

CRDS-FY2013-FR-06

研究開発の俯瞰報告書

システム科学技術分野 (2013年) 第2版

Panoramic View of the Systems Science
and Technology Field (2013) 2nd Edition



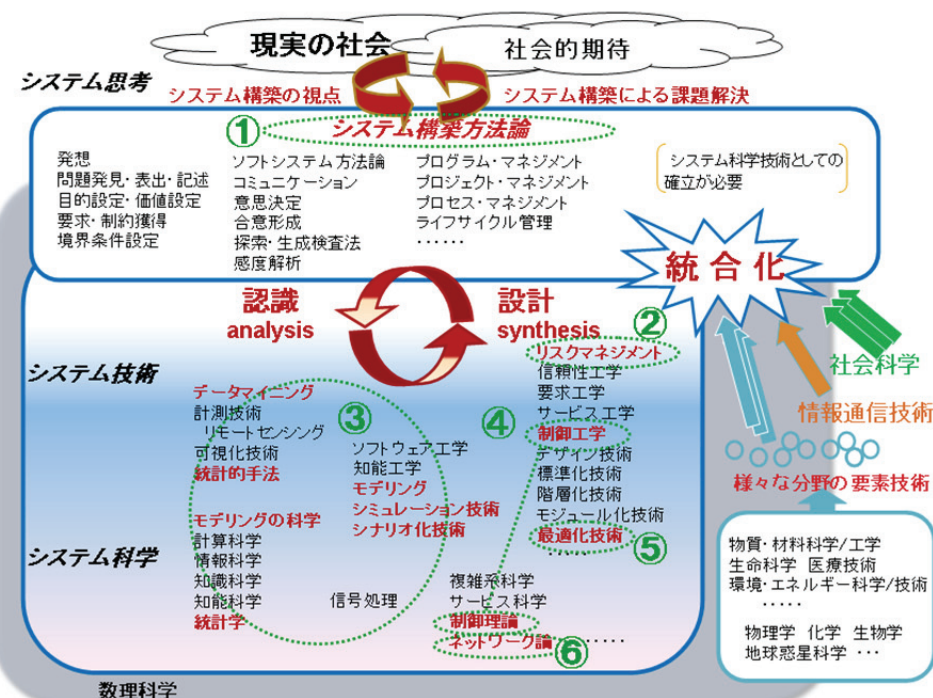
独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency



研究開発の俯瞰報告書概要（2013）

システム科学技術分野

俯瞰区分の抽出



②意思決定とリスクマネジメント

1) リスクの下での意思決定 2) リスク概念と尺度 3) 統合・複合リスク・その他リスク 4) 市場リスク 5) 信用リスク 6) リスクマネジメントの数値計算

③モデリング

1) 先端的数理モデリング 2) エージェント・ベース・モデルとマイクロ・マクロ連携 3) 統計モデル 4) 動学的経済モデルと統計整備 5) データ同化 6) データマイニング・機械学習 7) モデル合成による社会課題解決の展望 8) モデルの正則化・最適化 9) モデル統合に基づくシステム設計とその評価 10) モデルの評価技術

④制御

1) 学習制御／適応制御 2) ロバスト制御 3) 最適制御／予測制御／予測制御 4) 分散制御／分布制御 5) 合意・同期・被覆制御 6) 大規模・ネットワーク制御 7) 確率システム制御 8) 故障検出／信頼性設計 9) 制御の基盤としてのシステム理論

⑤最適化

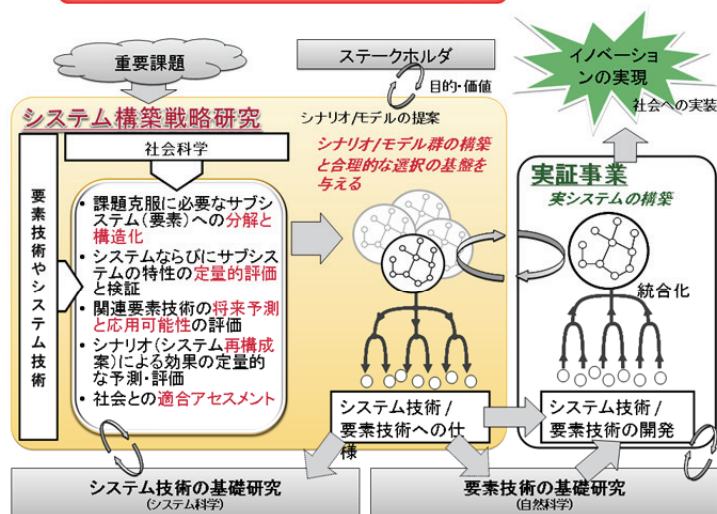
1) 基盤分野としての最適化 2) 連続的最適化 3) 分散的最適化 4) 最適化計算 5) 最適化モデリング 6) 最適化ソフトウェアと応用

⑥ネットワーク論

1) 複雑ネットワークおよび総論 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 3) ネットワークに関する離散数学 4) ネットワーク解析用ソフトウェア

将来は「システム構築方法論」「複雑系」「自己組織系」「社会システム」なども取り上げる必要がある。

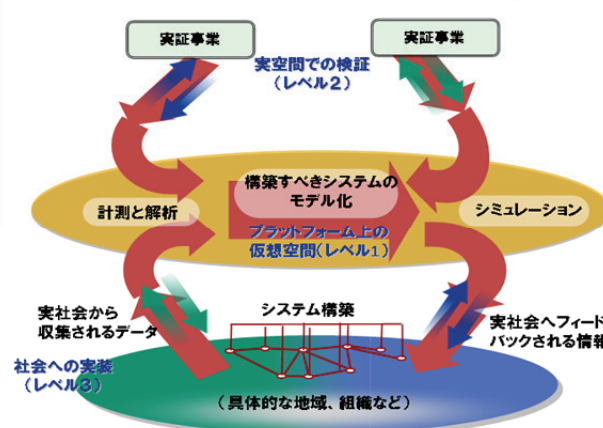
システム構築戦略研究



Kimura, H., Toyouchi, J., etc (2012) 「Proposal of strategic research on building systems」
『Systems Conference (SysCon), 2012 IEEE International』

各俯瞰区分を統一にとらえる方法論としてシステム構築方法論を考察。
サブシステム(要素)への分解と構造化、システム特性の定量的評価など学問的な研究課題が抽出される。
各分野にまたがる問題を解決するため、共用プロトコルやプラットフォームを確立するための研究も必要。

システム構築方法論



国際比較総括

各分析領域の国際比較から強みなどをキーワード化

日本	強み: モデリング、最適化 中位: マルチエージェントシミュレーション、ネットワーク 弱点: システム化、大規模システム制御、リスク管理、データマイニング
米国	すべての分野で圧倒的に優位。特に制御、システム化、計算機ネットワーク、経営システムとリスク管理、ソーシャルメディアなど
欧州	強み: リスク理論、予測理論、システム理論 弱み: 産業化
中国	システム科学分野の研究予算、論文数が急激に増加。実問題の解決に注力、スパコンも強い。
韓国	情報公開は不十分、国際的研究への参加も非積極的、応用統計の基礎/応用研究は、日本より優勢

エグゼクティブサマリー

システム科学技術は、望ましいシステムを構築するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体である。すべての科学技術の分野とシステムという意味で接点を持つきわめて広範な学問領域であり、システムを構築するプロセスに個々の対象システムを超えた共通性を持っている。この共通性を、すでに学問として確立もしくは確立しつつある「意思決定とリスクマネジメント」、「モデリング」、「制御」、「最適化」、「ネットワーク論」の5つの俯瞰区分として抽出し、それらの学問領域を再構成する「システム構築方法論」を合わせて6つの俯瞰区分を設定し、研究領域ごとの各国の技術力の国際比較を、専門家の主観評価によって行った。

システム科学技術は全体としてのシステムと人間を含むその個々の構成要素との間の関係が研究の主要なテーマであり、したがって要素にかかわるさまざまな研究分野を統合することへの強い志向を学問が本質的に内包している分野である。同時にモデル空間上での概念操作が研究開発の主要な場となるので、数理的な手法が不可欠となり、したがって抽象性、普遍性が重視される。しかし同時に、システムを社会に実装するところまで研究開発を貫徹させることを重視する極めて実践的な分野であり、未踏の分野や課題を多く含むいまだ未成熟の分野である。基礎研究と応用研究が統一されて初めて現実的に成立する学でもある。システム科学技術を振興することによって、要素研究がバラバラに行われその成果がうまく生かされていないことから来る日本の科学技術のさまざまな弱点を克服し、科学技術が社会的経済的な価値を生むこと、すなわちイノベーションの実現に日本の科学技術の活力を誘導することができる。

国ごとの技術力について特徴的なポイントを以下に示す。

日本

諸外国に比べこの分野に対する重要性の認識は低く、国の関心も薄い。分野によっては学会すらも存在しないなど、濃淡が激しい。

ゲーム理論、数理モデル、最適化理論などは伝統的に強い。リスク評価は企業内に閉じている場合が多い。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は欧米に匹敵し、SNSやWebでの産業応用が進んでいる。気象・海洋学におけるデータ同化、データマイニングの基礎研究は、研究者人口が少ないが世界トップクラスである。制御は鉄鋼、自動車、ロボット、化学プラントなど欧米に先んじた産業化の実績がある。

特にエネルギーや環境分野においてシステム化が日本の弱点であることが多くの人々によって指摘されており、この点に注力することが産業競争力の回復に必要であることは共通認識になりつつある。

米国

学術研究機関数、研究者人材、研究成果数、いずれにおいても圧倒的な優位性を維持している。ポストドクレベルの研究者には中国や韓国からの留学生が多く含まれており、将来トップレベルの知見を自国に持ち帰る研究者も多いと考えられる。基礎研究においても実務応用への意識が高く、企業のコンサルティングを行ったりすることにより、先端技術を産業界へ広めるとともに新たな問題／分野の掘り起こしが盛んである。理科系や技術系出身の経営者も多く、システム科学技術についての理解が進んでおり、さまざまな場面で積極的に新しい研究成果が実装されている。

伝統的に航空・宇宙・軍事研究の分野への利用を考慮した応用研究とこれを可能にするための基礎研究が盛んであるが、計算機ネットワークやスマートグリッドに必要な新しい分野（通信、分散制御、デマンドレスポンス、大規模・ネットワーク制御など）での予算措置も強化され、研究成果が顕著に現れてきている。

IBM、Microsoft、Yahoo、Google といった企業が、離散数学・計算機科学分野の学位取得者の主要な就職先になっている。また、facebook などの主要なソーシャルメディアの多くは米国発であり、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。

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、多くの IT 企業、製造業、金融機関において、ソフトウェアなどの形で実用化されている。医薬・医療への応用を目指した、がん、遺伝子・タンパク質ネットワーク、細胞・免疫系などの数理モデリングも盛んである。また、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大規模モデル研究が進んでいる。

欧州

全般的に米国に比して、若干劣る。

ファイナンスや保険分野のリスクの理論研究では世界の中心になるなど、分野によっては、基礎や応用研究で米国に引けは取らないが、産業応用は、米国に遅れを取っている。

金融規制などの研究、社会実装には強い。マックスプランク研究所などが開発した複雑系のモデルは特に評価が高く国政を含めて応用が進んでいる。地域的特性のためか、シミュレーションモデルの標準化スキームは進んでいる。先端的な制御技術に関しては、基礎研究や萌芽的研究が進展しており、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。社会インフラの分散制御／分布制御に関して、積極的に産業化が行われており、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などでは基礎研究から応用研究に至る広いスペクトラムの活発な研究が行われている。

政府や公共団体さらに企業が連携し、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システム科学技術を適用し、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いる。例えば、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進んでおり、災害時の移動、マーケティング、感染症制御などへの応用も期待される。

中国

諸外国のトレンドを追う形で進んでおり、オリジナリティの高い成果はまだあまり見受けられない分野が多いが、中国（あるいは中国系）研究者による論文やワーキングペーパーを目にする機会は増えている。また、外国で実績を積み帰国した若い世代の研究者が、これから質の高い研究成果を生み出していくと予想される。最近では北京、上海を中心として中国の研究者が主導する国際会議も数多く開かれるようになってきている。科学院に「数学・システム科学研究所」「自動制御研究所」がおかれ、中国のシステム科学技術を主導している。

数学分野の研究予算が急激に増加している。数理系専門家育成のために 300 大学に研究拠点を設置しており、数学のレベル向上が顕著である。

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、実現象の数理モデリング、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。

低炭素経済開発が政策目標として掲げられ、近年は中国人研究者による独自のモデル開発が行われ、国際的なモデル比較研究にも積極的に参加、存在感が大きくなっている。

中国本土には Microsoft Research など欧米のトップ企業が機械学習や情報処理技術に特化した最先端の研究所を設立し、高いレベルの研究成果を上げている。

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。

韓国

韓国、あるいは韓国系の研究者の論文は増えている。研究情報の公開は十分でなく、国際的な比較研究への参加も現時点では積極的でない。

応用統計の基礎／応用研究に関しては、日本に比べ優勢である。線形システムの予測制御に関する研究では伝統がある。分散電源を用いたスマートグリッドの実証研究や、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。

