

3. 研究開発領域

3.1 モデリング区分

3.1.1 先端的数理モデリング

(1) 研究開発領域名

先端的数理モデリング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会の諸現象・諸問題を理解・解決するための基礎となる数理モデリング技術の開発

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

データ計測技術や計算機の性能が大幅に向上したため、従来は扱うことが困難だった実社会の諸現象・諸問題を数理的手法によって理解したり解決したりすることが可能になってきている。先端的数理モデリングの目標は、物理法則のような支配原理・法則が明確でない対象に対しても、観測データや経験則に基づいて本質的な構造を抽出し数理モデル化する方法論を確立することである。一般的には、対象の性質や仕組みにふさわしい数理モデルの枠組みや表現を用いて現象を数学的に記述し、モデルパラメータ等の詳細を実データから決定することで、現象をよく表す数理モデルが構築できる。現象の本質を見事にとらえた数理モデルの例として、1920年代に提案された感染症伝播における個体数変動を記述するケルマック・マッケンドリックモデルや、1950年代に提案された神経細胞における活動電位の振る舞いを記述するホジキン・ハクスレー方程式などが挙げられる。いずれも現象論的モデルではあるが、モデル変数が物理的意味を持ち、実験・観測データの再現性が良いため、現在でも広く用いられている。このように、既存の数学を異分野へ一方的に応用するのではなく、実現象や実問題を深く観察して必要十分な数学的定式化を行うことで、現象の普遍的理解と実問題の解決が可能となる。さらに、個別研究を通じて蓄積された新しい数理モデリング手法を体系化することにより、より広い分野に応用できる技術となる。先端的数理モデリングは、数理工学や複雑系科学の根幹となる技術であり、今後様々な分野で観測可能なデータ量がさらに増えていくことを考えれば、他分野の最先端科学と融合してその適用範囲はますます広がっていくと予想される。

現実のシステムの多様性が明らかになるにつれ、従来の単一事象のモデリングを超えて、新しいモデルクラスが体系化され、応用範囲が拡大してきている。以下にいくつかの例を挙げる。

- ・ネットワークモデル：複数のシステムが互いに相互作用するようなシステムの記述に適しており、インターネット、電力ネットワーク、生体ネットワーク、経済ネットワークなどの数理モデリングに用いられている。ネットワークモデルの構築には、ネットワーク構造、ネットワーク要素の振る舞い、要素間の相互作用などの複数の側面を

それぞれモデリングすることが必要となる。

- ・ マルチスケールモデル：時空間的に異なるスケールのサブシステムが階層を構成するような複合システムの記述に適している。例えば、全球気候モデルは、各スケールの数理モデルを階層間相互作用によって結合させたものである。階層構造は、気象以外にも、生態システム、ナノシステム材料、社会構造など、実世界に多く見られる。
- ・ メゾスコピックモデル：マイクロとマクロの中間レベルを記述するもので、正確ではあるが詳細すぎるマイクロモデルと簡便ではあるが粗いマクロモデルの問題点を解消できる可能性がある。マイクロモデルとマクロモデルの研究がそれぞれ異なる分野で独立に発展していることも多く、目的に応じて双方の長所を取り込むことが可能である。
- ・ マルチフィジックスモデル：異質な物理現象が複雑に絡み合っ構成されるようなシステムの記述に適している。複数の物理モデルを組み合わせてシステム全体の統合的なシミュレーションを行うことを目的としており、物質科学や生体科学において広く活用されている。
- ・ ハイブリッド（力学系）モデル：異なる力学系が相互作用するシステムの記述に用いられ、連続変数と離散変数が混在している。例えば、スイッチを含む電子回路、パルス情報伝達を有する神経系、間欠的投薬下の病状変化のモデリングなどに用いられている。

数理モデリングはあらゆる分野で行われているが、主に数理〇〇学や理論〇〇学と呼ばれる学問領域で活発に行われている。これらの領域における数理モデル研究は多くの場合、欧米がリードしており、日本やアジアを含む諸外国はそれに追随しているのが現状である。個別事象というよりは、数理モデリング手法を体系的に扱う研究分野としては、数理工学、応用数学、数理科学などがある。米国では、応用数理学会（SIAM）が国際ジャーナルの刊行や国際会議の開催を通じて、世界における諸産業に役立つ数理工学的研究をリードしている。欧州では、ヨーロッパ数学会（EMS）、英国の応用数学研究所（IMA）、ドイツ応用数学会（GAMM）、フランス応用数学会（SMAI）などが、ヨーロッパ連合内の数学の産業応用に関する研究機関のネットワークを強化している。わが国でも、日本応用数理学会や電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティなどが実社会に役立つ数理モデル研究に力を入れている。さらに、数理工学に関する教育・研究機関は増加傾向であり、2013年に明治大学の総合数理学部現象数理学科が開設され、2015年には武蔵野大学の工学部数理工学科が開設予定である。また、以前の本研究開発領域の研究動向調査を受けて、2014年度からJST戦略的創造推進事業CREST「現代の数理工学と連携するモデリング手法の構築」およびさがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」が開始される。中国では、中国科学院が2010年に数学と分野横断科学に関する国立センターを設置し¹⁾、また中国応用数理学会が主導して2015年の応用数理国際会議（ICIAM）を北京で開催するなど²⁾、今後大きく成長する可能性がある。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・ 生物学においてはゲノム情報等のハイスループットデータが蓄積され、脳科学においては多計測脳波データが得られるようになり、地理情報学においてはリアルタイムの交通・輸送情報データが計測可能になってきている。このような時空間情報を含むデータから、システムの本質を抽出し数理モデリングを行う技術を確立することが課題となっている。現在ではシステムをブラックボックスとして扱わざるをえないため、機械学習などの手法が多用されているが、将来的には現象の理解に役立つ物理的に意味のある数理モデルの構築が期待される。
- ・ 個人情報を含むデータが計測されるようになり、遺伝子診断や消費行動予測に関わる数理モデリングが課題となっている。数理モデルが個人に影響を与えるビジネスに役立てられるようになったとき、数理モデルの信頼性を専門家でなくても分かるような説明が必要になる場面が出てくると予想され、そのような基準の開発が求められる。また、個人情報保護の観点も、今後の数理モデリング研究には必要となるだろう。
- ・ 実現象や実社会に役立つ数理モデルを構築するには、現実性を高めるための詳細化と理論的洞察を得るための簡略化・一般化を行う必要があるとあり、実験・開発研究者と理論研究者との間の連携が不可欠である。また、現実の諸問題を扱うためには、既存の数学モデルの枠組みを超えて、異なる数学分野の技法を融合したり全く新しい手法を開発したりする必要があることが多く、異なる数理モデリング技術に携わる理論研究者間の連携も重要だと考えられる。このような研究者間の連携の重要性は、わが国でも最近になってようやく広く認識されてきているが、欧米には遅れをとっている。そのような連携を強化するための工夫が求められる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 感染症に関する数理的研究の重要性が高まっている。米国の NIH と NSF は、感染症伝播の予測モデルとその支配原理の発見の開発プログラムにファンドを配分している³⁾。日本では、2014年に感染症数理モデルの教育研究コンソーシアムが立ち上げられた⁴⁾。
- ・ 人間行動の数理モデリングが注目されている。携帯電話やインターネット上のソーシャルメディアを通じて、人の移動・情報伝達データが大量に取得できるようになりつつある。これらのデータ解析を通じて、ヒトの消費行動、情報拡散、意見・文化形成、流行現象、一極集中現象、ミームなどの社会科学的現象が、数理モデリングの対象となりつつある⁵⁾。
- ・ JST と NSF は共同で、2014年から「ビッグデータと災害」に関する日本－米国の共同研究支援を行う予定である⁶⁾。予算総額は2億円。本プログラムの二本柱の1つは、スマートフォン等のデバイスによって収集された個人や集団の行動に関するビッグデータの分析により、災害及び災害対策のモデルを構築することである。
- ・ 数学や基礎科学の振興を行っているサイモンズ財団は、2015年から生体システムの実験および数理モデルの融合プロジェクトへの助成を開始する⁷⁾。予算総額は2.4億円程度。

- ・米国のブレイン・イニシアチブに対して巨額の予算が投じられているが、そのテーマの一部として、脳の数理モデリングとデータ解析が含まれている⁸⁾。

（6）キーワード

数理工学、数理科学、応用数学、ネットワークモデル、マルチスケールモデル、メソスコピックモデル、ハイブリッドモデル、データ駆動型モデル

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・1950年代に設置された東大工学部計数工学科を筆頭として、各大学の数理工学や数理科学を専門とする学部、大学院、研究所が設置され、工学や実社会に必要な数理モデリングおよび解析技術が体系化されてきており、世界的に高いレベルを保っている。 ・2013年度まで約5年間、内閣府合原最先端数理モデルプロジェクトが行われ、国内外の数学、物理学、工学、計算機科学、複雑系科学などの専門家の相互交流の活発化に貢献した⁹⁾。 ・感染症数理モデルの実用化に向けた教育・研究コンソーシアムが2014年度に発足し、サマースクールや研究集会を実施している⁴⁾。 ・JST戦略的創造研究推進事業CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」および、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」が2014年度に発足し、社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築を目指す。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・人の消費行動と社会行動の相関分析に基づいて、消費予測や広告戦略等に役立つ数理モデルの開発が行われており、ビジネスへの応用が試みられている¹⁰⁾。 ・地震等の災害の予測や対策立案に応用できる数理モデル研究に注目が集まっている。 ・CellDesignerという生物学的パスウェイのシミュレーションソフトが開発されている¹¹⁾。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ネット広告の投資効果予測に数理モデルを活用し、広告予算の削減を実現しようとする取り組みが企業でも行われるようになってきている¹²⁾。 ・九州大学マス・フォア・インダストリ研究所では数学と諸産業の共同研究を精力的に推進している。 ・科学技術試験研究委託事業「数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」において、さまざまな産業分野の数理モデル研究に関する研究会が行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・サイモンズ財団は、2015年より生体システムの実験と数理モデルを融合したプロジェクトへの助成を開始する⁷⁾。 ・オバマ大統領のBRAINイニシアチブ中間報告において、NIHは本研究領域に対して2014年に40億円の研究費を投じることを期待、その重点領域の一つとして、数理モデリング、統計学、計算論などと脳実験の融合を掲げている⁸⁾。 ・スマートフォンやソーシャルメディアのデータから、人の社会行動、消費行動、コミュニケーション、文化の発達などの数理モデルを構築する研究が活発に行われている。 ・NSFやNIHが癌研究に多くの予算を投じており、医療応用を目指した腫瘍成長の数理モデリングが広く行われている。 ・システム生物学をベースとした、遺伝子・タンパク質ネットワークおよび細胞・免疫系の数理モデリングが盛んに行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・力学系モデルを解析するフリーソフトウェアAUTOが普及している。 ・企業の研究所や海軍などでも最先端の数理モデル技術を用いたアルゴリズムの開発やシミュレータの開発が盛んに行われている。

	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 多くのIT企業、製造業、金融機関などで数理モデルが開発されソフトウェア等の形で実用化されている。 Mathwork社の商用ソフトウェアMatlabは世界的に科学技術計算に広く用いられ、信号処理システム等のモデリングに便利なSimulinkというツールを備えている。 Wolfram社の商用ソフトウェアMathematicaは世界的に普及している数式処理システムである。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ヨーロッパ数学会、英国応用数学研究所、ドイツ応用数理学会、フランス応用数学会などが、ヨーロッパ連合内の応用数学や産業数学に関する研究所の連携を進めており、最先端の数理モデリング研究が見られる¹³⁾。 英国は数理生物学のレベルが高く、生態系、感染症、がんなどの数理モデル研究が精力的に行われている。 ドイツ・フランス・イタリアのグループの連携により、新しいセンシング技術で得られる大量の人の接触データから感染症や人の行動パターン¹⁴⁾の数理モデリングが研究されている。 英国やドイツでは細胞やその遺伝子制御ネットワークのシステムバイオロジー研究のプロジェクトが推進されている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは自然エネルギー導入に熱心で、エネルギー問題に対する理論研究者の関心も高く、数理モデリングに注目が集まっている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ライブラリのパーツを組み合わせることで、製品製造プロセスのモデリングとシミュレーションを行うことのできるオブジェクト指向のモデリング言語Modelicaが開発され、自動車会社等の産業界で利用されている¹⁵⁾。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 中国科学院は「数学と分野横断科学に関する国立センター」(NCMIS)を設置して、数理モデリングと諸科学との連携を強化している¹⁾。 中国応用数理学会は、2015年の国際応用数理学会(ICIAM)を北京で開催するなど、存在感を示しつつある²⁾。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 計算知能分野に研究人口が多く、例えば生物模倣コンピューティングなど、数理モデルの応用を行う人材が育っている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) National Center for Mathematics and Interdisciplinary Sciences, CAS
<http://english.ncmis.cas.cn/>
- 2) The 8th international Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2015)
<http://www.iciam2015.cn/>
- 3) NIH, Ecology and Evolution of Infectious Diseases Program
<http://www.fic.nih.gov/Programs/Pages/ecology-infectious-diseases.aspx>
- 4) Infectious Disease Modelling Consortium
<https://sites.google.com/site/modelinfection/>
- 5) NIH, Modeling Social Behavior Program
<http://grants.nih.gov/grants/guide/pa-files/PAR-13-374.html>
- 6) Japanese-US Joint Research “Big Data and Disaster Research”
http://www.jst.go.jp/sicp/call_joint_nsf_bdd.pdf
- 7) SIMONS Foundation, Targeted Grants in the Mathematical Modeling of Living Systems
<http://www.simonsfoundation.org/funding/funding-opportunities/mathematics-physical-sciences/targeted-grants-in-the-mathematical-modeling-of-living-systems/>
- 8) NIH, BRAIN Initiative Interim Report
<http://acd.od.nih.gov/presentations/BRAIN-Interim-Report-Presentation.pdf>
- 9) 内閣府 FIRST 合原最先端数理モデルプロジェクト
<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/>
- 10) ヒット現象の数理モデル
http://www.excite.co.jp/News/economy_clm/20130522/President_9436.html
- 11) CellDesigner. <http://www.celldesigner.org/>
- 12) Nikkei BP net, リクルート、広告効果予測に「状態空間モデル」を採用しコスト削減
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20140530/560444/>
- 13) European Consortium for Mathematics in Industry. <http://www.ecmi-indmath.org/>
- 14) SocioPatterns. <http://www.sociopatterns.org/>
- 15) Modelica. <https://www.modelica.org/>

3.1.2 先端的統計モデリング

(1) 研究開発領域名

先端的統計モデリング

(2) 研究開発領域の概略

モデリング専門家の支援の下、広範な領域で利用されている高度統計モデリングの統合的活用を専門家僅少のわが国でも実現し、一挙に海外との格差を解消するために統計モデリングの非専門家である研究者・産業界と統計モデル高度利活用のインターフェースたり得る知識基盤システムを創生する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と内外の動向

【標準的統計手法活用から現象にフィットした統計モデル利用へのパラダイムシフト】

データに基づく帰納的推論に依拠する、予測・意思決定は、理工学、社会科学、政策・企業の経営マネジメントの至るところで用いられる横断的方法となっている。1980年代前半までは、国内外ともに正規線形モデル（重回帰モデル・分散分析モデル）あるいはその延長線上にある重み付線形モデルに基づく、標準的手法を諸学術分野ないしは産業界が利用するということが主流であった。諸学術の専門家ないしは産業界が、関心のある現象を自在にモデル化するということが国内外ともに稀であった。第二次大戦後この時期までは、わが国産業界における正規線形モデルの効果的適用については、統計的品質管理、品質改善に資する産業界向け標準教程の産学協業での確立と、それを基にした先進企業独自の社内教育活動が活発であった。その意味で、概ね 1990 年代前半まで、わが国モノづくり系企業の統計的手法活用は世界の最先端を走っていた。

しかし、1980年代以降、計算環境の急進展に伴い非線形最適化が容易に実現できる時代を迎え、統計モデルはこれまでの線形計算に依拠した線形モデル当てはめから、最尤法に基づく現象に即した柔軟なモデル当てはめに移行した。以下で述べるように 1970年代から、統計科学、とくに計量経済学、計量生物学、計量心理学の主流は標準的統計的手法の開発ではなく、現象の柔軟かつ効率的なモデル化に急傾斜していた。

【モデルの知を支える米国統計ソフトウェアとその独占的体制とフリーソフトウェア R の勃興】

柔軟かつ広範な統計モデルの知を諸学術・産業界への展開を加速したのが、1980年代後半からの SAS、SPSS、S-plus（前身の S 言語は Princeton 大学 John Tukey が ATT ベル研究所で 1970 年代に開発、1984 年にベル研究所から S システム、1988 年に S 言語が発表）などの米国で開発された商用統計・計量ソフトウェアの急成長である。

これに対して、1980年代以降、TIMSAC（統計数理研究所）、JUSE STATWORKS（商用ソフトウェア、日本科学技術連盟）、TPOS（社内ソフトウェア、トヨタ）、NISAN（九州大学）など、わが国独自の統計モデリングのためのソフトウェア開発が行われ、産業界でも活用されてきた事実はある。ただ、わが国開発の統計ソフトウェアは、米国の 3 大商用国際的ソフトウェアに比して、その規模、機能、適用領域は限定的である。

2000 年以降、この商用ソフトウェアに急速に食い込んだのが世界の統計科学者がボランティアに S 言語をフリーソフトウェア化した R 言語である。今や、純粋に実装されて

いる統計モデリングのためのライブラリ数では、Rは商用ソフトウェアを凌駕しており、日本国内にも急速に普及している。

【我が国モデルの知を支える専門家層の欠如】

今日、SASなどの電話帳数冊分の規模のマニュアルに網羅された統計モデルの統合的理解が可能な専門家は僅少というよりは皆無と言わざるを得ない。一方、この種の統計モデリングの統合的理解は、米国、英連邦諸国では通常の大学に設置されている統計学科・生物統計学科の修士課程修了生程度の専門家層が具有している。米国政府は、統計的方法を用いて社会・学術課題解決に当たる、職業統計家の総数は米国内で2012年5月現在27,600名、その17%が連邦政府、金融保険業12%、教育関係11%、地方政府9%）である。2012年から2022年に至る職業統計家の増加率は、連邦政府は27%と推定している(<http://www.bls.gov/ooh/Math/Statisticians.htm>)。一方、わが国には、統計モデル専門家育成の基盤としての統計学科、生物統計学科は存在しないし、政府統計でこの種の数理系専門職としての統計家がカウントされているという事実すらない。

【我が国の当該研究領域での先行研究】

1990年代、慶應義塾大学理工学部数理科学科柴田里程教授と渋谷政昭教授が、Shibata and Sibuyaにおいて、Data and Description 研究というデータとその分析に用いられているモデルとを統合的に記述する方法論を世界に先駆けて提案した¹⁾。この方法論は、今日のクラウド環境でこそ適用すべき、知識ベースへの情報蓄積基盤まで進展したが、国際標準的影響力を持たなかった。しかし、わが国統計モデル専門家欠如の中で、統計モデルに関わる知の統合的理解と再利用を加速する大きなテーマの一つとして注目できる。

（4）科学技術的・政策的課題

【統計モデルの発展に追いつかない我が国の応用】

1980年代までの重回帰分析に代表される標準的統計的方法適用時代までは、わが国の産業界・学術界は統計モデル専門職の助力なくしても、十分な国際競争力を有していた。しかし、柔軟な統計モデルの当てはめが主流となった現在、一部の学術分野を除いて、先進諸国が1970年代以降開発してきた次に示すような統計モデルへの学術界・産業界の応用ないしは浸透は全く不十分である。

実際、日本以外では先端的統計モデルについても、理論的論文よりは諸分野への適用研究論文の方が多い。一方、日本はいまだに20世紀初頭に開発された統計的方法の適用論文が多くある。しかし、海外応用統計研究論文では、既に重回帰分析や因子分析のように20世紀初頭に開発された標準的統計的方法の適用率が学術論文レベルでは著しく小さくなっている。

【統計モデル発展に関する俯瞰】

統計モデルを独自に開発する研究者群は、米国・英国が圧倒している。しかし、わが国でも、時系列モデル、空間時系列モデルなどで、幾つかの理論的貢献が認められる。しかし、わが国の多くの学術界、産業界でのモデル適用は、先に述べた統計ソフトウェアの機能を上回ることはない。以下では、1970年代以降の統計モデル発展の方向を次のように分類する。

・変動を記述する情報の多様性拡張

Nelder and Wedderburn²⁾の一般化線形モデル (GLIM, Generalized Linear Model) に代表される、被予測変数として、質的変量、順位変量、多項選択変量など様々なタイプの変量の変動について記述するモデルの開発が挙げられる。GLIMに関しては、国内外で医学・生物学領域でのリスク分析適用が社会制度として義務付けられた。我が国でも、生物統計学専門家育成が、医学系大学院レベルで繰り広げられ、他分野に比べると諸外国に対する遅延状況は小さい。

一方、GLIMに関わる統計モデルは、計量経済学分野でも質的選択問題として独自に発展し、2000年にシカゴ大の D. McFadden がノーベル経済学賞を受賞し、その方法は我が国マーケティング・サイエンス分野でも応用されている。質的選択問題に対しては、スタンフォード大学経済学科の雨宮健名誉教授など海外日本人の貢献も大きい。なお、McFadden の理論³⁾は計量生物学分野では、英国の Cox の比例ハザードモデル体系⁴⁾と数理的には同等であることも知られている。Cox の比例ハザードモデルは、提案当初からスタンフォード大学の心臓移植患者の余命解析といった医学分野での応用活動が開始され、わが国でも 1980 年代には、愛知県がんセンターの中里博昭ら全国がんセンター研究者らが組織した「ガン生存時間研究会」を起点に医学分野での普及利用が進展している。今日、Cox の文献の引用数は、累積ではなく年次ごとに増大している。

・系統的変動記述方法の柔軟化

上で述べた比例ハザードモデルは、生存時間データ分析における瞬間死亡率関数 (故障率関数) をノンパラメトリック表現した代表的モデリングであるが、GLIM 以降、系統的要因効果に特定の関数形を仮定しないノンパラメトリックないしはセミパラメトリックモデリングの開発が多数行われた。その代表的なものがベル研究所データ解析学派の Hastie and Tibshirani が中心となって開発した、一般化加法モデル (GAM, Generalized Additive Model) である⁵⁾。この方法自体は、局所平滑化技法やスプライン関数で回帰関数を表現する一連のモデルと考えることができる。一般化加法モデルに独立変数 (説明変数) ベクトルの回転を加えた射影追跡回帰モデルは、現在最も柔軟に多変数回帰関数を表現できる方法論の一つであり、ニューラルネットワークやサポートベクターマシンなど機械学習の方法ともモデル上密接な関係がある。既に、欧米ではこの種のノンパラメトリックモデリングは環境科学分野で日常的に使われているが、わが国では、農業環境分野、一部金融リスク分析分野を除いてほとんど系統的利用が行われていない。ただし、農林水産省の竹沢邦夫氏のノンパラメトリック回帰に関する専門書は、英訳もされている⁶⁾。

・時空間の動的モデル

時系列モデルについては、Box and Jenkins の ARIMA モデル⁷⁾提案以降、統計科学と制御工学との境界領域、経済時系列分析分野などで多くのモデル提案がなされてきた。また、時系列のみならず空間変動をも記述するモデルが近年数多く提案されてきており、空間点過程モデルなどはその代表的なモデルである。時系列モデルについては、わが国は比較的多数の理論研究者を輩出している。特に、統計数理研究所の赤池弘次から北川源四郎らに受け継がれた非定常・非ガウスの状態空間モデリングは、多変量時系列モデ

リングへの柔軟な拡張を可能とし、その貢献は世界的にも顕著である⁸⁾。おおよそ、特に、Durbin and Koopman らの欧州グループと共に世界の先端を走ってきた⁹⁾。

応用空間点過程モデルにおいても統計地震学分野の余震予測モデルで尾形良彦らの ETAS モデルで国際水準を抜く研究が行われてきた¹⁰⁾。一方、経済時系列など政策科学分野への高度時系列モデル応用については、Durbin らは英国でシートベルト着用の政策効果の検証を含めて十分な成果を挙げている。わが国経済・金融政策部局は、これまで ARIMA モデル周辺のモデル利用が中心であったが、近年は東京大学経済学部の国友直人教授らによる高度な計量モデルに基づく貢献もある。

金融時系列モデルについては、期待値のみならず分散(Volatility)についての時系列モデリングがとしての ARCH, GARCH モデルが米国の計量経済学者 Engle(1982)ら¹¹⁾によって開始され 2003 年のノーベル経済学賞を受賞している。この分野はわが国でも金融業界が参入している状況もあり、産業界への展開自体は欧米に僅かに遅れる程度である。さらに、近年では、数理ファイナンス分野で最尤法の枠組みでは反復解も構成できない確率過程のモデルないしは Stochastic Volatility モデルの検討が盛んになっている¹²⁾。この分野では、東京大学の吉田朋広教授などが国際的な水準の理論・応用研究を展開するとともに、R 言語による先端理論利用環境整備にも貢献している¹³⁾。

・同時方程式モデル・グラフィカルモデル・構造方程式モデル

正規線形モデルは、変動を記述する変量が単一の、単一方程式モデルであるが、歴史的には多くの変量間の因果関係を記述する計量経済学分野での同時方程式モデル、計量心理学分野での Path Model が、それぞれ 2 段階最小二乗法や重回帰分析の反復など線形計算の範囲内で当てはめられてきた。Joereskog による LISREL¹⁴⁾以降、これら因果モデルも、最尤推定に基づく柔軟なモデルに変貌し、因子モデル由来の潜在変量を導入した線形潜在構造モデル (SEM、Structural Equation Model) に変貌し、現在に至っている。また、観測変量間の関係性を Dempster の共分散選択を用いて探索的に明らかにする Graphical Model も類似モデルとして 1990 年代以降発展している。わが国は、東京工業大学宮川雅巳教授が日本品質管理学会を中心に活動し、1990 年代後半以降 (株)リコーの廣野元久氏らが独自のソフトウェア GGM、LGM を開発し、Graphical Model を産業界で活用する動きも活発となった¹⁵⁾。

これに対して、構造方程式モデルは SPSS 社の AMOS や Stanford 大学の Bentler が開発した EQS など柔軟な構造方程式モデルを直観的な操作で実現するソフトウェア普及の影響で、計量心理学のみならず経営学分野や産業界でも広まった。特に、わが国は米国につぎ、AMOS ユーザー数は世界第 2 位である。共分散構造モデルの我が国での急速な普及には、早稲田大学文学部の豊田秀樹教授や大阪大学基礎工学部の狩野裕教授、産業界では(株)日経リサーチの鈴木督久取締役などが貢献した。また、離散潜在変数に基づく、潜在クラスモデル(Latent Class Model)もマーケティング分野での利用が盛んになっている¹⁶⁾。このモデルは時系列モデルと結合すると Regime Switch Model や Hidden Markov Model と呼ばれる State Space Model の一部のクラスないしは階層ベイズモデルを形成し、その種の応用はわが国でも経済学、理工学分野で徐々に広がっている。

・ Stochastic Frontier Model

従来の計量モデルが確率変数の期待値ないしは分散などの記述を目的にしていたのに対し、計量経済学分野での確率的フロンティアモデルや工学分野の極値モデルのように、変量の最大値・最小値といった極値や分位点などを予測するモデルの応用が活発化している。同様の目的に資する数理的方法としては OR 分野でも包絡線分析（DEA）が提案されている¹⁷⁾。

（5）最近注目動向

・ モデルに基づく推論形式の Bayes 推論への変化とそれに伴うモデルの変革

ベイズモデルは、これまでのモデルの発展とは若干異なる軸でとらえられる。Zellner や Box に代表される事前分布をモデラーが想定し、モデラーの事前知識を共役事前分布や無情報事前分布で表現し、データとの統合を図るのが古典的英国派 Bayes モデリングである。今日注目されているのは、単にパラメータが分布に従うというモデルを積極的に利用しようとする Numerical Bayes Model（古典的には変量モデル、経験ベイズモデル、赤池 Bayes モデルなど）である。

いずれにせよ、Bayes 型モデルは、計算量を要する MCMC 法などモンテカルロシミュレーションに基づく事後分布計算が一般研究者でも可能になった 1990 年代以降から活用が開始された。現在最尤推定量に基づくモデリングを 30 年ぶりに Bayes 型モデルに切り替える時期に来ており、わが国の計量モデル応用ないしは統計教育も見直しの時期に入ったと言えよう。

たとえば、Graphical Model や因果モデルの Bayes Model としての Bayesian Net モデルなどは、非ベイズ的な Graphical Model より国内外の適用研究例は多い。また、産業技術総合研究所の本村陽一氏の Bayonet のように独自の有力なソフトウェア開発も進んでいる。AMOS などの共分散構造モデリングのソフトウェアも既にベイズモデルへの対応を完了している。

（6）キーワード

Bayes Model, Generalized Linear Models, Graphical Model, Latent Class Model, Non-Parametric Model, State Space Model, Stochastic Frontier Model, Structural Equation Model

（7）国際比較

（本表では、国は研究の主たる所在地を示し、必ずしも研究者の国籍を表象しない。）

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	×	→	・モデル自体の基礎研究は時系列、空間点過程など特定の分野
	応用研究・開発	△	→	・先端的なモデルの応用研究は、医学、金融、一部理工学など限定的、特に産業応用については、裾野は広いが水準のかさ上げが必要
	産業化	×	↘	・1980年代の計量モデル産業利用全盛の時代からは、モノづくり産業では後退が続いている。医薬、金融分野では国際的水準とそん色は少ない。
米国	基礎研究	◎	↗	・多くのモデリングで世界をリード
	応用研究・開発	◎	↗	・応用研究も活発
	産業化	○	↗	・高度計量モデルの利用の広がりには限定的
欧州	基礎研究	◎	↗	・米国につぐ基礎研究
	応用研究・開発	○	→	
	産業化	△	→	・政策科学などでの活用はあるが、産業化の利用は限定的
中国・韓国	基礎研究	○	↗	・欧米と類似の研究体制整備、米国に多くのモデル開発者が進出
	応用研究・開発	△	↗	・欧米と類似の研究・コンサルテーション体制整備
	産業化	△	→	・産業界への適用状況については不明

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Shibata; Sibuya. User interface provided by D&D (Data and Description), Bulletin of the International Statistical Institute, 1991, vol.1, p.1-25.
- 2) Nelder; Wedderburn. Generalized linear models, Journal of Royal Statistical Society, Ser. A, 1972, vol. 135, p.370-384.
- 3) McFadden. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, in P. Zarembka (ed.), Frontiers in Economics, Academic Press. 1973.
- 4) Cox. Regression models and life tables, Journal of Royal Statistical Society, Ser. B, 1972, vol. 34, p.187-220.
- 5) Hastie; Tibshirani. Generalized Additive Models, Chapman and Hall. 1990.

- 6) Takezawa. Introduction to Nonparametric Regression, Wiley. 2005.
- 7) Box; Jenkins. Time series analysis, Wiley. 1976.
- 8) Kitagawa. Non-Gaussian state-space modeling of non-stationary time series, Journal of American Statistical Association, 1987, vol. 82, p.1032-1041.
- 9) Durbin; Koopman. Time series analysis by state space methods, Oxford University Press. 2001.
- 10) Ogata. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, Journal of the American Statistical Association, 1988, vol. 83, p.9-27.
- 11) Engle. Autoregressive conditional heteroskedasticity with estimates of the variance of UK inflation, Econometrica, 1982, vol. 50, p. 987-1008.
- 12) Heston. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options, The Review of Financial Studies, 1993, vol. 6, p.327-343.
- 13) Hayashi; Yoshida. On covariance estimation of non-synchronously observed diffusion processes, Bernoulli, 2005, vol. 11, p.359-379.
- 14) Jöreskog. A general method for analysis of covariance structures. Biometrika, 1970, vol. 57, p. 239-251.
- 15) 宮川雅巳, グラフィカルモデリング, 朝倉書店. 1997.
- 16) Goodman. Exploratory latent structure analysis using both identifiable and unidentifiable models, Biometrika, 1974, vol. 61, p. 215-231.
- 17) Aigner; Lovell; Schmidt. Formulation and estimation of stochastic frontier production functions. Journal of Econometrics, 1977, vol. 6, p.21-37.

3.1.3 行動のモデリングとソフトコンピューティング

(1) 研究開発領域名

行動のモデリングとソフトコンピューティング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

従来の精密かつ正確に解析・設計する計算様式である「ハードコンピューティング」に対して、ソフトコンピューティングは、対象の挙動を大局的にとらえ、情報の不正確さをある程度認めて、人間の言葉に含まれる曖昧さや主観性を積極的に導入する。ソフトコンピューティングは、人間主体のシステムの構築及び計算技術の開発を行おうとする新しい知識情報処理パラダイムとして、人間の不確かな行動のモデリングと密接な関係がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) ソフトコンピューティングの詳説

人間と複雑大規模化する環境との相互作用によってダイナミックに変化するオープン型システムにおいては、システムを構成する人間・社会の複雑さや不確かさの考慮が重要となる。行動の不確かさをモデル化する方法論としては、これまでに意思決定論や経済学の分野において、確率論がその中心的な役割を果たしてきた。確率分布がわかっている場合のリスク下の意思決定については、von Neumann と Morgenstern を経て、Savage によって完成された期待効用理論、そして Kahneman と Tversky のプロスペクト理論へと発展してきた。また、ナイトやケインズらによって、確率分布が確定されていない不確実性下の意思決定についての研究もなされている。

一方で、人間は日々の行動や判断において、数値や数式ではなく、経験的で直感的な表現を用いた情報処理を行っている。人間の行動には様々な不確かさが関係しており、例えば、「明日の東京の平均気温」という未来に起こる事象の不確かさや、「明日～するつもりだ」という人間の意思の不確かさなどがある。ここで、生起事象や人間の意思の不確かさは、事象や人間の行動の“観測”によって不確かさは消失することになる。しかし、人間が日常使う言葉に含まれる曖昧さや主観的な曖昧さ、例えば「背が高い」という言葉に含まれる不確かさは観測によって消失することはない。したがって、人間の言葉や主観に含まれる不確かさを適切にモデル化するための方法論が重要となってくる。

このような背景において、この「背が高い」などの人間の言葉や判断の曖昧さや生物の環境適応性などに基づいた柔らかなモデリング及び計算を行おうとするのがソフトコンピューティング¹⁾である。ソフトコンピューティングは、1991年にカリフォルニア大学バークレー校の Zadeh 教授が設立した BISC(Berkeley Initiative in Soft Computing) という産学協同プログラムから始まった。ソフトコンピューティングという言葉は、従来の精密かつ正確に解析・設計する計算様式である「ハードコンピューティング (hard computing)」とは対照的な意味で名づけられ、取り扱いやすさ (tractability)、頑健性 (robustness)、低コスト (low cost) を達成するために、対象の挙動を大局的にとらえて、対象に関わる情報の不正確さをある程度認めることで、コストを抑えると同時にロバスト性を保証し、従来の科学が排除してきた人間の主観性も積極的に導入することで、人間主体のシステム構築と計算手法の開発を行おうとする新しい知識情報処理パラダイ

ムである。

ソフトコンピューティングに含まれる主な分野としては、ファジィ理論、ニューラルネットワーク、確率推論（ベイジアンネットワーク²⁾等）進化的計算（遺伝的アルゴリズム等）、群知能（粒子群最適化等）、カオス理論などがある。ただし、ソフトコンピューティングという言葉は単にその要素技術や計算を意味するのではない。システム科学技術が「部分と全体の関係」に最も関心事があるのと同様に、ソフトコンピューティングは、人間とコンピュータとの橋渡し、言葉の意味と実体との橋渡し、論理世界と実世界との橋渡しなど、記号論理と数値情報との橋渡しの役目を重要視する。この意味で、システム科学技術とソフトコンピューティングの親和性は非常に高い。

(3-2) ソフトコンピューティングの国内外動向

ソフトコンピューティングの起源は、カリフォルニア大学バークレー校の Zadeh 教授が 1965 年にファジィ理論³⁾を提案したことに始まる。米国で提唱されたファジィ理論は、長い間、母国で注目されることは無かった。1974 年にロンドン大学の Mamdani 教授がファジィ推論を蒸気エンジンの自動運転に取り入れ、1980 年には、デンマークのセメント会社がファジィ制御自動運転システムを開発し、世界初の産業化となる。しかし、その後は目立った実用化は見られず、ソフトコンピューティングの根幹となるファジィ理論が花開いたのは、米国でも欧州でもなく、日本である。1979 年から 1987 年にかけて開発された日立製作所による仙台市営地下鉄の自動運転システムは最も有名な産業への応用として知られる。その後、1990 年に松下電器のファジィ制御洗濯機など、数多くの家電製品へ組み込まれ、その年の日本流行語大賞が「ファジー」となっている。その後、下火になったが、現在もカメラのオートフォーカスや自動車の自動変速器(AT)など身近な場所に使われている。国内では、筑波大学がソフトコンピューティング学域を設けており、総合的にソフトコンピューティングを学ぶことができる。また、東京工業大学、九州工業大学、大阪府立大学などがこの研究領域で多くの優れた研究者を輩出している。近年は、建築・土木の分野では研究部会が新たに設置されるなど、ファジィ理論も含めてソフトコンピューティングに対する意識が学会レベルでも高まっている。また、平成 15 年度より、文部科学省の科学研究費補助金において、「感性情報学・ソフトコンピューティング」の細目が設定されている。

ソフトコンピューティングの前身となるファジィ関連の学術団体については、1984 年に IFSA（国際ファジィ学会）が設立され、国内では 1989 年に日本ファジィ学会（後に日本知能情報ファジィ学会と改称）が設立されている。米国では、1992 年には第 1 回 Fuzz-IEEE 国際会議が米国サンディエゴで開催され、以後、これまでに毎年 1 回、世界の様々な国で開催され、現在に至っている。

ソフトコンピューティングの起源となったのは、前述のとおり、1991 年に Zadeh 教授によって米国で設立された BISC である。ソフトコンピューティングのほぼ同義語として計算知能 (computational intelligence) があり、米国電気電子学会 (IEEE) の中で、Computational Intelligence Society(CIS)は学会の中でも最も活発な分科会の一つである。また、別の分科会である IEEE System, Man and Cybernetics Society(SMC)では、ソフトコンピューティングの研究部会が設立されている。欧州では、2006 年に、スペインで European Center for Soft Computing (ECSC)というソフトコンピューティ

ングの研究所が設立された。フランスの Dubois 教授らが可能性理論⁴⁾の発展に寄与しており、元々、欧州はソフトコンピューティングの研究者の層が厚い。中国では、近年、不確かさに関する研究論文数が急速に伸びており、水資源問題や大気汚染問題に対して、ファジィ確率計画を応用しようとする研究が精力的に行われている。また、清華大学の Liu 教授は世界に先駆けて、不確実性研究所を立ち上げており、精力的な研究活動を行っている。韓国では 2000 年頃から毎年、ISIS 国際会議を開催し、2 年に一度、日本知能情報ファジィ学会と合同で、SCIS & ISIS 国際会議を開催している。近年は、インドや台湾などアジアにおけるソフトコンピューティングの研究論文は急速に増えており、今後、ベトナムやインドネシアなどの東南アジア諸国の研究者の参入も益々増えると考えられる。

（４）科学技術的・政策的課題

（4-1）科学技術的課題

ソフトコンピューティングの歴史はまだ浅く、現時点では、ソフトコンピューティングにおける個々の要素技術やそのハイブリッド技術の開発に重点がおかれていると言える。要素技術として、急速に発展しているのは、ニューラルネットワークと進化的計算、そして不確かな行動を扱う要素技術としてのベイジアンネットワークである。しかし、ソフトコンピューティングは、学問的に統一的な体系化はなされていない。オープン型システムに遍在する不良定義あるいは不良構造の問題解決のためには、実際の問題解決のための体系化と普遍性の強化が重要な課題であると言える。特に、十分なデータや情報がない場合、事象の確率が明確に与えられない場合、また、事象そのものが曖昧な場合において、人間の行動の不確かさを表現するモデリングの方法論は十分ではない。2011 年 3 月の福島第一原発事故や 2012 年 5 月に発生した JP Morgan の巨額の評価損など、確率的リスク解析の限界があることは明らかであるが、ファジィ理論をはじめとするソフトコンピューティングがこのような問題解決に貢献できているとは現時点では言えない。ベイズ決定とファジィ決定⁵⁾を繋ぐ理論が必要である。

個別の重要課題としては、ファジィ集合のメンバシップ関数の同定法がある。1980 年代、90 年代に国内で一世を風靡したファジィブームでは、ファジィ制御が応用された。ファジィ制御の場合には、メンバシップ関数に含まれるパラメータを学習によって同定すればよいが、言語や評価における曖昧さをファジィ集合で表す場合には、メンバシップ関数の同定は極めて重要になる。

（4-2）政策的課題

ソフトコンピューティングの目指すところは、個別の要素技術の発展だけではなく、対象を大局的にとらえたモデリングや情報処理・問題解決を行う点にある。人間の行動や判断の不確かさを適切にモデル化するためには、分野横断的な研究が重要となるが、現時点では、知識の交流も十部に行われていない。西洋ではアリストテレス以来、2000 年以上にわたり論理的に考える長い歴史がある一方で、東洋では「論理」という言葉自体が元々無く、日本では明治時代に logic の訳語として作られている。過去に日本はファジィ理論の基礎・応用研究だけでなく、産業化でも確実に世界をリードし、また、ニューラルネットワークの基礎研究でも優秀な研究者を輩出してきた。「行動の不確かさ」

が益々重要になりつつある現代において、ソフトコンピューティングの分野における日本独自の研究を発展させるためにも、「行動の不確かさ」に関係する様々な分野の研究者・実務家が集い、お互いに積極的に意見を交換し、理論と応用研究を発展させるような分野横断的な組織や研究プロジェクトが必要である。その過程で、現場からのニーズを収集・調査し、シーズとのすり合わせと同時に、これまでに無い応用・産業化に繋がる新しい基礎研究を戦略的かつ段階的に行っていくことが課題である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

要素技術としては、ニューラルネットワークと進化的計算の発展が目覚ましい。ニューラルネットワークから発展した深層学習（Deep Learning）⁶⁾は、画像、音声、言語処理などに関する数々のコンペティションで優勝する性能を示しており、Google がインターネットの画像から人の顔や猫の概念を自動的に学習するシステム構築を行うなど、産業化に向けて注目度は高い。深層学習の源流となったのは「ネオコグニトロン」を考案した元大阪大学教授の福島邦彦氏（現ファジィシステム研究所）であり、1980年代は日本がニューラルネットワークの基礎研究分野で世界をリードしていた。また、進化的計算の一つである遺伝的アルゴリズムは、近年、重要な要素技術としての地位を確立している。基礎研究では、2009年に巡回セールスマン問題の最も有名な問題の一つであるMona Lisa TSP(10万都市)で現徳島大学の永田裕一氏が大規模ベンチマーク問題で世界一のパフォーマンスを出している⁷⁾。これは行動の不確かさのモデリングに直結する研究成果ではないが、ソフトコンピューティングの分野における日本の研究者の高いポテンシャルを示唆する成果である。

行動の不確かさについては、近年、人間の知覚、認知、感情、意思決定などの心的機構の解明に向けて、ソフトコンピューティングを活用し、人間の神経科学との融合研究が行われている。1980年代にファジィ理論の提唱者であるZadeh教授は「Computing with words」⁸⁾として、言葉（単語）に基づく情報処理手法を提唱した。このコンセプトを拡張し、2000年から2005年まで、理化学研究所脳科学総合研究センターでは、ファジィ理論の分野で菅野積分⁹⁾を提案した菅野道夫氏がリーダーとなり、コンピュータが日常言語を使って情報を処理する「日常言語コンピューティング」の研究が行われた。また、早稲田大学意思決定研究所においては、社会心理学の分野において、曖昧さと意思決定に関する研究が行われ、同時に、神経科学との関連性が議論されており¹⁰⁾、注目される。

また、哲学では曖昧さは「ソライティーズ・パラドックス（the Sorites Paradox）」とも関連して、重要な問題として認識され、確率論と曖昧さの研究も進んでいる¹¹⁾。ソライティーズ・パラドックスとは、砂山から砂を一粒ずつ除いていったときに、どこまでが砂山で、どこからが砂山では無いのか、というような曖昧さに関わる問題である。

2013年11月に統計数理研究所で開催されたワークショップ「行動と現象との不確かさを巡って」では、統計学、OR、ソフトコンピューティング、法学など様々な分野の研究者及び実務家が交流し、活発な議論が行われている。国内のソフトコンピューティングの研究分野における分野横断的な研究及び研究者間の交流として、今後の発展が注目される。

（6）キーワード

人間主体、扱いやすさ、頑健性、低コスト、曖昧性、大局性、主観性、ファジィ理論、進化的計算、ニューラルネットワーク、ベイジアンネットワーク

（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	○	→	・行動の不確かさのモデリングについては、ベイジアンネットワークに関する基礎的研究が産業技術研究所によって進められている。評価の不確かさについては、日本知能情報ファジィ学会の評価問題研究会を中心に、地道な基礎研究がなされている。進化的計算では、IEEE国際会議におけるコンペティションで最優秀賞を受賞するなど、研究レベルは高い。
	応用研究・開発	△	→	・建築学会、土木学会ではソフトコンピューティングに関する研究部会が設立されている。要素技術として、進化的計算の応用研究はかなり進んでいると言えるが ¹²⁾ 、行動の不確かさに関する応用については、建築土木分野への適用やベイジアンネットワーク以外にはあまり進んでいるとは言えない。
	産業化	△	→	・行動の不確かさを扱ったソフトコンピューティング技術の産業化は進んでいない。要素技術としての進化的計算に基づく最適化は産業化が進んでいる。また、ファジィ測度（非加法的測度）の実用化も見られ、今後の発展が期待される。
米国	基礎研究	○	→	・1991年にBISCが設立されてから、Zadeh教授を中心にソフトコンピューティングの研究が進んできた。IEEE CISでは、3つの学術雑誌、IEEE Transaction on Neural Networks, IEEE Transaction on Fuzzy Systems, IEEE Transaction on Evolutionary Computation を発行しており、質の高い論文が掲載されている。機械学習に関連した要素技術の基礎研究はレベルが高い。
	応用研究・開発	○	→	・ソフトコンピューティングの起源になったBISCは元々、産学共同プログラムとして始まっており、応用や産業化への意識は高い。要素技術に関しても、産業化への橋渡しをする応用研究が数多くなされている。
	産業化	○	→	・ベンチャー企業が最新の要素技術を使って産業化を進めるといふ文化的な土壌がある。GoogleやFacebookが深層学習（Deep Learning）などの要素技術を使って、新しい人工知能やビッグデータ解析の研究を精力的に進め、産業化を図っている。
欧州	基礎研究	○	↗	・2006年にスペインでECSC（ヨーロッパソフトコンピューティング研究所）が設立されている。元々、欧州では、ファジィ理論、進化的計算、ベイジアンネットワークなど、ソフトコンピューティングの要素技術において、レベルの高い研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・ベイジアンネットワークのソフトウェア開発は欧州が最も進んでいると言える。
	産業化	△	→	・一部で産業化は進んでいるが、十分ではない。
中国	基礎研究	○	↗	・近年、ソフトコンピューティングに対する関心は高まっており、論文数の伸びは著しい。一部には独創性の高い研究も見られる。IEEEの学術雑誌のEditorやAssociate Editorを務める研究者が増えている。
	応用研究・開発	△	→	・環境問題への応用に関する論文が増えている。
	産業化	×	→	・産業界への適応状況については不明
韓国	基礎研究	△	→	・毎年、ISIS国際会議を韓国国内で開催し、2年に一度、日本知能情報ファジィ学会と合同でSCIS & ISISを開催している。
	応用研究・開発	△	→	・進化的計算の応用研究は徐々に進んでいる。
	産業化	×	→	・産業界への適応状況については不明

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Zadeh, L.A., "Fuzzy logic, neural networks, and soft computing," *Communication of the ACM*, 1994, vol. 37, no. 3, p. 77-84.
- 2) 本村陽一, 岩崎 弘利, *ベイジアンネットワーク技術 ユーザー・顧客のモデル化と不確実性推論*, 東京電機大学出版局, 2006.
- 3) Zadeh, L.A.: *Fuzzy sets, Information and Control*, 1965, vol.8, no. 3, p. 338-353.
- 4) Dubois, D. and Prade, H.: *Possibility theory: Qualitative and quantitative aspects*, *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management*, 1998, vol. 1, p. 169-226.
- 5) Bellman, R.E. and Zadeh, L.A.: *Decision-making in a fuzzy environment*, *Management Science*, 1970, vol. 17, p. 141-164.
- 6) Hinton, G. E., Osindero, S., and Teh, Y.-W.: *A fast learning algorithm for deep belief nets*, *Neural Computation*, 2006, vol. 18, no. 7, p. 1527-1554.
- 7) Cook, W.: *In pursuit of the traveling salesman: mathematics at the limits of computation*, Princeton University Press, 2012 (ウィリアム・J・クック著 ; 松浦俊輔訳, *驚きの数学 巡回セールスマン問題*, 青土社, 2013)
- 8) Zadeh, L.A.: *Fuzzy logic = computing with words*, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, vol. 4, no. 2, p. 103-111.
- 9) Sugeno, M.: *Theory of fuzzy integrals and its applications*, Ph. D. Dissertation, Institute of Technology, Tokyo, Japan, 1974.
- 10) 竹村和久, 大久保重孝, *曖昧さと意思決定*, *知能と情報 : 日本知能情報ファジィ学会誌*, 2010, vol. 22, no.4, 419-426.
- 11) 一ノ瀬 正樹, *確率と曖昧性の哲学*, 岩波書店, 2011.
- 12) *ソフトコンピューティングの新展開とその産業応用*, 電気学会, 2009.

3.1.4 エージェント・ベース・シミュレーション

(1) 研究開発領域名

エージェント・ベース・シミュレーション

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

マルチエージェントモデルを利用して社会のマクロ現象とミクロ現象の関連を解明する研究

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

エージェントとは、感覚器を使って環境を知覚して、それに基づいて何かしらの処理をして意思決定を行い、効果器を通して行動する主体として定義される。これは、環境を観測して得られた情報に基づき行動する処理系であると言える。それをマルチエージェントという形で、拡張していったときにどんなことができるかという視点で、主に2つのアプローチがある。

一つは設計指向を持った工学的アプローチである。人工的につくられたシステムの全体目標を達成するために、複数のエージェント間のインタラクションを通して問題解決、調整を行う。オークションや取引といった競争型のマルチエージェント、そして、組織などのように自律的に行動する構成員が協力して共通の問題解決をする協力型マルチエージェントである。もう一つのアプローチが、社会科学的マルチエージェントモデルである。これは、分析的指向あるいは社会科学的な視点で、複数のエージェント間のインタラクションを通して複雑社会システムの現象を理解して、制度設計をするというものである。これは生成的社会科学と言われている。生成的とは、異質で自律的なエージェントが分散した局所的な相互作用を通してマクロな社会秩序の創発を生成的に説明するというものである。ミクロの主体が相互作用をすることで、マクロ秩序が創発し、その結果、ミクロ主体の行動が変化する。このモデルは、主に二つの志向性が存在する¹⁾。ひとつが、物理世界志向であり、このシミュレーションでは将来予測や物理空間の位置関係が大きな意味を持つ。もうひとつが、意味世界志向であり、このシミュレーションでは物理空間は大きな意味を持たず、相互作用を伴う行動の理解といった意味上の位置づけが重要となる。このような関係を、ミクロ・マクロ連携と呼んでいる。本調査では、相互作用に注目する社会科学的マルチエージェントモデルを主な対象とする。

国際比較について、次に述べる。マルチエージェントモデルの基礎研究では、米国および欧州が世界をリードしている。コンピュータ科学者がシミュレーション開発ツール(Repast, NetLogo, MASON等)を提供し、社会学者(社会学、経営学、人類学、経済・金融分野等)が様々な社会経済モデルを構築するという好循環を得ている米国が一方の雄である。また、EU域内の社会的文化的背景が多様な国々の社会学者が中心的なコミュニティを作り、社会科学の共通言語のひとつとしてマルチエージェントモデルを用いている欧州が、もう一方の重要な一角を占めている。ゲーム理論の限界を踏まえ、より現実的な社会的課題に対応できる複雑適応系としてのマルチエージェントモデルは、システム科学と社会科学の架け橋となる社会シミュレーション研究として発展を遂げてきた。欧州に加えて日本においても活発に研究が行われており、エージェント学習や複

雑ネットワーク研究との融合基礎領域において、世界最高水準にある^{2, 3)}。一方、アジア諸国の動きは緩慢ではあるが、中国や台湾、また韓国においても、経済・金融問題でのマルチエージェントモデル研究が進展してきており、情報発信も活発となっている⁴⁻⁶⁾。

応用研究では、米国では大規模モデルの研究が進んでおり、分散コンピューティング環境での数百万エージェントモデルの実装など、実社会を詳細に再現する研究が進んでいる⁷⁾。また、経済分野では、住宅市場における不動産価格の変動要因やバブルの発生原因などの研究など、エージェントモデルを用いた金融市場以外への拡張も進められている。加えて、複数のエージェント間のリソース割り当て問題として、オークションやメカニズム研究といった経済学を背景とした研究が急速に広がってきている。スマートシティやスマートグリッドなど、従来の数理科学や人工知能を応用した研究に加えて、人間系を考慮し具体的な実装までを視野に入れたエージェントモデルによる研究が注目を浴びている。特に、電力市場やクラウドスケジューリングなどではエージェントモデルによるオンラインメカニズム研究が進んでいる。また、交通マネジメント研究分野では、GPSデータや渋滞情報などを用いた、ITS(Intelligent Transport Systems)などの研究もエージェント技術と機械学習手法との融合領域として研究が行われている⁸⁾。一方、人類学などの考古学分野でも、遺跡調査から得たデータに基づき、当時の部族の移動要因を推測するモデルが構築されている。気候変動や河川の変化などによって生じる農作物の収量変化が主要な要因であることなど、現在の気候変動の議論にも影響する研究となっている。

一方、欧州では、EU 地域での環境問題や農業政策などの社会政策に対する共同研究が行われている。オランダやイタリアでは、消費者市場における普及プロセスの研究が進んでおり、LED電球などの省エネ製品の普及政策検証や群集行動の研究も進められている⁹⁾。また、環境保全を考慮した農地利用のための政策評価、地球温暖化対策における再生可能エネルギー普及政策などの環境政策研究や、EU 金融危機に端を発したシステムミック・リスク研究なども活発に行われている。一方、エージェントベースの最適化研究や協調メカニズム、知的エージェント研究など、自動車やロボット産業に貢献するような応用研究も行われている¹⁰⁾。このように、エンジニアリング分野に加えて、社会学、経営学、マーケティング、労働市場、金融・経済分野など社会科学者を中心とした、様々な社会問題のモデル化が精力的に行われているのが欧州の特徴となっている。

日本では、金融市場のメカニズム分析や労働市場での採用活動研究、公共財での制度設計などの研究が進んでいる。組織シミュレーションの領域でも、集団意思決定過程や協調行動、協力戦略の進化など、ミクロな意思決定がマクロな構造にあたえる影響の研究が行われている。特徴的なのは、協調学習理論の領域で、動的環境での探索問題、適応的強化学習、進化的協調学習など、複雑な環境下でのエージェント学習モデルにおいて、欧米をリードするような研究が行われている。しかし、社会科学系の研究者の参入が少なく、分野横断的な研究での成果が期待される。

産業化において、米国はエージェントモデル開発ツールの研究で世界をリードしており、世界標準のツールが米国で開発されている。これらを使ったコンサルタント業務も広く行われており、ソフトウェア産業化が進んでいる。また、アフガニスタンなどの復興政策シミュレーションなども進んでいる。欧州では、企業のマーケティング部門を中

心に、消費者市場の分析とマーケティング戦略策定のために、社会シミュレーションツールを使用することが広く行われている。日本でも、国産のエージェントシミュレーションツールが民間企業で開発提供されており、コンサルタント業務を含めた産業化が進んでいる。

（４）科学技術的・政策的課題

マルチエージェントモデルを社会シミュレーションのために適用しようとした時に、そのモデリング手法の標準化が課題となっている。米国、イギリス、ドイツなどでモデリングの Protokol 基準を策定する動きが活発化しているが、それぞれの国レベルの活動であり、国際的な統合化はまだ見られない。

欧米では、社会学者が主体となって実問題をモデル化することが広く行われているのに対し、日本では、経済学・社会学・経営学分野などの社会学者の参加は少なく、多くはコンピュータサイエンス系の研究者が中心となっている。実際の社会的課題を解決するためにも、横断的研究体制の構築が期待される。

マルチエージェントモデル開発ツールの提供が各国で盛んになっており、それらを用いたソフトウェア開発やコンサルタント業務などの産業化も徐々に進んでいる。しかし日本では、英語ソフトウェアの使用頻度は少なく、国内一社のみでの提供となっており、産業応用への展開と開発支援が課題となっている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

UNESCO の UniTwin プロジェクトとして、2013 年に Complex Systems Digital Campus が認定され、各国の複雑システム研究を横断する研究教育ネットワークとして、国際共同研究やロードマップの作成・推進をスタートしている¹¹⁾。

欧州において、国際経済・金融システムの動的分析を行なうための ICT 技術開発プロジェクトとして、GLODERS 調査プロジェクトが、European Commission's Framework Programme の支援を受けて発足している。この中で、3つのコンソーシアムが存在し、テキストマイニング、会話分析、マルチレベルのエージェントモデリングが研究テーマとなっている¹⁾。

米国において、NSF(National Science Foundation)から支援を受けたマルチエージェントプログラム開発ツール NetLogo の新バージョンが発表されている。3D 対応、データベース連携、統計ソフト連携、中国語対応などが充実し、社会学者が利用する事実上の世界標準ツールとして他をリードしつつある¹²⁾。

英国において、European Commission から支援を受けた、政策立案支援プロジェクト ePolicy(Engineering the policy making life cycle)がスタートした。地域の再生エネルギー供給計画や、経済・社会・環境評価および政策プランニングを、グローバル（マクロ）と個人（ミクロ）の双方のレベルを連携したモデルによって、政策意思決定を支援することを目指している¹³⁾。

韓国において、社会動態予測を行うための国家プロジェクトがスタートし、韓国電子通信研究院(ETRI)を中心に、マイクロシミュレーションをベースとした研究チームが発足している。

中国において、金融・経済分野における国際会議を招致し開催（天津市）するなど、システミック・リスクや経済的機会損失などの研究を推進している。

（6）キーワード

社会シミュレーション、マルチエージェントモデル、政策立案、政策評価、意思決定モデル、協調学習

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 社会現象をマルチエージェント技術を使ってモデル化した社会シミュレーション研究は、大学を中心とした基礎研究として広く行われており、研究成果も多い。 人々の関係性をモデル化する社会ネットワーク理論の発展に伴い、社会現象をネットワーク上の現象として分析するフレームワークの進展が著しい。 複数エージェントの意思決定モデルとして、マルチエージェント学習の研究や最適化手法の提案など、モデル構築の基礎研究レベルは世界最高水準にある。 経済学・社会学・経営学分野などの社会科学者の参加は比較的少なく、多くはコンピュータサイエンス系の研究者が中心で、分野横断的な研究での成果が期待される。 国内の統合的な研究会であるJAWSが中心となり、オークション・繰り返しゲーム理論・メカニズムデザイン・交通問題・防災・エージェント指向ソフトウェア工学・シミュレーションの妥当性評価などの基礎的な研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 人工社会・人工経済の研究領域では、金融市場のメカニズム分析や労働市場での採用活動研究、公共財での制度設計などの研究が進んでいる。 組織シミュレーションの領域では、集団意思決定過程や協調行動、協力戦略の進化など、ミクロな意思決定がマクロな構造にあたる影響の研究が行われている。 マルチエージェント学習領域では、動的環境での探索問題、適応的強化学習、進化的協調学習など、複雑な環境下でのエージェント学習研究が行われている。 医療分野では、救急医療体制の効率化や、地域医療連携モデルによる患者の受療行動シミュレーションや病床利用率の改善、感染症対策のシミュレーションなど、従来の数理モデルによる研究に加えて、エージェントモデルによる予測の精緻化が進んでいる。 応用分野では研究が数多く見られてきており、実務レベルでの認知が進んでいる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> オークション理論を用いたWebサービス選択や、ソーシャルメディアにおけるコメント投稿などの協調行動分析など、SNSやWebでの産業応用は進んでいる。 大手ゼネコンと共同で集合住宅内装工事における工期と賃金コスト分析といった、プロジェクト管理領域での実用化や、ビルエネルギー管理システムでのシミュレーションによる節電効果分析なども行われている。 再生可能エネルギーの最適電力配分や、太陽光発電と蓄電池を備えた住宅電力マネジメントモデルなど、実用化に向けた提案がされているが、個々数年は個別の産業として市場を形成することは難しく、システムの設計段階で利用される事例がほとんどであった。しかし、電力市場の自由化を目前として、動的な電力価格決定やデマンドレスポンスによる価格決定、電力制御におけるインセンティブメカニズムデザインなど、産業化に向けた研究が盛んに行われている。 国産のエージェントシミュレーションツールが民間企業で開発提供されており、コンサルタント業務を含めた産業化が進んでいる。

研究開発領域
モデリング区分

米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・米国でのマルチエージェント研究は、モデリング手法やシミュレーション開発ツールを含め、基礎研究および応用研究のレベルで世界をリードしている。 ・協調・懲罰ゲームや、ゲーム均衡解の解析、進化的な社会構造の分析など、ゲーム理論に基礎を置いた研究が広く行われている。 ・認知科学との接点も多く、簡素さを好む認知行動の研究や信頼の広がりなど、社会心理学を含む社会科学領域との融合研究も進んでいる。 ・モデリングの科学として、数理モデルや経済モデルに対して生成的社会科学としてのエージェントモデルの優位性を示すため、均衡解の分析に加えて均衡解への到達可能性に焦点を当てた基礎研究が多く行われている。 ・進化計算手法を適用し、共進化による社会構造の動的な解明を試みるモデルや、ベイジアン最適化技術を利用したエージェント行動戦略の最適化など、先進的な試みが見られる。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模モデルの研究が盛んに行われている。多数のエージェント意思決定主体の効率的な認知構造や、分散コンピューティング環境での数百万エージェントモデルの実装など、幅広い研究が進んでいる。 ・イノベーション研究として、新しい技術の採用が文化背景やeコマースといった消費市場の環境によってどのように変化するかといった、マイクロ・マクロ連携に加えてマイクロ・マクロ断絶の影響を分析する研究も進められている。 ・考古学における民族移動シミュレーションや、環境変動の予測にも利用されている。 ・大規模自然災害のシミュレーションや、社会不安による暴動発生メカニズムの分析、住宅パブル発生メカニズム研究など、深刻かつ大規模な社会的課題に対するエージェントモデリングによる研究が多く見られるようになってきている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・エージェントモデル開発ツールの研究は世界をリードしており、NetLogoやMASON、Repastといった世界標準のツールが米国で開発されている。これらを使ったコンサルタント業務も広く行われており、ソフトウェア産業化が進んでいる。 ・一方、政治や軍事的な戦略立案ツールとして、エージェントモデルが利用されており、アフガニスタン経済の麻薬産業からの離脱戦略や、先進国の少子化現象の分析と政策評価、交通情報東アフリカでの難民行動と支援アプローチの立案などが行われている。 ・自動車の自動走行研究に加えて、交通情報提供において、逐次収集される観測データに基づき動的経路情報の提供は重要な課題となっている。ドライバの行動をモデル化し、最適経路選択と渋滞発生との関係などをエージェントモデルで推定する研究は、IT企業を中心に精力的に行われており、実装に向けた進展が見られる。このように、産業化の面でも、米国のリードは揺るいでいない。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツを中心に、社会や生態系での新たな複雑系アプローチとして、エージェントベースモデル (ABM) の基礎研究が進んでいる。例えば、ABM設計のためのプロトコルが開発されている。また、シミュレーションモデルがブラックボックスになってしまうことを回避するために、パラメータ設定とシミュレーション結果の関係を記録するための標準化スキームの開発も行われている。 ・フランスおよびベルギーでは、オントロジーをベースとした行為者・制度・領域・資源を定義する手法が研究され、ソフトウェア工学のUMLとの連携もされている。 ・イギリスの社会シミュレーション研究は、CRESS(Centre for Research in Social Simulation)を中心として進んでおり、そのエージェントモデルの分類や社会のモデリング手法が社会シミュレーション研究の規範として広く用いられている。 ・Futur ICTプロジェクトなど、マルチスケールコンピューティング、ソーシャル・スーパーコンピューティング、大規模データマイニング、参加型プラットフォームなどをベースとした、大規模エージェントモデルによる社会動態予測研究は継続的に行われている。

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ、オランダ、イギリス、フランスなどが連携し、EU地域での環境問題や農業政策などの社会政策に対する共同研究が行われている。 オランダやイタリアでは、消費者市場における普及プロセスの研究が進んでおり、LED電球などの省エネ製品の普及政策検証などが行われている。また、近年では群集行動の研究も進められている。 社会学、経営学、マーケティングなど社会科学者を中心に様々な社会問題のモデル化が活発に行われているのが、欧州の特徴となっている。 工学的応用研究として、エージェント技術を用いた最適化研究や協調メカニズム、知的エージェント研究など、自動車やロボット産業向けの研究が進行している。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 企業のマーケティング部門を中心に、消費者市場の分析とマーケティング戦略策定のために、社会シミュレーションツールを使用することが広く行われている。 エージェントモデルや社会シミュレーションツールを開発提供する営利企業も、イギリス、ハンガリーなどで活発に活動を行っている。 サプライチェーン・マネジメント、ビジネスプロセス・マネジメントなどの効率的運用を目的としたシミュレーション・ソフトウェアが開発されており、業務改善のために提案が行われている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 中国におけるマルチエージェントモデル研究は、吉林大学、山西大学などで調査研究が進められているが、基礎研究が始まった段階にある。多くが、最適化問題を解くための分散AIの手法の一つとして、工学的な必要性から研究が進められている。 東北財経大学と英国サリー大学共同で、エージェント研究セミナーが開催された。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 湖南大学で、エージェントモデルパラメータの推定法としてマルチパターン技術を用いた研究が進められている¹⁴⁾。 天津大学が中心となり、金融・経済分野における国際会議を招致し開催するなど、システムック・リスクや経済シミュレーション、リスク管理など、エージェントモデルを用いた研究を積極的に推進している。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 韓国では、協調学習問題や、協調的進化学習など、工学的マルチエージェント研究が広く行われている。
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> サプライチェーンの協調問題や、オークションでの協調問題、Eコマースでの推薦品質など、マルチエージェント技術を工学的問題に適用した事例が多い。 社会動態予測を行うための国家プロジェクトがスタートし、マイクロシミュレーションを中心とした研究チームが発足している。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動・成果は見られない。
台湾	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 1995年からNational Chengchi Universityにおいて、経済社会問題のエージェント研究が幅広く行われている。社会ネットワーク研究との統合や、ゲーム理論、ファイナンス理論等の連携などが進められている。 2012年にWCSS(World Congress on Social Simulation) のホスト開催が予定されており、日米欧に続くポジションを占めるようになっている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> AI-ECON(Artificial Intelligence Economic Research Center)が立ち上がっており、Agent-Based Computational Economicsやファイナンス領域を主たる研究領域として、エージェントベースの複雑系研究、経済・金融研究などが進んでいる。 企業における物流業務のアウトソーシングを効率化するためのインセンティブ設計を目的としたソフトウェアが開発されている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> エージェントベースシミュレータのソフトウェアパッケージ開発を進めている。

- (註1) フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル
- (註2) 現状
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
- (註3) トレンド
↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) GLODERS
<http://www.gloders.eu>
- 2) Proceedings of the seventh international workshop on agent-based approaches in economic and social complex systems, 2012,
<http://paaa.asia/aescs2012.html>
- 3) Proceedings of Joint Agent Workshop and Symposium 2011,
<http://jaws-web.org/event/jaws2011/>
- 4) The 14th international conference on principles and practice of multi-agent systems 2011, <http://www.prima2011.org/>
- 5) Proceedings of the 6th Pacific Rim International Workshop on multi-agents 2003,
- 6) Artificial Intelligence Economic Research Center
http://www.aiecon.org/index_e.php
- 7) Proceedings of the Computational Social Science Society of America Annual Conference 2011, <http://computationsocialscience.org/conferences/17-2>
- 8) 伊藤他, 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究, 人工知能学会誌, 2013, Vol.28, No.3.
- 9) Proceedings of the seventh conference of the European social simulation association 2011, <http://www.essa2011.org/>
- 10) Proceedings of Advanced Methods and Technologies for Agent and Multi-agent Systems, KES-AMSTA, 2013
- 11) Complex Systems Digital Campus <http://unitwin-cs.org/index.html>
- 12) The center of connected learning (CCL) and computer-based modeling
<http://ccl.northwestern.edu/>
- 13) Centre for Research in Social Simulation CRESS,
<http://cress.soc.surrey.ac.uk/web/home>
- 14) Chao Yang, et.al., "Agent-Based Simulation on Women's Role in a Family Line on Civil Service Examination in Chinese History", Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2009, vol. 12, no. 2, p 5.

3.1.5 データ設計

(1) 研究開発領域名

データ設計

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

産業界における新技術・新製品開発あるいは自然科学・工学分野の仮説探索と検証のための実験効率を上げ、モデリングに基づく予測精度などを向上させるために、実験計画法などのデータ設計数理技術を、新素材・新技術開発分野などに実装し、その研究スピードを飛躍的に向上させる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【実験計画法の創生と発展】

英国ロザムステッド農事試験場の Fisher は、環境起因の系統誤差要因の影響を大きく受ける農業実験に対して、「実験計画法」を創生し、繰り返し、無作為化、ブロッキングといった方法論やグレコ・ラテン方格計画といった多要因同時研究を推進し、農業生産性を一挙に向上させた¹⁾。要因実験計画の数理は、有限体などの代数学的理論と結合し、通信学における符号理論などにも分野拡大するに至った。1950年代後半には Kiefer (1959)が最適実験計画の数理を整理し、モデリングの精度最適化におけるデータ設計の役割を定式化した²⁾。Kieferの理論は当時は殆ど応用不可能なものと考えられたが、近年の統計ソフトウェア (SAS-JMP) には単純な線形モデルの推定精度最適化のためのデータ設計支援機能が整備するに至り、山田など、わが国でもその種の実験計画法活用の活動が徐々にみられるようになった³⁾。

一方、実験計画の情報効率最適化の代数数理的側面における研究は、広島大学、東京理科大学を中心に行われ、日本数学会統計数学分科会の主要な活動を形成した。しかし、それらの理論研究を産業界が活用することは僅少であり、数理統計学講座消失傾向に伴い1990年代に比すると研究者数は半減している。

【実験計画法の技術開発への適用】

これに対して、1950年代には、英国の化学メーカーICIに勤務していた Box が製品特性最適化のための逐次実験計画 (Evolutionary Operation) を開発し、工業界に応用を開始した⁴⁾。

一方、この分野で1950年代以降1990年頃まで応用研究のトップを走ったのは日本である、電電公社の田口玄一らが、工業製品開発に特化した、情報収集効率が極めて高い「直交計画」に基づく独自の多要因実験計画法を構築し、わが国産業界に普及させた。田口は Fisher の実験計画法を技術特性の環境条件に対する安定化をめざした直積実験法を開発し、「タグチメソッド」と世界で呼ばれることになるロバストパラメータ設計を確立した (例えば、国際的に引用頻度の多いのは Taguchi⁵⁾)。その国内普及は、日本の新製品評価効率を1970年代後半以降、約四半世紀にわたって世界第一の水準に押し上げることとなり、1985年には、当該データ設計技術視察のためにベル研究所代表団が我が国の産業界状況を視察するに至った。

1990年代以降、米国工学系大学の統計学科 (ウィスコンシン大学、ミシガン大学、ジョージア工科大学)、機械工学系研究センター、あるいは GM など産業界を中心に田口

が提唱した実験計画の数理的解釈、改善研究が多数組織され、今日に至っている⁶⁾。米国では、Wisconsin 大学が大規模直交表の整備、要因間交互作用などを一部弱く想定できる場合のベイズ的最適実験計画支援ソフトウェア開発など理論的にも興味深い実装活動が1990年代からなされ、現在、SAS-JMPなどの一般産業界が利用可能なソフトウェアにも導入されつつある。

わが国は、田口の講演や著書に基づく産業界での開発研究への適用実績、その中で培ったノウハウなどは1990年代前半まで世界最高水準であった。しかし、アカデミアはテクノメトリクス分野という応用統計科学分野が脆弱なこともあり、東京工業大学の宮川の系統的研究⁷⁾を除いて田口の方法論を学術的に整理する試みは殆どない。河村、高橋がジョージア工科大学との共同研究⁸⁾のなかで、現在、SAS-JMPなどに機能追加を行いモデリングに基づくタグチメソッドを推進していることは興味深い、データ設計自体への貢献は少なくなっている。

我が国のお家芸であった実験計画法の技術開発・素材開発への適用の水準が欧米と比較して既に優位に立っているとは言えない状況の中、先端の実験計画法を難易度の高い重要な技術課題に関わる開発研究に対して積極的に活用する研究体制を再構築しなければならない。

(4) 科学技術的・政策的課題

日本のモノづくり全盛の1980年代後半、MITが提出したレポート⁹⁾には、日本の技術開発効率の高さとそれを支える実験計画法の活用などが記載されており、米国はその種の研究を加速したのに対し、わが国は明らかにその実装を減速させ、今日に至っている。数値実験主流の現代のモノづくり、素材開発において先端の実験データ設計技術を主要プロジェクトに導入する系統的試みを組織しない限り、技術立国としての我が国の復興はありえない。特にビッグデータブームにおける安価なデータに基づく知識発見ではなく、綿密に計画された高情報・少量データを設計することが、新たな技術開発におけるデータ創造の要点であることを技術開発者に徹底しなければならない。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

2000年以降、工業実験の主体は数値実験に移行し、その Verification と Validation を巡り、「数値実験計画法」という分野が立ち上がっている¹⁰⁾。これまでの実験と異なり、計画空間を拡大にとれるために応答局面の複雑性が増大している。これに対処するために古典的実験計画法、特に直交計画や擬直交計画ではない、中国の Fang が1980年代に開発し、欧米への波及が鮮明になった数論的方法に基づく「一様計画 (Uniform Design)」¹¹⁾に注目が寄せられている。一様計画の利用については、Ford 社が Fang 教授と契約を結んだこともホットトピックであった。

もう一つ注目すべき話題は、「過飽和計画 (Supersaturated Design)」である¹²⁾。これは実験回数より多い要因の影響を実験に割り付け、モデリング技術と共にその影響を推論しようという試みである。これが技術開発で利用可能となるとかなり複雑な現象に対しても開発効率を大幅に加速できる可能性がある。我が国では、この種の理論は山田の国際連携研究によって行われてきた¹³⁾。

（6）キーワード

DOE (Design of Experiments), Optimum Experimental Design, Robust Parameter Design, Uniform Design,

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・日本数学会、日本統計学会、日本品質管理学会で独立した研究グループが点在している。数学会、日本統計学会の研究の中にも企業が活用可能な研究はあるが、日本品質管理学会に比べると産業界とのインターフェース形成ができていない。
	応用研究・開発	○	↓	・日本独自のソフトウェア開発は21世紀にはいつてから僅かになってきている。
	産業化	○	↓	・実験計画法の産業界積極活用の伝統は失われつつあるが、依然として世界水準の利用は保たれている。
米国	基礎研究	◎	↗	・ミシガン大学、ジョージア工科大学、ウィスコンシン大学などで実験計画法の産業適用のための実践的でありかつ高度な理論研究が進展している。
	応用研究・開発	◎	↗	・理論研究を産業界に展開するためのソフトウェア開発、コンサルテーション産業が急速に立ち上がっている。
	産業化	○	→	・自動車産業界などで急速に先端的理論の活用が開始されているが、日本のようにこれという成果がみられていない。一般的な産業界はDesign For Six-Sigma活動を着実に展開し、日本のかつての水準に近付いている。
欧州	基礎研究	○	→	・英国は実験計画法発祥の地であるが、2000年以降欧州の理論研究については米国ほど産業界に特化した動きとはなっていない。
	応用研究・開発	○	→	・ドイツQDAS社などで実験計画にも関連するソフトウェア開発も行われているが、米国のような先端性はない。
	産業化	○	→	・Design For Six-Sigma活動を中心として多くの活動が開始されている。
中国	基礎研究	◎	↗	・数値実験計画に関わる重要な理論研究が中国を中心にも行われている。米国や欧州で関連する研究を主導している研究者も多くは中国系である。
	応用研究・開発	△	→	・開発した理論研究成果は米国などの企業との契約の中で用いられ、自国独自の実装研究はあまり見られない。
	産業化	○	↗	・Six-Sigma活動を中心に産業界への展開を国家的におこなっている。
韓国	基礎研究	△	→	・特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	→	・特に目立った動きはない。
	産業化	○	↗	・産業界での統計活用については往時の日本に近づいている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Fisher, R. A. The Design of Experiments, Macmillan. 1935.
- 2) Kiefer, J. Optimum Experimental Designs, Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B, 1959, vol 21 no. 2, p. 272-319.
- 3) 山田秀、葛谷和義、沢田昌志、久保田享. 実験計画法 活用編—技術研究での開発・設計成功事例、日科技連出版社. 2004.
- 4) Box, G.E. P. Evolutionary Operation: A Method for Increasing Industrial Productivity, Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics), 1957, vol. 6, no. 2, p. 81-101.
- 5) Taguchi, G. Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes, Asian Productivity Organization. 1986.
- 6) Wu, J. and Hamada, M. S. Experiments: planning, analysis, and optimization, 2nd ed. Wiley, 2011.
- 7) 宮川雅巳. 実験計画法特論—フィッシャー、タグチ、そしてシャイニンの合理的な使い分け、日科技連出版. 2006.
- 8) 河村敏彦、高橋武則. 統計モデルによるロバストパラメータ設計. 日科技連出版. 2013.
- 9) Dertouzos, M. L. et al. Made in America, MIT press. 1989.
- 10) Fang, Kai-Tai; Li, R.; Sudjianto, A. Design and Modeling for Computer Experiments, Chapman and Hall. 2006.
- 11) Fang, Kai-Tai; Lin, D. K. J.; Winker, P.; Zhang, Y. Uniform Design: Theory and Application, Technometrics, 2000, vol. 42, no. 3.
- 12) Lin, D. K. J. A new class of supersaturated design. 1993.
- 13) Yamada, S.; Lin, D. K. J. Three-level supersaturated designs, Statistics & Probability Letters, 1999, vol. 45, no. 1, p. 31-39.

3.1.6 データ同化

(1) 研究開発領域名

データ同化

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

データ同化にもとづくモデリングおよびシミュレーション手法の基礎研究を推進するとともに、戦略的応用分野として、物理、生物、医薬品開発、医療・情報産業、防災、工業製品設計、社会科学等の分野において、データ同化にもとづくシミュレーションモデルの実用化を図る。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

データ同化の目的は、観測データをモデル設計のプロセスに適切に取り込み、モデル単独では得られない高精度シミュレーションを実現することである。通常のシミュレーションでは、モデルの誤りや未知のメカニズムの存在、パラメータや境界条件の不確実性など、様々なエラーが積み重なることで予測精度の低下が生じる。データ同化にもとづくシミュレーションでは、モデルの不完全性に結びつくシナリオ（パラメータなど）を生成した上で、観測データとの適合度にもとづきこれらを選択あるいは淘汰することで、予測精度の改善が図られる。データ同化の概念は、気象・海洋物理学に由来する。身近な例では、気象庁の台風予測、エルニーニョ予報、局地集中豪雨の予測等でデータ同化が活用されている¹⁾。

本研究開発領域は、(a) データ同化の理論や計算に関する基礎研究の推進、(b) シミュレーションを予測や知識発見に活用する領域に対する技術普及、(c) 新規応用分野の開拓事業から構成される。データ同化の方法論的基盤は、統計科学、計算科学、物理、非線形システム科学など、複合的な要素から成り立っている。また、ユーザーの多くは大規模なシミュレーションを取り扱うため、ハイパフォーマンス・コンピューティング（HPC）の趨勢に応じた高度なプログラミングスキルが要求される。このような分野横断型の特性を持つ領域を創生し、高いレベルの研究者を育成・維持していくには、一研究グループ・一組織単位の活動では限界があり、ある程度大規模なプロジェクトを立ち上げ、継続的に支援していく必要がある。また、従来のデータ同化は、大気・海洋、津波、地震、宇宙等の地球物理の現象を対象とするものであったが、その解析手法は、シミュレーションが活用される広範な分野に適用できる。とりわけ、数パーセントの予測精度の改善が大幅なコスト削減や経済価値につながる防災、医療、情報産業、工業製品設計・品質管理、社会シミュレーションにおいて、データ同化の真価が発揮されると期待される。このような分野においてデータ同化の活用を促進していく上で、その中核機能を担うビッグプロジェクトの存在が望まれる。

これまでに実施された国内のプロジェクトでは、JST・CREST「先端的同化手法と適応型シミュレーションの研究」（代表：樋口知之 統計数理研究所 平成16年度～平成22年度）が、国内の様々な分野にデータ同化を普及させたという点で大きな貢献を果たした²⁾。しかしながら、これは領域「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」の一課題として実施されたものであり、また一研究所内のグループから構成される小規模なプロジェクトであった。近年では、文部科学省・次世代スーパーコンピュータプロ

プロジェクト「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」³⁾、同じく文部科学省・HPCI 戦略プログラム「分野 3・防災・減災に資する地球変動予測」⁴⁾において、データ同化を課題に掲げたワーキンググループが設置されている。ただしこれらは、生物学や地震津波を対象とする問題特化型の研究開発事業であり、分野横断的なトレンド拡大につながる性質のものではない。その他に近年、JST・CREST「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」において、研究課題「ビッグデータ同化の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」（代表：三好建正 理化学研究所 計算科学研究機構 平成 25 年度採択）が採択されている⁵⁾。

組織単位でデータ同化の旗印を掲げる国内の研究機関は極めて少数である。問題特化型では、気象庁・気象研究所と海洋研究開発機構にいくつかの研究ユニットが存在しており、これらが日本の気象・海洋シミュレーションの発展を牽引している。方法論型では、情報・システム研究機構・統計数理研究所・データ同化研究開発センター⁶⁾と理化学研究所・計算科学研究機構・データ同化研究チーム（チームリーダー：三好建正）⁷⁾がある。理化学研究所のデータ同化研究チームは 2012 年 10 月に新設されたものである。スーパーコンピュータ「京」を活用した大規模シミュレーションに特化したアルゴリズム開発に取り組んでおり、世界最大規模の全球大気アンサンブルデータ同化に成功している⁸⁾。また近年は、大気・海洋、津波、地震以外にも、宇宙科学、生化学、生体高分子の構造予測、パンデミック・シミュレーション、高圧ガス圧力調整器の設計、航空工学、東北大震災の原発事故による放射能汚染の拡散予測など、個別の研究レベルでは、データ同化のトレンドは拡大傾向にある。これは研究者個人の地道な啓蒙活動によるところが大きい。

個別研究の水準では、日本のデータ同化技術は欧米に比べて決して引けをとるものではない。しかしながら、研究者人口や組織、プロジェクトの規模、とりわけ科学技術振興策の戦略面に大きな差がある。米国では NCAR（The National Center for Atmospheric Research）⁹⁾、アメリカ航空宇宙局（NASA）、SAMSI（応用数理・統計科学研究所、Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute）¹⁰⁾、政府気象局・海洋局、メリーランド大学など、欧州では Reading 大学のデータ同化研究開発センター（DARC）¹¹⁾、ヨーロッパ地域の 18 カ国が加盟するヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）¹²⁾など、多数の研究組織が大小様々なプログラムを継続的に運営している。また、世界の 183 の国と 6 地域が加盟する世界気象機関（World Meteorological Organization; WMO）¹³⁾という国際連合機関（日本も加盟）は、気候・海洋データ同化システムの科学技術振興プログラムを立ち上げている。近年は、気候変動予測モデルのコンテストを開催するなど、科学技術水準の全体的な底上げを図るような新しい形態のプログラムが企画されている。また WMO は 4 年毎に世界気象会議を開催しており、ここでも欧米のデータ同化研究のプレゼンスは圧倒的である。学会規模の比較では、日本では日本地球惑星科学連合大会¹⁴⁾でデータ同化のセッションが企画されているが、例年の参加者数は 30 名程度にとどまる。これに対して欧米では、AGU（American Geophysical Union）¹⁵⁾、EGU（European Geosciences Union）¹⁶⁾を初め、データ同化を取り上げた大規模な学術会議が数多く存在する。

（４）科学技術的・政策的課題

物理、生命科学、医薬品開発、情報産業、防災、工業製品設計、社会科学など、シミュレーションモデルの高精度化が産業的付加価値やコスト削減、国民の便益に直結するような新しい応用分野を開拓し、データ同化を活用したシミュレーションを普及していく上でトップダウン型の科学技術振興政策が不可欠である。

我が国では、研究者個人の地道な活動が、応用分野への技術提供と人材育成を支えている。また、日本には、統計科学、計算科学、物理学、非線形システム科学、HPC など、データ同化の要素技術を総合的に学べる大学専攻ならびに教育プログラムが存在しない。データ同化のような分野横断的な特性を持つ科学技術を振興するには、少なくとも中規模以上のプロジェクトを継続的に立ち上げていくことが求められる。

文部科学省・次世代スーパーコンピュータプロジェクト³⁾や HPCI 戦略プログラム⁴⁾ など、HPC 関連のファウンディングシステムで、データ同化をテーマとするワーキンググループが設置されている。しかしながら、これらは問題特化型の研究開発事業であり、産学を巻き込んだ学際的潮流に発展する性質のものではない。産学連携による総合型プロジェクトならびに教育プログラムが立ち上がることが望ましい。

ビッグデータという言葉に象徴されるように、過去十年間に革新性の高い計測手法が数多く生み出され、近年は多くの研究分野で研究開発の在り方が大きく変わりつつある。データとモデリングの融合技術であるデータ同化に対するビッグデータ・ソリューションとしての期待は益々高まっている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 文部科学省・次世代スーパーコンピュータプロジェクト「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」³⁾、同じく文部科学省・HPCI 戦略プログラム「分野 3・防災・減災に資する地球変動予測」⁴⁾において、データ同化を課題とするワーキンググループが設置された。これにより創薬や防災シミュレーションでデータ同化の本格運用が進むことが期待される。
- ・ 情報・システム研究機構・統計数理研究所のデータ同化研究開発センター⁶⁾、英国 Reading 大学のセンター¹¹⁾など、データ同化に特化した研究ユニットの新設が相次いでいる。
- ・ 2012年10月に、理化学研究所・計算科学研究機構にデータ同化研究チームが新設された⁷⁾。
- ・ JST・CREST 研究領域「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」において、「ビッグデータ同化の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」（代表：三好 建正 理化学研究所 計算科学研究機構、平成 25 年度採択）が採択された⁵⁾。
- ・ 米国の統計科学系の公的研究機関 SAMSII では、データ同化に関する研究教育プログラムが継続的に運営されている¹⁰⁾。これに象徴されるようにデータ同化は統計科学の一つの研究分野として確立しつつある。SAMSII は統計科学・応用数理の研究機関で、米連邦政府機関である National Science Foundation (NSF) の一部門を構成している。提携大学および研究機関として、デューク大学、ノースカロライナ州立大学、ノース

カロライナ大学チャペルヒル校、National Institute of Statistical Sciences が名を連ねている。

- ・我が国では、東北大震災の原発事故による放射能汚染の拡散予測やインフルエンザのパンデミック・シミュレーションなど、実社会と関わりの深いところで、ユニークな研究が進められている。
- ・英国の Reading 大学・データ同化研究開発センターは、データ同化プログラムのオープンソースプロジェクトを推進している¹⁷⁾。

(6) キーワード

シミュレーション、統計科学、気象・海洋データ同化、創薬、防災、モデル設計、スーパーコンピュータ

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・分野横断型の研究開発ならびに教育活動を展開している大学や公的研究機関はほとんど存在しない。また現時点で、大規模な研究予算がついて運営されている総合型研究開発プロジェクトも存在しない。 ・情報・システム研究機構・統計数理研究所のデータ同化研究開発センター、理化学研究所・計算科学研究機構・データ同化研究チームの創設⁵⁾やJST・CREST型研究²⁾など、コミュニティの今後の発展・拡大に繋がるような動向が一部で確認される。 ・気象・海洋学におけるデータ同化の基礎研究は、研究者人口こそは欧米と比較して小規模であるものの、科学技術水準は世界でもトップクラスである。 ・生命科学や幾つかの工学的応用で、データ同化の方法論研究は独自の発展を遂げつつある。発展の仕方は他国に比べて非常にユニークであり、これらが日本初の新しいものに発展する可能性がある。 ・統計科学分野における基礎研究は欧米に比べて圧倒的に少ない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・気象・海洋学におけるデータ同化の科学技術水準は、世界トップクラスであり、台風の進路予測、中長期の天気予報、エルニーニョ予報や局地豪雨の予測システムなど、国民生活と非常に密接に結びつきながら発展してきている¹⁾。 ・文部科学省・次世代スーパーコンピュータプロジェクト「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」³⁾、同じく文部科学省・HPCI戦略プログラム「分野3・防災・減災に資する地球変動予測」⁴⁾において、データ同化を研究課題に掲げるワーキンググループが設置されている。これにより創薬や防災シミュレーションでデータ同化技術の本格運用が進むことが期待される。 ・東北大震災原発事故による放射能汚染の拡散予測やインフルエンザのパンデミック・シミュレーションなど、実社会に関わりの深いところでデータ同化の応用が進んでいる。これは日本の独自のものである。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・気象庁のデータ同化システムは既に実用化に成功しており、今後もさらなる高度化・多機能化が進むことが予想される。 ・気象・海洋以外の分野では、産業応用レベルの研究事例は確認できない。 ・防災、創薬、医療分野のシミュレーションで研究開発が進んでおり、これらがうまくいけば近い将来実用化につながる可能性がある^{3,4)}。

米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは非常に高く、当該研究領域において世界をリードしている。 地球物理学の分野では、NCAR (The National Center for Atmospheric Research)⁹⁾、アメリカ航空宇宙局 (NASA) を初めとする公的研究機関に巨額の研究予算が付き、高いレベルの基礎研究を数多く生み出し、また人材の育成と維持を担っている。 応用数理や統計科学の分野でデータ同化の研究が展開されており、大小様々な研究開発プロジェクト・教育プログラムが継続的に実施されるなど、これらが高いレベルの基礎研究を生み出す原動力となっている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 気象・海洋学におけるデータ同化の科学技術水準は、世界トップクラスであるが、この分野では日本も遜色ない研究成果を上げている。 水・エネルギー循環系シミュレーションを初めとする環境問題、医学・分子生物学、エージェントシミュレーション等、数多くの新規応用分野が開拓されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 気象局のデータ同化システムは既に実用化に成功しており、今後もさらなる高度化が進むことが予想される。これは日米欧に共通する。 アメリカ航空宇宙局 (NASA) の火星探査機データの解析にデータ同化技術が使われるなど、宇宙工学への応用は米国独自のものである。 民間企業の適用事例は表立っては見えてこない。しかしながら、応用数理や統計科学分野における教育プログラムの充実度を考えれば、数多くの人材が民間企業に流れていることが予想される。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは非常に高く、当該研究領域において世界をリードしている。 英国のReading大学にデータ同化研究開発センターが創設された¹⁷⁾。 欧州ではReading大学のデータ同化研究開発センター¹⁷⁾、ヨーロッパ地域の18カ国が加盟するヨーロッパ中期予報センター (ECMWF)¹²⁾ など、多数の研究組織で大小様々な研究プログラムが運営され、高いレベルの基礎研究を数多く生み出し、人材の育成と他分野への人材供給を支えている。 米国と同様に、応用数理や統計科学の分野でデータ同化の研究が展開されており、大小様々な研究開発プロジェクト・教育プログラムが継続的に実施されるなど、これらが高いレベルの基礎研究を生み出す原動力となっている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> おおむね米国と状況は似ている。 気象・海洋学におけるデータ同化の科学技術水準は、世界トップクラスであるが、この分野では日本も遜色ない研究成果を上げている。 水・エネルギー循環系シミュレーションを初めとする環境問題、医学・分子生物学、エージェントシミュレーション等、数多くの新規応用分野が開拓されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> おおむね米国と状況は似ている。 英国Reading大学のデータ同化研究開発センターがデータ同化プログラムのオープンソースライブラリを開発している¹⁷⁾。 欧州各国気象局のデータ同化システムは既に実用化に成功しており、今後もさらなる高度化が進むことが予想される。これは日米欧に共通する。 民間企業の適用事例は表立っては見えてこない。しかしながら、応用数理や統計科学分野における教育プログラムの充実度を考えると、数多くの人材が民間企業に流れていることが予想される。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国への多数の留学生が本国へ帰国し、大学で一定レベルの基礎研究力を維持している。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学などが個別に応用研究・開発を行う程度であり、大きなプロジェクトは確認できない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき活動は特に見えていない。

韓国	基礎研究	△	→	・米国への多数の留学生が本国へ帰国し、大学で一定レベルの基礎研究力を維持している。
	応用研究・開発	△	→	・大学などが個別に応用研究・開発を行う程度であり、大きなプロジェクトは確認できない。
	産業化	△	→	・特筆すべき活動は特に見えていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

1) 気象庁 データ同化システム

海洋データ同化：蒲地ら（2009）「今後の海洋データ同化システム開発の展望」測候時報 特別号 76

台風や集中豪雨の予報システム

<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/Project/2-12/2-12-sjis.htm>

2) JST・CREST「先端的同化手法と適応型シミュレーションの研究」

<http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/240489/www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoiki/bunya04-8.html>

3) 次世代スーパーコンピュータプロジェクト「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」

<http://www.nsc.riken.jp/pamphlet2009/p7.html>

4) HPCI 戦略プログラム「分野3・防災・減災に資する地球変動予測」

<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/>

5) JST・CREST「「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」

http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/44/44_02.html

6) 統計数理研究所 データ同化研究開発センター

<http://daweb.ism.ac.jp/contents/>

7) 理化学研究所 計算科学研究機構 データ同化研究チーム

http://www.riken.jp/research/labs/aics/research/data_assim/

8) 理化学研究所 / 科学技術振興機構 プレスリリース “「京」を使い世界最大規模の全球大気アンサンブルデータ同化に成功”

http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140723_2/

9) National Center for Atmospheric Research

<http://ncar.ucar.edu/>

10) SAMSI（応用数理・統計科学研究所 Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute）

<http://www.samsi.info/>

- 11) Reading 大学 データ同化研究開発センター
<http://darc.nerc.ac.uk/>
- 12) ヨーロッパ中期予報センター
<http://www.ecmwf.int/>
- 13) 世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）
http://www.wmo.int/pages/index_en.html
- 14) 日本地球惑星科学連合大会
<http://www.jpгу.org/>
- 15) American Geophysical Union (AGU)
<http://www.agu.org/meetings/>
- 16) European Geosciences Union (EGU)
<http://www.egu.eu/>
- 17) Reading 大学・データ同化研究開発センターのデータ同化プログラム・オープンソースライブラリ
<http://www.openda.org/joomla/index.php>

3.1.7 モデルの正則化・最適化

(1) 研究開発領域名

モデルの正則化・最適化

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

情報源の疎性に基づく新たなモデル正則化法とその応用、実現のための最適化法の研究。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ここでは、疎性とは多次元のベクトルの多くの成分が 0 であることをいう。こうした疎性を積極的に用いる情報処理の方法が近年広く用いられるようになってきた。

統計学をはじめ、信号処理、制御理論などの分野で連続信号を扱う場合、以前は信号のパワー、すなわち信号の二乗が基本となる量であった。一方、疎性を用いる方法では、疎性の高い解、すなわち 0 の多い解を求めることを目的とする。実際の解法では、非零の個数を陽に扱うのではなく、問題を緩和し、信号の各成分の絶対値の和である L1 ノルムを用いた正則項を用いる。こうした正則化を用いた新しい考え方によって、既存の様々な情報処理技術が書き換えられ、新しい技術が生まれている。

1990年代から、複数の分野で疎性が重要だと認識され、特に海外では疎性に基づく推定法が大きな流れとなってきた。大量のデータが観測できるようになりビッグデータと呼ばれているが、そうしたデータは多くの意味を持たない成分を含んでおり、疎性に基づく情報処理の技術は応用面から必要とされている手法でもある。

具体的には統計学の LASSO¹⁾、情報理論における圧縮センシング²⁾という手法が広く知られている。

統計学における線形回帰の問題では、説明変数の二乗による正則化項を用いた推定法（リッジ回帰）が古くから用いられてきたが、LASSO に代表される疎性に基づく手法は L1 ノルムに代表されるあらたな正則化項を用いた方法と捉えることができる。リッジ回帰と異なり、推定されるパラメータの多くは 0 となることから、変数選択を自動的に行う方法であり、説明変数の数がサンプル数より多い場合の不良設定問題に対して用いることができる。また、こうした方法はベイズ統計の枠組みで定式化できるため、理論的な扱いも充実している。

一方、圧縮センシングは情報理論の文脈で現れた手法である。そのため、統計学とは異なる問題意識が基礎になっている。情報源が疎性をもつならば、対象を観測する回数自体を少なく（圧縮）し、高速に対象の状態を推定できる。そしていくつかの仮定が満たされるならば、推定結果が正しいことが理論的に示されている。圧縮センシングは新しい考え方を与えている。

これらの方法では、理論とともに問題を解く際の最適化の方法が重要である。素朴に疎性を持つ解を求めるならば、0 でない成分の組み合わせを選択する必要がある。しかし、これでは組み合わせの数が爆発し大規模な問題では現実的な時間で解くことは難しいため、効率的な最適化の手法が必要である。疎性に基づく方法では、問題を簡単な凸最適化問題に緩和しても、多くの場合適切な解が得られることが示されているため、高

速な最適化法を用いることができる。欧米ではこうした凸最適化の解法の研究が盛んに行われている。対象毎の条件を考慮にいれ、勾配法と直線探索の組み合わせや内点法などによって問題を高速に解くアルゴリズム開発が広く行われている。

こうした疎性に基づく方法は様々な分野で応用され、その対象分野は広がるばかりである。ゲノム科学では、遺伝子の数に比べてサンプル数が圧倒的に少なく、LASSO などの方法が有効である。また、多量のデータの中から何か構造を見つけようというデータマイニングの問題も疎性の仮定が有効である。工学的な応用に関しては、動画の切り出しや画像のノイズ軽減といった画像処理や信号処理などの情報処理法の応用だけでなく、超解像度をもつカメラの作成や医用 MRI の短時間での計測法、NMR を用いた分子構造の決定法や、電波望遠鏡のデータ解析、X 線回折画像における位相復元など、実際の計測技術と組み合わせてこれまでの計測限界を押し上げようという研究も広く行われている。

LASSO や圧縮センシングは最初に定義された枠組みでは情報源がベクトルの場合を扱っているが、その後情報源が行列やテンソルである場合に拡張されている。こうした拡張によって応用範囲は広がっている。

(4) 科学技術的・政策的課題

疎性に基づく方法は、単一の理論を議論する性質のものではない。これまで信号の二乗誤差やパワーを中心に考えていた発想を柔軟に変えることに本質がある。数理的に広い視野をもち、問題の本質を高所から概観できる柔軟さが必要である。

こうした方法はデータ科学であり、様々なデータへの適用が必須である。多くの応用分野を含めた研究の流れを作り出す必要がある。

我が国では理論分野も応用分野も縦割りになってしまいう歴史があり、こうした方法論も特定の分野の話題と捉えることが多い。疎性を用いた研究はいくつかの分野では使われ始めている。今後、疎性に基づく新たな視点をより広い分野に広げていくことが課題である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

圧縮センシングに関する理論的結果について重要な結果を示した E. Candes³⁾ は複数の重要な賞を受賞し、圧縮センシングに関する注目度の高さを示した。

圧縮センシングに関する研究論文の数は海外の情報理論の研究会では数多くみられる。LASSO もふくめると、最適化、信号処理の会議でもかなりの数の論文が発表されている。初期には日本人の貢献は多くなかった。現在では徐々に増加している。

既存の分野を超えて疎性に関する学術的な国際会議 SPARS (Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations)⁴⁾ は 2 年に一度開かれており、2013 年に第 5 回が開催された。

DARPA や NSF の相当数のプロジェクトにおいて、疎性に関する手法を用いている。これは理論から応用含めた全体的な傾向である。

国内では平成 25 年から科研費新学術領域研究において「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」⁵⁾ が始まった。

(6) キーワード

圧縮センシング、LASSO、正則化、疎性、緩和問題

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> この分野の確立に貢献できる理論研究は存在するが、米国に比べて少ない。詳細な解析、方法の改善法などの提案に関する研究は行われている。 ICASSPなどのより大きな会議や情報理論などの会議には多くの日本人が参加している。これまでは疎性を用いたモデリングに関する貢献は大きくなかったが、徐々に増加している。 国内では、こうした話題に関する研究会やセミナーなどが開かれている。また、新学術領域においてスパースモデリングに関するプロジェクトが始まった³⁾。興味を持つ研究者が増加している。 一方、最適化理論で得られた半正定値計画問題のアルゴリズムやプログラムパッケージに関する日本発の研究が、海外のこの分野の一部で利用されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学や企業などでは、疎性を用いた方法に基づく方法を用いた統計科学や機械学習などでのデータ処理への適用が広く行われている。また、通信工学では応用を目指した研究もおこなわれている。 LASSOなどは統計の分野ではスタンダードな方法となっているので、ゲノム科学や脳データの解析など様々な分野で解析の際に用いられている。 既存の手法を用いてあてはめた研究が多く、日本からの発信というものは少ない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> データ処理技術としてはこうした方法が定着しつつある。しかし、他国に比べて際立ったものではない。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> LASSO、圧縮センシングともに提案が行われた国だということもあって、理論研究は世界をリードしている。統計、情報理論、最適化法、どの分野でももっとも大きい貢献をおこなっている。 ポストドクレベルの研究者の多くがこうした理論研究に携わっているが、彼らのなかには、中国や韓国からの留学生も多く含まれており、将来自国に戻る研究者も多く含まれると考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> DARPA、NFSを含む複数の予算のプロジェクトでは、疎性に関する方法を用いるものが数多くあげられている。 信号処理、画像処理、統計学、情報理論、物理学、あらゆる分野で疎性を用いることによる情報処理法の革新が進んでいる。 光学やMRIなどの医用機器では、ハードウェアを含めた応用研究が行われている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 企業の研究として、疎性を用いた方法は当然とりいれられている。特にIT技術を用いる企業では積極的に用いている。機械学習の会議などでは、そうした研究者の発表、そしてそうした企業で必要となる研究が多く発表されている。
欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国に比べると貢献は少ないが、フランスでは Wavelet に関する研究が以前からあり、その流れから信号処理において疎性を用いた研究が盛んである。また、スイスのEPFLなどは情報理論に関する世界的拠点であり、圧縮センシングに関する先駆的な研究を行っている。英国も複数のグループで疎性に基づく研究を中心に行っている。 SPARS というワークショップのシリーズについて、第1回レンヌ(仏、2005)はフランスの研究者が主導し、その後、ソルトレイク(米、2007)、サン・マロ(仏、2009)、エジンバラ(英、2011)、ローザンヌ(スイス、2013)とヨーロッパを中心に継続されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 信号処理、情報理論における応用の研究は広くおこなわれている。また、疎性を用いた方法は神経情報処理などで広く用いられている。 米国と同様に医用機器などでは応用研究が行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国と同様に、一部の医用機器メーカーなどでは応用研究が行われていると考えられる。しかし、米国ほどのひろがりを見せていない。

中国	基礎研究	○	↗	・いくつかの理論研究が中国でも行われている。米国や欧州で関連する研究を行っている大学院生やポストクの数是非常に多く、その研究者がこの数年中国にポストを得て戻っている。また、Microsoft Research が北京にあり、著名な研究者がいることから、今後この分野の研究が大きく進むと考えられる。
	応用研究・開発	○	↗	・基礎研究と同様に、今後、研究成果がでてくると思われる。北京にある Microsoft Research といった機械学習や情報処理技術に特化した最先端の研究がこうした方法の研究の中心になっている。こうした研究所は製品化を目標に据えて応用研究を進めている。
	産業化	△	↗	・現状では特筆すべき活動は見えないが、今後は研究が進むと予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	・多くの研究が行われている。米国や欧州で学ぶ学生やポストが多いことから、韓国に戻った研究者がこの分野の研究をけん引していると考えられる。
	応用研究・開発	○	↗	・圧縮センシングは応用分野が広いが、特に信号処理の分野での応用研究が多いように見える。
	産業化	△	→	・特筆すべき活動は特に見えていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. J. Royal. Statist. Soc B., 58(1), pp. 267-288.
- 2) Candès, E.; Romberg, J.; Tao, T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information, IEEE Trans. on Information Theory. 2006, vol. 52, no. 2, p. 489 – 509.
Donoho, D. (2006). Compressed sensing. IEEE Trans. on Information Theory, 52(4), pp. 1289 – 1306.
- 3) Emmanuel Candes
<http://eas.caltech.edu/news?keyword=Emmanuel+Candes>
- 4) SPARS ワークショップ
<http://spars2013.epfl.ch/>
- 5) 文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」平成 25 年度～29 年度 スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成
<http://sparse-modeling.jp/>

<国内の研究会>

圧縮センシングとその周辺

<http://noe.ism.ac.jp/sml/seminarlist/2011-05-cs-workshop/>

圧縮センシングとその周辺（2）（ウェブページ削除済み）

圧縮センシングとその周辺（3）（ウェブページ削除済み）

圧縮センシングとその周辺（4）http://mns.k.u-tokyo.ac.jp/~sparse/cs2012_12.html

<その他参考資料>

信号処理での圧縮センシング特集

・ Signal Processing Magazine, IEEE, 2008, Vol.25, issue 2.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=4472102>

国内での文献

・ 田中利幸. 圧縮センシングの数理、電子情報通信学会, Fundamentals Review. 2010, Vol.4, No.1.

・ http://w2.gakkai-web.net/gakkai/ieice/vol4no1pdf/vol4no1_39.pdf

文献集

・ <http://dsp.rice.edu/cs>

書籍

・ Sparse and Redundant Representations: From Theory to Applications in Signal and Image Processing

・ Alfred M. Bruckstein, Michael Elad, Springer-Verlag, 2010.

