2．俯瞰区分と研究開発領域

2.1　人工知能・ビッグデータ

人工知能（Artificial Intelligence：AI）技術は、人間の知的活動（認識、判断、計画、学習等）をコンピューターで実現するための技術群である。今日、AI 研究はさまざまな立場から取り組まれている。たとえば、人間の知能の本質・メカニズムをコンピューターで実現しようという立場（強い AI）や、人間の知能の働き・振る舞いに類する機能をコンピューターで実現しようとする立場（弱い AI）がある。また、人間の知能のさまざまな側面を広くカバーする汎用性の高いシステム（さまざまな状況で人間の知能のように動作するシステム）を目指す立場（汎用 AI）や、特定の機能や特定の状況下でのみ人間に近い（ときには精度で人間を上回る）振る舞いをするシステムを目指す立場（特化型 AI）がある。昨今、第 3 次 AI ブームと言われ、AI 技術がさまざまな実用的な応用に広がっているが、それらは現状、特化型 AI かつ弱い AI に相当する技術群である。

一方、ビッグデータ（Big Data）は、元来は膨大な量のデータそのものを指す言葉だが、その収集・蓄積・解析技術は、大規模性だけでなくヘテロ性・不確実性・時系列性・リアルタイム性等にも対応できる技術として発展している。また、センサー、IoT（Internet of Things）デバイスの高度化と普及によって、さまざまな場面で実世界ビッグデータが得られるようになり、その収集・解析技術は、実世界で起きる現象・活動の状況を精緻かつリアルタイムに把握・予測するための技術としても期待されている。今日、さまざまな社会課題が人間の手に負えないほどに大規模複雑化しており、実世界ビッグデータの収集・解析による状況の把握・予測は、そのような課題の解決に共通的に貢献し得る有効な手段になる。

これら AI 技術とビッグデータ（データそのもの、および、処理技術）は深く関係し合いながら発展している。ビッグデータが集められることで AI 技術（特に機械学習技術）は高度化し、精度を高め、その AI 技術を用いて実世界のビッグデータを解析することで、実世界の現象・活動のより深く正確な状況把握・予測が可能になってきた。

[AI・ビッグデータの俯瞰図（時系列）]

AI・ビッグデータの技術発展に関する俯瞰図（時系列）を図 2-1-1 に示す。この図では、横軸が年代、縦軸が取り組みの広がりをおおまかに表している。図中には、その時期に台頭した技術およびエポックをプロットした。AI は現在、3 回目のブームを迎えているが、これまでブームと連動して取り組みが広がってきた様子を示している。

第 1 次 AI ブーム（1950 年代後半から 1960 年代）では、AI に関わる基礎的な概念が提案され、AI が新しい学問分野として立ち上がったが、実用性という面ではまだトイシステムであった。第 2 次 AI ブーム（1980 年代）では、人手で辞書・ルールを構築・活用するアプローチが主流となり、エキスパートシステム、指紋・文字認識、辞書・ルールベース自然言語処理等（カナ漢字変換等）の実用化にも結び付いた。第 3 次 AI ブーム（2000 年代から現在）では、インターネットやコンピューティングパワーの拡大を背景として、ビッグデータ化と機械学習の進化がブームを牽引し、画像認識・音声認識、機械翻訳、囲碁・将棋等では人間に追いつき／上回る性能を示し、さまざまな AI 応用システム（認識・検索・対話システム等）が実用化され、社会に普及している。

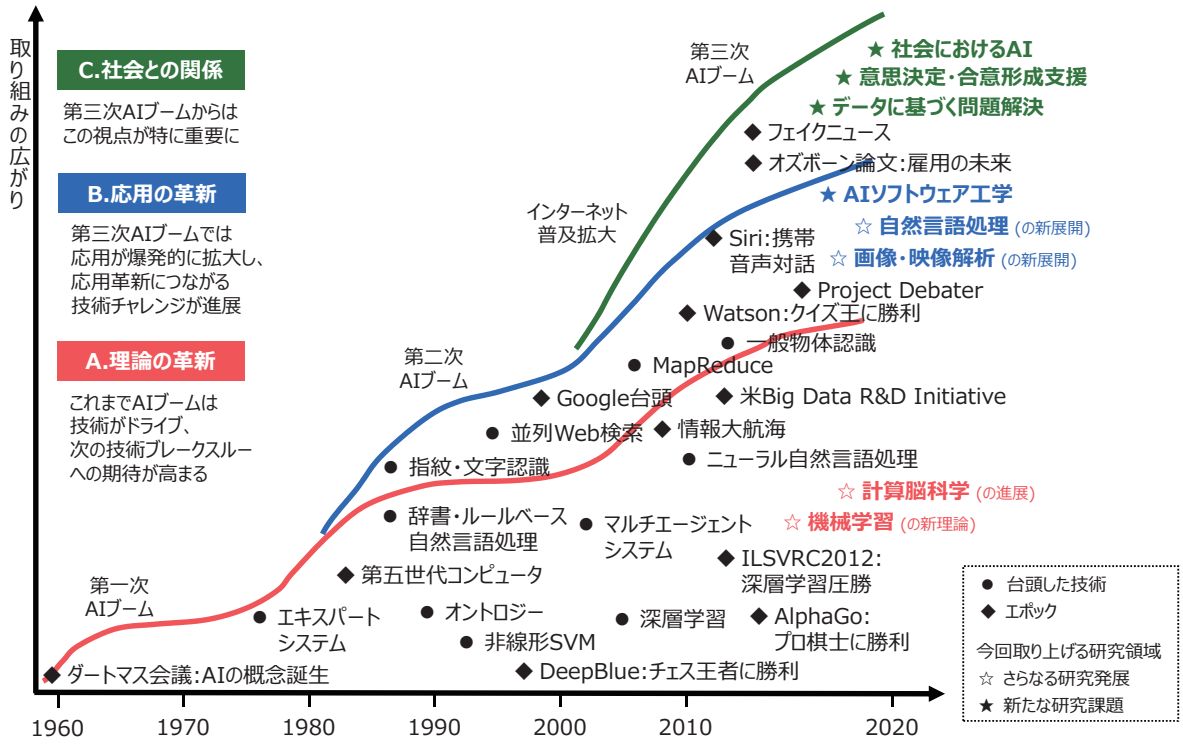


図2-1-1　人工知能・ビッグデータの俯瞰図（時系列）

このような技術発展を図 2-1-1 では 3 つの大きな流れでとらえている。

1 つめの流れは「A. 理論の革新」である（図中の赤ライン）。3 回の AI ブームはいずれも理論面の発展（知識表現・記号処理、辞書・ルールベース処理、機械学習・深層学習等）やコンピューティングパワーの増大等の技術進化によってドライブされた。

2 つめの流れは「B. 応用の革新」である（図中の青ライン）。第 2 次 AI ブーム以降は実用的な応用が生まれ始め、ビッグデータの高速並列処理・知識処理の実用化が進み、第 3 次 AI ブームでは、機械学習の応用分野が爆発的に拡大した。

3 つめの流れは「C. 社会との関係」である（図中の緑ライン）。これは第 3 次 AI ブームを迎えて、活発に議論されるようになった視点である。AI 技術のさまざまな応用が社会に広がったことに加えて、AI 技術の可能性が人間にとって恩恵だけでなく脅威や弊害ももたらし得るという懸念が強まったためである。

このようなこれまでの技術発展を踏まえて、図 2-1-1 にはさらに、今後の発展に関して、特に注目する技術テーマを 8 つ追加した（図の右端の赤字・青字・緑字の項目）。「機械学習」「計算脳科学」「画像・映像解析」「自然言語処理」という 4 つは、これまでも取り組まれてきた技術テーマであるが、理論や応用の革新という流れの中で、さらなる研究発展の勢いが感じられるものである。また、「AI ソフトウェア工学」「データに基づく問題解決」「意思決定・合意形成支援」「社会における AI」という 4 つは、AI の社会との関係や応用の革新といった流れの中で、新たな研究課題として立ち上がりつつあるものである。

[AI・ビッグデータの俯瞰図（構造）]

次に、これら８つの技術テーマを、AI・ビッグデータの技術スタックの中に位置付けた俯瞰図（構造）を、図 2-1-2 に示す。この図では、システムを構成する技術群を「処理基盤層」「処理コンポーネント層」「ソリューション層」に分けている。また、それと分けてもう一つ、「人間の理解、社会の受容」という層を設けている。これは、システムを設計する上で、その利用者となる人間や、それが組み入れられる社会についての理解・モデル化や規範・ガイドラインの議論も必要となるためである。図 2-1-2 には、今回注目する８つの技術テーマのほかにも、この技術スタック中に位置付けられる他の主要な技術テーマも配置している（図中で番号を振っていない薄い黄色の箱の項目）。

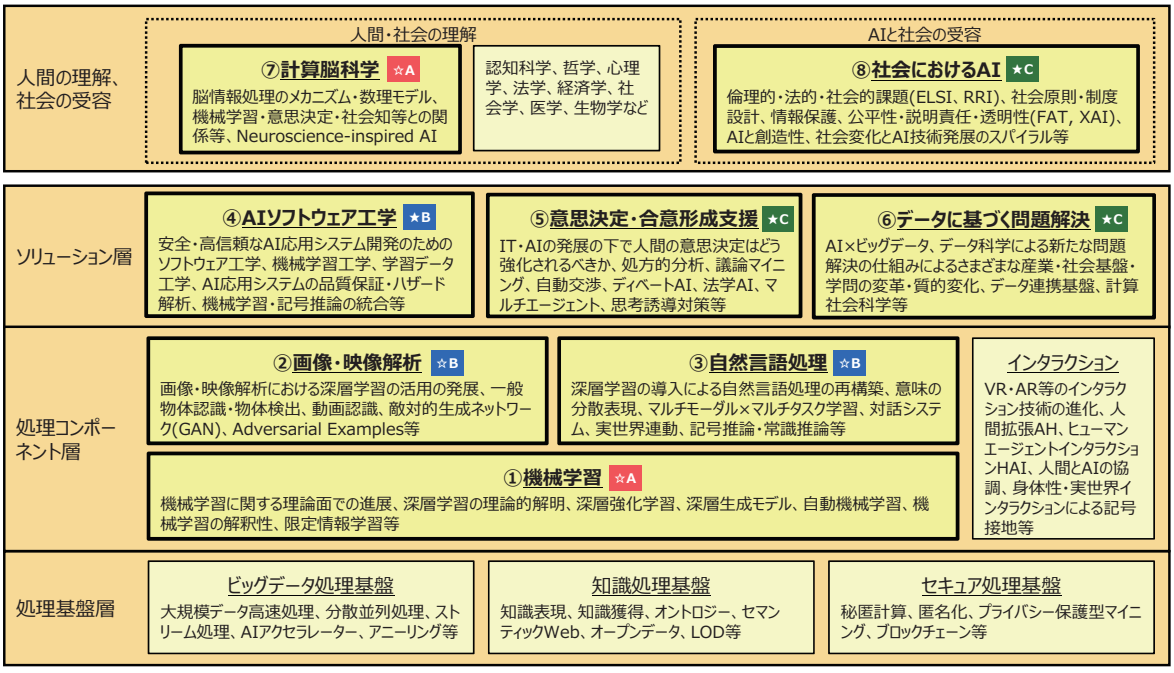


図2-1-2　人工知能・ビッグデータの俯瞰図（構造）

８つの技術テーマ（研究開発領域）について、その簡単な定義を以下に示す。それぞれの詳細は後続の節にまとめている。

①機械学習：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分類、予測、異常検知等が可能になる。
②画像・映像解析：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が何であるか（人や物体、文字等）、その位置や状態、あるいはシーン全体の状況を認識する技術である。
③自然言語処理：コンピューターによって自然言語を処理する技術である。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り、自然言語処理は、人間のコミュ

ニケーション、思考等の知的作業、知識の流通・活用等を支援する。

④ AI ソフトウェア工学：AI 応用システムを、その安全性・信頼性を確保しながら効率よく開発するための新世代のソフトウェア工学を意味する。従来の演繹型システム開発に加えて、機械学習を用いた帰納型システム開発にも対応した開発方法論・技術体系である。

⑤意思決定・合意形成支援：情報爆発等による可能性の見落としやフェイクニュース等による悪意・扇動意図を持った思考誘導操作の問題を、AI を含む情報技術によって軽減し、個人・集団が主体性・納得感を持って意思決定できるように支援する。

⑥データに基づく問題解決：AI・ビッグデータ解析が可能にする大規模複雑タスクの自動実行や膨大な選択肢の網羅的検証等による、問題解決手段の質的変化、産業構造・社会システム等の転換を生み出す研究開発領域である。

⑦計算脳科学：脳を情報処理システムとしてとらえて、脳の機能を調べる研究分野である。脳という情報処理システムについて、計算理論、表現・アルゴリズム、ハードウェアの 3 面からの理解を相互に深め、脳の情報処理機能を理解しようとする。

⑧社会における AI：AI 技術が社会に実装されていったときに起こり得る、社会・人間への影響や倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）を見通し、あるべき姿や解決策の要件・目標を検討し、それを実現するための制度設計および技術開発を行う研究開発領域である。

［AI・ビッグデータの研究開発強化戦略］

以上のような技術発展や研究開発領域の俯瞰を踏まえて、AI・ビッグデータの研究開発強化には、特にソリューション層への戦略的な取り組みが重要だと、JST CRDS では考えている。以下、その背景や理由を述べる。

- 図 2-1-1 俯瞰図（時系列）に示したように、取り組みが理論から応用、さらに社会との関係に広がっており、社会から見た AI・ビッグデータ技術の価値という視点がますます重要になっている。また、社会に対する、より大きな価値や新しい価値の創造、あるいは、脅威・弊害の回避を狙うことが、新たな革新技術への要請（新たな価値を生み出すために求められる技術的要件の明示）につながる。すなわち、図 2-1-2 俯瞰図（構造）におけるソリューション層の戦略強化が、上位層（社会、人間）に対する価値創造と、下位層（処理コンポーネント層、処理基盤層）に対する技術的要請を生む。

- 図 2-1-2 俯瞰図（構造）における処理コンポーネント層や処理基盤層については、国の施策として、人工知能技術戦略会議や、理化学研究所・産業技術総合研究所・情報通信研究機構等での取り組みが強化されている。また、上位層の「社会における AI」についての検討も「人間中心の AI 社会原則検討会議」をはじめ、複数の取り組みが進められてきた。しかしながら、その間をつなぐソリューション層の戦略強化は必ずしも十分でなかった。これに対して、図 2-1-2 におけるソリューション層は、(1)「AI システム」、(2)「人間」、(3)「社会」という 3 視点に対応し、その強化の方向を示している。つまり、
  (1)「AI システム」の視点では、安全で信頼できる AI システムを作るにはどうすればよいかという「AI ソフトウェア工学」の強化、

(2)「人間」の視点では、AIシステムと共存することで人間の思考や意思決定がどのように変化し、それをどう支援すべきかという「意思決定・合意形成支援」の強化、
(3)「社会」の視点では、AIシステムが組み込まれることで社会・産業・学問等がどう変革されるかという「データに基づく問題解決」の強化
という方向性を示した。

・ AI・ビッグデータの研究開発は「理論×データ×ソフトウェア」という3つの掛け合わせが競争力を生む。また、AI・ビッグデータは社会との関係が深くなり、研究者には、情報科学技術だけでなく、人文・社会科学まで含めた幅広い視野が求められるようになってきた。ソリューション層を起点とした研究開発強化は、このような人材の育成にも貢献する。

以上のような考えから、JST CRDSでは2018年に、ソリューション層を起点とした研究開発強化の提言として、「AIソフトウェア工学」と「意思決定・合意形成支援」について戦略プロポーザルを作成した[1]。

[1]「AIソフトウェア工学」に関する戦略プロポーザル：「AI応用システムの安全性・信頼性を確保する新世代ソフトウェア工学の確立」（CRDS-FY2018-SP-03、2018年12月発行）
http://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2018-SP-03.html
「意思決定・合意形成支援」に関する戦略プロポーザル：「複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術」（CRDS-FY2017-SP-03、2018年3月発行）
http://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2017-SP-03.html

２．１．１　機械学習

（１）研究開発領域の定義

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分類、予測、異常検知等が可能になる。

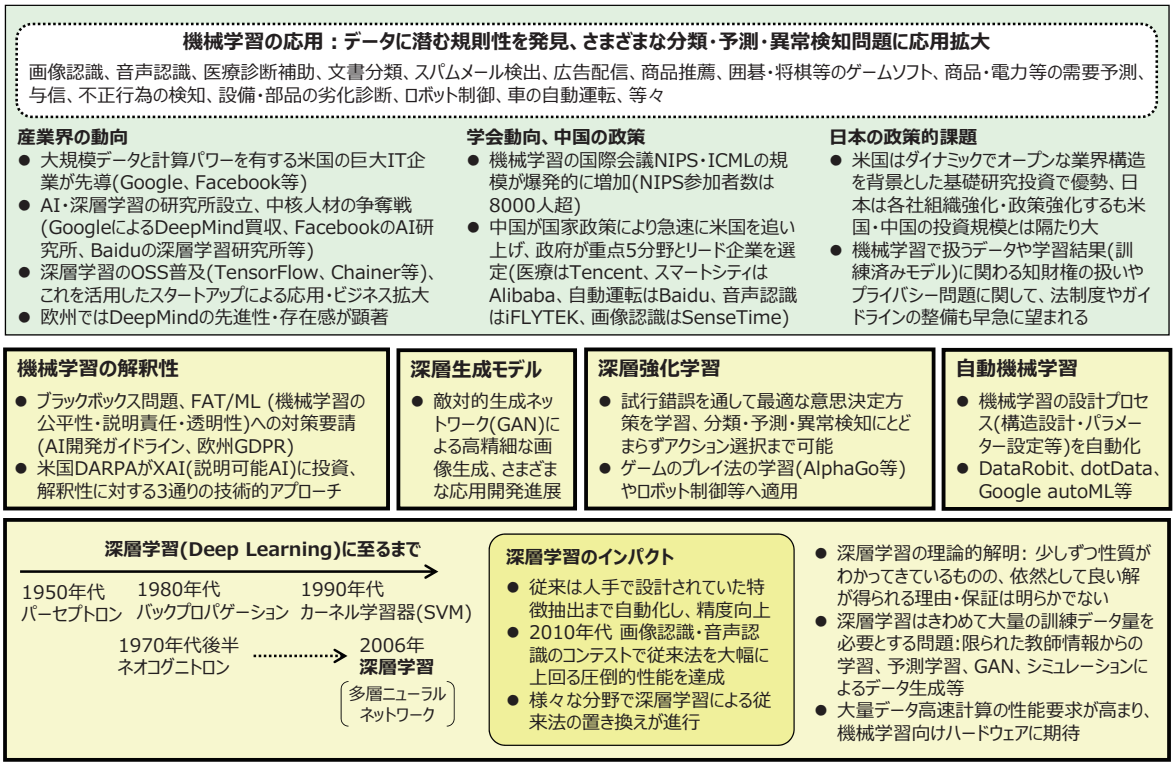


図2-1-3　領域俯瞰：機械学習

（２）キーワード

機械学習、ニューラルネットワーク、深層学習、深層生成モデル、深層強化学習、自動機械学習、ブラックボックス問題、訓練（学習）データ、訓練（学習）済みモデル

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

分類、予測、異常検知等の機能を実現したい目的に応じて、機械学習に投入するデータを用意することで、それらの機能が実現可能になる。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でさまざまな目的に利用されるようになった（例えば、画像認識、音声認識、医療診断補助、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）。

人工知能（AI）のモデル化は、トップダウンに人間が規則性を記述するアプローチと、ボトムアップに観測データから規則性を発見するアプローチの両面から取り組まれている。1980年代の第2次AIブームのときは前者が盛んに試みられたが、現在の第3次ブームを牽引しているのは後者である。ビッグデータの時代と機械学習技術の進化によって、人間には規則性を見出すのが難しいような現象のモデル化（規則性の記述）が可能になってきた。

［研究開発の動向］

① 技術発展の流れ

機械学習の基本的な処理構成は、訓練ステップ（学習ステップとも呼ばれる）と推論ステップに分かれる。訓練ステップは、訓練データ（学習データとも呼ばれる）を与えて、モデルを作るステップである。ここで作られたモデルは、訓練データの統計的傾向・規則性を表したものになる。推論ステップは、新たに入力されるデータを、訓練済みモデル（学習済みモデルとも呼ばれる）と照合することで、分類・予測・異常検知等の判定結果を出すステップである。訓練データに判定結果に関わるラベルが付与されているケースは教師あり学習、付与されていないケースは教師なし学習と呼ばれる（なお、教師あり学習・教師なし学習とは異なるタイプとして強化学習があるが、これについては後述する）。

機械学習の研究では、訓練ステップのアルゴリズム（学習アルゴリズム）、つまり、訓練データからそこに潜む統計的傾向・規則性をどのようにして見出すかが、一つの重要なポイントになる。モデルを訓練データにフィットさせ過ぎると、推論ステップで与えられるデータに対して必ずしも高い精度が得られないという問題（過学習と呼ばれる）も生じるため、汎化が適切に行われるような仕掛けが必要である。学習アルゴリズムの研究では、統計解析の手法とともに、人間の脳神経回路にヒントを得たニューラルネットワークを用いた手法が注目されるようになった。

このような研究は、古くは1950年代にパーセプトロン[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排他的論理和（eXclusive OR: XOR）のような入り組んだ関数を学習できないことが明らかになり[2)]、1970年代には関連する研究は下火になった。

しかし、1980年代に入って、バックプロパゲーション（Backpropagation、誤差逆伝播法）[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各ノードの重みを誤差逆伝播によって計算する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事ができる。その後、大規模データに対する超高速学習アルゴリズム等の開発を経て、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、未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只中であった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文字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、良質かつ大規模な画像データセットであるImageNetを使った画像認識コンペティション（ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge: ILSVRC）等の画像認識や音声認識のコンテストで既存手法を大幅に上回る世界最高性能を達成するに至った。CNNは空間的構造の表現の取り扱いに適しており、その多層化による性能向上のメリットを最大限享受できる学習として、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が考案された。これ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、それまでの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。一方、時間的構造の表現の取り扱いに適した方式としては、再帰型ニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network：RNN）が考案され、自然言語や時系列データのような連続性のあるデータの解析に用いられるようになった。

② コミュニティーの動向

こうした機械学習の基礎研究は、Neural Information Processing Systems Conference（NIPS、NeurIPS[1]）、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1,200人、2014年が2,400人、2015年が3,800人、2016年が5,000人、2017年・2018年[2]は8,000人規模の参加者があった。ICMLも参加者数は、2013年が900人、2014

[1] 2018年より略称が「NIPS」から「NeurIPS」に変更された。
[2] NeurIPS 2018は参加登録サイトがオープンしてからわずか11分で満席となった。2017年・2018年とも参加者数が同規模だが、勢いが頭打ちになったというわけではない。

年が1,200人、2015年が1,600人、2016年が3,000人、2017年が2,400人、2018年が5,000人と多数の参加者があり、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）の象徴となっている。

最先端の研究開発が進められている一方で、機械学習の基本的なアルゴリズムは、オープンソースソフトウェア（Open Source Software: 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・PyTorch（Facebook等）、TensorFlow（Google）、Chainer（Preferred Networks）等がよく知られている[8)]。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、機械学習・深層学習のコモディティ化が進んでいる。

③ 主要国での取り組み

機械学習の研究開発・ビジネスは、米国が規模・質ともに世界をリードしている。AI分野の国家戦略・投資では、歴史的に米国国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency：DARPA）が中心的な役割を果たしてきたことに加え、GAFAと呼ばれる巨大IT企業（Google, Amazon, Facebook and Apple）が活発な取り組みを進めている。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。

その米国を中国が急激に追い上げており、Association for the Advancement of Artificial Intelligence（AAAI）、International Joint Conferences on Artificial Intelligence（IJCAI）といったトップレベル国際会議での採択論文数でも米国に迫りつつある。中国政府は2017年7月に次世代AI発展計画を発表し、2030年までに理論・技術・応用のすべての分野で世界トップ水準に引き上げ、中国のAI産業を170兆円に成長させるという目標を設定した。これに向けて、11月には次世代AI発展計画推進弁公室を設立し、政府主導で4つの重点AI分野を定め、医療分野はTencent（騰訊）、スマートシティーではAlibaba（阿里巴巴）、自動運転はBaidu（百度）、音声認識はiFLYTEK（科大訊飛）をリード企業として選定した。その後、5つめとして、画像認識でSenseTime（商湯科技）もあげられるようになった。

わが国では、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／データ駆動知能システム研究センターが、政府投資に基づくAIの研究開発を推進している。政府は2016年4月に人工知能技術戦略会議を設立し、3省連携の司令塔機関の役割を持たせた。また、2018年9月に統合イノベーション戦略推進会議のもとで検討されたAI戦略案が発表された。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① 機械学習の解釈性

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ブラックボックス型である。学習結果はノードの重みに反映され、得られた規則性・モデルは人間が直接理解できる形では示され

ない。つまり、分類、予測、異常検知の結果について、理由を人間にわかりやすく説明することができない。

しかし、機械学習から得られた結果について、産業応用における分析担当者から顧客や意思決定者への説明、医療シーンにおける医師による医学的な所見との整合性確認、自動運転・ロボット制御等で事故が起きた場合の原因説明と責任の切り分け、公的機関での利用における公平性担保（人種・性別等によって不平等が生じない）といった要請がある。このような社会的要請から、透明性や説明責任がAI開発ガイドラインにおける重要な要件として論じられるようになってきた。国内では2016年から総務省のAIネットワーク社会推進会議において、AI利活用原則案・AI開発ガイドライン案が議論されている。国際的にも2014年から毎年「機械学習における公平性・説明責任・透明性」ワークショップFAT/ML（Fairness, Accountability, and Transparency in Machine Learning）が開催され、各国での議論も活発化している。欧州で2018年5月に施行された一般データ保護規制（General Data Protection Regulation：GDPR）には、AIの透明性を求める条文（GDPR第22条）が盛り込まれた。

そこで、この機械学習のブラックボックス問題に対する研究開発が活発になってきた[9]。米国DARPAは、説明可能なAI（Explainable Artificial Intelligence：XAI）への研究開発投資プログラムを開始した。このプログラムにおいて、機械学習の精度と解釈性を両立させることに向けたアプローチとして、次の3通りが取り組まれている。1つめはDeep Explanationである。深層学習について、入力の部分的な変化に対するモデル内の反応の変化を調べる等により、結果に特に影響を与えている要素・特徴を推定し、説明の根拠とする方法である。2つめはModel Inductionである。深層学習等のブラックボックス型の機械学習に対して、その入出力の振る舞いを、より解釈性の高い別モデルで近似する方法である。3つめはInterpretable Modelsである。ブラックボックスではない解釈性の高いモデルを用いる方法だが、決定木や重回帰分析のような従来のシンプルなモデルでは解釈性があっても高い精度が得られないため、解釈性がありながら精度も高い新しいモデルを作る。

Deep Explanationは、特に深層学習による画像認識応用において、認識結果が画像のどの部分やどんな特徴に着目して得られたのかを示す形で使われることが多い。また、Model Inductionでは、富士通が深層学習（Deep Tensor）の結果をナレッジグラフで説明する技術を発表し、Interpretable Modelsでは、NECが決定木的な場合分けと重回帰分析式を合わせて最適化する異種混合学習技術（因子化漸近ベイズ推論）を実用化している[10]。

② 深層生成モデル

機械学習でクラス分類を解くための手法には識別モデルと生成モデルがある。識別モデルはデータの属するクラスを同定するが、そのデータがどのように生成されたかは考えない。一方、生成モデルはデータがどのように生成されたか、その過程までモデル化する。深層学習に関して、前述のCNN等は識別モデルであるが、生成モデルにおいても著しい進展があった。特に、2014年にIan J. Goodfellow（当時モントリオール大学、現在Google）が発明した敵対的生成ネットワーク（Generative Adversarial Networks：GAN）[11]は、従来の生成モデルではできなかった高精細な画像を生成できることから、大いに注目され、画像生成を中心に精力的な技術開発と応用展開が進められている。本トピックについては「2.1.2 画像・映像解析」の節で詳しく述べる。

③ 深層強化学習

強化学習（Reinforcement Learning）[12] 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。これは試行錯誤を通してアクションを決定するものなので、ゲームのプレイや機器・装置の制御等への適用が広がっている。

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：詳細を後述）と注目を浴びた。また、Preferred Networks は CES（Consumer Electronics Show）2016 で「ぶつからない車」、CEATEC（Combined Exhibition of Advanced Technologies）2016 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。

④ 機械学習の設計自動化（自動機械学習）

OSS 化等、道具立てとして機械学習のコモディティ化が進んだが、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。機械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ことが多く、道具があっても使いこなすのは必ずしも容易ではない。また、大きな計算リソースを必要とする機械学習をクラウドで利用したいというニーズが高まっている。そこで、データと目的を与えれば結果が自動で出てくるような、機械学習の設計自動化、自動機械学習（Automated Machine Learning）の道具・フレームワークを目指した取り組みが活性化し、商用提供も始まった。これによって、データサイエンティスト不足が補われ、産業応用が広がることが期待される。

2012 年に米国ボストンで創業した DataRobot は、データサイエンティストの知識・ノウハウをソフトウェア化し、深層学習、決定木、ナイーブベイズ、SVM 等、100 以上のアルゴリズムから、問題やデータの性質に合う複数アルゴリズムを試し、精度の高い順にモデルを提示する機能を提供している。NEC は 2016 年にリレーショナルデータベースでの大規模データ予測分析プロセス全体を自動化する予測分析自動化技術（特徴量自動設計技術＋予測モデル自動設計技術）を発表し、2017 年にこの技術を製品提供する新会社 dotData を北米に設立した。銀行関連のデータ分析業務への適用事例では、従来 2 ～ 3 か月を要した作業期間が 1 日に短縮できたとのことである。

さらに Google はクラウド上で、Cloud Vision API や Natural Language API 等、訓練（学習）済みモデルによるサービスを提供してきたことに加えて、ユーザーが用意した訓練（学習）データを用いる自動機械学習サービス AutoML を発表した。2018 年 1 月に画像認識（Cloud AutoML Vision）、2018 年 7 月に自然言語処理（Cloud AutoML Natural Language）と機械翻訳（Cloud AutoML Translation）をリリースした。これらは、訓練済みモデルを別ドメインに転用して再学習する転移学習（Transfer Learning）技術と、対象ニューラルネットワークの構造やハイパーパラメーターを別のニューラルネットワークを用いた強化学習によって最

適化探索する NAS（Neural Architecture Search）技術によって実現されている [13]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

① DARPA の XAI プロジェクト [14]

前述の項「機械学習の解釈性」で触れたように米国 DARPA は、説明可能な AI（XAI）への研究開発投資プログラムを推進している（2017 年 5 月～ 2021 年 4 月の 4 年間）。この研究開発課題に対して、Data Analytics と Autonomy という 2 つの具体的なタスクを設定している。Data Analytics タスクは、マルチメディアデータを解析してターゲットを選択するに際して、選択の理由も示す（例えば、敵と判断した理由として銃の輪郭を強調表示する等）。Autonomy タスクは、ドローンやロボット等の自律システムにおいて、どういう状況でどういう理由で次の行動を決定したかを説明する。各タスクとも、説明可能なモデル（前述したように Deep Explanation、Model Induction、Interpretable Models という 3 通りのアプローチがある）だけでなく、説明のためのインターフェースも含んでいる。現在、11 チーム（UC Berkley、CMU、Xerox PARC 等）が採択されて、研究開発に取り組んでいる（1 チームあたりの予算規模は年間 $800K ～ $2M）。また、これら 2 つのタスクのほか、もう一つの研究開発課題として、説明の心理学的モデルが掲げられており、The Institute for Human & Machine Cognition（IHMC）が取り組んでいる。

② Google DeepMind の取り組み：AlphaGo から AlphaZero へ

ゲームを題材とした AI 技術開発は人間のチャンピオンに勝つことを、わかりやすいグランドチャレンジとして発展し、チェスでは IBM の Deep Blue が 1996 年に世界チャンピオンに初の 1 勝、翌年 1997 年には 2 勝 1 敗 3 引き分けで勝利した。将棋では 2010 年に「あから 2010」が女流王将に勝利し、その後、トッププロ棋士との直接対局は実現していないものの、対戦実績を重ねて結果から、2015 年にトッププロ棋士に追いついたとの判断がなされた。

完全情報ゲーム [3] として最も難度が高いとみられた囲碁は、さらに 10 年かかると言われていたが、Google DeepMind の AlphaGo（アルファ碁）が 2016 年～ 2017 年に世界トップランクプロに圧勝した。AlphaGo は、ゲーム AI 分野でよく使われているモンテカルロ木探索に、2 つの多層ニューラルネットワークを組み合わせた [15]。1 つは盤面を評価するための Value Network であり、もう 1 つは手を選択するための Policy Network である。これらは膨大なプロの棋譜からの教師あり学習と、膨大な回数の自己対戦による強化学習を通して訓練された。深層学習・深層強化学習によって、特定目的において人間の能力を超え得るというエポックメイキングな成果となった。

AlphaGo はその後、さらに進化し、2017 年 10 月に AlphaGo Zero というバージョンが発表された [16]。AlphaGo Zero では、Value Network と Policy Network を統合した 1 つの多層ニューラルネットワークを用い、盤面を評価し、次の手を選択する。その訓練にはもはや人間の棋譜は不要で、最初から自己対戦のみで訓練を重ねる。囲碁のルール以外の知識を与えず、自己対戦による強化学習のみを繰り返した結果、40 日後には従来の AlphaGo と 100 戦して

[3] 完全情報ゲームとは、すべての意思決定ポイントにおいて、これまでの行動や状態に関する情報がすべて得られるタイプの展開型ゲーム（ゲーム木の形式で表現できるタイプのゲーム）である。

89勝するまでになった。訓練にデータを必要とせず、自己対戦で成長するということは、ルールを変えるだけで（膨大なデータを用意する必要がなく）他の応用に適用でき、AlphaGo Zeroのアルゴリズムをさらに汎化したAlphaZero[17]はチェスや将棋でも世界チャンピオンプログラムに勝利した。サイエンス系の探索問題への応用も検討されている。

なお、以上は完全情報ゲームとして定式化されるタイプの問題を扱っており、完全情報ゲームではないタイプの問題にはそのままでは適用できない。まだ限定的ではあるが、不完全情報ゲームへの取り組みも始まっている。DeepMindはリアルタイムストラテジーと呼ばれるジャンルのゲームStarcraft IIでも、AlphaStarというソフトウェアを開発し、プロのゲーマーに勝利した。また、ポーカーにおいて、米国カーネギーメロン大学のLibratusというソフトウェアが人間に勝利した。

（5）科学技術的課題

［新展開・技術トピックス］にあげた①～④についても、いっそうの研究開発が必要であるが、加えて、以下のような技術的課題への取り組みも重要である。

① 深層学習の理論的解明

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[18]。一方、深層学習は非凸最適化学習手法であり、そもそも得られた解が何らかの誤差を最小にしている保証すらない。そのため、新たな理論解析手法の検討とそれによる深層学習の理論的解明が求められている。

これまでのところ、完全な解明には至ってはいないものの、深層学習の確率的勾配降下法は極小解にはまりにくいことに加えて、汎化性能が高いような幅が広い解を見つけられることや、ミニバッチ正規化やスキップ接続といったテクニックが学習を容易にし、適切なノイズを与えることで汎化性能をあげていること等がわかってきた。また、従来の機械学習の考え方ではパラメーター数が少ない方がモデルの複雑さは下がり、過学習しにくくなるのに対して、深層学習の場合は、モデルが大きければ大きいほど汎化性能は高いことも予想されている[19]。

② 訓練データ量の問題

深層学習は高い精度を得るためには、極めて大量の訓練データが必要である。しかし、通常、データ（しかも教師付き学習のためにはラベル付きデータ）を大量に用意することは容易ではない。一方、人間は学習のためにそれほど大量のデータを必要としていないと考えられており、より少ないデータ量での機械学習は重要な技術課題である。この課題に対してさまざまな取り組みが進められているが、以下に代表的なものをあげる。

・限られた教師情報からの学習

すべての訓練データにラベルを正しく付与することは多大なコストがかかる。そこで、一部のデータに付与されたラベルの情報や、分布の偏りに関する情報をもとに、精度よくモデルを推定する手法が研究されている。その一つが弱教師付き学習のアプローチである[20]。これは、完全な教師情報を含まない限られた情報から学習を行う枠組みであり、正例とラベルなしデータ、信頼度付きの正例、類似度データ対とラベルなしデータ、クラス事前確率の異なる2セットのラベルなしデータから二値分類器を学習できることが示されている。

・予測学習

現状の機械学習技術と人間の学習パターンを比較したとき、今後、教師なし学習に大きな技術発展の余地がある。特に将来予測の問題を扱う予測学習[21]は、常に時間遅れで実際の結果が得られるので、予測と実際の結果の差から学習することが可能である。しかし、対象物に関する知識や物理モデルの統合を含め、理論的な検討はまだ進んでいない。

・GAN

前述の深層生成モデル GAN は教師なし学習であり、ラベル付きのデータを用意する労力を省けるという意味で、訓練データ量の問題に対する一つのアプローチとなり得る。

・シミュレーションによるデータ生成

現実世界の観測データを訓練データに用いる場合、平常時のデータは集めやすいが、事故等の異常時のデータは十分に集めることが難しい。そのため、現実世界では起こりにくいケースも含めて、シミュレーションによって訓練データを生成・補完することで、訓練データのバリエーションや網羅性を高めることが試みられている。

③ 機械学習向けハードウェア

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・深層化の傾向にあるため、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の改善はアルゴリズムだけでなくハードウェア面でも盛んに取り組まれている[22]。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。Google は Tensor Processing Unit（TPU）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。これらの新しいハードウェアでは、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。また、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。

（6）その他の課題

① ダイナミックでオープンな業界構造を背景とした基礎研究投資

機械学習を中心とした AI 技術の基礎研究に対して、各国とも国家としての戦略的な投資が盛んであるが、北米では GAFA による基礎研究への大型投資も目立つ。この傾向が生じているのは、GAFA が事業で大きな売上・収益を得て、その一部を将来事業のための先行投資に回した結果ともいえるが、そのような一企業の研究投資方針だけでなく、ダイナミックでオープンな業界構造がそれを促進している面もある。つまり、産学間の人材流動性や活発なベンチャー投資・企業買収等を含むダイナミックでオープンな業界構造が、基礎研究と事業の好循環や勢いのある事業成長を可能にしている。これが AI・機械学習分野の基礎研究投資において、日本が苦戦している要因にもなっている。

その参考のため、北米を中心としたダイナミックな人材の動きをあげる。深層学習は、現在のブームの火付け役であるトロント大学の Geoffrey Hinton、モントリオール大学の Yoshua Bengio、ニューヨーク大学の Yann LeCun、スタンフォード大学の Andrew Ng 等、北米の大学教授が基礎技術開発の中心的な役割を担っている。Hinton らはベンチャー企業 DNNResearch を起こし、それが 2013 年 3 月に Google に買収されると、Hinton も Google

の Distinguished Researcher に就任した。LeCun 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 が 2014 年 5 月に Chief Scientist に就任した。また、Google は 2014 年 1 月にロンドンの深層学習のベンチャー企業 DeepMind を買収した。さらに、企業間連携の動きとして、2015 年 12 月に SpaceX や Tesla Motors の CEO である Elon Musk らを中心に、AI 研究を行う非営利団体 OpenAI が設立された。2016 年 9 月には、Facebook、Amazon、Google、IBM、Microsoft が AI 研究での提携を発表した。

このような動きにおいて遅れている感は否めない日本だが、基礎研究とビジネスを連動させ、外部資金も調達して成長する若いベンチャー企業（CEO が 30 代）が生まれ、勢いを示しつつある。その代表が 2014 年創業の Preferred Networks である。深層学習を中心とした最先端の機械学習技術の研究開発をベースに、交通システム、製造業（ロボット等）、バイオ・ヘルスケアの 3 つを重点事業領域として、トヨタ自動車・ファナック等から計 100 億円を超える資金調達を得ている。また、NEC は 2018 年に、最先端の機械学習研究者が CEO に転じた予測分析自動化技術のベンチャー会社 dotData を米国シリコンバレーに設立した。カーブアウトのスキームを用いて外部資金も調達し、先端技術の育成とビジネス展開を進める。

② 人材獲得・人材育成の課題

勢いのある GAFA 等の企業が、機械学習を専門とする博士学生、ポスドク研究員、さらには大学教授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ェ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、ソフトウェア開発力においても強化施策が望まれる。

③ 法制度の整備

機械学習で扱うデータや学習結果（訓練済みモデル）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。訓練済みモデルの再利用に関しては、単純にモデルをそのままコピーして使うケースだけでなく、追加学習して使うケース、複数の訓練済みモデルを組み合わせて使うアンサンブル（Ensemble）と呼ばれるケース、訓練済みモデルの振る舞い（どんな入力に対してどんな出力を出すか）の観測データを別のニューラルネットワークの学習に用いる蒸留（Distillation）と呼ばれるケース等も考えられ、知的財産権でどう扱うかは課題である [23]。

（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	○	↗	電子情報通信学会情報論的学習理論と機械学習（IBISML）研究会は 700 人を超え、人工知能学会は会員数 5000 人、全国大会参加者数 2600 人を超える等、AI・機械学習のコミュニティーは育っている。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（AIP）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。
	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、Preferred Networks 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なっており、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（年間売上 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。

（8）参考文献

1）Frank Rosenblatt, "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain", *Psychological Review* Vol. 65, No. 6 (1958), pp. 386-408.

2）Marvin Minsky and Seymour A. Papert, *Perceptron: An Introduction to Computational Geometry* (MIT Press, Massachusetts, 1969).

3）David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton and Ronald J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors", *Nature* Vol. 323, No. 6088 (09 October 1986), pp. 533–536. DOI: 10.1038/323533a0

4）Bernhard E. Boser, Isabelle M. Guyon and Vladimir N. Vapnik, "A training algo-rithm for optimal margin classifiers", *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory* (Pittsburgh, July 27-29, 1992), pp. 144-152. DOI: 10.1145/130385.130401

5）Geoffrey E. Hinton and Ruslan R. Salakhutdinov, "Reducing the dimensionality of data with neural networks", *Science* Vol. 313, Issue 5786 (28 July 2006), pp. 504-507.

DOI: 10.1126/science.1127647

6）Yann LeCun, Bernhard Boser, John S. Denker, Donnie Henderson, Richard E. Howard, Wayne Hubbard and Lawrence D. Jackel, “Backpropagation applied to handwritten zip code recognition”, *Neural Computation* Vol. 1, No. 4 (December 1989), pp. 541-551. DOI: 10.1162/neco.1989.1.4.541

7）Kunihiko Fukushima, “Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position”, *Biological Cybernetics* Vol. 36, Issue 4 (April 1980), pp. 193–202. DOI: 10.1007/BF00344251

8）岡野原大輔、「ディープラーニングフレームワーク、より簡単に、高速に、柔軟に」、『日経 Robotics』2016 年 6 月号（2016 年）、pp. 36-37。

9）Riccardo Guidotti, Anna Monreale, Salvatore Ruggieri, Franco Turini, Dino Pedreschi and Fosca Giannotti, “A Survey of Methods for Explaining Black Box Models”, arXiv:1802.01933 (2018).

10）高野敦、「もうブラックボックスじゃない、根拠を示して AI の用途拡大」、『日経エレクトロニクス』2018 年 9 月号（2018 年）、pp. 53-58。

11）Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville and Yoshua Bengio, “Generative Adversarial Networks”, arXiv:1406.2661 (2014).

12）岡野原大輔、「フィードバックから行動を獲得する強化学習」、『日経 Robotics』2015 年 11 月号（2015 年）、pp. 30-31。

13）森正和、「最新 AI 技術「NAS」（Neural Architecture Search）を紐解く ～ Google Cloud AutoML の裏側を見ていく～」、『Developers Summit FUKUOKA 2018』（福岡、2018 年 9 月 6 日）。

14）David Gunning, “Explainable Artificial Intelligence (XAI)”, DARPA Program Update (November 2017). https://www.darpa.mil/attachments/XAIProgramUpdate.pdf (accessed 2019-01-07)

15）David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Pan-neershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel and Demis Hassabis, “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”, *Nature* Vol. 529, No. 7587 (2016), pp. 484-489. DOI:10.1038/nature16961

16）David Silver, Julian Schrittwieser, Karen Simonyan, Ioannis Antonoglou, Aja Huang, Arthur Guez, Thomas Hubert, Lucas Baker, Matthew Lai, Adrian Bolton, Yutian Chen, Timothy Lillicrap, Fan Hui, Laurent Sifre, George van den Driessche, Thore Graepel and Demis Hassabis, “Mastering the game of Go without human knowledge”, *Nature* Vol. 550, No. 7676 (2017) pp. 354-359. DOI 10.1038/nature24270

17）David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Pan-neershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya

Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel and Demis Hassabis, “Mastering Chess and Shogi by Self-Play with a General Reinforcement Learning Algorithm”, arXiv:1712.01815 (2017).

18）Vladimir N. Vapnik, *Statistical Learning Theory* (Wiley, New York, 1998).

19）岡野原大輔、「ニューラルネットの逆襲から 5 年後」、Preferred Research Blog、2017 年 11 月 28 日。 https://research.preferred.jp/2017/11/deeplearning-5years-later/ (accessed 2019-01-07)

20）Takashi Ishida, Gang Niu and Masashi Sugiyama, “Binary classification from positive-confidence data”, *Proceedings of 32nd Conference on Neural Information Processing Systems* (Montréal, Canada, December 2-8, 2018).

21）岡野原大輔、「予測学習：Predictive Learning」、『日経 Robotics』2017 年 11 月号（2017 年）、pp. 36-37。

22）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：革新的コンピューティング ～計算ドメイン志向による基盤技術の創出～』、CRDS-FY2017-SP-02（2018 年 3 月）。

23）丸山宏・城戸隆、「機械学習工学へのいざない」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 2 号（2018 年 3 月）、pp. 124-131。

2.1.2　画像・映像解析

（1）研究開発領域の定義

カメラ等で撮影された画像や映像をコンピュータで解析して、その画像・映像の内容、つまり、そこに写っているものが何であるか（人や物体、文字等）、その位置や状態、あるいはシーン全体の状況を認識する技術である。

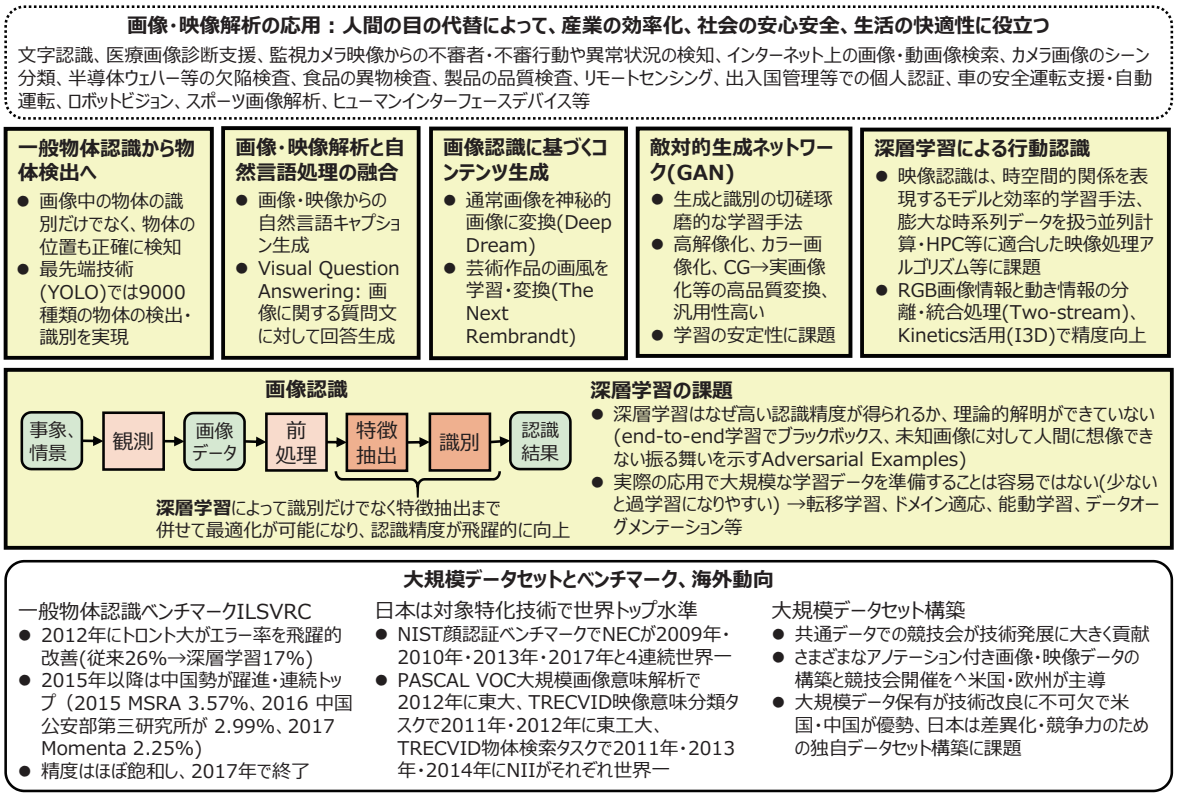


図2-1-4　領域俯瞰：画像・映像解析

（2）キーワード

画像認識、映像認識、パターン認識、メディア処理、一般物体認識、物体検出、顔認証、行動認識、深層学習、ニューラルネットワーク、敵対的生成ネットワーク、Adversarial Examples、大規模データセット

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人間の目の代替となり、産業の効率化、社会の安全安心、生活の快適性に役立つ技術である。人間が行っている目視作業の自動化といった単なる省力化としての価値だけでなく、ヒューマンエラーを低減する判断・診断の支援や、人間では処理しきれない大量な画像・映像データの高速処理等、これまで得られなかった新たな価値を提供する。具体的な応用先としては、郵便区分機等での文字認識、マンモグラフィ等の医療画像診断支援、監視カメラ映像からの不審者・不審行動や異常状況の検知、インターネット上の画像・動画像検索、カメラ画像のシーン分類、

半導体ウェハーやフォトマスク等の欠陥検査、食品の異物検査、製品の品質検査、衛星画像等のリモートセンシング、出入国管理等での顔や指紋を用いた個人認証、自動車の安全運転支援や自動運転、ロボットビジョン、スポーツ画像解析、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。

[研究開発の動向]

① 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[1)]。

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。文字認識やウェハー欠陥検査等は、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霧等を除去するデヘイズ処理、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、予め設定したクラス（あるいはカテゴリー）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、クラスごとに予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、クラスごとに予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、たとえば人物と車両を識別する場合は、それぞれが1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1つのクラスとして設定される。

② 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、従来から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 [2] 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 Social Networking Service（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) General-purpose computing on graphics processing units（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 [3] 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。トロント大学教授の Geoffrey Hinton 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 [4]、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 ImageNet を使った画像認識コンペティション（ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge: ILSVRC）の一般物体認識のベンチマークテストでトップを獲得した。Hinton 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 を舞台として深層学習の改良が続いたが [5, 6, 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、トロント大学の Hinton は 2013 年から Google 兼務、ニューヨーク大学教授の LeCun 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国際会議（International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 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 Microsoft Research Asia（MSRA）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、2017 年 4 月に、業界の垣根を越えた連携を促すオープンソース型のプラットフォーム「アポロ計画」を発表、わずか 1 年余りで自動車メーカーやサプライヤー、半導体メーカー等 100 社以上が集まった。Volvo とも提携し、2020 年以降に自動運転タクシーを実用化するとしている。2014 年 10 月、香港中文大学教授の湯暁鴎によるベンチャー企業 SenseTime（商湯）は、深層学習を活用した顔認識技術の研究と開発を手がけるが、2017 年 7 月にシリーズ B ラウンドで 4 億 1,000 万ドル、2018 年 4 月にはシリーズ C ラウンドで 6 億ドルを資金調達する等、大きな話題を呼んだ。映像監視や自動運転向け画像認識技術も手掛け、2017 年 12 月には本田技研工業と長期共同開発契約を締結している。これら中国企業が台頭する背景には、AI 技術に対する国策があり、中国政府は、2025 年までに AI 産業で世界をリードする目標を掲げている。前述の ILSVRC でも中国勢は世界トップの精度をたたき出しており、実用面で米国を脅かす存在になってきている。

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ー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。米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）の静止画顔認証ベンチマークテストでは、NEC が 2009 年・2010 年・2013 年と 3 連続で世界第一位を獲得してきたが、2017 年に NIST が実施した動画顔認証ベンチマークテスト（Face in Video Evaluation: FIVE）でも圧倒的優位で一位を獲得、4 連続世界一を達成した。ImageNet データを用いた PASCAL Visual Object Classes（PASCAL VOC）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教授の原田達也らのチームが 2012 年に世界第一位の認識精度を達成、TREC Video Retrieval Evaluation（TRECVID）の映像意味分類（Semantic indexing: SIN）タスクで東京工業大学教授の篠田浩一らのチームが 2011 年・2012 年に世界第一位の認識精度を達成、TRECVID の物体検索（Instance search: INS）タスクで国立情報学研究所教授の佐藤真一らのチームが 2011 年・2013 年・2014 年に世界第一位の検索精度を達成している。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① 一般物体認識から物体検出へ

ILSVRC をベンチマークテストとして、一般文体認識の精度が飛躍的に改善されたが、さらに、画像に映っている物体の識別だけでなく、その位置も正確に検知する物体検出のための深層学習モデルが、近年数多く提案されている [8]。2014 年に、物体の候補領域を抽出する処理と CNN を統合した Regional CNN（R-CNN）[9] が提案されたのをきっかけに、2015 年に Fast R-CNN[10]、Faster R-CNN[11] と高速化が進んだ。2016 年には、画像をグリッドに区切った領域をもとに物体を抽出する Single Shot MultiBox Detector（SSD）[12]、You Only Look Once（YOLO）が提案され、さらなる高速化と高精度化が進んでいる。これまでは十数種類の物体

の検出・識別するモデルが多かったのに対し、2017 年に提案された YOLO 9000[13] は、9000 種類の物体の検出・識別を可能とし、コンピュータービジョン・画像認識のトップカンファレンス（IEEE/CVF International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: CVPR）2017 のベストペーパーに選出された。

② 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（たとえば「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 Microsoft Common Objects in Context（MSCOCO）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）[15] 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。

③ 画像認識に基づくコンテンツ生成

画像認識（画像データからクラスへの抽象化）の過程で、ニューラルネットワークの構造中に、画像に含まれるさまざまな意味的な要素が抽出されてくるが、それにグラフィクス系を融合し、意味的な要素を操作して新たな画像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 DeepDream[16] と呼ばれるシステムを開発し、大きな話題となった。DeepDream 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 DeepStyle 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 プリンタを利用して新作を描く The Next Rembrandt プロジェクトを行っている。

④ 敵対的生成ネットワーク

深層学習によって、高精度な識別だけでなく、高精度な生成も可能になった。特に 2014 年に Goodfellow らが提案した Generative Adversarial Nets（GAN）[17] は、生成モデル G と識別モデル D から構成され、D は学習データと G が生成したデータを識別するように学習し、G は D が間違えるように学習する。G と D を切磋琢磨しながら学習させることで、精度のよいデータ生成が行える。2015 年には CNN を適用した Deep Convolutional GAN（DCGAN）[18] が提案され、精度のよいデータ生成が行えるようになったことで、近年ブームになっている。ラベル付きでデータを生成する Conditional GAN[19]、低解像画像を高解像化する Super Resolution GAN（SRGAN）[20]、モノクロ画像をカラー化したり、日中の画像を夜に変えたりする等、画像間の特徴を変換する pix2pix[21] 等、多数のモデルが提案されている。Apple も CG 画像から実画像に変換する SimGAN を発表し、CVPR 2017 のベストペーパーに選出された。Apple 初の論文として話題になった [22]。GAN は高品位なデータ生成モデルとして注目されているが、敵対的なコスト関数を最適化するため、学習の安定性に課題は残る。しかし、二つのモデルを敵対的に学習する枠組みは汎用性が高く、今後も多様な発展が期待される [23]。

⑤ 深層学習による行動認識

深層学習の登場により、人の行動認識等の動画像認識で、多くのモデルが提案されている。2014 年に提案された Spatio-temporal ConvNet は、単に 10 フレームを CNN へ入力するものであったが、2015 年に提案された Two-stream[24] は、見た目を表す RGB 画像を学習するネットワークと、動き情報であるオプティカルフローを学習するネットワークを組み合わせ、動きを直接的に扱うことで高い精度を実現した。各フレームを時間方向に並べ、3 次元の畳み込みとして学習するモデルも提案されたが、モデルのパラメーター数が多く、限られたデータでは精度がでなかった。2017 年に大規模な行動データ Kinetics の登場により、動画像を 3 次元として学習することが可能になり、I3D と呼ばれるモデルが高い精度を達成している [25]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

ILSVRC の終了と後継ベンチマークテスト

2012 年には深層学習が圧倒的な性能を披露し、一般物体認識の世界的ベンチマークテストとして画像認識技術の基本性能向上に大きく貢献してきた ILSVRC が、2017 年で終了となった。2017 年の結果は、上位 5 位までに正解が含まれないエラー率で、中国のベンチャー会社 Momenta が 2.25% で 1 位となった。2016 年は中国公安部第三研究所が 2.99% で 1 位であり、中国勢の躍進が目立つ。2015 年のトップが MSRA の 3.57% だったことを考えると、本ベンチマークテストに対する精度はほぼ飽和状態に達したとみられる。

ILSVRC は終了となったが、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画像認識の技術発展に大きく貢献したことは明白であり、さまざまな課題設定のもとで同様の取り組みが展開されている。そのようなベンチマークテスト／コンペティションのプラットフォームとして活用されているのが Kaggle である。Kaggle は、企業等がベンチマークのためのデータセットを公開し、このベンチマークに対する精度を世界中からの参加者間で競う場である。Kaggle 運営会社は、2017 年 3 月に Google に買収された。

Google は 900 万枚超の画像データセット Open Images V4 を公開した。これは訓練用（学習用）データセットにおいて 14.6 百万個の物体位置矩形、600 種類の物体カテゴリーが与えられており、物体検出ベンチマークで世界最大規模のものである。さらに、ILSVRC 終了後の 2018 年夏に、その後継として、Open Images V4 を用いた Open Images Challenge というコンペティション（ベンチマークテスト）が Kaggle 上で実施された。その物体検出タスクは、世界中から 454 チームの参加があり、1 位は Baidu（スコア 58.657%）、僅差での 2 位は Preferred Networks（スコア 58.634%）という成績であった。

（５）科学技術的課題

［新展開・技術トピックス］であげたトピック・方向性は、さらなる技術開発が必要で、引き続き重点的に取り組むべき科学技術的課題である。以下では、それらを補完・補足する位置付けで、2 つの面から科学技術的課題を述べる。

① 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「2.1.1 機械学習」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、パラメーター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、2 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（Adversarial Examples）が指摘されている [26), 27)]。

② 映像認識の課題

静止画像認識の近年の進展に対して、映像認識はそれ固有の技術課題があり、技術強化が進められている。たとえば、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、膨大な時系列の映像データを扱うためのコンピューティング基盤（ストレージや計算パワーの大規模化、並列計算システムに適合した映像処理アルゴリズムの構築等）の検討が必要である。

そのような技術強化と並行して、具体的な映像認識アプリケーションの実用化も進められている。たとえば、国際体操連盟・日本体操協会との共創で富士通が開発した体操競技の採点支援システム [28)] があげられる。これは 3D レーザーセンサーで体操選手の動きを計測し、そのデータに機械学習技術を適用し、ひねりの回転数・角度等に基づいて体操の技と難度を自動判定するシステムである。2019 年 10 月の世界選手権で実用化され、2020 年の東京五輪でも一

部種目で導入される見込みである。また、日本のスタートアップ企業 Vaak は、映像認識技術を用いた万引き防止システムを実用化した。監視カメラ映像から人物を検出し、関節点の位置、歩幅、持ち物の有無、年齢性別等を認識し、その時系列変化から万引きらしい行動を判定する。3000 時間の映像で訓練したシステムを用いた横浜の実店舗での実証実験で、実際に万引き犯の検挙に貢献した。

映像の内容理解・検索の技術発展には NIST の TRECVID 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。たとえば、4800 クラス 800 万本 50 万時間の動画からなる YouTube-8M 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。

（6）その他の課題

① 大規模データセット構築とベンチマークテスト

既に述べてきたように、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 2017 年には 2.25% まで改善された。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 をさまざまな関連情報付きで公開した。オープ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 第一水準手書き漢字データセットを公開し、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。

分野全体の技術水準向上と分野活性化に共通データセットが大きく貢献してきた一方、技術開発競争では独自のデータセット構築が価値を持つ。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、たとえば 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。

② 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。

③ 顔認識技術の社会的リスクへの対策

近年、顔認識技術がさまざまな応用に急速に広がっている。空港での入出国管理だけでなく、スマートフォンの認証にも使われ、SNSへの投稿写真中の人物タグ付けにも使われるようになった。中国では顔認識機能を有する犯罪者追跡システム「天網」が2000万台規模の監視カメラと連動して稼働している。

顔認識技術は以前からプライバシー保護の面からの懸念が指摘され、堅牢なセキュリティー確保や画像データを保存しない等の対策がとられてきた。しかし、従来は顔認識機能の利用が、そのような対策面で意識の高い大手企業に限られていたのが、裾野が拡大し、幅広い人・企業が簡単に利用できるような状況になりつつある。しかも、プライバシー保護の懸念だけでなく、特定の人種やマイノリティーの人々を差別してしまうリスク（学習データの質・量によっては、そういった人々の認識率が低く、場合によっては犯罪者と誤認識されやすい等）も指摘されている。さらに、顔の微妙な表情から感情追跡が可能になると、人の内面をのぞき込むような使われ方の懸念も生じる。

このような問題に対して、米国のシンクタンクであるAI Now Instituteは報告書[29]をまとめ、ガバナンスや監督・説明責任体制の整備が不十分なまま、顔認識技術が急速に広がりつつあることへの懸念と対策提言を示している。

（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 では東京大学、東京工業大学、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米国・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 4 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 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。たとえばスタンフォード大学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。
	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	◎	↗	オックスフォード大学、ETH、アムステルダム大学、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 等の企業の欧州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。北京大学・清華大学・香港中文大学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ェア公開・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）。SenseTime が多額の資金調達に成功、顔認証のみならず映像監視・自動運転の技術開発を進めている。
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。

（8）参考文献

1）佐藤敦、「安全安心な社会を支える画像認識技術」、『人工知能』（人工知能学会誌）29 巻 5 号（2014 年 9 月）、pp. 448-455。
2）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 年）。
3）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―」、『電子情報通信学会論文誌 A』J62-A 巻 10 号（1979 年）、pp. 658-665。

4）Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever and Geoffrey E. Hinton, “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks”, *Proceedings of the 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2012; Lake Tahoe, Nevada, December 3-6, 2012), pp. 1097-1105.
5）Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren and Jian Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition”, *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2016; Las Vegas, Nevada, June 26-July 1, 2016), pp. 770-778.
6）Yaniv Taigman, Ming Yang, Marc'Aurelio Ranzato and Lior Wolf, “DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification,” *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2014; Co-lumbus, Ohio, June 23-28, 2014), pp. 1701-1708.
7）Florian Schroff, Dmitry Kalenichenko and James Philbin, “FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering”, *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2015; Boston, Massachusetts, June 7-12, 2015), pp. 815-823.
8）原田達也、『画像認識』（講談社、2017）。
9）Ross Girshick, Jeff Donahue, Trevor Darrell and Jitendra Malik, “Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation”, *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2014; Columbus, Ohio, June 24-27, 2014), pp. 580-687.
10）Ross Girshick, “Fast R-CNN”, *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision* (ICCV 2015; Santiago, Chile, December 13-16, 2015), pp. 1440-1448.
11）Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick and Jian Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks”, *Proceedings of 29th Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2015; Montréal, Canada, December 7-12, 2015) pp. 91-99.
12）Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu and Alexander C. Berg, “SSD: Single Shot MultiBox Detector”, *Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision* (ECCV 2015; Amsterdam, The Netherlands, October 11-14, 2016), pp. 21-37.
13）Joseph Redmon and Ali Farhadi, “YOLO9000: Better, Faster, Stronger”, *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2017; Honolulu, Hawaii, July 21-26, 2017), pp. 7263-7271.
14）Andrej Karpathy and Li Fei-Fei, “Deep Visual-Semantic Alignments for Generating Image Descriptions”, *Proceedings of 28th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2015; Boston, Massachusetts, June 7-12, 2015), pp. 3128-3137.
15）Stanislaw Antol, Aishwarya Agrawal, Jiasen Lu, Margaret Mitchell, Dhruv Batra, C. Lawrence Zitnick, and Devi Parikh, “VQA: Visual Question Answering”, *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision* (ICCV 2015; Santiago, Chile,

December 7-13, 2015), pp. 2425-2433.

16）Alexander Mordvintsev, Christopher Olah and Mike Tyka, “Inceptionism: Going Deeper into Neural Networks”, Google AI Blog (17 June 2015). https://ai.googleblog.com/2015/06/inceptionism-going-deeper-into-neural.html (accessed 2019-01-07)

17）Ian Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville and Yoshua Bengio, “Generative Adversarial Nets”, *Proceedings of 28th Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2014; Montréal, Canada, December 8-13, 2014), pp. 2672-2680.

18）Alec Radford, Luke Metz, and Soumith Chintala, “Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks”, arXiv:1511.06434 (2015).

19）Mehdi Mirza and Simon Osindero, “Conditional Generative Adversarial Nets”, arXiv:1411.1784 (2014).

20）Christian Ledig, Lucas Theis, Ferenc Huszar, Jose Caballero, Andrew Cunningham, Alejandro Acosta, Andrew Aitken, Alykhan Tejani, Johannes Totz, Zehan Wang, and Wenzhe Shi, “Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network”, arXiv:1609.04802 (2016).

21）Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou, and Alexei A. Efros, “Im-age-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks”, arXiv:1611.07004 (2016).

22）Ashish Shrivastava, Tomas Pfister, Oncel Tuzel, Josh Susskind, Wenda Wang, and Russ Webb, “Learning from Simulated and Unsupervised Images through Adversarial Training”, *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2017; Honolulu, Hawaii, July 21-26, 2017), pp. 2242-2251.

23）篠崎隆志、「GAN―敵対的生成ネットワーク―の発展」、『人工知能』（人工知能学会誌）33巻2号（2018年3月）、pp. 181-188。

24）Karen Simonyan and Andrew Zisseman, “Two-Stream Convolutional Networks for Action Recognition in Videos”, *Proceedings of 28th Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2014; Montréal, Canada, December 8-13, 2014), pp. 568-576.

25）Joao Carreira, and Andrew Zisserman, “Quo Vadis, Action Recognition? A New Model and the Kinetics Dataset”, *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2017; Honolulu, Hawaii, July 21-26, 2017), pp. 4724-4733.

26）Anh Nguyen, Jason Yosinski and Jeff Clune, “Deep Neural Networks are Easily Fooled”, *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2015; Boston, Massachusetts, June 7-12, 2015), pp. 427-436.

27）Ian Goodfellow, Jon Shlens and Christian Szegedy, “Explaining and Har-nessing Adversarial Examples”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations* (ICLR 2015; San Diego, California, May 7-9, 2015).

28）藤原英則・伊藤健一、「ICTによる体操競技の採点支援と3Dセンシング技術の目指す世界」、『FUJITSU』69巻2号（2018年3月）、pp. 70-76。

29）Meredith Whittaker, Kate Crawford, Roel Dobbe, Genevieve Fried, Elizabeth Kaziunas, Varoon Mathur, Sarah M. West, Rashida Richardson, Jason Schultz and Oscar Schwartz, “AI Now Report 2018”, AI Now Institute (December 2018). https://ainowinstitute.org/AI_Now_2018_Report.pdf (accessed 2019-01-07).

２．１．３　自然言語処理

（１）研究開発領域の定義

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。自然言語処理はコンピューターによって自然言語を処理する技術を意味する。

自然言語に対して、プログラミング言語やマークアップ言語等、人工的に定義された言語がある。これらの人工的に定義された言語は解釈が一意に定まるように設計されているが、自然言語は文・句・単語等の意味や構造の解釈に曖昧性が生じ得る点、シンボルグラウンディング（記号と実世界における意味をどのようにして結びつけるか）や意図理解のように記号だけに閉じない問題が関わる点等が、その処理を難しいものにしている。

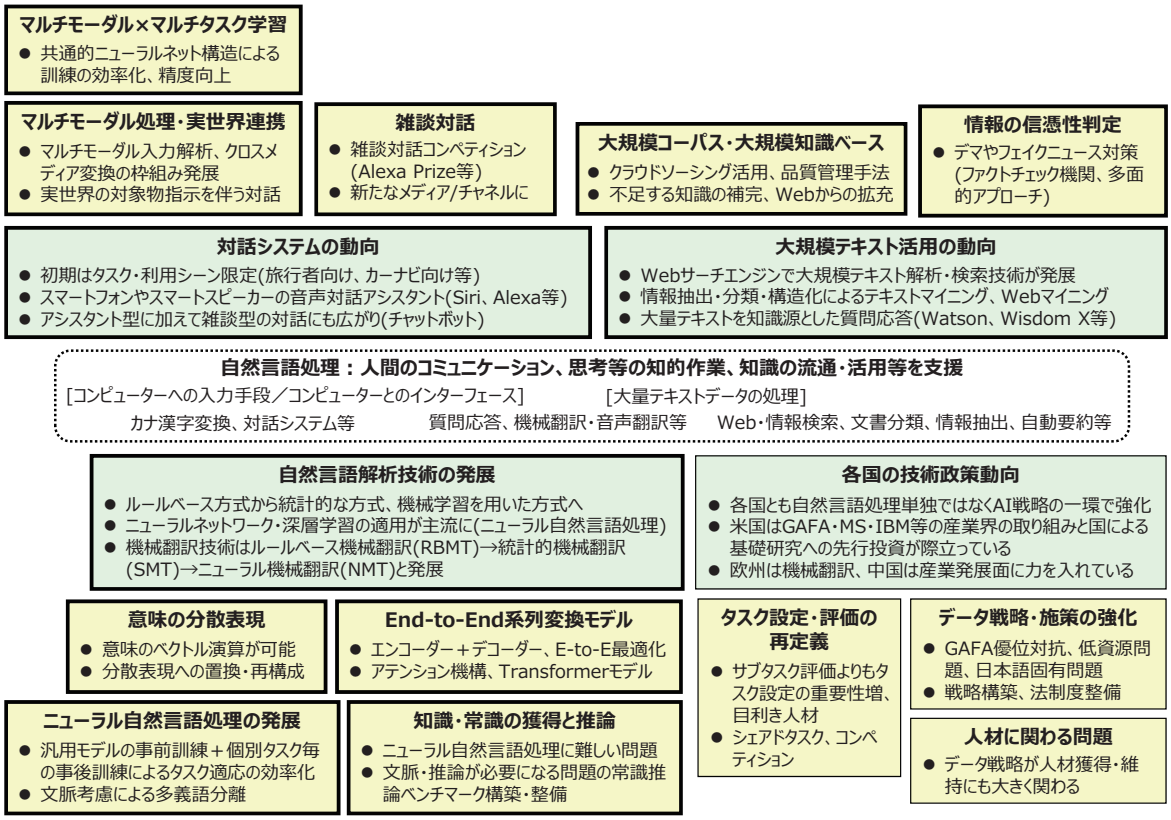


図2-1-5　領域俯瞰：自然言語処理

（２）キーワード

自然言語処理、形態素解析、構文解析、意味解析、機械学習、深層学習、分散表現、質問応答、機械翻訳、対話システム、情報抽出、知識獲得、常識推論

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人間にとって自然言語は、概念を表現する記号体系として、日常の意思疎通（コミュニケーション）だけでなく、思考の過程やその結果である知識の表現・保存にも用いられる。コンピ

ューターによる自然言語処理は、このような人間のコミュニケーション、思考等の知的作業、知識の流通・活用等を含むさまざまな場面に適用され得る。その代表的な場面・システムのいくつかを以下にあげる。

まず、コンピューターへのテキストの入力手段であるカナ漢字変換システムは、既に多くの人々に使われている自然言語処理システムの一つである。カナ列やアルファベット列を、単語や句といった単位に区切って言葉として解釈することがコンピューターで実現されている。さらに、コンピューターへのテキスト入力だけでなく、コンピューターとのインターフェース全般に自然言語を使う対話システムや質問応答システムがあげられる。具体的には、コンタクトセンターへの問い合わせや、家庭で使われ始めたスマートスピーカー（Amazon Echo、Google Home 等）に対する操作・指示命令を自然言語で行えるといったものである。人間がコンピューターやそのアプリケーションサービスを使う際に、自然言語で操作・指示できると、特別のコマンド入力・操作方法をあれこれ覚える必要がなく、普段使っている言葉で使えるというのが大きなメリットである。コンタクトセンターへの問い合わせのケースでは、自動化によって問い合わせ対応のスループット向上や質の安定が得られるというメリットもある。

また、大量かつ多様なテキストがデジタル化され、インターネット等を介して発信・共有される今日、人間が読むことのできる量をはるかに超えたテキストデータがまわりに溢れている。このような大量のテキストデータの処理をコンピューターで行うことで、人間の負荷を軽減しようという自然言語処理システムがある。既に日常的に利用されるようになった Web サーチエンジンがその代表である。膨大な情報の中から条件に合う情報を高速に見つけたり、整理したりするための情報検索・文書分類、その概要把握を助ける情報抽出・自動要約等も自然言語処理のターゲットである。また、上述の質問応答システムは、自然言語を用いたインターフェースであるとともに、大量テキストから容易に情報・知識を得るための手段でもある。

さらに、機械翻訳・音声翻訳（自動通訳）も自然言語処理の代表的なターゲットとして長年取り組まれている。母国語から他国語、あるいは、逆に他国語から母国語への翻訳・通訳は、他国語を話す人々とのコミュニケーションを支援するとともに、インターネット等を介して世界に流通している膨大な量の他国語で書かれた情報を調査・分析する労力を大幅に軽減してくれる。

［研究開発の動向］

① 自然言語の解析技術の発展

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解析であり、形態素解析（単語分割や品詞認定）、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、より深い解析への取り組みが進められた。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、機械学習を用いた方式に主流が移った。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、2014 年頃からはニューラルネットワークによる機械学習、特に深層学習が盛んに適用されるようになった [1), 2), 3)]。

このような技術発展は特に機械翻訳への取り組みによって牽引されてきた。機械翻訳方式は

当初のルールベース機械翻訳（Rule-Based Machine Translation：RBMT）から、1990年代に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（Statistical Machine Translation：SMT）に主流が移った。SMTの精度改善に頭打ちが見えてきた2010年代に、ニューラル機械翻訳（Neural Machine Translation：NMT）[2), 4)]が考案され、顕著な精度改善を生んでいる。SMTからNMTへの移行は、SMTで用いていた統計処理・機械学習のパートを単純に深層学習に置き換えたものではなく、機械翻訳のパラダイムを大きく転換させたものである。SMTでは、機械翻訳のプロセスを多段階に分け、各段階の処理モデルを統計的にチューニングして組み合わせていたのに対して、NMTでは、入力原文から翻訳結果の出力までを1つのモデル（ニューラルネットワーク構造）として扱い、End-to-Endの最適化を行う。今日、このEnd-to-End最適化のアプローチが、機械翻訳だけでなく、質問応答、情報要約、画像・映像に対する説明文生成等、自然言語処理のさまざまな応用に使われるようになった[5)]。

このように、自然言語処理の分野でも、ニューラルネットワーク・深層学習の適用が進んでいるが、画像認識・音声認識の分野ほど、一気に華々しい性能向上が得られたというわけではない。SMTからNMTへ移ったようなパラダイムの転換、処理プロセスの再構成が行われ、その後、使いこなし、チューニングが進んだ結果、この1～2年で徐々に従来方式の性能を上回るようになってきたという状況である。

② 対話システムの動向

対話的インターフェースは、まず、タスクや利用シーンを限定した形で実用化が進んだ。このような限定によって、扱うべき語彙・文型・文脈を現実的な規模に抑えることができる。たとえば、コンタクトセンターでの問い合わせインターフェース、車載端末におけるカーナビゲーションの音声インターフェース、旅行会話の音声翻訳等があげられる。Nuance、IBM、NEC等から法人向けソリューションが提供されたほか、情報通信研究機構（National Institute of Information and Communications Technology：NICT）で開発された個人旅行者向け多言語音声翻訳アプリVoiceTraは、スマートフォンアプリとして、民間企業や、スポーツイベントでの案内、病院診察での外国人対応等に使われ始めており、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。

この間、スマートフォンが普及したことで、そのフロントエンドのインターフェース（音声対話アシスタント）としても、対話システムが使われるようになった。2011年にリリースされたAppleのSiriや2012年にリリースされたNTTドコモの「しゃべってコンシェル」がその代表である。また、2014年には、MicrosoftがWindowsのフロントエンドとして、対話インターフェースを持つCortanaをリリースした。同じ2014年にはAmazon Echo（アシスタントソフトウェアはAlexa）が発売され、家庭向けの音声対話アシスタント内臓スピーカー（スマートスピーカーやAIスピーカーとも呼ばれる）という新しい製品形態が生まれた。同種の製品として、その後、2016年にGoogle Home（アシスタントソフトウェアはGoogle Assistant）、2017年にLINE Wave（アシスタントソフトウェアはClova）等が続いた。さらに、アシスタント型の対話よりも雑談型の対話が中心の「チャットボット」（Chatbot、会話（Chat）とロボット（Bot）を組み合わせた造語）と呼ばれるソフトウェアも利用が広がりつつある。

たとえば、Facebook Messenger や LINE 等のメッセージアプリにおいて、ユーザーの会話の相手の一人としてチャットボットが振る舞うといった使われ方があり、企業にとって新たな顧客接点としても注目されている。

以上は対話システムのアプリケーション形態の広がりを中心に述べたが、技術面は機械翻訳のケースと同じような発展を経ている。Siri の初期のモデルや「しゃべってコンシェル」等は人間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、近年はニューラルネットワーク・深層学習の適用が進んでいる。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。さらに、予め準備された発話を選択するのではなく、発話内容自体も深層学習・強化学習によって獲得する枠組みも研究されている。一方で、学習機能の使い方によっては不適切な対話をしかねないという、ある種の脆弱性が判明し[6]、発話内容を適切にコントロールできるようにすることが課題である。

③ 大規模テキスト活用の動向

テキスト検索は、コンピューターの処理性能が乏しかった時代、事前に人手で各テキストに付与したキーワードを索引に用いるしかなかったが、1990 年代以降、コンピューターの性能向上、並列処理技術の発展、ストレージの大容量化等が進み、フルテキストサーチ（全文検索）方式に主流が移った。急激に大規模化した Web サーチエンジンが、その代表であるが、クエリのキーワードと Web のフルテキストの単純なマッチングでは高い検索精度が得られない。Web の被リンク関係やアンカー文字列（リンク元テキスト）を考慮した検索結果のランキング法や、ユーザーの嗜好や目的に応じた適合ページの選別法等、さまざまな観点から Web 検索の精度を高める技術が開発された。また、大規模な Web を解析・検索するため、大規模自然言語テキストを解析・検索するための分散・並列処理、圧縮・索引処理等の技術が急速に発展した[7]。

また、Web サーチエンジンは幅広い一般ユーザー向けのアプリケーションとして発展したが、インターネット上の多様な情報や企業内の大量文書を解析し、企業活動・意思決定等に活用するテキストマイニング（テキストアナリティクスともいわれる）や Web マイニングと呼ばれるアプリケーション（および技術）も開発が進んだ[7, 8]。商品やサービスに関する評判・意見をインターネット上のサイトから集めて、肯定的か否定的かを自動判定し、マーケティングや風評・リスク対策に活用するためのシステム、論文情報・求人情報等の特定情報のみを選択的に収集・分類・構造化し、傾向把握や注目情報への迅速なアクセスを可能にするシステム等がその例である。

さらにその発展として、大量のテキスト情報を知識源として用いる質問応答システムがある。代表的なシステムとして IBM の Watson[9] があげられる。Watson 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、2011 年に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に成功した。国内では、NICT が開発・公開した WISDOM X は大規模な Web 情報をもとに、自然言語による「なに？（いつ／どこ／だれ）」「なぜ？」「どうなる？」「それなに？」という 4 タイプの質問に回答する。また、WISDOM X の技術を応用した対災害 SNS 情報分析システム DISAANA、災害状況要約システム D-SUMM も開発された。災害時には、多様な災害関連テキスト（SNS、ニュース、報告書等）がバースト的に流通するが、厳しい時間制約・人資源制約の下、それら

を精査・統合して適切なアクションを決定することは非常に難しい。DISAANA は 2016 年の熊本地震の際に政府で活用され、自然言語処理技術が災害時の迅速な意思決定にも活用可能であることを示した。

④ 技術政策動向

昨今、各国とも自然言語処理単独の技術政策ではなく、人工知能（AI）分野の技術政策の中で自然言語処理技術の強化を図っている。近年、日本の技術政策においても、自然言語処理を前面に打ち出した研究投資プログラムは進められていない。ただ、AI 技術政策の一環における自然言語処理の位置付けは、米中欧の政策それぞれに特徴が見られる。

米国は GAFA（Google, Amazon, Facebook and Apple）や Microsoft、IBM 等、産業界による先進技術の研究開発・応用が活発である上に、技術政策として、国の安全保障目的も含めた自然言語処理の基礎研究への先行投資が際立っている。もともと米国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、自然言語処理に関わる多くのプロジェクト（コンペティション型ワークショップを含む）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 4,500 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。

欧州は多数の国にまたがることから機械翻訳技術を中心に自然言語処理に継続的に投資を行ってきている。EU の第 7 次フレームワークプログラム FP7（2007 年～ 2013 年）では、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 年～ 2020 年）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。

中国は国が AI による産業活性化を推進している。中国工業情報化部（工信部）が 2017 年 12 月に「新世代の人工知能（AI）産業発展を促進するための 3 年行動計画（2018 年～ 2020 年）」を発表した。その中で、育成すべき AI 応用製品として、自動車、ロボット、無人機械、医療機器（映像補助診断システム）、画像映像による身分識別システム、自動音声応答装置、翻訳システム、インテリジェント家具という 8 分野を指定した。自動音声応答装置や翻訳システムは自然言語処理技術に直接関わる製品分野である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 意味の分散表現

自然言語処理における意味の分散表現[1]は単語・句・文・段落等の意味を固定長ベクトル（実際には数百次元程度）で表現したものである[10), 11), 12), 13)]。大量テキストにおける文脈類似性に

[1] 分散表現（Distributed Representation）は、ニューラルネットワーク研究の分野では局所表現（Local Representation）に対する概念として考えられた。一方、自然言語処理研究においても、単語の意味を扱う方法論として分布仮説（Distributional Hypothesis）があり、これら両面が融合したものと考えられている[13)]。自然言語に限らず、なんらかの離散的な対象物の表現方法として、局所表現や分散表現を用いることができる。局所表現は One-Hot ベクトルのように 1 つないしは少数の要素で特徴を表現するのに対して、分散表現は多数の要素に特徴を分散させて表現する。また、埋め込み（Embeddings）という言い方も用いられる。たとえば Distributed Representation of Words と Word Embeddings は同義である。

基づき、ニューラルネットワークを用いて分散表現を高速に計算するWord2Vecが2013年に公開され、自然言語処理の基本的な手法として広く使われるようになった。それまで使われていたBag-of-Words形式もベクトル表現だが、各単語に1次元ずつ割り当てるOne-Hotベクトル（N次元ベクトルの要素N個のうち1個だけが値「1」で他の要素はすべて「0」という形式）であった。Bag-of-Wordsと異なり、分散表現はベクトル計算によって単語や文の意味の合成・分解や類似度計算が可能である。たとえば、分散表現を用いると、「king」－「man」＋「woman」＝「queen」のようなベクトル計算が可能である。

この分散表現の導入によって、自然言語処理は急速に再構成が進んだ。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だ。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、深層学習を自然言語処理に適用する際の基本的手法になった。さらに、シソーラスや辞書にも分散表現の学習が取り入れられ、意味選択や質問応答等のタスクも分散表現の演算として扱われるようになりつつある。従来の記号処理は厳密な論理演算をベースとした硬いものだったが、分散表現を用いることで曖昧な条件を許した柔らかい演算が可能になったということができる。

② End-to-End系列変換モデル

前述のように、ニューラル機械翻訳NMTでは、入力原文から翻訳結果の出力までを1つのニューラルネットワーク構造として、End-to-Endの最適化を行っている。このアプローチは、入力系列から出力系列への変換という意味でSeq2Seq（Sequence to Sequence Model）[14]と呼ばれ、機械翻訳以外の系列変換型の応用（自動要約、画像のキャプション生成等）にも広く用いられるようになった。系列変換のためのニューラルネットワーク構造は、エンコーダーとデコーダーを、分散表現（実数ベクトル形式）を中間に置いて連結した形をとり[5]、テキスト入力に対するエンコーダー処理では分散表現への変換が行われる。つまり、

入力系列（End）→［エンコーダー］→ 分散表現 →［デコーダー］→ 出力系列（End）

という構成をとる。

デコーダーには時系列情報を扱うのに適した回帰型ニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network : RNN）を用いた生成処理が行われるが、デコーダー処理においてRNN中のどこ部分（特定の単語等）に注目するかを決定するアテンション機構が組み込まれたことが、生成結果の精度向上につながった。このアテンション機構は強力で、さまざまな形で発展・活用されている。RNNとアテンションの組み合わせは、機械翻訳だけでなく音声認識・対話等にも使われ、CNNとアテンションの組み合わせは画像のキャプション生成等にも使われる。さらに、RNNやCNNを使わずにアテンション機構のみで従来よりも高い精度が達成可能なことを示したTransformerモデル（自己アテンション機構を使用）[15]が注目されている。

③ マルチモーダル×マルチタスク学習

一つの試みとして、テキストに対する意味の分散表現は実数ベクトル形式だが、画像・映像・音声等の異なるタイプの入力に対しても同様のベクトル形式に変換することで、マルチモーダル処理を共通的なニューラルネットワーク構造で行うことが考えられる。さらに、それらの入力に対して行うタスクも共通構造をベースに組み上げることが考えられる。実際に、画像内の対象物の認識、キャプションの生成、音声の認識、4組の言語間での翻訳、文法と構文の解析

といった異なる複数のタスクを、1つのニューラルネットワーク構造で表現して訓練した結果、各タスクを別々のニューラルネットワーク構造で訓練したケースよりも高い精度が得られたことが報告された[16]。共通構造を用いることで、あるタスクでの訓練結果が別のタスクの精度向上にも効果があったということから、深層学習がマルチモーダルな応用場面に広がるだけでなく、効率的な訓練手法にもつながると期待できる。

④ 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、不特定多数の作業者に振り分けて作業を実施するクラウドソーシング[17]が活用されるようになった。クラウドソーシングには、1つ1つのタスクで見ると非常に安価に実施できる一方、作業者による品質のばらつきが避けられないという問題がある。この品質問題に対して、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、利用経験を重ねたことで、クラウドソーシングの適用が適するケース、あまり適さないケースも見極められるようになってきた。

次に、質問応答・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。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

雑談対話コンペティション

目的に着目した対話システムの類型として、タスク指向対話か非タスク指向対話（雑談対話）かという分け方がある。これまで対話システムの開発・実用化の中心は、観光案内、交通案内、チケット予約、スケジュール予約、レストラン検索といったタスク指向対話であったが、近年、雑談対話を行える対話システムの研究開発が活性化している。

それを示す事例として雑談対話コンペティションの開催があげられる。特に知られているのはAmazonが開催するAlexa Prize[18]である。その最終目標は、5段階評価で4.0以上の評価が得られる魅力的な会話を、人間と20分間以上続けることとされている。米国の大学の研究チームが対象で、優勝チームは第1回（2017年）がワシントン大学、第2回（2018年）がカリフォルニア大学デイビス校であった。しかし、いずれも平均対話時間は10分前後、5段階評価で3.1前後と、最終目標にはまだ遠い。他にも、機械学習のトップランク国際会議Annual Conference on Neural Information Processing Systems（NIPS、NeurIPS）でも2017年からThe Conversational Intelligence Challengeが開催されている。国内でも、2015年から対話破綻検出チャレンジが開催されており、2018年には対話システムライブコンペティションが開催された。

ビジネス上の狙いを考えると、Amazonは家庭向けにスマートスピーカーAmazon Echo（Alexa）をリリースしているが、魅力的な雑談対話を長く続けられるようになれば、家庭におけるテレビやネットアクセス等の時間を奪い取り、新たなメディアあるいはチャネルになり得る。雑談対話を通してユーザーの嗜好を獲得し、より的確で自然なレコメンデーションが可能になる。さまざまなタスク指向対話の前段としての位置付けることも可能である。

（５）科学技術的課題

① ニューラル自然言語処理の発展

ニューラル自然言語処理で高い精度を達成するには、大量の学習データが必要だが、さまざまなタスクのそれぞれについて大量の学習データを用意することは容易なことではない。そこで、まず、さまざまなタスクに共通的な汎用性の高いモデルを、大量のデータで事前訓練（Pre-training）しておき、それをベースにして個別のタスク毎の事後訓練（Post-training）を行うというアプローチが検討されるようになった。事後学習においては、個別のタスク毎に必要な学習データはそれほど大量でなくてもよい。このような事前訓練の手法として特に注目されたのは、2018 年に提案された OpenAI GPT[19]、ELMo[20]、BERT[21] である。OpenAI GPT は left-to-right 単方向の Transformer モデル、BERT は双方向の Transformer モデル、ELMo は left-to-rigt と right-to-left の連結モデルである。これらのモデルでは、事前訓練のアプローチに、文脈を考慮する仕組みも取り入れられている。従来、Word2Vec では多義語の意味を分離できなかった。たとえば「bank」という単語は「銀行」と「土手」という異なる 2 つの意味を持つが、分散表現において、これら 2 つの意味を分離できないという問題である。この問題に対して、ELMo や BERT は双方向の文脈を考慮した計算モデルを用いることで多義語を分離することを可能にしている。ELMo、さらに BERT は、複数のベンチマークで従来を上回る精度が得られたと報告されている。

また、End-to-End 系列変換モデルでは、入力系列と出力系列の間で言語要素の過不足が生じ得るという問題がある。つまり、Seq2Seq で実数ベクトルを介して出力系列を生成するため、入力系列になかった単語が出力系列に現れたり、その逆で入力系列にあった単語が出力系列で欠落してしまったりすることがある。また、現状、文単位の変換を行っているため、同じ単語が別の文では異なる表現で出力される等、文章全体での可読性の面でも課題がある。

分散表現と End-to-End 系列変換を用いた新しい枠組みで、自然言語処理のさまざまなタスクが再構成されつつあるが、さらなる技術発展が期待される。

② マルチモーダル処理・実世界連結

ニューラル自然言語処理によってマルチモーダル入力解析やクロスメディア変換を行う基本的な枠組みが得られた。たとえば、映像と音声から成る動画の内容解析や、画像や映像に対する自然言語のキャプション生成等が可能になってきた。今後さらなる性能向上やさまざまな応用開発が期待される。

また、対話システムにおける実世界連結もロボット応用等で重要性が増している。その具体的な成果例として、Preferred Networks が CEATEC JAPAN 2018（2018 年 10 月）でデモンストレーション展示を行った「全自動お片付けロボットシステム」が注目された。このシステムでは、部屋の中に散らかったさまざまな物について、片付けロボットに対して「それは赤い箱に片づけて」というような物体移動の命令を言語指示で行うことができる[22]。このような物体移動の命令は、自然言語（指示代名詞も含む）と実世界の物体を連結する仕組みを用いることで処理できる。対話システムの利用シーン拡大には、このような実世界連結の技術の発展が求められる。

③ 知識・常識の獲得と推論

自然言語処理の枠組みとしてニューラル自然言語処理が広がりつつあるが、従来のルールベースや統計ベースの方式でそれなりの精度が得られていた問題の解法を、ニューラル方式に置き換えて精度を上げたというのがこれまでの状況である。文脈理解や常識推論等、従来方式で難しかった問題はニューラル方式を使おうと依然として難しい。また、ニューラル自然言語処理によって、本来は記号レベルの処理である自然言語処理が End-to-End ブラックボックス化している。こういったことから、ニューラル自然言語処理とは異なるアプローチも組み合わせていくことが必要なことは間違いない。特に知識・常識の獲得やそれを用いた推論の問題でその必要性が高い。

常識推論は自然言語処理研究の黎明期から取り組まれてきたが、近年は問題がいくつかの具体的な形で定義され（含意関係認識、ストーリー予測、Adversarial Examples 等）、そのベンチマークが作られるようになった [23]。

含意関係認識（Recognizing Textual Entailment;. RTE）問題は、常識推論の古典的なベンチマークとみなせる。2 つの文 T と H が与えられたとき、T が H を含意するか（T が真のとき、H も真といえるか）を判定するのが RTE 問題である。2006 年から Pascal RTE Challenge コンペティションも開催されるようになった。当初のベンチマーク用データセットは数百事例程度の規模であったが、近年は Stanford Natural Language Inference（SNLI、画像の説明文ドメイン、約 57 万事例）、Multi-NLI（さまざまなドメイン、約 43 万事例）等、クラウドソーシングを活用した大規模データセットが構築されるようになった。

ストーリー予測は、連続する数文が与えられ、その原因（前提）や結果（エンディング）に該当する文を、別に与えられた数文の中から選択する問題である。10 万ストーリー規模のデータセットが構築され、やはりコンペティションも実施されている。

その後、単に規模が大きければよいわけではなく（統計的な傾向を捉えれば結果が出せるようなものではなく）、本当に文脈を捉えたり、推論したりすることが必要になる問題セットを作るべきだという認識が高まった。そこで、Adversarial Examples の考え方を取り入れたベンチマーク構築が検討されるようになった。このようなコンピューターの言語理解能力を評価するタスクは Machine Reading Comprehension（MRC）と呼ばれ [24]、自然言語処理のトップランクの国際会議でワークショップが開催される等、常識推論のベンチマークとして取り組みが活性化している。

④ 情報の信憑性判定

Web や SNS の情報を扱う上で常に問題となるのは情報の信憑性である。2011 年の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。2016 年の米国の大統領選挙ではフェイクニュースが結果に影響を与えたとも言われる。このような課題を受けて、ファクトチェック機関が立ち上がったり、Fake News Challenge コンペティションが開催されたりと、対策の検討が進められているが、技術のみで解決できる課題ではなく、多面的なアプローチが必要である [25]。

（6）その他の課題

① タスク設定・評価の再定義（コンペティションの設計・推進）

従来は形態素解析・構文解析等の自然言語処理のサブタスク別の精度評価が、技術改良における主たる目標になっていた。しかし、ニューラル自然言語処理では応用毎の End-to-End 最適化のアプローチがとられるため、サブタスクに注力することのウェイトが下がってきた。このような状況で技術開発を進めるにあたって、適切なタスクを設定し、評価の指標や条件を適切に定めることの重要性が高まっている。

これに関連して、AI 分野ではシェアドタスクでのコンペティション型ワークショップが盛んに実施されている。特に米国 NIST が自然言語処理・情報検索領域でこれを推進してきたことは先駆的で、この分野の基礎研究の強化を大きく牽引した。このような活動の推進においては、タスク設定に関わる目利き人材がキーになる。取り組むことに大きな価値があり、しかも無理難題ではなく挑戦意欲をかき立てるようなタスク設定の匙加減を適切にでき、コミュニティーをリードできるような人材が求められる。

また、雑談対話のように人間を相手にするシステムの評価は難しい。タスク指向対話では目的達成までの対話回数が少ない方が効率的でベターだが、雑談対話では長く続けられた方が良い。ただし、単なる長さだけでなく、魅力的な／楽しい対話という主観的な質の評価を扱わなくてはならない。前述の Alexa Prize 等のコンペティションでもそのような面での検討が進むと期待される。

② データ戦略・施策の強化

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。日々大量のデータを集める GAFA が優位な中、欧州では一般データ保護規則（GDPR）を成立させて対抗している。日本は、大量データの収集・整備・共有の仕組み作りをどのように進めるのか、法制度の整備も含めて、まだ十分な戦略が構築できていない。データ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。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。

その一方で、必ずしも大量の学習データを集めることができないタイプの問題も、現実には多い。GAFA のようなインターネットサービスからデータを集められるケースを除けば、現実世界のビジネスの現場で、最初から大量の学習データが得られるようなケースはあまりない。また、英語は流通しているデジタルデータの量が圧倒的に多いのに対して、そもそも集め得るデータ量が格段に少ない国の言語（低資源言語と呼ばれる）もある。このような学習データを十分大量に集めることが困難なタイプの問題に対する技術・体制・取り組み方等も考えていく必要がある。

また、テキストデータの場合、国際的な競争力のため英語や多言語対応が必要である一方、日本語固有の問題へも戦略的に取り組んでおくことも忘れてはいけない。

③ 人材に関わる問題

1980 年～ 2000 年頃、ルールベース方式が主流だった時代は、カナ漢字変換、機械翻訳、サーチエンジン等をターゲットとして、電気系大手企業の各社が自然言語処理の研究開発に力を入れていた。しかし、機械学習を用いる方式では、大量のテキストデータを使うことが研究

開発に不可欠で、多数のユーザーを抱えるインターネットサービスを運営している企業において、自然言語処理への取り組みが活発になってきた。特にGAFAは保有するデータ量やそれを処理する計算機パワーが圧倒的で、データ収集や実験が行いやすいことは研究者に魅力的である。つまり、人材の獲得・維持にデータ戦略が大きく関わっている。

（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	○	→	言語処理学会に活気があり、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226億ドルを筆頭にGoogle、Microsoft、Apple等100億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（2018年時点）[26]。自然言語処理・音声対話等のビジネスもさまざまな応用の開発・展開で先行している[27]。
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。
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。中国工業情報化部が2017年12月に発表した「新世代の人工知能（AI）産業発展を促進するための3年行動計画（2018年～2020年）」において、育成すべきAI応用製品8分野中に自動音声応答装置と翻訳システムがあげられた。
	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。

（8）参考文献

1）Christopher D. Manning, “Computational linguistics and deep learning”, *Computational Linguistics* Vol.41, No.4 (2015), pp.701-707. DOI: 10.1162/COLI_a_00239
2）Minh-Thang Luong, Hieu Pham and Christopher D. Manning, “Effective Ap-proaches to Attention-based Neural Machine Translation”, *Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (EMNLP 2015; Lisbon, Portugal, September 17–21, 2015), pp.1412-1421.
3）久保陽太郎、「ニューラルネットワークによる音声認識の進展」、『人工知能』（人工知能学会誌）31 巻 2 号（2016 年 3 月）、pp.180-188。
4）中澤敏明、「機械翻訳の新しいパラダイム：ニューラル機械翻訳の原理」、『情報管理』66 巻 5 号（2017 年 8 月）、pp.299-306。DOI: 10.1241/johokanri.60.299
5）情報処理推進機構 AI 白書編集委員会（編）、「自然言語を中心とする記号処理」、『AI 白書 2017』（KADOKAWA、2017 年）、pp.64-78（1.4 節）。
6）Mark Molloy, “Microsoft ‘deeply sorry’ after AI becomes ‘Hitler-loving sex robot’”, The Telegraph, 26 March 2016. https://www.telegraph.co.uk/technology/2016/03/26/microsoft-deeply-sorry-after-ai-becomes-hitler-loving-sex-robot/ (accessed 2019-01-25)
7）Anand Rajaraman and Jeffrey David Ullman, *Mining of Massive Datasets* (Cam-bridge University Press, 2012). （和訳：岩野和生・浦本直彦訳、『大規模データのマイニング』、共立出版、2014 年）
8）大塚裕子・乾孝司・奥村学、『意見分析エンジン―計算言語学と社会学の接点』（コロナ社、2007 年）。
9）“Special Issue: This is Watson”, *IBM Journal of Research and Development* Vol. 56 issue 3-4 (May-June 2012).
10）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』（人工知能学会誌）31 巻 2 号（2016 年 3 月）、pp.189-201。
11）Maximilian Nickel, Kevin Murphy, Volker Tresp and Evgeniy Gabrilovich, “A Review of Relational Machine Learning for Knowledge Graphs”, *Proceedings of IEEE* Vol. 104, No. 1 (2016), pp.11-33.
12）Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg Corrado and Jeffrey Dean, “Dis-tributed Representations of Words and Phrases and Their Compositionality”, *Proceedings of 27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2013; Nevada, United States, December 5-8, 2013), pp.3111-3119.
13）坪井祐太・海野裕也・鈴木潤、『深層学習による自然言語処理』（講談社、機械学習プロフェッショナルシリーズ、2017 年）。
14）Ilya Sutskever, Oriol Vinyals and Quoc V. Le, “Sequence to Sequence Learning with Neural Networks”, arXiv:1409.3215 (2014).
15）Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser and Illia Polosukhin, “Attention Is All You Need”, arXiv:1706.03762 (2017).
16）Lukasz Kaiser, Aidan N. Gomez, Noam Shazeer, Ashish Vaswani, Niki Parmar, Llion

Jones and Jakob Uszkoreit, “One Model To Learn Them All”, arXiv:1706.05137 (2017).

17）鹿島久嗣・小山聡・馬場雪乃、『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、機械学習プロフェッショナルシリーズ、2016 年）。

18）Ashwin Ram, Rohit Prasad, Chandra Khatri, Anu Venkatesh, Raefer Gabriel, Qing Liu, Jeff Nunn, Behnam Hedayatnia, Ming Cheng, Ashish Nagar, Eric King, Kate Bland, Amanda Wartick, Yi Pan, Han Song, Sk Jayadevan, Gene Hwang and Art Pettigrue, “Conversational AI: The Science Behind the Alexa Prize”, arXiv:1801.03604 (2018).

19）Alec Radford, Karthik Narasimhan, Tim Salimans and Ilya Sutskever, “Improving language understanding with unsupervised learning”, OpenAI Technical report, OpenAI Blog (11 June 2018). https://blog.openai.com/language-unsupervised/ (accessed 2019-01-25)

20）Matthew E. Peters, Mark Neumann, Mohit Iyyer, Matt Gardner, Christopher Clark, Kenton Lee and Luke Zettlemoyer, “Deep contextualized word representations”, arXiv:1802.05365 (2018).

21）Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee and Kristina Toutanova, “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, arXiv:1810.04805 (2018).

22）羽鳥潤・菊池悠太・小林颯介・高橋城志・坪井祐太・海野裕也・Wilson Ko・Jethro TanKo、「実世界におけるインタラクティブな物体指示」、『言語処理学会第 24 回年次大会発表論文集』（2018 年 3 月）、pp.943-946。

23）井之上直也、「言語データからの知識獲得と言語処理への応用」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 3 号（2018 年 5 月）、pp.337-344。

24）Saku Sugawara, Kentaro Inui, Satoshi Sekine and Akiko Aizawa, “What Makes Reading Comprehension Questions Easier?”, *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (EMNLP 2018; Brussels, Belgium, October 31-November 4, 2018), pp. 4208-4219.

