

3. 俯瞰区分と研究開発領域

3.1 知のコンピューティング

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

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

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

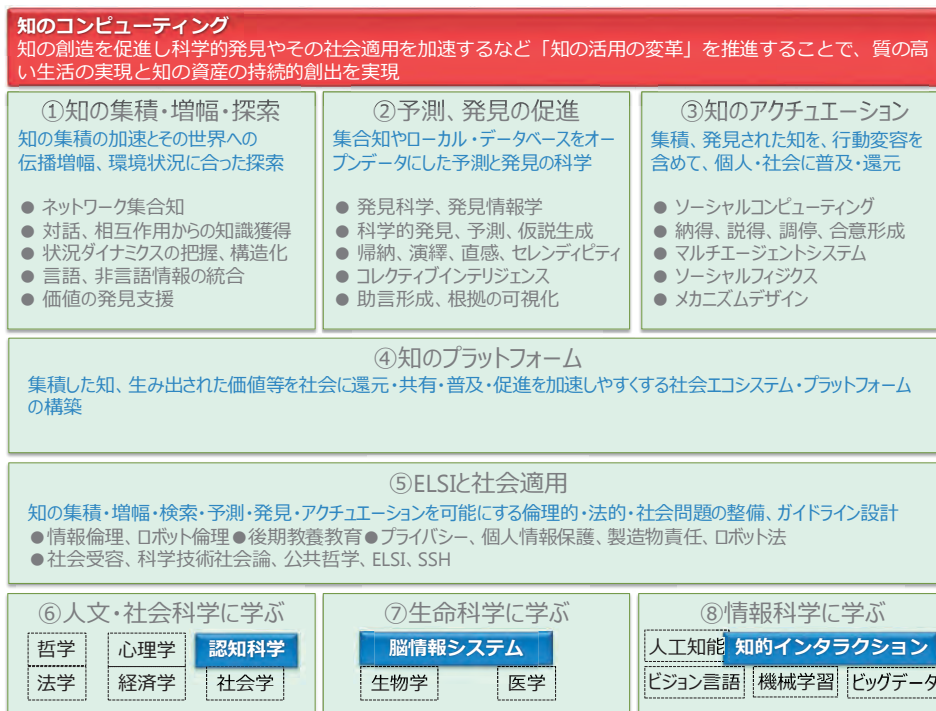


図3-1-1 知のコンピューティングの俯瞰図

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

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

i) 安西祐一郎、心と脳—認知科学入門、p32、2011

ii) Curt Swindoll, "Redefining Fundraising - Data", 2011, <http://www.pursuant.com/blog/redefining-fundraising-data/>

3.1.1 知の集積・増幅・探索

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 国内外における研究開発の動向

[背景と意義]

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

[これまでの取り組み]

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

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

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

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

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

[今後必要となる取り組み]

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

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

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

が顕在化する事例をセットにして蓄積する。

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

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

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

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

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

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

[注目すべきプロジェクト]

インタラクションからの暗黙知の発見については次のようなプロジェクトが注目される。MIT Media LabのCenter for Future Storytelling⁴⁾では、物語に着目して、コミュニティー、経験、創造性などに関わる知恵の増幅に取り組んでいる。Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences⁵⁾では脳の認知機能の解明に取り組む有力な研究チームを擁している。柏野牧夫らのIIPI (Implicit Interpersonal Information)の研究⁶⁾では、人間同士の円滑なコミュニケーションに必要な不可欠なソーシャルシグナルとその認知プロセスとの関わりを詳細に分析している。開一夫らのグループでは、乳児の発達の過程に注目して教える/教えられることのできるペダゴジカルマシン⁷⁾の開発に取り組んでいる。石黒浩らの存在感メディアの研究⁸⁾では、人間の存在感を遠隔に伝える研究を通して、人間の持つ価値に迫ろうとしている。メディアレベルでは、後藤真孝らの研究チーム⁹⁾が音楽を自動分析して打楽器、歌声、ビートなどさまざまな属性を取り出せるようにすることで、コンシューマにまで創造の範囲を広げようとしている。ヨーロッパでは、Bielefeld大学がCITECを2008年に設立し非言語コミュニケーションを中心に大掛かりに研究を展開している¹⁰⁾。

