

2.3 社会システム科学

我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱された **Society 5.0** で実現されるべき社会システムは、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることによって、経済発展と社会的課題の解決を両立しようとするものである。社会システム科学とは **Society 5.0** が目指す社会システムの安定的な挙動に向けて、設計、構成、監視、運用、制御、可視化、模擬および適切な制度設計により社会システムの発展的で持続可能な安寧を実現するものである。社会システムの大規模化・複合化・複雑化が高度に進展する中、社会システム科学の必要性が増してきている。ここでは、**Society 5.0** の社会システムを構築し運用するための社会システム科学の研究開発領域を俯瞰する。

社会システム科学を構成する研究開発領域を図 2-3-1 に示す。

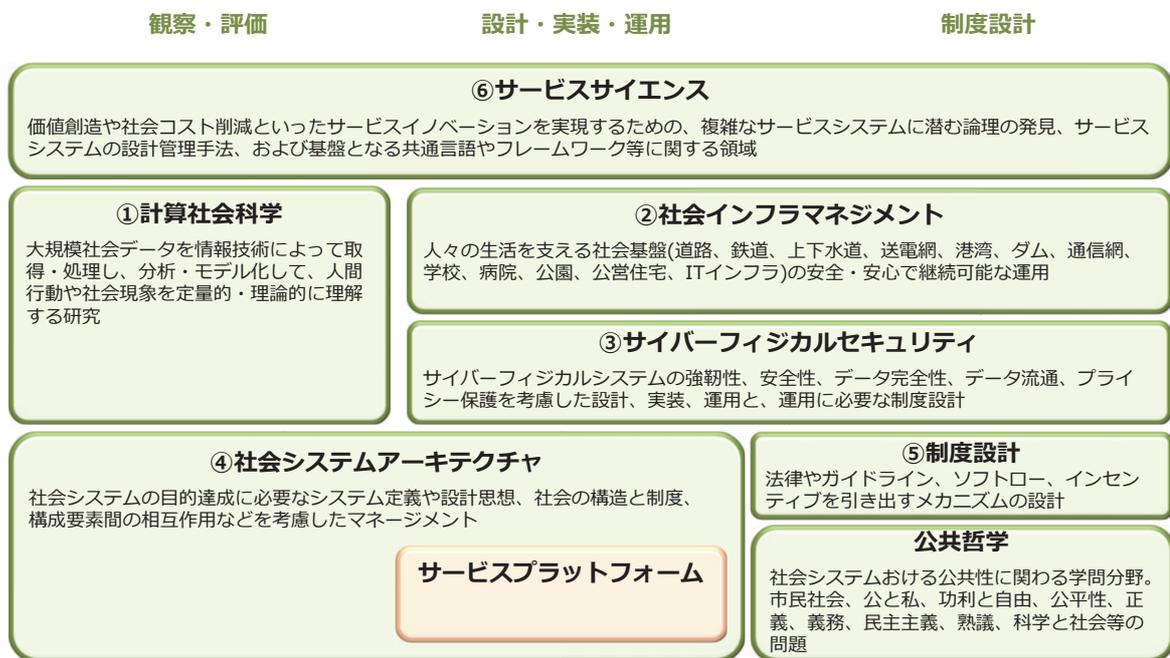


図2-3-1 社会システム科学の俯瞰図

① 計算社会科学

ビッグデータやシミュレーションを用いて、社会経済現象を研究する、社会科学、データサイエンス、計算科学の文理融合領域である。ビッグデータを利用することで、社会現象を定量的に分析したり、あるいはビッグデータに基づき導いた社会モデルを用いてシミュレーションすることで、社会の挙動を予測したりすることを可能にする。

② 社会インフラオペレーション

市民の生活の安全・安心を確保し、持続可能な社会経済活動を営むために必要なインフラとそれを提供する仕組みやサービスを含めた総称が社会インフラである。データに基づいて社会インフラを最適に維持管理するための、メンテナンス技術を中心とした研究領域である。

③ サイバーフィジカルセキュリティ

Society 5.0 が目指す社会システムは、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した Cyber Physical System になる。社会システムの安全性を担保するためには、サイバーとフィジカルの両特性を統合したセキュリティ概念が必要になる。これが、サイバーフィジカルセキュリティである。

④ 社会システムアーキテクチャ

Society 5.0 ではさまざまなモノやシステム同士が直接通信を介してデータの交換をすることが可能になる。社会システムは、システムとシステムが複雑な相互関係性を持ったシステム（System of Systems）とみなすことができる。このように複雑なシステムを管理、維持するためには、システムのアーキテクチャを定義することが必要である。なお、サービスプラットフォームは社会システムが提供するサービスを実現するアーキテクチャの中の、コンピュータシステムとして提供される部分と定義し、2.4 コンピューティングアーキテクチャの研究領域において俯瞰することとした。

⑤ 制度設計

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

⑥ サービスサイエンス

Society 5.0 ではモノや経済活動がサービスとして提供される。提供されるサービスに関わる、科学的な概念、理論の構築、サービスを提供するためのサービスシステムをマネジメントする技術や、構築するためのエンジニアリング技術がサービスサイエンスの研究領域である。

本報告書ではとりあげていないが、社会とは何か、公平性とは何か、正義とは何か、といった公共哲学・倫理の理解を踏まえて、社会システムは構築・運用されることが望ましい。また、技術が及ぼすリスクに対する社会受容性をどうやって醸成するのか、多様なステークホルダの合意をいかにして形成するか、社会が持つ多様な価値をどうシステムに反映するのか、と言った Cyber Physical System としての社会システムを前提とした、人文・社会科学的研究も求められている。

2.3.1 計算社会科学

（1）研究開発領域の定義

計算社会科学は、近年急速に発展しているビッグデータや計算技術に基づく社会経済現象の研究であり、図2-3-1に示すように、社会科学、データサイエンス、計算科学の文理融合領域である。人々が生活や業務においてかなりの時間をPC、タブレット、スマートフォン等のデバイス上で費やすようになり、オンラインでの行動やコミュニケーションの詳細が日々デジタルで記録されるようになり、大規模ソーシャルデータが急激な勢いで蓄積されるようになった。計算社会科学は、情報技術によって取得・処理された大量のデータを分析・モデル化して、社会経済現象を定量的に理解し、課題の予測や、現象の制御を試みるものである。

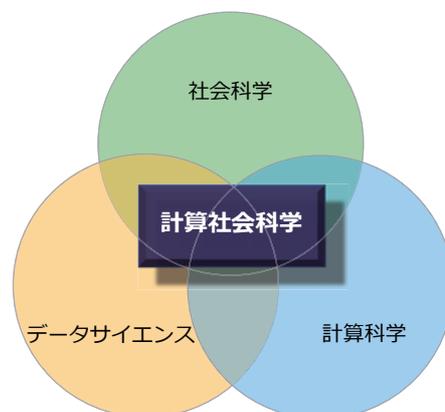


図2-3-2 計算社会科学の領域

（2）キーワード

ネットワーク分析、データサイエンス、ビッグデータ、ソーシャルデータ、シミュレーション、オンラインデータ、社会科学、社会学、経済学、物理学、計算科学、文理融合

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

人間社会のさまざまな面を科学的に探求する学術分野の総体である社会科学には、例えば、社会現象の実態や社会現象が起こる原因やメカニズムを統計・データから分析する学問として社会学がある。社会学はサーベイ調査やインタビューに基づいた実証分析を重んじているため、社会的関係性が必ずしも適切に扱えないという課題があった。ところが、ソーシャルネットワークの発展や、IoTによるデータのセンシングによって、人々の活動の記録が大量のデータとして収集・蓄積できるようになった。計算社会科学の意義は、こういったビッグデータを解析する実証研究と、ビッグデータに基づくシミュレーションによる理論研究を通じて、定量的な社会科学を行い、新たな知識を創出することにある。

また、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立した人間中心の社会である Society 5.0 では、人が生み出すデータに基づいて社会を理解し、社会課題を解決することが期待されている。変化する社会を定量的に理解しようとする計算社会科学が、社会理解と社会課題解決の中心的役割を果たす。

【研究開発の動向】

「計算社会科学」(Computational Social Science)という呼称は、2009年に15人の科学者(Lazer, Pentland, Adamic, Aral, Barabási, Brewer, Christakis, Contractor, Fowler, Gutmann, Jebara, King, Macy, Roy, Alstyn) ¹⁾により学術雑誌「Science」に掲載された同タイトルの論文により広く知られるようになった。この時点で計算社会科学の研究は既に一部の研究者によって盛ん

に行われており、上記論文の共著者達はその中心的存在であった。計算社会科学の源流は、それ以前の計算科学、経済学、社会学等に遡ることが可能であるが、現在急速に発展している流れのきっかけは上記の論文である。2015年には、欧米の研究者が中心となり、計算社会科学の国際会議「International Conference on Computational Social Science (IC2S2)」が発足した。以来、同会議は毎年欧米で開催されており、計算社会科学は欧米を中心に発展している。

欧米では国際会議だけではなく、表 2-3-1 に見られるように、計算社会科学を掲げる研究組織や教育プログラムが既に多数設立されている。この動きはシンガポールにおいても同様である。日本では神戸大学に「計算社会科学研究センター」が平成 30 年 4 月に設置されたのが初めてで、現在のところ、国内唯一の計算社会科学に特化した研究センターとなっている。

計算社会科学の中心的なツールとして、オンライン上で取得可能なソーシャルデータ等を用いたネットワーク分析や、エージェントベースシミュレーションに基づく社会経済現象の定量的分析がある^{2),3)}。こういった分析やシミュレーションに必要なビッグデータは、米国の Google、Amazon、Apple、Microsoft、Facebook 等の巨大 IT 企業が中国以外の世界を席捲し、中国は Alibaba といった中国独自の IT 企業が独占している。これらの企業は、ビッグデータを専門とする多数の研究者を雇用し、研究に従事させており、研究面での日本との格差が拡大している。

世界的に、Google、Amazon、Wikipedia 等から入手可能なデータが盛んに研究されているが、日本の社会科学研究者の間では、そういった研究の存在自体があまり知られていない。Google Scholar により計算社会科学に関する研究成果の絶対量を国際的に比較した場合、日本は、米国、中国、欧州主要各国よりも少なく、辛うじて韓国よりも多い程度である。その韓国ですら、計算社会科学における国際的なプレゼンスは日本以上にあると国際的には認識されている。

表2-3-1 「計算社会科学」を掲げる研究センター、教育プログラム等(平成29年3月現在)

国名	大学名/組織名	研究機関名	プログラム名
ドイツ	GESIS		Computational Social Science department
	Centre Marc Bloch		Digital Humanities team
デンマーク	University of Copenhagen	Copenhagen Centre for Social Data Science	
英国	University of Southampton	Computational Modelling Group	Care Life Cycle
	University of Surrey	Centre for Research in Social Simulation	
フィンランド	University of Helsinki	Centre for Research Methods	Computational Social Science
スペイン	Barcelona Supercomputing Center	Computer Applications in Science & Engineering Department	Computational Social Sciences and Digital Humanities
スイス	ETH Zurich	D-GESS	Professorship of Computational Social Science
イタリア	IMT School for Advanced Studies Lucca	Laboratory of Computational Social Science	
オーストラリア	The University of Queensland		Bachelors of Music (Honours) /Science
シンガポール	Singapore Management University	School of Information Systems	Living Analytics Research Centre

米国	The University of Chicago	Division of the Social Sciences	Masters in Computational Social Science
	Microsoft Research		Computational Social Science
	University of Washington	Information School	Data Lab
	Stanford University	Institute for Research in the Social Sciences	Center for computational Social Science
	University of Southern California	USC Dornsife College of Letters, Arts and Sciences	Computational Social Science Lab
	Santa Fe Institute		Graduate Workshop in Computational Social Science Modeling and Complexity
	University of Illinois at Urbana-Champaign	Beckman Institute	Organizational Intelligence and Computational Social Science
	Indiana University	School of Information & Computing	Center for Complex Networks and Systems Research
	Georgia Institute of Technology	Georgia Tech Research Institute	Aerospace, Transportation and Advanced Systems Laboratory Institute
	The University of North Carolina at Charlotte	Project Mosaic	Computational Social Science Seed Grants
	University of Nortre Dame	Center for Research Computing	Computational Social Science REU program
	Kent State University	Department of Geography	Computational Social Science Lab
	Cornell University	Information Science Department	Social Dynamics Laboratory
	University of Massachusetts Amherst	Computational Social Science Institute	
	Northeastern University	The Network Science Institute	MOBS LAB, Barabasi Lab
	Harvard University	Harvard University Privacy Tools Project	
	Massachusetts Institute of Technology	MIT Media Lab	Human Dynamics Laboratory
	Russel Sage Foundation		Computational Social Science
	Stony Brook University	Institute for Advanced Computational Science	Center for Computational Social Science
	George Mason University	Department of Computational and Data Sciences	Computational Social Science Program
University of North Carolina at Chapel Hill	Department of Computer Science	Social Welfare and Health Informatics Group	

（４）注目動向

【新展開・技術トピックス】

金融ネットワーク分析

2007～2008年の世界金融危機を従来の経済モデルが予測できなかったことは、経済学にとって大きな衝撃だった。それ以前の経済モデルは、空間的な構造を十分に考慮しておらず、破綻伝播のメカニズムが組み込まれていなかった。以来、金融市場を、金融機関をノードとしたネットワークとして考える金融ネットワークの分析が、計算社会科学において盛んになっている。破綻伝播のメカニズムや、金融危機の回避、危機発生後の危機管理等に関する多くの成果が期待されている⁴⁾。

企業内部データやシミュレーションによる企業組織の分析

企業内部の膨大な E メール・データに対してクラスター分析を行うことにより、企業の組織の効率性を測り、さらに、業務を効率化させるための組織改変を提案する試みがなされている。また、企業の組織構造がべき乗に比例した所得格差を生み出していることをシミュレーションにより示した研究もあり、企業内部の組織構造に関する研究は近年の重要な動向である^{5),6)}。

ビッグデータによるテロリズムや紛争の分析

世界的にテロリズムや紛争は絶え間なく起こっているが、テロリストが SNS を活用してプロパガンダを広めていることが、ビッグデータの分析により明らかになりつつある。また、過去のデータから紛争を予測する研究も進展している^{7),8)}。

オンライン販売データによる消費者行動の研究

Amazon である本を購入すれば、別の本も自動的に勧めてくるが、Amazon の販売データからは、同じ消費者が異なる分野でどのような本を好む傾向にあるか知ることができる。そのため、Amazon 等のオンラインの販売データを使った研究は近年の重要な動向である。例えば、科学分野での嗜好と政治的嗜好の関係を明らかにした興味深い研究もある⁹⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト等]

Microsoft の計算社会科学研究¹⁰⁾

計算社会科学の第一人者の一人である Duncan Watts を中心とした研究者プロジェクトで、E メール、ウェブサイト、Twitter 等から取得できるビッグデータや、集団行動に関する実験を行うことにより、人間行動に関する新たな知見を生み出すことを目的としている。

Professorship of Computational Social Science, ETH Zurich¹¹⁾

ETH Zurich における Dirk Helbing を中心とした計算社会科学研究者グループで、異なる分野のアプローチを取り入れ、計算社会科学の基礎研究および応用研究を行っている。進化ゲーム理論やエージェントベース・シミュレーション等を用い、社会規範形成、犯罪、社会的紛争、世論形成等のテーマについて研究している。

