）が現れつつある。 ・ストリームマイニングに関しては、KDDI研究所、NTT研究所などで研究が行われている。また、日立uCosminexus Stream Data Platformなど、主要ITベンダーやベンチャーなどでストリーム処理を対象としたシステムが開発、販売されている。ただし、米国などに比べて、大学における基礎研究との関連は薄い。
北米	基礎研究	◎	↗	・グラフマイニングについては、米国の大学、公的研究機関における基礎研究のレベルは極めて高く、ほぼすべての分野において世界をリードする高い水準の研究が行われている。 ・ストリームマイニングについても、米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高い。有力国際会議[6)～13)]における発表件数67件で最大である。
	応用研究・開発	◎	↗	・Google, Facebook, Twitter、AT&Tなどの企業において、各社のために有用なマイニング技術が研究開発されている。また、PBGLなど大学からも実用的ツールが提供されている。
	産業化	◎	↗	・グラフマイニングについては、GoogleやYahoo!などを中心に、グラフマイニングプラットフォームが開発されている。また、よく知られたグラフデータベースNeo4jは米国発である。 ・ストリームマイニングについては、Google、Facebook、Twitter、AT&Tなどの企業において、各社のために有用なストリームマイニング技術が開発されている。
欧州	基礎研究	○	↗	・グラフデータモデル、知識ベース、RDFなどの研究が盛んに行われており、グラフマイニングと関連付けた高い水準の研究が数多く行われている。 ・ストリームマイニングについては、StreamCloudプロジェクト[5)]などにより研究が活発に行われた。有力国際会議[6)～13)]における発表件数23件で北米・アジアに次ぐ数であった。
	応用研究・開発	○	↗	・グラフデータベースとしては、研究プロトタイプとしてRDF3Xなどがあり、高く評価されている。 ・ストリームマイニングについては、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	△	→	・グラフマイニング、ストリームマイニングのいずれにおいても、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。

アジア	基礎研究	○	↗	・ストリームマイニングについては、有力国際会議[6)～13)]における発表件数は米国に次ぐ26件であった。内訳は中国（13）、シンガポール（6）、香港（2）、台湾（2）、インド（2）、タイ（1）であり、中国の台頭が目立つ。 ・グラフマイニングについても、香港や韓国などで質の高い研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	・グラフマイニングについては、大学発のプロトタイプとして、iGraphがあるが、理論的研究が中心であり、リサーチプロトタイプで公開されているシステムはあまり例がない。MSRAでは、大規模グラフデータベースとしてTrinityを研究開発している。 ・ストリームマイニングについては、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	△	→	・グラフ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）Charu C.Aggarwal and Haixun Wang（Eds.）, "Managing and Mining Graph Data," Series: Advances in Database Systems, Vol. 40, 2010.
2）X. Yan and K. Borgwardt, "Graph Mining and Graph Kernels," KDD2008 Tutorial, 2008.
3）Christos Faloutsos, Gary L. Miller and Charalampos E. Tsourakakis, "Large Graph-Mining: Power Tools and a Practitioner's Guide," KDD2009 Tutorial, 2009.
4）Bin Gao, Taifeng Wang, and Tie-Yan Liu, "Large-Scale Graph Mining and Learning for Information Retrieval," SIGIR2012 Tutorial, 2012.1.
5）StreamCloud: http://www.streamproject.eu/
ICML: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/icml/
7）VLDB: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/vldb/
8）SIGMOD: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/sigmod/
9）SIGKDD: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/kdd/
10）ECML: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/ecml/
11）PAKDD: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/pakdd/
12）ICDE: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/icde
13）ICDM: http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/icdm

3.6.4　データのセキュリティとプライバシー

（1）研究開発領域名

データのセキュリティとプライバシー

（2）研究開発領域の簡潔な説明

データに求められる様々な安全性を確保するための技術の研究開発

（3）領域の詳細な説明と国内外の動向

データの安全性に求められる要件は、データが他人に漏れないこと（機密性/confidentiality）、データが元のままであること（完全性/integrity）、データが必要なときに使えること（可用性/availability）である。本領域では、さらにデータベースが管理すべき対象に個人情報やウェブ情報が重要になっていることを考慮に入れ、データのプライバシーが保たれること（プライバシー/privacy）、データが信頼できること（信頼性/credibility）の要件を加えて考察する。

データの安全性の確保は、従来サーバーやデータベースへのアクセス制限といったシステムレベルの技術で検討されてきた。しかし、クラウドコンピューティングなどの新しい環境下では、状況に応じて確実に安全性を制御できる情報処理が求められており、暗号などのセキュリティ技術の重要性が改めて認識されている。特定のシステム機構に依存しないポータブルで安全なデータ処理を実現する技術の研究開発が必要である。

データの安全性確保の一般的な手法

データの機密性を守る初歩的なモデルはストレージやデータベースを暗号化することである。このモデルではシステム管理者が鍵を使って暗号化を行い、操作のたびにデータの復号を行う。用いられる暗号は共通鍵暗号が一般的である。商用のデータベースでも実装が行われており、オーバーヘッドはストレージ、パフォーマンスともに無視できる大きさのものがある。ただしこのモデルではデータの盗難時の不正な利用を防ぐことができるが、データをデータベースから持ち出して使うことはできない、データをデータベース（システム／管理者）から秘匿することはできないなどの制限がある。

安全性を確保する要素技術の研究動向

まず初めにポータブルで安全なデータ処理を行うための要素技術研究の動向をまとめる。データの機密性を守るための要素技術の研究動向に、データ処理が可能な暗号技術がある。この技術は保存されたデータの機密性を守るだけでなく、演算・検索・アクセス制御といったデータ操作に対しても機密性を保持可能にする。

準同型暗号はデータ演算を可能にする暗号である。ある種の暗号には準同型性という性質があり、データを暗号化したままの乗法または加法演算が可能である。この性質により、データを他者（例えばクラウドに）委託したとき、委託者は受託者にデータを秘匿したまま演算をさせることができる。本暗号は公開鍵系の暗号がベースである。これまでも電子現金や電子選挙などの応用がある。処理速度や安全性といった技術的課題があるが、ドメインを限定することによりその解消が可能になってきている。より一般的な構成法、システム化の研究が課題となる。

検索可能暗号はデータを（データベースに）秘匿したままのデータ検索を提供するもので、暗号化されたデータに対して、検索者がクエリ（検索語）を秘匿してデータベースに送り、ヒットしたデータの暗号文が返される。本暗号は共通鍵暗号もしくは公開鍵暗号で実現できる。前者はパフォーマンスに優れる一方モデルの自由度に制限があり、後者はその逆である。

公開鍵暗号の発展系である関数型暗号は、データへのアクセス制御を初めとしたデータの利便性をポータブルに向上させることができる暗号である。検索可能暗号は文字列の等価判定を可能にしたが、関数型暗号を用いると、多様な判定関数（属性と論理式）で判定できるようになり、データにアクセス制限を適切に設定することができる。課題は処理速度である。

データの機密性と可用性を同時に担保する方式が秘密分散である。秘密分散はあるデータをn個のシェアと呼ばれる情報に分割し、n台のサーバーに分配する。任意のk個のシェアが集まると元の秘密が復元できるが、k-1個以下ではデータの情報が漏れないことを情報理論的（または計算量的）に保証する。上記から、1台のサーバーからデータの盗難があっても、そのデータからは元の情報が漏れず機密性が確保でき、またすべてのシェアがそろわなくても、元のデータが復元できるため可用性が確保できる。本技術は現在商用製品が出始めている。方式によって達成できる安全性や可用性が違うため、利用の際には適切なものを選択する必要がある。秘密分散は前記の準同型性をもつものがあり、秘匿演算の要素技術としても使われる。

データの完全性は電子署名を用いて確保することができ、各種の実装がある。演算の完全性を確保する準同型署名の研究も行われている。また、近年研究が進んでいる技術に自己訂正技術があり、これは他のコンピュータに要求した演算の結果に誤りや、偽装があっても、正しい演算結果だけを抽出して正常な処理を行うことができる。これらの技術を暗号と組み合わせることで機密性と完全性を同時に満たすこともできる。

安全性を確保するシステム技術の研究動向

ここまで説明した各種要素技術を使って、安全なシステムの構築技術の研究が行われている。一つの大きな流れは、暗号による完全準同型性の実現である。整数に対する加法と乗法の準同型性が実現できれば、それらから論理回路が構成でき、一般的な秘匿コンピュータの実現が可能になる。これを秘密計算と呼ぶ。マルチパーティー計算は複数のコンピュータが互いに乗法を秘匿しながら、強調して計算を行うモデルで、例えば、加法の準同型性を基に、乗法の準同型性をマルチパーティー全体として可能にする。マルチパーティーベースの秘密計算にNTTと白血病の研究グループによる実用レベルの統計計算の実証報告がある。さらに、2009年には単体で完全準同型を実現する暗号が発表されている。完全準同型暗号では1台のコンピュータで秘密計算が原理的に可能になる。ただし、この方式は現在では現実的な計算時間で処理することはできない。秘密計算は一般に処理速度やスケーラビリティが課題である。また、同様の機能を実現するために既存の暗号を組み合わせてデータベースのSQL相当の機能を実現した報告がある。この提案はパフォーマンスのオーバーヘッドは少ないため、安全性の検証が期待される。

データのプライバシーを保護する研究動向

データのプライバシーの保護は、データの機密性に関するゼロイチの議論と異なり、プライバシーに関与する登場人物を整理して誰に対してプライバシーを保護するのかを整理して考える必要がある。データを他者データベースに渡す局面でのプライバシーをデータベースへのインプットプライバシー、データベースでのデータ処理の局面でのプライバシーをマイニングプライバシー、データベースからマイニングや統計結果として出力するデータのプライバシーをアウトプットプライバシーと呼ぶ。

インプットプライバシーを保護する代表的な手法は匿名化である。匿名化とは一般に個人情報のリストに対するデータ変形操作で、データを見られても、個人特定を困難にする方法である。最もナイーブな方法はデータから個人が識別できる属性（氏名や住所）を取り除く、あるいは一般化／あいまい化することである。さらに匿名度の安全性の指標も数多く提案されており、k- 匿名性が代表的なものである。k- 匿名性は、匿名性の評価指標で、（個人識別情報を削除した上で）、保護したい属性の組み合わせが、そのデータ中ではk 人未満にならないような状態を作ることである。k 値が大きいほうがプライバシーに関して安全であるが、逆に分析用のデータとしての有用性はトレードオフ的に低下する。匿名化処理は、公開用／開示用のデータ作成のために実用化されており、匿名化状態を効率よく作成するためのソフトウェアも実装されている。匿名化の課題は保護する属性数が多い場合、データの一般化が過剰に進んでしまい、有用性が低下するという性質がある。なお、k- 匿名化を確率的に行う手法もあり（pk- 匿名化）、これは保護したい属性にランダムなノイズを乗せる方法である。この方法の場合、k- 匿名化で有用性が低下するようなスパースなデータに対しても、同じ匿名性で比較的有用性を保ったデータを作成できる報告がある。pk- 匿名化を行ったデータは、再構築という方法でデータを元の分布に近い状態に戻して統計値を求めることができる。

マイニングプライバシーを保護するためには、データをデータベース管理者に秘匿する必要があるため、暗号化が前提となる。データを暗号化したままマイニングを行う技術は、前述の秘密計算である。

アウトプットプライバシー、すなわち個人情報が蓄積されたデータベースに問い合わせを行って得た統計量から、プライバシーの侵害が起こる可能性を考える（例えば、ある属性に対する統計量が結果的に一人の個人のみにしか対応しない場合）。このような状況を回避する技術が、伝統的に統計分野で検討されてきており、実業務で使われている。n-k 占有ルールは、集計表の特定のセルの合計 k% 以上を最上位の n 個の個体の和が占める場合は、そのセルに対応する統計値を開示しないということを行う。また、分析システムの答えから個人の影響を排除する手法が研究されている。これは差分プライバシーと呼ばれ、答えである統計値を加工する。この手法はある統計値と、その統計値に対応する個体から1個体を除いた統計値の変化の幅の最大値に相当するノイズをレスポンスである統計値に乗せる方法である。

データの信頼性を確保する研究動向

データの信頼性は、情報セキュリティにおいては「意図した動作及び結果に一致する特性」（reliability）と定義されている。これは先述の可用性や完全性から構成される概念である。

さらにデータがネットワークを通して、自由に流通共有される状況においては、データの信憑性（credibility）といった概念の導入が必要になる。信憑性とは信用（trustworthness）と専門性（expertise）から構成されるとされている。この分野の研究動向は、例えばGoogleが採用している社会的支持に基づくランキングアルゴリズムPageRankが有名であり、日本でも総務省の委託研究「電気通信サービスにおける情報信憑性検証技術に関する研究開発」などで基礎的な技術が検討されてきている。しかし、情報の信頼性を分析するための具体的な工学的システムやアルゴリズムの研究はこれら一部の先行研究を除いて、未だほとんど行われておらず、ウェブのデータの信頼を判断する機械的手段、およびそれを確認する手段が必要である。

海外の状況

海外の具体的な技術開発の状況は上記の通りである。ここでは技術政策について述べる。暗号は基本的には標準化（米国立標準技術研究所（NIST）やISO/IEC JTC1で行われる）を軸に研究開発が営まれている。欧米では暗号研究は大学が中心であり、日本では企業が中心であるという特徴がある。なお、暗号技術は国防とかかわる部分があり、その部分に関しての動向の把握は困難である。プライバシー保護に関しては、個人を尊重する歴史の深い欧州がプライバシーに関する制度的な議論を深めており、特に統計分野においてその流れで欧州ファンドに基づく匿名化の技術開発が行われている。米国では医療関連の情報の取り扱いに関する政策は充実しているが、それ以外のデータの扱いに関しては、企業の競争的取り組みにゆだねている傾向がある。またデータの信頼性に関しては、サーチエンジンという枠組みでは企業による開発で米国が飛びぬけているが、それ以外の根本的な取り組みはこれからである。

（4）科学技術的・政策的課題

データセキュリティのリスクは高まっており、様々な対策技術が検討されているが、データベース分野と暗号分野でのアプローチにはギャップがある。従来のシステムレベルの対策に加えて、暗号などによるデータ自身を守るポータブルさをもつセキュリティ確保のアーキテクチャと、その要素技術の研究開発が必要である。要素技術の研究は、特に現在検索可能暗号や秘密計算などと呼ばれている、データの暗号化操作技術が重要である。これらの技術的課題は、処理速度とスケーラビリティである。

暗号技術の導入により、情報漏洩対策だけでなく、データ委託時のデータのセキュリティ確保が可能になる。しかし、暗号化データ操作技術は現在、日本（CRYPTOREC）や米国（NIST）などの推奨暗号リストには掲載されておらず、一方、企業などがセキュリティのために新しい技術を積極的に取り入れる社会的な状況も整っていない。これらを打破するために、制度・政策的バックアップが必要である。

（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）

- 米国では、オバマ大統領がサイバーセキュリティ政策を「Cyberspace Policy Review」として2009年5月に公表した。その中のアクションプランの一つを、「プライバシーや人権に配慮したサイバーセキュリティに基づくアイデンティティ・マネジメントに係るビジョンと戦略の構築」とし、2012年度予算1,650万ドル、2013

年度予算は2,450万ドル（要求額）を組んでいる。これに基づきIdentityEcosystemを2016年1月に運用開始するとし、個人には、利便性の向上、プライバシー保護、セキュリティの向上などを、民間にはイノベーションを、政府には国民へのサービス向上を期待するとしている。

- 欧州では、欧州委員会が2010年5月、「欧州デジタル・アジェンダ」を発表した。その中の優先課題の一つとして「信頼性向上と情報セキュリティ」があげられている。デジタル・アジェンダでは、ICT研究開発に対する公的投資を年間110億ユーロに倍増することが目標とされている。
- 中国では「第12次5か年規画」（2011年～2015年の5か年）において、セキュリティが重要分野としてあげられている。
- 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構築があげられている。
- 日本では2007年から3ヵ年続いた経産省の情報大航海プロジェクトにおける個人履歴情報の活用実験と匿名化基盤の開発が実施された。

（6）キーワード

暗号、プライバシー保護、信頼性、暗号化データ処理

（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	◎	↗	・安全な関数型暗号の発明などに代表される公開鍵系理論研究 ・情報の信憑性に関する基礎研究[4]
	応用研究・開発	◎	→	・マルチパーティー秘密計算の世界トップレコード[1]
	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） ・DVDや電子入札システムなどでの活用実績が多数存在する
米国	基礎研究	◎	↗	・IBMの完全準同型暗号の提案をはじめとする暗号基礎研究の充実[2]
	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 ・カナダの小児医療機関における医療情報の匿名化ツールの開発[3]
	産業化	◎	↗	・NISTによる暗号規格の実質的な世界標準化 ・Intel CPUへの暗号モジュールの搭載 ・Googleらによる、個人履歴情報の活用（ただしプライバシー保護に関する技術的評価はできない）
欧州	基礎研究	◎	→	・アカデミックな暗号研究は現在においても世界の中心に位置づけられる研究室が多数存在する
	応用研究・開発	◎	→	・IBMチューリッヒによる大規模な匿名署名プロジェクト ・マルチパーティー秘密計算の世界トップレコード ・オランダ統計局による匿名化ツールの開発
	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） ・英国政府による個人情報活用プロジェクトの開始（mi-data）
中国	基礎研究	○	→	・マルチパーティー計算の提案者を輩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	○	→	・暗号分野において、応用研究が行われている。プライバシー保護に関しての動向は不明である。
	産業化	◎	↗	・国策として4G携帯電話用の暗号が中国国産にさせるべく開発と標準化を推進している
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	△	↗	・従来より行われていた住民登録番号の扱いがプライバシー保護の側に変化するなど、今後の発展が期待されている。
	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）医療統計処理における秘密計算技術を世界で初めて実証、NTT/JALSG。
http://www.ntt.co.jp/news2012/1202/120214a.html
2）IBM Researcher Solves Longstanding Cryptographic Challenge.IBM
http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/27840.wss 2009
3）CryptDB: Protecting Confidentiality with Encrypted Query Processing
http://people.csail.mit.edu/nickolai/papers/raluca-cryptdb.pdf
4）電気通信サービスにおける情報信憑性検証技術に関する研究開発
http://nict-itaku.jp/project/detail.php?pid=121

3.6.5 ソーシャル・クラウドソース

（1）研究開発領域名

ソーシャル・クラウドソース

（2）研究開発領域の簡潔な説明

コンピュータネットワークを通じて多くの群衆（Crowd）に仕事を委託することによって問題解決を行うための基盤・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

クラウドソーシングとは、不特定多数の人（群衆）に仕事を委託することである。ITやコンピュータネットワークが未発達の時代には実現が困難であったが、これらの発達によって実現が容易となり、近年注目を集めている。 クラウドソーシングはCrowd（群衆）とoutsourcing（外部委託）を合成した造語でありJeff HoweによるWiredの記事“The Rise of Crowdsourcing"[1)]で広く知られる事になった。一部では、WWW上に構築されたソーシャルメディアを通じたクラウドソーシングを、その点を強調してソーシャルソーシングとよぶ例もあるが、ほぼ同義語として利用されている事も多い。下記では、クラウドソーシングにおいて業務を行う人々をワーカー（worker）と呼ぶ。

広義のクラウドソーシングには群衆の力を利用したすべての問題解決が含まれるが、上述の理由から、近年は特にWWWを通じたクラウドソーシングが注目を集めている。ACMのサーベイ記事[2)]では、WWWを通じたクラウドソーシングを次の二つに分類している。

（1）明示的な（explicit）クラウドソーシング。この例としては、Linuxに代表されるオープンソースソフトウェア開発や、Amazonにおける書籍レビューなどが含まれる。

（2）暗黙の（implicit）クラウドソーシング。これはさらに、専門システムを利用するもの（画像のメタデータ付けを行うオンラインゲームなど）と、主目的が異なるシステム（Web検索システムなど）に組み込むもの（例えば、検索ログを利用してスペル修正を行う）に分類される。

クラウドソーシングは実利用が先行する技術である。産業界においてクラウドソーシングが注目を集めている理由はいくつかある。

- ITとコンピュータネットワークの発展によってワーカーをリクルートするコストが劇的に下がり、粒度の細かい単位で委託可能な仕組みを提供できるようになってきたこと。
- 既存の人材派遣業などを通じたリクルーティングと比較して低コストでの労働力を調達できること
- その結果、これまでは実現が難しかった、低コストによる労働集約型の業務の実現が可能になったこと。これらの理由により、米国を中心にクラウドソーシングに関連する各種サービスが数多く事業化されている[3), 4)]。

クラウドソーシングは、産業界が注目するような安価な労働力の提供手段というだけではなく、これまで不可能であると考えられていた問題を解決できる可能性がある技術である。例えば、Wikipedia[5)]のような成長し続ける世界規模の百科事典の構築と維持の実現は、現時点ではクラウドソーシングが唯一の選択肢と考えられる。また、行方不明者捜索のた

めに衛星写真を細かく分割し、クラウドソーシングによって不明者を発見しようという試みがあった[6]が、これもクラウドソーシングがあって初めて可能となる例である。

クラウドソーシングは産業界による利用が先行してきたが、以上のような潜在的な可能性の大きさから、近年米国を中心に急速に学術的な関心を集めている。例えば、クラウドソーシングを利用した多様なアプリケーション構築に関する研究、クラウドソーシングに関する科学的知見を得るための研究、科学的知見の工学的な応用などを目指す研究などが進められている。しかし、依然として、クラウドソーシングに関する体系的な理論・技術の構築はそれほど進んでいない。重要なチャレンジとしては次が上げられる[2]

- ワーカーの効果的なリクルーティング
- ワーカーに委託するタスクの設計
- 各ワーカーの作業結果の統合
- ワーカーとその作業の評価

現時点の国際比較については、産業、学術ともに米国が圧倒的にリードしている。産業においては、米国では多くのクラウドソーシングプラットフォームが稼働している[3]。例えば、クラウドソーシングの市場を提供するプラットフォームであるAmazon Mechanical Turkでは、システムに登録したワーカーが、数セントからのタスクを引き受けて処理する仕組みを提供している。英語圏においてクラウドソーシング成功している理由としては英語圏人口の大きさがあると考えられるが、経済格差も一つの要因の可能性がある。例えば、Amazon Mechanical Turkにおいては、登録しているワーカーの46.8%が米国人、34%がインド人であり、米国人の多くは女性であるという報告がある[7]。

学術に関しては、コンピュータヒューマンインタラクション、WWW, データベース分野などの著名国際会議[8), 9), 10)]を見る限り、米国に大きく引き離されて次に欧州、さらに引き離されて日本、中国、韓国が同レベルと考えられる。しかし、現在の米国の状況を見るに、今後はこれらの国でもクラウドソーシングに関する学術研究が急激に増大する可能性は十分にある。

産業に関しては、英語圏以外の欧州・日中韓では、現時点では大きな差はないと考えられる。いずれも、ネットワークを通じて群衆に仕事を委託するという一般的な意味でのクラウドソーシングに関してはサービスが立ち上がっているが、学術成果を応用した高度なクラウドソーシングサービスの提供などはこれからと考えられる。中国では急激にクラウドソーシングの産業規模が増大しているとの報告があり[11)]、注目に値する。

（4）科学技術的・政策的課題

- クラウドソーシングの可能性の開拓：クラウドソーシングの大きな可能性は広く認められているところであり、具体的にどのようなアプリケーションが実現可能かに関しては米国を中心に様々な研究が行われている。この追求はしばらく必要と考えられる。
- クラウドソーシングに関する科学的知見の入手と体系的技術の構築：クラウドソーシングを利用したサービスの産業化はすでに数多く行われているが、クラウドソーシングに関する科学的知見や体系的な技術の構築は始まったばかりである。クラウドソーシングを用いた効果的な問題解決の実現にはこれらの推進が急務である。
- 日本語圏による労働力の確保：日本語圏は英語圏と比較して人口が少なく、日本語圏内での経済格差も比較的小さい。このような条件のもと、どのように日本語圏でのク

ラウドソーシングの労働力確保を行うかは大きな課題であるといえる。

・日本における研究コミュニティの活性化：クラウドソーシングはすべての応用領域に影響を及ぼす可能性がある重要なトレンド[12]であるにもかかわらず、我が国では、クラウドソーシングに関する基礎研究を行っている研究者が少なく、かつ、横の連携がとれていない。研究コミュニティの構築･活性化は重要な課題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）

・ワシントン大学ではFold itと呼ぶシステムを開発し、クラウドソーシングを用いてタンパク質構造解析を行った。論文はNatureに掲載された[13]

・DARPAでは近年クラウドソーシングを用いた問題解決の実験を積極的に推進している。例えば、全米に配置した10箇所のバルーンをソーシャルメディアなどを通じて発見するNetwork Challenge[14]や、クラウドソーシングを用いてシステム開発プロセスを劇的に効率化しようと試みるAdaptive Vehicle Make[15]などがある。

・米国では2010年よりクラウドソーシングに関する大規模会議Crowdconfが開催されており500名以上の多様な参加者（execs, scholars, investors, entrepreneurs, and data heads）を集めている[16]。

・中国のクラウドソーシングの規模が急速に増大しつつあるという報告がある[11]

・ハイチ地震や東日本大震災ではクラウドソーシングが注目を集めた。例えば、Ushahidi[17]というプラットフォームを用いた災害関連情報の収集が、ボランティアベースで行われた。

（6）キーワード

アウトソーシング、集合知、ヒューマンコンピュテーション

（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	×	↗	・全体としては、クラウドソーシングに関する基礎研究は活発とは言い難い。クラウドソーシングに関する発表が活発な学術会議であるコンピュータヒューマンインタラクション会議[8]をはじめ、WWW会議[9]，大規模データベース会議[10]などの発表においても、クラウドソーシングに関する日本からの発表はほとんど無い ・国内の研究会においても、例えばデータベース系会議[18]、人工知能系会議[19]、インタラクション系会議[20]などにおいても基礎研究は少ない。しかし、数年前にはこれらは皆無であり、トレンドは確実に上昇方向である。
	応用研究・開発	×	↗	・国内データベース系会議[10]などを見るとクラウドソーシングの一例であるWikipediaに関しては研究が以前から存在するが、多くは、すでにWikipediaに掲載されたデータの応用であり、クラウドソーシングそのものの研究は少ない ・Amazon Mechanical Turkを利用した研究が国内でもいくつか散見されるが、その数は少ない。その理由の一つは、Amazon Mechanical Turkを通じた仕事委託者は米国在住に限定（2012年8月現在）されているからである。 ・クラウドソーシングを利用した程度の研究がまだ多く、体系的なクラウドソーシング技術の確立に至っていない。
	産業化	○	↗	・商用のクラウドソーシングプラットフォームがいくつか登場している[4]。しかし、多くはクラウドソーシング市場の提供サービスレベルにとどまっており、体系的なクラウドソーシングに関する技術に基づく高度なサービスはこれからと予想される。
米国	基礎研究	◎	↗	・米国の大学・公的機関における基礎研究の質量はともに高く、世界をリードしている。各主要国際会議でのクラウドソーシングに関する論文はほとんどの米国のものであり[8), 9), 10)]、また、その量は圧倒的である。これらの多様な学術コミュニティにおいて、それぞれ活発にクラウドソーシングに関する研究が行われている。基礎研究の例としては、クラウドソーシング処理の効率化や、クラウドソーシングの宣言的記述などがある。
	応用研究・開発	◎	↗	・米国では応用指向の研究も数多く行われている。例えば、旅程表の作成をクラウドソーシングするといった試みをはじめ、多様な応用にクラウドソーシングを適用する試みが発表されている[8] ・ワシントン大学においては、コンピュータゲームを通じたクラウドソーシングによるタンパク質の構造解析の仕組みを開発し、論文はNatureに掲載された[13] ・学術的な研究成果の産業界における応用に関しては、カーネギーメロン大学で開発された画像にメタデータ付けを行うESPゲームがGoogle Image Labelerとして利用されるなど（すでに終了）の取り組みが行われている
	産業化	◎	↗	・数多くの企業がクラウドソーシングに関係する事業を展開している[3]。例としては、クラウドソーシングの市場とプラットフォームを提供するもの、また、クラウドソーシングを利用して特定の問題解決に特化したものなどがある。 ・クラウドソーシングの応用サービス、クラウドソーシングプラットフォームともに、著名なものは米国発が多い。群衆に仕事を委託するAmazon Mechanical Turk, CrowdFlower, CloudCrowd、クラウドソーシングによる研究開発を図るInnocentiveなど数え切れない。

欧州	基礎研究	△	↗	・米国に比べるとかなり小規模ではあるが、日韓中と比較すれば基礎研究が進んでいることが見える[8) 9), 10)]。 ・スイスでは、CrowdLang（チューリッヒ大学）、CrowdDB（チューリッヒ工科大学）、カリフォルニア大学バークレー校共同研究など、クラウドソーシング処理に関する基礎研究がいくつか行われている。
	応用研究・開発	△	↗	・欧州は米国との言語的・文化的つながりが強いこともあり、その影響を受け、活発な活動がおきつつある。 ・2011年には、Europe's First Crowdsourcing Convention がベルリンで開催された[21)]
	産業化	○	↗	・英語圏以外は、日韓とほぼ同じ状況であると推測される。ある程度の人口規模を持つ言語圏ではクラウドソーシングサービスが立ち上がっているが、学術的成果のこれらのサービスへの還元はこれからと考えられる。
中国	基礎研究	×	↗	・著名な国際会議ではデータ指向のクラウドソーシングに関する論文はほとんど見られない[8), 9), 10)] ・ここ数年の米国発の論文の圧倒的な量を考えると、中国でもこれらの研究が積極的に推進されることはほぼ確実と思われる。
	応用研究・開発	×	↗	・基礎研究と同様、著名な国際会議[8), 9), 10)] では WWW 上でのクラウドソーシングに関する論文はほとんど見られない。しかし、基礎研究と同様、中国でもこれらの研究が今後積極的に推進されることはほぼ確実と思われる。 ・2010年に重慶市で第1回世界威客大会が開催されている[22)]
	産業化	◎	↗	・クラウドソーシングの規模が英語圏よりも大きくなっているという報告がある[11)]。しかしながら、学術的成果のこれらのサービスへの適用はこれからと考えられる。
韓国	基礎研究	×	↗	・著名な国際会議[8), 9), 10)] ではクラウドソーシングに関する論文はほとんど見られない ・ここ数年の米国発の論文の圧倒的な量を考えると、韓国でもこれらの研究が今後積極的に推進されることはほぼ確実と思われる。
	応用研究・開発	×	↗	・基礎研究と同様、著名な国際会議[8), 9), 10)] ではデータ指向のクラウドソーシングに関する論文はほとんど見られない。しかし、基礎研究と同様、韓国でもこれらの研究が今後積極的に推進されることはほぼ確実と思われる。
	産業化	○	↗	・日本とほぼ同じ状況であると推測される。クラウドソーシングを利用したサービスが立ち上がっている（例えば、Loudsourcing[23)]）が、学術的成果のこれらのサービスへの還元はこれからと考えられる。

（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）Jeff Howe. The Rise of Crowdsourcing. Wired, 2006.
2）AnHai Doan, Raghu Ramakrishnan, Alon Y. Halevy: Crowdsourcing systems on the World-Wide Web. Commun. ACM 54（4）：86-96（2011）
3）米国のクラウドソーシングサービス（例）

http://www.ranker.com/list/list-of-the-best-crowdsourcing-Websites-and-pay-per-task-sites/cdu827
4）日本のクラウドソーシングサービス（例）
http://socialzukan.com/Web/index.php?cmd=type&cat=crowdsourcing
5）Wikipedia. http://www.wikipedia.org/.
6）Hafner, Katie. "Silicon Valley's High-Tech Hunt for Colleague". New York Times. http://www.nytimes.com/2007/02/03/technology/03search.html
7）Ipeirotis, Panagiotis G., Demographics of Mechanical Turk（March 2010）. NYU Working Paper No. ;CEDER-10-01. Available at SSRN: http://ssrn.com/abstract=1585030
8）Proceedings of The 2012 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems（CHI2012）. http://chi2012.acm.org/
9）Proceedings of the World Wide Web Conference 2012（WWW2012）. http://www2012.wwwconference.org/
10）Proceedings of 38th International Conference on Very Large Databases（VLDB 2012）. http://www.vldb2012.org/
11）Crowdsourcing Explodes in China
http://dailycrowdsource.com/crowdsourcing/news/270-crowdsourcing-explodes-in-china
12）List of Crowdsourcing Projects. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_crowdsourcing_projects
13）foldit. http://fold.it/portal/
14）DARPA Network Challenge. http://archive.darpa.mil/networkchallenge/
15）DARPA Adaptive Vehicle Make. http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Adaptive_Vehicle_Make__%28AVM%29.aspx
16）Crowdconf. http://www.crowdconf.com/
17）Ushahidi. http://ushahidi.com/
18）第4回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム（DEIM2012）
http://db-event.jpn.org/deim2012/
19）合同エージェントワークショップ＆シンポジウム2011（JAWS2011）http://jaws-Web.org/event/jaws2011/
20）インタラクション2012. http://www.interaction-ipsj.org/2012/
21）Europe's First Crowdsourcing Convention to be Held in Berlin
http://dailycrowdsource.com/crowdsourcing/news/480-europes-first-crowdsourcing-convention-to-be-held-in-berlin
22）http://www.xinhua.jp/socioeconomy/politics_economics_society/265532/
23）Loudsourcing. http://www.loud.kr/

3. 7　IT アーキテクチャ

IT システムはその設計・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り、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の概念が極めて重要である。例えば、コンピュータ・アーキテクチャは、命令セットという形でハードウェア提供者とソフトウェア開発者の間の共通理解を与える。ネットワーク・システムのアーキテクチャは、ネットワークに接続する様々な機器の設計者、ソフトウェア開発者、ネットワークの運用者、利用者の間の共通理解を与える。企業システムのアーキテクチャ（EA: Enterprise Architecture）は、企業内における様々なシステムについて、IT 部門、ベンダー、利用部門の間の共通理解を与える。

よいアーキテクチャは、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、信頼性が高い、柔軟で高性能なシステムスが構築できる。また、よいアーキテクチャは、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惹きつけ、その結果周囲にエコシステムを形成する。したがって、よいアーキテクチャをもつことは産業競争力の上でも重要である。

にも関わらず、コンピュータ・アーキテクチャ（S/360, Intel Architecture など）、ネットワーク・アーキテクチャ（TCP/IP など）、OS のアーキテクチャ（Unix など）、IT 業界で主流になったアーキテクチャのほとんどは、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、アーキテクチャの研究開発投資が軽視されていたきらいがある。

あるアーキテクチャが主流になるためには、産業上の力関係や政治力も必要であり、技術的な優位性だけの問題ではない。しかし、今後主流になりうるアーキテクチャをいち早く捉え、準備しておくことは可能なはずである。特に、Cyber Physical Systems（CPS）や、DevOps、ビッグデータなどの流れから、新たな IT アーキテクチャが生まれてくることは必至であり、情報・通信分野の研究開発もそのような流れを無視してはならない。

以上のような考察から、「次世代 IT アーキテクチャ」に関するワークショップを行い、今後戦略的に重要となる IT アーキテクチャを議論した。その結果、主に 3 つの領域において、アーキテクチャの研究開発を行うべきだという結論に達した。

1. 社会アーキテクチャと IT アーキテクチャの同時設計

これからの IT アーキテクチャは、社会のアーキテクチャと不可分のものとして設計されなければならない。これには、二つの理由がある。一つは、社会システムが IT を考慮することなしに設計できなくなってきたことである。金融、流通、公共、医療などにおいて、IT なしの社会システムは考えられない。したがって、社会システムを設計する者は、同時に IT についても知悉していなければならない。

同時に、IT 産業そのものが、ビジネスや社会を設計する能力を身に付けてきたことも重要な一因である。IT 産業はハードウェアの提供者、という位置づけで始まったが、今では IT 産業の重要な役割の一つが、企業のビジネスプロセス改革、あるいは IT を用いた新規ビジネスの設計にある。その経験・スキルを活かして IT ベンダーは今や社会システム設計のコンサルティング・ビジネスに触手を伸ばしているのである。

2. ワークロードに応じて柔軟にシステムを提供できるアーキテクチャ

IT の利用分野が広がるにつれて、IT システムのワークロードも多様化している。科学技術計算と事務計算だけだった時代から、今ではオーディオ・ビデオなどのメディア・信号処理、クライアントにおけるグラフィックス処理、あるいは Google や Amazon.com における大量の Web トラフィックなど、非常に幅広いワークロードが現れ、それぞれに応じたアーキテクチャが採用されている。

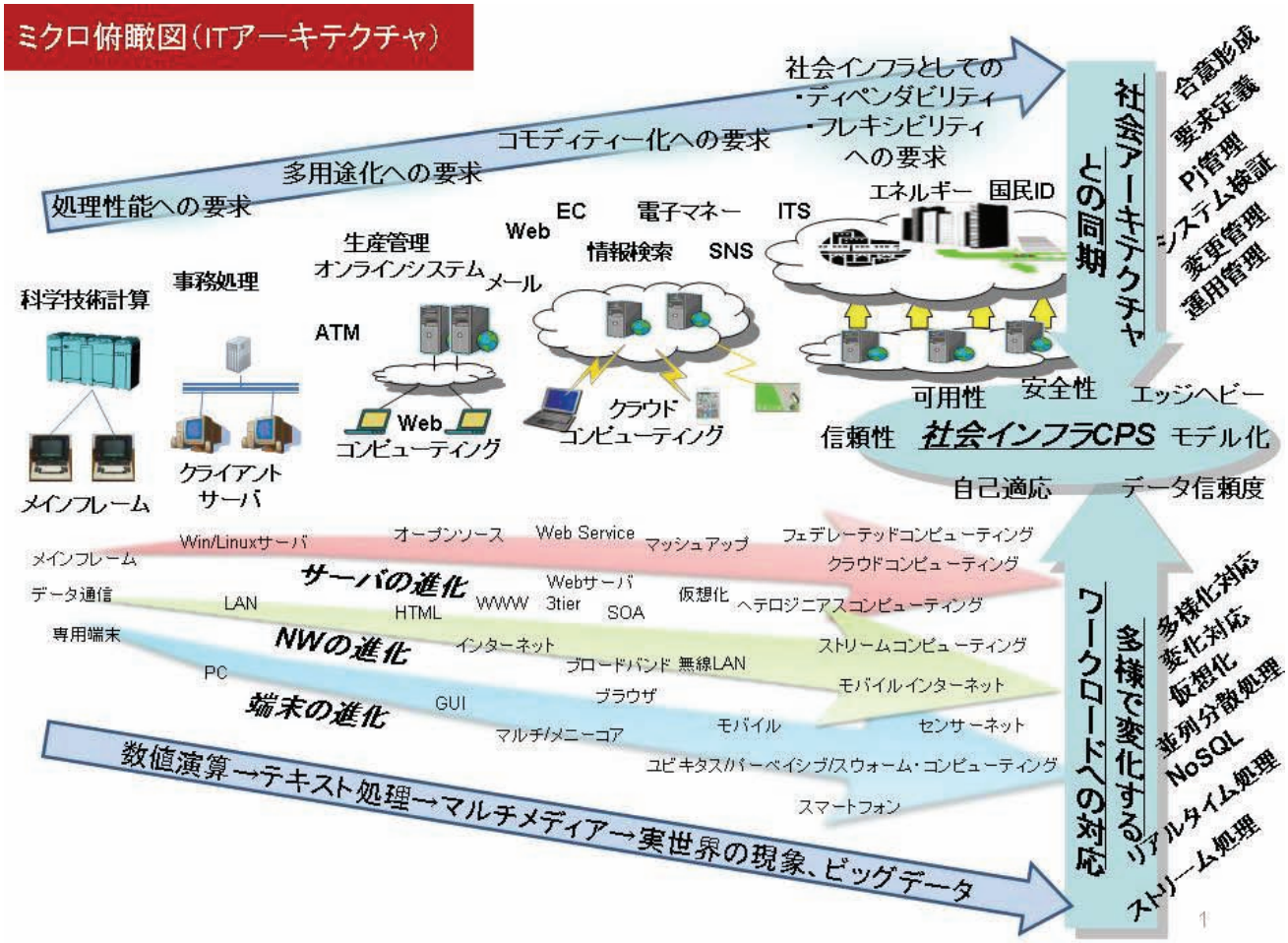
今後もワークロードが多様化することが予想され、その大部分はロングテール、すなわち個別性の高いものになるだろう。そのため、与えられたワークロードに対して適切なシステムを柔軟に提供できる仕組みが必要となる。カスタムチップ、FPGA（Field Programmable Gate Array）、クラウドコンピューティングなどは、いずれも、与えられたワークロードに対して柔軟にシステムを提供できる仕組み（アーキテクチャ）ということができる。このようなトレンドは今後も続くであろう。

3. CPS のアーキテクチャ

社会システムに組み込まれた IT においては、その重要性から CPS について、特にそのアーキテクチャを議論した。CPS においては、物理世界を扱うためにそのモデル化がアーキテクチャの要となる。この物理世界モデルは、センサから得られたデータによって動的に校正（データ同化）されるものでなければならない。また同時に、CPS の利用目的に応じて、モデルの構造、パラメータ数やその精度など、モデルそのものの姿を動的に変えていけるものでなければならない。

さらに、CPS においては、特にセンサデータに関して今までとは異なるワークロードが現れると思われることから、ストリーミング・コンピューティングや、ネットワークのエッジにおけるデータ格納・処理も必要となることだろう。

なお、ワークショップではアーキテクチャの焦点がより上位レイヤーに移動しつつあるという認識から上記 3 点の議論に集中したが、これらに加えて、伝統的なコンピュータ・アーキテクチャやネットワーク・アーキテクチャにも、ストレージ・クラス・メモリ（SCM: Storage Class Memory）や OpenFlow などの技術により、大きなパラダイムシフトが起きつつあることも指摘された。これらの分野についても継続的に議論を行なっていくべきであろう。


ミクロ俯瞰図（ITアーキテクチャ）
処理性能への要求
多用途化への要求
コモディティー化への要求
社会インフラとしての
・ディペンダビリティ
・フレキシビリティ
への要求
社会アーキテクチャとの同期
合意形成
要求定義
PJ管理
システム検証
変更管理
運用管理
科学技術計算
事務処理
生産管理
オンラインシステム
メール
Web
EC
電子マネー
ITS
情報検索
SNS
エネルギー
国民ID
ATM
Web
コンピューティング
クラウド
コンピューティング
メインフレーム
クライアント
サーバ
可用性
安全性
エッジヘビー
信頼性
社会インフラCPS
モデル化
自己適応
データ信頼度
Win/Linuxサーバ
オープンソース
Web Service
マッシュアップ
フェデレーテッドコンピューティング
クラウドコンピューティング
メインフレーム
サーバの進化
Webサーバ
3tier
仮想化
ヘテロジニアスコンピューティング
データ通信
LAN
WWW
HTML
SOA
専用端末
NWの進化
インターネット
ストリームコンピューティング
ブロードバンド
無線LAN
モバイルインターネット
PC
端末の進化
GUI
ブラウザ
マルチ/メニーコア
モバイル
センサーネット
ユビキタス/パーベイシブ/スウォーム・コンピューティング
スマートフォン
数値演算→テキスト処理→マルチメディア→実世界の現象、ビッグデータ
ワークロードへの対応
多様で変化する
多様化対応
変化対応
仮想化
並列分散処理
NoSQL
リアルタイム処理
ストリーム処理

3.7.1　社会システムアーキテクチャ

（1）研究開発領域名

社会システムアーキテクチャ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ICTはあらゆる領域に活用される万能ツールであり[1)]、現代の社会システム（ここでは企業におけるビジネスシステムを含めた広く社会に存在するITシステムと考える）はITを抜きには実現できない。また、社会システムのITアーキテクチャは、社会そのもののアーキテクチャと不可分なものとして設計しなければならない。本研究開発領域では、社会システムのアーキテクチャについて、社会システムをデザインし維持向上し続けるという観点で、今後、観察しあるいは必要な取り組み課題を明らかにする。社会そのもののアーキテクチャに関する明確な定義はないが、ここでは、社会を構成する集団・施設・環境、そこで行われる行為、それらを規定するルール、および、それら全体の構造を表すものとする。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

これからのITアーキテクチャは、社会のアーキテクチャと不可分のものとして設計されなければならない。これには二つの側面がある。

社会システムがITを考慮することなしに設計できなくなってきたこと

Amazon.comのビジネス設計にITが前提となっているのと同じように、現代では、金融、流通、公共、医療などにおいて、ITなしの社会システムは考えられない。したがって、社会システムを設計する者は、同時にITについても知悉していなければならない。

ATM（Automated Teller Machine）は、もともとは金融機関の店舗における現金の払い出しに設置されたものだが、日本でも駅やコンビニなど町のいたるところに設置され重要な社会インフラの一つとなっている。その設計には、広域かつ高信頼なネットワークと大規模トランザクションシステムにとどまらず最新ユーザインターフェイスといったITが前提となっている。また、このように社会システムの設計にはプロセスの標準化が重要である。ATMは、単に銀行内の窓口係（teller）の役割を機械で置き換えただけでなく、金融機関間の取引を含めた一連のプロセスを標準化することにより実現できた。

ETC（Electronic Toll Collection System）は、有料道路の料金所にて人手を介さずに料金を徴収するシステムである。料金所のシステムと車両上のシステムが無線通信によって料金の収受を行う。本システムは、利用者（車）、道路事業者（料金所）に加えて、クレジットカード会社、ETC車載器／路側機メーカー、販売店や道路システム高度化推進機構（ORSE）など多くのステークホルダーが関係する。このように業界を超えた複雑な社会システムでは、機器、データ、インターフェイス、プロトコル、プロセスなど様々なレベルの標準化が必要で、そのこと自体がシステムの構成要素であるといえる。なお、無線通信によるトランザクション処理を実現するための強力かつ高速なセキュリティ機能があって初めて実現できたものといえる。

SuicaはJR東日本が開発した非接触型ICカードを利用した乗車カードシステムで、乗車券を買わずに改札を通過できるシステムである。近距離無線による非接触通信による高速入出力と耐久性とセキュリティを兼ね備えた技術が前提となっている。ここで標準化

