3. 俯瞰区分と研究開発領域

3.1 知のコンピューティング

知のコンピューティングとは、知の創造を促進し科学的発見やその社会適用を加速するなど「知の活用の変革」を推進することである。知のコンピューティングにより、人々のくらしや社会システムの質的変革が促され、人と機械が共創した、より高度な知的社会が実現される。知のコンピューティングの開発により次のような効果が得られることを期待する。

・知の発見と伝播・活用を促進し、科学の発展と社会への浸透と富の再配分を加速
・最先端知識や技術の社会的適用の促進を図ることによる社会サービスの質の向上
・新しいソーシャルコンピューティングの開拓による発見の加速
・新しいコンピューティングパラダイムの開拓

知のコンピューティングを構成する研究開発領域を図 3-1-1 に俯瞰する。上段の 3 領域、①知の集積・増幅・探索、②予測、発見の促進、③知のアクチュエーションは、知のコンピューティングの最終的な目的となる領域を示す。④知のプラットフォームは、集積した知、生み出された価値を社会に還元して、共有・普及・促進を加速しやすくするためのエコシステムである。⑤ ELSI と社会適用は、知の集積・増幅・検索・予測・発見・アクチュエーションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。下段の 3 領域、⑥人文・社会科学に学ぶ、⑦生命科学に学ぶ、⑧情報科学に学ぶは、基盤レイヤーに含まれる学術分野を知のコンピューティングの文脈で整理整頓したものである。本報告書では基盤レイヤーは記述しないため、その中より特に進展の目覚ましい研究開発領域として、認知科学、脳情報システム、知的インタラクションの 3 領域を取り上げてここに記述した。

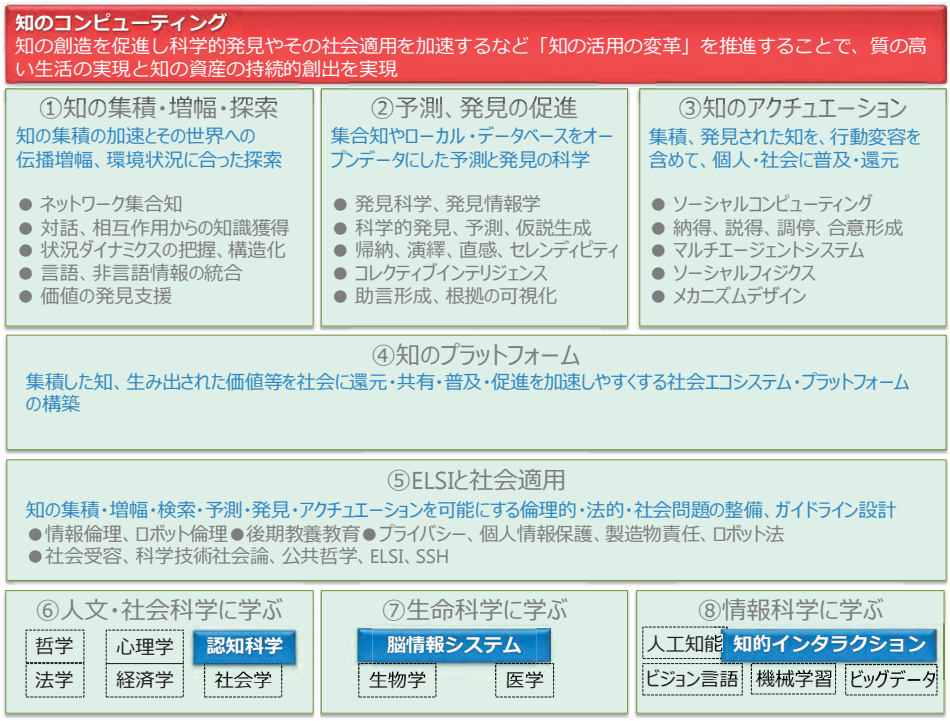

図 3-1-1　知のコンピューティングの俯瞰図

知のコンピューティングは 2013 年に CRDS が Wisdom Computing Summit にて提唱した新しい研究領域である。知のコンピューティングで扱う「知」とは何かについてはさまざまな観点でさまざまな議論があろう。情報が「心のはたらきや心理状態に変化を与えるもの」[i] であるとすると広義には「情報」に含まれる。ここでは、「知」とは、そのうち、「人間や集団の意思決定に影響を与えるもの」と考えることにする。DIKW（Data-Information-Knowledge-Wisdom）モデル[ii] では、データ、情報、知識を階層的に定義しているが、「知」や「情報」は表現形にはよらず、それらと変化を与えられる対象との相互作用によって認識されるものである。したがって、データから情報を抽出し、さらに新たな知見を知識として抽出するビッグデータや人工知能をはじめとする、表現形に関する既存の研究領域に強く依存する。知のコンピューティングは、その上で、人々の意思決定によりよい影響を与えるために、「知」をコンピューティング可能なものとして定式化することを狙う。

知のコンピューティング特有の「知」の定式化に関しては、新しい研究領域であり、現時点ではわが国の国際的な競争力を判断することは不可能である。しかしながら、上述したように基盤となる研究領域においては、例えば、大規模データ処理解析基盤、言語の深い意味理解、映像による意図理解、仮説生成と発見科学、合意形成とメカニズムデザイン、脳情報システム、ヒューマンロボットインタラクション、ネットワークロボットなど日本の強みといえるものも多い。

i） 安西祐一郎、心と脳―認知科学入門、p32、2011
ii） Curt Swindoll, "Redefining Fundraising – Data", 2011, http://www.pursuant.com/blog/redefining-fundraising-data/

3.1.1　知の集積・増幅・探索

（1）研究開発領域の簡潔な説明

急速に発展する情報ネットワーク社会の中で、変容していく知を、人工知能技術、人間・エージェント・インタラクション、コミュニティー・コンピューティングを総合して捉え、増幅し、共有し、体系化し、再利用するためのプロセスを支援するシステム構築のための研究開発課題である。

（2）国内外における研究開発の動向

［背景と意義］

行動の資源となる知は、個人ごと、コミュニティーごとに異なるばかりでなく、テクノロジーの発展とともに急速に変容している。そのように流動性・多様性の高い知を捉え、行動に結び付け、共有し、さらに競争力のあるサービスに結び付けていくことは容易ではない。中でも、価値に着目した取り組みへの期待は大きい。社会にはいろいろな価値が錯綜し、個々人や社会が自分のホームグラウンドや目標を定めることも大変困難になってきた。価値は暗黙性が高く、日常雑事の背後に埋もれてしまい、価値に気づくべき時には気づかず、かなりの時間が経過した事後になって初めて気づくことも多い。個々人にとっても社会にとっても、他者の価値に気づかないことは視野を広げるチャンスを失うばかりではなく、争いの原因になりかねない。構成員が暗黙裏に共有している価値に気づかないことは社会にとってはチャンスを失うこととなり、大きな損失である。価値のある知であるほどその存在は暗黙的である。達人の知のように必ずしも明文化されない感覚として保有されている場合もあれば、多くの人が分散して有しており、集合知プロセスを働かせたとき初めて顕在化してくるものもある。そのような知をタイムリーに捉え、多くの人が理解できるように増幅し、共有可能にして、体系化し、コミュニティーで再利用することを可能にするための強力な支援技術が必要である。

［これまでの取り組み］

知のプロセスを捉え、人工システム化する試みは 60 年以上前から人工知能研究で取り組まれてきている。これまでの人工知能研究で、記号化された知への取り組みについては、適用範囲と限界についてはかなり解明されてきたと言える。他方、社会に新たな価値をもたらす知の活用に取り組むためには、記号化される以前の主観的な段階の知（原初知）や、コミュニティーの中に浅く広く分散する知（集合知）も視野に入れることが必要である。

価値に注目した本格的な科学技術の取り組みはまだ行われていない。知識マネジメントは、価値の共有と強化に関わるものであるが、ビジネス的価値とそのビジネスプロセスへの実装に焦点が置かれており、一般市民レベルは視野の外に置かれている。サービス工学は、サービス消費者の要望に応えるためのサービス提供の科学技術を目指したものであるが、そもそもサービス消費者自身が自分の価値をどのように構成し、発展させていくかというサービス消費者の立場は所与のものとして位置づけられている。価値も人工物によって媒介される価値に焦点が置かれている。CSCW（Computer Supported Collaborative Work）分野では、組織における価値の長期的な醸成などソーシャルコンピューティング

における価値の役割に注目した招待講演や研究発表が徐々に増え、基礎的な研究基盤が構築されつつある。

データサイエンスは、ネットワークの出現で利用可能になった膨大なデータ資源から価値を導出するという点で関わりが深いが、主として所与の価値基準に基づくデータからの法則発見に重点が置かれ、価値そのもののダイナミズムの支援という観点は乏しい。人工知能研究は情報の知的処理に関わる研究分野であり、知のプロセスの背後にある価値とも関わりは深いが、従来研究は「知能」により重点が置かれ、価値とより深く関わる「心」についての取り組みは少なかった。認知神経科学は価値に関わる脳機能解明という観点からは本研究開発領域の科学的基礎を与えるものとして位置づけられる。認知神経科学で得られつつある基盤の上での価値のダイナミズム支援のテクノロジー開発が本研究課題の中心的関心事となる。

原初知や集合知への取り組みは、ネットワーク上のビッグデータの活用、各種センサーとアクチュエーターの普及、認知神経科学の進展によってはじめて可能になった。これらを統合して、原初知や集合知まで含めた知のプロセスを強化する情報技術への本格的な取り組みはまだ始まっていない。

［今後必要となる取り組み］

人工知能研究での取り組みのように、基本的にすべての知のプロセスを人工システムによって実行することを目指す必要はない。人間と人工知能（エージェント）の混在した、人間・エージェント・ハイブリッドコンピューティングの枠組みをとることにより、人工システムによるコンピューティングでこれまで視野に入らなかった感覚や価値など暗黙性の高い知の次元を視野に入れることが重要である。

原初知と集合知がどのように形成されるか解明し、そのプロセスを強化する情報技術の研究開発が望まれる。知のもたらす価値に注目した取り組みが有望であると考えられる。ヒューマン・コンピューティングの枠組みの中から、インタラクションの中からの価値創出、集合知を用いた価値発見、実践知に焦点を当てた取り組みを総合するアプローチが有望である。データに対して知的プロセスを適用すれば、価値が生まれ、逆にデータと価値を与えると､その価値を引き出すための知的プロセスが推定されるという図式を用いれば、ヒューマン・コンピューティングにより、データの背後にある価値を顕在化させ、データからどのようにしてその価値を導出できるかを推定することで、知的プロセスに迫る。知的プロセスの適切性は、そのプロセスを新たなデータに適用し、価値を算出し、それを人間の判断と比較する。おおむねこのような考え方で､知のプロセスを逆算することにより、価値への早期の気づきを捉え、相互に理解可能なものとし、互いの価値を調整して、サービスや社会システムに発展させていく価値のダイナミクスを支援する情報技術の研究開発を行う。知のもたらす価値の発見、増幅、共有、体系化、再利用に関わる既存の支援技術を統合して一つのシステムにまとめあげる統合的なアプローチをとる必要がある。

価値の発見支援：属人性が高く、主観に依存した価値発見のプロセスそのものを顕在化させ、その支援技術を開発する。ワークショップの手法を用いて参加者の価値を顕在化させつつ、グループの価値を作り上げていくこと、抽象的な題材を具体化して参加者が当事者意識で議論に参加できるようにすること、などが必要である。価値、および、その価値

が顕在化する事例をセットにして蓄積する。

価値の増幅支援：ワークショップ討論を通して顕在化される参加者の暗黙的な価値表現を捉え、それを具体化し、具体的なイメージにして他者にもわかるようにする。参加者が暗黙裏に供した「価値を的確に言い当てる」技術の開発はチャレンジングであるが、本研究開発領域において特に有効である。

価値の共有支援：共感を呼ぶイメージ提示が価値の共有には不可欠である。第 1 人称視点による主観の共有を支援する。

価値の体系化支援：価値の客観的側面と主観的側面を整合させて、さまざまな視点からの価値を統合するプロセスを支援する。

価値の再利用支援：価値を事例から分離して、新しい事例に適用したとき、同様の価値が生じるようにする。

(3) 注目動向

［新たな技術動向］

非言語コミュニケーションまで視野に入れて人と人とのコミュニケーションの深部に立ち入った分析を行い、感性や知恵に迫ろうという取り組みが増えている。例えば、オノマトペ（擬音語）に注目した表現の解明 [1]、スキルサイエンスなどがある。藤波努らのスキルサイエンスプロジェクト [2] は、身体に反映された知識の表現であるスキルに注目し、その解明に取り組んでいる。回想法という手法を用いた記憶と身体活動の関係の解明も興味深い。慶應義塾の諏訪正樹もからだメタ認知という手法を用いて身体に記憶された運動からの知の解明 [3] に取り組んでいる。最近になって、これが、ビッグデータに支えられた本格的な価値創造の取り組みに結びきつつある。

［注目すべきプロジェクト］

インタラクションからの暗黙知の発見については次のようなプロジェクトが注目される。MIT Media Lab の Center for Future Storytelling[4] では、物語に着目して、コミュニティー、経験、創造性などに関わる知恵の増幅に取り組んでいる。Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences[5] では脳の認知機能の解明に取り組む有力な研究チームを擁している。柏野牧夫らの IIPI（Implicit Interpersonal Information）の研究 [6] では、人間同士の円滑なコミュニケーションに必要不可欠なソーシャルシグナルとその認知プロセスとの関わりを詳細に分析している。開一夫らのグループでは、乳児の発達の過程に注目して教える / 教えられることのできるペダゴジカルマシン [7] の開発に取り組んでいる。石黒浩らの存在感メディアの研究 [8] では、人間の存在感を遠隔に伝える研究を通して、人間の持つ価値に迫ろうとしている。メディアレベルでは、後藤真孝らの研究チーム [9] が音楽を自動分析して打楽器、歌声、ビートなどさまざまな属性を取り出せるようにすることで、コンシューマにまで創造の範囲を広げようとしている。ヨーロッパでは、Bielefeld 大学が CITEC を 2008 年に設立し非言語コミュニケーションを中心に大掛かりに研究を展開している [10]。

集合知に関しては、松尾豊らの研究グループが人工知能手法を幅広く使い、ネットワー

ク集合知の収集と活用の研究を進めている[11)]。

実践を交えた総合的な取り組み：

企業レベルでは、IBM Research が Cognitive Computing を提唱し、人間の細やかな知性をデータとして捉え、活用できるようにすることを目指している[12)]。SAP もクラウドソーシングに力を入れている[13)]。

(4) 科学技術的課題

非常に挑戦的な課題であるが、実験室にこもって行う基礎研究には適していない。むしろ、具体的な題材を用いて実践的に取り組む中から、技術を確立し、広めていくとともに基礎を深化させていくというアプローチが必要である。確立された学術コミュニティーの中でのトップジャーナルやトップカンファレンス論文数による評価方法とは異なる評価が必要である。

(5) 政策的課題

人間と人工システムの共生によって、価値の発見、増幅、共有、体系化、再利用が行われる実験的な現場をいくつかつくり、そこにアイデアを持つ研究者、開発者、コンテンツクリエイター、ユーザーが一定期間参加することによって、アイデアのパイロット実装と評価をする、実践参加型の活動を創り出し、維持する政策の実現がひときわ重要である。異なる背景を持つものの、研究者ばかりの多様性を欠いた集団が場所で一定期間コミットして研究成果の実現を目指した過去の大型プロジェクトとは異なり、塾や工房やサービスセンターといった一定の社会機能を実際に果たしつつ、その中で、新しい技術を社会実装と評価をする活動を継続することで、本研究開発領域に関わる実践知が蓄積し、新たなブレークスルーにつながることが期待される。

(6) キーワード

人工知能、ヒューマン・コンピューティング、人間・エージェント・インタラクション、コミュニティー・コンピューティング、CSCW（Computer Supported Cooperative Work）

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	非言語コミュニケーション研究[1),7),8)]、スキルサイエンス[2),3)]、認知神経科学[6)]など実践的な取り組みは多い。
	応用研究・開発	○	→	先端的な取り組みとして相澤らの食べものに関するライフログ[15)]やよしもとロボット研究所[16)]などもあるがまだ大きな流れは見当たらない。

米国	基礎研究	◎	↗	CSCW[17] などにおいて挑戦的な研究が見受けられるほか、MIT[4]、CMU[18]、IBM Research[12] の本格的な研究がある。
	応用研究・開発	◎	↗	IBM Research の研究 [12] など具体的な応用への取り組みが発展していて、伸びている。
欧州	基礎研究	◎	↗	Max Planck Institute[5] や Bieledfeld 大学 CITEC[10] など
	応用研究・開発	○	→	Guide to ICT-related activities in Horizon 2020[14] を見る限り、この方面への取り組み意識は低いように思われる。
中国	基礎研究	△	→	CSCW[17] /CHI[19] /HCOMP[20] などに顕著な成果 / 活動は見当たらない
	応用研究・開発	△	→	CSCW[17] /CHI[19] /HCOMP[20] などに顕著な成果 / 活動は見当たらない
韓国	基礎研究	△	→	CSCW[17] /CHI[19] /HCOMP[20] などに顕著な成果 / 活動は見当たらない
	応用研究・開発	△	→	CSCW[17] /CHI[19] /HCOMP[20] などに顕著な成果 / 活動は見当たらない

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）第 27 回人工知能学会全国大会オーナガイズドセッション『オノマトペの利活用：「オノマトペ」という視点から現象を読み解く』
http://www.tkomat-lab.com/jsai2013/index.html
2）北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 藤波努 教授
http://www.jaist.ac.jp/ks/portfolio/fujinami/
3）慶應義塾大学 諏訪正樹研究室
http://metacog.jp/
4）MIT Media Lab. Center for Future Storytelling
http://cfs.media.mit.edu/research.html
5）Max Plank Institute Human Cognitive and Brain Sciences
http://www.mpg.de/149614/kognition_neuro
6）日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所 柏野牧夫 上席特別研究員
http://www.brl.ntt.co.jp/people/kashino/kashino/Top%28Jp%29.html
7）東京大学大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 開一夫研究室
https://ardbeg.c.u-tokyo.ac.jp/
8）株式会社国際電気通信基礎技術研究所 石黒浩特別研究所
http://www.geminoid.jp/ja/projects.html
9）国立研究開発法人産業技術総合研究所 情報技術研究部門 後藤真孝 主席研究員
https://staff.aist.go.jp/m.goto/index-j.html
10）Bieledfeld 大学 CITEC（the Cluster of Excellence Center in Cognitive Interactive Technology）
https://www.cit-ec.de/

11）東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 松尾豊 特任准教授
http://ymatsuo.com/japanese/
12）IBM Research Cognitive Computing
http://www.research.ibm.com/cognitive-computing/index.shtml#fbid=r7QukTLiXAd
13）SAP Training and Certification Shop
https://training.sap.com/shop/crowdsourcing/
14）Guide to ICT-related activities in Horizon 2020
https://ec.europa.eu/digital-agenda/node/68342
15）CREST “食” に関わるライフログ共有技術基盤
https://www.hal.t.u-tokyo.ac.jp/crest/
16）よしもとロボット研究所
http://www.yoshimoto.co.jp/yrl/
17）The ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing（CSCW2016）
http://cscw.acm.org/2016/
18）Carnegie Mellon Univ. Human-Computer Interaction Institute
http://www.hcii.cmu.edu/
19）The ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems（CHI2016）
http://chi2016.acm.org/
20）Conference on Human Computation & Crowdsourcing（HCOMP2016）
http://www.humancomputation.com/2016/

3.1.2　予測と発見の促進

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

森羅万象のデジタル化データが指数関数的に増大する超スマート社会において、森羅万象に潜む叡智を掘り起こし社会適用させるための「予測と発見」に関する革新的な科学技術研究開発領域のこと。①発見科学、発見情報学、②科学的発見、予測、仮説生成、③帰納、演繹、直感、セレンディピティ、④集合知、⑤助言形成、根拠の可視化、意思決定、等の「知のコンピューティング」分野をターゲットとする。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

科学的発見[1)-8)]は、科学の中核を成し、人類のはるかなる飛翔を支えてきた。科学者がある仮説を打ち出し , それが観測・実験データと矛盾するならば , その仮説は再構築を迫られる。科学的発見のプロセスとは、仮説作りと実験データによる反証という絶え間ない連鎖であり、知識発展サイクル（観測、仮説、予測、実験、観測、…）の繰り返しにより仮説が洗練されていくプロセスである[2),6),7)]。そのプロセスを支える「予測・仮説発見の技術」は、自然科学における科学的発見のみならず、社会科学や人文科学にも適用可能であり、さらにはビジネスや日常生活の多くの場面でも活用できると期待されている。

予想外の（偶然の）観測は科学的探究の出発点であり、思いがけない重要な発見や発明につながっている。科学的発見のプロセスにおいて、観測結果を説明するために仮説が導入され、この仮説は新たな予測を導き、その予測は検証実験によって確かめられる。そして、その検証実験における新しい観測によって、前の仮説は採択または棄却もしくは修正され、知識発展サイクルの繰り返しにより仮説が洗練されていく[2),6),7)]。チャールズ・サンダース・パース（Charles Sanders Peirce: 1839-1914）によれば、推測による仮説生成は「アブダクション（abduction）」であり、仮説からの帰結計算は「演繹（deduction）」、そして実験による結果の検証は「帰納（induction）」とみなされ、科学的発見のプロセスの各段階において本質的な役割を果たしている[3),7)]。本節では、発見の科学哲学に関する歴史[1)-3),6),7)]を概観した後に、予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向について俯瞰する。

［発見の科学哲学に関する歴史］

演繹法は、科学者はまず仮説を立てたのち、それを立証または反証する科学的エビデンスを求める思考法である。例えば、最初に「この袋に入っている豆はすべて白い」という大前提（一般原則）を置き、次に、「これらの豆はこの袋から取り出された」という小前提（事実）を提示すると、「これらの豆は白いに違いない」という結論が導き出される。この思考法は、大前提から入って論理を進めて実際的な結論を導く方法であり、フランスのルネ・デカルト（René Descartes: 1596-1650）によって提唱された[1)-3),6),7)]。演繹法では、大前提が究極の森羅万象理論に基づくものなら、誤りのない結論が導き出される。

一方、帰納法では、個々の事象の観察結果（経験事実）からパターンを見い出して、一般的な規則を導くことで、一般的な結論を導く。つまり、帰納法は小前提「こちらの豆も、あちらの豆も、この袋から取り出された」（個々の事実）と結論「取り出した豆はすべて

白い」から大前提「この袋に入っている豆はすべて白い」（仮説）を想定する思考法である。個々の豆について、実際の色（個々の事象）を観察した後、その経験から得られた観察結果に基づいて類似点をまとめ上げることで、大局的な仮説を推論するのである。取り出した豆がどれも白いなら、袋の中の豆はすべて白いと想定するのが自然であるが、1697 年にオーストラリアで実際に発見された黒い白鳥（ブラック・スワン：白鳥と同じカモ目カモ科ハクチョウ属に分類される鳥類）のように、同じ種類に分類される黒い豆が発見されれば、この仮説は反証されることになる。この帰納法を最初に明確に説明したのは古代ギリシャの哲学者アリストテレス（Aristotelēs: 384 B.C.- 322 B.C.）とされているが、この方法論を一般に広めたのは、フランシス・ベーコン（Francis Bacon: 1561-1626）であり、19 世紀にはジョン・スチュアート・ミル（John Stuart Mill: 1806-1873）によって「帰納主義」と呼ばれる手法が体系化された [1)-3),6),7)]。

アブダクション（仮説生成）は、個別の事象を最も適切に説明し得る仮説を提示する推論であり、帰納法と違って、事象間の因果関係の解明に重きを置いている。つまり、「この袋の中の豆はすべて白い」という規則を見い出し、「これらの豆はすべて白い」という観察結果を説明するための仮説「これらの豆はこの袋から取り出されたはずである」を生成するのがアブダクションである。この用語を最初に用いたのは、チャールズ・サンダース・パースであると言われているが、その概念は古く、アリストテレスが Prior Analytics において三段論法形式で示したものが起源とされている。カール・ポパー（Karl Raimund Popper: 1902-1994）は、仮説は反証可能でなければならないとする「反証主義」の立場をとって、ジョン・スチュアート・ミルの「帰納主義」を批判した [1)-3),6),7)]。

［予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向］

科学的探究を自動化し、新たな科学的知識を発見できるような、知能機械を作る試みは、コンピューター出現の時点からあった。しかしながら、科学的発見に必要不可欠なものは、デバイス・ハードウエア・ソフトウエア技術の協創的深化に誘われる情報科学技術の先進化である。このことを世に知らしめたのは、2000 年代以降のビッグデータ利活用のながれ動きと近年の人工知能（AI）ブームの再来である。並列処理を行う画像チップ・グラフィックスプロセッシングユニット（GPU）の大量生産による価格低下によって並列計算コストが大幅に低下するとともに、2009 年にアルゴリズムの改良によって深層学習（ディープラーニング）プログラムが GPU で高速処理できるようになった [9)] ことは、知のコンピューティングを取り巻く計算環境の加速的な進化につながっている [10)]。2009 年に GPU を使うことでニューラルネットワークを並列に稼動させることができることを見い出したのは、Andrew Ng が率いる米国スタンフォード大学の研究チーム [9)] であり、ニューラルネットの新たな可能性を拓いたことは特筆すべきことである。Andrew Ng は、米グーグル基礎研究所 Google X でディープラーニング技術を開発してきたスタンフォード大学准教授であったが、2014 年 5 月に中国のグーグルとも呼ばれる百度（Baidu）にヘッドハンティングされ、Baidu がシリコンバレーに新設した AI 研究所の初代所長に就任したことは驚くべき事実であった [10)]。

1960 年代に米国スタンフォード大学で開発された AI プログラム Dendral は、化学者が行うような判断と問題解決の過程を自動化することで、未知の有機化合物を質量分析法

で分析し、有機化学の知識を使って特定した世界初のエキスパートシステムである[11)]。そして、この流れを引き継いで、1976 年に D. Lenat により、探索ヒューリスティックス（経験則）手法を組み込んだ Automated Mathematician（AM）プログラムが開発され、面白い新概念やそれらに関する興味深い推測の発見が試みられた[12)]。しかしながら、素数の概念のような興味深い新しい概念を発見するのにかなり高い能力を AM プログラムは示したものの、あらかじめ用意できるヒューリステイクスと発見できる規則の数は限定的であった。1977 年から、P. Langley らにより、多数の数値データの中から不変数を発見する BACON プログラムの開発が始まり、古典物理学（Kepler の第 3 法則、Ohm の法則、Galileo の落体の法則等）の再発見が行われた[13)]。その後、2000 年代に入り、能動学習やアブダクション等の機械学習の進歩を背景にして、2009 年には、英国の R. D. King らにより、AI ロボット科学者 Adam が、初期段階の薬剤設計（遺伝子とその機能の関係を調べる機能ゲノミクス）の自動化を目的として設計され、酵母の酵素に関する未解決問題に挑戦した[14)]。その後、新薬発見プロセスを迅速化するとともに、より経済的に行うために、後継機の AI ロボット科学者 Eve が開発され、生化学実験の仮説生成、実験計画作成、実験遂行に至る発見プロセスを具現化し、知識発展サイクルを繰り返す自動化ハイスループット仮説主導の研究開発が進められている[14)]。また、同年（2009 年）には、米国コーネル大学 H. Lipson のグループが物理現象（振り子の運動）観測によって物理法則（運動量保存の法則とニュートンの運動の第 2 法則）を自動的に導き出す実験を行っている[15)]。

発見科学（Discovery Science）という言葉は、有川節夫（九州大学）を代表とするチーム型の科研費重点領域研究「巨大学術社会情報からの知識発見に関する基礎研究」（1998-2001）の略称として使われたのが最初である[4),5)]。研究開始の初年度から Discovery Science に関する国際会議を先導的研究活動の一環として立ち上げて、発見科学のムーブメントを起こし、今まで毎年、世界各地で Discovery Science 国際会議が開催されている。このさきがけとなったチーム型研究の最終報告書は Springer の Lecture Note シリーズから、「Progress in Discovery Science: Final Report of the Japanese Discovery Science Project（Springer, 2002/3/6）」として出版されている[5)]。そして、「情報洪水時代におけるアクティブマイニングの実現」（2001-2004 年度特定領域研究：代表・元田浩）、「IT の深化の基盤を拓く情報学研究」（2001-2005 年度特定領域研究：代表・安西祐一郎）、「情報爆発時代に向けた新しい IT 基盤技術の研究」（2005-2010 年度特定領域研究：代表・喜連川優）が戦略的に立ち上がり、2007 年 1 月の JST-CRDS ワークショップ「予測と発見–大規模情報からの『知識』獲得技術–」を経て、その後の FIRST 喜連川プロジェクト「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」（2009-2013 年度最先端研究開発支援（FIRST）プログラム）につながっていった。そして、2015 年 5 月には、経済産業省が主導して、産業技術総合研究所に AI 研究センターが設立され、翌 2016 年には文部科学省が主導して理化学研究所に AI などの統合研究開発拠点 AIP（Advanced Integrated Intelligence Platform Project）センターが設立されて、日本の情報学を中心とする発見科学が加速されるものと期待されている。

一方、AI 研究を先導してきた米国でも、米国 Obama 大統領が“Big Data Research

and Development Initiative”を宣言した 2012 年を契機に、発見情報学（Discovery Informatics）に関するムーブメントが米国を起点として起きており、発見情報学に関するワークショップやシンポジウムが毎年開催されるようになった[16),17)]。この動きは、コンピューティングにおける進歩が科学と工学のほとんどすべての領域を変容していることを再認識した結果であり、新しい発見の探究はコンピューティングのすべての領域を横断したイノベーションをもたらしていることを鑑みた動きである。彼らは、入手可能なビッグデータから洞察を得るために直面している能力の限界をビッグデータ研究の観点から再考することで、コンピューティングにおける共生的な進歩を通して限界に対処せざるを得ない状況にあると考えている。米国発の発見情報学は、前例のない複雑さを有するデータの本質を理解し洞察を得るための人間の能力を、適切な知的支援と自動化によって大いに高めることを目指している[16),17)]。

科学的発見に「集合知」で挑む動きがある。2013 年 6 月に、G8 科学担当大臣らによる科学研究データのオープン化に関する声明があり、その機運がますます高まってきた。オープンサイエンスのような動きは、「サイエンス 2.0」[18)] や「シチズンサイエンス」[19)] のような形で自然に出てきている。2007 年には、英国オックスフォード大学でスタートしたオンラインプロジェクト Galaxy Zoo は、インターネット上で銀河の画像を分類するボランティア参加型プロジェクトであった[20)]。Galaxy Zoo には、20 万人以上のボランティアが参加して、天文学者がハッブル望遠鏡で撮影した銀河の画像を鑑賞しつつ分類することで銀河研究を支援しており、100 万枚の画像を分類し、天文学者による銀河形成に関する探査的研究を助けた[21)]。これらの成果は、渦状のアームや銀河中心のふくらみなど画像中の形の特徴を読み取り分類する能力に関して、人間はコンピューターよりもはるかに優れていることを示している。2008 年、米国ワシントン大学の David Baker 教授ら、「タンパク質折り畳み」問題（化学的に安定した最低エネルギー構造の特定）にパズルゲーム感覚でチャレンジし、折り畳みの優劣を競い合う無料プログラム Foldit を発表した[22)]。タンパク質が取り得る形状は無数にあり、コンピューターによるシミュレーションでは膨大な時間がかかることから、「タンパク質折り畳み」問題は、科学における最も重要な未解決問題のうちの一つであると言われてきたが、Foldit 参加者（ゲームプレーヤー）は、人間の直感力（パターン認識能力）を活かしながら、マウスを使って得点が高い（エネルギー的により安定な）タンパク質構造を競い合って作ってゆくことでタンパク質構造予測に携わり、科学者が 10 年かかっても解けなかった難問題（HIV 治療薬を開発するために必要な酵素の構造解析）を 3 週間で解くことに成功した[22)] ことは驚きであった。2010 年には、米国 Kaggle 社は、複雑なビッグデータ問題に取り組めるデータサイエンティストをソーシャルネットワーク的手法で世界中から集めて競争させるアウトソースサービスを開始した[23)]。データ所有者は予測問題とデータを提供し、データ解析コンペティションにて、複数のデータサイエンティストに予測モデル構築を依頼し、賞金を提示することで、コンペ参加者同士を競い合わせ、最も精度の良い予測モデルやアルゴリズムを提案させるのである。代表的事例である入院患者の予測コンペでは、過去の患者のデータを分析し、近々入院が予測される患者を早めにケアすることで、緊急入院数を減少させ医療コストを削減させた。日本国内でも、2013 年にインフォコム社が主催する、日本初の懸賞金モデルによるデータ解析クラウドソーシングサイト CrowdSolving がサービスを開始し、数論

的ロジックから導かれる数値予測、ヒトインフルエンザウイルスの株予測など多くの実績を重ねている[24]。

(3) 注目動向

［IBM コグニティブ・サービスの世界展開 ～ IBM Watson と脳型チップ SyNAPSE ～］

米国 IBM が開発したコグニティブ（認知）システム（Watson）は、2011 年 2 月 16 日に米国の人気クイズ番組「Jeopardy!」に出場してクイズ王を破ったことで一躍有名になった[25]。その後、人間の知的活動に関わるさまざまな機能や、音声認識や画像の理解へも Watson が対応可能となり、質疑応用（コールセンターでのエンドユーザーと対話）、創造的発見（新しい創薬の発見、薬の副作用の予測）、判断支援（がん診断支援や電子カルテアドバイザー、保険約款の内容と事故の内容判断、）等に利用できるように開発が進められている[25),26]。Watson の質疑応答システムの中核アーキテクチャーを多言語化することで、Watson の日本語版やポルトガル語版の開発も行われ、IBM コグニティブ・サービスの世界展開が進められている。同社は、2014 年夏に発表した脳型チップ SyNAPSE（開発コード名は TrueNorth; ネズミ並みの数のニューロンとシナプスを備えた非ノイマン型プロセッサー）の実用化に向けて、そのハードウエアとソフトウエアの開発環境を公開することで、SyNAPSE の普及活動を積極的に進めている。SyNAPSE の最大の強みは、画像認識や音声認識といった高度なパターン認識を極めて低い消費電力（約 0.07W/chip）で実行できる点であり、IoT 等のセンサーネットワーク末端におけるエッジコンピューティングに向けた用途開発の加速が目的である[27]。例えば、公開された SyNAPSE の開発環境を使って、スイスの大学 ETH Zürich が中心とする研究チームは、自然言語解析アルゴリズムを SyNAPSE に実装する研究を開始するとともに、感情を解析する機能についても研究を開始している[27]。また、2016 年 3 月末には、米国ローレンスリバモア国立研究所は、IBM リサーチと協力して、IBM のニューロシナプティックコンピューターチップ SyNAPSE を使って、脳からヒントを得たディープラーニングのための極低エネルギー効率スーパーコンピューティングプラットフォームの開発を開始した[28]。これは「予測と発見」を促進するためのエッジコンピューティング用プラットフォームとなる大きな可能性を秘めている。

［Google のディープニューラルネットワーク（DNN）技術と強化学習の進化と深化］

米国の Google は、ディープラーニング技術が画像認識やパターン認識に非常に優れていることを証明するとともに、「神秘的な囲碁」に対する先導的な AI 研究を通して、ディープラーニングが AI にもたらす非常に多くの可能性（DNN 技術、ある言語から別の言語への翻訳技術、人間の話し言葉（自然言語）の意味理解等）を探っていると言われている[29]。Google が 2014 年 1 月に買収した英国の人工知能スタートアップ企業 DeepMind は、ディープラーニングと強化学習を用いた手法を使って囲碁の局面を評価する新しい手法を確立し、従来のモンテカルロ木探索の手法と組み合わせることで、AI 囲碁プログラム AlphaGo を開発した[29)-32]。この AlphaGo は既存の AI 囲碁プログラム（フランスの Crazy Stone や日本チーム DeepZen が開発した Zen）に 99.8% 勝つ[31]とともに、囲碁ヨー

ロッパチャンピオンのプロ棋士に 5 連勝した後、2016 年 3 月には、世界最強のイ・セドル棋士に 4 勝 1 敗の成績で歴史的な勝利をしたことは驚くべきことであった。DeepMind の研究者たちは、イ・セドル棋士との世紀の対戦の前に、ディープラーニングを使って AlphaGo を訓練し、ある種の「知性」に持たせることで本番の戦いに挑んだのである [29)-32)]。このようなアプローチは、結果の予測が難しく神秘的であると言われる囲碁において、良い手とはどんなふうに見えるものかを AI 囲碁システムが「学習する」という点で、計算パワーに頼った「しらみつぶし的な手法」とは大きく異なっており、「予測・仮説発見の技術」の次の方向性を示唆しているかもしれない。

また、AlphaGo の歴史的勝利の裏には、Google が機械学習ライブラリ「TensorFlow」向けにカスタマイズして独自開発したディープラーニング専用プロセッサー「Tensor Processing Unit」（TPU）があったことも忘れてはならない。Google は、同社のデータセンターで過去 1 年間にわたって TPU を使用しており、ある種の「知性」に持っていた AlphaGo にも使用していた [33)]。驚くべきことに、この TPU は、ディープラーニングのために開発した推論実行用 ASIC（Application Specific Integrated Circuit、特定用途向け IC） で、GPU（Graphic Processing Unit） や FPGA（Field Programmable Gate Array）といったディープラーニング処理に使用する他の技術と比較して、消費電力当たりの性能は 10 倍である。TPU は機械学習向けにカスタマイズされているため、演算精度をそれほど必要ではなく、1 演算あたりのトランジスタ数も少なくて済むのが利点であり、消費電力も小さい。したがって、機械学習に最適化された、1 ワットあたりのパフォーマンスが極めて高い AI チップと言える。現在では、DeepMind 社はニューラルネットと海馬を模した外部メモリーを組み合わせることにより、外部記憶を活用できる、より高度な AI を目指しており [34)]、今後ますます「予測と発見」が促進されるものと思われる。

［より脳に近い学習や推論のための脳型アルゴリズムと脳型コンピューティング］

HTM（Hierarchical Temporal Memory: 階層的時間記憶）理論の提唱者 Jeff Hawkins が創設した Numenta 社は、脳の動作をヒントに、深層学習とは異なる独自アルゴリズムで成果を上げはじめた [34)]。また、日本では、2016 年 9 月、NEC と東京大学は、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創として、「フューチャー AI 戦略協定」を結び、「ブレインモルフィック AI 技術」の早期実現を目指して、脳を模した専用のアナログ回路技術に関する研究を開始している [35)]。このような動きは、より脳に近い学習や推論のための脳型アルゴリズムを開発し、脳型コンピューティングを社会実装しようとする動きである。これによっても、「予測と発見」が促進されるものと期待できる。

［日本のオールジャパン的 AI 研究の挑戦］

日本では、2015 年 5 月に、経済産業省が主導して、産業技術総合研究所に AI 研究センターが設立され、2016 年には文部科学省が主導して理化学研究所に AI などの統合研究開発拠点 AIP（Advanced Integrated Intelligence Platform Project）センターが設立される。AIP センターでは、同省が推進する「人工知能 / ビッグデータ /IoT/ サイバーセキュリティ統合プロジェクト」の中核となる革新的な研究や実証・実用化のための次世代基礎

技術を大学等と連携しながら研究開発が遂行されるとともに、さまざまな人工知能・機械学習・ビッグデータ解析等の技術を組み合わせることで、革新的で高度な「統合プラットフォーム」を実現することを目指している。また、2016 年 11 月、産業技術総合研究所が、ディープラーニングの演算能力で世界一を狙って「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤（AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI）」の開発を開始しており、ディープラーニングに特化した演算性能で 130 PFLOPS（毎秒 13 京回の浮動小数点演算能力）を目指している [36]。2016 年は日本の AI 研究基盤元年と言っても過言ではなく、知のコンピューティング基盤が加速度的に整備されると考えられる。

（4）科学技術的課題

コンピューターによる科学的発見のプロセスには、次のような賛否両論の問題点 [8] がある。科学的発見のプロセスに「科学的直感」や「セレンディピティ」が大事であり、正しい問いの立て方が重要であるけれども、現在のコンピューターには実現できないのではないか !? という否定的な意見がある。一方では、すべての問いを網羅的に立てれば、その中には正しい問いが入っているので、仮説検証を網羅的に行うことで、コンピューターにも科学的発見が可能であるという肯定的な意見もある。コンピューターによる科学的発見が可能であることを実証するには、大規模な仮説生成と超高速・高精度の反証・検証サイクルの実現が必要不可欠であり、演繹的かつ知識集約型の学問領域における予測・発見を加速するには、体系的な知識の集約 [1)-8),16),17] が科学的発見の礎となる。これを実現するには、米国 IBM のコグニティブ（認知）システム（Watson）開発のような、グランドチャレンジが必要不可欠である。

ディープニューラルネットワーク（DNN）の機械学習には、膨大な学習データ、計算リソース、計算時間はもちろんのこと、電力も必要になってくる。しかも、時系列データを扱うのが苦手であり、機械学習と画像認識などの利用を同時に進めるリアルタイム学習の手法が確立していない [37]。そのためにも、DNN の限界を超える AI チップ（例えば、脳型チップ）の開発を加速させる必要があり、脳科学の知見に基づいた革新的 AI チップの技術開発が重要となる。今後 , 森羅万象のデジタル化が劇的に進む超ビッグデータ時代において、知的エッジコンピューティングや知的クラウドコンピューティングにより知識処理の大衆化が進むと , われわれ一人一人がスマホ代わりに超小型エージェント・ロボットを持つようになるであろう。例えば、「一を聞いて十を知り、そして百を語る」ような超小型エージェント・ロボットを開発するには、DNN をはるかに凌ぐ「新計算原理」が必要不可欠であり、「予測と発見の応用科学」としての助言形成、根拠の可視化、高度な意思決定支援等の技術開発につながるものと期待される。エージェント・ロボットがローカルに処理できるものは、組み込み AI を使ったエッジコンピューティングにより瞬時に高速処理し、難しく複合的な問題はクラウドに上げられて、クラウド AI により超知的情報処理しなければならない。そのためにも、高効率低エネルギー情報処理デバイスシステムの SW/HW 協調によるコ・デザインが必要不可欠である。

(5) 政策的課題

科学的発見に「集合知」で挑むには、科学研究データのオープン化が重要であり、オープンアクセスを、電子ジャーナルの価格高騰の文脈で考えるだけでなく、オープンアクセスに関する課題を学問的にもきちんと考える必要がある。科学研究データのオープン化の動きにともない自然に出てきたオープンサイエンス（サイエンス 2.0、シチズンサイエンス）の動きを、発見科学の観点から考えてみれば、データがオープンになっていることによって、市民を巻き込み、想定外の発見につながっていくことが期待される。これは科学の分野だけではなくて、日本の古典文学の分野においても起こりえることである。例えば、国文学研究資料館における画像データベースがオープン化されることにより、市民の中でも国文学に非常に関心を持った人々によるシチズンサイエンス的な国文学研究に発展し、想定外の面白い発見につながっていくものと期待される。

(6) キーワード

科学的発見、予測、仮説生成、帰納、演繹、直感、セレンディピティ、人工知能（AI）、集合知、ディープラーニング、強化学習、機械学習、AI チップ

(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	○	→	・2016 年 9 月、NEC と東京大学は、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創として、「フューチャー AI 戦略協定」を結び、「ブレインモルフィック AI 技術」の早期実現を目指して、脳を模した専用のアナログ回路技術に関する研究を開始している [35]。 ・ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の一部で量子最適化装置の開発が進められている。 ・脳型コンピューティングに関する基礎研究は産官学で行われているが、米国には質・量とも劣る。
	応用研究・開発	○	↗	・2016 年 11 月、深層学習の演算能力で世界一を狙って「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤（AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI）」の開発に乗り出した [18]。 ・2016 年、富士通は、従来技術を深化させたトランジスタを用いて、組み合わせ最適化問題を 1 万倍速く解く技術を開発した [28]。東芝は、脳型 AI チップをフラッシュ派生技術で省電力化させることに成功した [29]。 ・スーパーコンピューターベンチャー企業の PEZY Computing が低消費電力スーパーコンピューター開発に取り組んでいる。また、AI ベンチャー企業の Preferred Infrastructure が、深層学習の研究開発を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	・“Big Data Research and Development Initiative” がオバマ大統領により宣言された 2012 年を契機に、発見情報学（Discovery Informatics）に関するムーブメントが米国を起点として起きている。 ・脳型コンピューティング研究者の層が厚く、さまざまな基礎研究へ支援策が講じられている。DOE が先導してニューロモルフィックコンピューティングに関するワークショップが開催され、ニューロモルフィックデバイス開発は伝統的なフォンノイマンアーキテクチャーからのパラダイムシフトであることが示された。

米国	応用研究・開発	◎	→	・IBM が、ニューロシナプティックコンピューターチップ SyNAPSE を開発している。 ・IBM は、Watson の質疑応答システムの中核アーキテクチャーを多言語化することで、コグニティブ・サービスの世界展開が進められている。 ・2016 年 3 月末には、米国ローレンスリバモア国立研究所は、IBM リサーチと協力して、IBM のニューロシナプティックコンピューターチップ SyNAPSE を使って、脳からヒントを得たディープラーニングのための極低エネルギー効率スーパーコンピューティングプラットフォームの開発を開始した [28]。 ・Google が、機械学習ライブラリ「TensorFlow」向けにカスタマイズしたディープラーニング専用プロセッサー「Tensor Processing Unit」（TPU）を独自開発した。DeepMind はニューラルネットと海馬を模した外部メモリーを組み合わせることにより、外部記憶を活用できる、より高度な AI を目指している [34]。HTM（Hierarchical Temporal Memory: 階層的時間記憶）理論の提唱者 Jeff Hawkins が創設した Numenta 社は、脳の動作をヒントに、深層学習とは異なる独自アルゴリズムで成果を上げはじめた [34]。
欧州	基礎研究	○	↗	・Horizon2020 で欧州でもビッグデータ等と共に予算措置がなされ、高い性能を有するシステムも各所に設置、アプリケーションやシステムソフトウエア中心に競争力の高い研究がなされている。 ・2016 ～ 2018 年に Human Brain Project [20] で 50 PFLOPS の脳の動きを再現するスーパーコンピューターを設置する計画が進んでおり、Horizon2020 プロジェクト（2014 年～ 2020 年）の中で、エクサスケール技術の研究開発が進んでいる。 ・英国、オランダ、ドイツ、デンマークなどで量子コンピューティングに関する基礎研究に対する多額の支援が行われている。
	応用研究・開発	△	↗	・一部の特殊なスーパーコンピューターを除き、独自のスーパーコンピューターのシステム研究は弱いが、ARM プロセッサーや Extoll などを含む一部の技術を中心に、新たな開発の試みが試みられている。 ・AI の社会的影響に関する EU 主導の研究活動として、2012 年 3 月から 2 年間にわたって、「RoboLaw- 欧州における新興技術規制：ロボット技術に対する法と倫理」プロジェクトが実施された。
中国	基礎研究	○	↗	・2015 年、中国・清華大学は、脳型コンピューター研究センターを設立し、コンピューター科学、電子工学、材料科学、オートメーション工学、バイオメディカルなど各学部の専門家が参加する総力体制で、TrueNorth に似た「Tianji（天機）」チップを開発している。
	応用研究・開発	○	↗	・2014 年 5 月に、米グーグル基礎研究所 Google X でディープラーニング技術を開発してきたスタンフォード大学准教授 Andrew Ng が、中国のグーグルとも呼ばれる百度（Baidu）にヘッドハンティングされ、Baidu がシリコンバレーに新設した AI 研究所の初代所長に就任した。 ・2016 年 1 月、Baidu の AI 研究所が、NVIDIA GPU にも対応した、オープンソースの機械学習ソフトウエア「Warp-CTC」をリリースした。
韓国	基礎研究	×	→	・韓国科学技術院（KAIST）が、アナログ回路を使うアプローチを採用して、深層学習向け AI チップを開発している。 ・脳研究促進振興計画のもと、2009 年度に 610 億ウォン（約 45 億円）の研究予算を投入され、2011 年には韓国脳研究院が設立された。
	応用研究・開発	×	→	・2015 年、ニューロモーフィック・チップを、IBM の依頼で韓国サムスン電子が 28nm CMOS プロセスで製作した。 ・2016 年 11 月、韓国サムスン電子は、英国 AI チップ開発スタートアップ企業 Graphcore に 34 億ドルを出資した。 ・脳型および量子コンピューティングに関する研究開発が見受けられない。

（注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
（注２） 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) K. R. ポパー（著), 大内義一（訳), 森博（訳), 科学的発見の論理 上（恒星社厚生閣 , 1971).
2) N. R. ハンソン（著), 村上 陽一郎（訳), 科学的発見のパターン（講談社 , 1986).
3) 米盛裕二 , アブダクション―仮説と発見の論理（勁草書房 , 2007).
4) 森下真一 , 宮野悟（共編), 発見科学とデータマイニング（共立出版 , 2001).
5) S. Arikawa and A. Shinohara（eds.), *Progress in Discovery Science: Final Report of the Japanese Discovery Science Project*（Lecture Notes in Computer Science / Lecture Notes in Artificial Intelligence)（Springer, 2002).
6) 井上克巳 , アブダクションとインダクション , 人工知能学会誌 25（2010）389.
7) 井上克巳 , 人工知能による科学的発見 , 電子情報通信学会誌 98（2015）35.
8) 北野宏明 , 人工知能がノーベル賞を獲る日 , そして人類の未来 ―究極のグランドチャレンジがもたらすもの― , 人工知能 31（2016）275.
9) R. Raina, A. Madhavan, and A. Y. Ng, “Large-scale Deep Unsupervised Learning using Graphics Processors” in Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning, ICML’09（New York, 2009）873.
10) ケビン・ケリー , “コグニファイ：なぜぼくらに AI が必要なのか” , WIRED VOL.20, GQ JAPAN 2016 年 1 月号増刊（AI 特集)号（コンデナスト・ジャパン , 2015）16.
11) R. K. Lindsay et al., *Applications of Artificial Intelligence for Organic Chemistry: The Dendral Project*,（McGraw-Hill, 1980).
12) D. B. Lenat, “The Ubiquity of Discovery（Computers and Thought Lecture)” , in Proceedings of the 5th international joint conference on Artificial intelligence, IJCAI’77, Vol.2（Cambridge, USA, August 22-25, 1977）1093.
13) P. Langley et al., *Scientific Discovery: Computational Explorations of the Creative Process*（The MIT Press, 1987).
14) R. D. King et al., “Make Way for Robot Scientists” , Science 325（5943）945.
15) M. Schmidt and H. Lipson, “Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data” , Science 324（2009）81.
16) Y. Gil and H. Hirsh（eds.), 2012 NSF Workshop Report（Arlington, VA, February 2-3 2012). Available from http://www.discoveryinformaticsinitiative.org/diw2012.
17) Y. Gil and H. Hirsh, “Discovery Informatics: AI Opportunities in Scientific Discovery” , AAAI Fall Symposium on Discovery Informatics: The Role of AI Research in Innovating Scientific Processes（Arlington, Virginia, 2012).
18) B. Shneiderman, “Science 2.0” , Science 319（2008）1349.
19) R. Bonney et al., “Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy” , Bioscience 59（2009）977. ; H. Rosner, “Data on Wings” Scientific American 308（2013）68.
20) M. Nielsen, *Reinventing Discovery: The New Era of Networked Science*,（Princeton Univ. Pr., 2011).
21) K. Land, et al., “Galaxy Zoo: The large-scale spin statistics of spiral galaxies in

the Sloan Digital Sky Survey”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 388（2008）1688.
22）F. Khatib, F. Dimaio, Foldit Contenders Group, Foldit Void Crushers Group, S. Cooper, et al., “Crystal structure of a monomeric retroviral protease solved by protein folding game players”. Nature Structural & Molecular Biology 18（2011）1175.
23）米国 Kaggle 社ホームページ https://www.kaggle.com/（閲覧日 2017-2-8）
24）日本初のデータ解析クラウドソーシング（データ分析・予測モデル作成コンペ）マッチングサイト
https://crowdsolving.jp/ （閲覧日 2017-2-8）
25）D. Ferrucci et al., “Watson: Beyond Jeopardy!” Artificial Intelligence 199–200（2013）93.
26）S. Spangler et al., “Automated hypothesis generation based on mining scientific literature”, in Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining（New York, 2014）1877.
27）Hot News “IBM が脳型チップ普及に本腰 ハードとソフトの開発環境公開”, 日経エレクトロニクス 2015 年 10 号 pp.18-19.
28）Lawrence Livermore National Laboratory（LLNL）news（March 29, 2016）, “Lawrence Livermore and IBM collaborate to build new brain-inspired supercomputer”
https://www.llnl.gov/news/lawrence-livermore-and-ibm-collaborate-build-new-brain-inspired-supercomputer（閲覧日 2017-2-8）
29）Wired 日本語版ニュース（2016.1.1）, “グーグルらが人工知能で「囲碁の謎」に挑む理由”,
http://wired.jp/2016/01/01/mystery-of-go/ （閲覧日 2017-2-8）
30）Wired 日本語版ニュース（2016.3.16）, “AlphaGo とイ・セドルが、囲碁にもたらしたもの、AI にもたらしたもの”,
http://wired.jp/2016/03/16/final-round/ （閲覧日 2017-2-8）
31）D. Silver et al., “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”, Nature 529（2016）484.
32）伊藤毅志 , 村松 正和 , “ディープラーニングを用いたコンピュータ囲碁 ～ AlphaGo の技術と展望～”, 情報処理 57（2016）335.
33）Wired.com（October 28, 2016）, “How AI Is Shaking Up the Chip Market”,
https://www.wired.com/2016/10/ai-changing-market-computer-chips/（閲覧日 2017-2-8）
34）日経 BP 社 , “Breakthrough AI チップ創世記〔第 1 部：始まった進化〕エッジは超知覚 クラウドは英知のエンジンへ”, 日経エレクトロニクス 2017 年 1 月号（2007）32.
35）日本電気プレスリリース（2016 年 9 月 2 日）, “NEC と東京大学、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創を開始”
http://jpn.nec.com/press/201609/20160902_01.html（閲覧日 2017-2-8）

36）National Institute of Advanced Industrial Science and Technology（AIST）, “AI Bridging Cloud Infrastructure（ABCI）”,
http://www.itri.aist.go.jp/events/sc2016/pdf/P06-ABCI.pdf（閲覧日 2017-2-8）
37）野澤哲生 , “脳型チップで” DNN 超え” へ　次世代 AI 技術が続々登場”, 日経エレクトロニクス 2016 年 2 月号（2016）65.

3.1.3　知のアクチュエーション

（1）研究開発領域の簡潔な説明

人類の将来を見据えて、知の発見、創造、集積、伝搬、探索、影響などを通じて社会的な価値を最大化するための合意形成や紛争解決ができる系や場の理解とデザイン・構成するための技術

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ソーシャルネットワークやスマートフォンの爆発的な普及によって、日常的な人間同士のインタラクションの質に変化が現れている。われわれが日常的に使っている古典的な社会システムは、ソーシャルネットワークやスマートフォンのない時代のインタラクションに基づいた仕組みである。集合的知性としての昆虫や魚の群れは、そのインタラクションの方法を含んだ全体的なシステムとして優位に進化した結果と言われている。人間社会にも新しいインタラクションを導入することで集合的知性を促進する新しい社会システムを構築できる可能性が広がっている。

人間の集合的知性を情報技術によって促進するための方法論や概念を提供するのがマルチエージェントシステム研究である。マルチエージェントシステム研究は、主に社会の知性の本質を探りながら、新しい社会システムの可能性を探っている。分散人工知能を中心として、シミュレーション、ロボティクス、ゲーム理論といった学際的な研究が展開されている。

［交渉と合意形成］

マルチエージェントシステム研究[1)]における重要な課題として、複数のエージェント（知的な主体）が、いかに交渉し、より良い合意を形成するか、という交渉とその機構に関する課題がある。社会において個人合理性を持つエージェントが協調作業をするためには、個々の利益や効用を最大化しながら、社会やグループの利益も最大化できるように合意を得る必要がある。交渉というインタラクションは、多数のエージェントから構成される社会などの分散環境かつ利益が競合する状況で本質的に不可欠な要素であり、マルチエージェントシステム研究では必ず考慮する必要がある。したがって、これまで、エージェント間の交渉プロトコル / 交渉メカニズムの設計、個々のエージェントの交渉戦略の設計、交渉問題そのものの設計、交渉結果の評価手法、学習機構など、多くの研究が展開されてきた。

交渉についての研究では、代表的なものとして、米国カーネギーメロン大（CMU）の Professor Katia Sycara の労働紛争をシミュレートする PERSUADER に関する一連の研究[2)]がある。PERSUADER は、紛争に関する蓄積された事例に基づく事例ベース推論[3)]と多属性効用理論[4)]により、合意形成や説得のプロセスを自動的にシミュレートするシステムとして提案されている。非協力的なマルチエージェントシステムの一つとして多くの影響を与えた研究である。現在の Argumentation（討論）による交渉や Utility（効用）に基づく（ゲーム理論に基づく）交渉の起源になった研究であり、マルチエージェントの合意形成に関する研究に多大な影響を与えている。

マルチエージェント研究では、エージェントが出会い、交渉し、合意形成し、そしてグループで協調するという、大きな協調に達するまでのプロセスを想定し、プロセスの個々の要素について研究が細分化されていった。エージェントの出会いや交渉については、効用理論やゲーム理論によって分析され[5)]、さらに自動交渉[52)-54)]という研究に発展した。

［チームワーク］

合意形成を行った後に、いかにして資源を分配するか、そしてグループとして活動するかというモデルについても、提携ゲームの理論やチームワークに関する研究によって行われた。特に、チームワークに関する研究は南カリフォルニア大学の Milind Tambe 教授によって確立されている。Tambe 教授は、共同意図（Joint Intention）モデルに基づいて各エージェントが共同のゴールを持つ。そして、共同のゴールとは別に、個々にはローカルなゴールを持ち得るような階層型のゴールプランのモデル STEAM[6)] を示した。Tambe 教授はプロダクションシステム SOAR を用い、ソフトウエア実装を示すことでその効果を示している。すなわち、エージェントは、互いに交渉することで合意に達し、合意を得た後はチームとして協調的に行動する一連のプロセスの個々の方式はそれぞれについて研究され、それぞれについて成果が上がっている。

［オークション、マッチング］

マルチエージェントシステムの研究[35)]では、その後、ゲーム理論や数理経済学の理論が多く導入され、オークション理論やメカニズムデザイン理論に多くの影響を与えた。特に、オークション理論やメカニズムデザイン理論などの古典的な経済理論（新古典派経済理論）における計算量や情報の取り扱いなど情報科学的な観点を取り入れることで、これまでにはない計算論的メカニズムデザイン[7),33)]、アルゴリズミックゲーム理論[8)]、計算論的社会選択理論[34)]という新しい分野を開拓している。これらの理論は、腎臓の移植ネットワークの交換プロトコルや Google の電子広告オークションの理論[9)]などを説明する具体的な理論となっている。最近の展開としては、人間の社会の状況を実際にゲーム理論の 1 場面（スタッケルブルグゲームと呼ばれる）として定式化し、その理論的均衡点を元に、空港や野生生物保護のための警備員の監視スケジューリングの最適化が行われている[10)]。マルチエージェントシステムの研究は、社会そのものを対象にしているため、インターネットの普及とスマホによって多くの人が計算機パワーを自然に所有することで、これまではシミュレーションだけにとどまっていたような内容が、実世界において実際に効果的に働くようになっている。

［グループウエア、Computer Supported Cooperative Work（CSCW）］

グループウエアおよび CSCW の研究分野では、いかに計算機とそのネットワークが人々の協調作業を支援できるかという点について極めて多くの研究が行われてきた。ほぼ最近までの傾向は、人々の協調作業は Face-to-Face に勝る方法はなく、顔を見合わせ、膝を突き合わせて行うのが最適であり、どうにかして、計算機を用いて最適もしくは準最適なレベルの支援を提供しようとしてきた。一方、近年、ほとんどの人々がスマホを持ち、常時ネットワークに接続しているような状況では、Face-to-Face とは異なるネットワーク

越しのコミュニケーションの仕方が確実に進化している。つまり、Face-to-Face が良いか、ネットワーク越しのコミュニケーションが良いか、という比較ではなく、むしろ相補的なコミュニケーション手段として確立している。

グループウエア・CSCW の研究の一つとしてグループ意思決定支援システムがあった。グループでの意思決定をさまざまな情報ツールを提供することで支援するシステムである。グループでの意思決定では、意思決定における代替案の作成や代替案の選択が重要であるとされ、代替案の作成のフェーズではブレインストーミングのような発想支援の手法が用いられた。例えば KJ 法などの発想技法や創造技法も広く研究され、計算機ネットワークを用いた手法も多く提案された。他にも、複雑な問題を議論・討議することを支援するツールとして、古典的には gIBIS という意思決定支援ツール[11]も開発されている。これは、ワークショップの対話のファシリテーションの技法の一つとして課題をベースに捉え木構造にまとめる IBIS（Issue based information systems）method という方法をグラフィカルに表現するシステムである。この考え方は、wicked な（複雑な）問題を、議論を通して整理する場合に Issue（課題・論点）をベースに構造化することで、問題の本質を構造化し共有するための枠組みである。

代替案の選択はすなわちグループでの合意を形成することである。一般には投票方式などが広く採用された。しかし、投票方式を使えば民主的に決められるというのは一般的な誤解であり、Arrow の一般不可能性定理[12]などに代表されるように理論的には民主的とされる条件を満たすことのできる投票方式は存在しないことが証明されている。認定投票方式など、意見の分布を概観するのには利用できるが、投票だけによって決めてしまう方式は、決め方としては理論的には避ける必要がある。

グループウエア・CSCW の分野と産業組織論などの分野で注目すべき古典的研究成果として Tomas Malone 教授の「Future of Work」[13]がある。計算機ネットワークを前提とした時、将来の組織や人間の働き方はよりフラットで自律分散的になることを 2000 年前後に予見している。このビジョンはさまざまな方面に影響を与えており、実際現在の社会のあり方はビジョンに向けて進んでいる。Face-to-Face ではない協調作業のあり方を検討する必要がある。その意味では古典的ではあるが MIT の Pattie Maes 博士のソフトウエア・エージェントによる間接操作性[14]がある。ヒューマンインターフェースがデスクトップを代表とするように直接操作性を追求したものが標準であるが、ソフトウエア・エージェントのある程度の自律性により、グループでの意思決定（例えば会議スケジューリングなど）を含めた活動や作業をある程度自動化することが今後本格的に実現される。

エージェントによって、グループ意思決定支援における合意形成支援をしようという研究[15]も行われている。例えば、ある意思決定問題に対するそれぞれの参加者の好みや重み付けを階層意思決定法という構造によって表現し、この構造を用いてエージェントが自律的に合意案を発見支援するという方式が提案されている。ポイントは、人間の好みを構造化することでエージェントによる自律的な交渉や合意支援が可能になる。

最近では、ワークショップやハッカソンのようなグループワークによる議論の方法の効果が広く認識されている。ワークショップでは、Diversity に富んだ人間のグループを集め、アイデアの発想、集約、および合意形成というようなプロセスにより、発想に富む新しいアイデアを創造していくことをねらいとしている。特に、ファシリテーションとその技法

の重要性が高まっている。インターネットを使った大規模なグループワークや議論のファシリテーションの方法やその支援技術は現在研究が行われている。さらに、上記のエージェントによるファシリテーションの支援が重要である。

［ソーシャルコンピューティング］

一方、ソーシャルコンピューティングに関しては、The Wisdom of Crowds[16] など群衆（Crowd）を対象としたアイデアや意見の収集や集約手法が研究されビジネスにも応用されている。例えば、InnoCentive は、これまでは解くことのできなかった課題に対して解決方法のアイデアを収集するプラットフォームであり、すでに広く利用されており 25 万人以上の登録者がいる。インターネット上で、課題を投稿し、その解決方法を収集する。InnoCentive はクラウドソーシング（Crowdsourcing）の実現例の一つであり、大衆からの課題解決のアイデアをインターネットで広く集めることに成功している。クラウドソーシングはすでに実用段階にあり、特にアメリカでは非常に多くの応用領域や方法についてベンチャー企業を中心にさまざまな試みがなされている。

MIT の Pentland 教授らは、ソーシャル物理学（Social Physics）と呼ばれる研究を立ち上げている [17]。そこでは社会ネットワークをベースにして、人間のグループの振る舞いの分析、構築、誘導などを行っている。特に、DARPA のネットワークチャレンジでは、米国全土のどこかに配置された気象用の赤いバルーン 10 個の位置を、インターネットなどを最大限に活用して正確に報告するという競技が行われた。Pentland 教授のチームでは、社会ネットワークにおけるつながりに基づいた報酬の与え方（インセンティブメカニズム）を工夫することにより約 8 時間で全てのバルーンを発見し、優勝を収めている [18]。彼らのインセンティブメカニズムは、バルーンを見つけた人だけでなく、その社会ネットワーク上のつながりにいる人にも報酬を与えるというものであった。

以上のように社会ネットワークの振る舞いは、古典的な経済的合理人としての人間の捉え方よりも、より現実に即していることが少しずつ分かってきている。つまり、近年の意思決定や経済学では人間はそれぞれ独立に価値を持ち自己利益最大化するような決定を行うというモデルが支配的であったが、社会ネットワークを前提にした場合、人間の意思決定は必ずしもそのような振る舞いをしないことが分かってきている。社会ネットワーク上で、人間のグループや集団の意思決定を適切に支援するためには、社会ネットワーク上の関係を観点に入れた人間の振る舞いの行動モデルや方法論が必要になる。

ソーシャルコンピューティングの概念によってワークショップや発想支援を行うモデルの一つとして MIT の Collaboratorium[19),20] がある。ここでは、気候変動に関する課題とその解決方法をオンラインでクラウドソースの形で集め、集約している。さらに興味深いのは毎年、リアルな会議を開催し Collaboratorium での気候変動に関する話題について Face-to-Face で議論を行っている。オンラインとオフラインのワークショップを継続的に行っている一例である。Deliberatorium[21] は Collaboratorium のオンラインの議論についてさらに構造化した討論方式でパブリックな意見を集約するのに使われている。

政治学では、熟議に基づく民主主義を実現する方法として Deliberative Poll という手法の有効性が認識され始めている [22]。一般的に、世論調査（Poll）では、サンプリングした対象者に対するアンケートを集約しそれを元に世論を分析する。それに対して

Deliberative Poll では、サンプリングした対象者を集め課題に関する議論をし、持ち帰らせる。そしてしばらくしてからさらにアンケートを収集する。このように単にアンケートを採るだけでなく、間に議論や討論を挟むことによって、参加者自身やそのグループが課題そのものを学習することを促すことで、アンケートによる政治的意見の分布に明確な差が現れるようになる。単に投票をするだけでなく、対象者に課題について深く考え、議論をすることで組織としての学習が進むという効果が期待される。次世代の民主主義の一形態である熟議型民主主義として注目されている。Deliberative Poll では必ずしもネットワークを用いた合意形成までを想定している訳ではない。

また、MIT の Thomas Malone 教授のグループは、人間のグループとしての知的活動についての集合的知性（Collective Intelligence）のファクターが存在することを実験的に示している[23]。人間がグループとして問題解決をするときには、個々の参加者が持つ能力以上の知性（集合的知性）が発揮されていることが示されている。また、社会性を持つ動物の群れ（例えば小型の魚の群れやヒヒの群れ）における合意形成の仕組みも生物学的に解明されつつある[50]。センサー技術の発達により、個々の動物のトラッキングがより正確に、より広範囲かつ継続的に行うことができるようになったためである。人間の社会ネットワーク分析にも応用されている。

以上のように、インターネット上で動作するプログラムとしてのエージェントの合意形成機構と、人間の社会ネットワークを介した合意形成の仕組みを融合することで、人間の合意形成を支援できるような仕組みが構築できる。これは、インターネットを常時利用している人類の社会ネットワーク上の新しい合意形成の仕組みとなることが期待できる。

(3) 注目動向

(a) オンライン大規模意見集約

MIT Center for Collective Intelligence（CCI）のプロジェクト Deliberatorium[21] がある。ここでは、インターネットを使った大規模な議論や協議を支援し、大規模な意見共有を可能にするツールが構築されつつある。このプロジェクトでは、大規模な意見の共有を目指して､議論の論理的構造（議論マップ）を構築するシステムを開発している。議論を議論マップという構造を用いているため、強い構造化による議論支援と言える。議論マップでは、Argumentation tools と呼ばれる議論構造化理論に基づき、参加者の意見を主張、賛成反対、および問題提起などに分類することで、議論の構造を明確化する。意見集約は完全に構造化した議論マップ上で行い、分類により投稿内容を組み立てていく必要がある。そのため参加者に負荷を強いるという問題がある。

さらに MIT CCI は、地球温暖化問題に焦点を当てて、解決プランを協議するシステムとして The ClimateCoLab というシステムを構築している[19),20]。本システムでも、議論マップを利用して意見の整理を行っている。さらに発散に向けた主な機能として、地球温暖化に関する取り組み案を形式的に入力することで、その案が反映された世界を予想した簡単なシミュレーション結果を提供する機能である。例えば、各国の二酸化炭素排出量の変化を入力すると、温暖化の進行経過を確認できる。議論構造化を用いるこ

とで、参加者に高い負荷を強いる点は Deliberatorium と同様である。ClimateCoLab では、リアルな空間での対面型の議論をカンファレンス形式で行い、その後サイバー空間でのオンラインで議論を続けるなど、リアル空間での議論とサイバー空間での議論を交互にミックスしながら議論を継続的に行っている。

以上は、合意形成を支援するというよりは、インターネット上での集合知を利用して、多くのアイデアを集め、それらのアイデアを洗練化することを目的としている。 一方、伊藤らは、多数の意見を集約し合意形成を支援するシステムや方法論の研究開発を行っている。ここでは大規模な議論を適切に整理し、エンカレッジし、さらにはより良い方向に導くようなファシリテータに着目している。Wikipedia や Linux のようなプロジェクトでも、参加者は自由に記事を書いたりソースコードを編集できたりするが、少数ではあるが特定数の管理層が注意深く大多数の活動を管理している。この少数の管理層の役割が実はプロジェクトの成功の要因の一つと言われている。大規模な合意形成や意見集約に関しても少数の管理層、すなわちファシリテータが必要である。実際に名古屋市次期総合計画の市民からの意見集約にオンラインの議論支援システムを開発し、ファリシテーション支援機能などを実装するなど、幾つかの実験を行いその有用性を確認している [24)-30)]。

実験して明らかになってきたことは、大規模な議論では、参加者にとって、現在の議論の状況の把握、議論の内容に関する理由付け、さらに議論の内容に関する不整合など、議論の構造を適切に管理し、見える化することが重要である。そしてその構造を用いて、ファシリテータは適切に議論を整理でき、参加者も議論の内容を把握できる。さらにはさまざまな人工知能技術を応用することで知的な議論支援が可能になる。今後はさらに、議論構造の可視化機構、エージェントの自動交渉機構、インセンティブ機構を発展させ、大規模議論を支援するためのツールとして開発・導入していく予定である。

(b) 討論型世論調査（Deliberative Poll）

1990 年代頃から討論型民主主義もしくは熟議と呼ばれる枠組みの一つとして行われている。討論型世論調査はスタンフォード大学の James S. Fishkin 教授らによって提案されている [22)]。ランダムにサンプリングされた市民が意見を述べる（既存の世論調査）だけでなく、さらに一定の場所で討論をすることで、公共政策に関する課題の本質を市民が理解することと、社会的な合意を促進するための方法である。さまざまな公共政策の課題について国レベルや都市レベルですでに実行されている。オンラインを用いた討論型世論調査も行われているが、あくまでもサンプリングされた市民がオンラインで討論をする仕組みである。特徴的なのは、実施前と実施後おいて多くの場合に、必ず市民の意見の変化が現れ、社会的な合意が進んでいる点である。

討論型世論調査では、市民ら自身が対象とする公共政策の課題について討議を通じて学ぶ機会を与えられる。下のリストにあげるような非態度、合理的無知仮説などは望ましい状態ではないため、討論型世論調査によって公共政策に対して意見を深めるという意味で、有意義であると言える。

文献によると討論型世論調査は市民参加における以下の四つの問題をクリアできる手法とされている。

① 非態度
政策について明確な意見を持っていないにもかかわらず、持っているかのように回答する。回答に一貫性がなく、時間をおいて同じ質問を繰り返しすると、ランダムに変動する

② 合理的無知
市民ら一人一人が選挙を左右できる確率は非常に低いので公共政策について無知であることが合理的であると考えること

③ 集団分極化
議論を行えば行うほど意見分布が極端な方向にシフトする傾向のことを言う。これによって、もともと持っていた見解が強固になり集団間の溝が深まる傾向がある

④ 参加バイアス
参加動機の高い者しか集まらないという傾向

(c) 紛争メディエーション（Dispute Mediation）

対立的な状況での合意形成を支援する方法として、メディエーション（調停）がある。一般に紛争のメディエーションと呼ばれることが多い。メディエーションについては、国際法上の調停や、日本では、裁判外紛争解決手続き（ADR: Alternative Dispute Resolution）と呼ばれるものもある。一般的に、メディエーションは、当事者以外の中立な第三者によって解決案が提示され、その提示案に当事者らが合意することで、紛争の解決とすることを目指しており、国際政治から国内の民事調停法にまで極めて広い範囲が扱っている。Harvard Law School では The Public Disputes Program においてさまざまな現実の紛争に実際に関わり、調停やもしくは交渉の支援を行い、その事例を蓄積している。

(d) 自動交渉エージェント

自動交渉エージェント、交渉理論、効用理論、数理経済学、ゲーム理論、メカニズムデザイン理論、論理的議論などをベースに、自動ファシリテーション機構、エージェント自動合意形成アルゴリズム、についての研究がある。以下に最近の動向を上げる。

自動交渉機構に関する研究は、非協力的ゲームの囚人のジレンマの状況を、交渉エージェント間の何らかの通信やインタラクションにより、より社会的に価値のある合意点を見つけるアルゴリズムを議論する[31),32)]。オークションでの最適化される経済的効率性は、その場での評価値の最大化でありパレート最適な合意点である。一方で、自動交渉機構の研究で議論されるのは、パレート最適な合意可能点が複数ある場合にどの点を選択するべきか、もしくは、エージェントの効用空間が不確実な場合に、より多くの探索により、より良い合意点を発見できるかという点である。オークションというフォーマットをベースにしていない分、自動交渉エージェントの研究の方が、より一般的な交渉問題を取り扱っている。そのため、研究が個々のドメインで完結しがちであるため、ドメイン間での連携を図る目的で、自動交渉エージェントに関する国際プログラム競技会 ANAC（Automated Negotiating Agent Competition）が毎年開催されており、交

涉戦略や交渉問題そのものに関する質の高度化を進めている[52)-54)]。近年では、人間と交渉する自動交渉エージェントに関する研究もいくつか開始されており、論点とその値域が定義された妥協に基づく交渉であれば、ほぼ自動で行うことができる。

・離散的な交渉空間における効率的な交渉解探索アルゴリズム：
交渉空間が離散的であると古典的な交渉解であるナッシュ解が定義できない場合が多い[37)]。したがって、ゲーム理論や経済学では既存にはほとんど研究がない。藤田、伊藤、クラインらは、Simulated Annealing や遺伝的アルゴリズムに基づく交渉解の探索手法を提案している[38)]。

・効用モデル：
効用モデルは、人間の好みをソフトウエアであるエージェントに伝えるために必要であり、現状では以下のような研究が行われている。

➢ 論点の依存性を表現する効用のモデル：意思決定を行う時、複数の論点を考えるのが一般的である。例えば、自動車を購入する時に、排気量、色、タイプなどを考慮する。多属性効用関数は、このような複数の論点に基づく効用を定義できる。一般に多属性効用関数といった場合には、この属性の独立性を求めるが、交渉などの状況ではさらに各属性の値が他の属性の値に依存する場合が多い。そのような属性間の依存性を表現できる論点の相互依存を許す多属性効用モデルが提案されている[31)]。

➢ 人間の間の依存性を表現する効用のモデル：個々の人間の効用関数は他の人間の価値に依存する場合もある。人間の間の価値観の依存性を表現した効用関数も定義されている[39)]。

➢ グラフによる効用のモデル：人間の効用をグラフによって表現する研究も幾つか行われている。多属性効用関数を表現することができる[36)]。

・交渉戦略のモデル：
交渉における戦略は、主にいかにして妥協するかということに主眼が置かれる。どのようなタイミングで相手に譲歩した案を提案するかによって、合意の成立や交渉の失敗に影響がある場合が多い。森、伊藤らは、進化的ゲームの均衡点をベースに、妥協の度合いを測るモデルを提案している。これにより、ANAC2015 において総合優勝している[40)]。

その他、説得や妥協の数理モデル、合意創造の信念共有モデルなどについても今後の研究が期待される。

自動交渉機構については、最難関な国際会議 AAMAS（International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems）と毎年同時開催されている国際自動交渉エージェント競技会 ANAC（Automated Negotiating Agent Competition）と国際ワークショップACAN（International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations）が具体的なアルゴリズムのテストベットとなっている。ANAC と ACAN は、毎年、米国、欧州（英国やスペイン）、アジア（香港やシンガポール）、および豪州から参加者を集めており、そのプロシーディングスはほぼ全てが Springer から出版されており[41)-49)]、エージェント自動交渉の研究分野を世界的にリードするワークショップと競技会である。

論理に基づく交渉の枠組みが多数提案されている[55)-57)]。交渉のメカニズムを論理的なステートメントの交換と捉え、交渉や討論を、論理的なプロセスとして捉えて展開させる方法論である。日本でも法的推論における論争を自動化もしくは形式化する試みが広く行われている[58),59)]。論理的な議論のフレームワークは、研究グループごとに独自のフレームワークが提案されている。近年では、論理的な議論のフレームワークに、参加者の選好をどのように加えるかなどの提案がある。さらに、アーギュメンテーションマイニングという、実世界の議論のデータから、議論・討論の論理的構造を抽出する方法論についての議論がヨーロッパを中心に注目を集めている。

(e) インセンティブメカニズム

コレクティブインテリジェンスの視点から、大規模な議論をいかにして誘導すべきか、ボランタリーな活動のためのインセンティブを与えるべきか、という点についても追究されている。古典的な例では、誘引両立なメカニズムでは、真実申告に対するインセンティブが働いていると言える。例えば第 2 価格オークションでは、真の評価値をそのまま正直に入札することが最適である。つまり、真の申告以外の申告をすると損をするような仕組みとして設計されている。インセンティブメカニズムとは、メカニズムの設計者またはメカニズムを使わせる側の者がメカニズムを使うユーザーや参加者に対して、何らかの方向へ誘導するための仕組みである。以下に最近の動向を示す。

- DARPA Red Balloon Challenge:DARPA が開催した競技会で、アメリカ全土に 10 個の気象用バルーンを配置し、インターネットを用い、全てのバルーンの正確な位置を発見するスピードが競われた。優勝チームは、ソーシャルネットワークにおける、バルーンの発見活動への招待の連鎖をうまく利用してインセンティブメカニズムを作成した。つまり、バルーンを発見した人、その人を紹介した人、またその人を紹介した人、というようにバルーンを発見した人までにいたる社会ネットワークの経路上にいる人すべてにうまく賞金を分け与えたのである。この仕組みはうまく機能し 8 時間で全てのバルーンが発見されている[18)]。
- スコアリングルール：気象予測などで、気象予報官が自分の思った確率を正直に報告することで、最も高いスコアが得られるような関数を用いたスコアの方式である。その中の研究の一つとして、Baysian Truth Serum（BTS: ベイジアン自白剤）という方式がある。BTS のキーアイデアは、ある質問に対する回答について、その実際の頻度が、予測された頻度より大きい（surprisingly common）場合に高いスコアをつけることにあり、これにより真実申告を引き出すことが知られている[51)]。
- Reputation メカニズム：マルチエージェントの一連の研究において、各エージェントの行動に対する報酬関数を決めておき、行動をとった後にその報酬をポイントとして与える。そして、そのポイントに基づいてランキング（reputation）を決めるという枠組みである。さまざまな方法が考えられるが、興味深い点は、各エージェントが競争的に自分の reputation を高めようとすることが仮定されている点で、それにより全体の振る舞いが、より良い振る舞いになるようにメカニズムを設計する必要がある[35)]。

(4) 科学技術的課題

本領域における科学技術的な課題は以下の通りである。

・自由や民主主義に関する社会的な理解（知識の欠如）
・先端技術と生々しい現場の乖離
・現実の大部分の問題は複雑な問題（解けない問題）に属するのに対して、学術的な貢献が解ける問題に対する解法に比重が高く集まる点
・人間の価値観の数式化（技術的なボトルネック）
・数式化は最低限の価値観であれば可能で、その場合は最低限の場合のあるべき解を示すことは可能
・それでも人間の意思決定の連鎖による合意がどこに向かうかを予測するためには、社会ネットワーク全体の分析も必要

(5) 政策的課題

本領域における政策的な課題は以下の通りである。

・本領域は、人間の社会活動の根本的な部分を扱っている。学術面だけでなく、産業、国際、保安、法務、財務などの行政や自治体、企業や企業団体、一般市民による議論が必要である。特に AI やマルチエージェントシステムの発展により、そのあり方が大きく変わる可能性に直面している。
・本領域の研究プロジェクトの促進のためには、社会におけるさまざまな意思決定に大きく踏み込む必要がある。既存の ELSI のような法律や倫理に関する話し合いだけでは、意思決定そのものの実行力を担保できるものではない。本領域で開発されるような計算システムによって、相当に合理的かつ公正な意思決定案を構築できる可能性があり、その内容の価値を客観的かつ冷静に評価できる体制づくりが必要である。その体制は、学術会議や大学はもちろん、行政、自治体、企業団体、一般市民など社会全体で構成されなければならない。
・計算機による意思決定が実行される研究プロジェクトを実行できる、行政や自治体による社会的枠組みも必要である。行政特区の意思決定自体を計算機に任せるような仕組みとその意思決定によって実際に社会を構築する企業、企業団体、および一般市民が、このテクノロジーの発展には必要であり、ファンディングエージェンシーによる支援も重要である。

(6) キーワード

ソーシャルコンピューティング、コレクティブインテリジェンス、熟議民主主義（Deliverative Poll）、マルチエージェントシステム、エージェントシステム、ソーシャルフィジクス、メカニズムデザイン、大衆（Crowd）コンピューティング、システムダイナミクス

(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	○	↗	マルチエージェントシステムの分野で、オークション・マッチングの理論研究やインセンティブメカニズムの研究が多い。
	応用研究・開発	○	↗	先端的な取り組みとして伊藤らの JST CREST「エージェント技術に基づく大規模合意形成支援システムの創成」に関する研究や、横尾らの理論研究である科研 S「持続可能な発展のための資源配分メカニズム設計理論の構築」などもあるがまだ大きな流れは見当たらない。
米国	基礎研究	◎	↗	MIT CCI による Climate Colab や、Stanford の Delivertive Poll を始め、基礎研究は十分に根付いている。さらに、人工知能やマルチエージェントシステムの分野で、メカニズムデザイン、オークション、マッチングの理論研究が広く行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	上記の基礎研究がそのまま応用研究やベンチャーによる産業化につながる傾向にある。また、クラウドファンディング、市場調査など、Crowd（大衆の労力や財力）を用いた技術によるベンチャーが次々に生まれている。
欧州	基礎研究	◎	↗	自動交渉に関する基礎研究が強い。例えば、Imperical College London、Oxford University、Delft University of Technology、Centrum Wiskunde & Informatica（CWI）などがある。さらには論理的アプローチによる自動交渉の研究も盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	市民からの意見集約および合意形成のためのシステムとその応用は盛んに行われている（ウィーンやイタリアなど）。Citizen Science とも呼ばれる。CWI などでは、自動交渉の応用ソフトウエア（電力売買など）の開発も盛んである。
中国	基礎研究	○	↗	メカニズムデザインや自動交渉の基礎理論については、Hongkong Baptest Unviersity が盛んであるが他は見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない
シンガポール	基礎研究	◎	↗	Crowd Science に関する国際会議を新たに始めるなど、基礎研究に関して関心が集まっている。
	応用研究・開発	△	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない
オーストラリア	基礎研究	◎	↗	Crowd Science に関する国際会議を新たに始めるなど、基礎研究に関して関心が集まっている。
	応用研究・開発	△	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない
韓国	基礎研究	△	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない
	応用研究・開発	△	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) Nicholas R. Jennings, Katia Sycara, Michael Wooldridge, A Roadmap of Agent Research and Development, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Volume 1, Issue 1, pp 7-38, March 1998.
2) Katia Sycara, “Resolving Goal Conflicts via Negotiation” . In Proceedings of the

Seventh National Conference on Artificial Intelligence（AAAI-88）, St. Paul. MN., August 1988.

3）Christopher Riesbeck and Roger Schank. Inside Case-based Reasoning. Northvale, NJ: Erlbaum, 1989.

4）Ralph L. Keeney and Howard Raiffa, Decisions with Multiple Ob-jectives. ISBN 0-521-44185-4, 1993.

5）Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin, Rules of En-counter:Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers, MIT Press, 1994.

6）Milind Tambe, “Towards Flexible Teamwork” , Volume 7, pages 83-124, 1997.

7）R. K. Dash, N. R. Jennings and D. C. Parkes, “Computational-mechanism design: a call to arms,” in IEEE Intelligent Systems, vol. 18, no. 6, pp. 40-47, Nov-Dec 2003.

8）Noam Nisan, Tim Roughgarden, Eva Tardos, and Vijay V. Vazirani. 2007. Algorithmic Game Theory. Cambridge University Press, New York, NY, USA.

9）Benjamin Edelman & Michael Ostrovsky & Michael Schwarz, “Internet Advertising and the Generalized Second-Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords,” American Economic Review, American Economic Association, vol. 97（1）, pages 242-259, March 2007.

10）Milind Tambe. 2011. Security and Game Theory: Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned（1st ed.）. Cambridge University Press, New York, NY, USA.

11）Jeff Conklin and Michael L. Begeman. 1988. gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion. In Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work（CSCW ‘88）. ACM, New York, NY, USA, 140-152.

12）Kenneth Arrow: Social Choice and Individual Values, 1963.

13）Thomas W. Malone, The Future of Work, How the New Order of Business Will Shape Your Organization, Your Management Style, and Your Life, Harvard Business School Press, 2004.

14）Pattie Maes. 1994. Agents that reduce work and information overload. Commun. ACM 37, 7（July 1994）, 30-40.

15）Takayuki Ito and Toramatsu Shintani, “Persuasion among Agents：An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation”, In the Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence（IJCAI-97）, pp.592-597, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1997

16）James Surowiecki, The Wisdom of Crowds, Anchor, 2004.

17）Alex Pentland, Social Physics: How Good Ideas Spread-The Lessons from a New Science, Penguin Press, 2014

18）Galen Pickard, Wei Pan, Iyad Rahwan, Manuel Cebrian, Riley Crane, Anmol Madan, Alex Pentland, Time-Critical Social Mobilization, SCIENCE, 28 OCT 2011

：509-512
19）Malone, T. W. & Klein, M. Harnessing collective intelligence to address global climate change（Invited Lead Essay）. Innovations: Technology | Governance | Globalization, Summer 2007, 2,（3）, 15-26.
20）Joshua Introne, Robert Laubacher, Gary Olson, Thomas W. Malone, Solving Wicked Social Problems with Socio-computational Systems, Kunstliche Intelligenz, February 2013
21）Mark Klein , Enabling Large-Scale Deliberation Using Atten-tion-Mediation Metrics. Journal of Computer-Supported Cooperative Work. 21（4）:449-473, 2012.
22）James S. Fishkin, When the People Speak: Deliberative Democracy and Public Consultation, ISBN: 9780199604432, 2011.（邦訳：「人々の声が響き合うとき：熟議空間と民主主義」早川書房）
23）Anita Williams Woolley, Christopher F. Chabris, Alex Pentland, Nada Hashmi, Thomas W. Malone, Evidence for a Collective Intelligence Factor in the Performance of Human Groups, SCIENCE, 29 OCT 2010：686-688.
24）伊藤孝紀 , 深町駿平 , 田中恵 , 伊藤孝行 , 秀島栄三 ,「ファシリテータに着目した合意形成支援システムの検証と評価－オフィス家具の商品開発を事例とする」, 日本デザイン学会 ,2015
25）伊美裕麻 , 伊藤孝行 , 伊藤孝紀 , 秀島栄三 ,“オンラインファシリテーション支援機構に基づく大規模意見集約システム COLLAGREE - 名古屋市次期総合計画のための市民議論に向けた社会実装”, 情報処理学会論文誌 , 2015
26）伊藤孝行 , 奥村命 , 伊藤孝紀 , 秀島栄三 ,“多人数ワークショップのための意見集約支援システム Collagree の試作と評価実験～議論プロセスの弱い構造化による意見集約支援～”, 日本経営工学会論文誌 ,Vol.66, No.2,2015
27）Takayuki Ito, Yuma Imi, Takanori Ito, and Eizo Hideshima,“COLLAGREE: A Faciliator-mediated Large-scale Consensus Support System”, Collective Intelligence 2014, June 10-12, 2014. MIT Cambridge, USA.（poster）
28）Takayuki Ito, Yuma Imi, Motoki Sato, Takanori Ito, and Eizo Hideshima, Incentive Mechanism for Managing Large-Scale Internet-Based Discussions on COLLAGREE, Collective Intelligence 2015, May 31 – June 2, 2015 @ the Marriott Santa Clara in Santa Clara, CA（poster）.
29）Akihisa Sengoku, Takayuki Ito, Kazumasa Takahashi, Shun Shiramatsu, Takanori Ito, Eizo Hideshima and Katsuhide Fujita,Discussion Tree for Managing Large-Scale Internet-based Discussions,Collective Intelligence 2016,Stern School of Business New York University,June 1-3, 2016.（ACCEPTED poster）
30）Kazumasa Takahashi, Takayuki Ito, Takanori Ito, Eizo Hideshima, Shun Shiramatsu, Akihisa Sengoku and Katsuhide Fujita,Incentive mechanism based on qualit of opinion for Large-Scale discussion support,Collective Intelligence 2016,Stern School of Business New York University,June 1-3, 2016.（ACCEPTED poster）

31）Takayuki Ito, Mark Klein, Hiromitsu Hattori, “Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces”, In the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence（IJCAI2007）, Hyderabad, India, January 6-12, pp. 1347- 1352, 2007
32）Ivan Marsa-Maestre, Takayuki Ito, Katsuhide Fujita, Miguel A. Lopez-Carmona, Juan R. Velasco, Mark Klein, “Balancing Utility and Deal Probability for Negotiations in Highly Nonlinear Utility Spaces”, In the Pro-ceedings of the Twenty-First International Joint Conference on Artificial In-telligence（IJCAI2009）, July 11 - 17 in Pasadena, California, pp.214-219, 2009.
33）伊藤孝行 , “計算論的メカニズムデザイン”, コンピュータソフトウェア（日本ソフトウェア科学会論文誌)「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, 日本ソフトウェア科学会 ,Vol. 25, No.4, pp.20-32, 2008.
34）David Lazer, Alex Pentland, Lada Adamic, Sinan Aral, Albert-László Barabási, Devon Brewer, Nicholas Christakis, Noshir Contractor, James Fowler, Myron Gutmann, Tony Jebara, Gary King, Michael Macy, Deb Roy, Marshall Van Alstyne, Computational Social Science, SCIENCE06 FEB 2009：721-723
35）David C. Parkes, Michael P. Wellman, Economic reasoning and ar-tificial intelligence, SCIENCE17 JUL 2015：267-272
36）Rafik Hadfi and Takayuki Ito. “Low-Complexity Exploration in Utility Hypergraphs”. Journal of Information Processing. Vol. 23, No. 2 pp. 176-184, 2015.
37）Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein, “A Secure and Fair Protocol that Addresses Weaknesses of the Nash Bargaining Solution in Nonlinear Negotiation”, Group Decision and Negotiation Journal（IF=0.783）, pp.29-47, March 3, 2010（online）, 2012（print）.
38）Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein, “An Approach to Scalable Multi-issue Negotiation: Decomposing the Contract Space”, Computational Intelligence 30（1）, pp30-47, doi: 10.1111/j.1467-8640.2012.00462.x., 2014.
39）Takayuki Ito, David Parkes, “ Instantiating the Contingent Bids Model of Truthful Interdependent Value Auctions”, In the Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems（AAMAS2006）,pp.1151-1158, 2006.
40）森 顕之 , 伊藤 孝行 , “推定期待効用に基づく自動交渉エージェントの提案”, 情報処理学会 論文誌 2015 年 10 月号 , 2015.
41）Naoki Fukuta, Takayuki Ito , Minjie Zhang, Katsuhide Fujita, and Valentin Robu, “Recent Advances in Agent-based Complex Automated Negotiation”, Studies in Computational Intelligence 638, Springer, April 25, 2016. ISBN 978-3-319-30305-5
42）Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, Minjie Zhang, Valentin Robu: Next Frontier in Agent-Based Complex Automated Negotiation. Studies in Computational Intelligence 596, Springer, Mach 30,2015, ISBN 978-4-431-55524-7

43）Ivan Marsa-Maestre, Miguel A. Lopez-Carmona, Takayuki ITO, Minjie Zhang, and Katsuhide Fujita, “Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation”, Seris of Studies in Computational Intelligence 535, Springer-Verlag, ISBN978-4-431-54757-0, March 5, 2014.
44）Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, and Tokuro Matsuo, “Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions”, Series of Studies in Computational Intelligence 435, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-30736-2, 2012.
45）Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima, and Tokuro Matsuo, “New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations”, Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-3-642-24695-1, 2011.
46）Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima, Tokuro Matsuo and Hirofumi Yamaki（Eds.）, “Innovations in Agent-Based Complex Automated Negotiations”, Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-3642156113, Oct 28, 2010.
47）Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima and Tokuro MATSUO（Eds.）, “Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiations”, Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2009. ISBN 978-3-642-03189-2.
48）Takayuki ITO, Hiromitsu HATTORI, Minjie ZHANG, and Tokuro MATSUO（Eds.）, “Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multiagent Systems”, Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-76281-2, 2008.
49）Takayuki ITO, Hiromitsu HATTORI, Minjie ZHANG, and Tokuro MATSUO（Eds.）, “Rational, Robust, Secure Negotiations in Multiagent Systems”, IEEE Computer Society, 2005.
50）Ariana Strandburg-Peshkin, Damien R. Farine, Iain D. Couzin, Margaret C. Crofoot, Shared decision-making drives collective movement in wild baboons, SCIENCE19 JUN 2015：1358-1361.
51）Dražen Prelec, A Bayesian Truth Serum for Subjective Data, SCIENCE15 OCT 2004：462-466
52）Tim Baarslag, Katsuhide Fujita, Enrico Gerding, Koen Hindriks, Takayuki Ito, Nick R. Jennings, Catholijn Jonker, Sarit Kraus, Raz Lin, Valentin Robu, Colin Williams, Evaluating Practical Negotiating Agents: Results and Analysis of the 2011 International Competition, Artificial Intelligence Journal（AIJ）, Elsevier Science, Vol. 198, May 2013, pp. 73–103, 2013.
53）Tim Baarslag, Reyhan Aydogan, Koen V. Hindriks, Katsuhide Fuijita, Takayuki Ito, and Catholijn M. Jonker, “The Automated Negotiating Agents Com-petition 2010-2015”, pp.115-118, AI Magazine, Winter, 2015.

54）藤田桂英 , 森顕之 , 伊藤孝行 , “ANAC:Automated Negotiating Agent Competition（国際自動交渉エージェント競技会）,” 人工知能 , Vol.31, No.2, 2016.
55）Dung, P.M.: On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games. Artificial intelligence 77, 321-357（1995）
56）Kraus, S., Sycara, K., Evenchik, A.: Reaching agreements through argumentation: a logical model and implementation. Artificial Intelligence 104, 1-69（1998）
57）Sierra, C., Jennings, N.R., Noriega, P., Parsons, S.: A framework for argumentationbased negotiation. In: International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, pp. 177-192. Springer,（1997）
58）木藤浩之 , 新田克己：Pareto 最適な撤回可能帰結を軽信的に正当化する実践的議 論意味論 , 人工知能学会論文誌 , Vol. 27, No. 2, pp.52-60（2012）
59）木藤浩之 , 栗原正仁 , 片上大輔 , 新田克己：“対立の弁証法的解決に向けた妥協的推論の形式化” , 人工知能学会論文誌 ,Vol.25, No.5, pp.570-578（2010.7）.

3.1.4　知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用

（1）研究開発領域の簡潔な説明

知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用は、知の集積・増幅・伝播・検索・予測・発見・アクチュエーションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人工知能や知的ロボットなど知的情報処理技術の研究開発が進展し、実社会への適用が次々と実現することに対して、倫理的・法的・社会的（ELSI: Ethical, Legal, and Social Issues）な視点での考慮は不可欠である。しかしながら、新しい科学技術の利用に関する懸念や不安は知的情報処理固有のものではない。そもそも、ELSI に関する研究は、米国が 1990 年にヒトゲノム計画を立ち上げた際に、研究に潜む倫理的・法的・社会的問題を同時に研究するとしたことに端を発する [1)]。

IT においても、ELSI という言葉は使わないものの、情報の電子化に伴う個人情報漏えいやプライバシー侵害への危険性や不安に対して、早くも 1980 年には OECD 理事会の「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に関する勧告」などの取り組みが始まっていた。わが国においては 2003 年に「個人情報の保護に関する法律」が成立した後、数々の事故や紆余曲折の議論を経て、2015 年には「改正個人情報保護法」が成立、匿名化などの情報処理を施すことでパーソナルデータの利活用を促進する枠組みが整備された [2)]。並行して学術界でも、水谷雅彦らによるプロジェクト「情報倫理の構築（FINE）」（1998-2003）にて応用倫理学の一分野として、現代社会特有の倫理的矛盾の解決を目指す情報倫理学を構築する試みも行われた [3)]。

ロボットについては、1980 年代から自動車の組立工場などで産業用ロボットの利用が普及し始めたが、かつて産業革命当初、機械の普及による失業を恐れた労働者が起こした機械破壊運動（ラッダイト運動）のような排斥運動は起こっていない。新たに生まれた IT や知的作業の雇用が労働力を吸収したためと言われる。一方で、人工知能により自らの行動を判断、決定し動作する知能ロボットは工場から家庭や街中に活動の場を広げた結果、周囲にいる人間に対する安全・安心の課題が重要になってきた。日本では総じてヒト型ロボットの開発が活発であるが、今日の自動車もロボットの一種とみなせる。特に、自動走行は、ロボットの三大要素である動力系技術、センシング系技術、制御系技術の高度な連携により初めて実現できるものである。車の自律的な判断による事故に対する責任問題は、倫理や法的な問題の議論を巻き起こしている。これはむしろ本稿の主題である知のコンピューティングの問題そのものといえる。

知的情報処理、特に人工知能は興隆期と幻滅期を繰り返しながらも、現在第 3 次ブームを迎えて、ゲームやクイズなど知的とされる分野においても人間の能力を凌駕するレベルになりつつある。近年の急激かつ驚異的な進展により、コンピューターが人間を超える

「技術的特異点」、シンギュラリティ（Kurzweil[4]）という技術用語が新聞などの一般メディアにまで登場する。哲学者が超知性体 SuperIntelligence の脅威（Bostrom[5]）を描出すると、それに呼応する形で、今度は産業界や情報科学とは異なる学術界から人工知能の開発に対する懸念が叫ばれるようになってきた（Musk[6]、Hawking[7]）。同時に経済学者や社会学者からは、人間の雇用を奪うコンピューター（Brynjolfsson[8]、Osborne[9]）という指摘や、人類はどこへ行くのかという哲学的な問題提起（Fuller[10]）がなされた。

【国内外の動向】

以下、各国地域の動向を列挙するが ELSI に関しては人工知能や知的情報処理に特化した活動は少なく、ICT や科学技術一般に関する ELSI を扱う活動が多い。

米国では、産業界が主導して ELSI に取り組んでいる。特に企業から多額の投資が行われている。倫理に関しては 1980 年代から継続して取り組んだ情報倫理学も 2002 年には完了した。Google に設立されたという倫理委員会も実体は見えないままである。法的課題については、特に新しい法律を作るというよりも既存の法律の運用で対応するように見える。これに比して社会的課題に対しては、企業、大学とも活動が活発である。Kurzweil の設立した Singularity University は学位を授与する大学ではなく教育も行う一種のシンクタンク兼ビジネスインキュベーターである。MIT の Brynjolfsson は 2011 年と 2014 年に 2 冊の本で人間と機械の新しいあり方について論じた。Stanford 大学では AI100 プロジェクトで 1950 年から 100 年間で人工知能が人々の仕事や生活にどのような影響を与えるかという研究を開始した。特筆すべきは The Future of Life Institute である（詳細は注目動向に記述）。

欧州では、欧州委員会が主導してファンディングとりまとめを行っている。1991 年から活動する欧州科学技術倫理グループはさまざまな倫理的問題を調査研究している。EU FP7 の下では、RoboLaw や Project ETICA（Ethical Issues of Emerging ICT Applications）が ICT に関わる倫理問題を扱っている。大学では、De Montfort 大学（英）CCSR（Center for Computing and Social Responsibility）や Oxford 大学（英）Future of Humanity Institute（FHI）の活動が目立つ。FHI は、人類とその繁栄に関する全体像を扱う多くの学問領域にまたがる研究機関として 2005 年に設立され[11]、“SuperIntelligence” の著者として著名な哲学者 Nick Bostrom が所長を務める。

中国では、2012 年に北京大学に ROBOLAW.ASIA | YSAiL Initiative for Robotics, Law & Policy が設立された[12]。ロボットだけでなく人工知能も含めた法律との関係を研究する。EU FP7 の ROBOLAW プロジェクトや早稲田大学 Humanoid プロジェクトと協力関係にある。

韓国では、2007 年に産業資源省からロボット倫理憲章の草案を発表。第 1 条の目標から、人間・ロボットの共同原則、人間倫理、ロボット倫理、製造者倫理、使用者倫理、実行の約束までの全 7 条からなる。

日本では、政府と学術界が主導して次のような取り組みが行われている。情報倫理に関しては上述したプロジェクト FINE（1998 ～ 2003）にて IT 専門家の倫理ではない「情報化社会を生きる万人の倫理」を構築した。少し時間を置いて、村田潔のプロジェクト「組織情報倫理学[13)]」（2012 ～ 2016）が始まった。村田らは De Montfort 大 CCSR との関係も深く ETHICOMP 2007（明治大学にて開催）を主催した。ロボットに関しては上述の通り安全基準やガイドライン[14)]が倫理に先行するが、本田康二郎はロボット倫理憲章を目指し一般市民を巻き込んだ活動をしている[15)]。新保史生らは、ロボットは安全基準だけで安心して利用できるわけではないとして、必要な法概念としての「ロボット法学会」の設立を目指した活動を 2015 年から開始した[16)]。土井美和子、萩田紀博、小林正啓は 2003 年より「ネットワークロボットフォーラム」にて、ロボットの社会受容に向けた活動を展開してきた[17)]。人工知能に関しては 2014 年には人工知能学会に倫理委員会が発足した。

(3) 注目動向

・The Future of Life Institute（FLI）[24)]

2014 年に Jaan Tallinn（Skype 共同創始者）らにより米国ボストンに設立。科学アドバイザーに、Nick Bostrom、Elon Musk、Steven Hawking など人工知能の開発に懸念を示す有識者も名を連ねるが、設立のミッションは「安全で明るい未来を作るための研究とイニシアチブを推進する」というもの。研究開発の優先順位や自動機械に関するオープンレターの発信、および、寄付金を基金とした研究開発の助成を行うなど積極的に活動を展開している[25)]。

・科学技術振興機構（JST）

2013 年開始の CREST「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」では研究総括の萩田紀博（国際電気通信基礎技術研究所）の方針により ELSI への取り組みを採択の条件とするなど研究者に ELSI を主体的に考える機会を与え続けている。CRDS では、2014 年に「知のコンピューティングと ELSI/SSH」ワークショップを開催し、知のコンピューティングに関わる ELSI の論点を議論した[26)]。その後も AAAS2015[28)] や ESOF2016[29)] にて国際的な議論を展開している。JST 社会技術研究開発センター（RISTEX）では 2016 年度から新規研究開発領域として「人と情報のエコシステム」にて、情報技術のもたらすメリットと負のリスクを特定し、技術や制度へ反映してゆく相互作用の形成を目指している[27)]。

・IEEE “Ethically Aligned Design”

2016 年 12 月に全米電気電子学会（IEEE）Global Initiative は、“Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Wellbeing with Artificial Intelligence and Autonomous Systems”[30)] を公開した（2017 年 3 月までパブリックコメントを受け付ける）。

(4) 科学技術的課題

CRDS では人文社会科学および情報科学関連の有識者を招聘して、「知のコンピューティング」[18] の描き出す未来像に対して、人文社会科学 / 情報科学の双方からプロジェクトの推進において必要となる ELSI に関する論点を議論した[19),20)]。下表に抜粋する。ただし、ここに探索された課題は、知のコンピューティングや人工知能・ロボットに専ら関わるものと、情報科学技術全般に共通するもの、さらには、科学技術一般の社会受容そのものに関わるものとの区別が必ずしも明確でない。本領域で重要なことは、既知の解決方法や智恵で解決できない本領域特有の課題を特定すること、そして、解決に必要な事柄を深く議論することである。人文社会科学系の研究者も情報科学の研究者と共に自らの問題として取り組むことが求められる。同時に、研究者、企業、行政から一般市民まで含めた広い場で公共の問題として議論することも必要である。

表 3-1-1 倫理的・法的・社会的課題と想定される問題

倫理的・法的・社会的課題	想定される問題
新たな犯罪	ハッキングされた機械やシステムによる詐欺や盗聴・盗用
個人情報とプライバシー	個人に関わる情報の利活用に関するさまざまな問題 機微情報の扱い、非言語情報の多くはプライバシー情報 看視と監視（監視カメラや通行履歴など） 平時や非常時（災害、犯罪、国防など）の使い分け
知の所有権	知の断片化の促進と専門知の経済基盤の流動化 二次情報、三次情報の所有権、知のエコシステム、AI の著作物
機械の判断と責任	機械の判断の正当性・妥当性の担保 結果に対する責任の帰着、責任のトップは人間だけか
機械の自律性 (SuperIntelligence)	自律的に動作する機械をいかに制御するか 判断・推論の信頼性の保証
人間の自由意志	人間の行動原理や意思決定のメカニズムの研究により、個人や集団の合意形成や意思決定の制御・誘導
アイデンティティー	サイバー上の情報やプロファイリングによる虚像 それに基づく不公平や差別の助長 情報の標準化による個性の喪失
労働や雇用	機械により奪われる雇用問題 実践知の蓄積による名人・職人の雇用喪失
人間と機械の新たな関係	技術の進歩に人間はどう対応すべきか（抑制か活用か） 社会システムの技術への過剰依存、サイバーテロ

(5) 政策的課題

政策的課題は以下の通り。

・ELSI に関する学際的な拠点

知的財産センターが、研究者の知的財産の創造・保護・活用の促進を目的とするのと同じように、研究者の ELSI に関する普及啓発（後期教養教育）、相談（事前検証と事後対応）を支援して、ELSI 問題を適切に解決する仕組みが必要である。恒久的な機関として設立して継続的に支援することでさまざまなノウハウを組織的に蓄積することがわが国の国際的な競争力を向上させると期待される。

・人文社会科学者の継続的な関与に向けた取り組み

知のコンピューティングの ELSI については、倫理学者、哲学者、法学者、憲法学者、

社会学者、政治学者、経済学者などの人文社会科学者の研究者が自身の研究課題として積極的に関与することが望ましい。EU では人文社会科学者が、Horizon 2020 プロジェクトにおいて、SSH（社会人文科学）に対する賢明な投資が EU に有益であると宣言した（ビルニウス宣言、2013 年リトアニア）[21]。プロジェクトの終了と共に活動やコミュニティーが終息することがないよう、継続的な取り組みが必要である。

・実環境シナリオでの実証

Paolo Dario（イタリア聖アンナ大学院大学）は、EU/FP7 RoboLaw プロジェクトにおいてロボットを市民が暮らす環境の中で働かせて試験した。さまざまな問題に遭遇し、対応に多大な努力を要したが、その結果、法規制の欠如、政治的手段、想定外の障害などが明らかになったという [22]。知のコンピューティングが提供するアプリケーションサービスにおいても特区などの制度を活用して実際の適用に向けた課題の抽出と必要な対処の試行を効率的に実施すべきである。

・研究者に対する ELSI 教育の実践

藤垣裕子（東京大学）はリベラルアーツ（人間を種々の拘束や制約から解き放って自由にするための知識や技芸）をある程度の専門教育を受けた後で初めて意味をもつ「後期」教養教育と位置づけた [23]。知のコンピューティングの社会的・経済的インパクトの大きさを鑑みるに、さまざまな機会を通じて幅広い研究者に教育を実践することが重要である。

(6) キーワード

情報倫理、ロボット倫理、倫理委員会、プライバシー、個人情報保護、製造物責任、ロボット法、社会受容、科学技術社会論、倫理教育、後期教養教育、ELSI、SSH

(7) 国際比較

本稿では、カテゴリーを ELSI の各イシューとして比較する。

国・地域	イシュー	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	倫理的	→	○	・水谷雅彦（京都大）らのプロジェクト「情報倫理の構築（FINE）」（1998-2003）、『情報倫理の構築』出版（2003） ・村田潔（明治大）らのプロジェクト「組織情報倫理学」（2012-2016）、EHICOMP 2007 を主催 ・人工知能学会に倫理委員会発足（2014）
	法的	↗	○	・赤坂亮太（慶應大）が発起人となりロボット法学会設立に向けた準備委員会が活動を開始（2015） ・徳田英幸らによる「ネットワークロボットフォーラム」（2003～）、『ネットワークロボット―技術と法的問題―』出版（2007） ・無人航空機（ドローン、無線操縦機等）の安全な飛行のためのガイドライン施行（2015/12）

日本	社会的	↗	◎	・経産省・NEDO による「生活支援ロボット実用化プロジェクト」にて生活支援ロボットの安全性に関する検討を実施 ・ISO13482「生活支援ロボットの国際安全規格」発行（2014/2）。上記プロジェクト成果を経済産業省と NEDO が提案したもの ・人工知能が浸透する社会を考える、AIR: Acceptable Intelligence with Responsibility（2014-） ・日本学術会議「科学技術の光と影を生活者の対話から明らかにする」分科会（2015-） ・JST RISTEX「人と情報のエコシステム」 ・内閣府「人工知能と人間社会に関する懇談会」（2016）
米国	倫理的	↗	○	・Deborah Johnson “Computer Ethics”（1984,1993,2002）。コンピューター倫理学に関する世界初の教科書。 ・Google Ethics Committee 設立（2014/1） ・IEEE が倫理的 AI の設計に関するレポートのドラフト発行（2016）
	法的	→	○	・We Robot: Conference on Legal and Policy Issues Relating Robotics（2012）
	社会的	↗	◎	・Rob Nail、Ray Kurzweil, “Singularity University”（2008） ・Brynjolfsson and McAfee, “Race Against The Machine”（2011）, “The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies”（2014） ・Max Tegmark, Jaan Tallinn, The Future of Life Institute（FLI）（2014/3） ・Stanford 大 “One Handred Year Study on Artificial Intelligence（AI100）”（2014）
欧州	倫理的	↗	◎	・Oxford 大 “Future of Humanity Institute（FHI）”
	法的	→	◎	・EU/FP7 プロジェクト RoboLaw（2012-2014）、“Guidelines on Regulating Robotics” 発行（2014）
	社会的	↗	◎	・De Montfort 大、Centre for Computing and Social Responsibility（CCSR）（1996） ・Vilnius Declaration - Horizons for Social Sciences and Humanities（2013） ・Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?”（2013-/9） ・Nick Bostrom, “Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies”（2014/7） ・HORIZON 2020, “Responsible research & innovation”（2014-）
中国	倫理的	→	×	・特になし
	法的	↗	△	・北京大 “ROBOLAW.ASIA| YSAiL Initiative for Robotics, Law & Policy”（2012）
	社会的	→	×	・特になし
韓国	倫理的	→	△	・産業資源省『ロボット倫理憲章』発表（2007）
	法的	→	×	・特になし
	社会的	↗	△	・SOCIAL IMPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE - SIAI 2015

（注１） イシュー：倫理的、法的、社会的
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）小林傳司『トランス・サイエンスの時代 科学技術と社会をつなぐ』NTT 出版、2007
2）森亮二、日本の個人情報保護法改正の状況、情報処理 Vol.55 No.12、2014
3）水谷雅彦他、『情報倫理の構築』、新世社、2003
4）Ray Kurzweil, “The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology”,2006
5）Nick Bostrom, “Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies”, 2014

6）CBSNEWS, “Elon Musk: Artificial intelligence may be “more dangerous than nukes” ” , 2014
7）BBC NEWS, “Stephen Hawking warns artificial intelligence could end mankind” ,2014
8）Erik Brynjolfsson, Andrew McAfee, “Race Against The Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy” ,2011
9）Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?” , 2013
10）Steve Fuller, “Humanity 2.0: What it Means to be Human Past, Present and Future” , 2011
11）Future of Humanity Institute（https://www.fhi.ox.ac.uk/）
12）ROBOLAW.ASIA（http://www.robolaw.asia/index.html ）
13）組織情報倫理学、営利および非営利組織における情報倫理問題への対応ための政策提言に関する研究（http://www.cbie.meiji.jp/ja/）
14）経済産業省「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」, 2007
15）本田康二郎、プロジェクト「工学的関心に基づく倫理学の構築」（2013 ～ 2015）
16）新保史生、「ロボット法学会」設立準備研究会（http://robotlaw.jp/archives/66 ）, 2015
17）土井美和子・萩田紀博・小林正啓、「ネットワークロボット―技術と法的問題―」、2007
18）科学技術未来戦略ワークショップ「Wisdom Computing Summit」, 2013
19）科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」, 2014
20）サイエンスアゴラ 2015「激論！先端 ICT の光と影」
21）VILNIUS DECLARATION
（https://erc.europa.eu/sites/default/files/content/pages/pdf/Vilnius_SSH_declaration_2013.pdf）
22）Paolo Dario、“Testing Robotic Applications in Real-Life Scenarios”、ロボット革命国際シンポジウム、2016
23）藤垣裕子、『科学・技術と社会倫理』、p139、東京大学出版会、2015
24）The Future of Life Institute（http://futureoflife.org/team/ ）
25）西下佳代他、人工知能やロボットの社会的影響に関する先行的研究動向、第 30 回研究・技術計画学会予稿論文集、2015
26）科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」（ http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-09.pdf ）、映像版（https://www.youtube.com/playlist?list=PLwlAbCcz-l4sIISl7wnkSBvRGMVmI-Yzg ）
27）「人と情報のエコシステム」（http://ristex.jst.go.jp/examin/active/hite/ecosystem.html）
28）Wise Computing: Collaboration Between People and Machines, AAAS 2015 Annual Meeing, 2015
29）Wisdom computing: creative collaboration between humans and machines,

EuroScience Open Forum Manchester 2016（ESOF2016）
30）Ethically Aligned Design - The IEEE Standards Association
http://standards.ieee.org/develop/indconn/ec/ead_v1.pdf（2016）

3.1.5　認知科学

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

認知科学は人間、動物、機械、社会にさまざまな形で実現されている知の構造、機能、発生を扱う研究領域である。方法としては、心理実験、脳計測、コンピューターシミュレーション、統計解析、エスノグラフィーなど多様な方法を用いる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[歴史的背景]

認知科学は 1950 年代後半に米国における認知革命をその起点とする。それ以前に主流であった行動主義は刺激と反応との間の関数関係の同定のみを行い、内的情報処理過程についての言及を避けてきた。しかしこ Miller, G. A. による短期記憶の研究、Chomsky,N. による生成文法、Newell, A. や Simon, H. A. による問題解決の計算モデルなどの提案がこの時期に行われ、入力情報を加工、精緻化し、内的表象を作り出すものとして知性を捉える立場が一挙に普及した。

この後、認知科学は情報科学、特に人工知能との密接な関係を築き、人間の知性の基盤となる構造（アーキテクチャー）の解明、知識の表現と利用に関わる研究を、主に認知（知覚、記憶、言語、思考等）領域において行ってきた。この過程において、Rumelhart, D. や McClelland, J. L. によるニューラルネットワーク、認知神経科学、進化心理学、ロボティクスとの共同などを通して、その研究領域を拡大してきた。コンピューター・ビジョン、翻訳を含む自然言語処理、経済活動における意思決定、学校教育プログラム、ユーザーインターフェースの分析、改善などに大きな影響を与えてきた。

[近年の学術的動向]

他研究領域との共同を行うことで認知科学はさまざまな展開を遂げた。これらの中で実社会での応用の可能性を含むものを取り上げる。

新しい計算論が切り拓く認知科学の展開：

認知科学は計算機科学と切り離せない。一方で、初期の認知科学においては、知能の表現をプログラミング言語のような記号操作に求め、それゆえの表現の限界がしばしば指摘されてきた。Barsalou はそのような記号操作を中心とした認知システムの表現を Amodal（感覚独立）であると指摘し、知覚的シンボルシステムは Modal（感覚従属）であるべきだと指摘した（Barsalou、1999）。しかし、視覚情報処理に関しても、音声情報処理においても、それらを統合するロボティクス技術に関しても、20 世紀においてはソフトウエア的制約、ハードウエア的制約が共に強く、それらをマルチモーダルに包含した認知システムに関する計算論を組み立てることは極めて困難であった。

計算機資源の発達やプログラミング技術の発展により、これらの制約が外れてきたことに、近年の人工知能ブームの端緒とも呼ばれる深層学習の発展や、ベイズ理論に基づく各種の機械学習技術の発展の理由の一つがある。初期の認知科学や人工知能において重要でありかつ問題含みの存在であった記号（シンボル）という存在に対しても、マルチモーダ

ル情報からボトムアップに組織化される存在であるという仮定の下で、この形成過程を表現可能な計算論を明らかにしようという記号創発ロボティクスといった新たな取り組みも注目されている（谷口 、2014）。ノンパラメトリックベイズ、深層学習、スパースコーディング、確率的プログラミングなどといった新しい計算論の潮流の中で、認知科学研究においても、新たな展開が国内外において生じてきている。

知の社会性：

近年、ヒトの知性、およびそれを支えた脳の進化が、われわれ人間の社会性に由来するという考え方が広まってきている。つまりヒトの知性は比較的大きな社会集団においてその規範を守りつつ、協力し合うことから生じたという考え方である（開・長谷川 、2007; 苧阪 、2013; Tomasello、2010）。

こうした流れは乳幼児発達研究、人の近縁種を用いた比較認知科学研究、また進化心理学、社会心理学分野の研究者と認知科学者との共同を促し、その知見は知の社会性という仮説の確実性を高めている。この分野、特に比較認知研究は、京都大学霊長類研究所、東京大学進化認知科学研究センターなど世界有数の研究機関を有する日本が国際的にも先導集団の一角を占めている。新学術領域研究『共感性の進化・神経基盤』（代表：長谷川寿一）では、共感に着目した人間の知の社会性を探究する試みが行われている。基盤研究（S）『社会脳を担う前頭葉ネットワークの解明』（代表：苧坂直行）では、前頭葉ネットワークに注目し、さまざまな脳計測手法を用いて知の社会性の解明のための研究を行っている。

また、1990 年代から活発に進められている共同認知（collaborative cognition）も知の社会性を強く意識したものとなっている。ここでは人同士の共同が学習、問題解決にどのような影響を与えるのかをパフォーマンスレベルではなく、プロセスレベルで解明することに成功している（植田・岡田 、2000）。この成果は 21 世紀型スキルの育成と深く関わる学習科学の理論的支柱の一つとなっている。また近年設立された MIT の Center for Collective Intelligence では、こうした知見をベースにしながら、新規で魅力的な商品開発や市場での成功を生み出す組織の知性の特性の解明も行っている。

一方、Vygotsky, L. S. などの思想の流れを現代的に展開した状況的認知も認知の社会的側面を前提とした研究を進めてきた（Lave & Wenger, 1991）。この立場では共同体における人同士の関係のあり方、人と環境内の人工物との関係のあり方から、認知を捉えるという立場を取る。

知の身体性：

従来、身体は脳、あるいは中央制御系のシステムの命令を受けて受動的に働く機関であると考えられてきた。今日では、生態心理学、ロボティクスなどの研究領域との共同により、脳や中央制御系は身体の動きや働きを前提としたコントロールを行う、ある意味で折衷的な機能を果たしているにすぎないという見解が主流である（Barrett, 2011; Pfeifer & Bongard, 2007）。

生態心理学の研究は、人間の行為を微視的に分析し、環境情報、各身体部位の協調関係を明らかにしてきた（佐々木 、2013）。加えて、視覚、聴覚等さまざまなモダリティからの情報を統合する仕組み、それらが相互に与える影響を検討する多感覚統合研究は認知科

学において急激に発展を遂げているが、これも知の身体性の流れの一つと考えられる（特集「多感覚コミュニケーション」、2011; Special Issue: Action and language integration, 2014）。

知の創造と創発：

最後に知の創造と創発についての研究分野が挙げられる。知性は蓄えた知識を利用するだけでなく、与えられた環境の制約の中で、新たな知を絶えず作り出している。こうした活動が顕著な形で現れているのは、科学的な発見、工学的な発明、芸術、スポーツなどの分野においてである。これに加えて問題発見などの創造的能力を含む 21 世紀型スキルを育成する学習科学研究も展開している（Griffin, et al., 2011; 特集「批判的思考」, 2012; 特集「ヒューマン・ロボット・ラーニング」, 2012）。

この分野では実験室における研究、フィールド調査に加えて、脳計測、モーションキャプチャーなどの新しい技法による研究も行われている。この分野での研究センター、大型プロジェクトは存在しないが、日本の研究者は先端的な研究成果を残している。その結果、創造的活動においては、ローカルなレベルでの揺らぎが組織化され、システム的に共鳴する過程が含まれることが明らかになってきている。特に意識的な思考とは別の系の思考が先行的に働き、両者の相互作用が創造の核に存在するという知見が提出されている（特集『高次認知過程における意識的 , 無意識的処理』, 2013）。

諸外国に比べて研究活動が活発な領域である芸術の認知科学も、まさにこの知の創造と創発に深く関わる。この分野では、音楽、美術などに加えて、日本の伝統芸能の研究も活発に行われ、そこでは「息」、「間」など暗黙知とされてきたものへの科学的アプローチも始められている（特集「芸術の認知科学」,2014）。

判断と意思決定：

人間の判断や意思決定についての研究は長い歴史があり、膨大な知見が蓄積されてきた。近年は行動経済学の発展とも相まって、認知科学においても中心的なトピックの一つとなっている。2014 年の米国認知科学会では八つのセッションが意思決定に関するものとなっている（総セッション数約 100）。また日本においても、認知科学会では「判断と意思決定の認知科学」という特集号が組まれ、24 編の投稿がなされてもいる（うち 12 編採択）。これには、判断、意思決定が司法、投資、購買、医療、道徳、組織運営など、社会的に極めて重要な活動の根幹にあること、また人間の実際の判断、意思決定が特徴的なゆがみ、バイアスを持っていること、研究方法論が多様化したこと（脳機能画像、生理指標、進化心理学、複雑系モデリング等）が関係している。

［応用、社会との関わり］

グローバル化に伴い、日本は戦後の労働集約的な産業形態から、知識集約型のそれへの転換が強く求められている。特に新たな価値を生み出すイノベーションのメカニズムの解明とそれを生み出す環境の設計は急務である。これについては経営学の一部の分野での研究がなされているが、基本的に事例研究にとどまっており、応用、再利用可能な形の知が蓄積されているとは言い難い。こうした現状を打破し、持続可能なイノベーション社会を

築き上げるためには、人の思考、学習、発見についての認知科学の知見をベースにした、さらなる研究の展開が必要となる。

現代日本は超高齢化社会への突入に伴う問題（介護、認知症、独居老人等々）、また発達障がいの顕在化などさまざまな医療、福祉上の問題を抱えている。この分野の充実においても、認知科学の貢献は多岐に渡る。まず自閉症スペクトラムに代表される発達障がいについては、自己、他者認知について長年の知見を積み重ねてきた発達認知科学の知見が診断、支援に大きな役割を果たしてきたし、今後もさらにその役割は大きくなると考えられる（Baron-Cohen、1995）。また人とロボットの関係の構築についての研究を行ってきた HAI の研究は、介護の現場においての利用が期待されるロボットの開発にとって重要である（山田 , 2007）。

今後の教育に関する認知科学の役割は極めて大きい。特に新世代の持つべき能力として注目されている 21 世紀型スキルの育成については、問題解決、創造、批判的思考などについて蓄積を行ってきた認知科学の知見を抜きに進めることは困難である（楠見・道田 , 2016）。またその教育の実施の携帯についても従来の講義型の一方向的な伝達ではなく、学習の場のデザインを共創という側面から探究してきた学習科学の知見も不可欠である。

日本は古来さまざまな文化のエッセンスを巧みに吸収し、独自の価値を持つ文化、芸術を生み出してきた。こうした文化、芸術の伝承、そして新たな創造は今後もその重要性を失うことはないだろう。認知科学ではデザインや芸術に関する研究が他国と比べても非常に活発に行われており、その研究コミュニティーも作り出されている（日本認知科学会における『デザイン・構成・創造』、『芸術と情動』分科会等）。こうした知見を集約し、今後の展開につなげる取り組みが必要である。

(3) 注目動向

・新学術領域『認知的インタラクションデザイン学』（代表：植田一博）では、人間同士、人間と動物の相互適応のメカニズムの解明に基づき、ロボットや人工物のデザインへその成果を応用する取り組みを始めている。また科学技術振興機構の助成を受けた『みんなの使いやすさラボラトリー』（代表：原田悦子）では、さまざま人工物の使いやすさを高めるために、ユーザー心理、製品デザインの観点からの研究を進めている。またここでは新しい製品への適応に困難を覚えやすい高齢者を対象とした研究も行われている。

・JST 戦略的創造研究推進事業（CREST）で進められている「人間と機械の創造的協働を実現する知的情報処理技術の開発」（研究統括：萩田 紀博）では、人間と機械の協働により新たな知を創出し、人・集団の知的活動の質向上を実現する知的情報処理システムを目指した研究開発を推進している。プロジェクトの一つである、「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」（代表：長井隆行）は、人とロボットが意味理解を伴ったコミュニケーションに基づいて日常的なタスクを協調しながら達成する「人間機械コラボレーション」を実現する基盤技術の確立を目指し、実世界で意味理解を扱う「記号創発ロボティクス」のアプローチをコミュニケーションやビッグデータ利活用へ拡張し、ロボットが言葉や行動、環境の真の意味を自ら獲得し理解・行動す

るための技術を開発している。

・プロジェクション科学：認知科学は、人間の認知を刺激の受容から内的表象を構成する過程として描き出してきた。しかしながら表象は多くの場合、自分の外に感じられる。視覚刺激から作り出された視覚表象は当然脳の中に存在するが、当該の事物は脳の中に見られるのではなく、現実の世界の中に投射、定位される。この投射の過程についての研究はこれまでにほとんど存在しないが、2016 年の認知科学会ではプロジェクション科学として展開する必要性が議論された（小野 , 2016; 鈴木 , 2016）。 投射は、自己概念、ラバーハンド現象、腹話術効果などの心理学的な現象だけでなく、統合失調症における幻聴、幻視、失感情症などの精神疾患、ユーザーインターフェース、AR や VR によって作り出される仮想世界への没入感など、社会的にも重要なさまざまな現象に関連する。これらを包括的に扱う新しい領域の設立が望まれる。

（4）科学技術的課題

これまでに述べてきたように、認知科学がこれまでに蓄積した知見は産業、医療・介護、教育、文化・芸術などさまざまな分野の発展に重要な役割を果たす可能性がある。ただし、これらは認知科学内部だけで完結するものではない。関連分野との連携、協力が不可欠である。残念ながらこの連携、協力は現時点前十分な形で行われているとは言えない。

そこでこの現状を改善し、関連分野との連携の強化を行い、今後の日本社会の維持、発展に必要な取り組みについて述べる。

イノベーションに向けた取り組み：日本企業の国際競争力を高め、付加価値の高いプロダクトを生み出すために、認知科学、心理学、経営学、企業の相互交流を促進するための研究プログラムの設置、また研究センターの設立が急務である。特に企業の中で育まれている潜在的な知、暗黙知を明らかにし、その構造、機能、発生、伝達を一貫した形で明らかにすることは科学的にも社会的にも重要性が高い。この取り組みにおいては、（2）で挙げた知の創造、創発の研究が大きな役割を果たすであろう。

教育改革に向けた取り組み：21 世紀型スキルの実質の解明および教育カリキュラムの策定のために、認知科学、学習科学、教育工学などの連携を強化する必要がある。従来の知識伝達型の教育から、知識創造の教育への移行のための教育の具体的な姿を明らかにするプロジェクトが必要である。効率的にたくさん覚え、それを上手に使うための教育だけでなく、新たなアイデアを生み出し、意外性に関する好奇心を持ち、適切な評価眼を備えた人材を作り出す必要がある。またこうした研究の展開は、新たな大学入学者選抜方法の策定にも極めて重要である。

超高齢化社会に向けた取り組み：高齢者の介護、リハビリ、社会適応を促進するために、認知科学、ロボット科学、医学、理学療法など関連分野の交流が必要である。ここでは単に自動化された、効率的な介護システムではなく、高齢者が安心し、豊かな生活をおくれる、温かいシステムの開発を目指すことが重要である。この取り組みにおいては、（2）で

挙げた感情・情動的知性、知の身体性に関わる研究の役割が期待される。

芸術・文化を伝承、発展させるための取り組み：新たな価値の創出は産業界だけではなく、芸術、文化においても必要となる。この分野は各芸術領域の専門家の独占物となっているが、これをより活性させ、次世代へとつなげる取り組みが必要であり、認知科学はその中核に位置すると考えられる。この取り組みにおいては、(2) で挙げた知の創造、創発に関わる研究が大きな役割を果たす。

(5) 政策的課題

認知科学は知の総合科学であるので、上記のさまざまなプロジェクトに関係する知見を積み重ねている。人工知能については AIP の設立などの国家レベルでさまざまな動きが見られる。これが、人工知能が人間社会の中で機能するのであれば、認知科学の研究成果の取り込み、認知科学者の参加は必須と考えるべきであろう。しかしながらプロジェクトは技術開発に傾注し、それを利用する人、その影響を受ける人の問題が議論される兆しは見えない。また教育改革に向けた取り組みにおいても、上述の専門的知見を有した人材が、教育実務、教育行政レベルで決定的に不足している。

(6) キーワード

情動知能、知の社会性、知の身体性、創造と創発、イノベーション、21 世紀型スキル、文化と芸術、医療と介護

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした資料など
日本	基礎研究	◎	→	研究テーマが細分化する傾向にあるが「人間の知の理解」などの基礎的研究に取り組む研究者も増えつつある。
	応用研究・開発	○	↗	人間行動の理解（消費者行動や災害時の避難行動など）に基づく、サービス工学研究が立ち上がりつつある。また、工業製品のユーザビリティを反映した製品開発が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	認知科学は心理学や脳科学、工学の融合分野に位置づけられており、企業を含め基礎研究は充実している。
	応用研究・開発	◎	↗	脳活動を計測することで人間行動の情動面での理解を目指した研究が立ち上がりつつある。消費者の購買行動や政治活動（投票行動など）を脳活動から推測するニューロマーケティングが盛んになっている。 Antonio Rangel（CalTech）, Read Montague（University College London） 認知科学的視点に基づくコンサルタント専門の企業も立ち上がり、製品展開している。
欧州	基礎研究	◎	↗	認知科学は特に医学分野との連携を深め、医療分野での基礎研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	自閉症の早期発見・治療プロジェクトを代表として、認知科学の成果を応用した治療法の開発が盛んである。IROMEC（Interactive Robotic Social Mediators as Companions）プロジェクト

中国	基礎研究	△	→	fMRI や PET を利用した脳機能計測に基づく認知科学的基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	×	→	ベンチャー企業を中心にさまざまな認知科学の知見を応用した教材や知育玩具は開発されているが、特筆すべき活動は見えていない。
韓国	基礎研究	×	→	韓国科学技術院を中心に基礎研究が行われているが、特筆すべき活動・成果が見えていない。
	応用研究・開発	△	↗	自動車運転時の行動解析の大型プロジェクトが進行している。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

安西祐一郎他（編）(2014).『コミュニケーションの認知科学 1－5』岩波書店
Baron-Cohen, S. (1995). *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*. MIT.
Barrett, L. (2011). *Beyond the brain: How Body and Environment Shape Animal and Human Minds*. Princeton University Press.
Damasio, A. R. (2003). *Looking for Spinoza: Joy, Sorrow, and the Feeling Brain*. Harcourt.
藤田和生（編）(2007).『感情科学』京都大学学術出版会 .
Griffin, P. et al. (Eds.) (2011). *Assessment and teaching of 21st century skills*. Springer.
開一夫・長谷川寿一（編）(2009).『ソーシャル・ブレインズ：自己と他者を認知する脳』東京大学出版会 .
楠見孝・道田泰司（編）(2016).『批判的思考と市民リテラシー：教育、メディア、社会を変える 21 世紀型スキル』誠信書房 .
Lave, J. & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate, peripheral participation*. Cambridge University Press.
LeDoux, J. (1996). *The Emotional Brain: The Mysterious Underpinning of Emotional Life*. Simon & Schuster.
小野哲雄 (2016). プロジェクションサイエンスの視点からの認知メカニズムのモデル論的理解 . 第 33 回日本認知科学回大会発表論文集（CD).
苧阪直之（編）(2013).『社会脳シリーズ 1-3』新曜社 .
Pfeifer, R. & Bongard, J. (2007). *How the Body Shapes the Way We Think*. MIT Press.
佐々木正人他（編）(2013).『知の生態学的展開 1－3』東京大学出版会 .
Special Issue: Action and language integration: From humans to cognitive robots.