文部科学省「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」萌芽的課題『複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究（多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発）』（代表：伊藤伸泰）¹²⁾

社会経済現象では、多様なサブシステムが多層的に相互作用し合いつつ、時間的にも空間的にも異なったスケールの事象が不可分となっている。例えば、秒単位以下で進む株式取引が何年にもわたる景気停滞の引き金となる事象や、一か所の災害が広域的な移動を生じさせ、思わぬ場所での二次災害を引き起こすという事象が発生している。本プロジェクトは、ポスト「京」に向けて複数のサブシステムの相互作用モデルを構築し、社会経済現象上の課題を予測し制御する技術を開発することを目的とし、以下の 5 つのサブ課題に取り組んでいる。

A マクロ経済シミュレーション

B 企業ネットワークシミュレーション

- C 金融シミュレーション
- D 交通・人流シミュレーション
- E 社会・経済シミュレーションモデルの評価手法の開発

計算社会科学研究会¹³⁾

同研究会のメンバーは、日本における計算社会科学研究の中心メンバーであり、SNS のテキストデータを用いた研究等を積極的に推進している。

(5) 科学技術的課題

計算社会科学の体系化

これはビッグデータの研究利用全般に言えることではあるが、計算社会科学におけるビッグデータの研究利用はまだ萌芽的段階であり、現状としては、ファクトファインディング的な研究が主流である。よって、計算社会科学の学問としての領域を広げ、体系化することは、今後の長期的な課題であると考えられる。ただし、ビッグデータから得られる知見の積み上げだけで研究領域になる可能性もある。計算社会科学が取り組む研究領域の方向性はまだ定まっておらず、さまざまな方向への展開が考えられる。

経済学との融合

経済学は社会科学において最も計算を多用する分野であり、それ自体が計算社会科学の一角をなすと考えることができるので、計算社会科学の展開の方向として経済学との融合が考えられる。しかしながら、経済学特有のアプローチがあり、計算社会科学の他の分野との融合が難しい面がある。

経済学特有のアプローチとは、将来を見越した高度な合理性を要求することである。経済学では、個人は合理的に行動すると仮定され、多くの経済モデルでは、その行動は最適化問題を解くことによって導き出される。しかし、高度な合理性を持たせたままモデルを複雑にしようとする、最適化問題が解けなくなる。従って、経済モデルでは、あまりモデルを複雑にできない。一方、計算社会科学の一分野であるエージェントベースシミュレーションにおいては、個人の行動自体に合理的でない仮定を置くことが可能なため、モデルの構造は複雑にできる。

経済学と計算社会科学の融合には新しいコンセプトが必要であり、中長期的に取り組むべき大きな課題であると考えられる。

スーパーコンピュータを用いた大規模社会経済シミュレーション

スーパーコンピュータの発展に伴い、近年大規模シミュレーションが可能となってきた。例えば、全国の交通網のシミュレーション、特定地域において地震・津波等の自然現象が起きた際の物理的な災害のシミュレーション等、極めて詳細なレベルまで分析できるようになってきた。その一方で、個人の行動に基づいた日本経済全体のシミュレーションのような、ミクロの行動に基づくマクロレベルでの社会経済現象のシミュレーションに関しては、まだ十分な成果が得られていない。これは、経済学との融合が進んでいないことが理由の一つなので、融合を進めて、大規模かつ現実的な社会経済シミュレーションを行うことが、計算社会科学における中長期的な重要課題である。

(6) その他の課題

競争的研究費の獲得

計算社会科学は文理融合・複合領域であるため、競争的研究費の獲得が難しいことが課題として挙げられる。特に、科学研究費補助金においては該当する細目がなく、研究課題を申請する際には、どの細目に出すべきか常に難しい判断を迫られる状況が続いている。例えば、情報学における最新の手法を用いて、社会学における伝統的な課題に取り組んだ場合、情報学でも社会学でも評価されないリスクがあるが、こういった研究こそ推進すべきものである可能性が高いので、競争的研究費の獲得は極めて深刻な課題である。同様の問題は海外でも指摘されている³⁾。

研究成果の公表

研究成果の公表に関しても、研究費と同様の課題がある。計算社会科学は、文理融合・複合領域の研究であり、物理学、情報学、経済学、社会学等の多くの分野のジャーナル等で成果となる論文の掲載が可能である。しかし、複合的かつ新しい研究領域であるがゆえに、伝統的な分野の枠組みでは必ずしも十分な評価が得られないリスクがある。2018年1月に創刊された「Journal of Computational Social Science」は、この問題を解決することが大きな目標であり、今後、文理融合・複合領域が発展する上で中心的役割を担うことが期待されるが、同ジャーナルが掲載できる研究成果には限りがあるため、研究成果を公表すべき分野は今後も大きな課題として残る。

データ利用と法規制

日本においてビッグデータの研究利用がスムーズでないことは、多くの研究者によって指摘されている。特に、個人情報保護の名のもとで、国内では多くのデータの利用が制限されており、企業が持つデータの研究利用も縛りが多い。その一方で、Google等のIT企業は極めて個人的なデータを大量に蓄積し、研究・商用利用している現実がある。これは、研究においてもグローバルビジネスにおいても格差の大きな要因となっているため、ビッグデータの研究利用に関わる状況は、早急に改善する必要がある。その一方で、今後はプライバシーへの配慮が国際的に問題となってくる可能性がある。この点は、欧州からの個人情報の持ち出しに規制が入る等、既に顕在化している。

人材育成

現時点では、国内においては、計算社会科学に特化した教育プログラムが存在しないため、人材育成は大きな課題である。計算社会科学は社会科学、計算科学、データサイエンスの複合領域であるため、それぞれの領域における教育が必要である。計算科学は既存の教育プログラムで、データサイエンスは近年、多数新設されたデータサイエンスの教育プログラムにおいて習得できるが、社会科学に関しては、経済学、社会学、政治学といった伝統的な枠組みが教育の単位となっているため、計算社会科学を念頭に置いた社会科学全般の総合的な教育プログラムが必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	ビッグデータ関連では、Google が公開している機械学習関連のツールに匹敵するような日本発の技術は極めて限られている。ただし、ハード面、特にスーパーコンピュータに関しては、現在ポスト「京」の開発が進められており、ハード面では世界レベルの基礎技術を維持していると考えられる。
	応用研究・開発	△	↑	現状としては欧米に大きく遅れを取っている。研究成果の量を Google Scholar を使って単純に比較しても、欧米に遅れを取っている。しかし、近年、国内において計算社会科学研究会が発足し、「Journal of Computational Social Science」が創刊されるなど、研究活動が活性化しつつあり、研究者コミュニティにおける上昇機運も高まっている。
米国	基礎研究	◎	↑	Google や Amazon が、クラウドコンピューティングやビッグデータを研究者に提供する等、米国はビッグデータ関連分野を世界的に先導している。一般的認識として、計算科学全般および社会科学全般においても米国は先端研究の中心であるため、計算社会科学の基礎的技術全般としては、米国が世界最高峰のレベルであり、今後も顕著な成長が続くと考えられる。
	応用研究・開発	◎	↑	Microsoft の研究者グループや、Stanford、Cornel、Indiana 等の主要大学にある計算社会科学の高度な研究者グループが研究開発の先導的役割を果たしている。さらに、欧州と交互に IC2S2 (International Conference on Computational Social Science) という世界最大の計算社会科学の国際会議を隔年で開催しており、国際的な研究者コミュニティにおいて、欧州とともに中心的役割を果たしている。よって、今後も発展が続くと考えられる。
欧州	基礎研究	◎	↑	米国並の基礎技術があるとは言えないが、ビッグデータの研究利用に対する意識が高く、欧州全体に多数のスーパーコンピュータもあるため、既に高い基礎技術が、今後も顕著な発展を続けていくと考えられる。
	応用研究・開発	◎	↑	ETH Zurich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) や GESIS (Leibniz Institute for the Social Sciences) 等、計算社会科学の研究者グループを要する研究機関が多数ある。
中国	基礎研究	◎	↑	検索エンジンを始めとした独自の IT 技術を開発している中国は、ビッグデータに関わる基礎技術において米国について高いレベルにあると考えられる。
	応用研究・開発	○	↑	計算社会科学における研究の絶対量は日本を超えている。今後、高度な技術力を背景に、研究面でも急速に伸びてくる可能性が高い。
韓国	基礎研究	○	↑	ビッグデータに関する Google Patents でのヒット件数は日本を超えているため、今後、技術面で日本を大きく引き離していく可能性がある。
	応用研究・開発	○	↑	KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) にソーシャルコンピューティングの研究者グループがある等の理由で、国際的なプレゼンスは日本以上にあり、研究も盛んであると国際的な研究者コミュニティでは認識されている。

(8) 参考文献

- 1) David Lazer, Alex Pentland, Lada Adamic, Sinan Aral, Albert-László Barabási, Devon Brewer, Nicholas Christakis, Noshir Contractor, James Fowler, Myron Gutmann, Tony Jebara, Gary King, Michael Macy, Deb Roy, Marshall Van Alstyne. “Computational social science.” Science 323, 2009: 721-723.
- 2) Adam Mann. “Computational social science.” PNAS 113, 2016: 468-470.
- 3) Katie Metzler, David A. Kim, Nick Allum, Angella Denman. “Who is doing computational social science? Trends in Big Data Research.” A Sage White Paper, 2016.
- 4) Fabio Caccioli, Paolo Barucca, Teruyoshi Kobayashi. “Network Models of Financial Systemic Risk: A Review.” Journal of Computational Social Science 1, 2018: 81-114.
- 5) Veselka Boeva, Lars Lundberg, Sai M. Harsha Kota, Lars Sköld. “Evaluation of organizational structure through cluster validation analysis of email communications.”

- Journal of Computational Social Science 1, 2018: 327–347.
- 6) Blair Fix. “Hierarchy and the power-law income distribution tail.” *Journal of Computational Social Science* 1, 2018: 471-491.
 - 7) Adam Badawy, Emilio Ferrara. “The rise of Jihadist propaganda on social networks.” *Journal of Computational Social Science* 1, 2018: 453–470.
 - 8) Matthew Kupilik, Frank Witmer. “Spatio-temporal violent event prediction using Gaussian process regression.” *Journal of Computational Social Science* 1, 2018: 437–451.
 - 9) Feng Shi, Yongren Shi, Fedor A. Dokshin, James A. Evans, Michael W. Macy. “Millions of online book co-purchases reveal partisan differences in the consumption of science.” *Nature Human Behaviour* 1, Article number: 0079, 2017.
 - 10) Microsoft. “Computational Social Science.” Microsoft, <https://www.microsoft.com/en-us/research/group/computational-social-science/> (2019年1月16日アクセス) .
 - 11) Department of Humanities, Social and Political Sciences. “Computational Social Science.” ETH Zürich, <http://www.coss.ethz.ch> (2019年1月16日アクセス) .
 - 12) PostK-MultiSESim. 「多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発プロジェクトページ」複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究, <https://sites.google.com/site/postkmultisesim/> (2019年1月16日アクセス) .
 - 13) 計算社会科学研究会 . 「ホーム」計算社会科学研究会 , <https://css-japan.com> (2019年1月16日アクセス) .

2.3.2 社会インフラマネジメント

(1) 研究開発領域の定義

インフラは、市民が生活の安全・安心を確保し、持続可能で豊かな社会経済活動を営むために必要な、河川、ダム、砂防、上下水道、電気、ガス、通信、道路、鉄道、港湾、空港等の総称である¹⁾。社会インフラはインフラとそれが提供される仕組みやサービスを含んだものである。社会インフラのマネジメントの中でも、主として、維持管理に関わるメンテナンス技術を俯瞰する。

(2) キーワード

診断、異常検知、劣化予測、予防保全、長寿命化、ロボット、センシング、ビッグデータ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2018年8月14日にイタリアのジェノバで、イタリアと隣国フランスとを結ぶ高速道路が通る高架橋が崩落し、43人が犠牲になるという事故が発生した²⁾。この橋は長さ1.2kmのつり橋で、海風にさらされる環境にあり、常に補修作業が必要な状態だった。そのため点検作業は恒常的に実施され、道路面を支える鉄筋の一部に10~20%の腐食が進行していると認識していたと言う。しかしながら、精密なスキャン装置がないと腐食状態を正確に把握することが困難な構造であったため、橋に崩落の危険性がある、という判断には至っていなかったと言われている。この橋が建設された60年代は、より軽く、より安く作ることが流行していた時期であり、日本でも同様の設計思想に基づいて多くの構造物が建造されている。

米国では1981年に *America in Ruins: The Decaying Infrastructure* という本が出版され、インフラの劣化・荒廃が米国経済の成長の妨げになっているとされた。1967年12月のシルバー橋落橋事故、1983年6月のマイアナス橋落橋事故、2007年8月のミシシッピ川橋落橋事故などの事故³⁾が実際に発生している。

日本では1977年に開通した中央自動車道の笹子トンネルの天井板のコンクリート板が落下し9名が死亡するという事故が2012年12月に起こった。天井板を支えるボルトの接着方法が強度不足という指摘もあるが、5年に一度実施されていた詳細点検での検査が十分に実施されていなかった。目視で異常を確認した場合だけ打音検査を行う運用になっていたが、打音検査を実施していれば、ボルトの接着不良が事故以前に認識できた可能性は高い。

戦後、高度経済成長時代にかけて、道路、河川、下水道、港湾等の各分野で、橋梁、河川堤防、下水管渠、岸壁等の社会インフラが国や地方公共団体において重点的に整備されてきた。これらの社会インフラは老朽化が進んでおり、2023年には道路橋の40%以上が、またトンネルの30%以上が建設後50年以上経過する。事故を未然に防ぎ、機能を維持し必要なサービス水準を満足するように適切な維持管理をしながら計画的に更新していくことが求められている^{4),5)}。

社会インフラは、多くの階層からなる複雑なシステムであるとともに、同様の構造物であっても設置場所に応じて環境条件や荷重条件が異なり、その管理主体も国から都道府県や市町村といったようにさまざまであるといった多様性を有する。そのため、インフラの維持管理作業の頻度や作業量はさまざまである。また、供用中のインフラの維持管理は、サービスの品質を

低下させないように、利用者が少ない時間帯を使う必要があるため、作業時間や作業環境に制約がある。さらに、インフラが高所や水中といった、作業が困難な環境にあることもある。そのため、インフラマネジメントにはコスト、人材といった課題がある。

維持管理に必要な費用はインフラの老朽化とともに増大し、2013年度に3.6兆円であった維持管理・更新費が2023年には4.3～5.1兆円、2033年には4.6～5.5兆円程度になると推計されている⁶⁾。維持管理・更新費用を圧縮するための技術開発への期待は大きい。

また、インフラの維持管理に必要な技術者も不足しているが、特に小規模な地方公共団体において深刻である。技術者の不足が、インフラの状況を把握できていない状況を生んでいる。維持管理のノウハウを機械化する、あるいは可視化して伝承していくための技術が求められている。

【研究開発の動向】

従来の社会インフラ整備の主たる関心は、経済成長を背景とした需要の増大に答えるための量的ならびに質的な機能拡大にあった。高度成長が永遠に続くのであれば、現在存在するインフラも早晚陳腐化し機能不足に陥ると予測されるから、長期的・耐久的な利用よりはスクラップアンドビルドの繰り返しによる機能向上を前提に置いた、消費財のような使い方の方が合理的である。そのため、土木工学も、良質なインフラの供給・建設を主眼に置いた学問として発展してきた。しかしながら、成長には限界があり、それが顕在化した現代において、従来のアプローチの限界もまた明らかになりつつある。供用中のインフラの事故も頻発しており、危機的な状況も露呈している。それに対して、社会インフラを保持し、サービスを持続的に供給していくメンテナンスに関する知の体系化を進めている途中である。メンテナンスでは、時間が経過し、変化が発生する中で、適時適切な対応によってインフラの機能を保つ、あるいは強化・向上していくことが求められる⁷⁾。