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

ク集合知の収集と活用の研究を進めている¹¹⁾。

実践を交えた総合的な取り組み：

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

(4) 科学技術的課題

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

(5) 政策的課題

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

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

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

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

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

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

3.1.2 予測と発見の促進

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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

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

[発見の科学哲学に関する歴史]

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

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

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

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

[予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向]

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) 注目動向

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

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

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

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

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

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

[より脳に近い学習や推論のための脳型アルゴリズムと脳型コンピューティング]

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

[日本のオールジャパン的 AI 研究の挑戦]

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

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

(4) 科学技術的課題

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

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

(5) 政策的課題

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	・各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・2016年9月、NECと東京大学は、日本の競争力強化に向け戦略的パートナーシップに基づく総合的な産学協創として、「フューチャー AI 戦略協定」を結び、「ブレインモルフィック AI 技術」の早期実現を目指して、脳を模した専用のアナログ回路技術に関する研究を開始している³⁵⁾。 ・ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の一部で量子最適化装置の開発が進められている。 ・脳型コンピューティングに関する基礎研究は産官学で行われているが、米国には質・量とも劣る。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2016年11月、深層学習の演算能力で世界一を狙って「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤 (AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI)」の開発に乗り出した¹⁸⁾。 ・2016年、富士通は、従来技術を深化させたトランジスタを用いて、組み合わせ最適化問題を1万倍速く解く技術を開発した²⁸⁾。東芝は、脳型 AI チップをフラッシュ派生技術で省電力化させることに成功した²⁹⁾。 ・スーパーコンピューターベンチャー企業の PEZY Computing が低消費電力スーパーコンピューター開発に取り組んでいる。また、AI ベンチャー企業の Preferred Infrastructure が、深層学習の研究開発を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・“Big Data Research and Development Initiative” がオバマ大統領により宣言された 2012 年を契機に、発見情報学 (Discovery Informatics) に関するムーブメントが米国を起点として起きている。 ・脳型コンピューティング研究者の層が厚く、さまざまな基礎研究へ支援策が講じられている。DOE が先導してニューロモルフィックコンピューティングに関するワークショップが開催され、ニューロモルフィックデバイス開発は伝統的なフォンノイマンアーキテクチャーからのパラダイムシフトであることが示された。

米国	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IBM が、ニューロシナプティックコンピューターチップ SyNAPSE を開発している。 IBM は、Watson の質疑応答システムの中核アーキテクチャーを多言語化することで、コグニティブ・サービスの世界展開が進められている。 2016年3月末には、米国ローレンスリバモア国立研究所は、IBM リサーチと協力して、IBM のニューロシナプティックコンピューターチップ SyNAPSE を使って、脳からヒントを得たディープラーニングのための極低エネルギー効率スーパーコンピューティングプラットフォームの開発を開始した²⁸⁾。 Google が、機械学習ライブラリ「TensorFlow」向けにカスタマイズしたディープラーニング専用プロセッサ「Tensor Processing Unit」(TPU) を独自開発した。DeepMind はニューラルネットと海馬を模した外部メモリーを組み合わせることにより、外部記憶を活用できる、より高度な AI を目指している³⁴⁾。HTM (Hierarchical Temporal Memory: 階層的時間記憶) 理論の提唱者 Jeff Hawkins が創設した Numenta 社は、脳の動作をヒントに、深層学習とは異なる独自アルゴリズムで成果を上げはじめた³⁴⁾。
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> Horizon2020 で欧州でもビッグデータ等と共に予算措置がなされ、高い性能を有するシステムも各所に設置、アプリケーションやシステムソフトウェアを中心に競争力の高い研究がなされている。 2016～2018年に Human Brain Project²⁰⁾ で 50 PFLOPS の脳の動きを再現するスーパーコンピューターを設置する計画が進んでおり、Horizon2020 プロジェクト (2014年～2020年) の中で、エクサスケール技術の研究開発が進んでいる。 英国、オランダ、ドイツ、デンマークなどで量子コンピューティングに関する基礎研究に対する多額の支援が行われている。
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 一部の特殊なスーパーコンピューターを除き、独自のスーパーコンピューターのシステム研究は弱い、ARM プロセッサや Extoll などを含む一部の技術を中心に、新たな開発の試みが試みられている。 AI の社会的影響に関する EU 主導の研究活動として、2012年3月から2年間にわたって、「RoboLaw- 欧州における新興技術規制：ロボット技術に対する法と倫理」プロジェクトが実施された。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 2015年、中国・清華大学は、脳型コンピューター研究センターを設立し、コンピューター科学、電子工学、材料科学、オートメーション工学、バイオメディカルなど各学部の専門家が参加する総力体制で、TrueNorth に似た「Tianji (天機)」チップを開発している。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 2014年5月に、米グーグル基礎研究所 Google X でディープラーニング技術を開発してきたスタンフォード大学准教授 Andrew Ng が、中国のグーグルとも呼ばれる百度 (Baidu) にヘッドハンティングされ、Baidu がシリコンバレーに新設した AI 研究所の初代所長に就任した。 2016年1月、Baidu の AI 研究所が、NVIDIA GPU にも対応した、オープンソースの機械学習ソフトウェア「Warp-CTC」をリリースした。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 韓国科学技術院 (KAIST) が、アナログ回路を使うアプローチを採用して、深層学習向け AI チップを開発している。 脳研究促進振興計画のもと、2009年度に 610 億ウォン (約 45 億円) の研究予算を投入され、2011年には韓国脳研究院が設立された。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 2015年、ニューロモーフィック・チップを、IBM の依頼で韓国サムスン電子が 28nm CMOS プロセスで製作した。 2016年11月、韓国サムスン電子は、英国 AI チップ開発スタートアップ企業 Graphcore に 34 億ドルを出資した。 脳型および量子コンピューティングに関する研究開発が見受けられない。

