

2.3 社会システム科学

第5期科学技術基本計画で提唱された、Society 5.0はサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることによって、経済発展と社会的課題の解決を両立しようとする社会である。社会システム科学は、我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱されたSociety 5.0の社会システムに関する研究開発領域である。社会システム科学はSociety 5.0における社会システムの安定的な挙動に向けた、設計、構成、監視、運用、制御、可視化、模擬および適切なメカニズムデザインにより社会システムの柔軟性とレジリエンスの実現を目指す。社会システムの大規模化・複合化・複雑化が高度に進展する中、社会システム科学の必要性が増してきている。

社会システム科学の俯瞰図（時系列）

技術としてはITハードウェアの進歩に基盤を置き、図2-3-1に示したように1980～90年代のPCやインターネットの普及、さらに2000年代のスマートフォンの普及やIoTの実現に従って、社会システムはクローズドシステムからネットワークで接続された巨大で複雑なオープンシステムへと発展した。また、ソフトウェア化・サービス化が進み、事業体内での最適化から複数事業体間での最適化も可能となり、都市規模の最適化へと向かっている。eコマースやオンラインバンキング、APIエコノミーなどITのスマート化はさらに拡大を続けている。一方、ITが格段に普及してもそれを扱う社会の仕組みは数十年変わらない、もしくはゆっくりとしか変化しないこと、あるいは、既存の法制度や商慣習のために新技術や新サービスの社会適用が阻まれるなど、既存の社会システムの進展とITの進展との間の食い違いが顕在化し始めている。

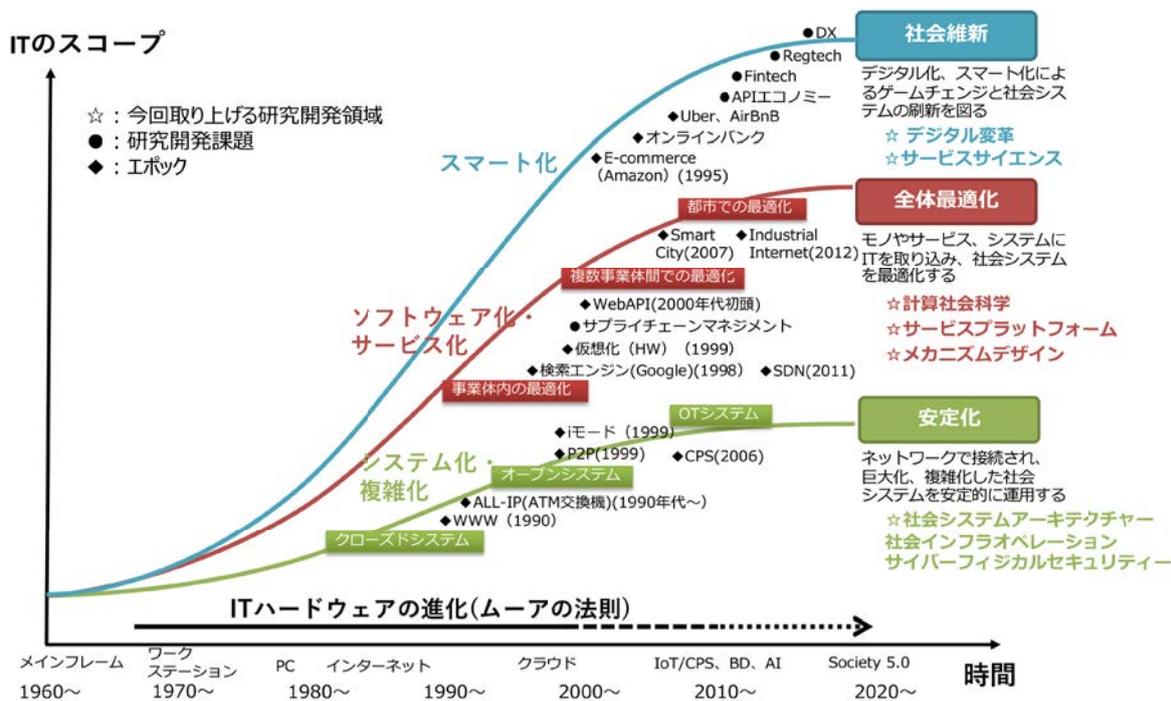


図2-3-1 社会システム科学の俯瞰図（時系列）

2.3 俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学

社会システム科学の俯瞰図 (構造)

この区分における三つの技術発展のトレンド「システム化・複雑化」「ソフトウェア化・サービス化」「スマート化」はそれぞれ「安定化」「全体最適化」「社会維新」の方向への発展が期待される。図2-3-2に注目する五つの研究開発領域を示した。

ネットワークで接続され巨大化・複雑化した社会システムの安定的な運用では、大規模システムのマネジメントに重要なコンセプトである「2.3.3 社会システムアーキテクチャー」を取り上げる。

また、Society 5.0の実現に向けては、モノやサービス、システムにITを取り込むことによる「全体最適化」の方向性が極めて重要である。これには、技術のみならず「2.3.4 メカニズムデザイン」や「2.3.5 計算社会科学」といった最適化(デザイン)のためのフレームワークの設定が求められる。

その上で、デジタル化・スマート化によるゲームチェンジと社会システムの刷新を図る「社会維新」に向けた研究開発戦略が求められる。本俯瞰報告書ではサービスに関わる科学的な概念・理論の構築から、サービス提供のためのシステムマネジメント技術、構築のためのエンジニアリング技術までを含む「2.3.2 サービスサイエンス」とデジタル技術を利用してビジネスモデルや組織構成をも変えていく「2.3.1 デジタル変革」を戦略的に重要な研究開発領域として取り上げる。

これらの研究開発領域を支えるサービスプラットフォームのアーキテクチャーであるICT社会基盤アーキテクチャーも重要な研究開発領域であるが、これはコンピューターシステムとして提供されるため、コンピューティング・アーキテクチャー区分で取り上げることとした。

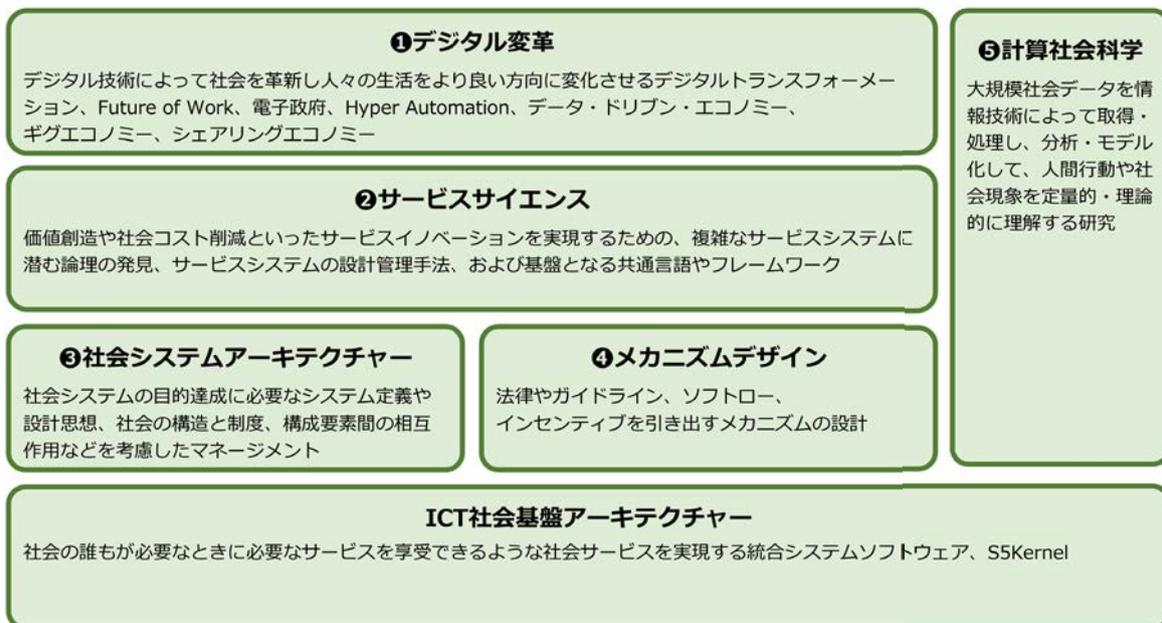


図2-3-2 社会システム科学の俯瞰図 (構造)

① デジタル変革

成熟し、日用品化しつつあるデジタル技術を利用して、社会や産業を変革することを目的としている。企業においては文化や風土といった組織のありかたや新たな顧客価値を生み出すためのビジネスモデルの創出などを目指す。デジタル技術を社会に浸透させることの重要性が増している。

② サービスサイエンス

サービスは、いわゆる旧来のカウンター越しの対面サービスのようなものも含めて、サービスを提供する人と利用する人が相互に影響し合って価値を生み出す行為である。サービスはさまざまな構成で実行されるプロセスであり、構成要素間の相互作用が非常に複雑なシステムととらえることができ、サービスシステムと呼ばれる。サービスの生産性向上と提供者と受用者の価値共創を目的とした、サービスとサービスシステムに関わる科学的な概念、理論、マネジメント技術、エンジニアリング技術の構築ならびに活用がサービスサイエンスである。

③ 社会システムアーキテクチャー

社会システムは社会を持続的に発展させていくというゴールに向けて、社会インフラなどのさまざまなシステムが相互に接続された全体のシステムである。このように、それぞれが独立したシステムとして動作しつつ、相互に関係しているシステム全体をシステムのシステム (SoS: System of Systems) と呼ぶ。社会システムアーキテクチャーはSoSである社会システムのアーキテクチャー定義と、マネジメントに関する研究開発領域である。

④ メカニズムデザイン

社会システムを運用するためには、制度を決めなければならない。社会にとって望ましい性質を持つ意思決定のルール／制度を設計するための研究領域がメカニズムデザインである。入札によって価格を決める意思決定の応用としてのオークションや、参加者の利益の全体を最大化する組み合わせを見つけるマッチングといった応用を持つ研究領域である。

⑤ 計算社会科学

ビッグデータやコンピューターを活用するデジタル時代の社会科学である。人間や社会が生み出す膨大なデータの分析、デジタルツールを活用した実験や調査、社会経済現象の大規模なコンピューターシミュレーションなど、新たに利用できるようになったデータや情報技術を駆使し、個人や集団、社会や経済等を、これまでにない解像度とスケールで定量的に研究する学際領域である。

社会システム科学では、技術が及ぼすリスクに対する社会受容性をどうやって醸成するのか、多様なステークホルダーの合意をいかにして形成するか、社会が持つ多様な価値をどうシステムに反映するのか、といったCPSとしての社会システムを前提とした、人文・社会科学的研究との連携も求められている。

2.3.1 デジタル変革

(1) 研究開発領域の定義

デジタル変革領域は、社会や産業をデジタル技術を利用して変革することを目的とした研究領域である。デジタル変革（DX: Digital Transformation）はすべての産業分野が対象であり、企業においては、文化や風土を変革し、競争力を高めて業績に貢献することが、社会においては、社会のシステムやプロセスを変革し、目指す社会（たとえば、Society 5.0）を実現することが変革の目的である。研究開発においては、現場を深く理解し洞察したうえで、新たな価値創出につなげることが必要となる。

(2) キーワード

情報通信、人工知能、モノのインターネット（IoT: Internet of Things）、ビッグデータ、5G、CPS（Cyber Physical Systems）、Society 5.0

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

PC、インターネット、クラウド、モバイル、といったICTインフラが整い、モノのインターネットが現れたことで、モノの情報がデジタル化されサイバー空間に持ち込まれるようになり、ディープラーニングの登場により、サイバー空間でのデータ処理技術が質的に変化したことで、デジタル技術を利用して、社会や産業を変革することが可能になった。リアル空間とサイバー空間が融合したCPS（Cyber Physical Systems）を利用して、顧客に新たな価値を提供することで利益を増大させたり、目まぐるしく変化するビジネス環境に対応するレジリエンス（強靭性）やアジリティ（敏捷性）を備えたりできる、デジタル変革に企業の注目が集まっている。また、社会課題の解決のためにもデジタル技術を活用することが有効であると認識され、第5期科学技術基本計画では超スマート社会実現に向けた取り組みとしてSociety 5.0が提唱された。デジタル変革は社会や産業を大きく変化させるという意義がある。

デジタル技術を研究開発する側からみると、新しいデジタル技術を創出することの重要性は変わらないものの、生み出したデジタル技術を社会や企業に浸透させる領域での研究開発がデジタル変革においては重要性を増している。デジタル技術を社会や企業に浸透させる領域においては、課題を明らかにしてから技術課題に落とし込むトップダウン型の研究開発が必要となる。情報科学技術分野においても、「デザイン」「スマート」「社会課題」などの言葉が多用され始めているが、以前からこれらの言葉を用いてきた土木や機械などの分野においてトップダウン型の研究開発が推奨されているのと同じである。

トップダウン型の研究開発において求められるのが「ストーリー」である¹⁾。どのように（how）実現するのかではなく、何を（what）なぜ（why）行うのかにより重きが置かれる。なぜこの研究開発を行わなければならないのか、この研究開発における課題は何か、この研究開発で誰にどのような価値を提供するのか、要求や要件を明確にしたうえで語る必要がある。デジタル変革の研究開発を進めることで、ストーリーを明らかにしながら研究開発を進める領域にデジタル分野の研究者や技術者に限らない多様な人々を集め、社会や産業のさまざまな場所でデジタル技術を利用して新たな価値を創出する動きを促進することができる。

[研究開発の動向]

デジタル技術の利用形態は、デジタイゼーション（digitization）、デジタルイゼーション（digitalization）、

デジタル変革 (digital transformation) と変化してきた。デジタイゼーションはアナログフォーマットをデジタルフォーマットに変えること、つまりデータのデジタル化である。CD、デジタル放送などがその例であり、デジタル化によってビジネスの効率化や合理化、付加価値の追加などができる。デジタイゼーションはデジタルデータやデジタル技術を使って処理の自動化 (場合によっては一部の自動化) を行う。デジタイゼーションが進んだデジタル革新では、デジタル技術を利用したビジネスモデルの変革や新しい価値の創出が行われるようになる。デジタル変革という用語は2000年に発行された文献²⁾のタイトルとして使われているが、これはデジタイゼーションに関連した内容であった。デジタルトランスフォーメーションの意味でデジタル変革という用語を提示したのは文献³⁾である。この論文ではデジタルトランスフォーメーションにより情報技術と現実が徐々に融合して結びつく変化が起こるので、情報システム研究者はより本質的な情報技術研究のためのアプローチ、方法、技術を開発する必要があるとしている。現在のところデジタル変革の定義は使うコンテキストに応じて微妙に異なるが、いずれの定義でも、デジタル変革に必要な新技術を開発するというよりは、すでにあるさまざまなデジタル技術を利用して引き起こす変革の方に焦点があたっている。

デジタル変革を推進するためにデジタル技術を社会に浸透させる研究の起点は、社会的課題の発見である。そのためには、新たな技術を開発する前に、社会的課題に気づき、課題と技術をマッチングさせることが重要となる。フィールドの要求や制約を抽出する作業が、デザイン学において具体的なモノを作り出す作業と類似していることから、Research through Designが提唱され、フィールドの問題を情報学から解決することを目指してフィールド情報学が提案されている。

Research through Design

デジタルを社会に浸透させる領域を加速する際に参考になるのがResearch through Designと呼ばれるデザイン学の分野である。Research through Designとは別の領域でも使えるような汎用的な知識を作り出すことを目的としている研究を、現実の世界に適用可能な特定のソリューションを構成的に作り出すことを目的としているデザインの知識や手法を利用して進めようとするものである。Research through Designでは人工物やプロトタイプデザイン (具体化) を利用して知識の一般化/抽象化を進める。Research through Designは特定の問題の解決策を探る研究で用いられることが多い。デザインの分野のみならずHCI (Human-Computer Interaction) の分野でもResearch through Designが取り入れられ始めている⁴⁾が、まだ確固たる枠組みが確立されているというところまでには至っていない。