Topics in Cognitive Science (2014). Vol. 6, No. 3.
Special Issue: The cognitive science of visual-spatial displays: Implications for design. *Topics in Cognitive Science* (2011). Vol.3. No. 3.
Special Issue: Collective behavior. *Topics in Cognitive Science* (2009). Vol. 1, No. 4.
Special Issue: Does cognition deteriorate with age or is it enhanced by experience? *Topics in Cognitive Science* (2014). Vol. 6, No. 1.
Special Issue: Music cognition and the cognitive sciences. *Topics in Cognitive Science* (2012). Vol. 4, No. 4.
鈴木宏昭（2016）. プロジェクション科学の展望 . 第 33 回日本認知科学回大会発表論文集（CD）.
谷口忠大（2013）.『記号創発ロボティクス』講談社 .
特集『デザイン学』日本認知科学会（編）(2010).『認知科学』vol.17, No.3.
特集『芸術の認知科学』日本認知科学会（編）(2013).『認知科学』vol.20, No.1.
特集『判断と意思決定の認知科学』日本認知科学会（編）(2015).『認知科学』vol.23, No.3.
特集『批判的思考』日本認知科学会（編）(2012).『認知科学』vol.19, No.1.
特集『ヒューマン・ロボット・ラーニング』日本認知科学会（編）(2012).『認知科学』vol.19 No.3.
特集『高次認知過程における意識的 , 無意識的処理』日本認知科学会（編）(2013).『認知科学』vol.2 0, No.3.
特集『社会性認知のメカニズム』日本認知科学会（編）(2011).『認知科学』vol.18, No.1.
特集『多感覚コミュニケーション』日本認知科学会（編）(2011).『認知科学』vol.18, No.3.
Tomasello, M. (2010). The Origins of Human Communication. MIT.
植田一博・岡田猛（編）(2000).『協同の知を探る：創造的コラボレーションの認知科学』. 共立出版 .
山田誠二（編）(2007).『人とロボットの間をデザインする』東京電機大学出版会 .

3.1.6　脳情報システム

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

脳の高度で柔軟な情報処理の機構についての知識を創出し、新しい脳型コンピューターや人工知能へ応用する技術である。脳の構成要素である神経細胞（ニューロン）、神経ネットワーク（ニューラルネットワーク）、個々の脳のつながりで形成される社会的なネットワークにおいて、その構造・ダイナミクス・機能がどのように関連するのかを明らかにする。その上で、脳の情報処理機構の一部を既存のコンピューター、または専用のハードウエアに実装して情報システムを構築する。

知のコンピューティングの創成にあたって、脳情報システム領域は不可欠である。その領域の概観は、知のコンピューティングを“創る”そして“実現する（使う）”という視点を考えるとわかりやすい。知のコンピューティングの創成で、ヒトや動物のさまざまな行動、その知覚・認知・運動―ひいては情動・感情・意思決定・学習・社会性など―、すなわち、脳の働き＝「脳情報システム」が大きなヒントになる。知のコンピューティングの実現には、「脳情報システム」とうまく対応するように、ヒトの活動の中に埋め込まれていくことが必要である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

領域全体の総称としては、計算脳科学（計算神経科学、計算論的神経科学とも言われる。以下同様）、理論脳科学、数理脳科学、情報脳科学とも称される（おのおので若干の強調点の違いがあるが、ここでの記載では同様と見なしてよい）。一方で、計算脳科学を母体とする中で、脳科学全体、さらには情報科学、心理学・経済学などの人文科学全般、そして医学・生物学をはじめとし、物理学・化学との連携も必要とされる、極めて学際的な領域である。脳情報システムはこのように射程が広い領域だが、以下、知のコンピューティングにむけて、「脳の働きを抽象」「さらに飛躍」「さらに身近に」「未来への苗床」という観点から分類して記載していく。

［抽象］

脳回路網の数理、非線形数理モデル、脳の学習、ヒト知性の脳情報システムとしての理解

上に述べたような脳のさまざまな素晴らしい機能を、脳の情報処理として、脳の計算がいかに行われるかを、その働きを数理的に抽象することで理解する、その脳情報システムを構成する、という研究領域である。数理的定式化のみならず、計算機シミュレーションなどを通じた能力の実証、また諸処の実験データとの比較検証も研究の重要な一部である。脳情報処理の計算を理解しようとする研究は、そのアプローチにはいくつかある。お互いに背反するアプローチではないが、それぞれの特長からアプローチ別に眺めておくと理解がしやすいと思われる。

一つには、多数の神経細胞が活動し、その相互作用からうまれる情報処理を理解しようとする研究である（神経回路脳の数理）。脳の働きを数理モデルとして記述・抽象化した

上で調べることが、重要な研究手段になっている。神経ネットワークを非線形力学系として捉え解析するための分岐理論や、統計モデルとして捉えて解析するための理論・手法が研究されている。個々の神経細胞、神経ネットワークの動力学、ネットワークの結合パターンの変化を数理モデルとして記述することにより、計算機上で局所的な神経ネットワークの振る舞いを再現することができる。神経細胞の詳細なパラメータや構造を取り込んだ詳細モデルを大規模な計算資源を用いて解析する手法があるが、一方で脳を理解するためには、複雑な神経ネットワークのダイナミクスから本質的な特性を抽出・抽象化する手法が重要である。また多様な脳活動計測のデータの解析手法も研究されている。

神経回路網の数理とも密接に関わるが、もう一つは「脳の学習」に着目したアプローチである。学習もその特徴に応じていくつかに分類できる。いわゆる「教師なし学習」「教師つき学習」「強化学習」の分類である。これらの分類の説明については他にゆずり、脳科学での近年の進展に関わる点をいくつか挙げる。教師なし学習は、入力の中に潜む構造をうまく把握する表現の学習であり、表現学習とも呼ばれる。近年、工学的展開でさまざまな話題を提供している深層学習も、もともとは脳の視覚系の表現学習の研究から生まれた。教師つき学習は、小脳の学習系との関連でロボット制御への新たな提案などの展開が生まれている[1)]。また自己組織化理論も教師なし学習に含まれる。強化学習は、脳における意思決定と学習の機能解明で、現在進展がもっとも目覚ましい[2),3)]。構造学習は、外界の構造の学習を行うものであり、高次認知機能の理解に重要と考えられている[4)]。Alpha Go の研究は、脳情報システムの知見を取り入れつつ、深層学習と強化学習をうまく融合させ、ビッグデータをうまく利用した、工学的進展である[5)]。

ヒト知性の脳情報システムとしての理解を進める研究も大いに進展している。一つは全脳レベルの構造を反映するようなシステムを作ることでその機能理解を進めるアプローチである[6)]。一方で、よりマクロなレベルで脳情報システムの理解を進めるアプローチがある。これは、特に、より高次の認知機能、例えば、ヒトのいわば究極の機能ともいえる社会知性、の情報処理とそれが脳のシステムの中でどのようにつくられているかを明らかにしようとするアプローチである[7),8)]。

［飛躍］
情報幾何、量子ニューラルネットワーク論

脳情報処理の数理原理を抽出することで、そこから新たな統計情報科学に数理的に展開しようという動きもある。例えば、情報幾何は、日本の計算脳科学研究から生まれてきた、日本オリジナルの研究分野として特筆すべきものがある。情報幾何とは、情報あるいは確率分布などを幾何学として定式化する研究アプローチである。また、後には代数学の手法を取り入れたアプローチなどとも交流している[9)]。広範な統計情報科学での諸問題に数理的にアプローチする際に、強力な数理的手段、理論的展開を支える基盤を提供している[10)]。

脳情報システムの活用をさらに飛躍させる要素として、神経ネットワークを専用の電子

回路に実装するニューロモルフィック・ハードウエアの研究が挙げられる。神経細胞の膜電位の動力学特性を再現するアナログまたはデジタル回路を集積し、高速動作と低消費電力で情報システムを構築するものである。センサーやアクチュエーター、複数のニューロモルフィックシステムを接続するためのインターフェースの規格も整備が進められている。

さらに量子コンピューター上にニューラルネットワークを構築する試みがある。量子性を持つ素子および素子間の結合を実装可能な専用ハードウエアに、量子ニューラルネットワークを構築し、その特性を活かした脳情報システムを構築する。日本では、多数の光パルスと光パルス同士の相互作用をレーザーネットワーク上に構成し、量子ニューラルネットワークを構築しており、組み合わせ最適化問題、画像認識などの機械学習への応用が見込まれている。

［身近］
Brain Machine Interface、人工知能応用（深層学習応用含む）

神経ネットワークの機能を応用した、パターン認識、最適化、予測、制御などさまざまな情報処理がある。近年急速に応用が進んでいる深層学習（ディープラーニング）も神経ネットワークとその学習機構を抽象化したものであり、画像認識・音声認識をはじめとするさまざまな分野で身近に利用されている。また今後身近になる応用技術として、脳活動から情報を読み取りブレイン・マシン・インターフェース（BMI）や脳情報解析の技術がある。

脳情報システムの研究の進展は、例えばパソコン･携帯あるいはいわゆる IoT の中にも、徐々に浸透して利用されている感がある。その一方で、脳情報システムの研究を、より目鼻立ちがはっきりする形で、いわば「知のコンピューティング」の実装の一形式、とするような研究として、ブレイン・マシン・インターフェースをとらえることができる。この研究では、脳活動と外界をつなぐ、例えばロボットにつなぐのが一番わかりやすい例であろう。それにより、脳活動をもとにロボットを動かす、という技術を実現する研究である。「外界とつなぐ」のは、他にも、疾患で身体不自由な方の手足につなぐ、あるいは義肢につなぐ、なども考えられる。これは、脳活動の情報を読み取り、適切な動きにつなげていく研究と見なせる。産業のさまざまな分野あるいはヘルスケアなどの分野での展開が考えられている。

［苗床］
脳計算モデリング、ヒト脳活動解析、計算精神医学、脳情報処理解析

今まで述べたような脳情報システムの研究をまさに駆動しているのが、計算脳科学と実験脳科学を互いに融合させたような脳科学の研究である。このタイプの研究を、「知のコンピューティング」―「脳情報システム」の領域の中にきちんと位置づけておくことは大変重要である。三つ例を挙げる。

・脳計算モデリング：高次認知機能を実現する脳情報処理のエッセンスを抽出し、その脳計算モデルを構築、そしてそれを実際に実験データで検証。このような研究が、上述の研究の基礎となっている。またそのモデル化には、マクロな計算論レベルのモデル化、またはより詳細な神経構造に対応させるモデル化、など多様なアプローチが含まれている
・大規模脳データ解析：近年の実験手法の発展に応じて、脳の解剖データや活動データのビッグデータ化が進んでいる。このようなデータから、脳回路の特性の同定および脳情報処理の同定をするための研究。
・ヒト脳活動解析：以下の注目動向で詳しく触れることにするが、「知のコンピューティング」―「脳情報システム」の領域で、脳情報システムの研究を発展させていくためには、ヒトの脳情報システムの理解を進めるべきなのは、論をまたないだろう。ヒト脳活動から、ヒトの脳機能、ひいては心の機能に迫ろうという研究が、現在急速に発展しつつある。

国内外の動向比較としては、米国を先頭とし、ヨーロッパ（特にイギリス・ドイツ）の研究が世界をリードしている。また中国や諸外国も急速に脳情報システムの研究に力を入れている。日本の研究は世界の上位に位置づけられる一方で、以前の脳科学振興の遺産に負うところも多い。今こそ、あらためて「脳情報システム」の研究への投資を日本で十分に増やすこと重要である。

(3) 注目動向

・脳科学全体を対象とした大型プロジェクト

脳科学全体をさらに飛躍させようというファンディングとしては、例えば米国で行われている BRAIN Initiative[11),12)]、ヨーロッパの Human Brain Project などがある[13)]。そこでは上述の理論研究の重要性が挙げられている。また、大規模実験データに対処する解析手法の開発、それとあわせてヒト実験データを利用した脳計算モデリングとヒトの情報処理を明らかにするようなデータ解析手法の開発が求められている。日本でも脳研究推進のための大型プロジェクトとしては例えば革新脳プロジェクトがある[14)]。

EU の Human Brain Project: は 2013 年にスタートした神経科学、計算機科学、脳・神経系の医学の分野の大型研究プロジェクトである。予算規模は 10 年間で 10 億ユーロ以上であり、EU を中心とした 100 以上の研究機関が参加している。プロジェクトの目標として脳研究、認知神経科学などの分野のための研究のインフラの整備と運営、脳と関連する疾患に関するデータの収集・整理・配布、脳のシミュレーション、脳にインスパイアされたコンピューター、データ解析、ロボットの開発などが掲げられている。人の脳全体のシミュレーションなど野心的な研究プロジェクトも含まれる。

革新的研究開発プログラム ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」[15)] では、新しい種類の量子計算デバイスであるコヒーレント・イジング・マシンが開発されており、そこにニューラルネットワークを実装する試みがある。日本が中心になって研究を進めているコヒーレント・イジング・マシンは、光を用いるた

め高速で、室温で動作する装置であり、多数の光パルスの相互作用により組み合わせ最適化問題の近似解を効率的に得ることができる[16]。この装置の光パルスをニューロンにみたて、ニューラルネットワークを構成し深層学習などの機械学習に応用することが検討されている。

・ヒトの経済活動や行動の解明のための研究

ヒトの脳研究は多方面から進展しつつある。例えば、ヒトのさまざまな経済活動とその意思決定を意識した、神経経済学の研究が急速に発展している[17]。また意思決定と学習を起点として、精神疾患と健常者のその脳計算過程の違いを明らかにしようという計算精神医学の研究も始まりつつある[18]。いずれ、臨床的な予防・治療などに生かされることが期待されている。また、ヒト fMRI のデータは 1 人の被験者のデータでも、それなりの大規模データである。ヒトの行動と脳活動を脳計算から解明するための「モデル化解析」[7),8)]、あるいは、脳活動から外界情報を直接読みだそうとする「脳解読」[19),20)]、などの解析手法が有望である。これらが、さまざまな脳計算理解の研究に使われている。また、近年クラウドソーシングのデータを利用することでヒトの行動を詳細に解析し、それと脳活動の関係を見ようという研究も始まりつつある[21]。日本の BMI 研究に関しては　Impact「脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現」でも行っている。なお、ヒト fMRI のデータを多数集めることで、大規模データを利用可能にしようとする Human Connectome Project もある[22]。

情報幾何学全般の進展は文献 10）が詳しい。また、情報幾何に関する国際学術誌発刊の準備が進められつつある。脳科学関連では、情報幾何による神経活動の高次相互作用の解析[23]の他にも、近年、情報幾何を「意識」の理解のための情報理論への発展[24]、あるいは半順序の数理と組み合せることで神経活動データのみならずアイテムセットマイニングへの応用も考えられている[25]。

（4）科学技術的課題

・ヒト脳を用いた研究の加速

ヒト脳を用いた研究を加速させていく必要がある。これにはいくつかの側面からの課題がある。

(1)計測技術：　ヒト脳活動の主要な計測技術として fMRI がある。fMRI の時間分解能・空間分解能を向上させる技術開発が大切である。(2) 解析技術：上述したモデル化解析・脳解読などに代表されるような、脳計算理解や脳情報解析に役立つような解析技術開発も重要である。(3) モデル技術・脳計算理論：この解析技術とあわせ、脳計算モデルおよび脳理論研究の促進も重要である。(4) ヒト知性の脳計算からの解明：ヒト脳の知情意を統合する脳計算論、例えば、情動・感情あるいは社会知性などの脳計算理解を促進する研究が強く求められる。

・従来と異なる原理に基づく計算機の必要性

脳・神経ネットワークをシミュレートする際には、多数の変数・パラメータで記述され

る数理モデルや、高次元・高分解能の計測により得られたデータを処理する必要がある。また脳を抽象化したニューラルネットワークを基にする情報システムでも、なお多くの計算資源が必要である。大規模な脳のシミュレーション、脳情報システム構築のためには、既存の CPU やスパコンではムーアの法則に起因する限界があるため、これまでと異なる原理で動作するアーキテクチャー、デバイスが望まれる。特に我が国としては、国産技術であるコヒーレント・イジング・マシンを活用した新しい脳情報システムの開発を支援するべきであろう。

・脳活動計測機器の高度化とデータ解析手法の革新

脳のモデル化の基になる脳活動の計測については、さまざまな技術が存在し多くのデータが取得できるようになっているが、さらに高性能化が求められる。人被験者への負担が小さな（低侵襲な）fMRI, PET を用いた計測により多くのデータが得られるようになっているが、これらは脳の電気的な活動により間接的に生じる血流の流れを計測する低時間分解能で、ミリ秒の時間スケールで変化する電気的な神経活動を捉えることはできない。また脳の電気的な活動を直接計測する EEG, MEG では、空間分解能は低く、網羅的な計測は難しい。動物を対象にした侵襲型の計測では、多数の神経細胞の同時記録や二光子イメージングにより、多数の神経細胞からの高分解能のデータが取得できるが、これらの侵襲型の計測をヒトに使うことはできない。今後、空間的・時間的な分解能の向上、低侵襲化が求められる。また多次元の神経時系列データを解析するための解析手法の整備や、データの活用はまだ十分とは言えない。今後の課題として、多次元時系列データの高次相関を考慮した解析、また非線形数理モデルと計測データを組み合わせて解析するデータ同化などのモデリング手法の整備・解析を進める必要がある。

・脳内の情報表現、情報コーディングの研究

脳内での情報処理を考える際の根本的な問題として、脳内での情報表現、情報コーディングの様式が明確ではないという問題がある。脳内ではスパイクと呼ばれるパルス状の電気信号が情報の伝達・処理を行うと考えられているが、スパイクのどのような側面が重要なのか（スパイクの頻度なのかタイミングなのか）については多くの議論がある。また脳は状況に応じて情報表現を切り替えている可能性も指摘されている[26)]。さらにさまざまな神経伝達物質・化学物質の流れ・濃度変化が脳内の情報表現に与える影響も考える必要がある。今後、さまざまな計測技術を導入した神経科学・生理学分野と数理科学分野の連携により、脳内の情報表現の解明に取り組む必要がある。

・脳内情報処理の解明

深層学習など神経ネットワークを基にしたパターン認識などへの応用が進んでいるが、それは生体の脳が持つ機能のごく一部であり、生体の脳の持つ豊かな特性・機能が十分活用されているとは言えない。生体の脳で観測されているさまざまな振動現象、同期現象、カオス現象などのダイナミックな特性が生体内の情報処理に関連することが指摘されているが、それを利用した情報システムの構築には大きな研究の余地がある。さらに情動、感情、意識など人の認知機能・意思決定に大きな影響を与えるが、その理解が不十分な部分

も存在する。

(5) 政策的課題

・科学と工学の研究をバランスよく配置したファンディング

「知のコンピューティング」の視点で､脳情報システム研究を推進するためのファンディング制度を設立することが求められる。なおそれにあたっては、本研究開発領域は、科学と工学の両面での研究をバランスよく促進することが必要不可欠である。その意味では、「知のコンピューティング」の中にあっては、相対的には、特に科学の色彩が強い領域との認識が必要であり、それにもとづいたファンディング制度の整備を進める必要がある。

例えば「苗床」の研究は、「知のコンピューティング」の視点から見ると、脳科学の中での研究と捉えて、やや遠いところに位置づけられがちかもしれない。しかしながら、実は、これらの研究こそが、「知のコンピューティング」の中で、「脳情報システム」が根づき、発展的な展開を自律的にうながすには肝要である。したがって、ファンディングの中で、これらの研究が「知のコンピューティング」研究の中に、それぞれの研究の方向性を尊重しながら緩やかな形で含まれ、それにより交流・対話が促進するようなファンディング制度運営が望まれる。

・産官学連携

産業への展開や臨床への応用には、産官学連携が重要である。例えば、基礎研究、応用研究そして実際の産業化、これらのトランスレーショナルなプロセスを促す制度設計が重要である。そして、倫理を含めた社会的合意形成を促す諸策が望まれる。

・基礎科学の研究への継続的な投資

脳情報システムの応用はさまざまな産業にもつながる技術であるが、その背後には生理学や数理科学などの基礎科学分野での数十年にわたる研究の蓄積が存在する。今後も基礎科学分野への継続した投資と、当該分野に向けた研究者の育成が必須である。

・分野間にまたがる研究

また脳情報システムは複合領域であり、神経科学、認知科学、数理科学、情報科学、工学など各分野の連携が必要である。今後このような分野間の連携がよりいっそう求められる。例えば、新しい原理に基づく脳情報システムを、新しい物性を利用する専用ハードウエアに実装するといった専門性の高い分野の連携が必要と考えられる。これまでにないような異分野間の連携を促進するようなファンディング制度や、分野の枠にとらわれず複数分野にまたがる専門性を持った学生・研究者を育成する大学・大学院での教育、政策の企画・実行が望まれる。

(6) キーワード

神経回路網の数理、脳学習理論、脳計算、脳情報、脳解読、脳型知能、脳型 AI、神経

経済学、計算精神医学、社会脳科学、意思決定、運動制御、認知、社会知性、情動･感情、強化学習、深層学習、表現学習、構造学習、情報幾何、非線形ダイナミクス、分岐解析、機械学習、ニューロモルフィック、ブレインモルフィック、ブレイン・マシン・インターフェース、コヒーレント・イジング・マシン、脳非線形数理モデル、量子ニューラルネットワーク論など

（7）参考文献

1）Kawato, M., Kuroda, S. & Schweighofer, N. Cerebellar supervised learning revisited: biophysical modeling and degrees-of-freedom control. *Curr. Opin. Neurobiol.*, doi:10.1016/j.conb.2011.05.014（2011）.
2）Sutton, R. A. & Barto, A. G. *Reinforcement Learning : An Introduction.* 1（MIT Press, 1998）.
3）Dayan, P. & Nakahara, H. Models and Methods for Reinforcement Learning. *Stevens' Handbook of Experimental Psychology: Volume V. Edited by E.J. Wagenmakers and John Wixted. Wiley, NY*（in press）.
4）Lake, B., Salakhutdinov, R. & Tenenbaum, J. B. Human-level concept learning through probabilistic program induction. Science 350, 1332-1338, doi:10.1126/science.aab3050（2015）.
5）Silver, D. *et al*. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature* 529, 484-489, doi:10.1038/nature16961（2016）.
6）Eliasmith, C. *et al*. A large-scale model of the functioning brain. *Science* 338, 1202-1205, doi:10.1126/science.1225266（2012）.
7）Behrens, T. E., Hunt, L. T. & Rushworth, M. F. The Computation of Social Behavior. *Science* 324, 1160-1164, doi:324/5931/1160［pii］10.1126/science.1169694（2009）.
8）Suzuki, S. *et al*. Learning to Simulate Others' Decisions. *Neuron* 74, 1125-1137, doi:10.1016/j.neuron.2012.04.030（2012）.
9）Watanabe, S. *Algebraic geometry and statistical learning theory*. Vol. 25（Cambridge University Press, 2009）.
10）Amari, S. *Information Geometry and Its Applications.* 1-388（Springer, 2015）.
11）NIH. BRAIN 2025: A Scientific Vision. 1-146（2014）.
12）Rastogi, A. K. BRAIN initiative: Brain secrets cheap at twice the price. *Nature* 511, 410, doi:10.1038/511410a（2014）.
13）The Human Brain Project, "The Human Brain Project", https://www.humanbrainproject.eu/（2017）
14）Okano, H. & Yamamori, T. How can brain mapping initiatives cooperate to achieve the same goal? *Nature Reviews Neuroscience* 17, 733-734, doi:10.1038/nrn.2016.126（2016）.
15）科学技術振興機構 , ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会

基盤の実現」：http://www.jst.go.jp/impact/hp_yamamoto/（2017）
16）T. Inagaki, Y. Haribara, K. Igarashi, T. Sonobe, S. Tamate, T. Honjo, A. Marandi, P. L. McMahon, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, K. Aihara, K. Kawarabayashi, K. Inoue, S. Utsunomiya, H. Takesue: “A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems”, Science,10.1126/science.aah4243,（2016）
17）Glimcher, P. W. & Fehr, E. *Neuroeconomics: Decision making and the brain*.（Academic Press, 2014）.
18）Montague, P. R., Dolan, R. J., Friston, K. J. & Dayan, P. Computational psychiatry. *Trends in Cognitive Sciences* 16, 72-80, doi:10.1016/j.tics.2011.11.018（2012）.
19）Haynes, J. D. A Primer on Pattern-Based Approaches to fMRI: Principles, Pitfalls, and Perspectives. *Neuron* 87, 257-270, doi:10.1016/j.neuron.2015.05.025（2015）.
20）Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y. & Kamitani, Y. Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. *Science*（2013）.
21）Rutledge, R. B., Skandali, N., Dayan, P. & Dolan, R. J. A computational and neural model of momentary subjective well-being. *PNAS* 111, 12252-12257, doi:10.1073/pnas.1407535111（2014）.
22）Human Connectome Project, “Human Connectome Project”, http://www.humanconnectome.org/（2017）
23）Nakahara, H. & Amari, S. Information-Geometric Measure for Neural Spikes. *Neural Comput*. 14, 2269–2316（2002）.
24）Oizumi, M., Tsuchiya, N. & Amari, S.-i. A unified framework for information integration based on information geometry. *arXiv preprint arXiv:1510.04455*（2015）.
25）Sugiyama, M., Nakahara, H. & Tsuda, K. Information Decomposition on Structured Space. *arXiv preprint arXiv:1601.05533*（2016）.
26）Y. Katori, K. Sakamoto, N. Saito, J. Tanji, H. Mushiake, K. Aihara. “Representational Switching by Dynamical Reorganization of Attractor Structure in a Network Model of the Prefrontal Cortex”, PLoS Computational Biology, 7, e1002266,（2011）

3.1.7　知的インタラクション

（1）研究開発領域の簡潔な説明

知的インタラクションの研究は、コンピューターやロボット、エージェント、情報家電を用いたシステムを開発して、インタラクションを通じて人（々）の知性を引き出すことや､社会生活を豊かにするインタラクションとは何かの原理を探ることを目的としている。発見した原理を基にして、人々のさまざまな活動（学習、健康活動、社会的・創造的活動など）を促進し、新たな知の価値を社会にもたらすシステム情報技術の確立とデザイン知識の創出を追究する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［歴史的背景］

人と機械のインタラクションの問題の重要性は古くより認識されていた。人を含んだインタラクションの研究は、米国で CHI（Computer-Human Interaction）と呼ばれる国際会議（現在は、採択率 20% 前後のインタラクション分野の最難関国際会議）が 1982 年に始まったことからも分かる通り、その歴史は 1980 年代初頭までさかのぼる。複雑な手順を必要とする機械（例：両面コピー機。今は複雑な操作は不要だが当時は素人が使うのが難しかった）やコンピューター（当時のコンピューターをユーザーが簡単に使用することは難しかった）と人のやりとり（インタラクション）の研究をする必要がでてきた。

使用が難しかった大きな理由は 2 点ある。一つは、ユーザーが、機械の状態を把握できないという問題である。複雑な手順で動く機械や、自動で動く機械は、動作に伴って、内部で行っている処理の状態が変化する。しかしながら、内部状態の変化は、情報処理の過程であったり、機械の機構の内部の動きであったりするので、ユーザーが把握できない。もう一つの問題は、機械がユーザーを理解できない問題である。当時は、画像認識をはじめセンサーによる環境認識技術が未発達であったために、機械が人間の状態を把握することができなかった。人と機械がインタラクションしながら複雑な仕事をこなす際に双方の内部状態が分からないことは、人と機械の間での深刻な齟齬につながる場合があり、使いやすい機械を作る上でも解決の必要な問題であった[37)]。

人と機械のインタラクションで生じる齟齬を解決するために取られたアプローチも二通りに分類される。一つは、人工知能研究の知見を用いて、コンピューターに知識をもたせたり、自然言語で対話したり、ユーザー入力の背後にある情報を推論したりなど、知的インタラクションによって齟齬を無くすアプローチである。もう一つのアプローチは、機械の内部状態を人が理解できるように可視化したり、インタラクション処理の流れを分かりやすく整理したり、機械に対して人がどう反応するかというヒューマン・ファクターの研究である。

1990 年代になると、二つの研究アプローチは別分野として認識されるようになり、エージェントの研究とヒューマン・コンピューター・インタラクション（HCI: Human-Computer Interaction）の研究に発展した。エージェントの研究は、人工知能をベースとしたが、当時は、まだ人と本当にインタラクションできる機械を実現する人工知能技術はなかったので、具体的なインタラクションの例題（会話例など）を課題として決め、例

題通りに人が機械とやりとりする場合のみうまく動くシステムを構築するのが限界であった。コンピューター・グラフィックスを用いた会話エージェントや、ロボットを用いた人と機械のインタラクションの初期の研究が 1990 年代中頃から始まっている。

HCI の研究では、機械に知的な情報処理をさせずに簡潔な情報処理手法を用いている。簡潔な情報処理の仕組みでも人と機械のやりとりに齟齬が生じないように、人がどのように機械を用いるかというインタラクションの観点から機械の設計を考えることに主眼を置いている。コンピューターの操作画面をウインドウインターフェースにするといった、人と機械のやりとりを簡単化する GUI（Graphical User Interface）の研究をはじめとし、CSCW（Computer Supported Cooperative Work）と呼ばれる、離れた場所にいる人と人のインタラクションの間にコンピューターが介在して支援する研究も行われた。コンピューターによる知的インタラクションは音声や映像を伝えたり、人同士の議論を支援するために遠隔で同じ図を共有する手法等が研究された。コンピューター・グラフィックス（CG）で仮想の世界を作る仮想現実（VR: Virtual Reality）や、CG で可視化した画像を、カメラで撮影したユーザー周囲の映像に重畳する拡張現実（AR: Augmented Reality）技術も研究された。

1990 年中頃に MIT の石井らは、人が触れることができる物をコンピューターのユーザー・インターフェースとする TUI（Tangible User Interface）を提案した。同時期に Mark Weiser が、コンピューターが部屋や建物といった環境に偏在的に埋め込まれている UBI（Ubiquitous Interface）の概念を提唱した。TUI や UBI は、物や部屋といった、日常生活の中ですでに人が使い方を熟知している周囲環境を媒介とすることで、人間がコンピューターや機械とやりとりしていることを無意識なものにする（やりとりしていること自体気づかないようにする）とともに、インタラクションにおける齟齬の発生を無くすことを目指している。

2000 年代に入ると、アクチュエーターやセンサーの小型化、小型コンピューターの高速化、インターネットおよび無線 LAN の普及と高速化によって、人型のロボットや安全で小型のロボットが構築できるようになった。センサーネットワークによって実世界に関する情報が広範囲の場所で取得可能になり、さらに、日本の発案でもあるネットワークロボットの試みによって、複数台のロボットがセンサーネットワーク、携帯電話・スマートフォン、アクチュエーターが連携して人にサービスを提供する手法の研究が行われた。

自律制御で動く機械であるロボットや、環境の状態を取得できるセンサーネットワークが登場したことで、知的情報処理を備えた機械と人のインタラクションについて研究する土壌が整ってきたのがこの時期である。2006 年からは、海外ではヒューマン・ロボット・インタラクション（HRI）に関する国際会議は始まっており、国内では、ヒューマン・エージェント・インタラクション（HAI）に関する国内シンポジウムが始まっており、HCI の研究とエージェントの研究が合わさった知的インタラクションの研究に興味をもつ研究者が徐々に増えてきている。

2010 年以降、スマートフォン、ウエアラブル・コンピューター、IoT、自動運転が登場・発展し、機械側がアクティブに人に情報を提示できるようになってきている。センサーのハードウエア技術が進むとともに深層学習を代表とする機械学習の技術が発展し、人の音声発話や、人の動き、環境の出来事を高い精度で認識できるようになってきている。80

年代にあった、人が機械の状態を把握できない問題、機械が人の状態を認識できない問題がかなり改善されている。

構築したロボットやエージェント、人とインタラクションできるコンピューターシステムを、実際に人が日常生活を行っている現場に持ち込み、そこで生じるインタラクションを観測する研究も、近年の技術の発展によって可能になった。従来は、実験室で行う人工的な状況設定でのインタラクションの検証であったのに対して、現場での人と機械のインタラクションを観測することで、実際に生じる生の問題点や課題を知ることができるとともに、開発した技術が真の意味で有効なのかを検証できるようになった。

［人間とロボットとのインタラクション］

人間とロボットの接点に関しては、初期の研究では、人がより効率的にシステムに指示を与える方法、すなわちヒューマン・インターフェースとして研究が進められていた。ロボット技術・情報技術が進歩し、ロボット・システムが自律判断を行えるようになるにつれて、双方が時に主導権をもつ動的なやりとり、すなわちインタラクションとしてこの接点を捉えるようになってきた。初期のロボットは、産業用のロボットマニピュレーターや探査ロボットといった無人環境で活動するものであったが、このようなロボットにおいても、自律行動する際に操作者とシステムのどちらがイニシアチブをもち、どのような情報を操作者にフィードバックするのか、どこまでを自律動作させるのか、など遠隔操作ロボットにおけるヒューマンロボットインタラクションの研究が進んだ。近年では、米国中心に UAV（Unmanned Aerial Vehicle）などの無人機の応用が進んでいる。

このような研究の流れと並行して、日常生活の場で人と関わりながら活動するようなロボットの研究が 90 年代後半から行われるようになった。MIT の Cynthia Breazeal らの開発した最初の Social robot、Kismet は、15 自由度をもつ顔ロボットで、感情モデルを内在し、カメラから人の顔や周囲の動きを検出して、人の働きかけに応じて表情を変えることができた [1)]。わが国でも早くからロボットとのインタラクションに関する先駆的な取り組みが行われており [2)]、顔ロボット [3)]、感情モデル [4)]、など、研究が進んだ。AIBO や ASIMO といった人とのインタラクションを強く意識したペット型、人型のロボットや、コミュニケーションロボット [5)] の研究開発が進んだ。ロボットは「道具」か「パートナー」か [6)]、といった議論が起きるようになり、これまではロボットは人の命令を忠実に遂行し、特定の目的のために役立つ「道具」だとみなされがちであったが、状況を察知してロボットからも働きかけるなど、知的な振る舞いとしての「人らしさ」をもつような「パートナー」として人々に役立つ展望が見えるようになってきた。

このような「人らしさ」をもつロボットの実空間性、身体要素、マルチモーダル・インタラクションに関して、デザインに有用な知識を創出する基礎研究が進んできている。実体をもつことでロボットはコンピューター上のエージェントよりも信頼され、社会的な印象を与える [7)]、人に依頼する場合にはロボットの方が作用しやすい [8)]、といった知見が集まった。視線を適切に利用することで、相手の注意をひきつけたり、会話への参加を促したりできる [9)]、など、人らしいロボットならではの人に作用するための新たな方法が次々に明らかになった [10)]。人間酷似型のアンドロイドロボットも開発され、アンドロイドロボットを使った人間理解研究も行われるようになった [11)]。機械工学や情報学の最先端の

技術によって実現されるロボットという新しい存在に対して、従来の人間理解に用いられてきた心理学・認知科学の研究フレームワークを用いる、といった機械・情報・心理等にまたがる分野融合的な研究により、新たな知識の創出が進んだ。

人間の理解に根差した情報技術の研究も行われるようになった。例えば、システムが人間の目線に立って環境内の物体とロボットの見え方をコンピューター上で計算することで、見えないところからロボットが唐突に現れることを避ける、といった行動計画を行うことで、人に不快感を与えないようにロボットが移動するためのパス・プランニング（経路計画）技術が実現された[12)]。人間に物を手渡す際に、人間から見て意図がうまく伝わるようにロボットアームを制御する方法[13)]など､振る舞いとしての「人らしさ」を創出し、自然に、親和的に、効果的に人々に働きかけることができるロボットを創り出すような情報技術が実現されるようになってきた。人の移動軌跡のビッグデータをモデル化することで人の進路を予測して通行人に効率的に話しかける行動計画をするロボット[14)]、混雑を起こさないように環境と調和したサービスを提供するロボット[15)]など、多くの人が同じように振る舞うという仮定のもとで、大量データの処理などの情報技術との結びつきも少しずつ始まっている。

ロボットとのインタラクションが人々の多様な活動を促進しうることも、少しずつ明らかになってきた。人らしいロボットが親和的に働きかけることで、街角での道案内[16)]、店舗内の案内[17)]、子供たちの第二外国語の学習[18),19)]、といった日常的な場面での活動支援の道筋が見えてきつつある。

現状のロボットのインタラクションに関する研究は、多様なユーザーのもつ異なる特性や状況に応じて知的な判断を行う、といった「知的インタラクション」の問題にはまだ取り組みがあまり見られない。辛うじて、周囲状況をセンシングし、自然に人々に働きかけることができるロボット・システムが実現できるようになりつつある段階と言える。しかし、様々な応用において、相手に応じたインタラクションを行うことは不可欠である。例えば、子供の学習場面を例にしても、子供ごとに学習の進度は異なり、得手不得手があり、また褒めて伸びる子供、伸びない子供、などそれぞれ異なった特性をもつ。こういった個の違いを扱うためには、実世界センシングの困難さ、ロボット・システムの複雑さ、多様な人間の異なる特性のモデル化の困難さなど、多くの未解決の研究課題がある。センシングや大量データの処理など急速に進歩する情報技術との結びつきにより、これらの困難さを超えて、その先の「知的インタラクション」の問題解決に進むことが期待されている。

［研究の意義］

知的インタラクションの原理を解明し技術を確立することで、人にとって機械を使いやすくしたり、機械の使用を通して人の生活の質を向上させたり、人の知性を引き出したりできるようになる。単純に何かの作業を支援する従来の機械技術や、一過性の情報を提示する従来の情報技術とは異なり、人と機械もしくは機械を通して人と人が何度もやりとり（インタラクション）して初めて人の生活の向上に結びついたり、人の知性を引き出せたりするものであり、知的情報処理技術を利用したインタラクションの研究は、情報処理分野の中で別途行う必要のある重要な研究対象である。

歴史的背景で述べた通り、知的インタラクションを実現する上で必要な基盤技術やハー

ドウエアは、2010 年前後より進化しており、現在は、研究を進める上で絶好の時期となっている。機械が人の状態や環境の出来事を高い精度で認識できる技術ができつつあり、機械の内部状態を適切に表現することのできるハードウエアが登場してきたことは、機械が人の内部状態を把握し、人も機械の内部状態を把握することを可能にする。インタラクションの参加者双方の間に齟齬を生じさせずに、人にサービスを提供したり、人の日常生活を支援したりすることができる。特に近年では、センシング技術やハードウエア技術の進展に伴って実験室ではなく、実際の日常生活の場で、開発したシステムを用いた実験を行うことができるようになっており、より本質に迫った知的インタラクションの原理の発見や、開発したシステムの有用性の検証ができるようになっている。

(3) 注目動向

［技術動向］

3D プリンターやカッティングマシンをはじめとするコンピューターで気軽に物を実体化できる環境の整備され、これらは知的インタラクション研究の発展に貢献している。知的インタラクションの研究では、人とのインタラクションを実際に引き起こし、その背後にある原理を探るので、インタラクションを引き起こすための機械やシステム自体を短い期間で効率よく開発する必要がある。例えば、人の肩に乗るロボットや、ぬいぐるみロボットなど、既存では存在しないロボットを構築し、どのようなインタラクションが発生するのか研究されている[38]。米粒大の赤外線距離センサーを指や腕などにアレー状で配置し人の動きを計測するといった場合にも、センサーの配置場所に合わせて固定する部品を 3D プリンターで出力し構築することができる。引き起こしたいインタラクションの現象を手軽に引き起こし検討できる状況になったのは研究遂行において大きな進展である。

もう一つの大きな進展は、深層学習をはじめとする機械学習の進歩である。カメラ画像や各種センサーから人の内部状態を推定することが難しかったが、深層学習により人の行動を認識するための良い特徴量が得ることができたり、人の心的な内部状態の変化を確率過程として捉えたりすることが徐々にできつつあり、機械が人間の状態を捉えることにより実現可能な知的インタラクションの幅も増えつつある。

米国の会社ボストンダイナミクスが構築した動歩行で歩く人型ロボットや、大阪大学・ATR の石黒浩が開発したアンドロイドなどは、動きや見た目で人と同様な生きている印象を人に与えることができる。人と同様の印象をもつ機械は、人が相手の場合と同様のインタラクションを実現できるメリットがあり、知的インタラクションの研究を行う上でも大きく貢献する。

ソフトバンク・ロボティクスの Pepper[23] や、さまざまなベンチャー企業から発売されているロボット、インターネット上でブームとなっている CG エージェントが公共の場や一般家庭に普及しつつあることも、知的インタラクションの研究を後押ししている。知的インタラクションの研究では、検証実験を行うために、実際の日常生活の中でインタラクションの現象を引き起こすことが重要であり、普及したロボットやエージェントをベースとした実証実験ができるようになったことも注目すべき動向である。

深層学習の応用の活発化などを背景に、音声や画像に関するセンシング技術の性能が高

まり、日常環境で実用的に利用できる水準に達するようになってきた。その結果、Amazon echo[20] など、実世界でインタラクションできるシステムが市場にでつつある。インタラクションの研究開発には総合的なシステム作りが必要となることが多い。その複雑さゆえ、個別の技術の進捗に加えて、プラットフォームとなる統合的なシステムが利用できるようになることで、さらにその先の研究開発が進むようになることも多い。ロボットのプラットフォームでは、AIBO[21] や Nao[22] などが著名であるが、この 2-3 年で Pepper[23] をはじめ、実世界での行動能力の高いロボットが利用可能になってきており、より高度で知的なインタラクションを研究する土壌ができつつある。

［ファンディング動向］

国内では、新学術領域「人ロボット共生学」のプロジェクトにおいて、人とロボットが共存し、互いに学ぶような、共生型のインタラクションについて研究が進んだ[24]。ERATO 石黒プロジェクトでは、人間と親和的に関わるアンドロイドロボットのために、言葉によるやりとりに加えて、身ぶり手ぶりや視線、表情、触れ合いといったマルチモーダルなインタラクションを行うための技術開発が進んでいる[25]。

米国では、NSF からの大規模なファンディングにより、Yale、MIT、USC の 3 大学をまたがるプロジェクトで、socially assistive robot の研究が進められており、従来、物理的な支援が中心であったロボットのインタラクションを、子供の学びなどの社会的な支援へとフォーカスを映し、かつ、知的インタラクションの課題の一部を先取りするように、ユーザー別インタラクションを長期的に行えるようにするための技術開発が進んでいる[26]。

欧州では、EU からの FP7 や Horizon2020 等のファンディングの枠組みのもとで、近年、ロボットのインタラクションの問題に取り組むプロジェクトが盛んになってきた。以前から、自閉症の子供を対象とした研究が行われてきたが、近年、子供たちの学びを対象とした研究へと広がりを見せている。例えば、“Expressive Agents for Symbiotic Education and Learning（略称：EASEL, 3M €）”では人とロボットが互いに影響しあい、学ぶような共生型のインタラクションの研究が進んでいる[27]。“Second Language Tutoring using Social Robots（略称 :L2TOR, 3M €）”のプロジェクトでは、ロボットを用いて子供たちの第二外国語の学びを支援するための技術開発が進められている[28]。

［実現に向けた技術的なボトルネック］

究極の知的インタラクションの担い手として人間と同等のインタラクション能力の必要性を想定すると実現に向けて無数の技術的ボトルネックが存在する。しかしながら、そこまでの理想的な状況を想定しなくとも、現状研究されている機械やシステムの飛躍的な向上を阻んでいる技術的ボトルネックが 2 種類存在する。

・実空間での音声・音響認識の問題

これが解決されれば、人が知的インタラクションを機械やシステムとする上での音声入力を飛躍的に向上させることができる。現状では、音声認識の精度は高く、空間内の音源（特定話者の声）を分離する技術も開発されている。しかしながら、実空間で人の音声を取得し認識しようと思うと、いまだに実用に耐えうる精度を得ることはできない。人の口のそばに接話型マイクを設置するか、人がマイクの側に移動して発話してもらう

必要がある。接話型マイクなしで、生活環境での人の発話を認識することができれば、知的インタラクションを実現するサービスが実環境で展開できるようになる。

・文脈推定・ドメイン推定の技術
本技術は解決のめどがほとんど立っていないボトルネックである。通常、知的インタラクションを引き起こす機械やシステムを構築する場合、インタラクションを通して実現するタスクや、インタラクションにおける主題を決めておくことで、人と機械のやりとりを遂行する上で必要となる知識や手順を設計することができる。タスクや主題を事前に決めることなしにインタラクションを成立させる知識や手順を用意するのは難しい。人間同士の会話と同様に、機械が人とインタラクションしながら、インタラクションの文脈を特定するとともに、何の話題（ドメイン）に関するインタラクションなのかを推定することができれば、事前に場面を特定することなしにより柔軟に人と機械の知的インタラクションを成立させることができる。

［実現において欠如している知見］

人と機械もしくは、機械を介した人と人の知的インタラクションにおいて、インタラクションにおけるやりとりを円滑にしたり、人と機械がお互いの内部状態を把握したりするために明らかにする必要がある知見について説明する。

・インタラクションの「間」やタイミングの知見：
従来の人と機械のインタラクションでは、人が機械に命令する番と機械が人に反応する番が交互に起こることが想定されていたり、やりとりの交代の時間間隔やタイミングに関する設計がされておらず、人が機械に合わせる形のインタラクションになっている。例えば、機械から人に質問した場合に、人が無反応であっても、機械はタイムアウトの時刻まで無反応である。銀行の ATM の場合も、キャッシュカードや現金を取るのにてこずっているとお構いなしに警告音が鳴ってしまう。しかしながら、人同士のインタラクションでは、時間間隔やタイミング自体にも意味が含まれており、人は巧みにインタラクションに「間」をもたせたり、タイミングを調整したりする。知的インタラクションを実現していくためには、インタラクションを時間方向で制御する知見が必要であるが、まだ、その設計指針がない。

・ターンテイキングの知見：
人同士の会話では、対面や複数人会話を問わず話者交代（ターンテイキング）が生じる。円滑な知的インタラクションを実現するためには、会話の次の場面で機械が発言するべきか、他の人が発言するべきかを適切に判断できる必要がある。人が何の情報を手掛かりとしてターンテイキングを行っているか明確には明らかになっておらず、機械がセンシングすべき特徴量が特定できていないのが現状である。

・感情表現とモダリティーの知見：
人間を相手として知的インタラクションを実現するためには、機械は人間がもつ感情も扱える必要がある。特に、人と機械がお互いの内部状態を把握するためには、機械は人の感情を認識する必要があるとともに、機械の内部状態を感情の形で表現することが有効である。人の感情は顔の表情として現れる以外に、言葉の語気の強弱に現れたり、ジェ

スチャーの速度や大きさの変化として現れたりする。顔の表情と感情の関係は詳細に調べられているが、人がもつ感情と他のモダリティーの対応関係は明確にはなっておらず機械の設計に利用することができないのが現状である。

・他者モデルの知見：
人は、インタラクションにおいて相手の内部状態を推定するために他者のモデルをもっていると考えられている。客観的に観測可能な相手の行動や発言のみから、相手の観測不可能な内部状態を推定するためには、事前にインタラクションの相手のモデルをもつ必要がある。他者モデルの研究は、ユーザーモデルとして古くより HCI 分野やヒューマン・ファクター分野で研究されているが、知的インタラクションがターゲットとする実時間で動的に相手とやりとりする場面での他者モデルの知見は不完全であり、機械学習と組み合わすことのできるレベルのモデル化が求められている。

・行動と意図の関係の知見：
インタラクションにおいては、機械的に相手とやりとりするものから、ある意図を実現することを目指して行われるものもある。インタラクション中の人の行動の背後にある意図の有無や意図の内容を特定できることは、知的インタラクションを実現する上で大変重要である。さらに、インタラクションにおいて機械が取った行動の意図を人に感じとらせることも、知的インタラクションを質的に向上させる上で重要である。しかしながら、行動と意図の関係をどのように扱うべきか明らかになっていないとともに、意図がインタラクション自体とどのような関係をもって進行するのか明らかではなくインタラクション自体のモデル化するための知見が必要なのが現状である。

［実現において欠如している知見に対する研究開発の取り組み］

欠如している知見の幾つかは、現在、研究対象として積極的に取り組まれている。他者モデルに関しては、新学術領域認知的インタラクションデザイン学において、人–人インタラクション、人–動物インタラクション、人–人工物インタラクションの観点から研究されている。人・動物・人工物の同一点、相違点を比較することで他者モデルを明らかにし、人と適応的にインタラクションできる人工物の仕組みを開発しようとしている[39)]。

機械学習の手法を用いて、人の行動から人が背後にもつ意図を推定する研究も行われている。人と機械のインタラクションにおいて、機械の背後に人が操作していると思わせる場合と、ロボットが操作していると思わせる場合を比較し、機械の行動の背後に人が想定する意図の違いを明らかにしようとする研究も行われている[40)]。

ターンテイキングの研究も、音声対話の分野で盛んに行われており、話者の呼吸や視線をベースに推定することが試みられている[41),42)]。

（4）科学技術的課題

本領域における科学技術的課題は以下の通りである。

・「知的」インタラクションへの取り組み
インタラクションの研究はこれまでに多くあるが、「知的」インタラクションの問題へ

の取り組みはまだ少ない。多様なユーザーがもつ異なるニーズ、特性、状況などをシステムが「知的」に扱うためには、ある程度、大規模なユーザー集団を対象に、近年、急速に進歩しつつある大量データ処理や実世界センシングなどの技術と組み合わせた統合的な技術開発が必要であり、研究者が個人で研究できるスケールの問題を超えている。チーム型の大規模なプロジェクトの推進等により、先導的な研究を促進する必要がある。

・ユーザーの受容性に関わる研究

ロボットなど、実世界に作用するアクチュエーションを含むシステムについては、近年、急速に注目が集まりつつあるが、ユーザーへの受容性をも対象とした研究開発においては、機械、情報、心理といった多面的な知識を統合した技術開発が必要となっており、分野融合的な研究開発の促進を急がないと、すでに HCI 分野などで情報・心理にまたがる人材育成で先行している米国等に大きく水をあけられる恐れがある。

・時間を意識した人と機械のインタラクションの制御

知的インタラクションを実現する上で取り組むべき課題は、時間を意識した人と機械のインタラクションの制御である。インタラクションの「間」とタイミングを扱える時間を考慮した行動制御技術や行動認識技術を上げることができる。また、さまざまなモダリティで感情を表現したり、人間の感情を認識する上でも、時間方向の行動の変化を制御したり捉えたりする手法が必要となる。また、実時間の時間制約の中で人の内部状態を推定したり、時間制約を考慮に入れて機械の内部状態を人に可視化する技術も重要になる。知的インタラクションのモデルに時間方向の設計を取り入れることで、実現される知的インタラクションの実用性がより高まると考えられる。

(5) 政策的課題

本領域における政策的課題は以下の通りである。

・学際的な研究の推進

知的インタラクションに関する研究を遂行するためには、情報工学分野だけではなく他の分野を取り込んで研究を行う必要があり、学際的な連携をベースに研究を推進するよう政策を立てるのが重要である。情報工学分野では、人とインタラクションする機械のアルゴリズムやモデルを構築できるが、認知科学分野や脳科学分野の研究者と連携することでインタラクションの中で人がどのように振る舞うのかといった知見をベースに研究を進めることができる。実際の日常場面でインタラクションを引き起こし、その背後にある原理を突き止めるためにも社会学の研究者との連携もする必要がある。例えば、カーネギメロン大学では、ロボティクスの研究者と、デザイナー、認知科学者が連携して、人とロボットのインタラクションのデザインで成果を出しており、工学者以外の人材との連携の重要性を示している[43)]。

・国際連携

文化差や言語の違いなど多様なユーザーを適切に把握できるようにするために、国をまたがった研究開発を進めることも喫緊の重要な課題である。国際連携を前提としたこの領域特有のファンディング制度が必要である。

(6) キーワード

知的インタラクション、インタラクションデザイン、ヒューマン・コンピューター・インタラクション（HCI）、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）、共同注視、注意のモデル、多人数対話、状況とプラン、話者交代、音源分離、他者モデル、ソーシャルロボット、コミュニケーションロボット

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	国際会議 ACM CHI において人とインタラクションできるハードウエアの提案を中心に存在感のある研究発信ができている。IEEE/ACM HRI でもアジア圏で最も数多く成果発表ができている。さらに、日本発の国際会議 ACM HAI は、2015（韓国）、2016（シンガポール）、2017（ドイツ）と海外進出し、知的インタラクションの研究成果を世界的に発信できている。ロボットのインタラクションでは多くの取り組みが他国に先行して行われていたが、近年、米国・欧州での基礎研究が盛んになる中で、HRI[29]，RO-MAN[30] 等での研究成果の報告はやや後れを取りつつある。
	応用研究・開発	◎	↗	Pepper やロボフォンなど、インタラクションを主目的としたロボットが何種類も市場に出るなど、民生分野での応用・開発が盛んである。
米国	基礎研究	◎	→	以前から軍事応用につながる基礎研究が盛んだった。国際会議 ACM CHI では、社会学的なアプローチ、認知心理学的アプローチでの研究成果も多く見受けられ、単純な機械の開発にとどまらない厚みのある基礎研究が行われている。民生用では MIT 等で古くからロボットのインタラクションの研究が早くから行われており [31]、近年、CMU [32]、Yale [26] など他の大学でも次々にインタラクションの研究プロジェクトが立ち上がり、HRI[29]，RO-MAN[30] などで盛んに研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	ロボットの応用展開ではボストンダイナミクス社など軍用の応用が最も進んでいるが、遠隔操作中心で、知的なインタラクションをあまり含まない。一方で IBM をはじめとした音声対話システムの応用展開が順調に進展されている。民生分野では、Amazon echo[20]，Jibo[33]，Baxtor[34] など、ややシンプルなプロトタイプがここ数年で市場に出つつある。
欧州	基礎研究	◎	↗	複数のハードウエアに移動して人とコミュニケーションするエージェントの研究が FP7 でなされるなど、基礎的な研究を地道に行っている。ロボットでは、英国の研究グループが早くから自閉症児を対象としたインタラクションを扱っていたが、近年、家庭内、高齢者向け、工場（作業現場）など、広い対象に知的インタラクションを活用する試みが進んでいる。また、ここ数年、子供の学習場面にロボットを利用する試みも急に盛んになってきている。HRI[29]，RO-MAN[30] などで盛んに研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	○	→	Nao, care-o-bot[35] など、研究用プラットフォームとしてのロボットは開発が進む
中国	基礎研究	△	→	HRI[29]，RO-MAN[30] に顕著な成果は見当たらない。
	応用研究・開発	×	→	顕著な成果 / 活動は見当たらない。
韓国	基礎研究	○	→	国際会議 ACM CHI では、日本よりも多い発表件数を誇り、アジア圏で初の CHI を 2015 年にホストするなど、ヒューマンコンピューターインタラクション分野での存在感は大きい。ロボットでは、HRI[29]，RO-MAN[30] に、顕著な成果 / 活動は見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	子供の学習場面に利用するロボットでは先行して市場化を試みるなど [36]、数社が知的なインタラクションを行うロボットを市場に出す試みを続けている。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）C. Breazeal, Towards Sociable Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, pp. 167-175, 2003.
2）Y. Yamamoto, M. Sato, K. Hiraki, N. Yamasaki and Y. Anzai, A Request of the Robot: An Experiment with the Human-Robot Interactive System Huris, *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication* (*RO-MAN1992*), pp. 204-209, 1992.
3）A. Takanishi, K. Sato, K. Segawa, H. Takanobu and H. Miwa, An Anthropomorphic Head-Eye Robot Expressing Emotions Based on Equations of Emotion, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (*ICRA2000*), pp. 2243-2249, 2000.
4）T. Ogata and S. Sugano, Emotional Communication Robot: Wamoeba-2r Emotion Model and Evaluation Experiments, in *Proceedings of the International Conference on Humanoid Robots*, ed: Citeseer, 2000.
5）石黒浩 , 宮下敬宏 , 神田崇行 and 知の科学 , コミュニケーションロボット , *人工知能学会* , p. 101, 2005.
6）C. Breazeal, J. Gray, G. Hoffman and M. Berlin, Social Robots: Beyond Tools to Partners, in *Robot and Human Interactive Communication, 2004. ROMAN 2004. 13th IEEE International Workshop on*, ed: IEEE, 2004, pp. 551-556.
7）A. Powers, S. Kiesler, S. Fussell and C. Torrey, Comparing a Computer Agent with a Humanoid Robot, *ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction* (*HRI2007*), pp. 145-152, 2007.
8）W. A. Bainbridge, J. Hart, E. S. Kim and B. Scassellati, The Effect of Presence on Human-Robot Interaction, *IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (*RO-MAN2008*), pp. 701-706, 2008.
9）B. Mutlu, T. Shiwa, T. Kanda, H. Ishiguro and N. Hagita, Footing in Human-Robot Conversations: How Robots Might Shape Participant Roles Using Gaze Cues, *ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction* (*HRI2009*), pp. 61-68, 2009.
10）C. Breazeal, K. Dautenhahn and T. Kanda, Social Robotics, in *Springer Handbook of Robotics*, Springer, pp. 1935-1972, 2016.
11）H. Ishiguro, Android Science, in *Robotics Research*, Springer, pp. 118-127, 2007.

12）E. A. Sisbot, L. F. Marin-Urias, R. Alami and T. Simeon, A Human Aware Mobile Robot Motion Planner, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, pp. 874-883, 2007.
13）H. Admoni, A. Dragan, S. S. Srinivasa and B. Scassellati, Deliberate Delays During Robot-to-Human Handovers Improve Compliance with Gaze Communication, *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, pp. 49-56, 2014.
14）S. Satake, et al., How to Approach Humans?: Strategies for Social Robots to Initiate Interaction, *ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction*（*HRI2009*）, pp. 109-116, 2009.
15）H. Kidokoro, T. Kanda, D. Brščić and M. Shiomi, Simulation-Based Behavior Planning to Prevent Congestion of Pedestrians around a Robot, *IEEE Transaction on Robotics*, vol. 31, pp. 1419-1431, 2015.
16）S. Satake, K. Nakatani, K. Hayashi, T. Kanda and M. Imai, What Should We Know to Develop an Information Robot?, *PeerJ Computer Science*, vol. 1, p. e8, 2015.
17）H.-M. Gross, et al., Shopbot: Progress in Developing an Interactive Mobile Shopping Assistant for Everyday Use, *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*（*SMC2008*）, pp. 3471-3478, 2008.
18）F. Tanaka and S. Matsuzoe, Children Teach a Care-Receiving Robot to Promote Their Learning: Field Experiments in a Classroom for Vocabulary Learning, *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 1, pp. 78-95, 2012.
19）T. Kanda, T. Hirano, D. Eaton and H. Ishiguro, Interactive Robots as Social Partners and Peer Tutors for Children: A Field Trial, *Human-Computer Interaction*, vol. 19, pp. 61-84, 2004.
20）*Amazon Echo*, https://www.amazon.com/Amazon-Echo-Bluetooth-Speaker-with-WiFi-Alexa/dp/B00X4WHP5E.
21）*AIBO*, http://www.sony.jp/products/Consumer/aibo/.
22）*Nao*, https://www.ald.softbankrobotics.com/a/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AA%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88/nao.
23）*Pepper*, http://www.softbank.jp/robot/consumer/products/.
24）*人とロボットの共生による協創社会の創成「人ロボット共生学」*, http://www.irc.atr.jp/human-robot-symbiosis/.
25）*石黒共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト*, http://www.jst.go.jp/erato/ishiguro/.
26）*Socially Assistive Robotics*, http://robotshelpingkids.yale.edu/.
27）*EASEL project*, http://easel.upf.edu/.
28）*L2TOR project*, http://www.l2tor.eu/.
29）*11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*（*Hri2016*）, http://humanrobotinteraction.org/2016/.
30）*The IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive*

Communication（*RO-MAN2016*）, http://www.tc.columbia.edu/conferences/roman2016/
31）*Cynthia Breazeal | Mit Media Lab*, https://www.media.mit.edu/people/cynthiab.
32）*CMU Personal Robotics Lab*, https://personalrobotics.ri.cmu.edu/.
33）*Jibo - the Worlds First Social Robot*, https://www.jibo.com/.
34）*Baxter | Redefining Robotics and Manufacturing | Rethink Robotics*, http://www.rethinkrobotics.com/baxter/.
35）*Care-O-Bot 4*, http://www.care-o-bot-4.de/.
36）*iRobiQ*（*Yujin Robot*）, http://en.yujinrobot.com/archives/portfolio_category/education.
37）サッチマン , ルーシー・A.1999『プランと状況的行為：人間 - 機械コミュニケーションの可能性』佐伯胖・監訳、東京：産業図書（Suchman., Lucille［Lucy］Alice., 1987. Plans and situated actions：the problem of human-machine communication. Cambridge: Cambridge University Press.）
38）Tadakazu Kashiwabara, Hirotaka Osawa, Kazuhiko Shinozawa, Michita Imai, “TEROOS: A Wearable Avatar to Enhance Joint Activities”, In Proceedings of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI, 2012,p. 2001-2004
39）植田 一博 , 認知的インタラクションデザイン学〜意思疎通のモデル論的理解と人工物設計への応用〜 http://www.cognitive-interaction-design.org/（2017）
40）Kazunori Terada, Seiji Yamada and Akira Ito: Experimental Investigation of Human Adaptation to Change in Agent Strategy in Competitive Two-Player Game, CHI ‘12: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 2808-2810（Note）（2012）
41）Ryo Ishii, Kazuhiro Otsuka, Shiro Kumano, Junji Yamato, “Analysis of Respiration for Prediction of “Who Will be Next Speaker and When” in Multi-Party Meetings”, ACM International Conference on Multimodal Interaction（ICMI 2014）, pp. 18-25, 2014.
42）Bohus, D., Horvitz, E.,（2010）- Computational Models for Multiparty Turn-Taking, Microsoft Technical Report MSR-TR-2010-115
43）Min Kyung Lee, Sara Kiesler, Jodi Forlizzi, and Paul Rybski, “Ripple Effects of an Embedded Social Agent: A Field Study of a Social Robot in the Workplace,” CHI 2012, May, 2012.

3.2 CPS/IoT/REALITY 2.0

【総論】

CPS/IoT/REALITY 2.0 は、社会にあるモノ、ヒト、コトを、サイバー空間を通じて利用可能とし、それらを組み合わせることで、新たなサービスや社会システムの構築を可能とする研究開発領域である。

近年のデバイス技術やデータ処理技術、通信技術などの発展とともに、ネットワークに接続される機器は増大し、2025 年にその数は 500 億端末に達するとの見込みもある。

パソコンや携帯端末だけでなく、電化製品、自動車、産業用機械、医療機器など物理的なモノがインターネットに接続され、サイバー空間と物理世界との融合が進展している。

こうした状況の下、近年、Cyber Physical Systems（CPS）や Internet of Things（IoT）といった技術が生まれ、社会への普及拡大が進むとともに、それによって産業構造や社会の変革が起こりつつある（2 章コラム参照）。

CPS は 2000 年代後半から、米国においてナショナルワーキンググループが幾度も開かれるなど、その効果が大きく注目されるようになってきた。2008 年には、CPS Steering Group によって“Cyber-Physical Systems Executive Summary”がとりまとめられ、その中で産業や国におよぼす影響の重大性へ言及がされた。

CPS は物理世界のモノから得られるデータをもとに、コンピューティングによる処理と物理的な制御を統合し、物理的なモノの制御最適化を行おうという技術である。小さな組み込みシステムから、自動車、航空機、さらには国レベルのインフラまで適用される。また、一連の技術の対象としては人間から得られるデータも含まれる。

一方、IoT は、もともとは 1990 年代、サプライチェーンにおける RFID の新しいアイディアを、インターネットと結びつけてつけられた言葉と言われる。現在では CPS と同様の技術として扱われることが多いと考えられる。

電子機器、自動車などモノの状況をセンサーによってセンシングし、インターネットを介してそれらのデータを集約、分析、その結果をもとにモノやそれらを含むシステムの最適化を図ろうという技術である。

こうした CPS や IoT 技術を広く産業や社会へ適用し、新たな価値を生み出そうという大きな動きが世界で進んでいる。

米国では GE 社が Industrial Internet を掲げ、航空機や鉄道、産業機器、電力システム等の運用状況のデータを元に、それらの最適化を図るサービスを推進している。GE 社では Industrial Internet によってこれらの運用効率を 1% 改善するだけで、年間数十億ドル規模の利益を生み出すと試算している [1)]。さらに、同社が中心となって Industrial Internet Consortium（IIC）を設立し、生産システムや産業用機器をインターネットで接続することにより産業の効率化を図るために、その標準化を提唱している。

ドイツでは産業界、国、アカデミアの連携による巨大プロジェクト、Industrie 4.0 を推進し、産業の高度化を進めている。この中で、CPS、IoT の活用による業務プロセスの改革、工場間の連携、製造業の効率化やコスト削減 / 市場化への時間短縮等を目指している [2)]。

こうした流れを背景に日本においても 2015 年に“IoT 推進コンソーシアム”が設立さ

れた。このコンソーシアムでは、産学官が連携し、IoT 技術の開発や新たなビジネスの創出に向けた実証や、標準化の推進、規制改革の提言を行うことを目的としている。

このように CPS、IoT 技術の社会への浸透がますます加速している。

これまで実体社会はあくまでで物理世界であり、サイバー空間は物理世界に情報をもたらすコンピュータ群であった。ところが、近年の CPS、IoT といった情報科学技術の進展に伴い、上述したようにビジネスや社会活動において、サイバー空間と物理世界が一体となり切り離せないものになりつつある。

こうした状況が進んでいくことで、近い将来、サイバー空間と物理世界が融合一体化した世界が生まれてくるだろう。JST-CRDS ではこうした世界を REALITY 2.0 と呼んでいる（図 3-2-1）。

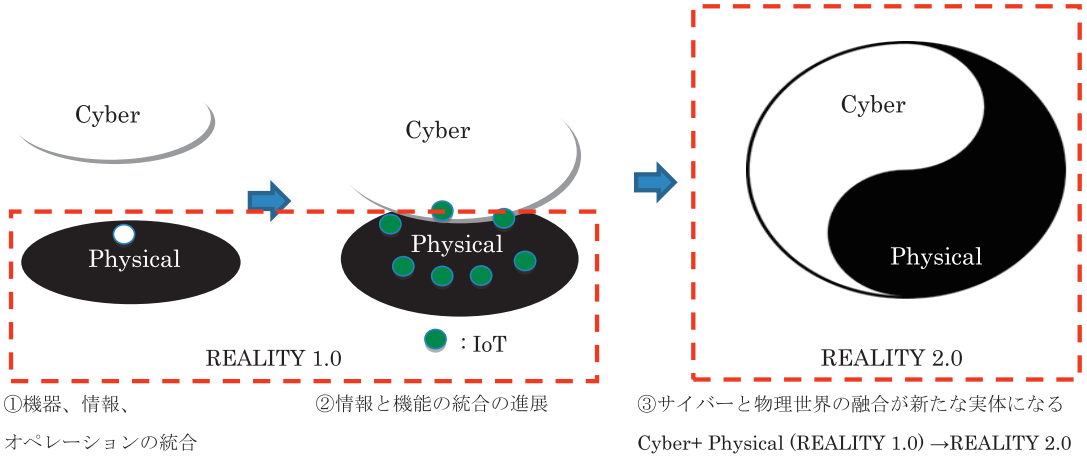

図 3-2-1. REALITY 1.0 から REALITY 2.0 の世界への移行

REALITY 2.0 の世界では、モノやヒトさらに実体を持たないさまざまなコトがサイバー空間を通じて相互につながりあい、関係を持ってくる。また、それらが持つ多様な要素、機能はネットワークを介して利用可能なコンポーネントとすることが可能となる（一種の API として利用可能な状態になる）。このため、モノ・ヒト・コトのコンポーネントを適宜組み合わせることによって、新たなサービスの創出やエコシステムを構築することが可能となる。ここで、複数のコンポーネントを組み合わせて、複合的なサービスを構成するための一種のプログラムを「実体定義レンズ」と呼ぶ。これを通じてモノ・ヒト・コトの機能を呼び出す事が可能となる。さらに、実体定義レンズによって動的に構成される機能のエコシステムで構成される社会をここでは、Software Defined Society（ソフトウエアデファインドソサエティー）と呼ぶ。

本区分では、現在、社会への普及、進展が進む CPS、IoT の研究開発領域を俯瞰するとともに、それらが進展した先の世界である REALITY 2.0 にむけて必要となる研究開発や政策的課題についてまとめる。

具体的には、CPS/IoT/REALITY 2.0 を構成する物理的なモノ・ヒト・コトとサイバー空間とのインターフェース（3.2.1）、ネットワークとデータ処理の基本的な枠組みとなるアーキテクチャー（3.2.2）、モノ・ヒト・コトのサービス化技術（3.2.3）、さらに CPS/

IoT/REALITY 2.0 を構成するプラットフォーム（3.2.4）から社会実装（社会デザイン）（3.2.5）までをまとめた。

これらの俯瞰図と各領域の概要は以下のとおりである（図 3-2-2）。

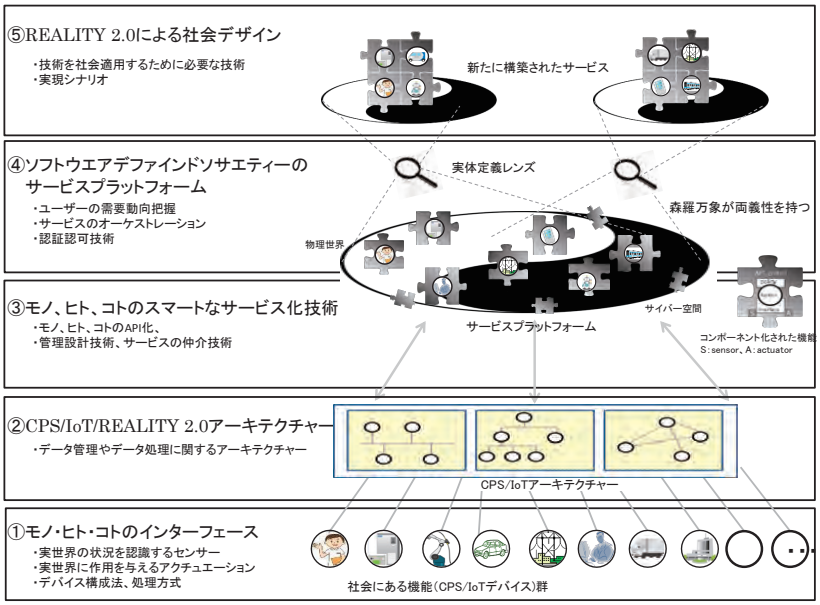

図 3-2-2. CPS/IoT/REALITY 2.0 俯瞰図

① モノ・ヒト・コトのインターフェース

CPS/IoT/REALITY 2.0 を支える技術であり、実世界を構成するモノ・ヒト・コトとサイバー空間を接続することを目的とする。実世界の状況を認識するセンサーや作用を与えるアクチュエーション技術、デバイスの構成法や処理方式等の広範な研究開発領域である。

② CPS/IoT/REALITY 2.0 アーキテクチャー

本領域では、上位のレイヤーを支えるデータ基盤技術を確立することを目的とする。実世界から集約される多様なデータを収集し、それらを多様なアプリケーションで活用できるようにするためのデータ管理やデータ処理等に関するアーキテクチャーが対象である。

③ モノ・ヒト・コトのスマートなサービス化技術

ここではある機能をほかの機能や実態から呼び出せるようにすることを「サービス化」と呼ぶ。

情報システムが提供するサービスに加えて、モノ・ヒト・コトなど物理世界や社会活動全体をサービスとして提供、利用可能とするための技術の確立とそれを支援する基盤構築を目指している。REALITY 2.0 実現に向けて、Web サービスにおけるサービス構築技術等を物理世界に適用していく事が一つの方法と考えられる。

サイバーの世界ではサービス化やその利用のための技術開発が進んでいるので、先行事例として Web サービスなどが参考となる。

④　ソフトウエアデファインドソサエティーのサービスプラットフォーム

この領域は、サービス構築の際に、必要な機能を利用するためのサービスプラットフォーム構築に関する技術である。

必要な機能の検索・発見や、価値の再配分、ユーザーの需要動向把握、サービスのオーケストレーションや認証認可技術やサービスのレベルを保証する技術、現在のクラウド等のサービスプラットフォームに物理的なモノやヒト等が入ってきた時に必要となる技術も含む。

⑤　REALITY 2.0 による社会デザイン

この領域では CPS/IoT/REALITY 2.0 を社会に適用するに当たって、その応用事例や適用するに当たっての技術的、政策的な課題について取り上げる。技術を社会適用するために必要となる技術に加えて、実現に向けたシナリオについても検討が必要である。

この分野において、諸外国では IIC や Industrie 4.0 等において、システム全体や企業、業界横断的な取り組みが進められている。そこで使われるアーキテクチャーの設計や基本ソフトウエアの整備が進んでいる。

わが国では、企業個別の取り組みはあるものの、企業や業界横断的な設計になっておらず、そのため国際的な標準化が進めづらいという弱みがある。その一方で、各種産業用ロボットや、建築機器の運用管理システム、工場の最適化システム等の個別企業における先進的な技術があり、その実用化も既に広く行われている。

2016 年から開始された第 5 期科学技術基本計画においては、超スマート社会の実現に向けて、システムの高度化、複数システムの連携協調を果たすための共通的プラットフォームの構築が、産学官、関係府省連携で進められようとしている。2015 年には IoT コンソーシアム、2016 年には AIP センターの設立など産業間、技術間の連携や基礎から応用までの研究開発が進められようとしている。こうした動きによって、個別技術の高度化や企業、業界横断的な取り組みの推進が期待される。

【参考文献】

1）GE 社，“インダストリアル・インターネット”，
http://www.ge.com/jp/industrial-internet（2016 年 12 月 20 日アクセス）

2）科学技術振興機構研究開発戦略センター，“戦略プロポーザル
「次世代ものづくり　～高付加価値を生む新しい製造業のプラットフォーム創出に向けて～」”，
https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/SP/CRDS-FY2015-SP-01.pdf（2016 年 12 月 20 日アクセス）

3）科学技術振興機構研究開発戦略センター，“情報科学技術がもたらす社会変革への展望－ REALITY 2.0 －の世界のもたらす革新”，
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/XR/CRDS-FY2015-XR-05.pdf（2016 年 12 月 20 日アクセス）

3.2.1　モノ・ヒト・コトのインターフェース

（1）研究開発領域の簡潔な説明

IoT/CPS/REALITY 2.0 を支える技術として実世界を構成するモノ・ヒト・コトの状況を認識するセンサー技術とモノ・ヒト・コトに情報や作用を与えるアクチュエーション技術、実世界との接続のための領域である。デバイスそのものの構成法や、その認識処理方式、作用や表現の方式等に関わる広範な研究開発領域である。ここでは、実世界との境界（エッジ）にあって REALITY 2.0 を実現する情報流の源であり作用点としての観点から関連する技術、動向と課題を概観する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

IoT/CPS 技術をベースに REALITY 2.0 を社会に実現するには、実世界と接し、そこからさまざまな状況を認識し情報を取得するセンシング、実世界に作用を与えるアクチュエーションといった技術から、得られた情報が構成するビッグデータを大量の計算機資源で分析するクラウド技術をさまざまな情報通信技術でつなげるといった総合的な情報技術が必要とされる。モノ・ヒト・コトのインターフェースではこれを踏まえて、センサー技術、アクチュエーション技術のみにとどまらず、実世界との境界でつなげて情報を流通するための技術についても言及する。具体的なつなげる技術としては、情報通信技術をはじめとして、長期稼動を実現するための電力供給技術、必要に応じて機器や端末が自律的に移動する技術が含まれると考える。

既存のセンシング機器は MEMS 技術を用いた小型化、省電力化、さらにスマート化が推進されている。自動車・船舶が積んでいたジャイロスコープは MEMS によりスマートフォンに内蔵され、GPS 受信機や Wi-Fi 通信機器は、省電力化が進められることで、携帯端末上でこれら個々の機能のオンオフを気にする必要性が低下している。近年では FOG（Fiber Optic Gyro: 光学ジャイロ）を用いたジャイロスコープの精度がさらに向上し、屋内測位、自動運転などで注目されている [1)]。ノーマリーオフコンピューティングは汎用プロセッサよりもむしろセンサーのような、特定のイベントを待機するために停止することが許されないような状況において効果的な試みであるといえる [2)]。さらに今後注目すべきはセンサーのスマート化である。センサーにより獲得された生のデータ量は目的とする情報にまで認識・分析されれば大幅に縮小することができる。また、認識された情報をその場で活用できる機会も増える。データ量の軽減のみでなく、カメラ映像からヒトのみを抽出し、映像的に匿名化処理を施す、人流状況の統計的処理をその場で実施するなどプライバシーに配慮した試みも実用化段階にきている [3)]。このように実世界との境界（エッジ）での処理をスマート化していく流れは今後飛躍的に進歩することが見込まれる。スマート化はセンサーに処理用プロセッサを追加する手法と、複数のセンサーを複合的に処理する手法で実現される。エッジにおけるスマートなセンシングは、これまでのクラウドでの分析処理に頼る流れと共存していくと考えられる。クラウドに情報を集約せず実世界にてそのまま情報を活用する流れとクラウドに情報を集約し、そこで分析処理後に活用する流れの二つのコンピューティングが共存していくといえる。前者をエッジコンピューティングといい、その重要性を極大化しすべてをエッジで処理する流れをエッジヘビーコンピュー

ティングと称されることもある[4)]。

アクチュエーション技術は実世界に影響を与える作用を実現するものであり、携帯端末での情報の提示、街中でのデジタルサイネージ、Haptic Engine などの触覚生成機器[5)]、没入型の VR 機器を用いた入出力一体型インターフェースなどがある。東京オリンピック・パラリンピックに向けて、多言語への対応やバリアフリーでの表現など、よりグローバルでユニバーサルな方式が注目されている[6)]。さらに、近年ではセンシングした結果を解釈してユーザーの行動変容をいかにして起こすかが課題となっており、より健康的、省エネルギー、省資源の行動などに向かわせていくためのアクチュエーションにも注目が集まっている[7)]。

つなげる技術である情報通信技術として、BLE（Bluetooth Low Energy）や 920MHz 帯を活用する近距離省電力で小規模端末間通信を対象とするものと、次世代携帯電話網である 5G が注目されている。BLE は今後の成長が期待されるウエアラブル機器の標準的通信規格の中に測位やジオフェンスの機能を盛り込み、特に O2O（Online to Offline）ビジネスの推進力として注目されている[8)]。その一方で携帯電話網技術の 5G はもはや単一の技術ではなく LTE（Long Term Evolution）で導入された OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）方式の進化、Massive MIMO（Multi-Input Multi-Output）方式の導入、さらには極小基地局の導入など数多くの技術の集合体の総称であると考えられる。特に極小基地局を活用した例ではモバイルエッジコンピューティングのインフラとしての活用が重要である[9)]。

つなげる技術に必須の要素として電力供給をいかに実装するかは常に課題である。高容量二次電池であるリチウムイオン電池、加工成形に利のあるリチウムポリマー電池は成熟期にあり、今後は ELDC（Electric double-layer capacitor: 電気二重層キャパシター）やリチウムイオンキャパシターなど高効率キャパシターの実用化のための開発、IoT 機器に特化したエネルギーハーベスト技術の開発に注目が集まっている[10)]。前述の BLE を測位インフラとして活用する場合に光発電素子により稼動させるプロトタイプがでている[11)]。ここでは太陽光に適したアモルファスだけでなく、屋内光に特化した色素増感方式でのエネルギー変換効率の向上と素子の長寿命化に注力されている。現状ではまだ、室内光での電池稼動期間とハーベスター素子寿命が拮抗する状況である。環境発電技術では光発電以外に、音や振動による発電の技術、レクテナによる電磁波や近距離での無線給電技術も実用間近である。

IoT 機器は環境に設置するモノと移動するモノに大別される。環境に設置するモノとしては、新たに設置する以外に既に設置されている設備を IoT 化する試みが、ビジネスモデルを構築しやすく参入障壁も低い。照明設備や空調設備のインテリジェント化やビルの出入り口、エレベーターなどのセキュリティー設備の高度化、ライフラインのスマートメーター化によるエネルギーマネジメントの導入等によって、モノのサービス化、ビジネス化につなげることが可能である[12)]。

移動するモノはヒトとともに移動する携帯端末やウエアラブル端末と、それ自身が自律的に移動する移動体に分けられる。ウエアラブル端末は新たな素材を開発することによって衣服や靴をインテリジェント化する医療系、フィットネス系の試みが注目されている[13)]。課題は電力供給、部品の保守、製品寿命などがあげられる。移動体の IoT は新しい分野

であり、ドローン等 UAV（Unmanned Aerial Vehicle）やロボットの普及により近年急激に注目を集めている。既に普及した掃除ロボットの移動はセンサーを活用し SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を実現しつつさらに進歩している。掃除以外の用途として警備、監視など十分な可能性をもっているが、ヒューマノイドの移動は多くの場合、コストや機構の問題が多く残念ながら限定的である。ドローンは航続可能距離 / 時間の課題が常にあるが、今後の活用を考えると VR 機器を活用した操縦性の向上や [14]、さらにその先の自動運転技術による自律移動の実現が重要だと考えられる。そのためには GPS を越えたセンチメータ級の精度での自位置の特定技術と、それを実現もしくは補強するためのリアルタイムの画像認識技術が必須となる。

(3) 注目動向

REALITY 2.0 の世界では、サイバー世界とリアル世界がシームレスに融合している。その実現時点では、モノ・ヒト・コトはサイバー世界でもリアル世界でもコンポーネント化され、「実体定義レンズ」により検索･統合され、サービスとして提供されることとなる。

このような世界が実現するには、まずさまざまなことがデジタル化されるデジタル・トランスフォーメーションが必要である。センサーの活用、技術の進展等により、かつてはデジタル化が難しく、「匠の技」が必要であった分野において、それがデジタル化されること、つまりはセンサー、データ、分析という、IoT が活用されることにより、匠の技が ICT により実現されるという事例も出てきている。酒造りという極めてアナログで匠の技を要する分野であっても、デジタル化は進展している [15]。

また、生産技術をデータにより見える化することで、生産性を向上させる試みも行われている。具体的に、日立製作所の例では、鉄道車両の組み立てに IoT を導入、ねじ締めに使うトルクレンチの締め付け力のデータを測定し、タブレットに送信、タブレット画面では､締め付けた箇所がそれぞれ適正な力かどうかが緑､赤などの色で示されるようになっている。海外工場では熟練工といった「匠」がいないため、それをデジタル化、システム化することで、どこで誰が作業を行っても品質を維持することを目指したものとなっている [16]。さまざまなモノ・ヒト・コトに関わることがデジタル化されるにつれ、サイバー世界とリアル世界とのインターフェースも変わりつつある。従来はリアル世界からサイバー世界への入り口は基本的にはパソコン（PC）であった。ユーザーはログインすることで、PC の世界、つまりはサイバー世界の住人となる。近年においては、PC に加えて、スマートフォンやタブレットの普及により、屋内のみならずモバイル環境でサイバー世界へのアクセスが実現した。

こうしたサイバー世界とリアル世界の新たなインターフェースとして音声が注目され始めてきている。この潮流の起爆点とみられているのは Amazon が 2014 年に出した Amazon Echo（アマゾン エコー）である。Amazon Echo は音声により家電等の制御を行う家庭内のハブとなるとともに、Amazon Echo に音声で対話・注文することによって Amazon への注文ができるという、電子商取引の入り口ともなっている。販売は好調であり、2016 年 4 月時点で、300 万台程度販売されたと報じられている [17]。

こうした音声のインターフェース化は Amazon に限らない。マイクロソフトは

Windows 10 に Cortana という音声認識・対話機能や、機能強化された音声・テキスト・動画による通信を可能とするスカイプや、スカイプ中で利用できるチャットボット Microsoft Bot を標準搭載する。また、日本語で女子高生の役割で会話するチャットボットりんなの提供をしている[18]。こうした動向は、従来通信におけるコンテンツ（通信の中身）の一つであった音声が、ヒトとモノ、あるいはサイバー世界とリアル世界のインターフェースとなる動きということができる。音声での会話はヒトにとってコマンド入力やテキスト入力よりもはるかに自然で容易なことである。音声インターフェースの隆盛により、二つの世界の垣根は低くなり、双方向的に融合がさらに進んでいくとみることができる。

モノ・ヒト・コトとの接点となり、情報化の入り口となるセンサーの分野では米国 Fairchild Semiconductors 社を始めとする MEMS 業界が中心となり、2013 年に産学連携組織 Trillion Sensors Summit を立ち上げた[19]。

従来、センシングが不可能と思われていた分野もその対象になりはじめており、新たなアプローチも登場している。以下に例を挙げる。

・センサーは物理センサーと化学センサーに大別できる。物理センサーが単一の物理量を測定するのに対し、化学量を測定する化学センサーは化学物質を複数種類の化学物質として受容し、パターン認知、部分認知するため、メカニズムが複雑となり実用化にハードルがあった。しかし、近年、味覚といった分野にもセンシング技術が確立し、実用化が進んでいる[20]。

・血糖値測定方法として現在は採血による測定が主である。これに対してグルコースの量に応じて光る特性を持つ Fluorescent microbeads と呼ばれる埋め込み装置を皮下血管に注入することで、採血することなく、光量により血糖値をリアルタイムで把握可能な技術も登場している[21]。

・映像のデジタル化と画像解析技術の発達は測定対象に特別な装置を設置することなく、動線分析等を可能にし、生産現場における効率化に貢献している[22]。

ヒトとサイバー空間とのインターフェースの事例として、Apple が自社初のウエアラブル端末である Apple Watch をリリースした際に ResearchKit の提供を開始している。これはスマートフォンやウエアラブル端末内蔵のセンサーによってユーザーの生理データを収集し学術研究に活用できるサービスである[23]。

また、Proteus Digital Health 社は薬剤の服用を正確に把握・管理できるデジタル錠剤システムを提供しており、医薬品の錠剤に小型のセンサーを結合させ、この錠剤を服用すると、胃液と反応し、センサーがシグナルを発し、このシグナルを患者の体表面に張り付けたパッチ型の小型検出器で検出するという仕組みを持つ[24]。

日本でも PLR（Personal Life Repository: 個人生活記録）にもとづいた個人の医療・介護記録を自身で管理し、流通の制御を個人にゆだねる分散 PDS（Decentralized Personal Data Store）の仕組みの実証が始まっている[25]。高齢化が進む社会でのパーソナルデータ活用の推進の意味でも注目すべき試みである。

コトのインターフェースとして、金融の分野では、ウエアラブル端末を通じた決済サービスの展開が進んでいる。2016 年リオデジャネイロで開催されたオリンピックにおいて VISA は指輪型ウエアラブル端末を Team VISA のメンバーに提供。NFC（Near Field

Communication）方式で決済ターミナルの近くで指輪をかざすだけで、支払いを可能にした[26]。

Apple は Apple Pay、Google は Android Pay、Samsung は Samsung Pay など自社のウエアラブル / スマートフォン端末決済システムを運営している。2016 年秋から Apple はこれらの中では初めて日本国内の決済サービスとして JR 系の交通サービスに参入している。もともと国内サービスが利用している FeliCa は Type F として NFC 規格に加わったが、従来の NFC Type A/B とは別の実装が必要とされ、参入の障壁となってきた。早ければ 2017 年からモバイル業界団体の GSMA 規格認定の NFC 搭載端末として Type F の実装が義務づけられるようになる見込みである[27]。

自動車保険の分野でもセンシングを活用し、新たなサービスが開発されている。あいおいニッセイ同和損害保険は、トヨタ自動車のテレマティクスサービス T-Connect のナビから、スマートフォン等を通じて取得した車両運行情報を、走行距離に基づいた保険料の算出や安全運転アドバイスなどのサービスに活用している[28]。

いまや携帯電話 / スマートフォンは情報インフラの一つであり、どのようなユーザーがどこで何をしているかというコトの情報化には欠かせない仕組みである。ドコモ地図アプリやヤフー防災アプリのようにユーザー数の多いものは、都市ごとの人流移動の把握に有効であることが知られており[29]、神戸市とドコモは徘徊者等の見守り実証を携帯の BLE 機構を用いて実施している[30]。

実世界の環境情報やモノを情報化する通常のセンサーのみならず、ウェブ上に流れている情報や、オープンデータを加工してリアルタイムに取得する技術として Sensorize（センサー化）が注目されている。慶應義塾大学が藤沢市と提携した試み[31]や、SNS や掲示板などから商品や企業に対する日々変化する評価や評判を自動的に収集するシステムが注目されている。

（4）科学技術的課題

ヒトを生物という観点からより正確にセンシングする場合、一般的にインプラント型（侵襲的）が有効である。膨大な情報を持つ脳を理解するニューロサイエンスにおけるブレインマシンインターフェース（BMI）の研究においては得られる情報量は非侵襲的な方法と比較して著しく大きい。しかし、生体への影響の他、ユーザー側の心理的違和感等の実用化に向けたハードルが存在する[32]。

ヒトの情感など生体情報を認識するにはウエアラブル機器のさらなる進化が必須である。衣類などに新たなセンシング、アクチュエーションの機能を持たせていくためには耐久性や、給電機構、清掃・洗浄への対応といった課題がある。

映像情報は高精細化が着実に進展しており、特に動画においては、カメラ等から生じた膨大なデータを全てクラウド等センターに伝送することは非効率であり、どこでどう必要な解析処理を実施するかが課題となる。ここではエッジコンピューティングの可能性を見いだすことができる。

モノ・ヒト・コトのインターフェースおよびそれらを通じたサービス等の社会への導入を考えた場合、既に存在する機器や設備を新たにセンサーに対応したものに置き換えていくだけでは、その進展が遅くなる事が考えられる。特に耐久消費財など買い替えまでの時

間が長いため、技術の進歩とその社会への実装に時間的な隔たりが生まれてしまう。REALITY 2.0 を技術の進展と共に社会に進展させていくためには、既にあるモノを置き換えるだけでなく、それらにセンシングやコンピューティングといった機能を付加することで、物理的なモノ・ヒト・コトをネットワーク上につないでいく、インターフェース化するといった発想も必要となる。

(5) 政策的課題

REALITY 2.0 の実現は個々人が生み出す情報を第三者に提供し、活用することに対する意義についての理解を抜きにしては語れない。この点では2013年にJR東日本のICカード・Suica の情報が 6 月末に販売開始されたが、利用者側からの個人情報保護の観点での指摘が同社に多数寄せられたことから、わずか一カ月後に販売中止にいたったことは記憶に新しい [33)]。個人情報とは、個人を特定できる情報を指す。Suica の例では販売するデータに明確には個人情報が入っていなかったが､利用者からの理解を得る事はできなかった。

プライバシーや個人情報の保護の観点からは、保護する対象がこれまでのように申込書等に記入し、個人が提供を意識しているもの以外に、センシングを通じて無意識のうちに多種多様なデータが生産、収集されることになる。これらのことから、個人はデータの活用について深い理解をしないままに、規約に同意することが考えられる。そのことから、情報の利用についてサービス開始時にパーミッションを得るだけではなく、サービス利用中においても利用者からの問い合わせに対して適正な説明が可能な仕組みづくりが求められるだろう。

(6) キーワード

エッジコンピューティング、スマートセンサー、エネルギーハーベスト、BMI、情感の認識と生成 / 表現、行動変容、パーソナルデータ / 個人情報の保護 / 活用

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	文部科学省 /JST、理化学研究所において、AI とともに IoT を推進する AIP、ERATO など基礎研究へのサポートが始まりつつある。
	応用研究・開発	○	→	自動運転や IoT に関連する事業、サービスの進展に合わせ、必要とされる技術の研究が発展。改正個人情報保護法の発効も追い風になるか。
米国	基礎研究	◎	→	Google やスタートアップ等、革新的なセンサー技術の研究開発は堅調。
	応用研究・開発	◎	↗	自動運転の実用化や、GE の Industrial Internet の進行、Qualcomm の AllSeen Alliance、Uber/AirBnB などの新規サービスの隆盛などとどまるところを知らない。
欧州	基礎研究	◎	↗	Connected Car 実現を目指し独仏の自動車メーカーが中心にセンサーの低価格化を推進。
	応用研究・開発	○	→	独 Siemens/Bosch/SAP の Industory4.0、Smart City を標榜するスペインの各市プロジェクトがあるも、個人情報保護の重視政策による圧迫。

中国	基礎研究	△	→	新規技術開発の動きは見受けられない。
	応用研究・開発	○	↗	Huawei などのメーカーとサービス事業者が活発な動き。個人情報配慮が軽いため実証が容易。
韓国	基礎研究	○	→	Samsung と LG を中心にディスプレイ技術とモバイル / ウエアラブル端末部材を中心に技術開発が活発。
	応用研究・開発	◎	→	SK テレコム等の通信キャリアと Samsung の連携、決済サービスの進展、ヒュンダイ等自動車メーカーの実証実験。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）三宅 常之 , ジャイロが 1 ～ 2 ケタ高精度に 屋内測位サービスを後押し , 日経エレクトロニクス 2015 年 11 月号 , pp. 59-67（日経 BP, 2015）.
2）国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（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（2016 年 12 月 14 日アクセス）
3）東急電鉄, “ニュースリリース 駅構内カメラ画像配信“駅視 -vision（エキシビジョン）”の実証実験を開始します”, http://www.tokyu.co.jp/company/news/list/?id=2392（2016 年 12 月 14 日アクセス）
4）唐島 明子 , “クラウドの次は「エッジヘビー」――分散協調型の機械学習で工場の機械がリアルタイム連携”, http://businessnetwork.jp/Detail/tabid/65/artid/4504/Default.aspx（2016 年 12 月 14 日アクセス）
5）Kyle Vanhemert, “手品のような「触感の UI」の未来” http://wired.jp/2015/04/12/apples-haptic-tech/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
6）国土交通省 , “空港やスタジアムにおける高精度な測位技術の活用実証や更なる活用推進を検討します”, http://www.mlit.go.jp/report/press/kokudoseisaku01_hh_000102.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
7）小谷 卓也 , “ウエアラブルには「行動変容」を促す仕組みを”, http://techon.nikkeibp.co.jp/article/FEATURE/20140603/355801/?ST=health（2016 年 12 月 14 日アクセス）
8）BeaconLabo（ビーコンラボ）, “ジオフェンス機能や Beacon を用いて新たなイベントとの出会いを提供”, http://beaconlabo.com/2015/12/1931/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
9）株式会社 NTT ドコモ , “IoT ×モビリティの「これまで」と「これから」”,

http://www.soumu.go.jp/main_content/000400688.pdf（2016 年 12 月 14 日アクセス）
10）和田 憲一郎 ,“エネルギー不要の技術あり、環境から少しずつ回収して使う”, http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1406/27/news020_2.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
11）大日本印刷 株式会社 ,“Spansion のエネルギーハーベスティング向け電源 IC 搭載モジュールを利用して屋内位置情報および O2O サービスの実証実験を開始”, http://www.dnp.co.jp/news/10105059_2482.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
12）Matt Burns, Google,“スマートサーモスタット Nest をハブとするホームオートメーション・プラットフォームを発表”, http://jp.techcrunch.com/2014/06/25/20140623google-makes-its-nest-at-the-center-of-the-smart-home/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
13）“UnderWare: Aesthetic, Expressive, and Functional On-Skin Technologies” International Workshop at the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing（UbiComp2016: Heidelberg, Germany, 2016）
http://underware.media.mit.edu（2016 年 12 月 14 日アクセス）
14）近藤 聖 ,“ついに空を飛べる !?VR ゴーグルドローン「FLYBi」”, https://www.borg.media/flybi-2016-06-02/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
15）日本経済新聞 ,「最高の酒に杜氏はいらない 「獺祭」支える IT の技」, 2015 年 3 月 24 日
http://www.nikkei.com/article/DGXMZO83592100U5A220C1000000/（2016 年 12 月 15 日アクセス）
16）一般社団法人　関西経済同友会　最先端技術ものづくり委員会 ,「【提言】「匠の技」と最先端技術が融合する関西クラスターの構築」, 2016 年 4 月 , P8
17）ZDNet Japan,“「アマゾン「Alexa」が注目を集める理由」--「スマートホーム・ハブ」の本命 ?」, 2016 年 4 月 24 日”, http://japan.zdnet.com/article/35081512/（2016 年 12 月 15 日アクセス）
18）日経産業新聞 ,「会話の時代が来た、ユーザーインターフェース」, 2016 年 9 月 29 日
19）株式会社 日本政策投資銀行（DBJ）産業調査部 ,“1 兆個のセンサによる社会変革”, http://www.dbj.jp/ja/topics/report/2015/files/0000021467_file2.pdf（2016 年 12 月 14 日アクセス）
20）株式会社 インテリジェントセンサーテクノロジー ,“味覚センサーとは ?” http://www.insent.co.jp/products/taste_sensor_index.html（2016 年 12 月 14 日 アクセス）
21）日経テクノロジーオンライン（編),「Trillion Sensors Summit Japan 2014 ～ 1 兆個のセンサが医療 / 農業 / 建物 / 交通を覆う～」全講演録 ,（日経 BP, 2014）
22）原田 典明 , 青木 勝 , 三上 明子 , 峯下 聡志 , 斎藤 志傑 , 人の行動を「見える化」する動線解析技術と活用例 , NEC 技報 Vol. 64, No. 3, pp.16-21（NEC, 2011）.
http://jpn.nec.com/techrep/journal/g11/n03/pdf/110303.pdf（2016 年 12 月 14 日 アクセス）

23）Apple,"ResearchKit と CareKit",
http://www.apple.com/jp/researchkit/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
24）大下 淳一 ,“センサー内蔵の錠剤「デジタルメディスン」が登場”,
http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/091400312/?ST=health（2016 年 12 月 14 日アクセス）
25）近藤 寿成“東京大学,“医療・介護記録を自身で管理する仕組みを試験運用”,
http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/090400176/?ST=health（2016 年 12 月 14 日アクセス）
26）赤坂 薫 ,“リオ五輪、選手は指輪型ウエアラブルで決済 !Visa が端末を配布”,
http://www.rbbtoday.com/article/2016/06/06/142525.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
27）小山 安博 ,“iPhone でモバイル Suica が使えるようになる ? - NFC 対応スマートフォンに FeliCa 搭載という流れ”,
http://news.mynavi.jp/articles/2016/07/15/nfc/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
28）マイカー燃費管理サービス「e 燃費（イーネンピ）」,“あいおいニッセイ同和損保、走行距離連動の保険を 4 月から販売…トヨタ T-Connect 活用”,
http://e-nenpi.com/article/detail/243935（2016 年 12 月 14 日アクセス）
29）東京大学空間情報科学研究センター ,“人の流れプロジェクト”,
http://pflow.csis.u-tokyo.ac.jp（2016 年 12 月 14 日アクセス）
30）株式会社 NTT ドコモ ,“神戸市ドコモ見守りサービス（実証事業）の開始”,
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/notice/2016/09/15_00.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
31）藤沢市・慶應義塾大学 SFC 研究所 ,“「藤沢みんなのレポート」の試行的運用を開始”,
https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/kouhou/shise/gaiyo/shicho/kishakaiken/2016/20161020_03.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
32）長谷川 良平 , ブレイン - マシン インタフェースの現状と将来 , 電子情報通信学会誌 Vol. 91, No. 12, pp. 1066-1075（2008）.
http://www.journal.ieice.org/conts/kaishi_wadainokiji/2008/200812.pdf（2016 年 12 月 14 日アクセス）
33）エースラッシュ , Suica のデータ販売中止騒動、個人特定不可なのになぜ問題 ? ビッグデータの難点 , Business Journal 2013 年 8 年 23 日記事
http://biz-journal.jp/2013/08/post_2760.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）

3.2.2　CPS/IoT/REALITY 2.0 アーキテクチャー

（1）研究開発領域の簡潔な説明

本領域では CPS/IoT/REALITY 2.0 のアーキテクチャーについて記載する。本領域の研究目的は、上位レイヤーを支えるデータ基盤技術を確立することである。

CPS/IoT の進展に伴い、実世界に張り巡らされることが期待される極めて多数のセンサーから得られるイベント、データを収集し、多様なアプリケーションで活用できるアーキテクチャーとそれに基づくプラットフォームの研究開発が必要となっている。

このレイヤーは REALITY 2.0 を支えるデータシステムであり、その構成要素には分散データ管理、エッジコンピューティング、ストリームコンピューティング、データシステムアーキテクチャーがある。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

REALITY 2.0 では大量のセンサー群から膨大なデータが収集される。このようなデータはユーザーの目的に応じて処理されるが、そのためにはデータ基盤システムが必要である。データ基盤システムとしてはデータベース管理システム（DataBase Management System:DBMS）が広く利用されてきた。DBMS には SQL 問い合わせ処理システムとトランザクション処理システムの二つのサブシステムが含まれる。これらのシステムはいずれも複雑であるため、それらを統合する DBMS 自体の大幅な修正は容易ではない。2005 年に両サブシステムをまとめる場合の性能的問題が指摘 [1] されて以来、サブシステムごとの改善が顕著に行われてきた。

その傾向は現在も変わらず、むしろ増加傾向にある。その結果として、さまざまな用途に最適化されたさまざまなサブシステムが現在乱立している。問い合わせ処理のストレージ一つをとっても、DBMS を用いる構造とファイル上でデータを置く構造がある。また、問い合わせ処理一つをとっても、SQL を提供するシステムと、MapReduce と呼ばれる分散並列データ処理システムを提供するシステムがある。さらにこれらはそれぞれクラスター、ハードウエアを用いた最適化などがあり、細かい用途に応じてさまざまなバリエーションが存在している。

性能最適化とは別の方向として、CPS/IoT/REALITY 2.0 のセキュリティーやプライバシー保護のために暗号化データを復号せずにデータ処理する研究も存在する [2]。

さらに、CPS/IoT のアーキテクチャーとして、極めて多数のセンサーを管理し、そこから送信されるイベントやデータを収集し、アプリケーションで処理できるためのクラウドコンピューティング、エッジコンピューティングなどを基礎とするアーキテクチャーのモデルと設計技術の研究が行われている [3)-6)]。

IoT アーキテクチャーのドメインによらない標準として、oneM2M [7]、Enterprise IoT [8]、MEC（Mobile Edge Computing）[9] や NIST の提案 [10] などがある。また、Industrie 4.0 [11]、IIC（Industrial Internet Consortium）[12] などの製造業や産業に特化したドメイン固有の IoT 参照アーキテクチャー、あるいは、機械学習やコグニティブなどの特定技術を実現するアーキテクチャーの設計技術などが基礎から実用化まで、研究開発が進められている。さらに、近年では新たな基盤的な技術であるボット（Bot）やブロックチェーン（Block

Chain）などを活用できるアーキテクチャー技術[13),14)]も出現しており、基礎研究から実用化まで包含した極めて重要な研究課題となっている。

わが国はこの分野における研究開発について他国の後塵を拝しており、世界の潮流に追従できていないという現状にある。

(3) 注目動向

［分散データ管理］

複数のコンピュータに跨がるデータ（複製）を共有するには二つの方式がある。第一の方式は合意である。古典的な分散合意手法には Paxos[15)] があり、その簡易版には Raft[16)] がある。これらの手法は分散システムにおいて合意を得るために用いられる。これまでの主たる用途はサイズの小さな設定ファイルの共有だったが、近年は地理的に分散した巨大なサイズのデータベース自体の共有のためにも用いられるようになってきた[17)]。

データ共有の第二方式は分散トランザクション処理である。データが複数ノードに存在する場合でもトランザクション処理を実行することは可能である。基本的な方式は 2 相コミットと呼ばれる。2 相コミットではデータを有するノード（データノード）に対して、まず処理可能かどうかを問い合わせる。全てのデータノードが処理可能と返答すれば、各データノードでの処理を実行させる。

2 相コミットは処理時間が長いことが知られており、そこでさまざまな高性能化の試みが行われている。まず､制約緩和による RAMP（Read Atomic Multipartition）[18)] がある。次に、不揮発メモリと RDMA（Remote Direct Memory Access）という高性能ハードウエアとネットワークを利活用した高性能化を実現する FaRM[19)] がある。FaRM は TATP（Telecommunication Application Transaction Processing）ベンチマークを用いた実験で 1 億 4000 万トランザクション / 秒という高性能を達成している。

［エッジコンピューティング］

センサーデバイスから生じる膨大なデータをクラウドに転送してから処理をするのでは膨大な通信コストが求められる。これを避けるためにセンサーデバイス、すなわちエッジにおいて必要な処理を行う計算パラダイムがエッジコンピューティングである。コンセプトは自明であり、計算パラダイムが分散（グリッド）から集中（クラウド）へ向かう時代には常に注目される。現在もさまざまな状況で適用されており、通信会社における試みなどがある[20)]。2016 年 10 月に初めての国際会議が開催[21)] されるなど、研究分野活発化の兆しがある。

EU では IERC（IoT European Research Cluster）のコーディネーションの下、エッジコンピューティングおよびゲートウェイアーキテクチャーの研究と標準化について、約 30 のプロジェクトが進行している[22)]。また、ETSI におけるモバイルエッジコンピューティングの標準化[9)] や Cisco などでの製品化[4)] への取り組みがある。

［ストリームコンピューティング］

サイエンスで使われる観測機や IoT デバイスからは、データが次々に生じる。例えば

天体望遠鏡 LSST（Large Synoptic Survey Telescope）からは年間 60PB（ペタバイト）の観測データが生成される [23]。このようなデータを全て保存して処理するには膨大なコストが必要である。そこでシステムに到着したデータをオンザフライで処理するデータ処理パラダイムであるストリームコンピューティングが注目されている。

かつてのストリームコンピューティングではリレーショナル代数あるいはタプルベースの処理にウィンドウ演算子を導入するものだったが、近年は異常検出などの特定分野を指向した技術が現れつつある [24]。

［データシステムアーキテクチャー］

①データ分析アーキテクチャー

さまざまな種類のデータが大量に生じることから、それを格納するデータシステムは多様なデータモデルを取る。最も使われるモデルは SQL により問い合わせ可能なリレーショナルデータモデルだと考えられる。このモデルを実現するアーキテクチャーとしていわゆる RDBMS（Relational Database Management System）とファイルベースの Hadoop/Spark がある。RDBMS の中には高性能化のために FPGA 等のハードウエアを活用している Netezza や Oracle ExaData などがある。Hadoop/Spark では KVS（Key-Value Store）やファイルでデータ管理を行い、MapReduce や SQL 問い合わせ処理系でデータ処理を可能にする。

急速に普及する Spark はインメモリ処理を指向することで高速化を図っており、そのソフトウエアスタックは SQL のみならず、グラフ処理（GraphX）、機械学習（MLlib）、ストリーム処理などさまざまなものがある。

②トランザクション処理アーキテクチャー

上記のデータ分析処理とは別に、単一マシンでのトランザクションに関しても活発な研究が昨今行われている。その例にはマルチソケットのメニーコアマシンにおける性能極大化を狙った研究もある [25]。主たる潮流として楽観的並行実行制御モデルに基づき多数のトランザクションをまとめてコミットする方式 [26] がある。このような試みによりトランザクションによる性能オーバヘッドは急激に削減されており、近い将来、トランザクションのオーバヘッドが無視できる可能性すら存在する。

［ドメイン固有の CPS/IoT の参照アーキテクチャーの研究の例］

ドイツの主導する Industrie 4.0 [11] や米国が主導する IIC（Industrial Internet Consortium）[12] などが製造業のアーキテクチャー参照モデルを提案し、グルーバルな主導権を握りつつある。また、Bosch は Enterprise IoT アーキテクチャーの参照モデルを提案している [8]。

また、ブロックチェーンの IoT アーキテクチャーへの応用として、IBM 社 Samsung 社による ADEPT（Autonomous Decentralized Peer-to-Peer Telemetry）などの新たなアーキテクチャーの研究が進められている [14]。

さらに、従来のスマートフォンのアプリケーションに代わる、ボット（Bot）を利用したモバイルサービスの新しいアーキテクチャーの研究と実用化が進展している。[13]。

その他の動きとしては、CPS/IoT の応用ドメインとして自動車ソフトウエアアーキテクチャーの研究と標準化が活発となっている。

［CPS/IoT のセキュリティー / プライバシーの研究］

IoT のセキュリティーやプライバシーの研究も活発になっている [27),28)]。特に、自動車がネットワークに接続された、いわゆるコネクテッドカーのハッキングが大きな問題となり、自動車のセキュリティーは重要な研究課題となっている [29)]。

（4） 科学技術的課題

デバイスとクラウドコンピューティングや企業情報システムとの間にエッジコンピューティング（または、フォグコンピューティング）と呼ぶ新たなコンピューティング層を配置するアーキテクチャーが台頭している [6)]。このエッジコンピューティングは今後の CPS/IoT/REALITY 2.0 アーキテクチャーにおいて重要な役割を果たすと考えられるため、その研究開発が必要である。

CPS/IoT /REALITY 2.0 システムでは社会の隅々まで張り巡らされたセンサーや端末の数が飛躍的に増大することから、スケーラビリティ、セキュリティー、リアルタイム性などの新たな要求を実現するアーキテクチャーのモデルとその設計方法、実装方法の研究が必要である。

さらに、技術的ボトルネックとなるのがデータのサイズとフォーマットである。サイズが大きくなれば管理・処理コストが増大する。フォーマットが増えれば、それらを跨がって共通した処理を行うことが困難になる。注目動向で挙げた要素はいずれも重要だが、わが国が国際的競争に勝つためには全てを対象とすることは現実的ではなく、いずれかの分野に注力することが必要である。注力すべき分野は、現在強い異分野との連携が容易な分野だと考える。

CPS/IoT/REALITY 2.0 アーキテクチャーの上位でわが国が強い分野には自動車産業があり、下位でわが国が強い分野にはスーパーコンピューターがある。自動車産業で重要な処理は、上記の注目動向で挙げたストリームコンピューティングであり、スーパーコンピューターで重要な処理は、データシステムアーキテクチャーである。これらの、技術的なボトルネック、知識の欠如、ホットな研究開発課題、わが国として今後取り組むべき技術的課題等については以下のとおりである。

［ストリームコンピューティング（自動車との連携から）］

技術的なボトルネックはデータの取り込みである。データ処理を行うにはそもそもデータをコンピュータへ取り込まなければならないが、NIC（Network Interface Card: ネットワークインターフェースカード）から CPU へのデータ転送コストが大きく、そもそもそこがボトルネックになっている。これについては FPGA を利用すれば NIC と計算を同一ボードで行う等の処理により解決される可能性がある。ただしプログラム困難性を同時に解決することが求められるだろう。

この分野におけるホットな研究開発課題は異常検知である。以前のストリームコン

ピューティングでは、SQL 処理のような定型処理を指向していたが、近年は、入力データ中にほんのわずかのみ存在する異常を検出するという、本来の目的である異常検知の研究が現れてきており、カメラ画像からの異常検知等が一層広がる可能性がある。

わが国として今後取り組むべき技術的課題は、自動運転との密接な連携である。運転中の異常を検出する機械学習アルゴリズムは多数研究されているが、膨大な数の異常検出パイプラインを効率的に動作させ、さらに異常検知時にそれを適切に説明する技術などの新しいデータベース技術 [2] が求められる。また、自動運転中のデータを保存・管理・分析するためのデータ基盤が必要になる。各企業はそれらのデータを蓄積しているだろうが、扱い方に苦労している可能性もある。現在はデータこそが貴重な資源であるため、海外企業にそれらのデータを押さえられる前に、自動運転研究者とデータ研究者が連携して、新しい基盤を構築することが望ましい。

［データシステムアーキテクチャー（スーパーコンピューターとの連携から）］

技術的なボトルネックは、データが多すぎることである。データをメモリへ移動させることも困難だが、そもそもデータが多すぎて複製を作ることも困難になりつつある [30]。

この分野におけるホットな研究開発課題は先進的デバイスを用いたデータ基盤ソフトウエアである。不揮発メモリや GPGPU などのアクセラレータの登場に伴い、それらを活用することで上記の問題を解決しようとする研究がデータシステムアーキテクチャー全般で行われている。この活用にはシステムの再設計が必要なため、ソフトウエアキテクチャーを熟知している必要がある。わが国でもファイルシステムについてはそのような試みが行われている [31]。一方、わが国ではそのような人材が産官学で希少である。この状況は米欧中韓とは正反対であり、日本だけ一人負けの状況である。

わが国として今後取り組むべき技術的課題は、スーパーコンピューター分野との連携によるデータシステムアーキテクチャーの再設計である。研究や、研究環境の整備等において他国から後れを取っている状況であるが、わが国が強い分野であり、さらに常に先進的デバイスを取り込むスーパーコンピューターの分野と連携すれば、近年のホットトピックであるに先進的デバイスを用いたデータ基盤ソフトウエアの研究開発を合理的に展開可能であるため、このアプローチが競争で優位に立てる一手法と考えられる。

また、REALITY 2.0 では膨大な量のデータを管理しなければならないが、それを実現する施設がほとんどないため、技術的課題以前に膨大量のデータを管理可能な施設を早急に検討する必要がある。HPCI（High Performance Computing Infrastructure）ではスーパーコンピューターユーザー用に 22PB（ペタバイト）のストレージを提供 [30] しているが、REALITY 2.0 でも同様にそれ以上のストレージを提供する施設がなければ、上位層の研究を適切に展開できないと思われる。費用削減・運用管理効率化のため、国内クラウドベンダーとの連携を視野に入れることが望まれる。

（5）政策的課題

研究開発を推進する上で本領域に特有の制度上の課題は、人材が他国（米欧中韓）よりも非常に少なく、また、研究を支援する体制が脆弱な点である。これは世界のトップ会議

（SIGMOD、VLDB、OSDI 等）にわが国から出席しているシステム系の研究者が非常に少ないことからも言える。本領域に関する学術研究者はわが国には少なく、特に若手の数が減り続けている。この領域でわが国が優位に立つためには、偶発的に有力な研究や技術が誕生することに期待するのではなく、若手研究者の育成に関する早期の取り組みをすべきである。

取り組みは、本領域に対して単に予算を増加させるだけでは不足である。まずは産学を跨がるコミュニティ構築が必要だと考えられる。なぜならこの分野は基盤技術であるため、応用を適切に理解しなければ適切な研究課題を設定できないためである。この分野は、学術的な研究を進めるというよりも、有益な技術を開発し、さらに運用するという意味合いが強い分野である。わが国のサイエンスの分野では、気象学や天文学など膨大なデータの管理に直面して苦しむ専門家がいる。一方で、企業内部ではそうした問題を抱えた人材が公には見えづらく、サイエンス分野の専門化との交流が進みづらいという問題がある。そのため、産学を跨る連携を進めるにはベンチャー企業などを利用した活発な人材交流が求められる。

次に、外国、特に米国との連携を行えるスキームが必要である。なぜならこの分野は米国が圧倒的に強いからである。米国のみならず企業でも研究開発が活発に行われており、活躍する日本人もいるため、彼らとの連携が好ましい。

また、上述した大規模データを管理可能な施設を整備することが好ましい。現状は身近にデータがないから技術の必要性がわからないために研究を展開できず、たとえ研究を展開しても不要と言われる状況である。現実には企業にも大規模データが存在するのだから（例：広告、通信など）それら企業との連携が好ましい。

さらに、CPS/IoT/REALITY 2.0 の社会的受容を促進するために、実証実験を行うテストベッドの構築や特区の設定をしていくことも必要である。

(6) キーワード

分散データ管理、エッジコンピューティング、IoT、
ストリームコンピューティング、classification、clustering
データシステムアーキテクチャー、relational database、Apache Spark
Apache Hadoop、MapReduce、SQL、GPGPU、FPGA、CPS、Fog Computing、
クラウドコンピューティング、Industry 4.0、Industry Internet
Consortium、Architecture、Platform、ブロックチェーン、Block Chain、
セキュリティー、プライバシー

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	⤵	一部の有力な研究者がまれにトップ会議で報告することがある程度であり、国際的には存在感は希薄である。人材育成計画は示されておらず、今後の不透明感が強い。
	応用研究・開発	△	⤵	一部のドメインや企業で積極的な取り組みが表れているが、米国や欧州に比べ規模や、産業間連携などの点で劣る。 また、人材を育てられる大学教員が稀少であり、企業では分野から撤退して人材を減らす状況が続いている。
米国	基礎研究	◎	→	多くの大学や産業界で研究が活発に行われ、世界をリードしている。また、SIGMOD、VLDB、OSDI、SOSP などデータ基盤に関わる国際会議で圧倒的な力を示している。さらに今後も政府が研究開発への支援を行う予定[32]。
	応用研究・開発	◎	↗	IIC のメンバー企業や自動車業界、医療機器業界などで、実用化が確実に進んでいる。 また、Amazon、Google、IBM などが IoT 開発プラットフォームを提供している。
欧州	基礎研究	○	→	IERC のコーディネーションのもと、30 を超える研究開発プロジェクトが進行[22),33)]。 また、米国には劣るが一定数の会議報告者が存在し、特に TU ミュンヘンのチームは Hyper なる超高速データ基盤で一定の存在感を見せている。
	応用研究・開発	○	↗	ドイツの Industrie 4.0 など、産学連携、業界横断的な応用研究と実用化が進んでいる[11),34)]。
中国	基礎研究	○	↗	Internet Plus プロジェクト[35),36)] を立ち上げ、広範な領域で研究開発を加速している。 また、トップ会議発表が近年急速に増加している。
	応用研究・開発	△	↗	Internet Plus では、さまざまな領域での応用が進められている。その一つとして、Made in China 2025[37),38)] のもと、技術開発と実用化を加速している。 また、優れた成果を出した後にアリババやファーウェイなどの企業で製品開発を行うケースが多く、着実に製品の品質を向上させている。さらに、幾つかの先進企業では、米国などから人材を確保し、研究開発を活発に進めている。
韓国	基礎研究	△	↗	メモリ関係で強い力を有するため、それを利活用した技術のトップ会議報告が目につく。 国としては、2014 年に IoT の研究開発に関するマスタープランを策定[39)]。
	応用研究・開発	△	↗	ホームネットワークシステムなど、特定ドメインでの実用化の研究、開発が盛んに行われている。 サムソン社の会議報告が多いことから、同社の製品の品質は向上していることがうかがわれる。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　⤵：下降傾向

(8) 参考文献

1) Michael Stonebraker and Ugur Cetintemel, One Size Fits All: An Idea Whose Time Has Come and Gone, In Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering (Tokyo, Japan、2005) pp. 2-11 , (IEEE, 2005).
2) Raluca Ada Popa, Catherine M. S. Redfield, Nickolai Zeldovich、and Hari Balakrishnan. CryptDB: protecting confidentiality with encrypted query

processing, In Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Operating Systems Principles（Cascais, Portugal, 2011）pp. 85-100（ACM, 2011）.

3）青山 幹雄、エッジ指向エンタープライズ IoT アーキテクチャの概念と課題 , ウィンターワークショップ 2016・イン・逗子（湘南国際村センター , 2016）論文集 , pp. 30-31（情報処理学会 , 2016）,

4）Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, and Sateesh Addepalli, Fog Computing and Its Role in the Internet of Things, In Proceedings of MCC ‘12 workshop on Mobile cloud computing（Helsinki, Finland, 2012）,pp. 13-16（ACM, 2012）.

5）Rajkumar Buyya and Amir Vahid Dastjerdi（eds.）, Internet of Things: Principles and Paradigms,（Morgan Kaufmann, 2016）.

6）Weisong Shi and Schahram Dustdar, The Promise of Edge Computing, IEEE Computer, Vol. 49, No. 5,pp. 78-81（2016）.

7）oneM2M（M2M 分野の新・国際標準組織）,Functional Architecture、TS-0001-V.2.10.0, Aug. 30, 2016,
http://www.onem2m.org/images/files/deliverables/Release2/TS-0001-%20Functional_Architecture-V2_10_0.pdf（2016 年 12 月 22 日アクセス）

8）Dirk Slama, Frank Puhlmann, Jim Morrish, and Rishi M Bhatnagar, Enterprise IoT: Strategies and Best Practices for Connected Products and Services（O’Reilly, 2015）.

9）European Telecommunications Standards Institute（ETSI）Mobile Edge Computing Industry Specification Group, Mobile-Edge Computing（MEC）; Framework and Reference Architecture, ETSI GS MEC 003 V1.1.1,（ETSI, 2016）
http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/01.01.01_60/gs_MEC003v010101p.pdf（2016 年 12 月 22 日アクセス）

10）National Institute of Standards and Technology（NIST）Cyber Physical Systems（CPS）Public Working Group, Framework for Cyber-Physical Systems, Release 1.0, May 2016,

11）Gunther Koschnick, The Reference Architectural Model RAMI 4.0 and the Industrie 4.0 Component,
http://www.zvei.org/en/subjects/Industry-40/Pages/The-Reference-Architectural-Model-RAMI-40-and-the-Industrie-40-Component.aspx.（2016 年 12 月 22 日アクセス）

12）Industry Internet Consortium（IIC）, Industry Internet Reference Architecture,Ver. 1.7,（IIC, 2015）,
http://www.iiconsortium.org/IIRA.htm（2016 年 12 月 22 日アクセス）

13）Economist, Bots, The Next Frontier, 09 April 2016,
http://www.economist.com/news/business-and-finance/21696477-market-apps-maturing-now-one-text-based-services-or-chatbots-looks-poised（2016 年 12 月 22 日アクセス）

14）IBM Institute for Business Values, Empowering the Edge: Practical Insights on a

Decentralized Internet of Things,（IBM, 2015）.
https://www-935.ibm.com/services/us/gbs/thoughtleadership/empoweringedge/
（2016 年 12 月 22 日アクセス）

15）Leslie Lamport, Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed System, Communications of the ACM Vol. 21, No. 7, pp. 558-565（1978）.

16）Diego Ongaro and John Ousterhout. In search of an understandable consensus algorithm. In Proceedings of the 2014 USENIX Annual Technical Conference（Philadelphia, USA, 2014）,pp. 305-320（USENIX, 2014）.

17）James C. Corbett, et. al, Spanner: Google's Globally Distributed Database, ACM Transactions on Computer Systems, Vol. 31, No. 3, Article 8,（2013）.

18）Peter Bailis, Alan Fekete, Ali Ghodsi, Joseph M. Hellerstein, and Ion Stoica. Scalable Atomic Visibility with RAMP Transactions, ACM Transactions on Database Systems Vol. 41, No. 3, Article 15（2016）.

19）Aleksandar Dragojević, Dushyanth Narayanan, Edmund B. Nightingale, Matthew Renzelmann, Alex Shamis, Anirudh Badam, and Miguel Castro. 2015. No compromises: distributed transactions with consistency, availability, and performance, In Proceedings of the 25th Symposium on Operating Systems Principles,（Monterey, California, USA, 2015）pp. 54-70（ACM,2015）.

20）田中 裕之 , 高橋 紀之 , 川村 龍太郎 , IoT 時代を拓くエッジコンピューティングの研究開発 ,NTT 技術ジャーナル 2015 年 8 月号 , pp. 59-63（NTT,2015）.

21）The First IEEE/ACM Symposium on Edge Computing（Washington DC, USA, 2016）
http://conferences.computer.org/SEC/（2016 年 12 月 22 日アクセス）

22）IoT European Research Cluster（IERC）

23）http://www.internet-of-things-research.eu/.（2016 年 12 月 22 日アクセス）

24）Large Synoptic Survey Telescope（LSST）, Technology Innovation
https://www.lsst.org/about/dm/technology（2016 年 12 月 22 日アクセス）

25）Peter Bailis, Edward Gan, Samuel Madden, Deepak Narayanan, Kexin Rong, and Sahaana Suri, MacroBase: Prioritizing Attention in Fast Data, 2017 ACM SIGMOD Conference,（Raleigh, North Carolina, USA, 14-19 May 2017）.

26）Hideaki Kimura. FOEDUS: OLTP Engine for a Thousand Cores and NVRAM, In Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data（Melbourne, Australia, 2015）pp. 691-706（ACM, 2015）.

27）Stephen Tu, Wenting Zheng, Eddie Kohler, Barbara Liskov, and Samuel Madden, In Proceedings of the 24th ACM Symposium on Operating Systems Principles（Farminton, Pennsylvania, USA, 2013）pp. 18-32（ACM, 2013）.