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

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

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

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

3.1.3 知のアクチュエーション

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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

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

[交渉と合意形成]

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

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

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

[チームワーク]

合意形成を行った後に、いかにして資源を分配するか、そしてグループとして活動するかというモデルについても、提携ゲームの理論やチームワークに関する研究によって行われた。特に、チームワークに関する研究は南カリフォルニア大学の Milind Tambe 教授によって確立されている。Tambe 教授は、共同意図 (Joint Intention) モデルに基づいて各エージェントが共同のゴールを持つ。そして、共同のゴールとは別に、個々にはローカルなゴールを持ち得るような階層型のゴールプランのモデル STEAM⁶⁾ を示した。Tambe 教授はプロダクションシステム SOAR を用い、ソフトウェア実装を示すことでその効果を示している。すなわち、エージェントは、互いに交渉することで合意に達し、合意を得た後はチームとして協調的に行動する一連のプロセスの個々の方式はそれぞれについて研究され、それぞれについて成果が上がっている。

[オークション、マッチング]

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

[グループウェア、Computer Supported Cooperative Work (CSCW)]

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

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

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

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

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

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

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

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

[ソーシャルコンピューティング]

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

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

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

ソーシャルコンピューティングの概念によってワークショップや発想支援を行うモデルの一つとして MIT の Collaboratorium^{19),20)} がある。ここでは、気候変動に関する課題とその解決方法をオンラインでクラウドソースの形で集め、集約している。さらに興味深いのは毎年、リアルな会議を開催し Collaboratorium での気候変動に関する話題について Face-to-Face で議論を行っている。オンラインとオフラインのワークショップを継続的に行っている一例である。Deliberatorium²¹⁾ は Collaboratorium のオンラインの議論についてさらに構造化した討論方式でパブリックな意見を集約するのに使われている。

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

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

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

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

(3) 注目動向

(a) オンライン大規模意見集約

MIT Center for Collective Intelligence (CCI) のプロジェクト Deliberatorium²¹⁾ がある。ここでは、インターネットを使った大規模な議論や協議を支援し、大規模な意見共有を可能にするツールが構築されつつある。このプロジェクトでは、大規模な意見の共有を目指して、議論の論理的構造 (議論マップ) を構築するシステムを開発している。議論を議論マップという構造を用いているため、強い構造化による議論支援と言える。議論マップでは、Argumentation tools と呼ばれる議論構造化理論に基づき、参加者の意見を主張、賛成反対、および問題提起などに分類することで、議論の構造を明確化する。意見集約は完全に構造化した議論マップ上で行い、分類により投稿内容を組み立てていく必要がある。そのため参加者に負荷を強いるという問題がある。