され実績を積み重ねた決済方式は、同じFeliCa技術を用いたJRや私鉄各社との相互利用や電子マネー機能の普及の先鞭を付けた。

既存のものをITで効率化するのでなく、ITを前提に設計すると違うものになる。

国民IDまたは国民番号制度は、国民一人ひとりに番号を与えて国民全員の個人情報を管理するシステムである。海外の事例が先行するが、我が国でも導入された暁には、現状当たり前と思っている社会システムや制度、例えば、社会保障や納税にとどまらず、戸籍や電気料金などの契約、将来的には選挙や国民の合意形成システムを変えてゆく可能性がある。法制度を含めた社会システムの設計時にこれを前提とするかどうかでシステムそのものが大きく変わる。

別の視点として、ITそのものが新しい形態の社会システムを形成してきたことがあげられる。古くはインターネット上のニュースグループやパソコン通信などネットワーク上での情報交換や意見交換を目的とした仮想的なつながりが、モバイル端末の高度化と高速通信網の整備によりTwitterやFacebookなどのSNS（Social Networking Service）により、地理的・社会的な壁を超えた地球規模のコミュニケーションが可能な社会へと発展してきている。

我が国の産業競争力の視点からは、AppleのiOSやGoogleのAndroidに見られる、ITを使った囲い込みによるビジネスの構造変化や産業構造の変化が顕著になっていることも重要である。IT、特にソフトウェアビジネスの研究が欧米を中心として活発になっている[13)]が国内では立ち遅れている。

これらはITなしには実現できない社会システムの一例だが、便利になり普及が拡大することは、正しく動かなくなったときの社会的なインパクトが大きいということを意味する。信頼性、可用性、サービス性などシステムとして満たすべき非機能要件が重要になる。また、誤操作や想定外の事態の発生から速やかに回復するレジリエンシーも求められる。

したがって、社会システムの設計はITを熟知しているメンバーの参画が必須である。一つには、IT技術を最大限に活用することによるシステムの効率化のためだが、実は、IT業界が長年培ってきた人間系を含む大規模かつ複雑なシステムを設計するための技術や技法（要求定義、概念設計）が使えることのメリットが大きい。このことが次の側面につながる。

IT産業そのものが、ビジネスや社会を設計する能力を身に付けてきたこと

IT産業は、ハードウェアの提供者、という位置づけで始まったが、今ではIT産業の重要な役割の一つが、企業のビジネスプロセス改革、あるいはITを用いた新規ビジネスの設計にある。その経験・スキルを活かしてITベンダーは今や社会システム設計のコンサルティング・ビジネスに触手を伸ばしているのである。従来、企業のビジネスプロセスのデザインをIT業界がコンサルとしてやってきたように、社会の制度設計もそういう形で実施する必要がある。

ITベンダーが主導して社会システムの設計を主導している事例がでてきている。社会システムの設計においては、行政、産業、国民、コミュニティなど様々なステークホルダーの要求を取り入れ、かつ、現実的な期間とコストという厳しい制約の中で、具体的な計画に仕上げる必要がある。複雑なビジネスシステムを設計構築してきたITベンダーの経験が生きる領域だからである。

IBMは「Smarter Planet」（2009年）にて、環境、エネルギー、食の安全など、地球規模の課題をITの活用により解決し、地球をよりスマートにしていくというコーポレートビジョンを提唱。実際にリオデジャネイロのインテリジェント・オペレーション・センターの計画に参画している[2)]。

米シスコシステムズは「Smart+Connected Community, S+CC)」にて人とサービスとモノと情報を結びつけた持続可能な社会を提唱。韓国の仁川市と契約し、ソウル郊外に新松島（New Songdo City）のスマートシティ建設プロジェクトに参加した[11)]。

日本でもNEDOの「IT融合による新社会システムの開発・実証プロジェクト」に、ITベンダーが参画し、都市交通、ヘルスケア、農商工連携およびこれらを支える基盤的技術である「データ処理基盤」の4分野で開発を実施する計画である[3)]。

（4）科学技術的・政策的課題

政策的課題

国家戦略としてIT活用プロジェクトの立案と実行、推進が必須である。2012年7月に発表されたActive Japan ICT戦略を実行するためには、韓国を成功例としてみると強い指導力の下で省庁横断で強力に推し進めなければ実現できない。並行して、スマートシティ特区や地域クラスタにて実績を積み重ねることも重要である。

合意に至るプロセスで収集・参照される個人の意見などのデータの扱いに関するポリシーの策定、および、それを策定･監査する枠組み（組織や制度･システム）が必要である。

科学技術的課題

合意形成の科学が必要である。多数のステークホルダー（住民、自治体、政府、企業、アカデミアなど）の合意形成を図る必要がある。そのためのビジョンやロードマップの共有、また、適宜、必要な情報の共有が図られ、双方向の議論が進められる必要がある。これには多数のステークホルダーの利害を調整し情報システムを構築してきたソフトウェア工学の知見と方法論が有用と考える。具体的には、要求定義、プロジェクト管理、システム検証、変更管理、運用管理などの方法論である。

どのような社会を目指すのかという社会デザインにおいて、社会システムと制度を折り合わせる必要がある。そのために経済学における行動経済学やメカニズムデザイン、社会学のコミュニティの理論やゲーム理論の適用も考慮に入れるべきである。

さらに、社会の中から情報を集めるためにどのようなセンサネットワークを構築し、どのような情報を集め、解析し、それの利活用が必要である。そして、情報の伝搬、集合知の形成や検証など昨今のソーシャルメディアの取り込みも行わなければならない。

形成された合意を実現するための社会システムライフサイクルマネジメント技術が必要である。制度設計、業務プロセス、フィジカルとサイバーが融合したインフラの構築などを横通しかつ統合的に扱えることが求められる。

ビジネスシステムを社会システムの一部としてみたときに、我が国の産業競争力向上に向けたITを活用したビジネスの創出が求められている。地球規模に広がった仮想ネットワークやOSS（Open Source Software）などを活用した新しい事業モデルの研究が必要である。

システムの持続的稼動と成長を実現するITインフラ要素技術群

・データモデル、標準化、共有・公開・伝搬・保護の仕組み

・センサネットワークと情報収集インフラ（ビッグデータ、CPS）
・非機能要件（レジリエンス、説明責任、公正、公平、安全、知財戦略）

（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）

スマートシティ
社会システムとしての CPS
ビッグデータで扱われる社会的規模のデータマイニング、スマートメーターなど
国民 ID
センサネットワーク

（6）キーワード

社会システム、社会システムデザイン、政策工学、電子政府、国民 ID、メカニズムデザイン、合意形成、センサネットワーク、ビッグデータ、ゲーム理論、レジリエンシー、ディペンダビリティ、ソーシャルメディア、SNS

（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	○	↗	・JST/RISTEX「科学技術と人間」（2007~）[4] ・JST/RISTEX「問題解決型サービス科学研究開発プログラム」（2010）[5] ・JST「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」（2012~）[6]
	応用研究・開発	○	↗	・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」(2012~)[3]
	産業化	○	→	・Active Japan ICT 戦略[10]
米国	基礎研究	◎	↗	・Cyber Physical System（CPS）[7]
	応用研究・開発	○	↗	・ICSOB（Int'l Conference on Software Business）[13]
	産業化	◎	↗	・IBM Smarter Planet[2] ・CISCO Smart+Connected Communities[12]
欧州	基礎研究	◎	↗	・The ARTEMIS Embedded Computing Systems Initiative[8]
	応用研究・開発	○	↗	・FP7 Digital Agenda for Europe[14]
	産業化	○	↗	・FP7 Cooperative Program[14]
中国	基礎研究	−		不明
	応用研究・開発	○	↗	・物聯網
	産業化	○	↗	・中国初の国家レベルの大規模環境都市開発プロジェクト「天津エコシティ」
韓国	基礎研究	−		不明
	応用研究・開発	○	↗	・スマートシティ新松島プロジェクト[11]
	産業化	◎	↗	・世界電子政府ランキングで世界トップクラス[9]

（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）平成24年版情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/index.html
2）http://www-06.ibm.com/innovation/jp/smarterplanet/
http://www-06.ibm.com/innovation/jp/smarterplanet/ レジリエント city/index.shtml
3）http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100158.html
4）http://www.ristex.jp/examin/science/index.html
5）http://www.ristex.jp/servicescience/
6）http://www.jst.go.jp/keytech/kouboh24-3.html

7）http://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08611/nsf08611.htm
8）http://www.artemis-ju.eu/
9）廉宗純 , 韓国と日本の行政での ICT 利活用の比較 :CIO 的視点から , 情報処理学会デジタルプラクティス ,Vol.3,No.1,January 2012,
10）「 知識情報社会の実現に向けた情報通信政策の在り方 」< 平成 23 年 2 月 10 日付け諮問第 17 号 >
http://www.soumu.go.jp/main_content/000169615.pdf
11）http://newsroom.cisco.com/press-release-content?type=Webcontent&articleId=426592
12）http://www.cisco.com/Web/strategy/smart_connected_communities.html
13）ICSOB（Int'l Conference on Software Business）
http://80.83.125.91/icsob/
14）Digital Angeda for Europe
http://ec.europa.eu/information_society/digital-agenda/index_en.htm

3.7.2 柔軟なアーキテクチャ

（1）研究開発領域名

柔軟なアーキテクチャ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ITの利用分野は科学技術計算と事務計算だけだった時代から、音声、画像、映像などのメディア・信号処理、在庫管理などの大量データを対象とした業務処理などに拡大し、近年では大量のWebトラフィック処理、リアルタイム処理など、取り扱うワークロードが多様化している。今後、サイバーフィジカルシステムをはじめとするITの社会実装が一層進展することによって、ワークロードは多様化するとともに社会的ニーズに応じて時間的に大きく変動するようになるため、これらに適応的に対応していくことが必要となる。本領域では、このような要請への対応に必要なアーキテクチャの研究開発を行う。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

世界全体に存在するITの処理能力は、例えば汎用コンピュータの処理能力は1986年と比較して2007年はMIPS（Million Instructions Per Second）換算で4桁以上増加している。また、汎用コンピュータとアプリケーションに特化したコンピュータで比較すると、1986年には汎用が41 %、アプリケーション特化が59 %であったものが、2007年には汎用が3 %に低下している[1)]。このように、世界全体でワークロードが増加し、それに応えるために処理能力の増強が図られてきたが、それと同時に多様化するワークロードへの対応がこれまでになされてきた[2)]。

さらに、例えば2011年には世界のIPネットワークトラフィックの1.9 %がモバイル機器によるものであったが、2016年には9.8 %に増加する[3)]とともに、ラップトップPC、スマートフォン、タブレット、M2M（Machine-to-Machine）モジュールなど機器の多様化が予想される[4)]など、ワークロードの増加とともに多様化が一層進展すると考えられる。

一方、2016年にインターネットの平均トラフィックは2011年の4倍に増加するのに対して、高負荷時のトラフィックは5倍の増加が予想される[5)]など、ワークロードが短時間のうちに大きく変動する状況がいろいろな場面で生じてくると考えられる。

このような背景から本研究開発領域の重要な側面として次の二つがあげられる。

- 多様化する処理対象、処理形態への対応
- ワークロードの急激な変化への柔軟な対応

多様化する処理対象、処理形態への対応

ハードウェアのプロセッサレベルでいえば、例えば1970年代の図形の描画に特化したグラフィックコントローラに始まり2000年代以降のGPU（Graphics Processing Unit）に至るものや1980年頃の公衆電話網の処理に必要な高速デジタル信号処理に特化したDSP（Digital Signal Processor）など積和演算やリアルタイム処理を志向するものなどがある。近年ではGPGPU（General Purpose GPU）として、プログラミングの自由度が増すとともに専用の高級言語が開発され、科学技術計算、画像処理、音声認識など用途が拡大している。一方、汎用のCPU（Central Processing Unit）についても、近年ではデー

タセンターの電力効率向上などの必要性から並列分散処理を前提に CPU あたりのスピードよりも電力効率を優先したスモールコアと呼ばれるアーキテクチャが登場するなど多様化が進んでいる [6]。このような多様化への対応方法としては、回路設計にまで遡って専用チップを開発する方法、ARM のような IP コアをモジュール化して専用チップを効率的に設計する方法、リコンフィギュラブルロジックなど製造後の回路再構成を可能とする方法など、市場規模、コスト、企業戦略などの要因により多様なスペクトルが見られる。また、メモリやストレージシステムにおいても 3 次元積層や不揮発性メモリを使った SSD（Solid State Drive）やストレージクラスメモリなどワークロードに対応するための取組みがなされている。

システムソフトウェアやソフトウェアプラットフォームのレベルにおいても、特定のワークロードに応じた多様化が進んでいる。例えば、機械制御などの組込み OS は限られたコンピュータ資源上でのリアルタイム処理を実現している。また、スマートフォンなどに搭載される Android や iOS、PC や汎用サーバーに組み込まれる Windows や Linux などは汎用のシステムソフトウェアといえる。特に、モバイル機器に搭載されるシステムソフトウェアについては、モバイル機器の今後の増加を考えると、その市場や技術に対する影響は非常に大きいため継続的に動向を追っていく必要がある。一方、大量データやストリーミングデータの並列分散処理、オンラインショッピングや Web 検索エンジンなどの大量のトランザクション処理がサーバー上で実現されている。並列分散処理に対しては Hadoop などのソフトウェアフレームワーク、大量トランザクションの高速処理に対しては Key–value store の Dynamo、カラム志向型の Bigtable などの NoSQL と多様なソフトウェアが生み出されている。さらに、大量データに対するリアルタイムでの機械学習を行うための Jubatus[7]、Mahout[8] といったソフトウェアプラットフォームが開発され、産業応用が進んでいる。

ワークロードの急激な変化への柔軟な対応

1960 年代に大規模メインフレームの計算パワーを複数のユーザが共有して使用することを目的に時分割などの仮想化技術が開発された。その後、クライアントサーバーシステムが普及し、特定業務に対して一つのサーバーで一つのアプリケーションを運用する形態が一般的となるが、1990 年代になるとサーバー性能の大幅な向上、社会への IT システムの導入拡大が進み、サーバーの利用率低下や分散した資源の運用管理コスト上昇を招き、仮想化技術の重要性が再び強く認識されるようになった [9]。

このようなことを背景として、サーバー上に仮想マシンを構築し、OS も含めたシステム環境を構築（サーバー仮想化）してコンピュータ資源の利用率を高めサーバー台数を削減したり、物理ストレージを仮想的に分割したり複数のストレージを 1 台に見せたり（ストレージ仮想化）など様々な仮想化技術が開発されている [10]。

このような仮想化技術や上記 a の並列分散処理技術などをベースとして、時間的に大きく変動するワークロードへの対応を可能とするクラウドコンピューティングが実現されるようになり、産業的にはコストを低減しつつもワークロードに応じたコンピュータ資源の調達が比較的容易になり企業活動の柔軟性を高めることに結び付いている。しかしながら、現在のクラウドコンピューティング環境は、必ずしもアプリケーションごとに特化した多様なワークロードに充分に対応しているとはいえない。このため、例えば、Amazon

EC2において、既存のシステム構成とは異なる構成による高性能コンピューティング機能が提供される[11]など、個別のワークロードにも対応していこうという動きも見られる。このような個別のワークロードへの対応や企業グループのシステム統合などを背景に、異なる複数のシステムを適材適所に組み合わせて利用するためヘテロジニアスなクラウドコンピューティング環境を実現する取組みが今後進んでいくと考えられる。

このようなトレンドを促すものとしてネットワーク技術の動向も注目が必要である。インターネット環境の出現後、WWWの開発と普及、検索エンジンとWebディレクトリの出現により、世界的なスケールで誰でも情報を発信・交換することが可能となり、Webコンテンツ やWebアプリケーションの急激な増大へとつながった。

このような中で、急増するトラフィックに対応するためのネットワーク帯域の拡大とともに、環境やアプリケーションによって異なる多様なワークロードへの対応を意識した動きが見られるようになっている。例えば、現在、Open Networking Foundationが推進しているOpenFlow/SDN（Software Defined Network）は、ネットワークのルーティング制御や帯域制御をソフトウェア的に実装し、柔軟な制御を可能とするアプローチである。これにより、通信事業者にとっては、オンデマンドで高速ネットワーク回線を提供したり、トラフィックの変動に応じて帯域を配分するなどサービス品質や効率の向上が可能となる。さらに、データセンターでは障害が発生したサーバーなどのトラフィックを即座に別のサーバーに切り替えてサービスを維持したり、オフピーク時にサーバー間インターコネクトのルータの電源を一時的に落として消費電力を抑えるなどの貢献も考えられる[12), 13)]。

クラウドコンピューティングやデータセンターといった流れは主にサーバー上で実現される技術であるが、今後、CPSのような新たなITシステムの潮流とともに、これらの構成要素であるセンサ群、ネットワーク、ストレージ群、サーバー群を必要に応じて組み合わせて多様なアプリケーションを実現することが必要になると考えられる。このためには、より細かい粒度でのコンピュータ資源の組み合わせを高い自由度で短い時間で可能とする技術が必要であり、今後のチャレンジングな技術的課題といえる。

（4）科学技術的・政策的課題

ワークロードに対応するアーキテクチャの研究開発を推進するには、現実にどのようなワークロードが発生しているのかを把握することが必要である。Google、Amazon、Facebookなど大規模インターネットサービス事業者が大量データ処理に関する研究開発に主導権をもちつつある理由の一端もここにある。このように、どのようなワークロードが発生するかという情報そのものも財産といえ、それらをどのように計測し、記述するかということは一つの科学技術的な課題といえる。

（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）

高速・大量データ処理といったニーズの高まりとストレージクラスメモリなどの新たな技術の流れを背景として、システムを構成する各レイヤーを統合的に見直していこうという動きが見られ[14)]、今後、新たなアーキテクチャが提案されていく可能性がある。例えばIBMによるSSDメーカーのTexas Memory Systemsの買収などは、このような統合的な見直しに向けた動きの一つと考えられる。

また、データセンターおよび広域ネットワークに影響を及ぼす OpenFlow 規格の策定を推進する Open Networking Foundation が 2011 年に設立され、他方では 2012 年に VMware がネットワーク仮想化の新興企業 Nicira Networks を買収し、オラクルが Xsigo Systems の買収を発表するなどネットワーク仮想化の動きが進展している。

（6）キーワード

ワークロードの多様化、ワークロードの急激な変化、クラウドコンピューティング、仮想化、並列分散処理、NoSQL、リアルタイム処理、ストリーム処理

（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	◎	→	・FIRST「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」、NEDO「ノーマリオフコンピューティング基盤技術開発」など不揮発メモリを用いた新たなアーキテクチャに係る取組みが進んでいる。 ・科研費特定領域「情報爆発」に始まりFIRST「超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的社会サービスの実証評価」などのプロジェクトに至る大量データ処理に関する基礎研究の蓄積がある。 ・情報通信研究機構の新世代ネットワーク戦略プロジェクトにおいてネットワーク仮想化、大量情報流通ネットワーク、コンテンツオリエンティッドネットワークなど産学官の研究プロジェクトが進んでいる。
	応用研究・開発	○	→	・スタンフォード大学のClean Slateプログラムに NTTドコモ、NECがスポンサーになり研究を推進。 ・Clean Slateプログラムの成果であるOpenFlow規格の策定を推進するOpen Networking Foundationに NECや NTTが会員企業として参画するなど研究開始当初からの取組みがある。
	産業化	○	→	・大規模分散処理環境で機械学習を行うソフトウェアフレームワークJubatusを NTTサイバーコミュニケーション研究所とPreferred Infrastructureが共同開発し、2011年にOSSとして公開した。 ・2012年に NTT Communicationがネットワーク帯域の空き状況に応じて通信経路を決定しネットワークの利用効率を向上させる機能を開発し、その機能を実装したOpenFlowコントローラをデータセンターの開発環境で運用開始している[15]。
米国	基礎研究	◎	→	・NSFが2009年～2011年にかけてクラウドコンピューティング技術に関するファンディングを実施し、アルゴリズムなど基礎的な研究への取組みもなされている[16]。
	応用研究・開発	◎	↗	・ドイツのDeutsche Telekom、米国のFacebook、Google、Microsoft、Verizon、Yahoo!の6社がOpen Networking Foundationを2011年に設立し、OpenFlow規格の策定や普及を推進している。 ・NSFの Computing in the Cloudプログラムにおいて Microsoftが Windows Azureを基礎研究、応用研究プロジェクトに無償提供するとともに、研究に必要なツールを共同開発した[17]。
	産業化	◎	↗	・Googleの Bigtable、Amazonの Dyanamoをはじめとした NoSQL、Hadoopのような並列分散処理ソフトウェアフレームワークが開発され巨大産業に供されている。さらに、大規模データのマイニングや機械学習のライブラリの Apacheの Mahoutなども開発され OSSとなっている。 ・ドイツのDeutsche Telekom、米国のFacebook、Google、Microsoft、Verizon、Yahoo!の6社がOpen Networking Foundationを2011年に設立し、スタンフォード大学のClean Slateプログラムの成果であるOpenFlow規格の策定を推進している。 ・世界に分散するサーバー群とそれらを結ぶ高速ネットワークにより地球規模のコンテンツデリバリネットワーク事業を行うAkamai Technologyなどの企業を擁する。

欧州	基礎研究	○	→	
	応用研究・開発	○	↗	・産業、ヘルスケアなどの応用を念頭においたセンサシステム、そのための無線通信や低消費電力化技術などの研究がIMECを中心に継続的に進められている。 ・ドイツのDeutsche Telekom、米国のFacebook、Google、Microsoft、Verizon、Yahoo!の6社がOpen Networking Foundationを2011年に設立し、OpenFlow規格の策定や普及を推進している。
	産業化	◎	→	・英国ARMが低消費電力プロセッシングコアのIP化とファブレス戦略により、携帯電話用では寡占状態にあるなど、ASIC市場において世界的に大きなシェアをもっている。
中国	基礎研究	△	↗	
	応用研究・開発	△	↗	・純国産のマルチコアプロセッサを使ったスパコンの開発など急速に技術レベルを上げている[18]。
	産業化	△	↗	・中国国内の検索最大手Baiduがモバイルとクラウドの積極的な活用をねらっており、独自のモバイルOSの開発やTencentとのサーバー・ラックの共通仕様「Project Scorpio」の検討など取組みが進んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	○	↗	・米国マイクロン・テクノロジーと韓国サムソン電子がハイブリッド・メモリキューブ・コンソーシアムを2011年に設立し、オープンインターフェース規格の共同開発・実装に取り組んでいる[19), 20)]。

（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.martinhilbert.net/WorldInfoCapacity.html
http://ijoc.org/ojs/index.php/ijoc/article/view/1562/742
How to Measure the World’s Technological Capacity to Communicate, Store, and Compute Information Part I: Results and Scope
2）http://www.sciencemag.org/content/332/6025/60
The World’s Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information
3）http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html
Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011-2016
4）http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html
Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011-2016
5）http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.html
The Zettabyte Era

6）スピードよりも効率重視 " スモールコア " を活用へ
日経エレクトロニクス No.1092, 2012
7）http://www.ngs-forum.jp/event/seminar/report/w12040401/w11002.pdf
Jubatus における大規模分散オンライン学習
8）http://www.ibm.com/developerworks/jp/java/library/j-mahout/
http://www.atmarkit.co.jp/fjava/rensai4/bigdata_java04/01.html
Mahout
9）仮想化の歴史
http://www.vmware.com/jp/virtualization/virtualization/history.html
10）仮想化の基本と技術　清野克行著
11）http://www.computerworld.jp/topics/601/186829
http://www.slideshare.net/AmazonWebServicesJapan/amazon-ec2-hpc
Amazon EC2
12）Google、Facebook、Microsoft などが業界団体「Open Networking Foundation」を設立
http://www.computerworld.jp/topics/603/191105
13）How the Emergence of OpenFlow and SDN will Change the Networking Landscape
2012 Brocade Communications Systems, Inc.
14）IT 融合シンポジウム　次世代ビッグデータ処理基盤システム
http://www.it-yugo.jp/program/PDF/2-7_takeuchi.pdf
15）ソフトウェアによりネットワークの動作を自由に制御する SDN ビジネスの展開について
http://www.nttdata.com/jp/ja/news/release/2012/060801.html
16）NSF Report on Support for Cloud Computing
http://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf12040
17）The sky is no limit: 13 research teams compute in the clouds
http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=119248
18）中国、国産プロセッサを搭載したスーパーコンピュータの存在を明らかに
http://www.computerworld.jp/topics/568/201024
19）ハイブリッドメモリキューブコンソーシアム（HMCC）
http://www.hybridmemorycube.org/
20）Hot Chip 23 - メモリバンド幅を画期的に高める Hybrid Memory Cube
http://news.mynavi.jp/articles/2011/09/13/hot_chips23_micron/index.html

3.7.3 CPSアーキテクチャ

（1）研究開発領域名

CPSアーキテクチャ

（2）研究開発領域の簡潔な説明

CPS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であり、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、知的生産性の向上に資すると期待されている。今後は、世の中のあらゆるシステムがコンピュータコントロールと連動して制御されるといっても過言ではなく、CPSはこれからの世の中に必須となる。

これまで種々のCPSが個別に開発されてきているが、整理され、統一された考えに基づくCPSのアーキテクチャというものが、あまり考慮されてきていない。用途に応じて専用にバラバラのアーキテクチャが採用されてきたともいえる。異種システムの連携、新システムの開発などを考えると、今後は統一された考えによるCPSアーキテクチャが必要であり、今後のCPSの重要度の高まりを考慮して、研究開発しておくべきと判断する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

CPSという言葉は、2006年ごろ米国科学財団（NSF: National Science Foundation）のH.Gillによって提唱された[1)]。コンピューティングと通信を物理システムと統合し、物理世界とのインタラクションを実現することによって、CPSは多くの便益を提供することができる[2)]。システムはより安全で効率的になり、構築・運用のコストを下げることができる。また個別の機器が連携することにより、新たな能力をもった複雑なシステムを実現することが可能になる。

米国では2009年からNSFが研究支援プログラムを立ち上げ､これまでに73のプロジェクトに対して約50億円（6500万ドル）の予算を付けている[3)]。

この73のプロジェクトの中でCPSのアーキテクチャに関連すると思われるものは6件であり、大半は個別のシステム開発のプロジェクトである。また、アーキテクチャに関連する6件はMediumとSmall Awardであり、総額でも650万ドル程度と、全体の1/10である。まだCPSアーキテクチャに関する活動は小さいと思われる。

一方ヨーロッパにおいては1998年から2002年に実施されたFP5においてARTISTプロジェクトを実施した。これは組込システムの研究開発に注力したものであり、その後のARTIST2, ArtistDesign, ARTEMISへと発展した。EUの研究開発では市場指向に重点が置かれており、産学の連携が奨励され、CPSは組込システムのデザインとして研究が行われている。

中国においては､「物聯網（ウーレンワン）」という名称で、各種センサやRFIDを利用したセンサ群と情報ネットワークの融合により、交通や物流など急激に成長する都市の問題を解決するための活動が中国各地の省や市で行われている。多くの都市で同時にいろいろな研究開発が行われているが、それらは個別対応であり、都市間で競い合っている状況である。中国全土、あるいはグローバルな展開を目指した技術やインターフェイスの研究開発には結び付いていないようである。すなわち、全体を見通したアーキテクチャについてはあまり議論されていないように見える。

国内においては、文科省が2011年度文部科学省委託業務「目的解決型のIT統合基盤技術研究開発の実現に向けたフィージビリティスタディ」を実施した。これは、安全・安心な社会、あるいは社会システム全体の高効率化を実現するIT統合基盤技術を開発するとの観点から、災害・エネルギー不足に強い社会づくりを支えるために必要となる要素技術などを検討し、国内外の研究開発動向や適用事例などを調査するとともに、その中で喫緊に集中的な研究を必要とするIT統合基盤技術の内容を明らかにすることを目的としていた。これと並行して、すでに重要性の認識されている技術課題については予備的な実証実験を行うことにより、検討内容を検証することも目的としていた。それを受け、2012年度には「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」という事業を実施している。

経済産業省の産業構造審議会情報経済部会は、2011年8月に中間取りまとめとして「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～」と題する報告を行った。この中で、農業や医療、交通など従来産業にITを融合することにより、新たなシステム産業創出を目指すとしている。これは明らかにCPSを意識したものであり、本報告は2012年度の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」としてまさに実施されようとしている。特筆すべきは、本プロジェクトには都市交通、ヘルスケア、農商工連携という各分野における実証・研究に加えて、「IT融合新産業を支えるデータ処理基盤に関する先導研究」が取り上げられている点である。世界に先駆けて、CPSアーキテクチャが提唱される可能性がある。

（4）科学技術的・政策的課題

- 個別の応用システムに関する研究開発は盛んであるが、共通基盤的な要素技術、特にシステムアーキテクチャに関する活動が不足している。これまでの汎用的なシステムに比べて、CPSは安全性や信頼性への要求が高くなる。カリフォルニア大学バークレー校のEdward A. Leeは従来のモデリングでは時間の概念の取り扱いが不十分であることを指摘し、コンピューティングとネットワーキングの新たな抽象モデルの必要性を説いている[4)]。
- CPSではサイバーであると同時にフィジカルな世界を取り扱うのであり、両者の橋渡しが重要な役割を果たす。まずは、フィジカルな世界をモデル化しサイバーの世界に取り込まなければならない。そのときにすべての物理的な要素を取り込むことはおよそ不可能であるから、ある観点から投影したものをモデル化しなければならない。そのための方法論の開発が待たれる。さらに、サイバーな世界で定義された要素をフィジカルなシステムに取り込むことも必要である。これらの中間的な記述が双方向に成り立つことが望まれる。
- また、このモデルは変化に対応することが必要である。すなわち、アプリケーションの要求に応じて、その粒度を変更したり、あるいはリアル世界にあわせてモデル自体の修整が可能であることが必要である。
- 物理世界で測定されるデータには必ず誤差があり、時間的な揺らぎや、計測そのものができないこともある。これに対して、ロボティクスではパーティクルフィルタを使ったパラメータ系列の推定が行われている。CPSにおいても、これまでコンピュータ側で取り扱ってきた数値データは正確であるとの前提であるが、データの精度や欠損、

信頼度への対応が必要となる。

- CPS においては、膨大な実世界のデータが収集される。これらのデータ収集には単に伝送するだけではなく、ストリーミングデータとして処理をしながら収集するという工夫が必要であろう。さらに、コストの面や、利用形態から見て、これらのデータをすべてデータセンターに蓄積することは、必ずしも得策ではないこともある。その場合、多くのデータがセンサあるいはセンサの周辺で管理されることが予想される。これをエッジ・ヘビー・データと呼び[5]、この取り扱いはハードウェアやミドルウェア、プログラミングモデルなどに影響を与えるであろう。それらが統合されたアーキテクチャが必要になる。
- CPS は実証することが重要であり、既存のシステムや他の CPS と連携することが多い。その場合、単独のシステムを構築し、実証実験を行うだけでは社会への定着は望めず、研究開発、実装、評価、分析のフェーズを繰り返すことによって、真に使えるものにするべきである。このようなループを回す研究開発は、これまでの資金形態では実施困難である。特区の設定など、柔軟な予算処置が必要であろう。また、プロジェクトの評価についても、最初に目標を設定し、ひたすらその実現を目指すというやり方ではなく、実装後の評価、その分析によって目標自体を見直しながら進めることが必要となる。このような柔軟なプロジェクト実施体制の構築が望まれる。
- CPS は社会基盤として広く浸透する考えであり、高い信頼性が求められる。そこで、CPS の信頼性を向上するためには以下のような技術開発が必要である。
  ➢モデリング技術、シミュレーション技術、安全検査技術などにより、CPS の信頼性、可用性などの事前評価・検証を可能にする。
  ➢様々なサービスが連携され、設計時には想定されなかった状況にもなる。このような場合でも、最終的な破たんを引き起こさないために、自己適応、自律技術の研究開発を実施し、CPS の信頼性を確保する。

（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）

スマートフォンの普及

2011 年の携帯電話出荷台数は 14 億 9,206 万台であり、そのうちスマートフォンは 4 億 7,465 万台であった。2017 年には 20 億台に迫ると予想されている[6]。スマートフォンはカメラや GPS などのセンサを装備し、インターネットに接続し、多くの情報を収集することができる。まさに CPS を支えるデバイスであり、個人個人に様々なサービスを届けるとともに、サービスそのものの有り様にも大きな影響を与える可能性がある。それらはニーズの変化、ワークロードの変化を引き起こし、CPS アーキテクチャに新たな要求を突きつけてくると思われる。

国内におけるプロジェクトの状況。

- 経産省、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」（2012 年～ 2016 年、2012 年：15 億円）
- 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」（2012 年～ 2016 年、2012 年：2.5 億円）

海外のプロジェクトの状況。

- アメリカにおいては、NSF が 2009 年から年間 3,000 万ドルのファンディングで、非常に多岐にわたるプロジェクトを実行中。
- EU においては、1998 年～ 2002 年の EU プロジェクト「ARTIST」。組込システム開発に関するプロジェクト。ARTIST2、ArtistDesign へと継続。その後 ARTEMIS プロジェクトとして、産学連携を実施。欧州は理論に基づく研究が活発。
- また、Ambient Assisted Living Joint Programming には、高齢者の生活支援を目指したプロジェクトが複数実施されている。WayFis では、高齢者の外出を支援するサービスを開発しており、150 万ユーロの予算が付いている。そのほかにも AAL では､介護ロボットのオープンプラットフォームの開発､高齢者のためのユーザインターフェイスの開発などのプロジェクトが実施されている。
- 中国では、物聯網（ウーレンワン）を 2009 年から実施。地方政府の動きが活発。多くの都市で活動を開始。米国を追い上げている。市場規模は 2020 年に 60 兆円と見られる。

（6）キーワード

CPS、アーキテクチャ、モデリング、プロジェクトマネージメント、シミュレーション、サービス連携、ワークロード、信頼性、安全性、時間の概念、エッジ・ヘビー・データ

（7）国際比較 [7), 8)]

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プロジェクトで基盤技術開発を開始。
	応用研究・開発	×	↗	・NEDO, 文科省で実証プロジェクトを開始。
	産業化	○	↗	・ITS、農業、エネルギーなど進展中。しかし、アーキテクチャとしての取り組みは少ない。
米国	基礎研究	◎	↗	・CPS Week2011 ではCPSアーキテクチャワークショップが開催され、アーキテクチャの重要性が議論されている。特にCMUのD.Garlanの研究は注目に値する。
	応用研究・開発	◎	↗	・NSFでいくつかアーキテクチャ関連のプロジェクトがある。
	産業化	◎	↗	・自動車への適用などでアーキテクチャが意識されている。
欧州	基礎研究	○	↗	・Internet of ThingsやNetwork of Exellenceの活動。
	応用研究・開発	◎	↗	・上記活動は応用にも力点を置いている。
	産業化	○	↗	・スマートシティなどで実践。
中国	基礎研究	○	↗	・CPS Week 2012 開催など、力を入れている。
	応用研究・開発	×	→	・理論と実践に差がある。
	産業化	○	↗	・物聯網、スマートシティプロジェクトが活発。
韓国	基礎研究	×	→	・CPSアーキテクチャの基礎研究はほとんど見られない。
	応用研究・開発	○	→	・ロボットのシステム化技術で先進的。
	産業化	○	↗	・ロボットの実用化に熱心。

（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）中島、SSR2011年度調査研究報告
2）CPS Steering Group, Cyber-Physicak Systems Executive Summary, Mar.6, 2008
3）http://www.nsf.gov/awardsearch/
4）E.A. Lee,"Cyber Physical Systems: Design Challenges", Technical Report No. UCB/EECS-2008-8, http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.html
5）丸山宏、岡野原大輔、”Edge-Heavy Data:CPS・ビッグデータ・クラウド・スマホがもたらす次世代アーキテクチャ”、2012年7月9日、GICTF総会　特別講演
6）矢野経済研究所　http://www.yano.co.jp/press/press.php/000890
7）CPS Week 2012　http://triton.towson.edu/~cpsweek/default.htm

8) "Comparison between the results of international technology level evaluation conducted by KEIT and CRDS", Aug. 2012, CRDS JST

3. 8 CPS（Cyber Physical Systems）

Cyber Physical Systems（CPS）は、Machine-to-Machine（M2M）、Internet-of-Things（IoT）、ビッグデータ、物聯網 などというキーワードとともに、情報通信技術の大きな一つの流れになりつつある。環境、都市、資源、医療／ヘルスケア、流通などの産業を、CPS 技術で抜本的に変革し、産業構造、経済構造、社会構造の大きな変革に結び付ける期待があるためである。

実空間に埋め込まれたセンサからのデータを収集、蓄積して、深く分析することで、既存の分野で新たな価値を創出することができる。例えば日本では、道路橋や河川管理施設、上下水道管きょ、港湾岸壁など、50 年以上経過する社会資本が今後急増し、必要となる社会資本ストックの更新費は約 190 兆円と推計されている。センサデータを積極的に用いることで更新費を低減できるとともに、上下水道の漏水／盗水検知や環境にやさしい都市開発など、世界的にも強く求められている地球的課題にも資することができる。

CPS の実現に向けては、本項で示すセンシング、アクチュエーション、プロセッシングという基盤技術に加えて、データ収集、プラットフォーム、社会デザインの 3 点をあわせて考慮していかなければならない。

センシング、アクチュエーション、プロセッシングに関しては、膨大な数の CPS デバイスが実世界に埋め込まれる世界の実現に向けて、低消費電力／低コスト CPS デバイスの研究開発が必須である。コンピュータ分野での Intel、携帯分野での Qualcomm に続く、新産業創出が目的である。

データ収集に関しては、競争力の源泉が「データを集めること」となることを認識し、都市、医療、農業、防災、防犯、環境、農業、物流など Web サービス以外の事業領域で生成されるデータを集めること自体を積極的に推進しなければならない。もちろん、データを集めさえすれば素晴らしい価値創造を実現できるものではない。集めたデータを深く分析して、新しい洞察や智恵につなげていかなければならない。

プラットフォームに関しては、垂直型から水平型の脱皮を目指した研究開発が必要である。エレベータの遠隔監視に代表される個別に構築した垂直型システムでは、用途や業種を横断した広がりを見込むことができない。業種によらない共通の仕組みを採用しプラットフォーム化して、様々な業種に水平展開しデータを相互に連携させることが必要である。データ連携、サービス連携などを含むサービス指向アーキテクチャを開発していかなければならない。

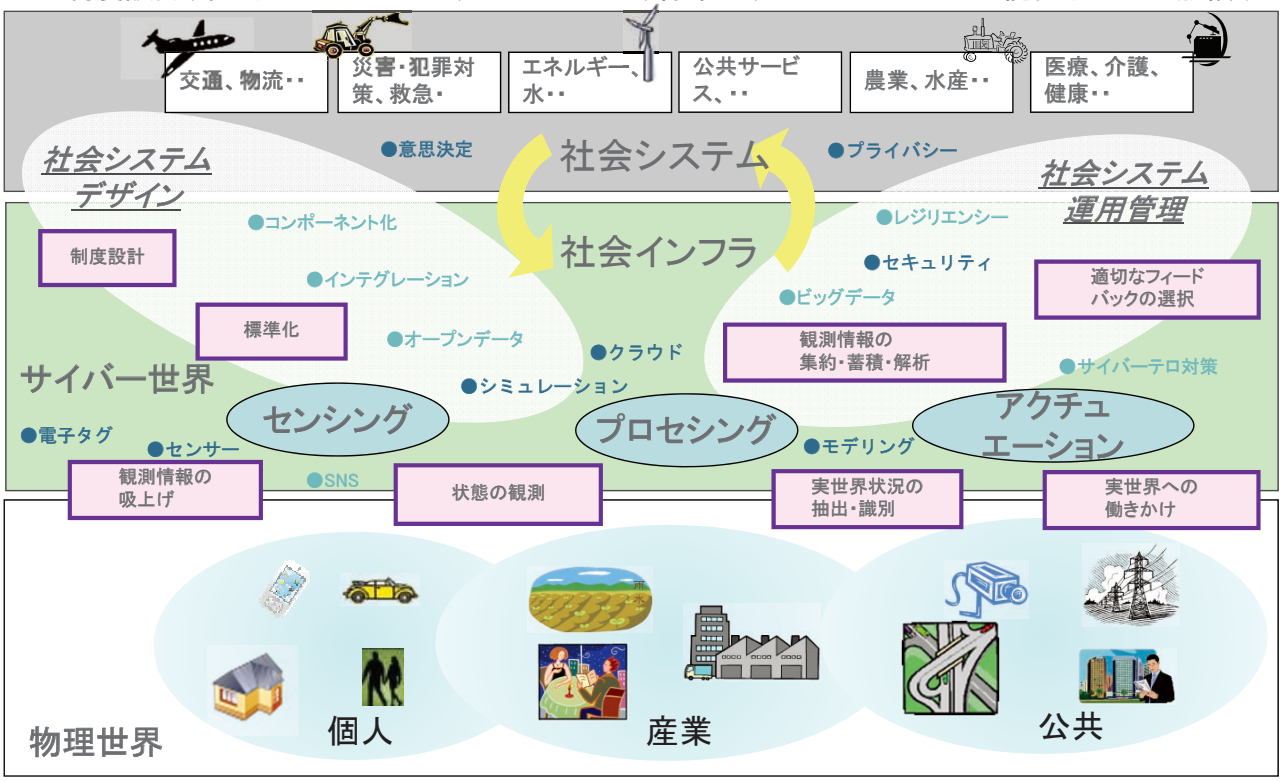
社会デザインに関しては、構造物監視、医療、農業などの他の事業領域を深く理解し、仮説を構築したうえで、検証、評価、改善を継続的に行うことが求められる。情報通信分野の研究者が、他の事業領域にまで踏み込んで新たな洞察や智恵を見出し、新しい社会をデザインしていくことが必要である。他の事業領域に踏み込んで価値を創造することには、大きなリスクを伴うからこそ、国がしっかりと支援することも必要である。

データが生活、社会、産業における「神経系」となる 10 年、20 年、50 年後の世界を、異分野・異業種の人達が一緒に沈思熟考しながら、新しい産業と社会制度の確立に貢献していくことこそが、CPS に課せられた課題である。

ミクロ俯瞰図（CPS）

物理世界とサイバー世界(ICT)の高度な融合によって新たな価値を生み出す

- 複数の社会システムにまたがる社会実験と学際的分野融合が必要
- 制度設計、社会アーキテクチャ、データモデル、標準化、コンポーネント化と統合などが重点領域



3.8.1 センシング

（1）研究開発領域名

センシング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

外界の様々な情報（物理情報、化学情報）を取得して電気的な信号に変換するデバイスおよびシステ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

“センシング”に関する技術は外界の情報を様々な機器に取り込むための入り口であり、IT機器、ロボット・車などへの情報入力装置としてますます重要となってくることが予想される。その重要性は産業界・研究者皆が認めるところであるが、“センシング”のための新規デバイス（センサ）の開発・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要求が国内外で出てきている。

その要求から考えて、今後強化すべきセンサ技術分野として、以下の3つがあげられる。

・オンサイトモニタリング用センサ（環境、農業、建造物）：農業現場へのセンサ技術の導入は総務省試算[1)]によると国内だけでも農業用センサは18億個強が必要となり、自動車用センサの0.8億個の約25倍の市場（海外を入れると爆発的に増える）をもつが、様々な環境情報を検出できるセンサ自体の開発に関しては国内外ともに大学・試験所レベルでも研究開発の動きが鈍い。また、豪雨、台風などに伴う崖崩れ、古い建造物の耐久性なども長期間にわたりセンシング可能なセンサが必要となる。現在センシング分野で研究開発されているエナジーハーベスト、無線技術（センサネットワーク技術）とこれらのセンシング技術との融合により、はじめて社会インフラを見守るセンシングシステムの実現を図ることができる。センサネットワーク技術は米国、欧州、国内で様々なプロジェクトが始まっているが、海外・国内ともにオンサイトモニタリング用センサデバイスの研究が進んでいない。特に農業関連のセンサネットワークのプロジェクトは国内で始まりつつあるが、センサ自体の研究に関しては、マーケットが未知数、農業用センサとしての基礎的研究が未熟という点が課題であり、今後開発を強化すべき課題と考える。それらのセンサ技術が確立できればスマートシティという概念にとどまらず、スマートフィールドとの考えが広がる。

・生命と情報化社会をつなぐためのセンシング技術（生体センシング、バイオメディカルLSI、体内埋め込み型センサ）：この分野は、米国で進んでいる。特にmHealth（Mobile Health）[2)]プロジェクトは、予防医療、在宅医療に関する取り組みであり、データの観測・採取、データベース化に取り組んでいる。その中でセンサデバイスは非侵襲での血圧、脈派、血糖値の測定が中心的な研究課題であり、これまで様々な機関で研究が進められてきたが、精度などの面から現時点でも医療情報として使えるまでに至っていない。体内埋め込み型のセンサデバイスの研究開発は、腹腔や皮下、消化器官内・血管内などに滞在し長期間の物理センシングおよび生体成分センシングを可能にし、病気の超早期診断、治癒率向上につながることは誰もが疑わないが、現在マーケットとして成功しているのはグルコースセンサのみである。

欧米において、10年ほど前からMEMS・バイオセンサ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、および細胞・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ていない。しかしながら、10年後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（感受部は生体分子、信号処理部は電子デバイス）が実現できる。生体材料や機能的高分子材料を用いることで生体情報や環境情報を、従来のセンサに比べ、高速・高感度にセンシングすることができ、LSI技術との一体化により、生体と機械とのインターフェイス（BMI（Brain Machine Interface）など）の強力なツールとなる。

LSI技術と医療バイオ技術の一体化に関して、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。後述する課題に記述するが、これらがイノベーションを引き起こすためには、死の谷、ダーウィンの海に加えて異分野・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）などの大きな壁を超える必要があり、この点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、従来のセンサは、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が、今後開発すべきITと生命をつなぐセンサはウェット環境での使用が必須となり（農業、環境、土壌、生体内、医療環境分野）、革新的な製作技術の誕生が必要である。これまでのセンサは半導体微細加工技術を基盤に進められており、ウェット環境での信頼性、耐久性含めた技術的な課題が存在している。