協調学習問題や、協調的進化学習など、工学的なマルチエージェント研究が広く行われている。

統計物理学者のうち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。

一方、国際比較という観点とは別に、注目すべき萌芽的な技術動向について専門家の意見を集約した。多数の重要な項目がありすべてを列挙はできないが、一例を以下に示す。

システム構築方法論

望ましいシステムを構築するためには、冒頭で記述した「意思決定とリスクマネジメント」、「モデリング」、「制御」、「最適化」、「ネットワーク論」などのすでに体系化された学問分野に加え、実社会とシステム科学技術を結ぶためのさまざまな方法論が必要と

される。本俯瞰では、これらの方法論をシステム構築方法論として位置づけた。この分野では、システムの全体を統合的に管理するための方法論（プロセス管理法）やシステム要素の感度解析手法、また、特に人間と社会を対象としたシステムの構築に向けて開発されてきたソフトシステム方法論などが対象となる。日本ではその展開が遅れている分野でもある。

意思決定とリスクマネジメント

ビッグデータや高速コンピューティングなど情報通信技術の飛躍的发展を活かした意思決定支援技術の進展、GPU（Graphics Processing Unit）の活用、ネットワークモデルを用いたシステミックリスクの研究、新たな金融規制（バーゼル 3）の仕組みなどの取組が進んでいる。

モデリング

マルチスケールモデル、ハイブリッドモデル、マルチフィジックスモデル、メゾスコピックモデルなど諸外国で活発に議論され、融合研究も進んでいる。欧米では、そのような役割を担う複雑系科学に関する大学研究センターや研究所が数多く存在している。

ブログ、Twitter などのソーシャルメディアの普及により、人の行動・移動・情報伝達データが取得できるようになりつつある。これらのデータを反映したヒトの社会行動・移動、感染症伝播、情報拡散、意見・文化形成、ミームなどの数理モデリングが特に欧米で急速に進んでいる。

制御

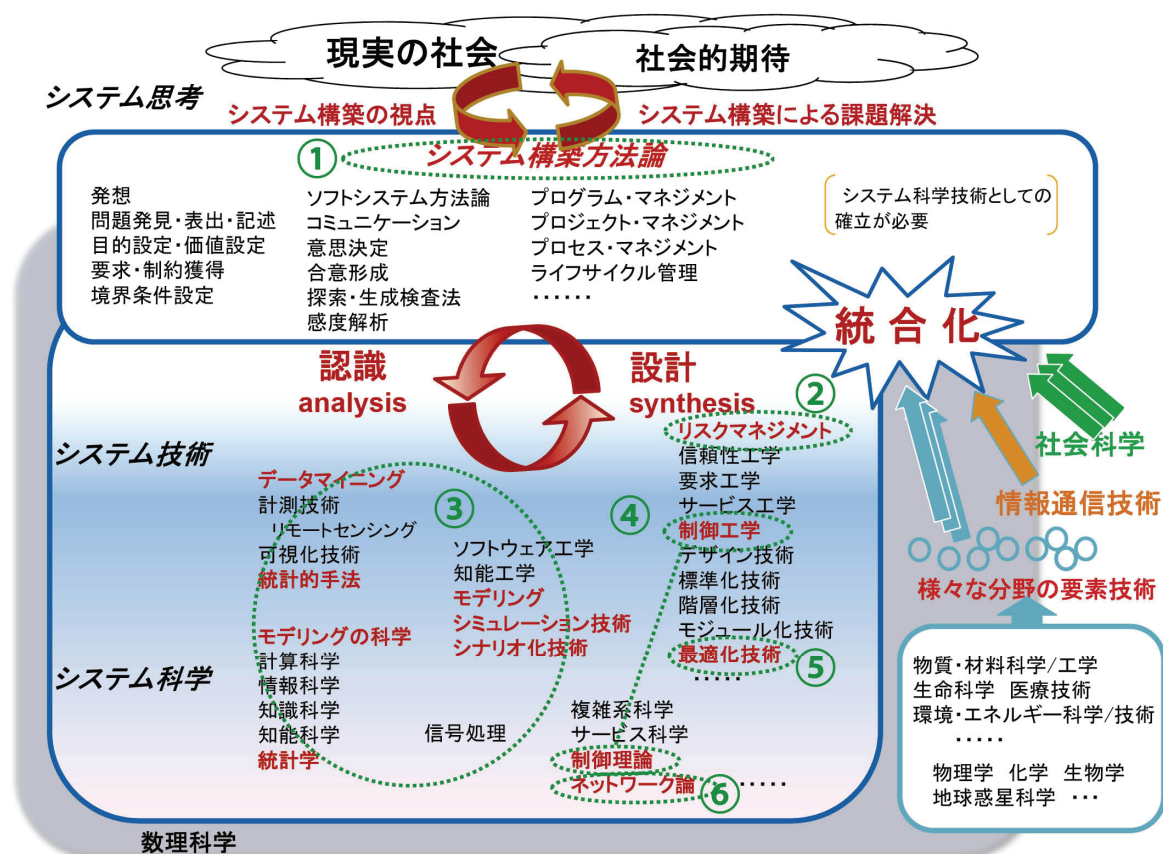
学習制御を 2 次元システムとしてとらえた（時間軸と学習回数軸を独立変数）研究、データ駆動型制御、環境に適応する行動や学習メカニズムの解明という共通の目的に向けた異分野融合、量子力学的手法、代数的手法による最適フィードバック制御や、確率的な要素を意図的に導入して、性能を向上させる試みなどが盛んに行われている。

最適化

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、大規模問題をより小さな問題へ変換する技術、大規模最適化問題を次世代スパコンで解くための手法開発など、さまざまな試みがなされている。

ネットワーク論

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、Twitter のデータ解析、facebook のネットワーク構造解析、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、ネットワーク可視化フレームワークの開発などが進んでいる。



システム科学技術分野 領域俯瞰図

研究開発領域一覧表

俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域
② 意思決定とリスクマネジメント	意思決定	④ 制御	学習制御／適応制御
	リスク概念と尺度		ロバスト制御
	統合・複合リスク・その他リスク		最適制御／予見制御／予測制御
	市場リスク		分散制御／分布制御
	信用リスク		合意・同期・被覆制御
	リスクマネジメントの数値計算		大規模・ネットワーク制御
③ モデリング	先端的数理モデリング		確率システム制御
	エージェント・ベース・モデルとマイクロ・マクロ連携		故障検出／信頼性設計
	統計モデル		制御の基盤としてのシステム理論
	動学的経済モデルと統計整備	⑤ 最適化	基礎分野としての最適化
	データ同化：新しい戦略分野の開拓		連続的最適化
	データマイニング・機械学習		離散的最適化
	モデル合成による社会課題解決の展望		最適化計算
	モデルの正則化・最適化		最適化モデリング
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価		最適化ソフトウェアと応用
	モデルの評価技術	⑥ ネットワーク論	複雑ネットワークおよび総論
			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
			ネットワーク解析用ソフトウェア

Executive Summary

Systems science & technology is a body of basic knowledge for building desired systems and a collection of technical method for achieving the objectives concerning systems construction. This is an extremely broad area of research that has a point of contact with all areas of science & technology, in terms of systems and common ground, in terms of processes involved in developing a system, which transcends the specificity of individual systems. Based on this common ground, we extracted five broad categories of research areas which are either established research areas or in its process of developments; namely, “Decision making & risk management,” “Modeling,” “Control,” “Optimization,” and “Network theory.” Based on these five research areas together with “System construction methodology,” which reconfigures them, we set out six study categories and carried out, by means of subjective evaluation by experts, international comparison of technological capabilities of various countries for each research area.

As systems science & technology is an area whose main theme of study is concerned with the relationship between the system as a whole and its components including humans, the discipline inherently involves a strong orientation toward integration of various research areas that are specific to each component. At the same time, as the concept manipulation in the model space is the main form of research & development, mathematical capability is indispensable for the research. Therefore, abstraction and universality are considered important. However, on the other hand, it is an extremely practical area where it is considered important that the research & development should result in actual installation of the system in society. It also is an immature area containing many unexplored fields and issues. In particular, systems science & technology is an area that can be completed only when basic research and application studies are integrated. By promoting systems science & technology, we can not only overcome various weaknesses of Japanese science & technology arising from study on components being carried out in an uncoordinated fashion and people’s failure to take advantage of the results effectively, but also induce the dynamism of Japanese science & technology towards creation of socio-economic values through science & technology; i.e., realization of innovation.

The following are typical features of technological capabilities of respective countries.

Japan

Compared with other countries, importance of systems science & technology is not recognized well, and there is not much national interest either. As there is not even

an academic society in some areas, there is a wide variation of levels of interest.

Traditionally, Japan has strength in game theory, mathematical modeling, and optimization theory. For risk assessment, in many cases, it is closed inside the business. Multiagent-based social simulation and modeling is as advanced as in the western countries; and industrial application is strongly promoted in such areas as SNS and Web. Although the researchers are not many, basic research on data assimilation and data mining in meteorology & oceanology is at the highest level in the world. With respect to control, Japan has a track record of industrial application predating the US and Europe in such areas as steel, automobiles, robots, and chemical plants.

Especially in energy and environmental problems, it is pointed out by many that systematization is a weak point in Japan. It is becoming a common view that reestablishing the foundations of industrial competitiveness must be approached from aspects of system construction.

US

The US maintains predominance in terms of the number of academic research institutions, human resources engaging in research, and the number of research products. As inflow of international students and postdoctoral scholars from China and Korea is steadily growing, it is thought that in the future there will be many researchers who would bring back highly advanced knowledge to their home countries. Awareness toward practical application is high even in basic research; they are not only trying hard to apply advanced technology to the industrial world, but also vigorously trying to identify new issues/areas by, for example, participating in business consulting. Many management staffs have science or engineering backgrounds, so that they have a good understanding of systems science & technology. Social implementation of new research products is positively promoted in various scenes.

Traditionally, they have been active in application basic research to aerospace/military areas and emphasizing such research themes. On the other hand, since they have also introduced stepped-up budgetary measures to promote such new areas like communication, non-centralized operation, demand response, and large-scale/network control, that are required for computer networking and smart grid, substantial research products are being produced in these areas.

Graduates from discrete mathematics/computer science areas are finding jobs mainly in such firms as IBM, Microsoft, Yahoo, and Google. In addition, major social media such as facebook originated from the US, so that research & development by

those researchers/engineers has also been active.

Development of algorithms and simulators using cutting-edge mathematical modeling technology is actively carried out at corporate institutes and the navy, and are put to practical use in the form of software, at many IT firms, manufacturers, and financial institutions. Mathematical modeling of cancer, gene/protein networks, and cell/immune systems with an eye to application in pharmaceuticals/healthcare is also actively undertaken. In addition, large-scale modeling research reproducing actual society in the virtual world; for example, implementation of a million-agent model in a distributed computing environment, is progressing.

Europe

In general, Europe is a little bit less advanced than the US.

Europe is, for example, the world's center of risk theory research in finance and insurance area, making them as advanced as the US in terms of basic and application research. However, they lag behind the US in the field of industrial application.

They are strong in such areas as financial regulation in terms of research and social implementation. The complex systems model developed by Max Planck Institute is highly recognized and application is being undertaken in various areas, including state administration. Standardization scheme of simulation modeling is advanced, possibly because of regional characteristics. With respect to advanced control technology, they are engaging in basic & seed research, and are developing industrial-purpose predictive control software targeting a wide range of systems. They are actively undertaking industrialization of non-centralized operation/distribution control of social infrastructure; and, with respect to implementation of sensor networks and information security measures for electric power system, vigorously undertaking a broad spectrum of research ranging from the basic level to the application level in a proactive manner.

The government and public corporations as well as businesses are collaborating to actively apply systems science & technology to such areas as transportation policy, finance, energy, manufacturing, environment, agriculture, IT, and healthcare, and promote a solution by carrying out large-scale calculation. Collection and analysis of social network data via mobile phone is also progressing. This is expected to find application to transportation at the time of disaster, marketing, control of infectious disease, etc.

China

They are undertaking their research following the trend of other countries so that in many areas, they have not produced many results with high originality. However, number of research papers and working papers by Chinese (or ethnic Chinese) are increasing. In addition, it is expected that researchers of younger generation who have established themselves in foreign countries and gone back to their home country would produce high quality research products in the future. These days, a number of international conferences come to be held at the initiative of Chinese researchers, centering on Beijing and Shanghai. China's systems science & technology is led by the "Academy of Mathematics and Systems Science" and "Institute of Automation" established within the Chinese Academy of Sciences.

Research budget in the area of mathematics is rapidly increasing. As research centers have been established at 300 universities for the purpose of training experts in mathematical theory, the level of mathematical study has been significantly upgraded.

As energy, transport, and environmental problems are becoming more serious with the growth of the economy, there is a growing tendency to place importance on new problem solving methods such as mathematical modeling and optimization of actual phenomena.

Low-carbon economic development is set out as one of policy target and, recently, a novel model has been developed out by Chinese researchers. Actively participating in international model comparative studies, the presence of China is increasingly recognized.

Leading American & European companies such as Microsoft Research have established cutting-edge research institutes specializing in machine learning and information processing technology, producing high-quality research products.

As demonstrated by the fact that China once became the world top rank in super computers, research products in the form of application of basic research are also steadily increasing in the area of large-scale computation.