3.1.8 機械学習・データマイニング

(1) 研究開発領域名

機械学習・データマイニング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

データマイニングとは、データ分析技術を蓄積されたデータ（例えば、大学入試の結果など）に適用し、そのデータの中から役立つルールや法則など（例えば、今年の大学合格者の得意科目の傾向など）の知識を見つけ出す技術。

機械学習とは、人工知能における研究課題の一つで、人間が経験的に行っている学習（例えば、学校の宿題をやらないことで教員に数回怒られると、学校の宿題はやるべきだということを学ぶこと）と同様の学習をコンピュータで実現させるための技術、理論、ソフトウェアの総称。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

データマイニングは、サービスサイエンスにおける消費傾向の発見、医療データマイニングにおける病状の進展規則の発見など、様々な応用分野でその有効性を示してきた。データマイニングの研究開発は、データマイニングするための手法の研究・データマイニングツールを開発する研究・データマイニングを適用する研究に大別される。データマイニングするための手法の研究は機械学習の研究との関連も深く、機械学習の研究が進展するとともに、同時に進展していくと予想される。データマイニングツールを開発する研究はデータマイニングの産業化を目指していると考えられるが、統計手法を整理した従来のデータ分析ツールと競合する可能性がある。データマイニングを適用する研究は、Web 上の大規模データ（ビッグデータ）を対象としたテキストマイニングなどの研究がしばらくは主流になると予測される。

機械学習は、1980年代後半から1995年頃まではニューラルネットワークの基礎研究・応用開発研究が機械学習そのもののような時代を経て、1995年頃から現代まではサポートベクターマシンを中心に基礎研究・応用開発研究が盛んに行われてきた¹⁾。機械学習の研究は、ニューラルネットワーク・サポートベクターマシンの研究という時代を過ぎて、最近では、カーネル法やベイジアンネットワークなど確率・統計に基づく機械学習の基礎研究が盛んになっている。目立たないが、近年の安価な計算機の高性能化等により、ある種の機械学習技術が、顔認識・侵入者検知・音声認識などの用途で産業化されている。機械学習は、その応用範囲が広いことから、様々な分野で応用研究が行われている。今後、機械学習の基礎研究・応用開発研究は、ビッグデータ（Web上のデータ、遺伝子データなど）を対象とした研究を中心に進展すると予測される。

国際比較については、データマイニング・機械学習の基礎研究では、米国・日本・欧州で非常に高い研究レベルを維持している。中国・韓国は、日欧米に留学していた優秀な学生が研究者として多数帰国しており、ある程度の基礎研究レベルを維持している。応用研究については、大きなプロジェクト研究は米国・欧州が先導しているが、関連学会等を調査してみると、小さな応用研究は日本でも多数見受けられる。データマイニング・機械学習の技術は、蓄積された（できる）データが存在することが前提となるため、

従来は Google・Yahoo!・Microsoft などの Web 上の膨大なデータを有する民間組織での産業化が図られてきた。今後は、他分野のビッグデータに対するデータマイニング・機械学習の基礎研究・応用研究が進展すると予測される。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

データマイニング・機械学習はそのものだけでは産業化が難しい。そのため、既存産業 (現在は、国防総省・Google・Yahoo!・Microsoft など) がデータマイニング・機械学習における応用研究を牽引する必要があることが世界的に重要課題となっている。

データマイニング・機械学習における研究が確率・統計に基づくデータ分析技術に急接近しており、データマイニング・機械学習と従来のデータ分析技術との棲み分けができなくなる可能性が危惧される。

世界的に、データマイニング・機械学習における研究は、研究予算の面から米国が研究の潮流を作っており、米国がデータマイニング・機械学習の研究予算を削減した際の研究の衰退が危惧される。

我が国では、データマイニング・機械学習の基礎研究に携わる研究者は多く、高い研究レベルを維持している。複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用 (FIRST)²⁾ など、データマイニング・機械学習の基礎研究に関連するプロジェクトもあり、現在、その研究レベルの維持が可能となっている。しかし、我が国の大学には、データマイニング・機械学習の研究に非常に重要な確率・統計学や数理モデルについて、体系的に学べる専攻がない。そのため、FIRST などのプロジェクト終了とともに、データマイニング・機械学習の基礎研究レベルが維持できなくなることが危惧される。また、現在、我が国には、産官学が連携した独創的なデータマイニング・機械学習の大規模な応用研究プロジェクトがないことが課題である。米国の研究予算に左右されない研究の潮流を作るためにも、産官学が連携した独創的なデータマイニング・機械学習の応用研究プロジェクトを継続して、立ち上げていく必要がある。

近年、日本、米国、中国、韓国でビッグデータに関連する多くのプロジェクトが立ち上がっている。その中でデータマイニング・機械学習の基礎研究は高度化していくと考えられる。しかし、どのプロジェクトにおいても高度化したデータマイニング・機械学習が役立つ場が示されないと、その研究開発は縮小していくことになる。今後は、様々な分野でのデータマイニング・機械学習、ビッグデータの利活用プロジェクトを継続して、立ち上げていく必要がある。特に、我が国では、産官学が連携した独創的なデータマイニング・機械学習の応用研究プロジェクトを継続して、立ち上げていくとともに、他国に先駆けて、データマイニング・機械学習、ビッグデータを体系的に教育・研究する場を産学連携して構築していく必要がある。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

Memorial Sloan-Kettering Cancer Center (MSKCC) が生物学の研究進展および組織化された生物学のプロセスの発見のために、機械学習によるゲノム情報や分子プロファイルの統合を目指して Computational Biology Center (cBio) を設立し、各国から研究者を募っている³⁾。我が国においても大学・公的機関で機械学習を利用した生物学の進

展を目指した研究が散見されるものの、国内外から研究者を募る規模のプロジェクトはない。

ドイツでは、Berlin Brain-Computer Interface(BBCI)(2001-2010)⁴⁾と呼ばれるプロジェクトが The ministry for education and research (Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)の予算で実施された。このプロジェクトの目的は EEG によって計測される脳信号の検知と解読の改善であった。より具体的には、新たなセンサ技術の開発と新たな機械学習技術を用いた脳波の分析並びに脳の理解の改善を目指したプロジェクトだった。我が国では理化学研究所に脳科学総合研究センター⁵⁾があり、このプロジェクトより規模が大きいものの、機械学習の研究にダイレクトに関連した研究チームはない。

Google・Yahoo!・Microsoft では、Web 上の大量データを活用した新たなサービスを模索するため、機械学習を利用した応用研究・開発が行われているとともに、Web 上の大量のテキストを扱う新たな機械学習技術の研究が行われていることが、国際会議等からうかがえる。

2012年以降、日本、米国、欧州、中国、韓国でビッグデータに関する研究予算の増大、大型プロジェクトの立ち上げが顕著になっている。日本では、データマイニング・機械学習を必要とするビッグデータ関連のプロジェクトとして、CREST の「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」⁶⁾、「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」⁷⁾などがスタートしている。米国では、Big Data Research and Development Initiative⁸⁾の中でビッグデータに対する政府の方針を示しており、\$200 million の研究開発費を投じている。欧州においては、BIG (Big Data Public Private Forum)⁹⁾プロジェクトが進行中である。中国においては、「2012年におけるハイテク・サービス業の研究開発と産業化に関する通知」でビッグデータ分析ソフト開発と活用サービス創出を重点支援対象に指定した。韓国においては、2012年に「ビッグデータマスタープラン」を発表し、「ビッグデータ分析活用センター」開所によるデータ処理環境の整備を行って、「公共データポータル、オープンデータ広場」など公共データ公開など国家で政策的取組みを行っている。

(6) キーワード

サポートベクターマシン、カーネル法、アンサンブル学習、ベイジアンネットワーク、統計、確率、テキストマイニング、パターン認識、ビッグデータ

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 日本の大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの研究領域において米国、欧州とともに世界をリードしている。 Asian Conference on Machine Learning¹⁰⁾を設立するなど、学会における当該技術の基礎研究者の数は非常に多く、また研究に勢いがある。 CRESTのプロジェクトにより、基礎研究開発が支援されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用(FIRST)など、当該分野の研究を包含したようなプロジェクトが存在する。 学会発表等から応用研究・開発の研究が大学・公的機関・民間機関で実施されていることがうかがえる。 データマイニング・機械学習を主とした産官学一体となった応用研究・開発プロジェクトは存在おらず、本研究領域の世界的な潮流を作ることができていない。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> カメラにおける顔認識や重要施設への侵入者検知など産業製品の一部の機能として、産業化が実現されている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国の大学・公的機関・民間機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの研究領域において世界をリードしている。特に国防総省の巨大予算による支援で、基礎研究の進捗が著しかった。 大学・公的機関・民間機関のどこでも基礎研究の重要性が認識されているため、様々な分野に優秀な人材が動ける強みを持つ。 大学・公的機関・民間機関のどこでも基礎研究レベルが維持され、予算も十分であることから、ソフト面における世界の研究傾向を形成できる強みを持つ。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 国防総省の巨大予算による支援のため、当該分野における応用研究・開発は多いはずであるが、数値としてそれを把握することは難しい。 癌センターによる遺伝子解析やスマートグリッドから得られる需要家の情報分析など大量データを扱う分野での応用研究・開発研究がプロジェクトとして、立ち上がり始めている。 Big Data Research and Development Initiative により相当額の研究開発費が投じられている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> Google、Yahoo!、Microsoftでは日々蓄積される大量の情報を整理し、検索できるように当該技術が利用されている。 カード会社等の信用診断などに当該技術が利用されている。 iPhone 4S に搭載されたSiriに代表される音声認識ソフトが開発されている。Siriが発表されてすぐに、日本・韓国でsmart phone用の同様の音声認識ソフトが産業化された。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ、イギリスの大学・公的機関における基礎研究レベルは高く、基礎研究の内、特に理論の研究では、米国、日本とともに世界をリードしている。 欧州には当該分野の基礎研究をまとめる能力に長けた研究者が多く、世界中で利用される教科書¹¹⁾が出版されている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ブレインマシンインタフェース(BMI)、ゲノム構造解析、マーケット分析の研究など、いくつかの応用研究・開発プロジェクトが実施されている。 民間機関でもいくつか応用研究・開発のプロジェクトが散見される。 BIG(Big Data Public Private Forum) プロジェクトが実施されている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> Google ヨーロッパ、Yahoo! ヨーロッパ、Microsoft ヨーロッパでは日々蓄積される大量の情報を整理し、検索できるように当該技術が利用されている。 民間製薬会社における新規製薬の企画への利用がうかがえる。

中国	基礎研究	○	→	・米国への多数の留学生らが本国へ帰国し、大学で一定レベルの基礎研究力を維持している。
	応用研究・開発	○	→	・軍事における応用研究・開発プロジェクトが存在しそうではあるが、その存在は確認できない。 ・「2012年におけるハイテク・サービス業の研究開発と産業化に関する通知」でビッグデータ分析ソフト開発と活用サービス創出を重点支援対象に指定した。
	産業化	△	→	・当該技術の産業化が行われた表だった情報はないものの、米国等へのサイバーアタックが中国からなら、高レベルな当該技術が一種産業化されていると考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	・米国への留学生らが本国へ帰国し、大学で一定レベルの基礎研究力を維持している。
	応用研究・開発	△	→	・大学などが個別に応用研究・開発を行う程度であり、大きな予算をかけたプロジェクトは確認できない。 ・大手家電製品会社が日本などの大学に寄付講座などを設立させ、応用研究・開発を推進しようとしているようである。 ・2012年「ビッグデータマスタープラン」発表し、「ビッグデータ分析活用センター」開所によるデータ処理環境を整備して、「公共データポータル、オープンデータ広場」など公共データ公開など国家で政策的取組みを行っている。
	産業化	△	→	・サムスン、LGなど世界的に著名な家電製品会社が存在し、安価なハードは生産されているが、ソフト面の色合いが濃い当該技術の産業化は確認できない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

1) Trends in Machine Learning according to Google Scholar

<http://yaroslavvb.blogspot.jp/2005/12/trends-in-machine-learning-according.html>

2) 複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用

<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/>

3) Computational Biology Center (cBio) at Memorial Sloan-Kettering Cancer Center (MSKCC)

<http://cbio.mskcc.org/jobs/index.html>

4) Berlin Brain-Computer Interface (BBCI)

<http://www.bbc.de/>

5) 理化学研究所 脳科学総合研究センター

<http://www.brain.riken.jp/jp/faculty/>

6) ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化

http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html

7) 科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化

http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-5.html

- 8) Big Data Research and Development Initiative

http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/big_data_press_release_final_2.pdf

- 9) BIG(Big Data Public Private Forum)

<http://www.big-project.eu/>

- 10) 4th Asian Conference on Machine Learning 2012

<http://acml12.comp.nus.edu.sg/>

- 11) Pattern Recognition and Machine Learning

<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/cmbishop/prml/>

3.1.9 モデル統合に基づくシステム設計とその評価

(1) 研究開発領域名

モデル統合に基づくシステム設計とその評価

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

対象とするシステムを構成する要素の動的振る舞いを数式化したモデルを素早く開発し、かつ、それらのモデル要素と既存のモデル要素を統合して、目的に合ったシステムの動的振る舞いモデルを構築し、開発されたシステムモデルを利用して、企画・戦略決定、機能設計、システムの安全性・信頼性・セキュリティなどが十分であることの評価・検証とシステムの維持や調整を行う。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システムの複雑化の進展によって、システム開発も複雑化し十分な安全性、信頼性、セキュリティなどを保証しながら要求性能を満たすには多大なコストとリソースが必要となってきた。現在では、ほとんどのシステムにおいて情報システムと電子制御が係わっていて、情報システムを通じたシステム間の連携が新しい付加価値を生み出すようになった。しかしながら、独立していたシステムが連携することで想定外の問題が発生し易くなり、システムを管理・制御するソフトウェアがシステムの安全性・信頼性・セキュリティや性能を決める重要な要素となっている。また、システム連携は製品競争の土俵が高性能・高品質・合理的な価格という「ものづくり」から「システム化による付加価値創造」に変化していることを意味する。日本は土俵の変化への適応が遅く、自ら積極的に土俵を変えていくことも苦手なように思える。

自動車の場合、新しい付加価値のほとんどに電子制御が係わっており、複数の電子制御システムが絡み合っ新しい付加価値を生み出している。制御ソフトウェアのサイズは急速に増大し、現在では、エンタープライズ系のソフトウェアサイズとほぼ同じとなっている。今後は、個々のシステムの複雑化が一層進むと共に、情報システム、交通システムや電力システムとの連携によって新しい付加価値を生み出すと考えられる。したがって、そのような環境での付加価値創造が重要になると思われる。現在では、自動車は国際競争力を維持しているが、国際競争の土俵の変化に対する危機感も増している。

このような社会ネットワークとの連携は、得られる利便性やエネルギー効率向上などの付加価値が非常に大きいので、他の組み込みシステム製品でも急速に進展している。こうしたことから、組み込みシステムのソフトウェアサイズは多様な要求を満たすために急速に複雑化していることに加えて、他のシステムと連携するためにソフトウェアサイズはさらに指数関数的に増大している。したがって、製品の複雑化、コスト競争の激化に対応できる生産性の高い開発プロセスが必須であり、上位のシステムを俯瞰した戦略的な政略決定、信頼性とセキュリティの確保が一層重要になると思われる。

(3-1) モデルベース開発

システム開発の複雑化の進展に対処するために、自動車業界は制御対象と制御装置の数理モデルを用いた制御システム開発を行うモデルベース開発(MBD: Model-Based Development)の導入を行っている^{1, 2)}。図1はMBDの概念を示している。下半分のグ

レーの領域はリアルな世界であり、上半分はバーチャルな世界である。制御システムは制御対象と制御装置からなり、制御システム開発は両者を組み合わせて機能検証を行い、その結果が十分であれば市場に出す。これと同様な構造をバーチャルな世界に作ることで MBD の基本的概念である。したがって、バーチャルな世界に制御対象と制御装置のモデルがあり、両者を組み合わせて機能検証を行う。これは、SILS (Software In the Loop Simulation) という。機能検証がバーチャルな世界で行えるので、検証効率が向上する。制御対象のモデルから制御を導出することを MBCD (Model-Based Control Design) という。この概念で興味深いことは、図 1 の破線に示すようにリアルとバーチャルな世界を繋ぐ2つのリンクがあることで、リアルタイムで動作する制御対象モデルを実際の制御装置で制御することを HILS (Hardware In the Loop Simulation) という。これは、実験が難しい場合や再現性が乏しい状況でも簡単にシミュレーションすることができ、開発効率を向上することができる。また、モデル化が難しい制御対象のアクチュエータやセンサなどを実際の部品に置き換えることができる。また、バーチャルなヒューマンインターフェースによって人間とシステムとのインタラクションもシミュレーション可能である。制御装置モデルで実際の制御対象を制御することを RPC (Rapid Prototyping Controller) という。自動車の量産制御装置やソフトウェア開発は時間がかかるので、抽象度の高い制御装置モデルから自動コード生成を使って効率よく制御実験ができる。MBD はこうした便利な環境を使っているが、最も重要なことは、モデルを機能仕様書として使うことである。モデルと開発対象の動的振る舞いを比較することで、精度の高い検証ができる。さらに、モデルを用いて検証条件を自動生成する方法などが利用され始めている。開発ステップ毎にこのような検証を配置することで、上流工程での不具合を下流工程に流さないこと、開発プロセス自体の品質を評価して継続的な開発プロセスの改善を行うことができる。

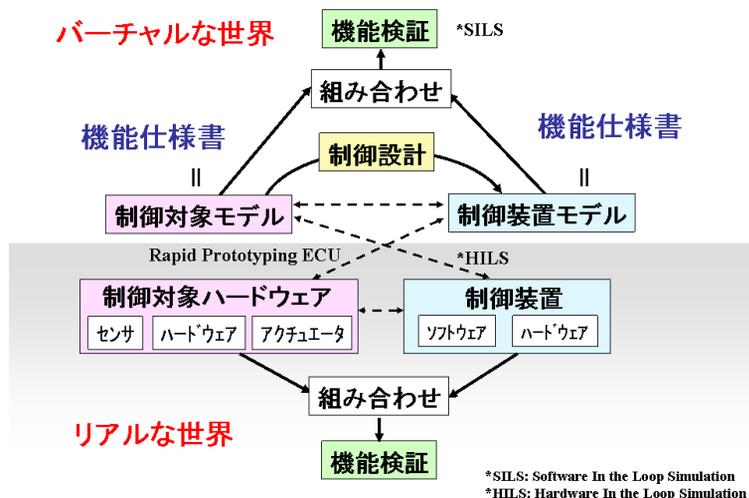


図 1 モデルベース開発 (MBD) の概念

MBD の概念は自動車の制御システム開発だけに適用されるものではなく、汎用的な概念であり、多くの産業からも注目されている。シミュレーションによって時間の経過

に伴うシステムの振る舞いを共有することで、分野の異なる専門家間のコミュニケーション精度が向上し、より適切な施策を見出すことができる。MBD の概念自体は古くからあるが、MBD は多くの技術とツールを体系化して用いる。近年、MBD が注目され始めたのは、シミュレーション技術や関連技術が進み、連続事象系と離散事象系が混在するハイブリッドシステムのシミュレーションが GUI を用いて簡単にできるようになった（Matlab/Simulink/Stateflow など）³⁾こと、コンピュータの計算速度が急速に上がったこと、実装コードの自動生成が進展したこと、検証ツールが適用可能になってきたこと、制御システム開発が複雑化してシステム開発の効率化が強く求められていることなどからである。

一方で、ソフトウェア開発の領域は複雑なシステム要求やシステム構成、ビジネスプロセスなどをモデル化（要素間の関係図で示すこと）する UML(Unified Modeling Language)⁴⁾や SysML⁵⁾をシステム開発の上流に導入する活動があり、こちらも MBD ということがある。両者の数学的バックグラウンドは大きく異なり、前者はシステム・制御設計を背景に微差分方程式をベースとし、対象の動的振る舞いをシミュレーションすることができるが、後者はソフトウェア実装を背景に論理学をベースとする開発要求などをシンボル化した要素間の関係図をモデルといい、一般には、シミュレーションすることはできない。背景が異なるため両者の間にギャップが見られる。システムの複雑化に対しては、両者が連携・統合されることが望ましい。

MBD におけるモデル化の対象は、以下の通りである。

- ① 要求モデル：望ましいシステムの振る舞いの記述
- ② 制約モデル：システムが満たすべき制約の記述
- ③ 制御対象モデル：制御対象の動的振る舞いの記述
- ④ 制御装置モデル：制御装置の動的振る舞いを記述
- ⑤ 人間モデル：人間の判断、感知、動作を記述
- ⑥ 環境モデル：気圧、気温、湿度、風速、道路状況など

要求モデルは、エネルギー効率の最適化、目標状態からの誤差の最小化や追従特性などを数式で表す。制約モデルは、自動車エンジン開発の領域では、アクチュエータの上下限值や達成できる速度の範囲、ノック限界、失火限界、排気ガス規制値などの数式表現に対応する。ノックや失火は運転可能な領域と運転不可能な領域を分けるが、その境界を数式化したモデルを境界モデルという。エンジンの燃費を向上しようとする、エンジンは境界近傍で運転することになる。多くの場合、最適条件は制約境界上にあり、最適化が進むに従い、境界モデルを求めることは必然である。また、利用可能な制御装置のメモリー容量、スタックマージン、計算速度や開発コスト、開発期間なども重要な制約である。制御対象モデルはシステムが大規模になるに従い、各種の分野、および、物理現象を統合して扱う必要が増している。人間モデルは、人間の行動の介在にシステムがどのような振る舞いをするか、また、人間にとってシステムはどのような振る舞いをすべきかを知るために、益々、重要になっている。環境モデルは、想定外な事象によって生じる問題を緩和するためにも、対象とするシステムが作動する全ての環境を可能な限り網羅する必要性がある。

MBD ではこれらのモデルを統合して組み込み制御システムを開発する。MBD はこれ

まで比較的規模が小さく、単純なシステムに適用されてきた。しかし、ハイブリッドシステムのモデルが可能になったこと、HILSを含むシミュレーション技術の進展、動的振る舞いモデルを用いた検証の進展によって、制御システム開発の複雑化に対処する方法として注目されるようになった。また、上述のようにモデル化対象を明確化し、情報管理機能を備えることで、より洗練された開発システムを目指すようになった。MBDは組み込み制御システムを対象として発展してきた開発手法だが、制御を「望ましい状態を実現すること。」と捕らえると、マネジメント領域を含み、あらゆる対象に拡張することができる。

しかし、MBDの大きな課題は対象のモデルを効率的に開発することである。モデリング手法は大きく分けると、物理法則に基づく物理モデリングと関数近似理論に基づく数式の係数を実験データに合うように調整する実験モデリングがある。前者は明示的にモデル構造を持つのでホワイトボックスモデリングに対応し、後者は内部構造を持たないのでブラックボックスモデリングに対応する。物理モデリングに関しては、特定の物理領域ではモデリング手法がよく発展しているが、力学系、電気回路系、伝熱系、流体系、化学反応系を跨ぐ混合物理領域モデリングは研究者や技術者間で共有できる環境は整っていない。このため、チームとしてモデルを開発する場合やモデルの流通に支障をきたしている。また、物理モデリングを担当する人材の育成をも困難にしている。しかしながら、物理モデリングは領域依存、産業依存、対象依存と考えられ、大学での研究とは相性が悪いと考えられ易い。しかし、関係者が今日できるモデリングに関する企業からの要求は強く、領域依存性、産業依存性、対象依存性を緩和した分野横断的物理モデリングの構築は必須である。実験モデルは汎用的な関数の係数を実験データと一致するようにパラメータを決定する方法であり、対象依存性が少ないので、大学では比較的よく研究されている。制御の領域ではシステム同定と呼ばれる実験データから動的システムのパラメータ調整手法が発展しており、機械学習では主にパターン認識などの静的なモデリング手法が発展している。動的システムにも機械学習の手法が適用されている。制御工学では開ループの同定精度を評価しただけでは、クローズドループの安定性が問題になることや閉ループ系の同定には外乱の統計的性質から特別な配慮が必要なことを指摘している。機械学習で得られるモデルを制御設計に用いることは容易ではない面もあり、これまでは、両者は互いに独立していたが、連携を発展させることが望まれる。

物理モデルと実験モデルを組み合わされたモデル、すなわち、グレーボックスモデルが実用的であるといわれている。この方向にデータ同化がある。しかしながら、一般的に物理モデルと実験モデルを組み合わせる方法は対象や開発者への依存性が強く、一般理論としては十分発達していない⁶⁾。

(3-2) モデル利用

モデルが大規模・高詳細度になれば、シミュレーション速度は遅くなり、精度と規模・詳細度のトレードオフが存在する。コンピュータの高速化によって、大規模なモデルを実行することが出来るようになったことが、モデル利用を促進してきた。今では、3D-simulationを含む各種のモデルを統合し、設計プロセスとリンクさせて最適設計を支援するツールも市販されるようになってきた⁷⁾。コンピュータの実行速度が上がれば、益々、便利な環境が手に入ると思われる。モデルは利用目的・記述方法・実行方法が揃

って意味を持つことから、CPU やコンピュータの動向も重要である。コンピュータの実行速度向上に頼って複雑化に対応することは、シングルコアのスピードアップが限界に達して困難になった。複数のコアを持つマルチコア、そして、より多数のコアを持つメニコア化の方向が鮮明になっている。しかしながら、従来の計算コードではアムダールの法則によって、既存コードの並列度でスピードアップが限定されてしまう。メニコアの恩恵を受けるためには、従来の計算アルゴリズムから並列性の高いアルゴリズムに変えていかなければならない。

モデル側からの複雑化への対応として、「複雑なモデルを開発し、その開発されたモデルを簡易化すること」と「的を得た簡易なモデルを直接開発すること」が考えられる。モデル簡易化の技術としてモデル次数を低減するモデルリダクション^{8, 9)}などの手法があるが、パラメータ数の低減を含む広い意味でのモデル簡易化は十分発展しているとはいえない。特にモデルパラメータ数は実験データに基づくパラメータ決定に必要な実験規模、データ量、最適化計算時間に大きく影響する。今のところ、モデル簡易化はモデル次数低減などある側面だけが発展しているといえることができる。

モデリング教育は特定の技術領域のモデリングを教えるに留まり、混合物理領域モデリング、物理モデルと実験モデルの統合、モデル簡易化、制御対象と制御装置モデルの統合、数式処理と数値計算を統合したモデル実行環境、モデル/データ管理を含む体系的な教育はなされていない。行き過ぎた要素還元主義の影響が強いためか、モデリングは技術領域の分断と一部の領域が発展するという傾向が見られる。

特に欧州ではスウェーデンの Lund 大学や Linkoping 大学を中心に物理モデリング言語 Modelica をベースとしたモデリング環境の整備が活発である¹⁰⁻¹³⁾。そうした環境構築によって欧州がシステムモデリングとシミュレーション分野でリーダーシップを取ろうとしている¹⁴⁾。これは、標準化もリンクし、欧州の産業基盤の強化を狙ったものと想像される。Modelica、および、類似言語を採用した物理モデリングツールもスウェーデン、ドイツ、カナダ、米国から発売されている。米国では VHDL-AMS が IEEE 標準 1076 となり、VHDL-AMS¹⁵⁾を採用した物理モデリングツールが発売されている。HILS などに利用される Real-time simulator は日本でも市販されているが、欧米のツールに大きく遅れを取っている。これは、計算ボードなどハードウェアは作れても、そのハードウェアに搭載するモデルが作れないことや関連するサービスソフトなどが弱いためである。日本では見るべきモデリングツールがないのが現状である。これは、長期的に産業の足腰を萎えさせる可能性がある。

(3-3) 現状でのモデルの評価

モデルとその有効性は一般に浸透していない。したがって、モデルに基づく開発は企業の中での主流にはなっていないし、モデリング担当者は各社で説明などに苦労している。これは、モデリングがモデル学として成立していないこと、モデリング教育が十分でないことに起因した問題であろう。そうは言っても、意識の高い担当者の努力で物理モデルや実験モデルが会社毎、産業分野毎に利用され成果を上げていることは疑いようがない。より生産的なモデリング環境やモデルの利用環境を構築する場合、「説明に苦労する！」と MBD の推進者は証言している¹⁾。

日本では、特定の領域でのモデリングやモデリングに関する一部の技術領域は発展し

ているが体系的・包括的・汎用的なモデリング研究はほとんどない。開発プロセスやモデリングツールを含めた戦略的・体系的で地道な欧州の活動は見習う必要があると思われる。開発の方法論やプロセスが標準化され法的拘束力を持つことも懸念される¹⁶⁾。残念ながら、モデリングとリンクした標準化に関する日本発信の活動は余り見られない。また、研究者間や技術者間で共通に利用できるモデリング環境整備の活動もほとんど見られない。未発達なモデリング理論やモデリングツールに阻まれ、1社では人材と費用の点からもモデリング環境構築は限界があるので、産官学の連携が必要である。

欧州では大学・研究所・エンジニアリング会社・企業が上手い連携を持ち、大学で開発された技術が効率的に企業に移転されている。エンジン制御パラメータを実験で決定することは複雑化に伴い、従来の方法では実施不可能なほど膨大な実験工数が必要となった。エンジンのモデリング分野ではドイツのベルリンにあるエンジニアリング会社 IAV(Ingenieurgesellschaft Auto Verkehr) GmbH が非線形実験計画 (DoE:Design of Experiments) と実験モデルに基づく Model-Based Calibration (MBC)を推進し、大学・競合他社とユーザーである自動車会社を含めた DoE Conference を主催して、MBC の普及と発展を行っている。そのような背景から自動車会社で利用される MBC ツールは主に欧州のもので、典型的ガソリンエンジンでも実験工数が半減できる MBC の導入が遅れてしまった。日本の数学・制御関係の研究者であれば、十分対応できる内容だが、欧州に後れを取ったことは残念である。この事例は、大学と企業の連携の弱さに起因すると思われる。結局、日本は大学・研究機関と企業を繋ぐエンジニアリング会社は育っておらず、大学と企業の分断がある。

(4) 科学技術的・政策的課題

モデルの有効性が広く理解されるように、教育・啓蒙すると同時に、体系的・包括的・汎用的なモデリング環境を整備する施策を行うべきである。現状は、モデリングの基礎となるモデルの定義や広く共有するモデリング環境が未整備であり、モデリング研究や教育が特定の領域で寸断されてしまっている。これらの横串を通し、モデル学を確立・発展・普及させることが危急の課題である。モデリング技術をスムーズに企業移転する方策、企業ニーズを受け取る仕組みは非常に重要である。特に、モデルをどのように課題解決に役立てるか開発プロセスや計測技術と一体になって実施しなければならず、産官学一体となった取り組みが不可欠である。早急にモデリング環境を整備するためには、モデリングの基礎理論の確立と発展、モデリングツールの開発、物理法ライブラリの構築、モデル流通の確立、啓蒙・普及、教育、および、標準化を実施するモデル研究・教育の拠点創設が不可欠である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

特に欧州ではモデリング分野でも、数式処理を利用したモデリングに関するコミュニティの Equation Based Object Oriented Languages and Tools (EOOLT) や物理モデリング言語とモデルライブラリー環境を整備する Modelica Association など時代に合った技術領域にフォーカスした国際的プロジェクトが多い。EUREKA (欧州最先端技術共同体構想)のクラスタープログラムの ITEA2 (Information Technology for European

Advancement) は異分野連携と Co-simulation 環境構築のための MODELISAR^{13, 18)}に 26M €、主要な産業分野でのモデルライブラリを整備する EUROSISLIB¹⁹⁾に 15M€, オープンなモデル開発環境と実行環境構築を目的とする OPENPROD²⁰⁾に 11M €をつけている。EUROSISLIB の最終的狙いは Modelica をデファクトスタンダードとし、システムモデリングとシミュレーション領域で欧州のリーダーシップを強化するためとしている。米国科学技術財団(NSF)は IT と物理システムの融合を狙った Cyber-Physical System(CPS)に 30 億円の予算をつけている。IBM、HP を初め各大学とも CPS が動き始めている。UC Berkeley は現在のコンピュータ計算と物理世界のミスマッチを指摘し、その解決を狙っている¹⁷⁾。日本では、体系的、かつ、横断的モデリング技術に関するプロジェクトはほとんどない。また、モデリングツールも国内で開発されたものは普及しておらず、企業が使うほとんどのツールは欧米で開発されたものである。このことは研究・産業基盤の弱体化に繋がり兼ねない。そのなかでも、内閣府の最先端研究支援プログラム「複雑数値モデル学の基礎理論とその分野横断的科学技術応用」は数値モデルに関する大型プロジェクトで注目される。

(6) キーワード

物理モデル、実験モデル、物理・実験モデル統合、制御対象モデル、制御装置モデル、人間モデル、環境モデル、要求モデル、制約モデル、境界モデル、モデルベース開発、システム同定、データ同化

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 特定の分野の中でモデリングは行われているが、分野間の連携や体系的で汎用的なモデリング研究はほとんどない。 実験モデル領域は統計・機械学習・制御などの分野で独立にモデリング理論が発展しているが分野を超えた連携は十分ではない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 技術領域、産業領域でのモデリングが個別に実施されている。 機械学習、統計理論、システム同定など実験モデルに関しては多くの研究があるが、相互の連携は弱い。 欧州で活発に活動されている Modelica のような研究はほとんどない。 企業で利用されるモデリングツールのほとんどは海外のものに頼っている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 産業界ではモデリングに対する関心が高い。 モデルベース開発(MBD)が普及され始めたことでモデルへの関心が高まっている。 欧州で開発された実験モデル作成ツールが自動車業界で進展している。JCUG(Japan Calibration User Group)が自動車業界と国内の大学連携を促進している。 計測自動制御学会で物理・実験モデルの統合、モデル簡易化などを含めたプラントモデリング部会が2009年に設立された。 モデリングツールは、ほとんど、欧米のツールに頼っている。 HILSやReal-Time Simulation が普及しており、国内でも Simulator が発売されるようになってきている。しかし、国内に留まり、十分成功しているとは言えない。

米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • Cyber Physical System (CPS) などITと物理システムの連携に関するプロジェクトが進行している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • 組み込み制御システム開発ではMATLAB/Simulink/Stateflowが非常に強く、物理モデリングツールとしてModelicaとよく似た言語を採用したSimScapeも連携している。 • STATEMATE、Labviewなどのツールもある。モデリングツール分野で米国は強い。 • VHDL-AMSなどのIEEEで標準化された方式を展開しているが、Modelicaの勢いが増しているように思える。 • Modelicaや類似言語を採用したツールも開発されている。 • ADL (Architecture Definition Language) などモデル構成を定義する言語が展開されている。 • カナダでは数式処理をベースにしたMapleSimなどのモデリングツールが開発されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • モデルベース開発(MBD)の普及が見られる。 • 従来から各種の物理モデリングツールは開発販売されている。 • VHDL-AMSを採用したモデリングツールが開発・販売されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> • Modelicaなどモデリングに関する新しい技術は欧州から出ている。 • 数式処理モデリングのEOOLTなど小規模のConferenceが活発。 • ITEA2¹²⁾がモデリングに関する活動を大きな予算を付けて支援している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> • Modelica Association¹⁰⁾は物理モデル言語Modelicaを開発・強化しており、物理モデルライブラリーも整備している。 • MODELISAR¹⁸⁾はFMI (Functional Mockup Interface)と呼ぶシステム設計と組み込みソフトウェア開発を効率化するためのモデル流通のオープンな枠組みを構築。 • EUROSISLIB¹⁸⁾ではModelicaに基づくモデルライブラリーを整備している。 • OPENPROD^{11, 20)}はオープンソースのモデリング環境を整備している。 • 自動車エンジン適合ツールとして、機械学習をベースとした実験モデリングが展開されている。CUG (Calibration User Group)がツールメーカーと企業の連携を促進している。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> • モデリングツールを販売する会社は多い。HILSなどReal-Time Simulatorの展開でも成功している。 • ISO26262のように開発ツールと国際標準のリンクも見られ、欧州に有利な環境を構築するために戦略的に活動しているように見える。 • 産業界はWhite box modelingツールとしてModelicaに注目し始めた。 • 実験モデリングツールでは、機械学習をベースとする自動車業界用のエンジン適合ツールがオーストリア、ドイツ、イギリスの技術会社から開発販売され、自動車業界に導入が進められている。
中国	基礎研究	△		<ul style="list-style-type: none"> • 注目すべきものは見られない。
	応用研究・開発	△		<ul style="list-style-type: none"> • 華中科技大学からModelicaに関する論文が出ている。 • 欧米からの方法論やツールを使った応用研究が行われている。
	産業化	△		<ul style="list-style-type: none"> • 欧米の技術コンサルタント会社は次々と中国に拠点を作っている。
韓国	基礎研究	△		<ul style="list-style-type: none"> • 注目すべきものは見られない。
	応用研究・開発	△		<ul style="list-style-type: none"> • 注目すべきものは見られない。
	産業化	△		<ul style="list-style-type: none"> • 注目すべきものはみられない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 尾形 (2008). 計測と制御, 電子制御システム開発を加速する MBD, Vol.47. pp.175-179
- 2) JMAAB
<http://jmaab.mathworks.jp/>
- 3) Mathworks
<http://www.mathworks.co.jp/products/matlab/>
- 4) 鎌田 (2008). 『欧米におけるモデル駆動組込みシステム開発と標準化の現状, Vol.1 : モデル駆動システム工学 (MDSE) とその実践. OTI.
<http://www.otij.org/research/index.html>
- 5) 鎌田(2007) SysML とシステム工学支援環境の現状と動向.
<http://www.otij.org/research/index.html>
- 6) Ohata, A. Identification for Automotive Systems, Lecture Notes in Control and Information Science, a Desired Modeling Environment for Automotive Powertrain Controls. 2012, vol. 418, p. 13-34
- 7) iSiD のホームページ : <http://ecust.isid.co.jp/>
- 8) Enns D.F. Model reduction with balanced realizations: and error bound and a frequency weighted generalization. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*.1984, p. 127-132.
- 9) Glover K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems in their L_∞ -error bounds. *International Journal of Control* . 1984, vol.39, no 6, p.1115-1193.
- 10) Modelica association
<https://www.modelica.org/>
- 11) OPENPROD (Open Model-Drive Whole-Product Development and Simulation Environment)
<http://www.ida.liu.se/~pelab/OpenProd/>
- 12) ITEA2 (Information Technology for European Advancement)
<http://www.ieta2.org>
- 13) MODELISAR
<http://www.modelisar.com>
- 14) AUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture)
<http://www.autosar.org>
- 15) Ashenden, A., Peterson, G., and Teeqarden, D. The System Designer's Guide to VHDL-AMS, Analog, Mixed-Signal, and Mixed-Technology Modeling. Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- 16) 徳田. 自動車のエレクトロニクス化と標準化. 晃洋書房. 2008,p.105-190.
- 17) Lee, A. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate? . 2006.
http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf

- 18) ITEA2 (2008). Modelica – AUTOSAR Interoperability to support Vehicle Functional Mock-up
<http://www.itea2.org/project/index/view/?project=217>
- 19) ITEA2 (2011). Extending interoperability in model-based systems engineering, Reinforcing European leadership in systems modelling and simulation.
<http://www.itea2.org/project/index/view/?project=185>
- 20) ITEA2 (2009). Whole product approach speeds systems development, Integrated open modelling and simulation environment to cut time to market and improve quality
<http://www.itea2.org/project/index/view/?project=1132>

3.2 制御区分

3.2.1 学習制御／適応制御

(1) 研究開発領域名

学習制御／適応制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

時々刻々と変動する環境下における未知の動特性をもつシステムを制御するために、観測情報を基に制御器自身も変動・適応させるような制御方式とその設計法に関する研究開発。および、観測された現実の情報と目標との誤差を学習することで制御入力を適切に構成する手法に関する研究開発。なお、制御のみならず、未知の動特性を、上記のような制御方式によってモデル化または推定を行う研究開発も、本研究開発領域に含む。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 適応制御

時々刻々と変動する環境下における未知の動特性をもつシステムを制御するために、観測可能な情報を基に制御器自身も変動・適応させるような制御方式を適応制御という。1950年代に、目標とする応答に追従させるべく適応的に対象のモデルを同定し制御器を順応させるモデル規範型適応制御 (Model Reference Adaptive Control System; MRACS) および、制御器のパラメータをリアルタイムに調整するセルフチューニングレギュレータ (Self Tuning Regulator; STR) が発案されたことが契機である。その後、MRACS と STR は、1960年～70年代にかけて、現代制御理論や非線形・時変システムの安定論の成果を取り入れる形で、理想環境下における基礎理論としては習熟した領域として確立した^{1, 2)}。さらに、不確かさに対するロバスト性が1980年代に活発に研究され、適応制御に用いる信号の性質などの観点から、モデル化誤差と安定性の関連などの理論的成果もいくつか得られている³⁻⁵⁾。その一方で、不確かさを陽に考慮した制御器で対応するロバスト制御と、リアルタイムで対応する適応制御の関係については、現時点でも理論的解析や有機的な融合はされていない。

1990年代に入ると、理論的に大きな壁であった相対次数の問題を緩和する目的で提案された高階調整法やバックステッピング法⁵⁾など、理論的に注目すべき発展的研究がなされた^{1, 2, 6)}。さらに1990年代後半には、適応制御の一部の研究者は、状況に応じて制御器の構成を切り替えるハイブリッド制御の研究領域に移行し、いくつかの興味深い成果を残している⁷⁾。2000年代に入ると、目標とする評価関数が未知の場合に、その勾配をリアルタイムに求めることで制御を行う極値制御⁸⁾も提案された。これは現在でも活発に研究されている適応制御のトピックのひとつである⁹⁻¹¹⁾。特に最近では、太陽光や風力など時々刻々と変動する自然エネルギーを利用した電力最大化問題への極値制御の適用がいくつか研究されており、その有効性も示されている^{12, 13)}。

適応制御の研究対象も、より現実的な問題設定に近い非線形、時変、分布定数などに拡張されてきている¹⁴⁾。特に非線形系においては、等価的に線形系としてはめ込むことで安定領域への軌道の吸収を図る I&I 法など非線形制御理論で2000年代に新たに確立

した手法を取り入れた非線形適応制御の方式が提案されている¹⁴⁾。そのほか、マルチエージェント系の適応制御、分数次微分システムの適応制御、クォータニオン等を用いた画像ベースの適応制御など、これまでにない新しい領域でも研究されている。そして、このような理論の発展と並行する形で、計算機の高速化と高精度化に伴い、自動車、化学プロセス、ロボティクスなど、国内外を問わず産業界への適応制御の応用も積極的に行われている。最近では医用工学やシステムバイオロジーなどでも、適応制御の応用例が見られるようになってきた^{9, 15)}。

そして、データに基づいてモデリングと制御をリアルタイムに行う適応制御の究極形として、モデル化と制御をデータという土壌で一括して行い、データから直接的に制御器パラメータを求める方法 IFT が 1990 年代に提案され欧州を中心に研究されている。これらに続く方法として、VRFT、FRIT なども提案され欧州および国内で実応用も視野に入れて活発に研究されている¹⁶⁻²⁰⁾。最近では、これらの時変システムへの適用や²¹⁾、リアルタイム化に向けた発展研究²⁰⁾も進められている。

(3-2) 学習制御

未知の動特性をもつ対象に対し、そのとり得る入出力間のデータのみを反復的に用いることで、目標とするような挙動をもたらす制御入力を生成する手法である。1980 年代中期に日本の研究者により提唱された **Betterment Process** がその研究の始まりであり²²⁾、国内では、ロボット制御の分野を中心に精力的に研究され現在に至っている。国外でも、**Iterative Learning Control (ILC)** として学習制御が提唱され²³⁾、医療や福祉機器への応用も含め盛んに研究が行われている。また、英国の一派とポーランドの多次元システムの研究者が共同で学習制御を 2 次元システムとしてとらえ（時間軸と学習回数軸を独立変数）、現在も精力的に研究を進めている⁹⁾。

一方、学習とは人間に備わっている能力であるから、人間の学習メカニズムの解明も、学習制御の発展に寄与するはずであるし、逆に新たな制御スキームが、人間の学習理解につながることも考えられる。そこで、まず、人間の学習メカニズムのひとつのモデルとして国内で **Feedback Error Learning (FEL)** という学習スキームが提案された²⁴⁾。これは二自由度制御系のフィードフォワード部（先んじて、行動を見越すところに相当）が、行動を通して適切に学習するモデルである。逆に、制御の観点から、このスキームを理論的に深く考察した興味深い研究がされている²⁵⁾。

さらに、人間が生まれながらに自然にもっている手先の技量の学習メカニズムを解明する研究も国内で行われ、数理的に整った体系としてまとめあげられつつある²⁶⁾。また、近年「移動知」という新たな領域も提案され^{27, 28)}、そこでは、人間や生物が環境に適応し、適切な行動を学習していく過程が、さまざまな分野の研究者によりアプローチされており、異分野融合研究の非常に良いモデルであるともいえる。

このように、一口に学習制御といっても多岐にわたる研究がある。そして、制御のひとつの手法というだけでなく、人間の行動理解、神経科学、医学、運動生理学、2 次元システムなど多岐にわたる領域との融合により発展している分野でもあり、今後もそのような形態で広く展開していくものと予測できる。

(3-3) 適応モデリング・学習モデリング

適応的または学習的な機構によりモデル化する研究も行われている。適応制御、とく

に間接法では対象を適応的に同定することでそれに適した制御則を逐次更新しているので、適応的なモデリングや同定は前提の技術として行われている²⁹⁾。直接法とよばれる適応制御のクラスでも、制御則自身を目的に応じて同定しており、陰に対象のモデル化をしているともいえる。実際に先述の FEL の 2 自由度系におけるフィードフォワード部の学習は対象の逆モデルを同定することに対応し^{22, 23)}、ある意味で適応モデリング・学習モデリングの成功例といえる。また内部モデル制御のような制御対象のモデルを内包した制御器のパラメータをオフライン学習によりチューニングすることで制御とモデリングを同時に行う研究も行われており^{30, 31)}、制御とモデル化の不可分性³²⁾に関わる問題の一つの糸口として、今後の発展を待ちたい。一方の学習制御では間接的に対象の動特性を習得することで、最適な制御入力を生成するともいえる。そのことを活用した同定やモデリングの研究も行われ³³⁾、同定手法のひとつの有用なアプローチとして確立しつつある。

モデルを、数式の関係のみならず現象背後に潜む相関関係の解明まで拡大すると、近年、興味深いいくつかの研究が活発に研究されている。とくに、ビッグデータとも関連の深い大量のデータの機械学習や統計的学習によるモデル化、疎な情報を活用したスパースモデリング³⁴⁾、および、データ同化³⁵⁾と呼ばれる気象などの大規模データの学習によるパラメータ同定は「(データの)学習モデリング」の代表例であろう³⁶⁾。また、適切な制御則を選択・学習するという意味で、制御の上位に位置する判断機構の学習まで拡大すると、人間が適切な制御のもとで最適な行動を行うための脳のメカニズムの解明が精力的に研究されている³⁷⁾。どちらも、これまで述べてきた制御とは趣の異なる複合領域に存在するが、どれもが横断的な学問であるが故に、今後の動向と融合可能性について注目に値すると考えられる。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・より広い意味での「学習」の領域との融合が望まれる。学習制御という領域は、他の分野との融合で発展した経緯もあるが、今後は、さらに、機械学習やデータマイニングなどの領域の成果を積極的に取り入れる、また、研究者同士の活発な交流を深めることも重要な課題である。例えば、計算機パワーも援用しつつ大量のデータを相手にしたような学習制御の新しい展開が望まれる。(3-2)で示したスパースモデリング、データ同化、人間の判断機構の解明など、さらなる他の領域との融合が発展的方向のためのひとつの課題である。
- ・大規模複雑な問題に対応するような適応・学習制御の体系だった理論が構築途上であると考えられる。エネルギー、環境、経済など昨今の国内外における制御に対する需要に応え得る適応制御や学習制御の発展も重要である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・IFAC (国際自動制御連盟) は、3年に1度、適応制御や学習制御に関連する研究を中心としたワークショップ Adaptation and Learning on Control and Signal Processing (ALCOSP) を開催し、すでに10回を数えている⁹⁾。毎回世界各国からのこの分野の研究者による最新成果が発表されている。第12回は2016年度にオラン

ダで開催される予定である。なお、2004年には日本で開催されている。

- ・欧州、特にスペイン、イタリア、スイス、北欧などで、PID制御の適応的なオートチューニングに関する研究開発の一環として、制御系設計 CAD 上のツールボックスや専門のベンチマーク問題が開発され、知識の共有に向けた動きが見られる³⁷⁾。
- ・英国のサザンプトン大学の一派とポーランドの多次元システムの研究者グループが共同で、学習制御を2次元システムとしてとらえた(時間軸と学習回数軸を独立変数)研究を提唱し、現在も精力的に研究を進めている。多国間共同研究の成功したひとつのモデルケースともいえる¹⁰⁻¹²⁾。
- ・文部科学省科学研究費(科研費)特定領域研究「移動知」が平成17年度～22年度まで遂行され、非常に有意義かつ学術的価値の高い研究成果が得られている^{27, 28)}。本報告の冒頭で述べたような適応制御や学習制御よりも、もっと広い意味でのコミュニティ(ロボット、制御、情報、医学、計算機など)による研究体制であり、環境に適応する行動や学習メカニズムの解明という共通の目的に向けた異分野融合が実現したといえる。
- ・科研費新学術領域研究「予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用」が平成23年度より遂行されている³⁷⁾。これは神経科学、医学、心理学、計算機科学などの多岐にわたる分野の研究者が結集して、人間の判断や行動認知に関わるメカニズムを解明しようとするプロジェクトであり、人間の行動を適切に制御する役割が通常の制御とするならば、その上位に存在する学習モデリングの話題である。
- ・科研費新学術領域研究「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」が平成25年度より遂行されている³⁸⁾。これは物理現象や気象現象などの大規模なデータを扱う際に、スパースモデリングや機械学習などの統計的手法をベースとして、現象の背後に潜む関連性を抽出、すなわちモデリングする試みであり、広い意味での学習モデリングの話題である。
- ・ニューラルネット(NN)の高次元学習化が可能になってきている。これはクリフォード代数とよばれる複素数を高次元化した量が導入・開発されたことが契機であり、NNが制御の分野に登場した20年ほど前に比べて極めて高次元の学習も可能になっている³⁹⁾。今後、この新しいNNがより広い意味での学習制御のツールとして浸透していくのではないかと考えられる。
- ・近年、データに基づく制御器パラメータチューニング法が、イタリア、スペイン、スイスなどの欧州、および日本を中心に活発に研究され、その応用例も増えつつある。欧州では特にVRFTが、日本ではFRITといった手法が中心であるが、日本の研究者がIFACのシンポジウム(ALCOSP'10、PID'12、ALCOSP'13)でFRITのOSを組み成果を発表するなど精力的に活動し、同時に研究者層を増やしつつある。なお、統計数理研究所の公開講座のテーマ¹⁶⁾や学会誌特集記事のテーマ²⁰⁾などとしても挙げられている。また、日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会においては、E-FRITという手法が開発され、主に化学プロセスを中心に、顕著な成果をあげている¹⁷⁾。

（6）キーワード

適応、学習、適応制御、学習制御、適応システム、適応推定、適応同定、データ駆動型制御、知能、最適化

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 従来の適応制御の研究に加え、非線形系、分布定数系、マルチエージェント系、分数次微分システムなどへの展開といった新しい動きも見られる^{6, 15)}。 データ駆動型制御器チューニング法が研究者層を増やしてきている^{16, 20)}。 移動知^{27, 28)}など広い意味での学習モデリングに関する研究^{36, 37)}も見られる。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> メカトロニクス、化学プラントを対象として連綿と研究され成果をあげている^{9, 15)}。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 化学プロセスへのセルフチューニング制御の適用が活発¹⁾。 日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会により、制御器パラメータチューニング法 E-FRITが、プロセス産業界で浸透してきている¹⁷⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 極値探索制御が提案され、その応用も含め研究が活発にされている⁸⁻¹¹⁾。 分布定数系、むだ時間系など、従来よりも適用範囲を広げた適応制御の理論の発展的研究が盛んに行われている¹⁴⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる⁹⁻¹¹⁾。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる⁹⁻¹¹⁾。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 英国、ポーランドなどで学習制御を2次元システムの制御としてとらえた研究が理論の観点から精力的にされている⁹⁻¹¹⁾。 データ駆動型制御器チューニング手法の理論・応用双方で研究が活発^{9-11, 38)}。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 北欧、イタリア、スイス、スペインなどで、データ駆動型制御器チューニングの応用開発が活発に研究されている¹⁶⁻²⁰⁾。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> PIDのオートチューニングのパッケージ化と産業応用が活発に行われている³⁸⁾。 工業以外でも、福祉、医用機器への適応・学習制御の適用も行われている⁹⁻¹¹⁾。
中国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 非線形系への適応制御など、理論の発展的研究が活発に研究されている⁹⁻¹¹⁾。 米国や欧州などに留学または勤務している中国人研究者も活発に研究している⁹⁻¹¹⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ロボットなどを対象としたメカトロニクス系で活発に研究されている⁹⁻¹¹⁾。 論文や国際会議などでいくつかの成果が見られる⁹⁻¹¹⁾。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業界では特筆すべき成果は現状では見られない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 理論面で特筆すべき成果は現状で見られない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究で特筆すべき成果は現状で見られない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業界で特筆すべき成果は現状では見られない。

研究開発領域
制御区分

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註 3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 適応制御におけるニュートレンド. 計測と制御. 1996, vol. 35, no. 6.
- 2) 宮里義彦. 適応制御の回顧と展望. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 4, p. 361-367.
- 3) 金井喜美雄. ロバスト適応制御. オーム社, 1990.
- 4) Narendra, N. S.; Annaswamy, A. M. Stable Adaptive Systems. Prentice-Hall, 1989.
- 5) Kritic, M.; Kanellakopoulos, I.; Kokotovic, P. V. Nonlinear and Adaptive Control Design, John Wiley and Sons, 1995.
- 6) 適応学習制御理論の新潮流. 統計数理研究所公開講座資料, 2006.
- 7) Morse, A. S. Control Using Logic-Based Switching. Springer, 1997.
- 8) Ariyur K. B.; Kritic M. Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control. Wiley-Inter Science, 2003.
- 9) Preprints of 8th, 9th, 10th, 11th IFAC Workshop on Adaptation and Learning on Control and Signal Processing. 2004, 2007, 2010, 2013.
- 10) Preprints of 17th, 18th IFAC World Congress. 2008, 2011.
- 11) Proceedings of 43rd, 44th, 47th, 50th, 51st IEEE Conference on Decision and Control. 2004, 2005, 2008, 2011, 2012.
- 12) Ghaffari, A.; Kritic, M.; Seshagiri S. Power Optimization and Control in Wind Energy Conversion Systems Using Extremum Seeking. IEEE Transactions on Control System Technology. 2014, vol. 22, no. 5, p. 1684-1695.
- 13) Li, X.; Li, Y.; Seem, J. E. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System Using Adaptive Extremum Seeking Control. IEEE Transactions on Control System Technology. 2013, vol.21. no. 6. p. 2315-2322.
- 14) Kritic, M. Delay Compensation for Nonlinear, Adaptive, and PDE Systems. BirkHauser, 2009.
- 15) 計測自動制御学会制御部門第1回マルチシンポジウム. 2014.
- 16) モデルフリー制御器設計の新展開 FRIT 法の基礎理論と応用. 統計数理研究所公開講座資料, 2011.
- 17) 加納. 直接的 PID 調整法 E-FRIT サイト. <http://e-frit.chase-dream.com/>
- 18) Stefanovic, M.; Safonov, M. G. Safe Adaptive Control - Data-Driven Stability Analysis and Robustness Synthesis. Springer, 2011.
- 19) Bazanella, A. S.; Campestrini, L.; Eckhard, D. Data-Driven Controller Design - The H₂ Approach. Springer, 2012.
- 20) データ駆動型制御 - 新機軸と新地平. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11.

- 21) Proceedings of 52nd IEEE Conference on Decision and Control. 2013.
- 22) 川村, 有本. 動的システムの学習的制御法 (Betterment Process) の提案. 計測自動制御学会論文集. 1986, vol. 22, no. 1, p. 56-62.
- 23) Moore, K. L. Iterative Learning Control for Deterministic Systems. Springer-Verlag, 1993.
- 24) Kawato, M. Feedback error learning Neural network for supervised motor learning. Advanced Neural Computers. R Eckmiller, R. ed. Elsevier Science Publishers, 1990, p. 365-372.
- 25) Miyamura, A.; Kimura, H. Stability of feedback error learning scheme. Systems and Control Letters. 2002, vol. 45, p. 303-316.
- 26) Arimoto, S. Optimal linear quadratic regulator for control of nonlinear mechanical systems with redundant degrees-of-freedom. SICE JCMSI. 2011, vol. 4, no. 4, p. 289-294.
- 27) 浅間, 矢野, 石黒, 大須賀編. 移動知 1 適応行動生成のメカニズム. オーム社, 2010.
- 28) <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/~ota/mobiligence/index.html>
- 29) Goodwin, G. C.; Sin, K. S. Adaptive filtering. Prediction and Control. Prentice-Hall, 1984.
- 30) 金子, 藤井. 制御器の学習・調整によるプラントの閉ループ同定. システム/制御/情報. 2006, vol. 50, no. 3, p. 100-105.
- 31) Kaneko, Osamu; Miyachi, Makoto; Fujii, Takao. Simultaneous Updating of Model and Controller Based on Fictitious Reference Iterative Tuning. SICE Journal of Control Measurement and System Integration. 2011, vol.4, no. 1, p.63-70.
- 32) 池田雅夫. モデリングと制御器設計の不可分性. システム/制御/情報. 1993, vol. 37, no. 1, p. 7-14.
- 33) Campi, M. C.; Sugie, T.; Sakai, F. An iterative identification method for linear continuous time systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 2008, vol. 54, no. 7, p. 1661-1669.
- 34) 田中利幸. 圧縮センシングの数理. 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamental Review. 2010, vol. 4, no. 1, p. 39-47.
- 35) 樋口知之編著. データ同化入門—次世代のシミュレーション技術. 朝倉書店, 2011.
- 36) 科学研究費新学術領域研究「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」. http://sparse-modeling.jp/public_research/member.html
- 37) 科学研究費新学術領域研究「予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用」. <http://decisions.naist.jp/index.html>
- 38) IFAC Symposium on Advances in PID Control. 2012.
- 39) コンピュータショナルインテリジェンスの新展開—クリフォード代数など高次元表現中心として—. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 4.

3.2.2 ロバスト制御

(1) 研究開発領域名

ロバスト制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムの不確かさに対して性能が変化しないロバストな（頑強な）制御系の解析と設計の方法論の究明。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ロバスト制御とは、システムがもつ不確かさへの対処を目的とした制御系の解析と設計のための方法論のひとつである。その特徴は、不確かな（バラツキをもつ）制御対象を「モデルの集合」でとらえ、実際の制御対象がどの集合要素であったとしても適切に振る舞う「一様な性能」を実現するコントローラ的设计を考える点にある。1980年ごろから、その問題設定の数理的な理解が進み、国内外で急速に研究が進展した。

制御理論の歴史は、バラツキのある負荷変動の下で蒸気機関の回転数を安定化したいという要求からスタートしたものであり、不確かさへの対処の歴史である。したがって、ロバスト制御の成立以前の制御理論（1940年ごろから研究が開始されたシステムの伝達関数表現に基づく古典制御理論や、1960年ごろから研究が開始されたシステムの状態方程式表現に基づく現代制御理論）でも、不確かさに合理的に対処したいという問題意識は存在した。実際、古典制御理論では、ゲイン余裕、位相余裕など、パラメータの変動に対する頑強さを定量化するための指標が確立されている。ただし、考えられている変動パラメータはスカラであり、取り扱っているのは非常に単純化した状況のみである。一方、現代制御理論では、システムを駆動する信号として、確率信号としてのノイズを導入し、不確かな振る舞いの統計的な解析を可能とした。それは、統計的最適制御理論として完成し、いくつかの実用化事例につながった。しかし、制御対象の正確なモデルと（白色雑音など、統計的解析の容易な）統計的性質の素直なノイズの組み合わせは、現実の制御系設計の状況を広くカバーできるものではなく、実用化事例はそれ以上広がらなかった。実際、平均や分散など、ごく少数のパラメータで不確かな振る舞いを記述しようとするのは、記述力の限界がある。

ロバスト制御理論の始まりとみなせるのは、G. Zames による H^∞ 制御であろう¹⁾。これは、システムを駆動するノイズに対して、白色雑音などのような統計的性質を仮定するのではなく、パワーが有界なクラスを考え、最悪な振る舞いとなるものを抑制する制御系設計を考えるものである。つまり、ノイズの集合を考える点に特徴がある。この定式化はゲインが有界な不確かな要素をもつモデル集合を考えることと実は等価であり、そのことが明らかになってロバスト制御の理論が発展した。回路理論で知られていた補間問題を援用して、木村がロバスト安定化問題の完全な解を与えたのは、これら研究の黎明期のことである²⁾。その後、Doyle らによる H^∞ 制御のリッカチ方程式による解法が明らかになった³⁾。これにより、ゲインが有界な不確かな要素（多入出力系）がひとつの場合については、完全に解かれた。引き続き、不確かな要素がシステム内に構造をもって複数含まれている複雑な、しかし実用的にも非常に重要な場合なども含め、研究

が進められた^{4, 5)}。これらの研究は主に欧米の研究者が牽引したが、山本が提案したサンプル値制御系のリフティング表現⁶⁾がデジタルシステムに対するロバスト制御の研究の基礎を築くなど、日本発の研究も存在感を示した。

このような研究の中で、システムの集合の記述には(方程式より)不等式を用いる方が自然であることから、1990年ごろより、線形行列不等式(Linear Matrix Inequality; LMI)に基づくシステムの解析と設計が注目を集めた^{7, 8)}。これは半正定値計画問題となって、凸最適化の研究へもインパクトを与えた⁹⁾。この流れは、岩崎と原によるLMIを用いたシステムの周波数特性の精緻な解析法¹⁰⁾や、多項式最適化のサブクラスであるSum of Squares of polynomials (SoS)を援用した不確かなシステムのロバスト性解析の研究¹¹⁾、LMIやSoSを用いた研究をサポートするための計算ツールの開発¹²⁾へとつながっている。ただし、規模の大きな問題については、計算量がボトルネックとなることが明らかになるにつれ、ロバスト制御の研究は、課題解決の中で新たなブレークスルーを目指している。

なお、これらの研究を進めるにあたって、International Federation of Automatic Control (IFAC)ではTechnical Committee 2.5 on Robust Control (TC 2.5)¹³⁾、IEEEのControl Systems Society (CSS)ではTechnical Committee on Computer-Aided Control System Design (後にComputational Aspects of Control System Design、いずれもTC-CACSD)¹⁴⁾やSystems with Uncertainty (TC-SU)¹⁵⁾などの国際的なグループをつくり、研究交換がなされてきた。例えば、TC 2.5では1994年より3年ごとにロバスト制御に関するシンポジウムを開催しており、TC-CACSDも1980年代よりワークショップやシンポジウムをほぼ隔年で継続的に実施している。これらに対してTC-SUは2009年活動開始と比較的新しく、TC 2.5やTC-CACSDとも連携しながら、国際会議でのオーガナイズドセッションの企画などを中心に活動している。一方、日本では、計測自動制御学会を中心に、1980年代の終わりから現在に至るまで、ロバスト制御に関する研究会やセミナーが、テーマの切り口を最新の内容に更新しつつ、継続的に実施されている¹⁶⁾。

いずれにせよ、実際のシステムの振る舞いを数理的モデルによって記述しようとするとき、精緻なモデルを得ることは(知識の限界、時間的制限、経済的制約より)現実的ではない。非線形性や無限次元性などに起因するかもしれない不確かさを、平均や分散などの統計的指標ではなく、集合としてとらえることは、理論と実際のギャップを埋める重要なアプローチのひとつであり、いまやモデル集合を出発点とすることは、制御理論における問題設定の常識となった¹⁷⁾。また、このようなロバスト性の捉え方は、制御理論の枠を超え、経済学¹⁸⁾、複雑ネットワーク¹⁹⁾、生物学²⁰⁾、最適化²¹⁾など、他分野へも広がりつつある。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・多様な不確かさを記述可能なモデル集合の表現を用いると、問題の規模が大きくなるにつれて、モデル集合の解析やそれを用いた制御系設計のための計算複雑さが急速に増大する。計算複雑さを抑えるためには、凸集合などの解析の容易なモデル集合を用いればよいが、そうすると現実の状況とモデル集合により記述できる状況とのギャップ

プが大きくなり、設計できる制御系の性能が頭打ちになる。このような、モデル集合の表現力と、制御系の解析と設計に必要な計算量とには、トレードオフがある。この点が、ロバスト制御理論のさらなる発展のためのボトルネックとなっている。

- ・ロバスト制御の出発点は、対象システムをモデル集合としてとらえることであるから、実際のシステムをモデル集合として記述するための方法論の確立がポイントとなる。しかし、集合としてモデリングすることは、選択できるモデル構造の自由度が大きく、また決定すべきパラメータ数も多いことから、数多くの実験や試行錯誤を要求し、非常に時間がかかる。この点も、ロバスト制御系設計を実践する上でのボトルネックとなっている。
- ・科研費の分野などを見ればわかるように、わが国では、制御に関する研究予算が、電気、機械など伝統的研究分野に細分化して紐づけされている。そのため、ロバスト制御などのように、特定の対象に紐づけされない分野横断的な研究を力強く支援する枠組みがないため、せっかく生まれた萌芽的な理論的研究成果に対して、(ポストドクも含め)研究者を結集して十分な規模を確保し理論研究を強力に進めるといったような枠組みがない。そのため、研究成果が散発的なものになっており、非常にもったいない。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ロバスト制御系の解析と設計を確定的に行い検証するという枠組みで考える限り、計算複雑さの限界は回避することができない。そこで、ランダムイズドアルゴリズムにより計算複雑さを劇的に低減させつつ、ロバスト制御系の解析と設計を確率的な理論保証の下で行い検証するという枠組みが提案され、ここ 10 年で急速に研究が進展した^{22, 23)}。
- ・制御対象の実際の応答データを実験により取得し、それより (制御対象のモデルを求めるのではなく) 制御系が望ましい振る舞いをするようなコントローラを直接設計する「データ駆動型制御」の研究が、最近集中的に行われている^{24, 25)}。ロバスト制御的な観点は現時点のデータ駆動型制御にはまだとりいれられていないが、もしそれが可能となれば、ロバスト制御におけるモデリングというボトルネックを解消するための新たな方法論となり得る可能性がある。
- ・米国の NSF では、2008 年より、**Cyber Physical System** というテーマにより、制御理論研究を支援している²⁶⁾。これは、実世界にある物理的制御対象をコンピュータ制御するという現代の制御工学のそもそもの枠組みを、ネットワーク上での実時間制御や組み込みシステムという視点から切り取ったテーマであり、分野横断的な制御理論研究の支援の枠組みとして、注目すべきものである。
- ・欧州では、2010 年より 4 年間、**Highly-Complex and Networked Control Systems (HYCON2)** という国際プロジェクトのもとで、共同研究の実施とともに、多国間で共同して人材育成を行うという先進的な取り組みを行っている²⁷⁾。

（6）キーワード

ロバスト制御、 H^∞ 制御、モデル化、ロバスト性、モデル集合、不確かなシステム、不確かさ

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ロバスト制御の黎明期に世界的な結果あり²⁾。 ・その後も継続して研究成果を蓄積^{4, 6, 8, 10)}。 ・ランダムイズドアルゴリズム利用への取り組み²³⁾、データ駆動型制御²⁵⁾など、萌芽的研究成果などあり。 ・JST CREST EMS領域では理論研究への支援あり。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・小規模な産学連携や実験室レベルでの実証実験あり。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄鋼プロセスなど、製造プラントでの実施例あり。 ・H^∞制御など標準的なロバスト制御手法は自動車のエンジン制御で実用化。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ロバスト制御の黎明期には研究を牽引^{1, 3)}。 ・その後も計測して研究成果を蓄積⁵⁾。 ・線形行列不等式や凸最適化ではブレークスルーとなる結果も^{7, 9)}。 ・NSFの後押しで、テーマを広げつつ研究が継続的に支援されている²⁶⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・実験室レベルでの実証実験は多数あり。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・半導体製造プロセスの制御など、製造プラントでの実施例あり。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・確率的ロバスト性はイタリアで顕著な研究成果あり²²⁾。 ・行列不等式などの取り扱いについても、理論的な成果¹¹⁾や世界的に知られる計算ツール^{12, 28)}など、顕著な研究成果あり。 ・データ駆動型制御の萌芽的成果²⁴⁾。 ・国際的な枠組みにより、理論研究を継続的に支援²⁷⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・産学連携による萌芽的な研究はあり。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・世界的に知られるような産業化の動きはなし。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・論文数は増加。 ・Chinese Academy of Sciences の Academy of Mathematics and Systems Scienceを中心に、活発に理論研究を実施。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・Chinese Academy of Sciences の Institute of Automation を中心に、積極的な研究開発を実施。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・産業化の動きなし。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・論文数はそれなり。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本企業との研究交流により技術情報を収集中。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・産業化の動きなし。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

研究開発領域
制御区分

(8) 引用資料

- 1) Zames, G. Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverses. IEEE Trans. Automat. Contr. 1981, vol. AC-26, p.301-320.
- 2) Kimura, H. Robust Stabilizability for a Class of Transfer Functions. IEEE Trans. Automat. Contr. 1984, vol. AC-29, no. 9, p. 788-793.
- 3) Doyle, J.C.; Glover, K.; Khargonekar, P. P.; Francis, B. A. State Space Solutions to Standard H₂ and H_∞ Control Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1989, vol. 34, p. 831-847.
- 4) 木村英紀, 藤井隆雄, 森武宏. ロバスト制御. コロナ社, 1994.
- 5) Zhou, K.; Doyle, J.C.; Glover, K. Robust and Optimal Control. Prentice Hall, 1996.
- 6) Yamamoto, Y. A Function Space Approach to Sampled Data Control Systems and Tracking Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1994, vol. 39, no. 4, p. 703-713.
- 7) Boyd, S.; El Ghaoui, L.; Feron, E.; Balakrishnan, V. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. SIAM, 1994.
- 8) 岩崎徹也. LMI と制御. 昭晃堂, 1997.
- 9) Boyd, S.; Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004.
- 10) Iwasaki, T.; Hara, S. Generalized KYP Lemma : Unified Frequency Domain Inequalities With Design Applications. IEEE Trans. Automat. Contr. 2005, vol. 50, no. 1, p. 41- 59.
- 11) Chesi, G.; Garulli, A.; Tesi, A.; Vicino, A. Homogeneous Polynomial Forms for Robustness Analysis of Uncertain Systems. Springer, 2009.
- 12) Löfberg, J. YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. Proc. IEEE International Symposium on CACSD. 2004.
- 13) International Federation of Automatic Control "Technical Committee on Robust Control". <http://tc.ifac-control.org/2/5>
- 14) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Computational Aspects of Control System Design".
<http://staff.polito.it/fabrizio.dabbene/TC-CACSD/index.html>
- 15) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Systems with Uncertainty".
<http://www.eee.hku.hk/~chesi/TC-SU>
- 16) 計測自動制御学会 50 年史. 計測と制御. 2011, vol. 50, no. 8/9.
- 17) Petersen, I. R.; Tempo, R. Robust Control of Uncertain Systems: Classical Results and Recent Developments. Automatica. 2014, vol. 50, p. 1315-1335.
- 18) Hansen, L. P.; Sargent, T. J. Robustness. Princeton University Press, 2008.
- 19) Cohen R.; Havlin, S. Complex networks: structure, robustness and function. Cambridge University Press, 2010.
- 20) Kitano, H. Biological robustness. Nature Reviews Genetics. 2004, vol. 5, p. 826-837.
- 21) Ben-Tal, A.; El Ghaoui, L.; Nemirovski, A. Robust optimization. Princeton University Press, 2009.

- 22) Tempo, R.; Calafiore, G.; Dabbene, F. Randomized Algorithms for Analysis and Control of Uncertain Systems with Applications. 2nd Ed., Springer, 2013.
- 23) 藤崎泰正, 大石泰章. ランダム化アルゴリズムによる制御システムの解析と設計. システム/制御/情報. 2009, vol. 53, no. 5, p. 189-196.
- 24) Campi, M. C.; Lecchini, A.; Savaresi, S. M. Virtual Reference Feedback Tuning: a Direct Method for the Design of Feedback Controllers. Automatica, 2002, vol. 38, p. 1337-1346.
- 25) 金子修. データを直接用いた制御器パラメータチューニング. 計測と制御. 2008, vol. 47, p. 903-908.
- 26) US National Science Foundation. “Cyber Physical Systems”.
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286
- 27) CNRS. “Highly-Complex and Networked Control Systems (FP7 NoE HYCON2)”.
<http://www.hycon2.eu/?page=0>
- 28) LAAS-CNRS. “Randomized and Robust Multi-Objective Control toolbox”.
<http://projects.laas.fr/OLOCEP/romuloc/>

3.2.3 最適制御／予測制御

(1) 研究開発領域名

最適制御／予測制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

さまざまなシステムを最も効率良く操作するための数理的手法およびその他分野応用に関する研究。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 最適制御

機械などのシステムに制御入力（操作量）を加えたときの応答は、システムの数学モデルを用いて予測できる。一般的にあって、制御したい出力（制御量）の目標値を少ないエネルギーで素早く達成するのがよい制御である。出力の誤差や目標値へ収束するまでの時間、消費エネルギーなどによって評価関数と呼ばれる性能指標を定義し、それを最小にする制御入力をモデルに基づいて求めるのが最適制御問題である。定義する評価関数に応じて、最短時間問題、最小エネルギー問題などさまざまな最適制御問題が設定できる。さらに、制御入力や出力が許容範囲を逸脱しないよう拘束条件を課すこともできる。

最適制御は、システムの状態の関数として求められる場合と、時刻の関数として求められる場合とがある。前者の場合は、時々刻々観測される状態に応じて制御入力が決まるのでフィードバック制御となり、後者の場合は、システムの実際の状態によらず各時刻の制御入力があらかじめ決まっているのでフィードフォワード制御となる。現実のシステムではモデルに誤差があったり外乱が加わったりするので、それらの影響を抑制するためにフィードバック制御が用いられることが多い。しかし、最適制御をフィードバック制御として求める問題は、ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式と呼ばれる非線形偏微分方程式を解くことに帰着し、特別な場合以外は解けないため、最適制御をフィードバック制御の形で求めるのは困難である。たとえ数値計算でハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式を解くとしても、すべての状態に対して最適制御を数値的に求めると計算量とデータ量が膨大になり、計算機の性能が飛躍的に進歩した今日においても現実的ではない。一方、フィードフォワード制御として最適制御を求める問題は、オイラー・ラグランジュ方程式と呼ばれる非線形常微分方程式の2点境界値問題に帰着する。2点境界値問題では初期条件と終端条件がそれぞれ一部ずつ与えられていて、常微分方程式の一般解が未知な場合は解くのが難しい。2点境界値問題を数値計算によって解くには、常微分方程式を繰り返し解き直して解を修正していくが必要があり、やはり計算に時間がかかる。また、求められるのはあくまでフィードフォワード制御なので、初期条件の変化、モデルの誤差や外乱に対処できない。最適制御の応用範囲は極めて広いものの、最適制御をいかに効率よく求めるかは困難な技術的課題である。

最適制御問題の数学的基礎である変分法の起源は17世紀にまで遡り、幾何学や解析力学で重要な役割を果たしてきた。変分法を拡張した最適制御の理論的整備は米国とソ連を中心に1950年代後半以降活発に研究された¹⁾。代表的な理論として、ベルマンに

よる動的計画法、ポントリヤギンによる最大原理がある²⁾。動的計画法によってハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式が導かれ、最大原理によってオイラー・ラグランジュ方程式を一般化した2点境界値問題が導かれる。また、線形システムに対して2次形式の評価関数を最小化する最適制御 (Linear Quadratic 制御 ; LQ 制御³⁾) は解析的に求めることができ、フィードバック制御として実現しやすい形だったため、その後の制御工学の発展に大きな影響を与えた。現在、LQ 制御は、多くの工学系学部における制御工学の講義で教えられるほど普及している。一方、LQ 制御以外の一般的な最適制御問題は解析的に解くことができないため、数値解法も1980年代頃まで活発に研究され、さまざまな手法が提案された。非線形計画問題の数値解法である勾配法やニュートン法を関数空間に拡張して、フィードフォワード制御の修正を反復する反復法が基本的な手法である^{2, 4)}。また、フィードバック制御が級数で表されると仮定して、その係数を逐次求めて近似精度を上げていく方法も複数提案され、現在でもある程度数の論文が発表されている⁵⁾。最適制御の存在や性質など数学的理論の研究は欧米が中心である⁶⁾。数値解法については、米国と日本の研究者が航空宇宙分野への応用を含めて継続的に取り組んできた⁷⁾。近年、最適制御をフィードバック制御の形で求める方法として、力学系理論に基づく方法⁵⁾、量子力学的手法⁸⁾、代数的手法⁹⁻¹¹⁾など、新しいアプローチが提案されつつある。その他、最適制御問題の拡張として、制御を妨害し評価関数を大きくしようとする外乱もしくはプレーヤーを想定し、制御にとって最悪な外乱が加わったときの評価関数を最小化する微分ゲーム問題²⁾も研究されてきた。微分ゲーム問題の応用としては航空機同士の追跡回避問題¹²⁾などがある。さらに、多数のエージェントとユーティリティ (行政) とからなる社会システムのデザインを最適制御や微分ゲームの枠組みで扱う試みも始まっている¹³⁾。

(3-2) 予測制御

一般に、拘束条件や非線形性があるシステムに対する最適制御をフィードバック制御として求めるのは難しい。一方、計算量が問題にならないければ、反復法で数値的にフィードフォワード制御を計算することが原理的には可能である。しかし、実際のシステムにおける外乱やモデル化誤差の影響を抑制して高精度の制御を行うには、フィードバック制御が望ましい。そこで、各時刻で有限時間未来までの評価関数を最小化する最適制御問題を解き、フィードフォワード制御として求めた最適制御における最初の値のみを実際の制御入力として用いることで、結果的にフィードバック制御を実現するのが予測制御である。各時刻で求める最適制御は、時刻の関数として計算するが、出発点である現在時刻のシステムの状態にも依存する。したがって、時々刻々フィードフォワード制御を求めなおすことで、結果的にフィードバック制御が実現される。

予測制御は、システムのモデルを用いて未来の応答を予測・最適化するので、モデル予測制御 (Model Predictive Control ; MPC) とも呼ばれる。また、評価関数の時間範囲 (評価区間 ; horizon) が未来に向かって後退していくので、receding horizon 制御 (Receding Horizon Control ; RHC) と呼ばれることもある。予測制御では、予見制御のように未来の情報を使って最適化する場合もあり、また、未来の目標値が未知でも何らかの仮定をおいて最適化する場合もある。システムの数学モデルや評価関数の与え方によって、PFC (Predictive Functional Control) 、DMC (Dynamic Matrix Control) 、

GPC (Generalized Predictive Control) など予測制御にはさまざまな問題設定があり、それらは 1970 年代前後にフランスや米国で提案された¹⁴⁾。当初は線形システムを主な対象とした研究が発展してプロセス産業を中心に応用が進み、欧米企業によるソフトウェアパッケージも市販されている¹⁴⁾。1990 年代頃から拘束条件、切り替えや非線形性を持つシステムに対する有効な制御手法として広く注目され始め、計算機の進歩による最適化計算の適用範囲拡大もあいまって、現在ではさまざまな問題設定に対して理論研究と応用の両方とも活発である。

予測制御の理論面では、有限時間の最適化からいかにフィードバック制御の安定性を保証するか、という問題が欧米を中心に 1990 年代から 2000 年代頃にかけて活発に研究された¹⁵⁾。また、フィードバック制御を実現するには最適制御問題を各時刻で高速に解く必要があるため、予測制御に適した数値解法の研究も 2000 年代以降盛んである。数値解法としては、最適制御をオフラインで計算してフィードバック制御を数値的なマップとして保存しておく方法¹⁶⁾と、実時間で最適化計算を行う方法^{17, 18)}とが研究されている。さらに、最適化計算やコード生成のツールも世界各国の大学によって開発・公開されている¹⁹⁻²⁵⁾。また、スマートグリッドなどへの応用を想定した問題設定として、分散した制御器間の情報伝達に制約が課された分散予測制御の研究も盛んになりつつある²⁶⁾。さらに、移動する評価区間を制御ではなく最適推定に用いる moving horizon 推定 (Moving Horizon Estimation ; MHE) の研究も、予測制御ほど活発ではないが行われている²⁷⁾。

応用はあらゆる分野に広がっており、例えば空調・環境の制御²⁸⁾、スマートグリッド^{26, 29)}や自動車の運動制御とエネルギー管理³⁰⁾なども研究されている。日本では化学プロセスを中心に産業界での応用事例が多く³¹⁾、さらに、先端的な予測制御の適用可能性を検討する産学の研究も活発になりつつある³²⁾。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・非線形システムの最適制御問題におけるフィードバック制御およびフィードフォワード制御の計算方法については、長年の研究にもかかわらずいまだに決定的な手法が知られていない。
- ・非線形システムに対する予測制御の安定性を判別する実際的な方法はいまだに確立されていない。
- ・大規模かつ複雑なシステムの予測制御を実現するために、予測制御における最適制御問題の数値解法にはさらなる高速化が必要である。必要な計算時間の正確な見積りも重要な課題である。
- ・最適制御における評価関数の体系的な設計方法および調整方法が確立されておらず、実際の応用において多大な試行錯誤が必要となってしまう。
- ・最適制御に関連する分野の数学者と制御理論研究者の交流が日本では欧米ほど活発でない。
- ・予測制御は応用可能性が急速に高まっており、幅広い分野の問題解決に貢献し得るが、制御工学分野外で十分に認識されているとはいえない。その結果、応用や数値解法に関して他分野との協力が不十分であり、研究者の交流促進が重要と考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・最適制御をフィードバック制御の形で求める方法として、力学系理論に基づく方法⁵⁾、量子力学的手法⁸⁾、代数的手法⁹⁻¹¹⁾など、新しいアプローチが提案されつつある。
- ・ETHのBuilding Control Groupにおいて、モデル予測制御をベースにした空調・環境のプロジェクトが行われている²⁸⁾。スマートグリッドにおいてもモデル予測制御が有力な手法として活発に応用されている^{26, 29)}。
- ・最適制御・予測制御におけるモデリング・数値計算・自動コード生成のためのソフトウェアが世界各国の大学によって開発・公開されている。例えば、モデリングでは、HYSDEL³³⁾、最適化計算ではMPT¹⁹⁾、qpOASES²⁰⁾、自動コード生成では、AutoGenU^{21, 22)}、ACADO²³⁾、CVXGEN²⁴⁾、FiOrdOs²⁵⁾がある。

（６）キーワード

最適制御、予測制御、モデル予測制御、最適化、変分法、動的計画法、実時間計算

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・航空宇宙分野を中心に数値解法の研究が継続されてきた⁷⁾。 ・線形システムに対する予見制御の理論は早くから独自に研究されていた^{12, 13)}。また、非線形システムに対する予測制御の数値解法も他国に比べて早い時期に提案された¹⁷⁾。 ・最適制御の理論でも近年独自の取り組みが見られる^{5, 8-11)}。 ・分散型の予測制御に関する研究が近年盛んになりつつある²⁶⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・予測制御の自動コード生成ソフトウェアAutoGenU^{21, 22)}が独自に開発されている。 ・先端的な予測制御の適用可能性を検討する産学の研究が活発になりつつある³²⁾。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・予測制御は化学プロセスを中心に産業界での応用事例が多い³¹⁾。 ・ただし、産業用ソフトウェアは独自開発が廃れ、欧米の市販ソフトウェア導入が主流となっている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・最適制御の理論と数値解法いずれも草創期から世界をリードしてきた¹⁾。予測制御に関する研究も盛んである。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・航空宇宙分野など最適制御の応用は盛んである。 ・自動コード生成ソフトウェアCVXGEN²⁴⁾が大学で開発・公開されている。 ・分散型の予測制御に関する研究が他国に先んじて活発になった。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・産業用予測制御ソフトウェア開発され化学プロセス分野で普及している¹⁴⁾。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・最適制御の理論研究はフランスが強い。予測制御に関してはイギリス、スイス、ドイツ、イタリア、スペインに活発な研究者がいる。 ・1998年以来数年おきに非線形モデル予測制御に関する会議NMPCが開催されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・EU内の産学共同研究プロジェクト、風力発電や空調などエネルギーシステムに対する予測制御の応用が近年盛んになっている^{28, 29)}。 ・大学による最適制御・予測制御用ソフトウェアの開発と公開が活発である。モデリングでは、HYSDEL³³⁾、最適化計算ではMPT¹⁹⁾、qpOASES²⁰⁾、自動コード生成では、ACADO²³⁾、FiOrdOs²⁵⁾がある。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・幅広いシステムを対象とする産業用予測制御ソフトウェアが開発されている¹⁴⁾。

研究開発領域
制御区分

中国	基礎研究	○	↗	・最適制御および予測制御に関する学術論文が増加傾向にある。
	応用研究・開発	△	↗	・応用研究への取り組みは活発であり、予測制御を中心に今後は応用事例が増えていくと予想される。
	産業化	△	→	・特に顕著な活動・成果は見えていない。
韓国	基礎研究	◎	→	・線形システムの予測制御に関する研究では伝統がある ³⁴⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	・特に顕著な活動は見えていないが、予測制御の応用研究が行われている。
	産業化	△	→	・特に顕著な活動は見えていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Bryson Jr., E. Optimal Control – 1950 to 1985. IEEE Control Systems Magazine. 1996, vol. 16, no. 3, p. 26-33.
- 2) Bryson Jr., E.; Ho., Y.-C. Applied Optimal Control. Hemisphere. 1975.
- 3) Anderson, D. O.; Moore, J. B. Optimal Control – Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall. 1989.
- 4) 大塚敏之. 非線形最適制御入門 (システム制御工学シリーズ 18). コロナ社, 2011, 232p.
- 5) 坂本登. 安定多様体の近似によるハミルトン・ヤコビ方程式の近似解法. シミュレーション. 2008, vol. 27, no. 4, p. 221-225.
- 6) Bardi, M.; Capuzzo Dolcetta, I. Optimal Control and Viscosity Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations. Birkhäuser, 1997, 570p.
- 7) 加藤寛一郎. 工学的最適制御. 東京大学出版会, 1988, 256p.
- 8) 伊丹哲郎. 最適制御の量子力学. 計測と制御. 2003, vol. 42, no. 10, p. 796-803.
- 9) Ohtsuka, T. Solutions to the Hamilton-Jacobi Equation with Algebraic Gradients. IEEE Trans. Automat. Contr. 2011, vol. 56, no. 8, p. 1874-1885.
- 10) Iwane, H.; Kira, A.; Anai, H. Construction of Explicit Optimal Value Functions by a Symbolic-Numeric Cylindrical Algebraic Decomposition. Computer Algebra in Scientific Computing. Gerdt, V. P. et al., eds. Springer, 2011, p. 239-250.
- 11) Ohtsuka, T. A Recursive Elimination Method for Finite-Horizon Optimal Control Problems of Discrete-Time Rational Systems. IEEE Trans. Automat. Contr. 2014, vol. 59, no. 11, p. 3081-3086.
- 12) 望田和彦, 加藤寛一郎. 微分ゲームに関する一覧書. 日本航空宇宙学会誌. 1989, vol. 37, no. 428, p. 441-450.
- 13) 平田研二, 内田健康. 分散化と統合化の制御理論. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 55-61.

- 14) Maciejowski, J. M. モデル予測制御—制約のもとでの最適制御. 足立修一, 管野政明訳, 東京電機大学出版局, 2005, 397p.
- 15) Mayne, D. Q.; Rawlings, J. B.; Rao, C. V.; Sokaert, P. O. M. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality. *Automatica*. 2000, vol. 36, no. 6, p. 789-814.
- 16) 藤田政之, 大嶋正裕. 講座・モデル予測制御 VI—ハイブリッドモデル予測制御. システム／制御／情報. 2003, vol. 47, no. 3, p. 146-152.
- 17) 大塚敏之. 非線形 Receding Horizon 制御の計算方法について. 計測と制御. 2002, vol. 41, no. 5, p. 366-371.
- 18) Diehl, M.; Ferreau, H. J.; Haverbeke, N. Efficient Numerical Methods for Nonlinear MPC and Moving Horizon Estimation. *Nonlinear Model Predictive Control*. Magni, L.; et al., eds. Springer, 2009, p. 447-460.
- 19) MPT. <http://control.ee.ethz.ch/~mpt>
- 20) qpOASES. <https://projects.coin-or.org/qpOASES>
- 21) AutoGenU. http://www.symbal.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index_j.htm
- 22) AutoGenU Maple 版. <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=153555>
- 23) ACADO Toolkit. <http://acado.github.io/>
- 24) CVXGEN. <http://cvxgen.com/docs/index.html>
- 25) FiOrdOs. <http://fiordos.ethz.ch/dokuwiki/doku.php>
- 26) 滑川徹. スマートグリッドのための分散予測制御. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 62-68.
- 27) Alessandri, A.; Baglietto, M.; Battistelli, G.; Zavala, V. Advances in Moving Horizon Estimation for Nonlinear Systems. *Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control*. 2010, p. 5681-5688.
- 28) <http://control.ee.ethz.ch/~building/research.php>
- 29) Parisio, A.; Rikos, E.; Glielmo, L. A Model Predictive Control Approach to Microgrid Operation Optimization. *IEEE Trans. Contr. Systems Technology*. 2014, vol. 22, no. 5, p. 1813-1827.
- 30) Di Cairano, S. An Industry Perspective on MPC in Large Volumes Applications: Potential Benefits and Open Challenges. *Preprints of 4th IFAC Nonlinear model Predictive Control Conference, 2012*, p. 52-59
- 31) 加納学編. 高度プロセス制御に関するアンケート調査結果報告書. 日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会ワークショップ No. 27, 2009.
http://ws27.pse143.org/files/WS27_APCsurvey2009_public.pdf
- 32) 大塚敏之編. 実時間最適化による制御の実応用. コロナ社, 2015.
- 33) HYSDEL. <http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel>
- 34) Kwon, W. H.; Han, S. *Receding Horizon Control : Model Predictive Control for State Models*. Springer, 2005, 400p.

3.2.4 分散協調制御

(1) 研究開発領域名

分散協調制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

分散協調制御とは、複雑に影響を及ぼしあう多数のシステムにより構成される大規模システムにおいて、個々のサブシステムが局所的な情報処理、情報交換の下で分散協調的に行動することで全体最適な状態を達成するためのシステム・管理・制御・最適化理論および技術に関する研究開発領域を指す。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

分散協調制御は、大規模システムを構成する個々の要素が局所的な情報処理、情報交換の下で分散的に意思決定・制御・最適化を行うことで、全体最適化を達成することを目的とする。分散協調制御が目指す「大規模システムを分散的に制御する」という概念のルーツは古く、「大規模システムの分散制御」という名称で 1970 年代に活発な研究がなされた¹⁾。この時代は日本においてはまさに高度経済成長期であり、欧米社会の経済もまだ右肩上がりの時代で、世界的に社会インフラの複雑化に伴う、交通渋滞や、環境汚染、人口増加などの社会問題が研究背景として存在していた。皮肉にもこのことが分散制御の分野における研究の動機となった。1980 年以降はロバスト制御理論の台頭で、世界中の制御研究者の興味がロバスト制御へと流れ、その余波を受けて、分散制御に関する研究は一時下降線を辿る。しかし、ロバスト制御理論が完成期を迎えた 2000 年を過ぎた頃から、アメリカを中心に、動的システム理論とグラフ理論が融合した新しい分散協調制御理論に関する研究が現れ、現在の世界の制御理論界における最重要課題のひとつとなっている。

新たな分散協調制御は必ずしも過去の分散制御の焼き直しではない。分散制御は全体を統括する主体の存在を認めた上でトップダウン的に全体を個々に分割していく手法が主であるのに対し、分散協調制御はこれに加え、スマート化された個体からボトムアップ的に全体を構成するという概念を包含する。また、分散制御ではサブシステム間のつながりは物理的な結合によって生じる受動的なものであると考えるのに対し、分散協調制御は意思決定者同士が情報のやり取りを通じて能動的につながる状況をも想定する。以上の違いは科学技術の進歩に依るところが大きい。実際、このような発想はセンサネットワークやロボットネットワークなど、近年の技術革新による安価で高性能なセンサ・ロボット・通信デバイスの登場によって初めて実現可能となった技術が背景にあり、旧来の電力システムや大規模プラントの制御が課題であった 1970 年代当時とは動機が異なる。同様の概念はわが国において 1980 年代後半に提唱された自律分散システム論²⁾において研究されたものの、対象が抽象的かつ広範であったためか、理論体系が確立されたとは言い難い。

最近の分散協調制御の研究は 2000 年代初頭に米国を中心に始まり、2004 年に IEEE Transactions on Automatic Control において初の特集が組まれた³⁾。2007 年には Proceedings of the IEEE をはじめとした当該分野のほとんどの雑誌で特集が組まれる

など、初期段階の研究はピークを迎えた。その後、欧州・アジア地域にも広がりを見せ、全体として爆発的な論文数の伸びを示している。2014年にはIEEE Control Systems Societyを中心に5つのsocietyが共同し、分散協調制御の研究に特化した論文集を創刊している⁴⁾。

欧州ではEUを中心に、電力網の国際連携、また水資源の国際連携など、社会インフラの分散制御に関して、その地理的な要因を理由に、1970年代から継続的に研究が進んでいる。その歴史と多様性、研究成果の蓄積はアメリカや日本を凌駕する。しかしながらやはり現時点で時流を掴んでいるのはアメリカであろう。

日本でも、計測自動制御学会制御部門において2007年から2年間フォーメーション制御調査研究会が活動し、学会雑誌「計測と制御」に特集「協調とフォーメーションの制御理論」⁵⁾が組まれた。これを契機に国内会議における関連研究の占める割合は現在まで右肩上がりの状態である。なお、来年には現時点までの最新情報を含めた書籍が出版される⁶⁾。

アジアでは米国や欧州のような分散協調制御に関するニーズがこれまで高くなったため、近年まであまり大きな動きはなかった。ただし、韓国では離島における分散電源の必要性から、ソウル大学が中心となり、済州島で分散電源やスマートグリッドへの応用に関する大規模な実証実験が行われている。中国では分散協調制御に関する研究は盛んであるが、やはり従来のロバスト制御理論、現代制御理論に関する研究が主流のように見受けられる。また、応用・産業面での成果も今のところ陽に見えてきていない。

応用研究・実用化の側面からは、上記のセンサネットワーク、ロボットネットワークに加え、それらを融合したモバイルセンサネットワークが、分散協調制御の登場以来重要な地位を占めている。特に、プリンストン大学のグループが中心となり、海洋調査におけるモバイルセンサネットワークの実地研究が進められており、分散協調制御はその運用のキーテクノロジーとなっている。海洋調査自体もそうであるが、その他にも防災・減災やインフラの老朽化が重要課題として認識される我が国⁷⁾においては、環境モニタリングやインフラ点検を司るこれらの技術および背景にある分散協調制御の発展は今後ますます必要性が増すものと考えられる。

他方、環境・エネルギー問題の顕在化と電力自由化に伴い、従来は純粋に集中型の工学システムであった電力システムに、必ずしも集中管理できない需要家が発電主体あるいは意思決定者として参入することで、分散協調制御技術の導入が必須となる。例えば、分散協調制御理論に基づくリアルタイムプライシングの制度設計に関する研究が世界的に大きな流れとなっている。我が国においても、2012年からCREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」⁸⁾が開始され、分散協調制御を中心に据えた次世代エネルギー管理システムの構築が進められている。

さらに、高度交通システムの整備が進めば、スマート化された個別の車両と制御・通信技術を装備したインフラが協調することで、効率性・安全性・利便性の増進が技術的には可能となる。ただし、ここでもやはり運転者の意思決定は集中管理が難しく、分散的な決定に基づく全体最適化を目指す分散協調制御の考え方に基づく研究が進められている。

以上の研究分野はサイバーフィジカルシステムと総称され、欧米では多額の研究資金

がこれらの研究に投入され^{9), 10)}、結果として膨大な量の良質な学術研究が報告されている。また、これらの機能を装備するまちづくりはスマートシティ/コミュニティ構想として、欧米のみならず、我が国においても重要課題の一つとして認識されている⁷⁾。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ひとつの大きなシステムとそれを分化したサブシステムの利害が必ずしも一致しないような問題に対して、系統的な問題解決の方法が求められている。これらを分散と協調の観点から、適当な評価関数の設定と適当な情報結合構造の構築問題として扱うことができるかと期待されているが、基礎的な研究課題が山積している。
- 上記のサイバーフィジカルシステムは人間をシステム中に内包する。そのため、社会的課題の解決に向けては工学システムのみから構成される世界を対象とするのではなく、人間も含むシステムへの取り組みが必須である。
- 制御工学は横断的な学問であるが、理論研究の進展に伴い抽象度や数学的な難解さが上がったこと、アカデミックな制御研究と実用分野における応用研究との共同プロジェクトの機会が日本では極めて少ないことなどにより、研究者コミュニティはかなり閉鎖的になってきている。また、研究者層は必ずしも厚くない。異分野間の緊密な連携を進め、社会的な課題を解決していくために、上記 CREST プロジェクト⁸⁾のような大きな誘引剤となる施策の継続が必要である。
- 従来の「ものづくり」を重視する教育に加え、物事を抽象的に、あるいは俯瞰的に捉えるシステム科学的な視点を養う教育の構築が必要である。我が国におけるものづくりの重要性は論を俟たないが、時代の要請は徐々にそれを統合した全体の管理にシフトしてきており、システムに強い人材を育成することが求められている。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- やや発散傾向にあった分散協調制御の研究であるが、ここに来て代表的な基本構造が明らかになりつつある。例えば、マサチューセッツ工科大学の研究グループは、個々のサブシステムが自身の局所目的を追求する分散制御と合意制御¹¹⁾に基づくサブシステム間の協調制御を同時に実行することにより、全体最適化が達成されることを理論的に示している。別の構造として、ジョージア工科大学のグループは各サブシステム間の協調のメカニズムを局所目的に埋め込んだ上でサブシステムを分散制御させることで、全体最適化を達成する構造を提案している。1970年代に登場した従来型の分散制御の枠組みに関してもスタンフォード大学のグループを中心に新たな理論が展開されている。
- 応用面では、米国の主要大学のほとんどが分散協調制御に基づくエネルギー管理システムの構築に注力している。特にカリフォルニア工科大学では、分散協調制御を用いたリアルタイムプライシングの基礎研究が盛んに行われている。カリフォルニア州は一般世帯へのスマートメータ導入がほぼ終了しており、それを利用したスマートグリッド関連の実証プロジェクトが進行している。また、マサチューセッツ工科大学のグループは、経済システム、周波数制御、自動発電制御を俯瞰的に捉えた Transactive Control なる新たなエネルギー管理システムの構築を提案している。

- ・欧州では電力や水資源の国際連携・運用の必要性から昔から実用的な制御に関する基礎研究／応用研究ともに盛んである。最近の動きとしては、例えばスウェーデンの Lund 大学では古典的最適制御と双対分解を用いた、最適制御問題の分散的処理に関する研究が盛んに行われており、北欧における大規模ウインドファームの分散制御への応用研究についても積極的な検討がなされている。2008 年度よりルネサスとスウェーデン研究会議の出資により設立され、大規模複雑系の分散協調制御に関して研究が進んでいる。
- ・センサネットワークの研究では、上であげたプリンストン大学の研究グループが理論／応用の両方で群を抜いている。特に応用面の成果は、分散協調制御が実地研究のレベルで成果を上げた好例として広く認識されている。群ロボットの分野では、スイス連邦工科大学のグループが開発した Kiva システムなど、産業面での貢献が進んでいる。また、昨今の Quadroter の産業応用化は、同グループおよびペンシルバニア大学が開発した制御システムが多大な影響を与えたものと考えられる。
- ・カリフォルニア大学バークレイ校のグループは高度交通システムに関して PATH (Partners for Advanced Transportation Technology) ¹²⁾ プロジェクトを立ち上げ、カリフォルニアにおける高度交通網制御に関する研究拠点を構成している。
- ・上記の応用研究を契機に理論研究にも新たな芽が生まれつつある。まず人間を含むシステムの制御に関して 2008 年より、ボストン大学、プリンストン大学、カリフォルニア大学、ワシントン大学の研究グループが共同で、人間と工学システム間の協調を中心に据えたプロジェクトを実施した ¹³⁾。ここでは特に、心理学とシステム制御の融合が図られており、人間心理モデルを組み込んだ研究が盛んに報告されている。また、マサチューセッツ工科大学を中心に、人間同士のつながりそのものを研究対象とする社会ネットワークに関する研究も盛んである。さらに、分散協調制御の構造を横軸に展開し、上位・下位の制御構造を縦軸に据える階層制御に関する研究が米国の主要グループを中心に報告され始めている。

(6) キーワード

分散協調制御、制御理論、システム理論、最適化理論、大規模システム、ネットワーク論、サイバーフィジカルシステム、スマートシティ／コミュニティ、エネルギー管理システム、センサネットワーク

(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	○	↑	・東日本大震災後、集中システムから分散協調システムへの移行の重要性が認識され、基礎研究の重点化が行われ始めている。その一端として、例えばCREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が開始されている。学術論文レベルでも関連論文の数は右肩上がりの状態である。
	応用研究・開発	○	↑	・分散システムの応用研究は盛んで、特に、スマートメータを代表としたセンサネットワークと分散電源に関する応用研究・開発が進んでいる。
	産業化	△	↑	・東日本大震災後、分散電源、防災、インフラ老朽化対策の必要性が現実化している。そのため応用研究から実用化・産業化のフェーズへの移行が進んでいる。

米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 本分野では質・量ともに世界の研究をリードしており、新たな発想のほとんどは米国発と言っても過言ではない。 米国電気電子学会では、Control Systems Societyを中心に5つのsocietyが連携してTransactions on Control of Network Systemsを創刊しており、勢いに衰えは見えない。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー分野では、分散化電源、スマートグリッド、リアルタイムプライシング、様々な分散協調制御への応用研究が世界に先駆けて行われている。 DARPA Grand/Urban/Robotics Challengeに代表される無人車両制御の応用研究・開発も盛んに行われている。 また、プリンストン大学のグループを中心に、海洋調査のためのモバイルセンサネットワークシステムの開発及び分散協調制御のフィールドワークの事例が報告されている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国の電力網は日本に比べて信頼性が低く、耐故障性に関する研究が盛んである。 サイバーテロに関する防御に関する研究も行われている。 また電力自由化に伴い、リアルタイムプライシングの制度設計に関しては世界的に進展している。オバマ大統領がグリーンニューディール政策を提唱してから風力発電を中心とした再生可能エネルギーの分散制御に関する研究成果が顕著に現れている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 関連論文数は順調な伸びを見せており、研究レベルも高い。 Lund 大学やスウェーデン王立工科大学を中心に革新的な研究成果も報告されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究と同様、応用研究・開発も盛んに行われている。例えばEUにおいて「Control for Coordination of Distributed Systems」というプロジェクトが実施され、実用化の検討も行われている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 電力網、また水資源の最適分配の実現のためには国際連携なしには運営が不可能である。 欧州では社会インフラの分散協調制御に関して積極的に産業化が行われており、近年水資源の枯渇に対する不安からそれらの重要性はますます高まっている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 爆発的な関連研究論文の伸びを見せているが、玉石混淆であり、どの程度本質をとらえた研究が含まれるかは疑問が残る。ただし、数学レベルの向上は顕著である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究に比べ、応用研究・開発の動きはあまり見られない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究が強くないため、産業化の動きもあまり見られない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 論文数は増加の傾向にあるが、米国、欧州に比べるとそれほど盛んと言えない。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> センサネットワークやスマートグリッドに関する応用研究が相対的に進んでいる。
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 済州島での分散電源を用いたスマートグリッドの実証研究がソウル大を中心として実施しており、その際に分散制御の応用について検討が行われている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Athans, Michael eds. Special Issue on Large-scale systems and decentralized control. IEEE Transactions on Automatic Control. 1978, vol. 23, no. 7.
- 2) 伊藤正美（編）. 自律分散システム. 計測と制御. 1990, vol. 29, no. 10.
- 3) Antsaklis, Panos J.; Baillieul, John, eds. Special Issue on Technology of networked control systems. Proceedings of the IEEE. 2007, vol. 95, no. 1.
- 4) IEEE Transactions on Control of Network Systems. <http://sites.bu.edu/tcns/>
- 5) 滑川徹（編）. 協調とフォーメーションの制御理論. 計測と制御. 2007, vol. 46, no. 11.
- 6) 東俊一ほか. マルチエージェント制御. システム制御工学シリーズ. コロナ社, 2015.
- 7) 内閣府. 科学技術イノベーション総合戦略 2014 ～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～. 2014. <http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2014/gaiyo2014.pdf>
- 8) CREST 研究領域 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開. http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html
- 9) Poovendran, Radha et al., eds. Cyber-Physical Systems. Proceedings of IEEE. 2012, vol. 100, no. 1.
- 10) National Science Foundation, Directorate for Computer & Information Science & Engineering . Cyber-Physical Systems. http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286
- 11) 藤田政之. 合意・同期・被覆制御. JST 研究開発戦略センター2012 年研究開発俯瞰報告書. 2013, p. 143-148.
- 12) ITS Berkley. California PATH. <http://www.path.berkeley.edu/>
- 13) Center for Human and Robot Decision Dynamics. <http://people.bu.edu/johnb/CHARDD.html>

3.2.5 確率システム制御

(1) 研究開発領域名

確率システム制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

決定論的な取り扱いが困難な外乱や環境変化を陽に考慮したシステムを構築する理論と応用に関する研究。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

実世界のさまざまな現象を数理的にモデリングする際、しばしばその詳細を決定論的に記述することは困難である。例えば、センサ信号などに混入する雑音などは、どの時刻にどのような影響があるかを前もって知ることは難しい。しかしながら、こうした場合においても何らかの統計的な性質は知ることができると仮定し、その影響を考察し制御するのが確率システム制御の立場である。特に、白色雑音と呼ばれる各時刻において独立同分布の統計的性質を有する確率的信号の取り扱いは長い理論研究の歴史を有し、現在の研究でも不可欠な土台となっている。一方で、環境の変化に応じて制御装置を適切に切り替えつつ制御するような状況や、通信ネットワークを介して制御を行いその輻輳状態を考慮する場合などを考えると、対象とするシステムそのものが確率的かつ不連続に変化する状況に直面する。こうした離散的な変化をいわゆるマルコフ連鎖やポアソン過程などを用いて表現し、その振る舞いを理論的に考察する研究も近年活発に行われている。

主要な目的としては、外乱に乱された観測値を基にシステム内部の状況や外乱そのものを適切に推定するフィルタリング問題、外乱の影響が存在してもなお所望の振る舞いをするような制御則を設計する確率制御問題などに分類することができ、どちらも活発に研究されている。前者には例えば、過去（平滑化問題、スムージング）や未来（予測問題）のある時刻の状況を推定する問題やデータ同化、センサ情報からシステムの異常を検出する故障検出といったフォールトトレランスを目指した重要用途も含めることができる。

次に手法の観点から分類する。従来はフィルタリングと制御のどちらの場合においても、カルマンフィルタや線形2次ガウシアン(LQG; Linear Quadratic Gaussian)制御に代表される伊藤解析(Ito Calculus)に基づく確率論的な試みが主流であった。しかしこうした研究は、拡張が図られ続けてはいるものの、システムの非線形性などに対処することは困難である場合が少なくない。これに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法などにより標本経路を生成し適宜利用するなど、高い計算機能力を前提とした手法が近年盛んに開発されている。フィルタリングに対する無香料カルマンフィルタやパーティクルフィルタはこうした流れの研究の代表例であるといえよう。システム制御の分野においてはモデル予測制御と呼ばれるリアルタイム制御の方法論が従来から精力的に研究されてきたが、これに確率的な要素を付加した確率モデル予測制御においても、最適化分野の確率計画法(もしくは確率制約計画問題; Chance constrained programming problem)などの知見も用いつつ、計算量を軽減することが重要な課題のひとつとなっ

ている。

一方で、上述した確率的な雑音に対するロバスト性の獲得を発展させ、大規模かつ信頼度の低いデータから重要な情報を抽出する手法の開発も盛んに研究されている。例えば、単純なデータ解析手法に加え、そのデータの生成過程にある種のダイナミクスを想定することで大幅に情報抽出の効率を向上できる¹⁾。こうした一連の研究は、データからダイナミクスモデルを構築するシステム同定と呼ばれる分野と融合し、今後も持続的な進展が見込まれる。この流れにおいて、カーネル法なども適切に用いれば、その単純な計算手法にも関わらず、高度な理論に裏付けされた手法と同等以上の精度でシステムが同定できるといった報告²⁾は特筆に値する。またこうした背景のもと、対象を確率モデルとして学習するという手法・解釈も今後、ますます重要性を増すものと考えられる。

一方で、汎用的な手法の構築もさることながら、特定の応用に特化し、その特徴を利用するシステム構築に関する進展も大きい。またその応用分野としては、機械システムなどシステム制御分野の標準的な対象にとどまらず、新規性の高い分野が多く含まれるので、ここでそのいくつかを例示する。数理ファイナンスの分野においては、その確立当時から確率制御の重要性が認識されてきた。近年、モデル予測制御と呼ばれる手法の専門家を中心に、オプションプライシングやポートフォリオ最適化に制御理論の応用が試みられている。システムバイオロジーの分野では、生体内の確率的挙動の解析やその役割の解明に制御理論研究者が積極的に取り組み、化学マスター方程式の高速シミュレーション手法の開発にも貢献している³⁾。さらに、がん生物学への応用例⁴⁾に見られるように、今後、この分野においてシステム制御論的な考え方は、大きな役割を果たすことができると期待できる。量子力学系の制御においても確率的な挙動の扱いが中心的な課題となるが、非線形フィルタリングやリスク鋭敏型フィルタリング/制御など理論への還元も盛んに行われている。

以上で述べた動向はおおむね国内外に共通するものであるが、基礎・応用などのフェーズにかかわらず主要な最先端の結果の多くは欧米各国で得られている傾向がある。例えば、確率モデル予測制御に関する理論研究としては、スイス連邦工科大学チューリッヒ校⁵⁾、ケンブリッジ大学⁶⁾、スウェーデン王立工科大学⁷⁾を中心に、確率モデル予測制御、分散最適化の確率的手法など最高水準の研究が行われている。またスタンフォード大学のグループなどによる数理ファイナンスへの応用⁸⁾、電力ネットワークのデマンドレスポンスの解析^{9, 10)}、ビルのエネルギーマネジメントシステムへの応用¹¹⁻¹³⁾、量子力学系^{14, 15)}など応用研究も盛んである。国内においては特に量子力学系¹⁶⁾や電力ネットワークへの応用にかかわる研究¹⁷⁾が活発である。また確率制御に関する理論研究は古くから非常に盛んであるが¹⁸⁾、今後は既存の定式化にとらわれ過ぎない理論結果が増えることが強く望まれる。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・現在のところ、どちらかといえば理論研究が先行している状態にある。今後、課題達成型で研究を推し進めるためには、モデリングや実データの取り扱いに立ち戻る必要があると思われる。例えば、風力発電量や日射量など莫大な実データのみが与えられるといった状況で、対象をどのようにモデリングすればよいかは自明ではない。こうした問題は理論・実用両側面から重要であり、統計学や情報理論・学習理論などとも密接に関連している。逆に、こうした情報の入手や開示がこれまで困難であった研究課題においては、データの提供により大きく進展する可能性もある。
- ・一般に、提供が困難なデータと数理的に情報量の多いデータは必ずしも一致するとは限らない。したがって、フィルタリングや制御といった具体的な用途を念頭においた上で、データのもつ情報量を特徴づける方法論を構築することも大変有益である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・従来までは確率的な不確定性はできるだけ避けるべきものであるとしてとらえられることが多かった。一方で、近年、確率的な要素を意図的に導入して、性能を向上させる試みが盛んに行われている。こうした考え方は、統計物理や生物学などでは古くから認識されていたが、本格的に制御系設計にも用いられはじめている。焼きなまし法（simulated annealing）などの単純な改良にすぎない研究も散見するものの、中には分散最適化などの観点からも重要なパラダイムシフトと注目されている研究もある¹⁹⁾。
- ・ビルの空調制御のエネルギー効率化など、大規模な対象へ確率モデル予測制御の応用を試みるプロジェクトも進行している¹¹⁻¹³⁾。
- ・システム同定や特徴量抽出に由来する数理最適化問題の解法として、Alternating Direction of Method of Multipliers (ADMM) などの手法を積極的に用いることで計算量・メモリの劇的なスケーラビリティを獲得するとともに、並列計算・分散実装と親和性を高めることが新たなトレンドとなりつつある²⁰⁾。
- ・様々な分野でシステムのレジリエンスが重要視されるなか、従来の正規性雑音を土台とした議論では扱うことのできない突発的な外乱やレアイベントの与える影響の評価も、重要な課題として認識されつつある²¹⁾。

（６）キーワード

確率制御、フィルタリング、モデル予測制御、確率計画法、マルコフ連鎖モンテカルロ法

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 理論研究のレベルは比較的高く長い歴史をもつ¹⁸⁾が、定式化レベルでの新規性を主張する結果がやや少ない。 次項目の応用研究においてさまざまな結果が得られていることにかんがみると、今後、新たな理論研究課題の創出や、そこからのさらなる展開が期待できる下地は十分にあるといえる。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 東京大学のグループ（およびその共同研究者グループ）¹⁶⁾により、量子力学系の制御理論に関して最先端の研究結果が得られている。 電力ネットワークにおける需要予測などのフィルタリングに関する興味深い研究が行われている¹⁷⁾。
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> カルマンフィルタや線形2次ガウシアン制御などすでに一般的な手法として十分確立している結果を除くと、これまでに確率システム制御の結果が産業応用にまで適用された例は多くはないと思われる。 ただし前項の応用研究に関しては、今後はより実用的な研究フェーズへの展開が期待できる。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 確率論、最適化、分散制御などさまざまな観点からの確率システム制御の研究において、最高水準の研究が行われている¹²⁾。 最適化のための手法のひとつとして、ゲーム理論・学習理論の観点などから積極的に確率的挙動を導入する研究が大いに注目を集めている¹⁹⁾。 非線形フィルタリングに関する結果²²⁾をはじめ、次項の応用研究に携わる研究者などによっても、高度な確率論的成果が得られている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スタンフォード大学のグループなどで確率モデル予測制御の数理ファイナンスへの応用に関する成果が得られている⁸⁾。 カリフォルニア大学サンタバーバラ校²³⁾などで、化学マスター方程式といったシステムバイオロジーにおける確率モデルに関する研究が精力的にすすめられている。 その他にも電力ネットワークのデマンドレスポンスの解析^{9, 10)}などに関しても、最先端の研究結果が得られている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 前項の応用研究に対しては、すでにツールボックスのレベルにおいてはさまざまなソフトウェアなどが開発されており、引き続き発展することが見込まれる。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スイス連邦工科大学チューリッヒ校⁵⁾、ケンブリッジ大学⁶⁾、スウェーデン王立工科大学⁷⁾を中心に、確率モデル予測制御、分散最適化の確率的手法など最高水準の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> もともとモデル予測制御はその応用も含めて欧州で盛んに研究されていたため、上出のグループにおいてさまざまな応用課題に適用が試みられている。 風力発電に関連する研究などにおいても、フィルタリングや異常検出に関する研究が多く行われている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ビルの空調制御のエネルギー効率化など、大規模な対象への応用に関するプロジェクトも進行している（OptiControl 6）VIKING Project¹⁴⁾。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 現在のところ、新規性の強い結果よりも、既存結果を着実に改良する結果が多く見られ、安定性や制御性能評価などの保守性の軽減などやや特定のトピックに偏る傾向がある。 国際会議などにおける発表件数の多さとその急激な伸びは、やはり注目を集めており、存在感を高めつつある。 欧米各国において多数の留学生が在籍しているため、今後の研究水準の上昇が見込まれる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> このフェーズでの目立った成果は得られていない。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> このフェーズでの目立った成果は得られていない。

研究開発領域
制御区分

韓国	基礎研究	○	↗	・国内での研究成果は必ずしも多くはないが、欧米各国において多数の優秀な留学生が在籍しているため、今後の研究水準の上昇が見込まれる。
	応用研究・開発	△	→	・このフェーズでの目立った成果は得られていない。
	産業化	×	→	・このフェーズでの目立った成果は得られていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Sznaier, Mario. Taming the upcoming data deluge: A systems and control perspective. Semi-Plenary Talk, 51st IEEE Conference on Decisions and Control, 2012.
- 2) Pillonetto, Gianluigi; Dinuzzo, Francesco; Chen, Tianshi; De Nicolao, Giuseppe; Ljung, Lennart. Kernel methods in system identification, machine learning and function estimation: A survey. Automatica. 2014, vol. 50, p. 657-682.
- 3) <http://control.ee.ethz.ch/~ssb/>
- 4) Vidyasagar, Mathukumalli. Computational Cancer Biology: An Interaction Network Approach. Springer, 2012.
- 5) <http://control.ee.ethz.ch/>
- 6) <http://www-control.eng.cam.ac.uk/>
- 7) KTH, ACCESS Linnaeus Centre.
<http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>
- 8) <http://soe.stanford.edu/research/japrimbs.htm>
- 9) Baeyens, E.; Bitar, E.Y.; Khargonekar, P. P.; Poolla K. Wind Energy Aggregation: A Coalitional Game Approach. IEEE Conference on Decision and Control, 2011.
- 10) Bitar, Eilyan; Poolla, Kameshwar, Khargonekar, Pramod; Rajagopal, Ram; Varaiya, Pravin; Wu, Felix. Selling Random Wind. Proceedings of HICSS-45. IEEE, 2012.
- 11) <http://www.opticontrol.ethz.ch/>
- 12) Kelman, A.; Daly, A.; Borrelli, F. Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage: Modeling, Stimulation, and Experiments. IEEE Control Systems Magazine. 2012, vol. 32, p. 44-64.
- 13) EU VIKING Project. <http://www.vikingproject.eu/new2/index.php>
- 14) Altafini, Claudio; Bloch, Anthony M.; Rouchon, Pierre eds. Special Issue on Control of Quantum Mechanical Systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 2012, vol. 57, no. 8.
- 15) <http://pracqsys2012.com/>
- 16) <http://www.cyb.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/>

- 17) <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>
- 18) <http://sci-sss.org/sss2012/>
- 19) Marden, J.; Arslan, G.; Shamma, J. Cooperative control and potential games. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2009, vol. 39, p. 1393-1407.
- 20) Boyd, Stephen; Parikh, Neal; Chu, Eric; Peleato, Borja; Eckstein, Jonathan. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. Foundations and Trends in Machine Learning. 2010, vol. 3, no. 1, p. 1-122.
- 21) Ohlsson, Henrik; Gustafsson, Fredrik; Ljung, Lennart; Boyd, Stephen. Smoothed state estimates under abrupt changes using sum-of-norms regularization. Automatica. 2012, vol. 48, p. 595-605.
- 22) Van Handel, R. Observability and nonlinear filtering. Probability theory and related fields. 2009, vol. 145, p. 35-74.
- 23) <http://www.ece.ucsb.edu/ccdc/index.html>

3.2.6 ハイブリッドシステム制御

(1) 研究開発領域名

ハイブリッドシステム制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

連続値をとる動特性および離散値をとる動特性の混在した動的なシステムのモデリング、解析、設計のための理論とその応用に関する研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

微分方程式や差分方程式により記述された連続値をとる動特性と論理条件などにより記述される切り換えなどの離散値をとる動特性の混在したシステムは、ハイブリッドシステムと呼ばれる。ハイブリッドシステムが大きな注目を集める理由の一つは、その適用範囲の広さにあると考えられる。人工物、物理現象を問わず多くのシステムが連続値と離散値の混在した特性を有しており、これらの例は、自動運転¹⁾、エンジン制御²⁾、航空機の制御系³⁾および管制システム⁴⁾、化学反応プロセス⁵⁾、ロボットに対するタスク生成⁶⁾、生産プロセスの管理⁷⁾、遺伝子調節ネットワーク⁸⁾など、数多く挙げることができる。

ハイブリッドシステムの重要性の指摘は、1960年代にまで遡ることができる⁹⁾。しかしながら、この時期にハイブリッドシステムに関する体系的な研究が展開されることはなかった。1990年代にかけて、実世界（物理現象）との相互作用を有する電子回路やソフトウェアの検証問題などを通じて、計算機科学者や論理学者の間でハイブリッドシステムの重要性に関する認識が高まると共に、これらの問題意識に刺激を受けた制御理論研究者の間でも活発な研究が展開され始めた。このような中、ハイブリッドシステムに関するワークショップが1991年に開催され¹⁰⁾、途中、1998年に名称をHybrid Systems: Computation and Controlと変更しながら¹¹⁾、現在まで継続して開催されてきている。また国内外の学会誌、論文誌に特集号が企画され¹²⁻¹⁴⁾、IEEE Conference on Decision and ControlやAmerican Control Conferenceといった制御理論に関する主要な国際会議では、ハイブリッドシステムに関するセッションが必ず設けられるなど、1990年代以降現在まで、常に活発な研究分野となっている。

ハイブリッドシステムのモデリング、解析、制御を目的とし、ハイブリッドシステム全般を表現する一般的なモデル¹⁵⁾から、対象の特性をより詳細に表現する種々のモデル、例えば、ハイブリッドオートマトン (Hybrid Automata)¹⁶⁾、スイッチドシステム (Switched Systems)¹⁷⁾、区分的アファインシステム (Piece-wise Affine Systems)¹⁸⁾、確率的ハイブリッドシステム (Stochastic Hybrid Systems)¹⁹⁾、混合論理動的システム (Mixed Logical Dynamical Systems)²⁰⁾、線形相補性システム (Linear Complimentary Systems)²¹⁾、Max-plus 代数システム (Max-plus Discrete Event Systems)²²⁾などが提案されている。ハイブリッドシステムは、その記述能力の高さと適用範囲の広さゆえに、これを統一的に取り扱うことのできる理論が現在までに構築されているとは言い難い。上記の各種モデルが目的に応じて使い分けられたうえで、解の存在性や一意性、安定性、同定手法、状態推定、コントローラ的设计法および実システムに対する応用など、

多くの研究成果がシステム理論、制御理論の観点から明らかにされてきた。なお近年、ハイブリッドシステムに関するハンドブック²³⁾や邦書の教科書²⁴⁾が出版されてきている。2000年代初頭頃までに体系づけられたハイブリッドシステムに関する研究成果は、これらを参照することで効率良く確認することができる。

近年の工学システムの発展は、単一の制御対象の高速かつ高精度な制御から、複数の構成要素からなる複雑なシステムによる高い機能の実現へと、制御理論、システム理論に対する要求と期待のシフトを生んでいる。自動運転の実現¹⁾や環境負荷の低いエンジン制御の達成²⁾、航空機の制御系³⁾と安全性を保証する管制システムの実現⁴⁾、移動ロボットや人と接するロボットに対するタスクの記述と制御^{25, 26)}、遺伝子調節ネットワークの解析⁸⁾などがこれらの例となっている。ハイブリッドシステムに対する今後の研究展開の期待の一つは、複雑なシステムに高度な機能を与える、インテリジェントな制御システムの系統的な構成法確立の可能性にあると考えられる。

システムが備えるべき機能を時相論理などにより記述される仕様として与え、この仕様を満足する制御系の自動設計実現を目指した研究が進展してきている²⁷⁻³²⁾。これらの研究では、例えば、1)連続値をとる動特性の振る舞いを有限の状態遷移で近似する離散抽象化、2)線形時相論理などにより記述される仕様を満足する有限の状態遷移系の設計と検証、3)連続値をとる動特性の望ましい状態遷移を実現するためのコントローラの抽出、といった手順がとられる。有限の状態遷移系に対する仕様の検証は、計算機科学分野のモデル検査や形式証明の概念と密接に関わっている³³⁾。したがってこれらの知見を活用した効率の良いアルゴリズムを利用する事も可能である。一方、連続値をとる動的なシステムの振る舞いは、通常有限個の状態のみで構成される遷移系として表現することはできない。そこで、近似における保守性を低減するための多くの離散抽象化の手法が提案されている³⁴⁾。形式仕様による機能の記述とこれを満足する制御系の自動設計は、計算機科学と制御理論が密接に関連する研究分野であり、かつこれまでにない高度な機能を有する工学システムを実現する可能性を秘めている。インテリジェントな制御システムの系統的な構成法確立を目指した、研究者間の交流の活性化と研究の進展が望まれる。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・ハイブリッドシステムの振る舞いは多様であり、未解決の課題は多い。最も基本的な概念の一つである安定性については、サーベイ論文³⁵⁾がまとめられるなど、ある程度体系的な理論、認識がまとまりつつあると言える。しかしながら例えば、システムの特徴づける重要な概念である入出力ゲインの解析問題³⁶⁾などを考えても、理論面、数値計算法などに取り組むべき問題が多く残されている。
- ・ハイブリッドシステムの解析、設計は数理科学的側面をもつ。また、解析や設計に必要な最手化計算も計算量の増大を伴う場合が多い。このような中、日本ではシステム理論や最適化に関連する数学者、研究者と制御理論の研究者との交流が、欧米と比較した場合活発ではない。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 米国でのハイブリッドシステムに関連する研究は、例えば、Grand/Urban Challenge³⁷⁾と言った大型プロジェクト型研究により牽引されている側面がある。
- ・ 欧米における近年の研究は、Cyber-Physical Systems³⁸⁾と関連付けられているものが多い。これに伴い、大型の研究プロジェクトや研究予算措置が設けられている。

（6）キーワード

ハイブリッドシステム、離散抽象化、時相論理、形式証明、モデル検査、自動設計

（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	○	→	・ 2000年代初頭頃までに比較し、ハイブリッドシステムの基礎研究に関する近年の活動は低調である。
	応用研究・開発	○	→	・ 2000年代初頭頃までに比較し、ハイブリッドシステムの応用研究・開発に関する近年の活動は低調である。
	産業化	△	↘	・ 2000年代初頭頃までは、産業界と連携した応用研究も報告されていたが、近年の活動は低調である。
米国	基礎研究	◎	↗	・ 近年のハイブリッドシステムに関する基礎研究は、米国が主導している。
	応用研究・開発	◎	↗	・ Grand/Urban Challengeなどの大型プロジェクト型研究により基礎研究から応用研究までが牽引されている側面がある。
	産業化	△	→	・ 産業界での応用は、今後活発になると期待される。
欧州	基礎研究	○	→	・ 1990年代以降、一定量の研究活動が継続されている。
	応用研究・開発	○	→	・ 1990年代以降、一定量の研究活動が継続されている。
	産業化	○	→	・ 自動車産業やエネルギー産業と連携した応用研究が進展していると考えられる。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Horowitz, R; Varaiya, P. "Control design of an automated highway system". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 913-925.
- 2) Balluchi, A.; Benvenuti, L.; Di Benedetto, M. D.; Pinello, C.; Sangiovanni-Vincentelli, A. L. "Automotive engine control and hybrid systems: Challenges and opportunities". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 888-912.
- 3) Lansdaal, M.; Lewis, L. "Boeing's 777 systems integration lab". IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2000, vol. 3, no. 3, p. 13-18.
- 4) Livadas C.; Lygeros, J.; Lynch, A. N. "High-level modeling and analysis of the traffic alert and collision avoidance system (TCAS)". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 926-948.
- 5) Engell, S; Kowalewski, S; Schulz, C.; Stursberg, O. "Continuous-discrete interactions in chemical processing plants". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1069-1082.
- 6) Song, M.; Tarn, T-J.; Xi, N. "Integration of task scheduling, action planning, and control in robotic manufacturing systems". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1097-1107.
- 7) Pepyne, D. L.; Cassandras, C. G. "Optimal control of hybrid systems in manufacturing". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1108-1123.
- 8) Batt, G.; Belta, C.; Weiss, R. "Temporal logic analysis of gene networks under parameter uncertainty". IEEE Transactions on Automatic Control. 2008, vol. 53, p. 215-229.
- 9) Witsenhausen, H. "A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems". IEEE Transactions on Automatic Control. 1996, vol. 11, no. 2, p 161-167.
- 10) Grossman, R. L.; Nerode, A.; Ravn, A. P.; Rischel, H., eds. Hybrid Systems, ser. Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1993, vol. 736.
- 11) Henzinger, T. A; Sastry, S., eds. Hybrid Systems: Computation and Control, ser. Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1998, vol. 1386.
- 12) Antsaklis, P. J.; Nerode, A., Eds. "Special issue on hybrid control systems". IEEE Transactions on Automatic Control. 1998, vol. 43, no. 4.
- 13) Morse, A. S.; Pantelides, C. C.; Sastry, S. S.; Schumacher, J., eds. "Special issue on hybrid systems". Automatica. 1999, vol. 35, no. 3.
- 14) Antsaklis, P. J., ed. "Special issue on hybrid systems: Theory and applications". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7.
- 15) Branicky, M. S.; Borkar, V. S.; Mitter, S. K. "A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory". IEEE Transactions on Automatic Control. 1998, vol. 43, no. 1, p. 31-45.