・低コスト、少量多品種製造技術（プリンテッドエレクトロニクス技術[3)]（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イメージセンサや加速度センサを除いては、センサ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、ならびにセンサ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。

大量のセンサ、時系列のセンシング情報から有意な情報が、センサネットからあふれてくる。それらのビッグデータより有意なセンシング情報を見つけ出す、マイニング技術を同時に開発しないと、センサの開発、センシングネットワークが発達しても有効に活用できず、センサによるイノベーションは起こらない。マイニング技術開発には、情報処理研究者だけではなく、センサのユーザであり、様々な経験をもつ異分野研究者との連携が鍵となる。

（4）科学技術的・政策的課題

センサ集積化製造拠点、異分野融合研究開発ができる開発拠点整備：我が国のセンサに関する国際競争力を確保するためには、センサの製造技術を一層高度化することが必要である。センサ産業の裾野を拡大し、多様な分野において多様な開発者・研究者が異分野融

合をしながらセンサ開発・実用化に取り組むことがセンサ分野の基盤強化のために重要である。しかしながら、製造設備を有する大手企業だけでは、今後市場が拡大すると予想される、農業関連センサ、生体・医療・バイオ関連センサは実用化することは困難であり、ニーズやシーズをもつ異分野の企業が、これまでのセンサ技術をもつ研究と連携して、容易にセンサ開発を行える拠点を作る必要がある。

センサ開発の環境（例えば医療用センサでは薬事、治験研究、保険点数など）：これまでのセンサは、電機部品メーカーが主体となって開発され、この流れは今後も進むものと思われる。その理由はセンサの高性能化、高感度化、システム化（ネットワーク化）すべて半導体技術が必須であるからである。しかしながら、それらの企業が事業化を始めるためには治験など（新規センサを治験に通すために5年程度必要。その後保険適用として認めてもらうためには3年）の長い年月が必要であり、これでは、日本企業が製品化を目指すにはタイミングを逸してしまい、政策的な解決法が必要である。

市場形成へのための戦略的施策：農業用センサ、バイオメディカルLSIなどは私たちの健康、安全な食環境に貢献でき、我々の生活の豊かさ、健康のために重要な技術である。しかしながら、企業がそのセンサ分野への参入を検討する場合、この分野は未成熟であり開発に対しての決断が遅れてしまう。このままでは海外企業により市場が形成された後の参入となり、重要なセンサ技術が海外に握られることになる。

（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）

・次世代DNAシーケンシング技術（半導体センサアレイ、ナノポア技術）[4), 5)]

DNAをシーケンシングして個人のDNAを簡単に知ることは、今後様々なテーラーメイド医療などに重要となってくる。米国を中心に半導体微細加工技術などを利用したDNAシーケンシング技術の研究が活発化している。一つは米国Life Technology社のCMOS技術による1000万個の水素イオンセンサをアレイ化したチップを利用するものであり、わずか20分程度でヒトゲノムが解読でき、商品化が始まっている。半導体センサ技術の低コスト化技術、センサの高密度化技術をうまく取り入れて、バイオセンサと集積回路技術の融合により成し得たものである。またCMOS技術によりナノサイズの穴(ナノポア）をアレイ化したものを利用して、その穴をDNAが通過するときのイオン電流を測定することでシーケンシングを行うものの開発がしのぎを削り始めており爆発的な展開が考えられる。

・mHealth（Mobile Health）

医療分野に関しては、世界的医療機器メーカーであるPhilips社の子会社で医療専門ソリューション開発会社であるVISICU社が、集中治療室の患者の状態を、患者に取り付けている医療機器に装着したセンサを通して心拍数や血圧などのリアルタイムの情報により監視することが可能な「eICU」ソリューションを開発・提供している。

・EPoSS：European Technology Platform on Smart Systems Integration[6)]

アプリケーション分野とプラットフォーム技術が交わるところに必要なデバイス技術を戦略的に定め、この技術開発を希望する企業、研究機関を配置するというスキームである。ターゲットとしているアプリケーション分野は、航空宇宙、自動車、通信、ネットワーク、医療・健康、セキュリティである。プラットフォーム技術としてエネルギー、スマートパ

ワーマネジメント、化学・バイオセンサ、印刷プロセス、スマートテキスタイル、画像センサがあげられる。プロジェクトの目的として欧州の産業の発展をあげていること。

（6）キーワード

オンサイトモニタリング用センサ、生体センシング、再生医療用センシング、CMOS集積化センサ技術、センサ開発製造拠点

（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に関する研究が後発ではあるが、慣性力センサやイメージセンサに関しての優位性は保っている。
	応用研究・開発	○	→	・17企業・研究機関などが参画し、国/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が進められている。省エネ効果に寄与するグリーンMEMSセンサ機能、無線通信機能、自立電源機能及び超低消費電力機能などを付与した革新的センサの開発を進めている。 ・センサネットワークに関するコンソーシアムが立ち上がり（新世代M2Mコンソーシアム）上流側からの開発が始まっているが、肝心の小型自立型のオンサイトセンサに関する開発が進んでいない。
	産業化	◎	→	・自動車関連センサ、携帯電話用センサ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、バイオセンサに関連の事業化が遅れている。また、異分野融合研究開発が次世代の事業展開に必須であるが、それらに対する動きは鈍い。これも医療に関する日本における認可関連の困難さが一因と考える。
米国	基礎研究	◎	→	・体内埋め込みセンサに関して医療現場を始め、その他の分野に向けて多くの研究者が、過去5年前と同様に集積している。特に生物とロボットとのインターフェイスに向けたセンサ開発は依然活発であると言える。 ・ナノ材料とシステムを集積化して、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。 ・センサデバイス単体のプロジェクトの数が少なくなっている。 ・イメージセンサに関しての基礎技術基盤として、宇宙開発用分析センシング技術としてもプロジェクト研究がJet Propulsion Laboratory（JPL）ではじまっている。火星探査衛星キュリオシティ後継機などへの搭載を目指している。
	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、安価に大量にセンサデバイスをつくるプロジェクトが進んでいる。 ・半導体材料などのマイクロエレクトロニクス材料を用いるのではなく、フレキシブルなエレクトロニクス技術とロボット技術との融合による次世代技術の検討が進んでいる（DARPA）。 ・米国ではセンサ単体のプロジェクトが減少する一方、センサネットワークを利用したエネルギー関連、スマートグリッド（例えばSmart Grid Investment Grants: SGIG）、スマートメータ、都市インフラ、医療関連（mHealth）が盛んである。
	産業化	◎	→	・半導体トップダウン技術を利用したバイオ技術との融合で大きな動きがある。CMOSによりアレイ化したバイオセンサ（水素イオンセンサ）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 Platform on Smart Systems Integrationのプロジェクトの一つとして進んでいる。ねらいは米国同様医療、ネットワークなどのアプリケーションのためのバイオセンサ、画像センサが中心である。 ・基礎研究としては、ナノエレクトロニクス、ナノフォトニクス分野を中心に進められており、材料、プロセスを中心的な課題としてセンサ研究が進んでいる。 ・CMOSベース医療用センサ、オンサイトセンサの研究が増加している（例えばDelft工科大学では食品の製造運搬）。
	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研究機関との共同研究を推進している。特に健康・環境、エネルギー・輸送・住宅、通信、マルチメディア、防衛への応用を目指した、MEMSセンサ、バイオ・化学センサを中心に進んでいる。
	産業化	◎	→	・ヨーロッパのマイクロエレクトロニクスの産業化の中心はベルギーIMECで進められてきたが、IMECにおいても、LSIを基盤技術としたセンシングデバイス研究が活発化している。特にその中心的開発はバイオ産業向けに重点が置かれている（ワンチップ化学センサ、イオンセンサ、分子認識センサ）。 ・STMicro electronicsが進めているMEMSセンサ事業（加速度センサ、圧力センサ、慣性力センサ）は堅調に行われており、さらに健康、バイオセンサ事業への展開を進めている。
中国	基礎研究	△	→	・10年後の産業化が期待される、オンサイトモニタリング用センサおよび体内埋め込み型センサなどの研究に関して、注目するような研究の動きはない。バイオセンサに関してもセンサ開発については、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は国をあげて研究が進められている。感知中国センター（SCC）[7]によるセンサ技術革新、研究成果の商業化、関連産業の集積が行われている。
	産業化	○	↗	・加速度センサなど生産拠点が、日本から中国に移っている。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デバイスの研究者人口は増えていない（逆に減っている）理由はディスプレイ、LED関連のプロジェクトに資金集中が進んでいるのが原因ではないかと思える。
	応用研究・開発	△	→	・ベンチャー中心に、グルコースセンサ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、イメージセンサになる。今後アミューズメント他の応用に向けて3次元画像（距離画像）センサの開発が行われている。（研究レベルでは日本の研究機関が進んでいたが、日本国内企業では事業化が進んでいない分野である）。
台湾	基礎研究	○	→	・台湾の研究機関によるバイオセンサ関連の研究が少数ではあるが進んでいる。しかしながら後述のマイクロエレクトロニクスファウンドリーの後押しにより、LSIベースのセンサ開発が今後活性化する可能性がある。
	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・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ファウンドリー大手（TSMC、Asia Pacific Microsystems社[8]）が力を入れており、センサ開発の産業自体日本国内から出て行く可能性がある。

（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）http://www.soumu.go.jp/main_content/000134247.pdf
2）http://www.mhealthsummit.org/
3）http://www.electroiq.com/articles/sst/2012/08/uc-berkeley-parc-thinfilm-electronics-pursue-printed-sensor.html
4）http://products.invitrogen.com/ivgn/product/4462917
5）Nature 475,348–352 2011
6）http://www.smart-systems-integration.org/
7）http://www.nrscc.gov.cn
8）http://www.apmsinc.com/

3.8.2 アクチュエーション

（1）研究開発領域名

アクチュエーション

（2）研究開発領域の簡潔な説明

サイバーフィジカルシステム―アクチュエーションは、環境や人間から抽出されたデータに基づいて、人間および環境、物質に働きかけるシステムについての研究分野である。中でも人間の感覚に働きかけて人間の行動に直接的に作用するとともにそれらの物理的なインタラクションを共有するサイバーフィジカルシステムは、従来困難であった人間支援を可能にする重要な研究開発領域である。高齢者が自律的な行動を維持し、社会的貢献を長期間継続するための支援技術にもつながる。

その際、特に重要な着眼点はダイナミックな運動情報の共有という概念と人間の触覚に対する刺激であり、ハードウエアにおいては人間の自由な行動を妨げない非拘束の触覚刺激デバイスと、それらの可能性を広げる非拘束での電力伝送技術が重要な研究開発分野となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サイバーフィジカルシステムとは、人間が意図的に入力するデータだけでなく、センサが計測した実世界の状態を共有・活用しながら情報世界と実世界が緊密に結合するシステムである。センサデータによって実世界の情報を獲得しようとする段階を第一世代のサイバーフィジカルシステムとすると、その次の課題は、ネットワークを介して直接的に実世界を制御することにある。

実世界における直接的なアクチュエーションの対象は、環境、物質、人間など多様であるが、特に人間を対象としたアクチュエーションは重要である。その具体的な作用には、生体に対する物理的・物質的作用、人間の感覚に対する刺激、人体に対する力学的作用、があり、それぞれが個別の発展可能性を有している。

これらはいずれもその要素技術において電子情報通信分野に深く関係しているが、特に人間の感覚に対するアクチュエーションは当該分野にとって重要なテーマになると考えられる。すなわちセンサデータから抽出した価値のある情報を、従来型の情報端末を通して提示するだけでなく、そのデータに基づいて人間の行動をより直接的に制御すること、さらにそのアクチュエーションに対する人間の応答の仕方までをネットワークで共有することによって、従来の限界を越えた人間支援システムが可能になると考えられる。

サイバーフィジカルシステムにおける人間感覚アクチュエーション

具体的な一つの研究分野は、人間のダイナミックな運動・行動のセンシングデータに基づくリアルタイムでの行動支援である。例えば感覚の衰えた高齢者が自律的な運動の能力を維持し、より長期間社会貢献を継続していくためには、情報システムによるリアルタイムの行動支援が必要である。古くからある老眼鏡は、老化によって劣化した視覚を補完する道具の一つであり、この道具のおかげで働き続けることができる高齢者は数多い。これをさらに拡張し、センシングとそのフィードバックによって衰えた感覚の一部を補完し、行動を直接的に支援する技術は、先進国における高齢化問題を最も直接的に解決できる可

能性がある。

このような人間の物理的行動支援のシステムを実現するための一つのアプローチは、1990年ごろまでに盛んに行われた人工知能研究と同様に知的行動の根本原理を解明し、個々のフィードバックシステムの動作をアルゴリズム化しようとするやり方である。これと対局をなすもう一つの考え方は、多数の人間の行動とその結果について、物理的ダイナミックスを含む膨大なデータを蓄積し、そのデータベースに基いて適切なフィードバックを決定する、という考え方であり、これは将来のサイバーフィジカルシステムが取り組むべき最も魅力的な問題の一つになるものと考えられる。

上記第2世代のサイバーフィジカルシステムを実現するためには、その前提として人間の感覚を刺激し、行動の制御を支援するための情報ディスプレイの技術的革新が不可欠である。人間の動き方の一つ一つを文字や言葉で伝え尽くすことはできないため、触覚による行動誘導の技術が期待されることになる。大掛かりな機械に頼らずとも、自分自身の筋肉を使って適切に行動させるための刺激装置、すなわち触覚までを含むフィジカルな相互作用において人間と環境の状態をセンシングし、人間に対して適切な感覚刺激を行うアクチュエーション技術が重要な研究課題となる。

触覚を介した情報支援は、人間の行動を適切に導くだけでなく、人間に安心感を与えたり、人間同士の絆を実感させて行動のモチベーションを高めたり、理性の根底にあるモチベーションに働きかけるために鍵となる情報のチャンネルであると考えられる。

特に近年、日本国内での研究によって超音波を用いた触覚の遠隔刺激技術が実証され、人間の行動を制約しない接触刺激が可能となった[1)]（Super Haptics）。従来は触覚刺激のために大掛かりな機械的装置に触る必要があるか、特別の装置を皮膚密着させる必要があったため、触覚を介して広く人間生活を支援することは物理的に困難であったが、そのような制約は近年大幅に緩和されつつある。また、最近の2、3年で急速に普及したスマートフォンなどの携帯端末にも容易に付加できる触覚提示デバイスも提案されており[2)]、非拘束での触覚刺激の可能性が急速に広がってきている。

触覚を含むフィジカルな相互作用に関連する技術については、民間企業、公的機関を問わず世界的に研究が活発化しつつあり、我が国においても集中的な研究開発とビジネス展開支援が強く求められる領域である。

サイバーフィジカルシステムのための基盤技術

前述のように人間を取り巻く環境が環境の側で自律的に動作し、人間を環境の側から支援する技術は「アンビエント」としてすでに定着しつつある考え方である。しかしこのようなアンビエント環境を最初から完全な形で提供しようとすると、その必要十分な仕様を事前に明確化することは容易でなく、コストも過大なものとなりがちである。特に前述のようなサイバーフィジカルシステムを実現するためには、個別の状況、および共有されたデータに基づいてフレキシブルに環境の機能を変化させることができる物理的インフラが必要となる。具体的には、様々な機能をもつデバイスを必要に応じて環境に配置し、実際に動作させるための電力供給と情報のコネクション技術の革新が不可欠である。また人間から離れた環境だけでなく、人間が身に着けたり、体内にインプラントして動作させたりするためには、そのデバイスまでの電力と情報の新しいパスが必要であり、現在我々が利用している配線技術やバッテリー、エナジーハーベスティングなどの技術では、その多く

をカバーすることは困難である。これに関係した技術については、2006年にマサチューセッツ工科大学から共鳴給電が発表されて以来、ワイヤレス電力伝送技術が検討されてきている。しかし当面の着地点として標準化[3]・実用化が検討されているワイヤレス電力伝送技術はその適用可能な条件の範囲がそれほど広くなく、サイバーフィジカルシステムでの活用のためには、基礎レベルからの研究が必要である。

近年の顕著な展開としては、マイクロ波帯での半導体素子の基礎特性向上があげられる。汎用部品においても60%の変換効率を有する素子が市販される段階になっており、高周波波動を電力伝送媒体として現実に活用できる状況が生じている。これによってワイヤレス電力伝送の設計の自由度は大幅に広がった。高周波数波動を物体表面に閉じ込め、人間が手に触れる一般環境で活用する技術[4]が提案され始めている他、ミリワットクラスの電力を体内に埋め込まれた微小素子に伝送するミリ波電力伝送など、新しい電力伝送の概念も提案され始めており、今後の集中的な研究開発によって成果が見込める技術領域であると考えられる。

（4）科学技術的・政策的課題

人間行動アクチュエーションの要素技術課題

特に重要な課題は、人間の自由な行動を制約しない非拘束性を保ちながら人間とフィジカルインタラクションできるハードウエア技術の確立である。ごく最近の研究で、人間の皮膚に非接触のまま触覚技術を誘起できる技術も実証され、人間とデバイスの機械的接触に起因する制約を受けない触覚情報提示が可能になった。これらの研究を契機とし、大面積超音波アレイデバイス、MEMSアクチュエーターを含む非拘束型のフィジカルインタラクション技術を確立していくことが急務である。

前述のように、米国、欧州をはじめ、韓国、ロシアまでもが触覚技術に対して積極的かつ大規模な研究開発投資を開始しており（残念ながら多くは非公開情報であるが）、我が国においても国家プロジェクトとしての支援が必須の研究領域である。

環境アクチュエーションの基礎技術

ワイヤレスの電力伝送法としては2006年以降、マサチューセッツ工科大学から提案された共鳴給電を中心に検討が進められ、その適用範囲が徐々に明確になってきた。と同時に新しいニーズに応える新方式のワイヤレス電力伝送法の必要性が認識されつつあるのが現状である。今後は高周波半導体素子を活用するマイクロ波帯の伝送方式や、ミリワットクラスの電力を微小素子に伝送するミリ波帯電力伝送方式などのシステムの研究を、素子の低損失化と同時に推進していく必要があり、確実な成果が見込める研究領域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）

- 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活発に活動している。多くは非公開情報であるが、Intel、Microsoft、Appleをはじめ、ディズニーなどアミューズメント関連企業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るが、より戦略的な動きとして、ロシアでも触覚研究所の設立が計画されている（ただし未公開情報）。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なっている。

- 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、特に近年はサムスンによる活発な研究開発が行われている。KAIST などの国立研究機関においても強力な研究開発体制が確立されている。
- 触覚刺激を非接触に行うことによって従来の触覚活用の制約を取り払う技術（Super haptics）は日本の大学から世界に先駆けて提案・実証された技術である。

（6）キーワード

感覚アクチュエーション、フィジカルインタラクション、アンビエント、触覚、非拘束触覚刺激、ワイヤレス電力伝送

（7）国際比較（特に触覚インターフェイスについて）

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。 ・個別的にはユニークな研究が多いが、産業化を見据えた系統的な研究体制はできていない。
	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が生まれていない。
	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。
米国	基礎研究	○	↗	・2000年初頭まではMIT Touch Labが触覚基礎研究をけん引。外科手術シミュレータ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Phantomを生み出したSensableや、情報機器における触覚インターフェイス技術を開拓した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みられるが、本格的な産業化はこれから。 ・Intel、Micorsoftやディズニー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なわれている。近年もImmersence Project（2010まで）など欧州共同のプロジェクトが展開されている。
	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所の設立を計画（ただし未公開情報）。
	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	―		不明
	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	◎	↗	・サムスンを中心とした本格的な研究開発投資が行われている。
	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。

（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）Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Trans. on Haptics,

Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
2）Senseg ホームページ
http://senseg.com/
3）ワイヤレスブロードバンドフォーラム ワイヤレス電力伝送ワーキンググループホームページ
http://bwf-yrp.net/menu-03-06-01.html
4）Akihito Noda and Hiroyuki Shinoda: Selective Wireless Power Transmission through High-Q Flat Waveguide-Ring Resonator on 2D Waveguide Sheet, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 59, No. 8, pp.2158-2167, August 2011.

3.8.3 プロセッシング

（1）研究開発領域名

プロセッシング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

インターネット、クラウドとセンサネットワークを結合したサイバーフィジカルシステムにおいて、センサネットワークの各ノード（センサネットノード）に組み込まれるプロセッサやソフトウェ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

プロセッシングとは、ハードウェアとしてのプロセッサとそのプロセッサで実行されるソフトウェアの組み合わせによるデータ処理・情報処理全般の機能である。サイバーフィジカルシステムでは、インターネットで結合されたサーバーやクラウドとセンサネットノードが分担してプロセッシング機能を担う。サーバーやクラウドは、インターネット上の大規模で高速なデータ処理･情報処理を専門に実施する。いわゆるサイバー空間でのデータ処理である。これに対しセンサネットノードでは、センシング機能の制御によるデータ入力やそのデータの処理･加工、インターネットやセンサネットワークからの処理要求（トランザクション）に対するデータ通信やアクチュエーション機能の制御を実施する。いわゆるフィジカル空間（物理空間）におけるデータ処理である。

サイバーフィジカルシステムのプロセッシング＝
インターネット上でのサーバーやクラウドでの処理（サイバーデータの処理）
＋
センサネットノードでの処理（フィジカルデータの処理）

2000年以降、欧米および我が国でユビキタスコンピューティング、サイバーフィジカルシステムなどとして研究開発されてきたこの分野は、PC、携帯電話、スマートフォンなど、人がインターネットと接続する情報機器がこの10年間で世界中に幅広く普及した背景から、新たに人や情報機器以外の各種機器や社会･自然環境下のセンサをインターネットに接続することで新たな機能やサービス、価値を生み出そうとして欧米、アジア各国で活発に研究開発が推進されている。このようにプロセッシングでは、社会・自然環境下の多数のセンサや機器をリアルタイムに接続することと、これによって得られた膨大なデータ（ビッグデータ）の処理が研究開発の基本的な目標だが、後者のテーマ分析は「ビッグデータ」などの他の区分に譲り、本稿は主に多数のセンサネットノードにおけるリアルタイムなデータ処理を対象とする。センサネットノードのプロセッシングに関係する主な技術動向は以下の通りである。

- インターネットとの接続、連携による機能実現が強く要求されるようになった。
- 多種多様なノード（各種のセンサや機器など）が具体的してきた。
- 無線ネットワークが広く使えるようになった。
- 高集積化と並列処理化によるマイクロプロセッサの高性能化が続く。
- 高性能化や台数の増加に対する低電力化の要求はますます強い。
- 機能やサービスの実現が単体ノードでは閉じず、アプリケーション指向性が強まる。

国際動向としては、Intel、Google、Microsoftを有し、民生とともに軍事でも強い動機付けをもつ米国がインターネットによるサービス市場の拡大を目指して多大な研究開発投資をしている。欧州は、組込みマイクロプロセッサのARMや無線・有線通信の標準規格、車載応用をベースに積極的な研究開発投資を継続している。韓国では、サムソンや有力大学でモバイル機器応用に向けたこの領域の研究開発が活発であり、また台湾では、産官学連携で医療応用に向けた研究開発プロジェクトが推進されている。

日本は、これまで民生機器や情報通信機器、車載機器・ロボットを対象に、プロセッサとソフトウェアを組み込んで機器を制御する組込み機器制御やそのためのマイクロコントローラ、SoCの技術に幅広く強みをもっているが、このプロセッシング技術を新たなセンシング技術やアクチュエーション技術に合わせて発展させるための研究開発投資が不可欠である。また日本は、先年の大震災で再認識された自動車や公共交通などの交通環境や電気・水道などの社会インフラの安全・安心、少子高齢化に対する医療・ヘルスケアなどサイバーフィジカルシステムのアプリケーションに対する強い要求があるので、これらを具体的な対象としながらプロセッシング技術、センシング技術、アクチュエーション技術とそれらを組み合わせたサイバーフィジカルシステムのプラットフォームの研究開発を推進することが重要である。

（4）科学技術的・政策的課題

・システムレベルでのセンサネットノードの低電力化

センサネットノードの増加速度はモバイル機器の10倍、PCの100倍と見積もられており、ノードの低電力化の技術開発が必須である。その際、デバイス・回路技術で動作電力や待機電力を削減する開発路線に加えて、パワーゲーティングや電力制御によってノードの電力を積極的にオフする「ノーマリーオフコンピューティング」の技術開発が重要である。ノーマリーオフコンピューティングでは、電力をオフできるタイミングと期間を検出するためにソフトウェアやアプリケーション属性を含むシステムレベルの電力制御の技術開発が必要である。

・内蔵メモリの高速化・低電力化・不揮発化

センサネットノードの内蔵メモリの高速化と低電力化は、ノードの動作時の電力削減だけでなく、ノードの電力をオフする際のデータの退避・復帰に必要な電力を削減するためにも重要な技術開発となる。不揮発RAMの開発はそのブレークスルーとなる可能性がある。

・多種類のセンシング、アクチュエーションに対応するプロセッシング・インターフェイス

センサネットノードに搭載されるセンシングやアクチュエーションの機能は多種多様である。これらの機能に対してハードウェア的にもソフトウェア的にもできるだけ共通の統合されたインターフェイスを構築することが重要な課題となっている。リコンフィギュラブル・アナログ回路技術とソフトウェア処理技術の組合せが有効になる可能性がある。

さらに技術の源流に遡った課題提起として次のような考察がある。我が国は現在、センシング技術やアクチュエーション技術の基礎研究に多くの強みを有しているが、中でもメカニカルな機械技術や微細加工技術、さらに材料技術に強みがあるものが数多くある。一方、これらのセンシングやアクチュエーションとセンサネットノードのプロセッサとは電

気信号によってインターフェイスがとられるが、その生のままのデータはセンシングやアクチュエーションの力学的、機械的、材料的特性に応じて多様な信号特性、信号ノイズなどを有している。このような信号特性の変換やノイズ補正には、センサノードでの電子回路的、ソフトウェア的なプロセッシング技術との融合技術が強力な効果を発揮する可能性が高い。3Dマウスなど、3Dセンサの商品化におけるセンサ・フュージョンと呼ばれるソフトウェアはその萌芽と言えるだろう。OSやプロセッサなど、オープン・プラットフォーム化が進む現状においても、このように力学・機械・素材などとプロセッシングやソフトウェアといった異なるレイヤーを結び付けた知財はその要素技術の応用や実用化において極めて強力で大きな効果を発揮する。センシング技術やアクチュエーション技術の強みを強化し、システムレベルでの強みに拡大するために、これらとプロセッシング技術の研究開発の連携強化が重要である。

・センサネットワーク通信の低電力化

センサネットノードの低電力化と並んで、ノード間のネットワーク通信の電力削減が重要な課題となっている。これに向けて、ノードとサーバーの間でプロセッシング負荷を最適化して通信パケットの長さや数、頻度を削減したり、通信自体を間欠的に動作させることによって電力を削減する開発が候補となる。

また、センシングしたデータをノードからクラウドなどに上げる際に、ノードでのフィルタリング処理などのプロセッシングの電力性能を改善することで、クラウド側に送信するデータ通信量を削減することができ、これによってネットワーク通信全体の低電力化が図れるといった、センサネットワーク・システム全体を俯瞰した処理負荷分散、電力負荷分散と全体電力低減の研究開発が重要になる。このようなセンサネットワーク・システム全体の低電力化の研究開発には、ノードでのプロセッシングを仲立ちにしてセンシングやネットワーク、クラウドにまたがった視点での研究開発が不可欠になるだろう。

・大規模センサネットワークの管理技術

センサネットワークは、社会環境や自然環境、各種機器に設置された多数のセンサやアクチュエータを接続するため、人が常時管理することが困難であり管理技術が大きな課題である。センサネットワーク構築時の初期化や起動の管理だけでなく、増設や故障に伴うノードの増減の管理、リアルタイムなデータ処理のベースとなる時刻管理、長時間動作による各ノードの電力管理や機能劣化の補正管理、セキュリティ管理など多様な課題がある。

・センサネットワークの研究開発体制

センサネットワークのプロセッシング技術の研究開発は、先に指摘したように、まず日本に強みがあるアプリケーションの要求でドライブして実証することが効率的と考えるが、そのためにはデバイスからアプリケーションまで、ハードウェアからソフトウェアまで、センシングやアクチュエーションからデジタルプロセッシングまでの多様な分野にまたがった研究開発の交流と連携、そして与えられたアプリケーション要求に対するソリューション最適化を指向しやすい研究開発の運営体制構築が極めて重要である。

（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）

- 2008年以降、米国ではサイバーフィジカルシステム[1)]と呼ばれるポスト組込み制御システムの技術開発プロジェクトが始動。EUでも同様に産学連携の大型プロジェクトARTEMIS（Advanced Research & Technology for Embeded Intelligence and

Systems）が実施されている。
・ARM 社が Cortex-M シリーズを中心に、組込み機器制御用のプロセッサコアの整備を加速している。
・リコンフィギュラブルなアナログ回路内蔵のマイクロコントローラの製品化[3), 4)]。

（6）キーワード

組込みシステム、組込みソフトウェア、マイクロコントローラ、センサ、センサネットワーク、リコンフィギュラブル、電力制御、ノーマリーオフ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	○	→	・組込み向けオリジナルのプロセッサやOS（μ ITRONなど）を有し、大学・企業研究機関における研究レベルは高い。 ・低電力・組込みプロセッサ技術については回路やOSそれぞれで研究は実施されているが、その最新研究レベルに基づく回路・アーキテクチャ・OS・ネットワークの統合技術の研究はまだ初期段階である。低電力統合技術の研究の一例としては、最新の大規模不揮発メモリとそれに基づくノーマリーオフコンピューティングの研究などがある。 ・また、サイバーフィジカルシステムとして組込み・ネットワーク・クラウドを統合したコンピューティングの研究もこれから本格化する段階で、LSI・アーキテクチャ・ソフトウェア・通信・スーパーコンピューティングなどの研究者間の連携による成果が期待される。
	応用研究・開発	◎	→	・コンシューマ用途、通信、車載、ビル・ホーム、社会インフラ（電力、交通など）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。ただ、医療分野についてはコンシューマ用途に準じるヘルスケアを除き目立った活動が不足しているようである。 ・インターネット、センサネット対応で重要な標準化の分野で欧米に遅れをとっている。 ・個々の機器でのコンピューティングをインターネット経由で密にリアルタイムで管理するなど、組込み機器を視野に入れたネットワーク・コンピューティングの応用開発、サービス開発において今後の発展が期待される。
	産業化	◎	↗	・個別機器での産業化は活発。 ・インターネット・サービスを含むビジネスモデルは今後の飛躍に向けた開発段階である。
米国	基礎研究	◎	↗	・組込み向けオリジナルのプロセッサやOSを有し、大学・公的機関・国防省・企業などの研究レベルは高い。 ・インターネット・コンピューティングの研究成果を組込みプロセッシングに展開する指向で研究開発が今後さらに活発化する傾向。
	応用研究・開発	◎	→	・コンピュータ、通信、車載、医療、社会インフラ（電力、交通など）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。インターネットを基盤にしたサービス開発も活発である。
	産業化	◎	↗	・インターネット・サービスのビジネス化が活発。
欧州	基礎研究	◎	↗	・組込み向けオリジナルのプロセッサ（ARM）やOSを有し、大学・公的機関・企業などの研究レベルは高い。 ・EUプログラムやIMECなどのように大学・企業などのジョイントプログラムでの効率よい研究開発が今後さらに活発化する傾向。
	応用研究・開発	○	→	・通信、車載、医療、社会インフラ（電力、交通など）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。インターネットを基盤にしたサービス開発も活発である。
	産業化	○	→	・個別機器およびインターネット・サービスのビジネス化が中心。

アジア（台湾、韓国、中国）	基礎研究	○	↗	・ライセンス・プロセッサ（ARM）による応用研究が中心だが、国家プロジェクトの支援を受けて大学・公的機関・企業における研究レベルは高い。 ・その中で台湾のNational Program for Intelligent Electronics（NPIE）のように、PC・スマートフォン以降の主要な応用市場としてMG+4C（Medical, Green, Car, Consumer, Computer & Communication）を捉えた研究開発が今後、活発化する傾向。
	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）をベースに応用市場を拡大する指向での応用研究・開発が盛ん。 ・中国を含めて車載、医療での研究開発の取組みが加速している。
	産業化	◎	↗	・個別機器、半導体のビジネス化が中心。

（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://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system
2）http://www.arm.com/ja/products/processors/index.php
3）http://ja.wikipedia.org/wiki/PSoC
4）http://japan.renesas.com/products/promotion/smart_analog/index.jsp

3.9 CHS（Cyber-Human Systems）

ICTが社会に組み込まれて、ICTを前提とした社会・経済の仕組みになっていくのは、論を待たない。物理世界とサイバー世界との統合を目指すCPS（Cyber-Physical Systems）はこの動きである。CPSが社会システムの一部として働くためには、人間あるいは社会を系の一部として扱う必要がある。介護ロボットなど人間と機械が協調して動作を行うシステム、分散エネルギーなど生活者の行動が系全体の振舞いに大きな影響を与えるシステム、あるいはクラウドソーシングのように多くのユーザの集合知を利用するシステム、などはいずれも、人間・社会を系の一部として捉えることによって、イノベーションを起こしていこうというものである。系の一部として考えたとき、人間・社会は最も不確実で予測しにくいコンポーネントであり、システムとしての設計の大きなチャレンジとなる。したがって、この分野においては、新しい応用を考えると同時に、人間・社会のモデル化に関する基礎研究を継続していかなければならない。

人間・社会のモデル化については、情報・通信分野のみならず、経済学・心理学・医学・政治学など、特に人文社会系の学問分野との積極的な連携が必要であり、その意味で本俯瞰区分は本質的に学際的なものとなる。

CPSの技術開発項目がある程度見えているのに対して、この人間・社会系は人文社会系との関連もあり、まだあまり整理されていない。しかし、ICTの新たな応用分野として見たときの重要性を考慮して、本俯瞰区分では、サイバーシステムと人間・社会の接点という意味から、以下の3つの切り口で研究開発領域を設定した。

1. 人間・社会のモデリング

人間の行動、あるいは人間の集団として社会の行動をモデル化し、それを予測することは容易ではない。しかし、情報通信分野以外でも、心理学、社会学、経済学など多くの領域で研究されている。それらの知見を総合して、CPSやCHSに利用できる人間・社会モデリングの研究開発を行う。

2. ソーシャルコンピューティング

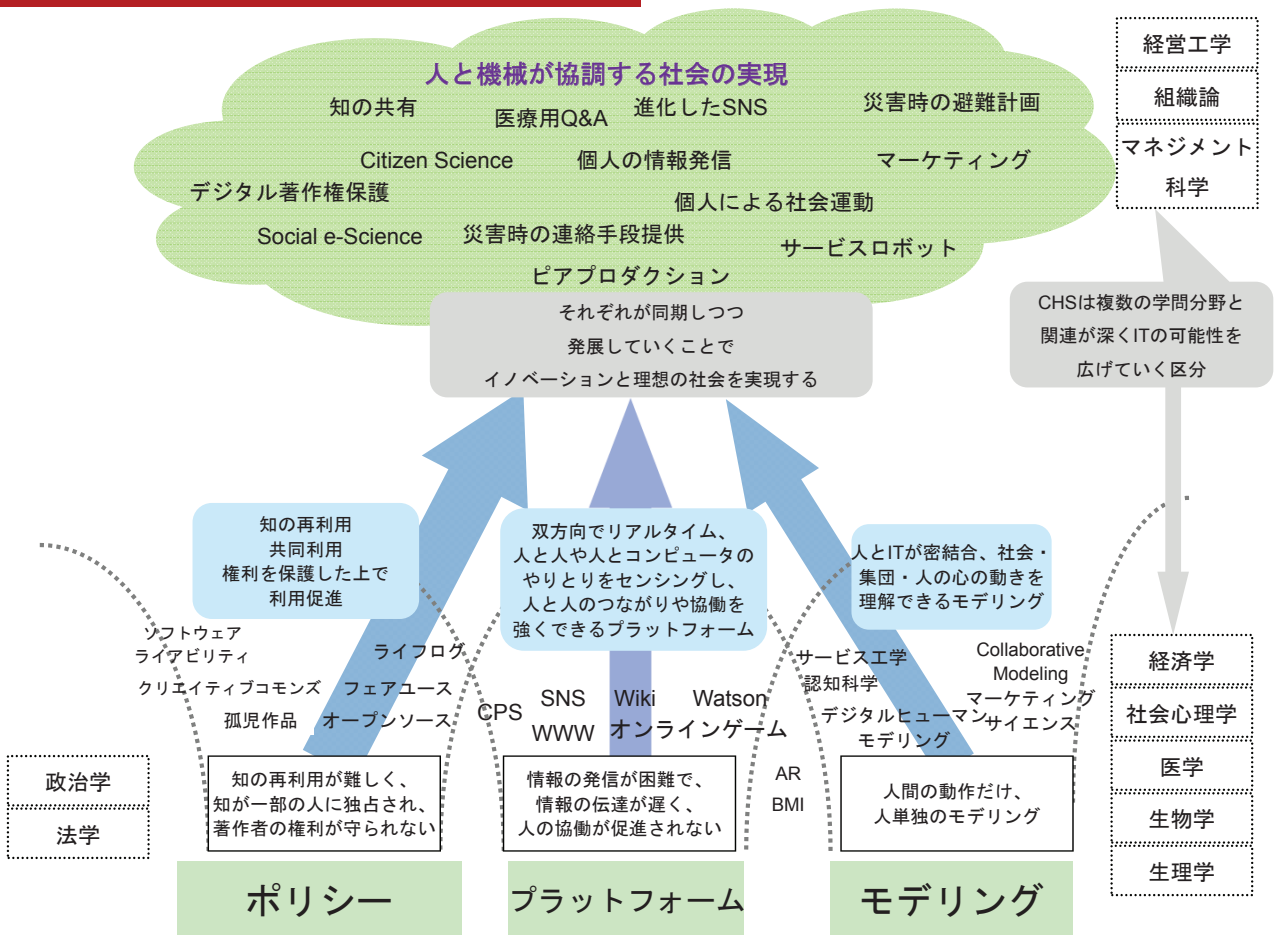
SNSをはじめとして、ITの導入が人間社会に大きな影響を与えている。Twitter、Facebook、Youtube、Facetimeなどの技術は10年前には存在していなかったにも関わらず、今では欠かせない社会インフラになっている。この領域は、今後も大きなイノベーションが起きると思われ、独立した研究開発領域として力を入れる必要がある。

3. ポリシー

CHSを考える上で、社会における制度、規範の議論とは分離して考えることはできない。法律やルールは、技術の発達とともに、また社会の価値基準とともに変化していかざるを得ない。したがって、これは双方向のインタラクションであり、IT技術の専門家と社会学の専門家とが共同して研究していく必要がある。

今回の俯瞰では、以上3領域に絞って議論したが、本俯瞰区分は、今後さらに学際的な視野を広くもって発展させていくべき分野と考える。

ミクロ俯瞰図（Cyber-Human Systems）



3.9.1　人間・社会のモデリング

（1）研究開発領域名

人間・社会のモデリング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

人間の機能（身体、心理、認知、行動など）をコンピュータ上に記述して再現する研究をデジタルヒューマンモデリングと呼ぶ。図1の内側のサイクルに示すように、身体機能モデルを製品の人間中心設計に活用するシナリオが一般的である。このシナリオにおいては、コンピュータ上の人間モデルは実在する人間（個人）と直結しておらず、その個人を再現提示することもない。製品のユーザ層の人間機能を統計的に再現提示することが求められてきた。近年､人間特性を観測しモデル化する技術､そのモデルを再現提示してサービスを提供する技術がオンラインで接続され、システムによる人間観測から提示までが短時間にフィードバックできるようになってきた。これは、システムが（システムの利用対象である）人間を含めた系のモデルを明示的にもち、システムが人間と相互作用を繰り返しながら、人間に対してサービス提供をしていく（＝人間とシステムとで価値を共創している）ことを意味している。これを「人間モデルを備えたCyber Human Systems」と呼ぶ。

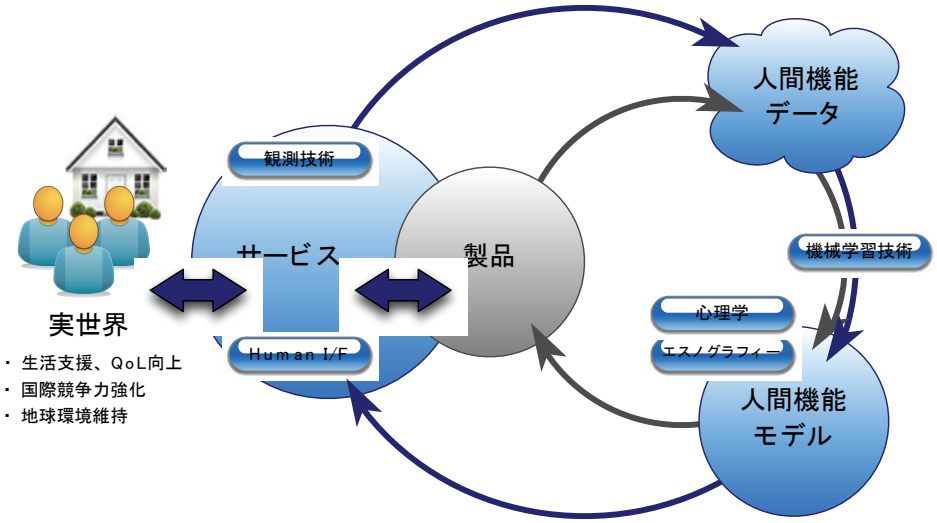


図1 人間モデルを備えたCyber Human Systems

例えば、家庭内で家事などを支援するサービスロボットシステムはその典型例である。ロボットシステムは周囲の物理環境と人間の特性、状況を観測し、システムに内包する人間の特性、状況モデルを更新して、それに応じてロボット自身の物理的運動や情報提示によってサービスを提供する。ここで、観測、モデル化、運動、情報提示というシステム機能モジュールは、オンライン接続されている必要があるが、物理的なロボットエージェントに内包していなくてもよい。例えば、住宅環境の壁や天井に埋め込まれたセンサと通信して観測データを収集したり、携帯端末やテレビの画面を借りて情報提示をすることもあり得る。ただし、この説明では、身のまわりのほとんどのシステムが「人間モデルを備え

た Cyber Human System」に含まれることになる。これでは研究領域の俯瞰として適当ではない。そこで、ここでは、以下の要件を備えるシステムに限定して考える。

- 実世界の人間と短時間で相互作用を繰り返しながら、サービスを提供するシステム
- 人間との相互作用のインターフェイスチャンネルが旧来のコンピュータシステムと同程度（キーボードやマウスによる入力、画面表示による出力）にとどまるシステムはあえて除外する
- システム内部に人間モデルを明示的に備えていないシステムは除外する

すなわち、個人の購買履歴から個人向けの商品推奨を行う現在の通販システムは、既存の PC やスマートフォンのインターフェイスチャンネルしか使用していないので除外する。カーナビゲーションシステムは自動車位置など多様なセンシングデータを利用しているが、現状では、明示的な人間モデルを内包していないのでこれも除外することになる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間モデルを備えた Cyber Human Systems の中核はデジタルヒューマンモデリング研究である。その研究はモデル化の対象となる機能とスケールで整理できる。身体機能の医学的な再現などを目的とする研究では、イオンチャンネルによる信号伝達から細胞活動、臓器・組織活動までのスケール（10^{-6} ～ 10^{-1} [m]）を包括するモデルが開発されている。東京大学などが共同で進める心臓機能モデル、理化学研究所で開発されたデジタルヒューマンモデルなどがある。基礎医学的な知見と実験データ（特にパラメータデータ）に、力学シミュレーションを組み合わせて精緻なモデルを実現している。手術シミュレーションなどに活用が始まっている [1)]。同様に筋線維レベルから筋肉、骨格、運動までのスケール（10^{-4} ～ 10^{0} [m]）を包括する筋骨格系モデルも幅広く研究されている。国内では東京大学、理化学研究所、海外では米国スタンフォード大学、デンマーク Aalborg 大学など。感覚系から行動系まで（10^{-3} ～ 10^{1} [m]）をモデル化したものとしては、産総研や米国ミシガン大学、米国アイオワ大学、独ミュンヘン工科大学などで研究が進められている [2)]。これらは健康増進サービス、自動車などの人間中心設計に活用されている。よりマクロスケールなものとして人間の消費行動に関するモデルがマーケティング分野で注目されている。購買情報から統計的にモデル化をする手法や、よりミクロに顧客の視線計測、行動計測を行う研究が盛んである [3)]。

このデジタルヒューマンモデルを中核とした Cyber Human Systems の典型例が（2）であげた生活支援ロボットシステムである [2)]。その中核は、生活支援サービスに必要となる環境・状況・人間モデルの機能構造をモデル化する研究と、ロボットが取得したデータをその機能構造に基づいてパラメータ化し、環境・状況・人間を符号化する研究である。ロボット工学分野で進められてきた SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）に kinect™ などの低価格運動センシング技術を統合し、人間行動観測と符号化を行う研究がある。人間行動符号を用いて環境の幾何モデルに意味的符号をつける取り組みも始まっている。

単体のロボットエージェントシステムのみならず、環境に埋め込まれた観測・提示技術がオンラインで接続されて機能する環境埋込型ロボットの中にも、Cyber Human Systems を指向するものがある。特にエネルギー効率運用に注目したスマートハウス研究では、エネルギー使用を通じて人間行動を観測し、エネルギー効率利用に向けて行動変

容を促すシステム開発が進められている。人間行動モデルを明示的に組み込んだシステムが研究されている。国内ではNICT、大学などが核となり企業と連携して実証プロジェクトとして推進されている。海外でも、生活の質向上や見守りなどのサービス提供を目的としたセンサハウス、スマートハウスの研究が進められている。