25）笹原和俊、『フェイクニュースを科学する：拡散するデマ、陰謀論、プロパガンダのしくみ』（化学同人、DOJIN 選書、2018 年）。

26）Barry Jaruzelski, Robert Chwalik and Brad Goehle, “WHAT THE TOP INNOVATORS GET RIGHT”, strategy+business (PwC Strategy&), 30 October 2018. https://www.strategy-business.com/feature/What-the-Top-Innovators-Get-Right?gko=e7cf9 (accessed 2019-01-25)

27）八山幸司、「米国における自然言語処理技術と人工知能のコミュニケーションをめぐる動向」、JETRO ニューヨークだより、2016 年 11 月。 https://www.ipa.go.jp/files/000055592.pdf (accessed 2019-01-25)

2.1.4　AIソフトウェア工学

（1）研究開発領域の定義

AIソフトウェア工学は、AI（Artificial Intelligence：人工知能）応用システムを、その安全性・信頼性を確保しながら効率よく開発するための新世代のソフトウェア工学を指す[1)]。

従来型のシステム開発においては、安全性・信頼性を確保し、効率よくシステム開発を行うための技術体系・方法論がソフトウェア工学の中で整備されてきた。ここでいう従来型とは、プログラム（手続き）を書くという演繹型のシステム開発方法を意味する。これに対して、AI応用システムの開発では、データを例示することによる、機械学習を用いた帰納型の開発方法が用いられる。AIソフトウェア工学は、従来の演繹型システム開発のためのソフトウェア工学から、AI応用システム向けの帰納型システム開発にも対応したソフトウェア工学へ拡張した技術体系・方法論である。

なお、AIソフトウェア工学とほぼ等しい用語として、国内では「機械学習工学」[2), 3)]、海外では「Software 2.0」[4), 5)]がよく用いられている。

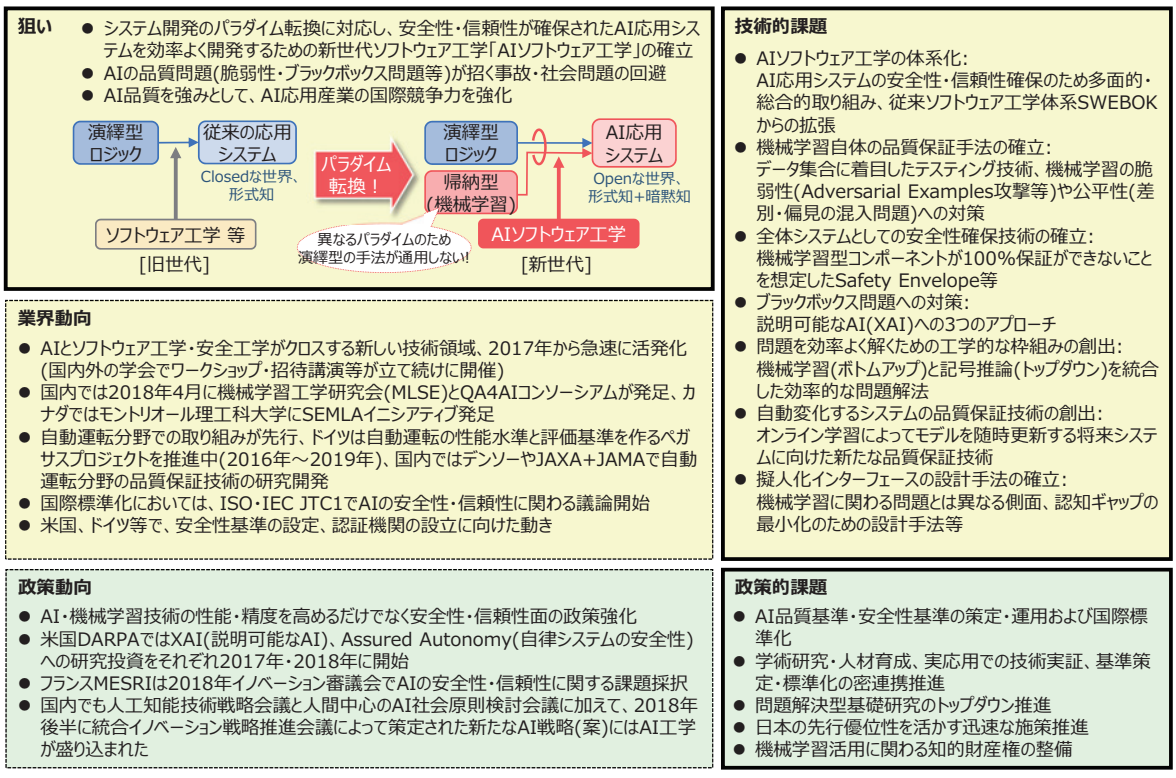


図2-1-6　領域俯瞰：AIソフトウェア工学

（2）キーワード

機械学習工学、ソフトウェア2.0、AI応用システム、ソフトウェア開発、ソフトウェア工学、安全工学、安全性、信頼性、公平性、解釈性、ソフトウェアテスティング、ソフトウェア品質、品質基準、訓練済みモデル、訓練データ、データ品質、データ検査、学習データ工学

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

現在のAIブームを牽引しているのは、深層学習（Deep Learning）をはじめとする機械学習技術の進化である。機械学習技術はさまざまな製品・システムに組み込まれ、実社会での応用・実用化が急速に広がっている。

しかし、機械学習による帰納型のシステム開発方法は、従来の開発スタイルとは大きく異なる。そのため、従来ソフトウェア工学として構築・整備されてきた技術・方法論（V字モデル等）は必ずしも適さず、システムの要件定義や動作保証・品質保証にも新しい考え方が必要になる。システム開発のパラダイム転換が起きているのである[1), 2), 3), 4), 5)]。

このパラダイム転換によって、システム開発に必要な人材スキルや方法論が刷新され、この変化に追従できないと、ソフトウェア産業やシステムインタグレーターは競争力を失いかねない。また、動作保証・品質保証等の考え方が整備されないまま、機械学習技術を組み込んだシステムが急激に社会に入っていくと、そこで発生した問題や事故が社会問題化する懸念もある。具体的な例として、画像認識等の誤認識を誘発するAdversarial Examples攻撃[6)]や、機械学習が訓練データ（学習データ）に潜んでいた差別・偏見を反映してしまう問題[7)]等が指摘されている（これらの詳細は後述）。

こういった問題・懸念は、AI応用システムの安全性・信頼性が本質的に低いということを意味するわけではない。パラダイム転換に対して、システム開発のための技術体系・方法論がまだ整備されていないためである。AIソフトウェア工学を確立していくこと[1]が、このような問題・懸念への対策になる。

また、「2.1.1 機械学習」「2.1.2 画像・映像解析」「2.1.3 自然言語処理」で述べてきたように、機械学習技術を用いることで、さまざまな応用において人間の判断を上回る精度の分類・予測・異常検知等が可能になった。これは、人間が形式知化できていないような規則性が機械学習技術によって獲得可能になり、コンピューターによってシステム化・自動化できる機能が広がってきたということである。AIソフトウェア工学は、このような新たな価値を生み出すAI応用システムの安全性・信頼性を確保するとともに、その効率のよい開発を可能にする。

［研究開発の動向］

① 学術界・産業界の動向

AIソフトウェア工学は、AIとソフトウェア工学（Software Engineering）や安全工学（Safety Engineering）がクロスする新しい技術領域である。「AIソフトウェア工学」という名称は2018年12月に発行したJST戦略プロポーザル[1)]で用いた。「AIソフトウェア工学」に相当する「機械学習工学」や「Software 2.0」という名称が研究コミュニティー内で認知されるようになったのも2017年からである[2), 4)]。

それ以前にもシステム開発のパラダイム転換への対応が必要だという指摘・議論はあったが、国内では2017年初頭から学会・業界イベント（2017年2月の情報処理学会ソフトウェアジャパン2017、同年8月の情報処理学会ソフトウェア工学シンポジウムSES2017、他多数）で

[1] ここでは、開発者の視点で書いたが、システムの安全性・信頼性の確保に向けては、システムの利用者や開発依頼者がAI応用システムの安全性・信頼性に関する考え方や特性を理解し、どのように受け入れていくか、という側面も考えていく必要がある。

基調講演や企画セッション等が立て続けに開催され、一気にホットトピック化した[1)]。

さらに2018年4月に、日本ソフトウェア科学会に機械学習工学研究会MLSE（Machine Learning Systems Engineering）が発足した[8)]。MLSEは、機械学習応用システムの開発・運用にまつわる生産性や品質の向上を追求する研究者とエンジニアが、互いの研究やプラクティスを共有し合う場として、研究発表会、ワークショップ、勉強会等、さまざまな活動を展開している。機械学習を用いたシステムの要件定義から設計・開発・運用まで、プロセス管理や開発環境・ツール、テスト・品質保証の手法、プロジェクトマネジメントや組織論も含めて、機械学習を用いたシステム開発全般について幅広いスコープで活動している。

同じ2018年4月には、AIプロダクト品質保証コンソーシアムQA4AI（Consortium of Quality Assurance for Artificial-Intelligence-based products and services）も発足した[8)]。産学27の発起人・団体で設立され、AIプロダクトの品質保証に関する調査・体系化、適用支援・応用、研究開発を推進するとともに、AIプロダクトの品質に対する適切な理解を啓発する活動を行っている。

一方、海外でも2017年後半から、機械学習を従来型プログラミングに対する新しいパラダイムと捉える動きが見られた。新しいパラダイムは「Software 2.0」（Teslaによる）[4)]や「Machine Teaching」（Microsoftによる）[9)]と呼ばれ、国際学会（2018年6月のISCA 2018、2018年12月のNeurIPS 2018等）で基調講演[5)]も行われるようになった。カナダのモントリオール理工科大学にSEMLAイニシアティブ（The Software Engineering for Machine Learning Applications initiative）が発足し、2018年6月にキックオフシンポジウムが開催された。

以上に示したように、国内外とも2017年から2018年にかけて急速に関心が高まり、議論や取り組みが活性化してきた。この背景には、AI・機械学習技術の応用がさまざまな分野に急速に広がり、品質保証クリティカルな応用分野にも適用されるようになってきたことがある。安全性・信頼性に関する要求レベルは応用毎に異なる。応用システムが持つ3つの性質「ミスの深刻性」「AI寄与度」「環境統制困難性」[2]に着目すると、一般に、ミスの深刻性が高く、AI寄与度が高く、環境統制困難性の高い応用ほど、品質保証がクリティカルになる[1)]。機械学習の応用として、商品のレコメンド機能や、文字認識による郵便物の自動読取区分システム等は10年以上前から実用化されているが、これらはミスの深刻性や環境統制困難性が比較的低い応用である。これに対して、昨今注目される自動運転や医療診断といった応用分野は、ミスの深刻性や環境統制困難性が高い（ミスが人命に関わり、多様な環境条件で使われる）。そのため、事前（および運用時）の品質保証が極めて重要なものになっている。

産業界の中でも特に問題意識が高く、検討が先行しているのが自動車業界である。自動運転の実現に向けてAI・機械学習技術の役割が増しており、上でも述べたように品質保証クリティカルな応用分野として具体的な検討が進められている。海外で特に注目されているのは、ドイツ経済エネルギー省（Bundesministerium für Wirtschaft und Energie：BMWi）が主導す

[2]「ミスの深刻性」は、AI・機械学習が誤った判定結果を出したときに生じる問題がどれくらい深刻であるかを意味する。人命に関わるような場合は深刻性が高い。「AI寄与度」は、問題解決のために実行されるアクションの決定にAI・機械学習がどれくらい大きく寄与するかを意味する。AI・機械学習の出力（判定結果）がそのまま反映される場合は寄与度が高く、AI・機械学習の出力（判定結果）を参考にして人間が最終的に判断する場合は寄与度が低い。「環境統制困難性」は、AI・機械学習を実行する際の環境条件をコントロールすることの難しさを意味する。環境条件を列挙することが難しく想定外のことがいろいろ起こり得る場合は困難性が高く、環境条件を統制することが容易であれば困難性が低い。

るペガサス（Pegasus）プロジェクト[10]（2016年1月～2019年6月）である。ペガサスプロジェクトには、自動車関連主要企業が参加し、自動走行システムの期待性能水準と評価基準を明確化するべく取り組んでいる（詳細は後述）。国内では、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と日本自動車工業会（JAMA）が連携し、AIによる自律化システムのソフトウェア品質確保の考え方をまとめようとしている[8]。また、デンソーは、自動運転を含むAI搭載システムの品質保証体系（仕組み）の構築を進めるとともに、(1) アプリケーション、(2) サブシステム、(3) コンポーネント（モデル／データ）の3階層で品質技術を開発している[11]。

その一方で、AI・機械学習の研究者は、機械学習の精度・性能を高める競争が激しく、総じて開発法自体への関心は低かった。しかし、社会におけるAIについての議論が活発に行われるようになり、機械学習の脆弱性（Adversarial Examples[6]等）、ブラックボックス問題[12), 13)]への対処等が検討され始めた。たとえば、2014年から毎年開催されているFAT/ML（Fairness, Accountability, and Transparency in Machine Learning）ワークショップ等で、機械学習における公平性・説明責任・透明性等が議論されている（詳細は後述）。これらは開発法そのものの研究ではないが、開発法を設計する上での指針になる。

② 基準策定・標準化の動向

上で述べたような問題意識の急速な高まりと連動して、AI品質関連の標準化活動や安全基準策定に関わる動きが生まれている。国際標準化機構ISO（International Organization for Standardization）と国際電気標準会議IEC（International Electrotechnical Commission）の第一合同技術委員会JTC1において、SC7がソフトウェア工学、SC42が人工知能を扱っている（JTC：Joint Technical Committee、SC：Subcommittee）。これらのSCでAIの品質や安全性・信頼性に関わる議論が始まっている。特にSC7下のWG6がソフトウェア品質、WG26がソフトウェアテスティングを扱っており、さらに自律システムの倫理等を扱うWGも新設される予定である（WG：Working Group）。また、ISO TC159で人間工学、その下のSC4でヒューマンコンピューターインタラクションを扱っており、AIを使う際の利用者視点でのガイドラインを作ろうとしている。IEEE Standard AssociationでもGlobal Initiative for Ethical Considerations in AI and Autonomic Systemsが議論されている。

他にも、米国ベンチャーEdge Case Researchと、米国の認証機関Underwriters Laboratoriesが共同で自律システムの安全性基準を策定しようとしている。Google DeepMindは自社のAI開発ガイドライン[14]を、仕様、頑健性、保証という3面からまとめていると発表した。

ドイツでは、ドイツ人工知能研究センター（The German Research Center for Artificial Intelligence：DFKI）とドイツの認証機関TÜV SÜDが共同で、TÜV for Artificial Intelligence策定の活動を進めている。日本国内では、ソフトウェア品質知識体系SQuBOK（Software Quality Body of Knowledge）策定部会が、2020年に発行予定の次期バージョンV3において、AI応用システムの品質も取り上げる予定である[15), 16)]。

③ 科学技術政策の動向

AIに関する科学技術政策は、いま各国が国としての戦略を掲げ、重点投資を進めている。その中で、AI・機械学習技術の性能・精度を高める技術開発競争が強く意識されてきたが、徐々

に安全性・信頼性の面にも目が向けられるようになってきた。

わが国では、総理指示を受けたAI研究の体制として、2016年に「人工知能技術戦略会議」とその下での総務省・文部科学省・経済産業省の3省連携による推進体制が構築され、AI技術の研究開発が強化されている。一方、内閣府に「人間中心のAI社会原則検討会議」が設けられ、AIの社会的・経済的・倫理的・法的な課題（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）を含む社会から見たAIへの要請が検討されている[3]。ここで次に「AI社会原則が示す姿（満たすことが望ましい要件）を実現するために、AI技術群を用いて、どのようにAI応用システムを作ればよいか」という問いが生じるが、それに答えるのがAIソフトウェア工学である。2018年6月の閣議決定を受けて新たに「統合イノベーション戦略推進会議」が設置され、その下で有識者検討に基づく「AI戦略（案）」が9月末に提言された。この「AI戦略（案）」ではAIソフトウェア工学を含むAI工学が取り組むべき課題として取り上げられている。

米国では、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency：DARPA）が推進するさまざまなAI関連プログラムの中で、安全性・信頼性に関わる研究開発も進められている。特に知られているのが2017年に始まったXAI（Explainable AI：説明可能なAI）プロジェクト[17]である。また、2018年に始まったAssured Autonomyプロジェクト[18]においても、自律システムの安全性確保が検討されている（これらのプロジェクトの詳細は後述）。

フランスでは、高等教育・研究・イノベーション省（Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation：MESRI）が、2018年9月にイノベーション審議会によって採択されたAIに関する2つの主要課題を発表した。その主要課題の1つが「AIを活用するシステムの安全確保、認証、信頼性確保の方法」である。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① AIソフトウェア工学の体系化への取り組み

システムの安全性・信頼性の確保は一つの技術で解決するものではなく、全体像を押さえつつバランスよく、技術開発を総合的に取り組んでいく必要がある。このような認識のもと、個々の技術開発と並行して、AIソフトウェア工学のスコープや技術体系が整理・検討されている[1]。AIソフトウェア工学のスコープ・技術体系を考えるにあたって、従来のソフトウェア工学の体系をもとにすることができる。具体的には、IEEE Computer Societyによってまとめられたソフトウェア工学の知識体系SWEBOK（Software Engineering Body of Knowledge）が参考になる。SWEBOK V3.0では、ソフトウェア要求、ソフトウェア設計、ソフトウェア構築、ソフトウェアテスティング、ソフトウェア保守、ソフトウェア構成管理、ソフトウェアエンジニアリングマネージメント、ソフトウェアエンジニアリングプロセス、ソフトウェアエンジニアリングモデルおよび方法、ソフトウェア品質、ソフトウェアエンジニアリング専門技術者実践規律、ソフトウェアエンジニアリング経済学、計算基礎、数学基礎、エンジニアリング基礎

[3] 社会から見たAIへの要請については、「人間中心のAI社会原則検討会議」に先立ち、内閣府の「人工知能と人間社会に関する懇談会」、総務省の「AIネットワーク社会推進会議」、経済産業省の「AI・データ契約ガイドライン検討会」等で検討されてきた。特に「AIネットワーク社会推進会議」では、透明性、利用者支援、制御可能性、セキュリティー確保、安全保護、プライバシー保護、倫理、アカウンタビリティという8つの原則を掲げた「AI開発原則（案）」や「AI利活用原則（案）」等を示してきた。内閣府は、2018年4月に「人間中心のAI社会原則検討会議」を発足させ、先行の検討結果を踏まえつつ、同年度末までに「人間中心のAI社会原則（案）」をまとめる予定である。

があげられている。AI ソフトウェア工学もこれらを扱うとともに、それぞれの項目において、機械学習型のシステム開発で新たに発生する課題に対応するための拡張が必要である。

また、従来のソフトウェア工学との対比で語られることが多いが、AI・機械学習の応用システム開発は、ソフトウェアだけに閉じず、ハードウェアやデータ管理も含めたシステムが対象スコープになる。狭い意味でのソフトウェア工学に限らず、安全工学やシステム工学も検討範囲に含まれる。具体的な手法として、機能間の関係性を踏まえ、制御系が環境と相互作用することで起きうる事故モデルを使った安全性分析・ハザード解析手法として知られる STAMP/STPA[19), 20)]（System Theoretic Accident Model and Processes / System Theoretic Process. Analysis）や FRAM（Functional Resonance Analysis Method）等を、AI・機械学習の応用システムにも拡張適用する検討が進められている[8)]。

② 機械学習のテスティング技術

機械学習を用いて作られたシステムは、どれだけテストすれば十分なのか、テストの方法や品質指標がまだ確立されていない。従来型の簡単なテストのイメージは、「ボタン A を押したら光る」「ボタン B を押したら音が鳴る」というような動作ロジックに沿って、すべてのケースと正しい結果を事前にリストアップすることができ、その通りの結果が得られるかを確認すればよいというものである。従来型でも、一定以上の規模や複雑さを持つシステムになると、すべてのケースはリストアップできず、テストが難しくなるが、機械学習型の場合は、動作ロジックの記述ではなくデータ例示によって動作を定義するので、そもそもすべてのケースをリストアップするための手がかりがない。たとえば、自動運転における環境認識では、「雨や霧のこともあるかもしれない」「物陰から人が飛び出すかもしれない」等、実世界で車が遭遇し得る環境の可能性をどう数え上げ、どれだけのケースをテストしておいたら十分安全なシステムだと言えるのか、という問題は機械学習型においていっそう難しい。

このことから、事前に想定していなかったケースに対するシステムの振る舞いが保証できず、脆弱性が生じる。この脆弱性を突く攻撃が Adversarial Examples 攻撃[6)]である。たとえば、機械学習を用いた画像認識システムがそれまで正しく認識できていた画像に対して、人間には気にならない程度の小さな加工（ごく小さなノイズ等）を加えて、それまでと全く異なる誤認識結果を出させるというものである。道路標識を対象とした実験で、停止標識を速度制限標識と誤認識させた（停止しなければ事故を招く）と報告されている。

機械学習のテスティング技術は、AI ソフトウェア工学分野で特に活発に取り組まれている研究テーマの一つである。機械学習は訓練データによってシステムの動作が定まるが、起こり得るすべてのケースを訓練データやテストデータとして事前にカバーすることはできない。そのような前提のもと、テストデータのカバレッジやパターン量を適切かつ効率よく増やすためのさまざまな手法が開発されている[23), 27)]。具体的には、ニューロンカバレッジ、メタモルフィックテスティング、サーチベースドテスティング、データセット多様性等のアイデアが知られている。ニューロンカバレッジは、深層学習等ニューラルネットワーク系の機械学習において、ニューラルネットワーク内の活性化範囲を調べ、それを拡げるようなテストパターンを生成しようという考え方である。メタモルフィックテスティングは、入力を変えると出力はこう変わるはずという関係を検証し、既存テストケースから多数のテストケースを生成する手法である。サーチベースドテスティングは、メタヒューリスティックを用いて、欲しいテストケー

スを表すスコアを最大化するようテストケースを生成する手法である。

③ 機械学習における公平性・解釈性・透明性（FAT/ML）

AI・機械学習技術がさまざまな応用に使われ、社会に広がるにつれて、社会における AI という視点からの議論が活発に行われるようになった。各国の政府機関・学会・企業等が AI あるいは AI 応用システムが満たすべき要件をまとめ、公開する動きも進んだ[28]。研究開発という側面では、FAT/ML（Fairness, Accountability, and Transparency in Machine Learning）というテーマで、技術的な定式化や対策検討が行われている。

公平性（Fairness）に関する問題[29), 30), 31)]は、主に訓練（学習）データに潜んでいた差別・偏見をシステムが学習してしまうというものである。たとえば、罪を犯した人間の再犯率を予測するために、人間による判断結果を機械学習にかけたとする。もしその判断を行った人間が特定人種に偏見を持っていたならば、機械学習による判断結果もその傾向を反映してしまう。また、個々の訓練データに偏見を持った判断が含まれているか否かだけでなく、訓練データの分布の偏りや量が差別を生むケース（特定人種の誤認識が多い、採用判定を性別で差別した等）も指摘されている。

説明責任（Accountability）あるいは解釈性に関する問題は、機械学習で獲得されたモデルやルールが人間には理解が難しい、また、機械学習による判定について理由を説明できないというブラックボックス問題[12)]である。すべての機械学習アルゴリズムがこれに該当するわけではないが、近年応用が拡大している深層学習はこれに該当する。顧客や利用者への説明が求められるケースや、事故・エラーが発生したときの原因解明・切り分けのために解釈性が求められるケース等、対策が求められる。

透明性（Transparency）に関する問題は、説明責任・公平性と要件的には重なるが、関連するトピックとして、欧州で 2018 年 5 月に施行された一般データ保護規制（General Data Protection Regulation：GDPR）に AI の透明性を求める条文（GDPR 第 22 条）が盛り込まれたことから、規制遵守という面での対応が求められる。

以上のような FAT/ML の問題に対して、AI・機械学習の主要な国際会議（NIPS、ICML、KDD）とも併設される形で 2014 年から FAT/ML ワークショップが毎年開催されており、2018 年からは ACM FAT* が開催されるようになった。技術的には、前述の XAI や、FADM（Fairness-aware Data Mining）[30), 31)]といった研究分野が立ち上がっている。XAI については、DARPA のプロジェクトの概要を後述するので、ここでは省略する。FADM については、不公平さの検出と不公平の防止という 2 つのタスクを中心に取り組まれている。訓練に用いるデータ集合に差別・偏見が潜んでいないかという視点だけでなく、訓練時にセンシティブな属性をどう扱うかという視点も必要になる。人種・性別等の属性を除外して機械学習を実行したとしても、他の属性に人種・性別等と相関の高いものがあれば、不公平な結果を出してしまうかもしれない。また、通常、機械学習の精度と公平性・解釈性の確保はトレードオフ関係が生じるので、応用・目的に応じた設計が必要である。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

① 機械学習工学研究会 MLSE

前述の通り、2018 年 4 月に、日本ソフトウェア科学会に機械学習工学研究会 MLSE が発足した。活動の趣旨やスコープについては前述したので、ここでは繰り返さないが、発足後の具体的な活動として、2018 年 5 月にキックオフシンポジウム、7 月にワークショップ、12 月に国際ワークショップ iMLSE（1st International Workshop on Machine Learning Systems Engineering）が開催された。6 月・8 月・9 月には関連国内学会の全国大会で企画セッションも開催された。情報処理学会誌 2019 年 1 月号（60 巻 1 号）では「機械学習工学」特集が組まれ、取り組みを俯瞰する 6 本の解説論文 [21), 22), 23), 24), 25), 26)] が掲載された。他に論文読み会や勉強会といった場も運営されている。上記キックオフシンポジウムは 500 名以上、産業界からの参加者比率も高く、業界の問題意識・関心が顕在化された。国際ワークショップ iMLSE では、前述の SEMLA イニシアティブのオーガナイザーメンバーであるの Giuliano Antoniol（モントリオール理工科大学教授）と Foutse Khomh（同大学准教授）を招き、SEMLA イニシアティブとの国際連携も図られた。AI ソフトウェア工学への取り組みが国際的にも活性化しつつある中で、日本は具体的な活動でやや先行しているが、MLSE の牽引によるところが大きい。

② ペガサスプロジェクト

ドイツ経済エネルギー省（BMWi）が主導するペガサスプロジェクト [10)] は、自動走行システムの期待性能水準（自動運転車両はどれくらいの性能が求められるか？）と評価基準（求められる性能を満たすことをどのようにして確認するか？）を明確化するための産学官共同プロジェクトである。BMW、Daimler、Volkswagen、Audi 等の自動車メーカー、Robert Bosch GmbH（ボッシュ）等のサプライヤー、ドイツ航空宇宙センターやダルムシュタット工科大学等の大学・研究機関、第三者認証機関 TÜV SÜD（テュフズード）等、計 17 団体が参加している。従来の V 字モデルに代わる自動運転の安全性評価フレームワークについて、自動走行車の機能・要件定義、走行環境・走行状況のデータ化、それらを組み合わせたテストシナリオ作成、テストシナリオに基づくシミュレーション・実走行テストとリスク許容性を踏まえた安全性評価という 4 項目が検討されている。プロジェクト期間は 2016 年 1 月～ 2019 年 6 月で、終了が近づいているが、活動は継続し、評価手法の国際標準化を目指すとのことである。

③ 米国 DARPA における関連プロジェクト（XAI、Assured Autonomy）

米国 DARPA の AI 関連プログラムの中で、安全性・信頼性に関わり、特によく知られているのが XAI プロジェクト [17)]（2017 年 5 月～ 2021 年 4 月の 4 年間）である。このプロジェクトは、人間の意思決定を支援するパートナーとしての AI を、人間の兵士が理解・信頼し、管理することを目指している。つまり、技術的には、機械学習の精度と解釈性の両立が目標であり、具体的なタスクとして Data Analytics と Autonomy という 2 つを設定している。Data Analytics タスクは、マルチメディアデータを解析してターゲットを選択するに際して、選択の理由も示す（たとえば、敵と判断した理由として銃の輪郭を強調表示する等）。Autonomy タスクは、ドローンやロボット等の自律システムにおいて、どういう状況でどういう理由で次の行動を決定したかを説明する。

これらのタスクにおいて、機械学習の精度と解釈性を両立させるアプローチは 3 通りが検討

されている。1つめはDeep Explanationである。深層学習について、入力の部分的な変化に対するモデル内の反応の変化を調べる等により、結果に特に影響を与えている要素・特徴を推定し、説明の根拠とする方法である。2つめはModel Inductionである。深層学習等のブラックボックス型の機械学習に対して、その入出力の振る舞いを、より解釈性の高い別モデルで近似する方法である。3つめはInterpretable Modelsである。ブラックボックスではない解釈性の高いモデルを用いる方法だが、決定木や重回帰分析のような従来のシンプルなモデルでは解釈性があっても高い精度が得られないため、解釈性がありながら精度も高い新しいモデルを作る。また、説明可能なモデルだけでなく、説明のためのインターフェースや説明の心理学的モデルの研究にも取り組まれている。

もう一つ、Assured Autonomyプロジェクト[18]（2018年5月～2022年4月の4年間）では、自動運転車やドローン等の自律システムの安全性確保が検討されている。そのために、実行時の入出力をモニタリングし、想定された振る舞いから外れたときに、それを検知して動作を止める等の対策アクション（事前に設計しておいたもの）を起動するような枠組みが研究開発されている。

（5）科学技術的課題

システムの安全性・信頼性の確保は、1つの技術によって達成し得るものではなく、多面的・総合的な取り組みが不可欠である。全体像を押さえつつ、見通しよく、バランスよく、取り組むべきである。そのため、個々の技術開発と並行してAIソフトウェア工学の体系化を進めることが重要である。これについては、前述の通り、ソフトウェア工学の知識体系SWEBOKをベースに体系を描くと見通しがよい。

ここで、AIソフトウェア工学に対する多面的・総合的な取り組みは、（A）実践から得られる知見を体系化していくアプローチや（B）理論・原理に関わる学術研究のアプローチが可能である。これらのうちアプローチ（A）は産業界を中心に自ずと進んでいくに違いない。その一方で、システム開発のパラダイム転換に対応するには、より根本的な取り組みとして、アプローチ（B）が不可欠である。このアプローチ（B）の学術的な基礎研究として重要な技術課題として、以下の4点があげられる[1]。

① 機械学習自体の品質保証手法の確立

データ集合に着目した機械学習の品質（精度、公平性等）の理論やテスティング手法が重要である。機械学習の精度や想定外リスクを左右するのは訓練データ集合なので、テストや訓練に用いるデータ集合の選び方やデータ集合の質の評価等が検討されている。また、機械学習をシステムに組み込み、運用する過程において、区別して評価・管理すべき品質の種類・性質（プロダクト品質、サービス品質、プラットフォーム品質）[32]も検討されている。研究開発が活性化しつつあるが、理論的整備や公平性確保、裏付けのある品質基準策定等、まだ多くの研究課題が残されている。

② 全体システムとしての安全性確保技術の確立

従来型と機械学習型の混在システムの全体としての安全性評価法やリカバリー処理設計法が必要である。機械学習型コンポーネントが100%保証はできないことを想定した全体システム

設計（Safe Learning、Safety Envelope）[33]、機械学習型の入力・出力をモニタリングして例外処理・リカバリー処理を起動するシステム構成法[18]が検討されている。また、安全性分析・ハザード解析手法（STAMP/STPA、FRAM）[19), 20)]に機械学習の特性も取り入れた拡張も今後の研究課題である。

③ ブラックボックス問題への対策

前述したように、機械学習応用に不安を与えている要因として、機械学習が判定したとき、その理由を人間が理解できないというブラックボックス問題がある。（すべての機械学習方式がブラックボックスというわけではないが）システムにブラックボックスな部分があると、設計時や利用時に、設計者あるいは利用者がシステムの動作を予測することが難しく、システムの安全性を確保する上で妨げになる。また、もしシステムが事故を起こしてしまった場合、その原因理解や責任の切り分けが難しいということにもなる。そこで、システム動作の解釈性を向上させ、事故発生時の原因理解や設計時・利用時の動作予測の容易にするため、XAI（説明可能なAI）と呼ばれる研究テーマへの取り組みが進められている[13), 17)]。

④ 問題を効率よく解く工学的な枠組みの創出

機械学習（ボトムアップ）と記号推論（トップダウン）を統合した効率的な問題解法を追求する。深層学習が広がったことで帰納型・ボトムアップ型の問題解決が主流になっているが、本来、演繹型・トップダウン型の記号推論も重要である。それらのあるべき組み合わせや新しい問題解決の枠組みを探究することは、AI応用システムのアーキテクチャ設計という面で重要である。新たな問題解法、効率的な処理構成として、さまざまな可能性が考えられる[34), 35)]。

以上の①～④は既に取り組みが始まっている重要な技術課題をあげたが、他にも今後取り組みが必要になると思われる技術課題を以下に2つあげる。

⑤ 自動変化するシステムの品質保証技術の創出

機械学習は、訓練データを与えてモデルを生成する訓練フェーズ（学習フェーズとも呼ばれる）と、その訓練済みモデルを用いて、新たに入力されたデータを判定する判定フェーズ（推論フェーズとも呼ばれる）を持つ。上で述べてきた品質保証に関わる手法は基本的に、訓練フェーズのバッチ的実行を想定している。すなわち、初期の訓練であれ、追加の訓練であれ、訓練フェーズを実行したら、判定フェーズに入る前に、必ず訓練済みモデルを評価・テストがされなければならない。しかし、機械学習の使い方として、オンライン学習によって、モデルを随時更新しながら、判定にも使っていく形があり得る。このような形の場合、システムの品質保証ははるかに難しく、新たな技術チャレンジが必要である。

⑥ 擬人化インターフェースの設計手法の確立

ここまで、AI応用システム開発における問題を、機械学習に起因するものにフォーカスして論じたが、機械学習以外にも問題になり得る要因が考えられる。その一つは擬人化インターフェースである。2次元（画面表示）にせよ3次元（ロボット形状）にせよ、人間の形状・表情・対話を模したインターフェース（擬人化インターフェース）を持つAI応用システムが提

供されつつある。擬人化インターフェースの利点は、そのシステムと相対する利用者にとって、システムがどのような応答をするかのモデルを仮定しやすいことである。しかし、それは逆に、利用者が思い込みをしやすい面があり、利用者が仮定したモデルと、実際のシステムの応答モデルとの間のギャップが、想定外の状況を生む可能性を持つ。そのような認知ギャップを最小化するような設計手法が求められる。

（6）その他の課題

① AI 品質基準・安全性基準の策定・運用および国際標準化

AI 品質を日本の強みにして、AI 適用産業の国際競争力を強化するチャンスである。そのため、国として適切な品質基準・安全性基準を策定し、その認証を行う機関を設立・運用（評価のための適切なデータセットの構築・管理も含む）、さらには国際標準化も推進すべきである。粗悪な AI 商品・サービスの流通は事故を多発させ、AI 応用システムに対する消費者の不安・懸念を招き、厳しい規制や国内 AI 関連産業の委縮につながる。そのような事態を回避し、市場の健全化と産業の活性化を促進するため、十分な根拠を持った適切な基準策定と、AI 応用システムの社会受容性を確保するための施策が求められる。

品質基準・安全性基準の策定・標準化は、自動車分野での取り組みが進みつつある。この分野で先行的な取り組みを推進し、さらに他分野への展開を進めたい。

② 学術研究・人材育成、実応用での技術実証、基準策定・標準化の密連携推進

AI ソフトウェア工学の研究開発は、(1) 学術研究＆人材育成、(2) 実応用での技術実証、(3) 基準策定・標準化、という 3 つの活動を密連携させて推進することが不可欠である。そのための司令塔の役割を持つ部門も必要である。産業界の AI 応用システムの開発現場に導入され、効果を生むものでなくてはならない一方で、パラダイム転換に対応できる新たな原理・理論を学術的な基礎研究から生み出していく必要がある。

③ 問題解決型基礎研究のトップダウン推進

システムの安全性・信頼性の確保には、さまざまな技術を用いて、多面的・総合的に取り組む必要がある。問題解決の視点から技術体系を構築していくことが必要になる。基礎研究を強化・推進するためのファンディングの考え方として、シーズプッシュ型（リニアモデル）は馴染まない。問題解決型でさまざまな解法を試み、その中から筋のよいものを見いだし、必要ならば、それらを組み合わせて、より優れた解法を創出していくようなアプローチが適する。このような問題解決型の基礎研究をトップダウンに強化・推進するファンディングを考える必要がある。

④ 日本の先行優位性を活かす迅速な施策推進

AI ソフトウェア工学は、学問分野としてまだ黎明期だが、AI に関わる他分野と同様に、動きがはやいことは間違いない。しかも、現状、国内での取り組みは海外にやや先行した面もあり、決して後追い状況ではなく、世界的にリードできるチャンスがある。また、品質基準・安全性基準等を打ち出して、標準化活動を進めるにあたっても先行優位性はキープしたい。したがって、日本の先行優位性を活かす迅速な施策推進が強く望まれる。

⑤ 機械学習活用に関わる知的財産権の整備

機械学習に用いるデータや解析結果に関わる知的財産権に加えて、機械学習固有の問題として訓練（学習）済みモデルの知的財産権の問題がある。訓練済みモデルの再利用のパターンは、(1) Copy：そのまま複製して使う、(2) Fine Tuning：ある訓練済みモデルにさらにデータを与えて追加訓練したものを行う、(3) Ensemble：複数の訓練済みモデルの出力を束ねて（平均・多数決等）使う、(4) Distillation：ある訓練済みモデルの振る舞い（どんな入力を与えたときにどんな出力が得られるか）を訓練データとして作ったモデルを使う、という 4 通りがある [3]。このようなパターンを含めて、訓練済みモデルの知的財産権をどのように保護すべきか、法整備が必要である。

（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 や NEDO のプログラムにおいて、AI 応用システムの安全性や品質保証に取り組む研究課題が採択されている。具体的には、JST ERATO「蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」（2016 ～ 2022、NII 等）、NEDO（AI・ロボット中核技術）「機械学習 AI の品質保証に関する研究開発」（2018 ～ 2022、産総研・NII）、JST MIRAI（サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングと AI）「高信頼な機械学習応用システムによる価値創造」（2018 採択、NII）が進められている。現状、少数の先進的研究者によって牽引されていて、研究者層がまだ薄い。国の AI 戦略に AI 工学が掲げられ、今後、政策強化が期待される。
	応用研究・開発	○	↗	2018 年 4 月に機械学習工学研究会 MLSE と QA4AI コンソーシアムが発足し、産業界からの多数の参画もあり、活発に活動が進められている。JAXA と JAMA の共同検討やデンソーでの取り組み等、自動車分野での安全性保証に関する技術開発も進められている。
米国	基礎研究	○	↗	DARPA が 2017 年から XAI プロジェクト、2018 年から Assured Autonomy プロジェクトをスタートさせており、基礎研究への比較的大型の政府投資がなされている。
	応用研究・開発	○	↗	GAFA は AI 応用システム開発に関する実践的な手法や知見を保有している。Edge Case Research と Underwriters Laboratories が共同で安全性基準策定・認証機関への検討を進めている。
欧州	基礎研究	○	↗	ドイツの産官学連携によるペガサスプロジェクトが、自動運転分野の安全性評価の基準や評価手法の開発で国際的に先行している。
	応用研究・開発	○	↗	イギリスの DeepMind が自社の AI 開発ガイドラインをまとめ、公開している。ドイツでは DFKI と TÜV SÜD が共同で AI に関する第三者認証の検討を始めた。
中国	基礎研究	△	→	2018 年 11 月に深圳で開催された第 17 回全国ソフトウェア応用大会において「AI に基づくソフトウェア工学」セッションが開催された。
	応用研究・開発	△	→	欧米企業に比べると、安全性・信頼性に関する中国企業での取り組みは現状あまり見えていない。
韓国	基礎研究	×	→	現状、特段の活動が見られない。
	応用研究・開発	×	→	現状、特段の活動が見られない。

（8）参考文献

1）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：AI 応用システムの安全性・信頼性を確保する新世代ソフトウェア工学の確立」、CRDS-FY2018-SP-03（2018 年 12 月）。
2）丸山宏、「機械学習工学に向けて」、『日本ソフトウェア科学会第 34 回大会講演論文集』（2017 年 9 月）。
3）丸山宏・城戸隆、「機械学習工学へのいざない」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 2 号（2018 年 3 月）、pp. 124-131。
4）Andrej Karpathy, “Software 2.0”, Medium (2017.11.12). https://medium.com/@

karpathy/software-2-0-a64152b37c35 (accessed 2019-01-18)

5）Kunle Olukotun, “Designing Computer Systems for Software 2.0”, Invited Talk (December 6, 2018) in *the 32nd Conference on Neural Information Processing Systems* (NeurIPS 2018; Montréal, Canada, December 3-8, 2018).

6）Kevin Eykholt, Ivan Evtimov, Earlence Fernandes, Bo Li, Amir Rahmati, Chaowei Xiao, Atul Prakash, Tadayoshi Kohno and Dawn Song, “Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models”, arXiv:1707.08945 (2017).

7）Kate Crawford, “The Trouble with Bias”, Invited Talk (December 5, 2017) in *the 31st Conference on Neural Information Processing Systems* (NIPS 2017; Long Beach, Calfornia, December 4-9, 2017).

8）進藤智則、「深層学習や機械学習の品質をどう担保するか？新しいソフト開発手法と位置付け「工学体系」構築へ」、『日経ロボティクス』2018 年 6 月号（2018 年）、pp. 3-10。

9）Patrice Y. Simard, Saleema Amershi, David M. Chickering, Alicia Edelman Pelton, Soroush Ghorashi, Christopher Meek, Gonzalo Ramos, Jina Suh, Johan Verwey, Mo Wang and John Wernsing, “Machine Teaching: A New Paradigm for Building Machine Learning Systems”, arXiv:1707.06742 (2017).

10）Ulrich Eberle, Olaf Schädler, Sven Hallerbach, Matthias Büker , Sebastian Gerwinn, Tino Brade and Christian Amersbach, “Automated Driving & Development Processes － A Brief Look Beyond”, *Pegasus Symposium* 2017 (Aachen, Germany, November 9, 2017).

11）桑島洋・安岡宏俊・中江俊博、「セーフティクリティカルな機械学習システムの品質保証の課題」、『第 1 回機械学習工学ワークショップ』（MLSE2018 ; 2018 年 7 月）。

12）Riccardo Guidotti, Anna Monreale, Salvatore Ruggieri, Franco Turini, Dino Pedreschi and Fosca Giannotti, “A Survey Of Methods For Explaining Black Box Models”, arXiv:1802.01933 (2018).

13）高野敦、「もうブラックボックスじゃない、根拠を示して AI の用途拡大」、『日経エレクトロニクス』2018 年 9 月号（2018 年）、pp. 53-58。

14）Pedro A. Ortega, Vishal Maini and the DeepMind safety team, “Building safe artificial intelligence: specification, robustness, and assurance”, Medium (2018.9.28.) https://medium.com/@deepmindsafetyresearch/building-safe-artificial-intelligence-52f5f75058f1 (accessed 2019-01-18)

15）鷲崎弘宜、「アジャイル品質保証の知識体系 － SQuBOK 2020 予定より－」、『enPiT-Pro スマートエスイーセミナー』（2018 年 9 月 7 日）。

16）SQuBOK 策定部会（編）、「SQuBOK Review 2018」（2018 年）。https://www.juse.or.jp/sqip/squbok/file/squbok_rev2018_20181016.pdf (accessed 2019-01-18)

17）David Gunning, “Explainable Artificial Intelligence (XAI)”, DARPA Program Update, November 2017. https://www.darpa.mil/attachments/XAIProgramUpdate.pdf (accessed 2019-01-18)

18）Sandeep Neema, “Assured Autonomy”, DARPA Program, August 2017. https://www.darpa.mil/attachments/AssuredAutonomyProposersDay_Program%20Brief.pdf

(accessed 2019-01-18)
19）情報処理推進機構 技術本部ソフトウェア高信頼化センター、『はじめての STAMP/STPA ～システム思考に基づく新しい安全性解析手法～』（情報処理推進機構、2016 年 3 月）。https://www.ipa.go.jp/files/000051829.pdf (accessed 2019-01-18)
20）情報処理推進機構 技術本部ソフトウェア高信頼化センター、『はじめての STAMP/STPA（活用編）～システム思考で考えるこれからの安全～』（情報処理推進機構、2016 年 3 月）。https://www.ipa.go.jp/files/000065199.pdf (accessed 2019-01-18)
21）丸山宏、「機械学習工学の狙いと展開」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 12-16。
22）今井健男・太田満久、「機械学習応用システムのテストと検証」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 17-24。
23）石川冬樹・徳本晋、「機械学習応用システムの開発・運用環境」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 25-33。
24）吉岡信和、「機械学習応用システムのセキュリティとプライバシ」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 34-39。
25）五十嵐健夫、「機械学習のためのヒューマンインタフェース」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 40-47。
26）本橋洋介、「機械学習応用システムのプロジェクト管理と組織」、『情報処理』（情報処理学会誌）60 巻 1 号（2019 年 1 月、特集：機械学習工学）、pp. 48-55。
27）中島震、「データセット多様性のソフトウェア・テスティング」、『日本ソフトウェア科学会第 34 回大会講演論文集』（2017 年 9 月）。
28）情報処理推進機構 AI 白書編集委員会（編）、『AI 白書 2019 ～企業を変える AI 世界と日本の選択～』（KADOKAWA、2018 年）。
29）MIT テクノロジーレビュー編集部（翻訳・編集）、『AI and bias：人工知能は公平か？』（MIT テクノロジーレビュー Special Issue Vol. 7；2018 年 5 月 31 日発行、角川アスキー総合研究所）。
30）福地一斗、「公平性に配慮した学習とその理論的課題」、『第 21 回情報論的学習理論ワークショップ』（IBIS2018；2018 年 11 月 6 日）。
31）神 嶌 敏 弘、「Fairness-Aware Data Mining」、2018 年。http://www.kamishima.net/archive/fadm.pdf (accessed 2019-01-18)
32）中島震、「機械学習ソフトウェアの品質：製品、サービス、プラットフォーム」、『電子情報通信学会 知能ソフトウェア工学研究会』（KBSE；2018 年 11 月 9 日）。
33）蓮尾一郎、「統計的機械学習と演繹的形式推論：システムの信頼性と説明可能性へのアプローチ」、『日本数学会 2018 年度秋季総合分科会 数学連携ワークショップ』（2018 年 9 月 24 日）。http://group-mmm.org/~ichiro/talks/20180924okayama.pdf (accessed 2019-01-18)
34）David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel and Demis Hassabis, “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree

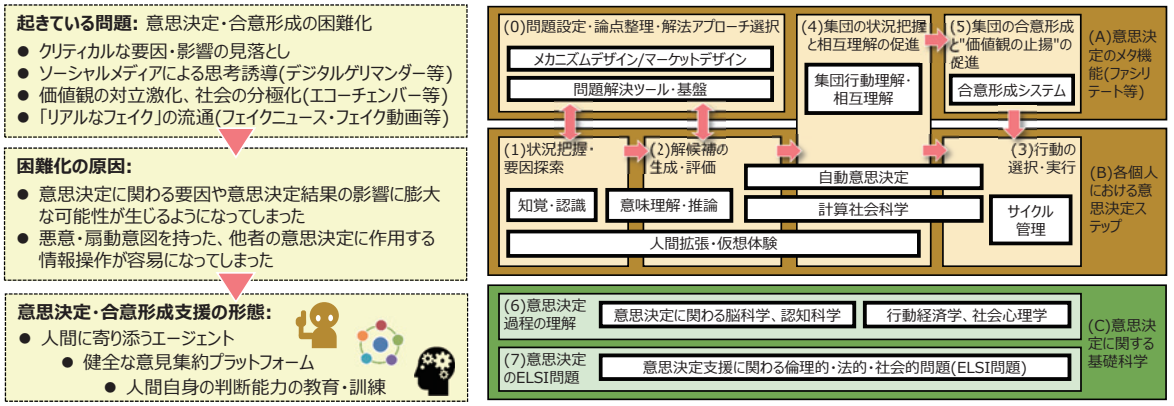
search”, *Nature* Vol. 529, (2016) pp. 484-489. DOI:10.1038/nature16961
35）我妻広明、「データ駆動型人工知能と論理知識型人工知能の融合による解釈可能な自動運転システムに関する研究」、『NEDO「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」（人工知能分野）中間成果発表会』（2017 年 3 月 29 日）。https://www.airc.aist.go.jp/info_details/docs/170329/1730-Wagatsuma.pdf (accessed 2019-01-18)

2．1．5　意思決定・合意形成支援

（1）研究開発領域の定義

「意思決定」は、個人や集団がある目標を達成するために、考えられる複数の選択肢の中から一つを選択する行為である。その選択では個人の価値観が拠りどころとなるが、集団の意思決定では、必ずしも関係者（メンバーやステークホルダー）全員の価値観が一致するとは限らない。関係者内で選択肢に関する意見が分かれたとき、その一致を図るプロセスが「合意形成」である。

情報爆発等による可能性の見落としやフェイクニュース等による悪意・扇動意図を持った思考誘導操作といった問題が顕在化し、意思決定ミスを起こしてしまうリスクが高まっている。このような問題・リスクを人工知能（AI）技術等の情報技術によって軽減し、個人・集団が主体性・納得感を持って意思決定できるように支援することを目指す研究開発領域である[1)]。



研究開発課題（番号は右上図との対応）	これまでの取り組み	今後の課題・方向性
膨大な可能性の探索・評価(1)(2)	因果関係推論、マルチエージェントシミュレーション等	因果関係知識獲得、常識推論等
自動意思決定(2)(3)	強化学習、予測型意思決定最適化等	多様な価値観や不完全情報での意思決定等
多様な価値観の把握・可視化(4)	gIBIS、言論マップ生成、VR・ゲーミングによる追体験等	議論マイニング、ディベートAI、法学AI等
交渉・合意形成・集合知支援(5)	討論型世論調査、自動交渉エージェント、インセンティブメカニズム等	高度な自動交渉、価値観の相互作用モデル等
フェイク対策(0)(1)	ソーシャルネット分析、メカニズムデザイン等	高度なファクトチェック支援、フェイク検出等
意思決定に関する基礎科学(6)(7)	脳の意思決定メカニズム、行動経済学、認知バイアス等	ELSI・社会受容性、利用者から見た透明性等

関連動向
- AI・ビッグデータ技術による分析ビジネスは自動意思決定・意思決定支援を提供する処方的分析へ(Gartner)
- 意思決定問題は、古くから主に人文・社会科学の分野で取り組まれてきたが、今日、情報科学技術の関わりが増大
- AI(機械学習・最適化)が扱うのは評価関数が定まり解が1つ求まる問題、多様な価値観が混在する問題は新たな技術チャレンジ
- 欧米では、AIへの大型投資に加えて、学際的な意思決定研究が進んでいる(大規模意見集約、討論型世論調査、市民科学等)
- 米国では政治・ジャーナリズム分野でもAI技術との融合的な取り組みや議論が進展

図2-1-7　領域俯瞰：意思決定・合意形成支援

（2）キーワード

意思決定、合意形成、意見集約、フェイクニュース、フェイク動画、デジタルゲリマンダー、議論マイニング、マルチエージェント、自動交渉、メカニズムデザイン、計算社会科学、行動経済学、処方的分析

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

我々は日々さまざまな場面で意思決定を行っている。クリティカルな場面での意思決定ミスは個人や集団の状況を悪化させ、その存続・生存さえも危うくする。例えば、企業の経営における意思決定ミスは、企業の業績悪化・競争力低下を招き、国の政策決定・制度設計における意思決定ミスは、国の経済停滞や国民の生活悪化にもつながる。また、個人の意思決定における判断スキル・熟慮の不足は、その個人の生活におけるさまざまなリスクを誘発するだけでなく、世論形成・投票等における集団浅慮という形で、社会の方向性さえも左右する。

情報技術が発展し、社会に浸透した今日、情報の拡散スピードが速く、膨大な情報があふれ、影響を及ぼし合う範囲が思わぬところまで広がっている。そのような意思決定の行為自体の難しさが増していることに加えて、意思決定の際の拠りどころとなる価値観の多様化[2), 3)]によって、合意形成の難しさも増している。さらには、価値観の対立から悪意・扇動意図を持った思考誘導の情報操作（フェイクニュース、フェイク動画等）まで行われるという問題も顕在化し[4), 5)]、社会問題化している。

このような意思決定の困難化（意思決定ミスを起こすリスクの増大）という状況に対して、AI 技術等の情報技術の活用は、問題のすべてを解決できるわけではなくとも、リスクを軽減し、状況を改善する手段になり得る。技術発展とともに急速に変化し、複雑化する社会環境にあっても、個人・集団が主体性・納得感を持って意思決定できるように、情報技術を用いて支援することが、上で述べたようなさまざまな意思決定場面で効果を生むと期待される。

また、集団での意思決定は、単に異なる意見の間の調整・交渉ではなく、多様な視点・考えからの集合知が期待でき、情報技術はその活性化・活用促進にも効果がある。

[研究開発の動向]

① 意思決定問題への取り組み

個人・集団の意思決定問題は古くから検討されてきた問題である。意思決定に関する先駆的な研究としては、1978 年にノーベル経済学賞を受賞した Herbert A. Simon の取り組み[6), 7)]がよく知られている。Simon は意思決定プロセスを、(1) 情報（Intelligence）活動、(2) 設計（Design）活動、(3) 選択（Choice）活動というステップで構成されるとした。(1) で意思決定に必要な情報を収集し、(2) で考えられる選択肢をあげ、(3) で選択肢を評価し、どれを選択するか決定する。これらのステップにおいて、必要な情報をすべて集めることができ、可能性のあるすべての選択肢をあげることができ、各選択肢を選んだときに起こり得るすべての可能性を列挙して評価することができるならば、合理的に最良の選択が可能になる。しかし、現実にはそのようなすべての可能性を考えて意思決定することはできず、人間が合理的な意思決定をしようとしても限界がある。この Simon が導入した「限定合理性」（Bounded Rationality）という概念は、意思決定に関する研究発展の基礎となった。Simon は、経営の本質は意思決定だと考え、限定合理性を克服するための組織論も展開した。

そのように人間の判断・行動が必ずしも合理的になり得ず、心理・感情にも左右されるものであることを踏まえて、行動経済学が発展し、その中では意思決定に関わる興味深い知見が示されている。特に有名なのは、Simon の後、行動経済学の分野でノーベル経済学賞を受賞した二人、Daniel Kahneman（2002 年受賞）と Richard H. Thaler（2017 年受賞）の研究であ

る。Kahneman は、直観的な「速い思考」のシステム 1 と論理的な「遅い思考」のシステム 2 というモデル[8]を提唱し、Thaler は、軽く押してやることで行動を促す「ナッジ」（nudge）という考え方[9]を提唱した。

また、脳科学分野における脳の意思決定メカニズムの研究も進んでいる（詳細は「2.1.7 計算脳科学」を参照）。ドーパミン神経細胞の報酬予測誤差仮説等が見いだされ、モデルフリーシステムによる潜在的な意思決定と、モデルベースシステムによる顕在的な意思決定が協調および競合しつつ、人間の意思決定が動作していることがわかってきた[10]。モデルフリーシステムは、事象と報酬との関係を直接経験に基づき確率的に結び付ける。モデルベースシステムは、事象と報酬との関係を内部モデルとして構築し、直接経験していないケースについても予測を可能にする。このような 2 通りのシステムは Kahneman のモデル（システム 1・システム 2）とも整合しており、意思決定が合理性だけによるものではないことの裏付けにもなる。

このような人文・社会科学分野や脳科学分野における意思決定に関する研究が、主に人間の側から掘り下げられてきた一方で、近年の情報技術の発展、Web やソーシャルメディアの普及は、意思決定を行う人間の環境を大きく変化させた。その結果、意思決定問題は新たな様相を呈するようになり、以前とは異なる困難さが生じている。今日、意思決定問題は情報技術との関わりが大きなものになっている。

② 意思決定問題の新たな様相・困難さ

本研究開発領域で取り組む意思決定・合意形成支援は、上で述べたような新たな様相・困難さに対処するために、情報技術を活用する。具体的な技術内容を説明する前に、新たに生じている困難さを示す事象（問題）として顕著なものを 4 つあげる。

1 つめは、クリティカルな要因・影響の見落としの問題である。たとえば、グローバル化したビジネス競争環境において、世界のあらゆる地域、思ってもいなかった業種から新たな競合が生まれ、想定していなかった法規制やソーシャルメディアで思わぬ切り口からの炎上も起こり得る。膨大な情報があふれ、社会がボーダーレス化した今日、意思決定に関連しそうな要因や意思決定結果の影響に膨大な可能性が生じ、人間の頭でそのあらゆる可能性をあらかじめ考えるのは極めて難しい。Simon のいう限定合理性が極度に進み、問題として深刻化している状況である。

2 つめは、ソーシャルメディアによる思考誘導の問題である。Web やソーシャルメディアを用いた情報発信・交流が広がり、それが人々の意思決定や世論形成に与える影響は無視できないものになっている[11), 12)]。2016 年の米国大統領選挙はその顕著な事例であり[4), 5)]、SNS（Social Networking Service）等のソーシャルメディアを用いた政治操作は「デジタルゲリマンダー」と呼ばれ[13)]、フェイクニュースが社会問題化した。SNS では、価値観が自分に近い相手としかつながらず、自分の価値観に沿った情報しか見ない、いわゆる「フィルターバブル」状態[14)]に陥りやすいことも、SNS が思考誘導の道具になりやすい原因になっている。

3 つめは、価値観の対立激化、社会の分極化の問題である。集団の合意形成に難航し、対立が激化する傾向が強まっている。価値観の対立は古くから起こってきた事象だが、社会のボーダーレス化に伴う関係者範囲の広がりや、SNS での同調圧力やエコーチェンバー現象による意見同質集団の形成強化が、対立を強め、社会の分極化（Polarization）や政治的分断と言われる事態も引き起こされている[15), 16)]。

4つめは、まるで本物のようなフェイク動画・画像の流通の問題である。前述のフェイクニュースは言葉（SNSテキスト等）で伝達されるものが主であったが、深層学習を用いた敵対的生成ネットワーク（Generative Adversarial Network：GAN）技術（GAN技術自体については「2.1.2 画像・映像解析」を参照）によって、まるで本物のように見えるフェイク動画やフェイク画像が簡単に作れてしまうようになった（Deepfakes、OpenFaceSwap等）。特にフェイク動画は本物だと信じ込まれやすく、政治家や有名人の架空の発言・行為等を作るためにこれが悪用され、社会に流通すると、何が真実で何かフェイクか、真偽判断を見誤るリスクが増大し、さまざまな混乱が生まれると危惧される[15), 17)]。

以上の問題に見られるように、(1) 意思決定に関わる要因や意思決定結果の影響に、膨大な可能性が生じるようになってしまったこと、(2) 悪意・扇動意図を持った、他者の意思決定に作用する情報操作が容易になってしまったことが、意思決定の困難化の原因として顕著である。

③ 意思決定・合意形成支援のための技術群

図2-1-7の右上部に、個人・集団の意思決定プロセス（合意形成を含む）に対応させて、関連する技術群を示した。Simonの3ステップに相当する(B)各個人における意思決定ステップを中心に、(A)意思決定のメタ機能と(C)意思決定に関する基礎科学を上下に配置した3層構造で技術群を整理した。以下、これらを5つの技術群に分けて、取り組みの現状と今後の方向性について述べる。

膨大な可能性の探索・評価

上述の原因への対策としてまず求められるのは、意思決定に関わる要因や意思決定結果の影響における膨大な可能性を探索し、それらの組み合わせの中から目的に合うものを評価して絞り込む技術である。自然言語処理による因果関係推論[18)]やマルチエージェントシミュレーションによる影響予測[19)]等の研究開発が進められており、具体的なシステムとして「なぜ？」「どうなる？」等の因果関係に関する質問応答を扱うことができる情報通信研究機構（NICT：National Institute of Information and Communications Technology）のWISDOM X[20)]が知られている。しかし、さまざまな分野・文脈で推論が行えるようにするには、常識を含め推論に必要な知識の獲得や、推論が成立する前提条件の精緻化等、取り組まなくてはならない技術課題がまだ多く残されている。

自動意思決定・自動交渉

価値観に対応する評価関数・効用関数が定められるケースは、AI技術の一分野として自動意思決定や自動交渉の研究開発が進められている。機械学習・最適化技術を活用した自動意思決定は、強化学習[21)]や予測型意思決定最適化[22)]等が開発されている（詳細は「2.1.1 機械学習」を参照）。さらに、異なる価値観（効用関数）を持ったエージェント間の自動交渉の研究があり、2010年から毎年、国際自動交渉エージェント競技会ANAC（Automated Negotiating Agents Competition）が開催されている[23)]。しかし、自動交渉は異なる価値観をもつ者の間の勝負という面があり、集団の合意形成を目的とするならば、ファシリテーターの役割[24)]や、相手への共感による価値観の変化といった面も取り込んでいく必要があり、自動ファシリテーション技術やフィールド実験にも取り組まれている[25)]。

多様な価値観の把握・可視化

多様な価値観が混在する状況下での意思決定・合意形成に向けては、その状況や価値観の違いを可視化する技術が有効である。賛成・反対の各立場から意見と根拠を対比する言論マップ生成[26]、主張・事実等への言明とその間の関係（根拠・支持、反論・批判等）を推定する議論マイニング（Argumentation Mining）[27]、議題に対して賛成・反対の立場でディベートを展開するシステム（IBMの「Project Debater」、日立の「ディベートAI」[28]等）が研究開発されている。これらは自然言語処理技術を用いた手法だが、集団の相互理解促進のためにはVR（Virtual Reality）技術やゲーミング手法を用いて相手の立場を追体験させるアプローチも効果がある。

フェイク対策

ソーシャルメディア上での情報伝播の傾向や、そこで起きている炎上、フェイクニュース、エコーチェンバー、二極化等の現象を把握・分析すること[4), 11), 12), 16), 17), 29)]は、フェイク対策のための基礎的研究となる。フェイクニュースへの対抗としては、発信された情報が客観的事実に基づくものなのかを調査し、その情報の正確さを評価・公表するファクトチェックという取り組みが立ち上がっている[4), 30)]。機械学習・自然言語処理等を活用してフェイクニュースを検出する競技会Fake News Challengeも2016年から始まった。ただし、フェイクの検出技術とフェイクの作成法は往々にしていたちごっこになるため、技術開発だけでなく、メディアリテラシーの教育・訓練や法律・ルールの整備による対策も進めることが必要である[4), 17)]。不適切な状況をなるべく回避するようなルール設計という面では、メカニズムデザインの理論[31)]も役立つ。

意思決定に関する基礎科学

情報技術によって人間の意思決定を支援するにあたって、そもそも人間の意思決定とはどういうものか、どうあるべきかを理解しておくことは重要である。既に言及した通り、行動経済学や脳科学の分野で意思決定プロセスのモデルやメカニズムが研究されてきた。また、社会心理学等の分野で研究されている確証バイアスを含む認知バイアスも意思決定に大きく関わる。加えて、人間の意思決定・合意形成を支援する機能がELSI（Ethical, Legal and Social Issues：倫理的・法的・社会的課題）の視点から適切であるかについても常に考えておかねばならない。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

① データ分析の発展段階（処方的分析へ）

米国の調査・アドバイサリー企業であるGartnerは、データ分析の発展を記述的分析（Descriptive：何が起きたか）、診断的分析（Diagnostic：なぜそれが起きたか）、予測的分析（Predictive：これから何が起きるか）、処方的分析（Prescriptive：何をすべきか）という4段階で自動化が進むとし、4段階目の処方的分析は「意思決定支援」と「自動意思決定」という2通りがあるとしている[32)]。この段階が進むほど、データ分析の顧客価値が高く、ビジネス上の競争も処方的分析へと進みつつある。

「自動意思決定」はデータ分析の結果に基づき、何をすべきかというアクションまで自動決定するものであり、「意思決定支援」はアクションの候補を人間に提示し、どんなアクションを実行するかは最終的に人間が決定するものである。一見すると、意思決定支援よりも自動意思決定の方が、より発展したものであるかのように思えるが、現状、意思決定問題の性質が異なると考えるのが適切である。すなわち、コスト、精度、速度、売上等のような明確な指標（いわば価値観に相当）が定められ、それを評価関数として合理的に解が一つ定められる意思決定問題は「自動意思決定」が可能になる。それに対して、さまざまな価値観が混在している状況下、あるいは、価値観が不確かな状況下での意思決定問題は、最終決定に人間が関わる「意思決定支援」の形が基本になる。「自動意思決定」タイプの問題は、機械学習・最適化技術等を用いた実用化が盛んに進められているが、「意思決定支援」タイプの問題にはそれとは異なる新たな手法の確立が必要である。

② 大規模意見集約システム

集団の意見集約・合意形成のために情報技術を活用するシステムは、古くはグループウェアや CSCW（Computer Supported Cooperative Work）の研究分野での取り組みが見られる。たとえば gIBIS という意思決定支援ツール[33]がよく知られている。gIBIS は、ワークショップにおける対話のファシリテーションの技法の一つとして、Issue（課題、論点）をベースに木構造の表現でまとめる IBIS（Issue Based Information Systems）法をグラフィカルに実現したシステムである。複雑な問題の本質を可視化・共有するために、このようなツールが有効なことが認識された。

一方、政治学の分野では、討論型世論調査（Deliberative Poll）[34]が、熟議に基づく民主主義を実現するための方法論として有効だと認識されるようになった。この方法論では、あるテーマについて回答を得る前に、回答者にグループ討論をしてもらうようにする。それにより、テーマに関する理解・熟慮が進み、回答の意見分布に明確な差が生じる。

米国マサチューセッツ工科大学（MIT）に 2006 年に設立された MIT Center for Collective Intelligence（集合知研究センター：CCI）では、学際的な取り組みを含め、集合知の収集・活用を推進する研究を進めている。インターネットを使った大規模な議論を、その論理構造の可視化（議論マップ）によって支援するシステム Deliberatorium[35]や、地球温暖化問題を取り上げて、解決プランを協議するシステム The ClimateCoLab 等のプロジェクトを進めている。さらに、CCI のトップである Thomas W. Malone は、2018 年の著書[36]で、人間の集合知に AI との協働を含めた Superminds の方向性を示した。

さらに、名古屋工業大学では大規模合意形成支援システム COLLAGREE[37]の研究開発を進めている。議論構造の可視化に加えて、エージェント技術によるファシリテーター機能の開発により、より柔軟で創造的な合意形成支援を目指している。名古屋・浜松等の自治体での社会実験にも取り組んでいる。

ここで述べたような集団の意思決定の支援では、価値観の異なる人々の間で意見を調整して合意点を見出すというよりも、むしろ、多様な考え・視点を持つ人々のコラボレーションに基づく集合知を通して、より良い解を見出すことに重点が置かれている。そのような集合知をより高めるための AI・情報技術による支援機能が検討されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

① IBM の Project Debater

Project Debater は IBM が開発したディベート AI システムで、人間とのディベート（討論）をライブで行うことができる。IBM のイスラエルの研究所で 2011 年から研究開発がスタートし、2018 年 6 月に米国サンフランシスコで開催されたイベント Watson West にて、イスラエルの 2016 年度ディベートチャンピオンとライブ対戦し、「政府支援の宇宙探査を実施すべきか否か」という議題で Project Debater が勝利した。ライブ対戦の進行は、対戦する両者が議題の肯定派と否定派に分かれ、まず 4 分間ずつ主張を述べ、次に 4 分間ずつ相手の主張に対する反論を述べ、最後に 2 分間ずつまとめを述べるという形で行われ、その勝敗は聴衆の支持数で決まる。

Project Debater の技術詳細はまだ論文として公開されていないが、データ駆動型のリアルタイム音声対話生成、長い話し言葉中から重要な概念や主張を識別する聞き取り能力、独自のナレッジグラフによる人間のジレンマのモデル化等の技術を新たに開発・適用したということである。ディベートの議題は直前に与えられ、その場で相手の主張も踏まえつつ、自分の主張を組み立てる。ニュース記事や学術論文を 3 億件の収集・構造化しておいて用いており、2011 年に米国のクイズ番組 Jeopardy! で人間のチャンピオンに勝利した IBM Watson[38] の自然言語処理や、研究が活発化している議論マイニング等の技術が応用されているものと考えられる。

なお、類似する国内での研究開発事例として、日立のディベート AI[28] があるが、より応用をフォーカスし、論理構築・推論を深める研究として法学 AI への取り組み [39), 40)] がある。

② 産業競争力懇談会（COCN）「人工知能間の交渉・協調・連携」、

2016 年度・2017 年度にかけて、NEC をリーダー企業として 20 前後の企業・組織が共同で調査・検討した報告書 [41)] が、COCN から出された。それぞれの行動基準（価値観、効用関数）をもった AI システムが混在する社会を想定したときに必要になる、AI システム間の交渉・協調・連携の仕組み作りを提言したものである。製造バリューチェーン、交通・人流、電力・水、自動運転車・移動体という 4 つの産業分野を中心としたユースケースの検討、課題の分析、共通の仕組み（交渉プロトコル等）、国への提言等がまとめられた。

アカデミアを中心に取り組まれてきている自動交渉エージェント技術を踏まえつつ、その具体的な産業応用に向けた検討が、産業界を中心に進められた。

（５）科学技術的課題

まず、［研究開発の動向］の項にあげたような意思決定・合意形成支援に関わるさまざまな要素技術の研究開発は、それぞれさらなる研究開発が必要である。それに加えて、それらの要素技術を活用・統合して、個人・集団の意思決定・合意形成を支援する機能・サービスを、具体的なシステムとして実現する取り組みが求められる。たとえば、以下に示すような支援形態①②③が考えられる。ただし、これらは一例であり、どのような機能・サービスが支援形態として有効かということ自体が研究課題である。

① 人間に寄り添うエージェント

意思決定の困難化の原因(1)として、意思決定に関わる要因や意思決定結果の影響に膨大な可能性が生じるようになってしまったことをあげた。この問題に対して、膨大な可能性を探索することはコンピューターが得意なタスクであることから、例えば、人間（個人や集団）に寄り添うエージェント型の支援形態が考えられる。近年、スマートフォンの音声対話インターフェースや家庭に置かれたスマートスピーカー等、エージェントインターフェースのアプリケーションが広がりつつある。その将来的な拡張機能として、個人向けエージェントならば、個人の意思決定場面で膨大な可能性の中から適切な選択肢をアドバイスしてくれたり、集団向けエージェントならば、議論・交渉の状況をモニタリングしていて、有望な合意点や新たな観点を提示してくれたりといった支援機能が考えられる。

② 健全な意見集約プラットフォーム

意思決定の困難化の原因(2)としてあげたのは、悪意・扇動意図を持った、他者の意思決定に作用する情報操作が容易になってしまったことである。情報技術による対策には限界があり、多面的に取り組む必要がある問題だが、Web・SNS等の情報システムをプラットフォームとして用いた意見集約（意見の発信・収集・投票等）のケースは、情報技術による対策が考えられる。健全な意見集約を行えるように、「悪意・扇動意図を持った、他者の意思決定に作用する情報操作」を検出・防止する機能やメカニズムが組み込まれたプラットフォームであってほしい。今後期待される対策機能としては、たとえば、フェイクニュースやデマ等を検出・排除する機能、ニュース等の一次情報や意見の根拠を追跡・確認する機能、声の大きい意見だけでなく公平に意見を集める機能、ある意見について異なる立場の意見も併記・比較する機能、投票や意見集約プロセスにおいて不正直な申告や裏工作の効果がなくなる（正直申告が最良となる）メカニズム等が考えられる。

③ 人間自身の判断能力の教育・訓練

意思決定の困難化の2つの原因に対する直接的な支援形態は上記①②の通りだが、もう一つ考えておくべき支援形態として、人間自身の判断力を高めるような教育・訓練がある。なぜならば、上に述べたような支援機能によって意思決定・合意形成が楽なものになると、人間は支援機能に頼り、自分自身で考えなくなっていき、人間の判断能力が低下してしまうと懸念されるからである。また、フィルターバブルに陥りやすいか否かには個人差があるものの、誰しもある程度の確証バイアスを持つことは避けられない。そこで、意思決定・合意形成支援の一環で、人間自身の判断能力の教育・訓練という側面も考えておきたい。その実現形態としては、判断能力の教育・訓練用ツールのような直接的な実装だけでなく、①や②に示したような支援機能を利用する過程で、人間自身が深く考えるように促したり、より多面的な検討を促したりするといった組み合わせ型の実装も考えられる。

（6）その他の課題

① ELSI および社会受容性に配慮した研究開発

人間の意思決定・合意形成を支援する機能が、倫理的・法的・社会的な視点（ELSI面）から適切であるかを常に考えておかねばならない。たとえば、人間の支援機能を意図したものが、

思考誘導や検閲（表現の自由の制限）と受け止められる可能性もある。

また、支援機能の考え方や仕組みについて利用者から見た透明性を確保し、社会受容性に配慮した技術開発が求められる。そのためには、実社会の具体的な問題に適用して社会からのフィードバックを受けるプロセスを、短いサイクルで回していくのがよい。技術・機能の効果や筋の良し悪しを早い段階で見極め、ELSI 面の懸念点や良い効果が得られないケース等への対策を早期に実施する。

そのような社会への試験的な適用の内容やプロセスは、原則公開で進めるようにするのがよい。どのような取り組みが進められているか、どのような条件でどのような結果が得られているのかを公開して、さまざまな視点から議論し、問題点の指摘やその解決のためのアイデアを得ることが、リスクの早期回避や知見の共有につながる。

② 分野横断の研究開発体制・推進施策

本研究開発領域は、AI 技術等の情報技術だけでなく、計算社会科学、脳科学、認知科学、心理学、経済学、政治学、社会学、法学、倫理学等が重なる学際的な領域であり、分野横断の研究開発体制・推進施策が必要である。そのためには、初期段階から分野横断で研究者を共通の問題意識・ビジョンのもとに束ねる研究開発マネジメントが望ましい。現状、本研究開発領域の個々の技術課題・要素技術に関わる研究者は多いものの、研究者それぞれの取り組みは全体の問題意識に対してまだ断片的なものにとどまっている感が強く、分野横断の連携・統合による骨太化が求められる。

また、情報技術分野と人文・社会科学分野の連携の仕方は、具体的な問題に対する問題の定式化の段階から共同で取り組むことが望ましい。情報技術の側で扱いやすい形の問題にしてしまうとか、人文・社会科学の側から結果に対して駄目出しするとかではなく、具体的な問題に対する定式化において意識合わせをすべきと考える。つまり、実社会への適用において発生するさまざまな制約事項を、アルゴリズム・原理のレベルで扱うのか、運用上の制約（法規制等）の形で扱うのかによって、技術的なアプローチは変わってくる。基礎研究のスタイルとしても、シーズプッシュ型ではなく、問題解決型の基礎研究として推進するのが適する。

（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	○	↗	大規模合意形成支援システム等で先端的な取り組みや、AI 間の交渉・協調・連携に関する COCN の取り組みがあるが、まだ大きな流れにはなっていない。
米国	基礎研究	◎	↗	MIT CCI の Deliberatorium や The ClimateCoLab、Stanford University の討論型世論調査をはじめ、学際的な基礎研究が根付いている。AI・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が強い。国および企業による AI 分野への大型投資が行われている（Facebook の自動交渉エージェント等）。
欧州	基礎研究	◎	↗	Imperial College London、Oxford University、Delft University of Technology 等、自動交渉の基礎研究が強く、論理的なアプローチによる自動交渉の研究もおこなわれている。
	応用研究・開発	◎	↗	市民からの意見集約や合意形成のためのシステム・応用に盛んに取り組まれている。自動交渉の応用ソフトウェア（電力売買等）への取り組みも見られる。

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は Hong Kong Baptist University で活動が盛んだが、他は見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	顕著な活動は見当たらない。
韓国	基礎研究	△	→	顕著な活動は見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	顕著な活動は見当たらない。

（8）参考文献

1）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：複雑社会における意思決定・合意形成を支える情報科学技術』、CRDS-FY2017-SP-03（2018 年 12 月）。
2）Edmond Awad, Sohan Dsouza, Richard Kim, Jonathan Schulz, Joseph Henrich, Azim Shariff, Jean-François Bonnefon and Iyad Rahwan, “The Moral Machine experiment”, *Nature* Vol. 563 (24 October 2018), pp. 59-64. DOI: 10.1038/s41586-018-0637-6
3）亀田達也、『モラルの起源－実験社会科学からの問い』（岩波書店、2017 年）。
4）笹原和俊、『フェイクニュースを科学する―拡散するデマ、陰謀論、プロパガンダのしくみ―』（化学同人、2018 年）。
5）湯淺墾道、「米大統領選におけるソーシャルメディア干渉疑惑」、『情報処理』（情報処理学会誌）58 巻 12 号（2017 年 12 月）、pp. 1066-1067。
6）Herbert A. Simon, *Administrative behavior: a study of decision-making processes in administrative organization* (Macmillan, 1947).（邦訳：二村敏子・桑田耕太郎・高尾義明・西脇暢子・高柳美香訳、『新版 経営行動：経営組織における意思決定過程の研究』、ダイヤモンド社、2009）。
7）Herbert A. Simon, *The Sciences of the Artificial* (The MIT Press, 1969).（邦訳：稲葉元吉・吉原英樹訳、『システムの科学 第 3 版』、パーソナルメディア、1999 年）
8）Kahneman, D., *Thinking, Fast and Slow, Farrar* (Straus and Giroux, 2011).（邦訳：村井章子訳、『ファスト & スロー：あなたの意思はどのように決まるか？』、早川書房、2014 年）
9）Richard H. Thaler and Cass R. Sunstein, *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness* (Yale University Press, 2008).（邦訳：遠藤真美訳、『実践 行動経済学』、日経 BP 社、2009 年）
10）坂上雅道・山本愛実、「意思決定の脳メカニズム―顕在的判断と潜在的判断―」、『科学哲学』（日本科学哲学会誌）42-2 号（2009 年）。
11）遠藤薫、『ソーシャルメディアと〈世論〉形成』（東京電機大学出版局、2016 年）。
12）田中辰雄・山口真一、『ネット炎上の研究』（勁草書房、2016 年）。
13）金子格・須川賢洋（編）、「小特集 ディジタルゲリマンダとは何か―選挙区割政策からフェイクニュースまで」、『情報処理』（情報処理学会誌）58 巻 12 号（2017 年 12 月）、pp. 1068-1088。
14）Eli Pariser, *The Filter Bubble: What the Internet is Hiding from You* (Elyse Cheney Literary Associates, 2011)。（邦訳：井口耕二訳、「閉じこもるインターネット」、早川書房、2012 年）
15）「Politics and Technology テクノロジーは民主主義の敵か？」、『MIT テクノロジーレビュー Special Issue』Vol. 11（2018 年）。
16）田中辰雄・浜屋敏、「ネットは社会を分断するのかーパネルデータからの考察ー」、『富士通総研 経済研究所 研究レポート』No. 462（2018 年）。

17）「特集:フェイクニュース」、『DIAMOND ハーバード・ビジネス・レビュー』2019 年 1 月号、pp. 16-82。
18）井之上直也、「言語データからの知識獲得と言語処理への応用」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 3 号（2018 年 5 月）、pp.337-344。
19）服部宏充・栗原聡、「エージェント研究におけるシミュレーション」、『人工知能』（人工知能学会誌）28 巻 3 号（2013 年 5 月）、pp. 412-417。
20）水野淳太・田仲正弘・大竹清敬・呉鍾勲・Julien Kloetzer・橋本力・鳥澤健太郎、「大規模情報分析システム WISDOM X, DISAANA, D-SUMM」、『言語処理学会第 23 回年次大会発表論文集』（2017 年）、pp. 1077-1080。
21）牧野貴樹・澁谷長史・白川真一（編著）、他 19 名共著、『これからの強化学習』（森北出版、2016 年）。
22）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 巻 1 号（2016 年）、pp. 64-67。
23）藤田桂英・森顕之・伊藤孝行、「ANAC: Automated Negotiating Agents Competition（国際自動交渉エージェント競技会）」、『人工知能』(人工知能学会誌) 31 巻 2 号 (2016 年 3 月)、pp. 237-247。
24）桑子敏雄、『社会的合意形成のプロジェクトマネジメント』（コロナ社、2016 年）。
25）伊藤孝行・藤田桂英・松尾徳朗・福田直樹、「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　―自動ファシリテーションエージェントの実現に向けて―」、『人工知能』（人工知能学会誌）32 巻 5 号（2017 年 9 月）、pp. 739-747。
26）水野淳太・Eric Nichols・渡邉陽太郎・村上浩司・松吉俊・大木環美・乾健太郎・松本裕治、「言論マップ生成技術の現状と課題」、『言語処理学会第 17 回年次大会発表論文集』（2011 年）、pp. 49-52。
27）岡崎直観、「自然言語処理による議論マイニング」、『人工知能学会全国大会（第 32 回）』(2018 年）1D2-OS-28a-a（OS-28 招待講演）。 https://www.slideshare.net/naoakiokazaki/ss-100603788
28）柳井孝介・小林義行・佐藤美沙・柳瀬利彦・三好利昇・丹羽芳樹・池田 尚司、「AI の基礎研究: ディベート人工知能」、『日立評論』98 巻 4 号（2016 年 4 月）、pp. 61-64。
29）Robert M. Bond, Christopher J. Fariss, Jason J. Jones, Adam D. I. Kramer, Cam-eron Marlow, Jaime E. Settle and James H. Fowler, “A 61-million-person experiment in social influence and political mobilization”, *Nature* Vol. 489 (12 September 2012), pp. 295–298. DOI: 10.1038/nature11421
30）Tsubasa Tagami, Hiroki Ouchi, Hiroki Asano, Kazuaki Hanawa, Kaori Uchiyama, Kaito Suzuki, Kentaro Inui, Atsushi Komiya, Atsuo Fujimura, Hitofumi Yanai, Ryo Yamashita and Akinori Machino, “Suspicious News Detection Using Micro Blog Text”, *Proceedings of the 32nd Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation* (PACLIC 32, Hong Kong, Dec 1-3, 2018).
31）横尾真、「メカニズムデザインと最適化」、『論理と推論の理論・実装・応用に関する合同セミナー』招待講演（2013 年）。 http://www.edu.kobe-u.ac.jp/istc-tamlab/cspsat/pdf-open/cspsat2_seminar06_yokoo.pdf (accessed 2019-02-15)

32）John Hagerty, “2017 Planning Guide for Data and Analytics”, *Gartner Technical Professional Advice* (13 October 2016). https://www.gartner.com/binaries/content/assets/events/keywords/catalyst/catus8/2017_planning_guide_for_data_analytics.pdf (accessed 2019-01-31)
33）Jeff Conklin and Michael L. Begeman, “gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion”, *Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work* (CSCW '88: Portland, USA, September 26-28, 1988), pp. 140-152. DOI: 10.1145/62266.62278
34）James S. Fishkin, *When the People Speak: Deliberative Democracy and Public Consultation* (Oxford University Press, 2011).（邦訳：岩木貴子訳、曽根泰教監修、『人々の声が響き合うとき：熟議空間と民主主義』、早川書房、2011 年）
35）Mark Klein, “Enabling Large-Scale Deliberation Using Attention-Mediation Metrics”, *Computer Supported Cooperative Work* Vol. 21, No. 4-5 (2012), pp. 449-473. DOI: 10.2139/ssrn.1837707
36）Thomas W. Malone, *Superminds: The Surprising Power of People and Computers Thinking Together* (Little, Brown and Company, 2018).
37）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』56 巻 10 号（2015 年）、pp. 1996-2010。
38）“Special Issue: This is Watson”, *IBM Journal of Research and Development* Vol. 56 issue 3-4 (May-June 2012).
39）佐藤健、「論理に基づく人工知能の法学への応用」、『コンピュータソフトウェア』（日本ソフトウェア科学会誌）27 巻 3 号（2010 年 7 月）、pp. 36-44。DOI: 10.11309/jssst.27.3_36
40）日本学術会議公開シンポジウム「AI による法学へのアプローチ」（2019 年 1 月 24 日）。http://research.nii.ac.jp/~ksatoh/ai-law-symposium/ (accessed 2019-01-31)
41）産業競争力懇談会（COCN）、「人工知能間の交渉・協調・連携」、『産業競争力懇談会 2017 年度プロジェクト最終報告』（2018 年 2 月 21 日）。

２．１．６　データに基づく問題解決

（１）研究開発領域の定義

人工知能（AI）・ビッグデータ解析が可能にする大規模複雑タスクの自動実行や膨大な選択肢の網羅的検証等による、問題解決手段の質的変化、産業構造・社会システム等の転換を生み出す研究開発領域である。

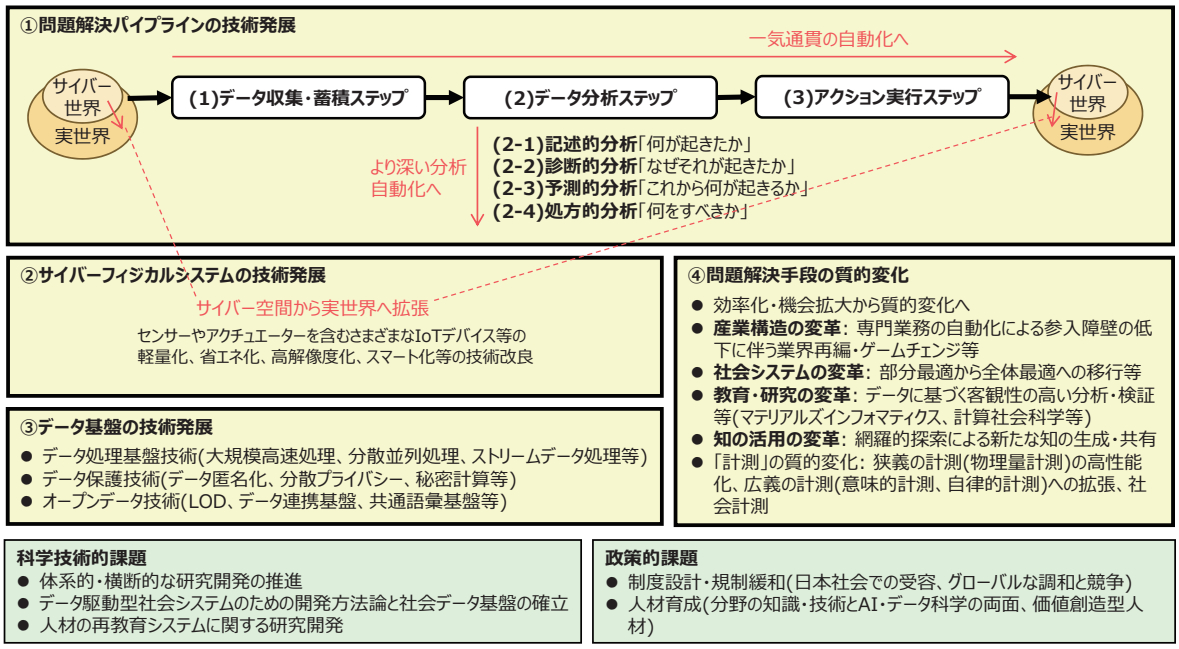


図2-1-8　領域俯瞰：データに基づく問題解決

（２）キーワード

ビッグデータ、データ駆動型社会、Cyber Physical Systems（CPS）、IoT（Internet of Things）、データサイエンス、オープンデータ、データ連携基盤、計測

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ビッグデータ（Big Data）[1), 2)]は、元来は膨大な量のデータそのものを指す言葉だが、その収集・蓄積・解析技術は、大規模性だけでなくヘテロ性・不確実性・時系列性・リアルタイム性等にも対応できる技術として発展している。また、センサー、IoT（Internet of Things）デバイスの高度化と普及によって、さまざまな場面で実世界ビッグデータが得られるようになり、その収集・解析技術は、実世界で起きる現象・活動の状況を精緻かつリアルタイムに把握・予測するための技術としても期待されている。今日、さまざまな社会課題が人間の手に負えないほどに大規模複雑化しており、実世界ビッグデータの収集・解析による状況の把握・予測は、そのような課題の解決に共通的に貢献し得る有効な手段になる。ここにさらにAI技術が加わり、AI技術とビッグデータ（データそのもの、および、処理技術）が深く関係し合いながら発展している。すなわち、ビッグデータが集められることでAI技術（特に機械学習技術）は

高度化し、精度を高め、そのAI技術を用いて実世界のビッグデータを解析することで、実世界の現象・活動のより深く正確な状況把握・予測が可能になってきた。

具体的なアプリケーションは、当初、Google等のサーチエンジンにおける検索連動型広告や、Amazon等のショップ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上向上に活用するものが中心であった。しかし、現在は、実世界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), 2)]、その社会的価値はますます高まっている。たとえば、電力・エネルギーの需要を予測して最適に制御したり、実店舗のさまざまな商品の品ぞろえや仕入れを最適化したり、防犯のため不審な人や振る舞いを検知・通知したりといった実世界のアプリケーションが広がっている。

わが国がビジョンとして掲げる「Society 5.0」は、内閣府[3)]によると、「サイバー空間とフィジカル空間（現実）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）」であり、サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合は「フィジカル（現実）空間からセンサーとIoTを通じてあらゆる情報が集積（ビッグデータ）、人工知能（AI）がビッグデータを解析し、高付加価値を現実空間にフィードバック」によって実現するとされている。これにより、交通、医療・介護、ものづくり、農業、食品、防災、エネルギー等、さまざまな分野で新たな価値創出が進められている。

［研究開発の動向］

「データに基づく問題解決」の基本的な枠組みに着目して、その研究開発の動向を、①問題解決パイプラインの技術発展、②サイバーフィジカルシステムの技術発展、③データ基盤の技術発展、という3面から述べる。次に、「データに基づく問題解決」がもたらす4つの変革（産業の変革、社会の変革、教育・研究の変革、知の活用の変革）の動向について、特に問題解決手段の質的変化がもたらされる可能性について触れる。

① 問題解決パイプラインの技術発展

「データに基づく問題解決」の基本的な処理の流れは、(1) データ収集・蓄積ステップ、(2) データ分析ステップ、(3) アクション実行ステップ、という順に進む。ここでは、これを「問題解決パイプライン」と呼ぶことにする。

(2) のデータ分析ステップは、さらに、データ分析の深さによって段階がある。米国の調査・アドバイザリー企業であるGartnerは、データ分析の段階を、(2-1) 記述的分析（Descriptive：何が起きたか）、(2-2) 診断的分析（Diagnostic：なぜそれが起きたか）、(2-3) 予測的分析（Predictive：これから何が起きるか）、(2-4) 処方的分析（Prescriptive：何をすべきか）という4段階としている[4)]。(2-4) によってアクションが計画され、(3) のアクション実行が可能になる。

問題解決パイプラインで、(1) → (2-1) → (2-2) → (2-3) → (2-4) → (3) とステップを深めるほど、問題の解決に近づき、社会価値・ビジネス価値が高くなる。つまり、たとえば (1)(2-1) しか自動化されなければ、(2-2) 以降は人間が行うことになるが、(1) から (3) まで一気通貫で自動化されれば、人間は実行状況をモニタリングしていればよいことになる。電力マネジメントの例で具体的に説明するならば、前者のケースは、電力消費状況の計測・可視化までが自動化され、その状況に基づいて人間が今後の必要量を判断し、アクションを考えることになる。後者のケ

ースは、電力消費状況を自動計測し、今後の必要量を自動予測し、最適な状況になるように自動制御も行われる（人間はその様子を見ていればよい）。

このような (1) から (3) まで一気通貫での自動化を可能にする方向で、技術開発が進められている（そのための具体的な技術内容は「2.1.1 機械学習」等を参照）

② サイバーフィジカルシステムの技術発展

前述したように、問題解決パイプラインは、当初、インターネット上のサービスに集まるデータを収集・解析し、そのサービスを改良・強化するために使われた。つまり、サイバー空間に閉じたパイプラインであった。しかし、現在は実世界（フィジカル空間）からデータを収集し、その解析結果に基づいて、実世界のシステムにフィードバックをかけるような応用へも広がっている。つまり、サイバーフィジカルシステム（Cyber Physical Systems：CPS）としての問題解決パイプラインへと拡張されている。

この拡張は、問題解決パイプラインにおける、(1) データ収集・蓄積ステップと (3) アクション実行ステップが、サイバー空間から実世界に広がったということである。そのために、センサーやアクチュエーターを含むさまざまな IoT デバイス、あるいは、ロボットが (1) や (3) に導入されるようになった。軽量化、省エネ化、高解像度化、スマート化等の技術改良が進められている（その具体的な技術内容は「2.4.6 IoT アーキテクチャ」を参照）。

③ データ基盤の技術発展

上記①②のような問題解決パイプラインを支えるデータ基盤にも取り組まれてきた。ここでいうデータ基盤は、データ処理基盤技術、データ保護技術、オープンデータ技術を含む。

データ処理基盤技術は、大規模なデータを高速に処理するための技術群である。ますます大規模なデータを、より高速に処理するという要求が高まり、分散並列処理技術、圧縮データ処理技術、ストリームデータ処理技術等が発展している（その具体的な技術内容は「2.4.4 データ処理基盤」を参照）。

データ保護技術は、分析対象となるデータの保護のための技術群で、暗号化等のセキュリティー技術に加えて、分析対象データが個人属性や行動履歴のようなパーソナルデータである場合に、そのプライバシーを保護するための技術、さらには、データの分析と保護を両立させるプライバシー保護型データ分析技術が取り組まれている。データ匿名化、分散プライバシー、秘密計算等の技術がある（それらの詳細は「2.1.8 社会における AI」を参照）。

一方、オープンデータ（Open Data）は、最小限の制約のみで誰でも自由に利用、加工、再配布ができるデータのことである。さまざまな問題解決にデータ利用が促進され、また、他のデータと組み合わせた新しい価値創出・サービス創出が活性化される。そのために、共通的なデータ形式や付加的な情報（メタデータ等）の記述形式等がデザインされている。特に、セマンティック Web 分野で開発・標準化された技術を用いたリンクト・オープンデータ（Linked Open Data：LOD）[5] がよく知られている。さらに、分野・組織をまたいだデータの連携を容易にするため、共通語彙の設定も含むデータ連携基盤の構築が推進されている。米国では 2005 年に NIEM（National Information Exchange Model）、欧州では 2011 年に SEMIC（Semantic Interoperability Community）がデータ連携標準の取り組みとして始まった。わが国でも「未来投資戦略 2018」で描くデータ駆動型社会の共通インフラとしてデー

タ連携基盤の構築が掲げられ、3 年以内に整備、5 年以内に本格稼働の計画で、共通語彙基盤（Infrastructure for Multilayer Interoperability : IMI）の構築等が進められている[6),7)]。IMI、NIEM、SEMIC の間の国際的な相互運用性も検討されている。

④ 問題解決手段の質的変化

AI・ビッグデータ技術を活用した「データに基づく問題解決」の枠組みによって、大規模複雑タスクの自動実行や膨大な選択肢の網羅的検証等が可能になり、問題解決手段の質的変化が起きる。これが「1.1.1 社会の要請、ビジョン」にあげた 4 つの変革（産業構造の変革、社会システムの変革、教育・研究の変革、知の活用の変革）につながる。

AI・ビッグデータ技術を活用した「データに基づく問題解決」の枠組みは、既に多くの業種・分野に広がっている。ここでそれらを列挙することは省くが（それらの詳しい内容は「AI 白書 2019」[8)] 等を参照）、さまざまな種類、多数の事例が生まれている。それらの事例では、従来人手で行っていた作業を自動化することで効率化が進んだり、自動化に加えて、膨大なデータを精緻に観察・分析することによる精度向上によって適用場面（ビジネス機会）が拡大したりと、効率化・機会拡大の効果がまずは見られる。しかし、それにとどまらず、産業構造・社会システム等の転換のような大きな質的変化も生まれる。効率化（コスト削減等）と機会拡大（売上拡大等）は従来の土俵の上での競争だが、この質的変化は土俵を変える（ゲームチェンジが起きる）。このゲームチェンジに備えるための打ち手、さらには、ゲームチェンジを主導するための打ち手が、技術開発と制度整備の両面から求められる。

以下、4 つの変革のそれぞれについて、質的変化の可能性に着目する。

1 つめの産業構造の変革は、人工知能技術戦略会議がまとめた産業化ロードマップ[9)] が参考になる。このロードマップは、主要分野として、生産性分野、健康 / 医療・介護分野、空間の移動分野という 3 分野を取り上げ、各分野での AI 利活用の進展を 3 つのフェーズでとらえている。フェーズ 1 では、各領域においてデータ駆動型の AI 利活用が進み、フェーズ 2 では、個別の領域の枠を越えて AI・データの一般利用が進み、フェーズ 3 では、各領域が複合的につながり合ってエコシステムが構築されるとしている。フェーズ 1・2 は概ね効率化と機会拡大に相当し、フェーズ 3 はゲームチェンジが起こり得る質的変化の段階に相当する。AI 技術（特に機械学習技術）によって各業界の専門的業務が自動化され得る。これはその業界にとって業務効率化だが、業界外から見れば参入障壁の低下になる。その結果、業界再編・ゲームチェンジが起こり得る。

2 つめの社会システムの変革は、部分最適から全体最適への移行が考えられる。IoT 技術の進化と普及によって、社会のさまざまな事象がビッグデータとして精緻かつリアルタイムに観測できるようになる。その一方で、さまざまな社会システムが相互に接続し合ったり、影響を与え合ったりするようになり、大規模で複雑な系を AI 技術で全体最適化する方向が考えられる。大規模複雑なシステムを個別で精緻な観測に基づきながら全体最適化を行うことは、人間には困難であり、質的変化が生まれると考えられる。このような社会システムデザインに関わる技術群や研究開発課題については「2.3 社会システム科学」で取り上げている。なお、何を最適と考えるかという価値観は国・地域・文化や個人個人によって異なるため、電力・水道・交通等のライフライン系は共通的な方針のもとでの全体最適な供給制御が考えられるが、より個人の生活スタイルに関わる部分は各自の価値観に任せるべきものとなる。

3つめの教育・研究の変革では、さまざまな現象・事象についてビッグデータが取得できると、従来は人間の主観や限られた観察に強く依存していたタイプの学問や施策設計が、データに基づく客観性の高い分析・検証を行えるようになり、質的変化が起きる。マテリアルズインフォマティクス（Materials Informatics：MI）[10), 11)]、計算社会科学（Computational Social Science）[12)] のアプローチ等がその一例である。

4つめの知の活用の変革では、コンピューターを用いた網羅的な可能性の探索から、それまで人間が気づいていなかった新たな知が生まれ得る。たとえば、囲碁の世界において、コンピューターソフトウェアであるAlphaGo[13)]が世界トップクラスの棋士に圧勝した。その際、AlphaGoが行っていた膨大な可能性の探索から導出された打ち手は、人間の棋士には思いもよらなかった手を含んでいたが、それはその後、新手として人間の棋士も取り入れるようになった。同様のことは、今後、科学的発見においても起こり得るかもしれない[14)]。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① マテリアルズインフォマティクス（MI）の展開[10), 11)]

MIは、材料科学とAI・データ科学を融合し、新材料や代替材料等の材料開発を大幅に効率化するデータ駆動型材料開発の取り組みである。従来の材料開発は、勘と経験で新たな材料を合成し、その材料の特性を調べることによって進められてきた。これに対してMIでは、材料に関するデータベース構築、シミュレーション、機械学習や統計解析（スパースモデリング等）を用いて、必要な特性を実現し得る材料を探索する（従来と逆問題）。

2011年に米国でMaterials Genome Initiativeが発足したことから注目され、欧州でも関連コンソーシアムが立ち上がる等、世界的な動きが起こっている。日本でも、2015年に物質・材料研究機構（National Institute for Materials Science：NIMS）を中心とする推進体制が構築された。JSTイノベーションハブ構築事業として、NIMSを中心とした情報統合型物質・材料開発イニシアティブMI2I（Materials research by Information Integration Initiative、2015年～）が立ち上がり、内閣府戦略的イノベーション創造プログラムSIPで「革新的構造材料」（2014年～2018年）が実施された。

MIを活用した具体的な成果としては、マサチューセッツ工科大学（MIT）とサムスン電子によるLiイオン電池の固体電解質材料の発見[15)]を契機とし、日本でも京都大学とシャープの産学協同研究による2次電池材料の開発にMIが活用された[16)]。NECが熱電材料分野でスピン流熱電変換素子向け材料として、それまでの数百倍の性能（出力密度）を持つ新材料をMIを用いて開発した[17)]のをはじめ、日立・富士通等を含め、ここ数年で産業界での取り組みが急速に活性化している。

②「計測」の質的変化

計測は「科学の母」（Mother of Science）と言われ、さまざまな科学研究を支えている。また、現在の状況を把握することは問題解決（ソリューション）の出発点であり、計測技術はさまざまなソリューションビジネスを左右する。今日、計測は、AI・ビッグデータ技術と結びついて、その概念を広げている。いわば「狭義の計測」から「広義の計測」へと概念を広げ、これがさまざまな研究・ビジネスに波及している。

「狭義の計測」は物理量計測である。従来の計測機器は、温度・重量等の物理量を直接計測して出力するものであった。しかし、いまでは、計測機器（あるいは計測システム）の中で、物理量データの統計処理・データ分析処理等の情報処理（AI・ビッグデータ技術の適用を含む）まで行い、その結果を計測結果として出力するものが増えている。そのような情報処理を加えることで、(1) 物理量計測の高性能化、(2)「意味的計測」、(3)「自律的計測」が可能になってきた[18]。ここで、「意味的計測」と「自律的計測」が「広義の計測」に相当する。以下、これら (1)(2)(3) について簡単に説明する（詳細は調査報告書[18]にまとめた）。

(1) 物理量計測の高性能化は、従来と同様に物理量を計測結果として出力するが、情報処理を加えることで、精度や効率を高めるものである。たとえば、カメラ画像の超解像（画像処理によって解像度を高める）等がある。

(2)「意味的計測」は、計測結果として得られた物理量データを分析することで、その計測結果に意味を与える（上位概念に変換する）ものである。位置の計測データ（座標）の住所・ランドマークへの変換や、指紋認証・顔認証等のバイオメトリクス認証機器・システムがその一例である。

(3)「自律的計測」は、物理量データの分析結果に基づいて、次のアクションの決定・実行まで行うものである。たとえば、現在の計測結果に基づいて、次に何を計測するかを決定するような、ロボットやドローンをベースとした自律的な計測システムがこれに該当する。

また、上記 (1)(2)(3) は計測の高次化であるが、物理量計測を出発点としている。このような物理量計測に加えて、人々が SNS（Social Networking Service）や CGM（Consumer Generated Media）で発信する情報も集めて、人々の行動や社会現象を把握しようというアプローチ（「社会計測」とも呼ばれる）も生まれている。さらに、「広義の計測」や「社会計測」で得られた人間や社会に関するビッグデータを分析して、人間の行動や社会の現象を定量的に理解しようとする計算社会科学[12]も、近年、取り組みが活発になっている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

AI による科学的発見というグランドチャレンジ

北野宏明（システム・バイオロジー研究機構、ソニーコンピュータサイエンス研究所、他）が、2016 年に AI による新たなグランドチャレンジを立ち上げた[14]。そのチャレンジは「2050 年までに、ノーベル賞かそれ以上の科学的発見を行う人工知能を開発する」ことを目標とするものであり、彼自身は特に生命科学分野をターゲットとして取り組んでいる。仮説として「科学的発見は、仮説空間の網羅的探索と検証によってなされる」と考えており、上述の MI と通じるところがあるが、ノーベル賞級の科学的発見を行うために道具として AI を使うという立場ではなく、科学的発見の本質を解明し、人間の知識の飛躍的拡大をサポートする AI 技術の実現によって、人類が直面する問題の解決につなげることを狙った取り組みである。

（５）科学技術的課題

① 体系的・横断的な研究開発の推進

AI・ビッグデータ技術の適用はさまざまな分野に広がっているが、前述した 4 つの変革に向けた体系的な研究開発、特に質的変化とそれから派生する問題への対応は必ずしも十分でない。また、社会、産業、教育・研究、知の活用と広い分野に及び、分野横断かつ多様な立場か

らの研究開発が不可欠である。

② データ駆動型社会システムのための開発方法論と社会データ基盤の確立

「データに基づく問題解決」は、データ駆動型の社会システムの開発方法論でもある。「2.3 社会システム科学」において関連する動向をまとめているほか、サイバーフィジカルシステムの開発方法論としての Reality 2.0[19] や、AI 応用システムの開発方法論としての AI ソフトウェア工学[20] もかかわりが深い。

また、国連で採択された SDGs（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）に掲げられているさまざまな社会課題に対しても、「データに基づく問題解決」は共通的に貢献する手段となる。ただし、貢献できる程度は社会課題の種類によって異なる。その差が生まれる要因として大きいのは、その社会課題の状況に関わる実世界ビッグデータを取得できるかという点と、状況把握・分析の結果を実世界へフィードバックして状況改善に結び付ける制御手段が整っているかという点だと考える。そのため、そのような仕組みを強化した社会データ基盤の整備も重要課題である。

③ 人材の再教育システムに関する研究開発

社会や産業の質的変化が起こってくる中で、「なくなる職業・仕事」に関する報告書[21] が話題になった。なくなる職業・仕事の一方で、新たな生まれる職業・仕事があることも指摘される。しかし、なくなる職業・仕事から新たな生まれる職業・仕事へ、必ずしも同じ人間が移行できるわけではない。社会や産業の質的変化に伴い、そこで働く人々に求められる能力・スキルも変化する。しかも、その変化がはやいため、人間の能力・スキル獲得のスピードが追いつかないことが問題になる。社会制度（ベーシックインカム等）や人材の再教育機会の整備を検討していく必要があるが、人材の再教育に関して、制度面の施策だけでなく、情報技術を活用した、より的確で効率のよい再教育システムの研究開発も必要と考えられる。

（6）その他の課題

① 制度設計・規制緩和

社会・産業等の質的変化に向けて、制度設計・規制緩和は必要になる。その際に、社会受容性に配慮した導入設計が重要になる。また、日本の社会適性という面だけでなく、グローバルな調和と競争環境も意識した設計が求められる。

② 人材育成

データ科学のアプローチや AI・ビッグデータ技術がさまざまな技術分野・産業分野に取り入れられるようになり、各分野のもともとの知識・技術と、AI・ビッグデータ技術の両方がわかる人材・組織の育成が重要になっている。また、「データに基づく問題解決」において、データ分析や AI・ビッグデータ技術は手段であり、問題解決・価値創造の側からの発想が重要である。価値創造型人材の育成も重要である。

（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	○	→	各分野で取り組み強化されているが、人材・資金や体系的な取り組みの面ではまだ十分でない。
	応用研究・開発	○	↗	実世界ビッグデータへの取り組みは強化されてきているが、社会・産業の変革に対する社会受容・制度設計等には課題がある。
米国	基礎研究	◎	→	適切なグランドチャレンジの設定等、長期視点での変革につながる基礎研究への投資が国によって行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	GAFA を中心とした産業界が AI・ビッグデータ技術の開発と社会・産業等の変革を牽引している。
欧州	基礎研究	○	→	
	応用研究・開発	○	→	
中国	基礎研究	○	→	
	応用研究・開発	◎	↗	国が AI・ビッグデータ技術を活用した監視・管理社会の構築を推進している。日本・欧米とは異なる文化・価値観だが、独自の社会変革を推進している。
韓国	基礎研究	△	→	
	応用研究・開発	○	→	

（8）参考文献

1）喜連川優、「ビッグデータ」、『學士會会報』No. 918（2016 年）、pp. 78-83。
2）城田真琴、『ビッグデータの衝撃―巨大なデータが戦略を決める』（東洋経済新報社、2012 年）。
3）内　閣　府、「Society 5.0」https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (accessed 2019-02-01)
4）John Hagerty, “2017 Planning Guide for Data and Analytics”, Gartner Technical Pro-fessional Advice (13 October 2016). https://www.gartner.com/binaries/content/assets/events/keywords/catalyst/catus8/2017_planning_guide_for_data_analytics.pdf (accessed 2019-02-01)
5）大向一輝、「オープンデータと Linked Open Data」、『情報処理』（情報処理学会誌）54 巻 12 号（2013 年 12 月）、pp. 1204-1210。
6）内閣官房 IT 総合戦略室、「分野間データ連携基盤の整備」、平成 30 年度第 1 回情報共有基盤推進委員会（2018 年 8 月 3 日）資料 1　https://imi.go.jp/contents/2018/08/t20180810_1.pdf (accessed 2019-02-01)
7）加藤文彦・武田英明・田代秀一・平本健二・松澤有三、「IMI 共通語彙基盤」、『デジタルプラクティス』（情報処理学会デジタルプラクティス論文誌）9 巻 1 号（2018 年 1 月）。
8）情報処理推進機構 AI 白書編集委員会（編）、『AI 白書 2019 －企業を変える AI、世界と日本の選択』（KADOKAWA、2018 年）。
9）人工知能技術戦略会議、「人工知能技術戦略」（2017 年 3 月 31 日）https://www.nedo.go.jp/content/100862413.pdf (accessed 2019-02-01)
10）加藤幸一郎、『材料開発の新潮流 ～材料科学とデータ科学の融合：Materials Informatics ～』、みずほ情報総研レポート Vol. 15（2018 年）。
11）「特集：待ったなし！ AI で材料開発」、『日経エレクトロニクス』2018 年 10 月号。
12）笹原和俊、「私のブックマーク：計算社会科学（Computational Social Science）」、『人工知能』（人工知能学会誌）30 巻 6 号（2015 年 11 月）、pp. 856-859。

13）David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel and Demis Hassabis, “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”, *Nature* Vol. 529, No. 7587 (2016), pp. 484-489. DOI: 10.1038/nature16961

14）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』（人工知能学会誌）31 巻 2 号（2016 年 3 月）、pp. 275-286。

15）Yifei Mo, Shyue Ping Ong and Gerbrand Ceder, “First Principles Study of the $Li_{10}GeP_2S_{12}$ Lithium Super Ionic Conductor Material,” *Chemistry of Materials* Vol. 24, No. 1 (2012), pp. 15-17. DOI: 10.1021/cm203303y

16）Motoaki Nishijima, Takuya Ootani, Yuichi Kamimura, Toshitsugu Sueki, Shogo Esaki, Shunsuke Murai, Koji Fujita, Katsuhisa Tanaka, Koji Ohira, Yukinori Koyama and Isao Tanaka, “Accelerated discovery of cathode materials with prolonged cycle life for lithium-ion battery,” *Nature Communications* Vol. 5, Article No. 4553 (2014), pp. 1-7. DOI: 10.1038/ncomms5553.