28）Fei Hu（ed.）, Security and Privacy in Internet of Things（IoTs）:Models, Algorithms, and Implementations（CRC, 2016）

29）Industry Internet Consortium（IIC）, Industry Internet of Things、Vol. G4: Security Framework,（IIC, 2016）

https://www.iiconsortium.org/IISF.htm.（2016 年 12 月 22 日アクセス）
30）Riccardo Coppola and Maurizio Morisio, Connected Car: Technologies、Isssues, Future Trends, ACM Computing Survey, Vol. 49, No. 3, Article No. 46（2016）.
31）High Performance Computing Infrastructure（HPCI）共用ストレージ https://www.hpci-office.jp/info/pages/viewpage.action?pageId=11862295（2016 年 12 月 22 日アクセス）
32）Fuyumasa Takatsu, Kohei Hiraga, and Osamu Tatebe, PPFS: a Scale-out Distributed File System for Post-Petascale Systems, the 2nd IEEE International Conference on Data Science and Systems,（Sydeny, Australia, 12-14 Dec. 2016）.
33）Afua Bruce, Dan Correa, and Suhas Subramanyam, Internet of ,Things: Examining Opportunities and Challenges, The White House Blog, Aug. 30, 2016. https://www.whitehouse.gov/blog/2016/08/30/internet-things-examining-opportunities-and-challenges（2016 年 12 月 22 日アクセス）
34）Ovidiu Vermesan and Peter Friess（eds.）, Digitising the Industry Internet of Things Connecting the Physical, Digital, and Virtual Worlds（River. 2016）.
35）The People's Republic China, The State Council, Internet Plus, http://english.gov.cn/2016special/internetplus/.（2016 年 12 月 22 日アクセス）
36）Zhu Wang, Chao Chen, Bin Guo, Zhiwen Yu, and Xingshe Zhou, Internet Plus in China, IEEE IT Professional, Vol. 18, No. 3, pp. 5-8（2016）.
37）The People's Republic of China, The State Council, Made in China http://english.gov.cn/2016special/madeinchina2025/.（2016 年 12 月 22 日アクセス）
38）Wing Chu, China's 13th Five-Year Plan: Made in China 2025 and Industrie 4.0 Cooperative Opportunities, HKTDC（Hong Kong Trade Development Council）Research, June 7, 2016. http://economists-pick-research.hktdc.com/business-news/article/Research-Articles/China-s-13th-Five-Year-Plan-Made-in-China-2025-and-Industrie-4-0-Cooperative-Opportunities/rp/en/1/1X000000/1X0A6AZ7.htm.（2016 年 12 月 22 日アクセス）
39）Ministries of the Republic Korea, Ministry of Science, ICT and Future Planning, Master Plan for Building the Internet of Things（IoT）, May 2014, http://www.iotkorea.or.kr/2013_kor/uploadFiles/board/KOREA-%20IoT（Internet%20of%20Things）%20Master%20Plan%20-%202014.pdf（2016 年 12 月 22 日アクセス）

3.2.3　モノ・ヒト・コトのスマートなサービス化技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

情報システムが提供するサービスに加えて、組み込み機器などの「モノ」にさまざまなサービスが付加されてきた。さらに、クラウドソーシングなどの「ヒト」の活動や、経験や体験など「コト」など、社会全体を距離や時間によらずサービスとして提供し、利用するための技術の確立とそれを支援する基盤の構築が進んでいる。

モノ・ヒト・コトを統合化し、新たなサービスを創出するために、機能をコンポーネント化（API（Application Programming Interface）化）して、プログラムから呼び出し可能とする技術やコンポーネントの粒度を決定するための技術が必要となる。また、シェアリングサービスなどのネットワークを通じたサービス提供、利用を仲介するプラットフォームやエコシステムを創出するための方法とそれを支援する基盤の研究開発が必要である。

さらに、モノ・ヒト・コトコンポーネントを統合化することでサービスを構築するための技術も必要となる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［サービスの Web API 化：「ヒト」「モノ」「コト」のサービス化］

Web 標準プロトコルである HTTP で利用可能とする REST[1] に基づく API 化が急激に進行している。これを Web API と呼ぶ。例えば、Web API のオンラインレジストリの一つである Programmable Web によれば、公開されている Web API 数は 2005 年に比べ 2013 には約 10,000 倍へと爆発的に増大している [2]。さらに、サービス化の対象も拡大している。3 次元高精度地図 [3] などの実世界の「モノ」、クラウドソーシングなどの「ヒト」の活動 [4] も Web API 化されようとしている。今後も、この Web API 化は一層拡大すると考えられる [5]。

Web サービスの世界においては、ある機能を持ったプログラムが、API という形でインターネット上に公開されている。このため、Web サービスを構築するに当たって、サービス提供者は必要な機能を全て一から作成する必要はなく、公開されている API を必要に応じてソフトウエアで呼び出し、それらを組み合わせることによって、提供したいサービスを実現している。ここで API の作成者は、API の利用や API の利用から得られる収益に対して課金をしたり、優れたアプリケーションが創出されることを期待して無償で提供するといった形で公開している。

REALITY 2.0 の世界では、こうした Web サービス（サイバー空間）において、機能を動的に組み合わせてサービスを構築するという仕組みを、物理世界に存在するモノ・ヒト・コトまで拡張していく。その実現に向けては、これまで Web サービスにおいて開発されてきた技術や手法を物理世界に適用していくことが一つの方法として考えられる。そのため、ここでは、Web の世界の具体的な技術と国内外の動向について記述する。

［サービスプラットフォームのインフラストラクチャー］

これまでの Web サーバーとアプリケーション（AP）サーバー、データベース（DB）の 3 層構造を基本としたインフラストラクチャーは、Web/AP/DB が硬直的に組み合わされていたために柔軟性にかけ、3 層のどこが止まってもアプリケーションは停止してしまう障害に弱い構造だった。最新のブラウザー中心型のアプリケーション技術では、シングルページアプリケーションアーキテクチャ [6] が採用される。シングルページアプリケーションアーキテクチャーはフロントエンドとバックエンドを並列にすることで、高いサービス継続性を提供する。画面を構成するフロントエンドは HTML5/JavaScript で構築され、HTML5 コンテンツを Akamai のようなコンテンツデリバリーネットワーク（CDN）にキャッシュすることができる構造を持つ。フロントエンドのサービス可用性は CDN がコンテンツを地域的に広く分散することで保証される [7]。CDN からロードされる HTML5 コンテンツは直接的なアプリケーションコンテンツは含んでおらず、サブページの枠組みだけが提供される。この枠組みだけのコンテンツがブラウザーにロードされると、内包されている JavaScript を起動しユーザーの Cookie や Web サイト、ソースアドレスなどのユーザー情報を収集する。続いて、アプリケーションの枠に適切なコンテンツを表示するためのバックエンドのアプリケーションロジックを API により呼び出す。呼び出されるアプリケーションは自社のアプリケーションである場合もあり、Web 広告や他者のサービスである場合もある。ブラウザーにはサブページの枠ごとに順次呼び出された API の戻り値として指定されたコンテンツが画面上に表示される。その多くは同様に CDN からロードされることで可用性を担保している。アプリケーション機能を提供するバックエンドサービスが停止していた場合には代替コンテンツを提示する。（図 3-2-3）

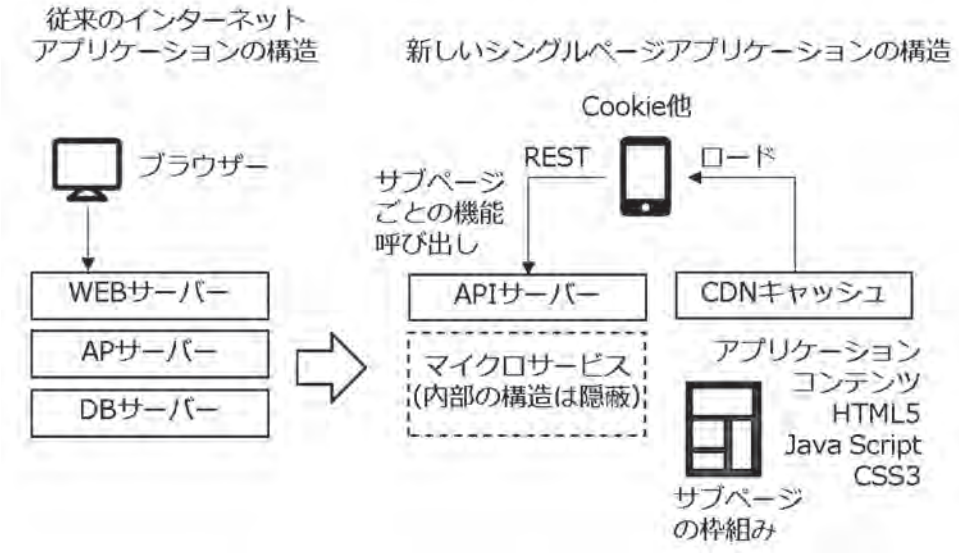

図 3-2-3. アプリケーション構造の変化

従来は 3 層構造のどこが止まっても停止してしまう構造だったが、最新のアーキテクチャーではフロントエンドは地域的に分散した CDN の高い可用性に守られ、バックエンドは代替コンテンツの指定によって可用性をユーザーに見せない構造が取られている。

［サービスエクスチェンジ］

これらのネットワークコンポーネントを相互に接続するキーとなるのがインターネット上に展開されている各種サービスのサイトを相互に接続するサービスエクスチェンジである。サービスエクスチェンジ[8] はサイバーチャネルに必要な数々のパブリックサービスへの高速で安定的な接続を提供する。Akamai 社などの CDN、Google や Facebook などの SNS/Ad-Tech、IBM Bluemix や Watson のようなアプリケーションとの接続や SFDC（Salesforce.com）や AWS（Amazon Web Service）、Microsoft 社の Azure など他のパブリッククラウドサービス等のプラットフォーム構築に必要なサービスが接続されている。サービスエクスチェンジを中心に、自社 API をパブリックサービスと並列して API 管理層での接続を実現することで、効率的で柔軟なサイバーチャネルのインフラストラクチャーを構築することが可能となる。パブリックサービスの DevOps や CD/CI 環境（CD: 継続的デリバリー、CI: 継続的インテグレーション）などの開発環境を利用したり、自社データセンターのクラウド開発環境を活用して管理体制を構築することでアプリケーションとインフラストラクチャーのコードを高速にリリースする環境が整う。

［ユーザーの動向、需要の把握］

上記の構造がもたらすメリットはサービスの継続性だけにとどまらない。ページの枠組みから呼び出されるサービスはそれぞれ独立して呼び出され、結果がブラウザー上で統合されるため、サービスの柔軟な変更や新しいチャネル機能の迅速な市場投入が可能となる。さらにこのブラウザー中心型のアプリケーションでは、ユーザーの興味や振る舞いを分析し、サービスや製品、お金等に対する需要を把握するためのビッグデータ分析基盤も提供できる。例えば、マウスがブラウザー上の画像の上を通過した時に小さなポップアップが表示されことがあるが、ブラウザーにロードされた JavaScript プログラムでは、こうしたユーザーのデジタルな振る舞い一つ一つが示す需要の動向を把握可能である。図 3-2-4 は Google が提供するトラッキングスニペットのアナリティクステンプレートである analytic.js[9] の基本スペックである。こうした UI/UX（UI: ユーザーインターフェース、UX: ユーザーエクスペリエンス）から得られる個人の振る舞いや関連した SNS 上での発言などをベースに、ユーザーのプロファイルを生成しデジタルの情報を解析することで、需要を把握するプラットフォームにつなげることが可能である。

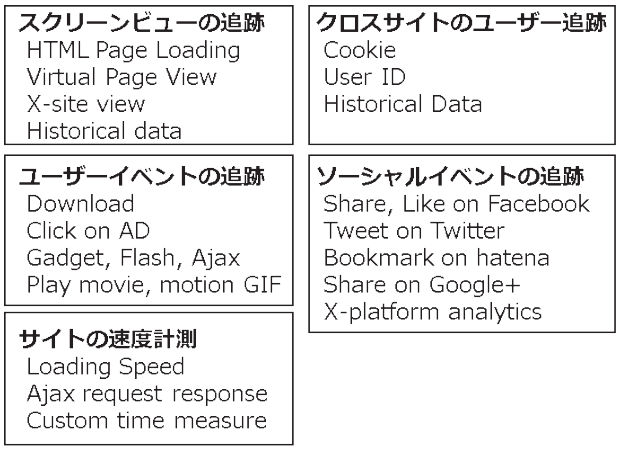

図 3-2-4. Google 社 analytic.js の機能仕様

図 3-2-4 のとおり、analytics.js ではアプリケーションのページにおけるユーザーの動作を追跡する機能が提供されている。

［API 管理と API 設計］

バックエンドのアプリケーションにおいて Apigee[10] のような API 管理は、開発者が組織の内外で API をもっと簡単に使えるように機能する。API 設計ツールは API の設計方法や API ライフサイクルの管理手法を提供する。

Web API は、その記述が比較的簡略であることから仕様が一定の形式でドキュメント化されていないことが少なくないためさまざまな問題がある[11]。そこで、Web API のドキュメント化の記述言語が提案されている。例えば、API Blueprint [12]、Open API[13] がある。いずれも、Markdown[14] を基礎とする簡潔な記述言語である。さらに、Web API を登録し、公開するディレクトリも提供されている[2]。また、Swagger（API のフレームワーク）[15] では、API の外部仕様に関する標準を確立している。その他、API 管理プラットフォームを提供する Apigee 社では、API 間のコントラクト（実行環境における約束事、契約）の提供に WADL（Web Application Description Language）を中心に取り扱っており、RAML や API Blueprint などのインポート / エクスポートもサポートしている。Usergrid[16] や IBM Mobile First Platform[17] は主にモバイル開発者のためのバックエンド・アズ・ア・サービスでありスケーラブルな運用環境とデータストレージの他、プッシュ通知のようなサービスを提供している。

技術的な API の将来は、サービスが他のアプリケーションを呼び出す Web フック[18] がサービスの可能性をさらに広げる。Web フックは GitHub や Slack など多くの場所で目にするものであるが、それが API 化されることで“ツーウェイ（two-way）API”となる方向性である。Web フックの特徴のひとつは承認が逆方向であることで、従来の API で一般的な OAuth とは反対に呼び出し側が API キーのような共有秘密情報などトークンを送信し Web フックの受信側が評価する。REST インターフェースの拡張について、HATEOAS[19] は REST インターフェースがアプリの「状態」を表現できない部分を、個々の状態を表現する XML/JSON に固有の MimeType を与えてリンクをたどることでアプリケーションの状態遷移を実現する“ジャスト・イン・タイム・コントラクト”の一種である。

［コグニティブ技術とデータの活用］

コグニティブ技術とデータの活用技術は成熟と進化が段階的に進んでおり、Web 以外にも多様なサービスで活用が進んでいる。REALITY 2.0 の世界においても、サービスの構築やその実施に当たってコグニティブ技術の適用がサービスの質の向上、信頼性の確保等、スマートなサービスの実現に寄与すると考えられる。現在、三つの領域での活用が段階的に実現される[20]。第一段階は、効果が得やすいビジネス現場の接客力向上を図るサービスの導入が挙げられる。コールセンターエージェントが扱うマニュアルや製品・サービスの情報などを IBM 社の WATSON のような質問応答システムに取り込み、エージェントと顧客の会話を音声認識や自然言語分析の API で分析することで、回答の正解率を高め、サービス品質と効率を向上させる。また、ロボットと組み合わせて店頭で接客[21] す

るケースなども見られる。第二段階では、社内外の情報や現場の経験などを学習し知見を得るシステムに進化する。製薬、医療、保険や投資分野では、こうしたシステムの活用によって社員が専門知識へアクセスする環境を整え、人間が判読できないほどの大量のデータや多様化した顧客ニーズへの対応を強化する[22)]。第三の段階では、大量なデータや画像をディープラーニング技術で分析することで、今まで思い付かなかったようなサービスのコンセプトを創出し、また人間の能力では防げない事故の防止対策が可能になると考えられている。自動運転、スマートシティー、投資ファンド、証券のポートフォリオや投資リスクの分析、または誤発注による被害防止などが先行する適用分野である。

［サービス仲介技術とそのプラットフォーム技術］

シェアリングサービスやクラウドソーシングなどの相互には直接知ることのない「ヒト」と「ヒト」との間でサービスの提供 / 利用を行うための、仲介サービスの提供が重要な研究開発、ならびに、ビジネスと社会制度上の課題となっている[23),24)]。特に、多くのシェアリングサービスでは、利用を希望する時点において、サービスの提供者と利用者間で即時に信用創造を行う必要があることから、そのための Web API が提供されている[25)]。

［サービスエコシステム創出技術］

モノ・ヒト・コトの Web API 化とマイクロサービス化の進展に伴い、従来の情報システムの枠組みを超えて、あらゆる業種、業界が情報サービス化へと転換している[26)-28)]。例えば、製造業におけるスマート / デジタルマニュファクチャリング[29),30)] や農業などの 1 次産業から金融業に至るサービスの連携による新たなバリューチェーン構築の研究開発が進展している[31)]。このようなサービスの連携を推進し、新たな社会基盤の提供と社会の生産性や安全性、セキュリティーの向上の研究開発が推進されている[32)]。

(3) 注目動向

・API 認証とセキュリティー方式の発展（例 :JWT、HMAC 等）
今日の API 認証は HTTP ベーシック認証あるいは、OAuth に依存している。今後については、JWT（JSON Web Token）や HMAC（Hash-Based Message Authentication Code）といった新しいセキュリティースキーマとデジタル署名が出現している。

・Web フックなど複数サービスの統合に関わる技術の API への取り込み
Web フックは Web サービス上のイベントを外部サービスへ通知する仕組みで、近年注目が集まっている API のコンセプトである。

・Fintech 共通 API[33)] など業界共通 API の標準策定
日本 IBM では Fintech の推進の一環として、2016 年から Fintech 共通 API の提供を開始した。API でアプリケーション間を接続し、銀行サービス開発費の削減やセキュリティーの強化を実現する。こうした、業界共通 API の標準策定が今後進められると考えられる。

・Linux コンテナ技術とコンテナオーケストレーション技術、サーバーレスアーキテクチャーの発展

一つの LinuxOS 上に仮想的に複数の OS 環境を構築する Linux コンテナ技術と、それらコンテナを運用、管理するコンテナオーケストレーション技術、および、サーバーを必要としないサーバーレスアーキテクチャーがそれぞれ発展。サービス実行やサーバー資源の最適化が図られている。

・CDN（Content Delivery Network）とインターネットオーバーレイネットワークの動向
CDN は本文中にもあるように可用性の確保に大きな役割を果たしており、セキュリティーの面でも重要である。その CDN のサービスを支える技術がオーバーレイネットワークである。また、同時に高速通信網の整備も重要となる。
GoogleFASTER や、Akamai などの動向が注目される。

(4) 科学技術的課題

アプリケーションやサービスさらにはモノ・ヒト・コトを連携させることで、新たなサービスやエコシステムを構築するための技術開発が引き続き必要となる。具体的には以下の課題が挙げられる。

・WADL（Web Application Description Language）や RAML（RESTful API Modeling Language）を中心とした API コントラクトとそのテスト駆動開発
・Web フックと HATEOAS などの先進的な取り組み
・コードベースのインフラストラクチャーの理解と普及
・モノ・ヒト・コトの Web API 化とマイクロサービス化の技術
Web API/ マイクロサービスを仲介、連携して新たなサービスやアプリケーションを構築する技術とその支援環境
・サービス化の技術を応用し、社会全体におけるモノ・ヒト・コトの Web API/ マイクロサービスを仲介して新たな価値を創出すると共に、信用、セキュリティー、プライバシーを保証する技術 . 特に、わが国の強みである製造業などのサービス化による競争力強化、ならびに、生産性の向上が求められている 1 次産業などへの応用の研究開発。

(5) 政策的課題

社会に存在するさまざまな構成要素をサービス化して利用を図るためには、その流通に向けた国際的な取り決めや、サービス化を創出していくための施策が必要となる。

具体的な政策的な課題は以下のとおりである。

・個人情報保護に関する国内法規制、国際的な取り決めに関わる外交方針、法規制以外のガイドライン等の制約
研究開発と新たなビジネスの創出を推進するための社会的な実証実験を可能とする制度、ならびに、規制緩和とリスクを軽減するための新たな法整備と規制のあり方を検討する必要がある。
・小規模 API 事業者の育成と保護、活性化
小規模事業者であっても優れたアイデアと技術を基に、価値の高い API の開発と提供

は可能である。大企業よりもスピーディーな事業展開を図れる可能性もある。こうした事業者が継続的に事業の展開を支援する方策が必要であろう。

・大規模 API 標準化の開発、流通支援、独占にかかわる監視
大規模 API の標準化や流通については、国内に限らず海外への展開も考慮しなくてはならない。そうした場合に、企業単独で行うのではなく、コンソーシアムや業界団体等による支援が効果的である。また、この団体にはより独占の監視といった役割も持たせるべきであろう。

・オープンソースのテクニカルコミュニティが提供する知見
オープンソースのテクニカルコミュニティは、多様な参加者のさまざまな知識を持ち、優れたソースや知見を持っていることが考えられる。この知見を API 開発のみならず、REALITY 2.0 実現に向けたモノ・ヒト・コトのスマートなサービス化の研究開発に取り込んでいくべきである。

(6) キーワード

API 管理、Apigee/Swagger、HTML5、JavaScript、サービスエクスチェンジ、マイクロサービス、リナックスコンテナ、コンテナオーケストレーション、DevOps、OAuth、エコシステム、API、Web services、REST、servitization、component、IoT、CPS、cloud computing、crowdsourcing、smart manufacturing、smart city

(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	△	→	基礎的な技術は米国のオープンソースが中心で、基礎研究の主導権は握れていない。規制緩和の動きも滞りがちでオープンイノベーションが起こりにくい。 サービス化の基礎研究の活動は活発とはいえない
	応用研究・開発	○	↗	ベンチャービジネス、ネットワークビジネスを中心に応用開発は発展していて依然としてオープンな市場を形成している。海外のサービスを取り込んだ統合サービスや Apple、Google、Amazon、IBM などの海外ベンダーのプラットフォーム利用も可能である。一方で既存企業においては IT システムの変革やセキュリティーポリシーの陳腐化が進み、システムの老朽化は激しく変化に対応できていない。 IoT などを対象とするサービス化に関する応用研究が活発化しており、さまざまな産業分野への応用も試みられている。
米国	基礎研究	◎	↗	シリコンバレーを中心に依然としてソフトウエアの主導権を握っている。オープンソースの開発も技術をリードしている。データの活用や人工知能の開発など先端研究も先行している。サービスのモデル化やオーケストレーション技術も米国発である。 政府の支援[34),35)]や産業界での旺盛な需要もあり、サービス化の研究開発は活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎的な技術が、ビジネスのマネタイズに応用され資本市場を活性化している。スタートアップからユニコーン化する流れができている。多面的で広範な応用研究とシェアリングサービスなどの新たなビジネスの創出が見られる。
欧州	基礎研究	○	→	日本と同様に基礎的な技術分野で米国依存である。 IoT 分野での 30 を超える研究開発プロジェクトが進行し、活発に研究が遂行されている。

欧州	応用研究・開発	○	→	規制については国ごとにさまざまであるが個人情報を含むデータの取り扱いに制約があり、サービスの組み立てを難しくしている。また、米国を含んだ多国籍なビジネスモデルに課税するなどナショナルリスクは高い。 IoT 分野での研究の多くは応用研究を視野に入れているが、新ビジネスの創出は限定的である。
中国	基礎研究	○	↗	国内に閉じたインターネットであるために、先行事例を最大限模倣しながら先端技術の研究は進んでいる。 政府による Internet Plus プロジェクト[36] などの長期的なプロジェクトの中でさまざまな研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	中国でインターネット人口が拡大し、国内の会社が世界的な大企業になるのに伴い、中国当局は検閲などを強化している。インターネットのグローバルの接続はファイヤーウォールで規制されており、実質的には利用できない。国際的なオーケストレーションプラットフォームには発展できない。 スリースターと呼ばれる、Alibaba、Baidu、Tencent や Huawei などを中心に応用研究への取り組みが活発となっている . また、多くのベンチャー企業が誕生している。
韓国	基礎研究	△	→	2014 年に IoT の研究開発に関するマスタープランを策定し、一定の研究開発が行われていると思われる[37]。
	応用研究・開発	△	→	ホームネットワークシステムなど、特定ドメインでの実用化の研究、開発が盛んに行われているが、産業界全体への波及は不明である。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（8）参考文献

1）L. Richardson et al. RESTful Web APIs O’Reilly 2013.
2）Programmable Web
http://www.programmableweb.com/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
3）HERE Maps for Developers: APIs for Solutions to Build Location-Aware Web and Mobile Apps
https://developer.here.com/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
4）Freelancer .com ホームページ
https://www.freelancer.com/developers.（2016 年 12 月 14 日アクセス）
5）M. Vukovic et al. Riding and Thriving on the API Hype Cycle Comm. of the ACM Vol. 59 No. 3 Mar. 2016 pp. 35-37.
6）Philip Klauzinski、John Moore “Mastering JavaScript Single Page Application Development” Packt Publishing（2016/8/31）ISBN-10: 1785881647
7）Akamai Cloud Architecture
https://www.akamai.com/jp/ja//resources/cloud-architecture.jsp（2016 年 12 月 14 日アクセス）
8）Equinix Service Exchange
http://www.equinix.co.jp/services/interconnection-connectivity/cloud-exchange/

（2016 年 12 月 14 日アクセス）
9）サイトに analytics.js を追加する
https://developers.google.com/analytics/devguides/collection/analyticsjs/?hl=ja
（2016 年 12 月 14 日アクセス）
10）Apigee
https://apigee.com/api-management/#/homepage（2016 年 12 月 14 日アクセス）
11）T. Espinha et al. Web API Growing Pains: Loosely Coupled Yet Strongly Tied J. of Systems and Software Vol. 100 Feb. 2015 pp. 27-43.
12）apiary API Blueprint Version 1A9（2016 年 12 月 14 日アクセス）
https://github.com/OAI/OpenAPI-Specification/blob/master/versions/2.0.md.（2016 年 12 月 14 日アクセス）
13）Open API Initiative Open API 2.0 Specification Sep. 2014
https://github.com/OAI/OpenAPI-Specification/blob/master/versions/2.0.md.（2016 年 12 月 14 日アクセス）
14）J. Gruber Markdown Version 1.0.1 Dec. 2004
http://daringfireball.net/projects/markdown/.（2016 年 12 月 14 日アクセス）
15）Swagger The World's Most Popular Framework for APIs.
http://swagger.io/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
16）Usergrid The BaaS Framework you run
https://usergrid.apache.org/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
17）IBM Mobile First Platform
http://www-03.ibm.com/software/products/ja/mobilefirstplatform（2016 年 12 月 14 日アクセス）
18）What's a Webhook?
http://sendgrid.com/blog/whats-webhook/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
19）Fielding、Roy T.（20 Oct 2008）. "REST APIs must be hypertext-driven"
http://roy.gbiv.com/untangled/2008/rest-apis-must-be-hypertext-driven（2016 年 12 月 14 日アクセス）
20）松尾豊「人工知能は人間を超えるか ディープラーニングの先にあるもの」,（KADOKAWA/ 中経出版 ,2015）
21）みずほ銀行 :Pepper を活用した、新しい店舗サービスの創造
https://www.mizuhobank.co.jp/mizuho_fintech/news/pepper/index.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
22）櫻井豊「人工知能が金融を支配する日」,（東洋経済新報社 ,2016）
23）M. Biehl, RESTful API Design, API-University Press, 2016.
24）K. J. Clark Integration Architecture: Comparing Web APIs with Service-Oriented Architecture and Enterprise Integration IBM DeveloperWorks Mar. 2015
http://www.ibm.com/developerworks/websphere/library/techarticles/1503_clark/1305_clark.html（2016 年 12 月 14 日アクセス）
25）Uber Technologies Building Moving Experiences

https://developer.uber.com/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
26）S. Meyer et al. Internet of Things-Aware Process Modeling: Integrating IoT Devices as Business Process Resources Proc. of CAiSE 2013 LNCS Vol. 7908 Springer Jun. 2013 pp. 84-98.
27）E. Mollick The Dynamics of Crowdfunding: An Exploratory Study J. of Business Veturing Vol. 29 No. 1 Jan. 2014 pp. 1-16.
28）R. Peers and S. Rana Embracing the Connected API EconomyS. Chishti and J. Barberis（eds.）The Fintech Book Wiley 2016 pp. 253-257.
29）T. Edger et al. NSF Workshop on Research Needs in Advanced Sensors Controls Platforms and Modeling（ASCPM）for Smart Manufacturing Feb. 2015 https://smartmanufacturingcoalition.org/sites/default/files/smlc_nsf_workshop_report.pdf（2016 年 12 月 14 日アクセス）
30）J. Lee et al. Predictive Manufacturing System - Trends of Next-Generation Production Systems IFAC Proceedings Vol. 46 No. 7 May 2013 pp. 150-156.
31）L. Ramundo et al State of the Art of Technology in the Food Sector Value Chain towards the IoT Proc. of RTS 2016 IEEE Sep. 2016 pp. 6 pages.
32）F. Hu（ed.）Security and Privacy in Internet of Things（IoTs）CRC Press 2016.
33）「FinTech 共通 API」、FinTech 企業との接続検証を実施 https://www-03.ibm.com/press/jp/ja/pressrelease/50067.wss（2016 年 12 月 14 日アクセス）
34）A. Bruce et al. Internet of Things: Examining Opportunities and Challenges The White Hous Aug. 30 2016. https://www.whitehouse.gov/blog/2016/08/30/internet-things-examining-opportunities-and-challenges（2016 年 12 月 14 日アクセス）
35）PCAST（The President's Council of Advisors on Science and Technology）Report to the President and Congress Ensuring Leadership in Federally Funded Research and Development in Information Technology Aug. 2015. https://obamawhitehouse.archives.gov/administration/eop/ostp/pcast/docsreports（2017 年 3 月 1 日アクセス）
36）The People's Republic China The State Council Internet Plus. http://english.gov.cn/2016special/internetplus/（2016 年 12 月 14 日アクセス）
37）Ministries of the Republic Korea Ministry of Science ICT and Future Planning Master Plan for Building the Internet of Things（IoT）May 2014 . http://www.iotkorea.or.kr/2013_kor/uploadFiles/board/KOREA-%20 IoT（Internet%20of%20Things）%20Master%20Plan%20-%202014.pdf（2017 年 1 月 12 日アクセス）

3.2.4　ソフトウエアデファインドソサエティーのサービスプラットフォーム

（1）研究開発領域の簡潔な説明

サービス構築の際に必要なコンポーネント（モノやヒト）を利用するためのサービスプラットフォーム構築に必要となる技術。コンポーネントの検索・発見や、価値の再配分、認証認可技術やサービスのレベルを保証する技術も含む。また、現在のクラウド等のサービスプラットフォームに物理的なモノやヒト等が入ってきた時に必要となる技術。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ソフトウエア定義技術を技術の核とする実体定義レンズによって、モノ・ヒト・コトといったコンポーネントを動的に組合せ、社会システムを構築する事ができる社会を、ここではソフトウエアデファインドソサエティーと呼ぶ。本領域ではソフトウエアデファインドソサエティーにおけるサービスプラットフォームを構築するために必要な技術についてまとめる。

［サービスプラットフォーム戦略］

従来のパイプライン型事業は原材料などを投入すると、プロセスを経て付加価値を生み出し、最終製品が出来上がるという価値連鎖を持っている。不動産や知的資産などの所有資源をもとに、調達から製造、保守まで全体の最適化によって最終顧客の生涯価値の最大化を図る。一方、プラットフォーム型事業は高価値の取引場を用意して、製品やサービスの作り手と買い手を引き合わせることで価値を生み出しており、主な資産は情報とインタラクション（取引、協働、交流など）である。資源は模倣や複製がしにくい個人やコミュニティが所有、拠出する部屋や車、運転やサービス、アイデア、情報などであって、それがプラットフォームの価値創造と競争優位の源泉である。クリティカルマスまで拡大するエコシステム全体価値の最大化と、フィードバックに基づく循環・反復型のプロセスが必要とされる[1)]。

［サービスプラットフォームの課題］

プラットフォームは機能をネットワーク外部化し、サードパーティーの製品を利用できるようにすることで利益を生むモデルであり、プラットフォームの機能強化が欠かせない。例えばセキュリティーソフトを無償化しながらサードパーティーのソフトウエアの安全な利用を提供するプラットフォームにおいて、ユーザーはサードパーティーのソフトウエアに誘引されながらもプラットフォーム自体の提供する機能である安全を必須のものと考えている。同様にアマゾンのユーザーは出品者から商品を受け取るが、アマゾンの電子取引システムを高く評価しているということはよく知られている[2)]。（図 3-2-5）

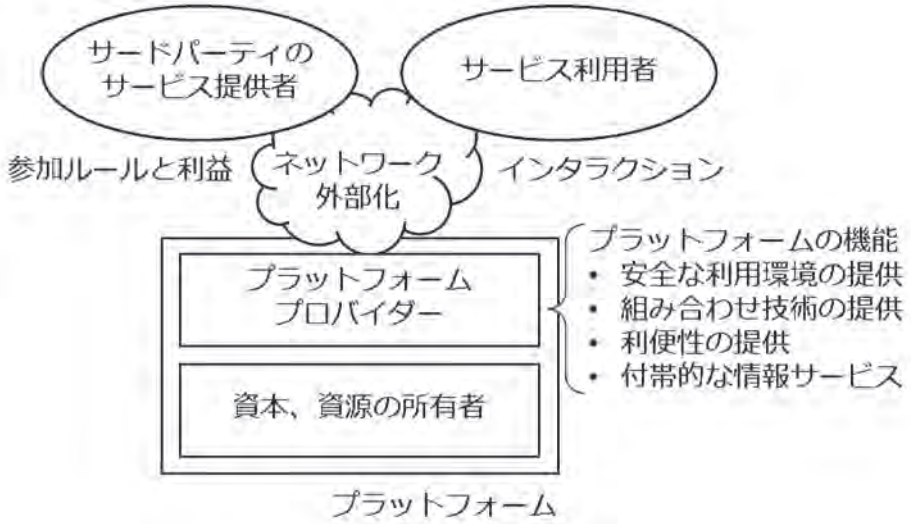

図 3-2-5. プラットフォームのネットワーク外部化

内部の最適化から外部とのインタラクションの価値を追求するプラットフォームの提供価値を維持することが重要

サービスは生産と消費が同時に起こる同時性、サービスの提供が終了すると無くなってしまう消滅性、触ることのできない無形性、提供価値が状況によって変化する変動性という特徴をもっている[3)]。サービスが取り扱う対象は、クラウドサービスのようなサーバーやストレージなどの実体をともなったものだけではなく、目に見えない信頼というような情報を電子的に取り扱うプラットフォームも出現している。Apple Pay のサービスでは、クレジットカード番号をモバイルインターネットでやりとりすることなく信頼できるやりとりをおこなうトークナイゼーションサービス[4)]が提供されている。サービスの価値は無形で変動性をもっているために計測や課金が難しい。どのサービスインスタンスがどれだけの価値を生み、利益配分されるべきかを決定するエコノミーの数学的なモデルは存在していない。クレジットカード番号のトークナイゼーションによって信頼を安全にやりとりすることで利益を得るのは Apple Pay、小売店、カード会社そしてユーザーの誰でどの割合なのか、数学的に決定できなければサービスは不透明で社会的に不均衡なモデルとなってしまう。Uber や AirBnB などは資産を単純にシェアするだけのモデルではなく、ユーザー間の信頼や個人の車や住居を利用するという経験を取り扱う複雑なシェアリングエコノミーであるが、それらの価値の再配分や課金のプロトコルの定義はソフトウエアデファインドソサエティーの参考となりうる。また、サービスは提供されなければ価値が生まれず、サービス停止やスローダウンは収益につながらないため、サービスの継続性を担保することがビジネスにおいては大きな課題である。

［サービスプラットフォームにおけるユーザー動向把握］

プラットフォームの成長を促すグロースハック[5)]では、直接的な成長を表すユーザー、売り上げ、デジタルエクスペリエンスから捕捉したデータの質と量などの明確な KPI（Key Performance Indicator）をセットした成長のストーリーを描く必要がある。ユーザーエ

クスペリエンスのライフサイクル成長モデルである AARRR（Acquisition、Activation、Retention、Referral、Revenue）はよく参照されるが、データ分析によってユーザーの動向を把握できるフレームワークである（図 3-2-6）。

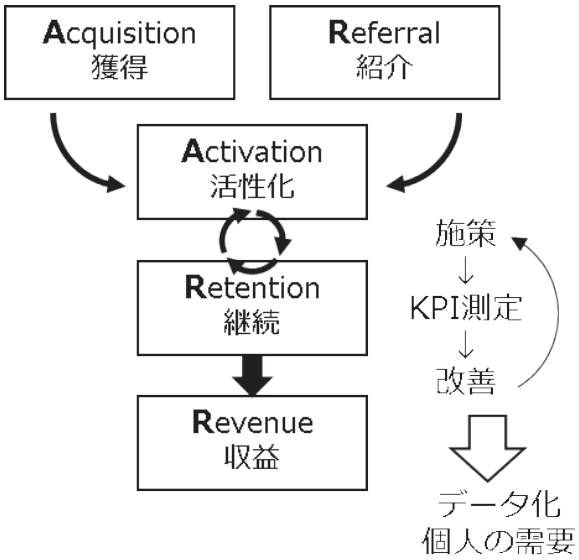

図 3-2-6. グロースハックのデータプラットフォーム

サイトの KPI の収集を通じてデータを収集し個人の需要を把握

サービスを開始する時の MVP（Minimal Viable Product）にメトリクス KPI を組み込んでおくことが循環・反復型のプロセスにとって重要である[6)]。ユーザーの抱える本質的な需要を把握する CPS のループバックはデジタルマーケティングの手法が用いられ、個人のプロファイルデータや需要動向を把握するプラットフォームを形成する。

［サービスオーケストレーションの原型］

オーケストレーション機能はクラウドコンピューティングの自動化プラットフォームに展開されてソフトウエアで制御できる仮想サーバーなどのシステムやミドルウエアの配備 / 設定 / 管理を自動化するソフトウエア定義環境の中核をなす技術要素である。過去 IT インフラストラクチャーの「見える化」で用いられたモニタリングシステムは、クラウド技術の導入により自律的なソフトウエア制御を実装することができ、故障や停止等のイベントに対して再起動、サーバー再配置、ディスク再接続など運用の自律化へと進展した。オーケストレーション機能は Chef や Puppet[7)] などのサービスコンテンツを含む定義済みサービスインスタンスをコードベース[8)] に管理できるツールと組み合わせることにより、システムの構造を設計構築するコンソールを提供する。オーケストレーションコンソールでは、期待するサービスを定義し組み合わせることでサービスプラットフォームを構築することができる。

また、オーケストレーション機能はパフォーマンスやキャパシティー、可用性などの非機能要件をポリシーに基づいて管理しサービスインスタンスの追加、拡張、再配置等を自動化することができる。これは、サービスの物理的実体を監視、モニタリングするという一方向であった情報の流れが、コードベースのサイバー空間において、設計構築したもの

が実体化されるという、設計主体に逆転していること示している。ソフトウエア定義を実現するコードベースの実体定義では「標準化された同じインターフェースの環境で実行されるソフトウエアは同じ結果をもたらす」という冪等性（べきとうせい）が重要である。冪等性とは、同じ操作を複数回行っても効果が変わらないことを指すが、冪等性の高い構造では同じソフトウエアが複数回実行されても結果に影響がない構成が実現されている。この方向は、サイバーとフィジカルの関係性が逆転しサイバー中心型の機能定義が有効であり、ソフトウエア定義技術によってサービス構築を可能とする実体定義レンズの機能要件であることを示している。（図 3-2-7）

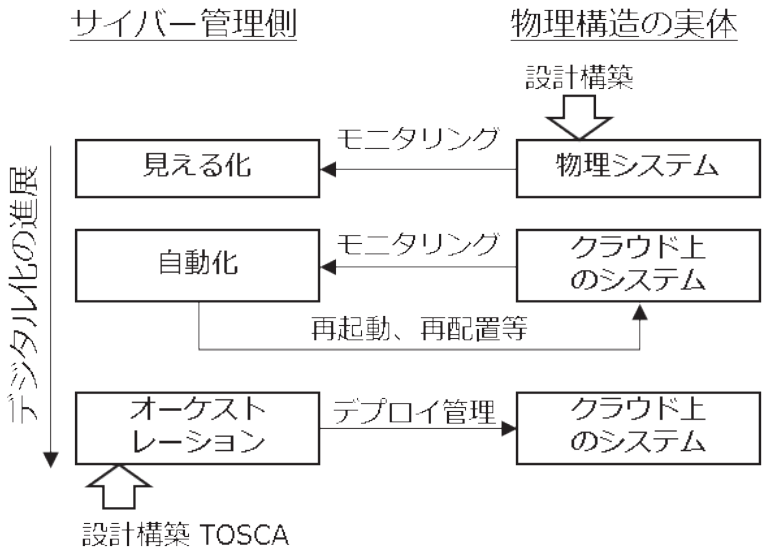

図 3-2-7. システム管理の変遷

システム管理はクラウド化を経て、オーケストレーション機能が導入され、サイバーと物理は逆転した。

OASIS TOSCA（Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications）はクラウドのオーケストレーションにおける仮想アプリケーションパターン標準定義機能である。TOSCA では冪等性を基本とした実体定義 =Artifact とアプリケーションサービスのモデルを定義するアプリケーション・アーキテクトをサービステンプレート上で統合する。サービスプラットフォームのサービスオーケストレーションを実行していく実体定義レンズの標準記述には同様の形式が必要になると思われる。

［サイバーフィジカルにおけるコントロールポイントの遷移］

IoT（Internet of Things）はモノやサービスが相互につながり合っている様を表しているだけではなく、モノやサービスが IT で実現される高度な制御システムによって統合されて支配される様を表している。モノがインターネットのように有機的なネットワークを形成した時にモノの振る舞いはどうあるべきかを考えるべきである。そういった意味で IoT は、「センサーを含んだシステムをモノの設計に組み込む」のでもなく「大量に存在しているセンサーのデータをリアルタイムあるいは蓄積してどう分析利用するか」というものだけでもない。サイバーワールドが提供する高度な制御システムの上でモノはどう設

計されるのか、それは自動車運航時のデータを収集分析して自動車自身の燃費改善をするという発想だけではなく、街区内の移動体すべての動きを制御することを目的として全体の制御システムが設計されその一つのコンポーネントとして自動車があるという逆転の発想が必要だ。エージェントベーステクノロジーが巨大なサイバースペースを構築できると考えられている。

［オーケストレーションプラットフォームによるスマートファクトリー］

日本の製造業は長らく、トヨタ生産方式の制約理論に基づいた一定の生産ペースを維持して効率を追求する生産方式を得意としてきた。そこから工程のスマート化をすすめ、デジタルの世界で収集したデータから得られた需要を製造工程にダイレクトに反映する、サイバーフィジカルシステムのフィードバックループの仕組みへと進化することで、需要に合わせた生産が可能になっていく。デジタルの世界で把握した需要に基づいて「何をいくつ作るか」を決定し、それに基づいて製造工程をつかさどるコントローラにダイレクトに指示を下し、生産過程をモニタリングしていく。こうした進化が進めば、サイバースペース上に構築されるソフトウエア定義による工場生産が実現される。サイバースペース上の仮想工場はオーケストレーションコンソールとなって各工程の動的な生産計画と動的な生産指図を高度に統合したコントロールセンターとなっている。Industrie 4.0 では生産管理、資源管理を担当するのが SAP 社であり、生産指図を展開する代表格が SIEMENS 社であり、その伝送路の標準規格に BECKOFF 社などがデジタルファクトリーにおける存在感を増している。（図 3-2-8）

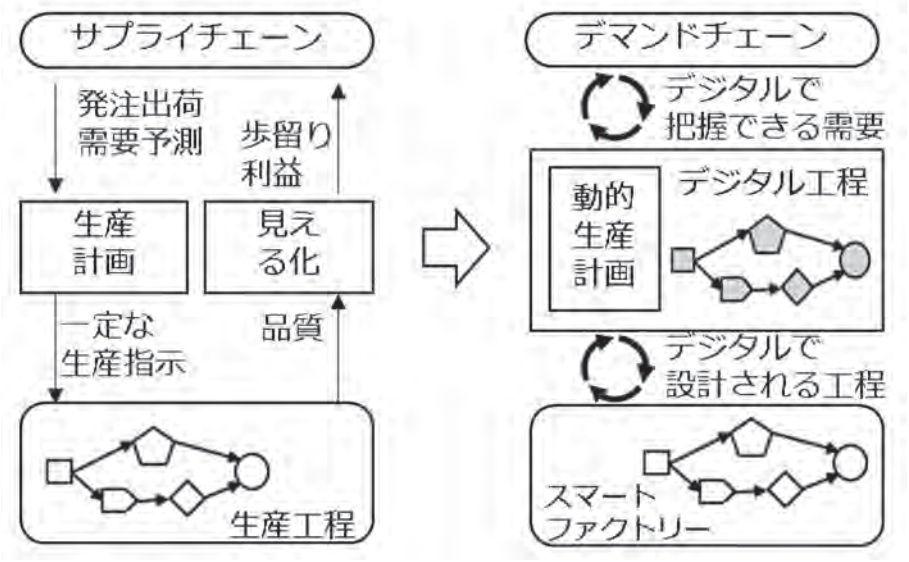

図 3-2-8. サイバーフィジカルシステム

これまでの一定の生産計画による高効率な大量生産のモデルからサイバー世界で把握できる個人の需要に即応できるデジタルで設計された工程がスマートファクトリーを駆動

この生産工程が社会に対してオープンになるとデジタルファクトリーのサイバースペースを有する企業が製品メーカー（OEM）となり、工程担当の製造工程はすべて社会で共有される Tier1 以下の製造サービス企業となっていく。これはファブレス生産に近い

Industrie 4.0 の理想像である。OEM のコアコンピテンシーは工場生産ではなくサイバースペースのオーケストレーション能力になる。製造工程は社会で共有されることで、自由な組み合わせが実現でき、また高品質な新製品や高機能なコンポーネントの開発など製造の自由度は飛躍的に向上する。Industrie 4.0 を推進するドイツ製造業は製造工程と製造指図を高度に統合するオープンインターフェースの策定に邁進しているが、日本製造業はこれまで培ってきたカイゼンのノウハウを生かし、連続した工程改善の流れのなかでオープンなオーケストレーションプラットフォームに進化する軌跡を描くことができる。（図 3-2-9）

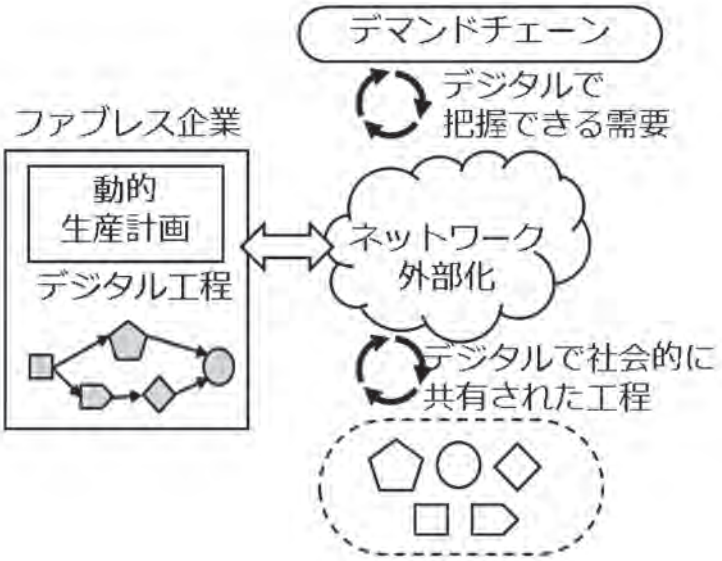

図 3-2-9.Industrie 4.0 や Industrial Internet はデジタルで共有された工程を作り出す

［API エコノミー］

自社のサービスに他社が提供するサービスを組み込む、あるいは連携することで新しい価値創造を実現することが API エコノミーであり、次のような類型がある。（1）自社データとサービスの利用を API 経由で可能にするもの。（2）自社サービスを他のサービスに連携することでユーザーを誘導するなどの効果を得るもの。（3）データや共通機能などのプラットフォーム機能を提供してサードパーティーのサービスに付加価値を与えるもの。（4）複数のサービスを組み合わせて新しいサービスや商圏を生み出すもの [9]。

複数のサービスを組み合わせる API エコノミーの例として cars.com[10] という実在の Web サイトがある。ユーザーは Web サイトからさまざまなメーカーの車を購入できる。車を選んだり、最寄りのディーラーを探したり、自動車ローンや保険を選んで契約することができる。しかし cars.com が自ら開発したのは情報を統合するための枠組みであり、ほとんどの機能を外部 API に依存している。ローンを提供している銀行の視点からすれば自動車ローンの利用者を獲得するために提携しているが、住宅ローンもあれば財務管理の API も提供しているのでユーザーには統合的な財務管理、分析機能をサービス化することができ API を公開することでビジネスチャンスを大きく拡大できる [11]。

API エコノミーにはそれぞれ課金モデルがある。API 利用者が便益に見合った額を支払う形態と、アドテクのように利用者が API を利用することで API 提供者に便益が生じ

るため、API 利用を無償にするか、または費用を API 提供者が負担するというモデルも存在している。サービスの価値は一般的に同様のサービスに比較して支払う価値がある金額で決定される[3)]。こうしたプラットフォーム型のような中間サービスの場合には、最終サービス提供者の価値に依存してしまうためサービスの価格に変動性が生じる。単体の市場価格だけでは決定しない API エコノミーの変動性は最適価格決定の不透明さにつながる。

［サービス提供条件の統合と合意に基づく認証認可処理］

API の提供者側は提供者側の理論で多くの制約と免責事項を利用条件としている。このため提供されるサービス条件を判断し、サービス間の提供条件の差異を埋め、統合する作業は困難を極める。多国言語によって提示される提供条件を自動的に判断し、プラットフォームが統合的なサービス提供条件を計算する人工知能などを活用したシステムが必要である[12)]。そのなかでは、法規制、コンプライアンス、倫理的文化的制約なども同時に判断される必要があり、実体定義レンズがサービスを自動的に統合するためには機械処理が必要である。エンドユーザーは容易に統合の経緯を知り得るべきであるし、個人データ利用の範囲と制約についても演算可能であるべきである。プラットフォームではユーザーの参加を認めるための与信等を加えた認証認可条件をすべてのサービスの論理積として満たす必要があり、フェデレーションを超えた処理が必要となる。

規制緩和のバランスは重要である。新しいサービスインスタンスが社会的に既存規制に阻まれることで、統合されたプラットフォーム上での統合もできなくなる。Uber は白タク規制に関わる問題であるが、Uber は単なる配車サービスではなく個人の所有する高級車を持ち主と共有するエクスペリエンスを提供しているのであって、運輸業のサービスコンポーネントは極めて少ない。一方で規制地域での民泊など規制しきれない課題に対しては、なし崩しの規制緩和が引き起こされやすい。

［ゼロトラストセキュリティーの普及］

セキュリティーの考え方にも革新が必要である。これまでのようにファイヤーウォールで隔離・分離するだけのネットワークセキュリティーでは巧妙化するサイバー攻撃や近年発生しているような内部犯行に対抗することができない[13)]。セキュリティー研究で有名なパロアルト・ネットワーク社は「検証して、信頼しないことを基本とする＝ゼロトラストネットワークセキュリティー」[14)] を提唱している。それには、多層防御・監視検知・セキュリティーインテリジェンスという三つの機能群が必要になる。また、重要情報の管理について記憶装置の暗号化や DB オペレーター、管理者権限の発行を厳密に管理し全てのアクセスや管理操作の記録を採取することで事件事故の初動対応を助ける基盤を構築する。サイバーセキュリティーを常に念頭に経営層を巻き込んだ管理体制を敷いておくことで、サイバーチャネルはユーザーや地域から信頼される活動の拠点となることがでる。また、信頼できるチャネルであるからこそデジタルライフをサイトに全面的に任せることができるようになる。サイバーセキュリティーは大きな安心と信頼を確保する前提である。

(3) 注目動向

下記に挙げるように、プラットフォームを介したサービスの構築や産業の変革に向けた動きが進められている。

・API エコノミーによる複数のサービスやシェアリングエコノミーの連携
（2）で上述したように、他社が開発したサービス（API）を統合することにより、新たなビジネスを創出する API エコノミーや、自動車や居住空間等やサービスをシェアするシェアリングエコノミーが台頭している。

・SNS などの情報インタラクションの価値化（プロファイルによる広告など）
SNS などにおいては個人のコミュニケーションや行動といった情報のインタラクションを分析可能である。これにより個人の興味関心や価値観をプロファイリングし、それに基づいた製品やサービスの広告を掲載可能となっている。こうした広告は、対象を限定できるために効果的であり、情報のインタラクションに価値が生まれている。

・プラットフォームとして提供するサービスの機能と価値が明確化
プラットフォームとして提供するサービス（PaaS）の実施が進んでいる。PaaS ではアプリケーションの開発と実行環境の両方を提供するため、開発の期間やコストの削減が可能であり、即座の対応も可能である。

・グロースハックなどデータに基づくデジタルマーケティングの進化
KPI の測定と改善、施策を繰り返しサービスを改善していくグロースハックのデータプラットフォームからユーザーの動向やプロファイルを把握するといった、デジタルマーケティング手法が出現している。

・スマートファクトリーと Industrie 4.0/Industrial Internet の発展
製造工程に CPS のフィードバックループを取り込むことで個人の需要に合わせた生産を可能とするスマートファクトリーが出現。さらに、Indutrie 4.0 では工場をサイバー空間を通じて接続し、仮想的な生産工程の実現を目指す。これによりさらに高品質、高機能な製品の動的な製造が可能。
Industiral Internet では、産業機器のモニタリングを通じて効率的な運用管理を行うシステムを開発。企業と機器の使用情報の共有により、効果的な資産活用方法を検討しコスト削減につなげようとしている。

(4) 科学技術的課題

ソフトウエアデファインドソサエティーにおいてサービスを構築するために、サービスの価値の定量化やサービスを連携するための技術が必要となる。

具体的には以下のとおりである。

・無形で揮発性のサービスドミナントな価値を定量化できるモデルの構築
物理的に存在する製品（モノ）と異なり、無形で保存ができない（揮発性）といった特徴を持つサービスについて、適切に市場で取引を可能とするために価値を定量化できるモデルの構築が必要

・サービスをソフトウエア定義しオーケストレーションする技術の開発
モノ、ヒト、コトのインターフェースや機能の差異を吸収し、その挙動をソフトウエア

で定義、制御するとともに、運用管理まで行う技術。

・API エコノミーの適切な権限管理を行う高度なフェデレーションのための標準
API エコノミーに参加する利用者に対して、API 利用についての権限管理を行う認証の標準の策定

・複雑な利用条件を法規制、コンプライアンス、倫理的文化的制約などと統合する処理
ソフトウエアデファインドソサエティーでは、プログラムからなる API だけでなく物理的なモノ、ヒトの利用、提供のやりとりがネットワークを介して行われる。これらの利用に当たって、既存の法規制や、コンプライアンス、提供される国や地域における文化的制約を統合的に考慮した上でサービスを提供する必要がある。

(5) 政策的課題

ソフトウエアデファインドソサエティーでは、新たなサービスの創出が容易となることが想定されるが、それに向けては既存の規制の緩和と規制導入の検討や、価値の再配分の透明性、公平性を担保する事が必要となる。また、既に標準化やプラットフォーム構築が進められている動きとの連携が求められる。

・規制緩和と新たな規制の必要性
既存規制により新たなサービスの創出が阻まれるという損失や、サービスプラットフォームによるなし崩しの規制緩和が生じないように、ソフトウエアデファインドソサエティーに適切な規制緩和が求められる。
一方、民泊に投機的不動産投資が参入したり、地域コミュニティが破壊されるといった本来サービスプラットフォームが目的としていないことがらに対する新規制の導入も必要となりうる。

・価値の再配分の透明性、公平性を担保するしくみ
ソフトウエアデファインドソサエティーのサービスプラットフォームでは、資産のシェアだけでなくユーザー間の信頼や、ユーザーエクスペリエンスを取り扱う複雑なシェアリングエコノミーを提供する。この維持発展には、参画するステークホルダー間において、価値の再配分の透明性、公平性を担保する仕組みが重要となる。

・Industrie 4.0 や Industrial Internet との協働推進
Industrie 4.0 や Industrial Internet は国や地域、企業の枠を超えて、製造業やサービスの連携や、それに向けた標準化、プラットフォーム構築を進めている。わが国でもこうした動きとの戦略的な共同推進を図るべきである。

・製品開発だけではなくサービス開発を経済的に支援し、加速させる仕組み

(6) キーワード

サービスプラットフォーム、サービス・ドミナント・ロジック、グロースハック、オーケストレーション、ゼロトラストネットワーク、認証認可フェデレーション、利益再配分モデル、Industrie 4.0

(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	△	→	サービス研究、データ分析技術等は進んでいるが普及に至らない。API、オーケストレーション、セキュリティーに関わる基礎的技術は米国等の先進技術に依存している。
	応用研究・開発	○	↗	プラットフォーム機能は専業化、委託化という側面が広く受け入れられる一方でシェアリングエコノミーのような新しい経済モデルには規制が多い。 個人情報のプライバシー保護以外の側面が議論されない。Industrie 4.0/Industrial Internet は脅威と感じており、追従の動きはある。
米国	基礎研究	◎	→	シリコンバレーを中心に依然としてソフトウエアの主導権を握っている。オープンソースの開発も技術をリードしている。データの活用や人工知能の開発など先端研究も先行している。API のモデル化やオーケストレーション技術も米国発である。
	応用研究・開発	◎	→	IBM/Microsoft などエンタープライズ IT が API 管理などのコンポーネントや先進事例で先行している。プラットフォーム事業も隆盛を極め、製造業では GE Predix が高いプラットフォーム機能で注目を集めている。
欧州	基礎研究	◎	→	Industrie 4.0 を中心に生産管理 /BOM、PLM、PLC などの技術標準とオープンな接続など標準先行して進んでいる。
	応用研究・開発	○	→	IoT というカテゴリーで PLC 接続標準化が先行しているが、標準先行しているので Predix に比較してプラットフォーム機能のネットワーク外部化は進んでいない。
中国 韓国	情報なし			

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）Marshall W. Van Alstyne, Geoffrey G. Parker, Sangeet Paul Choudary “Pipelines, Platforms, and the New Rules of Strategy” Harvard Business Review, April 2016 Issue（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://hbr.org/2016/04/pipelines-platforms-and-the-new-rules-of-strategy
2）Andrei Hagiu and Simon Rothman, “Network Effects Aren’t Enough” Harvard Business Review, April 2016 Issue（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://hbr.org/2016/04/network-effects-arent-enough
3）藤川 佳則 ,「サービス・ドミナント・ロジック『価値共創』の視点からみた日本企業の機会と課題」マーケティングジャーナル Vol. 27, No. 3, pp. 32-43（2008）.
4）IBM Japan, “Apple pay がもたらす変革”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://www.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=LBW03048JPJA
5）ライアン・ホリデイ（著）, 佐藤 由紀子（訳）, “グロースハッカー”（日経 BP, 2013）.
6）Steven G. Blank, “The Four Steps to the Epiphany”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）

http://web.stanford.edu/group/e145/cgi-bin/winter/drupal/upload/handouts/Four_Steps.pdf
7）Kief Morris, “Infrastructure As Code: Managing Servers in the Cloud”（Oreilly & Associates, 2016）.
8）Twelve-Factor App, “コードベース”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://12factor.net/ja/codebase
9）山際 貴子 , “API が黒子から主役に ?!”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://www.change-makers.jp/business/10787
10）Cars.com（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://www.cars.com/
11）田口 潤 , “API が価値・利益を生む時代が到来、「API エコノミー」の実像”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
http://it.impressbm.co.jp/articles/-/11713
12）Steve Danielson, “API　Management とは”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/api-management/api-management-key-concepts
13）サイバーセキュリティ .com, “サイバー攻撃が増え続ける 5 つの原因”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://cybersecurity-jp.com/cyber-security-guide/4-five-causes-of-cyber-attacks-continue-to-increase
14）パロアルトネットワークス 株式会社 , “ネットワーク セグメンテーションへのゼロトラスト アプローチ”（2016 年 12 月 15 日にアクセス）
https://www.paloaltonetworks.jp/solutions/initiative/network-segmentation.html

3.2.5. REALITY 2.0 による社会デザイン

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

複雑な社会の課題を REALITY 2.0 の枠組みを使って解決していくためのデザイン学を中心とした領域。社会課題の具体的な解決方法とそのシステムのデザインを研究し、解決のための知識の創出を行う。社会実装のための制度設計や社会受容性に関る社会科学、人間科学的研究も重要となる。また、解決方法が与える社会的効果、経済効果などの研究が必要である。さらに、社会受容性や解決方法の効果を実測するための実証型研究など、多面的な学術領域を複合した研究領域となる。

海外主要国は CPS/IoT について、主として産業振興として捉えている。リアル世界とサイバー世界がシームレスに融合する REALITY 2.0 というコンセプトは、その意味で先進的なものであると言えよう。本章では主要国の政策動向を概観した上で、REALITY 2.0 に向けた方向性を示唆する注目動向、科学技術・政策的課題を踏まえ、どのような社会システムを構築していくかについて、シナリオの方向性を示している。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

REALITY 2.0 は、現状ではその方向性が示唆されている「コンセプト」である。タンジブルなリアルの世界とバーチャルなサイバーの空間がシームレスに融合・一体化した RELAITY 2.0 という世界の本質は、暮らしや仕事など、われわれの生活空間「全体」の意識なき拡大とみることができる。

この REALITY 2.0 による社会のデザインに向けて、従来の IoT 技術、CPS（Cyber Physical System）や Smart City 開発活動においては、単一のシステムや単一のサービスの中での効率的なサービスが開発されてきた。

具体的な事例としては、Uber に代表されるカーシェアサービスや Airbnb に代表されるルームシェアサービスなどがある。これ以外にも、ビル内での電力利用の最適化や 1 企業グループ内でのサプライチェーン最適化が行われている。

これらの取り組みは、ヒトも含めて社会において遊休資源（リソースとなっている機能）を効率的に活用することや、無駄なリソースを効率化していることに相当する。このように個人（ヒト）の効率的な活用や 1 企業内のシステムの効率化は進められているが、社会システムは複雑かつ、個々の部分システムの相互依存性が強く、都市や国全体の最適化は非常に難しい問題である。

また、企業内や地域内では、ガバナンスが利きやすいため、社会リソースの制御は可能であるが、複数企業にまたがったシステムや複数地域、例えば国全体でのシステムは、ステークホルダーも多く、実現が困難である。

このような複雑な社会問題を解くという目的で、社会デザイン、社会システムデザイン、デザインアプローチなどの学術分野の研究が発展しつつあり、CPS や IoT の進展とともに社会への適用がされることで REALITY 2.0 による社会のデザインが進展していくと考えられる。

ここでは将来的なユースケースとして以下のような Ⅰ～Ⅲのシナリオを想定した。それぞれ「とくべき社会課題」と REALITY 2.0 が「実現した時の効果」を挙げている。

シナリオⅠ．総合モビリティマネジメント

〈解くべき社会課題〉

世界的な都市化が進展するとともに、都市の間での競争が激化する。人、モノのスムーズで、効率的な移動が都市の競争力の源泉になる。逆に渋滞による経済損失が都市の重要課題となる。ただし、都市における移動は、多様なモダリティ、移動体の組み合わせで構成され、複雑なシステムとなり相互作用が大きくなる。自動車の利用依存は都市に住む人の健康にも影響を与える。

〈実現した時の効果〉

（ア） 渋滞・遅延なく目的地に快適に移動を実現

（イ） 社会全体での移動に要するエネルギーや排出する温暖化ガスを最小化

（ウ） 通勤、通学、通院など移動目的と連動した交通サービスの実現
通院の場合は、交通状態を加味して診療予約、時には遠隔診療も組み合わせ、通勤の場合には、業務予定に合わせて、サテライトオフィス、テレワークも組み合わせて交通サービスを提供

（エ） 電車、バス、タクシー、フェリー、カーシェアリング、自転車、徒歩を、個々のコミューターの価値観、目的、健康状態など多様な状況を尊重し、全コミューターの移動を最適化

（オ） 交通のみならず、物流にかかわる移動も最適化。適時に適切なモーダルの組み合わせでの収集、配送。目的地への配送のみならず、確実に預かり、確実に受け取っていただくサービスを実現

（カ） 物流では、サービス企業ごとに車両などの移動リソースを保持。シェアリングなどにより、社会全体でのリソース利用の最小化

（キ） 災害発生時には、集中による遅延や事故を防ぎながら確実な避難を支援。発生後には、インフラなどの破損箇所を回避して、生活の質を確保する最大限の移動サービスを実現（物流、医療の提供）

（ク） 疫病発生時は、擦れ違いなどによる伝染履歴をトラッキングし、最小限の時間で感染者、潜伏期間感染者の特定による感染拡大を防止

シナリオⅡ．生涯人材育成、人材活用サービス

〈解くべき社会課題〉

少子高齢化に伴い社会福祉費は増大し続けている。一方、AI の発展に伴う働き方の変化や既存産業の衰退と新産業の発展のために新たな仕事への転換が進んでいる。また、多様化する脅威や犯罪のグローバル化に合わせた社会規範の急速な変化も起きている。こうした社会の動きに追従していかなくてはならない。

〈実現した時の効果〉

（ア） 教育機関において個人の学習履歴を管理可能（ただし、個人情報保護技術は必須）

（イ） 学習理解度や学習に関する癖を利用して、個人ごとに最適なカリキュラムを提供（補修、家庭学習）

（ウ）　卒業後も、就業する業務に関する人材育成でも、上記適応教育（トレーニング）サービスが実現
（エ）　学習履歴、推定されるスキルや個人特徴に合わせて、ジョブオファー。人材リソースを、企業、組織内に閉じ込めるのではなく、才能、知識やスキルをベースに、組織間、企業間で人材のシェアが可能に。組織内失業を回避し、個々人がさらに活躍できる社会が実現
（オ）　高齢者にも、体力、経験、知識、ノウハウなどに合わせて、少々のトレーニングを経て、就業機会を提供。遠隔業務や、ロボットを活用して、体力消費を最小限で、社会での活躍機会を創出
（カ）　日常生活を、健康で快適、快活に楽しめるような Tips の学習や、趣味をセミプロ並みに伸ばす日常トレーニング、ノウハウ学習を提供可能
（キ）　生活習慣病対策等、個人に対する生活指導なども強く連携可能

シナリオⅢ . 総合エネルギーマネジメント
〈解くべき社会課題〉
従来のエネルギーマネジメントは、施設内の電力マネジメントが中心であり効果は施設内に限定されていた。これを都市全体、社会全体のエネルギーマネジメントに広げていくことで、地球規模の環境問題、資源問題の解決につながる。エネルギー消費は、都市基盤としての交通や水、快適なオフィス、住環境の提供と関係するため、安定な都市基盤の提供には、エネルギー利用の平準化と利用最小化が必須となる。また、これらは、電力だけでなく、ガス、ガソリン、熱などのエネルギーも統合して管理することが必須となる。

〈実現した時の効果〉
（ア）　電力だけでなく、ガス、ガソリン、熱源を総合マネジメント実現
（イ）　電力を消費する機器の制御はもちろん、発生する熱源、熱排出の制御による省エネ化の実現
（ウ）　交通などの移動は最大のエネルギー消費を行うものであり、移動と合わせて制御する。需要を予測することで、不要な車両を削減して、エネルギー消費とサービス品質のバランスの最適化
（エ）　水などのユーティリティーの生成と配送は、ポンプを中心に大きなエネルギー消費があり、水は蓄積可能であることもあり、比較的時間的融通が利くエネルギー消費。他のエネルギー消費予測を参照しながらの制御を可能とし効率的な利用を実現
（オ）　熱エネルギーは、再利用、熱輸送を制御して、電力消費、ガソリン消費を低減（家庭やレストランなどは、クーラー、冷蔵庫、調理器具の統合制御が必要。排熱を、昇熱、熱輸送すれば、調理や工場で熱源にもなる。）

上記ユースケースシナリオのとおり、REALITY 2.0 は産業のみならず、ヒトの生活そのものを包含する、従来の CPS/IoT より大きなコンセプトとして捕らえる事が可能である。

対して、現在の、CPS/IoT は、文字とおりサイバーの世界と、物理的なリアル世界の融合ということを意味しているが、以下でみるとおり「産業競争力の強化」という文脈で使われることが多い。REALITY 2.0 のような観点で CPS/IoT をみている例は世界でもまだほとんどないと思われる。

諸外国の動向としては、CPS という言葉の起源である米国政府は、IoT という言葉を使わず、その意味で CPS を使っているが、主として産業分野における競争力強化ということを目的としてきている。例えば NSF（National Science Foundation）の CPS への取り組みについて、その適用分野は農業、エネルギー、輸送、ヘルスケア、製造業といった産業分野に関わる内容に言及されている [1)]。さらに、オバマ大統領（当時）が 2011 年に打ち出した Advanced Manufacturing Partnership（AMP）は、米国の製造業の競争力を高めるための産官学をまたがる施策であるが、その中でも CPS への取り組みが推進されている [2)]。また、2013 年 12 月より始められた Smart America Challenge は、同じく大統領による産官学共同のイニシアチブであり、CPS による雇用・新ビジネス創出等の社会経済的便益が、どのように生まれるかを実証的に行う取り組みである。この取り組みは 2014 年に都市やコミュニティにおける CPS/IoT 実証にフォーカスを当てた Global City Teams Challenge に移行している [3)]。都市での生活という面では産業主導からやや離れた感があるが、産業ソリューション等が都市生活にどのように使えるか、という観点のため、リアルとサイバーの融合という観点に至っているとは言い難い。

米国政府は上述のように、CPS/IoT 推進に向けたさまざまな取り組みを行ってきているが、政府主導というよりも、GE 社の Industrial Internet Consortium（IIC）などをはじめとする民間企業やベンチャー等による新しい動きを支援する、という姿勢がみられるものである。

欧州においては、ドイツにおける IoT の取り組み Industrie 4.0 が既によく知られている。これは製造業の競争力強化という色彩を強く打ちだしているものである。また、Industrie 4.0 の他、スマートサービス、データ、クラウド、エネルギー、バイオ、農業、ライフ、教育、労働環境、人材育成、スマート医療、スマートモビリティ、など多様な分野でデジタル化を促進している。産業界、企業、大学、研究機関の連携として、Fraunhofer や DFKI（ドイツ人工知能研究所）が基礎技術面ではけん引し、機械や製造設備の接続標準化を進めている。こうした取り組みの中で、特に Siemens、SAP ら有力企業が実用化を推進している。政府主導の動きが大きく、米国のように民間主導の動きを政府が支援するという方向性とは異なっている。

イギリスにおいては、2014 年 3 月に IoT への注力が政策的に示された。ドイツの展示会 CeBIT でイギリスのキャメロン首相（当時）は、IoT について、ドイツとの協力を進めていくことを表明、合わせて IoT 分野へのリサーチ予算として 4500 万ポンドを追加し、トータルで 7300 万ポンドとすること、100 万ポンドの European Internet of Things Fund を創設することなどを発表した [4)]。さらに IoT に関する産官学を巻き込んだ総合的な支援プログラムである IoTUK を創設するとした。この IoTUK は、IoT 技術の実用性を検証する都市の選定、新たな端末やネットワークのセキュリティー、信頼性に関するリサーチ・ハブの創設、ヘルスケアにおける IoT 技術のテストベッドの設置等、IoT の実証

に向けた支援を行うものとなっている[5)]。このような英国の取り組みは、同じ欧州でもドイツのような製造業中心のものよりも、やや幅を持ったものということができよう。

欧州全体としての IoT への取り組みも進められている。欧州委員会（EC）は 2010 年に定めた経済戦略 Europe 2020 に基づく ICT 戦略として Digital Agenda for Europe 2020 を 2014 年に発表している。この戦略の中では、IoT を含む ICT 分野の研究開発の重要性が示されている。研究開発の強化については、2014 年に創設されたファンディング・プログラム Horizon 2020 では新世代要素技術・システムの中で、スマート・サイバー / フィジカルシステム、スマートエニシング・エブリウエア・イニシアチブなどが対象となっている[6)]。さらに、産業界を含むさまざまな IoT にかかるステークホルダー間の緊密な連携を図るべく、2015 年には Alliance for Internet of Things Innovation（AIOTI）が設立されている[7)]。さらに、IoT　Forum を中心に IoT の基礎技術の開発から応用開拓まで推進しており、この中で特に国際標準化が推進されている。また、Smart City は大きな目玉であり、スペインサンタンデール市をショーケースとして IoT を活用した多様な社会システムの開発、統合化が進められている。

中国では IoT のことを物聯網（ブツレンモウ：ウーレンワン）と呼び、2009 年 8 月に当時の温家宝首相が「物聯網技術を強化すべき」と発言して以来、政府文書によく登場することとなった。

2015 年の政府活動報告では、中国製造 2025 とインターネット +（プラス）という、IoT を中心にした国家戦略構想が打ち出された。中国製造 2025 は、製造業にフォーカスしたものとなっており、ドイツの Industrie 4.0 の影響を強く受けたものとみることができる[8)]。インターネット + は、行動指針であり、インターネットをサービス領域から生産領域へと展開、経済発展に新たな優位性と新しいエネルギーを与えることを目指すとしている。本行動指針では、製造業、農業、エネルギー、金融、物流、交通、環境、人工知能など、11 の領域を重要な行動領域としている[9)]。

ICT インフラ先進国である韓国でも、IoT は重点育成分野として捉えられている。2015 年 3 月に未来創造科学部により発表された K-ICT 戦略は、2020 年までに ICT 生産額を 240 兆ウォン、輸出 2100 億ドルを目指す経済成長戦略であり、戦略育成分野のひとつとして、IoT が指定されている。大規模 IoT 実証団地の整備、ベンチャー育成、その他の実証実験などが推進されることが決められている。

さらに、IoT に特化したものとしては、2014 年にモノのインターネット（IoT）基本戦略、2015 年にモノのインターネット拡散戦略が未来創造科学部より発表されている基本計画では IoT プラットフォーム開発、IoT 専門ベンチャーの育成、技術開発促進等が定められている。拡散戦略は基本計画達成を速やかに行うための補完的政策となっており、2017 年までに製造、ヘルス / 医療、エネルギー、ホーム、自動車 / 交通、都市 / 安全といった 6 分野での IoT 事業化を支援するものとなっている。未来創造科学部は、K-ICT 戦略の実現に向け、2016 年中に、IoT 実証実験団地に加え、各種の実証実験を進める予定となっている[10)]。韓国の場合は、官民上げての IoT を盛り上げていこうとしており、さらに実証実験も積極的に進めているのが特徴的である。

韓国と同様、IT 先進国と言われるシンガポールでは国を挙げて Smart Nation を推進している。シンガポールの国家自体をショーケースとしながら IoT 技術を誘致、国家イ

ンフラの開発と輸出を実現しようとしている。

先端技術や Fintech を中心とした中小企業の育成、高齢化社会への対応として高齢者支援と高齢者自身による互助システム、健康促進支援の仕組みの実現や、交通・物流流通システムの高度化の他、水害やテロ対策など安全社会の確立にも取り組んでいる。

また、国立研究所 A*Star 傘下の Institute of Infocomm Research、Institute of High Performance Computing、国立シンガポール大学、南洋工科大学、シンガポールデザイン工科大学、シンガポール経営大学が基礎面で研究を推進。

社会システムデザインという観点では、iDA （Infocomm Development Authority）が推進している。

我が国では、2016 年 6 月に日本再興戦略 2016 が閣議決定、公表された。日本再興戦略 2016 は、サブタイトルに「第 4 次産業革命に向けて」とあるとおり、経済成長を主眼としたものであるが、いわゆる製造業のみにフォーカスを当てたものではない。IoT については、健康・医療、防災・災害対応、おもてなし、などに加え、人材育成に向けた施策も含められている。また、第 4 次産業革命により、新たなビジネスの創出が行われる一方、既存の社会システム、産業構造、商業構造を一変させる可能性も指摘されている [11)]。国家政策であるため、産業振興の色彩は強いが、おもてなしなど、日本独自の視点が組み入れられている点は特徴的である。

我が国を含め、主要国の CPS/IoT にかかる政策動向は上述のとおり、産業振興という色彩が強く、リアルとサイバーの融合により、ヒト・モノ・コトの表裏にかかわらず変革が起こるであろう、とするものは現状ではない。政策は先進的な事象の後追いをするという傾向があり、事象の面では、既に REALITY 2.0 に向かっている方向性を示すものが現れてきている。これについては以下の「（3）注目動向」の項で説明する。

(3) 注目動向

REALITY 2.0 ではさまざまなものがサービスとして提供されることになる。これは「あらゆるもののサービス化」と呼ぶことができる。サービスは基本的に利用するものであって、所有するものではない。これはクラウドコンピューティングの隆盛がもたらした「所有から利用」の流れを、現在進行しつつあるシェアリングエコノミーが加速、さらに REALITY 2.0 の世界に結びついていくという見方もできる。

クラウドコンピューティング隆盛以前は、あるサービスを提供したいと思う事業者等がいれば、その事業者等は、自らシステム等を用意する必要があった。クラウドコンピューティングの出現と隆盛により、サービス提供事業者は、自らはシステムを所有することなく、クラウド事業者のサービスを利用すればよくなった。これにより事業参入のハードルは下がり、事業規模の拡大・縮小に対して、非常に柔軟な形で対応することができるようになったのである。

このクラウド化の流れは、さまざまなものをサービス化することに繋がった。例えば従来は PC などの端末に添えつけられていたストレージは、Dropbox などといったクラウドストレージ・サービスに変わっている。また、書類を管理するアプリケーションは、Evernote のようなクラウド型サービスが登場し普及している。さらにユーザー認証につ

いても、クラウドと API（Application Programming Interface）を活用することで、サービス提供事業者自身が認証システムを構築せずとも、Facebook や Google のアカウントと認証機能をサービスとして利用できるようになっている。

こうしたサービス化の流れと、ソーシャルメディアの隆盛による評判の可視化、インターネットを活用した広範なマッチングが相まってシェアリングエコノミーが加速しつつある。シェアリングエコノミーの代表格である Uber は Uberization（ウーバライゼーション）という言葉をも生み出し、一つの社会現象となっている。Uberization とは、Uber の出現がタクシー業界に大きな影響を与えたように、これまでのビジネスモデルと異なる企業の出現により、既存業界の状況が大きく変わる現象を指すものである [12)]。

所有から利用の動き、サービス化の動きは、シェアリングエコノミーにおいて、さらに加速しつつある。先の Uber の例では、Uber のサービスを利用して運転手として仕事をしたいが車が無い、という人に車を貸す Breeze というサービスが生まれている [13)]。このサービスを利用すれば、Uber でビジネスをしたい人は車すら持たずに始めることができる。これは車というタンジブルな資産が、コンポーネント化し、サービスとなったものと言うことができる。もし、この動きが、よりさまざまな形でヒト・モノ・コトと結びつけば、それは REALITY 2.0 の世界に他ならない。

REALITY 2.0 におけるサービス提供に当たっては、シームレスにヒト・モノ・コトがつながり、サービス提供が実現することが求められる。近年話題となっているブロックチェーンはその実現に向けて活用可能な仕組みの一つであろう。

ブロックチェーンとは、電子通貨ビットコインに組み込まれた、強固な改ざん防止機能付き取引データベース（台帳）を作る仕組みである。そもそもはビットコインを支える中核的な仕組みとして導入されたものであるが、アルゴリズムに基づく自律的・分散的運用が可能なこと、および強固な（所有者）認証機能と耐改ざん性などから、電子通貨のみならずさまざまな権利移転などを伴う取引などに利用されるようになってきている。その活用範囲は試験レベルのものも多いが、裾野が広がりつつあるものである。例えば Airbnb などのルームシェアにおいて、大きな手間となるのが鍵の受け渡しである。部屋の発見とその利用申し込み・承認自体は、サイバー世界で可能であっても、実際にその部屋を利用するための鍵の受け渡しには人が介在することとなる。これを部屋に取り付けた電子ロックとブロックチェーンを活用することにより、人が介在することなく、円滑に部屋の貸し借りが可能となる Slock.it というサービスが出てきている [14)]。

現状、われわれはいまだ REALITY 2.0 の世界には至っていない。しかし、上で述べたように、REALITY 2.0 に向けた事例は確実に出てきており、それへの方向性を示しているとみることができる。

（4）科学技術的課題

REALITY 2.0 が実現する社会に向けての科学技術的課題は、本領域に至る各領域で議論されているとおり、広範かつ多層なレイヤーにまたがっている。ここで繰り返し述べることは避けるが、一つ取り上げたいのは、REALITY 2.0 の社会におけるセキュリティーの重要性である。

IoT の時代にはセキュリティーリスクが増す、ということが議論されてきている。例えば、IoT 推進コンソーシアム資料によると、IoT 時代には、ネットワーク接続する IoT 機器の増加により、攻撃対象の増加・影響範囲の拡大が指摘されている。また同資料では、IoT 機器の特性として、ライフサイクルが長く、人の関与が少ないため、異変や攻撃の検知等がしづらく、長時間攻撃が持続するということも指摘されている[15)]。

サイバー世界とリアル世界がシームレスにつながることとなる REALITY 2.0 の世界では、この指摘はそのまま当てはまることになるであろうし、また、今まではリアルの世界での攻撃と、サイバー世界での攻撃は、それぞれ別のアプローチをする必要があったものが、両世界の統合により、攻撃者にとっては一つのアプローチで済むこととなる。また両世界の統合により、その価値・影響も今より大きくなることが想定される。

これは攻撃者にとっては格好の状況であると言えよう。加えて近年、サイバー攻撃は技術が高度化し、攻撃手法も巧妙化しているとともに、サイバー犯罪自体が産業化しているとの指摘もある[16)]。

こうした攻撃者から社会を防衛し、安心･安全な社会を構築するためには、REALITY 2.0 におけるサービスプラットフォームのセキュリティーを確保することが必要であり、そのための技術研究・開発・実証が求められることとなるだろう。

さらに、社会システムデザインに向けては、以下のような科学技術的課題が挙げられる。

1. クローズシステムの制御からオープンシステムの制御へ発展
   （異システム間調停、行動変容、など）
2. 多センサー情報からの社会状態の理解（個別要素の理解でない）
3. 社会リソースの状態理解、属性認識とダイナミクスを考慮したシステムデザイン
4. 複雑情報、複数目的関数下でのシステム最適化とシステムデザイン
5. 社会リスクの評価、推定技術（自然災害、事故などによる社会への影響、危険性の分析）。被害最小化の計画立案。また、災害、事故発生後の運営継続性のための社会システムデザイン
6. 未知システムの社会受容性推定
7. プライバシー保護技術、技術だけでなくプライバシーに関する社会通念や侵害リスクに関する嫌悪感を乗り越える仕組みの実現
8. 国家間、企業間を跨った秘密データの交換技術、秘密データの処理技術

（5）政策的課題

（3）注目動向で見たとおり、REALITY 2.0 に向かう潮流は見えつつある。しかし、それに向かっての道には幾つもの越えるべき壁（政策的課題）があると考えられる。ここではこれについて、ヒトの壁、モノの壁、コトの壁という切り口で述べていきたい。

一つ目の「ヒトの壁」とは、REALITY 2.0 における利用者（国民など）のマインドに関するものである。新しい技術や仕組みが入るとき、利用者は戸惑いを覚えたり、不安を覚えたりすることがある。例えば 19 世紀の英国では、ラッダイト運動という、機械破壊運動が起こった。これは産業革命の進展に伴う機械利用の普及に対し、失業などの危惧を頂いた労働者が機械破壊運動を起こしたものである。これは「労働塊（ろうどうかい）の

誤謬」と経済学者が呼ぶものに基づいている。社会全体の生産量が固定的であり、それを生産するための仕事は取り合う形にならざるをえないとの前提に立った故のものである。後の歴史をみれば、産業革命という技術革新は、一時的には失業の増大をもたらしたかもしれないが、新しい産業や職種が生まれ、その失業者は吸収されるという見方もできる。

新しい技術や仕組みが生まれることで、労働者に悪影響が出るという見方は現在もある[17)]。この見方に基づき、技術進展に反対する動きもみられており、これをネオ・ラッダイト運動と呼ぶこともある[18)]。これは利用者の見方・マインドに関わる話でもあり、新しい技術等に対する社会的受容性・成熟度の話とも考えられる。利用者のマインドを高め、社会的受容性・成熟度を向上させていくには、技術などの進展により、どのような便益が利用者にもたらされるかについて的確に認知されることが重要である。その意味では利用者に対する適切な広報・教育活動を行っていくことが重要であろう。

二つ目の「モノの壁」とは、REALITY 2.0 を実現するためのシステムに関するものである。本報告書で挙げられているとおり、REALITY 2.0 を実現するシステムを構築するためには多くの技術的課題が存在する。これらの技術的課題の壁を超えるためには、調査、研究、および実証を含めて実験を積み重ねていくことが必要であると考えられる。既に文部科学省における「人工知能 / ビッグデータ /IoT/ サイバーセキュリティ統合プロジェクト」、経済産業省における「IoT 活用おもてなし実証事業」などが進められているが、このような重要分野における研究を的確に選定、必要なファンディングを継続していくことが求められる。

さらに、システムを運営するのは「ヒト」であるため、人材の確保も必須である。経済産業省が 2016 年 6 月に発表した「IT 人材の最新動向と将来推計に関する調査結果」[19)]によると、2015 年時点で 17 万人が不足しており、今後 2030 年までに約 80 万人が不足するとしている。本調査結果でも指摘されているが、個々の IT 人材のスキルアップ支援の強化に加え、先端 IT 人材、情報セキュリティー人材、IT 起業家などの重点的な育成強化も必要であろう。

三つ目の「コトの壁」とは REALITY 2.0 を実現するシステムを運用する上での決め事・ルールに関する課題である。情報処理推進機構 技術本部 ソフトウエア高信頼化センター（IPA/SEC）は、企業が IoT の課題をどう捉え、どのように取り組んでいるかに関する調査結果を 2016 年 9 月に発表した。「IoT 時代の異業種間の機器・システムがつながる世界において課題と思われることはなんですか」という問いに対する具体的な内容として、「つながりで発生するリスク」、「IoT の検証・テスト」、「IoT のセキュリティー対策」が上位の課題として挙げられている[20)]。これらはマインドの問題や技術面の問題も関わり、ルールだけでは解消しないものの、IPA/SEC が取り組んでいる IoT 製品開発のガイドライン策定などは課題解消に向けてのルール化の取り組みと言えよう。

さらに REALITY 2.0 の世界では IoT よりもさらに業界横断・産官学横断でみたルール作りが求められる。経済産業省は 2016 年 9 月、「第四次産業革命に向けた横断的制度研究会　報告書」を発表した。この中では、競争政策、データ利活用・保護、知的財産に関して業界横断的な制度の課題やあり方が議論されている[21)]。

また、2015 年 10 月に設立された、IoT 推進コンソーシアムは、民主導の組織であるが、IoT・ビッグデータ・人工知能時代において、企業・業種の枠を超えて、産官学で利活用

を促進するものであり、標準化などのルール検討に加え、技術開発、実証を行っている[22]。このような業界横断、産官学横断的な観点からのルール作りを行っていくことが必要であると考えられる。

ヒト、モノ、コトに共通する政策的課題としては、デジタル化に伴う「データは誰のものか」という観点がある。つまり、各種サービスの利用などを通じて得たデータは、サービス提供事業者のものか、あるいは利用者自身のものなのか、というものである。この問題は、EU でもデータポータビリティの権利として議論されている。つまり、データの対象者は、自らが提供した個人データを「構造化された、共通に用いられる機械判読可能な形式で」受け取る権利を有する、とするものであり、我が国においても、この論点は議論されている[23]。利用者・サービス提供者双方が納得し、価値を生み出すデータの活用枠組みの構築が求められるところである。

これら三つの「壁」を超え、REALITY 2.0 を実現するための社会の仕組み、つまり「社会システム」はどのようにデザインされるべきなのであろうか。社会システムデザインの考え方によれば、そのためには、状況を変革する「良循環」を新たに創造し、その良循環を駆動（ドライブ）するサブシステムを構築することとしている[24]。

例えば「ヒト」の壁に関し、これを変革する良循環についての試案の一つとしては、以下のようなものがあるだろう。

ヒト・モノ・コトのサービス化→サービスの多様化→利用者の選択肢増加→サービスの利用増加（需要の増加）およびフィードバックの増加→サービスの改善→利用者の満足度向上

ヒトの壁は新たな技術や仕組みへの不安や戸惑いに起因する。上記の良循環を生み出すことにより、サービスの需要増やサービスの改善により、サービスの提供者や利用者であるヒトの満足度が向上することで、壁を乗り越えて社会の変革を起こすことが可能であろう。

こうした社会システムの中で提供されるサービスは、サービス自体が新しく革新的なものもあるかもしれないが、必ずしも革新的なものばかりとは限らない。REALITY 2.0 はサービス自体ではなく、それを提供する仕組み全体を指しており、それが実現したときには、例えば今までと結果は表面上同じであっても、裏側のメカニズムが効率化しているということもあり得る。つまり、今までよりも静かに、穏やかに物事がなされるようになる、という便益も生まれてくるだろう。

このような社会システム実現に向けてのシナリオとはどのようなものになるのだろうか。おそらくそれは、スタティックなものではありえないであろう。なぜならば、現在、そして REALITY 2.0 に向かう社会では、変化は予測もしない形で起こりうると考えられるからである。このような状況の中で、参考になるのは、リーン・スタートアップの考え方のように、仮説構築、実装、軌道修正を迅速に繰り返すことにより進めていくアプローチではなかろうか。

上で述べた三つの壁は、どれか一つがなくなっただけで REALITY 2.0 が実現する訳ではない。三つの壁に対する取り組みそれぞれが相互に関連し、その検証を踏まえた取り組みがさらに相互に関連しながら進展（Evolution）し、REALITY 2.0 に向かって螺旋状進

んでいく。REALITY 2.0 はこのような形で実現していくのではないだろうか。

さらに、REALITY 2.0 による社会システムデザインに必要な要素を以下に挙げる。

1. 産官学民連携：REALITY 2.0 の社会システムデザインにおいては、基本技術の開発から社会実装のための制度設計や社会実験まで広範な研究分野の連携のみならず、官庁や実社会での活動主体としての地域団体、民間団体、企業などの連携が必須
2. 学際連携：理工学での他分野の連携のみならず、社会学、心理学、認知科学、経済学、経営学、医学、デザイン学などの多様な学術分野の連携が必要
3. 新たな知財管理：本領域は、単なる技術的な発明による社会課題解決を目指すものではなく、社会制度設計、社会システムのデザイン、ヒューマンマシン・インタラクションなどを組み合わせて実現する。それゆえ、特許制度や著作権管理とは異なるタイプの知財管理の方法が必要となる（現在は著作権、意匠権と特許権を組み合わせ）
4. 国際標準化：工場、交通、家電など単一システム内での機器接続に関する標準化は必須（システムインターフェース、データ交換のためのデータフォーマット、制御コマンド等の標準化）。
5. 府省連携：データシェアリング。監督官庁や組織ごとに異なるセンシングシステム、データを個別に保持。例えば、交通では、国土交通省、警察庁、道路業者が個別に保持して、データシェアができない。また、REALITY 2.0 では、社会実装における関係省庁が多岐にわたるため、府省連携で総合的な規制緩和や制度設計が必要。モビリティでも、交通、物流、流通、医療、保健、などが関係。
6. 国際連携：データシェアリングに関する規制の整合、収集されたデータの知的財産権の整合、個人情報保護の整合、セキュリティーシステムの共通化、共同開発と同時強化（国際連携によるセキュリティーホールの発生を防ぐ）。国際的なサービス事業での税制の整備
7. 多国間ファンディング：REALITY 2.0 のシステムデザインは、一国、例えば日本国内だけで実現しても意味がなく、他国と成果を共有していくことが必要。国内のファンディングでも、他国の研究者とも組み入れて、グローバルに適用可能なものとして、社会実装についての研究を進める必要がある。

(6) キーワード

シェアリングエコノミー、Uber、Uberization、Breeze、ブロックチェーン、ビットコイン、Airbnb、ネオ・ラッダイト運動、IoT 推進コンソーシアム、社会システム、社会システムデザイン、リーン・スタートアップ、システムデザイン、行動経済学、ニューロ経済学、デザインシンキング、深層学習、感情情報処理

(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	○	↗	閣議決定された「日本再興戦略 2016」は、産業分野を重点としているものの、製造業の IoT のみにフォーカスしたものではなく、健康・医療、防災・災害対応等さまざまな分野が含まれている。やや出遅れ感のある我が国であるが、ここへ来て注力度合いが高まっている感がある。
	応用研究・開発	△	↗	我が国では CPS/IoT の企業レベルでの取り組みは企業内に閉じた形で進展してきている。国内外の動向の変化から、業界横断、分野横断の兆しが見え始めている。
米国	基礎研究	○	→	米国では比較的早く CPS への取り組みはみられている。米国政府のスタンスとしては民主導で政府はその支援をする、というものであり、そのスタンスは基本的に変わっていない。
	応用研究・開発	◎	↗	GE の Predix などのプラットフォームの開発と事業化、Uber、Airbnb などレガシー技術を活用したサービス事業化など、社会に浸透し、海外展開もけん引。GE 主導の Industrial Internet Consortium をはじめとして、民間主導で CPS 関連の動向は活発である。産業分野の層も厚いが、スマートシティー、コネクテッド・ホームなど、生活関連分野への広がりもみられている。
欧州	基礎研究	○	↗	IoT Forum や EU Project を通じて、IoT の基礎技術の開発とスマートサンタンデールなどの実証実験を通じて基礎技術の強化を実施。また、IoT に関する国際標準化をけん引。 特にドイツではフラウンホファー研究所やドイツ人工知能研究所が Industrie 4.0 関連基礎技術の研究を推進している。 欧州においては、政府主導のドイツ Industrie 4.0 の取り組みが著名であるが、英国および欧州委員会も IoT 推進政策は整備してきている。産官学連携を推進する動きが目立つのが特徴的である。
	応用研究・開発	◎	↗	ドイツの Industrie 4.0 を中心としながら Siemens、SAP などでプラットフォーム開発と事業展開が推進されている。 推進政策に基づく実証実験は行われているものの、米国における GE のような、ビジネスとして強力に推進していく動きはあまりみられていない。
中国	基礎研究	◎	→	第 12 次 5 か年計画以降、IoT への投資額も莫大。有力大学でチャイナモバイル、などテレコムキャリア中心に応用開発と実証実験が幅広く展開。 比較的早く中国版 IoT である「物聯網」に注目し、推進してきている。2015 年にも「中国製造 2025」と「インターネット +（プラス）」という、IoT を中心にした国家戦略構想を打ち出し、IoT を政策的に推進している。
	応用研究・開発	○	↗	通信事業者である中国移動がコネクテッド・カーである Internet of Vehicles などに取り組む一方、Huawei 等のメーカーは比較的安価なウエアラブル端末を提供している。
韓国	基礎研究	○	→	2013 年以降、ICT と他産業の融合、いわゆる ICT 融合による新サービス創出を促進している。IoT は重点育成分野として指定。
	応用研究・開発	○	→	IoT 実証団地において、サムスン電子、SK テレコム等民間企業と自治体が連携し保険やヘルスケアなどの実験を実施。政府との連携色が強く、また海外展開を意識して、大企業と中小企業とが連携して展開をしようとしている。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
　　◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
　　△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
　　↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）NSF（National Science Foundation）, Cyber-Physical System（CPS）

http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286（2016 年 12 月 15 日アクセス）
2）NSF,Cyber-Enabled Materials, Manufacturing, and Smart Systems（CEMMSS）（2016 年 12 月 15 日アクセス）
http://www.nsf.gov/about/budget/fy2016/pdf/35_fy2016.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
3）JETRO,「米国における IoT（モノのインターネット）に関する取り組みの現状」, ニューヨークだより， 2015 年 8 月
4）ITEUROPA, “UK GOVERNMENT COMMITS TO INTERNET OF THINGS,” 2014 年 3 月 11 日
http://www.iteuropa.com/?q=uk-government-commits-internet-things（2016 年 12 月 15 日アクセス）
BBC NEWS, “ ‘Internet of things’ to get £45m funding boost,” 2014 年 3 月 9 日
http://www.bbc.com/news/business-26504696（2016 年 12 月 15 日アクセス）
5）Postscapes, “British government launches IoTUK program to coordinate Internet of Things development,”
http://www.postscapes.com/british-government-launches-iotuk-program-to-coordinate-internet-of-things-development/（2016 年 12 月 15 日アクセス）
6）一般財団法人マルチメディア振興センター , ICT Global Trend
https://www.fmmc.or.jp/ictg/country/eu.html（2016 年 12 月 15 日アクセス）
7）European Commission, “The Internet of Things,”
https://ec.europa.eu/digital-single-market/internet-things（2016 年 12 月 15 日 アクセス）
8）ジェトロセンサー ,「中国　IoT は製造強国への一里塚 ?」, 2016 年 6 月号
https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/91c49e2fc5e39931/20160013.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
9）RHB Rehobo Laboratories,「中国、「Internet+」行動を発表 , 2015 年 7 月 12 日
http://www.rehobolab.com/blogs/-internet（2016 年 12 月 15 日アクセス）
10）ITU ジャーナル ,「国を挙げて IoT 活性化に取り組む韓国」, Vol. 46 No.6（2016.6）
https://www.ituaj.jp/wp-content/uploads/2016/05/2016_06-10-kaigaiKorea.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
11）日本経済再生本部 ,「日本再興戦略 2016　– 第 4 次産業革命に向けて –」, 2016 年 6 月 2 日
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/2016_zentaihombun.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
12）IT pro,「経営層は“ウーバライゼーション”に強い関心、米 IBM が調査」, 2015 年 11 月 4 日
http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/110403605/（2016 年 12 月 15 日アクセス）
13）ダイヤモンド・オンライン ,「「ウーバライゼーション」の脅威–シェアリング・エコノミーとどう向き合うか」， 2016 年 4 月 8 日

http://diamond.jp/articles/-/89187（2016 年 12 月 15 日アクセス）
14）Slock.it
https://slock.it/（2016 年 12 月 15 日アクセス）
15）IoT 推進コンソーシアム事務局 ,「IoT セキュリティの動向について」, 2016 年 1 月 21 日
http://www.iotac.jp/wp-content/uploads/2016/01/ 資料 3-1_IoT セキュリティの動向について .pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
16）株式会社富士通マーケティング ,「第 02 回近年のサイバーセキュリティにおける攻撃側と防御側の状況」,2016 年
http://www.fujitsu.com/jp/group/fjm/mikata/column/ffri/002.html（2016 年 12 月 15 日アクセス）
17）産経ニュース ,「21 世紀のラッダイト運動　共有経済は「労働者壊す」」, 2016 年 1 月 24 日
http://www.sankei.com/world/news/160124/wor1601240003-n1.html（2016 年 12 月 15 日アクセス）
18）東洋経済新報社 ,「勝者の代償」, ロバート・B・ライシュ , 2002 年 7 月
19）経済産業省 ,「IT 人材の最新動向と将来推計に関する調査結果について」, 2016 年 6 月 10 日
http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/jinzai/27FY_report.html（2016 年 12 月 15 日アクセス）
20）MONOist,「 IoT の課題は「接続相手の信頼性が不明」なこと――IPA/SEC が調査」,2016 年 9 月 16 日
http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1609/16/news051.html（2016 年 12 月 15 日アクセス）
21）経済産業省 ,「第四次産業革命に向けた横断的制度研究会 報告書」,2016 年 9 月 15 日
http://www.meti.go.jp/press/2016/09/20160915001/20160915001-3.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
22）総務省 ,「スマート IoT 推進フォーラムの活動について」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000398945.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
23）生貝直人、「欧州等の先進事例にみるパーソナルデータ利活用の新潮流：データポータビリティ制度に基づくビッグデータ利活用のパラダイムシフトに向けて」、2016 年 3 月 17 日
http://ikegai.jp/nikkeiBD_ikegai160317.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）
24）横山禎徳、「「社会システム・デザイン」と 何か - 課題設定・形成能力という「身体知」獲得 -」、慶應義塾大学大学院 SDM、 2013 年 2 月 26 日
http://www.sdm.keio.ac.jp/pdf/slide1.pdf（2016 年 12 月 15 日アクセス）

3.3 ビッグデータ

ビッグデータの研究開発で目指すのは、膨大なデータの収集・解析、実世界現象の精緻でリアルタイムな把握・予測により、さまざまな社会課題を解決し、安全・安心で生産性の高い社会を実現することである。人間の手に負えない大規模複雑な社会課題が深刻化しており、その解決手段としてビッグデータに大きな期待が寄せられている。

これを支える技術は、ビッグデータの収集・蓄積→分析→活用という流れに沿った基礎技術、活用基盤、重点応用、制度設計という塊で捉え、以下の八つの研究開発領域を設定した（図 3-3-1）。

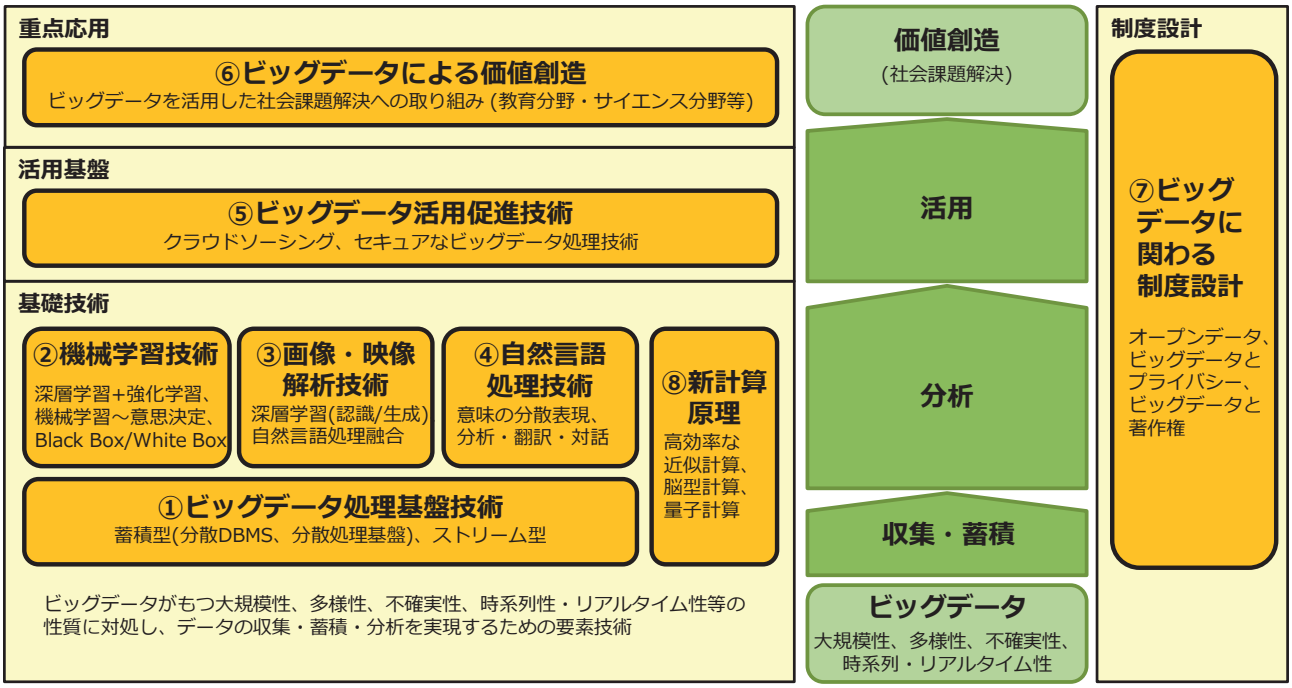

図 3-3-1　ビッグデータの俯瞰図

①ビッグデータ処理基盤技術

大量の計算機あるいはハイエンド計算機を活用し、ビッグデータを高速・高効率に処理するソフトウエア技術である。大規模性、多様性、不確実性、時系列性・リアルタイム性を備えたビッグデータを扱うさまざまな応用において共通的に必要とされる。

②機械学習技術

データの背後に潜む規則性や特異性を発見することにより、人間と同程度あるいはそれ以上の学習能力をコンピューターで実現しようとする技術である。事象や対象物についてその観測データに基づく判別・分類、予測、異常検知等が可能になる。

③画像・映像解析技術

カメラ等で撮影された画像や映像をコンピューターで解析して、その画像･映像の内容、つまり、そこに写っているもの（人や物体、文字等）の位置・カテゴリあるいは風景・場所・状況等を認識する技術である。

④自然言語処理技術

コンピューターで自然言語（人間が日常の意思疎通のために用いる自然発生的な記号体

系）を処理する技術である。自然言語で表現された大量テキスト情報の活用の促進・支援や、自然言語によるコミュニケーションの促進・支援に活用される。

⑤ビッグデータ活用促進技術

ビッグデータの基礎技術である①～④以外に、ビッグデータをさまざまな課題解決（価値創造）に活用していく上で共通的に必要になる技術である。特にクラウドソーシングとセキュアなビッグデータ処理技術が重要である。

⑥ビッグデータによる価値創造

ビッグデータに基づく実世界現象の精緻でリアルタイムな把握・予測による課題解決、安全・安心で生産性の高い社会に向けた価値創造のための技術である。特に、科学技術政策の面から、教育やサイエンスにおけるビッグデータ活用に着目する必要がある。

⑦ビッグデータに関わる制度設計

ビッグデータの流通・活用を支える仕組み・制度を取り上げる。特に、最小限の制約のみで誰でも自由に利用・加工・再配布ができるオープンデータと、データに関わる権利確保の面からプライバシー保護と著作権に注意が必要である。

⑧新計算原理

実世界に大規模分散するビッグデータを低消費電力で高速・高効率に処理する技術である。①の発展形にとどまらず、②～④のアルゴリズムの進化と密に関わる基本計算原理への取り組みであり、高効率な近似計算・脳型計算・量子計算等を含む。

これらビッグデータの研究開発領域は、②～④の領域を中心に人工知能（AI）技術との関わりが深く、各国とも国家資金が重点投入され、産業界での競争が激化している。

米国は、Google、Facebook、Microsoft 等の巨大 IT 企業が積極的な投資をしていることに加えて、Airbnb、Uber 等、次々とベンチャー企業が誕生し、成長している。技術・資金だけでなく、その支配下にあるデータ量の面でも、米国が強いポジションを取っている。

トップ国際会議の論文は、量・質とも米国が世界をリードしているが（例えば機械学習分野の ICML は 2016 年の採択論文のうち半数近くが米国発の論文であった）、中国の追い上げが目立つ。採択論文数で 2 位に浮上しただけでなく、深層学習技術に関わる大規模画像認識性能の競技会 ILSVRC において、2015 年に MSRA が 1 位、2016 年は 1 位が中国公安部第三研究所、3 位が香港中文大学と、中国勢の躍進が著しい。産業界も、Baidu の検索エンジン、テンセントのチャットサービス、アリババの EC サービス等、盛んな研究開発投資、大規模データの囲い込みを進めており、勢いがある。

欧州は、セマンティック Web 研究の層が厚く、プライバシー保護を含む制度設計への取り組みに特徴がある。加えて、Google が買収した英国の DeepMind は AlphaGo で囲碁の世界トッププロに勝利する等、最先端の深層学習技術で世界中から注目され、存在感を高めている。

日本は、米国・中国のようなネットサービスのビッグデータよりも、実世界ビッグデータの活用に基づく実社会の課題解決（ソリューション）への取り組みに特徴がある。タスク特化の画像認識で世界トップ性能を出してきた画像認識技術、ロボット制御等で先行する深層強化学習技術・転移学習技術、機械学習に基づく意思決定問題の解法、非順序型実行原理に基づく超高性能 DB エンジン等、社会課題領域で迅速かつシャープに性能を出す AI 技術・実世界ビッグデータ解析技術に強みを有する。

3.3.1　ビッグデータ処理基盤技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

ビッグデータ処理基盤技術は、大規模なデータ処理を高速・高効率に実行するためのソフトウエア技術であり、大量の計算機あるいはハイエンド計算機を活用することで、データ分析･解析処理の効率的な実行を実現する。ビッグデータは大規模性に加えて、多様性、不確実性、時系列性・リアルタイム性等の性質を備えており、このような性質に対処してビッグデータを高速・高効率に処理する技術は、さまざまなビッグデータ応用において共通的に必要とされる。

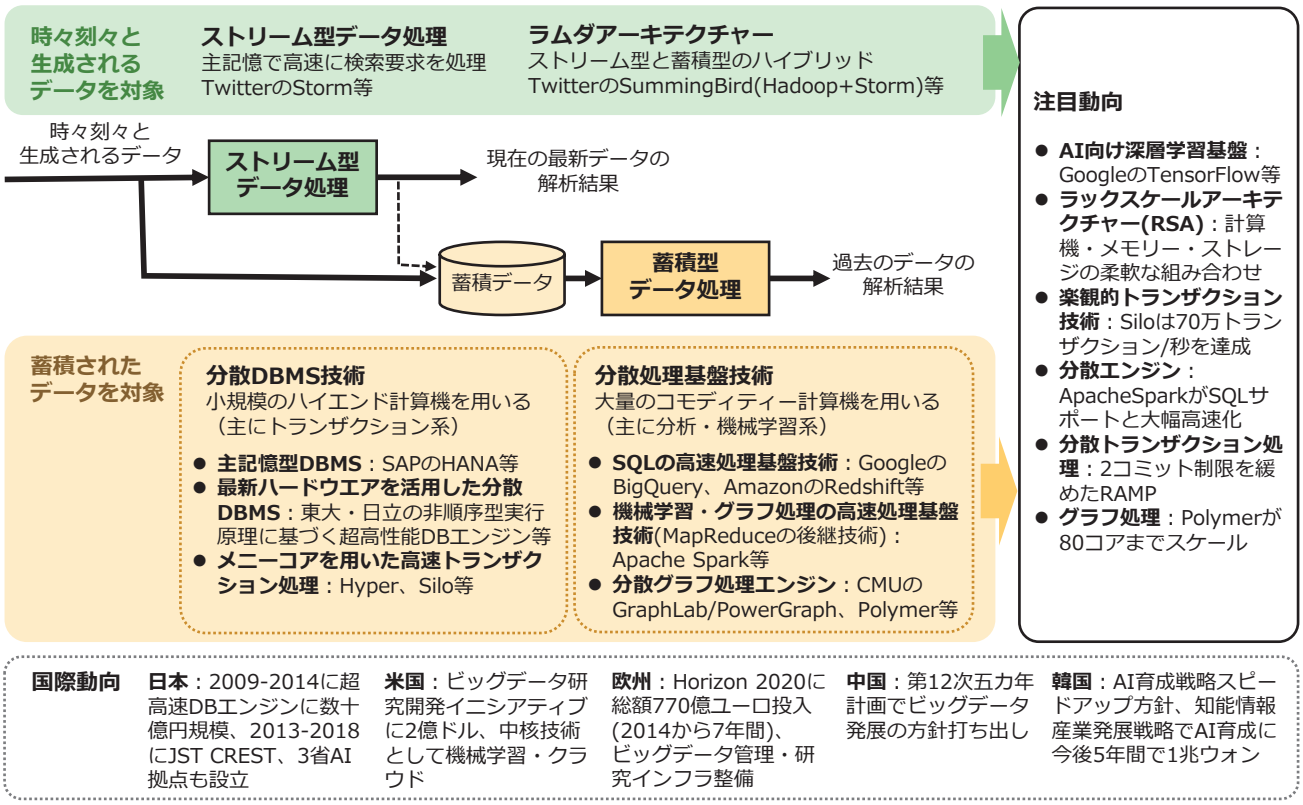

図 3-3-2　領域俯瞰：ビッグデータ処理基盤技術

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

IDC Japan の 2016 年 6 月の報告[1] によれば、2015 年の国内ビッグデータテクノロジー / サービス市場は、前年比 32.3 ポイント増の高い成長率を記録して市場規模は 947 億 7600 万円に到達し、今後の国内ビッグデータテクノロジー / サービス市場は 2020 年に 2889 億 4500 万円、2015 年～ 2020 年の年間平均成長率は 25.0% になると予測している。

ビッグデータを活用したさまざまなサービスを実現するには、ビッグデータを格納して分析・解析プログラムを高速・高効率に実行できる処理基盤が必要である。実際、クラウド環境では、エクサバイトスケールのデータ規模、100 万台を超えるサーバ群による大規模データ処理を実現できるような、ソフトウエア、ハードウエアから成るビッグデータ処理基盤が構築・運用されている。計算機資源を低価格で大量に調達することで、スケールメリットを生かした低価格なクラウドサービスを利用者に提供するため、このような技術が活用されている。

このようなビッグデータ処理基盤技術は、処理の対象となるデータが、蓄積されたデータであるか、あるいは時々刻々と生成されるデータであるかの二つの観点から、「蓄積型データ処理」と「ストリーム型データ処理」という技術領域に分類することができる。言い換えると、蓄積型データ処理は過去のデータに対する処理であり、ストリーム型データ処理は現在の最新データに対する処理である。

［蓄積型データ処理技術］

蓄積型データ処理技術はさらに、小規模のハイエンドな計算機を用いる「分散データベース管理システム（分散 DBMS）技術」と、分散 DBMS の機能を簡略化して数千台を超える大量のコモディティ計算機を用いる「分散処理基盤技術」（NoSQL、MapReduce 等がその代表）に分類される。

前者の「分散 DBMS 技術」には Oracle、IBM、Microsoft 等のデータベース（DB）製品や、SAP の HANA に代表される主記憶型の DBMS がある。最先端の技術としては、大量の主記憶・メニーコア・不揮発性メモリ・高速ネットワーク等の最新ハードウエアを活用した分散 DBMS の研究がなされている。例えば、東京大学と日立製作所が共同開発・商用化した非順序型実行原理に基づく超高性能 DB エンジン [2] があげられる。これは、参照中心の分析系 DB に対して、検索命令を細分化し、ハードディスクレベルで実行順序を入れ替えることでハードディスクの性能を最大限に引き出す技術である。一方、大学においては、参照と更新系の両方の処理を行うトランザクション系 DB の分野で、メニーコア上でトランザクションを高速処理する DB エンジンの研究が盛んになっている。その中心的なシステムとして Hyper [3] や Silo [4] があげられる。Hyper はベンチャー起業として独立後、2016 年にデータ分析大手企業の Tableau 社に買収されて話題となった [5]。

後者の「分散処理基盤技術」に関しては、米国の Google、Amazon、Facebook、Twitter 等の Web 系の企業が技術を先導しており、各社のサービスの専用用途に応じて開発が進められている。DB の問い合わせ言語である SQL を高速に処理する基盤技術としては、Google がクラウドサービスとして提供している BigQuery や Amazon の Redshift がある。BigQuery は、数億レコードを数秒で検索することが可能で、数千台のディスクを同時使用していると推測される。Redshift は、ディスクアクセスを並列化すると同時に、分析対象のデータのみをディスクアクセスするカラム指向技術とその軽量圧縮技術を使うことで高速処理を実現している。一方、大学においては、機械学習処理やグラフ処理を高速化する基盤技術の研究が進められており、MapReduce の後継となる技術が多数提案されている。特に、機械学習や行列計算における繰り返し型の分析処理に着目し、その中間結果を主記憶に保持することでディスクアクセスコストを削減した Apache Spark が成長を続けている [6]。日本発の技術としては機械学習を処理する Hivemall が Apache foundation のインキュベータープロジェクトに 2016 年 9 月に認定された [7]。グラフ処理は人・モノ・場所などの関係情報から知識を発見する技術であり、分散グラフ処理エンジンの代表的例としては、CMU の GraphLab/PowerGraph、マイクロソフト研究所の Graph Engine [8]、メニーコア環境におけるグラフ分析の代表的技術としては Polymer [9] があげられる。

［ストリーム型データ処理技術］

時々刻々と生成されるデータを対象とする技術として、一定量の限られた主記憶を利用して高速に検索要求を処理するストリーム型データ処理技術がある。ストリーム型データ処理技術は、米国や日本の DBMS ベンダから製品化されており、産業利用が進んでいる。Web 系企業では、Twitter がストリーム処理エンジン Storm を開発し、2011 年に公開している。

近年では、蓄積型データ処理とストリーム型データ処理をハイブリッドに組み合わせる技術が出現してきている。これは「ラムダアーキテクチャー」と呼ばれる。この類の技術は古くからあり歴史は長いが（2003 年に論文発表された PSoup[10] が代表例）、2014 年には Twitter から Hadoop と Storm を組み合わせた SummingBird が発表され、オープンソースソフトウエア（OSS）として公開された[11]。

［国際動向］

国家施策を中心に各国の動向をまとめる。

日本では、人工知能（AI）研究拠点として文部科学省の理化学研究所革新知能統合研究センター、経済産業省の産業技術総合研究所人工知能研究センター、総務省の情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターおよびデータ駆動知能システム研究センターが活動している。特にビッグデータ処理基盤の観点では、2009 年～ 2014 年の期間に最高速 DB エンジンの開発をテーマとして、数十億規模の予算による DB エンジン技術および機械学習技術の研究開発が実施された。2013 年～ 2018 年の期間、JST CREST の「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出･体系化」領域で研究開発が進められている。

米国では､2012 年 3 月に科学技術政策局（OSTP）がビッグデータ研究開発イニシアティブを発表、政府として戦略的に取り組む姿勢を明確にしている。その中核技術として、機械学習、クラウドコンピューティング、クラウドソーシング等があげられている。代表的な成功プロジェクトとしてスタンフォード大を中心とした Apache Spark があげられる。

欧州における主な取り組みとしては、Horizon2020 の中で、ビッグデータの管理・研究インフラの整備、データのオープンアクセスが計画されている。

中国では、ビッグデータ産業の発展を奨励・推進するため、「情報消費の促進による内需拡大に関する意見」、「ソフトウエアと情報技術サービス業の『第 12 次五カ年計画』」等の政策・計画の中で、ビッグデータ発展の方針を打ち出した。さらに、全国情報技術標準化技術委員会を組織し、ビッグデータ標準化の需要分析を行い、標準体系の枠組み研究および関連の標準研究を実施、国際標準化機構にビッグデータ研究案を提出している[12]。

韓国では、2012 年にビッグデータ・マスタープラン、2015 年にビッグデータ活用拡大対策を発表し、2017 年までに 97 のビッグデータ活用事業を進めるとしている[13]。

(3) 注目動向

Google では、検索サービスやクラウドサービスに必要な基盤技術はほぼ完成した状況にあると考えられ、現在は画像認識、音声認識、多言語翻訳等の Google が提供する AI 系サービスを支える深層学習の基盤技術（TensorFlow）の開発が目立っている[14]。同様

に Microsoft 研究所では、特に対話を中心とした技術に注力しており、その基盤技術として深層学習エンジンを OSS で公開している [15)]。

計算機ハードウエア関連では、計算機・メモリ・ストレージを柔軟に組み合わせ可能なラックスケールアーキテクチャー（RSA）が主流になっている。

（2）で取り上げたビッグデータ処理基盤技術もさらに発展している。メニーコア上でトランザクションを高速処理するエンジンの研究が進み、近年は楽観的トランザクション技術 [i)] に関する研究が盛んである。代表技術の Silo[4)] は、論理クロックに基づく非集中処理機構を導入することで、70 万トランザクション / 秒という高い性能を達成した。FOEDUS は、主記憶と不揮発性メモリの併用に適したトランザクション処理システムを実現している [16)]。分散エンジンに関しては、Apache Spark が発展しており、2016 年 7 月に 2.0 版が正式リリースされ、SQL サポートと大幅な高速化が達成された [6)]。分散トランザクション処理に関しては、2 層コミットの制約を緩めた RAMP（Read Atomic Multi-Partition）が提案され、1 層によるコミットを実現し [17)]。グラフ処理に関しては、Polymer がメニーコアでのデータレイアウトを工夫し、さらにデータの並行制御を効率化する工夫により、80 コアまでスケールする性能を達成した [9)]。

（4）科学技術的課題

ビッグデータ処理基盤技術の動向をまとめると、蓄積型データ処理技術における①トランザクション系の処理エンジンである分散 DBMS 技術と②ビッグデータを分析・機械学習するエンジンである分散処理基盤技術、③センサーなどから時々刻々と生成される最新データを処理するストリーム型データ処理技術がある。社会的なニーズから見ると、①は銀行業務や EC サイトなどで利用されており、現在の IT 社会の根幹を成すものである。大量の主記憶・メニーコア・不揮発性メモリ・高速ネットワーク等の最新ハードウエアを活用することで、より大規模なデータを高速・省電力で処理できる技術を目指した技術開発が求められる。②はメディアの自動認識・自動翻訳といった近年のビッグデータ・AI の実現に必要不可欠な技術である。従来培った大規模データ処理技術を応用して、新たなデータ処理アーキテクチャーを含めた技術の発展が見込まれる。また、③は、IoT の普及がもたらす実世界のリアルタイムセンシングデータを分析するシステムを実現する技術であり、新たな応用の発展に従って技術の発展が見込まれる。

（5）政策的課題

ビッグデータ処理基盤技術の研究は、最新ハードウエアの利用や、リアルなビッグデータ処理で生じる課題への取り組みが重要である。前者に関しては、最新ハードウエアを提供している Intel や HP における研究開発活動が大学における活動よりも有利で、後者に関しては、リアルなビッグデータを利用したビジネスを運営している Web 系や通信系の

i）　楽観的トランザクションは、通常の（悲観的）トランザクションと比べて、ロックよりもトランザクションの並列実行を優先し、複数トランザクションの競合頻度が低いケースに高速性能を発揮する技術である。近年、CPU の高性能化に伴ってトランザクション処理が短時間で実行できるようになって競合頻度が下がったため、注目されている。

企業が有利な傾向にある。日本の大学がビッグデータ処理基盤技術の分野で活躍するには、産学連携の推進等、このような場・環境との接点を一層強化することが不可欠である。現在の日本は、他国同様ビッグデータ処理分野に大型国家予算が投資されている状況にある一方、その基盤技術の研究開発を遂行できる人材、特に学生が少ないことが、日本の競争力を低下させている大きな原因の 1 つと考えられる。この状況を改善するには、まず大学教育においてデータ処理の基盤技術やプログラミングの教育を強化するとともに、特に研究開発を牽引する博士学生・ポスドクの数を倍増させる必要がある。そのためには、博士・ポスドク後の安定雇用のシナリオを充実させなければならない。

(6) キーワード

並列分散データベース管理システム（DBMS）、ストリーム型データ処理、NoSQL、MapReduce、分散処理基盤技術、クラウドコンピューティング

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・最新ハードウエアを用いた DBMS の研究 [18),19)]、大規模なグラフデータ処理の高速アルゴリズム [20),21)] 等、トップ会議で多数採択されている。
	応用研究・開発	○	↗	・Hivemall が Apache foundation のインキュベータープロジェクトに 2016 年 9 月認定された。 ・Apache Hadoop や Spark へのコミッタ輩出等、日本からビッグデータ処理基盤の OSS への貢献が伸びている [22)]。
米国	基礎研究	◎	→	・大学・企業の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。最新ハードウエアを用いた基盤研究では楽観的トランザクションをベースとした Silo（Google Scholar で引用数 98）、分散トランザクション処理に関しては RAMP（Google Scholar で引用数 50）が影響を与えている。
	応用研究・開発	◎	→	・分散処理基盤技術の取り組みは、Web 系企業が OSS 開発を先導しており、米国が圧倒している。 ・OSS 開発コミュニティでは大学と連携し、基礎研究成果を取り込む土壌も備えているのも強みである。Spark コミュニティは UC Berkeley 発で急成長を遂げている。
欧州	基礎研究	◎	→	・大量の主記憶・メニーコア・SSD・高速ネットワーク・GPU や FPGA 等の最新ハードウエアを活用した分散 DBMS が産業界を含め注目されている。Hyper は最新ハードウエアを活用して分析系処理とトランザクション系処理を両立するエンジンの代表格である。
	応用研究・開発	○	↗	・SAP の HANA 等のカラム指向インメモリ DBMS やストリーム型データ処理エンジンの取り組みが目立っている。
中国	基礎研究	◎	→	・大学が中心となり、基礎研究で多くの成果を上げている。難関国際会議採録も米・欧に次いで多い。グラフデータ処理等のアルゴリズム系が中心で、分散処理基盤技術の高速化の取り組みもある。Polymer はメニーコアでデータレイアウトを工夫し、OS レベル競合を回避することで 80 コアまでスケールする高性能を達成 [9)]。
	応用研究・開発	○	→	・Microsoft はグラフエンジン [8)] や深層学習エンジン [15)] 等の取り組みを行っている。

韓国	基礎研究	○	→	・フラッシュメモリを利用した DBMS の高速化等の高速 DBMS に関する取り組みや、グラフエンジンに関する取り組み [23] 等がある。
	応用研究・開発	△	→	・ビッグデータ基盤技術に関して目立った活動はない。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）IDC, 国内ビッグデータテクノロジー / サービス市場予測を発表 , http://www.idcjapan.co.jp/Press/Current/20160613Apr.html
2）早水悠登 , 合田和生 , 喜連川優 , アウトオブオーダ型クエリ実行に基づくプラグイン可能なデータベースエンジン加速機構 , 情報処理学会論文誌 データベース 7 (2),pp.104-116,2014.
3）Alfons Kemper, Thomas Neumann, HyPer, A hybrid OLTP&OLAP main memory database system based on virtual memory snapshots, Proceedings of ICDE, 2011.
4）Stephen Tu, Wenting Zheng, Eddie Kohler, Barbara Liskov, Samuel Madden, Speedy transactions in multicore in-memory databases, Proceedings of SOSP, 2013.
5）TechCrunch,BI サービスの Tableau がドイツの HyPer を買収してビッグデータ分析を高速化 , http://jp.techcrunch.com/2016/03/11/20160310tableau-scores-advanced-database-tech-with-acquisition-of-german-startup-hyper/
6）Spark Release 2.0.0, https://spark.apache.org/releases/spark-release-2-0-0.html
7）Apache Hivemall, https://hivemall.incubator.apache.org/
8）Microsoft, Graph Engine, https://www.graphengine.io/
9）Kaiyuan Zhang, Rong Chen, Haibo Chen, A NUMA-aware Graph-structured Analytics Framework, Proceedings of PPoPP, 2015.
10）Sirish Chandrasekaran, Michael J. Franklin, PSoup, A System for Streaming Queries over Streaming Data, VLDB Journal, 12（2）, 2003.
11）Oscar Boykin, Sam Ritchie, Ian O'Connell, Jimmy Lin, Summingbird, A Framework for Integrating Batch and Online MapReduce computations, PVLDB 7（13）, 2014.
12）SciencePortal China, 中国のビッグデータ発展の現状と趨勢 , https://www.spc.jst.go.jp/hottopics/1507/r1507_cheng2.html
13）ICT global trend, アルファ碁ショックで人工知能（AI）開発戦略がスピードアップ , https://www.fmmc.or.jp/ictg/country/korea.html
14）Jeff Dean, Building Machine Learning Systems that Understand, SIGMOD

tutorial, 2016.
15）Microsoft, The Microsoft Cognitive Toolkit, http://cntk.ai
16）Hideaki Kimura, FOEDUS: OLTP Engine for a Thousand Cores and NVRAM. Proceedings of ACM SIGMOD, 2015.
17）Peter Bailis, Alan Fekete, Ali Ghodsi, Joseph M. Hellerstein, Ion Stoica: Scalable Atomic Visibility with RAMP Transactions. Proceedings of ACM SIGMOD, 2014.
18）Hiroshi Inoue, Kenjiro Taura, SIMD- and Cache-Friendly Algorithm for Sorting an Array of Structures. PVLDB 8（11）, 2015.
19）Takashi Horikawa, Latch-free data structures for DBMS: Design, Implementation, and Evaluation. Proceedings of ACM SIGMOD, 2013.
20）Naoto Ohsaka, Takuya Akiba, Yuichi Yoshida, Ken-ichi Kawarabayashi, Dynamic Influence Analysis in Evolving Networks. PVLDB 9（12）, 2016.
21）Hiroaki Shiokawa, Yasuhiro Fujiwara, Makoto Onizuka, SCAN++: Efficient Algorithm for Finding Clusters, Hubs and Outliers on Large-scale Graphs. PVLDB 8（11）, 2015.
22）ITPro,NTT/NTT データから 3 氏が Hadoop や関連プロジェクトの「コミッタ」に就任 , http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/14/121902330/
23）Hyeonji Kim, Juneyoung Lee, Sourav S. Bhowmick, Wook-Shin Han, Jeong-Hoon Lee, Seongyun Ko, Moath H. A. Jarrah, DUALSIM: Parallel Subgraph Enumeration in a Massive Graph on a Single Machine. Proceedings of ACM SIGMOD, 2016.

3.3.2　機械学習技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

機械学習（Machine Learning）は、データの背後に潜む規則性や特異性を発見することにより、人間と同程度あるいはそれ以上の学習能力をコンピューターで実現しようとする技術である。これにより、事象や対象物について、その観測データに基づく判別･分類、予測、異常検知等が可能になる。情報爆発・ビッグデータの時代と言われる今日、さまざまな事象や対象物について大量の観測データが得られるようになり、機械学習技術は幅広い分野に応用されている。例えば、画像認識、音声認識、医療診断、文書分類、スパムメール検出、広告配信、商品推薦、囲碁・将棋等のゲームソフト、商品・電力等の需要予測、与信、不正行為の検知、設備・部品の劣化診断、ロボット制御、車の自動運転、等々。現在の第 3 次人工知能（AI）ブームをけん引しているのは機械学習技術の進化だとも言われる。

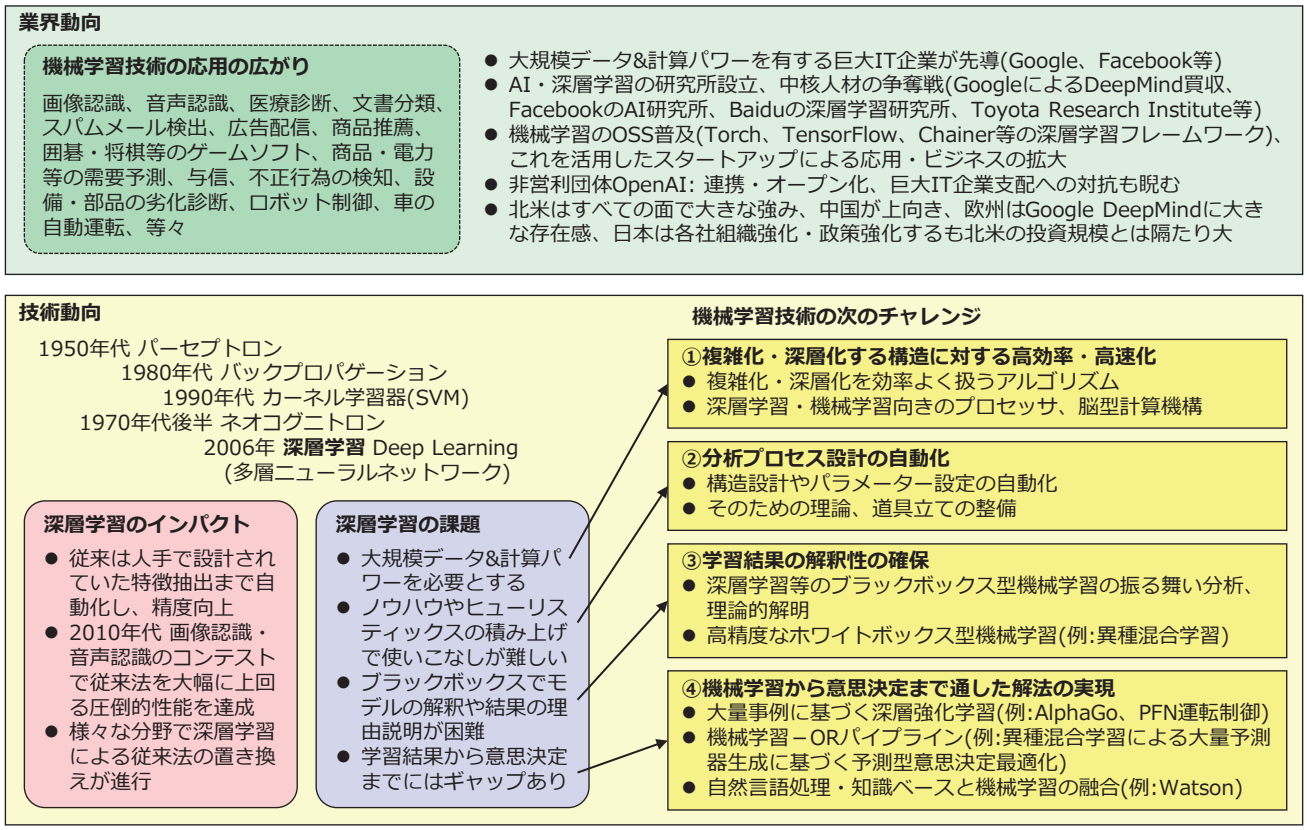

図 3-3-3　領域俯瞰：機械学習技術

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［機械学習研究の発展概観］

機械学習の研究は、古くは人間の脳の学習機能をコンピューターで実現しようという 1950 年代の研究にさかのぼる。パーセプトロン[1)]と呼ばれる単純なニューラルネットワークモデルが提案され、任意の線形分離関数を学習できることから 1960 年代に一大ブームを巻き起こした。しかし、単純なパーセプトロンでは XOR のような入り組んだ関数を学習できないことが明らかになり[2)]、1970 年代には関連する研究は下火になった。

しかし、1980 年代に入って、バックプロパゲーション[3]と呼ばれる、階層構造を持つニューラルネットワークモデルの勾配学習アルゴリズムが提案され、第 2 次ニューラルネットワークブームが到来した。ニューラルネットワークは、画像や音声の認識、ロボットの制御等、さまざまな問題に適用され、優れた性能を示した。しかし一方では、モデルの階層性に起因する非凸性（Non-convexity）のため、学習に非常に時間がかかり、一般に大域的な最適解を求めることができないという弱点が明らかになった。実際、複雑なニューラルネットワークをうまく学習するためには、学習パラメーターの初期値をうまくチューニングするためのノウハウや、学習を高速に実行するためのさまざまなヒューリスティックが必要であり、信頼性の高い学習システムを構築することは極めて困難であった。

そこで 1990 年代に入り、階層性を持たないサポートベクトルマシン（Support Vector Machine:SVM）と呼ばれるカーネル学習器が提案された[4]。SVM の学習は凸最適化として定式化されるため、容易に大域的な最適解を求めることができる。その後、大規模データに対する超高速学習アルゴリズム等の開発を経て、21 世紀初頭にはカーネル法を中心とする機械学習の一大ブームが到来した。カーネル法は音声・画像・自然言語等の処理や、生命情報の解析等、さまざまな分野で優れた性能を発揮した。しかし、カーネル法の性能を十分に引き出すためには、特徴抽出に対応するカーネル関数をうまく設計する必要があり、さらなる学習性能の向上のために、特徴抽出も自動化したいというニーズが高まってきた。その後、カーネル関数の学習法が盛んに研究されるようになったが、いまだ決定打に欠ける状況である。

カーネル法の全盛期の真っただ中であった 2006 年に、多層ニューラルネットワークの新しい学習アルゴリズムが発表された[5]。これは、教師なし学習手法によって事前学習した単層ニューラルネットワークを順々に積み上げていくことによって多層ニューラルネットワークを構築するという手法であり、特徴抽出を自動化する新たな可能性を切り開いた。また、カーネル法が全盛だった 1980 年代後半～ 1990 年代前半にも、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network:CNN）[6]と呼ばれる特殊な構造を持つ多層ニューラルネットワークが画像認識の分野で独立して研究されていた。これは、1970 年代後半に提案されていたネオコグニトロン[7]と呼ばれる人間の脳の視覚野をモデル化したニューラルネットワークと本質的に同等である。カーネル法が一層の学習器であるのに対して、ニューラルネットワークは多層構造を持つ。そのことから、これらのニューラルネットワーク技術は、深層学習（Deep Learning）と呼ばれるようになった。

深層学習の技術は、2010 年代に入ってから画像認識や音声認識のコンテスト（ILSVRC 等）[8]で既存手法を大幅に上回る世界最高性能を達成するに至った。現在は第 3 次ニューラルネットワークブーム（同時に第 3 次 AI ブーム）の真っただ中であり、当該分野は大きく発展しつつある。なお、機械学習・深層学習の画像認識への適用については第 3.3.3 節「画像・映像解析技術」、自然言語処理への適用については第 3.3.4 節「自然言語処理技術」で述べている。

［最近の業界動向］

国際的には、現在の深層学習ブームの火付け役であるトロント大学の Geoffrey Hinton 教授、モントリオール大学の Yoshua Bengio 教授、ニューヨーク大学の Yann LeCun 教授、

スタンフォード大学の Andrew Ng 教授らの北米の大学教員が深層学習の基礎技術開発の中心的な役割を担っている。産業界でも北米の企業が深層学習技術の産業応用をリードしている。特に、Ng 教授と Google が 2012 年 6 月に発表した深層学習による画像認識の研究成果[9] は、ニューヨーク・タイムズ紙に取り上げられる等、世界的な注目を集めた。

また、Hinton 教授らが起こした DNNResearch というベンチャー企業は 2013 年 3 月に Google に買収され、Hinton 教授も Google の Distinguished Researcher に就任した。Bengio 教授と LeCun 教授は International Conference on Learning Representations（ICLR）という深層学習に特化した国際会議を 2013 年に開始し、LeCun 教授は 2013 年 12 月に Facebook に新設された AI 研究所の所長に就任した。Baidu は 2013 年 1 月に深層学習研究所を設立し Ng 教授が 2014 年 5 月に Chief Scientist に就任した。Google は 2014 年 1 月に DeepMind というロンドンの深層学習のベンチャー企業を買収した。Google DeepMind は、深層学習を用いた強化学習の研究で顕著な成果を挙げており、2016 年 2 月には Google DeepMind の囲碁ソフト AlphaGo が韓国のプロ囲碁棋士に 4 勝 1 敗の成績を収めた[10]。2015 年 12 月には、SpaceX や Tesla Motors の CEO である Elon Musk 氏らを中心として、人工知能の研究を行う非営利団体 OpenAI を設立した。2016 年 1 月には、トヨタ自動車が人工知能研究会社 Toyota Research Institute（TRI）を米国に設立した。2016 年 9 月には、Facebook、Amazon、Google、IBM、Microsoft が AI 研究で提携すると発表した。

一方、欧州では、英国、ドイツ、フランス、スイス、イタリア、スペイン等の大学、研究機関にて基礎研究が行われている。アジアでは、中国の Baidu が深層学習の研究開発をリードしている。

国内では、人工知能学会、電子情報通信学会等で深層学習に関する研究発表が盛んになっている。産業界でも、Preferred Networks（PFN）、ドワンゴ人工知能研究所等[11] で深層学習の先端的な研究や適用事例があるほか、富士通の ZINRAI や日立の H、NEC の NEC the WISE 等、国内各社が深層学習を含む AI 技術ブランドを立ち上げて AI の産業応用を加速している。

なお、機械学習の産業応用のトピックは、第 3.3.6 節「ビッグデータによる価値創造」でも取り上げている。

(3) 注目動向

[深層学習の性能向上]

深層学習の性能を向上させようと、さまざまな改良案が提案されている。その中でも、深層残差ネットワーク（Deep Residual Network）と呼ばれる迂回路をもつネットワーク構造は、階層を深くしても効率よく学習が行えるという特徴があり、従来の 8 倍程度の深さである 152 もの層を持つ深層残差ネットワークを用いたアルゴリズムが、2015 年の画像認識コンテストで圧勝した[8]。

深層ニューラルネットワークは学習に膨大な時間がかかるため、計算を高速化する研究は、アルゴリズムだけでなくハードウエアの観点からも行われている。NVIDIA は、グラフィックス処理プロセッサ（Graphics Processing Unit:GPU）を応用し、深層学習を

高速に行える GPU を開発している[12]。Google は Tensor Processing Unit と呼ばれる深層学習に適したプロセッサを開発し、GPU と比べて 10 倍の速さで学習が行えると発表した[13]。これらの新しいハードウエアでは、従来のように浮動小数点計算を倍精度で行わず、単精度や半精度で行うことによって高速な学習を実現している。

このように、近年は、深層学習の性能をさらに向上させるべく、データ量は巨大化し、モデルも複雑化・深層化されているため、学習時間は増加の一途をたどっている。そのため、深層学習の計算効率を改善するためのアルゴリズムやハードウエアの研究が最も重要な研究テーマの一つとして、学術界・産業界において盛んに行われている。

［機械学習・深層学習の産業界への普及］

深層学習を含む機械学習の最先端の研究開発が進められている一方で、その基本的なアルゴリズムは、オープンソースソフトウエア（OSS）として提供され、また、さまざまな商用プラットフォームにも実装され、容易に使い始められる市場環境になっている。OSS として提供されている深層学習のフレームワークとしては、Torch（Facebook 等）、TensorFlow（Google）、Chainer（PFN）、MXNet（CMU、Amazon）等がよく知られている[14]。また、企業がデータや問題をネット上で公開して、世界中の多数の人々に解かせる場（Kaggle 等）も生まれ、さまざまなデータ分析問題で解法・精度が広く競われるようになってきた。

このように道具立てとしては、機械学習･深層学習のコモディティ―化が進んでいるが、その一方で、これらの道具を使いこなせる人材（いわゆるデータサイエンティスト）は依然として不足している。深層学習はその構造設計やパラメーター設定等にノウハウや試行錯誤が必要な状況であり、道具があっても使いこなすのは必ずしも容易ではない。データと目的を与えれば結果が自動で出てくるような、簡単に使える道具・フレームワークがあれば、データサイエンティスト不足を補えて、産業応用の拡大を加速できる。目的や手法に限定はあるものの、このような設計自動化の試みは出始めている[15),16]。

また、深層学習は大量データと大規模計算パワーを要求するため、具体的な問題への適用・応用まで含めた技術発展をリードしているのは、Google、Facebook 等のネット系巨大 IT 企業である。それ以外のプレーヤーは、特に北米では、主に理論的研究に取り組む大学と、上述のコモディティ―化した道具立てを活用した応用・事業で市場に参入するスタートアップ企業という構図になりつつある。ただし、前述の非営利団体 OpenAI は、出資者メンバー連携による技術の開発とオープン化を進めており、一部の巨大 IT 企業による AI 技術の寡占化の構図に対抗する動きと見ることもできる。

［意思決定問題への取り組み］

機械学習に関わり、重要性が増しているのは、AI による意思決定問題への取り組みである。機械学習はさまざまなリアル問題に適用されるようになったが、機械学習による判別・分類や予測は、それだけでは必ずしも問題を解決するまでに至らないことも多い。例えば、スパムメールフィルターという応用シーンならば、メールをスパムか否かを判別すればそれで問題解決になるが､機器の劣化検知や資源の需要予測といった応用シーンでは、検知された劣化にどう対処するか、予測された需要に対して資源供給をどうコントロールするかというアクションまで決定（意思決定）しないと問題解決にならない。こうした機

械学習から意思決定まで通した解法として、以下のような取り組みが注目される。

まず、深層強化学習を用いるアプローチがある。強化学習（Reinforcement Learning）は、学習主体が、ある状態で、あるアクションを実行すると、ある報酬が得られるタイプの問題を扱う機械学習アルゴリズムである。より多くの報酬が得られるようにアクションを決定する意思決定方策を、アクション実行と報酬の受け取りを重ねながら学習していく。この強化学習では、ある状態で、あるアクションを実行することの良さを表す評価関数を求める必要があるが、この評価関数や方策を深層学習によって学習するのが深層強化学習である。Google DeepMind は深層強化学習を用いて、Atari ゲームのプレイ方法をほぼゼロから学習して人間よりも高いスコアを出したり、囲碁で世界トッププロに勝利したり（AlphaGo）と注目を浴びた[10]。また、PFN は CES2016 で「ぶつからない車」、CEATEC2016 でドローン制御等のデモンストレーションを展示し、ロボット等の制御への適用・実用化を進めている[17]。このアプローチは、大量の事例を容易に集められるタイプの問題、あるいは、AlphaGo がコンピューター同士の対戦を繰り返して学習したようにシミュレーションで大量事例を生成できるタイプの問題に適している。例えば、ゲーム、広告、検索、アルゴリズムトレード等があげられる。

また、上記とは異なるタイプの意思決定問題に対するアプローチとして、機械学習に基づく予測型意思決定最適化がある。深層強化学習が適するのは、大量の事例が集められる / 作れるタイプの問題、つまり、意思決定を繰り返し試すことが容易なタイプの問題である。一方、古典的なオペレーションズリサーチ（OR）で扱われているようなタイプの意思決定問題は、意思決定で失敗したときのダメージが大きく、意思決定を繰り返し試すことは難しい。例えば、小売業における商品価格設定の戦略策定や、上水道システムにおける配水制御計画等の数理最適化問題がこれに該当する。古典的な OR 問題では、データが静的であることを仮定してきたが、機械学習によって大量の予測（外れる可能性もある不確かな情報）を動的に生成することができるようになり、機械学習からの大量出力に基づく OR 問題と捉えることで新たな発展が生まれている。この具体的な取り組みとして、異種混合学習[18]による大量の予測器生成に基づく予測型意思決定最適化[19]という、機械学習 -OR パイプラインのフレームワークがあげられる。

もう一つは自然言語処理・知識ベースと機械学習の融合によるアプローチである。IBM Watson 質問応答システム[20]がその代表である。他にも、Google のメール返信文の自動生成機能「スマートリプライ」[21]でも、リカレントニューラルネットワークによる機械学習が自然言語処理と組み合わせて使われている。

（4）科学技術的課題

深層学習はすでに音声や画像の認識の分野で従来法を寄せ付けない圧倒的な性能を達成しているが、これらの成果は、さまざまなノウハウやヒューリスティックの積み上げ、および、大量のデータと計算リソースによって実現されている。学習の性能を保証する理論の構築、および、ビッグデータを効率よく処理するための超高速学習技術の開発が、深層学習の科学技術的な重要研究課題である。

カーネル法に代表される従来の凸最適化学習手法では、最適解の一意性が保証されるこ

とを用いて、さまざまな統計的理論解析が行われてきた[22]。一方、深層学習は非凸最適化学習手法であり[i]、そもそも得られた解が何らかの誤差を最小にしている保証すらない。そのため、既存の統計解析手法が適用できず、新しい数学的な道具立ての登場が望まれている。これに関しては、例えば、ニューラルネットワークの学習で見つかる解が条件さえそろえば最適解に近いと予想される等[23]、ここ数年で理論的解析が進みつつある。

深層学習を含むニューラルネットワーク系の機械学習は、学習した規則性（モデル）を人間が理解できる形で示すことができない（判別・分類や予測の結果について理由を説明できない）ブラックボックス型である。深層学習・機械学習が社会のさまざまなシーンに適用されていくなかで、ブラックボックス型であることの問題が多く指摘され、Transparency（透明性）や Accountability（説明責任）が AI 開発原則における重要な要件としてあげられるようになってきた[24),25]。例えば、産業応用において通常は、モデル作成者（データサイエンティスト）とモデル利用者（ビジネス部門）が異なり、モデル作成者は予測結果や根拠に対するユーザーからの質問に答えることを要求される。また、医療のように人命・健康に関わるシーンでは、機械学習で導かれた結果と医学的な所見との整合性を確認でき、正しい判断のもとで利用することが求められる。さらに、公的機関での利用においては、人種・性別等によって不平等が生じないモデルであることを担保しなくてはならない。

そこで、深層学習のブラックボックス性に解釈性を与えるため、モデルがどういう特徴に反応しているかを調べて、その結果から逆にモデルが何を見ているのかを推定するアプローチや、生成モデルと認識モデルを同時に作るアプローチ等が試みられている[26]。一方、決定木や線形回帰は解釈性を持つホワイトボックス型の機械学習方式だが、精度に限界があった。これに対して因子化漸近ベイズ推論（異種混合学習）[18] という新しい理論が提案され、ホワイトボックス型のアプローチでありながら、高い精度と解釈性を両立させ得ることが示された。機械学習が社会のさまざまなシーンに浸透していくなかで、ここで述べたような解釈性への取り組みはますます重要性を増している。

また、ハードウエアに関しては、脳型の計算機構を持つ新しいプロセッサの研究も行われている[27),28]。システムレベルとアルゴリズムレベルの研究を融合した高速化技術のさらなる発展が期待されている。

一方、応用分野によっては、ビッグデータを収集するために非常に多大なコストがかかってしまう、あるいは、原理的にビッグデータを収集できないこともある。このような場面では、限られた情報から機械学習を行う必要があり、汎化能力を持たせるための基礎研究の重要性が再認識されつつある。

こうした機械学習の基礎研究は、Neural Information Processing Systems Conference（NIPS）、International Conference on Machine Learning（ICML）等の国際会議で主に議論されている。これらの国際会議は規模が爆発的に大きくなっており、NIPS は、2013 年が 1200 人、2014 年が 2400 人、2015 年が 3800 人、2016 年は 5000 人規模の参加者があった。ICML も参加者数は、2013 年が 900 人、2014 年が 1200 人、2015 年が

i) 非凸最適化学習が可能になった主要因として、1) ReLU 関数等を活性化関数に使うことで深い層であっても勾配が発散・減衰することがなくなった、2) RMSProp、Adam 等の新しい学習則により学習が停滞するプラトーの問題を回避できるようになった、3) GPU 等の高速な演算装置の登場により現実的な時間で学習できるようになった等があげられる。

1600 人、2016 年が 3000 人と増加の一途をたどっており、第 3 次ニューラルネットワークブームの象徴となっている。

(5) 政策的課題

国内では、文部科学省による理化学研究所革新知能統合研究センター、経済産業省による産業技術総合研究所人工知能研究センター、総務省による情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターおよびデータ駆動知能システム研究センターが人工知能の研究開発を行っている。政府は、2016 年 4 月に人工知能技術戦略会議を設立し、その中に設置された研究連携会議が上記 3 省を通じた基盤技術の研究開発を、産業連携会議が産業界を通じた社会応用を議論するという枠組みが作られ、具体的な研究開発のロードマップ、および、重点応用分野の選定が急ピッチで行われている。しかし、3 省間のデマケーション等の制約があり、さらなる制度の柔軟化が求められる。

国際的には、Google、Facebook、Amazon、Microsoft 等の巨大 IT 企業が、機械学習を専門とする博士学生、ポスドク研究員、さらには、テニュアの大学教授までをも大量に囲い込もうと躍起になっており、人材獲得競争が熾烈になっている。近年は、金融系や自動車系の企業もこの競争に参入しており、人材不足が深刻な問題となりつつある。

機械学習は米国が強いが、中国やインドは、トップ人材を組織的に米国に送り、彼らが本国に戻って活躍するという流れを作っている。また、中国やインドはシリコンバレーの人材と技術を使いこなすために、拠点を構えている。

さらに、AI・機械学習はアルゴリズムを適切なソフトウエアとして実装してこそ威力を発揮する。日本は人材育成において、理論・アルゴリズムの基礎研究に加えて、ソフトウエア開発力においても強化施策が望まれる。

また、機械学習で扱うデータや学習結果（学習済みモデル）等に関わる知的財産権の扱いやプライバシー問題は、産業応用における重要課題であり、法制度やガイドラインの整備が早急に望まれる。詳しくは第 3.3.7 節「ビッグデータに関わる制度設計」で述べる。

(6) キーワード

機械学習、ニューラルネットワーク、深層学習、強化学習、異種混合学習、意思決定、ブラックボックス問題

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	電子情報通信学会 IBISML 研究会は 700 人を超え、人工知能学会は会員数 4000 人、全国大会参加者数 1500 人を超える等、AI・機械学習のコミュニティは育っている。しかし、国際トップ会議（ICML、NIPS、AAAI 等）に採択される数は限られている。理化学研究所革新知能統合研究センターが機械学習の基礎研究強化を打ち出し、JST CREST、ERATO も含めて上向き。

日本	応用研究・開発	○	↗	NEC、富士通、日立、パナソニック、NTT、Yahoo Japan!、楽天、リクルート等が AI 分野に積極的な技術開発投資を行っている。特に深層学習に関しては、PFN がロボット制御で Amazon Picking Challenge 2016 に初出場して 2 位（1 位と同スコア）、トヨタやファナック等の大手との提携による事業強化、ライフサイエンス分野への AI 適用等も進めている。
米国	基礎研究	◎	↗	大学、企業とも機械学習の研究を非常に盛んに行っており、規模、質ともに世界をリードしている。例えば、機械学習のトップレベル国際会議の一つ ICML では、2016 年の採択論文のうち半数近くが米国発の論文であった。
	応用研究・開発	◎	↗	既に巨大 IT 企業となった Google、Facebook、Microsoft 等が AI・機械学習に積極的投資をしていることに加えて、Airbnb、Uber 等 AI 技術を活用したベンチャー企業が次々と誕生し、国際的に成功を収めている。例えば、Google の収益のほとんどを占める自動広告配信（年間売り上げ 6 兆円）は機械学習技術によるものであり、戦略メッセージを Mobile First から AI First へと切り替えた。DeepMind をはじめ AI・深層学習のベンチャー買収も積極的に実行している。トヨタが AI 研究開発のために設立した TRI も 1000 億円規模の予算を投入すると発表された。
欧州	基礎研究	○	→	英国、ドイツ、フランス、スイス、イタリア、スペイン等の大学や研究機関にて機械学習の基礎研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	○	↗	ロンドンの Google DeepMind、ベルリンの Amazon Machine Learning 等、北米の企業の欧州支社が中心となり、応用研究開発を行っている。特に DeepMind が基礎・応用の両面で存在感を増している。ICML や NIPS 等での採択率もトップクラスである。
中国	基礎研究	○	↗	機械学習の主要な国際会議である ICML を 2014 年に北京でホストする等、当該分野の研究者人口が爆発的に増加している。北米とのコラボレーションも活発である。清華大学・MSRA（Microsoft Research Asia）等を中心に、機械学習の国際会議での中国からの採択数が伸びている（国別で米国に次ぐ）。
	応用研究・開発	○	↗	Baidu、Huawei Noah’s Ark Lab、MSRA、Horizon Robotics 等、企業による応用研究開発が活発に進められている。
韓国	基礎研究	△	→	ソウル大学、KAIST、POSTECH 等の主要大学にて関連の研究は行われているが、国際的に顕著なものは多くない。
	応用研究・開発	△	↗	韓国の大企業が共同で出資して設立した民間の研究所である知能情報技術研究院（AIRI）が 2016 年 10 月に始まり、応用研究のトレンドは上昇しつつある。また、Samsung 等も応用研究開発に力を入れている。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) Rosenblatt, F. “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”. Psychological Review 65 (6): 386-408, 1958.
2) Minsky, M. & Papert, S. Perceptron, Cambridge, MA: MIT Press. 1969.
3) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. “Learning representations by back-propagating errors”. Nature 323 (6088): 533–536, 1986.
4) Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. “A training algorithm for optimal margin classifiers”. In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory, 144-152, 1992.

