

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「現代の数理科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

- ・ 生物医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、社会科学者(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科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。

研究開発領域
モデリング区分

- (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) 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所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攻撃が中国からなら、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て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。

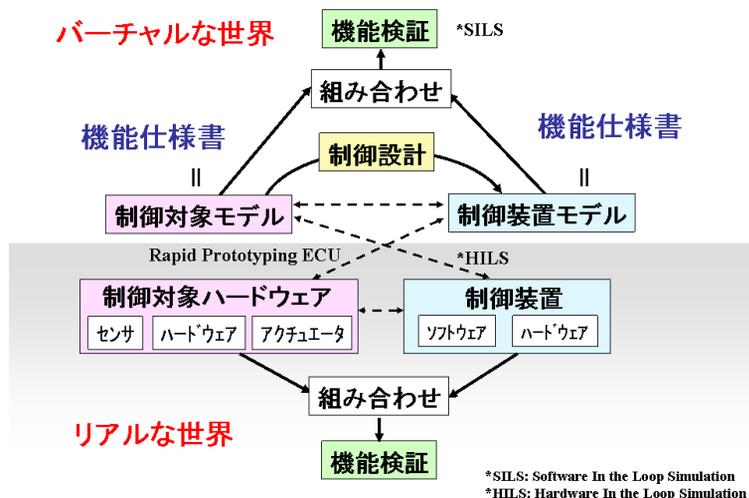


図 1 モデルベース開発 (MBD) の概念

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は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 など時代に応じ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>