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

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

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

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

(b) 討論型世論調査 (Deliberative Poll)

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

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

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

① 非態度

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

② 合理的無知

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

③ 集団分極化

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

④ 参加バイアス

参加動機の高い者しか集まらないという傾向

(c) 紛争メディエーション (Dispute Mediation)

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

(d) 自動交渉エージェント

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

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

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

- ・ 離散的な交渉空間における効率的な交渉解探索アルゴリズム：
交渉空間が離散的であると古典的な交渉解であるナッシュ解が定義できない場合が多い³⁷⁾。したがって、ゲーム理論や経済学では既存にはほとんど研究がない。藤田、伊藤、クラインらは、**Simulated Annealing** や遺伝的アルゴリズムに基づく交渉解の探索手法を提案している³⁸⁾。
- ・ 効用モデル：
効用モデルは、人間の好みをソフトウェアであるエージェントに伝えるために必要であり、現状では以下のような研究が行われている。
 - 論点の依存性を表現する効用のモデル：意思決定を行う時、複数の論点を考えるのが一般的である。例えば、自動車を購入する時に、排気量、色、タイプなどを考慮する。多属性効用関数は、このような複数の論点に基づく効用を定義できる。一般に多属性効用関数といった場合には、この属性の独立性を求めるが、交渉などの状況ではさらに各属性の値が他の属性の値に依存する場合が多い。そのような属性間の依存性を表現できる論点の相互依存を許す多属性効用モデルが提案されている³¹⁾。
 - 人間の間の依存性を表現する効用のモデル：個々の人間の効用関数は他の人間の価値に依存する場合もある。人間の間の価値観の依存性を表現した効用関数も定義されている³⁹⁾。
 - グラフによる効用のモデル：人間の効用をグラフによって表現する研究も幾つか行われている。多属性効用関数を表現することができる³⁶⁾。
- ・ 交渉戦略のモデル：
交渉における戦略は、主にいかにして妥協するかということに主眼が置かれる。どのようなタイミングで相手に譲歩した案を提案するかによって、合意の成立や交渉の失敗に影響がある場合が多い。森、伊藤らは、進化的ゲームの均衡点をベースに、妥協の度合いを測るモデルを提案している。これにより、ANAC2015において総合優勝している⁴⁰⁾。

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

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

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

(e) インセンティブメカニズム

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

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

(4) 科学技術的課題

本領域における科学技術的な課題は以下の通りである。

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

(5) 政策的課題

本領域における政策的な課題は以下の通りである。

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

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

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

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

- Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), St. Paul, MN., August 1988.
- 3) Christopher Riesbeck and Roger Schank. Inside Case-based Reasoning. Northvale, NJ: Erlbaum, 1989.
 - 4) Ralph L. Keeney and Howard Raiffa, Decisions with Multiple Objectives. ISBN 0-521-44185-4, 1993.
 - 5) Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin, Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers, MIT Press, 1994.
 - 6) Milind Tambe, "Towards Flexible Teamwork", Volume 7, pages 83-124, 1997.
 - 7) R. K. Dash, N. R. Jennings and D. C. Parkes, "Computational-mechanism design: a call to arms," in IEEE Intelligent Systems, vol. 18, no. 6, pp. 40-47, Nov-Dec 2003.
 - 8) Noam Nisan, Tim Roughgarden, Eva Tardos, and Vijay V. Vazirani. 2007. Algorithmic Game Theory. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
 - 9) Benjamin Edelman & Michael Ostrovsky & Michael Schwarz, "Internet Advertising and the Generalized Second-Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords," American Economic Review, American Economic Association, vol. 97 (1), pages 242-259, March 2007.
 - 10) Milind Tambe. 2011. Security and Game Theory: Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned (1st ed.). Cambridge University Press, New York, NY, USA.
 - 11) Jeff Conklin and Michael L. Begeman. 1988. gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion. In Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work (CSCW '88). ACM, New York, NY, USA, 140-152.
 - 12) Kenneth Arrow: Social Choice and Individual Values, 1963.
 - 13) Thomas W. Malone, The Future of Work, How the New Order of Business Will Shape Your Organization, Your Management Style, and Your Life, Harvard Business School Press, 2004.
 - 14) Pattie Maes. 1994. Agents that reduce work and information overload. Commun. ACM 37, 7 (July 1994), 30-40.
 - 15) Takayuki Ito and Toramatsu Shintani, "Persuasion among Agents : An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation", In the Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97), pp.592-597, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1997
 - 16) James Surowiecki, The Wisdom of Crowds, Anchor, 2004.
 - 17) Alex Pentland, Social Physics: How Good Ideas Spread-The Lessons from a New Science, Penguin Press, 2014
 - 18) Galen Pickard, Wei Pan, Iyad Rahwan, Manuel Cebrian, Riley Crane, Anmol Madan, Alex Pentland, Time-Critical Social Mobilization, SCIENCE, 28 OCT 2011