5）Hinton, G. E. and Salakhutdinov, R. R. “Reducing the dimensionality of data with neural networks”. Science, 313（5786), 504-507, 2006.
6）LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., & Jackel, L. D. “Backpropagation applied to handwritten zip code recognition”. Neural Computation, 1（4):541-551, 1989.
7）Fukushima, K. “Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position”. Biological Cybernetics 36（4): 193–202, 1980.
8）ImageNet, http://image-net.org/
9）RBB Today, 2012 年 6 月 27 日号 ,
http://www.rbbtoday.com/article/2012/06/27/90985.html
10）Wikipedia AlphaGo 対李世ドル ,
https://ja.wikipedia.org/wiki/AlphaGo%E5%AF%BE%E6%9D%8E%E4%B8%96%E3%83%89%E3%83%AB
11）特集「国内人工知能研究拠点紹介」, 人工知能学会誌 , 31（3)～（5), 2016.
12）NVIDIA,
https://images.nvidia.com/content/APAC/events/deep-learning-day-2016-jp/NVIDIA-DeepLearning-Intro.pdf
13）日経コンピュータ ,
http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/ncd/14/457163/052001464/
14）Wikipedia, Comparison of deep learning software,
https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_deep_learning_software
15）三菱電機 , ディープラーニングの自動設計アルゴリズム , 2016.10.7
http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2016/1007.html?cid=rss
16）NEC, 予測分析自動化技術 , 2016.12.15.
http://jpn.nec.com/press/201612/20161215_06.html
17）Preferred Networks,
https://www.preferred-networks.jp/ja/news/ceatec2016
18）Fujimaki, R. and Morinaga, S.: Factorized Asymptotic Bayesian Inference for Mixture Modeling, Proceedings of AISTATS, 2012.
19）藤巻遼平、村岡優輔 , 伊藤伸志 , 矢部顕大 , 予測から意思決定へ ～予測型意思決定最適化～ ,NEC 技報 69（1),2016.
http://jpn.nec.com/techrep/journal/g16/n01/pdf/160115.pdf
20）IBM Corp., “This is Watson”, Special Issue of IBM Journal of Research and Development, Issue 3-4, May-June 2012.
21）Google Research Blog, 2015.11.3
https://research.googleblog.com/2015/11/computer-respond-to-this-email.html
22）Vapnik, V. N., Statistical Learning Theory, Wiley, 1998.
23）Kawaguchi, K.: Deep Learning without Poor Local Minima, Proceedings of NIPS, 2016.

24）Fairness, Accountability, and Transparency in Machine Learning,
http://www.fatml.org/
25）ITpro, ニュース解説（2017.1.16), 総務省が AI 開発ガイドライン作成へ ,
http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/column/14/346926/011200764/
26）Park, D.H., Hendricks, L.A., Akata, Z., Schiele, B., Darrell, T., Rohrbach, M.:
Attentive Explanations: Justifying Decisions and Pointing to the Evidence,
https://arxiv.org/abs/1612.04757
27）http://www.ibm.com/smarterplanet/jp/ja/brainpower/
28）http://news.mynavi.jp/news/2016/09/05/204/

3.3.3　画像・映像解析技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

カメラ等で撮影された画像や映像をコンピューターで解析して、その画像･映像の内容、つまり、そこに写っているもの（人や物体、文字等）の位置・カテゴリあるいは風景・場所・状況等を認識する技術である。産業の効率化、社会の安全安心、生活の快適性に役立つものであり、具体的な応用先としては、例えば、文字認識、医療画像による診断支援、監視カメラからの不審者・不審行動や異常状況の検知、インターネット上の画像検索・動画像検索、製品の検査、顔や指紋からの個人認証、スポーツ画像解析、ロボットビジョンや自動車の自動運転、動作認識によるヒューマンインターフェースデバイス等があげられる。

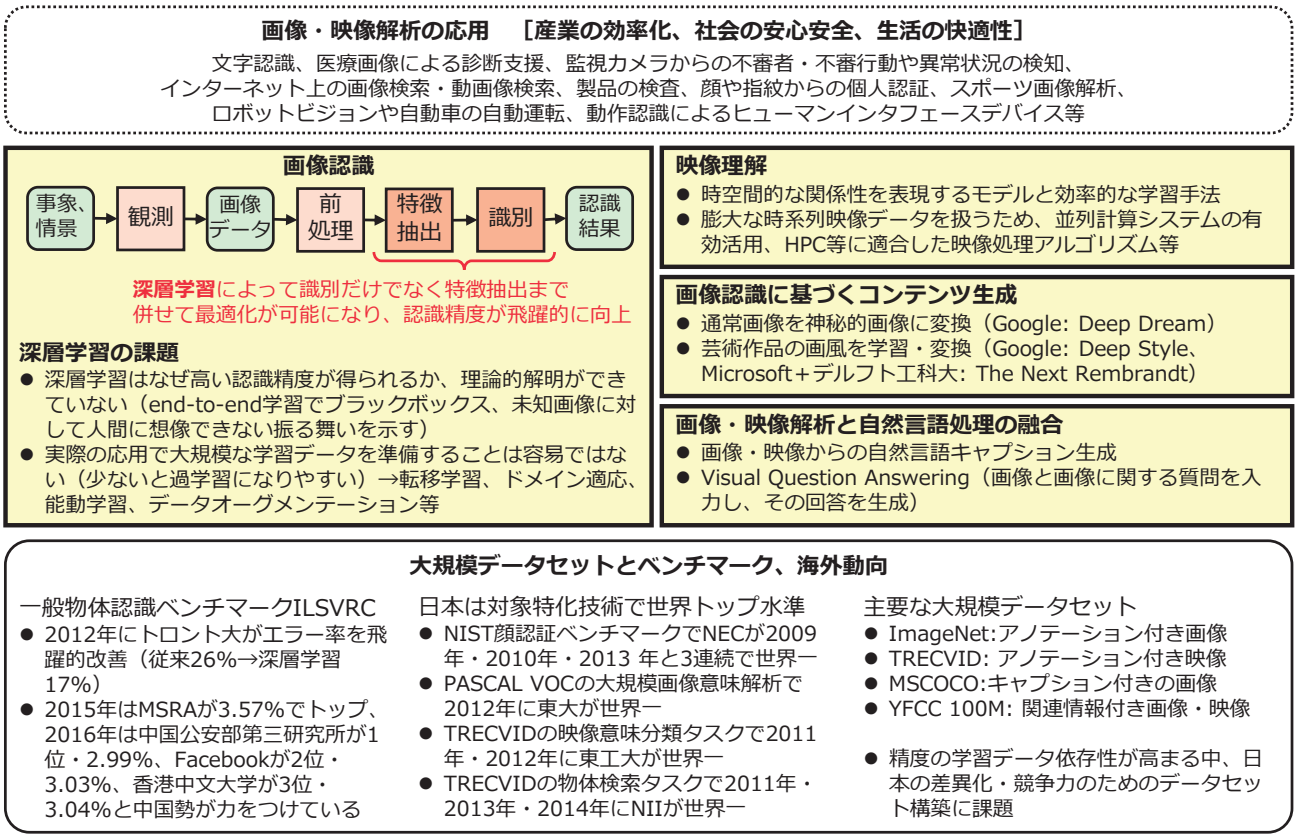

図 3-3-4　領域俯瞰 : 画像・映像解析技術

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［画像・映像のパターン認識］

画像・映像解析はパターン認識を画像・映像に適用するのが基本的な実現形になる。そのパターン認識処理は、観測、前処理、特徴抽出、識別から構成される。

観測は、実世界の事象を処理可能なデータに変換する処理である。画像・映像のデジタルデータは可視光カメラから得るのが一般的であるが、カメラから被写体までの距離情報を表す深度画像（デプス画像）､赤外線カメラ画像､マルチスペクトル画像等も用いられる。実世界は 3 次元立体であるが、カメラで撮影されるデータは 2 次元平面のため、被写体の姿勢変動や照明変動の影響で、被写体の見えが大きく変化する。また、隠れ（オクルー

ジョン）によって情報の欠落も生じる。これらの変動を受けにくいセンシングをどう設計するかが、観測の課題である。文字認識やウェハ欠陥検査等は、被写体自身が 2 次元平面のため、姿勢変動や照明変動の影響を受けにくく、産業を効率化する技術として早期に実用化されている。一方、情景中の 3 次元オブジェクトは、姿勢や照明の変動を受けやすいため課題も多い。そのため、エラー発生にシビアな車の自動運転では、前方障害物のセンシングにレーザーレンジセンサー等の測域センサーも用いられている。

前処理は、以降の処理にかかる演算量を軽減するための処理であり、具体的にはデータの正規化やノイズの除去が行われる。画像からの対象領域の切り出しや白色化と呼ばれる信号の大きさの正規化、対象の姿勢の正規化、不明瞭な領域の S/N 比（信号雑音比）を改善する鮮鋭化やデヘイズ処理､あるいは画像の解像度を上げる超解像処理等も含まれる。これら画質を改善する処理は、視認性を高めることを目的に利用されることもある。

特徴抽出は、前処理後の画像・映像から識別に有効な特徴を抽出する処理である。主に局所フィルターを用いて、エッジやコーナー等の画像特徴が抽出されることが多い。処理の高速化、あるいは次元の呪いと呼ばれる認識精度の低下を抑えるために、得られた多数の特徴を少数個に低次元化する処理も含まれる。具体的には、識別に有効な特徴の組み合わせを選ぶ特徴選択や、識別に有効な特徴に作り直す線形あるいは非線形な特徴変換が行われる。

識別は、特徴抽出で得られた特徴をもとに、あらかじめ設定したクラス（あるいはカテゴリと呼ぶ）に分類する処理である。特徴抽出で得られた多数の特徴値を多次元特徴ベクトルとみなし、クラスごとにあらかじめ設定した代表ベクトルとの内積や距離に基づいて識別する方法や、特徴抽出で得られた特徴点の集合と、クラスごとにあらかじめ設定した特徴点の集合のマッチングに基づいて識別する方法等がある。クラスは目的に応じて人間が設定するものであり、例えば人物と車両を識別する場合は、それぞれが一つのクラスとして設定される。一方、顔認証では、人物一人一人を識別する必要があるため、それぞれが一つのクラスとして設定される。

［深層学習を中心とした最近の動向］

パターン認識で高い精度を実現するには、観測から識別までの全体処理を最適設計することが重要である。観測と前処理は、専門家がこれまでの経験に基づき、目的に応じて設計している。識別は、計算機処理の発展とともに機械学習の技術開発が進み、テンプレートマッチングと呼ばれる単純な手法から機械学習で自動設計する手法に既に移行した。一方、特徴抽出は、従来専門家が経験に基づき設計するのが一般的であったが、2010 年頃からの深層学習 [1] の進展に伴い、特徴抽出と識別を合わせて機械学習で自動設計できるようになってきた。

深層学習（Deep Learning）とは、深い層構造からなるニューラルネットモデル Deep Neural Network（DNN）の学習方法である。2010 年頃までは AutoEncoder や Restricted Boltzmann Machine といった教師なし学習に基づく手法が研究されていたが、現在では後述する CNN をベースとした教師あり学習に基づく手法が主流となっている。深層学習が登場した背景として、1）インターネットや SNS の普及によってインターネット上に大量の画像がアップロードされ、かつクローリング等で容易にダウンロードできる

ようになったこと、2）クラウドソーシングによって安価に画像の正解付けができるようになったこと、3）GPGPU を含む計算機性能の向上により、ネットワーク構造の決定に必要な多くの試行錯誤が可能になったこと、があげられる。

現在主流となっているモデルは、福島邦彦が 1979 年に発表したネオコグニトロン[2]がもとになっている。畳み込み層（S 層）とプーリング層（C 層）の組を複数積み重ねることで、パターンの局所変動に頑健になることが示されていた。それを誤差逆伝播学習法で最適化できるようにしたのが、1989 年に Yann LeCun が発表した畳み込みニューラルネットワーク Convolutional Neural Network（CNN）である。MNIST 等の手書き数字データベースで有効性が示されていたが、ネットワーク構造が深くなるほど伝播される誤差が小さくなり、学習が進まなくなる問題が指摘されていた。トロント大の Geoffrey Hinton 教授らは、誤差が深い層まで伝播するように活性化関数や正則化を工夫することでこの問題を解決し[3]、CNN をさらに深くしたニューラルネット構造を用いて、2012 年に一般物体認識のベンチマークテスト Large Scale Visual Recognition Challenge（ILSVRC）[4]でトップを獲得した。Hinton 教授らは、従来手法がエラー率 26% だったのに対してエラー率 17% と、深層学習の適用によって一気に約 10% もの飛躍的な精度向上を達成したことが、画像認識・機械学習の研究者らに衝撃を与えた。ILSVRC を舞台として現在も深層学習の改良が続いているが[5)-7)]、試行錯誤的な改良に終始しており、なぜ深層学習で高い認識精度が得られるかは、理論的にはまだ解明されていない。

深層学習の技術開発を先導しているのは、Google、Microsoft、Facebook 等の米国の巨大 IT 企業であり、膨大な画像と潤沢な計算リソースを保有していることが、その背景にある。また、深層学習がブームになった後、トロント大の Hinton 教授は 2013 年から Google 兼務、ニューヨーク大の LeCun 教授は 2013 年から Facebook 兼務になる等、人材の囲い込みが今も進んでいる。米国のコンピュータービジョンとパターン認識に関する著名な会議 CVPR で 2016 年のベストペーパーに選ばれた Deep Residual Network[5]を提案した Kaiming He は、2015 年の ILSVRC でトップを獲得した時は MSRA（Microsoft Research Asia）に所属していたが、直後に Facebook に移ったことが話題になった。

中国の Baidu（百度）は、2013 年にシリコンバレーに Institute of Deep Learning を設立し、Google の AI プロジェクトの元責任者である Andrew Ng をトップに迎える等、深層学習に力を入れている。深層学習を使った自動運転技術の開発では NVIDIA とも提携し、2018 年末までに自動運転タクシーを実用化するという[8]。既に米カリフォルニア州の認可を受け、同州で走行テストを始めている。その背景には、中国の AI 技術に対する国策がある。中国政府は、2018 年までに同国の AI 技術者を世界と同水準にし、中堅企業を育成して、2025 年までに AI 産業で世界をリードするという目標を掲げている。

日本では、産業の効率化として古くから文字認識の研究が進められ、郵便番号読み取り区分機を世界で初めて実用化したのを始め、マンモグラフィ等の医用画像スクリーニング、半導体製造の際のウェハやフォトマスクの欠陥検査等が実用化されている。バイオメトリクス認証としては、虹彩認証、指紋認証、静脈認証、顔認証が実用化されている。静脈認証は世界で初めて日本国内の銀行で採用され、顔認証は 2001 年に発生した米国同時多発テロ以降のボーダーコントロール強化策として、世界各国に導入され始めている。日本の画像認識技術が世界トップ水準にあることは、国際的ベンチマークテストの成績でも示さ

れている。NIST の顔認証ベンチマークテストでは、NEC が 2009 年・2010 年・2013 年と 3 連続で世界第 1 位を獲得している [9]。ImageNet[10] データを用いた PASCAL VOC[11] における大規模画像意味解析コンペティションで東京大学（原田達也教授）のチームが 2012 年に世界第 1 位の認識精度を達成、TRECVID[12] の映像意味分類タスク（SIN）で東京工業大学（篠田浩一教授）のチームが 2011 年・2012 年に世界第 1 位の認識精度を達成、TRECVID の物体検索タスク（INS）で国立情報学研究所（佐藤真一教授）のチームが 2011 年・2013 年・2014 年に世界第 1 位の検索精度を達成している。

(3) 注目動向

［ILSVRC、一般物体認識］

深層学習の一般物体認識ベンチマークとしてよく知られる ILSVRC の 2016 年の結果が公開され [4]、上位 5 位までに正解が含まれないエラー率は、中国公安部第 3 研究所が 2.99% で 1 位となった。2 位の Facebook が 3.03%、3 位の香港中文大学が 3.04% で、2015 年のトップが MSRA の 3.57% だったことを考えると、本テストに対する精度は、ほぼ飽和状態とみられる。2015 年は、MSRA が Deep Residual Network と呼ぶ画期的なアイデアを提案してトップを獲得したが、今回は技術的には既存モデルの統合であり、面白みはないものの、中国は着実に力をつけてきていることが注目される。中国の Baidu も有力とみられていたが、ルール違反を犯したため、今回は参加が禁じられている [13]。

［画像・映像解析と自然言語処理の融合］

注目分野として、画像や映像と自然言語処理の融合がある。画像や映像に対して、その内容を自然言語で記述したキャプション（例えば「赤い服を着た女性が街中で電話をしている」等）を生成するタスクがその一例である [14]。このタスクを実施するためには、静止画像における ImageNet のような高品位のデータセットが必要となるが、画像キャプション生成では MSCOCO[15] がよく利用される。また、画像と自然言語処理を融合した新しい問題設定として Visual Question Answering（VQA）[16] がある。これは、計算機に画像と画像に関する質問を入力し、この質問に回答する知的システムを開発する課題である。

［画像認識に基づくコンテンツ生成］

画像認識によってセマンティクスに近い圧縮された情報が得られるが、それにグラフィックス系を融合し、実世界情報を生成するコンテンツ生成技術が進展している。2015 年に Google が Deep Dream[17] と呼ばれるシステムを開発し、大きな話題となった。Deep Dream は、通常の画像を夢に出てくるような見たこともない神秘的な画像に変換するシステムである。さらに Google は Deep Style と呼ばれる入力画像の画風を変換するシステムを開発し、人工知能が製作する芸術作品としてメディア等で取り上げられている。Microsoft とデルフト工科大学は Rembrandt（レンブラント）の画風を学習し、3D プリンターを利用して新作を描く The Next Rembrandt プロジェクト [18] を行っている。

（4）科学技術的課題

［深層学習の課題］

画像認識で高い精度を達成し、現在最強力な手法と考えられる深層学習だが、いくつかの課題が指摘されている。（参考：深層学習とその課題については第 3.3.2 節「機械学習技術」でも論じている）

まず、深層学習は、100 層以上にも及ぶ多層のニューラルネットを用い、パラメータ数が多いことから過学習になりやすい問題を内在している。過学習を軽減し、高い認識精度を得るには、大規模な学習データが必要である。しかしながら、実際の応用で大規模な学習データを準備することは容易ではない。学習データを十分に集められないケースには、1）データは大量にあるが、正解ラベルがないため学習に使えない、2）正解ラベルが付いた類似のデータは大量にあるが、認識したいタスクとは異なるため使えない、3）正常データは大量にあるが、異常データは極めて少ない、4）そもそもデータ自体が少ない、等がある。

1）に対しては、いかに低コストで正解ラベルを付与するかが課題であり、クラウドソーシングを利用して人件費を削減するやり方の他、精度改善に有効な一部のデータだけに効率良く正解ラベルを付与する能動学習や、一部のラベルありデータを手掛かりにラベルなしデータも学習させる、半教師あり学習が求められる。2）に対しては、大量の類似データで学習した DNN を初期値として、別タスクでファインチューニングする転移学習、類似データの分布を別タスクのデータ分布に合わせることで類似データを学習に流用するドメイン適応等が求められる。3）に対しては、二つのクラスのサンプル数のインバランスを考慮した学習や、異常データを正常データの外れ値とみなして検出する手法が求められる。4）に対しては、物理シミュレーション等でデータを生成する方法や、パターン変動に関する先見知識を反映してデータを生成する、データオーグメンテーションと呼ばれる方法等が求められる。

また、深層学習はなぜ高い認識精度が得られるか、理論的解明ができていない。深層学習は大量の学習データに基づく end-to-end 学習、つまり、入力と望ましい出力の対からそれらの間の関係性だけを学習する方法で、それを実現するメカニズムはブラックボックスである。画像の意味分類が end-to-end でできるようになったが、これは画像の意味を認識したことになるのかという疑問が生じ、その解明も兼ねて、画像からのキャプション生成や質問応答の研究が進んだ。しかし、これらにおいても end-to-end の方式が高い精度を示し、結局、ブラックボックスであることは変わっていない。さらに、これと表裏一体の問題として、学習時とは異なる未知画像に対して、人間には想像できない振る舞いを示すという問題も明らかになっている。砂の嵐のような奇妙な画像なのにペンギン等と認識されてしまう画像、どう見てもパンダなのにテナガザルと断言されてしまう画像等が生成可能であることが指摘されている [19),20)]。

［映像理解の課題］

静止画像認識はここ数年で大きな飛躍が見られたが、映像については現在まだその途上にある。実映像に対して時空間的な関係性を適切に表現するモデル構築、効率的な学習手法、これらを支える理論基盤の多くに課題が残されている。また、時系列の映像データは

量が膨大となるため、ストレージや計算パワーが大量に必要であり、並列計算システムの有効活用や、HPC（High-Performance Computing）等に適合した映像処理アルゴリズムの構築も重要な課題となる。

映像の内容理解・検索の技術発展には NIST の TRECVID[12] が大きく貢献してきた。また、ImageNet のような大規模で高品位なデータセットは映像理解においても重要であることから、さまざまな動画データセットの開発が進められている。例えば、4800 クラス 800 万本 50 万時間の動画からなる YouTube-8M[21] があげられる。この規模のデータセットになると大学レベルでの実現は困難であり、企業・政府等の力が必要となる。

(5) 政策的課題

［大規模データセット構築とベンチマークテスト］

この研究分野では、大規模な共通データセットを構築し、同じ土俵で適正に競争することが技術発展に大きく貢献してきた。一般物体認識ベンチマークテスト ILSVRC では、上位 5 位までに正解が含まれないエラー率が、2011 年に 25.77% だったのが 2016 年には 2.99% に改善された。NIST の顔認証ベンチマークテストでは、他人受理率を 0.1% とした時の本人棄却率が、1993 年に 79% だったのが 2002 年に 20%、2010 年には 0.3% にまで改善された。なお、ILSVRC では 1000 クラスに対して 120 万枚を学習し、10 万枚で評価される。NIST の顔認証ベンチマークテストでは、160 万枚に及ぶ顔画像で評価されている。企業においては、大規模データセットは技術競争力の源泉として内部に蓄積してきたが、最近、Yahoo! Research の研究者らが、画像・映像合計 1 億にも及ぶデータセット YFCC 100M[22] をさまざまな関連情報付きで公開した。オープンイノベーションの流れと推測される。

日本国内でも、かつては電子技術総合研究所（現、産業技術総合研究所）が ETL9 と呼ばれる JIS 第 1 水準手書き漢字データセットを公開し[23]、特に大学を中心に国内の手書き漢字認識に関する技術開発が大いに進展した経緯がある。しかし、クラス当たり 200 枚の画像であり、今となっては極めて小規模なものである。NIST の顔認証ベンチマークテストで日本企業が上位成績を収めている背景には、企業各社が独自に構築した顔画像データセットがある。ILSVRC で米国ネット企業が好成績を収めているのも、大量画像データ収集において優位な立場にいることが要因であろう。したがって、この分野で日本の技術力を高めるためには、日本独自の大規模データセットを国が主導して構築し、大学・国研、企業も含めて適正な技術競争ができる土壌を造ることが最も有効である。特に、インターネット上では容易に得られない実世界の画像・映像データにフォーカスし、例えば RGB-D のような深度情報も含めたデータセット構築が、今後の技術競争力を高める上で重要であろう。また、公共の場でのデータ収集や社会実証行う際の規制緩和も、検討すべき政策の一つである。

［長期視点での研究育成、人材施策］

昨今の画像・映像解析は深層学習一色だが、かつてのニューラルネットワークブームのあと 2012 年頃まで世界の第一線で活躍する画像認識研究者において深層学習の専門家は

ごく少数派だった。深層学習の成功は少数の研究者の長期間にわたる地道な努力が実を結んだものであって、流行に便乗することで成功したわけでは決してない。今後また全く新しい計算機アーキテクチャの出現により、深層学習とは異なる新規手法が生み出され、時代遅れとみなされた手法が再度注目される可能性も十分あり得る。そのために、すぐに役立つ技術だけではなく、10 年後、20 年後に役立つ可能性のある研究を支えていく制度が重要である。

一方で、深層学習を用いた実世界の画像・映像解析は、実社会のさまざまな課題解決に結びつき得る。複雑な実社会の課題分析から技術的・理論的にチャレンジングな研究ターゲットが見いだされ得る。このような課題解決では、画像・映像解析技術だけでなく、社会課題の分析や、音声・自然言語処理やロボティクスとの融合といったより広く複合的なアプローチのできる人材育成が求められる。このような境界領域研究の奨励や博士課程学生への支援制度、その後のキャリアパスの確保等も課題である。さらに、この分野ではグローバルな人材獲得競争が激化しているが、グローバル競争力の面で日本の給与体系は弱く、海外からの優秀な研究者・技術者の招聘による底上げが難しく、日本からの人材流出も懸念される。

(6) キーワード

深層学習、画像認識、映像理解、マルチメディア、大規模データ、メディア処理、パターン認識、検索、識別、認証、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	○	↗	NEC、オムロン、富士通等の企業で取り組まれているバイオメトリクス認証（顔・静脈等）を中心には世界的に競争力がある。大学や国研では一般画像の認識等の研究が進められている。ILSVRC、TRECVID では東大、東工大、国立情報学研究所等による世界的にも競争力のある技術が開発されている。産総研、理研や多くの大学で AI 研究センターが立ち上がり、基礎研究を支援する体制が整いつつあるが、現状、国際会議での存在感は中国ほど大きくない。
	応用研究・開発	○	→	顔認証では NEC が NIST ベンチマークで 3 回続けてトップを獲得し、世界的にも大きな存在感を示している。オムロンの OKAO Vision[24] は世界で 5 億ライセンスを出荷、世界トップレベルのシェアを持つ。静脈認証も日立や富士通が銀行向けに実用化し、国内大手電機メーカーの技術力は世界的に見ても高いものがある。
米国	基礎研究	◎	→	Stanford、UC Berkley、CMU 等の大学で基礎研究が盛んに行われている。大学のみならず巨大 IT 企業 Google、Facebook、Microsoft 等の研究所でも世界中の有能な研究者を集め、基礎研究を推進、この分野を主導。また、基礎研究に必要なデータセットの多くが米国の大学・巨大 IT 企業によって公開されている。研究すべきタスクの設定や研究コミュニティーへの情報発信等でも中心的な役割を果たしている。例えば Stanford 大が一般物体認識向け大規模データベース ImageNet 構築し、深層学習のベンチマークテスト ILSVRC を主導。NIST が顔認証・指紋認証を初めとしてデータセット構築とベンチマークテストを継続的に実施。

米国	応用研究・開発	◎	↗	Google、Microsoft、Facebook 等の巨大 IT 企業では有能な技術者を全世界から集め、応用研究や開発が盛んに行われ、大学との連携も盛んに行われている。大学でも起業を目指した応用研究や開発も数多く実施されている。深層学習を利用した画像・映像処理のためのツール群を無償で公開し、画像・映像処理用のサービスをクラウド上で実施する等、他企業の応用研究のサポートも実施している。
欧州	基礎研究	◎	↗	Oxford 大、ETH、Amsterdam 大、INRIA、Max Planck 等に優秀な研究者が多数在籍、基礎研究力が高い。Google DeepMind、Facebook AI Research、Qualcomm 等の企業の研究部門での基礎研究もインパクトのある成果をあげている。PASCAL VOC プロジェクト（2005 ～ 2012 年）が画像認識研究の底上げに大きく貢献した。ImageCLEF、MediaEval でデータセットを公開、行うべきタスク設定を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	FP7 に続く Horizon 2020 が 2014 年に開始され産官学連携のプロジェクトや応用研究・開発が推進されている。上述の企業の研究部門は、応用研究でもインパクトある成果をあげている。DeepMind は、2014 年に Google に買収された。
中国	基礎研究	○	↗	MSRA が ILSVRC 2015 の多部門でトップ成績を出し、注目を浴びた。北京大・清華大・香港中文大等はトップ会議におけるプレゼンスを高めている。欧米の有力研究者と連携で基礎研究の底上げを行っている例が多く見られる。欧米留学が多いことも研究レベルの底上げに寄与。
	応用研究・開発	○	↗	MSRA、Baidu、アリババグループ等が応用研究・開発向けのソフトウエア公開・サービス提供を始めている（Baidu の PaddlePaddle を提供、アリババグループでは画像・映像処理も行える AI システム ET をクラウド上で実施）。
韓国	基礎研究	○	→	トップ会議において KAIST・ソウル大学校等のプレゼンスがある。画像・映像圧縮、コンピュータービジョン分野では顕著な成果がある。
	応用研究・開発	△	↗	サムスン等での応用研究はあるが、日本企業ほどのプレゼンス・影響力はない。韓国政府が人工知能を国家戦略プロジェクトにすえて、2026 年までに AI 専門企業を 1000 社、専門人材を 3600 人育成する計画がある。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) 麻生英樹 , 安田宗樹 , 前田新一 , 岡野原大輔 , 岡谷貴之 , 久保陽太郎 , ボレガラ・ダヌシカ（人工知能学会監修 , 神嶌敏弘編),「深層学習―Deep Learning―」, 近代科学社 ,2015.
2) 福島邦彦 , 位置ずれに影響されないパターン認識機構の神経回路モデル―ネオコグニトロン―, 電子通信学会誌 J62-A（10),pp. 658-665,1979.
3) A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, NIPS, 2012.
4) ILSVRC, http://www.image-net.org/challenges/LSVRC/
5) K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, CVPR, 2016.
6) Yaniv Taigman, Ming Yang, Marc'Aurelio Ranzato, and Lior Wolf, DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification, CVPR, 2014.
7) Florian Schroff, Dmitry Kalenichenko, and James Philbin, FaceNet: A Unified

Embedding for Face Recognition and Clustering, CVPR, 2015.
8）https://blogs.nvidia.com/blog/2016/08/31/baidu-nvidia-worlds-first-map-to-car-platform-self-driving-cars/
9）http://jpn.nec.com/rd/research/DataAcquition/business.html
10）ImageNet, http://image-net.org/
11）PASCAL VOC　http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/
12）TRECVID, http://trecvid.nist.gov/
13）http://ameblo.jp/karurosu2013/entry-12039873013.html
14）A. Karpathy and L. Fei-Fei, Deep Visual-Semantic Alignments for Generating Image Descriptions, CVPR, 2015.
15）MSCOCO, http://mscoco.org/
16）S. Antol, A. Agrawal, J. Lu, M. Mitchell, D. Batra, C. L. Zitnick, and D. Parikh, VQA: Visual Question Answering, ICCV, 2015.
17）Deep Dream, http://deepdreamgenerator.com/
18）The Next Rembrandt, https://www.nextrembrandt.com/
19）Nguyen, Yosinski, and Clune, Deep Neural Networks are Easily Fooled, CVPR, 2015.
20）Goodfellow, Shlens, and Szegedy, Explaining and Harnessing Adversarial Examples, ICLR, 2015.
21）YouTube-8M, https://research.google.com/youtube8m/
22）YFCC 100M, http://www.yfcc100m.org/
23）ETL 文字データベース ,http://etlcdb.db.aist.go.jp/?lang=ja
24）OKAO Vision, http://plus-sensing.omron.co.jp/technology/

3.3.4　自然言語処理技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

自然言語は人間が日常の意思疎通のために用いる自然発生的な記号体系である。自然言語処理技術は、コンピューターによって自然言語を処理する技術であり、その主な応用分野には、（A）自然言語で表現された大量テキスト情報の活用を促進・支援する情報検索・情報抽出・情報分類・質問応答や、（B）自然言語によるコミュニケーションを促進・支援する機械翻訳・対話システム等がある。

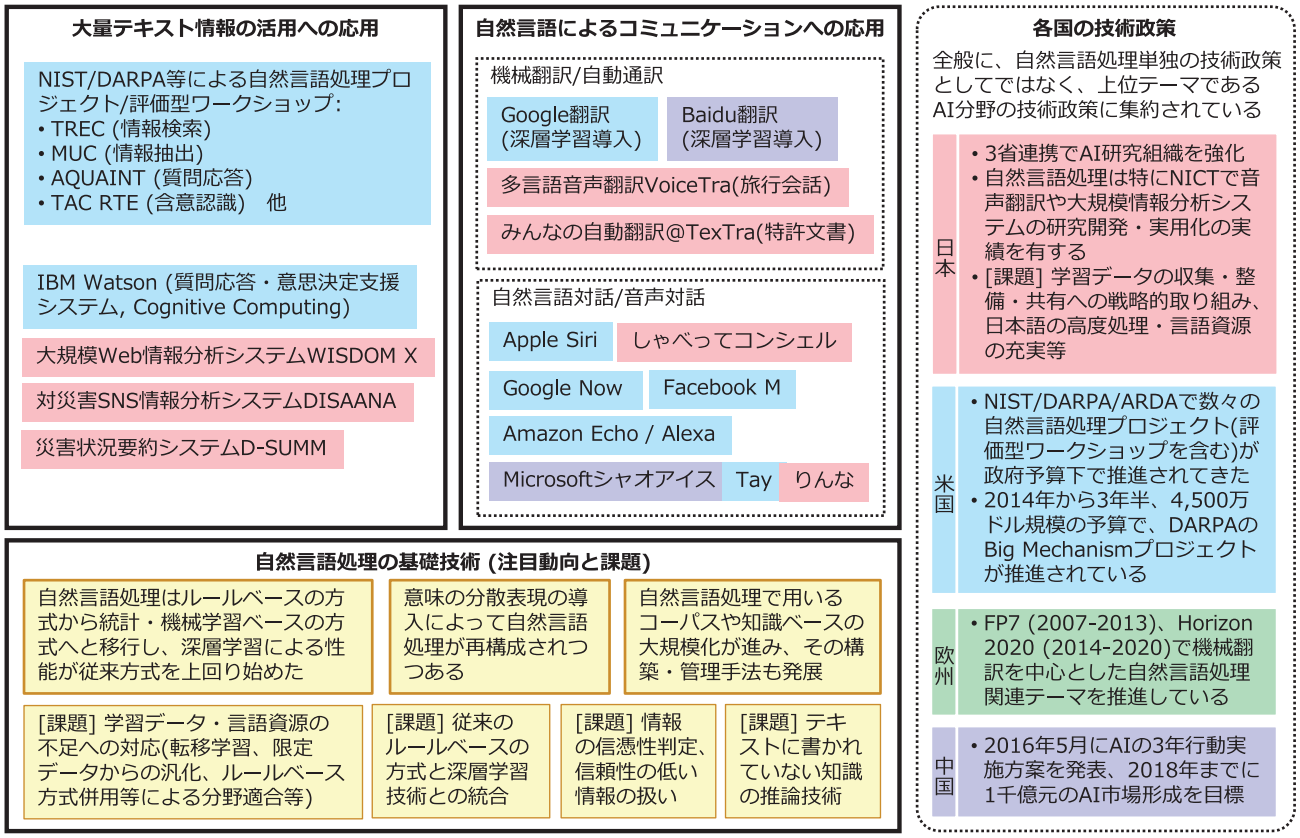

図 3-3-5　領域俯瞰：自然言語処理技術

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

自然言語処理技術において共通的に必要とされる基礎技術はコンピューターによる自然言語理解であり、形態素解析、構文解析、文脈・意味解析（語義の曖昧性解消や照応解析を含む）というステップで、より深い理解の実現が試みられてきた。そのアプローチは、黎明期の 1950 年代から 1990 年代頃まで、人間が記述した辞書･文法を用いるルールベース方式が主流だった。しかし、近年は大量のテキストデータ（テキストのビッグデータ）が利用可能になったことや、機械学習技術が大幅に進化したことから、統計的な方式、機械学習を活用した方式に主流が移っている。

［応用分野（A）大量テキスト情報の活用の促進・支援］

主な応用分野（A）（B）に目を向けると、まず、（A）自然言語で表現された大量テキスト情報の活用がさまざまなシーンに広がっている。

テキストのビッグデータは、上で述べたような自然言語処理技術を改良・精緻化するための訓練・学習データとして使われる側面もあるが、本来、人々の知識源として役立ち得るものである。しかし、いまやその量が人間の扱える規模を超えてしまっている。例えば、膨大な科学技術論文や Web 等に書かれた専門的知識のすべてをカバーすることは、専門家・研究者でももはや不可能に近い。また、災害時にバースト的に流通する多様な災害関連テキスト（SNS、ニュース、報告書等）を精査・統合して適切なアクションを決定することも、時間制約・人資源制約のある状況では極めて困難である。その結果、新たな科学的発見のチャンスの見落としや、不十分な状況判断によるアクションミス等が起きてしまう。キーワード検索による絞り込みは、テキストのビッグデータを前にして広く利用されている手段であるが、上記例のようなケースを解決することはできない。

この問題に対して、テキストに記載されている情報を構造化した形（例えば、いつ、どこで、誰が、何をしたか）で取り出す情報抽出技術や、テキスト間の同義性や含意関係（文 A から文 B が推論できるような関係）を認識する含意関係認識技術等、テキストの内容解釈に踏み込む研究が盛んになった。情報抽出技術については 1980 年代終わり頃、含意認識技術については 2000 年代半ば頃から評価型ワークショップも開催され [1)]、テキストの内容解釈に関わる基礎技術は着実に進展してきている。

近年は、大量テキスト情報を知識として活用する具体的応用システムが開発され、テキストの内容解釈に踏み込んだ技術の有効性・実用性が示されるようになった。IBM の Watson[2)] は、大量テキスト情報を知識源として自然言語で書かれた質問に回答する技術を中核とし、米国の人気クイズ番組「Jeopardy!」で人間のクイズ王に勝利するというグランドチャレンジを成功させ、大きく注目された。Google の Knowledge Vault[3)] は、大規模 Web 情報から事実を抽出して知識ベース化している。日本では、2016 年の熊本地震の際に政府でも活用された対災害 SNS 情報分析システム DISAANA、その拡張版である災害状況要約システム D-SUMM、大規模な Web 情報をもとに質問に回答する WISDOM X 等が、情報通信研究機構（NICT）から公開されている。

［応用分野（B）自然言語によるコミュニケーションの促進・支援］

自然言語によるコミュニケーションの分野では、機械翻訳（あるいは自動通訳）と自然言語対話（あるいは音声対話）が二大応用である。いずれも「夢の技術」として古くから技術的挑戦が続けられているが、最近は実際の場面で使われる技術になってきた。

機械翻訳の方式は、ルールベースの方式から、大規模な対訳コーパス（元言語のテキストとターゲット言語のテキストを対にしたもの）と機械学習技術を用いた統計的機械翻訳へシフトした。さらに、検索サービス大手の Google や Baidu は、対訳コーパスからの深層学習による end-to-end 翻訳のアプローチを、インターネット上で公開している翻訳サービスに導入し始めている [4),5)]。

また、分野を限って高品質な対訳コーパスを大量に収集し、そこから学習すると非常に高品質な翻訳システムを構築できることが知られている。日本では例えば、旅行会話にフォーカスしたスマートフォン版多言語音声翻訳アプリ VoiceTra が NICT で開発され、多数の民間企業、スポーツイベントでの案内や病院診察での外国人対応等に使われ始めている。2020 年の東京オリンピックに向けた総務省のグローバルコミュニケーション計画

では外国人観光客対応の活用も計画されている。NICT と特許庁が共同開発した特許文書翻訳システムは「みんなの自動翻訳 @TexTra」として公開され、特許庁では日常的に活用されている。

一方、自然言語対話のシステムは、長年にわたってプロトタイプの域を出ることはなかったが、2011 年に Apple の Siri、NTT ドコモの「しゃべってコンシェル」等が出現してから状況が変わった。これは音声認識技術の進歩だけでなく、スマートフォンの普及によるところが大きい。さらに、Amazon Echo は家庭向けの音声対話アシスタント内蔵スピーカーとも呼ばれるような形態で大きく注目され、今後、対話機能を備えた新しいタイプの製品が生まれていく可能性を示した。

技術的には、Siri の初期のモデルや「しゃべってコンシェル」等はプログラマーが記載したルールと従来型の機械学習の組み合わせであったが、近年は深層学習の活用が始まっている。Microsoft の「りんな」等には深層学習による発話選択が組み込まれている。また、そもそもユーザーへの発話をあらかじめ準備するのではなく、発話内容も深層学習・強化学習によって獲得する枠組みの研究も始まっている。しかし、発話内容のコントロールが難しく、場合によっては不適切な対話を行ってしまう問題があり [6)]、新たな枠組みが待たれる。また、応用分野（A）で扱われているような膨大な量の情報・知識を対話に取り込むことも、期待はされているが、いまだ研究は初歩の段階にある。

［海外動向］

技術政策面を概観すると、現在は自然言語処理単独の技術政策としてではなく、その上位テーマである人工知能（AI）分野の技術政策に集約されているといえる。米国の政策は自然言語処理分野でも際立っている。もともとアメリカ国立標準技術研究所（NIST）による情報検索・質問応答技術、国防高等研究計画局（DARPA）による情報抽出技術や文章理解、高等研究開発局（ARDA）による質問応答技術の研究開発等、多くのプロジェクト（評価型ワークショップを含む）[1)] が政府予算によって推進されてきた。2014 年からは DARPA の Big Mechanism プロジェクトが 4500 万ドル規模の予算、3 年半の予定で推進されており、技術論文から因果関係の情報を抽出し、そのモデル化を行う技術が研究されている。がんにかかわる因果関係モデルを論文から獲得するという研究であるが、このような長期的な研究テーマに先行投資する政策は高く評価できる。

欧州では EU の第 7 次フレームワークプログラム（FP7）が 2007 年から 2013 年まで実施され、言語解析ツールの相互運用や機械翻訳のプロジェクトが work programme として推進されていた。その後継となる Horizon 2020 プロジェクト（2014 ～ 2020）でも機械翻訳、対話、テキスト分析、文生成といったテーマが選ばれている。中国は 2016 年 5 月に AI に係る 3 年行動実施方案を発表し、2018 年までに AI 分野で 1000 億元レベルの市場形成を目標としている。自然言語処理はビッグデータ処理のための基盤技術として位置付けられている。

ビジネス面を見ると、自然言語処理は企業のサービス差異化のための中核技術として注目されるようになっており、2015 年はグローバルなベンチャー・キャピタル投資総額 550 億ドルの約 5％（27.5 億ドル）が AI 分野への投資であったと見積もられている。Google、Amazon、Microsoft、Facebook 等の巨大企業は各社が年間 10 億ドル以上の研

究開発投資を行っており、これらの各社が有するインターネット上のテキスト情報コンテンツをもとに新たなサービスを創出する意欲は非常に旺盛である。そのような中でも対話技術をサービス構築の基盤技術としてベンチャー企業や開発者のエコシステムを形成する動きが顕著である。IBM による Cognea 社の買収と、その後の Watson Developer Cloud 上での Dialog API の公開、Microsoft による Conversations as a Platform（CaaP）の構想と Cognitive Services の公開、ほかにも Amazon Alexa（Amazon Echo にも搭載）、Apple Siri、Google Now、Facebook M 等の対話アシスタントやチャットボットが今後の大きなアプリケーションあるいは多様なアプリケーションに共通する汎用ユーザーインターフェースとして急速に成長している。

(3) 注目動向

ビジネス・応用面や技術政策面の動向は（2）で言及しているので、ここでは、特に技術面から最近の注目動向を三つあげる。

［深層学習による性能向上］

既に書いた通り、自然言語処理は 1990 年代まではルールベースの方式が主流だったが、それ以降、機械学習技術の適用が進んでいる。適用される機械学習技術は、ナイーブベイズに始まり、2010 年頃には SVM（Support Vector Machine）が主流となったが、ここ数年は深層学習の適用が盛んである [7),8)]。ただし、画像認識・音声認識の分野では、深層学習の適用によって華々しい性能向上が見られたのに対して、自然言語処理の分野では簡単にそうはならなかった。

しかし、まさにこの 1 年くらいのタイミングで、自然言語処理の分野でも、深層学習を活用した方式が従来方式の性能を上回り始めた。形態素解析・品詞タギング、パージング、機械翻訳等のいずれにおいても、従来方式の性能を上回り始めた。ただし、画像認識・音声認識等の分野と比較すると、深層学習による性能向上のゲインはまだ小さい。また、その性能向上の要因は、何か技術的な飛躍があったというよりは、自然言語処理分野で深層学習の使いこなしが進んだという面が強い。

［意味の分散表現］

深層学習は end-to-end の結果を出すのが基本であり、自然言語処理において重要な問題と考えられてきた意味の計算モデルはブラックボックスになってしまう。この問題に対して、最近一躍注目されているのが、word2vec に代表される意味の分散表現 [9)-11)] である。分散表現は、文脈類似性に基づいて、単語の意味ベクトルを学習したものである。従来よく使われていた bag-of-words とは異なり、分散表現は固定長ベクトル（数百次元程度）の形をとり、ベクトル演算によって単語や文の意味の合成・分解が可能である。

この分散表現の導入によって自然言語処理が再構成されつつある。つまり、自然言語処理のプロセスを分解して、単語や意味の要素表現を分散表現に置き換える動きが進んでいる。分散表現は、ニューラルネットへの入力形式としても適しており、自然言語の解析・変換に用いる深層学習に組み込むのも容易である。シソーラスや辞書にも分散表現の学習

が取り入れられ、意味選択や QA の問題等も分散表現の演算として扱われるようになりつつある。

［大規模コーパス・大規模知識ベース］

ビッグデータの時代と言われるように、自然言語処理で用いるコーパスや知識ベースも大規模化が進んできたが、そのための管理技術も発展している。

まず、その構築手法としてクラウドソーシングが活用されるようになった。クラウドソーシングについては第 3.3.5 節「ビッグデータ活用促進技術」で詳しく触れるが、さまざまな分野・タスクで使われるようになってきた。一つ一つのタスクで見ると非常に安価ではあるが、作業者による品質のばらつきは避けられない問題に対しても、複数の作業者の結果を統計処理するとか、作業者を評価・選別するとか、管理手法が整備されてきている。また、さまざまな文例の中から文脈を理解しないと判定できないものを見つける等、クラウドソーシングの適用が特に有効なケースもわかってきた。

次に、QA や推論等を支える知識ベースの大規模化と有効活用も進んでいるが、その知識ベースの効率的構築技術や品質管理技術も発展している。知識の関係を補完する技術や、知識の足りない部分を Web・テキストから拡充する技術等も整備されてきている。

（4）科学技術的課題

・現在の自然言語処理は機械学習ベースが主流となっているため、学習データや情報源として利用可能な言語資源が存在しない分野では、研究開発や社会実装の大きな進展が望めない。このため、豊富なデータが利用可能な分野からの転移学習や、限られた学習データからの汎化能力、ルールベース的手法との併用等による分野適合手法のより一層の推進が急務である。この点は、理化学研究所革新知能統合研究センター（AIP）においても重要な研究テーマとして言及されている。

・従来のルールベースの自然言語処理技術と深層学習技術との統合も重要課題である。自然言語処理のタスク全体を end-to-end の深層学習で解くよりも、入力の一部の素性抽出に従来手法を適用する等、適切な組み合わせによってさらなる精度向上が期待できる。最近の研究では、要約タスクにおいて単純な単語の分散表現のみでなく品詞・固有表現のクラス名等の導入が精度向上に寄与したという報告[12]、読解タスクにおいて文脈共起・係り受け等の情報を用いた分類手法とのアンサンブルによって性能改善したという報告[13]、形態素解析エンジン JUMAN が深層学習採用（インターフェースは従来のまま）により構文解析誤りを約 40% 減少できたという報告等がある。また、深層学習による画像へのキャプション付与のように、従来の自然言語処理手法ではほとんど対応できていなかった問題の解決の糸口が見つかりつつあることも注目に値する。

・Web や SNS の情報を扱う上で常に問題となるのは情報の信ぴょう性である。東日本大震災ではインターネット上に大量のデマが出回った。これに関連し、信頼性の低い情報を検出する手法に関する研究も既に始まっているが[14]、いまだ決め手となる手法等は出現しておらず、今後さらなる展開が待たれる。

・知識の活用においては推論技術も重要である。テキストに書かれた情報を抽出するだけ

でなく、テキストに書かれていない知識を推論によって求める技術への取り組みも始まっている。生命科学において有力な仮説を提示して研究を加速するケース[15]や、Web 上の情報から導かれた仮説が著名な科学ジャーナルの内容を先取りするケース[16]等が報告されている。

(5) 政策的課題

・深層学習で高い性能を得るためには大量の学習データが必要である。日本として、どのような種類の学習データに重点を置くか、大量テキストデータの収集・整備・共有の仕組みも含めて、戦略的な取り組みが必要である。その収集から学習の実行まで、高い効率・生産性で回す深層学習ファクトリーのような姿を目指した取り組みも必要である。そのためには、専門性の高い人材の育成・確保や、大規模な計算機環境の構築・整備も考える必要がある。また、フェアユースの導入も含めた著作権法等の法制度の整備も急務であるが、これに関しては第 3.3.7 節「ビッグデータに関わる制度設計」で論じる。

・自然言語処理技術に特有の課題として、言語別に技術が細分化されやすいという問題がある。ネット系巨大 IT 企業では、そのソフトウエア・サービス提供のプラットフォームを公開し、グローバルビジネスのための開発者コミュニティー形成や基盤構築を戦略的に推進している。そこでは言語独立・共通的な技術、英語および多言語化しやすい技術が優先されやすい。これを意識し、日本としては、深層学習等の最先端・共通的技術分野への投資は AI 全般の研究開発活動の一環として重視しつつ、英語主導の自然言語処理研究ではフォーカスされない日本語の高度な処理や言語資源の充実を図ることで、国内の先進的事例と将来研究に不可欠な学習データを蓄積し、広く利用可能にしていくことが重要である。

(6) キーワード

自然言語処理、人工知能、機械学習、深層学習、分散意味表現、質問応答、機械翻訳、対話、言語理解、情報分析、情報抽出、知識獲得

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	言語処理学会を中心に基礎研究に取り組まれ、ACL・EMNLP 等の国際的トップカンファレンスでも一定数の発表がなされている。言語資源や研究利用可能なコンテンツの整備が不足しているとともに、自然言語処理単独の基礎研究のための政府プロジェクトがなく、AI 全般の研究振興のなかで相対的に埋没する危険がある。
	応用研究・開発	○	↗	NICT が音声翻訳システム VoiceTra、大規模情報分析システム WISDOM X や災害関連情報分析システム DISAANA、D-SUMM を開発・公開（一部は商用化）。NEC、NTT ドコモ、日本 IBM、Softbank、トヨタ等の民間企業でも、含意認識技術、Watson 技術（日本語版）の他、対話系の「しゃべってコンシェル」、Pepper、Kirobo mini 等の実用化が進んでいる。

米国	基礎研究	◎	→	スタンフォード大学、CMU、MIT、ペンシルバニア大学、ワシントン大学等の有力大学のみならず、Google 等の有力企業はそれぞれ強力な研究チームを持っており、基礎研究を遂行している。ACL、EMNLP 等の有力な国際会議等での発表の多くは米国発である。
	応用研究・開発	◎	↗	上述した基礎研究が大学教員の移籍等によって、比較的短期間に Google、Microsoft、IBM、Facebook、Amazon 等の応用研究・開発に回るサイクルが確立している。Amazon の 125 億ドルを筆頭に Google、Microsoft、Apple 等 1 億ドル規模の研究開発費を投入している企業が多数存在する（2015 年時点）。自然言語処理を含む AI 全般において極めて広範囲の実用化プロジェクトが進行している [17)]。
欧州	基礎研究	○	→	EU の第 7 次フレームワークプログラム（FP7）が 2013 年で終了、現在は後継プロジェクトとして Horizon 2020（2014 ～ 2020）が約 800 億ユーロの予算規模で進行中。多国語を公式言語として使用する環境のため、機械翻訳への投資が伝統的に大きいが、突出した研究は少ない。
	応用研究・開発	○	→	グローバル企業の研究所が存在し、一定のアクテビティーはあるが、米国主導による産業化の側面が強い。一方で欧州言語間の機械翻訳の精度は、人間による翻訳プロセスにおける「下訳」として使えるレベルにある [18)]。
中国	基礎研究	○	↗	北京大学・清華大学等の有力大学や Microsoft Research Asia、Baidu 等の民間企業の研究所を中心に基礎研究が進められている。ACL、WWW 等のトップコンファレンスでも中国発の論文が多数発表されている。2016 年 5 月に国家発展改革委員会等が合同でインターネット +AI の 3 カ年行動実施方案を発表し、2018 年までに 1000 億元レベルの市場規模形成を目標とすることを示した。自然言語処理はビッグデータ、マルチメディア情報処理や脳型コンピューターと並んでコアの技術として認定されている。
	応用研究・開発	○	↗	Microsoft のチャットボット「シャオアイス」、検索エンジン最大手である Baidu、チャットサービスのテンセント、EC 分野のアリババ等、盛んな研究開発投資と、サービスを通して得られる巨大データに背景にした AI 分野全般の実用化能力は脅威である。
韓国	基礎研究	△	→	KAIST、ETRI、KISTI 等の有力大学、国研を中心に基礎研究が進められている。ただ、ACL 等のトップコンファレンスでの韓国発の発表は減少している。
	応用研究・開発	○	↗	政府が Naver、サムソン、SK Telecom、Hyundai 等と Artificial Intelligence Research Institute を設立予定。Naver 等によるチャットボットや機械翻訳のサービスの開始が相次ぐ。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）NIST, The Retrieval Group, http://www-nlpir.nist.gov/
2）IBM Corp., This is Watson, Special Issue of IBM Journal of Research and Development, Issue 3-4, May-June 2012
3）Xin Luna Dong, et al., Knowledge Vault: A Web-Scale Approach to Probabilistic Knowledge Fusion, Proceedings of KDD 2014, pp. 601-610.
4）Zhongjun He., Baidu Translate: Research and Products, Proceedings of ACL 2015, pp.61-62.
5）Yonghui Wu et al., Google's Neural Machine Translation System: Bridging the

Gap between Human and Machine Translation.
https://arxiv.org/abs/1609.08144

6）The Telegraph, Microsft ‘deeply sorry’ after AI becomes ‘Hitler-loving sex robot’, 26 March 2016,
http://www.telegraph.co.uk/technology/2016/03/26/microsoft-deeply-sorry-after-ai-becomes-hitler-loving-sex-robot/

7）Manning, C. D., Computational linguistics and deep learning. Computational Linguistics, 41（4）, 2015.

8）Luong, M.-T., Pham, H., Manning, C. D., Effective Approaches to Attention-based Neural Machine Translation, Proceedings of EMNLP 2015, pp. 1412-1421.

9）岡崎直観 , 言語処理における分散表現学習のフロンティア , 人工知能 31（2）, pp. 189-201,2016.

10）Nickel, M., Murphy, K., Tresp, V., and Gabrilovich, E., A Review of Relational Machine Learning for Knowledge Graphs, Proceedings of IEEE 104（1）, pp.11-33, 2016.

11）Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. S., and Dean, J., Distributed Representations of Words and Phrases and Their Compositionality, Proceedings of NIPS 2013, pp. 3111-3119.

12）Nallapati, R. et al., Abstractive Text Summarization using Sequence-to-sequence RNNs and Beyond, Proceedings of CoNLL 2016.

13）Chen, D. et al, A Thorough Examination of the CNN/Daily Mail Reading Comprehension Task, Proceedings of ACL 2016.

14）Carlos Castillo, et al., Information credibility on twitter, Proceedings of WWW 2011, pp. 675-684.

15）W. Scott Spangler, et al., Automated hypothesis generation based on mining scientific literature, Proceedings of KDD 2014, pp.1877-1886.

16）Chikara Hashimoto, et al., Toward Future Scenario Generation: Extracting Event Causality Exploiting Semantic Relation, Context, and Association Features, Proceedings of ACL 2014, pp. 987-997.

17）JETRO, 米国における人工知能に関する取り組みの現状 ,
http://www.ipa.go.jp/files/000044196.pdf

18）MT@Work 2015, Streaming Service of the European Commission,
https://webcast.ec.europa.eu/machine-translation

3.3.5　ビッグデータ活用促進技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ここまでの節では、ビッグデータの内容を深く解析する技術、および、それを高速に処理する技術を中心に取り上げてきたが、本節では、それら以外に、ビッグデータをさまざまな課題解決（価値創造）に活用していく上で共通的に必要になる技術を「ビッグデータ活用促進技術」と呼び、特にクラウドソーシングとセキュアなビッグデータ処理技術を取り上げる。

クラウドソーシング（Crowdsourcing）[1] は「（インターネットを通じて）不特定多数の人に仕事を依頼すること、もしくはその仕組み」を意味する。人工知能（AI）技術だけでは解決困難な課題に対しては、人間の力を一部組み合わせて解決するヒューマン・コンピュテーションのアプローチ[2),3)] が有効である。クラウドソーシングは、このヒューマン・コンピュテーションのプラットフォームとして注目されており、ビッグデータ領域にもその活用が広がっている。

また、ビッグデータとして集まる情報には、個人の生活や行動にまつわる情報等、その利用に十分な配慮が必要なものが含まれる。したがって、ビッグデータの活用による価値創造を促進すると同時に、プライバシーを保護し、情報を保護するセキュアなビッグデータ処理が求められる。この保護と活用のトレードオフ問題に対して、法制度を含めた制度設計面からのアプローチは第3.3.7節「ビッグデータに関わる制度設計」で述べるものとし、以下では技術的なアプローチにフォーカスする。

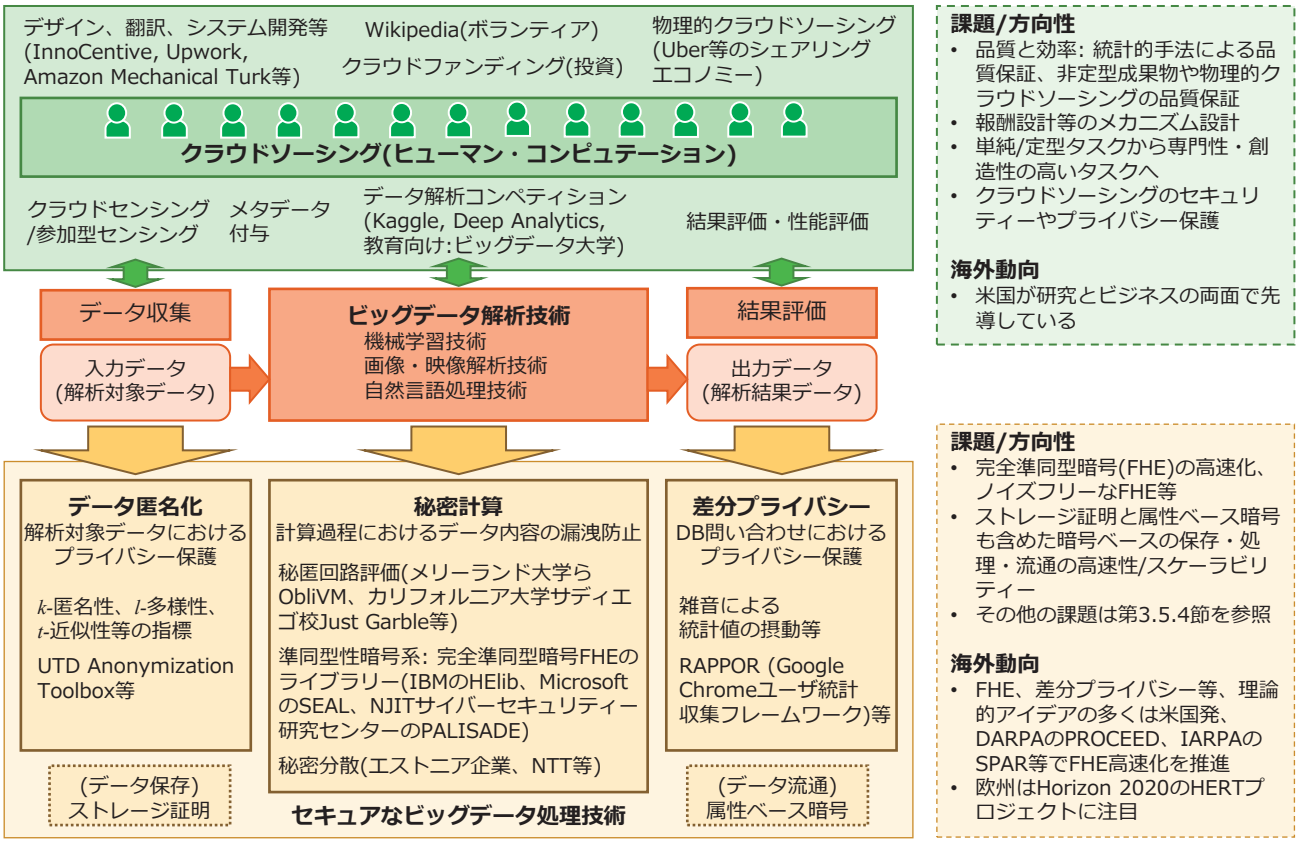

図 3-3-6　領域俯瞰：ビッグデータ活用促進技術

（2）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］

クラウドソーシングは、仕事の発注側にとっては、必要に応じた労働力調達の手段として、働き手にとっては、場所や時間にとらわれない新しい働き方として注目され、さまざまな分野・目的に急速に広がっている。その実施形態は、報酬の有無や雇用方式の違い等からさまざまなバリエーションがある。InnoCentive、Upwork、Amazon Mechanical Turk 等、オンライン労働力を募っての課題解決は、デザイン、翻訳、システム開発等に広く活用されている。ボランティアベースのものもあり、米国航空宇宙局（NASA）や米国国防高等研究計画局（DARPA）等の公的機関での活用のほか、国内では震災時の安否情報や医療情報の構造化への活用事例がある。不特定多数の人間が編集に関わる Wikipedia や、プロジェクトへの投資を一般に募るクラウドファンディングも、クラウドソーシングの一種とみなすことができる。情報処理技術分野ではコンピューターだけで完全な解決が困難な問題（例えば自然言語の理解・翻訳、画像理解、データベースにおける SQL 評価や参照解決等）に有効である。ヒューマンインターフェースや検索等の性能評価では、従来は少数の人間による小規模評価が主流だったが、クラウドソーシングを用いることで大規模評価が可能になった。

ビッグデータ領域においてもクラウドソーシングは極めて有用である。まず、効果的で効率的なビッグデータ収集のため、人間の知覚能力や判断を活用したクラウドセンシングや参加型センシングと呼ばれるアプローチ[4]がとられている。一方、ビッグデータの解析に際しては、機械学習アルゴリズムに与える正解データ等、メタデータの準備が大きなボトルネックとなる。この作業には通常、多大な人手が必要で、高い金銭的・時間的コストが生じる。クラウドソーシングを利用することで、そのコストを低減させることが可能になった。ただし、クラウドソーシングによって収集されたデータやメタデータは質のばらつきが大きい。そのため、これをいかに抑えて有効な解析やモデル構築を行うかについて、盛んに研究が進められている[5]。

さらに、ビッグデータ解析そのものにおいても、クラウドソーシングは極めて有効である。その典型例は、共通のデータを用いて参加者がその予測精度を競うデータ解析コンペティションである。解析したいデータを提供するスポンサーから勝者に賞金が支払われる賞金付きコンペティションを組織的に運営する「データサイエンティストのクラウドソーシング」が出現している。そのプラットフォームとして最もよく知られたものが Kaggle（kaggle.com）であり、世界中から 10 万人以上が参加している。国内でも同種のプラットフォームとして Deep Analytics（deepanalytics.jp）が運用されている。コンペティションの形式をとることによって、少数精鋭でデータ解析に取り組むよりも、短期間で高精度のモデルが得られることが実証されている。現在のプラットフォームはほぼ予測モデリングに特化したものであるが、探索的なデータ解析を対象とした試みも出てきており、今後の発展が見込まれる。

データサイエンティストの育成は喫緊の課題だと言われ、近年、国内外のさまざまな教育機関がそのための教育課程の提供を開始している。データ解析コンペティションは、実際のデータ解析を通じてデータ解析技術を身に付けられる教育的効果もあると認識されつつあり、Kaggle でもコンペティションを大学の講義等で利用できるサービスが提供され

ている。国内でも同様の試みとしてビッグデータ大学（universityofbigdata.net）がある。

［セキュアなビッグデータ処理技術］

ビッグデータ処理において、プライバシー保護、情報保護を確保する上で、技術的な面から押さえるべきポイントがいくつかある。解析対象データにおけるプライバシー保護、データベース問い合わせにおけるプライバシー保護、計算過程におけるデータ内容の漏えい防止である。以下、そのおのおのに対する技術的対策として、①データ匿名化、②差分プライバシー、③秘密計算（秘匿計算ともいう）を簡単に紹介する。なお、これらの詳細は、セキュリティー区分の第 3.5.4 節「プライバシー情報の保護と利活用」にも説明がある。

①データ匿名化

匿名化の処理は、ISO/TS 25237（Health informatics – Pseudonymisation）の中で「データとデータ主体（所有者）との間の相関を取り除くプロセス」と定義されている。個人データの収集において、姓名等の識別子を削除しただけでは、上記の相関は完全には取り除けず、他の属性情報・履歴情報を束ねて見ることで個人が特定され得るリスクがある。プライバシー保護のため、このような個人特定のリスクを定式化し、低減するための考え方として *k*- 匿名性[6] がよく知られている。具体的には、表形式データについて、個人データの属性値の組み合わせが同じであるデータが、個人データ集合中に k 個以上存在している状態が、*k*- 匿名性が成立した状態である。データの正確性は犠牲になるが、個人データを改変することで、*k*- 匿名性を成立させ、個人特定を困難にする。その後、*k*- 匿名性を基礎概念として、匿名化対象を表形式データからグラフや時系列データに拡張する研究や、*k*- 匿名性モデルにおいて十分にプライバシーを保護できない状況下におけるより強力な匿名性定義の研究等が進められている（*l*- 多様性、*t*- 近似性等）。

日本では 2015 年に個人情報保護法が改正され、匿名加工情報の取り扱いスキームが新設された。特定の個人を識別できないように個人情報を加工したものを匿名加工情報と呼び、その加工方法を定め、事業者による公表等、取り扱いの規律を設けている。*k*- 匿名性をはじめとする匿名化技術は実務的に重要な技術になるものと考えられる。

②差分プライバシー

一般に、統計的クエリの応答値の開示は個人情報の開示とは見なされにくい。母集団数が大きい場合には正しいが、「X 町 Y 町目在住の 60 代独身女性の平均所得」（例えば母集団数 5 人）のように母集団数が少ない場合は、統計値の開示が個別の個人所得の推測をある程度可能にしてしまうリスクがある。

差分プライバシーは、データベース問い合わせとその応答に関わる情報漏えいを理論的に評価し、その対応策を与える技術である[7]。差分プライバシーでは以下のような状況を想定する。データ収集者は、多数の個人に関するデータをデータベースに保存している。また、収集者以外の第三者が、データ収集者に対して、そのデータベースの内容について統計的なクエリ（例：ある数値属性に関する平均値や、ある離散属性値の組み合わせにマッチするレコード数のカウント）を発し、その応答値を得る。このとき「その応答値から、対象データベースに、ある個人が含まれているか否かを判定できる」ことをリスクと捉え、

このリスクを低減するために、統計値を雑音によって摂動させた上で開示するアプローチを取る。より具体的には、差分プライバシーの理論は、与えられた母集団数と対象クエリについて、その応答値に加えるべき雑音の分散の上限を理論的に与える。

差分プライバシーは、その安全性が攻撃者の背景知識によらないため、*k*- 匿名性等に比べて、より強力な安全性を保証できる。Google Chrome のユーザー統計収集フレームワーク RAPPOR（randomized aggregatable privacy-preserving ordinal response）[8] 等で実用化事例がある。

③秘密計算

秘密計算（Secure Multi-party Computation）とは、複数の者が互いに相手と共有することができない秘密のデータを所持しているときに、その秘密データを互いに他者に開示することなく、秘密データを入力に取る関数を評価し、その出力をいずれかの者あるいは第三者のみに報告する分散計算の総称である。その実現方式は、大きく分けて、秘匿回路評価、準同型性暗号系による暗号プロトコル、秘密分散に基づく秘密計算、という 3 種類が知られている。

秘匿回路評価は紛失通信を用いた秘密計算法である [9]。紛失通信とは、送信者が複数項目からなるリストを保持し、受信者がそのリストのインデクスを保持しているときに、送信者に受信者が持つインデクスを与えることなく、受信者が送信者からリスト中のそのインデクスに対応する値を得るプロトコルである。秘匿回路評価は、論理回路で記述可能な任意の関数を秘密計算として実装することが可能で、汎用性が高い。しかし、大規模な入力を引数に取る関数の評価に膨大な時間がかかり、実用性が低かった。近年は高速実装の研究が進み、文字列操作等の離散的な処理については実用性が高まりつつある。メリーランド大学らのグループによる Java 系コードで記述された計算を秘匿回路に変換して簡便に秘匿回路評価が可能な開発環境 ObliVM[10]、カリフォルニア大学サンディエゴ校らのグループで開発された秘匿回路開発フレームワーク Just Garble[11]（プログラムを論理回路として実装する必要がある）等がある。

準同型性暗号系とは、二つの整数値の平文に対応する二つの暗号値について、これらを暗号化したまま復号することなく（秘密鍵の知識なしに）、二項演算を行ったとき、もとの整数に対する加法・乗法等の演算結果の暗号値を得ることができるという性質を持った暗号系である。加法または乗法のいずれかに対応した準同型性暗号系は以前から知られていたが、2009 年に加法と乗法の両方で同時に準同型性を満たす暗号「完全準同型暗号」（Fully Homomorphic Encryption: FHE）が発表 [12] されたのがブレイクスルーとなり、研究が進展した。FHE は計算時間や空間計算量が膨大であるとされていたが 、さまざまな高速化テクニックが盛んに研究され 、ライブラリーも公開されるようになった。FHE を実現するライブラリーには、IBM の HElib、マイクロソフトの SEAL（Simple Encrypted Arithmetic Library）、DARPA SAFEWARE プログラム（2015 年 ～） で NJIT サイバーセキュリティー研究センターが開発中の PALISADE（2017 年前半に正式リリース）がある。FHE は秘匿回路評価と比較すると、算術演算をベースとするため、数値データ解析や行列演算をベースとするアルゴリズムに適しており、比較的単純な統計計算であれば実用的な時間で動作する例が報告されつつある 。

暗号系を用いない秘密計算手法として、秘密分散に基づく秘密計算が知られている。秘密分散では、秘密情報を複数の情報の断片（シェアと呼ぶ）に分散させる。単独のシェアからは秘密情報を復元することはできないが、複数のシェアを集めることで秘密情報を復元することができる。これを用いた秘密計算は、複数の秘密情報をランダムシェアとして複数の者に分散させ、これらの秘密情報を入力としたあるクラスの計算はランダムシェア同士の演算で実現し得ることを利用して実現する。実現可能な関数のクラスは限定されるが、暗号演算や暗号プロトコルの実行を含まないので一般に計算効率がよい。エストニアの企業から開発環境が提供されており、実用化を目指した動きも見られる[13)]。NTT は 1 万件のソートを 10 秒、100 万件の乗算を約 1 秒で処理可能な高速なライブラリーを開発し、医療統計処理に関する実証実験を実施した[14)]。

(3) 注目動向

［クラウドソーシング］

2012 年に米国政府が打ち出したビッグデータ研究開発イニシアチブの中で、クラウドソーシングは、機械学習やクラウドコンピューティングと並び、注力すべき情報技術分野とされた。それ以降、ビッグデータ領域でのクラウドソーシングの活用が広がり、標準的な選択肢の一つと考えられるようになってきた。研究領域としても、クラウドソーシングとヒューマン・コンピュテーションをテーマとした国際会議 HCOMP が 2013 年に発足した。これは毎年開催されており、本研究分野の中心的コミュニティーとしての役割を果たしている。

個別では、Microsoft Research は目立っている。企業の研究所でこの分野に力を入れるところが増えているが、特に Microsoft Research はこの分野に注力しており、毎年多くの重要な研究成果を発表している。また、ヒューマン・コンピュテーションの概念を唱えた CMU の von Ahn 氏は、クラウドソーシングを言語学習に利用する DuoLingo プロジェクト（duolingo.com）を開始し、その今後の動向が注目されている。

さらには、近年、Uber に代表されるシェアリングエコノミーが注目されているが、これもある種の物理的クラウドソーシングと考えることができる。今後、物理世界も視野に入れたクラウドソーシングは一層広まっていくと思われる。

［セキュアなビッグデータ処理技術］

米国では、2012 年のビッグデータ研究開発イニシアチブ設立以降、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）による 2014 年 5 月の「ビッグデータとプライバシー」[15)]、米国科学技術政策局ネットワークおよび情報技術研究開発プログラム（NITRD）による 2016 年 2 月の「連邦サイバーセキュリティー研究戦略」[16)] や 2016 年 5 月の「ビッグデータ研究開発戦略」[17)]、また、2014 年 9 月の「NSF Workshop on Big Data Security and Privacy」[18)] 等、本分野の研究開発に対して活発な検討が行われている。秘密計算アプローチの重要性も認識されており、DARPA やインテリジェンス高等研究計画活動（IARPA）等で、完全準同型暗号（FHE:Fully Homomorphic Encryption）の高速化研究も推進されている。

米国 DARPA 予算で実施されている PROCEED（Programming Computation on Encrypted Data、2011 ～ 2016、予算 20MUS$）プロジェクトは、「完全準同型暗号を用いた秘密計算が実用化できないのは、通常計算に比較して 10 桁遅くなるためであること」を問題として挙げ、これを 10 万倍高速化することを目指したものである。IBM、MIT、スタンフォード大、UCLA、テキサス大、バージニア大等により実施されており、FHE を実行する上で欠かせないブートストラップの高速化に加え、属性ベース暗号、量子暗号等の理論研究を含めこれまでに 130 件の論文が発表されている。

米国 IARPA 予算により実施されている SPAR（Security and Privacy Assurance Research、2011 ～終了年不明）プロジェクトは、FHE を用いた効率的なデータベース検索のプロトタイピング（最終的には通常検索の 8 倍の実行時間以内に抑える）を目指し、理論研究を含めた研究が実施されている。IBM、コロンビア大、MIT 等が参画しており MySQL に対する検索とほぼ同等（空間計算量は 7 倍）の性能を達成している。また関連する成果として、これまでに 62 件の論文がある。

企業では、FHE を提案し GitHub 上で HElib を提供している IBM ワトソン研究所の他、フランスに拠点を置く CryptoExperts 社の動きが注目される。Google Scholar での検索によれば、CryptoExperts 社は、これまでに 58 件の準同型暗号に関連する論文を発表すると共に、GitHub において、SFHE（演算回数を一定数に制限し高速化を図った FHE）のライブラリーを公開している。また、CryptoExperts 社が中心となり HERT プロジェクト（FHE を用いた革新的暗号技術の研究開発が目的、2015 ～ 2017、heat-project.eu）が、Horizon2020 の枠組みの中で実施されている（予算 :41MEUR）。

一方、日本では、匿名加工情報のスキームを含む個人情報保護法の改正が 2015 年に実施されたものの、秘密計算・秘匿化に特化した記述はない。秘匿化に関するプロジェクトとしては、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST の「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」（2013 ～）において、三つの関連プロジェクト「自己情報コントロール機構を持つプライバシ保護データ収集・解析基盤の構築と個別化医療・ゲノム疫学への展開」（佐久間淳：筑波大）、「ビッグデータ統合利活用促進のためのセキュリティ基盤技術の体系化」（宮地充子：北陸先端大）、「ビッグデータ統合利用のためのセキュアなコンテンツ共有・流通基盤の構築」（山名早人：早稲田大）が推進されている。また、情報通信研究機構（NICT）において、NICT が開発した準同型暗号 SPHERE をベースにロジスティック回帰分析を暗号化したまま行う技術開発が行われている [19]。なお、秘密計算に関わる日本からの特許出願数は米国・欧州に比較して多い。2011 年までの出願人上位には、三菱電機、日本電気、日本電信電話等がある [20]。

（4）科学技術的課題

［クラウドソーシング］

・アウトソーシングが素性の知れた特定の相手に対して仕事を依頼するのに対して、クラウドソーシングは不特定多数の相手に依頼する点が特徴である。そのため、その駆動力が不確定要素の大きい人間であることに起因する品質と効率の保証は、クラウドソーシングにおける重要課題である [21]。成果物の品質は仕事を受けた人間の能力ややる気に

大きく依存するため、統計的手法を用いた品質保証や非均一な質のデータの解析手法が必要である。同一のタスクを複数の働き手に割り当て多数決をとる冗長化による品質保証の仕組み等が用いられる。また、文章（記事作成や翻訳）、デザイン、プログラム等の複雑な構造あるいは非定型の成果物を求める仕事が多くなっているが、これら非定型成果物を伴うクラウドソーシングの品質保証は重要な未解決課題である。さらに、前述のシェアリングエコノミーのような物理的クラウドソーシングにおける品質保証も今後の課題といえる。一方、より積極的に、ワーカーから情報を正しく引き出したり、タスクを適切に実施させたりするための報酬設計等のメカニズム設計も重要な課題である。

・クラウドソーシングは多数の人的資源に同時にアクセスできるが、そのキャパシティーは無尽蔵でなく、必要な時に必要な質をもった必要な量の労働力が安定して得られる保証はない。また、人間の処理速度は機械と比べてはるかに遅いため、可能な限り自動化するのが望ましい。人的資源の動的な調達、タスクの最適な割り当て、作業フローの状況に応じた制御、可能な部分については機械学習による置き換えを図る等、積極的な効率化の方策が必要である。

・従来は、実行にそれほど深い専門知識や創造性を要しないクラウドソーシングが主流であったが、今後、より専門性が高く、創造性を必要とする課題をどのようにクラウドソーシングで実現していくかは、クラウドソーシングの利用可能性を広げる意味で大きな課題である。

・クラウドソーシングによるデータ収集では、企業や個人が積極的にデータ供出するインセンティブを与えることが重要である。例えば、企業においてクラウドソーシングを自社の主要ビジネスで利用するケースや、医療や健康の向上を目的に利用するケース等では、セキュリティーとプライバシーの問題が実用化への大きな壁となる。また、具体的な依頼内容をクラウドソーシングワーカーに対して開示する場合、（しばしば不特定多数の）ワーカーに対してタスク情報を公開することになり、タスク情報を通じた情報漏えいリスクが懸念される。このことが企業・行政がクラウドソーシングの本格的な利用にちゅうちょする一因となっている。クラウドソーシングにおけるセキュリティーやプライバシーを扱った研究は少なく、今後一層の研究開発が必要である。

［セキュアなビッグデータ処理技術］

・第3.5.4節「プライバシー情報の保護と利活用」でも同様の技術的課題を述べているので、ここでは（3）注目動向で取り上げたFHEの課題を述べる。

・FHEでは、暗号文にノイズを含めることにより、暗号強度を高めている。しかし、このノイズがあるが故に複数回演算を繰り返すとノイズが巨大化し復号できなくなる。このため、ノイズを小さくするためのブートストラップを定期的に適用しなければならず高速化においてのボトルネックとなっている。しかし、2016年9月に実施されたESORICS2016国際会議では、ノイズフリーなFHEが提案されており、日進月歩で進む暗号理論研究を正確に把握した上での実用化に向けた高速化が必要不可欠と考える。

・FHEにより暗号化されたデータに対する演算を実現するためには、計算途中で「値を参照できない」ことを前提としたアルゴリズムを考える必要がある。つまり、暗号化さ

れたデータに対して大小比較等に代表される条件分岐を適用できない。従来の多くのアルゴリズムが枝刈りによって計算量を削減するという基本原理の上に成り立っていることを考えると、実用化にあたっては従来のさまざまなアルゴリズムを見直す必要がある。

・FHE によるデータ処理だけでなく、データ保存のためのストレージ証明、データ流通のための属性ベース暗号についても、空間計算量、時間計算量の面で、ビッグデータにそのまま適用するのが困難な状況である。データを暗号化して保存・処理・流通を可能にする暗号体系について、理論とコンピュータアーキテクチャの両面から実用に向けてのプロトタイピングを進める必要があり、理論研究者と HPC 研究者との協業が求められる。

(5) 政策的課題

・クラウドソーシングは比較的新しい考え方・ビジネスモデルであるため、必ずしもこれまでの倫理的・社会的規範に沿っているとは言えない部分がある。例えば、しばしば指摘されるように、マイクロタスク型のクラウドソーシングでは経済的格差を利用してワーカーが極めて低賃金での作業を強いられたり、報酬が支払われなかったり等の問題がある。技術的な課題解決と同時に制度的な整備も必要である。

・プライバシー保護・情報保護に関わる政策的課題は、第 3.5.4 節「プライバシー情報の保護と利活用」および第 3.3.7 節「ビッグデータに関わる制度設計」に記載した。

(6) キーワード

クラウドソーシング、ヒューマン･コンピュテーション、データ解析コンペティション、プライバシー保護、秘密計算、完全準同型暗号、準同型暗号

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	クラウドソーシングは、米国に後れをとる形だが、国内の研究コミュニティー（クラウドソーシング研究会等）が育ってきており、トップレベルの研究も生まれている。 暗号理論は企業・大学・国研とも高いレベルにある。秘密計算関連の特許数は日本がトップ[20]。プライバシー保護･システムセキュリティーの基礎研究はトップ国際会議で発表数が少ない。
	応用研究・開発	○	↑	クラウドソーシングは、汎用・特化型それぞれにおいてさまざまなサービスが登場している。 秘密計算の応用技術は、産総研･筑波大による化合物検索のプロトタイプ構築や、NTT による疫学の実証実験等が知られている。
米国	基礎研究	◎	↑	クラウドソーシング、ヒューマン・コンピュテーションを先導しており、初期からクラウドソーシングの研究・活用が盛んで、さまざまな分野ら広がり、定着してきた。 暗号分野、データベース分野、データマイニング分野のどの研究領域でも、理論的アイデアの多くは米国の大学・企業の研究者から提案されている（差分プライバシー、完全準同型暗号等）。

米国	応用研究・開発	◎	→	クラウドソーシングは、大学と産業界の距離が近く、研究者自身が新しいビジネスを手掛ける等（von Ahn 等）、さまざまな先進的試みがある。 完全準同型暗号を提案した IBM ワトソン研究所をはじめ、ObliVM、JustGarble 等、秘密計算への取り組みでも先行している。
欧州	基礎研究	○	→	クラウドソーシングでは、欧州独自の目立った動きは見られないが、Microsoft Research Cambridge を中心に多くの研究成果がある。 プライバシー保護に関わる法制度や EU プロジェクトが積極的に進められており、それらを支える基礎研究には実績がある。
	応用研究・開発	○	→	基礎研究とほぼ同様。完全準同型暗号等を用いた革新的暗号技術の研究開発への取り組みとして、Horizon 2020 の HERT プロジェクトは注目（CryptExperts 社が中心）。
中国	基礎研究	○	→	クラウドソーシング関連で Microsoft Research Asia 等から着実に研究成果が出ている以外、特に目立った活動は見られない。
	応用研究・開発	△	→	第 13 次 5 カ年計画（2016 ～ 2020）でビッグデータ産業促進がうたわれている。2016 年国家自然科学基金の重点プログラムの一つとして暗号化システム [13] があがっているものの詳細不明。
韓国	基礎研究	△	→	暗号分野で基礎研究・標準化活動がある以外（例えば 2012 年以降、準同型暗号を用いたプロジェクトが 9 件実施 [16] されている）、特に目立った活動は見られない。
	応用研究・開発	△	→	ビッグデータ産業発展戦略（2013 年）、ビッグデータ個人情報保護ガイドライン（2014 年）[14] 等の整備が進んでいるものの、技術開発では特に目立った活動は見られない。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↗：下降傾向

（8）参考文献

1）Howe, J., The Rise of Crowdsourcing, Wired Magazine, 2006.
2）Law, E., Von Ahn, L., Human Computation, Morgan & Claypool Publishers, 2011.
3）鹿島久嗣 , 馬場雪乃 , 小山聡 ,「ヒューマンコンピュテーションとクラウドソーシング」, 講談社 ,2016.
4）Ganti, R. K., Ye, F., Lei, H., Mobile Crowdsensing: Current State and Future Challenges, IEEE Communications Magazine 49（11）, pp. 32-39, 2011
5）鹿島久嗣 , 梶野洸 , クラウドソーシングと機械学習 , 人工知能学会誌 27（4）,pp. 381-388,2012.
6）Sweeney, L., *k*-Anonymity: A Model for Protecting Privacy, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 10（5）, pp. 557-570, 2002.
7）Dwork, C., McSherry, F., Nissim, K., Smith, A. D., Calibrating Noise to Sensitivity in Private Data Analysis. TCC 2006, pp. 265-284.
8）Erlingsson, Ú., Pihur, V., Korolova, A., RAPPOR: Randomized Aggregatable Privacy-Preserving Ordinal Response, ACM Conference on Computer and Communications Security 2014, pp. 1054-1067.
9）Chi-Chih Yao, A., How to Generate and Exchange Secrets（Extended Abstract）.

FOCS 1986, pp. 162-167.
10）Liu, C., Wang, X. S., Nayak, K., Huang, Y., Shi, E., ObliVM: A Programming Framework for Secure Computation, IEEE Symposium on Security and Privacy 2015, pp. 359-376.
11）Bellare, M., Hoang, V. T., Keelveedhi, S., Rogaway, P., Efficient Garbling from a Fixed-Key Blockcipher. IEEE Symposium on Security and Privacy 2013, pp. 478-492.
12）Gentry, C., Fully Homomorphic Encryption Using Ideal Lattices, STOC 2009, pp. 169-178.
13）Bogdanov, D., Laur, S., Willemson, J., Sharemind: A Framework for Fast Privacy-Preserving Computations, ESORICS 2008, pp. 192-206.
14）NTT, http://www.ntt.co.jp/news2012/1202/120214a.html
15）The White House, PCAST Report on Big Data and Privacy: A Technological Perspective,
https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/11/16/fact-sheet-pcast-report-big-data-and-privacy-technological-perspective
16）NITRD, Federal Cybersecurity Research and Development,
https://www.nitrd.gov/cybersecurity/publications/2016_Federal_Cybersecurity_Research_and_Development_Strategic_Plan.pdf
17）NITRD, The Federal Big Data Research and Development Strategic Plan,
https://www.nitrd.gov/PUBS/bigdatardstrategicplan.pdf
18）NSF, Workshop Report Big Data Security and Privacy,
http://csi.utdallas.edu/events/NSF/NSF-workhop-Big-Data-SP-Feb9-2015_FINAL.pdf
19）暗号化したままデータを分類できるビッグデータ向け解析技術を開発 ,
http://www.nict.go.jp/press/2016/01/14-1.html
20）平成 25 年度特許出願技術動向調査報告書 ビッグデータ分析技術 , 特許庁 ,
http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/25_bigdata.pdf
21）Kittur, A. et al., The Future of Crowd Work, CSCW 2013.

3.3.6　ビッグデータによる価値創造

（1）研究開発領域の簡潔な説明

世界はボーダーレス化し、さまざまなものが相互に影響し合い、社会システムは大規模化・複雑化・複合化している。そのため複雑化した社会問題の解決や社会システムの最適設計等は人間の手に負えないものになりつつある。これらの深刻化する問題に対する技術面からのアプローチとして期待されるのがビッグデータである。ビッグデータの収集・解析は、（もはや人間には困難になった）実世界・実社会の現象や活動の精緻でリアルタイムな把握と予測を可能にする。そして、これは上述の問題解決や最適設計等のための大きな手掛かりとなり、安心安全で生産性の高い社会に向けたさまざまな価値創造につながる。本節では、このようなビッグデータによる価値創造について、さまざまな分野での取り組みを概観する。

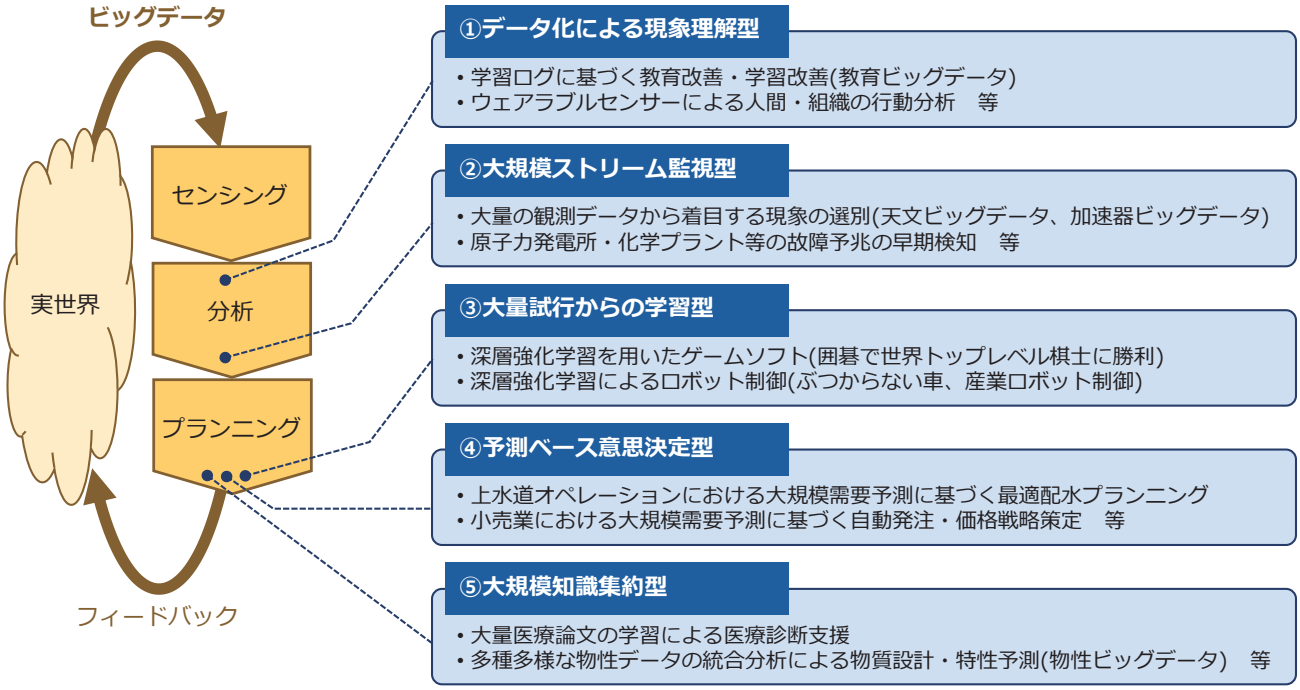

図 3-3-7　領域俯瞰：ビッグデータによる価値創造

（2）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」という言葉が使われ始めたのは 2010 年頃からであるが、既に社会・市場に浸透し、さまざまな分野・業種に応用が広がっている。当初は、Google 等のサーチエンジンにおける検索連動型広告や、Amazon 等の EC サイトにおける商品レコメンデーションのように、インターネット上のサービスに集まるビッグデータを売り上げ向上に活用するのが中心であった。しかし、現在は、実世界・実社会から集まるビッグデータを活用した社会課題解決へと広がってきており [1)]、その社会的価値はますます高まっている。

分野・業種ごとの事例をあげると際限がないので、ここでは技術的な視点からビッグデータ活用による価値創造 / 課題解決のタイプ分けを試みる。ビッグデータの活用フローは、実世界からデータを取得・収集するセンシング、そのデータの分析、分析結果に基づいてアクション（実世界へのフィードバック）を計画するプランニングから成る。以下、この

フローに沿って、図 3-3-7 に示すような五つのタイプがあることを説明し、各タイプの代表的事例も紹介する。

①データ化による現象理解型

従来は定量的な把握ができていなかった行動や事象について、ビッグデータを取得・収集する仕組みを作ることで、その精緻な状況把握や定量的な分析が可能になる。例えば、九州大学のラーニングアナリティクスセンターでは、みつば（M2B:Moodle/Mahara/BookLooper）システムから取得した学生の学習ログを分析することで、復習よりも予習が成績の高さに関連すること、成績上位者は複数の情報源をリンクさせて学習していること等を見いだし、教育・学習の改善に結びつけている[2)]。また、日立製作所では、HBD センサー（Human-oriented Big Data、旧称ビジネス顕微鏡）と呼ぶウエアラブルセンサーから取得した人間行動ログを分析することで、コールセンターや大規模店舗等のビジネス事例において、個人や組織の業績向上につながる（意外な）要因を発見している[3)]。なお、一つめの事例に関連した教育ビッグデータ分野の動向については、後述の（3）でも取り上げる。

②大規模ストリーム監視型

①は従来データを取得できていなかった現場に、新たにビッグデータを取得する仕組みを入れることで、価値を生み出した事例である。一方、この②は、もともとデータを取得する仕組みをもっているのだが、データ量が膨大になってしまい、従来の仕組みでは処理しきれなくなってしまった事例である。例えば、監視カメラが多数設置されるようになると、同時並行で多数の監視カメラ映像を見続けねばならなくなり、人間では見落としが避けられなくなる。画像認識技術を用いて異常事態や不審者・不審行動を検知することで、見落としを減らすことができ、大規模監視・広域監視が可能になる。

観測天文学や素粒子実験物理学の分野では、観測機器から膨大な量の観測データが得られるが、その膨大なデータ中に多種多様な現象が混在しており、研究・分析のターゲットとなる現象を選別することさえ容易なことではない。これに対して、大型加速器実験の観測データから機械学習技術を使ってヒッグス粒子の現象を特定する精度を競う「ヒッグス粒子機械学習チャレンジ」[4)] のような試みがある。さらに、観測天文学（天文ビッグデータ）の分野における取り組みについても、後述の（3）で取り上げる。

また、原子力発電所･化学プラント等で多数配置されたセンサーからのデータを監視し、故障・異常の予兆をできる限り早期に検知しようとする試み[5)] も②の事例である。故障・異常のケースを機械学習し、それに該当するケースを検知するのがアプローチの一つだが、故障・異常のケースは一般に発生が少なく学習しにくい。そのため、逆に正常時のモデルを学習し、それから外れるケースを故障・異常として検出するのがもう一つのアプローチである。

③大量試行からの学習型

①②はセンシング・分析までであるが、③④⑤は課題解決にさらに踏み込んでアクションのプランニングまで行う。コンピューターが課題を検出するだけでなく、解決策まで提

案するので、生み出される価値はより大きなものになる。③④⑤は分析からプランニングまでのアプローチに違いがある。その技術面も含む詳細は第3.3.2節「機械学習技術」のパートで説明している。

③はアクションを繰り返しながら、より良いプランニング方策を学習していくもので、主に深層強化学習技術が用いられている。2016 年に囲碁で世界トップレベル棋士に勝利した AlphaGo[6),7)] は大きな話題となった。また、Preferred Networks（PFN）が CES2016 でデモンストレーション（トヨタ･NTT と共同展示）した「ぶつからない車」[8)] もこの応用事例である。学習過程において、最初、車はうまく走れず、他の車等にぶつかりそうになりながら、トライを繰り返し、徐々にぶつからずに速く走る方策を学習していく。PFN はこの技術を適用した産業用ロボット制御にも取り組んでおり、2016 年の Amazon Picking Challenge の Pick タスク（棚からアイテムを取り出す）では 2 位（1 位と同スコア）に入った[8)]。

④予測ベース意思決定型

アクションのプランニングを実現するための、③とは異なるアプローチとして、オペレーションズ・リサーチ（OR）に機械学習技術による予測を組み合わせる解法がある。その代表的な事例として、NEC の上水道オペレーション向けの大規模需要予測に基づく最適配水プランニングや、小売業向けの大規模需要予測に基づく自動発注・価格戦略策定等があげられる。膨大な数の予測対象点（需要家・商品等）のそれぞれに対して、機械学習技術による需要予測を行い、全体最適なアクションプランを生成する。ここでの予測結果は、誤差（外れるリスク）や複雑な相互依存関係を持っているため、従来の OR 手法で扱うのが困難である（組み合わせ爆発が起きる、リスクを考慮できず精度が低下する等）。この問題に対して、予測型意思決定最適化[9)] という新しい手法が開発された。

また、予測の方法として、過去データから機械学習によって求めた帰納的なモデルを用いる方法以外に、扱う問題の種類によっては、物理モデルに基づくシミュレーションを用いる方法もある。

⑤大規模知識集約型

大量の生データ / 観測データから現象を捉えようとする④までのアプローチとは異なり、ビッグデータを知識として大量に蓄積・構造化し、それらを組み合わせた判断・推論からアクションを導くアプローチが、ここで述べる⑤である。第 3.3.4 節「自然言語処理技術」と関連が深い。

このアプローチの代表は IBM の質問応答・意思決定支援システム Watson[10)] である。Watson は米国の人気クイズ番組「Jeopardy!」で人間のクイズ王に勝利するというグランドチャレンジを成功させ、大きく注目された。このときの Watson は Wikipedia をはじめ、この番組で出題される問題に関わる類いのさまざまな情報源から大量の知識を集約し、それらを活用して回答を導出した。その後、情報源を問題に応じて収集・構築することで、さまざまな分野に適用を広げている。その一つ、大量医療論文の学習による医療診断支援では、医療機関での治療で回復が芳しくなかった患者について、Watson による病気タイプの判定が的中し、治療方法を変えたことが回復につながったことが報じられた[11)]。

医療論文の数は膨大、かつ、ますます増加しており、人間がそのすべてを読んで記憶することはもはや不可能になっていることから、この⑤のタイプの必要性が増している。同様に、災害時等にバースト的に流通する大量の情報を即時に理解し、対処することも人間の限られた能力では難しい。情報通信研究機構（NICT）が開発した対災害 SNS 情報分析システム DISAANA（disaana.jp）は、災害時のツイートを分析・集約することで、この問題解決を支援する。

また、物質系材料研究の分野では、多種多様な物性データの統合分析による物質設計・特性予測への取り組み（物性ビッグデータ）が進められており、後述の（3）で取り上げる。

(3) 注目動向

ビッグデータは（2）でも述べたようにさまざまな産業応用が広がっている。激しい企業間競争の中でこれはいっそう加速・拡大されていくにちがいない。この状況において科学技術政策の視点から、むしろアカデミア分野への応用に注目し、ここでは、教育、天文、物性という 3 分野でのビッグデータ活用を取り上げる。

［教育ビッグデータ］

教育分野におけるビッグデータ活用は、オンライン教育、対面講義、在宅学習等のさまざまな教育・学習の場面で、多種多様なデータを適切に収集・分析することで、教育や学習の効果を高めることを狙っている。データの具体的な例としては、授業への出席や小テスト、教材のページめくり、学生の心拍情報等があげられる。

このようなアプローチが注目されるようになった背景には、①情報機器・情報通信技術の普及により、授業内外を問わず、日常的に PC や携帯端末を利用した学習が可能となり、学習履歴データの収集が容易となったこと、②ソフトウエア面でも e-Learning、e- ポートフォリオ、履修情報、シラバス等の学内の教育情報システム、MOOCs（Massive Open Online Courses）等の教育機関の枠組みを越えたオンライン教育システムの利用が拡大し、そこでの学習履歴データが大量に蓄積されるようになったこと、③環境の変化・多様化に即した教育の質の向上、きめ細かな教育・学習支援の必要性が高まってきたこと等があげられる。

このような教育ビッグデータ活用への関心の高まりから 2008 年から EDM（Educational Data Mining）、2010 年から LAK（Learning Analytics and Knowledge）という国際会議が開催されるようになった。それぞれは、機械学習・知識発見アルゴリズムの応用に重点を置いた学会 IEDMS（International Educational Data Mining Society）と、解析結果を教育現場に応用することに重点を置いた学会 SoLAR（Society for Learning Analytics Research）の設立に至った。日本においては、教育ビッグデータの分析に関する学会として、2015 年に学習分析学会が設立された。また、2016 年 2 月には、九州大学がラーニングアナリティクスセンターを設置し、学内の教育ビッグデータの分析と、それに基づく教育・学習のサポートに取り組んでいる [2)]。

米国では、LA（Learning Analytics）を含む学習環境に関するコンソーシアム Unizin が 2014 年に設立され、現在では参加大学数は 10 を超える。Unizin では参加機関に対し、

教材などのコンテンツからソフトウエアやプラットフォーム、さらには学習分析に至るまでをサービスとして提供している。産業界においては、近年 EdTech と呼ばれるセクターが形成され活発な動きを見せている。有名大学と組み MOOCs のプラットフォームを展開している Coursera、誰でも講義をアップロードして売買できるマーケットプレイスを提供する Udemy、教育向けリアルタイムコラボレーションシステムを開発する Kramer 等のスタートアップ企業が生まれている。米国政府の Small Business Innovation Research 助成金から、2015 年には 900 万ドル以上が教育分野に投資された [12)]。さらに、大企業も参入し始め、Google は 2014 年に Google Classroom を、それを追う形で 2016 年に Microsoft や Amazon も同様のプラットフォームを立ち上げた。メール、カレンダー、ストレージ等を備えた Google Apps や Office 365 等の既存サービスをベースに、コミュニケーション、課題の提出・採点、行事のスケジュール管理等の機能を提供し、紙ベースだったこれまでの教室活動の置き換えを狙っている。また、Microsoft は Minecraft を買収する等、Game-based Learning にも力を入れている。

欧州では、LA に関するコミュニティーをベースにしたプロジェクト LACE（Learning Analytics Community Exchange）[13)]や、OWL（Open World Learning）[14)]、TeSLA（Adaptive Trust-based E-assessment System for Learning）[15)] 等のプロジェクトが数多く発足している。欧州ではプライバシー保護に関わる法整備等が進んでいるが、教育データのプライバシー保護を提唱した論文が LAK 2016 で Best Paper Award を受賞し、注目された。

システムの相互運用性を高めるための標準化も進められている。IMS Global Learning Consortium による試験問題の交換フォーマット仕様 Question & Test Interoperability、LA のためのフレームワーク Caliper Analytics[16)]。より汎用的な標準仕様 Experience API（xAPI）[17)]、国際標準化のためのワーキンググループ ISO/IEC JTC 1/SC 36 等があげられる。

［天文ビッグデータ］

天文ビッグデータは、宇宙における諸現象（宇宙の誕生と進化、銀河形成、星・惑星形成、宇宙生命等）を、観測的手法および理論的手法によって解明する科学領域である。観測的手法では、望遠鏡や検出装置を用いて研究対象天体からの電磁波（電波～可視光～ガンマ線）、粒子（ニュートリノ、宇宙線粒子等）、重力波のデータを取得し、コンピューターで分析する。理論的研究では、スーパーコンピューター等を用いたシミュレーションも盛んである。

望遠鏡等の観測装置の性能やデータ転送バンド幅の向上は著しく、国内外で次世代観測装置の建設が複数進行している。取得予定データの規模も格段に大きくペタバイト（PB、1015 バイト）を優に超える。(a) 地上からの観測および (b) 衛星からの観測が取り組まれている。

（a）地上からの観測装置としては、国立天文台は、すばる望遠鏡の次世代広視野カメラ Hyper SuprimeCAM[18)]、ALMA（Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array、日米欧の共同）[19)] からそれぞれ年間約 200TB（テラバイト、1012）のデータを生み出している。海外では、米国を中心に、可視光や赤外線領域のサーベイ型望遠鏡 LSST（Large Synoptic Survey Telescope）[20)] や Pan-STARRS（Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System）[21)] の建設や運用が始まっている。他にも大規模可視光・赤外線望遠

鏡として、直径 30m の TMT（Thirty Meter Telescope、日本・米国・カナダ・インド・中国が参加）[22]、直径 40m クラスの E-ELT（European Extremely Large Telescope）[23] をはじめ、各地で計画が進行している。

特に LSST は、米国 NSF の decadal survey でもトップにランクされ、2020 年の稼働開始に向けて建設が始まっている。その生み出すデータ総量は 450PB と見込まれており、ペタフロップス級のスーパーコンピューターによって迅速に処理されて分散データベースに格納された後、即時公開されて天文学研究に利用される。プロジェクトリーダー 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）をもくろんでいる。

さらに、電波領域では、欧州 LOFAR（Low Frequency Array）[24] と豪州を中心とした SKA（Square Kilometre Array、第 1 期分は 2023 年までに建設）[25] は電波望遠鏡の概念を大変革しつつある。これらは、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ーで実時間処理をすることで複数天体を同時観測するプロジェクトである。SKA は毎秒 1PB のデータを生産すると見込まれている。その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。現存の電波望遠鏡では、アンテナ・受信機等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 をターゲットとし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。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、データ処理等に関わるソフトウエア開発に充てられていることも注目に値する。

（b）衛星からの観測は、地球の大気に吸収されるガンマ線・エックス線・赤外線の一部は地上での観測が不可能または困難なため必要になる。国内では、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（JAXA/ISAS）が天文観測衛星を打ち上げ、研究者にデータを提供している。海外では、米国 NASA や欧州宇宙機関（ESA）が大きなプロジェクトを組んで天文観測衛星を打ち上げ、運用している。多くの場合、これらの主要宇宙機関に JAXA も含めた他国の宇宙機関（独 DLR、カナダ宇宙機関等）が国際協力する形をとっている。一般的に、衛星で取得されたデータの容量は、地上観測に比べて非常に少ない。これは地上へのデータ伝送帯域幅が限定されているためで、典型的には、一つの衛星プロジェクト全体で数百 GB 程度である。しかし、ESA が打ち上げた位置天文観測衛星である Gaia のデータは TB を超えるようになった。

天文データをアーカイブして公開するデータセンターとして代表的なものは、国内の国立天文台天文データセンターや宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の C-SODA、仏国のストラスブール天文データセンター（CDS）、欧州南天天文台（ESO）、米国の赤外線処理解析センター（IPAC）、カナダ天文データセンター（CADC）等である。仏国の CDS は、世界中の天文データや関連情報（天文系雑誌、雑誌掲載のデータ等）を収集・公開することに特化している点が特徴である。国立天文台天文データセンターは、観測データのアーカイブ・公開だけでなく、データ解析用の計算サーバー群の提供やバーチャル天

文台の開発・運用も行っている。バーチャル天文台は、世界各地の天文台やデータセンターが保有・公開しているデータアーカイブを、標準プロトコル（国際バーチャル天文台連盟が定めたもの）を介して相互利用できるようにしたものである。このプロトコルに基づくアプリケーションも多数提供され、天文学者が天文ビッグデータを活用した研究が進めやすい環境が整えられている。

［物性ビッグデータ］

ビッグデータの活用の仕方として、大量の生の観測データから規則性を発見し、事象を理解しようとするものが主流になっているが、物質系材料研究におけるビッグデータ（ここでは物性ビッグデータと呼ぶ）の活用の仕方は、それとはやや異なる。物性ビッグデータの活用では、大型装置によって観測・測定データを大量に集めるというよりも、さまざまな物質・材料に関する知見・データ・技術等を集約し、横断的な活用（interoperability）を可能にすることに重点がある。先人が蓄積してきた材料科学に関する知見や技術のデジタル化、従来型の材料科学のデータの収集・統合等によって、それを実現する。より詳細には、①質・信頼性・精度の均一性を担保したデータをメタデータとともに収集し、②データ群を扱う計算ソフトウエアやツールやアプリケーション、実験で得た測定・観測データ、論文とそのデータマイニング結果等を集約し、③これらからデータの関連性・傾向や物質の特性を分析し、新しい材料特性を予測し、その予測に基づいた実験・計算を提案することや、④データ科学や機械学習・人工知能技術を用いたプロセス全体の再構成・最適化によって、既知の積み上げでは想定し得ない新たな解を導出することを狙っている。これらによって、材料開発プロセスを短縮し、開発投資を最大化し、日本社会の多様な需要に応えることが期待されている[26)]。

このような物性ビッグデータのアプローチは、これまでの物質・材料科学にデータ科学を融合させたデータ駆動型材料研究とも呼ばれるものである。現在、日本では、このアプローチによる三つの大型プロジェクトが進行中である。

（1）JST イノベーションハブ構築支援事業「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI^2I：Materials research by Information Integration Initiative）」（2015 年～）
（2）内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」（2014 ～ 2018 年、研究機関 10・大学 37・企業 31）のうちのマテリアルズインテグレーション（MI）
（3）JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」（2015 年～）

従来の研究手法が物質の組成や結晶構造を入力して物性を評価するものであるのに対して、（1）は望ましい物性・機能を持つ物質を設計するという逆問題を解くことに挑戦している。そのためには、データから物性値を正確に予測する技術と、それをもとに膨大な可能性の中から望みの物性や機能を持つ物質・材料を発見する技術が必要である。産学官の協働体制・オープンイノベーションにつながるハブ拠点化、新物質・材料開発手法のパッケージ化・システム化、より広範囲の物質・材料系への発展・普及、組織的な人材育成、産業界とアカデミアの両者が活用できるデータベース構築等により、データ駆動型材料研

究のデータプラットフォームを目指している。このデータプラットフォームを試用するコンソーシアムには、既に 40 社以上の企業会員、約 100 名の活動員が登録されている。

（2）のマテリアルズインテグレーション[27]は、当分野に蓄積された多くの材料の知やデータと計算科学を組み合わせて、材料の組織・特性・性能を予測するシステムを目指している。材料科学の理論、実験、解析、シミュレーション、データベース等の科学技術をツール群として統合し、材料や部材の研究開発時間を短縮する。

これらに類似する取り組みに ICME（Integrated Computational Materials Engineering）がある。米国では 2000 年頃から国防総省の研究助成による基礎検討がなされ、さまざまなシミュレーションソフトウエアをマルチスケールシミュレーターとして統合して、材料開発に活用する試みが進められてきた。2011 年 6 月には MGI（Materials Genome Initiatives）が発足、近年に航空・軍事産業等に活用の例が出始めている。欧州では第 7 次欧州研究開発フレームワーク（FP7）において、ICME の実現に向けたワーキンググループが設置されている[27]。

（4）科学技術的課題

［教育ビッグデータ］

・デジタル教科書を用いたテーラーメード教育への取り組みは緊急性が高い。2020 年に全国の小中高にデジタル教科書を導入する計画があるが、デジタル教科書を用いた学習ログの蓄積・分析はあまり検討されていない。この学習ログを全国規模で蓄積・分析することで、多様性・個別性に対応したテーラーメードの個別教育が実現し得る。韓国・台湾等のアジア地域で既にデジタル教科書の導入が進められているが、ログの蓄積・分析はまだであり、日本がこの分野で大きくリードできるチャンスにもなる。

・全国規模の教育ビッグデータの蓄積・分析を行う教育用クラウド情報基盤の開発が望まれる。デジタル教科書と同時に全国導入することで、長期間の学習ログが全国規模で蓄積可能になる。プライバシーを保護した上で、これを研究者間で共有・分析することによって、教育学・心理学等の教育関連分野における研究を促進できる。そのため、まずは情報通信設備の整った大学等の高等教育機関から導入し、その効果検証後、初等中等教育に展開するのがよい。

［天文ビッグデータ］

・天文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 PB ものデータをいかに格納し、効率的に取り出し、高速かつ自動的に処理して科学的成果に結びつけるかに集約される。

・データ格納法は効率的なストレージ使用のために必須であり、全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。データの性質やアクセス頻度に応じて格納先（SSD、HDD、磁気テープ等）を選択する階層的ストレージや、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である。

・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ーを組み合わせる技術の開発が急務である。また、人手を介さず高い信頼度でデータを自動処理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や機械学習のソフトウエア開発が、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。

［物性ビッグデータ］

・生データからの規則性発見・現象理解ではなく、選別・整理された知見・技術としてのデータ集約のアプローチをとっていることから、集約としてのデータベースの質の担保が重要である。さまざまな研究機関に蓄積されてきた実験･測定データの統一的な収集、統一的なメタデータの設計・付与のための効率的な仕掛け作りが必要である。また、企業にとっては競争力・技術力の源泉になるデータであるため、企業からのデータ集約の仕組みも難しい課題である。
・物性・材料分野の知や経験に機械学習・AI 技術も駆使し、望ましい物性・機能を持つ物質を設計するという逆問題は挑戦的な技術課題である。

(5) 政策的課題

［教育ビッグデータ］

・エビデンスやデータに基づく政策決定と評価の推進が望まれる。海外では e-Learning や MOOCs などのオンライン講義の利用が盛んで、そこで蓄積された教育ビッグデータを分析する LA 研究が多い。しかし、日本はオンライン講義がまだ盛んでないため、小中高・大学等での対面型講義からログを蓄積するのがよい。これが教育の質保証と継続的な改善につながり、さらに各教育機関に蓄積されたデータを統合分析することで、全国にわたる教育ビッグデータの蓄積と､それをエビデンスとした国の教育政策の提案･評価が可能になる。また、教育効果を評価するには大規模で長期的な追跡調査が必要であるため、長期的な大型研究の予算化が求められる。米国・欧州では、長期の大型研究費の下で研究が推進され、米国 Unizin や欧州 LACE 等のコミュニティーも形成されている。中国・韓国でも、近年注目が非常に高まり、近く予算化されると思われ、日本においても競争力のある研究推進・コミュニティー作りが望まれる。
・教育ビッグデータの蓄積には、各教育機関におけるインターネットの整備や一人一台のコンピューターの利用が不可欠である。さらには、ICT インフラ整備だけでなく、それを活用した教育効果・学習効果の高い授業の設計・導入等、その実践のための教員研修・養成も重要である。また、実践結果のデータやエビデンスを共有する枠組み、継続的参照・分析を可能にする学習履歴フォーマットの標準化も重要である。
・教育ビッグデータの分析を行う教育データサイエンティストの育成も重要である（大学学部課程や大学院専攻コースの創設等）。

［天文ビッグデータ］

・米国 NSF は科学的成果を最大化するため、大型プロジェクトに対して原則データ公開を求めてきた。その結果､例えば SDSS カタログを用いた論文数は約 3000 件にもなる。日本でも同様の施策がビッグデータ推進に有用と考える。

・データ公開に関しては、国立天文台を中心にバーチャル天文台システムが構築され、その公開データによる研究成果も多数出ているものの、国際共同・国際競争の環境において人員・予算とも十分とは言えない。データ収集・公開に加えて、関連ソフトウエア技術開発や情報技術活用（分散データ管理、分散 DB、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等）、日本が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ー技術との連携等のための責任と競争力のある体制構築・投資が望まれる。
・天文分野で創出するデータ量は、国内だけでも数十 PB 規模となっている。これを格納するストレージの予算が膨大となるとともに、ストレージの更新に極めて長い時間を要するようになった（～数ヶ月）。過去のデータは廃棄できないため、格納量は増大の一途をたどっている。この問題を解決するため、個別の研究機関がストレージをそれぞれで調達・運用するのではなく、国が学術分野全体で利用できるクラウドストレージを用意して、各研究機関に利用させる制度に変えていくべきである（参考：カナダの COMPUTE Canada[28]）。
・この分野の研究スタイルは、従来「ものづくり」（ハードウエア重視）的なスタイルだったが、天文ビッグデータ研究では、むしろソフトウエアが重要である。そのための専門人材の育成・処遇も重要課題である。

［物性ビッグデータ］
・日本での取り組み開始は、米国 MGI に 5 年の後れをとった。とはいえ、米国・欧州もさまざまな試行錯誤を展開しているフェーズであり、データ戦略・データ外交を含めて日本の道筋を描いて取り組むことが重要になっている。例えば、米国 MGI の後追いではなく、日本が得意とする職人芸・知を踏まえつつ、計算科学・機械学習の活用によって人間の限界を超えるアプローチ等が考えられる。

(6) キーワード

価値創造、課題解決、機械学習、深層強化学習、予測型意思決定最適化、教育ビッグデータ、天文ビッグデータ、物性ビッグデータ、ラーニング･アナリティクス、エデュケーショナル・データマイニング、バーチャル天文台、マテリアルズインテグレーション、情報統合型物質・材料開発、データサイエンティスト

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	政府系投資・研究組織が強化されつつある（例えば、JST の CREST・さきがけ等における AI・ビッグデータ関連の活動等）。企業におけるこの分野の研究開発投資も増加している。
	応用研究・開発	○	↗	市場における存在感の面では、先行している米国との大きな差があるが、深層強化学習や予測型意思決定最適化等を用いた先進的な応用事例が見られ、伸びてきている。教育・サイエンス分野においても、M2B システムやバーチャル天文台等が注目される。

米国	基礎研究	◎	↗	ビジネス分野での先進事例でリードしているだけでなく、教育・サイエンス分野の基礎的な投資（大規模望遠鏡建設等）も続けられており、存在感は大きい。
	応用研究・開発	◎	↗	インターネット系の巨大 IT 企業（Google、Facebook、Amazon 等）が市場を先導し、研究開発や先端技術応用においても大きな存在感がある。また、教育・サイエンス分野でも MOOCs 活用や Edtech ベンチャー等、活気がある。
欧州	基礎研究	○	↗	英国の DeepMind（Google が買収）が深層学習の最先端技術と応用で注目されている。
	応用研究・開発	◎	↗	DeepMind が AlphaGo 他、先進的応用で大きな存在感を示している。教育・サイエンス分野においては、膨大な天文ビッグデータ処理を行う LOFAR、ラーニング・アナリティクスの Open University 等、世界をリードする取り組みが見られる。
中国	基礎研究	○	↗	深層学習技術に関する急速な追い上げが見られ、潜在的に大量データ収集が進めやすい状況にあるため、活用面でも勢いが出てきている。教育・サイエンス分野での活用にも基礎的な投資がされつつある。
	応用研究・開発	○	→	応用の広がりが出てきているものの、独自性の面では弱い。
韓国	基礎研究	△	→	特筆すべき活動は見られない。
	応用研究・開発	△	→	特筆すべき活動は見られない。オンライン教育は普及しており、教育分野の関心は高い。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）喜連川優 , ビッグデータ , 學士會会報 918,2016.
2）緒方広明 , 殷成久 , 毛利考佑 , 大井京 , 島田敬士 , 大久保文哉 , 山田政寛 , 小島健太郎 , 教育ビッグデータの利活用に向けた学習ログの蓄積と分析 , 教育システム情報学会誌 33（2),pp. 58-66,2016.
3）矢野和男 , 渡邊純一郎 , 佐藤信夫 , 森脇紀彦 , ビッグデータの見えざる手 ―ビジネスや社会現象は科学的にコントロールできるか―, 日立評論 95（6-7),pp. 432-433,2013.
http://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2013/06_07/2013_06_07_03.pdf
4）Cowan, G., Germain, C., Guyon, I., Kegl, B., Rousseau, D., The Higgs Boson Machine Learning Challenge, JMLR Workshop and Conference Proceedings（42), 2014.
http://jmlr.csail.mit.edu/proceedings/papers/v42/
5）棗田昌尚 , 落合勝博 , 朝倉敬喜 , 林司 , インバリアント分析技術の大規模物理システムへの適用―原子力発電所の監視への適用を例に― , 情報処理学会デジタルプラクティス論文誌 6（3),2015.
6）Silver, D., et al., Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search, Nature 529, pp. 484-489, 28 January 2016.
7）AlphaGo 対李世ドル , Wikipedia,

https://ja.wikipedia.org/wiki/AlphaGo%E5%AF%BE%E6%9D%8E%E4%B8%96%E3%83%89%E3%83%AB
8）奥田遼介 ,Deep Learning を用いたロボット制御 , 第 9 回科学技術におけるロボット教育シンポジウム ,2016.
http://www.slideshare.net/ryokuta/deep-learning-64339091
9）藤巻遼平、村岡優輔 , 伊藤伸志 , 矢部顕大 , 予測から意思決定へ ～予測型意思決定最適化～ ,NEC 技報 69（1),2016.
http://jpn.nec.com/techrep/journal/g16/n01/pdf/160115.pdf
10）IBM Corp., This is Watson, Special Issue of IBM Journal of Research and Development, Issue 3-4, May-June 2012.
11）「AI、がん治療法助言 白血病のタイプ見抜く」, 日本経済新聞 ,2016/8/4.
http://www.nikkei.com/article/DGXLZO05697850U6A800C1000000/
12）http://ies.ed.gov/sbir/2015awards.asp
13）LACE（Learning Analytics Community Exchange),
http://www.laceproject.eu
14）OWL（Open World Learning),
http://www.open.ac.uk/iet/main/research-innovation/research-projects/owl
15）TeSLA（Adaptive Trust-based E-assessment System for Learning),
http://www.open.ac.uk/iet/main/research-innovation/research-projects/adaptive-trust-based-e-assessment-system-learning-tesla
16）https://www.imsglobal.org/specifications.html
17）https://www.adlnet.gov/adl-research/performance-tracking-analysis/experience-api/
18）国立天文台すばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam,
http://www.naoj.org/Projects/HSC/j_index.html
19）The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array（ALMA),
http://alma.mtk.nao.ac.jp/j
20）The Large Synoptic Survey Telescope（LSST),
http://www.lsst.org/lsst/
21）The Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System（Pan-STARRS),
http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/
22）国立天文台 The Thirty Meter Telescope（TMT）推進室 ,
http://tmt.nao.ac.jp/
23）The European Extremely Large Telescope（E-ELT),
http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html
24）The LOw Frequency Array（LOFAR), http://www.lofar.org/
25）The Square Kilometre Array（SKA), http://www.skatelescope.org/
26）Borgman, C. L., Big Data, Little Data, No Data, MIT Press, 2015.
27）小関敏彦 , 材料データとマテリアルズインテグレーション , 情報管理 59（3),2016.
28）COMPUTE Canada, https://www.computecanada.ca/

3.3.7　ビッグデータに関わる制度設計

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ビッグデータの流通・活用を支える仕組み・制度を取り上げる。まず、データの流通・活用を促進する仕組みとして、最小限の制約のみで誰でも自由に利用・加工・再配布ができるオープンデータに着目する。その一方で、何でもオープンデータ化できるわけではない。データに関わる権利は確保されるべきであり、権利が守られていることで、データの流通・活用が進められるという面もある。これを支える法制度として、ビッグデータと関係の深いプライバシー保護と著作権にも着目する。

	データ流通・活用を促進する仕組み	データに関わる権利確保のための法制度	
	オープンデータ	**プライバシー保護**	**著作権**
動向	オープンガバメント オープンソースソフト オープンアクセス → オープンデータ 3つの流れが収斂 米data.gov 英data.gov.uk Open Data Institute（ODI） セマンティックWeb Linked Open Data (LOD) Linked Data 政策 ↔ 技術 W3Cでの標準化 コミュニティ Open Knowledge International (OKI)	日本 2003 個人情報保護関連5法 2015 個人情報保護法改正(匿名加工情報制度等) 欧州 1995 データ保護指令 2016 一般データ保護規則(各国に直接適用、罰則強化) 米国 1974 プライバシー法 (包括法なし、セクトラル方式) 2015 消費者プライバシー権利章典法案	元データ → ビッグデータ解析 → 解析結果 ● 元データの著作権問題 創作性の有無と権利制限規定 ● 解析結果の著作権問題 1)成果物が元データの著作権を侵害しないか 2)成果物に著作権が発生するか ● 解析結果の活用に伴う著作権問題 ● 国・自治体データの公開時(オープンデータ化)の著作権：日米で異なる ● 人工知能による創作物の著作権問題
課題	● 政策としてのオープンデータ戦略 ● 先駆的な適用事例からのフィードバックによる次世代技術開発 ● 人工知能の知識源としての活用対応	● パーソナルデータ取得時の本人同意の形骸化の問題 ● パーソナルデータ匿名化時のプライバシー保護の問題	● デジタル・ネット時代に即した改革(フェアユース規定、人工知能を介した創作物の著作権等) ● 巨大プラットフォーマーによる支配
国際比較	[欧]セマンティックWeb・LOD研究の本拠地。OKI主導によるソフトウエアやサービスが多数生み出されている。 [米]政策主導、OSS連携に強み。 [日]遅れているが立ち上がりつつある。	[欧]削除権・忘れられる権利の導入や企業への罰則強化等を含む一般データ保護規則、匿名化時のプライバシー保護問題等の取り組み等で先行。 [米]民間部門を規制する包括的な個人情報保護法はなく、企業の自主規制に委ねられている。著作権法はフェアユース規定で迅速対応を確保。 [日]個人情報保護法改正で事業促進。フェアユース規定には未対応。	

図 3-3-8　領域俯瞰：ビッグデータに関わる制度設計

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［オープンデータ］

オープンデータという概念は、いくつかの異なる領域での活動が収斂され、現在の形に至っている。その一つは、政策としてのオープンガバメント（開かれた政府）の流れを受けたものである。米国オバマ大統領は電子政府のあり方として 2009 年 12 月に Open Government Directive を発表し、米国政府がオープンガバメントを進めると宣言した。このための政策は主に透明性（Transparency）、参加（Participation）、協同（Collaboration）という三つから成る。このうち透明性の実現には、政府保有の情報をできるだけ生のまま公開することが必要であると考え、これをオープンデータとして実現するとした。実際、米国政府はdata.govをというサイトを立ち上げ、そこでさまざまなデータを公開していった[1)]。

二つめはオープンソースソフトウエア（OSS）の流れを受けたものである。OSS の活動は、Linux を初めとする数々の社会的に重要なソフトウエアを生み出し、技術者にも基

本的な考え方として広く受け入れられてきた。この考え方の延長として、ソフトウエアだけでなくデータもオープンになるべき、データは誰でも使えて再利用できるべきと考えられるようになった。また、OSS に関わる人々がオープンデータの活動にも関わるというケースもよく見られる。

三つめは学術界で近年広まってきたオープンアクセス（OA）の流れを受けたものである。OA は、学術成果は社会で広く共有すべき、有料でしか読めない論文では成果の共有ができないので、自由に読めるオープンな形で論文を公開すべきという考え方である。有名なものとして、2002 年に発表されたブダペスト・オープン・アクセス・イニシアチブがある。学術論文の OA は、研究成果を文献（論文）として無料で自由に閲覧できる方向に進んでいることに加え、近年のデータ科学の盛り上がりも受け、データとしても公開・利用を可能にする方向（オープンデータに通じる）に向かっている。

現在のオープンデータに関わる活動は、研究から社会まで多様なセクターの人を巻き込んだ複合的な活動になっている。以下、これを政策、技術、コミュニティーという 3 面から簡単にまとめる。