フィールド情報学

京都大学で試みられたフィールド情報学⁵⁾も、デジタルを社会に浸透させる領域を目指している。フィールド情報学とは、多様さと複雑さを持った現場 (フィールド) の視点に立った情報学である。フィールドで生じるさまざまな問題に対して、情報学の視点から解決法を提案することを目的としている。フィールドは自然環境であることもあるし、人間社会であることもある。フィールド情報学は現場の分野ごとに考えられてきた解決法をフィールドにおける情報の扱いとして統一的に扱うことを目指している。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

欧州のデジタル戦略

EUでは、2020年2月にShaping Europe's Digital Futureと題した文書⁶⁾をまとめた。デジタル技術を

使って、以下の三つの柱に沿った施策を今後5年間で実施するとしている。

- ①人々の役に立つ技術
- ②公平かつ競争力のあるデジタル経済
- ③民主的かつ持続可能で開かれた社会

①では、人々のデジタルスキルの向上やインフラの構築といった施策を、②では、オンラインプラットフォームの責任強化とオンラインサービスの規則明確化を目的とした「デジタルサービス法」の提案や高品質データへのアクセス向上や個人情報の保護といった施策を、③では、炭素排出量削減や欧州グリーンディールに絡めた施策をそれぞれ打ち出している。

仕事の将来 (Future of Work)

世界中でデジタル変革が仕事の将来 (Future of Work) にどのような影響を及ぼすか、という議論が活発になされている。特にシンギュラリティー (AI技術の進展が人間の能力を超える時点) が2045年にやってくる、としたカーツワイルの著書⁷⁾が出てから、AIに職を奪われるといった論調の記事が多く見られるようになり、Future of WorkとしてAI技術が発展した世界における仕事が議論されるようになった。Future of Workは人口統計の変化、技術の進展などに伴って以前から議論されてきたテーマであり、デジタル変革の議論においても、Future of Workの視点は重要である。

Covid-19によるデジタル変革の加速

2019年末に発見された新型コロナウイルス感染症 (Covid-19) の世界的な流行を受けて、対面での会議のかわりにインターネットを利用したリモート会議の実施を余儀なくされ、対面での授業のかわりにインターネットを使った遠隔授業が広く利用されるようになった。日本では、行政手続きや医療のオンライン化が急務であるとの認識が広くなされた。またテレワークを困難にする押印といったビジネスプロセスの見直しも検討され、実行された。感染拡大が抑制されたあとのニューノーマル時代には、Covid-19流行以前にはあまり進んでいなかったテレワークなども含めた、デジタル変革の必要性があらためて認識され、推進が加速されることになった。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

経済産業省の取り組み

経済産業省は平成30年にDXレポート⁸⁾を発表している。これは企業のDXを推進するために現状と課題を明らかにしたレポートである。同時に経済産業省自身のDXを推進することを決め、経済産業省デジタル・トランスフォーメーションオフィスを設置し⁹⁾、法人・個人事業主向け行政手続きをデジタル技術で簡素化するための「法人デジタルプラットフォーム」の実現を目指している。

日本経済団体連合会の取り組み

日本経済団体連合会は2020年5月に「Digital Transformation (DX) ～価値の協創で未来をひらく～」と題した提言¹⁰⁾をまとめている。デジタル変革を「デジタル技術とデータの活用が進むことによって、社会・産業・生活のあり方が根本から革命的に変わること。また、その変革に向けて産業・組織・個人が大転換を図ること」と定義している。企業におけるデジタル変革への取り組み指針や、デジタル変革を推進するための規制のあり方についての提言がまとめられている。

EUの取り組み

EUではデジタルヨーロッパと呼ばれるデジタル変革を加速するためのプログラムが2021年から新規に始まる。予算額は2020年5月の提案では7年間で82億ユーロである。デジタル革新のために必要なインフラ構築、競争力強化、技術主権確保が目的で、スーパーコンピューティング分野に22億ユーロ、AI分野に24億ユーロ、サイバーセキュリティ分野に18億ユーロ、先端デジタルスキル分野に6億ユーロ、経済・社会全体でのデジタルの幅広い利用確保に12億ユーロが投資される計画である。

(5) 科学技術的課題

デジタル変革で利用される主要な技術について、デジタル変革をより発展させる上で必要になる技術的課題を挙げる。

サイバーフィジカルセキュリティ

IoTですべてのモノがインターネットにつながり、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合することから、電力ネットワークや水道などの社会インフラがサイバー攻撃される可能性がある。そのため、サイバー空間からの不正アクセスを防ぐセキュリティ技術が重要である。セキュリティとサイバー攻撃はいたちごっこが続くので、セキュリティ技術の開発は継続する必要があるし、技術だけでなく、不測の事態が起こらないように見守る監視体制の整備や、セキュリティ意識を持たせる教育も重要である。

クラウドとエッジの機能分担

さまざまなモノに取り付けられたセンサーから多種多様で玉石混交なデータがインターネット上を飛び交うことになる。それらのデータの交通整理を行うための研究開発が必要である。データの質をクラウドで学習して、不要なデータはエッジ側で廃棄の判断ができるような技術が望まれる。監視カメラのデータのような画像データはデータ量が多いので、エッジ側で適切な処理ができるように機能分散できれば、ネット上のトラフィックを削減でき、無駄な電力も減らせ、コスト削減にも役立つ。どのようにクラウドとエッジの機能を定義し、それを実現するかが課題である。

安心・安全なデータ管理

デジタル変革ではデータを集めて保管し利用する。個人情報のようにデータの取り扱いに法的な制限がかけられている情報も含めあらゆる情報を適切に収集し、解析し、利用する技術の開発が求められる。信頼できないハードウェアやオペレーティングシステムを含む計算環境でも安全にデータを取り扱えるセキュリティ技術の創出、オープンな環境でもプライバシーを確保する技術の創出、データの自由な流通と個人情報の安全性確保を両立するデータ駆動プラットフォームの研究などが必要である。

beyond 5G

IoT時代の無線通信に求められる属性である、超低遅延、多数常時接続を実現するものが5Gだと期待されている。5Gの超低遅延通信が実現すれば、建設機械やロボットをリアルタイムに遠隔操作できるようになる。多数同時接続が実現すればあらゆる機器をネットに接続できるようになる。さらに5Gには超高速・大容量通信という属性もあり、多種多様なトラフィックを収容できるようになると期待されている。5Gの次であるbeyond 5Gで、これらの属性の高度化や新たな機能の研究開発をしていくことが技術的課題である。

(6) その他の課題

現場と技術をつなぐ人材を含めたチームビルディング

デジタル技術を社会に浸透させる研究開発を加速するには、現場と技術を「つなぐ人」としてのカスタマーサクセス人材を研究開発に含めることが必要である。現場に深入りしなければ現場にある顧客ニーズを深掘りできないためである。文献¹¹⁾には、カスタマーサクセス人材に向く特性として、「共感性を持つ」、「論理やデータを優先して意思決定する」、「関係性を重視し、長期・全体へ目配りできる」、「自分と違うタイプの人と知り合うのが好きで、影響力を生かした協業がうまい」、「未知のことに挑戦し、未踏のフロンティアを歩くのが好き」という5点が挙げられている。ビジネスエコシステムを構築しながら事業開発をする人と言っても良い。ディレクター、プロデューサー、チャンピオンなどと呼ばれることもある。

カスタマーサクセス人材と御用聞きとは異なる。特定の顧客しか見ていないと、単なる御用聞き、いわゆるアカウントマネジャーになってしまう。カスタマーサクセス人材は「関係性を重視し、長期・全体へ目配り」しながら、新たなビジネスエコシステムを構築する。コンソーシアムなどの成否も、カスタマーサクセス人材の存在が肝となる。参画している多様なステークホルダーそれぞれに共感し、すべてのステークホルダーがウィン-ウィンの関係性を構築していくことができれば、コンソーシアムは成功する。

今まで、日本ではこのようなカスタマーサクセス人材を研究開発分野においてきちんと評価してこなかったため、研究開発分野にカスタマーサクセス人材が入ってきていない。研究から産業化までをつなげるためには、事業開発の経験のあるカスタマーサクセス人材と研究者・技術者との掛け合わせを考えていかなければいけない。そのためには、カスタマーサクセス人材にリソースをより重点的に分配していかなければいけない。

研究開発プロジェクト構成

デジタル変革領域に関連する研究開発プロジェクトは、先端研究、実用化研究から産業化領域まで分野横断で進めていくことに特徴がある。米国のNSFやDARPAが長期に亘って継続的に支援し続けているCPS (Cyber Physical Systems) やEUのArtemisやFIWAREなどが代表的なものである。組み込みシステムなど技術に立脚した分野であっても、研究と産業の接続を意識して分野横断で進めており、産業界が主導しているプロジェクトも多い。また、出口はさまざまな産業領域となるとともに、分野横断で進めることになるため、多くのステークホルダーを集めた大規模な「アンブレラ」プロジェクトを構成することも多い。

米国とEUの研究開発プログラムのアプローチには違いもある。米国は、NSFがアカデミア中心、NISTやDARPAが実用化を見据えた社会実装、業界団体が産業化を担うという構造になっているように思われる。人材の流動性がこれらの接続を滑らかにし、先端研究から産業化まで連携がなされている。EUは、トップダウン型であるべき社会の姿に向けて研究プログラムが組成され、実用化に至る道筋まで政策でつなげる構造になっているように見受けられる。

人材の流動性に乏しい我が国においては、欧州のトップダウン型プログラムの方が、親和性が高いように思われる。産業界なども巻き込み、トップダウン型でアンブレラ型プログラムを組成することが、デジタル変革を推進する一つの方策となり得る。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	beyond 5Gとして、通信についての基礎研究を推進。社会科学と自然科学が連携した研究の支援はこれから。
	応用研究・開発	○	↗	政府のデジタル化を目指したデジタル庁の設立はこれから。例えばオンライン診療にも規制の壁。
米国	基礎研究	○	→	NSF、DARPA、NISTといったファンディングエージェンシーが連携して、基礎研究から、実用化まで支援。
	応用研究・開発	◎	→	巨大プラットフォームを中心にデジタルを生かしたビジネスモデルが新たに生まれ続けている。
欧州	基礎研究	○	→	Horizon EuropeやDigital Europeなどのトップダウンであるべき社会の姿を示して基礎研究を支援。
	応用研究・開発	○	→	ドイツはIndustrie4.0を掲げ製造業のデジタル化推進。
中国	基礎研究	○	→	国家重点研究開発として、基礎研究から応用研究までを接続した研究を推進。
	応用研究・開発	◎	→	国家主導でデジタル化を推進。国内向けの巨大プラットフォームも出現。
韓国	基礎研究	○	→	基礎研究の重要性は認識しているものの、具体的なアクティビティーが見えない。
	応用研究・開発	○	→	ICTの普及は世界的にトップレベルである。政府のデジタル化も進んでいる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネルギー分野 2.2.11）

参考文献

- 1) 森川博之. 「ストーリーとしての研究開発」. 電子情報通信学会誌 100, no. 7 (2017年): 635-41.
- 2) Patel, Keyur, and Mary Pat McCarthy. *Digital Transformation: The Essentials of e-Business Leadership*. McGraw-Hill, 2000.
- 3) Stolterman, Eric, and A.C. Fors. "Information Technology and the Good Life." *International Federation for Information Processing; Information Systems Research* 143 (2004): 687-92.

- 4) Zimmerman, John, Jodi Forlizzi, and Shelly Evenson. “Research Through Design as a Method for Interaction Design Research in HCI.” In *Proc. CHI 2007*, 493–502, 2007.
- 5) 京都大学フィールド情報学研究会, 編. フィールド情報学入門. 共立出版, 2009年.
- 6) European Commission. “Shaping Europe’s Digital Future,” February 2020.
- 7) Kurzweil, Ray. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Penguin, 2007.
- 8) デジタルトランスフォーメーションに向けた研究会. *DXレポート ～ITシステム「2025年の崖」の克服とDXの本格的な展開～*. 経済産業省, 2018年. https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/pdf/20180907_03.pdf.
- 9) 経済産業省. 「METI DX」. 参照 2021年1月29日. https://www.meti.go.jp/policy/digital_transformation/index.html.
- 10) 日本経済団体連合会. 「Digital Transformation(DX) 価値の協創で未来をひらく」, 2020年5月19日. http://www.keidanren.or.jp/policy/2020/038_honbun.pdf.
- 11) 弘子ラザヴィ. *カスタマーサクセスとは何か*. 英治出版, 2019年.

2.3.2 サービスサイエンス

(1) 研究開発領域の定義

サービスは、いわゆる旧来のカウンター越しの対面サービスのようなものも含めて、サービスを提供する人と利用する人が相互に影響しあって価値を生み出す行為である。サービスは一對一だけでなく、多対一、一對多、多対多など、さまざまな構成で実行されるプロセスであり、構成要素間の相互作用が非常に複雑なシステムと捉えることができる。これがサービスシステムである。サービスの生産性向上と提供者と受用者の価値共創を目的とした、サービスとサービスシステムに関わる科学的な概念、理論、マネジメント技術、エンジニアリング技術の構築ならびに活用がサービスサイエンスである。サービスサイエンスは当初 Service Science, Management, and Engineering の総称であったが、近年は Design, Art, Public Policy が加わり、Service Science, Management, Engineering, Design, Art, and Public Policy の総称とされる。サービス経済の拡大に対応して、サービスエコシステム、サービスシステム等も対象とする。

(2) キーワード

サービスシステム、プロダクトサービスシステム、価値共創、サービスドミナントロジック、サービスデザイン、製造業のサービス化、サービスエコシステム、参加型デザイン、サービスソロジー、サービスマーケティング、サービスマネジメント

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

サービスとは、経済用語においては売買した後に物が残らず、サービスを受ける側に効用や満足を提供する形のない財のことである。産業分類では、サービス産業は農林水産業にも工業にもあてはまらない第3次産業を意味している。一般的に、人が一連の行為を通じて他者に利益をもたらすことをサービスと呼んでいる。しかしながら、広く捉えると、サービスとはさまざまな行為者（それは人でも機械でも構わないし、個人や1台の機械でも構わないし、組織や機械を含むシステムでも構わない）が相互に作用して価値を生み出すことと定義することができる。ITの世界において、30年前は、どのようなハードウェアを使った計算機か、ということにユーザーの関心があったが、クラウドの発展とともに、IaaS (Infrastructure as a Service)、SaaS (Software as a Service)、PaaS (Platform as a Service) というように、xxx as a Service という言い方が広まってきており、計算機の機能をサービス視点から捉えるようになってきている。また、MaaS (Mobility as a Service) という概念が提唱され、自動運転車の実現がみえてくると、車もサービスの視点から語られるようになってきている。このように、介護や観光などといった、旧来のサービス産業だけでなく、製造業も含め多くの経済活動の本質がサービスを提供することにある、と再定義され、サービスサイエンスの適用範囲が広がっている。

サービスサイエンスの研究開発が進展することによって、科学的・工学的手法を生かしたサービスの生産性向上と、価値共創を中核概念とした産業構造や社会システムの変革の解明とデザインとが期待される。サービスを定量的に計測することを可能にすることで、サービスを工学的に取り扱うことができるし、共創される価値とは何かを追求することで、生活の質の向上や、社会課題の解決もサービスサイエンスのスコープに入ってくる。このように、サービスサイエンスは、情報工学、認知科学、経済学、組織論、マーケティング、オペレーションズリサーチ等、多くの研究領域にまたがるインターディシプリナリーな研究領域である。日本において