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

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

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

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

3.1.4 知の倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) と社会適用

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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

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

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

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

「技術的特異点」、シンギュラリティ (Kurzweil⁴⁾) という技術用語が新聞などの一般メディアにまで登場する。哲学者が超知性体 SuperIntelligence の脅威 (Bostrom⁵⁾) を描出すると、それに呼応する形で、今度は産業界や情報科学とは異なる学術界から人工知能の開発に対する懸念が叫ばれるようになってきた (Musk⁶⁾、Hawking⁷⁾)。同時に経済学者や社会学者からは、人間の雇用を奪うコンピューター (Brynjolfsson⁸⁾、Osborne⁹⁾) という指摘や、人類はどこへ行くのかという哲学的な問題提起 (Fuller¹⁰⁾) がなされた。

【国内外の動向】

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

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

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

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

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

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

(3) 注目動向

・ The Future of Life Institute (FLI)²⁴⁾

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

・ 科学技術振興機構 (JST)

2013 年開始の CREST 「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」では研究総括の萩田紀博 (国際電気通信基礎技術研究所) の方針により ELSI への取り組みを採択の条件とするなど研究者に ELSI を主体的に考える機会を与え続けている。CRDS では、2014 年に「知のコンピューティングと ELSI/SSH」ワークショップを開催し、知のコンピューティングに関わる ELSI の論点を議論した²⁶⁾。その後も AAAS2015²⁸⁾ や ESOF2016²⁹⁾ にて国際的な議論を展開している。JST 社会技術研究開発センター (RISTEX) では 2016 年度から新規研究開発領域として「人と情報のエコシステム」にて、情報技術のもたらすメリットと負のリスクを特定し、技術や制度へ反映してゆく相互作用の形成を目指している²⁷⁾。

・ IEEE “Ethically Aligned Design”

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

(4) 科学技術的課題

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

表 3-1-1 倫理的・法的・社会的課題と想定される問題

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

(5) 政策的課題

政策的課題は以下の通り。

- ・ ELSI に関する学際的な拠点

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

- ・ 人文社会科学者の継続的な関与に向けた取り組み

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

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

・実環境シナリオでの実証

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

・研究者に対する ELSI 教育の実践

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

本稿では、カテゴリーを ELSI の各イシューとして比較する。

国・地域	イシュー	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	倫理的	→	○	<ul style="list-style-type: none"> 水谷雅彦（京都大）らのプロジェクト「情報倫理の構築（FINE）」（1998-2003）、『情報倫理の構築』出版（2003） 村田潔（明治大）らのプロジェクト「組織情報倫理学」（2012-2016）、EHICOMP 2007 を主催 人工知能学会に倫理委員会発足（2014）
	法的	↑	○	<ul style="list-style-type: none"> 赤坂亮太（慶應大）が発起人となりロボット法学会設立に向けた準備委員会が活動を開始（2015） 徳田英幸らによる「ネットワークロボットフォーラム」（2003～）、『ネットワークロボット—技術と法的問題—』出版（2007） 無人航空機（ドローン、無線操縦機等）の安全な飛行のためのガイドライン施行（2015/12）