Cyber Human Systemsを拡張して考えると、ロボットや住宅のみならず実社会のサービスシステムも領域の範疇となる。特に、個人の身体・行動特性がキーとなる健康サービス、ナビゲーションサービスなどで、人間モデルを明示的に内包するシステムが開発されつつある。例えば、人間の歩行をモデル化してシステム内にもち、視覚・力・加速度センサなどで取得した個人データを歩行モデルで補完し、個人の歩行特徴として評価・提示することで歩行改善に繋げる研究がある[4)]。身体の筋骨格系モデルをシステム内にもち、高速な計算によってセンサ情報から現在の筋活動状態を計算して提示し、トレーニングに役立てる技術も研究されている。ナビゲーションでは別に取得した環境（地図）情報と人間の移動記録情報を組み合わせて機械学習し、状況を考慮して人間の移動パターンを類型化、モデル化する研究などが進められている。国内では企業と大学、産総研などが連携して研究を進めている。また、店舗小売を通じて得られる購買情報（ID付きのPOSデータなど）を後述するエスノグラフィーや行動観察に基づく仮説で分類し、機械学習で確率分布を与えることで消費者行動をモデル化する技術も飛躍的に進歩している[3)]。徐々にオンライン化が進み、レシートを使った顧客別クーポンの発券などに活用され始めている。

これらの研究において要素となる技術を大きく4つあげる。第一は人間機能モデリング、第二は観測技術、第三は構造・パラメータの機械学習技術、第四はヒューマンインターフェイス技術である。

・人間機能モデリング

人間行動モデリングは機能構造のモデル化と、そのパラメータを同定する部分とに分けることができる。これらは第三の機械学習技術と重複する。ただし、ここでは第一の技術はシステム開発段階で用いる技術で、第三の機械学習技術はシステム運用段階で用いる技術として分けて考えたい。したがって、第一の人間機能モデリングには、実験室的な研究手法も含む。機能構造のモデル化としては、解剖学的構造、運動、感覚知覚系のように科学的解明が進んでいる機能と、認知、心理、行動、生活のように科学的解明が十分ではない機能でアプローチが異なる。前者は既存の知識に基づいて機能構造モデルを開発できるが、後者については既存の学術的知識だけでは具体的に役立つレベルの機能構造モデルは構成できない。そこでエスノグラフィーのような方策を用いてモデルを構成することになる。エスノグラフィーは対象の行動様式をフィールドワークによって調査、記録し定性的なモデルを構築していく方法論体系である。行動観察のように言語表出をまったく利用しない方法[5)]や、デプスインタビュー法のように言語を用いて行う方法などがある[6)]。いずれも大規模に行うことは難しいが、深層知識が得られる点に特徴がある。

・観測技術

このような機能構造モデルが構成できれば、そこに定量的なパラメータを同定するための観測データが必要となる。ここでは、情報技術・ロボット技術によるセンシングが役立つ。人間データ（行動など人間の反応結果）だけでなく、環境データ（人間にとっての刺激入力）を同時にセンシングする必要がある。人間データとしては、位置や姿勢を計測する手法が数多く提案されている。また、自分の位置だけでなく、他の人間との相対的な距

離関係を環境情報として取得し、物理距離を指標として記述される人間関係が知的生産活動にどのように影響するかをモデル化する研究もある。

・機械学習技術

第三は、機能構造モデルをベースに収集されたセンシングデータを、モデルのパラメータとして同定する技術である。残念ながら、多くの人間機能は単純な数式モデルで決定論的に記述できないケースが多い。そこで、確率モデルを併用していく必要がある。これらを実現するのが機械学習技術である。主成分分析、サポートベクターマシン、ベイジアンネットワークなどがこれに相当する。認知、心理、行動、生活のような機能では、第一の技術で構成した機能構造モデルそのものを更新しなければならないことがある（解剖学的構造が更新されることはあまりないが、生活構造が更新されることはあり得る）。機械学習技術は、このような機能構造モデルの更新にも貢献する。

・ヒューマンインターフェイス

第四は、結果を提示し、人間に介入するためのインターフェイス技術である。現時点ではディスプレイ端末による視覚提示が中心であるが、Augmented Reality や、五感提示技術、場合によっては Brain Machine Interface 技術も関係する。

（4）科学技術的・政策的課題

- 人間の心理、認知科学、行動科学に関する知識体系が不十分であるため、一般的・汎用的な人間行動の機能構造モデルを構成できていない（応用事例ごとにフィールドワークを実施して構成せざるを得ない）。研究成果の多面的展開におけるボトルネックである。
- 心理学、認知科学、行動科学の研究者と、情報技術、ロボット技術の研究者の有機的連携が進んでいない。前者は知識としての新規性を、後者は技術としての新規性、困難性を追求するため、双方が同時に満足できるような具体的問題設定が難しい。プロジェクトとして連携し、プロジェクト成果を個人研究業績にカウントしていく研究評価が必要である。
- システムに内包された人間モデルの構成、更新のために獲得するデータの取り扱いに関する法的、社会的合意が曖昧なままであり、今後の研究活動に支障を来すと考えられる。研究段階において何をしてよいか、何は認められないか、実用段階においてはどうか、という点を社会的価値・リスク、個人的価値・リスクの観点で議論し、合意形成を進める必要がある。特に、研究やビジネスが国際化していることから、国内の議論、合意形成だけでなく、国際的な議論、合意形成にも主導的に関わる必要がある。

（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）

- 2001年頃　産総研に人間モデリングの拠点研究所としてデジタルヒューマン研究ラボが発足（ラボ長：金出武雄）。情報通信研究機構を中核としたホームネットワーク、スマートハウスの研究プロジェクトがスタート。
- 2008年頃　米国NSFのプログラムとして「Quality of Life Technology（QoLTech）」がスタートする。情報技術、ロボット技術を生活場面に導入し、障がい者・高齢者の生活の質向上に資する技術体系として確立することを目標とする。プロジェクトリーダーは米国カーネギーメロン大学・金出武雄教授。

・2010 年頃　加速度センサ、ビジョンセンサなどの低価格化が進み、ホームゲーム機やスマートフォンに安価に搭載され、ネットワーク接続されるようになる。インターネット上を流通する情報（テキスト情報など）を機械学習技術で構造化して知識化し、その知識をクラウドサービスとしてネットワーク上で共有できるインフラが整いはじめる。これに駆動され、実世界で人間特性データを収集し、クラウド上で人間モデルとして知識化して活用する研究が急速に広まる。

（6）キーワード

Digital Human Modeling、サービス工学、ヒューマンインターフェイス、AR、BMI、エスノグラフィー、認知科学、社会心理

（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	○	↗	・デジタルヒューマン技術、センシング技術、ロボット技術は高水準。 ・ビッグデータのモデル化技術などは大学、国立研究所での研究者層が薄い。 ・人間モデル（消費者行動モデル）に力点を置いたサービス研究が盛ん。
	応用研究・開発	◎	↗	・地域での実証フィールドを基盤とした健康プロジェクトやスマートシティプロジェクトなどが推進され、その一部として Cyber Human Systems が開発されている。ただし、プロジェクト終了後の商業化に難航している。 ・デジタルヒューマン技術、それを組み込んだロボットシステム開発に関連する政府系プロジェクト予算枠が乏しい。サービスに関しては経済産業省、文部科学省が小規模ながら産学連携の研究開発プロジェクトを進めている。
	産業化	○	→	・ロボットシステムは安全認証が、個人データを取得してモデル化するシステムは個人情報管理に関する社会的合意形成が障壁となり、産業化が進まない。 ・高齢者対応、子育てなど日本が先行して抱える問題（少子高齢化）への解決策を指向したプロジェクトが推進されている。
米国	基礎研究	◎	↗	・軍事応用を中心として、デジタルヒューマン技術、センシング技術、ロボットシステムの研究が推進されている。予算規模も大きく、研究成果も大。 ・ビッグデータを有する企業と大学が連携して技術開発を推進している。 ・IT とビッグデータを活用したサービス研究が盛ん。
	応用研究・開発	◎	↗	・医療、行政、社会インフラ（災害対策など）にフォーカスして国家的プロジェクトが推進されている。 ・高齢化社会対応の研究プロジェクトが増えつつある（日本に比べると、研究開発アクションのスタートが 10 年ほど遅い）。
	産業化	◎	↗	・コンシューマビジネスより社会インフラビジネスを得意とする企業（GE など）、ビッグデータを蓄積している IT 企業（Google など）が産業化を牽引している。 ・人権保護と個人情報の流通に関するポリシーが、日本に比べて明確であり、産業活動が活性化しやすい。
欧州	基礎研究	○	↗	・EU プロジェクトとしてデジタルヒューマン技術、センシング技術、ロボット技術はめざましく進展しており、直近 5 年で優れた成果をあげている。 ・製造業のサービス化という視点でのサービス研究が盛ん。
	応用研究・開発	○	↗	・福祉、医療、社会インフラ（社会安全など）にフォーカスして EU プロジェクトが推進されている。 ・技術をもつ研究機関に、福祉、医療の実証フィールドをマッチングさせてプロジェクトを進め、事業化に繋げている例がある（デンマークなど）。
	産業化	○	→	・社会インフラとしてのプロジェクト成果は、実際に社会政策を実施する体制が国ごとにバラバラであるため、事業化に難航することが多い。 ・人権保護と個人情報の流通に関するポリシーが、日本に比べて明確。ただし、米国と異なり自由度は抑えられている。
中国	基礎研究	△	→	・センシング技術、ロボット技術の研究は盛んで論文数も多い。サービスに関連する論文も増えてきている。 ・デジタルヒューマン技術、人間モデリングなどの研究はまだ盛んではない。これらを明示的に組み込んだシステム開発も研究者層が薄い。
	応用研究・開発	△	→	・要素技術やスタンドアローンシステムの開発プロジェクトが中心で、Cyber Human Systems としての研究プロジェクトはほとんどない。 ・ビッグデータ利用については国家統制が厳しく、限定的。
	産業化	×	→	・Cyber Human Systems としての産業化例はまだ乏しい。

韓国	基礎研究	△	→	・デジタルヒューマン技術、センシング技術、ロボット技術ともに論文成果はあるが、高い国際競争力をもつまでではない。 ・デジタルヒューマン技術については、経済産業省、文部科学省の大型予算、長期予算が付いて、産学連携プロジェクトが進められている。
	応用研究・開発	○	↗	・ヒュンダイを巻き込んだ自動車応用プロジェクト、サムスンを巻き込んだスマートフォン利用のアパレル電子商取引プロジェクトなどが推進されている。産業界からかなり大きな研究資金が提供されている。
	産業化	○	↗	・ヒュンダイ、サムスンのビジネスに集中することで、研究成果を産業化することに成功している。

（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）金出武雄 , 持丸正明：総論：医療のためのデジタルヒューマン技術 , 情報処理 , 46（12）, 1325-1330（2005）.
2）日本ロボット学会（編）：ロボットテクノロジー , 156-159（3編11章 デジタルヒューマン）、248-251（7編1章 SLAM）、252-255（7編2章 動作認識理解）, オーム社（2011）.
3）持丸正明：本格研究による人起点のサービス工学基盤技術開発事業の概要 , 電子情報通信学会 ソフトウェアインタプライズモデリング研究会 , 1-6（2011）.
4）川出雅人 , 持丸正明 , 森島繁生：顔・人体メディアが拓く新産業 , 映像情報メディア学会誌 , 65（11）, 1534-1544（2011）.
5）松波晴人：ビジネスマンのための「行動観察」入門 , 講談社現代新書（2012）
6）M. Kitajima, H. Tahira, S. Takahashi and T. Midorikawa: Understanding Tourist’s in situ Behavior: a Cognitive Chrono-Ethnography Study of Visitors to a Hot Spring Resort, Journal of Quality Assurance in Hospitality and Tourism, 13（4）, in press（2012）.

3.9.2 ソーシャルコンピューティング

（1）研究開発領域名

ソーシャルコンピューティング

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ブロードバンドや携帯電話の爆発的な普及に伴い、人、社会、コンピュータの関係が大きく変化した。場所や時間、他人、知人を問わず、リアルタイムにコミュニケーションをとることが可能となり、ショッピングサイトでは自分の好みに合った図書や商品が推薦され、検索エンジンは嗜好や興味に応じて必要な情報へ効率的にナビゲートしてくれる。また、Web 上に構築された大規模な百科事典や大規模な掲示板などは、我々のコミュニケーションの方法（特に情報の共有、意見形成の方法）に大きな影響を与えた。ほんの 10 年前には考えられなかったような大きな変化が次々と我々の生活の中に押し寄せてきている昨今、適切に情報を扱い、利活用する方法を模索することが必要となっている。

このような状況のもと、人や社会と新しい技術の関係のあり方を模索し、日々蓄積される情報を利活用するための技術や方法論を模索する研究領域「ソーシャルコンピューティング」が注目されている。ソーシャルコンピューティングに関する研究の歴史は長く、古くは論文の共著関係を解析する研究や、電子メールの履歴からユーザ同士がどのように影響するかといった研究などが行われていた。わかりやすい例としては、Facebook や Mixi といったソーシャルネットワーキングサービスや、オンライン百科事典「Wikipedia」といったサービスがソーシャルコンピューティング技術の応用サービスとして普及しているが、その他にも図書や音楽の推薦、検索エンジンにおける予測機能といった様々なアプリケーションのバックグラウンドでも、ソーシャルコンピューティングの技術が利用されている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ソーシャルコンピューティングの研究分野は広く、ブログや電子メールなども広義のソーシャルコンピューティング技術といえるが、ここでは最近特に注目を集めている研究分野に関して、扱うデータの特性から大きく 3 つの分野に注目する。まず一つ目は、Facebook や Mixi に代表される、SNS（ソーシャルネットワーキングサービス）に関する研究である。この分野の研究では、ユーザ間のつながりを解析することや、情報の流れのダイナミクスを解析する研究などが行われている。二つ目は、ソーシャルメディアに関する研究である。ソーシャルメディアは、ユーザによるインタラクティブなコンテンツ作成や共有のインフラを指すもので、代表的なものでは、オンライン百科事典である Wikipedia やマイクロブログの Twitter などのサービスが存在する。Facebook も、単なる SNS ではなく、ユーザによるコンテンツの作成・共有に重点があるため、ソーシャルメディアの代表例として知られている。ソーシャルメディアは、多くの人にとって重要なインフラとなっている一方､情報の信頼性やバイアス､プライバシーやセキュリティといった多くの点で研究サイドからの貢献が求められている。三つ目は、集合知の活用に関する研究である。Wikipedia などのソーシャルメディアには、半構造化された情報が膨大に存在しており、解析することで新たな価値を創造することを目的としている。

・SNS に関する研究

ソーシャルコンピューティングの一環として、論文の共著関係の解析や、メールの履歴を利用した人間関係の抽出などの研究は古くから研究されてきた。これらの研究においては、ソーシャルネットワークや人物間の関係抽出などが主な主題であったが、最近では WWW 上での大規模 SNS（Facebook や Mixi など）が普及したことに伴い、これらのサービス上に蓄積されたソーシャルネットワークデータを扱う研究が多くなってきている。特に、情報の伝達経路や、どのように情報が分布していくのか、といった、SNS の中での情報の伝達のメカニズムを解明する研究に注目が集まっており、実データに基づく研究が活発に行われるようになった。

また、SNS の普及に伴って顕著になった社会的問題や技術的課題に挑戦する研究も増加している。例えば、悪意のあるユーザによる情報操作やリンクファーミング（Link Farming）、ステルスマーケティングといった問題が多くの SNS 上で顕在化してきている。このような問題をどのように解決するかが重要な研究課題として注目されており、ユーザの行動パターンを分析することで、問題のあるユーザを自動判別したり、新しいレーティング方法を実装した SNS の提案といった研究が進められている。これらの研究では次世代の SNS の仕組みを議論するものが含まれており、より信頼性の高いシステム構築に寄与することが期待される。また、従来古典的なソーシャルネットワーク解析で活発に行われてきた、ユーザ間の関係解析や、ユーザ分類、クラスタ発見といった手法を取り入れることで、より高い精度で自動判別を行う手法などが研究されている。

最後に、SNS で重要な研究としてプライバシーやセキュリティの確保の問題があげられる。これは、Facebook などの実名で個人情報や友人関係を公開するサービスが一般的になってきたことに伴い、予期せぬ誹謗中傷を受けることやプライバシーを侵害されるケースが増加してきているためである。本研究分野は発展途上にあり、現在の研究動向としては、能動的にプライバシーを保護するための技術の研究開発よりも、個々のユーザのプライバシー保護戦略の分析や、プライバシーに関する意識の変化の分析といった、行動分析に関する研究が多い。このような研究では、年々個人情報をネット上に公開する人が増加していることに伴い、問題に遭遇するケースが急増しているが、問題回避のための技術が不足していることを示唆している。

・ソーシャルメディアに関する研究

ソーシャルメディアに関する研究の中でも、ここ数年で大きな注目を集めているのは、Twitter や Facebook 上でのマイクロブログ（タイムライン）および Wikipedia などのオンライン百科事典の解析である。Twitter などのマイクロブログは、ジャスミン革命やアラブの春（エジプトを含むアラブ諸国で発生した民主化運動）などの事件において、最も重要なコミュニケーションツールとして活用され、その存在意義を明確にしたことは記憶に新しい。すでにこれらの事件におけるユーザのダイナミクスに関する研究は成果が出ているが、分析に際しては、影響力のある（影響力のあった発言をした）人物の検知、イベント検出、感情抽出などが主要な技術として利用されている。

国内でも、東日本大震災の際に重要なコミュニケーションのインフラとして活用されたことは周知の事実であるが、当時のユーザ間のインタラクションを分析することで、ソーシャルメディア上での情報の伝達のダイナミクスを解明しようという試みが数多く行われ

ている。このような研究が進むことにより、より迅速かつ正確（効果的）に情報を伝える方法を確立することや、デマ情報の拡散を防止することなどが可能になると期待されている。

個人だけでなく､企業や政府にとってもソーシャルメディアは､無視できない重要なツールとなってきている。企業においては、単に情報発信のツールとしてだけでなく、世の中の動向（トレンド）を詳細に把握するためのツールとして今後重要な役割を占めると考えられている。しかし、リアルタイムに発生する膨大な情報を客観的に俯瞰し、トレンドを把握するための技術が不足していることが技術的課題である。また、政治においてもソーシャルメディアは重要なツールとなっている。オバマ大統領をはじめとする政治家の間でも急速に利用が広がっているが、単なる一方向性の情報発信ツールとしての指向が強く、効果的な利用方法や問題点の整理などができていないのが現状である。このような状況の中、政治家の間でのソーシャルメディアの利用方法の違いに関する研究など、利用傾向の分析の研究などが進められているが、このような研究が進むことにより、より効率的な利用方法を模索することが可能になると期待されている。

・集合知の活用

Wikipedia や Freebase といったソーシャルメディアは、誰でも参加し、編集可能であるという特性から、非常に多くのインターネットユーザが知識の集約に貢献してきた。その結果、幅広い分野において一般的な知識が網羅された巨大な知識ベースとして利用されるようになった。このようにして構築された膨大な一般的知識（Common Sense）の集合を有効活用することで、人工知能・情報検索・自然言語処理といった様々な研究領域の技術を高度化する取り組みが盛んに行われている。人間のクイズ王をリアルタイムの Q&A タスクで打倒した IBM Watson は記憶に新しいが、このような最近の質問応答システムも Wikipedia のようなソーシャルメディアから構造化された一般的知識を抽出し、活用している。また、スマートフォン上でリアルタイムに質疑応答するシステムが注目を集めているが、そのようなシステムも背景に大量の構造化知識データが集積されている。

ソーシャルメディア上に蓄積された膨大な一般常識知識をどのように利用するかという取り組みは始まったばかりであるが、近い将来、医師の診療を支援するシステムなどへの応用のほか、幅広い分野での活用が期待されている。しかし、大規模のデータを効率的に扱う方法や、スケーラビリティといった問題が残っており、現在では多くの計算リソースをもつ一部の企業しか、活用できていないのが現状である。また、蓄積した知識を柔軟に処理するための技術がアプリケーションレベルでの技術革新に必要とされる。

（4）科学技術的・政策的課題

- 直近の課題は、多様なユーザがリアルタイムに公開する情報を、客観的に集約し、俯瞰する技術になるだろう。大量の情報やバイアスのかかった偏った情報が多い中、社会全体の傾向や自分の周辺（価値観を共有できるクラスタ）の中での情報など、適切な視点で情報を俯瞰する技術が必要とされている。その構成要素としては、情報の信頼性の計測方法、情報の可視化・俯瞰技術などが必要となる。
- 中期的には、社会予測など（近）未来予測に関する研究が進むと思われる。最終的には、ブランディング戦略の最適化や効果的な情報発信方法の研究まで進めるとよい。

・SNS やソーシャルメディアには日々膨大な量の情報が蓄積されるが、その多くは非構造化データか半構造化データである。このような情報を活用し、新たな価値を創造するためには、知識の構造化技術が重要な役割を果たす。特に、一般常識知識を抽出する技術、抽出された知識を柔軟に処理する仕組み、そして大量の知識を小さな計算リソースで扱うための技術が必要とされている。

（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）

・情報の信頼性

ソーシャルメディアにおいては、記述の生存時間や著者のスコアリングなどを通じて情報の信頼性を数値化する研究が進んでいる。

・ソーシャルメディアの活用・マイニング

Twitter などの速報性の高いマイクロブログをマイニングし、未来予測タスクに利用する研究が進められている。研究領域としては黎明期にあるが、社会的インパクトの大きい分野であるため、より活発な開発が期待される。

・集合知の構造化技術

ソーシャルメディアに蓄積される膨大な量の情報から、一般常識知識を抽出・構造化することで、高度な質疑応答タスクに対応できるシステムが実現され始めている。また、各種検索エンジンは、バックグラウンド知識を高度化させるために、ソーシャルメディアから大量の一般常識知識を抽出し、活用している。

（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、集合知、知の構造化

（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	△	↗	・海外におけるプレゼンスの低さが目立つ。 ・マイクロブログのマイニングや集合知の活用については、国内コミュニティの形成など、ある程度の進展がある。
	応用研究・開発	△	→	・産学連携の基盤が弱いか。 ・人材育成だけでなく、国外への技術流出を避ける施策が望まれる。
	産業化	△	→	・世界に進出できるサービスの構築ができていない。 ・基盤技術は海外製のものが大多数。
米国	基礎研究	◎	↗	・大学と企業の連携が強い。
	応用研究・開発	◎	↗	・Google、Microsoft Research、IBMなど、産学連携の基盤の整っている企業が多く、学会への貢献も活発である。また、豊富な産学連携チャネルやインターンなど、人材の育成の面でも高い評価ができる。
	産業化	◎	↗	・シリコンバレーを中心に優秀なエンジニアによる多様なサービスの展開。 ・ソーシャルメディアから抽出した構造化知識を利用したサービスが実用化している。
欧州	基礎研究	◎	→	・Digital Enterprise Research Institute（DERI） や German Research Center for Artificial Intelligence（DFKI）、Max Planck研究所など、アイルランドやドイツでは、Webにおける知識処理の強力な研究拠点が形成されている。これらの研究所では、ソーシャルメディア解析にも力を入れている。
	応用研究・開発	○	→	・ドイツでは、MediaWikiの開発やWikipedia解析に携わる研究者やエンジニアが多い。また、社会全体として、ソーシャルメディアを通じた知識共有に対する意識の高さも顕著である。
	産業化	△	→	・世界に進出できるサービスの構築ができていない。
中国	基礎研究	△	→	・Microsoft Research Asia（MSRA）や清華大学、香港大学・香港科技大学が基礎研究でプレゼンスを増している。 ・MSRAは、アジア各国から優秀な研究者や学生を集めることに成功しており、質の高い研究をコンスタントに続けている。
	応用研究・開発	○	↗	・中国では、金盾と呼ばれる検閲システムが有名で、ネット上での言論を統制している。公表されてないがソーシャルメディア上での発言を解析・検閲する技術の研究が進んでいると考えられる。
	産業化	○	↗	・Weibo、百度などの独自サービスが成功している。 ・国内サービスの優遇政策、海外サービスへの制限が顕著。
韓国	基礎研究	△	→	・本研究領域では、Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）が一定のプレゼンスをもつ。
	応用研究・開発	△	→	・研究成果を開発に応用できているかは疑問。
	産業化	○	↗	・独自のソーシャルネットワーキングサービスの構築に成功している。 ・NAVERなど、一部サービスは他国への進出も進んでいる。

（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）特集「Twitter とソーシャルメディア」、人工知能学会学会誌、Vol. 27 No. 1、pp. 34-74（2012）
2）Social Media Evolution of the Egyptian Revolution, ACM Communications、Vol. 55, No. 05, pp. 74-80（2012）
3）IBM Watson, http://www-03.ibm.com/innovation/us/watson/
4）Deep QA, http://www.research.ibm.com/deepqa/deepqa.shtml

3.9.3 ポリシー（プライバシー）

（1）研究開発領域名

ポリシー（プライバシー）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ライフログ技術におけるプライバシー保護に関わる技術・政策

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

世界各国におけるプライバシー保護法制は、1980年のOECDによる「プライバシー保護と個人データの国際流通についてのガイドライン（通称OECD8原則）」を基盤として、20世紀終盤から急速に制度枠組の構築が進められてきた。EUにおいては、1995年のデータ保護指令により域内のプライバシー保護の水準を定めており、わが国においても、2005年に全面施行された個人情報保護法を中心とする関連5法の整備が行われている。それら法制度の中では、例外的に包括的な個人情報保護法制を有しない米国を除き、個人識別性のある情報および他の情報と組み合わせることにより容易に特定の個人を識別可能な情報について、取得時の利用目的明示や第三者提供時の事前同意が必要であるという点が、先進国においておおむね共有されている。

しかし、プライバシー保護の制度枠組は、個人情報を取り扱う情報技術の発展の影響を大きく受ける。特に近年、消費者の多様な行動履歴を活用するライフログサービスや、その集積であるビッグデータ解析技術の隆盛に伴い、世界各国でプライバシー保護法制の見直しが急速に進められている。その動向としては、大きく二つの方向性が存在する。

法制度による強固なプライバシー保護を重視するEUでは、2012年に入ってから、1995年のデータ保護指令を全面的に改正する「データ保護規則」の草案を公開した。従来のデータ保護指令では、「指令（directive）」という法形式により、一定の原則の下に各国ごとに異なる国内法を制定する形を採っていたが、それを各国に直接適用される「規則（regulation）」という法形式に変更し、EU域内での完全な法制度の統一を図ることが示されている。規則の内容としても、消費者に自らの個人データを完全に消去する権利を認める「忘れられる権利（right to be forgotten）」や、登録したデータの他サービスへの移動を認める「データ・ポータビリティの権利」など、確実なプライバシーの保護と、消費者の自己情報コントロール権の強化を実現しようとする姿勢が示されている[1)]。

一方で、米国ではEUとは対極的に包括的な個人情報保護法を持たず、医療や金融、児童といった特に保護の必要性が高い分野ごとのプライバシー保護法の存在を若干の例外として、関連産業の柔軟な発展を重視するという立場から、基本的に産業界による自主規制を重視する姿勢を維持してきている。2012年初頭には、今後のプライバシー保護の大綱を示した「プライバシーの権利章典（consumer privacy bill of rights）」にオバマ大統領が署名を行っている。その内容は近年のライフログサービスにおける消費者の選択権の強化に関わる規制強化の方針を含んでいるものの、原則的には産業界の自主規制とそれに対する政府機関の監視・強化を進める形であり、EUのような法規制による対応には慎重な姿勢を示している[2)]。

グローバルな情報社会においては、個人情報の流通が一国内に留まることはない。これら諸外国の動向を踏まえた上での、技術・法制度両面における研究の進展と、国際的に通

用可能な制度枠組を構築していくことが求められる。

（4）科学技術的・政策的課題

- ウェブブラウザの閲覧履歴やEコマースサイトでの購買履歴を元にした、行動ターゲティング広告が急速に拡大しており、ライフログ情報の利活用を行うための技術開発を促進しつつも、適切なプライバシー保護をいかに実現するかが課題となる。特にクッキーやIDに紐づけられる行動履歴は、必ずしも住所や氏名などの情報を要さず、個人情報保護法の対象となる「個人識別情報」に該当するか否かが定かではないため、その取扱のあり方が各国における研究と政策的実践の焦点となっている[3)]。
- 消費者が日常的に携行する、スマートフォンのプライバシー保護が世界的な課題になっている。特に近年ではアプリケーション・ストアなどによって提供されるサードパーティー製ソフトウェアが、位置情報や電話帳といった機微な情報を無断で利用している問題が指摘されており、アプリケーション・ストアにおける審査体勢の強化をはじめとする対応のあり方の検討が進められているところである[4)]。
- EUデータ保護指令では、「十分なプライバシー保護水準を有する」と認定された国以外へのデータ移転を原則として禁止しており、カナダやアルゼンチンなどがすでにその認定を受けている。同様の規定は新たなデータ保護規則案の中にも存在しているが、わが国はプライバシー保護を取り扱う独立機関の不在などを理由として、現在に至るまでその認定を受けていない。
- インターネット上のプライバシー保護においては、ウェブサイトなどにおいて提示されるプライバシー・ポリシーが重要な役割を果たす。しかし、その内容を一般の利用者が逐一把握することは現実的ではないため、プライバシー・ポリシーをウェブブラウザが自動的に解読するためのP3P（Platform for Privacy Preferences）技術の開発が進められてきた。しかし、このような技術は現在に至るまで幅広い普及には至っておらず、プライバシー・ポリシーの可読性と実効性をいかに確保するかが課題となっている。

（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）

- ライフログ情報を安全に取り扱うため、データの匿名化をはじめとする、プライバシー強化技術（Privacy Enhancing Technology、PET）の研究開発や基準策定が盛んに進められている[5)]。経済産業省が中心となって行われた「情報大航海プロジェクト」の中でも、匿名化技術基盤となるソフトウェアの提供が行われるなど、官民連携してのライフログ情報の利活用促進のための取組が進められている[6)]。
- 行動ターゲティング広告の拒否手段の一つとして、消費者が明示的に追跡を拒否するための、Do Not Track技術の開発と普及促進が国際的に進められている。これはHTMLリクエストのヘッダに、追跡拒否を意味する「DNT: 1」という文字列を加えるという仕組みであり、W3C（World Wide Web Consortium）での標準策定や、ウェブブラウザやウェブサイト側での技術的対応が進められている段階にある。
- 英国では2011年から、消費者が自らのEコマースでの購買履歴や決済履歴を集中的に確認・管理することを可能とし、かつそのデータを社会的に活用していくための集中的ポータルサービスとして、midata（マイデータ）プロジェクトを推進している。

詳細な内容は未だ検討段階だが、今後英国内のEコマース企業やクレジットカード企業は、同ポータルに対する取引履歴の提供を義務付けられる可能性がある[7]。

（6）キーワード

ライフログ、プライバシー保護強化技術、行動ターゲティング広告、EUデータ保護規則案、プライバシー権利章典、スマートフォン

（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	○	→	・2005年に全面施行された個人情報保護関連5法により、民間部門と公的部門を別個に規律するセグメント方式のプライバシー保護法制が定められている。OECD8原則をはじめとする国際水準に対応しているが、プライバシー保護の専門独立機関の不在をはじめ、欧州程に強固な法制度ではない面も指摘される。
	応用研究・開発	○	→	・ライフログのプライバシー保護については、総務省「利用者視点を踏まえたICTサービスに係る諸問題に関する研究会」などが中心となり検討を進めている。2010年にはライフログサービス全般に求められるプライバシー保護の「配慮原則」を、2012年にはスマートフォン特有のプライバシーリスクを特定した「スマートフォン・プライバシー・イニシアティブ」を策定し、産業界の自主的な対応を促すための取り組みを進めている。
	産業化	○	→	・ライフログサービス全般については日本情報経済社会推進協会（JIPDEC）や次世代パーソナルサービス推進コンソーシアム、行動ターゲティング広告についてはインターネット広告推進協議会（JIAA）などが中心となり、プライバシーの保護と情報流通の両立を図るための技術開発やルール形成を進めている。
米国	基礎研究	○	→	・民間部門を対象とした包括的な個人情報保護法が存在しないが、政府機関や医療、金融、子供に関する情報など、分野ごとでの立法を行うセクトラル方式を採っている。欧州のような包括的な個人情報保護法制の提案も度々なされているが、現在までに具体的な立法化には至っていない。 ・プライバシー保護政策全般において、消費者保護法制を所管するFTC（連邦取引委員会）の役割が大きい。産業界による自主規制の強化を促すと同時に、消費者に提示されたプライバシー・ポリシー違反に対する指導・訴追などを行うことにより、その実効性を担保している。
	応用研究・開発	○	↗	・2012年、オバマ大統領が今後のプライバシー保護政策の大綱を示した「プライバシーの権利章典」に署名を行っている。欧州のような包括的な個人情報保護法制の立法を含むものではなく、産業界の自主規制を重視した内容ではあるが、自主規制の策定プロセスに対する政府や市民団体関与の拡大、実効性の強化などに関わる施策が示されている。
	産業化	○	↗	・政府による法規制強化を避けることなどを目的として、分野ごとの業界団体などにおいて活発な自主的ルール形成が進められている。オンライン広告のDo Not Trackに関してはDigital Advertising Allianceの取り組みが注目される。

欧州	基礎研究	◎	↗	・1995年のデータ保護指令が全体的な基調をなし、それに基づいて各国政府がプライバシー保護法制を定めている。それに加えて、特に情報通信分野については、2002年に採択された電子プライバシー指令が、通信の秘密などの取扱を定めている。
	応用研究・開発	◎	↗	・2012年、従来のデータ保護指令を全面的に改正する「データ保護規則」の草案が公開されている。「忘れられる権利」や「データ・ポータビリティ」をはじめとする消費者の自己情報コントロール権の強化に加え、違反企業に対しては100万ユーロあるいは全世界売上の2%を上限とした罰金の規定などが含まれる。 ・2009年、電子プライバシー指令が改正され、オプトアウトでの取扱が規定されていたクッキーの取扱が、オプトイン（事前許諾）での取扱に変更されている。
	産業化	○	→	・EUのプライバシー保護法制は総じて消費者の権利を強く保護するものであるが、一方で産業界からは、柔軟なビジネス展開を阻害するものであるという批判も存在する。特に電子プライバシー指令の改正に伴うクッキー利用の事前許諾化に関しては、2012年の実施期限段階においても英国では95%のウェブサイトが未対応であることなどが示され、EUの姿勢と産業界の間に一定の温度差が存在する側面もある。
中国	基礎研究	△	→	・統一的な個人情報保護法の策定に向けた作業が進められているが、2012年現在、立法化には至っていない模様である[8]。
	応用研究・開発			
	産業化	○	↗	・民間主導の動きとして、大連のインターネット関連業界が中心となり、プライバシー保護水準認証のための個人情報保護評価制度（PIPA）を運用しており、日本のプライバシー・マークとの相互認証が確立されている[9]。
韓国	基礎研究	○	↗	・従来、公的部門や金融、医療などの分野ごとに立法的対応を行う米国型のセクトラル方式でのプライバシー保護を行っていたが、2011年に民間部門・公的部門の双方を対象とした包括的な個人情報保護法が施行されている[10]。同法における個人情報の定義や事業者の義務などは、日本の個人情報保護法と概ね同様の構成である。
	応用研究・開発	○	→	・政府系の研究機関Electronics and Telecommunications Research Institute（ETRI）の後援により毎年韓国で開催される、米国電気学会IEEEの国際会議ICACT（International Conference on Advanced Communications Technology）では、個人情報保護技術が主要テーマの一つにあげられており、米国の研究動向や国内の最新技術が主として通信技術との関連において紹介されている。
	産業化	○	→	・スマートフォン向けの音声通話・チャット用のソフトが実用化され、NAVER社の提供するLINEなどの製品が日本でも広く利用されている。電話帳データを自動的に活用してコミュニティを形成するという、個人情報の利用に関するソフトウェアであるが、これを政策適合的に実現するために個人情報保護技術の開発適用が進められているとされる。

（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）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
2）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
3）利用者視点を踏まえたICTサービスに係る諸問題に関する研究会 第二次提言
http://www.soumu.go.jp/main_content/000067551.pdf
4）スマートフォン プライバシー イニシアティブ
http://www.soumu.go.jp/main_content/000171225.pdf
5）パーソナル情報保護とIT技術の調査報告書
http://www.ipa.go.jp/security/fy23/reports/pdata/index.html
6）パーソナル情報を利活用し社会的価値を持たせるための基盤共通技術
http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/daikoukai/igvp/cp2_jp/common/024/010/post-61.html
7）個人情報の安心安全な管理に向けた社会制度・基盤の研究会 報告書
http://www.jipdec.or.jp/project/anshinkan/doc/2011/01.pdf
8）Data Protection and Privacy in China
http://www.jdsupra.com/legalnews/data-protection-and-privacy-in-china-m-27825/
9）Personal Information Protection Assessment
http://www.pipa.gov.cn/japan/
10）諸外国などにおける個人情報保護制度の監督機関に関する検討委員会・報告書
http://www.caa.go.jp/seikatsu/kojin/h22report1.pdf

3.9.4 ポリシー（著作権）

（1）研究開発領域名

ポリシー（著作権）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

著作物やデータの二次利用促進に関わる技術・政策

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

文化・経済の健全な発展にとって著作権の保護は不可欠であり、インターネットが本格的に普及を始めてからも、著作権保護期間の延長やデジタル著作権保護技術（DRM）の回避禁止をはじめとする著作権保護強化が進められてきた。しかし一方で、著作権の過度な保護は、自由な情報流通とは必ずしも相容れず、さらには新しい情報技術の開発や展開を阻害する恐れもある。特に近年では、政府や公共機関の保有する情報をインターネット上で広く公開し二次利用を促す、いわゆるオープンデータの取り組みも重視されはじめている。変化を続ける情報環境の中で、著作権の適切な保護を図りつつ、いかにして情報の円滑な流通と二次利用の促進を実現していくかが研究の焦点となっている。

情報の二次利用を促進するためのアプローチとして、近年重視される著作権分野の研究領域としては、大きく分けて次の3つをあげることができる。

第一に、著作権の権利制限規定の拡充と柔軟化である。わが国の著作権法では、著作権法30条以下に、私的利用のための複製や教育利用、引用や政治・報道利用などの著作権法の例外が設けられており、それらに該当する場合には著作権者の許可を受ける必要はない。しかし、このような限定列挙型の権利制限規定は、新しい技術や情報の利用態様が現れる度に法改正を行う必要があるため、より柔軟な、米国著作権法に規定されるような「フェアユース」条項の導入の必要性が論じられてきた[1)]。フェアユース条項とは、著作権者に経済的悪影響を与えないなどの一定な要件を満たした場合には、当該利用は著作権者の許諾を要しないという柔軟な権利制限規定である。その適用の具体化にあたっては裁判所の判断を要するものの、古くはベータマックスのビデオ録画、近年では検索エンジンをはじめとする新たな情報技術は当該条項によって認められたものも多い。

第二に、当該著作物の二次利用を認めることを著作権者が明示的に宣言する、自由利用ライセンスの活用である。その最も普及した形態であるクリエイティブ・コモンズ・ライセンス（CCL）では、「氏名表示」「改変禁止」「営利利用禁止」「同一条件継承」という4つの条件を組み合わせることにより、著作権者自身の必要性に応じた柔軟な著作物利用条件を定めることができる。CCLは、Wikipediaをはじめとする消費者参加型のウェブサービスの他、世界各国の大学の講義資料をインターネット上に公開するオープンコースウェアの取り組みなどにも用いられている。特に近年欧州では、2003年に採択された「公共セクター情報の再利用指令」に基づき、各国の公共機関が公的情報を公開するにあたっての二次利用条件としての利用も進んでいる[2)]。

第三に、権利者不明の著作物、いわゆる孤児作品（Orphan Works）への制度的対応である。近年、世界各国において、文化遺産や書籍などの大規模デジタルアーカイブ化の取り組みが進められているが、アーカイブ化の対象となる著作物は著作権者が不明であることが多く、デジタル技術による情報の保存と利用を困難にしている。欧州では近年、欧州

全域での文化遺産デジタルアーカイブ構想であるEuropeanaの推進に合わせ、新たな孤児作品再利用円滑化のための指令採択の作業が進められている[3)]。

（4）科学技術的・政策的課題

- わが国の著作権法へのフェアユース条項の導入については、現時点では米国のような柔軟な権利制限規定を導入する合意は得られておらず、現時点では（1）写真や映像などへの映り込み、（2）マスターテープなどの中間的複製、（3）技術検証のための複製といった限られた範囲での一般規定を導入するための法改正を行う方針が示されている。
- 権利者不明の著作物の取扱につき、わが国の著作権法67条では、著作権者の十分な探索など一定の条件を満たした場合に文化庁長官の裁定により利用を認める裁定制度が存在する。しかし、手続に要するコストや5年間の有効期間の存在などにより、必ずしも同制度の利用は進んでおらず、申請件数は1972年から2011年の間に80件に留まっており、過去の著作物の利用促進を図る上での利便性向上が課題となっている[4)]。

（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）

- EUでは2003年、「公共セクター情報の再利用指令」を採択し、各国政府の他、地方自治体などをはじめとする幅広い公共機関の保有する情報の公開と、再利用のための取り組みを進めている。2010年には同指令の実行状況についての調査が行われ、2012年中には、同指令の適用対象を公共美術館や博物館などに拡大する形で改正を行う方針が示されている[5)]。
- EUでは2005年から、欧州における文化遺産のデジタル化を進め、その横断的検索を可能とするEuropeanaプロジェクトを推進している。すでに1千万以上の作品を所蔵しているが、著作権者からの許諾取得が困難であることなどを理由に、公開されている作品の多くはすでに著作権が切れたものとなっており、アーカイブの円滑化を進めるための指令採択が検討されているところである。
- 著作物の利活用促進のために、著作権情報の簡便な把握を可能とするための統合的データベースの構築が進められている。EUでは、各国の保有する著作権データベースをネットワーク化するArrow（Accessible Registries of Rights Information and Orphan Works）プロジェクトが進められている他、わが国では2010年から、一般社団法人著作権情報集中処理機構が主体となり、複数の著作権管理事業者が保有するデータベースから一括して権利情報を検索可能とする取組を進めている。
- 各国において、二次利用が可能な形で公開された公的情報の利活用を促進するための取組が進められている。米国ワシントン州におけるApps for Democracyや、英国のPower of Information政策の中で行われたShow Us A Better Wayなどのように、公開された情報の活用アイデアやアプリケーション開発を広く求めるための事業が行われている[6)]。

（6）キーワード

フェアユース、オープンデータ、クリエイティブ・コモンズ、孤児作品

（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	○	→	・著作権法30条～50条に権利制限が規定されている。 ・著作権法67条に著作権者不明の場合の裁定制度が規定されている。 ・公共機関の著作物については、原則として著作権が存在するが、法令や判決文など一部の著作物は権利保護の対象とならない（13条）などの例外が定められる。
	応用研究・開発	○	→	・いわゆる日本版フェアユース条項の導入についての検討が進んでいるが、写真や映像などへの映り込み、マスターテープなどの中間的複製、技術検証のための複製といった限定的な範囲での導入とする方向性が示されている。 ・権利者不明の場合の裁定制度については、2009年に申請後の利用迅速化を含む一部改正がなされている。
	産業化	○	↗	・2012年には官民連携のオープンデータコンソーシアムが設立されるなど、公共情報の利活用に向けた作業が進められている。
米国	基礎研究	○	→	・合衆国憲法に定められた権限に基づき、連邦政府が著作権法（現行法は1976年制定）を定めている。特にインターネット上の著作権侵害におけるプロバイダの責任のあり方や、著作権保護技術の回避禁止などは、1998年のデジタルミレニアム著作権法が詳細な要件を定めている。 ・著作権法107条に規定されるフェアユース条項は、考慮要素として「利用の目的と性格」「著作権のある著作物の性質」「著作物全体における利用された量と重要性」「著作物の潜在的市場または価値に対する影響」の4つをあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	・オバマ政権以降、政府の保有する情報の二次利用を促進するオープン・ガバメント政策が活発に進められており、そこで公開された情報は連邦著作権法105条に基づき原則として自由に利用することができる。 ・著作権者不明の孤児作品の利用円滑化については、これまで幾度かの法案提出が行われているが、現在までのところ立法化には至っていない[7)]。
	産業化	○	↗	・クリエイティブ・コモンズ・ライセンスをはじめとする自由利用ライセンスの活用が進んでおり、大学教材の二次利用を促進するオープンコースウェアの取り組みをはじめ、公共情報の活用に向けた動きが活発である。
欧州	基礎研究	○	→	・2001年の情報社会指令および2003年の知的財産エンフォースメント指令をはじめとする各種のEU指令に基づき、各国が国内法を定めている。インターネット上のサービスプロバイダの責任については、2000年の電子商取引指令が詳細を定めている。
	応用研究・開発	◎	↗	・欧州における大規模な文化資源のデジタル化推進事業などを受け、2011年に「孤児作品の利用に関する指令」案を作成し、採択に向けた作業を進めている。 ・2003年に「公共セクター情報の再利用指令」が採択され、各国において公共機関の保有する情報の公開と二次利用促進のための作業が進められている。
	産業化			
中国	基礎研究	○	→	・1991年に施行された中華人民共和国著作権法が基盤となっている[8)]。
	応用研究・開発			
	産業化			

韓国	基礎研究	○	→	・1986年に全面改正された著作権法が基盤となっている[9)]。
	応用研究・開発	○	→	・2007年に締結された米韓自由貿易協定（FTA）に含まれる、著作権保護強化条項を受け、著作権保護期間の延長や損害賠償の強化をはじめとする大幅な法改正を行っている。 ・2011年の法改正により、フェアユース条項を導入している。
	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）権利制限一般規定ワーキングチーム報告書
http://www.bunka.go.jp/chosakuken/singikai/housei/h21_shiho_07/pdf/shiryo_3_2.pdf
2）Government use of Creative Commons
http://wiki.creativecommons.org/Government_use_of_Creative_Commons
3）Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on certain permitted uses of orphan works
http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ. do?uri=COM:2011:0289:FIN:EN:PDF
4）著作権者不明の場合の裁定制度
http://www.bunka.go.jp/1tyosaku/c-l/results_past.html
5）Digital Agenda: Turning government data into gold
http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/1524
6）海外におけるオープン・ガバメントの取り組み
http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/e-meti/opengov/opengovreport.html
7）Report on Orphan Works
http://www.copyright.gov/orphan/orphan-report.pdf
8） 中国における著作権侵害対策ハンドブック
http://www.bunka.go.jp/chosakuken/kaizokuban/pdf/china_singai_handbook.pdf
9） 韓国における著作権侵害対策ハンドブック
http://www.bunka.go.jp/chosakuken/kaizokuban/pdf/korea_singai_handbook.pdf

