

4. 情報科学技術分野

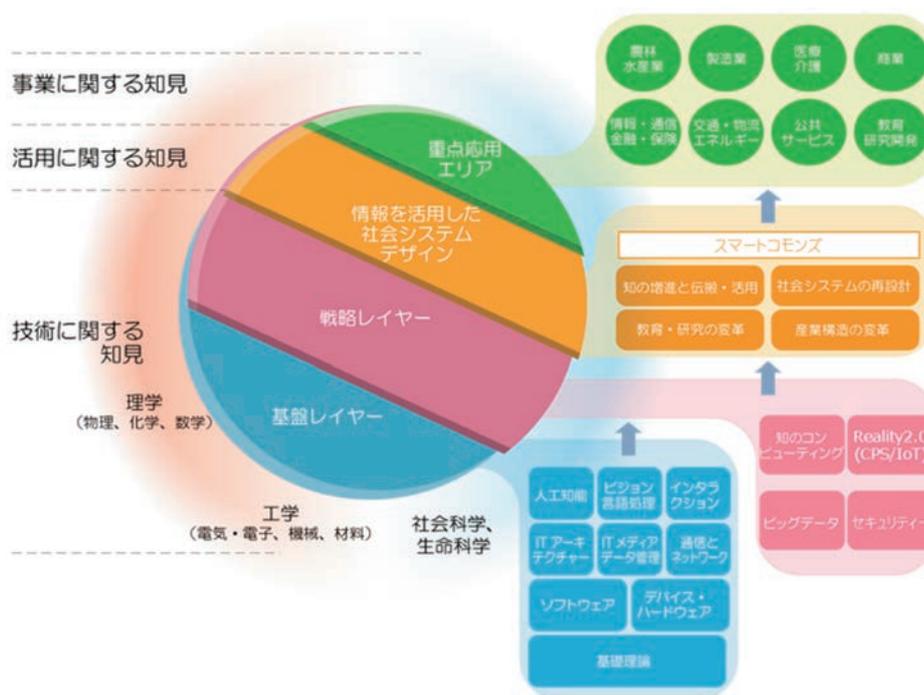
4. 1 情報科学技術分野の概要

情報科学技術分野は、科学としてよって立つ基礎理論から、その実装としての電子部品・デバイスや情報通信機器・組込み機械、さらには情報システム・情報サービスまでの広範な産業を支える技術分野である。同時に、その汎用工具的な性質から第二次、第三次産業はいうに及ばず、従来は直接関係ないと思われていた第一次産業や社会インフラ、社会システムの実装にまで深くかかわっている。

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

このような観点から、「研究開発の俯瞰報告書 情報科学技術分野（2015年）」の俯瞰図のうち、既存の学術分類だけではとらえられない時代の変化に対応するための研究開発領域からなる「戦略レイヤー」から「知のコンピューティング」、さらに社会共通資本としてのプラットフォームを構成するために必要となる研究開発領域からなる「Reality 2.0」を本報告書において新たに書き下ろした。

情報科学技術分野俯瞰図（2015年補遺版）



- Reality 2.0 (CPS/IoT)

近年の IoT や CPS、ビッグデータ等をはじめとした情報科学技術の進展・普及に伴い、個人やビジネス、社会活動において、サイバー世界が物理世界と一体となって切り離せないものになりつつある。この動きが進展していくことで、近い将来、物理世界とサイバー世界が一体化した世界ができるであろう。このような世界を「Reality 2.0」と呼ぶならば、Reality 2.0 の世界では、サイバー世界、物理世界に存在する多様な機能（モノ、ヒト、コンピューターやそれらが提供する、製造、物流、調達、ヘルスケア、ファイナンス、コンサルティング、人事、教育等）が、ネットワークを通じて利用可能なコンポーネントとして存在する。このコンポーネントを適宜組み合わせることにより、サービスを構築することが可能となる。このような世界において必要となる研究開発領域を採り上げた。

- 知のコンピューティング

情報科学技術を用いて、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速するために必要となる研究開発領域を採り上げた。特に、社会性、倫理性などにもとづく社会デザインにまで関与するために、知の社会適用に必要な ELSI/SSH やプラットフォームにフォーカスして研究開発領域を再構成した。

参考資料

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）、「研究開発の俯瞰報告書 情報科学技術分野（2015年）」（CRDS-FY2015-FR-04）、2015年4月、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-04.pdf>

4. 2 Reality 2.0 (CPS/IoT)

情報科学技術の進展は目覚ましく、その高度化と社会への普及はあっという間に進んでいる。データ処理技術や通信技術の進展とともに、ネットワークに接続される機器は増大し、その数は 2020 年には 500 億端末に上り、2025 年にはインターネットに接続する人口は 55 億人に達するとの予測がされている。こうした変化は、産業構造の変化を引き起こし、あるいは個人の生活や社会のあり方にも影響を与え始めている。

これまで、現実世界（実体社会）は、あくまで物理世界であり、サイバー世界は物理世界に情報をもたらすコンピューター群であった。ところが、近年の IoT (Internet of Things) や CPS (Cyber Physical Systems)、ビッグデータ等をはじめとした情報科学技術の進展・普及に伴い、個人やビジネス、社会活動において、サイバー世界が物理世界と一体となって切り離せないものになりつつある。この動きが進んでいくことで、近い将来、物理世界とサイバー世界が一体化した世界ができるであろう（図 1）。CRDS ではこの世界を「REALITY 2.0」と呼んでいる¹⁾。