サービスの提供の管理を運用管理（オペレーション）と呼び、その基礎となるインフラ・ハードウェアの管理を維持管理（メンテナンス）と呼ぶ。例えば、道路橋の場合、橋自体の保全は維持管理であるのに対して、交通整理など交通を円滑に確保する行為は運用管理となる。橋の健全性は円滑な交通に大きな影響があることから分かるように、この両者は密接に関連している。また、舗装のメンテナンスは、交通に対する影響が大きく、運用管理と維持管理の中間的な性質を持つ。社会インフラが有する目的に応じたサービスを提供する機能を、長期にわたって良好に保持することがメンテナンスの本質である。

インフラのメンテナンスに求められる技術は、(1) これまで人手に頼ってきた点検作業を効率化するための技術、(2) 長い期間構造物を監視しながら異常の発生を検知する技術、である。人手による点検作業は目視による検査と、ハンマーで部材を叩いて音の違いを聞き分ける打音による検査であった。どちらも長年用いられている評価手法だが、構造物の内部の様子や、定量的な劣化状態を把握するものではない。また、危険かどうかの判断は検査員の主観に委ねられているという課題もある。点検作業の効率化には、構造物の内部を広範囲にかつ非破壊で点検できる技術の開発が重要である。中性子線を照射して内部の欠陥や構造を調べる中性子イメージング、多数の超音波振動子を使うフェーズドアレイ超音波探傷法、ひびがあることで熱の伝わり方が変化することを赤外線で捉える、赤外線サーモグラフィ法、コンクリート内部の鉄筋、土中の空洞、ひびなどを測定することが可能な電磁波レーダー法といった技術が開発さ

れている⁸⁾。

センサネットワークを使ったIoT技術により、社会インフラを常時監視することが可能になる。これはインフラモニタリングと呼ばれ、正常に供用されているときのインフラの状態を常に把握することによる、異常の検知、補修が必要な時期の推定、破壊の前兆の理解などを目的としている⁹⁾。

インフラモニタリングを活用することで、点検に必要な人材不足の問題を解決できないか、という検討も進められている。例えば経済産業省が実施するIoT推進のための新産業モデル創出基盤整備事業の一つとして、社会インフラの効率的な点検に関して調査が行われている¹⁰⁾。

インフラの崩壊の原因は構造体の劣化だけでなく、交通量の増大といった、利用条件の変化ということにもある。事前の調査に基づいた推定のもとに利用状況が想定され、インフラは建造されるが、想定が外れることも多い。また、緩やかに変化する環境での材料の劣化を推測することは、大変難しい。従って、インフラモニタリングによって、利用状況が想定内かどうか、構造体の劣化が想定内かどうか、を随時チェックしメンテナンスしていく必要がある。

インフラメンテナンスは、インフラの状態を認識するためのデータを集める収集フェーズ、モデルを使ってシミュレーションや実験によって挙動を理解する解析フェーズ、集めたデータをもとにインフラの状態を認識する推定フェーズ、認識結果に基づいて補修等を行う実行フェーズというサイクルで実施され、それぞれのフェーズでの研究開発が進められている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

メンテナンスに必要なデータを入手するセンサ周りの技術と、インフラの状態を理解するためのシミュレーション周りの技術について展開が見られる。

社会インフラにセンサを導入する際には、東京ゲートブリッジの光ファイバーセンサのように、新規施工時にセンサを設置してモニタする場合や、センサが設置されていない既存インフラにセンサを設置してモニタする場合がある。より詳細なデータを取るために、安価でポータブルなセンサを多数設置する技術、センサは一つだが、車両に設置して道路を走行することで道路全体の状態をモニタする技術が開発されている。

インフラの形状データとして、点群データが利用されている。点群データは3次元スキャナを使って、現実の物体を点群データに変換してコンピュータで扱えるようにするものである。現実の形状を正しく認識することはメンテナンスを行う上での前提条件となる。図面が存在する場合は、図面と実データとの差分を把握することができる。点群データからCADデータを生成する技術は今後の研究課題である。

スマートフォンが広く普及したことで、住民にインフラの撮影をしてもらい、その画像データを集めてセンサデータとして利用することが可能になった。スマートフォンやタブレットを使って、多くの人が情報を集めるタイプのセンサをCrowd Sensingと呼んでいる。例えば、道路の穴を見つけたときにスマートフォンのカメラで撮影して、GPSデータと一緒にクラウドにデータを送ることで、道路をモニタできる。社会インフラメンテナンスに住民を巻き込んで継続的な活動とすることで、社会インフラは住民のものである、という意識が根付くことも期待できる。

構造物やその周辺環境も含めて、社会インフラの詳細なモデル化とリアルデータを取り込ん

だ数値シミュレーションが可能となっている。シミュレーションの内訳は、応力解析、衝撃解析、流体解析、振動・波動解析、熱解析等があり、これらを連成したマルチフィジックス解析が主流となっている。社会インフラの構成要素は多岐にわたり、その大きさや供用時間のスケールもさまざまであることから、マルチスケール解析も必須の技術である。有限要素法、有限差分法、境界要素法、粒子法等の計算手法を駆使して、社会インフラの破壊・非破壊シミュレーションの高度化を目指した大規模数値解析が行われている。この大規模解析を実施するためには、スーパーコンピュータ等を利用した HPC (High Performance Computing) 技術の導入が必要である。

大規模なシミュレーションの計算結果を理解するためには、結果の可視化が重要である。社会インフラのシミュレーションでは時間発展を伴うこともあり、大容量で多数のデータが生成されるため、これを効率よくハンドリングする必要がある。また、Virtual Reality を使って解析結果を疑似的に体験、あるいは解析結果を CG にして可視化する技術も提案されており、合意形成や住民参加などのコミュニケーションを目的とした活動や、防災・減災、新規インフラの設計にも活用されている。

現実世界の動画にコンピュータが作り出す仮想世界を融合させる Augmented Reality (拡張現実) を使って人間の感覚を拡張することも行われている。例えば、AR を利用して、地下埋設物の 3 次元モデルを携帯端末のカメラ画像に重畳して表示することで、地上から見るできない地下埋設物を可視化して、工事を効率化することができる。あるいは、現在のコンクリート面に、過去の点検データを時系列にして重ねることで、ひび割れの進展具合を簡単に確認することができる。

社会インフラの整備・管理や災害の備えとして活用されているのが、さまざまな空間的な情報を作成・管理・分析・表示する GIS: Geographic Information System (地理情報システム) である。GIS を使うことで点検結果を位置情報と重ねて表示して構造物の状態を一目で理解し、時間的な変化を位置情報と重ねて表示して経年変化を一目で理解することができる。

センサで集めたビッグデータを可視化するだけでなく、そのデータからインフラの状態を推定する、あるいは問題を検知するといったデータ解析技術の向上が重要である。社会インフラを、データ主導でマネジメントすることで、最適な管理を目指すことができる。ビッグデータの解析には Deep Learning といった機械学習が有効と考えられ研究されている。学習精度を高めるのに必要なだけの、大量の異常状態データを集めることが困難なので、正常な状態を学習して、そこからのずれを異常状態として検出する、という手法がある。この場合、異常と判断するずれの閾値をどう決定するか、という課題がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2014 年から 2018 年にかけての 5 年間、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の一つとして、「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」が実施された。ICT 技術やロボット技術といったシステム化されたインフラマネジメントを活用して、国内重要インフラの高い維持管理水準での維持、魅力ある継続的な維持管理市場の創造、海外展開の礎を築くことを目標とした。この目標を達成するために、点検・モニタリング技術の研究開発、構造材料・劣化機構・補修・補強技術の研究開発、情報・通信技術の研究開発、ロボット技術の研究開発、アセットマネジメント技術の研究開発の五つの研究開発項目を掲げた。新しい非破壊検査の技術とし

て、高出力 X 線・中性子源を使ってコンクリート橋内部を可視化する技術や、ハイパワーレーザーによるトンネル打音検査技術や、米国の時速 5km の道路検査装置 (Ground Penetration Radar) を凌駕する、時速 80km で橋梁床版内部を検査できる、高速・自動レーダー診断技術を開発した。また、インフラ点検の人材不足を補うために、高速走行型非接触レーダーによるトンネル点検、橋梁点検ロボットカメラ、スマートフォンによる路面性状把握システム、橋梁メンテナンス統合データベースシステム、地方自治体の橋梁点検のロボット技術による支援なども開発した。研究開発、技術開発、技術展開を継続して実施していくための拠点として、国立研究機関の拠点化を検討している。

革新的技術の発掘と社会実装、企業等の連携の促進、地方自治体への支援、インフラメンテナンスの理念の普及、インフラメンテナンスへの市民参画の促進を目的として、「インフラメンテナンス国民会議」を 2016 年 11 月に設立している。産学官民の技術や知恵を総動員するプラットフォームとして位置づけられている¹¹⁾。

米国では、運輸省の連邦高速道路局 (Federal Highway Administration) が Long-Term Bridge Performance というプロジェクトを 2005 年から実施している¹²⁾。LTBP は長期にわたって橋梁の状態や性能に関するデータを集める研究である。SIP で比較対象とした時速 5km の道路検査装置 (名称: RABIT) はこのプロジェクトで開発されたものである。LTBP ではさまざまなタイプの橋を、条件を揃えてデータを集めることによって、汎用的に橋梁の挙動を把握することを目指して RABIT を開発した¹³⁾。

(5) 科学技術的課題

点検の自動化、センサ開発、データ解析の高度化、メンテナンスロボットの開発、構造材料研究に課題があると考えられる。

インフラ点検の自動化は作業者の減少もあり、重要な課題である。打音検査や近接目視検査のように、人間の感覚を使って行う検査で人間がどうやって問題を認識しているのか、を理解する必要がある。人間のやり方を理解した上で、それを超える認識精度や速度を持つ装置や手法を、工学的に構成していかなければならない。Deep Learning といった機械学習技術が有効と考えられるが、最終的な判断を人間が行えるよう、認識結果に対する説明を可能にする必要がある。

非破壊検査に必要なセンサの開発は継続する必要がある。SIP で開発された、レーダー、高感度磁気、好感度近赤外分光、衛星 SAR、中性子線といった先端的なセンシング技術については、実用化に向けて、精度・速度の向上と同時に、設置コスト・維持コストの低減といった課題がある。また、これまでの手段で検出できない属性を検出できるセンサの開発も望まれている。さらに、計測したデータを集めるために、エラーなく、広範囲をカバーできる通信やセンサネットワークの研究も必要である。センサとネットワークとクラウドを含むシステム全体の処理の最適化を図るために、センサでローカルにデータを処理し、生データを解釈して意味データに変換することも必要になる。例えば、橋につけた加速度センサを使って、加速度データそのものを送るのではなく、通過した車の種類と時刻をセットにしたデータを送るようなイメージである。

センサで集めたデータを解析して、計測対象物の故障や崩壊の予兆を検出するデータ解析技術も重要である。さらに、故障の予兆を検知するだけでなく、メンテナンスの内容や時期を判

断し提案する技術も今後の課題である。機械学習による認識という帰納的な研究だけでなく、対象物をモデル化してシミュレーションを使って予測する演繹的な研究の推進も重要である。

人ではやり難い環境でメンテナンスを実施するロボットの開発も課題である。災害現場といった危険な作業環境で動作できるロボット、橋梁点検のような高所危険な場所での作業ロボットといったロボットであり、移動機能に限っても、二足歩行が有効な現場もあれば、専用の移動機構を持ったロボットが有効な現場もあるため、多様なロボットの研究が推進されることが望ましい。

構造材料（コンクリート、有機材料、複合材料、金属、絶縁材料）の劣化機序の理解や、シミュレーション技術を使った劣化進展予測や材料の余寿命予測も課題である¹⁴⁾。材料に関する基礎データがないと、実環境でのモニタデータを正確に解釈することができない。

(6) その他の課題

開発されたメンテナンス技術を社会実装していくには、アセットマネジメント技術が必要である。地方が抱える膨大なインフラを限られた予算で維持管理するための契約制度の見直し、人材教育、民間活用、住民との協働など、さまざまな施策を取る必要がある。

英仏で始まった官民連携事業 Public Private Partnership は米国やドイツにも広がり、米国ではシンクタンクの提言がされている¹⁵⁾。日本でも内閣府に民間資金等活用事業推進室を設置して PPP の活用を支援している。社会インフラの維持管理には膨大な費用がかかるため、PPP 等の活用が期待される。

人材の確保も課題である。専門性が高いと、コンクリートは分かるが、センサは分からないといったスキルセットになりやすい。モニタリングはさまざまな技術を融合したものであるため広い知識を必要とする。土木工学と機械工学、電気工学、情報工学の交流が望まれる。ただし、色々知っているということは逆に言うと専門がない、ということになってしまい、就職や、科研費の申請、論文投稿で不利となる。学問の境界を超える人材は必要だが、処遇とセットで考える必要がある。

社会インフラが新規に整備される際は積極的に住民への説明を行うが、運用段階に入るとサービスが提供されるのは当たり前になって、ことさらに状況の説明をすることもなくなる。しかし、このような状況が続くと、維持管理に対する住民の理解不足から、財源不足、人材不足を招くことになりかねない。また、老朽化に伴う撤去や複数インフラの集約に対して住民の理解を得ることも困難になる。米国土木学会 (American Society of Civil Engineers) は 4 年に一度 Report Card for America's Infrastructure を発表して、米国の空港、橋、ダム、上水道、河川、堤防、港、鉄道、道路といった社会インフラの状態を A～D のグレードで評価して結果を発表している。英国土木学会 (Institution of Civil Engineers) は The State of the Nation というレポートを出して、社会インフラに関するさまざまな情報を提供している。2017 年版ではデジタル革新がインフラに与える影響について論じている¹⁶⁾。日本でも土木学会が社会インフラ健康診断書 (試行版) を 2016 年度から発行して、道路、河川、下水道、港湾の診断結果を公表している^{17), 18), 19), 20), 21), 22)}。国土交通省も道路、航路標識、官庁施設についての点検実施状況を公表している。

点検を実施すると、時系列を持った大量のデータが生成される。このデータの所有関係を法的に担保する必要がある。対象物の所有者が、モニタデータの所有者でもあると考えるのが一

般的と考えられるが、公共物である社会インフラの場合、データの所有者は誰で、その公開について誰の了解を得ればよいのか、議論を深める必要がある。公共のデータはオープンデータとして公開することが望ましいが、テロリズムに利用されるといった、目的外の利用をされる可能性があることも考慮しておく必要がある。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	戦略的イノベーション創造プログラムのインフラ維持管理・更新・マネジメント技術での研究成果。 土木学会のメンテナンス学への取り組み。
	応用研究・開発	○	→	SIPに参加した各社の取り組み。
米国	基礎研究	◎	→	DOTが支援。
	応用研究・開発	◎	↗	SHMを請け負う会社があり、ビジネスとして展開されている。Structural Health Monitoringのマーケットは\$1.48Bと推計されている。(DIGITEXX社等)。
欧州	基礎研究	◎	→	HORIZON 2020でのプロジェクト (Zero Power Water Infrastructure Monitoring, Research into optimized and future railway infrastructure)。
	応用研究・開発	◎	↗	SHMを請け負う会社があり、ビジネスとして展開されている。(ドイツHBM、TESTIA等)。
中国	基礎研究	○	→	International Conference on Structural Health Monitoring and Integrity Managementを中国国内で2年に1回開催。2018年で4回目。
	応用研究・開発	○	→	積極的な海外進出政策を取っているが、新設市場の攻略がメイン。
韓国	基礎研究	○	→	大学で研究。
	応用研究・開発	○	→	積極的な海外進出政策を取っているが、新設市場の攻略がメイン。