はサービス学会(Society for Serviceology)が本領域の理念を推進しており、その設立趣意書によると、サービス学会はサービスに係る「社会のための学術」を構築することを目的としている¹⁾。

〔研究開発の動向〕

サービス研究において2004年が大きな転換点であった²⁾。まず、同年に発表された全米競争力協議会による提言書“*Innovate America*”、通称パルミサーノ・レポートにおいて「サービスサイエンス (SSME: Service Science, Management, and Engineering)」の概念が示され、米国を中心にサービスに対する科学的・工学的アプローチの本格的な検討が開始された。米国に続き、ドイツ、フィンランド、英国、韓国でもサービスサイエンス振興の取り組みを開始した。もう一つのエポックが、S. L. VargoとR. F. Luschによるマーケティング研究を源流としたサービスドミナントロジック (SDL: Service Dominant Logic) である³⁾。もともとこれらは別々の潮流であったが、2008年頃より相互に参照しあうなどの動きがみられ^{4), 5)}、補完がなされている。

日本国内の動向についても同様である。日本のサービス産業の生産性(労働生産性)が他の先進国と比べて低いことは以前から指摘されていたが、上述のサービスサイエンスの動きも相まって、日本におけるサービス科学・工学の政策的取り組みは、この生産性向上に端を発して2005年頃に始まった。代表的な取り組みとしては、サービス産業生産性協議会 (SPRING) の設置、文部科学省の人材育成プログラム、経済産業省の研究開発委託事業、産業技術総合研究所のサービス工学研究センターの設置、JST RISTEXの問題解決型サービス科学研究開発プログラム (S3FIRE) の設置などが挙げられる⁶⁾。

S3FIREではサービス科学を「サービスに関わる科学的な概念、理論、技術、方法論を構築する学問的活動、およびその成果活用」として定義しており、上述のサービスの科学的・工学的アプローチを色濃く反映した活動を当初行っていた。その後、S3FIREの本格活動時期(2011-2014年頃)は、国内でいえば人文社会科学、特にサービスマーケティング・マネジメントを含めたサービス科学の研究者コミュニティが形成されてきた時期である。また、国際的にみればサービスサイエンスとサービスドミナントロジックとが交差した時期とも一部重なる。そのため、S3FIREのサービス科学研究を国際的な研究開発競争の潮流に合わせて推進するために、サービスドミナントロジック等での中心概念である価値共創を軸に据えた展開や成果のとりまとめが徐々に行われていった。すなわち、日本におけるサービスサイエンスも共創の概念を包摂していったのである。共創の概念はサービスドミナントロジック以前にもシステム論や経営学の分野で存在していたが、情報通信技術の発達やスマートフォンの爆発的な普及などによりもたらされたさまざまな社会変化が、この概念の重要性にリアリティーを持たせたといえる。

現在、日本国内の関連学会においてもサービスサイエンス等に関する研究が個別に行われているが、上記の流れを最も汲んでいるのが、S3FIREの研究者コミュニティを中心に2012年に設立されたサービス学会である。その基本理念においても、サービスに対する科学的・工学的アプローチと価値共創の二つのキーワードがみられる。これが、本領域を読み解く上での基本的な理解である。2012年以降、世の中ではビッグデータへの関心、プラットフォーム・ビジネスの興隆、IoTによる製造とサービスの融合、シェアリングエコノミーの進展などがみられてきた。また、日本では第5期科学技術基本計画として超スマート社会であるSociety 5.0が掲げられており、ここではAIやIoTに大きな役割が期待されている。サービスについてもAIやIoTによる高度化が期待されており、サービスサイエンスの対象分野は広がりをみせている。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

サービスデザイン

サービスづくりのための一つの方法論や学術分野を表す固有名詞としてサービスデザイン (service design) という言葉が広く使われるようになってきている。サービスデザインとは、ユーザーの体験全体の改善を目的として、サービスを構成する要素を検討したり、その要素をまとめ上げたりする活動である。サービスデザインの動きには人間中心設計とデザイン思考が大きな影響を与えており、サービスデザインのためのツールの多くもこれらと共通している。サービスデザインでは、事業者や生活者の活動を観察、あるいは一緒に活動することで得られた共感をもとに、問題解決の方策を設計していく。欧州ではサービスデザインが組織戦略・経営に及ぼす影響について研究がされている他、特に北欧諸国と英国では、企業、行政、NPOなどとの協働により、医療、健康福祉サービスの改善等で成果が挙げられてきた。

また、サービスデザインを利用者中心に捉えると、解決策そのものに対する興味よりも、サービスによって、利用者の行動をどう支援するのか、あるいは利用者の行動をどのように変えるのか、という点に興味の中心がある⁷⁾。行動デザイン (behavior design) や行動のためのデザイン (design for action) と呼ばれる領域では、行動経済学などの知見を活用しながら、人々の日々の活動や行動習慣を変容し得るサービスをどのようにデザインするかに焦点があてられている。欧州では主に公共政策的な観点で、米国では産業の観点での応用が進められている。また、サービスデザインに関連しては、市民が参加して社会課題の解決方法を探るといった、参加型デザイン (participatory design) の手法の研究開発が進められてきた。さらに近年では、参加型デザインのアプローチの一環として、生活に根付いた場所 (リビング) を実証実験の場 (ラボ) として、提供者と利用者とは共に解決策を創り出す (共創) というリビングラボも注目を集めている⁸⁾。

サービスドミナントロジックとサービスエコシステム

2004年にマーケティング研究者であるS. L. VargoとR. F. Luschが、すべての経済活動をサービスとして捉えるサービスドミナントロジックという考え方を提唱した³⁾。商品は有形無形を問わず、顧客が利用することで初めて価値を持つものである、つまり、同じ商品であっても顧客によって価値は異なるため、商品の提供者は価値を提供するのではなく、価値を提案し、商品を受け取った顧客と一緒に価値を創り出すという考え方である。近年のサービスドミナントロジックの論点は、一対一のアクター間の原始的サービスに対するものというよりも、マルチステークホルダーを前提としたサービスエコシステム (service ecosystem) とそのデザインに対するものへと移りつつある。この文脈の下で、ネットワーク論、システム論、複雑適応系などの関連分野の他、サービスデザインや制度設計 (institutional design) との関係についても言及がなされつつある。2018年11月にはさまざまな研究者からの寄稿論文から構成されるHandbook of Service Dominant Logicが出版され、サービスドミナントロジックの近年の展開についてまとめられている⁹⁾。サービスドミナントロジックを軸にした社会システム (技術) への接近が行われており、本社会システム区分で扱われている技法 (モデリング&シミュレーション) の他、経済学 (特にゲーム理論) をもとにしたマーケットデザイン/メカニズムデザインとの関連も今後強くなっていくと思われる。

トランスフォーマティブ・サービス

トランスフォーマティブ・サービス研究 (transformative service research) とは、サービスと満足できる状態 (ウェルビーイング: well-being) の両方に焦点をあて、特にウェルビーイングの向上を目指す研究

である。ウェルビーイングとは、直訳すれば良い状態にあること、であり、何が「良い」ことなのかを明言していないが、満足、幸福、喜びといった感情を持つことや人生に意義を見だし、能力を発揮している状態なども含まれると考えられる。サービスを受けてウェルビーイングを向上させる対象としては、個人だけでなく、家族、コミュニティー、エコシステム、社会も対象とする。サービス経済は、単に経済的規模の拡大を追求する段階から、社会・環境の発展・持続可能性も考慮した変革的サービス経済（transformative service economy）を目指す段階に移行しなければいけないという考えに基づいている。経済的価値の創造だけでなく、社会的価値や自然生態系への配慮を含めた持続可能な価値の創造から考え、実践していくものである。サービス経済の成熟化への内省を含むものであり、過剰・過少消費の現象を考え直す過程で生まれたとされる¹⁰⁾。想定されるアウトプットとして、幸福や生活の質の向上の他、必要な人が必要なサービスを受けられるためのアクセス性の向上、サービスの過程で消費者が何らかの不利に陥る可能性の最少化、公平さの維持、格差の減少などが挙げられる。事例が集まりつつあるものの、いまだ途上の分野であるが、ここで掲げられているウェルビーイングは、今後のサービス研究にとって重要なトピックになるであろう。

プロダクトサービスシステム

プロダクトサービスシステム（product service system）とは、消費者のニーズに応えるために、プロダクトだけでなくサービスを組み合わせ対応するシステムのことである。製品製造・流通に伴う環境影響を低減し、持続可能な発展を実現するために、「脱物質主義」、「サービス化」を、ミラノ工科大学を中心とする都市工学の研究者たちが提唱したことが背景にある。プロダクトをサービス化しただけで、環境影響が低減されるわけではないが、一般にプロダクトサービスシステムはサーキュラーエコノミーを実現するために役立つコンセプトであると認識されている。例えば、利用サービスだけを提供することになると、カーシェアリングのように、商品（車）の総量を減らすことができ、商品の製造に伴う環境影響（原料採掘での廃棄物、製造でのCO²排出等）の削減につながる。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

NSFのファンディングと、サービスの国際標準化を挙げる。

スマートサービスシステム

スマートサービスシステムは、将来の状況への対応改善のため、データに基づき学習、動的適応、意思決定ができるサービスシステムである。超スマート社会やCPS（Cyber Physical Systems）のコンセプトで掲げられているように、ICTの進展により可能となったスマートサービスシステムもまたサービスサイエンスの大きな研究対象である。NSF（National Science Foundation）のDirectorate for Engineering, Industrial Innovation and Partnerships部門が実施する「Partnerships for Innovation：Building Innovation Capacity（PFI：BIC）プログラム」のトピックとして“human-centered smart service system”が2013年から2016年の間実施された。2015年には有毒藻類観測管理システムや感染症追跡システムなど10個のスマートサービスシステム研究開発に、2016年にはスマート工場や危険通知システムなど13個のスマートサービスシステム研究開発に、それぞれ100万ドルの資金提供がされた。また、このNSFでの取り組みを踏まえて、スマートサービスシステムに関する整理・体系化の試みもなされている¹¹⁾。2017年1月には、米国のサービスサイエンスの研究者・実務家コミュニティー（The International Society of Service Innovation Professionals：ISSIP）とNSFの共催で“Industry-Academe research

partnerships to enable the human-technology frontier for next generation smarter service systems"という内容の2日間のワークショップが開催された¹²⁾。

サービスの国際標準化動向

ISO (国際標準機構) やJIS (日本工業規格) のような標準は、今まで、その多くが製品 (モノ) を対象として確立されてきた。近年この標準の対象がサービスにも広がってきている¹³⁾。シェアリングエコノミーの品質標準、高齢社会のケアサービス標準などが、欧米主導の国際標準として議論されはじめている。さらに、より一般的・横断的な標準として、持続的なサービス提供の基盤となる人間中心の組織設計や、優れた顧客体験を継続して提供する組織の能力であるサービスエクセレンス (service excellence) の標準なども開発されつつある。サービスエクセレンスについては現在、ドイツのイニシアチブの下、ISO/TC312 Excellence in Service¹⁴⁾にて活動がされており、日本もDesign of excellent servicesを議論するWG2の議長として参画している。この国際規格により、エクセレントサービスの定義が明確になり、サービスを一定の基準のもとに測定・設計・管理・実現することが可能となる。

(5) 科学技術的課題

サービスサイエンスはさまざまな科学技術成果を結集した総合学問としての色合いが強い。2014年に行われた第10回科学技術予測調査では、それまでの“製造”分野に代わり“サービス化社会”分野が新設され、製造業のサービス化に限らず社会のさまざまな要素がサービス化しそれらがゆるやかにつながった社会像に関する広範なトピック (全101問) について専門家調査がなされた¹⁵⁾。2019年前半に実施された第11回科学技術予測調査では、第10回で問われていた内容 (トピック) の多くが、ICT・アナリティクスの科学技術予測における社会実装像 (社会に浸透した像や人に働きかける像) として直接問われるようになった。特にセンシング技術、データ解析技術、サービスロボット技術など、サービス科学・工学的アプローチから類推される設問に顕著である。このことは、サービスサイエンスという用語を出さずともその目指すところが浸透しつつあるという見方ができる一方で、サービスサイエンスでは何を研究すべきか、また何が他と違うかを明確に宣言しなければならない時宜に差し掛かっているとも捉えられる。サービスサイエンスにおける科学技術的課題を、サービス理論と価値共創、品質測定と価値評価、利用者の行動、提供者の活動、サービスデザインの観点から挙げると、以下のような技術課題が想定される。

- ・個人や社会に対して価値をもたらす行為としてのサービスに関する新理論の確立。
つまりサービスドミナントロジックをより発展させた新理論の追求
- ・サービスに関連した量の測定技術の開発
- ・共創によって生成される価値を測定する尺度
- ・利用者の主観性や多様性を考慮したサービス品質基準
- ・財・サービスの利用によって生じる快、不快、好き、嫌い等の感情計測
- ・サービス提供者および組織のスキルや成熟度計測
- ・ウェブルーミングやショールルーミング (実店舗で商品を見てWEBで購入、もしくはその逆) など、サイバー空間と実空間を行き来する利用者の行動解明
- ・個人や社会が持つ資源・スキルの効果的組み合わせや、共創における相互作用のダイナミズムの理論化
- ・さまざまな資源・スキルの遊休状況を複合したシェアサービスの社会システムシミュレーション
- ・今後の社会・経済の再設計に有効なパラダイムの創出

(6) その他の課題

サービスサイエンスは経営学、マーケティング、オペレーションズ・リサーチ、人事、組織学、経済学、情報工学、認知科学、自然科学、社会科学、人間科学、工学と幅広い研究領域に関わる研究であるため、サービスサイエンスを推進する人材の確保が課題である。ひとりの研究者がすべての分野のスペシャリストになることはできないので、いかにして必要十分な人材をサービスサイエンスの分野に集めるか、というチーム構成の課題がある。

そのためには、上記のような広い領域の人材を集めなければ達成できないような、ビッグチャレンジを設定して研究開発を推進する、課題設定型のプロジェクトが必要であろう。例えば、「環境問題に配慮した行動変容が促される社会をシェアリングエコノミーベースで検討」や、「パーソナルデータ、オープンデータを活用した地域振興のためのサービス検討」といったプロジェクトを設定し、推進する必要がある。

また、サービスサイエンスは産業界が実際の事業の中で活用しサービスのイノベーションにつながることで価値が高まる。新型コロナウイルス感染症がサービス産業に及ぼした影響は多大であるが、アフター・コロナ時代における新たなサービスを創出していくなかで、サービスサイエンスの産業界での活用が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	サービス学会に限らず、関連学会（専門領域）で活発に研究が行われている。一方で、JST RISTEX S3FIREのファンディング終了後、本領域にあった基礎研究費がなく、科研費細目“Web情報学”の中にキーワード「サービス工学」「サービスマネジメント」が存在する程度。
	応用研究・開発	○	→	サービス工学ロードマップで策定された観測・分析・設計・適用のフレームワークは普及が進んだ。しかしながら、学術研究の成果が産業界での取り組みに効果的に生かされているとはいえない。
米国	基礎研究	◎	→	サービスドミナントロジック、サービスマーケティング、マーケティング・デザイン/メカニズムデザインに関する研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	→	米国の場合には、当初よりこちらが強い。
欧州	基礎研究	○	→	サービスの国際会議 RESERの他、University of CambridgeのCambridge Service Allianceなど、欧州では以前より製品サービスシステム（Product Service System: PSS）として研究がなされてきている。
	応用研究・開発	◎	↗	Circular Economy, Industrie 4.0などの流れが多い。
中国	基礎研究	○	→	2008年頃から振興の取り組みを始めたと思われる。2019 INFORMS Conference on Service Scienceの開催国となっている。
	応用研究・開発	-		詳細不明。
韓国	基礎研究	-		第2次科学技術基本計画（2008～2012）で達成目標の一つとして挙げられたが、詳細不明。
	応用研究・開発	△	↗	サービスロボットが開発され、利用されようとしている。