- 16) Alur, R.; Courcoubetis, C.; Henzinger, T. A.; Ho, P.-H. "Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems". Grossman, R. L.; Nerode, A.; Ravn, A. P., Rischel, H., eds. *Hybrid Systems*, ser. *Lecture Notes in Computer Science*. 1993, vol. 736, p. 209-229.
- 17) Liberzon, D. *Switching in Systems and Control*. Birkhauser, 2003.
- 18) Sontag, E. D. "Nonlinear regulation: The piecewise linear approach". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1981, vol. 26, no. 2, p. 346-358.
- 19) Hespanha, J. P. "Modeling and analysis of stochastic hybrid systems". *IEEE Proceedings on Control Theory & Applications*. 2007, vol. 153, no. 5, p. 520-535.
- 20) Bemporad, A.; Morari, M. *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints*. *Automatica*, 1999, vol. 35, no. 3, p. 407-427.
- 21) Heemels, W. P. M. H.; Schumacher, J. M.; Weiland, S. *Linear complementarity systems*. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 2000, vol. 60, no. 4, p. 1234-1269.
- 22) De Schutter, B.; van den Boom, T. *Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems*. *Automatica*. 2001, vol. 37, no. 7, p. 1049-1056.
- 23) Lunze, J.; Lamnabhi-Lagarrigue, F., eds. *Handbook of Hybrid Systems Control*. Cambridge University Press, 2009.
- 24) Imura, J.; Azuma, S.; Masubuchi, I. *Control of Hybrid Systems*. Corona Publishing, 2014, in Japanese.
- 25) Belta, C.; Bicchi, A.; Egerstedt, M.; Frazzoli, E.; Pappas, G. J. *Symbolic planning and control of robot motion*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007, p. 61-69.
- 26) van de Molengraft, R.; Beetz, M.; Fukuda, T. *Robot challenges: Toward development of verification and synthesis techniques*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2011, vol. 18, no. 3, p. 22-23.
- 27) Tabuada, P.; Pappas, G. J. "Linear time logic control of discrete-time linear systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006, vol. 51, no. 2, p. 1862-1877.
- 28) Kloetzer, M.; Belta, C. "A fully automated framework for control of linear systems from temporal logic specifications". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008, vol. 53, no. 1, p. 287-297.
- 29) Yordanov, B.; Tumova, J.; Cerna, I.; Barnat, J.; Belta, C. "Temporal logic control of discrete-time piecewise affine systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2012, vol. 57, no. 6, p. 1491-1504.
- 30) Ding, X.; Smith, S. L.; Belta, C.; Rus, D. "Optimal control of markov decision processes with linear temporal logic constraints". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, vol. 59, no. 5, p. 1244-1257.
- 31) Karaman, S.; Frazzoli, E. "Sampling-based algorithms for optimal motion planning with deterministic μ -calculus specifications". *Proceedings of the 2012 American Control Conference*. 2012, p. 735-742.

- 32) Liu, J.; Ozay, N.; Topcu, U.; Murray, R. M. “Synthesis of reactive switching protocols from temporal logic specifications”. IEEE Transactions on Automatic Control. 2013, vol. 58, no. 7, p. 1771-1785.
- 33) Clarke Jr., E. M.; Grumberg, O.; Peled, D. Model Checking. MIT Press, 1999.
- 34) Alur, R.; Henzinger, T. A.; Lafferriere, G.; Pappas, G. J. “Discrete abstractions of hybrid systems”. Proceedings of the IEEE. 2003, vol. 88, no. 7, p. 971-984.
- 35) Shorten, R.; Wirth, F.; Mason, O.; Wulff, K.; King, C. Stability criteria for switched and hybrid systems. SIAM Review. 2007, vol. 49, no. 4, p. 545-592.
- 36) Hirata, K; Hespanha, J. P. “L2-induced gain analysis for a class of switched systems”. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. 2009, p. 2138-2143.
- 37) Iagnemma, K.; Buehler, M., eds. “Special issue on the DARPA grand challenge, part 1 and 2”. Journal of Field Robotics. 2006, vol. 23, no. 8, 9.
- 38) “Cyber-physical systems”. Program Announcements & Information. The National Science Foundation, 2008. <http://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08611/nsf08611.htm>

3.2.7 大規模・ネットワーク制御

(1) 研究開発領域名

大規模・ネットワーク制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

通信ネットワークにより多数のセンサ、アクチュエータ、コントローラを接続した大規模な制御システムに関する研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

大規模・ネットワーク制御が扱うシステムは、大別すると、ネットワーク化制御系とマルチエージェント系の2つのクラスがある。近年の情報通信技術の発展に伴い、こうしたシステムが急激に増えており、今後もその研究の重要性は高まると考えられる。背景には、リアルタイム性が非常に高いフィードバック制御にかかわる部分についてもネットワーク化が可能となったこと、組込み機器による制御機器の小型化・低価格化などがあげられる。また最近では、電力分野でスマートグリッドにおける分散制御にも期待が寄せられている。

ネットワーク化制御系（networked system）^{1, 2)}では、大規模プラントの監視・制御システムあるいは自動車などのように、多数のセンサ、アクチュエータ、およびコントローラを有線・無線の回線で接続してネットワーク化し、効率的な情報共有を実現した制御システムを扱う。他方、マルチエージェント系（multi-agent system）³⁾は、無線通信を用いた自律移動ロボット群やセンサネットワークなどの応用を指す。ここでは、おのおののエージェントは互いに通信することで得たローカルな情報を基に行動するが、システム全体として所望の仕様が達成できるような協調制御を実現する制御システムを扱う。

どちらのシステムも1990年代以降、応用面で発展してきたが、そうした動きに促される形で2000年頃から基礎研究が始まり、今日に至るまで盛んに研究がなされている。興味深いのは、当初、両システムの研究は独立して行われていたが、その重要性の高まり、および通信との深いかかわりから現在では両者は不可分の関係にある点である。実際、多くの国際的な研究プロジェクトにおいても、大規模ネットワーク化分散制御というキーワードが使われている。また、物理的なシステムを通信を介して制御するという意味において、米国で最近注目されているCyber Physical System (CPS)⁴⁾の代表的なクラスのシステムである。

近年は制御用ネットワークが一般の通信ネットワークと接続される場合が増えており、その結果、産業用監視制御システム（SCADA：Supervisory Control And Data Acquisition）における情報セキュリティに対する関心が高まっている。例えば、工場や電力系統がサイバー攻撃されると、被害は機密情報の漏えいなどにとどまらず、物理的に機器が故障・破損する可能性があり、非常に危険である。一般の情報機器に対するセキュリティ対策だけでなく、制御機器に特有の通信特性やダイナミクスを考慮した対策の重要性が指摘されている。

他方、インターネットをはじめ通信ネットワーク自体も大規模なネットワーク化シス

テムとみなすことができ、この分野で合わせて議論されてきた。ネットワーク制御（network control）という場合はこちらを指すこともある。多数の端末がいかに自律分散的に送受信を行い、通信速度や安定性を維持・向上させるかという輻輳制御（congestion control）の問題は、通信プロトコルの基礎に関わる重要な課題である。

国際比較については、米国が基礎・応用研究ともにこの分野をリードしている。CPSは重点領域となっており、莫大な予算が基礎研究に投じられている。また、軍事研究の観点からは、情報セキュリティや自律移動ロボット群や飛行体の遠隔操作などは非常に重要であり、そうした分野への予算配分も大きい。欧州においても、大学と産業界が組んだ大規模な研究プロジェクトが多数立ち上がっており、この分野に対する関心の高さがうかがえる。日本は、産業界での研究レベルが高く、技術的なレベルでは世界をリードしているといえる。しかし、多数のメーカーの機器をネットワーク化する際に不可欠となる標準化に関しては影響力が限られている。この分野の基礎研究に関しても、ファンディング面において組織的にサポートする機運は少ない。中国においては、研究者レベルでの関心は高く、研究のすそ野が広がってきており、応用面での技術レベルも今後高くなることが予想される。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・ ネットワーク化制御を無線通信ネットワークを介して実現するには、携帯電話のような人間同士の通信とは異なる、機械間の通信（Machine to Machine; M2M）が必要となる。しかし、現状では十分な通信速度と信頼性を保証することが難しく、無線通信分野における技術的な課題となっている。
- ・ ネットワーク化制御においては、通信における時間遅延が制御性能に大きな影響をもたらす。一般に遅延時間が変動するため、それを考慮した制御設計が課題である。
- ・ 無線を介した計測のためのセンサネットワークは幅広い応用範囲をもっているが、ひとつのボトルネックは省電力化である。つまり、多くの場合、こうしたシステムは電池駆動であるが、電力消費に占める無線の送受信による割合が高い。通信プロトコルに対する工夫が求められている。
- ・ 電力システムは大規模なネットワーク化システムであるが、近年、スマートグリッドへの関心が高まるにつれて、本領域の研究者が研究すべき対象としての位置づけが明確になってきた。特にスマートグリッドの実現にあたっては、電力会社や需要家における多くのシステム間でのリアルタイムな通信を基にした制御が非常に重要となる。
- ・ サイバーセキュリティ問題への政府レベルでの関心の高さは、米国国土安全保障省が制御システムの安全性に関する委員会を立ち上げていることから伺える⁵⁾。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ ネットワーク化制御においては、制御と通信の両分野がかかわるが、実際にシステムの安定化に際しては、制御対象と通信回線の性質が不可分に表れる限界がいくつも見つかっている。通信分野のシャノンの理論とも整合性が高く、学術的意義をもつ。
- ・ マルチエージェント系においては、エージェント間の情報交換を表すネットワーク構造が重要であり、協調制御に必要な性質について興味深い知見が得られている³⁾。

- ・日本では、学会レベルでの交流は分野横断的に行われており、ネットワーク制御システムにかかわりの深い研究会が 2005 年以降、継続的に活動している。最近のものでは、計測自動制御学会の「社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会」、「物理と情報をつなぐ次世代システム制御研究会」、また電子情報通信学会の「高信頼制御通信時限研究専門委員会」などがあげられる。
- ・米国では、米国科学財団 (NSF) が 2000 年頃より、情報通信技術に対して重点的に予算を配分してきたが、その中においてもネットワーク化制御は重要な位置を占めてきた。例えば、MIT、カリフォルニア大学バークレイ校、イリノイ大学などでは早い時期から大型の基礎研究および応用寄りの研究プロジェクトを立ち上げ、大きな成果をあげてきた。より最近では、情報通信技術をいかに社会の中で有効に使うかという観点から、研究の重点が CPS にシフトしてきたが、やはり物理的なシステムを情報・通信機器を用いて制御することの重要性は引き続き強調されている。
- ・また米国で特徴的なのは、CPS 関連のプロジェクトへの参加者が、制御、通信、情報科学、生物学、社会学などの各分野から集まっている点である。例えば、カリフォルニア大学サンタバーバラ校では、20 名以上の研究者からなる学際的な教育研究プログラム Network Science IGERT が 2013 年に立ち上げられた⁶⁾。大規模システムの階層化および各階層におけるスケールの異なるネットワークをテーマとして、多岐にわたる研究が行われている。イリノイ大学においても、主に工学系と情報系の研究者から構成される新たな研究組織 Information Trust Institute がつくられ、データ科学、電力系統、システム・通信、衛生情報などの分野を網羅した研究・教育活動を行っている⁷⁾。情報セキュリティに対する重要性も強調されており、組織内でいくつもの共同研究プロジェクトが立ち上がっている。他にも複数の研究機関が参加する共同研究プロジェクトとして、スタンフォード大学とカリフォルニア大学バークレイ校による STARMAC⁸⁾やペンシルバニア大学が主導する SPARCS⁹⁾などがあげられる。
- ・欧州では、欧州連合の政策執行機関である欧州委員会 (European Commission) の下の大規模な研究プロジェクトとして、HYCON (Highly-Complex and Networked Control Systems)¹⁰⁾が 2004 年より継続的に続いてきた。そこには、制御工学の理論と応用の関係者が 7 カ国 23 機関 (大学および企業) から参加しており、毎年 1 億円以上の予算がついている。プロジェクト開始当初は、ハイブリッドシステムに焦点を当てていたが、近年はネットワーク化された大規模システムへとシフトしている。
- ・欧州では、他にも同様のプロジェクトで複数の機関が参加するものは多数立ち上がっている。イタリアのトレント大学とオランダのアインドーベン工科大学を中心とした WIDE : Decentralized and Wireless Control of Large-Scale Systems¹¹⁾や、より最近のものでは、ドイツの DFG が支援する Control Theory of Digitally Networked Dynamical Systems¹²⁾がある。スウェーデンの王立工科大学では、複雑ネットワーク系関係の研究所として、ACCESS Linnaeus Centre (Automatic Complex Communication nEtworks, Signals, and Systems) が 2006 年に設立された¹³⁾。学際的な研究をサポートすることが目的で、制御、信号処理・通信、情報科学、応用数学の各分野から 60 名の研究者、100 名前後の博士課程学生が所属している。

（6）キーワード

大規模制御、ネットワーク制御、ネットワーク化制御、大規模・複雑制御システム、制御用ネットワーク、センサ・アクチュエータネットワーク、通信制約、産業用監視・制御

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学における制御工学あるいは無線通信の研究は、非常に基礎的な理論研究から、より応用寄りの実験ベースのものまで、幅広く行われている。ただし、この領域に対して組織的に取り組むための仕組みはあまり見受けられない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 制御用ネットワークで用いられるプロトコルの標準化などの活動に、企業からの参加がある。また、企業間でプロトコルを共有も進んでいる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大型プラントや自動車、ロボットなど、多くの産業分野においてネットワーク化された制御システムが導入されている。その普及レベルは非常に高い。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国の大学における基礎研究のレベルは非常に高い。特に他分野の研究者との共同研究が盛んで、新たな研究分野の開拓も多い。 予算面においては、NSFからはCPSやスマートグリッド関連のもの、国防省からは軍事に近い応用に関するものが、基礎研究費として潤沢に交付されている。 予算面で重点化されていることから、新しい研究者の参入も多い。 米国電気学会（IEEE）では、本領域を対象とした論文誌 <i>Transactions on Control of Network Systems</i> を2014年に発刊した。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔制御によるロボットや飛行体など、将来的なアプリケーションおよびその産業化に向けた研究が盛んである。 スマートグリッドに必要な通信や分散制御に関する研究が新しい分野として、ここ数年来、関心が高まっている。 産業監視制御システムにおける情報セキュリティに対する関心が高まっている。電力システムや工場などがネットワーク化され、外部と接続された場合に起こり得るサイバー攻撃や情報流出に対処する組織的な対策が進みつつある。 高速道路における自動運転や運転補助に関する研究は伝統的に盛ん。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> マイクロセンサを用いたセンサネットワークなどの応用は、ベンチャー企業を中心に産業化が進んでいる。
欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 欧州内での国際的な共同研究の活動レベルが高い。 欧州をベースとする国際自動制御連盟（IFAC）では、2004年に新しい技術委員会として <i>Technical Committee on Networked Systems</i> が立ち上げられ、最近ではほぼ毎年、シンポジウムを主催している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 複数の大学と企業が行う本領域での共同研究が盛んである。例えば、センサネットワークの実装や電力システムの情報セキュリティ対策といった応用研究に対しても、基礎研究を行っている研究者が参加している事例がある。メリットとして、基礎的な課題設定をする際に実用面の事情を確認できることなどがある。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツやスウェーデンの自動車や計測・制御機器の企業における制御用ネットワークに対する関心は非常に高く、1990年代初頭からの取り組みが続いている。

研究開発領域
制御区分

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・2000年以降、大学における基礎研究が重視された結果、博士課程学生が増えている。本領域は世界的にも注目されているため、新しい研究者の参入が顕著である。今後の発展が予想される。 ・CPS関連の米国電気学会（IEEE）および米国情報処理学会（ACM）の会議が一堂に会するイベント CPS Week は2012年に北京で開催された。
	応用研究・開発	○	↗	・同上。
	産業化	△	→	・大規模プラントなどの施設のうち、古いものは情報化・ネットワーク化があまり進んでいないと思われるが、急速な経済発展を背景に、今後、伸びる可能性が高い。
韓国	基礎研究	△	→	・米国で博士を取得した研究者が多いため、米国の研究動向に敏感であり、一定の研究レベルを保っている。
	応用研究・開発	△	→	・同上。
	産業化	○	↗	・自動車内LANはネットワーク化制御が実際に用いられる代表的なシステムである。自動車産業が伸びているため、今後の発展が予想される。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Bemporad, A.; Heemels, M.; Johansson, M., eds. Networked Control Systems. Springer, 2010, 371p. (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 406).
- 2) Tarraf, D. C. ed. Control of Cyber-Physical Systems. Springer, 2013, 380p. (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 449).
- 3) Bullo, F.; Cortes, J.; Martinez, S. Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms. Princeton University Press, 2009, 320p. (Princeton Series in Applied Mathematics).
- 4) PCAST. Designing a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information Technology. 2010.
<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd-report-2010.pdf>
- 5) U.S. Department of Homeland Security, Control Systems Security Program.
http://www.us-cert.gov/control_systems/icsjwg/
- 6) Network Science IGERT, University of California, Santa Barbara, CA, USA.
<http://networkscience.igert.ucsb.edu/>
- 7) Information Trust Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.
<http://www.iti.illinois.edu/>

- 8) The Stanford/Berkeley Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi-Agent Control (STARMAC).
<http://hybrid.eecs.berkeley.edu/starmac/>
- 9) Synthesis of Platform-aware Attack-Resilient Control Systems (SPARCS).
<http://rtg.cis.upenn.edu/HACMS/>
- 10) The FP7 NoE HYCON2. “HYCON 2”. <http://www.hycon2.eu/>
- 11) WIDE: Decentralized and Wireless Control of Large-Scale Systems.
<http://ist-wide.dii.unisi.it/>
- 12) Control Theory of Digitally Networked Dynamical Systems (DFG-Priority Program).
<http://spp-1305.atp.ruhr-uni-bochum.de/index.php>
- 13) KTH Royal Institute of Technology. “ACCESS Linnaeus Centre”.
<http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>

3.2.8 異常検出

（1）研究開発領域名

異常検出

（2）研究開発領域の簡潔な説明

製造設備、発電所、自動車など人間社会を支えるあらゆるシステムについて、それらが要求される性能を発揮し、安全に利用されるために、異常が発生したときにそれらを検出し、その影響を最小限にとどめ、安全な動作継続やシステム停止を実現するための技術に関する研究開発。異常検出の対象は人工物に限らず、病気の早期発見など人間そのものも対象となる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

異常検出は典型的な分野横断型技術であり、製造設備、発電所、自動車など人間社会を支えるあらゆるシステムの安全を確保するために不可欠な技術である。制御システムを有効に機能させるためにも、その前提として、設備が正常に動作していることを確認・保証しておく必要がある。仮に設備が正常に動作していない場合には、できるだけ早期に異常を検知するとともに、適切な対策を施さなければならない。異常検出手法は、モデル型（model-based）とデータ型（data-driven）の2つに大別される。モデル型異常検出^{1, 2)}では、システムの正常な挙動を第一原理モデル（物理・化学法則に基づいて現象を数式で表現したモデル、物理モデル）で表現し、システムの実際の挙動とモデルが予測する挙動とを比較し、その差によって異常の発生を検知する。一方、データ型異常検出^{3, 4)}では、計測したデータに統計的手法を適用して、システムの正常な状態を表現するモデルを構築し、正常状態からのズレを指標として異常の発生を検知する。対象システムを十分に理解した上で、迅速かつ正確な異常検出を実現するという観点では、モデル型異常検出が望ましいといえる。モデル型異常検出は比較的モデル化が容易な機械系システムへの応用が多い半面、複雑なシステムの物理モデル構築は技術的に難しく、コストも大きくなるため、データ型異常検出が利用されることも多い。データ型異常検出手法としては、特に製造業を中心に多変量統計的プロセス管理（Multivariate Statistical Process Control; MSPC）の研究開発と産業応用が目立つ。異常が発生した場合、それらを早期に検出する必要があることは当然であるが、さらに異常の原因を究明し、然るべき処置を行う必要があり、そのために異常診断技術が重要となる。異常検出と異常診断に関する研究開発は現在も極めて活発に行われている。そこには当然ながら、2011年に発生した事故によってわが国でも安全性に対する議論が活発化している原子力発電所を対象とした研究開発も含まれる⁵⁾。

上述の異常検出・異常診断技術を基盤として、さらに、異常や故障に適切に対応して高い信頼性を維持する機能をシステム自身にもたせるディペンダブル（dependable、高信頼化）システムの設計に関する研究開発も進められている。システムを高信頼化するために、元来、システムの構成要素を冗長化しておく方法が主として採用されてきた。このような技術はフォールトトレランス（fault tolerance、障害許容）技術、また構成要素の一部が故障しても正常に処理を続行するシステムはフォールトトレラント（fault

tolerant) システムと呼ばれる。近年、より広い観点から高信頼化を再定義する流れがあり、フォールトトレラントに代えてディペンダブルという言葉が使われるようになった。ディペンダブルシステムやディペンダブルコンピュータなどである。このようなフォールトトレランス技術やディペンダブルシステム技術は、絶対的な安全性が要求される鉄道や航空などの旅客分野や、他に類を見ない安全性が要求される原子力分野において研究開発および実用化が進められ、今では多くの産業分野で活用されている。制御分野においては、フォールトトレラント制御⁶⁾という呼称が一般的である。対象システムそのものの異常に加えて、誤操作などヒューマンエラーや例外的な事象に対する安全・信頼性確保も重要である。例外には多種多様な要因による多種多様な結果が含まれるため、その対策には綿密な解析が必要となり、システム設計も複雑になる。

製造業においては、設備の異常検出に加えて、製品特性・品質の異常検出も重要である。製品特性は特殊な分析機器を用いてオフライン分析されることが多い。このような場合、オフライン分析値だけを頼りに品質管理を実施すると、分析頻度が低いために、大量の不良品を製造する危険性が高い。そこで、装置の操業状態から製品特性を予測できるモデルを構築し、予測値を利用して品質管理を実施する戦略が有用となる。このような目的で仮想計測技術がさまざまな産業界で研究されている。例えば、石油化学産業ではソフトセンサーと呼ばれ、予測値を用いた製品品質のリアルタイム監視のみならず、予測値に基づく大規模制御や最適化も行われ、多数の実績が報告されている⁷⁾。半導体産業では Virtual Metrology (VM) と呼ばれ、歩留りの向上、検査回数低減によるコスト削減などの効果が期待されており、上述の MSPC とともに研究開発が活発に行われている。また、製薬産業では、米国 FDA (Food and Drug Administration) が 2004 年に発出した「製造および品質保証システムの目指すべき方向性に関する指針—PAT」⁸⁾に従い、日米欧の医薬品規制に関する調和を目指す ICH⁹⁾ (日米 EU 医薬品規制調和国際会議; International Conference on Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use) から、科学的根拠に基づいた品質および製造管理システムのパラダイムシフトを促すことを目的とした Q トリオと呼ばれる 3 種のガイドラインが発出された¹⁰⁻¹²⁾。PAT (Process Analytical Technology) とは、各工程における製品の重要品質特性をリアルタイムでモニタリングし、それに影響を与える変数を制御することによって品質管理することを指向した概念である。PAT の適用により、製造プロセスに対する理解が深まることが期待され、従来の「工程終了後の試験結果による品質確認」というパラダイムから「工程内での重要品質特性の制御」という新しいパラダイムへのシフトが可能となる。このように仮想計測技術を用いて製品特性を予測し、その予測値をフィードバック制御に利用する方法は近年ますます重要となっている。

異常検出は医療やヘルスケアの分野への応用も期待されている。製造設備の異常を人間の病気に置き換えれば、製造業を対象にして開発されてきた異常検出技術が医療やヘルスケアの分野にもそのまま適用できることは明らかであろう。例えば、健康診断や人間ドックで取得される大規模な健診データを統合・活用して、これまで以上に的確に受診者の健康状態や特定の病気に罹患するリスクを評価する研究開発が進められている。さらに、心電モニターや加速度センサーといったウェアラブルな計測機器の進歩が著し

く、そのような機器を用いたリアルタイム監視の研究開発も進められている。例えば、心拍変動解析を用いたてんかん発作予兆検知技術、ドライバーの眠気検知技術、ストレス評価技術などである。これらの研究開発は社会的影響も大きく、その進展に注目が集まっている。

安全確保のために異常検出は必要不可欠な分野横断型技術であるが、あくまで黒子的な役割を担う技術であり、本技術が企業のコア技術として表舞台に立つことはない。また、実システムの安全を保証するという重責を担うため、技術そのものに高い信頼性が求められる。このような共通点がある一方で、産業分野ごとに故障や異常に対する考え方や活用されている技術は異なる。しかし総じていえば、研究開発および産業化において欧米が抜きん出ているといえよう。この理由として、石油メジャーやメガファーマのように業界をリードするグローバル巨大企業における研究開発に割く人材および予算の充実、さらに大学との積極的な共同研究（コンソーシアムを含む）があげられる。一方、韓国や台湾における半導体産業、韓国における鉄鋼業のように個別分野ではアジア地域の急進が目立つ。これらの国では欧米で学位を取得した研究者が母国で活躍するケースも多く、博士を使いこなせない日本企業とは対照的に見える。中国では、大学からの論文発表件数が急増しており、まだ欧米や日本の研究の後追いが多いものの、肩を並べるのも遠い未来ではないだろう。日本の研究レベルは高いと考えられるが、本分野の研究者数は十分とはいえず、産業によっては欧米に遅れをとっているのは否めない。

（４）科学技術的・政策的課題

アンケート調査¹³⁾などから、製造業が抱える主な課題は、原料や設備の特性変化に適応可能な技術の開発であることが判明している。製品特性への要求が非常に厳しくなる中で、ロットごとの原料特性のバラツキ、設備の経年劣化、保守作業に伴う装置特性の急激な変化などの影響が深刻化しており、これらの変化がある状況下でも高い信頼性を維持できる異常検出・仮想計測技術の開発が求められている。

欧米では、コンソーシアムを活用して、複数の企業と複数の大学が共同して産業化を目指した研究開発を実施している。例えば、カナダの McMaster Advanced Control Consortium (MACC)¹⁴⁾や米国の Texas-Wisconsin-California Control Consortium (TWCCC)¹⁵⁾では、産業分野の垣根を越えて分野横断型技術の研究開発が行われており、優れた産業化事例が報告されている。故障検出や異常検出は分野横断型技術であるため、このような取り組みが効果的であると考えられ、日本でも推進されるべきであろう。

医療・ヘルスケア分野への応用については、日本における医療機器に対する承認審査の厳しさが実用化の障壁になりうる。実際、米国との比較で、この点への国内医療従事者の不満は小さくない。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

製薬産業では、医薬品開発段階で、各医薬品の製造過程に応じたリスクを明確にし、そのリスクを適切に管理するための製造および品質管理システムを確立すること、さらに製品化後も製品ライフサイクルにわたって継続的な品質改善を行えるシステムを確立することが技術開発の方向性として明確に示された。従来の「製品試験による品質保証」から「工程内での品質保証」へというパラダイムシフトの結果として実現が期待されるのが、RTRT（Real Time Release Testing）、すなわち製品試験を省略する出荷システムである。製品試験の省略によるコスト削減、出荷までのリードタイム短縮、非破壊迅速分析技術の適用による環境負荷の低減（製品試験で使用する溶媒の削減）などのメリットがあり、欧米のメガファーマを中心に研究開発と実用化が急速に進められている。

ハードウェアとソフトウェアの両面による計算機パワーの向上によって、精密な第一原理モデルに基づくシミュレーションを工学や科学の諸分野で活用できる環境が整備されつつある。NSF（National Science Foundation）は“Simulation-Based Engineering Science（SBES）”に関する2006年のレポート¹⁶⁾において、SBESは科学・工学分野において米国がリーダーシップを取り続けるために不可欠であり、多岐にわたる分野の進歩にコンピュータシミュレーションが中心的な役割を果たすと述べている。これを受けて、SBESの研究開発に関する調査¹⁷⁾が実施され、国際比較の結果も報告されている。SBESによる製造条件の動的最適化などもすでに実用化されており、精密なシミュレーションに基づく故障検知・異常検出・仮想計測技術に関する研究開発も今後活発化すると考えられる。日本でも石油化学産業でミラープラントやトラッキングシミュレータというコンセプトの技術開発が進められており、期待したい。

（６）キーワード

異常検出、異常診断、多変量統計的プロセス管理（MSPC）、フォールトトレラント制御／システム、ディペンダブル制御／システム、品質管理、仮想計測、ソフトセンサー、Process Analytical Technology（PAT）、Virtual Metrology（VM）、ウェアラブルセンサ、ヘルスケア

（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	◎	↗	・研究レベルは高いが、研究者の層が薄い。
	応用研究・開発	○	↗	・欧米との比較で、より活発な産学連携が求められる。
	産業化	○	↗	・研究者層の厚い欧米企業と比較すると遅れがちに見える。加えて、製造業の現場ではベテラン運転員の技能に依存する傾向があり、それが実装を遅らせている一面がある。 ・産業分野の垣根を越えた連携が必要と考えられる。
米国	基礎研究	◎	↗	・多岐にわたる分野で質量ともに充実している。 ・NSF (National Science Foundation) は2006年のレポートにおいて、Simulation-Based Engineering Science (SBES) は科学・工学分野において米国がリーダーシップを取り続けるために不可欠であり、多岐にわたる分野の進歩にコンピュータシミュレーションが中心的な役割を果たすと述べている。これを受けて、精密なシミュレーションを前提とした各種技術開発が活発化している。
	応用研究・開発	◎	↗	・産学連携（コンソーシアム）により、基礎研究から応用研究への展開が速い。例えば、米国のTexas-Wisconsin-California Control Consortium (TWCCC) やカナダのMcMaster Advanced Control Consortium (MACC) では、産業分野の垣根を越えて分野横断型技術の研究開発が行われており、優れた産業化事例が報告されている。
	産業化	◎	↗	・グローバル巨大企業を中心に多くの産業分野で優れている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・質量ともに充実している。
	応用研究・開発	◎	↗	・研究人材が豊富で、レベルも高い。
	産業化	◎	↗	・多くの産業分野で、巨大企業を中心に優れている。
中国	基礎研究	○	↗	・質にバラツキはあるものの、研究者数・論文数が急増している。
	応用研究・開発	○	↗	・基礎研究のレベル向上を反映し、応用研究のレベルも向上している。 ・台湾からの半導体分野での論文投稿が多い。
	産業化	△	↗	・全般にまだ日本や欧米とは差がある。
韓国	基礎研究	◎	↗	・海外から優秀な研究者を集めている。
	応用研究・開発	◎	↗	・大学・企業ともに海外にも人材を求めており、レベルが向上している。
	産業化	◎	↗	・半導体や鉄鋼分野でのレベル向上が著しい。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Isermann, R. Model-based fault-detection and diagnosis - status and applications. Annual Reviews in Control. 2005, vol. 29, p. 71-85.
- 2) Venkatasubramanian, V.; Rengaswamy, R.; Yin, K.; Kavuri, Surya N. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. Computers & Chemical Engineering. 2003, vol. 27, p. 293-311.
- 3) Venkatasubramanian, V.; Rengaswamy, R.; Kavuri, Surya N.; Yin, K. A review of process fault detection and diagnosis Part III : Process history based methods. Computers & Chemical Engineering. 2003, vol. 27, p. 327-346.
- 4) Kourti, T. Application of latent variable methods to process control and multivariate statistical process control in industry. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2005, vol. 19, no. 4, p. 213-246.
- 5) Ma, J.; Jiang, J. Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: A review. Progress in Nuclear Energy. 2011, vol. 53, no. 3, p. 255-266.
- 6) Zhang, Y.; Jiang, J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. Annual Reviews in Control. 2008, vol. 32, no. 2, p. 229-252.
- 7) Kadlec, P.; Gabrys, B.; Strandt, S. Data-driven Soft Sensors in the process industry. Computers & Chemical Engineering. 2009, vol. 33, no. 4, p. 795-814.
- 8) US Food and Drug Administration (FDA). Guidance for industry, PAT - A framework for innovative pharmaceutical development, manufacturing, and quality assurance. 2004.
- 9) PMDA. “日米 EU 医薬品規制調和国際会議”.
http://www.pmda.go.jp/ich/ich_index.html
- 10) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Pharmaceutical Development Q8-”. 2005.
- 11) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Quality Risk Management Q9-”. 2005.
- 12) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Pharmaceutical Quality System Q10-”. 2008.
- 13) Kano, M.; Ogawa, M. The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey. Journal of Process Control. 2010, vol. 20, no. 9, p. 969-982.
- 14) McMaster Advanced Control Consortium. <http://macc.mcmaster.ca/>
- 15) Texas Wisconsin California Control Consortium. “TWCCC Overview”.
<http://twccc.che.wisc.edu/>
- 16) National Science Foundation Blue Ribbon Panel. Simulation-Based Engineering Science. 2006, 66p. http://www.nsf.gov/pubs/reports/sbes_final_report.pdf
- 17) Research and Development in Simulation-based Engineering and Science.
<http://www.wtec.org/sbes/>

3.2.9 環境エネルギーとシステム制御

(1) 研究開発領域名

環境エネルギーとシステム制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

環境エネルギーに関するシステム制御研究が多岐にわたるなかで、スマートグリッド (Smart Grid) ¹⁾ やエネルギーマネジメントシステム (Energy Management Systems; EMS) ²⁾ に関する研究開発が代表的な領域としてあげられる。米国では老朽化等により転換期を迎えつつある電力系統設備を刷新し、かつ低炭素化社会の実現を目指したスマートグリッドの研究開発が、日本においては再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給を最適に制御する分散協調型エネルギーマネジメントシステム構築を目指した研究開発が重要となる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地球温暖化や気象変動の影響が増す中で、質の高い生活や確かな経済的成長を維持するために、低炭素化を目指すさまざまな研究開発が 21 世紀に入り進んでいる。米国では 2009 年にエネルギー長官スティーブ・チュー (U.S. Energy Secretary, Steven Chu) がスマートグリッドに関するビジョンを発表し、研究が加速されてきている ³⁾。欧州では伝統的な環境問題への高い意識から、再生可能エネルギーの導入が積極的に進められており、日本においても東日本大震災以降、分散協調型エネルギーマネジメントシステムの構築が急務となっている ^{4, 5)}。これらの研究開発には、システム科学における制御・最適化・モデリングの学術融合に加えて、センサーやネットワーク技術の進歩が大きく貢献している。

従来型の火力発電所等からの電力供給を前提とした電力系統システム制御工学については、一定の研究がこれまで進んでいるものの、これに対して再生可能エネルギーの安定的導入を可能とする新しい電力網の構築を目指した研究は重要性が増すばかりである ⁶⁻⁸⁾。再生可能エネルギー源として代表的な風力発電 (Wind Energy) や太陽光発電 (Photovoltaics; PV, Solar Energy) は、いずれも気象状況等による変動性、不確かさ、間欠性などの技術的課題を有している。このため再生可能エネルギーの導入に際しては、停電のリスクを最小限に減じ安定供給を確保したうえで、さらに周波数・電圧を維持して高い電力品質を保つ制御方法の研究が活発に推進されている ^{9, 10)}。風力発電については、北海を臨む欧州北部を始めとして、米国・欧州共に研究が盛んである。高性能な風力発電機のメカニカル制御も進んでおり、一方で洋上風力発電についても開発が進められている。また太陽光発電については日本における研究の歴史も長く、米欧と共に研究が進んでいるといえる。関連する技術開発としては、送配電側に設置される蓄電池の効率的活用方法、広域化によるならし効果の検証などもあげられる。気象観測データや地球環境モデルに基づく風力風速・日射量など再生可能エネルギー生成に関する予測技術の向上も欠かせない技術開発分野となっている。

広域連携された電力システムの制御法についても、近年研究が活発である。センサー側における PMU (Phase Measurement Unit) あるいはシンクロフェザーと呼ばれる位

相計測装置の開発が進化したことにより、米国では老朽化しつつある電力系統の信頼度の回復を目指して、広域制御 (Wide Area Control) の研究がひとつの焦点となっている。アクチュエータ側にはパワーエレクトロニクスの発達による FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器も用いられるようになり高性能化が図られている。日本においても電力システム改革に沿って広域系統運用が実施されることになり、広域制御の重要性が高まっている。米欧と日本の間にはメッシュ状とくし型という電力系統の特徴の違いがあるが、いずれにしても周波数制御、電圧制御、AGC (Automatic Generation Control)、最適潮流 (Optimal Power Flow; OPF) など、さまざまな制御手法の高度化が進んでいる。また震災以降の日本においては、災害時においても頑強なエネルギーインフラの構築も重要な課題となっている。

米国における近年のシェールガス開発の急展開により、卸電力市場を通じた最適な電力の取り引き方法に関する研究も始まっている。対して日本においては電力システム改革に伴う全面自由化に備え、電力の小売市場の設計やインセンティブについても経済学的な見地も踏まえて考察が進められている。需要側と供給側それぞれの利己的な意志決定を社会的利益につなげるために、人間行動を考慮したメカニズムデザインの研究が望まれている。

従来は電力のいかなる需要に対しても、主に供給側を一方的に管理・制御することにより調整を実施することが常識であった。しかしこれまでのように供給側ばかりではなく、需要側をも能動的に管理していくことで電力需給の最適化を図る研究が強力に進められている。いわゆる需要のスマート化であり、電力需要の固まりをバーチャルパワープラント (Virtual Power Plant) として見立てることもできる。特にデマンドレスポンス (Demand Response) に関する手法が数多く研究報告されている。電力需要の予測方法や電力料金の設定に関しダイナミックプライシングを行う方法、さらにスマート家電・インテリジェント家電が増えていく中で可制御・可変な負荷に対するデマンドサイドマネジメント (Demand Side Management) の各種方法の研究が行われている。関連して近年米欧を中心に TCL (Thermostatically Controlled Load) のモデリングと制御に関する研究に成果がみられる。また電気自動車 (Electric Vehicle; EV) やプラグインハイブリッド車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle; PHEV) を外部電池とみなすことにより、これを効率的にスケジューリングする研究も進められている。

上述のデマンドレスポンスと共に成長が期待される分野は、各種の電力エネルギー貯蔵 (Energy Storage) に関する技術開発である。特に高性能な蓄電池 (Battery) は、送電と配電の双方の需給制御において鍵となる要素技術であり、そのシステム管理技術の確立が期待される。他に燃料電池 (Fuel Cell) も電力の需給安定化には重要な役割を果たすことになる。さらに熱エネルギーと電気エネルギーの協調も今後欠かすことができないものであり、ヒートポンプを含む CHP (Combined Heat and Power)、コジェネレーション、HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 関連の技術開発も行われている。以上のような研究開発が統合された BEMS (Building Energy Management Systems) や HEMS (Home Energy Management Systems)、さらにはマイクログリッド (Micro Grid) の構築研究が期待される。

電力を計測するための各種スマートメーターや AMI (Advanced Metering

Infrastructure) の開発整備は、これから需給安定化のみならず、その効率最適化に向けて重要な役割を果たすことになる。機器開発に関わるハードウェア的な側面の他に、機械学習理論を駆使した電気エネルギーの使用に関するデータアナリティクス手法の進展が期待される。しかしながら一方で、同時にサイバーセキュリティやプライバシーに関する研究の進展もこれから益々重要になってくるであろう。

（４）科学技術的・政策的課題

センサー側では PMU (Phase Measurement Unit) の導入、アクチュエータ側では FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器の採用を促進し、新たな制御方法の技術開発を進めて広域制御の実現を図ろうとしている。再生可能エネルギーの導入に関しても、シェールガスの開発が進む中で電力市場における経済的なインセンティブの付加や統合的なメカニズムデザインの検討を進め、新たに低炭素化を目指す方向にある。欧州は各国が一体化することでロバストなシステムを構築し、大量の再生可能エネルギーが生成される地域から大規模な需要地域へ電力が送配電されるように制御技術の開発が着実に進められている。

これに対して平成 32 年（2020 年）に向けて電力システム改革が進められようとしている中、日本では再生可能エネルギーの可能な限りの導入を実現し、広域システム運用を実施する新たな広域機関による安定かつ最適な需給調整技術の確立が重要な課題となっている。同時に、卸電力市場の活性化に加えて小売市場の全面自由化に伴い、システム運用者・市場参加者・エネルギー需要家の協調・連携による需給管理技術の確立も急務の課題である。電気エネルギーを供給するサイドにおけるさらなる広域化と、その需要サイドにおける一層の分散化が同時に進行することとなり、電力需給を最適に制御する技術の確立に向けて多くの課題がある。

米欧と日本いずれにおいても、需要家参画型の仕組みや需要のスマート化の方向性は今後も最も重要な課題のひとつとなっている。需要の予測や監視、そして制御が課題達成の鍵となってくる。スマートメーターや AMI (Advanced Metering Infrastructure) の更なる普及を見越していく中で、デマンドレスポンスの手法の開発やデマンドサイドのマネジメント手法の開発に関して一層の研究を進めていく必要がある。同時に、サイバーセキュリティやプライバシーに関する課題も複雑に絡み合っていくことと考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 米国国立科学財団 (National Science Foundation; NSF) の支援による ERC (Engineering Research Center) プログラムとして、テネシー大学等を中心とした CURENT (Center for Ultra-wide-area Resilient Electric Energy Transmission Networks) プロジェクト¹¹⁾、あるいはノースカロライナ州立大学等を中心とした FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) プロジェクト¹²⁾に注目することができる。NSF ERC は大規模で学際的な研究開発拠点を構築するための支援プログラムであり、産学連携のみならず人材育成の面にも大きな重きを置いている点などに特徴がある。環境エネルギーに対するシステム制御研究に関

連するこれら CURENT や FREEDM プロジェクトでは、最大で年間 4 億円、最長で 10 年間総額約 30 億円の支援がなされるようになっている。

- ・日本においては、平成 24 年 (2012 年) より JST CREST 研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が開始されている。8 年間で総額 40 億円の支援が見込まれている。この研究領域の運営には新たにステージゲート方式の採用が試みられており、異分野の融合展開をはかる超領域的な研究の推進が成されようとしている。同時に JST と米国 NSF、ドイツ DFG との国際連携も積極的に進められており、社会的課題達成型のイノベーションプロジェクトとして進行している。
- ・環境やエネルギーに関わるシステム制御研究が進展していくに連れて、このような研究を中核としつつさらに大きな広がりもつスマートシティ (Smart City) に関する研究の成立が注目動向としてあげられる。エネルギーと共に人間社会には欠かせない水資源のマネジメントシステム、都市や地域における暮らしと密接に関わっている交通のマネジメントシステム、さらには社会インフラや環境モニタリングをも一括し管理・制御するシステムの構築研究が統合的に進められようとしている。社会インフラと融合したスマートシティへの展開である。すでに IEEE にはこの新興の研究分野を統括するワーキンググループが発足しており、活動を始めたところである¹³⁾。IEEE Control Systems Society 内にも同様の Technical Committee が設立されたばかりであり、すでに国際会議が開かれるなどしている。

(6) キーワード

エネルギーマネジメントシステム、スマートグリッド、再生可能エネルギー、太陽光発電、風力発電、蓄電池、広域制御、電力市場、デマンドレスポンス、電気自動車、マイクログリッド、BEMS、HEMS、スマートメーター

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・JST CREST研究領域の発足などにより、異分野の融合展開による超領域的な研究が加速され、学術的な基礎研究のレベルが向上してきている。
	応用研究・開発	○	↗	・経済産業省による4地域（横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市）における実証事業などにおいて、再生可能エネルギー導入や低炭素化に向けた技術開発が進められている。
	産業化	○	↗	・JST CRESTの課題解決型基礎研究や4地域等における実証事業研究の成果を受けて、今後産業化が進んでいくことが期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	・国等からの研究費の大幅な増加に伴い、基礎研究面での研究者数・論文数が著しく伸びている。その結果、世界の基礎研究をリードしているといえる。
	応用研究・開発	◎	↗	・当初の電力システムの信頼度の回復という側面から、シェールガスの開発などを経て、低炭素化社会の実現へ向けて様々な研究プロジェクトが実施されている。
	産業化	◎	↗	・エネルギー供給側の電力システムに関する産業ばかりでなく、電力市場・エネルギー需要家サイドに関わる産業も発展しつつある。特に需要家サイドに関連する産業は裾野が広く、今後の更なる展開が期待される。
欧州	基礎研究	○	→	・理論的な基礎研究と技術的な基礎研究がバランスよく進められている。欧州北部では風力発電に関する研究が特に進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	・環境に関する高い意識を背景に、再生可能エネルギーの導入を推進する研究が活発に行われている。各国個別でなく国を超えて欧州全体を一体化して捉えた環境エネルギー問題の研究も活発である。
	産業化	◎	↗	・再生可能エネルギーによる電力供給だけでなく、電力市場や需要家サイドの管理など様々な面で産業化が進みつつあるといえる。
中国	基礎研究	△	→	・米国におけるスマートグリッド制御の基礎研究をキャッチアップしつつ、研究者や論文数が増加しつつある。しかしながら科学技術イノベーションには達していない。
	応用研究・開発	○	↗	・急速な経済成長による電力需要の増加を充足するために、国レベルの事業が行われている。また新規の都市開発型のエネルギー関連プロジェクトも始められている。
	産業化	△	↗	・社会インフラ整備や都市開発を牽引する産業の成長はこれからである。
韓国	基礎研究	△	→	・学術的な基礎研究においては他国に比べて特筆すべき動きは少ない。むしろ応用技術開発の方に傾注している。
	応用研究・開発	○	→	・済州島におけるスマートグリッド実証事業など、経済の活性化を意識した国レベルの実証事業が進められている。
	産業化	△	→	・実証事業と民間の技術開発の間にはまだギャップがあり、産業化が十分に進んでいるとは言えない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Annaswamy, Anuradha M.; Amin, Massoud; DeMarco, Christopher L.; Samad, Tariq, eds. IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond. IEEE, 2013.
- 2) JST CREST. 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開.
<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoiki/bunyah24-1.html>
- 3) Samad, Tariq; Annaswamy, Anuradha M., eds. The Impact of Control Technology - Overview, Success Stories, and Research Challenges. IEEE Control Systems Society, 2011.
- 4) 特集 グリーンイノベーションと制御理論. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 8-86.
- 5) 特集 大規模エネルギーマネジメントシステムを支える省エネソリューション. 計測と制御. 2014, 53(1), p. 2-73.
- 6) Bakken, David E.; Bose, Anjan; Chandy, K. Mani; Khargonekar, Pramod P.; Kuh, Anthony; Low, Steven H.; von Meier, A.; Poolla, Kameshwar; Varaiya, Pravin P.; Wu, Felix F. GRIP - Grids with Intelligent Periphery: Control Architectures for Grid 2050. Proc. of the 2011 IEEE SmartGridComm, 2011, p. 7-12.
- 7) Andersson, Goran; Ilic, Marija D.; Madani, Vahid; Novosel, Damir, eds. Special Issue on Network Systems Engineering for Meeting the Energy and Environmental Dream. Proc. of the IEEE. 2011, vol. 99, no. 1, p. 15-232.
- 8) Chakraborty, Aranya; Ilic, Marija D., eds. Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids. Springer, 2012.
- 9) Fagiano, Lorenzo; Morari, Manfred; Rotea, Mario A.; Stewart, Greg, eds. Special Section on To Tame The Wind: Advanced Control Applications in Wind Energy. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013, vol. 21, no. 4, p. 1045-1222.
- 10) Annaswamy, Anuradha M.; Callaway, Duncan; Chow, Joseph; DeMarco, Christopher L.; Hill, David; Khargonekar, Pramod P.; Rantzer, Anders; Stoustrup, Jakob eds. Special Section on Control Theory and Technology. IEEE Transactions on Smart Grid. 2014, vol. 5, no. 4, p. 2031-2172.
- 11) NSF ERC. CURENT. <http://curent.utk.edu/>
- 12) NSF ERC. FREEDM. <http://www.freedm.ncsu.edu/>
- 13) IEEE Smart Cities. <http://smartcities.ieee.org/>

3.2.10 都市インフラとシステム制御

(1) 研究開発領域名

都市インフラとシステム制御

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

都市インフラシステムは、個々のサブシステム間の複雑な相互作用および相互干渉を含む大規模分散階層ダイナミカルシステム、つまりシステムのシステム (system of systems) と見なすことが出来る。その主な構成要素としては上下水道網¹⁻⁴⁾、交通網⁵⁻⁷⁾、送電網^{8, 9)}、情報網¹⁰⁾が挙げられる。これまでは、都市インフラの各要素がどのように相互作用・相互干渉し、その結果、大規模な動的システムが構成されているかについてシステム制御工学的な解析が充分に行われていなかった。豪雨による土砂災害 (2014) や東日本大震災 (2011) のような最近の大規模天災は、現在の都市インフラシステムにおける個々の社会基盤システム間の相互連携不足を露呈し、現状の都市インフラシステムが災害や事故に脆い事実が改めて浮き彫りとなった。現在、都市インフラシステムのモニタリングおよび制御のために、情報端末や計測制御装置が導入され始め、これに伴い都市インフラシステムの各サブシステム間の相互依存度が益々高まってきている^{11, 12)}。

都市環境の成長度は一般に人口もしくは人口密度で表現出来る。つまり都市インフラシステムは、システム工学的には、水、電気、天然資源を入力、排出物・廃棄物を出力、人口もしくは人口密度をシステムの状態として扱うことにより、システム科学アプローチが応用出来るであろう¹³⁾。現在、システム理論、制御理論、情報理論、意思決定理論および持続可能な設計からの概念を使用し、都市インフラシステムの分析、設計および最適化について研究が行われつつある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 複雑な都市インフラシステムの動的モデリング

都市インフラシステムは、時間的にも空間的にも振舞いも形態も一種のダイナミカルシステムと見なすことが出来る。更にはこのダイナミカルシステムは決定論的/確率論的性質を有する高度に複雑な系である。大規模複雑系である都市インフラシステムを時変システムとしてモデリングし、得られたモデルを用いて、サブシステム間の干渉、独立を含めた複雑動的システムの振舞いを予測・分析する研究が進んでいる^{14, 15)}。

(3-2) サイバーフィジカル都市インフラシステム

サイバーフィジカルシステムは、実世界 (Physical System) に浸透した組み込みシステムが構成するセンサネットワークの情報を、サイバー空間 (Cyber System) の強力なコンピューティングツールと結び付け、より効率のよい高度社会を実現するためのサービスおよびシステムである。都市インフラシステム分野においては、埋め込みセンシング、コンピューティングと制御技術に関する研究が盛んであり、特にスマートセンシングインフラ、高度交通網 (ITS)、サブエリアの電力モニタリングと制御、上下水道分配システムについての研究が進んでいる¹⁶⁾。

（3-3）都市インフラシステムの適応力と回復力

高層ビルと大型橋梁のような大型構造物は、長期間にわたる耐用年数の間に継続して安全性を保持することを要求されるため、地震、台風、突風、高潮、高波、風雪などの極端な負荷に起因する巨大な不確実性も考慮して設計されなければならない。今日の都市インフラシステムが直面する主な挑戦課題の1つは、これらの極端な負荷による破壊と損害のリスクを軽減し、かつ都市のインフラストラクチャーの回復力を増強する方法の探索である。例えば、大型構造物の動的な振舞いや動的な構造に適応するため、アクティブ/パッシブ制御システムを構築して極端な変形およびストレスを抑え、さらには大型構造物が破損・故障した時には、スマートに形状と剛性を適応的に再構成・再設計させる構造について研究が進んでいる。

（3-4）超低消費電力センシングと都市インフラシステムの状態推定

大規模で知的な都市インフラのフィードバック制御を実現するには、リアルタイム最適化や意思決定のための大規模リアルタイムセンサネットワークの構築が必要である。このためにはセンシングデバイスの低コスト化とダウンサイジング、そしてセンサバッテリーの長寿命化と超低消費電力センシングデバイスの開発を進めなければならない。この都市インフラの計測データセットは莫大になり、所謂ビッグデータとなるため、システム制御理論、コンピュータサイエンスおよび機械学習理論などを駆使して有効活用する研究が進展している。

（3-5）スマート水道網

従来の水道システムでは、一般消費者の水消費需要に対応するため、様々な所有権および管理境界は緩く相互連結していたに過ぎず、端部での流入流出量などの部分的な流量計測が長周期で行われていた。スマート水道網では、計測制御技術とICT技術の進展に伴い、全水道網の状態をリアルタイム計測することにより、水流と情報の流れを連繫させ、水道網を完全自動制御出来るだけでなく、水道管のトラブルなどの故障検出も可能となる。また水需要に合わせた効率的な水分配の実現を目指している。さらに、消費情報を基に、当該エリアにおける社会・経済活動についてもデータを蓄積することが出来る。

（3-6）環境発電

社会システムに電力エネルギーを給電するシステムとして、従来の発電機を用いない環境発電が注目されている。具体的には、社会システムの振動現象からエネルギーを抽出することが期待されている。抽出した電力を都市インフラのモニタリングのためのデバイス駆動に使用すれば、これらのデバイスは一般に消費電力が少ないので、サステナブルなモニタリングが可能となる。またモニタリング用のセンサデバイスは、対象システムに埋め込まれるケースが多く、そのため物理的にアクセスし難く、バッテリー交換は現実的でない。そのような場合、アンビエント振動エネルギーは、センサへ供給可能な数少ない動力源のうちの1つである。また別の例として、海上波発電システムは、浮遊システムが電力変換システムと接続され、海岸のコミュニティに電力を供給する。

これら両方の例において、振動エネルギーの有効利用には、電力変換技術の基本的制約およびエネルギー源の予測困難な振舞いを扱う必要がある。

（４）科学技術的・政策的課題

都市インフラと制御に関しては世界的に研究が推進されており、日本に於いてもこの分野の強化を早急に実施しなければならない。次節「（５）注目動向」で述べるワークショップ②では MIT の建設工学科の研究者と制御工学者、情報工学者が共同研究することにより、新領域における研究を推進している。日本においては土木建設に関する学界、研究グループが比較的閉じているためか、このようなコラボレーションはあまり見受けられない。

甚大な被害が想定される大規模災害に対し、新しい防災アプローチのパラダイムとして、予防だけでなく、回復力を加味したレジリエンス（回復性、強靱性）を高めるため、社会科学、人文科学等も含めた幅広い学術分野の総合的な研究開発を進め、強く弾力性のある社会の実現を目指すことが重要である。

渋滞や交通事故の抜本的な削減、環境負荷の低減など安全・安心で快適な交通社会を実現するため ITS を高度化することが重要である。これにあわせて、安全・安心で快適な生活を目指すスマートコミュニティの実現も見据えて技術開発を行うことが必須である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2014年12月にロサンゼルスで開催された 53rd IEEE Conference on Decision and Control 2014 は世界的にも制御理論に関して質、量ともに一流の会議であるが、その会議において社会インフラと制御に関する以下の 2 つのワークショップが開催されたことは特筆すべき動向であり、この事実はこの分野の大きな発展と今後の展開の兆候を示している。

①社会的規模のサイバーフィジカルシステムのためのビックデータ解析¹⁷⁾

カリフォルニア大バークレイ校の S. Shankar Sastry を中心にカーネギーメロン大、マサチューセッツ工科大、スウェーデン王立工科大の研究グループが集まり、レジリエントな（回復力を有する）社会的規模のサイバーフィジカルシステム（CPS）について議論している。本ワークショップでは最も急速に発展している CPS、特にエネルギー部門に注目し、社会的規模の CPS のための工学的アプローチとして自動制御、システム同定、圧縮センシング、プライバシー、セキュリティおよび機械学習を紹介している。またこれらの応用分野としての産業的ニーズ、インセンティブ設計、災害からの回復力とセキュリティ、プライバシー保護の制御工学的手法についても紹介している。

②災害からの回復力を有するサイバーフィジカルインフラシステム¹⁸⁾

マサチューセッツ工科大建設工学科の Saurabh Amin と Hamsa Balakrishnan を中心にイリノイ大学、ジョージア工科大、スウェーデン王立工科大、ハネウエルの研究グループが集まり、偶発的な故障およびテロやアタックの両方に対する回復力を有するインフラストラクチャーの構築問題について議論している。現代のインフラシステムは高度の ICT の発達により益々相互連結度を高めているため、ネットワーク制御の問題およびカスケード故障の問題の重要性が高まっている。この問題に対して、災害回復力のあるインフラシステムの構築への制御工学とシステム理論的なアプローチ

に関する研究が進展している。具体的には、フォールトトレラント制御、ロバスト制御・最適化を含むサイバーフィジカルシステム、侵入検知、セキュリティ、ソフトウェア検証、ヒューマン・オートメーション相互作用、メカニズム・デザイン、モデリングシミュレーションなどが挙げられる。これらの技術は、交通輸送、電気エネルギー、通信および水道と都市ガスのシステムのような一連の社会インフラシステムのために研究されてきた。このワークショップでは、災害からの回復力のあるサイバーフィジカルインフラストラクチャーを構築するために、制御理論的アプローチの中でも最先端技術のものを紹介している。

（6）キーワード

都市インフラシステムの動的モデリング、サイバーフィジカル都市インフラシステム、適応力と回復力、超低消費電力センシング、状態推定・状態予測、スマート水道網、環境発電

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 国交省を中心に構造物への対策（老朽化、長寿命化、低コスト化）、設備・サービスの強靱化、ハード/ソフト施策間の連携に関して研究開発が進められている。 ビックデータに関するプロジェクトが2014年度にスタートしているが、土木建設、制御、最適化の分野の参画は十分と言えない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 横浜、豊田、けいはんな、北九州でスマートグリッドに関する実証実験が進んでいる。
	産業化	×	↑	<ul style="list-style-type: none"> 東日本大震災後、再生可能エネルギー導入に関わる動きが活発化し特に太陽光発電とスマートメータ導入が進んでいる。 2013年に電力システムの改革方針が閣議決定され、2020年を目途に送配電分離とリアルタイム市場の創設が準備されつつある。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> サイバーフィジカルシステム、サイバーセキュリティーに関して盛んに研究が進んでいる。土木建設、制御、情報、通信、機械学習などの分野が横断的に連携した研究が進みつつある。 NSFで2009年より Resilient and Sustainable Infrastructures に関する大型ファンディングが進んでいる。 NISTでは2009年より Advanced Sensing Technologies for the Infrastructure: Roads, Highways, Bridges and Water Systems も進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ICTと連携した様々なビックデータの収集、応用展開に関する研究開発が強力に推進されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> スマートグリッド関連事業への助成を背景に、多くのプロジェクトが進んでいる。 電力網については老朽化した設備が増えてきているが、ITを活用してその更新費用を抑えつつ、供給信頼度向上を目指すプロジェクトが進んでいる。 州間電力連繫、カナダやメキシコとの国際電力連繫に関するプロジェクトが進んでいる。

研究開発領域
制御区分

欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・歴史的に社会インフラ（電力網や上水道）の国際連携が進んでいるため、それをニーズとして、大規模複雑システムの研究が進んでいる。 ・欧州発祥のIFAC（国際自動制御連合）では社会インフラを扱ったLSS（Large Scale Complex Systems）というSymposiumが隔年で開催されている。最近の主なトピックスはスマートグリッドやセキュリティである。 ・2011年よりMAINLINE（MAINtenance, renewaL and Improvement of rail transport iNfrastructure to reduce Economic and environmental impacts）というプログラムが進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・電力網の国際連携、上水道の国際連携に関わる研究が昔から行われており、歴史的にも社会インフラの制御技術に関して先駆的に研究が進んでいる。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・スマートグリッドの重要要素技術であるスマートメーターの導入が2000年代に入って急速に伸びている。 ・ドイツではE-Energyプロジェクトが2008年より展開されている。鉄道、道路など個別分野で専門的な老朽化対策プロジェクトが組まれている。
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・The 13th IFAC Symposium on Large Scale Complex Systemsを誘致し、2013年に上海で開催している。これに伴い研究者層が増えている。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・社会インフラ整備が未整備なエリアが多く、盛んに開発が行われている。
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・都市部では交通・物流、エネルギー、通信等のインフラ整備が進むと共に、国際比較で遅れ気味の汚物処理等のインフラの整備が進む。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・論文数は増加の傾向にあるが、米国、欧州と比べるとそれほど盛んとは言えない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・済州島のスマートグリッド実証事業を推進しており、スマートグリッドなど電力インフラの応用開発が盛んである。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・2011年に世界初のスマートグリッド支援に係る法律を制定するなど、電力インフラの産業化を官民一体で推進している。 ・2010年にスマートグリッド普及ロードマップを作成し、これに沿って法整備を進めている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Brdys, Mietek A. Operational Control of Water Systems: Structures, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, 1994.
- 2) Sampathirao, Ajay Kumar; Grosso, Juan Manuel; Sopasakis, Pantelis; Ocampo-Martinez, Carlos; Bemporad, Alberto; Puig, Vicenc. Water demand forecasting for the optimal operation of large-scale drinking water networks: The Barcelona Case Study. Preprints of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2014, p. 10457-10462.

- 3) 長岡裕. 上下水道施設におけるシミュレーション技術の現状と今後. 環境システム計測制御学会誌. 2012, p. 3-6.
- 4) 柏木雅彦, 臼井正和. 上下水道システムの現況と新しい概念. 電気学会誌. 1991, vol. 111, no. 3, p. 211-218.
- 5) Chen, Bo; Cheng, Harry H. A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2010, vol. 11, no. 2, p. 485-497.
- 6) Kamal, Md. Abdus Samad; Imura, Jun-ichi; Hayakawa, Tomohisa; Ohata, Akira; Aihara, Kazuyuki. Smart Driving of a Vehicle Using Model Predictive Control for Improving Traffic Flow. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems. 2014, vol. 15, no. 2, p. 878-888.
- 7) Chien, C. C.; Zhang, Y.; Ioannou, P. A. Traffic density control for automated highway systems. Automatica. 1997, vol. 33, no. 7, p. 1273-1285.
- 8) Camacho, E. F.; Rubio, F.; Berenguel, M.; Valenzuela, L. A survey on control schemes for distributed solar collector fields (part 1 and 2). Solar Energy. 2007, vol. 81, p. 1240-1272.
- 9) Varaiya, Pravin P.; Wu, Felix F.; Bialek, Janusz W. Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch. Proceedings of the IEEE. 2011, vol. 99, no. 1, p. 40-57.
- 10) Giani, Annarita; Bitar, Eilyan; Garcia, Manuel; McQueen, Miles; Khargonekar, Pramod; Poolla, Kameshwar. Smart Grid Data Integrity Attacks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2013, vol. 4, no. 3, p. 1244-1253.
- 11) 倉田成人. 都市のスマートセンシング. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11, p. 943-945.
- 12) 柴崎亮介, 関本義秀, 藤田秀之. 都市情報センシング. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11, p. 946-952.
- 13) van Beurden, Heidy. Smart City Dynamics : Inspiring views from experts across Europe. HvB Communicative BV. 2011.
- 14) Zhang, Pengcheng; Peeta, Srinivas. Dynamic and disequilibrium analysis of interdependent infrastructure systems. Transportation Research Part B. 2014, vol. 67, no. 9, p. 357-381.
- 15) Eusgeld, Irene; Nan, Cen; Dietz, Sven. "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures. Reliability Engineering & System Safety. 2011, vol. 96, no. 6, p. 679-686.
- 16) Li, Husheng; Dimitrovski, A.; Song, Ju Bin; Han, Zhu; Qian, Lijun. Communication Infrastructure Design in Cyber Physical Systems with Applications in Smart Grids: A Hybrid System Framework. IEEE J. of Communications Surveys & Tutorials. 2014, vol. 16, no. 3, p. 1689-1708.
- 17) <http://www.eecs.berkeley.edu/~ratliff/CDC2014WS/cdc2014ws>
- 18) <http://www.mit.edu/~hamsa/CDC2014ResilientInfrastructureWorkshop.html>

3.3 最適化区分

3.3.1 最適化コアモデルと関連諸技術

(1) 研究開発領域名

最適化コアモデルと関連諸技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

最適化という学問分野を一言で述べるならば、「関数を最小化(最大化)するための数理とアルゴリズム、そして、それに拘わるモデルやモデリングの方法論」である。システム科学や数理科学において、最適化はそれ自身が研究対象となると同時に、他の諸分野の道具となるという点において、勝れて横断的な分野である。道具として普遍的であるという点では、一面、数学と類似した性格を有する。モデリングの道具立てとしての最適化には2つの側面がある。(1)現実を一番よく説明するモデルを構築するための最適化、(2)モデルに基づいて最適にシステムを設計するための最適化。最適化には大きく分けて「数理最適化」と「シミュレーション最適化」の2つがある。前者は線形計画を代表とする数理に裏付けられた最適化であり、基本的に厳密最適解を求めることを指向する。後者は遺伝的アルゴリズム等、生物学や物理学における最適化過程のメタファーを計算機上で実現する最適化手法であり、良い解を求めることを指向し、必ずしも厳密な最適解を求めることには拘らない。本研究開発領域では、数理最適化に重点を置くが、道具としての普遍性を主張する以上、両方に目配りする必要がある。システム科学として分野融合的な広い視点に立った研究者や技術者が活躍する上での基盤を求めたい。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本領域では、シミュレーション最適化にも一定の注意を払いつつも、数理最適化により重点を置く。ここで、数理最適化を、「連続的最適化」、「離散的最適化」、そして「最適化モデル」の3分野に分ける。連続的最適化は連続空間での、離散最適化は組み合わせの最適化である。そして、最適化モデルとは、「線形計画、凸2次計画、半正定値計画、ネットワーク、劣モジュラ関数最適化等といった、有用な構造を持ち、それを効率的に解くことができる一連の問題」である。最適化モデルの分野は、「他分野のモデリングに最適化モデルを積極的に活用できる」という点で、分野融合的な視点から非常に重要である。最適化を最適化のアルゴリズム開発という視点のみで捉えるのでは、あくまでも、最適化はモデリングにかかわるといよりは、単にモデルを最適化する「道具」に過ぎないが、最適化モデルとここで呼ぶ一連の問題があるために、他分野でのモデリングにより積極的に活用される。このような背景を念頭に、以下では、最適化という分野のシステム科学や数理・モデリング科学の中での位置づけ、他分野とのかかわりを意識して検討材料を提供したい。

(3-1) 数理最適化の“文化”

方法論としての数理最適化の特徴は「最適解」を求めることに対する拘りである。「あくまでも厳密な最適解を求める」という精神を大事にしてきたことで最適化の分野は発展してきた。難しい最適化問題に対し、その制約領域をより広げ簡単化することで得ら

れる最適化問題を「緩和問題」という。緩和問題を活用することで、元の問題の最適解や最適値に関する近似解を得ることができる。また、双対問題を考えることによって、元の問題の最適値の厳密な見積もりができる。緩和問題や双対問題の活用によって、難しい問題の最適解を厳密に求めようとする、これはある意味で、その分野を特徴づけるオタクな部分であり、風土であるといえる。しかし、システム科学における最適化は、この精神を基軸としつつもよりダイナミックに近隣分野と相互作用して発展していく、より開かれた形での分野であるべきであろう。最適化の分野では、アルゴリズムの発展により、新しい最適化問題が解けるようになると、それがさらに新しいモデリングの契機となる。しばしばそれが、さらなるアルゴリズムや関連する数理の進展を促すという段階的な発展を促す。このダイナミズムは随所に見られ、分野横断型の研究の推進力となっている。その核となってきたのが、線形計画、凸2次計画、半正定値計画等の「最適化モデル」である。もちろん、最適化モデルの研究自身が、上述のオタク的精神の賜物であることはいままでのない。一方、世の中で最適化が利用されるときには、ユーザーは「良い使いやすい解」を得ることを指向しており、「厳密な最適解の価値」は必ずしも高くないことに留意すべきである。目的関数はユーザーがしたいことの「第0近似」に過ぎない。

(3-2) 最適化自身を研究することと個別分野での最適化研究との違い

数理科学やシステム科学の営みとして、モデルを構築し、そのパラメータを目的関数を調整することにより、最適化することが行われる。そこで、個別分野ごとに分野の特質を生かした最適化手法などが開発される。その典型例が統計学や機械学習におけるEMアルゴリズムである。一方、最適化分野で主として研究されるのは、

- (A) 準ニュートン法や非線形最適化法、分岐限定法など、一般的な枠組みの問題に対する数理とアルゴリズム。
- (B) 豊富な良い構造を持ち、多くの問題がそこに帰着され、効率的な解法が存在する問題、典型的には線形計画問題や半正定値計画問題、劣モジュラ関数最小化などに関する数理とアルゴリズムとモデリング。
- (C) 豊富な良い構造を持ち、多くの問題がそこに帰着されるが必ずしも効率的な解法が存在しない問題、典型的には巡回セールスマン問題や最大カット問題等に関する数理とアルゴリズムとモデリング。

他分野との関連でいうと、(A)のような研究成果は、各分野ごとに解きたい問題の特徴を有効に生かして各個別分野ごとのアルゴリズムに深化する。(B)のような枠組みは、「最適化モデル」に相当し、別分野での新たなモデリングの可能性を追求する強いモチベーションを与える。(C)は、多くの場合混合整数計画問題に帰着するが、個別の問題に対して効率的なアルゴリズムを得ることを目指して研究が行われる。

(3-3) 最適化のモデリングへの影響

最適化が計算推論における基本的なエンジンの役割を果たす以上、最適化技術の展開は種々のモデリングに根本的な変化をもたらす可能性がある。その例は凸2次最適化によるサポートベクターマシンや制御理論における半正定値計画法である。前者は1990年代初頭に内点法によって凸2次最適化が実用化されることによって、着想された方法である。後者についても内点法により半正定値計画問題が実用化は分野に大きな影響を

与えた。数理ファイナンスの分野における平均・分散モデルなども、凸2次最適化が実現されることによって新しい展開を遂げた。また、現在非常に活発に研究されている、圧縮センシングの分野では、線形計画や半正定値計画が単なる解法ではなく、モデリングの枠組みあるいは方向性を定める上で重要な役割を果たしている。今後、特に重要な影響があると思われるものに、混合整数計画問題と半正定値計画問題を挙げておく。これらの問題については、モデリング側からの求解に対する要求がより強い。現在の計算機の高性能化を考えると、現時点においても、混合整数計画問題の強力なソルバーと Excel 上でのモデリングシステムがリンクされた形でしかもフリーな形で提供されると社会的インパクトは相当に大きいと考えられる。

(3-4) 問題の大規模化

近年本分野で問題となっていることに問題の大規模化がある。特に機械学習や大規模データ(しばしばビッグデータなどと称される)解析、2次元・3次元データを扱う分野では、数百万変数、数千万変数の最適化問題を解く必要がある。典型例が、画像や時空間モデル、データ同化、マーケティングデータ等の最適化であるが、これらの最適化問題においては、降下方向を求めることすら容易ではない。ある意味では、現在は、1950年代、60年代に状況が似ているともいえる。すなわち、解きたい問題のサイズに対して計算機の手速や記憶容量が追い付いていかない部分がある。また、問題の大規模化により、計算精度が倍精度では不足するなどの計算インフラ上の問題もある。

(3-5) 確率的最適化と応用

最近、機械学習、そして金融工学をはじめとするリスク管理に関連する分野では、シミュレーションを通じて確率的に計算される関数の最適化やさまざまなシナリオが確率的に実現される状況での最適戦略を求める確率計画法、問題に含まれる不確実性を考慮した上でミニマックス最適解を求めるロバスト最適化等が重要になり、盛んに研究が進められている。確率的最適化の考え方は超大規模最適化問題を解く上でも有効である。リスク管理がモデリングの分野として重要になりつつある現在、確率的最適化と応用は注目すべき研究分野である。

(3-6) 最適化の数理・アルゴリズムと関連分野

最適化が関連する分野として大きいのは、数学と計算機科学である。後述するように、最適化問題の解法の計算複雑度は、計算機科学分野と密接な関連を保って進展してきた。数学については、最適化の分野の自律的な研究結果として得られてきた数学理論とより広い範囲で相互的に影響しあってきた分野がある。たとえば、前者としては連続的最適化問題の最適性条件、双対理論、後者としては凸解析と関数解析、内点法と Euclidean Jordan 代数、実代数幾何と多項式最適化 などがある。近年の流れとして、数理として研究されてきたものが具体的に計算することを意識して見直されているものも多い。特に半正定値計画問題に代表される凸最適化の実用化は、数学的研究対象としての凸性を、計算やアルゴリズムを意識した立場から見直すことにつながりつつあると考えられる。(類似のことは、過去にグラフ理論について、ネットワーク問題等の見直しから考えられた。) また、計算という立場からは、数値計算の分野と最適化も密接な関連がある。連続的最適化のアルゴリズムを最適解へ流れ込むベクトル場を追跡して解析することがよく行われるが、これは力学系や微分幾何、情報幾何等とも密接に関連する。離散

最適化におけるランダム化アルゴリズムの解析は、確率・統計等とも関係がある。微分方程式をデータに合わせる分野は近年データ同化といわれ注目を集めている。この分野も大規模最適化を必要とする。統計や機械学習の分野では、データからのオンライン(オフライン)学習、情報理論の分野でも符号長最短化という視点で最適化が行われる。制御におけるモデル同定もある種の最適化である。

(3-7) 最適化モデルとその発展の歴史

本稿では「最適化モデル」を1つの重要な軸として論を展開しているが、以下に、最適化モデルを中心とした最適化の進展を概説する。歴史的には最適化は統計学の最小二乗法やL1回帰との繋がり、力学と線形等式・不等式系との関係、物理学における変分原理、オイラーの一筆書きやハミルトン閉路等に断片的にその前史を認めることができ、さらに、1930年代ソ連の Kantorovich や Leontief による線形計画による経済の解析などへと続く。しかしながら本格的に最適化が学問分野として勃興したのは、1947年、Dantzig による線形計画問題に対する単体法の発見ののちのことである。線形計画問題の特徴は、連続的最適化でありかつ離散的最適化である点にあり、線形計画法を礎として、連続的最適化の分野では、最急降下法や Newton 法、準 Newton 法等のアルゴリズム、そして、最適性条件等の数学的理論や凸解析などの分野が1960年代から1970年代にかけて発展した。離散的最適化の分野では、グラフやネットワークに関するアルゴリズムが同様に1960年代から1970年代にかけて発展した。両方で重要な役割を果たしたのが、双対理論である。アルゴリズムと数理という立場からみると、最適化分野の初期の発展は上記のように要約できよう。モデリングの観点からも、線形計画問題は「簡潔で豊かな構造を持ち、多くの問題をそこに帰着することができる」という点で画期的であった。「豊かな数理的構造とそれを解く優れたアルゴリズムが存在する最適化問題」があつてはじめて最適化モデリングという分野が成立する。線形計画問題にかかわる「モデリング・数理・アルゴリズム」の分野が包括的に線形計画「法」という言葉で呼ばれる所以である。

1970年代、計算複雑度の理論が勃興したことは、最適化分野に大きな影響をもたらした。最適化問題の求解の手間を評価する視点が生まれ、まず、離散的最適化の分野においてさまざまな成果が得られた。1979年、ハチヤンが線形計画問題が楕円体法によって多項式時間で解けることを示した。楕円体法は実用的アルゴリズムではなかったが、離散的最適化問題のアルゴリズムの理論の発展に大きく寄与した。そして、1984年、カーマーカーによって、線形計画問題に対する実用的多項式時間解法である内点法が発見された。

内点法は、90年代にかけて、凸2次計画問題、さらに、凸計画問題に一般化された。これにより、特筆すべきは、半正定値計画問題である。半正定値計画問題は、線形計画と驚くべき類似性が成立する最適化問題である。半正定値計画問題は、線形計画問題に引き続く有力な最適化モデルであり、21世紀の線形計画問題と呼ばれることもある。線形計画問題に対しては線形計画法という分野が確立しているが、半正定値計画問題に関するモデリング・数理・アルゴリズムは未だに発展途上であり、数理諸分野で現在活発に研究されている。

(3-8) シミュレーション最適化の進展

先にも述べた通り、近年、タブサーチ、遺伝的アルゴリズム、Particle Swarm 最適化等、シミュレーションベースの最適化の活用分野が広がりつつある。これらの手法の嚆矢となったのは、シミュレーテッド・アニーリングであり、これらの手法は、多数の最適化候補が相互作用しつつより良い最適解を構成するよう協調する、という点に特徴がある。これらの手法は、目的関数が計算できさえすれば適用できることもあり、その実行においては、非常に多数回の目的関数を計算する必要があるとしても、計算機の性能が向上したため、工学の多くの分野で利用されており、注目すべき分野である。エージェントベースシミュレーション等の人工生命分野はもちろんのこと、統計や機械学習分野における、ベイズ推定やマルコフチェーンモンテカルロ等の分野との関連も興味深い。ただし、データ同化など、目的関数自身の計算がスパコンを用いないと不可能であるような超大規模問題への適用は困難である。

(3-9) 研究開発領域としての最適化

分野としての横断的な性格を強調し、システム科学諸分野と最適化がネットワーク状の形、あるいは融合的な形で結びついた形での広い研究開発領域を設定するべきと考える。

(3-10) 今後重要となると考えられる課題

以下に掲げる問題が重要であり、システム科学の深化に資するものと考えられる。

○他分野とのかかわりにおいて

機械学習や統計分野における超大規模最適化

機械学習とオンライン最適化

データ同化における最適化

人員配置やスケジューリングにおける最適化

信号処理や制御分野における最適化モデリング

実問題での最適化モデリング方法論（現場で使える解とのギャップの問題）

正定対称行列に関する数理とモデリング

○最適化分野

21世紀の線形計画を古典的線形計画法と同レベルの完成度を持った技術に仕上げていく

線形計画、半正定値計画、対称錐計画に引き続く「最適化モデル」の探求

凸性によるモデリング、緩和による難しい最適化問題の解法と凸最適化

行列の最適化

超大規模連続的最適化

大規模整数計画法

確率計画法

シミュレーション最適化：遺伝的アルゴリズム・メタヒューリスティクス・多目的最適化等

（3-11）分野の国際的な位置づけ

SIAM、ICAIM 等の応用数理系国際学会では、重要な役割を果たしている。

（3-12）我が国の位置づけ

我が国は、最適化分野では、優れた仕事を着実に輩出している。より具体的には、

1. 内点法と関連ソフトウェア
2. 非線形最適化と関連ソフトウェア
3. 相補性問題や変分不等式
4. 劣モジュラ関数最適化や離散凸解析
5. ネットワークフローやグラフ理論

等の分野において世界トップレベル（目安として、論文の引用数が 100 を超える、その業績が評価されることにより国際学会で特別講演をつとめる、あるいはトップジャーナルの編集者をつとめる）の業績が一定数ある。総合的に見て分野としては米国が一番進んでいるが、確実にその次の研究レベルは保っていると考える。一方、特に重要な分野である大規模整数計画法では米国やドイツのなどには劣ることが気になる。また、確率計画法など今後重要と思われる分野の研究者の層が薄い。従来蓄積の上に立ってさらに、幅広い視野を持ち、システム科学のいくつかの分野で横断的に活躍できる優秀な才能を集めて研究を進めることが重要である。

（4）科学技術的・政策的課題

大規模データ処理に関する最適化、人員配置やスタッフスケジューリング、確率最適化、Excel と混合整数計画ソルバーを基にした最適化モデリングシステム

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

圧縮センシング、大規模混合整数計画

（6）キーワード

機械学習、信号処理、画像処理、制御理論、統計学、データマイニング、凸最適化、半正定値最適化、線形最適化、整数最適化、0-1 最適化、確率的最適化、大規模最適化、スケジューリング、配送問題、人員配置、多目的最適化、モデル正則化、オンライン最適化

（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	○	→	・連続最適化における内点法・離散最適化における劣モジュラ関数最適化等、世界的にトップレベルの成果を生み出してきており、欧州と並び米国に引き続くレベルにあると考えられる。レベルを維持するために後継者の育成が重要。一方、広い視野を持った研究者の育成も重要である。
	応用研究・開発	○	→	・半正定値計画のためのSDPA、最適化パッケージNUOPTなど、世界的にトップレベルのソフトウェアが生み出されているものの、単体法や整数計画のソフトウェアにおいては課題がある。高齢化社会の到来に対処するための人員配置やスケジューリング等に関する最適化、画像処理や高次元データ処理、機械学習のための超大規模最適化アルゴリズムが重要であると考えられる。
	産業化	○	→	・レベルは低くないが、問題のモデリング・最適化というアプローチの有効性への認識を高めるためにさらなる展開が必要である。
米国	基礎研究	◎	→	・ほぼすべての分野において、MIT、コーネル、スタンフォード、ジョージア工科大学等に、世界トップレベルの研究者を多数擁し、名実ともに世界トップである。情報数理の他分野とのボーダレス化が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	・横型研究者が一定数おり、また、IMA、INPA、Banff International Research Station、Fields Institute 等研究集会等も盛んに行われており、異分野間の連携が柔軟に行われており、層の厚みも相俟って、この点でも世界トップである。
	産業化	◎	→	・ソフトウェア、コンサルテーション両方の側面があるが、双方とも豊富で優秀な人材が必要に応じて大学と連携しながら優れた製品を生み出している。大学研究者の起業が容易である点も重要である。
欧州	基礎研究	○	→	・総合的に見て、EU全体として比較すると、日本よりも水準は若干高いとも見えるが、個別の国レベルで見るとほぼ日本と同等と考えられる。日本と同様、各国において、トピック別に世界的に見て強い分野が幾つかある。
	応用研究・開発	○	→	・EUを通じた連携があり、さまざまなプロジェクトが進められておりその点は日本より有利であると考えられる。ドイツでは(混合)整数計画法の優れたソフトウェアが開発されている。
	産業化	○	→	・国により異なるが、日本と同レベルであると考えられる。
中国	基礎研究	△	↗	・平均レベルは必ずしも高くないが、研究者の数が多く、米国で活躍している中国人研究者と連携しており、トップレベルはそれなりのものである。
	応用研究・開発	△	→	・現在は産業的なインフラが必ずしも整っていないが伸びしろは相当あると考えられる。
	産業化	△	→	・現在は産業的なインフラが必ずしも整っていないが伸びしろは相当あると考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	・特に見るべき成果はない。長期的には伸びてくると考えられる。
	応用研究・開発	△	→	・特に見るべき成果はない。長期的には伸びてくると考えられる。
	産業化	△	→	・特に見るべき成果はない。長期的には伸びてくると考えられる。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

本報告をまとめるにあたって参考としたものは以下の資料である。

- ・オペレーションズ・リサーチ 2005 年 4 月号特集「モデリング —最適化モデリング—」
(企画担当：池上敦子)
- ・オペレーションズ・リサーチ 2005 年 8 月号特集「モデリング —広い視野を求めて—」(企画担当：池上敦子)
- ・オペレーションズ・リサーチ 2007 年 4 月号「モデリング —さまざまな分野、さまざまな視点から—」(企画担当：池上敦子、土谷隆)

以上については、国立情報学研究所 CiNii (<http://ci.nii.ac.jp/>)より各記事をダウンロード可能。

モデリング的な視点から書かれている凸最適化の教科書として、B.Boyd and L.Vandenberghe: *Convex Optimization* を挙げておく。

最適化アルゴリズムの最近の国際的な研究動向については、<http://www.optimization-online.org/> (最適化のプレプリントサーバー)、*Mathematical Programming*, *SIAM Journal on Optimization*, *Mathematics of Operations Research* 等の学術雑誌に掲載されている各論文が参考となる。

機械学習分野における最適化への関心の高まりについては、例えば、書籍 *Optimization for Machine Learning* (eds. S.Sra, S.Nowozin, S.J. Wright, MIT Press, 2011) や *Journal of Machine Learning Research*、国際会議 NIPS 会議録等を参照のこと。

制御と最適化のかかわりについては、例えば、岩崎徹也: *LMI と制御*、培風館、1997 を参照のこと。

圧縮センシングについては、*Proceedings of the IEEE*, vol.98, no.6 (2010 June) の Special Issue, *APPLICATIONS OF SPARSE REPRESENTATION & COMPRESSIVE SENSING* (eds. R. G. Baraniuk, E. Candès, M. Elad, and Y. Ma) が参考となる。和文解説として 田中利幸: 圧縮センシングの数理。電子情報通信学会、*Fundamentals Review*, Vol.4, No.1 (2010), p.39-47, (<http://w2.gakkai-web.net/gakkai/ieice/> より取得可能。)

Hans Mittelman のホームページ <http://plato.asu.edu/bench.html> には、種々の連続・離散最適化問題に対する最適化ソフトウェアのベンチマークによる性能比較が行われている。

3.3.2 連続的最適化

(1) 研究開発領域名

連続的最適化

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

連続変数をもつ最適化問題の解法およびその応用に関する研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

連続最適化において最も基本にあるのは線形計画問題 (Linear Optimization Problems、以下 LP) である。シンプルなこの最適化問題は、1947年にアメリカの Dantzig によって提案されて以来、長らく「最適解を効率よく求めることができ、かつ広汎な応用のある問題」として認識されてきた。この LP のさまざまな拡張が連続最適化というひとつの分野を形成しているといっていよう。そしてその拡張の方向は、従来次の2つに大別されてきた。①モデリングとしての汎用性・柔軟性を重視し、自由に非線形関数を用いる代わりに、最適解を求めることは困難なので局所的な解を求めることに焦点を絞る方向。②上記の最適解を求めることが困難な問題に対し、あえて最適解を求めることを目的とする方向 (大域的最適化)。これら2つの伝統的な拡張に対し、近年、③最適解を効率よく求めることができる範囲で、問題を LP から非線形へ拡張する方向、の研究が盛んになってきている。以下でこの3つの方向の現在について述べる。なお、用語でわからないものがあり、より詳しく知りたい場合には OR 事典¹⁾が手近な情報源である。

①の方向は、ニュートン法や逐次2次計画などを含む最も伝統的・正統的な連続最適化分野である。50年を超える歴史の中で、最適性条件の理論、ラグランジュ関数の理論など、さまざまな理論が整備され、また、さまざまな求解アルゴリズムの提案が行われて来た。しかし、近年、データの大規模化とモデリング技術の発達に伴い、次々と新しいタイプの問題が出て来ており、それらに対する研究が望まれていると共に行なわれている。特に大規模データによる大規模連続最適化問題の出現は、2次微分を保持することが不可能なことから、一時期性能の面から廃れていた共役勾配法やそれに類する1次微分のみを用いる手法が復権している。また、計算を安定させるために正則化項を追加させるヒューリスティクスなどが提案され、実際の計算に用いられている。

②の方向は、本当は必要とされているのに従来ずっと不可能とされてきた分野で、近年の計算機能力の向上に従いやっと一部で可能となってきた。分枝限定法とヒューリスティクスなどを組み合わせて解かれることが多い。この分野には有力な基礎理論がこれまで存在しなかったが、制約や目的に使われる関数がすべて多項式である「多項式最適化問題」の場合には、近年③の方向の技術を用いたエレガントな解法がフランスおよびアメリカで相次いで提案され、活発に研究されている。

③の方向は「凸計画」と呼ばれる最適化問題が基本である。凸計画は最適化問題が効率的に解けるために必要な中心的な概念であり、それにまつわる理論は数学的にも「凸解析」として展開されている。特に近年、凸計画の中でも、変数をベクトルから実対称行列へと拡張した「半正定値計画問題 (Semidefinite Program、以下 SDP)」とその仲

間が大きな流れを形成している。SDPに関する理論的研究は1990年代に整備され、内点法というアルゴリズムにより効率的に求解が可能であることが知られている。内点法はもともとLPに対するアルゴリズムで、1984年にATTベル研究所のKarmarkarによりその有効性が提案された。その後の発展では日本の研究者も決定的な役割を果たし、世界的に見てもトップレベルの研究を行っている。そのひとつの例証として、日本人を中心とする研究グループが1992年に米国OR学会のLanchester賞を授賞している²⁾。

SDPに関しては、現在信頼できるソルバーも手に入るようになり、応用に関する研究が進展している段階である。SDPの応用は多岐にわたる。先に述べた多項式最適化に対する応用の他、制御、グラフ理論、確率モデル、センサ位置同定問題、ロバスト最適化など、現在も次々に新たな応用が切り開かれている。また理論的にも、SDPのさらなる拡張として、錐線形計画問題が考えられ、これに対するさまざまなアルゴリズムが開発途上にある。

(4) 科学技術的・政策的課題

(3)でも述べたが、近年の情報爆発に対応するため、大規模データに対する最適化の必要性がますます高まっている。このため、1次微分のみを用いる最適化手法が重要性を増してきている。特に近年、この分野で理論的に新たな結果がいくつか得られており、大規模な最適化問題が次々と解かれるようになってきている。一方、単に大規模であるだけでなく、関数の微分の計算が不可能な場合や目的関数が確率的に変化するような問題が実際に現れ、求解が困難であることが知られている。これらの新しいタイプの最適化問題に対する効率的なアルゴリズムの構築が待たれている。

凸計画は1970年にはその基礎理論が整備されていたにもかかわらず、現在もなお理論的に新しい展開がなされている。近年の計算機能力の向上のおかげで、以前は理論のみであったものが実際に計算できるようになってきており、注目を浴びている。凸計画の分野の新しい最適化技術であるSDPについては、まだ広く深く知られているとはいえないが、今後の発展が期待できる。ただし、応用が広がるにつれて大規模な問題を安定的に解く必要が増しているにもかかわらず、そのための数値計算技術はいまだ成熟していない。特にソルバーの不安定性は深刻な問題で、現在、多くの商用ソフトウェアでSDPの解法をサポートしていないのは、これを克服できないためと思われる。応用に関する研究を進めるとともに、数値計算の技術に関しても研究が必要である。

連続最適化の重要な点は関係する分野とのインタープレイである。制御、ゲーム理論、機械学習、微分方程式論などとのからみで、突然流行することがある。近年の例でいえば、機械学習におけるサポートベクターマシン³⁾、非負行列分解、信号処理におけるcompressed sensing (圧縮センシング; CS)⁴⁾の流行があった。これらは、特に連続最適化の技術として新しい話ではないが、新しい応用が見つかったために脚光が当たったものと言える。このように、連続最適化という分野はいつ重要になるかわからない技術が詰め込まれている。近隣分野との交流を増やし、そのような発見がなされる機会を増やすことが特に重要である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

SDP の仲間であるがより容易である 2 次錐最適化問題に関しては、近年、求解アルゴリズムの商用ソフトウェアへの搭載が進んでいる (例えば、Gurobi Optimizer⁵⁾ や IBM CPLEX⁶⁾ など)。

これらのソフトウェアは数値的にも安定して、大規模な問題や整数制約にも対応している。このため、2 次錐最適化問題の応用が急激に広がりつつある。

連続最適化問題が何らかの意味で疎性をもつ場合に、それを利用して大規模問題をより小さな問題へ変換する技術が、かなり一般的な枠組みで論じられるようになった。現実の多くの問題は疎性をもつと考えられており、この方面の理論は、これからまだ発展する可能性がある。

現在、連続最適化分野の研究者のソフトウェア開発では、MATLAB (アメリカに本社をおく Mathworks 社所有の数値計算言語) が定番になりつつある。多くの最適化ソフトウェアは MATLAB で実装され、そうでない場合にも MATLAB インターフェースをもっていることが多い。

商用の最適化ソフトウェアとしては、Gurobi⁵⁾、IBM CPLEX⁶⁾、FICO Xpress⁷⁾ が有名である。どれも米国の会社である (ただし、CPLEX はもともとの開発はフランスの ILOG 社であったが 2009 年に IBM により買収された)。日本では、(株)NTT データ数理システムが Numerical Optimizer⁸⁾ というソフトウェアを自社開発している。NUOPT は、デンマークで作成されている Mosek⁹⁾ とともに、SDP を解法として取り入れている数少ない商用最適化ソフトウェアである。

3 年に一度開催される連続最適化の国際会議 ICCOPT が、東工大の水野真治教授を実行委員長として 2016 年に東京で開催されることが決定した。開催場所は六本木の政策研究大学院大学である。日本での最適化の大きな国際会議としては、1988 年の数理計画シンポジウム (ISMP) 以来、28 年ぶりの開催となる。ISMP のときには、多くの研究者が海外から集まり、そのときの若手研究者 / 学生らが大きな刺激を受けてこの分野に飛び込んで来て、その後の日本のプレゼンスを高めることになった。ICCOPT においても、これはずみに、より多くの若手研究者がこの分野に参入することが期待されている。

(6) キーワード

半正定値計画、2 次錐計画、錐線形計画、凸計画、大域的最適化、多項式計画、大規模データ、均衡条件つき最適化問題、微分不可能最適化問題

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本の大学・公的機関における基礎研究レベルは、個々の研究者の研究レベルは高いものが多いが、層の厚みで米国や欧州には見劣りがする。例えば有力ジャーナルの Editorial Board に入っている日本人の数は非常に少ない。 九州大学のマスフォアインダストリ研究所が有望な若手研究者を集めている。離散最適化の研究者も同じ研究所で集めており、ここがこれから日本の最適化研究の中心となる可能性がある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 世界に発信しているものもあるが、全体に層が薄い。 SDPAプロジェクト¹⁰は日本が世界に発信している数少ない最適化ソフトウェアのひとつである。 制度的な理由で、欧米のように大学教員が最適化コンサルタントのような副業を行なうことが難しい。このため、大学教員が企業の最先端技術に触れたり、そこで最適化問題を掘り起こしたりする機会が限られている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 最適化そのものを明示的に扱う企業は少ない。各企業で独自に最適化に関する情報収集を行い、工夫を行なっているのが実情である。 サラリーマン社長の多い日本では、企業経営において論理的・数学的な判断を参考にする風土が薄いように思われる。最適化を用いたイノベーションは常にアメリカ・ヨーロッパからもたらされている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの分野で世界をリードしている。 Stanford大学のYe教授、Cornell大学のTodd、Reneger両教授、Georgia TechのMonteiro教授らが、自ら研究するとともに強力な若手研究者を輩出している。 有力大学に限らず、さまざまな大学に優秀な研究者がおり、層が厚い。 一流ジャーナルの Editorial board はほとんど米国・欧米で占められている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 研究がすぐに応用・開発・起業につながる環境がある。 特に主要な商用ソフトウェア（IBM CPLEX、Gurobi、FICO Xpress）は米国で開発されている。IBMは強力に開発を推し進めているが、他のソフトウェアもほぼ同等の性能を保持している。激しい競争がレベルを高くしている。 大学の教授が積極的に企業の最適化コンサルタントを行い、それにより先端技術を広めるとともに新たな最適化問題／分野の掘り起こしに努めているのが強みである。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 企業活動において判断する場合に、最適化という観点を入れることにためらいがないため、最適化技術がさまざまな場面で徹底的に使われている。 INFORMS¹¹（アメリカのオペレーションズ・リサーチに関する学会；会員数1万人以上）のサイトを見ると、あらゆる場面で最適化技術が使われていることがわかる。 電力供給の自由化に伴う需給予測および対応など、重要な社会インフラに対しても最適化技術が使われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> オランダは内点法に関する研究が盛んで、その方面の人材もたくさん輩出している。 近年盛んに研究されている多項式計画に関しては、フランス、LAASのLasserre教授（2009年のLagrange賞受賞者）が創始者の一人である。Lasserre教授は代数幾何的数学技術の最適化への応用を提唱し、オランダのチームとともに研究が活発に行われている。 デンマークでも、CORE（Center for Operations Research and Econometrics）が基礎的分野で一流の成果を出している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツのZIB（Zuse Institute Berlin）では高性能最適化ソフトウェアの開発を行っている。 YALMIP¹²というフリーの最適化ソフトウェア環境を作成するプロジェクトが成功しつつある。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国と同様、企業における最適化技術のトータルな応用・適用が行われている。 商用ソフトウェアも、米国ほどの厚みはないが、2次錐最適化のソルバーとして名を馳せたMOSEK、非線形計画ソルバーのLancelotなど、独自のソフトウェアが生産されている。

研究開発領域
最適化区分

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 近年、中国からの大量の論文が投稿されている傾向がある。まだレベルの高いものは多くないが、かなりの人数が研究を行っており、これから伸びる可能性がある。 優秀な中国人研究者がたくさん米国に在住している。彼らが帰国するとき、劇的に教育・研究のレベルが上がることは予想される。また、これらの研究者の中にはジャーナルの Editorial board に入ったり学会活動で中心的な役割をしている人も多く、日本より存在感がある。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 未だソフトウェアの開発などでは存在感を示せていない。 国際学会を主催したり、Open access の学術雑誌を創刊したりするなど、この分野への投資はかなり行なっている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 市場が大きいこと、経済活動が地質学的に広範囲にわたっていることから、最適化技術の産業化に本格的に取り組むと効果は大きいものと考えられる。しかしそのような段階には至ったとははっきり認識できていない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 連続最適化に関する研究は盛んではない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特に存在感がない。
	産業化	-	-	-

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- (社) 日本 OR 学会 OR 事典編集委員会 “OR 事典 Wiki”
<http://www.orsj.or.jp/~wiki/wiki/index.php> メインページ
- Institute for Operations Research and the Management Science. “Frederick W. Lanchester Prize”
<http://www.informs.org/Recognize-Excellence/INFORMS-Prizes-Awards/Frederick-W.-Lanchester-Prize>, 小島政和、Nimrod Megiddo、水野真治、野間俊人、吉瀬章子が受賞(1992年)
- 栗田多喜夫. “サポートベクターマシン入門”.
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/tkurita/lecture/svm/index.html>
- Candès, Emmanuel. “Compressive Sampling”. Proceedings of the Int. Congress of Mathematicians, Madrid, Spain, 2006, European Mathematical Society. vol. 3, p. 1433-1452.
<http://www-stat.stanford.edu/~candes/papers/CompressiveSampling.pdf>
- Gurobi Optimization, Inc. “Gurobi Optimizer 5.6 Overview”.
<http://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/gurobi-overview>
- IBM, “IBM CPLEX Optimizer”.
<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>
- FICO, “FICO Xpress Optimization Suite”.
<http://www.fico.com/en/products/fico-xpress-optimization-suite/>

- 8) NTT データ数理システム株式会社, “数理計画パッケージ Numerical Optimizer”
<http://www.msi.co.jp/nuopt/>
- 9) MOSEK, “MOSEK”.
<http://www.mosek.com>
- 10) SDPA Project. “SDPA (Semidefinite Programming Algorithms) Official Page”.
<http://sdpa.sourceforge.net>
- 11) Institute for Operations Research and the Management Sciences. “informs online”
<http://www.informs.org/>
- 12) “YALMIP Wiki”.
<http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip/pmwiki.php?n=Main.HomePage>

3.3.3 離散的最適化

(1) 研究開発領域名

離散的最適化

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

最適化の問題設定には、主として、離散的な構造を対象とする離散最適化と連続変数を対象とする連続最適化とがある。両者の特性に応じて、必要とされる手法はおのずと異なる。離散最適化は、整数変数を扱う整数計画法とグラフやネットワークに代表される離散構造を扱う組合せ最適化に大きく分けられる。在庫管理と輸送を一体化したサプライ・チェーン・マネジメント（SCM）、ネットワーク型インフラの整備と運用、超大規模集積回路の設計、スケジューリングなど、本質的に離散的な構造を有する最適化問題は、現代社会の至る所に存在している。特に、限られた資源を有効に利用するためには、離散最適化技術の深化と積極的な利用が望まれる。

離散最適化問題の多くは、問題の規模を表す入力サイズに対して、指数関数的に増大する選択肢の中から最適のものを選び出すことを目的としている。このとき、すべての可能性を列挙しようとしたのでは、現実的な時間内に計算が終了し得ない。特によい性質を有する組合せ最適化問題においては、その構造を利用して、入力サイズの多項式オーダーの計算量で厳密解を見いだす多項式時間解法が知られている。一方、実務上重要な離散最適化問題の多くには、そのような多項式時間解法は存在し得ないと信じられており、その前提を認めた上で、離散最適化問題を実際に解くためのさまざまな試みがなされている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

離散最適化問題には、その構造を利用して効率的に解くことのできる問題と、そうではなくて、効率的な厳密解法は原理的に期待し得ないと信じられている問題とがある。前者の代表例として、最短路問題、最小木問題、最大流問題などがあげられる。これらは、いずれもネットワーク上で定義された最適化問題であり、その構造が詳細に理解されているとともに、計算機科学・情報科学関連の学科を中心に、その解法も広く教育されている。これらの最適化問題に対して、今日では、大規模ネットワークにおいても瞬時に最適解を計算することができる。ただし、教科書に載っているような手法のままではなく、大規模ネットワークに対応した工夫が必要となる点には注意を要する。

一方、実務上重要な多くの最適化問題は、むしろ、NP 困難と呼ばれる後者の部類に属している。ただし、NP 困難性は、あくまでも最悪ケースの計算量に関連して、多項式時間解法の存在を否定する状況証拠を提示しているに過ぎない。この種の問題に対する現実的な対処法としては、並列計算を含めて計算機資源を投入するとともに計算の過程を工夫することによって最適解を得ようとする厳密解法、局所探索を基礎とした反復計算法によって現実的な時間内に近似解を得る汎用解法を目指すメタヒューリスティクス、精度保証のある近似解を多項式時間で見いだす近似アルゴリズムなど、さまざまなアプローチによる研究がなされている。

効率的に解くことのできる離散最適化問題に関する研究としては、個々の問題に対す

る解法の高速化の他に、効率的に解ける仕組みを把握し、できるだけ一般的な枠組みにおいて効率的なアルゴリズムを設計する手法の研究も重要である。特に、マトロイドや劣モジュラ関数の重要性が J. Edmonds によって指摘されて以来、これらの概念を用いて記述される最適化問題の研究が盛んになされてきた。マトロイドは、ベクトル集合の線形独立性の概念の組合せ的な抽象化として 1935 年に Whitney によって導入された。導入の動機は、このように応用とは全く無関係なものであったが、1960 年代になって、組合せ最適化アルゴリズムとの関連が指摘された。劣モジュラ関数は、凸関数の離散版に当たる集合関数で、マトロイドの階数関数やネットワークのカット容量関数を含んでおり、効率的に解くことのできる離散最適化問題の多くが何らかの形で劣モジュラ関数に関係しているとさえいわれている。マトロイド最適化、劣モジュラ最適化やその拡張に当たる離散凸解析に関しては、わが国の研究者による本質的な貢献が続き、分野の発展を牽引している。