(8) 参考文献

- 1) 橋本鋼太郎、菊川 滋、二羽淳一郎編.『社会インフラ メンテナンス学 :Infrastructure Maintenance』(東京:丸善出版,2015) .
- 2) ロイター.「焦点:イタリアの橋崩落、なぜ防げなかったか」ロイター, <https://jp.reuters.com/article/italy-motorway-collapse-safety-idJPKCN1LC05D> (2018年9月11日アクセス).
- 3) 藤野陽三、阿部雅人.「米国ミネソタ州での落橋事故」土木学会誌 vol.92 no.10, 2007: 52-55.
- 4) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議.「インフラ長寿命化基本計画」2013年11月.
- 5) 産業競争力懇談会.「インフラ長寿命化技術」2014年3月3日.
- 6) 国土交通省.「国土交通白書」2014: 35.
- 7) 宇都正哲.「次世代社会インフラの動向」OKI テクニカルレビュー Vol.82 No.2, 2015:4-7.
- 8) 坪谷 剛、市口恒雄.「インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発」科学技術動向 143号, 2014:36-43.
- 9) 的場純一他.「センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について」JICE レポート vol.15, 2009:24-28.
- 10) みずほ情報総研株式会社.「平成28年度IoT推進のための新産業モデル創出基盤整備事業(IoT技術を活用した社会インフラの効率的点検・管理手法等調査)報告書」2017年3月.
- 11) インフラメンテナンス国民会議.「インフラメンテナンス国民会議ファクトブック 2017-2018」2018年5月.
- 12) U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. “Long-Term Bridge Performance (LTBP) Program Protocols, Version1.” FHWA-HRT-16-007, January 2016.
- 13) Nenad Gucunski et al. “Concrete Bridge Deck Deterioration Detection and Characterization Using a Fully Autonomous Robotic Platform RABIT.” International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, September 2015.
- 14) 科学技術振興機構研究開発戦略センター.「戦略プログラム 社会インフラの劣化診断・寿命管理技術」CRDS-FY2007-SP-02, 2007年4月.
- 15) Hudson Institute. “Infrastructure Spending and Public-Private Partnership.” March 2017.
- 16) Institution of Civil Engineers. “State Of The Nation 2017: Digital Transformation.” 2017.
- 17) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 港湾部門 試行版 2018.6」2018.
- 18) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 道路部門 試行版 2018.6」2018.
- 19) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 河川部門 試行版 2017.8」2017.
- 20) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 下水道部門 試行版 2017.8」2017.
- 21) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 道路部門 試行版 2017.8」2017.
- 22) 公益社団法人 土木学会.「インフラ健康診断書 道路部門試行版 2016.5」2016.

2.3.3 サイバーフィジカルセキュリティ

(1) 研究開発領域の定義

IoT (Internet of Things) や CPS (Cyber Physical System) の技術は人類に新たな利便性をもたらす。しかしながら、サイバー空間から物理空間への攻撃や物理空間からサイバー空間への攻撃など新たな脅威の可能性が浮上する。そのために、IoT や CPS の技術を安心、安全に使うためにはサイバーとフィジカルの両特性を統合した新しいセキュリティの概念が必要であり、それをサイバーフィジカルセキュリティと定義する。

(2) キーワード

脆弱性 (vulnerability)、リスクアナリシス (risk analysis)、情報セキュリティ (information security)、サイバーセキュリティ (cyber security)、機能安全 (functional safety)、BCP (Business Continuity Plan)、IoT (Internet of Things)、CPS (Cyber Physical System)、サプライチェーン (supply chain)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

20 世紀に花開いた情報技術は、情報化・電子化の名の下に現実世界への影響を強めている。別な言い方をすると、制御で始まったマイコン化の流れは、21 世紀に入ってネットワーク化を進めている。IoT は全ての物に組み込まれたコンピュータをネットワーク化する概念であり、CPS はサイバー空間と物理空間を融合されたものとする概念である。

このような技術の流れを踏まえると、サイバー空間へのサイバー攻撃が物理空間に大きな影響を及ぼす可能性がある。逆に物理空間からの攻撃が情報漏洩や情報破壊などのサイバー空間の脅威になる可能性がある。このため、サイバー空間と物理空間を統合した新たなセキュリティを確立させる必要がある¹⁾。

この領域研究の対象の一つが重要インフラである。電力、ガス、水道、交通、通信などの生活や社会活動を支える重要インフラへの攻撃は生活や社会活動への大きな脅威である。もう一つの対象が IoT 機器と呼ばれる身近なところでも働く機器である。これらの機器である家電や自動車がサイバー空間から攻撃を受ける可能性が増大している。同時に、これらの機器を経由したサイバー空間への攻撃が出現している。

この二つの対象を中心に、機器のセキュリティ、ネットワークのセキュリティ、クラウドのセキュリティ、そして全体の運用のセキュリティを統合的に研究するのがサイバーフィジカルセキュリティである。

[研究開発の動向]

1946 年に開発された真空管式コンピュータ ENIAC を始祖としてサイバー空間が構築された。そして、1971 年に Intel でマイクロプロセッサが開発されて家電、自動車などの身近な機器や、ポンプ、ゲート、ボイラー、タービンなどの重要インフラにおける現場機器の電子制御化が急速に進んだ。

2000 年代に入り、Microsoft の OS 利用と機器のネットワーク化が進み、コンピュータウイ

ルスなどのマルウェアが身近な機器や現場機器に影響を及ぼす可能性が唱えられてきた。それが現実になったのは、2010年にイランで起きたウラン濃縮工場へのサイバー攻撃であった。この時、サイバー空間から物理空間への脅威が現実のものと認識された²⁾。

これを受けて、電力、ガス、水道、交通、通信などの重要インフラ防御の研究が本格化した。当時、この分野で先導的な役割を果たしていたのは米国である。DHS (Department of Homeland Security) が中心となり、INL (Idaho National Laboratory) では実機を模擬したテストベッドを用いた攻撃への対処訓練も行っていた。欧州では、イランでの攻撃を契機に ENISA (European Union Agency for Network and Information Security) が中心となって会社の役員クラスへのサイバーセキュリティ教育を始めた。

国内では、2011年3月11日に東日本大震災が起これ、重要インフラが全て止まり、津波の被害が被災地の人々をさらに苦しめた。2010年のサイバー攻撃と2011年の大震災の教訓を受けて、2012年3月に技術研究組合制御システムセキュリティセンター (CSSC) が設置された。このセンターは民間企業が中心となって重要インフラを中心にサイバーセキュリティ技術を研究開発することを目的とするものである。

CSSC は国から支援された復興資金をベースに被災地である宮城県多賀城市に研究拠点を形成し、2013年5月に開所式を行った。INL に二基あったテストベッドを参考に、電力、ガス、下水、化学プラント、ビル、生産システムなど7基のテストベッドを構築した、

これらのテストベッドを使って、データログの取得、侵入防止、侵入検出、ホワイトリストなどの防御技術を開発するとともに、サイバーセキュリティ演習をビル、電力、ガス、化学の分野で実施した。合わせて、IEC62243 に基づくデバイスのセキュリティ認証である EDSA (Embedded Device Security Assessment) も2014年から行っている。これは世界で二番目である。なお、この国際認証に基づくマネジメントレベルの認証である CSMS (Cyber Security Management System) 認証を日本情報経済社会推進協会 (JIPDEC) が同じく2014年から行っている。これは世界初である³⁾。

2016年には MIRAI と名付けられたマルウェアが DDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃を行った。これは、ルータやカメラなどの機器に感染し、それらを踏み台にして特定のサーバーを攻撃するものであった。いわば、物理空間からサイバー空間への攻撃であり、この事件を境に IoT 機器のセキュリティ対策の重要性が認識されるようになってきた。最初はペネトレーション試験 (通信ポート経由での攻撃耐性試験) やサイドチャンネル攻撃 (消費電力監視等による暗号解読など) による脆弱性発見とその改善が主であったが、IoT 機器の一つであるスマートメータの普及に伴い、これらの機器における侵入検知や侵入防御、SOC (Security Operation Center) によるサイバー攻撃の検出などの技術も注目を浴びつつある。

加えて、サイバーフィジカルセキュリティではサプライチェーンとしてのセキュリティ担保が大きな課題となっている。これは2017年に起きた WannaCry による攻撃が契機の一つになっている。

事業者、インテグレイター、機器ベンダー、ネットワークベンダー、ソフトハウス、チップベンダーなどが重要インフラなどではサプライチェーンを構成している。半導体やミドルウェアにバックドアが仕掛けられれば、事業者には大きな脅威である。同様に設置や配線時などにも、侵入や攻撃の装置を挿入される可能性もある。このため、内閣府の研究開発プログラム SIP 第2期のプログラム「IoT 社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ」では、

IoT システム／サービスのサプライチェーンに注目して、サプライチェーンにおける、A. 信頼の創出・証明、B. 信頼チェーンの構築・流通、C. 信頼チェーンの検証・維持に関する研究開発を進めて、信頼のチェーンを実現しようとしている¹⁾。

経済産業省は Society 5.0、Connected Industries の実現にはサイバー攻撃の脅威の増大に対応することが必要と考え、産業に求められるセキュリティ対策の全体像を整理し、産業界が活用できる「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク」を策定しようとしている。このフレームワークは産業社会を、サイバー空間におけるつながり、フィジカル空間とサイバー空間のつながり、企業間のつながりの三層構造と、組織、ヒト、モノ、データ、プロセス、システムの6つの構成要素で捉えて、包括的にセキュリティポイントを整理している。パブリックコメントを実施して、それらの意見を踏まえて策定を進めている。

(4) 注目動向

IoT セキュリティ

IoT 機器のセキュリティについては、内閣サイバーセキュリティセンター、IoT コンソーシアム、経産省など各所で議論が進んでいる。セキュリティ確保は終わりのない作業である。このため、業界ごとに一定のガイドラインを設けてセキュリティ確保の水準を整えるとともに、その水準を向上させていく必要がある。米国が国防の観点から重要インフラについてのガイドラインを明示したことを受けて各国でガイドラインづくりが始まっている。国内でも原子力、電力、スマートメータ、IoT 機器など多様な産業でのガイドラインづくりが進んでいる⁴⁾。その中でも早かったのは日本電気標準委員会で作成されたスマートメータのガイドライン⁵⁾である。このガイドラインはスマートメータシステムのセキュリティ確保を目的として、一般送配電事業者が実施すべきセキュリティ対策の要求事項を規定している。既に、スマートメータは国内で普及期を迎えている。また、家電機器のネットワーク化においても、スマートメータ経由が想定されている。もっとも、このガイドラインは電力事業に限ったもので、家電機器との接続をする B ルート (スマートメータからリアルタイムに検針データ等を取得できるルート) は範疇外である。ただし、これからの IoT セキュリティを考えるとこの下敷きとなるものである。

サイバー演習

セキュリティは基本的に守りの技術である。このため、攻撃時の対応をあらかじめ演習・訓練していく必要がある。米国での演習・訓練を範として、国内でも内閣サイバーセキュリティセンターが主催する分野横断的演習⁶⁾や CSSC が主催する制御システムサイバー演習³⁾が行われている。民間も同様の取り組みを行っており、最近では演習業務を提供する会社も多数ある。

認証

セキュリティ確保は事業者や製造者に、まずは責任がある。次に製造者の場合、機器の納入業者が納品時などに認証をする場合がある。現在は、独立な第三者による第三者認証が主流となっている。特に国際標準に基づくセキュリティについての第三者認証を行うことで、サイバーフィジカルセキュリティを担保する流れが加速している⁷⁾。

サプライチェーン

現在の電子機器は非常に複雑な構成となっている。大きく分けてハード系とソフト系に分かれる。ハード系はメカや電子部品などに分かれ、ソフト系はファームウェア、OS、ミドルウェア、アプリケーションプログラムなどに分かれる。これら全てを1社でまかなうことは不可能であり、多数の会社などが連携して一つの部品を構成している。さらに、これらの部品の集積として製品や重要インフラや工場などがある。このためセキュリティ確保には、各社、各部品、各ソフトウェアの連携であるサプライチェーンを意識せざるを得ない⁸⁾。

(5) 科学技術的課題

学術的には情報セキュリティと物理セキュリティに分野が分かれて研究されてきた。前者は暗号化、認証の方式に主眼を置いてきた。そして、後者は部屋や建物の構造、入退出管理を主眼にしていた。サイバーフィジカルセキュリティでは、これらを統合して考える必要がある。

それだけでなく、情報系から物理系への影響を考えると機能安全問題を避けて通れない。物理系を操作されることで健康、環境、安全面にどのような被害が生じる可能性があるかを把握し、対策を講じなければならない。逆に、物理系を操作するIoT機器からの情報漏洩や情報破壊などの被害に対する対策も講じなければいけない。その意味で、サイバーフィジカルセキュリティは従来の情報セキュリティ、機能安全を含み、それらを有機的に統括するものでなければならない⁹⁾。

加えて、サプライチェーン問題が対策を複雑化している。ネットワークに流れる情報を暗号化する場合、関連する機器ベンダーが暗号キーを共有する必要がある。この場合、一つの機器に脆弱性があれば、ネットワーク全体の危機につながる。それだけでなく、多数が共有している情報を秘匿しなければならないという基本的に困難な課題を解決していく手法の開発が不可避である。この開発にはIoT機器へのブロックチェーン活用が期待される。

サイバーフィジカルセキュリティには完璧な防護はありえない。常に攻撃側とのイタチごっこである。そのため、定期的な見直し、改善が不可欠である。ソフトウェアで言えば、アップデートである。脆弱性情報に基づいて常に最新のOS、ミドルウェア、アプリケーションプログラムに更新を続けていく必要がある。同時に、アップデート作業時が一番危険である。安全に、確実に、そして通信や処理の負荷を最小にするリモートアップデートの仕組み開発には大きな期待が寄せられている。

フィジカル面でアップデートを考えると機器の置き換えとなる。現在もリコール制度が整っている家電や自動車では、危険性がある場合は部品の置き換え、製品自体の回収が行われている。IoT時代を迎え、ソフトウェアのアップデートでは対処できない危険性については、部品や製品の回収や置き換えを行わなければならない。これは、所有から共有、買い取りからレンタルという現在社会の大きな流れに沿う動きでもある。身の回りの機器は常に最新のセキュリティやセーフティが担保されている状態を作るためには、所有よりサービス享受という方向に意識を変えていく必要がある。

その場合、機器の稼働状況をネットワーク越しに監視する監視センターを設ける必要がある。この監視センターがサイバーフィジカルセキュリティを担保する要となる。各機器の状態、ネットワークの状態を監視し、攻撃や侵入、故障や脆弱性を監視し、問題に即応する体制構築が不可欠である。その意味でIoT機器単体のセキュリティの担保、クラウドサービスのセキュリティ