17）石田真彦・岩崎悠真・澤田亮人・桐原明宏・白根昌之、「スピン流熱電変換 〜インフォマティクスを活用した材料開発と適用領域〜」、『NEC 技報』71 巻 1 号（2018 年）、pp. 92-96. https://jpn.nec.com/techrep/journal/g18/n01/pdf/180119.pdf (accessed 2019-02-18)

18）科学技術振興機構 研究開発戦略センター、『調査報告書：計測横断チーム調査報告書 計測の俯瞰と新潮流』、CRDS-FY2018-RR-03（2018 年 12 月）。

19）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：IoT が開く超スマート社会のデザイン － REALITY 2.0 －』、CRDS-FY2015-SP-02（2016 年 3 月）。

20）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:AI 応用システムの安全性・信頼性を確保する新世代ソフトウェア工学の確立』、CRDS-FY2018-SP-03（2018 年 12 月）。

21）Carl Benedikt Frey and Michael A. Osborne, “The Future of Employment: How Sus-ceptible are Jobs to Computerisation?”, (September 17, 2013). https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf (accessed 2019-01-18)

2.1.7　計算脳科学

（1）研究開発領域の定義

脳を情報処理システムとしてとらえて、脳の機能を調べる研究分野である。計算論的神経科学（Computational Neuroscience）とも称される。視覚の計算理論等で知られる David Marr は、情報処理システムを理解するにあたって、(A) 計算理論、(B) 表現とアルゴリズム、(C) ハードウェアという 3 つの水準を併存させた理解が重要であると述べているが [1]、脳という情報処理システムについて、(A) の明確化を行うことで、(A)(B)(C) の 3 つのレベルの理解を相互に深め、脳の情報処理の機能を理解しようとするのが計算脳科学である。

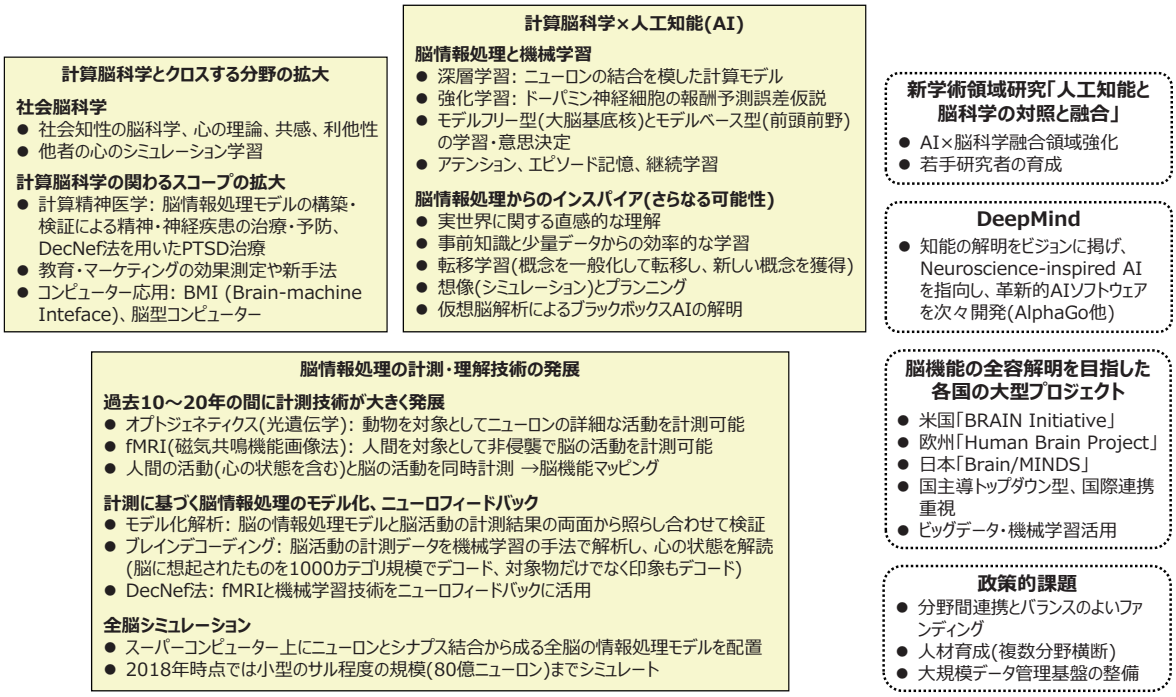


図2-1-9　領域俯瞰：計算脳科学

（2）キーワード

計算脳科学、計算論的神経科学、脳情報処理、脳活動計測、ブレインデコーディング、モデル化解析、ニューロフィードバック、深層学習、強化学習、社会知性、社会脳科学、計算精神医学、全脳シミュレーション

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

計算脳科学は人工知能（AI）の研究発展にさまざまな形で貢献し得る。たとえば、AI を創るために、人間の脳で行われている情報処理のメカニズムを知ることは、より高度な機能や高い処理性能を実現する方式のヒントになる。また別な面では、AI（あるいはその要素技術を組み込んだシステム）と人間がインタラクションをする際に、人間（特にその脳）の応答パターンを知ることは、より良いインタラクションを設計・評価することにつながる。

現在のAIブームを牽引している深層学習（Deep Learning）[2]は、脳を構成するニューロン（Neuron：神経細胞）の結合を模した計算モデルをベースとしている。深層学習は、計算脳科学の成果に基づき、画像認識・音声認識等のパターン認識の機能において、さまざまな条件下で、既に人間を上回る認識精度を達成するようになった。これらの成果は素晴らしいものであるが、同時にこれは脳の物体認識や知覚機能の実現に対応しているにすぎない。脳は、他にも運動・認知・言語・感情・意識等の優れた情報処理機能を実現しており、AI研究が脳研究から得られることはまだまだ多い。たとえば、深層学習は大量の学習データを必要とするのに対して、人間は比較的少量のデータからでも学習できている。また、深層学習は大きな計算パワー（消費電力）を必要とするのに対して、人間の脳の消費電力は約20ワット（薄暗い電球程度）である。これらは、計算脳科学がAIの研究発展に大きく貢献してきたこと、および、これからもさらに貢献し得ることを示す一例である。

［研究開発の動向］

① 脳情報処理の計測・理解技術の発展

過去10～20年の間に、脳の機能・活動を知るための計測技術は大きく発展した。

その一つは、動物を対象として、ニューロンの詳細な活動を調べることができるオプトジェネティクス（Optogenetics：光遺伝学）[3]である。これは、光によって活性化されるタンパク分子を遺伝学的手法で特定の細胞に発現させ、その機能を光で操作する技術である。従来の電気刺激を用いる手法や薬理学的手法では難しかったレベルの高い分解能が得られ、マイクロ～ミリ秒オーダーのタイムスケールで特定の神経活動のみを制御できるようになった。たとえば、マウスを使った実験結果によると、記憶をスイッチしたり[4]、誤りの記憶を形成したり[5]といった操作が行える。Nature Method誌が科学全分野の中から選ぶ「Method of the Year 2010」に選定されたことが、この技術が画期的であったことを示している。

もう一つは、人間を対象として、非侵襲で脳の活動を調べることができるfMRI（Functional Magnetic Resonance Imaging, : 磁気共鳴機能画像法）[6]である。fMRIは、神経活動に伴う血管中の血液の流れ（血流量）や酸素代謝の変化を、磁気共鳴画像装置（MRI）を用いて計測・可視化する技術である。人間の脳の活動を頭皮の外から測定する方法として、従来は脳波測定法や陽電子を用いるPET（ポジトロン断層映像法）があったが、これらに比べてfMRIは空間分解能が高く、PETの課題である被爆の心配もない。大きな病院に普及している臨床用の通常のMRI装置を活用できるという経済性もあり、fMRIは1990年代初頭に考案された後、急速に普及し、人間の高次の脳機能を調べるために活用されるようになった。

fMRIによって、人間の行動（心の状態を含む）と脳の活動の同時計測が可能になり、どのような行動や心の状態のときに、脳のどの部分が深く関わっているのか（脳機能マッピング）が調べられるようになった。さらに、マッピングだけでなく、脳の情報処理のモデル化が考えられるようになった。モデル化の主なアプローチとして、モデル化解析（Model-based Analysis）、ブレインデコーディング（Brain Decoding）等がある。

モデル化解析[7]では、脳の情報処理モデルを行動と脳の活動の両面から検証する。そのため、まず複数考えられる仮説について、それぞれの処理モデルがどれだけ行動データを説明できるかを調べる。さらに、この行動データへのフィッティングを通してモデルの自由パラメーターを推定する。その結果から脳のどの部分での活動かを導出し、脳の活動データと照らし合わせ

て検証する。

ブレインデコーディングは、fMRI 等によって計測された人間の脳の活動データを、機械学習の手法を用いて解析することで、人間の心の状態を解読しようとする技術である。当初 2005 年頃は、fMRI の計測データのパターンと、少数のカテゴリーとの間の対応関係を学習するものであった [8]。その後、深層学習や分散表現（Word2Vec）等の機械学習の新たな手法も取り込み、脳に想起されたものを、1,000 を超える数のカテゴリーと対応付ける一般物体デコーデイング [9] や、対象物（名詞）やその動作（動詞）だけでなく、それらの印象（形容詞）のデコード [10] にも迫りつつある。

② 脳情報処理と機械学習

機械学習を中心とする AI 技術の発展は、上記①の発展を通して明らかになってきた脳情報処理の (A) 計算理論や (B) 表現とアルゴリズムと、結びつきが強いものになっている。前述した通り、深層学習は脳を構成するニューロンの結合を模した計算モデルをベースとしている。さらに、強化学習、アテンション、エピソード記憶、作業記憶、継続学習等についても、脳情報処理の知見・発見との結びつきが強いことが知られている [11]。

脳情報処理への関心が触媒となっている機械学習の手法は大変多い。深層学習はもとより、その源流であるニューラルネットワーク・誤差逆伝搬法・自己組織化マップ・表現学習・独立成分解析・強化学習そして情報幾何などがある。これらの研究の発展において、脳科学と機械学習の両方で、日本の研究は大いに貢献してきている。

たとえば、強化学習（Reinforcement Learning）は、ドーパミン神経細胞の報酬予測誤差仮説によって、AI 研究における強化学習と脳の強化学習とが強く結びついている [12), 13)]。AI 研究における強化学習は、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い、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機械学習アルゴリズムである。一方、中脳にあるドーパミン神経細胞は、報酬予測誤差（実際に得た報酬量と予測された報酬量との誤差）に基づいてドーパミンを放出し、これが大脳基底核に運ばれることで、脳における強化学習の学習信号として働くということがわかってきた。また、脳における学習・意思決定のプロセスにはモデルフリー型とモデルベース型があり、モデルフリー型では、刺激と反応の関係性を報酬の程度・確率に直結した形で学習し、モデルベース型では、刺激や反応の間の関係性を状態遷移等の内部モデルとして学習する。モデルフリー型は上述の大脳基底核、モデルベース型は大脳新皮質、特に前頭前野が重要な役割を果たしていると見られている。

このように、脳情報処理における科学的発見が AI 的手法の理論的な裏付けになるとともに、脳情報処理の知見を取り込むことが AI 技術の発展につながり得るという事例が、機械学習を中心に積み上げられつつある。

③ 社会脳科学

人間は社会の中で他者との関わりを持ちながら考え、行動している。このような社会行動の根幹には、人々が互いの心や振る舞いを推断するときに働かせる社会知性（Socio-intelligence）がある。この他者の行動を予測し、その予測を踏まえた意思決定をする脳機能は、しばしば「心の理論」（Theory of Mind）と呼ばれる。そこには、他者の気持ち・感情を感じ取る能力である「共

感」（Empathy）や、自分の利益のみにとらわれず他者の利益を図るように行動する性向である「利他性」（Altruism）も関わる。この社会知性の脳科学（社会脳科学）がこの 15 年ほどで著しい発展を見せている。

この計算理論は、②で触れた脳の強化学習の計算理論をベースに発展させたものが考えられており、①で述べた fMRI による計測とモデル化解析の手法を用いて、脳計算モデルの検証が行われている[7), 12)]。この脳計算モデルでは、自己の行動選択を報酬予測誤差信号に基づいて学習することに加えて、同様のプロセスが他者の心の中でも行われているというシミュレーションを自己の心の中で行って学習する。この他者の心のシミュレーション学習は、シミュレーションにおける他者報酬予測誤差信号だけでなく、他者の観察から得られる他者の行動予測と実際の行動との差を示す他者行動予測誤差信号も用いたハイブリッドな構成で行われていることが明らかになってきた。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① Decoded Neurofeedback

前述のブレインデコーディングを発展させ、fMRI と機械学習技術をニューロフィードバックに活用した DecNef（Decoded Neurofeedback）法[14)]が国際電気通信基礎技術研究所（ATR）によって開発された。ニューロフィードバックは、特定の脳領域の活動を被験者にフィードバックし、被験者自身による脳活動の操作を促すことによって、その領域に対応した認知機能の増進や補綴を誘導するアプローチである。この DecNef 法は、fMRI と機械学習によるブレインデコーディング結果を被験者にリアルタイムにフィードバックすることで、従来に比べて細かい脳領域の操作を可能にした。特定の刺激に対して感覚が鋭くなる知覚学習の因果関係も示され、つらい記憶を思い出すことなく消すことの可能な、心的外傷後ストレス障害（PTSD）の新しい治療法につながる可能性も見いだされた[15)]。

② 計算精神医学

計算脳科学による脳情報処理モデルの構築・検証は、精神・神経疾患の解明や治療・予防にも貢献すると期待されるようになってきた。上述の DecNef 法を用いた PTSD 治療の可能性もその一例である。また、前述のモデル化解析を用いて、精神・神経疾患の患者（社会的不適応が認められる意思決定を伴う）と健常者の意思決定の間で、どの脳計算ステップや内的変数の扱いに違いが表れるのかを解明するアプローチも検討されている[7)]。現代社会におけるさまざまなストレス要因や高齢化社会で増加する認知症への対策も含め、精神・神経疾患の解明や治療・予防に向けて、計算脳科学と精神医学を融合した計算精神医学は重要性を増している。

③ 全脳シミュレーション

前述のような脳情報処理の計測技術の発展と脳計算モデルの理解の深まりによって、スーパーコンピューターを用いた全脳シミュレーションへの取り組みが進められるようになった。ニューロンやシナプス結合等で構成される全脳の情報処理モデルをスーパーコンピューター上に配置し、その振る舞いのシミュレーションを行い、その実行結果と、実際に全脳の活動を計測した結果とを比較することで、脳のより深く正確な理解が可能になる。さらに、パーキンソン

病・てんかん・うつ病を含む多くの脳疾患は、複数の脳領域が直接的・間接的に影響し合っていると言われており、そのような脳疾患の解明には、全脳シミュレーションのアプローチが有効と考えられている。

具体的な成果として、2013 年に日本とドイツの共同研究チーム（理化学研究所、ユーリッヒ研究所、沖縄科学技術大学院大学）によって、「京」コンピューターと NEST シミュレータを用いた大脳皮質神経回路シミュレーション[16]で、17.3 億個のニューロンと 10.4 兆個のシナプスのシミュレーション実行が確認された。2018 年には電気通信大学のプロジェクトにおいて、JAMSTEC の暁光システム（PEZY-SC：2048 コア、10000 チップ、28.19 PETA FLOPS）を用い、80 億の神経細胞からなる小脳モデルのリアルタイムシミュレーション[17]が実現され、視機性眼球反応に対応する神経活動の再現が確認された。これらのニューロン規模は小型のサル程度（マーモセット：約 6 億個、ヨザル：約 14 億個、マカクザル：約 63 億個）に相当する。人間は約 860 億個と言われており、「京」の 100 倍の性能を持つ次世代機「ポスト京」で人間の全脳シミュレーションを目指すプロジェクト（ポスト京 萌芽的課題 4「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」、2016 年 8 月～ 2020 年 3 月、沖縄科学技術大学院大学・京都大学・理化学研究所・電気通信大学・東京大学）が進められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

① 脳機能の全容解明を目指した各国の大規模プロジェクト

2013 年 ～ 2014 年 に、 米 国 で は The Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies（BRAIN）Initiative、欧州では Human Brain Project（HBP）、日本では「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト」（Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies：Brain/MINDS、革新脳）という脳科学研究の大型プロジェクトが相次いで立ち上がった。BRAIN Initiative はアポロ計画やヒトゲノム計画に匹敵する巨大科学プロジェクトとして構想されたと言われるが、いずれも脳機能の全容解明に向けて、国主導のトップダウン型で、国際連携にも重点を置いたプロジェクト推進が必要という共通的な認識がある。一方、米国の BRAIN Initiative は技術開発、欧州の HBP は計算論に基づいた脳のモデル化、日本の Brain /MINDS は霊長類モデルを活用したマップ作成等、各国の取り組みの特色も出されている。前述のように、オプトジェネティクスや fMRI 等の革新的な計測技術や、ビッグデータ解析・機械学習技術の進化が、脳機能の可視化の可能性を飛躍的に高めたことが、脳機能の全容解明を目指す方向性につながっており、これらのプロジェクトの中でも、脳情報処理の理論やデータ解析といった計算脳科学の側面は重きが置かれている。

② 新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」

国内においては、上記①にあげた Brain/MINDS プロジェクト（革新脳）のほか、脳科学研究戦略推進プログラム（脳プロ）、戦略的国際脳科学研究推進プロジェクト（国際脳）等も推進され、脳科学研究の強化が図られている。そういった中、特に計算脳科学にフォーカスしたものとして、新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」（研究期間：2016 年 6 月 30 日～ 2021 年 3 月 31 日）がある。「予測と知覚」、「運動と行動」、「認知と社会性」という 3 つの研究課題を掲げ、人工知能と脳科学の主要研究者を集め、融合研究を推進している。さらに、サマースクールやハッカソン等によって、融合領域の若手研究者の育成にも力を入れている。

③ DeepMind

DeepMind は Demis Hassabis らが創業した英国企業で、2010 年に創業され、2014 年に Google に買収された。革新的な機械学習技術を組み込んだソフトウェアを次々に開発し、2015 年にコンピューターゲーム（Atari 2600）のプレイ方法を自力で学習して高い成績を達成することを示し、2016 年・2017 年には囲碁ソフトウェア AlphaGo が世界トップランク棋士に圧勝して大きな話題となった。2018 年にはタンパク質の折り畳みを解析するソフトウェア AlphaFold が、アミノ酸の配列からタンパク質の構造を予測する CASP（Critical Assessment of Structure Prediction）競技会において、他を圧倒する世界トップ精度を達成した。

DeepMind は AI・機械学習のスタートアップとして注目されているが、「知能の解明」を企業ビジョンとして掲げており、Demis Hassabis 自身は脳科学研究での高い実績も有する（海馬とエピソード記憶に関する研究成果で Science 誌による 2007 年 10 大ブレイクスルーの一つに選ばれた）。2017 年には DeepMind のメンバーと「Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence」と題した論文 [11] を Neuron 誌に発表し、脳科学を重視した AI への取り組み姿勢を示した。AlphaGo 等で深層学習・強化学習の先進的活用事例が知られているが、DeepMind は計算脳科学の有効性・可能性を示しているとも言える。

（5）科学技術的課題

① 脳情報処理の計測・理解技術のさらなる革新と脳の多階層な構造・機能の解明

前述のように、オプトジェネティクス、脳波測定法、PET、fMRI 等、脳の活動を計測する技術が発展し、低侵襲・非侵襲化、分解能向上が図られてきた。これにビッグデータ解析・機械学習技術を組み合わせて、ブレインデコーディング、モデル化解析、ニューロフィードバック・DecNef 法等、脳情報処理をより深く理解する手段も生み出されてきた。

このような計測・理解技術に基づく脳の構造・機能の解明は、個々のニューロンや脳内各部の神経回路といったミクロなレベルから、脳全体の活動をとらえるマクロなレベルまで、さまざまな階層で進められてきた。それら多階層の成果を統合し、脳情報処理を総合的に解明していく取り組みが今後いっそう重要になっていく。そのために、多階層でビッグデータを蓄積していくことや、前述した全脳シミュレーションのためのコンピューティング基盤の研究開発も重要である。

② AI 研究課題に対する計算脳科学からの貢献

前述したように、脳情報処理の知見・発見にインスパイアされた AI 研究トピックとして、深層学習、強化学習、アテンション、エピソード記憶、作業記憶、継続学習等があげられる。今後さらに脳情報処理の知見・発見が AI 研究の発展に貢献していくと期待され、たとえば Demis Hassabis ら [11] は具体的に以下のような AI 研究課題をあげている。

- 実世界に関する直感的な理解：現状の AI は画像・映像から個々の物体に分解して認識し、それらの関係を組み立てようとする。それに対して人間は、幼児の段階から実世界における空間・数・物理感等を直感的に把握できる。
- 効率的な学習：現状の AI は大量の学習データを必要とする。それに対して人間は、事前知識と少量のデータから新しい概念を獲得することができる。

- 転移学習（Transfer Learning）：人間は概念を一般化し、転移して、新しい概念を獲得することができる（たとえば、ある乗り物の運転をできる人は、類似する乗り物の運転もできる）が、現状の AI ではまだ難しい。
- 想像とプランニング：人間は将来を想像・シミュレーションして、状況変化があっても柔軟に行動を選択できる。それに対して現状の AI は、過去の傾向の延長線上での行動に縛られている。
- 仮想脳解析（Virtual Brain Analytics）：計算脳科学が脳情報処理を解明しようとしているように、同様の手法・考え方を用いて、ブラックボックス化している AI システムを解明する試みが考えられる。

③ 計算脳科学とクロスする分野の拡大

脳の活動はさまざまな人間の活動の根幹であるから、計算脳科学の研究成果・知見はさまざまな分野に波及し得る。前述した社会脳科学では、他者との関係、社会知性を扱っており、個々の人間の意思決定のメカニズムから社会活動のメカニズムにまで、計算脳科学の関わるスコープは広がる。精神・神経疾患の解明や治療・予防にも貢献する計算精神医学の動向については既に触れたが、病気の治療法、さらには教育・マーケティング等の効果測定や新手法に貢献している。コンピューター応用においても、新しいインターフェースとしての BMI（Brain-machine Interface）、新しい計算メカニズムとしての脳型コンピューター等が検討されている。

（6）その他の課題

① 分野間連携とバランスのよいファンディング

脳の情報処理メカニズムはいまだ未知の部分が多く、その解明には長期的な基礎研究の継続が不可欠である。その一方で、コンピューターに実装され、さまざまな応用・ビジネスへと展開が進んでいる深層学習・強化学習技術は、脳の情報処理メカニズムとの関係が深い。また、脳の機能や情報処理メカニズムの理解には、認知科学・心理学等も関係が深く、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues：倫理的法的社会的課題）の面も考慮する必要がある。このような幅広い視点からの議論や分野間連携を促進するような研究プロジェクト体制も効果的である。長期的な基礎研究への継続投資を進めつつ、このような分野間連携の活動へもバランスよく研究投資していくことが重要である。

② 人材育成

上記①で述べたように、計算脳科学の研究には、複数分野横断の幅広い視野・知見を持った人材が必要であるが、現状はそのような人材が非常に少ない。研究プロジェクトにおいて、複数分野の研究者を 1 つの拠点で共同・交流させるような体制を作ることが望ましい。さらに、AI や計算機科学そして計算脳科学と脳科学を同時に学べるような、新たな大学院研究科・学部創設も検討すべきである。また、医学系の学生はもともと数学の素養が高いので、プログラミングや統計・数理・データ解析等、コンピューター科学を学び、活用する機会を継続的に設けることは有効と考えられる。

③ 大規模データ管理基盤の整備

脳活動の計測技術の進化や、脳科学研究の大型プロジェクトの実施を背景として、脳活動に関わる大規模データが取得・蓄積されるようになってきた。データ解析が研究発展への貢献も高まってきており、大規模データの保管・共有・効率的解析のための基盤整備が、今後の研究加速のために求められる。

（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	◎	→	fMRI 法、DecNef 法、京による全脳シミュレーション等、脳情報処理を計測・理解するための基本的手法の創出を主導してきた。国として脳科学の基礎研究プロジェクトを多階層で推進し、Brain/MINDS 等、国際的にも認知されている。
	応用研究・開発	○	→	米国と比べると、民間財団・ベンチャー企業での取り組みが相対的に弱い。
米国	基礎研究	◎	→	BRAIN Initiative をはじめ大型研究投資がなされており、分子細胞レベルからシステムレベルまで脳科学に関する層の厚い研究開発が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	民間財団・ベンチャー企業での取り組みが活発で、基礎研究から応用への展開が円滑に進められる。大規模なデータベースやツール類の整備が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	→	Human Brain Project（HBP）で欧州連携の大型投資が進められている。英国 DeepMind が、脳科学に基づく先進的 AI 技術開発に取り組んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	HBP では脳科学と情報科学の融合分野を強化しており、計算脳科学のコンピューティング基盤の整備も進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	第 13 次 5 カ年計画（2016 年～ 2020 年）で特に成長が見込まれる 5 分野の 1 つとして脳科学があげられ、15 年計画の（2016 年～ 2030 年）「Brain Science and Brain-inspired Intelligence」プロジェクトが立ち上げられた。上海の復旦大学が十数校および中国科学院（CAS）と脳科学協同イノベーションセンターを設立した。
	応用研究・開発	○	↗	中国は AI 分野の研究開発・ビジネスで米国と二強になりつつあり、脳科学を AI と連携させて強化する方針が打ち出されている。
韓国	基礎研究	○	→	韓国科学技術研究院（KIST）に機能的コネクトミクスセンターが設立された。さらに、Korean Brain Initiative が 10 年計画（2018 ～ 2027 年）でスタート、さまざまな階層での脳マップの作製や AI 関連研究等を推進。
	応用研究・開発	○	→	

（8）参考文献

1）David Marr, Vision: *A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* (W. H. Freeman and Company, 1982).

2）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 年）。

3）Karl Deisseroth, “Control the Brain with Light”, *Scientific American*, November 2010, pp. 49-55.

4）Roger L. Redondo, Joshua Kim, Autumn L. Arons, Steve Ramirez, Xu Liu, and Susumu Tonegawa, “Bidirectional reversal of the valence associated with the hippocampal memory engram”, *Nature* Vol. 513 (18 September 2014), pp. 426-430. DOI: 10.1038/nature13725

5）Steve Ramirez, Xu Liu, Pei-Ann Lin, Junghyup Suh, Michele Pignatelli, Roger L. Redondo, Thomas J. Ryan, and Susumu Tonegawa, “Creating a false memory in the hip-pocampus”, *Science* Vol. 341, Issue 6144 (26 July 2013), pp. 387-391. DOI: 10.1126/science.1239073

6）Seiji Ogawa, Tso-Ming Lee, Alan R. Kay and David W. Tank, “Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* Vol. 87, No. 24 (December 1990), pp. 9868-9872.
7）中原裕之・鈴木真介、「意思決定と脳理論：人間総合科学と計算論的精神医学への展開」、『Brain and Nerve』65 巻 8 号（2013 年 8 月）、pp. 973-982。
8）Yukiyasu Kamitani and Frank Tong, “Decoding the visual and subjective contents of the human brain”, *Nature Neuroscience* Vol. 8 (24 April 2005), pp. 679-685. DOI: 10.1038/nn1444
9）Tomoyasu Horikawa and Yukiyasu Kamitani, “Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual features”, *Nature Communications* Vol. 8, Article number 15037 (22 May 2017). DOI: 10.1038/ncomms15037
10）Satoshi Nishida and Shinji Nishimoto, “Decoding naturalistic experiences from human brain activity via distributed representations of words”, *NeuroImage* Vol. 180, Part A (15 October 2018), pp. 232-242. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.08.017
11）Demis Hassabis, Dharshan Kumaran, Christopher Summerfield and Matthew Botvinick, “Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence”, *Neuron* Vol. 95, Issue 2 (19 July 2017), pp. 245-258. DOI: 10.1016/j.neuron.2017.06.011
12）中原裕之、「社会知性を実現する脳計算システムの解明：人工知能の実現に向けて」、『人工知能』（人工知能学会誌）32 巻 6 号（2017 年 11 月）、pp. 863-872。
13）田中慎吾・坂上雅道、「推移的推論の脳メカニズム―汎用人工知能の計算理論構築を目指して―」、『人工知能』（人工知能学会誌）32 巻 6 号（2017 年 11 月）、pp. 845-850。
14）Kazuhisa Shibata, Takeo Watanabe, Yuka Sasaki and Mitsuo Kawato, “Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation”, *Science* Vol. 334, Issue 6061 (09 Dec 2011), pp. 1413-1415. DOI: 10.1126/science.1212003
15）Ai Koizumi, Kaoru Amano, Aurelio Cortese, Kazuhisa Shibata, Wako Yoshida, Ben Seymour, Mitsuo Kawato and Hakwan Lau, “Fear reduction without fear: Reinforcement of neural activity bypasses conscious exposure”, *Nature Human Behaviour* Vol. 1, Article Bumber 0006 (21 November 2016). DOI: 10.1038/s41562-016-0006
16）Susanne Kunkel, Maximilian Schmidt, Jochen M. Eppler, Hans E. Plesser, Gen Masumoto, Jun Igarashi, Shin Ishii, Tomoki Fukai, Abigail Morrison, Markus Diesmann and Moritz Helias, “Spiking network simulation code for petascale computers”, *Frontiers in Neuroinformatics* 8:78 (10 October 2014). DOI: 10.3389/fninf.2014.00078
17）Tadashi Yamazaki and Wataru Furusho, “Realtime simulation of cerebellum”, *International Symposium on New Horizons of Computational Science with Heterogeneous Many-Core Processors* (Riken Wako campus, Japan, February 27-28, 2018).

２．１．８　社会におけるＡＩ

（１）研究開発領域の定義

人工知能（AI）技術が社会に実装されていったときに起こり得る、社会・人間への影響や倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）を見通し、あるべき姿や解決策の要件・目標を検討し、それを実現するための制度設計および技術開発を行う研究開発領域である。

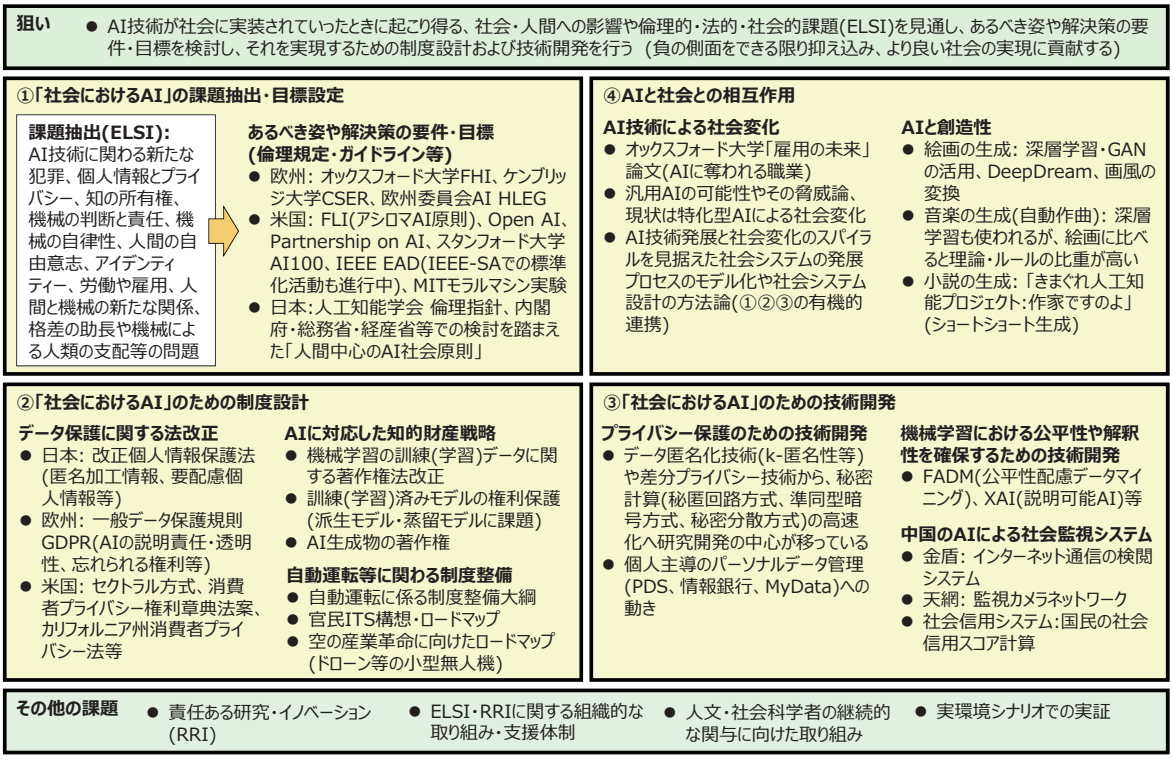


図2-1-11　領域俯瞰：社会におけるAI

（２）キーワード

ELSI、RRI、FAT、倫理、公平性、説明責任、透明性、創造性、法制度、プライバシー、知的財産権、ビジネスモデル

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

AI 技術は、人間の知的作業がコンピューターによって代行される可能性を広げることから、社会における人間の役割を変え、人間の働き方やモチベーションにも影響を及ぼし、社会の仕組み・あり方も変貌させる可能性を持っている。これによって、便利で効率的な社会を築くことができ、人間は快適な生活を過ごせると期待される一方で、AI が職業を奪うとか、プロファイリング（個人の性格・特徴を分析する技術）によってプライバシーを侵害されるとか、負の側面に対するさまざまな不安・懸念が指摘されている。

本研究領域の取り組みは、それら起こり得る影響・課題を事前に把握し、その対策を制度と技術の両面から実現することによって、負の側面をできる限り抑え込み、より良い社会を実現するために貢献する。

［研究開発の動向］

本領域の取り組みを、①「社会における AI」の課題抽出・目標設定、②「社会における AI」のための制度設計、③「社会における AI」のための技術開発、④ AI と社会との相互作用、という 4 つに分け、その概要と動向を述べる。

①「社会における AI」の課題抽出・目標設定

①は AI 技術が社会に実装されていったときに起こり得る、社会・人間への影響や倫理的・法的・社会的課題（ELSI）を抽出し、あるべき姿や解決策の要件・目標を定める活動である。

まず ELSI として考えられる問題を表 2-1-1 に例示した。JST CRDS では 2013 年から 2014 年にかけて、人文・社会科学と情報科学の双方から有識者を広く集めたワークショップを複数回 [1), 2), 3)] 開催しており、その中で議論された ELSI に関する論点をまとめたものである。AI 技術に直接関わるものだけでなく、情報技術全般に共通するものや、科学技術一般の社会受容そ

表2-1-1　倫理的・法的・社会的課題(ELSI)と想定される問題

ELSI	想定される問題	実際に発生した主な事例
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 ・ユーザーの個人情報を用いた詐欺、恐喝（オレオレ詐欺など） ・フェイクニュース、デマによる実質的な被害	・Microsoft の Twitter 上のチャットボット Tay が、人種差別的発言や暴力的発言をし始め、デビュー後数時間で停止（2016 年、米国）
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 ・EU の一般データ保護規則への抵触 ・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	・JR 東日本が Suica の乗降履歴を日立に販売し、利用者やマスコミが大反発（2014 年、日本） ・Cambridge Analytica が Facebook から不適切な方法で約 5000 万人のデータを政治操作等に悪用疑惑（2016 年、英国・米国）
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	・AI が描いた絵画が著名オークションで 4900 万円で落札（2018 年、米国）
機械の判断と責任	・機械の判断の正当性・妥当性の担保 ・機械の法的電子人格 ・結果に対する責任の帰着、責任のトップは人間だけか	・Amazon が AI 採用打ち切り、女性差別の欠陥露呈で（2018 年、米国）
機械の自律性	・自律的に動作する機械およびそれらの競合・協調動作をいかに制御するか ・判断・推論の信頼性の保証	・NY 証券取引所でフラッシュクラッシュ（2017、米国）
人間の自由意志	・個人や集団の合意形成や意思決定の制御・誘導 ・選挙や国民投票への介入	・ソーシャルメディア等を用いた政治操作（デジタルゲリマンダー）が米国大統領選挙の結果にも影響を与えたと言われる(2016 年、米国)
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と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	・ロシアのコンピュータプログラム「ユージーン」がチューリングテストに合格（2014 年、英国）
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	・ゴールドマン銀行の株式デスクに生身のトレーダー 3 人、昔は 500 人（2018 年、米国）
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 ・ポストヒューマニティー	・ジョージア工科大学の AI 教育助手 Jill Watson に、学生は気づかず（2016 年、米国）
格差の助長や機械による人類の支配	・情報リテラシーの有無によるデバイドや格差の拡大 ・スーパーヒューマニティーの出現と無用者階級	・時給 20 ドル以下の仕事の 83% で AI 優勢、時給 40 ドル以上の仕事で 4% と予想（2016 年、米国）

のものに関わるものも含んでおり、やや広めにあげている。加えて、表 2-1-1 には、実際に発生して報じられた主な事例も併せて載せた。また、参考として、論文[4]では AI と倫理に関わる問題を、AI の持つリスク、AI に関わる人間のリスク、失業などの社会的インパクト、法律や社会の在り方に関する問題という 4 つに分けて論じている。

次に、このような問題を議論し、あるべき姿や解決策の要件・目標を定めようとする取り組みが国内外で推進されている[5),6),7)]。以下にその代表的なものをあげる。

欧州では、比較的早い時期から、特に英国の大学・研究機関を中心に取り組まれてきた。まず、2005 年にオックスフォード大学の哲学科の下部組織として Future of Humanity Institute（FHI）が設立された。FHI は、技術変化によってもたらされる倫理的ジレンマやリスク（AI だけでなく気候変動や経済破綻等も含む）に対して、長期的にどう選択・対処していくべきか、学際的な研究を進めている。また、ケンブリッジ大学では、2012 年に人文・社会科学部局の下部組織として Cambridge Center for Existential Risk（CSER）が設立された。CSER では、AI、バイオ、ナノ等の先端技術のリスクに対する哲学的・倫理的な研究が行われており、産官学ワークショップ等を実施している。最近では、欧州委員会の AI HLEG（High-Level Expert Group on Artificial Intelligence）による Draft Ethics Guidelines for Trustworthy AI が 2018 年 12 月に公開され、パブリックコメントを受けた後、2019 年 3 月に最終版が出される予定とされている。

米国では、産業界主導で取り組みが始まり、それを追うように学術界での取り組みが立ち上がった。産業界主導の活動としては The Future of Life Institute（FLI）、OpenAI、Partnership on AI がよく知られている。FLI は、2014 年 3 月に Jaan Tallinn（Skype 共同創始者）らによって設立され、Elon Musk から 1000 万ドルの寄付も得て、AI 等の新技術を人類がうまくコントロールできるようにする研究を支援し、オープンレターも発信している。FLI はさらに、2017 年 1 月に 5 日間にわたるアシロマ[1]での会議の結果として、AI の研究課題、倫理と価値観、長期的な課題を含む 23 項目のガイドライン「アシロマ AI 原則」（Asilomar AI Principles）を公表し、多くの署名賛同を得ている[2]。OpenAI は、2015 年 12 月に Elon Musk を含む複数の投資家からの寄付金 10 億ドルをもとに設立された非営利研究機関で、安全な AI の恩恵をオープンソース（透明性の高い形で）で広く配分することを目指している。Partnership on AI は、2016 年 9 月に Amazon、Google、Facebook、IBM、Microsoft の 5 社が、AI のベストプラクティス構築、社会的影響の議論を目的として設立した非営利団体で、その後、Apple、Intel、Sony 等を含め、参加企業・団体数を大幅に増やしている。

一方、米国の学術界での取り組みとしては、スタンフォード大学の One Hundred Year Study on Artificial Intelligence（AI 100）、IEEE（The Institute of Electrical and Electronics Engineers、米国電気電子学会）の自律インテリジェントシステムの倫理に関する IEEE グローバルイニシアティブ（The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems）がよく知られている。AI 100 は、AAAI（Association for the Advancement of Artificial Intelligence、米国人工知能学会）の会長を 2007 年～ 2009 年に努めた Eric Horvitz（現 Microsoft）らが中心となって 2014 年 12 月に開設し、AI が法・経済・

[1] 米国カリフォルニア州のアシロマは、遺伝子組み換えに関するガイドラインが議論されたアシロマ会議が、1975 年に開催された場所である。このアシロマ会議は、科学者自らが研究の自由を束縛してまで自らの社会的責任を表明したもので、科学史に残る象徴的な場所で再び AI に関して同様の議論がなされた。

[2] 2018 年末時点の公開情報として、AI・ロボット工学研究者 1197 名、その他 2320 名がこの原則に署名したとのことである。

社会等にもたらす100年にわたる長期的な影響を学際的に調査・議論している。IEEEグローバルイニシアティブは、2016年4月に活動を開始し、「倫理的に配慮されたデザイン（Ethically Aligned Design）：自律インテリジェントシステムで人間の福祉を優先するためのビジョン」と題されたレポートを作成しており、2016年12月に初版（EADv1）、2017年12月に第2版（EADv2）を公開した（詳細は後述）。これはIEEEでの標準化も目指している。

日本では、学会・政府主導のガイドライン策定が推進されている。学会では2014年に人工知能学会が倫理委員会を立ち上げ、同委員会での議論や公開討論を経て、2017年2月に「人工知能学会 倫理指針」を公開した。9項目から成り、研究者倫理に焦点が置かれているが、最後の第9条「人工知能への倫理遵守の要請」はAI自体が倫理的であるべきということを掲げたのが特徴である。また、政府主導の活動としては、内閣府の「人工知能と人間社会に関する懇談会」、総務省の「AIネットワーク社会推進会議」、経済産業省の「AI・データ契約ガイドライン検討会」等が進められてきたが、それらを踏まえた活動として、内閣府の「人間中心のAI社会原則検討会議」が2018年5月に始まり、同年12月に「人間中心のAI社会原則（案）」が公開された。国内外から広く意見を募った上で2019年3月に策定という予定とされている。人間中心のAI社会原則（案）は、人間の尊厳が尊重される社会（Dignity）、多様な背景を持つ人々が多様な幸せを追求できる社会（Diversity & Inclusion）、持続性ある社会（Sustainability）という3つの価値を基本理念とし、「AI-Readyな社会」をビジョンに掲げ、人間中心の原則、教育・リテラシーの原則、プライバシー確保の原則、セキュリティー確保の原則、公正競争確保の原則、公平性・説明責任・透明性の原則、イノベーションの原則という7つをAI社会原則としてあげている。

②「社会におけるAI」のための制度設計

①で導出した要件・目標の実現に向けて、制度設計面での取り組みが進められている。具体的には、プライバシー・個人情報保護等のデータ保護に関する法改正、AIに対応した知的財産戦略、自動運転に関わる制度整備等が議論されている。ここでは、特にデータ保護に関する法改正の動向について述べる[8),9)]。他2点については「(4) 注目動向」で取り上げる。

日本におけるデータ保護の法制度としては、まず2003年に制定された、個人情報保護法を含む個人情報保護関連5法がある。その後、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、2017年5月に施行された。この改正では、事業者間での轌転流通が認められる匿名加工情報の新設、要配慮個人情報の導入、高い独立性を持つ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。

欧州（EU）では、1995年に制定されたデータ保護指令（Data Protection Directive: 95/46/EC）が存在したが、2012年からインターネット、デジタル化といった技術進化やグローバル環境変化を踏まえた全面的な見直しが進められた結果、パーソナルデータの取り扱い（Processing）と移転（Transfer）に関わる規則（Regulation）を定めた一般データ保護規則（General Data Protection Regulation：GDPR）が2016年4月に成立し、2018年5月から適用が開始された[3]。先のデータ保護指令は、各国に一定の法律の制定を義務付けているが、

[3] GDPRに関連するニュースとして、2019年1月、欧州委員会から日本は十分性認定（Adequacy Decision）を受けた。GDPRでは、EU域内の個人に関するデータをEU域外へ移転することを原則として認めていないが、十分なデータ保護政策がとられている国であれば、十分性認定を受けることで、移転が認められる。

指令（Directive）が各国に直接適用されるわけではない。それに対してGDPRは、各国に直接適用されるため、運用面での位置付けが大きく異なる。規則の内容の面では、特にAIとの関係が深いものとして、プロファイリングに基づく自動意思決定に対する説明責任・透明性を要求していること（GDPR第22条）があげられる。そのほかにも「削除権」（「忘れられる権利」、同第17条）、「開示請求権」（同第15条）、「データポータビリティー権」（同第20条）、罰則の強化等にも特徴がある。

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、民間部門については包括法がなく、自主規制を基本としている。規制対象を限定して個別領域毎に個別法が制定されるセクトラル方式がとられている。ただし、GAFA（Google, Amazon, Facebook and Apple）をはじめとするインターネット関連事業者に膨大な利用者データが集まる状況に際して、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、事業者によるインターネット上の追尾・追跡（トラッキング）を消費者が拒否（オプトアウト）できる「Do Not Track（DNT）」という概念を明確化して基本方針とした「消費者プライバシー権利章典」が提案された。さらに、その後、2015年に、この権利章典をもとにした「消費者プライバシー権利章典法案」が公開された。また、州法レベルでのさまざまなプライバシー保護法が制定されているが、特にカリフォルニア州は先進的な法律を制定してきた。たとえば、2002年に同州が最初に制定したセキュリティー侵害通知法（California Security Breach Notification Act：情報漏洩が発生した場合に事後的な通知・報告を義務付け）は、その後、ほぼ全州が同様の法律を制定した。さらに、カリフォルニア州は2018年6月に新たに消費者プライバシー法（California Consumer Privacy Act）を制定した（2020年1月施行）。この新法では、消費者が収集・販売された情報について開示・消去等を請求できるようになる。

③「社会における AI」のための技術開発

①で導出した要件・目標の実現に向けて、技術開発面での取り組みが進められている。特に活発に取り組まれている技術課題としては、機械学習における公平性や解釈性を確保するための技術開発や、プライバシー保護のための技術開発があげられる。前者については、FADM（Fairness-aware Data Mining）[10), 11)]やXAI（Explainable AI）[12), 13), 14)]等の技術開発が進められているが、「2.1.1 機械学習」「2.1.4 AIソフトウェア工学」の節でも取り上げているので、本節では詳細を省略する。ここでは特に後者についての技術開発状況を述べる。

なお、社会におけるAIに関して、①②の面だけでなく③の面、つまり、どのような情報技術によって対処できるかについても論じられる国際会議としては、2014年から毎年開催されているFAT/ML（Workshop on Fairness, Accountability, and Transparency in Machine Learning）や、2018年から始まったACM FAT*（ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency）　やAIE’S（AAAI/ACM Conference on Artificial Intelligence, Ethics, and Society）がある。

プライバシー保護のために取り組まれている代表的な技術として、(1) 解析対象データにおけるプライバシー保護のためのデータ匿名化技術、(2) データベース問い合わせにおけるプライバシー保護のための差分プライバシー技術、(3) 計算過程におけるデータ内容の漏洩防止のための秘密計算（秘匿計算と呼ばれることもある）技術等がある。

1つめのデータ匿名化技術は、データとデータ主体（あるいは所有者）との間の相関を取り除く技術である。パーソナル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。このようなリスクを定式化し、低減するための考え方としてk-匿名性[15]がよく知られている。具体的には、表形式データについて、パーソナルデータの属性値の組み合わせが同じであるデータが、パーソナルデータ集合中に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、パーソナル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きた（l-多様性、t-近似性等）。改正個人情報保護法で新設された匿名加工情報の実装において実務上重要な技術である。

2つめの差分プライバシー技術[16]は、データベース問い合わせとその応答に関わる情報漏洩を理論的に評価し、その対応策を与える技術である。一般に、統計的クエリの応答値開示は個人情報の開示とは見なされにくいが、母集団数が少ない場合は、統計値から個別情報がある程度推測できてしまうケースが起こり得る。そこで、差分プライバシーは、個人に関するデータを格納したデータベースに対する統計的クエリの応答値から、そのデータベースに、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て開示するアプローチを取る。個人がデータを提供するときに個人の下で雑音を加算するローカル差分プライバシーのアイデアも注目されている。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。ただし、データベース中に個人に関わるデータが含まれるかわからなくするために、大きな雑音が必要となることがある。

3つめの秘密計算[17]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、秘匿回路を用いた方式、準同型暗号を用いた方式、秘密分散を用いた方式という3種類が知られている。

秘匿回路方式は、1982年に秘密計算の概念が提案されたときに示されたアイデアで、二者間で一方が暗号化された秘匿回路を構築し、両者がおのおののデータを暗号化した上で回路に入力すると、回路による演算処理の結果が他方に渡されるというものである。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が、計算時間・通信量が大きい（通信回数は少なくできる）。

準同型暗号とは、暗号化したまま復号することなく（秘密鍵の知識なしに）、加法・乗法等の演算が可能な暗号系である。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」が発表されたのがブレイクスルーとなり、研究が進展した。秘匿回路方式と比較すると、算術演算をベースとしているため、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いる（一方、秘匿回路方式は文字列操作等の離散的な処理の方が向く）。

これらに対して、秘密分散は暗号系を用いない秘密計算手法である。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。秘密情報を複数の者にランダムシェアとして分散させ、ランダムシェア同士の演算によって秘密計算を実現する。実現可能な関数の種類は限定されるが、暗号処理を含まないので一般に計算効率がよい。

いずれの方式も当初は膨大な計算時間を要したが、近年、高速化改良が進み、実用性が高まっている。秘密計算ライブラリーが公開されるようになり、また、いくつかの企業で秘密計算を用いたサービスが実施されている（エストニアの Cybernetica による Sharemind、デンマークの Partisia、イスラエルの Unbound 等）。

④ AI と社会との相互作用

AI 技術は社会を変え、変わった社会がさらに発展あるいは安定化するために、また新たな AI 技術を要求する、というような連鎖（AI 技術→社会変化→ AI 技術→社会変化→…）が起こってくる。そのような社会変化や AI 技術の発展から、人間のあり方や思考の仕方も影響を受ける。連鎖のスピードや方向に、必ずしもすべての人々が追従できるわけではない。連鎖がどのような方向へ進むかを迅速に予測・把握し、連鎖の進行をうまくコントロールするための対策を的確に講じていくことが望ましい。

その際に、現状の AI 技術でどのようなことまでできるのか、さらに、今後どのようなことまでできる見込みなのか、といった見極めが求められる。これに関連した話題として、英国オックスフォード大学から 2013 年に発行された「雇用の未来（The Future of Employment）」と題する論文[18]が、「今後 10~20 年程度で、米国の総雇用者の約 47% の仕事が自動化されるリスクが高い」という予想を示したことから、AI 技術による職業や雇用機会の変化が盛んに論じられるようになった。また、さまざまな状況下でさまざまな目的に対応できる汎用 AI（Artificial General Intelligence : AGI）[19]の可能性や、それに対する脅威論も盛んに話題に取り上げられている[20), 21)]。その詳細をここでは論じないが、現状の AI 技術は汎用 AI からははるかに遠く、いま急速に社会に広がっている AI 応用システムは特定目的のみに対応した特化型 AI によるものである。ただし、特化型 AI であっても、社会や人間に大きな影響を与え得るものであり、社会を変えつつある。

また、AI 技術でどこまでできるかという面で、最近よく話題に上がるようになったものとして、AI による芸術作品（絵画、音楽）や文学作品等の生成、あるいは、AI の創造性という論点がある。まず AI 技術による絵画の生成については、深層学習の適用によって大きく進展した。2015 年に Google が開発した DeepDream[22]は、深層学習のニューラルネットワーク構造中の特徴情報を操作することで、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。さらに、ゴッホやムンク等の絵画作品から画風を学習し、入力画像をゴッホ風やムンク風の画風に変換するシステムも開発された[23]。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 プリンタを利用して新作を描く The Next Rembrandt プロジェクトの成果を公開し[24]、話題を集めた。深層学習を用いた敵対的生成ネットワーク（Generative Adversarial Networks : GAN）[25]による画像生成手法が発展し、きわめて自然で高精細な画像を生成できるようになった。2018 年 10 月には、14 世紀から 20 世紀に描かれた肖像画 1.5 万点のデータをもとに、GAN によって自動生成された肖像画が、米国ニューヨークの有名オークション「クリスティーズ」で、約 4900 万円という高値で、初めて

の AI 作品として落札された。

AI 技術による音楽の生成（作曲）についても、同様に深層学習の適用が進みつつあり、バッハ風やビートルズ風といった新曲を作ることが可能になった[26), 27)]。しかし、コンピューターを活用した作曲では、古くから音楽理論やルールをベースとした手法の蓄積があり、絵画のように GAN の活用は進んでいないようである。

AI 技術による文学作品の生成については、2012 年にスタートした「きまぐれ人工知能プロジェクト：作家ですのよ」がよく知られている。星新一のショートショート小説作品をコンピューターで解析して生成した作品を星新一賞に応募する試みを行っている。2016 年の星新一賞の一次審査を通過した（受賞はならず）。ただし、登場人物の設定や話の筋、文章の部品に相当するものは人間が用意しておき、AI 技術はそれらを用いた文章生成を行うものである。

人間の持つ創作欲求（美意識や自己表現等）そのものを AI が持つことは当分難しいとしても、表現の種や見本となるものがあるときに、そのスタイルをまねたり、新たな連想を生み出したりといったステップには AI 技術も活用できるようになりつつある。これは、人間の創作活動を支援する道具として、AI 技術の活用が進む可能性を示唆している。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

① 個人主導のパーソナルデータ管理への動き

これまでパーソナルデータは、企業が運営するサービスの利用者に関するデータとして、各企業のもとに集められ、管理される形態が大半であった。企業が集中管理しているパーソナルデータが漏洩する事故がたびたび発生し、運営会社のセキュリティー管理が必ずしも万全ではないという不安も生じている。このような企業主導のパーソナルデータ管理ではなく、個人主導のパーソナルデータ管理へ移行しようという動きがある[8)]。自分のパーソナルデータがどこまでどの企業に開示されているのかを、自分自身で把握し、コントロールしたい（すべき）という考えである。そのために法律面では、自己情報コントロール権（開示請求権、削除権・訂正権、データポータビリティ―権等が含まれる）の確保が考えられている。一方、技術・システム面では、自分の管理下にパーソナルデータを集約・管理する仕組み PDS（Personal Data Store）が設計されている。また、PDS として自分の手元に置く代わりに、情報銀行（情報信託銀行の略称）に管理を委託するビジネスモデルも考えられている。内閣官房 IT 総合戦略室は、2016 年 9 月からデータ流通環境整備検討会を開始し、その「AI・IoT 時代におけるデータ活用ワーキンググループ」において、PDS、情報銀行、データ取引市場等の仕組みを集中的に検討し、2017 年 3 月に中間とりまとめ[28)]を公表した。海外においても、米国のエネルギー分野のグリーンボタンや医療分野のブルーボタン、英国の midata イニシアティブによるエネルギー・モバイル・金融・小売データ分野での取り組み等、個人主体のパーソナルデータ管理に向かう動きがみられる。

② AI に対応した知的財産戦略の動向

国内では、内閣の知的財産戦略本部での議論の中で、AI に対応した知的財産戦略・法改正等が議論されている。2017 年 3 月に関連する報告書[29)]が公表された。

まず、機械学習の訓練（学習）データに関わる著作権法が改正され、機械学習のために、よりデータを利活用しやすくなった。もともと日本の著作権法は、コンピューターによる情報解析を目的とした複製等を許容する権利制限規定を有しており（旧 47 条の 7）、営利目的であっても、第三者の著作物が含まれていても、一定限度で著作権者の許諾なく著作物を利用することが可能とされている。さらに、2019 年 1 月 1 日施行の改正著作権法では、旧法では制限がかかっていたと解釈されるいくつかのケースに関して制限が緩和された（新 30 条の 4 第 2 号）。すなわち、旧法では訓練データを作成する主体と機械学習を実行する主体が同一であることを前提としていたのに対して、新法ではその前提が排除された。すなわち、作成した訓練データセットを他者に提供することも許容され、その利活用がいっそう促進される。

次に、訓練（学習）済みモデルの権利保護の課題について述べる。訓練済みモデルの再利用の仕方は、単純にモデルをそのままコピーして使うケース（複製）だけでなく、追加学習して使うケース（派生）、複数個の訓練済みモデルを組み合わせて使うケース（アンサンブル：Ensemble）、訓練済みモデルの振る舞い（どんな入力に対してどんな出力を出すか）の観測データを別のニューラルネットワークに学習させて新たなモデルを作るケース（蒸留：Distillation）が知られている [30]。このうちアンサンブルで使うモデルは複数個だが、1 つ 1 つは複製モデルに相当するので、権利保護を考えるべきモデルの種類は複製モデル・派生モデル・蒸留モデルの 3 種類である。このうち、派生モデルと蒸留モデルは、もとの訓練済みモデルとの関係性の立証が難しいことが権利保護上の課題である。契約・特許権・著作権等でどこまで保護できるか、新しい権利による保護が必要か、営業秘密として不正競争防止法で保護できるケースはどのようなケースか、といった検討がなされている [29]。

また、AI 生成物の著作権については、次のような解釈がされる。人間が AI 技術を道具として利用した創作物は、その人間に創作意図と創作的寄与があれば、その創作物は著作物であると認められる。一方、人間に創作的寄与が認められないケースは、AI 創作物とされ、現行の著作権法では著作物と認められない。AI はパラメーターを少しずつ変えながら休むことなく膨大なバリエーションの生成物を出力することが可能なので、それらに著作権を与えたら、大きな弊害を生む。ただし、ここでいう創作的寄与というのがどの程度のものならば該当するのかは、今後の課題として残っている。加えて、AI 創作物を人間による創作物だと偽られる懸念や、機械学習を用いた場合に生成物が訓練データと類似してしまう問題等も課題である。

③ 自動運転に関わる制度整備の状況

自動運転の研究開発、実用化に向けたトライアルが急速に進みつつあり [4]、その推進のための制度整備が、内閣をはじめ国土交通省・経済産業省・警察庁等の各省庁で検討されている。特に全体戦略としては、高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT 総合戦略本部）官民データ活用推進戦略会議から公表された「自動運転に係る制度整備大綱」（2018 年 4 月）[31] と「官民 ITS 構想・ロードマップ」（毎年更新、同年 6 月に 2018 年版）[32] に示されている。

最新 2018 年版のロードマップによると、自家用車については、2020 年までに自動運転レ

[4] 自動運転への取り組みの現状は「SIP-adus Workshop 2018」に詳しい。
http://en.sip-adus.go.jp/evt/workshop2018/

[5] 自動運転レベルの定義は、レベル 0:運転自動化なし、レベル 1:運転支援、レベル 2:部分運転自動化、レベル 3:条件付き運転自動化、レベル 4：高度運転自動化、レベル 5：完全運転自動化とされている [31]。

ベル [5]2、2020 年を目途に自動運転レベル 3、2025 年を目途に高速道路での自動運転レベル 4 の市場化が可能となる環境整備が掲げられている。物流サービスは、高速道路でのトラック走行について、2021 年までに自動運転レベル 2 以上での後続車有人隊列走行、2022 年以降にその無人隊列走行、2025 年以降に自動運転レベル 4 が掲げられている。移動サービスは、2020 年までに自動運転レベル 4 による限定地域での無人自動運転移動サービス、2022 年以降に自動運転レベル 2 以上による高速道路でのバスの自動運転を目指すとされている。

これに向けた制度整備のための重点課題として、(1) 安全性の一体的な確保、(2) 自動運転車の安全確保の考え方（道路運送車両法等）、(3) 交通ルールの在り方（道路交通法等）、(4) 責任関係（自動車損害賠償保障法、民法、製造物責任法、自動車運転死傷処罰法等）、(5) 運送事業に関する法制度との関係等があげられている [31]。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

① IEEE「倫理的に配慮されたデザイン（Ethically Aligned Design）」

自律インテリジェントシステムを実現する仕組みの確立に向けた公の議論（過度な期待や恐怖の払拭を含む）、標準化や認証プログラムの策定、各国あるいは国際的な政策立案を促すような指針を与えることを目的とし、2016 年 12 月に初版（EADv1）が公表され、そこからのフィードバックを踏まえて、2017 年 12 月に第 2 版（EADv2）が公表された。(1) 倫理的に配慮されたデザインのための一般原則、(2) 自律インテリジェントシステムへの価値観の組み込み、(3) 倫理的な研究や設計のための方法論やガイド、(4) 汎用人工知能や人工超知能の安全性や便益、(5) パーソナルデータとアクセス制御、(6) 自律型兵器システムの再構築、(7) 経済・人道的課題、(8) 法律、(9) 感情（アフェクティブ）コンピューティング、(10) 政策、(11) 情報通信技術における伝統的倫理観、(12) 複合現実、(13) ウェルビーイング、という 13 項目から成る。(9) ～ (13) が EADv2 で新たに追加された。

EAD はデザインという言葉を使っている通り、倫理そのものではなく、設計論・設計思想、それをどのように技術に落とし込めるかといった論点が整理されていることが特徴である [33]。また、このような議論を全世界から、AI 研究者だけでなく、人文・社会科学研究者、政策関係者、企業関係者等、多様な 250 人以上の参加者を得て進めている。自律型兵器システムのような問題にも踏み込んでいる。さらに、IEEE 標準化にもつなげようとしている点で、国際的な影響力が大きい。この標準化プロジェクトは、既に IEEE-SA（Standard Association：標準規格）に承認されている。EAD 報告書執筆陣を中心に、IEEE-SA P7000 シリーズとして標準化を目指す 14 のワーキンググループでドラフトを作成中である [34]。

② MIT メディアラボのモラルマシン実験

モラルマシンは自動運転車版のトロッコ問題（倫理的ジレンマ）に関する思考実験である。つまり、自動運転車にブレーキ故障等が生じ、事故で犠牲者が出ることが避けられない状況を示し、その中で一部の人だけ免れるとしたとき誰が優先されるべきかを、さまざまな人々に問い、回答を集めた。一人につき 13 通りのシナリオを示し、どちらを優先するか 2 択の質問に回答してもらうアンケートサイトを 2016 年 6 月に公開した。233 の国・地域、230 万人からのべ 4000 万件の回答が得られ、そのうち回答者が 100 人を超す 130 の国・地域のデータを分析した結果が 2018 年 10 月に発表された [35]。

その結果によると、たとえば、個人主義的な文化を持つ地域では、より多くの人数を救うことが優先される傾向や、一人当たりの GDP が低く、法の規律も低い地域では、法遵守違反に寛容だという傾向や、経済格差の大きい地域では、社会的な地位の高さが優先される傾向等が見られ、地域の文化的背景との相関、各地域の特徴、地域間の類似性等が示された。ここで示された世界規模の倫理観の多様性に対して、倫理ルール作りをどのように進めていくべきか、あるいは、ある倫理観にしたがって作られた製品・サービスの各地域での受容性をどう考えていくか等、より検討を深めていくことが望まれる。

③ 中国の AI による社会監視システム

中国では、従来の「金盾」（Great Firewall）システムに加えて、「天網」（Sky Net）システムと「社会信用システム」の構築を進めており、政府による社会や国民の監視・管理が、AI 技術を用いて強化されている。

「金盾」はインターネット通信の検閲システムであり、Web 検索エンジンの検索語、電子メールやインスタントメッセンジャーの通信内容、Web サイトや SNS（Social Networking Service）のコンテンツ等に対して検閲・遮断が行われる。2003 年頃から稼働し、その後も段階的に強化されている。

「天網」は監視カメラネットワークで、2012 年に北京市に本格的に導入され、2015 年には中国内の都市エリアが 100% カバーされた。2017 年時点で監視カメラ 1.7 億台の規模になり、さらに 3 年で 4 億台の設置が目指されている。顔認証技術が組み込まれており、人混みの中から指名手配犯を見つけ、逮捕できたという実績もあげている。深圳市では、交差点に設置された監視カメラから信号無視等の違反者を見つけ、警告する試みも実施された。

さらに中国政府による「社会信用システム」の構築が 2014 年～ 2020 年の計画で進められている。所得・社会的ステータス等の政府が保有するデータに加えて、インターネットや現実社会での行動履歴も含めて評価し、各国民の社会信用スコアを計算するという計画である。一方、民間の電子マネー運営企業・電子決済運営企業においては既に、利用者のプロファイルや行動履歴から独自に信用スコアを算出し、そのスコアに応じて利用者に優遇や制限を与える（公共交通機関の割引・制限、病院診察やビザ取得手続きでの優遇等）ことが行われている。特に Alibaba（阿里巴巴）が展開する信用スコア「芝麻信用」は中国内で利用者が 5 億人を超えるという電子決済サービス Alipay と連動しており、大きな存在感を示している [6]。

政府によるさまざまな行動の監視や信用スコアに基づく賞罰によって、品行方正に振る舞う人々が増え、犯罪・違反の抑制や迅速な逮捕にもつながるという効果が得られているという。中国の「金盾」「天網」「社会信用システム」そのものは、表現の自由やプライバシーを重んじる欧米・日本には適合しないシステムであるが、AI が組み込まれた社会の一形態として非常に興味深い。

[6] 日本国内でも 2017 年・2018 年から信用スコアに類するサービスが立ち上がりつつある。たとえば、みずほ銀行とソフトバンクが設立した J.Score では「AI スコア」を提供している。ただし、中国の「芝麻信用」とは性格が異なり、氏名・住所の情報を与えずに匿名で始めることができ、アンケートに答える形で、その個人の信用力や可能性をスコア化するサービスである。

（５）科学技術的課題

①「社会における AI」の課題抽出・目標設定に関わる研究開発課題

前述の IEEE EAD は、2017 年 12 月に公開された EADv2 に対する意見のフィードバックを受けて、2019 年に最終版となる EADv3 が公開される見込みである。それと並行して、IEEE-SA P7000 シリーズとしての国際標準化も進行中である。また、前述のような各国での検討に基づき、2017 年からは、OECD（経済協力開発機構）や G7 情報通信・産業大臣会合のような国際的な議論の場においても、AI に関わるガイドラインが議題として取り上げられるようになった。なお、日本の「人間中心の AI 社会原則（案）」も 2019 年 3 月策定後、OECD・G7 にて発信される予定である。

IEEE EAD 等と比較すると、日本のガイドラインはやや一般的・現実的な視点でまとめられている印象があり、長期的な AI の可能性や軍事・デュアルユース問題には踏み込んでいない。その背景として、IEEE EAD は非常に多様な人々が多数議論に参加していることがあげられる。国際的な原則・ガイドラインの策定のためのプロセスや議論の仕方等、議論の場のデザインにも目を向けていく必要がある [33]。

②「社会における AI」のための制度設計に関わる研究開発課題

研究開発の動向や注目動向のパートで取り上げたように、(1) プライバシー保護を含むデータ保護に関わる制度設計（PDS や情報銀行への対応も含む）、(2) AI に対応した知的財産戦略（訓練済みモデルや AI 生成物の扱い等）、(3) 自動運転に関わる制度整備に関しては、日本としての戦略・制度改革方針に沿って手が打たれつつあるが、まだ課題も残されており、引き続き検討・施策推進が求められる。

それら (1)(2)(3) 以外で、制度整備が急がれるものとして、ドローン等の小型無人機に関わる制度整備があげられる。これに関しては、小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会から 2018 年 6 月に「空の産業革命に向けたロードマップ 2018」[36] が公表された。このロードマップでは、小型無人機の飛行レベルについて、レベル 1：目視内での操縦飛行、レベル 2：目視内での自動・自律飛行、レベル 3：無人地帯での目視外飛行（補助者の配置なし）、レベル 4：有人地帯（第三者上空）での目視外飛行（補助者の配置なし）と定めている。そして、2018 年頃からレベル 3、2020 年代前半からレベル 4 の利活用を本格化させるとしている。そのための制度整備や実証環境整備として、空の産業革命に向けた総合的な検討、目視外・第三者上空飛行等の要件に関する検討、機体の性能評価基準の策定、無人航空機 JIS の策定、操縦・運航管理に係る人材等の育成、航空機・無人航空機相互間の安全確保と調和、ドローン情報基盤システム、福島ロボットテストフィールドの整備・活用、国家戦略特区制度による「規制のサンドボックス」制度の創設、電波利用の環境整備があげられている。

なお、国の制度設計においては、他国の動きもウォッチし、国際的な方向性との整合性・連動性も考慮していくことも必要である。

また、AI・ロボット技術の今後の進展を見据えて、その法的な課題が「ロボット法」という視点で議論されている [6), 37)]。将来に向けて重要な視点である。

③「社会における AI」のための技術開発に関わる研究開発課題

プライバシー保護技術については、匿名化技術や差分プライバシー技術から秘密計算の高速

化へ研究開発の中心が移ってきている。しかし、準同型暗号を用いた秘密計算は、暗号化されていても個人情報に該当し、データ主体の同意なしに処理することはできないという見解がある。また、改正個人情報保護法で新設された匿名加工情報も、実施に際しての具体的な仕組みが詰められておらず、活用は広がっていない。②の制度設計と③の技術開発が連動するように、取り組みを推進する必要がある。

また、機械学習の解釈性の問題に関しては、人間とAIの共存において重要なのは、解釈性よりも、むしろトラストではないかという見方もあり、問題設定をより高い視点から検討していくことも求められる。

自動運転に関して、②制度設計の面で論じたが、インタラクション／コミュニケーション技術の面の課題もある。特に、完全な自動運転に移行する中間的な段階で発生する問題として、レベル3で機械から人間にいきなり制御主体が切り替わる状況で人間はどう対応できるのか、人間が運転する車と自動運転車の混在する状況でどう相手を認識し、コミュニケーションするか、といった問題を考えていく必要がある。

④ AIと社会との相互作用に関わる研究開発課題

AI技術発展と社会変化のスパイラルを見据え、そのようなスパイラルを組み入れた社会システムの発展プロセスのモデル化や社会システム設計の方法論の研究開発にも取り組んでいく必要がある。その中で、上記の①「社会におけるAI」の課題抽出・目標設定、②「社会におけるAI」のための制度設計、③「社会におけるAI」のための技術開発を有機的に連携させていくことが重要である。また、職業の変化や人材育成・教育への取り組みも、その中で描いていくことが必要である。「AI社会論」[38]として取り上げられている問題も関係が深い。

（6）その他の課題

① 責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and InnovatŠn：RRI）

「社会におけるAI」への取り組みではRRIの考え方が不可欠である。RRIとは、新しい技術の創出・展開を進めるにあたって、生み出される成果が倫理的・法的・社会的に受容可能で、社会的価値・持続可能性等の面でも好ましいものであることを担保しながら取り組むことである。RRIは2000年代前半から欧米で議論されており、欧州のHorizon 2020においても政策的課題として重視されている。RRIを成り立たせる要件として、予見的であること（Anticipatory）、応答的であること（Responsive）、熟議的であること（Deliberative）、自己反省的であること（Reflective）があげられている[33), 39)]。

② ELSI・RRIに関する組織的な取り組み・支援体制

研究者のELSI・RRIに関する普及啓発（後期教養教育として幅広い研究者に対する継続的な教育実践を含む）や相談（事前検証と事後対応の両面）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。個々の研究者に自覚を持たせることは重要だが、ELSIガイドライン等を設定して研究者本人に任せるというだけでなく、組織的な支援体制作りが求められる。つまり、知的財産センターが研究者の知的財産の創造・保護・活用を多面的に支援・促進するのと同じように、ELSIについても継続的に支援する組織体制を作り、ノウハウを組織的に蓄積することが効果的である。

③ 人文・社会科学者の継続的な関与に向けた取り組み

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。欧州では人文・社会科学者が、Horizon 2020プロジェクトにおいて、人文・社会科学に対する賢明な投資が有益であると宣言した（ビルニウス宣言、2013年リトアニア）。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、継続的な取組みが必要である。

④ 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。AI関連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。

（7）国際比較

①「社会における AI」の課題抽出・目標設定、②「社会における AI」のための制度設計、③「社会における AI」のための技術開発、④ AI と社会との相互作用 という 4 つの活動のうち、①②を基礎研究、③④を応用研究・開発として扱い、下表にまとめる。

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	◎	→	人工知能学会、内閣府、総務省、経済産業省等による学会・政府主導のガイドライン策定が推進されてきた。内閣府「人間中心の AI 社会原則（案）」がまとまり、国際的に発信される予定。データ保護では、事業者間での轢転流通が認められる匿名加工情報の新設等を盛り込んだ改正個人情報保護法を施行。
	応用研究・開発	○	↗	NTT・NEC 等で秘密計算の研究開発・実用化が推進されている。PDS・情報銀行への取り組みも進んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	産業界主導で取り組み（FLI、OpenAI、Partnership on AI 等）が始まり、それを追うように学術界での取り組み（AI 100、IEEE EAD 等）が立ち上がった。EAD は IEEE 標準化を並行して進めており、国際的な影響力が大きい。
	応用研究・開発	◎	→	差分プライバシー、完全準同型暗号等、多くの理論的アイデアは米国の大学・企業の研究者から提案され、実装への取り組みも活発である。機械学習の解釈性に関する DARPA XAI、創造性に関する Google DeepDream 等、大学・企業の研究者層が厚く活発である。
欧州	基礎研究	◎	→	オックスフォード大学の FHI、ケンブリッジ大学の CSER 等、英国の大学・研究機関を中心に、比較的早い時期から取り組まれている。データ保護では、AI 処理の説明責任・透明性の要求や忘れられる権利等を盛り込んだ一般データ保護規則 GDPR を施行。
	応用研究・開発	◎	↗	プライバシー保護の基礎研究、匿名化技術を中心に著名な研究者がいる。ドイツを中心に、自動運転の制度設計への取り組みで先行している。
中国	基礎研究	△	→	2017 年 6 月に個人情報保護も含む中国インターネット安全法（中華人民共和国網絡安全法）が制定された。また、北京大学の ROBOLAW.ASIA というサイトでは、ロボットと AI の法律・倫理問題のさまざまな論考に取り組んでいる。
	応用研究・開発	△	↗	倫理・プライバシー保護面の取り組みは弱いが、AI 技術開発とその社会実装への取り組みは急成長している。中国独自の AI 監視・管理社会のための技術開発・システム化も注目される。
韓国	基礎研究	△	→	ロボットと人間との関係について定めたロボット倫理憲章の草案が 2007 年に産業資源部によって発表された。
	応用研究・開発	△	→	特に目立った活動は見られない。

（8）参考文献

1）科学技術振興機構 研究開発戦略センター、『ワークショップ報告書：知のコンピューティング ―人と機械が共創する社会を目指して― Wisdom Computing Summit 2013』、CRDS-FY2013-WR-05（2013 年 10 月）。
2）科学技術振興機構 研究開発戦略センター、『ワークショップ報告書: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」報告書』、CRDS-FY2014-WR-09（2014 年 10 月）。
3）科学技術振興機構、「激論！先端 ICT の光と影」、サイエンスアゴラ 2014 ワークショップ（2014 年 11 月）。
4）松尾豊・西田豊明・堀浩一・武田英明・長谷敏司・塩野誠・服部宏充・江間有沙・長倉克枝、「人工知能と倫理」、『人工知能』（人工知能学会誌）31 巻 5 号（2016 年 9 月）、pp. 635-641。
5）江間有沙、「「人工知能と未来」プロジェクトから見る現在の課題」、『人工知能学会第 29 回全国大会』2I5-OS-17b-1（2015 年）。DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2015.0_2I5OS17b1
6）弥永真生・宍戸常寿（編）、『ロボット・AI と法』（有斐閣、2018 年）。
7）総務省情報通信政策研究所、「AI ネットワーク社会推進会議報告書 2018 － AI の利活用の促進及び AI ネットワーク化の健全な進展に向けて－」（2018 年 7 月 17 日）。
8）中川裕志・高崎晴夫・石井夏生利・森亮二・佐古和恵・神嶌敏弘・高橋克巳、「特集：パーソナルデータの利活用における技術および各国法制度の動向」、『情報処理』（情報処理学会誌）55 巻 12 号（2014 年 11 月）、pp. 1333-1380。
9）総務省、『情報通信白書（平成 30 年版）』（2018 年）。
10）福地一斗、「公平性に配慮した学習とその理論的課題」、『第 21 回情報論的学習理論ワークショップ』（IBIS2018；2018 年 11 月 6 日）。
11）神嶌敏弘、「Fairness-Aware Data Mining」、2018 年。http://www.kamishima.net/archive/fadm.pdf (accessed 2019-01-18)
12）Riccardo Guidotti, Anna Monreale, Salvatore Ruggieri, Franco Turini, Dino Pedreschi and Fosca Giannotti, “A Survey Of Methods For Explaining Black Box Models”, arXiv:1802.01933 (2018).
13）David Gunning, “Explainable Artificial Intelligence (XAI)”, DARPA Program Update, November 2017. https://www.darpa.mil/attachments/XAIProgramUpdate.pdf (accessed 2019-01-18)
14）高野敦、「もうブラックボックスじゃない、根拠を示して AI の用途拡大」、『日経エレクトロニクス』2018 年 9 月号（2018 年）、pp. 53-58。
15）Latanya Sweeney, “k-Anonymity: A Model for Protecting Privacy”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* Vol. 10, Issue 5 (October 2002), pp. 557-570. DOI: 10.1142/S0218488502001648
16）Cynthia Dwork, Frank McSherry, Kobbi Nissim and Adam Smith, “Calibrating Noise to Sensitivity in Private Data Analysis”, *Proceedings of Third Theory of Cryptography Conference* (TCC 2006; New York, USA, March 4-7, 2006), pp. 265-284. DOI: 10.1007/11681878_14
17）竹之内隆夫・高橋克巳・菊池浩明（編）、「特集：安全なデータ活用を実現する秘密計算技

術」、『情報処理』（情報処理学会誌）59 巻 10 号（2018 年 10 月）、pp. 872-915。
18）Carl Benedikt Frey and Michael A. Osborne, “The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation?”, (September 17, 2013). https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf (accessed 2019-01-18)
19）Sam S. Adams, Itamar Arel, Joscha Bach, Robert Coop, Rod Furlan, Ben Goertzel, J. Storrs Hall, Alexei Samsonovich, Matthias Scheutz, Matthew Schlesinger, Stuart C. Shapiro and John F. Sowa, “Mapping the Landscape of Human-Level Artificial General Intelligence”, AI Magazine (Spring 2012), pp. 25-42. （和訳：篠田孝祐・市瀬龍太郎・ジェプカラファウ・寺尾敦・船越孝太郎・松島裕康・山川宏、「人間レベルの汎用人工知能の実現に向けた展望」、『人工知能』（人工知能学会誌）29 巻 3 号、2014 年 5 月、pp. 241-257）
20）Nick Bostrom, Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies (Oxford University Press Keith Mansfield, 2014).（邦訳：倉骨彰訳、『スーパーインテリジェンス：超絶 AI と人類の命運』、日本経済新聞出版社、2017 年）。
21）中川裕志、「AGI の群雄割拠」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 3 号（2018 年 5 月）、pp. 351-356。
22）Alexander Mordvintsev, Christopher Olah and Mike Tyka, “Inception-ism: Going Deeper into Neural Networks”, Google AI Blog (17 June 2015). https://ai.googleblog.com/2015/06/inceptionism-going-deeper-into-neural.html (accessed 2019-01-18)
23）Leon A. Gatys, Alexander S. Ecker and Matthias Bethge, “A Neural Algorithm of Artistic Style”, arXiv:1508.06576 (2105).
24）“The Next Rembrandt”, https://youtu.be/IuygOYZ1Ngo (accessed 2019-01-18)
25）Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville and Yoshua Bengio, “Generative Adversarial Networks”, arXiv:1406.2661 (2014).
26）Jean-Pierre Briot, Gaëtan Hadjeres and François Pachet, “Deep Learning Tech-niques for Music Generation - A Survey”, arXiv:1709.01620 (2017).
27）徳井直生、「Deep Learning を用いた音楽生成手法のまとめ［サーベイ］」、medium (Nov 21, 2017)。
28）IT 総合戦略本部 データ流通環境整備検討会「AI、IoT 時代におけるデータ活用ワーキンググループ　中間とりまとめ」（2017 年 3 月）。
29）知的財産戦略本部 検証・評価・企画委員会 新たな情報財検討委員会、「新たな情報財検討委員会報告書 ーデータ・人工知能（AI）の利活用促進による産業競争力強化の基盤となる知財システムの構築に向けてー」（2017 年 3 月）。
30）丸山宏・城戸隆、「機械学習工学へのいざない」、『人工知能』（人工知能学会誌）33 巻 2 号（2018 年 3 月）、pp. 124-131。
31）高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議、「自動運転に係る制度整備大綱」（2018 年 4 月 17 日）。
32）高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議、「官民 ITS

構想・ロードマップ 2018」（2018 年 6 月 15 日）。
33）江間有沙、「倫理的に調和した場の設計：責任ある研究・イノベーション実践例として」、『人工知能』（人工知能学会誌）32 巻 5 号（2017 年 9 月）、pp. 694-700。
34）江間有沙・長倉克枝、「「倫理的に調和した設計」の論点整理 ―異分野・異業種によるワークショップからの示唆―」、『情報法例研究』第 4 号（2018 年 11 月）、p. 3-14。
35）Edmond Awad, Sohan Dsouza, Richard Kim, Jonathan Schulz, Joseph Henrich, Azim Shariff, Jean-François Bonnefon and Iyad Rahwan, “The Moral Machine experiment”, *Nature* Vol. 563 (2018), pp. 59-64. DOI: 10.1038/s41586-018-0637-6
36）小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会、「空の産業革命に向けたロードマップ 2018：小型無人機の安全な利活用のための技術開発と環境整備」（2018 年 6 月 15 日）。
37）Ugo Pagallo, The Laws of Robots: Crimes, Contracts, and Torts (Springer, 2013).（邦訳：新保史生・松尾剛行・工藤郁子・赤坂亮太訳、『ロボット法』、勁草書房、2018 年）。
38）高橋恒一・井上智洋（編）、「特集：AI 社会論」、『人工知能』（人工知能学会誌）32 巻 5 号（2017 年 9 月）、pp. 640-700。
39）平川秀幸、「責任ある研究・イノベーションの考え方と国内外の動向」、文部科学省 安全・安心科学技術及び社会連携委員会（第 7 回）資料 4-3（2015 年 4 月 14 日）。

2.2　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、安心安全で QoL 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。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る。

電気仕掛けという意味で近代的なロボットの研究開発の歴史を振り返る。ロボットは、1962 年の産業用ロボットに始まり工場内の工程の自動化の実現を目指し、画像認識や学習機能を実装することで定型的な作業を正確に休まず実施できるレベルになってきた。また人間や動物の運動能力を模倣するロボットも登場した。90 年代になると工場で働く産業ロボットだけでなく、一般社会や家庭で働く知能ロボットの研究開発が盛んになった。2000 年代に入るとロボットの適用はさらに広がり、手術支援ロボットやロボット掃除機も開発された。また、2010 年台には一段と進歩した人工知能を搭載し自らの行動を判断、決定し動作する知能ロボットが、家庭用ロボットや人型ロボットとして、人間と知的なインタラクションが可能なパートナーとして存在に期待が高まっている。以上のトレンドは、技術の発展、実社会への浸透、および、人間との共生という 3 つの観点で捉えることができる。

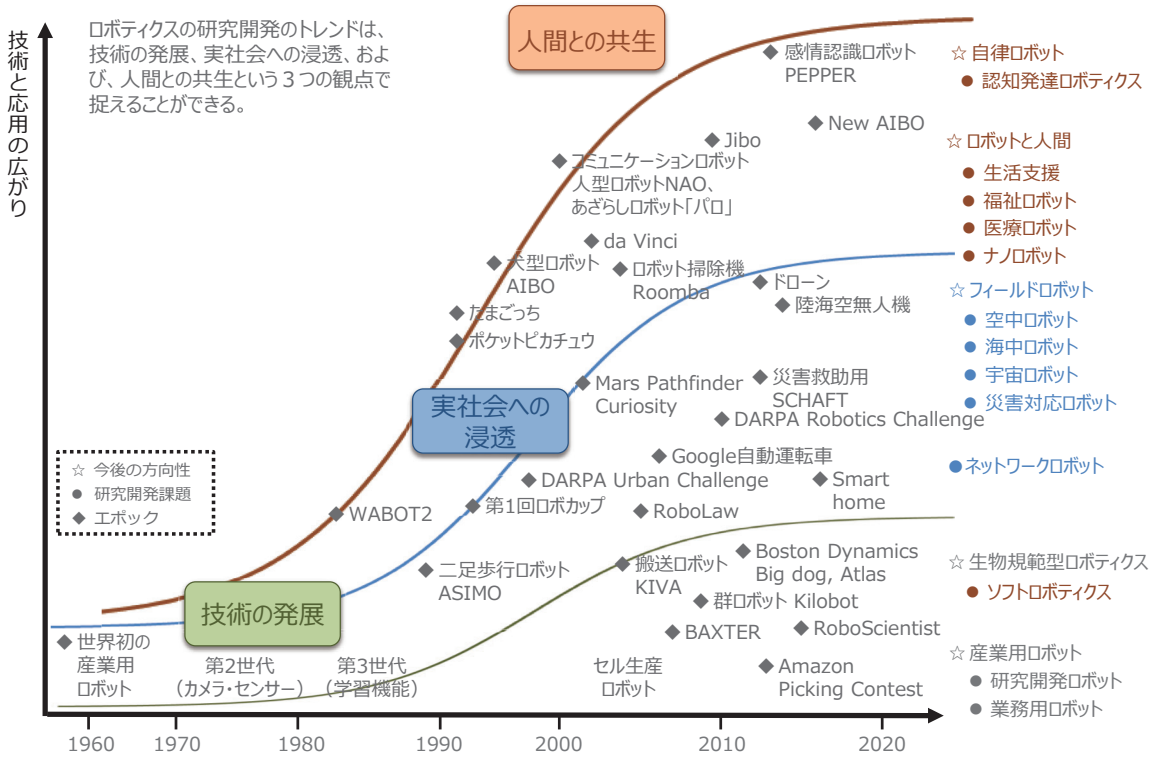


図2-2-1　ロボティクスの研究開発のトレンド

ロボティクスの研究開発領域を本俯瞰区分では図 2-2-2 に示すように応用領域、機能コンポーネント・統合化技術、および基盤技術のスタックに整理した。その上で今回の俯瞰報告書では、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 12 の研究開発領域を採り上げることとした。

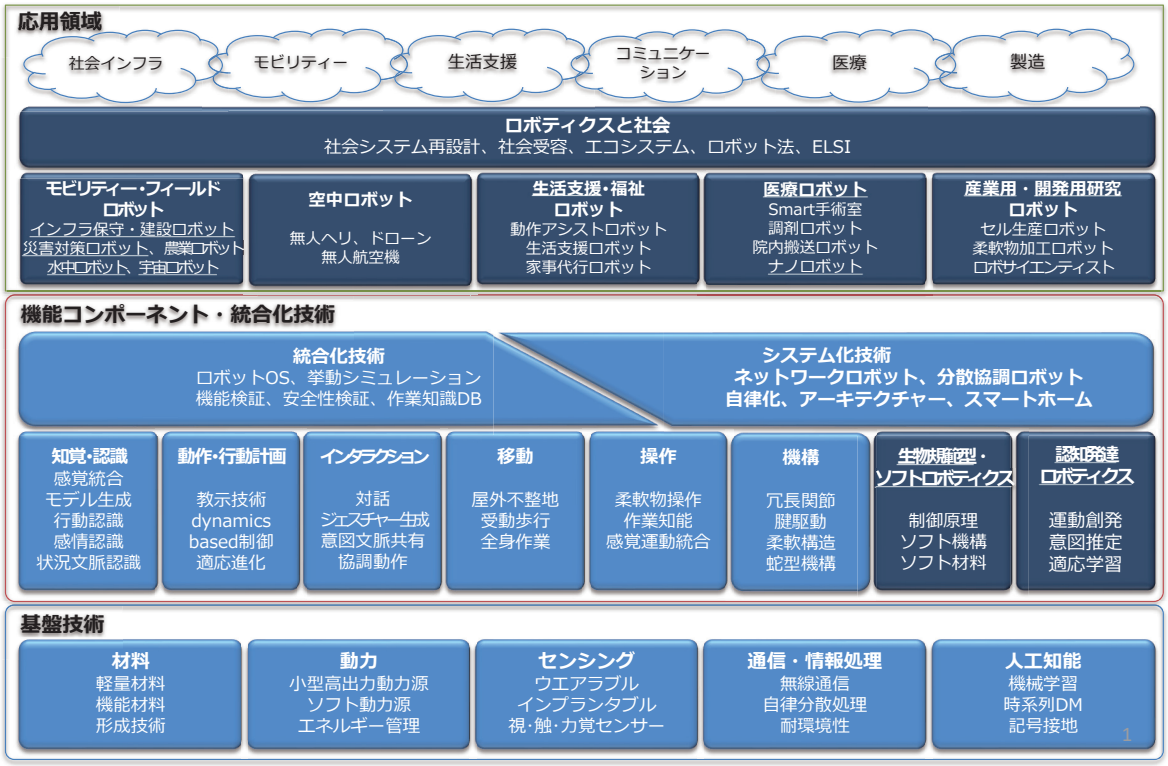


図2-2-2　ロボティクスの俯瞰図

① 認知発達ロボティクス

認知発達ロボティクスは、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成的な理解と、その理解に基づき人間と共生するロボットの設計論を確立する研究開発領域である。中核となるのは、ロボットの身体性とそれに基づく社会的相互作用である。その発展形が構成的発達科学である。

② 生活支援ロボット

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技術の確立を目指す研究開発領域。食事・排泄・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、家事・外出といった屋内外、健康管理やコミュニケーション、道具を用いた作業を含む手段的日常生活動作に関する自立支援、支援者支援、就労・社会参加支援を含む。IoT 技術の融合を確立していく段階にある。

③ 医療ロボット

医療ロボットは、ロボット工学の医療への活用であり、既に様々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いながら、治療あるいはその支援を目的とするもの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。

④ 海中ロボット

海中ロボットとは、人がいけない海中での調査観測や作業を行うロボットである。10m 以下の浅い海ならば、人はなんとか潜れるが、それ以上の深い海になると人は簡単にはいけない。地球環境を支配する海水、地震、津波の発生源である海底、水産資源を産む海、など知らなければならない海中の諸項目はいくらでもあり、また、石油やガスを生み出す宝の山である。人に代わってそこにでかけていき、何かをするのはロボットである。

⑤ 宇宙ロボット

「宇宙ロボット」は、宇宙開発および月惑星探査を目的として宇宙空間で使用されるロボットである。地球を周回する国際宇宙ステーションにおける作業や、軌道上の宇宙ゴミ（スペースデブリ）等の捕獲回収を目的とした「軌道上宇宙ロボット」および、月や惑星などの天体表面を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別される。

⑥ インフラ保守・建設ロボット

日本では、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。また、近年、自然災害が多発しており、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題である。一方、建設分野においては、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。これらの問題を解決するため、ICT やロボット工学を用いた点検や調査、建設における自動化や省人化が期待されている。

⑦ 災害対応ロボット

地震、津波、集中豪雨による水害、台風による暴風雨、山崩れ・地滑り、森林火事、竜巻、火山の噴火、土石流などの様々な自然災害および工場でのプラント事故、原子力発電所の事故、公共交通機関での事故、テロによる事故などの様々な人為災害が世界で頻繁に発生している。これらの災害現場に人間が入っていくには大きなリスクがある。人間の代わりの災害直後の現場に進入し、情報収集や人命救助などの緊急対応や災害からの復旧復興に関わるタスクを遂行する極限環境で有用なロボット技術を災害対応ロボットと定義する。

⑧ ソフトロボティクス

ソフトロボティクスは、柔軟材料に特有の機械的・電気的・化学的性質を積極的に利用したロボットシステムに関する新興の学術分野である。「ソフト」は物質的な柔軟性（ソフトネス）を意味する。主要な研究テーマとして、柔軟材料を利用した新しいロボット機構の探索、やわらかいロボットのモデル化と制御、柔軟物体の操作、生物規範型ソフトロボットを用いた生物の振る舞いの原理解明が挙げられる。接触安全性の付加や、高分子材料の多用による製造コストの低減などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。高分子材料学、生体力学、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。

⑨ 生物規範型ロボティクス

生物は進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して、優れた機能や能力、構造を獲得してきた。これらの中には未だわれわれが知り得ぬ非自明なカラクリが伏在しているはずである。生物規範型ロボティクスは、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを志向する研究開発領域である。

⑩ 産業用ロボット

産業用ロボットとは、国際標準化機構（ISO）によれば「3 軸以上の自由度を持ち、自動制御、

プログラム可能なマニピュレーター」となる。一般的に工場で利用されているロボットアームであり、作業の前に教示された位置に自動的に移動する繰り返し作業を実行する。従来の位置のみ教示再生方式で構築されてきた産業用ロボットシステムに、カメラなどの外界情報の導入や力を制御する技術の確立が必要となっている。

⑪ 研究開発用ロボット

高度なロボット技術を活用し、バイオ・ライフサイエンス研究生産性の向上を目指した技術開発。すなわち、ロボットにより多岐にわたる研究開発・バイオ産業に必要な作業を自動化し、データ再現性の向上を目指すとともに、少子化により深刻化する人材確保と育成の問題を克服する研究開発。また、ロボットにより、品質の高いデータを大量に得ることにより、人工知能（AI）が必要とする学習データを高効率に取得することを目指す研究開発も本領域に含まれる。

⑫ ナノロボット

20 年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いナノロボティクスは 10 年足らずの挑戦的研究分野であるため、厳密な研究分野の定義は存在しない。名称にナノという寸法サイズが入っているが、ナノロボットと称していても、実際は数 mm ～ 0.1mm 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 0.1mm 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。

２．２．１　認知発達ロボティクス

（１）研究開発領域の定義

認知発達ロボティクスの目的は、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成的な理解と、その理解に基づき人間と共生するロボットの設計論を確立することである。その中核となるのは、ロボットの身体性とそれに基づく社会的相互作用である。その発展形が構成的発達科学であるが、目指すところはほぼ同じである。基本的な神経構造から始まり、身体性や社会的相互作用に基づき、学習手法を介して、機能分化が段階的に生じる過程を描いている。新たな理解や洞察の獲得を目的としているので、知識の創出がターゲットとみられがちだが、技術の確立が表裏一体であり、分けては行けないことが、認知発達ロボティクスの基本的な考え方である。

（２）キーワード

身体性、社会的相互作用、ボディイメージ、ボディスキーマ、痛覚、共感、意識、学習、発達

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

近年、目覚ましい進展を遂げ、分野を拡張しつつある広い意味でAIの観点からロボティクスの役割と意義の説明を通じて、認知発達ロボティクスの意義の明確化を試みる。この観点から、最初に現状の深層学習の状況を再認し、認識系のデータ量、結果、応用範囲の豊富さに比して、運動系が量的にも質的にも貧素であることを指摘する。そして、それを打破する可能性を示す例を紹介し、残された課題等を列挙する。これを解決する一つとして、認知発達ロボティクスの考え方を導入する。認知発達ロボティクスの思想的背景である人間の心と身体や事物との関係に関する歴史的流れを概説する。それは、ロボットの持つ身体性や社会的相互作用の能力が、AIの一つの究極的課題である人工意識に結実されるのではないかという期待からである。それにより心の設計課題が浮き彫りになると予想される。そして、認知発達ロボティクスのゴールである、人間の認知発達過程の理解の一つの側面として、ロボットが自己という概念を持つ可能性を検討する。自己概念の発達的形態として、生態学的自己、対人的自己、社会的自己を形成する機構を検討する。それぞれの段階での課題を列挙し、ロボットの身体性にもとづく、身体表象、自己感覚、共感などの社会的相互作用などに関連する認知発達ロボティクスのアプローチを紹介する。前半が計算神経科学的側面が中心であり、後半は、認知発達過程の計算原理としての予測学習規範を紹介し、その可能性を検討する。そして、最後に人工意識のあり方を議論する。

［研究開発の動向］

深層学習の現状

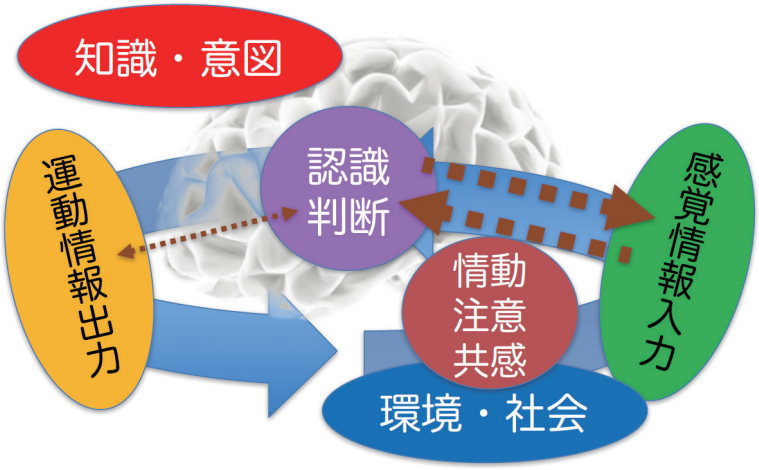


図2-2-3　深層学習の現状の適用範囲

深層学習の現状の適用範囲を図 2-2-3 に示す。随時、更新改良がなされているので、すぐに古くなることを覚悟で示す。深層学習は、元々、ヒトの視覚システムのモデル化から始まっているので、音声も含めたマルチモダルな感覚情報からの認識・判断が得意で有り、言語データとも組合せた音声や画像の出力も可能である。方や、運動出力に関しては、その厚みがない。理由は、画像の場合、数千万枚のデータが利用可能だが、ロボットの試行回数には限界があるからである。運動出力とのパイプが太くなることで、初めて、環境を含んだループが完成し、入力（感覚）から出力（運動）への即応的な応答（自動的かつ無意識的な行動）が可能になる。最近、やっとロボットの行動生成への適用が出始めている。これらに関しては、以下で簡単にふれる。

深層学習によるロボットの運動生成：深層学習では、主に多様な感覚情報からの認識・判断の学習がメインであり、優れた成果が出ていることから、これをロボットの運動生成に応用する際に、以下の 2 つの考え方がある。

① これまで困難と想定されていた視覚情報処理の部分に適用し、正確な物体認識や分割領域情報を用いて、従来のロボティクスの枠組で解決する場合（例：[1), 2), 3)]）。

② 図 2-2-3 に示したように、ロボット学習の枠組み、すなわち感覚・運動ループの中で深層学習の手法を適用する場合（例：[4), 5), 6), 7), 8)]）。

国際会議での技術動向

認知発達ロボティクスに最も関連する国際会議として、発達・学習とエピジェネティック・ロボティクス国際会議（International Conferene on Development and Learning and Epigenetic Robotics: ICDL-EpiRob）が 2018 年 9 月早稲田大学で開催された。発表された論文や併催されたワークショップのキーワードの上位 3 つは以下であった（図 2-2-4 参照）。

・Sensorimotor development
・Machine Learning methods for robot development
・Human-human and human-robot interaction and communication

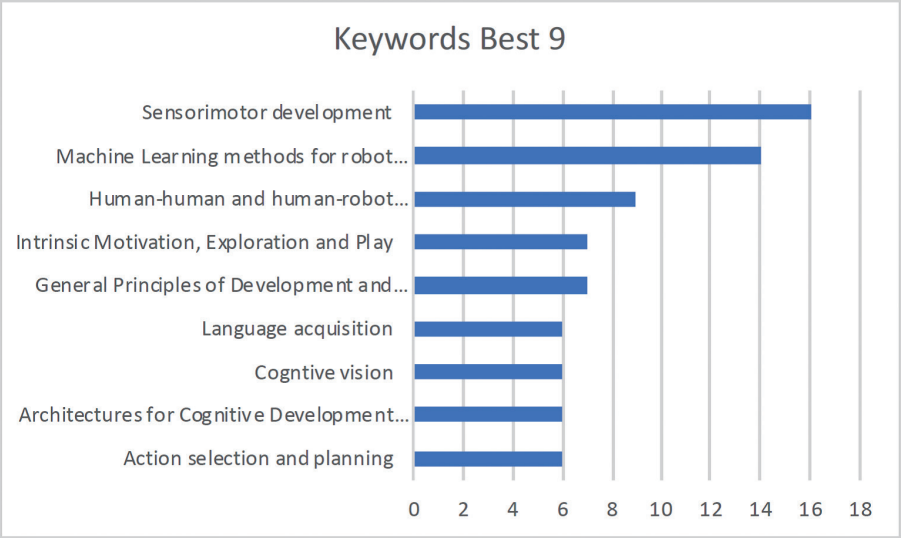


図2-2-4　ICDL-EpiRob2018における上位キーワード

第1位の感覚運動発達は、本会議のメイントピックであり、長年一位を保ってきているが、深層学習の興隆を受け、機械学習が猛追している。第3位は、通常のロボットの国際会議（ICRA やIROS ）では、ヒューマン・ロボットインタラクションに相当し、これらの会議でも上位を占めているが、本会議では、ヒューマン・ロボットインタラクションの元となる人間対人間のコミュニケーションに焦点をあてており、人間の認知過程の構成的理解を推進している証と思われる。因みに2018年10月にスペインマドリードで開催された知能ロボットとシステムに関する国際会議（IROS）では以下の5つがトップに上がっており、同年5月にオーストラリア・ブリスベンで開催されたロボットとオートメーションに関する国際会議（ICRA）のトップ5位とほぼ同じである。第5位のAutonomous Vehicle Navigationは自動運転に相当し、それに必要な技術がSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）である。

1. Deep Learning in Robotics and Automation
2. Motion and Path Planning
3. Localization（ICRAでは4位）
4. Learning and Adaptive Systems（ICRAでは3位）
5. Autonomous Vehicle Navigation（ICRAではSLAM）

ICDL-EpiRob会議に話題を戻すと、開催地の利で、日本が最も採択論文が多く、続きドイツ、フランス、中国と続くが、今回、米国からの投稿論文が激減しており、米国でのこの分野の研究が衰退してきたのかは、次年の結果をみなければ不明であろう。欧州勢は欧州内での共同研究が盛んであり、また日本の研究グループとの共同研究成果もあり、学際的研究テーマが国際的にも融和を図っている。フランスはSoftBank Robotics社からの発表が目立った。SoftBank Robotics社といっても日本ではなく、元のAldebaran社の本拠地のパリから発表であった。中国はAI/ロボティクス分野に恐ろしい勢いで投稿数を伸ばしている。ただし、認知

発達ロボティクスの分野への関心はあまり高くなく、まだ気がついてない模様で、既存分野に勢力を注いでいるようである。

（4）注目動向
[新展開・技術トピックス]

（a）予測誤差最小化原理による社会的相互作用創発

社会的認知機能の発達を統一的に説明する理論として、感覚・運動信号の予測学習に基づく計算モデルが導入されている[9]。認知発達のさまざまな側面を統一的に扱おうとする試みである。

予測学習とは、身体や環境からのボトムアップな感覚信号と、脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する感覚信号の誤差を最小化するように内部モデルを更新したり、環境に働きかけたりすることである。認知発達過程に適用する際、2つの過程が考えられる。一つは、自己の感覚・運動経験を通した予測器の更新による予測誤差の最小化過程で、自他認知、目標指向動作などが含まれ、認知発達初期過程に対応する。それに対し、社会的な環境では、予測した運動の実行による他者運動起因の予測誤差の最小化が課題で、模倣や援助行動などが対象である。以下では、前者の例として、ミラーニューロンシステムの発達を、後者の例として、他者行動の予測から利他的行動に至る過程を紹介する。

MNSの発達

MNS（Mirror Neuron System）については、AI白書の2017年版[10]の1.3.3.2の「ミラーニューロンシステムと社会性発達基盤」に詳しい。簡単に言えば、自身の行為の実行と他者による同一行為の観測を同一のニューロンが符号化しており、これがマカクサルのF5と呼ばれる運動前野で発見された[11]ことに由来する。人間も同様のシステムを有しているのではないかということで、システムと称されている。

MNSが生得的か生後の環境での学習・発達によって獲得されるかの議論は尽きない。認知発達ロボティクスの立場としては可能な限り後者の立場をとり、説明可能なモデルを構築してきた。

MNSについては、Kawai et al.[12]が、発達モデルを提唱している。視覚発達をともなう感覚運動学習がMNS発達を促進するという仮説の下に、未熟な感覚の時期には自他が混同されるが、発達に伴い自他分離が起こり、これがMNSの基盤となっている主張である。言語の習得を始めとして、乳幼児の未熟であるがゆえに、さまざまな認知機能の学習を促進していることが示唆されているが[13]、その計算モデル化の一つと言えよう。もう一つ、養育者側がそれを明示的・非明示的にサポートしていることも忘れてはならない。MNS創発の場合、他者（養育者）が、赤ちゃん（ロボット）の真似をしてくれることが前提となっている。

他者視点取得の困難さ

MNSが発達したことで、相手の行動観察から、自己の運動が励起され、そのことにより相手の行動の目的が予測可能になると期待される。上記の例では、簡単な運動に限っていたので、

識別が容易であったが、複雑な動きに対しては、どのように考えられるだろうか？自他分離が可能になったことで、「自己の気付き」の段階に入ってきた。そして次の段階として「他者視点取得（Perspective Taking）」の課題が上がってくる。すなわち他者の視点に立てるかという課題である。同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、座標変換の課題とも捉えられる。頭頂葉で自己座標系と他者座標系の変換が行われているようだ[14]が、発達の観点から、生得的と考えるよりも生後の学習の結果として変換プログラムが構築されたと見なしたい。とすれば、いかにして可能か？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[15]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で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。ただし、これは、サルの場合に対応し、ヒトの場合は、より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。その際には、並行する他の認知機能の発達との兼ね合い（独立か、相互促進か、干渉か）も、構成的手法の観点から興味深い課題である。

まず、自己の運動生成経験に基づく他者運動の予測課題では、最初に自己の運動生成経験を通した感覚・運動信号の予測学習を実施し、その後、自己の運動経験に基づく他者運動の予測が可能になる[16]。

次に、社会的行動の一種である利他的行動の創発について考えよう。発達心理学の分野では、14ヶ月の乳幼児が利他的行動を示すこと言われている[17]。そこでは、乳幼児は社会的信号（視線や発話）や、利他的行動に対しての報酬を受けずに、自発的に実験者を助けようとする。この過程が先に示した自己の予測器を利用した他者運動の予測と、他者起因の予測誤差を引き金とした運動の生成に対応し、これが結果として利他的行動に映ると考えられ、その過程の計算モデル化が行われた[18]。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

（a）認知ミラーリング

前節で紹介した予測符号化に基づく発達原理を追求しているプロジェクトがある。人の感覚から運動に至る認知過程を鏡のように映し出し観測可能にする情報処理技術として、認知ミラーリングシステムの開発を目指しており、計算論的モデル研究と発達障害当事者研究を融合し、脳の本質的機能とされる予測符号化理論に基づき認知（障害）原理とその機序を明らかにすることを狙っている。本原理をもとに開発するシステムによって発達障害者の認知過程の自己理解と社会的共有を可能にすることで、これまでに類のない当事者視点からの支援と合理的配慮の設計の実現を目指している。

JST戦略的創造研究推進事業（CREST）[知的情報処理]「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」（平成28-33年度、研究代表者：長井志江）
http://cognitive-mirroring.org

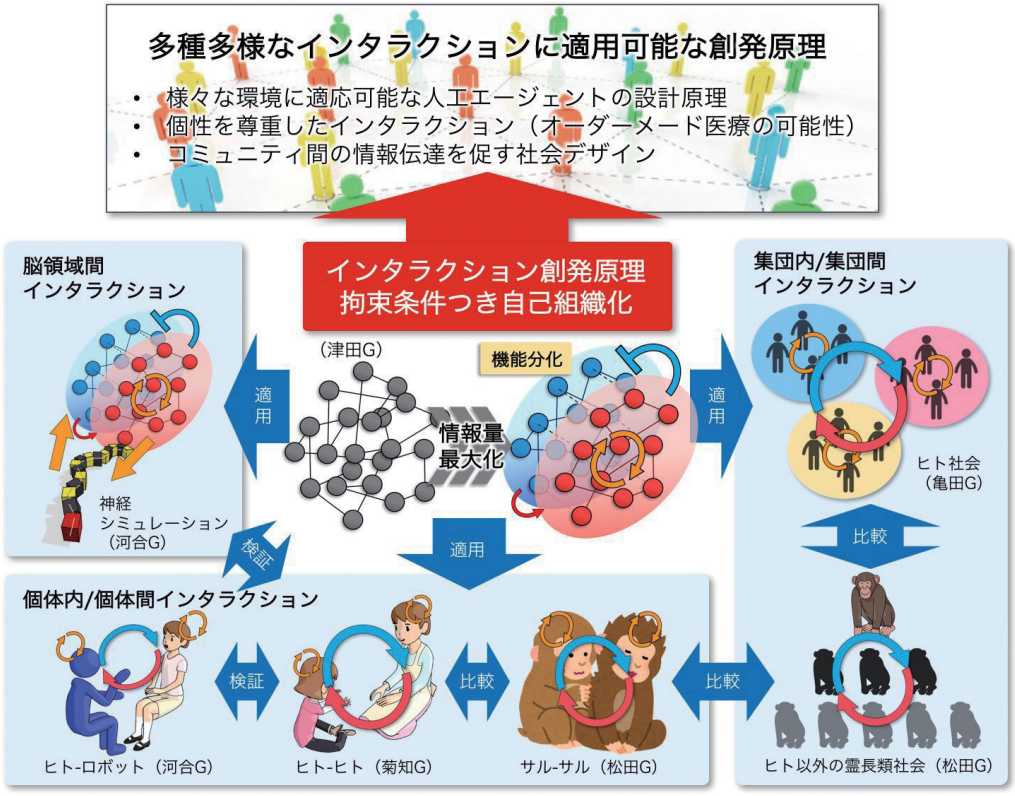


図2-2-5　機能分化プロジェクトの研究体制

（http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/kawai/crest/ より）

（b）機能分化の創発原理

前章の身体と神経の結合ダイナミクスの研究で、情報ネットワークのサブネットワーク構造の機能（個々のサブネットワークの働き及びそのクラスターとしての働き）は明らかではない。その情報理論的な原理として、Yamaguti and Tsuda[19] は、脳のヘテロなモジュール構造進化の数学的モデルを提唱している。これにもとづき、創発インタラクションを進化から発達までの拘束条件のもとで、種々の時空間スケールで解き明かそうとするプロジェクトが始まっている。

JST 戦略的創造研究推進事業（CREST）[共生インタラクション]「脳領域／個体／集団間のインタラクション創発原理の解明と適用」（平成 29-34 年度、研究代表者：津田一郎）http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/kawai/crest/

研究代表者の津田は、創発インタラクションの必須概念として、自律性、汎化性、共感や自己意識、動機づけ、時間の概念などを列挙し、上記プロジェクトで、脳領域、個体、集団のそれぞれのレベルやスケールでの相互作用の創発から生じる機能や現象としての意識のあり方が模索されている。

（5）科学技術的課題

先の「深層学習の現状」で示したように、感覚運動ループによる学習は、環境内での行動学習の基本であると同時に、知識・意図の拘束条件が加わることで、専門家のスキル（経験知に

よる行動規範）として獲得される。また、身体が環境にさらされることで、限られたリソースの下で、実時間の応答の要求に応じるために、関連しないものを処理対象としない注意が必要になり、さらに、社会的な環境の中での他者のやり取りを通じ、情動、そして共感などのメンタルな機能が人工システムにも芽生える可能性がある（図 2-2-3 参照）。この課題を追求してきたのが、認知発達ロボティクスである。

特に、身体性の思想そのものは、哲学者 Maurice Merleau-Ponty により 1945 年に書かれた名著 “Phenomenolgie de la perception”（英語訳名は” Phenomenology of Perception”；日本語訳名は『知覚の現象学』[20), 21)]）がその礎であろう。メルロー＝ポンティは、主観と客観に加えて身体性という次元が創発し、そこでは、同じ肉厚の身体が、触れたり見たりする主体と同時に触れられたり、見られたりする物体にも与えられうるとし、主観と客観の２つの極の間の繰り返される交流の場を身体が与えると主張する。すなわち、客観的物理世界と主観的経験をむすぶメディアとしての身体の重要性を指摘している。これは、認知発達ロボティクスにおける「身体性」の基本概念の根幹である。

この身体性の概念を主客の間の投影とみなし、物理的身体からの拘束を緩める「脱身体」の議論を青山学院大学の鈴木宏昭らが始めている[22)]。プロジェクション科学と呼ばれ、認知科学的視点からの身体性の再考を促している。この視点からの発展とは、若干異なるが、イタリア技術研究所（IIT）の Giulio Sandini 教授らのグループでは、人間自体の社会性の課題をロボットとの相互作用を通じて解き明かし、ロボットを始めとする人工物との共生社会のあり方を問うている[23)]。

継続かつ蓄積型の学習過程により広範な経験の符号化をエピソード記憶として保持し、現在直面しているシーンからの断片的情報を駆使して、人間の行為観察や言語情報と合わせて、過去の連想記憶を掘り起こし、人間との協働作業を遂行している。彼らは、その他の関連研究も含め、人工物であるロボットは人間の脳のあり方に拘束されることなく、クラウドなどのネットワークも利用すべきと主張している。

このような動向を考えると、今後の方向性として、以下の 2 つがポイントと考えられる。

③ 人間とロボットを含んだ環境での行動心理学的な側面の実験やこれを補足するイメージングなどの神経科学的実験、さらには計算モデルを駆使した検証実験など、人間を含んだ多様な実験・解析・統合を通じた認知発達ロボティクスの原理となる構成的発達科学を確立させる方向。

④ 身体性の拡張を物理世界からクラウドのネットワーク空間に伸ばすことで、人間サイドからの人工物へのアプローチがより重みをます傾向。これは、Andy Clark の著書” Natural-Born Cyborgs”（日本語訳名は『生まれながらのサイボーグ』[24)] を彷彿とさせる。

（６）その他の課題

浅田[25)] は、痛みの神経回路をロボットに埋め込むことで、痛みの感覚が、MNS を通した他者の痛みへの共感、さらには、モラル、倫理の創発に繋がるとの仮説を立てており、これが意識の課題と関連し、さらには、法制度の問題にも発展すると以下のように主張している。

身体には、上記の痛覚回路が内在し、触覚とは異なる痛みを検知することが可能とする。また、社会的相互作用の前提として、自他認知過程を通じ、他者の運動や知覚を推定しようとする傾向があるとする。これらに基づき、これまでの認知発達ロボティクスの研究が系列的に結び付くことで、共感の発達、そしてモラルの発生の可能性を示す。さらに、「人工システムが道徳的行為者や受益者になり得るか」などの倫理的な側面、さらには、「人工システムが自身の過失に対して責任をとれるか」などの法制度の課題にも言及し、すでに現代社会に浸透している人工システムとの未来共生社会を議論する必要がある。

関連するプロジェクトとして、JST RISTEX の「人と情報のエコシステム」の研究プロジェクトで、浅田が代表を務める「自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格」（http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/ristex/）がある。このプロジェクトでは、近年の AI 技術は、人工システムやロボットにおけるある種の自律性を可能にし、ちょうど親離れした子供のように設計者が予測できない行動を表出する可能性があることを指摘する。このような状況では、現在の法制度では設計者か利用者が過度な法的責任を負わされる恐れがあり、健全な科学技術の進展を阻害する可能性がある。そこで、人工システムの自律性をその目的の有無やその書き換え可能性に準じて三段階程度を想定し、従来の法人格論の分析を通じて、これらの段階に応じた法的取扱モデルを考案する。さらに、既存の責任理論の問題点を指摘し、リーガルビーイングズ（Legal Beings）としての人工システムに対する新たな制度を提案する。また、未来社会で起きそうな人工システムの過失を想定したビデオを作成し、一般社会がどのように受け入れるかを調査して、一般社会になじんだ法整備案を提案し、自律性の概念の深化と未来社会に通用する人工システムとその環境を提示することを目的としている。同じ RISTEX の他のプロジェクトとも協働し、心理学的側面、哲学的側面も含め、人工システム全般が社会に及ぼす影響を含めた議論を展開している。

（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	○	→	認知発達ロボティクスの提唱国であり、基礎研究に関しては、活動レベルが維持されている印象を受ける。発達を直接あつかうことの困難さがあり、原理モデルの獲得が試みられているが、まだ決定版はなく、模索している意味で現状維持である。
	応用研究・開発	◎	↗	発達の部分よりも認知の側面の応用研究としては、JST CREST の鈴木健嗣（筑波大学）プロジェクト「ソーシャル・イメージング」[26] が挙げられる。鈴木代表自身が認知発達をイメージしているかどうかは別として、さまざまなデバイス開発を通じて、身体性の意味と社会性を織り交ぜた興味ある研究を行っており、討論の価値はある。その他、先に示した「認知ミラーリング」においても、自閉症者への支援システムの開発がなされている。
米国	基礎研究	△	↘	深層学習（DL）に代表される AI 研究の興隆の勢いにおされ、多くの研究者が DL 関連の研究に傾倒している。計算神経科学者は多いが、認知発達の根源的な研究との関連を行っている研究者は少ない。
	応用研究・開発	△	↘	基礎研究と同様、DL の応用研究は多いが、ブラックボックスとしての利用が大半で、残りの枠組みは既存であり、新鮮味が少なく、認知発達の応用的な側面は薄い。
欧州	基礎研究	○	→	イタリア技術研究所（IIT）をはじめとして、フランス INRIA などが、認知発達関連の研究を行っており、EU のプロジェクトを部分的に獲得しているが、大規模な予算のプロジェクトには至ってない。ドイツフランクフルトの FIAS では、計算モデルを使った種々の知覚現象の再現や動機づけの説明が試みられている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツのビーレフェルト大学の CITEC では、人間とロボットの相互作用の工学的な応用研究を行ってきたが、最近、継続プロジェクトの予算獲得に失敗した模様である。フランスではアルデバラン社のペッパーを使った応用研究が発表されており、その成果が徐々に市場に出回ると期待される。

中国	基礎研究	△	↘	中国は中央政府の巨額の投資がAI・ロボット関係にばらまかれており、現在は、DLなどの応用研究が盛んに行われている。米国で活躍する中国人も含めると、相当な数の研究者が研究と論文作成に費やされているが、認知発達などの基礎研究には、短期の応用の見込みが困難であるため、見送られている感がある。その意味では、米国に類似した傾向である。
	応用研究・開発	△	↘	上記で説明したように、基礎研究すらあまり行われておらず、応用研究は皆無に等しい。しかしながら、認知発達ロボティクス研究に応用が明確になれば、かなりの投資が見込まれる。
韓国	基礎研究	△	↘	米国や中国やと同様の傾向で、認知発達ロボティクスの基礎研究の素地が見られない。AI・ロボティクスに関しては、軍事関係も含め、フォロー型の研究が中心とみられる。
	応用研究・開発	△	↘	AI・ロボティクス一般の応用研究はかなり行われているようだが、基礎研究の素地がないだけに、認知発達ロボティクス的な応用研究はほとんど見られない。

（8）参考文献

1）Ian Lenz, Honglak Lee, and Ashutosh Saxena, “Deep learning for detecting robotic grasps”, arXiv:1301.3592（2013）; International Journal of Robotics Research, Vol. 34, No. 4-5,（2015）pp.705-724.