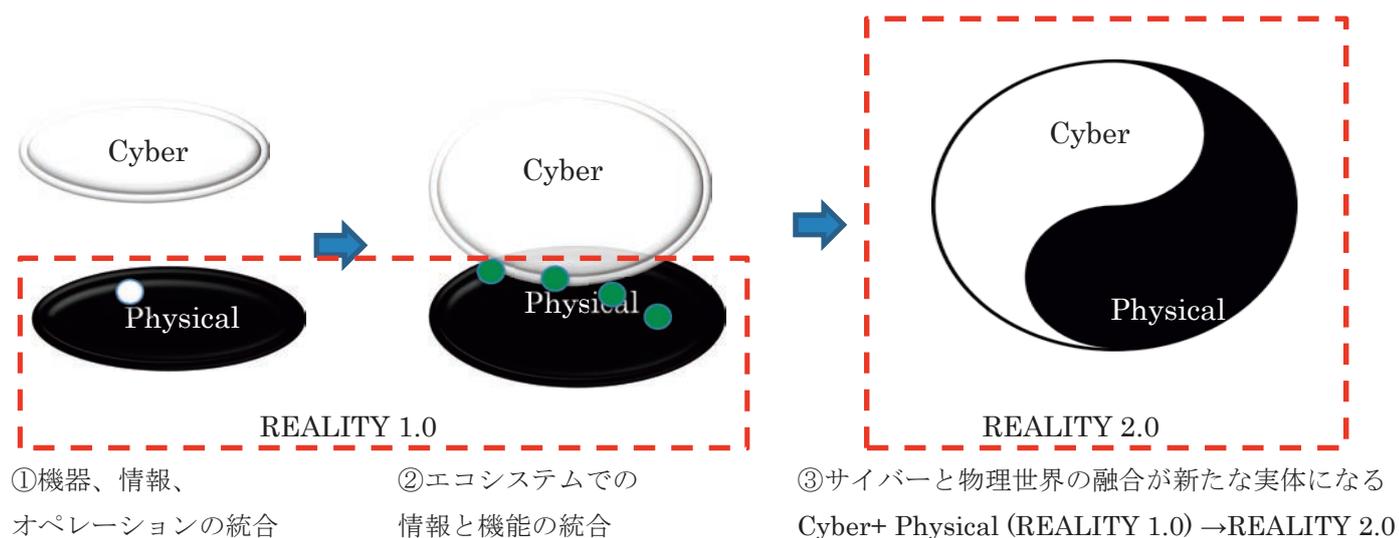


図 1 REALITY 1.0 から REALITY 2.0 の世界への移行

REALITY 2.0 の世界では、サイバー世界、物理世界に存在する多様な機能（モノ、ヒト、コンピューターやそれらが提供する、製造、物流、調達、ヘルスケア、ファイナンス、コンサルティング、人事、教育等）が、ネットワークを通じて利用可能なコンポーネントとして存在する。このコンポーネントを適宜組み合わせることによって、サービスを構築することが可能となる（図 2）。ここで、コンポーネントの構成を指定するものを、Software Defined（ソフトウェア定義）技術を核とした「実体定義レンズ」と呼ぶ。

実体定義レンズはソフトウェアプログラム的一种であり、サービスの要求者は、実体定義レンズを通じて、必要となる機能を要求する。実体定義レンズは、要求に応じた機能を持つコンポーネントをサービスプラットフォーム上で検索・発見し、それらを組み合わせることで要求に応じたサービスを構築する。

また、実体定義レンズは、適用ドメインやサービスに応じて複数作られる。これらを多段階に組

み合わせることができ、例えばモビリティとヘルスケアを重ね合わせることで、防災・減災に対応するシステムを構成することが可能になる。

また、セキュリティーや信頼性といった機能以外の要件（非機能要件）についても、実体定義レンズによって組み合わせることができ、要求するサービスに応じてセキュリティーの強度を利用者が選択するといったことが可能である。

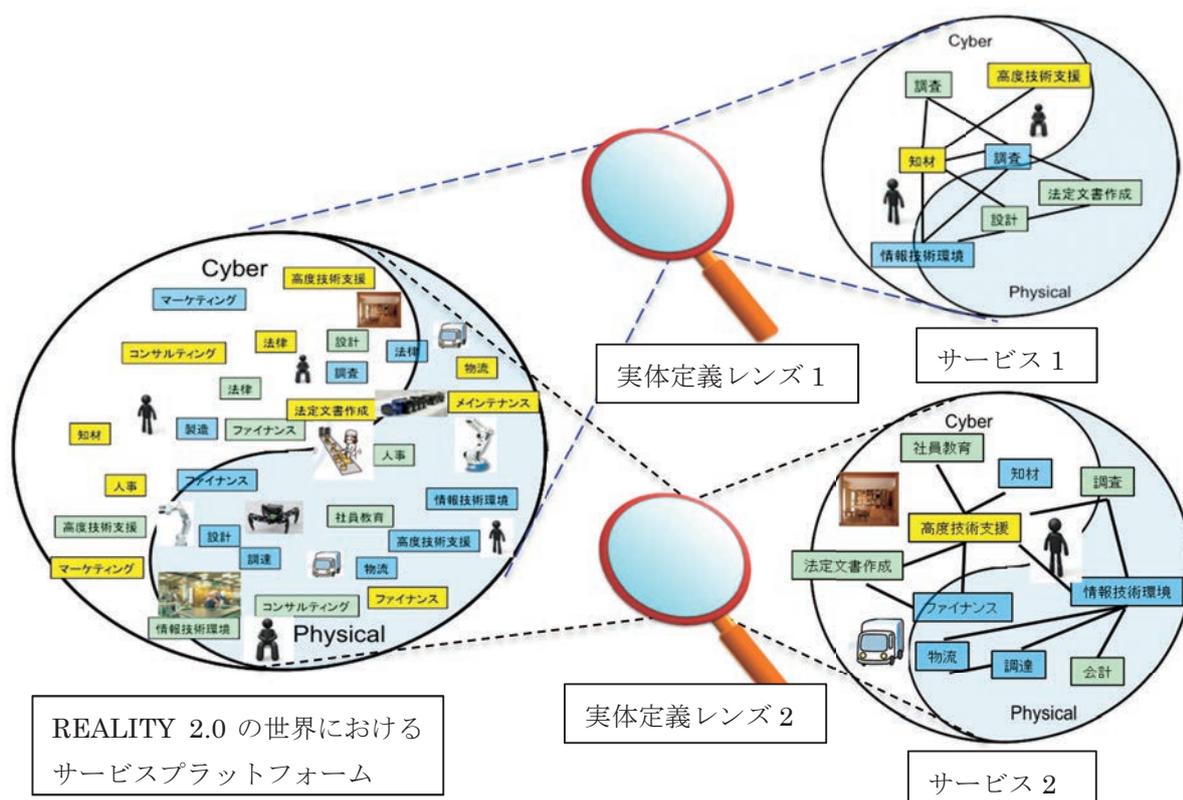


図2 サービスプラットフォームから実体定義レンズを通じたサービスの構築

こうした仕組みを構築していくことで、さまざまな機能のエコシステムが目的に応じて形成され、革新的なイノベーションが生まれるとともに、既存の価値観、社会規範が変貌していく可能性がある。