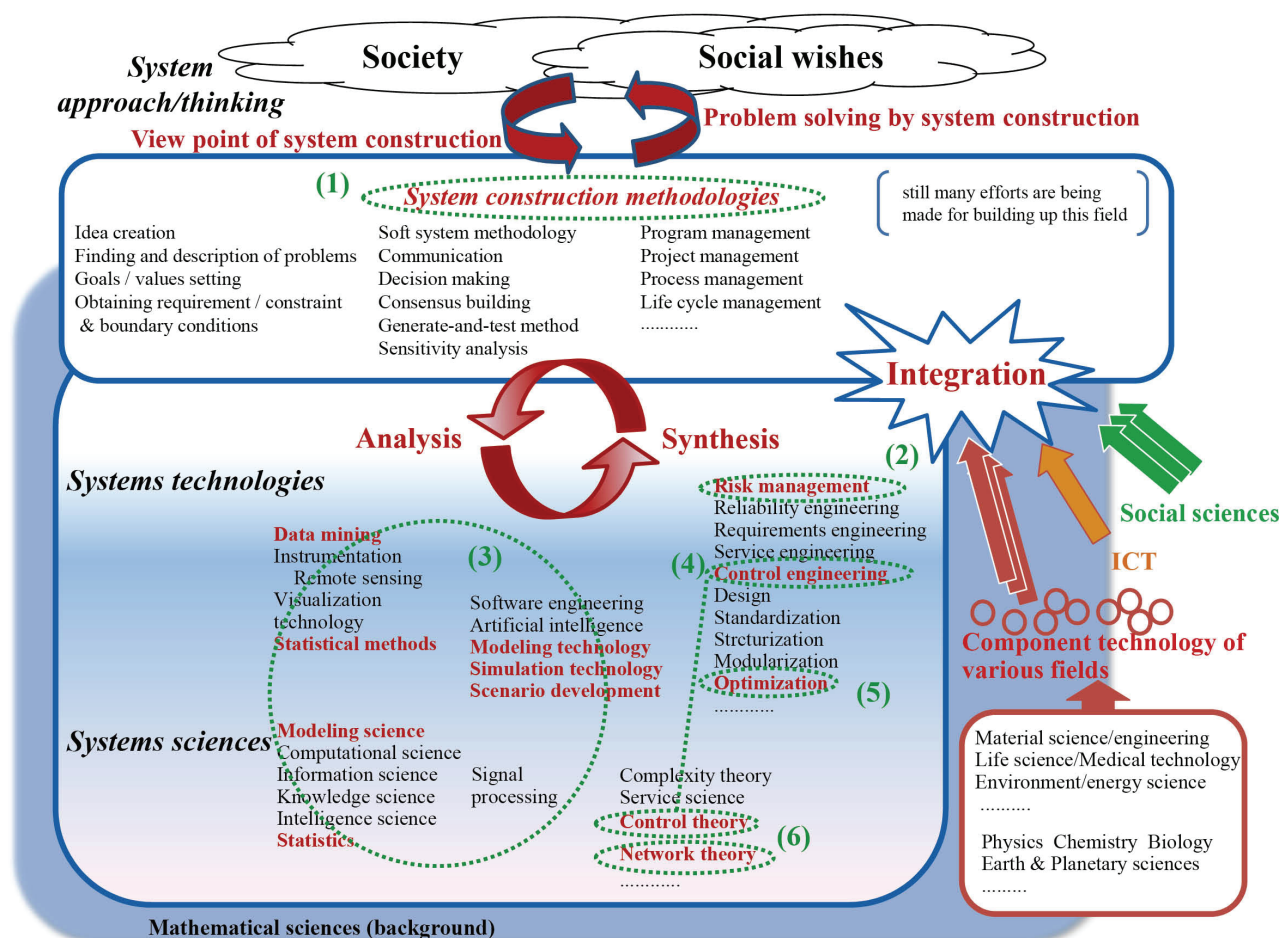
Korea

The number of research papers by Korean or ethnic Korean researchers is increasing. Disclosure of research information is not sufficient, and, at this point of time, they are not participating in international comparative studies in a proactive manner.

With respect to basic/application study of applied statistics, they have an advantage over Japan. Traditionally, Korea has strength in research on predictive control of linear systems. Experimental study of smart grid using dispersed power sources and intra-vehicle LAN are typical systems where networked control is actually used. As the automobile industry is growing, further development is expected.

Study on engineered multi-agent systems such as collaborative learning issues and collaborative evolutionary learning is widely undertaken.

A large portion of statistical physicists are engaging in network study. For this reason, more basic research products are published in senior academic journals than in Japan.



Panoramic view of the systems science & technology

List of research & development areas

Category	Research & development area
(2) Decision making & risk management	Decision making under risk
	Concepts and measures of risks
	Integrated / compound risk, and other risks
	Market risk
	Credit risk
	Numerical computation for risk management
(3) Modeling	Advanced mathematical modeling
	Agent-based model and the micro-macro link
	Statistical model
	Dynamic modeling for economies and statistical challenges
	Data assimilation: Exploration of new strategic fields
	Data mining/machine learning
	Prospect of social issue solution by model composition
	Model regularization/optimization
	Model integration-based system design and its evaluation
	Model evaluation technology
(4) Control	Learning control / adaptive control
	Robust control
	Optimal control / preview control / predictive control
	Decentralized control / distribution control
	Consensus / synchronization / coverage control
	Large-scale / networked control / network control
	Stochastic control
	Fault detection / reliability design
	Systems theory as a foundation for control
(5) Optimization	Optimization as a basic field
	Continuous optimization
	Discrete optimization
	Computing for optimization problem
	Optimization modeling
	Optimization software and application
(6) Network theory	Complex networks and overview
	Analysis of network structure using machine learning & other data mining tools
	Discrete mathematics related to networks
	Software for network analysis

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 目的と構成	1
1.1 俯瞰報告書作成の目的	1
1.2 構成	1
2. 俯瞰対象分野の全体像	2
2.1 分野の範囲と構造	2
2.1.1 分野の範囲	2
2.1.2 俯瞰の枠組	7
2.1.3 研究開発領域	9
2.2 分野の歴史、現状、及び今後の方向性	18
2.2.1 システム科学技術の特徴と技術の進化	18
2.2.2 社会ニーズや産業ニーズへの対応	20
2.2.3 これまでのファンディングの状況とその将来展望	22
2.2.4 研究コミュニティ（関連学会、研究機関など）	24
2.2.5 当該分野における各国の研究ビジョンと戦略	25
2.2.6 当該分野における政策的支援や支援活動と将来展望	26
2.2.7 研究開発をとりまく状況と今後の方向性	27
3. 研究開発領域	30
3.1 意思決定とリスクマネジメント	30
3.1.1 リスクの下での意思決定	30
3.1.2 リスク概念と尺度	39
3.1.3 統合・複合リスク・その他リスク	43
3.1.4 市場リスク	48
3.1.5 信用リスク	52
3.1.6 リスクマネジメントの数値計算	56
3.2 モデリング	60
3.2.1 先端的数理モデリング	60
3.2.2 エージェント・ベース・モデルとミクロ・マクロ連携	65

3.2.3	統計モデル	71
3.2.4	動学的経済モデルと統計整備	79
3.2.5	データ同化：新しい戦略分野の開拓	86
3.2.6	データマイニング・機械学習	92
3.2.7	モデル合成による社会課題解決の展望	97
3.2.8	モデルの正則化・最適化	103
3.2.9	モデル統合に基づくシステム設計とその評価	108
3.2.10	モデルの評価技術	117
3.3	制御	121
3.3.1	学習制御／適応制御	121
3.3.2	ロバスト制御	127
3.3.3	最適制御／予見制御／予測制御	132
3.3.4	分布制御／分散制御	139
3.3.5	合意・同期・被覆制御	145
3.3.6	大規模・ネットワーク制御	151
3.3.7	確率システム制御	156
3.3.8	故障検出／信頼性設計	161
3.3.9	制御の基盤としてのシステム理論	167
3.4	最適化	175
3.4.1	基礎分野としての最適化	175
3.4.2	連続的最適化	182
3.4.3	離散的最適化	187
3.4.4	最適化計算	192
3.4.5	最適化モデリング	197
3.4.6	最適化ソフトウェアと応用	204
3.5	ネットワーク論	212
3.5.1	複雑ネットワークおよび総論	212
3.5.2	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	218
3.5.3	ネットワークに関する離散数学	222
3.5.4	ネットワーク解析用ソフトウェア	227

専門用語説明	234
（付録 1） 索引	241
（付録 2） 執筆協力者一覧	245
（付録 3） 研究開発の俯瞰報告書（2013 年） 全分野で対象としている研究開発領域一覧	247
謝辞	

1. 目的と構成

1.1 俯瞰報告書作成の目的

この報告書は、2013年3月に発行した「研究開発の俯瞰報告書 システム科学分野（2013年）」の第2版として、当該分野の俯瞰結果を一部改訂し、とりまとめたものであり、JST 研究開発戦略センター（CRDS）が作成する俯瞰報告書（全7冊）の一部をなすものである。

俯瞰報告書は、CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握している研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS 独自の視点でまとめたものである。

俯瞰報告書は、各分野における研究開発の方向性や主要な研究開発領域、さらに国際的なわが国のポジションを把握するのに役立つ。また、複数の報告書を使うことで、複数分野にまたがる新しい切り口からの研究開発戦略を立案することにも役立つ。俯瞰報告書は、一義的には、CRDS における研究開発戦略立案に活用されるが、当該分野の動向を深く知りたいと考える政治家、行政官、企業人、学生などに大いに役立つはずである。また、研究者にとっても、自身の専門分野を超えた範囲の状況を知る上で有益である。

1.2 構成

社会ビジョンの実現および科学技術の基盤充実とフロンティアの拡大を目指した研究開発戦略を提案するためには、科学技術に関する様々な研究開発全体の俯瞰が必要である。CRDS では、研究開発が行われているコミュニティ全体を便宜的にいくつかの分野に分け、その分野ごとの研究開発状況を整理し可視化した俯瞰報告書を概ね2年に1回の頻度で、作成することとしている。

具体的には、①環境・エネルギー分野、②ライフサイエンス・臨床医学分野、③電子情報通信分野、④ナノテクノロジー・材料分野、⑤システム科学技術分野の5分野である。これらは、CRDS の内部組織であるユニットに対応している。「システム科学技術分野」は、これまで、わが国の科学技術政策において、特に重視されてこなかったが、CRDS としてその重要性に着目し、1分野としてとりあげている。

俯瞰報告書本編は、上記5分野別に作成される。更に、本編のほか、データ編として「データで見る俯瞰対象分野」、「主要国の研究開発戦略」が付随し、合計で7冊からなる。

以下、本報告書の「2. 俯瞰対象分野の全体像」では、CRDS が俯瞰の対象とする分野をどのように設定し、俯瞰の枠組をどう設定しているかの構造を示し、そこから当該分野の主要研究開発領域をどう導出したかを説明しており、いわば我々の活動の土俵を定め、それに対する認識を明らかにしている。また、対象分野の歴史、現状、および今後の方向性についていくつかの観点から全体像を明らかにしている。この章は、その後の章のコンテンツ全ての総括としての位置づけを持つ。

「3. 研究開発領域」では、俯瞰対象分野に存在する研究開発領域の現状を網羅的にリストアップして概説する。専門家との意見交換やワークショップを通じて、研究開発現場で共有されている情報をできるだけ具体的に記録する。また、研究開発領域ごとに主要国（原則、日本、米国、欧州、中国、韓国）を対象とした国際比較も行っている。

2. 俯瞰対象分野の全体像

2.1 分野の範囲と構造

2.1.1 分野の範囲

1) システム科学技術について

システム科学技術の誕生は、他の理工学の諸分野に比較すると新しく、最近急速に成長しつつある分野である。システム科学技術が対象としているのは言うまでもなく「システム」である。「システム」という言葉は日常語としても頻繁に使われており、それだけにシステムは人間にとってある意味では極めて身近な存在であるが、システムを実際に見たり触ったりすることはできない。システムは、その機能がわれわれに開示されるときに初めて具体的にその存在を実感できるような、いわば抽象的な機能としての存在でもある。

システムをアカデミックな文脈で初めて使ったのは、アイザック・ニュートンである。ニュートンの著書「プリンキピア」の第3巻は「世界システム」というタイトルである。ちなみに第3巻は運動の法則が述べられた、「プリンキピア」の中で中核となる部分である。技術と文明が進化し、技術が社会に浸透するにつれて社会のさまざまな機能がシステム化されることによって効率化され、効率化がさらなるシステム化を生み出す相乗効果により世界のシステム化が急速に進んだ。特に情報技術（IT）はシステム化を強力に推進するツールとなった。

このように「システム」が技術の重要な位置を占め、システムが付加価値を生み出すことが明らかになると、システムを対象とする科学技術が生み出されるのは自然の成り行きである。こうしてシステム科学技術が誕生した。2.2 節で述べるように、初期のシステム科学技術は既存のシステム（自然、社会、言語、制御、生産技術など）をシステムとして定位する作業と、複雑なシステムを効率よく作り出すための実践的な技法の集積であった。やがて力点はシステムを機能的な側面からとらえ、機能を実現するシステムを構築するための手法の研究に移った。言い換えれば、システムの解析から構成に力点をシフトさせることによって、システム科学技術はその重要性を獲得したといえる。

したがってシステム科学技術が対象とするシステムは、ニュートンがとらえた宇宙システムのような社会の外にあるシステムではなく、人間が技術を通して作り上げる「機能を実現するために要素を適切に結び付けた複合体」である。この定義はシステム科学ユニットが2010年に提出した「戦略提言：システム構築による重要課題の解決に向けて」で採用したシステムの定義である。システムの定義は他にも数多くあるが、それらはいずれも対象を全体（複合体、総体）とそれを構成する要素に分け、それらの間の関係を強調している。部分と全体の関係こそはシステム科学技術のもっとも強い関心事であり、システム科学技術のさまざまな研究課題を生み出す母体であり、科学的な研究の原点であるといつてよい。