①政策

米国と英国が先行している。米国は最初に政府のオープンデータポータル data.gov を公開した。英国が data.gov.uk を開設したのはそのあとだが、英国は国を挙げて積極的にオープンデータへの取り組みを進めている。特に Open Data Institute（ODI）を産官で設立して、国内外でのオープンデータを推進している。欧州は EU が 2000 年前半から公共セクター情報の再利用に取り組んでおり、取り組みの歴史は長い。

日本は 2012 年に内閣官房 IT 戦略本部が「電子行政オープンデータ戦略」を発表した。2015 年に決定された世界最先端 IT 国家創造宣言にも、オープンデータは目指すべき社会・姿を実現するための取り組みの一つとして含められた。2016 年には官民データ活用推進基本法において、国および地方公共団体等におけるデータ活用の推進が規定された。

②技術

オープンデータに関する技術開発はアカデミア研究と OSS コミュニティーにおける開発と標準化の三つに大別されるが、相互に関係し合っている。アカデミア研究は主にセマンティック Web の分野で進められている。特に高可用性に有用な Linked Open Data（LOD）、Linked Data はこの分野である。LOD 関連で、RDF（Resource Description Framework）、RDFS（RDF Schema）、OWL（Web Ontology Language）等の記述言語、問い合わせ言語 SPARQL、RDF データベースマネジメントシステム（triple store）、最近では、オープンデータに多くみられる表形式を適切に扱うための技術（“CSV on the Web”）等の技術が開発された。これらの多くは World Wide Web Consortium（W3C）に標準として提案され、採択されている。LOD は、セマンティック Web 分野で開発・標準化された技術による、Web 上のデータを公開・利用する方式あるいは公開されたデータセットであり、従来の Web が「文書の Web」であるのに対して「データの Web」とも言われる [2)]。

LOD 研究は欧州の研究グループ（中でもドイツ）が特出している。FP7 および後継の Horizon 2020 では多くのセマンティック Web 関連のプロジェクトが進められている。重要なものでは LOD プロジェクトや LOD2 プロジェクト [1)] がある。LOD2 プロジェクト

ではLODのライフサイクル（生成から蓄積・利用等）を支える技術・ソフトウエアを開発している。WikipediaをLOD化したDBpediaやその利用ツールDBepdia Spotlight、Silk等がこのグループおよびその周囲で作られている。なお、2015年あたりから、Wikipediaのデータ版といえるWikidataをLODとして使うことも増えてきた。

オープンデータに関わるソフトウエア開発はほとんどがコミュニティーベースで行われている。特に英国に本拠をもつOpen Knowledge International（OKI、旧称Open Knowledge Foundation:OKF）はさまざまなオープンデータ関連のソフトウエア開発の中心となっている。例えば、データカタログサイトのソフトウエアCKANや税金の可視化のopenspending.org等がその例である。

③コミュニティー

このような政府の動きや技術開発をつなぐのに重要な役割を果たしているのがコミュニティーである。主に非営利組織を母体に技術者や市民が募り、オープンデータ化の推進や利用促進の活動を行っている。英国では先にあげたOKIが組織としては著名である。日本でもOpen Knowledge Japan（OKJP、旧称Open Knowledge Foundation Japan:OKFJ）やリンクト・オープン・データ・イニシアチブ、Linkdataといった組織が活動している。例えば、これらはハッカソン、アイデアソン、コンペティション等を企画・運営し、オープンデータを広める活動を行っている。

［ビッグデータとプライバシー］

ビッグデータの中でも、個人に関する情報ないしパーソナルデータを活用する場合には、プライバシー・個人情報保護に関する課題が発生する。そのようなパーソナルデータとしては、例えば、大量のネット上の閲覧履歴、購買履歴、アプリケーションの利用履歴、書き込み内容や、現実空間における位置情報、移動履歴等がある。

ここでは、まず、プライバシー・個人情報保護法制の基本的な動向について述べる。日本では、2003年に個人情報保護法を含む個人情報保護関連5法が制定された。最近では、2013年からIT総合戦略本部の「パーソナルデータに関する検討会」が中心になって、個人情報保護法の改正に向けた議論が行われ、2015年に改正個人情報保護法が成立している[3)]。この改正では、特定の個人を識別することができないように個人情報を加工した匿名加工情報の新設、要配慮個人情報の導入、個人情報保護委員会の設立等、データを取得した個人の同意なしでデータを流通・利用活するための新しい枠組みが創設された。

また、EUでは、1995年に制定されたデータ保護指令が存在するが、2012年以降、一般データ保護規則の制定に向けた検討が進められ、2016年に一般データ保護規則が成立している[4)]。データ保護指令は、各国に一定の法律の制定を義務付けているが、指令が各国に直接適用されるわけではない。それに対し、一般データ保護規則は、各国に直接適用される点で異なっている。そのほか、データ保護規則は、「削除権」ないし「忘れられる権利」の導入、罰則の強化等の点が特徴になっている。

米国では、公的部門については、1974年のプライバシー法が存在するものの、民間部門に関する包括法は存在していない。そこでは、個別領域ごとに個別法が存在するにすぎず、いわゆるセクトラル方式がとられている。もっとも、米国では、2012年に「ネットワー

ク化された世界における消費者データプライバシー」という政策大綱が公表され、その中で「消費者プライバシー権利章典」が提案されている。さらに、その後、2015 年に、この権利章典を基にした「消費者プライバシー権利章典法案」が公開されている[5)]。

ビッグデータのプライバシー問題については、主として、以下のような観点から議論がなされている[6)]。第一に、パーソナルデータを取得する際の本人同意が形骸化してしまっているため、いかにして分かりやすい表示・説明をすることによって、実質的な本人同意を実現するかということである。多くの場合、プライバシーポリシーは、長文で難解な文章になっているため、多くの消費者が中身を全く読まずに盲目的に同意してしまっているというのが実態である。この課題については、日本でも経済産業省等によってさまざまな取り組みがなされている（これに関しては後述する）。

第二に、ビッグデータに含まれるパーソナルデータを匿名化することによって利活用をはかりたいという要望とプライバシー保護の要請をいかにして調和させるかということである。この点については、日本では、「パーソナルデータに関する検討会」等で議論されてきたが、海外でも活発な議論がなされている。EU では、英国の ICO が 2012 年に匿名化に関する行動規範を策定し、2014 年には、29 条作業部会が「匿名化技術に関する意見書」を公表している[7)]。また、米国では、2014 年にホワイトハウスが、「ビッグデータ：機会の獲得、価値の保持」と題する報告書を公表し、それと同時に、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）が、「ビッグデータとプライバシー：技術的視点から」という報告書を公表している[8)]。これらの報告書でも匿名化技術についての記述があるが、再特定・再識別技術が発達してきているため完全な匿名化が難しいことにも触れられている。さらに、ISO/IEC JTC1 SC27/WG5 では、De-identification 技術に関する国際規格の検討が進められている。

なお、ビッグデータの利用については、上記二つの課題のほかにも、いわゆるプロファイリングの問題も指摘されている。2013 年のデータ保護プライバシーコミッショナー国際会議では、プロファイリングを実施する際の条件を定めた「プロファイリングに関する決議」が採択された[9)]。また、EU の一般データ保護規則でも、プロファイリングを規制する条文が盛り込まれている。

［ビッグデータと著作権］

ビッグデータに関わる著作権問題は、①ビッグデータ収集時に問題となる「元データと著作権」の問題と　②解析結果を表示する時に問題となる「解析結果と著作権」の問題に二分される。以下、条文は特にことわらないかぎり日本の著作権法の条文である。

①「元データと著作権」の問題

元データに創作性がなければ、著作物にあたらないので、著作権はない（2 条 1 項 1 号、6 条）。このため許諾を得ずに利用しても著作権上の問題は発生しない。行動履歴（ライフログ）等がこれにあたる。創作性があれば、著作権があるため、原則として許諾が必要となる。ただし、著作権法は、許諾を得ずに利用できる権利制限規定を列挙している。この権利制限規定に該当すれば許諾は要らない。ビッグデータに関連する権利制限規定としては以下の規定があげられる。

・検索サービスのための複製等（47 条の 6）：検索サービスを提供するにあたり、検索エ

ンジンがウェブサイトの情報を収集するために行う複製等
・情報解析のための複製等（47 条の 7）：電子計算機による情報解析を行うための記録媒体への記録等
・情報通信技術を利用した情報提供の準備に必要な情報処理のための利用（47 条の 9）：例えば SNS 等のサービス・プロバイダーがユーザーの投稿したコンテンツを配信する際、サーバー上で分散処理するために行う複製等

②「解析結果と著作権」の問題

成果物が元データの著作権を侵害しないかと、成果物に著作権が発生するかという二つの問題がある。

・成果物が元データの著作権を侵害しないかは、成果物が元データの表現を利用する際に問題になる。元データに創作性があれば、著作権が発生するため、権利制限規定で認められている「引用」にあたらないかぎり著作権者の許諾を得る必要がある。引用は、「公正な慣行に合致するものであり、かつ、報道、批評、研究その他の引用の目的上正当な範囲内で行われるものでなければならない。」（32 条①項）。
・成果物に著作権が発生するかについては、編集著作物に該当すれば著作権が発生する。編集著作物は「編集物（データベースに該当するものを除く）でその素材の選択又は配列によって創作性を有するもの」（12 条）。編集物のうちデータベースについては、「情報の選択又は体系的な構成によって創作性を有するものは、データベースの著作物として著作権が認められる」（12 条の 2 ①項）。創作性がなければ著作物ではないので、著作権は認められない。

以上はビッグデータ解析に伴う著作権問題だが、解析結果の活用に伴う著作権問題もある。著作権で保護されるには何らかの創作性が必要で、単なる事実では著作権は発生しないが、企業が解析結果に対して、著作権等を理由に契約上の権利を主張して囲い込みを図る傾向が見られる。著作権法がわかりにくいこと、企業の法令遵守・コンプライアンス意識が高いこと等から、日本ではこうした「疑似著作権」の主張がまかり通りやすい土壌があることもビッグデータ解析結果の活用を妨げている。

前述した国・自治体のオープンデータにも著作権の制約がある。米国では連邦政府が作成した著作物には原則として著作権は発生しない（米著作権法 105 条）。国民の税金を使って作った著作物は国民のモノという考え方に根ざしている。日本では政府情報は法令や裁判所の判決等は著作権の対象にはならないが（12 条）、白書等の著作権は政府にある。政府も国税を使って作成したものは国有財産であるとの考え方から、契約で著作権を国に帰属させようとしてきた。このため、宝の山といわれる行政データを活用するオープンデータ政策を推進するにあたっても英米に後れをとっている。

(3) 注目動向

オープンデータ関連は、その次世代技術として LOD が広く関心を集めており、アーリーアダプターとしての適用事例が複数分野で見られるようになってきた[2)]。

・LOD に関する技術は 2014 年頃までに一通りの技術標準が作られ、現在は、これらの技術を用いたシステム、アプリケーション、サービスが作られるようになった段階である。アーリーアダプターとしての適用事例は、クロスドメイン関連（前述の DBpedia 等）、図書館関連、バイオサイエンス関連、政府データ関連で先導的なものが立ち上がっている。さらに、これらの適用経験から不足する機能が明らかになり、そのフィードバックを受けた新たな技術要素が第 2 弾の標準化として検討され始めている。
・このような技術適用を支援するように、商用を含む LOD 公開支援サービス等が登場し、技術的知識がなくても保有するデータを LOD として簡単に公開できる環境が整いつつある。LinkData.org の簡便な LOD 化ツール、jig.jp 社のオープンデータプラットフォーム（有料サービスを 2014 年 6 月開始）、インフォラウンジ社の Datashelf 等があげられる。

ビッグデータのプライバシー問題は、前述の 2 つの観点を中心に、さまざまな委員会・プロジェクトにおいて検討されている。
・第一の観点、パーソナルデータ取得時にいかにして分かりやすい表示・説明をすることによって実質的な本人同意を実現するかという問題は、経済産業省の IT 融合フォーラム・パーソナルデータ WG（2012 年～ 2013 年）で基本的な問題提起がなされた [10)]。この WG では、分かりやすい表示とするために求められる要素や具体的な手法等が示された。これを引き継ぐ形でパーソナルデータの利活用に関する事前相談評価の試行が実施され、2014 年 3 月に事前相談評価・評価基準書が公表された [11)]。これらの流れを受けた国際標準化への取り組みも進められており、2014 年に経済産業省内に検討委員会が設置され、「消費者向けオンラインサービスにおける通知と同意・選択に関するガイドライン」が策定された [12)]。これを ISO/IEC JTC1 SC27/WG5 において国際規格化する提案を日本から行い、現在、標準化活動が継続されている。
・第二の観点、パーソナルデータを匿名化し利活用をはかる際のプライバシー保護の問題は、まず医療分野において、2012 年に「社会保障分野サブワーキンググループ及び医療機関等における個人情報保護のあり方に関する検討会の合同開催」で議論がなされた。2013 年に規制改革会議創業等 WG での議論や、世界最先端 IT 国家創造宣言の公表を経て、IT 総合戦略本部のパーソナルデータに関する検討会において本格的な検討が開始された。この検討会は 2014 年にも引き続き実施され、その技術検討 WG で匿名化技術に関する詳細な検討がなされたことは注目される。これらの検討を踏まえて、2015 年改正個人情報保護法において匿名加工情報に関する規律が導入された。同改正法では、個人情報取扱事業者が匿名加工情報を作成する際の義務や、匿名加工情報取扱事業者が匿名加工情報を第三者に提供する際の義務等が規定されている。ただし、具体的な加工方法等、個人情報保護委員会規則に委ねられている部分も多い。
・プライバシー・個人情報の保護が不十分なサービスを公開してしまい、消費者の反発や社会的批判を受ける事態に陥るのを防止するには、新しい情報システムやサービスの導入や実施の前に、それがプライバシーに対してどのような影響を与えるのかを評価するプライバシー影響評価（PIA）の実施が有効である。PIA は我が国ではまだあまりなじみがないが、米国、カナダ、英国、オーストラリア等の諸外国では既に実施されている。

この PIA は現在、ISO/IEC29134 という名称で、ISO/IEC JTC1 SC27/WG5 において国際標準化の作業が進められている [13)]。

著作権関連では、人工知能を使って書いた小説が 2016 年の星新一賞の 1 次審査を通過したという話題もあり、人工知能（AI）を介した創作物の著作権をどう考えるべきかが現実の問題として検討され始めた。

・内閣に設置された知的財産戦略本部の次世代知財システム検討委員会は、2016 年 4 月に報告書を発表した。その第 3 章「新たな情報財の創出と知財システム」で取り上げた主要課題の一つめが「人工知能によって生み出される創作物と知財制度」である。
・この報告書によると、「現在の知財制度上、人工知能が生成した生成物は、人工知能を人間が道具として利用して創作をしていると評価される場合には権利が発生しうる。他方で、人間の関与が創作的寄与と言えず、人工知能が自律的に生成したと評価される場合には、生成物がコンテンツであれ技術情報であれ、権利の対象にならない」というのが一般的な解釈とされる。しかし、これらは創作過程の違いであって、その結果の創作物においては外見上見分けることができない。しかも、AI は膨大な数の創作物（の外見を持つもの）を高速に生成し得る。一方、AI は創作において、新しい手法や文化・イノベーションを生み出す可能性もあり、新しい時代に知財制度はどう対応していくべきか、方向性が論じられている。
・その検討において、膨大なデータを収集・保有し、AI 技術の開発にも積極的に投資している海外の巨大プラットフォーマーの存在感は大きい。上記報告書の第 3 章では、当面、具体的に進めていくことが考えられる事項を 3 点に整理しているが、その 2 点目で「制作ができるような人工知能の構築において重要なビッグデータの収集・活用に優位性を有するプラットフォーマーについて、ビジネスモデルの実態把握等を含め、その影響力について調査分析を行う」としている。

（4）科学技術的課題

・オープンデータの次世代技術として位置付けられる LOD は、第 1 弾の標準化を経てアーリーアダプターによる適用事例を通した次の技術発展段階に入っている。日本としてもキャッチアップしていく必要がある。
・第 3 次 AI ブームに対するビッグデータの貢献は大きいが、深層学習等のブラックボックス的な機械学習の学習データとしてビッグデータが使われる形と、IBM Watson のような自然言語処理・質問応答の知識としてビッグデータが使われる形がある。特に後者はオープンデータ・LOD と容易に結びつくものであり、応用領域として広がる可能性が高い。
・プライバシー保護に関わる科学技術的な側面や課題は、本俯瞰報告書のセキュリティー区分の第 3.5.4 節「プライバシー情報の保護と利活用」が詳しい。また、ビッグデータ区分の第 3.3.5 節「ビッグデータ活用促進技術」でも触れている。

(5) 政策的課題

・オープンデータ戦略は、米国のオープンガバメントに代表されるように、政府の戦略・政策との結びつきが強い。先行する米国・英国等の動きを踏まえつつ、日本のオープンデータ戦略・政策を鮮明化し、推進したい。英国の ODI は各国にノードという形で関連組織を増やしており、日本では大阪、アジアでは他にはソウルにノードがある。ODI の動き・影響にも注意が必要である。

・パーソナルデータの匿名化の課題については、前述の通り海外でも活発な議論がある。日本国内での議論は、これらの海外動向を十分に検討できていない面があり、今後も海外の最新動向を注視し、それらを十分に踏まえて、検討に反映していくことが重要である。

・プライバシーポリシーの確認・同意が形骸化している問題に対しては、ユーザーの実質的な本人同意が得られるよう、ポリシー内容を分かりやすく簡潔に提示する必要がある。そのために、食品表示ラベルに類似した情報共有標準ラベルやアイコン等による表示が検討されている。しかし、さまざまな表示方法等が提案されているのが実情で、ルールの明確化や標準化が課題である。

・「知的財産推進計画 2016」は四つの柱の一つに「第 4 次産業革命時代の知財イノベーションの推進」を掲げ、今後取り組むべき施策の一つに「デジタル・ネットワーク化に対応した次世代知財システムの構築」を挙げて以下の提案をしている。
「ネットワーク時代の著作物の利用への対応の必要性に鑑み、新たなイノベーションへの柔軟な対応と日本発の魅力的なコンテンツの継続的創出に資する観点から柔軟性のある権利制限規定について検討し、必要な措置を講ずる。」

・柔軟性のある権利制限規定の代表例は米著作権法が定めるフェアユース規定、つまり、フェア（公正）な利用であれば著作権者の許諾なしに著作物の利用を認める規定である[14)]。知財本部は過去にも「知的財産推進計画 2009」で「権利制限の一般規定（日本版フェアユース）の導入」を提案、文化庁で検討したが、権利者の反対などで骨抜きにされた。こうした経緯からか、今回は「柔軟性のある権利制限規定」という言葉に置き換えているが、提案を受けて、文化庁が文化審議会著作権分科会にワーキングチーム設けて検討中である。

・人工知能を活用したビジネスの特性を踏まえて、学習済みモデルに着目した知的財産権の議論がある[15)]。著作権に限らず、ビジネスモデル・契約も含めた考え方の整理や制度整備が必要と思われ、産業構造審議会でも検討が進められている。

(6) キーワード

オープンデータ、Linked Open Data、Linked Data、セマンティック Web、パーソナルデータ、プライバシー、個人情報保護法、一般データ保護規則、本人同意、匿名化、著作権、権利制限規定、フェアユース

（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	○	→	2003 年に個人情報保護関連 5 法が整備された。2015 年にはパーソナルデータに関する検討会での議論を経て個人情報保護法が改正された。しかし、フェアユース問題等、全般に動きが慎重で時代変化への対応が遅れ気味の面がある。 セマンティック Web 研究は一通りあるものの、オントロジー研究以外は相対的に弱い。最近は関心が高まり、コミュニティーが広がっている。
	応用研究・開発	○	↗	2015 年の個人情報保護法改正で匿名加工情報の制度が導入され、事業者が個人情報を匿名化すれば本人の同意なしに個人情報を利用できるようになり、ビッグデータビジネスが展開しやすくなった。2016 年に行政機関個人情報保護法と独立行政法人等個人情報保護法も改正され、非識別加工情報の提供制度も導入された。これも行政機関等に眠る個人情報を利活用しやすくし、ビッグデータビジネスの追い風となる。
米国	基礎研究	○	→	民間部門を規制する包括的な個人情報保護法は存在せず、いくつかの個別法が存在するにすぎない。消費者のプライバシー保護については、FTC（連邦取引委員会）が重要な役割を果たす。 AI・Web 研究に強みがあり、興味深い研究も出てくるが、全体としての動きにはなっていない。
	応用研究・開発	◎	→	2012 年に消費者プライバシー権利章典が提案され、2015 年には消費者プライバシー権利章典法案が公開された。民間部門を規制する包括的な個人情報保護法が存在しないため、企業による自主規制が重要になり、さまざまな分野で自主規制のためのガイドラインの制定等、産業活性を図りつつルール形成の努力が行われている。 行政データ専用サイト data.gov を世界で初めて開設するなどオープンガバントの取り組みが進んでいる。OSS コミュニティーとの連携も強み。
欧州	基礎研究	◎	↗	1995 年にデータ保護指令が成立し、これに基づいて各国が個人データ保護に関する法制度を整備している。2002 年には、電子通信の分野について、e- プライバシー指令が成立している。 セマンティック Web 研究の本拠地で、EU プロジェクトで層の厚い研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	2012 年にデータ保護指令を大幅に改正することを目的とする一般データ保護規則提案が公表され、2016 年に一般データ保護規則が成立した。削除権 / 忘れられる権利の導入や、企業に対する罰則の強化等が特徴になっている。 欧州委員会は 2016 年に European Data Portal を公開。英国データポータル data.gov.uk も充実。OKF 主導によるオープンデータ関連のソフトウエアやサービスが多数生み出されている。
中国	基礎研究	△	→	2006 年に個人情報保護法草案が公表されたが、まだ成立していない。消費者権益保護法、電信およびインターネットユーザー個人情報保護規定等の法規において個人情報保護に関する規定が定められているが、包括的な個人情報保護法は存在しないため、13 億人のビッグデータの産業での活用は進む可能性がある。
	応用研究・開発	△	→	2012 年に国家標準化委員会は「公共及び商業用サービスに関わる情報システムの個人情報保護のガイドライン」を定めた。2008 年に大連ソフトウエア産業協会が、個人情報保護の水準を認証する個人情報保護評価制度（PIPA）の運用を開始、この PIPA と日本のプライバシーマーク制度の間で相互承認プログラムを設けている。
韓国	基礎研究	○	↗	米国類似のセクトラル方式だったが、2011 年に民間部門と公的部門の両方を対象とする包括的な個人情報保護法が施行された。2015 年には個人情報保護法が改正され、法定損害賠償制度や懲罰的損害賠償制度等が導入された。
	応用研究・開発	○	↗	未来創造科学部と情報化振興院が、2013 年に民間企業・大学とも連携して実証実験等に取り組むビッグデータ分析活用センターを開設した。2014 年には韓国放送通信委員会がビッグデータ個人情報保護ガイドラインを公表、個人情報の識別化事例集も公表された。位置情報の保護および利用等に関する法律の存在も注目される。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（8）参考文献

1）JETRO/IPA, 米国オープンデータの動向調査 ,2013 年 3 月 ,
http://www.ipa.go.jp/files/000033718.pdf
2）武田英明 , リンクト･オープン･データの原理原則と最近の進歩 , 情報処理 57（7),「リンクト・オープン・データの利活用」特集号 ,pp. 588-593,2016.
3）個人情報の保護に関する法律及び行政手続における特定の個人を識別するための番号の利用等に関する法律の一部を改正する法律 ,2015 年 9 月 3 日成立 , 同月 9 日公布 .
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/pd/info_h270909.html
4）Regulation（EU）2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC（General Data Protection Regulation）
http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj
5）Administration Discussion Draft: Consumer Privacy Bill of Rights Act
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/legislative/letters/cpbr-act-of-2015-discussion-draft.pdf
6）村上康二郎 , ビッグデータ時代におけるプライバシー・個人情報の保護と法的問題点 , ビッグデータ・マネジメント ,pp. 269-279,2014.
7）Opinion 05/2014 on Anonymisation Techniques,
http://ec.europa.eu/justice/data-protection/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2014/wp216_en.pdf
8）Big Data and Privacy: A Technological Perspective,
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_big_data_and_privacy_-_may_2014.pdf
9）Resolution on Profiling, adopted on 24 Sep. 2013,
https://privacyconference2013.org/web/pageFiles/kcfinder/files/2.%20Profiling%20resolution%20EN%281%29.pdf
10）パーソナルデータ利活用の基盤となる消費者と事業者の信頼関係の構築に向けて、
http://www.meti.go.jp/press/2013/05/20130510002/20130510002-2.pdf
11）パーソナルデータ利活用ビジネスの促進に向けた、消費者向け情報提供・説明の充実のための「評価基準」と「事前相談評価」のあり方について ,
http://www.meti.go.jp/press/2013/03/20140326001/20140326001-2.pdf
12）消費者向けオンラインサービスにおける通知と同意・選択に関するガイドライン ,
http://www.meti.go.jp/press/2014/10/20141017002/20141017002a.pdf
13）村上康二郎 , プライバシー影響評価（PIA）に関する国際的動向と我が国における課題 , 情報ネットワーク・ローレビュー 13（2),pp. 33-56,2014.
14）城所岩生 ,「フェアユースが経済を救う－デジタル覇権戦争に負けない著作権法」, インプレス R&D,2016.
15）江村克己 , 人工知能の活用と共有経済の進展から考察するこれからの知的財産 , 知財研フォーラム（107),pp. 30-37,2016.

3.3.8　新計算原理

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

森羅万象のデジタル化が誘う超ビッグデータ時代に資する新しいコンピューティングパラダイムとしての計算原理のこと。既存の計算原理の性能限界を突破するための「ポスト・ムーア」時代を見据えた研究開発領域である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システム・情報科学技術のトレンドとして、2 章において「社会に浸透する AI、Big Data」を取り上げて説明したように、AI やビッグデータが社会に浸透する今日、ビッグデータ解析と機械学習を組み合わせた新しいサービスやアプリケーションの普及が急激に始まっている。このような計算ニーズが極めて大きくなっていることを背景として、AI 処理を高速化する専用チップ（AI チップ）の開発が世界中で始まっている。森羅万象のデジタル化データの内、スマートデバイス（エッジコンピューティングデバイス）中でローカルに処理できるものは、組み込み AI を使ったエッジコンピューティングにより瞬時に高速処理し、難しく複雑なものはクラウド AI で知的情報処理することにより森羅万象に潜む叡智を掘り起こさなければならない。いわばスマートデバイスは人の五感を凌ぐ超知覚であり、ハイパフォーマンスコンピューター（HPC）は超ビッグデータ時代における叡智の炬火（かがり火）となる超知能（森羅万象解析エンジン）である必要がある。

しかしながら、超ビッグデータ時代においては、既存の計算原理の性能では太刀打ちできないのは明白であり、このような新時代に資する「新計算原理」の必要性が急速に高まっている。しかも、超ビッグデータ時代の到来とともに、「ポスト・ムーア」時代が到来する。したがって、「新計算原理」を実行する今後のコンピューティングデバイス・システムの高性能化・低消費電力化には、限界を迎える微細加工技術の進展による半導体の高集積化を活用したプロセッサーの処理能力向上だけでなく、3 次元積層メモリーや不揮発性メモリー・光ネットワーク・各種省電力技術・新原理デバイス、さらにはそれらを活かすシステムソフトウエアやアプリケーションの進化を誘うコ・デザイン開発が必要不可欠である。

以下では、森羅万象解析エンジンであるハイパフォーマンスコンピューター（HPC）の現状を概観するとともに、HPC と AI と超ビッグデータとの必然的統合に焦点を絞って、「新計算原理」の観点から解説する。

［ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）の現状俯瞰］

2020 年代においてエクサ（10^{18}）フロップス（1 EFLOPS: 毎秒 100 京回の浮動小数点演算能力）を達成するエクサ級スーパーコンピューターの実現に向けて、日米欧中の各国がしのぎを削っている。主に、小型化すればするほど高速かつ省電力になるデナードスケーリングの終焉により、必要な並列性が億単位とも予想され、その際に消費電力を約 20 ～ 30 MW に抑えるには 33 ～ 50 GFLOPS/W と、現時点の世界最高値を 5 倍程度改善しなくてはならず、2008 年に達成されたペタ（10^{15}）フロップス（PFLOPS）よりはるかに困難である。以下では、HPC 研究の現状を概観する。なお、それらの技術的詳細は、2015 年度版俯瞰報告書（情報科学技術分野）[1] に記載されているので、ここでは割愛する。

HPC 研究としては、（a）超高性能計算能力を有するスーパーコンピューターのハードウエアおよびソフトウエアのシステム技術、および（b）スーパーコンピューターが有する計算能力を科学や産業などに活用するアプリケーション技術の研究開発、さらに（a）（b）全体のコ・デザインを挙げることができる。2015 ～ 2020 年にかけて、上記（a）のシステム技術に関して各国はエクサへの橋渡しとして数百ペタフロップスに至る中間的な性能のマシンを計画しており、数十万～数百万のプロセッサーを内包するハードウエアを、厳しい電力制約化で実現するために、メニーコア・ヘテロジニアス型アーキテクチャーや、積層メモリー・不揮発性メモリー、超高速光ネットワーク、高効率冷却など、IT における最先端のデバイスやハードウエアをインターネットデータセンター（IDC: Internet Data Center）等に先行して採用する傾向が高まっている。加え、巨大な電力を消費する大規模システムの高度な信頼性の達成、数億の並列性の有効なプログラミングなど、大規模スパコンの各種システムソフトウエア技術の研究開発にも多くの投資がなされている。上記（b）のアプリケーション技術に関しては、新たな数値的な手法やアルゴリズムにより、現行の数十 PFLOPS のトップスパコンにて数百万から 1000 万以上の並列性を有効に活かしたアプリケーション群が多く出現しているが、エクサへ到達する事の技術的な困難さから、アプリケーション・システムソフトウエア・ハードウエアの共同の研究開発「コ・デザイン」の重要さが強調され、各種プロジェクトに取り入れられている。

世界のスパコンの性能の上位 500 位までのコンピューターを LINPACK ベンチマーク（密行列の大規模連立一次方程式を解くベンチマーク）でランキングし、半年ごとに更新される TOP500 リスト [2] では、2016 年 11 月版で、中国国立スーパーコンピューターセンター（江蘇省無錫市）の「神威太湖之光（Sunway TaihuLight）」が 2016 年 6 月の初登場首位に引き続き、ダントツで首位の座を守った（93.0 PFLOPS）。2013 年 6 月から 2016 年 6 月まで首位の座を守ってきた中国防衛大学の「天河 2 号（Tianhe-2）」は、Sunway TaihuLight に比べて約 1/3 倍程度の 33.9 PFLOPS で連続世界 2 位であり、日本の「Oakforest-PACS」（東大・筑波大 :13.5 PFLOPS）は 6 位、「京」は 7 位（理研 :10.5 PFLOPS）であった。なお、Tianhe-2 のプロセッサーは米 Intel 製であるのに対して、驚くべきことに Sunway TaihuLight のプロセッサーも接続回路もすべて中国純製であった。このプロセッサーは、中国の国家並列計算機工程技術研究中心（NRCPC）が独自開発した 260 コア高性能プロセッサー「SW26010」であり、Sunway TaihuLight ではこのプロセッサーを搭載したシステムを 40960 ノードで構築することで、合計 10649600 コアという大規模システムを構築している。

［超ビッグデータと AI と HPC との必然的統合について］

ビッグデータ処理（特に大規模グラフ解析）に関するスーパーコンピューターの国際的な性能ランキング Graph500 リスト [3] においては、グラフの幅優先探索（1 秒間にグラフのたどった枝の数、Traversed Edges Per Second: TEPS）という複雑な計算を行う速度で評価され、2016 年 11 月版で、1 位「京」（理研 :38621 GTEPS）、2 位「Sunway TaihuLight」（中国 :23756 GTEPS）、3 位「Sequoia」（米ローレンスリバモア国立研究所 :23751 GTEPS）、4 位「Mira」（米アルゴンヌ国立研究所 :14982 GTEPS）であった。これらは、このようなデータ集約型の計算は今後市場拡大が予測されているビッグデータ

市場に HPC を適用するためには重要な指標である。また、産業利用など実際のアプリケーションで用いられる共役勾配法の処理速度の国際的なランキング HPCG（High Performance Conjugate Gradient）においては、2016 年 11 月版では、1 位「京」（理研 :602 TFLOPS）、2 位「Tianhe-2」（中国 :580 TFLOPS）、3 位「Oakforest-PACS」（東大・筑波大 :385 TFLOPS）、4 位「Sunway TaihuLight」（中国 :371 TFLOPS）であった。これは、TOP500 では「京」よりも上位で 9 倍以上のスコアを持つ「Sunway TaihuLight」などを上回っており、CPU の演算性能のみならずメモリーやネットワークも含めたシステム全体としての性能バランスを重視して設計開発された京の方が産業利用など実際のアプリケーションを非常に効率よく処理できることを示している。

スーパーコンピューターの電力効率を競うランキング Green500 リスト [4] の 2016 年 6 月版では、国内スパコン開発ベンチャーの PEZY/ExaScaler が開発したスパコン「Shoubu（菖蒲）」と「Satsuki（皐月）」が 1 ～ 2 位を独占した。ここで、2 位の「Satsuki（皐月）」は研究室の 3 m^2 のスペースに設置されており、TOP500 にランキングされた世界初のオフィス設置のスパコンであった。なお、Green500 は TOP500 に入っていることが前提であり、3 位には TOP500 を制した「Sunway TaihuLight」が入り、その消費電力性能も 2 位に僅差で迫る勢いであった。そして、Green500 の 2016 年 11 月版では、NVIDIA の最新アーキテクチャー「Pascal」をベースとした GPU「P100」を用いた NVIDIA 社内部向けシステム「DGX SATURNV」が 1 位（9.5 GFLOPS/W）、同じく GPU「P100」を使うスイス国立スーパーコンピューティングセンターの「Piz Daint」が 2 位（7.5 GFLOPS/W）となった [5]。そして、前回 1 位の「菖蒲」は 3 位に、前回 4 位の「Sunway TaihuLight」は 4 位に後退した。なお、今回の Green500 では、PEZY/ExaScaler は新たな値を登録しておらず、3 位になった菖蒲のスコアは前回のものであった。6 位以下では、日本最速の東大・筑波大の「Oakforest-PACS」が 6 位、京大の「Camphor 2」が 9 位に入るなど、日本勢が健闘した。また、ドイツの富士通テクノロジー・ソリューションズ本社に設置された富士通のサーバー機「QPACE3」も 5 位に入った。

近年の IDC におけるクラウドやビッグデータ基盤の出現により、HPC もそれらへの対応や、IDC インフラとの統合化の流れも始まっている。クラウドに関しては米国 DoE や NSF の試験的な導入を初めとして、Amazon HPC Instance[6] や Penguin Computing[7] が商用クラウド HPC サービスを開始している。また、各国のエクサの計画にはビッグデータも重要な項目として記載されている。ハードやソフトのシステムレベルの対応も要求され、シミュレーションが発生する莫大なデータの処理や、一般 IDC では扱えない規模や複雑さのビッグデータを処理するための基盤として期待されている。よって、森羅万象のデジタル化が劇的に進む超ビッグデータ時代においては、スーパーコンピューターが叡智を掘り起こすために必要不可欠なエンジンとなるためには、主に科学技術計算向けのスパコン用チップと深層学習向けの AI チップとの間で、要求性能が大きく乖離してはならない。なぜならば、脳におけるシナプスの発火 [8] という脳神経回路を模した演算処理（深層学習）は究極的には 1 ビット演算であるのに対して、科学技術計算では、現在の倍精度から 4 倍精度、8 倍精度と、求められる演算精度が高まる見通しであるからである。したがって、超ビッグデータ時代においては、演算精度を落として近似計算することも必要である。PEZY Computing を率いる齊藤元章 [9] によれば、演算精度を落とせば、演算コ

アを小さくできるので、今後登場する 7 nm（ナノメートル）プロセスであれば、1 チップに 4 ビット演算のコアを 100 万個搭載でき、現行の GPU の 1000 倍かそれ以上の性能をもった AI チップが実現できる見込みがある。

(3) 注目動向

［HPC 関連国家戦略について］

我が国では「フラッグシップ 2020」[17] という名称で、ポスト「京」コンピューターの開発が 2014 年度より開始され、2020 年度までに「京」の約 100 倍のアプリケーション実効性能をもつスーパーコンピューターの実現を目指している。また、2016 年 11 月、産業技術総合研究所が、深層学習の演算能力で世界一を狙って「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤（AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI）」の開発に乗り出した。深層学習に特化した演算性能で 130 PFLOPS を目指している [18]。

しかしながら、次に述べるように、米国、欧州、中国の動向から楽観視できないのが現状である。バラク・オバマは、米国大統領時代の 2015 年 7 月 29 日、スーパーコンピューターの研究開発を推進する新たな大統領令を発令した。この大統領令は、世界初となるエクサ級スーパーコンピューターの研究開発に専念する「国家戦略コンピューティングイニシアチブ（National Strategic Computing Initiative: NSCI）」を立ち上げ、HPC 分野における将来的な米国の地位強化を目指すものである [19]。このイニシアチブは、米国政府の下、エネルギー省、国防総省、国立科学財団の協力体制で、産学官共同により推進されており、ハード・ソフトのコ・デザインにより、アプリケーションが現行の約 100 倍で実行可能なエクサスケールシステムの開発が進められている。一方、欧州では、2016 ～ 2018 年に Human Brain Project [20] で 50 PFLOPS のスーパーコンピューターを設置する計画が進んでおり、Horizon2020 プロジェクト（2014 年～ 2020 年）の中で、エクサスケール技術の研究開発が進んでいる。また、中国でも、第 13 次 5 カ年計画（2016-2020）において、中国の威信をかけて 2 台の 100 PFLOPS 級スーパーコンピューターシステムの技術研究開発が進められている [21]。

［脳型コンピューティングのための AI チップの潮流について］

脳型コンピューティングのための AI チップの研究開発には、二つの異なる潮流がある。一方は、脳科学の知見に基づいて神経回路の働きを半導体で再現する「ニューロモルフィックチップ」を目指す流れであり、他方は、深層学習の演算を加速させる「深層学習アクセラレーター」を目指す流れである [22]。

前者の脳型コンピューティングに関しては、2016 年 3 月末、米国ローレンスリバモア国立研究所は、IBM リサーチと協力して、IBM のニューロシナプティックコンピューターチップ「TrueNorth」を使って、脳からヒントを得た深層学習のための極低エネルギー効率スーパーコンピューティングプラットフォームの開発を開始した [23]。また、日本では、2016 年 9 月、日本電気と東京大学は、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創として、「フューチャー AI 戦略協定」を結び、「ブレインモルフィック AI 技術」の早期実現を目指して、脳を模した専用のアナログ回路技術に関する

研究を開始している[24]。

後者の脳型コンピューティングに関しては、深層学習の演算を加速させる「深層学習アクセラレーター」を目指す流れである。この開発競争を先導しているのはNVIDIAであり、前述したように、Green500の2016年11月版[4]では、NVIDIAの最新アーキテクチャー「Pascal」をベースとしたGPU「P100」を用いたNVIDIA社内部向けシステム「DGX SATURNV」が1位（9.5 GFLOPS/W）を取り、深層学習用スーパーコンピューターの開発にも着手している。また、Googleは、機械学習ライブラリ「TensorFlow」向けにカスタマイズした深層学習専用プロセッサー「Tensor Processing Unit」（TPU）を独自開発し、同社のデータセンターで過去1年間にわたって使用しているとともに、韓国のプロ棋士イ・セドル氏に勝利した囲碁AIの「AlphaGo」にも使用していた[25]。驚くべきことにTPUは、深層学習のために開発したASIC（Application Specific Integrated Circuit、特定用途向けIC）で、GPU（Graphic Processing Unit）やFPGA（Field Programmable Gate Array）といった深層学習処理に使用する他の技術と比較して、消費電力当たりの性能は10倍である。TPUは機械学習向けにカスタマイズされているため、演算精度をそれほど必要ではなく、1演算あたりのトランジスタ数も少なくて済むのが利点であり、消費電力も小さい。したがって、機械学習に最適化された、1ワットあたりのパフォーマンスが極めて高いAIチップと言える。

［Microsoft StationQの挑戦］

Microsoftは、IBM、GoogleやD-waveとは全く違った量子コンピューター戦略をとっており、「新計算原理」に基づくトポロジカル量子ビットを使ったスケーラブルな量子コンピューターの開発に取りくんでいる[26]。

Microsoftは、2016年11月、革新的なトポロジカル量子コンピューターを世に送り出すためのプロジェクトを管理する最高責任者としてTodd Holmdahlを任命した[27]。彼は、これまで、Xbox、Kinectモーション・コントローラ、および、HoloLens拡張現実（AR）ヘッドセットの開発を導いてきた人物であり、今回、従来の量子コンピューターをロバスト性で凌ぐ可能性をもったトポロジカル量子コンピューターを製品化することを使命とした役職に就いたと言っても過言ではない。Microsoftは、世界中の共同研究者と一緒に量子コンピューターを構築するための取り組みを積極的に行っており、研究コンソーシアム的な研究施設StationQを世界各国に建設し、トポロジカル量子コンピューティングに関する研究を行っている。

Microsoftは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校キャンパスにStationQ Santa Barbaraという研究施設を先導的に開設し、トポロジカル量子コンピューティングに関する先導的な基礎研究を行ってきた。StationQ Santa Barbaraを率いるのが、数学者Michael Freedmanであり、トポロジーにおける難問とされるポアンカレ予想が4次元において成立することを証明し1986年にフィールズ賞を受賞した人物である。ここでは、数学者、物理学者、およびコンピューター科学者が共同で、2016年のノーベル物理学賞受賞テーマの新概念が開いた扉の先に見いだされた物質のトポロジカル相がどのように、頑強でスケーラブルなトポロジカル量子コンピューター・アーキテクチャを構築するために使えるかを理解することを目的として、世界中の大学の研究者とも協力しながら基礎研

究を進めている。また、Microsoft レドモンド本社の敷地にある StationQ Redmond では、量子アーキテクチャーと量子計算に関する研究を行っており、実世界量子アルゴリズムの開発とそれらの意味を理解することに専念するとともに、スケーラブルでフォールトトレラントな量子コンピューターのアルゴリズムやプログラムを作るための包括的なソフトウエア・アーキテクチャをデザインすることに打ち込んでいる。

Microsoft は、世界中の共同研究者と一緒にトポロジカル量子コンピューターを構築するための取り組みを積極的に行っており、キーとなる量子技術を有する世界トップクラスの有力な教授をその立場を維持したまま、戦略的に雇い入れている[26]。例えば、オランダのデルフト工科大学教授 Leo Kouwenhoven、デンマークのコペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所教授 Charles Marcus、スイスのチューリッヒ工科大学教授 Matthias Troyer、豪シドニー大学教授 David Reilly 教授の 4 氏が、各大学の教授の立場を維持したまま Microsoft に戦略的に雇い入れられたのである。Microsoft は、各大学にそれぞれ Station Q Delft、Station Q Copenhagen、Station Q Zurich、Station Q Sydney を開設し、プロジェクト最高責任者 Todd Holmdahl のもと、トポロジカル量子コンピューター研究開発に全 Microsoft StationQ 総力上げてこれまで以上に積極的に取り組む姿勢を見せている[26),27]。

（4）科学技術的課題

［ポスト・ムーア時代の到来と新計算原理について］

コンピューティングにおける進歩は科学技術が関係するほとんどすべての領域を変容してきた。とりわけ、新しい発見の探究はコンピューティングのすべての領域を横断したイノベーションをもたらしている。現在、我々は入手可能なデータの Volume（量）、Velocity（速度）、Variety（種類）から洞察を得るための能力の限界に直面しており、コンピューティングにおける共生的な進歩を通して対処せざるを得ない根本的な課題を提起している。前例のない複雑さのデータの本質を理解し洞察を得る能力は、森羅万象のデジタル化が劇的に進む超ビッグデータ時代に資する「新計算原理」によって大いに高められ、超ビッグデータ時代における叡智の光として進む道を正しく照らす炬火（かがり火）となるに違いない。

しかしながら、超ビッグデータ時代の到来とともに、「ポスト・ムーア」時代が到来する。したがって、「ポスト・ムーア」時代を見据えた「新計算原理」デバイスの基礎研究も必須である。当然このような総合的な開発法は、従来の微細化のみに頼るスパコン開発法と比べてはるかにコストがかかり、他のスーパーコンピューターや IDC サーバーから組み込みに至る他の IT エコシステムに対する技術的なレバレッジによる開発コストの分散が総合的なコスト削減、および迅速な進化の鍵となる。その点、他のマーケットにレバレッジが期待できず、かつ国際的にシェアが伸びない我が国のスパコンに特化した開発法は圧倒的に不利になると言える。今後はアプリケーションやシステムソフトウエアの汎用性を担保するハードウエア開発を目指すと共に、コ・デザインのためには国際共同開発を含めた体制を確保することが重要となる。この点、米 DoE と文部科学省間のエクサスケールスーパーコンピューターのシステムソフトウエアに関する日米協力取極[10] が締結されて

おり、その具体化が今後望まれる。

「ポスト・ムーア」時代を見据えたとき、相対的なデータ移動を可能とするアーキテクチャーとして、チップ間に光配線を用いてアルゴリズムを光で実行することが必要になってくる。また、相対的な計算量の伸びに対して、半導体パッケージや帯域幅の伸びはよくないことを鑑みると、相対的な計算量を減らすには、例えば、間違ってもいいから精度を許容する近似計算をして相対的な計算量を減らすことができるような計算方法を取り入れる必要がある。また、リアルタイム性を、今のビッグデータ処理に求めると、従来型のデータベースでは間に合わない。精緻なマイニングをすると計算量が増えてしまう。FLOPS が上がらなくなったら、どうするのか !? そのためには、ニューロモルフィックコンピューティングや量子コンピューティング等を取り入れて、計算量を減らすことも考えられる。そのためには、新しいアーキテクチャーを設計しなければならない。

マクロ・スコピックな観点から科学技術的・政策的課題を鑑みると、多様性のあるインフラ整備が大切であるが、プレーヤーが少ないのが現状である。また、ミクロ・スコピックな観点からは、やはり「新計算原理」に基づいたデバイスの深化が必須である。IT の研究分野は、応用分野であると思われているが、ロングタームの基礎研究が重要であり、必要不可欠である。企業が研究開発をしているからショートタームで物事を考えがちであるが、すぐに役立つと考えるのは間違いであり、肝に銘じるべきである。しかも、応用研究がもたらした社会実装の成果でもうかったお金を、米国企業（例えば、Microsoft や Google）のように基礎研究に回すべきである。

「新計算原理」は、世の中を変革する可能性が高い。このようなコンピューティングの変革期に、日本から新しいプレーヤーが出てくる可能性がある。そのためには、たくさんの種をまく必要がある。芽が出たら、集中投資すればよい。「ムーアの法則」の終焉が来るのは分かっているが、そのためにも、基礎研究が必要不可欠である。十数年後に待ち受ける「ポスト・ムーア」時代に向けた革命のための基礎研究を急がなければならない。

(5) 政策的課題

[量子コンピューティングに関する先導的基礎研究からみた人材育成戦略]

2015 年度版俯瞰報告書（情報科学技術分野）[1] の「量子コンピューティングデバイス」の章において、先導的基礎研究からみた人材育成戦略が記載されている。これは、全く「新計算原理」にも当てはまることであり、肝に銘じなければならないことである。以下に、引用文献をアップデートして抜粋する（量子コンピューティングデバイスに関する技術的俯瞰内容は、上記俯瞰報告書 [1] を参照のこと）。

ムーアの法則に頼るシリコンチップの高性能化が曲がり角にさしかかり、また、最新のチップはすべて海外に外注生産という状況を鑑みると、我が国は新しい発想に基づく素子のデザインと知財化に注力すべきフェーズを迎えている。量子アニーリングというコンセプト [11),12)] が日本で発明され、米国の研究者がそれに少しだけひねりを利かせて広めることに成功し、そこに価値を見いだしたカナダの D-wave 社 [12),13)] がやはり日本で発明された超伝導量子ビット [14)]、磁束量子パラメトロン [15)] といった手法を組み合わせて製品化に成功した過程を解析する事が重要であろう。1980 年代に電子立国として君臨した日本は、

米国で発明されたトランジスタ、酸化膜、プレーナー型接合、集積回路技術を引き継ぎ、高度な製造技術で向上させた一方、時には人まねと非難された歴史がある。量子アニーリング装置の要素技術の多くは日本の発明ということで大きく前進したが、製品化は北米が先んじた。コヒーレントイジング装置[16]も我が国の発明であるだけに、これからが産学共同の腕の見せ所である。いずれにせよ高度な基礎科学的成果をどのように組み合わせるかがイノベーションである。よって世界初の製品化を一途の目標として高度な基礎科学的成果を理解し、組み合わせることができる人材の育成が急務である。世界に通用する工学博士の育成といってよいであろう。そのような人材育成は、我が国の大学で実行するものと、一人でも多くの日本人を世界に飛び立たせる 2 本立てで実行すべきであり、そのような政策の企画・実行が期待される。

(6) キーワード

超ビッグデータ、ムーアの法則、ポスト・ムーア時代、森羅万象のデジタル化、エッジコンピューティング、高性能アプリケーション、量子コンピューティング、ニューロモルフィックコンピューティング、最適化、グラフ問題、深層学習、人工知能、メニーコア、ヘテロジニアス型アーキテクチャー、低消費電力システム、冷却技術、光ネットワーク、Approximate Computing（積極的な近似計算）

(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	○	→	・スーパーコンピューターに関する基礎研究は産官学で行われているが、米国には質・量とも劣る。 ・ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の一部で量子最適化装置の開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	・京コンピューターが稼働し、対応する超並列アプリケーションの開発が進展し、ポスト京の開発もスタートしている。 ・深層学習の演算能力で世界一を狙って「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤（AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI）」の開発に乗り出した[18]。 ・スーパーコンピューターベンチャー企業の PEZY Computing が低消費電力スーパーコンピューター開発に取り組んでいる。また、AI ベンチャー企業の Preferred Infrastructure が、深層学習の研究開発を行っている。 ・富士通は、従来技術を深化させたトランジスタを用いて、組み合わせ最適化問題を 1 万倍速く解く技術を開発した[28]。東芝は、脳型 AI チップをフラッシュ派生技術で省電力化させることに成功した[29]。 ・産業力の低下から企業における、量子コンピューティングデバイスに関する基礎研究が不振である。
米国	基礎研究	◎	→	・DoE を中心にスーパーコンピューターに関する研究費の手当がされ、大学・メーカーにも手厚く研究費が渡り、多くの研究者がスーパーコンピューターに関する基礎研究に携わっている。 ・脳型および量子コンピューティング研究者の層が厚く、様々な基礎研究へ支援策が講じられている。

	応用研究・開発	◎	→	・HPC 用チップは、Top500 において圧倒的なシェアを握っており、それらを利用したアプリケーション開発、システムソフトウエア開発、ハードウエア開発技術も、米国が最先端を走っている。 ・IBM が、ニューロシナプティックコンピューターチップ「TrueNorth」を開発している。 ・Google、IBM、および Microsoft といった主要企業が量子コンピューターの開発に挑戦している。
欧州	基礎研究	○	↗	・Horizon2020 で欧州でもビッグデータ等と共に予算措置がなされ、高い性能を有するシステムも各所に設置、アプリケーションやシステムソフトウエア中心に競争力の高い研究がなされている。 ・英国、オランダ、ドイツ、デンマークなどで量子コンピューティングに関する基礎研究に対する多額の支援が行われている。
	応用研究・開発	△	↗	・一部の特殊なスーパーコンピューターを除き、独自のスーパーコンピューターのシステム研究は弱いが、ARM プロセッサーや Extoll などを含む一部の技術を中心に、新たな開発の試みが試みられている。 ・脳型および量子コンピューティングデバイスの企業による研究開発が見受けられない。
中国	基礎研究	△	↗	・基礎研究はハード・システムソフトウエア・アプリケーションの全領域でまだ日米欧に比べて弱いが、急速に力をつけつつある。 ・量子コンピューティングに関しては、まだ研究が始まったばかりで、せいぜい 10 年程度しか蓄積がなく、他国に比べて大きく出遅れている。
	応用研究・開発	◎	↗	・Tianhe シリーズだけでなく、米国技術を買った上で追加開発にて独自開発した Shenwei など、大規模スーパーコンピューターを構築する力は日米に匹敵する。比較して大規模アプリケーション技術はまだ弱いが、最適化・運用技術は急速に向上しつつある。スーパーコンピューター TOP500 でダントツの首位をキープした Sunway TaihuLight のプロセッサーも接続回路もすべて中国純製であった。このプロセッサーは、中国の国家並列計算機工程技術研究中心（NRCPC）が独自開発した 260 コア高性能プロセッサー「SW26010」である。 ・2015 年 7 月、中国科学院と Alibaba は、「中国科学院—Alibaba 量子計算実験室」を共同設立し、量子情報科学研究を開始した。
韓国	基礎研究	×	→	・スーパーコンピューターの基礎研究は見るべきものがほとんどない。 ・韓国科学技術院（KAIST）が、アナログ回路を使うアプローチを採用して、深層学習向け AI チップを開発している。 ・米国・欧州で学んだ研究者を活発にリクルートし、量子コンピューティングに関する基礎研究の裾野を広げている。
	応用研究・開発	△	→	・スーパーコンピューターの計算能力は進展しておらず、応用技術の進展もない。 ・韓国サムスン電子は、英国 AI チップ開発スタートアップ企業 Graphcore に 34 億ドルを出資した。 ・量子コンピューティングに関する研究開発が見受けられない。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（8）参考文献

1）JST-CRDS, 2015 年度版俯瞰報告書（情報科学技術分野）
https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-04.pdf（閲覧日 2017-2-8）
2）TOP 500 Supercomputer Sites: http;//www.top500.org/（閲覧日 2017-2-8）

3）The Graph 500 List: http://www.graph500.org/（閲覧日 2017-2-8）
4）The Green500 List: http://www.green500.org/（閲覧日 2017-2-8）
5）Tiffany Trader, “Nvidia Sees Bright Future for AI Supercomputing”（Nov. 23, 2016）
https://www.hpcwire.com/2016/11/23/nvidia-bright-future-ai-supercomputing/
（閲覧日 2017-2-8）
6）Amazon AWS HPC instance: http://aws.amazon.com/hpc/（閲覧日 2017-2-8）
7）Penguin Computing: http://www.penguincomputing.com/（閲覧日 2017-2-8）
8）甘利俊一（監修), 深井朋樹（編集), 脳の計算論（東京大学出版会 , 2009）.
9）齊藤元章 , エクサスケールの衝撃（PHP 研究所 , 2014）.
10）総合科学技術・イノベーション会議 , “スーパーコンピュータに関する協力取極”
（評価専門調査会会議資料）（閲覧日 2017-2-8）
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu109/siryo1-2_part15.pdf
11）T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model,” Physical Review E 58, 5355（1998）.
12）西森秀稔 , 大関真之 , 量子コンピュータが人工知能を加速する（日経 BP, 2016）.
13）J. Condliffe, “Can a Powerful New Quantum Computer Convince the Skeptics?” MIT Technology Review（January 24, 2017）:
https://www.technologyreview.com/s/603438/（閲覧日 2017-2-8）
14）Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box” Nature 398, 786（1999）.
15）JST-ERATO 後藤磁束量子情報プロジェクト（総括責任者・後藤英一）:
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/gjrj_PJ.html（閲覧日 2017-2-8）
16）K. Takata, S. Utsunomiya, and Y. Yamamoto, “Transient time of an Ising machine based on injection-locked laser network,” New Journal of Physics 14, 013052（2012）.
17）理化学研究所 計算科学研究機構 , “フラッグシップ 2020 プロジェクト”
http://www.aics.riken.jp/jp/overview/post-kcomputer/（閲覧日 2017-2-8）
18）National Institute of Advanced Industrial Science and Technology（AIST), “AI Bridging Cloud Infrastructure（ABCI）”
http://www.itri.aist.go.jp/events/sc2016/pdf/P06-ABCI.pdf（閲覧日 2017-2-8）
19）The National Science Foundation（NSF), “The National Strategic Computing Initiative（NSCI）”:
https://nsf.gov/about/（閲覧日 2017-2-8）
20）Human Brain Project: http://www.humanbrainproject.eu/（閲覧日 2017-2-8）
21）JST Science Portal China, “第 13 次五カ年計画、中国の技術革新計画が明らかに”
http://www.spc.jst.go.jp/news/160704/topic_4_03.html（閲覧日 2017-2-8）
22）浅川直輝 , “東芝の「脳を模倣した」AI チップ、フラッシュ派生技術で省電力化 ,
日経コンピュータ ITpro ブログ（2017 年 2 月 1 日）
http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/column/17/013000015/013100003/（閲覧日 2017-2-8）

23）Lawrence Livermore National Laboratory（LLNL）news（March 29, 2016）, “Lawrence Livermore and IBM collaborate to build new brain-inspired supercomputer”
https://www.llnl.gov/news/lawrence-livermore-and-ibm-collaborate-build-new-brain-inspired-supercomputer（閲覧日 2017-2-8）
24）日本電気プレスリリース（2016 年 9 月 2 日）, “NEC と東京大学、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創を開始”
http://jpn.nec.com/press/201609/20160902_01.html（閲覧日 2017-2-8）
25）Wired.com（October 28, 2016）, “How AI Is Shaking Up the Chip Market”
https://www.wired.com/2016/10/ai-changing-market-computer-chips/（閲覧日 2017-2-8）
26）Microsoft Research, Station Q（Worldwide consortium for the advancement of topological quantum computation）:
https://stationq.microsoft.com/（閲覧日 2017-2-8）
27）Microsoft Official Blog, “Microsoft doubles down on quantum computing bet”
https://blogs.microsoft.com/next/2016/11/20/microsoft-doubles-quantum-computing-bet/（閲覧日 2017-2-8）
28）富士通研究所ニュースリリース（2016 年 10 月 20 日）, “量子コンピュータを実用性で超える新アーキテクチャーを開発”：
http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/10/20-1.html（閲覧日 2017-2-8）
29）東芝ニュースリリース（2016 年 11 月 7 日）, “ディープラーニング（深層学習）を低消費電力で実現する脳型プロセッサーを開発”
https://toshiba.semicon-storage.com/jp/company/news/news-topics/2016/11/micro-20161107-1.html（閲覧日 2017-2-8）

3.4 ロボティクス

ロボティクスは、高い自律性を持つ機械や機械と人間の緊密な相互作用を実現することで、安全・安心で質の高い生活をもたらす新たな社会システムの形成に貢献する研究開発領域からなる俯瞰区分である。IT との融合により、ロボットの自律化による適用領域の拡大、ネットワーク化やシステム化による多様なサービスへの組み込みが進みつつあり、今回戦略レイヤーにおいて取り上げることとした。

本俯瞰区分では、1）社会インフラ、モビリティー、生活支援、医療、製造などの応用領域からみたニーズとニーズに応えるための技術群とその発展の方向性を明確化すること、2）ロボティクスに革新的変化をもたらしうる新興領域を明確化すること、3）技術の発展、社会における利活用促進、産業競争力の強化の観点での重要性、の三つの観点から、以下の九つの研究開発領域を採り上げた。

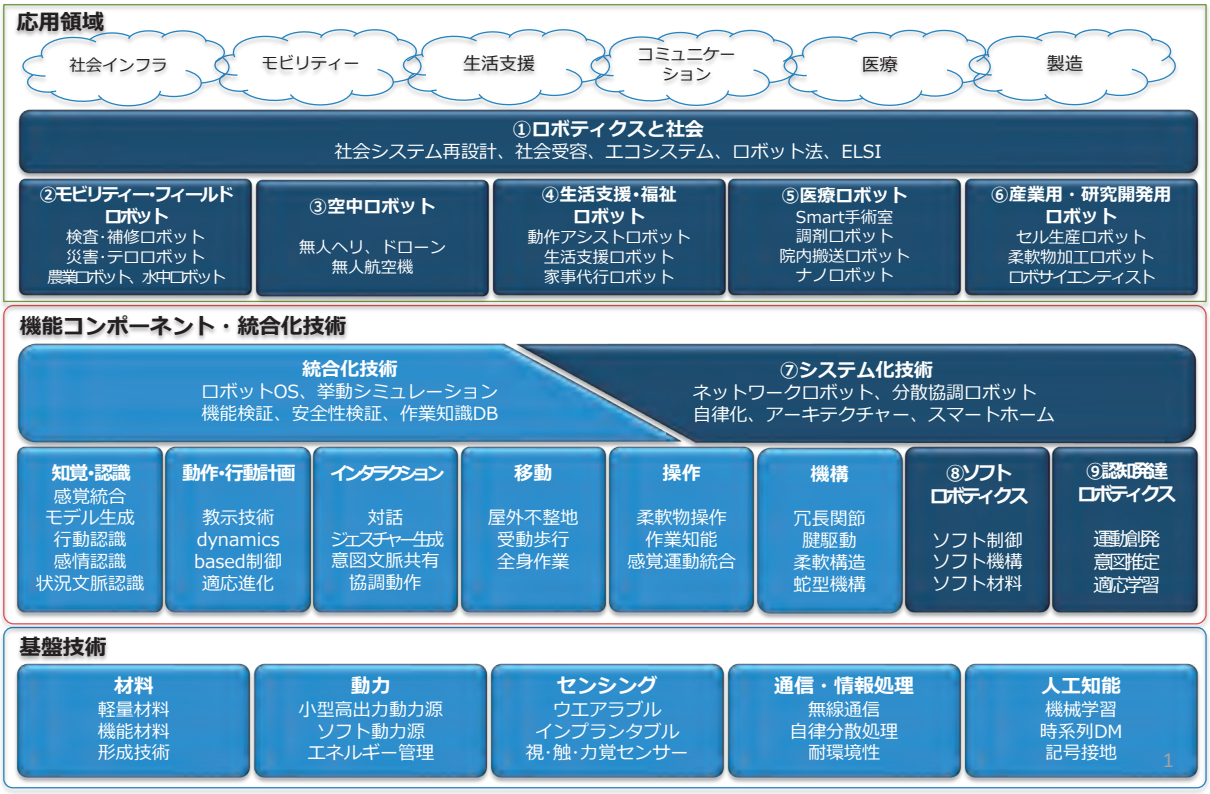

図 3-4-1　ロボティクスの俯瞰図

①ロボティクスと社会

ロボティクスの要素技術が一定レベルで整いつつあるなかでシステム技術の進展を加速する仕組み、社会への導入に伴うリスク軽減するとともに便益を最大化するための制度設計、社会への浸透を加速するためのビジネスとしてのサイクルを実現するエコシステム構築を含む社会受容の促進など、ロボティクスによる単なる既存機能の置き換えではない社会システムの再設計に係わる研究開発領域である。

②モビリティー・フィールドロボット

重要な機能として移動機能を備え、目的となるフィールドで作業を行うロボットを実現と利活用を目指す研究開発領域である。その適用領域は、農業、インフラ検査・保守、災

害調査・レスキュー、稼働するフィールドも陸上だけでなく、海中、空中などの拡がりがある。ここでは、陸上と海中で稼働するロボットを扱い、空中で稼働するロボットは別途、空中ロボットの研究開発領域で扱う。

③空中ロボット

人の操縦ではなくコンピューターで制御された自律的飛行が可能な飛行ロボットであり、小型無人航空機、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）、UAS（Unmanned Aerial System）、ドローンとも呼ばれている。センサー、マイクロプロセッサー等が超小型化・MEMS 化され高性能化された恩恵を受けて、数百グラムから数キログラム程度の小型で電動型の自律飛行可能なマルチローターヘリコプターが約 10 年前に誕生した。空中ロボットはホビー用から産業用まで幅広く、空の産業革命をもたらすといわれている。

④生活支援・福祉ロボット

ロボット工学の生活支援や福祉への活用であり、動作支援や見守りなど、日常生活に密着して人と深く関わり合う。特に、生活全般にわたって介護が必要な重介護の支援が、まずは重要なターゲットであり、支援が必要な主な活動として食事、排せつ、入浴・着替え、移動の四つが挙げられる。こうした活動の支援の方法自体の研究とロボット活用を目指す研究開発である。

⑤医療ロボット

ロボット工学の医療への活用であり、既にさまざまな応用事例が存在し、かつ将来的により広範な先進的応用が期待される研究開発領域である。応用展開は多岐に及ぶが、ここでは、ある一定の動作を伴う、医療支援を目的とするロボットを医療ロボットと位置づける。特に注目すべきは、機構・制御・センサー技術を統合した医療ロボットによる治療・診断・分析の統合により、従来には得られなかった医療効果向上を目指す研究開発である。

⑥産業用・研究開発ロボット

重工業や電子製品製造などの特定の作業に利用されてきた産業用ロボットの利用領域を食品、服飾、農林水産、サービス、医療・介護等の分野へ拡大するための基盤技術の確立、および、効率的に高い精度の作業を行うという特長を活かした先進的な取り組みが進みつつある研究開発現場で利用される研究開発ロボットの実現と利用拡大を目指す研究開発が進んでいる。

⑦システム化技術

ロボットは、認識、判断、計画、動作の各知的処理要素の統合、機構、センサー、アクチュエーター、電子回路、コンピューター、電源、配線、外装、ソフトウエアの各構成要素の統合、さらには、移動、マニピュレーション、対話、ユーザーインターフェース等の機能の統合により構成されることから、ロボティクスはシステム化の技術といえる。特に、より自律的な処理、より広範囲な状況の変化に応じた処理を可能とする知能化と各要素や部位を集積・統合する基盤となるプラットフォーム技術の研究開発が進んでいる。

⑧ソフトロボティクス

ロボットシステムにおける物理的な柔軟性（ソフトネス）を取り扱うロボティクスの分野で、今年急速に発展し注目を集めている。主要な研究テーマとして、柔軟性を積極的に利用した新しいロボットの開発、柔軟物体のモデル化や制御、生物システムにおける柔軟性の機能の解明などが挙げられる。ロボットへの接触安全性の付加、高分子材料によるロ

ボットの安価な製造の実現などにより、ロボットの応用拡大への貢献が期待されている。
⑨認知発達ロボティクス
　ロボットの知的機能を、従来のように直接プログラミングや単機能学習で実現するのではなく、人間の認知発達と同様に自律的に累積的に獲得させることで、より柔軟・汎用かつ高度にすることを目指す。このために、認知科学や神経科学等の知見も統合しつつ、シミュレーションやロボットなどの人工システムにより人間と同等な認知発達過程を再構成することで、その仕組みの新たな理解や洞察を得ると同時に、発達する人工システムの設計論を得る、構成論的アプローチと呼ばれる研究手法をとっている。人間の認知に関する統合システム論的理解を提示する科学的価値と、現状の人工知能技術を越え、人間により近い知能を実現する工学的価値の両面が期待される。

　近年、製造業の国内生産回帰、労働生産性の向上、ロボット活用領域の拡大を狙って、各国とも次の時代に求められるロボティクスの研究開発を強化している。具体的には、米国政府の Robotics Initiative における人と協働するロボットへの注目、Google、Amazon をはじめとする巨大 IT 企業やスタートアップなどの動きである。欧州でも欧州委員会の AAL（Ambient Assisted Living）、SPARC と呼ばれる官民連携などの取り組みがある。また、各国がしのぎを削って開発を進めている自動運転車もロボティクスの技術の結晶である。ロボットの本質は、センサーとアクチュエーターを知的に統合することであり、状況変化に応じて物理的な効果をもたらす全ての応用分野に適用可能なので、IoT による住環境制御なども含め、ロボットとは見えない場面においてもロボティクスの活用の拡大が見込まれる。

3.4.1　ロボティクスと社会

（1）研究開発領域の簡潔な説明

「ロボティクスと社会」は、「ロボット活用コミュニティー創出」に関わるロボティクスをロボット社会実装学として構築する研究開発領域である。

［対象とするロボット、他分野との相違点］

ロボットは機能的には産業用ロボットとサービスロボットに分類することができる。産業用ロボットは、社会へさまざまな製品を送り出す生産性を向上させる 20 世紀に生まれた最大の道具のひとつである。サービスロボットは、対話案内、物流仕分け支援、インターネットを活用したテレプレゼンス、遠隔手術・診断、義足・義肢ロボットなど、人や社会と共創・共存する道具、システム、サービスであり、今後の発展が期待されている。本稿では、主に、こうした人と共に働くロボットを対象として論じる。

本研究開発領域の特徴は、形と動きをもち、生物や人の機能の一部あるいは全部を実現する機械であるロボットがベースとなることである。人（々）でもできるが、人手不足、長時間労働、単純作業、多地点移動などの体力的・精神的負担を軽減・排除する理由で、ロボットが代行した方が望ましいサービスだけでなく、衛生面、人命（原発被爆、伝染病）、近所関係などで、人ではできないサービスも対象となる。

［イノベーションとロボティクス］

イノベーション（社会変革）を実現する手段は技術革新ばかりでなく、社会制度改革や組織改革なども、その手段である。しかしながら、現在は科学技術イノベーションの時代といわれるように、科学技術により社会変革が成し遂げられることが多く見受けられる。これまでも、社会変革のうち、特に工場における生産革命が、産業用ロボットないしロボット技術により成し遂げられてきた。今後もロボットは社会変革を成し遂げるし、その可能性がより高まっている時代を迎えている。というのは、ロボットは、われわれと同様、形と動きをもち人に身近な存在であることから、今後、われわれ社会やコミュニティーに変革をもたらすことが可能になると予想されるからである。言い方を変えると、社会変革が実現された時に、その背景にロボットないしロボット技術が存在することが多くなる。

ロボットイノベーション（ロボットによる社会変革）は、ロボット技術の側からみれば、ロボット技術の研究開発とその社会実装活動であるが、逆に、変革される社会の側からみれば、ロボットおよびロボット技術により変革された社会の実現活動と位置付けられる。なお、社会の実現には広範囲な事項が含まれるため、ここでは社会の一部であるコミュニティーの実現ととらえて論じる。

つまり、本稿では、ロボットイノベーションに関わるロボティクスを、ロボット活用コミュニティー創出の観点から、ロボット社会実装学として論じる。いいかえると、ロボットによるイノベーションを興すために必要となる、ロボット先端技術課題、社会実装、社会的インパクトの最大化に関わる諸課題を「ロボット社会実装学」として論じる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

（2.1）ロボットの現状

国際ロボット連盟 International Federation of Robotics（IFR）の統計によれば、産業用ロボットとサービスロボットの市場は確実に拡大している[1)]。2015 年の世界市場は産業用ロボットがトップで 24 万ユニット、市場の約 2/3 がアジアで 14・4 百万ユニット、世界で最も成長した地域の一つである欧州は 5 万ユニット、特に東欧市場の成長が前年度比 29 ポイントの伸び、次いで北米が 3 万 4000 ユニットであった。2015 年の生産は、中国、韓国、日本、米国、ドイツの全生産量が 2014 年比で 11 ポイントの伸びを示し、全市場の 3/4 に相当する。2012-2015 年では、産業用ロボット市場の最大地域はアジアであり、年間平均で 15% 伸びており全世界の 50% を占める。次いで北米南米を含むアメリカ地域、その次は欧州となっている。アジアの伸びは、アメリカ地区とアフリカを足した年間平均 6 ポイントの伸びをはるかに超えている。

2015 年の専門家向けサービスロボットの世界市場は、2014 年より 25 ポイント伸びて 4 万 1060 台、売上額も 46 億ドルと前年比 14 ポイント伸びている。中でも物流システムは 1 万 9000 台で 46 ポイント伸びて、売り上げで 17 ポイント伸びた。今後、2019 年までの予測では、物流関連のサービスロボットが、インターネット通販が好調なために、もっと高い伸び率を予測している。これ以外に医療サービスロボットは専門家向け、個人 / 家族向け、世界市場向けに分類できるが、堅調な需要が続き、ビッグデータのインパクトと、人コンピューターインタラクション、その他の先端技術が繰り返し開発されて、2012 年から 2017 年にサービスロボット市場はこれらの効果を足し合わせると、年間 17・4 ポイントの伸びをしめ、2017 年には 461 億 8000 万台に達すると予想されている[1)]。

2019 年には 33 万 3200 台のサービスロボットと 2310 億ドルの市場が生まれると予想されている。中でも物流システムと倉庫内自動案内車の伸びが顕著で、サービスロボット全体の 53% に相当する。プロ向け掃除ロボットも主に床掃除を中心に 2016 年から 2019 年にかけて 1 万 1700 台が市場に出ると見込まれている。医療ロボットもこの期間順調に台数が伸びるとみられている[1)]。

（2.2）「ロボティクスと社会」へのアプローチ

ロボティクスと社会という新しい研究開発領域の議論を、ロボットやロボット技術の社会実装に有効なアプローチ、つまり、ロボット活用コミュニティーづくりへのアプローチの議論から開始する。

［ロボット活用コミュニティーづくりに有効なアプローチ］

ロボットの汎用性を活かしてロボットハードウエアとソフトウエアとその要素が安価で使いやすいプラットフォームという形で市場に提供され、サービス事業者がそれらのロボットプラットフォームを利用して実現されたロボットやロボットサービスの社会実装をすすめ、教育・研究機関が人材育成や社会啓発を担う体制が構築されれば、ロボットの実用化が推進され、ロボット活用コミュニティーが実現される。図 3-4-2 は、ロボット活用コミュニティーづくりに有効なアプローチをステークホルダからみた図となっているとともに、ロボット活用コミュニティーないしは経済的に持続可能なエコシステムの構成図

にもなっている。ロボット社会実装学の主要なステークホルダとその構成図といえる。

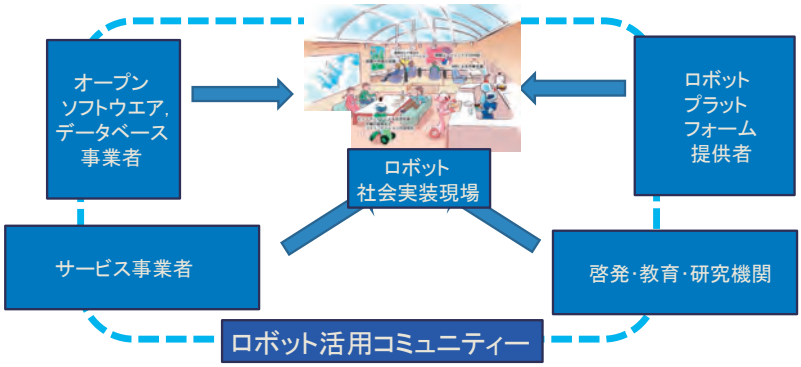

図 3-4-2　ロボット活用コミュニティーづくりに有効なアプローチ

［社会共創アプローチ］

一方、ロボット活用コミュニティーづくりを、それに有効な活動手法の観点から整理したのが、図 3-4-3 の社会共創アプローチである。

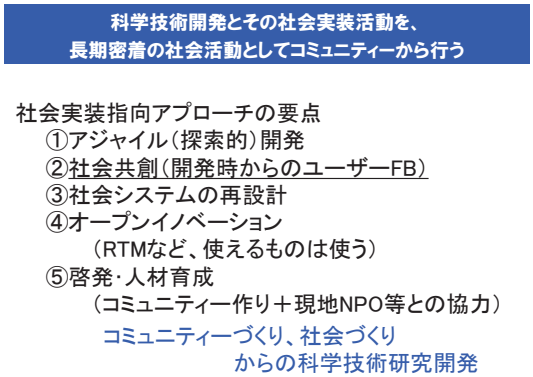

図 3-4-3　社会共創アプローチ

社会共創アプローチの要点は、①アジャイル開発、②社会システムの再設計、③コミュニティー共創、④オープンイノベーション、⑤新学問体系、教育・啓発、人材育成の並行プロセスとしての活動となっている点にある。このアプローチは日本学術会議の第 22 期の『提言：ロボット活用による社会課題解決とそれを支える先端研究の一体的推進方策～社会共創ロボティクス～』[2] のなかで提案されている。つまり、ロボット活用による社会課題解決や社会変革を実現するために、利用者、研究開発者、供給者が一体となったオープンイノベーションの枠組み「社会共創ロボティクス」の早急な確立と推進が不可欠であるとしている。その詳細は以下の通りである。

①アジャイル開発

実際の現場での利活用と開発・改良を直結し、迅速にフィードバックと開発・改良のサイクルを回す、いわゆる迅速な開発を実現する手法。

②社会システムの再設計

既存の作業、サービス、事業活動の一部をロボットで置き換えるという発想ではなく、それらの活動全体について、ロボット活用を前提としてシステム全体を見直し、再設計する。より大きなスケールでは、ロボットと人が協働する社会システムを創造することを目指す。

③コミュニティー共創

これらを進めるために、ロボットを利用する現場の当事者や管理者、事業主や出資者、ロボットの研究開発者と供給者、そしてロボットを用いた社会システムや新サービスの研

究開発者と実現主体、ロボットのサービス利用者などが一体となったコミュニティーが開発と利活用推進を行う。

④オープンイノベーション

こうした取り組みへの参入障壁を極力低くし、安価な開発ツールやプラットフォームの提供、的確な技術評価や可能性予測の能力を有する投資ファンドの育成、インターネット経由の協働、供給、投資（クラウドファンディング）等を兼ね備えたエコシステムからなるオープンイノベーションにより民間活力を喚起し推進力を確保する。

⑤ 新学問体系、教育・啓発、人材育成

これらの取り組みの方法論や理論的基盤となる、ロボティクスと社会的観点を融合した新たな学問体系の構築。および、人材育成と啓蒙、教育活動（ロボットやロボット技術を社会へ導入することを趣旨とした新しいロボコンなど)。

重要な対象分野の例として、災害・大事故・テロ等の対策、超少子高齢社会における医療と在宅看護・介護、高齢者等の自立生活支援と労働支援、交通や都市等のインフラとその保守、産業競争力強化に向けたフィールド作業や労働集約作業、多様なサービスの生産性と質的向上などがある。

これらの応用を実現するために、ロボットのハードウエアと運動、感覚、知能、コミュニケーション、ネットワーク化などの機能についてもさらなる高度化や革新が重要なことは言うまでもない。

[社会実装アプローチ]

ロボットイノベーションの推進段階を「基礎研究段階」→「応用研究段階」→「製品開発段階」→「ビジネス展開段階」にわけると、基礎研究段階と応用研究段階の間には、死の谷と呼ばれる壁が存在し、製品開発段階とビジネス展開段階の間には、ダーウインの海と呼ばれる障害が存在し、ロボットイノベーションの実現を妨げることが指摘されている。図 3-4-4 に示したような研究開発と社会実装を並列にすめる社会実装アプローチをとれば、この壁はなくなると考えられる。

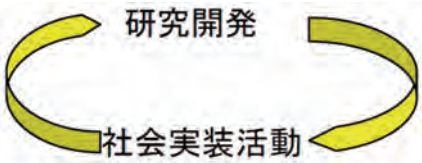

図 3-4-4　社会実装アプローチ

このアプローチは、ロボットの研究開発と社会実装開発を並行に進める活動が特長であるが、このアプローチに適した課題作業や作業環境を選択するとともに、その課題解決に適した技術を創出・選択・再利用することが重要である。その活動としては、初期段階からユーザーを取り込んで技術研究開発を実施するのみでなく、その利活用までを社会現場で推進するリビングラボラトリーとでも呼べるような拠点を決めた活動が有効である。この意味で、社会実装アプローチは、これまでのシーズ指向アプローチやニーズ指向アプローチを超えるアプローチとなっている。

[ロボットイノベーションプロセスからのアプローチ]

ロボットによって社会を変革する“ロボットイノベーション”を成し遂げるには、単に科学研究や技術開発を実施していれば事足りるものではない。図 3-4-5 に示したプロセ

ス群が、それぞれ研究と結びついて並行的に実施されることが必要要件である。それらのプロセス群は、a）グランドデザイン構築プロセス、b）事業モデル（ビジネスモデル）構築プロセス、c）技術開発プロセス、d）前述の a）～ c）を統合する統合プロセスあるいは統合システム構築プロセス、e）その社会実験プロセス、f）市場展開・開拓プロセス、g）啓発・教育プロセスとさらに、h）関連社会ルール改革プロセスである。以下に個々のプロセスごとに説明する。

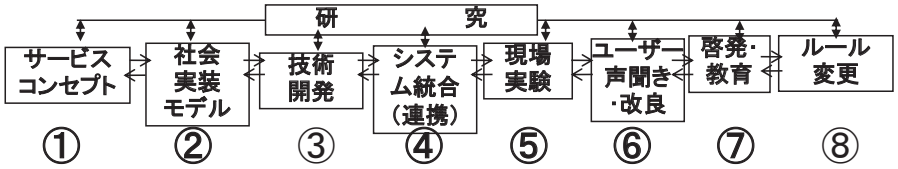

図 3-4-5　ロボットイノベーションプロセス

a）グランドデザイン構築プロセス

ロボットイノベーションを実現するには、実現するビジョンを明確にし、グランドデザインとして提示し、それを維持し追求し続けることが不可欠である。このような、最終的に目指す姿が常に明確になっていないと、活動期間中に動機や駆動力を失ったり、方向性を見失ったりしてしまう。

b）社会実装モデル構築プロセス

ロボットやロボット技術を活用して、人間社会を変化させ、変化を社会へ定着させるためには、ある程度の期間が必要である。最低限その期間中の継続性が維持されることが不可欠であり、資本主義の世の中では、経済的な合理性がないと継続できない。このため、社会への定着を可能とするビジネスモデルないし社会実装モデルが不可欠である。ロボット以外の代案と比べて経済的に合理的というだけでなく、倫理的・法的・社会的課題の観点からみて、利用者だけでなく、それ以外の人々にも受け容れられることが必須である。

c）技術開発プロセス

科学技術イノベーションを成しとげるうえで、優れた技術がこれを容易にすることは、論をまたない。人が欲しがるサービスやモノを実現する新しい科学的知見、技術が求められている。ただし、技術開発があれば、それだけで、科学技術イノベーションが成し遂げられるわけではないということも留意すべきである。

d）統合（インテグレーション）プロセス

グランドデザイン、ビジネスモデル、技術開発は、お互いにかなり異質なものである。これらの互いに異質な要素を統合することでイノベーションをもたらしうるシステムが実現される。こうした異質な要素をひとつのシステムにまとめ上げるために、統合（すり合わせ）が求められる。

e）社会実験プロセス

統合されたシステムにより社会実験が実施されることになる。社会実験においては、実験フィールドと参画者が重要な役割を果たす。これらを調達し、社会実験を成功させるには、時間も資金もノウハウも必要で、困難も伴うが避けて通れない道である。

f）市場展開プロセス
社会実験を通じてシステムの市場展開をはかることになる。このプロセスでは、実現システムへの市場展開投資が重要な役割を果たす。

g）啓発・教育プロセス
宣伝、啓発、教育は、市場展開のみならず、新しい人の参入や若いアイデアでの展開などに不可欠である。

h）社会システム改革プロセス
社会システムの改革もロボットイノベーション実現のための一要素である。

［イノベーション（社会変革）実現までの研究段階］

図 3-4-6 は、ロボットイノベーションをその進展段階で分類したものである。おのおのの段階の特徴がわかるようにそれが実施される場所、目標、必要とされるマネジメントも示してある。ロボットの研究は、いわゆる Toy World での研究から始まり、実世界、社会へと活動の場を広げてゆく。その段階は、「実験室内で実施される実験室段階（技術マネジメントが求められる）」→「研究者に好都合な限定された社会（社会実験マネジメントが求められる）で実施される実証実験段階」→「一般の社会やコミュニティーで実施される社会実装段階（ロボットの社会実装マネジメントが求められる）」→「広く社会に普及するために実施される普及段階（社会浸透マネジメントが求められる）」に分けられる。

図 3-4-6　ロボットイノベーションの研究段階とそれに求められること

［ロボットイノベーションをそのプロセスと研究段階からみた全体像］

ロボットイノベーションにおいて、このようなおのおのの段階に応じた研究開発や活動が、イノベーションプロセスごとに実施される。その状況を一覧マトリクスにしたものが図 3-4-7 である。縦軸にロボットイノベーションの進展の四つの段階を、横軸にロボットイノベーションの八つのプロセス（①～⑧）を、企画、実施、評価、刈り穫りの四つに分類した、4 ×

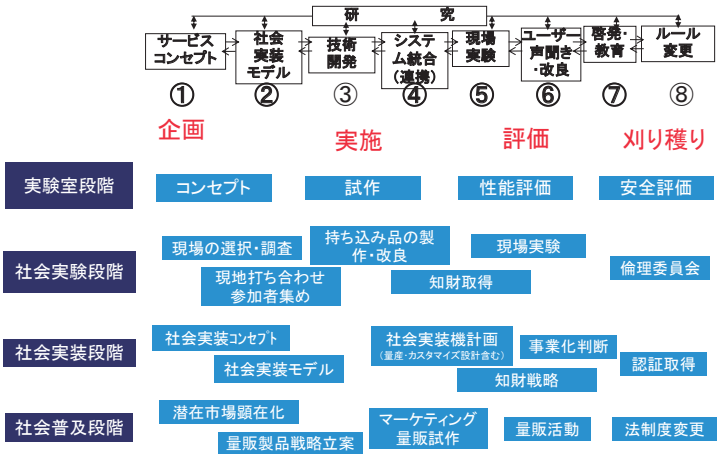

図 3-4-7　ロボットイノベーションをそのプロセスと研究段階からみた全体像

4 のマトリックスとなっており、それぞれの対応する部分に実施すべき研究開発や活動を記載したものである。これらは、ロボットイノベーションを段階を追って実現するうえで不可欠の活動であり、それぞれに有効な手法や知識が存在する。この観点からいうと図 3-4-7 はロボットの社会実装に必要な体系を示したものとなっている。このような体系が“ロボティクスと社会”におけるロボティクスの全体像である。

(3) 注目動向

［産業用ロボット活用コミュニティー創出の例］

最近、その成果が見えるようになってきた、産業用ロボット活用コミュニティー創出の試みを、注目動向として紹介する。このような成功活動事例から、ロボットイノベーションを実現する活動の内容が把握され、それに有効な手法を集積したロボット社会実装学の要素が明確化され、体系化されてゆくと考えられる。

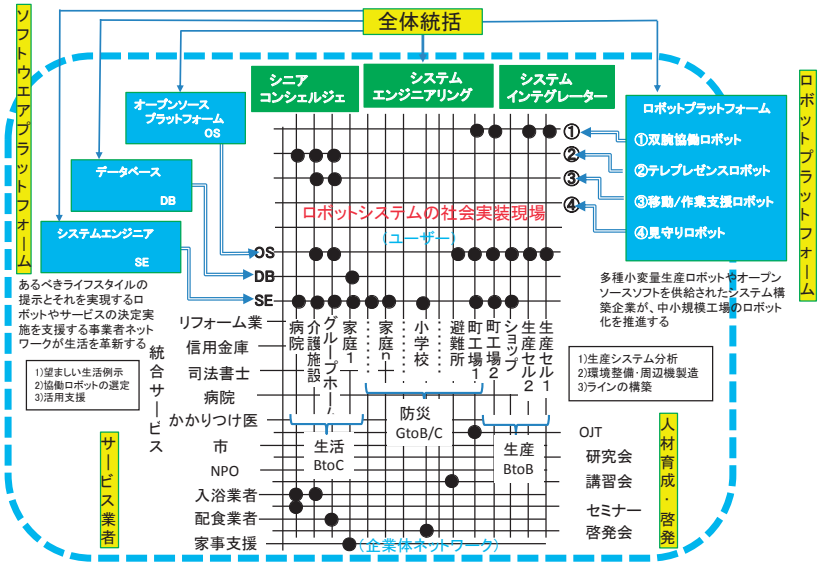

図 3-4-8　ロボット活用コミュニティーづくりの詳細図

具体的な事例の説明に入る前に、ロボット実用化に有効なアプローチの詳細な取り組み体制を図 3-4-8 に示す。

図中で、ハードウエアプラットフォームは右上、ソフトウエアプラットフォームは左上、サービス業者は左下、啓発・教育・研究は右下に配置され、その具体的な内容やステークホルダが書き込まれている。また、中央の縦線は、ロボット活用現場であり、産業用ロボット分野、生活支援分野、災害対応分野の典型的な事例が示してある。その上で、これらの現場におけるプラットフォームやサービス事業者、啓発・教育・研究との連携のある部分（接点のある部分）を「●」印で示してある。これらの連携を主導するのが、産業用ロボット分野においてはシステムインテグレータであり、生活支援分野ではシニアコンシェルジュ、災害対応分野では、システムエンジニアということになる。この図で示した体制のロボット活用コミュニティーの形成や、エコシステムの構築を推進することが、これからのロボット実用化において不可欠な事項である。

相模原市では、図 3-4-9 に示す体制が構築され、産業用ロボットの普及活動が推進されている。同市では、ロボットメーカーやソフトウエアハウスが、ロボットプラットフォームとしてのハードウエアやソフトウエアを提供するとともに、治具を製作している生産機器メーカーが市や市が雇用したコーディネーターと連携しつつロボット導入を希望する事業所に産業用ロボットを納入しており、その際に金融機関などがロボット導入を希望して

いる事業所の調査にあたることが実現されている。まだ、コミュニティー創出のレベルまでは達していないが、その端緒は切り拓かれている。

同市で実現されている産業用ロボット導入のプロセスを図 3-4-10 に示す。

金融機関（地方銀行や信用金庫）が、ロボットの知識を持つコーディネーターや市の職員と連携をとりながら、産業用ロボットの潜在市場であるさまざまな事業所を調査し、可能性がある場合には、導入プロセスに移っていく。金融機関が潜在市場であるさまざまな事業所を調査できる理由は、地方銀行や信用金庫にとって地域の事業所は融資などの金融業務の重要なターゲットであり、また、地域変革の担い手として投資の対象となるからである。地域の事業所に常にコンタクトをとり、情報交換することが銀行業務にとって不可欠なのである。こうした事業者は、必ずしもロボットの知識を持たないことが問題となるが、ロボット技術に詳しいコーディネーターと連携したり、啓発教育を受けたりすることで克服できる場合がある。

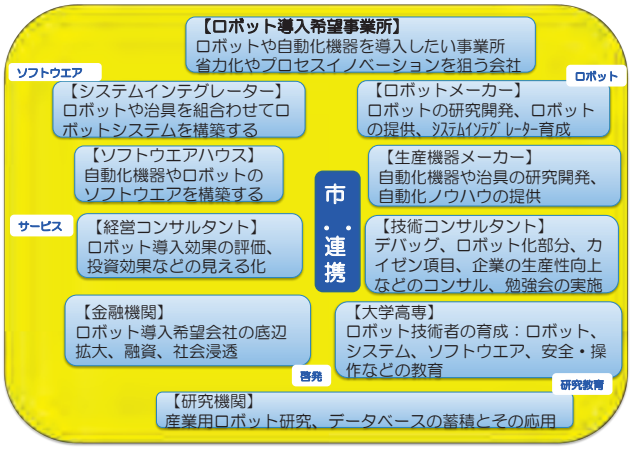

図 3-4-9　神奈川県相模原市の産業用ロボット導入プロジェクト体制

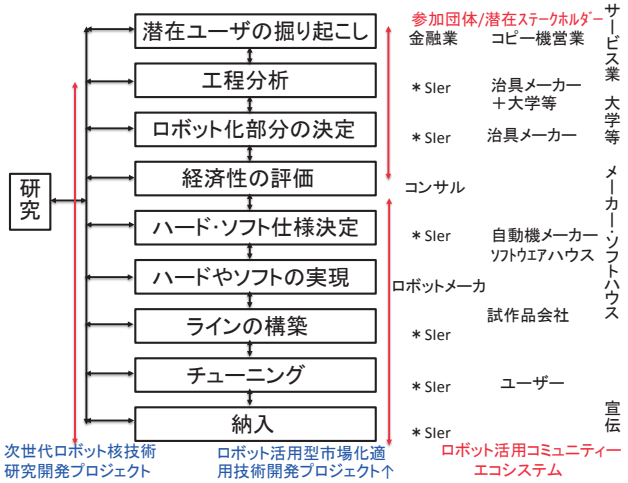

図 3-4-10　産業用ロボット社会実装プロセスと様々なステークホルダー

一方で、産業用ロボットの導入は、基本的には SIer が受け持つ仕事であるが、現実は地域に十分な質と量をもった SIer が存在するわけではない。その育成が重要課題となるが、同市では SIer 育成を次のような手順で実現している。例えば、ロボット分野に進出したい自動機器メーカーとロボット分野に専門性を持ちたいソフトウエアハウスが SIer チームを結成し、大学などの研究機関からロボットシステムやソフトウエアの手ほどきを受けながら事業所への産業用ロボット導入活動を実現する。

このようにして、同市では産業用ロボットの導入をさまざまな補助金やプロジェクト支援を受けて推進している。具体的には、経済産業省のロボット導入実証事業、ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト、次世代ロボット中核技術開発、地域活性化・地域住民生活等緊急支援交付金を活用して、産業用ロボットのロングテール市場の銀行による掘り起こしから治具メーカーを取り込んだロボット導入体制の構築まで、さまざまなレベルの工場への産業ロボット導入までの一貫した取り組みがなされている。こうした体制が、

今後も維持され、拡大して行くことで、産業用ロボット導入のためのエコシステムにつながってゆく。

（4）科学技術的課題

（4.1）倫理的・法的・社会的課題の検討

ロボットイノベーションを成し遂げるために、科学技術的な視点と同様に、これまで欠如していた最も大事な視点は、倫理的・法的・社会的課題（ELSI:Ethical, Legal and Social Issues）に関する検討である[4)]。

（4.2）イノベーションの推進段階を踏まえた課題

［科学技術イノベーションプロセス］

科学技術による社会変革（科学技術イノベーション）を実現する際には、図 3-4-5 に示したプロセスが全ての研究を結びつけて実施される必要があることは前述した。それらのプロセスは、①コンセプトづくり、②社会実装モデル構築、③技術開発、④統合、⑤社会実験、⑥改良、⑦啓発、⑧規則生成変革の各プロセスである。

［科学技術イノベーション実現への段階］

一方、科学技術イノベーションは、次の四つの展開段階を経ることも前述（図 3-4-6）した。それらは、Ⅰ）実験室段階、Ⅱ）実証実験段階、Ⅲ）社会実装段階、Ⅳ）社会普及段階である。具体的に説明すると、第Ⅰ段階の実験室段階では、実験室において研究が構想され、試作機が実現・評価される。それに続く、第Ⅱ段階の実証実験段階では、実現された試作機が、特定の限定された社会現場（実験社会）に導入され、社会実験を通じて科学技術研究が洗練される。

［社会実装活動の 4 × 8 マトリクス分析］

前述した①～⑧の 8 プロセスを横軸にとり、Ⅰ）、Ⅱ）、Ⅲ）、Ⅳ）の四つの段階を縦軸にとり、科学技術イノベーション活動をマトリクス表現し、それぞれのマトリクスの要素の活動として実施される主な活動内容を書き込んだ（図 3-4-11）。

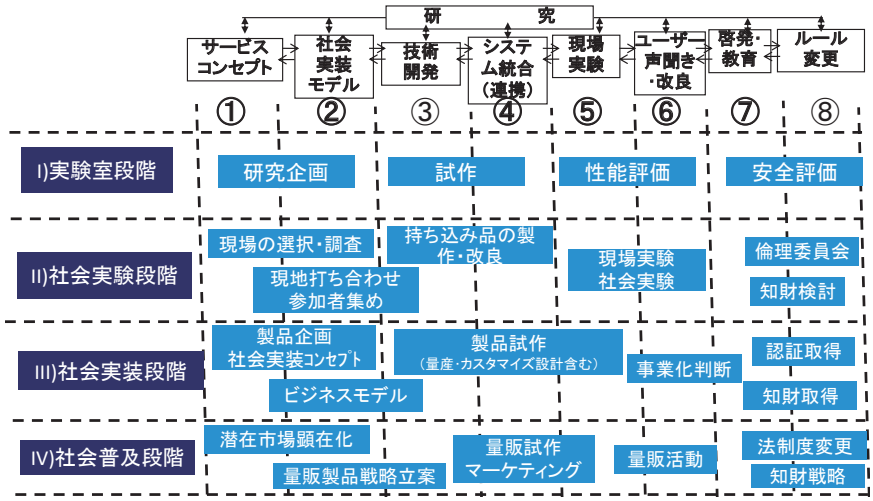

図 3-4-11　科学技術イノベーションの各プロセス・段階における主な活動

［科学技術イノベーションに有効な手法の体系化］

科学技術イノベーションを実現するための活動において、有効に活用できる手法を整理したものが図 3-4-12 である。このおのおのの知見が、ロボット社会実装学を構成し、それぞれの項目の研究開発が、今後追求されねばならない科学技術的課題である。

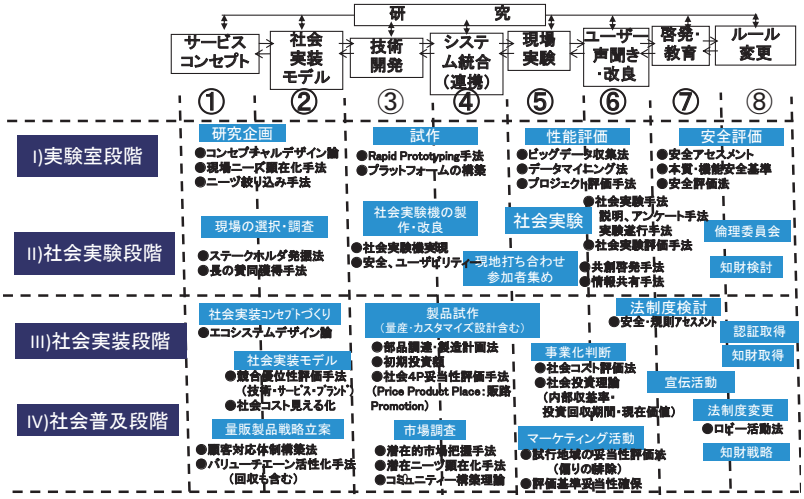

図 3-4-12　科学技術イノベーションの各プロセス・段階マトリクス整理

(5) 政策的課題

ロボット社会実装学の研究開発を推進する上で考慮しなければならない点に、本領域は、本質的に産官学連携、府省連携がその根底にあることである。民のみで完結する世界でないこと、官に関しても縦割りの省庁のみでは不十分である。ロボティクスと社会という研究領域の研究を推進するうえでは、必然的に、文部科学省、経済産業省、厚生労働省、国土交通省、農林水産省、外務省などの府省連携とそれに加えて民間との連携が求められる。

(6) キーワード

●ロボティクスと社会

ロボティクスと社会は、ロボットイノベーション（ロボットによる社会変革）を成し遂げることを目標とし、ロボット活用コミュニティー創出に関わるロボティクスを、ロボット社会実装学として構築する研究開発領域である。

●ロボット活用コミュニティー創出

ロボット活用コミュニティー創出活動は、ロボットイノベーション活動と等価である。その理由は、以下の通り。ロボットイノベーションは、ロボットに関する科学技術（ロボティクス）により社会を変革する活動であるが、科学技術の側から表現すると、「社会変革をひきおこすロボティクスの追求活動」であり、社会の側から表現すると「ロボティクスによる変革社会の創出活動」である。

●社会共創アプローチ

利用者、研究開発者、供給者が一体となったオープンイノベーションの枠組みで、社会課題解決や社会変革を実現するアプローチ。

●社会実装アプローチ
研究開発を実施してからその社会実装をはかる直列的なアプローチでなく、研究開発と社会実装を並列的に実施するアプローチ。

(7) 国際比較

ロボットイノベーションを成し遂げるために、多くのロボティクス関連の科学技術研究が実施されている。また、ロボットの社会受容性に関する研究も欧州を中心に実施されている。その概要を下表に整理する。いずれの国においても、科学技術研究が中心で、ロボット活用コミュニティー創出という観点での（4）で述べたような科学技術的課題に、体系的に取り組んでいる例は見当たらない。

その一方で、ロボットイノベーションの成功例が、米国のシリコンバレー、ボストン、ピッツバーグのエリア、デンマークやオーストラリアにおいて、運搬ロボット、医療ロボット、軍用ロボット、介護ロボットなどで見受けられる。持続可能なエコシステム構築も含めた観点で、その一部を概説する。これらの事例が、なぜ成功したのかの解明研究、効果的な手法抽出研究をはじめ、その他の地域における適用を効果的に実施することを可能にするプロジェクト管理に関する研究などが、これらの成功事例を世界に広めるために求められている。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・AI、ビッグデータ、ロボティクスが融合したロボット研究プロジェクトが立ち上がっている（NEDO: 次世代人工知能・ロボット中核技術開発、総務省 :SCOPE スマートネットワークロボット、JST: ERATO 石黒プロジェクト、CREST「知的情報処理」や「人工知能」など）[3]
	応用研究・開発	○	→	・ロボット基盤となるラピッド開発のためのマイクロエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、センサー、自動化技術、その他のハイエンド技術の領域で、世界のブランドとリーダーである ・ファナック、不二越、川崎重工、その他のブランド力ある企業が製造業の国際競争力を増している[1] ・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術、インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトなどフィールドロボティクスに重点[3] ・ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクトでロボットの社会実装を進めている[3]
米国	基礎研究	◎	↗	・1960 年代から AI 研究拠点設置が進展。同時期に基礎研究体制も整備[6] ・オバマ政権のイノベーション戦略でロボティクス、高度製造業、コネクテッド・カーを優先分野に位置づけ、研究開発・実証実験を支援[6] ・CS 分野の人材育成、雇用促進政策を実施し、産業構造転換を支援 ・関連基礎研究分野として BRAIN イニシアチブが注目されている[6] ・トヨタが Google-Shaft、Boston Dynamics を買収し、シリコンバレーに AI 研究所を設置[6]
	応用研究・開発	◎	→	・DARPA Grand Challenge は一段落。NSF などで応用研究が進展[6] ・コネクテッド・カーなど AI 活用型の製品・サービスが既に市場に投入されており、自動運転のリスク対策・セキュリティー強化のための安全基準の策定など、具体的な対策を実施する段階に入っている[6] ・2012 年から毎年開催の「We Robot カンファレンス」では、ロボットの利用拡大が社会に与える影響を法的・経済的・社会的観点で議論[6]

欧州	基礎研究	○	↗	・2010 年に開始したデジタル・アジェンダにロボティクス等の AI 関連領域があり、「FP7」や「Horizon2020」の枠組みで、研究開発を支援。基礎研究に加えて産官学が参画する連携も促進 [6)] ・FP7 の RoboLaw（2012-2014）で、自動運転車、手術ロボット、義手・義足ロボット、介護ロボットについて、ロボット技術の発展が社会規範、人々の価値観、社会的行動に与える影響を想定し、欧州がロボット技術で主導権を取ることが必要であること、柔軟な規制方式であるソフト・ローによる規律が望ましいこと、個人情報・人権の尊重が求められること、倫理的な見地から法規制を行うべきであることを提言 [6)] ・EU 議会でも ELSI に関する委員会が議論を進めている [6)]
	応用研究・開発	◎	→	・FP7 の ECHORD++ で自治体とベンチャーを含む企業・大学が連携した Urban Robotics の分野でスマートシティーを目指している [5)] ・英国：ビジネス・イノベーション技能省が研究開発費を公的研究組織や大学等に交付。AI 関連領域としてはロボット分野を支援 [6)] ・フランス :R&D、ベンチャー支援、地域経済活性化など、複数の支援計画で、AI 関連領域であるコネクテッド・オブジェクト、ロボット分野等を重点分野とした [6)] ・ドイツ :AI 関連領域として、Industrie 4.0、スマート・デバイス、自律技術、3D、ビッグデータ、クラウド・コンピューティングの基礎研究・応用研究を推進 [6)]
中国	基礎研究	△	→	・2020 年までに次世代ロボットの核心技術のブレークスルーを目指す [1)] ・コア技術に関する独自の成果と革新的理念に欠けており、精密減速機、サーボモータ、サーボドライブ、コントローラなど基幹部品の技術格差が特に顕在化しており、長期的に輸入に依存 [1)]
	応用研究・開発	○	↗	・2015 年に国務院は「中国製造 2025」を公布、中国のロボット産業の発展方針と技術的ロードマップを明確にした。2020 年までに 15 カ所前後、2025 年までに 40 カ所前後の製造業イノベーションセンターを形成する目標 [1)] ・産業用ロボットの生産は 2013 年より 3 年連続世界一。産業用ロボットに対する補助金政策により、産業用ロボット関連企業に対する製造現地化の誘致や優遇、コア構成デバイスの国内開発・製造を推進 [1)] ・2016 年に工情部は「ロボット産業発展計画（2016 ～ 2020）」を公布、ロボット産業発展の 5 カ年計画全体目標およびロボット産業体系の形成を掲げた [1)] ・サービスロボットは育成期に入った。産業用ロボットは環渤海、長江デルタ、珠江デルタと中西部の四大産業集積区を形成した [1)]
韓国	基礎研究	○	→	・2015 年米国 DARPA Robotics Challenge で韓国科学技術院（KAIST）によって開発された二足歩行人型ロボット『HUBO+（DRC-HUBO）』が全ての課題に成功し、最高タイムで優勝 [1)]
	応用研究・開発	△	→	・韓国政府が柔軟な動きを持つ「ソフトロボット」の開発に最大 7 年間で 125 億ウォン（約 12 億円）を投資 [1)]

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

●ロボットによる社会変革を成し遂げるための各国の取り組み [6)]

［米国］

米国シリコンバレーでは下記のような特徴的なステークホルダーを持つロボット実用化エコシステムが構築されている [7)]。

○ロボット・スタートアップ

スタートアップとは、「新規ビジネスで急成長し、市場開拓フェーズにある企業」

を指す。米国では、The Robot Report というウェブサイトが世界中のスタートアップの情報を集めており、このサイトによると、シリコンバレーやボストン、ピッツバーグ、アトランタに多くのスタートアップが存在する。中でも、シリコンバレー周辺には、図 3-4-13 のとおり、ロボット開発に取り組むスタートアップが多い。技術を非公開にしておくことを目的として意図的に表に出てこないスタートアップも存在するため正確な企業数は不明であるが、シリコンバレーだけで約 100 社存在すると言われている。

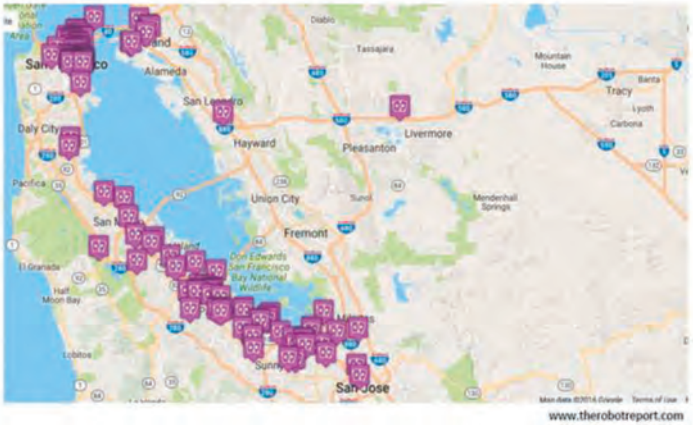

図 3-4-13　シリコンバレー周辺に存在する
ロボット・スタートアップの分布

シリコンバレーには先駆的にロボットを研究開発した Willow Garage 社という有名企業があり、この企業の閉鎖を機にロボット技術に関して優秀な人材がシリコンバレーの各社に散ったと言われている。これらの企業を含め、シリコンバレーにはソフトウエア開発からロボット開発に移行した企業が多い。現在は、①自走技術、②ビジョンテクノロジー（対象物を 3 次元で認識するための技術）、③インターフェース（スマホのように簡単にロボットを操作するための技術）の三つが、シリコンバレーにおけるロボット技術のキーワードと言われている。実用化が進んでいる自律搬送ロボットの事例を紹介すると、最初に倉庫やホテル、病院、老人ホーム、学校等、想定される各用途におけるニーズを掘り起こし、ビジネスとして成り立つ見込みのある用途に特化して製品開発する手法をとっている。日本は、こういったニーズ・ファインディングや市場の絞り込みの面でアメリカに劣っている。

投資側であるベンチャー・キャピタルについても、従来のソフトウエア開発だけではなくハードウエア開発にも関心を持ち始めており、近年、ロボット開発企業への投資が盛んになってきている。さらに、後述するハードウエア・アクセラレーターやクラウドファンディングによる投資も加わり、ロボット開発企業への投資額は急激な増加傾向にある。シリコンバレーのスタートアップには、生活支援ロボットや医療ロボットを開発する企業が多く、実用化されている商品も多い。

○アクセラレーター、企業投資、クラウドファンディング

シリコンバレーでは、一昔前にはベンチャー・キャピタルと企業の 2 者によって成り立っていると言われていたが、ベンチャー・キャピタル間の情報網は閉鎖的でありその資金だけでは不足することから、アクセラレーター等、別の仕組みを担う投資機関が生まれた。

アクセラレーターとはスタートアップの事業化を支援する事業者である。特にハードウエアの開発では、ソフトウエア開発に比べ多くの資金が必要であることや、試作を経て製造まで結びつける必要があること等、事業化に多くの課題があるため（図

3-4-14)、その課題解決をサポートするハードウエア・アクセラレーターという事業者が存在する。ハードウエア・アクセラレーターでは、一般的に、10 ～ 15 社の技術者が入る仕事場を提供され約 3 カ月にわたって専門教育を受けることができ、設計、マーケティング、法律、広報等、事業化のために必要な多くのことについて約 100 人いる専門家に相談することができる。また、未公開株 7% 程度と引き換えに 10 万～ 15 万ドルの資金提供を受けることができ、3 か月の教育プログラムの終了後には、投資家に対して約 10 分間でビジネス、製品、技術力等についてプレゼンテーションをする場が設けられ、投資を受けるチャンスが与えられる。

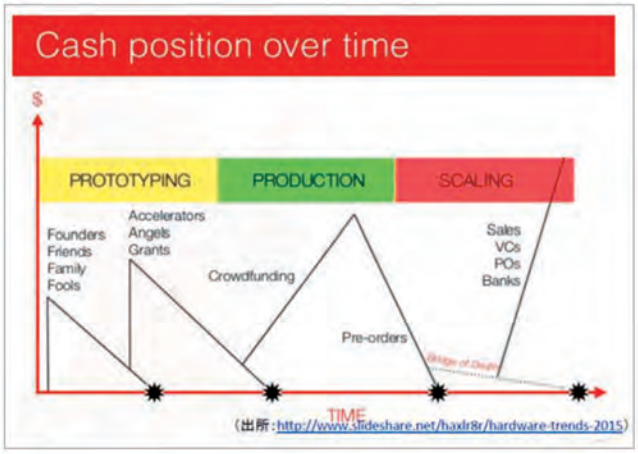

図 3-4-14　ハードウエア開発が実用化に至るまでのハードル

その他に、クラウドファンディングという仕組みも有効に機能している。クラウドファンディングとは、企業がインターネット等を通してプレゼンテーションをし、製品を安く売ると約束するなどして資金を募る仕組みである。

○ロボット人材の創出、教育の背景

シリコンバレーのエコシステムの特徴の一つとして、シリコンバレーロボティクスという NPO が開催するミーティング、セミナー、パーティー等、地元の交流会が盛んであることが挙げられる。ロボットに限らずアメリカ人は交流会の開催を好む傾向があり、中学生から NASA の研究者まで多くの人が展示、参加している。

ロボット人材の創出に寄与する取組の中では、「ファースト」という全米ロボットコンテストが有名である。毎年開催されており、小学生コース、中学生コース、高校生コース等がある。参加費だけで約 8000 ドルも要するため、多くの学生は寄付を募って参加している。この費用調達プロセスは企業の資金調達のプロセスと類似しており、技術 PR、広報、マネジメント等、起業のリハーサルと言えるものになっている。また、親が手助けして良いというルールがあるため、特にシリコンバレーでは NASA やスタンフォード大学の関係者が多く、専門家に近い人材がアドバイスしており、ハイレベルなチームが出場する。大学にとっては青田買いの場となっており、今年は 3200 チームが出場した。

［欧州連合］

ロボット社会実装の成功例として、FP7 プロジェクト ECHORD++ プロジェクトの Urban Robotics（都市型ロボティクス）によるスマートシティー作り [5] が知られている。欧州の複数の自治体にロボットサービスを必要とする社会問題を挙げてもらい、その中からバルセロナ市などを中心として社会問題の洗い出しとしかるべきベンチャーや企業をプロデュースする機能も持ち得た対策が取られている [5]。

［デンマーク］

○デンマークで福祉技術が積極的に展開される背景[8)]

福祉分野においてロボット化が推進されている理由としては、高齢化による労働者不足の解消と福祉におけるサービス品質の向上の二つが挙げられる。デンマークでは、日本と同様に高齢化が進んでおり、医療・福祉分野においても労働力不足が深刻になっている。65 歳以上の人口の割合は 16.5% であり、日本（26.7%）と比べると深刻ではないが、公務員の全人口に占める割合は日本の 7% に比べ、28% と顕著に高い。一方、デンマークにおける福祉に対する考え方の根本に、「自立」がある。自宅の庭の手入れを自分でしたい、友人や社会とつながりのある仕事を持ちたい、自立して買い物に行きたい、若いときのように自転車に乗りたい、福祉施設から自宅に戻りたいなど、高齢者が健康的で能動的な、意味のある人生を送るために必要な福祉技術が導入されている。具体的には、高齢者自身の能力を回復、開発、維持（広い意味でのリハビリ）するための、センサーおむつや遠隔治療ロボットなどである。また、福祉現場の労働環境の改善や魅力的な雇用の創出など、サービスを「提供する側」の視点に立った技術導入も行っている。

このように、デンマークは社会福祉先進国として高齢化社会に対応するために、高齢者などの自立を支援するロボットや福祉労働現場を改善するロボットに関する技術を積極的に導入していると考えられる。

○オーデンセ市の事例から見る先進福祉技術導入の取り組みと評価方法について

・オーデンセ市の決断

オーデンセ市では高齢化に加えて、高い失業率、厳しい財務環境、増加する慢性疾患患者などの福祉行政課題が顕在化している。これら課題に対し、福祉サービルレベルを下げるか、あるいは新しいサービスモデルを創出するかの選択を迫られた。社会保障先進国としてのあり方を議会で議論した結果、「新技術を活用し、新たな価値を創出し、福祉サービスのリストラを行い、新しいアプローチを導入する」改革を実行する方針を打ち出し、2008 年から政府が具体的なアクションを取り始めた。その結果、高度なロボット技術を国外から導入するべく、盛んに実証実験などに取り組む結果となっている。

・ホリスティック（全体論的）な評価方法の採用

デンマークでは、以前から「人間」を中心に置いた考え方が浸透しており、製品開発や技術導入の際には、ユーザーの視点に立ったユーザー・ドリブン・イノベーション（UDI）が確立している。UDI では、革新プロセスにユーザーを巻き込み、ユーザーの経験や知識を啓発して真のニーズを理解し、ユーザーニーズを満たすソリューション開発に注力する。UDI としての評価方法は、MAST 評価方法とも呼ばれ、ロボット技術の導入目的、代替手段との関連性、技術・アプリケーションの成熟度などを検討し、患者の視点、経済上、組織上の視点、社会文化、法的観点などから総合的に分析・評価する。オーデンセ市はさらに、経済性と資源、市民の視点、雇用と組織、技術の性能と機能の 4 項目からなる独自の評価方法を MAST 評価方法に加えた、ホリスティックな評価方法を採用している。例えば、ロボット技術を導入した場合には、労働力削減（Lavor Saving）などのポジティブな効果だけでなく、それに伴う雇用

減少などネガティブな影響を広く捉えて公平に評価する方法であり、日本ではこのような観点は欠落しているように感じる。

・コラボレーションラボラトリー

オーデンセ市では、技術開発の初期段階からユーザー、自治体、作業療法士などさまざまな立場の人々に実証実験に立ち合ってもらい、意見を取り入れる体制をとっている。さらに、ヘルスケア分野における課題を早急に評価する「コラボレーションラボラトリー」という先端の評価施設を新しく設立した。企業ごとにカスタマイズされた開発プロセスで、複数機関による横断的な評価や次世代ヘルスケアシステムに適合したテストを受けることができる。自宅、福祉施設、病院、かかりつけ医など異なる環境における評価を互いに関連させながら一度に行うことができるシステムを構築している。オーデンセ市と協力関係にある日本企業にとっては、コラボレーションラボラトリーに加え、病院、大学、行政機関等と広くつながることができ、ユーザーニーズが分かること、新しいアイデアを助言してもらえること、利便性をテストできること、大規模なテストができること、社会実装の支援をしてもらえることなど多様なメリットがある。例えば、ウォッシュレットを導入した場合に、プライバシー保護、感染症予防や労働環境改善になるだけでなく、福祉提供者の作業時間を 2 分間 / 回削減することができトータルの労働力削減効果が 5100 万円と算出された例や、介護士プラットフォームにおける業務管理の最適化や遠隔医療を行った場合に、2013 年～2016 年の 4 年間の労働力削減効果が 2 億 5000 万円と算出された例がある。

・デンマークが社会実装に成功している要因

福祉ロボットの社会実装に成功している要因は、前述した①人間中心の考え方が浸透していること、②ホリスティックアプローチのような方法論が確立していること、の他に③全員の意見を尊重する産学官の連携システム（トリプルヘリックス）が確立していること、④新規技術を社会に取り入れるシステムが確立していること、および、⑤ロードマップを描ける実行能力の高い人材を有していることが挙げられる。

特に、③トリプルヘリックスについては、日本における産学官連携とは似て非なるものである。具体的には、日本の場合は、図 3-4-15 の従来型の産学官連携のイメージ図のように産⇔学⇔官の連携が 1 対 1 になりがちであるが、デンマークにおけるトリプルヘリックスでは 3 者全てが連携している。そもそもヘリックスとは「らせん構造」を意味し、トリプルヘリックスにおいては 3 者が連携していく中で関係性を柔軟に有機的に変えながらうまく機能している。その理由の一つとして、例えば「事務次官と企業の最高技術責任者」のような、複数セクターのトップを経験した人がトリプルヘリックスの中心を担っていることが挙げられる。

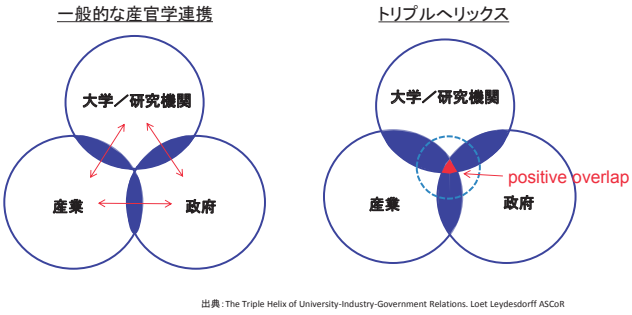

図 3-4-15　従来型の産学官連携（左）とトリプルヘリックス

また、④社会システムとしては、

インテリジェントパブリックデマンドと呼ばれる、課題を抽出し、本質的な問題を絞り込み、革新チームを編成し、新たなソリューションの導入、の 4 工程を繰り返し行うプロセスが採用されている。特に､本質的な問題の絞り込みは重要な工程であり、2 ～ 5 年を費やす。費用と効果のバランスを常にチェックする体制が整っていることも、デンマークが事業化にほとんど失敗しない理由と考えられる。

［オーストラリア］

○ノーリフトの導入とその効果[9)]

1998 年から看護連盟によってノーリフトポリシーに基づく介護システムが現場に導入され始め、現在に至るまで離職率の低下等、大きな改善効果が見られている。中でも、ビクトリア州都であるメルボルンではノーリフトポリシーが浸透しており、ほぼ全ての介護施設でリフトが使用されている。2002 年に発表されたビクトリア州政府の報告によると、リフトの導入は介護職員、被介護者、介護施設経営者の 3 者にメリットがあるとされている。それぞれのメリットの詳細を以下に記す。

介護職員が被介護者の「持ち上げ」をするには、その体重の大部分を支える必要があるため、職員の腰痛を引き起こす原因となる。「持ち上げ」にリフトを使用することで、職員の肉体的負担は大幅に軽減し、労災申請がおよそ半減（121 件→ 68 件）したと報告されている。その結果、職員の休職日数が減少しただけでなく、リフトという各施設共通の機器を導入することで、その使用訓練が一律となり、職員の新人教育での負担が軽減したと報告されている。

一方、被介護者にとっては介護職員によらず同様の介護を受けられるメリットがある。また、皮膚損傷の低減、移乗時の不快感の低減、転倒･転落事故件数の減少の他、寝かせきりによる合併症予防に効果があったと報告されている。

介護施設経営者にとっては、職員の離職率低減に伴い人材不足が解消しただけでなく、統一したケアの提供により介護現場で何が起こっているのか把握しやすくなり、インシデントの発見が容易になるといったメリットがあると報告されている。

○オーストラリアと比較した日本の介護現場の現状と将来課題

日本では、昔からマンパワーで解決しようとする考えが根強く残り、オーストラリアの考え方とは対照的である。日本の介護職員 6000 人を対象にアンケート調査したところ、81 ～ 82% の職員が介護に伴う腰痛を経験していることが分かった。腰痛になった場合にはサポーターや湿布で対策しているのが現状で、痛みを職場に伝えても職場環境が改善された例はほとんど無く、18% の職員が体重の重い被介護者の介護を断ったり寝かせきりにしたりすることがあると回答している。被介護者を寝かせきりにすると、次第に身体が硬くなってしまう「拘縮」という症状が見られるようになり、特に足が拘縮するとオムツ交換の作業が困難になる等の弊害が生じる。また、人力で持ち上げると被介護者の表皮が剥離したり、被介護者の筋疲労が起こったりする等の問題もある。このように、職員の肉体的負担や職場環境、被介護者への身体的ダメージ等、日本の介護現場では多くの課題を抱えていることが、アンケート調査から明らかになっている。

○将来課題

オーストラリアでは国や地方自治体等の行政機関が主体となり、特に在宅介護を重視する介護制度やエコシステムを設けながら、ノーリフトポリシーに基づく介護システムを現場に導入してきている。その背景には、介護職員不足を福祉機器・用具で補う必要性があったことも考えられる。一方、日本では 2016 年 3 月に加藤勝信内閣府特命担当大臣がノーリフト導入現場の視察に訪れ、6 月に閣議決定された一億総活躍プランにノーリフトが導入されたように、徐々にリフトが介護現場に認知され始めているが、オーストラリアと比較すると遅れている。リフトの使用が介護職員、被介護者、介護施設経営者の 3 者にとって十分なメリットがあることが、オーストラリアだけでなく日本でも明らかとなっている。今後も地域で無料介護相談を開催する等してノーリフトの普及活動が希求されている。

以上、ロボットによる社会変革の各国における成功事例を紹介してきたが、このようなロボット実用エコシステムの構築に集約される取り組みの体系的記述、成功要因の解明、有効手法の抽出などが、今後のロボットによる社会変革（ロボットイノベーション）、いいかえるとロボット活用コミュニティー創出において希求されている。このロボットと社会の中心課題を解決する科学技術をロボット社会実装学として構築する必要がある。

(8) 参考文献

1）国際ロボット連盟 Internation Federation of Robotics（IFR）http://www.ifr.org/
2）日本学術会議の第 22 期の提言、『提言：ロボット活用による社会課題解決とそれを支える先端研究の一体的推進方策～社会共創ロボティクス～』
http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t201-2.pdf
3）平成 28 年度補正予算 . ロボット関連の平成 28 年度補正予算・平成 29 年度予算概算要求について
http://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Open/2016/20161028_Robot_yosan/H29robot_yosan_kobetu.pdf
4）堀川、萩田、“ロボット社会実装における倫理的・法的・社会的問題の国内外動向”, 電子情報通信学会　CNR 研究会、信学技報、(2017－02).
5）EU FP7 プロジェクト ECHORD++ プロジェクト http://echord.eu/
6）欧米における AI ネットワーク化に関連する政策・市場動向
http://www.soumu.go.jp/main_content/000414765.pdf
7）瀧口範子：シリコンバレーにおけるロボット新規事業立ち上げのためのエコシステム , 神奈川県産業技術センター 第 5 回エコシステム研究部会 , 2016.11.24.
8）中島健祐：デンマークにおける先進福祉技術導入の取組みについて , 神奈川県産業技術センター 第 1 回エコシステム研究部会 , 2016.5.16.
9）保田淳子：オーストラリアのノーリフトとそのエコシステム , 神奈川県産業技術センター 第 1 回エコシステム研究部会 , 2016.9.1.