2）Joseph Redmon and Anelia Angelova, “Real-time grasp detection using convolutional neural networks”, arXiv:1412.3128（2014）; In the Proccedings of 2015 International Conference on Robotics and Automation（ICRA 2015; Seatle, Washington, May 26-30, 2015）pp. 1316-1322.

3）Lerrel Pinto and Abhinav Gupta, “Supersizing self-supervision: Learning to grasp from 50k tries and 700 robot hours”, arXiv:1509.06825（2015）; In the Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR 2016; Las Vegas, Nevada, June 26-July 1, 2016）pp. 3406-3413.

4）Sergey Levine, Chelsea Finn, Trevor Darrell, and Pieter Abbeel, “End-to-end training of deep visuomotor policies”, arXiv:1504.00702（2015）: Journal of Machine Learning Research, Vol. 17, Issue 1,（2016）pp. 1334-1373.

5）Frederik Ebert, Chelsea Finn, Alex X. Lee, and Sergey Levine, “Self-supervised visual planning with temporal skip connections”, In the Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning（CoRL 2017; Mountain View, California, November 13-15, 2017）, In the Proceedings of Machine Learning Research, Vol. 78,（2017）pp. 344-356.

6）Chelsea Finn, Ian J. Goodfellow, and Sergey Levine. Unsupervised learning for physical interaction through video prediction. In the Proceedings of 30th Conference on Neural Information Processing Systems（NIPS 2016; Barcelona, Spain, December 5-10, 2016）pp. 64-72.

7）Chelsea Finn and Sergey Levine. Deep visual foresight for planning robot motion. In the proceedings of 2017 International Conference on Robotics and Automation（ICRA 2017;, May 29-June 3, Marina Bay Sands, Singapore, 2017）. pp. 2786-2793

8）Pin-Chu Yang, Kazuma Sasaki, Kanata Suzuki, Kei Kase, Shigeki Sugano, and Tetsuya Ogata, “Repeatable folding task by humanoid robot worker using deep learning”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 2,（2017）pp. 397-403.

9）長井志江 ,“認知発達の原理を探る：感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル”,

ベビーサイエンス , Vol. 15,（2016）pp. 22-32.
10）独立行政法人 情報処理推進機構 AI 白書編集委員会（編）,『AI 白書 2017』（KADOKAWA, 2017）.
11）Giacomo Rizzolatti, Rosolino Camarda, Leonardo Fogassi, Maurizio Gentilucci, Giuseppe Luppino, and Massimo Matelli. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey: Ii. area f5 and the control of distal movements. Experimental Brain Research, Vol. 71, Issue 3,（1988）pp. 491-507.
12）Yuji Kawai, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Perceptual development triggered by its self- organization in cognitive learning”, In the Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems（IROS 2012; Vilamoura, Portugal, October 7-12, 2012）pp. 5159-5164.
13）Elissa L. Newport, “Maturational constraints on language learning”, Cognitive Science, Vol. 14, Issue 1,（1990）pp. 11-28.
14）Kenji Ogawa and Toshio Inui. Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. Joural of Cognitive Neuroscience, Vol. 19, Issue 11,（2007）pp. 1827-1835.
15）Yasutake Takahashi, Yoshihiro Tamura, and Minoru Asada, “Mutual development of behavior acquisition and recognition based on value system. In the Proceedings of the 10th international conference on simulation of adaptive behavior（SAB ’ 08; Osaka, Japan, July 7-12, 2008）pp. 291-300.
16）Jorge L. Copete, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Motor development facilitates the prediction of others’ actions through sensorimotor predictive learning”, In the Proceedings of the 6th Joint IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics（ICDL-EpiRob 2016; Cergy-Pontoise, France, September 19-22, 2016）, pp. 223-229.
17）Felix Warneken, Frances Chen, and Michael Tomasello, “Cooperative activities in young children and chimpanzees”, Child Development, Vol. 77, No. 3,（2006）pp. 640-663.
18）Jimmy Baraglia, Yukie Nagai, and Minoru Asada, “Emergence of altruistic behavior through the minimization of prediction error”, IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, Vol. 8, No. 3,（2016）pp. 141-151.
19）Yutaka Yamaguti and Ichiro Tsuda, “Mathematical modeling for evolution of heterogeneous modules in the brain”, Neural Networks, Vol. 62,（2015）pp. 3-10.
20）モーリス・メルロ＝ポンティ（著）, 竹内芳郎（訳）, 小木貞孝（訳）,『知覚の現象学 1』（みすず書房 , 1967）.
21）モーリス・メルロ＝ポンティ（著）, 竹内芳郎（訳）, 木田元（訳）, 宮本忠雄（訳）,『知覚の現象学 2』（みすず書房 , 1974）.
22）鈴木宏昭 ,“プロジェクション科学の展望”, 日本認知科学会第 33 回大会発表論文集 ,（2016）pp. 20-25.
23）Giulio Sandini, Vishwanathan Mohan, Alessandra Sciutti, and Pietro Morasso, “Social

cognition for human-robot symbiosis—challenges and building blocks”, Frontiers in Neurorobotics, Vol. 12, No. Article 34,（2018）pp. 1-19.
24）アンディ・クラーク（著）, 呉羽真（訳）, 久木田水生（訳）, 西尾香苗（訳）,『生まれながらのサイボーグ：心・テクノロジー・知能の未来』（春秋社 , 2015）.
25）浅田稔 , “痛みを感じるロボットの意識・倫理と法制度”, 人工知能学会誌 , Vol. 33, No. 4,（2018）pp. 450-459.

２．２．２　生活支援ロボット

（１）研究開発領域の定義

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技術の確立を目指す研究開発領域。食事・排泄・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：Activities of Daily Living）、家事・外出といった屋内外、健康管理やコミュニケーション、道具を用いた作業を含む手段的日常生活動作（IADL: Instrumental Activities of Daily Living）に関する自立支援、支援者支援、就労・社会参加支援を含む。IoT 技術の融合を確立していく段階にある。

（２）キーワード

サービスロボット、ソーシャル・ロボット、ケア・ロボット、ロボット支援機器、人支援技術、介護福祉ロボット、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、

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

生活支援ロボットは、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、介護者及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）や手段的日常生活動作（IADL）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。またこれに加え、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、これら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。このように、人の営みをロボットが支援するという観点からも、本領域は工学・情報学のみならず、人に関わる広範な研究領域と結びつくものであり、学際的な研究開発という科学的・工学的・社会的に高い意義がある。

これら生活支援ロボットは、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（Augmented Human）工学との関連は高い。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。

［研究開発の動向］

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、車椅子、車椅子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。体位変換や排泄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と位置づけられる。

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。「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、このような動作支援機器は、介護支援や障害者等の移動支援、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椅子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。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いる。また、トヨタ、ホンダ、パナソニック等は、作業支援を目的とした動作支援機器を事業として行っており、販売も進んでいる[3)]。

このような作業支援・介護支援技術については、今日の作業者の業務負担の軽減や、人手不足を解消するものとして期待が高まっている。また人の作業の代替・支援を目的として、高度な人間型ロボットにより問題を解決する試みがなされている。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、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、排泄・整容・入浴にも支援ロボットが開発されている。特にマニピュレーターについては複数のスタートアップ企業らによる事業拡大が見られるなど、近年生活支援ロボット応用として盛んな分野であると言える。

一方、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、日本でも複数の企業が開発を行い、普及モデルに達して来ているといえる．欧州イタリアでは、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

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。

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。これらは、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。これらは環境型のロボット支援技術といえる。

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]。このような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。このような遠隔操作型・遠隔存在感のためのロボット技術については、VR（Virtual Reality）技術の進展とともに、市場を広げつつある[13]。

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年には約2000社の企業が導入した。しかしながら、2018年にはその応用は限定的であることが明らかになり、導入する企業は大幅に減少した。いずれ

にせよ、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た。また米国でも、家庭用小型ロボット「JIBO」についても、事業拡大が困難に見られる。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といえるが、同時にAIスピーカの台頭[14]により、このようなコミュニケーションを目的とするロボットの普及は容易ではないといえる。またこのような背景の下、ソニー株式会社は2018年1月、自律型エンタテインメントロボットであるaiboの販売を再び開始した[15]。

一方欧米では、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や、遠隔操作による介護・食事介助支援[16]などが代表例である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

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[17]は2014年3月に第1版が刊行されたにも関わらず、2015年にはじめて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。また2018年には当該分野の最初の国際会議が開催されており、ロボティクスだけでなく素材や繊維も含めた新たな取り組みが広がっている。人支援分野においても様々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ェア、curara（クララ）[18]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[19]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[20]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。これにより、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。

また、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[21]。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及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（Electroencephalogram: EEG）や近赤外分光法による脳機能マッピング（functional Near-Infrared Spectroscopy: 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。

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官民パートナーシップ SPARC が 2014 年 6 月に立ち上がった [22]。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[23] 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 Horizon Europe[24] 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ロボットは人工知能分野と密接に関連しながら、高齢化という社会的課題に挑戦するために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 $ 以上の資金を得て広範にわたるロボティクス分野の支援が行われている。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、及び人の行動を認知、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。

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 [25] [26] するため総額 3,700 万ドルからなる新たな助成を開始した。これは、NRI における第 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、及び様々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。これは NRI-2.0 として、生活のあらゆる面で人を支援するための協働ロボットシステムの研究開発を促進するものである。

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、大きな売上を上げている。特に 1,000 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 [27]。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

トヨタ自動車は、生活支援ロボット「HSR（Human Support Robot）」を中核としたビジネスを開始しており、介助・自立・生活面の幅広い支援を目指す生活支援ロボットや、新たなヒューマノイドロボット（T-HR3）を開発、共同研究先とともに世界展開を行っている [28]。日本で行われた World Robot Summit 2018（WRS2018）においても、サービスロボットのチャレンジとして家庭内を想定した片付けや収納の他、店舗を舞台とする競技により商品陳列や接客が題材になった。このようなオープン・イノベーションが研究分野に与える影響は大きい。特に HSR はプラットフォームとしての役割も果たしており、多くの研究コミュニティが高い関心を持っている。

一方2017年から、トヨタモビリティ基金により車椅子・外骨格移動支援機器の革新的な進歩を目指した世界コンペティションが行われている[29]。これも同様に、下肢に障害を有する方々への新しい移動支援・自立支援を革新する生活支援ロボット開発を支援する取り組みであり、世界30カ国から選ばれた5件の提案の中から、2020年以降の実用化を目指すものである。このように移動が可能な生活支援ロボットの果たす役割は今後も大きくなると考えられる。

（5）科学技術的課題

本研究領域における大きな技術的なボトルネックは未だ知能化であると言える。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の応用研究の成果により、画像認識や音声認識に進歩が見られ、ロボットインターフェースとしての利便性は高まっていると言える。しかしながら、現状の機械学習は、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未だ至っていない。ここでは、米国及び中国において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。一方我が国では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、日本独自の人工知能技術開発に注力してきた[30]。しかしながら、構造化されたデータの量と質において諸外国との差は大きく、また基礎研究においても主導的な役割を果たせていないのが現状である。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。生活支援ロボットにおいては、ハードウエア・ソフトウエア・ネットワークの融合がシームレスに行われることが必要不可欠である。通信規格5Gを前に、世界中で新たなサービスの提案がなされているが、生活支援ロボットの分野の研究開発はより活発になるものと考えられる。

また、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、及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。

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合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。

（6）その他の課題

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、日本の産業を牽引し、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、ベンチャー企業が牽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 [31]。

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。

（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毎のファンディング（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	○	↗	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しており、またソニー株式会社も再びエンタテイメントロボットの販売を開始した。このように本邦では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、よりベンチャー企業の有する技術や先進性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）より現在に渡り、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	◎	↗	Horizon2020・Horizon Europeや、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。研究コミュニティの拡大と当該分野でのプレセンスが高まっている。
	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、開発に関してベンチャー企業などを中心に、プレセンスが高まってきている。
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）に主導される形で様々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いるが、人工知能分野への注力が目立つなど、今後に期待したい。

（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 , Vol. 11, No. 5, (1993) pp. 614-617. DOI: 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 , Vol. 7, No. 4, (1993) pp. 44-51. DOI: 10.11239/jsmbe1987.7.4_44
3) CYBERDYNE Inc. website, HAL® 腰タイプ作業支援用 HAL-CB シリーズ , https://www.cyberdyne.jp/products/Lumbar_CareSupport.html (accessed 2019-02-10)
4) Toshiharu Mukai, 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,” Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010; Taipei, Taiwan, October 18-22, 2010) pp.5996-6001. DOI:10.1109/IROS.2010.5651735
5) Toyota Motor Corporation website, Partner Robot Family, https://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/robot/ (accessed 2019-02-10)
6) Panasonic Age-Free Co., Ltd. website, Rise Assisting Robot “Resyone Plus” (離床アシストロボット “リショーネ Plus”) , https://sumai.panasonic.jp/agefree/products/resyone/news.html (accessed 2019-02-10)
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 , Vol. 21, No. 4, (2003) pp. 378-381. DOI: 10.7210/jrsj.21.378
8) Gabriele Ferri, Alessandro Manzi, Pericle Salvini, Barbara Mazzolai, Cecilia Laschi, and Paolo Dario, “DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage

collection: From DustBot project to the experimentation in the small town of Peccioli," Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011; Shanghai, China, May 9-13, 2011) DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980254
9) つくばモビリティロボット実証実験推進協議会 website, http://mobility.rt-tsukuba.jp (accessed 2019-02-10)
10) Adriana Tapus, Mataric Matarić, and Brian Scassellati, "The Grand Challenges in Socially Assistive Robotics," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, (2007) pp. 35-42.
11) 寺嶋 一彦 ,『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 Platforms website, コミュニケーションロボット PaPeRo i, http://www.necplatforms.co.jp/solution/marketplace/ (accessed 2019-02-10)
13) 舘 暲 , "テレイグジスタンス" , 日本ロボット学会誌 , Vol. 33, No. 4, (2015) pp. 215~221. DOI: 10.7210/jrsj.33.215
14) 安蔵 靖志 , "「スマートスピーカー」音声 AI が日常を変える", 日経パソコン , No. 785 (2018 年 1 月 8 日号) pp. 32-37.
15) Sony Corporation website, aibo, https://aibo.sony.jp (accessed 2019-02-10)
16) Camanio Care Ltd. website, BESTIC Eating Assistive Device, https://www.camanio.com/us/products/bestic/ (accessed 2019-02-10)
17) Soft Robotics Journal (Mary Ann Liebert, Inc. publishers) website, http://www.liebertpub.com/soro (accessed 2019-02-10)
18) 信州大学繊維学部橋本研究室 website, Robotic Wear curara® 研究プロジェクト紹介 , http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/chair/ht-lab/project/curara.php (accessed 2019-02-10)
19) (株) イノフィス , マッスルスーツ , https://innophys.jp (accessed 2019-02-10)
20) 尾形 哲也 , "ロボティクスと深層学習" , 人工知能 , Vol. 31, No. 2, (2016) pp. 210-215.
21) Christian I. Penaloza and Shuichi Nishio, "BMI Control of a Third Arm for Multi-Tasking," Science Robotics Vo. 3, Issue 20, (2018) eaat1228. DOI: 10.1126/scirobotics.aat1228
22) SPARC c/o euRobotics AISBL website, http://sparc-robotics.eu/ (accessed 2019-02-10)
23) euRobotics website, https://www.eu-robotics.net/ (accessed 2019-02-10)
24) Science | Business Network, "Research Strategies: Europe 2030 and the next Framework Programme," Science | Business Network conference (Brussels, Belgium, 12 Oct 2016). https://sciencebusiness.net/events/research-strategies-europe-2030-and-next-framework-programme (accessed 2019-02-10)
25) National Science Foundation website, "National Robotics Initiative (NRI)," http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm (accessed 2019-02-10)
26) Computing Community Consortium, "A Roadmap for US Robotics, From Internet to Robotics," 2016 Edition, (November 6, 2016).

https://cra.org/ccc/wp-content/uploads/sites/2/2016/11/roadmap3-final-rs-1.pdf（accessed 2019-02-10）
27）Tony Belpaeme, James Kennedy, Aditi Ramachandran, Brian Scassellati and Fumihide Tanaka, “Social robots for education: A review,” Science Robotics, Vol. 3, Issue 21, (2018) eaat5954.
28）トヨタ自動車（株）, “ヒューマノイドロボット T-HR3 を発表 ,” Toyota Global Newsroom（2017 年 11 月 21 日 ）, https://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/19666327（accessed 2019-02-10）
29）Toyota Motor Foundation website, “The Mobility Unlimited Challenge,” https://mobilityunlimited.org（accessed 2019-02-10）
30）理化学研究所 革新知能統合研究センター（AIP）website, https://aip.riken.jp/（accessed 2019-02-10）
31）内閣府・革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）website, 重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニックシステム（PM: 山海 嘉之）, http://www.jst.go.jp/impact/program/05.html（accessed 2019-02-10）

２．２．３　医療ロボット

（１）研究開発領域の定義

ロボット工学は、機械・情報・通信等、様々な技術が密接に関連する複合分野である。医療ロボットは、ロボット工学の医療への活用であり、既に様々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いながら、治療あるいはその支援を目的とするもの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。

（２）キーワード

画像診断、低侵襲手術、レギュラトリーサイエンス、医療機器、リハビリテーションロボティクス、医療機器ソフトウエア

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本稿における医療ロボットは、医療における治療行為を行う、あるいはその支援を行うためのロボット・システムのことを指しており、従来手法の向上、または新規的手法の導入により、医療の質を高めることを目的としている。この目的のため、従来の産業機械技術の枠にとらわれない様々な技術発展を要しており、非常に幅の広い研究開発が行われている分野である。その中でも共通する課題は、ロボットが人体の近傍で安全かつ効果的に動作を行うために要する新技術である。ロボット動作の安定性・安全性が重要であるのはもちろんであるが、例えば、治療に用いるために体内へ挿入する場合には滅菌・消毒などが可能であり、かつ小型であることが強く求められる。あるいは、リハビリテーションでは身体の一部をロボットの動作端へ何らかの方法で固定し、駆動力を人体へ安全に伝達することが重要である。このように、従来の産業技術では取り扱われなかった技術開発が重要であることは、これら事例からも明らかである。加えて、医療応用に向けてロボットがさらなる真価を発揮するのは、センサーによる医療の定量化であると考えられる。センサーデータの解析によって、例えば、術者の技量を担保する、患者の回復度を定量化する、などが考えられる。その発展として、医療事故を未然に予防する、より効果的な手法を提案するなどが検討され、多くの将来的な発展が期待される領域である。

[研究開発の動向]

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について、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、今後益々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（Intuitive Surgical 米国）[1)] であり、現在国内では腹腔鏡下前立腺悪性腫瘍手術、および腹腔鏡下腎悪性腫瘍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、コンソールには三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[3-7]。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（Renishow フランス）英国)、人工関節置換術における骨切除をガイドするロボット Mako（Stryker 米国)、放射線を適切に病変へ照射する放射線治療器 Cyberkfife（Accuray 米国）などがあり、市場を形成している。国内で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、日本)、内視鏡保持器具 EMARO（リバーフィールド 日本）等のデバイスが開発されている。

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｡持続的他動運動と呼ばれるセンサーフィードバック無しに一定周期での規定運動を継続して処方するリハビリテーション装置は多く存在するが、ロボット技術の観点から注目すべきは、患者の生体信号を取得し、リアルタイムにロボットへフィードバックする試みである。より具体的には、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[8]、また上肢に関への適用等[9]､研究開発が活発に行われている。国外では､2000 年に歩行リハビリ支援移動ロボット Locomat（Hocoma スイス）が上市され､一定の市場を形成するに至った。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[10]。国内では、HAL 医療用（CYBERDYNE 日本）[11] 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。国内では、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマなどの大手企業についてもこの分野へ参入しており、その有効性が広く認知されつつあると考えられ、市場の拡大が予見される。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

米国を中心として、手術支援ロボットについての新規スタートアップ企業として、Auris Surgical Robotics、Medrobotics 等、盛んに設立され、今後の動向が注目される。一部には、MAKO Surgical、Mazor Robotics 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

た米国 Verb Surgical 社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。同じく米国の TransEnterix の Senhanse Surgial System は、2018 年 5 月に FDA からの適用拡大を受けている。イタリア MMI（Medical Microinstruments）は小型外科手術ロボットを開発している。国内でも研究開発能力としてロボット技術を核とする、いわゆ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、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマ、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。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

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[12)]。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[13)]。海外では、欧州にて同じく手術支援ロボットの知能化を目指す ISUR（Intelligent SUrgical Robotics）プロジェクト[14)] が実施され、成果発展が今後期待される。

（5）科学技術的課題

現在、医工連携が国内各所でも活発に進められており、多くの成果が得られ始めているが、ロボットのような、多くの技術要素が複合した統合技術においては、医工の強固な連携が必要不可欠であり、推進が強く望まれる。また学術的な側面からは、臨床的成果が必ずしも工学的な発展的成果とは言えない場合があり、その逆も存在する。医工連携のさらなる発展によって、横断的分野における新しい価値創出が望まれる。

医療機器としての実用化を考えるとき、有効性・安全性の担保は必要不可欠である。ロボット技術を活用した医療機器は技術的に高度であり、これらを担保する方法に関しても高度な専門的知識と経験を要する。より実用化プロセスの迅速化のためには、このような人材育成は必要不可欠である。

要素技術に関しては、国内には優れた加工技術を有する中小企業が多く存在しており、医療機器における装置開発においては海外に対しても優位性を持っている。一方で、今後は単機能デバイスから、機器同士が相互的に高度に連携したシステム化が必要になると考えられ、医療機器ソフトウエア開発に関して、より多くの研究開発が必要となると考えられる。

医療ロボットにおいては、臨床応用へ進むためには多くのハードルがあり、その最たるものが研究開発資金である。上記（4）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ことを示したが、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、わ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充実することが望まれる。

（6）その他の課題

医療機器の産業化までの道のりには、「魔の川」、「死の谷」、「ダーウィンの海」と表現される、乗り越えなければならない厳しい障壁が立ちはだかっている。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高く、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。医療ロボットにはその開発に必要な技術はもちろんであるが、医療機器としての承認まで導くためのレギュラトリーサイエンスが必須であり、この分野の技術者・研究者が今後より必要になると考えられる。

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。

（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	○	→	ImPACT、AMED 事業等、複数の学術的国家プロジェクトが展開中
	応用研究・開発	◎	↗	リバーフィールド、A-Traction 等ベンチャー企業に加えて、トヨタ自動車、安川電機、帝人ファーマ、Medicaroid 等の大企業による上市・研究開発が進展中
米国	基礎研究	◎	→	多岐にわたる研究成果
	応用研究・開発	◎	↗	Verbsurgical、TransEnterix、Auris Health、Medrobotics、FlexDex 等、新規設立企業、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
欧州	基礎研究	○	→	独・仏・伊を中心に多くの研究事例、成果発表
	応用研究・開発	◎	↗	Hocoma、MMI、CMR Surgical、Bioservo、ReHaptix 等、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
中国	基礎研究	○	→	複数の研究成果報告を確認
	応用研究・開発	○	↗	一部企業に手術ロボットに関する開発事例が確認される。研究報告に増加傾向（Beijing Tinavi）
韓国	基礎研究	○	→	当該研究領域に多数の研究成果報告あり
	応用研究・開発	○	→	複数企業に開発報告あり（Koh Young Technology、Hyundai Heavy Industries、Meere Company）

（8）参考文献

1）Intuitive Surgical 社ホームページ
http://www.intuitivesurgical.com（2018 年 10 月 10 日アクセス）
2）日本ロボット外科学会ホームページ
http://j-robo.or.jp（2018 年 10 月 10 日アクセス）
3）日本コンピュータ外科学会ホームページ
http://www.jscas.org/（2018 年 10 月 10 日アクセス）
4）Christos Bergeles and Guang-Zhong Yang, “From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Vol.61, No. 5（2014）：1565-1576.
5）Ryan A. Beasley, “Current systems and research directions,” Journal of Robotics Vol.2012,Article ID 401613, 14 pages.
6）Riccardo Autorino et al., “Current Status and Future Directions of Robotic Single-site Surgery: A Systematic Review,” *European Urology* Vol.63, No. 2（2013）：266-280.
7）Nisha Patel et al., “Flexible platforms for natural orifice transluminal and endoluminal surgery,” *Endoscopy International Open* Vol. 2, No. 02（2014）：E117-E123.
CYBERDYNE8）Jan Mehrholz et al., “Electromechanical-assisted training for walking after stroke,” *Cochrane Database of Systematic Reviews* Vol.25, No. 7（2013）：CD006185.
9）Gert Kwakkel, Boudewijn J. Kollen and Hermano I. Krebs, “Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery After Stroke: A Systematic Review,” *Neurorehabilitation and Neural Repair* Vol.22, No. 2（2008）：111-121.
10）Hocoma 社ホームページ
https://www.hocoma.com（2018 年 10 月 10 日アクセス）
11）CYBERDYNE 社ホームページ
http://www.cyberdyne.jp（2018 年 10 月 10 日アクセス）12）原田香奈子 , 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（2018 年 10 月 10 日アクセス）
13）国立研究開発法人 日本医療研究開発機構 ホームページ
https://www.amed.go.jp/program/list/02/01/004_01-03.html（2018 年 10 月 10 日アクセス）
14）The I-SUR Project ホームページ
http://www.isur.eu/isur/（2018 年 10 月 10 日アクセス）

２．２．４　海中ロボット

（１）研究開発領域の定義

海中ロボット[1]とは、人がいけない海中での調査観測や作業を行うロボットである。10m以下の浅い海ならば、人はなんとか潜れるが、それ以上の深い海になると人は簡単にはいけない。地球環境を支配する海水、地震、津波の発生源である海底、水産資源を産む海、など知らなければならない海中の諸項目はいくらでもあり、また、石油やガスを生み出す宝の山である。人に代わってそこにでかけていき、何かをするのはロボットである。なお、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として述べる。

（２）キーワード

自律型海中ロボット（AUV: Autonomous Underwater Vehicle)、有索無人機（ROV : Remotely Operated Vehicle)、水中音響、耐圧設計、航法

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人がいけない海中の調査観測や作業のために、プラットフォームとして海中ロボット（表2-2-1参照）を投入することは必然である。しかし、電磁波が伝わらない海中では、ロボットとの通信手段を確保するには、トラブルの多い通信ケーブル（索）を繋ぐか、遅くてエラー率の高い音響通信を使うかに限られる。水深以上の長さを必要とするケーブル付きの遠隔操縦機（有索無人機 ROV : Remotely Operated Vehicle）は、ケーブルを扱うための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1500m毎秒であり、遅く、周波数が高くなると急速に減衰するために6000mの距離を通信するには数十kHzの周波数帯を用い、Data Rateはせいぜい数千bps[2]で伝送エラー率も高く、細かい遠隔操縦は困難である。ケーブルのない水中機（無索無人機）は、操縦者との密な通信ができないので、自律性が高くなければ深海に展開できず、自律型海中ロボット（AUV: Autonomous Underwater Vehicle）と呼ばれる。

表2-2-1　海中ロボットの分類

有索無人機		
	電力通信ケーブル付き遠隔操縦機（ROV:Remotely Operated Vehicle）	
		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（海底に接近して低速で移動し写真撮影）	
	グライダー型（潜降・浮上を繰り返す）	

［研究開発の動向］

有索機（ROV）は、1980 年代に技術的に大きく発展し、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 1980 年以前から行われている。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 11,000m まで潜ることのできる ROV「かいこう」を JAMSTEC（海洋研究開発機構）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 年に二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」（3000m 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。最近、新規参入者がカメラロボを「水中ドローン」と称して開発を始めだした。しかし、小型のゆえに外力に弱く、使用環境が限られることに十分な配慮が必要である。

細径ケーブル遠隔操縦機は、電池を内蔵し、データ通信用の光ファイバケーブルのみにより、潜水機と支援船とを接続する。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、JAMSTEC が「UROV」という名前で 1990 年頃から開発をおこなっている。JAMSTEC は 2007 年に「ピカソ」を開発して、深海生物調査に活用している。

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 JOGMEC と共同しておこなっ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 220km の潜航に成功している。しかし、行動の重要な判断を超音波リンクを通じたコマンド（すなわち人の操縦）に頼っているので、自律性のレベルは低かった。その後、改良が進められ、ペイロードを十分にとれる大型機（長さ 10m、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 3 ノット程度で航行する「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 [3)]。

ホバリング型 AUV は海底面直上数ｍ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。2000 年に開発された「Tri-Dog 1」がプロトタイプの初号機といってよい。これをベースに開発が進められ、2007 年に東京大学は「Tuna-Sand」を作り、これを 2010 年に日本海の水深 1000m のメタンハイドレート地帯に展開し、水深 1000m でベニズワイガニの棲息状況を撮影した。さらに、その実績をベースに、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、上昇下降を、浮力を変化させておこなうもので、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、現場にい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、それの特徴を生かせる海中観測や作業活動においてニッチを得ているといってよい。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、さらには複数ロボットを同時展開することである。それらが海中ロボット開発を加速することになる。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックスおよび注目すべき国内外のプロジェクト]

総合科学・イノベーション会議は、2014 年度より「戦略的イノベーション創造プログラム（通称 SIP）」を開始し、その中の一つの課題として「次世代海洋資源調査技術（通称「海のジパング計画」）」が取り上げられている。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複数ロボット同時展開システム開発が設定され、海上技術安全研究所などで研究開発が進んでいる。海域でロボットを展開するには支援船が必要で、その経費は数百万円 / 日を下らない。さらには、海域が悪ければロボットを展開することができない。海況の良いチャンスを有効利用するには、チャンスにロボットを複数展開して、同時に多くの観測・計測をおこなうことが必要となる。ケーブルのない AUV ならば、それが可能となる。

SIP では、2018 年 10 月までに、4 台の航行型 AUV、1 台のホバリング型 AUV、1 台の無人海面航行ロボット（USV : Unmanned Surface Vehicle）が開発され、試験展開がおこなわれている。これらロボットやシステムは民間企業が展開できるよう、技術移転が進められている。海のジパング計画は、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。

また、JAMSTC では AUV「ゆめいるか」と AUV「じんべい」を開発して、複数 AUV 展開システムを研究開発している。

AUV の最大の弱点は、海底に接近するものの、写真や音響撮影のみであって、「物」を海底から取ってくることができない。AUV 展開後の次のステージで ROV を投入すればよいのだが、「それなら最初から ROV を使えばよいのではないか」、という AUV にとってネガティブな意見が巻き起こる。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おこなわれている。科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）[海洋生物多様性]「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」課題において「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おこなう自律型海中ロボット部隊の創出（代表:浦　環）」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する対象を指定できるシステムの開発がおこなわれ、「Tuna-Sand 2」が開発され、サンプリング実験がおこなわれている。

SIP と CREST の二つのプロジェクトは、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重要な大規模プログラムは、

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 から 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の研究開発

2）北極海を含む氷海域で、海氷下の観測をおこなうことのできる海中ロボットの研究開発

の二つが重要である。文部科学省等での検討がおこなわれているが、これらは極めて大型なシステムとなるため、国家的で重点的な取り組みが必要である。

さらに、SIP で開発された高速通信を可能とする衛星通信用の小型アンテナシステムは、ROV を使った海洋調査において、海中映像をリアルタイムで陸上の研究者や一般人に配信して、海洋科学や海洋技術を、青少年を含む一般人に広く紹介することができる。アウトリーチ技術として極めて重要である。

海上保安庁海洋情報部は、測量船を使って海底地形図を作ることが業務である。深い海で、より精度の良い地形図を得るには、航行型 AUV を潜らせて至近距離から計測せねばならない。これまでは海外製品を購入していたが、2018 年度から日本製を導入することになった。利用者の限られる AUV にとって国内需要を確実に押さえることは、国内 AUV 開発を推進するために必要不可欠である。

（5）科学技術的課題

自律型海中ロボットが陸上の自律型ロボットと違う点は次の５つの海あるいは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いけない
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）ロボットを海域で動かすためには支援船、多額の経費、大きなチームが必要である
4）日本周辺でロボットが働いてほしい海域は、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

1）の危険性を取り除くためには、十分な準備と海での実績が必要だが、3）と 4）のために簡単にはできない。深海は未だに「探検」の世界であるので、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さけねばならない。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資金提供者に説明しなければならない。そのためには、AUV の展開実績が必要である。しかし、実績を作るためにも同じ 3）が必要である。すなわち、犬が尾を咬んで、ぐるぐる回っていることになり、なかなか 3）を克服できない。「運良く」研究費を獲得し、海域へと出動しても、4）のように海が荒れていれば、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（自律性）の向上、
2）ロボットの小型化、
3）複数ロボットを同時展開ができる、

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ナリオ作り、

が必要である。それに基づいて、(4) 注目動向に示した２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。第１期の SIP では、その路線のもとに開発が進められ成果を揚げている。2018 年から第２期が始まっているが、AUV 開発については残念ながら路線が不透明である。

上記の課題を解決するためには、広い視点に立った大型プロジェクト、それも現場での具体的な活動を含んだプロジェクトを作る必要がある。すなわち、自然の中でのロボットの活動を通じて、１）のロボットの信頼性と自律性を向上させねばならない。

（６）その他の課題

前節の最初に述べたように、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、世界で一番「大きい」「深い」「遠くまで」など重厚長大主義的な提案もあり得るが、前節最後に述べた４つの必要項目を満たすような方向をもつことが政策的に重要である。前述した海のジパング計画では、必要事項の１～３が重要課題として取り上げられていることが好ましい。

できあがっ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月に申請書をだすと、翌年の潜航可能性が開かれ、採択されれば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だすのは、２年後になる。このような極めて遅い日本の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、JAMSTEC は、研究船を大型化し、公募航海日数が減っている。大型船は「大鑑巨砲」になっているために、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いて、JAMSTEC の研究船だけに頼らない機器開発ができるような政策転換が必要である。水産系の大学などの船の利用がその道を作り出すのだが、既得権と目的外使用禁止の二つの障壁が立ちはだかっている。

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することが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、という残念な結果が引き続くことになる。海という過酷な現場で働くロボットを作るためには、その利用を促進する政策的な取り組みが不可欠である。

（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	○	↘	文部科学省のプログラム「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、2017年度で終了してしまい、その先がない。
	応用研究・開発	○	→	SIP「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」を通じて応用研究がなされている。第2期も開始した。
米国	基礎研究	◎	↗	米海軍海事技術本部（ONR：Office of Naval Research）の Funding、Sea Grant の推進など、基礎研究への Funding が継続してなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	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はあがっている
欧州	基礎研究	○	↗	Southampton 大学を中心として英国は特に力をいれている。スペインやポルトガルも参入し、研究活動は盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	商用の AUV や ROV を使った新たな活動が盛んになっている。Kongsberg は民間の中心
中国	基礎研究	△	↗	国が海洋に注目していて、それに伴って大学が積極的な研究開発をおこなうようになってきた。
	応用研究・開発	◎	↗	7000m 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しめしている。新たな海洋調査船を就航させている。
韓国	基礎研究	×	↘	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	△	→	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

（8）参考文献

1）浦 環 , 高川 真一 ,『海中ロボット』, (成山堂書店 , 1997).
2）Teledyne Marine Systems, “Benthos Acoustic Modem” https://aslenv.com/brochures/Benthos-acoustic-modems.pdf (accessed 2019-01-15)
3）Kongsberg Maritime,” Hydroid REMUS 6000 AUVs Aid in Discovery of Air France Flight 447 Wreckage”, (Press releases, April 8, 2011), https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/FBAE3A993FC33666C125786F00289474?OpenDocument (accessed 2019-01-15)

２.２.５　宇宙ロボット

（１）研究開発領域の定義

「宇宙ロボット」は、宇宙開発および月惑星探査を目的として宇宙空間で使用されるロボットである。地球を周回する国際宇宙ステーションにおける作業や、軌道上の宇宙ゴミ（スペースデブリ）等の捕獲回収を目的とした「軌道上宇宙ロボット」および、月や惑星などの天体表面を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別される。

（２）キーワード

宇宙環境、地球周回軌道、微小重力、移動探査ロボット、不整地移動、自己位置推定、ナビゲーション、遠隔操作、通信時間遅れ、自律性

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球の大気圏よりも外に広がる空間領域を「宇宙」と呼ぶ。国際航空連盟では、地表高度100km 以上の空間を「宇宙」と定義している。宇宙は高真空であり、熱環境、放射線環境が過酷であるなど、人間にとって危険な環境である。人が容易に訪れることができない宇宙空間では、ロボットによる作業が非常に重要となる。

1957 年にソビエト連邦が人類初の人工衛星（スプートニク 1 号）を打ち上げて以来、今日に至るまでに、数千もの人工衛星が地球周回軌道に打ち上げらており、その数は年とともに増大している。宇宙空間に打ち上げられる人工物（宇宙機）のうち、地球周回軌道を離れて、月、惑星、小惑星などの探査を行う目的のものを宇宙探査機と呼ぶ。宇宙機の大半は無人機であるが、地球を周回する国際宇宙ステーションや、その建設に大きな役割を果たしたスペースシャトルは有人の宇宙機であり、1960 年代から 70 年代に月面探査を行ったアポロ宇宙船は、有人探査機である。

打上げロケットも、無人の人工衛星も、単純なものから高度な誘導制御を含めて、一定の制御シーケンス、制御ロジックをもって動作しているので、広い意味で宇宙ロボットと呼ぶこともできる。しかしながら、ここでは腕またはハンドがある（マニピュレーション機能がある）、あるいは月惑星表面を移動する機能をもった「ロボット」を対象とする。

「宇宙ロボット」は、地球周回軌道上で活動を行う「軌道上宇宙ロボット」と、天体上を移動探査する「月惑星探査ロボット」に大別することができる。軌道上宇宙ロボットは、米国のスペースシャトルに搭載されたロボットアームや、国際宇宙ステーションに搭載されているロボットアームに代表される。これらは、宇宙ステーションモジュールの組み立てや、メンテナンスなどの宇宙飛行士の船外活動を支援することが主な目的である。近年では増加の一途をたどる軌道上で不要となった人工物体（宇宙ゴミ）を捕獲回収する目的で、軌道上宇宙ロボットの活用が期待されており、そのための研究開発が加速している。

地球以外の天体（月惑星）を探査する「月惑星探査ロボット」は、人に代わって科学的探査を行うことを主な目的とし、着陸船に搭載され岩石の採集や土壌分析を行うロボットアームや、着陸船から分離し天体表面を自由自在に移動探査するロボットが開発され、月、火星、小惑星、彗星の探査に活用されている。例えば、これまでの NASA による一連の火星探査により、火

星表面にはかつて大きな海（大洋）があったことも明らかになっている。小惑星や彗星などの重力場が小さい天体のロボット探査も近年注目を集めており、日本の「はやぶさ」探査機は、小惑星イトカワ表面から岩石サンプルを採集し、地球に持ち帰ることに成功している。これらの探査により、太陽系における惑星形成の歴史が明らかになってきている。

また、地球以外の天体から採掘した物質を、「資源」として活用するためのロボット技術の研究開発にも注目が集まってきている。

［研究開発の動向］

宇宙空間を自由に飛び回って作業をする「軌道上宇宙ロボット」の概念は1980年代前半より議論されてきた。1983年に出版されたNASA ARAMISレポート[1)]ではTelerobotic Servicerと名付けられた軌道上宇宙ロボット（図2-2-6）を用いた軌道上作業の可能性が論じられている。特に、軌道上ロボットによって宇宙ステーションの建設を行うことが議論され、その実証ステップとして米国では1987年にFlight Telerobotic Servicer（FTS）が計画された。しかしながら、技術や安全面で問題点が多く、1990年代中頃までにはFTS計画はキャンセルされ、実際の国際宇宙ステーションの建設は、スペースシャトル搭載のロボットアーム（Shuttle Remote Manipulator System, SRMS）および宇宙ステーション搭載ロボットアーム（Space Station Remote Manipulator System, SSRMS）を活用したモジュールの組み立てと、宇宙飛行士の船外活動による精細作業によって行われた。

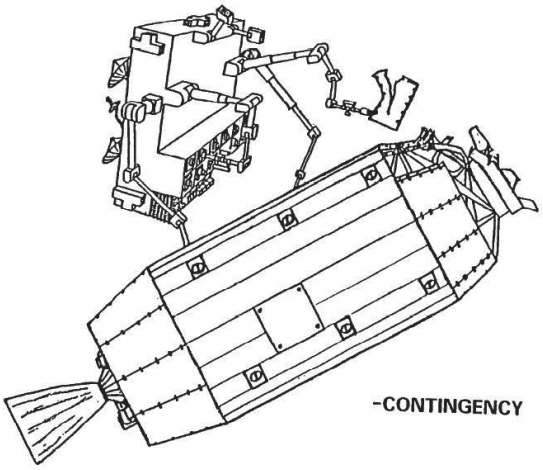


図2-2-6　Telerobotic Servicerの概念図[1)]

これに対して、軌道上宇宙ロボットの技術は1997年に日本の技術試験衛星きく7号（ETS-VII）によって、世界に先駆けて実証された。同衛星は軌道上で「おりひめ」「ひこぼし」と呼ばれる2つの部分に分離し、「ひこぼし」には長さ約2mのロボットアームが搭載されていた。自律制御による、おりひめ・ひこぼしのランデブー（接近飛行）・ドッキング（結合）や、ロボットアームを使って機器の交換をするなどの試験が行われた。このような技術は、他の人工衛星に対して燃料補給や機器交換などのサービスやメンテナンスを可能とし、また寿命後の衛星を捕獲して軌道変更するなど、人工衛星をより効果的に使用し、スペースデブリ（宇宙ごみ）の増加を防ぐ技術として重要なものであり、1999年のミッション終了までに、技術的および学術的にも価値の高い軌道上実験が実施された[2), 3)]。

ETS-VII で実証された自律誘導およびランデブー技術は、後に宇宙ステーション無人補給機（H-II Transfer Vehicle, HTV）「こうのとり」が国際宇宙ステーション（International Space Station, ISS）にランデブーする際の必須技術として活用されている。HTV は、ISS の下方 10m の距離まで近づいて相対停止したのち SSRMS により捕獲され、同アームにより ISS の所定の場所に結合される。HTV は 2009 年に初飛行が行われ、2018 年の 7 号機まで連続してミッションに成功している。

ETS-VII から 10 年後の 2007 年には、米国 DARPA が主導するオービタル・エクスプレス・ミッションが行われ、ETS-VII と同様の自律ランデブー・ドッキング、ロボットアームの制御実験が行なわれた。しかしながら、ETS-VII およびオービタル・エクスプレスで実証された技術は、捕獲される側の衛星姿勢が安定し、かつ把持のためにハンドレール状の機構が取り付けられているなどの「協力的」なターゲットであった。衛星がタンブリングと呼ばれる 3 軸回転運動し、把持するためのつかみ点が無い一般的な「非協力的」なターゲットを捕獲するためには、解決しなければならない技術課題が多く残されている。

地球以外の天体の表面を走行した世界初の無人移動探査ロボットは、ソビエト連邦（当時）が開発したルノホートである。米国が有人月探査（アポロ計画）を進めていく一方で、ルノホート 1 号は 1970 年 11 月にルナ 17 号により月面に着陸し、その後 1971 年 9 月までの約 11 ヶ月間にわたり月面上を 10.5km、2 号は 1973 年 1 月にルナ 21 号により月面に着陸し、その後同年 5 月に至るまで 37km（最近の再評価では 39km）走行し、多くの画像や観測機器のデータなどを地球に送信した。

一方、米国のアポロ計画では、1969 年 7 月に 11 号が人類初の月面着陸に成功した後、15 号（1971 年 7 月）、16 号（1972 年 4 月）、17 号（1972 年 12 月）の 3 回のミッションにおいて、LRV（Lunar Roving Vehicle）と呼ばれる 4 輪駆動の月面車を月面に持ち込み、宇宙飛行士が操縦して月面上を走行し探査範囲の拡大に貢献した。LRV の質量は 210kg、バッテリー（一次電池）駆動で、アポロ 17 号では走行距離は 35.7km に達した。

これら一連の月面探査が成功裏に終了すると探査の対象は火星へと拡がり、米国は 1975 年に 2 機の火星着陸探査機（バイキング計画）を打ち上げた。バイキング 1 号は 1976 年 7 月に、バイキング 2 号は 1976 年 9 月に火星表面に着陸した。これらの着陸機にはロボットアームが取り付けられており、着陸機近傍の土壌を採集してその場分析が行われた。

移動探査ロボットとしては、1996 年 12 月に打ち上げられた米国のマーズ・パスファインダー（MPF）計画にて、Sojourner と名づけられた質量約 10kg の小型ローバーが展開された。Sojourner は、電気モーターによる独立駆動の 6 つの車輪を持ち、ロッカー・ボギーと呼ばれる受動的なサスペンション機構を用いて、岩石が散在する凹凸の多い不整地でも適応的に走行することができた。地球・火星間の通信は片道でも 8 ～ 20 分かかるので、ローバー側に障害物や危険を認識し、緊急停止や回避行動を可能とするための相応の自律機能が必要である。マーズ・パスファインダー計画では、遠隔ロボットによる火星表面に必要な技術実証に主眼が置かれ、1997 年 7 月に火星に着陸した後、約 3 ヶ月間にわたって地球からの指令により、遠隔自律ナビゲーション、画像撮影、岩石や土壌の化学組成分析などのミッションが実施された。

MPF 計画の成功を受けて 2003 年にはマーズ・エクスプロレーション・ローバー（MER）を搭載した 2 つの探査機が打ち上げられ、2004 年 1 月に相前後して火星表面に到達した．ひ

とつはSpritと名づけられ、もうひとつはOpportunityと名づけられた。これらはゴルフカートほどの大きさ（質量185kg）であり、全長約1mの小型ロボットアームを含む、さまざまな分析装置を搭載している。当初予定のミッション期間である3ヶ月をはるかに超えて2台の探査ローバーは探査活動を継続し、かつての火星には水が存在した証拠を明らかにするなど数々の成果を挙げた。Spritは活動開始後の6年目の2010年までに7.7kmを走行し、2011年に活動を終了した。一方のOpportunityは、活動開始から14年目となる2018年においても探査活動を継続しており、走行距離は45kmを超えている。

MERの後継機として、NASAはより大型のマーズ・サイエンス・ラボラトリー（MSL）を開発した。探査ローバーはCuriosityと名付けられた。その重さはマーズ・エクスプロレーション・ローバーの約5倍の900kgであり、10倍の質量の科学探査機器を搭載している。2011年11月に打上げられ、2012年8月に火星のゲール・クレーターに着陸した。同ローバーは全長約2mのロボットアームを搭載しており、その先端には岩石に穴をあけるドリルが取り付けられている。また、レーザー光によって土壌や岩の表面を蒸発させてスペクトル分析を行う装置も搭載している。Curiosityから送られてきた画像や観測データを分析した結果、湖底の堆積物と推定される岩石が多数確認され、着陸地点であるゲール・クレーター（直径約150km）一帯は、30億年以上前は巨大な湖だった可能性が高いと考えられている。2018年12月現在、Curiosityの走行距離は19kmを超えており、岩石や土壌の分析を行いつつ、探査エリアを拡大している。

図2-2-7に、MPF、MER、MSLローバーの比較を示す。

図2-2-7　NASAの火星探査ローバー

（出典：NASA Press Release Images: Opportunity 17-Jan-2012 Three Generations of Rovers with Standing Engineers https://mars.jpl.nasa.gov/mer/gallery/press/opportunity/20120117a.html）

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］および［注目すべき国内外のプロジェクト］

火星探査ローバー

1997年のMPF以降の一連のNASA火星探査ローバーミッションにおいて、移動探査ローバーに関して以下の新規技術が開発され、あるいは新たな研究課題として浮上してきている。

（a）不整地移動機構

不整地移動機構の設計には、まず大分類として車輪、クローラー、脚型とすべきか、またそれぞれについて個数や配置方法など様々なバリエーションが考えられるが、これまでの4台のNASA火星探査ローバーではいずれも、6つの駆動車をロッカー・ボギーと呼ばれる受動的なリンク機構で連結するサスペンション方式が採用された。火星表面は多数の岩石で覆われており、同機構は岩石等で構成される凹凸地形に対して受動的に適応し、常に6輪接地を保ちながら移動することに非常に効果的な設計であったといえる。

（b）ビジュアル・オドメトリ

MER、MSLローバーの車体上部にはマストが突き出しており、その上にパン・ティルト機構を伴ったステレオカメラが取り付けられている。同カメラはパン機構を用いて周囲360度のパノラマ画像の作成に加えて、ローバー進行方向の障害物の認識に有用である。取得された画像に基づいて、ローバーの6軸姿勢を求め、地形に対する移動距離を求めるビジュアル・オドメトリの手法が開発され、SpritとOpportunityの当初2年間の移動軌跡をまとめた成果が文献[4]に報告されている。月惑星表面のような自然地形では、車輪は滑りや空転を起こしてしまうため、車輪回転数に基づいたオドメトリには限界があり、ビジュアル・オドメトリはそれに代わる方法として注目を集めた。

（c）車輪の滑りと立ち往生

上述のロッカー・ボギー・サスペンションは岩石等で構成される凹凸地形での走行においては優れた性能を発揮したが、MER、MSLローバーは、一見平坦な軟弱土壌（loose sand）にて車輪が空転し、砂地にめり込むなどのトラブルを起こしている。特にSpritは2009年5月に砂地にて立ち往生し、様々な脱出策が試みられたが成功することなく、その場でミッションを終了した[5]。このような状況に遭遇することを回避するため、NASAでは、前方カメラにて取得される画像に機械学習（AI）を用いて、ローバーが遭遇する土壌を自動的にbedrock, large/small rocks, outcrop, loose sandなどに分類（terrain classification）する技術の研究が進められている[6]。

小天体探査

太陽系には8つの惑星とその衛星および月の他に、無数の小惑星、彗星などの小天体で構成されている。1986年に近日点回帰したハレー彗星に向けて、欧州、日本、米国、ソ連が相次いで探査機を送り込んだのが、本格的な小天体探査の始まりと言えよう。1996年に打ち上げられた米国のNEARシューメーカー探査機は、小惑星EROSの近接観測を行った。注目すべき探査機は、2003年に打ち上げられた日本の「はやぶさ」探査機である。同探査機は2005年に小惑星ITOKAWAに到着し上空からの近接観測の後、表面に2回タッチダウンを行いサンプル（岩石片）の採集を行った。その後、いくつかのトラブルに遭遇しつつも2010年に地球に帰還し、1500個以上の岩石片を地球に持ち帰ることに成功した。ITOKAWAは岩石質（S

型）の小惑星であり、サンプルの分析によりその形成過程を明らかにすることができた[7), 8)]。

2004年には欧州宇宙機構が開発したロゼッタ探査機が打ち上げられ、同探査機は2014年にチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星に到着した。その後、フィラエと名付けられた着陸機が分離され、彗星表面上に軟着陸した。当初予定では、フィラエはアンカーを用いて彗星上に固定されドリルを用いて土壌のサンプリングおよびその場分析を行う予定であったが、アンカー機構が正常に作動せず、これらを行うことはできなかった。

はやぶさ探査機の成功を受けてJAXAは後継機「はやぶさ2」を開発し、同探査機は2014年に打ち上げられ2018年6月に小惑星RYUGUに到着した。タッチダウン・サンプリングは2019年に予定されているが、それに先立って2018年9月から10月にかけて、ミネルバII1およびMASCOTと名付けられた小型の探査ロボットが切り離され、小惑星表面に軟着陸し、その表面をホッピング移動（微小重力を利用して跳びはね、転がるような移動方式）を行い、RYUGU表面の様々な写真の撮影に成功した。RYUGUは炭素質（C型）の小惑星であり、その表面には有機物や水等の揮発性物質が含まれていることが期待されている。

日本は、「はやぶさ」「はやぶさ2」の2つの探査機により、小惑星近傍へのアプローチ、タッチダウン・サンプリング、小型ロボットによる表面移動探査等の技術確立に成功した。これは世界最先端のものである。

月探査

1972年12月、アポロ計画の最後のミッションである17号が月面を飛び立って以来、人類は月面に降り立っていない。この間、いくつかの無人探査機（1994年クレメンタイン、1998年ルナープロスペクター）が月周回探査を行っているが、2007年9月に打ち上げられた日本の月周回探査機「かぐや」が、「アポロ以来」と言われる本格的な月面観測を行った。アポロの着陸地点はいずれも月の表側の赤道域周辺に分布していたため、これまでの月面に関する詳細情報はこれらの地域に限定されていたが、「かぐや」は月の全面をくまなくスキャンするように観測を行い、「縦孔」と呼ばれる隕石衝突によるクレーターとは種類の異なる穴を複数発見した。これらはかつての火山活動により生じた溶岩トンネルの天井が崩落してできた穴であると考えられている。「かぐや」を追う形で、2007年10月には、中国の「嫦娥1号」、インドの「チャンドラヤーン1号」も打ち上げられた。米国は、ルナー・リコネサンス・オービター（LRO）およびエルクロスを2009年6月に打上げ、LROは「かぐや」よりも高い、最高50cmという高解像度で撮影を行った。エルクロスは月の南極付近に衝突し、その際に巻き上げられた砂塵の観測が行われた。

1994年のクレメンタイン探査機が、月の南極にあるクレーターの内側では常に日光が当たらない領域（永久影）があることを確認し、永久影の部分には水氷の存在を示唆するデータを得た。これ以降、月面探査においては、水氷の存在を確認し、それを資源として利活用する可能性を模索することが、重要な課題となっている。また、上述の「縦孔」探査も科学的にも、また将来人類が月面に長期滞在する際の候補地としても注目を集めている。極域の永久日陰や、縦孔から繋がる溶岩トンネルを探査するためには、高度なロボット技術が必要であり、今後の研究開発の重要課題である。

中国は、2007年の「嫦娥1号」以降、2010年に2号（いずれも周回探査機）を打ち上げ、2013年の3号では月面着陸を果たし、重さ約140kgの無人探査車「玉兎号」による表面移動

にも成功した。2018 年 12 月には 4 号が打ち上げられ、2019 年 1 月に月の裏側への着陸に成功し、無人探査車を使った探査が行われる。月の裏側が地球のほうを向くことは決してないため、これまで裏側は未踏の地となっていた。月面車と直接通信することはできず、月周回軌道上の中継衛星を使う必要があり、技術的な難易度は高い。科学的な成果が期待される。

2018 年 2 月 NASA は、月周回軌道上に人が長期滞在できる「月軌道プラットフォームゲートウェイ（LOP-G）」の開発を 2019 年度予算に盛り込み、最初のモジュールを 2022 年に打上げる計画を発表した。米国は、この計画を国際協力で推進することを各国に呼び掛けており、日本、欧州、ロシアは結局的に協力する意向を示している。LOP-G は、（a）国際協力と同時に産業界と連携により実現をめざすこと、（b）将来の月以遠の有人探査に必要な技術・システムのためのプラットフォームとなること、（c）宇宙空間におけるロボットを活用したプロジェクトなることなどの観点から大きな注目を集めている。

（５）科学技術的課題

宇宙デブリ捕獲

（3）で述べた宇宙デブリの捕獲・回収技術の重要性は年々高まってきている。図 2-2-6 に示したイメージの軌道上ロボットの実現にはさらに時間を要すると考えられるが、以下の 2 つの方向で実証的な研究開発が重要であろう。ひとつは、小型・超小型衛星を活用した要素技術の実証である。この切り口では、大学やベンチャー企業が取り組むハイリスク・ローコストな取り組みが計画され、実行され始めている。軌道上の不要物体を観測し、接近する、接触する、貼り付く、網をかける、把持するなどの各要素を切り取った実証ミッションが検討および実施されている。もうひとつの切り口として、ISS 補給機「こうのとり」（HTV）の発展形として、ISS 以外の対象へのランデブーを可能とする HTV-R が、JAXA にて検討されている。これらのプラットフォームにロボットアームを搭載し、軌道上実証を積み上げていくことが有効であると考えられる。

月探査

（4）で述べた月探査に向けて、日本（JAXA）では SLIM（Smart Lander for Investigating Moon）と名付けられた月面着陸機の開発が進められている。SLIM では月面のクレーターなどの地形をリファレンスとする画像航法を用いて、ピンポイント着陸（目標地点へ精度よく着陸）する技術を確立することが、最も重要と考えられている。上述のように月面では極域の永久日陰における水氷探査、縦孔を入口とする地底探査などが注目されており、これらを円滑に行うためには探査対象スポットへ着実にピンポイント着陸することは、探査活動の出発点として最重要な技術である。これを踏まえた上で、月面上では、（a）ローバーに代表される表面移動技術、（b）水氷発見のためのセンサー技術、（c）サンプルの掘削、採集技術、（d）採集したサンプルの分析技術の開発が求められている。これらの作業は無人で行うことが想定され、ロボット技術が大いに期待されている。

月面探査を考える上で、特に大きな技術課題として「越夜」の技術があげられる。月の自転速度は遅く、月面では約 2 週間の昼間（日照）と約 2 週間の夜（日陰）が繰り返される。夜の期間には地表温度は -150℃あるいはそれ以下まで下がるので、いかにして越夜をするかが月面ミッションにおける大きな技術課題である。（ちなみに、アポロ計画において人が月面に滞

在したのは、月の昼間の時間帯の数日間のみであった。）このような極低温では、現存する電子デバイスや電池等は破壊されてしまう。ヒーターによる保温が考えられるが、2 週間ヒーター加熱を継続するためには相当の電力量が必要となる。先行する米国、ロシア、中国の探査機・着陸機では、放射性同位体熱電気転換器（Radioisotope thermoelectric generator, RTG）が必要に応じて搭載されており、放射線同位体の崩壊熱を利用した保温（＋発電）が行われているが、この技術を日本で使うことは困難である。技術開発課題としては、放射線同位体による発熱がなくても極低温で使用可能な電池や電子デバイスの開発が求められている。

さらには、月面を覆うレゴリスと呼ばれる微粒子に対する防塵対策等も重要課題である。

自律ナビゲーション

月惑星上で上述のような無人探査ミッションを行うためには、探査ロボットには相応の自律性が求められる。ローバーが天体表面を移動するためには、ローバーと同スケールでの詳細マップが必要であり、マップを作成しながら探査領域を広げていく SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）技術が必須のものと言える。（4）でも紹介した画像ベースの機械学習（AI）を活用した Terrain Classification（走行のための地形分類、土壌分類）の開発と実装が注目すべき課題である。

（6）その他の課題

人材育成

これまでの宇宙開発は国家プロジェクトとして推進されてきたが、質量 100kg 程度以下の小型衛星を大学等の研究機関やベンチャー企業が開発し、大型衛星の相乗り副衛星として打ち上げるという新しい動きが広まりつつある。そのパイオニアとなったのは英国 Surry 大学である。同大学では 1981 年にアマチュア無線衛星を成功させ、1985 年には Surrey Satellite Technology Ltd（SSTL）と名付けた大学発ベンチャー企業を設立し、この分野のフロントランナーとして成長を続けている。1990 年代半ば以降、一辺 10cm、質量約 1kg の CubeSat というフォーマットが提唱され [9]、宇宙工学の教育、技術実証、人材育成、さらには、新しい宇宙探査ミッションや宇宙ビジネスへと拡がりを見せている。短期間、低予算で宇宙機を開発し、軌道上データが得られることは、新たに宇宙開発ビジネスに参加しようとする企業等に対して参入の敷居を下げ、また大学等の研究教育機関においては、実践を通して人材育成をおこなう機会の拡大につながる。地球周回軌道の範囲を超えて、月惑星探査の分野に対しても、大学やベンチャー企業が独自のミッションを提案し、実行できる時代へと突入しつつある。リスクの高い挑戦的なプロジェクトや、新しいアイディアに基づいた多様な宇宙ミッションが実施されることにより、宇宙開発・宇宙探査の分野にイノベーションが生み出されることが期待されている。

法規制

宇宙ビジネスへの参入の敷居が下がり、より多くのプレイヤーが宇宙開発に参入する時代に備えて、法規制の問題を考えておく必要がある。1967 年に、宇宙空間の探査・利用の自由、領有の禁止、平和目的などを基本原則にした国際的な「宇宙条約」が制定されている。しかし、月、火星、小惑星等に有用資源が発見され、これを国家や企業間で競争的に開発する場合、あ

るいは人類が地球以外の天体に長期滞在する時代を想定すると、これまでの枠組みでは対応できないケースが予想される。アメリカおよびルクセンブルクでは既に、宇宙における民間の活動を促進する目的で、新たな宇宙法や宇宙資源関連法を整備している。わが国も、先端技術開発でリーダーシップを発揮していくのと並行する形で、国際的なルール作りにも積極的に参加していくことが望まれる。

（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	○	→	日本初の人工衛星「おおすみ」が1970年に打ち上げられ、日本は、ソビエト連邦（当時）、米国、フランスに次ぐ4番目の人工衛星打上国となった。以降2003年にJAXAとして統合されるまでの間、日本の宇宙開発は、宇宙科学ミッションを指向する宇宙科学研究所（ISAS）と、1969年に設立された宇宙開発事業団（NASDA）の2本立てで進められてきた。NASDAの宇宙ロボットとしては、1997年の技術試験衛星VII型「おりひめ・ひこぼし」が特筆される。一方、ISASの小惑星探査として計画・開発されてきた「はやぶさ」は、微小重力天体への無人サンプルリターン技術を成功させたミッションとして、世界的に注目されるものとなった。
	応用研究・開発	○	→	日本が国際宇宙探査の分野でプレゼンスを示していくためには、重力天体への直陸技術の確立が重要であると考えられている。月面への高精度着陸を目指したSLIM計画が、2020年代前半の実現へ向けて開発が進められている。これに次ぐものとして、2018年現在、インド宇宙庁ISROとの共同による月極域着陸探査（SELENE-R）ミッション、米国が主導する月軌道プラットフォームゲートウェイ（LOP-G）への参加､火星衛星探査ミッション（MMX）、加えて欧州との協力による有人月離着陸実証ミッション（HERACLES）等を目指したロードマップが議論されている。日本でも宇宙開発にベンチャー企業が参入する動きも活発化しており、宇宙ゴミの監視・除去をめざすAstroscale社、月面資源探査をめざすispace社などが注目を集めている。
米国	基礎研究	◎	↗	宇宙開発・宇宙探査先進国であり、月惑星探査で常に主導的な立場にある。1958年にNASAが設立され、NASAの各フィールドセンターや主要大学にて常に基礎研究が行われている。特に、カリフォルニア工科大学の付属研究機関として発足したジェット推進研究所（JPL）は、1958年よりNASA専属の機関として宇宙開発計画や宇宙探査計画の技術開発に携わるようになり、宇宙船や惑星探査機の設計など技術面を担当している。米国の宇宙開発計画において、月着陸船や、火星探査機、外惑星探査機の開発などで大きく貢献している。
	応用研究・開発	◎	↗	NASAの宇宙プログラムは、ノースロップ・グラマン、ロッキード・マーティン、ボーイングなどの巨大産業に支えられてきたが、昨今ではSpaceX、Blue Origin, Vergin Galactic, Rocket Labなどのベンチャー企業が、ロケットの開発および打上げサービス事業を推進している。衛星を用いたリモートセンシングや通信サービスを提供するベンチャー企業も数多く立ち上っている。2009年に創業したPlanetary Resources社は、小惑星資源探査の商業化を目指している。 2018年NASAは､月周回軌道上に人が長期滞在できる「月軌道プラットフォームゲートウェイ（LOP-G)」を国際協力で開発することを呼びかけた。また米国内では、月へのペイロード輸送業務を民間に開放するCommercial Lunar Payload Services（CLPS）プログラムを開始し、民間月面探査ビジネスを目指すAstrobotics社などが採択されている。 これらの動きに伴って、大学における研究開発も活発である。
ロシア	基礎研究	◎	→	宇宙開発・宇宙探査先進国であり、旧ソビエト連邦時代の1957年に世界初の人工衛星、1961年人類初の有人飛行、1966年月面軟着陸（無人）、1970年月面車（無人)、1971年有人宇宙ステーションなど、世界の宇宙開発をリードする成果をあげている。2011年に米国のスペースシャトルが退役して以降、ロシアのソユーズ宇宙船が、国際宇宙ステーションへの有人アクセスができる唯一の手段になっている。
	応用研究・開発	◎	→	月探査については、極域表面探査やサンプルリターンなどを含むルナグローブ（無人）が計画されている。火星探査については欧州苦衷機関と共同でExoMars2020の開発を進めている。
カナダ	基礎研究	○	→	NASAスペースシャトルに搭載されたロボットアームSRMSおよび国際宇宙ステーション搭載ロボットアームSSRMSはカナダにおいて開発され、カナダにおける宇宙ロボット技術の重要な実績となっている。
	応用研究・開発	○	→	NASAや欧州宇宙機関の惑星探査大型プロジェクトに、特にロボット関連技術をもって貢献している。モントリオール郊外にはカナダ宇宙庁のMars Yardがあり探査ローバーの研究開発も活発に行われている。

欧州	基礎研究	◎	→	1975年に欧州宇宙機関（ESA）が結成され、2018年時点で22か国が加盟している。ロケット打ち上げはアリアンスペース社が担い、宇宙機開発はエアバス社を中心に様々な企業が参加している。オランダに欧州宇宙技術研究センター（ESTEC）があり、宇宙機に関する技術の開発や試験が行われている。特に宇宙ロボットの研究開発については、ドイツ航空宇宙センター（DLR）が学術研究コミュニティーではよく知られている。たとえば、1993年にスペースシャトルで実施されたROTEXは、軌道上宇宙ロボットの先駆的な軌道上実証として知られている。以降、DLRでは継続的に軌道上ロボットの先端的な研究開発が続けられている。
	応用研究・開発	◎	→	ESAでは様々な太陽系探査ミッションを戦略的に進めているが、宇宙ロボットの観点からは、ExoMars 2020が注目される。これはロシアの着陸機と欧州が開発するローバーにより構成される。ローバーは約300kgの6輪型が計画されており、欧州主要国の宇宙機関および大学等にて研究開発、実証試験が進められている。
中国	基礎研究	○	↗	中国最初の人工衛星は1970年、日本の「おおすみ」の約2か月後に成功した。1990年代にはいると、中国国家航天局と中国航天工業公司が設立され、国をあげた戦略的な宇宙開発が加速している。基礎研究では、北京航空航天大学、ハルビン工業大学、清華大学などが密接にかかわっている。
	応用研究・開発	○	↗	中国は2003年に神舟5号によって有人宇宙飛行を達成し、2011年には、ドッキング可能な有人モジュール「天宮1号」を打上げ独自の宇宙ステーション技術を確立した。月面探査については、2007年の「嫦娥1号」を皮切りに着実に開発を進め、2013年の「嫦娥3号」では月面への無人軟着陸・ローバー走行に成功し、2018年12月に打ち上げられた「嫦娥4号」では、月の裏側への着陸に成功した。また、2020年頃を目指して火星探査機を開発することも公表している。
韓国	基礎研究	△	→	KARI（韓国航空宇宙研究院）、KAIST、ソウル大学等の研究機関、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	△	→	KARIでは月探査計画を推進しているが、打ち上げに至るまでには、さらに時間が必要であると考えられる。
インド	基礎研究	○	↗	1960年代にインド宇宙研究機関ISROが創設され、1979年に自国で開発されたロケットの打ち上げに成功した。2008年には初の月周回探査機「チャンドラヤーン1号」、2014年には初の火星周回探査機「マンガルヤーン」に成功している。
	応用研究・開発	○	↗	月面無人着陸・ローバー探査を目指した「チャンドラヤーン2号」の打上げが2019年に予定されている。また、2020年代前半の打上げをめざして、JAXA-ISROの国際協力による月面極域着陸探査ミッションが検討されている。

（8）参考文献

1）David L. Akin, Marvin L. Minsky, Thiel, E. D., and Kurtzman, C. R., "Space applications of automation, robotics and machine intelligence systems（ARAMIS）, Phase II: Telepresence technology base development," NASA Contract Report 3734,（1983）.

2）Mitsushige Oda, "Experiences and lessons learned from the ETS-VII robot satellite," In the Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation（ICRA 2000; San Francisco, California, April 24-28, 2000）, Vol. 1,（2000）pp. 914-919.
DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844165

3）Kazuya Yoshida, "Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit," The International Journal of Robotics Research, Vol. 22, No. 5,（2003）pp. 321-335. DOI: 10.1177/0278364903022005003

4）Mark Maimone, Yang Cheng, and Larry Matthies, "Two years of visual odometry on the mars exploration rovers," Journal of Field Robotics, Vol. 24, No. 3,（2007）pp. 169-

186. DOI: 10.1002/rob.20184

5）Ramon Gonzalez, and Karl Iagnemma, "Slippage estimation and compensation for planetary exploration rovers. State of the art and future challenges," Journal of Field Robotics, Vol. 35, No. 4,（2018）pp. 564-577.
DOI: 10.1002/rob.21761

6）Brandon Rothrock, Jeremie Papon, Ryan Kennedy, Masahiro Ono, Matthew Heverly, and Chris Cunningham, "SPOC: Deep learning-based terrain classification for mars rover missions," AIAA Space Forum 2016,（2016）pp. 1-12.
DOI: 10.2514/6.2016-5539

7）Akira Fujiwara, et al.,“The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa,” Science, Vol. 312, Issue 5778,（2006）pp. 1330-1334; Masanao Abe, et al.,“Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft,” Science Vol. 312, Issue 5778,（2006）pp. 1334-1338; Tatsuaki Okada, et al.,“X-ray Fluorescence Spectrometry of Asteroid Itokawa by Hayabusa,” Science Vol. 312, Issue 5778,（2006）pp. 1338-1341; Jun Saito, et al.,“Detailed Images of Asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa,” Science Vol. 312, Issue 5778,（2006）pp. 1341-1344.

8）Tomoki Nakamura, et al.,“Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites,” Science, Vol. 333, Issue 6046,（2011）pp. 1113-1116; Hisayoshi Yurimoto, et al.,“Oxygen Isotopic Compositions of Asteroidal Materials Returned from Itokawa by the Hayabusa Mission,” Science, Vol. 333, Issue 6046,（2011）pp. 1116-1119; Hisayoshi Yurimoto, et al.,“Oxygen Isotopic Compositions of Asteroidal Materials Returned from Itokawa by the Hayabusa Mission,” Science, Vol. 333, Issue 6046,（2011）pp. 1116-1119; Mitsuru Ebihara, et al.,“Neutron Activation Analysis of a Particle Returned from Asteroid Itokawa,” Science, Vol. 333, Issue 6046,（2011）pp. 1119-1121.

9）Hank Heidt, Jordi Puig-Suari, Augustus Moore, Shinichi Nakasuka, and Robert Twiggs, "CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation," In the Proceedings of 14th Annual/USU Conference on Small Satellites（Logan, Utah, August 8-11, 2000）pp. 1-19.
http://culair.weebly.com/uploads/4/3/1/4/43140931/heidt-2000.pdf（accessed 2019-01-15）

２．２．６　インフラ保守・建設ロボット

（１）研究開発領域の定義

日本では、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。また、近年、自然災害が多発しており、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題である。一方、建設分野においては、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。これらの問題を解決するため、現在、ICT やロボット工学を用いた、点検や調査、建設における自動化や省人化が期待されている。（関連領域：社会システム科学　社会インフラマネジメント）

（2）キーワード

インフラ点検、無人化施工、情報化施工、ドローン、建設機械、ICT 土木

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

日本では、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の老朽化が急速に進んでいる。 2012 年に発生した笹子トンネル天井板落下事故では、天井板のコンクリート板が落下し、走行中の車複数台が巻き込まれ、多数の死者を出した。このような事故を未然に防ぐためには、インフラの維持管理・更新の作業が急務であるため、国土交通省は、2014 年 7 月より、日本国内の全トンネルと橋梁で一律に、5 年に 1 度の点検を義務付けている。しかしながら、全国には、橋梁だけで 70 万橋、トンネルは 1 万本あるため、点検コストは膨大となり、さらに、熟練点検員の不足も問題となっている。これらの橋梁やトンネルを始めとするインフラの点検を効率的に進めるための、ロボット技術に対する期待が大きい。

また、建設現場においては、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。特に、地方の土木建設工事においては、その状況は深刻化している。そこで、国土交通省は、2016 年を生産性革命元年と位置づけ、建設施工分野で「i-Construction」と銘打って、ICT（Information Communication Technology）土工を推進してきた。この施策を更に進めるため、ICT ならびにロボット技術を用いた建設機械の自動化に関する研究開発が求められている。

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る。特に 2018 年の異常気象による大雨や台風は、各地に大きな災害をもたらした。自然災害発生時には、災害調査や応急復旧が重要となるが、一般に、対象とする災害現場は非常に過酷であり、二次災害の危険も存在する。したがって、遠隔より調査可能な無人の調査機器ならびに、遠隔より操作可能な建設機械を用いた応急復旧技術が求められている。

以上に示した通り、現在、インフラ点検ならびに建設現場における自動化や省人化が急務であり、ICT やロボット工学を用いた点検技術や建設機械の自動化／省人化技術の研究開発が求められている。

(4)［研究開発の動向］

2013 年 3 月、国土交通省は、建設ロボット技術に関する懇談会を開催し、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)]。これに伴い、ここ数年、省庁間連携ならびに産官学連携により、これら4つの重点項目を中心に、研究開発が進められてきた。

① 情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化

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進められてきた。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ならびに、ブルドーザのブレード制御技術などが挙げられる[3)]。さらに、国土交通省は、2016年9月に、政府の「未来投資会議」において、建設現場の生産性革命に向け、「建設現場の生産性を2025年までに20%向上させる。そのため、3年以内に公共工事の現場で、施工・検査に至る建設プロセス全体を3次元データでつなぐ新たな建設手法を導入する。」という方針を決定した。通称i-Constructionと呼ばれるこの方針の施策のひとつが、ICTの全面的な活用（ICT土工等）である[4)]。ICT土工は、ドローンなどを使った3次元測量を行い、3次元設計データなどにより、建設機械を自動制御して施工し、再びドローンなどを使って3次元で出来形を検査するといった、ICTを全面的に活用する工事である。2018年には、ICT土工のみならず、ICTの活用拡大として、河川の浚渫工事や橋梁、トンネルなどの維持管理分野への拡大なども図られている。このように、2016年より、国土交通省がICTの活用を強力に進めているため、建設機械の制御技術の高度化のみならず、三次元データを取得するためのレーザ距離センサーやドローンに搭載したカメラを用いた航空測量などの実用化が急ピッチで進められている。

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

日本には、橋梁が約70万橋、トンネルが約1万本あり、5年に1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ならびに維持管理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）の「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」[5)]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）「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」[6)]の主導で進められてきた。また、国土交通省は、2014年より、実業務への導入が期待できる点検ロボットについて民間企業等への公募を行い、全国各地の実現場において実用性等の検証を実施した[7)]。上述のプロジェクトならびに国土交通省の現場検証により、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システムの開発[8)]や、トンネル内を走行しつつ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[9)]。このように、公共インフラの維持管理のためのロボット技術が、産官学の連携で進められている。

③ ロボット技術による災害現場調査技術の開発

日本では、地震や水害、火山災害などの自然災害が発生しやすく、被害を最小限にとどめるための、被災地における情報収集は大変重要である。そこで、災害調査技術の研究開発につい

ても、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）「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」の主導で進められてきた。例えば、火山災害対応を行うための、立入制限区域の情報収集を行うことを目的とした、長距離飛行が可能なドローンシステムの開発が進められている[10]。

④ ロボット技術による応急復旧技術の開発

1991年の雲仙普賢岳の噴火後、立入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[11]。この無人化施工は、建設機械や環境中に設置したカメラから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が遠隔から操縦するものである。先の福島第一原子力発電所の事故においても、瓦礫撤去作業の際にも活用され、また、2016年の熊本地震の際に発生した阿蘇の土砂崩れの応急復旧工事においても、無人化施工が利用された。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。

以上の4項目は、省庁間連携ならびに産官学連携により進められてきた具体的な社会的問題を解決するロボット技術であるが、石油プラントなどの民間のインフラの点検についても、国の施策とは独立に、自動化の要求が高まっている。例えば、洋上プラントの自動点検を対象としたロボットシステムの研究開発が、競技会形式で進められてきた[12]。また、災害対応については、2018年にスタートしたWorld Robot Summit（WRS）の中でプラント防災予防チャレンジやトンネル事故災害対応・復旧チャレンジが設定され、競技会形式で研究開発が進められている[13]。

上述の技術を更に向上させるためには、基礎研究の推進も重要である。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、ロボットの位置を精度良く推定する技術の研究、移動ロボットやドローンの自律動作の研究、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレータに伝える遠隔操作性向上に関する研究、ロボットとオペレータ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、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、ロボットシステムに関する研究が重要となると考えられる。

（5）注目動向

[新展開・技術トピックス]

インフラ維持・建設ロボットの研究開発については、基本的には、「新技術の創出を期待する」というよりも、既存のロボット技術を建設ロボット分野に適用し、新たな価値を創出することが期待されているように見受けられる。これを念頭に置き、近年の国内外の研究動向について以下に掲載する。

建設ロボットの遠隔操作に関するロボット技術としては、ここ数年、スイスのETHの建設機械が大きく注目されている。ここでは、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。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用の椅子の姿勢が変動することができ、臨場感の高い遠隔操作が可能となる。また、この建設機械に対し、遠隔操作する際の衝突回避に関する技術を開発した[14]。この技術にバーチャルリアリティ技術なども融合させることで、今後は、遠隔操作時の作業効率の向上が期待できる。

日本の建設機械については、コマツがスマートコンストラクションという枠組みを提案し、その中で、情報化施工ならびにIoTをベースとした施工システムの開発を進めている[15]。ここでは、ドローンで取得した三次元データを元に、施工計画からICT建設機械を用いた施工や、これらを統括するシステムをパッケージ化し、熟練工でなければ施工が困難であった法面成型などを容易に実現するシステムを提供している。また、鹿島建設は、クワッドアクセルという建設機械の自動化による建設生産システムを提案した。これは、汎用の建設機械にGPS、ジャイロ、レーザスキャナなどの計測機器及び制御用PCを搭載することによって自動機能を付加し、自動運転を実現している[16]。上記は、いずれも、既存の技術を組み合わせることで新たな価値を創出した例である。

また、内閣府のImPACT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、二本腕を有する建設ロボットを開発している[17]。このプロジェクトで開発した建設ロボットは、腰部で両手が旋回する2重旋回・複腕機構を搭載しており、両手のレイアウトが自由に変更できるため、手とクローラを使った急坂・段差のよじ登りや、双腕を用いた繊細・器用な作業性を実現することが可能である。また、このプロジェクトでは、遠隔操作性の飛躍的改善を目指し、有線給電ドローンによるロボット周囲状況の把握、任意視点の俯瞰映像生成、霧の透過視、画像ノイズ除去、半消失映像の生成、音源探索、AR操作アシスト、動力学シミュレータを用いた操作トレーニングなど、多様な情報提示と操作支援システムの開発を行っている。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。

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、前述の通り、2014年以降、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、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、SIPのテーマの一つのトンネル検査用可変形状フレームの機構については、トンネルの目視/打音検査を実現可能な可変形状フレームを製作し、トンネル内でのフレームの走行ならびに変形制御を実現すると共に、そこに搭載した視覚センサーならびに打音検査機を用いて、交通を妨げることなく、トンネル点検を実現する技術の開発を進めている[18]。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

前述のSIPならびにImPACTタフロボティクスチャレンジのプロジェクトは、2018年度で終了となるが、建設・インフラ維持管理技術／革新的防災・減災技術については、官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion PrograM : PRISM）[19]の中で研究開発が進められる予定である。ここでは、建設分野の三次元データベースの構築・有効活用、基準・制度、プレハブ化自動施工、新材料開発等基幹的な建設技術を開発すること目指している。このプログラムには、さらに「インフラ維持管理・更新・マネジメ

ント技術」と「レジリエントな防災・減災機能の強化」の両 SIP の成果も取り入れ、インフラの調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの一連の建設生産プロセスにおいて、建設分野を中心に他産業の技術を用いて生産性向上を実現するとともに、災害予防・被害軽減に資する対策を速やかに進めることを目標としている。

一方、2020 年を本大会とした World Robot Summit（WRS）では、プラント防災予防チャレンジやトンネル事故災害対応・復旧チャレンジが設定され、競技会形式で研究開発が進められている。2018 年には、東京でプレ大会を実施したが、国内のみならず、世界各国からチームが集結し、それぞれの課題に取り組んだ。競技会形式の研究開発については、その効果に賛否両論が存在するが、かつて DARPA が主催したチャレンジにおいても、そこで開発された成果がロボット技術を大きく推し進めた例もあるため、今後、WRS のチャレンジについても注目が集まっている。

（6）科学技術的課題

先述の通り、本分野における科学技術的課題については、「新技術の創出を期待する」ことよりも、既存のロボット技術を建設ロボット分野に適用し、新たな価値を創出することの方が期待されているように見受けられる。また、対象となる環境が屋外の自然環境であるため、屋内環境で培ったロボット工学の基礎技術が、そのままでは屋外環境で適用困難となることも少なくない。以下に、今後インフラ保守・建設ロボットに必要と考えられる技術的課題について列挙する。

① 建設機械における移動技術については、対象とする環境が不整地または軟弱土壌であることから、建設機械の走破性能（トラフィカビリティ）の検証ならびに、走行性能の向上が重要となる。軟弱土壌については、テラメカニクス [20] をベースとした研究が、建設機械に対しても進められてきたが、現実の環境は均一土壌といったテラメカニクスに必要となる条件を満たすことが不可能であるため、実問題に対して、直接適用することが困難といわれている。また、走行性能の検証には、土壌パラメータの取得が重要となるが、これを非接触で計測する手段も未解決の問題である。さらに、走行性能の向上については、サブクローラやバックホウのアームを利用した、不整地走破性能の向上に関する研究が進められているが、この分野の研究についても、今後の発展が期待される。

② ドローンの位置推定については、基本的には GNSS（Global Navigation Satellite System：全球測位衛星システム）で行うものが多いが、橋梁点検などのアプリケーションでは、信号が遮られるため、GNSS による位置推定を行うことが困難な場合がある。これを解決するための手法として、レーザ距離センサーや画像を用いた SLAM（Simultaneously Localization And Mapping）[21] の技術を利用した様々な方法が提案されている。しかしながら、この手法を用いて自然地形や、特徴量の少ない橋梁／トンネルにおける位置推定を行うことは、環境によって比較的困難であるため、今後の研究の進展が期待される。一方、石油プラントなどのインフラ点検を行うことが期待される不整地移動ロボットの位置推定についても、同様の手法の活用が期待される。

③ 無人化施工において、特に建設機械から遠く離れた場所から操作者が操作を行う場合、建設機械や作業エリアに設置したカメラから得られる画像情報を用いて作業を行う。これにより、作業効率は、通常の搭乗操作と比較し、50%程度まで低下するといわれている[22)]。この作業効率を向上させることは、無人化施工において非常に重要な課題であるが、これを実現するための方策については研究段階である。一つの方策として、作業現場の臨場感をオペレータに伝えるためのVR技術に関する研究が挙げられるが、現場に導入するまでには、大きなブレイクスルーが必要であると考えられる。

④ インフラ保守・建設ロボットは、数多くのセンサーや駆動系を必要とする比較的規模の大きいロボットシステムとなる。これを長時間、安定して動作させるためには、ロボットシステムにフェイルセーフ機能を導入することが望ましく、今後、ロボットシステムに対するフェイルセーフ機能の導入に関する研究が必要であると考えられる。また、建設現場など、人と機械が空間を共有する場合、人に対する安全性を確保する必要がある。ロボットの安全に関する研究は、サービスロボットなど複数の分野で進められているが[23)]、建設ロボットに関する安全についても、研究を進める必要があると考えられる。

⑤ ロボットとオペレータ間の無線通信を安定して確保することは、本分野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）の側面もあるが、今後、ハード面、ソフト面共に、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、インフラ保守・建設ロボットの適用範囲が大きく広がる可能性がある。

（7）その他の課題

(6) 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問題が存在する。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、総務省は、移動体を対象とした2.4GHz帯、5.7GHz帯、2.4GHz帯、169MHz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[24)]。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、ロボットの活用において、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。そのための法整備ならびに、非常時におけるルールの策定など、総務省の対応が期待される。

（8） 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	○	→	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。
	応用研究・開発	◎	↗	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。
米国	基礎研究	○	↗	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[25]やJPLならびにCaltechのグループが、高い成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	→	ブルドーザ、グレーダ、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[26]。
欧州	基礎研究	○	→	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[27]。
	応用研究・開発	○	→	ブルドーザ、グレーダ、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等に実用化が進められている。
韓国	基礎研究	△	→	不整地の走行に関する研究などは、各研究機関において、着実に進められている。
	応用研究・開発	△	↗	2020年より、建設機械の自動化に関するプロジェクトが立ち上がると聞いている。

（9） 参考文献

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（accessed 2019-02-08）
2）国土交通省,“情報化施工推進戦略,”http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf（accessed 2019-02-08）
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, Vol. 55, No. 6（2016）pp. 477-482.
4）橋本 亮,“I-Construction推進コンソーシアム等,”建設機械施工, Vol. 70, No. 7,（2018）pp. 5-10.
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, Vol. 71, Issue 4,（2016）pp. 42595.
6）新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI部, "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", http://www.nedo.go.jp/content/100871665.pdf（accessed 2019-02-08）
7）日本ロボット学会（編）,「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」特集, 日本ロボット学会誌 Vol. 34, No. 8 & No. 9（2016）.
8）大野 和則, 岡田 佳都, 原島 正豪, 横江 政和,“橋梁の近接目視点検を支援する飛行ロボットシステムの開発,”精密工学会誌, Vol. 83, No. 12,（2017）pp. 1066-1070.
9）水口 尚司, 大西 有三, 徳田 浩一郎, 西山 哲, 石村 勝伸,“道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告", 土木学会論文集 F2（地下空間研究）, Vol. 73, No. 1,（2017）pp. 1-10.
10）永谷 圭司, 羽田 靖史, "火山災害地域で活躍するセンシングロボットの開発", 電波技術協会報, Issue 315,（2017）pp. 14-17.
11）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,（2013）pp.45-53.

12）ARGOS Challenge Website, http://www.argos-challenge.com/en（accessed 2019-02-08）
13）World Robot Summit, “World Robot Challenge 2018,” http://worldrobotsummit.org/wrc2018/（accessed 2019-02-08）
14）David Gonon, Dominic Jud, Péter Fankhauser, and Marco Hutter, “Safe Self-collision Avoidance for Versatile Robots Based on Bounded Potentials,” Field and Service Robotics, edited by Marco Hutter and Roland Siegwart,（Springer-Verlag, Berlin, 2018）pp. 19-33..
15）四家 千佳史 , 小野寺 昭則 , 高橋 正光 , " 建機メーカーが描く ICT 建機施工を中心とした建設現場の未来（「スマートコンストラクション」の導入）", 日本建設機械施工協会誌 , Vol. 67, No. 12,（2015）pp. 16-20.
16）木村 駿 , " 鹿島のクワッドアクセルを徹底解剖 自動化の秘密 , 教えます ", 日経コンストラクション 2018 年 3 月 26 日号 , pp. 43-47.
17）吉灘 裕, 横小路 泰義, 永谷 圭司, 昆陽 雅司, 山下 淳, 田中 正行, "ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ（TRC）建設ロボット― 2 重旋回・複腕モデルによるフィールド評価実験 ―", ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集，2A1-J02（2018）.
18）權 純洙 , 井上 文宏 , 中村 聡 , 柳原 好孝 , “トンネル検査用可変形状フレームの機構と形状制御に関する研究” ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集，2A1-C01, C02（2018）.
19）内閣府 , “官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）” http://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.html（accessed 2019-02-08）
20）Jo Yung Wong, Theory of ground vehicles,（John Wiley & Sons, 2008）.
21）Josep Aulinas, Yvan Petillot, Joaquim Salvi, and Xavier Lladó, “The SLAM problem: a survey,” In Pro-ceedings of the 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence（CCIA2008; Sant Martí d'Empúries, Spain, October 22-24, 2008）, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Vol. 184,（2008）pp. 363-371.
22）茂木 正晴 , 山元 弘 , “無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動 ,” 計測と制御 , Vol. 55, No. 6,（2016）pp. 495-500.
23）新井 健生 , “安心なロボットを考える ,” 日本ロボット学会誌 , Vol. 36, No. 4,（2018）pp. 266-269.
24）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（accessed 2019-02-08）
25）David Kohanbash, , Scott Moreland, and David Wettergreen, ” Plowing for rover control on extreme slopes,” Field and Service Robotics, edited by Kazuya Yoshida and Satoshi Tadokoro（Springer-Verlag, Berlin, 2014）pp. 399-413.
26）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,” 日本建設機械施工協会誌 , Vol. 65, No. 7（2013）pp.21-24.
27）山口 崇 , “欧州における情報化施工等の状況 ,” 日本建設機械施工協会誌 , Vol.65, No. 7,（2013）pp.25-28.