2.3 俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネルギー分野 2.2.11）
- ・計算工学（もしくはエネルギー応用データ駆動科学）（環境・エネルギー分野 2.1.18）

参考文献

- 1) サービス学会。「設立趣旨」. 参照 2021年1月29日. <http://ja.serviceology.org/introduction/index.html>.
- 2) 村上輝康。「第1章 サービス学とサービスロジー」. サービスロジーへの招待, 編集者: 村上輝康, 新井民夫とJST社会技術研究開発センター, 4-20. 東京大学出版会, 2017年.
- 3) Vargo, S.L., and R.F. Lush. "Evolving to a New Dominant Logic for Marketing." *Journal of Marketing* 68 (2004): 1-17.
- 4) Lusch, R.F., S.L. Vargo, and G. Wessels. "Toward a conceptual foundation for service science: Contributions from service-dominant logic." *IBM Systems Journal* 47, no. 1 (2008): 5-14. <https://doi.org/10.1147/sj.471.0005>.
- 5) Maglio, P.P., and J. Spohrer. "Fundamentals of service science." *Journal of the Academy of Marketing Science* 36 (2008): 18-20. <https://doi.org/10.1007/s11747-007-0058-9>.
- 6) JST社会技術研究開発センター。「サービス学将来検討会 活動報告書 - 未来を共創するサービス学を目指して」. JST社会技術研究開発センター, 2015年.
- 7) Sangiorgi, D. "Transformative Services and Transformation Design." *International Journal of Design* 5, no. 2 (2011): 29-40.
- 8) Almirall, E., and J. Wareham. "Living Labs: Arbiters of Mid- and Ground- Level Innovation." *Technology Analysis and Strategic Management* 23, no. 1 (2011): 87-102.
- 9) Vargo, S.L., and R.F. Lusch, eds. *The SAGE Handbook of Service-Dominant Logic*. SAGE Publications Ltd, 2018.
- 10) 白肌 邦生, ホー バック. 「ウェルビーイング指向の価値共創とその分析視点」. サービスロジー論文誌 1, no. 1 (2018年): 1-9.
- 11) Lim, Chiehyeon, and Paul P. Maglio. "Data-Driven Understanding of Smart Service Systems Through Text Mining." *Service Science* 10, no. 2 (2018): 154-80. <https://doi.org/10.1287/serv.2018.0208>.

- 12) ISSIP/NSF Workshop. “Industry-Academe research partnerships to enable the human-technology frontier for next generation smarter service systems.” Accessed January 29, 2021. <https://www.servicescienceprojects.org/ISSIPNSF/>.
- 13) 持丸正明, 戸谷圭子. 「サービスの国際標準化動向」. サービスロジー 4, no. 3 (2017年): 40–43.
- 14) International Organization for Standardization. “Strategic Business Plan ISO/TC312.” Draft #1, 2020.
- 15) 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター. 「第10回科学技術予測調査」. 分野別科学技術予測, 2015年, 705–87.

2.3.3 社会システムアーキテクチャー

(1) 研究開発領域の定義

社会システムとは社会インフラなど、社会で利用されるシステムの総称である。社会システムは社会を持続的に発展させていくというゴールに向けて社会インフラなどのさまざまなシステムが相互に接続されたシステムである。このように、それぞれが独立したシステムとして動作しつつ、相互に関係しているシステム全体をシステムのシステム (SoS: System of Systems) と呼ぶ。社会システムアーキテクチャーは経済や環境、技術的な変化に対応し、社会を構成する人々の、身体的、精神的、社会的に良好な状態を意味するウェルビーイング (well-being) を維持、発展させることを目的に、SoSである社会システムのアーキテクチャー定義と、マネジメントに関する研究開発領域である。

(2) キーワード

System of systems、アーキテクチャー、ELSI (Ethical, Legal and Social Issues)、システムズエンジニアリング、ウェルビーイング、自律システム (A/IS: Autonomous Intelligent System)、ESD (Education for Sustainable Development)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

インターネット、モバイルネットワーク、Internet of Things (以下、IoT) 技術の発展により、さまざまなモノやシステムが相互につながるようになってきた。さらに、急速に進展する人工知能技術やそれを搭載するロボットなどの新技術も、今後社会システムに浸透していくと予想される。社会で利用されるさまざまなシステムが相互接続され大規模複雑化した社会システムは、いわゆる System of Systems (以下、SoS) となり、社会に影響する新たな課題をもたらすことが懸念される^{1), 2)}。アーキテクチャーとはシステムの基本的な概念または特性であり、システム要素とそれらの間の関係性を具体化したものであり、システムの設計や進化の原則となる。その役割はシステム全体の構想を示し、相互運用性を高め、関係する人の意思決定に貢献することにある。社会システムを SoS として捉え、SoS のアーキテクチャーを定義することで、倫理、法律、社会など多岐にわたる分野横断的な専門家や利害関係者が社会のめざす姿を描き、ELSI を考慮した対話によって社会的合意を形成し、それに基づき SoS の分析と統合を行うプロセスと仕組みを実現することが可能となる。さらに、SoS に対するシステムズエンジニアリング³⁾ を活用することで、必ずしも運用、管理が及ばない複数のシステムで構成されている社会システムを、経済的、政策的、技術的な環境変化のもとでもライフサイクル全般にわたって進化させることができるようになる⁴⁾。

[研究開発の動向]

当初、社会を支えるインフラストラクチャーは個別に構築され、運用されるものであった。組み込み計算機の発達に合わせて計算機が組み込まれ、インターネットといったネットワークの発達に合わせて、同種のインフラストラクチャー同士がネットワークで結合されシステムになった。IoT の概念に合わせて、システム同士をネットワーク結合して運用するようになり、システムのシステムである SoS が誕生した。電力システム、交通システムあるいは防災システムなどは、複雑に相互関係性をもつ複数のシステムから構成されている SoS である。SoS はライフサイクル全般にわたりマネジメントすることが困難なシステムを含むことがある。また、SoS はイ

インターネットを含む通信ネットワークに接続されたコンピューターシステムによって管理、統制される、サイバーフィジカルシステム (CPS: Cyber Physical System、以下CPS)⁵⁾ となっている場合もある。SoSは独立して動作可能なシステムが、ある共通したゴールに向けてネットワークされ、大規模な統合システムになっている。SoSは大規模で複雑でネットワーク化されているため、個々のシステムは独立して動作可能であるが、相互関係があり、要素である構成システムは、それぞれ異なるシステムライフサイクルを持つ。そのため、個々のシステムを最適化してもSoS全体の最適性は保証されないという特徴をもつ。

このような特徴をもつSoSを機能させるには、既存、もしくは、新規のシステムが混在することで得られる能力を、構成要素システムの能力の合計よりも優れたものにするために、計画し、分析し、編成し、統合するプロセスとして、System of Systems Engineering (以下、SoSE) が必要と考えられる¹⁾。システムズエンジニアリングで検討されるコンセプトである、分析、制御、評価、設計、モデリング、可制御性、可観測性、信頼性などを拡張してSoSに適用することが研究されている。

このようなSoSEの難しい課題に対処するためのマネジメントフレームワークとして、文献4では、SoSEのプロセスを時間で展開した波モデル (wave model) を提示している。そこでは、多岐にわたる進化の繰り返しの中で構成システムの開発を促し、社会システムを追加開発の対象として特徴づけている。外部環境からの社会システムへの継続的な入力の把握と、社会システムの動的な性質に対処するための継続的な分析を行い、社会システムを進化させる。この過程の中で、アーキテクチャーの進化もまた重要となる。社会システムアーキテクチャーは、時間とともに進化する社会システムの持続的なフレームワークを与えると同時に、新たな社会システムアーキテクチャーが追加実装されることで、アーキテクチャー自身も進化する。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

アーキテクチャーへの人の組み込み

社会システムの要素システムとして利用されるCPSについては、現実世界にユーザーとして存在する人を陽に考慮することの重要性が指摘され⁶⁾、CPSのループの中に人が介在することを前提とした取り組みがなされている⁷⁾。また、波モデルのプロセスを実現するための仕組みとして、SoSアーキテクチャーに社会のビューを持たせた上で、社会と技術システムの分析結果を踏まえて繰り返しマネジメントを行う仕組みとして、社会的合意をとりまとめた抽象的約定を設けるという提案もある⁸⁾。

社会システムに浸透する人工知能技術利用システム

技術の発展により、人工知能 (Artificial Intelligence、以下AI) の活用は避けて通れない。人々の仕事や生活に大きな影響を与えるAIについて政府や国際機関、企業で、AI活用原則ないしは倫理原則が策定されている^{9), 10), 11)}。このように各政府、各企業、各団体が独自の原則を掲げることは、おのこの姿勢や思想を国際社会、学会や市場に表明することとして大変意義深い。一方で、製品やサービスに搭載される自律システム、新興技術を設計する際のガイドラインの策定が望まれる。米国電気電子学会 (IEEE) の標準策定組織 (IEEE-SA) では、高度な知性を持った自律システム (Autonomous Intelligent System) の倫理にのっとった設計のガイドライン (Ethically Aligned Design、以下EAD)¹²⁾ を提唱している。EADには、その概念のフレームワークとして、“三つの柱” (The Three Pillars of the Ethically Aligned Design Conceptual Framework) が定義され、ユニバーサルな人間の価値観 (Universal Human Values)、政治的な自己決定とデータエージェンシー (Political Self-Determination and Data Agency)、技術的信

頼性 (Technical Dependability) から構成されている。また、人権、ウェルビーイング、透明性などの一般原則と、三つの柱の対応付けについても記載されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」

国内では、JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域¹³⁾の試みの中で、産学官が連携し、Society 5.0を形づくるための基盤として、多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームを構成しようとしている。システム連携を行うことでCPSを形成し、これを社会に組み込む際に人々との相互作用を考慮し、社会を持続可能なものとするために、社会をSoSとして考え、SoSアーキテクチャーに基づきこれをマネジメントしようとしている。

SIP 第2期 ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術

超スマート社会を実現するために、都市の抱える諸課題に対してICT等の新技術を活用しマネジメントするスマートシティの取り組みが全国各地でなされている。SIP「ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術」の中で、スマートシティのアーキテクチャーの設計が行われている¹⁴⁾。スマートシティへの取り組みでは、分野、都市ごとに個別に実装されて持続的な取り組みになりにくい、分野間のサービスが統合されないために住民の利便性が向上しにくい、構築されたシステムやサービスが再利用できないために開発コストが高いといった問題があった。スマートシティの構築に関する統一された手法・ルールを定義したリファレンスアーキテクチャーがないことが原因と考え、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議重要課題専門調査会での分野間データ連携基盤の整備に向けた方針の中で提示されたSociety 5.0のリファレンスアーキテクチャーをベースに、統一されたスマートシティリファレンスアーキテクチャーを構築し、産官学が共通指針とすべきリファレンスとして提供した。「利用者中心の原則」、「都市マネジメントの役割」、「都市オペレーティングシステム (都市OS) の役割」、「相互運用の重要性」の4つの基本コンセプトに基づき構築され、「都市マネジメント」と「都市OS」がスマートシティのサービスを提供する両輪とされている。地域のスマートシティ化により、デジタルによるコスト削減、生産性と付加価値の向上、住民中心の持続可能な地域経営の実現をめざしている。

情報処理推進機構のデジタルアーキテクチャ・デザインセンター設立

Society5.0を形成する基盤となるシステム全体のアーキテクチャーを産官学の連携の下で設計・提案し、その設計のための方法論を開発・確立するために、情報処理推進機構 (IPA) にデジタルアーキテクチャ・デザインセンターが2020年5月設立された。このセンターは

- ・異なる事業者間や社会全体でのデータやシステムの連携を容易にするための全体の設計図を作る「アーキテクチャー設計」
- ・設計を主導できる専門家の育成を担う「専門家の育成」
- ・将来的にアーキテクチャー設計が必要となりうる領域に関する調査および関係機関との連携方法の検討・情報交換等を行う「調査および国際連携」

の三つの機能を有している。

IEEEの標準策定プロジェクト

IEEEではEADに基づき、透明性、プライバシーなどの倫理を考慮した設計およびそのプロセスに関する標準を策定するプロジェクトP7000シリーズ¹⁵⁾が2017年に発足している。P7000シリーズは、P7000「システム設計中に倫理的懸念に対処するためのモデルプロセス」、P7010「自律的で高度な知能を備えたシステムが人間のwell-beingに及ぼす影響を評価するためのIEEE推奨プラクティス」、P7014「自律的で高度な知能を備えたシステムにおけるエミュレートされた共感における倫理的考慮の標準」など、13プロジェクトが存在する。その中でまず、P7010で検討されたドラフトが標準として承認され、2020年5月に公開¹⁶⁾された。今後順次、P7000シリーズが公開される見込みである。また、同時にP7000標準で使用される用語集(Glossary)¹⁷⁾も作成されており、自律システムに関するキーワードが整理されている。

(5) 科学技術的課題

社会システムアーキテクチャーに基づいて社会システムをマネジメントし、さらに、社会システムの分析を行いながら社会システムの進化に合わせて、そのアーキテクチャーを進化させていく、波モデルを実現するための技術的課題は少なくない。社会システムをどのように分析するのか、アーキテクチャーの進化をどのようにマネジメントし統治するのか、社会システムを進化させるときに必要なアーキテクチャーには何を記述しておくべきかについては、さまざまな利害関係者と共に取り組みなければならない大きな課題である。これらの課題は、技術的な観点だけでは解決に至らないこともあると考えられる。社会コンセンサスあるいは社会の合意に基づき、受容される社会システムを形づくる必要があるため、社会科学の分野の研究者、あるいは、地域と密着して活動をしている人々との協働が必要になる。地域やコミュニティで暮らす人々が身体的、精神的に良好な状態となり、そこに提供されるインフラやサービスに対してどのような意見を持っているのかを適時受け取ることは、社会システムの分析を行う際のもとになる情報を得るために必要と考えられる。

また、その分析に際しては、社会システムの状況をシミュレーションすることが求められるが、いわゆるデジタルツインと呼ばれる技術では、シミュレーションに用いるモデルの粒度を的確に定める必要がある。任意の粒度で適切に分析ができるようにすることは大きな技術課題となっている。このようなシミュレーションモデルを構築するためには、社会システムアーキテクチャーをあらかじめ定義しておくことが必要であるが、現時点では社会ビューポイントを網羅する方法論が確立されていないことも技術課題である。社会システムアーキテクチャーの統治、マネジメントに関しては、ISO/IEC/IEEE 42020 Architecture Processes¹⁸⁾が策定され、標準としての指針はここに示されているものの、社会システムへの適用に際してのテーラリングが課題となる。そして、この課題とともに、社会システムアーキテクチャーとして何を記述する必要があるのかを明確にする必要があり、このためには、社会システムの利害関係者を漏れなく抽出し、すべての関心事を把握することがその基礎となる。このことは社会コンセンサス、社会との合意と密接に関係することであり、社会科学の専門家との協働が欠かせないことを意味する。

(6) その他の課題

SDGs (Sustainable Development Goals)¹⁹⁾が2015年に国連から発行されている。これからのSociety5.0時代において、SDGsを達成し持続させていくには、現在および将来にわたりSDGsを推進する担い手として、先端技術を担い地球と社会の持続性に配慮できる人材の育成が必須となる。国連では、すべてのSDGsに貢献するための人材を育成する教育を提供することをめざし、「Education for Sustainable Development : Towards achieving the SDGs (ESD for 2030)」が掲げられている²⁰⁾。「ESD for