システム科学技術は、望ましいシステムを構築するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体である。すでに数多くの体系化された研究領域が生み出されてきており、それらの研究領域で得られた成果はシステム構築のために活用されている。制御、最適化、モデリングなど第3章で詳しい俯瞰と評価を行う具体的な分野である。これらの体系的な分野はシステム構築の特定の段階では重要ななくてはならない技法や手法を提供する。

これらはシステム構築の全プロセスにおける特殊な局面で必要となるので、いわば「スナップショット」的な技術であるといつてよい。しかし残念ながら、これらの体系化された研究領域の知識を動員するだけではシステム構築という困難な課題を達成することはできない。特に構成しようとするシステムが巨大かつ複雑で、しかも社会に実装することが要請されている場合は、どんなシステムにでも適用可能なシステム構築を達成する一般的普遍的な手法や手順が存在するわけではない。対象としているシステムの特殊性に依存する具体的な判断や処理を行うことを通じて、システムを組み上げていく必要がある。具体性を越えてシステム構築に至る全体俯瞰は「設計」の作業にほかならないが、現状では一種の直感に頼るアドホックな技法の域を出ていない。

しかし、システムを取り扱う科学技術である以上、普遍性を抽出し、一般的な手法を確立することは必要である。すでに体系化されたいくつかの領域は、その普遍性の抽出に成功した例といつてよい。普遍性と特殊性の相克がシステム科学技術の活力の源でもある。

2) システム科学技術の特徴

システムはほとんどあらゆる研究分野で意味を持つ概念であり、それぞれの分野で多様な役割を演じている研究の手段であり対象である。したがってシステムを取り扱うシステム科学技術は、ほとんどすべての研究分野と関連し、それぞれの分野の研究をつなげる役割を担っている。すなわち、システム科学技術はすべての科学技術の分野とシステムという意味で接点を持つきわめて広範な科学技術の領域である。この共通性は、科学技術の個々の分野を統合するモメントを生み出す。このことは現代の科学技術にとって重要な意味を持つ。分野の細分化は避けられない科学技術のトレンドであるが、システム科学技術はその細分化に抵抗し、分野の統合を図ることによって成立する科学技術である。このシステム科学技術の特徴は、システム概念そのものに内包されている。つまり、システムは異なる要素を統合してできあがる全体だからである。分野横断性と知の統合への強い志向はシステム科学技術の重要な性格である。

システム科学技術分野では、モデルが重要な役割を果たす。対象のモデルを計算機内に構成し、そこで作られた「モデル空間」と現実世界との間の緊張関係がシステム科学技術の研究課題を形成し、その発展を駆動する。特に、モデルが実世界をどれくらい正確に記述し、したがってどれくらい精度よく実世界で起こる事象を予測できるか、はシステム科学技術の評価を決める試金石となる。

システムを効率的にしかも適切に社会に実装するには、システムを構想し、システム構築の困難さを洞察し、複雑さを分解や統合を駆使して手際よく処理し、ステークホルダの間の調整を行うなど、さまざまな成熟した設計のためのスキルが必要である。このようなスキルの基盤となる技法はいくつか提案されているが、体系的な科学はまだ残念ながら存在しない。したがって現状では、実装を目標としてシステム構築の全プロセスを見通すための研究をあらかじめモデル空間で行うことによって、その困難とシステム構築にかかわるリスクをなるべく軽減することが必要である。そのような研究を意識的に行うことによって、システム構築のための科学的な基盤についての知見を集積することが可能である。このような研究のカテゴリーをシステム構築戦略研究とよんでいる。システム構築戦略研究を通して要素研究とシステム研究が統合される。

3) システム科学技術の役割

よい製品を作ろうとすればそれをよいシステムとしなければならない。製品を効率よく作るためには生産システムを高度化しなければならない。よい組織や制度を作るためにはそのシステム化がキーポイントとなる。このように、今の技術や社会はシステム化への志向が強い。しかも作られるシステムは極めて複雑で大規模なものが多い。システム構築は大規模化と複雑化、そしてそれがもたらす不確かさとの闘いであるといっても過言ではない。そしてすでに述べたように、システム化を担う科学技術はまだ未成熟である。特にわが国では要素技術は強いがシステム技術は未熟であり、それが日本の技術のさまざまな弱さの原因となっている。優れた要素技術もそれがうまく設計されたシステムの部分として組み込まれなければそれを実社会で生かすことができない。

システム科学技術の振興を通して日本の科学技術の弱点である要素研究のやりっぱなし、面白そうのできそうなテーマのつまみ食い、などを克服し、科学技術が社会的経済的な価値を生むこと、すなわちイノベーションの実現に日本の科学技術の活力を誘導することができる。

4) システム構築戦略研究

システム科学ユニットは、システム科学技術の実践的な側面を抽出し、システム科学技術と社会的課題を結びつける研究のカテゴリーとして「システム構築戦略研究」を定式化した。「システム構築戦略研究」はシステム構築に実際に着手するためにあらかじめ行うべき手順を示したものだといえる。ただし、実際のシステム構築に着手した後も、評価、検証の任に当たるという意味で、システム構築全体をスーパーバイズする役割も負っている。以下に、システム構築戦略研究の概要を示す。詳しくは戦略提言「システム構築による重要課題の解決にむけて～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～」(CRDS-FY2010-SP-04)を参照されたい。

図 2.1 は、システム構築戦略研究とシステム科学技術の関係を示したものである。具体的なシステムを構築する際のシステム構築戦略研究の手順は、

- (1) システムの全体機能の決定
- (2) 全体機能を達成するために必要な要素的機能および要素技術の決定
- (3) 要素を全体に配置するシステムアーキテクチャの決定
- (4) 与えられた資源のもとで全体機能が達成されるかどうかの検証
- (5) 実施計画の策定
- (6) 現在あるいは将来にわたって変動する環境下で機能を維持できるかどうかの検証

のように概略を説明できる。この手順を進めるにあたって、図 2.1 中に示しているサブシステムへの分解と構造化、システム特性の定量的評価など、学問的な研究課題が抽出され、それをシステム科学技術が担い、それによってシステム科学技術自身も発展する。

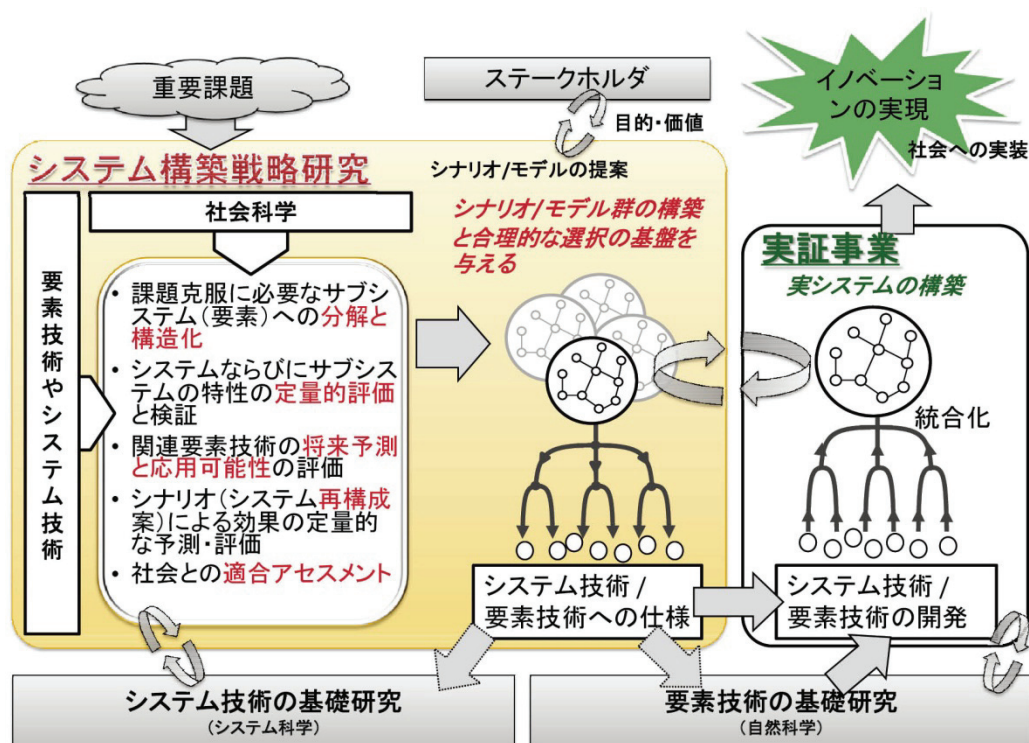
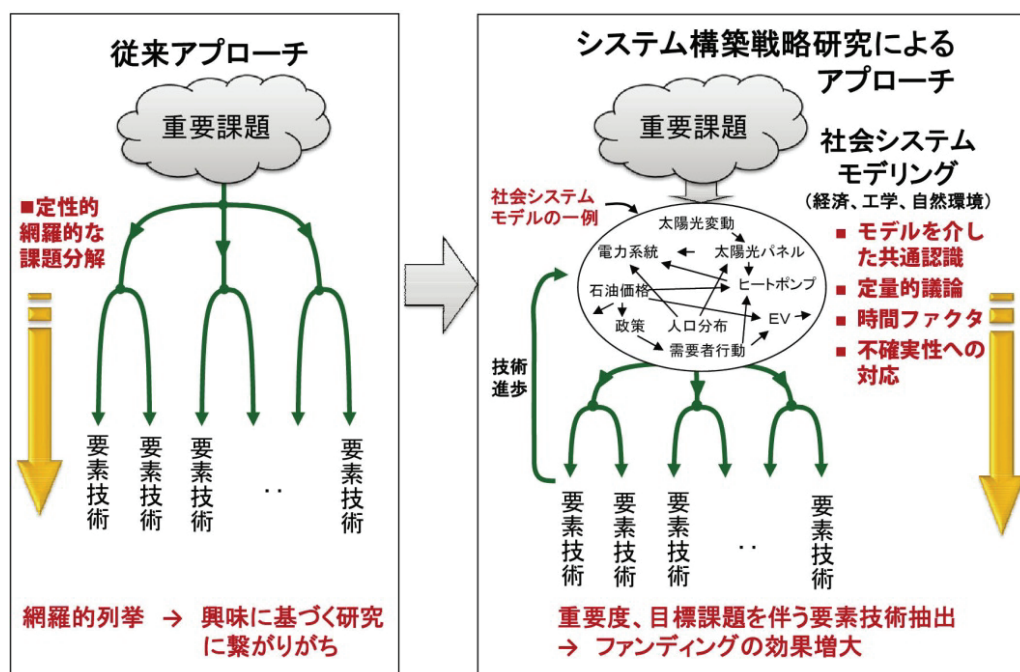


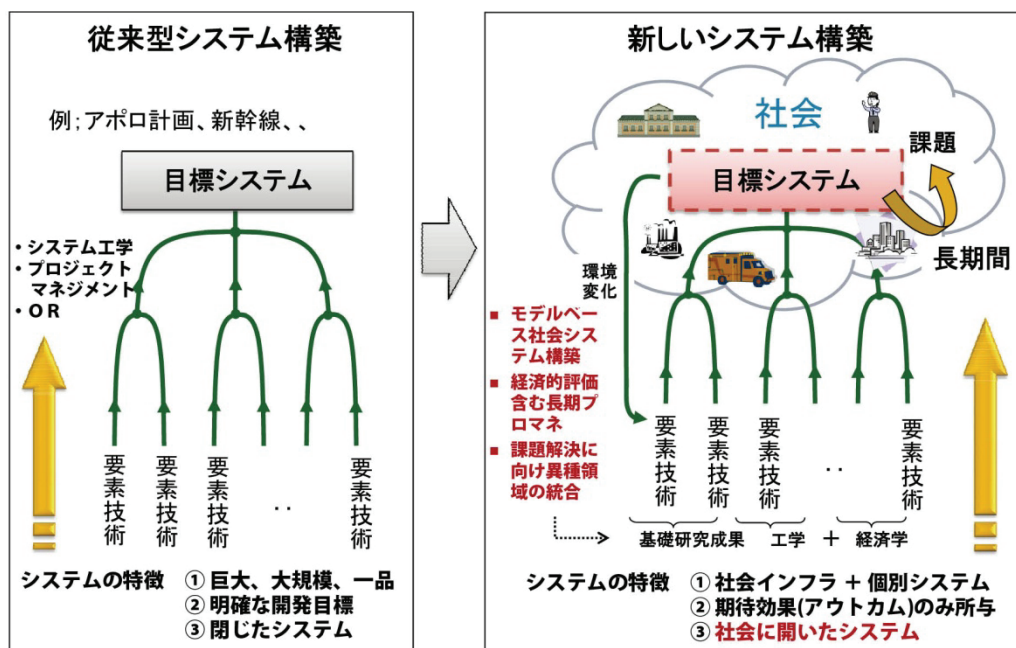
図 2.1 システム構築戦略研究

図 2.2 は、具体的なシステムを構築する際のシステム構築戦略研究の手順を、システム構築戦略研究が行われない場合のシステム構築と比較して示したものである。システムを構築する際はこのカテゴリーの研究がどうしても必要である。