日本	社会的	↑	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・経産省・NEDOによる「生活支援ロボット実用化プロジェクト」にて生活支援ロボットの安全性に関する検討を実施 ・ISO13482「生活支援ロボットの国際安全規格」発行(2014/2)。上記プロジェクト成果を経済産業省とNEDOが提案したもの ・人工知能が浸透する社会を考える、AIR: Acceptable Intelligence with Responsibility (2014-) ・日本学術会議「科学技術の光と影を生活者の対話から明らかにする」分科会(2015-) ・JST RISTEX「人と情報のエコシステム」 ・内閣府「人工知能と人間社会に関する懇談会」(2016)
米国	倫理的	↑	○	<ul style="list-style-type: none"> ・Deborah Johnson “Computer Ethics” (1984,1993,2002)。コンピューター倫理学に関する世界初の教科書。 ・Google Ethics Committee 設立 (2014/1) ・IEEE が倫理的 AI の設計に関するレポートのドラフト発行 (2016)
	法的	→	○	<ul style="list-style-type: none"> ・We Robot: Conference on Legal and Policy Issues Relating Robotics (2012)
	社会的	↑	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・Rob Nail, Ray Kurzweil, “Singularity University” (2008) ・Brynjolfsson and McAfee, “Race Against The Machine” (2011) , “The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies” (2014) ・Max Tegmark, Jaan Tallinn, The Future of Life Institute (FLI) (2014/3) ・Stanford 大 “One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)” (2014)
欧州	倫理的	↑	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・Oxford 大 “Future of Humanity Institute (FHI)”
	法的	→	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・EU/FP7 プロジェクト RoboLaw (2012-2014)、“Guidelines on Regulating Robotics” 発行 (2014)
	社会的	↑	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・De Montfort 大、Centre for Computing and Social Responsibility (CCSR) (1996) ・Vilnius Declaration - Horizons for Social Sciences and Humanities (2013) ・Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?” (2013-9) ・Nick Bostrom, “Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies” (2014/7) ・HORIZON 2020, “Responsible research & innovation” (2014-)
中国	倫理的	→	×	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし
	法的	↑	△	<ul style="list-style-type: none"> ・北京大 “ROBOLAW.ASIA YSAiL Initiative for Robotics, Law & Policy” (2012)
	社会的	→	×	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし
韓国	倫理的	→	△	<ul style="list-style-type: none"> ・産業資源省『ロボット倫理憲章』発表 (2007)
	法的	→	×	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし
	社会的	↑	△	<ul style="list-style-type: none"> ・SOCIAL IMPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE - SIAI 2015

(注1) イシュー：倫理的、法的、社会的

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

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

- 6) CBSNEWS, “Elon Musk: Artificial intelligence may be “more dangerous than nukes” ”, 2014
- 7) BBC NEWS, “Stephen Hawking warns artificial intelligence could end mankind” ,2014
- 8) Erik Brynjolfsson, Andrew McAfee, “Race Against The Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy” ,2011
- 9) Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?” , 2013
- 10) Steve Fuller, “Humanity 2.0: What it Means to be Human Past, Present and Future” , 2011
- 11) Future of Humanity Institute (<https://www.fhi.ox.ac.uk/>)
- 12) ROBOLAW.ASIA (<http://www.robolaw.asia/index.html>)
- 13) 組織情報倫理学、営利および非営利組織における情報倫理問題への対応ための政策提言に関する研究 (<http://www.cbie.meiji.jp/ja/>)
- 14) 経済産業省「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」, 2007
- 15) 本田康二郎、プロジェクト「工学的関心に基づく倫理学の構築」(2013～2015)
- 16) 新保史生、「ロボット法学会」設立準備研究会 (<http://robotlaw.jp/archives/66>), 2015
- 17) 土井美和子・萩田紀博・小林正啓、「ネットワークロボット—技術と法的問題—」、2007
- 18) 科学技術未来戦略ワークショップ「Wisdom Computing Summit」, 2013
- 19) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」, 2014
- 20) サイエンスアゴラ 2015「激論! 先端 ICT の光と影」
- 21) VILNIUS DECLARATION
(https://erc.europa.eu/sites/default/files/content/pages/pdf/Vilnius_SSH_declaration_2013.pdf)
- 22) Paolo Dario, “Testing Robotic Applications in Real-Life Scenarios”、ロボット革命国際シンポジウム、2016
- 23) 藤垣裕子、『科学・技術と社会倫理』、p139、東京大学出版会、2015
- 24) The Future of Life Institute (<http://futureoflife.org/team/>)
- 25) 西下佳代他、人工知能やロボットの社会的影響に関する先行的研究動向、第30回研究・技術計画学会予稿論文集、2015
- 26) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」(<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-09.pdf>)、映像版 (<https://www.youtube.com/playlist?list=PLwLABCcz-l4sIISl7wnkSBvRGMVmi-Yzg>)
- 27) 「人と情報のエコシステム」(<http://ristex.jst.go.jp/examin/active/hite/ecosystem.html>)
- 28) Wise Computing: Collaboration Between People and Machines, AAAS 2015 Annual Meeting, 2015
- 29) Wisdom computing: creative collaboration between humans and machines,