2030」は「ESDに関するグローバル・アクション・プログラム（GAP）」の後継枠組として、2019年12月国連総会において採択された決議に盛り込まれた。

「ESD for 2030」では、教育に関わるゴールであるSDG 4のみならず、教育がすべてのSDGs達成に向け重要なものであり、そのゴールは17のSDGsの達成を通じて、より公正で持続可能な世界を構築することである。また、「ESD for 2030」のアプローチとして「変容をもたらすアクション」(Transformative Action)、「構造的変革」(Structural Change)、「技術の未来」(The technological future)が挙げられており、個人の意識改革と行動変容のプロセス、社会課題の構造的な理解と困難な状況の人々への共感、社会課題を解決しようとする新興技術に対する批評(評価)的思考(Critical Thinking)が重要になる。このような動向を受けて、日本でも2019年にG20サミットに関連した教育イベントとして「21世紀の教育政策～Society5.0時代における人材育成～」²⁰⁾が開催され、Society 5.0時代や人生100年時代に向けた教育の転換点として、「ESD for 2030」の意義が確認された²¹⁾。

SoSである社会システムのマネジメントに対処するには、社会全体の課題を捉え、できる限りフラットな立場で検討を試みることができるシステムズエンジニアリングの基礎を身に付けることが重要となる。また、広範囲の技術分野と社会科学の分野の専門家や利害関係者との連携が必須になると考えられる。新しく開発された技術が、そもそも持続的で善き社会の構築に貢献できるのか、新たな課題を解決する可能性があるかなどを、多様な分野の専門家や利害関係者と批判的に、多角的に検証できる、倫理的な思考をもったエンジニアを育成する土壌が必要となる。言い換えるならば、自身のもつ専門性に引っ張られて、考え方が狭くなってしまふことを極力避けなければならない。ELSIを正しく理解し、例えば、「自律」、「協生」といった言葉を正しく理解し行動することができる技術人材こそが、これからの社会システムに欠かせないと考えられる。ただし、このような意識変革は、技術者などの理系人材にのみ求められるのではなく、いわゆる文系の研究者にも求められると考えられる。そして、両者がともに社会を形づくるために力を合わせることで研究体制の構築が求められる。そして、「より公正で持続可能な世界を構築する」というESDのマインドを持ってエンジニアがシステムを設計すれば、そのシステムを利用する人も、「より公正で持続可能な世界を構築する」マインドを持ち、結果的に社会全体が身体的、精神的に良好な状態に保たれると期待される。

今後ますます進化するAI、ロボットなどの高度な知性をもった自律システムが、人の代わりに人の仕事・サービスを提供することになり、そのような時代では、意図せずして人の行動を操作し、人権を侵害し、個人情報を利用する危険性がある。EADでは、自律システムの懸念として、プライバシーへの潜在的な害、差別、スキルの喪失、経済への悪影響、重要なインフラストラクチャーへのセキュリティリスク、および社会的ウェルビーイングに対する長期的な悪影響の可能性を挙げている。そのため、自律システムを設計する技術者が、ELSIを正しく理解することが必要となる。従来から技術者倫理の教育はなされているものの、エンジニアに対してELSIを考慮する教育がなされていないという問題がある。そのため、今後、倫理的な考慮のできるエンジニア、その育成環境の整備が求められる。

制度面での課題としては、社会システムについての活動で実証試験などを実施するために長い時間を要することがある。また、市民が積極的に参画して進める活動も社会システムを考える上では極めて重要なものである。このため、社会実証試験を実施するための制度面でのバリアーを低くすることが求められる。ただし、安全面、セキュリティ面での配慮は、社会への影響の度合いに応じて重要となるため、こうした社会実証試験を行うための制度作りを進める必要がある。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングの基礎に対する理解が十分ではなく、SoS関連の基礎研究が不足している。
	応用研究・開発	○	→	企業を中心にIoTへの興味は高く、個別の研究、プロジェクトは実施されていると考えられるが、システム全体あるいはSoSとして検討された研究はほとんど見られない。
米国	基礎研究	◎	→	IEEE、INCOSE関係では、SoSに関する研究は多数あり、標準化に向けての議論がなされている。 IEEE SA Global InitiativeによりEAD公開、具体的な標準をP7000シリーズとして策定中。 国家科学技術会議(NSTC)の人工知能特別委員会(Select Committee on Artificial Intelligence)による米国人工知能研究開発戦略計画2019年アップデート ²²⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	ビジネスへの応用を視野にUAFが提案され、それを応用する研究がすでに始まっている。NSFは他の省との連携によるプロジェクトへの予算化を進めている。
欧州	基礎研究	◎	→	CPSoS、SoSアーキテクチャーに関する研究がなされている。 OECD人工知能のガイドライン”Recommendation of the Council on Artificial Intelligence”¹⁰⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	個々の分野への応用を視野に入れており、電力が関係するスマートシティへの応用プロジェクトをHORIZON 2020で実施している。さらにHorizon Europeが2021年からの7年間のプロジェクトとして計画されている。
中国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	中国製造2025を立ち上げ、2049年までを見通した構想を掲げ、欧州企業との連携をすでに開始している。
韓国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	△	→	具体的な研究、プロジェクトは見えない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康) (環境・エネルギー分野 2.2.11)
- ・水循環 (水資源・水防災) (環境・エネルギー分野 2.2.3)
- ・水利用・水処理 (環境・エネルギー分野 2.2.4)
- ・電気エネルギー利用 (電力ネットワークマネジメント) (環境・エネルギー分野 2.1.8)

参考文献

- 1) Mohammad, Jamshidi, ed. *System of systems engineering: innovations for the twenty-first century*. John Wiley & Sons, 2011.
- 2) Maier, Mark W. "Architecting principles for systems-of-systems." *Systems Engineering* 1, no. 4 (1998): 267–84.
- 3) *A Guide for System Life Cycle Process and Activities*. 4th ed. Systems Engineering Handbook. Wiley, 2015.
- 4) Dahmann, Judith, George Rebovich, Ralph Lowry, JoAnn Lane, and Kristen Baldwin. "An implementers' view of systems engineering for systems of systems." In *Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International*, 212–17, 2011. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2011.5929039>.
- 5) "Definitions used throughout the project. Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-Physical Systems of Systems." Accessed January 29, 2021. <https://cordis.europa.eu/project/id/611115>.
- 6) Sowe, Sulayman K., Eric Simmon, Koji Zettsu, Frederic Vaulx, and Irena Bojanova. "Cyber-Physical-Human Systems Putting People in the Loop." *IT Pro, IEEE Computer Society*, February 2016. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.14>.
- 7) Madni, Azad M., Michael Sievers, and Carla Conaway Madni. "Adaptive Cyber - Physical - Human Systems: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop." In *28th Annual INCOSE International Symposium*, 2018. <https://doi.org/10.1002/inst.12216>.
- 8) 西村秀和. 「Society5.0 を形づくる」. 横幹, 特集「Society5.0、超スマート社会に向けた新しい価値を創造する各学会の取り組みと他分野との研究展望」, 12, no. 1 (2018年): 33–37. https://doi.org/10.11487/trafst.12.1_33.
- 9) 内閣府 統合イノベーション戦略推進会議. 「人間中心のAI社会原則」, 参照 2021年1月29日. <https://www8.cao.go.jp/cstp/aigensoku.pdf>.
- 10) 人工知能学会 倫理委員会. 「人工知能学会倫理指針」, 参照 2021年1月29日. <http://ai-elsi.org/wp-content/uploads/2017/02/人工知能学会倫理指針.pdf>. 11 OECD Legal Instruments. "Recommendation of the Council on Artificial Intelligence." Accessed January 29, 2021. <https://www.oecd.org/going-digital/ai/principles/>.
- 12) IEEE. "Ethically Aligned Design, First Edition (EADv1e)." Accessed January 29, 2021. <https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/documents/other/ead1e.pdf>.

- 13) 「JST未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域」. 参照 2021年1月29日. <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html>.
- 14) 内閣府. 「スマートシティリファレンスアーキテクチャー ホワイトペーパー (日本語版)」. 参照 2021年1月29日. https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/a-whitepaper1_200331.pdf.
- 15) “IEEE ETHICS IN ACTION.” Accessed January 29, 2021. <https://ethicsinaction.ieee.org/>.
- 16) “IEEE Std 7010™-2020: IEEE Recommended Practice for Assessing the Impact of Autonomous and Intelligent Systems on Human Well-Being.” Standards Committee of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, Approved May 5, 2020.
- 17) “ETHICALLY ALIGNED DESIGN First Edition Glossary.” Accessed January 29, 2021. https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/documents/other/ead1e_glossary.pdf.
- 18) “ISO/IEC/IEEE 42020:2019(E), First Edition, Software, Systems and Enterprise — Architecture Processes,” July 2019.
- 19) “SDGs (Sustainable Development Goals).” Accessed January 29, 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- 20) UNESCO. “UN General Assembly highlights UNESCO’s leading role in the Education 2030 Agenda.” Accessed January 29, 2021. <https://en.unesco.org/news/general-assembly-highlights-unescos-leading-role-education-2030-agenda>.
- 21) 文科省. 「2019年G20サミット教育関連イベント「21世紀の教育政策～Society5.0時代における人材育成～」G20 2019 JAPAN Summit Related Event on Education」. 参照 2021年1月29日. https://www.mext.go.jp/a_menu/kokusai/2019g20event/1419637.htm.
- 22) ぎょうせい. 「教育 Insight「21世紀の教育政策」で持続可能な開発目標に貢献」. 参照 2021年1月29日. <https://shop.gyosei.jp/library/archives/cat01/0000006828>.
- 23) NITRD. *THE NATIONAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT STRATEGIC PLAN: 2019 UPDATE*. Accessed January 29, 2021. <https://www.nitrd.gov/pubs/National-AI-RD-Strategy-2019.pdf>.

2.3.4 メカニズムデザイン

(1) 研究開発領域の定義

異なる目的／選好を持つ複数の参加者が存在する際に、なんらかの望ましい性質を持つ社会的意思決定のルール／制度を設計することを目的とする研究開発領域。各参加者の選好は個人情報であり制度の設計者（mechanism designer）にとって未知であることが通例であるため、参加者に真の選好を申告する誘因／インセンティブを与えるように制度を設計することが必要とされる。近年は、より実践的な側面を重視して、「マーケットデザイン」という用語が用いられることも多い。

(2) キーワード

ゲーム理論、ミクロ経済学、オークション、マッチング、マーケットデザイン、インセンティブ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

資源配分や公共的意思決定などの領域で、実現したいことを従来は、人間がアイデアを出し、議論に基づいて決めていたが、その結果は必ずしも最適とは言えなかった。本研究領域は、実現したい目標が自律的／分権的に実現できるようなルールを計算論的に設計（デザイン）することで、価格の均衡、公平性、正直であることが得をするといった性質を持つメカニズムの実現を目指している。

例えば、インターネットオークションで買い物をする際には、出品されている商品のどれを選択するか、また、いくらまでなら入札してもよいかなどの、さまざまな意思決定をする必要がある。また、出品する立場では、最低販売価格をいくらに設定するか、出品期間をどう設定するかなどを決める必要がある。これらの意思決定においては、自分の行動や利益のみではなく、他者がどのように考えて、どのように行動するかを考慮に入れる必要がある。このような複数の人間（プレイヤー）が、相手の利益や行動を考慮して戦略的に行動する場合の意思決定を分析する理論としてゲーム理論がある。ゲーム理論の一分野として、メカニズムデザインは複数の戦略的行動をするプレイヤーが集団で意思決定を行う場合に、望ましい性質を満足する社会的ルールを設計するための理論的根拠を与える。

また、人工知能の一分野であるマルチエージェントシステムと呼ばれる研究分野では、人間や知的なソフトウェア等の自律的な主体をエージェントと呼び、複数のエージェント間の相互作用を扱っている。マルチエージェントシステムの研究において、エージェント間の合意形成のためのルール設計は重要な研究課題となっている。このような研究を支える基礎理論として、ゲーム理論とメカニズムデザインの知見が用いられている。また、後述するキーワード連動型広告や組み合わせ入札等、インターネット等の技術の発達により実現可能となった新しい状況に適用可能なようにメカニズムを拡張することが、近年のマルチエージェントシステム研究における一つの大きな流れとなっている。

近年では、制度を実現する際の計算量や通信量等の実践的／工学的側面も考慮した情報科学分野との学際的な研究分野であることを強調し、「マーケットデザイン」という用語が用いられることも多い。

[研究開発の動向]

メカニズムデザインの主要な応用分野としてオークションとマッチングがある。以下、オークションとマッチングに関して、簡単な解説と研究開発の動向を示す。

オークション

オークションとは販売目的で売り手がなんらかの場に出した物品・サービスを、複数の買い手が価格を競って落札者を決定する仕組みである。オークションの仕組みは相互に提示価格を知ることができる公開型と、知ることができない封印型に分けられる。公開型は低い価格から始めてより高い値をつけた買い手に落札する英国式と、高い価格から始めて徐々に価格を下げ、最初に買うと宣言した買い手に落札するオランダ式がある。メカニズムデザインを適用するのは封印型のオークションである。以下の例で説明する。

- ・顧客はペイ・パー・ビューで、ある動画を見ようとしている。その際に複数の動画配信サービス会社が、顧客に対して同時に入札をして価格を提示する。顧客はこれらの入札に基づいて、どの会社を利用するかを決定する。

常識的な方法として、顧客は最も安い入札を選び、最も安い入札をした会社がその入札した金額で動画を提供することが考えられる（この方法は第一価格秘密入札と呼ばれる）。例えばA社が180円、B社が200円、C社が230円の入札をした場合、A社が落札し、180円で動画を提供する。普通に考えれば、これより良い方法はないと思われるが、この方法には若干の問題点がある。この方法を用いた場合、各社にとって入札値をどう設定するかが非常に難しい問題となる。入札値は理想的には原価に対して適切な利潤を加えたものになるべきであるが、適切な利潤というものを決める方法がない。実際のところ、各社は可能な限り利潤を増やしたいのであるが、落札できなくては利益が得られない。各社にとって他社の入札値をなるべく正しく推定することは非常に重要な課題となり、ダミーの顧客を使って他社の入札値を引き出そうとしたり、他社の入札をスパイしたりするような行為がはびこることが十分に予想される。

では、このような状況を回避することは可能だろうか。以下のように価格の決定方法を変更することにより、この問題を回避することができる。

- ・顧客は最も安い入札をした会社を選ぶが、その際に顧客が支払う金額は2番目に安い入札値とする。

前述の例では、A社が落札することは変わらないが、顧客の支払う金額はB社の提示した200円となる。この方法は第二価格秘密入札もしくはビックリー入札と呼ばれ、ノーベル経済学賞を受賞したWilliam Vickreyによって提案されたものである¹⁾。少し考えてみると、この方法を採用した場合、他社の入札値を察知することに意味がないことがわかる。落札した場合に自分が受け取る金額は、他社の入札値によって決定される。自分の入札値は自分が落札できるかできないかには影響するが、落札した場合の支払額には影響しない。よって、各社にとって入札をつり上げようという誘因はない。支払額は、勝者が勝てる範囲の最大の金額を与えていると考えられる。

おそらくこの方法は一見、非常識に感じられるであろう。顧客の立場からは180円の入札があるにも関わらず200円を支払うのは納得できないように感じられると予想される。しかしながら、実際にはこの方法を採用した場合、各社にとっては利潤を上乗せしない、原価ギリギリの価格を提示するのが最適な戦略となる（それでも利潤は得られることが保証される）。最初の方法と2番目の方法では、各社の提示する金額が異なってくるのである。このような原価ギリギリの価格は、最初の方法をとる限り、決して各社からは引き出せない価格である。英語で、Honesty is the best policy（正直は最良の策）という格言がある。通常は入札のような金もうけの場面で、正直が（というよりは何も考えずに入札することが）最良の策となることは考えにくいだが、ビックリー入札という、最も安値で入札した会社が、2番目に低い価格で落札するという制度を用いることにより、確かに正直が最良の策となるのである。さらには、最も低い原価を持つ会社が落札するということは、社会的に無駄がない効率的な結果となっている。