２．２．７　災害対応ロボット

（１）研究開発領域の定義

地震、津波、集中豪雨による水害、台風による暴風雨、山崩れ・地滑り、森林火事、竜巻、火山の噴火、土石流などの様々な自然災害および工場でのプラント事故、原子力発電所の事故、公共交通機関での事故、テロによる事故などの様々な人為災害が世界で頻繁に発生している。これらの災害現場に人間が入っていくには大きなリスクがある。人間の代わりの災害直後の現場に進入し、情報収集や人命救助などの緊急対応や災害からの復旧復興に関わるタスクを遂行する極限環境で有用なロボット技術を災害対応ロボットと定義する。

（２）キーワード

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）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

世界各地で災害が多発しており、それに備えることは各国共通の課題である。災害には、自然災害（洪水、地すべり、地震、台風、雪崩など）と人為災害（テロ、プラント災害、森林火災、交通事故など）があるが、いずれも大規模災害では多くの人が被災し、被災した国の組織と経済に大きな影響を与える。災害の様相は国の風土や文化によって様々であるが、災害対応技術の基礎となる基盤技術は共通であり、特に情報収集に関してはあらゆる災害において最重要である。日本では阪神淡路大震災で地震直後に瓦礫の中に閉じ込められた被災者の生存確率は 3 日後には 5% 以下になってしまうことが分かった。この黄金の 72 時間以内に、被災者を発見し救助することが喫緊の課題である。災害の被害を如何に少なくできるかは、初動にかかっている。その意味で、災害初期対応技術は非常に重要であり、二次災害を起こすことなく、迅速に大域的な情報と局所的な情報を収集し、適切な対応策を実施することが重要である。

災害時には電力・人材・時間・情報・食料など全てのリソースが不足する。このリソース不足を技術によって補完することで、より効果的効率的な災害対応活動の支援をすることは工学分野の使命である。特に情報が錯綜する初動時に、迅速に正確な情報を収集し共有することは極めて重要である。ファースト・レスポンダー（最初の対応者：災害や事故による負傷者に対して、最初に対応する救助隊・救急隊・消防隊・警察など）にとって災害の大域的な情報が不足すると、限られたリソースの適切な配分など重要な意思決定が困難になる。また、要救助者の位置の特定など、局所的な詳細情報を提供できれば、救助活動の効率化に大きく貢献する。

日本では、1995 年の阪神淡路大震災や地下鉄サリン事件、2011 年の東日本大震災や 2018 年の西日本豪雨災害など、自然災害や人為災害による大被害があとを絶たない。災害発生直後の初動が減災に極めて大きな影響を与えるため、初期の災害対応技術は非常に重要である。大規模な災害の場合には、迅速に大域的な情報と局所的な情報を正確に収集し、意思決定支援に活用することは、災害対応戦略の最適化という観点から重要である。

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、開発のみに留まっており、実運用には至らなかった。これに対し、ドイツの KHG 社（Kemtechnische Hilfsdienst. GmbH）とフランスのグループアントラ社では、事故時に備えて原子力災害対応ロボットが開発・配備されてきており、日本の災害対応ロボットシステムの実用化や配備は遅れていると言わざるを得ない。

先進国は公害の問題、少子高齢化の問題など様々な問題を、他の国々に先駆けて経験する。先進国はこれらの問題を解決し、次に同じ問題を抱えることになる国々にその解決策を示す必要がある。それが先進国の一員である日本の責務でもある。一方、日本は災害大国だと言われている。災害を経験した国は、その対応策を次に同じ問題に直面する国々に示す必要がある。しかし、全ての国が可能とは限らない。災害は先進国だけで発生するものではない。地震・津波・豪雨・火山・台風など多くの災害を経験した災害大国であり先進国である日本は、災害を経験した国々の代表として、その解決策を世界に示す必要があり、それが日本のプレゼンスを示すことにもなる。

［研究開発の動向］

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 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 [1]。海外では、2001 年のハイジャックされた旅客機がニューヨークの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 テロの現場から、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所を積極的に進めている国々では、事故時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、開発のみに留まっており、実運用には至らなかった。2011 年に日本で発生した東日本大震災では、陸海空のロボットが実災害現場で使用された [2, 3]。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瓦礫の調査や遺体の探索が実施された [4]。また、福島第一原子力発電所の事故現場では、無人化施工機械が瓦礫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、建屋の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、現在でも様々なロボットが開発されている。

次に、米国のレスキューロボット開発に関する状況を考えてみたい。国防高等研究計画局（DARPA）は軍で使うための新技術開発および研究を行っている国防総省の機関である。例えば、インターネットや GPS は DARPA からの予算支援を得て開発され、それが民用に転用されて広く普及し、現在ではインターネットや GPS が無い世界は考えられないまでになった。米国では、ロボットに関しても同様なシナリオで研究開発が進められている。戦場に人間が行く代わりに、ロボットが戦場に行って戦うのであれば、国民の理解が得られる。また、軍がロボットを調達するので大きな市場が形成され、ビジネスとして企業が商品としてのロボットを開発販売する。さらに、ロボットを実現場である戦場で使って課題を抽出し、開発にフィードバックし、それをまた戦場で使う。このような開発・実証実験・改良のループを回すことができる。これに対して日本では、50 年に 1 度程度しか起こらない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り、市場は存在していない。市場が無ければ企業が参入できず、志をもった大学の研究者がレスキューロボットを細々と研究開発し、災害現場へも訓練を積んでいない研究者が出動しロボットを運用するのが現状である。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、あるいは消防や警察や自衛隊にレスキューロボットを配備するなど、政府主導で研究開発を加速させる必要がある。東海村 JCO 放射能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。

このように、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、改良に繋げるフィードバック体制が可能であった。これに比べ、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てきており、状況は少しずつではあるが変化してきている。

一方、ヨーロッパ諸国の原子力発電所を積極的に進めていた国々では、ドイツ電力会社等によって出資設立された KHG 社やフランスの原子力事業者によって設立されたグループアントラ社などにより、事故時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。また、2015 年から ANR（The French National Research Agency）から公募された、石油サイト向け自律ロボットの国際コンテスト ARGOS Challenge - Autonomous Robots for Gas & Oil Sites が開催されてきており、プラントの保守点検および緊急時の対応にロボット技術を導入する試みがなされている。

また、アジアに目を向けてみると、中国は各分野で国策として多額の予算をかけて、世界のトップを目指して研究開発を加速させている。災害対応ロボットシステム分野もその例外ではなく、地震などの自然災害直後に用いる災害対応ロボットより、災害調査や公共安全等に用いられるロボットの開発が精力的に行われている。開発されているレスキューロボットは災害調査無人飛行ロボット、消防ロボット、陸上レスキューロボット（炭鉱レスキューロボット、爆発物処理ロボット、偵察ロボット）に分類される。開発は瀋陽自動化研究所、上海交通大学、ハルビン工業大学、北京航空航天大学、北京理工大学などの研究所や大学が中心となって、一部は商品化されている。また、大学の研究をベースに起業して、大きな会社に成長した DJI（大疆創新科技有限公司、Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd.）などがある [5]。DJI は中国広東省深圳にある会社で、民生用ドローン（マルチコプター）およびその関連機器の製造会社である。商用ドローン業界最大手であり、世界シェアの 70% を占めている。米国、ドイツ、オランダ、日本、北京、香港でオフィスが設立されている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年の人工知能の進展は目覚ましく、深層学習（Deep Learning）が画像認識に対して有効であることが明らかになり、ロボットの認識技術の大幅な向上が期待されている。災害対応分野では、被災者の発見などに適用が試みられている。また、移動ロボットの自己位置と環境地

図を同時に作成するSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術にも大きな進展があり、ロボットの自律化に大きく貢献している。

日本の内閣府が進める革新的研究開発推進プロジェクト（ImPACT: Impulsing PAradigm Change through disruptive Technologies）では、タフ・ロボティクス・チャレンジ（TRC）が採択され2014年度から5年間のプロジェクトが実施されている[6)]。TRCでは、（1）サイバー救助犬（センサーユニットなどを装着し情報化された救助犬）、（2）細径索状ロボット（瓦礫内の探査を目的とした能動スコープカメラ）、（3）太径索状ロボット（プラント点検を目的としたヘビ型ロボット）、（4）脚ロボット（2足歩行、4足歩行、腹這い移動などを実現する4脚ロボット）、（5）飛行ロボット（劣悪環境で自律飛行可能な無人ヘリコプタ）、（6）建設ロボット（双腕を搭載した建設ロボット）、（7）極限油圧コンポーネント（小型軽量大出力の油圧アクチュエーターユニット）（8）シミュレータ（動力学シミュレータ：Choreonoid）、（9）フィールド評価・安全・STM（Standard Test Method）に関する研究開発が行われ、実用化に向けてフィールド評価が実施されている。

ヨーロッパでは、2018年にEUのフレームワークであるHorizon2020において、Boosting the effectiveness of the Security Union（SU）の分野で“Specific Challenge: Resilience is critical to allow authorities to take proper measures in response to severe disasters, both natural（including climate-related extreme events）and man-made.”に関する公募がなされた。3年間で21,000,000ユーロの大きなプロジェクトであり、災害対応の初動における技術の重要性が認識されていることがうかがえる。それに対応する形でJSTでは、災害初期対応の分野で日本とEU間の共同研究を強化する目的で戦略的国際共同研究プログラム（SICORP: Strategic International Collaborative Research Program）日本－EU共同研究「災害初期対応技術」の公募がなされた。日本と欧州の研究者が協力することによって相乗効果が生まれることが期待されている。

ロボットの標準的ミドルウエアとしてROS（Robot Operating System）が広く使われており、全世界の研究者のアルゴリズムやソフトウエアなどの知見を共有できるようになってきた。日本でも、同様な目的で産総研が中心となりRTミドルウエアの開発普及に努力がなされている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本から生まれた国際的なロボット競技会であるロボカップにおいて、ロボカップレスキュー実機リーグが2001年から実施されており、現在では世界大会のほか各国でロボカップオープンが開催されている[7), 8)]。この競技会は、災害空間を模擬した実寸大のフィールドで、開発したロボットシステムを用いて、被災者を含めた環境情報を如何に正確に多く収集できるかを競うものである。本競技のフィールドは米国国立標準技術研究所（NIST）が主導して設計されている。NISTは米国ホームランドセキュリティ省からレスキューロボットの評価方法を標準化するプロジェクトを受託し、国際標準の策定を行ってきた。この評価方法は、本競技を長年実施して蓄積された知見を基盤として、Disaster Cityなどを利用したロボットの評価実験における多くの隊員たちの協力のもと試行錯誤を経て、構築されている。したがって、この評価方法には現場のレスキュー隊員のニーズが反映されており、将来的にはここで構築された評価方法がレスキューロボットシステムの調達での重要な役割を担うことになる。レスキューロボットリーグにおいて、この評価方法の基盤をなすフィールドを採用することにより、競技を通して

現実的な課題に解を与える技術が養われるとともに、評価方法も洗練されていくことになる。

一方、米国では国防高等研究計画局（DARPA）が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、ロボット競技会を企画・開催した[9]。これは、ヒューマノイドロボットが車両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た。日本では軍事技術開発を支援するDARPAが主催するロボット競技会へ、DARPAから予算支援を得て出場することに対抗があり、大学からの参加は認められなかった。2013年に米国フロリダ州で開催された予選には、世界各国から16チームの参加があり、日本から参加した、大学発ベンチャーのSCHAFTが一位で通過した。しかし、SCHAFTはGoogleに買収されたため、本選には出場していない。2014年に経済産業省と米国国防総省の合意に基づき、NEDOがこのDARPAのロボティクスチャレンジに大学チームが参加できる枠組みを急遽作って、日本からは5チームが本選に参加した。2015年に米国カリフォルニア州で開催された本選では、世界各国から25チームの参加があり、韓国の大学KAISTで開発されたロボットが優勝した。実施されたタスクは、車の運転・車から降りる・ドアを開けて建物中に入る・壁の弁を開ける・電動ノコギリで壁に穴を開ける・事前には知らされていないタスク（1日目はスイッチ切り替え、2日目はコンセント引き抜き）・瓦礫乗り越え・階段を上る、であった。また、通信には帯域の制約などの不定期な外乱が設定されており、不確実な情報インフラを前提としたシステム開発の重要性も意識された競技会のルール設計になっていた。

このような災害現場を模した実寸大の模擬フィールドでロボットを運用することは、非常に重要な経験である。特に、米国のように軍用ロボットの転用といった研究開発シナリオが成り立たない日本では、実環境での運用の機会が限られており、開発研究の加速にこれらの模擬フィールドでの実証実験は必須である。また、災害対応ロボットのみでは市場形成できない日本では、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で研究開発を推進する必要がある。そのような観点で、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戦略的イノベーション創造プロジェクト（SIP: Strategic Innovation promotion Program）などにおいて現場での実証試験が実施されている[10), 11)]。また、内閣府が進める革新的研究開発推進プロジェクト（ImPACT: Impulsing PAradigm Change through disruptive Technologies）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が実施されている。さらに、東京オリンピックに合わせて、WRS（World Robot Summit）において国際ロボット競技大会が開催される予定で、① BtoB中心の分野（ものづくり、農林水産業・食品産業分野）、② BtoC中心の分野（サービス、介護・医療分野）、③インフラ・災害対応・建設分野の3分野で競技が設けられる予定である。③の分野では、プラント点検、プラントの中の人の発見・救助などが利活用シーンとして想定されている。具体的には「プラント災害予防チャレンジ」と「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」、「災害対応標準性能評価チャレンジ」の3種目で検討が進んでいる。その会場の一部として福島県浜通り地域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が進められている。また、2018年10月にはそのプレ大会としてWRS2018が東京ビッグサイトで開催され、国際ロボット競技大会が実施された。災害分野は「プラント災害予防チャレンジ」（5か国9チーム参加）と「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」（国内8チーム参加）、「災害対応標準性能評価チャ

レンジ」（9か国19チーム参加）の3種目が実施された。

（5）科学技術的課題

大規模災害現場ではライフラインや通信網など社会基盤システムが大きなダメージを受け、使用可能な情報インフラが限られているという想定をしなくてはならない[12)]。災害直後に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重要であり、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ロボット本体に搭載して手繰りだす方式が取られているが、本体重量の増加を招いてしまう。実際、福島第一原発の事故対応でもケーブルのトラブルにより建屋内に取り残されたままのロボットも存在する。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。また、通信と同様に、エネルギー供給に関しても、有線と無線（バッテリ駆動）のトレードオフがある。災害現場でのエネルギー源の確保も大きな問題である。

原子力発電所の事故の様な災害現場では、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、防塵防水に始まって防爆や耐放射線性など耐環境性についても重要な課題である。

無人ヘリは上空からの情報収集には非常に有効な手段であり、福島第一原発の被害状況を上空から把握することができた。しかし、運用が容易な小型の無人ヘリは強風下での飛行が困難であり、建物の壁などの近くでは安定な飛行は難しい。航続時間も30分程度であり、適用に大きな制約が課される。航続時間を延ばそうとすると大容量のバッテリを搭載する必要があり、機体重量の増加を招く。ここにもトレードオフの問題がある。効率の良い（軽量で長時間持ち、急速充電が可能な）安全なバッテリの開発が急務である。また、屋外での無人ヘリの自己位置同定はGPSを用いれば精度よく計測でき自律飛行も可能であるが、屋内の自律飛行にはSLAM（Simultaneous Locali-zation and Mapping）のような自己位置同定技術が必須であり、非GPS環境下で高精度の自己位置同定を可能とする技術開発が求められる。

東日本大震災において日米の合同チームなどにより水中ロボットを用いた、港の瓦礫の調査・ご遺体の探索・沖合の漁場や養殖場の調査などが実施された。瓦礫などの対象の位置を特定し、地理情報システムに連動させて情報を記録し、その後の瓦礫撤去や養殖施設再生など、あらゆる時期に利活用されることになる。水中でセンシングに有効な物理量は光と音波であり、これらの物理量を用いて水中の対象物の位置を特定することは非常に難しく、精度の高い位置計測装置は非常に高価である。水中での位置同定技術開発も大きな課題である。

さらに、陸海空すべてのロボットに共通するが、ロボットを操作するオペレータの訓練には時間を要することに注意しておく。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。災害現場を模したモックアップを構築し、実災害さながらの訓練を通して、日頃からの運用やメンテナンスを実施することは、有事にシステムを有効に機能させるための必須の条件である。また、実災害現場でのロボット操作には失敗が許されず、オペレータにかかる精神的および肉体的負担は想像を絶するものがある。オペレータ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。そのために、未知の不整地環境でも自律的に移動や作業が可能な知能に関する研究開発を推進し、半自律機能を搭載していくこと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、今後は移動から様々な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。携帯電話などによる人間からの情報や固定センサー・レスキューロボットなどで収集した情報など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を経て平時に至る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。

（6）その他の課題

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は地震動や津波による被害さらには原子力発電所の事故が折り重なった巨大複合災害であり、日本で災害対応ロボットが適用された初めての大災害となった。発災後約一カ月の 4 月 6 日に福島第一原発の瓦礫処理に大成建設・鹿島建設・清水建設の無人化施工機械（バックホウ、クローラダンプ、オペレータ車、カメラ車）が導入された。無人化施工機械は 1993 年の雲仙普賢岳の噴火に始まり、2000 年の有珠山噴火、2004 年新潟中越地震などの多くの災害復旧工事での適用実績がある。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運用してきた成果である。現場での実運用を通じて得られた知見を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。次いで、4 月 10 日には Honeywell 社製の無人ヘリコプタ T-Hawk が導入され、1 ～ 4 号機原子炉建屋、タービン建屋およびその周辺の撮影を行った。また、4 月 17、18 日には iRobot 社製の Packbot が原子炉建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定を行った。Packbot は建屋内の 1 階部分の情報収集には成功したものの、階段を登ることができず建屋の 2 階以上の情報収集ができなかった。その後、6 月 24 日に千葉工業大学・東北大学などが開発した Quince が 2 号機に投入され、原子炉建屋地下に水位計センサーを投入することに、そして 7 月 8 日には 2 号機原子炉建屋の 2 階以上でダストサンプリングを収集することに成功している。

ここで、これらの活動における課題について考えてみたい[13)]。事故後の原子炉建屋内は強い放射能が予想され、ロボットに搭載されている電子機器やセンサー類の耐放射能性を十分検討する必要がある。電子機器はビット反転する可能性があり、CCD カメラや LRF などのセンサーはいずれ使用不可能になってしまう。耐性が無い場合には何らかの措置を講ずる必要があり、福島第一原発の対応では準備に時間を要した。実は、1999 年に発生した東海村 JCO 臨界事故が起こったことを受けて、国がプロジェクトを設置し、短期間に多くの技術者が心血を注いで放射能災害対応ロボットが開発された。しかし、製作しただけで、ロボットシステムの運用やメンテナンスや改良に必要な予算が計上されず、技術者たちもそのプロジェクトから離れざるを得なかった。せっかく培った技術や知見が消えて行ってしまった。無人化施工機械の成功例を見ても研究開発を継続し、現場での運用実績を積み重ねることが重要であることは明白である。

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[4)]。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。海外からの支援を受け入れる場合に、協調活動をスムーズに進めるためには、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国際的に標準化しておく必要がある。また、前節で技術的課題としても述べたが、無線通信に関して有事には特

定の周波数帯の使用や民生用で許可されている微弱な電波のパワーの増大を認めるような法整備も必要である。

東日本大震災における福島第一原発の事故は人類史上最悪の事故であり、その廃炉には３０－４０年に歳月が必要と言われている。これは、我々の世代だけでは解決できない未来への大いなる負の遺産である。この課題を次世代の人たちに託していかなければならない。その意味でも、経験や英知の伝承のために次世代を担う人材育成は非常に大切である。いくつもの要因が複雑に絡み合った大規模複合災害に立ち向かうためには、自分の専門に関する知識や技術だけでは不十分である。自治体職員・レスキュー隊員・医師や看護師・臨床心理士をはじめ他機関や他分野の職員・研究者・技術者などとの協力により課題を解決することが必要である。さらに、政治や経済の状況を正確に把握したうえで、行政と協働することによりはじめて大規模複合災害に対応することができる。安全で安心に暮らせる災害に強い文化や社会を築くためには、俯瞰的に物事をみることができ、的確な判断をすることのできる人材育成が必須である[13]。

（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	◎	→	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。
	応用研究・開発	○	→	近年、ImPACT や 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[14), 15)]。しかし、災害対応ロボットの市場が存在しないので、実用化や実運用には課題を残している。NEDO は、経済産業省と米国国防総省の合意に基づき、同省の DARPA と共同で、日本のロボット技術を活用した災害対応ロボットシステムの研究開発・実証プロジェクトを開始した[16)]。
米国	基礎研究	◎	↗	DARPA のロボティクスチャレンジ[17)] 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に関する基礎研究が行われている。ボストンダイナミックス社の BigDog はその好例である[18)]。
	応用研究・開発	◎	→	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 社のルンバはその好例である[19)]。
欧州	基礎研究	○	→	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。
	応用研究・開発	◎	↗	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。プラント災害を想定した災害対応ロボットの競技会 ARGOS Challenge - Autonomous Robots for Gas & Oil Sites を 2015 年から開催している[20)]。また、Horizon 2020 においては、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[21)]。さらに 2018 年に Horizon 2020 で災害初期対応技術に関する大型プロジェクトの公募があり、この分野の重要性が再認識された。
中国	基礎研究	△	→	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、災害対応分野でのロボット技術の基礎研究はそれほど進んでいないように感じられる。
	応用研究・開発	○	↗	災害対応を直接のターゲットとして開発されているわけではないが、大学や研究所を中心に軍用を視野に入れて開発が進められている。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。
韓国	基礎研究	○	→	DARPA のロボティクスチャレンジ[17)] 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。
	応用研究・開発	△	→	フィールドロボテフ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を災害対応を視野に入れているが、大きな動きは見られない。

（8）参考文献

1）松野 文俊 , “阪神淡路大震災を振り返って”, 日本ロボット学会誌 , Vol. 28, No. 2, pp. 138-141,（2010）.
2）特集号 震災対応 レスキューロボットの活動を振り返って I, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 1-41,（2014）.
3）特集号 震災対応 レスキューロボットの活動を振り返って II, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 2, pp. 91-161,（2014）.
4）特松野 文俊 , 東日本大震災におけるレスキューロボットと国際協力 , 日本ロボット学会誌 , Vol. 30, No. 10, pp. 1013-1016,（2012）.
5）特 JTS 中国総合研究交流センター , 調査報告書「中国のロボット分野における研究開発の現状と動向」（2018）.
6）特集号 タフ・ロボティクス , 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 10, pp. 695-734,（2017）.
7）田所 諭 , “ロボカップレスキューロボットリーグ”, 日本ロボット学会誌 , Vol. 27, No. 9, pp. 983-986,（2009）
8）松野 文俊 , 亀川 哲志 , 佐藤 徳孝 , 根 和幸 , “ロボカップレスキューから実災害対応へ”, 計測と制御 , Vol. 52, No. 3, pp. 495-502,（2014）.
9）Special Issue on DARPA Robotics Challenge（DRC）, Journal of Field Robots, Vol. 32, Issue 2, pp. 187-312,（2015）; ibid. Vol. 32, Issue 3, pp. 313-444,（2015）.
10）特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 I, 日本ロボット学会誌 , Vol. 34, No. 8, pp. 491-528,（2016）.
11）特集号 次世代インフラ用ロボット現場検証 II, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 9, pp. 571-607,（2016）.
12）特集号 災害対応ロボットの適用, ロボット（日本ロボット工業会誌）, No. 235, pp. 1-45,（2017）.
13）特集号 廃炉措置のための遠隔操作技術開発と人材育成, エネルギーレビュー , Vol. 35, No. 2, pp. 6-25,（2015）
14）内閣府・革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）website, タフ・ロボティクス・チャレンジ（PM: 田所 諭）, http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html（accessed 2019-02-10）
15）内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）website, インフラ維持管理・更新・マネージメント技術（PD: 藤野 陽三）, http://www.jst.go.jp/sip/k07.html（accessed 2019-02-10）
16）NEDO ニュースリリース（2014 年 7 月 31 日）, “日米共同で災害対応ロボット開発プロジェクト
—NEDO、災害ロボットの性能評価等で米 DARPA に協力—”,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100297.html（accessed 2019-02-10）
17）DARPA website, DARPA Robotics Challenge, http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge（accessed 2019-02-10）
18）Boston Dynamics website, http://www.bostondynamics.com/（accessed 2019-02-10）
19）iRobot website, History & Company Milestones,
http://www.irobot.com/About-iRobot/Company-Information/History.aspx（accessed

2019-02-10）
20）ARGOS（Autonomous Robots for Gas & Oil Sites）Challenge website, http://www.argos-challenge.com/en（accessed 2019-02-10）
21）The European Commission's website, Horizon 2020, https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020（accessed 2019-02-10）
22）DJI（Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd.; 大疆創新科技有限公司）website, https://www.dji.com/jp（accessed 2019-02-10）
23）International Field Robotics Forum 2016（Seoul COEX, Korea, Oct. 27, 2017）, http://www.ireforum.org/index.php?g_page=intro&m_page=intro02（accessed 2019-02-10）

２．２．８　ソフトロボティクス

（１）研究開発領域の定義

ソフトロボティクスは、柔軟材料に特有の機械的・電気的・化学的性質を積極的に利用したロボットシステムに関する新興の学術分野である。「ソフト」は物質的な柔軟性（ソフトネス）を意味する。主要な研究テーマとして、柔軟材料を利用した新しいロボット機構の探索、やわらかいロボットのモデル化と制御、柔軟物体の操作、生物規範型ソフトロボットを用いた生物の振る舞いの原理解明が挙げられる。接触安全性の付加や、高分子材料の多用による製造コストの低減などによって、ロボットの応用拡大に貢献することが期待される。高分子材料学、生体力学、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）キーワード

ソフトロボット、ソフトアクチュエーター、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

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ソフトロボティクスは、ロボットの新しい機能と用途を開拓する試みとして 2010 年頃から活発になった。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)]。この解決には異分野間の連合が不可欠であり、様々な分野で技術開発の活発化が期待される。基礎技術の開発から産業応用を含め、多くの分野にまたがる課題の豊富さが、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、研究開発途上の様々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。ソフトロボティクスは、人間と共存するロボットの技術基盤として重要である。

[研究開発の動向]

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に複雑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、コンピュータネットワークや豊富な計算資源を背景に、大量のセンサー情報を利用した知的な制御にフォーカスが移りつつある。一方、ソフトロボットについては、ハードウエアの構成法についても課題が多く、活発に研究が行われている。

柔軟材料の利用は、そのモデル化や制御について新しい問題を提起する。ソフトロボット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、連続体の変形や、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運動制御を行う機械学習の手法は有望なアプローチのひとつである。そのような学習を行なう上では、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。複雑な変形に追従できるセンサーやアクチュエーターは、生体親和性が高く、ウエアラブルデバイスへの応用も考えられる。

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[3]である。その他、風船のように内圧で支えられた膜構造を用いるインフレータブルロボットや、生きた細胞やハイドロゲルなどウェットウエアを使ったロボットも、ソフトロボットの仲間とみなせる。ソフトロボットの開発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。

ロボットアームの先端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。ソフトグリッパーの利点は、対象を傷つけにくく、物体の形状や姿勢にばらつきがあっても、単純な動作で把持できることである。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 Soft Robotics Inc.[4]は、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期待される。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空気圧で湾曲させる多指ハンドである。他に、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]。ジャミングとは、柔軟な袋に粉体をつめて中の空気を抜くと、袋中の粉が粉体同士の摩擦で流動性を失い、固体のようになる現象である。ジャミングを起こす柔軟な粉袋を対象に押し付け、対象の形状になじんだ状態でかたくすることで様々な形状の物体を把持できる。

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。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。剛体リンクを関節で接続した古典的なロボットアームと対比して、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なわれている。

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とは異なる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。1980 年代にはすでに、空気圧駆動の柔軟な湾曲アクチュエーター（Flexible Microactuator: FMA）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ウエアラブルデバイスの研究に使われている。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、取り出せる変位や力が小さいため、ロボットへの応用は限定的である。新しい原理の探索や、すでに知られているソフトアクチュエーターの改良が行われている。

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様々な研究が行なわれた[9]。生物規範型ロボットの研究では、把持や操作を行な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、生物に学び、作って理解する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。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

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[10]。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。Science 誌の姉妹誌として Science Robotics 誌が 2016 年に創刊されたが、この中でもソフトロボティクス研究は一定数を占め、伸びるソフトロボット[11]が表紙に採用されるなどしている。

2018 年には、初の国際会議 RoboSoft がイタリアで開催された。今後も年 1 回、開催国を変えながら継続的に開催される予定である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本国内の大型研究プロジェクトとしては、2018 年、科研費新学術領域「ソフトロボット学」が発足し、5 年間のソフトロボティクス関連研究を推進することになった。

アメリカ国立科学財団（NSF: National Science Foundation）は、2018 年、Continuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering（C3 SoRo）という領域を設定して研究提案を募集している。ヨーロッパにおいては、2015 年から EU が出資して SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation プロジェクトが進行中である。

（5）科学技術的課題

現状のソフトロボティクス研究は、柔軟材料を用いた様々な形態の実験的な探索にとどまっており、設計手法が確立されていない。ソフトロボットの振る舞いの予測や、デジタルファブリケーション技術と組み合わせた自動設計技術の開発が求められている。計算機内で柔軟ロボットの動作を扱うには、非線形な大変形や、接触・衝突のモデル化と高速なシミュレーションが必要となる。

また、柔軟ロボットの運動探索、運動創発、運動制御は大きな課題である。変形や接触に関する膨大な感覚情報をどのように取り込み、運動指令をどのように生成するかについては、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な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課題として残っている。空気圧アクチュエーターは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、様々なサイズのソフトアクチュエーターの標準品が、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。3D プリンタ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。柔軟材料に対応した 3D プリンタを用いたロボットの自動製造が有望視されるが、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改良が不可欠である。

（6）その他の課題

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、現状では北米やヨーロッパが主な先端的研究の発信源となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米では DARPA、ヨーロッパでは EU などから継続的な大型研究費の支援が背景となっている。次世代ロボットの開発でプレゼンスを発揮するためには、我が国においても、研究開発を促進する継続的な研究支援が必要である。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。

（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。西海岸スタンフォード大学やカリフォルニア大学サンディエゴ校でも、関連研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	→	ソフトグリッパーやウエアラブルデバイスで応用研究が進んでいる。スタートアップの新陳代謝も盛んで、ジャミンググリッパーを製品化した Empire Robotics は廃業したが、ソフトグリッパーを開発する Soft Robotics Inc. は継続している。
欧州	基礎研究	○	→	タコ型ロボットのような生物規範型ロボットや、やわらかい身体に根ざした知能に関する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がある。
	応用研究・開発	○	→	タコ型ロボットから派生した医療用ロボットアーム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なわれている
	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。また、複数の大学が参加するソフトロボティクス研究センターが設立された。
	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

（8）参考文献

1）Carmel Majidi, “Soft Robotics: A Perspective -Current Trends and Prospects for the Future,” Soft Robotics, Vol. 1, No. 1, (2014) pp. 5-11.

2）Toshiharu Mukai, 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,” Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010; Taipei, Taiwan, October 18-22, 2010), pp. 5996-6001.3）Robert F. Shepherd, Filip Ilievski, Wonjae Choi, Stephen A. Morin, Adam A. Stokes, Aaron D. Mazzeo, Xin Chen, Michael Wang, and George M. Whitesides, “Multigait soft robot.,” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United Stats of America (PNAS), Vol. 108, No. 51, (2011) pp. 20400-20403. DOI:10.1073/pnas.1116564108

4）Soft Robotics Inc., http://www.softroboticsinc.com/ (accessed 2019-01-15)

5）Eric Brown, 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 of the United Stats of America (PNAS), Vol. 107, No. 44, (2010) pp. 18809-18814. DOI: 10.1073/pnas.1003250107

6）Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto, and Shigeo Hirose, “Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope,” Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1988; Philadelphia, Pennsylvania, April 24-29, 1988), pp. 427-430.

7）Koichi Suzumori, Shoichi Iikura, and Hirohisa Tanaka, “Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms,” Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1991; Sacramento,

California, April 9-11, 1991）pp. 1622-1627.
8）Sangbae Kim, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer, “Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics,” Trends in Biotechnology, Vol. 31, Issue 5,（2013）287-294. DOI:10.1016/j.tibtech.2013.03.002
9）OCTOPUS Integrating Project, http://www.octopus-project.eu/（accessed 2019-01-15）
10）Mary Ann Liebert Inc., Journal of Soft Robotics（SoRo）, http://online.liebertpub.com/loi/SORO（accessed 2019-01-15）
11）Elliot W. Hawkes, Laura H. Blumenschein, Joseph D. Greer, and Allison M. Oka-mura, “A soft robot that navigates its environment through growth,” Science Robotics, Vol. 2, No. 8, Issue 8,（2017）. DOI: 10.1126/scirobotics.aan3028

２．２．９　生物規範型ロボティクス

（１）研究開発領域の定義

生物は、進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して、優れた機能や能力、構造を獲得してきた。これらの中には、未だわれわれが知り得ぬ非自明なカラクリが伏在しているはずである。生物規範型ロボティクス（bio-inspired robotics）は、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを志向する研究開発領域である。広義の意味では、バイオミメティクスやバイオミミクリーと捉えることができよう。そもそもロボットは、その出自から生物に範を求めてきたという来歴を持つ。その意味で生物規範型ロボットは、数多ある研究開発領域の中でもロボット黎明期から密接に関係してきた特異かつ稀有な研究開発領域でもある。

しかしながら、生物規範型ロボティクスの分野でこれまでに行われてきた研究開発は、生物の皮相的な模倣の域から抜け出ていないものが多い。ロボティクスの分野に革新的なブレークスルーをもたらす先導的役割を果たし得るための本領域のあり方や戦略を考えることが今、強く求められている。

（２）キーワード

バイオミメティクス、バイオミミクリー、構造と機能、工学的志向と理学的志向、バイオ・インスパイアード・ロボティクス（bio-inspired robotics）、ロボティクス・インスパイアード・バイオロジー（robotics-inspired biology）、モノとコト、陽的制御と陰的制御、自己組織化理論と制御理論、自律分散制御、大自由度システム

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

強力な計算パワーに依拠してサーボモータを高速かつ高精度で動かすことを基盤とした現在のロボットは、生物とは異質の方向に進化し続けてきた帰結の姿と言ってもよいであろう。一方で、このような制御指令値に「強引に」追従させることを良しとする現在の制御は、その成否がいかに的確な制御指令値を作り出すかに決定的に依存してしまうため、近年、制御アルゴリズムはますます大規模化、複雑化、精緻化の一途をたどっている。生物とは異なるソリューションを追求するという方向性は、もちろん間違ったことではない。工学的な視座に基づくアプローチを突き詰めていくことは重要である。しかしながら、近年の計算パワーの飛躍的向上がますますこの傾向を助長した結果、高性能なロボットの開発設計はかえって隘路に入った感がある。

一方で生物は、高度な中枢神経系を持たない種であっても、オープンで不確定性や曖昧性を内包する実世界環境下で驚くほどしなやかかつタフな振る舞いを見せる。しかしながら、このような振る舞いを実現させている発現メカニズムの本質は依然として解明されていない。

以上を鑑みると、生物規範型ロボティクスが持つ意義と期待されることは、昨今、大きく変わり始めたと考えられる。すなわち、生物規範型ロボティクスにこれから求められることは、これまで行われてきた生物の皮相的な模倣ではなく、何が有限な計算リソースしか持たない生物を非構造環境下であっても適応的に振る舞うことを実現させているのか、その本質を（生物系研究者らとの協働を通して）炙り出していくことであろう。換言すれば、単に構築するだけ

でなく、理解を伴った上で構築することが求められているのである。「モノ」的な模倣から「コト」的な模倣への転換と言ってもよい。

以上をまとめると本領域は、隘路に入った感がある移動ロボットの設計・開発に革新的なブレークスルーをもたらす原動力・先導的役割を担うという大きな意義をこれまで以上に強く持ち始めたのである。

［研究開発の動向］

生物は、種の数も膨大なだけでなく、一個体を取り上げてもさまざまな興味深い構造や機能を内包している。このため、生物規範型ロボットに関係する研究トピックは必然的に驚くほど多岐に渡り、枚挙にいとまがない。このような事情を勘案し、ここでは「センサー」、「アクチュエーター」、「構造・形態」、「制御」という切り口から本領域の研究開発の動向を手短に概観する。

センサー

これまでに、昆虫の複眼に着想を得た視覚センサー[1]や、多数の圧力センサーを実装したロボットハンドなど、生物に着想を得たさまざまなセンサーシステムの研究開発が行われてきた。以下、センサーに関する異なる研究アプローチを三つ採り上げながら説明していきたい。

第一は、感覚モダリティの種類と感覚器（センサー）の数に着目したアプローチである。生物は、ロボットに比べると驚くほど多種多様な感覚モダリティを検知するセンサーがあり、なおかつそれらが桁違いに膨大な数で全身に「偏在」している。今後は、このような膨大な数かつ異なる感覚モダリティのセンサー情報を活用することで、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発がますます重要となってくるであろう。最近、ソフトロボティクスと呼ばれる新興分野において、フレキシブルな基盤上に多数のセンサーを実装する技術の開発などが精力的に行われており[2]、新しい流れを創り出すことが期待される。

第二は、生物の感覚器官そのものを活用して、工学的には達成し得ない高精度なセンサーを構築する、ハイブリッド的なアプローチである。これに関して特筆すべき事例としてカイコガの触覚をロボットに実装する研究が挙げられる。カイコガの触覚はフェロモン一分子でも敏感に反応するという事実に着目して、ガス漏れや麻薬検知などへの応用も試みられており[3]、今後の発展が注目される。

第三は、生物の感覚情報処理の原理の解明を目指した研究である。一例としてコオロギの尾に存在する多数の微小毛が担う感覚情報処理に着目した研究が挙げられる[4]。ゴキブリを退治しようとしてわずかに近づいただけで逃げられた経験があると思うが、このような優れた探知能力はこれらの微小毛の基部に存在する感覚器によるものである。この研究では、複数のこれらの感覚器の情報を集めて確率共鳴に基づく情報処理を行うことで、個々の感覚器の S/N 比の問題を克服して検知精度を著しく高められることを明らかにした。生物学と情報処理理論の融合を通して、生物に内在する「コト」を明らかにした優れた研究と言えよう。

アクチュエーター

筋肉はモータに比べて驚異的な柔軟性とパワーウェイトレシオを持つ。筋肉が持つこのような優れた機能の工学的実現を目指して、さまざまなタイプのアクチュエーターの開発がこれまでに試みられてきた。これらの中で広く使われつつあるのが、マッキベン型アクチュエーター

に代表されるPMA（Pneumatic Muscle Actuator）と呼ばれるアクチュエーターである[5]。PMAは筋肉同様に大きな力を発生することができる。また、柔軟な構造を有しているため、二関節筋のように関節をまたいだアクチュエーターの配置も可能である。最近では細径の空気圧アクチュエーターを束ねた新しいタイプのPMAの開発が進められており、アクチュエーターの配置の自由度がさらに向上しつつある[6]。このような研究を通して、生物のごとく全身にアクチュエーターを張り巡らせることを可能とする技術の創成が期待される。

しかしながら一方で、PMAの動特性には遅延時間や強い非線形性があり、その制御はモータほど容易ではない。このような問題の軽減化を目指して、化学反応を活用したアクチュエーターや[7]、生物の筋肉そのものを活用して「ウェットな」アクチュエーターを創るという試みもなされている[8]。特に後者は、生物由来の材料ゆえに自己修復機能をも自然に併せ持つことが期待できる。このような新しい試みを通して、生物に比肩しうる軽量かつフレキシブルなアクチュエーターの早期の実現が待たれる。

構造・形態

車輪型のロボットを除けば、多くのロボットは多かれ少なかれ、何らかのかたちで生物の身体構造やロコモーション様式から着想を得たデザインが施されていると言えるであろう。限られた紙面でこれまでの事例を網羅的に説明することは困難であるため、ここでは特に動物の指や羽、ヒレに着目した生物規範型ロボットを三つ採り上げる。

ヤモリが、垂直な壁を苦もなく移動できるのは指に生えた微小な毛が壁面と分子間力で結合できるためである。この生物学的知見に着想を得た壁面移動ロボットが開発されている[9]。生物の身体に潜む構造を模倣することによって、壁面移動ロボットの新たなソリューションを示した意味で特筆すべき優れた研究である。

飛行ロボットは小型化に伴い、プロペラ等の推進器を使うのが困難となる。このような限界を打破する、昆虫や小型の鳥のような羽ばたきロボットの研究が進んでいる[10、11]。小型飛行ロボット実現への新しいアプローチとして注目を集めている。

ヒレや身体の屈曲を活用した水中ロボットの開発も行われている[12]。広く用いられているスクリューと違い、水底の砂を巻き上げないといった利点があるため、探査等に活用できると期待されている。

今後も、生物の身体構造や動きに着想を得ることで、既存のロボットが抱える問題を克服できる新しいタイプのロボットの開発が待たれる。

制御

紙面の都合上、特にロボットの移動（ロコモーション）のための制御について採り上げる。生物規範型ロボットにおけるロコモーションの制御の仕方としては以下の二つに大別できるであろう。

第一は、機構系には何らかのかたちで生物から着想を得た工夫が施されてはいるものの、制御系には生物に範を置く方策が特に用いられていないアプローチである。具体的には、機構系に柔らかさを持たせることで、フィードフォワード制御といった、言わば「決め打ち」の簡便な制御方策であっても優れた環境踏破性が生み出されることを示した研究が多数報告されている（RHex[13]やSprawlita[14]、i-Centipot[15]、準受動歩行ロボットなど）。生物規範型ロボット

と深く関係するソフトロボットの分野においても、大部分の研究がロボットの適応能力を「機構系の賢さ（clever mechanics）」にほぼ全面的に委ねており、制御方策は簡便なものにとどまっているというのが現状である。すなわち、既存研究のほとんどはこのアプローチに基づいていると言っても過言ではない。

第二は、生物規範型の制御方策を積極的に取り入れるアプローチである。リズミックなロコモーションを生み出すことを担っているCPG（Central Pattern Generator）と呼ばれる神経回路に着想を得て、結合振動子系などをベースとした自律分散的な制御方策を採用した研究などはこのアプローチの代表的な事例である[16,17,18]。制御指令値を求めてそれに従ってアクチュエーターを中央集権的に制御するという、これまでのロボット制御のアルゴリズムとは一線を画した興味深いアプローチである。しかしながら今のところ、制御系の素過程が結合振動子系にほぼ限られているのが現状である。ここには重大な理由と課題が山積しているため、これに関しては「(5) 科学技術的課題」のところで詳述する。

まとめると、生物規範型の制御方策は依然として未成熟の段階にあり、その理論体系の構築は焦眉の課題である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

前述のように、フレキシブルな基盤上に多数のセンサーを実装化することや、化学反応や生物の筋肉そのものを活用したウェットなアクチュエーターなど、さまざまな新しい要素技術に関する研究が進行中である。最近では、本領域と密接に関係しているソフトロボットという新興学問領域が中心となって、柔らかな身体がもたらす知的能力に焦点を当てた研究が大きな流れを形成しつつある。

しかしながら、これら大部分の研究は生物の構造模倣（ハードウエア技術）に関するものであり、生物が示す優れた能力の発現機序の理解を試みる研究はきわめて少数にとどまっていることに留意する必要がある。このような中で、morphological computationや陰的制御（implicit control）、手応え制御（tegotae-based control）といった、生物規範型ロボットの制御と深く関係する新しい概念が提唱されていることは注目に値する。今後は、概念レベルにとどまった議論に終始するのではなく、数理言語化通して生物規範型ロボットならではの制御原理の理論的基盤を構築していくことが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

本領域と密接に関係しているのがソフトロボティクスと呼ばれる研究分野である。ソフトロボティクスは、柔らかい身体から生み出される非自明な能力とその周辺技術を取り扱う、まだ誕生して間もない新興分野である。これまでの硬質な身体を前提としたロボットとは一線を画した新奇な研究トピックが山積しており、世界的に大きな注目を集めている。国内でも2018年度から科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」（領域代表：鈴森康一　東京工業大学教授）が立ち上がった。今後の展開が多いに期待される。

生体が持つ精妙かつ優れた機能の解明を中心とする基礎研究を国際的に協働して推進することを目的として設立されたヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム（HFSP）機構（本部：フランス・ストラスブール）がサポートする国際共同プロジェクトは、生物系の研究分野

においては世界的にあまねく知られている。2017 年に採択された国際共同プロジェクトのうち、生物規範型ロボティクスと深く関係する国際共同プロジェクトが２件採択された。一つはサンショウウオのように水陸両用のロコモーションを示す動物種から適応的運動機能の解明を試みる研究、もう一つはフンコロガシが示す多様かつ適応的な振る舞いの発現機序の解明を目指す研究ある。これらはともに、生物学とロボティクスの両者に資する研究プロジェクトである。生物学の基礎研究サポートをする HFSP がロボティクスに関係する研究テーマを選んだことは、ロボティクスと生物学の新しいありようについて考えさせられる。このほか、ソフトロボティクス領域で挙げたプロジェクトにおいても、研究が推進されている。

（５）科学技術的課題

説明の便宜上、「センサー」、「アクチュエーター」、「構造・形態」、「制御」という観点から生物規範型ロボットが抱える科学技術的課題について述べていきたい。

センサー

生物は、ロボットに比べると驚くほど多種多様な感覚モダリティを検知するセンサーがあり、なおかつそれらが桁違いに膨大な数で全身に「偏在」している。今後は、このような膨大な数かつ異なる感覚モダリティのセンサー情報を活用することで、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発がますます重要となる。すなわち、「量的な変化から質的な変化を生み出すセンサー技術」の創成が喫緊の課題となろう。このためのハードウエア的・ソフトウエア的な課題としては、以下のトピックが重要となる。

1）超多数のセンサーを高密度かつ分散して実装する技術
2）異なる感覚モダリティのセンサー情報を縮約・統合化する情報処理技術
3）柔らかな身体の状態を検知するセンサー技術とそれらの情報を活用するための新奇な情報処理スキーム

上記 3）に関して補足しておく。生物に比肩しうる柔軟性を身体に持たせると、今後のロボットは連続体的な特性を持つように変容していくだろう。これに伴って、物理量がベクトルからテンソル場へと変化することを反映し得るセンサーの構築技術や、感覚情報処理のあり方を考察していく必要がある。併せて、これらの膨大なセンサー出力を最大限に活用しうる、センサーリッチなフィードバック制御の理論体系の創成も重要な課題である。

アクチュエーター

生物が示すしなやかな動きの源の一つは、筋肉という柔軟かつ軽量のアクチュエーターが多数身体内に張り巡らされていることに起因している。ミミズの体表からは、推進のために剛毛と呼ばれる硬い毛針のようなものが飛び出すことが知られているが、一本の剛毛の根元には 10 本以上の筋肉が付いていると言われている。このことからもわかるように、生物規範型ロボットの究極の姿は、多数の軽量かつ柔軟で、生物に比肩しうるパワーウェイトレシオを持つアクチュエーターが物理的に離れた身体部位間をも結びつけつつ、全身にくまなく張り巡らされたものであろう。

このようなことを可能とする、新奇な原理に基づくアクチュエーターの開発が強く望まれる。

電磁力や形状記憶合金をベースとしたアクチュエーター、PMA 以外にも、化学反応や生体由来の材料を用いたアプローチは、ブレークスルーを生み出すことが期待される。さらに、身体中に大量のアクチュエーターを配置できることを可能とする技術の創成も待たれる。

構造・形態（マテリアルも含む）

前述のように、ヤモリの指に見出された構造を模倣することで垂直な壁面を自在に動き回るロボットや、羽のはばたき機構を模擬することにより小型の飛翔ロボットが構築できたことなどは、生物規範型のアプローチによって新しいソリューションを提供し得ることを示す好事例である。個々の生物種が示す優れた能力の背後には、進化過程を経て獲得してきた、未だわれわれが知り得ぬ構造的な工夫が数多く伏在しているはずである。このことを改めて深く考えさせられる興味深い研究成果が最近発表された。それは、驚異的な跳躍能力を示すノミのような小型節足動物の脚の基部に「歯車」状の構造が見つかったというものである[19]。すなわち、歯車はわれわれ人類が発明するずっと以前から生物が使っていた訳である。これ以外にも、シャコが示す超高速のパンチ[20]やアギトアリというアリの一種が示す超高速のアゴの動き（これは動物界最速の動きと言われている）[21]などの背後にある構造的な工夫を解明した研究も、今後ロボティクスへの応用が期待される興味深い事例として挙げられる。生物学者と協働しながらこのような事例やそこに内在する工夫を掘り出していく息の長い試みが今後はますます重要となってくるだろう。その分、波及効果はきわめて大きいはずである。

その他の課題として、生物的な特性を持つマテリアルの開発が挙げられる。筋肉のようなアクチュエーターに関係するマテリアル以外にも、例えば、

1）粘弾性をリアルタイムで改変できるマテリアル
2）自己修復能力や成長機能を有するマテリアル
3）伸縮に富みつつも靭性に富むマテリアル

などが開発されれば、ロボティクスの分野に大きなインパクトをもたらすと期待される。

制御

ここには重大な問題と課題が山積しているため、紙面を割いて詳しく述べていきたい。認識すべきことは、生物に範を置いた制御方策の理論的基盤は未だ脆弱であるという事実である。そもそもなぜこのような状況に至ったのか？　その理由を分析すると以下のようになる。

- 現在のロボット制御は、環境や身体特性の徹底した既知化に基づいた、言わば「閉じたシステム」に立脚した制御理論体系を基盤としている。ロボットが工場などの構造環境下から実世界のような非構造環境下へと稼働の場を拡大するにつれ、環境を認識するためのアルゴリズムが肥大化し、必然的に制御アルゴリズムはますます大規模化、複雑化、精緻化の一途をたどっている。工学者は、このような「閉じたシステム」に立脚する制御理論体系ではオープンで常に不確定性や曖昧性を内包する実世界環境に対峙する際には問題が生じることは十分に理解してはいるものの、代替となる理論的基盤が不在であり、なおかつ強力な計算パワーに頼ることができることも相まって、この思考の枠組からなかなか抜け出せないでいる。
- 生物は限られた計算資源にもかかわらず、驚くほど多様かつ適応的な振る舞いを示す。

これは、生物の制御系（脳・神経系）には、機構系（身体系）に実装され、そして環境に置かれてはじめて意味のある振る舞いを生み出すような制御則が脳・神経系にコード化されているからである。すなわち、生物の制御系は「開いたシステム」を基盤としており、現在のロボットの「閉じたシステム」とは根本的に異なっている。これが生物規範型の制御系を考察する際に遭遇する大きな壁となっている。この点をもう少し敷衍したい。後の説明の便宜上、陽的制御（explicit control）と陰的制御（implicit control）という概念を紹介する。陽的制御とは、制御系に明示的に（プログラムとして）記述されている制御則のことである。一方、陰的制御とは、身体と環境の相互作用の中に隠伏的に埋め込まれている制御則のことであり、morphological computation や physical computation、non-neural computation、unconventional computation などと呼ばれることもある。受動歩行機械は陰的制御則のみで動いているロボットと考えることができるだろう。これまでのロボットの制御系の設計は、アルゴリズムの大規模化・複雑化という大きな問題を内包しているものの、基本的に陽的制御則の設計に集約されており、問題の所在が明確であるという利点があった。一方、生物規範型の制御を考える際には、陰的制御の存在を前提として陽的制御のアルゴリズムを考えなければならない。しかしながら、これを実行するための理論的基盤がまったくないのである。これが生物規範型の制御を考える際の大きな障壁となっているのである。

- 生物規範型ロボットの分野と密接に関係しているのがソフトロボットと呼ばれる新興分野である。ソフトロボットの分野では、環境との相互作用と身体にリアルタイムで変形として現れることを活用することで、フィードフォワード制御のような簡便な制御方策からでも優れた適応能力などが得られることを示す研究が多い。このような、機構系の賢さに適応能力の発現をほぼ全面的に依拠するアプローチが生物規範型の制御方策の理解をかえって妨げている可能性も否めない。
- 生物規範型の制御の代表格が、生物ロコモーションを司る CPG と呼ばれる神経回路に着想を得た自律分散的な制御であろう。現在広く行われているロボット制御のように、制御指令値を明示的に作り出す必要がなく、制御系と機構系そして環境との相互作用の中から振る舞いを生み出すことができるという優れた特長を有している。しかしながら、素過程として用いられる数学的ツールが結合振動子系にほぼ限られているのが問題である。さらに、センサー情報をどのようにフィードバックするかについては依然として設計論が不在であり、アドホックに設計されているのが現状である。これも生物規範型制御が実用化に繋がることを阻んでいる大きな障壁の一つとなっている。
- 生物規範型の制御は自律分散制御と密接に関係している。しかしながら、自律個の振る舞いと自律個集団の振る舞いを結びつけるロジックが依然として存在してない。この理論的基盤の脆弱性が生物規範型制御の理解と構築の大きな障害となっている。

以上を踏まえ、今後の科学技術的課題を以下に列挙する。

① 環境の複雑化に呼応して制御系の設計がますます複雑化するという、現在のロボティクスが抱える呪縛から逃れるブレークスルーを与えることが期待されているのが生物規範型制御である。このためには原点に立ち帰った研究が必要である。すなわち、「有限な

リソースで全身に遍在する膨大な運動自由度を実時間で巧みに操りながら、無限の変化の様相を示す実世界環境と合理的に折り合いをつける」という、進化過程の初期に生物が獲得したもっとも根源的な知の基盤の本質を丁寧に紐解く必要がある。このためには、「動物を動物たらしめる適応的運動機能の生成原理とは何か」を徹底的に問いかける理学的な視座も不可欠となる。このような研究は必然的に長期に渡る試みとなるが、ここから生み出されるロボティクスへの波及効果は著しく大きいと期待する。

② 生物は膨大な運動自由度を巧みに操りながら、リアルタイムで環境と折り合いをつけつつ適応的に振舞っている。大自由度制御とリアルタイム性という、言わば二律背反するような要請を同時に満足するためには、自己組織化理論（理学）と制御理論（工学）が有機的に融合した新奇な理論体系の構築が喫緊の課題である。このような理論基盤が構築できた暁には、オープンで曖昧性や不確定性を内包する実世界環境下で、全身に偏在する 102 オーダー以上の運動自由度をリアルタイムで統御することも可能となるだろう。

③ 中央集権的な制御と自律分散制御が有機的に連関した新奇な制御理論の構築。換言すれば、高次脳機能に基づく制御と局所センサー情報に基づく制御（central vs. peripheral）が調和的にカップリングした制御法の創成。

④ これまでの生物規範型ロボットは、生物の構造の皮相的な模倣に基づくものが多い。すなわち、「モノ」的な模倣の域にとどまっている。生物規範型ロボットでブレークスルーを引き起こすには、生物に内在する制御原理といった「コト」の本質を炙り出す研究が不可欠である。すなわち、「モノ」的側面よりも「コト」的側面に着目した研究アプローチが求められているのである。ひとたび「コト」の本質が理解を捉えることができれば、さまざまな事例に適用できるため、その波及効果は極めて大きい。

⑤ 現在の生物規範型制御の多くは結合振動子系を基盤とした、いわゆる CPG 制御である。しかしながら、どのような感覚モダリティに関する情報をどのようにフィードバックするかに関しての設計論が不在である。この現状を打破するためのシステマティックな設計論の構築が強く求められている。さらに、結合振動子系以外の基盤となる制御系の数理モデルに関してもブレークスルーが欲しい。実際、生物は、周期的な運動のみならず非周期的な運動をも発現することが可能である。振る舞いの多様性は現在のロボットから欠落している知の属性である。この問題を解決可能な理論的基盤も必要である。

⑥ 生物規範型制御の理解と発展を阻んでいるのが、陽的制御のみならず陰的制御をも活用し、なおかつそれらの間で有機的なカップリングを形成する必要があることである。換言すれば、生物における制御は身体と環境とセットになって初めて意味を持つことがコード化されている。陽的制御だけを考えればよかったこれまでのロボティクスにはない難しさがここにある。このような制御のありように関して理解の階梯を一段上がり、数理言語的に説明可能な理論の創成が焦眉の課題である。

以上まとめると、生物規範型制御の理論的基盤の創成は喫緊の課題であり、このためには動物を動物たらしめている適応的運動機能の本質を（生物系の研究者らと協働して）炙り出していく息の長い研究が不可欠である。しかしながら、これが達成された暁の波及効果には著しいものがあり、ロボットの制御が「閉じた系」から「開いた系」へと対応可能となる Quantum

Leapを果たすと大いに期待される。ハードウエアの開発だけでなく、このような「コト」の本質を捉える研究に対しても長期的な支援が行われることを強く願う次第である。

（6）その他の課題

生物規範型制御として現在広く使われている、結合振動子系を基盤としたCPG制御は、多賀らによって提唱された[22)]。このような革新的なアイデアが工学系ではなく、理学系の研究者（当時、多賀氏は薬学部に所属）から出されたことは示唆的である。工学者は、兎にも角にも構築・実現を最優先するため、生物の皮相的な模倣に陥りがちである。生物に内在する、未だわれわれが知り得ぬ「コト」の本質を炙り出して理解の階梯を一段一段と上がっていくためには、理学的志向を持つ生物学や数理科学の研究者らとの長期に渡る有機的な協働が必須であろう。

ここで、生物学だけでなく、数理科学の研究者についても言及したのには理由がある。生物規範型ロボットの分野においては、生物学とロボティクスの研究者の、いわゆる生工連携が必要であることは論を俟たない。しかしながら（個人的な経験に基づけば）、生物学とロボティクスの研究者を単に寄せ集めても化学反応を引き起こすのは至難の技である。というのも、両者の間で「着目している対象」や「言語」に関して往々にして齟齬が生じるからである。生工連携の「言うは易く行うは難し」はまさにここにある。この問題を回避するためには「触媒」が必要なのである。それが数理科学の研究者である。コトの本質を抽出するためには数理モデリングの能力が必要である。具象と抽象をつなぐことに長けている数理科学者は、生物規範型ロボティクスにおいては特に必要とされるのである。

以上を踏まえて二点述べておきたい。

第一は、繰り返しになるが、昨今、本領域が持つ意義と期待されることは大きく変わり始めたことである。それは、隘路に入った感がある移動ロボットの設計・開発に革新的なブレークスルーをもたらす原動力・先導的役割を担うという大きな意義をこれまで以上に強く持ち始めたということである。この重責に応えるために本領域でこれから一層強く求められるのは、生物の「モノ」的側面ではなく「コト」的側面に着目した研究である。「コト」の本質を炙り出すには多くの困難が伴うことが予測される。しかし、いったんうまく「コト」の本質を捉えることができれば、さまざまな事例へと適用できるため、その波及効果には著しいものがあるだろう。将来の応用研究・開発そして事業化への道を切り拓くためにも、そして我が国がロボティクスの分野において強力なイニシアティブを発揮していくためにも、上記でも述べたように、生物学や数理科学の研究者らとの有機的な協働を行う基礎研究への手厚く息の長いサポートが本領域では特に必要である。そこで、ロボティクスと生物学、そして数理科学が三位一体となった研究プロジェクトへの積極的な支援を強く希望する。JST CRESTの数学領域では、数学と生物学、ロボティクスが三位一体となったプロジェクトが採択されている。今後の生物規範型ロボットに関するプロジェクトのありようを示す一つのロールモデルとなろう。このようなプロジェクトからは複眼的視座を持つ有能な若手研究者の育成も大いに期待できるだろう。ロボティクスの分野で我が国がイニシアティブを発揮していくためには、ロボティクスや生物学、そして数理科学といった異分野間を縦横無尽に行き来しながら斬新なアイデアを出していく、「芸域の広い」人材の育成を考えていく必要がある。ロボティクスだけに特化しない人材の育成が本領域においては特に重要な鍵となるのである。

第二は、生物規範型ロボットに関して、ロボティクスと生物学のありようについてである。生物規範型ロボット（bio-inspired robotics）という言葉が指しているのは、生物が進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して獲得した、人知を超えるような工夫をロボティクスに活かす（ありがたく使わせていただく）という考えである。一方で、ロボットをツールとして使うことで、生物学に対して資する成果を積極的に生み出していくというアプローチも考えられるだろう。これは、robotics-inspired biology という呼称が最近与えられているようである。生物学とロボティクスの新たなかたちの win-win 関係を模索しつつ、両者が対等で有機的に結びついた新奇な学問領域の創成についても大いに期待したい。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	科研費新学術領域「ソフトロボット学」の発足に伴い、身体の柔らかさに注目した基礎・応用研究において、生物学者、材料科学との連携が加速するものと期待できる。トレンドとしては上向きの印象を受けるが、諸外国に比べて研究予算の手厚いサポートがさほどないことが懸念事項の一つである。
	応用研究・開発	○	→	ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」に関連して、災害対応を想定した生物規範型ロボットの研究成果が多く報告されている。福島県に接地されているロボットテストフィールドなど共用研究設備も充実している。
米国	基礎研究	◎	↗	国防省などからの潤沢な研究予算配分を背景に、著名な研究室から研究成果が多く報告されている。
	応用研究・開発	◎	→	Boston Dynamics 社や Ghost Robotics 社に代表されるように、脚式移動ロボットの事業化が開始されつつあり、生物規範型ロボットの実世界応用の開拓が期待される。これらのベンチャ企業の母体となった研究成果は DARPA などの潤沢な資金的サポートがあった。一方で、Google が進めてきた歩行ロボットに関する研究開発が中止されるとの報道が最近あった。
欧州	基礎研究	○	↗	米国と同様に生物規範型ロボットを扱う著名な研究室が多数存在し、多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	ETH で開発された四脚ロボット ANYmal に代表されるように、災害対応や研究開発向けの脚ロボットベンチャ企業が登場している。ロボットの実世界応用を見据えた ARGOS Challenge の設立にみられるように、応用分野については上昇傾向にある
中国	基礎研究	○	→	中国系のコミュニティが運営する生物規範型ロボットに関する国際会議も長く続いており、継続した研究が遂行されている。また、関連するソフトロボットの分野でも多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	米国や欧州を猛烈に追随するように四脚ロボットのベンチャ企業 UniTree 社などが登場している。中国発信のクラウドファンディングによる資金調達が背後にあり、事業化までの迅速性には目を見張るものがある。
韓国	基礎研究	○	↗	ロボット研究のトップカンファレンスである IROS2018 の bioinspired robotics セッションにおいて、30 件中 3 件が韓国のグループであり、一定の地位を確立している。また、新しく設立されたソフトロボットに関する国際会議 RobSoft の第 2 回大会が 2019 年に韓国で開催されることもあり、さらなる盛り上がりが予想される。
	応用研究・開発	△	→	DARPA Robotics Challenge の本戦にて韓国のチームが優勝しているものの、生物規範型ロボットの実世界応用に関する事業化や研究プロジェクトについては大きな動きがない。産業用ロボットへ注力している傾向が見受けられる。

（8）参考文献

1）Dario Floreano et al., "Miniature curved artificial compound eyes," Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America（2013）,（4 June 2013）, dio:10.1073/pnas.1219068110.
2）Martin Kaltenbrunner et al., "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics," Nature（2013）,（25 July 2013）, doi:10.1038/nature12314.

3）Noriyasu Ando et al., "Odour-tracking capability of a silkmoth driving a mobile robot with turning bias and time delay," Bioinspration & Biomimetics（2013）,（5 February 2013）
4）下沢楯夫 , " 昆虫のセンシングと行動 ", 日本ロボット学会誌 ,（1988）,（1988/06/15）, doi:10.7210/jrsj.6.240
5）Bertrand Tondu and Pierre Lopez, "Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators," IEEE Control System（2000）,（April 2000）, doi:10.1109/37.833638
6）Shunichi Kurumaya et al. "Design of thin McKibben muscle and multifilament structure," Sensors and actuators A: Physical,（2017）,（1 May 2017）, doi:10.1016/j.sna.2017.04.047
7）Shingo Maeda et al., "Self-walking gel," Advanced Materials,（2007）,（16, October 2007）, doi:10.1002/adma.200700625
8）Yuya Morimoto et al., "Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues," Science Robotics,（2018）,（30 May 2018）, doi:10.1126/scirobotics.aat4440
9）Sangbae Kim et al., "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion," IEEE Transactions on Robotics,（2008）,（25 February 2008）, doi:10.1109/TRO2007.909786
10）David Lentink, "Bioinspired flight control," Bioinspiration & Biomimetics,（2014）,（22 May 2014）
11）Hao Liu et al., "Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems," Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,（2016）,（15 August 2016）, doi:10.1098/rstb.2015.0390
12）Robert K. Katzschmann et al., "Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish," Science Robotics,（2018）,（21 March 2018）, doi:10.1126/scirobotics.aar3449
13）Galen Clark Haynes et al., "Laboratory on legs: An architecture for adjustable morphology with legged robots," Unmanned Systems Technology XIV,（2012）,（April 2012）, doi:10.1117/12.920678
14）Jorge G. Cham et al., "Fast and robust: Hexapedal robots via shape deposition manufacturing," The International Journal of Robotics Research,（2002）,（1 October 2002）, doi:10.1177/0278364902021010837
15）大須賀公一 他 , " ムカデ型ロボット i-CentiPot", 第 8 回横幹連合コンファレンス ,（2017）,（2018/12/02）, doi:10.11487/oukan.2017.0_D-2-4
16）Gentaro Taga et al., "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biological Cybernetics,（1991）,（July 1991）, doi:10.1007/BF00198086
17）Dai Owaki and Akio Ishiguro, "A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping," Scientific Reports,（2017）,（21 March 2017）, doi:10.1038/s41598-017-00348-9

18）Shinya Aoi et al., "Adaptive control strategies for interlimb coordination in legged robots: A review," Frontiers in Neurorobitcs,（2017）,（23 August 2017）, doi:10.3389/fnbot.2017.00039
19）Malcolm Burrows and Gregory Sutton, "Interacting gears synchronize propulsive leg movements in jumping insect," Science,（2013）,（13 September 2013）, doi:10.1126/science.1240284
20）Katsushi Kagaya and Sheila Patek., "Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements," Journal of Experimental Biology,（2016）, doi:10.1242/jeb.130518
21）Hitoshi Aonuma et al., "Mechnisms of ultra-high speed movement in the trap jaw ant," Proceedings of the SICE Annual Conference 2017,（2017）,（19 September 2017）
22）多賀厳太郎, “脳と身体の動的デザイン – 運動・知覚の非線形力学と発達”, 金子書房（2002）

２.２.１０　産業用ロボット

（１）研究開発領域の定義

産業用ロボットとは、国際標準化機構（ISO）によれば「3 軸以上の自由度を持ち、自動制御、プログラム可能なマニピュレーター」となる。一般的に工場で利用されているロボットアームであり、作業の前に教示された位置に自動的に移動する繰り返し作業を実行する。従来の位置のみ教示再生方式で構築されてきた産業用ロボットシステムに、カメラなどの外界情報の導入や力を制御する技術の確立が必要となっている。

（２）キーワード

ロボットアーム、ロボットマニピュレーター、自動機、位置制御、力制御

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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。現在の産業用ロボットは、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[2)]。世界の産業用ロボットの出荷稼働数は、294,312 台（2016 年）、346,000 台（2017 年）であり、日本製ロボットは、152,672 台（2016 年）、211,713 台（2017 年）となっており、世界での産業用ロボットの利用台数は急速に増加傾向にある[3)]。日本の産業用ロボットの生産額は、ここ数年は 7000 億円前後だった。しかし、17 年は 9000 億円となり、18 年はそれを上回る 1 兆円の達成を見込んでいる。ただし、ロボットの利用の大幅な増加は海外であり、中国などロボット利用数の多い国で、自国製の産業用ロボット製造が活性化している。そのため、近い将来には現状の産業用ロボットの製造技術のキャッチアップが完了するとの見解もある。

現状の産業用ロボットは、小型軽量の電動モータにハーモニックドライブを装着して、金属製の構造体によって構成され、センサーやアクチュエーターへの電力線や信号線が、運動する関節を跨って配置される。制御法は、上記の Devol の特許と同じ教示再生方式を踏襲している。また、基本的にロボットは単体のコントローラによって個別または工場内のみで制御 / 管理されてきた。今後、産業用ロボットの高機能化のためには、このようなシステム構成や利用法を変更する必要がある。制御に関しても、従来型の産業用ロボットは位置制御を基盤としている。したがって、位置制御に適したロボットの利用となり、ロボットの関節剛性は一般に高い。これに対して、従来型の位置制御ロボットでは実現し難い組み立て作業、複数ロボットの協調作業などを達成するために力制御の導入が必要となっている。力を制御できるので、ロボットアームの関節は柔軟とできる。このような力制御可能なロボットアームは研究開発として 30 年以上前から報告されてきた。しかし、最近になって実用利用が進みつつある。ただし、産業用ロボットとして広く普及するためには、安全性、保守点検の容易性、価格などの課題があり、実利用には、さらなる技術開発が必要となっている。

［研究開発の動向］

① 構造の軽量化

従来は関節角度計測からロボットの手先精度を高めるために、ロボットリンクや関節部の剛性を高める必要があった。このため金属製のリンクや関節部となり、全体の重量の増加を招いた。今後、ロボット本体の軽量小型化が、新しいロボットの利用分野や人への安全性の確保の視点からも重要となる。このために、本体を金属材料からプラスティック材料、CFRP 材料に変更するなどが有力となる。また、複数のロボットアームが作業台付近で密集する可能性が高くなるので、ハンド部分やリンク自身を細く、小さく実現することが有用である。また、ギアやハーモニックドライブなどの減速器を高分子材料に置き換えて軽量化、潤滑用のオイルフリー化などが課題として挙げられる。

② IoT/AI 技術

保守点検の容易性の視点では、故障診断を IoT 技術によって達成されることが期待される。また、Deep Learning により、対象物の把持などを確実にする手法が研究開発されつつある。Google では 14 台の産業用ロボットに分散自己学習させて、様々な対象物のピックアンドプレイス作業の実験を行っている [4]。

③ 無線 / 高度な有線技術

配線のトラブルが産業用ロボットにおいて最も多く発生するので、無線技術や配線を抜本的に改良するプリンティドエレクトロニクス技術 [5] などの利用が想定される。

④ 手先効果器 / ハンド

産業用ロボットに利用されるハンドもモータ駆動がほとんどであり、一般に減速比も高く、柔軟性が少ないものが多い。このような剛体のハンドで、様々な対象物を把持することは困難な場合が多い。特に、組み立て作業などでは、対象に倣うコンプライアントな動きが必要となる。鉛直方向への挿入作業などには、機構的に柔軟性を持たせた RCC（Remote Center Compliance）も開発されているが、利用は限定的である。

⑤ 関節柔軟化

関節柔軟化には機構的または制御的手法がある。機構的手法として、以下がある。

⑤ -1　空気圧駆動など高減速比ギアを利用しない方法
⑤ -2　高減速比ギア付き電動モータに（可変）弾性要素など付加する方法 [6]
⑤ -3　機構的な重力補償によって重力トルク分を相殺して低減速比ギア付きモータを利用する方法 [7]

これらの既提案法の共通の問題点は、現状のロボットアームよりも、制御性能が低い、重量 / 体積が増加し、部品点数増から製作費も増加することなどが挙げられる。一方、制御的手法は以下となる。

⑤-4　手先の力センサーフィードバックによる方法
⑤-5　関節トルクセンサーフィードバックによる方法[8)]
⑤-6　摩擦補償入力による方法

制御的手法の問題は、信頼性、価格、保守点検などをも含めた性能評価は十分でなく、決定的なシステム実現法に至っていないと考えられる。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 金属材料から高分子材料への転換が進んでいる。たとえば、三井化学ではロボット材料事業開発室を発足させて、ロボットへの材料供給を開始している。ファナック製産業用ロボットをポリウレタン材料で被覆して、緩衝材として利用している。また、金属樹脂一体化技術により、CFRP とアルミを接合させて、ねじなどを除去することによって、軽量飛行ロボットに役立てている[9)]。

② ファナックは産業用ロボットの故障診断に IoT 技術を導入し実用化した。これは、工場で稼働している産業用ロボットをネットワークで接続し、ロボットからの情報をサーバで集中管理して予防保全や故障予知を実現し、ダウンタイム（稼働停止時間）をゼロにした。ロボットの機構部やシステムの状態を監視し、実際に故障を予知した場合には顧客に自動でメール通知するなどでダウンタイムをゼロとした[10)]。

③ ロボット関係世界最大の国際会議の一つである IEEE の ICRA2018 では、iRobot 創始者の Rodney Brooks 氏と、カリフォルニア大学バークレー校の Ken Goldberg 氏が基調講演の中で、多様な物体を取り扱うマニピュレーションが上手くできていないこと、これからの産業ではこれらのマニピュレーションが重要であると主張した。Brooks 氏は、ロボットのエンドエフェクタは数十年変わっていないことに言及し、Goldberg 氏は認識には深層学習などの技術が利用できると説明した。このような認識は世界的に広がりを見せており、様々な国でのマニピュレーションの産業化を目指している。

④ FESTO 社（ドイツ）がポリマー製空気圧モータを開発し、アームを製作した。ただし、粘性を適切に設定できないためか可搬物は極軽量物に限定されている[11)]。

⑤ 米国 Rethink Robotics 社は、直列弾性駆動を利用して双腕「Baxer」を販売した。ただし、2018 年 10 月に廃業した。

⑥ ドイツ航空宇宙センター（DLR：Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt）のロボット技術を基盤にドイツ KBee 社は、トルクセンサーフィードバック制御により関節柔軟化を実現したの「FRANKA　EMIKA」を販売した。2018 年に販売を拡大しつつある[12)]。

⑦ HEBI robotics は、アクチュエーターユニットに内蔵の SEA（Serise elastic actuator：上記（5-2）固定式）によるトルク検出機能を用いて柔軟関節ロボットを販売している[13)]。

⑧ 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）を開催する。 World Robot Summit競技種目は、ものづくり、サービス、インフラ・災害対応の3分野などがあり、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、2018年にはプレ大会が開催される[14]。

⑨ 日本ではＦＡ・ロボットシステムインテグレータ協会が、2018年7月に発足し、ロボットのシステム化を強化する[15]。

⑩ 安川電機は、本体重量7kgで低価格の小型産業用ロボットを2017年から販売開始した[16]。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

① 中国政府は中国版インダストリー4.0（第4次産業革命）と称される政策「中国製造2025」を打ち出し、重点分野の一つとして自動生産を国家的目標に掲げている。産業用ロボットメーカーの独KUKAは2016年に中国の美的集団に買収された事実も大きな流れとして理解できる。中国では、現状の産業用ロボットの技術的なキャッチアップは近い将来に完了するとの見方が強い。さらに、現状の産業用ロボットではなく新しい機能の産業用ロボット開発に一気に進む可能性が高い。これは固定電話の普及をスキップして形態電話に移行した状況と似ている。次世代の産業用ロボットとして、AI搭載型、力制御可能型などが想定されている。

② EUでは、New Horizon 2020 robotics projects from 2016として、ロボット分野の多くの共同研究が進行中である。中でも産業用ロボットと関係するプロジェクトは、ハンドリングも対象とするCo4Robotsプロジェクトや物流に関係するプロジェクトとしてILIAD、REFILLS、VERSATILEなどがある[17]。

③ ドイツDLRでは、長年にわたりロボット関節の柔軟化に取り組み、機構的解決法のSEA（Serise elastic actuator）やトルクセンサーによる制御的解決法の両方に先端的な結果を発表している。これらは長期的な研究計画から実施されていると思われる。

（５）科学技術的課題

① 軽量化 / 小型化

CFRPや高分子材料を積極的に利用して、従来よりも軽量小型ロボットを開発する必要がある。人協調ロボットの実現の際にもロボットの運動部の質量が軽量であることが重要な条件となる。また、ロボットの動作のエネルギー効率を高めるためにも軽量化が必要となる。軽量化、小型化から生じる様々な問題を機構や制御から解決するシステムインテグレーションも必要となる。

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。

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対象作業に対して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 柔軟化

外部環境と積極的に接触するためにもロボットの手先効果器や関節を柔軟化する必要がある。前述のドイツ DLR では、機構的解決法と制御的解決について研究を世界的にリードしている。ただし、未完成な部分もあり、今後の研究開発が重要となる。

⑤ 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。

（6）その他の課題

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効率的に生み出すためには、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。このような基礎から実用までの流れは、アメリカ型で

はベンチャー企業が実現し、ドイツ型では大学と企業の強い連携システムが達成している。早急に日本型の方法を構築する必要がある。

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、どのようにして国際的な知財を獲得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。

③ 材料とロボット協同チーム

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。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	産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り、物体のマニピュレーション研究は学会で活性化しつつある。
	応用研究・開発	△	→	大学で得られた技術などの新しい技術が、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。
米国	基礎研究	△	↗	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、人工知能での情報の集積化が基礎研究を加速可能である。
	応用研究・開発	○	↗	ベンチャー企業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。
欧州	基礎研究	○	↗	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。また、DLR の研究成果が顕著となっている。
	応用研究・開発	○	↗	ドイツ FRANCA EMIKA 社の「FRANKA EMIKA」が本格的に販売されようとしている。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。
中国	基礎研究	△	→	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。
	応用研究・開発	○	↗	人件費の高騰が企業存亡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。
韓国	基礎研究	△	→	基礎研究を政策的に取り組んではいない。
	応用研究・開発	△	→	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。

（8）参考文献

1）Bob Malone, “George Devol: A Life Devoted to Invention, and Robots,” IEEE Spectrum HP（26 September, 2011）,
https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/george-devol-a-life-devoted-to-invention-and-robots（accessed 2019-01-15）
2）日本ロボット工業会 HP, “産業用ロボット事例紹介”
https://www.jara.jp/various/example/industrial/index.html（accessed 2019-01-15）
3）日本ロボット工業会 HP, https://www.jara.jp/data/（accessed 2019-01-15）
4）IEEE Spectrum（ed.）, ” How Google Wants to Solove Robotics Grasping by Letting Robots Learn for Themselves,” IEEE Spectrum ACM Technews（March 29, 2016）.
https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/google-large-scale-robotic-grasping-project（accessed 2019-01-15）
5）菅沼克昭（監修）,『プリンティドエレクトロニクス技術最前線』（シーエムシー出版 , 2016）.
6）Ronald Van Ham,Thomas G. Sugar, Bram Vanderborght, Kevin W. Hollander, and Dirk Lefeber, ” Compliant actuator designs,” IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 16, Issue 3,（2009）pp. 81-94.
7）武居直行 , “省エネ・安全のための重力補償 ,” 日本ロボット学会誌 , 29 巻 , 6 号（2011）508-511.
8）Deutsches Zentrum für Luft- und Rundfahrt（DLR）HP,
https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11666/#gallery/28234
（accessed 2019-01-15）
9）三井化学 HP, https://www.mitsuichem.com/jp/release/2015/2015_0824.htm
（accessed 2019-01-15）
10）ファナック HP,
https://www.fanuc.co.jp/ja/product/new_product/2015/201504_zdt.html
（accessed 2019-01-15）
11）FESTO HP, https://www.festo.com/group/en/cms/12746.htm
（accessed 2019-01-15）
12）FRANKA EMIKA HP, https://www.franka.de/（accessed 2019-01-15）
13）HEBI robotics HP, https://www.hebirobotics.com/（accessed 2019-01-15）
14）経済産業省 HP, “World Robot Summit の開催形式及び競技種目を決定しました ”（2016 年 12 月 2 日ニュースリリース）, http://www.meti.go.jp/press/2016/12/20161202001/20161202001.html
（accessed 2019-01-15）
15）FA・ロボットシステムインテグレータ協会 HP, http://www.farobotsier.com/

（accessed 2019-01-15）
16）安川電機 HP，https://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/product/32116
（accessed 2019-01-15）
17）New Horizon 2020 robotics projects HP,
URL：https://robohub.org/new-horizon-2020-robotics-projects-rosin/
（accessed 2019-01-15）

２.２.１１　研究開発用ロボット

（１）研究開発領域の定義

高度なロボット技術を活用し、バイオ・ライフサイエンス研究生産性の向上を目指した技術開発。すなわち、ロボットにより多岐にわたる研究開発・バイオ産業に必要な作業を自動化し、データ再現性の向上を目指すとともに、少子化により深刻化する人材確保と育成の問題を克服する研究開発。また、ロボットにより、品質の高いデータを大量に得ることにより、人工知能（AI）が必要とする学習データを高効率に取得することを目指す研究開発も本領域に含まれる。

（２）キーワード

ロボット、ロボティクス、自動化、プロトコル最適化、少子化、研究不正、プロセスバリデーション、人工知能、ビッグデータ、ラボドロイド、バイオハザード、オミックス

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

ライフサイエンスの進歩とともに、研究開発・バイオ産業に必要なベンチワークの内容は多岐に渡り、大規模化の一途をたどる。即ち、研究者・大学院生・テクニシャンに至まで、研究の現場は、果てしない「手間仕事」に忙殺される。また、研究の大規模化とともに、人件費と人材の確保が常に研究生産性のボトルネックとなる。しかし、もっとも深刻な問題は、作業者間の「上手い、下手」、あるいはその時の「気合い、根性、集中力」といった、不確定要素に実験の正否と再現性が左右されることである。そのうえ、このような実験の技術は、長年の経験から取得された「暗黙知」であるため、技術の共有と再利用生が極めて低い。これらの問題をロボットによる作業の自動化によって解決しようとするのが、本研究領域である[1]。

［研究開発の動向］

ポストゲノム以降、質量分析計と次世代シーケンサー等の高感度・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殆どのバイオ・ライフサイエンスの研究分野で展開している。その結果、膨大なサンプル数をハイスループットに、且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、より高度な細胞培養手技が常に求められている。このような作業の殆どは、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、深刻な少子化の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、今まさに破綻の危機を迎えていると言っても過言ではない。また、研究者・技術者とは名ばかりで長時間のベンチワークを常態とする分野には魅力がなく、また人材の育成も極めて困難である。

近年、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。これまで開発・上市された自動化装置は、溶媒・試料の分注ロボット。または、調整されたサンプルを解析機に自動的に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生産の自動化が積極的

[1] 本項では、作業を繰り返すうちに無意識的に可能となった手技で、他者に知識として伝達出来ないことを指す。

に試みられている。その多くは、細胞・ラボウエア（試験管・試薬瓶・培養皿等）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、それに必要な外部軸と特殊治具をインテグレーションしたライン化方式である。

両方式の長所短所

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に見合う十分な量の定型作業が必要な場合、研究生産性を容易に向上させる可能性はある。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は却って準備作業時間と溶媒・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を引き上げる。さらに、各作業間を繋ぐのは結局人間による介入が必要となることが常で、人手によるヒューマンエラーとルーチ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出来ない特殊化した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人非介入で完全自動化するには、ライン化方式を取らざるをえない（文献１）。この方式は、工程の各ステップを担当するロボットをそれぞれ開発し、搬送するラインとして繋げる方式である。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～数年を要することも稀ではない。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、オペレーションには知識と経験が必要であり、専門のエンジニアが常駐しなければ稼働させられないことも多く、ランニングコストが問題となる。最も大きな欠点は、一旦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ボリュームを容易に変更出来ないことである。プロトコルの変更とプロトコル最適化が常に必要とされるバイオ・ライフサイエンスにおける作業では、費用対効果が見込まれるケースは極めて稀である。

まとめると、単機能ロボット組み合わせ方式では、作業に人の介入をなくすることが出来ない。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るため、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。これらの理由が、ライフサイエンスの自動化が他の分野に比べ大きく遅れた理由である。しかし、その一方で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から、ロボットによる自動化が潜在的に強く求められており、次項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 新しい動向：ヒューマノイド型ロボット

生産ロボットの世界ではヒューマノイドとは、人の動作をコピーし、人がこれまで使って

きた道具を使い「作業」するロボットを指す。即ち、ロボットの周辺に設置する装置とツールを変更すれば、単一のロボットシステムで多くの作業をすることが出来る。生産現場ではこれを「多能工ロボット」とも呼ばれる。研究用としては「汎用ヒト型ロボット（LabDroid：laboratory + humanoid）」と呼ばれている[1)]。LabDroidは、ライフサイエンスの実験が出来るだけの、人と同じリーチ長を持ち、ハンドは十分な過般重量と、動きの精度を持つ。このようなロボットが生まれ、検証研究がスタートして既に10年近くが経過した。細胞培養・オミクス（プロテオミクス/ゲノミクス）の作業を中心に、現在国内に20台以上のLabDroidが稼働している。LabDroidの特徴は、これまで自動化が困難であった、複雑で高度な手技を必要とする作業を自動化するのみならず、これまで個人のスキルとして暗黙知化していた作業を可視化・数値化し、数値化されたパラメーターを最適化することにより、熟練者よりも高い精度で作業を何度でも再現することを可能とした。また、ここ数年で、作業インターフェースが飛躍的に進歩し、特殊技能者によるティーチング作業を必要としない。特別な知識経験がなくとも、GUIにより直感的にロボットへの作業指示を可能とする。また、最適化されたプロトコルはネットワークを介して、他のロボットで共有することも可能となり、これまで、膨大なコストと時間を要した、人から人への技術移転を不要とした。また、人の技術をロボットへと遷し、そのロボットをスケールさせることにより、大きな研究生産性の向上が期待されている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

AIとの融合：細胞培養の自動化・最適化

個人の技術や経験値に高く依存し、長時間の作業が要求される、iPS細胞等の細胞培養を中心に産学連携体制での積極的な自動化の試みが行われている[2)]。特に再生医療を見据えた細胞培養は、高い再現性を担保した上での標準化が求められる。また細胞製剤の品質管理は非破壊的に行われる必要があるため、画像データから品質の良否の判断や、培養手順の迅速な最適化などが求められている。しかし、相変わらず、特定の作業者にしか、再現的な培養を行うことができず、その理由は暗黙知のままであり、人材育成に大きな問題を抱えるとともに、標準化が困難である。ごく最近、パナソニック社がiPS細胞の維持培養を自動化する専用ロボットを開発し、60日間の人非介入の細胞培養に成功した[3)]。また、臨床研究が控えている、パーキンソン病を対象とするiPS細胞による再生医療も、産業界が積極的に細胞生産の自動化にも取り組んでいる[4)]。

多くの細胞培養において、顕微鏡画像を教師データとして大量に得ることが可能であり、深層学習のようなAI技術との馴染がよいと考えられ、細胞培養の最適化と品質管理にAI技術を活用する試みもスタートしている。特に、ヒューマノイドのような自由度と汎用性が高いロボット技術と組み合わせた場合、膨大な培養時のパラメーターを効率よく最適化し、培養細胞の良し悪しを画像データから非破壊に判断することも可能であると期待されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

産総研人工知能研究センターが中心となり細胞培養を自動化しAIと融合するプロジェクトがスタートしている（NEDO次世代人工知能技術の社会実装を目指した先導研究：AI×ロボットによる高品質細胞培養の自動化とオミックスデータの大規模取得）。さらに、理化学研究所

多細胞システム形成研究センターにおいては、顕微鏡画像を教示データとし、AIによるiPS細胞の維持培養を最適化するのみならず、網膜再生のための分化・誘導プロトコルの最適化を自律的に実施するAIロボットシステムの研究開発がスタートしている（2017年07月01日読売新聞夕刊一面：AIロボ、iPS大量増殖…理研など実施へ）[3]。

がん治療において、プレシジョン・メディシンが急速に進展している。具体的には、がん細胞の遺伝子変異を網羅性高く検出し、患者個人々々の様々な変異に応じた、適切な投薬と治療法を選択する、各個人に応じたオーダーメイド治療である。近年特に、次世代シーケンサーの運用コストが下がり、臨床研究レベルから実際の診断へと急速に普及しつつある。既に国内では、がんゲノム診断を実施する臨床拠点150以上がリストアップされている。臨床研究から、診断へと展開するには、臨床検査の現場での精度管理が最も重要視される。しかし、世界的にがん遺伝子検査分野での精度管理の方法や技術はまったく確立しておらず、極めて大きな問題となっている。またこれまでの臨床検査と異なり、がん組織のゲノム診断の作業は長時間・複雑であり、これに関わる人材の確保と育成とコストの問題は全く未解決であった。しかし、がんゲノム診断に必要とされるクリニカル・シークエンスに関わる作業をLabDroidによる自動化が進んでいる。今後ゲノム診断の精度管理と標準化に向け、大きな期待が寄せられている[4]。

（5）科学技術的課題

今後、ロボットによるライフサイエンスの自動化を推進する上で、複数種類のロボット（専用ロボット、ヒューマノイド、搬送ロボット等）と各種解析機器との連携し、プロトコル共有とログの抽出を実現する上で克服するべき問題は、全てのロボットが理解できる共通言語によるプロトコルの記述と、セマンティックにログやデータ記述を記述し、AIと連携するシステムの構築である。そのためには、試薬・遺伝子／タンパク質等の分子名称を表記揺れなく取り扱い、作業オントロジーによる概念区分の導入が必須となる。しかし、この分野の研究者は少なく、手付かず様相を否定できない。

また、自然言語処理等でこれまでの文献情報を効率的に利用することが、これまで以上に求められる。生物学・医学に関わる自然言語処理による知識抽出は、多くの予算とリソースが投じられてきたが、いくつかの理由で進捗は捗々しくなく、相変わらず人手によるキュレーションが足かせとなっている。今後AIロボットによるビッグデータが生み出されるなか、これらは成果を加速する上で解決しなければならない課題である。

（6）その他の課題

バイオ・ライフサイエンス分野においてIoT化したロボットシステムを活用した新たな研究環境が生まれる。その結果、今まで研究者の技術・経験あるいはカンといったものに頼って実施していたプロトコルをクラウド上で、誰でも何処でも再現・再利用することを可能とする。その過程において、先ず研究者はユーザインターフェースを介して、自身の技術をロボットジョブに変換し作業を行い、実験結果を基に各作業ステップのパラメーターを最適化し、精度の高い実験結果を再現的に得られるに至る。そして、一旦最適化されたプロトコルはクラウドを介

[3] 参考資料内閣府広報ビデオ（Innovation Japan：AI To Advance Regenerative Medicine）（https://www.youtube.com/watch?v=gYbMtx4xTeU&index=4&list=PLoj1Ym89bkatlgzc0ZM borN_ICrE_tFZR%E3%80%80）
[4] 久保田文, “特集連動◎保険診療下での癌ゲノム医療：筑波大発iLAC、癌ゲノム医療向けエキソーム解析のため衛生検査所登録へ” 日経バイオテクonline (2018.11.22.). (accessed 2019-01-15)

して誰でも何処でもアクセスでき、さらに再最適化すら可能であり、高度な技術を研究コミュニティ全体で共有可能となる。すなわち、ロボットシステムは人との協働作業により進化し、より大きな知識を生み出す。

このプロセスを推進するにはロボットの特性やユーザインターフェースを熟知し、ロボットによる研究作業を指導し､データ共有の価値を啓蒙する「（仮称）ロボティックバイオロジスト」ともいうべき新たな職種が必要となる。そのような人材供給を含めた全体設計が必要となる。

（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	◎	→	細胞培養をはじめとする、膨大な最適化パラメーターが存在する、複雑で、長期間にわたる作業をヒューマノイド型ロボットが自動化するのみならず、AI との融合も急速に進展しつつあり、得られたデータを基に自律的な最適な実験プロトコルを生み出す、ロボット・サイエンスの実現に向け、産学官が積極的な連携を進めている。 ヒューマノイド型ロボットと、専用ロボットの連携・融合も進展する可能性が高い。フレキシブルで拡張性の高い自動化システムへと急速に進展しつつある。
	応用研究・開発	◎	↗	iPS 細胞の維持培養・特定細胞組織への分化を、ロボットにより自動化することなどが、世界に先駆けて成功し、AI との融合も急速に進展しつつある。 世界に先駆けて、全ゲノムシークエンスの完全自動化に成功しつつあり、いち早く、がんゲノム診断に導入される見通し。大きなコスト効果だけではなく、人材育成の問題や診断に必要とされるデータの精度・再現性の問題も解決することが期待されている。
米国	基礎研究	△	→	製薬企業らの、自動化熱が冷めた形。逆に人海戦術的な労働集約型の研究開発に戻りつつある。
	応用研究・開発	△	↘	エメラルドバイオ、トランスクリプティックス等の、ロボットによるクラウド受託研究サービスが数年前にスタートしたが、特に大きな進展はなく休眠状態。専用ロボットの組み合わせによる拡張性の欠如が浮き彫りとなる。 西海岸を中心に、ライフサイエンスの自動化を標榜するスタートアップが多数起業しており、活発な投資も行われ始めているが、ロボティックス的な大きなブレークスルーはなく、大きな進展は期待されていない。 大規模なゲノムシークエンスの作業を必要とするがんゲノム診断など、本来、最も早く自動化されるべき臨床・診断現場ですら、自動化の動きも鈍く、従来型自動化ロボットの信頼性に大きな疑問符が投げかけられており、限定的な専用ロボットと人の介入による人海戦術が逸脱していない。
欧州	基礎研究	△	→	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	△	→	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。バイエルン社が運営している INVITE 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	△	→	ドイツ KUKA 社を買収した美的社が、我が国で唯一のヒューマノイドであるラボドロイドを生産する安川電機と提携。積極的な自動化への意欲を見せているが、ライフサイエンス・バイオでの動きは少ない。
	応用研究・開発	－	－	特記事項ナシ
韓国	基礎研究	－		特記事項ナシ
	応用研究・開発	－		ソシアルロボットとしてのヒューマノイド研究は活発に行われているが、バイオ用作業ロボットを生産する企業はない。

（8）参考文献

1）Nozomu Yachie, Robotic Biology Consortium, and Tohru Natsume, “Robotic Crowd Biology with LabDroids,” Nature Biotechnology, Vol. 35, No. 4,（2017）pp. 310-312. DOI: 10.1038/nbt.3758

2）Shun-Ichiro Iemura and Tohru Natsume, ” One by one sample prepareation method for protein network analysis,” Protein interactions, Vol. 15, 978-953-51-0244-1, InTech（2012）pp. 293-310. DOI: 10.5772/37931

3）Shuhei Konagaya, Takeshi Ando, Toshiaki Yamauchi, Hirofumi Suemori, and Hiroo Iwata, “Long-term maintenance of human induced pluripotent stem cells by automated cell culture system,” Scientific Reports, Vol. 5, Article No. 16647,（2015）pp. 1-9. DOI: 10.1038/srep16647

4）日立製作所 ,“大日本住友製薬からヒト iPS 細胞を用いた再生医療向け大量自動培養装置を受注～パーキンソン病治療向け細胞の製造に向けた研究用装置～”日立製作所ニュースリリース (2017-4-10)

２.２.１２　ナノロボティクス

（１）研究開発領域の定義

20 年以上の歴史があるマイクロロボティクスと違いナノロボティクスは 10 年足らずの挑戦的研究分野であるため、厳密な研究分野の定義は存在しない。名称にナノという寸法サイズが入っているが、ナノロボットと称していても、実際は数 mm ～ 0.1mm 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 0.1mm 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が、サイズより研究アプローチの先進性、多様性に注目すべき未踏研究分野である。

（２）キーワード

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 (Micro Electro Mechanical Systems)、NEMS (Nano Electro Mechanical Systems)、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、生体工学科

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ナノロボティクスの研究は未踏挑戦領域であるため、学会として厳密な定義は存在しない。サイズが 0.1mm 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など外部環境に反応して薬物放出する機能性高分子もナノマシン、ナノロボティクスと称されている。材料学、生物学、医学などサイエンスとテクノロジが深く融合した新領域である。

[研究開発の動向（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 年台に MIT のフリンや US バークレイーのフィアリング、東京大学の三浦下山らにより空を飛ぶ数 mm の「フライングマイクロロボット」や、スタンフォード大学のカトコスキーらによるワ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「マイクロ壁面歩行ロボット」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 EU 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 年に名古屋大学の生田（現　東京大）らの「光駆動ナノロボット」である。最初のモデルは全長 10 μｍ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 100nm 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。pN 以下の分解能で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。細胞への力刺激による細胞内部の情報伝達を調べる細胞生物物理学者の研究ツールとして実用化が期待されている。

その後、2007 年にカーネギーメロン大学のシッティらは「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[1)]。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、まだ多大な技術的、医学的、倫理的課題がある。しかしドイツのマックスプランク研究所が彼をリーダとして招聘し、ナノロボティクス分野の研究センターを創設するなど、欧米での研究が急速に活発化している。

生体とのハイブリッドタイプには、体外で培養した心筋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のバイオメディカル学科のモンテマグノらが開発に成功した「マッスルロボット」（「マッスルMEMS」ともいう）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した。外部からの運動制御は持たず自律的に歩行した。

遠隔駆動に有利な磁気駆動方式のナノロボットはETHのNelsonら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1.5T（テスラ）の強力な磁場を発生する巨大な磁気コイルを用い、体外から駆動するシステムを構築している。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、静磁場的な手法で遠隔操縦するシステムで網膜の各種手術を目的としていた。

これは1990年台初頭に生田（当時九州工大）、永田（滋賀医大眼科）が提案した網膜手術用マイクロロボット「ゲンゴロー」の概念に基づいた研究である。最近ではカテーテルの先に磁石を付け、体外電磁コイルの磁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の開発を進めている。

東大の生田、安井、川口らは、直径10μmの磁性材料製の微細コイルをマイクロ光造形し、10cm程度の小型ヘルムホルツコイルで小電力かつ回転磁場を用い、マイクロコイルを液中でスクリューのように高速回転移動させている[2)]。欧米の静磁場を使う方式に比べ格段に小さな磁力で眼球内を移動可能である。2018年には複数の磁気コイルを独立に駆動制御することに世界で初めて成功しており、今後多方面での応用展開の拡大が期待される。

磁気駆動方式のマイクロロボット、ナノロボットは作製と駆動が容易でもあるため、欧米、韓国、中国など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関連会社エアロスペースカンパニーのヘルバニアンらにより開発され、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。本来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技術が駆使されていた。

本分野の研究成果は、IEEE主催のMEMS、NEMS、ICRA、Transducers、μ-TASなど採択倍率の厳しい国際会議や.Nature(姉妹紙を含む)、Science、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の姉妹ジャーナルScience 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年米国スタンフォード大のドレクスラーが提案した超分子、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数百から数千ナノメータサイズのナノロボットが出現する可能性もある。

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国際的に急速に進展すると思われる。

本分野の成果はロボティクスの専門学術誌に留まらず、Nature誌、Science誌など世界的に読者の多い学術誌に掲載されることが多いため研究者間でも注目度が高い。実用化までにはまだ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が、基本特許、産業創出の観点からは看過できない。バイオ医工学の人材育成政策と同時に、未踏最先端分野への切り込みが期待される。

(c) DDS (Drug Delivery System)、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。東京大学の片岡らは、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。がん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。従来の抗がん剤は、体内に注射されてもがん細胞にだけ選択的に導入することは困難で、細胞膜から内部への取り込み効率が低いため顕著な副作用の問題が発生している。この問題の解決に貢献することが期待され、研究費も投資されている。

(d) 研究目的

本分野は、研究目的の多様性がそのまま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。

ロボティクス分野

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、システム化まで到達しているものが多い。

合成化学分野

主に合成手法の開発とサイエンスとして化学的興味が原動力、目的である。医療応用も重要課題としているが、現時点では基礎的な知見と技術基盤の確立が優先されている。

DDS、創薬分野

新規の DDS、創薬技術の開発が目的であり、研究の出口も薬事承認による実用化である。

ミセルを用いたナノマシンでは体内での癌細胞の破壊であり、光駆動ナノロボットは体内ではなく、体外における細胞生物学の研究ツールを目的としている。ただし、まだ明確な目的を持たず、ナノロボットの実現可能性を探る研究も多く存在する。黎明期の研究分野の特長であり、さまざまな分野の研究者の知的好奇心を大切にすべきことである。

昨今のプロジェクト研究が企業内研究のように成果主義に見えるが、成果を一般化、普遍化する努力をし、より高いレベルの論文誌に投稿することをねらうべきである。米国でも MEMS など一見開発研究に見える成果を理論、実験結果を一般化し、Nature、Science レベルに掲載させている。将来の研究、産業の種として広範な分野に情報提供できることにもなる。

関連分野の遠隔手術ロボットは現在ミリメータサイズ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。他方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っている。

(4) 注目動向

［新展開・技術トピックス］

ナノロボティクスにおける国策ファンディング

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。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。

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。2017 年にはドイツのマックスプランク研究所が特別に研究所を創設し、米国からトップ研究者を所長として招聘している。

これまでロボティクス分野には消極的あったケンブリッジ大学にも、ソフトロボティクスの拠点ができ、国外からの研究者を集結させている。実はソフトロボティクスは、日本で 1990 年台に多くの研究が実施されており、今回のブームの一部は日本の後追いであるが、英文になっていないことや、現在の新素材、新技術の取り込みで、あたかも欧米から発信されているように見える。

日本人が日本人の論文を引用しないことも原因している。大学院で論文作成の際、英語になっていない研究であっても指導者が積極的に引用を指導することが必要である。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

EDEN2020 (Enhanced Delivery Ecosystem for Neurosurgery in 2020) は EU の Horizen 2020 から 830 万ユーロの資金を得た研究開発プロジェクトである [3)]。2016 年から 4 年間で、低侵襲な神経外科手術のための統合技術プラットフォームを提供することで、脳疾患の治療に段階的な変化をもたらすことを目的にしている。インペリアルカレッジロンドンや、ミラノ工科大、ミュンヘン工科大など 8 つの大学と臨床医、産業界が連携してプロジェクトを推進し、2020 年には臨床試験を始めることができるよう計画している。

（５）科学技術的課題

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。

（６）その他の課題

「人材育成」の遅れは、生体医工学分野が主体となるナノロボティクスにとって、致命的である。日本政府も医療機器が日本の中心産業にしたい意向はあるが、単に一部の医療メーカーへの資金投入に留まっており、人材育成の視点に欠ける。野球チームと同様、人材育成への投資無しには、優勝は見えてこない。

さらに我が国では、基礎研究予算が純粋サイエンスに偏り、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の見識を打ち破らないと、科学と工学が融合したナノロボティクスは発展できない。

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。

標準化も研究が実用化される前の概念段階から検討すべきである。このままでは従来のバイオ医療装置のように欧米ベンチャーの装置スペックがデファクトスタンダードになる可能性が大である。市場が明確化してからでは遅いことを再認識すべきであろう。

① 高度研究コーディネータ制度

日本と違い、欧米では世界の流れができる前に未踏研究に先行投資するため、特許、実用化の段階でも多くの先行利益を得てきた。この理由は、行政内に「研究の目利き」ができる博士レベルの「研究支援コーディネータ」が多数在籍し、政府の科学政策の方向決定、分野選択、人選、プロジェクト作成などで活動しているためである。日本でも早急な「高度研究コーディネータ制度」の確立が叫ばれている。

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、独創性の高い研究には陽には投資されてこなかった。それぞれの研究者の個人的な努力で支えられているのが日本の未踏研究の歴史である。この方法で今後日本は世界をリードできるか危惧されている。

② 人材育成政策

「人材育成」の観点でも、欧米や日本以外のアジア諸国の主要大学には、バイオエンジニアリング学科（生体工学科）、バイオメディカル学科（生体医工学科）が 20 年以上前から存在する。ここでは電気、機械工学、バイオマテリアル、創薬、医学などの研究者が学際的な研究者、技術者の育成をしている。

マイクロロボット、ナノロボットの多くも、バイオエンジニアリング学科で研究されてきた。最先端の医工学を追及するには、新素材、新概念、新原理の技術を躊躇なく推進する予算と環境が不可欠である。この点でも、日本に生体医工学科を早急に創設すべきである。

大学院レベルではなく、学部レベルからの組織的教育が重要である。

（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	○	→	ナノスケールの3Dプリンタである2光子光造形法（東大）や各種アクチュエーション技術（東大、東工大、阪大）、各種光計測などが活発である。しかし個別の研究室が頑張っており、組織的な動きや国からの大型予算なども皆無に近い。
	応用研究・開発	○	→	光駆動ナノロボットによる細胞実験ツールの開発（東大）。磁気駆動ナノロボット（東大）、筋肉駆動型のマイクロロボット（東大、阪大）などが開発されつつある
米国	基礎研究	◎	↗	DARPA、NSFなどの研究資金で、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。基礎から実用化までのルートができている。
	応用研究・開発	◎	↗	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。
欧州	基礎研究	◎	↗	ETH、RPFLなどスイス連邦工科大学、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、バイオ、医療応用と言っているが、研究の自由度が高い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ハムリンセンタでナノロボットの試作が始まった。 ケンブリッジ大学のソフトロボティクス戦略が脅威である。 マイクロナノロボティクスとも関係が深い医用ロボティクスに関しては、2019年にダビンチの主要特許が失効するため、KUKAなど大手の産業ロボットメーカや大学発ベンチャーが遠隔手術ロボットの実用化を進めている。 EUの複数国家間の大型予算EDEN2020を始め巨大な投資がされている。さらに大型の基礎研究予算も原動力となっている。
	応用研究・開発	◎	↗	バイオ、医療分野のテーマが大半。ベンチャー的な手法で実用化も進みつつある。手術ロボットダビンチの基本特許が2019年に切れるのを見越した多くの医療ロボットが開発されている。ナノロボティクスうについても、精力的。
中国	基礎研究	△	↗	欧米、日本に追従する形式で莫大な投資が行われている。欧米から帰国した気鋭の研究者が主導し、中国内の豊富な優秀人材が国から大型予算を得ている。 2017年からは3大重点研究所の一つとして医療ロボット研究所が上海交通大学に設置され、遠隔手術ロボットとマイクロナノロボットも重点テーマに選定された。
	応用研究・開発	△	↗	医療ベンチ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。 産業化が世界一であり、ハイリスクの研究開発テーマでも、思い切った資金投資が行われていることは、他の産業分野と同様である。
韓国	基礎研究	○	→	国の研究所とトップメーカが推進中。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。医療ロボットの次のターゲットとしてマイクロナノロボティクスを重点推進している。
	応用研究・開発	△	→	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と一体化して推進中。産学の人的連携も深く、意思決定も速い。

（8）参考文献

1）Bareh Behkam and Metin Sitt, “Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects,” Applied Physics Letters, Vol. 90, Issue 2, (2007) pp. 023902 (3 pages). DOI:10.1063/1.2431454

2）Masato Yasui, Masashi Ikeuchi, and Koji Ikuta, “Magnetic micro actuator with neutral buoyancy and 3D fabrication of cell size magnetized structure,” In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012; Saint Paul, Minnesota, USA, May14-18, 2012) pp. 745-750. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225113

3）Enhanced Deliverty Ecosystem for Neurosurgery in 2020, https://www.eden2020.eu/

2.3　社会システム科学

我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱されたSociety 5.0で実現されるべき社会システムは、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることによって、経済発展と社会的課題の解決を両立しようとするものである。社会システム科学とはSociety 5.0が目指す社会システムの安定的な挙動に向けて、設計、構成、監視、運用、制御、可視化、模擬および適切な制度設計により社会システムの発展的で持続可能な安寧を実現するものである。社会システムの大規模化・複合化・複雑化が高度に進展する中、社会システム科学の必要性が増してきている。ここでは、Society 5.0の社会システムを構築し運用するための社会システム科学の研究開発領域を俯瞰する。

社会システム科学を構成する研究開発領域を図2-3-1に示す。

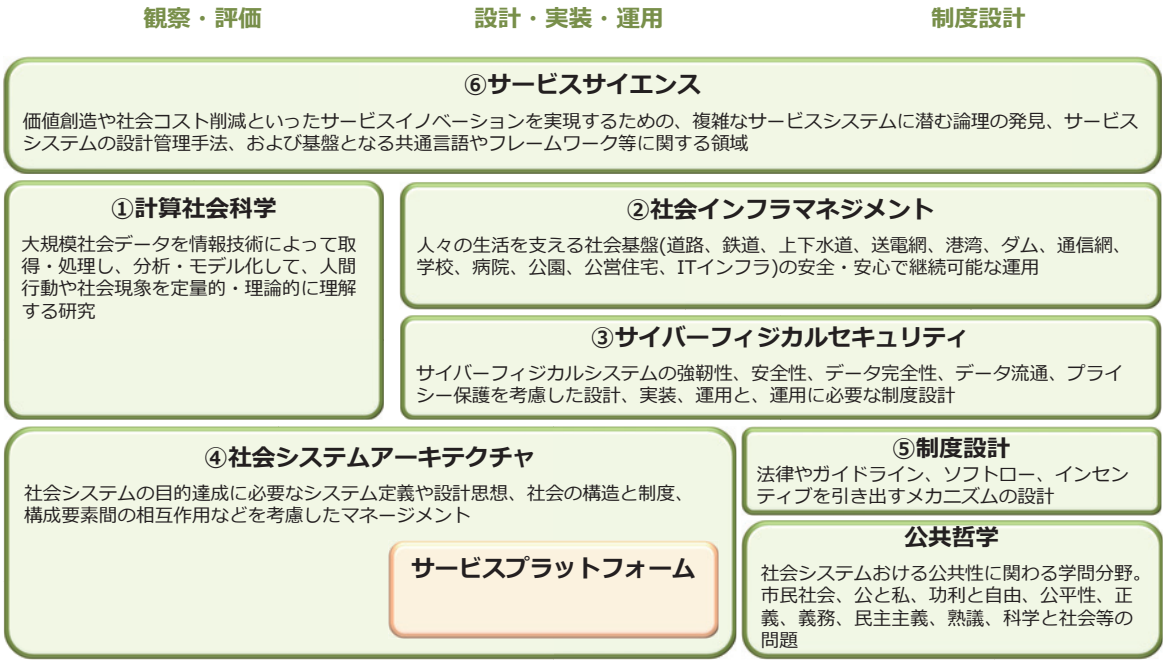


図2-3-1　社会システム科学の俯瞰図

①　計算社会科学

ビッグデータやシミュレーションを用いて、社会経済現象を研究する、社会科学、データサイエンス、計算科学の文理融合領域である。ビッグデータを利用することで、社会現象を定量的に分析したり、あるいはビッグデータに基づき導いた社会モデルを用いてシミュレーションすることで、社会の挙動を予測したりすることを可能にする。

②　社会インフラオペレーション

市民の生活の安全・安心を確保し、持続可能な社会経済活動を営むために必要なインフラとそれを提供する仕組みやサービスを含めた総称が社会インフラである。データに基づいて社会インフラを最適に維持管理するための、メンテナンス技術を中心とした研究領域である。

③ サイバーフィジカルセキュリティ

Society 5.0 が目指す社会システムは、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した Cyber Physical System になる。社会システムの安全性を担保するためには、サイバーとフィジカルの両特性を統合したセキュリティ概念が必要になる。これが、サイバーフィジカルセキュリティである。

④ 社会システムアーキテクチャ

Society 5.0 ではさまざまなモノやシステム同士が直接通信を介してデータの交換をすることが可能になる。社会システムは、システムとシステムが複雑な相互関係性を持ったシステム（System of Systems）とみなすことができる。このように複雑なシステムを管理、維持するためには、システムのアーキテクチャを定義することが必要である。なお、サービスプラットフォームは社会システムが提供するサービスを実現するアーキテクチャの中の、コンピュータシステムとして提供される部分と定義し、2.4 コンピューティングアーキテクチャの研究領域において俯瞰することとした。

⑤ 制度設計

社会システムを運用するためには、制度を決めなければならない。社会にとって望ましい性質を持つ意思決定のルール／制度を設計するための研究領域が制度設計である。入札によって価格を決める意思決定の応用としてのオークションや、参加者の利益の全体を最大化する組み合わせを見つけるマッチングといった応用を持つ研究領域である。

⑥ サービスサイエンス

Society 5.0 ではモノや経済活動がサービスとして提供される。提供されるサービスに関わる、科学的な概念、理論の構築、サービスを提供するためのサービスシステムをマネジメントする技術や、構築するためのエンジニアリング技術がサービスサイエンスの研究領域である。

本報告書ではとりあげていないが、社会とは何か、公平性とは何か、正義とは何か、といった公共哲学・倫理の理解を踏まえて、社会システムは構築・運用されることが望ましい。また、技術が及ぼすリスクに対する社会受容性をどうやって醸成するのか、多様なステークホルダの合意をいかにして形成するか、社会が持つ多様な価値をどうシステムに反映するのか、と言った Cyber Physical System としての社会システムを前提とした、人文・社会科学的研究も求められている。

2.3.1　計算社会科学

（1）研究開発領域の定義

計算社会科学は、近年急速に発展しているビッグデータや計算技術に基づく社会経済現象の研究であり、図2-3-1に示すように、社会科学、データサイエンス、計算科学の文理融合領域である。人々が生活や業務においてかなりの時間をPC、タブレット、スマートフォン等のデバイス上で費やすようになり、オンラインでの行動やコミュニケーションの詳細が日々デジタルで記録されるようになり、大規模ソーシャルデータが急激な勢いで蓄積されるようになった。計算社会科学は、情報技術によって取得・処理された大量のデータを分析・モデル化して、社会経済現象を定量的に理解し、課題の予測や、現象の制御を試みるものである。

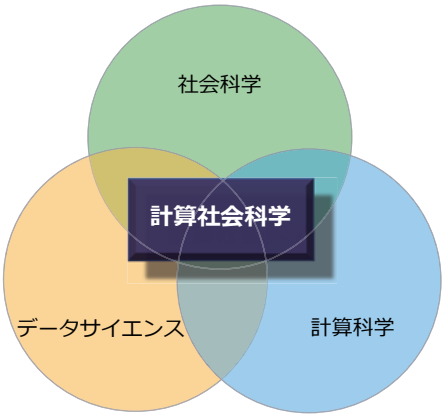


図2-3-2 計算社会科学の領域

（2）キーワード

ネットワーク分析、データサイエンス、ビッグデータ、ソーシャルデータ、シミュレーション、オンラインデータ、社会科学、社会学、経済学、物理学、計算科学、文理融合

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人間社会のさまざまな面を科学的に探求する学術分野の総体である社会科学には、例えば、社会現象の実態や社会現象が起こる原因やメカニズムを統計・データから分析する学問として社会学がある。社会学はサーベイ調査やインタビューに基づいた実証分析を重んじているため、社会的関係性が必ずしも適切に扱えないという課題があった。ところが、ソーシャルネットワークの発展や、IoTによるデータのセンシングによって、人々の活動の記録が大量のデータとして収集・蓄積できるようになった。計算社会科学の意義は、こういったビッグデータを解析する実証研究と、ビッグデータに基づくシミュレーションによる理論研究を通じて、定量的な社会科学を行い、新たな知識を創出することにある。

また、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立した人間中心の社会であるSociety 5.0では、人が生み出すデータに基づいて社会を理解し、社会課題を解決することが期待されている。変化する社会を定量的に理解しようとする計算社会科学が、社会理解と社会課題解決の中心的役割を果たす。

[研究開発の動向]

「計算社会科学」(Computational Social Science)という呼称は、2009年に15人の科学者(Lazer, Pentland, Adamic, Aral, Barabási, Brewer, Christakis, Contractor, Fowler, Gutmann, Jebara, King, Macy, Roy, Alstyne) [1)]により学術雑誌「Science」に掲載された同タイトルの論文により広く知られるようになった。この時点で計算社会科学の研究は既に一部の研究者によって盛ん

に行われており、上記論文の共著者達はその中心的存在であった。計算社会科学の源流は、それ以前の計算科学、経済学、社会学等に遡ることが可能であるが、現在急速に発展している流れのきっかけは上記の論文である。2015 年には、欧米の研究者が中心となり、計算社会科学の国際会議「International Conference on Computational Social Science（IC2S2）」が発足した。以来、同会議は毎年欧米で開催されており、計算社会科学は欧米を中心に発展している。

欧米では国際会議だけではなく、表 2-3-1 に見られるように、計算社会科学を掲げる研究組織や教育プログラムが既に多数設立されている。この動きはシンガポールにおいても同様である。日本では神戸大学に「計算社会科学研究センター」が平成 30 年 4 月に設置されたのが初めてで、現在のところ、国内唯一の計算社会科学に特化した研究センターとなっている。

計算社会科学の中心的なツールとして、オンライン上で取得可能なソーシャルデータ等を用いたネットワーク分析や、エージェントベースシミュレーションに基づく社会経済現象の定量的分析がある [2), 3)]。こういった分析やシミュレーションに必要なビッグデータは、米国の Google、Amazon、Apple、Microsoft、Facebook 等の巨大 IT 企業が中国以外の世界を席捲し、中国は Alibaba といった中国独自の IT 企業が独占している。これらの企業は、ビッグデータを専門とする多数の研究者を雇用し、研究に従事させており、研究面での日本との格差が拡大している。

世界的に、Google、Amazon、Wikipedia 等から入手可能なデータが盛んに研究されているが、日本の社会科学研究者の間では、そういった研究の存在自体があまり知られていない。Google Scholar により計算社会科学に関する研究成果の絶対量を国際的に比較した場合、日本は、米国、中国、欧州主要各国よりも少なく、辛うじて韓国よりも多い程度である。その韓国ですら、計算社会科学における国際的なプレゼンスは日本以上にあると国際的には認識されている。

表2-3-1「計算社会科学」を掲げる研究センター、教育プログラム等（平成29年3月現在）

国名	大学名／組織名	研究機関名	プログラム名
ドイツ	GESIS		Computational Social Science department
	Centre Marc Bloch		Digital Humanities team
デンマーク	University of Copenhagen	Copenhagen Centre for Social Data Science	
英国	University of Southampton	Computational Modelling Group	Care Life Cycle
	University of Surrey	Centre for Research in Social Simulation	
フィンランド	University of Helsinki	Centre for Research Methods	Computational Social Science
スペイン	Barcelona Supercomputing Center	Computer Applications in Science & Engineering Department	Computational Social Sciences and Digital Humanities
スイス	ETH Zurich	D-GESS	Professorship of Computational Social Science
イタリア	IMT School for Advanced Studies Lucca	Laboratory of Computational Social Science	
オーストラリア	The University of Queensland		Bachelors of Music（Honours）/Science
シンガポール	Singapore Management University	School of Information Systems	Living Analytics Research Centre

米国	The University of Chicago	Division of the Social Sciences	Masters in Computational Social Science
	Microsoft Research		Computational Social Science
	University of Washington	Information School	Data Lab
	Stanford University	Institute for Research in the Social Sciences	Center for computational Social Science
	University of Southern California	USC Dornsife College of Letters, Arts and Sciences	Computational Social Science Lab
	Santa Fe Institute		Graduate Workshop in Computational Social Science Modeling and Complexity
	University of Illinois at Urbana-Champaign	Beckman Institute	Organizational Intelligence and Computational Social Science
	Indiana University	School of Information & Computing	Center for Complex Networks and Systems Research
	Georgia Institute of Technology	Georgia Tech Research Institute	Aerospace, Transportation and Advanced Systems Laboratory Institute
	The University of North Carolina at Charlotte	Project Mosaic	Computational Social Science Seed Grants
	University of Nortre Dame	Center for Research Computing	Computational Social Science REU program
	Kent State University	Department of Geography	Computational Social Science Lab
	Cornell University	Information Science Department	Social Dynamics Laboratory
	University of Massachusetts Amherst	Computational Social Science Institute	
	Northeastern University	The Network Science Institute	MOBS LAB, Barabasi Lab
	Harvard University	Harvard University Privacy Tools Project	
	Massachusetts Institute of Technology	MIT Media Lab	Human Dynamics Laboratory
	Russel Sage Foundation		Computational Social Science
	Stony Brook University	Institute for Advanced Computational Science	Center for Computational Social Science
	George Mason University	Department of Computational and Data Sciences	Computational Social Science Program
	University of North Carolina at Chapel Hill	Department of Computer Science	Social Welfare and Health Informatics Group

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

金融ネットワーク分析

2007 ～ 2008 年の世界金融危機を従来の経済モデルが予測できなかったことは、経済学にとって大きな衝撃だった。それ以前の経済モデルは、空間的な構造を十分に考慮しておらず、破綻伝播のメカニズムが組み込まれていなかった。以来、金融市場を、金融機関をノードとしたネットワークとして考える金融ネットワークの分析が、計算社会科学において盛んになっている。破綻伝播のメカニズムや、金融危機の回避、危機発生後の危機管理等に関する多くの成果が期待されている[4)]。

企業内部データやシミュレーションによる企業組織の分析

企業内部の膨大なEメール・データに対してクラスター分析を行うことにより、企業の組織の効率性を測り、さらに、業務を効率化させるための組織改変を提案する試みがなされている。また、企業の組織構造がべき乗に比例した所得格差を生み出していることをシミュレーションにより示した研究もあり、企業内部の組織構造に関する研究は近年の重要な動向である[5), 6)]。

ビッグデータによるテロリズムや紛争の分析

世界的にテロリズムや紛争は絶え間なく起こっているが、テロリストがSNSを活用してプロパガンダを広めていることが、ビッグデータの分析により明らかになりつつある。また、過去のデータから紛争を予測する研究も進展している[7), 8)]。

オンライン販売データによる消費者行動の研究

Amazonである本を購入すれば、別の本も自動的に勧めてくるが、Amazonの販売データからは、同じ消費者が異なる分野でどのような本を好む傾向にあるか知ることができる。そのため、Amazon等のオンラインの販売データを使った研究は近年の重要な動向である。例えば、科学分野での嗜好と政治的嗜好の関係を明らかにした興味深い研究もある[9)]。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

Microsoftの計算社会科学研究[10)]

計算社会科学の第一人者の一人であるDuncan Wattsを中心とした研究者プロジェクトで、Eメール、ウェブサイト、Twitter等から取得できるビッグデータや、集団行動に関する実験を行うことにより、人間行動に関する新たな知見を生み出すことを目的としている。

Professorship of ComputatŠnal Social Science, ETH Zurich[11)]

ETH ZurichにおけるDirk Helbingを中心とした計算社会科学研究者グループで、異なる分野のアプローチを取り入れ、計算社会科学の基礎研究および応用研究を行っている。進化ゲーム理論やエージェントベース・シミュレーション等を用い、社会規範形成、犯罪、社会的紛争、世論形成等のテーマについて研究している。

文部科学省「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」萌芽的課題『複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究（多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発)』（代表：伊藤伸泰 ）[12)]

社会経済現象では、多様なサブシステムが多層的に相互作用し合いつつ、時間的にも空間的にも異なったスケールの事象が不可分となっている。例えば、秒単位以下で進む株式取引が何年にもわたる景気停滞の引き金となる事象や、一か所の災害が広域的な移動を生じさせ、思わぬ場所での二次災害を引き起こすという事象が発生している。本プロジェクトは、ポスト「京」に向けて複数のサブシステムの相互作用モデルを構築し、社会経済現象上の課題を予測し制御する技術を開発することを目的とし、以下の5つのサブ課題に取り組んでいる。

A　マクロ経済シミュレーション

B　企業ネットワークシミュレーション

C　金融シミュレーション
D　交通・人流シミュレーション
E　社会・経済シミュレーションモデルの評価手法の開発

計算社会科学研究会 [13)]

同研究会のメンバーは、日本における計算社会科学研究の中心メンバーであり、SNS のテキストデータを用いた研究等を積極的に推進している。

（5）科学技術的課題

計算社会科科学の体系化

これはビッグデータの研究利用全般に言えることではあるが、計算社会科学におけるビッグデータの研究利用はまだ萌芽的段階であり、現状としては、ファクトファインディング的な研究が主流である。よって、計算社会科学の学問としての領域を広げ、体系化することは、今後の長期的な課題であると考えられる。ただし、ビッグデータから得られる知見の積み上げだけで研究領域になる可能性もある。計算社会科学が取り組む研究領域の方向性はまだ定まっておらず、さまざまな方向への展開が考えられる。

経済学との融合

経済学は社会科学において最も計算を多用する分野であり、それ自体が計算社会科学の一角をなすと考えることができるので、計算社会科学の展開の方向として経済学との融合が考えられる。しかしながら、経済学特有のアプローチがあり、計算社会科学の他の分野との融合が難しい面がある。

経済学特有のアプローチとは、将来を見越した高度な合理性を要求することである。経済学では、個人は合理的に行動すると仮定され、多くの経済モデルでは、その行動は最適化問題を解くことによって導き出される。しかし、高度な合理性を持たせたままモデルを複雑にしようとすると、最適化問題が解けなくなる。従って、経済モデルでは、あまりモデルを複雑にできない。一方、計算社会科学の一分野であるエージェントベースシミュレーションにおいては、個人の行動自体に合理的でない仮定を置くことが可能なため、モデルの構造は複雑にできる。

経済学と計算社会科学の融合には新しいコンセプトが必要であり、中長期的に取り組むべき大きな課題であると考えられる。

スーパーコンピュータを用いた大規模社会経済シミュレーション

スーパーコンピュータの発展に伴い、近年大規模シミュレーションが可能となってきた。例えば、全国の交通網のシミュレーション、特定地域において地震・津波等の自然現象が起きた際の物理的な災害のシミュレーション等、極めて詳細なレベルまで分析できるようになってきた。その一方で、個人の行動に基づいた日本経済全体のシミュレーションのような、ミクロの行動に基づくマクロレベルでの社会経済現象のシミュレーションに関しては、まだ十分な成果が得られていない。これは、経済学との融合が進んでいないことが理由の一つなので、融合を進めて、大規模かつ現実的な社会経済シミュレーションを行うことが、計算社会科学における中長期的な重要課題である。

（６）その他の課題

競争的研究費の獲得

計算社会科学は文理融合・複合領域であるため、競争的研究費の獲得が難しいことが課題として挙げられる。特に、科学研究費補助金においては該当する細目がなく、研究課題を申請する際には、どの細目に出すべきか常に難しい判断を迫られる状況が続いている。例えば、情報学における最新の手法を用いて、社会学における伝統的な課題に取り組んだ場合、情報学でも社会学でも評価されないリスクがあるが、こういった研究こそ推進すべきものである可能性が高いので、競争的研究費の獲得は極めて深刻な課題である。同様の問題は海外でも指摘されている[3)]。

研究成果の公表

研究成果の公表に関しても、研究費と同様の課題がある。計算社会科学は、文理融合・複合領域の研究であり、物理学、情報学、経済学、社会学等の多くの分野のジャーナル等で成果となる論文の掲載が可能である。しかし、複合的かつ新しい研究領域であるがゆえに、伝統的な分野の枠組みでは必ずしも十分な評価が得られないリスクがある。2018 年 1 月に創刊された「Journal of Computational Social Science」は、この問題を解決することが大きな目標であり、今後、文理融合・複合領域が発展する上で中心的役割を担うことが期待されるが、同ジャーナルが掲載できる研究成果には限りがあるため、研究成果を公表すべき分野は今後も大きな課題として残る。

データ利用と法規制

日本においてビッグデータの研究利用がスムーズでないことは、多くの研究者によって指摘されている。特に、個人情報保護の名のもとで、国内では多くのデータの利用が制限されており、企業が持つデータの研究利用も縛りが多い。その一方で、Google 等の IT 企業は極めて個人的なデータを大量に蓄積し、研究・商用利用している現実がある。これは、研究においてもグローバルビジネスにおいても格差の大きな要因となっているため、ビッグデータの研究利用に関わる状況は、早急に改善する必要がある。その一方で、今後はプライバシーへの配慮が国際的に問題となってくる可能性がある。この点は、欧州からの個人情報の持ち出しに規制が入る等、既に顕在化している。

人材育成

現時点では、国内においては、計算社会科学に特化した教育プログラムが存在しないため、人材育成は大きな課題である。計算社会科学は社会科学、計算科学、データサイエンスの複合領域であるため、それぞれの領域における教育が必要である。計算科学は既存の教育プログラムで、データサイエンスは近年、多数新設されたデータサイエンスの教育プログラムにおいて習得できるが、社会科学に関しては、経済学、社会学、政治学といった伝統的な枠組みが教育の単位となっているため、計算社会科学を念頭に置いた社会科学全般の総合的な教育プログラムが必要である。

（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	○	→	ビッグデータ関連では、Google が公開している機械学習関連のツールに匹敵するような日本発の技術は極めて限られている。ただし、ハード面、特にスーパーコンピュータに関しては、現在ポスト「京」の開発が進められており、ハード面では世界レベルの基礎技術を維持していると考えられる。
	応用研究・開発	△	↗	現状としては欧米に大きく遅れを取っている。研究成果の量を Google Scholar を使って単純に比較しても、欧米に遅れを取っている。しかし、近年、国内において計算社会科学研究会が発足し、「Journal of Computational Social Science」が創刊されるなど、研究活動が活性化しつつあり、研究者コミュニティにおける上昇機運も高まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	Google や Amazon が、クラウドコンピューティングやビッグデータを研究者に提供する等、米国はビッグデータ関連分野を世界的に先導している。一般的認識として、計算科学全般および社会科学全般においても米国は先端研究の中心であるため、計算社会科学の基礎的技術全般としては、米国が世界最高峰のレベルであり、今後も顕著な成長が続くと考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	Microsoft の研究者グループや、Stanford、Cornel、Indiana 等の主要大学にある計算社会科学の高度な研究者グループが研究開発の先導的役割を果たしている。さらに、欧州と交互に IC2S2（International Conference on Computational Social Science）という世界最大の計算社会科学の国際会議を隔年で開催しており、国際的な研究者コミュニティにおいて、欧州とともに中心的役割を果たしている。よって、今後も発展が続くと考えられる。
欧州	基礎研究	◎	↗	米国並の基礎技術があるとは言えないが、ビッグデータの研究利用に対する意識が高く、欧州全体に多数のスーパーコンピュータもあるため、既に高い基礎技術が、今後も顕著な発展を続けていくと考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	ETH Zurich（Eidgenössische Technische Hochschule Zürich） や GESIS（Leibniz Institute for the Social Sciences）等、計算社会科学の研究者グループを要する研究機関が多数ある。
中国	基礎研究	◎	↗	検索エンジンを始めとした独自の IT 技術を開発している中国は、ビッグデータに関わる基礎技術において米国について高いレベルにあると考えられる。
	応用研究・開発	○	↗	計算社会科学における研究の絶対量は日本を超えている。 今後、高度な技術力を背景に、研究面でも急速に伸びてくる可能性が高い。
韓国	基礎研究	○	↗	ビッグデータに関する Google Patents でのヒット件数は日本を超えているため、今後、技術面で日本を大きく引き離していく可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）にソーシャルコンピューティングの研究者グループがある等の理由で、国際的なプレゼンスは日本以上にあり、研究も盛んであると国際的な研究者コミュニティでは認識されている。

（8）参考文献

1）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.” Science 323, 2009: 721-723.