本章では、上記に向けて必要となる研究開発領域として、「ソフトウェア定義技術」について記載する。

【参考資料】

- 1) 情報科学技術がもたらす社会変革への展望 — REALITY 2.0 — の世界のもたらす革新
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/XR/CRDS-FY2015-XR-05.pdf>

4. 2. 1 ソフトウェア定義技術

(1) テーマ名

ソフトウェア定義技術

(2) 概要

ソフトウェア定義技術とは、システムの構成要素となっているハードウェアやソフトウェアコンポーネントのインターフェースや機能の差異を吸収すると同時に、その挙動をソフトウェアで定義・制御する、抽象化と仮想化技術の総称である。

ソフトウェア定義データセンターは、その最たる典型で、ネットワーク、ストレージ、CPU などすべての構成要素がソフトウェアで定義・制御可能なサービスとして提供されている。

(3) 国内外における研究開発の動向

これまでのアーキテクチャーの最大の弱点は、急速な外部環境の変化に対する仕様変更に対応できないことである。近年のビジネスは、リアルタイム性、拡張性、継続性、オープン性などがますます求められるようになっており、それを支えるためのテクノロジーも登場している。

現在のシステムは、ハードウェアとソフトウェアが混在し、ハードウェアについては、結線や設定など、人力に頼る必要がある。また、ハードウェアとソフトウェアが密結合しており、例えば、ハードウェアを変更すると、それに対応してOSやアプリケーションの見直しや動作確認が必要であるなど、技術の更新のタイミングの差異により、密結合したシステムの何かひとつが変更されただけで全体を見直す必要が生じることになる。このため、システムの入替えによる非機能要件の向上が見込まれても機能面に差異がない場合には入れ替えのインセンティブが働かなかつたり、全体コストの低減が見込まれても多数のシステムが稼働している中での一括置換えは現実的でなかつたりすることから、管理上の負荷の増大や新しい技術の導入の足かせになるという問題があった。

そこで、新しいアプローチとして、ソフトウェア定義が登場した。ソフトウェア定義とは、システムの構成要素となっているハードウェアやソフトウェアコンポーネントのインターフェースや機能の差異を吸収すると同時に、その挙動をソフトウェアで定義・制御する、抽象化と仮想化技術の総称である。例えば、ネットワークの流れを制御するネットワークスイッチは、複数のベンダーが商品販売している。ネットワークスイッチは、ソフトウェアのコマンドによる制御が可能であるが、そのコマンドの内容や使い方は、ベンダーごとに異なっている。この違いを吸収し、どのベンダーのネットワークスイッチが使われていても、同じ方法で制御ができる仕組みをソフトウェア定義ネットワークという。

ソフトウェア定義は、ネットワーク（SDN: Software Defined Network）¹⁾から始まり、ストレージ（Software Defined Storage）、コンピュート（Software Defined Compute）、データセンター（Software Defined DataCenter）²⁾といったハードウェアへと広がり、現在では、Web サービスといったアプリケーションソフトウェア（SDAS: Software Defined Application Service）³⁾にまで広がっている。アプリケーションソフトウェアについても同様に、ソフトウェアベンダーごとに、同じ機能でもインターフェースが異なる。このインターフェースを統一し、どのベンダ

一のアプリケーションソフトウェア機能でも、ソフトウェア定義によって、制御ができるようになる。

SDAS は、再構成の迅速化と制御の簡素化を両立させることができる。物理プレーン、仮想化レイヤー、アプリケーションプレーンという 3 つの階層構造で全体を管理する。SDAS とは、SOA (Service Oriented Architecture) ⁴⁾ の概念を発展させたものである。SOA は小さなアプリケーションを”サービス”という単位で柔軟に組み合わせることで、システムの再構成を迅速化することができる。ソフトウェア定義アーキテクチャーは、SDAS の範疇である Web サービスに加え、コンピュータやストレージ、ネットワークなどのハードウェアインフラも対象とすることができる。

オープンコミュニティを中心として、ドメイン共通プラットフォームのソフトウェア定義化が進んでおり、代表的なものとして、IaaS (Infrastructure as a Service) 領域では OpenStack⁵⁾ や CloudStack⁶⁾、PaaS (Platform as a Service) 領域では CloudFoundry⁷⁾ や OpenShift⁸⁾、GE 社が開発中の Predix Cloud⁹⁾ などがある。今後は、ドメインに特化した SaaS (Software as a Service) 領域への拡大が考えられる。

また、ソフトウェア構築定義テンプレート、業務フロー関連技術などを活用して、機能群を依存関係や設定値などを含めて自動的にインストール、構成することや、複数のクラウドサービスをつなげて、一つのシステムを構成することがソフトウェア定義を活用することで可能となる。

トップダウンアプローチである SOA は一般に広くは普及しなかったが、マイクロサービス ¹⁰⁾ というキーワードで、Web サービスは再度注目を浴びつつある。マイクロサービスはボトムアップアプローチであるため、複数の開発者から、同じような機能が異なるインターフェースで、個別に提供される可能性がある。アプリケーション側から見れば、サービス提供者を変えると、プログラムを書き換える必要がある。そのため、サービス提供者とサービス使用者のコミュニケーションが重要になる。

国内の事例でも、携帯電話会社が何か新しい料金プランを出せば、他社が即座に追従する。契約時の料金のシミュレーションや、料金計算にはシステムが必要だが、短期間で新料金プランに対応したシステムを開発していることになる。過去のプランも、契約者がいる限りは継続するので、オプションまで含めると、その組み合わせは膨大な数になる。携帯電話各社では、このような複雑なシステムでも短期間で対応できるように、開発手法、システム構造、ソフトウェアなどの工夫をしている。