一方、1990 年代以降、アメリカ合衆国を中心に、NP 困難な組合せ最適化問題に対する精度保証付きの近似アルゴリズムの研究が盛んになされるようになった。この種の取り組みの萌芽はすでに 1970 年代に見られるが、1980 年代の組合せ多面体論と連続最適化の研究成果を受けて、より洗練された形で近似アルゴリズムを設計する手法が導入されたのが、この時代の特徴であった。特に、ネットワーク最適化問題や施設配置問題に対する線形計画法を用いた主双対近似アルゴリズムや Goemans, Williamson (1995) による最大カット問題に対する半正定値計画法に基づく近似アルゴリズムが、大きなインパクトを与えた。また、PCP 定理など、計算複雑度の理論研究の進展の結果として、離散最適化問題の近似困難性、すなわち多項式時間近似アルゴリズムの性能限界を保証する理論も整備された。近似アルゴリズムに関しては、STOC/FOCS/SODA といった計算機科学の国際会議を主な舞台に膨大な数の論文が発表されたが、わが国からの本質的な貢献は決して多くはなかったといわざるを得ない。

近似アルゴリズムに関する理論的な研究成果の実際上の有効性については、議論の余地がある。通常解析では、最悪ケースに着目して近似比を算定するため、一般的な感覚と較べて、緩い近似比となる傾向がある。最小化問題に対して、最適解の α 倍以下の目的関数値が得られる近似アルゴリズムは、 α 近似アルゴリズムと呼ばれる。近似アルゴリズムの設計に携わる研究者の感覚では、 α として問題のサイズに依存しない定数が採用できるものは、相当によいアルゴリズムであり、例えば、 $\alpha=2$ が保証できる離散最適化問題は稀少である。しかし、実務家の感覚としては、最適解の 2 倍が保証されただけでは、そのまま使う気にはなれないであろう。もちろん、理論的な結果として近似比 2 が保証されたアルゴリズムでも、出力として得られる近似解の目的関数値が最適値にかなり近い値が出される可能性はある。このような実際上の現象に関しては、近似アルゴリズムの実験的解析が報告されるとともに、経験則が集団の中で共有されていくことが重要である。

離散最適化問題の多くは、整数変数に関する線形制約条件の下で線形目的関数を最適化する整数計画問題の形に定式化できる。整数計画問題全般を対象に厳密解を計算する汎用的なアルゴリズムの研究は、1960 年の Gomory による切除平面法の提案以来、長年にわたって続けられてきた。分枝限定法、分枝切除平面法といった手法が提案され、

改良を重ねることによって、今日では、かなりの規模の整数計画問題まで現実的な時間内で解くことのできる商用ソフトウェアも普及している。わが国では、多くの研究者が1970年代に整数計画法に取り組んだが、当時の計算機の性能に基づいて、その有用性に疑問を感じて撤退した。一方、欧米では、さまざまな批判を受けながらも、整数計画法の研究を継続した集団があり、その努力が近年になって実を結んでいる。以上のような状況を受けて、わが国でも何人かの若手研究者が整数計画法の研究と普及に積極的に取り組んでいるが、まだ世界的な認知を得るには至っていない。

離散最適化関連の国際会議として、1990年以来、3年に2回のペースでIPCOが開催されている。ここでは、計算機科学の国際会議と同様に、投稿された論文の中から発表されるものを選んで、毎回、120件ほどの投稿があり、30件余りを選抜している。論文のテーマは、整数計画法、組合せ最適化、近似アルゴリズムなど多岐にわたる。わが国からの投稿で採択されているものは、ほとんどが組合せ最適化に関するものであり、これまでのところでは、整数計画法に関する論文は出ていない。

（４）科学技術的・政策的課題

整数計画問題が解けるようになってきた結果、研究の中心は、混合整数計画や非線形整数計画に移行している。これは、離散的最適化と連続的最適化との融合領域に当たる。伝統的に、連続系最適化の分野に強く、双方を包含した共通のコミュニティを擁しているわが国にとっては有利な状況にある。非線形整数計画の高性能ソルバーの開発を目標に、整数計画法、離散凸解析、連続最適化の研究者を糾合したチームを編成して研究活動を推進することは有効であろう。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2011年は、巡回セールスマン問題に対する近似アルゴリズムの設計が注目を集めた。巡回セールスマン問題は一般にNP困難であるが、各辺の移動距離が三角不等式に従うという自然な仮定の下で、近似比 $3/2$ の近似アルゴリズムが1976年にChristofidesによって提案された。それ以来、近似比 $4/3$ のアルゴリズムが存在するのではないかと予想されているにもかかわらず、これを凌駕する結果は得られていなかった。2010年12月にOveis Ghareh, Saberi（アメリカ合衆国）、Singh（カナダ）によって、グラフ的な巡回セールスマン問題に対して $3/2$ よりもわずかによい近似比の近似アルゴリズムが発表されたのを皮切りに、研究が活性化され、4月にはスウェーデンのMönke, Svenssonが同じ問題に対する全く異なるアプローチで、近似比が大きく改善されることを示した。8月には、ポーランドのMuchaがMönke, Svenssonのアルゴリズムの解析を改良し、その近似比が $13/9$ となることを示した。さらに、2012年1月には、Sebó（フランス）、Vygen（ドイツ）が近似比 $7/5$ のアルゴリズムを発表している。この種の改良がまだ続いていくのか、グラフ的とは限らない場合にも拡張可能なのか、多くの研究者が注目している。

巡回セールスマン問題の様な組合せ最適化問題は、実行可能解の特性ベクトルと呼ばれる0-1ベクトルの集合の凸包における線形最適化という形で定式化できる。多くの場合、この凸包の形が非常に複雑となり、線形不等式制約で記述するには、入力サイズの

指数オーダーの制約式を必要とする。これに対して、より高次元の空間において、その射影が実行可能解の特性ベクトルの凸包を与えるような多面体上での線形最適化に帰着するというアプローチが考えられる。特に、高次元空間における多面体が、入力サイズの多項式オーダーの情報で記述できれば、多項式時間解法が得られることになる。このような高次元空間における定式化は拡張定式化（extended formulation）と呼ばれている。Yannakakis (1991)が、対称性を保持したままでは、巡回セールスマン問題やマッチング問題の拡張定式化が指数オーダーの不等式制約を必要とすることを明らかにした。2012年に、Firoiri等は、通信複雑度の概念を用いて、対称性を仮定しない形でも巡回セールスマン問題の拡張定式化が指数オーダーの線形不等式を必要とすることを示した。この結果は、巡回セールスマン問題の本質的な難しさを組合せ多面体論の観点から明らかにしたという面で非常に注目された。さらに2014年には、Rothvoßがマッチング多面体の拡張定式化が指数オーダーの線形不等式を必要とすることを示している。マッチング問題に対しては、Edmondsによる多項式時間解法が知られているので、この結果は、拡張定式化によるアプローチの限界を示したものとみることができる。

現実社会における最適化では、将来の入力に関する情報のないままに逐次的に決定を行うオンライン最適化も重要である。オンライン最適化アルゴリズムの性能は、入力がすべて与えられた場合の最適値との比の最悪値を意味する競合比を用いて解析するのが古典的である。しかし、競合比は、実際の性能よりも悲観的な結果を導く傾向があるため、入力に確率分布を仮定した上で期待競合比を解析することも一般的である。オンライン最適化のアルゴリズム設計は、オフライン最適化に対する近似アルゴリズムの設計手法のみならず、学習理論や確率的最適化の影響も受けて発展している。さらに、近年では、過去の入力に関する記憶を保持せずに処理を行うストリーム・アルゴリズムの研究が注目されている。

（6）キーワード

組合せ最適化、マトロイド、劣モジュラ関数、近似アルゴリズム、半正定値計画法、メタヒューリスティクス、整数計画法、分枝限定法、切除平面法、混合整数計画法、拡張定式化、NP困難、オンライン最適化

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 組合せ最適化分野では健闘しているが、近似アルゴリズムや整数計画法に関しては、欧米先進国の後塵を拝している。学術雑誌や国際会議における論文の採択状況にそれが反映されている¹⁾。 組合せ最適化の若手研究者を中心に、レベルの高い論文が発表される傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 企業に就職して活躍する博士課程修了者は依然として少ない。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> スケジューリング、生産計画、配送計画において、多くの適用事例が知られている²⁾。 メタヒューリスティクスを含んだ最適化パッケージも作成、販売されている³⁾。

米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> MITをはじめとする拠点大学で、世界中から集まった優秀な大学院生が学位を取得している。特に、Carnegie Mellon大学とGeorgia工科大学では、1990年代から、‘Algorithms, Combinatorics, and Optimization’ というタイトルの博士課程プログラムがあり、計算機科学、離散数学、最適化のバランスのとれたカリキュラムを提供することによって、離散最適化分野で多くの優秀な研究者を輩出してきた^{4, 5)}。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IBM、Microsoft、Yahoo!、Google といった企業が、離散最適化・計算機科学の分野の学位取得者の主要な就職先になっている。その中には、世界的に広く知られた研究者も少なくない。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> スケジューリング、生産計画、配送計画といったオペレーションズ・リサーチの伝統的な適用分野だけでなく、検索連動広告のように離散最適化技法が決定的な要素となる新たなビジネスモデルが出てくる。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 各国に研究拠点があり、互いに連絡を取り合っており、サマースクールや研究会を実施し、研究レベルの向上に努めている。 ハンガリーでは、組合せ最適化の研究グループが、非常に高い水準の研究を継続的に進めており、若手研究者の育成にも成功している。わが国の研究者集団と長年にわたって研究交流を続けてきた。最近では、両国の研究者の間で、共同研究も盛んに行われるようになっている⁶⁾。 ドイツでは、整数計画法の研究者を中心に離散最適化の研究者が多く、充実している。 オランダでは、国内に複数の研究拠点が存在する上に、それらが互いに近いという利点を活かして、オペレーションズ・リサーチ関連の博士課程における教育プログラムを全大学共通で行っている。これによって、教員の負担を増やすことなく大学院レベルの教育水準を向上させている。 フランスでは、CNRSの施設を利用して、定期的に招待者のみが参加する国際研究会を開催して、情報交換と研究レベルの向上に努めている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは、数学の工学的応用を推進するプロジェクトMATHEONが推進され、産業界の諸問題に数学者が取り組む体制が整ってきた⁷⁾。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> EUでは、鉄道輸送の合理化に最適化の研究者が積極的に関与し、成果をあげている⁸⁾。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 香港のLap Chi Lau以外には、世界的に知られた離散最適化の研究者はいない。 北京の清華大学にAndrew Yaoを所長とする理論計算機科学の研究所が設立された。今後の発展が期待されるが、必ずしも離散最適化に重点的に取り組んでいるわけではない⁹⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究・開発の動きについては不明。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業化の動きについては不明。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 計算機科学、離散数学では優れた研究者がいるが、離散最適化分野で世界的に知られた研究者はいない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究・開発の動きについては不明。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業化の動きについては不明。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) “IPCO : Integer Programming & Combinatorial Optimization”.
<http://www.mathopt.org/?nav=ipco>
- 2) （社）日本 OR 学会 OR 事典編集委員会. “ORWiki 事例編”.
<http://www.orsj.or.jp/~wiki/wiki/index.php/事例編>
- 3) ㈱数理システム. “NUOPT の機能仕様”.
<http://www.msi.co.jp/nuopt/products/spec.html>
- 4) Carnegie Mellon Univ. “ACO program”. <http://aco.math.cmu.edu/>
- 5) School of Mathematics, Georgia Institute of Technology. “Georgia Tech's Ph.D. Program in Algorithms, Combinatorics, and Optimization”.
<http://www.aco.gatech.edu/>
- 6) “Egerváry Research Group on Combinatorial Optimization (EGRES)”.
<http://www.cs.elte.hu/egres/>
- 7) “DFG Research Center MATHEON”.
<http://www.matheon.de/>
- 8) “ARRIVAL ; Algorithms for Robust and online Railway optimization: Improving the Validity and reliability of Large scale systems”. <http://arrival.cti.gr/>
- 9) 清華大学. “ITCS : Institute for Theoretical Computer Science”.
<http://iiis.tsinghua.edu.cn/en/itcs/>

3.3.4 最適化計算

(1) 研究開発領域名

最適化計算

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会における大規模かつ複雑で緊急性の高い諸問題に対して最適化手法の適用を行い、最新の計算技術を駆使した大規模計算によって解決するための研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1940年代後半にいわゆるオペレーションズ・リサーチの分野において最適化問題の研究が開始されてから、産業政策や企業経営などの幅広い分野において適用が行われ、欧米先進国を中心に多くの成功事例が紹介されている。ここでいう最適化問題とは主に以下の2つに分類することができる。

- ・数理計画問題（線形計画問題、整数計画問題、半正定値計画問題など）
- ・組合せ最適化問題（特にグラフ、ネットワーク系の最適化問題）

最近の国内外の情勢から最適化問題の適用が必要とされる分野には以下のように新しい分野が加わり、物理的な範囲においても以前のように一企業や一国におけるレベルから、地球的な規模に拡大しつつある。

- ・大規模災害などで突発的に発生してリアルタイムに状況が変化し早急な解決が望まれる問題（防災計画策定、交通・災害復興・避難・ロジスティクス）
- ・資源やエネルギーの確保や生成および省エネルギー化や最適供給に関する研究（交通制御、資源探索、エネルギー供給、ライフラインの基盤計画、スマートグリッドなど）
- ・社会公共政策や企業経営などのため大規模データの有効活用（疫病の拡散、人口の増減、経済動向などの分析、生命科学系（創薬、遺伝子）、ビジネス系（金融、データマイニング、機械学習）、安全保障分野（組織構成の解明、事件事故の事前予測））

これらの諸問題は大規模かつ複雑で緊急性が高い問題が多いことから、問題解決（具体的かつ現実的な対応）のためには以下に示すような新しい最適化計算の研究開発が必要という認識が欧米および日本などの先進国では共有されつつある。上記のような諸問題に対してまずデータ収集や分析および数理的にモデル化を行った後に、最適化理論を実装してソフトウェア化を行い計算機上で解決する手法（いわゆる最適化計算）は幅広い分野で用いられ多くの成功を収めてきた。この手法での3つの要素（データ + 最適化理論 + 計算）が必要かつ不可欠である。データは現実の問題を表すものであり、一般的にはデータの収集や解釈も困難な場合が多く大規模な現実問題では扱うべきデータ量は非常に巨大になることが多い。また最適化理論は扱う問題を厳密な数学的問題へとモデル化し、解決する手法を与える役目を果たす。さらに計算は数理モデルおよびその解決手法を、現実のデータと結びつけ実際の問題を解決する役割を担っている。

最適化計算の根幹をなすこれら3つの要素は、オペレーションズ・リサーチの誕生から多くの研究者の継続的な努力と研究により、飛躍的に発展してきた。データに関して

は、収集技術および集積技術の向上により、超大規模データを扱うことが可能となった。最適化理論に関しても、コンピュータサイエンスや数学などの分野との融合を経て多大な進歩を見せている。そして、計算力に関しては計算機自体の性能の向上および実装方法の工夫や並列化などにより、現在では大規模な問題に対しても超高速で安定な計算が可能となった。よって、最先端理論（Algorithm Theory）+大規模実データ（Practice）+最新計算技術（Computation）による超大規模最適化問題の解決を目指し、特に米国やドイツなどの欧米先進国では分野横断型のさまざまなプロジェクトが開始されている。また日本でも最先端理論や高性能計算技術（いわゆる HPC）など個別の分野では大きな成果をあげており、欧米型の問題ごとに理論からアルゴリズム、データ収集、ソフトウェア実装それに大規模計算までの研究者が集結、融合を目的とするプロジェクトが開始されている。その他のアジア諸国（中国、台湾、韓国、シンガポールなど）でも日本と同様かあるいは日本よりもやや遅れている状況にあるといえる。

（４）科学技術的・政策的課題

（4-1）科学技術的課題

- ・（３）で述べたような実社会で要求される大規模最適化問題を解決するためには、短時間に膨大な計算量とデータ量を処理するための新技術が必要となる。例えば近年の日本は地震、津波、台風、洪水など大規模災害に何回も襲われており、大規模災害時には防災計画の策定、災害時の避難と誘導および情報収集と解析、復興計画の策定、スマートグリッドによる高度かつ安定な電力供給などを行う必要があるといわれている。このように大規模災害などで突発的に発生してリアルタイムに状況が変化し早急な解決が望まれ、かつ非常に計算量やデータ量などの規模が大きく従来の手法では処理が困難な性質をもつ実問題においては、大規模ネットワークの探索とクラスタリングの高速処理技術の開発が必須となる。
- ・現在では大規模な計算基盤としてペタスケールスーパーコンピュータ（スパコン）が用いられている。2015年頃にポストペタスケールスパコン、さらに2018年から20年頃にエクサスケールスパコンの登場を目指して、日本、米国、欧州、中国などで研究開発が行われている。しかし、現在の最適化理論とソフトウェア実装方法ではこれらの次世代スパコン上で数千万規模の並列性を備え、ストレージの階層性が深化したポストペタスケールシステム上でのスケーラブルな実行は困難であり、アルゴリズム、システムソフトウェアと同時並行的な解決が求められている。そのため理論的性能限界などからボトルネック箇所を特定、数値演算能力とメモリバンドなどのトレードオフ関係を把握、計算量とデータ移動量の正確な推定、疎性やサイズなどのデータ特性と性能値の見極めなどに関する研究開発が推進され、大きな成果を挙げつつある。

（4-2）政策的課題

- ・実際には最適化、HPC、防災、生命科学などの複数分野の連携は政治的、予算的な要因からも困難な場合が多く、日本だけでなく各国においても現時点においては連携が有機的に行われている事例は少ない。
- ・特に日本の教育機関においては内容が特定の分野に特化しやすく、最適化計算分野において活躍できる人材育成のシステムの確立が進んでいない。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

(5-1) 日本

・現在、JSTによる以下の研究事業が推進されている。

1. 2011年度開始：JST CREST 領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」¹⁾
2. 2013年度開始：JST CREST・さきがけ複合領域「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」²⁾
3. 2014年度開始：JST CREST 領域「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」、さきがけ領域「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」³⁾

これらの領域では最先端の数理アルゴリズムの探求から超大規模データ処理システムソフトウェアなどに関する実用性を見据えた研究開発が対象とされており、大規模最適化問題を高性能なアルゴリズムを用いて次世代スパコンで解く際に必要な新技術が多く算出されていくことが期待できる。上記の1のJST CREST チームが2014年6月に京コンピュータを用いてグラフビッグデータの処理のベンチマークで世界1位になっている¹⁾。

(5-2) 米国

・DIMACS Challenge⁴⁾: DIMACS (Center for Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science)はラトガーズ大学やプリンストン大学などが共同で設置している離散数学と理論計算機科学の研究所である。以下のように定期的に代表的な最適化問題を選択して、実問題を解くためのアルゴリズム実装に関するコンテスト(DIMACS Challenge)を行っている。

1. 1990-1991: Network Flows and Matching
2. 1992-1992: NP-Hard Problems: Max Clique, Graph Coloring, and SAT
3. 1993-1994: Parallel Algorithms for Combinatorial Problems
4. 1994-1995: Computational Biology: Fragment Assembly and Genome Rearrangement
5. 1995-1996: Priority Queues, Dictionaries, and Multidimensional Point Sets
6. 1998-1998: Near Neighbor Searches
7. 2000-2000: Semidefinite and Related Optimization Problems
8. 2001-2001: The Traveling Salesman Problem
9. 2005-2005: The Shortest Path Problem
10. 2011-2012: Graph Partitioning and Graph Clustering
11. 2013-2014: Steiner Tree Problems

・ジョージア工科大学⁵⁾ではIndustrial Engineering分野だけで100人を超える博士課程の学生が在籍しており、博士課程の学生たちによる最適化関連のソフトウェア開発も盛んに行われている。整数計画法、巡回セールスマン問題の解法に関する基礎理論から応用、さらには米企業との共同研究が極めて活発に行われている。

・最適化を含めたオペレーションズ・リサーチ分野の諸問題を解決するためのオープンソースソフトウェアの開発と公開を行うCOIN-ORプロジェクト⁶⁾が推進されている。これに関連してAIMMS MOPTA Modeling Competition⁷⁾という最適化問題のモデリ

ングを競うための競技会が毎年開催されて（今年のテーマはスマートグリッドにおけるスケジューリング）結果発表も例年リーハイ大学で行われている。

- ・グリッドおよびクラウド関係で有名な広域分散用のソフトウェアであるウイコンシン大学で開発された CONDOR Grid⁸⁾を利用した最適化ソルバーの開発が活発に行われている。
- ・アルゴン国立研究所では、世界中で開発されている最適化問題用のソルバーを集めて、無料のオンラインサービスである NEOS サーバー⁹⁾の運用を行っている。ユーザは最新の最適化ソフトウェアの動向を知るだけでなく、それらを無料で利用することによってソフトウェア導入前の評価を行うことも可能となっている。

(5-3) 欧州

- ・ドイツの国立研究所 ZIB¹⁰⁾では“Fast Algorithms - Fast Computers”をモットーに最適化理論などの基礎研究からソフトウェア開発、さらに産業界や政府系機関との深い連携が行われており、最適化計算の観点では世界的にも非常に高いレベルにある。
- ・さらに DFG(German Research Foundation)のプロジェクト Matheon¹¹⁾が注目を集めている。Matheon では数学関係の教育を行うだけでなく、数学を応用して具体的なアプリケーションを解く研究（ソフトウェア開発を含む）が活発に行われている。また、DFG のアルゴリズム工¹²⁾も、基礎研究から企業までをつなげる重要な役目を負っている。

(5-4) 中国

中国人民解放軍国防科学技術大学(NUDT)¹³⁾は世界最速のスーパーコンピュータ天河2号を保有して、大規模なグラフ探索に関するソフトウェアの開発などを行っている。

(6) キーワード

最適化問題、グラフ解析、大規模データ、コンピュータサイエンス、HPC

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本の大学や研究機関の基礎研究のレベルは総じて高く、いくつかの分野（数理計画問題に対するアルゴリズムと大規模計算など）では世界のトップレベルを誇っているが、研究者の層が欧米各国と比較して厚いとはいえず、全体的には上昇傾向にあるとはいえない。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> これまでの日本では、この分野の応用研究は軽視される傾向にあったが、近年の複雑かつ大規模な諸問題の解決のために、応用研究も重視する傾向に変化しつつあり、財政的な支援や組織づくりが始まっている。 エネルギーや環境問題、災害対策などが非常に注目されており、今後はこれらの分野での最適化計算手法の適用が期待されている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 日本の製造業は高機能素材系などの分野で依然として世界トップレベルの基礎技術と生産能力を有しているが、今後はこれらの分野に対する適用も期待できる。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国の大学や研究機関での基礎研究のレベルは高く、多くの分野で世界のトップレベルを誇っている。特に最適化理論、モデリング言語、特に整数計画問題などのソフトウェア、さらにスパコン上での長時間の大規模安定計算などの分野では非常に強いとされている。 世界中から広く人材を集めることによって、高い研究のレベルを維持しているが、経済や財政危機によって、今後の基礎研究費の減額などによる負の影響が心配されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究の強みを生かした形で応用研究・開発も非常に進んでおり、欧州と同様にアプリケーションを中心に各分野の研究者が集結する形でプロジェクトが推進されている。 大規模最適化問題に対して、最新のアルゴリズムとスパコン上の大規模計算による解決という手段が重要視されている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 理科系や技術系出身の経営者も多く、積極的に新しい技術を産業界に導入すべきという方針に関するコンセンサスが得られており、他国よりも先駆けて研究成果が製品化されることが多い。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国と同様にこの分野の基礎研究には長い伝統と層の厚さを兼ね備えており、EU内のドイツ、イタリア、フランス、オランダやスイスなどに限らず、米国、日本、南米とも非常に活発な人材交流を行っている。 特にドイツなどでは組合せ最適化や数理計画問題の基礎理論から、ソフトウェア開発それにスパコン上での大規模計算まで非常にバランスと連携が取れた形での研究が推進されている。 米国と同様に経済や財政危機から今後の基礎研究費の減額が心配されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究から産業までのつながりが非常によく、教育、研究だけでなく、具体的なアプリケーションを解く、つまりアプリケーションを中心に各分野の研究者が集結する形で応用研究・開発が行われており、最適化ソフトウェアの作成が非常に重視されている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 政府や公共団体さらに企業などとの連携によって交通政策、金融、エネルギー、製造業、環境、農業、情報通信、医療などの分野に積極的に最適化問題を適用して、大規模計算によって解決する試みが積極的に推進されており、今後の進展に大きな期待がされている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 中国国内の研究機関では最適化計算などの分野に関して積極的に欧米および日本の研究機関との交流や共同研究を指向する動きが見られる。 近年、欧米や日本などの大学に多くの優秀な留学生を関連する分野（数学、最適化、コンピュータサイエンス、HPC）に送り込むとともに、人材の呼び戻し政策を積極的に行っているため今後の研究水準は飛躍的に向上することも期待できる。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 現時点では独自技術と呼べるものは少ないが、スーパーコンピュータで過去世界1位になるなど、大規模計算分野においても基礎研究を応用した形での成果は確実に増えてきている。 中国国内ではエネルギーや交通、環境問題などが経済成長とともに深刻化しており、これらの諸問題の解決のために、最適化計算などの新しい問題解決の手法が重要視される傾向が高まっている。

	産業化	○	↗	・基礎研究や応用研究・開発の高まりに合わせて幅広い産業分野での最適化計算技術の適用と成果が期待されている。
韓国	基礎研究	△	→	・数学理論を含めた最適化およびHPC系などの研究者の層はあまり厚いとはいえず、国際的にも他国ほどの存在感を示すまでには達していない。
	応用研究・開発	△	→	・世界的な規模をもつ製造業では設計や製造分野において、最適化問題の適用と大規模計算による解決を積極的に導入しようというプロジェクトが開始されているが、業績悪化などであまり進んでいない。
	産業化	△	→	・他国と比較して顕著な産業化への努力が見えていないとはいえないが、韓国の現政権は数学を技術として産業移転することに高い関心をもっている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」、<http://www.postpeta.jst.go.jp/>
- 2) JST CREST・さきがけ複合領域「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」、
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-6.html
- 3) JST CREST 領域「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」、さきがけ領域「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」、
http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/109mathcollabo.html
- 4) DIMACS ホームページ、<http://dimacs.rutgers.edu/dimacs2.html>
- 5) ジョージア工科大学リサーチラボ、
<http://www.isye.gatech.edu/research/labs-centers-groups/>
- 6) COIN-OR ホームページ、<http://www.coin-or.org/>
- 7) AIMMS MOPTA Modeling Competition ,
<http://www.aimms.com/community/modeling-competitions/mopta-2012>
- 8) CONDOR ホームページ、<http://www.condor.com/us/index.jsp>
- 9) NEOS サーバーホームページ、<http://www.neos-server.org/neos/>
- 10) ドイツ ZIB 国立研究所、<http://www.zib.de/en/home.html>
- 11) ドイツ Matheon プロジェクト、<http://www.matheon.de/>
- 12) DFG のアルゴリズム工学、<http://www.algorithm-engineering.de/index.php?lang=en>
- 13) 中国人民解放軍国防科学技術大学、<http://english.nudt.edu.cn/>

3.3.5 最適化モデリング

(1) 研究開発領域名

最適化モデリング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

潜在的な評価尺度や制約をも意識した最適化モデリング技術とそれと連動するアプローチの研究。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

最適化は、モデリングとアルゴリズム、そしてそれらを支える理論から構成される。最適化モデリングは、現実のシステムなどの設計、運用、制御、予測などに役立つ知見を得るために、現象を数理的に表現し、理論に基づいて（最適化アルゴリズムを利用するなどして）数値的な解を提供できるようにするものである。つまり、最適化におけるモデリングとは、問題を抱える意思決定者に、枝葉を取り除いた本質的な構造を提示して問題把握を支援するだけでなく、その先にある「問題を解くこと」を大きな目標としていることが特徴である。

一方、解くことを強く意識するせいで、定式化のことをモデル化、モデリングと述べている場合も見られる。定式化を支援するものとしてモデリング言語が挙げられるが、数理的モデルを効率的に記述するもの¹⁾であり、ここでは、モデリングと定式化は類義語であるとして、モデリングの方がもっと広い意味を持つとしておく。もう少し詳しくいうと、モデリング（もしくはモデル）とは、本来、意思決定を助けるものであるので、必ずしも数式を使うべきというものではない。しかし、モデリングは抽象化であり、最適化においては数値解を得る目的もあることから、その抽象化が数学的・数理的につながっている、という関係が存在するわけである²⁾。

また、近年では、最適化アルゴリズム、実装、そして、計算環境の著しい進歩に伴い、うまく定式化できれば、Cplex³⁾、Gurobi⁴⁾、Scip⁵⁾、Xpress⁶⁾、Numerical Optimizer⁷⁾といった汎用ソルバーを利用し、これまでには「最適解を得ることが困難、実行可能解を得ることも難しい」とされてきた問題ですら、現実的な時間で解ける場合も多くなった。つまり「うまく定式化する」ことも当然だが、その前にどのようにモデリングしたか、どのように問題を捉えたかが、真の問題解決に最も大きく関わるようになってきた。言い換えれば、解く技術が著しい発展を遂げたために、最適化モデリングの重要性が際立ってきたといえる。

2013年の報告書に詳しく述べたが、国内外を含め、最適化モデリングでよく使われる方法（テクニック）を3つ簡単に挙げておく⁸⁾。

- ① 対象を既知の構造⁹⁾にあてはめて、線形計画法、動的計画法、分枝限定法など実績のあるアルゴリズムの力を発揮させる余地を拡大する
- ② 計算量を減らすために、扱う対象の構造をいかして問題を分割¹⁰⁾する
- ③ 意思決定の粒度を考慮し、問題を階層化する

一方、これらの工夫を行っても、扱いが難しいのが、問題の目的をどう捉えるかである。定式化の際の目的関数の設定が難しいということにもつながる。

目指すものが、金額に変換できるようなコストの最小化、もしくは物理的な量や利益の最大化であり、意思決定の対象が物理的実体に結びつくような場合には、比較的自然的な形で捉えることができる。早く移動したい、早く作業を終わらせたい、移動距離を少なくしたい、利用車両数を少なくしたい等である。しかし、人間の評価尺度（好ましさや不満度）を含む問題は、それ自体を数値化することが難しく、さらに複数の要素の組合せについては、その尺度の足し算で表せるわけではない。さらには、意思決定者が、潜在的に考えている評価尺度はモデリングにおいて表現されることがなく、不満の残る解を与えることも少なくない。こういった状況は、複数の人間が働く現場での人員配置やスケジューリングで起こりやすく、優れた最適化アルゴリズムが開発されても、なかなか現場に浸透しないという現実がある。

また、国内外の研究を見渡すと、論文タイトルに「人の好み（preference）を考慮した」とつけられたものも多くみられるが、好ましくないものを禁止しているだけ、設定した目標に到達しない度合いに重みをつけて足し合わせた（線形の）目的関数が設定されているだけの場合がほとんどである。

古くから、多目的計画、ゴールプログラミングについての研究¹¹⁾があり、評価尺度の扱いに対する問題提起はされていたものの、現在の最適化アルゴリズムの進歩を十分にいかせるモデリングの研究、逆に、最適化アルゴリズムで作りに出した情報を利用した上での最適化モデリングの研究がまだ存在しないのが現状である。

一方、最適化技術をだれでもどんな現場でも利用できるようになるには、扱いにくい評価尺度、複数の目的（目標）、潜在的な評価尺度や制約をも意識した最適化モデリングの研究が必須であるといえる。

（４）科学技術的・政策的課題

（３）で挙げた３つの方法において、重要な視点と課題を整理しておく。

①の「既知の構造にあてはめる」については、「緩和」の視点が重要である。枝葉を落とすこと（緩和すること）ことで、問題構造がシンプルに表現でき、十分研究されたモデルに落とし込むことができれば、非常に効率がよい。妥当な解を与える限り、問題把握のためにも、効率よく解くためにも、できるだけシンプルに緩和できるのがよい。しかし、解きやすさ（都合の良さ）を優先するため、問題にとって本質的な部分を無視することになってしまう危険については常に意識するべきである。また、逆に、重要度の低いものから緩和すればよいというわけでもない。重要度の高い制約をハード制約、できれば考慮したい制約をソフト制約とし、ハード制約を真の制約として、ソフト制約を満たさなかった度合いを目的関数で最小化することも論文でよくみられるが、問題によってはこれが逆効果の場合もある。１つの車が、同じ時刻に違う場所でそれぞれ配達業務を行うといった、物理的に起こりえない状況を禁止することをハード制約としておくことには全く問題ないが、起こりうる状況の好ましさ（好ましくない度合い）で、ハード制約とソフト制約に分けることが、結果的に受け入れられない解を与える場合がある。例えば、人間がもつ評価尺度（その制約を満たさなかった場合のペナルティ）が数値的に表せないだけでなく、満たせない制約の組合せによって解の評価が全く異なる問題では、１つ１つはそれほど重要な制約に見えなくても、人間にしか適切な緩和ができない

場合が多い。よって、重要な制約を多少緩和した解を与え、その重要な制約を満たせるよう、数値的に扱いづらい制約を意思決定者が1つ1つ緩和して解を修正する方がずっと現実的で効率がよい場合が起こり得る。このように、一時的に重要な制約を緩和しても、「緩和したことを陽に意識しておく」ことにより、人間に「適切な緩和」のチャンスを与えるだけでなく、新しいアプローチ方法の構につながると考える。しかし、それらを単に人間任せにするのではなく、数理的に最適化の視点で行う方法を構築することも重要であり、適切な緩和のために有益な情報提供やその情報の可視化といったことが、大きな課題の1つと考える。

②の「分割」については、制約群の中で、独立に扱いやすい部分を部分問題として捉え、意思決定の多くの部分に関わる結合制約（Linking Constraints）をいかに少なくするようにするかが重要である。分割では、結合制約を緩和することになるので、部分問題の中に結合制約を満たさない度合いを最小化するような仕組みを作っておく必要がある。また、どう分割するかについては（③の「階層化」もそうであるが）、多くの場合、意思決定者が経験と勘で行っているのが現状である。これに対し、制約間の関わりや強さから分割や階層化を行うため、場合によってはマイニング技術等も利用しながら、最適化の技術を駆使することも課題である。

以上をまとめると、最適化モデリングが抱える大きな課題は、目的関数の設定と解の提示方法にあると考える。最適化アルゴリズムやそれを利用できる環境が整う中、その適用分野が広がり、人間の評価尺度を持つ問題を無視することができない。その中で、暫定的に設定する目的関数がどうあるべきか、またそれが与えた解が唯一の最適解ではないことを十分理解し、それを囲むような良解空間や修正可能な空間を与える技術が切望されるなか、最適化モデリングは、意思決定過程において、これまでよりも広い領域を担っていくべきと考える。分割や階層化といった大きな構造を捉える際に必要な情報を提供できる仕組み作りも課題といえる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

暫定的に与えた目的関数が与えた解に対し、人間が持つ潜在的な制約条件や評価尺度を解に修正するためには、最適化モデルにおける最適解を1つ（もしくは少数）出力するだけでは不十分であり、最適解ではないが意思決定者が「あれもあり得た、これももあり得た」と思う（実行不可能解も含む）近似解を出力する必要がある¹²⁾。しかし、最適解の周辺にある膨大な数の近似解を単に列挙するだけではかえって混乱を招くことになりかねない。人間の意思決定過程を動的計画の考え方に対応させることにより、解空間をネットワークで表し¹³⁾、良解空間を絞り込むこと¹⁴⁾、そして、過去に蓄積された解の特徴をモデルに反映するために、統計的な技術を利用したり、機械学習¹⁵⁾との連動を実現したりする研究など、新しい動きもある。しかし、これらは、始まったばかりの（もしくは、これから始まろうとしている）活動であり、既存研究として成果を探すことが難しい。また、2013年の報告でも述べたが、個々のテーマごとにそれぞれのモデリングが提案されていても、最適化モデリング自体についての研究は、これまでに例がない。したがって、大規模なプロジェクトとなるのは今後の展開となる。

潜在的な評価尺度、つまり人間の暗黙知¹⁶⁾に対してロバスト性をもつ最適化の考え方、

最適化モデリングとアルゴリズムの関連の研究、そして変数・制約式の緩和を含めたモデルの変形に関する理論的な展開、解空間の可視化や良解の分布に対する情報提供を、誰でも利用できる技術が望まれているといえる。

（6）キーワード

潜在的評価尺度、納得、解空間、可視化、ネットワーク表現、緩和、修正、最適化アルゴリズム、列挙、統計、機械学習、マイニング

（7）国際比較（潜在的な評価尺度や制約をも意識した最適化モデリングに絞った評価）

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	△	→	・暗黙知を意識し、モデルの簡素化、可能良解の可視化、解の修正を支援する情報についても研究が始まっているもののまだ顕著な成果がでていない。 ・最適化モデリング自体の研究への意識があいかわらず薄い。 ・目的関数設定が比較的容易（明らか）な問題を扱った研究が多い。
	応用研究・開発	△	→	・明らかではない尺度を無視したままの研究も多い。
	産業化	△	→	・小規模な最適化問題を支援するシステムが数多く存在するにもかかわらず、最適化エンジンの利用はされないままであり、最適化モデリング研究の取り組みへの遅れが明らかである。
米国	基礎研究	△	→	・目的関数設定が比較的容易（明らか）な問題を扱った研究が多い。 ・応用研究上の意図と強く結びついた、特定の構造に対して深く掘り下げて追究する取り組みは多い。
	応用研究・開発	△	→	・明らかではない尺度を無視したままの研究も多いが、明らかでない尺度自体をもともと対象にしないという現実を反映しているとも考えられる。
	産業化	△	→	・人員配置などの小規模な最適化問題用のシステムも数多く存在するが、人間の評価尺度を重視しているかは不明である。
欧州	基礎研究	△	↗	・目的関数設定が比較的容易（明らか）な問題を扱った研究が多い。 ・応用研究上の意図と強く結びついた、特定の構造に対して深く掘り下げて追究する取り組みは多い。 ・Preference Learning の研究がある
	応用研究・開発	△	→	・明らかではない尺度を無視したままの研究も多いが、人間を中心とした最適化システムの開発もある。
	産業化	△	→	・人員配置などの小規模な最適化問題用のシステムは存在する
中国	基礎研究	×		
	応用研究・開発	×		
	産業化	×		
韓国	基礎研究	×		
	応用研究・開発	×		
	産業化	×		

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 山下浩,他. 数理科学のためのモデリング言語 SIMPLE. コンピュータと教育研究会報告. 1995, vol.95, p.25-30.
- 2) 伊理正夫. モデリング. bit 臨時増刊. 1983, vol.15, p.898-903.
- 3) IBM,CPLEX Optimizer,
<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>
- 4) Gurobi Optimization, Gurobi Optimizer, <http://www.gurobi.com/>
- 5) Zuse Institute Berlin, SCIP Optimization, <http://scip.zib.de/>
- 6) FICO, Xpress Optimization,
<http://www.fico.com/en/products/fico-xpress-optimization-suite/>
- 7) NTT データ数理システム, Numerical Optimizer, <http://msi.co.jp/nuopt/>
- 8) 日本応用数理学会 監修/薩摩順吉・大石進一・杉原正顕 編, 応用数理ハンドブック, 朝倉書店, 2013.
- 9) 茨木俊秀. 「問題解決エンジン」群とモデリング. オペレーションズ・リサーチ. 2005, vol.50,p.229-232.
- 10) C.H. Papadimitriou, K. Steiglitz, Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, Prentice Hall, 1982.
- 11) 田辺隆人, 他. 「納得」を生み出すスケジューリングアルゴリズムとソフトウェア 制約充足を超えて: 実行可能領域の直観的把握. スケジューリング・シンポジウム. 2009, p.169-173.
- 12) 中山弘隆. あれもこれもよくしたい多目的計画法. オペレーションズ・リサーチ.1996, vol.41, p.343-348.
- 13) Ahuja ,R.K.; Magnanti,T. L.; Orlin,J.B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Prentice Hall. 1993.
- 14) 秋田博紀; 池上敦子. ナース・スケジューリングにおける部分問題実行可能解空間のネットワーク表現. 統計数理. 2013,vol.61, p.79-95.
- 15) J. Fürnkranz, E. Hüllermeier, Preference Learning, Springer, 2010.
- 16) マイケル・ボラニー (佐藤敬三訳), 暗黙知の次元: 言語から非言語へ, 紀伊國屋書店,1966.

3.3.6 最適化ソフトウェアと応用

(1) 研究開発領域名

最適化ソフトウェアと応用

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

最適化技術の発展を多様な実務分野に役立てるためのソフトウェア開発および利用技術の研究。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 実務に役立てる3要素の役割と現状

最適化を実務に役立てるには3つの要素が必要である。ひとつは解決したい問題を最適化問題として記述するモデリング、つぎにモデリングされた最適化問題を解くアルゴリズム、さらに問題を具体的に記述するデータである。以下これらの要素に関する役割と現状を概括する。

①モデリング

定式化によって現実世界と最適化アルゴリズムの仲立ちをする技術であり、最適化アプローチを成り立たせる根源となっている要素である。例えば航空産業の分野¹⁾では古くから最適化を実務に応用しようとする努力の中から、大規模な問題を分割、あるいは階層化して扱いやすくする技術が生まれ、その成果が他分野に広まっている²⁾。しかしながら、モデリング技術は学問的に体系立って整理されているとはいえず、アルゴリズムに対して従属的な関係にとどまっている。その理由としてはモデリングには実務そのものと最適化技術の双方の知見を集約しなければならないため担い手が少ないこと、さらに、モデルとアルゴリズムを分離するソフトウェア技術である「モデリング言語」が比較的最近まで普及していなかったことが考えられる。

②アルゴリズム

モデリングされた問題に対して、具体的な解を求めるための技術である。Dantzigによる単体法というアルゴリズムの開発が、最適化技術の基礎となった。制約を満たしながら、特定の目的関数を最小化する解を求めるという問題は、変数が連続で関数が線形の場合には、線形代数、不等式論など古典的な数学が有用なアプローチを提供する。Dantzig以降も数十年にわたって、変数が一部離散的な場合、関数が非線形な場合、制約式が行列方程式の場合などに対応するアプローチが案出され、今日の最適化技術の理論的な礎となっている。アルゴリズムの所要時間や得られる解の「良さ」に理論的な裏づけがあることは、最適化技術を利用する実務家にとっても大きなメリットとなる。

しかしながら、理論的な解析の充実に比べてソフトウェアとしての実装は多くない。これはソフトウェアの動作がデータ構造の効率や計算機環境、選定するテスト問題などの「夾雑物」によって変動して見えてしまうために優劣の評価がつけにくく、アカデミックな業績評価に結びつけにくいという事情によると考えられる。

③データ

最適化は定量的な分析であることから、信頼のおける分析結果を出すためには解析対象に関する正確なデータが必要になる。1990年代前半までは、データの取得やメンテナ

ンスには非常に大きなコストが必要で、最適化アプリケーション導入における大きな障壁となっていた。ビジネス分野における IT 環境が整い、完全に整備されているとはいえないながらも大量のデータが蓄積している現在は当時と比べると、最適化の応用において状況は大幅に改善された。IT ビジネス界の昨今のトレンドである「ビジネスアナリティクス」「ビッグデータ」はこのような状況を背景として生まれている。機械学習アルゴリズムの文脈では、単純な学習モデルとアルゴリズムでもデータが潤沢にあればかつてないほどの汎化性能が実現されたという報告がある。

(3-2) 3 要素に関連するソフトウェア技術

次に最適化を成り立たせている上記の要素と関連する重要なソフトウェア技術について記述する。

①汎用プログラミング言語 (⇒アルゴリズム)

例えば FORTRAN や C、C++ が代表的な汎用言語である。最適化の黎明期には計算機に計算を行わせる手段として唯一取り得るものであった。90 年代までは、信頼できる数値計算ライブラリの充実もあって、FORTRAN が最適化の分野では最もポピュラーな汎用言語であったが、現在では安価な処理系の充実に伴って C、C++ に主流が移ってきている。

汎用プログラミング言語のみで最適化アプリケーションを実装するコストは大きい。FORTRAN や C は手続き指向の言語であるため、数式モデルそのものの表現や構造化されたデータのハンドリングに適しているとはいえない。一方で C++ はオブジェクト指向言語であるが、計算の効率化とオブジェクト指向を両立させるために相応のテクニックが必要である。近年になって ruby や python などインタプリタによって実行できるスクリプト言語が最適化分野にも普及してきているが、アルゴリズムそのものの実装には用いられる例はあまり多くない。

②スプレッドシート (⇒データ)

Microsoft Excel に代表されるビジネスアプリケーションである。最適化の入出力である数値データをハンドリング・可視化することに長けており、最適化アプリケーションのインターフェースとして最も普及している。現在、ほぼすべての汎用最適化パッケージは何らかの形でスプレッドシート型のインターフェースを備えている。スプレッドシートの欠点はパターン化したデータでもサイズに比例して入力の手数が増えてしまうこと、抽象化した数式的な表現を直接記述することができないという点である。

③統計解析パッケージ (⇒データ)

SAS や SPSS、S-PLUS、R など、統計演算を数値的に行ったり、統計データを可視化したりするソフトウェアである。スプレッドシートと同様の機能をもつ他、データの管理をする機能やデータ処理用の言語を伴って提供されている。これらの言語に含まれているデータ処理用の言語は特に大規模データに関する処理を簡便に記述する上で操作性が高く、最適化との親和性が高い。そのため多くの統計解析パッケージが最適化ソフトウェアとのインターフェースをもつか、あるいは最適化ソフトウェアを内部に組み込んでおり、例えば金融工学モデルのパラメータ推定などに積極的に利用されている。

④モデリング言語 (⇒モデル)

AIMS、GAMS、AMPL、SIMPLE、OPL など、数式モデルとして最適化問題を簡便に記述するためのツールである。数式に現れる繰り返しパターンを簡素に記述する機能、大規模データをハンドリングする機能をもつ。最適化アルゴリズムの実装 (ソルバー) と協調動作させることを意図してつくられており、線形関数・二次関数の係数を行列として出力する、非線形関数の微係数を計算する、といった機能を有する。モデリング言語の登場において、当初最適化アプリケーションにおいて渾然一体となっていたモデル・データ・アルゴリズムをそれぞれ分離し、ニーズに応じて選択的に組み合わせる取り扱うことが可能となった。ただ、モデリング言語は単体で完結するわけではなく、必ずデータとアルゴリズムを結合しなければならないという点で最適化のサービス側が利用するツールという位置づけにとどまる。

⑤高速コンピューティング技法 (⇒アルゴリズム)

最適化アルゴリズムの実行は一般に多大な計算コストを所要するため、各時代でのハードウェア・ソフトウェアの先端技術が投入されてきた。1990 年前半はベクトルコンピュータ、1990 年代後半は、高性能化したパーソナルコンピュータのキャッシュ性能の利用、2000 年代後半からのマルチコア環境による並列化、さらに最近になって流行している GPU を用いた並列化、といった技術が最適化計算に大きなインパクトを与えている。現在では 10 万円台で購入できるパソコンにおいて、数千万変数規模の線形計画法が現実的な時間で可能となっており、大規模計算が個人の環境で可能となっている。

⑥ソルバー (⇒アルゴリズム)

MINOS、CPLEX、Xpress-MP、Numerical Optimizer、Gurobi、IPOpt、SCIP、SDPA など学問的な成果を取り込む形で開発されたアルゴリズムの実装 (ソルバー) である。その一部は商用プロダクトとして保守され続けており、現在において (混合整数) 線形計画問題・凸な 2 次計画問題・制約充足問題に対しては安定かつ信頼できるソルバーが市場に出回っている。特に商用パッケージはほぼ例外なく、何らかのモデリング言語、あるいはスプレッドシートアプリケーションとのインターフェースをもつ。しかしながら、商用以外のプログラムも含めて考えると、ソルバープログラムが対象としているスコープや機能、性能は多種多様で、インターフェース、品質はさまざまである。ソルバーを実務的な問題解決のために選定して利用するにはアルゴリズムとソフトウェアに対する深い知識が必要となる。

⑦大規模ストレージ (⇒データ)

近年、急速に整備されつつある。ビジネス分野におけるデータがかつてない規模で蓄積し、具体的な意思決定への利用に向けた機運が高まっている。しかしながらデータから有益な情報を引き出すにはデータを選別・整理する技法を学ぶ必要があることに注意しなければならない。最適化に利用するためにはさらに、データの内容や量とモデル・アルゴリズムの整合を考慮する必要がある。現状において、大規模ストレージのデータはまだ集計や構造を持たない機械学習モデルに利用されるにとどまっており、蓄積した大規模データの最適化モデルへの利用は今後の課題である。

(4) 科学技術的・政策的課題

前項までの記述において、最適化を支える構成要素とそれを支える技術について概観した。個々の技術は長い時間をかけて成熟の域に達しているともいえる。しかしながら、最適化ソフトウェアの応用は決して期待された通りに進んでいるとはいえない。それはなぜなのか考えられる理由を次に列挙することで、技術的・政策的な課題を明らかにする。

①「アルゴリズム」が多すぎる

最適化の研究の歴史は50年以上と長く、その成果としてアルゴリズムやその解析、実装プログラム（ソルバー）が多数蓄積されている。このことが分野の全体像を見えにくくしており、具体的な問題を解決しようとしている実務家（ユーザー）を混乱させている側面は否定できない。例えばウェブを調査すればアルゴリズムやソルバープログラムの名前や一覧などの情報は存在する。しかしソルバーの作り手、研究者、ソフトウェアベンダーがそれぞれの立場でアルゴリズムの分類をしており、アルゴリズムの呼び名についてもコンセンサスが取れていないので、専門外のユーザーに対して利用しやすい状況とはいえない。

②ニーズが合致しない

実務家が求めるのは実務上の問題解決であるが、研究者の目的や指向は必ずしも問題解決にあるとは限らない。研究として「面白い」問題は得てして非常に難しく、実務的に利用価値のあるアルゴリズムを構成することは難しい場合も多い。研究者は時間をかけても厳密解を出すことに意義を見いだすかもしれないが、実務家は「そこそこ」の実行可能解をあまり時間をかけずに求めることを指向するかもしれない。例えば企業と大学の共同研究の場でこのような不一致が顕在化してしまうと、双方にとって望ましくない結末を招く。

③コスト見積もりが難しい

特に組み合わせ問題では一見簡単に見える問題でも、一定以上の規模になると驚くほど難しい場合がある。また、実務家（ユーザー）にとっては自然な要請に起因する問題の改変が、よく知られた効率的なアルゴリズムを適用する上で致命的な影響をもたらす場合もある。

一般に最適化問題を解く前にどの程度の計算リソースを所要するかを見積もるのは困難なことが多く、大規模で非線形、あるいは離散的な問題の場合には、計算リソースの不足のために何ら有効な結果が得られない場合さえある。またユーザーが解をみるまでに制約の抜けなどのモデル化の不備に気づくことができない、といった現象がソフトウェアの開発フローを混乱させる。

このような背景のため、ソフトウェアプロジェクトに最適化技術を組み込むことは費用・工期の上で大きなリスク要因となり得る。リスクを軽減するためには、アルゴリズムとその実装、モデル化に対する深い知識と経験をもった人員の参加が必要になる。

④データの整備にコストがかかる

1990年代までは実務分野において数量化されているデータを得ることの方が難しく、最適化までたどりつかないことは珍しくなかった。この状況は現在において大幅に改善されている。しかし最適化の前提となる精度のよいデータを整備した形で揃えるのに特

別な技術や人的コストを所要することは変わりなく、データはモデルやアルゴリズムよりもはるかに高価な要素であることは認識すべきである。モデルが最適化の要であるという立場では、データは従属的なものであるが、モデルに固執するあまり、常に新しいデータを必要とし、多大なコストをかけてデータを整備する結果を招くのでは最適化の応用は進まない。コスト面にも配慮して既存のデータをうまく利用できるようなモデルをデータに合わせこむというアプローチも考慮に入れてしかるべきである。

最適化ソフトウェアは、実務的な課題を出発点とし、モデル、データ、アルゴリズムを総合させて構成される。モデル、データ、アルゴリズム個々の技術についてはある程度の成熟はみているものの、モデル、データ、アルゴリズム相互の「刷り合わせ」において多くの問題が発生し得る。解消の方向性としては、次のような方策が適切であろうと考えられる。

⑤情報発信

最適化が適用されている問題は数多く、そのうちの一部は大きな効果をもたらしている。私企業の利益に貢献しているものは発表できにくいので広まりにくい。例えば学校の配置や道路や橋梁など社会インフラのメンテナンスなど、利害が対立する中で中立性を保ちながらリソース（予算）を配分するという、公共性の高いテーマにおける貢献を示すことで、関心呼び起こすことが期待できる。

⑥魅力的な教科書

アルゴリズムの数学的な側面よりも、応用事例に即した教科書があれば、最適化分野に参入する研究者やユーザーの増大に大きく貢献するであろう。現在ではスタンダードな最適化の教科書は理論的な側面を指向したものが多い。

⑦解の解釈機能の充実

最適化は数値を入力して数値を出力するため、ソフトウェアの入出力は数値の表など無味乾燥なものとならざるを得ない。アルゴリズムが返した結果を解釈して「意図」をくみ取って指し示す方法は開発されていないため、最適化技術のユーザーには「数字を読む」能力が必要となり、最適化技術を使いこなす上での障壁となっている。このような最適化の「解釈」に関する研究はあまり前例がないが、大きな成果をもたらす可能性がある。

⑧コンサルタントの育成

最適化の分野において専門的な知識をもつ職業的コンサルタントは極めて少ない。モデル、データ、アルゴリズム個別ではなく、相互の刷り合わせのノウハウをもつ人材を育成することによって、最適化の適用は大きく進むことが期待できる。

⑨アカデミックな研究領域の拡大

最適化ソフトウェアの成功にはモデル、データ、アルゴリズムの「刷り合わせ」技術が重要であることは認識されつつも、学問分野として認識されてはいない。アルゴリズムに適したモデル化技法、モデルの実務分野への見立て、ユーザーの意図を適切に汲み取るモデル化技法、アルゴリズムが利用する計算機資源の見積もり、マシンアーキテクチャを利用するアルゴリズムの実装などの課題を学問的に整備することで、最適化ソフトウェアの利用に伴うリスクを大幅に軽減できることが期待できる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

① ビジネスアナリティクスのトレンド

データの蓄積を背景に、IT 業界は「ビジネスインテリジェンス」というキーワードの下、集計・可視化を行うツールを開発し、浸透させた。次に IT 業界は「ビジネスインテリジェンス」の次の段階として、「ビッグデータ」に基づく「ビジネスアナリティクス」というキーワードを打ち出し、集計や可視化を超えた、意思決定や予測といった価値をデータから引き出すソフトウェアの開発と浸透に努力している。「ビジネスインテリジェンス」の具現化のひとつとして最適化ソフトウェアとその応用があることは間違いなく、その意味で最適化に対する社会的な期待は高まっている。

② 問題解決型指向

サービスサイエンス、ヘルスケア、Web マーケティングなどの分野では、特定の問題解決をテーマとして、さまざまなバックグラウンドをもつ研究者が集結して研究を進めている。このような動きの中から、異なる専門分野をもつ研究者同士の交流、横断的な知識をもつ人材が育成されることが期待できる。

③ 定量化できない分野の最適化

最適化技術はエネルギーコストの最小化など、解の「良さ」が明確に定量化できてしかも評価軸が少ない分野から出発したが、昨今では就業人口の減少や消費者の成熟を背景として、定量化が難しく多様な評価尺度が存在する人的スケジューリング・配送計画・積み付けなどの分野にも応用が進められようとしている。その中から、旧来のモデル・アルゴリズム（ソルバー）の弱点や改善ポイントの議論が始まっている³⁾。

④ 研究者による高性能汎用ソルバーの作成

わが国における、問題解決エンジンプロジェクト⁴⁾、SDPA（線形半正定値計画）⁵⁾、ドイツにおける SCIP（制約充足・混合整数計画法）⁶⁾のように、研究者が高性能な汎用ソルバーを開発、リリースする動きが見られる。これは最適化アルゴリズムそのもののみならず、高品質な実装を開発することが研究活動として認識されだしたことを示すと解釈できる。

⑤ モデル化不要の技術の台頭

最適化においてモデル化は必須の技術であるが、それが応用への障壁となってもいる。最近ではモデル化を簡素化する技術も台頭してきた。関数値の値のみから最適化を行う DFO（Derivative Free Optimization）はユーザーが最適化したい問題を数式で記述する必要はなく、プログラムをあくまで「ブラックボックス」として結合するのみで最適解を導出する技術である。また、機械学習アルゴリズムは判別分析モデルをデータから学習し、データが大量であればあるほど、モデル化の精度を向上させることができる。これらの技術は最適化の利用を普及させる上で意義深い。

（6）キーワード

詰め込み、ネットワーク設計、fleet スケジューリング、意思決定支援、判別分析、人的スケジューリング、施設配置、金融商品開発、広告最適化、ポートフォリオ最適化、モデルパラメータフィッティング、ロバスト最適化、CAE、設計最適化、生産スケジューリング、命令スケジューリング、VR、SAT、カッティングストック、運転計画、巡回セールスマン、石油化学プラント、設備計画、ロジスティクス、RCPSP、リコメンド、制御、保守計画、作付計画、品質管理

（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	○	↗	・多くの研究者が参画している。
	応用研究・開発	○	↗	・汎用数理計画法ソルバーやモデリング言語の開発が行われている。
	産業化	△	↗	・米国・欧州にくらべて最適化モデルに関する一般的な理解は進んでおらず、普及の段階には達していない。 ・大規模システム開発において最適化は一般的なコンポーネントとして認知されていない。
米国	基礎研究	○	↗	・多くの研究者が参画している。
	応用研究・開発	○	↗	・多くの汎用ソフトウェアが開発されている。
	産業化	○	↗	・広い分野で応用事例の報告がある。 ・最適化モデルに関する一般的な理解が進んでいる。
欧州	基礎研究	○	↗	・多くの研究者が参画している。
	応用研究・開発	○	↗	・汎用数理計画法ソルバーやモデリング言語の開発が行われている。
	産業化	○	↗	・最適化モデルに関する一般的な理解が進んでいる。
中国	基礎研究	△	↗	・指導的立場の研究者は見ないが論文発表などはかなり多い。
	応用研究・開発	△	→	・潤沢な資金を背景に応用しようという機運は高まっている。
	産業化	△	→	・現在のところビジネス環境の制約が少ないためにまだビジネス分野でのニーズは多くないのだと考えられる。公的規制や事業が成熟して差別化を図ろうという意図が生まれたときに流行するのだと思われる。
韓国	基礎研究	×	→	・分野への参画は後発であり、指導的立場の研究者は見ない。
	応用研究・開発	×	不明	・不明。
	産業化	×	不明	・不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Marsten,R.E.; Muller,M.R.; Killion,C.L. Crew Planning at Flying Tiger: A Successful Application of Integer Programming, *Management Science*. 1975, vol.25,no.12, p.1175-1183.
- 2) Papadakos,N. Integrated Airline Scheduling. *Computers & OR*. 2009, vol.36, no.1, 2009, p.176-195.
- 3) 田辺隆人,岩永二郎,多田明功,池上敦子. 「納得」を生み出すスケジューリングアルゴリズムとソフトウェア制約充足を超えて: 実行可能領域の直観的把握. *スケジューリングシンポジウム*. 2009,p.169-173.
- 4) 茨木俊秀. 「問題解決エンジン」への道. *応用数理*. 2004, vol.14,no.1, p.67-70.
- 5) Yamashita, Makoto; Fujisawa, Katsuki; Fukuda, Mituhiro; Kobayashi, Kazuhiro; Nakta, Kazuhide; Nakata, Maho. Latest developments in the SDPA Family for solving large-scale SDPs. *Handbook on Semidefinite, Cone and Polynomial Optimization: Theory, Algorithms, Software and Applications*. edited by Anjos, Miguel F. ; Lasserre, Jean B. Springer. NY, USA, Chapter 24. 2011, p. 687-714.
- 6) Achterberg, Tobias. SCIP : Solving Constraint Integer Programs. *Mathematical Programming Computation*. 2009, vol. 1, No.1, p. 1-41, doi:10.1007/s12532-008-0001-1

3.4 ネットワーク論区分

3.4.1 複雑ネットワークおよび総論

(1) 研究開発領域名

複雑ネットワークおよび総論

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

統計物理学、確率論、シミュレーション工学などの理論的技術を用いた、現実中存在する生物、社会、工学などのネットワークの構造特徴抽出、ネットワークの構造やネットワーク上のダイナミクスの理解や予測、ネットワークの制御。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本稿で述べる研究分野はネットワーク科学、ないし、複雑ネットワーク研究、と一般的に呼ばれ、本俯瞰区分の要に位置する。多数の要素が相互作用していることはシステム科学の対象であることの必要条件である。その中で、ネットワークとは、要素2つの相互作用の集合体として表されるようなシステムを指す。

人の組織というシステムについては、友人関係の織りなす網目、より具体的には Facebook にあるような2者間の友人関係の集合体がネットワークの例である。環境というシステムにおいては、捕食-被食関係にある2つの生物種を結び、そのような捕食-被食関係とそれにかかわる生物種を集めたものがネットワークの例である。逆に、ネットワークという視点においては、要素2つの相互作用の集合体に分解できないものは扱わない。例えば、3人以上のグループでの友人関係は、グループ内の各2人の対人関係の集まりであると見なして解析を行う。3体以上の直接相互作用が本質的な役割を果たすシステムの取り扱い、他の方法論に委ねられる。

ネットワークとは離散数学でいうグラフと同値であり、グラフ理論は近代的研究に限っても、半世紀以上の歴史がある。これに対して、ネットワーク科学は、1998年を境に勃興した新しい分野である。グラフ理論と対象を同じくするにもかかわらず、異なる研究分野として認識され、2015年時点で多くの研究者が研究に参画するようになった理由は、主に2つある。

一つ目は、ネットワーク（すなわち、グラフ）を1998年頃までは数学的に扱うのが唯一の理論的手法であったのが、統計物理学者や数学をベースとしない工学者の研究への参画によって、厳密さに必ずしもこだわらずに、現実のデータを解析する手法が発達したことである。具体的には、マスター方程式、平均場近似、有限サイズスケールリングといった物理学的手法、ネットワークの生成やその上の感染症伝搬などのダイナミクスを解析するための数値計算の技術などが積極的に現実のネットワークの解析に用いられるようになった。それにより、多くのネットワークが頂点の次数が裾の長い分布に従うというスケールフリー性をもつこと、スケールフリー・ネットワークでは感染症伝搬が極度に起こりやすいこと、などが次々と明らかにされた。

二つ目は、1998年頃に、種々のネットワークのデータが一般の研究者に供用されるようになってきたことである。インターネットの発展や、計算機の飛躍的な性能向上がこ

の時期に起こった。このことは、分野横断的にネットワークの特性を比べることをも可能にした。例えば生態学における食物網、工学における電気回路や送配電網、社会学における人間関係ネットワークなどは、各個別分野においては 1998 年より何十年も前から研究が行われていたが、分野内の個論にとどまっていた。こういったデータをインターネット経由で黎明期のネットワーク科学研究者が使用できるようになりつつあったことに加えて、インターネット、ウェブグラフ、遺伝子発現制御ネットワーク、神経ネットワーク、電力網などのネットワークのデータが、インターネットや高速になった計算機を援用しながら、採取され、整理された。そして、分野横断的にネットワークを解析することによって、スケールフリー性に代表される普遍性や、分野別の個別性が明らかにされてきたのである。

2000～2005 年はネットワーク生成モデル、感染症伝播、中心性（頂点の重要性を定めて応用すること）、コミュニティ構造（計算機科学、離散数学などの分野ではグラフ分割とも呼ばれる）などが主要なテーマであった。それ以降は、本俯瞰区分の研究開発領域「機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析」とも関係するネットワーク構造推定などの理論のさらなる発展とともに、感染症制御、生態系保全、人間の移動を考慮したネットワーク、電力網のコントロール、創薬などの研究が発展している。ネットワーク研究の理論発展に寄与したような確たる基礎理論を身につけた研究者が、これらの応用研究に参画していることが特徴的である。すなわち、理論と応用が異なる人材で担われている分野と事情が異なる。

国際比較としては、本領域を創成した 2 本の論文（1998、1999 年）の発祥でもある米国が圧倒的に他国をリードしている。その片方の著者である Barabási のチームを含む多くの強力な研究チームがボストンに存在し、シカゴも人材の蓄積が厚い。半世紀以上続く社会学のネットワーク研究も米国が中心であること、多くのインターネット企業が米国を本拠地にしていることも、米国が基礎研究から産業化フェーズまでの広きにわたって世界の研究フロンティアを牽引していることに寄与している。欧州出身の代表的な研究者も、その多くが米国で研究室を開設している。欧州はそれに次ぎ、2000 年代前半よりイタリア、スペイン、ハンガリー、フィンランドなどで研究が比較的盛んである。近年はイギリス、フランス、ドイツといった一般的に研究リソースが多い国に人材が移動している。アジアでは、基礎研究に限っては韓国が高いレベルを維持している。

（4）科学技術的・政策的課題

- ・ 基礎研究は 1998～2010 年頃の間非常に発展した。次のフェーズ、すなわち、今後 10 年程度での応用研究、産業化、あるいは、それに必要な種類の理論の構築の成否が、さらに長いスパンでネットワーク科学という研究分野がシステム科学技術分野の中において、さらには、科学技術全体の中において重要たり得るかどうかの分水嶺である。過去のカオスや複雑系の研究にも同様のフェーズの遷移があった。しかし、海外に比して、確かな基礎力をもちつつ応用や産業化に尽力する国内の人材は極めて少ない。
- ・ 特にインターネットや社会ネットワークの領域において、一般企業は多くのデータを有している。応用研究や産業化のもうひとつの障壁として、こういったデータや企業

側の問題意識に立脚するような産学連携が国内においては遅れていることがあげられる。多くの日本企業がかつてのような経済的・人的余裕をもたないこと、個人情報取り扱いについて匿名化などを施した上でも風当たりが強い日本の国民性などが主要な原因であると推測される。これに比して、海外では、携帯電話の通信データが研究用に供用されているなど、産学連携が進んでいる。

- ・ 日本学術振興会の分野区分などからもわかるように、日本の研究分野の予算配分、人的リソースの配分、研究教育制度は、既存の学問分野に基づく縦割りで行われる部分が多い。一方、ネットワーク科学は、扱うネットワークの対象が多岐にわたることからもわかるように、極めて学際的な分野である。学際的な分野を支援する枠組みは、存在するものの十分でない。審査側への外国人の登用などを含めた抜本的な対策が必要であると思われる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ 2011年11月に、Facebookと大学の研究者が協同して、Facebookのネットワーク構造解析結果を論文発表した。マーケティング、ユーザ利便性の向上などへの応用が見込まれる。
- ・ RFID (電波による個体識別) 機器を人間に装着してもらい、人間同士の動的な社会ネットワーク (誰と誰が、いつ、どのくらいの長さ相互作用したか) を時空間的に大規模に計測するシステムが、2008年以降に、まずは基礎研究として調査され、病院への導入などの応用が模索されている。こういった型のネットワークはテンポラル・ネットワークと総称され、理論、応用の両面から現在の注目動向である。
- ・ 2010年にBoston大学Stanleyらのグループは、単独では障害耐性の高いネットワークが互いに接続しあうと脆弱になり、壊滅的な障害が起こりやすくなるという理論研究を論文発表した。これが契機となり、複数のネットワークが相互作用するネットワーク (マルチプレックス・ネットワーク) の研究が現在盛んである。
- ・ Northeastern大学のA.-L. Barabásiは、ネットワーク科学を創始する論文のひとつを1999年に著し、現在に至るまでネットワーク研究の第一人者であり続けている。その予算規模は公開資料からは明らかでないが、ネットワーク的に結合したシステムの制御性やネットワーク理論を使った創薬の研究などがBarabásiチームの現在のプロジェクトとされている。
- ・ 日本では2012年10月よりJST ERATO河原林巨大グラフプロジェクトが発足した。ネットワーク科学及び本研究俯瞰区分の研究開発領域「機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析」、「ネットワークに関する離散数学」に関わる研究者が集まり、質の高い理論研究が発信されている。

(6) キーワード

スケールフリー、スモールワールド、べき則、中心性、コミュニティ構造、感染症、生態系、脳、遺伝子発現、インターネット、ウェブ、ソーシャルネットワーク

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 理論研究や実データを用いた基礎研究が国内で行われるようになってきたのは、2004年頃であり、欧米に大きく遅れをとっている。そのひとつの証左として、ネットワーク研究の代表的な総説論文¹⁾に引用されている日本発の論文数はわずかである。 2007年頃以降、研究者の数は非常に増えており、日本物理学会、情報処理学会、電子情報通信学会などの中にネットワークを冠した学会のセッション、研究会組織などが存在し、定期的に研究会を開催している。 2012年10月よりJST ERATO 河原林巨大グラフプロジェクトがスタートし、コンピュータ科学の研究者の参入が進んでいる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 日立グループが、世界に先駆ける技術で、人の職場における動きや、対人相互作用を高精度で記録するシステムを開発した。国内外の大学にデータを供与したり、国内の企業への試験的な導入（一部は商品化）を行ったりしている²⁾。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> サイジニア社が、複雑ネットワーク理論に基づいて、アマゾンなどの購買サイトであるような、商品を買ったときに他の商品を薦めるレコメンデーションシステムを商品化し、国内外から高く評価されている³⁾。 職場などの人間関係ネットワーク解析を請け負うコンサルティングサービスは、過去10年程度の間いくつかの会社が提供した模様である。しかし、特筆すべき成功事例はない。顧客の収益化の見通しのないまま商品化を行ってしまったことが原因であると思われる。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 1998年と1999年にそれぞれ1本ずつ発表された論文⁴⁾がネットワーク科学の幕開けであると世界的に認識されている。これらの論文は米東海岸発であり、以来、米国は本分野の基礎研究を行う研究者の質量において、他国を圧倒している。 ネットワーク科学を代表する国際会議のシリーズが、米国を母体として毎年開催されていて、毎回数百人の研究者が集う⁵⁻⁷⁾。 Northeastern大学⁶⁾、Indiana大学⁷⁾などに、ネットワーク科学の研究センターがある。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ネットワークの基礎研究の礎をつくったような研究者が、遺伝子システム、感染症の制御などについて、大型プロジェクトを運営している^{6, 7)}。 Google社の検索エンジンのアルゴリズムに近いeigenfactorが、論文誌のランキングについて、既存の有名な手法（Impact Factor）の弱点を克服するものとして開発され、世界中の学術機関で使われているWeb of Scienceというデータベースにも実装されている⁸⁾。 シカゴにおいて、チーム作業の生産性などといった独創的な応用研究が進められている⁹⁾。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ネットワークの理論を用いて、企業組織のネットワークをコンサルティングし、生産性の向上を目指すプロトコルが、商品化されている¹⁰⁾。 Googleの検索エンジンには、1998年に西海岸で発明されたページランクというアルゴリズムが搭載されている。ページランクはその後のGoogleの発展を牽引した。産業化における、ネットワークの基礎理論の最大の成功例として認知されている。 Facebookの中には、ネットワークの三角形を増やすようユーザーに推薦する機能など、ネットワーク科学の知見に基づく仕組みが搭載され、コミュニケーションの円滑化や拡大に間接的に貢献している。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 特にスペインとイタリアにおいて、統計物理学の背景をもつ多くの研究者が基礎研究を行っている。ハンガリーとフィンランドも、他の分野の平均に比べて本分野における基礎研究が盛んである。近年は各国からイギリス、フランス、ドイツなどへ有力研究者の移動がある。 ネットワーク科学に関する（数百万ユーロから多いもので2000万ユーロを超える規模の）大規模プロジェクトが複数ある¹¹⁾。 スペインのBascompteのグループは、食物網の解析、その生態学的機能などの研究において、世界をリードしている¹²⁾。

	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・米国の研究者と共同して、いくつかの欧州の国における携帯電話による社会ネットワークのデータの取得と解析が2007年以降行われている¹³⁾。災害時の移動、マーケティング、感染症制御などへの応用可能性がある。 ・フランスの携帯電話事業者が、自社の提供する携帯電話通話記録データを用いた研究のコンペティションを主催している¹⁴⁾。
	産業化	△	→	・世界的に知られるような産業化の動きはなし。
中国	基礎研究	×	↗	・国内の研究者評価システムが論文の数に偏っているためか、質の低い論文が大量に論文誌に現れている現状である。ただし、状況は少しずつ改善しているため、今後は上昇が見込まれる。
	応用研究・開発	×		・応用研究・開発の動きなし。
	産業化	×		・産業化の動きなし。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・優秀な部分を含む統計物理学者のかなりの割合がネットワーク研究を行っている。そのため、上位の学術誌には、日本よりも多くの基礎研究成果が発表されている。 ・米国のボストンやシカゴにある世界的なネットワークの研究センターとの間に太いつながりが以前からあり、継続的に人員の交流が行われている。そのため、最先端の情報が入ってきやすい。 ・統計物理学関係以外のネットワークの基礎研究はあまり盛んではない。
	応用研究・開発	△	→	・韓国最大のsocial networking serviceであるCyworldと大学が提携して、その構造解析などを行っている ¹⁵⁾ 。ただし顕著な後続研究は見当たらない。
	産業化	×		・産業化の動きなし。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Albert, R.; Barabási, A.-L. Statistical mechanics of complex networks. Rev. Mod. Phys. 2002, vol. 74, p. 47-97.; Newman, M. E. J. The structure and function of complex networks. SIAM Rev. 2003, vol. 45, p. 167-256.; Boccaletti, S. et al. Complex networks: structure and dynamics. Phys. Rep. 2006, vol. 424, p. 175-308.
- 2) 日立ハイテク ビジネス顕微鏡.
<http://www.hitachi-hitec.com/jyouhou/business-microscope/>
- 3) サイジニア. <http://www.scigineer.co.jp/>
- 4) Watts, D. J.; Strogatz, S. H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature. 1998, vol. 393, p. 440-442.; Barabási, A.-L.; Albert, R. Emergence of scaling in random networks. Science. 1999, vol. 286, p. 509-512.
- 5) Netsci. <http://netsci2014.net/>
- 6) Center for Complex Network Research, Northeastern University.
<http://www.barabasilab.com/>

- 7) Center for Complex Networks and Systems Research, Indiana University.
<http://cnets.indiana.edu/>
- 8) Eigenfactor の HP. <http://mas.eigenfactor.org/>
- 9) Amaral 研究室の HP. <http://amaral.northwestern.edu/>
- 10) Cross, B. Driving Results through Social Networks – How Top Organization Leverage Networks for Performance and Growth. Jossey-Bass, 2009.
- 11) NETWORKS. <http://www.thenetworkcenter.nl/>
MULTIPLEX. <http://www.multiplexproject.eu/>
PLEXMATH. <http://www.plexmath.eu/>
- 12) Bascompte 研究室の HP. <http://bascompte.net/>
- 13) Onnela, J. P. et al. Structure and tie strengths in mobile communication networks. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007, vol. 104, p. 7332-7336.
- 14) data for development. <http://www.d4d.orange.com/en/home>
- 15) Ahn, Y. Y.; Han, S.; Kwak, H.; Moon, S.; Jeong, H. Analysis of topological characteristics of huge online social networking services. Proceedings of International World Wide Web Conference, 2007.

3.4.2 機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析

(1) 研究開発領域名

機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

機械学習やデータマイニングの技術を用いたネットワーク構造、あるいは、より一般的に関係データの解析。ネットワーク上の関係予測や分類、順位づけなど。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

データ解析技術の一分野である機械学習、データマイニング分野では、近年、ネットワーク構造をもったデータの解析が盛んに行われている。複雑ネットワーク研究などの関連分野が「ある種のネットワークに共通して現れる性質を理解する」という科学的な動機を基礎としているのに対して、機械学習やデータマイニング分野におけるネットワークを対象とした研究は「与えられたネットワークデータにおける知識発見や予測を行う」という、より具体的で応用的な志向が強い。また、これらの技術と大規模な計算資源を用いて膨大なデータに対する計算を実際に行うためのアルゴリズムやシステム開発など、産業的な側面も強い。ただし、近年では様々なソーシャルネットワークサービス等の普及により、これを具体的な共通の興味の対象として、両者は急速に接近しつつある。

データマイニングとはデータベースに格納された膨大なデータの中から何らかの知見を発掘する (mining) ことを目的とする分野であり、1990年代の初頭に米 IBM アルマデン研究所の Rakesh Agrawal 氏らの研究グループによって創始された。現在では、データマイニングはデータ解析技術における一大分野を成しており、産業界における注目度も非常に高い。初期の研究では、関係データベース中に繰り返し表れる特徴的なパターンを発見するという限定された問題設定から始まった¹⁾が、近年ではその守備範囲はデータ解析技術全般にわたっている。ネットワーク構造をもったデータも例外ではなく、これを対象としたデータマイニング分野はしばしばリンクマイニング²⁾と呼ばれ、特に米国を中心として盛んに研究が行われている。リンクマイニングにおける基本タスクとしては、ネットワーク上でのノードの分類や順序づけ (ランキング) など、従来の非ネットワーク型のデータ空間を対象とした解析における基本タスクをネットワーク上に拡張したものが挙げられる。また、ネットワーク型データに固有のタスクとしてリンク構造の予測、特徴的な部分構造パターンの発見、ネットワーク構造の分類なども挙げられる。特にソーシャルネットワークを対象としたネットワーク上の情報伝播 (所謂「口コミ」) の解析も盛んである。

一方、ネットワーク構造は、より一般的にオブジェクト同士の関係を表現した関係データとしても理解することができる。人工知能から派生した機械学習分野では、関係データの解析は古くより一階述語論理を基礎とした知識獲得の枠組みである帰納論理プログラミング (関係学習) として、欧州を中心に研究が行われてきた。帰納論理プログラミングの枠組みは非常に汎用的であり、化合物内部の分子が形成するネットワーク構造の解析などにも用いられた。しかし、その強力さの代償として適用可能なデータ規模は

著しく限定される。そこで、近年ではより大規模でノイズをもった現実のネットワークデータへの適用を意識し、よりシンプルで統計的なモデル化に基づく方法の研究が盛んである。特に最近ではベイズ統計学を用いたモデル化が盛んに行われている。なお、統計的なモデル化は機械学習やデータマイニングで盛んになる以前からも、小規模な社会ネットワーク分析分野において、 p^* モデル、確率的ブロックモデルなどの名の下にすでに用いられてはいたが、機械学習やデータマイニングでは大規模で具体的なネットワークへの適用を意識して、モデルの複雑化や計算アルゴリズムの開発などが行われている。

関係データを対象とした解析の現実的課題への応用として最も成功しているもののひとつは、各々のユーザに合わせて適切な情報を提示する推薦システムである。推薦システムの研究自体は 1990 年代半ばから始まり、米 Amazon 社をはじめとするオンラインショッピングモールなどにおいて、顧客に対する適切な商品推薦に用いられてきた。推薦システムについて注目すべき近年の出来事は、米国最大のオンライン DVD レンタル企業である米 Netflix 社によって 2006 年から数年間にわたって開催された Netflix Prize³⁾である。これはユーザに対する映画の推薦精度を高めることを目指した予測モデリングのコンペティションであり、高額な優勝賞金が大きな話題をよび、多数の参加者を集め、結果としてこの分野を大きく進展させた。一方で、Facebook や Twitter といったソーシャルメディアが広く普及したことを背景に、これらにおける情報推薦、例えば新たな友人や話題の推薦といった機能を提供する目的にも、推薦システムの技術が用いられており、推薦システムは機械学習・データマイニング技術の「キラーアプリケーション」としての地位を確立している。

バイオ、創薬といった分野でもネットワーク構造は頻繁に現れ、機械学習やデータマイニングの技術が活用されている。例えばタンパク質の相互作用などの生体内ネットワークや、薬剤とその標的の間の相互作用ネットワーク、あるいはそれらが引き起こす副作用について、既知の関係から未知の関係を予測することができれば、実験のコストを大幅に削減することができる。一方、薬剤の候補となる化合物などもまた、原子間の共有結合などの作用を表したネットワーク構造を内部にもっており、これらを基に化合物の性質を予測することができれば、やはり薬剤設計の効率化につながる。

最近では、解析の対象となるネットワークが、静的で均一なものからより現実的かつ複雑な時間的に変化する異種混合的なネットワークへと広がりつつある。上記の推薦システムを例にあげれば、ユーザとコンテンツという 2 つのオブジェクトの間の関係の有無（もしくはその強さ）だけでなく、ユーザがコンテンツに対して取り得る行動の種類や、関係に付与されるタグといったより詳細な関係情報、あるいは関係の時間的な変化といった動的特性にまで踏み込んだ解析が行われている。ここではより複雑な確率的な関係生成モデルや、テンソル分解と呼ばれるモデルや推定アルゴリズムが開発されており、ここ数年盛んに研究がなされている。同様の動きは複雑ネットワーク研究の分野でも起こっており、時間変化を伴う「時変ネットワーク」や異種混合的な「多重ネットワーク」として精力的に研究がおこなわれている。

情報科学分野の多分に漏れず、ネットワーク構造データの解析についても欧米、特に米国が主導的に研究を進めており、日本を含むアジアはその後追いとなっている感が否めない。しかしながら、データマイニングの分野にグラフ構造データを持ち込んだグラ

フマイニングにおいて、日本は、研究初期の段階から重要な基礎研究を着実に積み上げてきている。また、情報科学全般の動向とも一致して、中国の存在感が急激に増している。

（４）科学技術的・政策的課題

近年、「ビッグデータ」の旗印のもと、多種多様な巨大データを活用することでさまざまなビジネス的あるいは社会的要請の高い実問題の解決を目指す機運が高まっている。ビッグデータの特徴としてしばしば挙げられるのが、量、スピード、多様性の3つである。このうちネットワーク構造データは、従来のデータ解析技術が対象としていた定型の表形式ではないという点で、多様性に深く関係している。そして、現在もさまざまな努力がなされてはいるものの、量とスピードへの挑戦は今後の技術的課題といえる。

また、これらの技術を真に社会に役立てていくためには、社会的意義のある課題設定と、なによりもデータが利用可能となることが必須である。近年オープンガバメントの流れが注目されているが、今後は公民連携のデータ共有が一層必要になっていくと思われる。一方で個人の行動履歴などの情報は、ともすると極めてデリケートな個人情報となり得る。データ解析によって得られる利便性とプライバシーの兼ね合いは、技術と政策の両面で考えていかなければならない重要課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

Carnegie Melon 大学の Christos Faloutsos 氏を中心とするグラフマイニングプロジェクト⁴⁾は数十億ノードをもつ大規模ネットワーク処理を目指したプロジェクトであり、このような解析技術の大規模化は Facebook などの大規模ソーシャルネットワークの隆盛なども相まって当該分野におけるひとつのトレンドといえる。Stanford 大学の Jure Leskovec 氏を中心とした SNAP (Stanford Network Analysis Project) プロジェクト⁵⁾もまた様々な種類のネットワークデータを解析するためのツールを提供するだけでなく、ネットワークデータのアーカイブとしての役割も果たしており、強い求心力をもっている。

また（３）でも述べたように、近年では解析の対象となるネットワークが静的で均一なものから、より複雑な時間的に変化する異種混合的なネットワークへと発展しつつあり、モデルや手法の高度化が著しい。

（６）キーワード

グラフマイニング、リンクマイニング、協調フィルタリング、マーケティング、ソーシャルメディア、ソーシャルネットワーク、バイオインフォマティクス、ケモインフォマティクス、創薬

（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	○	↗	・グラフ構造データを扱うデータマイニング技術については、その初期の段階から、大阪大学のチームをはじめとして日本が重要な貢献を行っている ⁶⁾ 。
	応用研究・開発	△	→	・基礎研究と産業化の結びつきが弱い。
	産業化	○	↗	・国内ソーシャルメディアにおける情報推薦、楽天、アマゾンなどのオンラインショッピングモールなどでの推薦システムなど、関係予測の産業利用が見られる。
米国	基礎研究	◎	↗	・当該分野を牽引する研究グループが多く存在する。Carnegie Mellon大学のChristos Faloutsos氏のグループやStanford大学のJure Leskovec氏らのグループが大規模なグラフ解析を積極的に進めている。Stanford大のDaphne Koller氏、Maryland大のLise Getoor氏のグループなどが、統計的な関係データ解析研究を積極的に推進している。
	応用研究・開発	◎	↗	・Netflixのチャレンジが特に推薦方式の進展を加速した。また、Twitter、Facebook、LinkedInなどの主要なソーシャルメディアの多くは米国発であることもあり、これらの研究者・エンジニアによる研究開発も盛んである。
	産業化	◎	↗	・Twitter、Facebook、LinkedInなどのソーシャルメディアにおける情報推薦、Amazon.comなどのオンラインショッピングモールなどにおける商品の推薦など、世界的に利用されているサービスにおける技術利用が盛んである。
欧州	基礎研究	○	↗	・米国に準ずる形で発展している。欧州は伝統的に論理に基づく関係データ解析に強く、帰納論理プログラミングを発展させてきた。Imperial College LondonのStephen H. Muggleton氏のグループなど多くの有力な研究グループが存在する。
	応用研究・開発	○	↗	・Mines ParisTechのJ.-P. Vert氏のグループをはじめとして、生体ネットワークや薬剤-標的間ネットワークなどをターゲットとしたネットワーク解析が盛んである。
	産業化	△	↗	・欧州独自の目立った動きはない。
中国	基礎研究	○	↗	・Microsoft Research Asiaや有力大学からコンスタントに論文が発表されている。
	応用研究・開発	△	↗	・特に目立った動きはない。
	産業化	○	↗	・海外ソーシャルメディアへのアクセスが制限されるなか、中国国内のソーシャルメディア、オンラインショッピングなどが独自に進化しており、推薦などの技術が用いられていると推測される。
韓国	基礎研究	△	→	・特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	→	・特に目立った動きはない。
	産業化	△	→	・特に目立った動きはない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Agrawal, R.; Imielinski, T.; and Swami, A.N. Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. Proc. SIGMOD Conference. 1993, p. 207-216.
- 2) Getoor, L.; Diehl, C. P. Link Mining: A Survey. SIGKDD Explorations. 2005, vol. 7, no. 2, p. 3-12.
- 3) Netflix Prize. <http://www.netflixprize.com/>
- 4) Pagasas project. <http://www.cs.cmu.edu/~pegasus/>
- 5) Stanford Network Analysis Project. <http://snap.stanford.edu/index.html>
- 6) Inokuchi, A.; Washio, T.; Motoda, H. An apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data. Proc. Principles of Data Mining and Knowledge Discovery (PKDD). 2000, p. 13-23.

3.4.3 ネットワークに関する離散数学

(1) 研究開発領域名

ネットワークに関する離散数学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

グラフ理論は、その誕生以来、電気回路、分子構造などの具体的なグラフ構造に関する研究に動機づけられて発展してきた。その内容は伝統的に、直感的に理解しやすい問題設定を軸に展開され、多くの予備知識を必要としないといわれてきた。しかし、1980年代以降、グラフマイナー理論に代表される構造的グラフ理論の興隆によって、その数学的内容が充実するとともに、理論計算機科学にも大きな影響を与えている。同時に、計算機性能の向上に伴い、グラフ理論とその周辺が重要な役割を果たす応用分野も急速に拡大している。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本開発領域は、グラフ理論の成果によって支えられている。現代のグラフ理論を牽引しているのは、グラフマイナー理論に代表される構造的グラフ理論である。実際、国際数理計画法学会 (MPS) とアメリカ数学会 (AMS) が共同で 3 年ごとに離散数学分野の優れた論文を表彰している Fulkerson 賞を見ると、過去 20 年間に受賞した 15 件のうち、グラフ理論に関するものは 6 件あり、そのうちで 5 件までが構造的グラフ理論の論文である。

アメリカ合衆国の Robertson、Seymour は、1983 年から 2012 年にかけて、全部で 23 編からなる連作論文を発表してグラフマイナー理論を確立した。グラフのマイナーとは、元のグラフから辺の開放除去 (両端点をそのままにして辺を消去する操作) や縮約除去 (両端点が一致するまで辺を縮める操作) と孤立点の除去を繰り返し適用して得られるグラフのことである。グラフが平面に埋め込み可能であることを意味する平面性のように、マイナーを取るという操作に関して閉じている性質は多い。そのような性質を満たさないグラフがひとつ見つかり、それをマイナーとして含むグラフもその性質を満たさない。このようなグラフのうちで極小なものを禁止マイナーと呼ぶ。グラフの平面性の禁止マイナーは、完全グラフ K_5 と完全 2 部グラフ $K_{3,3}$ のみであることが知られている。このようにマイナーに関して閉じた性質に関しては常に有限個の禁止マイナーが存在するというのが Wagner 予想である。Robertson、Seymour の一連の論文における最終目標は、この Wagner 予想の証明であった。これによって、与えられたグラフにおいて、マイナーに関して閉じた性質の有無を調べることが、禁止マイナーの存在を調べることに帰着された。

グラフマイナー理論は、Wagner 予想を証明しただけでなく、さまざまな副産物をもたらしている。理論計算機科学の観点で特に重要なのは、木幅の概念の導入である。木幅とは、グラフがどの程度木に近い構造を有しているかを表すパラメータである。木幅 1 のグラフは木であり、木幅が 2 以下のグラフは直並列グラフになる。一般のグラフ上で NP 困難な問題に対しても木幅が限定されたグラフのクラスに対しては、多項式時間アルゴリズムが設計できることが多い。この例が示すように、パラメータを固定したグ

ラフに対して計算量を議論する研究分野が生まれ、今日に至っている。

グラフマイナー理論の応用として、大規模集積回路の設計にも関連の深い、指定された端子対間を結ぶ点素道の有無を判定する問題に対して、端子対数を固定した場合の多項式時間アルゴリズムが設計されている。ただし、得られたアルゴリズムは多項式時間であるものの、実際の計算時間は端子対数が少し大きくなると爆発的に大きくなる。この難点を克服して、現実的なアルゴリズムを実現することを目指したアルゴリズム的グラフマイナー理論が河原林らによって始められ、成果が次々とあがっている。

グラフマイナー理論の鍵は、禁止マイナーを含まない任意のグラフが、小さな部品を特定の方法でつなぎ合わせることで構成できることである。同様のパラダイムが、マイナーとは異なる操作に関して閉じている性質に注目した場合にも適用可能であることが期待される。こうしてグラフマイナー理論と同様の方法論による研究が進められ、構造的グラフ理論と総称されている。その中でも最も有名な成功例は、グラフの彩色に関する強パーフェクトグラフ予想の Chudnovsky、Robertson、Seymour、Thomas による証明であろう。ここでは、マイナーを取る操作の代わりに、誘導部分グラフを取る操作が単位操作となる。

グラフマイナー理論に代表される構造的グラフ理論の研究は、アメリカ合衆国を中心に展開されている。そこから派生した木幅などのパラメータ固定計算量の研究は、ヨーロッパで盛んに行われている。日本では、河原林らの活躍によって、アルゴリズム的グラフマイナー理論が推進されているという状況にある。

一方、構造的グラフ理論以外でも、以下にあげる重要な展開がなされている。

既存のグラフにできるだけ少ない辺を加えることによって所望の連結度を達成することを目的とするグラフの連結度増大問題は、通信網の設計との関連も深く、注目を集めてきた。特に 1980 年代後半の渡辺、中村による結果を契機に、多くの研究者が参入した。中でも、Frank を中心としたハンガリーの研究者集団の活躍は特筆に値する。わが国では、グラフの合法的順序づけの手法を編み出した永持、茨木が、辺連結度増大問題に対する最も効率的な決定性アルゴリズムを設計した。近年では、ハンガリー出身の Végő が、長年の課題であった点連結度増大問題に関して、画期的な成果をあげている。

ネットワーク中に容量制約を満たしつつ多種類のフロー（水、物流、交通流などに対応）を効率的に流すことを目的とした多品種流問題は、単品種の場合と異なり、整数性を課すと NP 困難になる。現実では、流したい対象は自由に分割できないことも多いため、フローの量などが整数であるという制限を課すことは、応用目的のためにも重要である。整数性を課さない問題は線形計画法で簡単に解けるため、どのような条件下で線形計画緩和の最適解の整数性が保証できるかが重要となる。実際には、整数性が保証される場合は非常に限られているが、ある種の条件下では、分母が 2 の分数最適解をもつことが保証される。さらに進んで、どのような需要設定ならば、ネットワークの構造や容量によらずに、任意の整数容量の問題に対して、最適解の分数性が保証されるかという課題が Karzanov によって 1990 年に提起された。この問題も長い間未解決であったが、最近の平井による一連の研究の結果、完全に解決された。

ネットワークは、通信や輸送の媒体であるだけでなく、建造物の骨組みとしても現れる。骨組みの組合せ的な構造から、その剛性を判定することを目的とした組合せ剛性理

論もグラフ理論と同様に古くから研究が行われてきた。特に、2次元骨組みの一般剛性を特徴づけた Laman の定理以来、多くの研究者が参入している。近年では、組合せ剛性理論の応用分野が、建築構造物だけでなく、ネットワークセンシングや分子構造解析へも広がってきている。ネットワークセンシングに関連しては、点対間の距離情報に基づいて各点の位置を決定する問題において、解が一意に決定できる条件として、大域剛性の概念が登場した。大域剛性に関する最も基本的な問題であった Hendrickson 予想は、最近、Connely と Jackson、Jordán が解決した。分子の剛性を判定する際には、グラフの「2乗」として得られるグラフを扱うことが理論的な筋道として自然である。このクラスのグラフの3次元における一般剛性が効率的なアルゴリズムで判定できる全域木の詰め込みによって特徴づけられる、という予想が1980年代に Tay と Whiteley によって提示されていた（分子剛性予想）。この予想は、最近、加藤と谷川によって肯定的に解決された。今日では、組合せ剛性理論の研究者の多くが、有用な物質の設計への応用を念頭において、結晶構造のように周期性のある構造の剛性の特徴づけに取り組んでいる。

以上のように、ネットワークに関する離散数学は、急速な進展を見せており、長年の未解決問題が次々と解決されてきた様子には眼を見張るものがある。その中で、わが国の若手研究者も本質的な貢献を果たしている。

(4) 科学技術的・政策的課題

近年の離散数学の進展は、理論の深化がもたらしたものであり、対象の直感的な把握のしやすさと予備知識を必要としない点が離散数学の特徴といわれていた時代からは隔世の観がある。それゆえに、当該研究開発領域の進展は研究者個人の資質と努力に大きく依存している。同時に、その成果は、分野横断的にさまざまな応用技術の基礎となっている。日本が本領域の優位性を獲得するためには、優れた研究者が研究に没頭できる環境を維持することが必要不可欠であろう。

一方で、実用にかかわる問題が新たな研究対象を生み出して、分野の発展を刺激してきたことも事実である。したがって、本分野の研究者が異分野と協働することを奨励する施策には、長期的に見ても意義があると思われる。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

従来のグラフ理論・グラフアルゴリズムの研究では、対象となるグラフの基本的な構造が把握できること、言い換えると、グラフが計算機に格納できることが暗黙の前提とされていた。しかし、ネットワーク科学の進展に伴って、爆発的な大きさのネットワーク、あるいは進化し続けるネットワークも興味の対象となってきている。このようなネットワークを扱うには、計算モデルの設定から再検討する必要がある、計算機科学における新たな研究テーマともなっている。2010年に京都賞を受賞した Lovász は、このように巨大なネットワークを調べるアプローチとして、グラフの無限極限に当たるグラフオンの概念を導入し、研究を進めている。今後の展開が注目される。

（6）キーワード

グラフ、ネットワーク、グラフマイナー理論、木幅、固定パラメータ計算量、アルゴリズム的グラフマイナー理論、構造的グラフ理論、パーフェクトグラフ、連結度増大問題、多品種流問題、組合せ剛性理論、分子剛性予想、グラフオン

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・アルゴリズム的グラフマイナー理論、多品種流問題、組合せ剛性理論において、画期的な結果が、若手研究者によって発表されている。 ・世界水準の競争に参加している研究者層の厚さという点では、改善の余地がある。
	応用研究・開発	○	↗	・ERATO河原林巨大グラフプロジェクトが発足し、多くの若手研究者が応用研究に積極的に参画して成果をあげている ¹⁾ 。
	産業化	○	→	・2部グラフのDM分解を用いて半導体メモリの不具合を救済する方式が開発され、実用化された（東芝） ²⁾ 。
米国	基礎研究	◎	↗	・構造的グラフ理論の研究で、他を圧倒している。 ・ネットワークゲーム理論、評判の伝搬モデルなど、新たな問題設定で野心的な研究テーマが追究されている。
	応用研究・開発	◎	→	・IBM、Microsoft、Yahoo!、Googleといった企業が、離散数学・計算機科学の分野の学位取得者の主要な就職先になっている。その中には、世界的に広く知られた研究者も少なくない。 ・分子剛性予想が証明される以前から、その正当性を前提に、分子運動の自由度を解析するソフトウェアが開発されている ³⁾ 。
	産業化	○	→	・木幅の変種を用いたルーティング方式の開発された（Bell 研究所） ⁴⁾ 。
欧州	基礎研究	◎	→	・ドイツ、フランス、オランダにおいては、グラフアルゴリズム、特にパラメータ固定計算量の研究が充実している。 ・グラフ連結度に関する研究では、ハンガリーの研究者の活躍が顕著。
	応用研究・開発	○	↗	・ドイツでは、数学の工学的応用を推進するプロジェクトMATHEONが推進され、産業界の諸問題に数学者が取り組む体制が整ってきた ⁵⁾ 。
	産業化	○	→	・グラフアルゴリズムのパッケージソフトLEDAが販売されている ⁶⁾ 。
中国	基礎研究	△	→	・論文数は多いのかもしれないが、質の高いものは少ない。
	応用研究・開発	△	→	・応用研究・開発の動きは不明。
	産業化	△	→	・産業化の動きは不明。
韓国	基礎研究	○	↗	・KAISTでは、Sang-il Oumが中心になって、外国人若手研究者を多数含んだ活動的なグループを形成している ⁷⁾ 。
	応用研究・開発	△	→	・応用研究・開発の動きは不明。
	産業化	△	→	・産業化の動きは不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) <http://www.jst.go.jp/erato/kawarabayashi/>
- 2) <http://www.j-tokkyo.com/1999/G11C/JP11238396.shtml>
- 3) FIRST. <http://flexweb.asu.edu/software/first/>
- 4) Communications Network Ring Router, US patent number 5533016.
- 5) MATHEON. <http://www.matheon.de/>
- 6) LEDA. <http://www.algorithmic-solutions.com/>

3.4.4 ネットワークを扱うソフトウェア

(1) 研究開発領域名

ネットワークを扱うソフトウェア

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

社会・生物・人工物システムに見られる依存関係や共起関係、相関などの接続関係を記述したデータ集合からネットワーク構造を構成し、ネットワークの表現・操作・分析における適切な形式でデータを管理し、ネットワーク構造を特徴付ける諸統計量を計算し、ネットワークを低次元空間に埋め込み視覚化するための計算機ソフトウェア。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本稿が想定するネットワークを扱うソフトウェアとは主に以下の2つの機能のいずれか、あるいは両方を併せ持つものである。一つには①ネットワークという構造を持つ位相的性質を統計的・数値的に評価するための計算機能。もう一つには②本質的に高次元の空間でのみ距離的な矛盾なくレイアウト可能なネットワーク構造を、次元圧縮や最適化の技法を用いて矛盾を最小化しつつ低次元空間（主に2次元）に埋め込むための視覚化機能である。ソフトウェアが主たる対象とする学術領域、実装された分析・視覚化アルゴリズムの種類、スケーラビリティのような計算パフォーマンス、商用／非商用、ライセンス形態、開発言語、動作するプラットフォーム、他の統計分析ソフトウェアとの連携、ユーザインターフェイス、インタラクティブ性など、多様なニーズに応じて数多くの開発プロジェクトが歴史的に存在し、全体を俯瞰するのは容易ではない。またソフトウェアと一言で言っても、利用者にとってプログラミングの経験を必要としないパッケージ化されたソフトウェアから特定のプログラミング言語向けのライブラリまで、その使い方や利用者に要求されるスキルレベルは様々である。

①の構造分析機能についてみると、技術的に高度なものとしては主に以下の3つを挙げることができる：1) ネットワークの持つ行列的性質を求める固有値解析機能、2) 最短経路や媒介性といったネットワーク上の経路または距離に関する特徴量を求める経路探索機能、3) 相対的に密に接続されたノード集合—“クラスター構造”や“コミュニティ構造”と呼ばれる—を発見するクラスタリング機能。その他にも次数（ノードにつながるエッジ数）やモチーフ（あらかじめ定義された単位構造）の分布、さらには隣接関係に対するネットワーク特徴量間の相関といった指標もネットワークに固有の計算問題として重要である。固有値解析機能を例にとれば、ネットワーク構造の数学的表現は行列を用いて自然に与えられるため、その行列の持つ数学的／統計的性質を求めることはネットワークの機能を推定する上で重要な意味を持つ。例えば1998年にGoogle社が発表した“ページランク”¹⁾と呼ばれるウェブサイトの評価手法は、ウェブが持つネットワーク構造を遷移確率行列で表現したときの固有ベクトルを求める問題に帰着される。行列表現に対する数値計算手法は工学的にも長い歴史を持っており、商用／非商用を問わず様々な数値計算ライブラリが存在する。経路探索やクラスタリングについても同様、いずれも応用分野は制御や最適化といった工学の多岐にわたり、数多くの計算アルゴリズムとその実装例が存在する。したがってそれらは統合型の数値計算パッケージ

ソフトウェアが提供する定番機能ともなっている。つまり、比較的新しい学問領域であるネットワーク科学においても、その根幹の部分では従来の多くのソフトウェア資産が利用可能である。また近年では R²⁾や Python³⁾といった主に学術・教育分野で急速に普及が進んでいるプログラミング言語・環境上で動作するネットワーク分析パッケージの開発も盛んである。ユーザが増えることで様々なニーズに応じたチュートリアルが整備されるとともに最新の研究成果もいち早く取り込まれ、その結果益々ユーザが増える、という一極集中的な循環が予想される。

②の視覚化機能についてみると、古くには階層構造を表すツリーの描画のような単純なものから始まり、電子回路図や人間関係といったより複雑な構造に対する工学的・社会科学的応用の面から 1990 年前後にネットワークの自動描画の研究が本格的に行われ始めた。初期の代表的な研究はエッジをバネに見立てた力学エネルギー極小化に基づくノードのレイアウト手法であり、1989 年の鎌田・川合らの研究は現在でも標準的に用いられる手法の一つである⁴⁾。国際的な研究集会として、例えばネットワーク可視化の国際会議 Graph Drawing⁵⁾は 1992 年、ネットワークを含む情報可視化一般の国際会議 InfoVis⁶⁾は 1995 年が第 1 回の開催年である。時期を同じくして Pajek⁷⁾や Graphviz⁸⁾といったネットワーク可視化ソフトウェアがそれらの研究成果を取り込んでユーザを集めた。初期の可視化ソフトウェアの多くはノード間の隣接関係を記述したデータファイルを読み込み、あらかじめ指定したアルゴリズムを用いてレイアウトを行った結果を画像ファイルとして出力するものであった。したがって、クラスタリングや経路探索の結果をレイアウトや視覚属性に反映させたい場合には、予め分析ソフトウェアを用いてネットワークの構築や属性付けを行い、それを一般的なネットワーク記述形式でファイルにエクスポートし、ネットワーク可視化ソフトで画像を生成するという手順になる。そのためソフトウェア間の入出力データの形式互換性も重要となる。多くのソフトウェアがサポートする形式としては例えば GML(Graph Modeling Language)⁹⁾、GraphML¹⁰⁾、dot¹¹⁾などがある。あるいは単純なカンマ/タブ区切りテキスト(csv、tsv)を用いるケースも一般的である。近年ではファイル入出力を基本とする従来の手順から、一つのソフトウェアの中で様々な分析結果をインタラクティブにレイアウトや視覚表現に反映する機能を備えたものも増えてきている。扱うネットワークが大規模になればレイアウト計算の負荷は高くなるため、可視化とその前処理としての構造分析の融合は自然な流れである。また「探索的ネットワーク分析」と呼ばれるような、ネットワークを様々な視点から眺めながら分析の糸口を掴んでいく研究アプローチでは、上述した分析と視覚化の統合的活用は必須である。

このような構造分析と可視化の機能を総合的に備えたソフトウェアの開発が加速するのはネットワーク科学が大きく注目を集めた 2000 年代初頭からである。開発主体はソフトウェア開発能力を持った研究者個人によるものから、ネットワーク科学を牽引する研究者グループによるもの、あるいはそのスピンオフ企業のような高い専門性を持った企業である。個人開発から始まりオープンソースプロジェクトに移行していくものも多くみられる。主に学術利用において現在使われているソフトウェアのリストを表 1 に示す。ここで挙げた例は汎用性や開発の規模、ユーザ数、将来性(実装の一般性、オープン性、開発主体)の面で主観的に特に重要と認めたものである。国際的に見た場合、量

的にも歴史的にも米国が圧倒的に先行している。欧州ではドイツが先行していると考えられ、他の国でも特徴的な活動は認められる。日本では大学の研究室等の小規模なレベルでの開発例は過去にいくつか見つけられるが、国際的にユーザを集めることはなく活動も継続的ではない。同様に中国、韓国でも目立った活動は見られない。

表1：ネットワークを扱うソフトウェアの例

プロジェクト名	開発主体	用途	開発開始年
Pajek	スロベニア：Vladimir Batagelj	可視化	1996
Graphviz	米：AT&T 研究所	可視化	2000
Siena/RSiena (with R) ¹²⁾	英：オクスフォード大学	分析・可視化	2000
BGL (Boost Graph Library) (with C++) ¹³⁾	米：インディアナ大学	分析	2000
GTL (Graph Template Library) (with C++) ¹⁴⁾	独：パッサウ大学	分析	2001
visone ¹⁵⁾	独：コンスタンツ大学	分析・可視化	2002
UCINET for Windows (商用) ¹⁶⁾	米：Analytic Technologies 社	分析・可視化	2002
Cytoscape ¹⁷⁾	米：Institute for Systems Biology	分析・可視化	2002
NetDraw ¹⁸⁾	米：Analytic Technologies 社	可視化	2002
statnet (with R) ¹⁹⁾	米：ワシントン大学	分析・可視化	2003
Tulip ²⁰⁾	仏：ボルドー大学	分析・可視化	2003
LGL: Large Graph Layout (with Java) ²¹⁾	米：テキサス大学オースティン校	可視化	2003
JUNG (with Java) ²²⁾	米：カリフォルニア大学アーバイン校	分析・可視化	2003
SNAP (with C++/Python) ²³⁾	米：スタンフォード大学	分析	2004
igraph (with R) ²⁴⁾	洪：科学アカデミー	分析・可視化	2005
CFinder ²⁵⁾	洪：エトヴェシュ・ロラード大学	分析・可視化	2005
Network Workbench (with Java) ²⁶⁾	米：インディアナ大学	分析・可視化	2006
GraphStream (with Java) ²⁷⁾	仏：ル・アーヴル大学	分析・可視化	2007
NetworkX (with Python) ²⁸⁾	米：LANL 研究所	分析・可視化	2008
NodeXL (Excel プラグイン) ²⁹⁾	米：Microsoft Research	分析・可視化	2008
Gephi ³⁰⁾	仏：Gephi コンソーシアム	分析・可視化	2008
Cuttlefish ³¹⁾	瑞：チューリヒ工科大学	分析・可視化	2009
graph-tool (with Python) ³²⁾	独：ダルムシュタット工科大学	分析・可視化	2009

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・近技術的には大規模データに対する適用性が伝統的かつ現代的な課題である。組み合わせ爆発に由来する計算量的困難を克服するためのアルゴリズムや、また扱うデータ量の増加に対応する分散処理フレームワーク³³⁾といった新しい研究成果を積極的に取り込む開発体制が重要である。
- ・一方で、例えばソーシャルネットワーク研究の実際においては扱うデータ量は必ずしも大規模でない場合も多い。探索的なデータ分析においてはむしろユーザインターフェイスの作りこみとソフトウェアとしての完成度が重要になる。具体的な研究課題を抱えたアカデミック内部ではこういったソフトウェア開発は難しく、開発力のある集団(企業やコミュニティ)をどのように味方につけていくかが重要である。
- ・アクティブな開発体制を維持するためには、高いコミットメントを持ったコアメンバーはもちろん、オープンソース開発に見られるような一定規模のコミュニティを形成することが重要である。また、広く開発への貢献やユーザを集めるにはソフトウェア開発の国際化(英文ドキュメントの充実など)が重要である。
- ・ソフトウェア開発は科学的な知見を得るための活動とは必ずしもベクトルを同じくせず、アカデミズムの中では過去には積極的には評価されにくい風潮があった。現在ではいくつかの国内論文誌にシステム開発論文というカテゴリが設けられ、また未踏IT人材発掘・育成事業(年齢制限あり)³⁴⁾のような資金提供も存在し、一定の評価がなされるようになってきている。天才発掘的な個人サポートに止まらず、科学研究を支援するソフトウェア開発を中・長期的プロジェクトとして奨励する資金的枠組みも重要である。
- ・一般にソフトウェア開発は科学・技術的な探究活動とは異なるスキルとメンタリティを必要とするものであり、先進的なソフトウェアの発展に必要なのは最新の研究動向と技術動向に一定の関心と理解を持つスキルを持った研究者である。学部から大学院につながる一貫性を持ったスキル教育が重要である。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・最近のトレンドとして、一般的なブラウザ上で動作する JavaScript ベースのネットワーク可視化フレームワークの開発が進んでいる³⁵⁾。プラットフォームに依存せず、他者へのプレゼンテーションやブラウザの機能を用いた外部データの利用が容易であるため、そういったブラウザベースの可視化手法はウェブデザインやマーケティング、ジャーナリズムに浸透しつつある。
- ・2012年度の報告では「クラスタリングのような計算負荷の高い分析機能を提供する外部のクラウド型計算サービスと融合した、ウェブベースの高度なネットワーク可視化サービスが登場する可能性は高いと考えられる」と予測したが、現時点ではまだそのような動向は見られない。
- ・Gephi³⁰⁾(高い審美表現を目指すインタラクティブ性の高い汎用のネットワーク可視化ソフトウェア)、Cytoscape¹⁷⁾(システム生物学のための専門的ソフトウェアとして開発がスタートしたものの、その後開発コミュニティを充実させながら汎用の可視化ソフトウェアとして多くのユーザを集める)、NetworkX²⁸⁾(教育用プログラミン

グ言語として欧米の大学で積極的に導入されている Python のライブラリとして開発が進む）、igraph²⁴⁾（分野を問わず多くの研究者や学生が利用する非商用の統計分析ソフトウェア“R”のパッケージとして提供される）等はオープンソースプロジェクトとしてコミュニティを形成し積極的に開発が進められており、近年目にする機会の多いソフトウェアの例である。Network Workbench²⁶⁾は完成度が高いソフトウェアの一つだが 2011 年で更新が止まっている。ネットワーク分析のツール群をライブラリとして提供する SNAP²³⁾はベンチマーク用のデータセットも同時に多数提供しており、研究論文での引用も多くみられる。

- ・ ネットワーク構造をデータベース内に自然な形で保持することができる“グラフデータベース”³⁶⁾の開発も進んでいる。収集・蓄積されたデータに分析・可視化という付加価値を与えるビジネス分野は近年活発であり、データベースや分散コンピューティングとその出口としての分析・可視化のスムーズな連携は更に進んでいくだろう。

（6）キーワード

ソフトウェア、フレームワーク、統計分析、固有値分析、経路探索、クラスタリング、可視化、レイアウト、ユーザインターフェイス、プラットフォーム、開発言語、オープンソースプロジェクト、ライセンス、データベース