2）Adam Mann. “Computational social science.” PNAS 113, 2016: 468-470.

3）Katie Metzler, David A. Kim, Nick Allum, Angella Denman. “Who is doing computational social science? Trends in Big Data Research.” A Sage White Paper, 2016.

4）Fabio Caccioli, Paolo Barucca, Teruyoshi Kobayashi. “Network Models of Financial Systemic Risk: A Review.” Journal of Computational Social Science 1, 2018: 81-114.

5）Veselka Boeva, Lars Lundberg, Sai M. Harsha Kota, Lars Sköld. “Evaluation of organizational structure through cluster validation analysis of email communications.”

Journal of Computational Social Science 1, 2018: 327–347.
6）Blair Fix. “Hierarchy and the power-law income distribution tail.” Journal of Computational Social Science 1, 2018: 471-491.
7）Adam Badawy, Emilio Ferrara. “The rise of Jihadist propaganda on social networks.” Journal of Computational Social Science 1, 2018: 453–470.
8）Matthew Kupilik, Frank Witmer. “Spatio-temporal violent event prediction using Gaussian process regression.” Journal of Computational Social Science 1, 2018: 437–451.
9）Feng Shi, Yongren Shi, Fedor A. Dokshin, James A. Evans, Michael W. Macy. “Millions of online book co-purchases reveal partisan differences in the consumption of science.” Nature Human Behaviour 1, Article number: 0079, 2017.
10）Microsoft. “Computational Social Science.” Microsoft, https://www.microsoft.com/en-us/research/group/computational-social-science/（2019 年 1 月 16 日アクセス）.
11）Department of Humanities, Social and Political Sciences. “Computational Social Science.” ETH Zürich, http://www.coss.ethz.ch（2019 年 1 月 16 日アクセス）.
12）PostK-MultiSESim.「多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発プロジェクトページ」複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究 , https://sites.google.com/site/postkmultisesim/（2019 年 1 月 16 日アクセス）.
13）計算社会科学研究会 .「ホーム」計算社会科学研究会 , https://css-japan.com（2019 年 1 月 16 日アクセス）.

２．３．２　社会インフラマネジメント

（１）研究開発領域の定義

インフラは、市民が生活の安全・安心を確保し、持続可能で豊かな社会経済活動を営むために必要な、河川、ダム、砂防、上下水道、電気、ガス、通信、道路、鉄道、港湾、空港等の総称である[1)]。社会インフラはインフラとそれが提供される仕組みやサービスを含んだものである。社会インフラのマネジメントの中でも、主として、維持管理に関わるメンテナンス技術を俯瞰する。

（２）キーワード

診断、異常検知、劣化予測、予防保全、長寿命化、ロボット、センシング、ビッグデータ

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2018年8月14日にイタリアのジェノバで、イタリアと隣国フランスとを結ぶ高速道路が通る高架橋が崩落し、43人が犠牲になるという事故が発生した[2)]。この橋は長さ1.2kmのつり橋で、海風にさらされる環境にあり、常に補修作業が必要な状態だった。そのため点検作業は恒常的に実施され、道路面を支える鉄筋の一部に10~20%の腐食が進行していると認識していたと言う。しかしながら、精密なスキャン装置がないと腐食状態を正確に把握することが困難な構造であったため、橋に崩落の危険性がある、という判断には至っていなかったと言われている。この橋が建設された60年代は、より軽く、より安く作ることが流行していた時期であり、日本でも同様の設計思想に基づいて多くの構造物が建造されている。

米国では1981年にAmerica in Ruins: The Decaying Infrastructureという本が出版され、インフラの劣化・荒廃が米国経済の成長の妨げになっているとされた。1967年12月のシルバー橋落橋事故、1983年6月のマイアナス橋落橋事故、2007年8月のミシシッピ川橋落橋事故などの事故[3)]が実際に発生している。

日本では1977年に開通した中央自動車道の笹子トンネルの天井板のコンクリート板が落下し9名が死亡するという事故が2012年12月に起こった。天井板を支えるボルトの接着方法が強度不足という指摘もあるが、5年に一度実施されていた詳細点検での検査が十分に実施されていなかった。目視で異常を確認した場合だけ打音検査を行う運用になっていたが、打音検査を実施していれば、ボルトの接着不良が事故以前に認識できた可能性は高い。

戦後、高度経済成長時代にかけて、道路、河川、下水道、港湾等の各分野で、橋梁、河川堤防、下水管渠、岸壁等の社会インフラが国や地方公共団体において重点的に整備されてきた。これらの社会インフラは老朽化が進んでおり、2023年には道路橋の40%以上が、またトンネルの30%以上が建設後50年以上経過する。事故を未然に防ぎ、機能を維持し必要なサービス水準を満足するように適切な維持管理をしながら計画的に更新していくことが求められている[4), 5)]。

社会インフラは、多くの階層からなる複雑なシステムであるとともに、同様の構造物であっても設置場所に応じて環境条件や荷重条件が異なり、その管理主体も国から都道府県や市町村といったようにさまざまであるといった多様性を有する。そのため、インフラの維持管理作業の頻度や作業量はさまざまである。また、供用中のインフラの維持管理は、サービスの品質を

低下させないように、利用者が少ない時間帯を使う必要があるため、作業時間や作業環境に制約がある。さらに、インフラが高所や水中といった、作業が困難な環境にあることもある。そのため、インフラマネジメントにはコスト、人材といった課題がある。

維持管理に必要な費用はインフラの老朽化とともに増大し、2013 年度に 3.6 兆円であった維持管理・更新費が 2023 年には 4.3 ～ 5.1 兆円、2033 年には 4.6~5.5 兆円程度になると推計されている [6]。維持管理・更新費用を圧縮するための技術開発への期待は大きい。

また、インフラの維持管理に必要な技術者も不足しているが、特に小規模な地方公共団体において深刻である。技術者の不足が、インフラの状況を把握できていない状況を生んでいる。維持管理のノウハウを機械化する、あるいは可視化して伝承していくための技術が求められている。

［研究開発の動向］

従来の社会インフラ整備の主たる関心は、経済成長を背景とした需要の増大に答えるための量的ならびに質的な機能拡大にあった。高度成長が永遠に続くのであれば、現在存在するインフラも早晩陳腐化し機能不足に陥ると予測されるから、長期的・耐久的な利用よりはスクラップアンドビルドの繰り返しによる機能向上を前提に置いた、消費財のような使い方の方が合理的である。そのため、土木工学も、良質なインフラの供給・建設を主眼に置いた学問として発展してきた。しかしながら、成長には限界があり、それが顕在化した現代において、従来のアプローチの限界もまた明らかになりつつある。供用中のインフラの事故も頻発しており、危機的な状況も露呈している。それに対して、社会インフラを保持し、サービスを持続的に供給していくメンテナンスに関する知の体系化を進めている途中である。メンテナンスでは、時間が経過し、変化が発生する中で、適時適切な対応によってインフラの機能を保つ、あるいは強化・向上していくことが求められる [7]。

サービスの提供の管理を運用管理（オペレーション）と呼び、その基礎となるインフラ・ハードウェアの管理を維持管理（メンテナンス）と呼ぶ。例えば、道路橋の場合、橋自体の保全は維持管理であるのに対して、交通整理など交通を円滑に確保する行為は運用管理となる。橋の健全性は円滑な交通に大きな影響があることからも分かるように、この両者は密接に関連している。また、舗装のメンテナンスは、交通に対する影響が大きく、運用管理と維持管理の中間的な性質を持つ。社会インフラが有する目的に応じたサービスを提供する機能を、長期にわたって良好に保持することがメンテナンスの本質である。

インフラのメンテナンスに求められる技術は、(1) これまで人手に頼ってきた点検作業を効率化するための技術、(2) 長い期間構造物を監視しながら異常の発生を検知する技術、である。人手による点検作業は目視による検査と、ハンマーで部材を叩いて音の違いを聞き分ける打音による検査であった。どちらも長年用いられている評価手法だが、構造物の内部の様子や、定量的な劣化状態を把握するものではない。また、危険かどうかの判断は検査員の主観に委ねられているという課題もある。点検作業の効率化には、構造物の内部を広範囲にかつ非破壊で点検できる技術の開発が重要である。中性子線を照射して内部の欠陥や構造を調べる中性子イメージング、多数の超音波振動子を使うフェーズドアレイ超音波探傷法、ひびがあることで熱の伝わり方が変化することを赤外線で捉える、赤外線サーモグラフィ法、コンクリート内部の鉄筋、土中の空洞、ひびなどを測定することが可能な電磁波レーダー法といった技術が開発さ

れている[8)]。

センサネットワークを使ったIoT技術により、社会インフラを常時監視することが可能になる。これはインフラモニタリングと呼ばれ、正常に供用されているときのインフラの状態を常に把握することによる、異常の検知、補修が必要な時期の推定、破壊の前兆の理解などを目的としている[9)]。

インフラモニタリングを活用することで、点検に必要な人材不足の問題を解決できないか、という検討も進められている。例えば経済産業省が実施するIoT推進のための新産業モデル創出基盤整備事業の一つとして、社会インフラの効率的な点検に関して調査が行われている[10)]。

インフラの崩壊の原因は構造体の劣化だけでなく、交通量の増大といった、利用条件の変化ということにもある。事前の調査に基づいた推定のもとに利用状況が想定され、インフラは建造されるが、想定が外れることも多い。また、緩やかに変化する環境での材料の劣化を推測することは、大変難しい。従って、インフラモニタリングによって、利用状況が想定内かどうか、構造体の劣化が想定内かどうか、を随時チェックしメンテナンスしていく必要がある。

インフラメンテナンスは、インフラの状態を認識するためのデータを集める収集フェーズ、モデルを使ってシミュレーションや実験によって挙動を理解する解析フェーズ、集めたデータをもとにインフラの状態を認識する推定フェーズ、認識結果に基づいて補修等を行う実行フェーズというサイクルで実施され、それぞれのフェーズでの研究開発が進められている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

メンテナンスに必要なデータを入手するセンサ周りの技術と、インフラの状態を理解するためのシミュレーション周りの技術について展開が見られる。

社会インフラにセンサを導入する際には、東京ゲートブリッジの光ファイバーセンサのように、新規施工時にセンサを設置してモニタする場合や、センサが設置されていない既存インフラにセンサを設置してモニタする場合がある。より詳細なデータを取るために、安価でポータブルなセンサを多数設置する技術、センサは一つだが、車両に設置して道路を走行することで道路全体の状態をモニタする技術が開発されている。

インフラの形状データとして、点群データが利用されている。点群データは3次元スキャナを使って、現実の物体を点群データに変換してコンピュータで扱えるようにするものである。現実の形状を正しく認識することはメンテナンスを行う上での前提条件となる。図面が存在する場合は、図面と実データとの差分を把握することができる。点群データからCADデータを生成する技術は今後の研究課題である。

スマートフォンが広く普及したことで、住民にインフラの撮影をしてもらい、その画像データを集めてセンサデータとして利用することが可能になった。スマートフォンやタブレットを使って、多くの人が情報を集めるタイプのセンサをCrowd Sensingと呼んでいる。例えば、道路の穴を見つけたときにスマートフォンのカメラで撮影して、GPSデータと一緒にクラウドにデータを送ることで、道路をモニタできる。社会インフラメンテナンスに住民を巻き込んで継続的な活動とすることで、社会インフラは住民のものである、という意識が根付くことも期待できる。

構造物やその周辺環境も含めて、社会インフラの詳細なモデル化とリアルデータを取り込ん

だ数値シミュレーションが可能となっている。シミュレーションの内訳は、応力解析、衝撃解析、流体解析、振動・波動解析、熱解析等があり、これらを連成したマルチフィジックス解析が主流となっている。社会インフラの構成要素は多岐にわたり、その大きさや供用時間のスケールもさまざまであることから、マルチスケール解析も必須の技術である。有限要素法、有限差分法、境界要素法、粒子法等の計算手法を駆使して、社会インフラの破壊・非破壊シミュレーションの高度化を目指した大規模数値解析が行われている。この大規模解析を実施するためには、スーパーコンピュータ等を利用したHPC（High Performance Computing）技術の導入が必要である。

大規模なシミュレーションの計算結果を理解するためには、結果の可視化が重要である。社会インフラのシミュレーションでは時間発展を伴うこともあり、大容量で多数のデータが生成されるため、これを効率よくハンドリングする必要がある。また、Virtual Realityを使って解析結果を疑似的に体験、あるいは解析結果をCGにして可視化する技術も提案されており、合意形成や住民参加などのコミュニケーションを目的とした活動や、防災・減災、新規インフラの設計にも活用されている。

現実世界の動画にコンピュータが作り出す仮想世界を融合させるAugmented Reality（拡張現実）を使って人間の感覚を拡張することも行われている。例えば、ARを利用して、地下埋設物の3次元モデルを携帯端末のカメラ画像に重畳して表示することで、地上から見ることができない地下埋設物を可視化して、工事を効率化することができる。あるいは、現在のコンクリート面に、過去の点検データを時系列にして重ねることで、ひび割れの進展具合を簡単に確認することができる。

社会インフラの整備・管理や災害の備えとして活用されているのが、さまざまな空間的な情報を作成・管理・分析・表示するGIS: Geographic Information System（地理情報システム）である。GISを使うことで点検結果を位置情報と重ねて表示して構造物の状態を一目で理解し、時間的な変化を位置情報と重ねて表示して経年変化を一目で理解しすることができる。

センサで集めたビッグデータを可視化するだけでなく、そのデータからインフラの状態を推定する、あるいは問題を検知するといったデータ解析技術の向上が重要である。社会インフラを、データ主導でマネジメントすることで、最適な管理を目指すことができる。ビッグデータの解析にはDeep Learningといった機械学習が有効と考えられ研究されている。学習精度を高めるのに必要なだけの、大量の異常状態データを集めることが困難なので、正常な状態を学習して、そこからのずれを異常状態として検出する、という手法がある。この場合、異常と判断するずれの閾値をどう決定するか、という課題がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2014年から2018年にかけての5年間、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の一つとして、「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」が実施された。ICT技術やロボット技術といったシステム化されたインフラマネジメントを活用して、国内重要インフラの高い維持管理水準での維持、魅力ある継続的な維持管理市場の創造、海外展開の礎を築くことを目標とした。この目標を達成するために、点検・モニタリング技術の研究開発、構造材料・劣化機構・補修・補強技術の研究開発、情報・通信技術の研究開発、ロボット技術の研究開発、アセットマネジメント技術の研究開発の五つの研究開発項目を掲げた。新しい非破壊検査の技術とし

て、高出力 X 線・中性子源を使ってコンクリート橋内部を可視化する技術や、ハイパワーレーザによるトンネル打音検査技術や、米国の時速 5km の道路検査装置（Ground Penetration Radar）を凌駕する、時速 80km で橋梁床版内部を検査できる、高速・自動レーダー診断技術を開発した。また、インフラ点検の人材不足を補うために、高速走行型非接触レーダーによるトンネル点検、橋梁点検ロボットカメラ、スマートフォンによる路面性状把握システム、橋梁メンテナンス統合データベースシステム、地方自治体の橋梁点検のロボット技術による支援なども開発した。研究開発、技術開発、技術展開を継続して実施していくための拠点として、国立研究機関の拠点化を検討している。

革新的技術の発掘と社会実装、企業等の連携の促進、地方自治体への支援、インフラメンテナンスの理念の普及、インフラメンテナンスへの市民参画の促進を目的として、「インフラメンテナンス国民会議」を 2016 年 11 月に設立している。産学官民の技術や知恵を総動員するプラットフォームとして位置づけられている [11]。

米国では、運輸省の連邦高速道路局（Federal Highway Administration）が Long-Term Bridge Performance というプロジェクトを 2005 年から実施している [12]。LTBP は長期にわたって橋梁の状態や性能に関するデータを集める研究である。SIP で比較対象とした時速 5km の道路検査装置（名称 : RABIT）はこのプロジェクトで開発されたものである。LTBP ではさまざまなタイプの橋を、条件を揃えてデータを集めることによって、汎用的に橋梁の挙動を把握することを目指して RABIT を開発した [13]。

（5）科学技術的課題

点検の自動化、センサ開発、データ解析の高度化、メンテナンスロボットの開発、構造材料研究に課題があると考えられる。

インフラ点検の自動化は作業者の減少もあり、重要な課題である。打音検査や近接目視検査のように、人間の感覚を使って行う検査で人間がどうやって問題を認識しているのか、を理解する必要がある。人間のやり方を理解した上で、それを超える認識精度や速度を持つ装置や手法を、工学的に構成していかなければならない。Deep Learning といった機械学習技術が有効と考えられるが、最終的な判断を人間が行えるよう、認識結果に対する説明を可能にする必要がある。

非破壊検査に必要なセンサの開発は継続する必要がある。SIP で開発された、レーダー、高感度磁気、好感度近赤外分光、衛星 SAR、中性子線といった先端的なセンシング技術については、実用化に向けて、精度・速度の向上と同時に、設置コスト・維持コストの低減といった課題がある。また、これまでの手段で検出できない属性を検出できるセンサの開発も望まれている。さらに、計測したデータを集めるために、エラーなく、広範囲をカバーできる通信やセンサネットワークの研究も必要である。センサとネットワークとクラウドを含むシステム全体の処理の最適化を図るために、センサでローカルにデータを処理し、生データを解釈して意味データに変換することも必要になる。例えば、橋につけた加速度センサを使って、加速度データそのものを送るのではなく、通過した車の種類と時刻をセットにしたデータを送るようなイメージである。

センサで集めたデータを解析して、計測対象物の故障や崩壊の予兆を検出するデータ解析技術も重要である。さらに、故障の予兆を検知するだけでなく、メンテナンスの内容や時期を判

断し提案する技術も今後の課題である。機械学習による認識という帰納的な研究だけでなく、対象物をモデル化してシミュレーションを使って予測する演繹的な研究の推進も重要である。

人ではやり難い環境でメンテナンスを実施するロボットの開発も課題である。災害現場といった危険な作業環境で動作できるロボット、橋梁点検のような高所危険な場所での作業ロボットといったロボットであり、移動機能に限っても、二足歩行が有効な現場もあれば、専用の移動機構を持ったロボットが有効な現場もあるため、多様なロボットの研究が推進されることが望ましい。

構造材料（コンクリート、有機材料、複合材料、金属、絶縁材料）の劣化機序の理解や、シミュレーション技術を使った劣化進展予測や材料の余寿命予測も課題である[14)]。材料に関する基礎データがないと、実環境でのモニタデータを正確に解釈することができない。

（6）その他の課題

開発されたメンテナンス技術を社会実装していくには、アセットマネジメント技術が必要である。地方が抱える膨大なインフラを限られた予算で維持管理するための契約制度の見直し、人材教育、民間活用、住民との協働など、さまざまな施策を取る必要がある。

英仏で始まった官民連携事業 Public Private Partnership は米国やドイツにも広がり、米国ではシンクタンクの提言がされている[15)]。日本でも内閣府に民間資金等活用事業推進室を設置して PPP の活用を支援している。社会インフラの維持管理には膨大な費用がかかるため、PPP 等の活用が期待される。

人材の確保も課題である。専門性が高いと、コンクリートは分かるが、センサは分からないといったスキルセットになりやすい。モニタリングはさまざまな技術を融合したものであるため広い知識を必要とする。土木工学と機械工学、電気工学、情報工学の交流が望まれる。ただし、色々知っているということは逆に言うと専門がない、ということになってしまい、就職や、科研費の申請、論文投稿で不利となる。学問の境界を超える人材は必要だが、処遇とセットで考える必要がある。

社会インフラが新規に整備される際は積極的に住民への説明を行うが、運用段階に入るとサービスが提供されるのは当たり前になって、ことさらに状況の説明をすることもなくなる。しかし、このような状況が続くと、維持管理に対する住民の理解不足から、財源不足、人材不足を招くことになりかねない。また、老朽化に伴う撤去や複数インフラの集約に対して住民の理解を得ることも困難になる。米国土木学会（American Society of Civil Engineers）は 4 年に一度 Report Card for America’s Infrastructure を発表して、米国の空港、橋、ダム、上水道、河川、堤防、港、鉄道、道路といった社会インフラの状態を A ～ D のグレードで評価して結果を発表している。英国土木学会（Institution of Civil Engineers）は The State of the Nation というレポートを出して、社会インフラに関するさまざまな情報を提供している。2017 年版ではデジタル革新がインフラに与える影響について論じている[16)]。日本でも土木学会が社会インフラ健康診断書（試行版）を 2016 年度から発行して、道路、河川、下水道、港湾の診断結果を公表している[17), 18), 19), 20), 21), 22)]。国土交通省も道路、航路標識、官庁施設についての点検実施状況を公表している。

点検を実施すると、時系列を持った大量のデータが生成される。このデータの所有関係を法的に担保する必要がある。対象物の所有者が、モニタデータの所有者でもあると考えるのが一

般的と考えられるが、公共物である社会インフラの場合、データの所有者は誰で、その公開について誰の了解を得ればよいのか、議論を深める必要がある。公共のデータはオープンデータとして公開することが望ましいが、テロリズムに利用されるといった、目的外の利用をされる可能性があることも考慮しておく必要がある。

（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	◎	↗	戦略的イノベーション創造プログラムのインフラ維持管理・更新・マネジメント技術での研究成果。 土木学会のメンテナンス学への取り組み。
	応用研究・開発	○	→	SIP に参加した各社の取り組み。
米国	基礎研究	◎	→	DOT が支援。
	応用研究・開発	◎	↗	SHM を請け負う会社があり、ビジネスとして展開されている。Structural Health Monitoring のマーケットは $1.48B と推計されている。（DIGITEXX 社等）。
欧州	基礎研究	◎	→	HORIZON 2020 でのプロジェクト (Zero Power Water Infrastructure Monitoring, Research into optimized and future railway infrastructure)。
	応用研究・開発	◎	↗	SHM を請け負う会社があり、ビジネスとして展開されている。（ドイツ HBM、TESTIA 等）。
中国	基礎研究	○	→	International Conference on Structural Health Monitoring and Integrity Management を中国国内で 2 年に 1 回開催。2018 年で 4 回目。
	応用研究・開発	○	→	積極的な海外進出政策を取っているが、新設市場の攻略がメイン。
韓国	基礎研究	○	→	大学で研究。
	応用研究・開発	○	→	積極的な海外進出政策を取っているが、新設市場の攻略がメイン。

（8）参考文献

1）橋本鋼太郎、菊川　滋、二羽淳一郎編 .『社会インフラ　メンテナンス学 :Infrastructure Maintenance』（東京：丸善出版 , 2015）.
2）ロイター .「焦点：イタリアの橋崩落、なぜ防げなかったか」ロイター , https://jp.reuters.com/article/italy-motorway-collapse-safety-idJPKCN1LC05D（2018 年 9 月 11 日アクセス）.
3）藤野陽三、阿部雅人.「米国ミネソタ州での落橋事故」土木学会誌 vol.92 no.10, 2007: 52-55.
4）インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議.「インフラ長寿命化基本計画」2013 年 11 月 .
5）産業競争力懇談会.「インフラ長寿命化技術」2014 年 3 月 3 日 .
6）国土交通省.「国土交通白書」2014: 35.
7）宇都正哲.「次世代社会インフラの動向」OKI テクニカルレビュー Vol.82 No.2, 2015:4-7.
8）坪谷　剛、市口恒雄.「インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発」科学技術動向 143 号 , 2014:36-43.
9）的場純一他.「センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について」JICE レポート vol.15, 2009:24-28.
10）みずほ情報総研株式会社.「平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業（IoT 技術を活用した社会インフラの効率的点検・管理手法等調査）報告書」2017 年 3 月 .
11）インフラメンテナンス国民会議.「インフラメンテナンス国民会議ファクトブック 2017-2018」2018 年 5 月 .
12）U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. “Long-Term Bridge Performance（LTBP）Program Protocols, Version1.” FHWA-HRT-16-007, January 2016.
13）Nenad Gucunski et al. “Concrete Bridge Deck Deterioration Detection and Characterization Using a Fully Autonomous Robotic Platform RABIT.” International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, September 2015.
14）科学技術振興機構研究開発戦略センター.「戦略プログラム　社会インフラの劣化診断・寿命管理技術」CRDS-FY2007-SP-02, 2007 年 4 月 .
15）Hudson Institute. “Infrastructure Spending and Public-Private Partnership.” March 2017.
16）Institution of Civil Engineers. “State Of The Nation 2017: Digital Transformation.” 2017.
17）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書 港湾部門 試行版 2018.6」2018.
18）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書 道路部門 試行版 2018.6」2018.
19）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書 河川部門 試行版 2017.8」2017.
20）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書 下水道部門 試行版 2017.8」2017.
21）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書 道路部門 試行版 2017.8」2017.
22）公益社団法人　土木学会.「インフラ健康診断書　道路部門試行版　2016.5」2016.

2.3.3　サイバーフィジカルセキュリティ

（1）研究開発領域の定義

IoT（Internet of Things）や CPS（Cyber Physical System）の技術は人類に新たな利便性をもたらす。しかしながら、サイバー空間から物理空間への攻撃や物理空間からサイバー空間への攻撃など新たな脅威の可能性が浮上する。そのために、IoT や CPS の技術を安心、安全に使うためにはサイバーとフィジカルの両特性を統合した新しいセキュリティの概念が必要であり、それをサイバーフィジカルセキュリティと定義する。

（2）キーワード

脆弱性（vulnerability）、リスクアナリシス（risk analysis）、情報セキュリティ（information security）、サイバーセキュリティ（cyber security）、機能安全（functional safety）、BCP（Business Continuity Plan）、IoT（Internet of Things）、CPS（Cyber Physical System）、サプライチェーン（supply chain）

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

20 世紀に花開いた情報技術は、情報化・電子化の名の下に現実世界への影響を強めている。別な言い方をすると、制御で始まったマイコン化の流れは、21 世紀に入ってネットワーク化を進めている。IoT は全ての物に組み込まれたコンピュータをネットワーク化する概念であり、CPS はサイバー空間と物理空間を融合されたものと考える概念である。

このような技術の流れを踏まえると、サイバー空間へのサイバー攻撃が物理空間に大きな影響を及ぼす可能性がある。逆に物理空間からの攻撃が情報漏洩や情報破壊などのサイバー空間の脅威になる可能性がある。このため、サイバー空間と物理空間を統合した新たなセキュリティを確立させる必要がある [1]。

この領域研究の対象の一つが重要インフラである。電力、ガス、水道、交通、通信などの生活や社会活動を支える重要インフラへの攻撃は生活や社会活動への大きな脅威である。もう一つの対象が IoT 機器と呼ばれる身近なところでも働く機器である。これらの機器である家電や自動車がサイバー空間から攻撃を受ける可能性が増大している。同時に、これらの機器を経由したサイバー空間への攻撃が出現している。

この二つの対象を中心に、機器のセキュリティ、ネットワークのセキュリティ、クラウドのセキュリティ、そして全体の運用のセキュリティを統合的に研究するのがサイバーフィジカルセキュリティである。

[研究開発の動向]

1946 年に開発された真空管式コンピュータ ENIAC を始祖としてサイバー空間が構築された。そして、1971 年にい Intel でマイクロプロセッサが開発されて家電、自動車などの身近な機器や、ポンプ、ゲート、ボイラー、タービンなどの重要インフラにおける現場機器の電子制御化が急速に進んだ。

2000 年代に入り、Microsoft の OS 利用と機器のネットワーク化が進み、コンピュータウィ

ルスなどのマルウェアが身近な機器や現場機器に影響を及ぼす可能性が唱えられてきた。それが現実になったのは、2010年にイランで起きたウラン濃縮工場へのサイバー攻撃であった。この時、サイバー空間から物理空間への脅威が現実のものと認識された[2)]。

これを受けて、電力、ガス、水道、交通、通信などの重要インフラ防御の研究が本格化した。当時、この分野で先導的な役割を果たしていたのは米国である。DHS（Department of Homeland Security）が中心となり、INL（Idaho National Laboratory）では実機を模擬したテストベッドを用いた攻撃への対処訓練も行っていた。欧州では、イランでの攻撃を契機にENISA（European Union Agency for Network and Information Security）が中心となって会社の役員クラスへのサイバーセキュリティ教育を始めた。

国内では、2011年3月11日に東日本大震災が起こり、重要インフラが全て止まり、津波の被害が被災地の人々をさらに苦しめた。2010年のサイバー攻撃と2011年の大震災の教訓を受けて、2012年3月に技術研究組合制御システムセキュリティセンター（CSSC）が設置された。このセンターは民間企業が中心となって重要インフラを中心にサイバーセキュリティ技術を研究開発することを目的とするものである。

CSSCは国から支援された復興資金をベースに被災地である宮城県多賀城市に研究拠点を形成し、2013年5月に開所式を行った。INLに二基あったテストベッドを参考に、電力、ガス、下水、化学プラント、ビル、生産システムなど7基のテストベッドを構築した、

これらのテストベッドを使って、データログの取得、侵入防止、侵入検出、ホワイトリストなどの防御技術を開発するとともに、サイバーセキュリティ演習をビル、電力、ガス、化学の分野で実施した。合わせて、IEC62243に基づくデバイスのセキュリティ認証であるEDSA（Embedded Device Security Assessment）も2014年から行っている。これは世界で二番目である。なお、この国際認証に基づくマネジメントレベルの認証であるCSMS（Cyber Security Management System）認証を日本情報経済社会推進協会（JIPDEC）が同じく2014年から行っている。これは世界初である[3)]。

2016年にはMIRAIと名付けられたマルウェアがDDoS（Distributed Denial of Service）攻撃を行った。これは、ルータやカメラなどの機器に感染し、それらを踏み台にして特定のサーバーを攻撃するものであった。いわば、物理空間からサイバー空間への攻撃であり、この事件を境にIoT機器のセキュリティ対策の重要性が認識されるようになってきた。最初はペネトレーション試験（通信ポート経由での攻撃耐性試験）やサイドチャンネル攻撃（消費電力監視等による暗号解読など）による脆弱性発見とその改善が主であったが、IoT機器の一つであるスマートメータの普及に伴い、これらの機器における侵入検知や侵入防御、SOC（Security Operation Center）によるサイバー攻撃の検出などの技術も注目を浴びつつある。

加えて、サイバーフィジカルセキュリティではサプライチェーンとしてのセキュリティ担保が大きな課題となっている。これは2017年に起きたWannaCryによる攻撃が契機の一つになっている。

事業者、インテグレイター、機器ベンダー、ネットワークベンダー、ソフトハウス、チップベンダーなどが重要インフラなどではサプライチェーンを構成している。半導体やミドルウェアにバックドアが仕掛けられれば、事業者には大きな脅威である。同様に設置や配線時などにも、侵入や攻撃の装置を挿入される可能性もある。このため、内閣府の研究開発プログラムSIP第2期のプログラム「IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ」では、

IoT システム／サービスのサプライチェーンに注目して、サプライチェーンにおける、A. 信頼の創出・証明、B. 信頼チェーンの構築・流通、C. 信頼チェーンの検証・維持に関する研究開発を進めて、信頼のチェーンを実現しようとしている[1)]。

経済産業省は Society 5.0、Connected Industries の実現にはサイバー攻撃の脅威の増大に対応することが必要と考え、産業に求められるセキュリティ対策の全体像を整理し、産業界が活用できる「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク」を策定しようとしている。このフレームワークは産業社会を、サイバー空間におけるつながり、フィジカル空間とサイバー空間のつながり、企業間のつながりの三層構造と、組織、ヒト、モノ、データ、プロシージャ、システムの 6 つの構成要素で捉えて、包括的にセキュリティポイントを整理している。パブリックコメントを実施して、それらの意見を踏まえて策定を進めている。

（4）注目動向

IoT セキュリティ

IoT 機器のセキュリティについては、内閣サイバーセキュリティセンター、IoT コンソーシアム、経産省など各所で議論が進んでいる。セキュリティ確保は終わりのない作業である。このため、業界ごとに一定のガイドラインを設けてセキュリティ確保の水準を整えるとともに、その水準を向上させていく必要がある。米国が国防の観点から重要インフラについてのガイドラインを明示したことを受けて各国でガイドラインづくりが始まっている。国内でも原子力、電力、スマートメータ、IoT 機器など多様な産業でのガイドラインづくりが進んでいる[4)]。その中でも早かったのは日本電気標準委員会で作成されたスマートメータのガイドライン[5)]である。このガイドラインはスマートメータシステムのセキュリティ確保を目的として、一般送配電事業者が実施すべきセキュリティ対策の要求事項を規定している。既に、スマートメータは国内で普及期を迎えている。また、家電機器のネットワーク化においても、スマートメータ経由が想定されている。もっとも、このガイドラインは電力事業に限ったもので、家電機器との接続をする B ルート（スマートメータからリアルタイムに検針データ等を取得できるルート）は範疇外である。ただし、これからの IoT セキュリティを考えるときの下敷きとなるものである。

サイバー演習

セキュリティは基本的に守りの技術である。このため、攻撃時の対応をあらかじめ演習・訓練していく必要がある。米国での演習・訓練を範として、国内でも内閣サイバーセキュリティセンターが主催する分野横断的演習[6)]や CSSC が主催する制御システムサイバー演習[3)]が行われている。民間も同様の取り組みを行っており、最近は演習業務を提供する会社も多数ある。

認証

セキュリティ確保は事業者や製造者に、まずは責任がある。次に製造者の場合、機器の納入業者が納品時などに認証をする場合がある。現在は、独立な第三者による第三者認証が主流となっている。特に国際標準に基づくセキュリティについての第三者認証を行うことで、サイバーフィジカルセキュリティを担保する流れが加速している[7)]。

サプライチェーン

現在の電子機器は非常に複雑な構成となっている。大きく分けてハード系とソフト系に分かれる。ハード系はメカや電子部品などに分かれ、ソフト系はファームウェア、OS、ミドルウェア、アプリケーションプログラムなどに分かれる。これら全てを1社でまかなうことは不可能であり、多数の会社などが連携して一つの部品を構成している。さらに、これらの部品の集積として製品や重要インフラや工場などがある。このためセキュリティ確保には、各社、各部品、各ソフトウェアの連携であるサプライチェーンを意識せざるを得ない[8)]。

（5）科学技術的課題

学術的には情報セキュリティと物理セキュリティに分野が分かれて研究されてきた。前者は暗号化、認証の方式に主眼を置いてきた。そして、後者は部屋や建物の構造、入退出管理を主眼にしていた。サイバーフィジカルセキュリティでは、これらを統合して考える必要がある。

それだけでなく、情報系から物理系への影響を考えると機能安全問題を避けて通れない。物理系を操作されることで健康、環境、安全面にどのような被害が生じる可能性があるかを把握し、対策を講じなければならない。逆に、物理系を操作するIoT機器からの情報漏洩や情報破壊などの被害に対する対策も講じなければいけない。その意味で、サイバーフィジカルセキュリティは従来の情報セキュリティ、機能安全を含み、それらを有機的に統括するものでなければならない[9)]。

加えて、サプライチェーン問題が対策を複雑化している。ネットワークに流れる情報を暗号化する場合、関連する機器ベンダーが暗号キーを共有する必要がある。この場合、一つの機器に脆弱性があれば、ネットワーク全体の危機につながる。それだけでなく、多数が共有している情報を秘匿しなければならないという基本的に困難な課題を解決していく手法の開発が不可避である。この開発にはIoT機器へのブロックチェーン活用が期待される。

サイバーフィジカルセキュリティには完璧な防護はありえない。常に攻撃側とのイタチごっこである。そのため、定期的な見直し、改善が不可欠である。ソフトウェアで言えば、アップデートである。脆弱性情報に基づいて常に最新のOS、ミドルウェア、アプリケーションプログラムに更新を続けていく必要性がある。同時に、アップデート作業時が一番危険である。安全に、確実に、そして通信や処理の負荷を最小にするリモートアップデートの仕組み開発には大きな期待が寄せられている。

フィジカル面でアップデートを考えると機器の置き換えとなる。現在もリコール制度が整っている家電や自動車では、危険性がある場合は部品の置き換え、製品自体の回収が行われている。IoT時代を迎え、ソフトウェアのアップデートでは対処できない危険性については、部品や製品の回収や置き換えを行わなければならない。これは、所有から共有、買い取りからレンタルという現在社会の大きな流れに沿う動きでもある。身の回りの機器は常に最新のセキュリティやセイフティが担保されている状態を作るためには、所有よりサービス享受という方向に意識を変えていく必要がある。

その場合、機器の稼働状況をネットワーク越しに監視する監視センターを設ける必要がある。この監視センターがサイバーフィジカルセキュリティを担保する要となる。各機器の状態、ネットワークの状態を監視し、攻撃や侵入、故障や脆弱性を監視し、問題に即応する体制構築が不可欠である。その意味でIoT機器単体のセキュリティの担保、クラウドサービスのセキュリティ

の担保という状況から、クラウドサービスに対応する監視センターとIoT機器が一体となったサイバーフィジカルセキュリティの担保にギアアップして、研究開発を行っていく必要がある。

（6）その他の課題

サイバーフィジカルセキュリティの分野は国防の一つとして扱われている。大きな転機となったイランでのスタックスネットによる被害とそれに続く中東での数々のインシデント、近年での他国から攻撃の可能性が指摘されるウクライナでの停電や米国での選挙妨害など、外交・軍事マターとして扱われている。

このため、セキュリティ技術は秘匿事項として扱われ、実際の研究開発がオープンになっていない。これは、オープンに情報を共有し、それを深めていくという学術の世界と相容れない。その意味で、学術研究としての難しさが存在する。企業レベルでも、実際のセキュリティ対策を明らかにするのは大きな抵抗がある。それは、対策を示すこと自体が攻撃の糸口を与えることにつながるからである。

サイバーフィジカルセキュリティを学術で扱う場合には、個別で行われている対策技術を学術の観点から抽象化して整理する必要がある。これが不十分だと、一般性や再現性に支障を来たして学術として扱われない可能性が存在する。

サイバーフィジカルセキュリティを研究する上での、もう一つの課題は広範な分野の知識が要求されることである。情報系、物理系に加えて、人文系の幅広い知識が必要である。情報系に限っても、ソフトウェア、通信方式、ネットワーク、データベースなど広範な知識が要求される。これらを完璧に知っている人はいない。同様に物理系と言っても、センサ、アクチュエータ、電子回路、半導体という知識だけでなく、熱管理、電波干渉など広範な知識が必要である。これも完璧に知っている人はいない。

このような困難を乗り越えるには、専門家集団の緊密な連携が必要である。それも機密情報を共有するため、信頼でつながった専門家でなければならない。広範な知識を持ち、信頼を持たれる研究者は簡単には育たない。それなりの教育体系と社会体制を整える必要がある。産業分野ではIPAで人材養成プログラムが2017年より始まっているが、大学での取り組みは、これからという印象が濃い。その意味で、サイバーフィジカルセキュリティ分野の研究者養成は大きな課題である。

（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	○	→	計測自動制御学会学術講演会などで関連セッションが2005年から引き続き構成されている。
	応用研究・開発	◎	↗	CSSC中心の研究開発から2006年よりSIPとして大規模な研究開発に移行。2020年の東京オリンピック・パラリンピックを視野に入れた技術開発を進めている。
米国	基礎研究	○	→	大学の研究者は自動車や産業機器の脆弱性発見を進めている。毎年、ブラックハットで発表を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	大統領令に基づいて重要インフラのセキュリティ確保を進めている。加えて、産業界はIIC（Industrial Internet Consortium）を中心にセキュリティ基準の作成を進めている。

欧州	基礎研究	○	→	暗号化、サイドチャンネル攻撃を中心に学術的な研究を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	GDPR（General Data Protection Regulation）が 2018 年 7 月に開始され、それへの対応に忙しい。
中国	基礎研究	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。
	応用研究・開発	—	↗	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。ただし、攻撃技術を磨いているという他国からの指摘はある。ドイツが Industrie4.0、米国が IIC を軸にセキュリティ技術を中国に展開している中で、中国独自規格を進めている。
韓国	基礎研究	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。
	応用研究・開発	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。

（8）参考文献

1）後藤厚宏.「IoT 社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ」内閣府 , http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/press2/security.pdf （2018 年 8 月 20 日アクセス）.
2）新誠一.「超スマート社会におけるサイバーセキュリティ」計測と制御 vol. 55 no. 4, 2016: 300-302.
3）新誠一.「重要インフラのサイバーセキュリティ対策」エネルギー・資源 vol. 38 no. 2, 2017: 17-20.
4）資源エネルギー庁.「電力・ガス分野におけるサイバーセキュリティ対策」経済産業省 , http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/denryoku_gas_kihon/pdf/004_07_01.pdf （2018 年 8 月 20 日アクセス）
5）一般社団法人　日本電気協会.「スマートメーターシステムセキュリティガイドライン」https://www.denki.or.jp/wp-content/uploads/2016/07/s20160609.pdf （2018 年 8 月 20 日アクセス）.
6）内閣官房　内閣サイバーセキュリティセンター.「2017 年度「分野横断的演習」について」https://www.nisc.go.jp/conference/cs/ciip/dai14/pdf/14shiryou08.pdf （2018 年 8 月 20 日アクセス）.
7）新誠一.「社会インフラシステムにおけるセキュリティ対策」標準化と品質管理　vol. 69 no. 7, 2016: 2-6.
8）経済産業省　商務情報政策局　サイバーセキュリティ課.「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワークの概要」経済産業省 , http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/sangyo_cyber/wg_1/pdf/002_05_01.pdf （2018 年 8 月 20 日アクセス）.
9）新誠一.「IoT を生かすためのセキュリティ」日経ものづくり no. 744, 2016: 106-110.

２．３．４　社会システムアーキテクチャ

（１）研究開発領域の定義

社会を持続的に発展させていくには、経済や環境、技術的な変化を適切に捉え、安全性を確保した上で、その社会を形成する人々へ適切なサービスを介して価値を提供することが重要である。特に近年の急速な技術の発展に伴い、さまざまなものが容易につながりその影響を受ける中で、社会をやりくりしていくため、全体をシステムとして捉えてその基本特性と原則を表すアーキテクチャに基づくマネジメント技術を確立することが求められる。

（２）キーワード

System of systems、システムズエンジニアリング、システム連携、アーキテクチャ

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

Internet of Things（以下、IoT）技術の発展はめざましいものがあり、さまざまなものがつながることでサービスを提供することができるが、こうしたサービスシステムは、いわゆるSystem of Systems（以下、SoS）となり、創発的な振る舞いをすることが懸念される[1), 2)]。地域、コミュニティなどのいわゆる社会の持続可能な発展には、経済や環境、技術的な変化を適切に捉える必要があると考えられるが、これは大規模で複雑なシステムとしての課題となる。SoSは、必ずしも運用、管理が及ばない複数のシステムで構成されるため、経済的、政策的、技術的な環境の変化の可能性があるライフサイクル全般にわたって、SoS全体として求められる機能、特性を維持することを保証するのは難しい。

システムズエンジニアリング[3)]では、システムアーキテクチャを定義することで、次のプロセスであるシステム設計の定義に際しての制約を課しているため、アーキテクチャに基づきシステムのマネジメントを行うことは比較的容易である。しかしながら、外部環境の変化に応じて進化が繰り返される可能性のあるSoSの場合には、そのアーキテクチャの構築は容易ではない。SoSアーキテクチャでは、SoSの分析に基づきアーキテクチャ自身の進化を行うことが求められる[4)]。このため、外部環境に応じて変化するSoSをマネジメントするための持続的なアーキテクチャフレームワークが必要となり、その中でSoSアーキテクチャ自身を進化させる必要がある。当該研究開発領域は、社会システムをSoSとして捉え、さまざまな利害関係者からの要求を満たすSoSアーキテクチャとそれを導くためのプロセスを研究する。

［研究開発の動向］

社会を支えるインフラストラクチャとしての電力システム、交通システムあるいは防災システムなどは、そのライフサイクル全般にわたりマネジメントすることができる単体のシステムではなく、ライフサイクルをマネジメントするのが困難なシステムを含めて複雑に相互関係性を持つ複数のシステムから構成されている。インターネットを含む通信ネットワークに接続されたコンピュータシステムによって管理、統制される、いわゆるサイバーフィジカルシステム[5)]となっている場合もある。このような、異質な個々のシステムが独立して動作可能ではあるが、ある共通したゴールに向けて共にネットワークされている大規模な統合された複数システムを

System of Systems（SoS）と呼ぶ[1),2)]。SoSは、大規模かつ複雑で、ネットワーク化されているため、個々のシステムは独立して動作可能であるが、相互関係があり、SoSの要素である構成システムは、それぞれ異なるシステムライフサイクルを持つ。個々のシステムを最適化してもSoS全体の最適性は保証されない。

SoSの特徴としては、各構成システムの運用の独立性、それらの管理の独立性、地理的な分布、創発的な振る舞い、進化的な発展が挙げられる[2)]。このような特徴を持つSoSを成功裏に導くには、既存、もしくは、新規のシステムが混在することで得られる能力を、SoSを構成する部分の能力の合計よりも優れたものにするために、計画し、分析し、編成し、統合するプロセスとして、System of Systems Engineering（SoSE）が必要となる[1)]。しかしながら、これは容易なことではない。SoSの課題としては、次の点が挙げられる。

- システムズエンジニアリングで検討されるコンセプト、分析、制御、評価、設計、モデリング、可制御性、可観測性、信頼性などを、どのようにSoSへ拡張して適用するのか。
- どのようにSoSをモデル化し、シミュレーションするのか。
- SoSの要素となるシステム間のインタフェースをどのように扱うのか。
- SoSの創発的な振る舞いをどのように扱うのか。
- SoSの境界は動的であり、これをどのように定めるのか。
- 時間が経つにつれて進化するSoSに関する要求をどのように扱うのか[4)]。

このようなSoSEの難しい問題に対処するためのマネジメントフレームワークとして、文献4では、SoSEのプロセスを時間で展開した波モデルを提示している。そこでは、多岐にわたる進化の繰り返しの中で構成システムの開発を促し、SoSを追加開発の対象として特徴づけている。そして、外部環境からのSoSへの継続的な入力の把握と、SoSの動的な性質に対処するための継続的な分析を行い、SoSの進化を繰り返す。この過程の中で、アーキテクチャの進化もまた重要となる。SoSアーキテクチャは時間とともに進化するSoSの持続的なフレームワークを与えると同時に、計画されたSoSアーキテクチャが追加的に実装され、それ自身を進化させる。

欧州では、SoSのエンジニアリングとマネジメントの研究と革新に関する欧州ロードマップの策定に向けて、Cyber Physical Systems of Systems（CPSoS）に関する30ヶ月間のプロジェクトを2013年から開始し、2016年に終了している[5)]。これに関連して、AMADEOS（Architecture for Multi-criticality Agile Dependable Evolutionary Open System-of-Systems）[6)]のプロジェクトが、欧州委員会第7次フレームワークプログラムのもとで創設された。そこではプロジェクトCOMPASS[7)]、DANSE[8)]で定めたSoSに関する基本的な概念を継承している。一方で、ドイツを中心とした産業界の活動としては、2013年4月にIndustrie 4.0のレポート[9)]が公表され、そこでは製造業を中心とする産業としてInternet of Things（IoT）の活用が描かれている。

米国では、Cyber Physical Systems（CPS）に関して2006年からNSF（National Science Foundation）が予算をつけ、現在も継続させており、さまざまな分野、政府機関との連携がなされている[10)]。カーネギーメロン大学ソフトウェアエンジニアリング研究所では、システムとソフトウェアの購入者とエンジニア（提供者）を越えて、複雑なSoSへの全ての参入者が、ユー

ザが求めることへの異なった見方と期待を必要としている現状を踏まえ、SoS Navigator[11] を提供している。これにより、SoS に関与する各リーダーに対して、彼らが置かれる状況で需要側と供給側の重要な観点からの新たな気付きを与え、SoS コンテキストで現状とは異なるビジネスモデルの適応と持続が要求されているか否かを判断するための評価基準を示している。

米国の産業界から Industrial Internet Consortium（IIC）[12] が 2014 に発足し、IoT を活用した革新を加速しようと試みられている。IIC はリファレンスアーキテクチャを提案しており、そこでは、ビジネス／利用／機能／実装の 4 つのビューポイントを設定して、アーキテクチャを定義している。すなわち、ビジネスビューポイントではビジネス価値とその根拠を持ち、利用ビューポイントでは特定のアクティビティと役割で協働し、機能ビューポイントでは特定のセキュリティ機能を持ち、そして実装ビューポイントでは、特定の特性を持った技術に依存する必要がある。文献 13 では、さらにビジネスのレイヤーの上に社会ビューポイントを設定し、そこに社会的合意を取りまとめるための抽象的な約定を設けることが提案されている。

これまでビジネスあるいは SoS に関するモデル記述に際しては、防衛関係のアーキテクチャフレームワークである DoDAF（Department of Defense Architecture Framework）、あるいは MODAF（Ministry of Defense Architecture Framework）、TOGAF（The Open Group Architecture Framework）が用いられることが多かった。2016 年に OMG（Object Management Group）から UAF（Unified Architecture Framework）[14] が発行され、統一的にビジネスあるいは SoS に関するモデル記述をサポートする動きがあり、既にいくつかの研究発表がなされている。こうした研究で UAF を活用する際、IIRA（Industrial Internet Reference Architecture）のビジネスビューポイントから下位の利用／機能／実装のビューポイントとの対応関係を明確にしている [15]。

中国では、2015 年に「中国製造 2025」を掲げ、2049 年までの長期的な視点で、幅広い産業での世界トップレベルの製造業を目指して活動を行っている [16]。既に欧州企業との連携が実施されていることは注目に値する。

国内では、内閣府を中心に超スマート社会の実現、Society 5.0 が提唱され、これに関連して、JST（Japan Science and Technology Agency）は未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域 [17] で、“多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築”を掲げている。これは Society 5.0 を実現するために必須となるシステム連携を技術的に確立させ、サービスを社会に提供するための重要な研究領域である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

OMG は UAF[14] を発行し、これにより、ハードウェア、ソフトウェア、データ、人員および設備を含む複雑なシステムの幅広い範囲に対してアーキテクチャをモデル記述し、さらに SoS の設計、実装へと通じるアーキテクチャ構成をモデル記述することができるようにしている。複雑システムの分析、仕様、設計、検証をサポートし、SysML（Systems Modeling Language）[18] に基づく関連ツールと他の標準に基づくツール間の連携のもとで、アーキテクチャ情報を交換できるようになる。UAF は、これまでアーキテクチャフレームワークとして用いられた DODAF、MODAF などをサポートするものであり、SoS が関与するビジネスの構

築に大きな貢献が期待される。

具体的には、スマートグリッド[15]、石油・ガスプラント[19]の分野へUAFを用いたSoSとしての対処が試みられており、IIoT（Industrial Internet of Things）をビジネスへ活用するシステムの開発が進むものと推測される。また、UAFをSoSのモデル記述にテーラリングすることについて研究した論文[20]も見られる。

米国のNSFは、CPSに関して国土安全保障、道路管理、生物医工学、がん研究、衛生研究などのさまざまな分野で、政府機関と連携している[10]。また、CPSには人の介在が含まれているが、陽に人を考慮することの重要性が指摘され[21]、CPSのループの中に人が介在することを前提とした取り組みがなされている[22]。また、欧州委員会第7次フレームワークプログラムのAMADEOSのプロジェクトでは、SoSアーキテクチャの構築に向けての取り組みがあったが、レジリエンスのビューポイントを設定することでSoSの進化を捉え、これに基づくSoSアーキテクチャを提案する研究[23]がある。

SDGs（Sustainable Development Goals）[24]が2015年に国連から発行されている。国連に加盟する全ての国が、全会一致で採択したアジェンダで、2015年から2030年までに、貧困や飢餓、エネルギー、気候変動、平和的社会など、持続可能な開発のための諸目標を達成するとしている。SDGsの17の指標には、貧困や飢餓、健康や教育、さらには安全な水などの開発支援、エネルギー、働きがいや経済成長、まちづくり、気候変動など、包括的な指標が含まれている。これは、INCOSEが2014年に公表したシステムズエンジニアリング・ビジョン2025[25]と密接に関係し、持続可能な社会を形づくる上で極めて重要な指標となっている。社会が何を求めているかを把握し、社会に価値を提供すると考える解決策が、社会的に受容可能か否かを関連する地域の歴史的背景や文化、民族、宗教なども含めた上で考える必要があり、このことは文献[13]で提案している社会のビューポイントと密接に関係がある。OMGが提案するUAFが主として、ビジネスビューポイントから下位の利用／機能／実装のビューポイントまでを網羅するのに対して、SDGsを考慮するならば、社会ビューポイントの存在が重要となる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内では、JST未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域[17]の試みの中で、産学官が連携し、Society 5.0を形づくるための基盤としてのプラットフォームを構成しようとしている点が注目すべきことである。これは、国際的に見ても、最先端の研究開発プロジェクトである。システム連携を行うことで、いわゆるCPSを形成し、これを社会に組み込む際にそこに住み、そして生活をする人々との相互作用を考慮し、社会を持続可能なものとするためには、社会をSoSとして考え、これをマネジメントすることが求められる。また、社会のマネジメントを行うためのSoSアーキテクチャを、Society 5.0のプラットフォームとして位置づけるところに大きな意義がある。

欧州では、欧州委員会のFP7で取り組んだCPSoSのプロジェクトに関連して、AMADEOS、COMPASS、DANSEのプロジェクトが具体的に実施されたことは既に述べたが、これに続く2014年から2020年までの7年間に実施されるHORIZON 2020[26]では、Energyの分野内に、Smart Citiesのプロジェクトを設定している。また、2021年から2027年の7

年間は、Horizon Europe と名付けられた研究・イノベーションのフレームワークプロジェクトとなることが決まりつつある。全ての人々の生活を向上させるための「社会的ニーズ」、種の生存、地球保護のための「生物圏」、変化をもたらす「イノベーション」に関する移行と、そして、これら 3 つの移行をやりくりするための「ガバナンス」の 4 つを特徴としており、SDGs[24] との関連に言及している [27]。これらの取り組みは、JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域と密接に関係するものと考えられる。

先に述べたとおり、米国の NSF は、CPS に関して国土安全保障、道路管理、生物医工学、がん研究、衛生研究などのさまざまな分野で、政府機関との連携がなされている。ただし、具体的なプロジェクトについては、明確になっていない。

今後の情報技術の発展により、人工知能の活用は避けて通れないと考えられ、SoS、CPS、あるいは Industrie 4.0、IIoT を始め、これらの技術の産業への応用を進める際には、これらを設計するエンジニアが倫理について、正しい理解をしておかなければならない。米国電気電子学会（IEEE）は、The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems[28] を 2013 年から立ち上げ、倫理に沿った設計（Ethically Aligned Design、EAD）の重要性について、関係者間で議論を始めており、標準づくりに向けた活動を積極的に行っている。

（5）科学技術的課題

SoS アーキテクチャに基づいて SoS をマネジメントし、さらに、SoS の分析を行いながら SoS の進化に合わせて、そのアーキテクチャを進化させていく、波モデルを実現するための技術的課題は少なくない。SoS をどのように分析するのか、アーキテクチャの進化をどのようにマネジメントし統治するのか、SoS を進化させるときに必要なアーキテクチャには何を記述しておくべきかについては、さまざまな利害関係者と共に取り組まなければならない大きな課題である。これらの課題は、技術的な観点だけでは解決に至らないこともあると考えられる。

特に、社会コンセンサスあるいは社会の合意に基づき、受容される SoS を形づくる必要があるため、社会科学の分野の研究者、あるいは、地域と密着して活動をしている人々との協働が必要になる。地域やコミュニティで暮らす人々が、そこに提供されるインフラやサービスに対してどのような意見を持っているのかを適時受け取ることは、SoS の分析を行う際のもとになる情報を得るために必要と考えられる。

また、その分析に際しては、SoS の状況をシミュレーションすることが求められるが、いわゆるデジタルツインと呼ばれる技術では、シミュレーションに用いるモデルの粒度を的確に定める必要がある。任意の粒度で適切に分析ができるようにすることは大きな技術課題となっている。このようなシミュレーションモデルを構築するためには、SoS アーキテクチャをあらかじめ定義しておくことが必要であり、その際に、UAF を用いることが考えられるが、現時点では社会ビューポイントを網羅する方法論は確立していないことも技術課題である。SoS アーキテクチャの統治、マネジメントに関しては、ISO/IEC/IEEE 42020 Architecture Processes[29] が策定される予定で、標準としての指針はここに示されているものの、社会システムへの適用に際してのテーラリングが課題となる。そして、この課題とともに、SoS アーキテクチャとして何を記述する必要があるのかを明確にする必要があり、このためには、社会システムの利害関係者を漏れなく抽出し、全ての関心事を把握することがその基礎となる。この

ことは社会コンセンサス、社会との合意と密接に関係することであり、社会科学の専門分野の方々との協働が欠かせないことを意味する。

一方で、人工知能、自律システムは今後、SoS、IoT にとって必須の技術になることが容易に想像できるが、これを社会のビューから考えれば、倫理上の問題が浮き上がってくる。IEEE は EAD の活動として既に標準づくりを始めているが、社会システムを形づくる上での人工知能、自律システムの活用に関して、倫理上の課題を取りまとめておく必要がある。

（6）その他の課題

（5）に記述したとおり、広範囲の技術分野と社会科学の分野との連携を行うことが、当該の社会システムアーキテクチャには必須であると考えられるが、実際にはそれぞれの分野の専門性を持って活動をしているため、連携する形を取ることが困難になると考えられる。また、ソーシャルメディアなどの情報システムの利用に対する考え方や捉え方が世代間で異なるなど、社会への参画の仕方について社会学的な観点での課題が山積している。

当該研究課題に対処しようとするには、システムズエンジニアリングの基礎を理解し、SoS の課題を捉えた上で、できる限りフラットな立場で検討を試みることができる人材の確保が重要となる。分野の専門性に引っ張られて、考え方が狭くなってしまうことを極力避けなければならない。さらに、EAD に関する倫理的な問題を正しく理解し、例えば、「自律」、「協生」といった言葉を正しく用いることができる技術人材こそが、これからの社会システムに欠かせないと考える。ただし、このような意識変革は、技術者などの理系人材にのみに求められるものではなく、いわゆる文系の研究者にも求められると考えられる。そして、両者が共に社会を形づくるために力を合わせることができる研究体制の構築が求められる。

制度面での課題としては、社会システムについての活動で実証試験などを実施するために長い時間を要することがある。また、市民が積極的に参画して進める活動も社会システムを考える上では極めて重要なものである。このため、社会実証試験を実施するための制度面でのバリアを低くすることが求められる。ただし、安全面、セキュリティ面での配慮は、社会への影響の度合に応じて重要となるため、こうした社会実証試験を行うための制度づくりを進める必要がある。

（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	△	→	システムズエンジニアリングの基礎に対する理解が十分ではなく、SoS 関連の基礎研究が不足している。
	応用研究・開発	○	→	企業を中心に IoT への興味は高く、個別の研究、プロジェクトは実施されていると考えられるが、システム全体あるいは SoS として検討された研究はほとんど見えない。JST 未来社会創造事業では、「超スマート社会の実現」領域で応用研究を推進しようとしている。
米国	基礎研究	◎	→	IEEE、INCOSE 関係では、SoS に関する研究は多数あり、標準化に向けての議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	ビジネスへの応用を視野に UAF が提案され、それを応用する研究が既に始まっている。NSF は他の省との連携によるプロジェクトへの予算化を進めている。

欧州	基礎研究	◎	→	CPSoS、SoS アーキテクチャに関する研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	個々の分野への応用を視野に入れており、電力が関係するスマートシティへの応用プロジェクトを HORIZON 2020 で実施している。さらに Horizon Europe が 2021 年からの 7 年間のプロジェクトとして計画されている。
中国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	中国製造 2025 を立ち上げ、2049 年までを見通した構想を掲げ、欧州企業との連携を既に開始している。
韓国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	△	→	具体的な研究、プロジェクトは見えない。

（8）参考文献

1）Mohammad Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century（New Jersey: John Wiley & Sons, 2011）.
2）Maier Mark W. “Architecting principles for systems-of-systems.” Systems Engineering. Volume1, Issue4, 1998:267-284.
3）Systems Engineering Handbook. A Guide for System Life Cycle Process and Activities Fourth Ed.（New Jersey: John Wiley & Sons, 2015）.
4）Judith Dahmann, George Rebovich, Ralph Lowry, JoAnn Lane, Kristen Baldwin. “An implementers' view of systems engineering for systems of systems.” Systems Conference（SysCon）, 2011 IEEE International, 2011:212-217.
5）CPSoS. “Definitions used throughout the project. Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-Physical Systems of Systems.” http://www.cpsos.eu/project/what-are-cyber-physical-systems-of-systems/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
6）“Cyber-Physical System of Systems, Foundation – A Conceptual Model and Some Derevations: The AMADEOS Legacy.” Springer Open, DOI 10.1007/978-3-319-47590-5, 2016.
7）“COMPASS.” http://www.compass-research.eu/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
8）“DANSE - Designing for Adaptability and evolutioN in System of systems Engineering.” https://www.danse-ip.eu（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
9）National Academy of Science and Engineering. “Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group.” https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
10）National Science Foundation. “Cyber Physical Systems.” https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
11）Software Engineering Institute. “SoS Navigator 2.0: A Context-Based Approach to System-of-Systems Challenges.” Carnegie Mellon University, http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=8515（2018 年 8 月 28 日アクセス）.

12）“Internet Industrial Consortium.” http://www.iiconsortium.org/index.htm（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
13）西村 秀和.「Society5.0 を形づくる」横幹、特集「Society5.0、超スマート社会に向けた新しい価値を創造する各学会の取り組みと他分野との研究展望」、12 巻、1 号 , 2018:33-37, DOI https://doi.org/10.11487/trafst.12.1_33.
14）Object Management Group, “ABOUT THE UNIFIED ARCHITECTURE FRAMEWORK SPECIFICATION VERSION 1.0.” https://www.omg.org/spec/UAF/About-UAF/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
15）Matthew Hause. “Using MBSE to Evaluate and Protect the Electrical Grid as a System of Systems.” 27th Annual INCOSE International Symposium, 2017.
16）Extelligence.「中国版 Industry4.0 ！「中国製造 2025」の現状」https://xeex-products.jp/extelligence/made-in-china-2025/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
17）「JST 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域」 https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
18）Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language Third Edition（Massachusetts: The MK/OMG Press, 2015）.
19）Matthew Hause, Steve Ashfield. “The Oil and Gas Digital Engineering Journey.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
20）Lucio Tirone, Emanuele Guidolotti, Lorenzo Fornaro. “A Tailoring of the Unified Architecture Framework’s Meta-Model for the Modeling of Systems-of-Systems.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
21）Sulayman K. Sowe, Eric Simmon, Koji Zettsu, Frederic de Vaulx and Irena Bojanova. “Cyber-Physical-Human Systems Putting People in the Loop.” IT Pro, IEEE Computer Society, January/February, 2016.
22）Azad M. Madni, Michael Sievers, Carla Conaway Madni. “ADAPTIVE CYBER-PHYSICAL-HUMAN SYSTEMS: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
23）Demetrios Joannou, Roy Kalawsky. “A Novel “Resilience Viewpoint” to aid in Engineering Resilience in Systems of Systems（SoS）.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
24）United Nations. “SDGs（Sustainable Development Goals）” https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
25）INCOSE. “SE Vision 2025.” https://www.incose.org/products-and-publications/se-vision-2025（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
26）“HORIZON 2020” https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
28）European Union. “Horizon Europe - the next research and innovation framework programme” https://ec.europa.eu/info/designing-next-research-and-innovation-

framework-programme/what-shapes-next-framework-programme_en（2019 年 1 月 8 日アクセス）.
28）IEEE. “The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems.” https://ethicsinaction.ieee.org/（2018 年 8 月 28 日アクセス）.
29）James N Martin. “Overview of an Emerging Standard on Architecture Processes – ISO/IEC 42020.” 26th Annual INCOSE International Symposium, 2016.

２．３．５　制度設計

（１）研究開発領域の定義

異なる目的／選好を持つ複数の参加者が存在する際に、何らかの望ましい性質を持つ社会的意思決定のルール／制度を設計することを目的とする研究開発領域。各参加者の選好は個人情報で制度の設計者（mechanism designer）にとって未知であることが通例であり、参加者に真の選好を申告する誘因／インセンティブを与えるように制度を設計することが必要とされる。近年は、より実践的な側面を重視して、「マーケットデザイン」という用語が用いられることも多い。

（２）キーワード

ゲーム理論、ミクロ経済学、オークション、マッチング、マーケットデザイン、インセンティブ

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

米国では eBay、日本ではヤフオク！、モバオクなどのインターネット上のオークションサイトが、買い物をする際、あるいは不用品を処分する際の選択肢の一つとして定着しつつある。インターネットオークションで買い物をする際には、出品されている商品のどれを選択するか、また、いくらまでなら入札してもよいかなどの、さまざまな意思決定をする必要がある。また、出品する立場では、最低販売価格をいくらに設定するか、出品期間をどう設定するかなどを決める必要がある。これらの意思決定においては、自分の行動や利益のみではなく、他者がどのように考えて、どのように行動するかを考慮に入れる必要がある。このような複数の人間（プレーヤー）が、相手の利益や行動を考慮して戦略的に行動する場合の意思決定を分析する理論としてゲーム理論がある。また、戦略的行動をする複数のプレーヤーが集団で意思決定を行う場合に、望ましい性質を満足する社会的ルールを設計することは制度設計／メカニズムデザインと呼ばれ、ゲーム理論の一分野として活発な研究が行われている。

一方、人工知能の一分野であるマルチエージェントシステムと呼ばれる研究分野では、人間や知的なソフトウェア等の自律的な主体をエージェントと呼び、複数のエージェント間の相互作用を扱っている。マルチエージェントシステムの研究において、エージェント間の合意形成のためのルール設計は重要な研究課題となっている。このような研究を支える基礎理論として、ゲーム理論と制度設計／メカニズムデザインの知見を用いること、また、後述するキーワード連動型広告や組み合わせ入札等、インターネット等の技術の発達により実現可能となった新しい状況に適用可能なようにメカニズムを拡張することが、近年のマルチエージェントシステム研究における一つの大きな流れとなっている。近年では、制度を実現する際の計算量や通信量等の実践的／工学的側面も考慮した情報科学分野との学際的な研究分野であることを強調し、「マーケットデザイン」という用語が用いられることも多い。

［研究開発の動向］

制度設計の主要な応用分野としてオークションとマッチングがある。以下、オークションとマッチングに関して、簡単な解説と研究開発の動向を示す。

オークション

制度設計／メカニズムデザインの雰囲気をつかむために、以下のような事例を考えよう。

- 顧客はペイ・パー・ビューで、ある動画を見ようとしている。その際に複数の動画配信サービス会社が、顧客に対して同時に入札をして価格を提示する。顧客はこれらの入札に基づいて、どの会社を利用するかを決定する。

常識的な方法として、顧客は最も安い入札を選び、最も安い入札をした会社がその入札した金額で動画を提供することが考えられる（この方法は第一価格秘密入札と呼ばれる）。例えばA社が180円、B社が200円、C社が230円の入札をした場合、A社が落札し、180円で動画を提供する。普通に考えれば、これより良い方法はないと思われるが、この方法には若干の問題点がある。この方法を用いた場合、各社にとって入札値をどう設定するかが非常に難しい問題となる。入札値は理想的には原価に対して適切な利潤を加えたものになるべきであるが、適切な利潤というものを決める方法がない。実際のところ、各社は可能な限り利潤を増やしたいのであるが、落札できなくては利益が得られない。各社にとって他社の入札値をなるべく正しく推定することは非常に重要な課題となり、不正な手段を使ってでも他社の入札額を知ろうとする行為が蔓延することが十分に予想される。

では、このような状況を回避することは可能だろうか？　以下のように価格の決定方法を変更することにより、この問題を回避することができる。

- 顧客は最も安い入札をした会社を選ぶが、その際に顧客が支払う金額は二番目に安い入札値とする。

前述の例では、A社が落札することは変わらないが、顧客の支払う金額はB社の提示した200円となる。この方法は第二価格秘密入札もしくはビックリー入札と呼ばれ、ノーベル経済学賞を受賞したWilliam Vickreyによって提案されたものである[1)]。少し考えてみると、この方法を取った場合、他社の入札値を察知することに意味がないことが分かる。落札した場合に自分が受け取る金額は、他社の入札値によって決定される。自分の入札値は自分が落札できるかできないかには影響するが、落札した場合の支払額には影響しない。よって、各社にとって入札をつり上げようという誘因はない。支払額は、勝者が勝てる範囲の最大の金額を与えていると考えられる。

顧客の立場からは、180円の入札があるにも関わらず200円を支払うのは納得できないように感じられるだろう。しかしながら、実際にはこの方法を取った場合、各社にとっては利潤を上乗せしない、原価ギリギリの価格を提示するのが最適な戦略となる（それでも利潤は得られることが保証される）。第一価格秘密入札とビックリー入札では、各社の提示する金額が異なってくるのである。このような原価ギリギリの価格は、最初の方法を取る限り、決して各社からは引き出せない価格である。英語で、Honesty is the best policy（正直は最良の策）という格言がある。通常は入札のような金儲けの場面で、正直が（というよりは他人のことは何も考えず、自分の原価だけに基づいて入札することが）最良の策となることは考え難いが、ビックリー入札という、最も安値で入札した会社が、二番目に低い価格で落札するという制度を用いるこ

とにより、正直が最良の策となるのである。さらには、最も低い原価を持つ会社が落札するということは、社会的に無駄がない効率的な結果となっている。

長い間、ビックリー入札は、優れた理論的な性質を持つものの、一般に広く用いられることはないと言われてきたが、検索連動型広告（sponsored search）と呼ばれる事例で広く用いられるようになっている。具体的には、広告主はサーチエンジン（例えば google）のキーワードに対して入札額を設定する。キーワードがユーザによって検索されると、基本的には入札額の高い順に、検索結果とは別に、例えば画面の右側に広告が提示される。キーワード連動広告により、ターゲットを絞った効率的な広告が可能となる。また、ユーザが広告のリンクをクリックした場合にのみ、広告主はサーチエンジンに広告料を支払う（pay-per-click）ようになっている。さて、ここで広告料をどのように設定すべきだろうか。初期のシステムでは、広告主は前述の第一価格秘密入札と同様に、入札に等しい額を支払っていた。しかし、この場合、広告主にとっては入札額の設定方法が難しくなる。このため、エージェントを用いてダミーの検索を行い、入札額を自動的に変化させる等の行為が蔓延し、入札額が著しく不安定になるという問題が生じた。

現在では、上から k 番目の位置の広告（スロット）を得た広告主は、k+1 番目の広告の入札額に等しい額を払うという、ビックリー入札に準じた方式に変更されている。この変更により、入札額の調整が不要となり、入札額が安定するという結果が得られている [2]。この事例は、人間同士のオフラインの取引では問題が生じなかった制度（第一価格秘密入札）であっても、エージェントを含む系に導入された場合は、変化のスピードが急激であるため破綻してしまう可能性があり、より安定性の高い制度の導入が必要とされることを示している。

入札制度の設計に関して、売手の利益を最大化するための制度設計 [3]、価値に依存関係のある複数の商品が販売される場合（組合せオークション）の制度設計および組合せオークションが関わる計算問題の効率的な解法に関する研究 [4]、ネットワークの匿名性を利用した不正行為に頑健な制度設計 [5, 6] 等が行われている

マッチング

マッチングは、学生と学校、労働者と企業のような二種類のエージェント間の望ましい組み合わせを求める問題であり、学生と学校をマッチする学校選択制、研修医と病院をマッチする研修医配属問題、また、大学関係者に非常に身近な問題として学生を卒業研究の研究室にマッチする研究室配属問題、さらに生体腎移植において患者とドナーをマッチする腎臓交換問題などの広範な応用を持つ。ロイド・シャプレイとアルビン・ロスはマッチングメカニズムの理論とその実践に関する業績で2012年のノーベル経済学賞を受賞している。特に、デイビット・ゲールとロイド・シャプレイによる、Deferred Acceptance（DA）メカニズム [7] がよく知られている。

マッチングの理論的な基礎となる問題として、安定結婚問題というものがある。これは男女がそれぞれ n 人いるとして、ある望ましい性質を満たす n 組の男女のペア（マッチング）を作るというものである。望ましい性質として、ここでは安定性を考える。例えば Alice、Becky、Carol、Daisy の 4 名の女性、John、Ken、Lee、Mike の 4 名の男性がいるとする。各男性は 4 人の女性に対して、各女性は 4 人の男性に対して、好みの順番が決まっている。当然、好みの順番は（たまたま同じとなるかも知れないが）人によって異なる。Alice にとって、より望ましい男性の順が John、Ken、Lee、Mike の順であり、John にとってより望ましい女性の

順が Alice、Becky、Carol、Daisy の順であるとする。ここで、もし Alice の相手が Ken で、John の相手が Becky だとすると、Alice と John は今の相手と別れてペアとなった方が二人とも今より幸福になることになる。このようなペアを不安定なペアと呼び、不安定なペアを含まないマッチングを安定なマッチングと呼ぶ。

さて、どうしたら安定なマッチングを求めることができるだろうか？　最も単純な方法として、男性の順序を、J、K、L、M で固定し、女性 A、B、C、D の並び替えを全て生成し、J、K、L、M と組み合わせて、安定かどうかをチェックするという総当り法が考えられる。しかし、これは最悪、4! 回（n 人なら n! 回）の組み合わせをチェックすることになり、人数が増えると現実的な時間内に安定なマッチングを求めることは絶望的となる。もっと効率的に安定マッチングを見つける方法として提案されているのが、前述のデイビッド・ゲールと、ロイド・シャプレイによる DA メカニズムである。この方式では、男性／女性は、独身か婚約中のどちらかであり、初期状態では全員独身である。独身の女性が残っていれば、以下の処理を繰り返し適用する。

1．独身の女性は、これまでにまだプロポーズをしていない男性のうちで、最も好みの男性にプロポーズする（男性が婚約中でも気にしない）。
2．その際、一人の男性には一回しかプロポーズできない（一度断られた男性には二度とプロポーズできない）。
3．男性は、自分にプロポーズしている女性の中で、最も好みの女性と婚約し、他の女性のプロポーズを断る（現在婚約中の女性がいても、より良い相手がプロポーズしてきたら、現在の婚約を解消して、最も好みの女性と改めて婚約する）。

独身の女性がいなくなれば、現在婚約中のペアでマッチングを決定する。この方式を用いた場合、各女性は、一人の男性に一回しかプロポーズできないので、繰り返しは高々 4^2 回（n 人なら n^2 回）で終了する。

女性にとっては、まだプロポーズしていない中で最も好みの男性にプロポーズするのが最適である、すなわち、正直が最良の策であることが示される。要は、この方式ではプロポーズして断られても、その後に不利な扱いを受けることはないので、ダメ元で最も好みの相手にプロポーズするのが最適となる。また、このメカニズムで得られたマッチングは、全ての安定なマッチング中で女性にとって最も望ましいものになっていることが保証される。一方、男性にとっては、現在自分にプロポーズしている女性の中で、最も好みの女性を選ぶのが最適とは限らない。あえて好みでない女性を選ぶことで、結果としてより望ましい女性と結ばれるという、複雑な状況が存在し得る。

安定結婚問題の拡張として、学生と学校や研修医と病院のような、一つの学校／病院に複数の学生／研修医が割り当てられる多対一のマッチングがある。この状況に上記の DA メカニズムを拡張することは容易であり、学生を女性に、学校を男性に対応させればよい。各学生は、それぞれ第一希望の学校に応募する。学校は自分に応募している学生から、自身の選好に基づいて定員まで学生を仮合格として、その他の学生を不合格とする。不合格となった学生は、第二希望の学校に応募する。各学校は、仮合格となった学生と、新たに応募してきた学生を区別せず、選好に基づいて定員まで学生を仮合格とし、この処理を新たに応募する学生が生じなくなるまで繰り返す。この制度を用いた場合、学生にとって正直が最良の策であり、結果の安定性が保証される。

マッチングに関して、DA メカニズムの理論的性質の解析や、各種の応用事例に関する検討[8]、マッチングに関わる各種の計算問題に関する検討[9]、さらには、後述する制約の導入も含めたモデルの拡張等が行われている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

オークションに関して、さまざまな最適化の技術を用いて、望ましい性質を持つメカニズムを人手によらず自動的に生成する方法（自動制度設計）と呼ばれる研究が行われている。アイデア自体は以前から提案されていたが[10]、探索空間が膨大となるため、実用的な規模の問題に適用可能な制度の設計は困難であった。近年、深層 Q-learning や SAT solver 等の最新の最適化技術を用いる研究が活発化している。自動制度設計を用いることで、個々の事例に応じた最適な制度の設計が可能であり、今後の発展が期待される。

マッチングに関して、現実の問題で重要となる各種の制約条件を満足する制度の設計に関する研究が進んでいる。例えば、研修医配属において、大都市圏の病院全体での研修医の数を制限することにより、地方の病院に十分な数の研修医が配属されることを目的とする地域上限制約[11]、あるいは直接的に過疎地域の病院に一定の数の研修医を割り当てることを保証する下限制約[12]、さらには公立学校において、学生の多様性を確保するためのアファーマティブアクション[13), 14)]等がある。また、DA メカニズムで扱うことのできる制約のクラスに関する数学的性質に関する研究[15]も進んでいる。このような研究は、実問題に適用可能な制度の開発のために極めて重要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

学術的な研究プロジェクトは多数存在するが、多くは個人ベースであるため、ここでは実用指向のプロジェクトの紹介を行う。

スマートグリッド

スマートグリッド関連のプロジェクトは多数存在し、供給側と需要側に適切なインセンティブを与え、電力の需給をバランスするためのさまざまな制度に関する研究が行われている（例えば、Smartnet Project[16]、Empower[17]）。

研修医配属

研修医配属はマッチングの典型的な応用事例である。米国の National Resident Matching Program（NRMP）[18]では、毎年、研修医と病院のマッチングを行っており、2018 年には 4 万人以上の研修医と 3 万以上の病院におけるポストとのマッチングを行っている。日本においても 2004 年から必修の臨床研修医制度が発足し、医学部卒業生に 2 年間の研修が義務付けられた。この研修制度とあわせて研修医と病院とのマッチング制度が採用されている[19]。日本においては、今後、地域枠の研修医（ある地域で研修を行うことを条件に奨学金等を受けている研修医）の扱い等に関する制度の修正が必要となると考えられる。

生体腎移植ネットワーク

倫理的理由から、生体腎移植は近親者等のみに制限されることが通例であるが、免疫の不適合から近親者のドナーからの移植が不可能な場合に、生体腎移植ネットワークと呼ばれる、適切にドナーを交換することで移植の可能性を広げる方法が用いられている（例えば米国のUnited Network for Organ Sharing[20]）。適切なドナーと患者のマッチングを発見する制度／アルゴリズムが導入されている。

（5）科学技術的課題

オークション、マッチング共に、理論研究は数理モデルに基づいて緻密な理論が構築されており、モデルにおける前提条件が成立するなら、理論的帰結は論理的に正しい。しかしながら、理論的成果を実問題に適用する際には、モデルにおける前提条件、例えば人間の行動選択に関する仮定が成立するか否かを吟味する必要がある。前提条件が成立しない場合には、当然のことながら帰結も成立しない。

例えば、安定結婚問題におけるDAメカニズムが女性にとって正直が最良の策であるという帰結は、各男性は女性に対して固定された順序を持ち、その順序に従って行動するという前提に依存している。現実の状況を考えると、この前提が成立するかが疑わしい場合が存在する。例えば、男性、女性がそれぞれ100名の安定結婚問題において、自分が男性であり、事前の状態ではAliceとBeckyは、ほとんど同程度に好きだが、ごくわずかにAliceの方を好んでいるとする。DAメカニズムを実行した際に、Beckyは最初から自分にプロポーズして婚約しているのに対して、Aliceの方は他の男性にプロポーズして断られ続けて、99番目に自分にプロポーズしてきたという状況を考えよう。人間の心理から言って、この状況でBeckyを断ってAliceを選ぶことは難しいが、DAメカニズムは、あくまで事前の順序に基づいてBeckyを断ってAliceを選ぶことを前提としている。事前の順序があまり変わらないなら、最初から自分を一番好きだと言ってくれているBeckyを選びたいというのは自然な心理であるが、一番好きと言う女性を優先すれば、女性側に嘘であっても「あなたが一番好き」という誘因を生じさせてしまう。行動・実験経済学、心理科学等の分野と協力し、エージェントシミュレーション、被験者実験、実証分析等を用いて、人間がモデルから外れた行動を取る場合の制度の頑健性の検討等を行い、社会的に受容可能な制度に発展させる必要がある。

また、現実の問題は複雑であり、既存の数理モデルで対応可能できるのは、現実の問題から抽出された部分問題に過ぎない。例えば、マッチングにおいては、各学校には固定された上限制約が与えられているという前提が置かれていることが通例であるが、現実には各学校の定員は、前段階として予算や人的資源に関する資源割り当て問題を解いた結果であると考えることができる。通常、前段階の資源割り当て問題は、学生の選好を予測して決定されているが、この予測が間違っていると、個々の問題に関して最適解が得られたとしても、全体としての最適解が得られることは保証できない。現実的な問題において、より大きな部分問題をカバーできるようにモデルを拡張することが必要である。

（6）その他の課題

制度設計研究の実問題への適用に関して、我が国は立ち遅れており、過去の経験に囚われた科学的根拠の弱い政策決定が行われがちである。例えば、我が国はOECD加盟国のうち、小

国を除くと、周波数利用免許割り当てをオークションによらず国の裁量で決定している唯一の国となっている。制度設計という考え方とその重要性を、政策決定者および国民に広く周知する啓蒙活動が必要である。

（7）その他の課題

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	情報科学とミクロ経済学／ゲーム理論の研究者による国内コミュニティが形成されており、学会での企画セッションが開催されるなど、研究が拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
米国	基礎研究	◎	↗	AAAI、AAMAS 等の主要会議において、論文の 3 割超は米国の大学・企業によるものである。
	応用研究・開発	◎	↗	周波数オークション、研修医マッチング等の社会応用事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
欧州	基礎研究	◎	↗	伝統的に理論研究に強みがあり、英国、フランス、ドイツを始め、多くの国で制度設計、特に計算量的社会的選択理論と呼ばれる分野の研究が盛んである。
	応用研究・開発	○	↗	特にスマートグリッド等に関する応用研究が盛んであり、社会実験の事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
中国	基礎研究	○	↗	機械学習等の他の AI 分野における急速な進展と比較すると、やや緩やかではあるが、国際会議等でのプレゼンスは拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
韓国	基礎研究	△	→	特に目立つ動きはない。
	応用研究・開発	△	→	特に目立つ動きはない。

（8）参考文献

1）William Vickrey. “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders.” Journal of Finance, Vol. 16, 1961: 8-37.
2）Benjamin Edelman, Michael Ostrovsky, Michael Schwarz. “Internet Advertising and the Generalized Second Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords.” American Economic Review, Vol. 97, 2007: 242-259.
3）Roger B. Myerson. “Optimal auction design.” Mathematics of Operation Research, Vol. 6, 1981: 58-73.
4）Peter Cramton, Richard Steinberg, Yoav Shoham, ed. Combinatorial Auctions（Massachusetts: MIT Press, 2005）.
5）Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, Shigeo Matsubara. “Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids.” Artificial Intelligence, Vol. 130, No. 2, 2001: 167-181.
6）Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, Shigeo Matsubara. “The Effect of False-name Bids in Combinatorial Auctions: New Fraud in Internet Auctions.” Games and Economic Behavior, Vol. 46, No. 1, 2004: 174-188.
7）David Gale, Lloyd S. Shapley. “College Admissions and the Stability of Marriage.” The American Mathematical Monthly, Vol. 69, No. 1, 1962:9-15.
8）Alvin E. Roth, Marilda A. Oliveira Sotomayor. Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis（Econometric Society Monographs）（Cambridge: Cambridge University Press, 1990）.
9）David F. Manlove. Algorithmics of Matching Under Preferences（Singapore: World

Scientific, 2013）.
10）Tuomas Sandholm. “Automated mechanism design: A new application area for search algorithms.” International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2003:19-36.
11）Yuichiro Kamada, Fuhito Kojima. “Effcient Matching under Distributional Constraints: Theory and Applications.” American Economic Review, Vol. 105, No. 1, 2015: 67-99.
12）Daniel E. Fragiadakis, Atsushi Iwasaki, Peter Troyan, Suguru Ueda, Makoto Yokoo. “Strategyproof Matching with Minimum Quotas.” ACM Transactions on Economics and Computation, Vol. 4, No. 1, 2016: 6:1-6:40.
13）Lars Ehlers, Isa E. Hafalir, M. Bumin Yenmez, Muhammed A. Yildirim. “School Choice with Controlled Choice Constraints: Hard Bounds versus Soft Bounds.” Journal of Economic Theory, Vol. 153, 2014: 648-683.
14）Ryoji Kurata, Masahiro Goto, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo. “Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol. 58, 2017:153-184.
15）Fuhito Kojima, Akihisa Tamura, Makoto Yokoo. “Designing matching mechanisms under constraints: An approach from discrete convex analysis.” Journal of Economic Theory, Vol. 176, 2018: 803-833.
16）“Smartnet Project” http://smartnet-project.eu/（2018 年 11 月 7 日アクセス）.
17）“Empower” http://empowerh2020.eu/（2018 年 11 月 7 日アクセス）.
18）“National Resident Matching Program” http://www.nrmp.org/（2018年11月7日アクセス）.
19）「医師臨床研修マッチング協議会」http://www.jrmp.jp（2018 年 11 月 7 日アクセス）.
20）“United Network for Organ Sharing” https://unos.org/（2018 年 11 月 7 日アクセス）.