3.4.2　モビリティー・フィールドロボット

（1）研究開発領域の簡潔な説明

重要な機能として移動機能を備え、目的となるフィールドで作業を行うロボットの実現と利活用を目指す研究開発領域である。不確定な環境での移動や作業の実現が重要な技術的課題であるが、必要なタイミングでロボットを投入できるようにするための信頼性の確保、運用や研究開発サイクルをいかに担保するかといった課題もある。ここでは、インフラ検査・保守、災害調査・レスキュー対応へ適用されるロボット、および海中で稼働するロボットを採り上げる。なお、空中で稼働するロボットは空中ロボットの研究開発領域で採り上げる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

以下では、①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット、②災害調査・レスキューロボット、③海中ロボットに分けて記載する。

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

日本では、現在、建設産業において、少子高齢化に起因する若年就業者数の減少や、熟練した技術者・技能者の不足が問題となっている。また、昭和 30 年代からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が急速に老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。さらに、日本は、世界的に見て非常に地震、火山噴火、風水害などの自然災害が発生しやすい地域にあり、災害発生時には、災害調査や応急復旧が重要となる。これらの問題に対応するため、2013 年 3 月に国土交通省の「建設ロボット技術に関する懇談会」は、建設ロボット技術の開発・活用に向け、省庁連携の下で、（1）情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化、（2）ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化、（3）ロボット技術による災害現場調査技術の開発、（4）ロボット技術による応急復旧技術の開発を重点的に進める旨の提言を発表した [1)]。これらのロボット技術の開発は、上述の社会問題を解決するために急務であり、近年、関連する研究開発プロジェクトが複数立ち上がり、産官学連携で研究開発が進められている。

まず、（1）情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化について説明する。建設機械を用いた施工の効率化を目指し、国土交通省が主導する情報化施工戦略 [2)] の下で、ICT 技術を導入した自動制御建設機械の研究開発が現在進められている。例として、高精度の GPS 等を利用した機械の位置情報、施工状況、設計値をオペレーターに提供し、施工をサポートする油圧ショベルのマシンガイダンス技術や、ブルドーザーのブレード制御技術などが開発された [3)]。次の（2）ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化については、橋梁点検とトンネル点検を中心に技術開発が進められている。日本には橋梁が約 70 万橋、トンネルが約 1 万本あり [4)]、5 年に一度の点検が義務づけられている。これらの橋梁やトンネルの点検を効率的に進めるため、ロボット技術を導入する試みが、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の主導で進められてきた [5)]。例えば、足場をかけずに橋梁の目視点検実施を可能とするドローンを用いた橋梁点検システムの開発や、トンネル内を走行するだけでトンネル壁面のヒビや剥離の点検の実施が可能なトンネル点検車の開発が進めら

れてきた。(3) ロボット技術による災害現場調査技術の開発については、主にトンネル災害や土砂災害、火山災害における情報収集を目指した災害調査技術の研究開発が進められている。最近では、トンネル火災に対応可能な防爆仕様の不整地移動ロボットの開発が進められている[6)]。また、土砂災害や火山災害対応では、人の進入が困難な領域におけるドローンを用いた調査システムや、ドローンでの運搬が可能な調査用の小型移動ロボットの研究開発が進められている。最後に（4）ロボット技術による応急復旧技術の開発について説明する。1991 年の雲仙普賢岳の噴火後、立ち入り制限区域内における応急復旧工事（土石流を堰き止める砂防堰堤の工事）を行うため、遠隔操作型の建設機械による無人化施工技術の開発が進められてきた。この無人化施工は、カメラで取得した画像情報を元に油圧ショベルなどの建設機械をオペレーターが遠隔から操縦するものであり、先の福島第一原子力発電所の事故においてがれき撤去作業の際にも活用された。なお、無人化施工技術に情報化施工技術を導入することで施工効率が向上することが指摘されており、(1) と（4）の分野は相互補完の関係にもある[7)]。

以上の 4 項目は、具体的な社会的問題を解決するロボット技術であり、現在、数年後の実用化を目指した研究開発が進められているが、これらの技術をさらに向上させるためには基礎研究も重要となる。具体的には、移動ロボットの移動技術の研究、特に不整地や軟弱土壌における移動体の移動性能の向上に関する研究、ロボットとオペレーター間の安定した通信を確保するための通信技術に関する研究開発、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレーターに伝える VR 技術等を用いた遠隔操作性向上に関する研究、数多くのセンサーや駆動系を必要とする大規模なロボットシステムを、長時間、安定して動作させるためのロボット自身の安全に関する研究が重要となると考えられる。

②災害調査・レスキューロボット

日本では、1995 年の阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件を契機として、大都市直下型の地震や地下街などの閉鎖空間にける NBC[i)] テロ災害などを想定して、大学の研究者を中心にレスキューロボット開発が進められてきた。米国では、2001 年にハイジャックされた旅客機が世界貿易センタービルに突っ込むというテロが発生した。この 9.11 テロ現場から、軍用ではあるが遠隔操作ロボットを使って遺体を発見する成果を挙げた。また、フランスの様に原子力発電を積極的に進めている国々では、事故に備えて原子力災害対応ロボットが開発･配備されてきた。日本でも 1999 年に発生した東海村 JCO 臨界事故直後に、原子力災害対応ロボットが政府主導で開発されたが、開発のみにとどまっており、実運用には至らなかった。2011 年の東日本大震災では、陸海空のロボットが実災害現場で使用された。JST と NSF の支援で、日米の合同チームが結成され、水中ロボットによるがれきの調査や遺体の探索が実施された。また、福島第一原子力発電所の事故現場では、無人化施工機械ががれきの除去に活用された。これは、国土交通省が普賢岳における土石流対策のための土木工事を遠隔で行うためのシステム開発を継続してきた成果である。現場での実運用を通じて開発にフィードバックする体制を継続的に支援してきたからこそ、福島第一原発での成果につながった。また、建屋中の情報収集に国内外のロボットが用いられた。廃炉まで 30 ～ 40 年を要すると予想されており、現在でもさまざまなロボットが開

i) Nuclear 核兵器、Biological 生物兵器、Chemical 化学兵器を使用したテロ

発されている。

米国のレスキューロボットの開発は、DARPA からの豊富な資金援助を背景に軍用ロボット技術を転用することで進められてきた。また、実際に戦場でロボットを使用して問題点を明らかにし、改良につなげるフィードバック体制が可能であった。一方、日本では災害対応のみに用途が限られるレスキューロボットでは市場を形成することはできず、大学の研究者が開発を担ってきた。そのため、商品化は非常に困難な状況であった。しかし、東日本大震災における福島原発事故対応のために、政府も予算をつぎ込んで災害対応ロボットの開発を進めるようになった。

③海中ロボット [24)]

海中ロボットは表 3-4-1 に示すように有索無人機と無索無人機に分類できる。

表 3-4-1　海中ロボットの分類

名称			特徴
有索無人機（ROV:Remotely Operated Vehicle）			
	電力通信ケーブル付き遠隔操縦機		
		重作業 ROV	マニピュレーションをおこなう
		カメラロボ	ビデオ観測のみで、軽量小型
	細径ケーブル遠隔操縦機		ロボットが電池を持ち、操縦は光通信ケーブル経由
無索無人機（AUV: Autonomous Underwater Vehicle 自律型海中ロボット）			
	航行型		3 ノット程度で航行する
	ホバリング型		海底に接近して写真撮影
	グライダー型		潜降・浮上を繰り返す

電磁波が伝わらない海中では、ロボットとの通信手段はトラブルの多い通信ケーブル（索）をつなぐか遅くてエラー率の高い音響通信を使うかに限られる。水深以上の長さを要するケーブル付き遠隔操縦機（有索無人機）は、ウインチや張力緩和装置などを必要として、システムは大規模になる。音響通信の場合はそのような大規模装置はいらないが、音の伝播速度は約 1500 メートル毎秒であり、周波数が高くなると急速に減衰するために 6000 メートルの距離を通信するには数十キロヘルツの周波数帯を用い、Data Rate はせいぜい数千 bps[25)] で伝送エラー率も高く、高度な遠隔操縦は困難である。従って、ケーブルのない水中機（無索無人機）を深海に展開するには高い自律性が必要であり、自律型海中ロボット（AUV: Autonomous Underwater Robot）と呼ばれる。

有索機は、1980 年代に技術的に発展し、多くの先鋭的な商用機が作られ、海底石油開発や深海調査に用いられている。先進的な研究課題としての「テレエグジステンス」の初期の研究は、米国海軍によって有索遠隔操縦機をプラットフォームとしてその時代から行われている。日本では、近海に海底石油開発がないこともあって商用重作業 ROV の開発には見るべき物がない。ただし、海洋の最深部 1 万 1000 メートルまで潜ることのできる ROV「かいこう」を海洋研究開発機構（JAMSTEC）が開発し、1995 年にマリアナ海溝チャレンジャー海淵に潜航させた。残念ながら 2003 年に 2 次ケーブル切断事故が起こり、「かいこう」の本体部分は失われた。JAMSTEC は 1999 年にカナダの ISE 社製の ROV「ハイパードルフィン」（3000 メートル級）を購入し、これを改良しながら海底調査活動に利用し、高度な運用技術を獲得している。カメラロボは、浅海での調査や観測に使われている。2011 年の津波災害のときには、被災した沖合漁業施設周辺の海底調査に活躍している。

細径ケーブル遠隔操縦機はデータ通信の光ファイバケーブルのみにより、潜水機と支援船が接続されているので、高速データ通信ができるとともに、大型甲板装置を必要としないので、発展が期待されている。日本での開発例は、2007 年に JAMSTEC が開発した「ピカソ」で、深海生物調査に活躍している。

無索機は、1980 年代から東京大学生産技術研究所で開始され、種々のモデルが建造され実海域で展開されている。2000 年に「R-One Robot」が手石海丘の全自動観測に成功し、AUV の観測実績を示した。2003 年に建造された「r2D4」は「R-One Robot」のソフトウエアを継承して、機体が完成すると同時に、全自動観測を開始している。2008 年に石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）と共同で調査された伊是名海穴の海底地形観測データは、その後の伊是名海穴海底鉱物資源開発の基礎となっている。JAMSTEC は大型の「うらしま」を 1998 年に建造を開始し、2003 年に 220 キロメートルの潜航に成功している。しかし、超音波リンクを通じたコマンドに頼っている面が多く、自律性のレベルは低かった。その後、改良が進められ、大型機（長さ 10 メートル、空中重量 7 トン）として観測に利用されている。上記 3 台のプロトタイプ AUV は航行型である。ミッションが単純な航行型 AUV は、2000 年代になって市販されるようになり、詳細な海底地形図の計測、墜落航空機の発見や海底石油開発のための海底調査などに用いられるようになった。2009 年に発生したエールフランス 447 便墜落事故では、航行型 AUV「REMUS 6000」が墜落機を 2011 年に発見している [26)]。ホバリング型 AUV は海底面直上数メートルまで接近して海底写真を撮影することをもっぱらの仕事としている。2010 年に東京大学の「Tuna-Sand」が日本海のメタンハイドレート地帯に棲息するベニズワイガニの棲息状況を撮影したのを皮切りに、キチジやズワイガニの調査に使われるようになった。グライダー型 AUV は、浮力を変化させて上昇下降を行うもので、エネルギー消費が少なく、システムも簡単なので、利用しやすく、米国で開発された「Slocum」と「Sea Glider」が世界的に海水の調査プラットフォームとして利用されている。翼を使って水平移動が可能なので、「Algo Float」の後継機として期待されている。

このように各種の海中ロボットは、それぞれに特徴を持ち、現場に行かなければデータが得られない深海において有効性を発揮している。すなわち、その特徴を活かせる海中観測や作業活動においてニッチを得ている。次の段階は、ロボットから得られる海中データをいかに利用するかということと、自律型の自律性を高めることであり、それらが海中ロボット開発を加速することになる。本報告では、新しい技術開発がいろいろと考えられる自律型海中ロボットについて主に述べる。

(3) 注目動向

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

建設ロボットの遠隔操作に関する技術として、スイスの ETH では台車の姿勢を大きく変動させることで不整地を走行することが可能な脚車輪を有する油圧ショベルに対し、これを遠隔操作するための姿勢変動可能な搭乗型遠隔操作装置を開発した [8)]。この装置では、遠隔地にある操作対象の建設機械の姿勢に応じてオペレーターの椅子の姿勢を変動させることができ、臨場感の高い遠隔操作が可能となる。今後、このような研究に近年急速に成

長を遂げている VR 技術なども融合させることでオペレーターに現場の臨場感を与えることが可能となるため遠隔操作の作業効率の向上が期待できる。

また、建設ロボットの研究開発では、無人化施工機械を含め一般の建設機械をベースに遠隔操作や自動制御の研究開発が進められており、移動性能や作業性能については、その機械が有する能力が上限値となる。これに対し、内閣府の ImPACT プロジェクト内のタフ・ロボティクス・チャレンジでは、走行性能や作業性の高い新たな建設ロボットの実現を目指して二重旋回型の 2 本腕を有する建設ロボットを開発し、二つの腕を利用した不整地走行や 2 本腕の協調による複雑な作業の実施などの提案（図 3-4-16）を行っている [9]。このように従来の建設機械とは一線を画す建設ロボットに関する研究開発も始まっている。

図 3-4-16　二重回旋型の双腕建設ロボット [9]

一方、インフラ検査ロボットや災害調査ロボットに関しては、2014 年以降、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）[5] や新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の主導の研究開発が行われると共に、国土交通省がトンネルや橋梁といった試行現場を提供するなど [10]、省庁間連携による実用化研究が強力に進められてきた。特にマルチローター機（ドローン）の性能向上により、ドローンを活用した調査手法の提案が数多く行われ、産学連携の下で研究開発が活発に行われている。

②災害調査・レスキューロボット

米国では DARPA のロボティクス・チャレンジとして、福島第一原発の事故の様な災害を想定したロボット競技会が開催された。これは、ヒューマノイドロボットが車を運転して現場に向かい、ドアを開け、不整地や階段を走破し、バルブを回すなどの作業を遂行するシナリオで実施され、世界各国からの参加があり、韓国の大学で開発されたロボットが優勝した。日本では、平常時に使っているロボットシステムが災害時にも活用できるというコンセプトの下、橋梁やトンネルなどのインフラ点検やダムや河川の保守管理や火山の観察調査などに有用なロボットシステムを開発・実用化することを目的とした SIP プロジェクトのインフラ維持管理・更新・マネジメント技術 [15] が実施されている。また、内閣府が進める ImPACT プロジェクトでは、災害現場で有効に働く、タフなロボットを開発するタフ・ロボティクス・チャレンジ [16] が実施されている。さらに、東京オリンピックに合わせて、ロボットオリンピック（国際ロボット競技大会）が開催される予定で、ものづくり、サービス、災害の 3 分野で競技が設けられる予定である。災害分野は「プラント」、「トンネル」、「災害対応規定」の 3 種目で検討が進んでいる。その会場として福島県楢葉町に災害現場や実プラントを模擬したテストフィールドの建設する構想が進められている。

③海中ロボット（自律型海中ロボット）

2014 年度より開始した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の一課題として「次世代海洋資源調査技術（通称「海のジパング計画」）」が採り上げられている。海のジパング計画では、海底鉱物資源を低コスト・高効率で調査する技術開発が進められ、そ

の重要な課題として自律型海中ロボットを使ったシステム開発が設定され、研究開発が進んでいる。これにより 2016 年 11 月までに、2 台の航行型 AUV、1 台のホバリング型 AUV、2 台の無人海面航行ロボット（VMob:Autonomous Virtual Mooring Buoy）が開発され（写真 3-4-1）、試験展開が行われている。具体的な観測ターゲットを見据えた大規模研究開発であり成果が期待される。

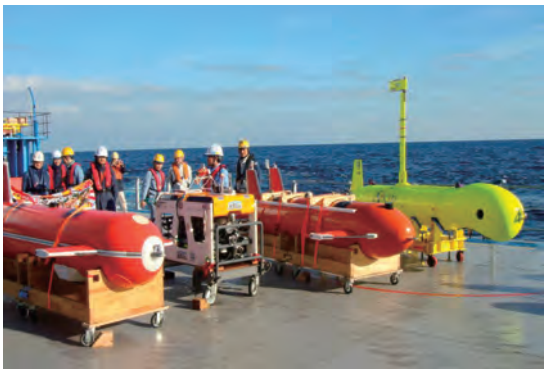

写真 3-4-1 「海のジパング計画」で開発された AUV

AUV の最大の弱点は、海底に接近するものの写真・音響撮影するのみであり、「物」を海底から取ってくることができないことである。これを解決するためのプロジェクトが、東京大学生産技術研究所と九州工業大学を中心として行われている。JST の戦略的創造研究推進事業（CREST）「海洋生物多様性および生体系の保全・再生に資する基盤技術の創出」領域において「センチメートル海底地形図と海底モザイク画像を基礎として生物サンプリングを行う自律型海中ロボット部隊の創出」が 2011 年度から開始され、サンプリングができ、かつ、時間遅れのある少ない情報伝送能力の音響通信であっても、支援船上の研究者がサンプリング対象を指定できるシステムの開発が行われている。

上記プロジェクトは、熱水鉱床や海底生物資源に関するプロジェクトであるが、今後の我が国の自律型海中ロボット研究開発の大規模プログラムとして以下が重要である。

1）大深度自律型海中ロボットの研究開発：特に、プレート型地震を見据えた 6000m ～ 8000m 水深での詳細な広域地形図調査を可能とする航行型海中ロボット

2）北極海を含む氷海域で、海氷下の観測を行うことのできる海中ロボット

文部科学省等での検討が行われているが、これらは極めて大型なシステムであり、国家的で重点的な取り組みが必要である。

（4）科学技術的課題

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

不整地や軟弱土壌における移動ロボットの移動技術、フィールドロボットの通信技術、作業現場の臨場感を伝える遠隔操作技術、複雑なロボットシステムの安全性の確保が重要となると考えられる。この中でも特に大きなボトルネックが通信技術である。

フィールドロボットのための遠距離無線通信を安定して確保することは、本領域を進めていく上で必要不可欠である。しかしながら、現状では、通信距離の問題、通信遅延の問題、複雑な自然地形での遮蔽物による通信遮断の問題などが存在し、これらが問題とならない範囲でのみ実用化が図られてきた。無線通信については、通信帯域の確保の問題も含むため政策的課題（総務省）でもあるが、今後、ハード面、ソフト面ともに通信に関する目覚ましい技術革新を起こすことができれば、フィールドロボットの実用化が大きく進む可能性がある。

②災害調査・レスキューロボット

災害現場では、使用可能な情報インフラは限られることを想定しなくてはならない。テンポラリにロバストな通信インフラを構築することは大きな課題である。通信方式に関して、有線通信は確実であるが、移動ロボットの運動の制約になる。陸上のロボットではケーブルを搭載して手繰りだす方式が採られているが、本体重量の増加を招いてしまう。無線通信の場合には、アドホックネットワークなどが適用されているが、ホップするごとに伝送量が減少してしまうなど問題がある。有線と無線をうまく使い分けるあるいは併用するなど課題解決が必要である。

また、災害現場でのエネルギー源の確保も大きな問題である。バッテリーに関しても、効率良い（軽量で長時間持ち急速充電が可能な）安全なバッテリーの開発が急務である。小型の無人ヘリは俯瞰的な情報収集には有用であるが、飛行可能時間はバッテリー性能に大きく依存している。

原子力発電所の事故の場合には、放射能の影響を考えた耐放射線性を付与する必要がある。また、尼崎の列車脱線事故やトンネル内の事故など、火気による爆発の危険性がある場合には、防爆性能が要求される。このように、防塵防水にはじまり防爆や耐放射線性など耐環境性も重要な課題である。

災害現場は未知の環境であり、人間による遠隔操作が基本である。オペレーターの負荷を軽減化できるインターフェースの開発が重要である。また、オペレーターの訓練に要する時間的・金銭的コストの削減が可能な操作が容易なシステムの開発も重要である。さらに、未知の不整地環境でも自律的に作業が可能な知能に関する研究開発も今後の大きな課題である。

現状ではレスキューロボットに期待されている主なタスクは情報収集であり、アクセシビリティーをどのように向上させるかが課題となっているが、今後は移動から作業へと適用できるタスクを広げていく必要がある。

さらに、広域災害では情報が錯綜する。固定センサーやレスキューロボットなどで収集した膨大な時空間情報を柔軟にハンドリングでき、災害直後だけでなく復旧復興までを含めたそれぞれの時期に情報を利活用できる情報システムの構築も重要な課題である。

③海中ロボット（自律型海中ロボット）

自律型海中ロボットが陸上の自律型ロボットと異なる点は次の五つの海・深海という言葉で代表される困難さである。

1）ロボットに事故が発生したときに ROV を使わなければ助けに行けない

2）ロボットが働く環境を私たちは十分に想像できない

3）ロボットを海域で稼働させるには支援船、多額の経費、大規模なチームが必要である

4）日本周辺でロボットを稼働させたい海域は、往々にして波が高く、風が強く、現場作業が可能かどうかの予測が難しく、計画的な海域展開ができない

5）能力をデモンストレーションする機会が少ない

こうした困難さのうち、1）を取り除くには、十分な準備と海での実績が必要だが、3）と 4）のために簡単には実現できない。深海はいまだに「探検」の世界であり、ロボットに「探検」をさせることになる。従って、ロボット開発者は、よく海洋のことを勉強し、

経験を積んで 2）がはらむ危険性を極力避けねばならない。3）を克服するために、大きな資金を獲得し大きなチームを動かすには、ロボットを動かすことの意義を説明しなければならない。そのためには、実績が必要であるが、実績を作るためにも同じ 3）が必要である。すなわち、なかなか 3）を克服できない。「運よく」研究費を獲得し、海域へと出動しても、海が荒れていれば、ロボットを展開できない。海況がよくて観測可能な状況は、最近では 50% 以下になっているようである。すなわち、予定通りの成果を挙げにくく、5）が重くのしかかってくる。そこで、少ないチャンスをものにし、他のシステムではできないことをなしとげて、自律型海中ロボット技術を進展させ、そこから得られるデータで高い評価を得るためには、

1）ロボットの信頼性と全自動性の向上
2）ロボットの小型化
3）複数ロボットの同時展開ができる
4）ロボットがたとえ失われても次に進めるような開発および展開のシステム作り

が必要である。それに基づいて、（3）注目動向の最後に示した二つの大きなプログラムが進められるべきである。特に、複数ロボットの同時展開では、無人海面航行ロボットの管理下に海中ロボットを置くことで、支援船をロボット展開作業から解放し、別の作業に従事させることが海洋活動を活発にする上で重要となる。

（5）政策的課題

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

上記（4）科学技術的課題でも触れたが、移動体の通信技術については、通信帯域確保、ならびに通信出力の上限に関する規制という制約が存在する。国土の狭い日本では無線通信の干渉をできる限り低減するため、無線通信に利用可能な通信出力が抑えられている。また、災害時などの非常時に占有可能な通信帯域も確保できていなかった。そこで、2016 年 8 月に総務省は移動体を対象とした 2.4 ギガヘルツ帯、5.7 ギガヘルツ帯、169 メガヘルツ帯の無人移動体用無線通信を可能とするように電波法施行規則を改正した [11)]。この改正により、通信に関する問題がどの程度解決されるかは現状では未知数であるが、今後もフィールドロボットを活用するため、無人移動体が利用しやすい無線帯域の確保が必要となると考えられる。

②災害調査・レスキューロボット

50 年に一度程度しか起こらないような大地震による大規模災害のために多額の予算をつぎ込んでレスキューロボットを開発することは民間企業では不可能である。平常に使っているロボットシステムが緊急時にも使えるというシナリオで市場を創出する、あるいは消防や自衛隊にレスキューロボットを配備するなど、政府主導で開発研究を加速させる必要がある。

東日本大震災においてレスキューロボットを用いた災害対応支援のための日米の合同チームが結成されたときに、なかなか公的な機関からの要請が出ず、米国チームの来日が遅れた経緯がある。即時の受け入れが可能なような制度の設計が必要である。また、活動予算に関しても直後からの支援は重要である。

東海村 JCO 臨界事故後の原子力事故対応ロボットの開発が、運用までを視野に入れて実施されなかった失敗を反省し、研究開発の支援を継続的に行うことおよび現場での実運用を可能とするようなファンディング制度が必要である。

海外からの支援を受け入れる場合に、協調活動がスムーズに進むように、システムの統合や情報の共有が容易なようにプロトコルを標準化しておく必要がある。

③海中ロボット

有用な自律型海中ロボットを開発するには、多大な経費が必要となる。この予算を得るには、通例「世界で一番」が必要とされている。そこで、世界で一番「大きい」「深い」「遠くまで」など、重厚長大主義的提案がまかり通ることになる。これは、（4）科学技術的課題の最後に述べた四つの必要項目とは向かっていく方向が違う。したがって、重厚長大ではない「世界で一番」を主張するような課題を採択できる仕組みをつくることが政策的に重要である。（3）注目動向で述べた海のジパング計画では、（4）科学技術的課題の 1）～ 3）が重要課題に挙げられており好ましい。

完成した自律型海中ロボットを海域展開するには、通常、JAMSTEC の研究船公募課題に応募して、審査を受け、採択されると海域展開が可能になる。しかし、このプロセスは長い。7 月に申請書を提出して採択されると翌年に潜航のチャンスを得ることができる。その潜航の成果を踏まえて次の申請書を提出すると次の潜航は最初の潜航の 2 年後になる。このような極めて遅い開発スケジュールでは世界の開発競争にはついていけないのが現状である。さらに、研究船の大型化に伴って、公募航海日数が減っている。大型船は、AUV 展開だけには使いにくく、大きな研究者チームを編成しなければならない。これが、小回りのきかない水中機器開発の世界をもたらしており、大型の研究船だけに頼らない機器開発ができる政策転換が必要である。

米国における水中機器開発の予算の多くは、基礎研究を含めて、米国海軍関係の組織から出ている。日本では、水中機器開発を重要課題とする政府組織が貧弱で、開発するものは、海外製品に価格的に、および現場実績的に太刀打ちできないことがある。そのために、せっかく開発したものが、政府調達されず、現場に利用されないで、開発のみで終了してしまう。このやり方を変えねば、「世界で一番」「世界でただ一つ」「だれも使わない」で、二番機も作られない、という残念な結果をもたらすことになる。海という過酷な現場で稼働するロボットを作るには、その利用を促進する政策的な取り組みが不可欠である。

（6）キーワード

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

遠隔操作、臨場感、移動体通信

②災害調査・レスキューロボット

アクセシビリティー、耐環境性（防塵防水防爆性、耐放射線性）、Human-in-the-loop、ユーザーフレンドリーなインターフェース、自律機能、ロバストな通信、時空間情報統合システム、インターフェースの共通化・標準化

③海中ロボット

自律型ロボット、探検、サポート体制、政府調達

(7) 国際比較

表中の丸数字は、①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット、②災害調査・レスキューロボット、③海中ロボットに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①○ ②◎ ③○	①→ ②→ ③↘	①不整地移動に関する基礎研究、遠隔操作性向上に関する基礎研究、ロボット運用の際の安全に関する基礎研究は全般に成果が出ている ②阪神淡路大震災以降、JST や NEDO がレスキューロボット開発研究に関するプロジェクトを実施してきており、基礎研究は進んでいると思われる ③文部科学省プログラム「海洋鉱物資源広域探査システム開発（通称基盤ツール拠点）」を通じて基礎研究がなされている。しかし、プログラムが終了する 2017 年度以降が見えていない
	応用研究・開発	①◎ ②○ ③○	①↗ ②→ ③→	①インフラ点検ロボットや建設ロボットの応用研究や実用化については、近年、顕著な成果が出ていると見受けられる [10] ②近年、ImPACT、SIP など出口イメージを明確にしたプロジェクトが実施され、実用化を視野に入れて研究開発が進められている ③「海のジパング計画」を通じて応用研究がなされている
米国	基礎研究	①○ ②◎ ③◎	①→ ②↗ ③→	①不整地の走行に関する研究では、特にカーネギーメロン大学 [12] や NASA ジェット推進研究所ならびにカリフォルニア工科大学のグループが高い成果を挙げている ② DARPA の Robotics Challenge[18),19)] に見られるように、多額の予算支援を背景に戦場を想定したロボットの基礎研究が行われている。Boston Dynamics 社 [20] の BigDog はその好例である ③海軍研究局（ONR）の Funding、米国海洋大気庁の Sea Grant の推進など、基礎研究へのファンディングが継続的に実施されている
	応用研究・開発	①○ ②◎ ③◎	①→ ②→ ③↗	①ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている [13] ② DARPA の支援で開発されたロボットが民生品として世の中に普及するシナリオで、応用研究開発が促進されている。i-Robot 社 [21] のルンバはその好例である ③北極海や熱水地帯の観測、さらには民間の沈没船捜索など、海中活動のアクティビティーが上昇
欧州	基礎研究	①△ ②○ ③○	①→ ②→ ③↗	①遠隔操作の臨場感に関する基礎研究において、近年、スイスの ETH のグループが成果を挙げている [8]。それ以外、顕著な成果が認められない ②地震災害はそれほど多くはないが、火災などの災害やテロ災害に対応するためのレスキューロボットが開発されてきている ③ Southampton 大学を中心に英国は特に力を入れている。スペインやポルトガルも参入し、研究活動は盛ん
	応用研究・開発	①○ ②○ ③◎	①→ ②→ ③↗	①ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている [14] ②原子力発電を前提としている国では早くから原子力災害対応ロボットの開発と配備が進められてきている。また、Horizon 2020[17] では安全に関するプロジェクトを進めており、テロ対策としてロボットの活用が期待されている ③商用の AUV や ROV を使った新たな活動が盛んになっている。ノルウェーの Kongsberg は民間の中心
中国	基礎研究	①－ ②△ ③△	①－ ②→ ③→	①－ ②ロボット関連の重要な国際会議における論文発表の状況から推測すると、災害対応分野のロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいない ③国が海洋に注目しており、それに伴い大学が積極的な研究開発を行うようになってきた
	応用研究・開発	①－ ②○ ③◎	①－ ②↗ ③↗	①－ ②災害対応を直接のターゲットとしているわけではないが、ドローンを開発し世界的に販売をしている DJI 社 [22] は注目に値する ③ 7000 メートル級有人潜水艇を作り、その次のプロジェクトへとつないでいる。AUV のアプリケーションにも興味を示している。新たな海洋調査船を就航させている

韓国	基礎研究	①－ ②○ ③×	①－ ②→ ③↘	①－ ② DARPA の Robotics Challenge で韓国の大学チームが優勝するなど、災害対応に関する研究を加速させようとしている ③成果主義に陥りがちで、基礎を尊重しない風潮にあり、低迷している
	応用研究・開発	①－ ②△ ③△	①－ ②↗ ③→	①－ ②フィールドロボティクスに関する国際フォーラム[23] を開催するなど、ロボット技術の応用先の一つとして災害対応を視野に入れている ③マンガン団塊採取プロジェクトを起こしたりして深海への進出を強めている

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

①インフラ検査・保守ロボット、建設ロボット

1) 国土交通省総合政策局 ," 建設ロボット技術の開発・活用に向けて～災害・老朽化に立ち向かい、建設現場を変える力～ "
http://www.mlit.go.jp/common/000995047.pdf
2) 国土交通省 , “情報化施工推進戦略”
http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf
3) 建山和由 , 横山隆明 . "ICT を利用した建設施工の高度化と将来展望 ." 計測と制御 55.6 (2016): 477-482.
4) 国土交通省 , “道路構造物の現状”
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
5) 藤野陽三 , 永谷圭司 , "SIP のインフラ維持管理・更新 / 災害対応ロボット技術 ", 土木技術 , Volume 71, Issue 4, pp. 42595, (2016)
6) 大西献 , 宿谷光司 , 岡﨑弘祥 , 小堀周平 , 村角謙一 , 久川恭平 , " トンネル災害時の引火性ガス雰囲気内探査ロボットの開発（NEDO インフラ対応ロボット開発プロジェクト)", 第 16 回システムインテグレーション部門講演会予稿集 , pp.2543-2546 (2015).
7) 植木 睦央 , 猪原 幸司 , 北原 成郎：「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて , 建設マネジメント技術 2013 年 6 月号 ,pp.45-53 (2013).
8) Marco Hutter et. Al, “IBEX - A Tele-operation and Training Device for Walking Excavators” , Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.48-53 (2016).
9) 吉灘 裕 , 昆陽 雅司 , 永谷 圭司 , 山下 淳 , 野瀬 松男 ,"ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ（TRC) 建設ロボット実験システム（単腕モデル)", 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 ,RSJ2016AC3C2-06 (2016).
10) 特集 " 次世代社会インフラ用ロボット現場検証の取り組みについて ." 日本ロボット

学会誌 Vol. 34.No.8, No.9 (2016).
11）総務省 総合通信基盤局 ,” ロボット・IoT における電波利用の高度化など最新の電波政策について” , http://kiai.gr.jp/jigyou/h28/PDF/0617p1.pdf (2016).
12）Kohanbash, David, Scott Moreland, and David Wettergreen. “Plowing for rover control on extreme slopes.” Field and Service Robotics. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399-413 (2014).
13）椎葉祐士 , 建山和由 , 宮武一郎 , 古屋弘 , " 米国における情報化施工の導入環境調査報告 ." 建設機械施工：一般社団法人日本建設機械施工協会誌：Journal of JCMA 65.7, pp.21-24 (2013).
14）山口崇 . " 欧州における情報化施工等の状況 ." 建設機械施工：一般社団法人日本建設機械施工協会誌：journal of JCMA 65.7, pp.25-28 (2013).
②災害調査・レスキューロボット
15）SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/meibo/infura_meibo.pdf
16）ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ
http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html
17）Horizon 2020
https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020
18）DARPA ロボティクス・チャレンジ
http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge
https://ja.wikipedia.org/wiki/DARPA ロボティクス・チャレンジ
19）NEDO DARPA ロボティクスチャレンジに協力
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100297.html
20）ボストンダイナミクス
http://www.bostondynamics.com/
21）i-Robot
http://www.irobot.com/
http://www.irobot.com/About-iRobot/Company-Information/History.aspx
22）DJI
https://www.dji.com/jp
23）International Field Robotics Forum 2016
http://www.ireforum.org/index.php?g_page=intro&m_page=intro02
③海中ロボット
24）浦ほか：「海中ロボット」、成山堂書店、1997
25）Benthos Acoustic Modem:
http://teledynebenthos.com/_doc/main/Brochures_Datasheets/Modems_brochure_2013_2014_lo.pdf
26）Hydroid REMUS 6000 AUVs Aid in Discovery of Air France Flight 447 Wreckage:
https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/FBAE3A993FC33666C125786F00289474?OpenDocument

3.4.3　空中ロボット

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

空中ロボットとは人の操縦ではなくコンピューターで制御された自律的飛行が可能な飛行ロボットのことであり、小型無人航空機、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）、UAS（Unmanned Aerial System）、ドローンとも呼ばれている。空中ロボットは当初は軍事目的で第 2 次世界大戦前に試験飛行した後、イラク戦争やアフガン戦争で実戦配備された。一方で、携帯電話やスマートフォンの進化の中で、センサー、マイクロプロセッサー等が超小型化・MEMS 化され高性能化された恩恵を受けて、数百グラムから数キログラム程度の小型で電動型の自律飛行可能なマルチローターヘリコプターが約 10 年前に誕生した。これらの空中ロボットは技術的完成度から考察すると安全性や信頼性・耐久性に課題が多く黎明期の段階であったため、これまでは主にホビー用が主力であった。しかし、2016 年頃から次第に産業用への利活用が拡大し始め、空の産業革命をもたらすとまで言われるようになっている。ここでは主に、飛行距離が短距離で数キロメートルまでの農業、インフラ点検、測量、警備、災害対応用途、飛行距離が中距離で数キロメートル～数十キロメートルの物流、宅配用途等の産業用空中ロボットの現在と将来技術を俯瞰する。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

設計に関する研究開発要素として、固定翼、回転翼、これらの複合型 UAV の航空工学的な最適化設計が挙げられる。つまり、飛行距離、飛行速度、滞空時間、ペイロード等の最大化と、消費エネルギー、機体サイズ、重量、騒音の最小化の達成である。電気推進系では、モーター、モータードライバー、プロペラ、バッテリーなどの駆動系とペイロード、機体サイズ、重量、構造等の最適化である。エンジン推進系ではモーター、モータードライバーをエンジンに置き換えれば最適化アプローチは同じである。さらに、可変ピッチと固定ピッチなどパラメータも多岐にわたる。特に、無人の飛行体であり自律制御しやすい機体構造も検討すべきである。静音化も考慮した高出力プロペラの 3 次元形状もほとんど取り組まれていない。有人航空機に関しては約 100 年の歴史の中で体系化された設計理論が確立されているが、UAV については経験則はあるものの設計論が確立されていない。

次に製作に関する研究開発要素がある。空中を飛翔する機体はいかに軽量化するかで性能が決まる。1 グラムでも削減するにはどうすべきかという難問と対峙して、軽量化すると剛性が低下するという矛盾する命題を解かなければならず、軽量化と高剛性化の紙一重の戦いである。炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が使用されることが多いが、CFRP にも品質には大きな差がある。高品質で信頼性のある機体製作が大きな課題である。

そして、空中ロボットの正確な非線形動的モデリングという課題が依然として研究開発ステージにある。すなわち、ニュートン・オイラーの運動方程式から基本的な式は誘導されるが、個々の空中ロボットの厳密なモデルまでは導出されていない。また、風洞実験などのデータも皆無に近く、ホビー用機体製作の感覚とこれまでの経験則で産業応用機体が設計・製作されている実情がある。空中ロボットは電子工学、制御工学、コンピューターサイエンスを得意とする大学の研究室から誕生しており、航空工学の専門分野から誕生し

ていないことも理由の一つである。次のフェーズとして空中ロボットに航空工学の知見を採り入れることで、飛翔体としての飛躍的な高性能化の可能性がある。羽ばたき翼型の空中ロボットに至っては、大学での研究開発が主体であり実用機は現存していない。胴体運動と羽ばたき運動のモデル化など依然として未解明領域である。

UAV は気象変動の激しい地表から高さ 150 メートル程度までの超低空空間を人の介在しない無人で飛行するという宿命を持っている。現状は天気の良い日のみ UAV は飛行するが、いずれは雨や雪の日、風の強い日も物流ドローンは飛行する必要がある。したがって、UAV 制御技術については高いロバスト性と環境適応性が求められる。現状は試行錯誤のチューニングによる制御器が一般的であるが、6 自由度の運動をともなう UAV をモデルベースで分散型線形制御を行う方法も実用化されている。さらに、今後は飛行性能と信頼性の向上を目指したモデルベースの階層集中型非線形制御の方法、非線形空力特性も考慮した非線形適応制御法、アクチュエーターの飽和とサンプリングレートの制限、モデリングの不確実性、時変ダイナミクスを考慮したゲインスケジューリング法、さらに先進的なロバスト適応制御、モデル予測制御、バックステッピング、ダイナミックインバージョンベース制御、モデル規範適応制御、およびフォールトトレラント制御が積極的に研究され実装される日も近い。近未来的にはスーパーバイザーの上位システム（ガイダンスシステムもしくはネットワーク型でクラウドシステム）とナビゲーションと下位の制御システムが緊密に連携しながら安全性・信頼性・耐久性を担保していくことになる。

各コンポーネントに目を転じると、推進システムには内燃機関推進と電気推進がある。エンジンに代表される内燃機関は、長時間・長距離・大ペイロード用途に優れているが飛行高度に限界がある。一方、電気推進システムは、エネルギー源としてバッテリー、太陽電池、燃料電池等が使われるが、長時間・長距離・大ペイロード用途への軽量小型高性能化の研究開発が活発である。他方で、不燃性と耐環境性、特に -20℃～ -30℃程度の低温環境下での発電能力が求められている。パワーマネジメントの観点の研究も重要となっている。そして、現状ではホビー用モーターとドライバーが多くを占めているが、高出力で信頼性、耐久性の高い産業用 UAV のモーター、モータードライバーの開発が必要である。

次に、センサーとセンシング、中央演算処理装置（CPU）と CPU 周辺機器である。慣性計測センサー（IMU: Inertial Measurement Unit）と方位センサー、衛星測位システムと気圧計から拡張カルマンフィルター等を利用した高精度自己位置推定の課題がある。オートパイロットの超小型化・軽量化への命題から、全てのセンサーの MEMS 化による低消費電力化、低ノイズ化と高信頼化、振動と飛行環境の影響を受けない耐環境性が求められている。後述する（4）科学技術的課題でも解説しているが、現状の UAV はガイダンスシステムの無いナビゲーションと制御システムで飛行している。これは搭載可能な高速演算可能な超小型マイクロプロセッサー CPU が現存しないことが理由である。CPU や周辺メモリーなど半導体産業の進化を待たねばならない側面もあるが、解決策としてクラウドサービスを活用したネットワーク型 UAV として飛行することが考えられるが、その場合には高速通信が肝となる。搭載可能な高性能で超小型のガイダンスボードが実装できるには少なくとも 10 年程度を要すると思われる。

通信技術については、各国の法律的制約がありさまざまであるが、現在使用されている社会インフラの携帯電話基地局との通信、衛星通信、複数 UAV 間通信などにより飛行状

態をモニタリングするというのが一般的である。今後は携帯電話基地局を活用した LTE 回線による高速大容量通信が進化していくと考えられる。この発展型としてアドホック & メッシュネットワーク化と、UAV 運行管理システムや UAV 管制システムからなる UTM（UAV Traffic Management system）が実現される。そして、空域エリアごとに UTM が構築され、通信途絶時には優れた自己修復機能により信頼性の高いネットワーキングと緊急時の応答を行うなどの多様なユースケースで、空中ロボット群の多数機管制制御が可能になる。いずれは有人航空機と無人航空機が共存して統合型管制システム下で安全運航管理する技術開発がなされていくと考えられる。こうした通信のためにドローン専用周波数帯として 5.7 ギガヘルツが総務省から割り当てられたが、小型軽量のデバイスの開発も急務である。実時間軌道計画については、飛行中の LTE 回線によるネットワーク化が必須で、クラウドサービスにより必要な 3 次元地図が実時間でダウンロードできるようにすべきである。この 3 次元地図は、将来的には、社会的共通基盤化もしくは地図サービス会社などから提供されるようになることが望ましい。局所的な天気情報なども同様である。

故障検出技術について、有人航空機ではパイロットが行う重要なミッションをコンピューターが自律的に行うという大変過酷な現状にある。センサー系統、アクチュエーター系統、フライトコントローラ CPU 周辺の故障が想定される。信頼性向上の観点から 2 系統以上の冗長システムが望ましいが、ペイロードの制約の関係からできない場合も多い。この場合は自律的異常診断アルゴリズムを別系統 CPU により実行して FTA（Fault Tolerant Analysis）解析を行う必要があり、統合型機体健康管理 IVHM（Integrated Vehicle Health Management）システム [1] や不測の事態に対応できる自動緊急対処管理 ACM（Automated Contingency Management）システム [1] 等の開発と実装が求められる。さらに、フォールトトレラント制御技術は必須である。

自律性に関して、緊急の三つの課題がある。一つ目は GPS 電波が受信できない環境下での自律飛行の達成、二つ目は障害物の検知と回避であるセンス & アボイド SAA（Sense and Avoid）、三つ目は風などの外乱環境下で精度の良い着陸性能を目指すピンポイントランディングである。これら三つの技術が時速 50 キロメートル～ 80 キロメートル程度の飛行速度で実現すれば、空中ロボットの実応用は急速に進展して物流などで利活用され大きな産業化が図られる。さらに、高度な自律性のためには複数の自律的な UAV が相互に通信しながら、協力して個々の状態を制御し、状態情報を交換しながら共通の目的を達成することが必要となる。ネットワーク型 UAV と群れ飛行と呼ばれる UAV スワームが今後普及して行くと考えられる。

マイクロ UAV である MAV（Micro Air Vehicle）の研究開発は数グラムの昆虫サイズを目指している。MAV は極端に小さなペイロードで、電源、センサー、通信システムにかなりの制約があり、空気の粘性による低レイノルズを取り巻く問題に対抗するための研究が必要である。信頼性や耐久性への挑戦が続いている。

(3) 注目動向

現在、UAV はホビー用から産業用へと応用分野を拡大しながら、新産業創出への期待

から世界的な高揚時期に入っている。世界のドローン市場は急速に成長しており、ABI Research によれば 2016 年の 39 億ドルが 2019 年には 90 億ドルに達すると予測[2] している。ドイツの Drone Indusry Insight 社の 2016 年調査[3] では全世界でドローン産業に係るベンチャー企業の数は 711 社で、北米 50%、ヨーロッパ 30%、アジア 9%、オセアニアと中東・アフリカ 3% で、企業規模は平均年数 6.5 年、従業員数 8.3 人となっておりドローン産業はこうしたベンチャー企業によってけん引されていると報告している。

このようなドローンへの期待の社会的背景は、先進国を中心に少子高齢化社会による慢性的な労働力不足、そして、人件費高騰による省力化・無人化の促進と低コスト化、サービスの向上にある。特に、運送系や測量・建設・土木系の分野においては求人倍率が高く深刻な状況に陥っている。宅配ドローンや 3 次元測量、インフラ点検、i-construction などドローンを活用した取り組みは以上のような社会的背景がある。さらに、3 次元空間を自在に飛べない人間の憧れとして、分身としてのドローンにリモートセンシングの役割を託すという側面も多々ある。人が行けない場所での災害調査、精密農業の生育調査、漁場探索、将来的には消火活動や高所危険作業など無限の可能性を秘めたドローンに近未来を想像できる点も重要である。

(4) 科学技術的課題

近年、UAV への期待と可能性が拡大し、ハードウエアやソフトウエアの性能が劇的に改善している。そうしたなかで、飛行前方の障害物を迅速に認識して衝突回避を自律的に行い複雑な環境を認識して飛行経路を自ら生成しながら自律飛行するためには、ガイダンス（G: Guidance）、ナビゲーション（N: Navigation）、制御システム（C:Control）が重要な役割を果たす[4),5)]。この 3 要素（GNC）は完全自律制御飛行のためのコア技術であり、自律飛行における頭脳部として今後急速に進化を遂げていくものと思われる。特に、物流・宅配ドローンに見られるように自律制御飛行のレベルが高度化して目視外飛行かつ長距離飛行となると、ガイダンス、ナビゲーション、制御システムが決定的に性能を決めることになる。図 3-4-17 はガイダンス、ナビゲーション、制御システムの関係を模式的に示している。

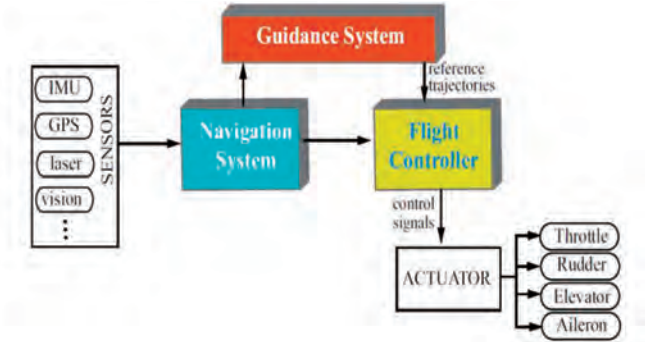

図 3-4-17　ガイダンス、ナビゲーションおよび制御システムの関係[4),5)]

UAV におけるガイダンスシステムは人間に例えると大脳の役割に似て、認識と知能・判断を担う。複雑な未知環境においても障害物を検出して衝突回避しながら目標軌道をリアルタイムに決めて自律飛行する、いわゆる実時間経路生成を実行する。もし機体に異常

が発生した場合は、飛行継続が可能かどうかを判断して困難であれば、安全な場所を探索しながら地上に帰還するというミッションも含まれるため、高度で瞬時の判断を伴う上級レベルの自律飛行に該当する。有人航空機ではパイロットが担う高度な技術であるが、UAV ではすべてコンピューターが逐次変化する 3 次元空間を認識して飛行経路と高度などを瞬時に決定していく必要がある。現状はガイダンスが全くないかほぼ無いに等しい状態で飛行しており、最も重要な科学技術的課題と言える。当分の間はネットワーク化が不可欠で、クラウドサービスによるガイダンスを受けながら飛行することになる。将来的には搭載した人工知能（AI）などの支援を得た飛行になるであろう。

ナビゲーションシステムは図 3-4-17 のように IMU、GPS、レーザー、ビジョンなどのさまざまなセンサーデータからカルマンフィルター等を用いて自己位置推定を行い、そのデータを制御システムに伝える役割を担っている。現在の多くの自律飛行可能な UAV はガイダンスシステムの無い、ナビゲーションシステムと制御システムの二つのシステムで Waypoint 飛行と呼ばれる初級的な自律飛行を実現している。ガイダンスが人間の大脳であれば、ナビゲーションと制御は人間の小脳に相当しており平衡感覚や運動機能を担っている。先進的なナビゲーションシステムではレーザー、超音波センサー、赤外線センサー、シングル・ステレオカメラ、3D カメラ、ビジョンチップなどを冗長的に搭載してマッピングや障害物検出を行い、自己位置推定の精度を上げている。

制御システムは、ガイダンスシステムから指示されるさまざまな目標値や命令とナビゲーションシステムから伝送される現在の機体の位置、飛行速度、姿勢などをもとに、四つの制御信号を決めてロール、ピッチ、ヨー角速度、スロットルを制御する。

（5）政策的課題

目視外飛行と第三者上空飛行について、現状では厳しい規制下にある。目視外飛行は原則禁止となっており、特別な許可が無い限り認められない。基本は目視外飛行にならないように監視者を配置することが義務づけられている。さらに困難な課題は、第三者上空飛行である。陸地の上空を飛行する場合は地権者の許可が必要となっている。これは海上においても同様で漁協等の許可が無いと飛行できないことになっている。また、タンカー等が停泊中はタンカー上空の飛行を回避し、航行中の漁船等の上空も原則飛行回避することと定められている。国家戦略特別区が全国に 10 カ所あり、その中でドローン飛行の特区として千葉市が指定されているが、この特区内での飛行においても上記の飛行許可をすべての地権者、漁協から取得する必要がある。したがって、現状では船舶がたくさん行き交う東京湾上空を飛行することは、ほとんど不可能な状況になっている。この目視外飛行と第三者上空飛行の緩和について、ゼロベース特区という新しい概念の導入の動きがある。

ドローンの国際標準化の動きが次第に本格化してきている[6)]。ISO TC20/SC16 Unmanned Aircraft Systems の会合がワシントン、ロンドン、北京と 3 回行われ、第 4 回はマドリードで 2017 年 3 月頃に開催された。三つの WG が設置されており、WG1「General」は民間用および商業用の無人航空機システムに関する一般的な要求事項、WG2「Product Manufacturing and Maintenance」は機体、管制装置、C2 リンク（管制局との通信方式）などの無人航空機システムの設計、製造、耐空性に関する要求事項、

WG3「Operation and Procedures」は無人航空機システムの運用方法に関する要求事項、について検討することになっている。ISO TC20/SC16 議長は米国連邦航空局（FAA）元 Senior Executive の John Walker 氏で、米国、中国、フランス、ドイツ、英国、ロシア、日本など十数カ国が参加している。WG2 では、電池（提案者：米 ASTM International）、管制向け機体識別システム（米 NASA、欧州民間航空機電子装置機関：EUROCAE、フランス民間航空総局：DGAC、中国 Aero-Polytechnology Estabilishment:CAPE、緊急時のリスク低減技術（米 SAE International）などの議論が行われており、さらに、可搬質量、電波干渉、Fright Critical System（航法・通信・衝突防止システム）などが議論の対象に挙がっている。こうした国際的な動きに呼応して、日本も 2017 年 4 月に ISO TC20/SC16 対応の委員会を設置し活動を開始する予定である。

(6) キーワード

UAV（Unmanned Aerial Vehicle）、UAS（Unmanned Aerial System）、ドローン、空中ロボット、飛行ロボット、ガイダンス、ナビゲーション、制御システム、自律制御、自律飛行、回転翼機、固定翼機、VTOL（Vertical Take-Off and Landing）

(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	◎	↗	・基礎から応用研究は主に大学や研究機関中心に実施されており、ドローンの高揚期を迎えて、活発化している。内閣府の革新的研究開発推進プログラム ImPACT において災害対応を中心としたタフ・ロボット・チャレンジが実施されており、この中で飛行ロボットは 20 の研究機関でテーマを分担して基礎から応用研究まで推進されている
	応用研究・開発	◎	↗	・応用から実用化研究は国プロとして、戦略的イノベーション創造プログラム SIP や経産省・NEDO、国交省、農水省、総務省などの省庁でドローンを活用した農業・漁業、インフラ点検、測量、災害・火災、宅配などさまざまな公募型研究が推進されている ・国内ドローン市場は 2015 年で 104 億円、2016 年 199 億円、2020 年 1138 億円と 2015 年比 11 倍の成長予測である。内訳は 2015 年でサービス市場 58.6%、機体市場 31.7% が 2020 年にはサービス市場 678 億円（2015 年比 11 倍）、機体市場 240 億円（同 7 倍）、周辺サービス市場 220 億円（同 22 倍）と予測されている。ドローンメーカーでは自律制御システム研究所、エンルート、プロドローンなど、サービスではエアロセンス、アミューズワンセルフ、テラドローン、TEAD などがある
米国	基礎研究	◎	↗	・基礎から応用研究が盛んである。MIT 人工知能研究所では固定翼型ドローンを時速 48 キロメートルで飛行させ、障害物を二つのカメラで瞬時に見分け、かつ、3 次元マッピングシステムの開発に成功している。ペンシルバニア大学 GRASP 研究所は昆虫の飛行原理から衝突防止の飛行法を考案し実現した。その他、DARPA をはじめとする国家プロジェクトが組まれて基礎から応用研究が活発化している

	応用研究・開発	◎	↗	・米国ドローンベンチャー企業のトップに位置する 3D Robotics 社は、中国 DJI 社との競争に勝つべく Phantom に似た Solo を開発販売した。しかし、DJI から価格ダンピングの攻勢を受けて敗北し、在庫を抱えて出資金を使い切り、社員を 50% 解雇する事態に陥った。結果的に 3D Robotics は凋落傾向にあることは否めない ・応用研究等では農業関連で Micasense、PrecisionHawk、Event38Unmanned System が、点検関連で Measure、Kespry、物流で Amazon、Flirtey、UPS、測量で Skycatch、工場倉庫管理で Walmart、ADASA、テレコムで Google、Facebook、娯楽で Disney、Hoovy、林業で Droneseed、水上・水中ドローンで O-Robotix、Sail Drone、ユーザー向けサービスで DroneDeploy、Pix4D、Hivemapper、Airmap、DroneBase、セキュリティーで Drone Shield 社などがある [7]
欧州	基礎研究	◎	↗	・基礎研究より応用研究が盛んである。チューリッヒ大学では 4 発ロータードローンがぎりぎり通過できる狭い空間を魚眼カメラと IMU のみから高速で通り抜ける研究や、スイス連邦工科大学チューリッヒ校 ETH ではスワーム飛行の研究を、ローザンヌ校（EPFL）では人が搭乗できるドローンの開発や衝突回避の研究開発を実施している
	応用研究・開発	◎	↗	・仏 Parrot 社は 2012 年にスイス連邦工科大ベンチャーの Pix4D（ドローン専用 3 次元マッピングソフト開発）や senseFly、2014 年に農業 AI の AIRINOV（ドローンによる農業リモートセンシングサービス企業）、Micasense（農業リモートセンシング用マルチスペクトルカメラ開発企業）に出資して傘下に置いている ・農業関連では Airinov 社、点検関連で Aerial Power、Sky Futures、Redbird、DeLair Tech、Lufthansa Aerial Service、テレコムで Nokia Networks、公共で Skyfire Consulting、公共で MineKafon、Airfusion、Flyability、ユーザー向けサービスで Drone Volt、Airstoc、Flock、セキュリティーで Dedrone、BlighterSurveillance 社などがある [7]
中国	基礎研究	◎	↗	・民生用ドローンの基礎研究は北京航空航天大学無人機研究所、南京航空航天大学無人機研究所、南昌航空大学無人機研究所、西北工業大学第 365 研究所、中国航天科技集団公司研究院など中国全土で 15 カ所程度の研究所、研究センターで実施されている。基礎研究より応用開発・ビジネスが盛んである
	応用研究・開発	◎	↗	・DJI 社はドローンビジネスで世界の市場の 7 割程度を占めている。つまり、独り勝ちの様相で他国や他社を圧倒している。2016 年 3 月に Phantom4 を発表、初の農薬散布用機体 Agras MG-1 の機体販売を開始して、10 月には高性能ドローン MAVIC Pro、11 月には Phantom4 Pro と Inspire2 を続々発表している。さらに、米国 Apple 社、Facebook 社、熱赤外線カメラ大手 FLIR、カメラメーカーやスマートグラスメーカーと連携し、測量や AI 農業を推進する Precision Hawk と連携強化している ・投資獲得規模で世界 1 位の DJI 以外にも 4 位 Zero Zero Robotics（Hover）、8 位 Yuneec、9 位 Ehang で、ZEROTECH や AEE、Xaircraft、MMC、EWATT など有力企業がある。特に、2015 年末に「軽・小型ドローン運航規程」が公布されてドローン環境が整備された [7]
韓国	基礎研究	○	→	・日・米・欧・中と比較してやや研究活動は遅れている感がある
	応用研究・開発	◎	↗	・企業としては、空撮で LSware/VORA、3S Solution、Drone IT、UAV Survey、Keva Drone、100 ㎏大型ペイロードの ELECBIRD、Gryphon Dynamics、物流で Korean Air、Blueye、農業で KUAS、VTOL の PNU Drone、UCONSYSTEM などの企業がある

（注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

（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（8）参考文献

1）Kimon P. Valavanis: Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer, 2015
2）Thompson, Cadie. “Here’s where the real money is in drones”. CNBS. http://www.cnbc.com/2015/05/13/heres-where-the-real-money-is-in-drones.html, (accessed 2016-11-29).
3）“The drone market environment map 2016”. DRONEII. COM. https://www.droneii.com/drone-market-environment-map-2016, (accessed 2016-11-29).
4）Nonami, K. et al: Autonomous Flying Robots, Springer, 2010
5）野波健蔵：計測と制御、計測自動制御学会、Vol.56, No.1, 2017 年 1 月 14 日
6）馬場景子：日経 Robotics、日経 BP 社、No.16, 11 月号、2016
7）インプレス総合研究所、世界のドローンビジネス調査報告書 2017、2016 年 12 月 15 日

3.4.4　生活支援・福祉ロボット

（1）研究開発領域の簡潔な説明

生活の質や利便性向上を目指し、人が生活する空間において、介護・福祉を含む生活用途に使用されるロボットの実現を目指す研究開発領域。ロボットを中心とした ICT 技術の融合を確立していく段階にある。食事・排せつ・整容・入浴・移動など生活を営む上で不可欠な基本的日常生活動作（ADL）、および家事・外出から電話や服薬管理、金銭管理といった道具を用いた作業を含む手段的日常生活動作（IADL）に関する自立支援、支援者支援、および就労・社会参加支援を含む。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

生活支援・福祉ロボットは、生活を支援するという目的志向に立脚し、支援される側に対する自立支援や社会活動支援、および支援する側に対する支援者支援が対象となる。すでに 90 年代前半には、就労支援も含む自立支援、社会参加支援、介護者支援からなるサービスロボットとして、加藤により生活支援ロボット（リリスボット：Living and Life Support Robot）が提案されている [1)]。また土肥は、広範なライフサポートテクノロジーとして、介護ロボット、コミュニケーション支援と精神的支援も合わせて、介護者および被介護者の両方の立場に立ったロボットを提案している [2)]。

基本的日常生活動作（ADL:Activities of Daily Living）や手段的日常生活動作（IADL:Instrumental Activities of Daily Living）の支援は、自立支援や支援者支援にとって重要な課題である。また、就労支援や娯楽、コミュニケーションなどは社会参加支援であるといえる。これまで、生活の介助や支援は人手によるサービスとしてなされてきた。社会福祉は地域社会のネットワークに大きく依存するが、個々人の生活は、ロボットを含む機械によって支えられる範疇は多く、世界的な社会課題の解決に向けた技術の大きな柱の一つとなる研究領域である。

［生活支援・福祉ロボットの種類］

生活支援ロボットは、利用者の自立を高めて生活機能の向上を実現するとともに、介護・看護職員や家族といった支援する側の人々の生活の質を向上させることを目指している。その作業目的別に区分すると、①移動作業型生活支援ロボット、②情報・コミュニケーション型生活支援ロボットに大別される。

① 移動作業型生活支援ロボット：義肢、装具、車いす、車いす搭載型マニピュレーターなど、本人の意思による移動や作業を支援するロボット。福祉車両等は、今後の自動運転技術と融合することで、搭乗型の生活支援ロボットであると言える。体位変換や排せつ行為を支援するベッド等の介護支援機器も環境要因としての生活支援ロボット。

② 情報・コミュニケーション型生活支援ロボット：環境認識・音声認識・合成技術によ

る対話支援機能を有するロボットなど、人の認知機能の拡張からコミュニケーションの支援までを対象とする生活支援ロボット。利用者の意思をマイクやカメラから取得するためウエアラブル機器と連動し、情報をインターネットから取得する機能も含む。

上記に共通し、人の視線や表情計測といった生体センシング技術、人の意図推定・行動予測技術、複数のモダリティを通じた人の身体へのフィードバック技術という観点より、系内に人を含むシステムをデザインすることが必要不可欠である。この観点から、人の身体的･認知的能力を補綴し強化する人間拡張工学（Augmented Human）との関連は高い。なお、人と機械の協働作業において、人と機械がどのようなインターフェースによって接続されているか（機械がどの程度介入しているのか）という観点から、多岐にわたる人支援技術の全体像を体系的に捉えることが可能である。

［国内外の研究開発動向］

①移動作業型生活支援ロボット

人の身体動作を支援する技術は、移動という基本的な日常動作に対し、四肢をはじめとする身体の動作機能を拡張・増幅・補助もしくは代替する技術といえる。近年「パワードスーツ」などの言葉で知られる身体着用型の動作支援機器は、外骨格ロボットとして古くより知られた技術であり、上肢・下肢ともに、世界的に多く研究がなされている。日本ではロボットスーツ HAL、米国では BLEEX、欧米では ReWalk、Locomat などが先駆的な取り組みを行っているが、介護支援や障害者等の動作支援、労働による身体的負担の軽減など汎用性が高い。

例えば、物理的な支援としての代表的な介護動作として、介護者がベッドや車いすなどから被介護者を抱き上げ移動し抱き下ろすという移乗動作が挙げられる。これは介護現場において最も負荷の高い重労働であるにも関わらず、現状は介護者の手で行われることが一般的であり、介護者の腰痛などを引き起こす原因となっている。移乗動作の支援機器としては介護用リフターが挙げられるが、着脱に手間がかかるといった問題から、十分に普及しているとは言いがたい。そこで近年、腰部に着用する動作支援機器が広く研究開発されており、販売も進んでいる[3)]。このような介護支援技術については、今日の介護職員の業務負担の軽減や､介護者不足を解消するものとして期待が高まっている。これらはまた、機能改善、機能獲得を目的とした治療技術への応用も期待される。

一方、ロボット技術の高度化により、さまざまな人間型ロボットが民間企業や大学などの研究機関において開発されており､介護者の支援動作を代替するための試みが見られる。これらは、人の作業の代替・支援を目的として構築される。例えば、ロボットが腕で被介護者を抱きかかえて、移乗する動作を支援するロボット[4)]などが見られる。

また、ベッドから車いすへの移乗や、屋内のトイレ等への移動をスムーズにするなどの目的で、人の形をしていない機能的なロボットの開発も行われている。トヨタ自動車の非装着型のパートナーアシストロボット[5)]、パナソニックの離床アシストベッド[6)]などを代表とする移乗動作支援ロボット（移動介助機器）の他、食事支援も多く研究が行われている[7)]。食事は毎日決まった時間に行われており、ロボットによる食事支援は有益である。日本ではセコム社のマイスプーンが先駆的な取り組みを行って来ており、近年でも、ス

ウェーデンの医療用食事支援ロボット（Bestic）が注目されている。この他、マニピュレーターによる物体操作の支援や、家事支援、排せつ・整容・入浴にも支援ロボットが開発されている。

自動運転技術に代表されるような、移動ロボット技術にも大きな発展が見られる。GPS（Global Positioning System）や RFID（Radio Frequency IDentification）などの環境センシング技術や無線通信技術の発展により、あらゆる機器がインターネットに接続され固有のアドレスを有する IoT 技術が実現されつつあり、ロボットとの連携が進められている。これらに親和性の高いロボット掃除機分野においては米国が先導しているが、イタリアでは、DustBot[8] と呼ばれる国家プロジェクトにより、街区において巡回する掃除機型ロボットの社会実験が行われ、その有用性が明らかになっている。また、移動手段としてのパーソナルモビリティ技術に関しても、産総研などが中心となり、ロボット特区[9] を利用した社会実験の取り組みが見られる。このような取り組みは、外出が困難な高齢者の支援に向けて特に有用である。

②情報・コミュニケーション型生活支援ロボット

人とロボット間の言語・非言語による相互作用を通じて、人の認知機能の支援やコミュニケーションの支援を行う技術である。知覚、言語処理、コミュニケーション戦略、ロボットのネットワーク化、ロボット制御、マニピュレーターなどの技術の開発が広く行われている。特に、HRI（Human Robot Interaction）分野において精力的に研究されている研究課題であり、認知ロボット（Cognitive Robot）、ソーシャル・ロボット（Social Robot）や、社会支援型ロボット[10]（Socially Assistive Robot）とも呼ばれる。生活支援を目的とし、実世界において自律的に行動する機械系を実現するとともに、人の認知・運動特性や主観性の理解に基づくロボットの行動過程における内部処理と表象に関する研究が進められている。ロボットは、自身の経験からその知識と内部表象を学習し、環境にシームレスに統合される未来のロボットを実現するための取り組みである。

これに加え、介護用やリハビリテーション用のロボットを次世代住居環境により補助する研究もなされている。例えば、住居環境のカメラからロボットに対して物体の位置測定データを提供することで支援する手法や、パーティション等の部屋の構造そのものが可動である住居環境なども提案されており、可動部分が自走型のロボットと互いに干渉をすることなく動作可能であることが実証されている。環境型のロボット支援技術であるといえる。

一方、教育現場、保育現場、介護現場において、対話や教示を主たる機能とするコミュニケーション型の生活支援ロボットの導入が進められている[11]。保育や介護の現場では、パーソナルロボットを通じて支援者が現場に参加したり、子供や高齢者の状況を確認したりすることができるとともに、その状態を動画メールで受け取ることができるサービスが検証されている[12]。システムを保育園で実際に使って実証実験を行った結果、保護者が保育園での子供の活動に関与できることが確認されている。

日本では、2015 年にソフトバンクロボティクス株式会社が感情認識パーソナルロボット（Pepper）の販売を開始し、2017 年現在ではすでに約 2000 社の企業が導入している。これにより等身大の人間型ロボット（車輪型）が、街中で見られるようになり、コミュニ

ケーションをするロボットが生活の中に登場することが現実となっている。また米国でも、家庭用小型ロボット「JIBO」が販売されるなど、これまで研究段階であったソーシャル・ロボットが、大手・ベンチャー企業を中心に積極的な取り組みが進んでいる。

欧米では、このような情報・コミュニケーション型生活支援ロボットは、自律型よりも遠隔操作ロボットを用いた取り組みが盛んである。コンパニオンロボットを目指す Care-O-bot、Hector、遠隔操作による介護・食事介助支援[13] などが代表例である。

(3) 注目動向

［新しい知見や新技術の創出］

従来の剛性の高い機構や関節を有するロボットがその高い精度により作業を実現することに対し、柔軟な材料を積極的に用いて新しい機能を発現したり、生物学的規範を参考にして動作したりする新たなロボットの研究分野として、ソフトロボティクスが世界的にも盛んに研究されている。専門ジャーナルである Soft Robotics 誌[14] は 2014 年 3 月に第 1 版が刊行されたにも関わらず、2015 年に初めて Impact Factor が 6.13 をつけるなど、ロボティクスだけでなく広く応用分野からも注目されている。人支援分野においてもさまざまな取り組みがなされており、信州大学らが中心となった生活支援ロボティックウエア curara（クララ）[15] や、東京理科大やそのベンチャー企業である株式会社イノフィスによるマッスルスーツ[16] などは、従来の機械的なアクチュエーターとは異なる機構を用いて対人親和性の高い、ソフトロボット技術に準ずる生活支援ロボットである。

当該分野の大きな課題である知能化については、近年、深層学習（Deep Learning）に代表される人工知能技術の発展が世界的な潮流となっており、大学や研究機関のみならず、多くの企業が参入している。画像識別や音声認識の分野では、生活支援ロボットのインターフェースとして利用可能な技術が安価にかつ手軽に実装できるようになると期待される。

人の意思と機械とを直接つなぎ相互に作用させるシステムの実現を目指すブレイン・マシン・インターフェース（Brain Machine Interface:BMI）の研究は、主に米国が主導する形で進められている。例えばリモコンなどの操作が難しい被介護者が、ロボットに意思伝達（命令）したりその応答を受けたりすることが実現されると期待される。日本でも、医療応用のため脳の硬膜下に埋め込む形の電極およびロボットシステムへの連結の取り組みがなされている。また、脳波（EEG）や近赤外分光法による脳機能マッピング（fNIRS）等の脳の中枢系からの信号に基づくもののみならず、末梢系からの信号を利用するサイバニック技術等の研究開発も広く行われており、運動支援のみならずコミュニケーション支援への応用も期待される。こうした技術が成功すると、従来のようにコントローラなどを仲介して機械を操作することなく、人の意思を直接機械に伝えることが可能となるため、近年非常に精力的に研究が行われている。

［国際的なファンディング動向］

欧州では FP7（2007 年～ 2013 年）において、ICT 分野のチャレンジ領域として Cognitive Systems and Robotics が選定され、主にロボットの人工知能化技術に関する研究プロジェクトのファンディングが強化された（年約 2 億ユーロ）。Horizon 2020（2014

年～ 2020 年）では、欧州委員会、180 の企業、研究機関により、ロボット工学における世界最大の民間研究・革新プログラムとして SPARC と呼ばれる官民パートナーシップが 2014 年 6 月に立ち上がった [17]。応用の対象は、製造業、農業、保健、運輸、市民社会セキュリティー、家庭であり、欧州委員会より、総額 7 億ユーロが投資される。また、欧州委員会からの投資に加えて、2012 年 9 月に設立された欧州のロボティクス関係者の非営利組織 euRobotics[18] から 21 億ユーロが投資される予定である。

また、2016 年度には、Horizon2020 の後継として事実上の FP9 となる Europe 2030[19] の策定が進められているが、将来計画においても生活支援・福祉ロボットは、高齢化という社会的課題への挑戦という位置づけで、官民パートナーシップの下での進展が期待される。

欧州における生活支援・福祉ロボットは、人々が独立的な生活を行うためのケア・システムとして位置付けられている（ケア・ロボット）。ロボット導入により独立的な生活を支援することには、技術的なソリューションの発展とともに、各国の社会保障、社会福祉制度などの法的措置の採択を必要とする。

米国では、2011 年に、省庁横断型のロボット開発支援プログラム（National Robotics Initiative:NRI）が発表され、国防高等研究計画局（DARPA）、航空宇宙局（NASA）、国立衛生研究所（NIH）、農務省（USDA）らのパートナーシップの下で、すでに約 3 億ドル以上の資金を得て広範に亘るロボティクス分野の支援が行われている。本プログラムは、先進製造パートナーシップ（Advanced Manufacturing Partnership）施策の一つとして位置付けられているのが特徴である。医療・ヘルスケアでは、遠隔ロボットやリハビリテーション支援のロボットの研究開発が行われている。また、生活支援ロボットは、サービスロボットとして位置付けられており、モビリティ機能、および人の行動を認知、習得する能力を有するサービスロボットの開発が進められている。

さらに 2015 年 12 月には、国立科学財団（NSF）が、人間と協力して働く「協働ロボット（co-robot）」の開発・利用を促進 [20] するため総額 3700 万ドルからなる新たな助成を開始した。これは、NRI における 4 回目の助成となる。脳制御による人工装具プロトタイプに関する研究、捜索救助活動を行うロボットチームの開発、およびさまざまな医療ケアを補佐するロボットの構築などが含まれる。このような、協働ロボットに関する新たな標準規格である ISO 10218 と ISO/TS 15066 も普及を後押ししている。

米国では、すでに複数の企業が生活支援ロボットを実用化し、大きな売り上げを上げている。特に 1000 万台の iRobot ルンバを売り上げている掃除機ロボット分野では世界を主導しており、高齢者の介護や子どもの教育を対象としたコミュニケーションロボットの導入も始まっている [22]。家庭用のパーソナルロボットは、人の支援のためにあるため、生活支援ロボットと同じ位置付けである。一方で、主に産業向けではあるが、低価格の人共存型ロボット（Baxter）[23] も実用化されている。

（4）科学技術的課題

まず、大きな技術的なボトルネックは知能化である。人の理解に基づくロボットの行動過程の生成は、知能化が大きな役割を果たし、その内部処理と表象は人工知能分野の長年

の課題である。近年盛んに研究されている深層学習も、事象の相関を学習する能力には長けているが、人々が行っている日常動作の背景にある概念や社会知に関する知識が欠如しているため、実世界で動作する知能ロボットの実現には知能化技術の進展が大きな課題となる。欧米では、政府のみならず民間企業が数兆円規模で人工知能開発に注力しているなか､我が国では 2016 年度に理化学研究所に革新知能統合研究センター（AIP）が設置され、人工知能・ビッグデータ・IoT・サイバーセキュリティーの統合プロジェクトとして、基礎研究から出口に向けた応用研究を行うために約 54.5 億円の予算が措置された。欧米型でなく、日本独自の人工知能技術開発に注力する必要があると考えられる。また、これらの基礎研究を、横断的な研究課題である生活支援ロボットへ応用するための基盤研究の推進が急務である。

次に、人がロボットと物理的な空間を共有するためには、ソフトロボットに代表されるような対人親和性の高いロボットの実現も喫緊の課題である。柔軟関節や接触安全性の確保という観点から見ても、外力に対し敏感なアクチュエーター技術が重要となる。近年、力センサーを搭載したマニピュレーターの実用化が急速に進んでいる背景もこれにあると言える。対人安全性基準、試験方法、および認証手法の確立とあわせて、重要な科学技術的課題である。

最後に、このようなロボット支援技術活用の方向性として、人とともに動作するロボットにおける最適な組み合わせを考えることが必要不可欠である。特に、利用者の自立を高め、より安全な生活（生活機能の向上）を実現し、介護･支援職員の負担を軽減するといった、基本的な現場での課題を研究開発現場にフィードバックし協業する枠組みが限定的であり、その知識の欠如が課題である。特に、ロボット技術をサービスとして生活支援・福祉応用するためには、複数からなるシステムを統合し、ロボットの動作から、ロボットへ動作教示するインターフェースといった人とインタラクションする部分まで、一貫した目的のために動作させるためのインテグレーション技術が必要不可欠である。

(5) 政策的課題

生活支援・福祉ロボット技術は、ロボット工学、人工知能・IoT、人支援技術、ウエアラブル技術、自然言語処理、およびインタラクション技術が有機的に連携した技術領域である。特に、我が国が強みを持つハードウエアとソフトウエアを融合したメカトロニクス技術に関連するものであり、日本の産業をけん引し、世界的な競争力強化の礎としていくべき分野である。しかし、広範かつ世界的にも高い基礎研究のレベルにも関わらず、その産業化については欧米に対し高い競争力が確保できていない現状がある。

日本国内では、工場や農業における作業支援に向けた生活支援ロボット、また自立支援や介護者支援など、福祉分野でのロボット開発は盛んに行われている。ロボットスーツ HAL を開発・販売する CYBERDYNE 社は、2014 年 3 月に東京証券取引所マザーズに上場するなど、ベンチャー企業がけん引する分野でもある。同社は、内閣府・革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の支援も受け､「重介護ゼロ」を目指した取り組みを行っている。

このような生活支援ロボットの開発においては、工学的な発明と学術的な研究に加え、

実社会における実証研究とともに、安全性に関する基準策定、医療福祉機器としての許認可、健康保険・介護保険収載まで、社会に実装するまでのハードルは高い。このため、海外での活動が先行し、それが日本に逆輸入されるという現象が起きている。国内でも、生活支援ロボットの国際安全規格、安全性検証手法の確立、ロボットソフトウエアの機能安全等の検証を目指した、生活支援ロボット実用化プロジェクト（2009 ～ 2013 年度、経済産業省）が行われていたが、その後継が大きく期待される。

日本における生活支援・福祉ロボットの開発水準は世界を先導している。府省連携の取り組みを活かしながら、研究開発だけでなく、社会（臨床）実験、市場開拓のそれぞれのフェーズを支援する政策的な取組の一層の促進が望まれる。

(6) キーワード

サービスロボット、ケア･ロボット、介護福祉ロボット、知能ロボット、移動作業支援、コミュニケーション支援、エンパワーメント、ロボット支援機器、人支援技術

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・移動ロボットやマニピュレーターといったロボットの要素技術、ロボット学会、機械学会、日本生活支援工学会、ライフサポート学会等を中心とした学会活動、基礎研究から社会実装まで段階ごとのファンディング（NEDO、JST START）など、基礎研究を行うためには充実した環境にある。また、対人親和性の向上、新材料を用いたロボット要素技術の開発が進むなど、高い研究レベルにある。知能化においては､理研･革新知能統合研究センター(AIP)など、今後の人工知能とロボット統合プロジェクトの連携が期待される
	応用研究・開発	○	↗	・次世代型電動車いすを開発する WHILL などのベンチャー企業も出ているが、社会構造が大企業を中心としており、新たな技術が産業化するのに障壁がある。近年、移動体通信の Softbank 社がロボットビジネスを展開するなど、歴史的にコミュニケーションロボットの分野は応用研究・開発が盛んである。今後は、ベンチャー企業を中心として人工知能技術と連携しての発展が期待される
米国	基礎研究	○	→	・NRI（National Robotics Initiative）においては、生活支援ロボットは医療・ヘルスケア分野の一つとして位置付けられ推進されている。手術支援ロボットや、内視鏡ロボットなど、産業ロボット技術を転用したロボット医療機器の研究開発が盛んである。生活支援ロボットにおいては、HRI 分野においてサービスロボットの研究開発は高いレベルにあり、当該分野を先導している。また､教育･療育支援ロボットなどの取り組みに大きな予算が措置されるなど、ハイリスクな研究にも支援が行われる体制がある
	応用研究・開発	◎	↗	・世界的に人工知能を搭載したロボット掃除機を普及させた iRobot 社をはじめ、大学からのスピンオフなど多くのベンチャー企業を中心に応用研究・開発が盛んである。2015 年における研究ロードマップ[21] では、医療・ヘルスケアロボットよりも先にサービスロボットが記載されていることが特色である
欧州	基礎研究	◎	↗	・欧州における生活支援・福祉ロボットは、特に、イタリア、ドイツ、フランスの研究者が主導的な役割を果たしており、過去 10 年では当該分野の研究者が IEEE のロボット分野のプレジデントを務めるなど、そのプレセンスは極めて高い。また、認知ロボットやソフトロボットの基礎研究が発展しており、世界的に著名な専門ジャーナル等が刊行されるなど、基礎研究のレベルが高い

	応用研究・開発	◎	⤴	・FP7、Horizon2020 の支援や、世界最大の民間研究・革新プログラムとしての官民パートナーシップ SPARC など、世界的にも注目度が高い。コミュニケーションロボット分野では、近年 Softbank 社が小型の人間型ロボットで世界的に著名な仏アルデバランロボティクス社[24]に資本を入れ、共同開発などを行っている。また、スウェーデン、オランダを中心としたのロボット・ベンチャー企業によるロボット介護支援の取り組みは事業化が急速に進むとともに、産学連携により標準化への取り組みを主導するなど、今後も発展が見込まれる
中国	基礎研究	×	→	・国家中長期科学技術発展規画綱要（2006 年～ 2020 年）において、先端技術 8 分野の中で知的ロボットをあげている。これは、認知ロボットやソーシャル・ロボットに関連する広範な分野であり、今後サービスロボット、ケア・ロボットへの応用が期待できるが、いまだ当該分野でのプレセンスは低い
	応用研究・開発	×	→	・生活支援ロボットは、多くの要素技術のインテグレーションが必要であるが、これらを推進する応用研究、開発に関してはあまり成果が見られない
韓国	基礎研究	△	→	・2000 年代のユビキタスロボットコンパニオンプロジェクト（URC）に主導される形でさまざまなサービスロボットに関する研究が盛んにあり、多くの成果が出たが、その後継プロジェクトが限定的である。このため、HRI に関する有力な研究者らが減少気味である
	応用研究・開発	×	→	・ユビキタスロボットコンパニオンプロジェクト（URC）終了後、企業との連携を中心としてその成果の実用化が進められたが、新規市場創出には至らなかった。その後、知識経済部が中心となり、2013 年から 10 年間のロボット未来戦略を発表しており、今後が期待できる

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
⤴：上昇傾向、 →：現状維持、 ⤵：下降傾向

(8) 参考文献

1) 加藤 一郎 , リリスボット―生活支援ロボット―の構想 , 日本ロボット学会誌 , 11 (5):614-617, 1993. http://doi.org/10.7210/jrsj.11.614
2) 土肥 健純 , ライフサポートテクノロジーの今後の展望 ―生命から生活へ―, 日本生体医工学会誌 ,7 (4):44-51, 1993. http://doi.org/10.11239/jsmbe1987.7.4_44
3) HAL® 作業支援用（腰タイプ),CYBERDYNE 株式会社 https://www.cyberdyne.jp/products/Lumbar_CareSupport.html
4) T. Mukai et al., “Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms,” IEEE/RSJ IROS, pp.5996-6001, 2010.
5) パートナーアシストロボット（トヨタ自動車株式会社） http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/family.html
6) 離床アシストロボット リショーネ Plus, パナソニック株式会社 https://sumai.panasonic.jp/agefree/products/resyone/news.html
7) 石井 純夫 , 食事支援ロボット「マイスプーン」, 日本ロボット学会誌 21 (4), 378-381, 2003.
8) G. Ferri et al.: DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage collection: From DustBot project to the experimentation in the small town of Peccioli, Proc.

of IEEE ICRA, DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980254
9）つくばモビリティロボット実験特区 ,http://mobility.rt-tsukuba.jp
10）A. Tapus, M. Mataric, B. Scassellati Socially Assistive Robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, 14（1）:35-42, 2007.
11）手嶋 一彦（編著），今後の超高齢化社会に求められる生活支援（医療・福祉・介護・リハビリ）ロボット技術，情報機構，2015.
12）NEC コミュニケーションロボット Papero 等,
http://www.necplatforms.co.jp/solution/marketplace/
13）BESTIC, Eating Assistive Device, Bestic AB 社，http://www.besticinc.com
14）Soft Robotics Journal, Mary Ann Liebert, Inc. publishers.,
http://www.liebertpub.com/soro
15）身体装着型のロボット「Robotic Wear curara®」,
http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/chair/ht-lab/project/curara.php
16）マッスルスーツ , 株式会社イノフィス https://innophys.jp
17）SPARC c/o euRobotics AISBL: http://sparc-robotics.eu/
18）euRobotics: https://www.eu-robotics.net/
19）Research Strategies: Europe 2030 and the next Framework Programme
http://sciencebusiness.net/events/2016/research-strategies-europe-2030-and-the-next-framework-programme/#sthash.CzfbZ1xY.dpuf
20）協働ロボット（co-robot）http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm
21）A Roadmap for US Robotics - From Internet to Robotics -, 2016 Edition, November 6, 2016, National Science Foundation
http://jacobsschool.ucsd.edu/contextualrobotics/docs/rm3-final-rs.pdf
22）Jibo Robot, https://www.jibo.com/
23）人間型ロボット「バクスター」，Rethink Robotics 社,
http://www.rethinkrobotics.com/jp/baxter/
24）ソフトバンクロボティクス社，https://www.ald.softbankrobotics.com/ja

3.4.5　医療ロボット

（1）研究開発領域の簡潔な説明

医療ロボットは、ロボティクスの医療への活用であり、既にさまざまな応用事例が存在し、かつ将来的により広範な先進的応用が期待される研究開発領域である。その応用展開は多岐に及ぶが、ここでは、ある一定の動作を伴う、医療支援を目的とするロボットを医療ロボットと位置づける。特に当該研究領域にて注目すべきは、機構・制御・センサー技術を統合した医療ロボットによる治療・診断・分析の統合により、従来には得られなかった医療効果向上を目指す研究開発である。ここではその代表として、手術支援と、リハビリテーションに関する活用領域について述べる。さらに、利用目的が医療目的に留まらないが、将来的に医学や細胞生物物理学等へ大きな貢献が期待されるナノロボティクスを採り上げる。ナノロボティクスはまだ研究が始まって 10 年程度の未踏挑戦領域であり、学会として厳密な定義は存在しないが、1 ミリメートル以下のマイクロロボットをさらに小型化、高機能にしたものから、2016 年のノーベル化学賞のように超分子を組み合わせて歯車など可動機械要素を作製するもの。さらにスマートピルとも言える外部環境に反応して薬物放出する薬物もナノマシン、ナノロボティクスといえる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［手術支援とリハビリテーション］

一般的なロボットへの医療現場からの期待は、主として精密・小型・拡張性に集約される。具体的な事例および研究開発動向として、以下に手術支援、リハビリテーションそれぞれについて述べる。

手術支援ロボットは、国内でも一部が保険適用され、今後ますますの発展が期待されている。国内外で最も知られるものは、da Vinci（米 Intuitive Surgical 社）[1] であり、現在国内では、腹腔鏡下前立腺がん手術、および腹腔鏡下腎がん手術のいずれも泌尿器の領域に関して保険適用されている。一方で、国外に目を向けると婦人科での適用が泌尿器を上回っており [2]、今後ますます適用が広がる可能性がある。Da Vinci による手術では、内視鏡を含む複数の多関節細径ロボットアームを体内へ挿入する。医師はコンソールと呼ばれる装置から操作器を介してロボットアームを操ることができる。このとき、コンソールには 3 次元内視鏡映像が提示される。da Vinci の利点を集約すると、多関節細径ロボットアームにより患者への身体的ダメージが少ない低侵襲手術を実践する、手ぶれによる振動を機械的に除去し動作スケール変更により精細な手技を実践できる、コンピューターの介在により画像診断技術等と融合した新しい手技への発展が期待できる、などがある。この手術支援ロボットは、遠隔操作ロボットと位置づけられ、研究開発が旺盛な分野である [3)-6)]。これ以外についても、事前に取得した医療画像を元に患者病変へ正確に位置決めを行うための画像誘導下手術支援ロボット（Neuromate：仏 Renishow 社）、放射線を適切に病変へ照射する放射線治療器（Cyberkfife：米 Accuray 社）、さらには内視鏡を保持する操作の手ぶれを予防する椅子形装置（iArmS：デンソー）、内視鏡保持器具（EMARO：リバーフィールドとホギメディカル）等の単機能な医療支援デバイスについて国内外での臨床応用が始まっている。

リハビリテーションロボットは、上記の手術支援ロボットと同様に、最近になり一部に保険適用が認められ、今後のより広範な活用が期待されている。国外では、2000 年に Locomat（スイス Hocoma 社）が上市され、一定の市場を形成するに至っている。同装置は、トレッドミル上に設置された下肢駆動装置を患者へ装着し、歩行機能の再獲得を目指すリハビリテーションを処方するものである[7]。国内では、HAL 医療用（サイバーダイン）[8] が緩徐進行性神経・筋疾患を対象として保険適用され、今後のより広範な適用が期待される。同装置は Locomat と同様に歩行訓練を目的とするが、装置が比較的小型・軽量であり、患者に装着して移動できる点が最も異なる。Locomat、HAL ともに筋電位等の生体信号を装置へフィードバックする機能を有している。リハビリテーションロボットによって、反復運動の処方をロボットに置き換えることが可能であることに加えて、センサー技術を活用することによって定量的な診断をリアルタイムに施すことができる。さらに、患者の動作意図に合わせて障害のある身体を装着型ロボットにより適切なタイミングで駆動することによって、脳・神経・筋の可塑性を促進し、リハビリテーション効果を高めることが、これら装置への最も大きな期待である。リハビリテーションロボットは、その有効性が報告されており[9]、また上肢への適用等[10]、研究開発が活発に行われている。

［ナノロボティクス］

(i) 研究分野の定義

ナノロボティクスは 20 年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いまだ 10 年足らずの挑戦的研究分野であるため、学会としての厳密な定義は存在しない。そのためナノロボットと称していても、実際は数ミリメートル～ 0.1 ミリメートル程度のマイクロロボットサイズであることも多い。本報告書では 0.1 ミリメートル以下の肉眼では見えないスケールの研究を中心に記述する。

(ii) 研究アプローチの多様性と目的

(a) ロボティクスからのアプローチ

1990 年代に MIT の Anita Flynn や UC バークレイーの Ronald Fearing[14]、東京大学の三浦宏文、下山勲ら[15] により空を飛ぶ数ミリメートルのマイクロロボットや、スタンフォード大学の Mark Cutkosky[16] らによるファンデルワース力を利用したヤモリの指先の微細構造の吸着現象を用いたマイクロ歩行ロボットなどの研究が有名である。2000 年以降は、さらに小さい領域での研究が活発化し、ドイツのカールスルーエ大学、ETH（スイス連邦工科大学）、EPFL（ローザンヌ工科大学）など欧州を中心に活発に研究された。

外部から操縦可能な世界初のナノロボットは 2004 年に現在東京大学の生田幸司[17]（2010 年以前は名古屋大学）らの「光駆動ナノロボット」である（図 3-4-18）。最初のモ

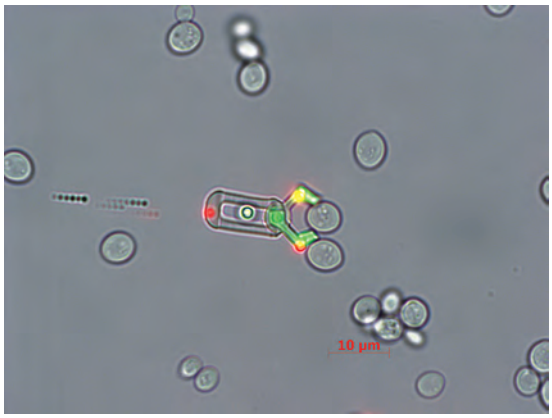

図 3-4-18　光駆動ナノロボット
（出典：参考文献 25）

デルは全長 10 マイクロメートルで 3 自由度の運動が可能で液滴内でマスタースレーブ的に稼働する。ロボットハンドはすでに独自開発していた 2 光子レーザを用いた光造形法を用いて 100 ナノメートル精度で、組み立て工程なしで作製し、Yag レーザを用いた光捕捉で駆動制御できる。ピコニュートン以下の微小力をリアルタイム測定できる力感付きマスタースレーブナノロボットまで到達している。細胞への微小な力刺激による細胞内部の情報伝達を調べる新規の細胞生物物理学者の研究ツールとして実用化間近である。

その後、カーネギーメロン大学の Metin Sitti ら [18] はバクテリアの鞭毛を人工物に結合したハイブリッドタイプのナノロボットを開発した。医療を目的としているが、体内にこのロボットを導入し外部から目的に応じて誘導、操縦するには、まだ多くの技術的、倫理的課題がある。

生体とのハイブリッドタイプには、培養した筋肉細胞をシリコンや樹脂に結合して動かすナノロボット研究も増えてきた。最古の研究は 2001 年に当時 UCLA の Carlo Montemagno ら [19] が開発に成功したマッスルロボットである。培養心筋を M 形状のシリコン構造に結合し、心筋の自発的かつ周期的な伸縮をアクチュエーターとして液中を歩行させた。

遠隔駆動に有利な磁気駆動方式のナノロボットは ETH の Bradley Nelson ら [20] が精力的に研究している。磁性材料を用いた小さなロボット体内に入れ、MRI 用の 1・5 テスラの強力磁場を発生する巨大な磁気コイルを用いて体外から駆動するシステムを構築している。当初は眼球内に入れたロボットを磁気コイルの電流を変化させて遠隔操縦するシステムを研究していた。網膜の各種手術を目的としていた。最近はカテーテルの先に磁石を付けて、体外コイルからの磁気力によりカテーテルを誘導するシステムなど複数の医療デバイス応用を進めている。

東大の生田幸士ら [21] は、直径 10 マイクロメートルの磁性材料製のマイクロコイルをマイクロ光造形し、外部の 10 センチメートル程度の小型ヘルムホルツコイルで小電力の回転磁場を用いて液中のマイクロコイルをスクリューのように回転移動させている。小さな磁力で眼球内を移動可能である特長を持つ。その他、磁気駆動方式のナノロボットは作製と駆動が容易でもあるため、韓国、中国を含む多くの国で研究されている。

マイクロカプセル内に画像取得と薬物放出機能を持たせた医用ナノロボットは 1980 年台から数多く提案はされているが、まだ実証機まで到達しているものは少ない。研究の意義とイメージが SF 的で一般人には理解しやすいので、マスコミではこれがナノロボットとして紹介されることが多い。1965 年の米国映画「ミクロの決死圏」の実現に見えるからであろう。

関連研究としては、2000 年台初頭、スペースシャトルの耐熱タイルの損傷を宇宙空間から検査発見することを目的に、無線ビデオカメラと小型推進機能を持つ手のひらサイズの円盤型衛星であるナノサテライトが NASA の関連会社エアロスペースカンパニーの Henry Helvajian ら [22] により開発され、実際にスペースシャトルから放出された。シャトルの周囲を浮遊し観察に成功した。これは、本領域で扱うナノロボティクスのカテゴリーには入らないサイズであるが、反応ガラス製のナノサテライト内には、3D マイクロ流路やジェット噴射、電子回路など医療用のマイクロマシン、ナノマシン、MEMS 技術が多用されていた。

アプローチ（a）の研究成果は、IEEE 主催の MEMS、NEMS、ICRA、Transducers

など採択率の厳しい国際会議や APL、IEEE の論文誌などに掲載されている。2016 年に新規創刊された Science の新規姉妹ジャーナル Sciene Robotics にも掲載されている。

（b）合成化学からのアプローチ（シーズ志向）

研究の潮流は複数あるが、1986 年に米国の未来学者 Eric Drexler[23] が提案した超分子、高分子の立体構造から構成されたナノスケールの可動機構を持つ「ナノマシン」の概念に啓発されたプロジェクトが多い。合成化学的な手法が主となるため高分子合成分野の研究者の参入が多い。バクテリアの鞭毛の根元にある分子モータが各種の高分子構造の組み合わせで構成され、さらに高効率なモータとして機能する仕組みの解明が行われてきた。将来この手のナノサイズの分子モータで動くナノロボットが出現する可能性もある。また、近年では DNA を素材とするナノ構造や、アクチュエーター特性を持つゲルを用いたナノロボット（ゲルロボティクスと称している）も多く研究されている。

2016 年のノーベル化学賞が、超分子による歯車や車台など可動機構の構築であったため、今後要素部品開発を得意とする合成化学研究者とシステム構築を得意とするロボティクス研究者の共同研究が活発化する可能性がある。

アプローチ（b）の成果は Nature、Science など高度な学術誌に掲載されることが多いため注目度も高いが、まだ実用化までには多くの課題解決と人的予算的リソースの投入が不可欠な段階である。

（c）DDS、創薬からのアプローチ（ニーズ志向）

pH や温度など外部環境の変化に応じて薬物の放出を制御するスマートピルをナノロボットと称することもある。東京大学の片岡一則ら[24] の抗がん剤など薬物を内包できる高分子ミセルを用いた手法で開発を進め、治験段階にまで到達している。癌細胞にだけ抗がん剤を投入するターゲット療法、ミサイル療法が最終目標である。現在の抗がん剤は注射されても癌細胞に選択的に導入困難で、細胞膜から内部への取り込み効率が低いため副作用の問題が発生している。

（d）研究目的

研究目的の多様性がアプローチの多様性にも反映している。以下に簡潔にまとめる。

アプローチ（a）:シーズ志向とニーズ志向があり、双方が融合している点が特長である。新概念、新原理の医療ツール、医療デバイスの開発を唱っている研究が多い。ロボティクス、マイクロマシン、MEMS、メカトロニクスを基盤する研究者が多いため、単なる要素技術の開発だけでなく、システム化まで追求している点が興味深い。

アプローチ（b）：主として合成手法の開発とサイエンスとして化学的興味である。もちろん医療応用も重要課題であるが、現時点では基礎的な知見と技術の確立が優先されている。

アプローチ（c）：明らかに創薬が目的であり、研究の出口も薬事認証による実用化である。代表的には、前者はミセルを用いたナノマシンによる体内での癌細胞の破壊であり、後者は体外で細胞生物学の研究ツールである。明確な目的を設定せず、ナノロボットの実現可能性を探る研究も多く存在する。

現在の遠隔手術ロボットはミリメートルスケール以上の大きさであり、精密機械工学に

技術基礎を置いているが、ナノロボティクスは作用する物理現象、構成素材、製作手法、駆動制御、応用などすべての研究要素で、技術の確立による知識の創出が主目的となる。

(3) 注目動向

［手術支援とリハビリテーション］

当該研究領域に関する注目動向として、国内では、人工知能、対象のモデル化をもとに手術支援ロボットにさらなる知能化を施す試みが革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の一環として進行中である[11)]。また、同じく国内では日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業として、軟性内視鏡手術システム、スマート治療室に加えて、ニューロリハビリシステムの開発が行われている[12)]。国外では、欧州にて同じく手術支援ロボットの知能化を目指す ISUR[13)] が実施され、成果発展が今後期待される。特に米国を中心として、Auris Surgical Robotics、Medrobotics 等の手術支援ロボットのスタートアップ企業が盛んに設立され、今後の動向が注目される。一部には、MAKO Surgical のように、大手医療機器メーカーから買収を受けるケースが見られる。Google と大手医療機器メーカーである Johnson & Johnson との共同で設立された Verbsurgical についても当該研究領域での開発を表明しており、今後の動向が注目される。国内でも研究開発能力としてロボット技術を核とするベンチャー企業としてリバーフィールド、A-Traction が設立されている。また、大企業としては、安川電機、Medicaroid（川崎重工業とシスメックスの共同出資）などが当該領域に参入している。このように今後、より競争が増すことで、ロボット技術の臨床応用での成果発展が予見される。

［ナノロボティクス］

マイクロロボティクスを含むナノロボティクスにおける国策的活動に関しては、米国では DARPA の基礎研究ファンディングで 10 年以上前から研究支援が実施されてきた。

欧州では、スイスの ETH、ドイツのカールスルーエ研究所、大学が大型予算を獲得し、活発化している。

韓国でも 2000 年以降、医療分野に比重を置いたロボティクスプロジェクトが存在し、その中で小型のロボット内視鏡などマイクロロボティクスが研究されたが、ナノロボティクスのスケールまで到達しているものは少ない。

我が国と違い、欧米では世界の流れを気にしないで、未踏研究に投資するため、特許、実用化の段階でも多くの先行利益を得てきた。

我が国では、1990 年台に当時の通産省が主導し 10 年間の「マイクロマシン大型プロジェクト」が推進されたが、主に企業向けであり大学での新規性の高い研究には陽には投資されてこなかった歴史がある。今後、日本が世界をリードしていくために、個々の研究者の努力で支えられている未踏研究への投資が必要である。

(4) 科学技術的課題

［手術支援とリハビリテーション］

医療ロボットにおいては、医療ニーズを顕在化し、革新的あるいは従来技術とのマッチ

ングによって、患者のための価値を創出できるかが重要である。この実践には、医学と工学とを俯瞰的に理解し、双方の専門領域を結びつける取り組みが重要である。その一例として、産業機械技術はこれまでに大きな発展を遂げたが、医療で求められる清潔性、安全性とは質が異なるため、医療ロボットへの適用には独自的な進化発展が求められる。より具体的な事例としては、手術支援ロボットでは小型、細径な多関節細径ロボットアームを体内に挿入するが、このような機械技術は過去には確立されてこなかったため、大きな発展の余地を残している。さらには、センサー技術、人工知能との統合発展によって、手術支援ロボットの動作の一部を自動化する試みもなされている。最近になり大きく発展した自動車の自動運転技術ともやや関連すると言えるが、手術操作は元来専門的知識、技術、経験を要し、かつ対象となる人体は各個体で異なり、柔軟であるため大きく変形する。よって、科学技術的視点からは、より大きな挑戦的課題であり、各方面からの技術統合が期待される。

［ナノロボティクス］

技術的なボトルネックはナノスケールの構造を製作する手法の開発もあるが、合目的に機能するシステムを構築することである。構造から機能へである。さらに応用分野が多岐に渡るため、その基盤技術の開発には、船団的な大型プロジェクトより中型、小型で鋭い予算配分が重要となる。オールジャパンよりオンリージャパンの成果が出せる仕組みを構築することが鍵となる。

(5) 政策的課題

［手術支援とリハビリテーション］

医療機器の実用化までの道のりは、一般に「死の谷」とも表現され、厳しいことで知られる。これは技術的課題の解決から製品の上市に至るまで、薬事承認、臨床治験、保険収載等、安定した収益を得るまでに超えるべきハードルが多く、多くの労力、時間、資金を要するためである。医療ロボットでは、その動作の一部を機械・電気的に代替的にロボットが行うことから、一般的医療機器と比較してそのハードルはさらに高くなる。上記 (3) において、米国ではスタートアップ企業設立が盛んであると述べたが、これには国内の経済的風土、下地の相違を勘案する必要がある。現況においては、我が国において当該研究領域をより発展させるためには、公的なファンディング制度とスタートアップ企業支援の両面から支援を行うことが望まれる。

医療行為は、同一の医療機器によってその手法が支援されることで再現性が担保されることが多く、業界標準（de facto standard）となることで、その医療機器が継続的に一定の市場シェアを占める事例が治療機器（外科治療デバイス等）・診断機器（内視鏡、画像診断装置）の両分野で散見される。

医療ロボットが大きな注目を集め、多くが臨床応用に向けて提案されるいま、現在の研究開発動向が将来にわたる研究開発と市場双方の領域形成に大きく影響する可能性があり、今後が注目される。

［ナノロボティクス］

我が国では、基礎研究予算がサイエンスに偏り、工学の基礎への投資が少ないため、ハ

イリスクの工学研究が進展しにくい。サイエンスが基礎で工学が応用とのステレオタイプを打ち破り、科学と工学が融合した取り組みを推進することが必要である。

研究インフラはシリコン MEMS のような巨大な設備は必須ではない。他方、顕微鏡、分析機器の高度化も平行して進める必要がある。

従来のバイオ医療装置のように欧米ベンチャーに装置スペックのデファクトスタンダード化で先を越されることのないよう、概念段階から標準化も検討すべきである。

（6）キーワード

医療情報、画像診断、遠隔診断治療、保健情報、健康情報、医用画像、細胞内ロジスティクス解析、医用超音波システム、画像診断システム、検査・診断システム、低侵襲治療システム、遠隔診断治療システム、臓器保存･治療システム、医療情報システム、コンピューター外科学、医用ロボット、遠隔ロボット、低侵襲手術、レギュラトリーサイエンス、安全性評価、臨床研究、医療技術倫理、医療機器、ユニバーサルデザイン、福祉・介護用ロボット、生体機能代行、福祉用具･支援機器、ヒューマンインターフェース、リハビリテーション医学、ナノロボット、マイクロロボット、ナノマシン、マイクロマシン、MEMS、NEMS、医用デバイス、マイクロファブリケーション、ナノテクノロジー

（7）国際比較

表中の丸数字は、①手術支援とリハビリテーション、②ナノロボティクスに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①○ ②○	①→ ②→	①複数の学術的国家プロジェクトが展開中 ②ナノスケールの３D プリンタである２光子光造形法や各種アクチュエーション技術、各種光計測などが活発である
	応用研究・開発	①◎ ②○	①↗ ②→	①大企業、複数のベンチャー企業による研究開発成果展開の試みが進展中 ②光駆動ナノロボットによる細胞実験ツールの開発。磁気駆動ナノロボット、筋肉駆動型のマイクロロボットなどが開発されつつある
米国	基礎研究	①◎ ②◎	①→ ②↗	①多岐にわたる研究成果 ②生物と融合したハイブリッドナノロボティクスが活発化。メカだけのマイクロロボットも数多く開発されてきた
	応用研究・開発	①◎ ②◎	①↗ ②↗	①大企業、複数のベンチャー企業による研究開発成果展開の試みが進展中 ②医療応用を目指しているが、まだ多くがシーズ志向の実証研究レベルである。しかしベンチャー企業が容易に創設できるため、大学の研究成果の実用化は素早いと予想される
欧州	基礎研究	①○ ②◎	①→ ②↗	①独・仏・伊を中心に多くの研究事例、成果発表 ② ETH、RPFL などのスイス、Pisa の高等研究大学院などのイタリア、カールスルーエのドイツなど、シーズ志向の研究が多い。ニーズ志向では、英国のインペリアルカレッジが医用ロボティクスの研究所の王立芸術大学院ヘレンハムリンセンターでナノロボットの試作が始まった ②国家プロジェクトよりも、大型の基礎研究予算で進めている
	応用研究・開発	①◎ ②◎	①↗ ②↗	①独 Stryker、スイス Hocoma など実績、複数のベンチャー企業による試みを確認 ②バイオ、医療分野のテーマが大半
中国	基礎研究	①△ ②△	①→ ②↗	①大きな研究成果報告は確認されず ②欧米、日本に追従する形式で莫大な投資が行われている。欧米から帰国した若い研究者が主導し、国から大型予算を得ている

中国	応用研究・開発	①○ ②△	①↗ ②↗	①一部の企業（Beijing Tinavi）等に手術ロボットに関する開発事例が確認される ②医療ベンチャーが日本や米国のシニアレベルの大学研究者を招いて、研究推進中。分野は医療、バイオを含む広範なものである
韓国	基礎研究	①○ ②○	①→ ②→	①当該研究領域に多数の研究成果報告あり ②国の研究所とトップメーカーが推進中。ポリマーマイクロアクチュエーターなど新規要素技術にも投資中
	応用研究・開発	①○ ②△	①→ ②→	①複数企業に開発報告あり（Koh Young Technology, Hyundai Heavy Industries, Meere Company） ②バイオ、医用を中心にした個別研究が韓国のトップメーカーと一体化して推進中。産学の人的連携も日本では考えらえないほど深い

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（８）参考文献

1）Intuitive Surgical, Inc.
http://www.intuitivesurgical.com
2）日本ロボット外科学会
http://j-robo.or.jp
3）From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots: Bergeles C, Yang GZ.: IEEE Trans Biomed Eng 2014;61(5):1565-1576.
4）Current systems and research directions: Beasley RA.: J Robot 2012: Article ID 401613.
5）Current Status and Future Directions of Robotic Single-site Surgery: A Systematic Review: Autorino R, Kaouk JH, Stolzenburg J, Gill IS, Mottrie A, Tewari A, Cadeddu JA.: Eur Urol 2013;63(2):266-280.
6）Flexible platforms for natural orifice transluminal and endoluminal surgery: Patel N, Seneci C, Yang G, Darzi A, Teare J.: EIO 2014;02(02):E117-E123.
7）Hocoma 社
https://www.hocoma.com
8）サイバーダイン株式会社
http://www.cyberdyne.jp
9）Electromechanical-assisted training for walking after stroke: Mehrholz J, Elsner B, Werner C, Kugler J, Pohl M.：Cochrane Database Syst Rev. 2013 Jul 25;7:CD006185.
10）Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery After Stroke: A Systematic Review: Kwakkel G, Kollen B, Krebs H: Neurorehabilitation and Neural Repair 20089;22(2):111-121.
11）ImPACT「バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命」

http://www.jst.go.jp/impact/program/15.html
12）国立研究開発法人 日本医療研究開発機構
http://www.amed.go.jp/program/list/02/01/029_01-03.html
13）The I-SUR Project
http://www.isur.eu/isur/
14）ST Hsieh, W Zesch, WP Chan, TW Kenny, R Fearing, “Adhesive force of a single gecko foot-hair” ,Nature 405, 681–685 ,2000
15）T. Yasuda, I Sbimoyama, H. Miura, "Microrobot locomotion in a mechanical vibration field", *Advanced Robotics*, vol. 9, no. 2, 1995.
16）A. T. Asbeck, S. Kim, M. R. Cutkosky, W. R. Provancher, M. Lanzetta, "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays", *Int. J. Rob. Res.*, vol. 25, no. 12, pp. 1165-1179, 2006.
17）N Shimada, K Kadoguchi, M Ikeuchil ,K.Ikuta, “Nanoscale dynamic viscoelasticity analyzer by using optically driven nanobeams for study of biomolecules” , IEEE MEMS'12 Conference, 2012
18）HyunGyu Kim ,Kyungmin Jeong ,Metin Sitti ,TaeWon Seo, “Steering control of a water-running robot using an active tail”, IEEE/RSJ International Conference onIntelligent Robots and Systems (IROS2016)
19）Ricky K. Soong,George D. Bachand,Hercules P. Neves,Anatoli G. Olkhovets,Harold G. Craighead,Carlo D. Montemagno, “Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor” , *Science* 24 ,Vol. 290, Issue 5496, pp. 1555-1558 ,2000
20）R Borer, A Sengul, BJ Nelson , “OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation” , IEEE Transactions on Robotics,Vol.26, Issue: 6, 2010
21）M Yasui, M Ikeuchi, K Ikuta, “3D remote controllable nano actuation system for cell handling and micro surgery” , IEEE MEMS12 Conference, 2012
22）Siegfried Janson, Adam Huang, William Hansen, and Henry Helvajian. "Development of an Inspector Satellite Propulsion Module Using Photostructurable Glass/Ceramic Materials", CANEUS 2004 Conference on Micro-Nano-Technologies 2004
23）K E Drexler , “Biological and Nanomechanical Systems: Contrasts in Evolutionary Capacity.” ,ALIFE, 1987
24）Kazunori Kataoka, Glenn S Kwon, Teruo Okano, Yasuhisa Sakurai, “Block copolymer micelles as vehicles for drug delivery” , Journal of Controlled Release, Vol.24, Issues 1–3, pp. 119-132, 1993
25）K. Ikuta, S. Ito, Optical-driven nano manipulators with master-slave control for microbiology, 7th International Workshop on High-Aspect-Ratio MicroStructure Technology (HARMST 2007), Besancon, France, June 7-9, 2007

3.4.6　産業用・研究開発用ロボット

（1）研究開発領域の簡潔な説明

従来の産業用ロボットは、教示再生方式、電動モータ、剛体リンク機構等のキー技術に基づき、限定環境での正確性、高速性から、重工業や電子製品製造などの特定の作業に利用されてきた。しかし、今後の利用拡大が予想される食品、服飾、農林水産、サービス、医療・介護、科学研究等の分野での利用は限定的である。本研究開発領域では、まず、こうした利用拡大に必要となる革新的な要素技術とシステムインテグレーション基盤技術を採り上げる。さらに、科学研究の生産性や再現性を飛躍的に向上させる取り組みとして、バイオ・ライフサイエンス研究におけるロボット技術活用ための研究開発を取り扱う。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

（2.1）産業用ロボット

（2.1.1）産業用ロボットの歴史

現在の産業用ロボットの起源は、アメリカの G. C. Devol が、1954 年に出願した特許 Programmed Article Transfer にある [1)]。この方法では、ロボット運動を教示と再生により実現し、物体の設置や搬送を行う。現在の産業ロボットは、この原理に基づいて動作している。その後、この教示再生方式の産業用ロボットは、日本において高速化・高精度化の方向に技術が成熟した。現在では樹脂成形、プレス、アーク溶接、スポット溶接、塗装、機械加工、研磨・バリ取り、組み立て、入出荷、クリーンルーム、その他に産業用ロボットが広く活用されている [1),2)]。International Federation of Robotics（IFR）によれば [3)]、世界の産業用ロボットの稼働台数は、2015 年度終わりには 163 万 1600 台であり、2019 年度には、258 万 9000 台と予想している。2014 年度、日本は産業用ロボットの出荷台数が 12 万台となり、過去最高となった。ただし、輸出依存型であり、輸出先の韓国、中国などの新興国でのロボット製造も進んでいる。

（2.1.2）現状の産業用ロボットの特徴

①教示再生方式による自律性の確保

教示再生方式では目標位置の教示のために、通常、ティーチング装置があり、オペレーターがロボットを操縦して、目標位置に移動させる。目標位置は各関節角度の値として記憶される。ロボットは一度記憶された目標位置への運動を繰り返すために、以後、オペレーターの操縦は不要となり、ロボットのみによって自律的に作業を継続可能となる。

②電動モータの利用

初期の産業用ロボットでは、油圧駆動や空気圧駆動も見られた。しかし、最近では、ほとんどが電動モータの利用となっている。一般的な電動モータは、ロボットの関節運動に比して高速に回転し、低トルクとなる。このために、100:1 程度以上の減速器を取り付け、回転数を減じてトルクを増大させている。この方法は、モータの回転数を計測すれば高減速比によってロボットの出力回転量を高精度に測定することも可能であり、産業用ロボットの高精度化に役立っている。しかし、現状の産業用ロボットは高減速比のギアなどを利用するために、摩擦の影響で、ロボットの関節は硬くなり、対象物との機械的接触を制御

することに困難を伴う。
③剛体リンク
教示再生方式によってロボットは目標関節角度への運動を繰り返す。関節角度が目標位置に収束することで、ロボット手先が目標位置へ到達することを保証するためには、対象物の重量などに依存してロボットリンクが変形しない保証が必要となる。ゆえに、剛体リンクを理想とする。
④ロボット周辺の確定環境の設定
教示再生方式では、ロボット「自身」の形状を高精度に再現することを保証できる。しかし、ロボットを設置する位置・姿勢が変化する場合や対象物の位置・姿勢が変更される場合などでは、空間座標系とロボットの関節座標系に誤差が生じ、ロボットの手先は本来の空間目標位置からずれてしまう。このような問題を発生させないために、工場などのロボット利用環境では、ロボットと対象物の位置・姿勢を正確に人が設定する。このような確定環境を準備してロボットを利用するためには、ロボットについての一定の知識が必要である。

現状の産業用ロボットは、こうした特徴を持つため、重工業、自動車産業、電子機器製造などの以下のような限定された条件下において利用が成功している。
・均一対象物でばらつきがない　・ロボットと対象物の両方が剛体で変形しない
・大量生産する　・位置制御で作業を実現できる
・利用環境が確定環境として整備可能である

（2.1.3）現状の産業用ロボットの課題
①変種変量生産
近年、多くの産業で顧客ニーズなどに合わせた変種変量生産が期待されている。このような場合、大規模工場を建設して、専用の製造ラインを立ち上げる時間はなく、ロボットの能力によって対応することが要求される。
②多様な剛体対象物
対象物が剛体の場合でも、多様な形状や色などの特徴の異なる対象物を取り扱う必要がある。
③柔軟対象物
形状が変化する柔軟物のハンドリングが必須となっている。電子部品や自動車などの製造においても、フラットケーブルやワイヤハーネスなどの柔軟部品の製造は人に依存している部分が大きい。また、衣服、靴などの柔軟な材料を利用する製造やハンドリングは、従来のロボット技術では十分に達成できていない。食品の場合、均一食材の大量生産は工場で実現される場合も多い。しかし、弁当の製造など多種類の食材のハンドリングは現状のロボット技術では未解決となっている。
④変動環境
現状のロボットを利用するためには､人がロボットの周辺を確定環境とする必要がある。一方、ロボットを幅広く利用するためには、不確定な環境においても利用可能な技術が必要となる。基本的には、以前から利用されるロボットの関節角センサーに加えて、カメラ

などの外界センサーを利用する方法となる。以前から研究開発成果は報告されているものの実利用までには隔たりがあり、実用化されている例は少ない。ただし、バラ積みされた剛体の対象物を視覚センサーとロボットアームで取り出す作業などは実用例が出はじめている[4),5)]。

⑤力制御

従来の産業用ロボットの作業は位置制御を中心としていたが、さまざまな作業を達成するためには、対象物や環境とロボットの間の発生力を計測、制御する必要がある。力制御を組み込んだロボットも研究開発されてはいるが、信頼性、耐久性、利用の容易さ、価格など多くの課題が残されている。

⑥ロボットの柔軟性

周辺の人や環境とロボットとの機械的接触を想定すると、ロボット自身が柔軟性を有することが期待される。関節の柔軟化、リンクの柔軟化、手先効果器の柔軟化などが想定される。

⑦ケーブルトラブル

一般に、ロボットは多自由度となる。各自由度にはセンサー / アクチュエーターがあり、多自由度にすると、ケーブル数が多くなる。今後、センサー数が増加する傾向にあり、ロボット全体でのケーブル数も増加傾向にある。設置型の産業機械に比して、ロボットは各部が動くために、これらのケーブルも動くことになる。このため、ケーブルに関する損傷、接続不良などのトラブルが多発する。この問題解決には、無接触給電技術やワイヤレス技術の導入が期待されている。

⑧フィードフォワード制御の利用

現在の産業用ロボットの制御は関節位置についてのフィードバック制御を基本としているが、今後、高速化・高精度化をもとめる際に、フィードフォワード制御を多様に利用することが重要となる。研究開発提案は見られるものの、信頼性を保証する実用化例は少ない。

（2.2）研究開発用ロボット

（2.2.1）研究開発の自動化の歴史

ポストゲノム以降、質量分析計と次世代シークエンサー等の高感度ハイスループット解析機器の出現により、大規模で網羅的な解析がバイオ・ライフサイエンスのほとんどの研究分野で展開しており、膨大なサンプル数をハイスループット、かつ正確に処理しなければならない。また、iPS 細胞をはじめとする幹細胞技術の飛躍的な進歩により、より高度な研究手技が常に求められている。このような作業のほとんどは、これまで人手による人海戦術により処理されてきた。しかし、深刻な少子化時代を迎え、研究開発費が伸び悩む中、労働集約的な作業を前提とするライフサイエンスとバイオ産業は破綻の危機を迎えていると言える。また、長時間のベンチワークを常態とする分野は魅力が低下し、人材の育成が極めて困難になっている。

こうしたなか、バイオ・ライフサイエンス研究において、大規模研究であるオミックス解析を中心に、ロボットによる自動化研究は行われてきた。これまでに開発・上市された自動化装置は、溶媒・試料の分注ロボット、調整されたサンプルを解析機に自動供給する

オートサンプラー的なものが中心で、それぞれの作業に特化した単機能ロボットである。

また、再生医療の分野では細胞製剤の生産自動化が積極的に試みられているが、その多くは、細胞・ラボウエアをハンドリングするロボットアームに細胞培養に必要な恒温槽・遠心機等をカスタマイズ自動化し、さらに外部軸と特殊治具をインテグレーションするライン化方式（図 3-4-19）である。

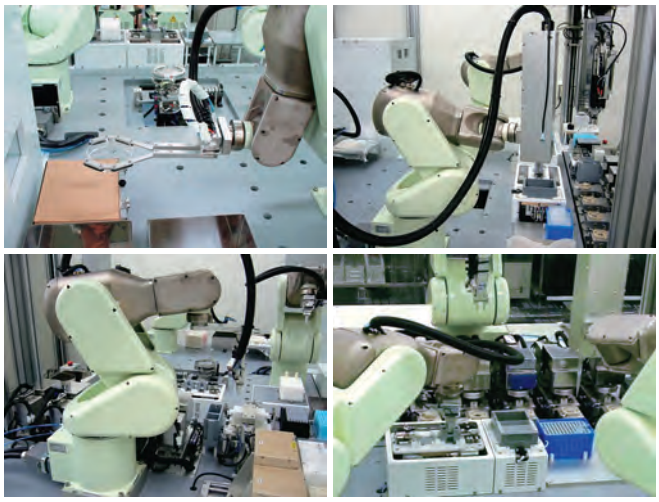

図 3-4-19　ライン化方式

（2.2.2）研究開発用ロボットの課題

①単機能ロボット組み合わせ方式

ベンチワークの各ステップに、単機能ロボットをあてがい組み合わせる方式は、各ロボットの信頼性が高く、かつロボットのスループットが目的にかなう場合は、研究生産性を容易に向上することが可能である。しかし、作業量に対してロボットのスケールが過大である場合、かえって作業時間と溶媒・培養液等の消費量が無駄となる場合が多い。また、各ロボットの使用方法あるいはプログラミングを個別に習得する必要があり導入コストにつながる。また、各作業間をつなぐのは人間によることがほとんどであり、人手によるヒューマンエラーとルーティンワークは決してなくならない。また、専用ロボットだけで多岐にわたるベンチワーク全てを自動化することは不可能であるため、スループットが求められる作業のみが自動化される傾向は否めない。

②ライン化方式

専用ロボットが行うことができない作業を自動化する場合、あるいは作業全体のワークフローを完全自動化するには、ライン化方式を採らざるをえない[17]。この方式の欠点は、開発導入コストが膨大となることである。システムデザイン、検証、製作と導入後の最適化に、多くの場合 1 年～数年を要するからである。また、複数メーカーの、複数のロボット方式（垂直多軸、スカラー、カーテシアン方式等）が混在するため、専門のエンジニアが常駐しなければ稼働できないことも多く、ランニングコストも問題となる。最も大きな欠点は、一度完成したロボットのワークフローを変更、あるいはチューブ、フラスコ、ディッシュ類のサイズと種類を容易に変更できないことである。すなわち、作業が必要なくなった時点で、ロボットシステムが突然陳腐化することを意味する。プロトコル変更とプロトコル最適化が常に行われるバイオ・ライフサイエンスの作業では費用対効果が見込まれる

ケースはまれである。

まとめると、単機能ロボット組み合わせ方式は、作業に人の介入をなくすことができない。また、ライン化方式は、導入コストとランニングコストが膨大となり、作業内容が常に変化するバイオ・ライフサイエンスの現場には馴染まない。こうした理由から、この分野の自動化は他に比べ大きく遅れている。しかし、バイオハザードの顕在化、少子化問題、プロジェクトの大規模化傾向等、ロボットの自動化が潜在的には最も求められており、次項(3.2)の注目動向に記載する革新的なイノベーションが本格的に実用化した場合、ロボットの巨大な市場が生まれる可能性がある。

(3) 注目動向

(3.1) 産業用ロボット

(3.1.1) 先進国の工場国内回帰指向

先進国では工場を国内に回帰して、国内での GDP 拡大と雇用を確保する政策を打ち出している。例えば、スポーツ用品世界 2 位の独アディダスは、2016 年 5 月に、2017 年からドイツ国内でロボットによる靴の大量生産を始めると明確に発表した。靴は柔軟要素が多く、ロボットでの製造が困難な対象の一つであった。同社は 1993 年に国内の靴生産から撤退していたが、24 年ぶりに国内生産に回帰する。発展途上国の人件費が上昇し、ロボット技術力への期待が背景にある。同様にキヤノンもロボット等の自動化技術により海外の工場を日本に戻し、国内生産を重点化すると発表した。米国は、トランプ政権で工場を国内に設置する方針を打ち出している。米国内での人件費を、海外と同程度にはできないと思われるので、ロボットに代表される自動化技術によって、この問題を解決すると予想される。したがって、米国の製造業でのロボット技術開発が加速すると思われる。

一方で、服飾分野において、縫製工場などの生産工場を先進国内に設置することは、技術的な問題のために、現状では達成できていない。日本では、縫製工場をアフリカ諸国へ展開することも予想されているが、現状では輸送時間とコストのために実現は困難である。

(3.1.2) スマートオートメーション

ドイツが提唱する Industrie 4.0 や IoT として、世界中につながる工場によって、変種変量生産に対応し、先進国内に工場を維持し、利益の拡大が図れるとの期待が大きい。ただし、セキュリティーの問題が指摘されている。

(3.1.3) Rethink Robotics[8)]

米国のベンチャー企業であり、Baxter と Sawyer と呼ばれるロボットを製作、販売している。これらのロボットは、従来の産業用ロボットの課題を解決するために、直列弾性アクチュエーターによる柔軟性の付与、カメラの内蔵による変動環境対応、ダイレクトティーチングによる利用の容易性、教示再生以外のロボットとのヒューマンインターフェース技術などの機能を有しており、従来の産業用ロボットの弱点を克服する方針を明確に打ち出している。価格も安い部品などを利用することにより、2 万 5000 ドル程度と

している。

（3.1.4）高分子材料利用ロボティクス

高分子材料を利用するロボットは、柔軟な生物に学ぶ考えかたとして 1960 年代から研究者の興味を引き付けてきた。しかし、耐久性、運動性能、センシング性能などで既存の他の方法に比して十分でないことから、実際にロボットとして利用されることは無かった。

しかし、2010 年ごろから、Soft Robotics への関心が高まり、国際ジャーナル「Soft Robotics」[9] が刊行した。また、世界最大のロボットの研究者会員を有する IEEE に Soft Robotics の HP サイトが開設され [10]、2014 年、2015 年とワークショップなどが開催されている。多くはポリマー材料を利用したセンサー、アクチュエーター、構造に関する研究である。アクチュエーターでは、空気圧駆動、水 / 油圧駆動型、ポリマー静電型、イオン電導型、導電性ポリマー、ポリマー熱駆動型などが研究開発されている。センサーでは、高分子材料の熱、電気、光などの特性変化を計測することによって、柔軟で多様なセンサーが実現可能となる。

近年特に高分子材料を利用するロボットの研究発表が多くなった理由に 3D プリンターの普及がある。例えば、最も実現性が高いと予想される空気 / 水 / 油などの流体駆動型アクチュエーターの多くは、型にシリコンゴムなどを流し込み、成型することで製作される。従来は、金属製の型を製作して、シリコンゴムなどで実現していた。金属製の型の製作は費用と時間がかかり、多数の形状を簡単に試験することが困難であった。近年、3D プリンターの利用により、CAD データからさまざまな形状の ABS 樹脂製などの型を容易に実現できるようになり、こうした方法が普及した。さらに、柔軟な高分子材料を直接 3D プリンターで成形可能となり、さらに製作が容易になっている。ただし、2016 年の現時点では、このような高分子材料を利用する 3D プリンターは、数千万円程度の価格であり、今後、低価格に移行するにしたがって、世界的にこの手法が広がると予想される。このような世界的な Soft Robotics の動向は、IEEE の雑誌 Spectrum でも紹介されている [11]。

（3.1.5）ランドロイド [12]

パナソニック、大和ハウス、セブンドリーマーズは、洗濯物を自動で折りたたむ機械を 2017 年から発売すると 2016 年に発表した。乾燥した洗濯物を画像処理、人工知能、ロボットアームのシステムによって、折りたたむことが可能と言われている。

（3.1.6）Amazon ピッキングチャレンジ

Amazon が、世界から研究チームの参加を呼びかけ、Amazon 社の倉庫内での在庫の対象物群から対象物を取り出し、箱詰めする作業のコンテストを実施している。ロボットアームにカメラ等のセンサー、多様な形状と性質の対象物を確実に持ち上げて箱詰めするためのハンド、およびそれらの制御システムを組み込んでいる。

（3.1.7）ハンドリング研究

2015 年に政府によって策定された「ロボット新戦略」に基づき、2020 年に World Robot Summit（ロボット国際大会）の開催に向けた取り組みが進んでいる。この大会は、

世界が注目する高度なロボット技術を内外から集結させて、各課題を解決すると同時に、人々のロボットへの理解を深め、ロボットの活用に関する積極的な議論を誘発し、具体的な利活用方法が生み出される機会とすることを目標としている。

World Robot Summit 競技種目には、ものづくり、サービス、インフラ・災害対応などがあり[i]、特にものづくり等では産業用ロボット技術の向上が期待されている。

学術界でも、ハンドリング研究について、近年活発な議論が開始されている。例えば、日本ロボット学会では、2014 年ごろから産学連携セッションなどを開催して、産業用ロボットの高度利用、新しい産業用ロボットの提案などの議論を重ねている。また、計測自動制御学会のロボットマニピュレーションに関する技術調査委員会は、2015 年度に設立され、手の科学を基盤にハンドリング技術に迫ろうとしている。

（3.1.8）人工知能

産業用ロボットとしては、不確定環境においてロボット自身の作業の確実性を保証することが重要となる。外部環境の認識に従来の画像処理による手法よりも、機械学習を利用することによって、認識精度が高まる結果が数多く報告され、産業利用の可能性が拡大している。

（3.2）研究開発用ロボット

（3.2.1）ロボット・サイエンティスト

2009 年、マンチェスター大学の Ross King らが、ロボティクスと人工知能（AI）を融合し、観察に基づく仮説の生成を AI が行い、その検証実験をロボットにより自動化するシステムを構築し、科学的な知識の発見を自動化可能であることを実証した。同グループはシステムをロボット・サイエンティストと呼んだ。ロボティクスは、スカラーロボットと分注ロボット・搬送ロボットをインンテグレーションした典型的なライン化方式で、単細胞のモデル生物（この場合は酵母）の増殖率といった単純な観察数値から、未知の遺伝子機能を公共データベースの情報を利用して予測（仮説の生成）し､その仮説を基にロボットが検証実験を行い、結果を解釈し再び仮説を生成するというサイクルを自動化し、機能未知遺伝子の分子機能を明らかにした（生物学的な知識の発見）[18]。その後、Eve と呼ばれる化合物スクリーニングとリード最適化[ii] を自動化するロボット・サイエンティストも生み出した[19]。これらの試みは、AI とロボットを研究開発応用した先駆的な研究でありライフサイエンスと AI ロボットの新たなトレンドを生み出した。

（3.2.2）ラボドロイド（LabDroid）によるベンチワークの高度化 / 高再現性化

谷内江（東大先端研・トロント大学）らは、近年、国内のトップロボットメーカーと共同で、人が使う道具を使用し人と同じ動作で作業するヒト型ロボットにより、長時間にわたる難易度の高いベンチワークを自動化することに成功した（図 3-4-20）。

研究室（ラボラトリー）で働くヒューマノイドから造語し、ラボドロイドと呼ばれてい

i) World Robotics Summit の開催形式及び競技種目を決定しました
http://www.meti.go.jp/press/2016/12/20161202001/20161202001.html
ii) リード化合物をもとにして、さまざまな化学的変化を行い、薬としての効果が高く、毒性の少ない化合物を見出す活動

る[20]。オミックス全般の作業や次世代シーケンサーのサンプル処理、細胞培養等の広範のベンチワークを、人が操作してきた装置、ツール、ピペッター、チューブ類を使って行い、既に国内で 10 台以上が稼働している。ラボドロイドの特徴は、ロボットに使用させるツールや装置を変更することで高い汎用性を生み出すことである。従って、段取り替えやプロトコルの変更が常に伴うライフサイエンスにおける自動化の問題をほとんど解決する。同時に、これまでの周辺機器は既存の資産をそのまま活用でき、導入コストを大幅に削減できる。また、日本の技術の粋を尽くした技術で生み出されたロボットの信頼性は極めて高く、ロボットエンジニアの常駐等のランニングコストが不要となる。さらに特筆すべきは、人の動作をロボットジョブにする際に、暗黙知であった作業が数値化・可視化されるプロセスが必然的に生まれる。その結果、数値最適化が可能となり、人間の熟練者の技術をも凌駕する高度な作業を再現的に繰り返すことが現実のものとなる。ロボットジョブを他のロボットに移植可能であり、特定の熟練者にしかできなかった高難易度の作業を共有・再現できるのである。また、作業ログをリアルタイムにタイムスタンプとともに電子化保存可能であるため、実験ノートの自動生成も可能となり、捏造の完全防止が可能となる。また、ベンチワークに忙殺されていた研究者が、知的作業に集約することが可能となり、研究生産性が革命的に向上することも実証されつつある。日本が直面する、少子化、バイオハザード、再現性の危機、捏造、高額低稼働率装置などの問題を解決するポテンシャルがあると考えられている。

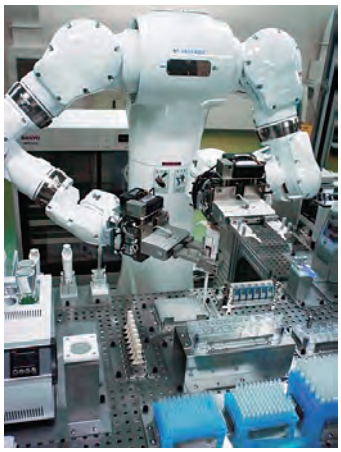
図 3-4-20 ラボドロイド

（4）科学技術的課題

（4.1）産業用ロボット

（4.1.1）変動環境認識技術

変動環境に対応可能とするために、センサーによる環境認識が重要となる。従来のエンコーダ等の内界センサーに加えて、カメラ、超音波センサー、接触センサー、力センサーなど外界を認識する多種類の複合センシングや分布センシングなどが期待される。また、特に以下が注目される。

① 3D ビジョンセンサー[13)-16)]

従来のステレオカメラ方式に加えて、赤外線などのパターン照射や到達時間計測（TOF: time of flight）により、単眼のカメラで奥行き情報が取得可能となっている。ただし、さまざまな産業への利用のためには、より高精度で実時間処理に適した機器が望まれる。

②柔軟センサー

金属性のロードセル型の力センサーとは異なり、エラストマー材料、導電性材料などを利用した変位センサーや触覚センサーが提案されている。

多様なセンサーが開発されているものの、利用技術としては成熟しておらず、必要なセンサー種類の明確化、不必要なセンサーの利用の排除、何をどこまで認識するかなどの基

本的な課題がある。

画像処理に機械学習を利用することによって、従来よりも対象物認識精度が高まっている。しかし、現状では利用可能な環境の多様性には限界があり、産業界での具体的利用方法を開発する必要がある。

（4.1.2）システムインテグレーションの科学と技術

すでにさまざまなセンサー、アクチュエーター、機構が研究段階では提案されている。ただし、それら既存要素の組み合わせ方法（SI: システムイングレーション）技術が未成熟である場合が多い。例えば、カメラ等の視覚センサーとロボットの運動制御を結びつける制御技術では、ステレオカメラとロボットの幾何学的なキャリブレーションを実施する必要がある。キャリブレーション誤差のためにロボットの手先精度は、0.5 ミリメートル程度に限定されてきた。ロボット単体の繰り返し精度は、数十マイクロメートルであるにも関わらず、視覚センサーフィードバックでは、大きな誤差を生み出し、作業が実現できない場合が多い。このような課題を解決するために、SI の科学を基盤に SI 技術を構築することが必要である。

（4.1.3）力制御

今後、機械的な接触作業のニーズが多様化するので、力を制御する科学的考察と技術的開発が必要である。力制御法はすでに提案されている。しかし、力のフィードバック制御には､因果律に反するなど基本的な理論の不備もあり､実用化しようとすればフィードバックゲインの調整などは経験者が慎重に行うなど、実用上の課題が大きく残されている。まずは、実用化のニーズが高いところから対象に基礎理論からの構築が重要となる。

力センサーなどのハードウエアが高価で壊れやすいものが多く、実用化に適した新しい方法の提案が期待される。また、従来の集中系に対する力とトルクの計測に縛られずに、分布力を効果的に計測できるセンサーシステムとその信号処理技術も期待される。

（4.1.4）柔軟物モデリング / 制御の科学と技術

剛体の力学を基盤に、現在までのロボット工学が作られてきた。一方、実世界には多くの柔軟体があり、今後のロボットの利活用を促進するためには、柔軟物のモデリングと制御の科学と技術を拡大することが重要である。

柔軟物体のシミュレーションのために、有限要素法がある。しかし、さまざまな柔軟物のモデリングと制御の視点では、有限要素法は適していない場合が多い。実時間制御に適し、計算手法が容易で、全体の見通しも利く理論構築に適したモデルが必要である。

（4.1.5）ロボットの柔軟化

①手先効果器

ロボットの柔軟性に関して、産業用ロボットでは、組み立て作業を支援する手先効果器として Remote Center Compliance（RCC）が提案され、実用化されている。ただし、挿入作業に目的が限定されており、一般のハンドの柔軟化などが未開拓の課題である。

②関節

前述のように電動モータに高減速比のギア等を利用すると摩擦力により関節が硬くなる。これを解決する方法として、直列弾性駆動が提案されている。これはモータ出力軸とロボットリンクの間に、機械的に弾性要素を入れて、ロボット関節を柔軟化する方法である。後述の Rethink Robotics 社などが製品化しているが、高速化、高精度化などの課題もあり、一般的には実用化が広がっていない。弾性値を可変にして、このような課題を解決する方法も開発されているが、研究段階にとどまっている。また、関節部にトルクセンサーや手先に力センサーを設置し､外力を計測することによって､目標とする柔軟性をモータ駆動によって人工的に作る方法も提案されている。耐久性、信頼性、価格などの課題を解決する新技術の付与が期待されている。

③リンク

リンク自身を柔軟にすることは、柔軟アーム研究として梁構造の振動抑制や位置制御として報告されている。しかし、一般にリンクの柔軟性について、対人安全性や軽量化 / 耐久性などの視点での研究開発はほとんど見られない。

（4.1.6）新材料利用

ロボットに柔軟性を持たせるために、高分子や CFRP などの非金属材料を利用することが想定される。これらの材料を利用することにより、柔軟化、軽量化、低価格化などが達成できると期待される。現状では研究開発段階であり、実用化可能な技術開発が必要である。

（4.2）研究開発用ロボット

（4.2.1）作業教示

（3）注目動向の（3.2.2）で述べた人の動作をロボットジョブにする場合の最も大きな技術的な課題は、関節数が多い双腕ロボットの作業教示が極めて難しく、特殊な経験と技能を持った専門家（ティーチングマン）が必要となることである。大きな自由度と汎用性を持てる一方で、作業内容の変更のたびにティーチングマンが必要となると、普及と一般化は困難であり、やはりランニングコストが下がらない。しかし、この問題を解決するための技術開発は進んでおり、AI あるいは自動軌道生成等、計算機科学によるティーチング技術が進歩し、単純な動きは、ほぼティーチングマンを必要としないシステムも生まれつつある。また、ティーチングマンによって作られたロボットジョブをブロック化しライブラリーを構築し、ライブラリーの既存ブロックを組み合わせることにより、ティーチングをすることなく、ほとんどのライスサイエンスにおける作業内容を自由に変更できることも実証されつつある [20)]。

（5）政策的課題

（5.1）産業用ロボット

（5.1.1）産業界ニーズ駆動の基礎技術開発

ロボット研究では、人や生物の形態や機能から刺激を受けて、同様の人工物を製作するアプローチが今までに多く見られた。今後もこのような方法が重要ではある。しかし、産

業界に有用な結果を生み出すためには、このような方法論に限定せず、産業界のニーズから研究内容を検討し、基礎原理まで立ち返る研究手法が有用となる。例えば、ティーチングの負担、キャリブレーションの負担、力制御の低信頼性などの課題に対する極めて高い産業界のニーズがあり、基礎技術・基礎科学が未熟なために解決できていない課題が数多く存在する。このようなニーズを科学的一般問題として整理し、解決することが重要である。このためには、産業界と学界が協力したプロジェクトチームを編成し、問題の整理、一般化問題の作成、一般化問題の解決法提案を実施する必要がある。

（5.1.2）次世代産業用ロボットの知財戦略

開発された次世代産業用ロボットの知財戦略を立てる必要がある。例えば、課題のひとつのケーブルトラブル解消のためのケーブルレスロボットなどの技術を、日本がいち早く開発して、国際標準規格などを提案することなどが挙げられる。また、材料技術、SI 技術など開発した技術の特徴を考慮して、どのようにして日本の国益に資するかを研究開発と並行して検討すべきである。

（5.1.3）異分野協同チーム

現在までのロボティクスは、伝統的な機械と電気電子からなるメカトロニクスに、急速に進歩した情報学 / 情報工学が集積して形成されてきた。しかし、材料分野とロボット分野との研究開発協力は極めて少なく、この分野での人材養成などもほとんど行われていない。ロボットへの利用を目的とした材料開発、材料利用方法開発および新しい材料を利用したロボット開発が必要であり、そのための研究開発体制が重要である。

（5.2）研究開発用ロボット

（5.2.1）ロボット研究ラボの整備

高度なロボット技術と AI 技術を駆使したシステムは現状では極めて高額で、各大学研究室が独自の研究資金で整備することは不可能である。従って、ロボット研究ラボを複数整備し、クラウドを活用した実験受託サービスを行うシステムの整備が望ましい（図 3-4-21）。研究者は自由にロボットラボにアクセス可能となるとともに、人件費と消耗品費の無駄を大幅に節減できると予想される[iii)]。各研究機関のロボットラボの運営費は十分捻出することが可能と考えられる。また、今後のロボット技術の競争力は、ロボットのハードウエアだけではなく、操作インターフェースの利便性やロボットジョブのライブラリーの充実度など、ロボットを活用する上での情報量である。情報量とユーザーの数が、システムのデファクト化と技術の成熟度を高める最も大きなドライビングフォースである。従って、政策的にロボットラボ整備の先行投資を実施するとともに、運用・活用方法 を広く議論することが必須である。

iii） ライフサイエンスの作業は人手で行うと再現性が低く、無駄な実験を何度も繰り返すことが常である。ロボットが実験することにより、９割の実験を削減できるという予想もある。また、無駄な実験から解放された研究者が、生産的・知的な作業に従事することにより、実験費の費用対効果は大きく改善される。

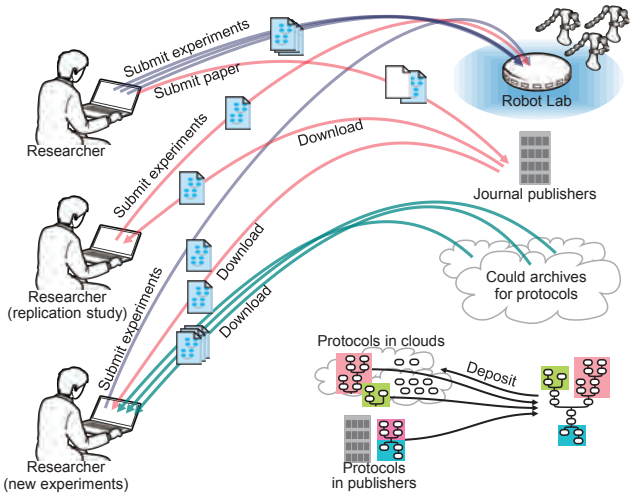

図 3-4-21　ロボットによる実験受託ラボのイメージ

(6) キーワード

産業用ロボット、教示再生方式、高減速比、位置制御、剛体リンク、力制御、柔軟ロボット、接触作業、確定環境、変動環境、キャリブレーション、フィードフォワード制御、変種変量生産、ケーブルレス、スマートオートメーション、ハンドリング、ラボドロイド、ヒューマノイド、捏造問題、バイオハザード、オミックス、細胞培養

(7) 国際比較

表中の丸数字は、①産業用ロボット、②研究開発用ロボットに対応する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	①△ ②◎	①↗ ②↗	①産業界と学会の両方に現状ロボットの課題が共有されつつある。ただし、基礎研究としては十分ではなく、他の国に対して、優位性を主張することは現状では難しい。ただし、ロボットの研究者数、研究開発実績等は十分にある ②アカデミアと産業界が共同でロボティック・バイオロジー・コンソーシアムを組織し、ロボット駆動型の新しい生命科学のあり方について議論が始まった。コンソーシアムが中心となり 2016 年 6 月に RSSB(Robotics and Semantics System for Biology) という国際シンポジウムを実施。海外の著名なライフサイエンスの実験・理論研究者、ロボティクスの専門家、人工知能研究者、コンピューターサイエンティスト等を召還した領域横断的な学術交流が行われた
	応用研究・開発	①△ ②◎	①→ ②↗	①大学で得られた技術が、ベンチャー企業などとして実用化される例が少ない。大企業では基盤からの技術改革は起こしにくい ②ヒューマノイドのライフサイエンスへの応用に世界で初めて成功。誰でも直感的に使うことのできる優れた GUI を備えたソフトウエアから、研究者自身が作業教示し、ロボットを操作可能な技術を開発、実装した。事業化もスタートした [iv]
米国	基礎研究	①△ ②△	①↗ ②→	①基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、大学と企業との実用化問題解決の共同研究開発は活発である。また、画像処理、人工知能での集積化が基礎研究を加速可能である ②ライフサイエンスの自動化は専用ロボットの組み合わせ研究がほとんど。ライフサイエンスロボットの IoT 化は活発に進展

iv）ロボティック・バイオロジー・インスティテュート　https://rbi.co.jp/

米国	応用研究・開発	①○ ②◎	①↗ ②↗	①ベンチャー企業 Rethink Robotics などの活動が活発であり、現状の産業用ロボット問題の解決意識をもっている。一方、Amazon picking challenge のように、ユーザー側からのロボット技術改良の力が作用して、応用研究開発が進展する可能性が高い ② Emerald BioSystems、Transcriptic 等のロボットによるクラウド受託研究サービスが始まっている。ライン化方式がほとんど
欧州	基礎研究	①△ ②○	①→ ②→	①基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、EU として共同研究開発体制ができているので、多様な研究テーマを実施している ②独 Rostock 大学にライフサイエンスの自動化に特化した学部がある
	応用研究・開発	①△ ②○	①↗ ②→	①米国に比して、ベンチャー企業の活動は顕著ではないが、上記の多様な基礎研究開発体制を有しているので、応用研究開発の可能性を有している ②大手製薬企業を中心にバイオ産業用ロボットの技術支援が活発に行われている。Bayer 社が運営している INVITE [v] という組織では、アカデミアのイノベーションを内外から積極的に呼び込み、企業の研究者とともに応用・検証研究が実施され実証されたロボットを迅速に社内に導入するオープンイノベーションシステムを構築
中国	基礎研究	①△ ②－	①→ ②－	①基礎研究を政策的に取り組んではいない。ただし、国家、地方政府が多額の研究開発費をロボットに投入している ②不明
	応用研究・開発	①○ ②－	①↗ ②－	①人件費の高騰が企業存続の危機となっているため、ロボット利用を進めている。現状は他国で製造された産業用ロボットを利用している場合が多いが、国内でのロボット生産を加速し、利用が拡大しつつある。これに伴って、新しい SI 技術などが生まれる可能性もある ②独のロボットメーカー KUKA を美的が買収し、今後の展開が注目される
韓国	基礎研究	①△ ②－	①→ ②－	①基礎研究を政策的に取り組んではいない ②不明
	応用研究・開発	①△ ②－	①→ ②－	①巨大企業内でのロボット応用技術は進展すると思われる。ただし、センサー、アクチュエーター等の要素開発を担う企業数は少なく、海外からの輸入に依存している ②高度なヒューマノイド、バイオ用ロボットを生産する企業はない

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）日本ロボット工業会 , 21 世紀を切り開く日本のロボット産業
http://www.jara.jp/other/dl/industry.pdf
2）日本ロボット工業会 , 産業用ロボット事例紹介
http://www.jara.jp/x1_jirei/
3）World Robotics, Industrial robots 2016, IFR Statictial department, International Federation of Robotics（IFR）
4）ファナック，バラ積みロボット
http://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/baradumi.html

v）　INVITE GmbH　http://www.invite-research.com/en/

5）三菱電機，バラ積み部品を整列するロボットシステムを開発
http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2011/1011.html
6）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（要約版）
http://www.jara.jp/other/koho02.html
7）日本ロボット学会 ロボット工学ハンドブック 第 5 章 操縦型ロボット , コロナ社 , 2005 年
8）Rethink Robotics
http://www.rethinkrobotics.com/
9）Mary Ann Liebert, Inc. publishers., Soft Robotics
http://www.liebertpub.com/overview/soft-robotics/616/
10）IEEE Robotics & Automation Society, Soft Robotics Technical Commitee
http://www.ieee-ras.org/soft-robotics
11）Jonathan Rossiter, Helmut Hauser, Soft Robotics - The Next Industrial Revolution? [Industrial Activities], IEEE Robotics & Automation Magazine, Volume 23, Issue 3, 2016, 17-20
http://ieeexplore.ieee.org/document/7565693/
12）セブン・ドリーマーズ・ラボラトリーズ（株), ランドロイドとは
https://laundroid.sevendreamers.com/about/
13）Intel, インテル RealSense テクノロジー
http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/architecture-and-technology/realsense-overview.html
14）Microsoft, Meet Kinect for Windows
https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect
15）（株）三次元メディア
http://www.3dmedia.co.jp/index.html
16）三菱電機株式会社 , セル生産ロボット向け小型 3 次元ビジョンセンサーと 3 次元物体認識技術を開発
http://www.mitsubishielectric.co.jp/news-data/2008/pdf/0214-a.pdf
17）Iemura S, et al., “One by one sample prepareation method for protein network analysis” , Protein interactions, INTEC open access publisher, 2012, 293-310.
18）King, R. D. et al., “Make Way for Robot Scientists” , Science,325（5943）, 2009, 945–945.
19）Wilson, N., “Technology: A robot scientist” , Nature Reviews Genetics. 5（3）, 2004, 164.
20）Yachie N, et al., “Robotic Crowd Biology with LabDroids” , Nat. Biotech in press.