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・ソフトウェア開発において基礎研究とプロトタイピングの差は現状小さくなっていると考えられるため、「応用研究・開発」にまとめるものとする。
	応用研究・開発	△	→	・国外で開発された定評のあるソフトウェアの日本語化といったプロジェクトは存在するものの、ソフトウェア開発に関する組織的で継続性を持った独自の活動は見られない。
	産業化	△	→	・科学・技術系ソフトウェアベンダーが商用の統計分析パッケージの一機能として一般的なネットワーク分析機能を提供するケースや、国外で開発された定評のある統計分析パッケージの輸入代理業のみ。 ・Big Dataへの取り組みの一環としてネットワーク分析をソリューションとして提供する企業は一定数存在するが、パッケージソフトウェアとして提供している例は見られない。
米国	基礎研究	◎	↗	・同下。
	応用研究・開発	◎	↗	・歴史的にも著名な開発プロジェクトが米国の大学や研究機関を中心に多く存在し、研究者にとっての標準ソフトウェアとしてよく利用されている。現在アクティブに開発が進行しているプロジェクトも多い。
	産業化	◎	→	・ネットワーク分析に特化した商用ソフトウェアを提供しているベンダーが多く存在する。
欧州	基礎研究	◎	↗	・同下。
	応用研究・開発	◎	↗	・個別ではドイツ発祥の開発プロジェクトが多いものの、国際的な人材交流も活発であり、ハンガリー、イギリス、フランス、イタリア、スペイン、北欧など、大学機関を中心に特徴ある開発プロジェクトが存在する。
	産業化	○	→	・ネットワーク分析に特化した商用ソフトウェアを提供しているベンダーが存在する。

中国	基礎研究	×		・ソフトウェア開発に関する特筆すべき成果なし。
	応用研究・開発	×		・ソフトウェア開発に関する特筆すべき成果なし。
	産業化	×		・ソフトウェア開発に関する特筆すべき成果なし。
韓国	基礎研究	△	→	・日本と状況に差はないと考えられる。
	応用研究・開発	△	→	・日本と状況に差はないと考えられる。
	産業化	△	→	・日本と状況に差はないと考えられる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Page, L., Method for node ranking in a linked database. U. S. Patent 6,285,999 B1. 1998.
- 2) The R Project for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>
- 3) Python. <https://www.python.org/>
- 4) 例えば Fruchterman, T. M. J. et al. Graph Drawing by Force-Directed Placement. Software—Practice and Experience. 1991, vol. 21 no. 11, p. 1129-1164.; Kamada, T. et al. An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs. Information Processing Letters. 1989, vol. 31 p. 7-15.
- 5) Graph Drawing. <http://graphdrawing.org/symposia.html>
- 6) IEEE Information Visualization (InfoVis). <http://conferences.computer.org/infovis/>
- 7) Pajek. <http://pajek.imfm.si/doku.php>
- 8) Graphviz. <http://www.graphviz.org/>
- 9) GML (Graph Modeling Language). <http://www.fim.uni-passau.de/index.php?id=17297&L=1>
- 10) GraphML. <http://graphml.graphdrawing.org/>
- 11) The DOT Language. <http://www.graphviz.org/content/dot-language>
- 12) Siena/RSiena. <http://www.stats.ox.ac.uk/~sniijders/siena/>
- 13) BGL (Boost Graph Library). <http://www.boost.org/libs/graph/doc>
- 14) GTL (Graph Template Library). <http://www.fim.uni-passau.de/index.php?id=17297&L=1>
- 15) Visone. <http://visone.info/>
- 16) UCINET. <http://www.analytictech.com/ucinet/>
- 17) Cytoscape. <http://www.cytoscape.org/>
- 18) NetDraw. <https://sites.google.com/site/netdrawsoftware/>

- 19) Statnet. <http://statnet.org/>
- 20) Tulip. <http://tulip.labri.fr/TulipDrupal/>
- 21) LGL (Large Graph Layout). <http://lgl.sourceforge.net/>
- 22) JUNG. <http://jung.sourceforge.net/>
- 23) SNAP (Stanford Network Analysis Project). <http://snap.stanford.edu/>
- 24) Igraph. <http://igraph.sourceforge.net/>
- 25) CFinder. <http://cfinder.org/wiki/>
- 26) Network Workbench. <http://nwb.cns.iu.edu/>
- 27) GraphStream. <http://graphstream-project.org/>
- 28) NetworkX. <http://networkx.lanl.gov/>
- 29) NodeXL. <http://nodexl.codeplex.com/>
- 30) Gephi. <https://gephi.org/>
- 31) CuttleFish. <http://cuttlefish.sourceforge.net/>
- 32) graph-tool. <http://graph-tool.skewed.de/>
- 33) 例えば Ghemawat, G.; Gobioff, H.; Leung, S.-T. The Google File System, 2004.; Dean, J.; Ghemawat, S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters, 2004.
- 34) (独) 情報処理推進機構 未踏 IT 人材発掘・育成事業。
<http://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/>
- 35) 例えば d3 (Data Driven Document). <http://d3js.org/>; sigma.js. <http://sigmajavascript.org/>
- 36) 例えば neo4j. <http://www.neo4j.org/>

3.5 複雑システム区分

3.5.1 複雑系生命科学

(1) 研究開発領域名

複雑系生命科学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

階層的構造を持つ生命システムの普遍的性質を理解するための新しい学問分野として複雑系生命科学は導入された。特に、全体は部分が集まってできているけれども、各部分は全体の性質で規定されるという複雑系固有の循環を重視し、分子、細胞、個体、生態系といった階層的システムがいかに動的に安定した状態を形成するかに注目して研究が進められている。大自由度の力学系、確率過程、統計力学とイメージングやトランスクリプトーム解析などの定量的生物学と「つくって理解する」構成生物学の実験と密に連携し、複製、適応、記憶、分化、発生、進化における普遍的な原理、法則を明らかにしつつある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 経緯

分子生物学は、生命の各要素過程の詳細を次々と明らかにし、さらにはゲノム、プロテオームなどの膨大なデータベースを作成し、その結果各要素を組合せた「計算機的な」生命観を形成するに至った。しかし、実際の生物はコントロールされた条件の下でも機械的振る舞いからのずれがあらわれ、大きく揺らぎ時間的に変動することが明らかにされてきた。そもそも個々の細胞反応は、分子の衝突によるものであるから確率的であり、しかも分子数が必ずしも多くはないので、ゆらぎは避けられず、一方で、さまざまな反応がフィードバック過程を含んでいるので、複雑なダイナミクスも生じうる。さらに、分子（遺伝子）の役割は多様であって、一遺伝子が一つの表現型をうむというような一対一の因果関係が必ずしも成り立たず、また、遺伝子の働きは生体が置かれた状況にも依存する。このように、それぞれで揺らぎの多い素過程がたくさん絡みあっているにもかかわらずその総体として生命はうまく機能している。しかし、この漠然とした印象のままでは自然科学にはなりえない。一見曖昧な問題こそ厳密に扱い、動的システムとしての生命のしくみを定量的なレベルで明らかにしなければならない。このような観点でのアプローチが 90 年代後半から、物理生物学、システム生物学、定量生物学などの掛け声で始まってきた。

日本では 90 年代初頭の複雑系研究を踏まえて、日本発の学問分野として「複雑系生命科学」が提唱された。この原点は、1993 年に行われた、国際会議「Complex Systems: Constructive Complexity and Artificial Reality」（沼津）に遡る。そこでは構成的アプローチと大自由度力学系での集団運動、カオスの遍歴、階層をまたがるダイナミクス、多対多の動的関係性などが重視された。それらをふまえて、理論だけでなく細胞生物学の実験も巻き込んで、90 年代後半から複雑系生命科学の研究が推進されてきた¹⁻³⁾。その特徴としては以下の 2 つのポイントがある。

(3-2) 特徴

- ・個々の要素と全体とのダイナミックな相互関係を重視して生命システムの理解を目指す：

一般に生命系は分子（遺伝子）、細胞、多細胞個体、生態系という階層をなすが、階層の各レベルの状態は、互いに影響しつつ、揺らぎ、動的に変化する。その結果、階層の上位が下位の状態に影響を与える。つまり、階層間の関係は双方向でかつダイナミックである。そこで、部分からなる全体の性質が部分を規定する、という複雑系に特徴的な性質⁴⁾が如実に現れる。例えば、組織（つまり細胞集団）は細胞の集団でつくられるけれども各細胞の性質はそれがおかれている組織の性質によって変化させられる。このように各要素とその集合（全体）のダイナミックな循環関係に着目する。ここで、生命の階層をなす各要素は一般に時間的に変化する。例えば細胞であれば分裂して増殖する。そこで階層の各レベルでダイナミックな変化が起こりうる。ただし、生命システムが安定しているのであれば、そのときは上位と下位の関係に整合性がとれて維持されているはずである。このようにダイナミックな要素間の「柔らかな」関係から、いかに部分と全体の関係が安定し整合した状態が生まれるか、そこから生命システムの普遍特性が現われるかを明らかにするのが複雑系生命科学の基本姿勢となる。こうした視点から、生命システムが安定して存在するための条件を求め、それをふまえて、複製、適応、分化、進化の基本的な性質を導くのである。このためには、力学系、多くの要素集団の性質を扱うための統計力学といった、数理、物理で発展した考え方が重要になる。

- ・構成的生物学：

生命現象の普遍的な性質を明らかにするために、今ある生物にとらわれずに、こちら側から基本性質を設定して生命システム固有の性質を構成するという立場がとられる。これは、進化の結果の現存の生物そのままを調べるのではなく、我々の側から条件を設定して、生命の基本的複製過程や発生過程がいかにあらわれるかを調べる立場である。従来の研究のように取り除くとシステムが働かなくなる分子を探る、つまり、生物機能の「必要条件」を探求する、のではなく、こちら側でつくりあげた条件でシステムを構成し、それによってどのレベルの生物機能があらわれるかという十分条件の探求である。これは、進化を通してチューンアップされた「非常によく出来た機械」という面に着目するのではなく、生命が最低限みたす普遍的性質を探ることを意味している。

(3-3) 関連する研究分野との相違

- ・システム生物学と複雑系生命科学

分子の探索でなく、システムとして生命を理解するという立場は、古くからあり、また 20 世紀にはウィーナー、ベルトランフィ達がつとに指摘している。この方向は現在システム生物学として脚光を浴び、数年前には立場は異なりながらもその関連の書籍があいついで上梓された⁵⁻⁷⁾。複雑系生命科学は、システムの観点を重視する点ではシステム生物学の一環とも考えられる。ただし、現在主流のシステム生物学では、網羅的なデータを用い、こみいったモデルを構築して、実験と比較する。その意味では complicated-systems biology とでもいうべきものも多く、部分全体の階層を意識

した complex-systems biology (複雑系生命科学) とは立場を異にする。

その一方で、揺らぎ、動態を重視した物理側からのアプローチも現在盛んで、これもシステム生物学の一環とされることもある。実際、Elowitz らは外部ノイズと内部ノイズに分けて細胞の揺らぎを測る方法を提唱⁸⁾、また Alon はシステム生物学の教科書の中で基本ネットワークモチーフの動態と機能の関係を論じている⁵⁾。これらは、複雑系生命科学にも親和性の高い研究方向である。

・ 構成的 (constructive) 生物学と合成 (synthetic) 生物学

構成的生物学と似た立場で、近年、合成生物学という研究方向も盛んである。どちらも、こちら側である性質を作り出そうという点は共通している。しかし、合成生物学は、何か目標を持って、ある性質 —それが生命システムに必須かは限らない— をデザインするという工学的な志向性を持つ。一方で構成的生物学は、こちらで条件を作って、そこからどのような生命の論理が引き出されるかをみようという発見的志向性を有する。また、合成生物学では通常、少数成分のデザインした遺伝子回路を用い、ある振る舞いを構築しようとする。一方で、構成的生物学では複雑系例えば、固有の大自由度系の性質を重視し、一部だけ切り出した性質よりもそれが全体との循環関係の中でどのように振る舞うかに注目する。この点に関しては、合成生物学の代表的研究として、発現が時間的に振動するように遺伝子回路を設計し、それを大腸菌に埋め込んで、タンパク量を振動させるという実験がある⁹⁾。一方で、構成的生物学にも、双安定な発現を持つ遺伝子回路を埋め込むという、類似の実験がある。しかし、後者では、2つの状態をいれたにもかかわらず、細胞全体の増殖との関係で、一方の適応的状态のみが選ばれるという、デザインした以上の発見がなされ、それをもとにして、細胞の適応の論理がひきだされてくる¹⁰⁾。また、進化に関していえば、合成生物学では、実験室内での淘汰を通して高機能を持つ分子や細胞をつくりだすのを目指すのに対して、構成的生物学では、実験を通して、進化しやすさと可塑性の関係を明らかにし、それをもとに進化の新しい法則を求めている。

(3-4) 国内外の動向

日本では複雑系の国際会議は International Workshop on Complex Systems (1993) に端を発し、その後、複雑系生命科学と関連したものとして Search for Logic of Life as Complex Systems: Constructive, Dynamic, and Developmental Approach (2001)、International Symposium on Complex Systems Biology (2009) などが開催されている。複雑系と生命科学をつなぐ国際会議は欧米でも毎年様々な形で行われている。また、日本における関連した研究会としては、定量生物の会と細胞をつくる会が毎年開催され、若手を中心に活発な研究が進められている。

大型プロジェクトとしては日本では COE 複雑系としての生命システムの解析 (1999-2004)、ERATO 複雑系生命 (2004-2010)、ERATO 動的微小反応場 (2010-2015)、複雑生命システム動態研究教育拠点 (2013-) などが文科省により採用され、世界を先導する研究が行われている。また、理化学研究所には定量生物学に関連した生命システム研究センターが立ち上がっている。

一方、世界各国では、必ずしも複雑系生命科学というわけでもないないけれども、関連分野としてシステム生物学、定量生物学、合成生物学が加速度的に研究され、大きな

予算がつぎこまれている。研究所に関しても、米国では Harvard、Princeton、MIT、California、Rice などの主要大学にはシステム生物、物理生物、定量生物などの研究組織が創設され、また欧州でもデンマーク Niels Bohr 研究所、フランス CNRS (Paris)、スペイン CRG (Barcelona)、ドイツ Max Planck 研究所、Ruhr 大学などで複製細胞構築や物理的生命システムの研究センターが作られ、一方、アジアではインドの Bangalore、中国の北京大学、上海大学などで精力的な研究組織が立ち上がっている。このような組織面では日本は遅れをとっているとも考えられる。

(4) 科学技術的・政策的課題

(4-1) 技術：

基礎科学的な側面が非常に強い研究分野であるが、それゆえに、そこで培われる動態測定方法、データ解析や状態の特徴付けの方法、理論的定式化は、今後の医療や創薬などに対しても長期的スパンにおいて幅広い波及効果をもつと考えられる。例えば、細胞状態のロバストネスと可塑性を支配する状態論の研究は細胞状態コントロール技術の開発に繋がると期待され、細菌の薬剤耐性獲得、細胞のガン化の動態研究は、それを抑制する手法の開発にも繋がるであろう。一方で、複雑系の理論研究が、iPS 細胞の作製以前から遺伝子活性化による分化多能性回復を予言していたにもかかわらず、それが有効に実験に伝わっていなかったことを反省すれば、多能性、分化制御に関して理論と実験のより強いタイアップも望まれる。

(4-2) 社会：

これまで科学の応用という技術的側面が重視されていたけれども文化としての科学、社会システムの発展への知見という形でのフィードバック、例えばシステムの多様性と格差への独自の知見も複雑系生命科学では特に重要である。生命システムがいかに安定して存続、増えられるかという原理を理論的に解明することは、社会システムの安定性の理解にも大きな意義がある。文化としていえば、「生命とは何か？それを創って理解しよう」という方向は若者への夢を与え、国民多くの知的好奇心を高め、わくわくさせるであろう。その意味で、生命システムの普遍特性を表現する複雑系生命科学は具体的かつ直接的応用が明日できるようには一見みえなくても、長期的には、日本国民が人類科学のために果たす意義は大きなものとなる。

(4-3) 教育：

学問、教育の細分化による欠点は数多く指摘されている。システムとしての生物の理解更には現在蓄積されている膨大な生物情報のデータの解析には、数理科学、物理学、化学、生命科学の共同作業が強く要求されている。そのような研究を進めていくためには、これらのうちの1分野を専門としつつも他分野にも十分な素養を持つ人材を育てることが必要である。世界各国ではこうした教育改革が急ピッチで進んでいるのに比して日本では逆に数理、物理の学生と生命科学の学生が分離するという傾向が生じている。このような分野の発展には研究所ではなく、大学内に研究組織をつくり、研究現場に大学生が日常的に接するようにさせることが肝要になる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

理論、実験、モデリングが三位一体となった複雑系生命科学の進展により、複製、適応、発生(分化)、進化の基本的特性があらわれるための普遍的論理が明らかにされてきた。ゆらぎの中で細胞が複製していく際の普遍統計法則の抽出、ゆらぎを用いた一般的適応、遺伝子発現ダイナミクスと細胞間相互作用による安定した発生-分化の原理、ゆらぎと進化の間の法則の抽出などが行われ、揺らぎの中でしなやかに振舞う生命ネットワークの論理が提示され、枚挙的な生物学とは相補的な知見が得られてきた^{2, 3, 6)}。

- ・ 構成的生物学の大きな夢である、複製細胞系構築に向けて、リポソームが栄養成分をとりこみ、分裂を繰り返していく複製系が完成させられ、一方で、リポソーム内での多段階遺伝子発現なども行われた¹¹⁾。また PureSystem と呼ばれる大腸菌から抽出した数百の反応をミセルの中にもうめこみ進化させることにも大阪大学の四方哲也らは成功している。他方、理論的には細胞複製系の基盤となる触媒反応ネットワーク系の性質が調べられ、特に複製系では少数しかない成分が遺伝を担うようになることが示された。この少数成分による制御はタンパクと DNA を用いた自律複製系実験でも確認されている。
- ・ 触媒反応ネットワーク系からなる細胞が複製を続ける際に、数千もの遺伝子にわたって発現量の分布に普遍的統計則(巾乗則)があることは示され、遺伝子発現実験データで検証された。さらに細胞ごとに各成分の量の対数が正規分布をみたすことも理論と実験で明らかにされた。一方で細胞の各成分のゆらぎと細胞成長の揺らぎの関係が調べられ、細胞状態の統計的理論が研究されている。
- ・ 抗生物質に対して一部のバクテリアが生き残る Persistence 現象が、遺伝子変化でなく細胞状態(タンパク質の量)の揺らぎにより生じることを実験的に検証され¹²⁾、揺らぎが集団としての生存に有効であることが明らかにされた。
- ・ シグナル伝達系という精巧な仕組みを使わなくても、成長する細胞では一般にゆらぎを利用して外界への適応が生じることが実験、理論で示された。これは適応には進化によって準備されたシグナルネットワークがなくても最低限適応が起こるという、一般的概念を提供したことになる^{10, 13)}。
- ・ 細胞内の遺伝子発現の動態と細胞間相互作用によって分化が進行するという自発的な細胞分化理論が提唱され、発生過程の安定性と分化の不可逆性の理論的基盤が議論された。特に初期に不規則な振動が生じるとその細胞が多能性を持ち、その細胞が分裂するにつれ、細胞分化が決定していくことが示され、さらには複数の遺伝子を強制的に発現させることで、分化多能性が回復することが予言された。90年代の提唱当時はこの理論は真剣にはとりあげられなかったが、2009年に京大影山らには遺伝子発現の振動が確認され、脚光を浴びつつある¹⁴⁾。
- ・ 粘菌で1細胞内のcAMPのダイナミクスと多細胞集団での相互作用を同時に計測することで、粘菌細胞が細胞内の振動と細胞間のやりとりを通して部分と全体の関係をつくって集合化する過程が明らかにされた¹⁵⁾。これは1細胞と集団をつなぐ組織化の原理の解明への一歩であろう。
- ・ 進化の構成的実験により、表現型(タンパク蛍光量)のゆらぎが大きいほど進化しやすいことが見いだされ、このことは、物理の揺動応答理論を拡張した、表現型ゆらぎ

と進化速度の一般的比例関係として定式化された。これをふまえて、発生過程でのノイズによる表現型の分散と遺伝子変異による分散との間の比例関係が進化シミュレーションにより確認され、その起源がノイズに対する表現型安定性と遺伝変異に対する安定性の間の相関にあることが示された。現在、進化における遺伝的变化と表現型変化を結びつけるマクロ状態論の構築が進んでいる。このような考え方を背景にして、理化学研究所生命システム研究センターの古澤力らはバクテリアの抗生物質耐性進化が数自由度の空間で表現できることを示し、これは進化の予測への新しい分野を開いている¹⁶⁾。以上は漸進的な進化に関するものであるが、表現型可塑性と遺伝的同化に基づく種分化理論も提唱されている。こうした流れで、進化における可塑性をシステム生物学の立場で研究する新しい分野も提唱されている¹⁷⁾。この中には、進化と発生の関係という、古来の難問を、力学系の進化で考える方向も含まれている。

大規模プロジェクト関連の動向としては、(3-4)でも述べたように、日本では生命動態に関するプロジェクトやセンターなどが立ち上がっている。揺らぎ、動態と生物のロバストネスや可塑性を結びつける研究が盛んに行われており、細胞分化、進化に関して Waddington が数十年前に予見した描像¹⁸⁾が定量的かつ理論的な形で発展させられている。

(6) キーワード

複製、適応、記憶、細胞分化、発生、進化、状態論、可塑性、ロバストネス、揺らぎ、力学系、確率過程、統計力学

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ COE複雑系としての生命システムの解析（1999-2004）、ERATO複雑系生命（2004-2010）、ERATO動的微小反応場（2010-2015）、複雑生命システム動態研究教育拠点（2013-）などが文科省により採用され、世界を先導する研究が行われている。 ・ 理化学研究所には定量生物学に関連した生命システム研究センターが立ち上がっている。 ・ 階層間の整合性のダイナミクス、ゆらぎの積極的意義、可塑性や進化可能性と動態との関係、などは日本発の研究テーマである。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ システム生物学を進める上での1細胞長期計測装置、微細加工技術などの開発が進んでいる。また、抗生物質耐性のしくみ、また進化の方向の制御など、応用の基盤となる研究が進みつつある。
	産業化			
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ Harvard、Princeton、MIT、California、Riceなどの主要大学にはシステム生物、物理生物、定量生物などの研究組織が創設されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ システム生物学、合成生物学などを医薬へ応用する研究が始まっている。
	産業化			

欧州	基礎研究	◎	↗	・デンマークNiels Bohr研究所、フランスCNRS（Paris）、スペインCRG（Barcelona）、ドイツMax Planck研究所、Ruhr大学などで複製細胞構築や物理的生命システム関連の研究センターが設置されている。
	応用研究・開発	○	↗	・システム生物学を医薬へ応用する研究が始まっている。
	産業化			
中国	基礎研究	○	↗	・北京大学、上海大学など多拠点で生命システム研究に関連した研究組織が設置され、米国で活躍していた研究者を呼び戻し、また膨大な研究資金が投入されている。
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究	△		
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 金子邦彦編. シリーズ・ニューバイオフィジックス II-7：複雑系のバイオフィジックス. 共立出版, 2001.
- 金子邦彦. 生命とは何か－複雑系生命科学へ－. 東大出版会, 2003, 2009（第2版）.
- 金子邦彦. “複雑系生物学－ゆらぎ、安定性、可塑性と適応、進化、発生”. 現代生物学入門 8：システムバイオロジー. 浅島誠, 黒岩常祥, 小原雄治編. 岩波書店, 2010, p. 75-113.
- Kaneko, K.; Tsuda, I. Complex Systems: Chaos and Beyond. Springer, 2001.
- Alon, U. An introduction to systems biology: design principles of biological circuits. CRC Press, 2006.
- Kaneko, K. Life: An Introduction to Complex Systems Biology. Springer, 2006.
- Palsson, B. O. Systems biology. Cambridge University Press, 2006.
- Elowitz, M. B.; Levine, A. J.; Siggia, E. D.; Swain, P. S. Stochastic gene expression in a single cell. Science. 2002, vol. 297, no. 5584, p. 1183-1186.
- Elowitz, M. B.; and Leibler, S. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators. Nature. 2000, vol. 403, no. 6767, p. 335-338.
- Kashiwagi, A.; Urabe, I.; Kaneko, K.; Yomo, T. Adaptive response of a gene network to environmental changes by attractor selection. PLoS ONE. 2006, vol. 1, e49.

- 11) Rasmussen, S. et al., eds. *Protocells: bridging nonliving and living matter*. MIT Press, 2008.
- 12) Wakamoto, Y.; Dhar, N.; Chait, R.; Schneider, K.; Signorino-Gelo, F.; Leibler, S.; McKinney, J. D. Dynamic persistence of antibiotic-stressed mycobacteria. *Science*. 2013, vol. 339, no. 6115, p. 91-95.
- 13) Furusawa, C.; Kaneko, K. A generic mechanism for adaptive growth rate regulation. *PLoS Computational Biology*. 2008, vol. 4, e3.
- 14) Furusawa, C.; Kaneko, K. A Dynamical-Systems View of Stem Cell Biology. *Science*. 2012, vol. 338, no. 6104, p. 215-217.
- 15) Gregor, T.; Fujimoto, K.; Masaki, N.; Sawai, S. The onset of collective behavior in social amoebae. *Science*. 2010, vol. 328, no. 5981, p. 1021-1025.
- 16) Suzuki, S.; Horinouchi, T.; Furusawa C. Prediction of antibiotic resistance by gene expression profiles. *Nature Comm*. 2014, vol. 5, 5792.
- 17) Soyer, O. S. ed. *Evolutionary systems biology*. Springer, 2012.
- 18) Waddington, C. H. *The strategy of the genes*. Routledge, 2014.

3.5.2 複雑系脳・神経科学

(1) 研究開発領域名

複雑系脳・神経科学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

本研究領域は複雑系科学の発展の中で新領域として位置づけられてきたが、本研究領域の発展が逆に複雑系科学に新しい研究のトレンドを提供するとともにその中から多様な分野への本質的な寄与が与えられるような分野横断的な成果が見られたことに特徴がある。特に、初期においては本領域の研究成果が計算理論に大きな影響を与え、その後人工知能の研究開発にも新しい方向性を提起し、最近では複数の脳の相互作用を研究するコミュニケーション神経情報学が起ることで発達障害への介入、教育への対応、人と共生するロボットの開発などへも影響を与え始めている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1940年代から1950年代にかけてのノーバート・ウィーナーのサイバネティクス研究領域の開発と確立の過程において、神経生理学者のウォーレン・マッカロと数学者のウォルター・ピッツが共同研究によって神経細胞の活動を最も簡単でかつ本質的にとらえることが可能な形式ニューロンモデルを提案した。サイバネティクスは複雑系研究の第二期に属するとみなされている¹⁾ので、形式ニューロンとそのネットワークの計算論的研究が複雑系研究の流れの中での脳・神経系研究の始まりと言ってよかろう。実際、彼らは形式ニューロンのネットワークが万能チューリングマシンと同等な能力を持つことを証明し、脳機能研究の基礎を作った。

複雑系研究はその第三期において著しい発展を遂げた。すなわち、1960年代以降の自己組織化論と非線形非平衡統計力学の研究動向の中でヘルマン・ハーケンのシナジェティクスやイリヤ・プリゴジンの散逸構造論、ルネ・トムのカタストロフ理論を経て、1970年代から1980年代にかけてカオス理論、フラクタル幾何学などの新しい領域が確立されたことが領域の飛躍をもたらした。これが契機となり、自然科学、数学、工学、人文社会科学をも巻き込んだより広範な複雑システムの研究が希求されるに至った。このような研究動向の中で金子邦彦²⁾が発見したカオス結合系や振動子結合系を用いて多くの同期現象や高次元のカオス現象が発見され、複雑系の有力な研究ツールの一つが確立された³⁾。さらに、結合が弱い弱結合系に関しては蔵本由紀によって位相縮約を基盤にした精密な理論体系が構築された⁴⁾。

脳・神経系のダイナミクスの研究は計測技術の進歩とともに多くの研究者の視野に入るようになった。ウォルター・フリーマンがラットやウサギの嗅球においてカオスの挙動を発見し、その機能的意味を明らかにしたことがダイナミクス研究への一つの動機づけを与えた。脳・神経系におけるカオスの挙動については、さらにレスリー・ケイが嗅覚系の広範囲にわたる遷移現象を発見し、チャールズ・グレイとウォルフ・シンガーらが視覚野で同期・脱同期の非周期的遷移を発見するなど、様々な領野で発見されたが、近年ではデフォルトモードネットワークのダイナミックな挙動とも関係づけられ議論され始めた。さらに、ヒトの認知活動における脳活動のダイナミクスに見られる同期・

脱同期現象がバレラらによって発見され、引き込み協調と遷移ダイナミクスが注目された（総説としてフリーマン⁵⁾が参考になろう）。

さらに、1970年代以降、甘利俊一が神経回路網の数理⁶⁾を確立する中で、理論的には神経回路のダイナミクスに注目が集まり、例えば甘利の連続連想記憶の学習ルールなどの研究がその後の複雑系脳・神経科学における脳のダイナミクスの理論研究を先導した。これに呼応して、合原一幸と松本元がヤリイカの神経において周期的信号に対するカオスの応答を発見し、林初男と石塚智がイソアワモチの神経において周期的信号や直流信号に対してカオスの応答を発見することで、神経系におけるカオスの存在が実証された。その後、合原らのカオスニューロンネットワークのダイナミクスの解析と津田一郎らの非平衡神経回路のダイナミクスにおけるカオスの遷移現象の解析はともに従来の連想記憶モデルを動的な方向に拡張し動的連想記憶の神経機構の解明に寄与した。さらに、津田らはカオスの遍歴概念を脳・神経系の動的遷移過程を理解するための基礎概念として導入し、多くの非定常的で非周期的な脳活動の機能的な意味の解明に適用している⁷⁾。他方で、合原らはカオス力学系とカオスニューラルネットをもとにした複雑系の工学応用を‘カオス工学’と名付けて発展させた⁸⁾。

また、脳のダイナミックな情報処理に関する研究は1970年代に塚田稔らが神経発火の時系列のマルコフ連鎖解析を行いその後の動的脳の研究を先導した⁹⁾。世界的な潮流として特殊なタスクに対して応答する特殊な神経細胞の発見が主流を占めていた時代にあつて、脳のダイナミクスに着目した研究は極めて少なく、塚田らの研究は特筆に値する。当時の潮流であつた静的脳観はわが国では津田が動的脳観を提案した1984年、1990年においてもなお主流を占め、21世紀に入ってようやく、動的脳観が静的脳観にとってかわるようになった。それは、次の事情によるところが大きい。塚田、藤井宏、奈良重俊、津田、合原の5名がダイナミックブレイングループを形成し、海外ではJapanese Gang of Fiveと呼ばれるようになり、複雑系脳・神経系のダイナミクス研究をけん引した。特に、彼らはダイナミックブレインフォーラム (DBF) をほぼ毎年世界のさまざまな都市で開催し、動的脳観の研究を世界に広めていき、世界中で多くの賛同者が現れ、脳のダイナミクスの研究が一つの潮流となった。ルビン・ワンとファンジー・グーらはこの研究動向の影響を強く受け、さらに規模の大きな国際会議である International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN) を組織し、この分野の国際学術誌である Cognitive Neurodynamics の発刊を行い、成功させた。甘利をはじめ、フリーマンや上記5人組も editor に名を連ねた。

脳ダイナミクスに関する実験データが共通して示していることは、脳ダイナミクスは非定常、非周期的だが決してランダムではなく複雑な秩序構造を内包するカオスの挙動であり、また、過渡的な引き込みによる同期・脱同期遷移がみられるなど臨界的な秩序状態が内包されているといった、遷移的、臨界的、準定常的な性質を有する点である。これらの観点で、脳ダイナミクスと脳機能との関係が理論と実験の協働研究によって徐々に明らかにされつつある。ダイナミックな記憶に関しては、ラットやヒトで研究が進んだ。また、サルやチンパンジーの思考や学習実験も複雑系研究の中で進展している。さらには、一個体の脳活動の研究にとどまらず、複数個体間のコミュニケーションに伴う脳ダイナミクスの解析とコミュニケーションの神経機構の解明に関する研究が複雑系

数理科学の観点から進んでいる。コミュニケーションで重要になる要素の一つである脳のボトムアップ・トップダウン情報処理に関する検証実験がラット、サル、人間などを用いて研究されている。また、脳神経の持つ自律的なダイナミクスとして、状態間の転移的变化、固有振動数を持つ状態の生成崩壊、神経部位同士の結合の動的変化などが、ヒトを含む哺乳類の脳の異なる部位で見つかっており、*metastable brain* の観点で研究が進んでいる¹⁰⁾。これらは脳内の異なるダイナミクスの相互作用による情報生成の機構を解明する上での重要な手がかりを与えると考えられる。さらに、脳内ダイナミクスには引き込み協調が起こりうるということが知られている^{11, 12)}。

文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」では、コミュニケーションをしているときのペア脳のダイナミクスを同時測定し、それを複雑系数理論に基づく数理モデルで解析した。そこにおいて、複雑系脳・神経科学の観点からコミュニケーションに伴う脳神経機構の解明が著しく進み、‘コミュニケーション神経情報学’という新領域が確立された（特集号^{13, 14)}を参照のこと）。また、上記のように海外でもこの数年、複数の脳の相互作用の研究がコミュニケーションパラダイムのもとに展開されている。例えば、スコット・ケルソーやエマニュエル・トグノリらは、二人の人間がタッピングなどの簡単な運動を互いに統制する過程の脳活動を脳波レベルで研究し、特定の周波数領域の脳波の過渡的で臨界的な引き込みがみられることを発見し、脳の準定常状態仮説を提案した¹⁰⁾。世界的にもコミュニケーションの時の脳活動の研究が盛んになってきている。我が国においては山口陽子のグループが類似のタッピング課題で特定周波数脳波の同期・脱同期転移を発見している¹⁵⁾。また近年、水原啓暁と乾敏郎は脳波と機能的MRIを併用する技術を開発し、それによって異種領野間の同期現象を観測し、コミュニケーションにおける様々な周波数の引き込み協調の役割を解明した¹⁶⁾。さらには、無意味記号の交換による意味の生成過程における脳活動研究においても特定周波数の脳波の引き込みが観測されるなど、脳の機能の一部が複雑系の解析手法によって明らかになっている。今後もこの方向での研究の発展が国の内外で期待されている。

（４）科学技術的・政策的課題

・科学技術イノベーション総合戦略との関係性

複雑系脳・神経科学領域は、「科学技術イノベーション総合戦略」（平成 25 年 6 月 7 日閣議決定）中の‘国際社会の先駆けとなる健康長寿社会の実現’における重点的取り組みとして挙げられたブレイン・マシン・インターフェース（BMI）研究と関係している。本領域では変動する環境に対して柔軟な機能を発揮するための機能分化によるデフォルトネットワークの生成原理やそのダイナミクスが研究されており、この原理に基づく即時適応を行うロボットの開発研究や、創造性を発揮すると考えられる脳領域のTMSやtDCSによる研究に発展することで、近未来のBMI開発に関与する可能性がある。さらには、これらを応用して脳神経系の障害者支援ツールの開発研究や人と共生しコミュニケーションできる発達ロボットの開発へと発展する可能性がある。

・健康・医療戦略との関係性

「科学技術イノベーション総合戦略」に記載され、「健康・医療戦略」（平成 25 年 6 月 14 日関係閣僚申し合せ）にも記載されている iPS 細胞などの分化万能性を持つ幹細胞の研究は新しい再生医療の道を開くと期待されている。特に、iPS 細胞による神経回路の再生は様々な脳疾患、認知症の原因解明と根本治療への道を切り開くものとして期待されている。本領域における細胞分化、機能分化に関係する研究成果は、再生医療の基本となる分化万能性に共通する数理構造を明らかにする可能性がある。この数理モデルは臓器への分化に適用可能であり、脳の欠損を補う再生ネットワークの数理モデルとしても応用可能である。また、健常者と自閉症児の脳波活動の比較研究なども本領域で研究されているが、これらの研究は自閉症の治療への道につながる可能性を秘めている。このように、本領域研究の成果は、わが国の健康・長寿社会の実現に数理科学の立場から貢献すると期待される。

・その他、政府戦略との関係性

第 4 期科学技術基本計画（平成 23 年 8 月 19 日閣議決定）において、科学技術の共通基盤の充実、強化が謳われ、特に領域横断的な科学としての数理科学の役割の重要性が指摘された。これを受けて、文部科学省研究振興局基礎研究振興課に数学イノベーションユニットが新設され、数学と諸科学の連携研究によるイノベーション創出に期待が寄せられている。本領域研究においては、わが国の健康・長寿社会が抱えるさまざまな社会的課題のうちコミュニケーションの脳内機構を数理科学的に解明する研究もおこなわれている。このように、本領域は数理科学の力で社会の要請に応えようとする国の研究指針とも合致している。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

脳神経系のダイナミクスの研究は単一脳の研究からペア脳の研究へと進んでいる。コミュニケーション課題や社会的な状況設定における脳内ダイナミクスはペア脳に課される拘束条件によって個々の脳が新たな機能を発現するという点に注目が集まっている。それらは個々の脳に存在するデフォルトモードネットワークの機能的結合によって新たな機能が瞬時に分化し発現するために新しいシステムの制御原理が内在していると見られ、この開発が注目される。その根本原理が解明されることで、適切な学習と不適切な学習に関するアルゴリズムが開発され、さらには過酷環境下で即時に機能分化し適応するロボットの構築が期待される。

さらに、本領域は次の新学術領域研究とも関係する。

平成 26 年度—平成 30 年度：

行動適応を担う脳神経回路の機能シフト機構（小林和人代表）；認知的インタラクションデザイン学：意思疎通のモデル論的理解と人工物設計への応用（植田一博代表）；脳内身体表現の変容機構の理解と制御（太田順）

平成 25 年度—平成 29 年度：

こころの時間学 —現在・過去・未来の起源を求めて—（北澤茂代表）

平成 24 年度—平成 28 年度：

構成論的発達科学—胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステムの理解—

（國吉康夫代表）

平成 23 年度—平成 27 年度：

予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用（銅谷賢治代表）

平成 22 年度—平成 26 年度：

メゾスコピック神経回路から探る脳の情報処理基盤（能瀬聡直代表）；質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究（小松英彦代表）

平成 21 年度—平成 25 年度：

ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明（津田一郎代表）

また、本領域は平成 21 年度発足の JST CREST

脳神経回路の形成・動作原理の解明と制御技術の創出（小澤瀨司代表）

において展開されている研究とも関係している。

海外の動向として、米国のブレイン・イニシアティブ（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies; BRAIN）は神経科学で新たに発展が期待される神経テクノロジーによって脳機能解明を目指すものとして、本領域の成果が応用される可能性がある。

（6）キーワード

複雑系数理理論、数理モデル、脳ダイナミクス、動的脳観、非線形力学系、カオス、フラクタル、非線形振動子、引き込み、コミュニケーション、ペア脳、数理モデリング

（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	◎	↑	・第4期科学技術基本計画に数理科学の振興が入ったことで、従来の脳神経科学に数理科学、特に複雑系数理科学が必要との認識が広まっている。しかし、優秀な若手が安定した職に就けないなどの問題が多々認められ、近い将来には人材不足による急降下が危惧される。
	応用研究・開発	○	→	・科学技術イノベーション総合戦略、健康・医療戦略などにおいてBMI研究やiPS細胞による幹細胞研究などが言及されている。
	産業化	×	—	・そもそも行われていないと思われる。
米国	基礎研究	◎	↑	・ブレイン・イニシアティブによる脳神経科学研究の振興。オバマ大統領の一般教書演説で数学・数理科学振興に力を入れることが力説されている。
	応用研究・開発	◎	↑	・パーキンソン患者の脳へのチップの埋め込みと複雑系科学を応用したチップへのシグナル印加などすでに、医療、治療にまで踏み込んでいる。NeuroprosthesisとBMIの融合を試みているように見える。
	産業化			
欧州	基礎研究	◎	↑	・英国、ドイツを中心に複雑系科学を振興する傾向がいまだに続いている。
	応用研究・開発	○	→	・Neuroprosthesisを主導し、英国、ドイツ、スイスなどに大きな研究室があり活発に研究が進められているが、飛び抜けて優れた成果が聞かれない。
	産業化			

中国	基礎研究	△	↗	・一部成果が見え始めているので、今後は大きな成果が出る可能性がある。
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究	×	→	・基本的に日本の科学技術政策に追従しているため、新しいものが出るのは純粋に個人の力によるだろう。ただし、最近では日本人をはじめ優秀な外国人が大学、研究所のポジションにつき始めているので、今後は伸びる可能性を秘めている。
	応用研究・開発			
	産業化			

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) ハーバート A・サイモン. システムの科学. 稲葉元吉, 吉原英樹訳. パソナルメディア, 1999. (サイモンはこの本で、複雑系は人工物であるととらえている。サイモンとは反対に、複雑系を生命系として捉え、数理科学の立場から解説したものに、岩波「数学辞典第4版」中の「複雑系」の項、ならびに大野克嗣、非線形な世界、東京大学出版会、2009年がある。)
- 2) 例えば、Kaneko, Kunihiko. Clustering, coding, switching, hierarchical ordering, and control in network of chaotic elements. Physica D. 1990, vol. 41, p. 137-172.
- 3) 例えば、金子邦彦. 生命とは何か—複雑系生命科学へ. 東京大学出版会, 2009.
- 4) Kuramoto, Yoshiki. Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. Dover, 2003.
- 5) ウォルター J・フリーマン. 脳はいかにして心を創るのか. 浅野孝夫訳. 産業図書, 2011.
- 6) 例えば、甘利俊一. 神経回路網の数理. 産業図書, 1978.
- 7) Tsuda, Ichiro. Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems. Behavioral and Brain Sciences. 2001, vol. 24, no. 5, p. 793-847. カオスの遍歴は、池田研介、金子邦彦、津田一郎、ピーター・デイビスによって1990年前後に提案された高次元（ベクトル場では4次元以上）力学系のカオス的な遷移現象の総称である。最近の特集号として、Kaneko, Kunihiko; Tsuda, Ichiro. eds. Focus Issue on Chaotic Itinerancy. Chaos. 2003, vol. 13, no. 3. また脳神経系におけるカオスの遍歴の最近の総説は Tsuda, Ichiro. Chaotic itinerancy. Scholarpedia. 2013, vol. 8, no. 1, p. 4459.; Tsuda, Ichiro. Chaotic itinerancy and its roles in cognitive neurodynamics. Current Opinion in Neurobiology. 2015, vol. 31, p. 67-71.
- 8) 合原一幸. 応用カオス. サイエンス社, 1994.; 池口徹, 小室元政, 山田泰司, 合原一幸. カオス時系列解析の基礎と応用. 産業図書, 2000.

- 9) Tsukada, Minoru; Ishii, N.; Sato, R. Temporal pattern discrimination of impulse sequences in the computer-simulated nerve cells. *Biol. Cybernetics*. 1975, vol. 17, no. 1, p. 19-28.
- 10) Kelso, J. A. S.; Dumas, G.; Tognoli, E. Outline of a general theory of behavior and brain coordination. *Neural Networks*. 2013, vol. 37, p. 120-131.
Tognoli, E; Kelso, J. A. S. The metastable brain. *Neuron*. 2014, vol. 81, p. 35-48.
- 11) Gray, C. M.; Konig, P.; Engel, A. K.; Singer, W. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*. 1989, vol. 338, no. 6213, p. 334-337.
- 12) Rodriguez, E.; George, N.; Lachaux, J.P.; Martinerie, J.; Renault, B.; Varela, F. Perception's shadow: Long-distance synchronization in the human brain. *Nature*. 1999, vol. 397, p. 340-343.
- 13) Sakaguchi, Y.; Aihara, T.; Dominey, P. F.; Tsuda, I., eds. Communication and Brain: Emergent Functions through Inter-Neuron and Inter-Brain Communications. Special Issue of *Neural Networks*. 2015, vol. 62, p. 1-118.
- 14) Tsuda, Ichiro; Yamaguchi, Yoko; Hashimoto, Takashi; Okuda, Jiro; Kawasaki, Masahiro; Nagasaka, Yasuo. Study of the neural dynamics for understanding communication in terms of complex hetero systems. *Neuroscience Research*. 2015, vol. 90, p. 51-55.
- 15) 川崎真弘, 北城 圭一, 山口 陽子. 人と人のタッピング同期に関連した2者間の脳波リズム同期. *信学技報*, 2012, vol. 112, no. 176, p.73-78.
- 16) Mizuhara, Hiroaki; Inui, Toshio. Is mu rhythm an index of the human mirror neuron system? A study of simultaneous fMRI and EEG. *Advances in Cognitive Neurodynamics*. 2011, p. 123-127.

3.5.3 複雑系数学

(1) 研究開発領域名

複雑系数学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

伝統的な数学においては簡明な構造をもつ図形の上の幾何学や解析学が展開され、応用されてきた。より複雑な図形については、早くから遭遇していたが、数学研究の対象になり始めたのは 20 世紀とくにその後半からである。他方、21 世紀に入り、諸分野からの複雑な系の数学的な理解と解析に対するニーズは一段と高まり、既存数学の発掘・応用とともにその本質を捉える数学的革新が期待されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 数学的な背景

しばしば例えられるようにチョコ・ブラーエの観測データ（当時のビッグ・データ）の中に法則性を見たのは古代ギリシャ伝来の二次曲線論を知っていたケプラーであった。カオスにおいては永らく多くの人々が不規則現象を見ていながらそれに気付くことはなかった。複雑な系は多数存在し、それぞれの（既存あるいは成立途上の）分野において解明したい代表的な複雑な系は存在するが、複雑系の定義はまだない¹⁾。概念の形成されていないものを見るのは至難の業である。

おそらく数学における複雑な図形との最初の遭遇は極小曲面の問題であろう。この問題は、18 世紀変分法の創成期に Euler、Lagrange と共に始まり、石鹼膜で実験してみせた物理学者名を冠して Plateau 問題とも呼ばれる。そこでの複雑な図形は泡状の膜であり、その数学的記述形式が確立されたのは 20 世紀後半の varifold の理論や幾何学的測度論であった。

次の大きな遭遇は 19 世紀、場所は Navier-Stokes 方程式、複雑系は乱流であろう。その解は弱解（Leray-Hopf 解）として定式化されているが、その存在問題は未解決で 2000 年クレイ研究所による 7 つのプレミアム懸賞問題のひとつとなった。

現在の複雑系研究につながる「自己相似性」をもつ図形には、20 世紀初頭にかけて発見された Cantor 集合、Peano の「空間を埋め尽くす」（space-filling）曲線、Koch の雪片、Sierpinski の鏟等や Poincare による自己漸近 (homoclinic) 軌道があり、さらに、「いたるところ微分不可能な」曲線（Weierstrass や高木貞治他）もある。その背景には Cantor による集合論の成立とそれに基づく無限の理解があった。（余談ながら、それまでの欧州の伝統では無限は専ら神の領域に属するものであり、人の営む研究の対象ではなかった。）

(3-2) 幾何学・解析学

物質科学、生命科学等々において複雑な形状をもつ対象の把握とその解析に対する期待は急増している。そのような対象は自己相似図形を手掛かりにすることが多い。現在では、そのような図形に対しては Mandelbrot 以来フラクタルという用語が定着し、Hausdorff 次元（その簡易版がフラクタル次元や箱数次元）も広く知られている。中でも、木上淳により定式化された p.c.f.有限分岐自己相似集合は幾何学的構造が比較的明快

で数学的研究が最も進んでいる。そこでも直接微分を定義して微積分を展開するには困難があるが、確率解析における福島正俊たちの **Dirichlet** 形式論が活用できて、その上の熱伝導や拡散などの現象を記述し、解析することができる。なお、フラクタル図形は見える人だけが見ることのできるものの例である。実際、その数学的実在を知っていれば、コンピュータによって好きなだけの精度の近似図形を描くことができるが、知らなければ、ただややこしい図形を見るだけで終わる。余談ながら、フラクタルな境界をもつ領域におけるラプラス作用素の固有値分布の研究 (**Weyl** の公式の一般化) の源流のひとつ (**G. Papanicolau**) が現場から持ち込まれた波消しブロックの問題であったことは示唆的である。また、多粒子系や大きなグラフ (ネットワーク) は複雑系であろうが、現在までのところ、サイズ無限大でのスケール極限 (例えば、流体力学極限) や特殊解の構造 (例えば、ソリトン) あるいは特殊な自己相似性 (例えば、**scale-free network**) の観点からの研究は進んでいるが、サイズ有限の大規模系そのものの数学解析は格段に難しく、今後の大きな課題である。

(3-3) 力学系

複雑な系の記述形式として、現在までのところ、最も汎用性があるのは力学系の概念である。力学系 (**dynamical system**) とは、一言でいえば、状態空間の上の時間発展を定める規則である。言い換えれば、時間発展の数学的な定式化である。力学系理論は、整数論、幾何学、解析学から確率論、応用数学に及ぶ横断的な領域であり、位相力学系、微分可能力学系、保測力学系、複素力学系 (**complex dynamics**。複雑系と混同しやすい伝統的な数学用語であり、要注意。) などに分類され、研究されている。拡散過程等の確率過程もセル力学系 (セル・オートマトン) も力学系の一種である。

(3-3-1) アトラクタ

アトラクタ (吸引集合) の概念は力学系という記述形式のもつ第一の強みであろう。そのもっとも簡単な例は不動点 (固定点) であり、平衡状態を記述するものとして、周期点と共に 20 世紀初頭以来多くの研究がある。1960 年代後半からカオス現象が注目されるようになり、コンピュータの能力の向上と共に、さまざまな「状態」が観察され、それらは、奇妙なアトラクタを始めとして、アトラクタとして把握される。**Lyapunov** の安定性理論に始まる伝統的なアトラクタに関しては十分な数学研究の蓄積があり、確立した数学概念である。しかし、諸現象を記述するにはそれだけでは事足りず、いわゆる **Smale** のアトラクタなど微妙な構造をもつアトラクタの諸概念が提唱され、数学的研究が進みつつある。なお、時間反転したときのアトラクタがレペラ (反撥集合) であり、安定方向と不安定方向の双方をもつ不変集合が双曲型集合である。一様双曲型集合に関しては 1960 年代の **Smale** の馬蹄形、1970 年代の **Pesin** の一般論以来の十分な数学的蓄積がある。統計力学における臨界現象の理論では、くり込み群 (**renormalization group**) が双曲型不動点をもち、その不安定方向が 1 次元であることから、普遍法則等を導いている。しかし、非一様双曲型集合についての研究は進んでいるが未成熟である。とくに 1 点のみで退化する双曲型集合は間欠的カオスなど間欠性の数学モデルとして有望である。

(3-3-2) 分岐理論

力学系のもつ第二の強みは分岐理論である。分岐の出発点は 1930 年代の Birkhoff に始まる標準形である。連続時間／離散時間に依らず、微分可能力学系の不動点は線形化写像の Jordan 標準形に応じて中心、渦心、鞍点等に分類される。これは非退化な不動点における標準形が Jordan 標準形により決まることを利用している。力学系がパラメータとともに動くとき、標準形が様変わりする(消失や出現も含めて)ことが分岐であり、非退化な不動点の分岐については十分な数学的蓄積がある。Hopf 分岐は非線形振動論の中心的な問題である。またハミルトン力学系における標準形理論から KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) 理論が誕生した。さらに、連続時間の場合の周期運動を離散時間の不動点の場合に帰着して解析するのが Floquet の理論である。不動点から分岐したものがさらに分岐するとき、2 次分岐という。2 次分岐(さらにより高次の分岐)については意欲的な個別研究は進み、成果もあげている。また起こり得る現象の選択肢を与えるには役立つ。しかしながら、数学理論としては未成熟で、(実/数値)実験結果の解釈や理解に必須というレベルに留まり、予見能力は不十分である。「動く」記述方式という観点からは今後の大きな課題である。

(3-4) 応用解析

大規模な系の考察は 19 世紀後半の Boltzmann に始まる。そこでは熱力学の法則を分子運動の統計力学で説明したいという「夢」があった。20 世紀後半 Turing は形態形成を化学反応から捉えることを提唱した。現在、Boltzmann の流れを汲むものの代表例として確率論を基礎とした流体力学極限の研究がある²⁾。Turing の流れでは、分岐理論を基礎とした反応拡散系の研究などを挙げることができる。また、Navier-Stokes 方程式を始め、各種の偏微分方程式の研究も進んでおり、その応用研究も展開しつつある。

(4) 科学技術的・政策的課題

複雑系数学には、2 つの方向が必須である：

- ① 課題解明に向けた既存の数学・数理的手法の活用
- ② 課題に即した新たな数学手法の発掘と展開

①は、課題そのものもしくはそのモデル化が既存の馴染みある数学・数理的手法の適用範囲に入っていること(もしくは入るような設定が可能なこと)を想定し、創意工夫により問題を解明しようとする方向である。その際の流れは以下のようにまとめることができよう。

- ・ 大きなデータの収集・整理
- ・ 数理的な問題と察知し、問題を提起する能力
- ・ 問題を理解し、数学・数理の問題と認識する能力
- ・ 数学的定式化あるいは数理モデリング
- ・ 数学的あるいは数理的な解明の能力(数値解析、数値実験等の技法を含む)
- ・ 数学・数理的な結果の吟味、フィードバック

モデリングが成功し、使い慣れた道具で済めばその波及も速く、効率的である。そのためには既存の数学手法の発掘と的確な応用手法の開発は不可欠でありそれを担う人材あるいは橋渡しをする人材の育成が急務である。

②は、課題が馴染みある数学・数理的手法の適用範囲外の場合である。これについてもこの流れはほぼ当てはまるが、各項の内容は異なる。数学・数理的な手法の発掘は、課題に直面する側と数学・数理科学側との協働作業である。上述の Smale のアトラクタや高次分岐など数学内部の課題についても、データの収集においては諸分野からのさまざまな実験データの提供が不可欠であるが、見ても見えていない場合は協働なくして提供されることはない。特定の（単独または複数を組み合わせた）手法が発掘された段階では、課題に適用できる形に整備し、理論を展開する必要がある。また既存の手法がない場合には新たな手法の開発が必要となる。さらには新たな概念や記述形式の創出が必要となる。それらは通常長い時間を要する。

①、②いずれの方向も、数学者・数理科学者と諸分野の研究者が問題意識を共有し、協働する場を設置する必要がある。従来からの研究所、センター等の設置と共に、JSTにおける研究領域の設置が数学・数理科学においても一定の成果をもたらすことが証明されつつある。また有能な若手研究者も育ち始めている。欧米に比べて数学・数理科学の出身者の活躍の場が狭く、人材も不足しているが、このような流れが1世代以上の期間継続すれば、必要な人材の育成・養成も可能となり、我が国でもひとつの数学文化として定着することが期待される。しかしながら、期限付きのプロジェクトは、若手研究者の使い捨てにつながる恐れがある。使い捨てはまた、経験豊富な人材、目利きのできる人材の養成の中断・放棄でもある。アカデミア、民間を問わず、キャリア・パスへの政策的な配慮が必須である。

複雑系の数学に関する研究は米国では Los Alamos National Laboratory³⁾、Santa Fe Institute、Duke University⁴⁾、Brown University⁵⁾、Georgia Tech⁶⁾、University of Texas at Austin⁷⁾、University of Illinois⁸⁾、The New England Complex Systems Institute⁹⁾、Boston University¹⁰⁾、The Pennsylvania State University¹¹⁾、University of Michigan¹²⁾などで複雑系の研究が行われている。また SIAM Activity Group¹³⁾は毎年国際研究集会を開催し力学系に関する最新の研究成果を発信している。

わが国では、複雑系数学に関係の深い研究が、北海道大学大学院理学研究院数学部門、東京大学大学院数理科学研究科、京都大学数学教室、京都大学数理解析研究所、大阪大学理学部数学科、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所などで行われている。力学系に関する研究集会が数多く開催されており、研究者の交流が活発である。また FIRST 合原複雑数理解モデルプロジェクトでは力学系理論と制御理論の融合など複雑系数理に関する多くの成果を得ている。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

永らく日本の数学者は応用に興味をもたず、理学部の数学と諸分野とが分離する傾向のあったことは、文部科学省政策研究所「忘れられた科学——数学」¹⁴⁾でも指摘されたところである。しかし、その後の文科省や JST による施策もあり、諸分野との協働に対して当初の予想以上に数学界の反響は好意的であり、いくつかの大学では数学と諸分野の協働や連携を謳った研究所等の設置が始まっている：

- ・ JST「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」領域（西浦研究総括）
- ・ JST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」領域（坪井研究総括）

- ・北海道大学数学連携センター
- ・京都大学統合複雑系科学国際研究ユニット
- ・九州大学マス・フォア・インダストリ研究所（共同利用・共同研究拠点）
- ・明治大学先端数理科学インスティテュート（共同利用・共同研究拠点）
- ・東北大学原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIM）数学ユニット
- ・文部科学省数学協働プログラム（統計数理研究所、北海道大学、東北大学、東京大学、明治大学、名古屋大学、京都大学、広島大学、九州大学）

（6）キーワード

力学系・エルゴード理論、位相幾何学、微分幾何学、離散幾何学、偏微分方程式論、応用解析、数理工学、現象数理学、非線形科学、カオス、フラクタル、大規模系、複雑ネットワーク、数理モデリング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学大学院理学研究院数学部門、東京大学大学院数理科学研究科、京都大学数学教室、京都大学数理解析研究所、大阪大学理学部数学科などで複雑系の数学に関わる研究が行われている。 ・力学系に関する研究集会が数多く開催されており、研究者の交流が活発である。 ・FIRST合原複雑系数理モデルプロジェクトでは力学系理論と制御理論の融合など複雑系数理に関する多くの成果を得ている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学数学連携センター、東北大学原子分子材料科学高等研究機構、京都大学統合複雑系科学国際研究ユニット、統計数理研究所、明治大学先端数理科学インスティテュート、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学生命動態プロジェクト、早稲田大学複雑系高等学術研究所、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所、などで複雑系の数学の様々な分野への応用研究が行われている。 ・革新的シミュレーション研究センターではシミュレーション技術開発とソフトウェア解析を行っている¹⁵⁾。 ・渋滞学、定量腫瘍学など数学をベースとした新しい学術領域が展開されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・新日本製鐵住金では数理工学技術を研究開発の基盤技術に取り込み、製品・プロセス開発の高度化を実践している。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑系の研究グループが多数組織されており活発な活動を行っている。 ・Duke UniversityのThe Center for Nonlinear and Complex Systemsは工学系、生物系、数学系など様々な分野の専門家からなる研究グループ。複雑系の研究と教育双方が充実している。 ・Georgia TechのApplied Chaos Laboratoryは1982年から非線形力学に関する研究集会Dynamical Days USを毎年開催しており研究者の交流が盛んである。 ・University of Texas at AustinのCenter for Nonlinear Dynamicsでは複雑系の応用研究が盛ん。 ・The New England Complex Systems Instituteでは複雑系を対象として基礎・応用研究および教育活動を行っている。 ・SIAM Activity Groupは毎年国際研究集会を開催し力学系に関する最新の研究成果を発信している。 ・Los Alamos National LaboratoryのCenter for Nonlinear Studiesは1980年設立以来、力学系とカオス研究が盛ん。ワークショップ、研究集会を毎年多数開催している。 ・Santa Fe Instituteでは複雑系の分野横断的研究が盛んである。 ・DSWeb¹⁶⁾は米国、英国の力学系研究に関する最新動向（研究集会、研究グループ、ソフトウェアなど）を公開している。 ・Society of Chaos Theory in Psychology & Life Science¹⁷⁾は複雑系、カオスの理論研究および応用研究に関する最新の研究成果を発信している。

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> University of Marylandのカオス研究グループ¹⁸⁾は1970年半頃からカオス力学系の理論と実験の融合研究を推進している。 力学系モデルを解析する様々なソフトウェアが開発されている¹⁹⁾。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> MathWorks社のMatlab/Simulink、Wolfram社のMathematica、Maplesoft社（カナダ）のMapleなどの科学技術計算を支援する統合開発環境が世界中で広く利用されている。 汎用工学シミュレーションソフトであるCOMSOL社のCOMSOL Multiphysics、SIMULIA社の3D SIMULIAは複雑現象のシミュレーション計算を得意とし、製造業分野で利用されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> Max Planck Institute of Mathematicsでは複雑系の研究を行っている。 英国にはThe University of Warwick（力学系・エルゴード理論に強い研究グループがある²⁰⁾）やThe University of Bristolをはじめ様々な大学で複雑系研究グループが組織されている²¹⁾。 Complex systems society²²⁾は複雑系に関する国際会議をテーマごとに開催しており研究者の交流が盛んである。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Max Planck Institute for dynamics and self-organizationでは複雑系の応用研究を行っている。 University College London、Centre for Mathematics、Physics and Engineering in the Life Sciences and Experimental Biology²³⁾では複雑系のbiologyとmedicineへの応用研究が盛んである。 University of Oxfordの研究グループ「The Oxford Centre for Industrial and Applied Mathematics (OCIAM)」²⁴⁾では流体解析や非線形システムを含む数学研究を産業諸分野への応用を念頭に行っている。 FyDiK²⁵⁾、iDMC²⁶⁾などはじめ力学系モデルを解析する様々なソフトウェアが開発されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Smith Instituteは数学の産業諸分野への応用に取り組んでいる。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 北京大学、中国科学技術アカデミー、復旦大学、香港城市大学²⁷⁾などで複雑系の研究を行っている。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2005年に設立された国立数理科学研究所（NIMS）では、次世代ネットワークモデルや脳機能の数学をベースとした研究を行っている。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 日本数学会編. 岩波数学辞典. 第4版, 岩波出版, 2007.
- 2) 舟木直久, 内山耕平. ミクロからマクロへ (2) 流体力学極限. 丸善出版, 2012.
- 3) Los Alamos National Laboratory, Center for Nonlinear Studies.
<http://cnls.lanl.gov/External/>
- 4) Duke University, The Center for Nonlinear and Complex Systems (CNCS).
<http://www.math.duke.edu/cnsc/index.html>
- 5) Brown University, Lefschetz Center for Dynamical Systems.
<http://www.dam.brown.edu/lcds/>

- 6) Georgia Tech, Applied Chaos Laboratory. <http://www.cns.gatech.edu/>
- 7) University of Texas, Center for Nonlinear Dynamics. <http://chaos.utexas.edu/>
- 8) University of Illinois, The Applied Dynamics Laboratory.
<http://danko.mechanical.illinois.edu/index.htm>
- 9) The New England Complex Systems Institute. <http://necsi.edu/>
- 10) Boston University, Mathematics & Statistics. The Dynamical Systems Group.
<http://math.bu.edu/dynamics/faculty.html>
- 11) The Pennsylvania State University, Department of Mathematics, Center for Dynamical Systems and Geometry. <http://www.math.psu.edu/dynsys/>
- 12) University of Michigan, Center for the Study of Complex Systems.
<http://www.lsa.umich.edu/cscs/>
- 13) SIAM Activity Group. <http://www.siam.org/activity/ds/>
- 14) 文部科学省研究振興局, 数学イノベーション委員会中間報告.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/002/
- 15) 革新的シミュレーション研究センター. <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/index.php>
- 16) DSWeb. <http://www.dynamicalsystems.org/hp/hp/>
- 17) Society of Chaos Theory in Psychology & Life Science.
<http://www.societyforchaostheory.org/>
- 18) Dynamical System Software. <http://www.dynamicalsystems.org/sw/sw/>
- 19) University of Maryland. <http://www.chaos.umd.edu/>
- 20) The University of Warwick.
<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/math/research/dynamics/>
- 21) A list of research sites maintained at the University of Warwick.
<http://www.maths.warwick.ac.uk/dynamics/links.html>
- 22) Complex systems society.
<http://css.csregistry.org/tiki-index.php?page=wiki&redirectpage=homepage>
- 23) University College London, Centre for Mathematics, Physics and Engineering in the Life Sciences and Experimental Biology. <http://www.ucl.ac.uk/complex>
- 24) University of Oxford. <https://www0.maths.ox.ac.uk/groups/ociam>
- 25) FyDiK. <http://fydik.kitnarf.cz/>
- 26) iDMC. <https://code.google.com/p/idmc/>
- 27) City University of Hong Kong, College of Science and Engineering, Centre for Chaos and Complex Networks. <http://www.ee.cityu.edu.hk/~cccn/assoccentres.htm#Japan>

3.5.4 複雑系物理学

(1) 研究開発領域名

複雑系物理学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

物理的手法に基づく複雑系の計測手法開発と情報抽出、法則の発見。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

物理学には、素粒子物理学のように物質を極限まで分解して理解しようとする分野もあるが、それだけでは複雑な自然現象の理解は不可能である。我々を取り巻く自然現象は、多くの要素からなり、それらが複雑に相互作用しながら、時には秩序を、時には乱れを創り出している。この世界は、不断にエネルギーや物質の流れが存在する非平衡の世界であり、その理解のためには、複雑系を統計力学や非平衡物理学の視点から解きほぐす必要がある。物理学の本質は、理論と実験を両輪に、現象の奥に潜む法則やメカニズムを明らかにし、それらを元に予測や制御を行うことにある。複雑系に関する物理学が発展し、その理論や観測方法が進歩することで、新物質の開発や新たな計測技術などの新技術につながるとともに、実社会に偏在する様々な秩序とゆらぎに潜む法則の発見や制御技術の発達を促す可能性がある。

統計物理学は伝統的に多数の要素から成る系が、少数の変数で記述でき、さらにはマクロな法則に従うことを明らかにしてきた。その成果は、現代の物質科学や情報科学、エネルギーの科学を支える基盤となっている。しかし、これらの成果は多くの場合、熱平衡系に限られており、それに比べて非平衡系の統計力学はいまだ発展途上にある。そのメインストリームの一つは、ミクロな力学を出発点にして、非平衡系への拡張を目指すものであり、近年は、ゆらぎの定理の発見など非平衡系特有のゆらぎが満たす法則が明らかになっている。また、非平衡系に特徴的な自己組織化や乱れなどの構造形成の原理とメカニズムを明らかにしようとする潮流は、現在、マイクロスケールからナノスケールの現象までその対象を広げている。また、統計力学の手法を情報の世界に適用し、大自由度系の確率ダイナミクスを扱う情報統計力学と呼ばれる分野も近年発達してきている。

これらの非平衡統計力学、あるいは非平衡物理学、さらには情報統計力学を総合した分野を「複雑系物理学」と呼ぶことにする。「複雑系物理学」は、自然界の基本的な物理法則に立脚し、物質や対象の違いを超えて、(1) 多数の要素から成る系のゆらぎや応答の従う法則を明らかにし、(2) 非平衡状態で対称性を破って現れる自己組織構造や乱れの生成原理と性質を解き明かし、それらを元に、(3) ゆらぎから情報を得る計測技術や複雑系の制御方法の開発、さらには情報処理分野における統計力学手法の応用までを視野に入れた研究分野とすることができる。その対象は、非平衡状態にある固体、液体、ガラス、ソフトマターなど様々な凝縮系物質に始まり、非平衡状態としての生命現象や、動き回る要素集団であるアクティブマターや交通流、群衆モデルにまで及んでいる。また、手法としては、ミクロレベルの記述としての力学やメゾスケールでの確率過程による記述、マクロレベルでの連続体モデルによる記述などに立脚しながら、系の

時間発展法則や統計的性質を明らかにすることが主眼となっている。そこでは、しばしば単純なモデルによる記述が実際の物質や現象と定量的にも一致し、それが物質や系の違いを超えて同じ性質を持つという普遍性とと呼ばれる現象が現れることがあり、物理的アプローチの強みが明らかとなる場合がある。以下では、複雑系物理学の最近の発展について、少し具体的に見てゆくことにする。

物質の性質を定量的に測定、分類し、特徴づけることは、物質科学の基本であり、物質の利用においては欠かせない重要なステップである。特に、電気伝導率、帯磁率、熱伝導率、粘性率などの輸送係数の同定は重要である。熱平衡のゆらぎと応答の関係を最初に明らかにしたのは、1905年の Einstein によるブラウン運動の理論であり、電気伝導に関しては、1927年に Johnson と Nyquist により、抵抗の電圧ゆらぎと抵抗値の関係が明らかにされた。これらの理論を、NMR (核磁気共鳴) 信号の解析や量子系にも適用できる形に一般化し、線形応答理論という理論にまとめたのは、久保、富田、中野、中嶋を始めとする日本の統計力学研究者達であった¹⁾。特に、Green-Kubo 公式と呼ばれる関係式は、輸送係数を決定する方法として物質科学のあらゆる場面で用いられており、特に、物質設計シミュレーションでは欠かせない方法の一つである。線形応答理論は、熱平衡の近傍でのみ成立つ関係式であり、ゆらぎは基本的にガウス分布に従う。しかし、平衡から遠く離れると、駆動力と応答の関係は非線形となり、ゆらぎも非ガウス分布となる。このような非平衡ゆらぎの研究は多方面で行われてきた。中でも、抵抗に電流を流した場合のゆらぎであるショットノイズは、電子の粒子性が現れる最も単純な非平衡ゆらぎの一つである。ショット雑音では、ファノ因子を測ることにより、電気伝導に関与する電荷の素量分かる。これを利用して、分数量子ホール効果の検証が行われ、1998年のノーベル物理学賞にもつながったことは記憶に新しい。量子ホール効果は、電気抵抗の標準(約 10 桁)などにも用いられる重要な現象である。近年では、計測技術の進歩により、これらの量子現象が単電子ナノデバイスなどでも測定可能になってきており²⁾、電流ゆらぎ一つを取っても、非平衡ゆらぎの測定が物質の基本特性を明らかにするばかりでなく、今後も新現象の検出や電気標準の革新に結びつく技術となる可能性がある。

線形応答理論を越えて、非平衡状態で現れる熱ゆらぎの性質を理論的に明らかにしようとする試みは、統計力学分野で伝統的に行われてきたが、1993年に始まる「ゆらぎの定理」の発見³⁾、1997年の Jarzynski 等式の発見⁴⁾により大きく進展した。ゆらぎが観測しやすい小さな系を対象とするため、1分子計測やナノデバイス、単電子デバイスなど、小さな系の非平衡現象を扱う上で、不可欠の理論となりつつある。具体的には、RNAの1分子をレーザーピンセットや AFM (原子間力顕微鏡) で伸張させた場合のエネルギー変化やエントロピー生成をゆらぎの分布から測定することが可能である⁵⁾。同様のことは、ブラウン粒子のレーザー操作や⁶⁾、量子干渉デバイスの非平衡ゆらぎを測定するなどの状況にも適用可能である⁷⁾。このように設定が一般的なため、様々の実験系に適用できる可能性を持っている。実際にこの理論の出現により、1分子計測でも熱測定が可能となったことは特筆すべきであろう。通常、物質の比熱や相変化に伴う自由エネルギーには、マイクロカロリーメータなどを用いるため、少なくとも数 ml 程度の物質がないと測定は不可能であるが、1分子操作における仕事のゆらぎを測定し、Jarzynski

等式を用いれば、必要な物質の量はカロリメータの 10^{20} 分の 1 程度ですむことになり、微量な生体分子を測定する方法として今後用いられる可能性がある。Einstein 関係式や Green-Kubo 公式では、ゆらぎの相関関数と応答が一致するというゆらぎ-応答関係式が成立つが、非平衡状態では一般にこの等式が破れる。Harada-Sasa (HS) 関係式は、この破れの大きさが熱散逸率に等しいことを表している。このことは、1 分子計測やナノシステムにおいて、通常の方法では測定不可能な微量の発熱やエネルギー移動、さらには熱と仕事の変換効率などの計測を可能にするという大きな意義を持っている。このような観点から、小さな系における発熱やエネルギー収支を計測する実験が Toyabe 等により行われた⁸⁾。

これらの 1 分子計測における新しい非平衡関係式を用いた熱測定技術は、今のところデモンストレーションにとどまっているが、将来的に MEMS や近接光測定、蛍光測定技術などと組み合わせることで、同時に複数の分子を操作できれば、多種の分子を同時並行かつ大量に熱計測できる大きな可能性を秘めている。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・複雑系の物理を物質科学や工学に応用するためには、非平衡現象に関連したダイナミクスの理解、分岐理論や非線形動力学、非平衡の熱統計力学、非平衡相転移など基礎科学の十分な発展と理解が必要である。物質科学への応用には、非平衡輸送現象に関する理解を深化させ、電気的応答、磁氣的応答、構造形成や構造変化に関する知見として、連続体の弾性変形、塑性変形、破壊力学、欠陥の動力学などに分岐理論や秩序形成の理論を拡張して適用できる可能性がある。
- ・欧米では、複雑系科学を目的とした研究機関が多いため、基礎研究から応用研究までを見通して研究体制を整備したり、新しい研究動向が把握しやすい環境にある。複雑系科学に携わる研究者や研究グループが、世界の動向を迅速に知り的確に研究が展開できるよう、日本でも新たな研究所の創設が望まれる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・文部科学省の新学術領域研究 (研究領域提案型) では、「ソフトインターフェースの分子科学」(H20-H24)、「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」(H22-H26)、「感覚と知能を備えた分子ロボットの創成」(H24-H28)、「ゆらぎと構造の協奏: 非平衡系における普遍法則の確立」(H25-H29)、「生命分子システムにおける動的秩序形成と高次機能発現」(H25-H29) など、凝縮系物質や超分子集合体、生命を模倣した分子システムやロボットに至るまでを非平衡ダイナミクスや自己組織化の観点から理解し、実現しようとする大規模な共同研究プロジェクトが続けて採択され、ファンディングが加速するとともに、この分野の裾野が拡大しつつある。
- ・物理現象には量子限界、熱力学的限界などの様々の限界が存在する。これらの限界は、測定や標準の精度限界や、熱機関の効率の限界、物質の冷却限界、計算における最小発熱などを決めているが、これらの限界が本質的な限界であるのか、新しい技術で限界を破ることができるのかは、常に物理学者の議論の的となってきた。情報の世界で

- は、類似の概念として、通信路容量の上限を決める Shannon 限界や計算量理論における P/NP 問題などがある。近年、これらの理論的限界に関する理解が進み、限界に近い状態を有限時間で近似的に実現する技術や、操作的方法や新技術によって克服できる可能性が見えてきている。熱力学第二法則に関する Maxwell demon や計算の発熱限界に関する Landauer 原理をより精密に議論することを可能にした情報熱力学は、測定とフィードバックにより部分系ではこの限界が破れることを明らかにした^{9, 10)}。
- MRI や AFM (原子間力顕微鏡)、レーザーピンセットのデータ処理と解析には、熱ゆらぎによる揺動と散逸の関係を表す揺動散逸定理が使われている。通常は、熱雑音や量子ゆらぎが測定の限界を与えている。これに対して、古典ゆらぎに関しては、ゆらぎを測定し、フィードバックによりノイズを低減する方式が提案されている。例えば、加速器に於ける Stochastic Cooling 法¹¹⁾は、ゆらぎ情報のフィードバックによる冷却である。ちなみにこの実験手法は、1984 年のノーベル物理学賞のウィークボソンの発見につながったとされている。量子系では、レーザー冷却などが原子のゆらぎ情報に応じた制御を行っており、同様の技術として捉えることができる。
 - 2014 年の数学のフィールズ賞は、Hairer Martin の確率微分方程式の研究に与えられた。これは、成長するランダム界面の方程式である KPZ (Kardar-Parisi-Zhang) 方程式の厳密解の研究が近年急速に進んだことと、液晶の実験においてそれを検証する結果が得られたことに大きく影響を受けているとされている^{12, 13)}。
 - コロイド結晶は、フォトニック結晶の製作方法などに応用されているが、近年はコロイド粒子の一つ一つに構造の異方性や極性を導入することで、より複雑な構造を自己組織化する試みが行われている。オランダ、ユトリヒト大学の Soft Condensed Matter Group や、ニューヨーク大学の Center for Soft Matter Research では、新たな異方性コロイドの製作方法の開発が行われ、それらを用いたコロイド結晶やコロイド膜などの作成が試みられている。
 - バイオミメティック材料の開発において、ナノスケールからマイクロスケールの領域で構造を自己組織化することで、超撥水、構造色、サメ肌、イモリの粘着毛を模した材料の開発が行われている。
 - ImPACT 「しなやかなタフポリマー」のプログラム・マネージャー伊藤耕三等の環動ゲル、片岡一則のドラッグデリバリーシステム (DDS) における高分子ミセルは、いずれもソフトマターの自己組織化原理を用いた機能性高分子の製造方法である。
 - 世界的には、非平衡効果の産業応用も活発化している。ドイツでは、非平衡クロス効果の一種であるソーレ効果を利用して、高感度の生体分子認識や医療検査に使える計測器のベンチャービジネス (Nano Temper Technology) が立ち上がり、具体的成果をあげつつあるほか、ノルウェイでは、海水と真水を利用した浸透圧発電の実用化試験が行われ、フランスでも浸透圧発電を目指したナノチューブを用いた新しい半透膜の開発が始まっている¹⁴⁻¹⁷⁾。
 - 多くの境界領域分野で、ナノスケールからマイクロスケールまでの物理、化学現象を階層的に取り入れたマルチスケール、マルチフィジクスモデリングが実用化されつつある。
 - 世界的に、アクティブマターと呼ばれる研究分野が大きく成長しつつある。これは、

自己駆動コロイドや生体分子モーター、運動する細胞集団、昆虫や鳥、魚の群れに至るまで自ら動く粒子集団の振る舞いを理論・実験の両面から明らかにする研究であり、物理、化学、生物、工学など多くの分野の研究者を巻き込んで研究が開始されており、関連した国際会議や論文の数も急激に上昇している。ここでも、統計物理モデルが実際の系の本質を良く表していることが明らかになりつつある¹⁸⁻²⁰⁾。

- CG の物理シミュレーションでは、自由界面や分裂、合流する複雑な流体シミュレーションに物理保存則を満たしつつ、境界条件の扱いが容易な SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) モデルが多用されるようになってきている。
- Craig Reynolds が提案した BOID モデルは、単純なアルゴリズムにより、生物集団の動きを自然に近い形で再現することに成功した。このモデルは、バットマンやジュラシックパークなどの映画における CG 自動作成などで使用され、今日の CG の基礎となっている。
- スパースモデリングや圧縮センシングは、大規模データから少数の変数で記述できるモデルを抽出したり、少ないデータから背後にある本質的な構造を抽出する手法であるが、この解法には情報統計力学の手法が使われており、現在研究が活発化している。こうした研究は MRI や NMR の検査時間短縮、さらには宇宙探査データや生命情報などの解析にも効果的と考えられている。
- 情報統計力学手法を用いた情報ネットワークの性能評価、アルゴリズム開発が進められている。例えば、携帯電話、スマートフォンなどの通信機器に用いられている CDMA (Code-Division Multiple Access) などのスペクトラム拡散通信方式において、多数のユーザーの通信データを正しく復号化する問題では、NP 完全問題とも関係して、有限時間で解を見いだす近似アルゴリズムなどが使用されている。そのため理論的な性能限界などの性能評価が欠かせない。情報統計力学では、ベイズ推定の一種である MAP (Maximum A Posteriori) 法や MPM (Marginal Posterior Mode) 法などを用いて信号の推定を行い、レプリカ法などを用いてこれらの性能評価を理論的に行うことができる。
- ゆらぎから秩序を形成する原理として、物理系における自由エネルギーの最小化や、情報分野における評価関数の最小化などがあるが、これらに関連した多体問題の解を求めることが必要な場面が多く存在する。タンパク質フォールディング問題などにおいては、マルチカノニカル法やレプリカ交換法などが効率的に基底状態を求めるアルゴリズムとして使われている。また、ベイズ推定などの様々の統計的推定では、求める統計分布のサンプリングを行うため、マルコフチェーンモンテカルロ法 (MCMC 法) などが使われている。散逸系でアトラクターが存在する場合やポテンシャルの最小化問題では、シミュレーテッドアニーリング法が広く用いられており、最近では、量子アニーリング法などが世界初の実用的量子コンピュータである D-Wave にも採用されている²¹⁾。
- ネットワーク科学は、物理学者の A. Barabási 等により創設されたが、フラクタルやスケール不変性などの自然現象に見られる概念をインターネット空間やタンパク質の相互作用などあらゆる種類のネットワークに普遍的に見られる構造に着目することで、分野の境界を越えて拡大しつつある分野である。

- ・アクティブマターの研究は、鳥や魚の群れのモデルとして出発したが、現在では分子モーターや自己駆動するコロイド粒子、細胞集団の運動など広範な現象の普遍的な性質を扱う分野に拡大しつつある。数理科学分野では Crowd Dynamics の用語で呼ばれ、人間や動物の群集ダイナミクスの数理モデルを扱う分野と関連している。また、情報科学との関連では、群れ運動や Crowd Dynamics は、集合知や Decision Making の問題とも関連している。
- ・欧州の ERC (European Research Council) の Advanced Grant (AdG) で Critical Phenomena in Random Systems や、Complex structure and dynamics of collective motion、The Physics of Active Particle Suspensions などの大型予算が採択され、FP7 の International Research Staff Exchange Scheme (IRSES) では、SoftActive—Non-equilibrium dynamics of soft and active matter が採択され、仏独日の交換プログラムがスタートするなど、複雑系物理学に関するファンディングが行われている。

(6) キーワード

複雑系、複雑系物理学、統計力学モデル、熱力学第二法則、非平衡ゆらぎ、自己組織化、力学系、非線形科学、非平衡ソフトマター、アクティブマター

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学電子科学研究所、同大学院工学研究科応用物理学専攻、東北大学大学院理学研究科物理学専攻、同情報科学研究科応用情報科学専攻、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻、同総合文化研究科、東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻、同総合理工学研究科知能システム科学専攻、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻、同情報学研究科複雑系科学専攻、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻、広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻、九州大学大学院理学研究院物理学部門、早稲田大学先進理工学部、中央大学理工学部物理学科、明治大学先端数理科学インスティテュートなどで、複雑系の物理と関係した教育・研究が行われている。 ・科学研究費補助金の新学術領域研究で「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」(H25~H29)が発足し、非平衡系の統計力学の観点からソフトマター、量子凝縮系、生命機能に関する研究が展開されている。また、「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」(H25~H29)では、情報統計力学の研究が展開されている。 ・JST さきがけ事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」では、多くの若手の物理系研究者が採択され成果をあげた。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・産業技術総合研究所ナノシステム研究部門では、複雑系物理・化学に基づく非平衡材料やナノシステムへの応用研究が行われている。 ・「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)において物理と数学の材料科学への応用や自己組織化原理に基づくバイオメタリック材料の研究が行われている。 ・北海道大学大学院先端生命科学研究院先端融合科学研究部門、山形大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻、東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻などで、複雑系物理のソフトマターへの応用研究が行われている。 ・JSTのImPACTプログラムで「超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現」(伊藤耕三プログラム・マネージャー)が採択され、非平衡科学や自己組織化の応用開発が開始されている。 ・東京大学の片岡一則等が開発している抗がん剤などのドラッグデリバリーシステムは、高分子PEGを用いた高分子ミセルの自己集合効果を応用した技術である。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 株式会社豊田中央研究所、株式会社ブリヂストン、花王株式会社などで、自己組織化に基づくソフトマターの産業化研究が行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国の多くの大学で、統計力学、ソフトマター、生物物理学の基礎研究が展開されるとともに、Santa Fe Institute や Los Alamos National Laboratory、Rockefeller大学、Princeton大学などでは、物理、生物の分野融合により世界をリードする複雑系科学の研究が展開されている。 プリンストン高等研究所では、新たに理論生物学のグループを立ち上げ、S. Leibler、A. Libchaber、Simon Levinなどの有力な物理学者が核となり研究を展開している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> D-Wave Systems, Inc.は、東工大の西森秀稔等の提案した量子アニーリングの原理を使用して、量子コンピュータの開発を行っている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> CGにおいて物理法則に従い運動する物体や流体、生物の群れなどの生成アルゴリズムは、物理運動シミュレーションと呼ばれ広く普及している。 Wolfram社の商用ソフトウェアMathematicaは、物理学者であったS. Wolframが開発し、世界的に普及している数式処理システムである。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは、複雑系関連の研究施設がMax Planck Institute (MPI)の中に少なくとも4つ存在し、欧州を代表する複雑系研究が行われている。MPI for the Physics of Complex Systems (Dresden)、MPI for Dynamics and Self-Organization (Göttingen)、MPI for Dynamics of Complex Technical Systems (Magdeburg)、MPI for Polymer Research (Mainz)などで、物理学をベースに流体科学、非線形動力学、システム生物学、ソフトマターなどの複雑系の研究が大規模に行われている。 ドイツのFritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (Berlin)では、G. Ertl (2007年ノーベル化学賞)によって創始されたグループが化学反応拡散系に関する実験と理論研究を行っている。また、国立研究所Forschungszentrum Jülichには、Institute of Complex Systemsが設置されており、理論と実験グループがそれぞれソフトマターと生物物理の複雑系研究を展開している。 フランスは、数学、物理、生物学などの基礎科学に強い伝統を有し、それらを融合した分野として、アクティブマターや非線形動力学の研究が精力的に行われている。 英国は数理、物理、生物学のレベルが高く、生物流体の研究が精力的に行われている。 ドイツ科学財団 (DFG) による大型共同研究プロジェクトであるSFB (Sonderforschungsbereich) で“Physics of Colloidal Dispersions in External Fields” (SFB, TR 6, 2002-2013) が採択・実施され、ドイツ、オランダを中心としてコロイドの自己組織化と非平衡科学の基礎研究が大規模に行われた。 DFGによるPriority Programme “Microswimmers – From Single Particle Motion to Collective Behaviour” (SPP 1726, 2014-2016) が採択され、ドイツ国内での大規模な共同研究と教育研究が推進されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 欧州では、エネルギー問題に対する理論研究者の関心も高く、海水と真水を利用した浸透圧発電などのブルーエナジーにも関心が高まっており、ノルウェイで実用化試験が行われたほか¹⁴⁾、フランスでもナノチューブで起こる非平衡現象を利用した新しい半透膜の開発も始まっている¹⁵⁾。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは、非平衡クロス効果の一種であるソーレ効果を利用して、高感度の生体分子認識や医療検査に使える計測器のベンチャービジネス (Nano Temper Technology) が立ち上がり、具体的成果をあげつつある^{16), 17)}。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 北京大学、上海交通大学、復旦大学、中国科学アカデミーの物理学研究所などで、複雑系物理学の基礎研究が行われている。 中国の計算科学分野の中心的研究所であるBeijing Computational Science CenterのComplex Systems Divisionでは、統計力学に基づいた複雑系物理学の研究が行われている。 中国は1000 Talents Planにより海外から有力な研究者を呼寄せている。その一貫として、北京大学には、Center for Quantitative Biology、Center for Theoretical Biologyなどの研究所が新設され、物理学手法による定量生物学研究が開始された。 アクティブマターの研究は最近、中国政府が関心を寄せており、これらを対象とした研究が今後増えていくと期待される。

	応用研究・開発	○	↗	・国家自然科学基金委員会の2014年の重点研究 ²²⁾ として、「高性能科学技術計算と計算可能モデリング」が取り上げられ、非定常の流体運動や大気現象に関する研究が重点化されている。
	産業化	×	→	・特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	・ドイツ Max Planck Institute を目指して、Institute for Basic Science では、すでに10以上の研究センターが新設されている。その中で、Center for Theoretical Physics of Complex Systems、Center for Self-assembly and Complexity、Center for Soft and Living Matter などでは、複雑系物理学の観点から研究を行っている ²³⁾ 。 ・アメリカとの交流が盛んであり、ネットワーク科学の研究者数が多い。
	応用研究・開発	○	→	・サムソンは、医療技術や医薬産業に多くの投資を開始している。
	産業化	×	→	・特筆すべき活動・成果は見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 中島貞雄. 線形応答理論の成立. 日本物理学会誌. 1996, vol. 51, no. 10, p. 699-705.
- 2) Sela E.; Oreg, Y.; Oppen, F.; Koch, J. Fractional shot noise in the Kondo regime. Phys. Rev. Lett. 2006, vol. 97, 086601.
- 3) Evans, D. J.; Cohen, E. G. D.; Morriss, G. P. Probability of second law violations in shearing steady states. Phys. Rev. Lett. 1993, vol. 71, p. 2401.
- 4) Jarzynski, C. Nonequilibrium Equality for Free Energy Differences. Phys. Rev. Lett. 1997, vol. 78, p. 2690.
- 5) Liphardt, J. et al. Equilibrium Information from Nonequilibrium Measurements in an Experimental Test of Jarzynski's Equality. Science. 2002, vol. 296, no. 5574, p. 1832-1835.
- 6) Wang, G. M. et al. Experimental Demonstration of Violations of the Second Law of Thermodynamics for Small Systems and Short Time Scales. Phys. Rev. Lett. 2002, vol. 89, 050601.
- 7) Nakamura, S. et al. Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 080602.
- 8) Toyabe, S. et al. Nonequilibrium Energetics of a Single F1-ATPase Molecule. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 198103.
- 9) Sagawa, T.; Ueda, M. Minimal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure. Phys. Rev. Lett. 2009, vol. 102, 250602.; Sagawa, T.; Ueda, M. Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 090602.

- 10) Toyabe, S.; Sagawa, T.; Ueda, M.; Muneyuki, E.; Sano, M. Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Physics*. 2010, vol. 6, p. 988-992.
- 11) Möhl, D.; Petrucci, G.; Thorndahl, L.; van der Meer, S. Physics and technique of stochastic cooling. *Physics Reports*. 1980, vol. 58, p.73-102.
- 12) 舟木直久. フィールズ賞業績紹介 : ハイラー. 数学セミナー. 2015, 1月号.
- 13) Takeuchi, K. A.; Sano, M. Universal Fluctuations of Growing Interfaces: Evidence in Turbulent Liquid Crystals. *Phys. Rev. Lett.* 2010, vol. 104, 230601.
- 14) <http://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/>
- 15) Siria, A.; Poncharal, P.; Bianco, A. L.; Fulcrand, R.; Blase, X.; Purcell, S. T.; Bocquet, L. Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube. *Nature*. 2013, vol. 494 no. 7438, p455-458.
- 16) Baaske, P.; Wienken, C. J.; Reineck, P.; Duhr, S.; Braun, D. Optical Thermophoresis for Quantifying the Buffer Dependence of Aptamer Binding. *Angewandte Chemie*. 2010, vol. 49, p. 2238-2241.
- 17) <http://www.nanotemper-technologies.com/>
- 18) Ramaswamy, S. The Mechanics and Statistics of Active Matter. *Annual Review of Condensed Matter Physics*. 2010, vol. 1, p. 323-345.
- 19) Vicsek, T.; Zafeiris, A. Collective motion. *Physics Reports*. 2012, vol. 517, p. 71-140.
- 20) Marchetti, M. C. et al. Hydrodynamics of soft active matter. *Rev. Mod. Phys.* 2013, vol. 85, p. 1143.
- 21) Kadowaki, T.; Nishimori, H. Quantum annealing in the transverse Ising model. *Phys. Rev. E*. 1998, vol. 58, p. 5355.
- 22) 国家自然科学基金委員会, 2014年重大研究計画項目.
<http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2014xmzn/07/index.html>
- 23) <http://www.ibs.re.kr/eng.do>

3.5.5 複雑系数理モデル学

(1) 研究開発領域名

複雑系数理モデル学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

複雑系を解析するための数理モデリングとその数理解析手法の研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系は、一般に多種多様な非線形要素が非線形相互作用するシステムであり、要素群と全体の間には階層的フィードバックを生じる。したがって、要素還元論的理解も全体還元論的理解も、どちらか一方だけでは複雑系を理解するためには不十分である。

このような複雑系に対しては、数理モデルによる研究手法が有効である。すなわち、非線形要素および要素間の非線形相互作用をモデル化して数学的に複雑系を構成し、その数理モデルを理論的に解析することにより、複雑系を理解しようという方法論であり、「構成（もしくは、合成）による解析（analysis by synthesis）」と呼ばれる。この「構成による解析」という研究手法自体は、多種多様な構成要素を組み合わせることで複雑なシステムを構築することが不可欠な工学分野で早い時期に発想されたものと思われるが、特に数理モデルによる「構成による解析」は様々な問題で大きな効果を発揮するため、科学技術はもとより人文科学、社会科学を含めて多くの研究領域で活用されている。このように、多様な複雑系を数理モデル化して数理的に解析する研究分野を「複雑系数理モデル学」と呼ぶ。「複雑系数理モデル学」は、様々な構成要素から成る複雑システムの数理モデルを、(1) ネットワーク構造と最適化機能に関わる複雑ネットワーク理論、(2) ダイナミクスと制御機能に関わる複雑系制御理論および(3) 観測ビッグデータと予測機能に関わる非線形データ解析理論の3つの基礎理論から成る理論的プラットフォームに立脚して、構築・設計し解析することを可能にしている¹⁾。

複雑系においては、要素→要素間の相互作用→全体→さらに要素へのフィードバックという階層的フィードバックを生じるので、その数理モデリングにおいては、要素、要素間の相互作用、全体という3つの階層に留意する必要がある。上記の理論的プラットフォームを活用する場合にも、この3つの階層を考慮することが不可欠である。たとえば、(1) 複雑ネットワーク理論は、複雑系の構造という観点では3つの階層の中間レベルの「要素間の相互作用」のモデル化と最も密接に関係するが、どのような要素を想定するかといった要素レベルの問題、さらには全体を考えた最適化などの全体レベルの問題を考慮することも必要となる。同様に、(2) 複雑系制御理論は、たとえば、交通流制御のように渋滞低減を全体レベルの目標として定め、各要素である車両に対して、その相互作用を道路網というネットワーク構造上でモデル化した制御問題を取り扱う。一方、(3) 非線形データ解析理論は、要素レベルのデータ解析のみではなく、要素間の相互作用によるネットワーク構造の観測データに基づいた構造推定や、脳から計測した脳波、脳磁界データ、脳画像の解析や生物の行動データ解析のように複雑系の全体レベルの問題も取り扱う。

「複雑系数理モデル学」は、「自然の書物は数学の言語によって書かれている」とい

う意味の言葉を述べたと伝えられるガリレオ・ガリレイの思想を、複雑系を対象にして現代の科学技術に適用するものである。その基盤となる物理現象を超えた様々な実現現象の数理モデル研究は、特にわが国で精力的に開発されてきたものである。まず、第2次世界対戦後にGHQによって東京大学工学部航空学科が廃止されたことがひとつの契機となって、東京大学工学部で生まれた「数理工学」²⁾がある。また最近では、三村昌泰によって提唱された「現象数理学」³⁾が同様の方向を指向している。数理工学や現象数理学においては、様々な実現現象を数理モデルで記述し、その数理モデルを数学的に研究する。端的に言えば、複雑系数理モデル学は、複雑現象や複雑システムを対象にして数理工学や現象数理学の観点から研究する学問の総称である。

歴史的には、複雑系数理モデル学の重要な背景となったのは、1948年に出版されたW. Weaverの論文である⁴⁾。Weaverはこの論文の中で、17世紀以降の自然科学研究を、以下の3つに分類した。

- ① 17世紀から19世紀にかけて主として行われた、少数変数の決定論的法則を研究する「単純さの問題」(Problems of Simplicity)。
- ② 1900年前後から行なわれた、無数の変数からなる系の平均的挙動の確率・統計的法則を研究する「組織されない複雑さの問題」(Problems of Disorganized Complexity)。
- ③ この論文が出版された1948年の時点において今後本格的に研究すべき問題として挙げられた「組織された複雑さの問題」(Problems of Organized Complexity)。

この③の「組織された複雑さの問題」が、今日的意味での複雑系の研究に対応している。Weaverは、その具体例として、生命システム、経済システム、社会システムなどを上げるとともに、その研究のためには、第2次世界大戦中に開発が加速された電子計算機が重要な役割をはたすだろうと述べている。

実際、複雑系数理モデル学にとって、コンピュータの貢献は極めて大きい。なぜならば、複雑系は多くの場合大規模な非線形システムとして記述され、数学的な解析には大きな困難を伴うため、近似的数値計算やシミュレーションが本質的に重要な役割を果たすからである。

このこととも深く関係するが、数理モデル学のパラダイムの変遷は以下の3つに大別することができる。

- ① ニュートン・パラダイム (17世紀～19世紀) : 数理モデルもその解もともに式で表現する研究。
- ② ポアンカレ-ルンゲ-クッタ・パラダイム (1900年前後) : ポアンカレによる幾何学的・定性的解析、たとえば、「システムは安定か?」、「時間が経過するにつれて、周期的状態へ漸近するか?」、「パラメータ値が変化した時、解の力学構造がどのように変化するか?」といった問題を、解の式自体は明示することなく解析する研究(ただし、数理モデルの式は与えられる)、およびルンゲやクッタによって始められた、数値計算によって式が与えられた数理モデルの解を近似的に求める研究。
- ③ アルゴリズム的モデリング・パラダイム (1981年以降) : 数理モデルも解もともに、力学系の埋め込み定理に基づいて、コンピュータを用いてデータからアルゴ

リズムとして近似的に構成する研究。

この③のアルゴリズム的モデリング・パラダイムは、コンピュータの高性能化とビッグデータの集積によってはじめて本格的活用が可能になったものであり、第一原理からのモデル化が難しい複雑系研究にとって不可欠な手法になりつつある。特に最近のビッグデータ研究の活発化によって、今後益々重要になることが予想される。

複雑系数理モデル学の研究は、米国では Santa Fe Institute、欧州では Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems などを中心に行われている。さらに、米国には、複雑系全般を研究対象とする教育・研究機関が数多くあり、複雑系を対象とする国際学会や専門学術誌も豊富である。大学と企業の産学連携も盛んであるため、実社会に役立つ複雑系研究も活発に行われている。また、欧州にも、複雑系を謳う研究センターが数多く存在し、欧州各国の複雑系の研究機関の連携を促進するグループが形成されている⁵⁾。また、複雑系に関する国際会議 (ECCS) が毎年行われており、最新の研究が発表される⁶⁾。さらに、複雑系科学における研究・教育を促進し、研究・高等教育機関をつなぐ国際的なネットワークの設立を目的として、UNESCO UniTwin network for a Complex Systems Digital Campus⁷⁾のプログラムが2013年8月より開始されている。アフリカや中南米諸国を含めて、多くの国 (Algeria, Argentina, Belgium, Brazil, Cameroon, Chile, Colombia, Cuba, France, Germany, India, Israel, Italy, 日本, Lebanon, Mexico, Morocco, Mozambique, Peru, Poland, Portugal, Senegal, Spain, Switzerland, 台湾, Tunisia, 英国, Venezuela) の大学や研究所が参加している。中国や韓国などのアジア諸国には、まだ大きな存在感のある複雑系の教育・研究機関は見られない。

わが国では、複雑系数理モデル学に関係の深い研究として、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (ERATO)⁸⁾において、山本量子ゆらぎプロジェクト⁹⁾、今井量子計算機構プロジェクト¹⁰⁾、合原複雑系数理モデルプロジェクト¹¹⁾、金子複雑系生命プロジェクト¹²⁾、湊離散構造処理系プロジェクト¹³⁾、河原林巨大グラフプロジェクト¹⁴⁾などが、また内閣府/日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラム (FIRST)¹⁵⁾として、情報エネルギー生成基盤プロジェクト¹⁶⁾、量子情報処理プロジェクト¹⁷⁾、最先端数理モデルプロジェクト¹⁸⁾などが行われた。また、「世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)¹⁹⁾および東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)²⁰⁾において数学をベースとした研究が行われている。特に、平成15年度から20年度まで行われた科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 ERATO 合原複雑系数理モデルプロジェクト¹¹⁾および平成21年度から25年度まで行われた FIRST 最先端数理モデルプロジェクト¹⁸⁾において、複雑系数理モデル学が体系化された。これらのプロジェクトでは、複雑系を対象とする様々な基礎的モデリング・解析手法が開発されると共に、幅広い分野への応用研究が行われた。基礎理論では、それまで独自に発展してきた力学系理論と制御理論を融合して複雑系制御理論が構築され、たとえば両理論の概念を組み合わせたロバスト分岐という新しい概念が生み出された。また、複雑ネットワーク理論、非線形力学系理論、非線形データ解析などの異なる手法を組み合わせた研究が大きく進展した。たとえば、新しく提案された動的ネットワークバイオマーカーは、サンプル数の少ない遺伝子やタンパク質の大規模発現

データから疾病前状態（未病）を同定する新しい理論で、疾病の早期診断や病態悪化の予兆検出に応用できることが示された。この理論は、適用条件を満たせば、疾病以外の複雑ネットワーク不安定化の予兆検出に広く応用できると見込まれ、今後の水平展開が期待されている。

さらに、北海道大学数学連携研究センター、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学複雑生命システム動態研究教育拠点、統計数理研究所、明治大学現象数理学研究拠点、明治大学先端数理科学インスティテュート、九州大学マス・フォア・インダストリー研究所などで複雑系の数理モデルが活発に研究されてきている。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・ 複雑系の数理モデル化のためには、構成要素の数理モデル化とその相互作用の数理モデル化の両方が必要である。特に、複雑系に固有な要素還元論的理解も全体還元論的理解も単独では不可能な性質が、その数理モデル化をチャレンジングなものとしている。また、生命システム、経済システム、社会システムなど第一原理がいまだあきらかではない対象が多いので、数理モデル化に際しては、定性的数理モデルから定量的数理モデルまで様々なスペクトラムの数理モデルの構築が可能であるため、どのような目的でどのレベルで数理モデル化するかを十分に検討することが求められる。さらに、複雑系数理モデル学は広範囲の実現象を対象とするため、数理モデルの理論解析のためには、既存の数理解析手法のみでは不十分である。したがって、数理モデル化のみではなく得られた数理モデルの理論解析手法の開発も同じく重要である。
- ・ 一般に複雑系の数理モデルは大規模な非線形システムになるため、数値計算やシミュレーションの計算量は大きい。また、力学系の埋め込み定理に基づいてデータからのアルゴリズム的数理モデリングを行う際にも、ビッグデータを活用する場合はやはり計算量が問題になる。特に、GPS データやスマートグリッドなどを用いた、人間関係のネットワークや需要者側をも取り込んだ電力システムの数理モデル化に際しては、個人情報への取扱いに十分注意した上で行う必要がある。
- ・ 上記とも関連するが、通信情報、地理空間情報、生体計測情報、人間行動情報などのビッグデータが計測可能になってきており、それらを用いて複雑現象の数理モデリングを行うことが期待されている。しかし、そのような対象を扱うには、一般に高次元のシステムや大量の未知パラメータが必要となる。アルゴリズムと計算資源があれば機械学習の手法によってシステム同定は可能であるが、そのようなアプローチではシステムの本質を理解することは困難である。ビッグデータ解析においても求められていることであるが、情報の取捨選択に関する方法論を確立することは、複雑系数理モデル学にとって重要な課題である。
- ・ 地震、異常気象、感染症流行、発病などは、社会的にきわめて重要な現象であるが、1 回性の高い極端な事象であるため、その推定や予測を行うことが困難である。それらを目的とする数理的技術を改良していくことは、災害予防や疾病予防に大きく貢献すると考えられる。
- ・ スマートフォンや携帯デバイスの発達により人間の社会活動に関するデータが取得

できるようになってきたことを受けて、社会科学や心理学の研究対象だった複雑現象が数理モデリングの対象になってきている。流行現象や意見形成の数理モデルは産業界においてマーケティング戦略に、暴動や社会体制の変化などの数理モデル解析は社会現象の理解に、それぞれ貢献している。今後は、実用性の高いモデリング技術の発展が期待される。将来的には、適用範囲がさらに広がり、法学や政治学に関連する現象の数理モデリングも行われる可能性がある。

- ・数理モデルと実現象との間には、必ずモデル化誤差を生じる。複雑系においては要素と全体の間での階層的フィードバックが循環するため、このモデル化誤差が大きな影響を与える可能性がある。このことが、複雑系の数理モデル化の難しさの一つの要因となっている。この解決に向けて、ロバスト分岐解析理論のように数理モデルの不確かさを力学系理論に取り込むことが重要であろう。
- ・複雑系数理モデル学を実際の現象や問題に応用するには、異分野の研究者との対話と連携が重要である。したがって、数理モデリングの研究者にとっては、異分野の知識を身に着けることや、複雑系数理モデリングの技術的な面を非専門家にわかり易く伝えることが必要となるが、そのような訓練を行う教育現場が不足している。
- ・欧米では、複雑系科学を軸とした研究機関が多いため、日常的に新しいプロジェクトの発足や研究動向が把握しやすい環境にある。数理モデリングに携わる研究者や研究グループが、全世界の社会的重要な課題を敏感に察知できるような体制作りが望まれる。また、日本と諸外国の研究機関の連携もさらに進める必要がある。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・我が国の「第4期科学技術基本計画」(平成23年8月19日閣議決定)において、「数理科学」を、「科学技術の共通基盤」、「複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術」と位置付け、それに関する研究開発を推進することが明記された。2014年度には、科学技術振興機構のCREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」²¹⁾と同さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」²²⁾、さらには内閣府・革新的研究開発プログラムImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」²³⁾、厚生労働科学研究委託費・新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発研究事業「感染症対策及び予防接種行政に資する数理疫学研究」などがあらたに発足し、この分野のファンディングが活発化している。
- ・米国のブレインイニシアチブ²⁴⁾やHuman Connectome Project²⁵⁾、また欧州のHuman Brain Project²⁶⁾には巨額の予算が投じられている。多方面から脳の基礎的な仕組みを理解し、それを疾病の予防や治療、また脳型計算へと応用する研究が行われている。その一端として、脳の数理モデリングと解析技術の発展が期待されている。
- ・高品質のデータの再利用を目的とする学術雑誌Nature Scientific Dataが2014年に創刊され、複雑系の数理モデリングに役立つデータがオープンに使用可能になっていくと期待される。
- ・米国のJames S. McDonnell Foundationでは、2014年から複雑システム研究に対する競争的資金の提供を行っている²⁷⁾。

(6) キーワード

複雑系、複雑系科学、数理モデル、力学系、数理工学、現象数理学、非線形科学、複雑ネットワーク、複雑系制御理論、非線形データ解析

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 公立はこだて未来大学システム情報科学部複雑系知能学科、東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻、京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻、名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻などで、複雑系の数理モデルと関係した教育・研究が行われている。 内閣府最先端数理モデルプロジェクト（平成21-25年度）が実施され、複雑系数理モデル学の基礎理論研究が行われた。また、複雑系数理モデル学を様々な社会的重要な課題に応用した。さらに、日本科学未来館常設展示「1たす1が2じゃない世界—数理モデルのすすめ」で、複雑系数理モデル学のアウトリーチ活動が行われて約20万人が来場した。 JST戦略的創造研究推進事業CREST「現代の数理学と連携するモデリング手法の構築」および、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」が2014年度に発足した。社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築を目指すものである。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）¹⁹⁾および東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）²⁰⁾において数学をベースとした研究が行われている。 北海道大学数学連携研究センター、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学複雑生命システム動態研究教育拠点、統計数理研究所、明治大学現象数理学研究拠点、明治大学先端数理科学インスティテュート、九州大学マス・フォア・インダストリー研究所などで、複雑系数理モデル学の様々な分野への応用研究が行われている。 前立腺がんをはじめとする疾病のバイオマーカー値から数理モデルに基づいて患者個々の病状推定や予後予測を行う基礎技術が確立され、プロトタイプとなるソフトウェアが開発されている。 渋滞学という新しい数理モデルベースの研究分野が創成されており、渋滞解消などを通じて交通システムの効率化に応用されようとしている。 地震の予測や災害に強いインフラの設計に応用できる数理モデル研究に注目が集まっている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> トヨタ自動車株式会社、新日鐵住金株式会社、旭硝子株式会社などで、複雑系数理モデル学の最先端産業化研究が行われている。 ネット広告の投資効果予測に数理モデルを活用する研究が企業等において活発に行われている。 文科省・科学技術試験研究委託事業「数学・数理学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」において、さまざまな産業分野の複雑数理モデル研究に関する研究会が行われている。

米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • Santa Fe Institute や Los Alamos National Laboratory で、世界をリードする複雑科学の研究が行われており、数理モデリングも重要な役割を果たしている。 • オバマ大統領のBRAINイニシアチブ中間報告において、NIHは本研究領域に対して2014年に40億円の研究費を投じることを期待、その重点領域の一つとして、モデリング学、統計学、計算論などと脳実験の融合を掲げている⁵⁾。 • 脳の数理モデルとそのロボティクスへの応用研究に関して世界をリードしている。 • ブログやツイッターなどのソーシャルメディアのデータから人の社会行動（民主化運動の広まりなど）、会話やメールを通じた人のコミュニケーションの特徴、文化の発達などの数理モデルを構築する研究が精力的に行われている。 • NSFやNIHが癌研究に多くの予算を投じており、医療応用を目指した腫瘍成長の数理モデリングが広く行われている。 • 分子生物学とバイオインフォマティクスの進展を受けて、システム生物学において遺伝子・タンパク質ネットワークおよび細胞・免疫系の数理モデリングが盛んに行われ、医薬・医療への応用を目指して資金的にも力を入れている²⁸⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • New England Complex Systems Institute において、複雑系数理モデル学の応用研究が行われている。 • 力学系モデルを解析するフリーソフトウェアAUTOが世界的に普及している。 • 企業の研究所や海軍などでも最先端の数理モデル技術を用いたアルゴリズムの開発やシミュレータの開発が盛んに行われている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • D-Wave Systems, Inc. (拠点はカナダ) は、NASA や Google と共同で量子コンピュータを開発している。 • 米 IBM は、ヒトの脳の情報処理機構を模倣した半導体技術を開発している。 • 多くのIT企業、製造業、金融機関などで数理モデルが開発されソフトウェア等の形で実用化されている。 • Mathwork社の商用ソフトウェアMatlabは世界的に科学技術計算に広く用いられ、信号処理システム等のモデリングに便利なSimulinkというツールを備えている。 • Wolfram社の商用ソフトウェアMathematicaは世界的に普及している数式処理システムである。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • 複雑系科学における研究・教育を促進し、研究・高等教育機関をつなぐ国際的なネットワークの設立を目的として、UNESCO UniTwin-Complex Systems Digital Campus が 2013年 8月に発足した。 • ドイツのMax Planck Institute for the Physics of Complex Systems やフランスの国立科学研究センター (CNRS) において、ヨーロッパを代表する複雑系科学の研究が行われており、数理モデリングも重要な役割を果たしている。 • 各国の数理モデル研究者の交流が盛んである。European Conference on Complex Systems (ECCS) という会議では、毎年レベルの高い研究発表およびサテライトシンポジウムが企画されている⁶⁾。 • 英国は数理生物学のレベルが高く、生態系、感染症、がんなどの数理モデル研究が精力的に行われている。 • ドイツ・フランス・イタリアのグループの連携により、新しいセンシング技術で得られる大量の人の接触データから感染症や人の行動パターンの数理モデリングが研究されている²⁹⁾。 • 2013年に開始した、欧州FETの二大プロジェクトの一つであるHuman Brain Projectには、10年間で1200億円が投じられ、神経細胞の数理モデルに基づいて脳全体の活動のシミュレーションシステムの構築が目標とされている²⁶⁾。 • 英国やドイツでは細胞やその遺伝子制御ネットワークのシステムバイオロジー研究のプロジェクトが推進されている²⁸⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • Italian Society for Chaos and Complexityでは、特に複雑系の制御の観点からの応用研究を指向している。 • ドイツは自然エネルギー導入に熱心で、エネルギー問題に対する理論研究者の関心も高く、数理モデリングに注目が集まっている。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・The Smith Institute for Industrial Mathematics and System Engineering で、産業応用を目的とした複雑系数理モデル学の研究が行われている。 ・ライブラリのパーツを組み合わせることで、複雑な物理現象等のモデリングとシミュレーションを行うことのできるソフトウェアが開発され、自動車会社等の産業界で利用されている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・北京大学、復旦大学、中国科学アカデミーの応用数学研究所、システム科学研究所などで、複雑系数理モデル学の基礎研究が行われている。 ・中国政府は数学研究予算を増加しており、複雑現象の数理モデリング研究を担う人材が今後増えていくと期待される。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・国家自然科学基金委員会の重点研究^{28, 30)}として、「高性能科学技術計算と計算可能モデリング」が取り上げられている。 ・計算知能分野に研究人口が多く、複雑適応系などの観点から研究を行う人材が育っている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ソウル国立大学 Statistical Research Center for Complex Systems、POSTECH Nonlinear and Complex System Laboratoryなどで、複雑系の数理モデルと関係した教育・研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・数理科学の応用を目指して国立数理科学研究所（NIMS: National Institute of Mathematical Sciences）が2005年に設立されている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・特筆すべき活動・成果は見られない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 合原一幸編著. 暮らしを変える驚きの数理工学. ウェッジ, 2015.
- 2) 杉原正顯, 杉原厚吉編著. 数理工学 最新ツアーガイド. 日本評論社, 2008.
- 3) 三村昌泰編. 現象数理学入門. 東京大学出版会, 2013.
- 4) Weaver, W. Science and Complexity. American Scientist. 1948, vol. 36, p. 536-544.
- 5) Complexity Net. <http://www.complexitynet.eu/about/Pages/default.aspx>
- 6) European Conference on Complex Systems. <http://www.eccs14.eu/index.php?lang=en>
- 7) Complex Systems Digital Campus. <http://unitwin-cs.org/>
- 8) 科学技術振興機構 ERATO. <http://www.jst.go.jp/erato/index.html>
- 9) 山本量子ゆらぎプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/yry_PJ.html
- 10) 今井量子計算機構プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/irkk_PJ.html
- 11) 合原複雑数理モデルプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/ahs_PJ.html