3. 10　ビッグデータ

ビッグデータという言葉の起源は明らかではないがGoogle起業の10周年にあたる2008年9月にNatureは表紙に"BIG DATA"という文言を掲げた上で、特集記事にて新しいデータの奔流に対応した新しい科学と探索の研究に取り組むことの必要性を主張している[1)]。2011年にはマッキンゼーはビッグデータの経済的インパクトに関するレポートを公開し、ビッグデータの解析が今後の生産性向上、イノベーションや消費活動を支える基礎的な競争力になり、すべてのセクターのリーダーはビッグデータの意味するものに正面から取り組む必要があると説いた[2)]。一躍脚光を浴びたのは2012年3月29日に米国オバマ政権がBIG DATA INITIATIVEで2億ドルの予算をつけると発表したことである[3)]。一方、日本においては、膨大化するデジタルデータに対して比較的早い段階で、文部科学省「情報爆発時代に向けた新しいIT基盤技術の研究[4)]」（2006年）や経済産業省「情報大航海プロジェクト[5)]」（2007年）にて産学連携の大型プロジェクトを立ち上げ、推進している。

研究対象としてみたとき、ビッグデータは、ITの社会への普及により生み出される膨大なデジタルデータそのものを指す。つまり、情報システムはもとより、コンピュータを使ったシステムやCPUを内蔵する機器、センサーの類、人間の活動などが生成する様々なデータから成る。ビッグデータの特徴を3Vあるいは4Vで表すことが多い[6)]。第一のVはVolumeであり、文字通りビッグなデータ（量的な爆発）を意味する。第二のVはVelocityで、データの発生頻度や生成速度を意味する。第三のVはVarietyで、生成されるデータの多様性を示す。また、これらに加えて第四のVとしてVeracityをあげることもあり、データのあいまい性や誤差などを意味する。

ビッグデータが今注目されているのには、次のようないくつかの理由がある。

・大量のデータが利用可能になった。

音楽や映像情報の流通、SNS（ソーシャル・ネットワーキング・サービス）、センサーの普及。また、記憶装置の低廉化・大規模化、通信の高速化により大量のデジタルデータが過去数年にわたり蓄積されていること。この流れは、今後あらゆるものがCPUと通信ユニットをもってデータを生成し始めることでさらに加速する。

・大量のデータが処理可能になった。

マルチコア化によるCPU性能の向上、クラウドによるCPUそのものの数の増大、高速通信によるネットワークコストの低下などの基本性能の向上に加えて、検索エンジンで培われた大規模分散処理方式の発達により、地球規模で計算パワーが増大し続けている。

・データの価値が認識され始めた。

東日本大震災後の本田技研工業（株）の「通行実績情報マップ」に関する成功事例はそれまで営利目的と考えられていたデータ活用の認識を大きく変えた。また、(株）ウェザーニュースが先鞭をつけた利用者を巻き込んだサービスが企業と利用者の双方のベネフィットになるなど、ビッグデータのビジネス利用が進展している。

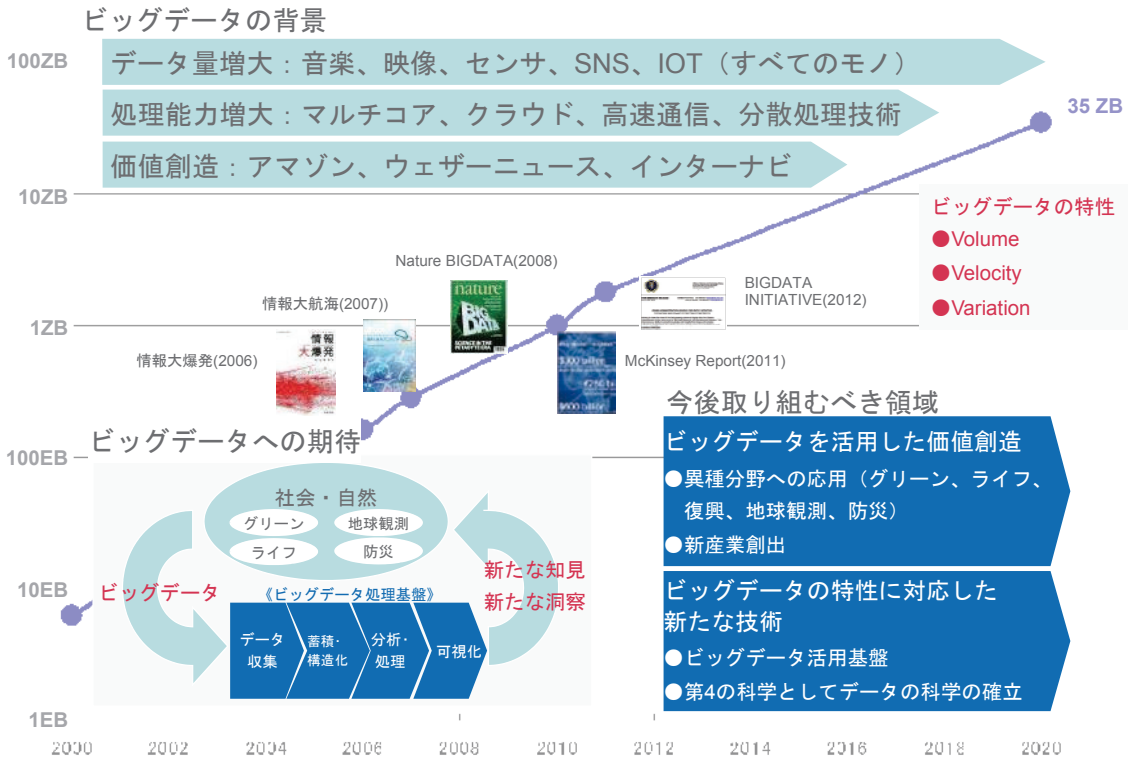
研究分野としてみたときは、ビッグデータは、大量かつ多種・多様なデータを許容できる時間内に効率的に収集・蓄積・処理・分析し、活用するための技術[7)]といえる。前述した様々な動きの背景には、量的に増大する様々な種類のデジタルデータに埋もれている未知の知識や洞察を抽出し、研究やビジネスに活用したいという期待がある。しかしなが

ら現状の技術レベルではビッグデータの要件を満たすことができないため、ビッグデータに対応した新たな研究開発が必要である。

本俯瞰区分では、ビッグデータに対応した研究開発領域として二つの基盤技術と三つの応用分野を取り上げた。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と、ビッグデータを分析して有用な知見を引き出す技術について、現状と今後必要となる課題をまとめた。また三つの応用分野は、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、ライフサイエンス、天文科学、ITメディアを選択し、分野ごとの取り組み状況を説明する。

（1）大量データ処理プラットフォーム技術
（2）データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術
（3）ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
（4）天文科学分野におけるビッグデータ
（5）ITメディア分野におけるビッグデータ

ミクロ俯瞰図（ビッグデータ）



1）"SCIENCE IN THE PATABYTE ERA", nature, Vol. 455, 4 September 2008
2）"Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity", McKinsey Global Institute, May 2011
3）Big Data Initiative - The White House, OSTP, March 29, 2012
4）http://www.infoplosion.nii.ac.jp/info-plosion/index.php
5）http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/daikoukai/igvp/index/index.html
6）"Gartner Says Solving 'Big Data' Challenge Involves More Than Just Managing Volumes of Data", June 27,2011
7）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　大量データ処理プラットフォーム技術

（1）研究開発領域名

大量データ処理プラットフォーム技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

蓄積されたデータあるいは時々刻々と生成される大量なデータ群を組み合わせて処理する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

大量データを処理するプラットフォーム技術を分類する軸は二つある。一つ目の軸は、対象とするデータが過去のデータであるか未来のデータかの分類であり、二つ目の軸は一元的に管理されたデータであるか多様な情報源で独立して管理されたデータを対象とするかである。ここでプラットフォーム技術とは、複数のコンピュータを組み合わせて動作させる技術のことを指す。

一つ目の軸が過去データを対象とする領域では、複数のコンピュータを用いて過去のデータを扱う技術としてハイエンドマシンにより構成される分散データベース管理技術（分散 DBMS: Database Management System）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コンピュータに適した NoSQL および MapReduce に代表される分析系の分散処理技術がある [3)]。商用化された分散 DBMS については、汎用目的な技術では米国が主導しており、応用を特化した技術では欧州にも製品が出ている。研究フェーズの取り組みについては、要素技術については 2000 年まででほぼ完成していて、近年では超高速な処理を要求する応用向けの取り組みが欧米の一部の大学で見られる。一方、NoSQL および分散処理技術に関しては、商用的に利用する米国の Web 系のベンチャー企業による先導型の研究開発になっており、応用の用途に応じた機能拡張がなされている。大学においても、欧米・日本において DBMS 技術の適用による分散処理技術の高速化、MapReduce 以外の分散処理アーキテクチャの提案、機械学習などの高度な分析処理を対象とした高速化の取り組みがなされている。今後はさらに大規模なデータを対象として、データセンタにまたがった処理や最新ハードを利用した技術に関する研究、あるいは現在はごく一部の企業でしかニーズが顕在化していないが電力問題を解消するため省電力化に関する研究が進むものと考えられる。

一つ目の軸が未来のデータを対象とする領域では、時々刻々と配信されるデータを対象として、一定量の主記憶を利用する環境の下で高速に検索要求を処理するストリーム処理技術がある [4)]。ストリーム処理は DBMS とは対照的であり、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を処理する。商用化については、欧米と日本の DBMS ベンダーから製品が出ており産業での利用が進みつつある。研究フェーズの取り組みについては、要素技術については 2005 年後前後までに発展が進み、それ以降は検索処理の高度化（CEP: Complex Event Processing（複合イベント処理）的なパターンマッチオペレータの導入、不確実ストリームへの対応、高度な Join（結合）オペレータの導入、ストリームトランザクションの提案、論理的な時刻同期モデルの導入、各種マイニングアルゴリズムの応用など）や最新ハードを用いた研究や、交通制御などの

具体的な応用に特化した取り組みが欧米・日本・中国でなされてきている。今後はM2M（Machine-to-Machine）などに代表されるようにストリームを生成する基盤が普及することで、ストリーム処理技術の応用が増加して、応用毎にさらに技術が発展するものと考えられる。

二つ目の軸に関して、多様な情報源で独立して管理されたデータを対象とした領域では、異なる情報源の類似したデータを関係づけして束ねて利用するデータ統合技術がある。データ統合技術は、異なる情報源間でのデータ構造の対応付けを行うスキーママッチングと、スキーマレベルでのマッチングにしたがってデータを加工してデータを束ねる操作から構成される[5)]。商用化については2000年ごろから米国を中心として製品が出ている。研究フェーズの取り組みについては、スキーママッチングの自動化などの要素技術については2005年後前後までに発展が進んできている。その後は構造化データと文書のような非構造データを関連付ける技術、不確実性を導入した確率的データベースなどのデータの確からしさを導入したデータ統合、またユーザの操作履歴を利用したデータ統合の自動化などの取り組みが発展してきている。ただし、問題の性質上、完全な自動化は困難であることから、適用領域やデータの特性にしたがった研究が分化している。日本でも企業統合や組織統合に応じてデータベース統合が実施されているが、自動化などの研究レベルの取り組みは論文などで公開されることが少ないと考えられる。今後については、引き続いて構造化データと非構造化データを関連付けることによる大規模データの分析が注目されると考えられる。

国際比較については、記述の各論については上述の通りであるが、国家施策という観点では、日本が2005年度～2010年度の期間に大規模な文部科学省科学研究費補助金プロジェクトで「情報爆発」をテーマとして、世界に先行してデータベース技術・自然言語処理技術を大規模データプラットフォームで行う取り組みを実施してきている。米国･中国･韓国でも2012年度から具体的な応用先と連携した大量データ処理プラットフォーム技術に対して莫大な予算が投資されている。システム系の技術に関しては企業主導でのシステム開発に強い米国が世界を大きく先行している。米国以外では、改良的な技術やアルゴリズム系について行われてきている。アルゴリズム系の取り組みに加えて、日本ではストリーム処理の製品レベルの取り組みが盛んである。中国については優秀な留学生や欧米で実績を上げた研究者が帰国することや海外企業の研究機関の中国への進出などの影響で、国全体の技術底上げが急速に進みつつある。

（4）科学技術的・政策的課題

- 大量データを集めて高度に分析するという観点では、構造化データと非構造化データを関連付けする課題、および機械学習あるいはシミュレーション処理と大量データ処理を連携させることで予測などの高度なデータ処理を実現することが、今後の最重要課題である。両者の課題とも、技術領域横断的な研究の取り組みを加速する施策が重要である。
- 大量データ処理プラットフォームといったシステム系の技術分野では、実データおよび大規模なコンピュータ環境を有している企業の方が、研究開発を進める上で大学より有利な状況にある。米国では、企業による新たなサービスによるニーズ志向で大量データ処理の研究開発を牽引して発展してきているが、他国では米国ほど顕著に大量

データ処理を牽引するサービスが発達していないため、研究と実用化のギャップがある問題を抱えている。また米国では研究開発者が自由に利用できるデータなどが公開されているが、他の国ではデータの利用の基盤が不十分であり、これも研究促進を阻む原因となっている。

（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）

- 米国では科学技術政策局（OSTP）が 2012 年 3 月 29 日、ビッグデータ研究・発展イニシアティブ（ビッグデータ 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ティブでは、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などがあげられている [1)]。
- 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 [2)]。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など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 か年計画綱要」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処理に関係する項目も含まれている。

（6）キーワード

データ統合、スキーママッチング、クラウドコンピューティング、分散データベース、ストリーム処理

（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	○	→	時系列データ処理やグラフデータ処理などのアルゴリズム系は先端的である。システム系についてはストレージ技術に基づく分散DBMS・分散処理技術の取り組みおよびストリーム処理技術について一定の取り組みがある。
	応用研究・開発	○	→	MapReduce系の分散処理については機械学習といった分析処理の高速化の取り組みがある。 ストリーム処理については、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。 プリファードインフラストラクチャとNTTは機械学習処理に特化したストリーム処理エンジンJubatusを世界に先駆けてOSS公開している。
	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きており、ビッグデータのニーズに乗って今後も産業の拡大が予想されるが、海外に先行者利益を抑えられてしまうリスクがある。 MapReduce系の分散処理についてはWeb系の企業やSI系企業を中心に開発事例が急増してきている。 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事業を行なっており、今後の応用のリアルタイム化に応じて発展が期待できる。
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・MapReduce系の分散処理については、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・応用毎の最適な分散処理）が特徴的である。 ストリーム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の導入、不確実ストリームへの対応、高度なJoinオペレータの導入、ストリームトランザクションの提案、論理的な時刻同期モデルの導入、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	◎	↗	NoSQL・MapReduce系の取り組みについては、Web系のベンチャー企業がOSS開発を先導してきており、米国が優位な立場にある。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。 データ統合については、Microsoft, Googleが10年以上モデル管理について取り組んでおり、非構造データと構造データの統合についてはIBMが近年集中的に取り組んでいる。
	産業化	◎	↗	NoSQL・MapReduce系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。 クラウドサービスについては、Amazon, Microsoft, Googleがそれぞれ世界市場で活躍している。 ストリーム処理については、Microsoft社（StreamInsight）やIBM社（InfoSphere streams）、オラクル社, Progress社（Apama）, TIBCO社、SAP社（Sybase）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。 データ統合については、Microsoft, IBMなどではデータ統合製品の販売やそれらを利用したSI事業を展開しており、Googleなどの Web系の企業ではWebスケールのデータ統合に取り組んでいる。

欧州	基礎研究	◎	→	分散 DBMS については、カラム指向 DBMS に基づく分散 DBMS の取り組みや、NoDB など大規模データをファイルレベルで格納する DBMS の研究が提案されている。 MapReduce 系の分散処理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。 ストリーム処理については処理モデルや高性能化の研究で成果をあげている。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 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あげている。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、MapReduce 系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。 Baidu などで NoSQL を利用した開発事例がある。
	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。
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あげている。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 やセンサネットワーク上におけるストリーム処理の高性能化、高度化に関する研究もある。
	応用研究・開発	△	→	大量データ処理プラットフォーム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 社がデータセンタなどを運用している。

（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）欧州におけるクラウドコンピューティング振興政策及び研究開発動向調査、NICT 欧州連携センター , http://www2.nict.go.jp/int_affairs/int/images/stories/pdf/re111118.pdf
2）総務省 H24 年度版 情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc121440.html
3）宮崎純、鬼塚真、データクラウド研究の潮流と最新動向、情報処理 52（6）, 2011.
4）北川博之、川島英之、天笠俊之、センシングデータ処理基盤技術―ストリームデータ処理―、情報処理 51（9）, 2010.
5）Philip A. Bernstein, Jayant Madhavan, Erhard Rahm: Generic Schema Matching, Ten Years Later. PVLDB 4（11）：695-701（2011）.

3. 10. 2　データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術

（1）研究開発領域名

データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術

（2）研究開発領域の簡潔な説明

大量データから、そこに潜む規則性や異常性などの有益な知識を発見すること、またそれに基づき将来の予測などを行うことなど、大量データを有効活用し、知識を創造する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

コンピュータを用いてデータから自動的に有用な知識を発見する技術は、1970年代より機械学習（Machine Learning）技術として米国を中心に発展してきた。1990年代後半より、扱うデータの大量性や多様性が注目され、データマイニング技術として発展してきた。データマイニング技術は、機械学習技術に加え、データの収集、管理、運用などといったデータ処理の一連の流れを含む総合技術を意味している。本分野はKDD（Knowledge Discovery and Data Mining）と称されている。

さらに、2010年頃から、データのさらなる大規模化、多様化に伴い、ビッグデータという名の下で、その活用の機運が高まってきた。ビッグデータが注目される背景には、次のことがあげられ、2020年には世界が扱うデータ量は約40ゼタ（10^{21}）バイトへ拡大すると予想されている。

- Web上のデータ（自然言語、画像、音声、リンクなど）、ソーシャルネットワークのデータ（Facebook、Twitterなど）、各種センサ（リモートセンシング、RFIDなど）データ、各種ログ（トランザクション、アクセスログ、Syslogなど）やインフラ系のパフォーマンスデータなど利用できるデータが低コストで大量に採取されるようになったこと。
- これらデータを蓄積するストレージや関係データベースの機能が向上し、データ容量が数十TBレベルにまで拡大したこと。これにより、CRMやERPで扱ってきた顧客データや企業内経営情報、サイエンスデータ（ゲノム、医療、天候、環境など）を大量に蓄積できるようになってきたこと。

上記ビッグデータの活用において、データマイニングはその分析技術の中核をなすものとして位置づけられる。現在のデータマイニング技術は、機械学習技術を軸とする要素技術と産業応用のための適用技術に大別できる。

要素技術については、以下に示すような古典的な分析技術とアドバンストな分析技術に大別することができる。

- 古典的な分析技術：クラスタリング（教師なし学習）、分類・回帰（教師有り学習）、半教師あり学習、相関分析、パターン分析、異常検知、リコメンデーション、テキストマイニング、特徴抽出、データ圧縮など
- アドバンストな分析技術：グラフ・ネットワークマイニング、ストリームマイニング、スパース正則化、行列・テンソル分解（Factorization）、影響力解析、情報伝搬解析、時空間マイニング、潜在変数モデル、変化解析、プライバシー保護、評判・意見抽出、圧縮センシングなど

応用分野では、以下の分野にて顕著なデータマイニング活用実績が報告されている。

- セキュリティ：なりすまし検知、攻撃検知、侵入検知、詐欺検知、ディジタフォレンジクス（法的証拠分析）など
- Web・SNS 解析：新トピック検出、話題分類、ランキング学習、コミュニティ発見、インフルエンサーの特定、Web デザイン最適化など
- マーケティング：顧客セグメンテーション、リコメンデーション、解約者予測、広告効果測定、併売分析など
- インフラ系：故障検出、障害検出、ネットワーク異常診断など
- 交通・ITS：自動車故障診断、メンテナンス最適化、渋滞予測、交通網最適利用など
- ヘルスケア・生物：診断支援、患者のセグメンテーション、ゲノム解析など
- その他：教育、福祉、リテール、金融など

国外の動向としては、米国が最も積極的である。2011 年 3 月 29 日にビッグデータ研究・発展イニシアティブ（Big Data Research and Development Initiative）を公告している [1), 2)]。この中で 6 つの機関（NSF, NIH, DOD, DARPA, DOE, USGS）が総額 2 億ドルを投じて、大量データの収集、蓄積から管理、分析のためのツールや技術の向上を図り、これを活用したサイエンスの発展展開、安全保障の強化などに力を入れようとしている。また、米国では Google 社を始めとする IT 系企業が創業以来 Web 上のビッグデータの活用に取り組み、Web 上でのデータの構造化に成功している。米国の Facebook や Twitter が提供するソーシャルネットワーキングサービスもビッグデータ活用の最も効果的な実験場でもあり、これらを通じて解析技術が急伸している。

EU では、2010 年 5 月に「欧州のためのデジタルアジェンダ」を策定し、その中で、inclusive knowledge society を実現するために、2011 年から 5 年計画の FI-PPP プログラムを 3 億ユーロの予算を投じて実施している [3)]。FI-PPP は、インターネット技術を中核にして、産業界を巻き込み、交通、医療またはエネルギーなどのインフラと業務プロセスを“smarter”（more intelligent, more efficient, more sustainable）にすることをねらっている。

中国では、Google に代わる検索エンジンを提供する百度社がビッグデータを保有する中核企業として存在する。2012 年 7 月にはビッグデータ World Forum を北京で開催 [4)]。2012 年 8 月には、データマイニング分野の最高峰と呼ばれる国際会議 KDD（ACM Conference on Knowledge Discovery and Data Mining） [5)] を北京で開催し、Mining the Big Data を主テーマに据えている。参加者の半分近くが中国人であり、中国のビッグデータに対する意識は米国にも劣らないといえる。

韓国では、2011 年 10 月に国家情報化戦略委員会が主導して、ビッグデータを活用することにより“スマート政府”を実現する計画を策定している [6)]。政府は国家知識情報プラットフォームを構築し、公開可能な情報を 2013 年までに全面公開することになっている。

日本では、2007 年度～ 2011 年度に経産省主導で、情報大航海プロジェクトが発足し、次世代検索・解析技術を醸成し、IT 基盤が整えられた。しかし、その後のビッグデータ活用に関する意識は高いものの、組織的な取り組みは国際的に遅れている感が否めない。

（4）科学技術的・政策的課題

ビッグデータ分析の科学技術的課題としては、3V（Volume, Velocity, Variety）といわれるビッグデータの特徴にいかに対応していくかという問題が上げられる。

Volumeとは、データの大規模化に伴う問題である。データの規模は、数の多さと、一つ当たりのデータの次元（属性の数）の大きさに分けて考えることができる。数の多さに対しては、多くの分析問題に対してデータ数の線形オーダやそれに準ずる計算時間で解けるアルゴリズムが開発されてきた。一方、次元の大きさに対しては、次元が増えると、取り得る仮説（知識の表現形式）が指数的に増える場合が一般的で、アルゴリズムの設計は困難になる。その中で、近年、大規模次元の中には本当に有用な次元は少ない、というスパース性の仮定のもとで、有用な特徴的次元を抽出する「スパース正則化」[7]や「Denoising」[8]の手法が注目されている。また、大規模データを圧縮して分析、復元する「圧縮センシング」[9]の可能性にも期待が高い。

Velocityとは、データの時間的変化、非定常性に伴う問題である。一般に、データの性質は時間と共に変化する。そのダイナミックな性質を理解し、データから有意義な変化を捉え、これに適応することが課題である。そのために、「（非定常）時系列データマイニング」や「ストリームマイニング」[10]といった手法が注目を集めている。変化検知や異常検知[11]についても期待が高まっている。

Varietyとは、データの多様性に伴う問題である。テキスト、音声、リンクなど現実のデータはヘテロ（非一様）であり、非構造的であり、分散して存在している。これらをいかに関連付け、統合し、全体的な知見を導き出すかが重要な課題とされている。その中で、データベースを横断して多様な関係性を抽出する「関係データマイニング」[12]、分散情報源から統合的に知識発見を行う「分散マイニング」、異なる問題の共通性を利用して学習する「マルチタスク学習」[13]といった方法が注目されている。また、ヘテロな要素の関係性を表すのに、グラフやネットワークが用いられることから、「グラフ・ネットワークマイニング」の可能性に対する期待も高い。また、潜在的因子をもった複雑な知識構造を扱う「潜在変数モデル」や「ノンパラメトリックベイズ法」[14]にも期待が高まっている。

上記に加え、データの著作権やプライバシー保護の問題も重要な課題である。データに顧客のプロファイルなどのプライバシーに関わるデータを含んでいるときに、これらを秘匿しつつ有用な知識を抽出するための「プライバシー保護型データマイニング」[15]の研究が注目を集めている。

上記課題に先立ち、「そもそもビッグデータからどのような情報を抽出したら価値を創造したといえるのか？」という本質的な問題に対して統一的かつ明瞭な見解が得られていない。これに対して一つの見通しを与えることが最大の課題であるといえる。一つの知見は、ビッグデータ分析を「データ圧縮」として考える見方である。つまり、全データをいかに短く圧縮できるかという立場から、データから捨ててよいものと捨ててはいけないものとを区別し、捨ててはいけないものの中から、規則性、異常、変化などの価値ある情報を抽出するという考え方である。これは記述長最小原理（MDL: Minimum Description Length principle）とよばれるデータ解析の原理である[16]。記述長最小原理は長期にわたって、機械学習やデータマイニングの本質的な問題に解決指針を与えてきている。今後は記述長最小原理のみならず、これに匹敵する普遍的原理を生み出し、見通しのよい形でビッグデータのもつ3Vの問題を克服し、どのような価値を創造したかを明らかにすることが

大きな課題である。

政策的課題としては、ビッグデータを共有するコンソーシアムを構築するのが困難であるという問題が上げられる。ビッグデータは個人情報、開発情報、障害情報などを含んでいるために、企業にとっては慎重な扱いが必要であり、外部と共有することは一般に困難を伴う。この点は、複数の団体が共同でビッグデータ分析の共通基盤を作る際の最大の障壁である。

（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）

大規模データの分散処理を支援するソフトウェアフレームワークとして、2004年にGoogle社がMapReduce[17]をリリースしたこと、およびこれに触発されて、Apacheソフトウェア財団がHadoop[18]をフリーソフトウェアとしてリリースしたことが、ビッグデータ分析に大きな貢献を果たしている。

分析技術としては、分類アルゴリズムの中では最も精度が高いとされている「サポートベクトルマシン」（Support Vector Machine）[19]について、従来は計算量が高いという理由から実用性が疑問視されていたが、2006年以降、これを線形時間で処理できるアルゴリズムが開発され[20]、ビッグデータへの適用への現実味が増した。

また、次元に比べてデータ数が少ないといったスパースなデータから有用な次元を抽出する「スパース正則化」の理論やこれをもとにデータを圧縮･復元する「圧縮センシング」の理論の発達により、大次元データの処理が現実的なものになった。

大規模プロジェクトは、すでに記した、米国のビッグデータ研究・発展イニシアティブの世界的な影響が大きい。韓国やフィンランドなど他国がこれに倣ってプロジェクトを立ち上げる動きが見える。

（6）キーワード

データマイニング、機械学習、データベース、知識発見、3V（Volume, Velocity, Variety）

（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	○	↗	・機械学習やデータマイニングの基礎に関しては、長年醸成してきており、専門の研究会（情報論的学習と機械学習研究会（IBISML研究会[21]）など）も成長してきている。 ・世界的に主要なジャーナルや国際会議に貢献できる研究成果は大学やNTTなどから出ているもの、その全体数は米国や中国に比べればまだまだ少ない。
	応用研究・開発	○	↗	・Web系、ソーシャル系、マーケティング系のビッグデータ活用が相対的に多く、インフラ系やセキュリティの応用も出始めている。その報告事例は米国に比べれば少ない。ゲノム分野を含むバイオインフォマティクス分野ではデータ活用が盛んである。
	産業化	○	↗	・各ベンダーがビッグデータのコンサル事業やプラットフォーム事業を展開しているが、ビッグデータ活用の具体的な描像が描き切れていない状況である。Web系企業ではリコメンデーションエンジンが大いに活用されている。 ・震災後の経験から、リスク管理にビッグデータを活用する機運が高まっている。 ・ビッグデータEXPOが開催され[22]、産業応用の意識は高まりつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	・データマイニングや機械学習の革新的アルゴリズムやソフトウェアはほとんどが米国から発信されている。 ・KDDやICDM（IEEE International Conference on Data Mining）[23]，SDM（SIAM International Conference on Data Mining）[24]などの主要国際会議を実質的に牛耳っており、学会での中心的ステータスを築いている。 ・大学・公的機関が基礎研究を行い、企業がそれを実用化するという直線的な構図ではなく、ビッグデータを手に入れたGoogle, Yahoo, Microsoft, IBMに代表される企業が、それをベースに基礎研究をけん引しているという構図をなしている。
	応用研究・開発	◎	↗	・大規模データ対応の分散処理ソフトウェアフレームワークとしてGoogleがMapReduceを、Apache社がHadoopをリリースし、ビッグデータ応用を率先している。 ・データマイニングの金融系、Web系、インフラ系、ヘルスケア系などの分野について適用技術が発展し、主に民間企業から成功事例が数多く報告されている。
	産業化	◎	↗	・Web系ではGoogleなどのネット企業が、ソーシャル系ではFacebookやTwitterがビッグデータを蓄積し、知識の構造化を推進している。 ・IBMなどの民間企業が、ビッグデータ活用のコンサルティングやプラットフォームを提供するビジネスを展開している。Siemensなどもヘルスケアに特化したビッグデータ活用に力を入れている。製造業、流通業、サービス業の広範な範囲にわたって産業応用が進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	↗	・フランス、イタリア、ドイツ、オランダ、ベルギーの大学・公共機関やIBMチューリッヒ研究所などでは1980年代より機械学習、データマイニングに関する基礎研究の実績がある。 ・欧州全体としては、PKDD（European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery）[25]と呼ばれる欧米主体のデータマイニング基礎の学会を毎年開催し、主催している。 ・フィンランドは、特にデータ分析に対する情報理論的手法において他国を圧倒している。
	応用研究開発	○	↗	・成熟した基礎理論を基盤にして、Web系、医療・生命科学系、金融系など広い範囲にわたって応用が進められている。
	産業化	○	↗	・フィンランドではData to Intelligence（D2I）と称するStrategic Research Agendaが始まろうとしている[26]。10の大学・公的機関と30の民間企業が参加し、初年度10M €投じてビッグデータ活用を図る。 ・産業応用主体のビッグデータConferenceがフランスで開催されている[27]。
中国	基礎研究	◎	↗	・米国に次ぐ勢いで、データマイニングの研究が発展している。北京大学、清華大学、上海交通大学、Chinese Academy of Sciencesなどの大学公的機関のみならず、Microsoft AsiaやHuawai社などの研究所が、Web系を中心とするデータマイニングの基礎研究に力を入れている。その主要国際会議への論文採択数は米国の次に多い。 ・PAKDD（Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining）[28]といった、環太平洋―アジア地区での本分野の国際会議を主導し、中心的役割を果たしている。 ・中国国籍で米国の大学企業で活躍している若手が多く存在し、母国に帰って本分野に貢献する潜在的人的資源は相当に高い。
	応用研究・開発	◎	↗	・SNSにおけるテキスト要約（北京大学とMicrosoft社）、広告推薦やテキスト分類（上海交通大学とMicrosoft社）や特許検索（清華大学とExxonMobil社）など（KDD2012、ICDM2011より）、産学共同で実用的なデータマイニングを生み出している事例が増えている。
	産業化	○	↗	・中国の検索エンジンはBaidu（百度）社が主流であり、ビッグデータを収集蓄積している。Mobile向けOSなどを手掛ける阿里云などもビッグデータ収集・活用のビジネス化を進めている。
韓国	基礎研究	△	→	・ソウル大学や浦項工科大学校（POSTECH）でデータマイニングの基礎研究の活動がある。主要国際会議で採択される論文数は少なく、データマイニング分野における貢献は相対的には高いとはいえない。
	応用研究開発	○	→	・データマイニングのバイオ、Web系、金融系への適用に関する報告が見られる。
	産業化	◎	↗	・SKグループ（通信・精油事業）、ロッテグループ（食品・流通事業）などが顧客情報をマーケティングに活用している。LG電子、サムスングループがWeb上のデータを商品開発に活用している。現代自動車が自動車センシングデータから顧客へのリコメンデーションに活用しているなどグループ企業単位で盛んである。

（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）アカデミッククラウドに関する検討会第二回　H.24.6.4 米政府“ビッグ・データの利活用を目的とした研究開発イニシアチブを発表
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/027/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2012/06/11/1321880_05.pdf
2）Office of Science and Technology Policy Executive Office of the President New Executive Office Building Washington, DC 20502: OBAMA ADMINISTRATION UNVEILS “BIG DATA” INITIATIVE: ANNOUNCES $200 MILLION IN NEW R&D INVESTMENTS
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/big_data_press_release_final_2.pdf
3）総務省　ビッグデータの戦略的活用に向けた諸外国の取組：
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc121440.html
4）BIG DATA world forum:
http://www.bigdatawf.com/conference.html
5）Proceedings of ACM SIGKDD Conference on Data Mining and Knowledge Discovery（KDD1995−KDD2012）
6）韓国におけるビッグデータ活用−IT 環境や企業風土を背景とした特徴的取組み−
http://www.nri.co.jp/opinion/it_solution/2012/pdf/ITSF120412.pdf
7）J.Friedman, T.Hastie, and R.Tibshirani: The Elements of Statistical Learning. Springer-Verlag, New York, 2001.
8）J.Rissanen: MDL denoising. IEEE Transactions on Information Theory, Volume: 46, Issue: 7 Page（s）: 2537 – 2543, 2000.
9）DL. Donoho: Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, Volume: 52, Issue: 4, Pages: 1289 – 1306, 2006.
10）J.Gama: Knowledge Discovery from Data Streams. RC Press, 2010.
11）山西健司：データマイニングによる異常検知 . 共立出版 , 2009.
12）S. Dzeroski and N. Lavrac, editors: Relational Data Mining. Springer, Berlin, 2001.
13）R.Caruana: Multitask learning. Machine Learning, vol.28,1997.
14）P. Orbanz and Y.-W. Teh.:Bayesian Nonparametric Models. In Encyclopedia of Machine Learning（Springer）, 2010.
15）C.C.Aggarwal and P.H.Yu: Privacy-preserving Data Mining. Springer-Verlag, New York, 2008.
16）J.Rissanen: Information and Complexity in Statistical Modeling. Springer, 2007.
17）MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters
http://research.Google.com/archive/mapreduce.html
18）Hadoop Wiki: http://wiki.apache.org/hadoop/ProjectDescription
19）V. Vapnik: The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, New York, 1995.
20）T.Joachim: Training linear SVMs in linear time. Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining（KDD2006）, Pages 217-226, 2006.
21）情報論的学習理論と機械学習研究会：
http://ibisml.org/
22）ビッグデータ　EXPO 2012 春：
http://expo.nikkeibp.co.jp/bigdata/2012spring/
23）Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining（ICDM2001−ICDM2011）
24）Proceedings of SIAM International Conference on Data Mining（SDM2001−SDN2012）
25）Proceedings of European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery（PKDD1997−PKDD2012）
26）DATA TO INTELLIGENCE（D2I）

http://www.datatointelligence.fi/
27）Conference - BIG DATA 2012 - Paris, France:
http://www.bigdataparis.com/uk-conference.php
28）Proceedings of Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining（PAKDD1997–PAKDD2012）

3. 10. 3　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

ゲノム配列決定装置（以降、シーケンサと呼ぶ）をはじめとするハイスループットな測定機器の急激な進展により、ライフサイエンスはペタ（10^{15}）バイトオーダのデータを扱う分野へと変貌しつつある。研究から産み出されるデータは大規模なだけでなく、その種類も多種多様で、これらのデータを統合的かつ効率よく扱い、そこから新たな知識を見出し、イノベーションにつなげるための研究開発がいままさに求められている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ライフサイエンスは、1990年頃に世界的にはじまったヒトゲノム計画を契機として、情報の洪水にさらされるようになり､情報の学問としての性格が強くなってきた。そして、このような動きの中からバイオインフォマティクスという学問分野が生まれ、発展してきた。しかしながら、1990年代は、それまでと比較すれば桁違いに多いが、絶対的にはそれほどのデータ量ではなかった。例えば、公共データベースに収められているDNAの塩基配列の量は、2000年の時点でも、せいぜいギガ（10^{9}）バイトオーダであった。それが、2000年代の半ばからハイスループットの測定機器が続々と開発され、いまでは、ペタバイトオーダのデータを扱う必要に迫られるようになってきた。シーケンサを例にとれば、その性能の伸びは、コンピュータにおけるムーアの法則を遥かに凌いでいる状況である。これにより、個々人のゲノムも高速かつ安価に決めることができるようになり、これを基盤とした大規模なコホートプロジェクト（特定の地域や集団を長期間にわたって観察し、ゲノムや環境など種々の要因と健康の関係を明らかにすることを目指すもの）も世界各国で活発化しつつある状況である。また、地球上の多様な生物のゲノムを決め、環境問題、エネルギー問題、食料問題の解決に役立てようとするプロジェクトも多数始まっている。

このような大量のデータを扱う技術に関してはすでに情報分野で様々な研究開発が行われているが、データの種類が多いこと、生物特有の曖昧性、冗長性、多義性、文脈依存性などの理由からデータの解釈に類似性検索など特別なアプリケーションが必要であること、個人ゲノムなど個人情報としての扱いが必要であること、などから、すでにある技術を応用するだけでは不十分であり、新たな技術開発が必要である。

新たな技術開発を行うには、もちろん既存の技術を応用する場合においてさえも、程度の差はあれ、生物学・医学と情報科学の両方の素養が必要になる。医学なのか農学なのか基礎生物学なのかによって、必要とされる知識や技術が一部異なるが、ここではそれらを区別せず、両方の素養を備えた人材をバイオインフォマティシャンと呼ぶことにする。国際比較などを行う際には、単に技術だけでなく人材の問題が避けて通れない。また、データの価値を最大化するためには、（特に公的資金で行ったプロジェクトに関して、そこから生まれる）データが共有され誰でも使えるようになっていること（公共財化）が不可欠である。このあたりのルール整備がどうなっているかも重要なポイントである。ライフサイエンスは、急速に、データ駆動型サイエンスに変貌しつつあり、一方で、基礎研究が応用や産業に直結する側面もあるため、いかにデータ共有を図るかという観点は、この分野

の振興を考える上で重要である。

さて、国際比較であるが、そのポイントは以下の4つである。

①ビッグデータの産出や解析プロジェクトとそのための予算および測定装置の開発や保有（プロジェクト）
②スパコンをはじめとするデータの格納や解析のための情報環境（ハードウェア）
③データの格納、転送、暗号化、統合化、解析、表示などのツールやデータベースの開発（ソフトウェア）
④上記を担う中核センター、バイオインフォマティシャン、データ共有ルールの整備状況

欧米では、特に米国が、上記の4つのどれをとっても進んでいるが、我が国は残念ながら②のハードウェアを除いて遅れをとっていると言わざるを得ない。日本を除くアジアは、特に中国は、ここ数年急速に体制を整えつつあり、上記の①から④どれをとっても（基礎生物学やアルゴリズム開発などを除いて）欧米に引けを取らない状況になりつつある。

上記の考察は、おもに基礎研究の話であるが、ライフサイエンス分野は基礎と応用・産業の垣根が低く連続的な面があり、基本的に基礎研究と同じことが応用や産業化についても言える。なお、我が国では、④のバイオインフォマティシャンの層が薄いため、また、これまで中核センターやデータ共有ルールの整備が遅れたため、応用や産業は、基礎に比べて、さらに欧米と差が開いていると言える状況である。これには、我が国の製薬企業などのバイオ産業が欧米に比べて規模がだいぶ小さく、この分野への投資が遅れていることも起因している。

（4）科学技術的・政策的課題

- 新型シーケンサに代表されるハイスループットな実験機器の普及により大量の機械可読化された実験データが比較的安価に生成されるようになっている一方で、それを収める記憶装置や転送させるためのネットワーク環境が十分に整っていない問題がある[1)]。
- ヒトの遺伝情報について網羅的に解析するENCODEやHapMap、1000ゲノムプロジェクトといった巨大プロジェクトが最近行われており、それらが生成したデータをどのように解釈して次の研究に役立てて行くかが大きな課題となる[2)]。
- この問題はタンパク質の質量分析を大量に行うプロテオミクスの分野[3)]やデジタルイメージ、各種検出装置から得られるデータの解析に関する分野[4)]、医学の世界[5)]にも及んでいる。
- 研究成果が主に収められている文献から、書かれている内容を抽出してデータベース化することで、これまでに得られた知見を利用しやすくなる。これらの作業を行うキュレーターは、必要性は認識されているもののキャリアパスなどの点で不安定な存在である。大量の研究成果が得られる時代において欠かせない存在であることから今後適切な環境を整備する必要がある[6)]。
- ビッグデータを扱うためには生命科学研究者がハイパフォーマンスコンピューティン

グを利用することになるが、解析対象にあわせた様々な選択肢があり、最新の動向を的確に把握する必要がある[7]。

（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NSFはNIHと共同で2012年に25百万米ドルの資金をビッグデータに関する研究に提供するプロジェクトを発表した[8]。当然のことながら、この中にはライフサイエンス分も含まれる。
- 米国ENCODEプロジェクトは15テラバイトを超える生データを生成し、その解析にはトータルで300年を超えるコンピュータ時間を要した[9]。
- 欧州においては、ライフサイエンス研究とその医学、環境、バイオ産業への応用を支援するための生物学的情報の持続可能な基盤としてEuropean Life Sciences Infrastructure for Biological Information（ELIXIR）が設置されている[10]。
- 我が国においては、2012年度より東北メディカルメガバンクと呼ばれる15万人規模のゲノムコホート研究が立ち上がった[11]。
- 同じく我が国において、ライフサイエンス分野のデータの整備、共有、統合化のためのプロジェクトが2006年度より立ち上がっている。また、そのための中核センターの整備も進められ、情報・システム研究機構ライフサイエンス統合データベースセンター（DBCLS）[12]、科学技術振興機構バイオサイエンスデータベースセンター（NBDC）[13]が、2007年度、2011年度にそれぞれ設置された。

（6）キーワード

新型シーケンサ、データ共有、データベース統合化、ゲノムコホート、バイオインフォマティクス

（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	○	↗	・ライフサイエンスそのもののアクティビティは高い。また、ミレニアム以降、網羅的なデータを出すプロジェクト（例えば、セルイノベーションプロジェクト[14]やターゲットタンパク研究プログラム[15]など）は多数企画され実行されている。そのためのハードウェア環境も十分に整っている（例えば、国立遺伝学研究所スーパーコンピュータ[16]）。しかしながら、データの解析力は弱い。人材も不足。データ共有ルールも未整備。ただし、データの整備、共有、統合化に関しては、2006年より文科省を中心に統合プロジェクトが実施されており、そのための中核センターの整備も行われ（前述のDBCLSやNBDC）、今後改善が期待できる。人材育成プロジェクトも2013年度から始まる予定。
	応用研究・開発	○	↗	・欧米に比べて、大規模コホート研究、がんゲノム研究、細胞バンク事業などは少々立ち遅れ気味。基礎研究にも増してバイオインフォ人材不足が深刻。2012年度より、前述の東北メディカルメガバンク計画などが立ち上がり、今後の展開が期待できる。これにより、人材不足の解消にもつながる可能性がある。
	産業化	△	→	・既存のバイオ産業にしてもバイオベンチャーにしても、個々の会社や産業の規模がそれほど大きくなくビッグデータの産出や解析に少し出遅れている。人材も払底状態で外国のベンチャーなどに研究開発を依存している状態。今後もあまり改善する兆しは伺えない。一方で情報産業もこの分野の活動は活発でなく、むしろ後退傾向にある。大規模コホート研究が立ち上がったことにより、今後改善される可能性は残っている。
米国	基礎研究	◎	↗	・すべての面で世界をリード。日本とは異なり測定機器そのものの開発も盛ん。データベースセンターも世界に冠たるNCBI[17]があるし、個々のゲノムセンターも充実。ただし、米国に限った話ではないが、ビッグデータの扱いに関しては、まだまだ技術的に確立していない面があるので、これからの技術開発が重要。
	応用研究・開発	◎	↗	・前述のENCODEプロジェクトも応用的な側面があるが、それ以外でも、がんゲノムプロジェクトなどの医学研究[18]、環境ゲノムやバイオエネルギー関係のプロジェクト[19]、なども充実している。
	産業化	◎	↗	・多数のベンチャーが立ち上がっている。個人ゲノム解析サービス[20]、ゲノムデータ向けクラウドサービス[21]などの産業化も活発である。
欧州	基礎研究	◎	↗	・データ産出に関しては、英国ではウェルカム財団が出資するWellcome Trust Sanger Institute（旧Sanger Centre）[22]が中心になり、健康と疾患に関わるゲノムの理解をミッションとして、いくつかのプロジェクトを進めている。測定機器の開発も行われている。そのデータの解析は、数百名の人員を擁するEBI（European Bioinformatics Institute）[23]が欧州の中核センターとなって進めている。その上に、前述のELIXIRプロジェクトも計画されており、米国に伍してこの分野を牽引するものと思われる。
	応用研究・開発	○	↗	・上述したものに加え、英国では早くから50万人規模のコホート研究[24]を計画しており、バイオバンクとしてはほぼ準備を終えた。スウェーデンでは同じく50万人規模のLifeGeneプロジェクトが立ち上がりつつある[25]。さらに、海洋微生物のプロジェクト[26]なども進行中である。
	産業化	○	→	・欧州ではもともと産業界との結びつきが強く、情報産業も乗り出すなど、活発である。米国と類似の個人ゲノム解析サービスもアイスランドで行われている[27]。 ・　　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	△	↗	・生物学にしても情報科学にしても基礎となる研究力は、欧米や我が国に比較して、まだまだ低いが、ビッグデータの産出、解釈という観点では中国のBGI（旧 Beijing Genomics Institute）[28]を中心に急速に立ち上がりつつある。データ産出のためのシーケンサの台数の面でででもそれを解析するためのコンピュータ資源の面でも世界で最高水準のレベルを誇る。また、バイオインフォマティシャンも数百名レベルの陣容を誇り、我が国を凌いでいる。今後さらに進展する可能性がある。ただ、よくも悪くもBGIが中心で、他の活動はあまり見えない。
	応用研究・開発	○	↗	・上記のBGIを中心に様々な植物ゲノムの解析プロジェクトが多数実施されている。この中には、欧米からの委託も多いが、世界のゲノムデータ生産拠点としての地位を確立しつつある。また、中国では、英国バイオバンクに関係した研究者がChina Kadoorie Biobank[25]を50万人規模で立ち上げ、本家よりも早く2008年に研究参加者が50万人に達した。
	産業化	△	↗	・これもやはりBGIの活動であるが、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	△	↗	・ゲノム解析、バイオインフォマティクスどちらも急速に立ち上がりつつあるが、まだまだ基礎研究力、バイオインフォマティクスという点ではまだまだ開発途上。また、層が薄く広がりという点では欧米に叶わない。ただし、スーパーコンピュータなどの設備は整っている。
	応用研究・開発	△	↗	・知識経済府や保健福祉府を中心に、がんなどのゲノム解析を実現するプラットフォームの整備が進みつつある[29]。また、韓国では25万人規模を目指すKorea Genome and Epidemiology Study（KoGES）が実施されている。
	産業化	△	↗	・サムスンを中心に、ゲノム解析サービス、がんゲノム解析サービスなどの産業化が立ち上がりつつある[30]。