昨今、インダストリー4.0¹¹⁾ やインダストリアル・インターネット ¹²⁾ など、企業内だけでなく、企業間で連携していく取り組みが始まっている。板金や溶接、組み立てなど各企業が強みを持つ工程をつなげて、ひとつの商品を作り上げていくバーチャルな工場を作ろうという取り組みも、そのひとつである。企業単独では商品を生産することができないものを、複数の企業が連携することによって実現する。

すでにこのような連携が、配車サービスを展開している Uber¹³⁾ というシステムで、始まっている。配車アプリを通して、今居る場所への配車指示、目的地までの移動、決済などを行うことができる。現在は、人が運転する車が、“移動という機能”を提供しているが、将来的には自動運転車も、同様の“機能”を提供するだろう。配車を指示した人は、誰が運転しているのかを意識せずに、“移動という機能”を使用することになる。

このように、外部環境の変化に合わせて、必要な“機能”を組み合わせ、迅速にシステムを構

築するために必要な工夫を、あらかじめしておく必要がある。このようなスピード感を持って、優位性を確保することが、最重要課題であると考ええる。ここで“機能”をサービスと置き換えれば、以上の議論はすべてソフトウェア定義技術により実現可能な課題であると考えられる。

(4) 科学技術的・政策的課題

1) “機能”の大きさの明確化とインターフェースの共通化

“機能”の大きさをどうするか、という課題は SOA の当初からある古典的な課題であるがいまだ決定的な解決策はない。“機能”を小さくすると、多くの人に使ってもらえる可能性がある。単価も安くなる。一方、インターフェースの呼び出しによるオーバーヘッドが大きくなり、性能が悪化する可能性もある。他社との差別化が難しく、競争が激化するかもしれないが、“機能”を使う側からすれば、スイッチングコストが安くなり、移行のモチベーションにもなるだろう。逆に、大きくすると、“機能”に自社の強みを反映でき、競合との差異を明確化できることで、単価を上げることができるが、汎用性が低くなるため、アプリケーションからの使用頻度が少なくなり、再利用性が悪化する。このためには、サービス毎に“機能”の大きさを最適化するために実証的な研究をする必要がある。また、サービス実装におけるノウハウを蓄積し、共有化していくべきである。

さらに、同じ“機能”であっても、実装によってインターフェースが異なると、それを呼び出す側の負担が大きくなる。標準化団体やオープンコミュニティなどにおいて、“機能”単位のインターフェースを共通化・標準化しておく必要がある。

2) “機能”を適正に利用する仕組みの構築

“機能”をサービスとして提供するという事は、アウトプットに対する責任が発生する。“機能”の使用に関して代金を徴収できたとしても、それ以上の損失を憂慮すれば、外部公開しない、という選択をするかもしれない。システム全体の活性化が脅かされないよう、責任範囲を明確化しておく必要がある。そのために、“機能”を公開し、利用に供するプラットフォームを構築し、そのプラットフォーム上でメタデータとして仕様を公開できる仕組み、“機能”の信頼性を評価する仕組みを実装するといった方法が考えられる。権威のある認定機関で信頼性などを保証するよりも OSS や API エコノミーで行われているような競争に基づく市場原理に任せる方式の検討も行うべきである。

3) サービスの変化に迅速に対応可能なシステム構造・環境の実現

機能群の実装であるサービスは、日々もしくは時々刻々変更を加えていく必要がある。開発現場の意向を踏まえて、SOA+DevOps 的に開発を行うマイクロサービスのようなボトムアップアプローチが重要となる。

例えば、アマゾンでは 11 秒ごとに新しいコードがデプロイ(展開)されており、最も多いときで 1 時間に 1079 回デプロイが行われる¹⁴⁾。シリコンバレーのスタートアップでは、短いサイクルでの事業化とその検証を繰り返す“リーンスタートアップ”を実践している。このようなスピード感が、他社優位性を確保し、企業の成長の原動力になっている。頻繁に修正を加えた場合でも、その修正が他に影響を及ぼさないように、あらかじめ、システムやソフ

トウェアの構造を設計、構築しておく必要がある。また、プログラムの修正を最低限に抑えるために、ルールやプロセスを簡単に追加、修正できる仕組みを取り入れておく必要がある。

こうしたことを実現する手段として、“機能”を公開し、それを利用するためのサービスプラットフォームの構築が考えられる。このプラットフォーム上でサービスに必要となる機能を検索し、それらの統合化により迅速なサービス構築可能とする。このためには、必要となる機能の検索、発見技術や機能同士を統合化するための、ソフトウェア定義技術の研究開発が必要となる。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- **FinTech** : Finance (金融) と Technology (IT 技術) の 2 つの言葉を合体させた造語である。つまり「IT を使ったお金にまつわるツールやサービス」のことを総称して「FinTech」と言う。“クラウドファンディング”もその一例で、将来的には、ソーシャルレンディングとしてお金を借りたい人とお金を投資したい人を結びつけるサービスができ、銀行を通さずに「誰でも銀行商売ができて、誰でも自由にお金を借りられる」可能性がある。
- **AirBnB** : 自分の空き部屋やスペースを有料で旅行者に貸すサービスである。宿泊する側の使い方はシンプルで、泊まりたい街を検索すると その街で物件を登録しているユーザーがヒットする。宿泊費や、家のタイプ（一軒家、プライベートルーム、シェアルームなど）から、自分の希望に合った物件を選び、希望日に空きがあれば予約ができる。受け入れ側から見ても、自分の家に空き部屋やスペースがあれば旅行者に有料で貸し出すことができる。
- **シェアリングエコノミー** : サービス・人材・プロダクトなど有形無形を問わず、交換・共有により成り立つ経済の仕組みのことを指す。欧米を中心に広がりを見せており、近年、日本でも浸透しつつある。例えば、“野球場で社員総会”、“有名スタジオで忘年会”など遊休スペースを簡単にインターネット上で貸し借りすることができる。
- **API マネジメント** : ウォーターフォール開発が主流の基幹システムと、スピードを重視するスマホなどのモバイル機器の進化速度や開発手法の差を補完し、迅速かつ効果的に連携を実現する方法として、「API (Application Programming Interface)」が今再び注目されている。API 公開においては、基幹システムの情報を社外のスマホなどのモバイル機器からアクセス可能にするため、セキュリティやプライバシーの配慮は必須で、また、API のビジネス成果を可視化し、制御するための監視や流量制御の機能も欠かせない。公開した API の品質が不適当な場合は企業イメージが損なわれる懸念もある。効果的に API を公開し、ビジネス貢献を図るためのツールや手段をまとめた技術は「API マネジメント」として急速な進化を続けている。
- **API エコノミー** : プラットフォームとなるアプリケーションやサービスの API を公開し、他社がこの公開 API を活用して新たなサービスを開発し提供することで、元のプラットフォームやその情報の付加価値を高める経済活動、または、高められた魅力的な情報が API 化されて更に流通することで、API によってつながれた市場が、新たなビジネス圏を生み出していく、インターネット上の新たなビジネスモデルである。
- **GitHub** : 何千もの組織、何百万ものユーザーがソフトウェア開発のコラボレーション効率の改善、コードレビューとプロセスの改善に利用しているプラットフォームである。ソフトウ