- 12) 金子複雑系生命プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/kcs_PJ.html
- 13) 湊離散構造処理系プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/mrk_PJ.html
- 14) 河原林巨大グラフプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/kkg_PJ.html
- 15) 日本学術振興会 FIRST. <http://www.jsps.go.jp/j-first/>
- 16) 情報エネルギー生成基盤プロジェクト.
<http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRST/home.php?>
- 17) 量子情報処理プロジェクト. <http://www.nii.ac.jp/qis/first-quantum/>
- 18) 最先端数理モデルプロジェクト. <http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/>
- 19) 東北大学原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）.
<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/index.html>
- 20) 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）.
<http://www.ipmu.jp/ja/>
- 21) 科学技術振興機構 CREST 「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」領域.
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah26-1.html
- 22) 科学技術振興機構 さきがけ 「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」.
http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/109mathcollabo.html
- 23) 内閣府・革新的研究開発プログラム ImPACT 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」. <http://www.jst.go.jp/impact/program12.html>
- 24) NIH, BRAIN Initiative Interim Report.
<http://acd.od.nih.gov/presentations/BRAIN-Interim-Report-Presentation.pdf>
- 25) Human Connectome Project. <http://www.humanconnectomeproject.org/>
- 26) Human Brain Project. <https://www.humanbrainproject.eu/>
- 27) James S. McDonnell Foundation, Studying Complex Systems Program.
<https://www.jsmf.org/programs/cs/>
- 28) 八尾徹. システムバイオロジーの内外動向. 日本バイオインフォマティクス学会, 2011.
http://sysbioevo.org/conference/JSBi_1st_ASB/Yao20110228.pdf
- 29) SocioPatterns. <http://www.sociopatterns.org/>
- 30) 国家自然科学基金委員会. <http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2013xmzn/04/06.html>

3.5.6 複雑系社会学

(1) 研究開発領域名

複雑系社会学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

複雑系社会学という言葉が自覚的に用いられることはなく、「社会学と複雑科学」ないし「複雑系と社会学」という表現が用いられているのが現状である。複雑系社会学という表現が用いられていない理由のひとつに、そもそも社会学はその誕生以来、「複雑性」をあつかう学問であり続けてきたことにある。社会学理論における主流は有機体論であり、機械論とは異なり、社会は人びとの複雑な相互作用により編成された全体であり、その性質は個人に還元できないもの（全体は部分の総和以上）であることを強調してきた。このことは複雑系の科学のねらいと基本的に同じである。ただ、あえて複雑系社会学という表現を用いるとすれば、複雑系社会学とは人びとの相互作用により個人個人の性質には還元できない創発特性をもたらすシステムであり、予測を不可能にするような不安定状態を内在的に持っている、あるいは不安定に揺らぎつつも新たな秩序を生み出す可能性を持っている社会システムを解明する学問であるといえる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系の科学運動が高まっている背景には、近代科学が金科玉条とする方法的立場に対する不信感が存在する。要素還元論の立場、および認識主体の認識対象に対する優位を前提とし、対象に認識作用や秩序形成能力を認めようとしなない立場に対する不信感である。

ニュートン流の近代科学では、要素還元主義、決定論、時間の可逆性、均衡（平衡）、安定性等が強調されてきた。そして、この世界から秩序（≒ 法則）を取り出すことが科学の使命とされた。そこには、混沌から切り離され、区別され、混沌とは別個に存在する《秩序》を分節化できるとする発想があった。

これに対し、1970年代末から台頭してきた、ゆらぎ・自己組織化・オートポイエーシスおよび1990年代から注目されるようになったカオスや複雑系やエージェントベースのシミュレーションなどは、創発特性主義、非決定論、時間の非可逆性、不均衡（非平衡）、不安定性、認識対象の自律性等を強調する。そこには、混沌からの秩序形成、秩序と混沌の相互浸透こそが世界の本質であるとする発想がある。つまり、世界は秩序と混沌の境を揺れ動く非定常系に他ならないとする科学観である。複雑系社会学はこうした新しい潮流を受け入れることをねらいとするが、まだその取り組みが始まったばかりである。

社会学で複雑性の概念が明示的に用いられたのは初期のルーマンである。彼はサイバネティクスのアシュビーが定式化した「最小多様度の法則 (law of requisite variety)」¹⁾ (訳 7、11 章参照) に準拠して社会学理論を定式化した。初期ルーマン理論の中核をなす概念枠組は、世界で営まれる体験や行為には、現実化されうる以上の可能性が常に存在するという意味での「複雑性 (Komplexität)」 (ルーマンは多様度を複雑性と読み替えている) と体験や行為が環境条件に依存して期待されたとおりに生起しない可能

性があるという意味での「不確定性 (Kontingenz)」、およびこれらの問題に対処してそれを制御するような「体験加工の構造」である²⁾ (訳 p. 38)。

社会システムは体験や行為が期待はずれに終わる不確定性にみずからをゆだねることはできない。システムが環境とのあいだで境界を維持していくには、「複雑性の縮減 (Reduktion von der Komplexität)」(つまり不確定性を制御できるような方策をシステムが備えること、たとえば法整備や制度設計)によって行為の可能性のなかから実現可能な一部を選択し、それに対する期待を確実にする必要がある。複雑性の縮減によって体験や行為を一定のパターンに制限しそれらが実現される期待値を高める(すなわち制御する)ことが初期ルーマン理論のエッセンスである。この複雑性の取り扱い、対象(環境)を制御することで社会システムの均衡を維持するというサイバネティクスの枠内にある。複雑性の縮減という考え方はトップダウン型の社会政策や社会計画にとって親和的である。

1990年代半ばに米国で設立されたサンタフェ研究所から発せられた複雑系の科学は、複雑性をア prioriに制御の対象とする発想を持たない。不確定性、ゆらぎ、非平衡を積極的なものとして位置づける。そして、複雑系社会学に共通する問題意識は、人びとの相互作用に原因する不確定性やゆらぎ、非平衡からいかに社会的なるものが創発してくるのか、さらに一般化していえば社会生成がなされるかを探究することにある。

従来の科学観では、平衡(均衡)状態に焦点をあててシステムの挙動を定式化することが重視された。そして、均衡状態から乖離する現象は攪乱、逸脱、ゆらぎなどと呼ばれ、システムにとって望ましくないもの、統制すべき対象とみなされた。しかし、非平衡系の研究が進むことで、ゆらぎの積極的な意義が認識されるようになった。たとえば、生命工学(バイオホロニクス)では、ゆらぎは「生きていることの証」とされる。また、熱力学の分野でも、ゆらぎが増幅するなかから、新たな構造が形成される(たとえば、ランダムな熱伝導から対流構造を組織される)ことが明らかにされている。さらに、ゆらぎは快適さの源泉であるとする研究も進んでいる(F分の1ゆらぎ)。社会学でも、1980年代半ば以降、さまざまな領域でゆらぎ現象が取り上げられるようになった。近代家族のゆらぎ、法制度のゆらぎ、世界システムのゆらぎ、近代性のゆらぎとポストモダンなど、従来、価値が認められ、社会的に正当性が与えられ、違背に対する制裁基準が存在していた制度の基盤がぐらついていることを表す概念として多用されるようになった。そして、ゆらぎをつうじた秩序形成という視点から、社会がみずからを内発的に変える自己組織化の兆候として把握する試みがなされている。

自己組織性は複雑系社会学にとって重要な研究領域であり、これはシステムが環境との相互作用を営みつつ、みずからの手でみずからの構造をつくり変えていく性質を総称する概念である³⁾。自己組織化の過程はトップダウン式の過程ではなく、制御センターを持たないボトムアップ式の過程である。局所的な構成要素が、局所的なルールに従い、相互作用によって新たなレベルの複雑性を創発する。ゆらぎは自己組織化に必要な内発的要因であり、これを秩序に変換する仕組みとして、再帰性(reflexivity)あるいは自己言及(self-reference)がある。

1970年代後半、生物化学や熱力学において、自己組織性へのアプローチ法が登場した。具体的には、プリゴジンらの「散逸構造の理論」⁴⁾およびこれとほぼ同一の論理を持

つハーケンの「シナジェティクス（協同現象論）」⁵⁾、ヴァレラとマトゥラナの「オートポイエーシス（自己創成論）」^{6, 7)}等である。これらの理論に共通する点は、自己触媒、自己回帰、円環的因果に代表される自己言及性をあついていること、およびオートポイエーシスを除いてゆらぎの増幅を自己組織化の重要な要因としてあついていることである。複雑系社会学では、自己組織性論は近代性の脱構築や経営組織の変革と活性化、コミュニティの権力構造の再編、国際法社会のあり方、文化とコミュニケーションの変容などの研究に用いられている。

複雑系社会学にとって特異な位置を占めるのがオートポイエーシスである。ヴァレラとマトゥラナが提唱するオートポイエーシス（self-production）の理論は、生体系の自律性を定式化する試みである。この理論では、従来のシステム論における入出力図式は採用されない。オートポイエティック・システムとは、構成上は入力も出力もない組織的に閉じた円環的なネットワークである。そして要素を生産する要素が円環的なネットワークによって再帰的に自己にかかわり、自己を再生産しつつシステムを維持する⁶⁾（p. 12-15）。また、オートポイエーシスは、従来の科学の方法であるシステム外部からの観察者の視点ではなく、システム内部からの当事者の視点を取り入れる。社会を外から観察して定式化するのではなく、観察者本人が観察される対象でもある自己言及性を前提とした社会の記述と説明をめざす。

後期のニクラス・ルーマンは、このオートポイエーシスに依拠して社会システム論を展開し、社会学界に多大の影響を与えた。彼は社会システムを、コミュニケーションを要素とするオートポイエティック・システムとして定式化した⁸⁾（1984: chap. 4; 1988: chap. 2）。社会システムの要素は、人間ないしその行為ではなく、コミュニケーションである。コミュニケーションがコミュニケーションを誘発すると同時に他に接続し、これが延々と続いてネットワークが形成される。社会システムは自己産出的なシステムであり、個人や役割あるいは行為から成るのではなく、コミュニケーションから成るといふ新しいテーゼを打ち立てた。複雑系社会学はコミュニケーションのコミュニケーションによる意味システムとして社会の解明をめざす。

複雑系社会学では社会を複雑適応系とみなす研究も進められている。この系は多様な構成要素の相互作用からなり、自身でみずからの構造や機能を変える能力を備えている。またそれは環境に対して開かれているだけでなく、システム内に対しても開かれており構成要素間の相互作用によってそれ自身の性質に変化をもたらす、ひいてはシステム全体の変化をも帰結する。アイディアの相互交換や創造的な学習、社会集団により生みだされた計画は、関係する個々人ならびに役割構造へ影響を与え、適応的な変化を引き起こす。フィードバック制御ループは自己制御だけでなく自己方向づけ（self-direction）ないし環境適応を可能にする。そしてこれによりシステムは自身の構造を変化させる⁹⁾。

複雑な現象は多数の要素の相互作用からなるが、これを表現した数式を解析的に解くことは不可能に近い。ところがコンピュータが大容量化することで、解析的に解けなくてもシミュレーションによって系の振る舞いとその帰結を知ることができるようになった。エージェントベースのシミュレーションは、複雑な人間関係や社会ダイナミクスについての解明をめざし、個々の異質なエージェントの相互作用から巨視的な社会秩序や形態が生成される様子を、ボトムアップにかつプロセス遡及的なかたちで明らかにする

試みである。こうしたシミュレーションによって社会秩序の形成や都市化のメカニズムが解明される可能性がある。

このアプローチは、個人と社会をつなぐミクローマクロリンクの問題に解決の手掛かりを与えてくれる可能性がある。これまで個人をベースに相互作用を表現することで社会を表現する方法（方法論的個人主義）と、個人には還元されない社会の特性にもとづいて個人の行為や個人間の相互作用を解明する方法（方法論的集合主義）のあいだには大きな溝があり、これを埋めることは至難の業とされてきた。ミクロ（個人）からマクロ（社会）の特性を導出することは、マクロ水準での創発特性のゆえに、ほぼ不可能とみなされてきた。実際、社会学理論でミクローマクロリンクが問題化され、これに対する取り組みがなされてきたが、みるべき成果はいまだあがっていない。このアポリアの解決への期待が複雑系社会学にむけられている。

（４）科学技術的・政策的課題

ゆらぎの具体的な指標化を進めることが重要である。社会のゆらぎについての可視化が求められる。たとえば、人びとの生活を改善するために、かつて「生活の質」指標の体系化が試みられた。生活領域を、新国民生活指標にならって、「住む」「費やす」「働く」「育てる」「癒す」「遊ぶ」「学ぶ」「交わる」の8領域に分けて、各領域でゆらぎの指標化を試みることである。ゆらぎの指標化およびその値の計測基準は、「価値観の崩れ」「社会的正当性の衰退」「制裁基準の弛緩」の3側面からなされるべきである。社会を非平衡状態に導いている（可能性がある）生活項目をエビデンスベースでチェックすることが求められる。

また、地域社会の自己組織化力を高めるための諸施策を考察することが期待される。現在、創造的地域社会を実現することが急務となっているが、このためには複雑系社会学の大きな柱である自己組織性の理論に基づき、創造的地域社会を議論するための数理計量的な枠組みを考えることが求められる。すなわち、まず地域社会の創造性を評価する軸（尺度）を設定・計測して、創造的地域社会を実現するための課題を整理することである。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

冷戦構造が崩壊し、欧米を中心として新たな国際秩序が摸索されているなか、やっかいなゆらぎが多発している。国際社会に吹き荒れている民族主義の嵐がそれである。イラクのクウェート侵攻によるアラブ民族主義の高まり。スペインのカタロニア地方やバスク地方における、スペインからの分離運動。イギリスにおけるアイルランド人の民族的抵抗およびスコットランドの独立運動。さらに、ルーマニア、ハンガリー、ブルガリア、ユーゴスラビアなど東欧諸国でも民族問題が噴出している。

民族主義の嵐は冷戦後の国際社会にとって最大のゆらぎである。現在の国際社会は、このゆらぎによって破壊を蒙むらない程度に、信頼性と冗長度を備えていよう。問題は、このゆらぎから異質な文化や民族固有のアイデンティティへの包容力を備えた新しい国際秩序を形成できるかにある。現在のところ、それがどのような秩序なのかまだ見えてこない。だが、国際社会のなかに、このゆらぎに注目し、諸民族の主張を取り込む受信

網と対話のためのコミュニケーション回路を増やすような、自己組織化を実現しなければならないことだけは確かである。これは複雑系社会学ひいては複雑系の科学の試金石でもある。

（6）キーワード

創発特性、複雑適応系としての社会、ゆらぎ、自己組織性、オートポイエーシス、自己言及

（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	○	↗	・かつての一般システム理論運動と同様に、諸科学を包括する運動として複雑系科学が登場したため、また文理融合アプローチが中心であるため、社会学ではマイナーな領域として位置づけられている。しかし、社会システム論の分野で自己組織性、オートポイエシス、ゆらぎ、エージェントベース・シミュレーションなどに対する取り組みが若手を中心に高まりつつある。
	応用研究・開発	×	→	・応用研究に取り組める状況にない。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
米国	基礎研究	◎	↗	・サンタフェ研究所に刺激されて、Sociology and Complex Science (SACS) グループづくりをはじめとして、次代の社会学理論の開拓へ向けて熱心な取り組みがなされている。
	応用研究・開発	○	→	・SACSツールキットと呼ばれる社会システムをモデル化するための新しい方法など、応用研究へ向けた取り組みが見られる。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
欧州	基礎研究	◎		・散逸構造論やシナジェティクスを生んだドイツを中心に、複雑系と社会学に関する研究が進められている。また、オートポイエーシスを社会学に取り込んだルーマンを記念して、複雑系学派の形成の動きの兆しがみられる。
	応用研究・開発	×	→	・基礎研究が中心であり、応用研究については不明である。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Ashby, W. Ross. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall, 1956. (篠崎武, 山崎英三, 銀林浩訳. サイバネティックス入門. 宇野書店, 1967.)
- 2) Luhmann, Niklas. *Soziologie als Theorie sozialer Systeme*. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*. 1967, vol. 19, p. 615-644.
- 3) Imada, Takatoshi. *Self-Organization and Society*. Springer-Verlag, 2008. (今田高俊. 自己組織性と社会. 東京大学出版会, 2005.)
- 4) Nicolis, Gregoire; Prigogine, Ilya. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York: John Wiley & Sons, 1977. (小島陽之助, 相沢洋二訳. 散逸構造—自己秩序形成の物理学的基礎. 岩波書店, 1980.)
- 5) Haken, Herman. *Synergetics: An Introduction, Non-equilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Springer-Verlag, 1976 (1978: 2nd ed.). (牧島邦夫, 小森尚志訳. 協同現象の数理 — 物理, 生物, 化学系における自律形成. 東海大学出版会, 1980.)
- 6) Varela, Francisco J. *Principles of Biological Autonomy*. New York: North Holland, 1979.
- 7) Maturana, Humberto R.; Francisco J. Varela. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co, 1980. (河本英夫訳. オートポイエーシス—生命システムとはなにか. 国文社, 1991.)
- 8) Luhmann, Niklas. *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1984. (佐藤勉監訳. 社会システム理論 上・下. 恒星社厚生閣, 1993.)
- 9) Buckley, Walter. *Society-A Complex Adaptive System: Essays in Social Theory*. Amsterdam: Gordon and Breach, 1998.

3.5.7 複雑系経済学

(1) 研究開発領域名

複雑系経済学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

この領域の研究者の多くが共通に持つ願望は、一言でいえば、社会・経済の現象を他の自然科学の対象と同じように研究を進めたいということに集約される。従来、社会・経済の現象は、まず、定量的な観測が困難であり、実験もできない場合が多く、さらに、個人レベルの感情や思想までもが影響を与えるということから、自然科学の対象とは考えられてこなかった。しかし、近年、社会の高度情報化に伴い、いわゆるビッグデータによって、自然現象を越えるほどの膨大な社会・経済データが集まっており、それらを丁寧に分析することで普遍的と言えるような法則性が確立される事例が報告されてきている。また、複雑系数理モデルに基づくシミュレーションによって数値実験もできるようになっており、同じように実験が不可能な地球惑星科学や宇宙科学と同様に、観測とシミュレーションを並行することで社会・経済現象の研究を進められる土台ができてきている。

最も研究が進んでいる金融市場の研究を例に挙げれば、千分の1秒刻みで市場に入ってくるひとつひとつの注文が全て観測できるようなデータを分析し、そもそも、なぜ、どのように市場価格が変動するのかということに対して定量的に答えられるような定式化ができてきた¹⁾。金融市場に関する先行研究である金融工学は市場価格の変動がランダムウォークに従っているという仮説に基づいた応用主体の学問体系であるが、そもそもどのような場合にはランダムウォーク仮説が妥当であり、どのような場合にはその仮説が破れるのかもデータに基づいて判断ができるようになり、暴騰や暴落時には金融工学に代わる数理モデルを使うことが必要であることも明らかになっている。この分野で開発された日本発のデータ解析ツールの中には金融の実務家がアプリとして使える環境になっているものもあり、今後の展開が有望である。

研究対象は、膨大で詳細なデータが揃っていればほぼどのようなものでも分析し、モデル化することができる」と期待されており、ビッグデータのブームも後押しする形で、金融市場以外でも、ソーシャルメディアにおけるブログやツイッターの書き込み記事の特性分析から、日本国中の約100万社の企業が形成する巨大な取引ネットワーク構造の解析、さらには、世界貿易から国の発展の動力学にまで研究対象が広がっている²⁾。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系の中の重要な基本概念である『フラクタル』は、拡大しても縮小しても同じように見えるような複雑な現象を総称する言葉として、マンデルブロによって1975年に創出された³⁾。フラクタルは、1980年代にあらゆる科学の分野に応用されるほど大きなブームになり、複雑系の研究が大きく進展する推進力となった。また、フラクタルは、コンピュータグラフィックスなどを通し、広く一般市民にも知られるようになり、デザインなどにも応用された。極めて広範に応用されたフラクタルであるが、創始者のマンデルブロ自身は、1960年代に市場価格の変動のデータ解析をしている中からフラクタル

の発想を得ており、同時に、市場変動はベキ乗のすそのを持つ分布であり、無視できない頻度で桁違いに大きな変動が発生することをいち早く報告していた。ベキ乗のすその持つ分布はベキ分布とよばれ、平均値がサンプル数とともに発散するなど統計学としては扱いにくい、地震現象や破壊現象などでは普遍的に現れる分布であり、1980年代からの様々な複雑系の研究によって、ベキ分布の事例はフラクタルと同様に広範な現象において確認されている。

複雑系の中のもう一つの重要な概念である『カオス』は、1960年代から数理モデルや時系列解析を通して生まれて来たものであり、1980年代には、市場価格の変動や社会の変動をカオスの視点からモデル化する研究が散見されるようになった。米国に1984年に設立されたサンタフェ研究所⁴⁾は、そのような流れから生まれた非営利研究所であり、その後の複雑系の研究に大きな影響を及ぼした。このころから、いち早くヘッジファンドなどを通して市場価格変動の研究の成果を実利に結び付ける研究者も現れた。そのような試みの多くは実務では低迷したが、中には実際にリアルタイムのデータ解析に基づく自動的な売買だけでファンドを大きく成長させ、偶然以上の確率で市場変動の予測が可能であることを実証した事例もあった。

1990年代に入ると、複雑系の研究者の中から、アカデミックな観点から市場変動に関心を持つ研究者が集まり、経済物理学という新しい研究分野が生まれた⁵⁾。そのころから入手可能になった市場の詳細なデータを用いた解析により、市場の変動が正規分布からは大きく乖離しベキ分布に近い特性を持つというマンデルブロの発見が再確認され、様々な市場について広く成立する普遍性の高い事実であることが確認された。また、市場変動に関して観測できない部分を補う手法として、仮想的な戦略を持つディーラーをコンピュータプログラムで用意し、それらのディーラーが取引をし合う仮想市場の研究が始まり、どのような場合に市場の価格変動がベキ分布に従うようになるのか、という基本的な問題が研究された。その結果、トレンドフォローとよばれる直近の価格変動の平均的な動きを追従する行動がベキ分布の発生に直接寄与しており、市場の暴騰や暴落もそれによってかなり説明可能であることが明らかになった。この分野での研究では、日本が世界をリードしている。

また、金融市場の価格変動の他に、企業の売り上げなどの財務データも研究用として入手できるようになり、データ分析に基づく企業の成長に関する研究が始まった。企業の売り上げがベキ分布に従うことがまず経験則として確認され、それを説明するための数理モデルもいろいろと提案された。また、1990年代の後半から、このような分野の国際会議が頻繁に開かれるようになり、研究が世界的に加速された。

2000年代からは、さらに様々な社会・経済データが入手できるようになり、研究の対象が大きく広がっていった。不動産・コンビニやスーパーマーケットなどの一般の商品・ネット販売される家電製品、などの様々な価格の変動、企業間の取引ネットワーク構造の解析、ソーシャルメディアにおける書き込みの分析、などデータも多様化し、解析手法も多様化している。学術的にも、例えば、日本や欧州では、物理学会の中の分野のひとつとして社会経済物理学という領域ができるなど、研究が定着してきている。

従来の経済学や社会学のアプローチとの違いは、まず、扱うデータが極めて詳細で膨大になり、エクセルファイルに入らないようなビッグデータを扱うことが挙げられる。

次に、データ分析の手法が回帰モデルに頼らず自然科学全般や複雑系科学の様々な手法を駆使していること、また、シミュレーション手法も観測事実と整合するように緻密に作られることが多いことも特徴である。研究成果としては、普遍的な事象に注目し、論文は物理学など理系の学術誌に掲載されることが多く、個別のケーススタディーに関してはあまり積極的とは言えない。

経済学や社会学の分野との協力関係は年々強化されており、この分野で育った若手研究者が経済学や社会学の分野で職を得ることも増えており、それらの分野との境目は次第に薄くなっている。ケーススタディーは既存の学問分野で行われることが多く、普遍性を追求する研究や冒険的な先端研究をこの研究開発領域が担うようになってきているといえるかもしれない。

この研究開発領域で教育された学生・大学院生は、3分の2程度は民間企業に就職しているが、昨今のビッグデータ解析ブームを支えるデータサイエンティストとして実務の場で活躍している。学位を取得した後も、アカデミーあるいは民間企業でほぼ100%職を得ることができている。他分野で教育を受けた博士研究者でも、この研究領域の研究を手掛けると就職先の可能性が大きく広がり、いわゆるオーバードクター問題の解決にも貢献できる可能性が高い。

（4）科学技術的・政策的課題

この研究開発領域は、ビッグデータに対する社会全体のニーズの高まりとともに実施すべき課題が年々増大している。情報技術によって集められた社会・経済のビッグデータから、実際に役立つ情報を抽出する技術を作り出し、未来予測をするためのシミュレーション手法を開発する役割を担うのがこの研究開発領域だからである。ビッグデータ解析は、現状では、民間企業の方が進んでいるが、その理由は、大学などのアカデミックな分野ではデータの入手が困難であるからである。民間企業では、どのような業種であっても企業活動とともに膨大なデータが日々蓄積されており、それらを活用できるかできないかで未来が大きく変わるという意識を持っている。しかし、現状では、既存のデータ解析手法をビッグデータに適用しているに留まっており、大きな成功につながった事例はまだあまりない。この研究開発領域で開発してきたデータ解析手法やモデル化手法を応用すれば、これまでよりも質も量も高いビッグデータ解析とシミュレーションを行うことができるようになると期待される。今、アカデミーにとって最も必要なのは、研究費の乏しい研究者でも使えるようなビッグデータセンターのようなものを設立することである。研究者の理論は緻密で技術は高くても、実際のデータで実践しなくてはその理論や技術をさらに洗練されたもの発展させることはできない。例えば、公的な機関が民間企業の持つデータを典型的なビッグデータのサンプルとして買い取り、研究者に無料あるいは廉価に提供できれば、研究者はパソコンがあるだけで、アイデアを試す研究開発を行うことができ、この分野の研究の多様性は大きく発展する。

近年、大学院の定員枠が拡大したが、オーバードクター問題が広くマスコミでも報道されるようになり、研究者への道に進むことを躊躇する優秀な人材を多く見かける。また、学位を取得したあと有期の研究職についてはいるが、職を繋げることが難しい状況に陥る若手研究者も多い。このような人材を、社会のニーズが高いビッグデータ解析と

社会経済シミュレーションの方向に転換することができれば、高度な科学的な思考力を直接社会の役に立てることができ、研究者にとっても社会にとってもメリットがある。若手研究者には、入り口で選んだ専門分野をそのまま継続するだけでなく、広く社会経済を見渡して、全く別の分野の研究開発にも挑戦してみることが強く勧められる。政策的にこれを推進するためには、専門転換のための研究費を提供することが想定される。従来の研究費は、ほとんどが専門をさらに進めるためにお金を出す形であるが、専門以外の研究をすることを促すような形で研究資金あるいは生活資金を提供するのである。研究者として大成している人の中にも、研究人生の途中で大きく専門分野を転換し、その結果大成功に至った事例は枚挙にいとまがない。分野転換には大きな勇気が必要だが、国が政策としてそれを後押しするような形を見せることができれば、ハードルが低くなり、分野転換を選ぶ若手が増加するはずである。広い視野で見渡せば、研究者不足で困っているような学術分野もあるので、オーバードクター問題に直面している博士取得者が才能を活かせる場は必ず見つけられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

金融の現場で実務についている人達にとっては、金融工学が前提とするランダムウォーク仮説が破れていることは、日常的に体験していることであり、金融工学の仮定を鵜呑みしている人はほとんどいない。しかし、金融業にとって重要な金融派生商品の値付けや設計においては、金融工学がこれまで唯一の実務的な手段だったため、利活用しているのが実情である。複雑系経済学研究で開発している PUCK ツールや変化点検出手法などのデータ解析手法は、与えられた時系列データとランダムウォーク仮説とのずれを定量化するものであり、これまで、実務家が現実と理論の間に感じていたギャップを埋める役割を果たすようになってきている。例えば、変化点検出を使えば、市場の変動の統計的な特性が変化したことをいち早く自動的に察知することができ、素早い対策を打つことが可能となる。また、これらの手法を駆使することで、市場が大変動する前兆を捉えることができるようになる見込みがあり、津波が来る前に避難するというような行動をとることもできる。

このような研究の延長線上に期待されるのが、市場変動観測所の設置である。現在、金融の現場では、多数の市場を常時モニターしているが、それはあくまで、利益追求のためである。そうではなく、市場変動を、あたかも地震現象や気象現象あるいは宇宙線のような自然現象として客観的に捉え、全地球的な規模での経済変動を丸ごと観測し、分析し、危険な大変動の予兆を検出した場合には注意を促し、金融危機の発生を未然に防ぐことで社会に寄与するという狙いである。このプランは、日本学術会議の中の巨大プロジェクトのひとつとして提案されており、学術的な必要性は承認されている。世界的にも、このような観測プロジェクトに賛同する研究者は多く、小規模ではあるが、スイスではチューリッヒ工科大学が金融市場バブル観測所を開設しており、米国では、ノーベル経済学賞受賞者のエングルらが市場のボラティリティ観測所を開設している。国や民間企業と大学が協力するような形で、市場変動観測所を構築することができれば、研究者を活性化し、社会にも大きな寄与ができるものと期待される。

金融市場の研究はこの研究開発領域で最も先進的であり、そこでの事例と同様のこと

が今後、他の研究対象においても追従されることと想定される。社会の中のビッグデータは多種多様であるが、その中から重要なものを集中的に観測するような観測所を構築し、データを収集する方法の研究開発、データから有益な情報を抽出する方法の研究開発、予測や制御につながるシミュレーション手法の研究開発などのコアとして活躍するような組織となり、国家や複数の企業のサポートで維持運営される、という未来図が描かれる。このような観測所ができてくれば、上述のオーバードクター問題対策として有効に機能し、この組織を通して、専門転換した研究者を民間企業に送り込むというような人的な流れも想定される。

（6）キーワード

経済物理学、経済ネットワーク解析、エージェントモデル、システミックリスク、ソーシャルメディア分析

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 外国為替市場や企業ネットワークなどの研究では他にない質と量のよいデータに基づいた重要な基礎研究を行い、世界をリードする成果を挙げている。 若手向けの研究予算がつくようになり活性化している。 この分野の国際会議を何度も開催し、世界から研究者を集めている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 市場の変動を再現する仮想的な市場モデルは、世界に先駆けて、基本的な市場変動の特性を再現することができるようになっており、日銀の介入などの特異的なイベントも再現できるようになっている。 インターネットのロコミ解析による市場の雰囲気分析などの先駆的研究が企業と大学の実務的な共同開発によって進められている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 日本で開発された市場変動がどの程度ランダムウォークから乖離しているかを定量的にリアルタイムで評価する手法がブルームバークプラットフォームのアプリとして採用されるなど、実務家が利活用する段階になってきた。 日本で開発された企業の取引ネットワークから取引金額を推定する手法が実務で使用されるようになってきた。
米国	基礎研究	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究では、先行したが、期待されたほど研究者人口はそれほど増えず、また、基礎研究を深める研究はあまり勢いが無い。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 分野をまたがるような研究費がとりにくいようで、すその広い研究開発は期待されるほど進んでいない。
	産業化	◎	↓	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究で成果を挙げた研究者は、ヘッジファンドなどの形で実務に入るケースが多く、クォンツとよばれる人材も多く金融業界に輩出している。 基礎研究から起業したプレディクションカンパニーが欧州系の金融機関に買収され、主導していた研究者が欧州の大学に移籍するなど、最近では欧州に吸収されている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スイス・イギリス・ハンガリーなどでは新しい学問基盤として教育から研究までを進める体制が作られており、若手が数多く育てられている。 分野や国をまたがる研究費が出やすいようで、研究会も数多く開催されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 情報系や経済学者との交流も多く、応用を目指す研究が根づいている。 金融機関の連鎖的な危機であるシステミックリスクの研究などに強みがある。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・1990年代に複雑系モデルに基づく自動売買で大きく成長したヘッジファンドもあり、また、欧州系の金融機関は理系のポストドクレベルの人材を大量に雇用しており、表には見えにくい形ではあるが、実務的に活躍していると思われる。 ・産業というわけではないが、政策などにも影響を与えるような発言力を持つポジションについているこの分野の研究者もいる。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・この分野の研究者人口が増加し、研究所も作られている。また、中国市場のデータは利用者ID付のものが研究に使われており、他の国では入手できないレベルの研究につながっている。
	応用研究・開発	△		
	産業化	△		
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・この分野の国際会議を開催し、一定数の研究者を維持している。 ・複雑ネットワークに絡んだ経済現象の研究では若手の活躍が目立つ。
	応用研究・開発	△		
	産業化	△		

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 高安美佐子. 金融市場－経済物理学の観点から. 岩波講座・計算科学 6・計算と社会, 第2章. 2012.
- 2) 高安美佐子, 田村光太郎, 三浦航. 学生・技術者のためのビッグデータ解析入門. 日本評論社, 2014.
- 3) B.マンデルブロ. フラクタル幾何学. 広中平祐監訳. ちくま学芸文庫, 2011.
- 4) サンタフェ研究所. <http://www.santafe.edu/>
- 5) 高安秀樹. 経済物理学の発見. 光文社新書, 2004.

3.6 サービスシステム区分

3.6.1 サービス価値創造基盤システム

(1) 研究開発領域名

サービス価値創造基盤システム

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

サービス価値創造を行うための情報・知識処理基盤を「サービス価値創造基盤システム」と呼ぶ。価値創造基盤システムは、単体としての要素技術でなく、それ自体がシステムを形成しており、サービス価値創造システムのサブシステムと位置づけられる。すなわち、センシング技術、データ処理技術などの単体要素技術は、本領域の対象外とする。サービス価値創造基盤システムは、サービス価値共創の概念的フレームワーク¹⁾における「チャンネル」を形成するものであり、「チャンネル」に「コンテンツ」が載ることによって、価値創造システムとなる。

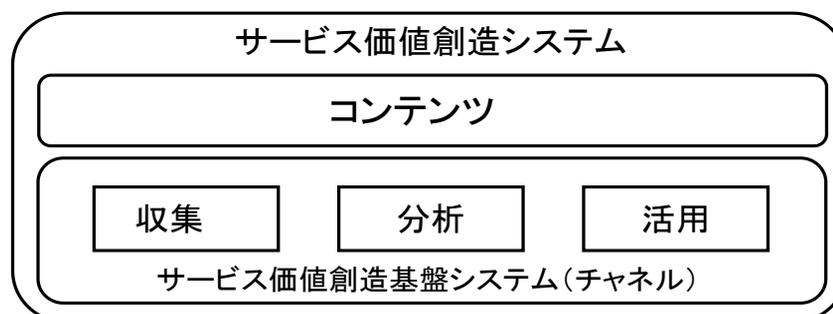


図 サービス価値創造システムとサービス価値創造基盤システム

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サービス価値創造基盤システムの対象は人間である。サービス価値創造のための人間に関するデータの収集・分析・活用は、複雑かつ重層的であり、研究開発においても様々な視点が存在する。ここでは、サービスセンシング収集・分析・活用対象と活用のタイミングの視点で、研究開発の俯瞰を行う。ここで、サービスセンシング収集・分析・活用の対象には、サービス需要者（顧客）、サービス提供者（従業員）、サービス提供環境がある。さらに、サービスセンシングには、物理センサによるサービスセンシングと人間（人間センサ）によるサービスセンシングがある。また、活用に関しては、実時間活用と事後活用がある。

・物理センサによるサービスセンシング

情報通信技術の発展により、サービス需要者、サービス提供者、サービス提供環境に関する様々なデータが物理センサによって収集可能になってきた。具体的には、人間の位置や動線の計測、動作や行動の計測、視線・視点の計測、バイタル情報の計測などがある。人間の位置や動線の計測に関しては、画像、GPS、RFID、無線 LAN、Bluetooth などを活用し、ショッピングモールやアミューズメントパークなどでサービス需要者（顧客）の位置情報を活用した状況適応型のサービスを提供する。また、長期間のライフロ

グをサービスに活用することもできる。サービス提供者（従業員）に関しては、動線や滞留分布から、業務の可視化を行い、それに基づく業務改善を行う。GPSによる屋外での位置計測は、より精度の高い位置測位を可能にする準天頂衛星システムの整備が行われている。また、屋内の位置測位に関しても、Indoor Messaging System (IMES)などの方式が提案され、実際のショッピングモールなどでの実証実験が行われている²⁾。バイタル情報の計測に関しては、医療・介護サービスにおけるサービス需要者（患者、要介護者）の体温、血圧、脈拍などのデータの収集はもとより、脳波だけでなく NIRS、fMRI、光トポグラフィなどの脳活動計測によるサービス需要者の分析とマーケティングへの応用も行われるようになってきている。近年の様々なセンサを搭載するウェアラブルデバイスの普及およびデータを収集するための Machine to Machine (M2M) ネットワークインフラの整備もサービスセンシングの高度化にとって追い風になっている。

・人間センサによるサービスセンシング

物理センサによるサービスセンシングは、非常に強力なツールであるが、完璧ではない。人間の五感で感じる情報（気づき）が、サービスの質と効率の向上に極めて重要である³⁾。このとき、人間の気づきを情報通信技術でいかに支援するかがポイントになる。従来から、ヒューマンファクターの分野で、状況アウェアネスの研究は行われてきたが、気づきの誘発が主であり、サービス提供者間での気づきの共有や活用に関しては、あまり論じられてこなかった⁴⁾。もちろん、現場では、人間系で気づきの共有は行われていたが、それを計算機上で実現したシステムとしては、宿泊業の例（リッツカールトン、星野リゾート、など）がある。今後は、腕時計型や眼鏡型のウェアラブルデバイスの普及により、より簡単にサービス提供者の気づきの収集が可能になるだろう。特に、音声認識技術の向上に伴い、音声による気づきの収集は大きな可能性を有している。また、ソーシャル・ネットワークキング・サービス（SNS）の分析結果をサービス需要者のマーケティングに利用することは活発に行われている。

・分析

サービスセンシングで収集されたデータの分析に関しては、統計的分析、機械学習、テキストマイニングなどの手法が開発されている。特に、データが、ボリューム（Volume：量）、バラエティー（Variety：種類）、ベロシティ（Velocity：頻度）の軸で“ビッグ”になり、簡単な計算機やツールで処理できない場合に対応する技術の開発が進められており、サービスセンシングにおいても活用されるであろう。具体的には、都市の交通サービスや大規模なショッピングセンターにおけるサービス需要者の行動情報は、ビッグデータとして扱う必要がある。また、サービス提供時の画像や音声などのメディアから必要な情報を収集する認識技術が必要である。これらの認識技術は、長年研究開発が行われてきたが、技術および計算能力の向上により、様々な用途で実用的な性能を満たすようになってきている。

・活用

活用に関しては、そのタイミングにより、「実時間活用」と「事後活用」がある。実

時間活用とは、サービスセンシングで得られた情報をサービス提供中に活用することであり、事後活用とは、サービス提供者の学習やサービスプロセスの改善に活用することである。実時間活用の例としては、Webショッピングやコールセンターなどのサービスにおいて、顧客（サービス需要者）の過去の購買・問い合わせ情報からプロフィールを抽出し、より適切なサービス（商品の推薦など）を提供することができる。また、コンビニエンスストアにおける、販売時点（POS）情報を活用した商品の調達・展示の最適化も実時間活用の典型例である⁵⁾。ここでは、データに基づく最適化技術も重要となる⁶⁾。事後活用に関しては、サービス提供時に収集したデータから状況を可視化し、新人教育や業務改善ミーティングで利用することができる。ここで、サービスの状況やノウハウのデータベース化技術および可視化技術が重要となる。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・ サービス需要者およびサービス提供者の個人情報扱うために、プライバシーおよびセキュリティに関して、技術的・管理的・制度的な対策が必要である。具体的には、プライバシー保護データマイニング⁷⁾などの技術や蓄積された個人情報を個人で管理（削除など）できる仕組みが必要である。一方で、匿名化などの適切な処理をした上でのオープンデータ化による共有資源としてのデータ活用は、サービスの質と効率の向上には必要であり、特に医療分野でのオープンデータ化とその分析による効果的な医療は、医療費抑制が不可避な高齢化社会において求められている。
- ・ サービス需要者およびサービス提供者の人間的要因（嗜好、感性、感情、疲労など）のセンシングおよび分析手法は、物理的なセンシングや分析と比べて難しく、人間工学や感性工学などの研究は進んでいるものの、依然として技術的な課題である。特に、日本の「おもてなし」サービスなどのハイコンテクストサービスに関するセンシングおよび分析は未開拓な領域である。
- ・ サービス提供者のノウハウや熟練の技のデータベース化が活用の視点では重要であるが、暗黙的な知識が多く、その知識処理は多くのチャレンジングな課題を有している。ここでは、サービスの標準化が必要であり、特に医療分野では取組みが進んでいる⁸⁾。
- ・ 各種サービスセンシングで収集されるビッグデータの処理には、従来のクラウド型のアーキテクチャでは対応できない。これらのエッジ・ヘビー・データを処理するための新しいアーキテクチャが必要である⁹⁾。
- ・ サービスの効率化には、サービス提供者の自動化が不可欠である。スマートフォンの音声対話など一部実用化されているが、さらなる自動化（自動ナビゲーション）のためには、サービス需要者の意図理解の技術開発が必要である。
- ・ サービスセンシングデータの収集と活用のための共通のM2Mプラットフォームの整備が必要である。現状のM2Mプラットフォームは、個別のアプリあるいは事業者ごとに構築されており、サイロ化している点が課題である。インターネットのように誰でも安価に利用できるM2Mプラットフォームにより、様々なサービスセンシングデータの収集と活用が可能になり、サービスのイノベーションを加速できる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 米国マサチューセッツ工科大学（MIT）メディアラボでは、サービスセンシング収集分析・活用に関する研究を活発に行っている。一例として、Picard 教授らの Affective Computing Group では、Google Glass を活用し、人間の心理や感情を計測する BioGlass や SenseGlass の研究を行っている¹⁰⁾。Pentland 教授の Human Dynamics Group では、名札型センサを用いた組織の分析を行っている¹¹⁻¹³⁾。
- ・ 日立製作所では、複数のセンサデバイスを内蔵した名札型センサを活用した、組織のコミュニケーションの可視化と、可視化に基づく組織の知識創造活動を支援するシステム「ビジネス顕微鏡」を開発し、組織改革のためのサービスを提供している^{14, 15)}。
- ・ 産業総合研究所サービス工学研究センターでは、従業員の行動を計測・可視化し、無駄な動きを小集団活動で議論し、加速度／ジャイロセンサや RFID タグを用いて、従業員の動線をトラッキングし、業務の改善に活用している^{16, 17)}。また、業務プロセスを蓄積し共有するコト・データベースを構築している。具体的には、現場のコト情報を収集、分類、検索する技術を開発し、介護施設などでの試行評価を推進している¹⁸⁾。
- ・ 国土交通省などの日本政府の複数の省庁から構成される地理空間情報活用推進会議において、地理空間情報の活用推進に関する行動計画（G 空間行動プラン）に基づき、様々なプロジェクトが実施されている¹⁹⁾。
- ・ 音声でサービス提供者の気づきを収集し活用するプラットフォームとして音声つぶやきシステムがある。既に、看護・介護サービスで実用化され、保守や接客サービスにも適応可能である²⁰⁾。

（６）キーワード

サービスセンシング、ビッグデータ、知識創造、気づき、組織学習、機械学習、ビッグデータ、位置情報、ウェアラブルデバイス、生体情報モニタ

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ JST RISTEX問題解決型サービス科学研究開発プログラムで、サービス価値共創の概念的フレームワークの提案やおもてなしサービスなどの日本独自の基礎研究が行われているが、まだまだ欧米の理論の導入が多い。 ・ 感性工学に代表される人間の感性の計測と評価に関しては、先行している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ サービス学会が設立され、サービスセンシングに関する研究開発が活性化している。 ・ G空間プロジェクトなど位置情報を活用したサービスの応用研究・開発は進んでいる。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 名札型センサを活用した組織のコミュニケーションの可視化に関しては、事業化されている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ インターネットなどを活用したサービスマーケティングなどの分野で研究の蓄積がある。また、データ分析の基礎研究に関しても先行している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人間のセンシングに関しては、MITメディアラボのPicard 教授やPentland教授らの研究グループなど、活発に研究が進められている。

	産業化	◎	↑	・ Google Glassなどのウェアラブルデバイスの実用化とそれを使ったサービスが数多く提案されている。
欧州	基礎研究	◎	→	・ サービスセンシングにも適用できるCPS(Cyber Physical System)に関しては、EUのFPやHorizonなど枠組みで基礎研究が推進されている。
	応用研究・開発	○	↑	・ ヘルスケア分野のM2Mの国際標準化に積極的に取り組んでいる。
	産業化	○	↑	・ ヘルスケア分野での応用は進んでいる。
中国	基礎研究	×		
	応用研究・開発	×		
	産業化	×		
韓国	基礎研究	×		
	応用研究・開発	×		
	産業化	○	↑	・ スマートフォンのサービスとして音声対話システムが製品化されている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 村上輝康. サービス価値共創の概念的フレームワーク. サービスロジー. 2014, Vol. 1, no. 2, p. 6-13.
- 2) 宮崎慎也. RFID 技術を用いて取得したスーパーマーケット内の顧客動線の可視化. 日本建築学会技術報告集. 2012, vol. 18, no. 40, p. 1033-1037.
- 3) 内平直志, 居健太郎, 平林裕治, 水流聡子. サービスの価値共創モデルにおける気づきの役割. 研究・技術計画学会第28回年次学術大会講演要旨集. 2013.
- 4) Endsley, Mica R. Designing for situation awareness: An approach to user-centered design. CRC Press. 2012.
- 5) 確井誠. 図解 セブンイレブン流 サービス・イノベーションの条件. 日経BP社. 2009.
- 6) 高木英明, サービスサイエンスことはじめ—数理モデルとデータ分析によるイノベーション. 筑波大学出版会. 2014.
- 7) 佐久間淳, 小林重信. プライバシ保護データマイニング. 人工知能学会誌, 2009, vol. 24, no. 2, p. 283-294.
- 8) 飯塚悦功, 棟近雅彦, 水流聡子. 患者状態適応型パス—電子カルテおよび病院情報システム搭載版電子コンテンツ（医療の質安全保証に向けた臨床知識の構造化）. 患者状態適応パスシステム研究会編. 日本規格協会, 2010.
- 9) 丸山宏. エッジ・ヘビー・データとそのアーキテクチャ: ビッグデータ時代のITアーキテクチャ. 情報管理. 2013, vol. 56, no. 5, p. 269-275.

- 10) Javier Hernandez Rosalind, W.; Picard, SenseGlass. Using Google Glass to Sense Daily Emotions, UIST '14. 2014.
- 11) Pentland, Alex Sandy. Honest signals. MIT press. 2010.
- 12) Olguín-Olguín, D.; Pentland, A. Sensor-based organisational design and engineering. International Journal of Organisational Design and Engineering. 2010, vol. 1, no. 1, p. 69-97.
- 13) Kim, T., et al. Sociometric badges: Using sensor technology to capture new forms of collaboration. Journal of Organizational Behavior. 2012, vol. 33, no. 3, p. 412-427.
- 14) 早川幹, 大久保教夫, 脇坂 義博. ビジネス顕微鏡 : 実用的人間行動計測システムの開発., 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, 2013, vol. 96, no. 10, p. 2359-2370.
- 15) 矢野和男. データの見えざる手 ウェアラブルセンサが明かす人間・組織・社会の法則. 草思社, 2014.
- 16) 石川智也, 興梠正克, 蔵田武志. サービス現場での従業員トラッキングシステムの評価と応用 (< 特集> サービス工学と VR). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. 2011, vol. 16, no. 1, p.23-33.
- 17) 本村陽一, 竹中毅, 石垣司 編著. サービス工学の技術 —ビッグデータの活用と実践. 東京電機大学出版局. 2012.
- 18) 西村拓一, 渡辺健太郎, 福田 賢一郎, 本村 陽一. コト・データベースによるモノ・コトづくり支援. 第8回人工知能学会全国大会. 2014.
- 19) 地理空間情報活用推進会議. 地理空間情報の活用推進に関する行動計画 (G 空間行動プラン) , 2011, <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/230908/honbun.pdf>
- 20) 内平直志. 音声つぶやきによる気づきの収集と活用で看護・介護サービスの質を向上する. サービスロジー. 2014, vol. 1, no. 2, p. 14-17.

3.6.2 サービスシステムモデル

(1) 研究開発領域名

サービスシステムモデル

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

特定の応用によらないサービスシステムの一般的なモデル表現に関する研究開発分野である。サービスシステムは、マーケティング、システム技術、情報システム技術など、多様な分野からの取組みが進んでおり、異なる分野間の議論のためには、対象物に関する共通認識としてのサービスシステムモデルを持つ必要がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サービスシステムモデルに関しては、サービスシステムの定義を中心にした「サービスシステム概念モデル」、サービス価値をモデル化した「サービス価値モデル」、サービスの提供者と利用者の間でのインタラクションやその行動規範などを対象にした「サービスシステム応用モデル」、ビジネス意思決定に必要なサービスのライフサイクルに関する「ライフサイクルモデル」の4つの分類が考えられる。

(3-1) サービスシステム概念モデル

サービスシステムの定義として著名なのは、Hill¹⁾によるモデルで、サービスとは人や品物の状態変化であり、この変化は、ある経済主体が相手とする経済主体の許諾を得てもたらした結果である、と定義されている。このモデルは、サービスシステムの基本的構造を表すものとして、広く引用されてきた。Tomiyama²⁾は、サービスシステムとはサービス提供者とサービス受容者と環境からなり、サービスチャネルという手段を通じて受容者はモノ、エネルギー、情報等のサービスのコンテンツを提供者から得て、その状態を変化すると定義した。2000年代になって、Vargo & Lusch³⁾は、Service Dominant Logic (S-D Logic)を提案し、サービスは、サービス提供者と顧客との価値共創行為であり、知識やスキルなどの能力を他人や自分自身に利するように活用するもので、社会は基本的にはサービスの交換に立脚して構成されるとした。吉川⁴⁾は、サービスを社会活動の基本機能であるとして、時間的な属性、サービスの社会的な増幅などを考慮して、その基本論理づくりを試みている。また、Kosaka⁵⁾は、伝統的なサービス業である加賀屋のサービスの定義をサービスシステムモデルとして定義している。これらは、サービス行動とは、ある人が、ある動機に基づく意図を持って他の人に何らかの影響を与えようとしてとる行動であり、人が社会を作ることによって生じるもので、社会を作る根拠でもあるとして、論理を組立てようとしている。

(3-2) サービス価値モデル

サービスは、顧客にとっての価値創造あるいは顧客との価値共創と捉えられている。サービス価値をどうモデル化するかが大きな研究課題である。価値の捉え方として、Value-in-use⁶⁾、Experience Value⁷⁾、Value-in-Context⁸⁾、などが議論されており、サービス研究に大きな影響を与えてきた。20世紀の製品中心のビジネスにあっては、製品の性能や機能が価値を決める大きな要素であった。しかし、価値は顧客が決めるという考え方が、顧客の経験価値などの概念とともに生まれてきた。経験価値は顧客が作り上げ

るものであり、ここで、顧客との価値共創という非常に重要な考え方が Prahalad⁹⁾によって提案された。経験価値、顧客との価値共創、という基本的な考え方は、価値をモデル化する上で非常に重要であり、現在も研究がつづけられている。Kameoka¹⁰⁾は、サービスの顧客総合価値は、製品価値、サービス価値、顧客が独自に付加する価値の3つを総合したものであるというモデルを提案し、そのためには価値創造のための知識創造が必要であるとして、サービスにおける知識科学的なアプローチの重要性を指摘した。Kosaka¹¹⁾はシステム科学と知識科学の視点からサービスを捉え、価値を提供者と利用者の関係性を場の概念で捉えるサービス場概念とそれに基づくサービス価値創造プロセスを提案した。また、Ueda¹²⁾らは、価値を歴史的にサーベイし、価値共創に関するモデルを提案し中島ら¹³⁾はサービス実践における価値共創モデルを提案している。

(3-3) サービスシステム応用モデル

サービスシステムを具体的に構成する上でのガイドラインともなるべきモデルである。モデルのタイプとしては、統一モデリング言語 (Unified Modeling Language, UML) にみられるとおり、システムの静的な要素間関係を表す構造モデルと、システムの要素間の動的な振舞いを表す振舞いモデルに分けることができる。Alter¹⁴⁾は、UMLに基づきサービスシステムの構造を示した。これまでも、多くの試みがなされてきたが、サービスシステムを多面的に捉えた優れた構造モデルとなっている。一方、振舞いモデルについては、サービスシステムの実態は、提供者と受容者の間の相互のやり取りであることから、ペトリネット等の離散事象システムとしての表現が用いられてきた。この方向性は、製造技術からのサービス分野への接近によって顕著となっている。Shimomuraら¹⁵⁾は、サービスシステム構築のための計算機支援システムを提案しているが、その中で扱うモデルはペトリネットや次に述べる情報システム分野のモデルを想定している。マーケティング分野では、サービスの提供者と利用者の間でのインタラクションやその行動規範などを対象にしたサービスシステムモデルとして、Grove & Fisk¹⁶⁾によるサービス劇場モデルがある。サービスシステムとは、サービス提供者が顧客に向かって展開する演劇とみなすとのメタファが、関与者の即興的かつ社会的な関係をみるのに適切であるとするモデルである。また、情報システム分野では、インターネット上のサービスを統合して複合サービスを実現することを目指し、サービス統合の振舞いを記述するために、ソフトウェアに関する国際標準化団体 The Object Management Group (OMG) の仕様として Business Process Modeling Notation (BPMN)が 2000年代に開発され、さらに、Business Process Model & Notationへと進展を遂げている。

これまでの、サービスシステムのモデルは、一つの企業の振舞いとして記述されるのがほとんどであった。しかし、企業は単一に存在するのではなく、複数の企業から形成されるエコシステムとして捉えることが望まれるようになってきている。Funabashi¹⁷⁾は、企業間のサービスが連鎖する参照モデルを提案している。

(3-4) サービスライフサイクルモデル

電話に代表されるように、利用者が増えることによって価値が増える現象は、ネットワーク効果、あるいはバンドワゴン効果と呼ばれ、古くから研究がなされてきている¹⁸⁾。この発展として、両面市場 (Two-sided markets) と呼ぶモデルを、Rochet & Tirole¹⁹⁾は提案した。例えば、クレジットカード発行機関は、カード保有者と商店という二種類

のサービス顧客を持ち、この顧客同士が相互依存性を持ちながらネットワーク効果を形成するというモデルである。黒田²⁰⁾は、日本の携帯電話サービス事業者の価格政策が、電話利用者とコンテンツ提供事業者の成長にどんな影響を与えてきているかを分析した。

サービスシステムのライフサイクルを評価するために、System Dynamics を代表とするシミュレーション手法が採用される。このほとんどが、個別システムの分析に留まっているが、Tian ら²¹⁾は、経済合理的な行動をするマルチエージェントモデルで、サービスエコシステムをシミュレーションする枠組みを提案している。

(4) 科学技術的・政策的課題

サービスシステムは、マーケティング分野から端を発して、様々な研究背景を持った研究者が参入して始まっている新しい研究開発分野である。多様な研究者が自らの位置を認識して相互に啓発して発展的にサービスシステム分野を展開する上で、サービスシステムのメタ構造を表す参照モデルを追及する研究領域が極めて重要な役割を果たす。

これまでの日本の研究開発では、概念的なモデルでは先端的な発信を行い、また、実社会を対象とした多くのシステム開発研究も進められているが、概念的モデルを念頭に置きつつ個別のシステム事例を抽象化した参照モデルを構築しようという取組みは、あまり活発ではない。今後、多様な展開が想定されるサービスシステムの標準化のリーダーシップを確保するためにも、格段の注力が望まれる研究領域である。

近年のサービス科学やサービスシステムの目指す「顧客との価値共創、価値モデル」の研究開発は、従来のサービス産業だけでなく、製造業、情報産業にとって重要課題である。すべての産業の共通基盤として、サービスシステムを位置づけるような産業政策的な配慮が必要と考える。また、サービスは典型的な横断型科学技術であり、多くの異なる専門分野の研究者、実務者が、サービスの価値を議論する場が重要である。特に価値モデルに対する数理的なアプローチを活性化するための施策が望まれる。こうした活動を活性化する目的でサービス学会が設立されたが、政策的にもこうした学会の活性化を支援することが望まれる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

システム科学技術分野からのサービスシステムへの貢献は、1990年代の、IEEE の System, Man, and Cybernetics 部門 (Society) からの呼び掛けによるところが大きく、伝統的な最適化アルゴリズムやモデリングに立脚した話題が多かったが、その後生まれた IEEE の Systems 協議会 (Council) が関心を高めており、システム構築法の観点からの取組みの活発化が予想され、サービスシステムの参照モデル開発への影響も大きくなるであろう。産業面では、通信、エネルギーなどのプラットフォームビジネスが社会的に大きな影響力を持つと予想され、このビジネス意思決定における理論基盤を与える、両面市場モデル、あるいは、多面市場 (Multi-sided markets) モデルには、多くの取組みがなされると思われる。日本のサービス科学研究者からの取組みの立ち上りが期待される話題である。

アジア地区、特に、中国において注目すべき動向は、サービスシステムを対象とした
コンファレンス : International Conference on Service Systems and Service

Management (ICSSSM)を IEEE の SMC との協賛で、毎年実施し、2014 年度で 11 回目の実施となる等、大学を中心にサービス研究を進めていることである。現状では、事例分析や OR 的な研究が多く、サービスを価値創造システムと捉えたシステム論的なアプローチは少ないが、欧米の大学との連携が積極的に進められており、大学を中心に研究開発レベルのポテンシャルは急速に向上するものと思われる。東南アジアのマレーシアやタイにおいても、サービスサイエンスへの注目度は高く、ビジネス系の学部を中心にサービスサイエンスのコースを開始した例もある。

（６）キーワード

参照モデル、概念モデル、価値モデル、実装モデル、ライフサイクルモデル、構造モデル、振舞いモデル、両面市場モデル

（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	◎	→	・製造技術の観点から、新たな概念モデルの構築に寄与した。日本が直面する課題に対応した社会ビジョンの基盤となる新たな概念モデルの発信が期待される。
	応用研究・開発	△	→	・具体的なシステム開発研究は行われているが、この結果を抽象化して参照モデルを作るという取組みは希薄である。
	産業化	×	→	・産業界が連携して、標準モデルを開発するという機運には至っていない。
米国	基礎研究	◎	→	・マーケティング学からサービス学を生み出したように、時代の要請に対応した新たな概念モデルで世界をリードし続けている。
	応用研究・開発	○	↗	・サービスシステム科学が多様な分野の融合領域であることを認識しており、新しい学問領域を自ら形成するというスタンスを維持している。
	産業化	◎	→	・BPMNの標準化にみられるとおり、産業のニーズに応じて、モデルの標準を進めるとと思われる。
欧州	基礎研究	○	→	・米国や日本ほど実績を持ち合わせていないが、脱温暖化等で新たな概念モデルを定期する素地はある。
	応用研究・開発	◎	→	・個別の事例を汎化する基盤が整っている。離散事象システムモデルはもとより、両面市場モデルなど具体的な成果を生み出している。
	産業化	○	→	・標準化に大きな関心を持っているが、産業界の強い米国に続く形での展開と思われる。
中国	基礎研究	△	→	・概念モデルを生み出すには世界が受容する社会観が必要である。
	応用研究・開発	○	↗	・サービスシステム開発の実践が幅広く行われており、その抽象化についても高い関心もたれている。
	産業化	△	↗	・米国企業の研究所での取組みに注目すべき動きがみられる。
韓国	基礎研究	-		
	応用研究・開発	-		
	産業化	-		

（註 1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註 3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Hill, P. On Goods and Services. *Review of Income & Wealth*. 1977, vol. 23, no. 4, p.315-338.
- 2) Tomiyama, T. A manufacturing Paradigm toward the 21st Century. *Integrated Computer Engineering*. 1997, vol.4, p.159-178.
- 3) Vargo, S. L.; Lusch, R. F. Evolving to a New Dominant Logic for Marketing. *Journal of Marketing*, 2004, vol. 68, no. 1, p. 1-17.
- 4) 吉川弘之. サービス工学序説. *Synthesiology*. 2008, vol. 1, no. 2, p. 111-122.
- 5) Kosaka, M.; Shirahada, K. New Trends in Service Science and Education for Service Innovation. *Progressive Trends in Knowledge and System-Based Science for Service Innovation*. IGI Global. 2013, p.1-21.
- 6) Lusch, R. F. ; Vargo, S. L. *The service dominant logic of marketing*. M. E. Sharpe, Inc. 2006.
- 7) Pine, Joseph B. II; Gilmore, James H. *The Experience Economy*. HARVARD BUSINESS SCHOOL PRESS. 1999.
- 8) Matthias, B.; Schahram, D.; Florian, R. A survey on context aware systems. *Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 2007, vol. 2, no. 4, p.263-277.
- 9) Prahalad, C. K.; Ramaswamy, Venkat. Co-creating Unique Value with Customers. *STRATEGY & LEADERSHP*, 2004, vol.32, no.3, p.4-9.
- 10) Kameoka, A. Services Science Empower Next Generation NOT: Just-in-Time Innovation Management by Service Layer Integrated Strategic Roadmapping. In Hefley, B.; Murphy, W. eds. *Service science, management and engineering: education for the 21st century (Service Science: Research and Innovations in the Service Economy)*. Springer. 2010, p.363-364.
- 11) Kosaka, M.; Doan, Minh Chau; Shirahada, K.; Wang, J. Service Field Concept for Service Value Creation. *Springer Proceedings in Complexity, The 8th International conference on Knowledge Management in Organizations*, Springer. 2013, p.13-23.
- 12) Ueda, K.; Takenaka, T.; Vancza, J.; Monostori, L. Value creation and decision-making in sustainable society. *Manufacturing Technology*. 2009, vol. 58, p.681-700.
- 13) 中島秀之, 平田圭二. サービス実践における価値共創のモデル. *サービソロジー*. 2014, vol.1, no. 2, p.26-31.
- 14) Alter, S . Metamodel for Service Design and Service Innovation: Integrating Service Activities, Service Systems, and Value Constellations, *Proc. of 32nd International Conference on Information Systems*. 2011, p.1-20.
- 15) Shimomura, Y. et al. A Proposal for Service Modeling. *Proc. of EcoDesign 2003*. 2003, p.75-80.
- 16) Grove, S. J.; Fisk, R. P. The Service as Theater. *Advances in Consumer Research*. 1992, vol. 19, p.455-46.
- 17) Funabashi, M. A Reference Model for Service Systems Building Transdisciplinary Research Community. *Proc. of ACIS2014 (to appear)* . 2014.

- 18) Rohlfs, H. J. Bandwagon Effects in High Technology Industries. MIT Press. 2003.
- 19) Rochet, J. C.; Tirole, J. Platform Competition in Two-sided Markets. J. of the European Economic Association 1. 2003, vol.4, p.990-1029.
- 20) 黒田敏史. 両面市場モデルによる携帯電話コンテンツ配信プラットフォームの価値構造の分析. 東京経大会誌. 2010, vol. 267, p.171-189.
- 21) Tian, C. H.; Ray, B. K.; Lee, J; Cao, R.; Ding, W. BEAM: A Framework for Business Ecosystem Analysis and Modeling, IBM Systems J. 2008, vol. 47, issue 1, p.101-114.

3.6.3 価値共創過程のモデリング

(1) 研究開発領域名

価値共創過程のモデリング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

サービスシステムにおける価値共創過程を、顧客とサービス提供者間の相互作用としてとらえ、その説明・分析のためのモデルを構築しようとする研究開発領域である。さらには、そのようなモデルを構築するためのメタモデリング手法も対象とする。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サービスシステムは、価値を創造する資源(人間、技術、組織、共有された情報)がサービス提供者と顧客の間でダイナミックに相互作用する仕組みである¹⁾。その基本的な相互作用は、顧客およびサービス提供者間の相互作用だけでなく、これらの相互作用を支えるプラットフォームとの相互作用も重要となってきた。多くの場合、これらの相互作用が非線形的に関係し合うため、サービスシステムは、必然的に記述や予測が難しい挙動をする複雑なシステムとなる。

近代的な価値共創メカニズムは、ICTによりビジネス・モデルやサービス形態が実現され、顧客を共創者として巻き込む仕組みとそれを可能とする制度、組織のイノベーションが不可欠である²⁾。サービスサイエンスは、サービスシステムの共通の基盤を見出すことに最大の関心があり、そのコアとなる価値共創過程の分析・解明のためのモデル構築は、その中心的課題である。

サービスプロセスの古典的なモデルとしては、Parasuraman らによる SERVQUAL モデルが挙げられる³⁾。SERVQUAL モデルは、知覚品質における概念形成、計測のための基準、手法を生みし、80年代よりサービス品質研究の中心であった。その根幹をなすギャップモデルは、顧客が抱いていたサービスへの期待と、実際にサービスを受けた知覚のギャップを少なくし、実際にサービスを受けた顧客からのフィードバックによりサービス品質向上を目指す方法である。このモデルでは、サービス提供者と顧客の非対称性、サービス品質の可観測性・客観性・文脈非依存性などが仮定されており、そこに限界がある。

この点を改善解決しようとして提案された1つのモデルが、価値共創過程の4段階モデルである。このモデルは、サービスシステムにおける価値共創過程を、価値共創の最初の段階を共同体験(co-experience)段階、次にサービスを体験することで相互の内部モデルを予測・観察・同定する内部モデル共同定義(co-definition)段階、共有化された内部モデルの最適化を目指し、顧客とサービス提供者がサービスレベルを高め相互作用を行う共同上昇(co-elevation)段階と共同開発(co-development)段階、の4つの段階により説明・分析するモデルである⁴⁾。

さらに、この4段階モデルのマネジメントのために提案されたモデルとして、価値協奏プラットフォームモデルがある^{5), 6)}。このモデルは、サービスシステムを、価値共創過程とそれを支えるプラットフォームの2階層から成り立つとするモデルである。価値協奏プラットフォームが価値共創過程を支援しマネジメントするためには、(1)巻き込み

戦略(Involvement strategy)、(2)目利き戦略(Curation strategy)、(3)エンパワーメント戦略(Empowerment Strategy)の3つの戦略が重要であるとし、これらの戦略を、先に述べた価値共創の4つの段階に係る形で論じている。

価値共創過程を知識創造過程モデル(SECIモデル)と対応づけて提案したのが KIKI モデルである⁷⁾。これは、サービス場概念⁸⁾を前提として、サービス価値共創過程を、サービス提供者と顧客の情報共有(Knowledge sharing)、サービス場の同定(Identification of service field)、新サービスの創造(Knowledge creation of new service)、サービスの実装(Implementation of new service)、の4つのステップで構成する。また、提案モデルを具体事例と関係づける実証的な研究も行われている⁹⁾。

Process-Chain-Network(PCN)解析は、サービスオペレーションマネジメント(Service operations management, SOM)の分野で提案された、顧客とサービス提供者が形作るネットワーク型プロセスとそこでの相互作用を視覚的に表現する PCN Diagrams を用いたサービスシステム解析の枠組みである¹⁰⁾。PCN 解析は、与えられたサービスオペレーションのネットワークにおける価値を明らかにし、プロセスイノベーションの可能性を解析することを狙っている。これにより、サービスオペレーションマネジメントの基本的概念とマネジメント上の意義が明確に表現されるとしている。なお、提唱者の Sampson は、PCN 解析をより発展させることによって、より一般的な The Unified Service Theory を構築することを目指している¹¹⁾。

サービスインタラクションをモデル化したものとして、Interact-Serve-Propose-Agree-Realize (ISPAR)モデルがある。このモデルは、2つのサービスシステム間の価値共創の相互作用をサービスインタラクションと呼び、これを、(1)他のサービスシステムにサービスインタラクションを提案する(Proposal)、(2)そのプロポーザルに同意する(agreement)、(3)そのプロポーザルを実現する(realization)、の3つの行為の流れ(フロー)として記述する。その上で ISPAR モデルは、サービスインタラクションのプロセスフローを、規範的なモデルとして樹形図の形で記述する¹²⁾。ISPAR モデルの有用性は、C2C、B2B、公共サービスなど多様なタイプのサービスインタラクションに対して、共通する統一的な視点を与え、サービスインタラクション測定のための尺度を開発する基礎を提供できる点にある。

Service System Modeling は、サービスをモデリングするためにはどのような概念が必要かを理解するのを支援するいわば、モデリングのためのモデリングを目指すメタモデリング手法である¹³⁾。サービス工学でこれまで開発されてきた多様なモデリング手法を俯瞰し、それらを基礎にフォーマルなメタモデリングアプローチとして体系化・統合したものであり、サービスモデリングの参照基盤として、ヨーロッパを中心に広く注目されている。

(4) 科学技術的・政策的課題

本研究開発課題領域は、Service science management and engineering (SSME)における本流であり、世界的規模で、多様なモデル開発が進んでいる。ただ、それらのモデルは多くの場合、現状の個別のサービスシステムの説明・解析レベルにとどまっており、これらに基づいた政策提言、処方箋提示までには必ずしも至っていない。その意味で、特に我が国においては、現状の理解・分析から踏み出た政策へ展開・貢献できる仕組み作りが求められるところである。その際は、システム思考、デザイン思考など、Trans-, Inter-, Multi-disciplinary なアプローチが今までにまして重要なことは言うまでもない。実際、米国、欧州（特に北欧）においては、サービスシステムデザインにおけるそのようなアプローチの重要性と有用性は、研究者、実務家、政策担当者、投資家の共通の理解となっている。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

現在では、先進主要国の GDP の 3 分の 2 以上がサービスセクターによるものであるため、サービスシステムにおける価値共創過程を特に ICT をエネブラーとして活かしながらイノベーションを引き起こしたいという期待はきわめて強い。その中において、特に欧州における FuturICT と Horizon 2020 の 2 つの巨大研究開発プロジェクトの動向は特に注目される。

FuturICT は、ICT と複雑性科学、社会科学を統合してパラダイムシフトを引き起こし、社会と ICT の共生を目指す EU が主導する巨大研究開発プロジェクトである¹⁴⁾。新たな社会的な価値の創出を目指した ICT の革新的イノベーションを通して、地球レベルでの ICT プラットフォーム Living Earth Platform の構築を目指す。これにより、サステナビリティとレジリアンスに特に注目しながら、地球レベルで互いに相互作用を行う社会システムを理解し、マネジメントすることを狙っている。このプロジェクトはいくつかのサブプロジェクトに分かれているが、それぞれの規模は、年間 1 億ユーロの予算が見込まれている。

さらに、Horizon 2020 は、2014 年から 2020 年まで 7 年間に渡り、総額 800 億ユーロというかつてない規模で EU 全体が進めている、技術的革新・ブレークスルーを狙う研究イノベーションプログラムである¹⁵⁾。基礎研究から産業界のリーダーシップまで社会科学的側面も含めて世界最高クラスの科学技術を開発し、ICT、ロボティクスなどのイノベーションを通して、サービスイノベーションを引き起こすことを狙っている。

(6) キーワード

価値共創過程、価値協奏、ギャップモデル、KIKI モデル、PCN 解析、ISPAR モデル、Service Systems Modeling、FuturICT、Horizon 2020

（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	△	→	・システム科学等をテコに社会科学と科学技術を融合する真のサービス科学への貢献と海外に向けた情報発信が少ないのは残念。HSSE、FSCなど関連する国際会議のプロシーディングを見ると、これは明らか。
	応用研究・開発	○	→	・いわゆるサービス工学と呼ばれる定量的実証的研究が盛んに行われている。 ・個別的、応用的、事例的研究が盛ん。
	産業化	△	→	・サービス科学とは独立に産業界が独自の必要性に駆られて実施している印象。
米国	基礎研究	◎	↑	・Service Dominant Logic (S-D Logic)など、研究開発領域を強気に牽引している。
	応用研究・開発	◎	↑	・教育プログラムの開発と実施、あるいはISSIPの主導など学官を巻き込みながら、着実に展開している。
	産業化	◎	↑	・著名なICT関連企業を巻き込むISSPや、防衛産業など巨大企業をバックとする INCOSE(International Council on Systems Engineering)など、産業化の舞台が、拡大している。
欧州	基礎研究	◎	↑	・特に、北欧学派（スウェーデン、フィンランド）、フランス（RESER）は、20年以上の地道な研究を基礎に、サービスイノベーションモデルなど、さらに発展している。
	応用研究・開発	◎	↑	・特に、北欧、ドイツが価値共創モデルの応用・事例研究に力を入れている。 （たとえば、フィンランドのファンディングエージェンシーTEKESおよびVTTにおけるポスト・ノキア戦略）
	産業化	○	↑	・高齢化社会を迎えて、価値共創を実現する具体的な産業化に大きな関心を示している。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) University of Cambridge and IBM. Succeeding through service innovation. 2008.
- 2) 木嶋恭一, 出口弘, 寺野隆雄. システム科学・情報学から見たこれからのサービスサイエンス:1.サービスのためのシステム・サイエンス. 情報処理. 2014, vol. 55, no. 2, p. 126–131.
- 3) A. Parasuraman; V. A. Zeithaml; L. L. Berry. A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research. *Journal of Marketing*. 1984, vol. 49, no. 4, p. 41–50.
- 4) J. Galbrun; K. Kijima. A co-evolutionary perspective in medical technology: Clinical innovation systems in Europe and in Japan. *Asian J. of Tech. Innovation*. 2009, vol. 17, no. 2, p. 195–216.
- 5) Kijima, K.; Rintamki, T.; Mitronen, L. Value Orchestration Platform: Model and Strategies. presented at the Proceedings of Human Side Service Engineering 2012. 2012.
- 6) K. Kijima. Value Orchestration Platforms in Business and Communities. Invited Lecture presented at the Aalto University. 2014
- 7) Kosaka, M.; Zhang, Qi; Dong, W.; Wang, Jing. Service value co-creation model considering experience based on service field concept. *IEEE International Conference on Service System and Service management (ICSSSM2012)*. 2012.
- 8) Kosaka, M.; Doan, Minh Chau.; Shirahada, K.; Wang, J. Service Field Concept for Service Value Creation. *Springer Proceedings in Complexity, The 8th International conference on Knowledge Management in Organizations*. 2013, p.13-23 .
- 9) Sakano, H.; Kosaka, M. New Product Planning Process in the Age of Service Dominant Logic. *PICMET2014*. 2014.
- 10) Sampson , S. Visualizing Service Operations. *Journal of Service Research*. 2012, vol..15, no. 2, p. 182–198.
- 11) Sampson, S. The Unified Service Theory. *Handbook of Service Science*. 2010.
- 12) Maglio, P.; Spohrer, J. The Service System is the Basic Abstraction of Service Science. the 41st Hawaii International Conference on System Sciences. 2008, p. 1–10.
- 13) Fähnrich, K. P.; Böttcher, M. Service Systems Modeling. *Proceedings First International Symposium on Services Science ISSS'09*. 2009, p. 1–13.
- 14) Helbing, D. Introduction: The FuturICT knowledge accelerator towards a more resilient and sustainable future. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2012, vol. 214, no. 1, p. 5–9, Dec. 2012.
- 15) "What is Horizon 2020?". *Horizon2020*.
<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>

3.6.4 サービスデザイン

(1) 研究開発領域名

サービスデザイン

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

社会の高度化・成熟化の進行に伴う経済のサービス化より、デザインの対象がハードからソフトへ、モノからサービスへ、プロダクトからシステムへ拡大してきた。サービスイノベーションのシステムティックな創出を目指し、物理的なモノだけではなく、サービスインタラクション、サービスシステムをデザインの対象とする、新しいデザイン領域としての「サービスデザイン」をサービスシステムの研究開発領域として概観する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1990年頃から始まった初期のサービスデザイン研究^{1, 2)}は、サービスデザインと既存のデザイン領域の違いを強調していた。その後、米国、欧州を中心に、他のデザイン領域や、マーケティング、マネジメント、エンジニアリングなど関連する多様な領域の研究開発成果の集積により基礎づくりが始まった。デザイン領域では、インターフェースからインタラクションのデザインへと研究開発領域が拡張されてきた。インタラクションデザイン(Interaction Design)およびユーザー中心設計(User Centered Design、UCD)、人間中心設計(Human Centered Design、HCD)では、主に製品のユーザーインターフェース(User Interface、UI)やその使用によるユーザーエクスペリエンス(User Experience、UX)を総合的にデザインする。一方、サービスインタラクションの研究開発では、それらの成果を基礎とし、ユーザーだけではなく多様なステークホルダーを対象に、役割の再設計など組織に関するマネジメント要素も研究開発対象とする。さらに、サービスサイエンス（初期の領域が拡張され Service Science、Management、Engineering、+ Design、Art and Public Policy、SSMEDAP と広がってきている）³⁾や製品サービスシステム(Product-Service Systems、PSS)の進展とともに、サービスデザインの研究開発対象はサービスシステム、サービスライフサイクルへと拡張されてきている。

この領域における最近の流れのひとつは、サービスデザインやサービスインタラクションに関する理論の研究開発であり、サービスデザイン独自の論理を構築していこうとするアプローチである。様々なタッチポイントを総合的にデザインすることによる複雑さ、顧客の持つ資源の利用と統合、多様な顧客に対するサービスのカスタマイズ方法などが重要となる。一方、他の領域の手法や理論を取り入れていこうとするアプローチでは、サービスシステムを対象とした研究開発⁴⁻⁶⁾、サービスデザインとマネジメント領域の融合研究開発^{7, 8)}に注目する。

2004年に米国で提案され、現在では欧州、日本、中国などに広まったサービスサイエンスの研究者を中心に、サービスシステムに関する理論研究、デザイン手法、教育、応用に向けた実装技術などの研究開発が進められている。米国の National Science Foundation (NSF)主催の Workshop to Develop a Research Agenda for Service Innovation⁹⁾では、Human Centered Service Systems (HCSS)を今後強化すべき研究開発領域として取り上げている。HCSSは、人・情報・組織・技術からなる、相互の便益

のために協業するシステムである。例えば、ホスピタリティ、ヘルスケア、オンラインショッピング、金融システム、交通システム、政府のサービスなど多様なサービスシステムがある。人的要素に起因する HCSS の複雑性の解明に向けた研究や認知コンピューティング等の研究開発が求められている。また、米国起点のデザインコンサルティング組織の IDEO¹⁰⁾、ZIBA¹¹⁾や教育組織としての d.school¹²⁾をはじめとするデザイン思考の活動がサービスデザインに影響を与えている。

欧州では、デザインとマネジメントの関係性に関する研究開発が行われている。サービスデザインがどのように組織の変革に関与するか、ステークホルダーとの関係性をどのようにマネジメントすべきかなど、サービスデザインが組織戦略・経営に及ぼす影響の解明が進められている。また、サービスデザインをサービスとして提供するデザイン会社やコンサルティング会社が次々と設立され、企業、行政、NPO などと一緒にサービスデザインの実践を進めて、一定の成果が出ている。Design Council 等の活動と共に、サービスデザインの実践として英国が先行し、医療、健康福祉サービスの改善等で効果をあげている。

これらの研究開発以外に、手法・プロセス・ツールなどのデザイン技術・方法に関する研究開発¹³⁾、サービスデザイン教育などに関する研究開発が進行している。ソーシャルイノベーションなど市民参加のデザインでは、参加型デザイン (Participatory Design) などの手法の研究開発も進められている。

教育に関しては、サービスデザインの授業をプログラムとして最初に取り入れた大学は、Köln International School of Design (KISD)である。その後、ミラノ工科大学、カーネギーメロン大学等に設置され、特に北欧ではデザインおよびイノベーションに関する教育が広く実施されている。欧州では、EU 全体に対する Horizon 2020、フィンランドやスウェーデン、ドイツ、英国、イタリアにおける大学教育のカリキュラムの充実、新しい産業の創出等、研究開発から人材、産業に至るエコシステムを構築し取り組んでいる。米国では、NSF を中心に複雑化するサービスシステムの課題設定を行い、研究開発プログラムの作成に向け動き出した。また、大学と産業が共に、21 世紀のスキルの創出に向け、昨年度より T-Summit 2014: Cultivating Tomorrow's Talent Today (T 字型人材の開発)が行われている。さらに、市場にはデザイン力を十分に活用可能な産業が生まれている。

研究開発者の交流の場として、2008年に非営利団体として Service Design Network¹⁴⁾が設立され、サービスデザインの研究開発成果および実践的な事例を共有している。日本においても、2013年に SDN Japan 設立され、活動が開始された。コンファレンス¹⁵⁻¹⁷⁾が開催され個別のデザイン領域の最適化に注力してきた実務家・研究開発者が協同し、サービスデザインの取り組みは基礎づくりという新しいフェーズへ移行しつつある。

(4) 科学技術的・政策的課題

サービスデザイン領域の特徴の一つは、実践型の研究開発が多くを占める点である。これらの事例研究をどのように整備していくのか、研究開発の共有の場において、ポスター、ワークショップなどをどのように有効活用していくのか等、今後の検討課題である。また、人材教育に関して、日本では、大学教育および企業における人材に対する要求は、何年来変化が乏しい状況である。サービスイノベーションを創出するために、サービスデザイン人材（新しいサービスシステムをデザインし、経営・オペレーション等で実践をリードできる人材）を育て、それらの人材を活用するエコシステムを産学官が協業して緊急に構築する事が望まれる。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

すでに記述したが、欧州での産官学のエコシステム、米国での、NSF を中心とする Human Centered Service Systems (HCSS)研究の強化、大学と産業の協業による 21 世紀のスキルの創出(T-Summit 2014: Cultivating Tomorrow's Talent Today)、デザインに関する新産業創出に注目すべきである。欧州（特に英国）では、政府をはじめとする公共的機関への導入が進んでいる。非営利・公共サービスでの政府主導の取り組みによって、通常産業化しにくい領域の効率化・新しい価値を創出する取り組みとして重要であろう。

韓国では、国が産業を支援し、企業（LG・サムスン等）は積極的に産業化を試みている。日本におけるデザインの領域をサービスにまで広げることができれば、これまで実施してきている企業・政府の取り組みで同様の施策を実施する事も可能であろう。また、新しい研究領域として注目されているサービスデザインと経営領域に対して、おもてなしや日本のサービス品質経営を理論化し世界をリードするため、この領域の研究開発力を強化していく事も重要であろう。

(6) キーワード

サービスデザイン、ユーザーエクスペリエンス、ユーザーインターフェース、インタラクションデザイン、ユーザー中心デザイン、人間中心設計、サービスサイエンス、サービスシステム、製品サービスシステム、Human Centered Service Systems (HCSS)、参加型デザイン

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 日本のサービスデザインの基礎研究は、主な大学を中心に始まったという状態である。デザインと起業教育を行い、人材のエコシステムを構築するMEXTのEDGEプログラム等がトリガーとなり、この活動が加速されることが望まれる。 工業デザインのプログラムを持つ大学が中心となり、研究から教育プログラムへと発展してきた。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> サービスデザインの特徴上、実践的な現場に関わる研究・開発が多く、日本においては企業が中心となり行われている。 日本の企業では、早くからデザイン部門を保持している所もあり、今後のスマートコミュニティ等のデザイン力を要するビジネス機会の拡大によって、益々この傾向は強まる。 一方、未来の生活やサービスをイメージし視覚化するためにデザインを活用した公共サービスを対象とした活動も多く行われている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 企業での人材の受け入れ・活用、新産業創出の機会の増大等、制度においても変革が求められる。 企業内にデザイン部門が存在し、今後プロダクトだけではなく、サービスシステムを含む活動をしていく事が予想される。
米国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> これまで、サービスデザインに関する研究はIT技術関係にとどまっていた。今後は、米国を中心に広がってきたサービスサイエンス研究を基礎に、サービスデザイン研究が進むと考えられる。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> スマートシティ等、ビジネスの拡大と共に、企業において関連研究が進んでいる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業においても、サービスデザイン自体をリードする企業が存在する。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> サービスデザインの黎明期から研究領域をリードしている。今後もこの状況は継続すると考えられる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 同上
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> サービスデザインを活用する新産業も生まれてきている。今後は、欧州のみではなく、他の地域での展開が待たれる。 欧州（特に英国）では、政府をはじめとする公共的機関への導入が進む。
中国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき成果は見られない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 手法およびツール開発が行われている（台湾）。中国本国では、ITに関する研究・開発に留まっている。 国外（日本等）で教育を受けた教員が研究・教育を開始している。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 国外（日本等）の企業との協同プロジェクトが実施されている。
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国が産業を支援する事によって、基礎研究も充実してくる事が予想される。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 手法およびツール開発が行われている。サービスデザインをリードする研究者が存在する。
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国が産業を支援し、企業（LG・サムスン等）は積極的に産業化を試みている。サムスンはデザイン部門が1,000人を超えており、サービスデザインの専門の組織が存在する。LGは、本社の研究所としてサービスイノベーション組織を所持する。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Pacenti; Elena; Sangiorgi; Daniela. Service Design Research Pioneers. Design Research Journal. 2010, vol. 1, no. 10, p.26-33.
- 2) Meroni; Anna; Sangiorgi; Daniela. Design for Services. Gowe. 2011.
- 3) Maglio; Paul, P.; Kieliszewski; Cheryl, A.; Spohrer; James, C. Ed. Handbook of Service Science. Springer. 2010.
- 4) Demirkan; Haluk; Spohrer; James C.; Krishna; Vikas eds. The Science of Service Systems. Springer. 2011.
- 5) Demirkan; Haluk; Spohrer; James C.; Krishna; Vikas eds. Service Systems Implementation. Springer. 2011.
- 6) Kijima, Kyoichi ed. Service Systems Science. Springer. 2014.
- 7) Macintyre; Mairi; Parry; Glenn; Angelis; Jannis eds. Service Design and Delivery. Springer. 2011.
- 8) Sawatani, Yuriko. Toward Research on Designing a Service System. Serviceology of Services. 2014, p. 227-235.
- 9) NSF Workshop to Develop a Research Agenda for Service Innovation.
<http://ccss.ucmerced.edu/nsf-workshop-attendee-info/>
- 10) IDEO. <http://www.ideo.com/>
- 11) Ziba. <http://www.ziba.com/>
- 12) d.school. <http://dschool.stanford.edu/>
- 13) Stickdorn; Marc; Schneider; Jakob. This is Service Design Thinking: Basics, Tools, Cases. Wiley. 2012.
- 14) Service Design Network (SDN). <http://www.service-design-network.org/>
- 15) Freund, Louis E.; Spohrer, James C. Eds. The human side of service engineering. 2012.
- 16) Service Design and Innovation Conference (ServDes.). <http://www.servdes.org/>
- 17) International Service Innovation Design Conference.
<http://www.indi.unimas.my/ISIDC2014/>

3.6.5 価値共創の測定・評価

(1) 研究開発領域名

価値共創の測定・評価

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

サービス経営分野で急速に鍵となる概念となりつつある「共創価値」に関して、概念定義の明確化と、その数量化を可能にする計量モデル・測定尺度、およびそれを活用した価値共創の評価方法に関する研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

サービスの提供者と被提供者が共に資源を供出し、相互作用において価値を創造する「共創価値」の概念は 1990 年代から提唱され、近年の世界経済のサービス化と物財のコモディティ化の急速な進展に伴ってその重要性を高めている。ここでは、価値共創の概念定義、共創価値の計測評価、ビジネスにおける価値共創の視点から研究開発領域を俯瞰する。

(3-1) 価値共創の概念定義

価値共創の概念自体の歴史は古く、1980 年に既に A.Toffler¹⁾が Prosumer(Productionする consumer、すなわち、生産に関与し生産の一部を担う消費者)という造語を提示しており、その後、同様の潮流として R.Norman²⁾が BtoB におけるサプライヤー・アセンブリメーカー・卸・小売などが従来の役割を変えて双方向関係を結ぶ状態を価値星座(Value Constellation)と表現している。近年では、P.Kotler³⁾のマーケティング 3.0 は複雑化・高度化する現代における消費者ニーズへの対応策として、CK. Praharad & V.Ramaswami はイノベーションの源泉として共創価値を鍵概念として提示している⁴⁾。なかでも、共創価値概念の普及に最も貢献したのは、サービス・マーケティング研究における Vargo & Lusch の Service Dominant Logic(S-D Logic)と、それにドライブされた関連研究である⁵⁻⁸⁾。北欧諸国を中心とするノルディック学派は S-D Logic を理論的に詳細に検証し、対案としてサービスロジック⁹⁾を提案している。S-D Logic におけるサービスは提供者と被提供者が資源を提供しあって共創する仕組み全体を指すことから、価値共創プロセスと同義である。これまで提供者が事前に製品に埋めこんで被提供者の金銭と交換してきた価値(Use Value)から、被提供者の価値生産プロセスへの参加、交換後の使用段階において刻々と変化する文脈下で主体として生産する価値(Value in Use)へ焦点が移行することが指摘されている。すなわち、サービスには提供者視点と被提供者視点が必要になる。また、製造物の廃棄を減らすことが製造業のサービス化推進の初期の動因であった欧州では、サービスエコシステムの研究が盛んである¹⁰⁻¹²⁾。これは、価値共創活動の参加者が、社会、すなわち、行政・当該企業の取引先・地域住民など広範囲に及ぶことを意味する。世界的にみても、環境負荷・エネルギー問題、BOP 問題等の顕在化から、企業は社会的責任の遂行を強く求められるようになった。CSR(Corporate Social Responsibility)は広く企業に認知され、国際規格 ISO 26000 にも採用されている。しかしながら、企業にとってコスト要因にしかならない CSR では本格的な取り組みに至らなかったことから、新たに企業活動に直結し収益を生む社会貢

献活動である CSV(Creative Shared Value)が注目されている。

S-D Logic は概念的であり企業の実務的なマネジメントへの直接的な適用が難しいという批判を受けて、より実務適用を意識した研究として、S-D Logic の各主張を企業のもつ能力として読み替え実務適用に生かす研究が進行している¹³⁾。

(3-2) 価値共創の測定・評価方法

理論的には確立しつつあるといえる価値共創概念であるが、本研究開発領域のテーマである測定・評価モデルは未だ研究途上にある。顧客価値、従業員価値、企業価値のそれぞれの主体にとっての価値測定研究として行われているものの、共創においては個々の視点ではなく、統合的な最適化がなされなければ意味がない。しかしながら、上述のとおり、求める価値が異なる多様な関係者を対象とすること、その関係性が直線的ではなく星座型の複雑なネットワーク構造であることから、一般化された測定・評価モデル構築には、大型研究プロジェクトが必要であろう。

共創価値そのものの尺度構築は今後の課題であり、確立したものはないが、関連する概念の測定・評価モデルは複数見られる。視点は、顧客・企業・従業員にわかれ、測定されているものは満足度・ロイヤルティ・価値などである。顧客視点でのサービス評価は、サービス品質評価測定尺度研究、顧客満足度研究、顧客ロイヤルティ研究である。中でも、サービス研究の歴史上もっとも集中的に研究されてきたのはサービス品質である。代表的な SERVQUAL¹⁴⁾は、有形性・信頼性・反応性・確実性・共感性の5要因、22の質問項目でサービス品質を測る。サービスを受ける前と受けた後の顧客評価の差分を因子分析にかけけるものであるが、その後、事後のみを測定する SERVPERF が提案され、また、品質要因に社会的責任を加えた尺度も登場している¹⁵⁾。顧客満足度を測定するモデルは1989年の Swedish Customer Satisfaction Barometer (SCSB)をベースにした ACSI(American Customer Satisfaction Index)は1994年がスタートし、四半期毎に43産業の顧客満足度を測定、マクロ経済予測などにも活用している。本測定尺度は世界中にライセンスされているが、日本では2007年にサービス生産性協議会による JCSI が ACSI とは異なる独自の測定方法でスタートしている。そのほかにも、従来のサービス価値に関する評価に関しては、サービスや製品の多属性効用に着目した価値評価方法、観光サービスなどの具体的なサービスにおける価値評価など多くの研究がある。

(3-3) ビジネスにおける価値共創

一方、企業視点の顧客価値研究では、Rust et al.(2000, 2004)の顧客生涯価値 (LTV: Customer Life-Time-Value) の算出と、その拡張が代表的な研究になる^{16, 17)}。一人の顧客が一生涯である企業に落とす収益を、顧客の過去の実収益額と他社へのスイッチする確率から算出するものである。経済的な意味での価値を企業視点で測定したものといえよう。LTVは顧客からの直接的な収益をベースにしたものであるが、口コミや紹介などから派生する収益も考慮したものとして CEV(Customer Engagement Value, Kumar et al. 2010, 2013)が計量モデルも含めて提案されている^{18, 19)}。

従業員視点については、従業員の満足度研究や従業員のモチベーション研究は人的資源管理や組織論分野に多数の研究実績がある。サービス研究の範疇では、組織風土がサービスエンカウンター従業員のパフォーマンスに与える影響の研究が行われている^{20, 21)}。

しかしながら、これらいずれの研究も、視座がステークホルダーの一部に固定されており、また尺度も共創に焦点を置いたものではないため、共創活動から生まれる価値の測定という意味では十分ではない。今後の方向としては、RISTEX プロジェクトで現在進行中の価値共創尺度開発のような、各ステークホルダー全ての視点が網羅されること、共創活動に焦点をおいた評価軸が開発されること、業界を超えた一般化と、実務適用に際しての応用の容易性を確保した尺度開発が望まれる。

(4) 科学技術的・政策的課題

共創価値測定は、複数のステークホルダーに対する測定、また、その関係性を組込んだモデルの解析が必須であり、データ収集においても、分析手法においても挑戦的な課題である。データに関しては、共創は提供プロセス中や使用中に発生するものであるため、サービス提供現場の協力も不可欠であるが、顧客・従業員・社会を巻き込んだ包括的な調査への協力を得ることは容易ではない。個人情報管理の問題、従業員と顧客の対応関係の特定、複数ソースのデータのシングルソースへのマージなどの課題がある。データ収集と分析手法上の課題としては、エンカウンターでの対話レベルで刻々と変化するサービス提供文脈の影響を受けるダイナミックな共創活動を捉え、そこから発生する価値を評価する分析手法が必要となる。また、尺度内容に関しては、成熟経済化では基本機能の充足は所与のものであり、顧客ニーズの個別化・複雑化・高度化、従業員の価値観や働き方の多様化に対応するためには、製品・サービスの機能的な価値や経済的な結果のみを測るのでは不十分であり、感情・感性的な価値やステークホルダーに蓄積される知識・スキルの価値を考慮した測定尺度の開発が必要となる。エネルギー・金融・医療・教育など、主要なサービス産業は独自の各監督官庁の規制を受けているため、尺度の一般化と同時に、実務活用における業界毎のルールを反映した調整の自由度も必要になると考えられる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

共創価値の測定・評価に関して、国際規格 ISO の TC159 (人間工学の技術委員会) において、社会・顧客・企業・従業員の視点をカバーした人間中心の組織経営指針の標準 (ISO27500 シリーズ) の策定が薦められている。日本を中心に検討されている。27500 シリーズはエグゼクティブレベル (企業経営)、マネジメントレベル (執行管理)、プロジェクトリーダーレベル (現場管理) にわかれ、それぞれの段階で、ステークホルダーの共創を指向した企業理念から現場管理の指針までが策定される予定である。日本は、マネジメント・プロジェクトリーダーレベルの標準原案作成で中心的に活動している。

(6) キーワード

価値共創 (または共創価値)、バリュー・イン・ユース、バリュー・イン・コンテキスト、ロイヤルティ・プロフィット・チェーン、カスタマー・ライフタイム・バリュー (LTV)、カスタマー・エンゲージメント・バリュー、顧客満足、顧客ロイヤルティ、従業員満足、従業員ロイヤルティ、ハイパフォーマンス・ワークシステム (HPWS)、サービス品質、Creative Shared Value (CSV)、ISO (国際規格)

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・JST RISTEX 問題解決型サービス科学研究開発プロジェクト（2010年スタート）において共創価値尺度研究が含む複数のサービス研究が実施されている。 ・2012年にサービス学会が発足し、国内大会・国際大会計4回、学会誌発行などを通じて、共創価値に関する研究成果も紹介されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・上記サービス学会は産学文理融合を旨としており、産業界からの参加も多いため、応用研究の発生の場となりつつある。 ・上記RISTEXプロジェクトはフィールド企業との共同研究型であり、応用研究の側面もある。 ・国際規格ISOのTC159（人間工学）において、社会・顧客・企業・従業員の視点をカバーした27500シリーズ策定が、日本を中心に検討されている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・共創価値の認知はある程度されており、成功事例が取り上げられることはあるが、具体的な評価手法や尺度の産業界での運用には至っていない。 ・上記国際規格ISOが制定されれば、産業界、特に製造業で急速に浸透する可能性が高い。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・サービス研究において歴史的に北欧と並んで最も進んでおり、複数の大学にサービス研究センター（Maryland Univ.: Center for Excellence Service, Arizona State Univ.: Center for Service Leadershipなど）が設置されている。 ・世界最大のマーケティング学会であるAMAにはSERVSIG（Service Special Interest Group）が設置され、二年に一回の国際大会が行われている。特に近年は価値共創関連の研究発表が非常に多く見られる。
	応用研究・開発	○	↗	
	産業化	○	↗	
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・サービス研究において歴史的に米国と並んで最進んでいる北欧ノルディック学派に続き、多数の大学にサービス研究センター（Maryland Univ.: Center for Excellence Service, Arizona State Univ.: Center for Service Leadershipなど）が設置されている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・日本の産業技術総合研究所に相当する技術研究機関フィンランドVTTやドイツFraunhoferなどが製造業のサービス化に取り組んでいる。それぞれの研究所には経営系の研究者が所属し、文理融合の応用研究が行われている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・上記のVTT, Fraunhoferのサービス研究はこれらの研究は当初より産業化を視野にいれており、国外を含めた産業界からの資金提供型のものが多い。上記が工学的アプローチ、英国Cambridge Univ.のService Allianceはやや経営学的アプローチでそれぞれに産業化も進んでいる。
中国	基礎研究	○		
	応用研究・開発	△		
	産業化	△		
韓国	基礎研究	○		
	応用研究・開発	○		
	産業化	△		

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Toffler, A. *The Third Wave*. London. Pan Books Ltd. 1981.
- 2) Normann, R. *Reframing Business: When the Map Changes the Landscape*. Wiley. 2001.
- 3) Kotler, P.; Kartajaya, H.; Setiawan, I. *Marketing 3.0: From Products to Customers to the Human Spirit*. Wiley. 2010.
- 4) Praharad, C.K.; Ramaswamy, Venkad. *The Future of Competition: Co-creating Unique Value with Customers*. Harvard Business School Press. 2004.
- 5) Vargo, S. L.; Lusch, R. F. The four service marketing myths: remnants of a goods-based, manufacturing model. *Journal of Service Research*. 2004, vol. 6, p. 324–335.
- 6) Vargo, S. L.; Lusch, R. F. “Service-Dominant Logic: What It Is, What It Is Not, What It Might Be.” In *The Service Dominant Logic of Marketing: Dialog, Debate, and Directions*. Lusch, R. F.; Vargo, S. L., eds. New York: M.E. Sharpe. 2006, p. 43–56.
- 7) Vargo, S. L. Lusch, R. F. Service-dominant logic: Continuing the Evolution. *Journal of the Academy of Marketing Science*. 2008, vol. 36, p. 1-10.
- 8) Vargo, S. L.; Lusch, R. F. Evolving to a new dominant logic for marketing. *Journal of Marketing*. 2004, vol. 68, no. 1, p. 1–17.
- 9) Grönroos, C.; Voima, P. Critical service logic: making sense of value creation and co-creation. *Academy of Marketing Science*. 2012.
- 10) Cambridge Service Alliance. <http://www.cambridgeservicealliance.org>
- 11) Fraunhofer Institute for Industrial Engineering, Stuttgart. <http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/>
- 12) VTT Technical Research Centre of Finland. <http://www.vtt.fi/research/tic/>
- 13) Karpen, I. O.; Bove, L.L.; Lukas, B.A. Linking Service-Dominant Logic and Strategic Business Practice: A Conceptual Model of a Service-Dominant Orientation. *Journal of Service Research*. 2012, vol. 15, no. 1, p. 21-38.
- 14) Parasuraman, A.; Zeithaml, V. A.; Berry, L. L. A conceptual model of service quality and its implication for future research. *Journal of Marketing*. 1985, vol. 49, p. 41–50.
- 15) Sureshchandar, G.S.; Rajendran, C.; Anantharaman, R.N. The relationship between service quality and customer satisfaction – a factor approach. *Journal of Services Marketing*. 2002, vol. 14, no. 4, p. 363-379.
- 16) Rust, Roland T.; Katherine N. Lemon; Valarie A. Zeithaml. Return on Marketing: Using Customer Equity to Focus Marketing Strategy. *Journal of Marketing*. 2004, vol. 68, no. 1.
- 17) Rust, R.T.; Zeithaml, V. A.; Lemon, K. N. *Driving Customer Equity: How Customer Lifetime Value Is Reshaping Corporate Strategy*. New York: Free Press. 2000.
- 18) Kumar, V.; Aksoy, L.; Donkers, B.; Venkatesan, R.; Wiesel, T.; Tillmans, S. ‘Undervalued or overvalued customers: Capturing total customer engagement value. *Journal of Service Research*. 2010, vol. 13, no. 3, p. 297-310.

- 19) Kumar, V. Profitable Customer Engagement: Concepts, Metrics & Strategies. Sage publications: New Delhi, India. 2013.
- 20) Schneider, B.; White, S.; Paul, M.C. Linking Service Climate and Customer Perceptions of Service Quality: Test of a Causal Model. *Journal of Applied Psychology*. 1998, vol. 83, no. 2, p. 150–163.
- 21) Salanova, M.; Agut, S.; Peiró, J.M. Linking Organizational Resources and Work Engagement to Employee Performance and Customer Loyalty: The Mediation of Service Climate. *Journal of Applied Psychology*. 2005, vol. 90, no. 6, p.1217-1227.