現在、「システム構築」といえばソフトウェアシステムの構築をさす場合が多い。この場合、システム構築戦略研究にあたる部分がすでに実際に実務として行われている。(1)は「要件定義」、(2)はライブラリの選定、(3)はプログラム構造化、(4)は機能評価、(5)はプロジェクト・マネジメント、(6)は検証試験、である。ソフトウェアの場合と違い一般のシステム構築はハードウェアを含むのでそれぞれのステップに比較にならないほど多くの手間（分析、予測、評価など）が必要になる。この研究のカテゴリー自体がまだ進化の余地がある。



(a) システムの分析



(b) システムの設計

図 2.2 複雑で多様な社会でのシステム構築におけるシステム科学技術、システム構築戦略研究の役割

2.1.2 俯瞰の枠組

1) システム科学技術の位置づけ

システム科学技術と既存の科学技術との間の関係は、「システム」というシステム科学技術の対象の一般性、諸分野を統合する契機をはらむ横断的な学術としての性格、さらにそれとは裏腹にシステムの計画立案から実装までをパッケージとして一貫して行うことのできる実用的な側面、を考えると極めて複雑な側面を孕んでおり、位置づけを端的に表現することは至難の業である。あえてそれを行ったのが図 2.3 である。ここでは、根本的な基盤である数学から社会的期待の実現までの科学技術分野を網羅し、その中でシステム科学の位置づけを明確にしている。

縦軸には、認識と設計という観点を設定した。これは俯瞰図で採用した、課題の認識と解決に向けたシステムの設計という枠組みと対応させたものである。また横軸には、対象の複雑性という観点を設定した。これは、研究対象が基礎的・特定のであるか、総合的・複合的であるかと対比させたものである。なお、記載した分野名は、科学研究費補助金の平成 20 年度公募より適用されている「系・分野・分科・細目表」[b]における「分野」「分科」を用いている。

図 2.2 においても示したように、システム科学技術は、人文科学、社会科学も含めた諸分野の中で、より複合的な分野において、社会的期待¹の実現に向け、解決すべき課題の認識と課題解決のための設計の双方を結びつけるものとして位置付けられる。より純粋な分野において数学もしくは哲学、中間的な分野において数理科学が果たしているのと同様の役割を、システム科学技術が担っていることを表現している。

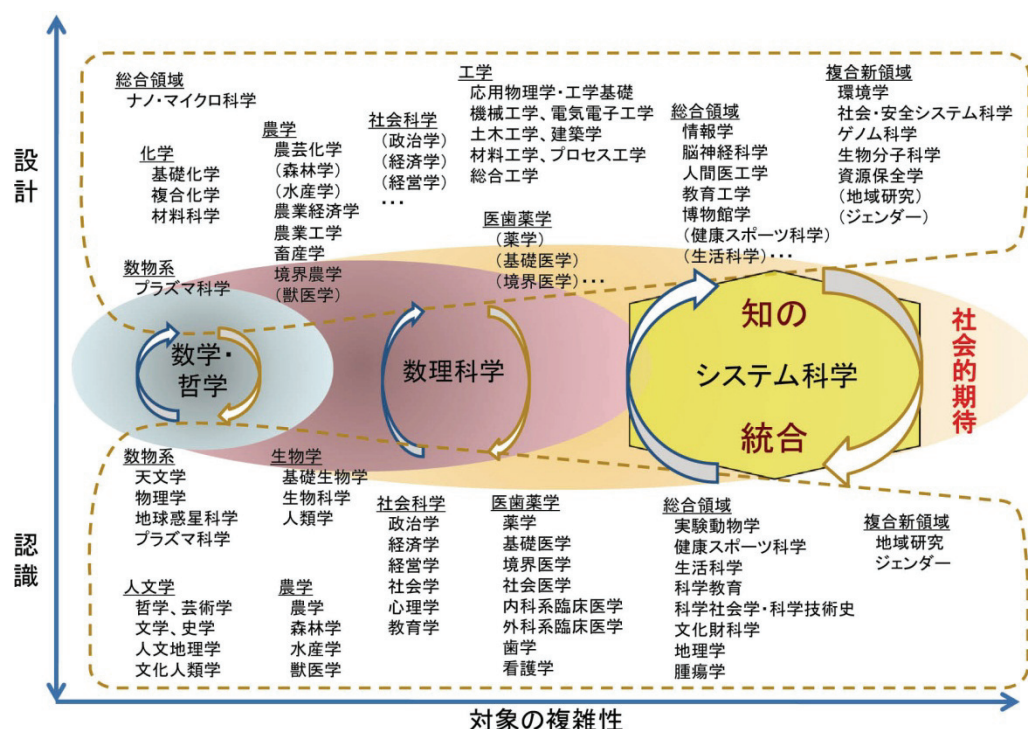


図 2.3 システム科学技術の周辺学問分野における位置づけ

¹ 社会的期待とは、研究課題を社会の価値に結びつけていくために、研究開発戦略の立案段階で研究者の自律的な発意の元で把握しておくべき“社会が何を求めているか”の具体的な内容を言う。

システム科学技術の領域俯瞰に基づいて、本分野の俯瞰区分を、

- | |
|------------------|
| ① システム構築方法論 |
| ② 意思決定とリスクマネジメント |
| ③ モデリング |
| ④ 制御 |
| ⑤ 最適化 |
| ⑥ ネットワーク論 |

の6区分とした。システム科学技術分野に関して、このような俯瞰を行うのは初めての試みであり、これらの6区分は初回にまず優先して調査を行うべき俯瞰区分として、WSやアンケートにおける有識者の意見にもとづいて設定している。上記の6領域に加え、例えば、システム理論や複雑系科学などの方法論も挙げられたが、今後の課題として今回は取り上げていない。また、データマイニング、計算科学、統計学などの方法論は、モデリング技法と関係が深いことから、モデリングの中での検討対象とすることとした。次回以降、俯瞰区分や研究開発領域の範囲は増強していく予定である。

なお、①システム構築方法論については、3章以降の詳細な俯瞰対象とはせず、本章にその方法論の略を記述するのみに留めている。これは、②～⑥の5領域については、すでにある程度確立している学問領域であり、エビデンスに基づいた歴史的考察や国際比較が可能であるが、システム構築方法論に関してはそのような比較が困難なためである。さらに、システム構築方法論には、学問分野としては十分に成熟していても、システム構築へ適用するにはまだ方法が確立されていない分野、例えばゲーム理論や学習なども含まれるが、これらの分野はシステム科学技術との接点に絞った国際比較が困難であるため、検討の対象から除外した。

2.1.3 研究開発領域

以下に、各俯瞰区分における研究開発領域の概要を示す。

①システム構築方法論

「システム構築方法論」は、学問体系としてのシステム科学技術と現実の課題を解決するためのシステム構築をつなぐ方法論として位置づけられるが、システム科学技術の一分野としては未だ確立されていない。特に、現実の社会において対象となるシステムをどのように分析し（認識）、また構成するか（設計）、については試行錯誤の状態を本質的に抜け出していない。

ここで取りあげる方法論は現状では学問領域としては未成熟であるが、システム科学技術の将来の発展に大きく貢献することが期待され、また将来の俯瞰対象となる可能性が高いものである。一方で、その適用がシステム構築の段階や対象とするシステムの特性などに依存するため、やや雑多な感が免れない。このような状況ではあるが、それらは以下の3つのカテゴリーに大別される。

- (i) 現実の社会とシステム科学技術をつなぐために必要となる方法論
- (ii) システム科学技術の方法論として開発されてきたが、未だ方法論としては確立して

おらず体系化されていない方法論

- (iii) システム科学技術以外の分野で確立された方法論であり、システム科学技術の方法論としても期待されているが、まだシステム科学技術としての位置づけが明確になっていない方法論（ゲーム理論や学習など）

なお、(iii) については 2.1.2 節の俯瞰の枠組みの文末に記述したように、将来の検討課題として残し、本俯瞰での対象とはしないことから、ここでは、(i) および (ii) について取りあげる。

- (i) 実社会とシステム科学技術を繋ぐために必要となる方法論

実社会の問題とシステム科学技術をつなぐ第一歩は、問題の発見やそのシステム構築としての定式化であろう（図 2.4 における認識のプロセス）。ここでは、問題そのものを発見する発想法やその記述・表出法が対象となる。また、問題を定式化する際の要求条件、制約条件、境界条件を設計する方法論が対象となる。

一方、システムを実社会に適用する際には（図 2.4 における設計のプロセス）、システムの実装を確実にするための方法論が必要である。これには、複数のプロジェクト全体を管理するプログラム・マネジメント、個々のプロジェクトを対象とするプロジェクト・マネジメント、その詳細を対象とするプロセス・マネジメントがある。また、システムの設計から廃棄までを対象とするライフサイクル管理手法などが存在する。また、特に、人間社会系のシステムでは、関与者の意思決定支援や合意形成手法、コミュニケーションのための手法を確立することが重要な課題となる。さらに、システムが社会に実装された場合の応答を評価するための感度解析やリスク評価も課題として挙げられる。

なお、ある機能を与えたときにその機能を実現する要素を組み合わせるための設計手法は、例えば、ソフトウェア開発や創薬、新素材開発においては最も重要な課題となっている。既存の要素の膨大な組み合わせから新たな機能を実現するための方法論としては、さまざまな探索手法が開発されている。このような探索手法では、例えば特定の分子組成の組み合わせをひとつの状態と定義し、分子組成が変わるごとに状態が遷移することで新しい状態が得られると考える。新しい薬品など目的の機能の分子組成の組み合わせが得られたら探索が成功する。新しい組み合わせが生成され、その妥当性が検査されるプロセスが継続する意味で、このような手法を生成検査法と呼ぶ。効率のよい生成検査法は種々の最適化アルゴリズムと密接な関係がある。

要素の組み合わせに注目する設計論が比較的整備されているのはソフトウェア開発の領域である。ウォーターフォール型開発、オブジェクト指向開発、エージェント指向開発など、システム開発の要請に対応してさまざまな方法が提案され、試みられている。しかしながら、適用方法は対象タスク領域により異なり、社会に開かれた設計問題全般に使えるものとはなっていない。システム構築における理論的かつ合理的な設計法は必ずしも確立してはおらず今後の研究課題である。

- (ii) システム科学技術の方法論として開発されてきたが、未だ方法論としては確立しておらず体系化されていない方法論

システム構築手法として開発されてきた方法論は、古くはシステムダイナミックス（SD）

をはじめとして少なくない。それらの多くは本俯瞰においても3章で記述される分野に包含されている。しかしながら、システムが実社会を対象とする場合、特に、医療・保険問題などの人間や社会にかかわるシステムが対象となる場合には、必ずしも確立した方法論は得られていない。ここでは、人間・社会を対象としたシステム構築方法論の一例として、ソフトシステム方法論（SSM）を対象として取りあげる。ソフトシステムという言葉は、主として人工物を対象として発展してきたハードシステム方法論と対比して使用される。

SSMは、対象を客観的に把握できるような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というより、対象が不分明で不確かさが多く、認識に主観を含まざるを得ないような場合に部分的にでも対象認識を深めようとする。問題解決のプロセスを、一連のつながりの形とはせず、むしろ、提携の形成・合意形成・討議・交渉などを通じて意思決定へのかかわりが生み出されると考え、この過程を積極的に取り扱うことを重視する。また、SSMは複数の関与者がかかわる複雑な意思決定状況において、討議や自由討論により、彼らの相互理解と学習を支援する。

すでに2.1.1節の4)で述べたシステム構築戦略研究は、現実のシステム構築の場でシステム構築方法論を展開し、その発展を図る枠組みである。現実のシステム構築にあたっては、システム構築戦略研究の枠組みの中で認識のプロセスと設計のプロセスを行き来しつつ試行錯誤しながらさまざまな方法論を試みることが多い。この大きな理由として次の3点が挙げられよう。1) 実社会における変化が激しいために、地球温暖化対策のような自然と社会とが絡み合う問題について、システム要求を明示化する仕様策定に時間を十分にかけられないこと。2) 一方で、水資源問題のような場合については、既存のシステムはすでに巨大化・複雑化しており、それらと整合性を保ちつつ新しい機能を追加しなければならないこと。3) 医療・保険制度のように、既存のコンポーネントの組み合わせのみで実現できないようなシステム化問題が実社会には数多く存在すること。

しかしながら、従来も認識と設計の試行錯誤の過程の中から、新たなシステム科学技術が発展してきたのも事実であり、この過程から今後の方法論が生まれるものと期待される。

②意思決定とリスクマネジメント

システム科学技術の特徴のひとつである、対象を計測し、モデル化し、さらにその評価や予測に基づいて、対策立案、施策にまで結びつける横断性を端的に表す分野として「意思決定とリスクマネジメント」分野があげられる。図2.5に俯瞰図を示した。意思決定は、個人生活のみならず組織や社会全体にとって極めて重要であり、これまでに、意思決定の研究は、多様な学問分野で進められてきている。これらの研究は「意思決定科学」とも総称されるものの、その多様性ゆえ、各分野に共通の基盤となるような体系が整備され一つの学問分野として確立されているとは言い難い状況である。こうした背景から、ここでは意思決定分野として、経済・金融・公共・経営に関するリスクマネジメントを対象とする。

リスクのある対象に対して適切な意思決定を行うためには、対象のリスク特性を「発生頻度」と「重大性」という二軸を中心に、金融機関や一般事業会社が内包する個々のリスク要素のみならず、それらが結びついた複合リスク、もしくは統合リスクを定性的あるいは定量的に把握し、評価することが重要である。こうした点から、金融領域と保険領域で個別に取り扱われていたリスクマネジメントが最近では統合した概念で取り扱われつつある。また、