3.4.7　システム化技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ロボットは、認識、計画、動作の各知的処理要素の統合、また、センサー、アクチュエーター、コンピューティングの各構成要素の統合、さらには移動機構、アーム機構、ハンド機構、視聴覚機能の各機能部位の統合により構成されることから、ロボティクスはシステム化の技術といえる。

重要テーマの一つである知能化については、より自律的な処理、あるいは、より広範囲の状況に応じた処理を可能にする知能化技術の確立を目指して、他のシステム要素との相互作用、実世界での時間的･空間的な制約、ロボットの能動的な振る舞いとの関係性といった点を特徴としたロボットのための人工知能技術として研究開発が進められている。

一方で、統合化については、事例ベースの積み上げが進んでいる段階である。そのなかでも、全ての要素技術の集積となるヒューマノイドロボットの開発を進めることで統合化に関する多くの知見が得られている。また、ロボットおよびロボットを利用したサービスのシステム化に向けて、開発した要素技術を広く再利用するために、ハードウエアおよびソフトウエアの両面からモジュール化が進展しており、国際的な標準化活動も活発化している。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

知能化のうち認識分野に関しては、主に画像処理（Computer Vision）分野と連携しながら、物体や環境の認識といった分野の研究が進められ、これまでには線画の解釈[1]に代表される 3 次元形状の再構成の研究[2]から、モデルベースの物体認識の研究[3]が進められてきた。これらの認識では既知の物体を画像から見つけ出す identification（同定）が対象であったと言える。一方、2000 年代に入ると局所特徴量の抽出と統計的機械学習法の援用による一般物体認識が盛んに研究されるようになってきた。ここでは、画像中の未知の物体をそれが属する既知のクラスに分類する classification（分類）が対象とされ研究[4]が進んできており、2015 年頃からは人工知能分野における Deep Learning 技術（畳み込みニューラルネットワーク）に基づいた End-to-End[5]の認識処理手法の発展に伴い、一般物体認識の性能が急速に向上している状況にある。また、2010 年頃から安価な 3 次元センサーデバイスが普及し、三次元点群処理の研究[6]や人の動作認識の研究も進んでおり、これらの成果が知能ロボット分野でも盛んに応用されている。一方ロボット分野から発展した認識研究はロボット視覚（Robot Vision）と呼ばれる。これには、ロボットの移動する視点を積極的に制御し認識プロセスに取り込んだ能動視覚（Active Vision）の研究[7]や、実時間で対象を追跡するトラッキングビジョンの研究[8]がある。

計画分野に関しては、ロボットが障害物を避けながら与えられた初期姿勢から目標姿勢への遷移軌道の導出する動作計画（Motion Planning）研究[9]と、環境を初期状態から目標状態へと遷移させる動作の遷移を導出するタスク計画（Task Planning）研究に分けられる。前者では配置空間（Configuration Space）の概念が重要である。これは、ロボットの関節数を次元とした空間に障害物を射影したものであり、動作計画問題は配置空間における初期姿勢から目標姿勢への探索問題として定式化された。この方法は多関節のロ

ボットでは探索空間が膨大になる問題があり、実応用は少なかった。しかしながら、2000 年前後には Probabilistic Road Map（PRM）や Rapidly exploring Random Tree（RRT）といったランダムサンプリングに基づく高次元の配置空間における探索問題を効率的に解く現実的な方法[10),11)]が提案され、一気に応用が広まっている。一方で、タスク計画については命題論理によりタスク計画問題を記述し、これを前向きまたは後ろ向き探索により解を見つける方法[12)]が提案され初期のロボット / 人工知能研究で利用されていたが、実世界でのより複雑なタスクでは記述力の面からもアルゴリズムの面からも制約が大きかった。その後、PDDL（Planning Domain Definition Language）と呼ばれる標準的な記述言語の確立やそれを用いた世界的な技術競技会が開催され、効率的なヒューリスティクの開発がすすみ、近年では実ロボットを用いたタスク計画の研究や、動作計画とタスク計画の統合に関しても研究が盛んになりつつある。また、ロボット分野特有の問題として認識と動作の不確実性を考慮したプランニング[13)]や動的環境に対応する実時間プランニング[14)]が研究されてきた。

動作制御に関しては、従来の制御手法を用いたアプローチだけでなく、最適化問題として定式化し解法を得るアプローチが、特にヒューマノイドのような多関節で位置制御だけでなく、力やバランスの制御など複雑な制約が多いロボットの歩行問題[15)]や全身動作生成問題[16)]を対象に、そこに含まれるさまざまな制約条件を満たす条件内で、二次計画問題等を解くことで目的とする動作を実現する手法として、広く研究され始めている。特に全身動作生成問題は、従来は動作計画の枠組みで取り組まれていた問題であり、最適化というツールを介して動作制御と動作計画の融合が進んでいるように見える。

統合化については、ロボットサービスの実現に必要となる要素技術をソフトウエアモジュールとして構成し、ソフトウエアモジュール間の連携を実現するためのミドルウエア技術（ロボット OS）や、ソフトウエアモジュールが提供する機能を記述するためのインターフェースの定義が重要になってきている。

ロボット OS に関しては、米国 OSRF（Open Source Robotics Foundation）が推進する ROS（Robot Operating System）[17),20)]が研究機関において多くの利用者を獲得している。その背景にはプロジェクトとしてソフトウエアを開発するだけでなく、コミュニティーづくりこそが、ソフトウエアの普及と標準化の鍵になると考え、ROS と共に双腕移動型のモバイルマニピュレータロボット（PR2）を各研究機関に提供するとともに、世界中の優秀な博士課程学生をインターンとして採用しソフトウエアの活用と人材、知識、ノウハウの交流に努めたことが挙げられる。

日本国内においては産業技術総合研究所による OpenRTM-aist（RT ミドルウエア）[21)]が後述する RTC の実装として活発に利用されている。これらを利用することにより、C++/Java/Python など複数の言語で、PC 用 OS から組み込み用リアルタイム OS まで複数の実行環境を用いて、ロボット機能の要素技術をモジュール化し、統合することが可能となる。これらの上位層でロボットサービスの連携のためのプラットフォーム技術として、総務省「ライフサポート型ロボット技術に関する研究開発」の成果として UNR（Ubiquitous Network Robot）Platform[22)]が公開されている。

これらに関連する標準化活動としては、従来は生産技術の一環として ISO/TC184（Automation Systems and Integration）で活動してきたロボット関連の標準化活動が ISO/TC299（Robotics）として 2016 年 1 月に分離して設立され、特に WG6（Modularity for Service Robots）ではサービスロボットのシステム化のためのモジュール化を対象とした活動が始まっている。国内からは、これまで OMG（Object Management Group）において日本が主導的に国際標準化を進めてきた RTC（Robotic Technology Component）および RoIS（Robotic Interaction Service Framework）などの規格を元に提案が進められている。

RTC はロボットの構成要素を分散オブジェクトとしてコンポーネント化するための技術であり、関連規格である FSM4RTC（Finite State Machine Component for RTC）とともに、ロボットシステムのためのソフトウエアコンポーネントのモデルを規定しており、「どのようにコンポーネントを構成するか」を定める。RoIS はロボット対話サービスの実現に必要となるコンポーネント機能のインターフェースを定義した規格であり、「どのような機能を持つコンポーネントが必要となるか」を定める。

また、UNR Platform のアーキテクチャーは ITU-T にて標準化勧告 F.747 として 2013 年に成立している。

米国においては ROS の実装が主導する形でミドルウエアのデファクトスタンダードを取る形を、欧州では Ambient Assisted Living（AAL）技術を統合するプロジェクトとしてサービス側からのプラットフォーム化を進めてきたと捉えられる。中国・韓国からは ISO/TC299 での標準化活動に見られるように、既存の要素技術をモジュールとして標準化を目指す傾向が見られる。

(3) 注目動向

現在は人工知能技術、特に Deep Learning 技術やこれに基づいた強化学習技術のロボット応用が盛んに研究されている。その手法や成果が確立するには数年かかると思われるが、認識分野に関してはいまだ画像処理分野で発展してきた手法と学習用データセットに強く依存してはいるものの、多くのロボットの認識行動システムに取り込まれつつある。また、強化学習については 90 年代に一度広く研究が行われていたが、その当時はロボットのとるアクションは離散的であり、タスク計画で扱うような行動レベルと動作計画で扱うような動作レベルに分類すれば行動レベルの動作計画と言えた。一方、近年注目を浴びているものとして、運転動作 [18] や物品把持動作 [19] など動作レベルでの強化学習の研究が行われており、この方向で研究が進めば強化学習の枠組みで動作計画と行動計画が融合される可能性がある。また、この人工知能とロボットの学際分野では民間のファンディングが盛んであり、Google や Amazon といった米国の IT 企業や、OpenAI という新たに設立されたコンソーシアムが盛んに研究を進めている。さらに中国の検索大手の Baidu が米国のロボティクス研究者を引き抜き研究拠点を構築している。

近年はコンテスト（チャレンジ）型研究開発がロボットの知能化、システム化のけん引役を務めている点も注目に値する。2013 年、2015 年に開催された DARPA の災害ロボティ

クスチャレンジでは、等身大ヒューマノイドが研究プラットフォームとして米国の参加チームに提供されたことにより、従来はシミュレーションや理論研究を行っていたコンピュータ・サイエンス系の研究グループが一気にヒューマノイド研究に取り込む素地が整えられ、米国でのヒューマノイド研究が盛んになった。また、2015 年と 2016 年に開催された Amazon の棚内物体把持コンテストでは、棚の中に乱雑に置かれた物品の画像認識、動作計画、把持計画、グリッパー機構が課題になり、特に画像認識では各チームが最先端の Deep Learning 技術を取り入れ、短期間でマニピュレーションロボットのシステムを構築した。

ロボット OS を基盤としたオープンソフトウエアの広まりも重要な役割を担っている。新しい手法がオープンなソフトウエアとして提供され、それを各研究グループで活用することが可能になり、新規に開発された手法でも有効なものは急速に広まり定着している。これはロボットのハードウエアに依存しない認識分野や計画分野において特に顕著であり、上記のコンテンストにおける Deep Learning 画像認識処理の広まりはその好例である。また、ファンディングのプロジェクトマネージャやコンテスト主催者もロボット OS の現状を深く理解し、そこで利用されているソフトウエアの技術レベルを考慮して、その先につながる適切な課題を設定している。

ハードウエアに関しても従来は各研究グループでハードウエアを開発していたが、近年はロボットプラットフォームと呼ばれる共通の研究基盤が充実してきている。特に、ヒューマノイドや双腕ロボットに代表されるような多関節の複雑な四肢を持ち、環境と物体の認識に基づき複雑な移動や操作のタスクを行うロボットでは、各要素機能の研究だけでなく、その統合による評価や問題点の洗い出し等が可能になり、研究を大きく加速する。ファンディングセクターによる具体的な事例としては、前出の災害ロボティクスチャレンジ用の等身大ヒューマノイド（Atlas）や、米国 NSF と韓国 KAIST が協力した研究教育用のヒューマノイド（NSF-Hubo）の提供があげられる。また、民間でも、主にモバイルマニピュレータ型のロボットプラットフォームが米国（Fetch）、欧州（PAL）、中国（Kejia）の企業から提供され始め、本分野の研究の進展に大きく貢献している。

ROS および OpenRTM-aist といったプラットフォーム技術は、近年、特にその通信層や、コンポーネントモデルの改良に向けて新たな標準の提案・採用を進める傾向がある。例えば ROS の次期バージョンの ROS2 では、ROS1 の通信層の実装を改良するのではなく、DDS（Data Distribution Service）または RTPS（Real-Time Publish Subscribe）の実装を利用することとなった。コンポーネントモデルについては、RTC を参照した一般的なコンポーネント仕様として UCM（Unified Component Model For Distributed, Real-Time and Embedded Systems）の制定が進められている。ロボット分野に閉じることなく、他のソフトウエアコンポーネントと共通の仕様を用いることで、さまざまなアプリケーションサービスとの連携が容易になる。

こうしたプラットフォーム技術に対するファンディング動向として、システム化技術そのものに注力するのではなく、具体的なサービス分野を想定した上で、その実現手段としてプラットフォーム化を志向する傾向が見られる。例えば Horizon2020 では、

Personalizing Health and Care（PHC）分野において、PHC-19-2014: Advancing active and healthy ageing with ICT: service robotics within assisted living environments など、サービスロボット技術に特化したファンディングが行われている。また、日本との共同ファンディングとして総務省による 2016 年度「戦略的情報通信研究開発推進事業（国際標準獲得型）」研究開発課題（ICT ロボット）や情報通信研究機構による欧州との連携による公共ビッグデータの利活用基盤に関する研究開発が Horizon2020 との連携研究として実施されている。

(4) 科学技術的課題

人工知能分野における Deep Learning 認識、強化学習技術のロボティクスへの応用に注目が集まっている。人工知能分野では画像データセットを用いた認識や、強化学習のゲームへの応用等が盛んであるが、ロボット応用では 3 次元の環境の理解、認識や行動の不確実性への対応、動作失敗時の復帰行動、タスク計画を含む高次の判断、常識や習慣などセマンティクスの領域等が課題になる。

計画分野では、動的環境への適用が可能になるような、高速計算、あるいは、計画の再利用が注目を浴びている。また、障害物を避けるロボットの姿勢だけでなく関節角度や加速度、あるいはそこから導出される全身のバランス等のより複雑な問題への対応が課題になる。同様の問題は動作最適化の分野でも取り組まれているため、両分野での交流から新しい研究の方向性が生まれることが期待されている。

プラットフォーム技術については、具体的なサービスに基づき研究開発を進めることから、対象とする現象に応じてデバイス開発が先行し、ボトムアップに統合を進めることが必須となる一面がある。一方、システム化のための手法はロボット技術に限らず一般的なソフトウエア開発手法を導入することが望ましく、トップダウンに設計を進めるべき側面もある。現時点では、さまざまな応用領域ごとに統合されてきた成果を、連携プロジェクトを通して実践的に統合させることでより抽象度の高いシステムモデルとして融合させる段階にあると考えられる。

(5) 政策的課題

政策的な課題としては、従来の研究テーマに対するファンディングに加えて、そこで開発された技術の検証の場として、災害ロボティクスチャレンジに代表されるようなファンディング、プラットフォーム提供、コンテスト型研究開発の一体化による運営が挙げられる。特に、準備と実施を含めて 1 ～ 2 年の短サイクルで何回も回すことで、研究コミュニティーの活性化と、研究の加速化が図られる。また、オープンソースの活用はロボティクス研究の基盤となりつつあるが、そこで利用されるソフトウエアもこのように複数の研究グループが同じ課題に取り組み、同じロボットプラットフォームを活用する中で鍛えられ利用に耐えうるものに成長していく点も見逃せない。

また、欧州でもさまざまなロボティクス関連の研究プロジェクトが実施されているが、そこでは数カ国の研究チームが含まれ、人材やノウハウの交流が進んでいる。わが国でも産官学、省庁、多国間の連携を前提とした新しいファンディング制度がたちあがることが望ましい。応用分野ごとに担当する省庁が異なってくることからもロボットサービスのシステム化を進めるうえで省庁間の連携が必要である。さらに、システム化技術を幅広く使えるよう抽象化を進める場合には、特定分野への応用という側面が薄れるため、具体的な成果に向けたファンディング制度とは相いれないこととなる。

今後ますます機械学習アプローチによる研究が盛んになることが予想されるが、そこでは学習データが重要な役割を果たす。ロボティクスに特化した標準的な学習データはいまだ存在せず、この分野における取り組みを支援するような政策も重要になってくる。

(6) キーワード

知能化、統合化、システム化、画像処理、3 次元点群処理、シーン理解、ロボット視覚、能動視覚、動作計画、タスク計画、確率的プランニング、セマンティック、最適化手法、Deep Learning 認識、強化学習、ロボット OS、オープンソースソフトウエア、コンテスト型研究開発、ネットワークロボット、クラウドロボティクス、サービスロボット、IoT (Internet of Things)、AAL (Ambient Assisted Living)、環境知能、ロボティクスミドルウエア、コンポーネントフレームワーク、モジュール化、分散オブジェクト技術、メッセージングフレームワーク

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・日本の大学、研究機関の基礎研究のレベルは高く、特に知能化、システム化の分野では顕著な研究成果も継続的に出てきている。また、大企業の取り組みも活発で、潤沢な資金を背景に積極的に研究開発を進めている ・OMG および ISO/TC299 における標準化活動でモジュール化技術の抽象モデルの提案を主導している。またコンポーネントフレームワークやネットワークロボット技術の実践を先導してきた ・米国や欧州での研究者層が厚みを増しつつあり、相対的には上昇傾向とは言えない状況にある
	応用研究・開発	○	↗	・災害対応ロボットや、インフラ整備ロボットの分野での応用が進められている一方、知能化統合化に関しては、コンテスト型研究開発や、研究プラットフォームとなるロボットプラットフォームへの取り組みが弱い ・統合されたサービスロボット技術の提案は活発に行われている一方で、モジュール化されたロボット技術を商業的に展開する活動は積極的ではない。そのためクローズドなシステム化となっている
米国	基礎研究	◎	→	・ロボットプラットフォームの提供、コンテスト型の研究開発を背景に、情報系の研究者を巻き込み活発に研究が進められている。なお、ROS の実装が広く使われており改良が進められているが、次期 ROS2 への切り替えを待つ段階にある
	応用研究・開発	◎	↗	・ロボットの知能化、統合化をコア技術としたベンチャー企業や企業の研究拠点が数多く誕生しており、積極的な応用研究開発が進められている ・自動運転車については研究開発が活発であるもののシステム化手法としてはクローズドな段階にある

欧州	基礎研究	◎	→	・ドイツ、フランスを中心に引き続き情報系と機械系がバランスよく層の厚い研究を進めている ・AAL の実現にあたり、ロボットの動作や検出した出来事の意味付けを記述し推論するフレームワークの基礎研究が進められ、システム統合のための基盤となる知識処理技術が確立している ・英国でもロボティクス研究拠点が開設され、米国からロボットプラットフォームを導入し研究に取り組み始めている
	応用研究・開発	○	→	・産業界とも連携しながら、知能化統合化を意識した産業用ロボットマニピュレータ等が商品化されている ・産業用以外では Horizon2020 での応用研究への取り組みは明確であるが。まだ成果が見えるまでに至っていない
中国	基礎研究	○	↗	・各大学でのロボティクスへの取り組みが増えており、研究者層も着実に増加している
	応用研究・開発	○	↗	・積極的にベンチャー企業等（Kejia）が知能化統合化の成果を商品化しており、ドローン（DJI）の様に知能化統合化をにらみながら、トップシェアを持つ分野の企業も排出している ・ISO/TC299 においてハードウエアのモジュール化を主導しており、ロボットデバイスの開発成果のアウトプット方法を考慮した活動が行われている
韓国	基礎研究	○	→	・KAIST を中心にロボティクスへの取り組みが充実している ・日本とともにサービスロボット技術のコンポーネント化を進めてきた実績があるが、近年は具体的な応用にシフトしている
	応用研究・開発	◎	↗	・ヒューマノイドプラットフォームの商品化を進め各国に導入を進めている ・ベンチャー企業も充実し、ロボット OS 用の入門用ロボットプラットフォームのデファクトスタンダードを生み出す企業（Yujin, Robotics）も育っている ・ISO/TC299 においてソフトウエアのモジュール化を主導しており、サービス用コンポーネントの開発成果のアウトプットを考慮した活動が行われている

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) D.L.Waltz: Understanindg Live Drawings of Scene with Shadows, The Psychology of Computer Vision. pp 19-91, 1975
2) デビッド・マー：ビジョン - 視覚の計算理論と脳内表現：産業図書（1987）
3) D.G. Lowe: Object recognition from local scale-invariant features. ICCV, pp 1150-1157, 1999.
4) M. Weber, M. Welling, P. Perona: Towarts Automatic Discovery of Object Categories, CVPR, pp 101-108, 2000
5) A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton: ImageNet classification with deep convolutional neural networks, Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012
6) R.B. Rusu: Semantic 3D Object Maps for Everyday Robot Manipulation, Springer, 2013
7) J. Aloimonos, I. Weiss, A. Bandyopadhyay: Active Vision, International Journal of

Comput Vision, pp. 333-356 ,1988
8）H. Inoue, T. Tachikawa, M. Inaba: Robot vision system with a correlation chip for real-time tracking, optical flow and depth map generation, ICRA, pp. 1621-1626, 1992
9）J.C. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991
10）S.M. Lavalle: Planning Algorithms, Cambridge University Press, 2006.
11）H. Choest, K. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. Kavraki, S. Thrun. Principles of Robot Motion, Theory, Algorithms and Imprementations. MIT Press, 2006.
12）R.E. Fikes, N.J. Nilsson: STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, Artificial Intelligence. 2（3–4）, pp 189–208, 1971
13）J. Blythe: Decision-Theoretic Planning, AI Magazine, 20（2）, pp. 37-54, 1999
14）R. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Jounral on Robotics and Automation, 2（1）, pp. 14-23. 1986
15）M. Posa, C. Cantu, R. Tedrake: A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact. International Journal of Robotics Research 33（1）, pp. 69–81, 2014
16）N. Ratliff, M. Zucker, J.A. Bagnell, S. Srinivasa: CHOMP: Gradient Optimization Techniques for Efficient Motion Planning, ICRA, pp 489-494, 2009
17）M. Quigley et al. ROS: an open-source Robot Operating System, 2009
18）P. Abbeel, V. Ganapathi, A.Y. Ng. : Learning Vehicular Dynamics, with Application to Modeling Helicopters, NIPS 18, 2006
19）S. Levine, P. Pasteor, A. Krizhevsky. D. QUillen, Learning Hand-Eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-Scale Data Collection. ISER 2016.
20）Morgan Quigley et al., “ROS: An Open-Source Robot Operating System”, ICRA2009 workshop on open source software, 2009.05, Kobe, Japan
21）Noriaki Ando et al., “RT-Middleware: Distributed Component Middleware for RT（Robot Technology）”, 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems（IROS2005）, pp.3555-3560, 2005.08, Edmonton, Canada
22）Koji Kamei, Shuichi Nishio, Norihiro Hagita, Miki Sato, “Cloud Network Robotics”, IEEE Network Magazine, vol. 26, no. 3, pp. 28-34, May, 2012.

3.4.8　ソフトロボティクス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ソフトロボティクスは、ロボットシステムにおける物理的な柔軟性（ソフトネス）を取り扱うロボティクスの新興分野である。主要な研究テーマとしては、柔軟性を積極的に利用した新しいロボットの開発、柔軟物体のモデル化や制御、生物システムにおける柔軟性の機能の解明が挙げられる。接触安全性の付加や、安価な高分子材料を用いた製造などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。材料科学、細胞工学、フレキシブルエレクトロニクスなど、隣接する諸分野と連携した学際的なシステム統合を特徴とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

産業用ロボットの延長線上にある「かたい」ロボットの開発では、ハードウエアの構成方法が成熟し、人型ロボットのような非常に高度な多関節ロボットも実現できるようになった。かたいロボットの先端研究は、コンピューターネットワークや豊富な計算資源を利用した、大量のセンサー情報の処理や知的な制御にフォーカスが移りつつある。2000年代に入って、ロボットの新しい応用分野を開拓する試みとして「やわらかさ」に注目して形成されたのがソフトロボティクスである。物理的なやわらかさは、人間と接しながら動作することを可能とし、変形の積極的な利用は環境や物体とのなじみを容易にする。また、高分子材料を主体とした設計は安価なロボット製造にもつながる。やわらかいロボットを成立させるアクチュエーターやセンサー、エネルギー源などのコンポーネントの開発は、それぞれ挑戦的な課題である[1)]。コンポーネントの統合や、応用の探索を含め、多分野にまたがる魅力的な課題の豊富さが、ソフトロボティクス研究が盛んな理由のひとつになっている。

現在、典型的なソフトロボットはシリコーンラバーで製作された小型ロボットである。その他、伸縮性はないが屈曲が可能なシートを用いたおりがみロボット、風船構造を用いたインフレータブルロボットなどもソフトロボットの仲間とみなせる。ソフトロボットの製作と応用はまだ試行錯誤の段階にあり、しばらくは多様な研究が行われると思われる。

現在のロボット市場の大半を占めるのは、自動車産業や電気電子産業などの製造業で使われる FA 用途の産業用ロボットである。産業用ロボットは、人間や環境との接触・衝突を想定しないため、硬質である。一方、研究開発途上のさまざまなサービスロボットでは、人間との接触・衝突が本質的に避けられず、物理的・心理的な安全のためにやわらかさが意味を持つ。例えば、抱き上げ介助ロボット[2)]では、かたい機構をやわらかい外装で覆うことで、撃力をやわらげ、接触圧を分散させるのと同時に、接触検知機能や、心理的な安心感を提供する。製造業向けに、人間とロボットが同じ作業空間を共有する協働ロボット（collaborative robot あるいは cobot, co-robot）に属するロボットアームが各社からリリースされ、ロボットの応用範囲が拡大していることから、物理的なやわらかさによる安全性の確保はますます重要になるだろう。

ソフトロボットは、超多自由度の柔軟物体に多数のセンサーやアクチュエーターが埋め込まれたシステムであるため、その物理シミュレーションや運動制御は、情報科学技術の

観点からも興味深い対象である。従来、多関節ロボットの運動は剛体リンク系の運動学・動力学によって記述され、位置制御や力制御が行われてきた。一方、ソフトロボットの運動制御では、無限自由度の変形や、無数の接触を扱う必要があり、従来の理論体系が適用できないという根本的な課題がある。制御入力と運動の複雑な関係を明快に記述することが難しいことから、多数の試行にもとづいて学習を行う運動制御手法が有望なアプローチのひとつである。そのような学習を行う上では、環境やロボットの状態に関する豊富な情報を得るためのセンサーが必要となる。柔軟体の変形や外界との接触を検出するセンサーの開発そのものが挑戦的な課題であり、フレキシブルエレクトロニクスと呼ばれる分野において、薄型・柔軟・伸縮可能といった特性を与えた電子デバイスの開発が進んでいる。こういった課題は、柔軟部分の多い人体とも共通するところが多く、ソフトロボットのための制御手法やセンサー技術はウエアラブルデバイス等への応用も考えられる。

柔軟な指は、変形によって対象の形状にやわらかくなじみ、つぶしたり傷つけたりせずに把持することが期待できる。ロボットの手先に取り付けることができるソフトグリッパーは研究例が多く、製品化も進んでいる。大学における研究からスタートしたソフトロボティクス関連のスタートアップ企業 Empire Robotics[3] や Soft Robotics Inc.[4] は、両社ともソフトグリッパーを扱っている。チャックや真空グリッパーの適用が難しい野菜や果物、パンなどのやわらかい物体の取り扱いは人手にまかせるしかなかったが、やわらかい指をもったソフトグリッパーによって自動化が進むかもしれない。ソフトグリッパーの方式のひとつは、シリコーンゴムなどのやわらかい素材を成形し、空気圧で湾曲させる多指ハンドである。他の方法に、ジャミング現象を利用したやわらかいグリッパーがあり、ソフトロボティクスが注目されるきっかけのひとつになった[5]。ジャミンググリッパーは、丸い柔軟な粉袋を対象に押し付け、袋中を真空にすることで、袋中の粉が摩擦でロックし（ジャミング現象）、対象の形状になじんだまま固くなることで把持を行う特殊なグリッパーである。対象をあらかじめ整列させたり、形状をビジョン認識したりすることなく把持できることが利点である。

ゾウの鼻あるいはタコの腕のように全体が柔軟で曲率が変わるロボットアームは連続アーム（continuum arm）と呼ばれ、ソフトグリッパーと並んでソフトロボティクス研究の主要な研究対象である。連続アームは、剛体リンクを有限の可動部（関節）で接続した古典的なロボットアームと対比される。ヘビロボットと類似しているが、片端が本体に固定され、移動ではなく把持や操作に使われる点が異なる。連続アームは多様な曲線を描けるので、巻きついたり、穴をくぐり抜けたりすることができる。これらの特長を活用して、医療用のアクティブ内視鏡[6]や、災害救助ロボットの研究開発が行われている。

ソフトアクチュエーター、すなわち、電磁モータや油空圧シリンダに代わるようなやわらかい駆動源の研究は、日本国内で盛んな分野である。その背景としては、ソフトネスが必要とされる介護福祉機器への期待の大きさというニーズの面と、機能性ソフトマテリアルの開発研究の裾野の広さというシーズの面の、両方がある。ソフトロボティクス研究で用いられる柔軟材料のアクチュエーションの方法としては、空気圧による膨張収縮と、形状記憶合金ワイヤによる引っ張りが代表的である。1990 年頃にはすでに、国内で形状記憶合金ワイヤの制御方法が検討され、また、空気圧駆動の柔軟な湾曲アクチュエーター（Micro Flexible Actuator:MFA）が開発されている[7]。ソフトアクチュエーターの一種で、

1950 年代に開発されたマッキベン型空気圧人工筋肉も、リハビリテーションロボットやウエアラブル・ロボットの研究で使われている。空気圧人工筋の製品化例は国内外に数件あるが、耐久性や制御性の問題から、利用が拡大するには至っていない。この他、イオン導電性高分子アクチュエーターや、誘電エラストマーアクチュエーターなどのソフトアクチュエーターの研究も進んでいるが、取り出せる力が小さいため、ロボティクス応用は限定的である。

ソフトロボティクスは生物規範型ロボットと関係が深い[8)]。連続アームの開発は、タコ型ロボットを目標としたプロジェクト内でさまざまな研究が行われた[9)]。プロペラではなくヒレによって推進する水中ロボット[10)]の開発においても、水生生物がモデルとなっている。生物規範型ロボットの研究では、把持や操作を行うハンドやアームばかりでなく、ソフトメカニズムによる移動能力（ロコモーション）も注目される。動物は駆動源である筋肉そのものが軟組織であり、骨格以外の結合組織もフレキシブルであるため、生物規範型ロボットの製作のために、ソフトロボティクス関連技術が使われる。やわらかさの長所・短所を考察する上で、生物に学ぶアプローチは有効であり、ロボット研究者と生物学者の共同研究が行われている。

(3) 注目動向

2014 年にソフトロボティクスを扱う初の学術雑誌が創刊された[11)]。エディターは、イモムシの研究で知られるタフツ大学の生物学者バリー・トリマー教授で、ソフトロボティクス関連の研究者コミュニティー形成で大きな役割を担っている。2016 年に発表された Soft Robotics 誌のインパクトファクターは、他の全てのロボット関連ジャーナルを上回るトップのスコアであった。

エネルギー源および制御回路も含めてすべて柔軟材料で構成された自立型ソフトロボットが初めて開発され、Nature 誌で報告された[12)]。マイクロ流路を内蔵したシリコーンゴムの身体をもったタコ型ソフトロボットで、電動ではなく流体圧で動作する。

(4) 科学技術的課題

現状のソフトロボティクス研究は、柔軟材料を用いたさまざまな形態の実験的な探索にとどまっており、センシングおよび制御についての取り組みが不十分である。計算機内で柔軟ロボットの動作を扱うには、大自由度の変形・衝突を処理するシミュレーション技術が必要となる。変形や、外界との接触に関する膨大な感覚情報を、どのように取り込み、どのような運動指令を生成するかもまた大きな課題である。大自由度システムに適用できる学習手法の開発や、分散的・階層的に運動制御を行う取り組みが望まれる。

また、従来のロボティクスと同様、アクチュエーター技術の改善は大きな課題である。空気圧アクチュエーターは配管や空気圧源などの周辺機器が大型になりがちである。また、形状記憶合金アクチュエーターは、電気で駆動できるものの本質的には熱駆動であるため、動作が遅くエネルギー効率が低い。高分子アクチュエーターや、動物や昆虫の筋を用いたバイオハイブリッドシステムなどのアプローチもあるが、使用条件が限られる。電気エネ

ルギーを運動エネルギーに効率よく高速に変換できるソフトアクチュエーターが求められる。また、電磁モータのように、さまざまなサイズのアクチュエーターが、制御装置を含めて低コストでいつでも入手できる状況を整える必要がある。

ソフトロボットは、その性質上、アクチュエーターと構造が一体化しており、製作が難しい。また、設計手法も確立されていない。3D プリンターなどのデジタルファブリケーション技術の発展にともなって、ロボットシステムを組み立てなしにまるごと造形するというプリンタブル・ロボットの概念が提案されている。柔軟材料が出力できる 3D プリンターを用いたロボットの造形が有望視されるが、現状ではまだ材料の選択肢が少なく、強度や耐久性について材料の開発が必要である。

(5) 政策的課題

日本国内でソフトロボティクスに関する先駆的な研究例があるにも関わらず、現状では北米が主な先端的研究の発信源となっている。これは、北米東海岸を中心に関連研究者のコミュニティーが形成され、先進的ロボティクス研究に DARPA などから継続的な支援があることが背景となっている。我が国においても、社会的な要求にもとづいて、ソフトロボティクスにおけるグランドチャレンジを設定し、関係各分野の研究者による一体となった研究開発を促進する大規模なプロジェクトが必要である。また、ソフトロボティクスのような萌芽的分野は、産業界からの支援を受けにくい状況にあるため、実用段階に入ってからの後追いではなく、黎明期における先行的な投資を促す施策が求められる。

(6) キーワード

ソフトロボット、ソフトアクチュエーター、空気圧アクチュエーター、連続アーム、ソフトグリッパー、フレキシブルエレクトロニクス

(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	○	→	・ソフトアクチュエーターの開発や、フレキシブルエレクトロニクスの研究、柔軟高分子材料の開発など、広範な研究が行われている
	応用研究・開発	○	→	・特に介護福祉機器の開発が盛んである。ソフトアクチュエーターを使ったリハビリロボットや、ウエアラブルデバイスの開発が行われている
米国	基礎研究	◎	→	・特にハーバード大学 WYSS Institue で複数の研究者がシリコーンラバーを使った軟体ロボットの研究を行っており、継続的に成果が発表されている。ハーバード大学と地理的に近い MIT やタフツ大学でも関連研究が行われている。コロンビア大学の研究グループは、VoxCAD というソフトロボットのためのシミュレーションソフトウエアの公開を行っている
	応用研究・開発	◎	↗	・ウエアラブルデバイスで応用研究が進んでいる。スタートアップも盛んで、インフレータブルロボットを製作する Otherlab から派生した Roam Robotics が空気圧ロボットスーツを開発している。産業用ロボットのためのソフトグリッパーを製品化した Empire Robotics や Soft Robotics Inc. もある。Web サイト Soft Robotics Toolkit が公開されている

欧州	基礎研究	○	→	・タコ型ロボットの開発や連続アームの研究が行われている。また、身体性の観点からソフトロボティクス研究が行われている。欧州委員会による継続的な支援があり、RoboSoft という名称で、複数の組織をまたがったコミュニティーがある。ソフトロボットの競技も開催されている
	応用研究・開発	△	→	・タコ型ロボットから派生した水中ロボットの開発などが行われている
中国	基礎研究	△	→	・西安交通大学や清華大学において、高分子材料を用いたソフトアクチュエーターの開発が行われている
	応用研究・開発	×	→	・不明
韓国	基礎研究	○	↗	・Seoul National University において、人工筋肉や、フレキシブルセンサー、おりがみロボットなどに関する研究が活発に行われている
	応用研究・開発	×	→	・ウエアラブルデバイスの研究開発が行われている。産業化の動きは不明

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) Majidi, Carmel. “Soft Robotics: A Perspective -Current Trends and Prospects for the Future.” Soft Robotics 1, no. 1 (2014): 5–11.
2) Mukai, Toshiharu, Shinya Hirano, Hiromichi Nakashima, Yo Kato, Yuki Sakaida, Shijie Guo, and Shigeyuki Hosoe. “Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms.” In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), 5996–6001, 2010.
3) Empire Robotics http://empirerobotics.com/
4) Soft Robotics Inc. http://www.softroboticsinc.com/
5) Brown, Eric, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R Zakin, Hod Lipson, and Heinrich M Jaeger. “Universal Robotic Gripper Based on the Jamming of Granular Material.” Proceedings of the National Academy of Sciences 107, no. 44 (2010): 18809–14.
6) Ikuta, K, M Tsukamoto, and S Hirose. “Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope.” In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 427–30, 1988.
7) Suzumori, K., S. Iikura, and H. Tanaka. “Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms.” Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, no. April (1991): 1622–27.
8) Kim, Sangbae, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer. “Soft Robotics: A Bioinspired Evolution in Robotics.” Trends in Biotechnology, 2013.

9）OCTOPUS プロジェクト http://www.octopus-project.eu/
10）ETH Zurich Sepios Project http://sepios.org/
11）Journal of Soft Robotics（SoRo）http://online.liebertpub.com/loi/SORO
12）Wehner, Michael, Ryan L. Truby, Daniel J. Fitzgerald, Bobak Mosadegh, George M. Whitesides, Jennifer A. Lewis, and Robert J. Wood. “An Integrated Design and Fabrication Strategy for Entirely Soft, Autonomous Robots.” Nature 536, no. 7617（2016）: 451–55

3.4.9　認知発達ロボティクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

コンピューターシミュレーションや実際のロボットなどの人工システムを駆使した構成的手法を用いて、人間の認知発達過程の新たな理解や洞察を得ると同時に、結果として、人間社会で共生するロボットを始めとする人工システムの設計論を確立することを目指す。新たな理解や洞察の獲得という知識の創出と技術の確立が表裏一体であることが認知発達ロボティクスの基本的な考え方である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本項目の構成として、まず、認知発達ロボティクスの基本的な考え方（2.1）を示し、認知発達ロボティクスを考えるうえで重要な人間の発達を概観（2.2）する。その後で、重要な基本概念である「身体性」（2.3）と「社会的相互作用」（2.4、2.5）を解説し、認知発達ロボティクス設計論（2.6）へのアプローチについて述べる。最後に国内外の研究開発動向（2.7）を紹介する。

（2.1）認知発達ロボティクスの基本的な考え方

認知発達ロボティクスとは、従来のロボット設計では明示的にロボットの行動を規定していたのに対し、環境との相互作用からロボットが自ら行動を学習・発達させていく過程に内包される抽象化、シンボル化を実現するためのロボット設計論である。当初、「認知ロボティクス」[1] とも呼ばれていたが、時間的発展に重点を置く意味で認知発達ロボティクスと呼ばれるようになった[2),3)]。

認知発達ロボティクスの焦点は、自律エージェントが環境との相互作用を通して、世界をどのように表現し行動を獲得していくかといった、ロボットの認知発達過程にある。特に、環境因子としての他のエージェントの行動が自分の行動をどのように規定していく過程の中に、ロボットが「自我」を見いだしていく道筋が解釈できるのではないかという期待がある。このように環境との相互作用をベースとして、その時間的発展に焦点をあて、脳を含む自己身体や環境の設計問題を扱う研究分野が認知発達ロボティクスである。

認知発達ロボティクスの基本的な考え方は、環境との相互作用を通じてロボット自身が問題自体に対する理解の過程を経験することで、さまざまな状況に対応可能なメカニズムを構成論的アプローチにより構築することである。特に、知的行動を人間のレベルまで求めるなら、人間以外の動物にも可能な連合学習から、人間特有のシンボル生成 / 利用の記号学習すなわち言語獲得に至る過程（言語創発）が、ロボットの内部構造と外部環境の多様かつ制約的相互作用の中に見いだされる必要がある。

従来のロボティクスでは、人間と共生するロボットのコミュニケーション技術として、トップダウン的に言語構造を与えており、言語創発過程が内包されていない。それゆえ、表層的な言語コミュニケーションにとどまり、限られたコンテキストでの定型的応答しかできない。認知発達ロボティクスでは、言語創発に至る過程そのものを人工的に構成することで、ヒトの認知発達過程の理解とともに新たなロボット設計論を目指す。

こうしたヒトの認知に関する研究は、従来、認知科学、神経科学、心理学などの分野で

扱われてきた。そこでは説明原理による理解を目指しており、認知発達ロボティクスが志向する設計原理に基づくものではない。しかしながら、人間理解という共通基盤をもとに、工学的アプローチからは「システム構成によるの仮説検証や新たな認知科学的仮説の生成」が、認知科学、神経科学、心理学などの分野に提案され、逆に、これらの分野から「システム構成への仮説」が工学的アプローチに提案され、相互フィードバックによる認知発達モデルの構成と検証が可能である。それが認知発達ロボティクスのひとつの理想形である。

（2.2）発達の概観と多様相

認知発達ロボティクスを考えるうえで、発達自体に関する知見は非常に重要であり、以下では人間の発達の概観とそれに基づく設計論への示唆を示す。

（2.2.1）胎児と新生児のさまざまな発達

近年、胎児の立体ソナー動画などに観察されるように、受精から数週間でさまざまな動きがあることが知られている。図 3-4-22 に胎児の運動と感覚の発達時期のデータを示す。

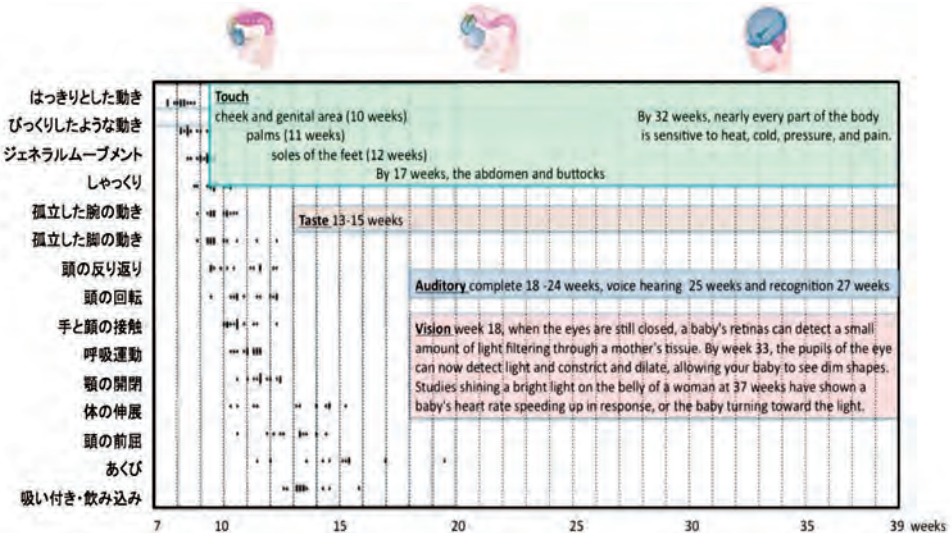

図 3-4-22　胎児の動きと感覚の創発（出典：参考文献 3）

触覚が、受精後 10 週くらいから頬、掌、足裏、足先で、そして 17 週あたりには腹部で発達し、32 週までに、ほぼ全身の触覚、温覚、冷覚、圧覚、痛みなどを感じるようになる。味蕾も 7 週くらいから出現し、味覚は 13 週あたりから、聴覚は 18 週～ 24 週あたりにかけて発達が始まり、25 週でヒトの音声が聞こえ、27 週から認識が始まる。視覚は、18 週で閉眼だが網膜は母胎の組織を通った微少な光を検出する。33 週までに瞳が光を検出し、開いたり閉じたりして大まかな形状を見ることができる。母親のおなかに外から光を当てると、それに応じて心拍が増加したり光の方に体を向けたりする [4)]。

誕生後、自分のボディースキーマ [i)] の学習、把持できる物体の学習、道具の学習、内的シミュレーションの学習というように徐々に発達していく [5)]。少し詳しく見ると、5 カ月

i)　ボディースキーマ（身体図式）とは、固有感覚を含む非意識的な諸感覚のフィードバックから生じ、暗黙裡に身体のコントロールに用いられているような表象（出典：生まれながらのサイボーグ アンディ・クラーク 春秋社）

で自分の手をじっと見る（手の順・逆モデル[ii]の学習）、6 カ月で抱いた人の顔をいじる（顔の視触覚情報の統合）、いろいろな角度からものを見る（3 次元物体認識の学習）、7 カ月で物を落として落ちた場所をのぞく（因果性・永続性の学習）、8 カ月で物を打ち合わす（物体の動力学的モデルの学習）、9 カ月でたいこをたたき、コップを口に持って行く（道具使用の学習）、10 カ月で動作模倣が始まる（見ることができない動きをまねる：オツムテンテンなど）、11 カ月で微細握り、他者に物を渡す（動作認知と生成の発達：協調・共同行為の起源）、12 カ月で、ふり遊びが始まる（内的シミュレーションの起源）、そして、12 カ月以降で他人の動きを見ながらまねる。このように、人間の赤ちゃんは、胎児期と出生後、目覚ましい勢いで認知発達過程を示す。

（2.2.2）発達の多様相

こうした発達の様相を、外から観測した場合、内部構造として捉えた場合、それらの基盤となるもの、そして社会的構造の観点から切り出し、その背後にある構造を考えてみる[6]。

外部から観測した場合、中央制御ではなく、分散かつ自己組織化的で漸次的過程とみなせる。発達段階の後段の構造は、前段の不完全で効率の悪い構造と行動表現の上に構築され、通常の人工システムと大きく異なっている。また、乳幼児の生態学的な意味での拘束は、必ずしもハンディではなく、むしろ発達を促す。脳、身体、環境の間の共同作用もしくはパターン生成の固有の傾向は、各種「引き込み現象」を引き起こし、さらに、能動的探索により自己の身体表象、自由度の拘束などによる運動パターン生成など自己組織化過程が見られる。

このような環境に対する能動的な探索と操作の結果は、発達心理学においては、知覚範疇化と概念形成であると考えられている。感覚やある種の知覚は運動と無関係に処理されるが、知覚範疇は感覚系と運動系の相互作用に依存する。自己組織化過程において、ミクロな構造として各種の調整を行う神経修飾物質があり、強化学習などにおける価値や神経可塑性と関連して、これらの相互作用をメタ学習の計算モデルから予測する研究も行われている。

マクロには、養育者をはじめとする他者の関わりが赤ちゃんの自律性 / 適応性 / 社会性を助長している。養育者による足場作り（scaffolding）は、認知的、社会的、技能的発達に重要な役割を果たす。また、乳幼児は養育者の反応に対す感受性期があり、養育者はこれに合わせて対応を調整する。

これら発達の過程において、認知発達ロボティクスの観点から重要な点は「身体性」と「社会的相互作用」である[7]。以下では、これらについて説明する。

（2.3）再考：身体性

ロボットが「経験、学習、発達」するためには、身体を持つということ、すなわち「身体性」が重要な役割を果たす。ロボットの身体性とは以下を意味している。

① さまざまな環境やその変動およびロボット自身の内部状態を感知できる感覚能力、環

ii） 順モデルとは、脳から筋肉に送信された運動司令の遠心性コピーから運動結果を予測すること、逆モデルとは、望ましい運動結果から、それを実現するために必要な運動司令を計算すること

境に働きかける多様な運動能力、それらを結ぶ情報処理能力は不可分であり、密に結合していること（不可分性）

② 限られた資源（感覚の種類や能力、運動能力）や処理能力の範囲で目的を達成するために、知覚・運動空間の関係を経験（環境との相互作用）を通じて学習できること（学習可能性）

③ 達成すべき目標や環境の複雑さの増大に対して適応的に対処できるように、学習結果の経時的発展（発達）を可能にすること（発達可能性）

これらのことを示す興味深い実験が、生後 2 週間の 2 匹の子猫の生理実験（図 3-4-23 参照）である[8]。1 匹は自ら歩行し、もう 1 匹は自ら歩行できない状態で、同じ視覚入力を与えた場合、前者が正常な奥行き知覚を構成できるのに対し、後者は正しく視覚入力を解釈できず正常な奥行き知覚が構成されないと言われている。このことは、感覚入力を正しく理解するには、自らの能動的な運動入力が不可欠であること（不可分性）、それらの関係を学習できること（学習可能性）が大事であることを示している。さらに、自ら歩行していない子猫も、ゴンドラから取り出して歩けるような環境を与えれば、正しい知覚が構成される（可塑性・再学習可能性と発達可能性）

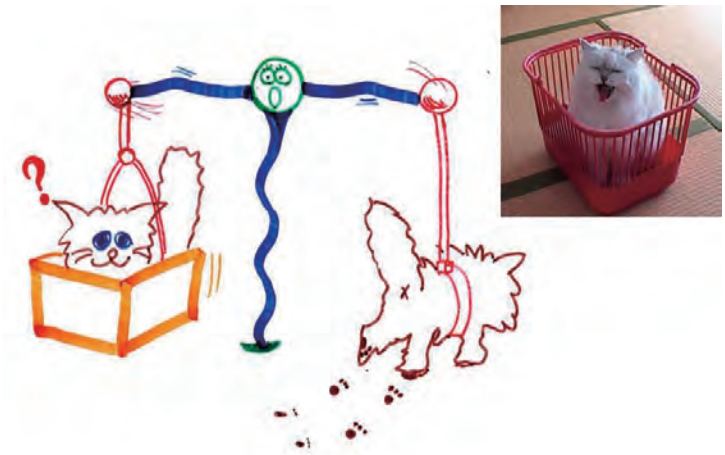

図 3-4-23　Hele and Hein の生後 2 週間の双子の子猫を使った実験の概念図

以上をまとめて、浅田、國吉らは、身体性を「行動体と環境との相互作用を身体が規定すること、およびその内容。環境相互作用に構造を与え、認知や行動を形成する基盤となる。」と規定している[6]。身体を感覚・運動・認知を支える物理的基盤と考えると、身体の物理的構造による拘束（形態）だけでなく、感覚器、運動器、認知機能など、どのレベルまで生物学的な意味合いで内部構造を模擬するかは議論の的である。以下では、現状と課題について探る。

（2.3.1）脳神経系

構成的手法として、これまで扱ってきた身体は、脳神経―感覚器―筋骨格―体表面系の一部であり、消化器系や循環器系、呼吸器系（音声模倣で一部呼気のみ扱っている）は、陽には含まれていない。従って、随意神経系である体性神経系と対照される自律神経系も含まれていないに等しい。Kuniyoshi and Sangawa [9] のように運動野と感覚野のみのごく一部を扱っているものがあるが、他の脳部位を想定したとしても明確な対応付けが困難な場合が多く、発達の視点も考慮に入れると対応問題が難しくなる。すなわち、

① 乳児の脳の状態、すなわち構造と機能は成人の脳から引き出すことはできないし、すべきでもない

② 言語発達の初期においては左脳より右脳の障害のダメージの方が大きい。このことは、最終的な言語野と呼ばれる部分が最初から中心的な役割を果たしているのではなく、発達の初期段階では異なる部位が関わっていると考えられる
③ 共同注意や言語の発達に見られるように、巨視的には機能の神経機構が皮質下から皮質へ、脊椎、脳幹から前頭前野へと移行していると見受けられる

などが指摘されている。このため、認知発達ロボティクスでは、個体発達をメーンにした森、國吉らの最小実装から始めて徐々に機能と構造を複雑化するボトムアップ的なアプローチ[10]に加え、他者を含めた環境、特に養育者との相互作用を主体としてモデル化するアプローチがあり、その場合の脳神経系の設計原理としてはミラーニューロンシステムがキーとなる。

（2.3.2）骨格筋系

筋骨格系は人間をはじめとする動物の運動を生成する身体の基本構造である。これは、従来のロボットではジョイント・リンク構造に相当するが、アクチュエーターとして前者では筋肉が、後者では主に電磁モータが利用されている点が大きな違いである。

電磁モータは、制御が容易であるなどの観点からアクチュエーターの代表であり、さまざまに利用されている。制御対象と制御手法を区別し、制御手法を駆使することで、さまざまな動きを実現可能であるが、トルク、速度ともに大きく変化する接触をふくむ激しい運動は非常に困難である。

これに対し、筋肉では、筋骨格系身体を効率的に利用して、跳躍･着地、打撃（パンチ、キック）、投てき（ピッチング、砲丸投げ）など瞬発的な動作を実現可能である。また、筋骨格の構造としては、一つの関節に対し複数の筋肉が、また一つの筋肉が複数の関節にまたがって張り巡らされ、複雑な構造となっている。そのため個々の関節の個別の制御は難しく、身体全体として環境と相互作用し、動きを生成する。一見、不都合にも見えるが、逆に超多自由度ロボットにおける自由度拘束問題[iii]の解決策とも言える。このような生物にならう筋骨格系の人工筋として McKibben 型空気圧アクチュエーターが注目されている。新山、國吉、Hosoda et al.[12] は、跳躍ロボットを開発し、動的な運動を実現している。先の自由度の拘束に関して、この二つのグループは、二関節筋構造（一つの筋が二つの関節にまたがって接続されている構造）の脚ロボットで運動のコーディネーションが一関節筋のみの場合に比べ容易であることを実験的に示している。これらは、制御が身体構造と密接に結びついていることを示している。すなわち、身体が環境との相互作用を通して、制御計算を担っているとも解釈できる。その極端な例が受動歩行であろう。明示的な制御手法もアクチュエーターもなしに坂道で歩行を実現できる。これは、物理的身体のエネルギー消費（資源拘束や疲労）の観点からも重要である。

身体性を大きな特徴とする認知発達ロボティクスでは、発達モデルで述べた運動学習から脳の高次機能学習へのシームレスな発達が理想であり、その観点からアクチュエーターとして、電磁モータではなく人工筋のような動的な運動が生成可能なものが望まれる。

iii）「超多自由度の運動機構系に対して、どのように運動を構造化するか？」は Bernstein が指摘した運動発達の基本問題[11]

（2.3.3）体表面

皮膚感覚は、その重要性は認識されつつも、技術的な実現の限界から人間型ロボットに、これまであまり採用されてこなかった[3)]。しかし、最近では、約 200 個の PVDF 素子が触覚センサーとしてシリコンの柔らかい皮膚の下に装着された CB2[13)] などが認知発達研究の研究プラットフォームとして開発されている。また、Ohmura et al.[14)] は、柔軟かつ切り貼り可能な触覚センサーを開発し、ヒューマノイドの全身に 1800 個を超える触覚として実装している。また、Takamuku et al.[15)] は、プラスチックの骨格にゴム手袋を装着し、PVDF 素子とゆがみゲージをシリコンと一緒に注入したバイオニックハンドを開発し、指や掌の触覚と把持運動を利用して数種の物体を識別している。センサー素子は校正されておらず、自己組織化を目指している。ヒトと比べセンサー素子は圧倒的に少ないが、受容器の種類として類似の構造を取っており、ヒトの把持スキルの学習発達研究への拡張が期待されている。

体表面の皮膚感覚は、体性感覚と密接に結びつき、ボディースキーマやボディーイメージ[iv)] などの身体表象を獲得する上で非常に根源的かつ重要な感覚である。高次脳機能が、このような基本的な知覚の上に構成されることを考えれば、認知発達ロボティクスとしては、何らかの形で実装していることが望ましい。メカノレセプターとしての構造化に加え、痛みとしての感覚は、生物の場合、個体の生命維持に必須であるが、その社会的意味としての共感は、将来、人間と共生するロボットにも望まれる。その際、明示的にプログラムされた物理的インパクトへの応答ではなく、共感としての情動表現が可能であれば、より深いコミュニケーションが可能と考えられる。これは、以下のミラーニューロンシステムとも深く関連する。

（2.4）ミラーニューロンシステムと社会性発達基盤

サルの腹側運動前野 F5 で発見されたミラーニューロンは、ヒトの場合に対応する部位がブローカ野の近くでもあったが故に、言語能力に至る道筋での重要な役割を果たしていると推察された。その後の研究から多くの事柄が明らかになりつつある[16),17)]。

最大の焦点は、他者の動作プログラムを自身の脳内で再現すること、すなわち、他者の内部状態を自己の内部状態としてシミュレーションできることとされている。これは、自他弁別、他者の行為認識、共同注意、模倣、心の理論、共感などと関連すると考えられる。村田[17)] は、これらに基づき以下のように論じている。

- 自己や他者の身体をそれぞれ認識するシステムがどこかで共有
- 自己身体認知のステップとして、遠心性コピー[v)] と感覚フィードバックの一致が運動主体感を構成し（実際、田村らのグループで頭頂葉のニューロンが遠心性コピーと感覚フィードバックの情報の統合に関わることを発見している）、ずれた場合には、運動主体感が構成されず他者の身体と認知
- ミラーニューロンは、もともと、自他に関わらず動作そのものを視覚的にコード化し、

iv） ボディーイメージとは、身長、痩せている・太っている、目や耳が大きいといった顕在的な自己身体に関する知識（脳科学辞典 http://bsd.neuroinf.jp/wiki/ 身体図式）

v） 運動制御においては運動の指令が運動野に送られるだけでなく、その信号のコピーが感覚領野にかえってくると考えられている。このコピーは、中枢神経から末梢系に送られるので、遠心性コピーと呼ばれ、感覚フィードバックの予測に使われると考えられる。また、こうした信号は運動の主体の感覚に必要である。求心性コピーは、逆に末梢系から中枢神経系に送られる信号で感覚系の信号が相当

運動実行中に感覚フィードバックとして働いていたが、発達・進化の過程で、運動情報と統合され、現在のミラーニューロンを構成

・ミラーニューロンは、他者の動作認識とともに、自己の身体や他者の身体の認識に関与

・遠心性コピーと感覚フィードバックを照合する頭頂葉が、一致（自己という意識）とズレ（他者という意識）のいずれを検出しているのか不明（ヒトの研究では右の頭頂葉はズレを検出しているらしい）

嶋田[17]も、ほぼ同様の立場だが「外在性身体情報（主に視覚に由来）」と「内在性身体情報（感覚や運動指令（遠心性コピー）に由来）」とう表現を用い、ミラーニューロンの活動について、「視覚野において、外在性身体が同定され、内在性身体との整合性がチェックされるが、このとき自他弁別のようにその差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる。この外在性身体から内在性身体への処理の流れは、運動が常に視覚フィードバックを元に修正されていることを考えれば十分可能である。」と述べている。そして、自他弁別とミラーニューロンシステムの共通点として、外在性および内在性の身体に関する諸感覚（視覚、触覚、聴覚、体性感覚、運動指令）の統合プロセスであるとしている。

このような「自己と他者の内部状態の共有と弁別」の過程は、運動経験だけに限られないと容易に察せられる。他者が触られた場合の自身が触られている感覚（体性感覚野や頭頂連合野が活性）、快 / 不快なにおいを嗅いでいる他者を観察した際の反応（情動系の回路が反応）、他者の痛みの知覚などが挙げられ、共感の元となっていると考えられる。自己と他者の経験が脳内の共通する部位で表現されているということは、他人の経験を自分の経験のように処理するメカニズムと解釈でき、こうした「鏡のような」脳の特性が感情を含めた他者の内部状態を共有・理解する能力の神経的基盤の一つではないかと考えられている[17]。

このようにミラーニューロンシステムは、自己と他者の共通性と差異に基づいた自己や他者への気づきを駆動し、社会的な行動の学習・発達に寄与しているとみなせるが、ミラーニューロンシステム自体が、どこまで生得的で、どれくらい学習可能かは定かではない。サルのミラーニューロンシステムの場合、対象が明示された他動詞的な動作にしか反応しないが、ヒトの場合、自動詞的な動作、つまり目的を持たない行動に対しても反応するミラーニューロンシステムが存在する[16]。

仮説として、サルの場合、ヒトに比べて個体の生存のための圧力が大きく、ゴール指向の運動が個別に確立して早く駆動可能である。ヒトの場合は、養育者の庇護をうけるので、その圧力が小さく、ゴール指向のみならず目的を持たない要素運動的なものにも反応することで、学習による構造化や組織化による汎用性が高まる余裕があり、結果として、より社会的な行動や認知能力へ拡張されたと考えられる。先に述べたように「自他弁別のように、その差異が意識されるのではなく、その差異を解消するように内在性身体が調整され、その結果として運動野や感覚野の活動が起こる[17]」ならば、こうした行為の連続が模倣やコミュニケーションにつながると考えられる。サルの場合には、生存の圧力が大きいため「自己と他者の差異を埋めていく」動機付けが低く、模倣にまで至らないと考えられる。事実、サルは模倣しないと言われている。

（2.5）認知発達ロボティクスによる社会性発達モデル

胎児から始まり子どもに成長するまでの発達過程を、社会性発達の観点からモデル化する試みが行われている。議論の基本的な考えは以下の通りである。

① 進化的過程まで踏み込まず、個体発生のレベルで議論するので、事前埋め込みは想定するが、なるべく最小に押しとどめ、可能な限り個体の学習発達過程での説明および設計を試みる。身体の構造、特に脳部位や感覚器、筋骨格系の配置、それらの結線構造を基本埋め込みとし、それら以外の事前埋め込みは、社会性発達モデルの各段階で議論する

② 自己他者認知のレベルに従って社会性の軸を構成する。すなわち、自己とは異なる対象と感知されるが、それが自分と類似した他者として明確には認知されない非明示的な他者（環境を含む）から自分と類似した明示的な他者の存在認知への変化を発達の基軸とする

③ 非明示的な他者から明示的な他者認知の過程でミラーニューロンシステムの役割を明示し、その構築と利用の可能性を議論する

④ 学習法として、ヘブ学習[vi]および自己組織化マッピング[vii]を基本的に想定する。事実、これまでの構成的手法の多くは、これらの学習法を利用している

図 3-4-24 に、ミラーニューロンシステム（MNS）を背景とした自己他者の確立過程を模擬した。

自己他者が未分化な状態から始まり、Neisser[18]に従った分け方をしているが、明確な境界があるわけでなく、連続であると同時にモダリティや発達する認知能力により一様に発達するわけでもない。むしろ非一様であり、発達段階でどのように相互作用しあうかが興味ある点である。明確な自己や他者の表象があるというよりも、相互作用の動的な状況のなかで、それらに対応する状態が創発される構造が望まれる。

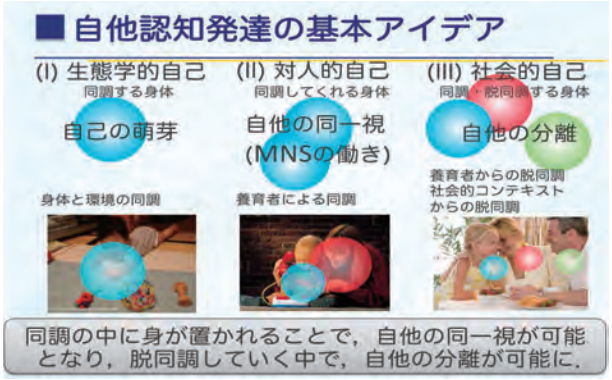

図 3-4-24　社会性の初期発達

（2.5.1）自己と他者が未分化な状態

近年、4 次元超音波撮像などの可視化技術の進展により、胎児のさまざまな行動および能力が明らかになりつつある[19]。この時期は自己他者未分化状態と考えられ、母胎内羊水環境で、母親の身体の内外からの刺激としての音や光などが非明示的な他者として作用する。

胎児の感覚の始まりとして、先にも述べたように、触覚は受精後約 10 週から、また視覚は 18 週～ 22 週の間くらいからと言われている。身体表象が身体のクロスモーダルな

vi）シナプスにおいて、シナプス前ニューロンの繰り返し発火によってシナプス後ニューロンに発火が起こると、そのシナプスの伝達効率が増強される
vii）視覚野におけるコラム構造の自己組織化をモデル化したもの

表現だとすると、視覚によって他者の身体を知覚する前から、自身の身体表象が触覚などの体性感覚と運動の学習からある程度獲得されていると仮定しても不思議ではない。この時期は、視覚、聴覚が作動しつつも、発声や四肢の運動との明確な結びつきが薄く、それぞれが未分化、未発達な状態にあると仮定できる。ただし、次節でも述べるように、口唇周辺や手の触覚分布の高密度である点や体内での身体の姿勢の拘束から、吸い付きなどの口唇と手の協調運動（手を口唇に近づけると口が開くなど[20]）が学習されているとみなせ、ミラーニューロンシステムの基盤として、個体の運動のライブラリーが獲得され始めているとみなせる。

Kuniyoshi and Sangawa[9] の研究では、人の身体、神経系の生理学的知見に基づく個々のモデルを組み合わせ、一つの赤ちゃんモデルとした。このモデルを用い、母胎中の胎児の発達および誕生後の行動をシミュレーションし、人の運動発達の理解を目指した。学習の結果、皮質上に、筋肉ユニット配置、より一般には体性感覚・運動マップを獲得した。この学習により、母胎内では当初ランダムであった運動が徐々に秩序化してくること、誕生後の母胎外の重力場での運動で、はいはいや寝返りに似た運動が創発されたことが報告されており、まさに“Body shapes brain”の典型例と言える。最近では、これを起点として、脳や身体、環境のシミュレーション粒度を高め、社会的行動発生原理をも含むことを狙っている[10]。そのためには、ミラーニューロンシステムのような構造が創発することが期待されるが、埋め込みとしての内的構造の基盤に加え、環境の外的構造の要件が必要である。

（2.5.2）自己と非自己の区別の始まり

新生児期の最大のミステリーは新生児模倣[21]であろう。明和は、比較認知発達科学の立場から、個体発生的な観点、進化史の観点から議論している[20]。呉[22]は、重度障害児観察（随意運動がほとんどなく大脳皮質が解剖学的にも機能的にもほとんど残存していない重度の脳性麻痺障害者で、新生児模倣[viii]と同様の口の模倣が観られる）から、新生児模倣の神経基盤は主に皮質下にあるのではないかと推論している。これは、手や口唇部分の触覚分布密度も高いことも含めて、口唇周辺の運動がかなり生得的である可能性を示している。皮質下での学習の可能性は連合学習が可能なこと[ix]からも十分伺える。

認知発達ロボティクスの観点からは、大胆ではあるが、これを支持する二つの仮説が挙げられている。一つ目の仮説は、身体構造の物理的拘束である。胎内の窮屈な状況では、両手を抱えているケースが伸ばしている場合よりも多く、口などの顔の近くにくる可能性が高いこと、その場合の運動経路にあまり自由度がないと察せられることである。これは、先にも述べたように、関節構造だけでなく、筋の張り方により可能な自由度が既に拘束されていることを意味する。二つ目の仮説は、情報量を増大するための探索などの能動的な行動原理である。すなわち、口唇部は触覚密度が非常に高いと仮定すると、他を触るよりも多くの情報量が入ってくる可能性がある。また、口腔内という身体表面と異なる意味合いをもつ部分に対する探索行動としても、胎児にとって興味ある対象と考えられる。

viii）ヒトやチンパンジーなどの生後まもない新生児が、他者の顔の動き、特に舌出し行動などを模倣する現象のこと
ix） 連合学習の成立機構（http://www.tmd.ac.jp/med/phy1/ptext/high3.html）

胎児期や新生児期は、ミラーシステムに必要な自己感覚運動写像、特に口唇周辺の手の稚拙な運動が獲得されると考えられる。まだ他者の概念はなく、生態学的な自己と非自己の区別がなされ始める時期と考えられる。その基本として、自己の身体認知課題がある。随伴性規範に基づく自己身体弁別は、宮崎、開[23]が乳幼児を対象として時間遅れに対する認知感度について考察している。計算論的には、Asada et al.[24]が、状態次数推定の方式を提案している。次数 1 で観測と運動の直接相関がとれ、静止環境か自己身体もしくは自己身体と同期した動きをする物体、すなわち道具などを切り出すことが可能である。次数 2 以上は、その他に属され、他者や他者の操作する物体などが含まれる。ただし、自己と類似した他者という明確な表象ではない。

（2.5.3）明示的な他者の存在を感じる時

生後の一年は、未熟ではあるが視覚による外界認知、特に自己身体である手を見つめるハンドリガードや母親の顔をいじる視触覚融合、物体を把持し、さまざまな角度から眺めたり、落としたりすることで、3 次元物体認識や物体の運動の因果性などの学習が行われる。これらを通じ、生態学的な自己と非自己の区別が確立される。さらに、この後、対人的自己や明示的な他者、三項関係[x]などの理解能力が確立されると考えると、基本課題として、自他弁別、他者行動認識が挙げられ、ミラーニューロンシステムが作動するために必要な機能である。

自己と他者が似た存在であるという認知は、他者の内部状態を推定する上で、前提となる条件と社会学では考えられてきたようである。実藤[25]は、先行研究を踏まえ「ヒトに備わった自他の類似性理解を通して、乳児は他者の中に自己を置いてその動きをたどることが可能となり ... それは、他者の身体や行動の中に自己との類似性を見いだすことができるだけでなく、ある行動にともなって生起する他者の心の動きにも自己との類似性を見いだすことができるようになることを意味する。」と議論している。すなわち、自他の類似性理解は他者の要求や意図、感情の理解といった後続する社会的認知発達の一側面を支える基盤と仮定される[26]。

構成的手法の観点から、類似性理解の基礎として、顔のようなパターンに対する好みを前提とし、視覚による他者観測時における顔パターンの検出および自身の顔部位との対応課題が挙げられる。新生児模倣に対する学習可能性として、Fuke et al.[27]は、視野内で腕を動かし、運動中の関節角速度と手先位置変化量の間を関係づける写像をニューラルネットによって学習し、その結果を用いて視野外でも腕の関節角度を通して手先位置を推測するモデルを提案した。また、接触運動中の各種センサー入力値に発生する不連続性をもとに、自己の顔表面からパーツを構成する特徴的な触覚センサー情報を抽出するモデルを提案した。さらに、抽出した顔の情報を他者の顔の視覚情報から抽出される特徴的な視覚情報と対応関係をとることにより、顔の模倣の基盤となるモデルを提案した。顔という非常に重要なコミュニケーションインターフェース部位の類似性理解を起点として、他の身体部位の類似性理解、さらには、行動の類似性理解にもつながると考えられる。

そこで、次の課題の「他者行動認識」だが、その前提として座標変換の課題がある。同

x） 私、貴方、物の三つの関係であり、私が貴方に物を渡すなどの四語文で表現されるような関係

一行動の主体の差異（自己運動か他者運動）による観察の見かけの違いの吸収である。頭頂葉で自己座標系と他者座標系の変換が行うわれているようである[28]が、発達の観点からは、生得的と考えるより、生後の学習の結果として変換プログラムが構築されると仮定する。サルの場合のゴール指向の他動詞的動作であれば、強化学習のスキームで報酬獲得による価値の等価性[29]により、同一行動の異なる視点からの観察による見かけの違いばかりでなく、実現方法が異なる行動も等価とみなすことで、結果として座標変換が可能と考えられる。しかし、ヒトの場合は、もっと一般的なスキームが必要かもしれない。例えば、物体操作など学習や発達を通じて、半ばゴール指向、半ば視触覚融合の連続的表象構築により、結果として座標変換が可能かもしれない。その場合には、並行する他の認知機能の発達との兼ね合い（独立 / 相互促進 / 干渉）も構成的手法の観点から興味深い課題である。

（2.5.4）養育者という他者と自己との相互作用

乳児期とオーバーラップするが、この時期は養育者という、より明確な役割をもつ他者の概念が確立されると同時に、自身に対する概念的自己も確立されるであろう。この時期の代表的課題として、共同注意、模倣、共感などが挙げられる。

これまでの共同注意を実現するロボット研究[30),31)]では、主に視線制御のみを扱っており、「共同注意は、他者の視線を追従した先にある他者の注意の対象に、自ら注意を向けることを必要条件としている。」にあてはまるとは言い難い。何らかの形で自他弁別や他者行動の認識が可能であれば、共同注意の基本行動としての視線制御から、他者の注意対象を推察しながら視線を合わせる合目的行動としての共同注意（この場合、共同注視）への発達[32)]が可能になると考えられる。この過程で、他者の注意が自己の中で表象され、自己の注意との共有、嶋田[17)]の言葉を借りれば、他者の注意を自己の注意としてすりあわせることで、注意が共有される。これは、まさしく、ミラーニューロンシステムの働きとみなせる。なぜなら、2.4 で述べたように、例えば、他者の背中を誰かが触ったのを自分が見たときに触られ行動を感じるように、視覚的に対応可能な自他のアクション間のみならず、直接観測できなくても内部状態として抽象化した知覚の対応を取ることもミラーニューロンシステムによって可能であると考えられるからである。このような過程によって、自ら他者の注意を喚起する視線行動である社会的参照などの社会的行動が獲得されるのであろう。

模倣に関しては、先に述べた座標変換が可能であれば、模倣行動の生成に関しては、問題が少ない。音声知覚の場合の座標変換は、音韻的な違いにも関わらず、自己と他者の間でシンボルとして等価と見なせるようになるかが課題である。構成的手法としては、養育者がゴール指向の情報を明示的か非明示的かに関わらず大きなバイアス与えていることを仮定した研究がなされている[33)]。模倣したり、されたりすることで、コミュニケーションの頻度が増し、学習が加速する。

前節で類似性理解の出発点の部位として顔の重要性を指摘したが、より積極的には、顔認知から顔表情表出の課題がある。コミュニケーションにおいて、他者の顔表情や視線を識別し、それに応じて行動することは極めて重要であり、構成的手法にとって顔の設計や構築のハードルは高いが越えなければいけない課題である。

Watanabe et al.[34] は、直感的親行動[xi] にもとづいて共感ロボットを構築した。明示的時には非明示的に、親が子どもの立場に立って、自身の、すなわち子の内部状態に対応する顔表情を表出させることで、子が親の顔表情の意味する内部状態が推し量れるという仮説に基づいている。ただし、この研究はこの部分に焦点を当てたので、内部状態空間において他者と自己の区別がない。先の議論を考慮すると、概念的自己の確立として、他者もしくは他者性として似ているが完全同一ではない存在の認知があり、そこに自己とは異なる差異が存在する。この過程で、先にも述べたように、差異を埋めて行く行為の連続が模倣やコミュニケーションにつながると考えられる。

（2.5.5）自己概念の社会的発達とミラーシステム

これまで、自己概念の社会的発達とミラーシステムの関係を構成的手法の観点から眺め、認知発達ロボティクスの研究例を交えて、その課題を示してきた。さきに述べたように、時期や認知機能に応じて、個別に表象するのではなく、統一的かつ構成的に認知発達を説明かつ設計可能な形で提供できなければ新しい価値観につながらない。すなわち、図 3-4-24 に示した自己概念の発達が、個別の表象ではなく、統一的な構造の発展なり創発の帰結として生じることが期待される。ただし、非常な困難を伴う取り組みであり、この問題意識を背景に課題を切り出さざるを得ない。その際、対象とする月齢の時点での想定される認知能力、学習発達させるべき認知機能を明確にし、それらの関係（独立 / 相互促進 / 干渉）を明らかにすることの積み重ねで、おぼろげながら全体像をポップアップできれば、結果として新しい価値の創造が期待できる。

認知発達ロボティクスとしては、言語や心の理論課題が、シンボリックな意味でゴールになる。これまで述べてきた自己と他者の概念確立の発達過程を経て、モダリティに依存しない模倣能力により、動作によるコミュニケーションから音声コミュニケーションへの発展が期待される。そのためには、研究用プラットフォームの開発も重要である。また、研究対象として扱えるようなるには時間を要する課題として、記憶の問題がある。

（2.6）認知発達ロボティクスの設計論

環境、身体、タスクが一体となって認知発達するロボットの設計論を構成しなければならないが、大きく 2 つに分けて説明する。一つは、身体を通じて行動するための環境表現を構築していくロボット内部の情報処理の構造をどのように設計するか、もう一つは、そのように設計されたロボットが上手に学習や発達できるような環境、特に教示者をはじめとする他者の行動をどのように設計するかである。両者が密に結合することで相互の役割である学習・発達が可能となる。

重要なポイントは、獲得すべき行動をロボットの脳に直接書き込むのではなく、他者を含む環境を介して（社会性）、ロボット自身が自らの身体を通じて（身体性）、情報を取得し解釈していく能力（適応性）と、その過程をもつ（自律性）ことである。認知発達ロボティクスや、それに関連するアプローチ[xii] は、まだその事例が少ないが、その方向性は、主に

xi） 例えば幼児が転倒してしまった時に、養育者は「痛かったね」と幼児に話しかけ、痛そうな表情をする行動のこと
xii）文献 3,35 や http://www.jst.go.jp/erato/asada を参照

二つに分かれる。

一つは、機構（計算モデル）の仮説を立て、コンピューターシミュレーションや実際のロボットを使って実験し、仮説の生成、検証、修正を繰り返すことである。もう一つは、上記の過程で環境側の主役である人間の行動や機構そのものを脳活動等の計測や（心理）実験によって調べることである。これらは互いに関連し、相互フィードバックしうる。

（2.7）歴史的経緯と国内外の動向

（2.7.1）歴史的経緯

認知発達ロボティクスの提唱以前の AI やロボティクスでは、モデルベーストや記号表象に基づく手法が主流であり、これに対し、行動規範型のロボットアーキテクチャー [36] を提案･実証し、表象無き知能 [37] を唱えたのは、当時 MIT にいた Rodney Brooks であった。実は、これに先立つ 1984 年に Valentino Braitenberg が、感覚運動系が密に連携した原初的な神経構造を模擬した移動ロボットの 14 の発展形態を表し、環境構造に依存した単純な行動から、認知や自由意志にまで言及可能な複雑な行動に至る生成法を思考実験を通じて著した [38]。

これらを背景に、先にも述べた認知発達における身体性や社会性の重要性が認識され始め [6]、「身体性認知科学」[39]、「認知ロボティクス」[1]、「認知発達ロボティクス」[3] が勃興し、知の理解と創造が不可分であるとの認識が高まった。2005 年秋から科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（ERATO）「浅田共創知能システムプロジェクト」が発足し、約 5 年半にわたりロボットなどの人工物の設計・製作・作動を通じて、人間の認知発達過程の謎に迫る研究を実施し、2011 年 3 月研究プロジェクトを終了した。そのなかで、人工筋肉などの柔軟素材を用いた身体構造と環境と動的結合による運動の創発、身体的行動から対人コミュニケーションまでを発達的につなぐ認知モデルによる認知発達の構成的理解、アンドロイドやマルチロボットシステムを用いたコミュニケーションの理解と実現、脳機能画像計測や動物実験による構成モデルの検証などを中心に取り組まれてきた。プロジェクトの個々の研究の詳細やサマリーは、既に発表されている解説等 [40),41] を参照されたい。

（2.7.2）国内の動向

国内では、上記の ERATO プロジェクトと並行して、ソニー CSL から理研 BSI に移り、その後 KAIST の教授となった谷淳らのグループが、リカレントニューラルネットワーク（RNN）を使ってロボットの認知の課題を追及しており、最近、一連の研究とその背後の思想をまとめた書籍を著した [42]。複雑系科学の分野で身体性認知科学としてのロボットの神経ダイナミクスの研究を極めている。かつて、谷淳のところにいて、現在、早稲田大学の尾形哲也教授のグループでは、RNN や深層学習を駆使したロボットの行動学習に焦点を置いている。立命館大学の谷口忠大准教授のグループでは、記号創発ロボティクスを提唱し、認知発達ロボティクスにおける言語創発の課題に焦点をおいた研究を実施している。立命館大学の谷口忠大准教授を含め、玉川大学の岡田浩之教授、早稲田大学の尾形教授等がメンバーになり、電気通信大学の長井隆行教授が率いる「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」プロジェクトが JST の CREST で 2015 年か

ら始まっている。

（2.7.3）海外の動向

元スイス・チューリッヒ大学の Rolf Pfeifer 教授が人工知能研究所を設立し、身体性に重きをおいた身体性認知科学の一連の研究や思想をまとめて、書籍として著している[39]。最近の著[43]では、柔軟な身体が有する環境との相互作用の豊かさが、いかにして知の創造や理解につながるかを説いている。大阪大学の細田耕教授は、Pfeifer 教授の下で過ごした経験も活かし、「柔らかヒューマノイド」[44]として、この点を強調し、身体性に基づく認知発達ロボティクスの設計論を展開している。これら一連の研究は認知発達ロボティクスにおけるロボットプラットフォームの重要性、さらには、認知過程への本質的な貢献の役割も含めて、現在ではソフトロボティクスの思想基盤となっている。

イタリアジェノバ大学の Giulio Sandini 教授のグループは、コンピュータービジョンの研究で、当初から生体視覚に着目し、物体の把持や操りなど行動系と密着したロボットビジョンの研究を行ってきており、発達の概念を取り入れた Developmental Robotics の考え方を、浅田らが認知発達ロボティクスとしての最初の英語論文[2]を発表した 2 年後の 2003 年に Pfeifer 教授らと一緒に著している。彼らは、iCub と呼ぶ幼児ロボットプラットフォームを開発し、認知発達研究のプラットフォームとして世界に送り出している。Sandini 教授らのグループは、その後、Italian Institute of Technology（IIT）のロボット領域の主要メンバーとなり、人間の行動系の研究を中心に多くの研究成果をあげている。

英国 Plymouth 大学の Angelo Cangelosi 教授率いるグループでは、iCub を用いた言語発達研究を推し進めている。これは、FP7 の ITALK プロジェクト[xiii]（2008 年 3 月～2012 年 2 月）の一部であり、IIT やドイツ Bielefeld 大学など欧州の主要な研究機関が含まれていた。Cangelosi 教授は、米国の南イリノイ大学の心理学者 Matthew Schlesinger 博士とともに「Developmental Robotics – From Babies to Robots –」と題する書籍を著しており、その中に ITALK プロジェクトの成果も含まれている[45]。多くのプロジェクトに継続的に携わっている。

ドイツの Bielefeld 大学の Helge Ritter 教授率いるグループでは、Human Robot Interaction（HRI）をメーンにした工学実利的な側面に重きをおいた一連のプロジェクトを遂行しており、欧州における COE プログラムを長年獲得し続けている。CITEC と呼ばれる研究センター（the Cluster of Excellence Center in Cognitive Interactive Technology ）を設立し、多くの研究者を抱えて活動している。最近の大きなプロジェクトの一つは、The Cognitive Service Robotics Apartment as Ambient Host と呼ばれているもので、2013 年 10 月からの 4 年プロジェクトで家庭内環境での認知ロボットの活動の実現を目指している。FIAS（Frankfurt Institute of Advanced Studies）[xiv]の Jochen Triesch 教授は、もともとコンピュータービジョンの研究を行ってきたが、神経科学をベースに認知過程のモデル化を試みている。すなわち、脳のネットワークの自己組織化により知的な感覚と行動が生成される機序を明らかにしようとしている。

xiii) ITALK　http://www.italkproject.org
xiv) FIAS　http://fias.uni-frankfurt.de/de/neuro/triesch/

フランス INRIA の Pierre-Yves Oudeyer 博士[xv] 率いる研究グループでは、内発的動機付けを情報論の立場から明らかにしようとする発達ロボティクス研究を行っている[46]。言語創発研究も行っているが、それは彼の師である元ソニー CSL パリ研究所長の Luc Steels 教授（Vrije Universiteit Brussel）の影響かもしれない。Steels 教授は、もともと記号 AI からはじまり、その後、ロボットを用いた生態学的な環境での記号接地問題解決を図った一連の研究[47]がある。Cergy-Pontoise University の Philippe Gaussier 教授[xvi]のグループでは、脳神経系のモデル化を通じた認知発達過程の解明を目指している。脳の各部の機能とその関係を計算モデルとして具現化し、ロボットによる検証を通じて、新たな理解と洞察を得ることを狙っている。

Brooks が行動規範型ロボットのアーキテクチャーを唱えた米国では、提唱後、一連の研究が行われてきたが、認知発達ロボティクスに強く関連する研究グループの形成には至らなかった。その後、Brooks は、お掃除ロボット Roomba で有名な iRobot 社を設立・創業後、Rethink Robotics 社を設立し、新たな産業ロボットとして Baxter の開発・販売に従事している。認知発達ロボティクスのアプローチの一つは、ロボットを道具として人間研究に利用することである。シアトルにある University of Washington で、I-LABS（Institute for Learning and Brain Sciences）を率いる心理学者夫妻の Andrew N. Meltzoff 教授、Patricia K. Kuhl 教授らは、赤ちゃんの行動実験および脳磁図（MEG）による計測を通じて発達研究を行っているが、ロボットやモデル研究との連携にも強い関心を示している。フランスの Gaussier 教授と共同研究を行ったり、大阪大学の浅田研究室からロボットを譲り受けたりして、ロボットの学習や社会性に関する研究を行っている。インディアナ大学は、発達心理学で著明な Linda Smith 教授が、計算モデルに関心を持っており、Chen Yu 教授らのグループらと連携し、赤ちゃんの発達モデル化を試みている[48]。

脳神経系の構造をベースにロボットの感覚行動のマッピングを対象とする研究は Neuro-robotics と呼ばれ、ノーベル受賞者の Gerald M. Edelman のグループが 1990 年代初期から行ってきた[49]。この文献の共著者には、脳のネットワーク構造を明らかにしようとするコネクトームの Olaf Sporns や意識の研究で著明な Giulio Tononi が含まれている。Neuro-robotics としての後継者は Jeffrey L. Krichmar で幾つかの共著文献がある。Edelman のグループ出身でもう 1 人あげないといけない研究者は Eugene M. Izhikevich で、大規模な脳活動シミュレーション研究[50]を行っている。これら一連の研究は、脳研究の派生とみなせるが、既存の脳研究のアプローチの限界を打破するうえで、人工物設計を通じたアプローチは認知発達ロボティクスの理念と通じる。

日本以外のアジア地域では、先に述べた谷らのグループが韓国の KAIST で行っている程度である。なお、大阪大学の浅田教授は、上記の海外研究機関のうち、IIT、UW、Bielefeld に加え、Caltech（下條信輔教授）の 4 機関との共同研究プログラム（JSPS 拠点形成事業）「認知脳理解に基づく未来工学創成のための競創的パートナーシップ」2012 年 4 月～ 2017 年 3 月）の代表を務めている。

xv）Pierre-Yves Oudeyer　http://www.pyoudeyer.com
xvi）Philippe Gaussier　http://perso-etis.ensea.fr/gaussier/

(3) 注目動向

我が国における二つの研究プロジェクトと米国を中心とする脳のネットワーク構造に関連する研究の動向を紹介する。

(3.1) 構成的発達科学と構成論的発達科学

二つの後継プロジェクトは、浅田 ERATO プロジェクトと比較して、神経科学や発達心理の分野の研究の割合が増えており、より学際融合が進んだ取り組みとなっている。一つは、浅田教授が代表を務める「神経ダイナミクスから社会的相互作用へ至る過程の理解と構築による構成的発達科学（科学研究費補助金特別推進研究：平成 24 年度～平成 28 年度）」プロジェクトである。もう一つは、國吉教授が代表を務める新学術領域研究「構成論的発達科学–胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステム的理解–：平成 24 年度～平成 28 年度）」である。

前者は、計算モデル、イメージング、心理・行動実験、ロボットプラットフォームの各グループが密に結合して、自他認知の発達原理の解明を目指している。図 3-4-23 に示した自己認知の発達過程では、人工システムが何を持って自己の概念を獲得したかの判別が困難である。そこで、共感の発達になぞらえ、人工共感を設計することを想定した模式図に自他認知の発達が組み込まれ、具体的な心的機能がサブゴールとして与えられている（図 3-4-25）。イメージング研究での特徴は、世界唯一の親子同時測定可能なハイパースキャン MEG システムを開発[52]し、最初の結果として、相互に顔を見つめているときと、無関係なビデオを鑑賞時の差違が、自閉症軽度と重度の親子ペアで異なることを発見した[53]。

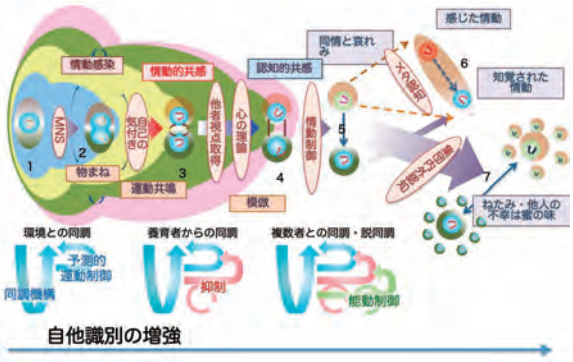

図 3-4-25　共感発達モデルとしての自他認知過程（出典：参考文献 51）

後者（図 3-4-26）の目玉の一つは、発達障害者の当事者研究[54]である。当事者が自身の内観を語ることで、外界からの観測による記述とは異なるものが得られ、それが設計のヒントになりうる。例えば、通常、我々が無意識的に処理し、抽象化された状態として感知する「（実際、そう指摘されるまで、そう思っていなかったが）おなかがすいた」状態は、複数の下位レベルの状態の集合として知覚される。そのため、彼らは、意識的にそれらをかき集め、いま、自分がどのような状態であるかを推定する。この過程は、先に述べた無意識的過程に相当すると考えると、彼らの記述が、この過程をモデル化する際の示唆を与えてくれる。もう一つの目玉は、胎児脳の発達シミュレーションで、2006 年の最初の論文発表[9]では、200 足らずの筋肉、すなわち、200 個程度のニューロン数であったが、2016 年に発表された論文[55]では 260 万個のニューロン、53 億のシナプス結合を STDP 則[xvii]で学習させた結果が報告されている。この規模で、身体との結合がなされたシミュ

xvii）　STDP 則　スパイクタイミング依存可塑性

レーションは、特筆に値し、今後の一つの方向性を示している。

これら二つのプロジェクトは、ロボティクスの範囲を超え、神経科学、発達心理、認知科学などの分野を巻き込んだ超越分野（Transdiscipline）である構成（論）的発達科学の構築を目指している。基本的な神経構造から出発し、身体性や社会性の拘束を受けながら、予測符号化などの汎用の学習手法を用いて、徐々に機能分化していく過程である。図 3-4-25 に示した共感発達モデルとしての自他認知過程は、その具体例として捉えられる。これら二つの研究プロジェクトは 2017 年 3 月で終了するが、それらの後継として当事者研究を発展させ、予測符合化を核とした JST CREST プロジェクト「認知ミラーリング：認知過程の自己理解と社会的共有による発達障害者支援」がある。もう一つは、ソフトロボティクスにおける人とのインタラクションを科学として捉えることを狙った JST さきがけプロジェクト「触れ合いデータを収集する子供アンドロイド高機能化」である。大阪大学の石黒浩教授が JST ERATO 石黒プロジェクトを 2014 年 7 月から開始し、アンドロイドの社会的行動の工学的実現を目指している。

図 3-4-26　構成論的発達科学　胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステム的理解

（3.2）脳の機能と構造のネットワーク解析

米国における認知発達ロボティクスそのものの研究はあまり盛んではないが、関連する動きとして計算論的神経科学の研究がある。脳科学は、今世紀最大のミステリーで、欧州や米国で大規模なプロジェクトが走っているが、そのなかで、最も根源的な神経ネットワークの機能と構造のネットワーク解析が計算論的神経科学の一分野として注目を浴びている。Human Connectome Project と呼ばれるプロジェクトはヒトの脳の神経器官の全結線構造を明らかにしようとするものである。一見、認知発達ロボティクスにあまり関係がないように思われるかもしれないが、基本的な神経構造のポテンシャルを明らかにするためには、この種のネットワーク解析が重要である。中心人物の 1 人の Olaf Sporn 博士は、Linda Smith や Cheng Yu がいるインディアナ大学の教授で、計算論的神経科学の第一人者で、MIT Press から 2 冊の書籍[56] などを出版している。また、國吉グループにおける胎児脳発達シミュレーションに先立って、脳の大規模シミュレーション研究は、先に紹介した Edelman グループの Izhikevich[50] らが行った。

（4）科学技術的課題

ビッグデータや人工知能、特に深層学習の強力な認識技術が有用な道具として活用できるようになりつつある一方で、全てが解決されるわけではなく、認知発達ロボティクスの研究を質的に転換させる取り組みが重要である。

（4.1）脳神経ネットワークシミュレーションと機能分化

國吉グループによる最新の胎児脳の発達シミュレーション[55]の一つの方向性は、徹底的に実際のヒトの脳の活動をシミュレーションすることで、その意味ではニューロン数、生態学的構造、脳の領野構造、さらにはより詳細な身体（感覚・運動系）などが、より精緻にシミュレーションされる必要がある。この過程で、多くのパラメータチューニングが必要であり、どのようにしてシステマチックにそれらを構造化するかは明らかではなく、試行錯誤と同時に関連分野の知見との相互フィードバックが欠かせない。

これに対し、単純化したネットワーク構造の解析により新たな知見や設計論が生じる可能性もある。Park et al.[57]は、胎児ではなく、ヘビのような機構をもつロボットの脳として、非線形振動子を組み込んだニューラルネットワークの神経系（感覚・運動・中枢）を構築し、行動創発を観測し、行動解析および、その背後にあるネットワーク構造を解析した。その結果、行動パターンによりサブネットワーク構造が異なることが分かった。これは、当初与えた解剖学的構造と異なるネットワーク構造が動的に発生し、遷移する過程を表しており、このような情報構造の再構築により、さまざまな機能が分化すると考えられる。この機能分化の情報理論的基盤、身体・環境とのカップリングによる機能の接地、さらには、左右脳に代表される側性化という機能分化のイメージング研究による検証が科学技術課題としてあげられる。

（4.2）AI 手法の HeavyData への応用

構成的発達科学の基盤となる基本的な神経構造は、ヒトの脳の機能と構造の解明に強く関連する。各種脳機能計測による膨大なデータは、BigData の一種であるが、モノに対するデータと異なり、各個人の行動と脳活動は対応していると予想されるにも関わらず、その間の関係は自明ではなく、幅広く複雑な時空間構造が内在する。そのような関係や構造を明らかにするために、膨大な脳機能データが取得されつつも、手をつけられないデータが存在し、新たな解析手法が望まれている。ここでは、各個人についてさまざまな局面で計測された脳活動の記録という意味でこれらのデータを「重い」と捉え、HeavyData と呼ぶ。HeavyData は、取得した環境の物理 / 化学 / 生理学的特性に加え、時間軸では、数ミリ秒単位の局所的ダイナミクス、さらに発達過程を視野にいれた大局的ダイナミクスが存在する。空間軸では、タスクに依存した多様な感覚・運動が含まれ、さらに社会的な相互作用の局面においては複数の脳の活動が解析対象となる。このような HeavyData の解析は容易ではない。

脳の構造と機能の関係性へのアプローチはボトムアップ的な研究が中心であった . しかし、このような手法では、MEG データから時空間を含めた脳の自発活動の発生メカニズム、および、生理学的な意味の解明は困難である。そこで、ボトムアップ的なアプローチに加え、人工知能手法である最適化手法や、ネットワーク理論を駆使した脳ダイナミクスシミュレーションによるトップダウン的な仮説検証を通じた構成的手法により、この課題を解決することが考えられる。

近年、脳のネットワーク構造としての解析は、WEB や飛行機のフライトマップなどと合わせてネットワーク科学として注目を浴びている。各種脳画像データにおいて、解剖学的構造と各タスク下での脳活動をつき合わせ、トポロジカルな構造を推定する手法が多い。

最近の自閉症識別手法について、Yahata et al.[58] が大人の fMRI データから脳の機能的ネットワークを推定し、機械学習手法を用いた特徴量選択により、高い識別率となることを報告した。ただし、こうしたシンプルな手法の組み合わせの MEG などの HeavyData への適用は容易ではない。最近、高い識別能力で注目されている深層学習技術が大人の脳波データへ応用されるようになってきた。このような背景から、HeavyData の解析への深層学習の適用などにより、発達障害の診断システムなどの応用が期待される。

（4.3）人工意識研究への発展

認知発達ロボティクスの基本課題として、人工システムが自己の概念を獲得できるかという問いかけがある。これは、「（自己）意識」の課題に関連し、「自由意志」、「動機付け」、「意図」、「自他認知」、「注意」、さらには「情動」や「共感」などの多く課題とも関係する。以前は、哲学的課題と思われていたが、近年、さまざまなアプローチがなされている。行動学や認知科学を主体とした観察と解析のアプローチ、神経科学を主体とした脳の機能と構造の解明を目指すアプローチに加え、Edeleman のグループの 1 人である Giulio Tononi は、情報論の立場から意識の測度として ϕ と呼ばれる情報量を定義し、人工システムと生物の意識をつなぐ統合情報理論を提唱している [59]。日本では、例えば、アラヤ・ブレイン・イメージングの金井良太が JST CREST 金井プロジェクト「神経科学の公理的計算論と工学の構成論の融合による人工意識の構築とその実生活空間への実装（2015 年～ 2020 年）」を行っており、ϕ を利用している。また、Tononi との共著で統合情報理論を拡張しているのは、理研 BSI の大泉匡史である。彼らは、主に理論的な側面を重視しているが、これらの検証や実際の具現化を考慮すると、人工知能やロボットなどの人工システムを用いた構成的手法が有用であり、結果として認知発達ロボティクスや構成的発達科学の基本課題の解決につながると期待される。

（4.4）認知発達研究用ロボットプラットフォームの開発

これまで、各研究者が独自に開発したプラットフォームを用いて、提案モデルの検証を行ってきたが、客観性や汎用性、さらには頑強性にも問題があった。Ishihara and Asada[60] は、ソフトロボティクスの背景理念である触れあいの科学を実践するための子ども型ヒューマノイドタイプのロボットプラットフォーム設計を目指して、5 つの規範を定め、既存のロボットプラットフォームと彼らが構築中の Affetto を比較した。5 つの規範は、Humanlike DOF、Agility、Mechanical softness、Lifelike surface、Childlike appearance である。これらのプラットフォームは、それぞれ個別の設計思想があるが、リッチな物理的接触を可能にすることで、認知機能の発達を支援することや、ハードとソフトともに構成的発達科学を支える基盤になることが期待され、空気圧をはじめとする柔軟アクチュエーター、ソフトマテリアル、触覚センサーの革新と統合が望まれる。

（5）政策的課題

産官学連携：本領域は、いまだ基礎研究の占める割合が多く、直近の産業応用は難しいが、あえてあげるとするならば、発達障害の診断、およびテーラーメード医療向けに脳の

発達シミュレーションおよびネットワーク解析を通じた医療ケアソフトパッケージの販売などが考えられる。また、ロボットプラットフォームを用いて、自閉症をはじめとする発達障害のケアへの応用も考えられる。さらに、赤ちゃんロボットを用いた育児シミュレーションによる初心者のお母さん方の育児不安解消などの応用も考えらるが、もう少し先になると予想される。

府省連携：研究開発における適切で柔軟な役割分担、迅速な連携などが望まれている現状を考えると、本領域においても省庁の連携は欠かせない。本質的に融合研究領域であり、そこから超域分野（Transdiscipline）を創る上でも重要である。

国際連携：日本人研究者の一つの欠点として、英語コミュニケーションによる国際連携の弱さがあげられる。ともかく海外の研究者と積極的に交流し、徹底的に議論する機会を増やして、学際と国際を両立させることが肝要である。特に、ロボティクスは、それ以外の研究分野間のブリッジ役として機能することが、他の分野よりも容易であり、その意味で本領域を主体とした国際交流プログラムのさらなる推進が人材育成の観点からも重要と考えられる。事実、先の共同研究プログラム（JSPS 拠点形成事業）は若手や大学院生を主体としており、若手の学際・国際交流ができつつある。

ファンディング制度：省庁間の壁を破ったテーマ設定などが必要である。省庁だけでなく、例えば科研費の融合分野の設定なども、まだ不足気味である。

人材育成：大学教育に関して、新入生の時点で基礎（数学、物理、生物、ロボティクス：工学の代表、人文社会科学）を徹底的に教育し、その後、どの専門にでも行ける能力を養うことで、専門取得後の融合研究が容易になり、さらに高度化すると期待される。

インフラ：ロボットプラットフォームの提供が遅れている。古くはソニー AIBO からはじまり、現在ではソフトバンクロボティクス社の NAO や Pepper があるが、じゅうぶんとはいえず、特にソフトロボティクスに代表される柔軟でリッチな相互作用が可能なプラットフォームの開発が望まれる。

(6) キーワード

認知発達、構成的発達科学、身体性、ミラーシステム、神経アーキテクチャー、社会的相互作用、自他認知

（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 ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト（2005 年～ 2010 年）の成果を引き継ぐ複数のプロジェクトが進捗 ・早稲田大学の尾形教授のグループが RNN や深層学習を駆使したロボットの行動学習に取り組んでいる ・立命館大学 谷口教授、電気通信大学 長井教授、玉川大学 岡田教授、上記 尾形教授らが言語創発にフォーカスした記号創発ロボティクスの CREST プロジェクトに 2015 年から取り組んでいる ・当事者研究を発展させ、予測符号化を核とした JST CREST プロジェクト「認知ミラーリング：認知過程の自己理解と社会的共有による発達障害者支援」がある。もう一つは、ソフトロボティクスにおける人とのインタラクションを科学として捉えることを狙った JST さきがけ「触れ合いデータを収集する子供アンドロイド高機能化」である
	応用研究・開発	－	－	
米国	基礎研究	○	↗	・計算論的神経科学に関して、コネクトーム・プロジェクトの Sporns、意識の Tononi、脳活動の大規模シミュレーションの Izhikevich、Neurorobotics の Krichmar などが活躍。さらに、発達心理学の大御所もいる
	応用研究・開発	－	－	・Izhikevich が Brain Corporation 社を San Diego に設立。人工脳を応用したビジネスを展開
欧州	基礎研究	◎	↘ → → → ↗	・スイス :Rolf Pfeifer 教授がチューリヒ大学を退職し、減退傾向 ・イタリア :IIT の Giulio Sandini 教授のグループが主に人間中心の研究を活発に行っているが、退職が近い ・英国 :Plymouth 大学の Angelo Cangelosi 教授のグループは、主に言語獲得の研究を行っており、大きなグラントを継続的に獲得。人材育成に熱心で、応用研究を含め活発に推進。グループの規模がやや小さい ・ドイツ :Bielefeld 大学は、工学的側面を重視し、応用研究が盛ん ・フランス :INRIA の Pierre-Yves Oudeyer 博士が内発的動機付けを中心とした基礎研究で継続的に活躍
	応用研究・開発	－	－	・ドイツ :Bielfeld 大学が高齢者ホーム応用研究を進めている
中国	基礎研究	－	－	
	応用研究・開発	－	－	
韓国	基礎研究	△	↗	・ソニー CSL から理研 BSI に移り、KAIST の教授となった谷淳らのグループが、RNN を使いロボットの認知の課題を追求、複雑系科学の分野で身体性認知科学としてのロボットの神経ダイナミクスの研究に取り組む ・2016 年のソウルで行われたアルファ基に火をつけられた形で、未来創造科学部は 5 年間で 1 兆ウォンの研究予算を決定した。サムスン電子、LG 電子、現代自動車、LINE など企業連合と各大学、国立研究所がコンソーシアムを組み、基礎及び実用研究を行っていくというもの
	応用研究・開発	－	－	

（注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

（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない

（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

（8）参考文献

1）浅田 , 石黒 , 国吉 . 認知ロボティクスの目指すもの . 日本ロボット学会誌 , Vol.17, No.1, pp.2-6, 1999.
2）Minoru Asada, Karl F. MacDorman, Hiroshi Ishiguro, and Yasuo Kuniyoshi. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. Robotics and Autonomous System, Vol.37, pp.185-193, 2001.
3）Minoru Asada, Koh Hosoda, Yasuo Kuniyoshi, Hiroshi Ishiguro, Toshio Inui, Yuichiro Yoshikawa, Masaki Ogino, and Chisato Yoshida. Cognitive developmental robotics: a survey.
IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, Vol.1, No.1, pp.12-34,2009.
4）小西行郎 / 監修 . 子どもの心の発達がわかる本不思議な「心」のメカニズムが一目でわかる . 講談社 , 2007.
5）乾 , 永井 , 小川 . 共創知能機構 . 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 , pp. CD-ROM, 2007.
6）浅田稔 , 國吉康夫 . ロボットインテリジェンス . 岩波書店 , 2006.
7）浅田稔 . ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性 . 日本ロボット学会誌 , Vol.28, No.4, pp.18-25, May 2010.
8）R. Held and A. Hein. “Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviors” . Journal of Comparative and Physiological Psychology, Vol.56:5, pp.872-876, 1963.
9）Y. Kuniyoshi and S. Sangawa. Early motor development from partially ordered neural-body dynamics: experiments with a. cortico-spinal-musculo-sleletal model. Biol. Cybern, Vol.95, pp.589-605, 2006.
10）森裕紀 , 国吉康夫 . 胎児・新生児の全身筋骨格・神経系シミュレーションによる認知知運動発達研究 . 心理学評論 , Vol.52, No.1, pp.20-34, 2009.
11）Olaf Sporns and Gerald M. Edelman. Solving bernstein’s problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. Child Dev., pp.960-981, 1993.
12）Koh Hosoda, Hitoshi Takayama, and Takashi Takuma. Bouncing monopod with bio-mimetic muscular-skeleton system. In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS’08), 2008.
13）T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada. Cb2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots, pp.CD-ROM, 2007.
14）Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, and Akihiko Nagakubo. Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.
15）Shinya Takamuku, Atsushi Fukuda, and Koh Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In Proc. of

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008 (IROS'08), p.ThAT13.5, 2008.
16）ジャコモ・リゾラッティ（著), コラド・シニガリア（著), 茂木健一郎（監修), 柴田裕之（翻訳). ミラーニューロン . 紀伊国屋書店 , 2009.
17）村田哲 . 脳の中にある身体 . 開一夫 , 長谷川寿一（編), ソーシャルブレインズ　自己と他者を認知する脳 , pp.79-108. 東京大学出版会 , 2009.
18）Ulric Neisser, editor. The Perceived Self: Ecological and Interpersonal Sources of Self Knowledge. Cambridge University Press, 1993.
19）明和政子 . 心が芽ばえるとき . NTT 出版 , 2006.
20）明和政子 . 身体マッピング能力の起源を探る . ベビーサイエンス , Vol.8, pp.2-13, Dec 2008.
21）Andrew N. Meltzoff and M. Keith Moore. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. Science, pp.74-78, 1977.
22）呉東進 . 重度障害児に見られる口の模倣行動から考える . ベビーサイエンス , Vol.8, pp.17-18, Dec 2008.
23）宮崎美智子 , 開一夫 . 自己像認知の発達 . 開一夫 , 長谷川寿一（編), ソーシャルブレインズ　自己と他者を認知する脳 , pp.39-56. 東京大学出版会 , 2009.
24）Minoru Asada, Eiji Uchibe, and Koh Hosoda. Cooperative behavior acquisition for mo-bile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development. Artifcial Intelligence, Vol.110, pp.275-292, 1999.
25）実藤和佳子 . 他者の中に自己をみる−自他の類似性理解が拓く初期発達の可能性− . 心理学評論 , Vol.52, No.1, pp.99-110, 2009.
26）Andrew N. Meltzoff. The 'like me'framework for recognizing and becoming an intentional agent. Acta Psychologica, pp.26-43, 2007.
27）Fuke Sawa, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Body image constructed from motor and tactle images with visual informaiton. International Journal of Humanoid Robotics, Vol.4, pp.347-364, 2007.
28）K. Ogawa and T. Inui. Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. Joural of Cognitive Neuroscience, Vol.19, pp.1827-1835, 2007.
29）Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura, and Minoru Asada. Mutual development of behavior acquisition and recognition based on value system. In Proceedings of the 10th international conference on simulation of adaptive behavior (SAB08), pp.291-300, 2008.
30）Yukie Nagai, Minoru Asada, and Koh Hosoda. Learning for joint attention helped by func-tional development. Advanced Robotics, Vol.20, No.10, pp.1165-1181, 2006.
31）Yukie Nagai, Koh Hosoda, Akio Morita, and Minoru Asada. A constructive model for the development of joint attention. Connection Science, Vol.15, No.4, pp.211-229, 2003.
32）G. E. Butterworth and N. L. M. Jarrett. What minds have in common is space:

Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. British Journal of Developmental Psychology, Vol.9, pp.55-72, 1991.

33）Yuichiro Yoshikawa, Minoru Asada, Koh Hosoda, and Junpei Koga. A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction. Connection Science, Vol.15, No.4, pp.245-258, Dec 2003.

34）Ayako Watanabe, Masaki Ogino, and Minoru Asada. Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.3, pp.315-323, 2007.

35）浅田稔 . 認知発達ロボティクスによる赤ちゃん学の試み . ベビーサイエンス , Vol.4, pp.2-27, Dec 2004.

36）R. A. Brooks. "A robust layered control system for a mobile robot" . IEEE J. Robotics and Automation, Vol.RA-2, pp.14-23, 1986.

37）Rodney Brooks. Intelligence without representation. Artifcial Intelligence, Vol.47, pp.139-159, 1991.

38）Valentino Braitenberg. Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 1984.

39）Rolf Pfeifer and Christian Scheier99. Understanding Intelligence. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 1999.

40）浅田稔 .「知能共創システムプロジェクト」の特集について . 日本ロボット学会誌 , Vol.30, No.1, p.1, January 2012.

41）浅田稔 . 特集「共創知能を超えて」にあたって . 人工知能学会誌 , Vol.27, No.1, pp.2-3, January 2012.

42）Jun Tani. Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena. Oxford University Press, 2016.

43）Rolf Pfeifer and Josh C. Bongard. How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence. MIT press, 2006.

44）細田耕 . 柔らかヒューマノイド . 化学同人 , 2016.

45）A. Cangelosi and M. Schlesinger. Developmental Robotics - From Babies to Robots -. MIT Press, 2015.

46）Pierre-Yves Oudeyer, Frdric Kaplan, and Verena V. Hafner. Intrinsic motivation systems for autonomous mental development. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.11, No.2, pp.265-286, 2007.

47）L. Steels and F. Kaplan. Aibo's　first words. the social learning of language and meaning. Evolution of Communication, Vol.4, No.1, pp.3-31, 2001.

48）Linda Smith and Chen Yu. Infants rapidly learn word-referent mappings via cross-situational statistics. Cognition, Vol.106, No.3, pp.1558-1568, 2008.

49）G. M. Edelman, G. N. Reeke Jr., W. E. Gall, G. Tononi, D. Williams, and O. Sporns. Synthetic neural modeling applied to a real-world artifact. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol.89, pp.7267-7272, 1992.

50）Eugene M. Izhikevich and Gerald M. Edelman. Large-scale model of mammalian thalamo-cortical systems. PNAS, Vol.105, No.9, pp.3593-3598, 2008.
51）Minoru Asada. Towards artificial empathy. International Journal of Social Robotics, Vol.7, pp.19-33, 2015.
52）Masayuki Hirata, Takashi Ikeda, Mitsuru Kikuchi, Tomoya Kimura, Hirotoshi Hiraishi, Yuko Yoshimura, and Minoru Asada. Hyperscanning meg for understanding mother-child cerebral interactions. Frontiers in Human Neuroscience, Vol.8, No.118, 2014.
53）Chiaki Hasegawa, Takashi Ikeda, Yuko Yoshimura, Hirotoshi Hiraishi, Tetsuya Takahashi, Naoki Furutani, Norio Hayashi, Yoshio Minabe, Masayuki Hirata, Minoru Asada, and Mitsuru Kikuchi. Mu rhythm suppression reflects mother-child face-to-face interactions: a pilot study with simultaneous meg recording. Scientific Reports, Vol.6, No. Article number: 34977, pp.1-8, 2016.
54）綾屋紗月 , 熊谷晋一郎 . 発達障害当事者研究 - ゆっくりていねいにつながりたい . 医学書院 , 2008.
55）Yasunori Yamada, Hoshinori Kanazawa, Sho Iwasaki, Yuki Tsukahara, Osuke Iwata, Shigehito Yamada, and Yasuo Kuniyoshi. An embodied brain model of the human foetus. Scientific Reports, Vol.6, No. Article number: 27893, pp.1-10, 2016.
56）Olaf Sporns. Discovering the Human Connectome. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 02142, USA, 2012.
57）Jihoon Park, Hiroki Mori, and Minoru Asada. Analysis of causality network from interactions between nonlinear oscillator networks and musculoskeletal system. In Late Breaking Proceedings of the European Conference on Articial Life 2015, pp.25-26, 2015.
58）Noriaki Yahata, Jun Morimoto, Ryuichiro Hashimoto, Giuseppe Lisi, Kazuhisa Shibata, Yuki Kawakubo, Hitoshi Kuwabara, Miho Kuroda, Takashi Yamada, Fukuda Megumi, Hiroshi Imamizu, Jos E. Nez, Hidehiko Takahashi, Yasumasa Okamoto, Kiyoto Kasai, Nobumasa Kato, Yuka Sasaki, TakeoWatanabe, and Mitsuo Kawato. A small number of abnormal brain connections predicts adult autism spectrum disorder. Nature Communications, Vol.7, 4 2016.
59）ジュリオ・トノーニ（著), マルチェッロ・マッスィミーニ（著), 花本知子（翻訳). 意識はいつ生まれるのか――脳の謎に挑む統合情報理論 . 亜紀書房 , 2015.
60）Hisashi Ishihara and Minoru Asada. Design of a 22 dof pneumatically-actuated upper body for a little child android ‘affetto’. Advanced Robotics, Vol.29, No.18, pp.1151-1163, 2015.