の担保という状況から、クラウドサービスに対応する監視センターと IoT 機器が一体となったサイバーフィジカルセキュリティの担保にギアアップして、研究開発を行っていく必要がある。

（6）その他の課題

サイバーフィジカルセキュリティの分野は国防の一つとして扱われている。大きな転機となったイランでのスタックスネットによる被害とそれに続く中東での数々のインシデント、近年での他国から攻撃の可能性が指摘されるウクライナでの停電や米国での選挙妨害など、外交・軍事マターとして扱われている。

このため、セキュリティ技術は秘匿事項として扱われ、実際の研究開発がオープンになっていない。これは、オープンに情報を共有し、それを深めていくという学術の世界と相容れない。その意味で、学術研究としての難しさが存在する。企業レベルでも、実際のセキュリティ対策を明らかにするのは大きな抵抗がある。それは、対策を示すこと自体が攻撃の糸口を与えることにつながるからである。

サイバーフィジカルセキュリティを学術で扱う場合には、個別で行われている対策技術を学術の観点から抽象化して整理する必要がある。これが不十分だと、一般性や再現性に支障を来たして学術として扱われない可能性が存在する。

サイバーフィジカルセキュリティを研究する上での、もう一つの課題は広範な分野の知識が要求されることである。情報系、物理系に加えて、人文系の幅広い知識が必要である。情報系に限っても、ソフトウェア、通信方式、ネットワーク、データベースなど広範な知識が要求される。これらを完璧に知っている人はいない。同様に物理系と言っても、センサ、アクチュエータ、電子回路、半導体という知識だけでなく、熱管理、電波干渉など広範な知識が必要である。これも完璧に知っている人はいない。

このような困難を乗り越えるには、専門家集団の緊密な連携が必要である。それも機密情報を共有するため、信頼でつながった専門家でなければならない。広範な知識を持ち、信頼を持たれる研究者は簡単には育たない。それなりの教育体系と社会体制を整える必要がある。産業分野では IPA で人材養成プログラムが 2017 年より始まっているが、大学での取り組みは、これからという印象が濃い。その意味で、サイバーフィジカルセキュリティ分野の研究者養成は大きな課題である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	計測自動制御学会学術講演会などで関連セッションが 2005 年から引き続き構成されている。
	応用研究・開発	◎	↗	CSSC 中心の研究開発から 2006 年より SIP として大規模な研究開発に移行。2020 年の東京オリンピック・パラリンピックを視野に入れた技術開発を進めている。
米国	基礎研究	○	→	大学の研究者は自動車や産業機器の脆弱性発見を進めている。毎年、ブラックハットで発表を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	大統領令に基づいて重要インフラのセキュリティ確保を進めている。加えて、産業界は IIC (Industrial Internet Consortium) を中心にセキュリティ基準の作成を進めている。

欧州	基礎研究	○	→	暗号化、サイドチャンネル攻撃を中心に学術的な研究を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	GDPR (General Data Protection Regulation) が 2018 年 7 月に開始され、それへの対応に忙しい。
中国	基礎研究	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。
	応用研究・開発	—	↗	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。ただし、攻撃技術を磨いているという他国からの指摘はある。ドイツが Industrie4.0、米国が IIC を軸にセキュリティ技術を中国に展開している中で、中国独自規格を進めている。
韓国	基礎研究	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。
	応用研究・開発	—	→	軍事研究として行われているようで、成果が見えない。

(8) 参考文献

- 1) 後藤厚宏. 「IoT 社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ」 内閣府, <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/press2/security.pdf> (2018 年 8 月 20 日アクセス) .
- 2) 新誠一. 「超スマート社会におけるサイバーセキュリティ」 計測と制御 vol. 55 no. 4, 2016: 300-302.
- 3) 新誠一. 「重要インフラのサイバーセキュリティ対策」 エネルギー・資源 vol. 38 no. 2, 2017: 17-20.
- 4) 資源エネルギー庁. 「電力・ガス分野におけるサイバーセキュリティ対策」 経済産業省, http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/denryoku_gas_kihon/pdf/004_07_01.pdf (2018 年 8 月 20 日アクセス)
- 5) 一般社団法人 日本電気協会. 「スマートメーターシステムセキュリティガイドライン」 <https://www.denki.or.jp/wp-content/uploads/2016/07/s20160609.pdf> (2018 年 8 月 20 日アクセス) .
- 6) 内閣官房 内閣サイバーセキュリティセンター. 「2017 年度「分野横断的演習」について」 <https://www.nisc.go.jp/conference/cs/ciip/dai14/pdf/14shiryoku08.pdf> (2018 年 8 月 20 日アクセス) .
- 7) 新誠一. 「社会インフラシステムにおけるセキュリティ対策」 標準化と品質管理 vol. 69 no. 7, 2016: 2-6.
- 8) 経済産業省 商務情報政策局 サイバーセキュリティ課. 「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワークの概要」 経済産業省, http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/sangyo_cyber/wg_1/pdf/002_05_01.pdf (2018 年 8 月 20 日アクセス) .
- 9) 新誠一. 「IoT を生かすためのセキュリティ」 日経ものづくり no. 744, 2016: 106-110.

2.3.4 社会システムアーキテクチャ

(1) 研究開発領域の定義

社会を持続的に発展させていくには、経済や環境、技術的な変化を適切に捉え、安全性を確保した上で、その社会を形成する人々へ適切なサービスを介して価値を提供することが重要である。特に近年の急速な技術の発展に伴い、さまざまなものが容易につながりその影響を受けながら、社会をやりくりしていくため、全体をシステムとして捉えてその基本特性と原則を表すアーキテクチャに基づくマネジメント技術を確立することが求められる。

(2) キーワード

System of systems、システムズエンジニアリング、システム連携、アーキテクチャ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

Internet of Things (以下、IoT) 技術の発展はめざましいものがあり、さまざまなものがつながることでサービスを提供することができるが、こうしたサービスシステムは、いわゆる System of Systems (以下、SoS) となり、創発的な振る舞いをするのが懸念される^{1),2)}。地域、コミュニティなどのいわゆる社会の持続可能な発展には、経済や環境、技術的な変化を適切に捉える必要があると考えられるが、これは大規模で複雑なシステムとしての課題となる。SoS は、必ずしも運用、管理が及ばない複数のシステムで構成されるため、経済的、政策的、技術的な環境の変化の可能性があるライフサイクル全般にわたって、SoS 全体として求められる機能、特性を維持することを保証するのは難しい。

システムズエンジニアリング³⁾では、システムアーキテクチャを定義することで、次のプロセスであるシステム設計の定義に際しての制約を課しているため、アーキテクチャに基づきシステムのマネジメントを行うことは比較的容易である。しかしながら、外部環境の変化に応じて進捗が繰り返される可能性のある SoS の場合には、そのアーキテクチャの構築は容易ではない。SoS アーキテクチャでは、SoS の分析に基づきアーキテクチャ自身の進化を行うことが求められる⁴⁾。このため、外部環境に応じて変化する SoS をマネジメントするための持続的なアーキテクチャフレームワークが必要となり、その中で SoS アーキテクチャ自身を進化させる必要がある。当該研究開発領域は、社会システムを SoS として捉え、さまざまな利害関係者からの要求を満たす SoS アーキテクチャとそれを導くためのプロセスを研究する。

[研究開発の動向]

社会を支えるインフラストラクチャとしての電力システム、交通システムあるいは防災システムなどは、そのライフサイクル全般にわたりマネジメントすることができる単体のシステムではなく、ライフサイクルをマネジメントするのが困難なシステムを含めて複雑に相互関係性を持つ複数のシステムから構成されている。インターネットを含む通信ネットワークに接続されたコンピュータシステムによって管理、統制される、いわゆるサイバーフィジカルシステム⁵⁾となっている場合もある。このような、異質な個々のシステムが独立して動作可能ではあるが、ある共通したゴールに向けて共にネットワークされている大規模な統合された複数システムを

System of Systems (SoS) と呼ぶ^{1),2)}。SoS は、大規模かつ複雑で、ネットワーク化されているため、個々のシステムは独立して動作可能であるが、相互関係があり、SoS の要素である構成システムは、それぞれ異なるシステムライフサイクルを持つ。個々のシステムを最適化しても SoS 全体の最適性は保証されない。

SoS の特徴としては、各構成システムの運用の独立性、それらの管理の独立性、地理的な分布、創発的な振る舞い、進化的な発展が挙げられる²⁾。このような特徴を持つ SoS を成功裏に導くには、既存、もしくは、新規のシステムが混在することで得られる能力を、SoS を構成する部分の能力の合計よりも優れたものにするために、計画し、分析し、編成し、統合するプロセスとして、System of Systems Engineering (SoSE) が必要となる¹⁾。しかしながら、これは容易なことではない。SoS の課題としては、次の点が挙げられる。

- ・ システムズエンジニアリングで検討されるコンセプト、分析、制御、評価、設計、モデリング、可制御性、可観測性、信頼性などを、どのように SoS へ拡張して適用するのか。
- ・ どのように SoS をモデル化し、シミュレーションするのか。
- ・ SoS の要素となるシステム間のインタフェースをどのように扱うのか。
- ・ SoS の創発的な振る舞いをどのように扱うのか。
- ・ SoS の境界は動的であり、これをどのように定めるのか。
- ・ 時間が経つにつれて進化する SoS に関する要求をどのように扱うのか⁴⁾。

このような SoSE の難しい問題に対処するためのマネジメントフレームワークとして、文献 4 では、SoSE のプロセスを時間で展開した波モデルを提示している。そこでは、多岐にわたる進化の繰り返しの中で構成システムの開発を促し、SoS を追加開発の対象として特徴づけている。そして、外部環境からの SoS への継続的な入力 of 把握と、SoS の動的な性質に対処するための継続的な分析を行い、SoS の進化を繰り返す。この過程の中で、アーキテクチャの進化もまた重要となる。SoS アーキテクチャは時間とともに進化する SoS の持続的なフレームワークを与えると同時に、計画された SoS アーキテクチャが追加的に実装され、それ自身を進化させる。

欧州では、SoS のエンジニアリングとマネジメントの研究と革新に関する欧州ロードマップの策定に向けて、Cyber Physical Systems of Systems (CPSoS) に関する 30 ヶ月間のプロジェクトを 2013 年から開始し、2016 年に終了している⁵⁾。これに関連して、AMADEOS (Architecture for Multi-criticality Agile Dependable Evolutionary Open System-of-Systems)⁶⁾ のプロジェクトが、欧州委員会第 7 次フレームワークプログラムのもとで創設された。そこではプロジェクト COMPASS⁷⁾、DANSE⁸⁾ で定めた SoS に関する基本的な概念を継承している。一方で、ドイツを中心とした産業界の活動としては、2013 年 4 月に Industrie 4.0 のレポート⁹⁾ が公表され、そこでは製造業を中心とする産業として Internet of Things (IoT) の活用が描かれている。

米国では、Cyber Physical Systems (CPS) に関して 2006 年から NSF (National Science Foundation) が予算をつけ、現在も継続させており、さまざまな分野、政府機関との連携がなされている¹⁰⁾。カーネギーメロン大学ソフトウェアエンジニアリング研究所では、システムとソフトウェアの購入者とエンジニア (提供者) を越えて、複雑な SoS への全ての参加者が、ユー

ザが求めることへの異なった見方と期待を必要としている現状を踏まえ、SoS Navigator¹¹⁾を提供している。これにより、SoS に関与する各リーダーに対して、彼らが置かれる状況で需要側と供給側の重要な観点からの新たな気付きを与え、SoS コンテキストで現状とは異なるビジネスモデルの適応と持続が要求されているか否かを判断するための評価基準を示している。

米国の産業界から Industrial Internet Consortium (IIC)¹²⁾ が 2014 に発足し、IoT を活用した革新を加速しようと試みられている。IIC はリファレンスアーキテクチャを提案しており、そこでは、ビジネス/利用/機能/実装の 4 つのビューポイントを設定して、アーキテクチャを定義している。すなわち、ビジネスビューポイントではビジネス価値とその根拠を持ち、利用ビューポイントでは特定のアクティビティと役割で協働し、機能ビューポイントでは特定のセキュリティ機能を持ち、そして実装ビューポイントでは、特定の特性を持った技術に依存する必要がある。文献 13 では、さらにビジネスのレイヤーの上に社会ビューポイントを設定し、そこに社会的合意を取りまとめるための抽象的な約定を設けることが提案されている。

これまでビジネスあるいは SoS に関するモデル記述に際しては、防衛関係のアーキテクチャフレームワークである DoDAF (Department of Defense Architecture Framework)、あるいは MODAF (Ministry of Defense Architecture Framework)、TOGAF (The Open Group Architecture Framework) が用いられることが多かった。2016 年に OMG (Object Management Group) から UAF (Unified Architecture Framework)¹⁴⁾ が発行され、統一的にビジネスあるいは SoS に関するモデル記述をサポートする動きがあり、既にいくつかの研究発表がなされている。こうした研究で UAF を活用する際、IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) のビジネスビューポイントから下位の利用/機能/実装のビューポイントとの対応関係を明確にしている¹⁵⁾。

中国では、2015 年に「中国製造 2025」を掲げ、2049 年までの長期的な視点で、幅広い産業での世界トップレベルの製造業を目指して活動を行っている¹⁶⁾。既に欧州企業との連携が実施されていることは注目に値する。

国内では、内閣府を中心に超スマート社会の実現、Society 5.0 が提唱され、これに関連して、JST (Japan Science and Technology Agency) は未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域¹⁷⁾で、“多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築”を掲げている。これは Society 5.0 を実現するために必須となるシステム連携を技術的に確立させ、サービスを社会に提供するための重要な研究領域である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

OMG は UAF¹⁴⁾ を発行し、これにより、ハードウェア、ソフトウェア、データ、人員および設備を含む複雑なシステムの幅広い範囲に対してアーキテクチャをモデル記述し、さらに SoS の設計、実装へと通じるアーキテクチャ構成をモデル記述することができるようにしている。複雑システムの分析、仕様、設計、検証をサポートし、SysML (Systems Modeling Language)¹⁸⁾ に基づく関連ツールと他の標準に基づくツール間の連携のもとで、アーキテクチャ情報を交換できるようになる。UAF は、これまでアーキテクチャフレームワークとして用いられた DODAF、MODAF などをサポートするものであり、SoS が関与するビジネスの構

築に大きな貢献が期待される。

具体的には、スマートグリッド¹⁵⁾、石油・ガスパラント¹⁹⁾の分野へUAFを用いたSoSとしての対処が試みられており、IIoT (Industrial Internet of Things) をビジネスへ活用するシステムの開発が進むものと推測される。また、UAFをSoSのモデル記述にテラリングすることについて研究した論文²⁰⁾も見られる。

米国のNSFは、CPSに関して国土安全保障、道路管理、生物医工学、がん研究、衛生研究などのさまざまな分野で、政府機関と連携している¹⁰⁾。また、CPSには人の介在が含まれているが、陽に人を考慮することの重要性が指摘され²¹⁾、CPSのループの中に人が介在することを前提とした取り組みがなされている²²⁾。また、欧州委員会第7次フレームワークプログラムのAMADEOSのプロジェクトでは、SoSアーキテクチャの構築に向けての取り組みがあったが、レジリエンスのビューポイントを設定することでSoSの進化を捉え、これに基づくSoSアーキテクチャを提案する研究²³⁾がある。