ネット技術の革新により、以前よりもはるかに容易に大量のデータを収集することが可能となったことから、大量のデータをさまざまな意思決定とリスクマネジメントに活用する動きが実業界で広がりを見せている。経済・金融市場のグローバル化と複雑な金融商品の登場に加え、さまざまな個々のリスクとそれらの統合リスクを評価、把握するための莫大なデータが入手可能な状況になりつつあることから、それらビッグデータから効率的にリスクを算出するための数値計算アルゴリズムの開発をハードウェア開発と共に進めていくことが重要な研究領域となっている。

以上の点を踏まえて、意思決定とリスクマネジメントの重点的研究領域として、①意思決定、②リスク概念と尺度、③統合・複合・その他リスク、④市場リスク、⑤信用リスク、⑥リスクマネジメントの数値計算を設定する。



図 2.5 俯瞰図（俯瞰区分レベル）意思決定とリスクマネジメント

③モデリング

システム科学技術において、現象や行動のモデル化プロセス自体を対象とする横断的学術領域が「モデリング」である。対象の適切なモデル化は、現象の制御、将来予測、科学的意思決定の前提であり、多くの学術的、社会的課題は、パラメータなどモデルの要素の条件付き最適化を通じて達成される。

図 2.6 に示した俯瞰図では、モデリング・プロセスを対象分野固有のモデル表現の知を活用して現象の分析を深化させる順問題的フェイズと、数理科学領域（特に最適化数理）の支

援を受けて課題解決に資するモデルを設計・合成する逆問題的フェイズとの2つに大きく分けた。

さらに、順問題フェイズを、対象の「表現の選択・設計」、モデルの「データとの同化」の2プロセスとした。多様な現象の「表現の選択・設計」にかかわる横断的研究開発領域として、現象の数理科学的表現を目指す①先端的数理モデリング、現象の計算科学的表現を目指す②エージェント・ベース・モデルとマイクロ・マクロ連携、現象の帰納的表現を目指す③統計モデリングの統合、に加えて④動的統計モデルとその適用を設定した。また、「データとの同化」に関しては、超大規模不完全データに対する推論技術やデータ設計などの高度化を目指す⑤データ同化、⑥機械学習を設定した。

また、逆問題フェイズを、現象や行動が因果ネットワーク上に複雑に絡む対象に関する学術・社会課題解決システムのモデル表現の設計、すなわちアーキテクチャーと合成を支援する「合成と最適化」、合成されたモデルの「妥当性・信頼性評価」の2プロセスからなるものとした。「合成と最適化」にかかわる研究開発領域として、社会課題解決システム合成戦略を導く、⑦モデル合成による社会課題解決の展望、システム合成方法論の数理科学的高度化を目指す⑧モデルの正則化・安定化・最適化を設定した。また、「妥当性・信頼性評価」と合成との境界プロセスに⑨モデル統合に基づくシステム設計とその評価、そして「妥当性・信頼性評価」自体の基盤統計数理科学的高度化を目指す学研究開発領域として⑩モデル評価技術を設定した。

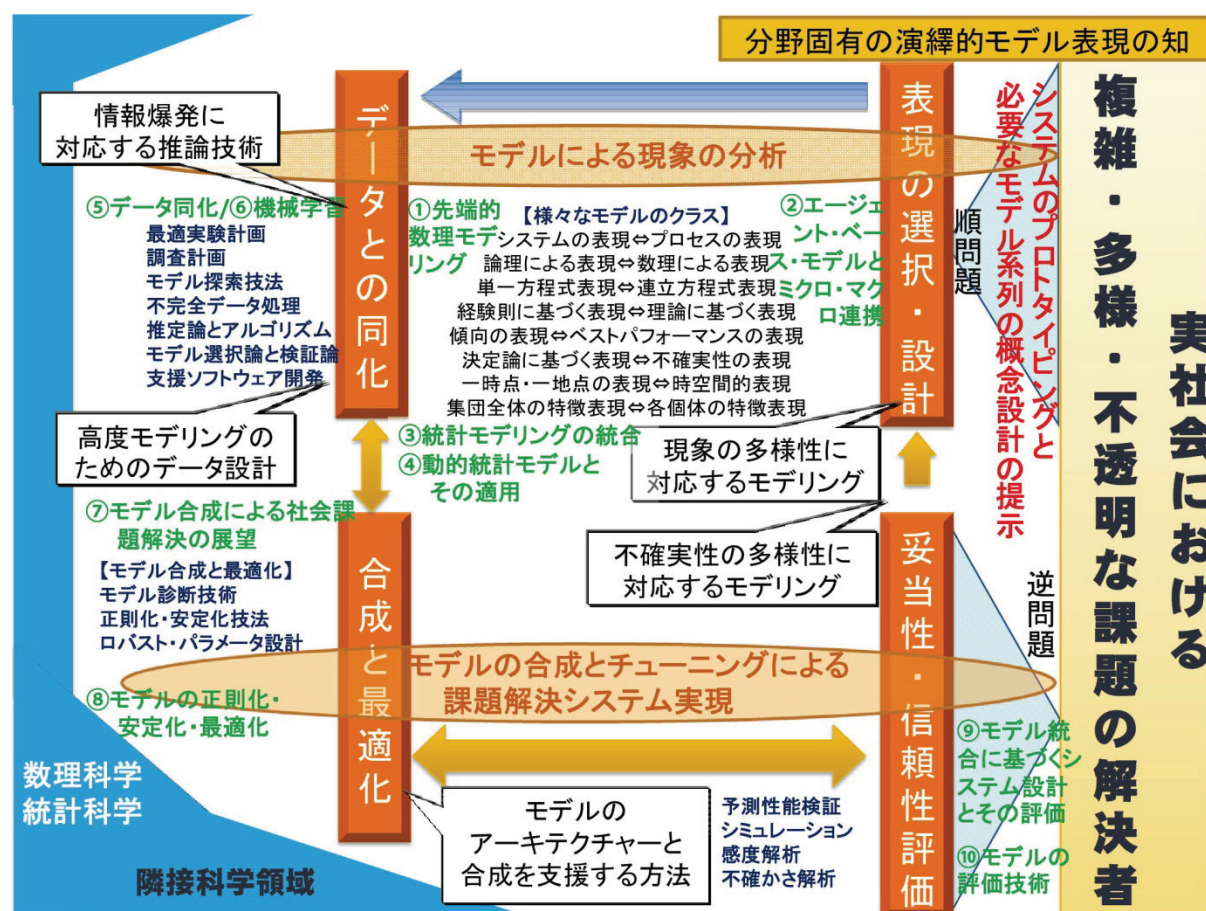


図 2.6 俯瞰図（俯瞰区分レベル） モデリング

④制御

「制御」は、電気、機械、化学、航空、自動車など、あらゆる分野で個別システムに求められる制御課題を解決していく過程で発展し、それが抽象化されることによって、どの対象システムにも普遍的に使える理論が形成されてきた領域である。したがって、数理科学にほとんど近いような研究から、現場で制御機器の調整を行うような開発まで、非常に幅広い活動を含む。

図 2.7 に示した俯瞰図では、実社会における課題を定式化してモデルを表現し、解析、制御系設計を経て、安全性や信頼性などを評価しながら、システムの実装・運用につなげるという、制御系設計を基軸として、関与する研究課題を記載している。研究開発領域は、基本的な研究課題群に近年注目され始めている新しい研究課題を付け加えて整理している。隣接科学領域も併せて示した。

制御は、実社会における課題、個別の対象や個別の工夫の必要性を核として生まれる課題解決型の学問領域である。現代の課題の特徴は、対象とするシステムの大規模化、ネットワーク化であり、もう一つの特徴はシステム内部の不確かさの増大と、システムと変動する環境との接触面の拡大である。今回の俯瞰における研究開発領域は、現代の課題に対するこのような認識に基づいて、制御俯瞰図の基軸である制御系設計の領域から選んだ。①「学習制御／適応制御」、②「ロバスト制御」、③「最適制御／予見制御／予測制御」、⑨「制御の基盤としてのシステム理論」は制御の基本的な研究開発領域であるが、現代の課題の解決に向けた新しい展開が始まった領域でもある。④「分散制御／分布制御」、⑤「合意・同期・被覆制御」、⑥「大規模・ネットワーク制御」はシステムの大規模化、ネットワーク化に伴う制御の課題に直接挑戦している研究開発領域である。この三つの領域は重なる部分もあるが、分散／分布など制御形態・構造に着目する「分散制御／分布制御」領域、新たな制御機能の実現を図る「合意・同期・被覆制御」領域、対象システムの固有性に重点を置いた「大規模・ネットワーク制御」領域と分類できる。⑦「確率システム制御」、⑧「故障検出／信頼性設計」はシステムの不確かさという現代の課題の解決に向けた研究開発領域である。

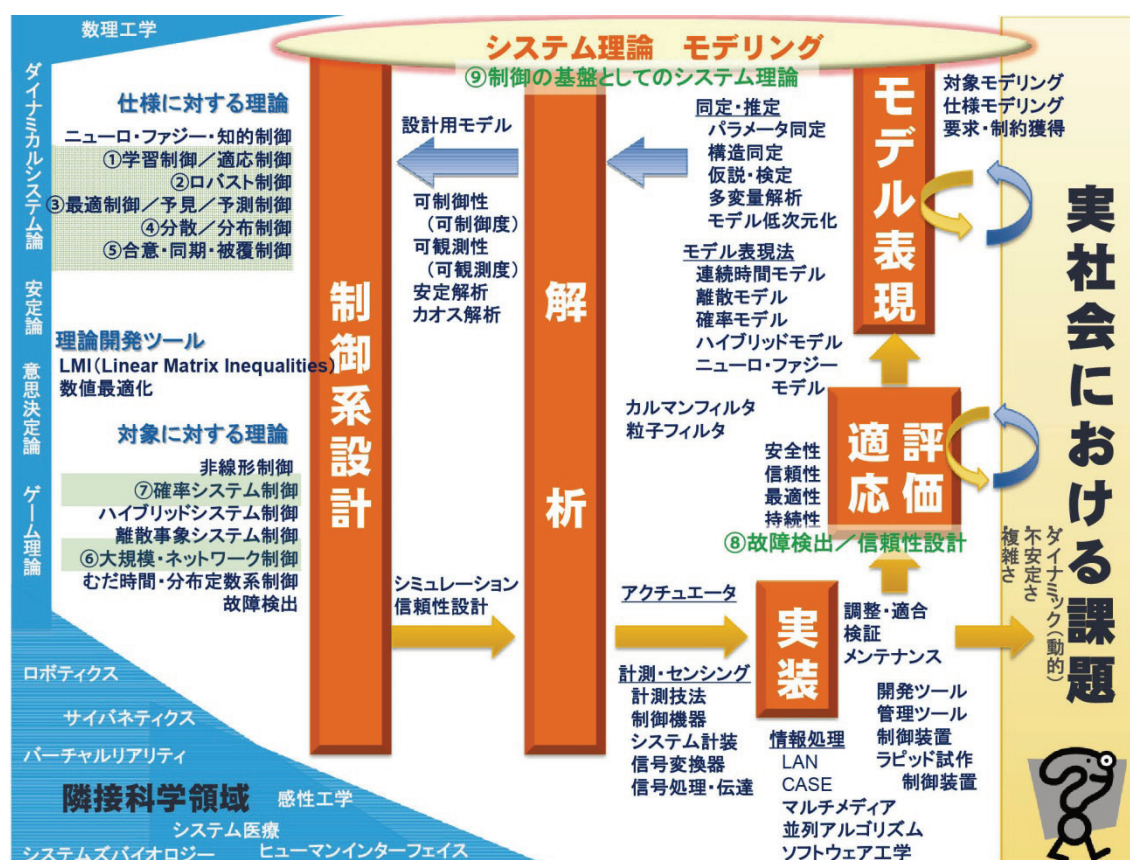


図 2.7 俯瞰図（俯瞰区分レベル） 制御

⑤最適化

「最適化」という分野は、歴史の古い分野ではあるが、近年、計算機の発展と相俟って急速に発展し、現在、システム科学技術も含め、あらゆる科学技術の基盤となっている。

最適化においては、図 2.8 の俯瞰図にもあるように、実社会における課題（最適化を必要とする実問題）を定式化してモデルに表現し（この際、さまざまな最適化モデルと呼ばれる規範モデルが準備されており、通常これらの規範モデルに表現する）、そして、これらの規範モデルに適した最適化アルゴリズムを利用して最適解を求め、その解を課題に照らして評価し、必要があればモデルを改良する、という流れで課題解決が行われる。最適化分野の研究開発領域としては、この流れを踏まえて、以下の 6 つの領域を設定している。まず、最適化分野の基本的な研究開発領域として、②「連続最適化」（連続変数の最適化問題とその解法の研究）、③「離散最適化」（整数変数を扱う整数計画法、グラフやネットワークに代表される離散構造を扱う組み合わせ最適化の研究）。つぎに、実社会の複雑かつ大規模な最適化問題に対応するための研究開発領域として、④「最適化計算」（複雑かつ大規模な最適化問題を解くための大規模計算技術の研究と開発）、⑤「最適化モデリング」（実社会の複雑、かつ、曖昧な問題をいかに最適化問題に定式化するかの技術の研究と開発）。また、最適化技術の普及のために重要な研究開発領域として、⑥「最適化ソフトウェアと応用」。さらには、①「基盤分野としての最適化」（最適化分野は、応用分野は言うに及ばず、数学などの基礎的分野とも融合し、科学技術の基礎として発展してきた。この最適化分野の分野融合的な基礎研究を促進する）。