3.5 セキュリティー

さまざまな機器や装置、システム、データや情報などを利活用するための技術。現代社会は、ICT システムに深く依存するようになってきており、ICT システムの安全性の確保は非常に重要な課題になってきている。このような問題を解決するために必要となるのが、セキュリティーである。

セキュリティーの研究分野は広く、かつ複雑である。単一の視点から俯瞰するのは困難であるが、図 3-5-1 に示すように、最もベースとなる領域としては教育・人材開発と社会の仕組みとしての法制度が非常に重要な役割を果たしている。さらに適用領域としては、クラウドコンピューティングや IoT（Internet of Things）、次世代ネットワークなど情報系の領域だけではなく、医療や交通サービス、電子政府などありとあらゆる社会システム・サービスに深い影響がある。この両者を結ぶところに技術を位置づけた。

縦軸には下から、装置のレベルであるデバイスのセキュリティー、それらの複合体であるシステムのセキュリティー、さらにデバイスやシステムに格納される情報のセキュリティーという階層で捉え、それらを統合して設計から運用・監視へとつながる横軸で捉えた。また、個別のセキュリティー対策だけではなく、全体を統合管理するための階層を設けた。暗号技術などの基礎的個別要素技術ももちろん重要ではあるが、ここでは応用領域や社会への適用に直接的に関連する七つの研究開発領域に注目する。

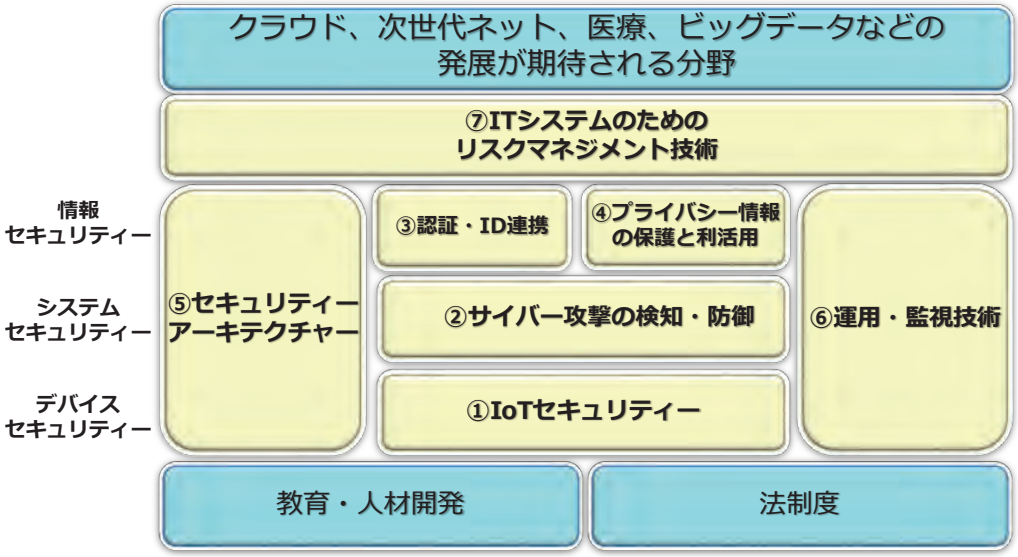

図 3-5-1　セキュリティー区分俯瞰図

① IoT セキュリティー

従来の情報機器だけではなく、家電や玩具、オフィス機器、自動車などのモノがネットワークに接続されつつある。これらのセキュリティー技術について、コンシューマー向けとインダストリー向けの２面性があり、ハードウエアとソフトウエアの両方に対する考慮、業界横断的な取り組みが必要である。

② サイバー攻撃の検知・防御

インターネットを経由したサイバー攻撃が日常的に行われるようになってきた。手口

も巧妙になり、その動機も変化している。国家安全保障と言う意味でもサイバーセキュリティーが重要である。新たな攻撃に対抗するためには、実データに基づいた対策が必須であるが、それらデータの共有が進まないという問題がある。

③　認証・ID 連携
さまざまなサービスを有機的に連携し、便利で付加価値の高い利用方法が望まれている。そこでは認証、認可、連携が重要になっている。ID、IC カード、生体情報などのさまざまな認証技術と、それらの安全な連携に関する活動があり、ビジネス現場における応用研究・開発が重要であり、実証のための仕組みが必要である。

④　プライバシー情報の保護と利活用
企業や政府、自治体、医療機関などが蓄積する個人情報を活用することは利用者にとっての利便性の向上、提供者の効率向上を実現する。そこでは、プライバシーの保護と利活用を両立する技術が重要になる。課題としては、利用者の同意を得る仕組み、データフォーマット、通信プロトコルの標準化、漏えいデータの失効などがある。

⑤　セキュリティーアーキテクチャー
セキュリティーバイデザインとも呼ばれ、製品やシステム、サービスの設計・開発段階からセキュリティーを作りこんでおこうと言う考えである。脅威の識別、リスク評価、対策の妥当性検証などが技術的課題となる。情報システムだけでなく、組み込み、制御システムなどへの対応が急務である。

⑥　運用・監視技術
情報システムのセキュアな運用のためには、日々の運用における状況の監視、対策の更新が必要である。対象となるシステムも日々変化し、機器の更新による性能向上にも対応しなければならない。セキュリティーだけでなく、ソフトウエア工学、人工知能、ネットワークなどさまざまな分野の融合が必要である。

⑦　IT システムのためのリスクマネジメント技術
現代社会は IT システムに深く依存し、その安全性の確保は非常に重要である。個別の技術的対策の導入も重要ではあるが、それだけでは不十分であり、リスクマネジメントのためのフレームワーク、リスクアセスメント、リスクコミュニケーションなどのリスクマネジメントのための理論から実務までの体系化、そのための技術の高度化が必要である。

日本においては、暗号要素技術の論文発表や理論的な提案等は活発に行われている。また、顔認証、指紋認証など生体認証においても世界をリードしている。しかし、実システム、実データに基づくセキュリティー対策技術についてはまだ取組が不十分であり、実践的な取組の強化が必要である。特にこれらは国家安全保障にも関わる問題でもあり、技術の国産化が重要な課題となっている。

3.5.1　IoT セキュリティー

（1）研究開発領域の簡潔な説明

情報家電、玩具、自動車、オフィス機器、医療機器、産業用設備・機器、制御システムなど多種多様な「モノ」がネットワークを介してつながる IoT（Internet of Things）が注目を集めているが、つながることで発生する脅威に対するセキュリティー対策を実現するための技術を確立する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

さまざまな分野において IoT 技術の適用が始まっているが、接続により発生する脅威に対するセキュリティー対策の不十分さや責任分界点の曖昧さなど、さまざまな課題がある。脆弱性の露見や設定不備などに起因して、各分野の IoT においてインシデントが発生しており、いまだ重大な被害は発生していないものの、医療機器や自動車などで利用者の生命に関わる問題や、産業用設備・機器や制御システムなどで企業の経営上大きな損害につながる問題が見つかっており、対策技術の確立および対策実施が急務となっている。ここでは、情報家電、医療機器、自動車などをネットワークに接続するコンシューマー向け IoT と、産業用設備・機器、制御システムなどをネットワークに接続するインダストリー向け IoT に分けて、研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向を示す。

①　コンシューマー向け IoT のセキュリティー [1)]

［背景と意義］

家電、玩具、自動車、オフィス機器、医療機器など、さまざまな機器が利便性向上や高付加価値化を実現するために、ネットワーク接続機能を備え、新たなサービスの展開が始まっている。ガートナーの調査結果 [2)] によれば、2020 年に IoT 機器は 260 億個に達する見込みであるが、2015 年 11 月に HPE（Hewlett Packard Enterprise）が公開した報告書「Internet of things research study 2015 report」[3)] によると、90% の IoT 機器が少なくとも一つ以上の個人情報を収集しているにも関わらず、80% が脆弱なパスワードを使用しており、70% が通信を暗号化していないなど、十分な対策が実装されないまま製品化やサービス提供が進んでいることを示している。また、複数のベンダーから提供される「モノ」が接続し、サービスを実現するためにはインターネット上のサーバーやクラウドサービスとの連携が必要となるなど、複雑なシステム構成となるため、責任分界点の曖昧さを生じる問題がある。

例えば、情報家電分野では、DVD/HD レコーダーの設定不備や脆弱性が攻撃者によって悪用され、第三者への攻撃（スパムコメント送信の踏み台など）に用いられた事例が報告されている。また、脆弱性を有するホームルータが乗っ取られ、DDoS（Distributed Denial of Service）攻撃の踏み台に悪用される（コンピューターが乗っ取られ、攻撃に使われる）事件が相次いでいる。さらに、情報家電の脆弱性が利用者自身に損害を与える事例も報告されている。インターネット接続機能を有する冷蔵庫における SSL サーバー証明書の検証処理に不備があり、中間者攻撃によって Google サービスへのログイン情報が窃取される危険性が指摘されている。

自動車分野では、2010 年以降、研究者によるさまざまな攻撃成功事例が報告されている。診断用ポートである OBD-II（On-board diagnostics II）への接続による攻撃、車載ネットワークの一つである CAN（Controller Area Network）への攻撃、ファームウエアの改ざんによるブレーキ・ステアリング・エアコンへの干渉、脆弱性を攻撃したエンジンスタートや扉の開閉操作、イモビライザー（電子キーを利用した自動車盗難防止機能）の遠隔操作などである。

医療機器分野では、インターネット接続機能を有するインスリンポンプや心臓ペースメーカーへのハッキングが可能であることが学会で報告されている。また、薬剤ライブラリや輸液ポンプの設定などを管理するサーバーソフトウエアに脆弱性が存在し、患者に投与する薬の種類や量を改ざん可能であることが報告された。

この様に、IoT におけるセキュリティー対策の不十分性や欠落は、対象分野によっては、利用者の生命や資産に関わる恐れがある。また、利用者には被害が発生しないものの、第三者に損害を与えるサイバー攻撃の踏み台になってしまうというリスクを生じる恐れがある。

今後予想される IoT 技術の急速な普及・展開に際して、セキュリティー対策の不十分な製品の出荷やサービス開始を抑止するために、コンシューマー向け IoT における脅威分析と対策検討など、IoT セキュリティー技術の確立が急務となっている。

［これまでの取り組み］

これまで IoT のセキュリティーにつながる検討が各所において進められてきたが、国内では、2016 年に政府機関、関連団体、民間団体から IoT のセキュリティーに関するさまざまなガイドライン、枠組み、手引きが公開された。

経済産業省と総務省は、2015 年 10 月に設立された産学官連携の IoT 推進コンソーシアムにおける検討をもとに、2016 年 7 月に「IoT セキュリティガイドライン ver1.0」[4] を公開した。また、内閣官房サイバーセキュリティセンター（NISC: National center of Incident readiness and Strategy for Cybersecurity）は、2016 年 8 月に「安全な IoT システムのためのセキュリティに関する一般的枠組」[5] を公開した。

情報処理推進機構（IPA: Information Promotion Agency, Japan）は、2006 年以降、現在では IoT と分類されるようになった組み込み機器、自動車、情報家電、医療機器などの情報セキュリティーについて、脅威と対策に関する調査を実施してきたが、2016 年 5 月に「IoT 開発におけるセキュリティ設計の手引き」[6] を公開した。また、IPA が 2016 年 3 月に公開した「つながる世界の開発指針」[7] における検討内容は、先に述べた「IoT セキュリティガイドライン ver1.0」に反映されている。

2016 年は、さまざまな民間団体からも IoT セキュリティーに関する資料が公開された。日本クラウドセキュリティアライアンス（Cloud Security Alliance Japan Chapter）[8] は、2016 年 2 月に「IoT 早期導入者のためのセキュリティガイダンス」（2015 年 4 月公開英語版の翻訳）を、2016 年 4 月に「IoT における ID/ アクセス管理　要点ガイダンス」（2015 年 9 月公開英語版の翻訳）と「Internet of Things（IoT）インシデントの影響評価に関する考察」を公開した。重要生活機器連携セキュリティ協議会（CCDS: Connected Consumer Device Security Council）[9] は、2016 年 6 月に 4 つの「製品分野別セキュリティ

ガイドライン」を公開した。日本ネットワークセキュリティ協会（JNSA: Japan Network Security Association）[10]は、2016 年 6 月に「コンシューマ向け IoT セキュリティガイド」を公開した。

海外では、2015 年 1 月、米国政府機関である連邦取引委員会（FTC: Federal Trade Commission）は、報告書「Internet of Things - Privacy & Security in a Connected World-」[11]を発行し、IoT に潜むプライバシーとセキュリティー上のリスクについて注意喚起した。非営利団体傘下の OWASP（The Open Web Application Security Project）は、「Top 10 IoT Vulnerabilities（2014）」を始めとする複数の技術情報を公開している[12]。業界団体 GSMA（GSM Association）が 2016 年 2 月に「GSMA IoT Security Guidelines」[13]を、非営利団体 OTA（Online Trust Alliance）が 2016 年 3 月に「OTA IoT Trust Framework」[14]リリース版を公開するなど、海外でも IoT セキュリティーに関する資料の公開が相次いでいる。

［今後必要となる取り組み］

IoT のセキュリティー対策としては、従来の情報通信分野の技術を流用可能なもの、組み込み分野の技術を流用可能なものと、新たに IoT 向け固有技術の開発を必要とするものがある。IoT 機器によっては、リソースやコスト上の制限から、従来技術を適用できない場合も考えられることから、この様な制約のもとで適用可能な新規技術の開発が求められる。

また、セキュリティー技術の導入に当たり、脅威分析を行いインシデント発生時の影響を明確化した上で、リソースやコストとの兼ね合いから実装・採用する対策を決定する必要があるが、十分な脅威分析を実施せずに製品開発やサービス運用開始が行われているケースも存在するため、セキュリティーを考慮した IoT 設計技術の確立・普及が求められる。

さらに、脅威の多くはハードウエアおよびソフトウエアに内在する脆弱性に対する攻撃として発生するので、脆弱性対策が重要である。技術的には、製造過程において、内在する脆弱性を出荷前に低減するためのセキュア設計技術やセキュアコーディング技術、未知の脆弱性を発見するファジング技術などの活用が必要となってくる。また、ソフトウエアに関しては、出荷後に新たに発見される脆弱性に備えて、更新機能の実装やパッチ流通技術の確立も不可欠である。

② インダストリー向け IoT のセキュリティー[15),16)]

［背景と意義］

IoT 技術を産業界で活用する IIoT（Industrial IoT）の導入が始まっている。ドイツ政府が推進する戦略的プロジェクト「インダストリー 4.0」においても、製造業などにおける産業用設備・機器や制御システムをネットワークに接続することで、新たな価値やビジネスモデルを創出することを目指している。従来の産業用設備・機器や制御システムは、固有プラットフォーム、専用ソフトウエア、独自プロトコルで構築され、基本的に外部ネットワークと接続しない環境での運用を想定していたため、情報セキュリティーへの懸念は大きくなかった。しかしながら、近年、Windows や UNIX 系の汎用プラットフォームや

標準プロトコルの採用が進み、さらにメンテナンスや管理などの目的で外部ネットワークに接続されるようになったため、サイバー攻撃の対象になりつつある。2010 年に発生したイラン原子力施設におけるマルウエア Stuxnet の感染、2012 年に発生したサウジアラビアの石油会社におけるマルウエア Shamoon の大量感染、2014 年に公開されたドイツ国内の製鉄所に対するサイバー攻撃、2015 年に発生したウクライナの電力会社に対するサイバー攻撃による大規模停電など、インシデントが多数報告されている。社会や組織に対する影響が大きい分野であり、今後ネットワーク接続の拡大とともに脅威の増大が予想されるため、早急に対策の強化が必要である。

サイバー攻撃において、産業用設備・機器や制御システムへの攻撃の糸口となるソフトウエアの脆弱性の報告件数も増加しているが、これらの分野では 24 時間 365 日の稼動（可用性）が重要な要件であるため、セキュリティーパッチの即時適用やアンチウイルスソフトウエアの導入が困難という課題がある。さらに、10 年以上の稼動を前提としているシステムもあるため、長期継続してサポートされるセキュリティー対策製品が入手困難であり、パッチの提供終了など、この分野固有の課題も抱えており、分野の特徴を考慮した脆弱性対策が急務となっている。

こうした中で、重要インフラや製造ラインなどで用いられる産業用設備・機器や制御システムに適用可能なセキュリティー対策、そのための基準や標準の整備と普及、さらには、それに基づく評価認証制度などの必要性が増している。

［これまでの取り組み］

制御システムのセキュリティー基準や標準は欧米を中心に策定が先行しているが、組織・システム・コンポーネントの全てを対象とし、業種に依存せず汎用的な基準・標準として、国際電気標準会議（IEC: International Electro technical Commission）が制御システムセキュリティーについて制定している国際標準規格 IEC 62443（工業用プロセス計測制御のセキュリティー規格）がある。IEC　62443 は 4 階層、合計 13 の規格から構成されており、国際計測制御学会（ISA: International Society of Automation）および WIB（Working-party on Instrument Behaviour）からの提案をもとに標準化中である。

ISA の下部組織である ISCI（ISA Security Compliance Institute）[17] は、制御機器、制御システムおよびセキュリティー開発ライフサイクルプロセスの認証制度である ISASecure を推進しており、IEC 62443 に基づく、

- EDSA 認証（Embedded Device Security Assurance Certification）
  制御機器（組み込み機器）のセキュリティー保証に関する認証、
  IEC 62443-4-2（Technical security requirements for IACS）に対応。
- SSA 認証（System Security Assurance Certification）
  制御システムのセキュリティー保証に関する認証、
  IEC 62443-3-3（System security requirements and security levels）に対応。
- SDLA 認証（Security Development Lifecycle Assurance Certification）
  制御システムの開発ライフサイクルプロセスのセキュリティー保証に関する認証、
  IEC 62443-4-1（Product development requirements）に対応。

の第三者評価認証を実施している。

国内では、2014 年 4 月から制御システムセキュリティセンター（CSSC）[18] 認証ラボラトリーにて、ISCI と相互認証される EDSA 認証業務を開始した。また、2014 年 7 月から日本情報経済社会推進協会（JIPDEC）[19] にて、IEC62443-2-1（Establishing an industrial automation and control system security program）を基本として策定された制御システムを対象とした CSMS（Cyber Security Management System）認証基準に基づく CSMS 適合性評価制度を創設し、認証業務を開始した。

その他としては、米国国立標準技術研究所（NIST: National Institute of Standards and Technology）が「Guide to Industry Control System（ICS）Security」[20] を発行しており、JPCERT コーディネーションセンターがその日英対訳版を作成・公開している。また、インダストリー IoT を推進する業界団体の一つである IIC（Industrial Internet Consortium）は、2016 年 9 月に「Industrial Internet of Things Volume G4: Security Framework」[21] を作成・公開している。

［今後必要となる取り組み］

情報セキュリティー対策が十分でない産業用設備・機器や制御システムに対して、脅威分析を行い、インシデント発生時の事業リスクを明確化する必要がある。導入・適用するためのセキュリティー技術としては、分野の特性から、アンチウイルスソフトウエアを適用できない機器や装置に対するホワイトリスト方式のソフトウエア制御技術、不正侵入に対する検知技術やハードウエアレベルで一方向の通信しかできない様に工夫された特殊なファイアウォールである一方向ゲートウェイ（GW）などが必要である。

コンシューマー向け IoT に対して開発されたセキュリティー技術の流用も考えられるが、完全性や機密性より可用性が求められる分野であることから、高信頼性を確立した上で導入する必要がある。

特に、電力・ガス・水道・化学・石油などといった重要インフラ分野においては、今後の深刻なリスクに備えて、評価認証制度を国内事業者および国産製品に普及させるとともに､分野ごとに固有の要件をまとめていくことが必要である。業界や事業者が主体となり、真に有効となる基準の策定や選定など、その検証を進めていく必要がある。

(3) 注目動向

IoT のセキュリティーに特化した研究が始まっている。例えば、IoT 機器に対する大量のマルウエア感染の実態を調査し、対策としてマルウエアの駆除実験を実施している。[22),23)] この研究では、攻撃観測技術として、ダークネットモニタリング（特定のホストが割り当てられていない IP アドレスを監視すること）やハニーポット（コンピューターウイルスや不正侵入を捕らえるわな）を用いて観測用ネットワークで攻撃が来るのを待つ受動的観測と、インターネット上の攻撃ホスト情報・脆弱性などを自ら探索する能動的観測の二つを組み合わせることによって、IoT 機器のマルウエア感染の実態を明らかにしている。

インターネット接続機器検索サービスとして、以前から存在する検索エンジン SHODAN や、ミシガン大学の研究者が 2015 年 10 月に開発した検索エンジン Censys が提示する検索結果は、脆弱性を有する IoT 機器が多数ネットワークに接続されたままと

なっている実態を示している。[24)]

IoT に適用可能な暗号関連技術としては、二つの対象的な次世代暗号技術の研究が進められている。一つは、リソースに限りのある IoT 機器に実装可能な軽量暗号アルゴリズム[25)]や軽量暗号プロトコルの研究であり、他方は、IoT 機器が収集した個人情報などの機微なデータを一元管理するクラウドサービスにおける情報漏えい対策として、データを暗号化したまま演算・検索を可能とする高機能暗号（検索可能暗号、秘匿検索など）の研究である。[26)]

科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」の成果として報告された、製造段階で生じる LSI の個体差を利用した IoT 機器の秘匿と認証を行うセキュリティー技術[27)]も興味深い。

IoT のセキュリティーを実現する上で、高機能暗号や高度のセキュリティーを実現するハードウエア、耐タンパー性 / 耐クローン性、ハードウエアのトロージャン対策など、ハードウエアセキュリティー技術も注目すべき分野である。

(4) 科学技術的課題

IoT のセキュリティーを実現するためには、多岐にわたるセキュリティー技術の知識が必要である。IoT の構成要素に従って、情報通信分野のセキュリティー技術と組み込み分野のセキュリティー技術を適材適所で使い分ける必要がある。また、ハードウエアセキュリティー技術とソフトウエアセキュリティー技術を組み合わせて実現可能な情報セキュリティー対策も存在する。システム全体のセキュリティーを考察するためには、これら全ての技術の知識を必要とするので、広範囲の知識を有する複数の研究者による連携・共同研究が重要になってくると考えられる。

サイバーセキュリティーの世界では、新たな脅威の出現や攻撃手法の巧妙化が予想されるため、現時点で判明している技術的課題を解決しても、今後想定していなかった新たな課題が発生することが想定される。継続的な技術開発・研究実施が必要不可欠な分野である。

(5) 政策的課題

業界や製品分野によっては、非機能でありコストを要するセキュリティー対策をどこまで実装するか基準が制定されていないため、各業界や各製品分野において、大枠のコンセンサスを形成することが課題である。業界団体が中心となり、各業界におけるセキュリティー脅威の共通認識を形成し、セキュリティー基準を制定していくことが望ましい。

さまざまな「モノ」が相互に接続するため、将来的には、業界横断的な基準が必要となることも考えられる。これらをまとめる上で、国家的な政策のもと、産官学連携や府省連携を行い、検討を進めることが期待される[28)]。重要インフラを形成するインダストリー向け IoT においては、国としての基準やガイドを制定することも必要な時代となってきている。

(6) キーワード

IoT、IoE、IIoT、脆弱性対策、脅威分析、制御システム、重要インフラ、攻撃観測技術、軽量暗号、高機能暗号、ハードウエアセキュリティー

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	軽量暗号、認証技術ならびにビッグデータ、AI と連携した検知技術の研究を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	総務省、経済産業省による IoT 推進コンソーシアムを設立し、ガイドラインを策定、公開している。
米国	基礎研究	◎	↗	製品寿命の長い IoT デバイスに対応する暗号技術やゲートウェイ、アプリケーションのフレームワークを研究するプロジェクトを発足している。
	応用研究・開発	◎	↗	CSA（Cloud Security Alliance）、OTA（Online Trust Alliance）、OWASP（The Open Web Application Security Project）がガイドラインを公開している。IoT 関連ベンダーも並行して、IoT 向けのセキュリティーソリューションを公表している。制御システムに関しては、米国政府によるセキュリティーガイドラインが公開されている。
欧州	基礎研究	○	→	IoT デバイスの研究開発に力をいれている。
	応用研究・開発	◎	↗	ENISA（The European Union Agency for Network and Information Security）によるスマートホームに対するセキュリティーの勧告文書を公開し、GSMA はサービスプロバイダー、製造業、ネットワークオペレーターなどに向けたガイドラインを公開している。また、ドイツ主導によるインダストリー 4.0 プラットフォームは実現戦略におけるセキュリティーの要求事項を公開している。
中国	基礎研究	△	→	IoT のセキュリティーに関する具体的な研究は公開されていない。
	応用研究・開発	○	→	ウイルス検知や防御技術の開発や自動車のハッキング実験を行っているが、IoT/ 制御システムに特化した製品は見当たらない。
韓国	基礎研究	△	→	IoT のセキュリティー関する具体的な研究は公開されていない。
	応用研究・開発	△	→	IoT のセキュリティー要件をまとめる動きはみえるが、国家もしくは標準化団体主導によるガイドライン策定の動きはない。また、具体的は製品も見当たらない。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA）, “IoT のセキュリティ”,
https://www.ipa.go.jp/security/iot/index.html（閲覧日 2016-12-16）
2）Gartner, “Gartner Says the Internet of Things Installed Base Will Grow to 26 Billion Units By 2020”,
https://www.gartner.com/newsroom/id/2636073（閲覧日 2016-12-16）
3）Hewlett Packard Enterprise, “Internet of things research study 2015 report”,

https://www.hpe.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/4AA5-4759ENW.pdf（閲覧日 2016-12-16）
4）IoT 推進コンソーシアム・総務省・経済産業省，“IoT セキュリティガイドライン ver 1.0”，
http://www.iotac.jp/wp-content/uploads/2016/01/03-IoT セキュリティガイドライン ver1.0 別紙 1.pdf（閲覧日 2016-12-16）
5）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC），“安全な IoT システムのためのセキュリティに関する一般的枠組”，
http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/iot_framework2016.pdf（閲覧日 2016-12-16）
6）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA），“IoT 開発におけるセキュリティ設計の手引き”，
https://www.ipa.go.jp/security/iot/iotguide.html（閲覧日 2016-12-16）
7）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA），“つながる世界の開発指針 ～安心安全な IoT の実現に向けて開発者に認識してほしい重要ポイント～”，
https://www.ipa.go.jp/sec/publish/tn16-002.html（閲覧日 2016-12-16）
8）一般社団法人 日本クラウドセキュリティアライアンス（Cloud Security Alliance（CSA）ジャパン），
https://www.cloudsecurityalliance.jp/（閲覧日 2016-12-16）
9）一般社団法人 重要生活機器連携セキュリティ協議会（Connected Consumer Device Security council: CCDS），
https://www.ccds.or.jp/（閲覧日 2016-12-16）
10）特定非営利活動法人 日本ネットワークセキュリティ協会（Japan Network Security Association: JNSA），
http://www.jnsa.org/（閲覧日 2016-12-16）
11）Federal Trade Commission（FTC），“Internet of Things – Privacy & Security in a Connected World”，
https://www.ftc.gov/system/files/documents/reports/federal-trade-commission-staff-report-november-2013-workshop-entitled-internet-things-privacy/150127iotrpt.pdf（閲覧日 2016-12-16）
12）Open Web Application Security Project（OWASP），“OWASP Internet of Things Project”，
https://www.owasp.org/index.php/OWASP_Internet_of_Things_Top_Ten_Project（閲覧日 2016-12-16）
13）Groupe Speciale Mobile Association（GSMA），“GSMA IoT Security Guidelines”，
http://www.gsma.com/connectedliving/future-iot-networks/iot-security-guidelines/（閲覧日 2016-12-16）
14）Online Trust Alliance（OTA），“Internet of Things”，
https://otalliance.org/IoT（閲覧日 2016-12-16）
15）一般社団法人 JPCERT（Japan Computer Emergency Response Team）コーディネー

ションセンター ,“制御システムセキュリティとは”,
https://www.jpcert.or.jp/ics/index.html（閲覧日 2016-12-16）
16）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA),“制御システムのセキュリティ”,
https://www.ipa.go.jp/security/controlsystem/index.html
（閲覧日 2016-12-16）
17）ISA Security Compliance Institute（ISCI), industrial control systems cybersecurity certification program ISASecure,
http://www.isasecure.org/（閲覧日 2016-12-16）
18）技術研究組合 制御システムセキュリティセンター（Control System Security Center: CSSC),
http://www.css-center.or.jp/ja/info/presentation.html
（閲覧日 2016-12-16）
19）一般財団法人 日本情報経済社会推進協会（Japan Information Processing Development Corporation: JIPDEC),
https://www.jipdec.or.jp/（閲覧日 2016-12-16）
20）National Institute of Standards and Technology（NIST),“NIST Special Publication 800-82 Revision 2,Guide to Industry Control System（ICS）Security”,
http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r2（閲覧日 2016-12-16）
21）Industrial Internet Consortium（IIC),“Industrial Internet of Things Volume G4: Security Framework”,
https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_PUB_G4_V1.00_PB.pdf
（閲覧日 2016-12-16）
22）横浜国立大学 情報・物理セキュリティ研究拠点 ,“研究成果 IoTPOT - Analysing the Rise of IoT Compromises”,
http://ipsr.ynu.ac.jp/iot/index.html（閲覧日 2016-12-16）
23）吉岡 克成 ,“止まらない IoT マルウェア大流行とその対策に向けて”,IoT Security Forum 2016
24）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA),“IPA テクニカルウォッチ「増加するインターネット接続機器の不適切な情報公開とその対策」改訂第二版”,
https://www.ipa.go.jp/security/technicalwatch/20160531.html
（閲覧日 2016-12-16）
25）Cryptography Research and Evaluation Committees（CRYPTREC),“CRYPTREC Report 2015 暗号技術評価委員会報告”,
https://www.cryptrec.go.jp/report/c15_eval_web.pdf（閲覧日 2016-12-16）
26）花岡 悟一郎 ,“IoT の高度化利活用を促す次世代高機能暗号技術”, IoT Security Forum 2016
27）三菱電機・立命館大学・JST プレスリリース ,“LSI の個体差から指紋のような固有 ID を生成し、組み込み機器の安心・安全に貢献「IoT 時代に向けたセキュリティー技術」を開発”,
http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150205/（閲覧日 2016-12-16）

28）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）サイバーセキュリティ戦略本部 ,“サイバーセキュリティ 2016”
http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/cs2016.pdf（閲覧日 2016-12-16）

3.5.2　サイバー攻撃の検知・防御

（1）研究開発領域の簡潔な説明

本領域の研究開発は、サイバー攻撃を迅速に検知し、有効な防御を行うための次世代技術の確立を目的としている。本分野の研究開発は、実際のオペレーションと強く結びついており、技術の発展により精度の高い分析や対策をより迅速に実現していくことが求められている。なお、本分野の研究開発は各国の政策にも強く結びついており、サイバー犯罪やサイバーテロリズム対策のための研究開発に対しファンディングが積極的になされる可能性が高い点にも留意されたい。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

インターネットの進歩・発展の陰で、インターネットを経由したサイバー攻撃も日々高度化を続けており、重大な社会問題となっている。サイバー攻撃に対抗すべく、サイバー攻撃の観測技術、分析技術、防御技術の研究開発への投資が世界各国で進められている。サイバーセキュリティーの重要性は政策レベルでも強く認識され、それに基づき研究開発の方向性やファンディングの方向性が決められることも多いため、政策面での動向も把握しておくことが重要である。

日本では近年、多数のサイバーセキュリティー関連の法整備が進められている。これは世界的なトレンドであるが、日本では 2014 年 11 月に制定したサイバーセキュリティ基本法からの流れに着目したい。本基本法では、第十九条および第二十条に当該分野における研究開発の重要性がうたわれている。また、本基本法を受けて、内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）は サイバーセキュリティー戦略を策定した。その 2016 年の年次計画である「サイバーセキュリティ 2016」[1] には、2016 年度に政府が実施する具体的な取り組みが記載されている。イノベーションの観点からは、第 5 期科学技術基本計画が策定され、2016 年度より本計画に沿った科学技術政策が実施されている。このように、日本ではサイバーセキュリティーの研究開発の重要性が強く認識されてきている。

日本の政府の情報セキュリティーに関する予算も増加傾向にある。サイバーセキュリティ基本法施行後の初の予算編成であった今回は、サイバーセキュリティーに対する姿勢が現れている[2]。ここで、情報セキュリティ政策会議が発行した「情報セキュリティ研究開発戦略（改定版）」[3] を見ると、日本の政府の情報セキュリティー研究開発予算は当初予算ベースでは減少基調にあるようにも読めるが、情報セキュリティーに関わる予算という視点で予算を見ると、着実に増加傾向にある。サイバーセキュリティー分野は実践的な研究開発が多い実態を考えると、サイバーセキュリティーの研究開発プロジェクトへの予算は増加傾向にあると捉えることができる。実際、実践的な研究開発、人材育成、そして実践演習などについては、研究開発という予算の外側の情報セキュリティーに関する予算として、ファンディングがなされるケースも多い。

一方、日本の今後の政策や研究開発への投資動向は、海外の状況に大きく影響されるため、海外の状況も把握しておかなければならない。特に、サイバーセキュリティー分野の研究開発をリードしている米国の動向は重要である。米国の 2017 年大統領予算教書[4] によると、研究開発全体に関する年間予算は約 1520 億ドルであり、これは、2015 年の

1350 億ドル、2016 年の 1460 億ドルに続き、増額されている。オバマ政権は、当初から研究開発への投資を優先する姿勢を打ち出しており、この基本姿勢は 2017 年に向けて揺らいでいない。また、同教書では、サイバーセキュリティーの重要性も強調されている。米国では、今後数十年に直面する課題への対応として、「イノベーション」、「機会創造」、「国家安全保障」という 3 本の柱を掲げているが、この国家安全保障の部分ではサイバーセキュリティーの重要性が強調されており、「サイバーセキュリティ国家行動計画」などへの予算計上が明示される他、対処すべき課題にサイバーセキュリティー関連事案が複数明示されるなど、本分野への重点投資が進められている。

(3) 注目動向

前述のサイバーセキュリティーに関する政策や戦略を知ることで、今後の研究開発への国の投資方針も見えてくる。これらの政策や戦略の中で特筆すべきことの一つに、「人材育成」の重要性があげられる。全世界的に、サイバーセキュリティー人材の重要性とその不足に関する認識が共有されており、それに対応すべく、人材育成に注力することがうたわれている。

日本においても、NISC では新・情報セキュリティ人材育成プログラム[5]（2014 年 5 月策定）、サイバーセキュリティ人材育成総合強化方針[6]（2016 年 3 月策定）に基づき、産学官の連携体制を基本とした施策を展開しており、2016 年度内に次期人材育成プログラムの策定が予定されている。文部科学省でも情報技術を活用して社会の具体的な課題を解決できる人材を育成すべく、複数の大学と産業界による全国的なネットワークを形成し、実際の課題に基づく課題解決型学習等の実践的な教育を実施・普及する enPiT（Education Network for Practical Information Technologies）を展開している[7]。その他、国立研究開発法人 情報通信研究機構（NICT）でも人材育成に本格的に着手している。従来、NICT が保持している演習基盤を活用し、実践的なサイバー防御演習（CYDER）が実施されてきたが、今後は NICT 自身が持つサイバーセキュリティーに関する技術的知見や研究成果等を活かし、NICT 自身が主体的に実践的な演習および関連する教育コンテンツの制作等を実施することとし、NICT の業務に当該演習に係る業務を追加するための法整備を行っている。

政策面ではなくイベント面に着目すると、2020 年開催の東京オリンピックは意識しておきたい。東京オリンピック開催に向けて、情報セキュリティーの確保が最重要課題の一つとなっており、国内企業複数社がセキュリティー事業の強化を表明している。政府としても本腰を入れた対応をしており、サイバーセキュリティー戦略の中でも、「オリンピック・パラリンピック CSIRT（シーサート：Computer Security Incident Response Team）の設置」を明記している。そして、2016 年の伊勢志摩サミットおよび 2019 年の我が国で開催されるラグビーワールドカップにおける取組を踏まえて対応を進めていくこととしている。

一方、ファンディング動向としては、FP7（第 7 次研究枠組み計画）、そしてそれに続く Horizon 2020[8] に着目したい。欧州では EU の FP7 の後継として、2014 年 1 月より Horizon 2020 が開始されており、2014 ～ 2020 年までの 7 年間の研究開発の方向性を示

すとともに約 770 億ユーロの予算が計上されている。Horizon 2020 ではプログラムセクション「Societal Challenges」の中で七つの社会的課題を抽出しており、その中に「Secure societies - Protecting freedom and security of Europe and its citizens」としてセキュリティー関連の課題が挙げられている。この課題の研究予算は、全体予算の 2.2% にあたる約 17 億ユーロを占めている [9)]。

この Horizon 2020 の中でサイバーセキュリティーに関してどのような取り組みをしていくべきかを理解することが重要であるが、その参考になるのが FP7 で実施された三つのサイバーセキュリティーロードマップ策定プロジェクトである。FP7 の枠組みの中では、サイバーテロリズムおよびサイバー犯罪に対抗するために必要な研究開発のロードマップを検討するプロジェクトが三つ存在している。具体的には、CyberROAD[10)]、CAMINO[11)]、そして COuRAGE[12)] である。それぞれその検討のアプローチは異なるものの、検討結果として抽出された重点研究課題には大きな齟齬はなく、今後のサイバーセキュリティー研究開発の方向性を理解する大きな手掛かりとなる。

（4）科学技術的課題

サイバーセキュリティー向上に向けた科学技術的課題のうち、近年特に重要視されているものを以下に紹介する。サイバーセキュリティーは喫緊の課題であるため、概して実践的な研究開発につながる研究課題が重要視される様相を呈している。

- 標的型攻撃対策技術：標的型攻撃は特定組織をターゲットとした長期にわたる執拗な攻撃である。典型的な標的型攻撃では周到に準備された電子メールに添付されたマルウエアによって組織内に侵入する。標的型攻撃では従来型の境界防御技術（入口対策、出口対策）が有効に働かないケースも多い。そのため、組織内部の観測・分析・検知技術（内部対策）の確立が重要となる。また、組織内のログ管理技術や、インシデント発生後のフォレンジック（ネットワークやコンピューターの記録を収集・分析する）技術の高度化も必要となる。
- ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃対策技術：Web を介した攻撃であるドライブ・バイ・ダウンロード（DBD）攻撃は、ハニーポット等の受動的観測では捉えられない攻撃である。DBD 攻撃に加担する悪性サイトを Web クローリングで検知する取り組みもあるが、クローリングのシード選択の問題や、数時間で生滅する悪性サイトを捉えられないなど課題が多い。DBD 攻撃対策技術として、ユーザーの Web ブラウザーや組織の Web プロキシー（Web の中継サーバー）等を観測点として取り込んだ大規模観測・分析技術の確立が必要となる。
- DDoS 攻撃対策技術：特定のサーバーに通信を集中させ、外部からのアクセスを不能にする DDoS 攻撃は、サービス提供者や通信事業者にとって依然重要な課題である。2013 年初頭から DDoS ツールやボットネット（乗っ取った攻撃用サーバーの集まり）を利用した従来型の DDoS 攻撃に加え、DNS（Domain Name System）や NTP（Network Time Protocol）等による通信の増幅を悪用したリフレクタ攻撃が台頭しており、対策を一層困難にしている。DDoS 攻撃対策技術として、リフレクタ攻撃観測用ハニーポット技術、大規模ネットワーク観測技術、さらにそれらと被害サーバー側の

DDoS 攻撃観測情報を用いた DDoS 攻撃の予測・早期検知・早期対策技術の確立が求められている。

・マルウエア分析・解析技術：膨大な亜種マルウエアや解析回避機能を有するマルウエアの出現により、シグネチャベースのマルウエア検知手法（マルウエアに特有のパターンに基づく検知手法）の効果が低下している。マルウエア対策技術として、サンドボックス解析技術（保護された領域で動作を解析する技術）の高度化や、カーネルモードで動作するマルウエア解析技術、マルウエアの長期動的解析技術、マルウエアの解析回避機能への対策技術の確立が必要である。

・大規模感染型マルウエア対策技術：大規模感染型マルウエア（ワーム等）はインターネット上で依然猛威を振るっている。大規模感染型マルウエア対策技術として、大規模ネットワーク観測・分析の高度化と、その観測結果を活用した対策技術の開発が求められている。また P2P（Peer to Peer）型の通信を行うマルウエアも多く存在しており、P2P 型マルウエアの観測・分析技術も重要である。

・サイバー攻撃可視化技術：サイバー攻撃は元来不可視であるが故に検知や防御が難しく、また対策の重要性を組織のトップマネジメントが正しく理解することを阻んでいる。サイバー攻撃可視化技術はセキュリティーオペレーションの迅速化・効率化や、トップマネジメント層を含めたセキュリティーアウエアネスの向上を図る上で重要となっている。

・サイバー攻撃情報共有技術：サイバー攻撃は容易に国境をまたいで行われるため、サイバー攻撃対策には国際的な情報共有が有効であるが、多くの場合、人手による情報共有が主流となっており、また機微な情報の共有は困難となっている。サイバー攻撃情報共有技術として、共通のデータフォーマットやインターフェースを定義することは非常に重要であり、そのための国際標準化活動も行われてきている。同時に、サイバー攻撃に関連した情報のグローバルなリポジトリの構築、機微情報のサニタイズ技術、高速な検索技術、異なる攻撃キャンペーン間の相関分析技術等の確立が重要となっている。

・脆弱性の自動管理技術：脆弱性の存在は、インシデント発生の主要因となる。そのため脆弱性の存在を監視し、必要な対策を必要な時に実施することが重要であるが、人的リソースの制約から対応が困難なケースが多数存在する。そのため、脆弱性の検知・対応を自動化する技術の研究開発が望まれている。既に、IT 資産リストと脆弱性情報レポジトリ内情報の更新を監視することで脆弱性を検知する技術や、SDN（Software Defined Network）を用いて脆弱性検知後の対応を自動化する技術などが検討されている。また、脆弱性の自動管理のみならず、各種のセキュリティーオペレーションの自動化に関する研究開発も強く求められている。

・モバイルデバイスのセキュリティー管理技術：モバイルデバイスへのサイバー攻撃の可能性は昔から指摘されてきていたが、近年、Android や iOS などを対象としたランサムウエアなどのマルウエアの脅威が増大してきている。モバイルデバイスへの人々の依存度は増加してきており、また、モバイルデバイスの数は膨大であるため、マルウエアの大規模感染などによるパンデミックが起きた際の被害は甚大である。そのため、モバイルデバイスのセキュリティーを評価・可視化するなどの技術の研究開発が必要である。

・IoT 向けセキュリティー技術：数年前より、Windows 端末だけではなく、Linux 組み

込み機器であるブロードバンドルータやWebカメラなどをはじめとするIoT機器がマルウエア感染する事例が多く見られている。IoT機器は、リソースの制約があるものや、常日頃から管理者による適切な管理を受けることが難しいものなども存在し、従来のセキュリティー技術をそのまま活用することが困難なケースが多数存在する。そのため、各種IoT機器のセキュリティーを担保するための研究開発が望まれている。また、IoT機器やモバイル機器に感染するマルウエアを想定した新しいハニーポット技術の確立、および収集したマルウエアの分析技術も課題となっている。

(5) 政策的課題

サイバーセキュリティーは「データオリエンテッド」な研究分野であり、研究の成否は、いかに大規模な“実データ”を定常的に収集できるかにかかっていると言っても過言ではない。実データを定常的に収集するためには、収集技術の開発のみならず、システムの安定稼働や長期運用体制の構築、関係組織（例えば大学の場合は学内情報センター）との折衝等々、人的コストの非常に高い作業を継続的に行う必要があり、有用なデータの収集が始まるまでに数年単位の時間を費やす事も珍しくない。しかしながら、公的な競争的資金は数年程度の年限で設定されており、大規模なデータ収集基盤の構築に多くの時間を割くことが難しく、そのためオリジナルな“実データ”を用いた研究環境を構築できている国内大学は数えるほどしか存在しない。また、公的な競争的資金では研究の新規性やデマケーション（他の研究との差別化）が重視されるため、既に構築したデータ収集基盤の長期運用という重要な項目に予算計上することが難しい。

また、サイバーセキュリティーは実践的な研究分野であり、常に実用化を目指した研究開発が重要である。米国の例をみると、ミシガン大学の研究グループが設立したArbor Networks社（DDoS対策製品でトップシェア）や、カリフォルニア大学サンタバーバラ校等の研究グループが設立したLastline社（標的型攻撃対策製品で成長株）など、大学の学術研究が実用化に直結している。さらに、それら企業の製品が集めた実データを学術研究にフィードバックすることで、新たな研究を生み出しており、実データを中心とした研究のライフサイクルが確立している。一方、サイバーセキュリティー分野において国内大学の研究成果が実際の製品やサービスに結びついた例はほぼ皆無であり、産業界と学術界の間で大きなギャップが存在している。

さらに、日本の公的な研究資金ではデマケーションが重要視されるため、類似の研究課題に関して複数の研究グループが研究資金を獲得して同時並行的に研究開発を進めることは、ほぼ起こり得ない（そして、研究資金獲得後は競争が発生しない）。米国では、複数の省庁がサイバーセキュリティーに関する研究予算を計上しており、その全体調整はNITRD（The Networking and Information Technology Research and Development）が受け持つものの、省庁間のデマケーションを行うのではなく、ある程度の重複は許容しつつ、年度ごとの評価を厳正に行い、高い研究成果を上げている研究グループが生き残る仕組み（つまり資金獲得後の競争の仕組み）を構築している。そのために、研究資金提供側の組織も各分野の専門家を擁しており、技術的な評価を行える体制を敷いている。

(6) キーワード

サイバーセキュリティー、サイバー攻撃、標的型攻撃、ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃、DDoS 攻撃、マルウエア、サイバー攻撃可視化、サイバー攻撃情報共有、脆弱性対策、モバイルセキュリティー、IoT セキュリティー

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・国内シンポジウム等でのサイバーセキュリティーやマルウエア解析に関する発表件数は大学、企業とも増加傾向。一方、著名な国際会議での発表件数については、暗号系分野においては以前から Crypto, Eurocrypt, Asiacrypt などにおいて一定の存在感を維持。サイバーセキュリティー分野では従来は存在感に乏しかったものの、近年、RAID 2013/2015/2016 や ACM CCS 2015 に採録されるなど、国際的な成果も伸びつつある。 ・日欧連携が積極的に行われている。例えば、総務省戦略的国際連携型研究開発推進事業と FP7 との日欧 ICT 協調課題である「サイバー脅威に対する回復性強化のためのサイバーセキュリティ」（NECOMA プロジェクト）は終了したものの、本コミュニティを中心に、日欧の研究機関が集結して国際共同研究を行っている。
	応用研究・開発	○	→	・総務省が主導する「国際連携によるサイバー攻撃予知・即応プロジェクト」（PRACTICE, 2015 年度末まで）や、「官民連携による国民のマルウエア対策支援プロジェクト」（ACTIVE）、「実践的サイバー防御演習」（CYDER）の中で、実践的な応用研究が進められている。 ・情報通信研究機構は日本最大規模のサイバー攻撃観測・分析・対策システム NICTER を中心とした研究開発を推進しており、特にそのリアルタイム分析・可視化技術は世界をリードしている。
米国	基礎研究	◎	→	・米国の大学・公的研究機関による基礎研究レベルは非常に高く、著名な国際会議でのプレゼンスも高い。 ・NSF、DoD、DHS 等からの豊富な研究資金に基づく大小のプロジェクトが継続的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	・大学での研究が実用を目指した応用研究であるものが多く、ミシガン大学発祥の Arbor Networks や、カリフォルニア大学サンタバーバラ校発祥の Lastline 社等、起業につながっている例も多い。 ・情報共有のフォーマットを規格化する動きが活発化しており、特に STIX や TAXII と呼ばれる脅威情報の交換のための規格は DHS から OASIS（Organization for the Advancement of Structured Information Standards, 構造化情報標準促進協会）へ移管して検討が進められている。
欧州	基礎研究	○	→	・ウィーン工科大学（オーストリア）や Eurecom Institute（フランス）等、マルウエア解析技術やサイバー攻撃観測技術等で高い研究成果実績有。 ・一方で、優秀な研究者が米国等の研究機関に移籍する事例も多く、研究人材の確保は容易ではないようにうかがえる。
	応用研究・開発	○	↗	・FP7 の後継の Horizon 2020 で、セキュリティーは七つの社会的課題の一つにあげられており、応用研究はさらに進むものと思われる。 ・EC は 14 カ国 28 組織（ISP、CERT、Law Enforcement、IT プロバイダー、学術ネットワーク、学術機関、重要インフラ事業者）で構成される ACDC（Advanced Cyber Defense Center）を設立。応用研究から実運用まで情報共有が進んでいる。

中国	基礎研究	△	↗	・中国国内トップクラスの大学の学生が米国等に留学し、研究成果を上げているが、中国国内の大学における研究成果が著名な国際会議に採録されるまでには至っていない。
	応用研究・開発	△	↗	・これまで国際的に注目される大規模研究プロジェクトは公表されているレベルでは見られない。 ・サイバーセキュリティー分野における国際標準化活動に徐々に注力。例えば IETF では Alibaba や Huawei のエンジニア、もしくは雇用した欧米のコンサルタントなどが chair の役職を務めたり、規格を提案してくるようになってきている。同様の傾向は ITU-T やその他の標準化団体でも見られる。
韓国	基礎研究	○	↗	・KAIST や POSTECH 等トップクラスの大学の研究成果が ACM CCS や NDSS 等の著名な国際会議に採録される等、基礎研究の国際的な評価は上がりつつある。
	応用研究・開発	○	→	・国家的なセキュリティーインシデントを多数経験しており、政府主導のセキュリティー対策を実践。 ・KISA、ETRI、KISTI といった公的機関が、サイバーセキュリティー技術の研究開発や、モニタリング、インシデント対応を行っており、特に政府機関に導入されているセキュリティー機器は 100% 国産と言われている。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）サイバーセキュリティ戦略本部 ,“サイバーセキュリティ 2016（案）”,
http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/cyber-security2016.pdf（閲覧日 2016-12-16）
2）井出 一仁 ,“政府予算はサイバーセキュリティ分野が急伸”,
http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/watcher/14/334361/011400462/（閲覧日 2016-12-16）
3）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）情報セキュリティ政策会議 ,“情報セキュリティ研究開発戦略（改定版）,”
http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/kenkyu2014.pdf（閲覧日 2016-12-16）
4）Barack Obama, “The Budget Message of the President,”
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2017/assets/message.pdf（閲覧日 2017-3-1）
5）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）情報セキュリティ戦略会議 ,“新・情報セキュリティ人材育成プログラム ,”
http://www.nisc.go.jp/active/kihon/pdf/jinzai2014.pdf（閲覧日 2016-12-16）
6）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）サイバーセキュリティ戦略本部 ,“サイバーセキュリティ人材育成総合強化方針 ,”
http://www.nisc.go.jp/conference/cs/jinzai/dai03/pdf/ 03sankoushiryou01.pdf（閲覧日 2016-12-16）
7）文部科学省 ,“情報技術人材育成のための実践教育ネットワーク形成事業”,

http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/kaikaku/itjinzai/index.htm（閲覧日 2016-12-16）
8）European Commission, “Horizon 2020,”
http://ec.europa.eu/programmes/ horizon2020/（閲覧日 2016-12-16）
9）European Commission, “Factsheet: Horizon 2020 budget,”
http://ec.europa.eu/research/horizon2020/pdf/press/fact_sheet_on_horizon2020_budget.pdf（閲覧日 2016-12-16）
10）CyberROAD（Development of the CYBER crime and CYBER terrorism research ROAD map）
http://www.cyberroad-project.eu/（閲覧日 2016-12-16）
11）CAMINO（Comprehensive Approach to cyber roadMap coordINation and develOpment）
http://www.fp7-camino.eu/（閲覧日 2016-12-16）
12）COuRAGE（Cybercrime and cyberterrOrism（E）Uropean Research AGEnda）
https://www.courage-project.eu/（閲覧日 2016-12-16）

3.5.3　認証・ID 連携

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ユーザーが安全かつ簡便に、さまざまなサービスを利用するためには、確実な認証を行う必要がある。限られた利用環境における認証だけでなく、さまざまな情報デバイスを利用し、さまざまな地点・時間においても確実な認証を行う柔軟で強固な認証技術が必要である。一方、クラウドコンピューティングを含むインターネット環境においては、サービスを提供するサイト間での情報連携を確実に行う必要がある。そのためには、複数サイト間での認証と、認証の対象となるユーザーが持つ属性情報の集合体（ID: アイデンティティー）を連携（フェデレーション）して利用するためのフレームワークであるアイデンティティー連携（ID 連携）が必須である。また連携した際、認証されたユーザーが利用可能となる範囲、例えば利用可能時間帯や利用可能アプリケーションを厳格に認可することが必要である。本領域では、このような多様な利用環境とサービス連携への対応に必要となる認証・ID 連携のアーキテクチャーの研究開発を行う。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

PC だけでなく、スマートフォンやウエアラブル・デバイス等のさまざまなデバイスをユーザーが利用する環境が進化する一方、インターネット上での単独運用によるサービス提供サイトだけでなく、複数のクラウドコンピューティング環境上で、さまざまな情報を連携したサービスが増加している。連携されるさまざまな情報の中には、漏えいしてはならない機微な属性情報も数多くあり、サービスを利用しようとするユーザーを確実に特定することが必要である。すなわち、さまざまなデバイスに対応した高度な認証技術が必要である。また、認証技術の範囲は、人やモノの特定と確認だけではない。人の場合、本人の存在性の確認に加えて、本人に対する権限付与も必要である。例えば、「社員として認められる（本人の存在性確認）が、一般社員なので機密情報にはアクセスできない（権限付与）」といった認証プロセスが必要である。一般に、存在確認のための行為を狭義の「認証」（Authentication）と呼び、権限付与行為を「認可」（Authorization）と呼ぶ。認証と認可は、本人が保有するさまざまな属性情報（Attribute）すなわちアイデンティティーによって決定される。

一方サービスにおいては、インターネット上の単一のサイトのみによって提供されるのではなく、直接サービスを提供するサイト以外で認証を行うような複数のサイト間における認証連携が増加する。そのために、サービスを提供するにあたっても複数のサイトに散在する属性情報を流通させる技術が必要となっている。ID 連携技術は複数サイト間で認証情報を連携させ、属性情報を流通させるために必要な技術である。

［認証技術の世界的動向］

世界各国で頻発するサイバー攻撃や ID 窃盗等に対処するため、さまざまな認証方式が研究開発されている。インターネット上で提供されるサービスにおいては、ユーザー ID とパスワードの単純な組み合わせによる認証方式から、ハードウエアトークンを用いた認証方式、複数の要素を組み合わせた多要素認証、過去の利用環境等との差分を分析するリ

スクベース認証等、さまざまな認証方式が研究開発されている。

IC カードを利用した認証は全世界的に非常に幅広く適用されている。接触型だけでなく NFC のような非接触型も適用が進んでいる。

スマートフォンを中心としたモバイルデバイスでは、内蔵のカメラや音声を利用した認証方式が研究・開発されている。指紋認証は、iOS のようなスマートフォン OS では、標準認証方式としても実装されている。また、NFC を内蔵したスマートフォンも多く出荷され、一部では IC カードの代替としても利用が広がっている。

一方、大量の情報を処理可能なコンピューティング環境が整備され、従来では不可能であった機械学習や AI と呼ばれる技術分野、グラフ理論を適用した技術分野、ブロックチェーンを利用した技術分野等の新しい技術研究を認証と組み合わせる最先端の研究開発が進んでいる。

［ID 連携技術の世界的動向］

複数のサイトを連携しサービスを提供するために ID を連携し、一度のサイトへのログインで複数のサイトが利用可能になるシングルサインオン（Single Sign On：SSO）の技術が開発され、ブラウザーベースの SSO だけでなく、スマートフォン等のデバイスや、ブラウザーを利用しない方式も開発・実装されている。SOAP（Simple Object Access Protocol）を利用し XML で記述されたセキュリティー情報を複数サイト間で交換する SAML（Security Assertion Markup Language）の技術 [1] は、SSO 機能を実装することが可能であり、2000 年代前半に標準化団体 OASIS（Organization for the Advancement of Structured Information Standards）で開発された。現在は高い信頼性を必要とする企業間 ID 連携やクラウド間 ID 連携において、多くのクラウドベンダーが SAML をサポートしている。また、REST（Representative State Transfer）ベースのプロトコルを利用した実現技術としては、2000 年代後半に登場した OpenID[2] や OAuth[3] を利用した方法、さらには OAuth をベースに発展させた OpenID Connect はここ数年で研究・開発され、コンシューマー向けサービスやソーシャルアプリケーションを中心に、クラウド上でも実装されている。

また、ID 連携を発展させ、複数のサイトに散在するユーザーの属性情報を流通する技術も研究・開発され、サービスへの実装も行われている。

［認可技術の世界的動向］

サービスを提供するにあたって、必要な情報を構成する複数のサイト間で認可情報をやりとりする技術は、2000 年代の早いうちに標準化が図られ、SOAP プロトコル上に XACML（eXtensible Access Control Markup Language）[4] として仕様が策定され今日でも引き続き拡張が行われている。一方、ネットサービスが広がるにつれ、REST 方式で認可情報のやり取りが必要になり、策定された技術仕様が OAuth である。OAuth の仕様を組み合わせることによって、認証を行うことも可能となっている。 認可を与えるには認証を受けたユーザーに関連した属性値を利用して判断する。

(3) 注目動向

［FIDO（Fast Identity Online）］[5)]

認証デバイス間での相互運用性や、パスワード管理の煩わしさを排除すべく、パスワード認証に代わる新たな認証方法の開発に取り組む組織として、2012 年 7 月に設立された非営利団体。UAF（Universal Authentication Framework）、U2F（Universal 2nd Factor）の 2 種類のプロトコルが開発されている。

［トラストフレームワーク］[6)]

異なる組織間での ID 情報の交換は、個人情報の悪用や漏えいのリスクがある。そこでポリシーやルールを明確にした上で、信頼できる組織を認定し、それらを連携させることによって、企業ごとのユーザーの登録・認証を別々に行うことなく、アイデンティティー情報を異なる組織や機関間で交換することを可能にする。

［マイナンバー］[7)]

わが国において、社会保障と税の一体改革を実現する手段として、国民に唯一無二の個人番号を付与し、行政手続きの効率化を行う。さらに将来の民間との連携等を視野に入れた制度である。個人番号を利用するために、耐タンパー性の高い IC カードの配布が予定されている。将来的には IC カードのみならず、スマートフォン内臓の NFC（Near Field Communication）による認証手段や、トラストフレームワークによる民間等他の認証フレームワークとの相互接続も課題としている。

［学術認証フェデレーション］[8)]

我が国において、学術 e- リソースを利用する大学、学術 e- リソースを提供する機関・出版社等から構成された連合体。米国で開発された Shibboleth をベースに連携ネットワークの構築・運用を行う他、ID 連携に関する技術の研究・開発を行い、国際学会での発表も活発である。

［クラウドコンピューティング］

さまざまなサービスがクラウドベースで提供され始めている中で、クラウド間やオンプレミスの企業との ID 連携が必要である。また、認証・認可・属性管理等のサービスを提供するクラウドである IDaaS（IDentity as a Service）も広がり、日本でも提供する企業がでてきている[9)]。

［機械学習・AI］

以前より認証分野では特徴量計算による認証技術の研究開発が行われてきた。最近では廉価で汎用的なデバイスを利用した音声認識、画像認識によって特徴量計算が身近なものになっている。大量の情報を用いて複数のアルゴリズムにより、高速で正確な特徴量計算を行う機械学習の研究開発が進んでおり、例えばリスクベース認証には機械学習の研究開発結果が反映されている。代表的なアルゴリズムとして SVM（Support Vector Machine）があり海外では 2000 年代初頭から研究が行われている[10)]。

［グラフ技術］

1999 年に W3C が Semantic Web の標準化技術として RDF（Resource Description Framework）の策定を行った。テキストだけでなく画像等さまざまなリソースのメタ情報を記述することが可能となっただけでなく、リソース間の関係性も網羅、つまりグラフ表現できるようになった。一方、グーグルの創業者らが研究開発した Page Rank や、Facebook が提供する Graph API は人やモノの属性情報を持つノードとノード間の関係を示すエッジで構成されるグラフ表現（RDF と対比しこれらをプロパティグラフと呼ぶ）である。「平均 6 人『知人の知人』を介していけば全ての人とつながることができる」という「6 次の隔たり」もグラフで表現することができる。RDF やプロパティグラフは機械学習と密接に関わることもあり、グラフ技術を取り入れ認証技術が発展することが期待される。

［ブロックチェーン］

ビットコインで一躍有名になったブロックチェーンであるが、その適用範囲はさまざまな分野で研究されている。複数のノード間のトランザクションの正当性に注目し、認証への適用も考案されている [11]。一部では実際に特許を取得し先行者利益を得ようとする動きもある [12]。

（4）科学技術的課題

認証技術は、モバイルデバイスの進化による技術的進展がさらに期待できる。特に日本では、静脈認証や顔認証といった生体認証は実用化されており、より高精度な認証を行うべく技術の深みの追求をすべきであろう。また、スマートフォン内蔵のカメラを利用した虹彩による認証技術の研究等も行われており、モバイルデバイスを利用した認証技術は、国際的にも先を走り続けることが期待される。

一方、ID 連携技術の場合、技術的目標は「他のサービスと連携できること」であり、独自技術仕様を提供できる企業や機関は「他を凌駕した当該サービス市場において占有率（シェア）を持つこと」にある。しかし最近では、Facebook や Twitter 等でも、ID 標準技術をベースに拡張する傾向にあり、全く新しい技術をゼロから基礎研究して開発を行っていない。従って、ID 連携技術の場合は、短期においては、応用研究・開発に重点を置く方向にある。

機械学習・AI、グラフ技術、ブロックチェーンの分野は、日本の取り組みは十分とはいえない。より高度な認証技術を研究開発する場合、これらの技術に対する取り組みは必須であると考えるが、セキュリティー分野とこれら機械学習等の分野の両方の技術を持ち合わせている研究者や技術者は日本には非常に少ないと思われる。その中で、例えばブロックチェーン技術を認証に組み入れる取り組みが日本でもいくつかでてきている [13),14)]。セキュリティー分野は最近では学際的な分野として取り扱われる機会が増えて来たと思われるが、最新の機械学習やグラフ技術は、数学や統計学に対する理解力と応用力が必須であり、国際的な技術力向上のためにはその対策を講ずることは避けて通れないと思われる。

(5) 政策的課題

機械学習やグラフ技術を取り入れた認証技術を小さな実証を重ねて研究することは、クラウドや OSS、企業が提供する実験環境等を利用することによって可能であるが、実用化には本格的な実証が不可避であり、それには多量な実験データが必要である。しかし、昨今のプライバシー / 個人情報保護が叫ばれる中、実験に必要な大量のデータを入手しにくくなっている。一方、ブロックチェーンの場合、ビジネスによる利益期待が大きいため、十分な実証と検証を行わずに本番サービスに導入され、後のトラブルに繋がる可能性も危惧されている。社会への適用時の信頼性・安全性確保のために、十分な技術研究開発を行う必要があり、法制度的な扱いや特区のような政策的なサポートも必要と考える。

(6) キーワード

アイデンティティー、認証連携、フェデレーション、強固な認証、生体認証、プライバシー、マイナンバー、機械学習、AI、グラフ、ブロックチェーン

(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	△	→	・認証分野：生体認証では顔認証等の研究のように、世界に先んじて進んでいる分野がある。また国内外への論文投稿も活発であり研究が進んでいるとみられる。 ・機械学習、グラフ技術の技術を認証技術へ適用する研究は少ない。ブロックチェーンは幾つかの例が散見される [13]。 ・ID 連携分野：日本独自の基礎研究は進んでいない。
	応用研究・開発	△	↗	・認証分野：顔認証の実証実験等、認証精度向上・問題点克服のための研究・開発・実証が進んでいる。IPA では生体認証の導入・運用についてのガイドラインを公開している [15]。 ・機械学習、グラフ技術等の技術を認証技術へ適用する基礎研究が進んでいないため応用研究に結びつかない。ブロックチェーンは基礎研究から応用研究・開発のフェーズでの十分な実証を行われず実用試行のケースもある [14]。 ・ID 連携分野：学術認証ネットワーク（学認）による ID およびサービス連携のための応用研究・開発が進んでおり、国際学会での発表も多く行っている。学認が開発した uApprove.jp は本人同意による属性提供を実装している。 ・認証と ID 連携の広範囲の適用として期待されるものに、将来医療等を含み、広範囲の用途が考えられているマイナンバーとそれを支えるシステムがあり、さまざまな実証が行われている [16]。
米国	基礎研究	◎	↗	・認証分野：国防関連を含め生体認証の研究が進んでいる。 ・ID 連携分野：ネット企業を中心に民間での研究が進んでいてる。 ・機械学習、グラフ技術、ブロックチェーン等の技術を認証技術へ適用する多くの研究が行われている。[11]
	応用研究・開発	◎	↗	・認証分野：官民の重要施設や安全保障対策を優先として、応用研究・開発を行っている。 ・機械学習、グラフ技術、ブロックチェーン等の技術を認証技術へ適用し、応用も進みいくつかは実用化の域に達している。米国特許取得の例もある [12]。 ・ID 連携分野：ネット企業を中心に民間での応用研究が進んでいて、積極的に技術標準化のイニシアチブをとる。IETF や W3C のようなインターネット中心の規格に大きな影響力を行使している。

欧州	基礎研究	△	→	・認証分野：欧州の通信会社を中心とした研究が以前は多かったが、最近は特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない。 ・機械学習、グラフ技術、ブロックチェーン等の技術を認証技術へ適用する研究は少ない。 ・ID 連携分野：EU のプライバシー保護の動きと併せ、プライバシーと併せた関連研究が散見される。
	応用研究・開発	○	→	・認証分野：EU の eID や EU 諸国の電子政府を中心としたシステムのための認証技術に関する応用研究・開発が進んでいる[17]。 ・機械学習、グラフ技術、ブロックチェーン等の技術を認証技術へ適用する基礎研究が進んでいないため応用研究に結びつかないと思われる。 ・ID 連携分野：EU の TAS3 プロジェクトでは 2011 年までに大規模な ID 連携実証実験を行った[18]。
中国・韓国	基礎研究	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない（公開されていない）。
	応用研究・開発	△	→	・特筆すべき顕著な研究成果が見受けられない（公開されていない）。

（注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
（注２）　現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３）　トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）OASIS（Organization for the Advancement of Structured Information Standards）, “OASIS Security Services（SAML）TC”
https://www.oasis-open.org/committees/security/（閲覧日 2016-12-16）
2）OpenID Foundation, http://openid.net/developers/specs/（閲覧日 2016-12-16）
3）Dick Hardt, “The OAuth 2.0 Authorization Framework”
http://tools.ietf.org/html/rfc6749（閲覧日 2016-12-16）
4）OASIS eXtensible Access Control Markup Language（XACML）
https://www.oasis-open.org/committees/xacml/（閲覧日 2016-12-16）
5）FIDO（Fast IDentity Online）Alliance Consortium, “FIDO Alliance”
https://fidoalliance.org/（閲覧日 2016-12-16）
6）経済産業省 , “ID 連携トラストフレームワーク”
http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/id_renkei/（閲覧日 2016-12-16）
7）内閣官房 , “社会保障・税番号制度”
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/bangoseido/（閲覧日 2016-12-16）
8）学術認証フェデレーション , “学認（GakuNin）”
https://www.gakunin.jp/（閲覧日 2016-12-16）
9）山田 高 , “法人向け IDaaS「KDDI Business ID」提供開始 !”（KDDI Cloud Blog 2014.07.29 記事）
http://cloudblog.kddi.com/idaas/230/?v=block（閲覧日 2016-12-16）
10）Kenneth Jonsson, Josef Kittler, Yong Ping Li, and Jiri Matas, “Support vector machines for face authentication”, Image and Vision Computing Vol. 20, No. 5-6,

pp. 369-375（2002）.
11）David Shrier, Weige Wu, and Alex Pentland, “MIT Blockchain & Infrastructure（Identity, Data Security）Report”（MIT, 2016）.
http://cdn.resources.getsmarter.ac/wp-content/uploads/2016/05/MIT_Blockchain_Infrastructure_Report_Part_Three_May_2016.pdf（閲覧日 2016-12-16）
12）Justin Fisher, Maxwell H. Sanchez, “Authentication and verification of digital data utilizing blockchain technology”（U. S. Patent 20160283920 A1: 2016-09-29）.
http://www.freepatentsonline.com/y2016/0283920.html（閲覧日 2016-12-16）
13）東京大学大学院情報理工学系研究科附属ソーシャル ICT 研究センター , “次世代個人認証技術講座 実証実験 ～ MITHRA Project ～”
http://www.sict.i.u-tokyo.ac.jp/news/mithra/（閲覧日 2016-12-16）
14）Keychain Pte. Ltd., “分散型認証プラットフォーム Keychain”,
http://keychain.jp/one-page/index.html（閲覧日 2016-12-16）
15）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA), “生体認証導入・運用の手引き”
https://www.ipa.go.jp/files/000024404.pdf（閲覧日 2016-12-16）
16）総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会 ICT 共通基盤技術検討ワーキンググループ , “日本の医療を取り巻く状況と医療 ICT の利活用 医療健康共通基盤”（第 6 回会合資料）
http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/innovation/ict/6kai/siryo2-3.pdf（閲覧日 2016-12-16）
17）European Commission, “Trust Services and eID（electronic IDentification）”
http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/trust-services-and-eid
（閲覧日 2016-12-16）
18）Trusted Architecture for Securely Shared Services（TAS^3）Consortium, “The TAS^3 Integrated Project”
http://vds1628.sivit.org/tas3/（閲覧日 2016-12-16）

3.5.4　プライバシー情報の保護と利活用

（1）研究開発領域の簡潔な説明

プライバシーを保護したままでデータベースから共通の傾向や固有のパターン等の有益な知識を抽出する。技術を大きく分類すると、(1) 個人を識別不能にする匿名化技術、(2) プライベートなデータを暗号化したままで任意の計算を実行する秘匿計算技術、(3) プライバシー保護した上でデータマイニングを実施する技術、(4) 抽出された知識からプライベート情報が漏えいしない様に精度を落としたりノイズを加えたりする差分プライバシー技術がある。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

多くの企業が顧客の情報や購買履歴を管理して、ビジネスに活用する動きが加速している。いわゆる、ビッグデータと呼ばれる、大規模で機械的に収集される多量のデータがあらゆる分野で注目を集めている。例えば、わが国において特定機能病院を対象に導入されている、疾患と治療の記録からなる DPC (Diagnosis Procedure Combination) データセットは、700 万人の患者のデータを格納し、急性入院の約 50% を電子化している。多量で多様な電子化データに基づいて、疾病や債券市場の動向の予測、都市計画や防災対策などの従来考えられなかった新しい価値が創造されようとしている。

その一方で、ビッグデータの活用から生じるプライバシーの課題も浮き上がってきた。2013 年 7 月には、JR 東日本が交通系 IC カード Suica4300 万枚の乗降履歴を市場調査を目的として利用者の同意なく日立製作所に販売していたことが報道されて、大きな批判を浴びた。氏名や連絡先などの個人を特定する情報は除外されていたが、カードに割り当てられた ID は一月単位で保存されており、乗降駅の履歴を積み上げることで個人を識別されるリスクが残っていた。自分の情報が再識別されることを懸念した多くの利用者が利用停止を求めることとなった。2014 年 7 月には、ベネッセホールディングスが、「進研ゼミ」や「こどもちゃれんじ」などで知られる教材の受講者の氏名や生年月日などの 760 万件の個人情報を外部に流失したことを明らかにした。データベースの管理をしていた委託先の技術者がスマートフォン経由で情報を抜き出して、名簿業者に販売していた。漏えい対策のための倫理教育やマネジメントシステムを整備しても、悪意のある内部者による不正行為を防止することが困難であること、そして、漏えいした顧客情報を流通させるマーケットが存在していることが認識された事件であった。

2003 年に制定された個人情報保護法は、制定当時は存在していなかったスマートフォンや Suica の様なデバイスから個人が識別されることを想定していなかった。従来の仕組みでは個人情報ではないが、ビッグデータの普及に伴って、個人が識別されたり利用者が意図しない追跡が行われたりする可能性のある情報、いわゆる、グレーゾーンの存在が顕在化してきた。そこで、2015 年、保護法が改正され、2016 年から個人情報の監視や検査権限を有する個人情報保護委員会が発足し、2017 年から全面施行を予定している。改正された大きな項目は次の通りである [1)]。

1）　個人情報の定義の明確化
　個人識別符号（第 2 条 2 項）、要配慮個人情報（第 2 条 3 項）
2）　個人情報の有用性確保
　匿名加工情報（第 2 条 9 項）、認定個人情報保護団体による個人情報保護指針（第 53 条）
3）　個人情報の保護を強化
　個人情報データベース等提供罪（第 83 条）
4）　個人情報保護委員会の新設と権限（第 5 章）
5）　個人情報の取り扱いのグローバル化
　国境を越えた適用（第 75 条）、外国執行局への情報提供（第 24 条）
6）　オプトアウトの扱い
　届出厳格化（第 23 条 2 項）、利用目的の変更禁止（第 15 条 2 項）

問題となっていたグレーゾーンとされていた身体の特徴に関する情報や携帯電話や免許証などのデバイスの番号なども取り扱いの対象として広げる一方で、個人を再識別するリスクを低減するためのプライバシー保護技術の活用も想定している。

海外でもビッグデータの活用のための法整備は進んでいる。ビッグデータという概念を産んだ米国では、2012 年に企業が行う個人情報の収集に対して、利用者が主張できる権限をまとめた「消費者プライバシー権利章典」を公表している。企業が収集している情報の種類やその活用方法の情報は、消費者に正しく提供されるべきである。企業に追跡されることを拒否できる Do-Not-Track 原則などの権利も認められるべきことがうたわれている。欧州では、データが国境を越えて流通する時は、データの保護が十分であるかどうかを認定することを定めた EU データ保護規則（GDPR）が 2016 年に成立した。

このように、プライバシーを保護することと、ビッグデータを活用するという二つの大きな要請があり、国内外の法整備は着々と進んでいる。しかし、技術的には両者を完全に満足することはそれほど容易ではない。ビッグデータとひとくくりにするにはデータは多様であり、その粒度、頻度、アクセスの方法はさまざまである。個人を識別しようとする攻撃者にもさまざまなタイプがあり、匿名化されたデータと照合できるどんな情報を持っているかを事前に決めることはできない。例えば、クレジットカード運用会社にとって、カード番号から個人を特定することは容易であるように、照合性の容易性には一様な基準はない。さらに、単に乗車駅と利用日時を知られても気にしない利用者もいれば、ストーカーに追われている利用者にとっては深刻な情報であったりするように、プライバシーの感じ方には主観的な曖昧さが避けられない。

［これまでの取り組み］

ここでは、プライバシー保護技術を（1）匿名化技術、（2）秘匿計算技術、（3）プライバシー保護データマイニング技術、（4）差分プライバシー技術に分類して、それぞれの取り組みを示す。

1）　匿名化技術

匿名化の処理は、ISO/TS 25237（Health informatics – Pseudonymisation）の中で、

データとデータ主体（所有者）との間の相関を取り除くプロセス、と定義されている。最も簡単なものは、氏名などの情報を仮の疑似 ID と置き換える仮名化である。しかし、2001 年に Samarati が、氏名を削除しても、性別や年齢、郵便番号などの本人に関する静的な属性情報を束ねることで、本人を識別する疑似 ID（QI:Quasi Identifier）として利用できることを指摘し、集合として評価した個人識別の度合いを与える *k*- 匿名性（k-anonymity）[2] の概念を初めて提唱し、その後のさまざまなアルゴリズムの研究が行われた。Sweeney による定式化 [3] が行われ、QI の数で定義した *k*- 匿名性を発展させ、最頻度のアイテムが 1/l の確率でしか識別できないことを保証した *l*- 多様性（l-diversity）[4]、それに加えてセンシティブ属性が閾値 t より離れていることを保証した t- 近似性（t-closeness）などの研究が行われた。

匿名化の評価指標にはいくつもの定義があるが、それらを保証する匿名化の方法は一意ではない。属性を削除したり、値を一般化したりする組み合わせがあり、Yao らによりその匿名化問題は NP- 完全問題に属する困難な問題であることが証明されている [5]。従って、大規模な問題に対して誤差を最小化する匿名化を求めることは現実的ではなく、事前に閾値を用意して枝刈りを施したり、トップダウンにデータセットを分割したり、ボトムアップに分割されたデータセットを統合することで匿名性の保証を得るアルゴリズムがいくつか開発された。Incognito[6] や Anatomy[7] などが知られている。製品の開発も盛んであり、オープンソースにも、例えば University of Texas, Dallas 校の UTD Anonymization Toolbox[8] などが知られている。ここでは、前述の Incognito に加えて、Datafly, Mondrian Multidimensional k-Anonymity, l-diversity, t-closeness, Anatomy の 6 つの代表的なアルゴリズムが実装されている。

理論的な匿名化の指標やアルゴリズムの定義、それらの効率的な実装が行われ、今後はそれらをさまざまなビッグデータに適用する際に生じるさまざまな応用研究が進むとみられる。例えば、GPS などの位置情報の時系列データである、いわゆる trajectory data（移動経路データ）から個人が特定されないようにする要求は大きく、ITS の普及と相まってこれから盛んになることが予想される。Peloponnese 大学のグループは、多次元になる GPS の時系列データを匿名化する閾値ベースの研究 [9] を行い、疑似位置データを用いた実験を重ねている。Facebook などのソーシャルネットワークサービスにおけるプライバシー保護も重要な課題である。多くのサービスではアカウント作成が無料で行われるために、偽の利用者を容易に許してしまい、それらを用いた個人情報の抜き取りが深刻な脅威になっている。これらに対して、自然言語処理を用いて投稿に対して匿名化のレベルを制御したりする研究が今後盛んになるとみられる。Illinois 大学 Chicago 校（米）の Yu らのグループはグラフ理論を用いて、仲介者の数を制御することで、そういった脅威を抑制する研究 [10] を試みている。

2015 年には我が国において個人情報保護法が改正された。この改正法において、従来の個人情報に加え、匿名加工情報と呼ばれる新しい取扱いのスキームが新設されたことは注目に値する。個人情報に特定の個人を識別することができないように個人情報を加工したものを匿名加工情報と定義し、その加工方法を定めるとともに、事業者による公表などその取扱いについての規律を設けている。具体的な加工方法については、現在も検討が行われている。「特定の個人を識別することができないように個人情報を加工すること」に

は *k*- 匿名性の達成も含まれると考えられ、今後我が国における個人情報の加工方法として、*k*- 匿名化やそれに関連する匿名加工技術は実務的に重要な技術となる可能性が高い。

2） 秘匿計算技術

データを開示することなく、複数のデータの統計処理を行えれば、プライバシー漏えいの危険性が減る。これを秘密計算と言うが、秘密計算にはこれまでに大きく分けて、秘匿計算、準同型性暗号系による暗号プロトコル、秘密分散に基づく秘密計算、の三種類の実現方式が知られており、それぞれの方式には計算効率性や計算モデルの自由度の観点において、長所と短所がある。

ここでは、秘匿計算、あるいは秘匿回路計算（SFE:Secure Function Evaluation）について述べる。秘匿計算は、入力値を秘匿したままで任意の関数（回路）を評価する技術である。入力の一部を持つ複数の入力者と回路評価者との間で関数評価が行われるので、マルチパーティープロトコル（Multi Party Protocol）とも呼ばれる。1）の匿名化には、匿名性の強さに応じた再識別のリスクが残っていたのに対して、この技術では暗号化や秘密分散を用いて平文の情報を 1 ビットも漏えいさせないことを試みる。プライバシー情報を秘匿したままで、いかなる解析アルゴリズムも実行することができる理想の技術である。

後に Turing 賞受賞者となる Andrew Yao がこの理論を最初に提案したのは、まだ公開鍵暗号が提案されて間もない 1986 年のことであった [11]。しかし、任意の回路を秘匿計算できるというその自由度の代償として、ビットレベルで信号を暗号化しなくてはならず、膨大な計算コストのために実用性はなく、長い間理論研究者の興味の対象であった。この間、暗号化の代わりに秘密分散を用いるプロトコルなどの多くの理論整備が行われた。

計算機技術の発達とプライバシー保護の強い要請に押されて、ようやく実装されたのは当初の提案より 18 年後の 2004 年、イスラエルの Malkhi らによる研究グループが Usenix Security で発表した Fairplay[12] である。Fairplay は高級言語レベルで記述されたプログラムソースをゲートレベルの回路記述言語にコンパイルし、それらを 2 台の仮想マシンの間で暗号化と復号化を繰り返して回路での実行をする。基本的な算術計算と限定された条件分岐機能しかなく、例えば乗算でさえ加算の繰り返しを用いて自分で実装しなくてはならなかった。それでも、試験実装したシステムを公開しており、その後の本分野の研究を活性化する原動力となった。

Fairplay 以降も多くのシステム開発が続いている。Fairplay の 2 者を複数プレーヤー間で実行するような拡張 Fairplay-MP や、SEPIA, TASTY, VIFF などの多くの SFE 実装系が発表されている。置換ネットワークと呼ばれる専用回路のアイデアを用いて高速に秘匿積集合を計算するシステムの開発 [13] や、Virginia 大学のグループによる新しいコンパイラー（Billion-gate）は従来のメモリーの制約を取り除き、SFE の技術をより実用レベルに近づけた [14]。中でも、Tartu 大学（エストニア）の Dan Bogdanov が開発した Sharemind [15] は、秘密分散を要素技術にした汎用の SFE コンパイラであり、ソフトウエア開発キット（SDK:Software Development Kit）を提供したりライセンシングを進めたりしており注目されている。ソートや統計処理などの Sharemind ベースの研究にもつながっている。Sharemind プロジェクトのウェブ [16] からデモンストレーションを行って

いる。

国内の秘匿計算の試みとして、NTT セキュアプラットフォーム研究所の MEVAL[17] がある。MEVAL は、秘密分散型の秘匿計算の処理系であり、100 万件の加算、乗算、大小比較、ソートをそれぞれ、1.5 ミリ秒、135.1 ミリ秒、286.8 ミリ秒、6875 ミリ秒で実行できることが報告されている。2013 年のデータで、乗算は Sharemind の 10 倍高速である。

3） プライバシー保護データマイニング技術

プライバシー保護データマイニング（Privacy-Preserving Data Mining, PPDM）は利用者のプライバシーを保護してビッグデータの活用を実現する技術である。

PPDM 研究の原典は、2000 年に発表された二つの全く同名の論文である。一つは、イスラエルの Lindel と Pinkas によって暗号理論のトップカンファレンスである CRYPTO で発表された "Privacy Preserving Data Mining"[18] であり、もう一つも機械学習のやはりトップ会議の一つである ACM SIGMOD で発表された "Privacy-preserving data mining"[19] である。前者は公開鍵暗号を用いて秘匿しながら対数計算を実行し、後者はランダムなデータを入力に加えてマイニング処理を行い、ベイズの定理に基づいてノイズを除去する再構築アルゴリズムを提案している。興味深いことに、両者とも同一の情報エントロピーに基づく決定木学習アルゴリズム ID3 を秘匿しながら実行するものであった。

この二つの論文を出発点として、多くの研究が行われ、一つの分野の様に発達している。データマイニングアルゴリズムにはさまざまな種類があるので、そのそれぞれをプライバシー保護する試みが 2000 年代初頭には行われた。ナイーブベイズ学習、決定木学習、クラスタリング、相関ルール抽出[20]、情報推薦、協調フィルタリングなどである。これらのアルゴリズムの解説については、Aggarwal と Yu によるサーベイ "Privacy-Preserving Data Mining: Models and Algorithms"[21] が良書である。

PPDM の主な要素技術には、加法準同型性を満たした公開鍵暗号アルゴリズムとそれを用いた秘匿内積プロトコル[22] や 2）で述べた秘匿回路計算 SFE がある。条件を満たす準同型性暗号として、Paillier 暗号[23] や楕円曲線暗号がよく知られている。デファクト標準の RSA 公開鍵暗号は、乗法の準同型性を満たしているが、平文が同じならば暗号文も同じになる性質を持っているために利用できない。一般に、秘匿計算部分はビット長に応じて大きなコストがかかるので、秘匿内積で計算できるところは極力そちらで行い、比較や等号処理等の準同型性暗号を用いると困難なところだけを SFE で行うことが多い。このスタイルの代表例に、Vaidya と Clifton の相関ルール抽出[20] がある。一方、秘匿内積を使わないで、分散管理された複数の集合の積集合を秘匿して求める問題もよく用いられる。積集合の大きさを求めれば、クロス集計や頻出アイテムの評価を与えるからである。この秘匿積集合には、入力する値と多項式の係数をそれぞれ異なるパーティーが保有し、秘匿したままで関数の出力値のみを求める秘匿多項式評価プロトコルが要素技術として構成される。Freedman らによるプライベートマッチングプロトコル[24] が代表例であり、Camenisch らによってさらなる効率化[25] が行われている。

これらの要素技術の研究開発や安全性評価は 2000 年代にほぼ完成していて、実現可能性は確認されている。しかし、ビット長に比例してかかる暗号化のコストが大きく、実用

化のレベルには至っていない。改良されたアルゴリズムや小規模のデータセットに、適用範囲は限定されている。この技術的な困難さを改良するために、加法準同型性だけでなく乗法の準同型性も保証する環準同型性暗号などの暗号要素技術の改良が重ねられている。

暗号要素技術のブレークスルーを待つ間は、たとえ大きな処理コストと時間をかけても見合うだけの、極めてプライバシーの要求が強い分野から PPDM の適用が進むものと予想される。あるいは、*k*- 匿名性などで失われる精度が許容できないほど高い精度を必要とする分野にも適用の可能性がある。これらの例には、ゲノムデータの解析や臨床疫学などの医療分野があげられる。文献[26] では、健康診断の結果により得られたピロリ菌に感染した患者リストと、地域がん登録で得られた胃がん患者のリストを秘匿したままマッチングすることで、ピロリ菌のがん罹患に関する相対危険度を求める実験が行われた。

クラウドに委託したデータの漏えいを防止してそのサービスを活用するために、さまざまな検索可能暗号方式が提案されている。Boneh らは、データ所有者が公開鍵を用いてデータを暗号化してクラウドに保管し、秘密鍵を持つ利用者が検索用のタグを生成して、クラウドに検索を実行させる公開鍵検索可能暗号（Public Key Encryption with keyword Search: PEKS）を提案した[27]。これを元にして、キーの連言検索や範囲検索を可能とする方法[28] などいくつもの改良が試みられている。松田らは、階層型 ID ベース暗号を用いてマルチユーザーへの対応を可能とする方式を提案し、ブラウザーと Web サーバー間で SQL 文による検索を可能とするシステムを実装している[29]。

4） 差分プライバシー技術

差分プライバシー技術とは、データベース問い合わせとその応答に関わる情報漏えいを理論的に評価し、その対応策を与える技術である。多数の個人に関するデータが蓄積されたデータベースに対して、統計的な問い合わせを行い、その応答値から、問い合わせ対象としたデータベースに、ある個人が含まれているか否かが判定可能であるというリスクを低めるために、統計値を雑音によって摂動させ、開示することによりプライバシーを保護する。与えられた母集団数と対象クエリについて、その応答値に加えるべき雑音の分散の上限が理論的に求められる。

差分プライバシーの研究は 2006 年の Dwork らの研究[30] に端を発し、以降、理論計算科学、暗号理論、データ工学、機械学習等、多数の理論分野にわたり、主に理論的アプローチの下で複合的に発展しつつある。差分プライバシーのモデルは、暗号理論における標準的な安全性定義として用いられている「識別不可能性」の議論を下敷きとしていることから、以前から積み上げられてきた理論的な安全性解析との親和性が高い。また、その安全性が攻撃者の背景知識によらないことから、*k*- 匿名性等に比べより強力な安全性を保証できる。ただし、差分プライバシーを達成するためには、クエリ応答値に非常に分散の大きい確率分布から得た雑音による摂動を与えることが必要な場合があることから、実用に耐えない場合もあるが、以下のような実用化も始まっている。Google は Web ブラウザーである Chrome に RAPPOR（randomized aggregatable privacy-preserving ordinal response）と呼ばれる差分プライバシーを用いたユーザー統計の収集フレームワークを実装している。Chrome を利用する多数のエンドユーザーから数値や文字列の情報を受け

取り、これを集約して統計情報を得るときに、集計者はユーザー個別の情報を得ることになり、プライバシー上の懸念がある。RAPPOR では、chrome から情報送信する際に、ユーザーの手元で情報をランダム化した上で情報提供し、集計者側からはユーザー個別の情報が特定されないことを差分プライバシーの定義において保証している。また、Apple は iOS10 において多数ユーザーの利用パターンの解析において、個別データの Privacy を保護するために差分プライバシーを利用していると公表している。

［今後必要となる取り組み］

現在のプライバシー保護技術を実サービスに適用するにあたって、今後次のような取り組みが求められると考える。

・利用者の同意を取る仕組み
データの所有者とデータをひもづけて、利用目的の変更や第三者提供に対して同意や利用停止などの制御を可能とする仕組み。

・匿名化されたデータを交換するためのフォーマットの標準化
XML や JSON などの標準的なフォーマットの上で、データの種類と形式、匿名化措置の方法や程度、利用条件などのポリシーなどを記述する標準フォーマット。

・要求する匿名化レベルや提供するためのポリシー記述言語の標準化
プライバシー情報の所有者が自分の情報を誰にどこまで提供するかを定めたり、第三者に情報提供のための条件、提供先において受け取るための条件など、さまざまな論理的な条件を十分に表現するための記述言語。ポリシーを宣言することで、機械的な条件の判断や交渉を可能にする。

・PPDM（Privacy-Preserving Data Mining）でデータを交換するための通信プロトコルの標準化
プロトコルに従って暗号文を交換するためのデータ形式や制御メッセージの交換のための汎用的なプロトコル。暗号鍵や公開鍵証明書などの既存のフォーマットや TLS など通信プロトコルを応用して、PPDM で必要なマルチパーティーで行われる非同期通信を可能とする枠組みが必要である。

・匿名化されたデータやその提供者に対して、評判や信頼の度合いを提供するためのトラストフレームワーク
匿名化によって低減された個人識別のリスクやその情報発信者の評判などを交換するためのプロトコルや表現形式の標準化。

・漏えいしたデータを早期に検出する技術
P2P などで公開されているデータに違法なものや漏えいしている情報がないかを機械的に判断して、検出する技術の開発。

・SNS などへ情報を発信する際に、ポリシーに応じてプライバシー情報の検査をする機構
不用意な個人情報の公開を防止するために、自身で設定したポリシーに整合しない情報を発信する前に警告を与えるサービスや技術の開発。

・漏えいした情報を失効させる仕組み
やむなく漏えいしてしまったプライバシー情報や個人情報に対して、認証された管理者

のもとで迅速に失効させる技術とその制御プロトコル等の開発。

(3) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

［注目すべきプロジェクト］

・Geographic Privacy-aware Knowledge Discovery and Delivery（GeoPKDD）[31)]
車や人等の動きのデータ（trajectory data）をプライバシーに配慮して現実的な知識抽出サービスを実現しようとするプロジェクト。イタリア Pisa 大学、スイス EPFL、ベルギー Hasselt 大学などの共同プロジェクト。

・MIT, CryptDB [32)]
SQL データベースにおけるクエリーとデータそのものを暗号化することで、不正なサーバー管理者に対して格納されているデータのプライバシーを保障するシステムの開発プロジェクト。通常の非暗号化された SQL データベースと遜色ないほどのパフォーマンスを実現している。

・University of Texas Dallas 校、UTD Anonymization Toolbox [8)]
匿名化アルゴリズムのツールボックスの開発プロジェクト。*k*- 匿名性などの多くのアルゴリズムをサポートして、Windows 版、Linux 版のツールボックスを公開している。

・独立行政法人産業技術総合研究所セキュアシステム研究部門「プライバシー保護データベース検索技術」プロジェクト [33)]
化合物データ、ゲノムデータ、地質データなどのデータベース提供者に対して、検索クエリーを知らせないで検索を実現するプロジェクト。生命情報工学研究センターと共同して、製薬開発分野における応用を検討している。

・JST CREST プロジェクト、自己情報コントロール機構を持つプライバシー保護データ収集・解析基盤の構築と個別化医療・ゲノム疫学への展開 [34)]
暗号技術を適用して、ゲノム塩基配列中の塩基の変異（SNP）とその影響を秘匿したままで評価する技術の研究プロジェクト。ゲノムの影響を考慮した個人に特化した治療等への応用を目標としている。筑波大学、東京大学、名古屋工業大学、三重大学、産業技術総合研究所による共同プロジェクト。

(4) 科学技術的課題

秘匿計算技術の課題には次のようなものがある。

・計算コスト、通信コストの削減
計算とともに生じる大きな処理時間が最大の問題である。また、1 ビットの情報でも暗号化するとその暗号文の大きさに拡大することとなり、一般的な公開鍵暗号として数千ビットを想定すると、1000 倍近くの容量を消費する。

・秘匿したまま処理を行う要素技術の拡大
従来は加算のみ、乗算のみに限られていた演算をそれらの両方とも実現したり、指数計算などのより複雑な計算へと拡大すること。

・実現するデータマイニングなどの処理の複雑化、多様化

ロジステック回帰の様に逐次的に係数を変化させて、収束を必要とするアルゴリズムなどを効率的に実現する方法の開発。

・高機能暗号の研究開発
関数型暗号や完全準同型性暗号などの高機能暗号の基礎研究は、近年発展の速度が速く、今後も継続した取り組みが必要である。高機能暗号に関連する研究は理論の構築に比して実装技術やライブラリの構築 、現実的なユースケースに即した応用技術が追いついていないため、その整備が必要である。

・秘密計算の研究開発
秘密計算を利用したプライバシーデータの活用については、準同型暗号や Garbled circuit の活用については多くの研究例がすでにあるが、高機能暗号の活用はこれまでにほとんどない。データ解析と暗号理論分野の両方に精通した研究者・技術者が少ないことがその理由の一つであると考えられ、分野間の交流等人材開発が必要である。また「ビッグデータ解析」と「個人データのセキュリティ・プライバシー保護」を個別的な研究開発課題でなく、両者を両輪としたソリューション型の研究開発を進める必要がある。

・差分プライバシーの研究開発
差分プライバシーは理論計算科学分野ではすでにデファクトスタンダードのプライバシーモデルとして定着した感がある。実応用を目指した試みも米国では出始めている。この分野に精通した研究者・技術者は諸外国に比べ日本には極めて少なく、少なくとも研究者レベルではこの分野の専門家の養成が必要であろう。

(5) 政策的課題

我が国の個人情報保護法においては、プライバシー保護レベルとしては最も低い仮名化や匿名化などを想定しており、単純な匿名加工データとするだけで本人同意不要の第三者提供が行われる可能性がある。匿名化は現実的なプライバシー保護技術の一つではあるが、措置の手順や加工の履歴を知る悪意のある攻撃者による内部犯行に対しては十分ではない。一方、安全性の高い PPDM などの暗号化によるプライバシー保護はその存在が知られてはいるが、計算コストや技術が成熟していないことを理由にまだ普及の兆しが見えない。匿名化だけで十分であるという制度が定着すると、暗号化を用いる動機付けが低下してしまい、この技術の普及が一段と遅れてしまうことが懸念される。

個人データ活用におけるプライバシー保護は、法制度との整合性を維持しつつ両技術を適切に組み合わせる複合的なソリューション開発が必要であり、そのための人材育成、組織の構築が必要である。

デバイス・通信技術の発展や、新種のサービスの普及に伴い、プライバシー保護のあるべき姿は急速に変容していくともに、個人情報活用に対する個人の受容度も変化していく。技術の進歩に柔軟に対応できる法制度の整備も重要な課題である。

(6) キーワード

匿名化、仮名化、*k*- 匿名性、*l*- 多様性、マルチパーティー計算、Secure Function Evaluation、加法準同型性暗号、水平分割、垂直分割、プライバシー保護データマイニング、プライベートマッチング、差分プライバシー

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・暗号理論に関する基礎研究は、企業、大学、国立研究所ともに高いレベルにある。国際的にも競争力があり、優れた成果を挙げている。 ・プライバシー保護技術・システムセキュリティーについての基礎研究は、トップ国際会議等での発表は数が多くなく、国際的に競争力があるとは言えない。
	応用研究・開発	○	→	・ゲノムのプライバシー保護プロジェクト等、応用を意識したプロジェクトが増えてきている。NTT や三菱等は実装を発表している。
米国	基礎研究	◎	↗	・多くの学術論文が発表されている。いずれの研究領域においても、差分プライバシー、完全準同型暗号など多くの理論的アイデアはほとんど米国の大学・企業の研究者から提案されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・MIT の CryptDB や SFE の実装等、高い技術力で提案された概念の実装が先行している。 ・高速秘密計算の開発環境 ObliVM, JustGarble などの秘匿回路開発フレームワークが発表されている。
欧州	基礎研究	○	→	・論文レベルではコンスタントに発表が続いている。差分プライバシーや暗号理論の研究も強い。
	応用研究・開発	○	→	・EU のプロジェクトなどで、ユビキタスネットワーク等の多くの分野を統合する動きが見られる。EU データ保護指令などの法整備も先行している。
中国	基礎研究	○	→	・秘匿回路評価の提案者を排出するなど学者を生み出しているが、活躍の場は米国などが主である。
	応用研究・開発	○	↗	・データ工学分野を中心に、複数名のデータプライバシー研究者が活動している。
韓国	基礎研究	○	→	・各種の暗号アルゴリズムの基礎的な研究を行い、国際標準に提案活動を行っている。
	応用研究・開発	△	→	・特に目立った活動は見られない。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）個人情報保護委員会
http://www.ppc.go.jp/personal/preparation/（閲覧日 2016-12-22）
2）Pierangela Samarati, “Protecting respondents’ identities in microdata release,” IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 1010-1027 (2001).

3) Latanya Sweeney, “k-Anonymity: A Model for Protecting Privacy”, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, Vol. 10, No. 5, pp. 557-570 (2002).
4) Ashwin Machanavajjhala, Daniel Kifer, Johannes Gehrke, and Muthuramakrishnan Venkitasubramaniam, “L-diversity: Privacy beyond k-anonymity”, ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, Vol. 1, No. 1, Article No. 3 (2007).
5) Chao Yao, X. Sean Wang, and Sushil Jajodia, “Checking for k-anonymity violation by views”, In Proceedings of the 31st international conference on Very Large Data Bases (Trondheim, Norway, 2005), pp. 910-921 (VLDB, 2005).
6) Kristen LeFevre, David J. DeWitt, and Raghu Ramakrishnan, “Incognito: efficient full-domain k-anonymity”, In Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD (SIGMOD’05) international conference on Management of data (Baltimore, USA, 2005), pp. 49-60 (ACM, 2005).
7) Xiaokui Xiao and Yufei Tao, “Anatomy: simple and effective privacy preservation”, In Proceedings of the 32nd international conference on Very large data bases (Seoul, Korea, 2006), pp. 139-150 (VLDB, 2006).
8) UTD (The University of Texas at Dallas) Data Security and Privacy Lab, “UTD Anonymization Toolbox”
http://cs.utdallas.edu/dspl/toolbox/（閲覧日 2016-12-16）
9) Giorgos Poulis, Spiros Skiadopoulos, Grigorios Loukides, Aris Gkoulalas-Divanis, “Apriori-based algorithms for km-anonymizing trajectory data”, Transactions on Data Privacy Vol. 7, No. 2, pp. 165-194 (2014).
10) Chongjing Sun, Philip S Yu, Xiangnan Kong, and Yan Fu, “Privacy Preserving Social Network Publication Against Mutual Friend Attacks”, Transactions on Data Privacy Vol. 7, No. 2, pp. 71-97 (2014).
11) Andrew C. Yao, “How to generate and exchange secrets”, In Proceedings of the 27th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (Toronto, Canada), pp. 162–167 (IEEE, 1986).
12) Dahlia Malkhi, Noam Nisan, Benny Pinkas, and Yaron Sella, “Fairplay – a secure two-party computation system”, In Proceedings of the 13th USENIX Security Symposium (San Diego, USA, 2004), pp. 287–302 (USENIX, 2004).
13) Yan Huang, David Evans, Jonathan Katz, and Lior Malka, “Faster secure two-party computation using garbled circuits”, In Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium (San Francisco, USA, 2011), pp. 35-35 (USENIX, 2011).
14) Benjamin Kreuter, Abhi Shelat, and Chih-Hao Shen, “Billion-gate secure computation with malicious adversaries”, In Proceedings of the 21st USENIX Security Symposium (Bellevue, USA, 2012), pp. 14-14 (USENIX, 2012).
15) Dan Bogdanov, Sven Laur, and Jan Willemson, “Sharemind: A framework for fast privacy-preserving computations”, In Proceedings of the 13th European

Symposium on Research in Computer Security（Málaga, Spain, 2008）, pp. 192-206（Springer-Verlag, 2008）.

16）Cybernetica, “Sharemind project” https://sharemind.cyber.ee/（閲覧日 2016-12-16）

17）濱田 浩気 , 五十嵐 大 , 菊池 亮 , 千田 浩司 , 諸橋 玄武 , 冨士 仁 , 高橋 克巳 , “実用的な速度で統計分析が可能な秘密計算システム MEVAL”, コンピュータセキュリティシンポジウム（高松 , 2013）論文集 , pp. 777-784（情報処理学会 , 2013）.

18）Yehuda Lindell and Benny Pinkas, “Privacy Preserving Data Mining”, Advances in Cryptology – CRYPTO 2000: 20th Annual International Cryptology Conference（Santa Barbara, USA, 2000）, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1880, pp. 36-54（Springer-Verlag, 2000）.

19）Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant, “Privacy-preserving data mining”, In Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data（Dallas, USA, 2000）, pp. 439-450（ACM, 2000）.

20）Jaideep Vaidya and Chris Clifton, “Privacy preserving association rule mining in vertically partitioned data”, In Proceedings of the 8th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining（Edmonton, Canada, 2002）, pp. 639-644（ACM, 2002）.

21）Charu C. Aggarwal and Philip S. Yu, “A General Survey of Privacy-Preserving Data Mining, Models and Algorithms”, Privacy-Preserving Data Mining, Vol. 34, pp. 11-52（2008）.

22）Bart Goethals, Sven Laur, Helger Lipmaa, Taneli Mielikäinen, “On private scalar product computation for privacy-preserving data mining”, In Proceedings of the 7th Annual International Conference in Information Security and Cryptology（Seoul, Korea, 2004）, pp. 104-120（Springer-Verlag, 2004）.

23）Pascal Paillier, “Public-Key Cryptosystems Based on Composite Degree Residuosity Classes”, Advances in Cryptology – EUROCRYPT 1999: International Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques（Prague, Czech Republic, 1999）, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1592, pp. 223-238（Springer-Verlag, 1999）.

24）Michael J. Freedman, Kobbi Nissim, and Benny Pinkas, “Efficient Private Matching and Set Intersection”, Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2004: International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques（Interlaken, Switzerland, 2004）, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3027, pp. 1-19（Springer-Verlag, 2004）.

25）Jan Camenisch and Gregory M. Zaverucha, “Private intersection of certified sets”, Financial Cryptography and Data Security, Vol. 5628, pp. 108-127（2009）.

26）Hiroaki Kikuchi and Jun Sakuma, “Bloom Filter Bootstrap: Privacy-Preserving Estimation of the Size of an Intersection”, Journal of information processing, Vol. 22, No. 2, pp. 388-400（2014）.

27）Dan Boneh, Giovanni Di Crescenzo, Rafail Ostrovsky, and Guiseppe Persiano, “Public key encryption with keyword search”, Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2004: International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques（Interlaken, Switzerland, 2004）, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3027, pp. 506-522（Springer-Verlag, 2004）.
28）Dan Boneh and Brent Waters, “Conjunctive, subset, and range queries on encrypted data”, In Proceedings of the 4th Theory of Cryptography Conference（Amsterdam, The Netherlands, 2007）, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4392, pp. 535-554（Springer-Verlag, 2007）.
29）松田 規 , 伊藤 隆 , 柴田 秀哉 , 服部 充洋 , 平野 貴人 , “検索可能暗号の高速化と Web アプリケーションへの適用方式に関する提案”, マルチメディア、分散、協調とモバイル（DICOMO2013）シンポジウム（十勝川温泉 , 2013）論文集 , pp. 2067-2074（情報処理学会 , 2013）.
30）Cynthia Dwork, “Differential privacy”, In Proceedings of the 33rd international conference on Automata, Languages and Programming（Venice, Italy, 2006）Part II, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4052, pp. 1-12（Springer-Verlag, 2006）.
31）Geographic Privacy-aware Knowledge Discovery and Delivery（GeoPKDD）
http://www.geopkdd.eu/（閲覧日 2016-12-16）
32）MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory（CSAIL）Computer Systems Security Group
http://css.csail.mit.edu/cryptdb/（閲覧日 2016-12-16）
33）国立研究開発法人 産業技術総合研究所（AIST）「プライバシー保護データベース検索技術」プロジェクト
https://www.risec.aist.go.jp/project/dbscoop-ja.html
（閲覧日 2016-12-16）
34）国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 Genome Privacy CREST（プロジェクト統括・佐久間 淳）
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/45/45_02.html
（閲覧日 2016-12-16）

3.5.5　セキュリティーアーキテクチャー

（1）研究開発領域の簡潔な説明

セキュリティーアーキテクチャーとは、ソフトウエア製品やシステムの開発において、安全な（セキュリティー上の脆弱性のない）製品、システムを構築するための構造、技法を指す。特に、プログラミング工程における脆弱性修正ではなく、分析、設計工程などの早期段階から安全に構築することが必要とされるため、セキュリティー・バイ・デザイン（セキュア・バイ・デザイン）と呼ばれることもある。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システムやソフトウエアの脆弱性を除去する手法として、従来「セキュア・プログラミング」が主な関心の対象であった。しかし、セキュア・プログラミングの対象は開発工程におけるプログラミング（実装）工程に限定されている。このような、ソフトウエアの欠陥修正を実装段階に置く手法は、ソフトウエアの開発プロセス、特にウォーターフォール型開発では手戻りのコストがかかるということは既に知られていた[1)]。セキュリティー上の欠陥である脆弱性修正においても状況は同じであり、テストや完成後の脆弱性検査において脆弱性が発見されても、修正に多大なコストと期間がかかり、開発プロジェクトの事情によっては修正せずに放置せざるを得ないという事態が頻発するようになった。そこで、他のソフトウエア開発同様、分析工程や設計工程など、開発の早期段階からセキュリティーの問題点を発見し対処するというセキュリティーアーキテクチャー技術研究の必要性を生んだ。また、セキュリティーに近いプライバシー保護研究の分野では、同様の概念が既にプライバシー・バイ・デザイン[2)]として存在していた。そのため、本研究領域はそれに倣い、セキュリティー・バイ・デザインとも呼ばれることになる。

以上の歴史的経緯をふまえ、セキュリティーアーキテクチャーの研究の多くは、既存のソフトウエア工学における問題解決の手法をセキュリティーに拡張するアプローチがとられている。従来のソフトウエア工学的手法と、セキュリティーに適用する場合の大きな相違点は、悪意の想定の有無にある。例えば、分析工程における要求工学は要求の獲得に関する技術であるが、要求の獲得においては、他の要求については利害関係者が開発対象に要求する内容を対象とするのに対し、セキュリティーの要求獲得では、まず第三者または利害関係者による、悪意に基づく要求（脅威）を認識し、その要求により、対象のソフトウエアやシステム、サービス等が被害を受けないように、対策を施す必要がある。このように、まず脅威を認識し、続いてその対策を検討するというプロセスは従来の開発プロセスにはないセキュリティー特有のものである。このようなプロセスのうち、要求獲得段階で行われる技術のことをセキュリティー要求工学と呼び、一般に分析、設計工程で行われるプロセスを脅威分析と呼ぶ。

セキュリティー要求工学技術は、ゴール指向分析や、エージェント指向分析、ユースケース分析など、既存の要求工学の技術をセキュリティーに応用したものが多く提案されている[3)]。一方、脅威分析については、アタックツリー分析[4)]や脅威モデリング[5)]など、セキュリティー分野独自の必要性から発展したものが多い。

(3) 注目動向

近年、サイバー攻撃の対象が ICT システム、機器にとどまらず、ソフトウエアが搭載されている組み込み機器や制御システムなどにも広がりを見せている。現実に、車載システムや航空システム、工場などへのサイバー攻撃手法の公開や、攻撃による被害が発生している[6)-8)]。また、近年さまざまな機器がインターネットに接続することで、さまざまなサービスを提供する Internet of Things（IoT）が急速に発展しているが、IoT システムもまた、構築時にセキュリティーが十分に考慮されていないために脆弱性が存在していることが多く、現実のサイバー攻撃により情報漏えいなどの被害が問題化している。そこで、近年では組み込み、IoT や制御システムを対象としたセキュリティーアーキテクチャーについての研究も活発になってきている。

(4) 科学技術的課題

セキュリティー要求工学、および脅威分析において、必要な技術要素は下記の通りであるが、それぞれの要素において、技術的課題が存在する。

［脅威の識別］

対象のソフトウエア、システムにどのような脅威が存在するかを、開発者が識別できることが重要になる。しかし、現状では、脅威の識別に必要な情報は、脅威モデリングにおける STRIDE 脅威分類などに限定されている。また、アタックツリー分析における下位ノードの識別（ある脅威を可能にする攻撃や条件の識別）についても、十分なセキュリティー知識がないと困難な、属人性の高い作業になってしまっている。知識の欠如を補完するために、Common Attack Pattern Enumeration and Classification（CAPEC）[9)] や Common Vulnerabilities and Exposures（CVE）[10)] など、既知の攻撃や脆弱性がパターン化、データベース化されているが、脅威抽出において十分に活用されていないのが現状である。

また、脅威の識別には、対象となるソフトウエア、システムのモデル化、ないしモデルとしての把握が必要になる。ソフトウエアのふるまいの中で、データがどのように流れるかが明確になることで、そのデータに対する攻撃のポイントが明確になる。しかし、このモデル化は、開発工程が上流にさかのぼるにしたがって、詳細化が困難になる。この課題はセキュリティー要求工学における脅威抽出の障害となる。

［リスク評価］

識別された脅威に対する対策を検討する前に、脅威が引き起こす影響のリスクを評価する必要がある。セキュリティーにおけるリスク評価の方法には議論が存在していたが、近年 ICT 以外の組み込みや制御システムにセキュリティーを適用する際により明確になった。自動車などの製造においては、安全性（機能安全、セーフティ）のリスク分析として Fault Tree Analysis（FTA）[11)] が用いられる。FTA では故障の事象の原因をアタックツリーのように細分化した上で、各基本事象の発生する確率と影響の積によりリスクを求めている。機能安全において扱う事象はこれまで、自然現象やヒューマンエラーなど、蓋然性に基づく確率の予測が容易であった。しかし、サイバー攻撃ではその事象が人為によって操作可能であるため、FTA をセキュリティーに適用する場合、事象のリスク評価の発生確率の算出が問題となる。そこで、セキュリティーにおけるリスク評

価には、確率の変わりに攻撃の発生頻度を用いる手法、攻撃の容易さ、攻撃者のスキルを用いる手法などが提案されている。

［対策の妥当性検証］

対策の妥当性は、最終的にテスト段階で確認する手法と、分析、設計それぞれの工程が終わった段階で確認する手法の二つがある。それぞれの技術的課題について述べる。

・セキュリティーテストの十分性、網羅性の確認

セキュリティーテストについては、第三者による確認が容易である理由からブラックボックステストやその一種であるファジングがよく用いられるが、これらのテストは十分性、網羅性の確保には適していない。十分性や網羅性の確認には、静的コード解析技術が用いられることが多い。

・要求仕様、設計仕様の検証

ソフトウエアの検証をレビューによる確認以外で行う手法としては、形式手法を用いる方法がある。形式手法は定理証明を用いる手法と、モデル検査による手法がある。定理証明を用いる手法は、ソフトウエアの正しさを数学的に証明することができるが、証明には数学的知識を必要とし、かつ自動化が進んでいないため、応用は暗号アルゴリズムやプロトコルの証明にとどまっている。一方、モデル検査はツールによる自動化が進んでいるが、モデルの記述に知識を要するなどの問題があり、一般のソフトウエアへの普及は進んでいないのが現状である。

(5) 政策的課題

セキュリティーアーキテクチャーに関わる標準としては、ISO IEC 15408（コモンクライテリア、CC）[12] がある。CC はソフトウエア製品、システムのセキュリティーを保証する認証制度になっている。しかし、CC の適用は CC 認証を要求されている一部の製品に限定されており、一般の製品やシステムの開発には、追加で必要なドキュメントや工数、費用面の問題から普及が進んでいない。

近年、組み込み、制御システムに対するサイバー攻撃の脅威が高まっていることもあり、機能安全による開発の規格、標準がある業種では、機能安全規格、標準をセキュリティーに拡張することで対応しようとしている。しかし、業種にまたがる共通のセキュリティー構築のための規格、標準はまだ確立していない。また、組み込みや制御システムにおいては、セキュリティーの認識不足、知識不足による安全性の欠如が問題視されており、2020 年の東京オリンピック、パラリンピックを控え、特に重要インフラ分野におけるセキュリティー人材育成の必要性が指摘されている。

(6) キーワード

セキュリティー・バイ・デザイン、セキュリティー要求工学、脅威分析、リスク評価、形式手法、機能安全、セーフティ、IoT、組み込み

(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	○	→	要求工学分野において、ゴール指向を中心に研究がされてきた。
	応用研究・開発	△	↗	また十分ではないが、IoT など具体的な応用分野を中心に活発化しつつある [13]。
米国	基礎研究	◎	→	CMU（Carnegie Mellon University）、FAU（Florida Atlantic University）を中心にあらゆる領域において先行している。
	応用研究・開発	◎	→	ツールやサービス提供、業界ごとの規格やガイドラインなどの開発が活発である。
欧州	基礎研究	◎	→	各種要求工学手法の応用や、プライバシーを含めた研究が各国で活発である。
	応用研究・開発	◎	↗	近年では Industrie 4.0[14] での CPS へのセキュリティーの組み込みも進む。
中国	基礎研究	○	→	要求工学をセキュリティーに応用する研究など、いくつかの事例が見られる。
	応用研究・開発	○	↗	IoT、ビッグデータなど特定の分野における応用研究が見られる。
韓国	基礎研究	×	→	国際会議等で顕著な研究成果が見られない。
	応用研究・開発	×	→	上に同じ。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) Richard H. Thayer（Editor）, Merlin Dorfman（Editor）, Software Requirements Engineering, 2nd Edition,（Wiley-IEEE, 2000）.
2) Peter Hustinx, “Privacy by design: delivering the promises”, Identity in the Information Society, Vol. 3, No. 2, pp 253–255（2010）.
3) 吉岡 信和 , 田口 研治 , “セキュリティ要求工学の実効性”, 情報処理 Vol. 50, No. 3, pp. 185-186（2009）.
4) Bruce Schneier and Adam Shostack, “ Breaking Up Is Hard to Do: Modeling Security Threats for Smart Cards”, In Proceedings of the 1st USENIX Workshop on Smart Card Technology（Chicago, USA, 1999）, pp. 175–185（USENIX, 1999）.
https://www.schneier.com/academic/paperfiles/paper-smart-card-threats.pdf（閲覧日 2016-12-15）
5) Adam Shostack, Threat modeling: designing for security（Wiley, 2014）.
6) Forbes, “Digital Carjackers Show Off New Attacks”（2013/07/24 公開 Youtube 動画）
https://youtu.be/oqe6S6m73Zw（閲覧日 2016-12-15）
7) Charlie Miller and Chris Valasek, “Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle（August, 2015）”

http://illmatics.com/Remote%20Car%20Hacking.pdf
（閲覧日 2016-12-15）

8）Reuters, “Polish airline, hit by cyber attack, says all carriers are at risk”, （2015/06/22 公開 technology news 動画）
http://www.reuters.com/article/us-poland-lot-cybercrime-idUSKBN0P21DC20150622（閲覧日 2016-12-15）

9）Sean Barnum, “Common Attack Pattern Enumeration and Classification”, https://capec.mitre.org/documents/documentation/CAPEC_Schema_Description_v1.3.pdf（閲覧日 2016-12-15）

10）Mitre, “Common Vulnerabilities and Exposures（CVE）”, https://cve.mitre.org/（閲覧日 2016-12-15）

11）International Electrotechnical Commission（IEC）, “Fault Tree Analysis Edition 2.0”, （IEC, 2006）.

12）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA）, “ISO/IEC 15408: valuation criteria for IT security, ver.3.1 release 4”, https://www.ipa.go.jp/security/jisec/cc/prevcc.html（閲覧日 2016-12-15）

13）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA）, “つながる世界の開発指針～安全安心な IoT の実現に向けて開発者に認識してほしい重要ポイント～”, http://www.ipa.go.jp/files/000051411.pdf（閲覧日 2016-12-15）

14）Bill Lydon, “Industry 4.0 - Only One-Tenth of Germany’s High-Tech Strategy（Automation.com2014/04/04 記事）”, http://www.automation.com/automation-news/article/industry-40-only-one-tenth-of-germanys-high-tech-strategy（閲覧日 2016-12-15）

3.5.6　運用・監視技術

（1）研究開発領域の簡単な説明

サイバー攻撃に備えた各種セキュリティー装置やネットワークの運用･監視技術の確立。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サイバー攻撃に用いられる手法は日々進化を続けており、通常のサイバー攻撃であっても、攻撃の検知や攻撃による被害発生を未然に阻止することは難しくなりつつある。2016 年も、JTB、日本経済団体連合会など、十分なサイバー攻撃対策を施していると思われる組織でさえも、サイバー攻撃による侵入や重要な情報の流出を阻止することができなかった [1)-3)]。

このような被害発生を前提とした対策手法として、情報処理推進機構は 2014 年に『高度標的型攻撃』対策に向けたシステム設計ガイド [4)] を公開している。本ガイドでは、マルウエア感染などの初期潜入は防ぎきれないことを前提に、その後に発生する組織内ネットワークでの盗聴やバックドア開設（基盤構築）や端末間での感染拡大やサーバーへの侵入（内部侵入・調査）を発見し封じ込めることを求めている。同様の考え方は米国 National Institute of Standards and Technology（NIST）が公開した Computer Security Incident Handling Guide[5)] でも採用されている。

また、マルウエア Mirai が公開された結果、工場出荷時のままなど脆弱なパスワードを設定された IoT 機器による 10 万台規模のボットネット（botnet: 悪意のあるプログラムにより乗っ取られた多数のゾンビコンピュータで構成されるネットワーク）が構築され、1Tbps を超える DDoS 攻撃が発生するようになっている [6)]。このほか、フィンランドにおいては、DoS 攻撃によりマンションの暖房が停止するというサイバー攻撃も観測されている [7)]。

McAfee Labs の予測 [8)] によれば、2015 年時点で、タブレット機器、ウエアラブル機器、IoT 機器の台数は、それぞれ 2.48 億台、2 億台、150 億台と推定されている。現時点ですら、IoT 機器はその他機器と比べ台数が桁違いに多い。今後、タブレット機器は 2019 年までに 2.69 億台、ウエアラブル機器は 2018 年までに 7.8 億台に増加すると予想されている一方、IoT 機器は 2020 年までに 200 億台に増加するとされており、IoT 機器のセキュリティー対策は重要な課題となりつつある。

また、世界的な IPv4 アドレス枯渇と IP アドレスの使用機器の爆発的な増加を受けて、IPv6 アドレスの利用が加速される兆候がある。Linux 系、BSD 系、Windows 系といった主要 OS は既に IPv6 に対応している。さらに、Apple 社は、2016 年 6 月 1 日以降に同社 App ストアに提出される iOS 用アプリケーションでは、IPv6 のみのネットワークに対応すること必須化すると発表した [9)]。このよう流れを受けて、今後、多くの OS やアプリケーションは IPv6 に対応するようになることになると推定される。

しかし、これは、従来とは桁違いな多くの情報機器が IPv6 によってインターネットに直結される可能性、一つの組織に数億台の情報機器が存在する可能性があることを意味している。このような背景を受けて、国内外で、新たな考え方によるセキュリティー対策やネットワーク運用の手法が開発され始めている。

［サイバー攻撃検知技術］

前述の通り、初期感染による被害発生を前提としたサイバー攻撃対策が必須となった。これは、一般的な対策であるインターネットとの接続点におけるセキュリティー対策（入口・出口対策）に加え、組織内のネットワークでのセキュリティー対策（内部対策）が必要になることを意味する。

一般に、対外接続回線の回線速度（帯域幅）に比べ、組織内 LAN の総回線速度は数桁大きく、100Gbps を超えることも珍しくない。Intrusion Detection System などのセキュリティー製品の価格は監視対象の回線速度に比例するため、入口・出口対策と同様に全ての通信を漏れなく監視することはコスト面から非現実的になる。このため、組織内ネットワークの状況を俯瞰し、異変を察知した場合にその発生箇所を集中的に精査してサイバー攻撃の有無を確認し、必要に応じた対策を講じるという手法の確立が必要となる。

［被害緩和技術］

初期感染、基盤構築、内部侵入・調査の各段階では、組織内の情報機器でマルウエア感染などの被害が既に発生している。この状況の悪化を回避するためには、被害が発生している機器への対処が求められる。従来は、マルウエア感染機器を隔離（ネットワークからの切離）し、マルウエアの駆除や駆除ができない場合のクリーンインストールを施して安全性を確認したのちに再接続する手順が一般的であった。

しかし、情報技術の応用範囲が広がるにつれ、単体で稼働する情報機器というものはほぼ存在しない状況となっている。また、情報機器をプラント制御などに活用している場合、制御対象であるプラントが停止する前に情報機器を隔離することは極めて危険な行為であると言える。さらに、海外においては、マルウエアの駆除活動を攻撃側が察知すると、発見されていない感染機器を用いて、データの消去など破壊活動に転じる事例も確認されている。

標的型サイバー攻撃などでは、対処しても執拗に侵入を繰り返すだけでなく、対処を繰り返すことで攻撃側が防御側の体制を学習しステルス化することも懸念される。攻撃の存在を確認できる状況であれば、観測により攻撃側の目的などを推定する方が望ましいこともある。つまり、感染を継続させることによるリスクを軽減させる技術、あるいは、感染機器を攻撃者に察知されることなく監視下に置く手法の確立が必要となる。

［ネットワーク構成技術］

前述の俯瞰監視 / 集中監視、および、被害緩和を実現するためには、サイバー攻撃の状況に応じて監視対象のネットワーク構成を動的に変更する技術が必要となる。例えば、サイバー攻撃による被害を受けているネットワークセグメントを隔離する、制限付きで組織ネットワークへの接続を継続する、集中監視用のセキュリティー装置に当該セグメントの通信を転送するなどが考えられる。また、攻撃側の目的（狙っている情報など）が推定できた場合、その情報が存在するサーバーやネットワークセグメントを隔離する、アクセス制限を強化するなどの保護策を講じることも考えられる。これにより、業務を継続しつつ、かつ、サイバー攻撃に対処するレジリエントなネットワークが実現される。

例えば、Software Defined Networking（SDN）を応用し、攻撃の通信のみをハニーポッ

トなどのおとりシステムに誘導し、攻撃側の活動を監視する手法は製品化が進みつつある。さらに、最近は仮想化技術の活用が広がっており、情報の持ち出しができないように細工を施した本物のシステムの仮想イメージをおとりシステムとして活用するという手法も採用可能になりつつある。

［脆弱性自己検証および対策技術］

ソフトウエアに対する検証やサイバー攻撃の観測によりソフトウエアの脆弱性を発見し、この脆弱性を狙った攻撃を無害化する対策を生成する技術である。

例えば、脆弱性の発見手法としては、検証手法の一種であるファジング（fuzz testing）を用いてソフトウエアに例外処理を発生させ、脆弱性が存在する箇所を特定する。サイバー攻撃により被害が発生した際の攻撃プログラムや攻撃セッションを解析し、攻撃側が狙っている脆弱性、あるいは、攻撃セッション中の shellcode や exploit code といった情報を特定する。

無害化の手法としては、Intrusion Prevention System（IPS）に当該脆弱性を狙った攻撃を検知する暫定パターン（signature）を生成し、セッションを観測した時点で通信を遮断する。脆弱性が発生する機械コードを変更する暫定パッチを作成するというものがある。

現在、これらの一連の処理に加え、暫定 signature や暫定パッチ適用による副作用の有無の検証までを全て自動化する技術の研究開発が進みつつある。

［被害機器特定技術］

現代のサイバー空間の利用では、モバイル機器の存在が大きくなってきている点に特徴がある。IoT 機器の普及に伴い、その傾向はさらに加速されることは自明と言える。サイバー攻撃によって被害を受けたモバイル機器は、その状態を抱えたまま現実世界を移動することなる。当然、当該機器は、現実世界の位置などに応じてサイバー空間も移動することになる。また、車車間通信のように、時間や場所といった環境に応じて機器同士がアドホックネットワークを構成する利用も増えると想定される。

このような状況下でのサイバー攻撃対策を講じるためには、当該機器の地理上の位置に加えサイバー空間上での位置（IP アドレスや接続ネットワーク等）を短時間で特定する技術が必要になる。特にアドホックネットワークの場合、従来のように固定されたポイントを通過する通信を監視する集約型監視が行いにくく、ネットワーク構成の変更に追従する動的な監視の仕組みが必要となる。

ただし、既にさまざまな機器がサイバー空間に存在する現在、これらを新たな機器に置き換えることは非現実的であるため、ネットワーク監視などにより、不審な挙動を示す機器を発見する技術の研究開発が必須となる。

［セキュリティー情報イベント管理（Security Information Event Management: SIEM）］

各種セキュリティー機器が発する警報やサーバー等のログ情報の相関分析により、単体の機器の警報では見つけられないサイバー攻撃や同時多発するサイバー攻撃の中から危険度や緊急度の高いものを抽出し、セキュリティー技術者に提示する技術である。

ただし、多くの場合、相関分析のルールの定義、パラメータの調整は観測対象のネットワークごとに行う必要があり、そのためにセキュリティー技術者に求められる背景知識も幅広いものが求められる。

現在、これら設定等の処理を自動的に行う技術の研究がなされている。

(3) 注目動向

国内においては、総合科学技術・イノベーション会議による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において、「重要インフラ等におけるサイバーセキュリティの確保」に関する研究開発が進行中であり、研究費は 2015 年度 5 億円、2016 年度 25.5 億円となっている [10)]。また、文部科学省が実施する国立大学法人等における情報セキュリティー体制の基盤構築において、俯瞰 / 集中型監視技術や当該技術を活用する人材育成の研究開発が進行中であり、実施費用は 2016 年度 7.8 億円となっている [11)]。

一方、米国においては、国防高等研究計画局（DARPA　Defense Advanced Research Projects Agency）による脆弱対策技術を完全自動化した CTF 大会 DARPA Cyber Grand Challenge が 2015 年から 2016 年にかけて実施され、総予算は 5500 万ドル（約 56 億円）であった [12)]。なお、このチャレンジで用いられたプログラムは全て無償公開されており、その成果を活用したと思われるセキュリティー製品のコンセプト発表が始まっている。

また、被害機器特定技術については、MITER による 5 万ドル（約 5 百万円）の賞金をかけたチャレンジ [13)] が 2016 年 11 月現在開催中である。このほか、2012 年より NIST がメリーランド大学に National Cybersecurity Center of Excellence を設置し、組織のセキュリティー向上のための監視手法の開発を開始している。

そのほか、韓国や台湾においては、研究機関や学校（台湾の場合は幼稚園から大学まで）のセキュリティー監視を一括して行う Security Operation Center（SOC）が運用を開始しており、膨大な情報を俯瞰的に処理する手法の研究開発が進みつつある。

(4) 科学技術的課題

サイバー攻撃の手口が高度化するにつれ、その検知および対策技術も高度化が求められており、そのためには IDS/IPS（侵入検知・防御システム :Intrusion Detection System/ Intrusion Prevention System）を始めとする各種セキュリティー機器の高性能化が必須要件となる。IDS/IPS を例とすれば、以前は 1 パケットごとに解析処理すれば良かったが、現在はセッション全体を解析、さらには、複数のセッションの相関性、SIEM（Security Information Event Management）の場合は複数のログ間の相関性まで解析する必要が生じている。

しかし、ネットワーク技術の進歩はいまだ著しく、5 年ほど前であれば、高性能なものでも大規模組織で 10Gbps、一般家庭も 100Mbps、モバイル機器単体で 10Mbps 程度だったものが、それぞれ、100Gbps、1Gbps、200Mbps を超える時代となり、10 倍以上の伸びとなっている。これに対し、CPU やメモリ量の増加は頭打ち状態から数倍程度となっている。

セキュリティー機器の高度化のためにはこれらハードウエア資源の高性能化、および、限られた資源を効果的に活用する手法の開発が求められている。

(5) 政策的課題

他国と比較した場合の相違点として、米国との比較であれば、これまでも指摘されている通り予算規模の違いが挙げられる。さらに、米国においては、さまざまな技術開発に幅広く投資し、その中の一部が実を結べば良いと考えており、集中投資によるリスク発生を回避している。前述の DARPA Cyber Grand Challenge を例とすれば、決勝に進んだチームはサイバーセキュリティーを専門とする者だけで構成されておらず、ソフトウエア工学、形式言語理論、機械学習理論、知識ベース技術などさまざまな研究分野の人材が参加していた。わが国では、これらの研究分野は急速に人材が減少している状況にあるのと対照的である。

また、決勝に進んだチームを監督する教員、DARPA（国防高等研究計画局）関係者らとの情報交換から、人工知能によるサイバー攻撃防御の完全自動化は遠い未来に実現すべき究極の目標ではあるが、今後 10 年程度の人工知能研究分野およびハードウエアなどの周辺技術の進歩を鑑みると、サイバーセキュリティー技術者の補佐役の実現を当面の目標と考えているようであった。この考え方は、韓国の学術研究機関のセキュリティー監視を行っている Korea Institute of Science and Technology Information のセキュリティー監視チームとの合同ミーティングでも同様であった。

国家予算が厳しいわが国ではあるが、人工知能学会などが人工知能に対する過度の期待に警鐘を鳴らし始めているように、極度の一極集中とならない政策が必要になっていると考える。

また、他国と比べ、わが国においてサイバーセキュリティー研究を行う際に壁となるのが、通信の秘密の扱いである。前述のように諸外国では、一定の条件下でセキュリティー監視センターによる通信解析を認めているが、わが国では、憲法、有線電気通信法などにより通信解析自体が違法であるとされている。この問題は、極めてセンシティブなものであり、拙速な解決は望ましくないが、何らかの対応が求められている。

(6) キーワード

サイバーセキュリティー、サイバー攻撃対策、標的型サイバー攻撃、レジリエントネットワーク、セキュリティー情報イベント管理（Security Information Event Management）

(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	△	→	監視運用に携わる研究者が極めて少ないが、大学情報センター系の教員などを中心に基礎研究は行われている。ただし、自校の通信であっても実データを研究に利用できる大学は少ないのが現状である。
	応用研究・開発	△	→	製品化では実データによる検証および機能強化が必須であるが、実データの入手が極めて困難であることもあり、外国製品との差を埋めることに苦労している。このため、アンチウイルスソフトなどを除けば、監視運用の製品化まで至った例はごく少数に止まっている。
米国	基礎研究	○	↗	DoD（DARPA）、DHS、NSF などにより潤沢な研究資金が幅広く投資されており、かつ、研究に必要な実データの入手も一定条件のもとで可能となっている。
	応用研究・開発	○	↗	大学で生まれたアイデアを元に起業化する流れがうまく循環している。ただし、すべての起業化が成功しているわけではなく、実際にはごくわずかである。 また、実データを活用した製品の性能検証や高機能化が有効に働いている。極端な事例として、実際に Botnet を乗っ取って運用してみた実事例を論文で発表するなど、わが国を含めた諸国では違法性が問われる活動まで容認されている。
欧州	基礎研究	○	↗	サイバーセキュリティー全般として基礎研究は活発であり、国際会議での発表も数多くなされている。
	応用研究・開発	△	→	欧州も個人情報保護や通信の秘密の制限が厳しくかけられているため、実用化段階の検証が行いにくいのが現状である。5 年ほど前であるが、フランス Eurecom の研究者が大挙して渡米し、米国のセキュリティー企業や大学に転職するという事態も発生している。
中国	基礎研究	－	－	監視運用に関する情報はほとんど公開されていないため評価が難しい。
	応用研究・開発	－	－	Golden Firewall（金盾）と言われる通信監視が極めて効果的に機能していることから、かなりのレベルの技術開発が行われていることは推定できるが、監視運用に関する情報はほとんど公開されていない。
韓国	基礎研究	○	↗	北朝鮮が関与したとされるサイバー攻撃を受け重要情報が流出するなどの被害が年に数回の頻度で発生しているため、監視運用に必要な基礎技術の開発は比較的活発である。
	応用研究・開発	△	→	基礎技術の製品化は、政府機関等での採用必須化などもあり、アンチウイルスソフトや IDS など一定の分野で進んでいる。ただし、米国やイスラエル製品と競合する分野では、厳しい競争にさらされ、製品化が難しいのが現状である。
イスラエル	基礎研究	○	↗	サイバーセキュリティーに直結しないものであっても、国防に関連する可能性がある基礎理論分野については、大学や研究機関において活発に研究されている。
	応用研究・開発	△	→	国家による支援制度もあり、数多くのベンチャー企業が立ち上がっている。また、大学等の研究機関との連携も国家が後押しする体制が整っている。ただし、製品化に関するノウハウが十分にないこともあり、他国企業と共同で製品化する事例も多い。また、米国製品と競合することが多いのも実情である。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、　○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、　×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、　→：現状維持、　↘：下降傾向

(8) 参考文献

1）Piyokango, “JTB への不正アクセスについてまとめてみた”,
http://d.hatena.ne.jp/Kango/20160614/1465925330（閲覧日 2016-12-15）
2）Piyokango, “経団連事務局端末の不審な通信発生についてまとめてみた”,
http://d.hatena.ne.jp/Kango/20161110/1478795281（閲覧日 2016-12-15）

3）Piyokango, “2016 年 6 月に複数の組織で確認されたマルウエア感染インシデントについてまとめてみた”,
http://d.hatena.ne.jp/Kango/20160626/1466954474（閲覧日 2016-12-15）
4）独立行政法人 情報処理推進機構（IPA), “『高度標的型攻撃』対策に向けたシステム設計ガイド」の公開”,
https://www.ipa.go.jp/security/vuln/newattack.html（閲覧日 2016-12-15）
5）National Institute of Standards and Technology（NIST), “Computer Security Incident Handling Guide”,
http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-61r2.pdf
（閲覧日 2016-12-15）
6）西脇 春名 ,“大規模 DDoS 攻撃を引き起こした IoT ボットネット :「Mirai」ソースコード徹底解剖 - その仕組みと対策を探る”,
http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1611/08/news028.html
（閲覧日 2016-12-15）
7）Piyokango, “フィンランドで発生した DoS 攻撃の影響による家庭用管理システムの障害についてまとめてみた”,
http://d.hatena.ne.jp/Kango/20161126/1480177786（閲覧日 2016-12-15）
8）McAfee Labs, “2016 年の脅威予測”,
http://www.mcafee.com/jp/resources/reports/rp-threats-predictions-2016.pdf
（閲覧日 2016-12-15）
9）Apple, “Supporting IPv6-only Networks”,
https://developer.apple.com/news/?id=05042016a（閲覧日 2016-12-15）
10）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC), “サイバーセキュリティの概要”,
http://www.nisc.go.jp/conference/cs/kenkyu/dai05/pdf/05shiryou0304.pdf
（閲覧日 2016-12-15）
11）内閣サイバーセキュリティセンター（NISC), 政府のサイバーセキュリティに関する予算 ,
http://www.nisc.go.jp/conference/cs/dai06/pdf/06shiryou05.pdf
（閲覧日 2016-12-15）
12）Defense Advanced Research Projects Agency（DARPA), “DARPA Cyber Grand Challenge”,
https://cgc.darpa.mil/（閲覧日 2016-12-15）
13）Miter, “MITER Challenge IoT”,
https://www.mitre.org/research/mitre-challenge/mitre-challenge-iot
（閲覧日 2016-12-15）

3.5.7　IT システムのためのリスクマネジメント

（1）研究開発領域の簡潔な説明

重要性をます IT システムの安全を確保するためのリスクマネジメント（リスクアセスメント、リスクコミュニケーションを含む）技術の高度化を行う。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

［背景と意義］

現代社会は、IT システムに深く依存するようになってきており、IT システムの安全性の確保は非常に重要な課題になってきている。そのような中で、高度化、複雑化する標的型メール攻撃やランサムウエア、さらには内部犯罪のための対策を適切に実施するためには、ハードウエアやソフトウエアの導入などの個別の技術的対策だけでは不十分で、リスクアセスメント、リスクコミュニケーションを含むリスクマネジメントのための理論から実務までの体系化やそのための技術の高度化が不可欠となってきている。

特に、最近では、次のような対応が必要となっている。

（a）新しい状況に適応したリスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立。

重要インフラや IoT もサイバー攻撃の対象となりつつあり、攻撃により重要インフラや IoT が誤動作した場合やそのサービスが失われた時の脅威は非常に大きな問題となることが予想されることからこれらを含めた新しいフレームワークが必要となる。

（b）リスクマネジメントの基礎となるリスク分析やリスク評価を含むリスクアセスメント技術の高度化。

攻撃手段が高度化・複雑化しており、従来のフォルトツリーやアタックツリーのようなリスク分析法では、適切なリスク分析が行えず、適正な現状のリスクやリスク対策効果の把握が困難になっている。また、リスクの時間推移に伴う動的変化への対応も必要となる。さらに、ここでは、リスク対策が必要かどうかだけでなく、どのような対策の組み合わせが望ましいのかの検討も可能とする必要がある。

（c）リスクに関与する人たち（例えば経営者、従業員、顧客など）がいろいろいる中で、提案された対策案やその組み合わせを実行するに当たってのリスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成。

損害額・対策費用の増大等の問題が生じており、セキュリティー担当者の判断だけで対策を決定するのは困難になってきている。このため、経営者との間の適切なリスクコミュニケーションが大切になっている。経営者とのリスクコミュニケーションは時間がかかりすぎないようにするとか技術的な知識が十分でなくとも判断しやすくする等の難しい条件が要求される。

［これまでの取り組み］

（a）リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立：

IT 分野では、2000 年に情報セキュリティーマネジメントが標準化の対象となってい

る（ISO/IEC27001）[1]。しかし、この段階で情報セキュリティーのリスクマネジメントで扱う対象は、下記の三つの階層のうち第 2 階層が中心で、情報資産をマネジメントの対象としてあつかってきてきた。

第 1 階層　IT システムそのものの安全
第 2 階層　IT システムが扱う情報の安全
第 3 階層　IT システムが行うサービスの安全

そして、第 1 階層の IT システムそのものの安全性のうちハードウエアの安全性はほとんど扱われてこなかった。またネットショッピングの安全などの第 3 階層の IT システムが行うサービスの安全問題もほとんど対象外であった。さらに、この段階では、関与者間のリスクコミュニケーションの問題も明示的には扱われてこなかった。

2009 年になると一般化されたリスクやリスクマネジメントの定義が標準化された（ISO 31000）[2]。ここでは、図 3-5-2 に示すようなリスクマネジメントプロセスが提案され、リスクマネジメントの中に、リスクアセスメントだけでなく、リスクコミュニケーションが位置づくようになった。このような中で、重要インフラや IoT を含めてリスクマネジメントのためのフレームワークという動きがみられるようになってきた。企業全体のリスクの中に情報システムのリスクをどう位置づけるかなどの検討のため情報セキュリティーのリスクを経済学的に扱う試みが 21 世紀になって行われ始めた[3]。セキュリティー経済学については、ENISA で 2011 年より、WG が作成され、必要なアプローチ方法に関する分析結果が 2012 年に報告されている[4]。

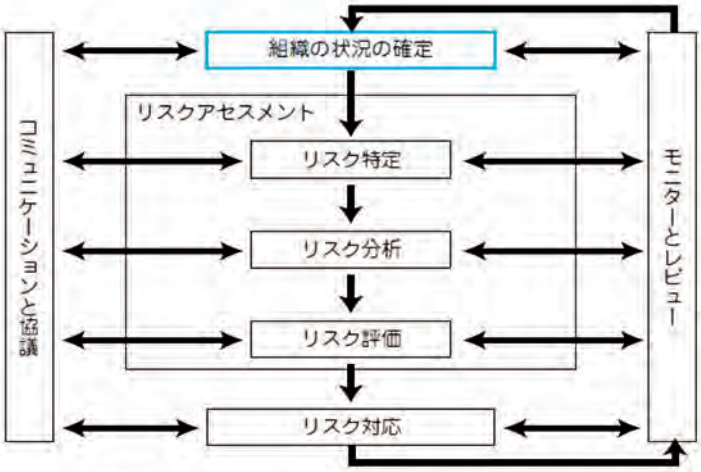

図 3-5-2　リスクマネジメントのプロセスの流れ

(b)　リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化。

リスクマネジメントの中心となるリスクアセスメントは、次の二つのフェーズに分けて考えることができる。

(1)　対策を必要とするリスクの明確化
(2)　そこで必要となる対策の検討とそのプライオリティ付け

(1) のために実施されるのがリスク分析である。従来は定性的分析や準定量的分析法が中心であったが定量的分析の試みも行われてきた。例えば、Bruce Schneier がセキュリティー評価に適するようにフォルトツリー分析法を改良したアタックツリー分析

法[5] の適用なども行われている（例えば、文献 6)）。また、高度化・複雑化するサイバー攻撃の対策のリストアップと対策効果の推定を容易にするために、侵入後の種々のシーケンスの記述が可能なイベントツリー分析法と各シーケンスの分岐時点における対策効果の記述が容易なディフェンスツリー分析法を組み合わせる方式も提案されている[7]。

このようなモデル化を行ううえで脅威分析の方法に関する研究が進み始めている[8]。重要インフラや IoT を対象にすることにより、機密性の喪失だけでなく、完全性や可用性の喪失が重要になり、制御対象を含めたリスク評価が重要になってきているからだと考えることができる。このため、セキュリティーとセイフティーを統一的に扱おうとする試みが行われている[9]。

(c) リスクに関与する人たちがいろいろいる中で、提案された対策案やその組み合わせを実行するに当たってのリスクコミュニケーションに基づく関与者間の合意形成

IT システムに関するリスクコミュニケーションの研究は、国内外でほとんど行われてこなかった。佐々木良一らは、IT システムのリスクコミュニケーションの目的を①個人的選択、②組織内合意形成、③社会的合意形成の 3 つに分けられることを示すとともに、組織内合意のために多重リスクコミュニケータ MRC の開発を行った[10]。これは、リスク間の対立や、関与者間の意見の相違を考慮しつつ、リスクコミュニケーションにより対策案の最適な組み合わせを求められるようにするものである。MRC については種々の発展が図られている。しかし、IT システムのリスクコミュニケーションの検討はまだまだ不十分であり、今後研究の加速が期待される。

［今後必要となる取り組み］

(a) 重要インフラや IoT なども含めたリスクマネジメントのためのより広いフレームワークの確立

サイバー攻撃の激化や、いろいろなものがインターネットに接続されたことから、既に述べたように、リスクマネジメントの新しいフレームワークの検討が少しずつではあるが進みつつある。このような検討は「産」だけでも「学」だけでも不可能で産官学が協力した推進が必要となる。

(b) リスクアセスメント技術の適用範囲の拡大と適用容易化

今後、クラウドのリスクアセスメント、サプライチェインのリスクアセスメント、制御システムのリスクアセスメント、内部犯罪のリスクアセスメントなどが重要になると考えられているが、その研究はまだまだ不十分である。脅威分析の深化や、セキュリティー分析と安全分析の関連付けと統一的扱いも重要な課題となる。

また、リスクの本質である、一つのリスク対策が新たなリスクを生み出す問題や、リスク対策により、攻撃側が動的に変化する問題などを考慮した新しいリスクアセスメント技術の開発が期待される。

さらに、対策案の組み合わせを求めるためのリスクアセスメント技術については、大規模なシステムに適用できるようにするとともに、多くの人が適用できるようにしていく必要があると考えており、さらなる改良が期待されている。

また、重要インフラや IoT を対象にすると、セキュリティー分析だけでなく安全分

析も必要になってきており、これらをどのように組み合わすべきかということも課題となってきている。

(c) IT システムのためのリスクコミュニケーションに関する研究の深化

IT システムの適用に関する社会的合意形成（例えば、青少年のための情報フィルタリング）のためのリスクコミュニケーション技術が重要になっていくと考えられる。また、組織内合意形成においても多くの人が容易に適用できるようにする方向での改良が期待されている。特に、今後はリスクコミュニケーションに経営者の参加が不可欠となるが、経営者はリスクコミュニケーションに多くの時間をかけるわけにいかず、技術的理解も限界がある中で適切な合意形成をできるようにしていく必要がある。

さらに、合意形成を可能にする要因等の分析等の理論化を通じた、リスクコミュニケーション手段の高度化なども重要なテーマになっていくと考えられる。

(3) 注目動向

リスクマネジメントのためのフレームワークの確立と、それに伴い必要となる技術の確立については、2008 年ごろより佐々木良一らが「IT リスク学」[11] の名のもとに IT リスクを広くとらえたうえで、学の確立を図ってきている。

2014 年 2 月には米国の NIST（国立標準技術研究所）が「重要インフラのサイバーセキュリティーを向上させるためのフレームワーク」を策定し、リスクに関する目標と現実のギャップを特定・分析し、優先順位付けを行う方法を提案した[12]。経営層とのリスクコミュニケーションの方法についても考慮しているのが大きな特徴であり、注目に値する。

また、Jack Freund と Jack Jones は 2015 年に “Measuring and Managing Information Risk: A FAIR Approach”[13] という本を出版し、Information Risk のフレームワークの見直しと Information Risk の測定法や管理法の検討を試みている。FAIR というのは Factor analysis of information risk の略である。ここでは、定量的リスク分析を積極的に扱い発生確率の不確実性を考慮し、モンテカルロ法を用いてリスクの分布を求めるような方法も提案されている。FAIR Institute という非営利組織も設立され、FAIR に基づくリスクマネジメントの普及活動を行っているようである。

リスクマネジメントの基礎となるリスクアセスメント技術の高度化については、2012 年には、米国の NIST（National Institute of Standards and Technology）より SP800-30 Rev.1（リスクアセスメントの実施の手引き）[14] が出版され、リスクアセスメントのための具体的手順が示された。しかし、一般的な方法であり、目的や対象によっていろいろな手法が必要とされるが、これらに関する研究は限定的である。

必要となる対策の検討とそのプライオリティ付けは図 3-5-2 におけるリスクの評価に対応し、どのような対策をとるべきかを明確にするため、Stefano Bistarelli らは , アタックツリーに脆弱性への対策を適用したディフェンスツリーを定義し , 対策のリスク低減率と運用コストを考慮した ROI（Return On Investment）と , 攻撃者が再攻撃を仕掛ける割合を考慮した ROA（Return on Assets）を用いた最適な対策選定手法を提案している[15]。

また、事故シーケンスの発生確率を下げる対策と、損害の大きさを低減する対策を組み合わせて最適な対策案の組み合わせを求める方式の研究も増えてきている。2016 年には

“Risk Analysis and Security Countermeasure” という本[16] が出版され定量的評価に基づく対策案の選定を行う方法も提案された。最近、このような定量的分析に基づく対策の検討が注目を浴びているように見える。このため、リスク関連のデータをどのように集めるかにも関心が行くようになり、セキュリティーインテリジェンス技術と結びつけるような動きも出てきている。

(4) 科学技術的課題

情報セキュリティーや IT リスクの問題を考えるにあたっては、科学技術的な研究はもちろん重要であるが、国際政治、法律、安全保障、危機管理、経済学、心理学等の社会科学的視点も含めさまざまな領域の研究とも連携して行われることが求められる。しかし、これらの研究は個別かつ小規模におこなわれているに過ぎない。

(5) 政策的課題

今後の脅威の増大を考えるなら、政府はこの問題を重要課題として取り上げ、大きなプロジェクトの設立を検討すべきであると考える。このプロジェクトにおいては、セキュリティー保険とのリンク等社会実装の関係も含めて研究課題としておくべきだろう。

(6) キーワード

リスクアセスメント、リスクコミュニケーション、リスクマネジメント

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	IT システムに関するリスクコミュニケーションなどの研究が大学などで積極的に進められているが層は薄い。
	応用研究・開発	○	↗	IPA 等でセキュリティー経済学やリスク心理学的アプローチが進み始めているが層は薄い。
米国	基礎研究	◎	↗	リスクアセスメントに関する大学における研究は多い。また、理論的研究に関するアプローチが開始されている。
	応用研究・開発	◎	↗	NIST を中心に、リスクマネジメントに関する基準やガイドを策定して公開している。国の組織の安全性評価に積極的に適用している。
欧州	基礎研究	○	→	ディフェンスグラフを用いる対策案選定法などのリスクアセスメント技術が大学などで積極的に進められている。
	応用研究・開発	◎	→	セキュリティー経済学については、ENISIA で 2011 年より、WG が作成され研究がおこなわれてきたが、最近は目立った新しい動きは見られない。
中国	基礎研究	○	↗	大学などにおいてリスクアセスメントに関する研究は行われているようであり、論文などは増えつつある。
	応用研究・開発	△	→	目立った動きが見えない。

韓国	基礎研究	○	→	大学などにおいてリスクアセスメントに関する研究は行われている。
	応用研究・開発	○	→	政府機関などにおいてリスクアセスメントが実施されている。

（注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
（注２） 現状　※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。
◎　特に顕著な活動・成果が見えている、 ○　顕著な活動・成果が見えている
△　顕著な活動・成果が見えていない、 ×　活動・成果がほとんど見えていない
（注３） トレンド
↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) International Organization for Standardization（ISO）, “ISO/IEC27001:2013,Information security management”, http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso27001.htm（閲覧日 2016-12-15）
2) International Organization for Standardization（ISO）, “ISO31000: 2009, Risk Management,” http://www.iso.org/iso/home/standards/iso31000.htm（閲覧日 2016-12-15）
3) Ross Anderson, “Why information security is hard---An economic perspective,” In Proceedings of the17th Annual Computer Security Appliations Conference（Louisiana, USA, 2001）, pp. 358-364（IEEE, 2001）.
4) European Union Agency for Network and Information Security（ENISA）, Working Group on Economics of Security https://www.enisa.europa.eu/activities/risk-management/working-group/WG%20EoS（閲覧日 2016-12-15）
5) Bruce Schneier, “Attack trees,” Dr. Dobb’s journal, Vol. 24, pp. 21-29（1999）.
6) Sophie Pinchinat, Mathieu Acher, and Didier Vojtisek, “Towards Synthesis of Attack Trees for Supporting Computer-Aided Risk Analysis” Workshop on Formal Methods in the Development of Software（co-located with SEFM）2014（Grenoble, France, 2014）.
7) 石井 亮平 , 佐々木 良一 , 金子 紀之 , “イベントツリーを用いたリスク評価ツールの実装と標的型攻撃最適組み合わせ問題への適用”, コンピュータセキュリティシンポジウム 2013（高松 , 2013）論文集 4 号 , pp 147-154（情報処理学会 , 2013）.
8) 大久保隆夫 , “脅威分析法 組み込みの安全性とセキュリティを保証するために”（情報セキュリティ大学院大学講義資料） https://www.ipa.go.jp/files/000046476.pdf（閲覧日 2016-12-15）
9) Kenji Taguchi, et. al., “Meta-modelling approach to standardizing Safety-Sensitive Consumer Devices,” Asia-Pacific Council on Systems Engineering Conference（APCOSEC）2013（Yokohama, Japan, 2013）.
10) 佐々木 良一 , 日高 悠 , 守谷 隆史 , 谷山 充洋 , 矢島 敬士 , 八重樫 清美 , 川島 泰正 , 吉

浦 裕 , “多重リスクコミュニケータの開発と適用” , 情報処理学会論文誌 Vol. 49, No. 9, pp. 3180-3190 (2008).

11）佐々木 良一 (編),「IT リスク学 情報セキュリティを超えて」(共立出版 ,2013).

12）National Institute of Standards and Technology（NIST), “Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity Ver.1.0（February 2014)” , https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/cyberframework/cybersecurity-framework-021214.pdf（閲覧日 2016-12-15）

13）Jack Freund and Jack Jones, Measuring and Managing Information Risk: A FAIR Approach（Elsevier, 2015).

14）National Institute of Standards and Technology（NIST), “Guide for Conducting Risk Assessments（September 2012)” , http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-30r1.pdf（閲覧日 2016-12-15）

15）Stefano Bistarelli, Fabio Fioravanti, and Pamela Peretti, “Defense trees for economic evaluation of security investments,” In Proceedings of the 1st International Conference on Availability, Reliability and Security（Vienna, Austria, 2006), pp. 416-423 (IEEE. 2006).

16）Thomas L. Norman, Risk Analysis and Security Countermeasure（CRC, 2016).