２．３．６　サービスサイエンス

（１）研究開発領域の定義

サービスは、いわゆる旧来のカウンター越しの対面サービスのようなものも含めて、サービスを提供する人と利用する人が相互に影響し合って価値を生み出す行為である。サービスは一対一だけでなく、多対一、一対多、多対多など、さまざまな構成で実行されるプロセスであり、構成要素間の相互作用が非常に複雑なシステムと捉えることができる。これがサービスシステムである。サービスの生産性向上と提供者と受用者の価値共創を目的とした、サービスとサービスシステムに関わる科学的な概念、理論、マネジメント技術、エンジニアリング技術の構築ならびに活用がサービスサイエンスである。サービス経済の拡大に対応して、サービスエコシステム、サービスシステム等も対象とする。

（２）キーワード

サービスシステム、価値共創、サービスドミナントロジック、サービスデザイン、製造業のサービス化、サービスエコシステム、スマートサービスシステム、参加型デザイン、サービソロジー、サービスマーケティング、サービスマネジメント

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本領域の研究開発が進展することによって、科学的・工学的手法を活かしたサービスの生産性向上と、価値共創を中核概念とした産業構造や社会システムの変革の解明とデザインとが期待される。日本においてはサービス学会（Society for Serviceology）が本領域の理念を推進しており、その設立趣意書には以下の様に記されている[1)]。

“サービスは経済の主要活動であるとともに、生活の質（Quality of Life）の向上、地域社会の繁栄、ひいては地球規模問題の解決の基底となる重要な要素である。グローバル化する市場においては、製品やサービスの経済学的価値を高めることが求められる一方、サービスを利用する個々の生活者にとっての価値（生活価値）を高めることが重要である。また、エネルギーや環境をはじめとする地球規模の問題の解決や社会価値の創出に向けては、サービスに関わるステークホルダ間の共創的意思決定を促す制度設計も求められる。

従来、サービスの関連研究は、経営学やマーケティング、情報工学や設計工学といった個別の研究分野で発展してきた。しかしながら、社会においてより良いサービスを実現するためには、社会科学、人間科学、理工学の協調が必要であるとともに、産業界と学術界との強い連携が不可欠である。そこでは、社会および経済のサービスに関わる活動、すなわち、狭義のサービス業のみならず、製造業等におけるサービス化も含めた包括的なサービスに対する学術的理解を確立し、顧客と共に高い顧客満足度を共創する体系の展開が必要である。...（中略）...本学会は、サービスに関する広範な知識を体系化することで、さまざまな産業課題の解決に寄与し、よって、サービスに関わる「社会のための学術」を構築することを目的とする。”

IT の世界において、30 年前は、どのようなハードウェアを使った計算機か、ということにユーザの関心があったが、クラウドの発展とともに、IaaS（Infrastructure as a Service）、SaaS（Software as a Service）、PaaS（Platform as a Service）というように、xxx as a Service と

いう言い方が広く広まってきており、計算機の機能をサービス視点から捉えるようになってきている。また、自動運転車の実現が見えてくると、MaaS（Mobility as a Service）という概念が提唱され、車もサービスの視点から語られるようになってきている。介護や観光などといった、旧来のサービス産業だけでなく、製造業も含め多くの経済活動がサービス化され、サービスサイエンスの適用範囲が広がっている。

［研究開発の動向］

サービス研究において2004年が大きな転換点であった[2)]。まず、同年に発表された全米競争力協議会による提言書“Innovate America”、通称パルミサーノ・レポートにおいて「サービスサイエンス（Service Science, Management, and Engineering: SSME）」の概念が示され、米国を中心にサービスに対する科学的・工学的アプローチの本格的な検討が開始された。米国に続き、ドイツ、フィンランド、英国、韓国でもサービスサイエンス振興の取り組みを開始した。もう一つのエポックが、S. Vargo と R. Lusch によるマーケティング研究を源流としたサービスドミナントロジック（Service Dominant Logic: SDL）である[3)]。元々これらは別々の潮流であったが、2008年頃より相互に参照し合うなどの動きが見られ[4), 5)]、補完がなされている。

日本国内の動向についても同様である。日本のサービス産業の生産性（労働生産性）が他の先進国と比べて低いことは以前から指摘されていたが、上述のサービスサイエンスの動きも相まって、日本におけるサービス科学・工学の政策的取り組みは、この生産性向上に端を発して2005年頃に始まった。代表的な取り組みとしては、サービス産業生産性協議会（SPRING）の設置、文部科学省の人材育成プログラム、経済産業省の研究開発委託事業、産業技術総合研究所のサービス工学研究センターの設置、JST RISTEX の問題解決型サービス科学研究開発プログラム（S^3FIRE）の設置などが挙げられる[6)]。

S^3FIRE ではサービス科学を「サービスに関わる科学的な概念、理論、技術、方法論を構築する学問的活動、およびその成果活用」として定義しており、上述のサービスの科学的・工学的アプローチを色濃く反映した活動を当初行っていた。その後、S^3FIRE の本格活動時期（2011-2014年頃）は、国内で言えば人文社会科学、特にサービスマーケティング・マネジメントを含めたサービス科学の研究者コミュニティが形成されてきた時期である。また、国際的に見ればサービスサイエンスとサービスドミナントロジックとが交差した時期とも一部重なる。そのため、S^3FIRE のサービス科学研究を国際的な研究開発競争の潮流に合わせて推進するために、サービスドミナントロジック等での中心概念である価値共創を軸に据えた展開や成果の取りまとめが徐々に行われていった。すなわち、日本におけるサービスサイエンスも共創の概念を包摂していったのである。共創の概念はサービスドミナントロジック以前にもシステム論や経営学の分野で存在していたが、情報通信技術（ICT）の発達やスマートフォンの爆発的な普及などによりもたらされたさまざまな社会変化が、この概念の重要性にリアリティを持たせたと言える。

現在、日本国内の関連学会においてもサービスサイエンス等に関する研究が個別に行われているが、上記の流れを最も汲んでいるのが、S^3FIRE の研究者コミュニティを中心に2012年に設立されたサービス学会である。その基本理念においても、サービスに対する科学的・工学的アプローチと価値共創の二つのキーワードが見られる。これが、本領域を読み解く上での基本的な理解である。2012年以降、世の中ではビッグデータへの関心、プラットフォーム・ビ

ジネスの興隆、IoTによる製造とサービスの融合、シェアリングエコノミーの進展などが見られてきた。また、日本では第5期科学技術基本計画として超スマート社会であるSociety 5.0が掲げられており、ここではAIやIoTに大きな役割が期待されている。サービスサイエンスは当初SSMEの総称であったが、そこにDesignが加わり、その後にArtとPublic Policyがさらに加わり、今ではService Science, Management, Engineering, Design, Art, Public Policy: SSMEDAPの総称とされることもある。

このようにサービスサイエンスの対象分野は広がりをみせている。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

サービスデザイン

サービスデザインの動きには人間中心設計とデザイン思考が大きな影響を与えており、ツールの多くもこれらと共通している。サービスデザインでは、事業者や生活者の活動を観察、あるいは一緒に活動することで得られた共感をもとに、問題解決の方法を設計していく。欧州ではサービスデザインが組織戦略・経営に及ぼす影響について研究がされている他、特に北欧諸国と英国では、顧客企業、行政、NPOなどとの協働により、医療、健康福祉サービスの改善等で成果が挙げられてきた。

また、サービスデザインを利用者中心に捉えると、解決策そのものに対する興味よりも、サービスによって、利用者の行動をどう支援するのか、あるいは利用者の行動をどのように変えるのか、という点に興味の中心がある[7]。Behavior designやDesign for actionと呼ばれる領域では、行動経済学などの知見を活用しながら、人々の日々の活動や行動習慣を変容し得るサービスをどのようにデザインするかに焦点が当てられている。欧州では主に公共政策的な観点で、米国では産業の観点での応用が進められている。また、サービスデザインに関連して、ソーシャルイノベーションなど市民参加のデザインとして、参加型デザイン（Participatory Design）などの手法の研究開発が進められてきた。さらに近年では、参加型デザインのアプローチの一環として、生活に根付いた場所（リビング）での実証実験の場（ラボ）であり、これを通じて提供者と利用者とが共に解決策を創り出す（共創）というリビングラボも注目を集めている[8]。

サービスドミナントロジックとサービスエコシステム

2004年にマーケティング研究者であるStephen L. VargoとRobert F. Luschが、全ての経済活動をサービスとして捉えるサービスドミナントロジックという考え方を提唱した[3]。商品は有形無形を問わず、顧客が利用することで初めて価値を持つものである、つまり、同じ商品であっても顧客によって価値は異なる、という考え方である。近年のサービスドミナントロジックの論点は、一対一のアクター間の原始的サービスに対するものというよりも、マルチステークホルダを前提としたサービスエコシステム（Service Ecosystem）とそのデザインに対するものへと移りつつある。この文脈の下で、ネットワーク論、システム論、複雑適応系などの関連分野の他、Service Design（サービスデザイン）やInstitutional Design（制度設計）との関係についても言及がなされつつある。2018年11月にはさまざまな研究者からの寄稿論文から構成されるHandbook of Service Dominant Logicが出版され、サービスドミナントロジックの近年の展開についてまとめられている[8]。サービスドミナントロジックを軸

にした社会システム（技術）への接近が行われており、本社会システム区分で扱われている技法（モデリング＆シミュレーション）の他、経済学（特にゲーム理論）をもとにしたマーケットデザイン／メカニズムデザインとの関連も今後強くなるであろう。

トランスフォーマティブ・サービス

トランスフォーマティブ・サービス研究（Transformative Service Research）とは、サービスと満足できる状態（ウェルビーイング）の両方に焦点を当て、特にウェルビーイングの向上を目指す研究である。サービスの対象として、個人だけでなく、家族、コミュニティ、エコシステム、社会も対象とする。サービス経済は、単に経済的規模の拡大を追求する段階から、社会・環境の発展・持続可能性も考慮した変革的サービス経済（Transformative Service Economy）を目指す段階に移行しなければいけないという考えに基づいている。経済的価値の創造だけでなく、社会的価値や自然生態系への配慮を含めた持続可能な価値の創造から考え、実践していくものである。サービス経済の成熟化への内省を含むものであり、過剰・過小消費の減少を考え直す過程で生まれたとされる[10]。想定されるアウトプットとして、幸福や生活の質の向上の他、必要な人が必要なサービスを受けられるためのアクセス性の向上、サービスの過程で消費者が何らかの不利に陥る可能性としての脆弱性の緩和、公平さの維持、格差の減少などが挙げられる。事例が集まりつつあるものの、まだ途上の分野であるが、ここで掲げられているウェルビーイングは、今後のサービス研究にとって重要なトピックになるであろう。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

NSF のファンディングと、サービスの国際標準化を挙げる。

スマートサービスシステム

超スマート社会や Cyber Physical System（CPS）のコンセプトで掲げられているように、ICT の進展により可能となったスマートサービスシステムもまたサービスサイエンスの大きな研究対象である。NSF（National Science Foundation）の Directorate for Engineering, Industrial Innovation and Partnerships 部門が実施する「Partnerships for Innovation：Building Innovation Capacity（PFI:BIC）プログラム」として推進されたプロジェクトがある。“human-centered smart service system”として 2013 年から 2016 年の間実施された。スマートサービスシステムは「将来の状況への対応改善のため、データに基づき学習、動的適応、意思決定ができるサービスシステム」として定義され、関連する 10 個のスマートサービスシステム研究開発に、それぞれ 100 万ドルの資金提供がされた。また、この NSF での取り組みを踏まえて、スマートサービスシステムに関する整理・体系化の試みもなされている[11]。

2017 年 1 月には、米国のサービスサイエンスの研究者・実務家コミュニティ（The International Society opf Service Innovation Professionals: ISSIP）と NSF の共催で "Industry-Academe research partnerships to enable the human-technology frontier for next generation smarter service systems" という内容の 2 日間のワークショップが開催された[12]。

サービスの国際標準化動向

ISO（国際標準機構）やJIS（日本工業規格）のような標準は、今まで、その多くが製品（モノ）を対象として確立されてきた。近年この標準の対象がサービスにも広がってきている[13)]。シェアリングエコノミーの品質標準、高齢社会のケアサービス標準などが、欧米主導の国際標準として議論され始めている。さらに、より一般的・横断的な標準として、持続的なサービス提供の基盤となる人間中心の組織設計や、サービスエクセレンス（Service Excellence）の標準なども開発されつつある。サービスエクセレンスについては現在、ドイツのイニシアティブのもと、ISO TC312 Excellence in Service にて活動がされており、日本も参画している。

（5）科学技術的課題

サービスサイエンスはさまざまな科学技術成果を結集した総合学問としての色合いが強い。2014年に行われた第10回科学技術予測調査では、それまでの“製造”分野に代わり“サービス化社会”分野が新設され、製造業のサービス化に限らず社会のさまざまな要素がサービス化しそれらが緩やかにつながった社会像に関する広範なトピック（全101問）について専門家調査がなされた[14)]。2019年前半に実施される予定の第11回科学技術予測調査では、第10回で問われていた内容（トピック）の多くが、ICT・アナリティクスの科学技術予測における社会実装像（社会に浸透した像や人に働きかける像）として直接問われるようになった。特にセンシング技術、データ解析技術、サービスロボット技術など、サービス科学・工学的アプローチから類推される設問に顕著である。このことは、サービスサイエンスという用語を出さずともその目指すところが浸透しつつあるという見方ができる一方で、サービスサイエンスでは何を研究すべきか、また何が他と違うかを明確に宣言しなければならない時宜に差し掛かっているとも捉えられる。サービスサイエンスにおける科学技術的課題を、サービス理論と価値共創、品質測定と価値評価、利用者の行動、提供者の活動、サービスデザインの観点から挙げると、以下のような技術課題が想定される。

- 個人や社会に対して価値をもたらす行為としてのサービスに関する新理論の確立。つまりサービスドミナントロジックをより発展させた新理論の追求
- サービスに関連した量の測定技術の開発
- 共創によって生成される価値を測定する尺度
- 利用者の主観性や多様性を考慮したサービス品質基準
- 財・サービスの利用によって生じる快、不快、好き、嫌い等の感情計測
- サービス提供者および組織のスキルや成熟度計測
- ウェブルーミングやショールーミング（実店舗で商品を見てWEBで購入、もしくはその逆）など、サイバー空間と実空間を行き来する利用者の行動解明
- 個人や社会が持つ資源・スキルの効果的組み合わせや、共創における相互作用のダイナミズムの理論化
- さまざまな資源・スキルの遊休状況を複合したシェアサービスの社会システムシミュレー・　ション
- 今後の社会・経済の再設計に有効なパラダイムの創出

（6）その他の課題

サービスサイエンスは経営学、マーケティング、オペレーションズ・リサーチ、人事、組織学、経済学、情報工学、認知科学、自然科学、社会科学、人間科学、工学と幅広い研究領域に関わる研究であるため、サービスサイエンスを推進する人材の確保が課題である。一人の研究者が全ての分野のスペシャリストになることはできないので、いかにして必要十分な人材をサービスサイエンスの分野に集めるか、というチーム構成の課題がある。

そのためには、上記のような広い領域の人材を集めなければ達成できないような、ビッグチャレンジを設定して研究開発を推進するような、課題設定型のプロジェクトが必要であろう。例えば、「環境問題に配慮した行動変容が促される社会をシェアリングエコノミーベースで検討」や、「パーソナルデータ、オープンデータを活用した地域振興のためのサービス検討」といったプロジェクトを設定し、推進する必要がある。

（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	○	→	サービス学会に限らず、関連学会（専門領域）で活発に研究が行われている。一方で、JST RISTEX S3FIRE のファンディング終了後、本領域にあった基礎研究費がなく、科研費細目“Web 情報学”の中にキーワード「サービス工学」「サービスマネジメント」が存在する程度。
	応用研究・開発	○	→	サービス工学ロードマップで策定された観測・分析・設計・適用のフレームワークは普及が進んだ。しかしながら、学術研究の成果が産業界での取り組みに効果的に活かされているとは言えない。
米国	基礎研究	◎	→	サービスドミナントロジック、サービスマーケティング、マーケティング・デザイン／メカニズムデザインに関する研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	→	米国の場合には、当初よりこちらが強い。
欧州	基礎研究	○	→	サービスの国際会議 RESER の他、University of Cambridge の Cambridge Service Alliance など、欧州では以前より製品サービスシステム（Product Service System: PSS）として研究がなされてきている。
	応用研究・開発	◎	↗	Circular Economy, Industrie 4.0 などの流れが多い。
中国	基礎研究	×	→	2008 年頃から振興の取り組みを始めたと思われるが、詳細不明。
	応用研究・開発	×	→	2008 年頃から振興の取り組みを始めたと思われるが、詳細不明。
韓国	基礎研究	×	→	第 2 次科学技術基本計画（2008~2012）で達成目標の一つとして挙げられたが、詳細不明。
	応用研究・開発	×	→	第 2 次科学技術基本計画（2008~2012）で達成目標の一つとして挙げられたが、詳細不明。

（8）参考文献

1）サービス学会.「設立趣旨」http://ja.serviceology.org/introduction/index.html（2018 年 12 月 1 日アクセス）.
2）村上輝康.「サービス学とサービソロジー」第 1 章『サービソロジーへの招待』村上輝康 , 新井民夫 , JST 社会技術研究開発センター 編著.（東京：東京大学出版会 , 2017: 4-20）.
3）Stephen L. Vargo, Robert F. Lusch. “Evolving to a New Dominant Logic for Marketing.” Journal of Marketing 68, 2004:1-17.
4）Robert F. Lusch, Stephen L. Vargo, Gunter Wessels. “Toward a conceptual foundation for service science: Contributions from service-dominant logic.” IBM Systems Journal, Vol. 47, No.1, 2008: 5-14. https://doi.org/10.1147/sj.471.0005
5）Paul P. Maglio, Jim Spohrer. “Fundamentals of service science.” Journal of the

Academy of Marketing Science 36, 2008: 18. https://doi.org/10.1007/s11747-007-0058-9
6）JST 社会技術研究開発センター.「サービス学将来検討会 活動報告書 - 未来を共創するサービス学を目指して -」JST 社会技術研究開発センター , 2015.
7）Daniela Sangiorgi. “Transformative Services and Transformation Design.” International Journal of Design, Vol.5, No.2, 2011:29-40.
8）Esteve Almirall, Jonathan Wareham. “Living Labs: Arbiters of Mid- and Ground-Level Innovation.” Technology Analysis and Strategic Management, 23（1）, 2011: 87-102.
9）Stephen L. Vargo and Robert F. Lusch（eds）. The SAGE Handbook of Service-Dominant Logic, SAGE Publications Ltd, 2018.
10）白肌邦夫、ホー　バック.「ウェルビーイング指向の価値共創とその分析視点」サービソロジー論文誌 , Vol.1, No.1, 2017: 1-9.
11）Chiehyeon Lim, Paul P. Maglio. “Data-Driven Understanding of Smart Service Systems Through Text Mining.” Service Science 10（2）, 2018:154-180. https://doi.org/10.1287/serv.2018.0208
12）ISSIP/NSF Workshop. “Industry-Academe research partnerships to enable the human-technology frontier for next generation smarter service systems” http://www.servicescienceprojects.org/ISSIPNSF/（2018 年 12 月 1 日アクセス）.
13）持丸正明 , 戸谷圭子.「サービスの国際標準化動向」サービソロジー , Vol.4, No.3, 2017: 40-43.
14）科学技術・学術政策研究所.「第 10 回科学技術予測調査−８. サービス化社会分野の調査結果」http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/3080/8/NISTEP-RM240-28ServiceJ.pdf（2018 年 12 月 1 日アクセス）.

2.4　コンピューティングアーキテクチャ

ここでは、コンピューターの使い方から見た、大きな構造について技術動向を俯瞰する。CPU のインストラクションセットや、コンピューターそのもののハードウェア構造などには立ち入らない。性能向上、計算負荷に応じた構成、用途に応じた構成、新しい応用の開拓などの技術課題について動向を把握し、今後の展開について検討する。

（1）俯瞰構造

ここでは、コンピューティングアーキテクチャの視点からその技術をデバイス層、分散処理基盤層、サービスプラットフォーム層、応用、サービス層の４層に整理した。俯瞰構造図を図2-4-1 に示す。今後のコンピューティングについて考えると、サイバーの世界だけでなく、フィジカルの世界との連携も重要になる。そこで、フィジカル世界との接点であるデバイス層を一番下に据えている。ここには通信基盤やセンシング、アクチュエーションなどの機能が並び、サイバーとフィジカルの融合を実現する。その上に、フィジカルな制約があることを前提としてコンピューティングのあり方を考える分散処理基盤がある。ここまでが情報通信・処理の基本的な機能を提供する。

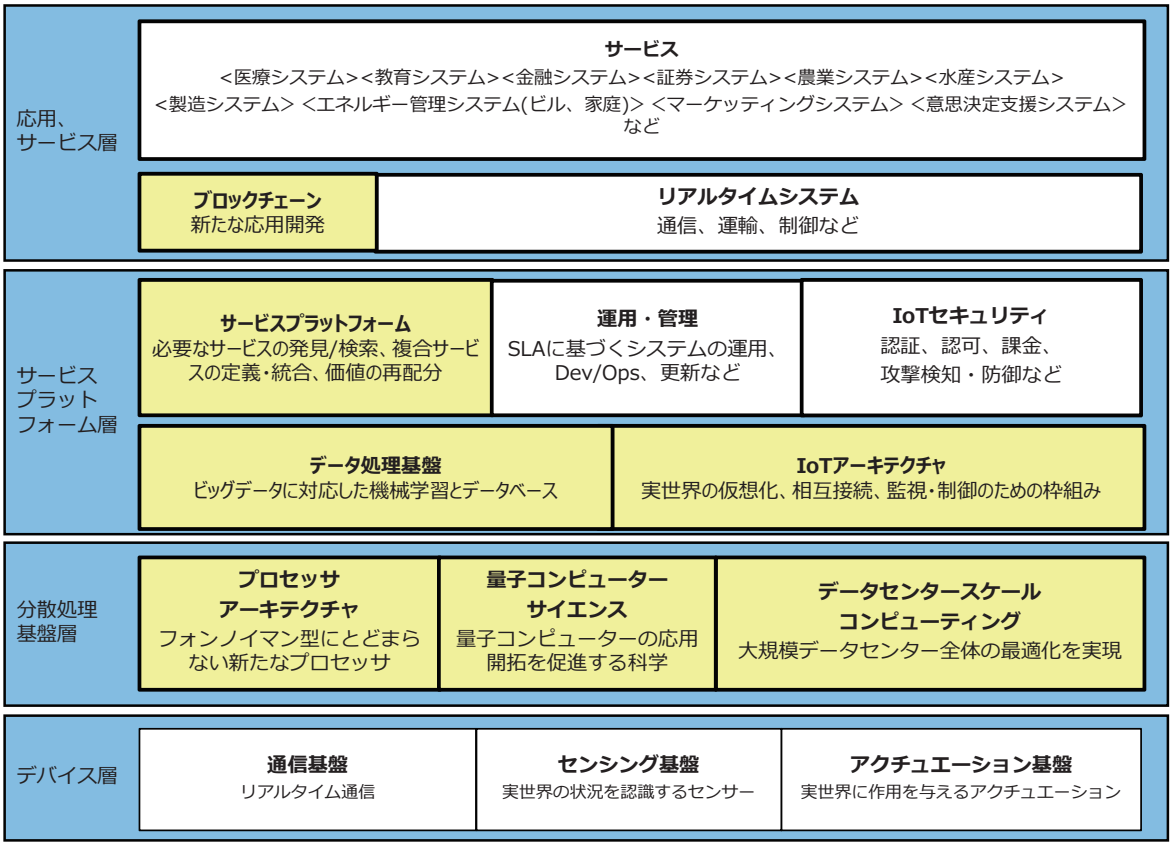


図2-4-1　コンピューティングアーキテクチャ区分俯瞰図（構造）

さらにその上に、多様な応用を載せるためのベースとしてのサービスプラットフォームが位置する。ここでは、ある程度応用を意識したシステムの構成や運用管理の手法などが議論の対象となる。

さらに最上位には応用やサービスそのものが位置する。公共的なサービス・システムや、企業が運用するサービス・システム、それらの融合したものや、どちらでも使われるものもある。また、特にリアルタイム性を重視する交通や運輸、通信などはIoT（Internet of Things）における重要な応用領域である。

（2）時系列

これらの技術要素をコンピューターが誕生して以来の時系列の流れとしてとらえる（図2-4-2）。最初は1台のコンピューターを使うところから出発したが、すぐに複数のコンピューターを連結して使うようになった。当初は企業内でのコンピューターネットワークであったが、大規模データセンターが各地に建設されるようになり、CPU、記憶装置、通信装置などを適切に配備し運用するための技術開発が行われてきた。

さらにインターネットが普及するにつれ、ネットワーク接続されたコンピューティング環境が広く一般に使われるようになってきた。特に、クラウドコンピューティングが一般的になり、スマートフォンなどのデバイスとクラウドコンピューティングの組み合わせにより様々なサービスが提供されるようになり、そのためのソフトウェア基盤整備も進んだ。

また、IoT/CPS（Cyber Physical Systems）と言われる、フィジカル世界とサイバー世界の融合領域においては、その計算内容や負荷、反応時間などに応じて、どこにデータを置きどこでどのタイミングでどの処理をするかといった柔軟な構成が求められ、それを可能にするIoT/CPSアーキテクチャが重要になる。特に、フィジカルデバイス付近で処理を行うエッジコンピューティングは今後の発展が望まれる。

上位のサービスや応用と、コンピューティングを接続するのがサービスプラットフォームである。ハードウェアやソフトウェアの隠蔽化により、下位層の構成を意識せずに様々な応用やサービスを実現することができる。上位層から見て、このプラットフォームの出来栄えが、提供できるサービスの品質を大きく左右することになる。北米を中心とする大手ITサービス企業は、多面的市場を対象としたプラットフォームを掌握し、スケーラブルなビジネスを実現している。このような動きがIoT/CPSを通じて、フィジカル世界にも広がることは容易に想像される。今後のあらゆるビジネスにおいて最も重要なレイヤーになる可能性がある。

UBERやAirBnBに代表される、シェアリングサービスが広まっている。既存のサービスに満足できないユーザからの支持を受け、今後も様々な局面でシェアリングやマッチングのサービスが広まると期待される。また、ブロックチェーンを利用した仮想通貨やスマートコントラクトなど、連携の広がりの観点で新たな展開も見せつつある。新しい応用を考えることが、下位層のサービスプラットフォームや分散処理基盤に対して大きな影響を与える。必ずしも新たな応用のすべてが予想できるわけではないが、その可能性を検討しておくことは、今後のコンピューティングアーキテクチャの方向性を考えるうえで役に立つであろう。

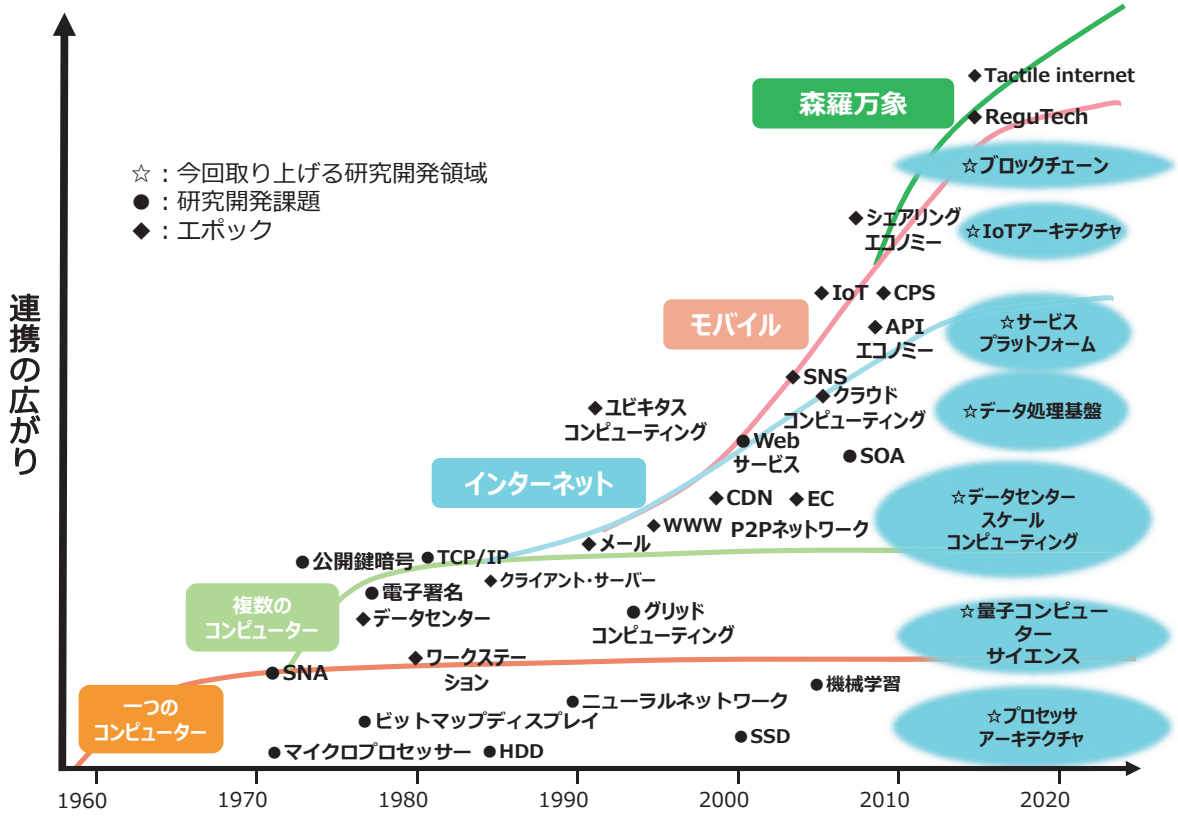


図2-4-2　コンピューティングアーキテクチャ区分俯瞰図(時系列)

本節の構成は以下のようになっている。2.4.1 では新しいプロセッサの動きについて述べる。これまでムーアの法則に支えられて進歩してきた汎用プロセッサは微細加工だけに頼る性能向上は限界に達しつつある。そこで、新たなプロセッサとして、布線論理型やニューロモーフィックなどの新しいアーキテクチャのプロセッサが登場している。

さらに、従来とは全く異なる原理で動作する量子コンピューターの登場が期待されている。2.4.2 では、基礎研究段階にある量子コンピューターを、コンピューターたらしめる計算機科学の観点から技術動向と課題について述べる。

米国大手 IT 企業はそれぞれに大規模なデータセンターを運用し、ビジネスに活用している。そこにはコンピューター単体の作り方とは全く異なる技術が存在する。2.4.3 においてはそれらの技術について述べる。

大規模データ処理技術の進展が現在の人工知能技術の発展や、IoT への期待を高めている。大規模データ処理のためには大きく分けて、計算処理そのものとデータベースがある。これらの技術について 2.4.4 で俯瞰する。

一方で、クラウドコンピューティングや IoT は計算処理そのものもさることながら、さまざまなサービスを結びつけ、新たなサービスを創りだし、それらを人々に届けることが重要である。そのためには、サービスプラットフォームが重要な役割を果たしている。2.4.5 ではサービスプラットフォームの動向に注目する。

モバイルネットワークの進歩、普及につれて、現実世界のものやサービスと、サイバー世界が融合し始めている。この動きは農業から工業、サービス業まですべてのセクターで起きて

いる重要なトレンドである。そこには、IoT をどのように設計すべきかというアーキテクチャと、物理世界とサイバー世界を結びつけるデバイスが重要な役割を果たす。それらについて、2.4.6 において述べる。

ビットコインをはじめとする仮想通貨が注目を集めている。その基本技術であるブロックチェーン技術はそのほかにも多くの可能性を持っている。2.4.7 では分散システムや P2P ネットワークとしてのブロックチェーン技術に着目し、その技術の方向性や応用について考えてみる。

２．４．１　プロセッサアーキテクチャ

（１）研究開発領域の定義

コンピューティングにおいてプロセッサは中心的な役割を果たし、長らくフォンノイマン型アーキテクチャが大勢を占めていた。アーキテクチャ (Architecture) という言葉は、元来は建築学の分野において建築様式を意味する言葉であるが、情報処理分野では、計算機ハードウェアの基本様式、基本構造、設計思想などを指す言葉として使われている。ソフトウェアは「アーキテクチャをターゲットとしてコンパイルされる」ものであり、ハードウェアは「アーキテクチャをもとにしてデザインされる」ものであると理解することができ、ソフトウェアとハードウェアとを結びつける抽象モデルがアーキテクチャであるといえる。その位置付けは極めて重要であり、プロセッサを特徴付ける概念である。

（２）キーワード

フォンノイマン型アーキテクチャ、ドメインスペシフィックアーキテクチャ、深層ニューラルネットアクセラレータ、リコンフィギュラブルコンピューティング、インメモリーコンピューティング、エッジコンピューティング

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

プロセッサにおけるアーキテクチャ研究は、1980 年代から 90 年代にかけて、CISC(Complex Instruction Set Computer) 対 RISC(Reduced Instruction Set Computer) アーキテクチャ論争、RISC アーキテクチャをベースにしたプロセッサの高実行効率化技法、命令レベル並列化、スレッドレベル並列化等の並列実行手法などの研究で大いに盛り上がった。その後、ムーアの法則（トランジスタサイズは 1.5 年で 1/2 になる）に従ったプロセッサ単体性能の着実な向上の勢いに隠れ、アーキテクチャ研究は次第にその輝きを失っていった。しかし、2010 年頃より、主に 1）ムーアの法則に陰りが出たこと、2) アーキテクチャの工夫を必要とする新しいタイプの情報処理課題がメインストリームになったこと（後述）、の二つの事象が並行して進行し、特にここ数年は「アーキテクチャ研究の黄金時代」とも呼ばれる活況を呈している。Society 5.0 というキーワードで近未来の超スマート社会のビジョンが産官学で議論されているが、その議論は、情報処理能力のこれまで通りの指数関数的な発展を前提にしている。その前提を支えてきたムーアの法則の今後が心もとない現状においては、アーキテクチャ技術の果たすべき役割は大きい。

[研究開発の動向]

コンピューティングアーキテクチャは、いわゆるフォンノイマン型を王道として発展してきた。これは、メモリー内に蓄えられた命令列（処理プログラム）を順次解釈・実行していくことを基本的特徴とする手続き処理型のアーキテクチャであり、チューリングマシンを源流とする極めて強力な問題記述能力・汎用性を誇る。1980 年代に、多様なプログラムをより少ない命令数で実行することを目的として命令数が膨れ上がってしまった IBM 等の汎用コンピューター (CISC) に対するアンチテーゼとして、アーキテクチャを単純化・規則化して命令数

を減らしたマイクロコンピューター（RISC）が提案された。RISC は実行命令数は増えるものの、命令当たり実行時間の短縮によりプログラム処理性能が向上することが定量的に示され、脚光を浴びた。ムーアの法則の力を大いに借りて、クロック周波数向上により性能向上を図る RISC ドリブンなアプローチが、その後のアーキテクチャを席捲することとなった。

フォンノイマンアーキテクチャでは、処理プログラムと処理データの双方をメインメモリーに蓄えるため、頻繁なメインメモリーアクセスが性能律速要因になる（フォンノイマンボトルネック）ことが知られている。RISC アーキテクチャ登場以来のアーキテクチャ研究の主要な分野の一つは、このボトルネックを緩和するためのメモリーシステム階層に関するものであり、キャッシュメモリーの工夫やその他様々な命令・データのバッファリング手法が提案されてきている。その他の主要分野としては、手続き型処理の根幹となる分岐命令の先読み・予測、制御ハザードの回避、複数命令並列実行や複数スレッド（スレッドとは一塊の手続きのこと）並列実行、プロセッサを多数並べた大規模並列システム、等が挙げられる [1]。

フォンノイマン型に代わる「非ノイマン型」のアーキテクチャ思想を打ち立てる研究も古くから続いている。その一つは、1980 年代から 90 年代にかけて盛んに研究されたデータフローアーキテクチャである。その基本思想は入力データが揃って実行可能になった命令から実行する点にあり、あらかじめ定められた手続き順に命令を実行するフォンノイマン型に比べると、自然に並列化が可能というメリットがあった。ムーア則に基づく単体プロセッサ高速化の波と、当時の処理対象ワークロードが手続き処理型向きだったことで、情報処理アーキテクチャの主流とはならなかったが、様々な並列化技術としてプロセッサ内に埋め込まれる形で、現在でも広く影響を与えている。その当時、電総研（現産総研）を始めとして日本でも有力な研究がいくつも進められ（SIGMA-1 [2], EM4 [3] 等）、日本のデータフロー分野の技術・アイデア・知見の蓄積は厚い。

FPGA（Field Programmable Gate Array）は、ユーザーが手元で自在に回路を実装できる集積回路として、ハードウェア設計のプロトタイプ目的で 1985 年に登場し発展してきた。視点を変えて、所望の情報処理をソフトウェアプログラムにではなくハードウェア構造に設計することを考えるならば、FPGA は新たなコンピューティングデバイスと考えることもできると登場当初から提唱されていた。トランジスタ微細化の進展につれ FPGA に搭載できる回路規模が爆発的に増大し、特に 2010 年頃からはこの「FPGA コンピューティング」の考え方が実用的な意味を持ち始めている。

FPGA コンピューティングは、あくまでプロトタイプ目的だった FPGA の別用途利用であり、コンピューティングに使うならばそもそもプログラマブルハードウェアのアーキテクチャから再定義すべきと考える研究が 1990 年代から 2000 年代にかけて盛んに進められた。一つの方向性は、1-2 バイトのデータ処理に適した粗粒度の演算器アレイ（Coarse Grained Reconfigurable Array; CGRA）アーキテクチャであり、もう一つは動的再構成アーキテクチャである。後者は、ソフトウェアにおける仮想メモリーの考え方にならい、ハードウェアを仮想化することで汎用性を高めようとするアプローチであり、特に日本で研究が盛んに進められた（慶応大学 WASMII [4]、NEC（現ルネサスエレクトロニクス）の動的再構成プロセッサ DRP [5] など）。これらの分野はリコンフィギュラブルコンピューティングと呼ばれている（FPGA コンピューティングもその中に含んで使われる場合が多い）。

コンピューターの出力を人間が視覚的に理解するために必要となるのがグラフィクス処理

であり、GPU(Graphics Processing Unit) はその専用アーキテクチャとして発展してきた。グラフィクス処理には、画素、線分、頂点、視線方向など様々なレベルでデータ並列性が存在するため、主に SIMD(Single Instruction Multiple Data) 型のデータ並列アーキテクチャとして進展してきている。既にコンピューターに組み込まれた GPU をグラフィクス目的以外でも使用して他のデータ並列性の高い応用を処理できるように、2010 年頃からいわゆる GPGPU(General Purpose GPU) アーキテクチャやその利用環境が広まってきた (GPU コンピューティング)。

信号処理分野でも独自のアーキテクチャが発展してきた。信号処理には積和演算が演算の大半を占めることや、あらかじめ静的に処理時間を計算できるリアルタイム性が要求されるという特徴があり、これに応え汎用プロセッサから分化して誕生したのが信号処理プロセッサ (DSP) アーキテクチャである。主にベースバンド信号、音声、画像などが処理対象であり、特に静止 / 動画像を加工したり圧縮・伸長したりする処理では、2 次元画像を効率よく処理するための様々なアルゴリズム - アーキテクチャ連動の工夫が創案されてきており、イメージ処理プロセッサ、ビデオ処理プロセッサなどと呼ばれている。

これらコンピューターから出発したアーキテクチャ以外に、回路の集積度がある程度進んできた段階で、それをアーキテクチャに対する境界条件の大きな変化ととらえ、集積回路の効率実装の観点からアーキテクチャを作り直そうと考える研究分野が 80 年代に勃興した (VLSI アーキテクチャ)。特に、フォンノイマンボトルネックの解消を狙ってメモリーとロジックが一体となったインメモリー型の処理を標榜する場合が多く、知能メモリーアーキテクチャと呼ばれている [6)]。メモリーアレイ内で演算を行うことから、データの移動が少なく並列性を高めやすいという特徴があるが、応用が限られるという難点があり、大きなブレークスルーを起こすには至っていない (部分的にシステム LSI に取り込まれることはある)。

また、同じく集積回路ドリブンで、正統的なアーキテクチャ研究からははみ出た研究としてニューロモルフィックアーキテクチャが挙げられる。1980 年代の第 2 次ニューラルネットブームの際に、網膜神経回路のアナログ集積回路化で注目を集め、シナプスの動作を精密に模倣する回路の試作などが報告されているが、実用化とは距離のある研究であったため、単発的な研究にとどまっていた。しかし、近年になり人工知能分野において注目を浴びるようになり、IBM の TrueNorth、マンチェスター大学の SpiNNaker(Spiking Neural Network Architecture)、Intel の Loihi など機械学習のアクセラレーターとして開発が進められている。

従来のコンピューターとは異なる計算原理で動作し、問題によっては圧倒的な高速化を実現すると期待されているのが量子コンピューターである。1980 年代に理論的可能性が示され、その後、因数分解への適用可能性、量子誤り訂正符号の提案があり、2000 年代には量子コンピューターの研究が活発化したが、スケーラビリティを確保する技術的な見通しの悪さから研究開発は停滞していた。近年になり、ハードウェア技術や量子誤り訂正符号などの進展により、その可能性が再認識されている（詳細は、2.4.2 を参照）。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

現在のアーキテクチャ研究の活況は、情報処理性能向上に対する社会的要求に応えるためには今後アーキテクチャで差分を産み出すしかない状況を反映したものである。一方、時代の変

化により情報処理の対象ワークロードが変化することで、アーキテクチャの工夫で性能向上ができる余地が生まれたからでもある。

その一つは、ビッグデータを活用しクラウドサービスを支える大規模分散並列コンピューティング技術であり、それを先鋭化したデータセンタースケール・コンピューティングアーキテクチャの考え方である[7]。すなわち、今やネットワークでつながった巨大な数のコンピューティングノードの集合体そのものがコンピューターシステムであり、その構成のみならず、空調を含めた電力モデル、故障に対する冗長性、機器のライフタイムマネジメント等、システム全体のオペレーション最適化を考えることがアーキテクチャの一つの大きな分野となっている。

もう一つの分野がドメインスペシフィックアーキテクチャの新展開である[8]。その背景には、機械学習、深層ニューラルネット（Deep Neural Network: DNN）、大規模グラフ処理等に代表されるビッグデータ時代の新たな情報処理ワークロードが、従来の手続き型処理から離れ、構造型処理に適した特徴を有するようになっている点が大きい。例えば、DNN は、大量・多層に並べられたニューロン間の複雑な結合網という「構造」の中に入力データストリームを流し込んで学習や推論を行うことを特徴とする。処理の中に、分岐を含む手続きはほとんど存在せずDNN という構造そのものを並列ハードウェア構造の上に適切にマッピングすることで大幅な処理能力向上を見込むことができる。このような処理対象領域の特徴をアーキテクチャに反映させることで、大幅に処理効率を向上させることがドメインスペシフィックアーキテクチャの狙いであり、前述のグラフィックス処理、信号処理、イメージ / ビデオ処理などはその走りともいえる。なお、プログラミング言語の世界でも、アーキテクチャの世界の動きに呼応して、ドメインスペシフィック言語（Domain Specific Language: DSL）が発展していることも注目される。

深層ニューラルネット (DNN) アクセラレーター

深層ニューラルネット（DNN）が画像分類精度で従来手法を大きく超えることが 2011 年に報告され、本技術は一躍脚光を浴びることとなった。その成功の鍵となった学習手法は 1980 年代に提唱されたバックプロパゲーション（BP）技術であるが、大規模学習データ、高性能計算機、様々な BP 改善手法（いわゆるディープラーニング / 深層学習技術）等が相俟って急速に技術発展し、今や多様な応用分野（画像・音声認識、自動翻訳、自動運転、等）で DNN 活用が拡がっている。また、DNN の学習・推論処理の加速・低エネルギー化を目指して多くの DNN 処理エンジンが提案され（Google 社 TPU [9]、MIT Eyeriss [10]、等）、新しい情報処理アーキテクチャ技術として大きな注目を集めており、ドメインスペシフィックアーキテクチャの代表的な存在であるといえる。膨大な並列性を有するという点で GPU コンピューティングがまずその中心的アーキテクチャとなり（特に学習側）、エッジ側での推論処理を対象として、組み込み機器（特に画像処理）の積和演算アクセラレーターとして発展してきた DSP ベースのアプローチも提案されている。また、構造型の情報処理であるという特徴に注目して、データフローマシンをベースとしたものや[11]、FPGA コンピューティング[12]、リコンフィギュラブルコンピューティング[13]など、様々なアプローチがしのぎを削っている状況である。国内では、東京工業大学が FPGA コンピューティング[14]、北海道大学がリコンフィギュラブルコンピューティング[15]ベースの研究を活発に進めている。また、産業界ではルネサスエレクトロニクス社が動的再構成プロセッサを DNN 処理の差別化エンジンとする技術を発表し[16]、注目を浴びている。

ニューロモルフィックハードウェア

DNN の興隆の影響を受けて、集積回路の上で生体神経回路網の動作を出来る限り精密に模擬しようとするニューロモルフィックハードウェア分野も活性化している (DNN アクセラレーターと混同される場合が多いが、区別して理解する必要がある)。生体模倣の目的については慎重に考える必要がある (例えば鳥を忠実に模倣しても飛行機は実現できない) が、脳が DNN より桁違いに (一説に 10^4 倍) エネルギー効率が良い理由を探求し、その本質を新しい時代のアーキテクチャとして昇華していく方向の研究ならば工学的な意義も持ちうる。この分野では、IBM 社の TrueNorth [17] や、清華大学の Tianji [18]、Intel 社の Loihi [19] などが知られている。これらはデジタル回路を採用しているが、不揮発性メモリーを用いたアナログ回路アプローチも、特に新規デバイスの出口戦略的な位置づけで、活発に研究されている。

アニーリングマシン (量子、非量子)

DNN の勃興と並行して、種々の組合せ最適化問題を二値スピン格子のイジングモデルにおけるエネルギー最小化問題に置き換え、その近似解を求めるアニーリング計算機分野も広く注目を集めている。格子状に並べられ互いに相互作用するスピンが安定状態（すなわちエネルギー最低状態）に自然に収束するという物理現象を情報処理と見なし、短時間で質の高い近似解を得ようとする方法と理解できる。基本的には物理現象を利用して情報処理を実現するナチュラルコンピューティングの流れを汲むものであり、これまでに量子現象を使うアプローチ [20] と、集積回路で疑似的に再現するアプローチ [21,22] とが提案されている。「量子アニーリング」の原理は 1998 年に東工大・西森教授が発表したことで知られ、量子力学的なトンネル効果によりエネルギー極小値にはまらずに最低状態（＝与えられた最適化の解）を探索できるという特徴がある（ただし、実際の D-wave マシンはこの「量子アニーリング」の原理とは異なる動作をしていると考えられている）。一方、量子効果に頼らなくとも、成熟した集積回路技術とアーキテクチャの知見を活かし、スケーラビリティ、結合数、結合の階調などの観点で量子アプローチよりも実用的な計算機として開発を進めているのが日立や富士通などである。

量子コンピューター

従来のコンピューターの論理素子 (bit) では「０か１か」の２状態の情報を計算に用いるのに対し、量子コンピューターでは「０でありかつ１でもある」状態を任意の割合で組み合わせた量子ビットを用いる。量子コンピューターの計算原理としては、量子ビットに位相の回転、量子もつれ、量子干渉などの量子ゲート操作をすることにより情報処理を行う量子回路型量子計算（量子チューリングマシン）が代表的な計算原理であり実装も進んでいるが、量子断熱計算や測定型量子計算など等価な計算モデルも多く知られている。理論通りに動作すれば、現在のコンピューターよりも本質的に高速な計算が可能となると証明されているが、現在のところ、量子性に基づく量子コンピューターの高速性を実験実証するまでには至っていない。Shor の因数分解や Grover の検索などの典型的な量子アルゴリズムが要求する量子ビット数やエラー率と、現状の技術との間には大きな隔たりがある（詳細は 2.4.2 を参照）。今後、量子コンピューターアーキテクチャの研究開発の充実が期待される。

以上のような主要なドメインスペシフィックアプローチの中で、アーキテクチャ的な手段と

して特に注目されているのがリコンフィギュラブルコンピューティングである。これは、HWの構造に問題を落とし込んで解くというこのアプローチの基本的特質が、構造型の情報処理ワークロードと非常に相性が良いからである。日本では、90年代から00年代にかけて様々なリコンフィギュラブルアーキテクチャが活発に研究されてきたという歴史的な経緯があり、相対的に技術・人材の蓄積が厚い分野であるということは注目に値する。

また、演算自体は単純かつ並列化しやすく、入出力データに強くバインドされたものであるという特徴から、ニアメモリーコンピューティングないしはインメモリーコンピューティングというアプローチも重要になっている。これらのアーキテクチャ概念は知能メモリーアーキテクチャとして古くから存在するが、現実的な応用の中で重要性が増してきたため改めて注目されている状況である。

さらに、クラウド一極集中に対するアンチテーゼとして、エッジコンピューティングの概念も注目されている。利点は、ネットワークバンド幅の削減、データの秘匿性や安全性の向上、リアルタイム性の向上などであるが、エッジ側の情報処理能力をどの程度持たせるべきかなど、定量的な答えが見えていないなど課題はまだ多い。日本の産学が有する強みを今後のスマート社会に生かしていくという意味では、エッジコンピューティングのシナリオが技術競争的に非常に重要なことはほぼ間違いがない。これを成立させるユースケースや応用スタディ、対応する社会的プラットフォーム等の研究開発に期待が集まるところである。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国では、IEEEが中心となって、Rebooting Computingキャンペーンを2013年から始めた。これに呼応する形でDARPAが各種のコンピューティングプラットフォームに関するプロジェクトを年々増やしはじめ、2018年にはこれをまとめる形で電子技術の復権を目指すERI(Electrics Resurgence Initiative)を立ち上げ[23]、これから数年間で1600億円もの研究費をつぎ込むと報道されている。対象は、前述のドメインスペシフィックアーキテクチャの各分野やそのLSI設計手法、テストシステム実証を中心として、それ以外にも新規半導体デバイスや3次元実装技術のシステム応用を含んでいる。

また、UC Berkeley発のイノベーションとして、ピュアなプロセッサアーキテクチャの世界で、オープンなプロセッサプラットフォームを標榜するRISC-Vアーキテクチャが急速に求心力を高めていることも注目に値する。アーキテクチャに新規性があるのではなく、寡占の度を強めるデファクト・プロプライエタリIPであるARMアーキテクチャに対するアンチテーゼとして、オープンソースIPであることが最大の特徴であり、UC Berkeley発であるという正統性を強みにMakersムーブメントの上げ潮に乗ることに成功したように見える[8]。AI系ハードウェアのアクセラレーターを構成する際にもシステム全体の管理を行うプロセッサは必須部品であり、ここにARMではなくRISC-Vを選択するプロジェクトが急速に増えている。

中国では、中国政府や有力都市の行政府が、大規模な人工知能ハードウェアプロジェクトを始めている。その予算は年間1,000億円以上といわれ、米国以上の規模を誇る。清華大学にはAI/ニューロモルフィック分野のハードウェア研究センターが設立され、北京市内の狭いエリアに隣接する清華大学、北京大学、中国科学院の関係者がキャンパス周辺にスタートアップ企業を次々に立ち上げる生態系が形成されている（一説には中国では現在30を超えるAIハードウェア系スタートアップがあるとのこと）。北京は国策で直にドライブされている状況である

が、上海・深圳でもHuawei社やBAIDO社が中心となって、北京と同規模の民間ムーブメントが起きている模様である。

欧州は、Human Brainプロジェクト等、ニューロモルフィック系のプロジェクトが歴史的に盛んに進められてきており、相対的には現在のアーキテクチャ革新の動静からは少し距離を置いたポジションに見える。英国に位置するARM社は米中からの遅れに危機感を感じてこの分野のR&Dに力を入れ始めている。イスラエルでは、画像処理・信号処理技術の強みを生かして、小規模ながらスタートアップ企業が蓄積し始めている。

日本では、2018年度から文科省の戦略目標「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」をもとにJSTにおいてCREST、さきがけ研究領域が立ち上がり、これと並行して経産省-NEDOでも「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発」事業が立ち上がった。投資規模で米中にはるかに劣ることは明白であり、日本が蓄積してきた技術的強みや産業界でのポジショニングを明確に意識した、勝てるシナリオ作りとそれにそった研究開発戦略が求められるところである。

（5）科学技術的課題

爆発的なスマート化の進展に呼応した情報処理対象のドラスティックな変化により、情報処理アーキテクチャは今大きな変革期を迎えている。所謂人工知能(AI)ブームの下、米国・中国を中心に活発な開発競争が数年来続いているが、今見えているAI技術は単なる氷山の一角であり、将来にはより豊潤な知能コンピューティングの世界が拡がっていると推定して研究を強力に進めなければならない。なぜならば、一つには日進月歩で過去の常識を覆し続ける深層学習技術の爆発的発展がそれを示唆しているからであり、また一つには、それが真ならば、今後数十年にわたって発展し続けるであろう新しい情報処理アーキテクチャのイニシアティブを取ることが世界的な社会のスマート化の大競争の中で決定的に重要だからである。

科学技術上の課題としては、短期的な「AIチップ開発競争」に勝つことが目標ではなく、この新しい時代に相応しい本質的で持続可能な情報処理アーキテクチャの変革を産み出すことを目標としなければならない。アーキテクチャの世界は、Winner-Take-Allの世界であり、アーキテクチャ的に正しいからデファクトスタンダードになるというのではなく、近未来の応用分野に適した尖ったアーキテクチャでニーズに応え、そのニッチな応用の爆発的な拡大とともにデファクトスタンダードに成長していくという系譜を必ず辿って最終的にデファクトとなる。この観点から、エッジにおける知的なデータ処理を、そのデータ処理に適したドメインスペシフィックなアーキテクチャで、リコンフィギュラブル、インメモリー等の尖ったアーキテクチャ的な特徴を武器としながら、応用課題やソフトウェアのエコシステムと連携して発展させていくことが重要である。

（6）その他の課題

アーキテクチャ革新の好機との認識に立つ海外の著名計算機アーキテクチャ研究者は、データと研究資金を持つGoogle、NVIDIA、Facebook等のAIプラットフォーマ企業を足場に次世代アーキテクチャの研究を進めている。また、米国・中国は、AIハードウェアに1000億円規模の国家予算の投資を始めており、そのような企業群と国家投資余力を持たない日本の立ち遅れは大きい。コンピューター産業競争力低下の影響を受けてアーキテクチャ研究分野から

人材が流出してきた国内ではアーキテクチャ人材が払底しており、学生にも不人気な時期が長く続いていた。長らくアーキテクチャ研究を主導してきた米国では、アーキテクチャを含むコンピューター科学の分野は継続的に人気専攻であり、例えばMITのアーキテクチャ講義では、大型教室に学生が入りきらない状況になっている。一方、半導体とコンピューター技術振興を国策に掲げる中国では最優秀の学生層がこの分野に集中している。人材や次世代教育の点でも彼我の差は非常に大きい。

このような状況で日本がとるべきアプローチは、まずキャッチアップしなければならない状況を正しく反省することを出発点に、短中期的には過去の技術蓄積を再度掘り起こしながら尖ったアイデアの創出をプロモーションする戦略が重要である。また、長期戦略的にはコンピューティングアーキテクチャ分野の若手世代の育成を目立った形で始めることだと考える。後者に関して、中国が如何に若手世代を育成し技術をキャッチアップしてきたかを正しく理解することは、重要な一手ではないだろうか。

（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	△	→	・アーキテクチャ分野の国際学会ではプレゼンスはないに等しく、集積回路分野では過去の影響力を辛うじて保ってはいるが、新しいムーブメントを起こすような指導的立場は持てていない。どちらの技術階層でも人材の層が薄く、特に若年層が薄い。
	応用研究・開発	△	→	・DNNのエッジコンピューティング分野ではルネサスエレクトロニクス社がEmbedded AIとその差別化IPとしてDRPコアを戦略的に開発・事業展開している。アニーリングマシン分野では集積回路型で日立・富士通のプレゼンスが見える以外は、総じて世界的プレイヤーとして活躍できていない。
米国	基礎研究	◎	→	・Stanford、MIT、UCB、Harvard等の主要大学が積極的に先進技術を発信し続けている。産学連携、官学連携等も活発で研究資金や人材育成・供給の面で研究開発のエコシステムが活発に機能している。 ・DARPAの研究資金投入が突出して目立っている。
	応用研究・開発	◎	→	・Google、Facebook等のプラットフォーマがアーキテクチャ分野に投資し続け、NVIDIAもGPGPUへの先行投資が実ってDNN分野でデファクト企業の位置を積極的に狙って影響力を高めている。また、多数のスタートアップ企業が誕生し、世界の技術開発をリードしている。
欧州	基礎研究	○	→	・ニューロモルフィック分野での活動が目立つ。DNN分野ではKU Lueven, EPFL等の少数の大学が世界的に見てレベルの高い研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	・ARM社がドメインスペシフィック分野に事業戦略のかじを切り始めた。 ・英国のGraphCore、イスラエルのCEVA等、技術的な特徴が鮮明なスタートアップ企業も存在する。
中国	基礎研究	◎	→	・アーキテクチャ分野では優れた研究成果を発表し続けており、集積回路分野でもそのレベルに達しつつある。巨額の国費を投資して技術開発を振興しており、清華大学や中国科学院の成果が目立っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・米国には劣るものの、BAIDUなどのプラットフォーマを有し、積極的にアーキテクチャ分野に投資している。30社以上のAIハードウェアスタートアップ企業が生まれているといわれており、例えば、その一つであるユニコーン企業のCambricon社の技術がHUAWEI社のスマートフォンに搭載されている。。
韓国	基礎研究	○	→	・アーキテクチャ分野でも集積回路分野でも、日本よりもはるかにプレゼンスが大きい存在となっている。KAISTやソウル大学がメインプレイヤ。
	応用研究・開発	△	→	・Samsung社の研究開発動向が垣間見える程度で、産業界全体の状況は不明。

（8）参考文献

1）John Hennessy and David Patterson, “Computer Architecture: A Quantitative Approach,” 6th Edition, 2017, Morgan Kaufmann.
2）Toshitsugu Yuba, et.al., “The SIGMA-1 dataflow computer,” in ACM '87 Proceedings of the 1987 Fall Joint Computer Conference on Exploring technology: today and tomorrow, PP578-585, 1987.
3）Yoshinori Yamaguchi, Shuichi Sakai and Yuetsu Kodama, “Synchronization Mechanisms of a Highly Parallel Dataflow Machine EM-4,” IEICE Transactions, Vol. E74, No.1, pp.204-213（1991）.
4）Xiao Ping Ling and Hideharu Amano, “WASMII: a data driven computer on a virtual hardware,” in Proceedings IEEE Workshop on FPGAs for Custom Computing Machines, pp33-42, 1993.
5）本村真人 , 他 , “動的再構成プロセッサ（DRP）,” 情報処理学会誌 , Vol.46, No.11, pp.1259-1265, 2005.
6）村岡洋一 , ” 知的連想メモリマシン ,” オーム社 , 1989.
7）Parthasarathy Ranganathan, “More Moore: Thinking Outside the（Server）Box,” Google, in Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, 2017.
8）David Patterson, “50 years of Computer Architecture: From the Mainframe CPU to the Domain-Specific TPU and the Open RISC-V Instruction Set,” UC Berkeley, in Proceedings of International Solid Sate Circuits Conference, 2018.（講演ビデオ：https://www.youtube.com/watch?v=NZS2TtWcutc）
9）Norman Jouppi, et.al., “In-Datacenter Performance Analysis of a Tensor Processing Unit,” Google, in Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, 2017.
10）Yu-Hsin Chen, et. Al., “Eyeriss: A Spatial Architecture for Energy-Efficient Dataflow for Convolutional Neural Networks,” MIT, in Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, 2016.
11）Chris Nicol, “A Dataflow Processing Chip for Training Deep Neural Networks,” Wave Computing, in Proceedings of Hot Chips, 2018.
12）Jeremy Fowers, et. al., “A Configurable Cloud-Scale DNN Processor for Real-Time AI,” Microsoft Research, in Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, 2018.
13）Shouyi Yin, “An ultra-high energy-efficient reconfigurable processor for deep neural networks with binary/ternary weights in 28nm CMOS,” Tshinghua University, in Proceedings of Symposium on VLSI Circuits, 2018
14）中原 啓貴 , “FPGA を用いたエッジ向けディープラーニングの研究開発動向 ,” 人工知能学会誌「AI 計算資源」にあたって小特集 , Vol.33, No.1, pp.31-38, 2018 年 1 月 .
15）Kodai Ueyoshi, et. al., "QUEST: A 7.49-TOPS Multi-Purpose Log-Quantized DNN Inference Engine Stacked on 96MB 3D SRAM using Inductive-Coupling Technology in 40nm CMOS," International Solid-State Circuits Conference, 2018.

16）Taro Fujii T et. al.,, "New Generation Dynamically Reconfigurable Processor Technology for Accelerating Embedded AI Applications," Symposia on VLSI Technology and Circuits, pp. 41-42, 2018.
17）Paul A. Merolla, et. al., “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” Science, Vol. 345, Issue 6197, pp. 668-673, 2014.
18）Luping Shi, et. al., “Development of a Neuromorphic Computing System,” in Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting, 2015.
19）Mike Davies, “Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning,” IEEE Micro, January/February 2018.
20）“The D-Wave 2000Q ™ Quantum Computer Technology Overview,” D-Wave, 2016.（https://www.dwavesys.com/sites/default/files/D-Wave%202000Q%20Tech%20Collateral_0117F.pdf
21）山岡 雅直 , “組合せ最適化問題に向けた CMOS アニーリングマシン ,” 日立 , IEICE Fundamentals Review, Vol.11, No.3, 2018.
22）“AI と量子コンピューティング技術による新時代の幕開け ～デジタルアニーラが未来を切り拓く～ ,” 富士通 , FUJITSU JOURNAL, 2017.
23）https://www.darpa.mil/work-with-us/electronics-resurgence-initiative

２．４．２　量子コンピューターサイエンス

（１）研究開発領域の定義

量子コンピューティング（量子計算）とは、状態の重ね合わせ、量子もつれ、量子干渉などを計算資源として、古典系では不可能な情報処理を可能とする新たなコンピューティングである。本研究開発領域は、理論的な計算モデルから、ソフトウェア、アーキテクチャ、ハードウェアなど物理学・計算機科学・電子工学の広範囲に及ぶ話題を含む。また、量子コンピューター実現に必要となる様々な工学、量子コンピューター開発を通して得られる計算機科学への示唆も関連トピックスとして含む。

（２）キーワード

量子コンピューター、量子計算、量子情報科学、計算機科学、量子ビット、量子ゲート、量子回路、量子アルゴリズム、量子加速、量子プログラミング言語、量子コンパイラ、量子SDK、量子コンピューターアーキテクチャ、NISQ、量子優位性、量子誤り訂正符号、量子メモリ、量子センサー、量子通信、量子アニーリング、イジングモデル、量子シミュレーター

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

半導体微細加工技術によるコンピューターの飛躍的な性能向上が技術的・経済的な限界に近づき、これまでのように個々のトランジスタ性能向上だけによる計算機の性能向上はもはや望めなくなってきている[1)]。一方で、ビッグデータ処理、メディア処理、深層学習、組合せ最適化などの計算ニーズが高まり、コンピューターの性能向上に大きな社会的期待が寄せられている。このようにシーズ・ニーズの両面から、新計算原理、新アルゴリズム、新アーキテクチャ、新デバイスなど新しい計算パラダイムとその計算機システム実現技術への関心が、近年急速に高まっている[2)]。

このような背景のもと、注目を集めているのが「量子コンピューター」である。因数分解や検索などの特定の問題を効率的に計算できる量子アルゴリズムが複数知られているほか、量子化学計算や機械学習での利用も期待されている。しかし、いずれも実用サイズの計算を実行するにはハードウェア性能が不足している。量子回路モデルを中心とするハードウェアの開発目標は、量子ビット集積化と高忠実度・高操作性の量子ゲート実装、そして量子誤り訂正符号の実装による大規模化[3)]であるが、開発には２～30年程度要すると見られる。ソフトウェアやアーキテクチャの視点もまだ不足している[4)]。この理論・アルゴリズムとハードウェアの間の大きなギャップを埋めるには、量子情報科学と電子工学、計算機科学、数理科学などが融合した「量子コンピューターサイエンス」が必要である。本領域は、量子コンピューター実現を支える学理基盤・工学基盤として意義深い。また、量子優位性の実験検証は理論計算機科学にとって重要なマイルストーンであり、新しいアルゴリズムの発見など、量子計算・量子情報処理が従来の計算機科学にもたらすフィードバックが大いに期待される点でも意義がある。

［研究開発の動向］

これまでの研究開発の流れ

量子コンピューターの計算モデルとして現在一般的なものは、1993 年に Yao により提案された量子回路モデル [5] である。等価な量子計算モデルには、断熱量子計算、測定型量子計算、トポロジカル量子計算などがある [6]。量子回路モデルよりも物理的に自然な（すなわち、計算機実現に妥当そうな）モデルもあるが、現在のところ量子回路モデルに基づく研究に取り組む研究者・組織が多い。

量子コンピューター研究の第 1 次ブームのきっかけは Shor の因数分解アルゴリズム（1994 年）と Grover の検索アルゴリズム（1996 年）という 2 大アルゴリズムの登場である [7]。デコヒーレンスや量子誤りなどハードウェアの技術課題に明るい見通しはなかったものの、Calderbank、Shor、Steane らによって具体的な誤り訂正符号 [8] も提案され、理論的研究が 2000 年代初頭にかけての量子コンピューター研究の駆動力となった。米国標準技術研究所（NIST）がウェブ公開する「Quantum Algorithm Zoo」には、現在までに提案された多数の量子アルゴリズムが整理されている [9]。

大規模量子コンピューターの実現には、複数の物理量子ビットから論理誤りのない論理量子ビットを構成する「量子誤り訂正符号」が鍵となる。中でも、2 次元表面符号と呼ばれる符号が、エラー閾値が約 1 %と高く注目されている。この符号には、エラーの検出・訂正に最近傍の量子ビット間での 2 量子ビットゲートまでしか必要としない、2 次元正方格子の各辺を伸ばすだけでエラー耐性を決める符号距離を大きくできる、などハードウェア実装面での利点もある。IBM や Google の超伝導量子ビットのレイアウトが 2 次元正方格子なのは 2 次元表面符号の実装を念頭にしているためである [10]。

近年のトレンド

現在生じている第 2 次量子コンピューターブームの火付け役は、2014 年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）の Martinis グループによる、超伝導 5 量子ビットデバイスでの高忠実度（1 量子ビットゲート：99.92%、2 量子ビットゲート：99.4%、測定：99%）の実証 [11] だと言われる。このブームは、理論・実験の両面で「量子コンピューターをいかに創るか」という工学的なフェーズに入ったことが特徴である。Google、IBM、Microsoft、Intel、Alibaba といった IT 企業が量子コンピューターへの研究開発投資を拡大し、QC Ware、Rigetti Computing、IonQ、1QBit、Zapata Computing などスタートアップも次々立ち上がった。

現状では、超伝導量子ビット系では 20 量子ビットデバイスの動作確認までされており、50 ～ 100 量子ビットのサイズでの動作検証も予定されている。イオントラップでは 51 量子ビットの量子シミュレーターなどが報告されている [12]。このサイズは誤り訂正符号の原理実証が可能であるほか、計算能力の点での概念実証も可能だろう。ただし、ゲートのエラー率は高く、意味ある量子計算が実行できる量子回路の深さ（ステップ数）は限られる。そのため、浅い量子回路と（古典）統計処理・最適化を組み合わせて演算するアルゴリズムが精力的に探索されている。また、古典コンピューターでは量子コンピューターのふるまいを効率的にシミュレーションできないことを証明する量子優位性の検証 [13] も、小規模量子コンピューターで実行可能なインパクトある研究課題である。

海外・国内政策動向

量子コンピューターを含む一連の量子技術には、各国政府は競うように大規模な研究開発投資を進めている。米国[14]、欧州[15]、中国[16]、英国[17]、カナダ[18]、ドイツ[19]などでは今後、大規模な研究支援が見込まれる。国として早期から量子技術への注力を表明してきたのはオランダである。2013年のQuTechセンター開設に呼応するように、翌年にはオランダ政府は科学技術外交における「National Icon」に位置付け、大規模な政府投資を行うことを発表した。QuTechは量子コンピューターの重要開発拠点であるだけでなく、欧州全体の量子技術研究の象徴的な研究機関といえよう。欧州のFET Flagshipプログラム「Quantum Technology Flagship」の初回公募では、OpenSuperQとAQTIONの２つの量子コンピューター開発プロジェクトが採択された。

我が国では、2017年に文部科学省量子科学技術委員会が「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」[20]を発表、これを受ける形で、同省は研究開発プログラム「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」を開始、「量子情報処理」「量子計測・センシング」「次世代レーザー」の３つの技術領域で合計20件の研究課題が採択された。また、情報処理推進機構（IPA）「未踏ターゲット事業」において「アニーリングマシン」「ゲート式量子コンピュータ」の２部門でIT人材育成・支援が進められている。

（４）注目動向

［新展開・技術トピックス］

量子ソフトウェア開発プラットフォーム

ハードウェアの技術進展に伴い、その計算能力を最大限引き出すためのソフトウェアの重要性も増してきている[21]。量子ソフトウェア開発の基盤となる量子プログラミング言語の設計は、比較的初期から取り組まれたテーマである。QCL、QPL、QMLなどの量子プログラミング言語が開発され、近年では、コンパイラをともなった量子プログラミング言語QuipperとScaffoldの開発が注目される。また、MicrosoftがC#から呼び出すことを想定したドメイン固有言語としてQ#を開発・公開している。いずれの言語も、QRAMモデルでの実行を想定している。QRAMモデルは「量子データ・古典的制御」の標語のとおり、データに量子力学的重ね合わせを許すが、プログラムには重ね合わせは許されず、プログラム（命令流）は古典的なままである。入出力は古典コンピューターに対して行うため、「量子プログラム」は全て古典データで表現される[22]。

最近になり、実際の小規模量子コンピューター実機やそれを模したシミュレーター上で誰もが量子計算を実行できるような、具体的プラットフォームが登場した[23]。代表的な量子ソフトウェア開発キット（SDK）として、IBMのQISKit、Rigettiの Forest、スイス連邦工科大学（ETH）のProject Q、Microsoftの QDK、Googleの Cirq、デルフト工科大学（TU Delft）のQuantum Inspireなどがある。多くは、プログラミング言語とコンパイラのほか、シミュレーター、ライブラリ、検証ツール、サンプルコード、ドキュメントなどがパッケージとなっている。量子プログラミング言語としてはIBMのOpenQASMのほか、Rigettiの Quil、Microsoftの Q#などそれぞれSDKごとで独自に提供される。IBMは量子ビット制御用の低級言語のOpenPulseも公開している[24]。関数型の量子プログラミング言語としては（Haskellをホストとする）Quipperが有名[25]であるが、上記いずれのプラットフォームでも採用され

ていない。

多くの SDK でバックエンドはシミュレーターのみである中、IBM の QISKit は、実機を利用できる点で注目されている[26]。高級言語から OpenQASM をターゲットとしたコンパイラ（Microsoft QDK ではドライバの扱い）も開発されており[27]、OpenQASM は量子回路の表現形式としてデファクト標準になりつつある。シミュレーターに特化することで高速化を図る動きもあり、京都大学藤井研究室が開発する高速量子回路シミュレーター Qulacs などが知られている。現状は多様な可能性が試されている状況であり、今後の整理・洗練に注視する必要がある。

量子コンピューターアーキテクチャの重要性

量子コンピューターにおけるアーキテクチャの概念は、ハードウェアの規模拡大とともにその重要性が認識されつつある[28, 29]。誤り訂正がある場合とない場合ではレイヤー構造は大きく異なり、どのように構造化するかはアーキテクチャ研究の重要なテーマである。現状の 5 ～ 50 量子ビットをアーキテクチャ概念なしにそのまま大規模化することは不可能である。とくに、構成要素の粒度・抽象度、要素間インターフェイス、古典・量子の命令フロー、量子・古典部分のインターフェイスなど、設計すべきことは多い。設計指針としては、NISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）デバイスではドメイン志向で検索やサンプリングないしは量子アルゴリズムで頻出する位相推定などの特定の量子計算に最適化する方向性が考えられる[30]。大規模量子コンピューターでは誤り訂正符号の選択がアーキテクチャを決める。

これまで述べたように、量子アルゴリズムや量子プログラミング言語、量子ソフトウェア開発キット（SDK）がハードウェアの状況からある程度自由に開発されているのは、計算機と呼ぶに十分な性能のハードウェアが未だ登場していないからという見方もできる[31]。高い操作性（ゲート速度）と高い忠実度を達成し、集積化するような実装技術の開発は依然として困難を極めている。実現系としては、ゲート速度で優れる超伝導回路と、ゲート忠実度に優れるイオントラップの２つの系が有望視されているほか、固体系ではシリコン量子ドット系も注目されている[32]。量子センサーや量子通信との接続性を考えると、ダイヤモンド NV センターや光量子ビットも開発余地が十分にあると思われる。高周波回路、配線、パッケージング、低温技術など、電子工学の知見も広く活かされる[33]。

NISQ 時代の量子計算

エラー耐性量子コンピューターの登場にはまだ時間がかかるため、現実的に手に入るエラー耐性無しの量子コンピューター上で、エラーを許しながら、なんらかの量子優位性のある計算を実行することは重要な研究開発テーマである。近年、NISQ デバイスでの実行を考慮して、Variational Quantum Eigensolver（VQE）[34] や、Quantum Approximate Optimization Algorithm（QAOA）[35]、Quantum Circuit Learning（QCL）[36] などの量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの提案が相次いでいる。これらのアルゴリズムでは、量子部分は古典最適化アルゴリズムに埋め込まれており、1 回の計算で量子部分に多くのステップが要求されない（浅い量子回路）という特徴がある。

NISQ デバイスの多くは量子ゲートのエラー率や量子ビット間の結合性が限定的であり、量子ビット・量子ゲートの性能もチップ内でばらつく。そのため、量子ビット・量子ゲートの優

先利用を決める「マッピング」に関する研究も近年進められている[37]。空間的なマッピングのほか、測定回数やノイズの大きなゲートを別のゲートの組み合わせで近似するなど、時間方向への分解と最適化も重要な課題である。

量子優位性

量子優位性（Quantum Advantage や Quantum computational supremacy と呼ばれる）の検証は、「量子コンピューターの振る舞いが古典コンピューターでは（多項式時間では）シミュレーションできない」ことを証明しようという理論・実験研究である。アルゴリズムの実用的な意味合いはないものの、量子コンピューターの研究の重要テーマである。ランダム量子回路、ボソンサンプリング、IQP、DQC1 などのモデルがあり、Shor の素因数分解アルゴリズムなどと比べて単純な量子回路で実現可能である[38]。Google のグループはランダム量子回路の方法で実験実証しようとしている。理論的には、量子計算が古典計算より高速であることはほぼ保証されている状況であるが、具体的な問題設定での実験実証は、理論計算機科学の歴史上重要なマイルストーンである。

多くの場合、スーパーコンピューターによるシミュレーションが「実質不可能」となるような問題サイズはどの程度か、という点に関心が集まる。古典アルゴリズムの進歩やコンピューターそのものの性能向上により、この問題サイズは変化する。最近では、90 量子ビットあれば最新のスパコンでも計算が 100 年かかるとの試算もある[39]。

この観点から、そもそも NISQ ハードウェアのサイズ（たかだか 100 量子ビット）で使われる量子アルゴリズムを、通常の計算量理論で性能評価するのは適切でないといえる。例えば、古典ベストのアルゴリズムでは問題サイズnに対し$O(n)$の時間かかるところを$O(\log n)$に加速する量子アルゴリズムがあったとしても、定数倍の範囲で量子加速は確認できず、古典計算の方が速いように見えることも生じうる（たとえば、$n = 50$については$n < 15 \log n$ で古典計算のほうが早い）。

量子コンピューターが古典コンピューターを凌駕する領域を理論・実験的に正確に把握することは、量子コンピューターサイエンスにとって極めて重要である。同時に、従来の計算量理論への新たな視点のフィードバックも期待できる。量子コンピューターの計算能力のベンチマーキングや、様々なレベルにおける検証にも有益な知見を提供してくれるだろう。加えて、量子計算を古典計算で検証できるかという問題は、計算量理論における未解決問題のひとつであり、その証明は大きなインパクトを生む。実用的な検証プロトコル実現の意味でも重要な問題である。

標準化・ベンチマーキング

IEEE Standard Association（IEEE-SA）が量子コンピューティングにかかる用語の標準化プロジェクトを推進している[40]。IEEE P7130「Standard for Quantum Computing Definitions」は、トンネル効果、量子干渉、重ね合わせ、エンタングルメントなどの用語定義に加え、技術の進展に合わせた追加定義も想定されている。IEEE P7131「Standard for Quantum Computing Performance Metrics & Performance Benchmarking」はメトリクスやベンチマーキングに関する標準化である。今後拡大するコミュニティ内の円滑なコミュニケーションには、定義が共有された共通言語が不可欠である。また、多様な量子コンピューター

の技術進展を定量的に評価・追跡することは今後の量子コンピューター研究開発を加速するための基盤として重要である。

量子アニーラー・量子シミュレーター

量子回路モデルに基づく量子コンピューターとは異なる計算原理で動作するコンピューターとして量子アニーラーと量子シミュレーターが挙げられる[41]。最も大規模であるD-wave Systems社のマシンは最適化問題を横磁場イジングモデルの最低エネルギー状態探索問題として解く。量子アニーリングは組合せ最適化問題に対するメタヒューリスティックス解法であり、理想的な条件下では「量子計算」のひとつである量子断熱計算を含む広い概念と理解される[42]。この計算原理で動作するコンピューターは自然現象を利用して最適化問題の近似解を与えるアナログ量子コンピューターと捉えるべきだろう。比較的大規模の量子シミュレーター[43]や、non-stoquastic（注：sto“qu”asticは量子的に見えて実は古典の確率的（stochastic）モデルで表現可能、という意味の造語である）な効果による指数加速の達成[44]など、今後の発展も注目される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- QuTech（オランダ）:「誤り耐性量子計算（FTQC）」「量子インターネットとネットワークコンピューティング」「トポロジカル量子計算」の３つを研究目標に掲げる欧州の量子技術研究の中心拠点。IntelやMicrosoftなどと共同研究を実施。
- Networked Quantum Information Technologies (NQIT) Hub（英国）:「UK National Quantum Technologies Programme (UKNQTP)」の４カ所のハブ拠点のうち最大の拠点。Oxford大学を拠点とし、量子コンピューターと量子シミュレーター（Quantum demonstrator）の開発が目標。
- 量子計算実験室（中国）：中国科学院（CAS）とAlibaba社とのMoUのもと設立された量子コンピューター開発センター。クラウド提供など活発な研究開発を進めている。量子技術としては中国科学技術大学に依拠している。
- EPiQC（米国）：NSF支援による量子情報とコンピューターサイエンスの混成チームで、実用的な量子コンピューター開発をねらうプロジェクト。シミュレーター、デバッガ、コンパイラ開発のほか、IEEEやACM系の国際学会でのチュートリアル実施など、アウトリーチにも積極的。
- IEEE Rebooting Computing Initiative（米国）：IEEE内のワーキンググループ。主催する国際会議ICRCでは量子コンピューター関係の発表も多い。「IEEE Quantum Computing Summit」の開催や、「量子コンピューティングのメトリクスとベンチマークのためのIEEEフレームワーク」の公開など、活動は活発である。
- 慶應義塾大学 量子コンピューティングセンター（日本）：IBM Q Network Hubのアジア地区の唯一の拠点で、実機のリモートアクセスが可能。参加企業との連携による量子ソフトウェア開発を行うほか、教育活動も熱心である。

（５）科学技術的課題

エラー耐性量子コンピューターと現状の NISQ デバイスとの間には量子ビット数で５～６桁に渡る計算機システムとしての大きなギャップが存在している。ソフトウェアとアーキテクチャの研究開発の充実により、量子アルゴリズムから量子ハードウェアに至る量子コンピューター開発全体を強化する必要がある。とりわけ、計算機システムとして実現するような、大規模化を前提とした俯瞰的な設計・開発が求められる[45]。

理論・ソフトウェアではオーバーヘッドの軽い誤り訂正符号、浅い量子回路で有用な計算を行える新アルゴリズム、ハードウェアでは量子ゲートのエラー制御技術の高精度化、実装容易な集積化法の探索、量子制御部分まで含めたチップレイアウト設計など、様々なアプローチでギャップを埋めてゆく必要がある。量子回路を最適化することで誤り訂正符号のオーバーヘッドをソフトウェア的あるいはアーキテクチャ的に緩和できることもあろう。また、トポロジカル量子誤り訂正符号を採用する場合に、計算リソースの大半を占める T ファクトリー（論理 T ゲートをサポートするために必要な「魔法状態」と呼ばれるアンシラ状態の生成）などを、実行ユニットやファブリックなどとして取り出すような、アーキテクチャ志向の取り組みも必要である[46]。

研究開発が進捗している超伝導回路では、デコヒーレンスの理解とそれに基づく改善、制御用エレクトロニクスの開発（低温 CMOS、超伝導回路）、量子誤り訂正符号と量子ビットレイアウト・配線のコ・デザイン、そして、量子ビットの集積化が必要である。また、マイクロ波帯で動作する超伝導回路と光量子通信（近赤外～可視域）との間を量子情報のまま接続する量子インターフェイス技術が長期的には必要である。

（通常の意味の）ソフトウェア工学の発展も待たれる。とりわけ、量子ハードウェア制御に関するソフトウェア（ファームウェア）として、誤り訂正処理を行うプログラム、NISQ マシンでの誤り抑制方法の探索、動作検証の理論と具体的なソフトウェアツールなどは、すぐにでも必要だろう。同様に、量子プログラムのコンパイラ、リソース推定・最適化ツール、最適化後の量子回路の検証ツールなども、(古典コンピューター上の) ソフトウェアとして重要である。ハードウェアとしての量子回路を検証するような理論の構築と、具体的なツールの開発も不可欠である。

（6）その他の課題

量子コンピューターの研究開発にはハードウェアからソフトウェアに至るまでの必要な全ての技術をフルスタックで用意することが重要となるが、それらに関わる機器や人材を物理的に１ヶ所に集合させることは現実的でない。したがって、多様な研究開発拠点や研究チームから成る研究開発ネットワークの構築と、その効果的・効率的な連携・協調動作のためのハブ拠点が複数必要だろう。

例えば、量子コンピューターサイエンス研究開発拠点、計算プラットフォーム運営・提供拠点、教育・訓練拠点、海外の有力研究者と日本国内の研究者を取り次ぐ国際連携拠点など様々な種類が考えられる。それぞれの機能に合わせて大学や公的研究機関に設置し、その上で、量子情報処理の教育・訓練プログラムの開発・提供、正確で積極的なアウトリーチ・科学広報活動、スピンアウトする量子スタートアップ企業の積極的支援など、多様な施策により、持続性あるネットワーク構築が求められる。

これらの研究開発プロジェクトや研究開発ネットワークの成功は、量子コンピューターコミュニティのプレーヤーの充実と、エコシステムの醸成にかかっている。計算機科学・物理・数学・電子工学に跨がった研究者・技術者のコミュニティは萌芽期であり、多分野連携・産学連携・技術レイヤー連携を可能とする研究開発・人材育成の拠点形成を念頭にした政府投資により、コミュニティ形成・エコシステム形成を強力に促進することが不可欠である。

（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	△	→	・国際会議における日本の存在感は薄い。第２次ブームでの出足は遅かったが、JST 戦略事業（CREST・さきがけ・ERATO）、大型プロジェクト（Q-LEAP）、政府研究開発投資（SIP）が開始された。しかし、官民投資規模は米中欧と比較して依然として桁落ち以下である。
	応用研究・開発	△	→	・産業化に向けた応用研究、製品開発には至る研究成果は顕著でない。NEC、NTT、日立製作所などには量子デバイス技術・量子光学技術の蓄積はあるが、計算機システムに至らない。 ・MDR、QunaSys、Jij などソフトウェア関連のスタートアップが登場したが、量・質ともに今後の発展が欲しい。
米国	基礎研究	◎	↗	・超伝導量子ビットでは UCSB の Martinis グループ（後に Google に移籍）、MIT、Yale 大学、UC バークレー、イオントラップでは Maryland 大学、Duke 大学、Harverd 大学がそれぞれ中心的存在である。量子情報分野では Caltech、MIT が中心的である。 ・国家量子イニシアティブにより、研究所の新設も予定されている。 ・IEEE Rebooting Computing Initiative などコンピューターサイエンス側も活発な活動が進む。
	応用研究・開発	◎	↗	・Google、IBM、Intel、Microsoft が研究を進める。応用研究だけでなく、基礎研究も行われている。 ・多様なスタートアップが登場し、Google や IBM などとエコシステムが形成されつつある。
カナダ	基礎研究	○	↗	・「Seizing Canada's Moment」で ICT 優先テーマに量子コンピューティングが明記され、Waterloo 大学の Institute for Quantum Computing（IQC）に大規模な研究費支援がなされた。量子情報の基礎研究では同地区にあるペリメータ研究所も顕著な成果を上げている。
	応用研究・開発	○	↗	・ウォータールー地区は BlackBerry 創業者の Lazaridis による寄付で研究所が集積、「Quantum Valley」となりつつある。 ・西側のブリティッシュコロンビア州でも D-wave Systems、1QBit など量子アニーラー関係のスタートアップが活躍している。
欧州	基礎研究	○	↗	・多数の大学での量子情報科学の基礎研究の取り組みがある。EU Quantum Technology Flagship プログラムが始まり、量子技術に関する多数の国際連携チームが採択された。 ・オランダの TU Delft にある QuTech では大規模な研究開発が進められている。
	応用研究・開発	△	→	・企業による量子コンピューター研究開発で目立つものは少ない。
中国	基礎研究	○	↗	・「国民経済・社会発展第十三次五カ年計画」で量子コンピューターが重大科学技術項目に明記され、中国科学院（CAS）による拠点形成が進む。
	応用研究・開発	△	↗	・CAS-Alibaba 量子計算実験室が設立され、量子コンピューターのクラウド提供を行っている。

（8）参考文献

1）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）革新的コンピューティング～計算ドメイン志向による基盤技術の創出～』, CRDS-FY2017-SP-02 (2018)
2）IEEE Rebooting Computing, https://rebootingcomputing.ieee.org/
3）National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Quantum Computing Progress and Prospects*, The Narional Academies Press (2018)
4）F. T. Chong, D. Franklin and M. Martonosi, Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware, *Nature* 549, 180 (2017)

5）A. C.-C. Yao, Quantum circuit complexity, Proc. The 34th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 352 (1993)
6）小柴健史 , 藤井啓祐 , 森前智行 ,『観測に基づく量子計算』, コロナ社（2017）
7）M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press (2000)
8）K. Fujii, *Quantum Computation with Topological Codes, From Qubit to Topological Fault-Tolerance*, Springer (2015)
9）Quantum Algorithm Zoo, https://math.nist.gov/quantum/zoo/
10）田渕豊 , 杉山太香典 , 中村泰信 , 超伝導技術を用いた量子コンピュータの開発動向と展望 , 電子情報通信学会誌 , Vol. 101, No. 4, 400 (2018)
11）R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, A. Veitia, D. Sank, E. Jeffrey, T. C. White, J. Mutus, A. G. Fowler, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A. N. Korotkov, A. N. Cleland and J. M. Martinis, Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance, Nature 508, 500 (2014)
12）H. Bernien, S. Schwartz, A. Keesling, H. Levine, A. Omran, H. Pichler, S. Choi, A. S. Zibrov, M. Endres, M. Greiner, V. Vuletić and M. D. Lukin, Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator, *Nature* 551, 579 (2017)
13）A. W. Harrow and A. Montanaro, Quantum computational supremacy, *Nature* 549, 203 (2017)
14）Executive Office of the President of the United States National Science and Technology Council (NSTC), *National Strategic Overview for Quantum Information Science* (2018)
15）European Commission, *Quantum Manifesto* (2016)
16）国務院 ,『国家十三五国民経済・社会発展計画綱要』(2016)
17）Quantum Technologies Strategic Advisory Board, *National strategy for quantum technologies: A New Era for the UK* (2015)
18）Government of Canada, *Seizing Canada's Moment: Moving Forward in Science, Technology and Innovation* (2014)
19）Bundesregierung, *Hightech-Strategie* (2018)
20）文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会 ,『量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策～我が国競争力の根源となりうる「量子」のポテンシャルを解き放つために～ 報告書（平成 29 年 8 月 16 日発表）』(2017)
21）F. T. Chong, D. Franklin and M. Martonosi, Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware, *Nature* 549, 180 (2017)
22）Mingsheng Ying 著、川辺治之 訳 ,『量子プログラミングの基礎』, 共立出版 (2017)
23）R. LaRose, Overview and comparison of gate level quantum software platforms, arXiv:1807.02500 (2018)
24）D. C. McKay, T. Alexander, L. Bello, M. J. Biercuk, L. Bishop, J. Chen, J. M. Chow, A. D. Córcoles, D. Egger, S. Filipp, J. Gomez, M. Hush, A. Javadi-Abhari, D. Moreda, P. Nation, B. Paulovicks, E. Winston, C. J. Wood, J. Wootton, J. M. Gambetta, Qiskit

Backend Specifications for OpenQASM and OpenPulse Experiments, arXiv:1809.03452 (2018)

25）B. Valiron, N. J. Ross, P. Selinger, D. S. Alexander, J. M. Smith, Programming the Quantum Future, Communications of the ACM, Vol. 58, No. 8, 52 (2015)

26）寺井弘高 , 丘偉 , 山下太郎 , 大規模量子計算に向けた超伝導量子回路の作製技術 , 低温工学 , Vol. 53, No. 5, 295 (2018)

27）ScaffCC, https://github.com/epiqc/ScaffCC

28）N. C. Jones, R. Van Meter, A. G. Fowler, P. L. McMahon, J. Kim, T. D. Ladd, and Y. Yamamoto, Layered Architecture for Quantum Computing, *Phys. Rev. X* 2, 031007 (2012)

29）R. Van Meter and C. Horsman, A Blueprint for Building a Quantum Computer, *Communications of the ACM*, Vol. 56, No. 10, 84 (2013)

30）F. Chong, Introduction to Grand Challenges and Research Tools for Quantum Computing, IEEE MICRO51 Tutorials (2018)

31）蓮尾一郎 , 星野直彦 , 量子プログラミング言語 , 情報処理 Vol. 55, No. 7, 710 (2014)

32）阿部 英介 , 伊藤 公平 , 固体量子情報デバイスの現状と将来展望 －万能ディジタル量子コンピュータの実現に向けて , 応用物理 , Vol. 86, No. 6, 453 (2017)

33）今道貴司 , 井床利生 , ルディーレイモンド , 量子コンピューターを使ってみよう－ QISKit を用いた量子プログラミングの紹介－ , オペレーションズ・リサーチ Vol. 63, No. 6, 350 (2018)

34）A. Kandala, A. Mezzacapo, K. Temme, M. Takita, M. Brink, J. M. Chow and J. M. Gambetta, Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets, Nature 549, 242 (2017)

35）J. S. Otterbach, R. Manenti, N. Alidoust, A. Bestwick, M. Block, B. Bloom, S. Caldwell, N. Didier, E. Schuyler Fried, S. Hong, P. Karalekas, C. B. Osborn, A. Papageorge, E. C. Peterson, G. Prawiroatmodjo, N. Rubin, Colm A. Ryan, D. Scarabelli, M. Scheer, E. A. Sete, P. Sivarajah, Robert S. Smith, A. Staley, N. Tezak, W. J. Zeng, A. Hudson, Blake R. Johnson, M. Reagor, M. P. da Silva, C. Rigetti, Unsupervised Machine Learning on a Hybrid Quantum Computer, arXiv:1712.05771 (2017)

36）K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa, and K. Fujii, Quantum circuit learning, Phys. Rev. A, 98, 032309 (2018)

37）IBM Qiskit Developer Challenge, https://qe-awards.mybluemix.net/

38）森前智行 ,『量子計算理論 量子コンピュータの原理』, 森北出版 (2017)

39）A. M. Dalzell, A. W. Harrow, D. E. Koh, R. L. La Placa, How many qubits are needed for quantum computational supremacy?, arXiv:1805.05224 (2018)

40）IEEE Standards Association P7130 – Standard for Quantum Computing Definitions, https://standards.ieee.org/project/7130.html

41）IEEE Rebooting Computing, An IEEE Framework for Metrics and Benchmarks of Quantum Computing (2018)

42）T. F. Rønnow, Z. Wang, J. Job, S. Boixo, S. V. Isakov, D. Wecker, J. M. Martinis, D. A.

Lidar, M. Troyer, Defining and Detecting Quantum Speedup, Science 345, 6195, 420 (2014)

43）R. Harris, Y. Sato, A. J. Berkley, M. Reis, F. Altomare, M. H. Amin, K. Boothby, P. Bunyk, C. Deng, C. Enderud, S. Huang, E. Hoskinson, M. W. Johnson, E. Ladizinsky, N. Ladizinsky, T. Lanting, R. Li, T. Medina, R. Molavi, R. Neufeld, T. Oh, I. Pavlov, I. Perminov, G. Poulin-Lamarre, C. Rich, A. Smirnov, L. Swenson, N. Tsai, M. Volkmann, J. Whittaker, J. Yao, Phase transitions in a programmable quantum spin glass simulator, Science 361, 6398, 162 (2018)

44）H. Nishimori and K. Takeda, Exponential Enhancement of the Efficiency of Quantum Annealing by Non-Stoquastic Hamiltonians, Front. ICT, 17 (2017)

45）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）みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～』, CRDS-FY2018-SP-04 (2018)

46）T. S. Metodi, A. I. Faruque, F. T. Chong, Quantum Computing for Computer Architects, Morgan & Claypool (2011)

２．４．３　データセンタースケール・コンピューティング

（１）研究開発領域の定義

Google、Amazon、Facebook などの IT 巨大企業はサービスを提供するために巨大なデータセンターを運用している。数十万台あるいは数百万台のサーバーを設置し、それをつなぐネットワーク、ストレージなどが数百メートル四方の広さの建屋に設置されている。このような大規模データセンターにおいては、従来のラックスケールの考え方だけでは不十分である。物理的な制約も考えて、サーバー、ネットワーク、ストレージの配置や処理方式を最適化しなければならない。本研究開発領域においては、こういった大規模データセンターに向けた研究開発課題を俯瞰する。

（２）キーワード

データスケール・コンピューティング、メモリー・セントリック・コンピューティング、Hyper Converged Infrastructure、AI アクセラレータ、デジタルアニーラ、高速不揮発性メモリー、高速インターコネクト

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

情報検索や EC サイト、SNS などのサービスがグローバルに拡大するとともに、スマートフォンとクラウドコンピューティングの融合によるさまざまなサービスの利活用、IoT を代表とする膨大なデータの取得と処理などによって、データセンターで処理するデータ量は近年ますます増加している。これまでのラックスケールでの計算実行から、データセンタースケールでの計算の実行へと移りつつある。また、膨大なデータを対象とした情報処理では、計算（プロセッシング）よりもデータの記憶・移動に要する時間がボトルネックとなる。そのため、プロセッサを中心とするコンピューティング（プロセッサ・セントリック・コンピューティング）だけでなく、メモリーを中心とするコンピューティング（メモリー・セントリック・コンピューティング、あるいはデータ・セントリック・コンピューティング）が必要になる。磁気メモリー（MRAM）、抵抗変化型メモリー（ReRAM）、相変化メモリー（PCRAM）といった高速な不揮発性メモリーや、光通信技術などの登場により、従来の Flash/HDD デバイスや電気通信と比較してデータを高速に転送・記憶することが可能になりつつある。このような、膨大な数のサーバー・メモリー・ストレージ・インターコネクトで構成されるデータセンターが今後のクラウドコンピューティングにおいて重要な役割を果たす。

[研究開発の動向]

電子計算機は 1949 年に実用的なプログラム蓄積方式の EDSAC(Electronic Delay Storage Automatic Calculator) が開発されてから約 70 年間で 10^{12} 倍という驚異的な性能向上を遂げてきた。これは、平均して約 1.5 年で 2 倍という指数関数的な向上であり、技術的には半導体の微細加工技術の向上が最も大きな要因であった。しかし、2000 年代に入るとチップあたりの消費電力の壁、動作周波数向上の壁、動作電圧低下の壁などにより、性能向上の陰りが見えてきた。すなわち、単純な微細化に頼ったムーアの法則の終焉である。

コンピューティングデバイスだけでなく、メモリーでも特徴的なデバイスの開発が進められている。2015年にIntelとMicronが共同でDRAMより大容量な128Gbitの3D-Xpointメモリーを発表[1]、2018年5月にはIntelがDDR4スロットに挿せる「Optane DC」不揮発性メモリーを発表した[2]。SAPはこの大容量不揮発性メモリーを自社のインメモリーDB製品に適用し、大容量と不揮発性を生かしデータ処理能力と可用性の劇的な向上を目指している[3]。これまでメモリー層はDRAMが利用されてきたが、DRAMの大容量化の鈍化によりDRAMとOptane DCメモリーなど複数のメモリーデバイスを組み合わせる取り組みが進んでいる。Samsungからアクセス時間が10 μ s以下の極めて高速であるが小容量なFlashメモリー技術[4]と、それを採用したSSDが発表されている。一方で大容量化を目指したQLC-Flash[5]が登場するなど、微細化による汎用品の性能・容量の向上から、次の時代に向けた目的特化の技術の開発が加速している。

これら特徴的なコンピューティングデバイスとメモリーデバイスを活用する新しいアーキテクチャの取り組みとして、HPEのThe machine[6]が挙げられる。大容量な不揮発性メモリーを中心に、高速ネットワークで各種の特化型プロセッサーと接続することで、データ移動を抑えたデータセントリックのコンピューティングを目指している。データセントリックの概念はビッグデータ処理に特化したソフト技術によりApache Hadoop[7]でも一部実現されている。Hadoopでは、大量のデータを複数ノードで構成された分散ファイルシステムに格納し、極力データのあるノードで処理を行う。既存アーキテクチャをベースに、ストレージとコンピュータノードがネットワークで分断されることなく、データのあるところで処理するデータセントリックな構成となっている。また、従来は専用ハードで提供されていたネットワークやストレージ機能をソフトウェアで実現するSDx（Software Defined X）化が進展し、汎用サーバー上のソフトウェアとして統合型基盤を実現できるようになってきた。事前にネットワーク機能やストレージ機能をインストールしておくことで、設置や増設時の設定作業を排したHyper Converged Infrastructure(HCI)[8]が注目されている。HCIは簡単利用が注目され普及してきたが、HCIではローカルディスクを利用するため、データを仮想マシンの近傍に配置することで、データの移動を最小限に抑え、優れたパフォーマンスを実現するアーキテクチャとなっている。

既存の多くのデータセンターは仮想化基盤上で運用されるが、これは性能が同じである大量のコンピューティングリソースから、ユーザが求めるリソースを切り出し提供する技術である[9]。ドメイン指向コンピューティングでは、様々なコンピューティングリソースやメモリーリソース中からアプリケーションに最適なハードを選択し再構成する技術が必要となる。Intelが進めているラックスケールデザイン[10]は、サーバーを構成するプロセッサやメモリー、ストレージなどを分解し、サーバー単位ではなくラック単位でコンピューターを構築することにより、アプリに応じて最適な構成をとることが可能となっている。製品化の例として、HPEの「HPE Synergy」[11]が挙げられる。コンピューター、ストレージがリソースプール化されており、各ワークロードに合わせて再構成できる。いずれもラックスケールでの例であるが、データセンタースケールに拡張することでさらなるリソースの最適化が可能となる。

従来型アーキテクチャの性能向上が飽和する一方、処理すべきデータ量は爆発的に増加し続けており、2025年には175ZBに達すると予想されている[12]。このままでは、従来型コンピューティングの処理能力を上回るのは明白であり、大量データの中から新たな知見を得るための

新しい情報処理技術の創造が課題となる。従来のアーキテクチャは数値処理に優れていたが、データセンターに集約された大量データから情報や知識を効率よく創出するデータセンタースケールのアーキテクチャへの進化が求められている。深層学習を始めとしたAI技術では、従来のように人がシステムを演繹的に設計・構築するのではなく、学習用データを使ってシステムの動作を帰納的に定義する。学習のためには大量のデータが必要であるため、高品質な大量データ活用技術が新しいサービスの源泉となる。

また、リアルタイム性を要求するシステムにおいては、データセンター側までデータを転送する時間が許容できず、エッジ側での深層学習処理などが必要な場合もあり、データセンター側とエッジ側の連携アーキテクチャが重要な課題である。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

次世代メモリーの実用化とプログラミングモデルの整備

2015年にIntelとMicronが共同でDRAMより大容量な128Gbitの3D-Xpointメモリーを発表した。学会では各種の次世代不揮発性メモリーが議論されてきたが、3D-XPointは商用化された最初の大容量不揮発性メモリー技術である。ダイあたりの容量は128GbitとDRAMより1桁大きく、2015年当時のFlashメモリーに近い容量である。高速SSDとして製品化され、Flashメモリーベースの SSDより1桁高速な性能を実現している[13]。また、2018年5月にはIntelがDDR4スロットに挿せる「Optane DC」不揮発性メモリーを発表し、主記憶としての不揮発性メモリーを実現した。従来、主記憶であるDRAMは揮発性であることを前提にプログラミングされており、主記憶が不揮発化することを想定していない。ストレージの業界団体であるStorage Networking Industry Association(SNIA)は、不揮発性メモリーに対するプログラミングモデルを標準化し、Persistent Memory Development Kit(PMDK)[14]と呼ばれる不揮発性メモリーを活用するためのライブラリが開発されている。また、Hypervisor、OS、ファイルシステムでもバイトアクセス可能な不揮発性メモリーを活用する対応[15]が進められ、新しい時代のメモリーデバイスの活用に向けて環境の開発が加速している。

Gen-Z consortium

本コンソーシアムは2016年10月に大手のコンピューティングやメモリー企業12社によって設立され、不揮発性メモリーやGPU、FPGAなどをメモリーセマンティックに接続する広帯域で低レイテンシーなインターコネクトの実現を目指している[16]。2018年にはコア仕様1.0を公開、ベンダーがGenZ規格のインターコネクトの開発を可能にしている。多種多様な新しい不揮発性メモリーやコンピューティングデバイスに対応し、他のインターコネクトと比較してメモリーセマンティックで通信する上での特徴的な機能が盛り込まれている。不揮発性メモリーと様々なドメインに特化したコンピューティングデバイスをつなぎ、メモリーに格納されたデータを中心にした新しいアーキテクチャを実現する上で主要な構成要素である。

Open Compute Project (OCP)

OCPとは，2011年にFacebookの呼びかけにより発足したデータセンターのファシリティからサーバーに至るまでの管理仕様を公開したプロジェクト[17]。現在は、MicrosoftとIntel

を加えた 3 社が牽引し、200 社弱のベンダーが参画、データセンターの標準化を目指している。ハードウェア仕様の標準化からスタートし，2017 年の Summit では，ソフトウェアやファームウエアの標準化にも着手している。Microsoft は Project Olympus というサーバー仕様を公開、データセンターの管理粒度をサーバーからラックにしようとしている。Intel は、自社の Intel Rack scale design を標準化すべく OCP に参画している。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

日本では AI 応用などに向けた新しいコンピューティングの国家プロジェクトとして、2018 年度から JST CREST「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術」、JST さきがけ「革新的コンピューティング技術の開拓」、NEDO「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」が始まっている。しかし、カバーすべき領域がエッジ、データセンター、インターコネクトのハード・ソフトと広範であるため、例えば本研究開発領域であるデータセンター向けの研究開発が十分にカバーされているとは言い難く、より一層の強化が必要である。

米国においては、The National Computing Initiative(NSCI) が 2015 年の大統領令によって発足し、ハイ・パフォーマンス・コンピューティングでの米国のリーダーシップを実現しようとしている。NSCI は複数の省庁にまたがる統一的な戦略であり、産業、アカデミアの連携のもとに活動を進めている。National Science Foundation（NSF）においても、NSCI@NSF と題して、HPC の研究開発と配備に対してファンディングを行っている。Energy-Efficient Computing: from Devices to Architectures（E2CDA) というプログラムでは、材料からデバイス、コンピューティングアーキテクチャなどの研究に対して、2016 年から 18 年に合計で 2 千 2 百万ドル、Scalable Parallelism in the Extreme（SPX) においても 2 千万ドルの研究資金を提供している。また、Petascale Computing Resource Allocations (PRAC) においては、実際にスーパーコンピューティング環境を構築するために、2013 年から 2018 年までに 3 億 3 千万ドルが投資されている。

これまでコンピューティングの性能向上を支えてきたムーアの法則の終焉を迎え、コンピューティングを根底からすべて考え直そうという動きが IEEE の Rebooting Computing Initiative である。材料、デバイス、システム、アーキテクチャ、言語など多くの領域の専門家が集い、コンピューティングの将来を模索している。

欧州においては HORIZON2020 において、Advanced Computing というトピックを設定し、2014 年から研究提案を募集し、現在 30 以上のプログラムが実行されている。低電力プロセッサー、フォグコンピューティング、ディープラーニングの学習アルゴリズムなど多岐にわたる研究が推進されている。2015 年から 2017 年の間に開始されたプロジェクトへの投資金額は総額 1 億 5 千万ユーロに達する。

（5）科学技術的課題

AI アクセラレータ、高速な不揮発性メモリー、高速インターコネクトなど、AI を使ったリアルタイム処理などを差別化するハードウェア技術の研究を強力に推進することは当然、必要である。ただし、こうしたハードウェアのキラー技術の能力を最大限に発揮させるためには、個別のハードウェアの研究開発だけでは不十分であり、ハードウェアを融合したサーバー・ス

トレージを構築するための、OS、デバイスドライバ、分散処理・データベース等のミドルウェアなど、ハードウェア・ソフトウェアを統合・全体最適化したコンピューティング技術の研究開発が必須になる。ハードウェア・ソフトウェアの統合は１つの企業、単独の研究機関・大学では行うことは難しく、分野のレイヤをまたいだ複数の産学の連携が必要になる。

（６）その他の課題

(5) で記載のように、ハードウェア・ソフトウェアを統合・全体最適化したコンピューティング技術の研究開発では、分野のレイヤをまたいだ複数の産学の連携が必要になる。また、日本の産業界の状況に鑑みても、遠い将来の技術・コアとなる事業以外の技術の研究開発に投資を行うことが難しくなっている。いわゆる中央研究所が減ってきていることはその一つの象徴ではないか。そのため、日本企業が将来にわたって競争力を保つためには、外部の研究機関・大学を「基礎研究や異分野融合のための研究開発リソース」として活用することが極めて重要になると考えられる。

（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トップカンファレンスで発表しているが、アーキテクチャ分野での存在感は低い。
	応用研究・開発	○	↗	・業務のデジタル化が進み、自動車など強い業種に特化したデータセンターの研究開発が進められている。
米国	基礎研究	◎	→	・産業界と大学が協力し、アーキテクチャのトップカンファレンスでの発表件数は首位。コンピューティングの主要な部品ベンダーを擁しており圧倒的。
	応用研究・開発	◎	→	・Amazon、Google、Facebook、Microsoft などメガデータセンタを運用するプラットフォーマが主導。最新開発成果は自社で利用した後に発表するほどの開発力を持ち、自社サービスを強化するハード、ソフトを強化。
欧州	基礎研究	○	→	・SAP のファウンダーが創設した HPI や、Tableau に買収された Hyper を開発したミュンヘン工科大など、DB 分野では数多くの成果をトップカンファレンスで発表。
	応用研究・開発	○	→	・Horizon Europe において、Cloud Computing の Work Programme を実行するなど、具体的な応用に向けた研究開発が進められている。
中国	基礎研究	○	→	・スーパーコンピューターではトップクラスの性能を実現している。
	応用研究・開発	◎	↗	・Baidu は 2018 年に AI チップである「Kunlun」、Alibaba は「Ali-NPU」を開発するなど AI 分野で攻勢。データセンターの規模でも、Alibaba クラウドは AWS、AZURE に次ぐ第３位のシェア。
韓国	基礎研究	○	→	・Samsung などメモリーベンダの存在感が大きく、大学でもメモリーにかかわる研究テーマが多い。メモリー技術に関しては、トップカンファレンスで発表する力を持つ。
	応用研究・開発	○	→	・電子政府の普及など、実用化が進んでいる。

（８）参考文献

1）Intel News Release July 28, 2015, Intel and Micron Produce Breakthrough Memory Technology, https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/#gs.gq890Fs.
2）Intel News Release May 30, 2018, “Reimagining the Data Center Memory and Storage Hierarchy”, https://newsroom.intel.com/editorials/re-architecting-data-center-memory-storage-hierarchy/#gs.234zB98.
3）SAP HANA Blog, “Continuous and Customer-Driven Innovation with SAP HANA”,

https://blogs.saphana.com/2018/06/05/continuous-and-customer-driven-innovation-with-sap-hana/.

4）Wooseong Cheong et al. “A Flash Memory Controller for 15us Ultra-Low-Latency SSD Using High-Speed 3D NAND Flash with 3us Read Time” International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2018.

5）東芝メモリプレスリリース 2017 年 6 月 28 日、世界初、QLC 技術を用いた 3 次元フラッシュメモリ「BiCS FLASH ™」の開発について、https://business.toshiba-memory.com/ja-jp/company/news/news-topics/2017/06/memory-20170628-1.html.

6）Hewlett Packard Enterprise Press release May 16, 2017, “HPE Unveils Computer Built for the Era of Big Data”, https://news.hpe.com/a-new-computer-built-for-the-big-data-era/.

7）Apache Hadoop, https://hadoop.apache.org/

8）IDC Japan, 国内コンバージドシステム市場予測を発表、https://www.idcjapan.co.jp/Press/Current/20180820Apr.html.

9）Takashi Miyoshi, Kazuichi Oe, Jun Tanaka, Tsuyoshi Yamamoto and Hiroyuki Yamashima, New System Architecture for Next-Generation Green Data Centers: Mangrove, FUJITSU SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL Vol.48, No.2.

10）Intel Rack Scale Design, https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/rack-scale-design-overview.html.

11）Hewlett Packard Enterprise, HPE Synergy, https://www.hpe.com/jp/ja/integrated-systems/synergy.html.

12）David Reinsel, John Gantz and John Rydning, The Digitization of the World From Edge to Core, IDC White Paper, 2018.

13）F.T. Hady, A. Foong, B. Veal, and D. Williams, “Platform Storage PerformanceWith 3D XPoint Technology,” Proceedings of the IEEE, vol.105, no.9, pp.1822–1833, 2017.

14）Andy Rudoff, Persistent Memory Programming: The Current State and Future Direction, SNIA Persistent Memory Summit 2019.

15）Mark Carlson, Persistent Memory what developers need to know, SNIA Storage Developer Conference (SDC), 2018.

16）GEN-Z, https://genzconsortium.org/.