SDGs (Sustainable Development Goals)²⁴⁾が2015年に国連から発行されている。国連に加盟する全ての国が、全会一致で採択したアジェンダで、2015年から2030年までに、貧困や飢餓、エネルギー、気候変動、平和的社会など、持続可能な開発のための諸目標を達成するとしている。SDGsの17の指標には、貧困や飢餓、健康や教育、さらには安全な水などの開発支援、エネルギー、働きがいや経済成長、まちづくり、気候変動など、包括的な指標が含まれている。これは、INCOSEが2014年に公表したシステムズエンジニアリング・ビジョン2025²⁵⁾と密接に関係し、持続可能な社会を形づくる上で極めて重要な指標となっている。社会が何を求めているかを把握し、社会に価値を提供すると考える解決策が、社会的に受容可能か否かを関連する地域の歴史的背景や文化、民族、宗教なども含めた上で考える必要があり、このことは文献¹³⁾で提案している社会のビューポイントと密接に関係がある。OMGが提案するUAFが主として、ビジネスビューポイントから下位の利用/機能/実装のビューポイントまでを網羅するのに対して、SDGsを考慮するならば、社会ビューポイントの存在が重要となる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内では、JST未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域¹⁷⁾の試みの中で、産学官が連携し、Society 5.0を形づくるための基盤としてのプラットフォームを構成しようとしている点が注目すべきことである。これは、国際的に見ても、最先端の研究開発プロジェクトである。システム連携を行うことで、いわゆるCPSを形成し、これを社会に組み込む際にそこに住み、そして生活をする人々との相互作用を考慮し、社会を持続可能なものとするためには、社会をSoSとして考え、これをマネジメントすることが求められる。また、社会のマネジメントを行うためのSoSアーキテクチャを、Society 5.0のプラットフォームとして位置づけるところに大きな意義がある。

欧州では、欧州委員会のFP7で取り組んだCPSoSのプロジェクトに関連して、AMADEOS、COMPASS、DANSEのプロジェクトが具体的に実施されたことは既に述べたが、これに続く2014年から2020年までの7年間に実施されるHORIZON 2020²⁶⁾では、Energyの分野内に、Smart Citiesのプロジェクトを設定している。また、2021年から2027年の7

年間、Horizon Europe と名付けられた研究・イノベーションのフレームワークプロジェクトとなることが決まりつつある。全ての人々の生活を向上させるための「社会的ニーズ」、種の生存、地球保護のための「生物圏」、変化をもたらす「イノベーション」に関する移行と、そして、これら3つの移行をやりくりするための「ガバナンス」の4つを特徴としており、SDGs²⁴⁾との関連に言及している²⁷⁾。これらの取り組みは、JST 未来社会創造事業の「超スマート社会の実現」領域と密接に関係するものと考えられる。

先に述べたとおり、米国のNSFは、CPSに関して国土安全保障、道路管理、生物医工学、がん研究、衛生研究などのさまざまな分野で、政府機関との連携がなされている。ただし、具体的なプロジェクトについては、明確になっていない。

今後の情報技術の発展により、人工知能の活用は避けて通れないと考えられ、SoS、CPS、あるいはIndustrie 4.0、IIoTを始め、これらの技術の産業への応用を進める際には、これらを設計するエンジニアが倫理について、正しい理解をしておかなければならない。米国電気電子学会(IEEE)は、The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems²⁸⁾を2013年から立ち上げ、倫理に沿った設計(Ethically Aligned Design, EAD)の重要性について、関係者間で議論を始めており、標準づくりに向けた活動を積極的に行っている。

(5) 科学技術的課題

SoSアーキテクチャに基づいてSoSをマネジメントし、さらに、SoSの分析を行いながらSoSの進化に合わせて、そのアーキテクチャを進化させていく、波モデルを実現するための技術的課題は少なくない。SoSをどのように分析するのか、アーキテクチャの進化をどのようにマネジメントし統治するのか、SoSを進化させるときに必要なアーキテクチャには何を記述しておくべきかについては、さまざまな利害関係者と共に取り組まなければならない大きな課題である。これらの課題は、技術的な観点だけでは解決に至らないこともあると考えられる。

特に、社会コンセンサスあるいは社会の合意に基づき、受容されるSoSを形づくる必要があるため、社会科学の分野の研究者、あるいは、地域と密着して活動をしている人々との協働が必要になる。地域やコミュニティで暮らす人々が、そこに提供されるインフラやサービスに対してどのような意見を持っているのかを適時受け取ることは、SoSの分析を行う際のものとなる情報を得るために必要と考えられる。

また、その分析に際しては、SoSの状況をシミュレーションすることが求められるが、いわゆるデジタルツインと呼ばれる技術では、シミュレーションに用いるモデルの粒度を的確に定める必要がある。任意の粒度で適切に分析ができるようにすることは大きな技術課題となっている。このようなシミュレーションモデルを構築するためには、SoSアーキテクチャをあらかじめ定義しておくことが必要であり、その際に、UAFを用いることが考えられるが、現時点では社会ビューポイントを網羅する方法論は確立していないことも技術課題である。SoSアーキテクチャの統治、マネジメントに関しては、ISO/IEC/IEEE 42020 Architecture Processes²⁹⁾が策定される予定で、標準としての指針はここに示されているものの、社会システムへの適用に際してのテーラリングが課題となる。そして、この課題とともに、SoSアーキテクチャとして何を記述する必要があるのかを明確にする必要があり、このためには、社会システムの利害関係者を漏れなく抽出し、全ての関心事を把握することがその基礎となる。この

ことは社会コンセンサス、社会との合意と密接に関係することであり、社会科学の専門分野の方々との協働が欠かせないことを意味する。

一方で、人工知能、自律システムは今後、SoS、IoTにとって必須の技術になることが容易に想像できるが、これを社会のビューから考えれば、倫理上の問題が浮き上がってくる。IEEEはEADの活動として既に標準づくりを始めているが、社会システムを形づくる上での人工知能、自律システムの活用に関して、倫理上の課題を取りまとめておく必要がある。

(6) その他の課題

(5)に記述したとおり、広範囲の技術分野と社会科学の分野との連携を行うことが、当該の社会システムアーキテクチャには必須であると考えられるが、実際にはそれぞれの分野の専門性を持って活動をしているため、連携する形を取ることが困難になると考えられる。また、ソーシャルメディアなどの情報システムの利用に対する考え方や捉え方が世代間で異なるなど、社会への参画の仕方について社会学的な観点での課題が山積している。

当該研究課題に対処しようとするには、システムズエンジニアリングの基礎を理解し、SoSの課題を捉えた上で、できる限りフラットな立場で検討を試みることができる人材の確保が重要となる。分野の専門性に引っ張られて、考え方が狭くなってしまうことを極力避けなければならない。さらに、EADに関する倫理的な問題を正しく理解し、例えば、「自律」、「協生」といった言葉を正しく用いることができる技術人材こそが、これからの社会システムに欠かせないと考える。ただし、このような意識変革は、技術者などの理系人材にのみに求められるものではなく、いわゆる文系の研究者にも求められると考えられる。そして、両者が共に社会を形づくるために力を合わせることで研究体制の構築が求められる。

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	システムズエンジニアリングの基礎に対する理解が十分ではなく、SoS関連の基礎研究が不足している。
	応用研究・開発	○	→	企業を中心にIoTへの興味は高く、個別の研究、プロジェクトは実施されていると考えられるが、システム全体あるいはSoSとして検討された研究はほとんど見えない。JST未来社会創造事業では、「超スマート社会の実現」領域で応用研究を推進しようとしている。
米国	基礎研究	◎	→	IEEE、INCOSE関係では、SoSに関する研究は多数あり、標準化に向けての議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	ビジネスへの応用を視野にUAFが提案され、それを応用する研究が既に始まっている。NSFは他の省との連携によるプロジェクトへの予算化を進めている。

欧州	基礎研究	◎	→	CPSoS、SoS アーキテクチャに関する研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	↑	個々の分野への応用を視野に入れており、電力が関係するスマートシティへの応用プロジェクトを HORIZON 2020 で実施している。さらに Horizon Europe が 2021 年からの 7 年間のプロジェクトとして計画されている。
中国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	○	↑	中国製造 2025 を立ち上げ、2049 年までを見通した構想を掲げ、欧州企業との連携を既に開始している。
韓国	基礎研究	○	→	システムズエンジニアリングハンドブックの翻訳版を発行し、その導入を進めている。
	応用研究・開発	△	→	具体的な研究、プロジェクトは見えない。

(8) 参考文献

- 1) Mohammad Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century (New Jersey: John Wiley & Sons, 2011) .
- 2) Maier Mark W. “Architecting principles for systems-of-systems.” Systems Engineering. Volume1, Issue4, 1998:267-284.
- 3) Systems Engineering Handbook. A Guide for System Life Cycle Process and Activities Fourth Ed. (New Jersey: John Wiley & Sons, 2015) .
- 4) Judith Dahmann, George Rebovich, Ralph Lowry, JoAnn Lane, Kristen Baldwin. “An implementers' view of systems engineering for systems of systems.” Systems Conference (SysCon) , 2011 IEEE International, 2011:212-217.
- 5) CPSoS. “Definitions used throughout the project. Towards a European Roadmap on Research and Innovation in Engineering and Management of Cyber-Physical Systems of Systems.” <http://www.cpsos.eu/project/what-are-cyber-physical-systems-of-systems/> (2018 年 8 月 28 日アクセス) .
- 6) “Cyber-Physical System of Systems, Foundation – A Conceptual Model and Some Derivations: The AMADEOS Legacy.” Springer Open, DOI 10.1007/978-3-319-47590-5, 2016.
- 7) “COMPASS.” <http://www.compass-research.eu/> (2018 年 8 月 28 日アクセス) .
- 8) “DANSE - Designing for Adaptability and evolution in System of systems Engineering.” <https://www.danse-ip.eu> (2018 年 8 月 28 日アクセス) .
- 9) National Academy of Science and Engineering. “Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group.” <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> (2018 年 8 月 28 日アクセス) .
- 10) National Science Foundation. “Cyber Physical Systems.” https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286 (2018 年 8 月 28 日アクセス) .
- 11) Software Engineering Institute. “SoS Navigator 2.0: A Context-Based Approach to System-of-Systems Challenges.” Carnegie Mellon University, <http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=8515> (2018 年 8 月 28 日アクセス) .

- 12) “Internet Industrial Consortium.” <http://www.iiconsortium.org/index.htm> (2018年8月28日アクセス) .
- 13) 西村 秀和. 「Society5.0 を形づくる」横幹、特集「Society5.0、超スマート社会に向けた新しい価値を創造する各学会の取り組みと他分野との研究展望」、12巻、1号、2018:33-37, DOI https://doi.org/10.11487/trafst.12.1_33.
- 14) Object Management Group, “ABOUT THE UNIFIED ARCHITECTURE FRAMEWORK SPECIFICATION VERSION 1.0.” <https://www.omg.org/spec/UAF/About-UAF/> (2018年8月28日アクセス) .
- 15) Matthew Hause. “Using MBSE to Evaluate and Protect the Electrical Grid as a System of Systems.” 27th Annual INCOSE International Symposium, 2017.
- 16) Extelligence. 「中国版 Industry4.0 ! 「中国製造 2025」の現状」<https://xeex-products.jp/extelligence/made-in-china-2025/> (2018年8月28日アクセス) .
- 17) 「JST 未来社会創造事業「超スマート社会の実現」領域」
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/super-smart/index.html> (2018年8月28日アクセス) .
- 18) Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language Third Edition (Massachusetts: The MK/OMG Press, 2015) .
- 19) Matthew Hause, Steve Ashfield. “The Oil and Gas Digital Engineering Journey.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
- 20) Lucio Tirone, Emanuele Guidolotti, Lorenzo Fornaro. “A Tailoring of the Unified Architecture Framework’ s Meta-Model for the Modeling of Systems-of-Systems.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
- 21) Sulayman K. Sowe, Eric Simmon, Koji Zettsu, Frederic de Vault and Irena Bojanova. “Cyber-Physical-Human Systems Putting People in the Loop.” IT Pro, IEEE Computer Society, January/February, 2016.
- 22) Azad M. Madni, Michael Sievers, Carla Conaway Madni. “ADAPTIVE CYBER-PHYSICAL-HUMAN SYSTEMS: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop.” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
- 23) Demetrios Joannou, Roy Kalawsky. “A Novel “Resilience Viewpoint” to aid in Engineering Resilience in Systems of Systems (SoS) .” 28th Annual INCOSE International Symposium, 2018.
- 24) United Nations. “SDGs (Sustainable Development Goals)” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (2018年8月28日アクセス) .
- 25) INCOSE. “SE Vision 2025.” <https://www.incose.org/products-and-publications/se-vision-2025> (2018年8月28日アクセス) .
- 26) “HORIZON 2020” <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en> (2018年8月28日アクセス) .
- 28) European Union. “Horizon Europe - the next research and innovation framework programme” <https://ec.europa.eu/info/designing-next-research-and-innovation->

framework-programme/what-shapes-next-framework-programme_en（2019年1月8日アクセス）。

- 28) IEEE. “The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems.” <https://ethicsinaction.ieee.org/>（2018年8月28日アクセス）。
- 29) James N Martin. “Overview of an Emerging Standard on Architecture Processes – ISO/IEC 42020.” 26th Annual INCOSE International Symposium, 2016.