長い間、ビックリー入札は、優れた理論的な性質を持つものの、一般に広く用いられることはないと言われ

てきたが、検索連動型広告 (sponsored search) と呼ばれる事例で広く用いられるようになってきている。具体的には、広告主はサーチエンジン (例えば google) のキーワードに対して入札額を設定する。キーワードがユーザーによって検索されると、基本的には入札額の高い順に、検索結果とは別に、例えば画面の右側に広告が提示される。キーワード連動広告により、ターゲットを絞った効率的な広告が可能となる。また、ユーザーが広告のリンクをクリックした場合にのみ、広告主はサーチエンジンに広告料を支払う (pay-per-click) ようになっている。さて、ここで広告料をどのように設定すべきだろうか。初期のシステムでは、広告主は前述の第一価格秘密入札と同様に、入札に等しい額を支払っていた。しかし、この場合、広告主にとっては入札額の設定方法に様々な戦略が考えられる。このため、エージェントを用いてダミーの検索を行い、入札額を自動的に変化させる等の行為が横行し、入札額が著しく不安定になるという問題が生じた。

現在では、上からk番目の位置の広告 (スロット) を得た広告主は、k+1番目の広告の入札額に等しい額を払うという、ビックリー入札に準じた方式 (一般化第二価格オークション: Generalized Second Price Auction) に変更されている。この変更により、入札額の調整が不要となり、入札額が安定するという結果が得られている²⁾。誰かが検索エンジンを用いるたびに入札が行われているため、今やビックリー入札は、世界中で最も頻繁に実行されている入札の制度と言えるであろう。この事例は、人間同士のオフラインの取引では問題が生じなかった制度 (第一価格秘密入札) であっても、エージェントを含む系に導入された場合は、変化のスピードが急激であるため破綻してしまう可能性があり、より安定性の高い制度の導入が必要とされることを示している。

入札制度の設計に関して近年注目を集めた事例として、米国の連邦通信委員会 (FCC) による無線周波数帯域の使用権のオークションがある。FCCは米国国内の無線電波に関する免許を発行している組織であり、従来は公聴会や抽選等によって免許を発行していたが、免許発行後の権利譲渡や、不要になってしまった周波数帯域の非有効利用等の問題があった。公共の財産である周波数帯域の効率的かつ迅速な運用を行うため、1994年より入札によって無線免許を与える方針となった。入札メカニズムの設計にメカニズムデザインの専門家が多数参加しており、入札の理論的研究を活発化させる契機となった³⁾。電波の周波数の割り当てなど、従来では売ることが難しかったモノやサービスを売ることが可能にした新たなオークションのメカニズムデザインの研究と実用化に貢献したとして2020年のノーベル経済学賞をスタンフォード大学のポール・ミルグロムとロバート・ウィルソンが受賞した。

他にも、入札制度の設計に関して、売り手の利益を最大化するためのメカニズムデザイン⁴⁾、価値に依存関係のある複数の商品が販売される場合 (組み合わせオークション) のメカニズムデザイン、および組み合わせオークションが関わる計算問題の効率的な解法に関する研究等が行われている⁵⁾。

マッチング

マッチングは、学生と学校、労働者と企業のような二種類のエージェント間の望ましい組み合わせを求める問題であり、学生と学校をマッチする学校選択制、研修医と病院をマッチする研修医配属問題、また、大学関係者に非常に身近な問題として学生を卒業研究の研究室にマッチする研究室配属問題、さらに生体腎移植において患者とドナーをマッチする腎臓交換問題などの広範な応用を持つ。ロイド・シャプレイとアルビン・ロスはマッチングメカニズムの理論とその実践に関する業績で2012年のノーベル経済学賞を受賞している。特に、デイビット・ゲイルとロイド・シャプレイによる、Deferred Acceptance (DA) メカニズム⁶⁾ がよく知られている。

マッチングの基礎となる問題として、安定結婚問題がある。これは男女がそれぞれn人いるとして、ある望

ましい性質を満たす n 組の男女のペア (マッチング) を作るというものである。望ましい性質として、ここでは安定性を考える。例えば Alice、Becky、Carol、Daisy の 4 名の女性、John、Ken、Lee、Mike の 4 名の男性がいるとする。各男性は 4 人の女性に対して、各女性は 4 人の男性に対して、好みの順番が決まっている。当然、好みの順番は (たまたま同じとなるかもしれないが) 人によって異なる。Alice にとって、最も好ましい男性が John、2 番目が Ken、John にとって、最も好ましい女性が Alice、2 番目が Becky であるとする。ここで、もし Alice の相手が Ken で、John の相手が Becky だとすると、Alice と John は今の相手と別れてペアとなった方が二人とも今より幸福になることになる。このようなペアを不安定なペアと呼び、不安定なペアを含まないマッチングを安定なマッチングと呼ぶ。

どうしたら安定なマッチングを求めることができるだろうか。最も単純な方法として、男性の順序を固定し、女性の並び替えをすべて生成し、固定した男性の順序と組み合わせ、安定かどうかをチェックするという総当たり法が考えられるが、これは、最悪、 $n!$ の組み合わせをチェックすることになり、人数が増えると現実的な時間内に安定なマッチングを求めることは絶望的となる。より効率的に安定マッチングを見つける方法として提案されているのが、前述のロイド・シャプレイと、デイビッド・ゲイルによる DA メカニズムである。この方式では、男性/女性は、独身か婚約中のどちらかであり、初期状態では全員独身である。独身の女性が残っていれば、以下の処理を繰り返し適用する。

- ・独身の女性は、これまでにまだプロポーズをしていない男性のうちで、最も好みの男性にプロポーズする (男性が婚約中でも気にしない)。
- ・その際、一度断られた男性には二度とプロポーズできない。
- ・男性は、自分にプロポーズしている女性の中で、最も好みの女性と婚約し、他の女性のプロポーズを断る (現在婚約中の女性がいても、より良い相手がプロポーズしてきたら、現在の婚約を解消して、最も好みの女性とあらためて婚約する)。

独身の女性がいなくなれば、現在婚約中のペアでマッチングを決定する。

この方式を用いた場合、各女性は一度断られた男性には二度とプロポーズできないので、繰り返しはたかだか 4^2 回 (n 人なら n^2 回) で終了する。次に、この方式で安定なマッチングが得られることを示そう。任意の時点で、婚約中の男女に関して以下の性質が成立する。女性に関しては、婚約中の相手よりも望ましい男性には、すでにプロポーズして断られている。また、男性に関しては、今まで自分にプロポーズしてきた女性の中で、最も望ましい女性と婚約しており、この女性よりも自分にとってより望ましい女性は、自分以外の男性にプロポーズしている。よって、全員が婚約している終了時のマッチングにおいては、各女性に関して、現在の相手よりも望ましい男性は、自分のプロポーズを断って他の女性と婚約しているため、この男性とペアになれる可能性はない。また、各男性にとって、現在の相手よりも望ましい女性は、自分にプロポーズすることなく、他の男性と婚約しているため、この女性とペアになれる可能性はない。よって終了時のマッチングは安定である。

さらに、女性にとっては、まだプロポーズしていない中で最も好みの男性にプロポーズするのが最適である、すなわち、正直が最良の策であることが示される。要は、この方式ではプロポーズして断られても、その後不利な扱いを受けることはないので、玉砕覚悟で最も好みの相手にプロポーズするのが最適となる。また、このメカニズムで得られたマッチングは、すべての安定なマッチング中で女性にとって最も望ましいものになっていることが保証される。一方、男性にとっては、現在自分にプロポーズしている女性の中で、最も好みの女性を選ぶのが最適とは限らない。あえて好みでない女性を選ぶことで、結果としてより望ましい女性と結ばれるという、恋愛ドラマで出てくるような複雑な状況が存在し得る。

安定結婚問題の拡張として、学生と学校や研修医と病院のような、一つの学校／病院に複数の学生／研修医が割り当てられる多対一のマッチングがある。この状況に上記のDAメカニズムを拡張することは容易であり、学生を女性に、学校を男性に対応させればよい。各学生は、それぞれ第1希望の学校に応募する。学校は自分の学校に応募している学生から、自身の選好に基づいて定員まで学生を仮受諾として、その他の学生を拒否する。拒否された学生は、第2希望の学校に応募する。各学校は、仮受諾となった学生と、新たに応募してきた学生を区別せず、選好に基づいて定員まで学生を仮受諾とし、この処理を新たに応募する学生が生じなくなるまで繰り返す。この制度を用いた場合、学生にとって正直が最良の策であり、結果の安定性が保証される。また、安定なマッチング中で、学生にとって最も望ましいものが得られる。マッチングに関して、DAメカニズムの理論的性質の解析や、各種の応用事例に関する検討⁷⁾、マッチングに関わる各種の計算問題に関する検討⁸⁾、さらには、後述する制約の導入も含めたモデルの拡張等が行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

制度とは、人々の選好（例えばオークションであれば各参加者の商品に対する価値）を入力として、社会的決定（誰がいくらで落札するか）を返す関数とみなすことができる。様々な最適化の技術を用いて、望ましい性質を持つ制度／関数を人手によらず自動的に生成する方法（自動メカニズムデザイン）と呼ばれる研究が行われている。アイデア自体は以前から提案されていたが⁹⁾、探索空間が膨大となるため、実用的な規模の問題に適用可能な制度の設計は困難であった。しかし近年、深層学習¹⁰⁾やSATsolver¹¹⁾等の最新の最適化技術を用いる研究が活発化している。

マッチングに関して、現実の問題で重要となる各種の制約条件を満足する制度の設計に関する研究が進んでいる。例えば、研修医配属において、大都市圏の病院全体での研修医の数を制限することにより、地方の病院に十分な数の研修医が配属されることを目的とする地域上限制約¹²⁾、あるいは直接的に過疎地域の病院に一定の数の研修医を割り当てることを保証する下限制約¹³⁾、さらには公立学校において、学生の多様性を確保するためのアフーマティブアクション¹⁴⁾、¹⁵⁾等がある。また、DAメカニズムで扱うことのできる制約のクラスに関する数学的性質に関する研究¹⁶⁾も進んでいる。

また、より広範囲の問題を扱えるようにマッチングのモデルを一般化した研究が行われている。例えば、難民の家族を国や地域に割り当てる難民マッチングと呼ばれる問題¹⁵⁾、¹⁷⁾では、各家族は家、学校、病院等の複数の資源を必要とする。通常のマッチングでは、各学生／医師は、学校／病院の定員を一つ消費するのに対し、難民マッチングは複数の資源を扱い、また、資源の消費量が複数単位になり得るという点で、通常のマッチングモデルの一般化となっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

東大マーケットデザインセンター

東京大学経済学研究科が中心となり、東京大学マーケットデザインセンター²³⁾が2020年夏に開設された。前スタンフォード大教授でマッチング理論の世界的権威である小島武仁がセンター長を務めており、伝統的な経済学だけではなく計算機科学などの関係領域との学際的な協働を行い、これらの関係領域との高い次元での真に有機的な融合を実現することを目的としている。

研修医配属

研修医配属はマッチングの典型的な応用事例である。米国のNational Resident Matching Program (NRMP)²⁰⁾では、毎年、研修医と病院のマッチングを行っており、2018年には4万人以上の研修医と3万以上の病院におけるポストとのマッチングを行っている。研修医と病院の希望（研修医はどの病院に配属されたいか、病院はどの研修医なら受け入れられるか）のリストを元にマッチングを実施する、DAメカニズムをベースにしたアルゴリズムが採用されている。日本においても2004年から必修の臨床研修医制度が発足し、医学部卒業生に2年間の研修が義務付けられた。この研修制度とあわせて研修医と病院とのマッチング制度が採用され、NRMPと同じアルゴリズムが採用されている²¹⁾。日本においては、研修医の大都市圏への集中を避けるため、都道府県別の募集定員の上限が設定されているが、都道府県の上限を満たしつつ、より柔軟な配属が可能な制度の導入²²⁾が望まれる。

生体腎移植ネットワーク

倫理的な理由から、生体腎移植は近親者等のみに制限されることが通例であるが、免疫の不適合から近親者のドナーからの移植が不可能な場合に、生体腎移植ネットワークと呼ばれる、適切にドナーを交換することで移植の可能性を広げる方法が用いられている（例えば米国のUnited Network for Organ Sharing²³⁾）。適切なドナーと患者のマッチングを発見する制度／アルゴリズムが導入されている²⁴⁾。

(5) 科学技術的課題

オークション、マッチング共に、理論研究は数理モデルに基づいて緻密な理論が構築されており、モデルにおける前提条件が成立するならば、理論的帰結は論理的に正しい。しかしながら、理論的成果を実問題に適用する際には、モデルにおける前提条件、例えば人間の行動選択に関する仮定が成立するか否かを吟味する必要がある。前提条件が成立しない場合には、当然のことながら帰結も成立しない。

例えば、安定結婚問題におけるDAメカニズムが女性にとって正直が最良の策であるという帰結は、各男性は女性に対して固定された順序を持ち、その順序に従って行動するという前提に依存している。現実の状況を考えると、この前提が成立するかが疑わしい場合が存在する。例えば、男性、女性がそれぞれ100名の安定結婚問題において、自分が男性であり、事前の状態ではAliceとBeckyは、同程度に好きだが、ごくわずかにAliceの方を好んでいるとする。DAメカニズムを実行した際に、Beckyは最初から自分にプロポーズして婚約しているのに対して、Aliceの方は他の男性にプロポーズして断られ続けて、99番目に自分にプロポーズしてきたという状況を考えてみよう。人間の心理から言って、この状況でBeckyを断ってAliceを選ぶことは難しいが、DAメカニズムは、あくまで事前の順序に基づいてBeckyを断ってAliceを選ぶことを前提としている。事前の順序があまり変わらないなら、最初から自分を1番好きだと言っているBeckyを選びたいというのは自然な心理であるが、1番好きと言う女性を優先すれば、女性側にうそであっても「あなたが1番好き」と言う誘因を生じさせてしまう。行動・実験経済学、心理科学等の分野と協力し、エージェントシミュレーション、被験者実験、実証分析等を用いて、人間がモデルから外れた行動をとる場合の制度の頑健性の検討等を行い、社会的に受容可能な制度に発展させる必要がある。

また、現実の問題は複雑であり、既存の数理モデルで対応できるのは、現実の問題から抽出された部分問題にすぎない。例えば、マッチングにおいては、各学校には固定された上限制約が与えられているという前提が置かれていることが通例であるが、現実には各学校の定員は、その前段階として予算や人的資源に関する資源割り当て問題を解いた結果であると考えられる。通常、前段階の資源割り当て問題は、学生の

選好を予測して決定されているが、この予測が間違っていると、個々の問題に関して最適解が得られたとしても、全体としての最適解が得られることは保証できない。現実的な問題において、より大きな部分問題をカバーできるようにモデルを拡張することが必要である。前述の難民マッチングは、そのような一般化の一つであり、また、マッチングと資源割り当てを同時に扱う研究²⁵⁾がある。