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

3.1.5 認知科学

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[歴史的背景]

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

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

[近年の学術的動向]

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

新しい計算論が切り拓く認知科学の展開：

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

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

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

知の社会性：

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

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

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

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

知の身体性：

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

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

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

知の創造と創発：

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

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

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

判断と意思決定：

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

[応用、社会との関わり]

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

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

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

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

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

(3) 注目動向

- ・新学術領域『認知的インタラクションデザイン学』（代表：植田一博）では、人間同士、人間と動物の相互適応のメカニズムの解明に基づき、ロボットや人工物のデザインへその成果を応用する取り組みを始めている。また科学技術振興機構の助成を受けた『みんなの使いやすさラボラトリー』（代表：原田悦子）では、さまざまな人工物の使いやすさを高めるために、ユーザー心理、製品デザインの観点からの研究を進めている。またここでは新しい製品への適応に困難を覚えやすい高齢者を対象とした研究も行われている。
- ・JST 戦略的創造研究推進事業（CREST）で進められている「人間と機械の創造的協働を実現する知的情報処理技術の開発」（研究統括：萩田 紀博）では、人間と機械の協働により新たな知を創出し、人・集団の知的活動の質向上を実現する知的情報処理システムを目指した研究開発を推進している。プロジェクトの一つである、「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」（代表：長井隆行）は、人とロボットが意味理解を伴ったコミュニケーションに基づいて日常的なタスクを協調しながら達成する「人間機械コラボレーション」を実現する基盤技術の確立を目指し、実世界で意味理解を扱う「記号創発ロボティクス」のアプローチをコミュニケーションやビッグデータ利活用へ拡張し、ロボットが言葉や行動、環境の真の意味を自ら獲得し理解・行動す

るための技術を開発している。

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

（4）科学技術的課題

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

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

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

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

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

挙げた感情・情動的知性、知の身体性に関わる研究の役割が期待される。

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

(5) 政策的課題

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

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

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

(注1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(注3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

安西祐一郎他（編）（2014）.『コミュニケーションの認知科学1-5』岩波書店

Baron-Cohen, S. (1995). *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*. MIT.

Barrett, L. (2011). *Beyond the brain: How Body and Environment Shape Animal and Human Minds*. Princeton University Press.

Damasio, A. R. (2003). *Looking for Spinoza: Joy, Sorrow, and the Feeling Brain*. Harcourt.

藤田和生（編）（2007）.『感情科学』京都大学学術出版会.

Griffin, P. et al. (Eds.) (2011). *Assessment and teaching of 21st century skills*. Springer.

開一夫・長谷川寿一（編）（2009）.『ソーシャル・ブレインズ：自己と他者を認知する脳』東京大学出版会.

楠見孝・道田泰司（編）（2016）.『批判的思考と市民リテラシー：教育、メディア、社会を変える21世紀型スキル』誠信書房.

Lave, J. & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate, peripheral participation*. Cambridge University Press.

LeDoux, J. (1996). *The Emotional Brain: The Mysterious Underpinning of Emotional Life*. Simon & Schuster.

小野哲雄（2016）. プロジェクションサイエンスの視点からの認知メカニズムのモデル論的理解. 第33回日本認知科学回大会発表論文集（CD）.

苧阪直之（編）（2013）.『社会脳シリーズ1-3』新曜社.

Pfeifer, R. & Bongard, J. (2007). *How the Body Shapes the Way We Think*. MIT Press.

佐々木正人他（編）（2013）.『知の生態学的展開1-3』東京大学出版会.