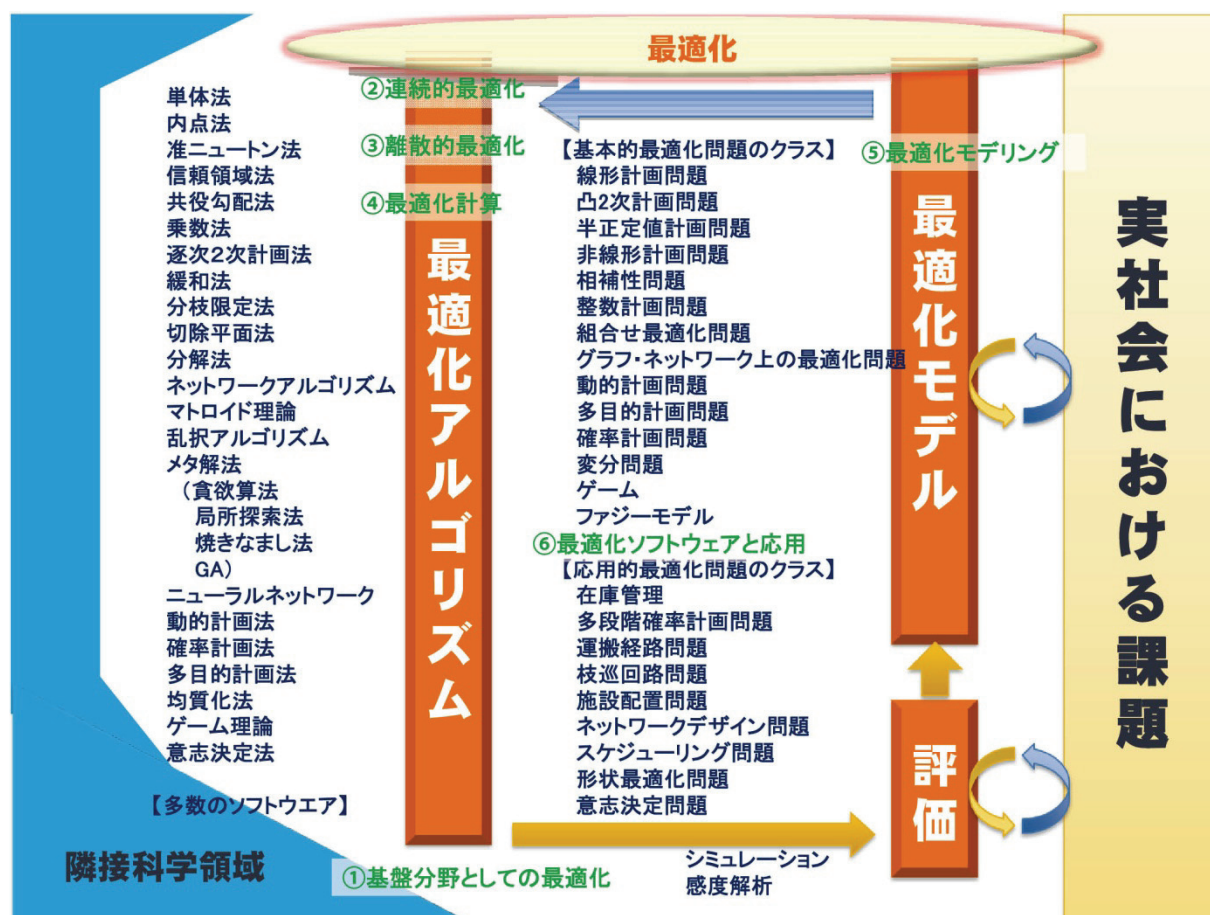


図 2.8 俯瞰図（俯瞰区分レベル） 最適化

⑥ネットワーク論

「ネットワーク」は日常語としては、インターネット、地域コミュニティ、組織、社会などの意味に多義的に用いられ、そのような混同は学問の世界においてすらしばしば起こる。しかしながら、本俯瞰区分の指す「ネットワーク」は、明確に、複数の要素（ノード、頂点などと呼ぶ）と、2つの要素間を結ぶ関係（リンク、枝などと呼ぶ）の集まりからなるシステムを表す。例えば、ソーシャル・ネットワークは人間をノード、二者の間の人間関係をリンクとするネットワークである。インターネットは、コンピュータをノード、ケーブルなどをリンクとするネットワークである。

1998年以降、そのような種々のネットワークの複雑、かつ秩序だった構造が急速に明らかにされ、かつ、さまざまな応用が進んだ。応用分野を問わぬ普遍性と、統計物理学者や応用数学者が多く参入して一挙に分野が発展したことが特徴的である。図 2.9 に俯瞰図を示した。①「複雑ネットワークおよび総論」は、ネットワーク科学の主軸に位置しているそのような発展を概括し、かつ、本俯瞰区分の総括を行う領域である。

近年、多くの研究開発分野において大規模データの存在と可用性が認識され、その意義や解析手法が問われている。ネットワーク科学もこの流れの中にある。すなわち、ネットワーク上で収集できる膨大なデータが急速に整備され、その中から有用な情報を抽出するデータマイニングの需要が高まっている。統計科学や機械学習が一般的にこの役割を担うが、それ

らのネットワーク解析に特化したものは、それだけで一研究領域を築いている。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」領域ではこの分野を概括する。

ネットワーク研究の歴史は17世紀の数学にまで遡る。その現代版はグラフ理論と呼ばれ、これを含むグラフに関する純粋数学理論は離散数学、応用数学の主要な一翼を成し、産業応用にも到達している。数学の世界の指すグラフと本稿の指すネットワークは同義である（学術的にはグラフのノードやリンクに量的関係が付されたものがネットワークであり、グラフとネットワークは区別されるが、本稿では敢えて区別していない）。③「ネットワークに関する離散数学」がこの分野を概括する領域である。

ネットワーク研究は、検索エンジン、ソーシャル・ネットワーキング・サービス、人材支援、マーケティング、環境保護、製薬、など多様な分野へと応用されている。個別応用分野の専門家は、通常、ネットワークについては非専門家である。したがって、ネットワーク科学が世の中で有用たるためには、非専門家がネットワークの可視化や指標解析などをグラフィカル・ユーザー・インターフェイスのもとで行えるソフトウェアが必須である。実際に、最近10年程度に限っても新規ソフトウェアの開発、競争、淘汰が健全な形で起こっている。④「ネットワーク解析用ソフトウェア」はこの分野を概括する。

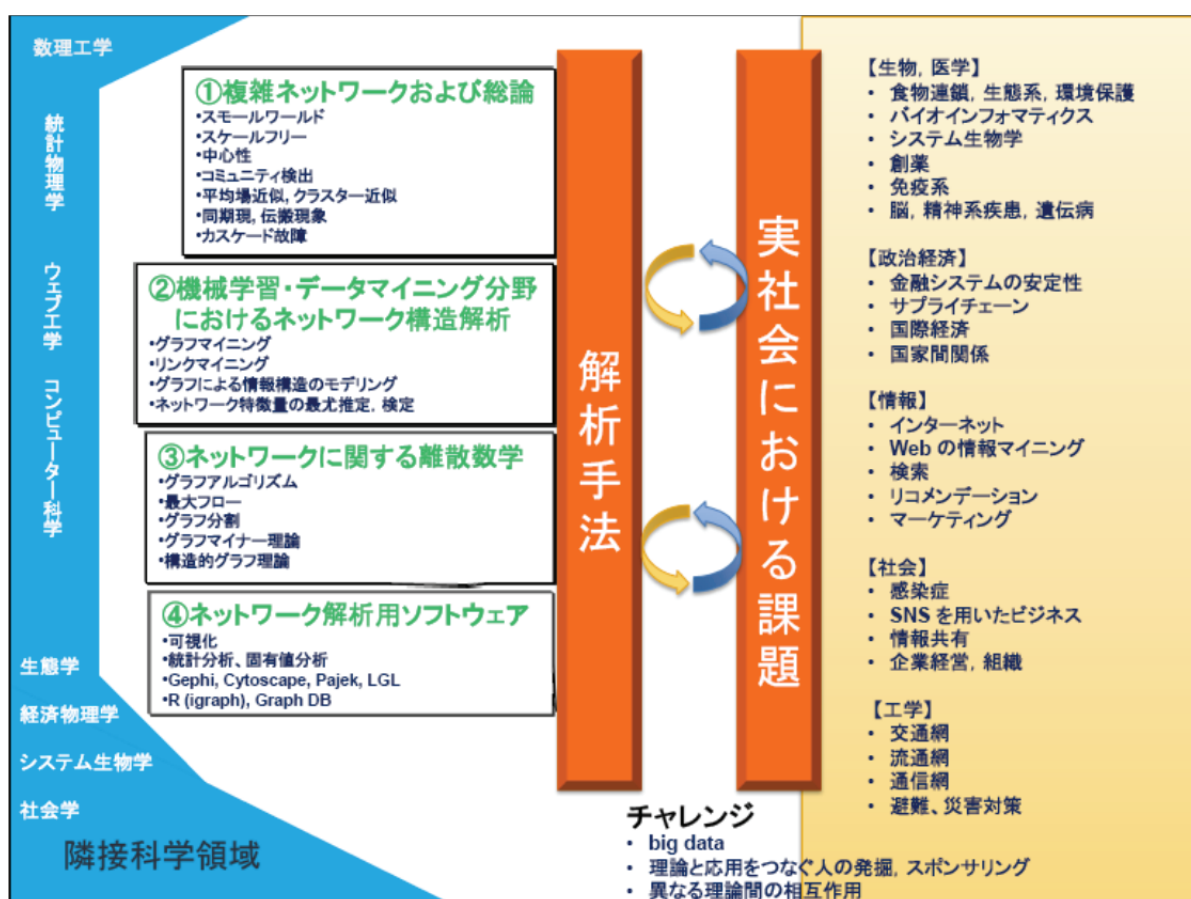


図 2.9 俯瞰図（俯瞰区分レベル） ネットワーク論

2.2 分野の歴史、現状、および今後の方向性

2.2.1 システム科学技術の特徴と技術の進化

2.1 で述べたように、システムをアカデミックな文脈で初めて使ったのは、アイザック・ニュートンであり、自然科学諸分野において、例えばシステムバイオロジーのように対象をシステムとして理解することを目的とする学問分野は多数あるが、システム科学技術が対象とするシステムは、人間が技術を通して作り上げる「機能を実現するために要素を適切に結び付けた複合体」である。

システム技術に最初に注目したのは、カール・マルクスといわれている。マルクスは、当時盛んであった紡績・織布工場の紡績機械が、道具機と原動機、両者を結ぶ伝達機の三つの部分からなることを観察し、機械はシステムとして進化することを予言した。産業革命から始まっていたシステム化は、フォード社の流れ作業方式による自動車の生産で一つの頂点を迎える。自動車部品（要素）の自由な結びつきを可能とするモジュール化と規格化を押し進め、複雑化する自動車（全体）を効率よく生産することに成功した。複雑さに対抗するシステム化がこのとき始まったのである。モジュール化や規格化、またシステムの各要素を秩序付けて複雑なシステム全体を取り扱うことを容易にする階層化は、近代的な生産方式を最も基本的なところで規定する現代技術の象徴である。

研究開発、設計、製造、販売など産業技術のあらゆるフェーズで多様な形で使われるシステム技術の発展は、やがてその体系的科学的な基盤を必要とするようになる。それに応えて1930年代から第二次大戦後にかけて生み出されたのが、モデル化、ネットワーク、制御、最適化、計算アルゴリズムなど、人工物を対象とする一連の科学の成立である（コラム参照）。これら人工物の科学の成立を「第三の科学革命」と呼ぶ人もいる。

第三の科学革命の成熟は、サイバネティックス、情報通信理論、一般システム理論を生み出した。「システム科学」という言葉が学術の世界で最初に使われたのがいつであるかは不明であるが、1945年にルートヴィヒ・フォン・ベルタランフィが「一般システム理論に向けて」（Zu einer allgemeinen System Lehre）と題する論文を発表しており、その前後にはシステム科学という言葉がすでに使われていたと思われる。

表 2.1：第三の科学技術革命の成果例

1931	ブッシュの微分解析器
1931	ブリュンによる回路理論の数学化
1932	ヘイゼンのサーボ機構の理論
1935	ベルタランフィの一般システム理論
1936	チューリングの機械計算の一般モデル
1940	オペレーションズ・リサーチの開始
1944	ノイマンのゲーム理論
1945	ボードのフィードバックの理論
1946	最初の汎用デジタル計算機 ENIAC
1948	ウィーナーのサイバネティックス
1948	シャノンの情報通信理論
1949	最初のプログラム内蔵式計算機 EDVAC