(6) その他の課題

メカニズムデザインの実問題への適用に関して、我が国は立ち遅れており、過去の経験にとらわれた科学的根拠の弱い政策決定が行われがちである。例えば、我が国はOECD加盟国の小国を除いた中で、周波数利用免許割り当てをオークションによらず国の裁量で決定している唯一の国となっている。政策決定者や国民のメカニズムデザインに関する知識や理解の乏しさを克服することが社会的課題であり、そのための啓蒙活動が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	前述の東大マーケットデザインセンターが開設される等、研究コミュニティが拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
米国	基礎研究	◎	↗	AAAI、AAMAS等の主要会議において、論文の3割超は米国の大学・企業によるものである。
	応用研究・開発	◎	↗	周波数オークション、研修医マッチング等の社会応用事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
欧州	基礎研究	◎	↗	伝統的に理論研究に強みがあり、英国、フランス、ドイツをはじめ、多くの国でメカニズムデザイン、特に計算量的社会的選択理論と呼ばれる分野の研究が盛んである。
	応用研究・開発	○	↗	特にスマートグリッド等に関する応用研究が盛んであり、社会実験の事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
中国	基礎研究	○	↗	機械学習等の他のAI分野における急速な進展（AAAI2020では国別の採択論文数はトップ）と比較すると、やや緩やかではあるが、国際会議等でのプレゼンスは拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
韓国	基礎研究	△	→	特に目立つ動きはない。
	応用研究・開発	△	→	特に目立つ動きはない。
シンガポール	基礎研究	○	↗	シンガポール国立大、南洋理工大、管理大等で活発に研究が行われており、研究資金も潤沢である。
	応用研究・開発	○	↗	交通渋滞解消等の社会実験の事例、各種のスタートアップ企業が存在する。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) Vickrey, William. "Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders." *Journal of Finance* 16 (1951): 8–37.
- 2) Edelman, B., M. Ostrovsky, and M. Schwarz. "Internet Advertising and the Generalized Second Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords." *American Economic Review* 97 (2007): 242–59.
- 3) McMillan, John. "Selling Spectrum Rights." *Journal of Economics Perspectives* 8, no. 3 (1994): 145–62.
- 4) Myerson, Roger B. "Optimal auction design." *Mathematics of Operation Research* 6 (1981): 58–73.
- 5) Cramton, P., R. Steinberg, and Y. Shoham, eds. *Combinatorial Auctions*. MIT Press, 2005.
- 6) Gale, D., and L.S. Shapley. "College Admissions and the Stability of Marriage." *The American Mathematical Monthly* 69, no. 1 (1962): 9–15.
- 7) Roth, A.E., and M.A.O. Sotomayor. *Two-Sided Matching: A Study in Game Theoretic Modeling and Analysis (Econometric Society Monographs)*. Cambridge University Press, 1990.
- 8) Manlove, D.F. *Algorithmics of Matching Under Preferences*. World Scientific Publishing Company, 2013.
- 9) Sandholm, T. "Automated mechanism design: A new application area for search algorithms." In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 19–36, Springer, 2003.
- 10) Duetting, P., Z. Feng, H. Narasimhan, D. Parkes, and S.S. Ravindranath. "Optimal Auctions through Deep Learning." In *Proceedings of Machine Learning Research*, 1706–15, 2019.
- 11) Okada, N., T. Todo, and M. Yokoo. "SAT-Based Automated Mechanism Design for False-Name-Proof Facility Location." In *Proceedings of 22nd International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA-2019), Lecture Notes in Computer Science*, 11873:321–37. Springer, 2019.
- 12) Kamada, Y., and F. Kojima. "Efficient Matching under Distributional Constraints: Theory and Applications." *American Economic Review* 105, no. 1 (2015): 67–99.
- 13) Fragiadakis, D., A. Iwasaki, P. Troyan, S. Ueda, and M. Yokoo. "Strategyproof Matching with Minimum Quotas." *ACM Transactions on Economics and Computation* 4, no. 1 (2016): 6:1–

6:40. <https://doi.org/10.1145/2841226>.

- 14) Ehlers, L., I.E. Hafalir, M.B. Yenmez, and M.A. Yildirim. “School Choice with Controlled Choice Constraints: Hard Bounds versus Soft Bounds.” *Journal of Economic Theory* 153 (2014): 648–83.
- 15) Kurata, R., N. Hamada, A. Iwasaki, and M. Yokoo. “Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types.” *Journal of Artificial Intelligence Research* 58 (2017): 153–84.
- 16) Kojima, F., A. Tamura, and M. Yokoo. “Designing matching mechanisms under constraints: An approach from discrete convex analysis.” *Journal of Economic Theory* 176 (2018): 803–33.
- 17) Aziz, H., J. Chen, S. Gaspers, and Z. Sun. “Stability and Pareto Optimality in Refugee Allocation Matchings.” In *Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS-2018)*, 964–72, 2018.
- 18) Delacretaz, D., S.D. Kominers, and A. Teytelboym. “Refugee Resettlement,” working paper 2016.
- 19) 「University of Tokyo Market Design Center」, 参照 2021年1月29日. <https://www.mdc.e.u-tokyo.ac.jp>.
- 20) “National Resident Matching Program,” Accessed January 29, 2021. <http://www.nrmp.org/>.
- 21) 「医師臨床研修マッチング協議会」. 参照 2021年1月29日. <http://www.jrmp.jp>.
- 22) Kamada, Y., and F. Kojima. “Stability and Strategy-Proofness for Matching with Constraints: A Problem in the Japanese Medical Match and Its Solution.” *American Economic Review P&P* 102, no. 3 (2012): 366–70.
- 23) “United Network for Organ Sharing,” Accessed January 29, <https://unos.org/>.
- 24) Rees, M.A., J.E. Kopke, R.P. Pelletier, D.L. Segev, M.E. Rutter, A.J. Fabrega, J. Rogers, et al. “A nonsimultaneous, extended, altruistic-donor chain.” *The New England Journal of Medicine* 360, no. 11 (2009): 1096–1101.
- 25) Yahiro, K., and M. Yokoo. “Game Theoretic Analysis for Two-Sided Matching with Resource Allocation.” In *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2020)*, 1548–56, 2020.

2.3.5 計算社会科学

(1) 研究開発領域の定義

計算社会科学 (computational social science) とは、ビッグデータやコンピューターの活用が可能にするデジタル時代の社会科学である。人間や社会が生み出す膨大なデータの分析、デジタルツールを活用した実験や調査、社会経済現象の大規模なコンピューターシミュレーションなど、新たに利用できるようになったデータや情報技術を駆使し、個人や集団、社会や経済等を、これまでにない解像度とスケールで定量的に研究する学際領域である。さらに、計算社会科学は、従来の仮説駆動型 (hypothesis-driven) の社会科学研究だけでなく、データ駆動型 (data-driven) の探索的研究やその知見に基づく理論構築、実社会問題に関する解決志向型 (solution-oriented) の研究にも重きを置く。

(2) キーワード

機械学習、計算科学、経済学、社会学、社会的ネットワーク、社会物理学、シミュレーション、ソーシャルメディア、データサイエンス、ネットワーク科学、ビッグデータ、バーチャルラボ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人はつながりの中で生きる社会的な存在であり、人と社会は共進化の関係にある¹⁾。したがって、個人や集団、社会や経済を理解するためには、社会的関係性 (社会的ネットワーク) と社会的相互作用のダイナミクスを理解することが重要になる。これまでの社会科学はこれらの問題に実験や調査の手法で取り組み、さまざまな仮説や理論を提唱してきた。しかし、実験・調査においてデータをとるための手段、時間的・空間的制約、リソースやコストなどが、これらの仮説や理論を検証する上でボトルネックになっていた。

しかしデジタル社会になって、公共や民間のデータベース、オンライン取引、ソーシャルメディアでのやりとり、インターネット検索、IoT機器のセンシングデータなど、新しい情報源からの大規模で包括的なデータが利用可能になった。また、クラウドソーシングなどを活用した大規模行動実験 (バーチャルラボ) を行うことも可能になった。これらの高密度な行動データは社会科学に新しい知見や洞察をもたらす。また、新しい計



図 2-3-3 計算社会科学の領域

算技術の登場により、大量のテキストやGPSなどの位置情報、画像や映像などのメディアデータの高速な処理、高度な機械学習を用いたデータ分析も可能になった。

このような新たに利用可能になったデータとツールの登場によって、これまでは不可能だったような「社会現象の要素」を計測し、定量的に議論できるようになった。それによって、レジリエントで持続可能な未来の社会システムを構築し革新するために不可欠である、人間・社会の本質的な理解を深められることが計算社会科学の意義である。

【研究開発の動向】

計算社会科学の名が広く知られるきっかけとなったのは、ノースイースタン大学の政治学者デイビッド・レイザーらによる Science 誌に掲載された2009年の論文である¹⁾。2000年代後半といえば、電子メールやブログ、携帯電話の通話記録やバイオセンサーによる身体情報などの行動の電子的痕跡（デジタルトレース）の取得と分析が盛んになり始めた頃である。その後、ソーシャルメディアやIoTが社会に浸透し、人間行動と社会経済活動に関するビッグデータが利用できるようになった。

これまで社会科学が、人間社会を研究するためにデータやコンピューターを使ってこなかったわけではない。社会学や心理学や経済学などは、計算社会科学の誕生以前から、人間社会の問題を扱っていた。また、ネットワーク科学やコンピューターサイエンスは、理論や技術の応用先として人間社会のデータを研究対象としていた。しかし、ビッグデータの登場以前は、これらの分野間の交流はほとんどなかった。ビッグデータが登場し、発展したネットワーク科学とコンピューターサイエンスが計算の手段と技術を与えたことによって、これらの分野が急接近して、現在の計算社会科学の原型が作られた。

欧米諸国では早くから計算社会科学の重要性が認識され、現在、オックスフォード大学やマサチューセッツ工科大学などの主要大学、マイクロソフト²⁾ やフェイスブック³⁾ などのテック系企業に、計算社会科学に関連する研究グループや教育プログラムが作られている（表1, 2）。計算社会科学という名前は冠していないものの、欧米の主要大学を中心に社会学や心理学、経済学や経営学、物理学やネットワーク科学、コンピューターサイエンスの分野で計算社会科学を研究している研究室も増えている（表1）。また、これらの研究室で博士研究員をしていた研究者が顕著な業績を上げて独立し、計算社会科学の研究室を新たに立ち上げるケースも増えてきている。

計算社会科学の国際会議 IC²S² (International Conference on Computational Social Science) は、毎年、欧米を中心に開催され、社会科学やコンピューターサイエンスを含むさまざまな分野の研究者が交流する場となっている。2020年は新型コロナウイルス感染症の影響でオンライン開催となったが、世界中から参加者が集まった。同会議に受理されたアブストラクトの著者は1620名（42カ国）で、中でも米国が圧倒的に多く、全体の58%を占めた。次いで、英国が8%、ドイツが6%、そして日本、イタリア、フランスが2%強となっている。このことから、計算社会科学がとりわけ米国で盛んであることがわかる。また、若手研究者や大学院生向けのサマースクール SICSS (Summer Institutes in Computational Social Science) も、2017年以降、世界中の研究機関で毎年開催されている。

国内においても、近年、計算社会科学への関心が高まっている。計算社会科学研究会⁴⁾ は2017年以降、年1回のペースでワークショップを開催し、毎回100名前後の参加者が分野を超えて集まり、発表や議論を活発に行っている。また、神戸大学計算社会科学研究センター⁵⁾ が設立され、計算社会科学の学術誌 Journal of Computational Social Science が日本発で創刊された。

計算社会科学が世界的に盛り上がっている2020年のこのタイミングで、再び、デイビッド・レイザーらに

表 2-3-1 計算社会科学の主要な研究組織 (2020年9月現在)

国名	大学名・組織名	学部・部門	研究室・研究グループ	
米国	Microsoft Research		Computational Social Science Group	
	Facebook Research		Core Data Science	
	University of Washington	Information School	Data Lab	
	University of Pennsylvania	Annenberg School for Communication		
	Stanford University	Institute for Research in the Social Sciences	Center for Computational Social Science	
	University of Southern California	Dornsife College of Letters Arts & Sciences		Computational Social Science Lab
		Viterbi School of Engineering		Information Sciences Institute
	Indiana University	Luddy School of Informatics, Computing, and Engineering	Center for Complex Networks and Systems Research	
	University of Michigan	School of Information		
	Cornell University	Department of Sociology, Department of Information Science	Social Dynamics Lab	
	Columbia University	Data Science Institute		
	Northeastern University	The Network Science Institute	MOBS Lab, Brabasi Lab, Lazer Lab	
	Northwestern University	Kellogg School of Management		
	Harvard University	Institute for Quantitative Social Science		
	Massachusetts Institute of Technology	Media Lab, Sloan School of Management	Human Dynamics Group, Social Machines Group	
	Princeton University	Center for Information Technology Policy		
	Yale University	Yale Institute for Network Science	Human Nature Lab	
University of Vermont	Vermont Complex Systems Center			
Duke University	Department of Sociology	Social Networks & Computational Social Science		
英国	University of Southampton		Computational Modeling Group	
	University of Oxford	Oxford Internet Institute		
	University of Surrey	Centre for Research in Social Simulation		
	Nokia Bell Labs			
ドイツ	GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences	Computational Social Science Department		
	Max Planck Institute for Human Development	Center for Humans & Machines		
オランダ	University of Groningen	Interuniversity Center for Social Science Theory and Methodology		
	University of Amsterdam, Vrije Universiteit Amsterdam		Computational Social Science Amsterdam	
イタリア	IMT School for Advanced Studies Lucca	Networks Department	Laboratory of Computational Social Science	
	ISI Foundation			
フィンランド	University of Helsinki	Helsinki Center for Digital Humanities		
	Aalto University	Department of Computer Science		
スイス	ETH Zurich	Professorship of Computational Social Science		
スペイン	Universidad Carlos III de Madrid	GISC		
カタール	Hamad Bin Khalifa University	Qatar Computing Research Institute		

2.3 俯瞰区分と研究開発領域
社会システム科学

表 2-3-2 計算社会科学の主要な教育プログラム (2020年9月現在)

国名	大学	学部	教育プログラム
米国	The University of Chicago	Social Sciences Division	Masters in Computational Social Science
	University of Massachusetts Amherst	Computational Social Science Institute	Program in Data Analytics and Computational Social Science
	George Mason University	Computational and Data Sciences Department	Computational Social Science Ph.D Program
	University of Warwick	Centre for Interdisciplinary Methodologies	MSc in Urban Analytics and Visualization
	University of California, Davis		Graduate Programs Designated Emphases, Computational Social Science
	The University of Arizona	College of Social and Behavioral Sciences	Graduate Certificate in Computational Social Science
英国	University of Oxford	Oxford Internet Institute	MSc in Social Data Science
	University of Exeter		College of Social Sciences and International Studies Masters Degrees
ドイツ	RWTH Aachen University		MSs in Computational Social Systems
デンマーク	University of Bamberg		Master of Arts in Political Science with Focus on Computational Social Sciences
スウェーデン	Linköpings Universitet		MSs Computational Social Science
	Lucerne University of Applied Sciences and Arts	Faculty of Humanities and Social Science	The Lucerne Master in Computational Social Sciences

よる論文が Science 誌に掲載された⁶⁾。そこでは、計算社会科学の誕生から約 10 年が経過し、データへのアクセスや共有、研究倫理、学際的研究へのインセンティブや教育改革など、克服すべきさまざまな問題点が出てきたことが述べられている。また、ペンシルベニア大学の計算社会学者ダンカン・ワッツが述べているように、研究成果を論文として出版するだけでなく、社会的・経済的課題の解決を志向するような研究が、今後ますます求められる⁸⁾。したがって、現在の計算社会科学は、関連諸科学を緩く束ねるアンブレラ・タームから独自のアイデンティティを持つ新しい社会科学へと変化を遂げつつある段階だといえる。

(4) 注目動向

[新展開・技術的トピックス]

オルタナティブデータ

主に金融領域において、政府統計や企業統計などの公開データとは別のデータを総称して、オルタナティブデータという。クレジットカードの決済データや販売の POS データ、スマートフォンの位置データ、衛星画像、ニュース記事や SNS の投稿などがそれに当たる。機械学習や人工知能 (AI) などの発展によって膨大なデータを高精度に分析できるようになり、投資判断にオルタナティブデータの活用が進んでいる。近年は、消費統計の推定や消費者意識の把握など、公開データでは捉えきれないリアルタイム性の高い情報源として、投資判断以外の目的でも活用が進んでいる。