3.6.6 製品サービスシステム

(1) 研究開発領域名

製品サービスシステム(Product-Service Systems)

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

新興国の急速な技術向上や製品のコモディティ化の進展による、先進国製造業の極めて厳しい状況を打破するために、製品中心型で大量生産思想型のビジネスモデルとは異なる新たな価値創出の枠組みが求められており、製品の生涯、提供者と受給者双方による活動の全般を対象としてサービスを提供する「製造業のサービス化」が、産学官の注目を集めている。製品とサービスの高度な統合により、製品価値を最大化するビジネスモデルは「製品サービスシステム(Product-Service Systems, PSS)」¹⁻³⁾と呼ばれる。PSSは製品とサービスの統合だけでなく、これを中核として価値創出する社会基盤、ステークホルダによる共同・協業のためのネットワーク構造を含む。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

PSS 研究は、2000 年代前半から欧州と日本を中心に進められてきた。欧州は事例分析、事例開発その研究開発の主軸を置き、旧来型ビジネスから PSS 型ビジネスへの移行方法に関する研究が行われてきた。ドイツおよび英国は、Industrial Product-Service Systems(IPS2)⁴⁾という呼称のもとで、PSS の中で対企業ビジネスに焦点を当てた研究開発を重点的に行い、その対象は航空機エンジン、建設機器、工作機械、大型印刷機など多岐に渡る。ドイツは、要求分析手法の提案に始まり、実学的視点に基づいて、実際の企業分析を実施し、実践的な PSS の設計・開発が行っている。企業が PSS を導入する上で必要とされるケイパビリティの整理、市場ごとの PSS 導入の妥当性評価など、極めて実践的な研究開発を行っている⁵⁾。ドイツでは、2020 年までの中期計画・High-Tech Strategy 2020 Action Plan に基づく国策として、Industrie 4.0(第4次産業革命)⁶⁾と呼称する国家プロジェクトが進められている。モノづくりと IT の高度統合による高付加価値達成の考え方は、極めて PSS の思想と近く、Smart Factory や Internet of Things(IoT)、Machine to Machine Communication(M2M)などの技術コンセプトは、提供者と受給者双方による活動の全般を対象としてサービスを提供する PSS のコンセプトとともに実用化されるものであり、Industrie 4.0 の進展に伴い、PSS の研究開発が一層加速する可能性が高い。最近、Cyber Physics/Cyber Physical Systems の研究者が PSS に言及する事例が目立つが、これは上記の技術統合が進んでいる証拠である。

英国では、PSS と近い動機に基づく Private Finance Initiative(PFI)や Partnering などの事業実績が蓄積され、実践的な研究開発が進行している。現代社会における保守・保全サービスの重要性に着目し、Through-life Engineering Service 等の呼称のもとで、保守・保全に関する研究開発と PSS 研究開発の統合化、横断化が加速している⁷⁾。PFI は、主として公共施設、社会基盤の整備、運営に民間が携わることでコスト削減とサービス品質の向上を目指すビジネスモデルであり、1980 年代初頭の行財政改革に端を発する。道路整備事業、地域再生事業、小中学校運営、病院運営、省庁舎管理など、多くの先行事例が存在する。Partnering は、同国の国防費の削減が行われる中で、効率的で効

果的な国防を達成するために、軍用装備品の補給・装備関連業務を、PFIと同様に民間委託し、コストの削減と効率の向上を目指す仕組みであるが、補給装備品の個数や役務の工数に応じて対価を支払うのではなく、包括的な関連業務全般を対象に長期的な契約を締結し、期間中の役務達成率、役務効率の観点で契約当初に取り決めた Key Performance Indicator(KPI)による評価に基づいて、対価およびインセンティブを支払うものである。英国では1990年以降の国防予算の大幅削減を背景として、2005年以降は国防の Partnering が義務付けられている。英国では公共事業などを対象に、コスト削減とサービス品質向上を目的とした民間役務代行や、そのためのビジネス設計がいち早く普及をしていることが、製造業における PSS の研究開発開始の障壁を下げている。

日本では PSS を設計対象として見做し、その設計方法に関する研究、特に設計過程を重視する動的な、また、設計の背後にモデルの存在を仮定し、そのモデルを用いて設計を形式化しようとするモデル的な研究が進められてきた⁸⁾。事例開発中心の欧州の PSS 研究開発に比して、日本では PSS の設計方法論とそれに基づく設計支援手法、設計支援ツールの開発が進み、欧州の PSS 設計研究に先行している。しかし企業による PSS の開発が現時点をもって殆ど行われていないなど、その応用研究、産業化は欧州と比較して著しく遅れている。この理由に、日本が英国やフランスとは異なり、PFI や Performance Based Logistics(PBL)、Partnering 等の実績に乏しく、国内で PSS に対する理解が進まないことがある。高度成長期の大量生産・販売により成長を遂げた国内製造業にとって、製品販売により得られる交換価値よりも、サービスの提供によって得られる使用価値、文脈価値を重視する PSS 型ビジネスモデルは、その意味・意義を理解出来ても、その業態へ転換し、ビジネスを展開することに大きな抵抗が存在する。しかしこれ以上の国内製造業の弱体化を抑止し、国際競争力の再獲得による国益の維持・向上を達成するには、この障壁を効果的かつ速やかに解消することが極めて重要である。

スウェーデン、デンマーク、フィンランドを中心とする北欧圏では、持続可能型消費や環境調和性などの持続可能性に関するキーワード、Function Selling (機能販売)、Integrated Product Service Offering (製品サービスの統合的提供)などの呼称とともに、PSS に関する研究開発が活発に行われている⁹⁾。これは環境負荷の低減と顧客価値の向上を両立する新たなビジネスモデルとして、PSS に対する期待が高まっているためである。このような環境調和を指向する PSS では、顧客による製品共有型のビジネスモデルや、提供者が顧客に代わり製品を利用し、その結果を複数の顧客に受け渡すビジネスモデルが代表的である。これらのビジネスモデルでは、製品稼働率の向上や部品の共有化などにより結果的に製品の製造・販売に際して消費される資源およびエネルギーが削減されることによる環境負荷低減だけでなく、製品を保有し、直接に使用することによって生じる顧客のコストやリスクの低減が可能となり、顧客が受け取る価値が高まるということが主張されている。

イタリア、フランスなどでも急速に PSS 分野に関する研究開発が活発化している他、北米においてもこれまでのサービスサイエンス(Service Science, Management and Engineering, SSME)系とは視点の異なるサービス関連研究として PSS に関する研究開発が勃興している。イタリアでは、自動車産業を中心に PSS の事例開発が活発化している他、皮革製品などを扱う多数の中小企業に対して、PSS のビジネス思想を普及させ、

その生産性を向上させるとともに、中小企業による協業を加速し、国内の産業基盤の強化を図ることも試みられている¹⁰⁾。PSSは大企業にのみ有効なビジネス戦略では無く、中小企業においても自社ビジネスの差別化、新たな市場の開拓を実現する有効手段となり得る。イタリアはスウェーデンとともにこの点に着目し、中小製造業の活性化手段としてのPSS開発に取り組んでいる。フランスでは、英国と同様に、PFIの事業実績が蓄積されている。フランスにおけるPFIの対象は、有料道路、空港、港湾、鉄道、水道、ガス、駐車場、港湾、空港、市場、など多様な分野に広がりを見せており、特に道路や水道施設に対する適用事例が広く知られている。また、北欧におけるスウェーデン等による取り組みと同様に、環境負荷の低減、持続可能社会の実現に関連するキーワードとともにPSSに関する研究開発が加速している¹¹⁾。これまで環境調和型製品設計や、ライフサイクル設計に関連する研究に取り組んでいた研究者が、PSSに関する研究を開始するケースが増えており、社会の持続性を高めるために、他の先進国と同様に製造業が新たな価値を創出する「製造業のサービス化」に対する関心が、環境調和に関する研究分野においても急速に高まっている。北米でもこれまで大規模設備のメンテナンスに関わっていた研究グループがPSSやSSMEに関連する研究への展開を開始している他、英国と同様のPBL¹²⁾が積極的に展開されており、英国やドイツと同様に製造業におけるPSSの研究開発が活性化することが予想される。

黎明期より同分野を牽引してきたドイツ、デンマーク、日本の研究グループは、ごく最近、主として製造業がPSSビジネスへの移行するための方法をまとめた設計ガイドをほぼ同時に公開している。デンマークのグループによる設計ガイド¹³⁾は、造船業との共同により、ビジネスの現状分析から導入準備までの一連のPSS設計プロセスを包括し、高い完成度を誇っているが、同ガイドの内容は造船という個別事例を中心に扱っており、製造業全般に対する汎用性・実用性は十分ではない。ドイツおよび日本では、それぞれがPSSの設計方法論および設計支援ソフトウェアの開発を独自に行い、其々の研究成果から得た成果・知見をもとに、PSS設計ガイドツールのプロトタイプを構成している。製造業において実践的に活用可能なツールが整備されることが求められている。すなわち、学术界から産業界への関連技術の移転が円滑化され、製造業におけるPSS開発を加速させるとともに、それを実践する組織や技術者のマインドセットを変革することが強く求められている。

（４）科学技術的・政策的課題

我が国では、PSSの応用研究、産業化が欧州と比較して著しく遅れを取っている。この最大の理由は、我が国においてこのビジネスモデルに対する理解が進展していないことである。高度成長期の大量生産・販売により成長した国内製造業には、サービスの提供によって得られる使用価値、文脈価値の創出を重視するPSS型ビジネスモデルへの転換を果たし、ビジネスを展開することに大きな抵抗が存在している。しかしこれ以上の国内製造業の弱体化を抑止し、国際競争力の再獲得による国益の維持・向上を達成するためには、この日本製造業が有する抵抗を速やかに解消することが極めて重要である。この手段として、PSS関連分野の研究を活性化させ、国内における全体的な研究アクティビティを高める必要がある。民間等による応用研究および産業化のフェーズを併せて

活性化させ、国内における PSS 応用研究・開発のレベルを引き上げるために、国策による関連事業を積極的に遂行するべきである。併せて、国内における PSS に対する理解を広げ、普及を押し進める理念教育に国が取り組むことも極めて重要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

ドイツの Industrie 4.0、英米仏における PFI、PBL、Partnering の進展など、PSS 関連の国策が欧米を中心に一斉に展開され、PSS の研究開発が一層加速する可能性が高い。中国・韓国の PSS に関する現状の研究活動は鈍いが、Industrie 4.0 に強い関心を示すなど、今後急速に研究開発が加速する可能性がある。我が国では、徐々にではあるが PFI 事例が増えつつあること、武器輸出三原則に代わり導入された防衛装備移転三原則のもとで条件付きでの軍用装備品輸出が可能となったなど、防衛省主導による PBL、Partnering の対象範囲が拡大することにより、インフラ、重工業分野を中心に PSS 型ビジネスモデルへの転換が進行する可能性がある。

（６）キーワード

製品サービスシステム(Product-Service Systems, PSS)、サービス工学(Service Engineering)、Service Science、Management and Engineering(SSME)、Through-life Engineering、機能販売(Function Selling)、Integrated Product Service Offering(IPSO)、Private Financial Initiative(PFI)、Performance Based Logistics(PBL)、Partnering、Industrie 4.0、Cyber Physics、Cyber Physical Systems

（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	○	→	・基礎研究は、本分野で先進的な欧州の研究成果をベースとしつつも、設計論、設計工学の知見に基づく独自の成果を精力的に発信し、設計研究に関しては先行している。しかし研究者数が限られ、全体的な研究アクティビティは高いとは言えない。
	応用研究・開発	△	→	・設計論を応用したPSSの設計方法論や設計支援ソフトウェアが開発され、他国の論文でも頻繁に引用されている。しかし研究者数が限られていること、民間等による応用研究の遅れなど、応用研究・開発のレベルは欧米の後塵を拝している。
	産業化	×	→	・製造業のサービス化に対する機運が高まり成功事例も出始めている。しかし研究開発の成果を実産業において活用するには至らず、特筆すべき成果は少ない。
米国	基礎研究	×	→	・マーケティングやマネジメント分野において、製造業のサービス化が議論されることは多いが、PSSというコンテキストでの基礎研究は、ほとんど行われていない。
	応用研究・開発	△	→	・PSSにおける組織管理などに関する少数の論文が発表されるにとどまっている。
	産業化	△	→	・住宅や化学薬品に関するPSSに関するサーベイが発表されているが、少数である。

欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 欧州発祥の研究分野であり、多くの研究者がPSSに関連する研究に従事し、大型のファンドも投入されている。PSSに関する代表的国際会議であるCIRP Industrial Product-Service Systemsも多くが欧州で開催されており、主導的な立ち位置を占めている（欧州4回、日本1回、北米1回）。特に英国、ドイツ、スウェーデンでは基礎研究が充実しており、企業へのヒアリングを通じたケーススタディや、既存研究のレビュー論文の数は、他国・地域の追従を許さず、順調に増加する傾向にある。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 論文数では英国がリードしており、PSSの設計技術、モデル化・シミュレーション技術、収益コスト分析技術などといった多様な応用技術の開発が進められている。設計技術としては、異なるステークホルダが参加する協調設計に関する方法論や、設計に有用な知識・情報を管理するための技術の開発が目立つ。 ドイツでは大型プロジェクトTR29等により、PSSの応用研究が盛んに行われてきた。例えば、日本と同様に製品分野で培われた知見に基づく設計・開発方法論や、PSSの運用をサポートする情報システムの研究開発が行われている。 スウェーデンやイタリア、オランダ、フランスにおいても、設計技術やシミュレーション技術の開発が進められている。オランダやフランスでは、PSSに対して持続性の観点からの期待が高く、環境負荷の評価ツールなどが開発されている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 新しい研究分野であるため、産業化に関する成果は比較的少ないが、増加傾向にある。多くは、特定の製品分野（ヘルスケア、自動車、住宅、オフィス家具、航空機など）におけるPSSの実現に向けた諸分析（機会・障壁、収益・コスト、リスク）をするにとどまっており、産業化に向けた準備段階にあると考えられる。欧州内では、英国、ドイツ、スウェーデンに加え、イタリアやフィンランドが産業化に向けた動きを見せており、世界的にも先進的である。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 中国も日本と同様、欧州の基礎研究をベースとするものが多く、基礎研究に関する独自の成果は少ない。日本に比べて多くの論文が発表されているものの、文献調査に関するものがほとんどであり、企業へのヒアリングを中心に研究を進めている欧州に比べると質・量ともに見劣りする。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 欧州に比べて研究者数や論文数は少ないが、中国においても設計技術やシミュレーション技術、収益コスト分析技術などの開発が行われている。研究傾向は、欧州と近いが、マスカスタマイゼーションやモジュール開発などのキーワードが目立つ。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 欧州には見劣りするが、産業化に向けた動きは活発である。特徴的である点は、RFIDなどICT技術を用いたPSSの運用支援に関する研究が進んでいる点である。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき成果は見受けられない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> PSSのコンセプト立案や業務プロセスの可視化などに関する支援技術の開発が行われているが、日本と同様にまだ少数である。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究と同様、特筆すべき成果は見受けられない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Goedkoop, Mark J., et al. “Product Service Systems, Ecological and Economic Basics.” Report for Dutch Ministries of Environment (VROM) and Economic Affairs (EZ), 1999.
- 2) Mont, Oksana K. Clarifying the concept of product-service system. Journal of Cleaner Production, 2002, vol. 10, p. 237-245.
- 3) Tukker, Arnold. et al. New Business for Old Europe. Greenleaf Publishing. 2006.
- 4) Meier, Horst. et al. Industrial Product-Service Systems-IPS². CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2010, vol. 59, no. 2, p. 607-627.
- 5) Abramovici, Michael. et al. Adaptive Change Management for Industrial Product-Service Systems. Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering. 2010, vol. 56, no. 11, p. 696-706.
- 6) Federal Ministry of Education and Research. Project of the Future: Industry 4.0.
<http://www.bmbf.de/en/19955.php>
- 7) Roy, Rajkumar. et al. Through-Life Engineering Services. Measurement and Control. 2013, vol. 46, no. 6, p. 172-175.
- 8) Shimomura, Yoshiki. et al. A unified representation scheme for effective PSS development. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009, vol. 58, no. 1, p. 379–382.
- 9) Lindahl, Mattias. et al. Environmental and economic benefits of Integrated Product Service Offerings quantified with real business cases. Journal of Cleaner Production. 2014, vol. 64, no. 1, p. 288-296.
- 10) Manzini, Ezio. et al. A strategic design approach to develop sustainable product service systems: examples taken from the 'environmentally friendly innovation' Italian prize. Journal of Cleaner Production. 2003, vol.11, no. 8, p. 851-857.
- 11) Maussang, Nicolas. et al. Product-service system design methodology: from the PSS architecture design to the products specifications. Journal of Engineering Design. 2009, vol. 20, no. 4, p. 349-366.
- 12) Sols, Alberto. et al. Defining the fundamental framework of an effective Performance-Based Logistics (PBL) contract. Engineering Management Journal. 2007, vol. 19, no. 2, p. 40-50.
- 13) Technical University of Denmark. PROTEUS Workbook Series.
<http://www.proteus.dtu.dk/Results/Workbooks>

3.6.7 地域・コミュニティサービスシステム

（1）研究開発領域名

地域・コミュニティサービスシステム

（2）研究開発領域の簡潔な説明

地域・コミュニティにおける価値創造に関する研究開発領域である。地域や任意のコミュニティに存在するサービス要素をシステムの視点で理解し、生活の質の向上のための価値創造について、人間の潜在能力の拡大を含め、現状の問題状況の改善を目指す。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地域・コミュニティにおけるサービス研究では、当該地域の生活の質向上のための価値創造が重要になる。そこでは経済価値に留まらず、他者への関心や共助活動に基づく社会的価値の創造が必要である。

地域・コミュニティをシステムの観点から研究する試みは、地域を政治・経済・社会・空間の諸システムで構成される複合的な地域システムとして定義し、地域システムを変革する端緒としての住民の重要性を指摘する¹⁾など、比較的以前から行われてきた。たとえば、住民は、投票行動によって地域の政治システムに変化を起し、選択的商品購入により地域の経済システムを変化させる。また、同じ関心を持つ者同士で新たなる組織形成を行うことで地域の社会システムを変化させ、自らが生活する空間を定義・形成していくことで地域の空間システムを変化させる。こうしたダイナミズムが地域やコミュニティのあり方を変化させるのである。このような捉え方は、地域政策論の観点からも研究があり、住民同士の協働システム²⁾の構築の必要性を議論する試みもなされている。

しかしながら、地域システムを価値創造に重きを置いてサービスの考え方に基づいて議論するようになったのは、最近になってからである。異分野融合型の横断型科学技術に関する国内会議である横幹連合カンファレンスでは、地域社会をサービスシステムとして構築しようとする試みが新たに始まっている³⁾。ここでは、サービスシステムを、創発原理を背景に人々のニーズを満たし価値を生むために結び付けられた有形・無形の技術の集合と定義した。そして、地域・コミュニティの活動を、サービスシステムの視点で分析したり、デザインすることを試みている。こうした思考に基づき、多くの関係者を交えて地域の活性化について検討を加える取り組みとして、平成18年度から地域住民に対して地域再生システム論（現在は地域活性化システム論）の教育が、総務省の支援によって開始され、現在はその導入校が30を超えている⁴⁾。地域それぞれの課題に対し、具体的なアクションプランを見出していくことが狙いである。

一方、消費者行動論を含めたサービスマーケティングの分野では、TSR(Transformativ Service Research)あり、これは、「個人やコミュニティそして生態系に至るまで、消費に関わる実存在の Well-being（人間の厚生）に改善や良い変化を形成することに主眼をおく研究」と定義される⁵⁾。Anderson ら⁶⁾は TSR 特有の分析単位として(i)サービス提供主体(ii)消費主体(iii)サービスと消費者に影響を与える政策、文化、技術、環境などのマクロ環境(iv)共創のアウトプットとしてのアクセス性、脆弱

性の緩和、ウェルネス、幸福、生活の質、公平さの維持、格差の減少といった人間の Well-being に関わる要素、を提示し、価値共創のシステムとして消費者の厚生を考える枠組みを開発した。これは地域・コミュニティにおけるサービス研究と親和性が高く、2013年度から開始したサービス学会でも、地域の買い物支援活動に関するサービス視点での分析事例⁷⁾を始めとしてなされているものの、サービス研究の中で、サービスシステムの発想で地域の価値創造を研究開発する取り組みは始まったばかりであるといえる。

(4) 科学技術的・政策的課題

地域・コミュニティにおける価値創造に関する課題の多くは、人間同士の共助の体制をどのように設計し、いかに他の要素を含めて効果的にそれを運用していくかという問題に行き着く。これは「社会のための科学」として近年重要性が高まっている総合工学⁸⁾でも議論が行われている。そこでは、地域・コミュニティは広がりがあり相互作用も複雑な巨大複雑系社会経済システムのため、「認識科学と設計科学の連携」が必要であるとされている。柘植によれば⁸⁾、巨大複雑系社会経済システムには複数の特徴があるが、システムの環境および目的がシステムの創生者に予測できず、問題を完全に記述できないため、システムの目的を他主体が連携して共創的に探索していく必要性があるという。

地域・コミュニティにおける価値創造には、生活者の価値観やニーズが基盤にあり、システムとして定義すべき問題が記述しにくいいため、目的の共創の必要性が重要である。これに向けては、システムの要素である生活者をより理解するサービス技術の開発が欠かせない。例えば、地域医療サービスについて、多様な消費者の満足を、その者がおかれている状況に関するデータと共に、いかに計測・分析し新たなサービスに展開させるか、そのための技術開発や、地域の廃棄物処理課題および環境課題に関して、生活者の生活の質に影響が出る情報および対策としての知識をいかに効果的に普及させるか、等に関する技術開発が求められる。このように地域・コミュニティにおける価値創造には、多様な市民の価値観を把握・共有したり、価値を共創するために必要な知識を普及したりするための技術開発が必要である。

このためには、行政が俯瞰力を持ち、分野や行政区を時に超えた連携を設計する態度が求められる。従来、政策的意思決定は価値の共有および価値観の収束が重要なテーマのひとつであり、経済学や公共政策論がそのための有用な視点としてあった。しかし、複雑な地域サービスシステムにおける価値創造を考えた場合、事業主体や行政機構が主たるアクターとして存在するだけでなく、市民も自らの価値を形成する主体として存在する。多主体で構成される、より価値創造・共創志向のシステム方法論の開発が必要となる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

地域・コミュニティの価値創造に関しては、科学技術振興機構の RISTEX プロジェクトにおいて、「救命救急サービスを核とした地域の安心・安全を創出する知的社会サービス基盤の創生 (代表: 濱上知樹)」や、基礎的調査としての「地方都市活性化のための社会シミュレーションモデル企画調査 (代表: 寺野隆雄)」を始めとして、関連プロジェクトが行われている⁹⁾。

また、サービス研究で米国アリゾナ州立大学の Center of Service Leadership では、The Science of Service - Leading Edge Research Opportunities with the CSL として、Smart Services and Self-Services Technologies、Service Design、そして人間の厚生に関するサービス研究領域として Transformative Service を挙げている¹⁰⁾。これと関連して、アメリカマーケティング協会の年次大会では Transformative Service Research トラックが作られたり、AMASERVSIG Conference では地域に存在する自然資源と住民の価値共創システムのモデル化のような報告が行われるなど、関連した活動は活発化している。

欧州では、サービス研究で有名なスウェーデンのカーlustatt大学の Center for Service Research において、eHealth Service に関する調査レポートが出され、国の関連する共同研究が 2006 年代から行われていることが示唆されている¹⁰⁾。また、スイスの Eawag¹¹⁾の研究者は途上国の衛生状態が悪いコミュニティの持続可能な発展に向けて、水問題や衛生問題に関わるインフラサービスやビジネスモデルイノベーションの視点で研究しているなど同じく取り組みは活発である。

（6）キーワード

社会・経済システム、地域社会サービスシステム、Transformative Service Research、人間の厚生(Well-being)、巨大複雑系社会経済システム、総合工学、共助

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 平成18年度から総務省の支援により、初めての地域再生システム論が北陸先端科学技術大学院大学にて開講され、地域活性化のために地域の課題やそのための基礎技術およびサービスについて検討がなされるようになってきている。 サービス学会において厚生サービスシステムの研究が始まっている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 地域包括ケアプロジェクトとして、東京大学高齢社会総合研究機構が中心となり、医療機関や家計、近隣の薬局などを含めた地域サービス拠点を統合し、地域・コミュニティが価値創造できるためのシステムを構築・運用が始まっている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 地域・コミュニティの価値を高めるためのIT支援ツールの開発・事業化が進んでいる。スマートコミュニティに関するプロジェクトも盛ん。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> サービス関係論文誌である Journal of Service Research において、地域・コミュニティにおける価値創造も含む議論としての Transformative Service Research の特集号が組まれている。 サービス研究で著名なセンターであるアリゾナ州立大学 Center for Services Leadership では2014年現在、次世代の主要なサービス研究のテーマとして「スマートサービスとセルフサービスの技術」、「サービスデザイン」、に加え「Transformative Service」を掲げている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 産業化ともリンクするが、IBMは Smarter city として Planning management、People、Infrastructure の観点でシステムを提案し、特にITやビッグデータに関する技術の展開とともに成功事例を積み重ねている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ発祥でアメリカにて発展している Frog Design¹²⁾ はサービスシステムデザインの観点でコミュニティにおける問題を解決している。このほか、NPO組織が環境システムデザインの観点からコミュニティのサービス設計をしている。

欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スウェーデンのカールスタット大学のCenter for Service Researchでは、eHealth Serviceに関する調査レポートが出され、国の関連する共同研究が2006年代から行われていることが示唆されている。 スイスのEawagの研究者は途上国の衛生状態が悪いコミュニティの持続可能な発展に向けて、インフラサービスやビジネスモデルの視点で研究している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> サービスデザインに関する研究が進んでおり、地域のサービスデザインツールのプロトタイピングが盛んである。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 例えばシーメンスは技術を駆使しスマートシティビジネスを進めている。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 清華大学の教員がIEEE SMCSの中の分科会組織として、Service Systems and Organizationを立ち上げているが、関連する国際会議において地域・コミュニティに関する研究報告は確認されていない。 医療機関・クリニック・薬局・顧客らが情報を共有しあうコミュニティヘルスケアサービスシステムの研究報告がIEEE Services Systems and Services Conferenceにおいて報告されている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究で特筆すべき成果は現状では見られない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 中国各地でスマートシティプロジェクトはあるが国内企業がそれをリードする状況では必ずしもない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究で特筆すべき成果は現状では見られない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究で特筆すべき成果は現状では見られない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業化で特筆すべき成果は現状では見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 日下正基. 地域システムと環境. 社会・経済システム. 1992, no. 11, p. 67-70.
- 2) 三上亨. 地域を自立させる人々. 文眞堂, 2013.
- 3) 中森義輝. 地域社会サービスシステム構築論. 第5回横幹連合コンファレンス論文集. 2013, p. 448-455.
- 4) <http://www.chiiki-info.go.jp/local/system/localsystemgaiyou.pdf>
- 5) Rosenbaum, Mark S.; Corus, Canan.; Ostrom, Amy L.; Anderson, Laurel.; Fisk, Raymond P.; Gallan, Andrew S.; Giraldo, Mario.; Mende, Martin.; Mulder, Mark.; Rayburn, Steven W.; Shirahada, Kunio.; Williams, Jerome D. Conceptualisation and Aspirations of Transformative Service Research. Journal of Research for Consumers, 2011, no. 19, p.1-6.
- 6) Anderson, Laurel.; Ostrom, Amy L.; Corus, Canan.; Fisk, Raymond P.; Gallan, Andrew S.; Giraldo, Mario.; Mende, Martin. Mulder, Mark. Rayburn, Steven W.; Rosenbaum, Mark S.; Shirahada, Kunio; Williams, Jerome D. Transformative service research: An agenda for the future. Journal of Business Research, 2013, vol. 66, no. 8, p. 1203-1210.

- 7) Ho, Quang Bach.; 白肌邦生.; フィスク,レイモンド. Transformative Service Research II: アクセス性課題を克服するサービスシステムの事例研究. サービス学会第 1 回国内大会. 2013.
- 8) 柘植綾夫. 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える—フロントランナー型イノベーションの創成力—. 学術の動向. 2010, 12, p. 40-43.
- 9) 問題解決型サービス科学研究開発プログラム. 独立行政法人科学技術振興機構社会技術研究開発センター. <http://www.ristex.jp/servicescience/project/>
- 10) User involvement for service innovation.
http://www.kau.se/sites/default/files/Dokument/subpage/2013/10/%20involve_agenda_nov2013_pdf_20901.pdf
- 11) Eawag: Welcome. http://www.eawag.ch/index_EN
- 12) History | frog - Frog Design. <http://www.frogdesign.com/about/history.html>

3.6.8 対人サービスシステム

（1）研究開発領域名

対人サービスシステム

（2）研究開発領域の簡潔な説明

対人サービスは、人間から人間に対する支援を行うサービスであり、対象相手のニーズはウォンツの理解は、動作、振る舞い、会話などのインタラクションにより行われる。ホテル、観光、教育、介護、小売り、飲食などにおけるホスピタリティ、おもてなしのマネジメントを含む。現在、対人サービスに対する研究開発領域の範囲には、狭義の範囲と、広義の範囲とに大別される。狭義の範囲では、対人サービスとは、いわゆるサービスの「接客」の場面を意味する。この対象においては、対人サービスはホスピタリティ及びおもてなしとほとんど同義の領域である。一方、広義の範囲では、対人サービスとは、人から人に対する支援を行うものであり、「接客」という顧客接点を起点とした、裏舞台を含む全てのプロセスを対象とするものである。対人サービスシステムに関する研究開発の目的は、サービス対象の認知、サービスの認知から行動・アクセスへの支援、並びに、サービスに対する継続利用の向上などをシステム科学の視点で捉え、探究することである。とりわけ、サービスに対する継続利用の向上（リピート率の向上）が重要であるが、一方で、評価に時間がかかる点も指摘される。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

対人サービスに関する研究動向は、主に3つに分けられる。第1は対人サービス産業に関する研究である。ホスピタリティマネジメント（ホスピタリティ産業に対するマネジメント）など、対人サービスの産業マネジメント研究は、米国を中心に行われている。近年では、経済発展が目覚ましい中国をはじめ、アジアにおいても研究が活発化されてきている。第2は、対人サービスの理論（特性・性質）に関する研究である。特定の産業としてではなく、サービス全般とした対人サービスの理念や、価値創出プロセスなどの理論に関する研究である。これらの研究は欧州を中心に行われてきている。日本では、1990年以前からも、社会学、人類学、哲学、史学等の様々な研究分野において対人サービスの精神や理念について言及されていたが、近年では、さらに、高コンテクスト・サービスを対象とした研究など、サービスの理論的基盤の深耕がなされてきている。第3は、対人サービスへの技術適用である。ICT（情報通信技術）などを活用して、対人サービスにおけるイノベーションの促進やコスト削減などを指すものである。ICT活用に関して、米国が先行しているが、日本も活発な研究・実践活動を行っている。具体的には産業技術総合研究所などによる対人サービス領域におけるサービス工学の適用などである。以下、具体的に対人サービス領域の研究開発を概観する。

（3-1）人サービスの産業マネジメント研究

対人サービス産業（ホスピタリティ産業）には、主に人的接客サービスを提供するホテル業、飲食業、旅行業、教育、医療、福祉などがある。対人サービス産業マネジメントとはその産業における経営のことである。海外、特に米国においては、対人サービス産業に関連する研究が主流である。対人サービス産業において、近年注目されている産

業は、ツアーサービス、ホテル・宿泊施設、クルーズライン、レストラン・フードサービス、プライベートクラブ、スパ、リゾート、コンベンション、会議、病院、テーマパーク、カジノ、航空などがあげられる。この中で中心的な研究課題は、人的資源管理、顧客管理、経営管理、マーケティング、産業のグローバル化などである。すなわち、限られた人的資源、経営資源の制約の中で、いかに顧客満足を高め、顧客関係性を構築・持続させていくかという課題解決に向けた研究開発である。注目される研究は、Priyanko Guchait¹⁾、Li Miao et al.²⁾、Michaelら³⁾、Hara⁴⁾、大川⁵⁾などである。

また、欧州では、ヨーロッパ統合のため、対人サービスの環境も変化している。それゆえ、環境変化に適合するための戦略が、近年の研究活動の主流になっている。また、多数の社会問題を抱えている欧州では、政策の研究も注目されている。代表的な研究としては、伊藤るり⁶⁾、中力えり⁷⁾等である。

アジアでは、対人サービス産業に関する研究状況が乏しい状況であるが、近年、対人サービスにある程度力を入れるのは中国（香港）と台湾である。中国の経済発展と共に、大きな消費市場ができ、対人サービスにおいて、特にホテル・観光業を中心に研究がなされている。注目されている研究の例としては、Nelson K.F. Tsang⁸⁾、Gu and Ryan⁹⁾、Liu and Jang¹⁰⁾などである。

(3-2) 対人サービスの理念・理論の研究

対人サービスの理念・理論の研究は欧州が主体となっている。これは、対人サービスにおいて、顧客への行動に対する社会的な価値要素や、顧客にサービス提供することによる経済的な価値要素の研究などである。また、対人サービスにおいて、商品そのものの使用価値だけではなく、ブランド購入、幸せの提供という象徴的な要素などについても研究が行われている。さらに、対人サービスには人間と人間の関わりが基本であり、人間の関係性においては、社会背景や文化などのコンテキストから強く影響を受ける。このような対人サービス価値を支えるコンテキストの研究も、近年、欧州で多く行われている。また、接客場面を中心にした接待の精神についても言及されてきている。すなわち、対人サービスにおけるホスピタリティやおもてなしである。ヨーロッパのホスピタリティの概念と日本のおもてなしの概念とは完全に一致するわけではないが、対人サービスを提供する際の精神・理念という点では、欧州でも日本でも近年、注力した研究がなされている。

日本では、「おもてなし」に関する研究としては、事例分析や実証研究¹¹⁾を中心とするものが多い。旅館、茶道、華道など、様々のおもてなしの現場を事例にして、「おもてなし」の精神や所作などを追求する。しかしながら、「おもてなし」に関する科学的アプローチに基づく研究はまだ極めて少ない。小林、原、山内(2014)¹²⁾らの日本型クリエイティブ・サービスを対象とした「切磋琢磨の価値共創」概念、並びに、「実践科学的サービス研究」方法論は、その少ない研究の中の一つである。

(3-3) 対人サービスの ICT 活用によるイノベーションへの取り組み

近年、対人サービスにおけるインフラや環境変化としては、ICT（情報通信技術）の進展が著しい。ネットコミュニティの発展や、情報流通と蓄積・利用形態の変化（検索機能の進展、大量データの利活用、クラウド化など）により、ITCを活用した対人サービスの革命的な改革を行う活動が活発になっている。

日本では、この領域においては、かなり活発な研究活動を行っている。特に、対人サービスにおけるロボット開発に関する研究開発に力を入れている。対人サービスにおいては、人間と人間との間のアクションは大事であるが、ロボットを使うと、キーボードやマウスなどの入力に頼らずに、人間の振舞い・意図を把握し、その人間が望むサービスのロボットシステムによる実現を目指している。社会心理学などの人と人とのコミュニケーション研究をベースにして、対人サービスにおけるロボットの「振舞い」の検証¹³⁾、マルチエージェントシステムに基づく対人サービスロボット¹⁴⁾、障害のある人に生活を支援するロボット¹⁵⁾、生活機能向上の対人場面でのロボットの研究などが注目されている。

（４）科学技術的・政策的課題

日本では、対人サービスに対する要請が高いにも関わらず、対人サービス研究は、欧米と比べてやや遅れているのが現状である。日本のサービスは、相対的に高品質であり、また、その価値創出のプロセスも、欧米のサービスとは異なった特徴を有する。従って、グローバル化社会における日本の研究活動としては、この研究方向に力を入れるべきだと思われる。

科学技術的課題としては、広義のサービス概念に立脚した理論的研究が必要である。このためには、領域依存の縦割りのサービス領域毎の研究開発を推進させるだけでは不十分であり、複数領域に横断的な研究プロジェクトの推進が必要である。また、生産性向上に対する政策的課題としては、提供者、利用者に対する学習が必須であり、サービスデザイン力、リテラシー力のある高度人材育成の強化が必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国においては、ニューロサイエンスの応用展開として、ニューロ・マーケティングへの適用研究も進められており、当該領域に対する大規模プロジェクトの1つとなっている。一方、日本においては、科学技術振興機構 ImPACT プロジェクト「脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現」において、脳情報を活用した対人サービスへの応用研究が今後推進される見込みである。

（６）キーワード

ホスピタリティ、おもてなし、顧客接点、継続性、再利用意向、コンテキスト、ニューロ・マーケティング

（7）国際比較

日本、アジア、米国、欧州においてまだ未開発の領域が多く、研究活動が増加傾向にある。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	理念・理論研究	○	↑	・JST問題解決型サービス科学研究開発プログラムなどで、高コンテキスト・コミュニケーションに基づく対人サービスなどの理論研究が行われている。
	産業マネジメント研究	○	↑	・日本旅館、料亭などを対象とした「おもてなし」の理念、所作等に関する事例分析が行われている。
	ICT利活用研究	○	↑	・加賀屋における「おもてなし」に対するバックオフィスとしてのICT活用などの事例あり。
米国	理念・理論研究	○	↑	・フランチャイズなどの経営理論に関する研究が行われている。
	産業マネジメント研究	◎	↑↑	・事例分析を中心に、ホスピタリティ産業を中心とした産業マネジメント研究が推進されている。コーネル大学ではホテルマネジメント、セントラルフロリダ大では、観光マネジメントの研究が推進されている。
	ICT利活用研究	○	↑	・ニューロ・マーケティングなど新しいICT技術を活用した研究がなされてきている。
欧州	理念・理論研究	◎	↑	・サービス政策をはじめ、対人サービスに関する理念・理論研究が推進されている。
	産業マネジメント研究	△	→	・当該領域に対する目立った活動はあまり見受けられない。
	ICT利活用研究	△	↑	・当該領域に対する目立った活動はあまり見受けられないが、今後ICTの進展と共に、活発化すると想定される。
アジア (特に香港、台湾)	理念・理論研究	×	↑	・当該領域に対する目立った活動はあまり見受けられないが、今後ICTの進展と共に、活発化すると想定される。
	産業マネジメント研究	○	↑	・事例分析を中心に、ホスピタリティ産業を中心とした産業マネジメント研究が推進されている。
	ICT利活用研究	△	↑	・当該領域に対する目立った活動はあまり見受けられないが、今後ICTの進展と共に、活発化すると想定される。

（8）引用資料

- 1) Guchait, Priyanka. ; Namasivayam, Karthik.; Lei, Pui-Wa. Knowledge management in service encounters: impact on customers' satisfaction evaluations. Journal of Knowledge Management. 2011, vol. 15, no. 3, p. 513-527. .
- 2) Miao, Li.; Mattila, Anna S.; Mount, Dan. Other consumers in service encounters: A script theoretical perspective. International Journal of Hospitality Management. 2011, vol. 30, p.933-941..
- 3) Davidson, ichael C.G.; Mc Phail, Ruth.;Barry, Shane. "Hospitality HRM: past, present and the future". IJCHM. 2011, vol. 23, no. 4, p.498-516. Gallotti, Maria : "The Gender Dimension of Domestic Work in Western Europe", ILO International Migration Papers

- No.96, 2009.
- 4) Hara, Tadayuki. “Reviewing Tourism Funding Model for Public Infrastructure and Destination Marketing Organizations: A Case of Orlando” *Journal of Tourism Economics, Policy and Hospitality Management*, 2013, vol. 1, no. 1, p. 1-13.
 - 5) 大川弥生. 「真のニーズ」の把握における生活機能モデル準拠の有効性-対人サービス場面 (1対1) と機器開発場面 (1対多) との区別と連関を考えつつ-. 国民生活研究. 2010, vol. 50, no. 2, p. 63-90.
 - 6) 伊藤るり. “仏独伊における移住家事・介護労働者—就労実態、制度、地位をめぐる交渉—”. 国際移動とジェンダー(IMAGE)研究会編ワークショップ記録集. 2012, p.1-12
 - 7) 中力えり. “EUの雇用政策・社会政策の変容とフランスの「対人サービス」政策”. 和光大学現代人間学部紀要. 2013, no. 6.
 - 8) Tsang, Nelson K.F. Dimensions of Chinese culture values in relation to service provision in hospitality and tourism industry. *International Journal of Hospitality Management*. 2011, vol. 30, no. 3, p.670-679. Gu, H., Ryan, C.Chinese clientele at Chinese hotels—preferences and satisfaction. *International Journal of Hospitality Management*. 2008, vol. 27, no. 3, p. 337-345.
 - 9) Liu, Y., Jang, S. Perceptions of Chinese restaurants in the U.S.: what affects customer satisfaction and behavioral intentions? . *International Journal of Hospitality Management*. 2009, vol. 28, no. 3, p. 338-348.
 - 10) 中村孝太郎, 松本加奈子, 増田 央. 「もてなし」型価値共創の視点 (第3報): 国内外の宿泊サービスにおける文化依存・拡大志向の事例より. 研究・技術計画学会年次学術大会. 2013, vol. 28, p. 563-568.
 - 11) 小林潔司, 原 良憲, 山内 裕. 日本型クリエイティブ・サービスの時代「おもてなし」への科学的接近. 日本評論社. 2014.
 - 12) 村川賀彦, 十時伸. サービスロボットによる「ふるまい」の評価 —商業施設での試験運用—. *Human-Agent Interaction Symposium*. 2006.
 - 13) 西山裕之, 溝口文雄. マルチエージェントに基づく対人サービスロボットシステムの設計. 人工知能学会全国大会(第19回). 2005.
 - 14) Woo-Keun Yoon 他. 上肢に障害のある人に生活を支援するロボットアーム RAPUDA に関する産総研の人間工学実験. 日本ロボット雑誌. 2011, vol. 29, no. 3, p. 255-256.

3.6.9 ITサービスシステム

(1) 研究開発領域名

IT サービスシステム

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

情報システムは、顧客に様々な価値を提供するサービスシステムと捉えられる。また、情報産業は、売り切り型の製品販売ビジネスから、利益を長期間に渡って回収するサービスビジネスへの転換を余儀なくされている。こうした背景から、IT サービスシステムを IT によるサービス価値創造に必要な技術やビジネスモデルを研究開発する領域として位置づける。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

IT サービスシステムの研究開発を IT システムの価値創造、クラウドコンピューティングやビッグデータ等新技术の影響、IT サービスシステムと人材、の3つの視点から俯瞰する。

(3-1) ITシステムにおける価値創造

IBM が SSME(Service Science Management and Engineering)というコンセプトを発表し、いろいろな分野のサービスをサービスシステム^{1, 2)}として捉えるべきと主張している。これは、金融サービス、医療サービスなどに向けた IT システムが、組織、情報システムなどを含むサービスシステムとして構成されているからであり、IT システムを、横断型科学技術の研究開発対象として、サービスシステムを実現する価値創造システムとして実現して行くべきことを示唆している。現状(As-is)からあるべき姿(To-be)への変革が新たな価値創造の鍵となるが、具体的なプロセスについては未だ十分に開発されていない。IBM Global Services Delivery Framework (IGSDF)³⁾は、ソリューションを提供する以前に、ビジネス機会をマネジメントする重要性を指摘している。日本では、西岡らが顧客の目的価値と情報システムの機能価値に着目した IT システムの価値創造プロセス手法 MUSE⁴⁾を開発し、IT システムによって顧客価値を実現するための設計プロセスを提示している。

(3-2) クラウドコンピューティングやビッグデータ等の新技术の影響

情報産業のサービス化に、より大きなインパクトを与えたのが、クラウドコンピューティングの登場である。クラウドコンピューティングでは、企業は自社の経営等に必要な ICT システムを借りることができる。保守も任せることができるので、保守の人材を雇用する必要も無い。最初に莫大な投資をしなくても立ち上げることができるのが、顧客から見たときのメリットである。このようにクラウドコンピューティングの普及は、既存の情報産業にビジネスモデルの転換を促す⁵⁾、サービスビジネスモデルの研究開発が不可欠となる。電機・通信・自動車等の大企業が、従来の枠を越えて、ヘルスケアや農業の分野で事業展開を行おうとする動きがあり⁶⁾、今後は、社会インフラ分野等へも範囲は拡大し、新たなサービスシステムの研究へつながるであろう。

一方、ビッグデータは、顧客やシステム環境に関する大量なデータを活用し、求められるサービスが何かを適切に判断し、サービス価値向上を実現する技術としてサービスサイエンス分野でも注目を集めている⁷⁾。

(3-3) ITサービスシステムと人材

情報産業の人材を活かし、サービス価値創造を目指すことも重要である⁸⁾。最新のICTシステムを従来のやり方を使っているだけでは、競争力にはつながらない⁹⁾。競争力につなげるためには、顧客の企業側には、ICTシステムの使いこなしが求められる¹⁰⁾。このためには、顧客企業の現場を理解し、かつ、ICTシステムにも理解がある人材が必要である¹¹⁾。富士通¹²⁾、日立¹³⁾といった大手の情報産業が必要性を認識している。観察者としての人間が現場に入り込み、観察対象者を観察し、メモや写真を撮り、質問したり、インタビューし、ビデオを使うなど^{14, 15)}、多様な計測方法を活用する。収集したデータの分析技術については、たとえば、時間主導型活動基準原価計算(時間主導型ABC、TDABC)の方法¹⁶⁾や、ビジネスダイナミクスの方法¹⁷⁾がある。現場で働く人同士のコミュニケーションの質が、現場の業務成果と強く関係していることが報告されている^{18, 19)}。

(4) 科学技術的・政策的課題

クラウドコンピューティングを利用したサービスでは、進出分野において、異種企業と組んで、新たにサービスエコシステムを創り上げることが課題となる。このためには、既存の情報産業と応用分野を知る企業と組んで、ICTシステムと現実世界をリンクする技術を開発する必要がある。また、優秀な人材を活用するサービスでは、定量分析と定性分析をうまく結び付けることが課題となる。さらに、現場観察におけるプライバシーも課題である。特に企業の現場に計測技術を持ち込んで測定する際には、この問題は重大に見えるが、克服する方法はある。第一に、個人の評価に使わないことを約束する必要がある。第二に、計測したデータから得た分析結果を経営者に必ず説明することが必要である。しかし、現場の問題が客観的な分析結果となって必ず経営者に報告されると知れば、むしろ積極的に協力してくれる¹⁵⁾。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

定量分析の分野では、大量のセンサが社会インフラや環境変化を見守り、そこから新ビジネスも登場して来る²⁰⁾。大量のデータを前提に、知能的な判断を再現できる技術²¹⁾と合体することで、自分で問題を見つけて解決していくようなクラウドコンピューティングシステムも登場して来る。一方で、定性分析の分野では、人間による解釈が必要である。これに関して、MIT Media LabのPentlandらは、人間は正直シグナル(Honest Signals)を発しており意図的に隠せるものではないので、正直シグナルを解析することで、会話の行方などを知ることができる²²⁾。

欧州のFuturICTプロジェクトでは、複雑な地球社会を理解するためには、社会科学(Social Sciences)の役割が重要だとしている²³⁾。クラウドコンピューティングとセンサによる定量分析は、ある変動の範囲内では有効かも知れないが、理解を越えて変動を始めた世界では役に立たなくなるおそれがある。復活力があるシステム²⁴⁾(レジリエントなシステム)を作るには、モデルの限界を知っておくことが必要であり、人間の知恵の定性的な分析も欠かせない。定量分析と定性分析は対立するものではなく、相補的に使うべきものである。

（6）キーワード

情報産業のサービス化、クラウドコンピューティング、ビッグデータ、ICTシステム、サービスビジネス、ビジネスモデル、ソリューションビジネス、センシング、現場観察、フィールドワーク、現場改善

（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	○	→	・ITシステムの価値創造プロセス手法MUSE ⁴⁾
	応用研究・開発	○	↗	・クラウドコンピューティングとセンシング技術を組み合わせた、ヘルスケア分野、農業分野へ、電機・通信・自動車等の大手企業が進出を模索 ⁶⁾ 。 ・センシングとビッグデータ解析の融合を大手電機メーカーなどが研究中 ²¹⁾
	産業化	○	↗	・富士通のフィールド・イノベーション ¹²⁾ や、日立ハイテクのビジネス顕微鏡 ¹³⁾ 等。
米国	基礎研究	○	→	・MIT Media LabのPentlandらによる、正直シグナル ²²⁾ 。 ・Janusz Bryzek氏のトリリオンセンサー・ユニバース構想 ²⁰⁾ 。
	応用研究・開発	○	↗	・PARCのinnovation services ¹¹⁾
	産業化	○	↗	・IBM のGlobal Services Delivery Framework (IGSDF) ³⁾
欧州	基礎研究	◎	↗	・FuturICTは、地球規模のセンシングシステム(Planetary Nervous System)、地球規模の社会活動の可視化(Living Earth Simulator)、地球規模のオープンフォーラム(Global Participatory Platform)の開発プロジェクト ²³⁾ 。
	応用研究・開発	○	↗	・FuturICTは、地球規模のセンシングシステム(Planetary Nervous System)、地球規模の社会活動の可視化(Living Earth Simulator)、地球規模のオープンフォーラム(Global Participatory Platform)の開発プロジェクト ²³⁾
	産業化	◎	↗	・オランダの農業は、生産者、大学、政府が密に連携し生産の効率を高め、国際競争力を高めている ⁶⁾ 。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Maglio, Paul P.; Kieliszewski, Cherly A.; Spohrer, James C., eds. Handbook of Service Science. Springer. 2010.
- 2) Demirkan, Haluk; Spohrer, James C.; Krishna, Vikas., eds. The Science of Service Systems. Springer. 2011.
- 3) “IT 構造改革への軌跡” .
<http://www-935.ibm.com/services/jp/gbs/application-management/ibm-case/process-tool.html>.
- 4) Nishioka, Yukiko.; Kosaka, Michitaka. Service Value Co-creation for Enterprise IT Solution Services. The 2nd Asian Conference on Information systems (ACIS2013). 2013
- 5) Wood, J. B.; Hewlin, Todd; Lah, Thomas. Consumption Economics: The New Rules of Tech. Point B Inc.. 2011.
- 6) [特集] 農業と創る電機の未来. 日経エレクトロニクス. 日経 BP 社. 2014, no. 1142, p. 23-45.
- 7) Ho, Tu-Bao.; Taewijit, Siriwon.; Ho, Quang-Bach.; Dam, Hieu-Chi. “Big Data and Service Science”. Progressive Trends in Knowledge and System-Based Science for Service Innovation. Kosaka.; Shirahada. IGI Global. 2013, p. 128-144.
- 8) Kohda, Youji. “Service Innovation in Information Business”. Progressive Trends in Knowledge and System-Based Science for Service Innovation. Kosaka.; Shirahada. IGI Global. 2013, p. 308-324.
- 9) Car, Nicholas G. IT Doesn't Matter. Harvard Business Review. 2003, p. 41-49.
- 10) 前川徹. IT の戦略的価値をめぐる論争—ニコラス・カーの” IT Doesn' t Matter” を再考する—. 富士通総研(FRI)経済研究所研究レポート. 2005, no. 248.
- 11) PARC. <https://www.parc.com/services/focus-area/innovation-services/>
- 12) 富士通. フィールド・イノベーション.
<http://jp.fujitsu.com/about/corporate/philosophy/businesspolicy/fieldinnovation/>
- 13) 日立ハイテク. ビジネス顕微鏡.
<http://www.hitachi-hitec.com/jyouhou/business-microscope/>
- 14) Christian Heath; Jon Hindmarsh; Paul Luff. Video in Qualitative Research (Introducing Qualitative Methods series). SAGE Publications Ltd, 2010.
- 15) 松村耕平, 神田陽治. オフィスワーク向けビデオフィールドワーク手法の開発. 日本経営工学会論文誌. 2012, vol. 63, no. 3, p. 196-199.
- 16) Kaplan, Robert S.; Anderson, Steven R. Time-Driven Activity-Based Costing: A Simpler and More Powerful Path to Higher Profits. Harvard Business School Pr. 2007.
- 17) Sterman, John D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill Europe. 2000.
- 18) Waber, Ben. People Analytics: How Social Sensing Technology Will Transform Business and What It Tells Us about the Future of Work. FT Press. 2013.
- 19) 矢野和男. データの見えざる手: ウェアラブルセンサが明かす人間・組織・社会の法則. 草思社. 2014.

- 20) [特集] 1 兆個センサー社会、始動.日経エレクトロニクス.日経 BP 社. 2014, no.1133, p. 27-43.
- 21) [解説] Google や Qualcomm が本気に、今度こそ人工知能.日経エレクトロニクス. 日経 BP 社. 2014, no. 1135, p. 63-70.
- 22) Heibeck, Tracy; Pentland, Alex. Honest Signals: How They Shape Our World. The MIT Press. 2010.
- 23) “FuturICT”.
http://www.futurict.eu/sites/default/files/docs/files/FuturICT_5p_Project%20Summary%20WITH%20LOGOS.pdf
- 24) Zolli, Andrew; Healy, Ann Marie. Resilience: Why Things Bounce Back. Free Press. 2012.

3.7 システム構築方法論区分

3.7.1 合意形成

(1) 研究開発領域名

合意形成

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会に関する課題について人々が有する多様な見解や選好を、相互理解を図りながら共通の理解や解決策に繋げようとする実践的かつ系統的な取り組み、及びそのプロセスに関する理論および手法論を対象とする領域。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 交渉分析

「交渉」をもっとも一般的に定義すると、「複数の利害関係者が資源の配分を巡ってコミュニケーションを行い、最終的にある結論に達するまでの過程」ということができる。ある財の取引を巡って、売り手と買い手の間で価格を巡って取り交わされるコミュニケーションは、交渉の典型例である。公共政策を巡っても、国同士、国と地方自治体、地方自治体同士、政府と企業などの間で、交渉が必要となることは多い。交渉分析の主目的は、「交渉に勝つため」「交渉で有利になるため」ではない。むしろ、相手主体と合意し、いかに共存共栄関係を築くことができるかを考察するために、交渉分析は行われる。

利害関係者が、交渉を通じて利益を得ることができる、すなわち Win-Win solution が得られると予期しているとき、交渉は始まる。交渉の中で、Win-Win solution に達することができないと利害関係者が判断した場合は、交渉は終了する。

ゲーム理論においては、その最初期の段階から交渉のモデル化が試みられている。ゲーム理論は、複数のプレイヤーが相互作用を伴いながら(相手の出方をうかがいながら)戦略的に行動する状況をモデル化するための理論であり、経済学においても、政府が規制を導入した場合の企業の反応の予測など、広く応用されている。ゲーム理論には、プレイヤー間の協力関係を前提とする協力ゲーム理論と、協力を前提としない非協力ゲーム理論が存在する。交渉そのものにおいては、決裂の可能性も存在するため、非協力ゲームによる分析がより適している。ナッシュ均衡 (Nash equilibrium) とは、非協力ゲームにおいて、「どのプレイヤーにも、現状を敢えて変更する動機がない」状態を意味する。Nash は、2人のプレイヤーが資源の取り分を巡って提案を交わす交渉を非協力ゲームとした場合、ナッシュ均衡となる資源配分が存在することを示し、これがナッシュ交渉解 (Nash bargaining solution)¹⁾と呼ばれている。さらに、非協力ゲームによって協力行動を説明するというナッシュプログラムを提唱している²⁾。

事前の交渉により合意に達し、複数プレイヤーによる提携行動が可能となった状況を記述するのが協力ゲーム理論である。協力ゲームでは、提携 (coalition) に所属するプレイヤー間で拘束的な合意が成立し得ることと、協力によって非協力的なケースよりも全体の利益が増大することを前提としている。そのため協力ゲーム理論では協力によっ

て得られた利益をプレイヤー間でいかに配分 (imputation) するかが主要な問題となる。協力ゲームの配分解に関しては、シャプレイ値 (Shapley value)³⁾を始め、数多くの解が導出されている。協力ゲーム理論の実問題への適用研究としては Young ら⁴⁾があり、その後国内外で水資源開発事業等への適用事例が蓄積されている。

また、非協力的な状態から協力的な状態に至る要因を明らかにしたいという動機から、提携が形成される過程をモデル化するものとして提携形成ゲームがある。提携形成ゲームには、提携構造を分割、すなわち複数の部分集合として記述するものと、ネットワーク、すなわち2名のプレイヤー間の協力関係の累積として記述するものがある。前者の代表例としては Shenoy⁵⁾があり、後者の代表例として Myerson⁶⁾がある。

一方、非協力ゲーム理論から導かれる理論解に対する疑義も提起されている。実験ゲーム理論 (行動ゲーム理論) においては、実験室環境での実際の人間の行動に関する結果が蓄積されている。代表例として、ある金額の現金 (例えば 1000 円) を 2 名で分け合う交渉に関する実験 (最後通牒ゲーム) を取り上げる。2 名のうち一方が配分額を提案し、もう一方はその提案を受諾するか、拒否するかを選択することができる。非協力ゲーム理論からは、後者は自分への配分額が正であれば、不公平な配分であっても (例えば自らが 1000 円中 50 円しか得られない配分であっても) 受諾するはずである。しかし実験においては、あまりにも不公平な配分を提示された後者は提案を拒否することが多い。さらには、前者の被験者の多くはそもそもそのような不公平な提案をすることは少なく、双方が 5 割前後を得られるような提案を行うことが多い⁷⁾。

実験ゲームにおける多くの知見は、個人合理性の仮定に基づいた非協力ゲームによる交渉分析の枠組みに、何らかの修正が必要なことを示唆している。利他性 (Altruism)、互酬性 (Reciprocity) 等の寄与が指摘される他、合意形成の観点から注目すべき要素として文脈 (Context) がある。

Shelling⁸⁾は 1960 年の段階において既に、協調行動において双方の期待の焦点 (フォーカルポイント) が重要な役割を果たすことを指摘している。また Liberman ら⁹⁾は、実験ゲームにおいて、「ゲームの名称」が被験者の行動に大きな影響を及ぼすことを示している。これらの研究は、既存のゲーム理論において考慮されていなかった、交渉に至るまでの経緯、経験に基づいた当事者の問題に対する認識構造等の文脈が、交渉結果に影響することを示唆している。

また、より実務的要請にこたえるための研究として、わが国の都市地域計画、防災計画等においては、ワークショップ形式等による市民参加、住民参加が導入されており、ファシリテーション (Facilitation) の重要性が認識されている。ファシリテーションは一般に、複数の関係者が討議する場で、円滑なコミュニケーションを促進するための活動を指す。一般の市民は、討議の場で理路整然と意見を述べる人々のみではない。そのため、市民参加の場においては、時に議論が発散してしまうこともある。ファシリテーター (ファシリテーションを実施する人) は、そのような発言を主旨に沿って言い換えたり、他の人の意見と結合させたり、発展させるなどして、有益な議論の実現を目指す。ただし実際のファシリテーションには経験的要素も多く、現状においては暗黙知に依存する部分も大きい。

さらに、調停 (Mediation)、仲裁 (Arbitration) 手法も導入されてきている。調停、

仲裁は共に第三者の関与を通じた紛争解決のための手法である。調停が第三者による解決案の提示に留まり、解決案を受け入れるか否かは当事者にゆだねられているのに対して、仲裁においては、当事者は第三者によって示された判断に従わなければならない。

(3-2) コンフリクト・マネジメント

ナッシュ均衡を始めとする、非協力ゲーム理論の分析枠組みを、実際のコンフリクト分析に適用することを志向したものとして、Howard が提案したメタゲーム分析がある¹⁰⁾。メタゲーム分析は、①プレイヤーの戦略を各プレイヤーの有する「オプション」の組み合わせとして表現すること、②オプション間の相互依存性（同時に生起し得ないオプション群の存在など）を考慮可能であること、③現状（Status Quo）概念が導入されていること、④プレイヤーによる一方的改善（unilateral improvement）に対する制裁（sanction）の可能性が考慮されていること等、数理的な非協力ゲーム理論には存在しない概念が導入されてきている。

メタゲーム分析をもとに、Fraser らはコンフリクト解析手法を提案している¹¹⁾。さらにコンフリクト解析手法を発展させたものとして、コンフリクト解決のためのグラフモデル（Graph Model for Conflict Resolution, GMCR）がある¹²⁾。戦略（あるいはオプション）の組み合わせとして事象（state）あるいは結果（outcome）を記述するという非協力ゲーム理論の伝統的枠組みとは異なり、GMCR の特徴として、まず事象を同定した上でモデル構築を行う点がある。このような柔軟なモデル構造の導入により、現実の複雑なコンフリクトに対して、過度の単純化を行うことなしに、非協力ゲーム理論に基づいた分析を適用することが可能になったといえる。

非協力ゲーム理論における協力行動と非協力行動の間のジレンマの代表例は「囚人のジレンマ」である。囚人のジレンマ状況においては、2人のプレイヤーはそれぞれ、「協力的な行動」と「非協力的な行動」という2つの選択肢を有している。2人のプレイヤーが構成する社会の視点からみれば、2人とも「協力的な行動」を選択するのが最も望ましい帰結と言える。しかし、一方のプレイヤーの視点に立つと、相手プレイヤーが「協力的な行動」を取っているとき、自分が「非協力的な行動」を取れば、相手の協調にただ乗りして利益を得ることができる。どちらのプレイヤーもそのように考えたとすれば、結局2人とも「非協力的な行動」を選択する結果となり、社会的にも望ましくない。

非協力ゲーム理論の立場からの囚人のジレンマの解決策として、囚人のジレンマ構造を有するゲームの繰り返し（フォーク定理）がある。Axelrod¹³⁾は繰り返し囚人のジレンマゲームのシミュレーションにおいて、制裁の可能性を考慮に入れつつ、協調的行動を基本とする行動戦略が有効であることを示している。さらに、実験ゲームにおいては、実際人間は必ずしもジレンマに陥らず、協調が可能であることが示されている。コンフリクト・マネジメントという立場からは、いかなる条件、場面設定のもとで、人々の協調行動が可能となるのかを明らかにすることが今後重要となるといえる。

一方、ジレンマの当事者が多数となる社会的ジレンマの状況においては、人々の協力関係の形成はより困難となることが多い。社会的ジレンマにおいては、プレイヤーが「協力的な行動」と「非協力的な行動」という2つの選択肢を有している点は囚人のジレンマと同じであるが、プレイヤーが多数存在する。その場合、1人が「非協力的な行動」をとることの影響が見えづらいため、ただ乗りしようという誘因は囚人のジレンマよりも

大きくなると考えられる。社会的ジレンマ構造が生起しやすい問題としては、交通問題（社会全体から見て適切な交通手段選択への誘導、放置自転車問題など）、環境問題（地球温暖化対策への協力、ゴミ分別の徹底など）などがある¹⁴⁾。我が国においては、実験社会心理学において、社会的ジレンマ研究が進展している¹⁵⁾。また、交通問題を中心に、社会的ジレンマ解決のための工学的実践事例も多く蓄積されている¹⁶⁾。

(3-3) 合意形成論・熟議型計画

実社会における課題が益々多様化していく中で、「いかなる状態を以て解決とするのか」、「どうすれば解決に至れるのか」、「そもそも何が社会として問題にされる（べきである）のか」、といった問に対する回答自体が多様化してきた。19世紀後半から20世紀前半にかけて主流であった実証主義的アプローチによる計画理論の多くは、技術的・専門的知見を有するプランナーが合理的、長期的視点から目的とする社会状態に向かって最適な施策を実行することを志向するものであった。しかしながら、1950年代には複雑な社会問題を、科学的に定式化されたモデルの精緻化によってのみ解決しようとする手法論に限界が指摘され、社会問題の複雑性、多元性に対処しうる代替的なアプローチが模索されてきた。

合意形成論は、社会の構成員が有する価値規範や事実認識が多様であることを前提としつつ、多くの個人が他者との差異を尊重しつつ共存していくための方策を探るプロセスとその手法論である。さらに、政策科学および計画学において、合意形成に向けたコミュニケーション行為とその討議倫理こそが本質的な公共過程であると位置づけた新たな計画理論として¹⁷⁾、対話型計画（communicative planning）¹⁸⁾、熟議型計画（deliberative planning）¹⁹⁾が提唱されてきた。

合意形成の近年の実践的取り組みについては、Susskindらによる体系化が行われている²⁰⁾。合意形成論はしばしば公理的アプローチである公共選択論、ひいてはその例である多数決決定をめぐる議論と対比される。Susskindらは、多数決決定でしばしば排除されがちな少数意見をいかにして尊重し、全員によるプロセスへの参加を実現するか的手法を合意形成の各段階について提唱する。事実認識の差異を解消しようとする共同事実確認（joint fact-finding）、対立の構造をあらかじめ明らかにするための紛争アセスメント、合意形成プロセスそれ自体に関する規約（グラウンド・ルール）等は、その内の広く普及した例である。

社会的関心事の合意形成に関する代表的実践手法としては、市民陪審（Citizens Jury）と討議型世論調査手法（Deliberative Polling）が挙げられる。これらはいずれも討議の主体となる市民が、実際の意思決定過程で用いられている投票手続きではなく、無作為抽出によって選ばれる点に特徴がある。市民陪審では、ある特定の課題について無作為に討議参加者が抽出され、専門家との対話や討議参加者同士の対話を通して、課題に対する態度表明が行われる。市民陪審で合意された見解は社会に対する提言として位置づけられ、実際の社会的意思決定手続きによって選定された意思決定者が、真に全ての市民を代表しているかという代表性に関わる問題に、代替的な解決策を提供する。一方、討議型世論調査手法では、無作為に抽出された討議参加者が、討議の前後において課題に対しどのような態度を表明したか、とりわけどのような態度変化が見られたのか、に主として着目する。討議参加者は、課題に対する事前意向調査の後に市民陪審と類似し

た討議プロセスを行い、課題に対して理解をより深めた時点において再度意向調査に回答する。さらに、このプロセスを通して見られた態度変容の結果や要因について分析が行われ、その分析結果が社会的に公表される。いずれも米国および英国において多数の応用例が見られる²¹⁾。わが国における合意形成手法の代表的な実践例については、猪原²²⁾、城山・松浦²³⁾、土木学会誌編集委員会²⁴⁾等が詳しい。

(3-4) 社会技術システム理論

実社会の課題を解決するために開発、導入される科学技術的成果が果たして本当に社会問題の解決に寄与するか否かは、単に科学技術の機能的側面だけではなく、社会がその科学技術を受容するか否かという社会的側面によっても強く規定される。両者の相互作用を明示的に理解することによって、より効果的な社会問題への技術的介入を目指す社会技術的アプローチが提唱されてきた。1960年代に英国 Tavistock Institute を中心としたグループは、鉱業や製造業の生産過程において新規技術が導入された際、必ずしも期待された生産性向上が生じない理由を明らかにしようとする中で、技術が用いられる集合的な行為に内在する社会的、組織的文脈が大きな影響を与えていることを明らかにした。社会技術システム理論 (sociotechnical systems theory) は、「人間=組織」と技術との相互作用を社会心理学的、人類学的アプローチを援用して明らかにすることによって、生産システムの組織再設計をはじめとする技術的介入を提唱する研究分野である²⁵⁾。

社会技術システム概念は、その後の技術の構成主義的アプローチに多大な影響を与えた。Bijker らによる「技術の社会的構成」(Social Construction of Technology: SCOT)²⁶⁾は、ある技術が現在の形で成立しているのは、そこに至る社会集団の相互作用の帰結であるという立場に立ち、技術は社会的要請から必然的に開発され、社会に普及するという決定論的な見方に疑念を唱えた。SCOTは、合意形成論の文脈においては、社会問題の解決策として科学技術専門家が提示する介入策が必ずしも社会に受容されないのはなぜかを明らかにするための分析視角を提供するものといえる。関連する概念として Latour によって提唱されたアクターネットワーク理論 (Actor-Network-Theory: ANT)²⁷⁾では、科学技術を人間とその他の構成要素が互いに影響を及ぼし合うネットワークとして捉え、人間が人工物を創造するだけでなく、人工物が結果として人間の行動や社会の規範を形成する積極的役割を担う存在であると論じた。

SCOT および ANT はその後の科学技術社会論に大きな影響を与え、実践的な取り組みにも適用されてきた。初期には 80 年代のデンマークで試行され、その後多くの地域で実践されたコンセンサス会議を例に見ることができる。コンセンサス会議は上記の討議型世論調査手法と類似の過程を経て選ばれ、討議を行った市民が、社会的に重要な影響をもたらす特定の技術について提言を行う仕組みである。最近では地球規模の課題を解決するための科学技術はいかにして社会的に成立するかを考察するサステナビリティ・トランジション(sustainability transition)の分析枠組みとしてしばしば用いられている²⁸⁾。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・社会的重要な課題をめぐって、合意形成手法を用いてファシリテーション、メディエー

ション、仲裁等の第三者介入を行う中立な実施機関の設立がある。社会的課題に対し導入しようとする政策・施策に直接の利害を有さず、中立性・不偏性が担保される合意形成の専門機関が米国、欧州の非営利部門においては既に活動しているが、わが国においては未だ同種の組織が十分に確立しているとはいえない。

- ・公正な合意形成プロセスの前提となる公共コミュニケーション・メディアと「熟議の場」の確立が求められている。社会的課題について、多様な価値観を有した市民が、専門家、非専門家を問わず既存の情報資源を活用しつつ議論を行い、その結果自体が新たな公共資源となるようなコミュニケーション・メディアの開発が模索されている。とりわけ情報通信技術を活用した熟議民主主義の実現に向けた取り組みが各国で注目されている。
- ・社会心理学分野における小集団研究、意思決定研究、組織科学等の関連分野において蓄積されてきた実証的アプローチの知見を、合意形成の実践に活用する取り組みが課題である。
- ・まちづくり、地域づくりにおいて参加型計画の枠組み導入が進展している。しかし、ファシリテーションについては実施者の経験に依存しているのが実態であり、経験知を形式知に変換するための技術開発が必要である。
- ・熟議民主主義の立場から、「少人数の人々が集まって討議する場」の総称としてのミニ・パブリックス概念が提唱されている²⁹⁾。ミニ・パブリックスは必ずしも意思決定の場ではなく、問題認識の共有などを目的としている。ミニ・パブリックスに該当する試みは世界各国に存在しており、それに対する支援技術の開発も必要と考えられる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・合意形成研究は初期の概念提唱段階から実践段階を経て、現在、各合意形成手法および計画手法論について実証的な評価がなされつつある段階にある (例えば Street et al³⁰⁾)。実証的な評価にあたっては、その評価基準となるべき規範自体が合意形成理論および対話型・熟議型計画の存在意義と根幹的目的を規定することになるため、理念枠組みの再定義を行う理論研究も同時に活発である。
- ・合意形成手法の体系が早期に確立した地域・国においては、重要な政策課題及び社会的意思決定に同手法が用いられた例も多く見られる。例えば医療・公衆衛生分野における市民陪審やコンセンサス会議の事例、都市計画、社会資本整備における対話型・熟議型計画の実践、英国の統治体制をめぐる大規模な討議型世論調査の実施 (Power 2010³¹⁾)、日本における「エネルギー・環境の選択肢に関する討議型世論調査³²⁾」、等が挙げられる。
- ・地球規模の課題をめぐる合意形成の取り組みの例として、サステナビリティ・トランジションの研究ネットワーク (Sustainable Transitions Research Network³³⁾)、および同ネットワークによる International Conference on Sustainability Transitions が国際的な活動報告・情報発信の場として定期的に開催されている。
- ・東日本大震災を踏まえて新設された「地区防災計画」制度においては、「地域コミュニティ主体のボトムアップ型計画」の重要性が強調されている他、ワークショップ等

による地区属性の把握の必要性が指摘されている³⁴⁾。

- ・ 実験ゲーム理論における、文化的・社会的要素（文脈）を導入する試み。

（6）キーワード

合意形成、熟議型計画、対話型計画、市民陪審、コンセンサス会議、討議型意識調査手法、社会技術システム、技術の社会的構成、アクターネットワーク理論、実験ゲーム、利他性、文脈依存性、ファシリテーション、コンフリクト、社会的ジレンマ

（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	○	→	・ 公共政策、科学技術社会論、計画学などの分野において主要な諸概念は定着しており、専門教育に反映されている。
	応用研究・開発	○	↗	・ エネルギー、社会資本整備をはじめとする政策分野において合意形成の取り組みが実施されている。
	産業化	△	→	・ 一部において合意形成支援団体の非営利組織化が図られているものの、成果は限定的である。
米国	基礎研究	◎	→	・ 合意形成手法の体系化に関して国際的に顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	→	・ 合意形成手法が、重要な社会的課題にしばしば適用されている。
	産業化	○	→	・ 非営利組織を中心とする活動が顕著に行われている。
欧州	基礎研究	◎	→	・ 西欧・北欧を中心に科学技術社会論や熟議民主主義の分野において顕著な理論的貢献が見られる。
	応用研究・開発	◎	→	・ 合意形成手法が、重要な社会的課題にしばしば適用されている。
	産業化	△	→	・ 成果は限定的である。
中国	基礎研究			・ 不明。
	応用研究・開発			・ 不明。
	産業化			・ 不明。
韓国	基礎研究			・ 不明。
	応用研究・開発			・ 不明。
	産業化			・ 不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Nash, J. The Bargaining Problem. *Econometrica*. 1950, vol.18, no.2, p.155-162.
- 2) Nash, J. Non-cooperative games. *Annals of Mathematics*. 1951, vol.54, no.2, p.286-295.
- 3) Shapley, L. A Value for N-Person Games. In *Contributions to the Theory of Games* volume II, H.W. Kuhn and A.W. Tucker (eds.). 1953.
- 4) Young, P.; Okada, N.; Hashimoto, T. Cost Allocation in Water Resources Development. *Water Resources Research*. 1982, vol. 18, p. 463-475.
- 5) Shenoy, P. On Coalition Formation: a Game-Theoretical Approach. *International Journal of Game Theory*. 1979, vol.8, No.3, p.133-164.
- 6) Myerson, R. Graphs and Cooperation in Games. *Mathematics of Operations Research*. 1977, vol.2, no.3, p.225-229.
- 7) Camerer, C. *Behavioral Game Theory*. Princeton University Press, 2003.
- 8) Shelling, T. *The Strategy of Conflict*. Harvard University Press, 1960.
- 9) Liberman, V.; Samuels, S.M.; Ross, L. The name of the game: Predictive power of reputations versus situational labels in determining Prisoner's Dilemma game moves. *Personality and Social Psychology Bulletin*. 2004, vol.30, no.9, p. 1175-1185.
- 10) Howard, N. *Paradoxes of Rationality: Games, Metagames, and Political Behavior*. The MIT Press, 1971.
- 11) Fraser, N. ; Hipel, K. *Conflict Analysis: Models and Resolutions*. North-Holland, 1984.
- 12) Fang, L.; Hipel, K. ; Kilgour, M. *Interactive Decision Making: The Graph Model for Conflict Resolution*, Wiley, 1993.
- 13) Axelrod, R. *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1984.
- 14) 藤井聡. 社会的ジレンマの処方箋—都市・交通・環境問題のための心理学. ナカニシヤ出版, 2003.
- 15) 山岸俊男. 社会的ジレンマ: 「環境破壊」から「いじめ」まで. PHP 出版, 2000.
- 16) 日本モビリティ・マネジメント会議(JCOMM).
<http://www.jcomm.or.jp/>
- 17) Habermas, J. *Theory of Communicative Action*. Beacon Press. 1985
- 18) Innes, J. E. Information in Communicative Planning. *Journal of the American Planning Association*. Winter 1998, vol. 64, no. 1, p.52-63
- 19) Forester, J. F. *The Deliberative Practitioner: Encouraging Participatory Planning Processes*. MIT Press. 1999.
- 20) Susskind, L.; McKernan, S. ; Thomas-Larmer, J. *The Consensus Building Handbook: A Comprehensive Guide to Reaching Agreement*. Sage. 1999.
- 21) Consensus Building Institute. <http://www.cbuilding.org>
- 22) 猪原健弘編著. 合意形成学. 勁草書房. 2011
- 23) 城山英明. 松浦正浩. 日本における公共政策の交渉と合意形成. L. E. サスカインド・J. L. クルックシャンク「コンセンサス・ビルディング入門: 公共政策の交渉と合意形成の進め方」有斐閣. 2008, p.191-204
- 24) 土木学会誌編集委員会編. 合意形成論—総論賛成・各論反対のジレンマ. 土木学会. 2004

- 25) Trist, E. L. ; Murray, H. The Social Engagement of Social Science: A Tavistock Anthology: The Socio-Psychological Perspective. University of Pennsylvania Press. 1990
- 26) Bijker, W. E.; Hughes, T. P.; Pinch, T. The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology. MIT Press. 1987
- 27) Latour, B. Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford University Press. 2005
- 28) Paredis, E. Sustainability Transitions and the Nature of Technology. Foundations of Science. 2011, vol. 16, p.195-225.
- 29) 田畑真一. 熟議デモクラシーにおけるミニ・パブリックスの位置づけ：インフォーマルな次元での熟議の制度化. 田中愛治監修. 政治経済学の規範理論. 勁草書房, 2011.
- 30) Street, J. ; Duszynski, K. ; Krawczyk, S.; Braunack-Mayer, A. The Use of Citizens' Juries in Health Policy Decision-making: A Systematic Review. Social Science & Medicine. 2014, vol. 109, issue C, p.1-9
- 31) Power 2010, <http://www.power2010.org.uk>
- 32) 内閣府. エネルギー・環境の選択肢に関する討論型世論調査.
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/kokumingiron/dp/index.html>
- 33) Sustainability Transitions Research Network, <http://www.transitionsnetwork.org/>
- 34) 内閣府. 地区防災計画ガイドライン
<http://www.chikubousai.go.jp/pdf/guidline.pdf>

3.7.2 問題構造化技法

(1) 研究開発領域名

問題構造化技法

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システム概念やシステム・モデルを用いて、組織や集団・社会など多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の改善や解決の支援を目的として、利害関係者間で問題を構造化しようとする様々な方法論を開発・提案・実践するとともに、それらを俯瞰し、それらの特徴を比較検討する研究開発領域。その主たる方法論は以下の通り。

ソフトシステム方法論(SSM: Soft Systems Methodology)、戦略的選択アプローチ(Strategic Choice Approach)、メタゲーム(Metagame)、ハイパーゲーム(Hypergame)、ドラマ理論(Drama theory)、戦略的仮説検証法(SAST: Strategic Assumptions Surfacing and Testing Methodology)、インタラクティブ・プランニング(Interactive Planning)、批判的システム思考(Critical Systems Heuristics)、マルチメソドロジー、質的研究方法、シミュレーション&ゲーミング、アクション・リサーチ、デザイン科学研究

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 問題構造化技法の体系

問題構造化技法とは、システム概念やシステム・モデルを用いて、組織や集団や社会など、多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の改善や解決を支援しようとする思考の体系である。

まず、問題構造化技法に関するメタ方法論として、比較選択方法論がある。比較選択方法論は、問題構造化技法で用いられる方法論全体を比較し、ある問題状況ではどの方法論を選ぶべきかについて検討し、各方法論について、それぞれのいわば強み弱みを明らかにして、それを問題状況に応じて使い分けようとする方法論的相補主義の考え方に基づく。その代表的な枠組みとして、SOSM (System of Systems Methodologies) がよく知られている¹⁾。SOSM は、複雑な問題状況をシステムの複雑さ(単純か、複雑か)と参加者の関係(単一的か、多元的か、強圧的か)の2軸に従い4つのタイプに分類し、そのタイプごとにそれに適した問題構造化技法を対応させる典型的な状況適用的かつ相補的な方法論の分類枠組みである。SOSM は、その方法論が目指す方向性が目標追求なのか、多様な価値観の調整なのか、公平性の確保なのか、あるいは多様性の促進なのかによって、タイプ A から D までの4つに分類する。本報告では、まずこの分類方法に従い、問題構造化技法を俯瞰する。

問題状況に関心や利害関係を持つ参加者は、問題状況の複雑さと多様性を増大させる要因のひとつである。このような参加者としての人に焦点をあてた実践ないしは研究の領域として、社会や組織を構成する参加者の経験や思考を参加者の内面から理解し記述しようとする質的研究方法、参加者がシミュレーションに意思決定者として参加し体験に対する内省(振り返り)にもとづく学びを通じて、対象の理解や問題解決を図ろうとするシミュレーション&ゲーミング、研究者自身が問題状況に行為的に関わることによ

って学びを得ると同時に状況それ自身も変えようとするアクション・リサーチなどがある。質的研究は、参加者のおかれた状況と文脈に関する詳細な記述と解釈（一部領域密着的な理論の生成）を指向し、シミュレーション&ゲーミングは、（教育や訓練にも用いられるが）参加者間の相互理解や合意形成を指向し、アクション・リサーチは、改善と関与を指向する方法である（Carr & Kemmis, 1986）²⁾。一方で、参加者を取り巻く社会的組織的要素よりはむしろ、参加者の認知的行動的側面の持つ特徴を人工物システムの設計に活かそうとするデザイン科学的研究という研究領域もある。以下、本節では、問題構造化技法の関連方法論あるいは関連研究領域として、質的研究方法、シミュレーション&ゲーミング、アクション・リサーチ、デザイン科学研究について説明と国内外の動向について述べる。

(3-2) タイプ A：目標追求をめざすハードシステム思考および構造主義的アプローチ

タイプ A は SOSM の枠組みでは単純なシステムで参加者が単一の場合に対応し、タイプ A での問題状況を扱おうとする問題構造化技法は、目標追求型のアプローチで、あらかじめ決められた目標に向かう最適化アプローチから組織の生存可能性を確保するために必要な組織的行動と設計を目指すアプローチまで、多種多様である。このタイプのアプローチは、目標はすでに明白であるか、簡単に決められるものと想定している。対象システムが目標を達成するためにシステムを最適化したり、あるいはシステム内外で発生する複雑さや混乱の度合いに対応したりすることに力を注ぐ、問題解決型のアプローチである。

このカテゴリーの典型的なものは、（従来型の）オペレーション・リサーチ(OR)、システム分析、システム工学などのハードシステム思考と、システム・ダイナミクスや組織サイバネティクスなどの構造主義的なアプローチである。ただ、ハードシステム思考にも、ソフト OR、ハイパーゲーム、メタゲームドラマ理論など、主観性、非合理性などを取り入れてモデルを拡張する方向も、特に英国・日本・カナダを中心に一部に見られるようになってきている（タイプ B の項で後述）。また、システム工学でも、米国で最大規模の産学官を繋ぐ団体 INCOSE（International Council on Systems Engineering）が、ソフトな方向性に大きな関心を持つ動きが最近活発化している。

構造主義的アプローチのなかで、システム・ダイナミクス(SD)は、複雑系の中に存在する膨大な変数を、相互性のあるフィードバックループとして表現することが本質的な特徴である。フィードバックループ同士のシステミックな相互関係により、システムの構造を表現し、この構造がシステムの振る舞いを決定するとする。なお、このシステム・ダイナミクスにも、ソフト SD と呼ばれるソフト化の方向が最近開発されている（David Lane, 1998）。

一方、組織サイバネティクスは、システムが生存し絶え間なく自己を調整し続け、自己組織化し、内的もしくは外的な要因で発生する混乱に対応していくために、設計上のどの主要ポイントを操作すればいいのかを、より深いレベルで考察することを目指している。すなわち、組織サイバネティクスは、生存可能システム・モデル（VSM: Viable Systems Model）を使い、ハードシステム思考では扱いきれない複雑さや混乱の問題を取り扱おうとする。VSM は、ダイナミックに変化する環境の中でシステムが生存可能であり続けるためにサイバネティクスの処方に従って複雑な組織を設計しようとする

際の処方箋であり、組織内の問題を診断し、生存可能性を確保するために有用である。なお、VSMに基づき、より問題解決の手法として開発されたコンサルティング手法であるチームシンテグリティ(Team Syntegrity)は、カナダを始め北米、英国で実務的な人気がある。

(3-3) タイプB: ソフトシステム思考(Soft Systems Thinking)

タイプBはSOSMの枠組みでは参加者が多元的な場合に対応し、タイプBの問題構造化技法は、利害関係者の異なる価値観を探求し調整することを目的とするもので、ソフトシステム思考ないしはソフトシステムズアプローチと呼ばれる。ここでは、利害関係者の主観性を尊重した学習プロセスの重要性が強調される。

ソフトシステム思考の方法論は、(1)構造のよくわかった問題に対して厳密な解決案を提供することを目指すというより、むしろ構造のよくわからない問題状況を部分的にでも構造化しようとする、(2)意思決定プロセスへの問題関係者の積極的参加を強く要請すること、などの際だった特徴をもつ有力な問題構造化手法のひとつである。ソフトな方法論にとっての評価尺度は、「有効性(effectiveness)」(達成したいことを実際に達成しているか)と「洗練さ(elegance)」(利害関係者は提案内容が趣味のいいものだと感じているか)である。ソフトシステム思考は、利害関係者同士の価値観や信念や哲学が異なることから発生する意見の食い違いや対立を取り扱い、こうした食い違いや対立に対処できるなら、問題の解決はより明快なものになるとの立場に立つ。

以下、タイプBに属するいくつかの問題構造化技法を説明する。

(i) ソフトシステム方法論

特に、Peter Checkland (1981)の提唱したソフトシステム方法論(SSM)は、複数の価値観や視点とその意味するところを明示するためにシステム・モデルを用い、複数の視点をシステムックに探求し、比較対照しようとする典型的なソフトシステム思考である^{1) 3)}。その目的は、問題状況の参加者が異なる世界観とその異なる世界観が提示する変化の可能性を、より完全に理解できるように、システムックな学習プロセスを生み出すことである。

この学習プロセスによって、異なる価値観や信念を持つ問題関係者間で、仮に一時的でも、様々な価値観が並立しながらそれぞれが他を受け入れている状況(アコモデーション(accommodation))を達成しようとするのである。合意(consensus)が合理性・最適性をもって追求されるのに対して、アコモデーションは学習により探索される。関係者それぞれが、認識する世界や環境に関する知覚を、ディベートや自由討論等で互いに表明し、すり合わせ、その過程で自分とは異なる世界観を持った他者の立場・考え方を学習し、理解するのである。

ソフトシステム方法論は、次の戦略的仮説検証法(SAST)の強い影響を受けている。

(ii) 戦略的仮説検証法(SAST)

SASTはその哲学的根拠の多くをChurchmanの「社会システム設計」に負っている。ChurchmanはAckoffとともに、第二次世界大戦後のアメリカでORの研究に関わった重要な先駆者であるが、二人は1960年代から1970年代にかけてORに失望し、ソフトシステム思考の開発に注力し、SASTを提唱した¹⁾。SASTは、(1)論理的根拠を重視する最適化よりも満足化・目標をめぐる対立を容認する、(2)自身の表現内における異なる

目的の評価・対立を明確化し交渉を促進する透明な手法を活用する、(3)能動的主体としての人間要素を取り扱う、(4)ボトムアップ・プロセスに基づく問題構築を行う、(5)不確実性を受け入れる、という特徴をもつ。

(iii) インタラクティブ・プランニング

インタラクティブ・プランニングは、Russell L. Ackoffによって提案された、望ましい現在のデザインを通して未来を作り出そうとする方法論である。インタラクティブ・プランニングは、組織の将来は、それまで何をやってきたか以上に、これから何を行うかに依存するという信念に基づき、(1)現時点で考えるあるべき姿から現状へのバックワードを行う、(2)このアクションは、絶え間なく行われ、開始も終了もない。(3)組織・グループのあらゆるステークホルダーを取り込み、計画段階から関与させる、といった特徴を有する¹⁾。

(iv) 戦略的選択法(Strategic Choice)

John Friendらによって提唱された、政治的な不確実性を含む種々の不確実性に直面する意思決定主体のインタラクティブ・プランニングへのアプローチである⁴⁾。英国タビストック研究所(Tavistock Institute of Human Relations)でORと社会学者により考案されたという出自から、極めて柔軟性に富んだ使い勝手の広い問題解決の方法論で、現在では、公共・私的を超えて様々な問題解決で用いられている。それぞれ異なる利害を持つ多様な利害関係者のグループを仲介し、それまでの発言・コミットメントに縛られることなく、より未来志向的で創造的にアコモデーションが達成できるように導くことが、この方法論の主眼である。

(v) ソフトORとソフトゲーム理論

メタゲーム、ハイパーゲームは、それぞれ、高次の認知階層、主観性に焦点を当てた具体的な数理的分析の枠組みである^{5, 6)}。メタゲーム分析は問題状況を戦略ゲームとして捉え、典型的には、各プレイヤーは自分の戦略を選ぶ方針(相手の取る戦略から自分の戦略を対応させる関数)を高次の戦略として取り得るとして分析を行う。

ハイパーゲームは、通常のゲーム理論のように「関与するすべてのプレイヤーは同じゲームを見ている」とは想定せず、ある問題状況に関与する人々は異なった多様な価値観をもっており、各主体は共通に関与している問題状況を異なって知覚し、いわば内部モデルを構築して意思決定を行うと仮定する。

ハイパーゲームのメタモデルとして、木嶋らは、I-PALM (Poly-agent Learning Model)を提唱し、問題状況の理解の変化といったダイナミックな視点から、各合意形成主体間に相互作用のない独立な状況認識(単純ハイパーゲーム)から始まって、各合意形成主体が次第に他者の内部モデルを学習し、相互認識を形成し(共生的ハイパーゲーム)、ついには通常のゲーム状況を共通に認識するようになる一連の過程を記述している⁷⁾。

(vi) ドラマ理論

ゲーム理論では、合理的で目標追求的な振る舞いが論じられるのに対して、ドラマ理論では感情や非合理性に焦点を当て、決定が実行される前段階(プレプレー段階)での相互作用を通してどのように意思決定主体が変化してゆくかが考察される。変化に焦点を当てること、すなわち、決定主体が未解決の問題に取り組む際に、彼らが状況認識をどのように書き換えていくか(「再フレーム化」しているか)に焦点を当てることによ

って、ドラマ理論は、彼らが他者との関係の中でどのようにして自己実現を達成しようとするのかを明らかにしようとする⁷⁾。

具体的には、ドラマ理論の枠組みは、次のような特徴を持っている。

ドラマ理論は、各キャラクターが行動を実際に採る前のプレプレー段階でのキャラクター間の相互作用により、将来的にどのようなことが起こるかに関心がある。実際の行動が採られるのは、最後の実施の段階にすぎない。

ゲーム理論が、「合理的な解」に興味があるのに対して、ドラマ理論は相互作用という「ドラマティックな解」に関心がある。ドラマ理論の関心は、与えられた合理性の下で得られる解では満足できないキャラクターが、より良い解決策を求めて相互作用を書き換えていく過程全体の分析にある。

ゲーム理論では、立場(ポジション)や脅しといった概念は用いられていない。ゲーム理論が、プレーヤーは合理性にのみしたがって行動すると仮定し、合理性のみを意思決定過程の有効な概念とみなすのに対し、ドラマ理論では、意思決定過程を「緊張が解消していく過程」として意思決定状況を捉える。

(3-4) タイプC: 公平性確保の方法論

タイプCは、強圧的と見なされる問題状況に介入しようとするアプローチである。ソフトシステム思考には、異なる利害関係者間でも合意、あるいは少なくとも調整は可能だという多元的なバイアスがかかっているため、この強圧的な状況には適切に対応できないとし、タイプCのアプローチは、システム設計そのものと設計に伴う結果において、公平性を確保しようとする。すなわち、現状で不利益を受けている人々を支援し、全員がシステム設計に完全に貢献し、対象システムの運営からしかるべき利益を受けられるようにしようとするのである。

この典型的な方法論である批判的システム・ヒューリスティクス(CSH: Critical Systems Heuristics)は、社会的不公平に真正面から取り組もうとする方法論で、(1)ある決定で影響を受ける者全員が決定プロセスに参加するよう確保することで、社会的不公平に対応すべきだという解放的システム思考を確立し、(2)計画者や関心のある市民が使える方法論を提供しようとする。すなわち、CSHは、社会システムの設計者や関心のある市民に、システムの設計の規範的内容(normative content)を明らかにすることを目指している。ここで、規範的内容とは、計画の前提となる価値観と計画の利害関係者への社会的影響や副作用を意味する。

(3-5) タイプD: ポストモダンアプローチ

一般論として状況改善を保証できると主張するシステム方法論に懸念を抱く立場がタイプDである。彼らはあらゆる問題状況には膨大で解析不可能な複雑さと強圧が内在しているものだとして、これにはポストモダンなシステム実践が適切だと主張する。すなわち、解放のためのシステムズアプローチと同様に、抑圧された視点を強調し、多様性を助長しなくてはならないという。これはある意味で、圧倒的支配のシステムに挑戦し打破して、抑圧された意見に声を与えなくてはならないと考えるため、アンチ・システムミックであるともいえる。ほかのシステム手法に比べて比較的新しく、まだきちんと確立されていない。

(3-6) 問題構造化技法のマルチメソドロジー

SOSM が主張する方法論的相補主義をさらに進め、問題状況の次元と介入プロセスのフェーズ (ステージ) に応じて、問題構造化技法の様々な方法論の特徴をうまく組み合わせさせて使おうとするマルチメソドロジー (multi-methodology) と呼ばれる立場がある。これは、既存の様々な方法論のプロセスをいくつかのフェーズに分解して、再度組み合わせることにより、新たな問題解決の可能性を開拓しようというのが、マルチメソドロジーの考えである。

(3-7) 質的研究方法

質的研究 (qualitative research) という名称は、言葉の形式をとるデータに依拠するあらゆる種類の社会研究の総称を指す。一般に質的研究とは、インタビュー、観察記録、公的文書、映像、歴史的な文書などを基にした調査・研究手法、および研究方法論を指す。主に、心理学、社会学、文化人類学、教育学、福祉学、経営学などの人文・社会諸科学、看護学や医学 (特に、精神医学、心身医学、公衆衛生学) において用いられる。質的研究には、大きく個人誌 (ライフヒストリー)、現象学、グラウンデッド・セオリー (Grounded Theory)、エスノグラフィー (Ethnography)、ケーススタディの 5 つの伝統がある (Creswell, 1998)⁸⁾。ここでは、情報システム分野でよく用いられるグラウンデッド・セオリーとエスノグラフィーについて述べる (Mingers, 2003)⁹⁾。

グラウンデッド・セオリーは、Glaser と Strauss(1967)¹⁰⁾によって提案された研究方法で、基本的には、統一理論ではなく、収集されたデータを説明する中範囲の理論を構築するための、データの収集と分析に関する体系的で帰納的なガイドラインから成る (Charmaz, 2000)¹¹⁾。グラウンデッド・セオリーには、多様な系譜がある。木下 (2003)¹²⁾は、分析技法の共通性として「コーディング方法としてのオープン・コーディングと(軸足・)選択的コーディング、基軸となる継続的比較分析、その機能面である理論的サンプリング、そして分析の終了を判定する基準として、それ以上の修正が必要とされない水準に達することを意味する理論的飽和」の 5 点を不可欠の条件として挙げている。この方法は、人工物システムが享受される社会や組織の構成要素である人 (ユーザ) やシステム構築に関わる利害関係者の分析として利用可能である。情報システム分野では、主要な研究方法の 1 つになりつつあり、米国、欧州、豪州、ニュージーランドではよく用いられている。また、シンガポール、中国 (香港)、韓国、わが国でも徐々に用いられるようになってきた。ただし、データ分析技法として表面的に用いる傾向にあり、理論的飽和まで至るものは多くない。

エスノグラフィーは、本来はフィールドワークの報告書としての記述を意味していたが、今日では、文化的行動を記述し解釈するプロセスとその記述や解釈の両者を指す。欧米では、方法論としての側面が強調される傾向にあり、わが国でもその傾向になりつつある (小田, 2010)¹³⁾。前者の意味では、エスノグラフィーとは、研究者が人々の日々の生活に溶け込み、グループ参加者を観察したりインタビューを行ったりする参与観察を通じて、文化共有グループのメンバーの行動や言語や相互作用の意味を学ぶ方法である。エスノグラフィーへの科学的アプローチは、構造機能主義、シンボリック相互作用論、文化人類学、認識人類学、フェミニズム、マルクス主義、エスノメソドロジー、批判理論、カルチュラル・スタディーズ、ポストモダニズムなどに広がりを見せている。

わが国では、災害に居合わせた人自身の言葉を聴き災害対応に関わる知識の体系化を行う災害エスノグラフィーという言葉が注目を集めているが、記述や解釈の側面を強調している。批判的エスノグラフィーでは、エスノグラフィーを研究者と研究対象の人々との対話から生じる創発的プロセスと捉え、研究に提言的な視点を持ち込もうとする。システム構築においては、人工物システムを享受し文化を共有する組織における参加者の行動や言語のパターンの意味を学び、よりよいシステムの設計や開発に役立てるという利用方法がある。方法論としてのエスノグラフィーは、フィールドへの比較的長期間の滞在を要するため、システム構築分野でこれを採択した研究はあまり多く見られない。

(3-8) シミュレーション&ゲーミング (Simulation & Gaming)

ゲーミングとは、一般に人間が勝負や競技に参加することを意味するが、シミュレーション&ゲーミング (あるいはゲーミングシミュレーション) とは、人間がシミュレーションに参加することを通じて、現実対象の理解や問題解決を図る方法論を指す。典型的な応用例は、教育や訓練での利用である。Greenblat (1998)¹⁴⁾は、ゲーミングシミュレーションを、現実がシミュレートされた文脈の中に人間の行うゲーム活動を取り込んだ形式と定義している。ゲーミングは、ゲーム設計者、ゲーム参加者 (プレーヤ)、および、ゲーム進行役 (ファシリテータ) の三者間のコミュニケーションと見ることもできる。新井 (2004)¹⁵⁾は、「設計者、ファシリテータ、プレーヤの3者がともに現実世界に対する認識と理解を深める」ための方法論と位置付けている。シミュレーション&ゲーミングの応用分野は、心理学、教育学、政治学、政策科学、経営学、経済学、看護学など多様であり、開発教育、合意形成、戦略策定、制度設計などの実践的応用領域もある。システム構築に対しては、構築するシステムの目的、望ましい状態や振る舞いなどについて、利害関係者間で事前に合意形成を行なう場合に用いることが可能である。シミュレーション&ゲーミングは、欧州を拠点とする ISAGA(International Simulation And Gaming Association)をはじめとして、オランダ、ドイツ語圏、北米、日本、タイ、シンガポールで学会が設立されている。中国では特に上海を中心として、意思決定能力や組織化能力向上を目的とする企業内研修のためにゲーミングを用いる動きが出て来た。わが国においては、ゲーミングとエージェントベースシミュレーションを組み合わせたハイブリッドなシミュレーションの動きが活発である。

(3-9) アクション・リサーチ

アクション・リサーチ (Action Research) とは、目標とする社会的状態の現実へ向けた変化を志向した広義の工学的・価値懐胎的な研究であり、この目標状態を共有する研究対象者と研究者による共同実践的な研究のことを指す (矢守, 2010)¹⁶⁾。

アクション・リサーチは、望ましい社会状態に対する価値判断に関する調整が求められる場合、研究者と研究対象者との間の固定的な構造に変化が求められる場合に必要とされる (矢守, 2010)¹⁶⁾。制度や規則などを含む広義の人工的システムの構築においては、何を望ましい状態とするかの価値について、その調整が求められるが、このような場面において、アクション・リサーチは有効である。Mingers (2003)⁹⁾は、情報システム研究において、アプローチを実証的なものと解釈的なものに大別し、その両者に跨るものとして、アクション・リサーチと事例研究を挙げている。アクション・リサーチは、個別の研究手法というよりは、研究当事者の実践に対する態度や当事者間の関係性

を指した概念であり（矢守, 2010）¹⁶⁾、そのような態度で、たとえば、OR（オペレーションズリサーチ）、SSM（ソフトシステム方法論）、社会技術的システム思考などの既存の技法や方法、あるいは方法論を活用するアプローチと言える（神沼ほか, 1995）¹⁷⁾。上述したように、アクション・リサーチは、特定の方法というより、研究の態度や概念を指すものであるため、アクション・リサーチそのものをテーマとした研究コミュニティは、国内外に優勢なものは見当たらない。むしろ、看護学や教育学などの研究分野ごとに、アクション・リサーチを行おうとするコミュニティが存在する。なお、学術雑誌として Action Research 誌が 2003 年から刊行されている。

（3-10）デザイン科学的研究

デザイン科学的研究（Design Science Research）は、特定の領域で支持されている核となる理論を、関心のある問題状況に仮説的推論（演繹や帰納に先立って、個別の現象を適切に説明しうる仮説を導出する推論）によって適用し、人工物の構築と評価を通じた学びによって、問題解決や改善を図ると同時に特定の問題状況に適用可能な（一般理論ではない）中範囲の理論を生成しようとする研究方法である。例えば、組織で利用するシステムの設計において、システムにとって重要な組織的文脈的な情報をいかに設計者に際立たせ、それが実装されるシステムに反映させられるようにできるかという問題に関して、認知心理学で支持されている理論を仮説推論的に適用して、システム構築を行ない、その成果物の評価をすることを通じて、システム構築という中範囲の領域に適用することのできる理論を得ようとする。

この一連の研究の主要関心は、システムの設計法や構築法ではなく、組織で使われるシステムに関わる問題解決に対して、システム成果物を設計・構築・評価をする循環的なプロセスがいかに貢献できるかにある。構築を通じた学びという観点では、デザイン科学的研究は、情報システム、教育学、ヘルスケア、コンピュータ科学、工学の領域にも広く利用されている（Vaishnavi & Kuechler, 2011）¹⁸⁾。デザイン科学的研究では、一連の活動は、問題解決や業績向上を目的として行われ、とりわけ情報システム領域において人気を博している。米国で最も盛んであり、実証研究、行動学的研究、情報経済的研究、質的研究と並んで1つの領域を確立しつつある。この流れは、欧州、豪州、ニュージーランドにも広がりつつあるが、米国ほどではない。残念ながらわが国においては、情報システム領域においてもデザイン科学的研究を方法として採択した研究は見られない。

（4）科学技術的・政策的課題

問題構造化技法は、応用システム思考として、特に英国、北欧、ドイツ、オーストラリア、ニュージーランド、南米等で十分確立され、コンサルティングの実務でも大きなプレゼンスを示している。ただ、その特徴からも分かるとおり、問題構造化技法のかなりの部分は、文化的コンテクストに依存するところが大きく、特に米国、北米での認知度は高いとはいえない。今後は、これらの地域・文化を踏まえた上での問題解決のためのシステム構築方法論として、一皮脱皮することが求められる。その萌芽として、社会を複雑系として捉えたシステム思考が急速に発展しつつある¹⁹⁾。問題構造化技法の関連領域・方法の主要な関心は、組織的、社会的、政治的文脈におかれる利害関係者とその

中において構築されるシステムとの関係性を、人間の側面から理解し、それをシステム構築における問題構造化に役立てようとするものである。人工物システムは人間活動が営まれる複合システムとして多重的な現実をもたらすことを意識し、その構築に当たって複眼的なシステムズアプローチの確立が求められる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

英国、欧州、オセアニア、南米等では、問題構造化技法 (応用システム思考) は、ビジネススクールで広く標準的なカリキュラムとして設定されるとともに、コンサルティング会社、地方自治体、政府、NPO などの具体的な問題解決に頻繁に用いられる「通常のコ考え方」となっている²⁰⁾。

米国では、ここ数年来、巨大規模の産学官の団体 INCOSE (International Council on Systems Engineering) が、システム工学のソフト化、社会化を狙い、問題構造化技法をテーマとする学会 (たとえば、ISSS= International Society for the Systems Sciences) に定期的に参加し、連携を模索し成果を上げ始めている。

デンマークを中心とする北欧・ドイツにおいては、最近、自然エネルギー活用、ゴミ処理問題を中心に持続的発展を目指すプロジェクトとしてトランジション・マネジメント (Transition Management) という潮流が大きくなっているが、その基礎となっているのはこの問題構造化技法である²¹⁾。また、ケンブリッジ大学が中心となって、問題構造化技法 (特に VSM) とサービス科学をつなぐ研究プロジェクトを推進している²²⁾。

(6) キーワード

問題構造化手法 (Problem Structural Methodologies)、応用システム思考 (Applied Systems Thinking)、ソフト・システムズ・メソドロジー (SSM)、戦略的選択アプローチ (Strategic Choice Approach)、メタゲーム (Metagame)、ハイパーゲーム (Hypergame)、ドラマ理論 (Drama theory)、戦略的仮説検証法 (SAST)、インタラクティブ・プランニング (Interactive Planning)、批判的システム思考 (Critical Systems Heuristics)、マルチメソドロジー、質的研究方法 (Qualitative Research Method)、シミュレーション &ゲーミング (Simulation & Gaming)、アクション・リサーチ (Action Research)、デザイン科学的研究 (Design Science Research)、エスノグラフィー (Ethnography)、グラウンデッド・セオリー (Grounded Theory)

（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	○	→	・ビジネススクールでのカリキュラムとして、一定の水準を保っている。特に、ソフトOR、ソフトゲーム理論に関しては、世界でのプレゼンスを発揮している。
	応用研究・開発	○	→	・ビジネススクールでのカリキュラムの一貫として、適用事例集の作成が一定の水準で行われている。特にサービス科学(SSME)での適用が顕著である。
	産業化	△	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。
米国	基礎研究	△	→	・ほとんど行われていない。
	応用研究・開発	○	↗	・産学官の団体 INCOSE (International Council on Systems Engineering)が、システム工学のソフト化を狙い、問題構造化技法をテーマとする集会に定期的に人を送り込み、連携を模索している。
	産業化	△	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。
欧州	基礎研究	◎	↗	・南アフリカで開発され現在世界41カ国で実際に用いられているKetsoなど新たな理論と実践が着実に進んでいる ²⁰⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	・南アフリカで開発され現在世界41カ国で実際に用いられているKetsoなど新たな理論と実践が着実に進んでいる ²⁰⁾ 。
	産業化	○	→	・通常の意味の産業化にはなじまない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Jackson, M. Systems Thinking: Creative Holism for Managers. John Wiley and Sons, 2003.
- 2) Carr, W.; Kemmis, S. Becoming Critical: Education, Knowledge, and Action Research, Falmer, 1986.
- 3) Checkland, P. Systems thinking, systems practice. John Wiley and Sons, 1999.
- 4) Friend, J.; Hickling, A. Planning Under Pressure: The Strategic Choice Approach. 2005.
- 5) Bennett, P. G.; Bryant J. "Drama Theory and Confrontation Analysis", Rational Analysis for a Problematic World: Revisited, Rosenhead, J.; Mingers, J. Eds. Chichester: Wiley, 2001, p. 225-248.
- 6) Bennett, P. G. "Modelling complex conflicts: formalism or expertise?". Review of International Studies. Oct. 1991, vol. 17, no. 4, p. 349-364.
- 7) 木嶋恭一. ドラマ理論への招待. オーム社, 2001.

- 8) Creswell, J. W. *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing among Five Traditions*, Sage, 1998.
- 9) Mingers, J. The paucity of multimethod research: a review of the information systems literature, *Information Systems Journal*. 2003, vol.13, no.3, p. 233-249.
- 10) Glaser, B. G.; Strauss, A. *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*, Aldine De Gruyter, 1967.
- 11) Charmaz, K. Grounded theory: Objectivist and constructivist methods. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (2nd ed.; p. 509-535), Sage, 2000.
- 12) 木下康仁. *グラウンデッド・セオリー・アプローチの実践—質的研究への誘い*. 弘文堂, 2003.
- 13) 小田博志. *エスノグラフィー入門*. 春秋社, 2010.
- 14) Greenblat, C. S. *Designing Games and Simulations: an illustrated handbook*, Sage, 1998.
- 15) 新井潔. *ゲーミングシミュレーション, オペレーションズリサーチ*. 2004, vol.49, no.3, p.143-147.
- 16) 矢守克也. *アクションリサーチ—実践する人間科学*. 新曜社, 2010.
- 17) 神沼靖子, 佐藤敬. *アクションリサーチとソフトシステム方法論*. 情報処理. vol.36, no.10, p.941-946, 1995.
- 18) Vaishnavi, V. ;Kuechler, B. *Design Science Research in Information Systems*, <http://desrist.org/desrist/>, 2011.
- 19) Ball, P. *Why Society is a Complex Matter*. Springer, 2012.
- 20) Ketso. *Ketso:a hands-on kit for creative engagement* <http://www.ketso.com/learn-about-ketso>
- 21) Loorbach, D. *Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity Based Governance Framework*. *Governance*. 2010, vol. 23, no. 1, p. 161-183.
- 22) Ng,I. C. L. *Creating New Markets in the Digital Economy*. Cambridge University Press, 2014.

3.7.3 高信頼要求工学

(1) 研究開発領域名

高信頼要求工学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムは社会インフラとして実社会に広く深く浸透している。CPS (Cyber Physical System) が注目されているように、従来はハードウェアだけで構築されていたシステムも、ハードウェアの機能の多くがソフトウェアで置き換えられ、現代ではソフトウェアなしでは成立しない状況である。業務の効率化のためだけでなく、あらたなイノベーションを生む価値創造のための重要な手段としてソフトウェアシステムが認識されている。このため、以下では主としてソフトウェアシステムを中心に説明するが、ソフトウェアシステムが人間による業務やハードウェアと密接に関係しているため、ソフトウェアシステムに限定したとしても、人間系やハードウェアとの相互作用を含んでいることはいうまでもない。要求工学自体、主としてソフトウェア開発領域で発展し 40 年以上の歴史があるが、最近、セキュリティ、安全性など人間系やハードウェアを含む社会システムの高信頼化が重要となっており、ソフトウェアシステムに限らず一般的なシステム構築の研究開発領域としても高信頼要求工学に注目が集まっている。高信頼要求工学は、実社会のあらゆるサービスや機器が相互に接続され、あらたなサービスがこのような複合的なシステムアーキテクチャの上で創出されていく状況を前提にして、どのようなサービスをなぜ開発するか、それが他のシステムとどのように相互連携し、社会環境にとって意義ある公正なシステムであるのかに関する非機能要求を明らかにするとともに、要求の妥当性を確認する研究開発領域である。ここで、非機能要求とは、システム機能についての特性および制約についての要求のことである。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

安全設計の観点から 1990 年代に入ってソフトウェア安全性が検討されるようになった¹⁾。セキュリティ要求工学の研究は、2000 年に入ってから研究開発が盛んになった。持続可能性は、ようやく 2010 年代になってソフトウェアシステムの品質の一部として認識されるようになった^{1, 2)}。このような安全性やセキュリティに対するソフトウェア技術の発展は、社会的な事件・事故の顕在化がきっかけになっている。したがって、最初から安全性やセキュリティが要求工学で検討されてきたわけではない。たとえば、IEEE Std. 830-1998 では、安全性とセキュリティは制約の一種としてしか扱われていない。これに対して、最も新しい要求工学の標準である ISO/IEC/IEEE 29148:2011 では、安全性とセキュリティが主要な話題として取り上げられている。

識別されたハザードから導出される制約が安全性要求である。過去のソフトウェア障害原因のほとんどが、コーディングエラーではなく要求欠陥であるという Leveson の報告³⁾がある。このため、重要安全システムに対する要求仕様の網羅的な分析手法の研究が進んでいる。

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災とそれに続く福島第一原子力発電所の事故は、我々にシステムの安全性に対する認識を飛躍的に高め、ハザードが起こったとしても小さな

被害で速やかに回復することが求められるようになった。このような安全性は、最近ではレジリエンス（resilience）と呼ばれることが多く、ハザードに対して一定の耐性を持つと同時に、万一被害を受けたときにはその後の回復を早めることや機能が低下したままでも最低限の機能を維持するグレースフルデグラデーションなどを含めた概念である。このようなレジリエンス的な安全性に対する要求も高まっている。

特定のシステムにおける具体的な要求に、セキュリティに関する高水準の組織方針が明示されていることがセキュリティ要求である。安全要求と同様に考えると、「保護すべき資源への識別された攻撃への対策としての制約」がセキュリティ要求であるということもできる。安全性は、システムコンポーネントが環境内で相互作用する際に発生する「創発特性（emerging property）」である。創発特性は、システムが静的に存在するときから継承する特性と反対に、システムが使用されるときに発生する動的な性質である。ソフトウェアシステムは使われなければ、非安全（unsafe）ではない（つまり、安全である）。これに対して、持続可能性は、継承部分と創発部分がある。

持続可能性要求のために、経済面、社会面、環境面、人間面、技術面からなる5次元の汎用参照モデルが Penzenstadler らによって提案されている（www.se4s.org）。この参照モデルでは、環境面の持続可能性要求が他の持続可能性要求と相互に関連付けられるようになっている。また、安全性要求と同じように、品質保証のための追跡と妥当性の確認ができる。

また、エンタープライズアーキテクチャの国際標準である TOGAF ではアーキテクチャ開発手法にセキュリティならびにディペンダビリティの概念が導入されている。ここで、特定のシステムのアーキテクチャに対して、複数のシステム全体に関するアーキテクチャのことをエンタープライズアーキテクチャという。また、安全性、信頼性、持続可能性、可用性などを包括した用語がディペンダビリティである。

（4）科学技術的・政策的課題

ソフトウェアイノベーションで成功しているサービスや製品に共通するのは、すべてオープンなプラットフォームを提供していることである。したがって、社会がソフトウェア化する現代におけるイノベーションは、ソフトウェアイノベーションであり、システム構築に当たっては、多様なソフトウェアシステムとの相互連携が不可欠となるオープンプラットフォームについて、価値だけでなく安全性、セキュリティ、持続可能性を統合的に明らかにする高信頼要求工学の研究開発が必要である。

産官学連携プロジェクトの成果を継続的に発展させるためには、標準化が必要である。たとえば、オランダの産官学プロジェクトであったエンタープライズアーキテクチャの統合モデル図式言語である ArchiMate は TOG(The Open Group)が継続的に標準化している。また、2014年3月に終了した JST による日本の産学連携 DEOS プロジェクトでも、高信頼アーキテクチャプロセスである O-DA(Open Group Releases Dependability through Assuredness)を TOG で標準化している。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際的な産官学連携プロジェクト Shields には、スウェーデンの Linköping University の他、ノルウェーの SINTEF、スペインの European Software Institute、ドイツの Fraunhofer IESE、フランスの Institut National des Télécommunications と Montimage、ハンガリーの SEARCH-LAB とイタリアの TXT e-Solutions が参画した。2008年1月1日から2010年の6月30日までの予定で終了したこのプロジェクトには、産官学の異なる国の組織が参画しているところに EU の高い戦略性を見ることができる。

また TOG では、Openplatform3.0 の取組みが 2013 年に発足し、オープンプラットフォームのための要求開発を加速しようとしている。

（６）キーワード

要求工学、安全性、セキュリティ、持続可能性、運用性、非機能要求、エンタープライズアーキテクチャ、アーキテクチャ、社会技術システム、サイバーフィジカルシステム、ステークホルダ要求、システム開発

（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	○	→	・高信頼性要求工学に関する基礎的な研究論文がある。
	応用研究・開発	○	→	・高信頼要求工学に関する応用研究論文がある。
	産業化	△	↘	・欧米に比べ、産業化に関連する明確な方向性は見えない。
米国	基礎研究	◎	↗	・IEEEなどでの学術論文が多数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・TOGなどで産業界が連携して進展させようとしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・IEEEなどでの学術論文が複数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・EUがプロジェクトとして連携して進展させようとしている。
中国	基礎研究	△	↘	・南京大学などで形式手法についての研究がある。また南京大学で Symposium on Dependable Software Engineering2014を開催した。
	応用研究・開発			・不明
	産業化	○	→	・セキュリティ技術では、最近のサイバー攻撃に見られるように、急速に発展していると思われる。

韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • IEEEなどの国際会議でセキュリティ技術などの発表がある。 • Ministry of Knowledge Economy が Korea 大学に Center for Engineering and Education of Dependable Softwareを設置して研究を支援している。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> • Hyundaiなどが機能安全要求について研究開発を進めている。
	産業化	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> • Hyundaiなどが機能安全要求について研究開発を進めているが、産業化までには至っていない。

(8) 引用資料

- 1) Penzenstadler, Birgit; Raturi, Ankita; Richardson, Debra; Tomlinson, Bill. Safety, Security, Now Sustainability : The Non functional Requirement for the 21st Century. IEEE Software. 2014, May/June, p. 40-47.
- 2) Hilty, L. M. et al. The Relevance of Information and Communication Technologies for Environmental Sustainability. Environmental Modelling and Software. 2006, vol. 21, no. 11, p. 1618-1629.
- 3) Leveson, N. Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, MIT, 2011.