2.3.5 制度設計

(1) 研究開発領域の定義

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

(2) キーワード

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

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

米国ではeBay、日本ではヤフオク!、モバオクなどのインターネット上のオークションサイトが、買い物をする際、あるいは不用品を処分する際の選択肢の一つとして定着しつつある。インターネットオークションで買い物をする際には、出品されている商品のどれを選択するか、また、いくらまでなら入札してもよいかなどの、さまざまな意思決定をする必要がある。また、出品する立場では、最低販売価格をいくりに設定するか、出品期間をどう設定の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。また、戦略的行動をする複数の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ことは制度設計／メカニズムデザインと呼ばれ、ゲーム理論の一分野として活発な研究が行われている。

一方、人工知能の一分野であるマルチエージェントシステムと呼ばれる研究分野では、人間や知的なソフトウェア等の自律的な主体をエージェントと呼び、複数のエージェント間の相互作用を扱っている。マルチエージェントシステムの研究において、エージェント間の合意形成のためのルール設計は重要な研究課題となっている。このような研究を支える基礎理論として、ゲーム理論と制度設計／メカニズムデザインの知見を用いること、また、後述するキーワード連動型広告や組み合わせ入札等、インターネット等の技術の発達により実現可能となった新しい状況に適用可能なようにメカニズムを拡張することが、近年のマルチエージェントシステム研究における一つの大きな流れとなっている。近年では、制度を実現する際の計算量や通信量等の実践的／工学的側面も考慮した情報科学分野との学際的な研究分野であることを強調し、「マーケットデザイン」という用語が用いられることも多い。

[研究開発の動向]

制度設計の主要な応用分野としてオークションとマッチングがある。以下、オークションとマッチングに関して、簡単な解説と研究開発の動向を示す。

オークション

制度設計／メカニズムデザインの雰囲気をつかむために、以下のような事例を考えよう。

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

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

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

- ・ 顧客は最も安い入札をした会社を選ぶが、その際に顧客が支払う金額は二番目に安い入札値とする。

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

顧客の立場からは、180 円の入札があるにも関わらず 200 円を支払うのは納得できないように感じられるだろう。しかしながら、実際にはこの方法を取った場合、各社にとっては利潤を上乗せしない、原価ギリギリの価格を提示するのが最適な戦略となる（それでも利潤は得られることが保証される）。第一価格秘密入札とビックリー入札では、各社の提示する金額が異なってくるのである。このような原価ギリギリの価格は、最初の方法を取る限り、決して各社からは引き出せない価格である。英語で、**Honesty is the best policy**（正直は最良の策）という格言がある。通常は入札のような金儲けの場面で、正直が（というよりは他人のことは何も考えず、自分の原価だけに基づいて入札することが）最良の策となることは考え難いが、ビックリー入札という、最も安値で入札した会社が、二番目に低い価格で落札するという制度を用いるこ

とにより、正直が最良の策となるのである。さらには、最も低い原価を持つ会社が落札するということは、社会的に無駄がない効率的な結果となっている。

長い間、ビックリー入札は、優れた理論的な性質を持つものの、一般に広く用いられることはないと言われてきたが、検索連動型広告 (sponsored search) と呼ばれる事例で広く用いられるようになってきている。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によって検索されると、基本的には入札額の高い順に、検索結果とは別に、例えば画面の右側に広告が提示される。キーワード連動広告により、ターゲットを絞った効率的な広告が可能となる。また、ユーザが広告のリンクをクリックした場合にのみ、広告主はサーチエンジンに広告料を支払う (pay-per-click) ようになっている。さて、ここで広告料をどのように設定すべきだろうか。初期のシステムでは、広告主は前述の第一価格秘密入札と同様に、入札に等しい額を支払っていた。しかし、この場合、広告主にとっては入札額の設定方法が難しくなる。このため、エージェントを用いてダミーの検索を行い、入札額を自動的に変化させる等の行為が蔓延し、入札額が著しく不安定になるという問題が生じた。

現在では、上から k 番目の位置の広告 (スロット) を得た広告主は、 $k+1$ 番目の広告の入札額に等しい額を払うという、ビックリー入札に準じた方式に変更されている。この変更により、入札額の調整が不要となり、入札額が安定するという結果が得られている²⁾。この事例は、人間同士のオフラインの取引では問題が生じなかった制度 (第一価格秘密入札) であっても、エージェントを含む系に導入された場合は、変化のスピードが急激であるため破綻してしまう可能性があり、より安定性の高い制度の導入が必要とされることを示している。

入札制度の設計に関して、売手の利益を最大化するための制度設計³⁾、価値に依存関係のある複数の商品が販売される場合 (組合せオークション) の制度設計および組合せオークションに関わる計算問題の効率的な解法に関する研究⁴⁾、ネットワークの匿名性を利用した不正行為に頑健な制度設計^{5),6)}等が行われている

マッチング

マッチングは、学生と学校、労働者と企業のような二種類のエージェント間の望ましい組み合わせを求める問題であり、学生と学校をマッチする学校選択制、研修医と病院をマッチする研修医配属問題、また、大学関係者に非常に身近な問題として学生を卒業研究の研究室にマッチする研究室配属問題、さらに生体腎移植において患者とドナーをマッチする腎臓交換問題などの広範な応用を持つ。ロイド・シャプレイとアルビン・ロスはマッチングメカニズムの理論とその実践に関する業績で2012年のノーベル経済学賞を受賞している。特に、デイビット・ゲールとロイド・シャプレイによる、Deferred Acceptance (DA) メカニズム⁷⁾がよく知られている。

マッチングの理論的な基礎となる問題として、安定結婚問題というものがある。これは男女がそれぞれ n 人いるとして、ある望ましい性質を満たす n 組の男女のペア (マッチング) を作るというものである。望ましい性質として、ここでは安定性を考える。例えば Alice、Becky、Carol、Daisy の 4 名の女性、John、Ken、Lee、Mike の 4 名の男性がいるとする。各男性は 4 人の女性に対して、各女性も 4 人の男性に対して、好みの順番が決まっている。当然、好みの順番は (たまたま同じとなるかも知れないが) 人によって異なる。Alice にとって、より望ましい男性の順が John、Ken、Lee、Mike の順であり、John にとってより望ましい女性の

順が Alice、Becky、Carol、Daisy の順であるとする。ここで、もし Alice の相手が Ken で、John の相手が Becky だとすると、Alice と John は今の相手と別れてペアとなった方が二人とも今より幸福になることになる。このようなペアを不安定なペアと呼び、不安定なペアを含まないマッチングを安定なマッチングと呼ぶ。

さて、どうしたら安定なマッチングを求めることができるだろうか？ 最も単純な方法として、男性の順序を、J、K、L、M で固定し、女性 A、B、C、D の並び替えを全て生成し、J、K、L、M と組み合わせて、安定かどうかをチェックするという総当たり法が考えられる。しかし、これは最悪、 $4!$ 回 (n 人なら $n!$ 回) の組み合わせをチェックすることになり、人数が増える現実的な時間内に安定なマッチングを求めることは絶望的となる。もっと効率的に安定マッチングを見つける方法として提案されているのが、前述のデイビッド・ゲールと、ロイド・シャプレイによる DA メカニズムである。この方式では、男性／女性は、独身か婚約中のどちらかであり、初期状態では全員独身である。独身の女性が残っていれば、以下の処理を繰り返し適用する。

1. 独身の女性は、これまでにまだプロポーズをしていない男性のうちで、最も好みの男性にプロポーズする (男性が婚約中でも気にしない)。
2. その際、一人の男性には一回しかプロポーズできない (一度断られた男性には二度とプロポーズできない)。
3. 男性は、自分にプロポーズしている女性の中で、最も好みの女性と婚約し、他の女性のプロポーズを断る (現在婚約中の女性がいても、より良い相手がプロポーズしてきたら、現在の婚約を解消して、最も好みの女性と改めて婚約する)。

独身の女性がいなくなれば、現在婚約中のペアでマッチングを決定する。この方式を用いた場合、各女性は、一人の男性に一回しかプロポーズできないので、繰り返しは高々 4^2 回 (n 人なら n^2 回) で終了する。

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

安定結婚問題の拡張として、学生と学校や研修医と病院のような、一つの学校／病院に複数の学生／研修医が割り当てられる多対一のマッチングがある。この状況に上記の DA メカニズムを拡張することは容易であり、学生を女性に、学校を男性に対応させればよい。各学生は、それぞれ第一希望の学校に応募する。学校は自分に応募している学生から、自身の選好に基づいて定員まで学生を仮合格として、その他の学生を不合格とする。不合格となった学生は、第二希望の学校に応募する。各学校は、仮合格となった学生と、新たに応募してきた学生を区別せず、選好に基づいて定員まで学生を仮合格とし、この処理を新たに応募する学生が生じなくなるまで繰り返す。この制度を用いた場合、学生にとって正直が最良の策であり、結果の安定性が保証される。

マッチングに関して、DA メカニズムの理論的性質の解析や、各種の応用事例に関する検討⁸⁾、マッチングに関わる各種の計算問題に関する検討⁹⁾、さらには、後述する制約の導入も含めたモデルの拡張等が行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

オークションに関して、さまざまな最適化の技術を用いて、望ましい性質を持つメカニズムを人手によらず自動的に生成する方法（自動制度設計）と呼ばれる研究が行われている。アイデア自体は以前から提案されていたが¹⁰⁾、探索空間が膨大となるため、実用的な規模の問題に適用可能な制度の設計は困難であった。近年、深層 Q-learning や SAT solver 等の最新の最適化技術を用いる研究が活発化している。自動制度設計を用いることで、個々の事例に応じた最適な制度の設計が可能であり、今後の発展が期待される。

マッチングに関して、現実の問題で重要となる各種の制約条件を満足する制度の設計に関する研究が進んでいる。例えば、研修医配属において、大都市圏の病院全体での研修医の数を制限することにより、地方の病院に十分な数の研修医が配属されることを目的とする地域上限制約¹¹⁾、あるいは直接的に過疎地域の病院に一定の数の研修医を割り当てることを保証する下限制約¹²⁾、さらには公立学校において、学生の多様性を確保するためのアファーマティブアクション^{13), 14)} 等がある。また、DA メカニズムで扱うことのできる制約のクラスに関する数学的性質に関する研究¹⁵⁾ も進んでいる。このような研究は、実問題に適用可能な制度の開発のために極めて重要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

学術的な研究プロジェクトは多数存在するが、多くは個人ベースであるため、ここでは実用指向のプロジェクトの紹介を行う。

スマートグリッド

スマートグリッド関連のプロジェクトは多数存在し、供給側と需要側に適切なインセンティブを与え、電力の需給をバランスするためのさまざまな制度に関する研究が行われている（例えば、Smartnet Project¹⁶⁾、Empower¹⁷⁾）。

研修医配属

研修医配属はマッチングの典型的な応用事例である。米国の National Resident Matching Program (NRMP)¹⁸⁾ では、毎年、研修医と病院のマッチングを行っており、2018年には4万人以上の研修医と3万以上の病院におけるポストとのマッチングを行っている。日本においても2004年から必修の臨床研修医制度が発足し、医学部卒業生に2年間の研修が義務付けられた。この研修制度とあわせて研修医と病院とのマッチング制度が採用されている¹⁹⁾。日本においては、今後、地域枠の研修医（ある地域で研修を行うことを条件に奨学金等を受けている研修医）の扱い等に関する制度の修正が必要となると考えられる。

生体腎移植ネットワーク

倫理的理由から、生体腎移植は近親者等のみに制限されることが通例であるが、免疫の不適合から近親者のドナーからの移植が不可能な場合に、生体腎移植ネットワークと呼ばれる、適切にドナーを交換することで移植の可能性を広げる方法が用いられている（例えば米国の United Network for Organ Sharing²⁰⁾）。適切なドナーと患者のマッチングを発見する制度／アルゴリズムが導入されている。

（5）科学技術的課題

オークション、マッチング共に、理論研究は数理モデルに基づいて緻密な理論が構築されており、モデルにおける前提条件が成立するならば、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、ほとんど同程度に好きだが、ごくわずかに Alice の方を好んでいるとする。DA メカニズムを実行した際に、Becky は最初から自分にプロポーズして婚約しているのに対して、Alice の方は他の男性にプロポーズして断られ続けて、99 番目に自分にプロポーズしてきたという状況を考えよう。人間の心理から言って、この状況で Becky を断って Alice を選ぶことは難しいが、DA メカニズムは、あくまで事前の順序に基づいて Becky を断って Alice を選ぶことを前提としている。事前の順序があまり変わらないなら、最初から自分を一番好きだと言ってくれている Becky を選びたいというのは自然な心理であるが、一番好きと言う女性を優先すれば、女性側に嘘であっても「あなたが一番好き」という誘因を生じさせてしまう。行動・実験経済学、心理科学等の分野と協力し、エージェントシミュレーション、被験者実験、実証分析等を用いて、人間がモデルから外れた行動を取る場合の制度の頑健性の検討等を行い、社会的に受容可能な制度に発展させる必要がある。

また、現実の問題は複雑であり、既存の数理モデルで対応可能できるのは、現実の問題から抽出された部分問題に過ぎない。例えば、マッチングにおいては、各学校には固定された上限制限が与えられているという前提が置かれていることが通例であるが、現実には各学校の定員は、前段階として予算や人的資源に関する資源割り当て問題を解いた結果であると考えることができる。通常、前段階の資源割り当て問題は、学生の選好を予測して決定されているが、この予測が間違っていると、個々の問題に関して最適解が得られたとしても、全体としての最適解が得られることは保証できない。現実的な問題において、より大きな部分問題をカバーできるようにモデルを拡張することが必要である。

（6）その他の課題

制度設計研究の実問題への適用に関して、我が国は立ち遅れており、過去の経験に囚われた科学的根拠の弱い政策決定が行われがちである。例えば、我が国は OECD 加盟国のうち、小

国を除くと、周波数利用免許割当てをオークションによらず国の裁量で決定している唯一の国となっている。制度設計という考え方とその重要性を、政策決定者および国民に広く周知する啓蒙活動が必要である。

(7) その他の課題

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	情報科学とマイクロ経済学／ゲーム理論の研究者による国内コミュニティが形成されており、学会での企画セッションが開催されるなど、研究が拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
米国	基礎研究	◎	↑	AAAI、AAMAS等の主要会議において、論文の3割超は米国の大学・企業によるものである。
	応用研究・開発	◎	↑	周波数オークション、研修医マッチング等の社会応用事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
欧州	基礎研究	◎	↑	伝統的に理論研究に強みがあり、英国、フランス、ドイツを始め、多くの国で制度設計、特に計算量的社会的選択理論と呼ばれる分野の研究が盛んである。
	応用研究・開発	○	↑	特にスマートグリッド等に関する応用研究が盛んであり、社会実験の事例、各種のスタートアップ企業が存在する。
中国	基礎研究	○	↑	機械学習等の他のAI分野における急速な進展と比較すると、やや緩やかではあるが、国際会議等でのプレゼンスは拡大しつつある。
	応用研究・開発	△	→	理論研究と比較して、やや弱い印象を受ける。
韓国	基礎研究	△	→	特に目立つ動きはない。
	応用研究・開発	△	→	特に目立つ動きはない。

(8) 参考文献

- 1) William Vickrey. “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders.” Journal of Finance, Vol. 16, 1961: 8-37.
- 2) Benjamin Edelman, Michael Ostrovsky, Michael Schwarz. “Internet Advertising and the Generalized Second Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords.” American Economic Review, Vol. 97, 2007: 242-259.
- 3) Roger B. Myerson. “Optimal auction design.” Mathematics of Operation Research, Vol. 6, 1981: 58-73.
- 4) Peter Cramton, Richard Steinberg, Yoav Shoham, ed. Combinatorial Auctions (Massachusetts: MIT Press, 2005) .
- 5) Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, Shigeo Matsubara. “Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids.” Artificial Intelligence, Vol. 130, No. 2, 2001: 167-181.
- 6) Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, Shigeo Matsubara. “The Effect of False-name Bids in Combinatorial Auctions: New Fraud in Internet Auctions.” Games and Economic Behavior, Vol. 46, No. 1, 2004: 174-188.
- 7) David Gale, Lloyd S. Shapley. “College Admissions and the Stability of Marriage.” The American Mathematical Monthly, Vol. 69, No. 1, 1962:9-15.
- 8) Alvin E. Roth, Marilda A. Oliveira Sotomayor. Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis (Econometric Society Monographs) (Cambridge: Cambridge University Press, 1990) .
- 9) David F. Manlove. Algorithmics of Matching Under Preferences (Singapore: World

- Scientific, 2013) .
- 10) Tuomas Sandholm. “Automated mechanism design: A new application area for search algorithms.” International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2003:19-36.
 - 11) Yuichiro Kamada, Fuhito Kojima. “Efficient Matching under Distributional Constraints: Theory and Applications.” American Economic Review, Vol. 105, No. 1, 2015: 67-99.
 - 12) Daniel E. Fragiadakis, Atsushi Iwasaki, Peter Troyan, Suguru Ueda, Makoto Yokoo. “Strategyproof Matching with Minimum Quotas.” ACM Transactions on Economics and Computation, Vol. 4, No. 1, 2016: 6:1-6:40.
 - 13) Lars Ehlers, Isa E. Hafalir, M. Bumin Yenmez, Muhammed A. Yildirim. “School Choice with Controlled Choice Constraints: Hard Bounds versus Soft Bounds.” Journal of Economic Theory, Vol. 153, 2014: 648-683.
 - 14) Ryoji Kurata, Masahiro Goto, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo. “Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol. 58, 2017:153-184.
 - 15) Fuhito Kojima, Akihisa Tamura, Makoto Yokoo. “Designing matching mechanisms under constraints: An approach from discrete convex analysis.” Journal of Economic Theory, Vol. 176, 2018: 803-833.
 - 16) “Smartnet Project” <http://smartnet-project.eu/> (2018年11月7日アクセス) .
 - 17) “Empower” <http://empowerh2020.eu/> (2018年11月7日アクセス) .
 - 18) “National Resident Matching Program” <http://www.nrmp.org/> (2018年11月7日アクセス) .
 - 19) 「医師臨床研修マッチング協議会」 <http://www.jrmp.jp> (2018年11月7日アクセス) .
 - 20) “United Network for Organ Sharing” <https://unos.org/> (2018年11月7日アクセス) .