17）Open Compute Project, https://www.opencompute.org/

２．４．４　ビッグデータ処理基盤技術

（１）研究開発領域の定義

本領域は、大量な台数の計算機あるいはハイエンドな計算機を効果的に利用することで、大規模なデータ（ビッグデータ）に対する分析処理を効率的に実行する基盤的ソフトウェア技術を確立する領域である。主な要素技術は分散並列型の大規模データ分析処理であり、分析処理の種類はデータベース検索・機械学習・データマイニングが対象である。

（２）キーワード

データベース、機械学習、データマイニング、並列分散データ処理、最適化、分類、クラスタリング、クラウドコンピューティング

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

Data is the new oil（データは新しい石油である）といわれるように、ビッグデータを分析することで隠れた知識やルールを発見して、社会的あるいは経済的なインパクトを生み出すことが期待されている。先端的な分析処理に関する応用として、コンピュータ囲碁、Google や NICT などが取り組んでいる翻訳技術、自動運転や早期がんの診断支援[1)]における映像・画像認識などが挙げられる。これらの応用例では共通して、大量のビッグデータを活用して人間の能力に近い情報処理の実現を目指している。一方、ペタバイトスケールの大規模データを扱う応用として、NTT ドコモが運用するモバイル空間統計（ドコモの携帯電話ネットワークのしくみを使用して作成される人口の統計情報）、国立天文台における観測データの画像解析、Amazon に代表されるクラウド環境を利用した多様なサービスが挙げられる。

市場調査会社の IDC Japan の 2018 年 8 月の報告[2)]によれば、2017 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 8.9%増の高い成長率を維持し、市場規模は 8848 億 8900 万円となったとされている。更に、今後の予測として 2022 年の市場規模は 1 兆 5617 億 3100 万円に達し、年間平均成長率（CAGR：Compound Annual Growth Rate）は 121%になると報告されている。このようなビッグデータテクノロジー／サービス市場を牽引するのは、大規模データを対象としたデータベース検索・機械学習・データマイニングなどの技術である。

［研究開発の動向］

ビッグデータ処理の基盤システムに関する技術は、分析処理の種類に応じて、大規模データを管理するデータベース系の技術と、高度な分析を行う機械学習系の技術に分類することができる。

データベース系のクラウド技術

クラウド環境におけるデータベースの役割は、大規模データに対して、大量のクエリを高スループット・低レスポンス時間で処理することにある。代表的なシステムとして、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）の技術と、1000 台を超える大量のコモディティ計算機を用いる NoSQL および Spark/MapReduce に代表される

分散処理システムがある。前者の分散 DBMS については Oracle、IBM、Microsoft などのデータベース製品や SAP の HANA に代表される主記憶型の DBMS が代表的である。後者については、Google がクラウドサービスとして提供している SQL エンジンの BigQuery、Amazon が提供する SQL エンジンの Redshift、NoSQL エンジンの DynamoDB、分散処理エンジンの Elastic MapReduce、そして Microsoft が提供する NoSQL エンジン Azure Cosmos DB 等が代表的である。

研究の動向として、1) 不揮発性メモリ・メニーコア・高速ネットワークボードなどの最新ハードウェアを活用した分散並列 DBMS の研究、2) データベースに対するアクセスパターンを分析予測することで高速な処理を実現するワークロード予測技術、3) クラウドにおける大量なクエリを高速に処理するためのインデックス選択技術や最適な実行プラン選択するクエリ最適化技術、4) 高速なデータ書き込みと分析処理を両立することでリアルタイムな分析を実現する HTAP(Hybrid transaction/analytical processing) 技術、5) 機械学習などの高度な分析応用とデータベース処理を融合した横断的最適化技術、6) 大規模データを分析する事前処理としてデータクリーニングを効率化する技術 (data wrangling) などが挙げられる。1 に関してはハードウェアベンダと大学の連携で研究が進められることが多く、2 と 4 に関しては企業が提供する実際のアクセスパターンを分析することで大学が研究を行うことが多い。3 に関するクラウド環境におけるデータ処理エンジンとしては、Google、Microsoft、Amazon、Facebook、Twitter などの Web 系の企業が先導しており、各社の専用の用途に応じて開発が進められている。5 と 6 は主に大学を中心に研究が進められている。

機械学習系のクラウド技術

クラウドにおける機械学習の実行環境は進化が目覚ましい。 代表的なシステムとして、Google では画像認識、音声認識、多言語翻訳などのサービス (Google Cloud Machine Learning Engine) を実現する基盤システムとして深層学習の基盤技術（TensorFlow）の開発を進めている。同様に、Microsoft でも画像認識、音声認識、検索エンジン、対話システムを提供する Microsoft Azure Cognitive Services の開発を進めている。IBM では Watson API を利用して画像認識、音声認識、自動翻訳などの機能を提供している。日本では、PFN が画像解析や物体検出技術に注力しており分散深層学習フレームワーク ChainerMN および画像認識フレームワーク ChainerCV を公開している。また、NTT ドコモは対話 AI を実現する API として、自然対話、トレンド抽出、音声認識などの機能を提供している。このほかにも、Keras や PyTorch、Caffe などさまざまな機械学習フレームワークがクラウドで提供されている。使用する言語やインストールの仕方、学習速度、処理の柔軟性、使いやすさなどに特徴があり、利用に当たっては適切なものを選択する必要がある。また、リアルタイム性を要する応用システムにおいては、機械学習系の処理をエッジ側で処理する必要があり、学習モデルの小型化、高速化、およびクラウド側との連携アーキテクチャが課題である。

国際動向

日本では、文科省の人工知能（AI）研究拠点として理化学研究所 AIP センター、経産省では産業技術総合研究所人工知能研究センター、総務省では情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターが設立されており、ビッグデータ・AI 向けのプロジェクトに重点化した戦略を国

が主導している。また、AI向けのクラウド環境として、2018年8月から産業技術総合研究所が研究者にAI橋渡しクラウド（AI Bridging Cloud Infrastructure、ABCI）のサービス提供を開始している。ABCIは理論ピーク性能が半精度で550PFLOPS、倍精度で37PFLOPSのスパコンによって実現されており、2018年11月のスパコンの速度性能ランキング(TOP500)で世界5位に位置している。一方、企業の取り組みにおいては、2020年の東京オリンピックを見据えて、自動車の自動運転・人流制御による渋滞解消・スポーツにおけるトレーニングや戦術のAI導入などの取り組みが通信、メーカ、スタートアップなどの企業を中心に進められている。

米国では、Google、Amazon、Microsoft、IBMなどのクラウド事業を手掛ける企業がGPUを利用できる深層学習向けのクラウドサービスを提供するとともに、簡単にAIを利用した応用プログラムを開発するためのAPIの提供を行っている。代表的な企業であるGoogleを例にとると、大規模な計算機環境を簡易に利用するためのコンテナ技術（Kubernetes）を開発しOSSとして公開して世界での普及を進めており、ビッグデータの管理に関しては自社の分散データベース管理システムであるF1およびSpannerの開発を進めている。また、機械学習に関しては開発環境であるTensorFlowのソースコードを公開するとともに、機械学習に特化したGoogleの自社開発プロセッサTPUをGoogleのクラウド環境で利用できるサービスを開始している。画像認識、音声認識、多言語翻訳などのAI応用を簡単に開発するためのAPIを提供している(Google Cloud Machine Learning Engine)。

EUにおけるビッグデータに関する主な取組としては、Horizon2020（2014年から7年間の計画で総額770億ユーロを投じる計画）において、ビッグデータの管理、研究のインフラの整備、データのオープンアクセスが進められている。AI・ビッグデータに対する競争力はEU各国で状況が異なっているが、ドイツ・フランス・スイスが活躍している。企業の例としては、主記憶型DBMSをコア技術とするSAP社では、SAP Cloud Platformというクラウドサービスを提供しており、また大学ではミュンヘン工科大学がGoogleを含めて多くの企業と連携しており、スタートアップも輩出している。フランスではスタートアップが多く生まれており、またフランス原子力庁（CEA; Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）ではIoT応用を対象としたシステムおよびクラウド開発を進めている。

中国では、企業としてはAlibabaが商業的に成功しており（2018年10月の株式時価総額世界ランキングにおいて世界8位)、米国のAmazonと同様にEコマースを運用するバックエンドのシステム向けの独自の大規模分散システムを開発し運用している。研究領域に関しては、マイクロソフトリサーチアジア（対話システム、コンピュータビジョン、検索システム等の研究）やIBMなどの企業が活躍している。

韓国では、AI・ビッグデータに対して国家予算が多く投資されていると共に、Samsungなどの企業においてAIのスキルを有する人材の育成に取り組んでいる。

（4）注目動向

最新ハードを活用した並列分散データベースの高速化

クラウド環境で大規模データを分散並列処理するプロジェクトとしてはUCB発のApache Spark [3)] が著名であり、既に巨大なコミュニティに成長し世界的に普及している。分析処理方法もSQL、グラフ処理、機械学習と広範囲で豊富なライブラリ群を提供しており、多様な応

用に適用可能である。Spark ではメニーコアなどの最新ハードウェアを活用していないためハイエンド向きの計算機環境には適さない問題があったが、パーデュー大の Flare プロジェクト[4] では Spark の足回りを Java から C 言語に変更し、メニーコアの代表的な NUMA(Non-Uniform Memory Access) 環境を活用するため OpenMP を用いたクエリ実行エンジンを研究している。また、データベース管理システムで最新ハードを活用する代表例としてミュンヘン工科大学の Hyper project[5] では、メニーコアを活用し高速なトランザクション処理および分析処理を両立するメインメモリーのデータベースエンジンの研究を行っており、2016 年に BI サービスの Tableau 社に買収されている。

データベース処理と機械学習の連携による処理の最適化

世の中の大半のデータはデータベースに格納されているため、データベースからデータを取り出して機械学習を適用する必要がある。従来は、データベースの最適化と機械学習の最適化が局所的に独立に行われていたため、システム全体としての最適化が行われていなかった。この問題に対して、UCSD の Triptych project[6] では、機械学習におけるデータ処理に関する情報をデータベース側に伝えることによって、システム全体としての最適化を行う研究に取り組んでおり、特徴量抽出のような線形的な学習から深層学習のような非線形な学習にわたる最適化の技術の研究に取り組んでいる。同様の文脈で、データベースに格納された複数のテーブルを 1 つに結合することなく学習する技術として Markov Logic があり、ワシントン大学の Pedro Domingos 教授が該当分野の第一人者である。

データクリーニングの自動化

機械学習やデータマイニングの処理においては、アルゴリズムにデータを入力する前にデータのフォーマットを加工したりノイズを除去したりするデータクリーニングの操作が必要であり、データクリーニングの操作は分析工程の大半を占めることが知られている。しかし、データクリーニングの処理は一般化することが難しいため、データ分析者が多くの時間を費やして手動で行わざるを得ないという問題があった。この問題を解消する手段として、近年 Data Wrangling という技術が注目されておりオライリーの書籍なども発刊されている。Data Wrangling に関する近年の取り組みとして UCB の DataWrangler プロジェクト[7] があり、ユーザが GUI からデータを操作することで期待されるクリーニング操作を推定して、自動的にプログラムを生成するツールを開発している。本研究プロジェクトから Trifacta 社がスタートアップとして起業し、ツールの商用化に取り組んでいる。

発見的データ分析

ビッグデータを扱う現在、データの多様性が増しており、膨大な情報の中から仮説を立案して検証を行う従来型の仮説検証型のデータ分析が困難になりつつある。この問題に対して、発見的データ分析の技術がある。発見的データ分析の起源は古く 1977 年に John Tukey が提唱した detective work に遡る。代表的な研究として、イリノイ大の zenvisage project[8] やワシントン大の HypDB project[9] が挙げられる。特に HypDB はベイズネットワークとデータ分析を融合した技術であり、隠れた因果関係を探索して見つけるという特徴を持つ分析技術である。

機械学習の生産性向上

機械学習に関しては研究が多岐に渡るとともに、急速なスピードで研究が進んでいる状況にある。その中でもクラウド環境で利用されてきている技術として、多様な機械学習アルゴリズムの自動選択と自動パラメータチューニングを行う Automated Machine Learning (AutoML) があり、2013 年の Auto-weka の頃から注目され、現在では多くのプロジェクトが存在する。代表例の 1 つとして Google Cloud AutoML [10] はクラウド環境において利用することが可能になってきている。Google Cloud AutoML では、画像認識、テキスト分類、翻訳のサービスを提供しており、教師データを入力するだけで、機械学習の非専門家であってもカスタムの学習モデルを構築することが可能である。同様なサービスとして、Apple では Create ML [11] というツールキットを提供しており、画像分類とテキスト分類に関して GUI 操作でモデル学習することができ、簡単にスマートフォンアプリに組み込んで利用することが可能である。

量子計算を用いた DBMS の高速化

近年、量子コンピュータが注目されており、Google、IBM、D-wave、NII と NTT の共同研究などの取り組みがある。この量子計算の仕組みを、DBMS の処理の最適化問題に適用するという研究がスイス連邦工科大学ローザンヌ校で取り組まれている [12]。この研究では、DBMS の最適化を D-wave 社の計算機で実行している。また、NTT では、量子計算のクラウドサービス QNNcloud [13] の提供の準備を進めており、量子計算を一般ユーザでも利用可能な時代になりつつある。

（5）科学技術的課題

データベース系のクラウド技術について

ビッグデータの特徴は Volume（大規模）、Velocity（高い更新頻度）、Variety（多様）の 3V と言われるが、すべてを満たすデータベースエンジンは完成しておらず、中長期的に見て取り組むべき重要課題と言える。

現在の研究開発では、3V の任意の 1 つだけ高いレベルで実現するか、あるいは 2 つの両立を目指す研究が進められている。例えば、時々刻々と変化する大規模データを瞬時に捉えて分析する技術は、Volume と Velocity を両立する一例であり、これはデータベースにおけるトランザクション処理（OLTP）と分析処理（OLAP）を両立するという重要な技術課題である（前述の Hyper project はこの範疇に入る）。また、前述の発見的データ分析は、有益な知識を発見するため膨大で多様な属性群の中から適切な属性を探索する技術であり、Volume と Variety を両立する一例である。異なるスキーマを有する大量なデータベース群をデータ統合して参照利用するケースも Volume と Variety を両立する一例と言える。この例を更に発展させて、時々刻々と変化するデータベースの更新を他のデータベースに即時に伝播して更新を反映する技術は 3 つの V を全て両立する一例であり、チャレンジ性が高い課題である。

機械学習系のクラウド技術について

現在の大きな課題として、学習モデルの再利用の促進とそれに必要となる要素技術の研究を挙げる。現在、全世界的に機械学習のアルゴリズム研究が急速に進んでおり教師データの公開

も一部進んでいるが、学習モデルの再利用がされることが少ないため、全世界で同じ評価実験を行って稼動と電力を無駄に消費している状況にある。また、学習モデルを再利用せずにゼロから学習を行うことは、人間で例えると新生児の状態から学習を行うことに相当するため、無駄が大きいことは明らかである。このため、今後は学習モデルの再利用を進めるための共有化のフレームワークと要素技術開発が必要である。具体的には、共有化された膨大な学習モデル集合の中から適用先に適した学習モデルを選別するデータベースの技術、探索した学習モデルを転用するための転移学習の技術（これは現在でも盛んに行われている）、転移学習後の再学習において破壊的忘却を避ける技術、既存の学習モデルの一部を切り出して再利用する、あるいは複数のモデルを合成して再利用するといった学習モデル変換の技術の開発が重要な課題になると考えられる。

（6）その他の課題

本研究開発領域に限らないが、大学における研究体制の大きな問題は特任雇用の不安定さである。企業に就職すれば充実した退職金制度と年金が受給されるのに対して、特任教員には制度が充実していないため、優秀な学生が大学へ就職することのハードルになっている。

更に、研究開発を推進する上での日本社会における問題として、博士進学希望者が少ないこと、および産学連携による大学から企業への技術移転が少ないことが挙げられる。両方とも多様な原因と対策が考えられ、大学の教育の在り方も再考が必要であるが、大きな原因の一つは人材の流動性が低いことであると考えられる。社会流動性が低いため、博士のような資格の重要性が高くなく、博士号の取得が学生へのモチベーションになりにくい。一方、企業側から見た場合、突出した能力の学生を採用するよりも、早い段階で企業文化に馴染んだ方が望ましいため、博士よりも修士を採用する傾向にある。また、社会流動性が低いため、特に企業から大学あるはその逆の方向に転職する人材が極めて少なく、その結果、産学連携にプラスに働かない状況にあると考えられる。現実的には人材の移動は障壁が高いことから、近年は企業や大学でクロスアポイントメントを導入する兆しが見えてきている。しかし、依然として企業と大学間のクロスアポイントメントの利用はごく少数である。

日本人が世界で活躍するような施策も必要である。義務教育期間で言えば、実用的な英語教育が必要であり、最も効果がある施策としては大学入試の英語を実用的な英語試験に変更する方法が考えられる。博士卒業生に関して言えば、日本の企業では修士と博士とで給与差が大きくないため、海外企業に就職するモチベーションが大きいことはプラスの要因と捉えることはできる。大学の教員に関しては、日本ではサバティカル制度の活用が進んでおらず対策が必要である。

本領域特有の問題点としては、データベース系および機械学習系のクラウド技術に関して、企業および大学共に米国が市場的にも技術的にも先行していることである。E コマースなどの応用分野の事業領域では拮抗しているが、クラウド事業[14]に関しては Amazon をはじめとする海外クラウド企業が日本市場の 7 割を超すシェアを占めてしまっている。また、クラウドの運用コストは電力費が多くを占めるため、低コストな電力が提供される地域のクラウドサービスが有利な傾向にある。クラウド事業が本研究開発領域の出口として重要であるとともに、事業から得られる課題こそが新たな研究開発を駆動する力となることを考慮すると、今後の国家的な施策として、日本企業によるクラウド事業と技術開発を支援する必要があると考えられる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・データベース分野での最難関会議の SIGMOD2017 では、大規模データの高速分析処理に関して、過去最高レベルの 4 人の日本人発表があった。クラウド系の基盤技術に関する発表は全体で増加傾向にあるが、一方、日本からの発表は減少している。機械学習系の最難関会議では、日本の大学および企業からコンスタントに発表されている。
	応用研究・開発	○	→	・Apache Spark のコミッタに新たに 2 名が輩出され合計で 4 名（67 名中）の日本人がコミッタ登録され、ビッグデータ処理基盤の OSS への日本からの貢献が伸びている。 ・Preferred Networks が開発する深層学習エンジン Chainer は市場ランキングが下降ぎみである、 ・日本の電機メーカ、自動車メーカ、研究機関等が大規模データの活用と人工知能を活用した応用に精力的に取り組んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	・米国の大学・企業における基礎研究レベルは高く、データベース系および機械学習系の両面で世界をリードしており、特にデータベース分野での最難会議の約 6 割は米国からの発表である。
	応用研究・開発	◎	→	・分散処理基盤技術の取り組みについては、Web 系の企業が OSS 開発を先導しており米国が圧倒している。OSS 開発コミュニティでは大学との連携が強い。Logicblox や TigerGraph など大規模データ分析のスタートアップ企業も多い。Spark コミュニティは機械学習系の機能強化に取り組んでいる。
欧州	基礎研究	◎	→	・不揮発性メモリー・メニーコア・高速ネットワーク・GPU や FPGA などの最新ハードウェアを活用した DBMS の研究開発が強い。Hyper は Tableu 社に買収されており、産学連携が円滑に進んでいる。
	応用研究・開発	○	→	・SAP の HANA などのカラム指向で主記憶型の DBMS やストリームデータ処理エンジンの取り組みが目立っている。
中国	基礎研究	○	→	・大学が中心となって基礎研究において多く成果を挙げている。難関国際会議への採録も米国・欧州に次いで 3 番目に多い。アルゴリズム系の研究が中心であるが、クラウド系の基盤技術の研究が増加しつつある。 ・現地の優秀な学生を囲い込むため、外資研究機関の現地法人化が進んでおり、Microsoft では、対話エンジンの研究を中心的に取り組んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	・Alibaba が商業的に成功しており（2018 年の世界時価総額において世界 8 位）、E コマースを運用するバックエンドのシステム向けの独自の大規模分散システムを開発し運用している。 ・中国全体としてスタートアップ企業が好調である。例えば、大規模データを分析するためのシステムに関するスタートアップ企業 PingCAP は、高速 DBMS の OSS 製品を軸として事業化を成功させている。
韓国	基礎研究	○	→	・最新ハードウェアを利用した DBMS の高速化などの高速 DBMS の取り組みや、グラフエンジンの取り組みなどが目立っている。
	応用研究・開発	△	→	・SAP は韓国に支店を構え、韓国の大学と共同研究を行い、SAP HANA DBMS の高速化に取り組んでいる。また、サムソンは大学と連携することで、AI 教育に力を入れて始めている。

（8）参考文献

1）AI で早期胃がん領域の高精度検出に成功 早期発見・領域検出で早期治療に大きく貢献 https://www.ncc.go.jp/jp/information/pr_release/2018/0721/index.html
2）IDC、国内 BDA テクノロジー／サービス市場予測を発表、https://www.idcjapan.co.jp/Press/Current/20180827Apr.html
3）Apache Spark, Lightning-fast unified analytics engine, https://spark.apache.org/
4）FLARE, Scale up Apache Spark with Native Compilation and set your Data on Fire!, https://flaredata.github.io/
5）HyPer – A Hybrid OLTP&OLAP High Performance DBMS, https://hyper-db.de/
6）Project Triptych , https://adalabucsd.github.io/triptych.html
7）DataWrangler, http://vis.stanford.edu/wrangler/

8）zenvisage, A System for Effortless Visual Exploration of Large Datasets, http://zenvisage.github.io/
9）HypDB, Bias in OLAP Queries: Detection, Explanation, and Removal, http://db.cs.washington.edu/projects/hypdb/
10）Cloud AutoML, https://cloud.google.com/automl/
11）Create ML, Create machine learning models for use in your app., https://developer.apple.com/documentation/createml
12）Multiple Query Optimization on the D-Wave 2X Adiabatic Quantum Computer, PVLDB, 2016
13）QNNcloud, https://qnncloud.com/index-jp.html
14）MMRI、国内クラウド市場は 2019 年度に 2 兆円へ成長、https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=37

２．４．５　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

新しいコンピューティングメカニズムやネットワークエッジにおけるコンピューティングを実現するIoT/CPSデバイスによって生成されるデータを活用し、コンピューティングサービスを実現するプラットフォームとなるのがサービスプラットフォームである。サービスプラットフォームはサービスの受益者のコミュニティを形成し、サービス提供者をマッチングして相互の価値交換を行う取引を円滑にする。サービスプラットフォームは巨大なので、社会システムへの影響が大きい。

（２）キーワード

サービスプラットフォーム、5G、エッジコンピューティング、限界費用ゼロ

（３）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

サービスプラットフォームはサービスの提供者と消費者、プラットフォーマーの3アクターモデルである。サービスや物品のマーケットプレース、ペイメントサービス、SNSやゲームなどのサービス交換型のプラットフォームと、YouTubeのようなデジタルコンテンツ配信やアプリケーション開発を行うSFDC(Salesforce dot com)やAndroid/GooglePlayなどのようなメーカー型のプラットフォームがある。マッチアップによる取扱手数料やゲームアイテムの販売などの有償サービスと、広告宣伝費に転嫁するフリーミアムのビジネスモデルが混在している。

これまでのアプリケーションソフトウェアの設計は商品検索、受発注処理、ポイント計算などの機能設計が中心だった。サービスプラットフォームのアプリケーションソフトウェアの設計で重要なのはユーザーのコンテクストを理解しプラットフォームへの帰属を拘束する戦略を実装することである[1)]。機能を提供するソフトウェアは、コピーや模倣を通じてコモディティ化しやすく、同じような機能を利用する利用者が増えるほど機能の価値が下がってしまう。最終的には機能モジュールはオープンソースによるライセンス解放という道を辿ることも多い。一方、サービスプラットフォームには、利用者が増えれば増えるほど他の利用者の利便性も向上するというネットワーク効果があり、この効果はコピーされにくい。サービス提供者と消費者の共創が引き起こされ、つねにより良いサービスがプラットフォームに供給される循環が、両者の価値交換を円滑にする。また、旧来の冗長なプロセスがバイパスされるなどコア取引のフリクションを減らすことで利用者を誘引する。比較的スケールの大きなビジネスを実装する場合、サービスを企画する提供者と消費者の間でサービスの質や内容を直接調整することは難しいが、サービスプラットフォームはユーザーの性向、動向を把握しサービス提供者に対応を促して調整問題を解決することで、サービスプラットフォームへの帰属を拘束する[2)]。

ネットワーク効果を引き起こしプラットフォームに参加者を滞在させるためには、ユーザーの性向動向を詳細に知るデジタルマーケティングの手法が欠かせない。最新のWEBアプリケーションはユーザーのブラウザー上での行動を監視・収集してパーソナルプロファイルデータを作成する[3)]。

［研究開発の動向］

サービスプラットフォームは多くの人々を引きつけることによってその存在価値が維持される。したがって、サービスプラットフォームの提供する経済性や多様性、利便性も重要であるが、ユーザーにとっての信頼性がプラットフォームを選定する際の重要なファクターになる。サービスの継続性や可用性などの信頼性はすでに多くの研究開発がなされているが、ここではその内容の信頼性、信頼を保証するネットワークに関わる動向について述べる。

内容の信頼性については、機械学習におけるバイアスが問題になることがある。サービスプラットフォームの収集するデータには多くのバイアスが含まれる。Google 写真検索で”Grandmother”を検索すると、米国の人種的な人口構成に反してその多くは幸せそうに笑う白人女性である。データ収集時の現実社会とのずれは、人種バイアスであるとともにシェアされるシーンが幸せなシーンに偏りやすいという誘因も働いている。こうした記録のバイアスは実行時のデータが学習に利用されると増幅し、共振しやすい。さらにバイアスはデータだけではなくアルゴリズムにも潜んでいる。機械学習をバックエンドにした判断システムは特定の KPI に対して最適化する傾向にあり、その意図が政治的なものであろうと、単なる製品の広告であろうと関係なく、ただ「サイトの滞在時間を長くするように」というようなアルゴリズムにしたがってサイトのユーザーを偏った思想に誘導してしまう。それは広告主やアルゴリズムの設計者の意図にも関係なく、かつアルゴリズムの判断基準すら判然としない。しかし、巨大なデータと高速な並列処理によって実現される深層学習や機械学習に基づく機械の判断の正邪を人間個人が判断することは困難であり、人間は機械の判断に盲目的に従ってしまう。Human in the Loop のような牧歌的な対応では、サービスプラットフォームの判断を正常化することはできないため、そこにも機械的な対応が求められる。

人工知能のモデルやアルゴリズムの検定には、バイアスのあるデータセットとバイアスの無いデータセットを準備してその出力を調査することで (a) 判断バイアスのあるシステム、(b) バイアスのデータに弱いシステム、(c) バイアスのデータにも耐性のあるシステムというような三段階の評価フレームワーク [4] をシステムに付随させる。また、データセットのバイアスを低減させる方法として、機械学習のデータセットに対してバイアスを含んだ出力が少なくなるように前処理を行う方法が考えられている。バイアスのあるデータにおいて、バイアスのない出力を増やし、バイアスのある出力を抑制するような関係性を最適化問題として定式化する方法などが考案されている [5]。

クラウドコンピューティングで提供されるサービスにはモバイルネットワークで利用されるものが多い。SNS や EC あるいは情報検索もスマートフォンでの利用が一般的である。今後、自動運転などのサービスが行われるようになると、さらなるネットワークの高速化、大容量化、大規模化が必要になる。移動通信システムは、1980 年代にアナログ方式の第 1 世代が登場した後、1990 年代にはデジタル方式の第 2 世代、世界共通方式である第 3 世代、さらに第 4 世代が導入されるなど、10 年毎に進化し続けている。最大通信速度は 30 年間で約 10,000 倍に高速化した。しかし、2021 年までに、モバイル接続デバイスの数が 116 億台（M2M モジュールを含む）になると予想される。この数字は、同時期の世界の推計人口（78 億人）を上回り、世界中のモバイル端末によるデータ トラフィック量は 2016 年から 2021 年にかけて 7 倍に増加して、49.0 エクサバイト / 月に達すると予想されている [6]。

そこで、2020 年には、次世代の移動通信システムである「第 5 世代移動通信システム（5G）」

の実現が期待されている。5G においては以下のような性能目標が立てられている [7]。

① 拡張モバイルブロードバンド (enhanced Mobile BroadBand)
ピークのデータ帯域 20Gbps、ユーザー体感速度 100Mbps
② 大規模マシンタイプ通信 (massive Machine Type Communication)
単位面積接続数が 100 万デバイス / ㎢
③ 超高信頼・低遅延通信 (Ultra Reliable and Low Latency Communication)
無線区間において 1msec の低遅延

新たなモバイルネットワークの出現により、高精細映像と低遅延ネットワークによる遠隔診療や建設機械の遠隔制御、臨場感のあるスポーツ観戦、さらに、自動運転への適用も検討されている。自動車や道路・建造物などの交通インフラに搭載したセンサを活用し、交通状況のリアルタイムな情報収集・解析を行うことによって、高度な運転支援、移動支援を実現すると期待されている。

一方、多様な応用を実現する 5G ネットワークを支えるバックボーンネットワークは、従来の光ネットワークでは限界にきており、より大量のデータを物理的に同じサイズの光ケーブルで配信できるためのマルチコア・マルチモード通信技術やマルチコア・マルチモード一括光スイッチなど超大容量マルチコアネットワークシステムの研究開発が重要である。

（4）注目動向

生活のなかに深く入り込んできたサービスプラットフォームは、いまや無くてはならないものになった。なかでも GAFA（Google、Apple、Facebook、Amazon）は巨大なプラットフォームを形づくり、今や Google なしで医者も選べないしクリニックに行き着くことすらできないという状況もあり得る。Facebook や Instagram で毎日のできごとで友人と心を通わせ、Amazon は小売、物流、エンターテイメント、IT、金融と支配力を拡大し私たちの生活になくてはならないものになっている。米ニューヨーク大学スターン経営大学院　スコット・ギャロウェイ教授は近著 "The Four: The Hidden DNA of Amazon, Apple, Facebook, and Google" において、過去 20 年の間に四つのテックジャイアンツは歴史上の如何なる存在よりも巨大になり、現代の独占（Modern Monopolies）を果たしていると述べた [8]。GAFA が基盤としているインターネット事業において彼らは強力なプライベート CDN のバックボーンを利用したタダ乗り事業者＝ OTT（Over the Top）と言われてきたが、いまや消費者の支持を得たコンテンツには逆らうことができない。

金盾（Great Firewall）によって GAFA の侵攻を食い止めた中国では、Baidu や Alibaba のような GAFA に代わるプラットフォームが育っている。国内では利用者がより深いパーソナル情報をアップロードするサービスの共創 [9] が起こり、新しいペイメントサービスや芝麻信用のような個人の信用レイティングが社会生活を円滑にしている。こうした社会形成はプライバシーという観点でビッグブラザーであると思われがちだが、サービスプラットフォームの視点から見ると「より良い生活を得るために情報を提供し、適切なサービスを受け取る」という行為であり、西側諸国で Google や Amazon を利用している利用者心理と変わらない。

インターネット黎明期にあったオープンで公平なピアツーピアネットワークの文化は、現代

の強力なサービスプラットフォームによってインターネット上のデータが独占されたため、一極集中した構造になっている。古きインターネットはノード間の情報接続を実現するハイパーリンクと、情報のリッチな表現をはたすHTML、その世界を覗くWEBブラウザーによって互いに平等なピアツーピアのネットワークを構成してきた。しかし現代のGoogleは検索のクローリングを続けながら、WEBサーバー間のリンクの繋がり、HTMLによって表現された情報の意味、セマンティックグラフをKnowledge Graphに集約し、WEB検索の枠を超えインターネットに存在している情報のセマンティックを集中管理している。また、WEBブラウザーに仕込まれたトラッキングスニペットはブラウザー上のアクションやGPSなどのユーザーのコンテクスト、行動データを集約してパーソナルプロファイルデータを集約している。こうして、情報のゲートキーパーの役割を果たしながら広告媒体の莫大な利益を吸い上げている。GoogleやAmazonのようなインターネットの巨大なサービスプラットフォームは、インターネット全体を支配する巨大帝国となっている。

サービスプラットフォームの大量のデータとユーザー情報は経済活動の極めて高い効率化をもたらし生産性を向上させる。そこでは、データの価値が生まれる規模（十分な相関や特徴量のとれる量）、クリティカルマスに達するオーディエンス・コミュニティを構築することでネットワーク外部化する価値を生み出す[10]。プラットフォーマーはオーディエンスのスイッチングコストを高めつつ、そこで取引されるトランザクションのフリクションを減らしていくことでビジネスを効率化する。デジタル情報を扱う情報商品の流通コストはゼロに近くても情報の開発コストはゼロではない。サービスプラットフォームは参加者をサービス提供者にすることでその情報の開発コストもゼロにする。YouTubeはプロシューマーが映像を作り、Uberは運転者をリソースとする調達のオンデマンド化をもたらす。WeChatPayはユーザーが預けたキャッシュフローを活用した運用によって、より複雑なマネタイズを実現している。サービスプラットフォームのビジネスモデルでは、限界費用は常にゼロに近づいている。

現代のフリーミアムプラットフォームのアドテクビジネスが経済に与える影響を過小評価してはいけない。プラットフォーマーが吸い込んでいるのは現実社会の広告宣伝費だけではなく、ECへの転換など商流の相当部分を占める販売管理費全体である。経済活動の全てを効率化し、冗長なプロセスをバイパスすることで、企業は営業部門も物流部門もデータだけに依存する最適化されたものになり、物理的な営業所も営業社員も存在しなくなる。

サービスプラットフォームによる生産性の増大は正帰還であるため、富は偏在し、限界費用はゼロに近づいていく[11]。デジタル世界の資源は無限に思えるようなデータであるため独占がいままで見たことのないレベルに達することが予想できる。GAFAの富の独占が行き過ぎて資本主義すら壊れてしまうのではないかということを、おそらくGAFA自体もコントロールできないと思われる。

Amazonは書籍の通信販売から始まったが、いまや日用品から衣料品、食品にまで商材を拡大し、さらに実店舗でのビジネスまで行っている。さらにそのバックエンドとしての流通においても非常に大きなビジネス展開をしている。自身のコンピューティングパワーを用いて、世界でも最大級のクラウドサービスも実現している。一方のGoogleもパソコンにおける検索サービスと広告ビジネスから端を発したが、いまや携帯電話のプラットフォームであるAndroidを押さえ、自動運転やロボットの開発にも乗り出している。両者は音声プラットフォームで激しい争いを繰り広げており、それは他の産業セクターも巻き込んでいる。これらの背景にはデ

ータの独占という状況があり、誰もその制御が行えないという問題がある。

ヨーロッパにおいてはGDPR（General Data Protection Rule）を発効し、彼らの独走を止めようとしている。我が国においても、独占禁止法による規制の導入が検討されている。

（5）科学技術的課題

人工知能に関しては、詳細は他の区分に譲るが、プラットフォームとして社会のインフラになるためには、公正・公平・透明性の確保が重要である。そのためにも説明可能な人工知能や、人工知能プログラムの品質保証なども重要な課題である。

５Gにおいては、無線通信技術の研究開発はもちろん必須であるが、ネットワーク構築・運用技術もともに研究開発をするべきである。さらに、エッジコンピューティングの効果的な利用方法や、さまざまなビジネスのプラットフォームとして利用されるためのビジネス開発の研究開発も必要であろう。

（6）その他の課題

新たなサービスの創出のためには、既存の規制の緩和と新たな規制導入の検討や促進策、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、適切な規制緩和が求められる。

一方、GAFAに対するGDPRのように、サービスプラットフォームが寡占化し、暴走することがないように、新規制の導入も検討しなければならない。サービスプラットフォームはすでにグローバル化しており、徴税やプライバシー保護、商習慣などにおいて国際的な連携・協調が必要である。

価値の再配分の透明性、公平性を担保するしくみ

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。ここではブロックチェーン技術の利活用が期待されるが、規制とのバランスが重要になってくる。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	・データ解析の基礎的技術、大量データの処理技術などは継続的に進んでいる。しかしディープラーニング等に利用される国産 GPU や FPGA はなく、専用チップの開発も進まない。 ・プラットフォーム独占や中立性の基礎的研究が欠けている。 ・個人情報の扱いに関する先行研究もない。
	応用研究・開発	△	↘	・プラットフォームのデータ解析に展開する実装は進んでいない。 ・新しいデータ活用、独自技術なども進まない。プライバシー議論が先行し、データ活用が進まない。 ・人工知能開発を闇雲に規制する議論があり、人材が散逸している。 ・5G URLLC/mMTC は先送りされている。 ・人工知能のエッジコンピューター化はすすんでいない。 ・ブロックチェーン実装は投機的な仮想通貨に偏っている。 ・ペイメントサービスは黎明期にあり、シェアは依然として些少である。 ・国民 ID（マイナンバー）も利用の広がりを見せていない。
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ェ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、自動運転などの先端研究も先行している。
	応用研究・開発	◎	→	・GE が Predix で産業界のサービスプラットフォームに挑戦したが他要因で躓いている。 ・GAFA の独占は強く、Uber AirBnB と続いている。Netflix、Amazon、Apple の放送通信の OTT(Over the Top) 事業参入が盛んでコンシューマータッチポイントを独占しようとしている。ケーブルテレビの契約をやめる動き（コードカット）も多くなっている。 ・クレジットカードと Paypal を押しのけた新しいペイメントは生まれにくい。 ・5G に対する動きは弱い。
欧州	基礎研究	◎	→	・基礎的なソフトウェア技術は米国依存。自動運転技術の開発は活発である。 ・5G の URLLC/mMTC に積極的。情報のオーナーシップに関わる議論を GDPR で実装、プラットフォーム規制の基礎的機能を研究。
	応用研究・開発	○	→	・GAFA に対する独占、プライバシー規制を先行させ、制裁金による徴税機能を果たしている。 ・一部の電子政府で国民 ID システムによる行政システムの開放などの先行事例がある。 ・ブロックチェーンを用いた貿易データ管理などスマートコントラクトの実装例もある。
中国	基礎研究	◎	↗	・データ処理や人工知能研究、自動運転技術などの研究も進み、シリコンバレーに追いつく勢いである。 ・5G については機材メーカーを中心に積極的でミリ波利用などで先行し、URLLC/mMTC に対しても積極的な実装を進めようとしている。
	応用研究・開発	◎	↗	・GAFA の侵入を阻む金盾の内部でサービスプラットフォームの構築が進んでいる。 ・個人データの共創が進み、プライバシーに関する異なる価値観を創出している。 ・ペイメントサービスは先行して普及しており、世の中の動きは早い。 ・ブロックチェーンはビットコインのマイニングが中心でスマートコントラクトなどは目立たない。

（8）参考文献

1）安宅和人 2017「経済産業省産業構造審議会新産業構造部会 February 13, 2017” シン・ニホン” Ai x データ時代における日本の再生と人材育成」http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/013_06_00.pdf
2）アレックス・モザド（著), ニコラス・L・ジョンソン（著), 藤原朝子（翻訳） 2018『プラットフォーム革命――経済を支配するビジネスモデルはどう機能し、どう作られるのか』英治出版
3）山下克司 2017『“3.2.3 モノ・ヒト・コトのスアートなサービス化技術 P166-186』研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野（2017 年）CRDS 科学技術振興機構
4）Biplav Srivastava and Francesca Rossi, “Towards Composable Bias Rating of AI

Services,”
AAAI/ACM Conference on Artificial Intelligence, Ethics, and Society http://www.aies-conference.com/wp-content/papers/main/AIES_2018_paper_65.pdf

5）F.P. Calmon*1, D. Wei, B. Vinamuri, K. N. Ramamurthy, and K. R. Varshney, “Optimized Pre-Processing for Discrimination Prevention,” 31st Annual Conference on Neural Information Processing System http://papers.nips.cc/paper/6988-optimized-pre-processing-for-discrimination-prevention.pdf

6）Cisco Visual Networking Index、https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html

7）「第５世代移動通信システム（５G）の技術的条件」、新世代モバイル通信システム委員会 http://www.soumu.go.jp/main_content/000556416.pdf

8）Scott Galloway 2017 “The Four: The Hidden DNA of Amazon, Apple, Facebook and Google” Bantam Press (2017/10/5)

9）Spohrer, J., Anderson, L., Pass, N., and Ager, T.（2008）“Service science and service-dominant logic,” Otago Forum 2: Academic Papers. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.3642&rep=rep1&type=pdf

10）アルスタイン・マーシャル W. , パーカー・ジェフリー G., チョーダリー・サンギート・ポール , 有賀裕子（訳）(2016)「パイプライン型事業から脱却せよ プラットフォーム革命」『Harvard Business Review 2016 年 10 月号』p27-38 ダイヤモンド社

11）丸山俊一 , NHK「欲望の資本主義」制作班 , “欲望の資本主義” 東洋経済新聞社 , 2017

２．４．６　IoT アーキテクチャ

（１）研究開発領域の定義

膨大な数のセンサーや端末がネットワークに接続される IoT 時代において、実世界とサイバー世界を高度に融合するコンピューティング環境を実現するための技術である。

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、それらに作用や情報を与えるアクチュエーション技術、デバイスそのものの構成法、認識処理方式、作用や表示方式等の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、ビッグデータ分析を可能にする機械学習 /AI 技術が含まれている。

ここでは、実世界との境界（エッジ）にあって Society 5.0 を実現する情報流の源でありかつ作用点としての観点から関連する技術、動向と課題を俯瞰する。

（２）キーワード

エッジコンピューティング、フォグコンピューティング、クラウドコンピューティング、モバイルエッジコンピューティング、5G、ストリームコンピューティング、Internet of Things、スマートセンサ、エネルギーハーベスト、VR、ウェアラブル、パーソナルデータ / 個人情報の保護 / 活用、アクチュエーション

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

膨大な数のモノがネットワークに接続されるようになると [1]、現在のクラウドコンピューティングはネットワークに起因する遅延、様々なデバイスへの対応、地域性・局所性への対応などの観点で必ずしも最適な解とはならなくなる。モノがクラウドに接続される形態に加えて、エッジ側に機能追加することも必要となる。

例えば、スマートグリッドにおける高速デマンドレスポンス [2] では、数秒オーダーの速度で需要側に設置されたスマートメータと需給調整を行うことが必要となる。膨大な数のスマートメーター―からデータを収集して、需給調整方法を計算し、需給側に対して制御を行うことを考えると、集中管理のクラウドでは遅延の制約を満たすことが難しくなる。エッジ側とクラウド側とが連携しながら処理を行う仕組みが必要となる。

実世界と接し、そこから様々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、実世界に接するエッジでのスマートコンピューティング技術、エッジで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制御するクラウド技術と分析する AI に代表される認識技術、そしてエッジとクラウドをつなげる様々な情報通信技術が本領域には含まれる。IoT アーキテクチャは、これらの広範な技術を統合した上に成り立ち、実世界と情報空間の間に位置し、利用者にとって最も身近に感じられる重要な位置づけにある。

［研究開発の動向］

コンピューティング分野は、時代とともに何度もパラダイムシフトを繰り返してきた。1960年代にはユーティリティコンピューティングという概念が生まれ[3]、その後、クラスターコンピューティング、さらに1990年代に入ると、ユビキタスコンピューティングの考え方が登場し、ヒューマンセントリックでコンテクストアウェアなサービスが創出された。また、インターネット上の多くの計算資源を結びつけ、ひとつの複合したコンピュータシステムとしてサービスを提供するグリッドコンピューティングも登場した。2000年代に入ってからは、大規模データセンターを背景としたクラウドコンピューティングが世界を席巻した。2000年代後半からモバイルクラウドコンピューティングが唱えられはじめ、今のフォグ／エッジコンピューティングへと発展している。

これらの変遷の背景には、エンドユーザの要求とハードウェアの進化がある。フォグ／エッジコンピューティングが登場した背景も、エンドユーザの要求の変化とデバイスの高性能化にある。クラウドコンピューティングでは通信遅延が大きく、モビリティサポートへの対応が不十分、大きな通信オーバーヘッド、コンテキストアウェアネス対応が困難などといった課題を抱えていた。

通信技術

5Gの登場が現実味を帯びてきていることもあり、産業界においてもフォグ／　エッジコンピューティング分野での動きが活発になりつつある。5Gの持つ「低遅延」、「大容量」という特徴を生かして、アプリケーションの応答性の改善や、ユーザエクスペリエンスの向上などが期待されている。OpenFog Consortium[4], OpenCORD initiative[5], ETSI Mobile Edge Computing(MEC)[6], Field System[7], Edge Cross[8]などのコンソーシアムも設立され、それぞれが主導権を獲得すべく活動をしている。

BLE（Bluetooth Low Energy）や920MHz帯を活用するWi-SANなどの近距離省電力で小規模端末間通信を対象とするもの、さらにLPWA（Low Power Wide Area）と呼ばれるノイズレベルのサブGHz帯の無線信号を低ビットレート、超低消費電力でサポートする広域無線網も注目されている[9]。

センシング技術

既存のセンシング機器はMEMS(Micro Electro Mechanical Systems）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。メインプロセッサが休眠できるアーキテクチャの採用によって省電力化が進められ、携帯端末上でのこれらの個々のセンシング機能や通信機能のオンオフを気にする必要が低下している。

近年のスマートフォンではARMのbig.LITTLEアーキテクチャと呼ばれる高性能コアと低性能コアを同一ダイ上に混載して、常時センシングを止めずにかつ省電力性能を上げる方式が一般化し、ARMはそれを更にDynamicIQ技術[10]に発展させた。Appleのモーションコプロセッサは低性能で省電力コアをセンサーハブとしてメインプロセッサ外に独立させた方式で、センサデータの一次処理を担うなどの役割ももつ。

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圧縮することができる。また、認識された情

報をクラウドに上げることなく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[11)]。

機械学習技術

携帯端末での機械学習機能では、iOS の CoreML や Google の TensorFlow とその携帯端末版である TensorFlow Lite を内蔵する ML Kit は、整備されてきたハードウェアをサポートし現実的な文字や画像などの認識機能を備えつつある。いずれも機械学習の処理としては認識フェーズをサポートしているが、学習フェーズはより大量の計算機リソースを必要とするためにクラウドベースの対応となっている。Google ではこのために ML Kit を mBaaS（mobile Backend as a Service）である Firebase の一部として実装している。　さらに ML Kit は Android/iOS ともにサポートしており、今後の爆発的な普及が予想される[12)]。

アクチュエーション技術

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、機械可読マーカー、タッチデバイスに導入された Apple の Taptic Engine などの力覚生成機器はウェアラブル機器のインタフェースとしても多用されるようになってきており、今後は広範囲に力覚を用いた UI が適用されていくと思われる。没入型の VR 機器を用いた入出力一体型インタフェースも Oculus Go などのように小型化しスマートフォンを必要としないものが出荷されており、既に普及期に入り始めたといえる。

電力供給技術

IoT のエッジでの小型端末に必須の要素である電力供給をいかに実装するかは常に課題である。大容量二次電池であるリチウムイオン電池、加工成形に利するリチウムポリマー電池は成熟期にあり、全固体電池技術によるさらなる高性能化が期待され燃料電池車をとばして一気に電気自動車への移行が急激に加速した[13)]。今後は電気二重層コンデンサ（Electric double-layer capacitor、EDLC）やリチウムイオンキャパシターなどの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ターの開発に注目が集まっている。環境発電技術では光発電以外に、レクテナによる電磁波や近距離での無線給電技術、音や振動による発電の研究も実用間近である。

ウェアラブル技術

ウェ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[14)]。課題は電力供給、部品清掃、製品寿命のアンバランスなどがあげられる。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

フォグ／エッジコンピューティング分野の特徴は、プレイヤーの多様化である。もともとは、シスコがフォグコンピューティングを 2012 年に提唱[15)]したように、IT 企業がフォグ／エッ

ジコンピューティングを主導してきた。これに対して、昨今は、通信事業者や製造業などからフォグ／エッジコンピューティングに参入するプレイヤーが増えてきている。通信事業者からは Mobile Edge Computing(MEC)、製造業からは GE の Industrial Internet Consortium[16]、ファナックの Field System[7]、三菱電機の Edge Cross[8] などである。

このような流れの中で求められるものは、多種多様なアプリケーションの要件を理解することに加えて、これらの要件を抽象化してフォグ／エッジコンピューティングの設計につなげていくことである。現在は、個別のアプリケーションに特化したフォグ／エッジコンピューティングにとどまっている。特化型フォグ／エッジコンピューティングの開発を通して要件を一つ一つ積み重ねていきながら、抽象化につなげ、汎用的なフォグ／エッジコンピューティング基盤の構築につなげていかなければいけない。

また、IoT データを単一システム内、あるいは、複数のシステム間をまたいで流通させるためのメタデータの記述や流通プロトコルが重要である。インターネットが TCP/IP によって発展したように IoT システムのさらなる発展には、汎用的な流通プロトコル (MQTT, CoAP, HTTP REST, SOX, SPAQL) の確立が重要な課題である。

センシングの注目動向としては深度センサーの利用の多様化である。自動運転用の LiDAR に端を発し、商用ベースでは Kinect、Google の Project Tango、Apple の FaceID など、ますます小型化と用途の多様化が目立っている。今後は多眼のカメラレンズ搭載機器がこのような立体空間認識機能を備えていくはずである。

モビリティの大きな動向としては、無人タクシーや物流の先導追従運転など自動運転の社会への導入が始まり、ポスト自動運転の世界を考えた動きが始まっていることであろう。トヨタの e-Palette を始めとするモビリティをプラットフォーム化する動き [17] は MaaS(Mobility as a Service) を実現しようとする交通業界全体からさまざまな提案がでてくるものと思われる。

個人情報データは保護すべき対象とされるが、それを安心して活用できる基盤として情報銀行という仕組みが立ち上がりつつある。個人がその健康情報データや購買データを信託し、それを非識別化加工を実施した上で、活用するサービス企業とやりとりし、銀行のように一部の利息が個人情報提供者に戻ってくる仕組みである。情報銀行はこれらの個人情報を中央集権的に管理する仕組みであるが、一方では PLR (Personal Life Repository) 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) の仕組みの実証も始まっている [18]。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。

自動車保険の分野でもセンシングを活用し、あら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 [19]。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

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。加古川市は町の見守りサービスの基盤を「かこがわアプリ」と 900 機の見守りカメラ、公用車および日本郵政の配達者に装備した V2X 機器で実現し、子供や高齢者が携帯する BLE タグ位置を検出できるサービス

を実施している[20]。ここで注目すべきはこれら見守りサービスを実施する民間3社で互いの見守り網となる機器の利用を相乗りさせることに成功していることである。このようなアライアンスは今後も拡大していくことが期待できる。

最新のセンシング技術として注目される深度センサー利用はGoogleのProject Tangoで深度センサーが用いられた端末が普及する兆しがあったが、光学カメラベースに技術を移転しVR/AR技術の携帯端末での利用・普及が始まっている。特殊な端末から、光学カメラというほとんどの携帯端末が有するセンサーに軸足を変更したことによって、VR/AR技術は数億の端末によって利用可能な技術に生まれ変りつつある。特に高級なスマートフォンにおいては、光学センサーとして複眼のレンズを搭載しており、既に簡易に高度かつ精細で、焦点や光量の破綻のない写真撮影が可能になっている。これが空間認識に利用され、VR/AR技術がProject Tangoレベルの点群データを活用できるにようになるのも遠くないと考えられる。

Googleの Tensor Processing Unitに端を発する機械学習専用プロセッサも近年では携帯端末に搭載されるレベルになってきている。中国の麒麟、Appleの A12bionicなどは、プロセッサダイの半分近くをニューラルネットワーク処理用の専用プロセッサが占めている。これまではGPUを用いていたAI処理計算に対して、より効率が良く演算器数の多い専用プロセッサが追加されていくと思われる。すでに製造工程におけるダークシリコン問題や多大な生産コスト増などで汎用プロセッサの純粋な意味でのムーアの法則は崩壊している。いよいよポストムーアの法則時代の個性的なプロセッサ開発や新しいアーキテクチャを探求していく試みが始まっているといえる[21]。

[コンソーシアム]

以下のような様々なコンソーシアムが立ち上がり、業界を横断して連携・競争が激しくなっている。

IoT推進コンソーシアム[22]

総務省と経産省が中心となり、産学官が参画・連携し、① IoTに関する技術の開発・実証及び標準化等の推進、② IoTに関する各種プロジェクトの創出及び当該プロジェクトの実施に必要となる規制改革等の提言等を推進している。設立当初は700社が参加していたが、2018年現在で3,600社が参加している。

スマートIoT推進フォーラム[23]

上記「IoT推進コンソーシアム」の下に、IoT関係の技術開発・実証を推進する技術開発ワーキング・グループとして設置された。IoT・BD・AI等に関する技術の開発・実証の推進、IoT・BD・AI等に関する技術の標準化や国際展開等を推進している。

oneM2M[24]

さまざまなハードウェアやソフトウェアに容易に埋め込むことができ、現場の無数のデバイスを世界中のM2Mアプリケーションサーバーに接続することができる、共通のM2Mサービス層に必要な技術仕様を開発することを目標に、TTCなど世界の主要な標準化団体が設立した団体である。

AllSeen Alliance

Qualcom が開発した通信規格を中心として、IoT 機器の相互接続を実現することを目的として、2013 年に設立された。その後、もう一つの IoT フレームワーク推進団体である Open Connectivity Foundation[25] と協力して一つの IoT 標準としてオープンソースプロジェクト IoTivity を推進している。

OpenFog Consortium[4]

効率的かつ信頼性のあるネットワークとスマートな端末のためのフレームワークの構築を目指し、ネットワーク遅延、移動端末への対応、通信帯域障壁問題、システムとクライアントの分散調整などの技術課題に取り組んでいる。ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft, プリンストン大学が 2015 年に設立したコンソーシアム。

Central Office Re-architected as a Datacenter[5]

マイクロデータセンターの構築を目指したコンソーシアム。AT&T, SK Tlecom, Verizon, China Unicom, NTT コミュニケーションなどが参画。

ETSI MobÕe Edge Computing(MEC)[6]

無線アクセスネットワーク (RAN) にエッジコンピューティング機能配備を目指して、エッジサーバについての技術要件とアーキテクチャの議論を行っている。通信キャリアや装置開発ベンダ、OTT などが参加している。

FIELD System[7]

ファナックが開発する製造業向けエッジコンピューティングプラットフォーム。Cisco, Rockwell Automation, Preferred Networks, NTT, NVIDIA, 日立製作所などが参画。

Edge Cross[8]

FA 向けエッジコンピューティング。アドバンテック、オムロン、NEC、日本 IBM、日本オラクルが参加し、三菱電機が幹事会社となっている。

Automotive Edge Computing Consortium[26]

自動車向けエッジコンピューティング。Intel、Ericsson、デンソー、トヨタ自動車、トヨタ IT 開発センター、NTT、NTT ドコモなどが参加している。

Edge Computing Consortium[27]

OT と IT の協調を目指すエッジコンピューティング。Huawei、Shenyang Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences，China Academy of Information and Communications Technology，Intel，ARM，iSoftStone が参画している。

（5）科学技術的課題

フォグ／エッジコンピューティング分野での研究開発領域は、大きく「クラウドーフォグ／エッジ連携機構」「フォグ／エッジデバイスの仮想化」「フォグ／エッジでのアプリケーション開発環境」「フォグ／エッジデバイス、ネットワークでの資源管理」「ストリームコンピューティング」「セキュリティとプライバシー」とに分けることができる。

クラウドーフォグ／エッジ連携機構

第一の課題は、フォグ／エッジノードとクラウドノードとの間でタスクやサービスをどのように分割するかにある。タスク分割、タスク割当問題は、分散システムや並列コンピューティングなどの分野では多くの研究がなされてきたが、フォグ／エッジ環境でのフレームワークは残念ながら未だ存在しない。資源リッチなクラウドから、資源制約のあるフォグ／エッジに、性能やプライバシーを考慮しながらタスクを効率的にオフロードするのは大きなチャレンジである。

第二の課題は、フォグ／エッジコンピューティングでのサービス指向コンピューティングの難しさにある。フォグ／エッジコンピューティングは、センサー、アクチュエータ、エッジデバイス、クラウドサーバそれぞれが多様であり、それらが分散しているとともに、アプリケーションも多種多様であるため、サービスのセマンティクスのあり方が問題になる。

第三の課題は、ドメイン間連携にある。フォグ／エッジコンピューティングは、単一の事業者がクラウドからフォグ／エッジまで統合してサービス提供するとは限らない。そのため、エンドツーエンドでサービス提供を行うためには、ドメイン間での連携が必須となる。多種多様な要件を満たすことのできるドメイン間連携機構は大きなチャレンジである。

フォグ／エッジデバイスの仮想化

第一の課題は、フォグ／エッジデバイス向けのVM(Virtual Machine)やコンテナ技術である。フォグ／エッジデバイスは資源制約の中で動作させなければいけないため、従来のハイパーバイザやコンテナ管理ソフトが使えるとは限らない。フォグ／エッジ向けのハイパーバイザ、コンテナ管理ソフトの開発が必要である。

第二の課題は、VMやコンテナのマイグレーションである。フェールセーフでフォールトトレラントなシステムを実現するためには、マイグレーションが必須である。IoTデバイスの移動にあたってもサービスマイグレーションが必要となる。すでにクラウド環境においては、ライブマイグレーションが実現されているが、同様のことが資源的な制約のあるフォグ／エッジでも行えるような環境が必要になる。

第三の課題は、マイクロサービスを実行するコンテナの配置にある。制約のある資源環境下において、所望のサービス要件を満たすためのコンテナの最適配置は重要な課題である。

フォグ／エッジでのアプリケーション開発環境

ドメイン特化型のアプリケーション開発環境は既に存在するものの、汎用型のアプリケーション開発環境は存在しない。ソフトウェア定義やソフトウェア制御技術を使うことで、汎用型の開発環境を実現できる可能性がある。アプリケーションからサービスとサービス依存グラフを抽出し、サービスをフォグ／エッジデバイスに展開するミドルウェアの開発が必要である。

フォグ／エッジデバイス、ネットワークでの資源管理

フォグ／エッジデバイスは資源制約があるため、CPU、メモリ、ネットワーク、センサー、アクチュエータなどの資源を適切に分配しなければいけない。このためには、フォグ／エッジデバイスの資源を効率よく推定する機構、公平にかつ所望の QoS(Quality of Service) を満たすように資源を割り当てる機構、SDN(Software Defined Network) を用いてネットワーク資源を適切に割り当てる機構などの開発が必須である。

ストリームコンピューティング

多種多様な IoT デバイスから収集した膨大な異種データから、重要な特徴を抽出するオンラインデータ分析プラットフォームの開発はこれからの課題である。ストリーム処理、分散機械学習、オンライン機械学習などとともに、動的時間伸縮法（DTW: Dynamic Time Warping）などのパターンマッチング技術を用いたストリームデータからの特徴抽出なども含めて、幅広い研究開発が必要である。

セキュリティとプライバシー

フォグ／エッジデバイスは、エンドユーザに近く、クラウドと比較してセキュリティリスクの不安がある。また、資源制約もあるため、DoS(Denial of Service) 攻撃などのセキュリティ攻撃にも弱い。さらに、エンドユーザに近いことから、プライバシーに対する考慮も必須である。セキュリティとプライバシーはアプリケーションごとに要件が異なるため、アプリケーションごとに、一つ一つ地道に考えていくしかない。

（6）その他の課題

フォグ／エッジコンピューティングを設計するためには、現場に入り込んで顧客のニーズを把握することが大切である。机上で議論するだけでは、現場に適用できないシステムとなってしまう。スマートシティにしてもスマート工場にしてもスマートグリッドにしても、顧客の価値を明らかにしながら設計していかなければいけない。

そのためには、研究者と現場とをつなぐ触媒役となりえるカタリスト人材が必要である。技術開発を行う人と現場とを上手につなぐ役割である。このような人材が圧倒的にわが国には少ないことが、「技術で勝ってビジネスで負ける」一因である。

わが国の研究開発予算の使途は、技術開発に重点的に振り向けられている。これに対して欧米の研究開発予算は、カタリスト人材などを含む技術開発以外にも振り向けられていることを踏まえ、技術開発以外のリソースに予算配分をしていくことが重要である。

これは標準化でも同様である。フォグ／エッジコンピューティングを展開していくためには、標準化議論も避けて通ることができない。技術的な観点からのみ標準化作業に携われる人だけでは仲間を作って事業につながる標準化に結び付けることが難しい。事業戦略を考えながら仲間作りを行うだけでも多大なリソースを必要とすることから、このような人材にも予算配分をしていくことが重要である。

アーキテクチャ設計は技術開発項目に含まれることになるが、学術的成果として認められづらいこともあり、なかなかアーキテクチャ議論にリソースを割くことができない状況になっている。そのため、研究開発プロジェクトにおいては、意識的にアーキテクチャ議論を推進する

仕組みがあることが望ましい。抽象化して議論する場を提供することが、わが国のアーキテクチャ人材の育成にもつながる。

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生産、収集される多種多様なデータも対象になる。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。そこで、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。

自動化された処理はローンの審査や人事・採用評価などに及びつつあり、その究極的な様相を見せているのが中国 Alibaba の Alipay で与信システムとして利用されている Sesame Credit Score(芝麻信用) である。ユーザのあらゆるネット活動と個人特定のできる大量の監視カメラによるユーザの評価を 950 点満点で実施し人物評価がなされ、その数字のみが一人歩きしている。このスコアはいまや中国社会全体の治安にも影響するほどの効力があり、一旦低い評価を受けるとそこから抜けだせないバーチャルスラムと呼ばれる新たな貧困層を生んでいるともいわれている。その一方では 2018 年 5 月から EU で発行された GDPR(EU 一般データ保護規則) はこのような AI による自動化された評価や審査を禁止する方向にある。この両者の動きは両極にあるともいえ、日本、米国も GDPR 的な規制がないままであると今後は経済的にも社会的にも大きな問題が発生しかねない。

（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	△	→	・アプリケーション／サービスにまで踏み込んでの基礎研究は少ない。アーキテクチャ議論にも弱い。 ・文科省 /JST の AI/IoT を推進するサポートがあるも、他国の競争についていけていない。
	応用研究・開発	○	↗	・製造業を中心に、実用化が確実に進みつつある。 ・個人情報保護法の改正、官民データ活用推進基本法の制定などでデータ利活用の推進が期待される。
米国	基礎研究	◎	→	・アプリケーション／サービスにまで踏み込んでの基礎研究を幅広く進めている。 ・Google やスタートアップ等、革新的なセンサー技術や AI 技術の本格応用の研究開発が順調。
	応用研究・開発	◎	→	・産業界コンソーシアムを中心に、動きが活発である。 ・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	○	→	・EU が継続的に支援しており、アーキテクチャ議論などにも強い。
	応用研究・開発	◎	↗	・ドイツ企業を中心として盛んな研究開発を進めている。コンソーシアムの作り方、場の作り方がうまい。 ・Smart City を標榜するスペインの各市プロジェクトがあるも、GDPR 発行後の個人情報保護の重視政策による圧迫に注目。
中国	基礎研究	△	→	・日本と同じレベルにある。アーキテクチャ議論にも弱い。ただし、独自のアーキクチャや他国に依存しないサービス実現の必要性から、麒麟などのシリコンチップおよび端末製造技術の進展が著しい。
	応用研究・開発	◎	↗	・Huawei などのメーカーと Alibaba などサービス事業者が活発な動き。 ・個人情報配慮が軽く、急速に社会が変化している。
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 / ウェ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	○	↗	・スマホ決済サービスの進展と定着、Hyundai 等自動車メーカーの実証実験。 ・個人情報保護が緩和されビッグデータ活用が急速に拡大中。

（8）参考文献

1）総務省、「IoT デバイス 1 の急速な普及」、情報通信白書平成 30 年版
2）経済産業省、「ディマンドリスポンスについて」、第 4 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会、2017 年 4 月 20 日 http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/004_s01_00.pdf
3）Simson Garfinkel、"The Cloud Imperative"、MIT Technology Review, October 3, 2011 https://www.technologyreview.com/s/425623/the-cloud-imperative/
4）https://www.openfogconsortium.org/
5）https://opencord.org/
6）https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing
7）https://www.fanuc.co.jp/ja/product/field/index.html
8）https://www.edgecross.org/ja/
9）成長期を迎えた LPWA の将来と課題 http://jbpress.ismedia.jp/articles/-/52839
10）ARM が bit.LITTLE アーキテクチャを AI 拡張した技術 DynamicIQ https://community.arm.com/processors/b/blog/posts/arm-dynamiq-expanding-the-possibilities-for-artificial-intelligence
11）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
12）Google のモバイルアプリ向け機械学習モデルが iOS/Android 共通で登場 https://jp.techcrunch.com/2018/05/09/2018-05-08-googles-ml-kit-makes-it-easy-to-add-ai-smart-to-ios-and-android-apps/
13）FW グループ、EV 向け全固体電池を量産へ https://response.jp/article/2018/06/22/311132.html
14）UnderWare: Aesthetic, Expressive, and Functional On-Skin Technologies http://underware.media.mit.edu
15）Cisco、「フォグコンピューティング」 https://www.cisco.com/c/m/ja_jp/solutions/internet-of-things/iot-system-fog-computing.html
16）https://www.iiconsortium.org/
17）トヨタの e-palette 構想 https://newsroom.toyota.co.jp/jp/corporate/20508200.html
18）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
19）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
20）加古川市、見守り事業開始 http://www.city.kakogawa.lg.jp/soshikikarasagasu/kyodo/shiminseikatsuanshinka/ICT/mimamori.html

21）ポストムーアの法則時代のコンピューティング
https://www.publickey1.jp/blog/16/qcon_tokyo_2016_3.html
22）http://www.iotac.jp/
23）https://smartiot-forum.jp/
24）http://www.onem2m.org/
25）https://openconnectivity.org/
26）https://aecc.org/
27）http://en.ecconsortium.org/

２．４．７　ブロックチェーン

（１）研究開発領域の定義

ブロックチェーンは、ネットワーク上に「ブロック」と呼ばれるデータのかたまりを「鎖（チェーン）」のように連結していく分散台帳の一つの形態であり、仮想通貨ビットコインの実装で初めて用いられた。一般に、分散台帳とは、ネットワーク上の複数のノード間で共有されつつ同期されることで同じ状態が保たれるデータの集合である。整合性を保つために P2P（Peer to Peer）ネットワーク技術と合意形成アルゴリズムが使われる。ビットコインでは、信頼できる第三者機関が存在しない状況でも、個々のデータと系全体のデータの真正性を保証することができるよう高度な暗号技術を採用している。ブロックチェーンに関する基礎から応用まで様々な研究開発が世界中で行われており、ブロックチェーンそのものの実態も今後変化する可能性が高いため、本項では現在および将来にわたってブロックチェーンを構成する可能性のある技術を含め広く俯瞰することとする。

（２）キーワード

分散台帳、公開鍵暗号、ハッシュ関数、P2P ネットワーク、合意形成、インセンティブメカニズム、スマートコントラクト、仮想通貨、ビットコイン

（３）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

ブロックチェーンはその生い立ちから仮想通貨ビットコインとの関係が特に深い。ビットコインはブロックチェーン技術に基づく仮想通貨であり、2008 年に Satoshi Nakamoto 論文[1)]によるアイデアの発表があり、翌年にビットコインのソフトウエアが公開された。これは、暗号技術、P2P（Peer to Peer）ネットワーク技術、分散合意形成技術および継続的運用のためのインセンティブの仕組みから成り立ち、仮想通貨ビットコインの基礎となった。ブロックチェーン技術は、仮想通貨はもとよりそれ以外への適用が期待されており、さまざまな分野で新たなサービスの開発や実証実験が進められている。

ブロックチェーンは、非中央集権的な仕組みで価値の交換を記した台帳を分散共有することを可能にしたことに本質がある。これまで、たとえば銀行が担ってきた「信頼」を中央集権的な組織なしで、安全に共有することができる。すなわち、人と人をデジタル技術に基づく信頼によって結ぶことができるようになったともいえる。中央集権的に保証や仲介をしてきた事業者は不要になり、これまでと違った、分散と自動化による新たなビジネスが可能になる。紙をベースとした仕事の進め方から、完全にデジタルなビジネスへの移行であり、大きな社会変革の可能性を秘めている。

一方で、科学技術的な課題は山積しており、プログラムによる自動取引（スマートコントラクト）などの機能的要件に加えて、性能、安全性などの非機能的要件も改良、改善が必要である。また、金融取引にとどまらず、有形無形資産の取引、デジタルコンテンツの流通、保険や身分の証明など、さまざまな応用に対応するためには、サービス全体の設計・実装基準などの整備も必要である。さらに、これまでとはスキームの異なるビジネスとなることを勘案すると、従来の商習慣や法制度との兼ね合い、それらの刷新も含めて社会との共創が重要なテーマとな

る。さらに、ブロックチェーン技術により実現されている 4 つの主要仮想通貨システム (ビットコイン、イーサリアム、ライトコイン、モネロ）で使用されているマイニングにかかる消費電力が年間約 16.6 テラワット時にもなり、スロヴェニアの電力量と同程度といった莫大な電力消費量となっており、世界の電力消費への脅威だけでなく、地球環境への影響についても喫緊の改善が必要である [2)]。これらの課題を解決し続けることによって、ブロックチェーン技術は新しい法、経済、社会制度を生み出す基盤となることができる。

[研究の経緯]

ブロックチェーンに関わる技術の系譜をたどる。ブロックチェーンは仮想通貨ビットコインを実現するために設計された。仮想通貨自体は暗号技術の応用として古くから考えられてきた。David Chaum のブラインド署名技術を用いた DigiCash[3)] は暗号技術に基づく仮想通貨の草分けである。DigiCash はさまざまな理由から普及には至らなかったが、2008 年に Satoshi Nakamoto が書いた論文とその実装により、ビットコインが生まれた。当初のブロックチェーンは、ビットコインの実現に特化して設計された、暗号技術と P2P ネットワーク技術、分散合意形成技術などの既存技術の統合といえる。Satoshi Nakamoto の功績は、通貨の発行を Proof of Work と呼ばれる分散台帳の整合性維持に対する作業への対価とすることで、継続的に運用できるインセンティブメカニズムを考案したことである。本稿では、ビットコインおよびビットコインから派生した仮想通貨（オルトコイン）で使われるブロックチェーン技術を第 1 世代とする。

ビットコインの成功により、ブロックチェーンに対して、仮想通貨以外にも応用できる技術としての期待が高まり、新たなブロックチェーン技術が研究・実装された。その代表がスマートコントラクトである。スマートコントラクトは、取引情報中にある種のプログラムを組み込むことにより、価値交換以外の情報管理や処理を可能にする仕組みである。たとえば、ある一定の条件を満足した場合に支払いを行うというような契約を自動的に実行することもできる。これを第 2 世代とする。

ブロックチェーンは汎用的な情報処理の技術基盤であると考えると、今後、第 3 世代としてさらに広範な応用が広がるだろう。どのような応用が生まれるのか、そのためにはどんな技術的発展が必要かということは今後の研究開発、ビジネス開発にかかっている。

[研究開発の動向]

プラットフォーム化するブロックチェーン

ビットコインの技術基盤として生まれたブロックチェーンの汎用性を活用した応用が次々に生まれ、また、同時にビットコイン以外のブロックチェーンを処理する実行基盤（プラットフォーム）も登場した。現時点での代表的なプラットフォームとして、ビットコイン、イーサリアム、Hyperledger Fabric があげられる。次項に述べるように、それぞれ管理者の有無と参加者の参加方法やできることが異なる。イーサリアムは、ビットコインの課題解決や新たな拡張性を目指して全く新規に設計された。独自仮想通貨イーサーの実行基盤でもあるが、契約、権利管理等への利用をめざして開発が進められている。Hyperledger Fabric は主に企業でのブロックチェーンの活用を目指して OSS（Open Source Software）プロジェクトとして開発が進められている。表 2-4-1 にプラットフォームとしてのビットコイン、イーサリアム、Hyperledger Fabric の特徴をまとめた。

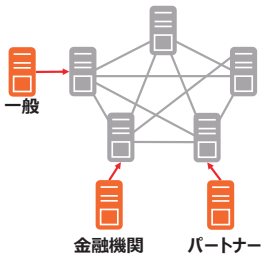
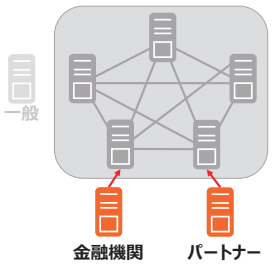
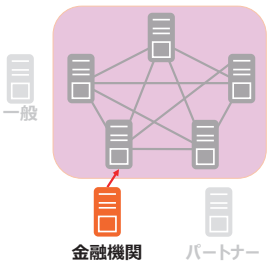
表2-4-1 代表的なブロックチェーン・プラットフォーム

	ビットコイン	イーサリアム	Hyperledger Fabric
開始年	2008	2015	2015
開発主体	Satoshi Nakamoto 他	イーサリアム財団	LINUX、IBM、Intel、ソラミツ他
形態	パブリック型	パブリック型	パブリック型・プライベート型
内容	仮想通貨としての流通	仮想通貨を含めた取引一般	様々なソリューションの技術基盤
合意形成方式	Proof of Work	Proof of Work。 今後 Proof of Stake へ変更予定。	PBFT（v0.6）、 EndorcementPolocy（v1.0）
通貨	BTC（ビットコイン）	ETH（イーサー）	通貨なし／あり
プログラミング	スクリプト（scriptSig）による限定されたプログラム	スマートコントラクト言語による自由なプログラム	スマートコントラクト言語による自由なプログラム

パブリック型からプライベート型、コンソーシアム型へ

ビットコインは、管理者に相当する組織が存在せず、誰もが平等で、誰からも許可を得ることなくネットワークに参加できる、非中央集権な P2P ネットワークである。このようなオープンなブロックチェーンはパブリック型やパーミッションレス型と呼ばれる（以下、本項ではパブリック型と呼ぶ）。一方、例えば、米国 Ripple Labs が運営する仮想通貨 Ripple のようなケースでは、管理者がおり、参加できるのは特定の限られた者のみである。このような、中央管理者を置き運営しているブロックチェーンはプライベート型やパーミッションドと呼ばれる（以下、本項ではプライベート型と呼ぶ）。また、プライベート型の派生形で複数の管理者からなるコンソーシアム型もある。これらについて、表 2-4-2 に整理した。

表2-4-2 参加モデルによるプラットフォームの分類

参加モデル	パブリック型	コンソーシアム型	プライベート型
構成			
管理者の有無	なし	あり（複数企業）	あり（単独）
参加者	不特定多数 (Permission less)	特定複数 (Permissioned)	組織内 (Permissioned)
合意形成の仕組み	PoW / PoS（※ 2）など （厳格な承認が必要）	特定者間のコンセンサス （厳格な承認は任意）	組織内承認 （厳格な承認は任意）
参加者のアクセス権	全員がフルアクセス	管理者が決める	管理者が決める
プラットフォーム	ビットコイン（※ 1 BCN） イーサリアム	Hyperledger Fabric	Hyperledger Fabric Ripple

※ 1 BCN: ブロックチェーンネットワーク ※ 2 PoW: Proof of Work / PoS: Proof of Stake

画像：Fujitsu ｜金融ソリューション ～ブロックチェーンの取り組み～を参考に作成
（http://www.fujitsu.com/jp/solutions/industry/financial/concept/blockchain/）

パブリック型の場合は、参加者の賛同が必要であるため、ブロックチェーンの仕様変更は一般には難しい。合意できない場合は、過去ビットコインで起こったような分裂（フォークという）が発生する。プライベート型の場合は管理者の決定で自由に変更でき、柔軟なシステムの運用が可能である。プライベート型の場合は、新しい技術の検証などがしやく、企業を中心に、契約、取引そのほかの実証実験のベースになっていることが多い。

このように、「完全に自律分散的なブロックチェーン」と「中央管理に適したブロックチェーン」という全く異なる性格が表れる。パブリック型ブロックチェーンは、そもそも中央集権機関などの既存の枠組みとは根本的に相容れないモデルであり、既存の枠組みを破壊しながら発展し普及する可能性もある。この結果、将来的には分散化による完全な仲介者の排除が実現されるかもしれない。一方でパブリック型ブロックチェーンには合意形成に時間がかかる等の現実的な課題があるため、それを解決する一つの手段としてプライベート型のブロックチェーンが考案された。プライベート型ブロックチェーンは、既存の枠組みを大きく変えずに効率化を進めることができるため、企業や銀行等におけるプライベート型ブロックチェーンの採用が今後急激に進む可能性もある。

仮想通貨以外への応用

ブロックチェーンは、もともとビットコインのために発明された技術であるが、通貨以外への応用としては、金融取引、資金調達（ICO）、不動産取引、電力取引、投票などがあり、改ざんが難しいという特徴を利用して、身分証明、土地の登記簿、選挙の投票の仕組み、ダイヤモンドの認定書と取引履歴の記録簿、不動産情報管理システムなどの応用例もある。詳細は(4) 注目動向に記載。

[標準化の状況]

ISO では 2016 年 9 月 に ISO/TC307 Block-chain and electronic distributed ledger technologies を設置し、ブロックチェーンと電子分散台帳におけるシステム、アプリケーション，ユーザー間の互換性やデータ交換にかかわる国際標準化活動を開始した 。2018 年 10 月時点で 39 か国が参加し（他に 13 か国のオブザーバ）作業中である。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

スマートコントラクト [4, 5, 6)]

スマートコントラクトは「契約の締結と実行の自動化」であり、1994 年に Nick Szabo という法学者・暗号学者により提唱された。本項ではブロックチェーン上であらかじめ設定していたプログラムにより自動的にトラストレス（信用を考慮する必要がないこと）で取引を実行する仕組みを指す。ビットコインの使用言語（スクリプト）は分岐やループを持たないため、実行できる処理は限定される。一方で、イーサリアムは自由なスマートコントラクトを書くためのチューリング完全と呼ばれるプログラム言語を提供、さまざまな契約を仲介者無しで自動的に実行するためのプログラムが作成できる。例えば、車の購入を考えてみる。売り手はスマートフォンなどの電子鍵で車のカギをロックできるとする。スマートコントラクトにより買い手が契約条件通りの金額を支払うと、そのイベントを検知して自動的に車の所有権とカギを購入

者に移転し、それにより買い手のスマートフォンなどの電子鍵で解錠可能となり、すぐに運転ができるようになる。このように一定の取引条件を満たしたことを確認して契約を自動的に執行できる仕組みが可能になる。しかし、実際にスマートコントラクトが機能するためには、取引条件を満たしていることを現実世界にアクセスして保証する信頼できる第三者（オラクルと呼ばれる）が必要となる。

DAG（有向非巡回グラフ：Directed Acyclic Graph）[7, 8, 9)]

ブロックチェーンは基本的に複数の取引（トランザクション）をブロックとしてまとめて、それをチェーン状につなぐ構造を持つが、DAG は一つ一つの各取引をユニットとして巡回しないよう一方向に複数のチェーンでつなげた構造を持つ。DAG では取引をまとめたブロック生成が不要なので、その報酬を目的とした Proof of Work の概念がない。DAG を用いた分散台帳には、2016 年に公開された仮想通貨 IOTA、Byeball などがある。IOTA では DAG を用いた Tangle と呼ばれる技術を用いており、取引を行う自分自身が過去の二つの取引を承認しながら DAG への組み込みを行う。一定時間内に多くの取引を取り込めるとともに、パブリック型の課題とされるインセンティブ不整合（ブロックチェーンの承認機能を支えるマイナーのインセンティブは報酬であり、取引台帳の維持ではないこと。このため報酬の低下がブロックチェーン自体の機能不全を引き起こす）が回避でき、手数料が掛からない高速な取引が実現できる。このように IOTA は、名前の由来通り IoT におけるマイクロペイメントと呼ばれる少額取引に特化した仕組みになっている。ただし DAG を用いた分散台帳技術は歴史が浅く、セキュリティ、信頼性等についてはまだ十分検証されているとは言えない。

ビットコイン・ブロックチェーンを用いたオフチェーン技術

ビットコイン・ブロックチェーンを少額取引（マイクロペイメント）として利用する場合、手数料が高いことや取引のスループットが低い（約 7 取引 / 秒）という課題がある。この問題点を解決するために基盤レイヤー (レイヤー 1) となるビットコイン・ブロックチェーンの外に、レイヤー 2 として新しいシステムを設けることで対応するオフチェーン技術が検討されている。有名なものとしてはライトニングネットワークがある。すでにいくつかの実装プロジェクトが進んでいるが、開発途上であり、実現にはビットコイン本体の仕様変更を必要とする。しかし、将来的にビットコインのスケーラビリティの問題を解決し、多様な用途でマイクロペイメントを実現できると期待される。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

本項では主に応用に向けた取組みを紹介する。

FinTech ×ブロックチェーン

日本銀行は欧州中央銀行と共同で、Project Stella を 2015 年から進めている [10)]。これは、金融市場インフラへの分散型台帳技術の応用可能性を調査するものである。このプロジェクトは、技術に関する概念的な整理（法的な議論を除く）だけでなく、実際に実験を行いながら進められている。現在、調査の途中であるが、Hyperledger 基盤を用いた検討の結果を踏まえ、分散型台帳環境下での証券と資金の受渡が実現できることを明らかにしている。分散

型台帳を応用して DvP（Delivery versus Payment）を実現するといった議論は始まったばかりであり、これらのアプローチの安全性や効率性について、さらなる分析が必要であることも指摘している。

電力取引×ブロックチェーン

日本でのフィードインタリフ制度（固定価格買取制度）の導入を契機に、蓄電池や分散型電源、再生エネルギーの普及を促進するため、新たな電力取引の仕組みを考える動きが出てきた。分散型電源を利用し「地産地消」を図るコンセプトは従来からあったが、関連技術の進展により取引システムが安価に構築可能になったことから、ブロックチェーンの利用を含め検討が加速している。多くは電力取引システムへの応用であるが、一歩踏み込んだ非同期連系技術の検証を行っている事例を紹介する。東京大学はメーカー・電力会社などと提携し、さいたま市美園地区(みそのウィングシティ)で電力取引システムの検証実験を 2017 年から始めた。これは、DGR（デジタルグリッドルータ:系統に接続する電力変換器がそれぞれ固有のアドレスを持ち、ブロックチェーンを介して取引し、電力ルーターを同時に動作させる）を用いた電力潮流制御を用いた仕組みである。太陽光発電、蓄電池の電力を株式市場のようなザラ場で価格を決め、売りと買いの約定が成立したもの（同時同量）のみが流れるようになっており、引き取り手がない電気は入れないようにしている。このため系統への負担を抑えられる。この技術により電力は通信におけるパケットのように取り扱われる。

医療・ヘルスケア×ブロックチェーン

ブロックチェーンが、医療・ヘルスケアに徐々に浸透しつつある。世界最大のヘルスケア IT の国際会議・展示会である HIMSS : Healthcare Information and Management Systems Society において 2018 年次総会以後、ブロックチェーンが主要セッションの 1 つとして大きく取り上げられている。また、エストニアのように国を挙げて医療・ヘルスケアにおけるブロックチェーンを実践する事例も存在する。

しかし、わが国では実際に当該領域に取り組む研究者は、アカデミア、企業とも極めて少ないのが実態である。2018 年 9 月時点で、「医療・ヘルスケア×ブロックチェーン」を研究実施対象と明言した唯一のプロジェクトが、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「AI（人工知能）ホスピタルによる高度診断・治療システム」である。同プロジェクトの研究開発計画書（平成 30 年 7 月 19 日）では「サブテーマ A : セキュリティの高い医療情報データベースの構築とそれらを利用した医療有用情報の抽出、解析技術等の開発」の中に、「⑦トレーサビリティ、スマートコントラクトを内包するブロックチェーン技術等を応用した通信プロトコルの開発」が公募対象として掲げられている [11]。わが国の医療・ヘルスケアにブロックチェーン技術を実装するために検討すべき課題は多いが、ブロックチェーンは、そのような状況に大きな風穴をあける、破壊的な技術としてのポテンシャルを有すると期待されている。

［諸外国の政策や海外動向］

エストニア～ブロックチェーン先進国～ [12, 13]

人口 132 万人（2018 年）の小国であるエストニアは、国を挙げて電子政府化に取り組んでいるデジタル先進国である。ブロックチェーンにおいても先進的なチャレンジを続けており、

ビットコインの登場よりも早い2008年に、ブロックチェーンの原型とも言える“hash-linked time-stamping”技術の試験的実装を開始した。2012年には正式に実装され、エストニアは世界初のブロックチェーン導入国家となった。

エストニアにおけるブロックチェーン導入と深く関係しているのが、2006年に同国に設立されたGuardtime社である。同社は、Keyless Signatures Infrastructure（KSI）[14]という独自のブロックチェーン技術を強みとしている。従来のブロックチェーン技術は公開鍵暗号方式を採用してきたが、KSIはハッシュを台帳の維持管理にのみ利用している点に特徴がある。KSIはブロックチェーンのもつ改ざん耐性をもちつつ、限られた機関でのみ利用可能とした技術であり、例えば医療情報のような高度な個人情報を有するデータも取り扱い可能である。KSIブロックチェーン技術は、e-ヘルスレコード、e-処方箋データベース、e-Law／e-Courtシステム、e-Policeデータ、e-バンキング、e-ビジネス登録、e-Landなどのエストニア電子政府の多くのサービスを保護している。また、タリン工科大学（Tallinn University of Technology）では、eヘルス実現のために、すべての医療データの完全性をブロックチェーン技術によって保証する研究が進められている[15, 16]。

EU Blockchain Initiative

EUはBlockchain Initiativeとして複数のプロジェクトを平行して走らせている。2018年2月には、ブロックチェーンによるイノベーションの加速とEU内のブロックチェーンエコシステムの開発を目的としたEU Blockchain Observatory and Forumを設立した。100名規模の有識者によるフォーラム活動を精力的に実施し、”Blockchain Innovation in Europe”、”Blockchain and the GDPR”、”Blockchain for Government and Public Services”等の質の高いレポートを発行している[17]。Digital Single Marketも2017年の中間評価でブロックチェーンに関連づけられた。他にも、”Horizon Prize on Blockchains for Social Good”や仮想通貨に関するプロジェクトもイニシアティブの下で開発が進められている。

BSafe.network

ビットコインは当初一個人や企業を中心に開発がなされ大学等の研究機関の関与はあまり見られなかった。不安を抱えながら動作しているのが現状である。そこで、ブロックチェーン技術の不安を解消し、誰からも信頼できる技術とすべく、2016年、BSafe.networkがMITからの呼びかけに応じて設立された。これは研究用のブロックチェーン専用のネットワークである。世界中から日本（東大、慶大、東邦大、立命館大、早大が参加）を含むアジア、ヨーロッパ、北米、そしてアフリカの28の大学が参加している。参加するとネットワークのノードが置かれ、研究成果を実装したソフトウエアをインストールして実行することで、研究成果の有効性を確認できる。このプロジェクトでは、セキュリティ、ネットワーク技術、コンセンサスメカニズム、ゲーム理論、経済学、および規制に関わることなど、ブロックチェーンに関わるあらゆる要素が研究と実験の対象になっている。インターネットのための技術開発を行う際にNSFNetが果たしたのと同じ役割を担うことを想定している。

米国IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）

米国IEEEは、ブロックチェーン技術の開発と採用において重要な役割を果たすことを考え

ており、2018年1月にIEEE Blockchainイニシアチブ（BCI）を発足させた。BCIはIEEEにおけるブロックチェーンの全てのプロジェクトおよび活動のベースとなる。BCIは、標準化、教育、イベント、コミュニティー開発とアウトリーチなどといった様々な活動で構成されている。また、BCI発足後最初のシンポジウムを2018年7月にBlockchain-2018: The 2018 IEEE International Conference on Blockchainとして開催した。

Ripple社「大学ブロックチェーンリサーチ構想（University Blockchain Research Initiative: UBRI）」プロジェクト

2018年6月、Ripple社は、「大学ブロックチェーンリサーチ構想UBRIプロジェクトについて、選抜した世界有力17大学と共同提携すると発表した。プロジェクト全体の寄付金総額は、5千万ドル（約55億円）であり、同社の持つ専門知識や技術的資源の提供を受けながら、ブロックチェーン、仮想通貨と電子決済等に関する学術研究を行なう計画である。選抜した17大学の内訳には、中国や日本は含まれておらず、米国の7大学（MITコンピューター科学AI研究所、Princeton大学情報技術政策センター、UCBハースビジネススクール、Texas大学Austin校マコームズビジネススクール、Oregon大学、Pennsylvania大学、North Carolina大学Chapel Hill校）、欧州の4大学（英国・University College London（UCL）、オランダ・Delft工科大学、ルクセンブルグ・Luxembourg大学、キプロス・Nicosia大学）、インドの2大学（インド情報技術大学ハイデラバド校、インド工科大学ボンベイ校）、カナダ・ウォータールー大学、オーストラリア・オーストラリア国立大学、ブラジル・ジェトゥーリオ・ヴァルガス財団、韓国・高麗大学の17大学である。また、Ripple社は、中国・清華大学金融科学技術研究所（THUIFR）との提携を別途結び、大学院生を対象としたブロックチェーン技術研究奨学金プログラム（BRSP）を2019年1月から開始している。ブロックチェーン業界の未来を担う若い人材のために、ブロックチェーンに関する国際的な規制についての認識を広め、ブロックチェーン技術の研究機会を提供することを目的としている。

その他の注目動向

Shawn Fanning（音楽ファイル共有ソフトNapsterの開発者）らが創業した米国IoTスタートアップHeliumは、ブロックチェーンの仕組みを利用して、安価でどこででも利用可能なIoTデバイス向けのネットワーク網を新たに構築するための研究開発を行っている。彼らが開発するシステムは、「Proof of Coverage」と名付けられ、低消費電力ゲートウェイが分散型元帳を管理するためのマイナー的な役目を担う。

また、Matthew Spokeが創業した米国スタートアップAionは、ブロックチェーンの相互運用のための「token bridge（トークン・ブリッジ）」を開発し、イーサリアムベースのトークン保有者が、Aionのブロックチェーン上に資産を実際に移動することなくバックアップする実証実験を行っている。

（5）科学技術的課題

ブロックチェーンに関わる技術全体を俯瞰する（図2-4-3）。最下層は、ブロックチェーンが依拠する技術（暗号技術、P2Pネットワーク、分散合意形成）であり、計算機科学の分野においてそれぞれ30年以上の歴史を持つ。その上に位置するのは、ブロックチェーンをブロック

チェーンたらしめる固有技術（分散台帳、スマートコントラクト、システム運用管理）である。また、これらの技術を使って特定の応用を効率的に実現するための実行環境を応用分野との間に定義した。ソフトウエアとしてのプラットフォームと制度設計や信用モデルから成る。

ブロックチェーンの応用は、ブロックチェーン上に記録されるデータの種類で、取引管理と情報共有・情報管理の２つに分けられる。取引管理は、複数の当事者間のやり取りの記録を管理し、情報共有・情報管理は、特に取引に関わらない種々の情報の記録を管理する。情報共有と情報管理の違いは、一般に記録された情報を公開情報として扱うか、個人情報として扱うかの違いであるが、厳密には決められないものもあるため、ここではまとめて扱う。

図2-4-3　ブロックチェーン技術の俯瞰

以下、個々の技術的課題について列挙する。

［ブロックチェーン固有技術］

分散台帳：ファイナリティ、スケーラビリティ、匿名性

仮想通貨に用いられるパブリック型においては、ブロックに格納されるトランザクションの真正性を確定することをファイナリティと呼ぶ。P2P ネットワーク上で異なるマイニングノードが異なる時間関係で受信したトランザクション情報をもとに新規ブロック候補を作成するので、本来同一のブロックチェーンを分散して持つべきなのに、各マイニングノード間で新規ブロックの内容に差異が出ることは避けられない。ビットコインでは、新規ブロック候補に、さらに新たなブロックが 6 個つながったら当該ブロックが確定したものとみなしているが、これは確率的

な判断であり、絶対的な確定とは言えない。このため、ビットコインの場合、ブロックサイズ（1 MB）、トランザクションの平均サイズ（300B）、ブロック生成時間（約 10 分）から、7 トランザクション／秒がその性能限界といわれる。一般に、クレジット決済などの処理能力は数千トランザクション／秒以上を処理できるため、それと比較してあまりに貧弱な性能しか確保できないことをスケーラビリティ問題と呼ぶ。ビットコインにおいても、ライトニングネットワーク（レイヤ 2 技術の一種）を用いてこの課題を解決しようとしているが、まだ実験検証の段階である。分散台帳に関する三つ目の課題が、匿名性・プライバシーの問題である。ビットコインでは、ユーザーの ID として公開鍵暗号の公開鍵のハッシュ値を用いることによってユーザーの実名は秘匿している。トランザクションは公開されているため他の情報と突合することでユーザーを特定することが可能である。また、そもそも取引内容を公開したくない場合も多い。

スマートコントラクト：プログラミングモデル、プログラミング言語、正当性検証

スマートコントラクトに関してはシステムとして採用すべきプログラミングモデルの選択といかなるプログラミング言語を実装すべきかが課題となる。ビットコインではスクリプト型のプログラミングを用いて簡単な取引処理が記述可能だが、分岐やループ処理が行えずその記述範囲には限界がある。そこで、イーサリアムではチューリング完全型のプログラミング言語（Solidity）を実装したが、チューリング完全性ゆえにその結果がユーザーの意図したものか否かの検証（正当性検証）に課題がある。また、自由度が高い分、ハッカーに攻撃される可能性も高くなる（DAO 事件がその例）。

システム運用管理：鍵管理、版管理

そもそもビットコインは仮想通貨の発行と支払いまでを対象としていたがため、法定通貨との交換や仮想通貨以外の応用に関しては考慮がない。したがって、ビットコインのために発明されたブロックチェーンを今後、広く社会システムの基盤の一部として機能させせるためには、例えば、一般の利用者の使用を前提とした交換所や取引所などのシステムを想定した機能や非機能要件を満たす必要がある。具体的には、ユーザーの ID 管理、鍵管理（有効期限、更新、失効）やブロックチェーンネットワークのソフトウエアの版管理など、信頼できる機関による管理を前提とせざるを得ない場合もある。

［ブロックチェーンが依拠する基盤技術］

暗号技術の危殆化：量子コンピューター、暗号プロトコル

ブロックチェーンの各ノードから発信されるトランザクションの耐改ざん性はハッシュ技術によって担保されており、発信者の正当性は電子署名によって検証される。ビットコインをはじめとする仮想通貨では、現時点での暗号解読技術・能力に耐えるように、ハッシュ関数、署名方式が選択されている（ビットコインではハッシュ関数として SHA-256 と RIPEMD160 が使われ、公開鍵暗号としては secp256k1（楕円曲線暗号の一種）が使われている）が、将来の暗号解読能力の進歩、例えば、量子コンピューターによって、これらの暗号技術が破られる危険性がある（危殆化）。暗号技術の危殆化に対しては、新たなハッシュ関数、署名方式の開発など暗号技術そのものの研究と、すでに動いているブロックチェーンの内容を新方式に安全に移行する仕組みに関する研究の両方の側面がある。

P2P ネットワーク：可用性維持、攻撃耐性

ブロックチェーンの各ノード間の通信には P2P ネットワークが用いられる。この P2P ネットワークにおける通信経路（各ノードが他のどのノードと通信するかのネットワーク構成）が、分散合意形成におけるマイニングノード間の公平性に影響を与える可能性がある。マイニングに参加するノード間で公平な条件になるような P2P ネットワークの構成が課題となる。また、DOS 攻撃や DNS ハッキングのような手法で、P2P ネットワークが歪められて、分散合意形成が機能しなくなる可能性があるため、これらの対策も必要である。

分散合意形成：合意形成アルゴリズム、インセンティブ設計、攻撃耐性

パブリック型においては、複数のトランザクションをまとめて新たなブロックを作成する際に、どのトランザクションを真正なトランザクションとして認めるかという、多くのノードによって分散的に行われる合意形成が必要になる。ビットコインにおいては、この検証作業への報酬として、最初に成功した作業者にブロックに追加する権限と併せて新規仮想通貨を与えることとしている（Proof of Work）。この作業には多大な計算機パワーを必要とし、電力消費が問題となっている。イーサリアムなどの仮想通貨では、この点を解決するために合意形成の決定権を多くの通貨を持つノードにより多く与えるという別の分散合意形成アルゴリズム（Proof of Stake）が提案されているが、そのインセンティブの設計を含め実効性の検証は今後の課題である。

（6）その他の課題

ブロックチェーンはビットコインの成功により仮想通貨への応用が注目されがちだが、改ざん困難な分散台帳の応用は、取引管理だけでなく情報共有・情報管理まで広範である。現状は、ブロックチェーンは、情報だけでなく価値交換の基盤から社会基盤そのものになる可能性があるとして将来性を期待する声は大きい。しかし、現実には仮想通貨以外の応用に関しては、ブロックチェーンを使わなくても実現できるケース（Blockchain Inspired Solution と呼ばれる）も多く、新たな応用の開拓に苦慮している。

根本的な原因は、ブロックチェーンが基盤技術も応用技術も未熟なことにある。投機的な価値を持つ仮想通貨をともかく獲得するためのエンジニアリング技術、特にマイニング技術の進化は専用の ASIC を開発するまでに至る。一方で、すでに見たように科学技術的な課題も山積している。そもそもブロックチェーンは総合格闘技と呼ばれることがあるように、構成する要素技術は、暗号技術・P2P ネットワーク・分散合意形成、社会システムデザインなど、これまで相互に交わる機会のあまりなかった研究コミュニティーに属する。ブロックチェーンを将来の社会インフラ技術の重要コンポーネントとするために、準備段階として研究開発や社会実装の環境整備が必要である。以下にそれらの課題のうち特に重要と考えるものを記述する。

インキュベーション・プラットフォームによる人材育成とキラーアプリの創出

ブロックチェーンの現状は 1990 年代のインターネットに似ていると言われる。電子メールが使われ始め、ブラウザや HTTP サーバーによる WWW の実装が始まったころ、我が国では WIDE プロジェクトとして大学や研究機関などを対象とした非営利目的のインターネット利用技術の開発が行われた。その後、インターネットの商用利用が始まり、新たなアイデアをもっ

たベンチャー企業が登場し、グローバルな情報処理・情報通信のインフラとしての基盤が成立した。30年前とは環境がまったく違うため同じアプローチが成功するとは思えないが、多種多様な動機や興味をもった人材が、さまざまなアイデアを試行しお互いに切磋琢磨する「るつぼ」のような環境が必要である。人材が育まれ次世代のキラーアプリが生まれ始めるのにある程度、例えば5年から10年程度の、時間がかかることを考えると待ったなしの状況であると言える。

法制度とシステム開発のコ・デザインによる社会システムの再構築

経産省がとりまとめた「ブロックチェーン技術を利用したサービスに関する国内外動向調査」[18]では、ブロックチェーンが起こす社会変革の可能性として、地域通貨、土地等の登記、C2C（個人間）取引、開かれたサプライチェーン、取引の自動化などを具体例として挙げているが、いずれも既存の法規制や商習慣の枠組みを逸脱する可能性が高い。このような新たな社会システムを構築するためには、設計の段階から法制度の再設計とシステムの開発とを同時にデザインすることが不可欠である。

持続的に運用できる仕組みの創出

ブロックチェーンをつかって再構築された新たな社会システムにおいては、ブロックを生成するインセンティブを確保し続けることが課題となる。分散合意形成がPoW等ではうまくいかない場合には、例えば、PoA（Proof of Authority）のような別の仕組みが必要となり、その際にはオーソリティとしての国や自治体などの存在が改めて重要となる。エストニアなどの取り組みを参考にした施策の検討が望まれる。

（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	○	→	・慶應義塾大学の大槻知明教授らのグループは、ブロックチェーン技術を応用し、製品が消費者の手に渡った後も偽物製品の検知が可能な所有権管理システム（POMS: Product Ownership Management System）のプロトタイプを開発し、2017年7月に発表[19]。 ・慶應義塾大学の松谷宏紀准教授らのグループは、GPUを用いたブロックチェーンキャッシングによる取引の異常検知に関する研究成果を2018年12月にIEEE国際会議ISPA 2018で発表[20]。
	応用研究・開発	○	→	・トヨタとToyota Research Institute（TRI）は2017年5月、自動運転車の開発に使う走行データの取引市場やカーシェアリングの運用などに、ブロックチェーン技術の適用を検討すると発表。トヨタは研究所に対して、2016年～2020年の5年間にかけて約10億ドル（約1,120億円）を投入する予定。 ・2018年2月、NECおよびNEC欧州研究所は、取引記録に参加するノード数200ノード程度の大規模接続環境下で毎秒10万件以上の記録性能を達成する世界最速のブロックチェーン向け合意形成アルゴリズムを開発し、世界規模のクレジットカード取引を支えるシステムとして必要とされる毎秒数万件を超える性能を実現。 ・富士通は、2017年11月、ブロックチェーン同士を安全につなげるセキュリティ技術「コネクションチェーン」を開発。また、同社は2018年3月、ブロックチェーン研究開発の拠点として、ブロックチェーン・イノベーション・センターをベルギー・ブリュッセルに開設し、ベルギーにおけるスマートシティの実現に向け、ブロックチェーンの利用を検討開始。

米国	基礎研究	◎	→	・UCB の Dawn Song 教授らの研究グループは、Ethereum の根本的な制約を克服する新たな「プライバシーを重視した」スマートコントラクト技術を探求。 ・MIT の Thomas Hardjono 教授らの研究グループは、データグラム（ネットワーク間を行き来できる情報の共通単位）と呼ばれるインターネット・プロトコル・スイートの概念を提案し、現在のブロックチェーン開発者はデータグラムの概念を取り入れるべきだと主張。
	応用研究・開発	◎	→	・Microsoft は、Azure 上で動作する BaaS（Blockchain as a Service）の開発・展開に加え、分散台帳技術を開発するエンジニアに向けて新たに Azure Blockchain Workbench を公開した。 ・Google は、ブロックチェーンを用いて改変を検知できるログに署名を保管し、システムに保管された情報が修正されていないことを保証するか、何の情報がいつ変更されたかを追跡可能とする技術に関する特許を 2017 年 9 月に申請した。Google がブロックチェーン技術を用いた情報保護を模索していると推察されている。 ・UCB の Dawn Song 教授は、研究成果を基にスタートアップ Oasis Labs を創業し、暗号通貨専門ファンド Andreessen Horowitz から 3 億ドルの出資を受けた。また、プライベート・トークンの先行販売により、投資家達から 4500 万ドルを調達している。Oasis Labs は、開発した「プライバシーを重視した」スマートコントラクト技術を用いて、スマートコントラクトの実行をブロックチェーンの合意形成から切り離すことで、データへの選択的アクセス許可と確実な機密保持の 2 つを提供することを目指している。 ・ベリディウム基金（Veridium Foundation）は IBM と提携して、公開型の Stellar ブロックチェーンを使って、「二酸化炭素排出権（炭素クレジット）のトークン化」を計画している（2018 年後半発行予定）。これは、IBM にとっては、公開型ブロックチェーンと許可型ブロックチェーンとを組み合わせる実証実験であり、炭素クレジットを他の商取引と組み合わす実証実験でもある。
欧州	基礎研究	○	→	・Wien 工科大学の Matteo Maffei 教授が率いる研究グループが、Ethertrust プロジェクトにより、Ethereum のスマートコントラクトのセキュリティを向上させる研究成果を 2017 年 11 月末に発表。 ・スウェーデンのチャルマース工科大学（Chalmers University of Technology）では、公平なモビリティサービスに向けた MaaS（Mobility as a Service）におけるブロックチェーン技術の役割について研究している。 ・フィンランドの Aalto 大学は、Pekka Nikander 教授をリーダーとして、2018 年から SOFIE と呼ばれる 3 年間の EU Horizon 2020 プロジェクトを立ち上げ、技術的および商業的にオープンなフレームワークを創造し、IoT を統合するためのオープンなビジネスプラットフォームの創出に関する研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・IoT のための仮想通貨 IOTA と有向非巡回グラフを応用した IOTA のコア技術 Tangle に関するプロジェクトが、ベルリンを拠点にして 2015 年に始まった。 ・EU の DECODE（Decentralised Citizens Owned Data Ecosystem：分散型市民所有データエコシステム）プロジェクトが、2017 年に開始。個人データを米国大手 IT 企業から取り戻し、データ主権を個人にもたらすことを目的としている。現在、EU Horizon 2020 プログラムの一環として、14 のコンソーシアムメンバーに総額 500 万ユーロ（約 6 億円）の資金が 2019 年末まで提供され、プロジェクトが進行中。分散型台帳技術と組み合わせて実現する DECODE の新技術は、アムステルダムとバルセロナで実証実験が行われる予定。 ・My Health My Data (MHMD) プロジェクトは、医療データのプライバシーとセキュリティにおける新しいパラダイムシフトを目指した EU Horizon 2020 プロジェクトであり、2016 年 11 月にスタートした。EU から総額 400 万ユーロ（約 5 億円）の資金が 2019 年末まで提供され、機密データとしての医療データの共有方法を根本的に変えることを目指している。 ・フランスの銀行グループ SociétéGénérale とオランダの金融サービス会社 ING が協力して、石油取引に焦点を当てた Easy Trading Connect プロジェクトとして、ブロックチェーン技術の導入により商品取引の処理時間を 3 時間から 30 分未満に短縮できることを 2017 年 2 月に実証した。 ・デンマークのコペンハーゲンに本社を置く海運業界のスタートアップ Blockshipping は、世界中の 2700 万個のコンテナをリアルタイムで追跡、記録する世界初のブロックチェーン・プラットフォーム（Global Shared Container Platform: GSCP）を開発中。 ・オランダ最大級のスーパーマーケットチェーン Albert Heijn は、2018 年 9 月、清涼飲料水を専門とする充填事業者 Refresco と提携して、プライベートブランドのオレンジジュースを対象に、ブロックチェーン技術を活用して、ブラジルのオレンジ農園から各店舗に陳列されるまでのサプライチェーンをすべてデータ化することで、サプライチェーンの透明化を開始。

中国	基礎研究	○	→	・清華大学 Li Liao 教授らは、世界初のパーソナル AI 技術を開発しているベンチャー企業 ObEN とともに、ブロックチェーンの多くの課題（セキュリティ、トランザクション速度、容量、スケーラビリティ、およびエコシステム構築）を探求している。
	応用研究・開発	◎	↗	・中国初のブロックチェーン実験特区が 2018 年 10 月、海南省海口市に正式にオープン。仮想通貨取引所 Huobi（火幣）は、国内本社を移し、Tianya Community（天涯社区）とともにブロックチェーン研究室を設立するとともに、10 億ドル規模のグローバルブロックチェーン業界ファンドを創設する計画。 ・Alibaba（阿里巴巴）が提供するクラウドサービス Alibaba Cloud's BaaS の提供地域が、2018 年 10 月、米国、ヨーロッパ、東南アジアなどを含む国際市場にまで拡大。なお、本技術は、Hyperledger Fabric に加え、Ant Blockchain（Alibaba グループの金融関連会社 Ant Financial Services が独自開発した Blockchain プラットフォーム）に基づいたものである。 ・Web サービス会社 JD.com（京東商城）は、米国 New Jersey 工科大学と中国科学院ソフトウエア研究所（ISCAS）と協力してブロックチェーン研究所を 2018 年 10 月に設立。分散型アプリケーション（DApps）の基本的なコンセンサス・プロトコル、プライバシー保護、セキュリティなどに関する研究を長期的に行なっていく計画である。
韓国	基礎研究	△	→	・2018 年 6 月、高麗大学は、世界第 4 位の取引量を誇る Huobi（火幣）の子会社 Huobi Korea とブロックチェーン開発の分野での産学連携に合意。Huobi Korea は、高麗大学を、韓国国内でのブロックチェーン技術の研究と技術教育の提携を拡大するための基盤とみなしている。
	応用研究・開発	△	→	・ソウル市は、今後 5 年間で、ブロックチェーンエコシステムを創ることで、ブロックチェーンハブを目指すと宣言。2021 年までに 603 億ウォン（約 60.3 億円）を投じ、200 以上のブロックチェーン企業が入居できるビジネス施設を建設するとともに、トレーニングセンターを運営して 700 名超の専門家を育成することを計画。 ・サムスン SDS は、2018 年 6 月に、ブロックチェーンを基盤にした金融プラットフォーム Nexfinance を発表。同社は、Nexfinance を通じ、デジタル金融ビジネスを立ち上げることを計画中。 ・サムスン SDS は、ブロックチェーンを活用した銀行向けの個人認証ツール BankSign を開発し、2018 年 8 月に発表。全銀行間で個人認証を一括で行える技術革新を目指している。 ・サムスン SDS は、自社のブロックチェーン・プラットフォーム Nexledger を輸出税関ロジスティクス・サービスに活用することに、2018 年 9 月、韓国税関と合意したと発表。

（8）参考文献

1）Satoshi Nakamoto,” Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”, https://bitcoin.org/bitcoin.pdf (accessed 2019-1-20)
2）https://www.nature.com/articles/s41893-018-0152-7
3）David Chaum, “Blind Signatures for Untraceable Payments”, Advances in Cryptology: Proceedings of Crypto 82 (Santa Barbara, California, August 23-25, 1982) pp 199-203.
4）Aram Mine, “ブロックチェーン上で契約をプログラム化する仕組み「スマートコントラクト」”, http://gaiax-blockchain.com/smart-contract (accessed 2019-1-20)
5）Arvind Narayanan, Joseph Bonneau, and Edward Felten, Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction, (Princeton Univ. Pr., 2016); 長尾高弘（訳）,『仮想通貨の教科書』(日経 BP 社 , 2016).
6）山際貴子 , “スマートコントラクトとは？ ブロックチェーン活用の仕組みと KDDI の実証実験を紹介”, ボクシルマガジン・ビヨンド (2018.01.10) https://boxil.jp/beyond/a3594/ (accessed 2019-1-20)
7）Hayata, “DAG 通貨の種類とそれぞれの特徴について”, Crypto Times (2018-03-02) https://crypto-times.jp/explain_dag/ (accessed 2019-1-20)
8）おくなも , “DAG 型暗号通貨のすすめ　ブロックチェーンを代替しうる新技術”, BTC

News (2017.09.22) https://btcnews.jp/2x5fpwlo12702/ (accessed 2019-1-20)

9）Serguei Popov, “The Tangle”, IOTA Whitepaper Ver. 1.4.3 (update: April 29, 2018), https://forum.helloiota.com/732/The-Tangle-whitepaper; IOTA Fan Site（訳）, https://iotafan.jp/wp-content/uploads/2018/06/iota1_4_3jp.pdf (accessed 2019-1-20)

10）日本銀行 , 欧州中央銀行 , 共同調査プロジェクト (Project Stella) 報告書「日本銀行・欧州中央銀行による分散型台帳技術に関する共同調査 ― 分散型台帳技術による資金決済システムの流動性節約機能の実現 ―」https://www.boj.or.jp/announcements/release_2017/data/rel170906a3.pdf (accessed 2019-1-20)

11）内閣府 , 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「AI（人工知能）ホスピタルによる高度診断・治療システム」研究開発計画（平成 30 年 7 月 19 日）
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/10_aihospital.pdf (accessed 2019-1-20)

12）e-Estonia guide, https://e-estonia.com/wp-content/uploads/eestonia-guide-2018.pdf (accessed 2019-1-20)

13）e-Estonia FAQ, https://e-estonia.com/wp-content/uploads/faq-a4-v02-blockchain.pdf (accessed 2019-1-20)

14）Ahto Buldas, Andres Kroonmaa, and Risto Laanoja, “Keyless Signatures’ Infrastructure: How to Build Global Distributed Hash-Trees”, Proceeding of 18th Nordic Conference on Secure IT Systems (NordSec 2013; Ilulissat, Greenland, October 18-21, 2013) Vol. 8208, pp. 313-320.

15）E-estonia, “Estonian Healthcare: e-Health record and e-Prescription took over,” Youtube (July 10, 2013), https://www.youtube.com/watch?v=2XOqsJh4Abg (accessed 2019-1-20)

16）E-estonia, “E-health – Estonian Digital Solutions for Europe,” https://e-estonia.com/e-health-estonian-digital-solutions-for-europe/ (accessed 2019-1-20)

17）EU Blockchain Observatory and Forum An Initiative of the European Commision, https://www.eublockchainforum.eu/ (accessed 2019-1-20)

18）経済産業省、「ブロックチェーン技術を利用したサービスに関する国内外動向調査」報告書（2016 年 4 月 28 日）
http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160428003/20160428003.html (accessed 2019-1-20)

19）Kentaroh Toyoda, Panagiotis Takis Mathiopoulos, Iwao Sasase, and Tomoaki Ohtsuki, “A Novel Blockchain-Based Product Ownership Management System (POMS) for Anti-Counterfeits in The Post Supply Chain”, IEEE Access, Vol. 5, (2017) pp. 17465-17477. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2720760

20）Shin Morishima and Hiroki Matsutani, "Acceleration of Anomaly Detection in Blockchain Using In-GPU Cache", Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA 2018; Melbourne, Australia, December 11-13, 2018) in press.