エア資産を共有することができるため、重複作業を防ぐことができるとともに、作成中のコードを有効に活用できるようになり、開発者の工数とコスト削減が可能となる。

(6) キーワード

Software Defined Network、Software Defined Storage、Software Defined Compute
Software Defined DataCenter、Software Defined Application Service
Service Oriented Architecture、Web サービス、OpenStack、CloudStack
CloudFoundry、OpenShift、Predix Cloud、マイクロサービス、インダストリー4.0
インダストリアル・インターネット、Uber、標準化、DevOps、FinTech
AirBnB、シェアリングエコノミー、API マネジメント、API エコノミー
GitHub

(7) 参考資料

- 1) NTT コミュニケーションズ株式会社,“SDN ガイドライン 第 0.1 版”,
http://www.o3project.org/ja/download/document/SDNguideline_ja_v0.1.pdf (2016年3月17日アクセス)
- 2) ヴィエムウェア株式会社,“Software-Defined Data Center”,
<http://www.vmware.com/jp/software-defined-datacenter/> (2016年3月17日アクセス)
- 3) ガートナー ジャパン株式会社,“デジタル・ビジネスのアプリケーション向け ソフトウェア・デファインド・アーキテクチャ”,
http://gartner.co.jp/b3i/research/150217_app/index.html (2016年3月17日アクセス)
- 4) 日本アイ・ビー・エム株式会社,“SOA 入門: 第1回 SOA って何?”,
http://www.ibm.com/developerworks/jp/websphere/library/soa/soa_intro/1.html
(2016年3月17日アクセス)
- 5) 日本 OpenStack ユーザ会,“日本 OpenStack ユーザ会”,<http://openstack.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 6) 日本 CloudStack ユーザー会,“日本 CloudStack ユーザー会”,
<http://cloudstack.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 7) 日本 Cloud Foundry グループ,“日本 Cloud Foundry グループ”,
<http://cloudfoundry.gr.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 8) アイティメディア株式会社,““使用”より“構築”で学ぶオープン PaaS 「OpenShift」(1/5)”,
<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1304/25/news014.html> (2016年3月17日アクセス)
- 9) 日本 GE 株式会社,“産業用ソフトウェアプラットフォーム、「Predix クラウド」”,
<http://gereports.jp/post/132395795854/predix-cloud> (2016年3月17日アクセス)
- 10) グローブエクスパートナース (株) 鈴木雄介,“マイクロサービスアーキテクチャとは何か”,
<http://arclamp.hatenablog.com/entry/2015/06/13/213830> (2016年3月17日アクセス)
- 11) ベッコフオートメーション 代表取締役社長 川野俊充,“ドイツが描く第4次産業革命「インダストリー4.0」とは?”,
<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1404/04/news014.html> (2016年3月17日アクセス)
- 12) 日本 GE 株式会社,“インダストリアル・インターネット”,
<http://www.ge.com/jp/industrial-internet> (2016年3月17日アクセス)

- 13) 株式会社 日経 BP, “シリコンバレー出張で思い知った「Uber」の威力”,
<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/opinion/15/221102/070900022/>（2016年3月17日アクセス）
- 14) 新野淳一, “Amazon は1時間に最大1000回もデプロイする。クラウドネイティブなデプロイとはどういうものか?”,
http://www.publickey1.jp/blog/12/amazon11000_aws_reinventday2_am.html
（2016年3月17日アクセス）

4. 3 知のコンピューティング

知のコンピューティングとは、情報科学技術を用いて、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速することである。知のコンピューティングにより、人々のくらしや社会システムの質的変革が促され、人と機械が共創した、より高度な知的社会が実現される。知のコンピューティングの開発により次のような成果が得られることを期待する。

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

知のコンピューティングを構成する研究開発領域を図3に俯瞰する。上段の3領域、①知の集積・伝播・探索、②予測・発見の促進、③知のアクチュエーションは、知のコンピューティングの最終的な目的となる領域を示す。④知の社会エコシステム・プラットフォームは、集積した知、生み出された価値を社会に還元して、共有・普及・促進を加速しやすくするための基盤となるソフトウェアとデータを含む。以上が新しい学術分野である。

下段の2領域、⑤個人・集団・生物に学ぶは、既存の学術分野を知のコンピューティングの文脈で整頓したものである。また⑥知の ELSI と社会適用は、知の集積・増幅・伝播・探索・予測・発見・アクチュエーションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。