Special Issue: Action and language integration: From humans to cognitive robots.

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

3.1.6 脳情報システム

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

知のコンピューティングの創成にあたって、脳情報システム領域は不可欠である。その領域の概観は、知のコンピューティングを“創る”そして“実現する（使う）”という視点を考えるとわかりやすい。知のコンピューティングの創成で、ヒトや動物のさまざまな行動、その知覚・認知・運動一ひいては情動・感情・意思決定・学習・社会性など一、すなわち、脳の働き＝「脳情報システム」が大きなヒントになる。知のコンピューティングの実現には、「脳情報システム」とうまく対応するように、ヒトの活動の中に埋め込まれていくことが必要である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

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

[抽象]

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

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

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

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

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

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

[飛躍]

情報幾何、量子ニューラルネットワーク論

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

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

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

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

[身近]

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

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

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

[苗床]

脳計算モデリング、ヒト脳活動解析、計算精神医学、脳情報処理解析

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

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

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

(3) 注目動向

- ・脳科学全体を対象とした大型プロジェクト

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

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

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

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

- ・ヒトの経済活動や行動の解明のための研究

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

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

(4) 科学技術的課題

- ・ヒト脳を用いた研究の加速

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

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

- ・従来と異なる原理に基づく計算機の必要性

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

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

・脳活動計測機器の高度化とデータ解析手法の革新

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

・脳内の情報表現、情報コーディングの研究

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

・脳内情報処理の解明

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

も存在する。

(5) 政策的課題

・科学と工学の研究をバランスよく配置したファンディング

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

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

・産官学連携

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

・基礎科学の研究への継続的な投資

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

・分野間にまたがる研究

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

(6) キーワード

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

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

(7) 参考文献

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

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

3.1.7 知的インタラクション

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[歴史的背景]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[人間とロボットとのインタラクション]

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

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

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

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

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

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

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

[研究の意義]

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

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

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

(3) 注目動向

[技術動向]

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

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

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

ソフトバンク・ロボティクスのPepper²³⁾や、さまざまなベンチャー企業から発売されているロボット、インターネット上でブームとなっているCGエージェントが公共の場や一般家庭に普及しつつあることも、知的インタラクションの研究を後押ししている。知的インタラクションの研究では、検証実験を行うために、実際の日常生活の中でインタラクションの現象を引き起こすことが重要であり、普及したロボットやエージェントをベースとした実証実験ができるようになったことも注目すべき動向である。

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

まり、日常環境で実用的に利用できる水準に達するようになってきた。その結果、Amazon echo²⁰⁾ など、実世界でインタラクションできるシステムが市場にでつつある。インタラクションの研究開発には総合的なシステム作りが必要となることが多い。その複雑さゆえ、個別の技術の進捗に加えて、プラットフォームとなる統合的なシステムが利用できるようになることで、さらにその先の研究開発が進むようになることも多い。ロボットのプラットフォームでは、AIBO²¹⁾ や Nao²²⁾ などが著名であるが、この 2-3 年で Pepper²³⁾ をはじめ、実世界での行動能力の高いロボットが利用可能になってきており、より高度で知的なインタラクションを研究する土壌ができつつある。

[ファンディング動向]

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

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

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

[実現に向けた技術的なボトルネック]

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

・実空間での音声・音響認識の問題

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

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

- ・ 文脈推定・ドメイン推定の技術

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

[実現において欠如している知見]

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

- ・ インタラクションの「間」やタイミングの知見：

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

- ・ ターンテイキングの知見：

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

- ・ 感情表現とモダリティーの知見：

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

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

・他者モデルの知見：

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

・行動と意図の関係の知見：

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

[実現において欠如している知見に対する研究開発の取り組み]

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

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

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

(4) 科学技術的課題

本領域における科学技術的課題は以下の通りである。

・「知的」インタラクションへの取り組み

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

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

- ・ユーザーの受容性に関わる研究

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

- ・時間を意識した人と機械のインタラクションの制御

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

(5) 政策的課題

本領域における政策的課題は以下の通りである。

- ・学際的な研究の推進

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

- ・国際連携

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

(6) キーワード

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

(7) 国際比較

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

- (注1) フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
- (注2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない
- (注3) トレンド
↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

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

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

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