（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/20717155
2）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22687389
3）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22916831
4）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22918378
5）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22942030
6）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18769432
7）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20717155
8）http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12499/nsf12499.htm
9）http://gigaom.com/cloud/big-data-and-dna-what-business-can-learn-from-junk-genes/
10）http://www.elixir-europe.org/
11）http://www.megabank.tohoku.ac.jp/
12）http://dbcls.rois.ac.jp/
13）http://biosciencedbc.jp/

14）http://www.cell-innovation.org/
15）http://www.tanpaku.org/
16）http://sc.ddbj.nig.ac.jp/
17）http://www.ncbi.nlm.nih.gov/
18）http://ngs-brescia.blogspot.jp/2012/05/cghub-at-ucsc-cancer-data-at-petabyte.html
19）http://jgi.doe.gov/
20）https://www.23andme.com/
21）https://basespace.illumina.com/home/index
22）http://www.sanger.ac.uk/
23）http://wwWebi.ac.uk/
24）http://www.ukbiobank.ac.uk/
25）http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t155-1.pdf
26）http://www.euromarineconsortium.eu/
27）http://www.decodeme.com/
28）http://www.genomics.cn/en/index
29）http://pgm21.or.kr/
30）http://www.Samsunggenome.com/

3. 10. 4　天文科学分野におけるビッグデータ

（1）研究開発領域名

天文科学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

宇宙における諸現象を、観測的及び理論的手法により研究する科学領域

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

宇宙の誕生と進化、銀河形成、星・惑星形成、宇宙生命などを含む宇宙における諸現象を、観測的研究方法、理論的研究方法などにより解明するための科学である。観測的研究では、電磁波（電波～可視光～ガンマ線）、粒子（ニュートリノ、宇宙線粒子など）、重力波（未検出だが検出装置開発が世界諸国にて推進）を用いる。理論的研究では、純粋な物理・化学の理論研究のみならずスーパーコンピュータなどを用いたシミュレーションも盛んである。

特に観測に用いる望遠鏡の性能向上は、半導体技術やデジタル技術の発展に伴って、著しい。また、データ転送バンド幅も大幅に向上し、現在では、基幹ネットワークとしてファイバー1本当たり毎秒40ギガ（10^9）ビット（Gb）もの転送速度が実現され、さらなる大容量化も期待されている。これらの技術的進展により、国内外では可視光・赤外線および電波領域における次世代観測装置建設が複数進行し、また、計画されている。これらの計画の多くは、取得予定データの規模も格段に大きくペタバイトを優に超え、データ管理やデータ処理技術の開発を主眼とする国際共同プロジェクトとして進められており、わが国としても価値観や文化の異なる国々といかに対等に渡り合っていくかが問われる時代となっている。

国内では、国立天文台のすばる望遠鏡に次世代広視野カメラであるHyper Suprime-Camが設置され、2012年9月に初めてカメラに光が導かれた[1)]。当該カメラによる本格観測は2013年度に始まる予定で、年間約200テラ（10^{12}）バイト（TB）の観測データが生み出される予定である。また同天文台は、日米欧の共同の下、ミリ波とサブミリ波の電波領域で、既存の電波望遠鏡の感度や空間分解能を約100倍改善するAtacama Large Millimeter/submillimeter Array（ALMA）[2)]を推進している。ALMAの観測は装置の一部を用いて2011年度より始まっているが2013年度にはすべてのアンテナが揃ってフル観測が始まる。フル観測時におけるデータ生成率は年間約200TBと見込まれている。

米国を中心として、可視光や赤外線領域でのサーベイ型望遠鏡であるLarge Synoptic Survey Telescope（LSST）[3)]やPanoramic Survey Telescope & Rapid Response System（Pan-STARRS）[4)]の建設や運用が始まっている。これらは数百ペタ（10^{15}）バイト（PB）規模のデータを生み出し、研究パラダイムの大変革をもたらすと期待されている。大規模可視光・赤外線望遠鏡としては、直径40mクラスのEuropean Extremely Large Telescope（E-ELT）（欧州南天天文台）[5)]、直径30mクラスのThirty Meter Telescope（TMT）[6)]やGiant Magellan Telescope（GMT）[7)]（いずれも米国中心）という計画が進行中である。また中国では、ようやくLarge Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope（LAMOST）[8)]の運用を開始した。

また、電波天文学では、国立天文台も参加するALMA望遠鏡以外にも、欧州のLow

Frequency Array（LOFAR）[9] や豪州や南アフリカ地域に展開される Square Kilometer Array（SKA；2016年着工、2020年から観察開始）[10] および SKA に向けたプロトタイププロジェクト（ASKAP、MeerKAT）が進行中である。そのデータ生産率は LOFAR の場合で1時間当たり約 10TB、SKA では毎秒 1PB と見込まれている。得られた観測データから、検出天体に関するカタログが作成され、広く天文学研究に利用される予定である。

これらの大規模データを扱うプロジェクトでは、その予算のほぼ半分がデータ管理、データ処理などに関わるソフトウェア開発に充てられていることは注目に値する。

（4）科学技術的・政策的課題

天文科学におけるビッグデータプロジェクトに共通する技術的課題は、数百ペタバイトものデータをいかに①格納し、②効率的に取り出し、③高速かつ自動的にデータ処理して科学的成果に結びつけるかに集約されると言ってよい。従来の研究スタイルと異なり、ハードウエアよりもソフトウエアが重視されている点に注意が必要である。

データ格納法は効率的にストレージを使用するために必須であり、すべての生データを格納せずに処理済みデータ（派生するカタログデータを含む）のみを格納・蓄積・公開する方法も試みられている。また、データの性質を踏まえて格納するメディアを選択（アクセス頻度が高いデータは高速な SSD に、中程度のものは HDD に、低いデータは磁気テープになど）する階層的ストレージ、そして分散した階層的ストレージに対応したデータフォーマットの研究も必須となっている。データ生産率が高いため、広帯域ネットワークを通じた伝送技術と超広帯域入出力性能を付加したスーパーコンピュータを組み合わせる技術の開発が急がれている。この観点は、スーパーコンピュータの将来像としても重要視されている。また、人手を介することなく、高い信頼度で自動的にデータ処理をするためのロバストなソフトウエアシステムや超巨大データ内から宇宙に関する知見を見いだすための可視化および機械学習ソフトウエアの開発が天文ビッグデータを活用する上で極めて重要となっている。

我が国においてはこれまで、ハードウエア技術の開発にこれまで重点が置かれ、ビッグデータを活用する上でカギとなるソフトウエア技術の開発は軽視されてきた。データ公開に関しては国立天文台を中心にヴァーチャル天文台システムが構築され公開データによる研究成果も多数出ているものの、本稿で述べた今後の世界の動向を踏まえると、中核的研究機関において関連ソフトウェア技術の開発や情報技術の活用（分散データ管理、分散データベース、自動データ処理、統計的データ処理、機械学習による知識発見など）を実行させるための予算措置及び人員増員を行い、我が国の高いレベルにある情報学・統計科学やスーパーコンピュータ技術との連携を通じ、国際共同および国際競争に耐えるだけの責任ある体制を整えることが急務と言えよう。

米国科学財団（NSF）は従来、科学的成果を最大化することを重要視し、大きなプロジェクトに対しては原則データ公開することを求めてきた。このポリシーは米国内に浸透し、例えば、SDSS カタログを用いた論文数は約 3000 にもなる。我が国においても、科学的成果の最大化のため、データを公開することを担保・促進する方向に公的研究費補助制度を改善することが求められよう。

（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）

LSST[3] は、米国 NSF の decadal survey でもトップにランクされ、その生み出すデータ総量は 450 PB と見込まれている。このデータはペタフロップス級のスーパーコンピュータによって迅速にデータ処理され、分散データベースに格納された後、即時公開され天文学研究に利用される。LSST は、チリに設置した直径 8.4 m の望遠鏡に付けた 32 億ピクセルをもつ可視光・近赤外線領域カメラを用いて全天の 3/4 について 15 秒の露光時間で毎晩 2 回撮像、サーベイを行い、地球に接近する小惑星などの移動天体の検出、超新星爆発の時間変化、暗黒エネルギーの解明を目指す野心的計画であり、2020 年の稼働開始に向けて建設が始まっている。プロジェクトリーダーである Tony Tyson 氏は、「LSST は望遠鏡ではなく、データ供給マシンである。」と述べ、天文学における研究パラダイムの刷新 – データ活用型天文学へ – をも目論んでいる。

電波天文学における二つのプロジェクト（LOFAR[9] と SKA[10]）は、電波望遠鏡という概念の大変革をもたらしつつある。これらはいずれも、地理的に分散した複数の電波望遠鏡からの信号を光ファイバーで伝送し、高性能スーパーコンピュータによる実時間処理を通じて複数天体を同時観測するものである。現存の電波望遠鏡では、アンテナや受信機などのハードウエア性能が望遠鏡の性能を決していたのに対し、LOFAR や SKA では「信号処理技術を含むソフトウエア」がプロジェクトの成功のカギとなっている。このため、例えば豪州では、西オーストラリア大学で SKA に向けたデータ管理やデータ処理技術開発のために世界から優秀な人材を集め、また、スウィンバーン大学では巨大データの可視化や機械学習を通じた知識発見に向けた研究開発を推進している。

国際天文学連合は、北京で開催された第 29 回総会に際し、”Data Intensive Astronomy”特別セッションを開催し、本稿に関連する現況や将来の方向性について密な議論を行った[11]。

（6）キーワード

分散データベース、超高速ネットワーク、スーパーコンピュータ、可視化技術、統計的データ処理、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	○	→	・国立天文台では、日米欧共同で建設している ALMA 望遠鏡の初期運用を始め[2]、また、すばる望遠鏡に、新世代広視野カメラである Hyper Suprime-Cam が設置され、間もなく観測を開始予定[1]。また、直径 30m の光学望遠鏡である TMT 計画[6] も予定されている。 ・宇宙科学研究所では、赤外線望遠鏡 SPICA や小惑星探査のための「はやぶさ 2」計画などを推進している。
	応用研究・開発	○	→	・国立天文台や宇宙科学研究所には、各観測装置からのデータを集約し公開するための組織やヴァーチャル天文台システムが設置され、天文科学研究に供されている。 ・取得した大規模データに対するデータ解析や各種統計処理などを行う環境は未整備であり、今後の課題である。
	産業化	△	→	・産業応用活動は見られない
米国	基礎研究	◎	→	・可視光や赤外線での大規模望遠鏡が建設中もしくは計画中（LSST[3]、Pan-STARRS[4]、TMT[6]、GMT[7]）で、取得する観測データ量はエクサ（10^{18}）バイト（EB）に迫る。 ・欧州や東アジア（日本、台湾）と共同で ALMA 望遠鏡の建設と運用を実施。
	応用研究・開発	◎	→	・各観測装置からのデータを集約し公開するヴァーチャル天文台組織が設置され、天文科学研究に供されている。 ・取得した大規模データに対するデータ解析や各種統計処理などを行う環境の整備が進みつつある。
	産業化	○	→	・現状では目だった動きはないものの、応用研究には Microsoft などの企業も関わっており、中長期的には得られた技術の産業化を指向している。
欧州	基礎研究	◎	→	・北米や東アジア（日本、台湾）と共同で ALMA 望遠鏡の建設と運用を実施。 ・欧州南天天文台（ESO）は、直径 40m クラスの光学・近赤外線望遠鏡である E-ELT[5] の建設を開始した。 ・オランダ ASTRON が中心となり、低周波の開口合成電波望遠鏡 LOFAR[9] を運用中。そのデータ生成量は 1 日 240 TB に及ぶ。
	応用研究・開発	◎	→	・ESO には、大規模データアーカイブを専門に扱う部署があり、天文研究用に広くデータ公開を行っている。 ・LOFAR では、スーパーコンピュータにより膨大なデータを処理するシステムを構築。 ・取得した大規模データに対するデータ解析や各種統計処理・機械学習などを行う環境の整備が進みつつある。
	産業化	△	→	・産業応用活動は見られない
中国	基礎研究	○	→	・分光性能に優れた光学望遠鏡 LAMOST[8] を運用。 ・電波望遠鏡建設計画が多数進行中。
	応用研究・開発	△	→	・国家天文台がデータ公開のための組織を作っているが、政府によるネットワーク規制のため、国内外とのデータ交換に大きな制限が課せられている。
	産業化	△	→	・産業応用活動は見られない
韓国	基礎研究	△	→	・中小望遠鏡を運用しているが、データ生成率は高くない。
	応用研究・開発	△	→	・観測データ公開機能を持つ組織はないため、KASI はデータセンターを立ち上げる計画を持っている。
	産業化	△	→	・産業応用活動は見られない

豪州	基礎研究	◎	→	・SKA[10] に向けたパイロットプロジェクトとしてASKAPを推進。ASKAPはSKAの1%の能力しかもたないものの、数100テラビットのデータ転送率が必要。 ・西オーストラリア大学を中心に、階層化ストレージの研究やスーパーコンピュータによる数百テラビットクラスの入力データを処理する技術研究を推進。
	応用研究・開発	◎	→	・大量データの可視化技術や統計的データ処理・機械学習の研究がスウィンバーン大学を中心に進められている。
	産業化	△	→	・産業応用活動は見られない

（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）新型の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam、始動へ
http://www.nao.ac.jp/news/topics/2012/20120913-subaru-hsc.html
2）The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array（ALMA）
http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/
3）The Large Synoptic Survey Telescope（LSST）
http://www.lsst.org/lsst/
4）The Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System（Pan-STARRS）
http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/
5）The European Extremely Large Telescope（E-ELT）
http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html
6）The Thirty Meter Telescope（TMT）
http://www.tmt.org/
7）The Giant Magellan Telescope（GMT）
http://www.gmto.org/
8）Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope（LAMOST）
http://www.lamost.org/public/?locale=en
9）The Low Frequency Array（LOFAR）
http://www.lofar.org/
10）The Square Kilometer Array（SKA）
http://www.skatelescope.org/
11）IAU Special Session “Data Intensive Astronomy”
http://www.iau.org/science/meetings/past/special_sessions/1047/

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・伝送などが可能なデジタル表現された情報、また、こうした情報の解析に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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。ビッグデータにおける IT メディアを考えると、大量に蓄えられたこうした情報に対するデータマイニングなどの技術が考えられるが、これらの技術については他の研究開発領域の記述に譲る。ここでは主として、IT メディアから、データマイニングなどの技術に供するために必要な内容情報を抽出するための解析技術について考える。

数値ならびにテキスト情報については、研究開発がすでに十分に進んでおり、技術的に成熟している。ただし、テキストについては書き言葉の解析が主であって、Web 情報、特に blog や Twitter 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。その一方、blog や Twitter で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。こうした情報は、実世界・社会・生活により近い情報であるため、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用いる手法である。こうした技術の研究開発の特段の推進のためには、大規模なデータセットの構築、適切な研究開発ロードマップ（マイルストーンとしてのタスク）の設定、オープンな環境での研究開発の振興が重要と考えられる。

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、FP7 における ICT 分野で IT メディア分野の研究開発を推進しており、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のため、オープンな研究開発の推進にはきわめて積極的である。特にインターネット、検索技術、マルチメディアを重要視しており、米国への猛追を図っている。

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、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。しかしながら、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限からこれができず、研究開発においても主導的な役割を果たせないでいる。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、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が、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、大学・国研、企業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。産業化についても、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：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を持ち、実際の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ますます容易になってきている。研究開発用には、こうしたデータに、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が、これもAmazon Mechanical Turkなどクラウドソーシングの利用により実現しやすくなってきている。しかしながら、こうして構築したデータを研究コミュニティに公開するのは、著作権・肖像権・個人情報保護法など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。
- 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し、研究コミュニティに発信し、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FP7の下で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のICT分野への取り組み、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、10,000 オーダの概念数、1 千万オーダの画像を含む。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 Internet Archive[4] 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 情報を収集し、時間と合わせた過去の情報とともに蓄積し、一般向けに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が、コーネル大学との共同研究により一部の研究者らにデータセットを提供している例がある[5]。
- 米国議会図書館は、2010 年 4 月 15 日、Twitter のツイート情報をすべて保存することを公式発表した[6]。また、同図書館は、前出フランス国立視聴覚研究所と、双方が保有する映像資料の一部を交換するプログラムを開始した[7]。
- 米国標準技術局（NIST）では、TREC[8] ならびに TRECVID[9] プロジェクトにより、それぞれ情報検索、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[10] 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きわ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 などを通じて、Web、検索、マルチメディア解析などを含む様々なプロジェクトを支援している。PASCAL VOC（Visual Object Classes）[11] 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きわ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、研究コミュニティを主導している。Chorus+[12] 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を主導する MediaEval プロジェクト[13] を支援している。
- 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ェアの開発」[14] 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、Twitter、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・公開については△ ・我が国においては、主として著作権、画像・映像などの視覚情報においては肖像権・個人情報などの問題により、大量に収集され、研究用途に広く公開されているデータセットはまれである。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。例えば、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。 ・しかし、blog や Twitter などの情報については、大量に収集され、広く公開されているデータはほとんどない。 ・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た研究グループにのみ配布するなど、特段の配慮が必要となっている。 ・研究については○ ・日本語自然言語処理や日本語音声認識については特段の進展が見られ、実用レベルの技術が広く利用可能である。 ・大学・国研において、blog、Twitter などの日本語の解析、画像・映像の解析も盛んに研究が行われている。
	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・開発は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への発信など、積極的に世界でも中心的な役割を果たしてきている。NIST、LDC などがその中核的な機関となっている。 ・NSF などにより、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、顕著な研究成果を上げている。実際の研究コミュニティにおいても、米国の大学などの研究者が主導的な役割を担っている。 ・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。
	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・開発もきわめて盛んである。
	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	◎	→	・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。 ・Webや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など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、研究コミュニティに公開している。
	応用研究・開発	○	→	・FP6/FP7では、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など、産業化にも積極的であり、実際に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	○	↗	・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などの例はほとんどない。 ・研究はきわ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	△	→	・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。 ・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	○	↗	・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などの例はほとんどない。 ・研究は盛んに行われている。データベース、コンピュータビジョン（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	○	→	・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。

（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）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）Internet Archive
http://archive.org/
5）The Cornell Web Lab
http://Weblab.infosci.cornell.edu/
6）米国議会図書館、Twitterの全公開ツイートを保存へ
http://current.ndl.go.jp/e1042
7）米国議会図書館（LC）とフランス国立視聴覚研究所（INA）が互いの国を記録した映像資料の交換を開始
http://current.ndl.go.jp/node/20094
8）TREC
http://trec.nist.gov/
9）TRECVID
http://trecvid.nist.gov/
10）IARPA ALADDINプロジェクト
http://www.iarpa.gov/solicitations_aladdin.html
11）PASCAL VOC
http://pascallin.ecs.soton.ac.uk/challenges/VOC/
12）Chorus+
http://avmediasearch.eu/
13）MediaEval
http://www.multimediaeval.org/
14）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ェアの開発」
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/006/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2011/08/31/1310172_01.pdf

3. 11　人工知能

コンピュータ・サイエンスの歴史において、解法がわかっていない問題領域は人工知能と呼ばれることが多かった。探索アルゴリズム、知識表現、推論、自然言語処理、音声認識、画像認識などはいずれも、かつては人工知能の分野と考えられていたものである。これらの技術は、現在ではそれぞれ独立の研究開発分野と考えられていて、CRDS電子情報通信分野の俯瞰報告書においても、いずれかの俯瞰区分における個別の研究分野として取り上げられている。また、機械学習は今でも人工知能の分野として考えられているが、現在の主流は、統計的機械学習であるので、主に俯瞰区分「ビッグデータ」で扱う。では、なぜ人工知能を情報・通信分野の俯瞰区分として独立に扱うのだろうか？

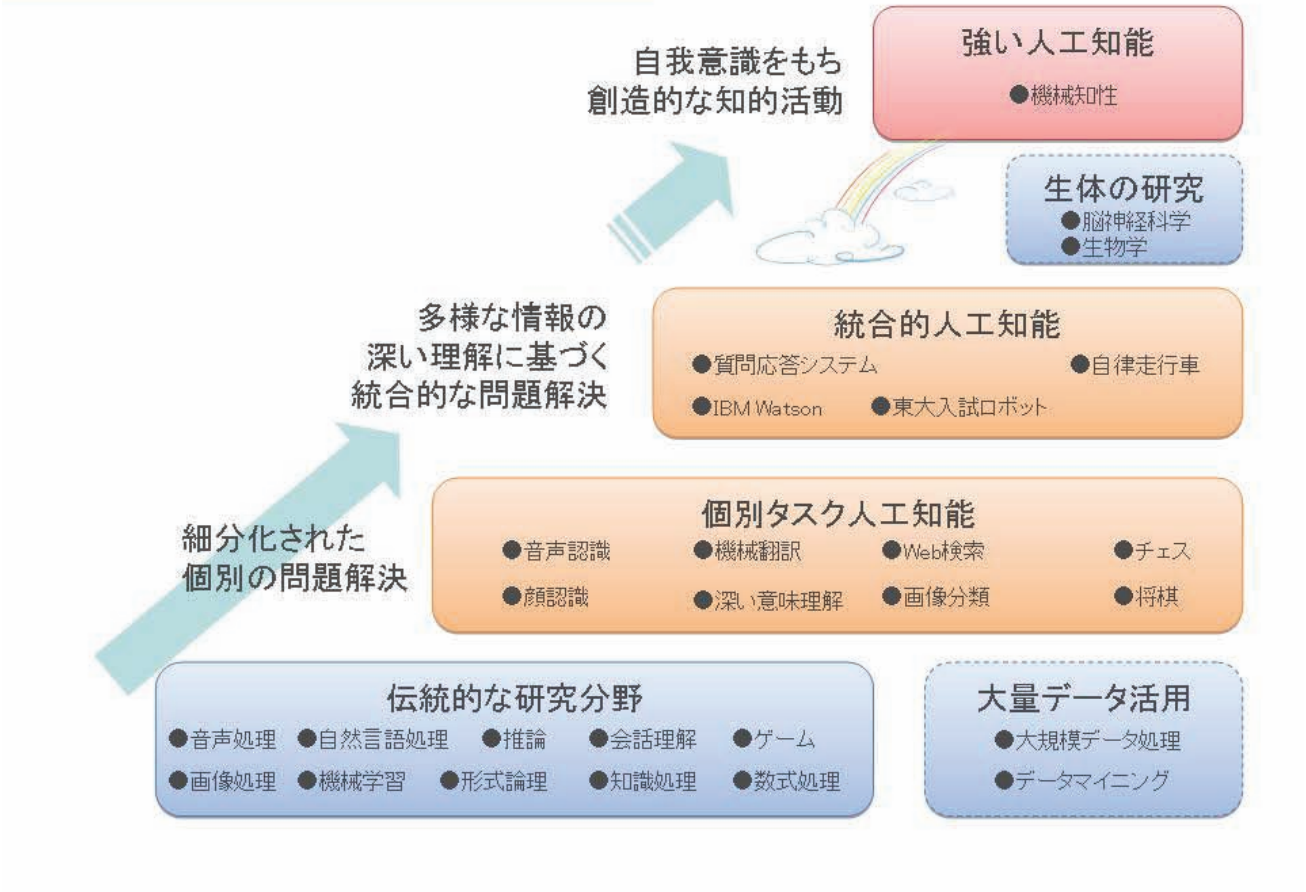
人間のように自律的に考え、成長するいわゆる「強い人工知能」については、コンピュータ科学の初期からそのコンセプトはあったが、1950年のチューリング・テストの論文から60年以上たった今も、そのようなものが可能か、あるいは、そもそも「強い人工知能」を定義できるのかどうかすら定かではない。多くの研究者は、いずれは強い人工知能が実現されるだろうが、それは数十年先の話であり、現在の人工知能研究の延長上にあるとは考えていない。

ただし、このような強い人工知能が実現された暁には、科学技術が急速に発展する可能性がある。ひとたび人間の科学者に匹敵する機械知性ができれば、人間の研究者のように数十年をかけて教育・訓練する必要もなく、大量に複製できるだろう。それらは疲れを知らず、24時間365日研究を続け、次々と大量の論文・特許を生むだろう。このことは、このような強い人工知能を最初に完成した国が、その後の科学技術の発展において大きなアドバンテージをもつことを意味する。したがって、近い将来に強い人工知能の実現の可能性が小さいとしても、我々はこの研究分野に常に注意を払っている必要がある。万が一、強い人工知能の技術が完成する道筋が見えたならば、ただちにその分野に大量の研究資源を投入して、この分野で遅れをとることのないようにしなければならない。このため、この人工知能を敢えて独立した俯瞰区分として、定義することとした。

強い人工知能につながるかどうかは不明であるが、現在手に入る技術を統合することによって、いままで不可能あるいはきわめて困難と思われていたアプリケーションが現れつつある。米国のクイズ番組において人間のチャンピオンを破ったIBMのWatsonはその好例である。また、スマートフォンにおけるSiriや「しゃべってコンシェル」などの、音声対話によるインターフェイス、インターネット上で利用できる多国語翻訳などは、これらの統合に基づく統合型人工知能アプリケーションの例だと見ることができる。統合型人工知能は、医療・法律など、今まで人間のエキスパートの知識・経験に大きく依存してきた業種において、大きなブレークスルーになることが期待されていて、産業応用の観点からも無視できない。このため、強い人工知能に加えて、統合型人工知能の研究開発動向もこの俯瞰区分で扱う。

我が国としては、統合型人工知能に一定の投資を行いつつ、強い人工知能の研究開発動向を常にウォッチし、これの萌芽が見えたならばただちに大量の資源を投入する体制を整えておく必要がある。

ミクロ俯瞰図（人工知能）


自我意識をもち
創造的な知的活動
強い人工知能
●機械知性
生体の研究
●脳神経科学
●生物学
多様な情報の
深い理解に基づく
統合的な問題解決
統合的人工知能
●質問応答システム
●自律走行車
●IBM Watson
●東大入試ロボット
細分化された
個別の問題解決
個別タスク人工知能
●音声認識
●機械翻訳
●Web検索
●チェス
●顔認識
●深い意味理解
●画像分類
●将棋
伝統的な研究分野
●音声処理
●自然言語処理
●推論
●会話理解
●ゲーム
●画像処理
●機械学習
●形式論理
●知識処理
●数式処理
大量データ活用
●大規模データ処理
●データマイニング

3. 11. 1　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。最近、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？」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、IBM Watsonのインパクトからも明らかなように、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。

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、政策決定など様々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､今後は前述のような統合的人工知能技術が応用されていく可能性が高い。実際、IBM Watson は医療診断への応用研究が現在進められている。このような動きは産業界でも顕著であり、IBM Watson 以外でも Apple の Siri や NTT ドコモのしゃべってコンシェルなど自然言語理解に基づく応用技術の研究開発が近年目立っている。

（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。基盤技術が様々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、様々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。また、判断の根拠を人間が理解できる必要があるため、根拠を可視化・明示化するなど、システムがブラックボックスとならないような技術を開発する必要がある。
- 現在の人工知能技術はウェブなど大規模データを利用することで飛躍的な進展を見せており、これは今後も変わらないと思われる。しかし、そのような大規模データを管理・利用できるコンピュータリソースを保有できる研究機関は限られているため、研究用クラウドの整備や相互運用が必要である。また、データの再利用には著作権上の問題があり、研究を阻害する要因となりうる。フェアユース規定の改正など、法整備が必要と考えられる。

（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）

- 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、Deep Learning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。クイズというきわ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。現在は医療診断への応用が研究されており、クイズという必ずしも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きわ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活発化すると予想される。

- 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、欧州地域の様々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など、一般ユーザ向けの産業でも自然言語インターフェイ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、オントロジーなど様々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、今後応用研究がさらに進展すると考えられる。
	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、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 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 年からは、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 が開始される。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 4 つのプログラムのうちの一つであり、大規模予算の元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 は、深い自然言語処理を実用レベルまで高精度化することで、クイズ番組で歴代チャンピオンに勝利するという快挙を成し遂げた。これは現在の深い言語処理の一つの成功例であり、特定タスクを設定した統合的人工知能研究の成功例でもある。現在は医療診断への応用が研究されており、その実用性は注目すべきものである。 ・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。

欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州は多言語コミュニティであるため、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。 ・深い自然言語処理や統合的人工知能を対象とした大規模なプロジェクトやファンディングは今のところ見られない。
	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。ただし、深い自然言語処理や統合的人工知能を目指す研究は少ない。
	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。 ・深い自然言語処理や統合的人工知能を対象とした大規模プロジェクトは今のところ見られない。
	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 Agency Announcement（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）

3.11.2　強い人工知能

（1）研究開発領域名

強い人工知能

（2）研究開発領域の簡潔な説明

人間のように考え、自律的に行動し成長する人工知能。正確な定義はできないが、人間と同様に自我意識をもったり、プログラミングや発明などの創造的な知的作業を行う機械知性として捉えられる。本領域では、特に科学技術の研究・発明などを、自発的にかつ人間の研究者を越えるパフォーマンスで実施するようなものを考える。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

強い人工知能を、どのように定義するかについては、多くの議論がある。古くは、文字ベースの対話を人間と行うことによって、人間であるか機械であるか区別がつくかどうかを調べる「チューリング・テスト」が提案されたが、少なくとも限られた時間内では、人間の対話者に機械と悟られないほどの対話プログラムはすでに現れている。また、本俯瞰区分のもう一つの領域である「統合人工知能」においては、クイズに答えるコンピュータ・プログラムなどがすでに開発されている。これらは、外部からは高度な知的作業をしているように見えるが、内部的には予め指示された処理を行なっているだけなので、真に思考しているとはいえない、という議論もある。

いわゆる強い人工知能が、現在知られている推論モデルや機械学習を発展させていった延長上にあるかはよくわかっていない。機械は（例えば魂の有無によって）本質的に人間の知性と異なるのだ、という哲学的な議論や、知性は人間の身体と切り離しては出現し得ない、という議論がある一方で、すでにインターネット上には、（我々にはまだ検出できていないが）自我意識をもった知性が目覚めているかもしれない、という議論もある。

発明家・人工知能研究者のRay Kurzweilは、2006年に*The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*というタイトルの本を出版し、機械知性が人間のそれを越える日が近いと予測した。Kurzweilによれば、科学技術の進歩は指数関数的であり、今後の進歩は急速にやってくる、その中でもGNR、すなわち遺伝子学（Genetics）、ナノテクノロジー、それにロボティクスの3分野の急速な進展が、ある一点で昇華して強い人工知能になるとしていて、その時期は2020年だと予測している。

多くの人工知能研究者はこの予測には懐疑的である。いずれは人間を越える機械知性が登場することに異論はなくても、それは数十年先の話であるというのが一般的な見方であり、この分野に対して大型の政府研究予算がついたという話は聞かない。にもかかわらず、強い人工知能を作ろうという動きは存在する。そのようなものの一つが、Singularity Instituteである。

（4）科学技術的・政策的課題

- 海外、特に米国・中国の動向のウォッチ
  強い人工知能の完成は、知性の再生産につながるため、このようなものが外国で開発された場合には、急速にその国の科学技術力を高める可能性がある。このため、他国の動向を常にウォッチしておくことが肝要である。

・脳神経科学・生物学などとの連携
特に脳神経科学の進歩は急激であり、これらの知見が常にコンピュータ科学の研究者にも届くようにしておく必要がある
・人工意識の倫理的側面
自我意識をもつ強い人工知能ができると、それには人格が存在するかの議論が必要になってくる。人権はあるのか､そのような人工知能を消去することは殺人に当たるか､逆に強い人工知能が人間に被害をもたらした場合に、責任を問えるか、などである。これらについては、適宜議論を継続し、いざというときにあわてないようにしなければならない。

（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）

・Singularity Institute
・ニューロシナプティック・コンピューティング・チップ（IBM）
・特定タスク型統合人工知能プロジェクト
自律走行車（Google）、質問応答システム（IBM Watson、Siri など）

（6）キーワード

強い人工知能、チューリング・テスト、シンギュラリティ

（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	△	→	・産総研知能システム、はこだて未来大学などが散発的に研究 ・自然言語処理の分野では依然としてポテンシャルが高い
	応用研究・開発	○	↗	・東大入試ロボットの開発プロジェクト（NII） ・多くの分野で機械学習の応用が盛んになってきている
	産業化	△	→	・しゃべってコンシェル（NTT ドコモ）など
米国	基礎研究	◎	→	・シンギュラリティ・インスティテュートの取り組み ・GNR の 3 領域において、底力がある
	応用研究・開発	◎	↗	・ニューロシナプティック・コンピューティング・チップの開発（IBM） ・Google の自律走行車
	産業化	◎	↗	・Watson（IBM）の医療分野への応用が始まっている ・UAV などの軍事技術においては、一歩先を行っている
欧州	基礎研究	△	→	・FP7 の“Cognitive Systems and Robotics”があるが、主にロボティクスにフォーカスしている。
	応用研究・開発	△	→	・Volvo の自律走行車のプロジェクトなどがあるが、先導車に従属するもので、自律性は低い
	産業化	△	→	・特に大きな動きは見られない
中国	基礎研究	○	↗	・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 ・国力が上がるにつれ、チャレンジングな課題に挑戦する風土がある ・大量の次世代シーケンサを導入するなど、ライフサイエンスでの投資が、強い人工知能の実現に貢献する可能性もある
	応用研究・開発	○	↗	・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 ・独自のサーチ技術、ネットのサーベイランスなど現場で使われる技術と経験・データが蓄積されつつある
	産業化	○	↗	・産業よりも、まずは軍事・治安などに利用される可能性が高い
韓国	基礎研究	△	→	・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	△	→	・特に動きは見られないが、住民登録番号制度とその決済インフラに基づくアイデアが出てくるかもしれない
	産業化	△	→	・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）Ray Kurzweil, The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, 2006.
2）Singularity Institute, http://singularity.org/.
3）IBM, Cognitive Computing Chips, http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35251.wss.

3. 12　レジリエントICT

現代社会は様々な業務が複雑に依存し合うことにより成立している。そのため、一部の機能が停止あるいは障害に見舞われただけでもその影響が広範囲に及ぶ場合が多く、また、その影響範囲を事前に正確に把握できていない場合も多い。さらに、災害時における紙ベースの書類の紛失や流失に備えて電子化や情報化が進めば、その電子的な保護も必要不可欠となる。レジリエントICTとは、このような状況において、一部のシステムに問題や障害が生じたとしても、その影響を最小限に抑える強靭さと、それらの問題や障害を特定・排除し速やかに定常状態に回復するためのしなやかさとを提供する情報処理技術を指す。問題や障害の原因には、不具合、人的ミス、災害、サイバー攻撃など複数の要因が考えられるが、悪意を持って行われる攻撃は従来の対策を迂回したり無効にしたりする方向で日々進化を続けており、従来の対策を適用し続けるのみでは十分な強靭さとしなやかさを確保できなくなってきている。そのため、新たな視点に基づく革新的な対策が求められており、そのための研究開発に期待が寄せられている。本レジリエントICT分野では、領域をICTの構成要素とコミュニティに応じて「レジリエント情報社会」、「レジリエント・システムソフトウェア」、「レジリエントネットワーク」、「レジリエントデバイス」を研究開発領域として選定し、それらの動向についてまとめた。

「レジリエント情報社会」領域では、米国の同時多発テロおよび我が国における東日本大震災／福島原発事故以来、重大事象が発生した場合においても被害を最小限度に留め重要インフラやサービスを速やかに正常状態に回復するためのレジリエントな情報社会システム実現の重要性が認識され始めている。レジリエント情報社会を主たるトピックスとする研究成果の発表場所はいまだ十分に形成されているとはいえないが、関連する学術論文誌としてIEEE Computer SocietyからTransaction on Dependable and Secure Computingが季刊で発行されているほか、米国NSF（National Science Foundation）とCCC（Computing Community Consortium）共催の“Computing for Disasters”ワークショップにおいて、大規模災害に対処する新しい学術領域が挑戦すべき4つの課題として、1）時空間的に微小から巨大まで極端なスケールの事象とデータの取り扱い、2）要素間の密接な結合と相互依存性がもたらす複雑システムの取り扱い、3）極端な環境のもとでの人間とシステムの協調、4）異分野を融合させた総合的、地域依存的、実験的な研究方法、の必要性が指摘されている。

「レジリエント・システムソフトウェア」領域では、故障忘却型コンピューティング（Failure oblivious Computing）、オートノミック・コンピューティング、仮想化、重複除外（Deduplication）、Secure Deletion、セキュアチップTPM（Trusted Platform Module）、形式的手法などICTの強靭さとしなやかさを強化する技術の重要度が高まってきている。ここで、故障忘却型コンピューティングとは、故障状態に陥ったとしても処理を止めるのではなく処理を継続しながら対応する手法であり、オートノミック・コンピューティングは、システムの自己構成、自己修復、自己最適化、自己防御などの処理を含む計算手法である。いずれも、仮想化などと並び高い可用性やしなやかさを確保する際に重要となる技術である。一方、新たな技術やコンセプトに対して新たな攻撃方法や課題なども指摘され始めてきており、それらの解決が求められている。

「レジリエントネットワーク」領域では、ネットワーク構成のしなやかさを実現するた

めの Software-Defined Network/OpenFlow に関する研究開発が急速に進展しつつある。強靭さに関しては、前述のとおり従来からのファイアウォールや侵入検知システム、メールフィルタリングなどによる境界での防御や、過去に蓄積された攻撃パターンによる検知が難しくなってきており、新たな視点での対策が求められている。対策が難しくなってきている背景には、攻撃が想定される防御網に引っかからないことが事前に確認されてから攻撃が行われていること、ポリモルフィックと呼ばれる形態を変化させるマルウェアが増えてきていること、攻撃が複数の段階に分かれて構成されており攻撃の真の目的の特定が難しくなってきていること、攻撃手法が従来の不特定多数の中からたまたま脆弱性のあるシステムをねらう方法から、予め標的を定めそれ用に高度にカスタマイズされた攻撃を仕掛ける標的型に変わってきている点などがあげられる。攻撃対象についても、影響の大きな重要インフラおよびそれらの関連組織へと変わってきており、また、従来あまり対象とされてこなかった制御システムや車載ネットワーク、各種デバイスなども攻撃の対象となってきている。重要インフラや各種デバイスは、現実世界との接点を持っており、攻撃を受けた場合の社会への影響が大きいという問題がある。

「レジリエントデバイス」領域では、デバイスが保持する暗号鍵を抜き出す攻撃への耐性とそのレベルの評価、また、抜き出された鍵を無効化し定常状態にするための処理、模倣品の検出、バックドアの検出とその機能の無効化あるいは排除などの重要性が高まってきている。前者については、利用者 / 機器認証やデータ保護などの用途のためにデバイスが暗号鍵を安全に保持しなければならない機会が増してきており、後者に関しては、製造・組立を賃金の安い海外で行うファブレス化の進展に伴い、製造・組立現場での設計情報の流出、廃棄品の不正流通、余剰品の不正販売、流通時の摂取やすり替えなどが危惧されていることなどに起因する。模造品に関しては、米国国防総省への納入においても年々増加していることが報告されており、2012 年の 5 月には大量の偽造電子部品が米軍機に利用されていることも判明している。模造品の混入は、品質や機能の低下を招くだけでなく、サイバー攻撃用のバックドアなどを仕込まれる隙も与えることになるため、それらへの対策が求められている。

ミクロ俯瞰図（レジリエントIT）

★しなやかで強靭な社会を実現するための情報処理技術★

巨大化した複雑な情報社会を支えるITシステムに求められるもの
(1) 情報社会システム全体のディペンダビリティ／セキュリティの確保
(2) 社会的環境や技術の変化に対するディペンダビリティ／セキュリティの持続性

レジリエント情報社会

- ●リスクの認知、評価、管理
- ●リテラシ（情報倫理）
- ●コミュニケーション、広報、教育
- ●制度設計
- ●デジタルフォレンジクス

ソフトウェア・システム

- ●組み込みセキュリティ
- ●理論的なソフトウェア安全性保証・検証手法
- ●クラウドコンピューティング
- ●トラステッドコンピューティング
- ●仮想化技術

ネットワーク

- ●ネットワーク観測・分析
- ●マルウェア対策
- ●Webセキュリティ
- ●インフラセキュリティ
- ●エマージングネットワークセキュリティ

デバイス・物理特性

- ●動的再構成ハードウェア
- ●非侵襲攻撃
- ●侵襲攻撃
- ●物理的耐クローン機能（PUF）／人工物メトリクス
- ●ディペンダブルデバイス・デザイン

基盤技術

- ●仕様定義・設計技術
- ●暗号理論、プライバシ保護
- ●高性能認証（生体認証、キャンセラブル生体認証、耐情報漏えい認証）
- ●想定外の科学

3. 12. 1　レジリエント・システムソフトウェア

（1）研究開発領域名

レジリエント・システムソフトウェア

（2）研究開発領域の簡潔な説明

OS、ハイパーバイザーなど仮想化技術を含むシステムソフトウェアによるしなやかさと強靭さの強化に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システムソフトウェアのレジリエンシー強化の動向についてトピックに分けて説明する。

クラウドとモバイル環境

OS、ハイパーバイザーなどはアプリケーションと異なり特権命令を実行するために認証機構や保護機能があり、攻撃されにくいとされていた。しかし一旦攻撃が成功すると多くの権限が利用可能になるため、最近の高度化された攻撃の対象になっている。特に多数のユーザのOSを預かるマルチテナントクラウドコンピューティング（IaaS: Infrastructure as a Service）ではその重要性が増している。2012年度中に導入を予定されているMETI Cloud 2012のthin-client system（Desktop as a Service）においても各国の導入事例を踏まえて調査が行われている[1)]。

IaaSではハイパーバイザーとしてはオープンソースのKVM、Xenあるいは商用のVMwareが多く使われている。これらのハイパーバイザーをベースとしてIaaSを構築するためのソフトウェアとしてEucalyptus、CloudStack、OpenStackが開発され、実際のサービスも行われている。ハイパーバイザー自体のセキュリティ強化は多くの学会で行われているが、構築ツールについては不明確であり、今後対応の必要があると思われる。

仮想化技術はOS自体を守る機能も求められている。例えば、スマートフォンなどの携帯機器をオフィスに持ち込んで業務に活用するBYOD（Bring Your Own Device）では個人とビジネスとの利用を分けるために仮想化環境の活用が欠かせない。スマートフォン用のハイパーバイザーとしてはOSで最も権威のある会議の一つであるACM SOSP（Association for Computing Machinery Symposium on Operating Systems Principles）2011においてCells（コロンビア大学のJason Nieh研究室）が最優秀論文賞をとったばかりでなく、イスラエルにcellroxというベンチャー企業が立ち上がりBYOD対応の製品開発が行われている。韓国のサムスンはオープンソースのハイパーバイザーXenのARM対応を2007年から行っており、自社製品でのデモ開発も行っている。

大容量化による障害対処

一つのデバイスあたりのデータ保持あるいは処理の大容量化が行われているが、データ単位当たりの信頼性は向上しておらず、個々のデバイス内での障害対処が困難になっている。例えば、ハードディスクを束ねて高信頼化する技術のRAIDには障害後に再構築する仕組み（rebuild）があるが、ハードディスクの信頼性が向上しないことにより再構築時に失敗する確率が高まっている。これに対処するためにパリティーを2重に持つRAID6

の規格が使われるようになってきている。このような状況はマルチコア内のキャッシュなどにも起こっており、各モジュールにおける高信頼化の対処が望まれている。このような高信頼化機能はファイルシステムとしても開発されており、Windows Server 2012から利用が可能になったレジリエント File System（ReFS）ではデータのコピーが複数のディスクに作成され、ディスクの一部および全体に障害が発生しても保護される。また、Linuxではシステム障害からの復元力を強化するためのレジリエント Storageアドオンが RedHatから提供されている。