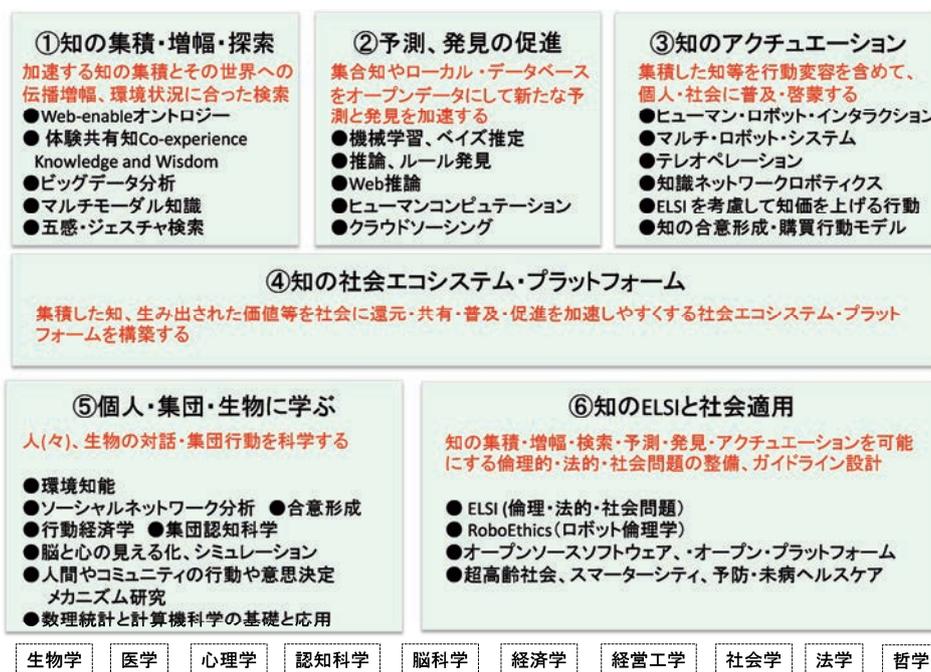


図3 知のコンピューティングの俯瞰図

今回の報告書では、③と④の密接な関連性を鑑み一つの領域として記述した。また、⑤は既存の学問領域が中心となるため改めて本節には記載することはない。

なお、執筆にあたり伊藤孝行教授(名古屋工業大学)、小林正啓弁護士(花水木法律事務所)、西田豊明教授(京都大学)の各位に協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

4. 3. 1 知の集積・増幅・探索

(1) テーマ名

知の集積・増幅・探索

(2) 概要

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。

(3) 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。なかでも、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、価値に気付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はじ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、他者の価値に気付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。構成員が暗黙裡に共有している価値に気付かないことは社会にとってはチャンスを失うこととなり、大きな損失である。価値のある知であるほどその存在は暗黙的である。達人の知のように必ずしも明文化されない感覚として保有されている場合もあれば、多くの人が分散して有しており、集合知プロセスを働かせたときはじめて顕在化してくるものもある。そのような知をタイムリーに捉え、多くの人が理解できるように増幅し、共有可能にして、体系化し、コミュニティ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。また、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つつあり、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からは乏しい。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ここでの提案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。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と考えられる。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。概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。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。参加者が暗黙裡に供した「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、本研究課題解決に有効である。

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。第一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、様々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。

(4) 科学技術的・政策的課題

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) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

[新たな技術動向]

非言語コミュニケーションまで視野に入れて人と人とのコミュニケーションの深部に立ち入った分析を行い、感性や知恵に迫ろうという取り組みが増えている。例えば、オノマトペ（擬音語）に注目した表現の解明¹⁾、スキルサイエンスなどがある。藤波努らのスキルサイエンスプロジェクト²⁾は、身体に反映された知識の表現であるスキルに注目し、その解明に取り組んでいる。また、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、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⁾。

(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

(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 ¹⁷⁾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。
	産業化	○	→	大きな潮流は見当たらない。
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。
	産業化	◎	↑	IBM Research ¹²⁾ などの取り組みに見られるように、産業化を本来の動機になっている。
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。
	産業化	○	→	SAP ¹³ などでも集合知を活用しようという取り組みはかなり行われている。
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
	産業化	△	→	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
	産業化	△	→	顕著な成果／活動は見当たらない

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考資料

- 1) 第27回人工知能学会全国大会オーナーガイドセッション『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/>

4. 3. 2 予測と発見の促進

(1) テーマ名

予測と発見の促進

(2) 概要

科学的発見¹⁻⁸⁾は、科学の中核を成し、人類の遥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。

(3) 国内外における研究開発の動向

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返しにより仮説が洗練されていく^{2,6,7)}。チャールズ・サンダース・パース（Charles Sanders Peirce: 1839-1914）によれば、推測による仮説生成は「アブダクション（abduction）」であり、仮説からの帰結計算は「演繹（deduction）」、そして実験による結果の検証は「帰納（induction）」とみなされ、科学的発見のプロセスの各段階において本質的な役割を果たしている^{3,7)}。本節では、発見の科学哲学に関する歴史^{1-3,6,7)}を概観した後に、予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向について俯瞰する。

(3.1) 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の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）からパターンを見出して、一般的な規則を導くことで、一般的な結論を導く。つまり、帰納法は小前提「こちらの豆も、あちらの豆も、この袋から取り出された」（個々の事実）と結論「取り出した豆はすべて白い」から大前提「この袋に入っている豆はすべて白い」（仮説）を想定する思考法である。個々の豆について、実際の色（個々の事象）を観察した後、その経験から得られた観察結果に基づいて類似点をまとめ上げることで、

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

アブダクション（仮説生成）は、個別の事象を最も適切に説明し得る仮説を提示する推論であり、帰納法と違って、事象間の因果関係の解明に重きを置いている。つまり、「この袋の中の豆はすべて白い」という規則を見出し、「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}。

(3.2) 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こと⁹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、ニューラルネットワークの新たな可能性を拓いたことは特筆すべきことである。Andrew Ng は、米グーグル基礎研究所 Google X でディープラーニング技術を開発してきたスタンフォード大学准教授であったが、2014年5月に中国のグーグルとも呼ばれる百度（Baidu）にヘッドハンティングされ、Baidu がシリコンバレーに新設した AI 研究所の初代所長に就任したことは驚くべき事実であった¹⁰。