2.3.6 サービスサイエンス

(1) 研究開発領域の定義

サービスは、いわゆる旧来のカウンター越しの対面サービスのようなものも含めて、サービスを提供する人と利用する人が相互に影響し合って価値を生み出す行為である。サービスは一人対一人だけでなく、多対一人、一人対多、多対多など、さまざまな構成で実行されるプロセスであり、構成要素間の相互作用が非常に複雑なシステムと捉えることができる。これがサービスシステムである。サービスの生産性向上と提供者と受用者の価値共創を目的とした、サービスとサービスシステムに関わる科学的な概念、理論、マネジメント技術、エンジニアリング技術の構築ならびに活用がサービスサイエンスである。サービス経済の拡大に対応して、サービスエコシステム、サービスシステム等も対象とする。

(2) キーワード

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

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

本領域の研究開発が進展することによって、科学的・工学的手法を活かしたサービスの生産性向上と、価値共創を中核概念とした産業構造や社会システムの変革の解明とデザインとが期待される。日本においてはサービス学会 (Society for Serviceology) が本領域の理念を推進しており、その設立趣意書には以下の様に記されている¹⁾。

“サービスは経済の主要活動であるとともに、生活の質 (Quality of Life) の向上、地域社会の繁栄、ひいては地球規模問題の解決の基底となる重要な要素である。グローバル化する市場においては、製品やサービスの経済的価値を高めることが求められる一方、サービスを利用する個々の生活者にとっての価値 (生活価値) を高めることが重要である。また、エネルギーや環境をはじめとする地球規模の問題の解決や社会価値の創出に向けては、サービスに関わるステークホルダ間の共創的意思決定を促す制度設計も求められる。

従来、サービスの関連研究は、経営学やマーケティング、情報工学や設計工学といった個別の研究分野で発展してきた。しかしながら、社会においてより良いサービスを実現するためには、社会科学、人間科学、理工学の協調が必要であるとともに、産業界と学术界との強い連携が不可欠である。そこでは、社会および経済のサービスに関わる活動、すなわち、狭義のサービス業のみならず、製造業等におけるサービス化も含めた包括的なサービスに対する学術的理解を確立し、顧客と共に高い顧客満足度を共創する体系の展開が必要である。... (中略)... 本学会は、サービスに関する広範な知識を体系化することで、さまざまな産業課題の解決に寄与し、よって、サービスに関わる「社会のための学術」を構築することを目的とする。”

ITの世界において、30年前は、どのようなハードウェアを使った計算機か、ということにユーザの関心があったが、クラウドの発展とともに、IaaS (Infrastructure as a Service)、SaaS (Software as a Service)、PaaS (Platform as a Service) というように、xxx as a Service と

という言い方が広く広まってきており、計算機の機能をサービス視点から捉えるようになってきている。また、自動運転車の実現が見えてくると、MaaS (Mobility as a Service) という概念が提唱され、車もサービスの視点から語られるようになってきている。介護や観光などといった、旧来のサービス産業だけでなく、製造業も含め多くの経済活動がサービス化され、サービスサイエンスの適用範囲が広がっている。

【研究開発の動向】

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

日本国内の動向についても同様である。日本のサービス産業の生産性 (労働生産性) が他の先進国と比べて低いことは以前から指摘されていたが、上述のサービスサイエンスの動きも相まって、日本におけるサービス科学・工学の政策的取り組みは、この生産性向上に端を発して 2005 年頃に始まった。代表的な取り組みとしては、サービス産業生産性協議会 (SPRING) の設置、文部科学省の人材育成プログラム、経済産業省の研究開発委託事業、産業技術総合研究所のサービス工学研究センターの設置、JST RISTEX の問題解決型サービス科学研究開発プログラム (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、国内で言えば人文社会科学、特にサービスマーケティング・マネジメントを含めたサービス科学の研究者コミュニティが形成されてきた時期である。また、国際的に見ればサービスサイエンスとサービスドミナントロジックとが交差した時期とも一部重なる。そのため、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取りまとめが徐々に行われていった。すなわち、日本におけるサービスサイエンスも共創の概念を包摂していったのである。共創の概念はサービスドミナントロジック以前にもシステム論や経営学の分野で存在していたが、情報通信技術 (ICT) の発達やスマートフォンの爆発的な普及などによりもたらされたさまざまな社会変化が、この概念の重要性にリアリティを持たせたとと言える。

現在、日本国内の関連学会においてもサービスサイエンス等に関する研究が個別に行われているが、上記の流れを最も汲んでいるのが、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見られる。これが、本領域を読み解く上での基本的な理解である。2012 年以降、世の中ではビッグデータへの関心、プラットフォーム・ビ

ジネスの興隆、IoTによる製造とサービスの融合、シェアリングエコノミーの進展などが見られてきた。また、日本では第5期科学技術基本計画として超スマート社会である Society 5.0 が掲げられており、ここではAIやIoTに大きな役割が期待されている。サービスサイエンスは当初 SSME の総称であったが、そこに Design が加わり、その後 Art と Public Policy がさらに加わり、今では Service Science, Management, Engineering, Design, Art, Public Policy: SSMEDAP の総称とされることもある。

このようにサービスサイエンスの対象分野は広がりをみせている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

サービスデザイン

サービスデザインの動きには人間中心設計とデザイン思考が大きな影響を与えており、ツールの多くもこれらと共通している。サービスデザインでは、事業者や生活者の活動を観察、あるいは一緒に活動することで得られた共感をもとに、問題解決の方法を設計していく。欧州ではサービスデザインが組織戦略・経営に及ぼす影響について研究がされている他、特に北欧諸国と英国では、顧客企業、行政、NPO などとの協働により、医療、健康福祉サービスの改善等で成果が挙げられてきた。

また、サービスデザインを利用者中心に捉えると、解決策そのものに対する興味よりも、サービスによって、利用者の行動をどう支援するのか、あるいは利用者の行動をどのように変えるのか、という点に興味の中心がある⁷⁾。Behavior design や Design for action と呼ばれる領域では、行動経済学などの知見を活用しながら、人々の日々の活動や行動習慣を変容し得るサービスをどのようにデザインするかに焦点が当てられている。欧州では主に公共政策的な観点で、米国では産業の観点での応用が進められている。また、サービスデザインに関連して、ソーシャルイノベーションなど市民参加のデザインとして、参加型デザイン (Participatory Design) などの手法の研究開発が進められてきた。さらに近年では、参加型デザインのアプローチの一環として、生活に根付いた場所 (リビング) での実証実験の場 (ラボ) であり、これを通じて提供者と利用者と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 Stephen L. Vargo と Robert F. Lusch が、全ての経済活動をサービスとして捉えるサービスドミナントロジックという考え方を提唱した³⁾。商品は有形無形を問わず、顧客が利用することで初めて価値を持つものである、つまり、同じ商品であっても顧客によって価値は異なる、という考え方である。近年のサービスドミナントロジックの論点は、一対一のアクター間の原始的サービスに対するものというよりも、マルチステークホルダを前提としたサービスエコシステム (Service Ecosystem) とそのデザインに対するものへと移りつつある。この文脈の下で、ネットワーク論、システム論、複雑適応系などの関連分野の他、Service Design (サービスデザイン) や Institutional Design (制度設計) との関係についても言及がなされつつある。2018年11月にはさまざまな研究者からの寄稿論文から構成される Handbook of Service Dominant Logic が出版され、サービスドミナントロジックの近年の展開についてまとめられている⁸⁾。サービスドミナントロジックを軸

にした社会システム（技術）への接近が行われており、本社会システム区分で扱われている技法（モデリング&シミュレーション）の他、経済学（特にゲーム理論）をもとにしたマーケットデザイン／メカニズムデザインとの関連も今後強くなるであろう。

トランスフォーマティブ・サービス

トランスフォーマティブ・サービス研究（Transformative Service Research）とは、サービスと満足できる状態（ウェルビーイング）の両方に焦点を当て、特にウェルビーイングの向上を目指す研究である。サービスの対象として、個人だけでなく、家族、コミュニティ、エコシステム、社会も対象とする。サービス経済は、単に経済的規模の拡大を追求する段階から、社会・環境の発展・持続可能性も考慮した変革的サービス経済（Transformative Service Economy）を目指す段階に移行しなければいけないという考えに基づいている。経済的価値の創造だけでなく、社会的価値や自然生態系への配慮を含めた持続可能な価値の創造から考え、実践していくものである。サービス経済の成熟化への内省を含むものであり、過剰・過小消費の減少を考え直す過程で生まれたとされる¹⁰⁾。想定されるアウトプットとして、幸福や生活の質の向上の他、必要な人が必要なサービスを受けられるためのアクセス性の向上、サービスの過程で消費者が何らかの不利に陥る可能性としての脆弱性の緩和、公平さの維持、格差の減少などが挙げられる。事例が集まりつつあるものの、まだ途上の分野であるが、ここで掲げられているウェルビーイングは、今後のサービス研究にとって重要なトピックになるであろう。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

NSF のファンディングと、サービスの国際標準化を挙げる。

スマートサービスシステム

超スマート社会や Cyber Physical System (CPS) のコンセプトで掲げられているように、ICT の進展により可能となったスマートサービスシステムもまたサービスサイエンスの大きな研究対象である。NSF (National Science Foundation) の Directorate for Engineering, Industrial Innovation and Partnerships 部門が実施する「Partnerships for Innovation : Building Innovation Capacity (PFI:BIC) プログラム」として推進されたプロジェクトがある。“human-centered smart service system”として 2013 年から 2016 年の間実施された。スマートサービスシステムは「将来の状況への対応改善のため、データに基づき学習、動的適応、意思決定ができるサービスシステム」として定義され、関連する 10 個のスマートサービスシステム研究開発に、それぞれ 100 万ドルの資金提供がされた。また、この NSF での取り組みを踏まえて、スマートサービスシステムに関する整理・体系化の試みもなされている¹¹⁾。

2017 年 1 月には、米国のサービスサイエンスの研究者・実務家コミュニティ (The International Society 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始めている。さらに、より一般的・横断的な標準として、持続的なサービス提供の基盤となる人間中心の組織設計や、サービスエクセレンス (Service Excellence) の標準なども開発されつつある。サービスエクセレンスについては現在、ドイツのイニシアティブのものと、ISO TC312 Excellence in Service にて活動がされており、日本も参画している。

(5) 科学技術的課題

サービスサイエンスはさまざまな科学技術成果を結集した総合学問としての色合いが強い。2014年に行われた第10回科学技術予測調査では、それまでの“製造”分野に代わり“サービス化社会”分野が新設され、製造業のサービス化に限らず社会のさまざまな要素がサービス化しそれらが緩やかにつながった社会像に関する広範なトピック (全101問) について専門家調査がなされた¹⁴⁾。2019年前半に実施される予定の第11回科学技術予測調査では、第10回で問われていた内容 (トピック) の多くが、ICT・アナリティクスの科学技術予測における社会実装像 (社会に浸透した像や人に働きかける像) として直接問われるようになった。特にセンシング技術、データ解析技術、サービスロボット技術など、サービス科学・工学的アプローチから類推される設問に顕著である。このことは、サービスサイエンスという用語を出さずともその目指すところが浸透しつつあるという見方ができる一方で、サービスサイエンスでは何を研究すべきか、また何が他と違うかを明確に宣言しなければならない時宜に差し掛かっていると捉えられる。サービスサイエンスにおける科学技術的課題を、サービス理論と価値共創、品質測定と価値評価、利用者の行動、提供者の活動、サービスデザインの観点から挙げると、以下のような技術課題が想定される。

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

（6）その他の課題

サービスサイエンスは経営学、マーケティング、オペレーションズ・リサーチ、人事、組織学、経済学、情報工学、認知科学、自然科学、社会科学、人間科学、工学と幅広い研究領域に関わる研究であるため、サービスサイエンスを推進する人材の確保が課題である。一人の研究者が全ての分野のスペシャリストになることはできないので、いかにして必要十分な人材をサービスサイエンスの分野に集めるか、というチーム構成の課題がある。

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

（7）国際比較

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

（8）参考文献

- 1) サービス学会. 「設立趣旨」 <http://ja.serviceology.org/introduction/index.html> (2018 年 12 月 1 日アクセス) .
- 2) 村上輝康. 「サービス学とサービソロジー」 第 1 章『サービソロジーへの招待』村上輝康, 新井民夫, JST 社会技術研究開発センター 編著. (東京: 東京大学出版会, 2017: 4-20) .
- 3) Stephen L. Vargo, Robert F. Lusch. “Evolving to a New Dominant Logic for Marketing.” *Journal of Marketing* 68, 2004:1-17.
- 4) Robert F. Lusch, Stephen L. Vargo, Gunter Wessels. “Toward a conceptual foundation for service science: Contributions from service-dominant logic.” *IBM Systems Journal*, Vol. 47, No.1, 2008: 5-14. <https://doi.org/10.1147/sj.471.0005>
- 5) Paul P. Maglio, Jim Spohrer. “Fundamentals of service science.” *Journal of the*

- Academy of Marketing Science 36, 2008: 18. <https://doi.org/10.1007/s11747-007-0058-9>
- 6) JST 社会技術研究開発センター. 「サービス学将来検討会 活動報告書 - 未来を共創するサービス学を目指して -」 JST 社会技術研究開発センター, 2015.
 - 7) Daniela Sangiorgi. “Transformative Services and Transformation Design.” *International Journal of Design*, Vol.5, No.2, 2011:29-40.
 - 8) Esteve Almirall, Jonathan Wareham. “Living Labs: Arbiters of Mid- and Ground-Level Innovation.” *Technology Analysis and Strategic Management*, 23 (1) , 2011: 87-102.
 - 9) Stephen L. Vargo and Robert F. Lusch (eds) . *The SAGE Handbook of Service-Dominant Logic*, SAGE Publications Ltd, 2018.
 - 10) 白肌邦夫、ホー バック. 「ウェルビーイング指向の価値共創とその分析視点」 *サービスロジー論文誌* , Vol.1, No.1, 2017: 1-9.
 - 11) Chiehyeon Lim, Paul P. Maglio. “Data-Driven Understanding of Smart Service Systems Through Text Mining.” *Service Science* 10 (2) , 2018:154-180. <https://doi.org/10.1287/serv.2018.0208>
 - 12) ISSIP/NSF Workshop. “Industry-Academe research partnerships to enable the human-technology frontier for next generation smarter service systems” <http://www.servicescienceprojects.org/ISSIPNSF/> (2018年12月1日アクセス) .
 - 13) 持丸正明, 戸谷圭子. 「サービスの国際標準化動向」 *サービスロジー* , Vol.4, No.3, 2017: 40-43.
 - 14) 科学技術・学術政策研究所. 「第10回科学技術予測調査-8. サービス化社会分野の調査結果」 <http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/3080/8/NISTEP-RM240-28ServiceJ.pdf> (2018年12月1日アクセス) .