また、ストレージおよびメモリの仮想化としては同一データの重複をリンクで置き換えて容量を削減する重複除外（Deduplication）の技術の研究が進んでいる。これにはストレージおよびメモリでは大規模データ中のどこに同一データがあるのかを高速に見つけ出す技術が必要であり、この方面の技術開発が進んでいる。重複除外の技術は EMC（重複除外の技術はプリンストン大学発の DataDomain社から買収）のほか、多くのベンチャー企業内での開発が進んでいる。日本では富士通の ETERNUSや日本電気の iStorage HSシリーズ（HYDRAstor）が製品として出されている。重複除外はネットワークストレージでも活用されている。例えば、米国 Dropboxにも使われているが、重複したデータはアップロードしない性質を利用したサイドチャネル攻撃[2)]が報告されており、活用には注意を要する。同様の攻撃は仮想マシン間のメモリ重複除外でも報告されている。

制御システム攻撃の波及

2010年に検出された Stuxnetは制御システムへのターゲット型攻撃（APT: Advanced Persistent Threat）としてすでに多く対策が考慮されているが、攻撃技術の波及は広く一般にまで及んでいる。Stuxnetの亜種と言われている Duqu（2011）や Flame（2012）は APTではなく、個人情報を盗み出すことを主な目的で利用されている。これらは今まで信頼のもとと考えられていた Windowsのデジタル証明書を偽造するなど、非常に高度な攻撃手法を含んでいる。Duquおよび Flameについてはブダペスト工科経済大学の CrySySがセキュリティ企業と共同で解析を進めており、EuroSec2012でその経緯の発表が行われた。

また、一般的なデバイスへの攻撃も増えている。2011年 11月にコロンビア大学の Salvatore Stolfo教授らはネットワークプリンタのファームウェアの脆弱性を突いて、インターネット経由で遠隔プリンタを過熱させ紙を焦がす攻撃が実際に可能であることを示した。また、2012年の USENIX HotSecでは SSDなどのフラッシュメモリに対して寿命を縮める書き込み攻撃が紹介された。今後スマートグリッドなど M2M（Machie To Machie）の利用が進むにつれて、この手の攻撃が進むと予想される。

形式的手法の適用

システムソフトウェア開発においてバグの混入を防ぐ形式的手法（Formal Method）の適用が注目を集めている。インパクトのある成果としてはオーストラリアの NICTA（National ICT Australia）が主要カーネルコード 7,900行の形式検証を行った SeL4（ACM SOSP 09で発表）がある。これは米国政府の調達基準である評価保証レベル（EAL: Evaluation Assurance Level）の最高レベル EAL7を満たすものである。SeL4はすぐに利用できる OSではないが、この成果に触発されて、システムソフトウェアへの形式的手

法の適用の学会発表が増えてきた。また、Airbus社の航空機がフランスの国研で開発された形式手法ツールSCADEを使って開発されるなど成果がある。国内においてもICカードのFeliCaの開発を形式的手法で進めてバグ混入を防ぐ成果を上げている。

高信頼コンピューティング

高信頼コンピューティング（Trusted Computing）はソフトウェアの起動が想定した手順通り検証する技術であり、PCやモバイルデバイスについてはIntelを中心とする業界団体TCG（Trusted Computing Group）により規格が進められている。TCGが進めている高信頼コンピューティングはセキュアチップTPM（Trusted Platform Module）を信頼の起点として、起動の履歴を改ざんされない形でTPM内に保存する。TPMは乱数生成機能や鍵保管機能などもあり、Windowsのディスク暗号化のBitlockerの鍵保存にも使われている。しかし、中国、ロシア、ベラルーシ、カザフスタンでは法律によりTPMの利用ができない。代わりに中国においては独自の規格であるTCM（Trusted Computing Module）がある。TPMは当初目指していたPCやモバイルデバイスでの利用より、遠隔で操作する必要があるコピー・プリンタなどの複合機で活用されており、国内複合機メーカーで活用されている。また、最近は車載OSの管理に注目が高まっており、2012年にトヨタがTCGメンバーになるなど動きがある。

サンドボックスとコードサイン

米国Apple社のiOSの成功[3)]に見られるように、セキュリティ機能としてのサンドボックスとコードサインの重要性が認識された。コードサインによりソフトウェアのインストールあるいは更新時に信頼できる出所か確かめ、そのソフトウェア自体は外部に影響を及ぼさないサンドボックス内で実行される。これらの機能の問題はこれらのセキュリティ機能を回避するJail Breakが後を絶たないことである。これは日本のゲーム機メーカーを悩ますライセンス回避ハードウェアのドングルと同じである。また、コードサインについては2012年のflameがWindowsのデジタル証明書を偽造する事例も出てきている。

データの消去とトレース

データが完全に消去されたこと、あるいはデータを保持していることを明確にする技術が重要になっている。ハードディスクと異なり、物理的なデータ書き込み位置が特定できないフラッシュメモリ（SSD）では既存の消去技術で完全に削除したことを保証できない。また、クラウドストレージでもどこにコピーがあるのか明確にトレースできないなど、同様の問題がある。この問題を解決するために、保存するデータに暗号化を施したSecure Deletionなどが USENIX Security2012で提案されているが、鍵管理手法など完全な解決策になっていない。

障害 / 異常 / 故障に対する（非）対策技術

クラウドのデータセンターなどの大規模システムでは障害（fault）、異常（error）、故障（failure）が常時発生する状況である。このような環境ではそれらを起こしにくくする研究ばかりでなく、発生対処の研究が重要になっている。例えば、故障にすぐ対処しないFailure oblivious Computing（故障忘却型コンピューティング）[OSDI04]はデータセン

ターの大規模化を支える一つの実行モデルになっている。また、Self Healing [ASPLOS09]は独自に障害から回復する新しい技術を提案している。コード自体の正確性と消費電力のトレードオフを図るCode Perforationの概念はマサチューセッツ工科大学から2009年から提案されている。これらの技術は2001年にIBMが提唱したオートノミック・コンピューティング（システムの自己構成、自己修復、自己最適化、自己防御などの統合したシステム）をレジリエンシーへ展開するための基盤技術である[4)]。個々の技術はまだまだ萌芽的研究レベルであるが、応用への適用が早いクラウド環境では考慮すべき研究分野である。

（4）科学技術的・政策的課題

- 研究開発に使われるマルウェア収集を海外の機関に頼っている、あるいは個別の研究機関内に閉じており、研究基盤として活用されていない。有効な防御、対応、回復技術を作るには実際の攻撃を確かめる必要があるが、それを外部に漏らさず研究できる実験環境がない。
- 大規模システムにおける高信頼化の研究は重要であるが、高信頼化の研究開発を行える研究基盤がなく、この分野の研究が進んでいない。日本は製造業における高信頼化の経験があるため、この分野は得意と考えられるが、その知見が十分に生かされていない。
- ソフトウェア開発、特にセキュリティ分野では優秀な人材が優劣を決める。北米の研究機関やセキュリティ関連機関（米国軍、国土安全保障省、連邦捜査局）はBlackHatで積極的に優秀な人材確保を行っている。アカデミックの会議でも研究機関は盛んに人材募集の紙が貼られている。座長が発表者をJob Marketに出る人材であることを強調し、興味のある研究機関が個別にコンタクトをとる場も散見される。これに対し、日本では研究機関ばかりでなく、企業も参加する例が見当たらない。国際的な競争に打ち勝つには優秀な人材を確保すべきと思われるが、日本はその手立てを打っていると思えない。
- 優秀な学生には多くの留学生も含まれており、彼らを引きいれる職場を提供しないことには人材の散逸にほかならない。米国の大学で鍛えられた日本人も国内で適切なポジションを得られず、苦労している例が見られる。

（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）

- 米国国防総省は、米国の陸軍・海軍・空軍・海兵隊が個別に持っていたサイバー部隊を統合し、米軍の情報通信インフラに対するサイバー攻撃に対応する統合部隊Cyber Command（USCYBERCOM）を2010年10月に設置した[5)]。
- 米国国防総省は 国土安全保障省と国家のサイバーセキュリティにおける協力体制を構築し、両省間で人、機器、設備などについて相互に支援し合うことを定めた。2011年7月には、国防総省がCyber Commandのオペレーションも含めた、国家のサイバー空間におけるオペレーションに関する防衛戦略を公表している[5)]。
- 中国における国際会議の誘致が目立つ。既存の権威ある会議の誘致ばかりでなく、新しく開かれる会議も多い。それらの会議は主要出版社からのプロシーディングス発行やインパクトファクターが取れるなどの権威付けが行われている。

・欧州の研究予算であるFP7では情報セキュリティに係わる研究テーマがChallengeに分類され、その関心の高さが伺える。2011年～2012年では6.25億ユーロの予算が割り当てられており、これは8つあるChallengeの中で最も多く、ICT分野全体予算の25%を占める[6)]。

（6）キーワード

仮想化、形式的手法、コンピュータセキュリティ、情報漏えい、高信頼化

（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	△	→	・主要国際会議（USENIX Security, ACM CCS, IEEE SSP, ACM SOSP, USENIX OSDI）への発表がほとんどない。日本人が著者として含まれる場合も海外の大学を通してであり、日本の研究機関のプレゼンスは薄い。主要国際会議のワークショップなどには採択論文がある。 ・科学技術振興調整費（2007 年～ 2009 年）で開発されたハイパーバイザー BitVisor がオープンソースで提供されており、研究のベースとして国際的にも利用されている。
	応用研究・開発	○	→	・Linux へのコード提供が 10% など、システムソフトウェアに対する一定の開発力はある。 ・富士通は Xen の開発をセキュア・プラットフォームプロジェクト（2007 年～ 2009 年）として行っており、開発力はある。 ・BlackHat などのセキュリティカンファレンスには度々採択されているが企業の単発が多く、その分野の権威として見られるまで成熟していない。 ・日本初の Linux セキュリティ機能である Tomoyo など日本からの提案開発もある。
	産業化	◎	→	・商用のサーバー仮想化機構として日立の Vitage があり、技術力を有する。 ・遠隔制御する複合機へ TPM を使った Trusted Computing は日本の企業が進んでいる。Toyota も TCG に加わるなど発展も見られる。 ・FeliCa への形式的手法活用など高信頼ソフトウェア開発の取り組みも見られる。 ・列車やプラントなど制御系のシステムソフトウェアは強さが見られる。 ・METI Cloud のような活用も見受けられるが、クラウドの利用には慎重な意見が多い。高信頼化を求めるユーザ側の慎重さが阻害になっているようにも見える。
米国	基礎研究	◎	↗	・セキュリティおよびシステムソフトウェアの主要国際会議において常に 50% 以上の論文が採択されており、質量とも圧倒的である。 ・障害 / 異常 / 故障にすぐ対処しない技術など一見して的外れのような研究も進められるような懐の深さがある。 ・中国、インド、韓国から留学生の発表が多く、彼らが研究を支えている。 ・人材の Job Market があり、研究のモティベーションを支えている。
	応用研究・開発	◎	↗	・クラウドサービスを提供するシステムソフトウェアをオープンソースで提供し、開発サイクルを早める手法が見受けられる。 ・研究成果をサービスとして直ちに提供してデファクトを確立する戦力も見受けられる。これに対するベンチャーキャピタリストの投資もある。
	産業化	◎	↗	・基礎研究を産業へ転換する仕組みがベンチャーキャピタリストを中心にできあがっている。また、ベンチャーは大企業に買収されることでその技術を広く普及することができている。 ・仮想化技術は大学発である（Xen, VMware）か、米国外で作られたもの（KVM はイスラエル、VirtualBox はドイツ）であるが、いずれも米国大企業に買収されて製品となっている。 ・製品サイクルは早いが廃れるのも早く、セキュリティサポートの問題がある。 ・レジリエント File System（ReFS）が Windows Server 2012 で提供され、レジリエント Storage アドオンが RedHat から提供されている。

欧州	基礎研究	◎	→	・主要国際会議で必ず欧州内の有名な研究機関の発表があり、研究レベルの高さが伺える。 ・OS の国際会議ではスイスの ETH、EPFL によい研究成果が見受けられる。
	応用研究・開発	◎	→	・欧州ネットワーク情報セキュリティ庁（ENISA）のリスクメトリックスや車載 OS の規格など標準関係では強みが見られる。 ・フランス国研 INRIA 発の形式的検証技術をベンチャーにして AirBus で使うなどの連携した応用研究開発事例がある。
	産業化	◎	→	・PC の分野で強みがあまり見られないが、ドイツの車載関連研究やフランスの形式的検証技術など固有の分野での強みがある。 ・携帯電話関係のシステムソフトウェアで強みがあったが、米国発のスマートフォン用ソフトに対しては劣勢に見える。
中国	基礎研究	◎	↗	・米国に留学してそのまま米国に滞在した研究者との連携が強く、国際共同研究を進め研究水準が上昇している。 ・清華大学、復旦大学などの大学を絞った重点研究拠点に研究者の集約が行われ、高度な研究開発につながっている。 ・国際会議を積極的に誘致し、プレゼンスを高めている。
	応用研究・開発	○	→	・国策としての独自セキュアチップの開発がある。 ・Microsoft などの米企業が研究機関を置き、注目を集めている。 ・研究においても国の方針にしたがう制約が見られる。
	産業化	△	→	・OS やハイパーバイザーでの独自産業は目立ったものが見受けられない。 ・セキュアチップの独自 TCM など国内のマーケットに閉じているようで詳細が不明である。
韓国	基礎研究	○	↗	・フラッシュメモリ上のファイルシステムや管理に関する研究は強く、国際会議での採択も目立つ。 ・ETRI, KAIST など国の研究機関も国際会議での発表が一定数あり、プレゼンスがある。
	応用研究・開発	△	→	・ARM 用の Xen はサムスンの研究者を中心に開発が進められるなど事例が見受けられるが、他にはインパクトのあるものが見受けられない。
	産業化	◎	→	・フラッシュメモリやスマートフォンの製品に強いが、ソフトウェアは米国で作られたもののカスタマイズが多く、国内で作成された研究成果を生かしているかは不明である。

（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）米国連邦政府などにおけるクラウド利用の最新動向 , 経済産業省 堀田博幸 , 行政 & 情報システム 2012 年 4 月号
http://www.iais.or.jp/ja/
2）Danny Harnik, Benny Pinkas, and Alexandra Shulman-Peleg, Side Channels in Cloud Services: Deduplication in Cloud Storage, IEEE Security & Privacy, Volume:8 Issue:6.
http://www.computer.org/csdl/mags/sp/2010/06/msp2010060040.html
3）iOS Security May 2012

http://images.apple.com/ipad/business/docs/iOS_Security_May12.pdf
4）岩野一生 , オートノミックコンピューティングからレジリエンシーへの道 , 2010/03/05
http://www.imes.boj.or.jp/citecs/12sympo/ref5.pdf
5）米国における情報セキュリティ研究開発戦略の動向について
「平成 23 年度情報セキュリティ産業の活性化方策に係る調査」
http://www.nisc.go.jp/conference/seisaku/strategy/dai21/pdf/21sankou03.pdf
6）平成 22 年度 情報セキュリティ技術の研究開発戦略の策定に向けた技術評価等の調査
http://www.nisc.go.jp/inquiry/pdf/kenkyu-kaihatsu_gaiyou.pdf

3. 12. 2　レジリエントネットワーク

（1）研究開発領域名

レジリエントネットワーク

（2）研究開発領域の簡潔な説明

サイバー攻撃などの予防、軽減、分析、対応、回復のためのネットワーク技術

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

インターネットにおいては、不正侵入、情報漏えい、サービス妨害といった脅威が引き続き問題となっており、従来からのファイアウォールや侵入検知システム、メールフィルタリングなどによる境界防御のためのセキュリティ技術の効果が低下している。近年では、省庁や企業の特定の部署や個人を標的とした標的型攻撃やAPT（Advanced Persistent Threat）が世界的に問題となっており、保護対象ネットワーク内への侵入を防ぐ入口対策、保護対象ネットワーク内での攻撃者による不正活動を予防・検知するための組織内監視技術、情報が外部に漏えいすることを防ぐ出口対策などを組み合わせた多層防御、攻撃やインシデントの情報を共有するための枠組みなど、標的型攻撃対策が活発に議論されているものの、突かれる脆弱性や攻撃パターンは常に変化するため、それらへ迅速に対応するためのしなやかさが求められている。

また、攻撃の多様化により、蓄積された過去の攻撃パターン、いわゆるシグネチャによる攻撃検知が難しくなっており、侵入検知システムやウイルス対策ソフトによる防御を突破して保護されたネットワークやシステムに侵入する事例が増えている。これに対して、多数のユーザからのレピュテーション（評判）情報を積極的に利用した良悪判定技術や各組織のネットワークで観測された攻撃をリアルタイムに集約・共有し、防御に役立てるクラウド型のセキュリティ機構が検討され、製品化・サービス化されている。また、負荷分散、攻撃、障害に際しネットワーク構成をしなやかに変更可能なSoftware-Defined Network/OpenFlowに関する研究開発が急速に進展しつつあるとともに、レイヤー2の障害回復能力を高めたレジリエントEthernet Protocol、帯域の利用効率を高めるレジリエントPacket Ringなどの開発や市場への導入が始まっている。

攻撃者に操作されてスパムメール送信やサービス妨害など大規模攻撃を行う、マルウェア感染コンピュータ群、いわゆるボットネットに対する対策も重要な課題であり、広域ネットワーク観測やマルウェア解析を通じてボットネットの動向把握を行うプロジェクトが国内外で実施されている。

スマートフォンの世界的な普及に伴い、当該分野における脅威も増大しており、インターネット上の正規・不正規のオンラインマーケットにおいて、不正アプリケーションが多く発見されるようになっている。これに対して最近数年で、スマートフォン向けアプリケーションの解析やスマートフォンへのセキュリティ機構の導入に関する研究成果の発表が急増している。また、外部ネットワークとの接続や標準化が進む制御システムにおいては、以前からセキュリティ対策の必要性が指摘されてきたが、Stuxnetをはじめとする制御システムを標的とした脅威の現出により、その重要性が再認識されており、国内外で対策技術の研究開発やセキュリティ検証施設（テストベッド）の構築などが進められている。

情報化が進む自動車の車載ネットワークや車車間・路車間通信、情報家電やオフィス機

器などのホームネットワーク、Personal Area Network におけるセキュリティの確保も重要な課題といえる。さらに、IP アドレスの枯渇から移行が進む IPv6 についてもプロトコルレベルや実装レベルでの脆弱性の検討が行われ始めている。

上記のように問題の山積する現在のインターネットの状況を鑑み、制御可能でレジリエントな次世代のインターネットのアーキテクチャに関する検討が欧米において始まっており[1), 2), 3)]、今後の成果が期待される。

（4）科学技術的・政策的課題

インターネット上の不正活動は国家の枠組みを越えて行われていることに比べて、対策側の国際協調、情報共有は、充分とはいえない。米国の PREDICT[8)] のように情報共有のための様々な試みが始まっているものの、今後、国家の枠組みを越えた連携を強化する必要がある。

研究開発を行う上で必要なデータを取得するために、法律の観点でも整備と見直しを進める必要がある。

変遷著しい脅威への後追いの技術開発や対処療法的な対策にとどまらず、問題の本質を追及し根本解決を目指す研究開発を推進する必要がある。

（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）

- 米国 NSF（National Science Foundation）では、Secure and Trustworthy Cyberspace 分野や Computer and Network Systems（CNS）分野において、制御可能でレジリエントな次世代インターネット技術の創出をテーマに数千万ドル規模の予算拠出を予定している[1)]。
- 欧州においても、European Commission の FP7 において情報システムセキュリティとトラストの分野で研究資金が投入されている。特に、モバイルデバイスや人間を含む多数のエンドノードを円滑に接続可能で、障害にも強いレジリエントな次世代のインターネットアーキテクチャが検討されている[2)]。また、ボットネット対策プロジェクトに 800 万ユーロ規模の予算拠出を予定している[3)]。
- 欧州ではドイツなどを中心に自動車の情報セキュリティに関する研究開発で先行しており、EVITA（E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications）[4)] や PRESERVE（Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems）[5)] といったプロジェクトにおいて安全な車載ネットワークや車車間通信、路車間通信を実現する技術の開発が進められている。
- 米国の研究者が実車の電子制御ユニットにネットワーク経由で不正プログラムを感染させ、外部から操作することが可能であることを示し[6)] 注目を集めている。

（6）キーワード

侵入検知、レピュテーションベースセキュリティ、標的型攻撃、APT（Advanced Persistent Threat）、マルウェア、Software-Defined 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	△	↗	・国内会議レベル（情報処理学会コンピュータセキュリティシンポジウム、マルウェア対策研究人材育成ワークショップや電子情報通信学会暗号と情報セキュリティシンポジウムなど）では、大学・企業ともに発表が多いが、Usenix Security や ACM Conference on Computer and Communications Security（ACM CCS）などのメインカンファレンスで採録されるには至っていない。
	応用研究・開発	○	→	・総務省、経済産業省による Cyber Clean Center（CCC）や情報通信研究機構の nicter など世界的に見ても独自性をもった研究開発が行われている例がある。IPv6 技術検証協議会による IPv6 対応製品の検証を行う試みも実施されている。
	産業化	△	→	・アンチウイルス、ネットワーク IDS・IPS、ファイアウォールなどは国産製品のシェアは低く海外ベンダーに依存している。高い技術力を有する国内ベンダーも存在するが、国内での採用にとどまっている。 ・ICT サービス分野では国内のソリューションプロバイダが活躍している。
米国	基礎研究	◎	→	・米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高く主要な国際会議でもプレゼンスが高い。 ・大学での研究は海外からの優秀な人材の流入に支えられている。 ・NSF、DoD、DHS など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	◎	→	・大学と企業間の人材流動・交流が活発で、大学での研究が基礎だけにとどまらず実践的である。ミシガン大学と Arbor Networks 社のように大学における研究を直接的に事業に結び付け成功している例がある。
	産業化	◎	→	・IDS、IPS、ファイアウォール、WAF（Web Application Firewall）、UTM（Unified Threat Management）といったアプライアンス製品の販売にとどまらず、ソリューションの提供により高い収益を上げている。Google、Amazon、Yahoo!、Facebook といったサービスプロバイダにおいても豊富な情報量と優秀な人材の確保により高い技術的優位性を維持している。
欧州	基礎研究	○	↗	・マルウェア対策やネットワーク監視の分野で成果が出ており、特に、ウィーン工科大学（オーストリア）、Eurecom Institute（フランス）、ボーフム大学（ドイツ）、カリフォルニア大学サンタバーバラ校（アメリカ）、ノースイースタン大学（アメリカ）のセキュリティ研究者による International Secure Systems Lab の研究成果が顕著である。
	応用研究・開発	○	↗	・FP7 や ICT PSP に支援された研究プロジェクトに企業が多く参画し、実用面を意識した研究開発を実施している。例えば DEMONS プロジェクト[7] では欧州 9 カ国の通信事業者などが参画し、協調的で、かつプライバシー問題を考慮したネットワークモニタリング技術の研究開発を実施している。
	産業化	○	→	・ウイルス対策ソフト市場では、Avast Software（チェコ）、Avira（ドイツ）、Kaspersky（ロシア）、F-Secure（フィンランド）などが国際的に高いシェアを有している。UTM、IDS、IPS、ファイアウォールなどにおいては、Sophos（イギリス）に買収された Astaro（ドイツ）などが高いシェアを有している。

中国	基礎研究	△	↗	・清華大学などの優秀な学生が米国の大学に留学し研究成果をあげている。中国本土発の研究開発はまだ著名な国際会議において採録されるレベルには至っていない。
	応用研究・開発	△	↗	・これまで国際的に注目される大規模研究開発プロジェクトは見られないが、情報セキュリティ分野に重点が置かれた中国科学院信息工程研究所が2011年に設立されており、今後の成果が期待される。
	産業化	△	↗	・国産のネットワーク機器ベンダーであるHuaweiは、世界有数の売上高を誇り、ソリューションサービスにも力を入れている。また、金山毒覇、瑞星、江民など国産ウイルス対策ソフトの国内シェアが高い。
韓国	基礎研究	○	↗	・KAISTやPOSTECHといったトップレベルの大学の研究成果がACM CCSやNetwork and Distributed System Security Symposium（NDSS）などの著名国際会議で発表されるに至っており、競争力が向上している。
	応用研究・開発	○	→	・度重なる国家規模のサイバー攻撃被害の経験から政府の危機意識は高く、政府主導の対策技術、システム開発が実施されている。例えば、KISAはボット感染ホストの検知から駆除までを一貫して行うシステムを構築し国内ベンダーの協力のもと、サービス提供を行っている。
	産業化	○	↗	・Ahnlabをはじめとして情報セキュリティ企業が数百程度存在し国産の技術を開発している。これらの企業が扱う製品の韓国国内シェアは高く、SECUIのUTM製品など日本を含む海外での導入実績が増えている例がある。

（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）Secure and Trustworthy Cyberspace, NSF
http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12503/nsf12503.htm
Computer and Network Systems, NSF
http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12582/nsf12582.htm
2）Trustworthy ICT Research in FP7
http://cordis.europa.eu/fp7/ict/security/docs/brochure-ict-security-research.pdf
Objective ICT-2011.1.1 Future Networks, FP 7 ICT - WORK PROGRAMME 2011.
http://cordis.europa.eu/fp7/ict/future-networks/programme_en.html
3）Objective 5.1, Cyber-Security, Information Communication Technologies Policy support Programme
http://ec.europa.eu/information_society/activities/ict_psp/documents/call6_theme_5_presentation.pdf
4）EVITA（E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications）
http://evita-project.org/
5）PRESERVE（Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems）
http://preserve-project.eu/
6）S. Checkoway, D. McCoy, B. Kantor, D. Anderson, H. Shacham, S. Savage, K. Koscher, A. Czeskis, F. Roesner, T. Kohno. “Comprehensive Experimental Analyses of Automotive Attack

Surfaces," USENIX Security 2011.
7）DEMONS（DEcentralized, cooperative, and privacy-preserving MONitoring for trustworthinesS）
http://www.fp7-demons.eu/
8）PREDICT（Protected Repository for the Defense of Infrastructure Against Cyber Threats）
https://www.predict.org/

3. 12. 3　レジリエントデバイス

（1）研究開発領域名

レジリエントデバイス

（2）研究開発領域の簡潔な説明

デバイスのレジリエンシー確保に関する研究開発

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

デバイス上で扱う情報の秘匿や改ざん防止は、レジリエントな社会を実現する上で欠かせない要件になりつつある。しかしながら、デバイスに対して一時的な故障を意図的に引き起こしたり、消費電力などの物理量を解析したりすることにより、そこに格納されている重要情報を取り出すサイドチャネル攻撃が提唱されて以来、様々な攻撃、対策、評価手法が研究されるようになっている。

また、デバイスを自社製造しないファブレス化が進むことにより、模造デバイスや試験により廃品となったものが正規品として流通する問題が顕在化してきており[1)]、いざという場合に期待されたレジリエンシー機能（防止、対応、回復などの機能）が提供されなくなることが懸念されている。このような不正を検出する技術として、デバイスの複製が極めて困難な物理的特性を認証に用いる（Physical Unclonable Function）技術の研究がなされており、近年では米国 Verayo や米国 Veratag による製品化が進んでいる。偽造防止技術はプリンタトナーや携帯機器のバッテリーの認証にも有効であり、市場の発展が期待されている。

デバイスの安全性を評価する標準は暗号モジュールに関しては米国 FIPS140-2/ ISO/IEC 19790（CMVP: Cryptographic Module Validation Program）や欧州 ISO/IEC 14508（Common Criteria）、制御デバイスに対しては IEC 62443 が主である。我が国ではこれらに準拠した安全性評価がなされている状態であり、評価ビジネスでは後れをとっている。今後、偽造防止技術 PUF の標準化がなされると考えられ、産業化に向けた取り組みの体制が課題となっている。我が国のアドバンテージとして、サイドチャネル攻撃の実験用ボード Side-channel Attack Standard Evaluation Board（SASEBO）[2)] の開発があげられる。実験用ボードの開発は国内企業に移行しつつあるが、それらを活かした評価環境の整備と標準環境としての普及が課題となっている。

国際比較については、米国が産業化において先進的であり、欧州では国際学会の傾向[3), 4), 5)]や蘭 Riscure 社・仏 Morpho の活動から理論的な研究が主に英・仏・独・蘭にて進んでいると判断される。中国では、海外のファブレス化を受けて製造元の役割を担っているためか、特段に偽造防止技術などに力を注いでいるとは見えない。韓国では Electronics and Technology Research Institute（ETRI）による Side Channel Analysis Resistant Framework（SCARF）プロジェクトが企業のサポートや数十人規模のグループにより進められており、今後の動向は実験環境でリードしている我が国として予断を許さない。

デバイスの不具合や機能修正を製造後に可能とする要素技術として、回路が再構成可能な FPGA（Field Programmable Gate Array）デバイスが適しており、製造コストの高いネットワークや測定機器などの製品において実利用が進んでいる。FPGA デバイスでは、機能を止めることなく回路の一部を更新することが可能となる動的再構成技術の実装が進

んでおり、ネットワーク機器など無停止で運用するシステムへの利用が期待される。一方、ソフトウェアのようにデバイスの回路が更新可能となったことにより、コンピュータウイルスのような悪意のある回路によるシステムへの攻撃にさらされることが予想される。今後、動的再構成技術の実利用に向けた回路設計・動的更新技術や悪意のある回路に対する対策技術の研究を推進することが重要となっている。

（4）科学技術的・政策的課題

- デバイス製造後に安全性を評価する方式では、基準に満たない場合に莫大なコストが無駄になることから、攻撃に対する安全性をデバイス製造前に検証する技術の研究が急務である。
- デバイスの安全性評価では、製造や計測など技術の発展に伴って攻撃の容易さが変わるため、評価手法の理論的な面と物理的特性の妥協点、もしくは、統一論が求められる。しかし、理論から実践の多岐に渡る知見を集約する必要があり、評価手法の研究が困難となっている。
- 世界的には、英国 Cambridge 大学の S. Skorobogatov など研究者が製品の攻撃や公表を行っており[6]、研究の実例や新たな手法の発見、メディアを通じた危険性の呼びかけが促進されている。米国 AES アルゴリズム制定などに見られるように、内部情報などを公開して様々な研究者による攻撃や評価に晒すことが安全性向上に有効である一方、我が国では攻撃実験への忌避感が強く、これが研究推進の阻害要因となっている。

（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）

- 独 Center for Advanced Security Research Darmstadt（CASED）[7] が 2008 年に設立され、大学、研究所 3 組織が協力して研究を推進しており、国際ワークショップ COSADE（Constructive Side-Channel Analysis and Secure Design）を開催して各国研究の集約を図っている。
- 米国 NIST では 2007 年より開始された新たなハッシュアルゴリズム SHA-3 の選定が 2012 年 10 月に完了した[8]。アルゴリズムの選定ではサイドチャネル攻撃への耐性も検討されたため、今後、標準暗号アルゴリズムが更新される際にはサイドチャネル攻撃やフォルト攻撃への耐性も追加される可能性が高い。

（6）キーワード

暗号、ハードウェア、非破壊攻撃、故障利用攻撃、偽造防止、評価

（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 CHES2011[4]、HOST2011[3] において、小型の実装向けブロック暗号やグループ署名の実装から偽造防止技術 PUF、攻撃対策手法、シミュレーションによる評価技術や、新たなフォルト攻撃（Fault Sensitivity Analysis, FSA）が発表されており、一定の存在を維持している。 ・国内研究プロジェクトでは、PUF 技術を対象としたプロジェクト[9]のほか、欧州フランスとの共同研究[10] などが進められている。
	応用研究・開発	◎	↘	・偽造防止技術や非破壊攻撃対策手法においては主要な特許を国外企業が取得しており、今後の NFC・IC タグの利用拡大や偽造検出分野にて実用となる技術開発が課題である。 ・非破壊攻撃向け標準評価ボード[2] の研究開発は国内外での利用が進み、本分野での我が国の存在感を高めることに成功した。今後、これまでの成果を活用した評価環境の整備・普及が課題である。
	産業化	○	→	・国内では交通系 IC カードが広く普及しており、さらに携帯電話に NFC 機能が付加されるにしたがって物理的攻撃の事例が顕在することが懸念である。 ・標準評価ボードの研究成果が複数企業にライセンスされているが、今後、解析ノウハウを活用して評価環境の開発・販売・普及へ繋げることが課題である。 ・IC タグの利用拡大やデバイス偽造防止に有力な技術である PUF の実運用を推進することが課題である。
米国	基礎研究	○	↗	・偽造防止技術 PUF や故障利用攻撃に関する研究発表が多く、研究分野のトレンドが非破壊的な攻撃から移行しているとみられる。 ・新たなハッシュアルゴリズム SHA-3 の選定が NIST により 2012 年 10 月に完了した。これに伴い、アルゴリズムの効率的な実装法や攻撃への対策手法など、実用化に向けた研究が活発化すると予想される。
	応用研究・開発	◎	↗	・暗号アルゴリズムの標準化において NIST の影響力は大きく、SHA-3 の選定をはじめ AES、DSS（Digital Signature Standard）といった主要なアルゴリズムの標準化も行っている米国の優位性は継続すると考えられる。
	産業化	◎	↗	・非破壊攻撃への対策手法の特許を持つ CRI 社を Rambus 社が買収しており、基本特許が数年内に期限を迎えることから、今後の対策特許の動向に要注意である。 ・偽造防止技術の実用化を VERAYO 社や VERATAG 社により進められている。 ・Xilinx 社、Altera 社の FPGA デバイスには動的再構成技術が搭載されており、開発ソフトウェアによるサポートがなされている。今後の実利用や悪意のある回路への対策技術の研究の動向に注視する必要がある。
欧州	基礎研究	◎	↗	・仏、独ではサイドチャネル攻撃での漏えいモデルやシミュレーションによる解析の研究が盛んであり、CHES2012 では欧州の研究機関から多くの論文が採択されている[11]。 ・独 CASED において、複数の研究機関が密に協力して研究を行っており、多くの成果が拠出されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・イギリス Cambridge 大学の研究者により、製品の脆弱性が公開され、我が国でも報道されたことは産業界への影響が大きく、学術界・産業界の今後の取り組みに注意が必要である。
	産業化	◎	→	・蘭 Riscure 社による評価環境において、レーザー装置や測定装置など製品の充実が進んでいる。 ・欧州 Common Criteria の影響力は依然として大きい。 ・偽造防止技術においては目立った産業化活動は見られない。

中国	基礎研究	△	↗	・中国の研究者それぞれによる国際誌への投稿・掲載がなされているが、研究機関あげてのプロジェクトが進行しているかどうかは不明である。理論から実装まで幅広く、チームとして人材を投入しているかが一つの要素であり、中国の進展を測るには調査が必要である。
	応用研究・開発	×	→	・ファブレス向けのデバイス製造は盛んであるが、防止技術の研究は積極的になされていない。
	産業化	×	→	・デバイスの偽造や不正防止技術への関心は必ずしも高いとは言えず、技術開発に関しても目立った活動は見受けられない。
韓国	基礎研究	○	↗	・研究機関 ETRI の SCARF プロジェクトをはじめ、サイドチャネル攻撃への対策手法の研究が盛んになされている。
	応用研究・開発	○	→	・上述の SCARF プロジェクトではハードウェア・ソフトウェア実装の暗号回路から接触型・非接触型の IC カード向け評価ボードが開発されているほか、統合評価環境の開発が潤沢な資金と人員のもとでなされている。 ・主に国内の暗号向けの対策手法が注力されており、対外的な活動は見られない。
	産業化	○	↗	・国民の IC カード普及がなされており、安全性評価や運用の制度が進展すると予想される。

（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）Counterfeit Chips on the Rise, IEEE SPECTRUM JUNE 2012, pp14-15
2）http://www.risec.aist.go.jp/project/sasebo/
3）http://www.engr.uconn.edu/HOST/HOST-2011.pdf
4）http://www.iacr.org/workshops/ches/ches2011/accepted.html
5）http://cosade2012.cased.de/accepted_papers.html
6）http://www.cl.cam.ac.uk/~sps32/sec_news.html
7）http://www.cased.de/en.html
8）http://csrc.nist.gov/groups/ST/hash/index.html
9）http://www.dvlsi.jst.go.jp/list/h21-03.html
10）http://www.jst.go.jp/inter/cooperation/country/france.html
11）https://www.cosic.esat.kuleuven.be/ches2012/papers.shtml

3. 12. 4　レジリエント情報社会

（1）研究開発領域名

レジリエント情報社会

（2）研究開発領域の簡潔な説明

環境、技術、機能などの変化に際しても信頼できる安全なサービスを継続的に提供できる復元力に富んだ情報社会を実現する情報システムのアーキテクチャ、設計・保全技術、評価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

情報社会は、情報通信技術（ICT）をその活動の基盤とする社会であり、階層構造を成している。階層構造の根幹は地球規模で張り巡らされた情報システムのネットワークである。ネットワーク自体もインターネットやイントラネットなどの多層構造を持つ。これらネットワークを土台として人と組織のあらゆる活動を共通に支える重要インフラ（例えば、エネルギー網、交通網、通信網、金融網、流通網、企業基幹網、行政網など）が形成される。さらにこのインフラを活用して多種多様なサービス（例えば、コンテンツサービス、健康・福祉サービス、ビジネス支援サービス、生産・供給サービス、観光・交流サービス、エネルギー・環境サービスなど）を提供するシステムが構築される。

情報社会を一つのシステムと見ると、それには二つの特徴がある。第一の特徴は、複雑で巨大な「システムのシステム」という点にある。情報社会はその階層構造における層内や層間で重要インフラやサービスを構成する多数の要素が密接に結合して相互に作用し合うさらに複雑で巨大な一つのシステム、あるいは多数のシステムから成る巨大システム、と見ることができる。第二の特徴は、人間がシステムのユーザであると同時にシステムの構成要素でもあるという点にある。情報技術は飛躍的に進歩し、情報システムは飛躍的に複雑化・巨大化する一方で、人間の能力は昔と変わらず、しかもその行動は常に不確実性を伴い、誤りを犯し易い。情報社会は、本質的に不確実な人間を要素として含む複雑で巨大なシステムである、と言える。

こうした情報社会では、その基盤である情報システムがすでに人間の理解能力を超えて複雑化し巨大化していることに加えて、本質的に不確実性を伴う人間がその制御ループの中に組み込まれていることから、自然災害、要素の経年劣化、設計ミスや操作ミス、邪悪な人間の侵入などによるシステム要素の不具合事象は日常的に発生し得る。たとえ発端となる不具合は小さな事象であっても、多数のシステム要素が密接に結合して相互に作用し合うために、不具合の連鎖を引き起こし、その結果として大規模なシステム障害、インフラ事故、サイバーテロなどの重大事象に至るという危険が常に存在する。ひとたびそのような重大事象が生じると多大の人命損傷、財産逸失、社会機能マヒなど、社会全体に破局的事態を招くことになる。場合によっては国家安全保障への重大な脅威にもなる。

このような事態に至ることを防ぐために、基盤である情報システム／ネットワークのディペンダビリティおよびセキュリティを確立する研究開発が行われている。これらの研究開発はもちろん今後一層推進する必要があるが、それだけでは二つの意味で不十分であることが、近年、世界で広く認識されるようになってきている。第一は、ディペンダビリティ／セキュリティの確立は、基盤である情報システムだけを対象とするのでは不十分で

あり、その上に構築される重要インフラやサービスシステム、さらには社会の統治機構やリスク管理まで含めた情報社会システム全体のディペンダビリティ／セキュリティの確保が必要である、との認識である。第二は、変化に対するディペンダビリティ／セキュリティの持続性が必要である、との認識である。今日の世界は、社会を取り巻く環境も、社会の発展を支える技術も、社会の要求する機能も、絶えず変化している。そのような変化に際しても信頼のおけるサービスを継続的に提供できる復元力に富んだ社会でなければならない。重大事象が発生した場合には、被害を最小限度に留めるとともに、重要インフラやサービスを速やかに元の正常状態に回復することのできるレジリエントな情報社会システムの実現がグローバルに認識されている課題である。

こうした課題は、欧米では2001年9月11日の米国における同時多発テロ以来、また我が国においては2011年3月11日の東日本大震災と福島原発事故以来、人々に広く認識されることになった。この数年来、我が国を含めて世界各地で進められているスマートグリッドやスマートシティの研究開発プロジェクトにおいても、情報社会システムの脆弱性や事故連鎖のリスクが重要課題の一つになっている。

この研究開発領域は、環境、技術、機能などの変化に際しても信頼できる安全なサービスを提供し続けることのできる復元力に富んだ情報社会を実現する情報システムのアーキテクチャ、設計・保全技術、評価技術に関する研究開発を行うことを目的とする。限界状況の環境下で重大なシステム障害やインフラ事故に対して迅速かつ的確な意思決定と行動を可能にする情報社会を実現するために、情報技術、工学、数理科学、社会科学、人文学などを融合した全く新しい学術領域を開拓するものである。

レジリエンス（resilience）は、従来フォールトトレランス（Fault-tolerance）の同義語として、情報システムにおけるディペンダビリティ（Dependability）とセキュリティ（Security）に関連する文脈で用いられてきたが、2000年代半ば頃から、主としてEUの研究プロジェクトにおいて、「環境や技術の変化に関わらずディペンダビリティを持続する性質」として定義されてから、その概念が世界で広く共有されることとなった。

ディペンダビリティが元々包含する属性概念はreliability、availability、integrity、safety、maintainabilityである。またセキュリティが包含する属性概念はavailability, integrity, confidentialityである。これらに加えてレジリエンスを実現するための技術目標として、変化に適応できるevolvability、信頼できるサービスを評価できるassessability、人間とシステムの両方に対するusability、複雑化するシステムの回復を容易にするdiversityがあげられる。

ディペンダビリティは、1960年代から汎用分野ではコンピュータメインフレームの基本設計技術として、特定用途分野では、宇宙開発、航空機、鉄道、通信ネットワーク、銀行システムなど、特にディペンダビリティへの要求が強い分野におけるフォールトトレランス技術として、理論と実用の両面で研究開発が進められてきた。この分野で先導的かつ圧倒的な役割を果たしてきたのは米国である。またソフトウェア工学分野の研究では、欧州からもいくつかの先駆的な研究が生まれた。

最近は、情報システムの大規模化、複雑化、ネットワーク化が進み、そこで提供されるサービスとその利用者の多様化が急速に進んだ結果、サイバーテロ、情報漏えい、システム侵入など、セキュリティを損なう悪意の人為的フォルト、および、システム設計ミス、操作ミス、保守ミスなど、過失による人為的フォルトがディペンダビリティを阻害する新たな

脅威になってきている。このため、現在活発に研究が進められているのはネットワーク化情報システムにおける悪意および過失による人為フォルトに対処する技術であるが、この分野でも米国の研究水準が圧倒的に高い。

レジリエンスは、EUのFP6プログラムのもとで、情報システム・ネットワークが技術の進歩、社会・環境の変化に遭遇してもなおディペンダビリティ／セキュリティを保持する性質として定義され、時間の経過によって生じるリスクに対するディペンダビリティの研究プロジェクトが進められている。並行して、重要インフラや環境に情報技術を適用する情報社会を構想したプロジェクトが世界中で立ち上がっている。米国エネルギー省が主導する”Smart Grid”，米国NSFが主導する”Cyber-Physical Systems”，IBMが主唱する”Smarter Planet”，IEEE Reliability Societyが主催するPrognostics and Health Management”など、いずれもディペンダビリティ／セキュリティが重要なキーワードになっている。こうしたプログラム、プロジェクトには多くの企業、研究機関、大学が参加しており、研究者層の拡大と将来の研究水準向上に貢献する。

なお、レジリエント情報社会を主たるトピックスとする研究成果の発表場所はまだ見当たらないが、ネットワーク、ウェブサービス、データセンター、オープンシステム、ビジネス応用、社会インフラなどの多くの国際会議で、レジリエンス、ディペンダビリティ、セキュリティをキーワードとするセッションが設けられている。また情報システムのディペンダビリティ／セキュリティに関する学術論文誌として、IEEE Computer SocietyからTransaction on Dependable and Secure Computingが季刊で発行されている。

（4）科学技術的・政策的課題

技術的に3つの大きな課題がある。第一はレジリエンスの定義である。「変化に際しても継続的にディペンダビリティ／セキュリティが保持される性質」がEUで提唱された定義であり、感覚的には国際的に支持されていると思われるが、技術的に意味のある定義に掘り下げることが課題である。第二に、情報社会システムの定義である。情報システムのディペンダビリティ、セキュリティ、レジリエンスは国際的にも共通に理解されているが、情報社会システムのレジリエンスに関する共通理解はまだない。第三にレジリエンスの評価方法である。情報システムのディペンダビリティ、セキュリティに対する評価方法も、これまで盛んに研究されているが、まだ確立したものはなく、国際的な共通理解もない。評価技術はこの研究開発領域で最も重要な研究課題の一つである。

政策的には、情報社会を一つのシステムと捉えてそのレジリエンスあるいはディペンダビリティを研究する領域が我が国では未熟であり、研究者も少ないことが課題である。福島原発事故を契機に社会や統治機構のディペンダビリティの重要性が広く認識されることになったので、今後、この領域が育成されることが期待される。

（5）注目動向

米国NSF（National Science Foundation）とCCC（Computing Community Consortium）の共催で2012年4月24、25日に米国ヴァージニア州アーリントンで開催された“Computing for Disasters”ワークショップにおいて、大規模災害に対処する新しい学術領域が挑戦すべき4つの課題として、1）時空間的に微小から巨大まで極端なスケールの事象とデータの取り扱い、2）要素間の密接な結合と相互依存性がもたらす複雑システム