1960年代に米国スタンフォード大学で開発された AI プログラム Dendral は、化学者が行うような判断と問題解決の過程を自動化することで、未知の有機化合物を質量分析法で分析し、有機化学の知識を使って特定した世界初のエキスパートシステムである¹¹。そして、この流れを引き継いで、1976年に D. Lenat により、探索ヒューリスティックス（経験則）手法を組み込んだ Automated Mathematician (AM) プログラムが開発され、面白い新概念やそれらに関する興味深い推測の発見が試みられた¹²。しかしながら、素数の概念のような興味深い新しい概念を発見するのにかなり高い能力を AM プログラムは示したものの、あらかじめ用意できるヒューリスティックスと発見でき

る規則の数は限定的であった。また、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、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ことが決まっており、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)}。

また、科学的発見に「集合知」で挑む動きがある。2013年6月に、G8科学担当大臣らによる科学研究データのオープン化に関する声明があり、その機運がますます高まってきた。オープンサイエンスのような動きは、「サイエンス 2.0」¹⁸⁾や「シチズンサイエンス」¹⁹⁾のような形で自然に出てきている。2007年には、英国オックスフォード大学でスタートしたオンラインプロジェクト Galaxy Zoo は、インターネット上で銀河の画像を分類するボランティア参加型プロジェクトであった²⁰⁾。Galaxy Zoo には、20万人以上のボランティアが参加して、天文学者がハッブル望遠鏡で撮影した銀河の画像を鑑賞しつつ分類することで銀河研究を支援しており、100万枚の画像を分類し、天文学者による銀河形成に関する探査的研究を助けた²¹⁾。これらの成果は、渦状のアームや銀河中心のふくらみなど画像中の形の特徴を読み取り分類する能力に関して、人間はコンピューターよりもはるかに優れていることを示している。2008年、米国ワシントン大学の David Baker 教授ら、「タンパク質折り畳み」問題（化学的に安定した最低エネルギー構造の特定）にパズルゲーム感覚でチャレンジし、折り畳みの優劣を競い合う無料プログラム Foldit を発表した²²⁾。タンパク質が取り得る形状は無数にあり、コンピューターによるシミュレーションでは膨大な時間がかかることから、「タンパク質折り畳み」問題は、科学における最も重要な未解決問題のうちの1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²³⁾ことは驚きであった。また、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⁾。

(4) 科学技術的・政策的課題

● コンピューターによる科学的発見のプロセスの問題点

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。

- オープンサイエンスによる科学的発見と科学研究データのオープン化

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とともに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興味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。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- 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様々な機能や、音声認識や画像の理解へも Watson が対応可能となり、質疑応答（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（癌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)}。また、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。また、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始めている。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⁾。現在、スイスの大学 ETH Zürich が中心とする研究チームが、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⁾。

- グーグルのディープニューラルネットワーク技術と強化学習の進化と深化

米国のグーグルやフェイスブックは、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 (ディープニューラルネットワーク技術、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²⁸⁾。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²⁸⁻³¹⁾。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³⁰⁾とともに、囲碁ヨーロッパチャンピオンのプロ棋士に 5 連勝した後、2016 年 3 月には、世界最強のイ・セドル棋士に 4 勝 1 敗の成績で歴史的な勝利をしたことは驚くべきことであった。DeepMind の研究者たちは、イ・セドル棋士との世紀の対戦の前に、ディープラーニングを使って AlphaGo を訓練し、ある種の「知性」に持たせることで本番の戦いに挑んだのである²⁸⁻³¹⁾。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。

- 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、様々な人工知能・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おり、2016 年は日本の AI 研究基盤元年となると期待されている。

(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、集合知、ディープラーニング、強化学習

(7) 参考資料

- 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)", IJCAI PDF (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. Dimairo, 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/>
- 24) 日本初のデータ解析クラウドソーシング (データ分析・予測モデル作成コンペ) マッチングサイト <https://crowdsolving.jp/>
- 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", 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-エッジコンピューティングに向けて用途開発を加速" 日経エレクトロニクス 2015/10 号 pp.18-19.
- 28) 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/>
- 29) Wired 日本語版ニュース (2016.3.16), AlphaGo とイ・セドルが、囲碁にもたらしたもの、AI にもたらしたもの <http://wired.jp/2016/03/16/final-round/>
- 30) D. Silver et al., "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search", Nature 529 (2016) 484.
- 31) 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 (2006) 335.

4. 3. 3 知のアクチュエーションとプラットフォーム

(1) テーマ名

知のアクチュエーションとプラットフォーム

(2) 概要

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及びそのための社会エコシステム・プラットフォーム

(3) 国内外における研究開発の動向

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。我々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として、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^{52,53,54)}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いる。

【グループウェア、Computer Supported Cooperative Work (CSCW)】

グループウェア及び 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様々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。このビジョンは様々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、及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 Crowds¹⁶⁾など群衆（Crowd）を対象としたアイデアや意見の収集や集約手法が研究されビジネスにも応用されている。例えば、InnoCentive は、これまでは解くことのできなかった課題に対して解決方法のアイデアを収集するプラットフォームであり、すでに広く利用されており 25 万人以上の登録者がいる。インターネット上で、課題を投稿し、その解決方法を収集する。InnoCentive はクラウドソーシング（Crowdsourcing）の実現例の一つであり、大衆からの課題解決のアイデアをインターネットで広く集めることに成功している。クラウドソーシングはすでに実用段階にあり、特にアメリカでは非常に多くの応用領域や方法についてベンチャー企業を中心に様々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 個をインターネットなどを最大限に活用して、それぞれの位置を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）を工夫することで約 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繋がり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、物理的な会議を開催し 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取るだけでなく、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し、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そして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、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わけではない。

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出来る。

(4) 科学技術的・政策的課題

- 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) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

(a) 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、Argumentation Map 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となる機能として、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。さらには様々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し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なわれている。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。様々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なわれているが、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4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、元々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、国際法上の調停であったり、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 において様々な現実の紛争に実際にに関わり、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などをベースに、自動ファシリテーション機構、エージェント自動合意形成アルゴリズム、についての研究がある。以下に最近の動向を上げる。