ナウキャスト

ビッグデータからアルゴリズムによって、現状の把握や近未来の状態を予測する技術をナウキャスト (Nowcasting) という。有名な例は Google Flue Trends (GFT) である。同社の研究グループは、インターネット検索で使われる特定の語がインフルエンザの流行と高い相関を示すことを明らかにし、GFTを開発した⁹⁾。米国疾病予防管理センターだとインフルエンザの流行予測に1~2週間かかるのに対し、GFTは1日遅れで予測することができた。後の研究で、検索語のみを用いる方法の欠点が指摘されているが、改善方法も提案されている¹⁰⁾。コロナ禍においては、位置情報ビッグデータを用いた人流予測や外出自粛率の可視化、SNSの投稿からの巣ごもり経済のトレンド予測など、実世界についてのタイムリーで正確な予測は、基礎研究のみならず、企業戦略や政策立案をする上でも重要である。

個人の属性・パーソナリティーの測定と推定

SNSの投稿や共有のデータから、個人の属性やパーソナリティーなどを推定する技術が盛んに研究されている¹¹⁾。年齢や性別などの基本属性に加え、ユーザーが生成したテキストデータから、性格因子であるビッグ・ファイブなどの特徴がある程度予測できることは知られていたが、予測に寄与する情報の種類についても明らかになってきている¹²⁾。オンラインツールを活用した道徳観の測定¹³⁾や購買行動に見られる政治的イデオロギーの違い¹⁴⁾など、こうした知見とAI技術は社会科学のツールとなることはもちろん、メンタルヘルスの分析や個性に応じた適切な働きかけ、効果的な広告戦略や潜在顧客の発掘など、さまざまな実社会応用が期待される。

フェイクを創る・見破る技術

2016年以降、フェイクニュースやフェイク動画がインターネット上を拡散する現象が社会問題となっている。人工知能研究機関OpenAI¹⁵⁾が開発した言語生成モデルGPT-3やAIを使った動画の合成技術Deepfakeなどの技術は、より巧みなフェイクコンテンツの作成を可能にする。フェイクコンテンツを創る技術は正しく活用されれば、拡張現実やデジタルツイン、エンターテインメントやアートなど、新たな表現の可能性を切り開く。しかし、プロパガンダなどに悪用されれば、インフォデミックの状況を悪化させる危険性がある。フェイクを見抜き、拡散しないようにするためには、フェイクニュースの拡散現象の仕組みを知る必要があり、計算社会科学の一連の研究が重要な知見を明らかにしている^{16), 17)}。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

ウェルビーイングの計測

ウェルビーイングとは身体的、心理的、社会的に良好な状態であることを意味しており、人の幸福感と関係している。従来はアンケートなどによって幸福度を測る試みがされてきたが、センサーで人の身体運動や、人と人とのコミュニケーション頻度を計測することで、ウェルビーイングを計測する研究が行われている。青山学院大学は次世代Well-Beingプロジェクトとして人や環境の情報を可視化することで人々の豊かな生活に役立てる研究を行っている。日立は企業経営にハピネス・マネジメントを取り入れる事業として株式会社ハピネスプラネットを設立し、企業の生産性、創造性の源泉としての幸福感を向上させる事業を行っている。

Social Science One

Social Science One¹⁸⁾ はフェイスブックのデータを社会科学の研究者に公式に提供するための窓口とな

る独立機関である。将来的には他の企業からのデータ提供も視野に入れている。2018年4月、同機関とフェイスブックは、ソーシャルメディアが民主主義と選挙に与える影響を調査するプロジェクトを立ち上げ、データの利用申請が認められた研究者にデータへのアクセスを提供開始した。

International Conference on Computational Social Science (IC²S²)

計算社会科学の国際会議IC²S²は、社会科学やコンピューターサイエンスを含むさまざまな分野の研究者が交流する場となっている。2015年にフィンランドのアールト大学で第1回大会が開催され、2016年は米国ノースウエスタン大学、2017年はドイツのGESISライプニッツ社会科学研究所、2018年は再び米国ノースウエスタン大学、2019年はオランダのアムステルダム大学で開催された。2020年は、新型コロナウイルス感染症の影響でオンライン開催となったが、米国マサチューセッツ工科大学がホストをつとめた。通常の研究発表の他にも、CSS4Impactというワークショップが開かれ、交通、健康、持続可能性、疫学、プライバシー、政策立案などの社会規模の問題に対して、計算社会科学でいかにしてインパクトのある解決策を構想するかについて議論された。

Summer Institute in Computational Social Science (SICSS)

サマースクールSICSSは、大学院生を含む若手研究者の計算社会科学教育を目的としている。プリンストン大学の社会学者マシュー・サルガニックが、2017年に第1回を開催して以降、世界中のさまざまな国で年に複数回開催されている。2020年には東京で開催予定だったが、新型コロナの影響で翌年に延期された。同サマースクールはラッセルセージ財団やフェイスブックなどの助成を受けながら継続している。

計算社会科学研究会

同研究会は、日本での計算社会科学の普及と発展を目指して、社会学、心理学、経済学、情報学、物理学などのさまざまな分野の研究者が集まり、研究発表や議論、情報共有を行う場となっている。2017年以降、年1回のペースでワークショップを開催している。また同研究会のメンバーは、人工知能学会や数理社会学会などの国内学会、IEEE Big DataやWeb Intelligenceなどの国際会議において、計算社会科学の企画セッションやワークショップをオーガナイズしている。

神戸大学計算社会科学研究センター

同センターは2017年3月に発足し、2020年現在、日本では唯一の計算社会科学に特化した研究センターである。上東貞志センター長を中心として、データサイエンスと計算科学に基づいた新しい社会科学としての計算社会科学を確立し、同領域の国際研究拠点を形成することを目指している。2020年2月には同センター主催で、大学院生向けのスクールCCSS School on Computational Social Scienceをオンライン開催した。

(5) 科学技術的課題

人間の行動理論の構築

従来の社会科学では研究不可能とされていたような社会学の問い、例えば、マクロレベルの社会ネットワークや文化の変化をミクロな個人の意思決定と結びつけるような理論を大量のデータとデータサイエンスを使って構築するような研究開発が必要である。情報科学側から見ると、社会現象や人々の行動を多様なデータから多面的に分析する技術の開発につながる。人間行動に関する理論が構築されれば、それを元にした社

会モデルを利用した社会シミュレーションも可能になる。シミュレーションについては、実際の人間行動とシミュレーション結果を比較することで理論を進展させたり、社会実験の代わりにさまざまな施策の効果を見積もったりするといった活用が考えられる。

個人情報を含むデータの共有・分析

計算社会科学が社会課題解決型の研究を行うためには、これまで以上に詳細な個人情報を含むデータを扱うことになる。例えば、社員の個人情報とひもづいた企業の事業活動のデータ、教育機関における成績データ、医療やヘルスケア分野におけるビッグデータなどである。暗号化したままデータを扱える準同型暗号を使って大規模なデータを高速に処理できる技術のように、個人情報を含むデータを、プライバシーの問題を解決しつつ共有し、分析する技術の研究開発が必要である。

スーパーコンピューターの社会科学への応用

現在、次世代スーパーコンピューター「富岳」を利用した新型コロナウイルスの対策が研究されている。新型コロナウイルスの治療薬候補同定などの創薬研究はもちろん、せきや発声による飛沫の拡散のシミュレーションにも活用されている。その結果は、マスクの効果的な使用法、オフィスの配置、医療機関等での換気方法の検討などに直接つながる。それらはさらに、ウィズ・コロナやアフター・コロナの社会における新しい行動・生活様式を決めたり、政策や戦略を立てたりする上で重要な基礎データとなる。経済・金融、交通・人流などの予測シミュレーションを使って社会課題を解決するには、大規模シミュレーションを効果的に活用することが必要である。

(6) その他の課題

データの活用環境の整備

計算社会科学において圧倒的に米国のプレゼンスが高いことは、GAF A (Google、Amazon、Facebook、Apple) をはじめとするビッグデータを所有する企業が多いことやオープンデータを含め、データ利活用の環境が整っていることと無関係ではない。IoTやクラウドの活用で産出されるデータはますますプラットフォームに集積され、それらが価値の源泉となる。法の整備と併せて、今着手しなければ欧米との差は開く一方であるため、研究者間でデータを安全に共有し、効率よく分析できるようなデータインフラの整備は急を要する課題である²。

人材育成

計算社会科学が学問領域として発展するためには、現在の縦割りの大学教育を見直し、文理融合型の学際的方法論を身につける教育を目指す必要がある²。コンピューターサイエンスのスキルを持った社会学者や社会科学の素養を持ったコンピューターサイエンティストの育成は急務である。また、デジタル時代の調査・実験に伴う倫理の問題は、技術的な問題以上に重要であるため、倫理教育は必須である。加えて、計算社会科学のコミュニティを醸成したり、次世代を担う博士人材を支援したりする制度づくりも重要である。

学際的研究の支援

科学研究費補助金の場合、申請に際して社会科学や情報などを選択しなければならないが、伝統的な分野では、計算社会科学の研究提案が適切に評価されないかもしれないというリスクがあり、学際的なテーマに

挑戦しづらいという事情がある。学際的研究に関する研究助成も増えてきているが、まだ支援は十分とはいえない状態である。社会科学系と数理・情報系の研究の思考・嗜好・志向の溝は大きく、それを乗り越えて研究成果が出るまでには、ある程度の時間を要する。学术界と産業界のコラボレーションにおいても状況は同様である。したがって、学際のコラボレーションを中長期の視点で支援する仕組みが重要になる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	国際会議 (IC ² S ² , SocInfo, ICWSM等) の発表数や国内における関連ワークショップの数、関連論文の掲載数が増えていることから、国内における基礎研究のレベルは向上しているといえる。しかし、その傾向は欧米と比べると緩やかである。また、欧米と比較して、海外の研究機関との共同研究が少ないのも課題である。
	応用研究・開発	△	↗	SansanやDeNAなどのように、Kaggleの資格を持つデータサイエンティストを積極的に採用し、実社会データやAIを高度に活用した研究開発を行う企業が増えている。また、理化学研究所の「富岳」などのスーパーコンピュータの社会科学への活用が進むことが期待される。特に、新型コロナ対策、経済・金融、交通・人流の予測シミュレーションなど、社会課題解決のための重要なツールになる。
米国	基礎研究	◎	↗	国際会議の発表数、論文数 (特に、NatureやScience等の高インパクトの学術誌)、研究機関や教育プログラムの数のいずれにおいても、圧倒的に米国の大学や企業が多い。
	応用研究・開発	◎	↗	米国では、計算社会科学の知見を社会課題のインパクトのある解決やイノベーションにつなげる動きが盛んである。特に、MITやノースウエスタン大学ケロッグ経営大学院は、基礎研究を重んじる欧米の他の大学と比べると、その色が強い。
欧州	基礎研究	◎	↗	米国に次いで計算社会科学の基礎研究が盛んなのが、英国のオックスフォード大学インターネット研究所、ドイツのGESIS、スイスのETH Zurichなどである。国際会議の発表数や論文数の増加、研究機関や教育プログラムの整備がハイペースで進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	欧州にはノキアやBooking.comのような世界的IT企業があり、IoTを活用した社会イノベーションは盛んである。GDPRなどの個人データに関するルールが世界に先駆けて整備されれば、ビッグデータやAIを活用した応用研究・開発がやりやすくなり、さらに進展する可能性がある。
中国	基礎研究	○	→	国内にはこの分野の研究者人口はそれほど多くはないが、清華大学や香港城市大学などの一部に、計算社会科学に近い分野の研究者がいる。一方、ノースウエスタン大学のダーシェン・ワン (Dashun Wang) のように、欧米の大学で学位を取得し、PIとして海外で研究室を主宰する中国人研究者は少なくない。
	応用研究・開発	◎	↗	AIに関する主要な国際会議 (ICML, KDD, IEEE系) での中国のプレゼンスは、米国を凌ぐ勢いで高まっている。また、テセント、アリババ、百度など米国シリコンバレーに匹敵するIT企業や社会実験のしやすい環境から、AI技術の社会応用ではこの分野を牽引する可能性がある。

韓国	基礎研究	○	→	KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) にはソーシャルコンピューティングのグループがあり、ミーヨン・チャ (Meeyoung Cha) などの著名な研究者が在籍する。現時点では、国内における当該分野の研究者人口は多くないが、今後、基礎研究が盛んになる可能性はある。
	応用研究・開発	○	↗	リアルタイムに新型コロナウイルスの感染者情報を共有し、初期感染拡大の封じ込めに成功したことからわかるように、韓国のIoT技術の社会応用力は大きい。今後、応用研究・開発では大きく発展する可能性がある。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネルギー分野 2.2.11）

参考文献

- 1) Lazer, D., A. Pentland, L. Adamic, S. Aral, A.-L. Barabási, D. Brewer, N. Christakis, et al. "Computational Social Science." *Science* 323 (2009): 721–23.
- 2) Microsoft Research. "Computational Social Science." Accessed January 29, 2021. <https://www.microsoft.com/en-us/research/theme/computational-social-science/>.
- 3) Facebook Research. "Core Data Science (CDS)." Accessed January 29, 2021. <https://research.fb.com/teams/core-data-science/>.
- 4) 「計算社会科学研究会」. 参照 2021年1月29日. <https://css-japan.com/>.
- 5) 「神戸大学計算社会科学センター」. 参照 2021年1月29日. <http://ccss.kobe-u.ac.jp/>.
- 6) Lazer, D., A. Pentland, D.J. Watts, S. Aral, S. Athey, N. Contractor, S. Freelon, et al. "Computational social science: obstacles and opportunities." *Science* 369 (2020): 1060–62.
- 7) Lazer, D., R. Kennedy, G. King, and A. Vespignani. "The Parable of Google Flu: Traps in Big Data Analysis." *Science* 343 (2014): 1203–5.
- 8) Watts, D.J. "Should social science be more solution-oriented?" *Nature Human Behaviour* 1, no. 15 (2017): 1–5.
- 9) Ginsberg, J., M. Mohebbi, R. Patel, L. Brammer, M. Smolinski, and L. Brilliant. "Detecting influenza epidemics using search engine query data." *Nature* 457 (2009): 1012–14.
- 10) Kandula, S., and J. Shaman. "Reappraising the utility of Google Flu Trends." *PLoS Computational Biology* 15 (2019): 1007258.

- 11) Kosinski, M., D. Stillwell, and T. Graepel. "Private traits and attributes are predictable from digital records of human behavior." In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110:5802–5, 2013.
- 12) Mori, K., and M. Haruno. "Differential ability of network and natural language information on social media to predict interpersonal and mental health traits." *Journal of Personality*, 2020.
- 13) Awad, E., S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, J.-F. Bonnefon, and I. Rahwan. "The Moral Machine Experiment." *Nature* 563 (2018): 59-64.
- 14) Shi, F., Y. Shi, F. A. Dokshin, J. A. Evans, and M. W. Macy. "Millions of online book co-purchases reveal partisan differences in the consumption of science." *Nature Human Behaviour* 1, no. 79 (2017): 1–9.
- 15) Vosoughi, S., D. Roy, and S. Aral. "The spread of true and false news online." *Science* 359 (2018): 1146–51.
- 16) Sasahara, K., W. Chen, H. Peng, G. L. Ciampaglia, A. Flammini, and F. Menczer. "Social influence and unfollowing accelerate the emergence of echo chambers." *Journal of Computational Social Science*, 2020.
- 17) "OpenAI." Accessed January 29, 2021. <https://openai.com/>.
- 18) "Social Science One. Building Industry-Academic Partnerships: A Scientific Program of Harvard's Institute for Quantitative Social Science." Accessed January 29, 2021. <https://socialscience.one/>.

2.3