の取り扱い、3）極端な環境のもとでの人間とシステムの協調、4）異分野を融合させた総合的、地域依存的、実験的な研究方法、の必要性が指摘された。

（6）キーワード

レジリエンス、ディペンダビリティ、セキュリティ、情報技術、情報社会、情報システム、重要インフラ、サービス、システム障害、インフラ事故、サイバーテロ

（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	○	→	ディペンダビリティ分野のフラグシップ国際会議DSN（International Conference on Dependable Systems and Networks） の Steering Committee member、IEEE TC on Dependable Computing の Executive Committee member、PRDC（Pacific-Rim Symposium on Dependable Computing）の Steering Committee Chair を日本から出すなど、世界の研究コミュニティの中心にいるが、論文投稿件数、採択件数ともに横ばいであり、上昇傾向にはない。伝統的にハードウェアの研究者が多かったが、JST-CREST「ディペンダブル組み込みOS」領域が実施され、ソフトウェア科学会で「ディペンダブルシステム研究会」が活動するなど、ソフトウェア分野の研究者が増加傾向にある。レジリエント情報社会の研究はまだほとんどないが、福島原発事故を契機に社会的関心は高まっている。学術会議に「安全・安心社会と情報技術」分科会が設置され、研究開発の方向性を模索している。
	応用研究・開発	○	→	情報システムに関しては、主要要素の2重化を基本とするフォールトトレラントサーバーがNEC、富士通から販売され、一定のシステム構築力を有しているが、上昇傾向にあるとはいえない。評価方法が確立していないため、企業における技術開発の主流にはなっていない。各地のスマートシティ、スマートグリッドプロジェクトにおいても重要インフラのレジリエンスに対する取り組みが十分とはいえない。
	産業化	○	→	この分野は企業における研究開発レベルと生産現場の技術力を必ずしも明確には分けられない。上記の技術開発水準同様、一定の水準は保ちつつも上昇傾向にあるとはいえない。伝統的な信頼性向上技術などのボトムアップアプローチが主流であり、トップダウンアプローチのシステム設計が弱い。レジリエント情報社会の視点はほとんどない。
米国	基礎研究	◎	↗	DSNへの投稿数、採択数は圧倒的に多い。NSFが主導する”Cyber-Physical Systems”プログラムや”Computing for Disaster”プログラム、エネルギー省が主導する”Smart Grid”プログラム、IEEE Reliability Society が主導する”Prognosis and Healthcare Management”プログラムなどへの参加を通じて、大学、研究所の研究水準は上昇傾向にある。また、関連する国際会議”Conference on Earthquake Engineering”、“IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robots”、“IEEE Conference on Technologies for Homeland Security”、“Information Systems on Crisis Response and Management”などを通じて研究者数も増加傾向にある。イリノイ大学アーバナ・シャンペン校、カーネギメロン大学などの拠点校で国家安全保障の観点から重要インフラの防衛に関する研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	情報技術に関しては、ストラタス社の無停止型サーバーは草分け的存在。カリフォルニア大学バークレー校発のRAID技術は信頼性向上をねらうディスクアレイの標準的実現方法として広く普及している。クラウドで先行するMicrosoft、Google、IBM、Amazon、オラクルなどのデータセンターのディペンダビリティ技術開発は独自の進展を遂げている。IBMの”Smarter Planet”構想が同社の主唱する”Autonomic Computing”と共鳴し、各地で進む”Smart City”や”Smart Grid”プロジェクトにおける技術開発のインセンティブを生みだしている。
	産業化	◎	↗	エネルギー省が主導する”Smart Grid”に参加する企業を中心に社会の重要インフラのレジリエンスに関する技術開発のインセンティブが生まれつつある。宇宙開発、国家安全保障を旗印に開発された技術が産業技術力としての裾野へ広がりを見せている。

欧州	基礎研究	◎	↗	従来からフランスのCNRS-LAASを中心として、イギリス、イタリア、ポルトガルなどのEU諸国はディペンダビリティの概念形成に大きな貢献をしてきた。また、FP6では「変化に直面してもディペンダビリティを維持する」レジリエンスの概念を提唱し、FP7では引き続きその実現技術の開発に取り組んでいる。ディペンダビリティ評価技術、ベンチマーキング、重要インフラの依存性解析などでも世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	エアバス、メルセデス・ベンツ、ボッシュなどの欧州企業が中心となる国際会議SAFECOMPや”Embedded Real Time Software”などへの参加を通じて、企業における組み込みシステムのディペンダビリティ研究の裾野が広がりつつある。エアバスやメルセデスなどの技術開発は活発であり、技術水準も高い。
	産業化	○	→	エアバスのFly-By-Wire技術やメルセデスの安全走行技術などにディペンダビリティ概念が反映されているが、一般的にはディペンダビリティあるいはレジリエンスは必ずしも製品レベルの産業技術力として現れていない。
中国	基礎研究	△	↗	近年国際会議への論文投稿数は急激に増えているが、その技術内容に新規性は少なく、採択件数は少ない。従来技術の後追いあるいは他国のコピー的色彩がまだ強い。ネットワーク関連の論文が多い。ハイパフォーマンス分野では2010年11月のスーパーコンピュータのランキングでNVIDIAのCPUを大量に採用した並列処理で1位と3位に入り注目されたが、2012年6月のランキングは5位と10位に順位を下げた。ディペンダビリティ分野の情報技術に見るべきものは少ないが、研究の裾野は確実に広がっている。レジリエント情報社会の視点はない。
	応用研究・開発	△	↗	この分野の企業における技術開発力に関する情報は十分に得られないので、確かな評価は難しい。国際会議などへの発表も企業からのものはほとんどない。しかし、近年の急速な経済成長によって国内の技術開発投資は急速に進んでいるものと思われる。
	産業化	△	→	ディペンダビリティあるいはレジリエンスに関する産業技術力を判断する情報に乏しい。
韓国	基礎研究	△	→	韓国出身で米国のこの分野で活躍する研究者は多いが、国内の研究水準は、国際会議での論文発表状況を見る限り、高いとはいえない。会議参加者数も少ない。レジリエント情報社会の視点をもつ研究の動きは見られない。
	応用研究・開発	△	→	急速に成長した強大な企業サムスングループを擁するが、技術開発力は必ずしも高いとはいえない。ディペンダビリティ、あるいはレジリエンスの価値評価が確立していない現状では、特に目立った動きは見られない。
	産業化	△	→	サムスンは総合電気・情報産業で世界をリードする大きなマーケットを得ているが、ディペンダビリティ、レジリエンスの分野に限ると上昇傾向は必ずしも感じられない。

（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 DSN（International Conference on Dependable Systems and Networks）
2）Proceedings of EDCC（European Dependable Computing Conference）

3）Proceedings of PRDC（Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing）
4）Proceedings of LADC（Latin-American Symposium on Dependable Computing）
5）Proceedings of SAFECOMP（International Conference on Computer Safety, Reliability and Security）
6）IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing
7）IFIP WG 10.4 “Dependable Computing and Fault Tolerance”,
http://www.dependability.org/wg10.4/
8）EU FP7 ANIKETOS Project
http://www.aniketos.eu/
9）European Network of Excellence ReSIST
http://www.resist-noe.org/
10）NSF, Cyber-Physical Systems
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286
11）Information Trust Institute, UIUC
http://www.iti.illinois.edu/
12）US Department of Energy
http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm
13）IBM, Smarter Planet
http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/
14）IEEE PHM
http://www.phmconf.org/phm_topics.htm
15）Computing for Disaster: A report from the Community Workshop
http://cra.org/ccc/docs/init/computingfordisasters.pdf
16）東京電力福島原子力発電所事故調査委員会報告書
http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/report/index.html

専門用語説明

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

サイバーシステム（Cyber System）

情報ネットワークシステム、特に、インターネットを介して人々やプログラムが相互に情報交換するシステムの総称。2006年に提唱されたCPS（Cyber Physical Systems）では、実世界をあらわすPhysical Systemに対応した、物理的実体を持たない仮想的な世界を意味する。

3Dプリンティング（Three-dimensional Printing）

三次元のデザイン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）が安価で市場に出回り、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。

デザインデータ（Design Data）

データ化された設計情報。特に、3Dプリンティングにおいては、コンピュータ上で設計・流通される3次元の設計図面を“印刷”して、所望の形状の製品を得るという、新しいものづくり工程における設計図面に該当し、製品の設計・製造・流通・利用を媒介する知的財産ともいえる。このデザインデータを共通資産としてオープン化する動きもみられる。

ビットとアトムの世界（the Bit world and the Atom world）

コンピュータ上の情報世界と物理世界を構成の最小単位で象徴的に表現したもの。1990年代中頃、米国マサチューセッツ工科大学メディアラボの創立者で初代所長のNicholas Negroponteが情報世界と物理世界の界面の重要性を唱えた際に使われた。デジタル技術を活用した製品製造は、ビットの世界で表現された設計情報をアトムの世界で表現された製品に変換するプロセスであるとも言える。

第３の産業革命（Third Industrial Revolution）

デジタル技術とデスクトップ製造技術（3Dプリンティング等）の融合により進展しつつある新しい産業構造変革のこと。The Economist誌が2012年4月21日号の特集「Manufacturing and innovation」で提唱した。大企業の量産工場からユーザへの一方通行であった製品供給が、ネット上でのデザインデータの共有と必要に応じた個人製造というスタイルに変わりつつある。18世紀の英国における繊維産業の機械化を第1の産業革命、20世紀初頭のフォードによる大量生産の実現を第2の産業革命として対照させ、大きな産業構造の変革であると言われている。

知のコンピューティング（Intelligence 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技術を指す造語。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。

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。

コグニティブ・コンピューティング（Cognitive Computing）

IBMが提唱するコンピューティングの第3のパラダイム。第1は作表機の時代、第2はプログラム可能なシステムの時代、第3がコグニティブ・コンピューティングの時代。第3のパラダイムではシステムは経験から学習し、記憶し、仮説を立て、結果から再び学習する。自律的に新たなアイデアを想起するシステムの実現を目指して脳を模倣したSyNAPSEプロジェクトなどが進んでいる。

3.1 デバイス／ハードウェア

アンビエント・アジャイル・プラットフォーム（Ambient Agile Platform）*

多種多様な実世界（実空間）の情報を収集するために、空気のように（アンビエント）散在させるセンサネットワーク無線端末を、小型・低消費電力・低コストに、短納期で素早く（アジャイルに）提供し、実空間アプリケーションの実用化を促進する枠組みのこと。要素技術としては、製造後にプログラム可能なデバイス、デバイスの知識がなくてもサービス提供者がデバイスを使いこなせるソフトウェア環境、少量生産を低コストに実現する3Dプリンタ技術、異種デバイスの集積技術、小型化技術、極低電力技術等が考えられる。

極低電力ICT（Extreme Low Power ICT）

情報通信システムの低電力化の限界を打破し、エネルギー効率を極限まで追究するために、デバイスから回路・システムのみならず、ソフトウェアからサービスまでの広範な技術連携・融合により実現する電力技術のこと。デバイス自身を極低電力化してITの省エネに貢献（of IT）したり、極低電力情報デバイス等によって、照明、空調、物流等を最適化して、社会のグリーン化を促進（by IT）することが可能となる。

3.2 ネットワーク

エラスティックネットワーク（Elastic Network）*

弾力性や融通性のあるネットワーク。通信能力を柔軟に融通・制御可能とする新しいアーキテクチャやネットワーク制御方式を持つ。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、モデル化し、モデル化されたネットワークをソフトウェアにより制御する。

グリーンネットワーク（Green Network）*

低炭素化、低消費電力化を目指すネットワーク。デバイス単体での低消費電力化から、システム全体での低消費電力化に研究開発の流れが移りつつある。グローバルなコンソーシアムにおける、国際協調による研究開発が行われている。

フィールド指向ネットワーク（Field Oriented Network）*

ネットワークを適用するフィールドに存在する、情報通信の課題を発見し、解決することによって研究開発がすすめられるネットワーク。実世界情報を活用するM2M（Machine

to Machine）、IoT（Internet of Things）、CPS（Cyber Physical Systems）などの領域において、活発に活動が進んでいる。

3.3 ソフトウェア

プログラミングモデル（Programming Model）

コンピュータ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。

ソフトウェア工学（Software Engineering）

ソフトウェアの設計・構築・運用に関する工学的手法。対象となるシステムの要求定義から、設計、製造（プログラミングとテスト）、運用・保守にいたる開発プロセスの全範囲にまたがる。ソフトウェアの研究開発の主体は、スマイルカーブ（Smiling Curve）の両端にあたる付加価値の高い、要求分析・設計と運用・保守にフォーカスされる傾向にある。

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、インターネットを代表とするネットワーク上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ようになった。それ以前の利用形態と比べて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として一般向けに賃貸し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。

3.4 ロボティクス

リアルワールド（Real World）

産業用ロボットが製造現場で動作するためには、そのための環境を前もって構築していた。リアルワールドは、そのような目的遂行のための特別な変更を加えない状況のことを指す。リアルワールドでロボットが機能を提供するためには、時々刻々変化する動的環境を認識しなければならないし、対象物を操作するための制御系にも多くの制約が存在する。

サービスロボット（Service Robot）

一般生活に密着する応用に供せられるロボットのこと。ロボットが提供する機能を時間的・空間的に組み合わせて、サービスとして利用する。サービスの受け手は人並びに社会であり、サービスの受け手の多様性に適応することが必要である。

生活支援ロボット（Life Support Robot）

個々人の生活の中に入って活躍するロボットのこと。安全性が重視され、簡明な操作技術が重要である。さらに、社会に受容される制度も併せて作っていかなければならない。

3.5 知能／インタラクション

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。

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。

ヒューマンインターフェース（Human Interface）

人間とコンピュータなどの機械との間で情報のやりとりを実現するための技術。視覚、聴覚以外に触覚を使った人に対する新たな情報提示、音声やジェスチャによる効果的な情報入力技術の研究に加えて、人の創造性を引き出したり、共同作業を効果的に支援したり、災害時の効果的な避難誘導の手段を提供するなどといった社会的な文脈の取組みも包含している。

3. 6　データベース

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。

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。

データプロヴェナンス（Data Provenance）

データベース中のデータがどこから来たかといった情報も含めて管理しようとする考え方。製品のライフサイクル管理などにおいて物品の生産・製造から流通、廃棄にいたるまで追跡可能にするトレーサビリティの考え方をデータ管理に応用したもの。データの信頼性の向上を目指すものである。データプロヴェナンスは特に e サイエンス分野での取組みが重要といわれている。

3. 7　IT アーキテクチャ

社会システムアーキテクチャ（Social System Architecture）

金融や流通、公共サービスなどの社会システムの構造や実装、処理の流れなどを決定づける基本設計や設計思想のこと。よいアーキテクチャがあると、利用者や構築者にとって

システムがわかりやすく、見通しが良い。信頼性や効率の向上、拡張性なども期待できる。これからの社会システムはITを考慮したうえで設計しなくてはならないし、ITにおける技術を用いることによって社会システムの設計を行うことが可能になってきた。ITアーキテクチャと社会システムアーキテクチャが不可分のものになってきている。

ワークロード（Workload）

コンピュータの処理対象となる負荷のこと。コンピュータの当初の目的であった科学技術計算から企業における事務計算などのバッチ処理、在庫管理や生産管理などのトランザクション処理へと移ってきた。その後、コンピュータの利用の拡大に伴い、音声や画像、映像などのメディア・信号処理などのリアルタイム処理へと発展し、さらに近年では大量のWebや実世界データの処理を対象としている。社会の要求に応じて、多様な処理対象・処理形態、さらに時間的に変化するワークロードへの対応が必要になってきている。

CPSアーキテクチャ（CPS Architecture）

CPSを構築するうえで、基本的な考えとなる設計思想のこと。CPSはサイバーであると同時に物理的な世界を対象としており、両者の橋渡しが重要である。物理的な世界をモデル化してサイバーの世界に取り込むとともに、両者を一体化するためのアーキテクチャが重要である。

3.8 CPS

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。

センシング（Sensing）

外界の様々な情報を取得して、機械可読な形式に変換すること。さらにデータ収集が競争力の源泉であることから、様々な領域でのデータ収集を推進することが必要である。

アクチュエーション（Actuation）

環境や人間から抽出されたデータに基づいて、人間および環境、物質に働きかけることを指す。中でも人間の感覚に働きかけて人間の行動に直接的に作用するとともに、それらの物理的なインタラクションを共有するサイバーフィジカルシステムは、従来は困難であった人間支援を可能にする重要な研究開発領域である。

プロセッシング（Processing）

ハードウェアとしてのプロセッサとそのプロセッサで実行されるソフトウェアの組み合わせによるデータ処理・情報処理全般の機能。サイバーフィジカルシステムにおいては、ネットワークで結合されたサーバやクラウドと、センサネットノードが分担してプロセッシング機能を担う。サーバやクラウドでは収集されたデータの大規模・高速・高度処理が行われる。センサネットノードにおいては、データの入力･処理･加工やアクチュエーション機能の制御を行う。

3.9 CHS

CHS（Cyber Human Systems）*

ITが社会に深く浸透したため、もはやコンピュータシステムは人間・社会を系の一部

として含むものとして捉える必要がある。Cyber Human Systemsとは、こうしたサイバーと人間・社会が密接に影響を及ぼしあうシステムを指す。

ソーシャルコンピューティング（Social Computing）

コンピュータシステムが人の社会的振る舞いを媒介する技術。Facebookなどコミュニティ形成のためのソーシャルネットワーキングサービス、Wikipediaなど人々の相互作用を媒介してコンテンツを形成するソーシャルメディアが注目されている。プライバシーや情報の信頼性といった観点からの媒介のあり方や半構造化データの集積としての活用に関する研究が進んでいる。

行動モデリング（Behavioral Modeling）

人間の行動を、ある観点から投影、抽象化してコンピュータ上に記述して再現すること。モデリングは、行動の機能構造のモデル化とモデルのパラメータ同定により実現される。モデルを内包するシステムにおいて、人間観測からサービス提供までのフィードバックが短時間に可能になってきており、エネルギーの効率的利用に向けて行動変容を促すスマートハウス、消費者行動のモデリングにもとづくマーケティングなど多様なサービスに活用されはじめている。

ポリシー（Policy）

ITが提供するサービスやインフラの運用について、その方針や情報の取り扱いなどを規定したもの。統一的なポリシーの下でサービスの開発や運用を行うことで、様々な機能・非機能要件を保つことができる。プライバシー、セキュリティ、サービスの品質などは、そうした要件の重要な例である。

3.10 ビッグデータ

ビッグデータ（Big Data）

ITの社会への普及により生み出される膨大なデジタルデータそのものを指す。定量的な定義はない。コンピュータを使ったシステムやCPUを内蔵する機器やセンサーの類、人間の活動などが生成する様々なデータから成る。ビッグデータの特徴を、3V（Volume: 規模、Velocity: 生成速度、Variety: 多様性）あるいは、Veracity（あいまい性）を加え4Vで表すことが多い。経済的なインパクトに関してはマッキンゼーのレポート（2011）がある。2012年3月29日にオバマ政権がBIGDATA INITIATIVEとして大々的な取組みを発表したことで一躍脚光を浴びた。

ストリーム処理（Stream Processing）

センサーやtwitterなどのマイクロブログなど刻一刻と生成されるデータを対象として高速な検索処理などを行う技術。ストリーム処理は、従来のデータベース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、事前に登録された検索要求に対して入力されるデータを処理する。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。日本ではプリファードインフラストラクチャ社とNTTが、機械学習処理に特化したストリーム処理エンジンJubatus（ユバタス）を世界に先駆けてOSS公開している。

ソーシャルネットワーキングサービス（SNS: Social Networking Service）

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、Qzone（中国）や

CyWorld（韓国）、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、アラブの春での情報伝達など、社会に大きな影響を与える存在になっている。

MapReduce、Hadoop

MapRecude は複数のコンピュータを用いて大規模データ処理を行うためのプログラミングモデル。Google 社が関数言語 Lisp にある Map 関数と Reduce 関数の考え方を分散処理に応用した MapReduce としてリリースした。Hadoop はフリーソフトウェアの名称。MapReduce に触発されて、Apache ソフトウェア財団がリリースした。どちらもビッグデータ分析に大きな貢献を果たしている。

Key-Value ストア（Key-Value store）

データをキー（Key）と値（Value）の組み合わせで保存するデータベース、または、データベース管理システム。銀行などの大規模トランザクション処理で使われるリレーショナルデータベースシステムが主に集中的にデータを保存するのに対し、Key-Value ストアは複数のサーバや記憶装置上に分散してデータを保存するため巨大なデータストアが実現できる。Google 社の Bigtable、Amazon 社 Dynamo、Microsoft 社 Windows Azure Table Storage などが有名。

3. 11　人工知能

強い人工知能（Strong Artificial Intelligence）

人間のように考え、自律的に行動し成長する人工知能。正確な定義はできないが、人間と同様に自我意識を持ったり、プログラミングや発明などの創造的な知的作業を行う機械知性として捉えられる。発明家・人工知能研究者の Ray Kurzweil は著書の中で、機械知性が人間のそれを越える日が近いと予測した。遺伝子学、ナノテクノロジー、それにロボティクスの三分野の急速な進展がある一点で昇華して強い人工知能になるとしている。

IBM ワトソン（IBM Watson）

IBM が開発した人工知能コンピュータ。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。当初は Jeopardy! に特化した開発されたが、勝利後はヘルスケア分野でのデシジョンサポートシステムとしての応用に向けた開発が進められている。

3. 12　レジリエント ICT

ディペンダビリティ（Dependability）

提供するサービスが良質で信頼でき、人間と社会の活動が安心してそれに依拠できるという情報システムの性質。自然現象、経年劣化、設計ミス、操作ミス、システム不整合など、予測不能で偶発的に生じる物理的、人為的な障害原因の存在を前提として、いつでも正常にサービスできる可用性、正常なサービスを継続できる信頼性、ユーザや周辺に破局を及ぼさない安全性、システムに不適切な変更が生じない完全性、システムを容易に修復・改良できる保守性、を総合した概念として定義される。

情報セキュリティ（Information Security）

情報やシステム・サービスをその生産者、所有者、運用者、利用者が合意した意図のと

おりに利用しつづけることを保障すること。より具体的には、意図的な不正アクセス、データの盗用・改ざん・消去・記録などの不正利用や、システム・サービスの停止・拒否・不能・妨害などの様々な攻撃から、元々の情報やシステムを守る技術。半導体チップから回路、ネットワーク、システム、基本ソフトウェア、応用ソフトウェアなど様々なレベルでの実装が行われている。情報セキュリティ技術の発展はこのようなダークサイドとの終わりのない戦いの結果といえる。

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 1）検討の経緯

平成 23 年度に実施した俯瞰ワークショップを踏まえ、平成 24 年度は特任フェロー会議を中心に、電子情報通信分野の俯瞰区分、研究開発領域の検討を進めた。特に、IT アーキテクチャについては、デバイスからソフトウェアまで幅広い技術レイヤーを横断した議論が必要であることから、ワークショップを開催して俯瞰区分のスコープや研究開発領域を明確にした。

IT アーキテクチャワークショップの概要

日時：2012 年 8 月 27 日（月）１０時～１７時 30 分
場所：科学技術振興機構　東京本部別館　4 階 F 会議室
参加者（敬称略）
特任フェロー：統計数理研究所　丸山宏、三菱商事　岩野和生、芝浦工大　新井民夫（AM のみ）
特別参加：中央大学　竹内健、東京大学　中村宏、南山大学　青山幹雄、NEC　妹尾義樹
CRDS: 丹羽邦彦、茂木強、的場正憲、鈴木慶二、高島洋典
アジェンダ：　Ⅰ．総論…10:00~12:30
Ⅱ．午後の進め方…13:30~14:00
Ⅲ．グループワーク…14:00~16:00
Ⅳ．まとめ…16:00~17:30

午前中の議論ではアーキテクチャを、界面（どこを対象にするか）とドライバー（変革の推進力）という二つの視点から整理することとし、最終的には以下の形で合意した。

○アーキテクチャには少なくとも３つのレベル
　社会 / ビジネスと IT の界面
　サービスとインフラの界面
　サイバー・フィジカルの界面
○新しいアーキテクチャがもたらすソフトウェアとハードウェアのインプリケーション
○３つのドライバー
　ワークロード
　テクノロジ
　IT への社会的期待（説明責任、電力）

午後のグループワークは次のマトリクスにおいて特に注目すべきと判断した○印の領域について行った。

	ワークロード	テクノロジ	社会的期待	
社会・ビジネスの界面			○	→ A グループ
サービス・IT インフラの界面		○		→ B グループ
サイバー・フィジカルの界面	○	○	○	→ C グループ

各グループでは以下のような議論が行われた。

○ A グループ（社会システムアーキテクチャ）

IT だけで考えられるものではない。複数の社会サービスが統合することによって、社会コストを大幅に低減することができる。そのためにはまず見える化が大事。その次に、IT 以外も含めた制度設計などを考える。サイドエフェクトに関しても、モニタリングの仕組みがあるだろう。見える化は難しいが、やらなければならないこと。

○ B グループ（サービス・IT インフラ）

リコンフィギュラブルデータセンターという概念。学習しながら自らを変えていくもの。デバイスのレベルでも、水平分業への見直しが起こりえる。オールマイティーの IT インフラはあり得ない。サービス、アプリを調べて、特定の用途への切り込みと割り切りの戦略が必要。さらに、アーキテクチャとしてどこを押さえるか、どこがコントロールポイントか、という視点を持ちたい。

サービスのレイヤーからの要求である電源の信頼性やワークロードの変化、使われ方などからの IT インフラへの要求を洗い出すべき。たとえば、状況に応じてトレードオフを設定するようなこと。知財も重要な観点である。

○ C グループ（サイバー・フィジカル）

アーキテクチャとしてフィジカルな要素を取り込むことが必要。そこで、物理世界を投影してサイバー世界に取り込むことが大きな課題。一方で、逆にサイバーから物理世界への働きかけも記述しなければならない。双方向のモデリングである。またダイナミックなトレードオフ、フォーカスの移動などが考えられる。こういうことをきちんと定義することは意味がある。フィジカルとサイバーの界面の定義。

最後の全体まとめでは、俯瞰区分において考慮すべき以下の重要事項を指摘し、これらの重要事項を踏まえて俯瞰報告書の執筆を進めることとした。

① IT アーキテクチャは、社会アーキテクチャと不可分なものとして設計しなければならないこと

②次世代 IT アーキテクチャは、多様化する（ロングテール化する）ワークロードに柔軟に対応できるものでなければならないこと（e.g., "Built-to-Workload" を可能にするアーキテクチャ）

③ CPS アーキテクチャのコアは､動的に変化する物理世界モデル（影武者）であること。特に、このモデルは要件の変化と、物理世界の状態の変化に柔軟に適応し、進化できるものであること。

（付録2）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

■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】
黒田　忠広　慶應義塾大学　理工学部電子工学科　教授
高宮　　真　東京大学　大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）　准教授
中野　義昭　東京大学　先端科学技術研究センター　所長・教授
中村　　宏　東京大学　情報理工学系研究科　システム情報学専攻　教授

■ネットワーク

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【総括責任者】
今泉　英明　トヨタ　IT開発センター　開発・調査部　シニアリサーチャー
桐葉　佳明　日本電気株式会社　クラウドシステム研究所　技術主幹
鈴木　　誠　東京大学　先端科学技術センター　助教

■ソフトウェア

丸山　　宏　統計数理研究所　副所長、CRDS特任フェロー【総括責任者】
青山　幹夫　南山大学　情報理工学部　ソフトウェア工学科　教授
小野寺民也　日本アイ・ビー・エム株式会社　東京基礎研究所　ミドルウェアＳＷ＆システムズ担当部長

■ロボティクス

新井　民夫　芝浦工業大学　工学部　教授、CRDS特任フェロー【総括責任者】
大場光太郎　産業技術総合研究所　知能システム研究部門　副部門長
松日楽信人　芝浦工業大学　工学部機械機能工学科　教授
油田　信一　芝浦工業大学　工学部電気工学科　教授

■知能／インタラクション

石塚　　満　東京大学　情報理工学系研究科　教授【総括責任者】
石田　　亨　京都大学　情報学研究科　社会情報学専攻　教授
黒橋　禎夫　京都大学 大学院情報学研究科 教授
橋田　浩一　産業技術総合研究所　知能システム研究部門　上席研究員
美濃　導彦　京都大学　副理事、学術情報メディアセンター教授
山口　高平　慶應義塾大学　理工学部　管理工学科　教授

■データベース

西尾章治郎　大阪大学大学院情報科学研究科　教授、CRDS特任フェロー【総括責任者】
天笠　俊之　筑波大学　システム情報系情報工学域　准教授
石川　佳治　名古屋大学　情報基盤センター　教授
川島　英之　筑波大学　システム情報系情報工学域　講師
北川　博之　筑波大学　システム情報系情報工学域長　教授

高橋　克己　　ＮＴＴ　ｾｷｭｱﾌﾟﾗｯﾄﾌｫｰﾑ研究所　情報ｾｷｭﾘﾃｨﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄﾏﾈｰｼﾞｬｰ
原　　隆浩　　大阪大学大学院　情報科学研究科　准教授
森嶋　厚行　　筑波大学大学院　図書館情報メディア研究科　准教授

■ IT アーキテクチャ

丸山　　宏　　統計数理研究所　副所長、CRDS 特任フェロー【総括責任者】
青山　幹夫　　南山大学　情報理工学部　ソフトウェア工学科　教授
新井　民夫　　芝浦工業大学　工学部　教授、CRDS 特任フェロー
瀬尾　義樹　　日本電気株式会社　C&C イノベーション推進本部　イノベーションプロデューサー
竹内　　健　　中央大学　理工学部　電気電子情報通信工学科　教授
中村　　宏　　東京大学　情報理工学系研究科　システム情報学専攻　教授

■ CPS（Cyber Physical Systems）

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】
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
澤田　和明　　豊橋技術科学大学　電気・電子情報工学系　教授
篠田　裕之　　東京大学　情報理工学系研究科　システム情報学専攻　准教授
清水　　徹　　ルネサスエレクトロニクス株式会社　技術開発本部　技術企画統括部　主管技師長

■ CHS（Cyber-Human Systems）

丸山　　宏　　統計数理研究所　副所長、CRDS 特任フェロー【総括責任者】
生貝　直人　　大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構　新領域融合研究センター　特任研究員
岡田　仁志　　国立情報学研究所　情報社会相関研究系　准教授
中山浩太郎　　東京大学　知の構造化センター　特任講師
松尾　　豊　　東京大学大学院工学系研究科　総合研究機構　准教授
持丸　正明　　産業技術総合研究所　デジタルヒューマン工学研究センター　センター長

■ビッグデータ

西尾章治郎　　大阪大学、CRDS 特任フェロー【総括責任者】
大石　雅寿　　国立天文台　天文データセンター　センター長　准教授
鬼塚　　真　　NTT ソフトウェアイノベーションセンタ　主幹研究員　特別研究員
佐藤　真一　　国立情報学研究所　コンテンツ科学研究系教授
高木　利久　　東京大学大学院　新領域創成科学研究科　教授
山西　健司　　東京大学　情報理工学系研究科　数理情報学専攻　教授

■強い AI

丸山　　宏　　統計数理研究所　副所長、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長 / 情報社会相関研究系　教授
宮尾　祐介　　国立情報学研究所 国立情報学研究所コンテンツ科学研究系　准教授

■レジリエント ICT

古原　和邦　　産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター主幹研究員【総括責任者】

片下　敏宏　　産業技術総合研究所 セキュアシステム研究部門　研究員
須崎　有康　　産業技術総合研究所 セキュアシステム研究部門　主任研究員
南谷　　崇　　キヤノン株式会社 総合 R&D 本部 顧問
吉岡　克成　　横浜国立大学　学際プロジェクト研究センター　環境情報研究院　准教授

（付録３）索引

3D プリンティング…… 319
3V(Volume, Velocity, Variety) …… 257
3 次元集積 …… 47
3 次元プリンタ …… 44
Advanced Persistent Threat(APT) …… 296, 303
ALMA 望遠鏡 …… 269
ATM …… 185
BYOD(Bring Your Own Device) …… 295
CPS …… 13, 70, 198, 204, 323
CPS アーキテクチャ …… 183, 198, 323
Cyber-Human Systems …… 224, 323
DNA シーケンシング技術 …… 208
Do Not Track 技術 …… 240
ETC …… 185
FPGA …… 44
Hadoop …… 83, 325
IBM Watson …… 143, 282, 325
IoT …… 70, 204
IT メディア …… 274
KDD(Knowledge Discovery and Data Mining) …… 255
Key-Value ストア …… 325
k- 匿名性 …… 171
Liked Open Data …… 142
M2M …… 70, 204
MapReduce …… 83, 250, 325
mHealth(Mobile Health) …… 208
Open Flow …… 62, 193
P3P 技術 …… 240
Personal Data Store …… 131
Physical Unclonable Function …… 308
QA …… 143
RAID …… 295
ROBOCUP …… 99
Robotics Challenge …… 99
Secure Deletion …… 297
Self Organizing Network …… 61
Semantic Web …… 142
Software-Defined Network …… 58, 60, 303
Suica …… 185
Super Haptics …… 213
Wikipedia …… 176, 233
アーキテクチャ …… 182
アーバンチャレンジ …… 96
アクチュエーション …… 212, 323
アジャイル …… 42
安全性検証・認証 …… 113
安全設計 …… 114
アンビエント …… 40, 42, 213
アンビエント・アジャイル・プラットフォーム …… 40, 42, 43, 320
一人称ビジョン …… 121, 123
一般常識知識 …… 235
一般的知識 …… 235
物聯網 …… 198, 204
エスノグラフィー …… 228
エッジ・ヘビー・データ …… 200
エラスティックネットワーク …… 58, 60, 320
オートノミック・コンピューティング …… 298
オープンコースウェア …… 244
オープンデータ …… 244, 321
オンサイトモニタリング用センサ …… 206
オンチップ・ネットワーク …… 48
オントロジー …… 142
画像映像処理 …… 133
仮想化技術 …… 192
仮想空間アプリ …… 42
環境埋込型ロボット …… 227
関数型暗号 …… 170
観測技術 …… 228
機械学習 …… 141, 229, 322
偽造防止技術 (PUF) …… 308
基盤レイヤー …… 2, 16
キュレーション …… 158
共存ロボット技術 …… 104, 106
組込みソフトウェア …… 76
クラウドコンピューティング …… 192, 321
クラウドソーシング …… 176, 322
グラフマイニング …… 164
グランドチャレンジ …… 96
グリーンネットワーク …… 58, 65, 320
クリエイティブ・コモンズ・ライセンス …… 244
形式的手法 …… 296
研究用データセット …… 275
検索可能暗号 …… 170
合意形成 …… 187
公開データ …… 270
公共セクター情報の再利用指令 …… 244
高信頼コンピューティング …… 297
行動ターゲティング広告 …… 240
行動モデリング …… 324
コードサイン …… 297
極低電圧回路 …… 48
極低電力 ICT …… 47, 320
コグニティブ・コンピューティング …… 143, 320

コグニティブ無線…… 61
国民ID …… 186
孤児作品 …… 244
故障忘却型コンピューティング …… 292, 297
コホートプロジェクト…… 263
サービスインテグレータ …… 112
サービス構造決定技術…… 103
サービスコンピューティング…… 76
サービスロボット…… 89, 321
災害用ロボット …… 89
サイドチャネル攻撃 …… 308
サイバーシステム…… 319
差分プライバシー…… 171
サポートベクトルマシン …… 141, 258
産業用ロボット …… 89, 95
サンドボックス …… 297
シーケンサ…… 263
システムインテグレーション…… 96
自然言語処理…… 133
実空間アプリ …… 42
質問応答 …… 135, 235
社会アーキテクチャ …… 182
社会システムアーキテクチャ…… 185, 322
社会デザイン…… 187, 204
集合知…… 233, 235, 320
自由利用ライセンス …… 244
情報セキュリティ …… 325
触覚 …… 213
触覚インターフェイス…… 121, 123
人工知能 …… 23, 141, 280
新世代ネットワーク …… 58
スーパーコンピュータ…… 53
ストリーム処理 …… 84, 165, 250, 324
ストリームマイニング…… 165
スモールコア・サーバー…… 61, 192
生活支援ロボット……110, 321
制御システム攻撃…… 296
生体センシング …… 206
セキュリティ …… 313
センサデータベース …… 152
センサネット…… 42, 218
センサネットワーク通信…… 220
センシング…… 206, 323
戦略的新領域レイヤー…… 2, 13
ソーシャルeサイエンス…… 129
ソーシャルコンピューティング …… 224, 233, 324
ソーシャルソーシング…… 176, 322
ソーシャルネットワーキングサービス …… 233, 234, 324
ソーシャルメディア …… 233, 234
ソフトウェア工学…… 74, 76, 321
第3の産業革命 …… 319
大規模センサネットワーク …… 220
知のコンピューティング…… 15, 319
重複除外（Deduplication）…… 296
著作権データベース …… 245
強い人工知能…… 289, 325
極低電力ICT…… 47, 320
ディペンダビリティ …… 313, 325
データ・ポータビリティの権利 …… 239
データ収集…… 204
データ統合技術 …… 251
データ認知科学 …… 129
データプロヴェナンス…… 158, 322
データ保護規則 …… 239
データ保護指令 …… 239, 240
データマイニング…… 141, 255, 322
デザインデータ …… 319
デジタルヒューマンモデリング …… 226
テレプレゼンス …… 121, 123
統合的人工知能 …… 282
ドメイン特化言語…… 85
人間・社会モデリング…… 224
人間感覚アクチュエーション…… 212
人間機能モデリング …… 228
人間行動アクチュエーション…… 214
認知科学…… 129
ノーマリーオフコンピューティング…… 49, 219
バイオインフォマティシャン…… 263
パターンデータ …… 133
パターン認識…… 133
光ネットワーク …… 58
ビッグデータ …… 14, 248, 257, 324
ビットとアトムの世界…… 319
秘密計算 …… 170
秘密分散 …… 170
ヒューマンインターフェイス…… 121, 229
ヒューマンインタラクション…… 121
ヒューマンエージェントインタラクション（HAI）…. 121, 123
ヒューマンロボットインタラクション（HRI）…… 121, 123
標的型攻撃…… 303
ファブラボ…… 44
フィールド指向ネットワーク…… 58, 70, 320
フェアユース…… 244
深い意味理解…… 282
不確実データ …… 158
不整備環境…… 96
プライバシー強化技術…… 240
プライバシーの権利章典 …… 239
プライバシー保護法制…… 239
プラットフォーム…… 104, 105, 204
ブレインマシンインターフェイス（BMI）…… 121, 124
プログラミングモデル…… 74, 83, 321

プロセッシング ····· 218, 323
プロセッシング・インターフェイス ····· 219
分散データベース管理 ····· 250
ボットネット ····· 303
ポリシー ····· 224, 324
マイクロブログ ····· 233
マルチテナントクラウドコンピューティング ····· 295
マンマシンインターフェース ····· 110
無線センサノード ····· 42
メニーコア・プロセッサ ····· 49
モバイルコンピューティング ····· 84
モバイルデータベース ····· 152
ユーザビリティ ····· 121, 124
ライフログサービス ····· 239
ランタイム ····· 74, 83
リアルワールド ····· 95, 321
レジリエンシー ····· 186, 313, 326
レジリエント File System(ReFS) ····· 296
レジリエント ICT ····· 25, 292
レスキューロボット ····· 99
ロボットカー ····· 97, 98
ロボットコンテスト ····· 97
ロボット操作技術 ····· 110
ワークロード ····· 183, 191, 323
ワイヤレス電力伝送 ····· 214
ワイヤレスネットワーク ····· 58
忘れられる権利 ····· 239

（付録 4）研究開発の俯瞰報告書 （2013 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-FY2012-FR-03）

俯瞰区分	研究開発領域
化石資源エネルギー	低品位・未利用固体炭素資源の革新的な改質転換・輸送・利用技術（短期）
	メタンハイドレート利用技術（中長期）
	超高温材料と伝熱技術（中長期）
	革新的電気化学的反応器の基盤技術（中長期）
	超高効率固体酸化物形燃料電池（短期）
	負荷運用性に優れ CO_2 の大幅低減が可能な高効率石炭火力発電技術（短期）
	劣質・未利用固体炭素資源を使用した高度製銑技術（中長期）
	吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒（中長期）
	石油化学品の革新的製造プロセス（中長期）
	次世代型バイオ燃料（中長期）
再生可能エネルギー	浮体式洋上風力発電システムの大規模普及に向けた革新的技術（短期）
	バイオマスエネルギー増産加速化のための生物機能解析基盤技術（中長期）
	地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術（短期）
	超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術（中長期）
	未利用温泉エネルギーによるバイナリー発電システム（短期）
	高温地熱エネルギー革新的利用技術（中長期）
	太陽熱利用の革新的技術・システム（短期）
エネルギー利用技術・システム	低コスト・高効率燃料電池（短期）
	次世代二次電池（中長期）
	高効率ガソリンエンジン（短期）
	中低温熱利用基盤技術（短期）
	エネルギーキャリア基盤技術（短期および中長期）
	再生可能電力による化学品生産技術（中長期）
	次世代エネルギーネットワーク基盤技術（短期および中長期）
	電力国際ネットワーク基盤技術（中長期）

2．ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2012-FR-04）

俯瞰区分		研究開発領域
ヒトの理解につながる生物科学		ゲノム科学
		構造生物学
		分子・細胞生物学
		ケミカルバイオロジー
		発生・再生科学
		脳・神経科学
		数理情報生物学
		物理生物学（生物物理学）
医療・福祉	疾患	悪性新生物
		循環器・代謝疾患
		感染症
		免疫疾患
		精神・神経疾患
		疫学
	医療技術	医薬品創薬および医薬品開発
		医療機器開発
		再生医療
		医療 IT
		医療技術評価
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
		被験者保護
		研究不正
		リテラシー・アウトリーチ
食料・バイオマス生産		作物増産技術
		持続農業
		機能性作物
物質・エネルギー生産		バイオ燃料
		化成品原料
		医薬品・食品原料
		資源回収・リサイクル
環境保全		微生物生態・環境ゲノミクス
		動物生態
		植物生理・生態
		生物多様性

3．電子情報通信分野 （CRDS-FY2012-FR-05）

俯瞰区分	研究開発領域
デバイス／ハードウェア	アンビエント・アジャイル・プラットフォーム
	極低電力 ICT 基盤技術
	ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術
ネットワーク	エラスティックネットワーク
	グリーンネットワーク
	フィールド指向ネットワーク
ソフトウェア	ソフトウェア工学
	プログラミングモデルとランタイム
ロボティクス	リアルワールドにおける機能提供技術
	QoL を向上させるためのロボット技術（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）
	ロボット技術の社会的受容
知能 / インタラクション	ヒューマンインターフェイス・インタラクション
	データ認知科学またはソーシャル e サイエンス
	言語、メディア理解
	知能システムの基礎
データベース	モバイル・センサデータベース
	トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術
	グラフ・ストリームマイニング
	データのセキュリティとプライバシー
	ソーシャル・クラウドソース
IT アーキテクチャ	社会システムアーキテクチャ
	柔軟なアーキテクチャ
	CPS アーキテクチャ
CPS （Cyber Physical Systems）	センシング
	アクチュエーション
	プロセッシング
CHS （Cyber-Human Systems）	人間・社会のモデリング
	ソーシャルコンピューティング
	ポリシー（プライバシー）
	ポリシー（著作権）
ビッグデータ	大量データ処理プラットフォーム技術
	データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術
	ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
	天文科学分野におけるビッグデータ
	IT メディア分野におけるビッグデータ
人工知能	統合的人工知能
	強い人工知能

レジリエント ICT	レジリエント・システムソフトウェア
	レジリエントネットワーク
	レジリエントデバイス
	レジリエント情報社会

4．ナノテクノロジー・材料分野 （CRDS-FY2012-FR-06）

俯瞰区分		研究開発領域
グリーンナノテクノロジー	エネルギーを創る	太陽電池
		人工光合成
		燃料電池
		熱電変換
	エネルギーを運ぶ・貯める	蓄電デバイス
		パワー半導体デバイス
		高温超伝導送電
	エネルギーを節約する	グリーンプロセス触媒
		ナノ組織構造制御材料
	環境を守る	元素戦略・希少元素代替技術
		分離機能材料による水処理
		放射性物質除染、減容化
バイオナノテクノロジー		生体材料（バイオマテリアル）
		ナノ薬物送達システム（ナノ DDS）
		ナノ計測・診断デバイス
		バイオイメージング
ナノエレクトロニクス		超低消費電力ナノエレクトロニクスデバイス
		異種機能三次元集積チップ
		センシングデバイス・システム
ナノテクノロジー・材料科学技術基盤		超微細加工技術
		ＭＥＭＳ／ＮＥＭＳ
		ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化）
		分子技術
		界面制御
		空間・空隙構造制御
		バイオミメティクス
		ナノ計測
		物質・材料シミュレーション
		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-FY2012-FR-07）

俯瞰区分	研究開発領域
意思決定とリスクマネジメント	意思決定
	リスク概念と尺度
	統合・複合リスク・その他リスク
	市場リスク
	信用リスク
	リスクマネジメントの数値計算
モデリング	先端的数理モデリング
	エージェント・ベース・モデルとミクロ・マクロ連携
	統計モデル
	動学的経済モデルと統計整備
	データ同化：新しい戦略分野の開拓
	データマイニング・機械学習
	モデル合成による社会課題解決の展望
	モデルの正則化・最適化
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価
	モデルの評価技術
制御	学習制御／適応制御
	ロバスト制御
	最適制御／予見制御／予測制御
	分散制御／分布制御
	合意・同期・被覆制御
	大規模・ネットワーク制御
	確率システム制御
	故障検出／信頼性設計
	制御の基盤としてのシステム理論
最適化	基礎分野としての最適化
	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

■研究開発の俯瞰報告書作成メンバー■

岩野　和生	上席フェロー	
丹羽　邦彦	上席フェロー	（2012年９月まで）
新井　民夫	特任フェロー	
桜井　貴康	特任フェロー	
中野　義昭	特任フェロー	
西尾　章治郎	特任フェロー	
丸山　宏	特任フェロー	
森川　博之	特任フェロー	
嶋田　一義	フェロー	
鈴木　慶二	フェロー	
高島　洋典	フェロー	
高野　良太朗	フェロー	（2012年12月まで）
的場　正憲	フェロー	
茂木　強	フェロー	

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-FR-05

研究開発の俯瞰報告書

電子情報通信分野（2013年）

Panoramic View of the Electronics, Information and Communication Field (2013)

平成25年3月　March 2013

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
Electronics,Information and Communication 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　K's 五番町
電　　話 03-5214-7481
ファックス 03-5214-7385
U　R　L http://crds.jst.go.jp/

© 2013　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.

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

CT CTC G CC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTC G CC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTC G CC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTC G CC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