自動交渉機構に関する研究は、非協力的ゲームの囚人のジレンマの状況を、交渉エージェント間の何らかの通信やインタラクションにより、より社会的に価値のある合意点を見つけるアルゴリズムを議論する^{31,32)}。オークションでの最適化される経済的効率性は、その場での評価値の最大化でありパレート最適な合意点である。一方で、自動交渉機構の研究で議論されるのは、パレート最適な合意可能点が複数ある場合にどの点を選択するべきか、もしくは、エージェントの効用空間が不確実で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くても、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出来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⁾。
 - 人間の間で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。人間の間で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 (ホンコンやシンガポール)、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の世界的にリードするワークショップと競技会である。

(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している。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たる社会ネットワークの経路上にいる人すべてにうまく賞金を分け与えたのである。この仕組みはうまく機能し8時間で全てのバルーンが発見されている¹⁸⁾。
- **スコアリングルール** : 気象予測などで、気象予報官が自分の思った確率を正直に報告することで、最も高いスコアが得られるような関数を用いたスコアの方式である。その中の研究の一つとして、**Baysian Truth Serum (BTS: ベイジアン自白剤)** という方式がある。BTS のキーアイデアは、ある質問に対する回答について、その実際の頻度が、予測された頻度より大きい (**surprisingly common**) 場合に高いスコアをつけることにあり、これにより真実申告を引き出すことが知られている⁵¹⁾。

Reputation メカニズム : マルチエージェントの一連の研究において、各エージェントの行動に対する報酬関数を決めておき、行動をとった後にその報酬をポイントとして与える。そして、そのポイントに基づいてランキング (**reputation**) を決めるという枠組みである。様々

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⁾。

(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) 参考資料

- 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 Sci-

- ence, 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, 「ファシリテータに着目した合意形成支援システムの検証と評価—オフィス家具の商品開発を事例とする」, 日本デザイン学会, 2015
 - 25) 伊美裕麻, 伊藤孝行, 伊藤孝紀, 秀島栄三, "オンラインファシリテーション支援機構に基づく大規模意見集約システム COLLAGREE - 名古屋市次期総合計画のための市民議論に向けた社会実装", 情報処理学会論文誌, 2015
 - 26) 伊藤孝行, 奥村命, 伊藤孝紀, 秀島栄三, "多人数ワークショップのための意見集約支援システム Collagree の試作と評価実験—議論プロセスの弱い構造化による意見集約支援—", 日本経営工学会論文誌, Vol.66, No.2, 2015
 - 27) Takayuki Ito, Yuma Imi, Takanori Ito, and Eizo Hideshima, "COLLAGREE: A Facilitator-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, March 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", Series 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.

4. 3. 4 知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用

(1) テーマ名

知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用

(2) 概要

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。

(3) 国内外における研究開発の動向

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¹⁾としたことに端を発する²⁾。

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洩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³⁾。並行して学术界でも、水谷雅彦らによるプロジェクト「情報倫理の構築(FINE)」(1998-2002)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⁴⁾。

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の利用が普及し始めた産業用ロボットは、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つとみなせる。特に、自動走行は、ロボットの3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臨界点というシンギュラリティ（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。また、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は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 問題に取り組んでいる。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。法的課題についても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。第一条の目標から、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、実行の約束の全七条からなる。

日本では、政府と学术界が主導して取り組んでいる。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（明治大学）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⁾。また、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。JST では、知的情報処理の ELSI に関して、CRDS を中心に2013年からワークショップを継続的に実施している^{18),19),20)}。

(4) 科学技術的・政策的課題

[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」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⁾。次ページの表に抜粋する。ただし、ここに探索された課題は、知のコンピューティングや人工知能・ロボットに専ら関わるものと、情報科学技術全般に共通するもの、さらには、科学技術一般の社会受容そのものに関わるものとの区別が必ずしも明確でない。本領域で重要なことは、既知の解決方法や智慧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 1 想定される問題と倫理的・法的・社会的課題

倫理的・法的・社会的課題	想定される問題
新たな道徳 新たな犯罪 個人情報とプライバシー	ネット時代の情報倫理教育（子どもや一般人） 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）
知の所有権	平時や非常時（災害、犯罪、国防など）の使い分け 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を制御・誘導することが可能になる
アイデンティティー	サイバー上の情報やプロファイリングによる虚像 それに基づく不公平や差別の助長
労働や雇用	情報の標準化による個性の喪失 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

[政策的課題]

- 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する。
- 人文社会学者の継続的な関与に向けた取組み
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 では人文社会学者が、Horizon
2020 プロジェクトにおいて、SSH(社会人文学)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に、継続的な取組みが必要
である。
- 実環境シナリオでの実証
Paolo Dario（イタリア聖アンナ大学院大学）は、EU/FP7 RoboLaw プロジェク
トにおいてロボットを市民が暮らす環境の中で働かせて試験した。さまざまな問
題に遭遇し、対応に多大な努力を要したが、その結果、法規制の欠如、政治的手
段、想定外の障害などが明らかになったという²²⁾。知のコンピューティングが提

供するアプリケーションサービスにおいても特区などの制度を活用して実際の適用に向けた課題の抽出と必要な対処の試行を効率的に実施すべきである。

- 研究者に対する ELSI 教育の実践

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

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- 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ティブを推進する」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したり、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

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AAAS2015²⁷⁾やESOF2016²⁸⁾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」（仮）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。

(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

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(京都大学)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(明治大学)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、ラジコン機等) の安全な飛行のためのガイドライン施行 (2015/12)
	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産省と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)
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)
	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	→	△	● 産業資源省『ロボット倫理憲章』発表（2007）
	法的	→	×	● 特になし
	社会的	↗	△	● SOCIAL IMPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE - SIAI 2015

（註1） フェーズ（本稿では ELSI の各課題に対応させて記述）

倫理的：倫理的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

法的：法的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

社会的：社会的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

（註2） 現状

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3） トレンド

↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8） 参考資料

- 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) ROBOLAWASIA (<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) Wise Computing: Collaboration Between People and Machines, AAAS 2015 Annual Meeting, 2015
- 28) Wisdom computing: creative collaboration between humans and machines, EuroScience Open Forum Manchester 2016