3.7.4 システムアシュアランス

(1) 研究開発領域名

システムアシュアランス

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

安全性やディペンダビリティ（広義の信頼性）などのシステムの属性（attribute）に完全、客観、絶対を求めることが実際的にも概念的にも極めて困難であることが明らかになるにつれ、リスク評価やそれに基づく機能安全の概念が、社会的に受け入れられはじめている¹⁾。前者の立場を仮に絶対的な立場、後者を相対的な立場とよぶこととする。この二つの立場は、安全性やディペンダビリティなどの属性の評価方法、および、評価結果の判断基準の設定に関して異なる前提を持っている。

絶対的な立場では、これらの属性は万人が認める客観的な法則や事実に基づいて評価することが可能であり、またそのような評価がなされるべきであるとする。判断基準の設定についても、万人が認めるべき「絶対に安全」等の基準を、客観的な法則や事実に基づいて確立することができ、また、そのような記述を確立するべきであるとする。したがって、誤りの混入を除けば、システムは「絶対に安全」か否かの二者択一の判定結果だけが評価の利用者にとって重要なことになる。

相対的な立場では、属性の評価方法にも、判断基準の設定にも、評価者の主観に基づく部分があることを前提とする。この場合、諾否の判定結果だけでなく、評価の過程が明示されることが評価の利用者にとって重要なことになる。この明示には、評価がどのような主観にもとづいてどのようになされたか、安全性やディペンダビリティがどういう意味で考えられているか等の記述が含まれる。評価の利用者は、これらを検討した上で、システムの安全性やディペンダビリティについて各々の判断を下すことになる。結局のところ、相対的な立場で問題となるのは、システムの開発者、利用者を含む各関係者がシステムの安全性やディペンダビリティについて十分な「確信」を得ているかどうかである。この確信を与えることをシステムアシュアランス（system assurance）と呼び、より強いシステムアシュアランスを得るためのアシュアランス活動（assurance activity）が展開されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 一般システム理論

Bertalanffy による文献²⁾が初期の一般システム理論に関する古典的文献としてしばしば引用される。1968年に刊行された同書では一般システム理論の要求に応える「新しい」研究動向としてサイバネティクス（制御理論）、情報理論、ゲーム理論、決定理論、グラフ理論、因子分析等が挙げられており、応用を含むシステム科学の分野としてシステム工学、オペレーションズリサーチ、人間工学などが挙げられている。

Luhmann の講義録³⁾も一般システム理論の概説として広く引用されている。そこでは一般システム理論におけるモデルの変遷が、均衡の概念に基づいて安定と攪乱に関する考察を行う均衡モデル；閉鎖システムと開放システムを扱うための入力-出力モデル、刺激-応答モデル、及びブラックボックスモデル；サイバネティクスや制御理論にみられ

るフィードバックモデルなどを通して説明されたのち、『システムは形式である（ただし形式の概念がシステムと環境の差違にあてはめられるという前提のもとで）』との見解が述べられる。

文献²⁾は、生物学、心理学、経済学、社会学、物理学、化学などのいろいろな科学にみられる理論の「同形性」に注目し、数理科学的方法が物理学や化学のみならず、これらのいろいろな科学に適用できることを強調している。しかし、理論の同形性の理解は一般常識に委ねられ、同形とはどういうことなのかについて、数理科学的な考察が深く加えられているわけではない。この方向の考察はその後も発展していないが、例えば、代数構造を対象化して比較する函手意味論（圏論を用いて形式的体系の意味論の一般的な与え方を議論する理論。Lawvere の文献⁴⁾に始まる）などの応用の可能性がある。

大規模で複雑なシステムをどのように扱うのかは、システム科学の今後にとって極めて重要である。文献²⁾ではしかし、理論の同形性に焦点をあて、大規模性や複雑性に対する関心が少ない。一方、Luhmann の文献³⁾では、「形式」や「自己組織性」、「観察」、「再参入」、「複雑性」など、大規模で複雑なシステムを考察する時に重要な視点を取り入れている。そのためには、微分方程式による記述などの解析学的手法だけでは不十分である。Luhmann はこれを補うものとして数理論理的な手法に着目しており、特に、文献⁵⁾の体系を基にして記述と分析を試みる。文献⁵⁾は数理論理学をゼロから展開するが、二十世紀の数理論理学の主流からはずれた個性的な記述を採るために他の文献との関連がわかりにくい上、命題論理に相当する部分だけで、述語論理に相当する部分（限量子）がない。

開放システムは伝統的には熱力学で用いられた概念である。そこでは「外界」との物質やエネルギー、あるいはエントロピーの交換がないシステムと規定された。文献³⁾ではエネルギーやエントロピーだけでなく「情報」の交換にも注目して社会システムにおける開放システムを論じるが、情報の内容について踏み込んだ定式化は与えられていない。今後、情報の定式化をもっと詳細にした上で開放システムの考察を進めることが求められる。

ところで、文献²⁾や文献³⁾では、Shannon の情報理論を出発点として情報に関する考察を進める傾向がある。しかしこれでは情報の質的あるいは意味的な側面を論じることができず、情報処理の多くの側面を捉えることはできない。既に 1960 年代後半、梅棹忠夫と湯川秀樹は、Shannon の情報概念で情報処理の対象を取り扱うことの不十分さを指摘している⁶⁾。梅棹らは Shannon の情報理論に代わる「情報物理学」の必要を感じたが、その後情報物理学の発展は見られなかった。その役割を不十分ながら果たしつつあるのが、現在の情報科学におけるプログラム意味論であると見なすことができる。

もっとも、プログラム意味論が複雑で大規模なシステムを十分に扱うことができているとはまだいえない。大規模システムを取り扱うために抽象データ型の理論⁷⁾が提出され、その数学的背景として普遍代数^{8, 9)}や函手意味論⁴⁾が用いられた。これらはプログラムを入力から出力への関数とみる立場に立って必要な操作の構造を代数系によって表現する理論である。さらに 90 年代末になって、代数の双対概念である余代数が、停止しないプロセスを記述するのに有効であることが示された¹⁰⁾。代数による理論と余代数による理論は、Luhmann のいう入力-出力モデルと刺激-応答モデルに対応する。

これらの過去の業績の上に立って、System of Systems の数理科学的な根拠を構築することは、システム科学が進むべき一つの重要な方向であろう。

(3-2) 検証と妥当性確認の枠組

検証はシステムの実体（実現）が仕様を満たすよう正しく作られているかを調べることを言う^{11, 12)}。検証の概念は、システムの実体とそれを記述する仕様の二つが常にある、という二元論を前提としている。数理論理学における形式理論（仕様に相当する）とそのモデル（実体に相当する）は、この二元論を数理的に表現する概念として広く受け入れられている¹³⁾。（なお、ここでのモデルは、形式理論による抽象的な記述に適合するように構成されたより具体的な対象を指す。論理学以外の分野、特に工学での一般的用語としての「モデル」は、具体的な対象を抽象化した結果を指すが、論理学では意味が異なる（逆になる）ので注意を要する。どちらも、与えられた対象をより扱いやすい対象に変換するものである。数理論理学では、形式理論を対象としてその性質を調べる目的でより具体的な対象を考えるため、このような逆転が起きる。）

検証は一般的には観察によって行われる。システム自体を観察して仕様通りになっているかどうかを確かめる（静的な観察）他、システムが「動作」するもの場合には、システムの実体を実際に動作させ、仕様通りの動作かどうかを（動的に）観察する、いわゆる試験（テスト）が重要な検証方法である¹⁴⁾。

システムの実体が同時に別のシステムの仕様になっている場合もあり、その場合には、システムの動作をテストによらずに検証することもできる。たとえばソフトウェア（ソフトウェアはシステムの一例である）の実体であるソースコードは通常高級プログラミング言語におけるプログラムであるが、これはそれ自身、それがコンパイルされる目標言語（アセンブリ言語など）のプログラムの仕様だと見なすこともできる。プログラミング言語の意味が明確に決まっておれば、ソースコードをよく観察することによって、それがどのように動くかが決定し、仕様通りの動きかどうかを推論することができる。

実体が別のシステムの仕様になるのはソフトウェアに限らず、大規模なシステムでは広く見られる。このような場合には、検証を推論によって行うことができる。一般にはこの推論は非常に煩雑なものになるが、近年の情報科学の発達の結果生まれた定理証明支援技術を用いて、煩雑な、しかし型通りの推論を計算機によって支援することができるようになり、「定理証明による検証」の可能性が広がりつつある。

検証だけではシステムのアシュアランスは得られない。必ずしも明文化することができないユーザのニーズや使用目的に対して、正しいシステムが作られていることを確認する必要がある¹²⁾。まず、システムの仕様がニーズや目的に適ったものかどうかを確かめる必要がある。さらに、検証過程が適切なものかどうかを確かめる必要がある。検証過程の執行が適切であるかどうかだけでなく、検証過程そのものがそもそも適切に設計されているかどうかについても、何らかの形で確かめられなければならない。

また、システムの外に目を向けて、システムが周りの環境に受け入れられるものであるかどうかを確かめることも必要である。社会的、倫理的、法律他の規則、そのときの技術水準、などいろいろな基準に照らしてシステムを確かめる必要がある。

これら、検証の枠組の外でのシステムの確認をまとめて妥当性確認という¹²⁾。妥当性確認は、その根拠とする基準に常に不明確さが残る。検証の「適切さ」も参照すべき外

部基準も、いずれも完全に明確には記述しきれないものである。参照すべき外部基準のリストが明確に与えられることはないし、各々の外部基準がそれ自体、不確定である場合もある。社会的常識は不明確なものよい例だが、明確に決まっているように見える法律も、実は解釈が時代によって変わることを考えると、不明確さが残るといわなければならない。

(3-3) 検証

大規模で複雑なシステムの試験では、テストケースの選択が大きな問題である。大規模で複雑なシステムでは、テストすべき入力データ、つまりテストケースの数が膨大であり、あらゆる場合を尽くす全数検査が不可能であるが、それでは「どのテストケースをどのような基準で選ぶべきか」ということが問題になる。特に情報処理を含む巨大システムの場合、システムの動作が環境の変化に関して連続ではなく、微細な環境変化が動作を全く変えてしまうことが普通なので、機械システムや電子システムなどのテストケース選択とは異なる基準が必要である。

情報処理におけるテストケースの選択は古典的には被覆 (coverage)、つまりいろいろな分岐の枝をどれくらい尽くしているか、をもとに基準が作られてきた。これはシステムの実体の構造に依存して行なう、いわゆる white box test である。試験結果が実体に依存することになり、望ましい状況ではないが、これ以上のことができなかった。

近年になって、model based testing^{15, 16)}の考えが広がっている。これは、仕様を明確に記述し、実体ではなく仕様をもとに coverage などを算出しながら、テストケースの設計をしようとするものである。したがってここでいう model は仕様にあたる。また、この方向を延長して、形式理論として対象化した仕様から、テストケースを自動生成する技術が過去十年間に発達している。このために有効なのが形式理論の充足可能性判定に関する SAT (SATisfiability) solver¹⁷⁾、SMT (Satisfiability Modulo Theory) solver^{4, 18, 19)}等のソフトウェアである。これは論理式を与えると、それを真とする解釈が存在するかどうかを判定して、存在する場合には、各変数の具体的な値を計算して返すものである。これを使ってテストケースを計算させることができる。

形式理論として仕様を対象化することからもう一つの可能性が生まれている。これはモデル検査の手法である。様相論理の一つである modal μ calculus においてシステムの動作を記述すると、検証項目をあらゆる動作にわたってしらみつぶしに検査することができる。これは modal μ calculus^{20, 21)}における形式理論が必ず有限モデルを持つこと (finite model property²²⁾) を根拠とする技術である。その後 modal μ calculus をいろいろに制限して高速な検査を可能にする研究 (計算木論理 (Computation Tree Logic, CTL²³⁾、線形時相論理 Linear Temporal Logic, LTL²⁴⁾、あるいは拡張してより詳細かつ複雑な仕様を書くことを可能にする研究 (実時間モデル検査²⁵⁾、確率モデル検査²⁶⁾など) が進められる一方、検査技術の研究 (モデル検査器の開発) にも大きな努力が払われている (SMV²⁷⁾、Spin²⁸⁾をはじめ多数)。

以上は試験による検証の技術であったが、システムの実体が下位システムの仕様等の記述である場合には、実体が仕様を満たすことの確認を適切な形式体系の中の形式証明を構築することによって行うことができる。これを定理証明による検証という。このような形式証明は、一般には極めて煩雑になってしまい、計算機による処理が求められる。

計算機による定理自動証明は計算機技術黎明期からのテーマであるが、ここで求められるのはむしろ、計算機が証明を作ることよりも、証明に間違いがないか、システムに変更があった時にどこの証明を見直さなければならないかのトレースをとることなど、どこかで（計算機あるいは人間によって）書かれた証明をデータとして処理することである。そのような研究分野が情報科学における定理証明支援系と呼ばれるものであり（Coq²⁹, Agda³⁰, HOL³¹, Isabelle³²）、近年では関数型プログラミング言語などのプログラミング技術と合流して大きな流れを作りつつある。

(3-4) 妥当性確認とアシュアランスケース

実装（モデル）が仕様を満足していることを確かめるのが検証であるのに対し、仕様が意図通りに記されているかどうかを確かめる作業を妥当性確認という。情報システムや大規模プラントなど、大規模で複雑なシステムでは、仕様の記述が膨大であるのが普通で、仕様がそれを書いた者の意図通りになっているかどうかは、自明ではない。

検証や妥当性確認に加え、これらの確認作業の方法が適切であるかどうかの確認も必要である。検証や確認の対象となる主張、それらの項目が成り立つことの議論およびその根拠を提供するデータ（テスト結果、モデル検査に用いた状態遷移機械の記述と検証項目、検証結果を表す形式証明など）を記した文書をアシュアランスケースと呼んで、リスクコミュニケーションのために用いようという動きが近年盛んである。認証のための提出文書にアシュアランスケースを要求する事例もでてきており、アシュアランスケースに関する国際標準も次々に制定されつつある。

アシュアランスケースは、全くの自由形式で書かれてよいものである。しかし、意思疎通を容易にするためには、一定の構造を持たせた方が好都合であり、アシュアランスケースが持つべき構造が研究された（GSN³³, CAE³⁴, Toulmin diagram³⁵, D-Case³⁶）。

その結果、アシュアランスケースは、数理論理学における形式証明と同様の構造をもつべきことが明らかになった³⁷⁻³⁹。）この考察を押し進め、アシュアランスケースの構造を明確にして、機械処理を可能にしようとする形式アシュアランスケースの研究もある⁴⁰。その背景には情報科学における定理証明支援系研究の成果がある（Agda, Coq, HOL, Isabelle）。

以上はアシュアランスケースの構文的な構造であるが、意味的な構造を明らかにしようとする研究も進められている。

(4) 科学技術的・政策的課題

複雑で大規模なシステムを的確に理解するための数理科学的な基盤が求められている。一般システム理論を発展させて、社会学や経営学などにも適用しようとする Luhmannらの仕事⁴¹は、そのための一つの有望なアプローチを提供している。

妥当性確認は、妥当性確認過程自体の確認をも含む。これは自己参照である。自己参照は矛盾を導き得るが、その矛盾を避ける方法も現在ではいくつか知られている。Luhmann³は自己参照を一般システム理論の重要な項目としてあげており（「再参入 re-entry」）、文献⁵を用いて、いくらか数理科学的な分析をおこなっている。しかし、そこで用いられている形式体系の枠組は学界による検討を経たものとはいいがたく、二十世紀の数理論理学の発展を反映していない。自己参照は情報科学においても中心的課

題の一つであり^{10, 42, 43)}、高階論理⁴⁴⁾や構成的型理論⁴⁵⁾などの学術的に評価が確立した形式体系を用いて、システム工学(systems engineering)への応用を図ることは、システム科学における大きな科学技術的課題である。

妥当性確認の技術的研究は、検証の技術的研究に比べて大きく遅れを取っているが、大規模で複雑なシステムの取り扱いには、検証よりもむしろ妥当性確認が必要とされている。妥当性確認には系統的、科学的手法があり得ないと考える者もいるが、例えばアシュアランスケースは、妥当性確認の結果を客観的に記述するためのものとして広く受け入れられつつある。アシュアランスケースは合理的な議論を記述するためのものであるから、情報科学、論理学、存在論をはじめとする学術研究の対象である。一方、アシュアランスケースは、システムに関する確信を社会で共有するための文書であるため、標準化や認証などの政策と一体となって発展させるべきものである。

以下に、アシュアランスケースに関する科学技術的・政策的課題をいくつかあげる。

1. 確信の問題。数学の証明と違い、アシュアランスケースには蓋然性の議論が含まれる。したがって、アシュアランスケースの確からしさや議論の確実さを量的あるいは質的に評価する方法が求められる^{46, 47)}。
2. オントロジー・整合性。現実をよく反映したアシュアランスケースを記すための、系統的な語彙の与え方(オントロジー)が求められる。また、アシュアランスケースは一般に膨大な文書になるため、自動的、機械的な整合性検査が求められる⁴⁰⁾。
3. 評価法。アシュアランスケースは認証のための提出文書等として用いられるため、アシュアランスケース自体の客観的な評価法の提示が求められる^{48, 49)}。
4. 標準化。確信を社会で共有するためには、アシュアランスケースが対象とするシステムおよびシステムに期待される性質に関する社会的合意が必要である。そのための標準化活動を、システム科学技術に関する政策立案者と研究者・技術者が連携して展開することが求められる^{11, 50, 51)}。

(5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

アシュアランスケース手法を用いたシステムアシュアランスが注目を集めている背景の一つとして、システムに関する標準規格や安全規制の性格付けがここ十年ほどで世界的に大きく変化しつつあることが挙げられる。従来の「規範的(prescriptive)規格・規制」では、開発者・運用者に求められたのは規格・規制の示す特定の技術的要求を満たすことであり、それが規格・規制の目的を達成するのに十分かどうかは規格制定者・規制者側の問題と考えられた。それに対して、近年の「目的に基づいた(goal-based)規格・規制」のアプローチでは、開発者・運用者自らが目的に対するリスクを分析して、適切な技術的要求を設定し、目的が十分に達成されていることを議論と証拠で示すことが要求される。この変化は、複雑・大規模なシステムの障害・事故を通して、規範的規格・規制に限界があり、ある場合には全く有効でないことが認識されてきた結果でもある。

上記の変化で、ここ数年で特に影響が大きいものの例として、以下が挙げられる。

- ・ ISO 26262 Road vehicles – Functional safety (10 パート、2011~2012 年発

行)⁵²⁾: ISO 26262 は自動車の電気・電子機器の機能安全に関する ISO 国際規格で、車載機器のライフサイクル全体を通じて安全ケース (安全性のアシユアランスケース) を作成し活用することが鍵となる (機能安全とは、安全関連機器が機能することによって安全性を確保することをいう)。これはアシユアランスケースの概念を初めて自動車産業に導入するもので、新概念を消化しようとする産業側の活動や、そのニーズを受けた大学等での研究が急速に活発化している。日本でも、JasPar によって機能安全テンプレート、同記入ガイド、等が開発されている⁵³⁾。

- ・医療用機器へのアシユアランスケースの適用: 米国 FDA は、501(k)制度 (医療用機器市販前申請認可制度) の改善に関する 2010 年の報告書において、機器申請にアシユアランスケースを要求していく方向性を示し、2011 年から特に輸液ポンプの認可にアシユアランスケースを用いるパイロットプログラムを進行中である^{54, 55)}。これも、それまでアシユアランスケースに馴染みのなかった産業分野への導入であり、医療機器産業による対応とそれを支援する学術的研究が急速に活発化している⁵⁶⁾。

関連して、医療用機器の安全性に関する英国のプロジェクト Chi+Med (Computer-Human Interaction for Medical Devices)⁵⁷⁾においても、アシユアランスケースの利用が検討されている。

新しい分野の規格・規制にシステムアシユアランスの考えが導入される度に、産業側は上記のような急速な対応をしてきたが、アシユアランスのための費用が大きいことから導入に抵抗が示されることも多い。費用増大の要因に、たとえ共通の技術部品でも、使用先のシステムごとに、また適用分野別の規格・規制ごとにアシユアランスを繰り返さなければならない点がある。安全性のアシユアランスと認証に関する EU の大型プロジェクト OPENCROSS (Open Platform for Evolutionary Certification of Safety-critical Systems)⁵⁸⁾は、合成的・進化的な手法によってアシユアランスの部品化・再利用を促進し、分野に跨る認証の共通基盤を構築することで、アシユアランスと認証にかかる時間・費用を大幅に削減することを目指している。

アシユアランスケース手法の普及のために、アシユアランス議論の具体的・標準的な表現法の確立や計算機上でアシユアランスケースを扱うツールの整備が進められている。表現法としては、航空・鉄道分野でも採用された Goal Structuring Notation (英 York 大) が普及してきている⁵⁹⁾。また、アシユアランスケース・ツールの相互互換性を目的としたデータ形式として、OMG SACM (Structured Assurance Case Metamodel)標準仕様が開発されている⁶⁰⁾。

(6) キーワード

システムアシユアランス、アシユアランス活動、検証、妥当性確認、一般システム理論、再参入、形式、理論の同形性、自己組織性、観察、複雑性、高階論理、構成的型理論、情報、函手意味論、普遍代数、余代数、アシユアランスケース、メタアシユアランスケース、形式アシユアランスケース、定理証明支援系、GSN、CAE、Toulmin diagram、D-Case、確信、モデル検査、SAT solver、SMT solver、model based testing、有限モデル性 (finite model property)、

（7）国際比較

検証に関しては膨大な活動があり、単純な比較が意味をなさないので、ここでは、近年急速に立ち上がっているアシュアランスケースに関する研究開発について比較する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・形式アシュアランスケース。
	応用研究・開発	○	↗	・産学連携の試みを開始（D-Case研究会）。
	産業化	○	↗	・国際標準への貢献(ISO 15026改訂作業の分担)。
米国	基礎研究	○	→	
	応用研究・開発	◎	→	・アシュアランスケース生成技術(NASA Amesの活動)。
	産業化	◎	↗	・政府認証に取り入れつつある(FDAによる輸液ポンプ認証など)。国際標準への貢献(ISO 15026改訂のリーダーシップ)。
欧州	基礎研究	◎	→	・安全工学、ディペンダビリティ工学など。
	応用研究・開発	◎	↗	・産学の連携が密。自動車や航空、医用機器、軍用技術その他。
	産業化	◎	↗	・国内規制にアシュアランスケースが用いられている(特に英国)。コンソーシアム、ベンチャーなどが盛ん(GSN, Adelard)。事故調査にも用いられている(Nimrod墜落など)。国際標準への貢献(IEC 62741提案)。
中国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	→	
韓国	基礎研究	×	→	
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	△	→	

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Inge, J. R. "The safety case, its development and use in the United Kingdom." In PROC. 25TH INTERNATIONAL SYSTEM SAFETY CONFERENCE. 2007.
- 2) von Bertalanffy, Ludwig. General System theory: Foundations, Development, Applications, New York: George Braziller, revised edition. 1976, ISBN 0-8076-0453-4. (First edition 1968.)
- 3) Niklas Luhmann. Introduction to general system theory.
- 4) Lawvere, F. William. Functorial Semantics of Algebraic Theories and Some Algebraic Problems in the context of Functorial Semantics of Algebraic Theories. Ph.D. thesis, Columbia University, 1963. (Republished in Reprints in Theory and Applications of Categories, 2004, no.5, p.1-121.)
- 5) Brown, Spencer. Laws of form, 5th English editon, 2011, ISBN 978-3-89094-58004, Bohmeier Verlag, Leipzig, Germany. (First published in London in 1969).
- 6) 梅棹忠夫, 湯川秀樹. 人間にとって科学とは何か. 中公新書 132, 中央公論新社, 1967, ISBN-13 978-4121001320.
- 7) Goguen, Joseph; Thatcher, James; Wagner, Eric. An initial algebra approach to the specification, correctness and implementation of abstract data types, In Raymond Yeh (ed.) Current Trends in Programming Methodology IV, Prentice-Hall, 1978, p.80-149.
- 8) Cohn, Paul Moritz. Universal Algebra. Dordrecht, Netherlands: D.Reidel Publishing. 1981, ISBN 90-277-1213-1. (First published in 1965 by Harper & Row).
- 9) Grätzer, George. Universal Algebra, D. Van Nostrand Company, Inc., 1968.
- 10) Rutten, J. J. M. M. Universal coalgebra: a theory of systems. Theoretical Computer Science, Vol. 249 Issue 1, Oct. 2000, p.3 - 80.
- 11) IEC, IEC 62741/Ed1: Guide to the demonstration of dependability requirements. The dependability case, 2014.
- 12) Boehm, Barry W. "Verifying and validating software requirements and design specifications." IEEE software. 1984.
- 13) Goguen, Joseph; Burstall, Rod M. Institutions: Abstract model theory for specification and programming. Journal of the ACM (JACM) . 1992, vol.39, no.1, p.95-146.
- 14) Avizienis, A.; Laprie, J-C.; Randell, B.; Landwehr, C. E. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on 1.1. 2004, p.11-33.
- 15) Utting, Mark; Legiard, Bruno. Practical model-based testing: a tools approach. Morgan Kaufmann, 2010.
- 16) Utting, Mark; Pretschner, Alexander; Legiard, Bruno. "A taxonomy of model-based testing approaches." Software Testing, Verification and Reliability. 2012, vol.22, no. 5, p.297-312.
- 17) Gomes, Carla P.; Kautz, Henry; Sabharwal, Ashish; Selman, Bart. "Satisfiability solvers." Handbook of Knowledge Representation 3 . 2008, p.89-134.

- 18) Barrett, Clark W.;Sebastiani, Roberto.;Seshia, Sanjit A.; Tinelli, Cesare. Satisfiability Modulo Theories. Handbook of satisfiability. 185, 2009, p.825-885.
- 19) De Moura, Leonardo; Bjørner, Nikolaj. "Z3: An efficient SMT solver." In Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Springer Berlin Heidelberg. 2008, p.337-340.
- 20) Kozen, D. Results on the propositional mu-calculus. Theoret. Comput. Sci..1983, vol.27, p.333-354.
- 21) Pratt, V. R. "A decidable mu-calculus: Preliminary report," Foundations of Computer Science, 1981. SFCS '81. 22nd Annual Symposium. 28-30 Oct. 1981, p.421-427.
- 22) Bradfield, J.; Stirling , C. The Handbook of Modal Logic, chapter Modal Mu-Calculi, 2006, p.721 - 756.
- 23) Clarke, E. M.;Emerson, E. A.;Sistla, A. P. "Automatic verification of finite-state concurrent systems using temporal logic specifications". ACM Transactions on Programming Languages and Systems. 1986, vol. 8, no.2, p.244-263. doi:10.1145/5397.5399 .
- 24) Pnueli, Amir. The temporal logic of programs. Proceedings of the 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), 1977, p.46-57. doi:10.1109/SFCS.1977.32.
- 25) Yi, Wang; Pettersson, Paul; Daniels, Mats. Automatic Verification of Real-Time Communicating Systemsby Constraint Solving. In Proceedings of the 7th International Conference on Formal Description Techniques, Berne, Switzerland, 4-7 October, 1994.
- 26) Kwiatkowska, Marta; Norman, Gethin; Parker, David. Stochastic Model Checking. In M. Bernardo and J. Hillston (editors) Formal Methods for the Design of Computer, Communication and Software Systems: Performance Evaluation (SFM'07), volume 4486 of Lecture Notes in Computer Science (Tutorial Volume), Springer. June 2007, p.220-270.
- 27) McMillan , K.L. Symbolic model checking. In Kluwer Academic Publ.,1993.
- 28) Holzmann, G. J. The SPIN Model Checker: Primer and Reference Manual. Addison-Wesley, 2004. ISBN 0-321-22862-6.
- 29) Huet, Gérard; Herbelin, Hugo. "30 years of research and development around Coq." In Proceedings of the 41st annual ACM SIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages. ACM. 2014, p.249-250.
- 30) Bove, Ana; Dybjer, Peter; Norell, Ulf. "A brief overview of Agda—a functional language with dependent types." In Theorem Proving in Higher Order Logics, Springer Berlin Heidelberg, 2009, p.73-78.
- 31) Slind, Konrad; Norrish, Michael. A brief overview of HOL4. In Theorem Proving in Higher Order Logics (TPHOLs). LNCS. Springer. 2008, p.28 - 32.

- 32) Nipkow, Tobias; Paulson, Lawrence C.; Wenzel, Markus eds. Isabelle/HOL: a proof assistant for higher-order logic. LNCS vol. 2283. Springer, 2002. Updated version available as <http://isabelle.in.tum.de/doc/tutorial.pdf>
- 33) Kelly, T.; Weaver, R. The Goal Structuring Notation - a safety argument notation. In Proceedings of the dependable systems and networks 2004 workshop on assurance cases. 2004.
- 34) Bishop, P.; Bloomfield, R. A methodology for safety case development. In F. Redmill and T. Anderson, editors, Industrial Perspectives of Safety-critical Systems - Proc. Sixth Safety-critical Systems Symposium. Springer London, 1998, p.194 - 203.
- 35) Toulmin, Stephen. *The Uses of Argument*. Cambridge University Press, 2003 (First edition 1958).
- 36) Matsuno, Yutaka; Takamura, Hiroki; Ishikawa, Yutaka. "A Dependability Case Editor with Pattern Library." In HASE 2010. 2010, p.170-171.
- 37) Hall, Jon G.; Mannering, Derek; Rapanotti, Lucia. Arguing safety with Problem Oriented Software Engineering. In Proc. 10th IEEE High Assurance Systems Engineering Symposium (HASE'07), 2007, p.23-32.
- 38) Basir, Nurlida ;Denney, Ewen; Fischer, Bernd. Constructing a Safety Case for Automatically Generated Code from Formal Program Verification Information. In Proc SAFECOMP 2008, p.249-262
- 39) Takeyama, Makoto; Kido, Hiroyuki; Kinoshita, Yoshiki. Using a Proof Assistant to Construct Assurance Cases Correctness by Construction (Fast abstract), 42nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, 2012.
- 40) Kinoshita, Yoshiki; Takeyama, Makoto. Assurance Case as a Proof in a Theory ---towards formulation of rebuttals---. In Assuring Safety of Systems: Proceedings of the Twenty-first Safety-critical Systems Symposium. SCSC. 2013, p.205-230.
- 41) Niklas Luhmann. Social systems.
- 42) Aczel, P. Non-Well-Founded sets. CSLI Lecture Notes. no.14, Stanford University Center for the Study of Language and Information, 1988, ISBN-13: 978-0937073223.
- 43) Scott, D. S. "Data types as lattices". Proceedings of the International Summer Institute and Logic Colloquium, Kiel, in Lecture Notes in Mathematics. Springer-Verlag. 1975, vol.499, p.579-651.
- 44) Church, Alonzo. A formulation of the simple theory of types. The Journal of Symbolic Logic 1940, vol.5, no.2, p.56-68.
- 45) Per Martin-Löf. Intuitionistic type theory. Napoli, Bibliopolis, 1984.
- 46) Bloomfield, R.; Littlewood, B. ;Wright, D. Confidence: its roles in dependability cases for risk assessment. Proc. 37th Int. Conf. Dependable Systems and Networks, 2007.
- 47) Hawkins, R.; Kelly, T.; Knight, J.; Graydon, P. "A new approach to creating clear safety arguments." In Proc. Safety Critical Systems Symp. 2011.

- 48) Bloomfield, R.; Bishop, Peter. "Safety and assurance cases: Past, present and possible future—an Adelard perspective." In Making Systems Safer - Proceedings of the Eighteenth Safety-Critical Systems Symposium, Springer London, 2010, p. 51-67.
- 49) Denney, E.; Pai, G.; Habli, I. "Towards Measurement of Confidence in Safety Cases," In Proc. International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM) 2011. 2011, p.380-383.
- 50) ISO/IEC, ISO/IEC 15288 Systems and software engineering - System life cycle processes, 2008.
- 51) ISO/IEC, ISO/IEC 15026 Systems and software engineering – Systems and software assurance – Part 2: Assurance case, 2011.
- 52) ISO, ISO 26262 Road vehicles -- Functional safety. 2011-2012.
- 53) JasPar. 機能安全対応のための解説書・テンプレート. 2013
- 54) FDA. Accomplishments: CDRH Plan of Action for 510(k) and Science.
<http://www.fda.gov/AboutFDA/CentersOffices/OfficeofMedicalProductsandTobacco/CDRH/CDRHReports/ucm276286.htm>
- 55) FDA. Guidance for Industry and FDA Staff - Total Product Life Cycle: Infusion Pump - Premarket Notification [510(k)] Submissions. 2010.
- 56) University of Pennsylvania. Generic Infusion Pump project.
<http://rtg.cis.upenn.edu/gip.php3>
- 57) CHI+MED team. CHI+MED project home page. <http://www.chi-med.ac.uk/index.php>
- 58) OPENCROSS consortium. OPENCROSS project homepage.
<http://www.opencross-project.eu/>
- 59) Goal Structuring Notation Working Group. The GSN working group online.
<http://www.goalstructuringnotation.info/about>
- 60) Object Management Group. OMG Structured Assurance Case Metamodel 1.1. 2014

3.7.5 コンセプトエンジニアリング

(1) 研究開発領域名

コンセプトエンジニアリング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

コンセプトエンジニアリングとは、「新たな創造を実現していくための、システムの理想的なあり方を戦略的に表現している概念を構築し、実現していくための技術」を指す。つまり、システム構築のライフサイクルの上流工程において、アイデアを作り出し、そのキーとなる特徴を抽出し、関連する専門分野を統合して抽象的なレベルでアーキテクチャを構想し、実現性を含めて評価・確認するための総合的・構造的なアプローチである¹⁾。この意味で、システムズエンジニアリングがシステム構築の長いライフサイクルを通じて確実に実現するための工学であるのに対し、コンセプトエンジニアリングは、「高い抽象度」、「戦略的な特徴への集中」および「短時間での実施」というシステム構築の上流工程であるための特徴に合わせた工学である。

歴史的には、すでに 70 年代初頭に、コンセプトエンジニアリングをキーワードとする文献²⁾が米国で発表されている。現在とほぼ同様の意味として使用されており、当時から、初期段階でコンセプトを適切に定義し、それを製品化に結びつけるという考えが、このコンセプトエンジニアリングという言葉に込められていたことが分かる。ただし、当時はシステムが特定の適用領域に閉じたもの（例えば、単独の自動車など）であったため、必ずしもコンセプトエンジニアリングがなくても対応ができたため、その後の研究は新たなアイデアを生み出すコンセプトメイキングに集中していった。

これに対して、近年スマートグリッドなどを代表とするような、複数領域システムが統合されたシステムが必要になったため、構造的なアプローチとしてのコンセプトエンジニアリングの重要性が急激に増してきた。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

一般的な用語である「コンセプト」と「エンジニアリング」のコンビネーションとしての「コンセプトエンジニアリング」は、少なくとも海外においては比較的長い期間にわたってある程度認知を得ている。しかしその工学的かつ具体的なアプローチについては、いまだに体系化されていないというのが実情である。更に、上述した通り、これまではシステムが単一分野（例えば、自動車などドメインが単独であるか、ソフトウェアのように分野が単独）であったため、高い能力を有する個人がいれば対応することができた。しかし、スマートグリッドやスマートシティなどを代表とする分野統合的なシステムでは、これまで独立なシステムとして構築されていたものが統合されて、一つのシステムとして機能する必要がでてきた。このような分野統合的なシステムを社会に実装するためには、技術的な側面だけでなく、社会的側面（法制度など）も含めて、同時に考える必要がある³⁾。このため、複数の人が協同して検討をする必要がでてきたため、個人の暗黙知と感覚に依存するのではなく、どのような考え方に基づいて、何のために何をやっているのかについて、体系化・明示化されたアプローチが必要となってきた。このような背景から、近年急激にコンセプトエンジニアリングに関する研究が進められ

てきている。

コンセプトエンジニアリングに似た活動として、コンセプトメイキングやコンセプトデザインという活動がある。これらはどちらもコンセプトを作り出すことに中心をおいた活動であり、アイデアを作り出し、その特徴を抽出し、更に実現性を含めながら抽象的なアーキテクチャを構想し、評価・確認するといった、システム構築の上流工程におけるトータルなプロセスをカバーしたものとなっていない。

また、意匠デザインを中心としたデザイン分野としては、作り出したコンセプトをプロトタイピングすることが容易であるため、これまでもいわゆるプロトタイピングを通じてコンセプトを明確にしていく活動が進められてきた。しかしながら、システム全般については必ずしも明示的には実施されていない。これらの活動は、コンセプトエンジニアリングの一部を担うものとはなるが、コンセプトを作り出すすべての活動を網羅しておらず、必要な活動を十分にカバーするものとなっていない。1998年に発表されたサーベイ論文⁴⁾を始め多数の論文で、上流（コンセプト設計）フェーズでの判断が、ライフサイクル全体のコスト・性能・信頼度・環境影響度など極めて広範な要素に重大な影響を与えることが指摘されている。しかもこのフェーズでは入手可能な情報が最も少ないことが大きな制約となっている。

海外においては以下に示す通り、本開発領域に関連する研究が様々なアプローチで実施されてきた。文献⁵⁾では、プロトタイピングプロセスの体系的な評価を試みており、コンセプトフェーズにおける作業が重要な役割を果たしていることを指摘している。ただし、プロトタイピングプロセスに限定した評価となっており、コンセプトに関わるすべてのプロセスに関するものとなっていない。また、概念としてはコンセプトエンジニアリングに関連するものであるが、用語としては必ずしも陽に使われているわけではない。文献⁶⁾においては、調査の結果、製品開発の競争力に最も強い影響を及ぼすのがコンセプトエンジニアリングであると結論づけている。また、コンセプトフェーズに注目しつつ、ライフサイクル全体の理解と、その間、関係者が適切に情報を共有することが不可欠であるとも主張しており、体系的なマネジメントとして捉えることの重要性を指摘している。つまり、コンセプトエンジニアリングのような考え方の重要性は述べているものの、ではコンセプトエンジニアリングがこういったものであるかなどについての検討は含まれていない。文献⁷⁾ではコンセプトエンジニアリングをサポートする支援解析システムとして、“Conceptual design support and analysis system (COSDAS)”と呼ばれる、適用分野に依存しないフレームワークを示している。このCOSDASシステムをある種のテストベッドとして活用することにより、設計作業の体系的な記録や分析を試みている。文献⁸⁾はコンセプトエンジニアリングにおけるアイデア創出の手法に関して幅広く調査・評価してその特徴を整理している。この目的のため、デザインコンセプトを創出する過程を記録・測定するソフトウェアを開発し、手法、問題の種類、作業者等にどの程度依存するかを検討している。ここでは論理的に手法を提示することは決して創造性を損ねるものではないということが確認されており、俯瞰的なアプローチの重要性が強調されている。

以上のように、海外においては、コンセプトエンジニアリングに関連する研究は様々な切り口とアプローチによって継続的に推進されており、一つの専門分野が構成されて

いる。ただし分野に依存しない体系的なエンジニアリング活動という観点としては、まだ緒に就いたばかりであり不十分と言わざるを得ない。

一方、我が国では、当該分野における論文もほとんど存在せず、研究開発の対象としては認識されていなかった。研究開発ではないが、数少ない企業での組織的取り組み事例として確認されたのが、（株）東芝のケース⁹⁾と（株）東レ経営研究所のケース¹⁰⁾くらいであり、海外と比較して本分野における学術的な取組みに関して明らかに遅れを取っている。

以上の経緯を踏まえて、上流フェーズで適切なコンセプトを創り上げ、それを体系的に実現するための手法である「コンセプトエンジニアリング」を研究する意義は大きい。

（４）科学技術的・政策的課題

コンセプトを作り出し、それを実現につなげていくことは、イノベーション創出においても大変重要であり、個別技術分野・製品分野に対する基礎的な研究は、これまでも実施されてきた。しかしながら上流システム工程であるコンセプトフェーズにおいて、適用分野に依存しない体系的な設計手法に対する研究開発は必ずしも十分に研究されていない。特にコンセプトの構築には技術的側面のみならず、組織活動や調達側・供給側に関わる要素も加味する必要があり、総合的かつ構造的にアプローチする手法の確立が大きな課題となっている。さらに複数のコンセプトを体系的かつ定量的に評価した上で最適なものを選択するための手法についても十分とは言えない。

現在、イノベーション創出を目的として、デザイン思考などのアプローチが注目を浴びてきている。デザイン思考やワークショップなどは文部科学省、経済産業省などでもイノベーション創出のための手法として政策的にも活用されている。しかし、デザイン思考は人間中心的なアプローチのため、人が強く関わる対象分野に特に有効なものであり、上述した分野統合的なシステムの人に直接的に関わらない部分も含めてコンセプトをデザインするためには、より俯瞰的に分野横断的なエンジニアリングが必要となるが、現在は明確に政策的には支援・教育が行われていない。このため、政府が今後ますます、分野統合的な大規模システムを進めるときに、その実現を支援する体制が十分にとれないと考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

システムズエンジニアリングの国際的団体である INCOSE (International Council on Systems Engineering)の中で、Model-Based Conceptual Design Working Group (MBCD WG)が2012年5月から活動を開始した。このWGは、コンセプトデザインにモデルベース開発のアプローチを適用するというものである。コンセプトデザインという言葉を使っているが、そもそも Model-based Systems Engineering がモデルをシステム開発のライフサイクルを通じて活用していくという概念で作られているため、議論としてはコンセプトエンジニアリングと同じレベルのものが実施されている。MBCD WGは、オーストラリアのシステムズエンジニアリングの団体である SETE (Systems Engineering Test & Evaluation Conference)が中心となって立ち上げたもので、すでに2012年に2回、2013年に3回の会合が SETE や INCOSE のシンポジウムなどで開催

されている。INCOSE の論文誌である INSIGHT の 2014 年 12 月号で MBCD の特集が組まれており、米国、欧州、オーストラリアから投稿された多数の論文から、20 件近くが紹介される予定である。

INCOSE が欧米（およびオーストラリア）を中心として MBCD を組織的に推進する一方で、我が国ではこれに対応した活動は残念ながら不十分と言わざるを得ない。特定の分野に限定することなく、広くあらゆる分野における製品・サービスに影響を及ぼしうる技術分野であり、早急に着手することが必要である。

(6) キーワード

Concept Engineering, Conceptual Design, Concept Making, Model-based Concept Development, Innovation, Idea Creation

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	・一部体系化の試みは実施されたことがあるが、継続はしていない ^{2, 3)} 。
	応用研究・開発	△	→	・一部、体系化されたものをもとに実際に活用を試みられたが、一部のみでの継続に限定されている ⁹⁻¹¹⁾ 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
米国	基礎研究	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	応用研究・開発	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	応用研究・開発	◎	↗	・以前体系化されたものをベースに、更に広げるための活動が行われ始めている ^{2, 12)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
中国	基礎研究	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ¹³⁾ 。
	応用研究・開発	△	→	・実験を通じた応用研究の実績もある ^{14, 15)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。
韓国	基礎研究	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ^{16, 17)} 。
	応用研究・開発	△	→	・工学的な応用をある程度想定した基礎研究の発表事例もある ^{16, 17)} 。
	産業化	△	→	・実効的には暗黙的知識により実行されている。

(註 1) フェーズ

- 基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル
- 応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル
- 産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

- ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
- ◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○ : ある程度の活動・成果が見えている、
- △ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 × : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

- ↗ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↘ : 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Strengers, George A Structure for Model Based Concept Definition. Model-Based Conference Handbook. 2013
- 2) Wetzstein, Hanns J. Interdisciplinary Aspects of Engineering: The Environment of concept Engineering. IEEE trans of Aerospace and Electronic Systems. March 1970, vol. AES-6, No.2 .
- 3) de Weck, Olivier L. et al., Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World. MIT Press. 2011
- 4) Hsu, Wynne ;Woon, Irene M Y. Current research in the conceptual design of mechanical products. Computer-Aided Design. 1998, vol.33, p.377-389.
- 5) Wall, Matthew B. ; Ulrich, Karl T.; Flowers, Woodie C. Evaluating prototyping technologies for product design. Research in Engineering Design. 1992, vol. 3, Issue 3, p.163-177.
- 6) Hague, M J ;Taleb-Bendiab, A ; Brandish, M J. An Adaptive Machine Learning System for Computer Supported Conceptual Engineering Design.AI System Support for Conceptual Design. 1996, p.1-16
- 7) Al-Salka, M. A. ;Cartmell , M.P. ; Hardy, S.J. A Framework for a Generalized Computer-based Support Environment for Conceptual Engineering Design. Journal of Engineering Design. 1998, vol. 9, Issue 1 , p.57-88.
- 8) Mohan, Manikandan ;Shah, Jami J. ;Narsale, Sumit ;Khorshidi, Maryam Capturing Ideation Paths for Discovery of Design Exploration Strategies in Conceptual Engineering Design, Design Computing and Cognition '12. 2014, p. 589-604.
- 9) 國澤好衛. デザイン過程におけるコンセプトエンジニアリング. Bulletin of JSSD, 2006, p.276-277.
- 10) 谷口文朗. コンセプトエンジニアリングのセオリーと上野原市中山間地の公共交通体系再構築のためのデマンドミニバスのコンセプト. 帝京科学大学紀要. 2009, vol.5, p.29-49.
- 11) 麻生洋平, 白坂成功, 保井俊之, 前野隆司. 2x2 欲求マトリクス - 心理的価値に基づく利他的コンセプト創出法 -, 日本創造学会論文誌, 2013年2月, vol. 16, p. 171-189.
- 12) Dr Quoc Do, MBCD - Working Group 2013 Activity Report, MBCE Working Group, INCOSE, 2014/09/29.
http://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:08-iw14-mbse_workshop-mbcd_wg-2013_activity_report-do-final.pptx
- 13) Chen, Yong. et al., A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems. Computer-Aided Design, 2012, vol.44, p.146-153.
- 14) Zhang, Yu Xian. et al., The Research on Modeling of Design of Product, 2011, Applied Mechanics and Materials, 2011,vol.121-126, p.1196-1199.
- 15) Min, Li, Zhang Mingqin, ;Ruijun, Zhang. Application study of TRIZ theory in product conceptual design. Hoisting and Conveying Machinery. 2010, vol.3.

- 16) Hong, E. P ;Park, G. J. Modular design method based on simultaneous consideration of physical and functional relationships in the conceptual design stage. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol.28, p.223-235
- 17) Park, G. J. Teaching conceptual design using axiomatic design to engineering students and practitioners. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol.28, p.989-998.

3.7.6 SoS アーキテクチャ

(1) 研究開発領域名

System of Systems (SoS) アーキテクチャ

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

実社会における課題を解決に導くためには、対象とする社会技術システムをグローバルな観点から分析し、価値を最大化するために技術的なアプローチを採る必要がある。今や実社会は、発電プラント、自動車、各種機械や産業用ロボットなどの物理的なシステムが、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、いわゆるサイバーフィジカルシステムとなっている¹⁾。すなわち、社会技術システムは、そのライフサイクルを全般にわたってマネジメントすることができない複数の個々のシステムが複雑に相互関係性をもっている。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は **System of Systems (SoS)** と呼ばれる²⁾。こうした複雑な社会技術システムの中で、関心の対象とする製品やサービスなどのシステムが、環境、経済、政策、技術の観点から、所望の機能を果たすことが求められている。当該研究開発領域は、社会技術システムを **System of Systems** として捉え、さまざまな利害関係者からの要求を満たす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。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

INCOSE SE ハンドブック³⁾で、「システムは、一つ以上の定められた目的を達成するために編成された相互作用する要素の組み合わせ」と定義される。また、アーキテクチャ記述の国際標準 ISO/IEC/IEEE 42010⁴⁾では、「アーキテクチャは、システム要素とその関係性の中で具体化されたシステムの動作環境、ならびに、システムを設計し進化させるその原則における、システムの基本概念または特性」と定義される。システムズエンジニアリングプロセスでは、対象とするシステム (**system of interest**) に関してライフサイクル全体を見渡した上で、要求分析を行い、そしてそのアーキテクチャを構築することが極めて重要となる。

しかしながら、近年では、対象とするシステムが、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できないシステムを含めて複雑に相互関係性をもつ複数システムとなる場合がある。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²⁾。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、SoS の要素であるシステムは、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⁵⁾。

SoS の特徴としては、各システムの運用の独立性、各システムの管理の独立性、進化的な発展、創発的な振る舞い、地理的な分布が挙げられる⁶⁾。文献⁷⁾ではこれらを、自

立性、帰属性、接続性、多様性、創発性という 5 つの特徴にまとめ、文献⁸⁾では、これら 5 つの特徴により、従来のシステムがもつ調和性、集中化、プラットフォーム中心、同質、かつ予見可能性という性質が、SoS ではそれぞれ、独立性、分散化、ネットワーク中心、異質、不確定性という性質になることを述べている。このような特徴をもつ 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²⁾。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²⁾。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。

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⁸⁾では、リスクマネジメント、構成管理、性能管理、政策管理、リソースマネジメントをヒューマンファクタとして実施することを提案している。文献⁹⁾では、SoSE のプロセスを時間で展開した波モデルとして示し、多岐にわたる進化の繰り返りで構成システムの開発を促し、SoS を追加開発として特徴づけている。そこでは、外部環境からの SoS への継続的な入力が必要であり、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 の進化が繰り返される。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。

SoS の進化をサポートするため、文献¹⁰⁾ではリスク分析を用いた方法論が検討されている。ここでは、化学プロセスの安全性を確保するために開発された HAZOPS(Hazard and Operability Study)を修正した形式で SoS の進化に関連するリスクを分析している。また、文献¹¹⁾では、SoS を理解し進化させるためにシステムズモデリング言語 SysML (Systems Modeling Language) を用いることについて論じられており、文献¹²⁾では、全球地球観測システム GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) を事例として、SysML を用いてシステムアーキテクチャをモデルとして記述し、シミュレーションモデルと結合させることでアーキテクチャの評価、分析、詳細化を進めるアプローチを示している。この他、マルチドメインマトリクス (Multi-Domain Matrix) を用いることで、SoS に関する複数のドメイン、すなわち環境、社会、機能、技術、プロセスにわたる関係性を明らかにしている研究¹³⁾、オブジェクトプロセス方法論 OPM (Object-Process Methodology) に基づき、SoS アーキテクチャを分析し、その進化を観測する研究¹⁴⁾がある。

(4) 科学技術的・政策的課題

INCOSE は 5 年ごとに 10 年後を見据えた将来ビジョンを示しており、2014 年に公表された最新のシステムズエンジニアリング・ビジョン 2025¹⁵⁾では、常に進化し続ける社会で、環境、経済、政策そして技術などの新たな課題が発生していることを踏まえた上で、その解決策が大規模で複雑なエンジニアリングシステムとなることを指摘している。こうした解決策は、社会的に受容可能で、かつ、社会に対して価値を提供するときのみ成功し得るものであり、ここに応用される技術は、関連する地域、あるいは地域の能力と人的・物的資源に応じて調整されなければならない。そこでは、ライフサイクル全般にわたる分析と、安定した統治環境に沿った安全で、堅牢で、かつ、持続可能な実装が必要となる。特に、文献¹⁶⁾では、価値を最大化することを目的として明確化する価値駆動システムズエンジニアリングの重要性を論じるとともに、環境、経済、政策そして技術の関係性を明確にするこれらの境界を越えたグローバルなコンテキスト分析の重要性を述べている。また、文献¹⁵⁾では、多数の利害関係者の関心事に対処しなければならないという SoS の難しい課題には、そのシステムアーキテクチャの構築などに際して、システムモデルに基づいてシステムズエンジニアリングを遂行するモデルベースシステムズエンジニアリングやデジタル形式でのプロセスに移行することの重要性が強調されている。このような方向性に対しては、モデル間の矛盾を特定するためのアプローチが必要と考えられる¹⁷⁾。

IEEE Systems Society では、製造業のサプライチェーン、車両ドライバー環境システム、スマートグリッド、協調制御、同定、学習、適応、モニタリング、故障診断、故障許容制御、SoS 自動制御アーキテクチャといった分野と、制御システムとの関連性が述べられている^{18, 19)}。また、制御理論の観点から SoS について論じる研究²⁰⁾があり、そこでは、マルチエージェントシステムの観点から個々人、業者や組織などでは解決困難な問題を SoS によって解決に導く方向性を提示している。文献²¹⁾では、サイバー攻撃シナリオの検討を通して冗長設計と動的システムモデルと状態推定の 3 つの統合により、コンピュータやコンピュータネットワークの安全を確保するためのサイバーセキュリティが報告されている。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

システムズエンジニアリングの知識体系ガイド SEBoK では、SoS に対してどのようにアーキテクチャを構築するべきかという方向性を示している²²⁾。一方で、INCOSE および OMG (Object Management Group) では、モデルベースシステムズエンジニアリングの重要性²³⁾とともに、その基本となるシステムズエンジニアリング教育の必要性を強調している。欧州では、SoS のエンジニアリングとマネジメントにおける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)の活動を 2013 年から開始している¹⁾。ドイツを中心とした活動として、2013 年 4 月には Industry 4.0 のレポート²⁴⁾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。サイバーフィジカルシステムとしての社会技術システムによる価値を生むための仕組みの議論がすでに始められている。米国では、Industrial Internet Consortium²⁵⁾が 2014 に発足し、ここでもサイバーフィ

ジカルシステムによる革新を加速しようと試みられている。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 へのすべての参加者が、ユーザー要求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 Navigator²⁶⁾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、彼らが置かれている状況で需要側と供給側の重要な観点からの新たな気づきを与え、SoS コンテキストで現状と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。

（6）キーワード

System of Systems、アーキテクチャ、システムズエンジニアリング、社会技術システム、サイバーフィジカルシステム、システムライフサイクル、対象システム、システム設計、システム開発、モデルベースシステムズエンジニアリング、コンテキスト分析、システム解析

（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	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ SoSのシステム故障を防ぐための方法論を論じている ²⁷⁾ 。 ・ 全球地球観測システム GEOSSを実現するにあたってのSoSの観点や、情報システムとしてのアーキテクチャの課題が整理されている ²⁸⁾ 。
	産業化	△	↘	・ 欧米に比べ、産業化に関連する明確な方向性は見えない。
米国	基礎研究	◎	↗	・ IEEEやINCOSEなどに学術論文が多数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・ 産業界が連携して進展させようとしている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・ IEEEやINCOSEなどに学術論文が複数あり、活発な議論がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ システムおよびソフトウェアの分野で着実に進展している。
	産業化	◎	↗	・ 産業界が連携して進展させようとしている。
中国	基礎研究	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ CPS分野での応用研究が散見される。
	産業化			・ 産業界としての動きの情報は現時点で得られていない。
韓国	基礎研究	×	→	・ SoSに関する基礎的な研究論文が見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・ CPS分野での応用研究が散見される。
	産業化			・ 産業界としての動きの情報は現時点で得られていない。

（8）引用資料

- 1) 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/>
- 2) Mohammad, Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century. John Wiley & Sons, 2011
- 3) Haskins, Cecilia. Systems Engineering Handbook, A Guide for System Life Cycle Process and Activities. 2010, Ver. 3.2
- 4) International Standard ISO/IEC/IEEE 42010 1st ed., Systems and software engineering —Architecture description. 2011
- 5) Eisner, Howard; Marciniak, John; McMillan, Ray. Computer-aided system of systems (S2) engineering. Systems, Man, and Cybernetics, Decision Aiding for Complex Systems, Conference Proceedings, 1991 IEEE International Conference on. IEEE, 1991.
- 6) Maier, Mark W. Architecting principles for systems-of-systems. Systems Engineering. 1998, vol.1, no.4, p.267-284.
- 7) Boardman, John; Sauser, Brian. System of Systems-the meaning of of, System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on. IEEE, 2006, p.6.
- 8) Gorod, Alex; Sauser, Brian. J.; Boardman, John. T. System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward. IEEE Systems Journal, 2008, vol.2, no.4, p.484-499.
- 9) Dahmann, Judith; Rebovich, George; Lowry, Ralph; Lane, JoAnn; Baldwin, Kristen. An implementers' view of systems engineering for systems of systems. Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International, 2011, p.212-217.
- 10) Lock, Russell. Developing a Methodology To Support the Evolution of System of Systems Using Risk Analysis. Systems Engineering, 2012, vol.15, no.1, p.62-73.
- 11) Lane, Jo Ann; Bohn, Tim. Using SysML Modeling To Understand and Evolve Systems of Systems. Systems Engineering, 2013, vol.16, no.1, p.87-98.
- 12) Wang Renzhong; Dagli Cihan H. Executable System Architecting Using Systems Modeling Language in Conjunction with Colored Petri Nets in a Model-Driven Systems Development Process. Systems Engineering, 2011, vol.14, no.4, p.383-409.
- 13) Bartolomei Jason E.; Hastings Daniel E.; Neufville de Richard; Rhodes Donna H. Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An Organizing Framework for Modeling Large-Scale Complex Systems. Systems Engineering, 2012, vol.15, no.1, p.41-61.
- 14) Osorio Carlos A.; Dori Dov; Sussman Joseph. COIM: An Object-Process Based Method for Analyzing Architectures of Complex, Interconnected, Large-Scale Socio-Technical Systems. Systems Engineering, 2011, vol.14, no.4, p.364-382.
- 15) A World in Motion, Systems Engineering Vision 2025. Vision 25 Systems Engineering, INCOSE.

- http://www.incose.org/newsevents/announcements/docs/SystemsEngineeringVision_2025_June2014.pdf
- 16) Leea Benjamin D.; Paredisa Christiaan J.J. A Conceptual Framework for Value-Driven Design and Systems Engineering. 24th CIRP Design Conference 2014, 2014
 - 17) Herzig Sebastian J. I.; Qamar Ahsan; Paredisa Christiaan J.J. An Approach to Identifying Inconsistencies in Model-Based Systems Engineering, Conference on Systems Engineering Research (CSER2014), 2014
 - 18) T. Persini. Control systems technology: Towards a systems-of-systems perspective, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 18., no.2, p.249, March 2010
 - 19) Samad Tariq; Parisini Thomas. Systems of Systems, from The Impact of Control Technology. T. Samad and A.M. Annaswamy, 2011.
<http://ieeecss.org/general/impact-control-technology>
 - 20) Karcanias Nicos. System of Systems: A Control Theoretic View, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013, p.1732-1737.
 - 21) Horowitz Barry M.; Pierce Katherine M. The Integration of Diversely Redundant Designs, Dynamic System Models, and State Estimation Technology to the Cyber Security of Physical Systems. Systems Engineering, 2013, vol.16, no.4, p.401-412.
 - 22) Architecting Approaches for Systems of Systems. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK).
http://www.sebokwiki.org/wiki/Architecting_Approaches_for_Systems_of_Systems
 - 23) MBSE Wiki. Object Management Group (OMG).
<http://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php>
 - 24) 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. National Academy of Science and Engineering, 2013.
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/rot/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf
 - 25) Internet Industrial Consortium.
<http://www.iiconsortium.org/index.htm>
 - 26) SOS Navigator 2.0: A Context-Based Approach to System-of-Systems Challenges. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University.
<http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=8515>
 - 27) Nakamura Takafumi; Kijima Kyoichi. System of System Failure: Meta Methodology to Prevent System Failures. System of Systems, Edited by Dr. Adrian V. Gheorghe, 2012.
 - 28) Shibasaki Rousuke; Pearlman Jay S. System of Systems Engineering of GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Chapter 22, Mohammad, Jamshidi., ed. System of systems engineering: innovations for the twenty-first century. John Wiley & Sons, 2011.

3.7.7 ライフサイクルマネジメント

(1) 研究開発領域名

ライフサイクルマネジメント

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムには、設計から、構築、廃棄へとといった複数の段階からなる時系列的な流れが存在する。この流れはライフサイクルと呼ばれ、各段階において性能や機能ならびに品質、信頼性、安全性などのシステムの特徴が確認され、様々な意思決定がなされるなどして、各段階の進捗が管理される。この管理がライフサイクルマネジメントである。ライフサイクルマネジメントの研究は、長期間にわたり発現するシステムの特徴であるライフサイクル特性（システム価値）を最大化するために必要なマネジメントに関する研究であり、ライフサイクルにおける各段階の進め方に関する研究や、各段階で必要となる検討の順序に関係する研究が存在する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

旧来の考え方では、システムが起動、使用される際の、システムに要求する機能の実現保証が重要課題であり、将来に起こる可能性があることに対しては殆ど注意が払われなかった。しかしながら、システムの規模が拡大し、その使用期間が長期化するにしたがって、長期にわたるシステムの発展自体が要望として重要な側面の一つとなった。システムの長期間にわたり発現する特性に注意する必要があるが指摘され、ライフサイクルマネジメントの必要性が認識されている。

システムのライフサイクルは、開発（Exploration）、構想（Concept）、設計（Development）、構築（Production）、支援（Support）、利用（Utilization）、廃棄（Retirement）の7つの段階から構成される^{1, 2)}。各段階においてシステムの特徴が確認され、段階の進捗がマネジメントされる。このマネジメントがライフサイクルマネジメントである。ライフサイクルマネジメントに関する研究は、後述するシステムのライフサイクルにおける特性（ライフサイクル特性）を最大化するために必要なマネジメントに関する研究であり、ライフサイクルにおける各段階の進め方に関する研究や、各段階で必要となる検討の順序に関係する研究も含まれる。

ライフサイクルマネジメントの対象を実質的な適用分野で考えると、建築物や車、電気製品などの工業製品や、銀行のオンラインシステムやWebサービスシステムのようなソフトウェアなど、様々に存在する。それらの対象に応じて、ライフサイクルマネジメントを具体的に捉える活動、概念が存在する。代表的なものとして、プロダクト・ライフサイクルマネジメントとソフトウェア・ライフサイクルプロセスがある。

(3-1) プロダクト・ライフサイクルマネジメント（PLM: Product Lifecycle Management）³⁾

製造業において、製品開発期間の短縮、生産工程の効率化、および顧客が要求する製品を適切に市場投入できるように、企画・開発から設計、製造・生産、出荷後のサポートやメンテナンスまで、製品のライフサイクルを包括的に管理することが重要視されている。これには、製品のライフサイクルに関係する製品データを共有化する情報システムなどが構築され、数多く市販されている。

また、環境配慮型設計（エコデザイン）においては、製品のライフサイクルにおけるリユース、リサイクル、アップグレードなどを、企画・開発段階から計画し、製品設計に埋め込むライフサイクルプランニングという考えも提唱されている。このライフサイクルプランニングもライフサイクルマネジメントに関連する概念として認識できる。さらには、顧客に対して物理的な製品を提供するだけでなく、販売後の製品サポートやメンテナンスなどのサービスの提供まで含めたシステムを提供することで、製品の付加価値を高める取組みが活発化している。この取組みはプロダクト・サービスシステム（PSS : Product Service System）⁴⁻⁶⁾と言われ、プロダクトとサービスを一体化したシステムのライフサイクルマネジメントの重要性が強く認識されている。

なお、プロダクト・ライフサイクルマネジメントのライフサイクルとは異なる意味で使用される用語として製品ライフサイクル（PLC : Product Life Cycle）が存在する。製品ライフサイクルは、販売市場での製品の導入期、成長期、成熟期、衰退期の4つの段階からなる、新製品の普及過程に関する概念である。製品企画やマーケティングなどの分野では、製品システムと市場との関係、市場参入者との競争関係、顧客や社会的責任などを考えた上での最適な製品ライフサイクルを設計することの重要性が議論され、様々な手法が提案されている。

(3-2) ソフトウェア・ライフサイクルプロセス（SLCP : Software LifeCycle Process）

ソフトウェアの構想・設計から開発、導入、運用、保守、破棄に到るまでの工程全体をライフサイクルプロセスと定義し、そのライフサイクルプロセスをマネジメントするために、構成する各工程について個々の作業内容、用語の意味などを標準化した枠組みが提案されている。ソフトウェアの開発・運用に際しては、発注側と受注側の間で相互の役割や責任範囲、各工程の具体的な業務内容について認識に差異が生じてしまうが、枠組みによって規定される標準モデルを活用することによって、相互認識を共通化することが期待できる。1995年8月に国際標準化機構（ISO）によって策定されたISO/IEC 12207がSLCPの標準的なモデルとなり、日本では、1996年7月にISO 12207を日本語化したものがJIS X 0160:1996としてJIS規格となっている。

図1に、ISO/IEC 15288（JIS X0170）で定義されているライフサイクルプロセスを示す⁷⁾。このプロセスは、下記の合意プロセス、エンタプライズプロセス、プロジェクトプロセス、テクニカルプロセスの4つのプロセスから構成される。

- ・合意プロセス（Agreement Process）：製品またはサービスの取得・提供に関する合意を確定するための活動
- ・エンタプライズプロセス（Enterprise Process）：合意を確実に満たすための組織の能力を管理し、プロジェクト遂行に必要な資源および基盤を提供する活動
- ・プロジェクトプロセス（Project Process）：プロジェクト計画を確立し、進捗を追跡し、目標の達成までコントロールする活動
- ・テクニカルプロセス（Technical Process）：システムに対する要求を定義し、要求を製品に変換し、サービスを提供するために製品を使用し、その効用を持続させ、製品を終息させる活動

上記のプロセスを円滑に進めるためのマネジメントに関する研究が存在する。プロジ

ェクトプロセスに関しては、後述のプロジェクトマネジメントが関連するが、テクニカルプロセスは、利害関係者要件定義（Stakeholder Requirements Definition）、要求分析（Requirements Analysis）、方式設計（Architectural Design）、実装（Implementation）、結合（Integration）、検証（Verification）、移行（Transition）、妥当性確認（Validation）、運用（Operation）、保守（Maintenance）、処分（Disposal）の11種類のプロセスに整理され、それらのプロセスのマネジメント方法に関する開発、研究課題が多く存在する。

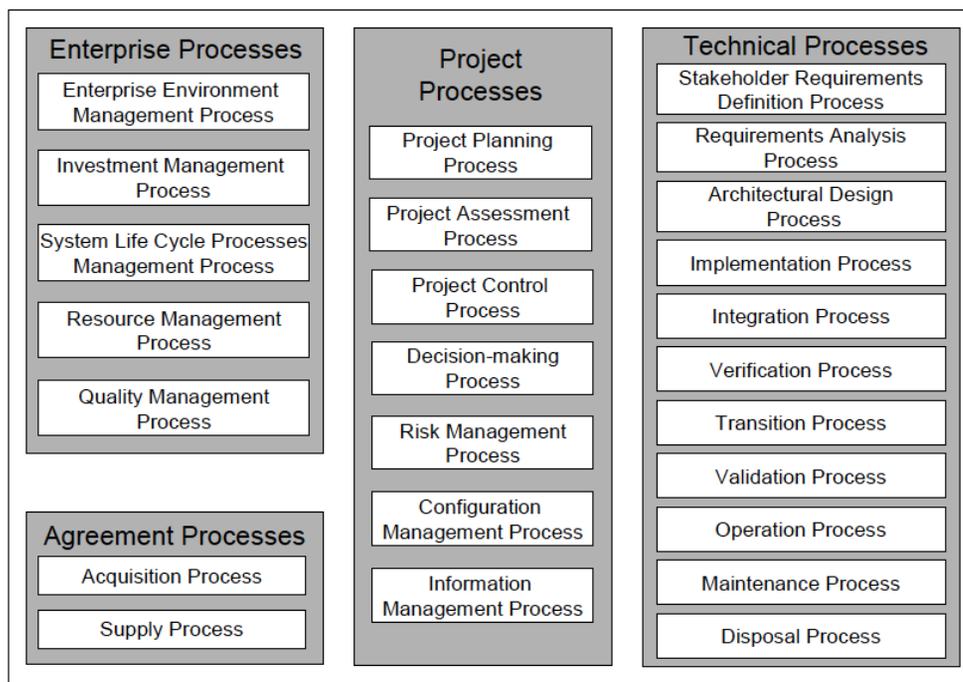


図1 システムのライフサイクルプロセス⁷⁾

このテクニカルプロセスのマネジメントに関連して、その実行モデルとして V-model が提唱され、システムの構築プロセスが整理されている。この中での V の意味は、システムのライフサイクルにおけるテクニカルプロセスをグラフィカルに V 字で表現したものであり、さらには、Verification と Validation の V&V モデルからも由来している。V&V モデルは、システムが設定された目的に応じて構築されているかを検証するプロセスであり、「Verification：仕様に沿ってシステムを正しく構築しているのか?」、「Validation：目的に適った正しいシステムを構築しているのか?」を検証するものである。V 字型で表現されるプロセスの左側はシステムの仕様を記述していく流れを示しており、右側はテストの流れを示す。仕様策定部分は、ユーザ要求仕様→機能仕様→設計仕様（詳細仕様）の順となる作業から構成される。また、テスト実行部分は、単体テスト→結合テスト→システムテストの順となる作業から構成される。

ライフサイクルにおけるシステムの特性を評価することはライフサイクルマネジメントにおいて重要な位置づけとなる。システムの複雑化に伴って、ライフサイクルにおいて重要な副作用が発生するようになった。柔軟性や保守性など、システムに要求される

特性は、システムが最初に使われ始めた後で出現することが多い。これらの特性は英語では"-ility"で終わることが多いので、イリティと総称される⁸⁾。イリティとして扱われるシステム特性としては、品質、信頼性、安全性、柔軟性、堅牢性、耐久性、スケーラビリティ、適応性、ユーザビリティ、相互運用性、持続性、保守性、試験容易性、モジュール性、復元力、拡張性、機敏性、製造可能性、修理性、発展性などが挙げられる。これらのイリティの定義、活用法に関する研究はライフサイクルにおけるシステムの定量的評価を実現するうえで重要である。

ライフサイクルにおいてはシステムの変更がしばしば発生する。マネジメントとしては、その変更に対して適切に対応することが重要課題となる。システムの変更に対するマネジメントとしては、コンフィグレーション・マネジメント（CM：Configuration Management，構成管理）がある^{9, 10)}。コンフィグレーション・マネジメントは、システムのライフサイクルにわたる性能、機能的および物理的要件、設計、操作に関する情報などを管理し、要求の変化に応じたシステムの構成変更に対応する。複雑なシステムである軍事、IT サービス、土木構造物、生産システム、パッケージソフトウェアなどで利用される。システムの構成変更を検討する際には、システムの構成要素間、サブシステム間、システム間の機能的関係を把握し、システムの部分的変更が及ぼす影響を考慮することが重要とされる¹¹⁾。コンフィグレーション・マネジメントの方法論に関する研究はシステムのライフサイクルをマネジメントする上では重要な研究課題として認識できる。

（４）科学技術的・政策的課題

- 1) ソフトウェアではライフサイクルの標準モデルが示されているが、一般的にはライフサイクルという考え方の存在を示しているだけであり、そのライフサイクルの中でモデルがどのように変遷するかを具体的に議論することまでには至って居ない。ライフサイクルモデルが示すように、ライフサイクルに応じてシステムに対する認識は変化し、モデルは変遷する。モデル間の整合性を確保し、モデルの生成や活用を効果的に進める手法に関する研究が要望される。
- 2) システムの大規模化、複雑化に伴ってシステムの変更要求に対する対応が複雑化している現状が存在する。マネジメントの観点では、変更の影響が俯瞰でき、全体的な視野でマネジメントすることが要望される。大規模、複雑なシステムを効果的に俯瞰できる手法が待望される。
- 3) ライフサイクルマネジメントの対象が工業製品であるプロダクト・ライフサイクルマネジメントに関する研究、実用化は進んでいる。しかしながら対象製品に特化される部分が多く、汎用的な手法とし実用化されていない他の製品、システムへ使用することは困難な状況である。
- 4) ライフサイクルという時間軸を意識し、将来のシナリオを想定したマネジメントを計画することは有効である。推定する将来のシナリオの不確実な情報を扱い、システムの計画、構築に対して有効に活用する研究が待望される。
- 5) システムの変更は、一貫性を保証する体系的手法を使って提案され、評価され、実施される必要がある。変更案は予想されるシステム全体への影響について常に評価され

る。その際に、変更が規定通りに行われるかを検証し、部品やシステムの文書が実際の構成を反映していることを確認することが重要である。完全な構成管理では、部品毎、サブシステム毎、システム毎についての全システム情報が実体を反映するよう対策をとる手法の開発が待望される。

- 6) システムの大規模化、複雑化に伴い、システムに関係する知識も大規模、多様化する。それらの知識を集約し、有効活用する人材も多分野から構成される。それらの人が持つ知識を集約し、システムの構成要素間の関係を明確にする必要性はある。また、それらの情報を可視化し、システムの共通理解を与えるプラットフォームの開発が重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

現代社会が大規模に激変する時代を迎え、システムの外部環境の変化を深く考慮したシステムの構築、運用は極めて重要な課題である。また、複合システム（SoS：System of Systems）の時代と表現されるように、多様なシステムが複雑に相互作用を持つ現在では、システムの変化、変更に対する適応性は必須である。この問題認識の視点から整理する。

- 1) プロジェクト・ポートフォリオ管理（PPM：Project Portfolio Management）¹²⁾：同時に進行している全プロジェクトを対象に、プロジェクトの優先順位やリソースの割当等を検討し、組織の戦略に基づいて計画／実行／管理／統制を行なうプロジェクト・ポートフォリオ管理（PPM）が存在する。この管理も、システムのライフサイクルを管理する上では重要であり、ライフサイクルマネジメントに関連する重要課題である。
- 2) チェンジマネジメント（Change Management）¹³⁾：システムのライフサイクルにおけるすべての変更をコントロールするためのマネジメントである。システムの機能を最小限の停止に止めながら、システムの変更を実現化する方法論である。システムの運用段階において、顧客の要求、外部環境の要求などの変化に対する柔軟な対応を実現する重要課題である。
- 3) レジリエンス（Resilience）¹⁴⁻¹⁶⁾：レジリエンスとは、環境から加えられる擾乱に対してシステムが適応し、平常状態をどれだけ維持できるかという能力のことである。環境変化に対する生態系の回復能力を意味する概念であったが、技術システム、社会システムにおいて、安全性・信頼性などよりも進んだ概念として注目され始めている概念である。東日本大震災において甚大な災害を受けた日本においては、社会システム、産業システムなどの機能復旧が問題視され、システムのレジリエンス性に関する研究の必要性が強く叫ばれた。システムに対する想定外の危機発生に対する機能回復力がシステムの評価指標となるが、System of Systemsにおいては多様な利害関係者（Stakeholders）が関与しているため、総合的なレジリエンスを評価する方法論の構築が必要である。
- 4) システム構造の分析：システムのモデル化および分析は容易な仕事ではない。システムの個々の要素を全て抽出するだけでなく、これらの要素がどのように互いに影響し合い、また、これらがシステムの境界線を超えて他のシステムや外部環境とどのよう

に相互作用するかを追跡する必要がある。システムを構成要素とそれらの影響関係からなるネットワークで捉えることにより、システムの変更に対する柔軟性や、変更が及ぼす影響等が議論できる。さらには、DSM（Dependency Structure Matrix / Design Structure Matrix）やMDM（Multi Domain Matrix）などによるシステムの構造を可視化し、分析するアプローチ^{17, 18)}は、行列表示でシステム要素間の関係を示すシンプルな手法であるが、その可能性は高いと思われる¹⁹⁾。

（6）キーワード

プロダクト・ライフサイクルマネジメント（PLM：Product Lifecycle Management）、ライフサイクルプランニング、プロダクト・サービスシステム（PSS：Product Service System）、製品ライフサイクル（PLC：Product Life Cycle）、ソフトウェア・ライフサイクルプロセス（SLCP：Software LifeCycle Process）、V-model、コンフィグレーション・マネジメント（CM：Configuration Management）、プロジェクト・ポートフォリオ管理（PPM：Project Portfolio Management）、チェンジマネジメント（Change Management）、レジリエンス（Resilience）、イリティ（ility）、DSM（Dependency Structure Matrix）、MDM（Multi Domain Matrix）

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> 手法の基礎となるモデル・理論の研究などはあまり盛んに行われていない。 大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題とされていない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ライフサイクルマネジメントの市販システムを外部から購入し、活用しようすることが多い。 日本的なマネジメント手法が残り、新しいマネジメント手法への移行の障壁となっている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> システムエンジニアリングに関する学術活動は低調であり、ライフサイクルマネジメントの必要性は理解されているが、実行性に乏しい。 自動車産業等では継続的に研究・実践が行われており、世界的に高いレベルにある。 社会システムの分野、特に教育や行政の分野では研究・実践が遅れている。
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究が確実にされている。 大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題となっている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究の成果を応用する流れが存在する。特に大学と企業との共同研究が盛んである。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> システムズエンジニアリング協会（INCOSE）の活動を通じて、ライフサイクルマネジメントの普及活動は盛んである。 社会システム分野、特に、医療・福祉や教育の分野の研究・実践はトップレベル。 プロダクト・ライフサイクルマネジメントを対象とした市販システムが存在し、実務レベルでの活用が盛んである。 ソフトウェアに関するライフサイクルマネジメントに関しては、標準モデルの策定や、マネジメント手法の標準化等、実務レベルにおいて精力的に進められている

欧州	基礎研究	○	↗	・システムの複雑性を定量化したり、構造分析の手法などの研究が行われたりなど、基礎研究が確実に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	・基礎研究の成果を応用する流れが存在する。特に大学と企業との共同研究が盛んである。 ・製品とサービスの統合システム（PSS）に関するライフサイクルマネジメントの研究、実用化が盛んに検討されている。
	産業化	○	→	・システムズエンジニアリング協会（INCOSE）の活動を通じて、ライフサイクルマネジメントの普及活動は盛んである。 ・プロダクト・ライフサイクルマネジメントを対象とした市販システムが存在し、実務レベルでの活用が盛んである。
中国	基礎研究	△	→	・大学等では、ライフサイクルマネジメントは研究課題として取り組まれているようである。欧米追従的な内容である。
	応用研究・開発	×	-	・特筆すべき活動・成果が見えていない。
	産業化	×	-	・特筆すべき活動・成果が見えていない。
韓国	基礎研究	△	→	・応用研究のニーズに引っ張られて基礎研究も進められている。 ・大学等の教育機関では、ライフサイクルマネジメントは課題となっている。
	応用研究・開発	○	↗	・情報技術を有効活用したプロダクト・ライフサイクルマネジメントに関する取組みは積極的であり、応用的な研究は盛んである。
	産業化	○	→	・ライフサイクルマネジメントを導入する活動は盛んである。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK),
[http://www.sebokwiki.org/wiki/Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge \(SEBoK\)](http://www.sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))
- 2) 井上雅裕, 陳 新開, 長谷川浩志. システム工学 問題発見・解決の方法, オーム社, 2011.9
- 3) IEEE Std 15288™-2004, Adoption of ISO/IEC 15288:2002 Systems Engineering—System Life Cycle Processes
- 4) Corallo, Angelo ; Latino, Maria Elena ; Lazoi, Mariangela ; Lettera, Serena ; Marra, Manuela ; Verardi, Sabrina. Defining Product Lifecycle Management: A Journey across Features, Definitions, and Concepts, Hindawi Publishing Corporation, ISBN Industrial Engineering Volume 2013, Article ID 170812.
- 5) Park, Yongtae ; Geuma, Youngjung ; Lee, Hakyeon. Toward integration of products and services: Taxonomy and typology, J. Eng. Technol. Manage. 2012, vol.29 p.528-545.
- 6) Umeda, Yasushi; Takata, Shozo; Kimura, Fumihiko; Tomiyama, Tetsuo; Sutherland, John W.; Kara, Sami; Herrmann, Christoph; Duflou, Joost R. Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective. CIRP Annals -

- Manufacturing Technology. 2012, Vol. 61, Issue 2, p. 681-702.
- 7) Boehm, Matthias; Thomas, Oliver. Looking beyond the rim of one's teacup: a multidisciplinary literature review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering & Design. *Journal of Cleaner Production* 51. 2013, p.245-260.
 - 8) de Weck, Olivier L.; Roos, Daniel; Magee, Christopher L. エンジニアリングシステムズ (春山真一郎 監訳) . 慶應義塾大学出版会. 2014.2.
 - 9) Xu, Yuchun ; Malisetty, Mahesh Kumar ; Round, Michael. Configuration management in aerospace industry. *Procedia CIRP* 11. 2013, p.183 – 186.
 - 10) Lindkvist, Carmel ; Stasis, Angelos ; Whyte, Jennifer. Configuration management in complex engineering projects. *Procedia CIRP* 11 . 2013, p.173 -176.
 - 11) D. C. Wynn, N. H. M Caldwell, P. J. Clarkson; Predicting change propagation in complex design workflows, *Journal of Mechanical Design*. 2014, vol.136, 081009-1 - 081009-13.
 - 12) Martinsuo, Miia. Project portfolio management in practice and in context, *International Journal of Project Management* 31. 2013, p.794-803.
 - 13) Motawa, I.A.; Anumba, C.J.; Lee,S.; Peña-Mora,F. An integrated system for change management in construction, *Automation in Construction* 16 . 2007, p. 368-377.
 - 14) 東京大学大学院工学系研究科 編著. 震災後の工学は何をめざすのか. 内田老鶴圃. 2012.7
 - 15) Hollnagel, Elik; Woods, David D.; Leveson, Nancy. レジリエンスエンジニアリング 概念と指針 (北村正晴 監訳) . 日科技連. 2012.11.
 - 16) 東北大学災害復興新生研究機構 <http://www.idrrr.tohoku.ac.jp/>
 - 17) Schmidt, Robert III;Vibaek, Kasper Sanchez; Austin, Simon. Evaluating the adaptability of an industrialized building using dependency structure matrices, *Construction Management and Economics*. 2014, vol. 32, no. 1-2, p.160-182.
 - 18) Eppinger, Steven D.; Browning, Tyson R. *Design Structure Matrix Methods and Applications (Engineering Systems)* . The MIT Press. First Edition edition ,May 25, 2012.
 - 19) Lindemann,Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas. *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*.Springer. 2009 edition (October 15, 2008).

3.7.8 プロジェクトマネジメント

(1) 研究開発領域名

プロジェクトマネジメント

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

科学の進歩が緩やかであった時代、日々の仕事には変化が少なく、繰り返しの作業が多かった。しかし、現代社会は、科学技術の発展に伴い、めまぐるしく変化している。そのため、システムを構築する際に過去の作業形態や作業手順が有効とは限らなくなってきた。行政や企業においても、絶えず自らを変革し、価値あるシステムを顧客に提供していくことが求められる。このような社会状況を背景に、私たちは、絶えず新しいシステム構築にチャレンジしていくことが必要となっている。新しいシステムを構築する場合は、日々の業務とは別にプロジェクトとして取り組む。プロジェクトは必ず新しい何かを含んでいるため、過去に成功した方法を使えば成功するというものではない。未経験な事態を前提に、新しいチャレンジが必要とされる。新規性と不確実性を伴うシステム構築を組織として成功に導いていくための一連の科学的方法とプロセスをまとめたものがプロジェクトマネジメントである。また、そのための科学的手法や関連する領域を横断する、いわば目標達成のための統合的な方法論全般が研究領域となる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プロジェクトを確実に成功させるためには、科学的な計画の立案が重要となる。プロジェクトに関する計画技法の始まりは、必ずしも定かではないが、近代のプロジェクトマネジメントに関するツールには、ネットワークダイアグラムを用いて日程計算等を行う PERT(Program Evaluation and Review Technique)や CPM(Critical Pass Method)、プロジェクトの作業を統一的な価値の基準に置き換えて計画・管理していく技法として、EVM(Earned Value Management)¹⁾等が利用されている。これらは1960年代に開発されたシステム科学技術であり、教科書にも取り上げられている。また、システム構築プロジェクトを確実に成功させるためには、上記の技法だけでなく、組織としての取り組みが重要であり、職業人としてのプロジェクトマネージャの存在が重要になる。このようなことを背景として、米国では1969年に、プロジェクトマネジメントに関する団体として、PMI(Project Management Institute)が設立された。そして、様々な産業で使える汎用的なプロジェクトマネジメントに関する知識体系として、1996年に PMBOK(Project Management Body of Knowledge) Guide²⁾が発行された。PMBOK Guide は、4年に一度更新され、最新の第5版では国際規格である ISO 21500 と同じく、プロジェクトマネジメントの知識エリアを、統合、スコープ、タイム、コスト、品質、人的資源、コミュニケーション計画、リスク、調達、ステークホルダーとし、各知識エリアに分けて記述している。

欧州では、IPMA(International Project Management Association)が、ICB(IPMA Competence Baseline)と呼ばれる標準を発行しており、現在、約50ヶ国のPM団体が加盟している。英国では公共調達プロジェクトに用いるPMの標準として、Prince2(PRjects IN Controlled Environments, version 2)の適用をOGC(英国商務局)が義務付けている。また、BS 6079は、英国の標準であるBritish Standardの一つで、プ

プロジェクトマネジメントに関する3部構成の標準となっており、主として建設系で利用されることが多い³⁾。

日本では、1996年のPMBOK Guideの発行をきっかけにプロジェクトマネジメントへの注目が高まり、1998年から1999年にかけて、日本プロジェクトマネジメントフォーラム(現、日本プロジェクトマネジメント協会)、PMI東京支部、プロジェクトマネジメント学会が相次いで設立された。プラントエンジニアリングや情報産業を中心に、プロジェクトマネジメントへの取り組みやプロジェクトマネージャの育成が活発化した。また、2001年には、P2M(プロジェクト&プログラムマネジメント標準ガイドブック)が日本発のガイドとして発刊された。

(4) 科学技術的・政策的課題

プロジェクトには、必ず各プロジェクト固有の新しい要素が含まれており、決められた手順で実施すれば成功が約束されるわけではない。そこで、少しでも確実にプロジェクトを成功させていくために、様々な産業分野で、プロジェクトに関する取り組みがなされて来た。現代のプロジェクトマネジメントは、国防、プラントエンジニアリング、宇宙開発などで生まれ、建設や情報分野など、日常的に多くのプロジェクトを実施している産業分野で発達してきた。しかし、近年、社会の変化が激しくなり、より多くの分野で日常的にプロジェクトに取り組むことが多くなっている。例えば、政府や地方公共団体は多くのイベントを実施しており、それらの確実な実施のためにプロジェクトマネジメントが必要となっている。また、JAXAでは、ロケットの打ち上げから始まり、多くの研究プロジェクトを抱えており、これらのプロジェクトの成功のために、プロジェクトマネジメントに取り組んでいる。

このように、従来の産業分野やシステム構築だけでなく、科学技術研究なども、プロジェクトとして取り組まれており、その研究プロジェクトの確実な成功のためには、プロジェクトマネジメントの進展と啓蒙が必要となっている。

科学技術や研究に関するプロジェクトは、土木や建設のプロジェクトに比べ、さらに不確実性が強いという性質を持っている。このことから、従来のプロジェクトマネジメントの枠組みだけでは不十分であり、科学技術研究のような不確実性の高いプロジェクトに対しても効果が発揮できるプロジェクトマネジメントのあり方に関する研究が必要である。これらの研究成果は、不確実性を内包するシステムの構築にも適用可能である。

国や行政組織が行う科学技術研究プロジェクトは、税金によって実施されており、限られた期間、予算、人員の中で、成功への精度を高めることが要求される。また、その科学技術研究プロジェクトの成功率が国際競争において重要な要素となる。仮に、他国に比べて科学技術研究プロジェクトの成功率が悪い場合は、まさに国際競争力そのものが低下することになる。このことから、行政としてもプロジェクトの成功率を上げるために、プロジェクトマネジメントに取り組む時代に来ている。

国や行政組織が行うプロジェクトは、研究開発だけではない。公共事業や情報システムの調達もプロジェクトである。このような調達プロジェクトも、一つひとつ確実に効率的に取り組まなければならない。そういう意味においても、行政としてプロジェクトマネジメント技術の利用、そしてその知識のある人材の登用が必要不可欠である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

プロジェクトには、新規性、個別性の問題があり、必ず計画の中に不確実性を伴う。この不確実性への取り組みがプロジェクトの成否に大きく影響する。近年は、社会が大規模化、複雑化するとともに、変化が激しくなり、関与するステークホルダーの多様化と相まって、プロジェクトに含まれる不確実性も従来とは比較できないほど大きくなっている。このことを含め、プロジェクトマネジメント領域では、以下の動向が予想される。

1) プロジェクトの持つ不確実性へのマネジメントの確立

プロジェクトの持つ不確実性については、主にリスクとして語られ、研究の重要なエリアである。リスクの識別方法、リスク対策、プロジェクト期間を通したリスクマネジメントプロセス等に関する研究が行われている⁴⁾。また、今後は、システムが一層大規模化、複雑化してくることが予想され、リスクに対する更なる取り組みや複雑なシステム構築に適用できるプロジェクトマネジメントの研究が期待されている⁵⁾。

2) プロジェクトの見積り

計画段階でプロジェクトの規模を可能な限り正確に見積もることは、プロジェクトを成功させるために重要な要素である。建設、プラントエンジニアリング、情報システム開発などのシステム構築では、それぞれの産業分野ごとに見積りのベストプラクティスが存在する。また見積りの手法としては、積算、過去プロジェクトデータからの回帰予測などがある。IT プロジェクトでは、情報システムそのものの規模の計測のために、プログラムコード数だけでなく、ファンクション・ポイント数などが使われており、それらをどのように計測、予測するかの研究が数多くなされている。しかし、システム構築の技術は、日進月歩を遂げているため、企業が独自にデータを蓄積し、より適切な見積りができるように研究が進められている⁶⁾。本課題においては、今後もさらなるデータの蓄積と分析が必要である。

3) スケジューリング

プロジェクトのスケジューリングには、PERT 等の技法が用いられる。また、プロジェクトマネジメントツールでは、具体的な人の割り当てを含めたスケジューリングの技法が既に広く用いられている。しかしながら、実際のプロジェクト現場では、作業と、その作業を実施するために必要なスキルや技能とのマッチングを考慮しなければいけないという課題がある。また、システム構築では、途中で計画や設計を変更しなければならないことがある。このような、プロジェクト途中での変更に対応することも求められる。以上のことから、プロジェクトメンバーが保有するスキルに基づくスケジューリングの在り方や、不確実性下でのスケジューリングについての研究が期待されている。

4) 国際規格 ISO 21500 に基づいたプロジェクトマネジメントの適用

2012 年にプロジェクトマネジメントに関する新しく国際規格として ISO 21500 が発行された。このことに伴い、今後は、国際的にも ISO 21500 に準拠したプロジェクトマネジメントの推進が活発化することが予想され、日本も例外ではない。現代社会はボーダレス化が進展しており、プロジェクトも国境を跨いで行われることが珍しくない。このことから、国際標準に基づいたプロジェクトのあり方や、国際プロジ

プロジェクトのマネジメントについての研究が期待される。また、ISO では既刊のプロジェクトマネジメント規格に加え、複雑大規模なプロジェクトつまりプログラム、およびプロジェクトやプログラムのポートフォリオマネジメントの規格化を進めている。

5) プロジェクト人材の育成

行政や企業では、多くのシステム構築プロジェクトが日々実施されている。このことから職業人としてのプロジェクトマネージャが不足している。そのため産業界から、優秀なプロジェクトマネージャの育成に関する要望が大きい。また、プロジェクトの成否が社会に与えるインパクトが大きいため、欧米では既に PM4K(Project Management for Kids)の名前で初等教育からプロジェクトマネジメントの知識と技能の教育に取り組んでいる。この点に関し、日本は、大学においてもプロジェクトマネジメントを教育しているところが少なく、大きく立ち遅れている。そのため、効果的なプロジェクトマネジメント教育に関する研究が望まれている。

6) パーソナル PM

私たち社会を構成する一人ひとは、自らの人生というプロジェクトを運営している。個人が目標を立案し、達成するための方法論と、組織を対象とした従来のプロジェクトマネジメントには多くの共通点といくつかの違いが存在する。そこで、個人のプロジェクトを成功させるための方法論を確立しようという動きがある⁷⁾。また、個人として目標を達成し、充実した人生を送ることができる国民を多く持つ国は、組織としてのプロジェクトマネジメントも卓越して運営できると考えられる。このような視点から、パーソナル PM としての研究が期待されている。

7) アジャイル・プロジェクトマネジメント

システム構築プロジェクトには多様な種類があり、限られた予算、限られた期間で運営される。そのため、本来やっておきたいマネジメント作業をフルに実行することはできない。そこで、求められる品質や要求事項に合わせて、プロジェクトマネジメントの技法や質の水準をテーラリングして適用する。情報システム開発に代表されるように、近年、プロジェクトに許される期間は、短縮し、かつ要求事項の変更は増大している。このような環境の中、アジャイルな開発が注目されている。ここでいうアジャイルとは、「迅速な」「軽微な」という意味で用いられる。また、システム構築の初期段階で完成時の仕様や見積りを確定するのではなく、プロジェクトをとりまく状況の変化に応じて「育てる」「成長させる」というニュアンスで考えると理解しやすい。このようなアジャイルな性質を強く持った開発や研究に適したプロジェクトマネジメントの確立が望まれている。

8) 契約に関する課題

プロジェクトは不確実性の下で実施される。そのため、既に、製品として製造された物品の売買と異なり、契約行為そのものが難しい。このことから、プロジェクト契約をめぐる発注者と受注者間でトラブルになるケースもある⁸⁾。さらに、プロジェクトの実施に伴い作成される成果物の著作権や特許権の扱いについても注意が必要である。プロジェクトを円滑に運営していくためには、これらの問題について、トラブルとにならないような契約形態と社会的コンセンサスの形成が必要となる。

また、欧米ではプロジェクトの品質向上や期間短縮を目指すため、アワード(報奨)

やインセンティブを用いた多様な契約形態を利用して、発注者側、受注者側双方のモチベーション向上を図っている⁹⁾。

9) プロジェクトの評価

プロジェクトの評価には多様な軸と尺度が必要であり、成功したか失敗したかについて単純に決定することはできない。このことから、従来より評価尺度に関する研究が行われてきた。また、評価カテゴリー間の依存関係について、AHP(Analytic Hierarchy Process)やニューラルネットワークを用いた解析を行う研究もある¹⁰⁾。今後もシステムの複雑性が増すことから、引き続き適正な評価に関する研究が期待される。

(6) キーワード

不確実性のマネジメント、見積り、ソーシャル・プロジェクトマネジメント、パーソナル・プロジェクトマネジメント、アジャイル・プロジェクトマネジメント、契約、評価

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 企業を中心として、不確実性（リスク）への取り組み、プロジェクト人材への教育に関する研究等が行われている。 一方、大学におけるプロジェクトマネジメントの研究、授業、教員数は、欧米に比べてかなり見劣りしている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトマネジメントの国際標準化において、日本は重要な役割を担ってきた。 ソーシャルプロジェクトやパーソナルプロジェクトなど、従来の企業等の枠組みを超えたスケールのプロジェクトのあり方についての研究が行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 建設、土木、プラントエンジニアリング、ITシステムインテグレーションなどに関わる企業は、プロジェクトマネジメントに積極的に取り組み、ビジネスとして成功させてきた。この過程において、日本は諸外国に比べ、一括請負や受託契約が多くなっている。このことは、プロジェクトマネジメントのノウハウや人材が受託側企業に集中していることを意味している。これには、良い面と悪い面がある。また、欧米では、モチベーション向上のために多様な契約形態を用いているが、日本での取組みは大きく遅れている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトマネジメントに関する技術および知識体系の作成において世界をリードしてきた。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 連邦政府をはじめ行政がプロジェクトマネジメントに取り組み、調達等に取り入れている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 職業人としてのプロジェクトマネージャは確立しており、企業も積極的にその人材を活用している。プロジェクトマネジメントに関するPMP(Project Management Professional)資格取得に関するニーズも高い。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IPMAを中心として研究と交流を深めている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> IPMAを中心として研究と交流を深めている。建設をはじめ産業分野での研究が積極的に行われている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクト調達において、多様な契約形態が存在し、プロジェクトの特性に合わせて組み合わせている。これにより、プロジェクト関係者のモチベーションを向上させ、プロジェクトの納期や品質の向上に活用している。

研究開発領域
システム構築方法論区分

中国	基礎研究	△	→	・基礎的な研究については、あまり見当たらない。
	応用研究・開発	○	↗	・中国では项目管理という名前で、プロジェクトマネジメントの教育が積極的に行われている。また、関連する複数のプロジェクトをまとめて管理するプログラムマネジメントは、多項目管理と呼ばれ、同様に教育されている。
	産業化	◎	↗	・中国では、プロジェクトマネジメントのノウハウを十分に活用し、産業の育成、国家プロジェクトを推進している。
韓国	基礎研究	△	→	・基礎的な研究については、あまり見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・1992年に、韓国プロジェクトマネジメント協会(Korean Project Management Association: KPMA)が設立されている。 ・PMP資格取得者の数は日本の約半数であり、総人口からすると日本と似た状況にある。
	産業化	○	→	・製品開発などへの活用が行われている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 富永章. 解説：アーンド・バリュー・マネジメント. プロジェクトマネジメント学会. 2003.
- 2) Project Management Institute Standards Committee. A Guide to The Project Management Body of Knowledge. Project Management Institute. 1996.
- 3) プロジェクトマネジメント学会 出版委員会 編著. プロジェクトマネジメント入門. プロジェクトマネジメント学会. 2013.
- 4) 桑原希尽, 江崎和博. プロジェクトにおけるリスクマネジメントの研究に関する動向. 情報処理学会研究報告. 2014, vol.2014-IS-192, no.2.
- 5) 竹久友二. 複雑性マネジメントにおける PM コンピテンシーについて. プロジェクトマネジメント学会秋季研究発表大会予稿集. 2011, p.76-80.
- 6) 渡辺浩世, 辻川直輝. 継続的な見積りプロセスの改善とその定量的効果について. プロジェクトマネジメント学会誌. 2012, vol.14, no.3, p.14-19.
- 7) 富永章 編著. パーソナル プロジェクトマネジメント. 日経 BP 社. 2011.
- 8) 市毛由美子. ソフトウェア開発をめぐる法律問題 - 紛争回避のためのポイント -. 情報処理. 2014, vol.55 no.3, p.225-231.
- 9) 大久保隆, 持原真理子. 米国政府調達における契約の種類と実際：コントラクト・マネジメントの考慮点. プロジェクトマネジメント学会誌. 2002, vol.4, no.2, p.3-7.
- 10) 本間利久, 房克哲, 山戸昭三. NN モデルにおける発見的方法によるプロジェクト評価カテゴリー間の相互依存性解析. プロジェクトマネジメント学会 2012 年度春季研究発表大会予稿集. 2012.

3.7.9 品質マネジメント

(1) 研究開発領域名

品質マネジメント（品質管理）

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムの構築・運営は、多くの人々が働く組織によって行われる。このため、組織が適切にマネジメントされていないと、どんなに良いシステム構築・運営の方法論を用いても期待する成果は得られない。品質マネジメントとは、顧客及び社会のニーズを満たす製品・サービス・システムの提供と働く人々の満足を通じた組織の長期的な成功を目的とし、製品・サービスの開発・提供やシステムの構築・運営に関わる様々なプロセス（インプットをアウトプットに変換する活動）の維持向上、改善及び革新を組織の全部門・全階層の参加を得て科学的手法を駆使して行うことで、外部および内部の環境の変化に適した効果的かつ効率的な組織運営を実現する活動である。なお、ここで言う品質／質とは、関心の対象となるものが、顧客および社会の明示された、暗黙の、または潜在しているニーズを満たす程度であり、高性能、高機能、高信頼性を必ずしも意味しない。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

品質マネジメントは、1924年にW. A. Shewhartが管理図を考案したことから始まった。統計学を使って品質の維持向上・改善を行うところから、統計的品質管理（Statistical Quality Control, 略してSQC）と呼ばれた。SQCは第2次世界大戦中に米国や欧州で活用され、大きな成果をあげるとともに、理論化・体系化が進んだ。これが戦後に日本に紹介され、多くの企業が自社の製品競争力を強化するためにその活用・実践に取り組んだ。そのような中、産学連携を通してPDCAサイクル、方針管理、QCサークル、改善の手順、QC七つ道具、工程能力指数などの原則・活動・手法が生まれ、組織運営の方法論として発展していった。1970年代に入ると、品質マネジメントは、製品の製造だけでなく、製品の設計・開発にも適用されるようになり、品質機能展開、信頼性・保全性、品質保証体系などに関する研究が進んだ。また、1980年代には、ソフトウェア開発やエネルギー分野への適用が進むと同時に、欧米やアジア諸国から組織運営の有効な方法論として注目され、多くの研究者・実務家が調査のために日本を訪れ、世界中に普及した。さらに、これらの国々では、1990年代に入ると、品質マネジメントが医療、教育、運輸、金融、行政などの社会システムの分野で活用・実践されるようになり、当該分野に適した活動・手法が研究されるようになった。日本でもこれらの動きを受けて、同様の取り組みが行われている。このような発展の経緯を踏まえると、品質マネジメントの研究領域およびその動向を概括する場合には、a)SQC、b)品質を中核とした組織運営のための原則・活動・手法、c)適用領域の拡大に応じた方法論の拡張、の3つに分けて捉えるのが適切である。

品質マネジメントの原点であるSQC（項目a）については、ppmレベルの管理が求められるようになった、計測装置やコンピュータの発達により多量のデータを自動的に収集することができるようになった、顧客ニーズの多様化に伴って品種の切り替えが頻繁

に行われるようになったなどの製造工程の変化に伴い、累積和管理図、多変量管理図、回帰残差管理図などの研究が行われている¹⁾。また、複雑で広範なプロセスやシステムの因果関係の解析が求められるとともに、膨大な量の多次元データが利用できるようになったことで、グラフィカルモデリングやパス解析などの手法、機械学習などのデータ駆動型の手法の適用・研究が進んでいる²⁾。さらに、実験計画法から発展し、安定設計の方法として広く活用されるようになった品質工学については、様々な場面における適用の難しさを克服するための具体的な手順の開発、より少ない実験数で精度のよい結果を得るための計画の提案、実務的に提案されている方法の理論化、応答曲面法・最適化手法との融合などの研究が活発に行われている³⁾。他方、価値提供の下流および上流域では、市場における故障・トラブルの発生状況や製品・システムの使用・運用状況、顧客の購買行動や意見・発言に関するデータの量・内容が、情報技術の活用により飛躍的に増大・変化する中で、これらを用いて信頼性の推定やトラブル予測を簡単に精度良く行うための手法、データの形態に適した顧客行動のモデル化やニーズの解析を行うための手法の研究が活発に行われている^{4) 5)}。

品質を中核とした組織運営（項目 b）は品質マネジメントの最も主要な研究領域である。組織運営のための原則については、1960～70年代に内容が固まった。研究者によって色々な整理がされているが、顧客第一、プロセス重視、PDCA サイクル、再発防止、未然防止、重点志向、事実に基づく管理、全員参加、人間性尊重など、10～20個にまとめているものが多い。ただし、組織の規模が大きくなるにつれてこれらの原則をどうやって浸透させるかが大きな課題となっており、そのための方法が研究・実践されている。他方、活動については、大きく、方針管理、日常管理、小集団改善活動、品質管理教育、プロセス保証、新製品開発管理などに分けられるが、それぞれをどう実践するのがよいか組織の状況に大きく依存するため、組織の状況の変化に応じて新たな方法が研究されている。また、これらの活動を支援するための手法についても、数多くの提案がなされている。

例えば、方針管理については、方針（課題、目標、方策）の策定、組織階層に沿った展開・実施、期末の反省という基本的な枠組みは1960～70年代に日本で確立されたものの、米国やアジア諸国を中心に、管理指標の系統的な生成、事業戦略の立案・展開との融合などが研究・実践されている^{6) 7)}。また、日常管理については、標準に基づく作業の実施と管理項目による異常の検出・処置という基本は変わらないものの、標準における動画・静止画の活用、4M（Man、Machine、Material、Method）の変化点の管理、意図しない人的エラーや意図的な不遵守などの人に起因するリスク抽出と対策生成、力量・スキルの評価と教育・訓練、効果的な内部監査などの方法がそのための支援ツールとともに研究・実践されている⁸⁻¹⁰⁾。さらに、小集団改善活動については、1960年代に日本で生まれたQCサークル活動をベースとしながら、1990年代に米国において非製造職場に適した横断型・非継続型のチーム改善活動が開発され、現在は世界中で両者を併用する形での実践が行われている¹¹⁾。また、小集団改善活動の実践を支える改善の手順についても、問題・課題のタイプによって複数の手順が考案され、それらと組み合わせで使用できる手法や手法のパッケージ化に関する研究も進んでいる¹²⁾。方針管理、日常管理、小集団改善活動などを支える人材を育成するための品質管理教育については、階

層別分野別教育体系、教育効果の定量的な把握の視点からの研究・実践が行われている¹³⁾。

プロセス保証については、在庫ゼロを目指した生産方式の普及や安全・安心に対する関心の高まりを受け、100%保証が求められるようになった。このため、プロセス、FMEA QA ネットワーク、良品条件の明確化など、トラブル・事故の未然防止を目指した方法・手法が研究・実践されている^{14, 15)}。また、新製品開発管理については、顧客のニーズを満たすために不可欠な技術の特定とその開発のための方法・手法（品質機能展開や品質工学の活用など）、既存の固有技術や過去の知見を着実に設計に活かすための方法・手法（デザインレビューや設計の標準化など）、顧客のニーズに合った製品・サービス・システムを企画するための方法・手法（顧客の声の収集・分析や顧客満足度調査など）、これらを有機的に結びつけ有効な新製品開発体系として機能させるための方法・手法（コンカレント開発、品質情報システムなど）が研究・実践されており、このような中から高い顧客価値を持った製品・サービス・システムが生み出されている^{16, 17)}。

組織運営のための原則・活動・手法については、どんなに個々の要素のレベルが高くてもそれらが密接に関連づけられていなければ全体として大きな成果は得られない。このため、品質賞、マネジメントシステム認証、自己評価などの視点から、総合的な組織運営に関するモデル化や推進方法の研究・実践が行われている¹⁸⁾。なお、これらの研究・実践では、狭い意味の品質だけでなく、環境、量・納期、コスト、安全などの他の経営要素に着目して、あるいはそれらの統合を目指して行われているものも多い。

適用領域の拡大にともなう方法論の拡張（項目 c）については、1970～90年代に米国や日本を中心にソフトウェア開発の分野に関する研究・実践がソフトウェア工学と密接に関連しながら進んだ。ソフトウェアは論理の集合体であり、目に見えない、物理的な連続性がないなどの特徴を持つため、設計・文書化や検証・妥当性確認のための技法、信頼性評価や再利用のためのモデルなどが研究されている¹⁹⁾。また、これに加えて、ソフトウェアを含めた製品・サービス・システムの開発は一般にプロジェクトによって行われるため、工数予測や人的資源管理などのプロジェクトマネジメントの方法が研究されている。さらに、ソフトウェアやハードウェアを含む複合的なシステムについては、ニーズの変化に伴って適時に機能拡張を行うこと、これに伴って生じるコンフィギュレーションの管理を確実に行うこと、運用時の保守や使用終了後の廃棄・回収を考慮することなどが必要であり、システムのライフサイクルを考え、各段階に応じた適切な対応を行うライフサイクルマネジメントの方法が研究されている。これらについては、組織全体の運営を取り扱う品質マネジメントと連携を保ちながら、それぞれ独自の研究領域が形成されている。

医療・福祉の分野においては、1990年代より米国を中心に事故防止・患者満足度向上を目指して品質マネジメントの活用が進んだ。患者・利用者の状態が一人一人異なるために標準化が進んでいないとともに、人による作業が中心のため人的エラーの防止が重要な課題となる。これらを受けて、プロセスの標準化やエラー防止に関する方法・手法が活発に研究・実践されている²⁰⁾。また、医療機関・福祉施設の状況に適した品質マネジメントのモデルや手法のパッケージ化も研究されている。また、教育の分野での活用については、1990年代より米国・欧州・アジア諸国において研究・実践がなされ、小集

団改善活動を生徒の学習意欲・能力の向上に役立てる取り組みも行われている²¹⁾。エネルギー、運輸、金融、行政などの分野における活用も進んでいる²²⁾。

（４）科学技術的・政策的課題

- 1) 多くの日本企業がグローバル展開を行っており、従業員の中の非日本人の割合が増えている。また、高年齢化と生産人口の減少にともない、高齢者や女性の活躍が期待されている。言語・文化・考え方が異なる人が働く組織において、価値観を共有し、組織力と働く人の満足を高める方法の研究・実践が求められている。
- 2) 開発期間の短期化が求められる中、ばらつきを考慮した設計、シミュレーションによる評価、トラブル予測などを設計・開発プロセスの中に総合的に組み入れ、複数の組織が密接に連携を図りながら効果的・効率的に設計・開発を行うことができる方法が求められている。
- 3) IT の活用により製造工程や市場で得られるデータが量的に増大する中で、これらに適した解析手法の研究・開発が求められている。また、社会の発展により顧客・社会のニーズが多様化する中で、潜在ニーズを把握し、これを満たす製品・サービス・システムを企画するための手法の研究・開発が求められている。
- 4) 製品・サービス・システムにおいてソフトウェアや情報の果たす役割が大きくなっており、これらの信頼性を保証する方法が求められている。また、製品・サービスの開発・提供やシステムの構築・運営において人が果たす役割が大きくなっており、意図しないエラーや意図的な不遵守を防ぐ方法が求められている。
- 5) 社会システムが複雑化し、安全・安心への関心が高まるにつれ、エネルギー、医療・福祉、運輸、金融などの分野で品質マネジメントの必要性が着目されており、各分野に適した実践の方法が求められている。特に、法的規制と事業者の自律的な取り組みをどう連係させるかは重要な課題となっている。
- 6) 教育分野における品質マネジメントを活用した教育・学習の質の向上、そのための方法の研究・実践が求められている。特に、初等・中等教育において品質マネジメントの考え方・手法を教育カリキュラムに組み込み、学ぶ力や生きる力を持った生徒を育てる方法の研究・実践が重要な課題となっている。
- 7) 地球温暖化などの環境問題がクローズアップされ、持続的成長が重要な課題となるにつれ、組織の環境への取り組みを加速するために品質マネジメントを活用すること、そのための方法を研究・実践することが求められている。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

品質マネジメントは、組織運営のための方法論であり、各産業分野のリーダーと見なされる組織が大学の研究者やコンサルタントと協力しながら個別に研究・実践を進めている。これは、社会システム分野（エネルギー、医療・福祉、運輸、金融などの分野）でも同様である。

また、これに加えて、日本品質管理学会、American Society for Quality、日本科学技術連盟、日本規格協会など、品質マネジメントを専門とする学会・協会では、複数の組織・研究者が協力して研究を行っている。例えば、日本品質管理学会の現地現物研究会

では、産と学が定期的に会合を開き、自工程完結のためのマネジメント手法の構築、SQCと品質工学の融合による問題解決ストーリーの構築などを行っている。また、グローバル品質教育研究会では、海外拠点における品質教育の標準的なプログラムを開発している。日本科学技術連盟では、ソフトウェア品質に関する研究会を組織しているほか¹⁹⁾、各地域の企業・組織と協力し、小集団改善活動の普及を行っている。日本規格協会では、品質工学に関する研究会を継続的に行うとともに、JIS規格の発行やISO規格の審議、品質管理検定の企画・運営を通じて品質管理の普及を行っている。

さらに、欧州やアジアでは、European Organization for QualityやAsian Network for Qualityを中心にして、それぞれの地域において品質マネジメントの普及・推進を行っている複数の学会・協会の間の連携も図られている。また、Deming賞やMB賞(Malcom Baldrige National Quality Award)などの品質賞、ISO規格に基づくマネジメントシステム認証制度なども個々の組織の取り組みを加速する上で役立っている。Deming賞やMB賞の受賞報告講演要旨集を見ると、様々な業種・業態の組織が賞への挑戦の過程を通じて、顧客・社会のニーズや各組織の経営環境に適した品質マネジメントを工夫・実践し、顕著な成果をあげていることがわかる。

このような中から、(4)で示した課題を克服するために、(3)で述べたような新たな知見や技術が着実に生み出されている。

政府等が経済的に支援し、複数の組織・研究者が連携して推進する大規模プロジェクトは少ないが、米国における医療・福祉分野のNational Demonstration Program、MB賞教育部門の創設などは、当該分野における研究・実践の進展に大きく寄与したものである。

(6) キーワード

顧客ニーズ、プロセス、PDCAサイクル、未然防止、全員参加、方針管理、小集団（チーム）改善活動、品質保証、品質賞、マネジメントシステム認証

（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	△	→	・国際比較研究 ¹⁶⁾ や手法の基礎となるモデル・理論の研究などが行われている。
	応用研究・開発	○	→	・品質工学やグラフィカルモデリング ³⁾ 、設計・開発プロセスの管理や人に起因するトラブルの防止の手法 ^{9, 17)} 、医療・福祉分野に適した手法 ²⁰⁾ などの研究が行われている。
	産業化	◎	→	・自動車産業等では継続的に研究・実践が行われており、世界的に高いレベルにある。 ・社会システムの分野、特に教育や行政の分野では研究・実践が遅れている。
米国	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	◎	↗	・品質工学やQFDのほか ⁵⁾ 、Six Sigma等の小集団改善活動 ¹¹⁾ 、BSC等のメトリックスに着目した研究 ⁶⁾ 、品質マネジメント活動のモデル化に関する研究が行われている。
	産業化	◎	↗	・MB賞受賞企業等に見られるように、高いレベルにある。 ・社会システム分野、特に、医療・福祉や教育の分野の研究・実践はトップレベル ^{13, 21)} 。
欧州	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	・サービス業を含めた広い分野で品質マネジメントを実践するための方法が研究されている。ISOマネジメントシステム認証の活用に関する研究も見られる ¹⁸⁾ 。
	産業化	○	→	・欧州品質賞受賞企業等に見られるように、高いレベルにある。
中国	基礎研究	△	→	・SQCなどの研究が行われている。
	応用研究・開発	△	↗	・SQCの研究が中心であるが、品質マネジメントの組織での実践を促進することを目指した研究も見られる ¹²⁾ 。
	産業化	△	↗	・日本企業の関連企業がDeming賞を受賞するなど、少しずつ成果が出始めている。
韓国	基礎研究	△	→	・手法の基礎となるモデル・理論などの研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・方針管理やリスクマネジメント ⁷⁾ 、新製品開発や調達管理、顧客満足などに関する研究、実践研究や成功事例に着目した研究が行われている。
	産業化	○	→	・国際的な品質賞を受賞した企業や組織はない。
インド他	基礎研究	△	→	・応用研究が中心であり、基礎研究はほとんど見当たらない。
	応用研究・開発	○	↗	・製造業に限らず、運輸、教育、行政などを含む様々な分野で品質マネジメントを実践するための方法が研究されている ²²⁾ 。
	産業化	◎	↗	・インドやタイではDeming賞受賞企業も多い。これらの企業は世界的にトップレベル。 ・インド、タイ、マレーシア、シンガポール等では社会システム分野でも活発な研究・実践が行われている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

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

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Wang, Sai; Reynolds, Marion R. Jr. A GLR Control Chart for Monitoring the Mean Vector of a Multivariate Normal Process. *Journal of Quality Technology*. 2013, vol. 45, no. 1, p.18-33.
- 2) 黒木学.分散に対する因果効果の定量的評価と工程解析への応用. *品質*. 2008, vol. 38, no. 3, p.373-384.
- 3) 大久保豪人, 永田靖. タグチの RT 法における同次元でない連続量データへの適用方法. *品質*. 2012, vol. 42, no. 2, p.86-102.
- 4) 横山真弘. オンライン状態監視により個別に取得されるユーザの稼働情報に基づく寿命分布の推定に関する研究. *品質*. 2013, vol. 43, no. 4, p.59-61.
- 5) Singh, Rahul K.; Elrod, Cassandra C.; Cudney, Elizabeth A. Comparative Analysis of Quality Function Deployment Methodologies: A Case Study Analysis. *Quality Management Journal*. 2012, vol.19, no.1, p.7-23.
- 6) Schonberger, Richard J. Time-Relevant Metrics in an Era of Continuous Process Improvement: The Balanced Scorecard Revisited. *Quality Management Journal*. 2013, vol.20, no.3, p.10-18.
- 7) Chung, Kyu Suk. Evaluating Korean Strategic Management System by Malcolm Baldrige Criteria. *Asian Journal on Quality*. 2013. vol.14, no.1, p.1-11.
- 8) 金子憲治. ビジュアルマニュアルを使い品質管理を現場に徹底. *クオリティマネジメント*. 2009, vol. 59, no. 2, p. 34-39.
- 9) 中條武志. 人に起因するトラブル事故の未然防止と RCA. 2010, 日本規格協会.
- 10) 竹島壮郎, 安田駿一郎, 篠田心治ほか. 作業者の動きとももの変化に着目した技能分析手法の考案. *日本経営工学会論文集*. 2014, vol. 64, no. 1, p. 1-8.
- 11) Zhang, Weiyong; Hill, Arthur V; Gilbreath, Glenn H. A Research Agenda for Six Sigma Research. *Quality Management Journal*, 2011, vol.18, no.1, p.39-53.
- 12) Cheng, Chuen-Sheng; Kuan, Chi-Ming. Research on product reliability improvement by using DMAIC process: A case study of cold cathode fluorescent lamp. *Asian Journal on Quality*. 2012. vol.13, no.1, p.67-76.
- 13) Kirkpatrick, Donald L.; Kirkpatrick, James D. *Implementing the Four Levels: A Practical Guide for Effective Evaluation of Training Programs*. 2007, Berrett-Koehler Publishers.
- 14) 早乙女慧, 高見沢正己, 石崎博ほか. 情報システム開発における情報漏洩事故の未然防止ー意図しないヒューマンエラーに起因する事故の防止を目的とする FMEA の提案ー. *品質*. vol.43, no.4, p.86-93.
- 15) 佐々木眞一. 自工程完結ー品質は工程で作り込むー. 2014, 日本規格協会.
- 16) アブレート・グルミレ; エルバス・ボリスほか. 顧客満足度とマーケットシェアの関係メカニズムについての国際比較研究. *品質*. 2012. vol.42, no.3, p.95-105.
- 17) 鈴木潤平, 賀治明日香, 清水望寿帆ほか. 複数機種に対応した機能設計プロセスの手順化 : 自動販売機を事例として. *日本経営工学会論文誌*. 2011, vol.62, no.3, p.95-105.

- 18) Sampaio, Paulo; Saraiva, Pedro; Rodrigues, António Guimarães. A Statistical Analysis of ISO 9000-Related Data for European Union Ultra-Peripheral and Portuguese Region. *Quality Management Journal*, 2009, vol.16, no.2, p.44-58.
- 19) SQuBOK 策定部会. ソフトウェア品質知識体系ガイド（第2版）. 2014, 日科技連出版社.
- 20) 金海哲, 棟近雅彦, 佐野雅隆, 金子雅明. 与薬事故に対するエラープルーフ化に関する研究－改善対象要素に着目した対策立案方法の提案－. *品質*. 2013. vol.43, no.3, p.110-124.
- 21) Pewaukee School District. Malcolm Baldrige National Quality Award Application. 2013, http://patapsco.nist.gov/Award_Recipients/
- 22) Kumar, Madhu Ranjan; Sahay, B K; Ranjan, P. Adapting TQM to Change Indian Bureaucracy: A View From Inside. *Quality Management Journal*, 2011, vol.18, no.1, p.23-38.