これらを受けて、1950年代後半からシステム研究は発展する。1960年前後に自己組織システムに関する国際会議が幾度か開催されている。65年には、IEEE（電気電子技術者協会；The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.）において、"Systems Science and Cybernetics"のTransactionが創刊され、69年には、ロンドンのインペリアル・カレッジで国際サイバネティックス会議が開催されている。計算機技術の発展とともに、科学の細分化や行き過ぎた還元主義に対する批判を軸としたサイバネティックスやシステム論の主張は、一部の科学者の注目を集めるようになった。そのきっかけになったのは、スイスに本部を置く民間のシンクタンクであるローマクラブが1972年に出版した「成長の限界」である。世界をトータルな動的なシステムととらえ、その状態変動のメカニズムを記述するモデルにもとづいて将来予測を行なったもので、その悲観的な予測結果とともに世界を思い切って簡略化した定量モデルで記述するシステムダイナミクスの方法論の斬新さは学問的にも大きな注目を集めた。同じ年にウィーンにアメリカとソ連の共同イニシアティブのもとに文明社会が直面する課題を研究するために国際応用システム分析研究所（IIASA）が設立された。東西冷戦のさなか、両陣営の研究者が政治的対立を超えて共同研究を行なう研究所ができたことは、緊張緩和にかなりの貢献があったと思われる。システム研究の普遍性を示す象徴的な出来事といつてよい。

その後、システム科学の中心に躍り出たのが「複雑適応系」という新しいサイエンスを中心的な研究対象としたアメリカのサンタフェ研究所である。サンタフェ研究所は、「複雑なシステムを理解するための基本原理の発見」をミッションとして、1984年に設立された。複雑適応系の特徴は、システムを構成する各要素の変化がわかっても、システムとしての動きは予測困難であること、各要素が変化する能力と経験から学習する能力を持ち、自らを自己組織化して環境に適応しようとするなどである。例えば、組織・集団、経済、証券取引、生態系、脳、免疫、細胞、があげられる。この研究所を中心として、21世紀の科学として着目されている複雑系の研究は、新しいシステム科学の必要性を明らかにし、数学、物理、生物、化学、経済などのさまざまな分野に大きな影響を与えた。現代のシステム科学はこの流れの中にあるといつてよく、フラクタル、ニューラルネットワーク、カオス理論、複雑系経済システム等々の分野において成果を上げている。

日本は、第二次世界大戦終戦直後の復興から続く一連の経済成長のなかで、第三の科学技術革命の巨大な成果を取り入れ、一時は世界の先頭を切っていたといえる。例えば、1964年に開業した東海道新幹線は、オペレーションズ・リサーチ（OR）やサイバネティックスなどの積極的な導入努力のもと、先進的なシステム技術が実装され、インフラも車両も電動機もほとんどすべての技術が国産で、敗戦後の日本技術の復活を物語る誇るべき成果である。また、日本電信電話公社（電電公社）が1970年代から1980年代にかけて開発したメインフレームコンピュータ DIPS（Dendenkosha Information Processing System）では、開発を請け負った日立製作所が「ソフトウェア工場」という世界でも初めての試みを実現し、属人的な作業とされていたソフトウェアの生産を規格化とモジュール化を通してハードウェアと同じような手順で作成する方法を定着させた。そのほか、製鉄所や自動車の生産管理、エンジンの電子制御技術、産業用ロボットなど、90年代に初頭までは、日本のシステム科学技術は健在であったが、それ以降次第にその存在感は薄れ、要素科学技術にくらべてシステム科学技術の蓄積・進化が産学ともに貧弱となってしまっている状況にある。

すでに 2.1 で記したように、システム科学技術は、望ましいシステムを構築するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体であり、その主な役割は、要素を結びつけてシステムを作り、要素にはない、あるいは要素を超える、新しい機能を実現することである。システム技術と要素技術がぴったりと寄り添って開発が進み、新しい機器を作り出したり、機器の既存の性能を大きく突破したりした例として、電力供給網や近年のスマートグリッド、工場のオートメーション化、コンバインドサイクル発電、電車運行システム、集積回路など枚挙に暇がない。要素技術とシステム技術の相補的な関係は、システム技術の本質を理解する上で重要である。その一方で、システム科学の研究は、次第に普遍的抽象的なテーマに偏り、この分野の研究者は急速な発展を遂げてきたレーザー、半導体、新素材などの要素技術の発展を視野に入れることができなかった。その結果、この分野の研究者たちは閉ざされた研究コミュニティとみられて一時活力を失っていたが、このことへの反省とともに新しい応用分野へアウトリーチしていく気運が世界的にも高まっている。

科学技術によって生み出された人工物が社会に浸透していく際に、複雑大規模なシステムやネットワークは必ず現れる。現在そのフロンティアは、生物学や脳科学、材料科学に広がり、それぞれの分野に大きなインパクトを与えつつある。システム科学技術によって解決すべき課題は多い。

コラム システム科学の源流

制御工学は機械工学とほぼ同じくらいに古い工学であるが、制御系の設計法が数学的に体系化されたのは、1932 年のナイキストの安定判別法と、1938 年のヘイゼンによるサーボ機構の理論が提案された時期である。また、ボードは当時ベル研究所の発明として広帯域の電話回線に用いられていたフィードバック増幅器の設計理論を数学的に体系化し、フィードバックという言葉を定着させた。フィードバック制御の理論はやがてウィーナーによってサイバネティクスの基本原理に取り上げられ、人工物科学の中心的な位置を占めるようになった。戦後、制御工学とそれを支える理論は長足の発展を遂げ、オートメーションとそのロボット化の理論的な基礎を与えるとともに、鉄鋼を含む大規模な装置の設計と運用のキーテクノロジーとして活躍している。

同じく 1930 年代、実在する大規模な工学系ネットワークの問題を初めて解き、その後のシステム科学の進むべき道を指し示したのがヴァネヴァー・ブッシュである。ブッシュは、アナログコンピュータである微分解析機を開発し、送電網の敷設計画案を計算機上でモデル化し、短期的な異常現象が電力網全体に与える影響を計算した。

微分解析機などのアナログ計算機は第二次大戦中にさまざまな形でシステムの問題を解くために使われ、デジタル計算機がその後継者となったことを考えると、計算機科学とシステム科学技術は切っても切れない関係にある事がわかる。計算機科学の父と呼ばれるアラン・チューリングは、チューリングマシンで「アルゴリズム」と「計算」の概念を定式化し、論理学と数学の融合とコンピュータの誕生に重要な役割を果たした。計算機技術は、通信技術や信号処理技術と結びついて情報技術（IT、あるいは ICT）と呼ばれるようになった。IT は歴史的にも現実の科学技術の姿においてもその深い淵源をシステム科学技術に負っている

第二次世界大戦中には、戦争という最も厳しい状況のもとで、オペレーションズ・リサーチ（OR）、モデルと計算機を用いた最適解の計算とそれに基づく合理的な意思決定の手法が発達した。今日では軍事的関心以外に、ゲーム理論や金融工学など、経済的関心からも OR の応用研究が進んでいる。

2.2.2 社会ニーズや産業ニーズへの対応

わが国では、平成 22 年 6 月に閣議決定された「新成長戦略」において、社会的期待が先導する科学技術研究という概念が明快に打ち出された。これは日本だけではなく、欧米においても同様の傾向である。日本は科学技術の先進国として世界に先駆けて、現在の経済社会に山積する新たな課題に正面から向き合い、その処方などを提示することにより、新たな需要と雇用の創造を目指さねばならない。

「課題解決型」の国家戦略として、第 4 期科学技術基本計画、産業構造ビジョン、経団連提言などにおいて、具体的な課題が挙げられている。例えば、経済産業省の産業構造ビジョ

ン 2010（2010 年 6 月 22 日）では、(1) インフラ関連／システム輸出、(2) 環境エネルギー課題解決産業、(3) 文化産業、(4) 医療・介護・健康・子育てサービス、(5) 先端分野（ロボット・宇宙など）、を戦略 5 分野として設定している。産業競争力ビジョンのなかで「高機能・単品売り型産業から、システム売り／課題解決型／文化付加価値型、の産業へ」という強い文句がまさに掲げられているように、これら 5 分野においてはシステム構築が主題であり、要素技術とならんでシステム科学技術が主要な役割を担うことは明らかである。産業構造ビジョンの例に限らず、多くの場合、科学技術の成果が社会的な価値をもたらすには、システムを介することが必要である。交通機関や電気、水道、ガスなどのライフライン、電話やインターネットなどの通信もシステムであるし、企業や工場、病院、金融や株式市場や税制もシステムである。さらには自治体や国もシステムといってよい。技術の発展とともにシステムに要求される機能や性能はますます高くなり、それを実現するために、システムはさらに複雑かつ大規模化し、システム構築にあたって新しい課題が数多く生み出されてきている。

システム構築を行う上で直面する困難は、いずれも技術と人間・社会との界面で発生するが、システムのタイプによって大きく 2 つに分けることが可能である。自動車や家電、プラントなどのように、機械的システムとして製造・建設されたシステムは人為的なものであり、それ自体は社会とは独立して作られる。したがって、システムの内部と外部の境界が明確である。便宜的に、こちらを「バウンダリー型」と称する。バウンダリー型のシステム構築の困難さは、科学技術の問題に最終的に帰着でき、少数の科学技術の枠内、あるいは企業の内部に閉じて解決可能であることが多い。

一方、エネルギー供給や交通・通信などのインフラシステムや医療介護システムなどでは、サービスの供給側と消費側が常に結び付いており、社会の構造やその状態、個人の性向や活動パターンがシステムの挙動に直接影響を与える。この場合、社会インフラシステムは社会と一体になっており、どこまでがシステムの内部でありどこからが外部であるかははっきりしない。このようなシステムを、社会や人間に対して開いているという意味で「オープン型」と称する。オープン型のシステム構築の困難さは数多くある。まず、ダイナミックに変化する社会・人間の複雑さや不確かさを将来も含めて考慮しながら、当面の条件・制約を決め、システム構築を目指さなければならない。目指す過程でコンディションが変化すれば、それに対応してシステムも柔軟に進化させなければならない。また、特性や機能の異なる要素技術を目的実現のために結集し統合することも必要である。さらには、必要な機能／要件を実現するシステム構造はひとつには決まらないため、多種多様なステークホルダの合意を形成しながら、多数ある組み合わせから最適なものを設計・選択することが求められる。これらさまざまな困難な課題を解決するためにシステム科学ユニットが提案しているのが「システム構築戦略研究」である。

このようなオープン型のシステム構築の成功例はまだ少なく、きわめて挑戦的なテーマといえよう。もちろん、バウンダリー型のシステムも、機械システムを作ることから一歩踏み込んで、そのシステムが個々のユーザにどう使われるか考慮するとオープン型の側面が一挙に拡大し、その社会性がクローズアップされる。システム科学技術を発展させ、国が戦略的に支援しなければならないのは、このような事情も含めたオープン型のシステム構築を通したイノベーションである。システム科学技術には、社会的期待を実現するシステム・構造を、

システム構成論をもって記述し、要素科学技術と結びつける体系的な方法論を提供すること、システム構築による重要課題の解決策を世界に提供していく際の結節点の役割を果たすことが求められている。

表 2.2： オープン型のシステム構築を通じたイノベーションの課題例

1	（システム都市：国交省、経産省、文科省） 統合サービスシステムとしての都市インフラ構築のための基盤研究 都市におけるサービス機能を提供するインフラシステムを効率化し、また頑健性や復元性を強化するための都市モニタリング、モデリング、シミュレーション手法を確立し、これらを搭載する統合システム（プラットフォーム）を構築する。
2	（システムウォーター：経産省、国交省、農水省、文科省、内閣府） 持続可能な水循環システム構築のための戦略研究 全体的展望に立って与えられた地理的、経済的、社会的な条件に対して、最適な水の生産、配分、処理システムと、その水循環システムを設計・提案できるプラットフォームを構築する。
3	（システム防災：総務省、警察庁、内閣府、文科省） システム科学技術と防災・減災科学技術の融合に基づく統合防災システムの構築 平時における防災サイクルと有事における減災サイクルを科学技術的要素と社会技術的要素を考慮しながら、大域的な情報共有と最適な減災オペレーションをベースにシームレスに統合した統合防災システムを構築する。
4	（高齢者のシステムケア：厚労省、文科省） 人体の生理統合モデルを用いた高齢者ケアシステムの構築 高齢者グループの日常的な疾患管理と効率的な治療を、患者個人の生理統合モデルを用いて少人数の医療スタッフで実現する在宅医療・ケアシステムを構築する。
5	（システム医療：厚労省、経産省、文科省） 身障者とロボットが共存できる統合介護システムの構築 介護現場の状況分析およびそこでロボットが果たしうる機能のシステム解析にもとづいて、ロボットとそれが使われる介護現場をシステムとして統合的に研究開発を行い、実用的な介護ロボットシステムを構築する。
6	（資源創生システム構築：経産省、文科省） レアメタル国内循環システムのための戦略研究 日本の経済・社会活動にとって必要不可欠なレアメタルを、日本国内に存在する資源のみで持続可能にする循環システムを構築する。
7	（EMS制御：経産省、文科省） 再生可能エネルギーを含む多様なエネルギー需給の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築 各要素技術をどのようにつなぎどのように運用すれば、エネルギー管理システムが最適化されるかを定量的に評価可能な基本モデルを設計し、それに基づきながら社会状況や地域性に応じた最適な分散協調型EMSを構築する。

2.2.3 これまでのファンディングの状況とその将来展望

日本では、システム科学技術の一部とみなせる領域、例えば数理科学やサービス科学といった領域へのファンディングは行われているが、システム科学技術全般を対象とした総合的な施策は存在しない。システム技術に関しては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業などで数多く行われているが、実用化段階の近い個別的な狭い領域に対してのものがほとんどである。科学技術基本計画において、第4期に初めて「システム科学技術」が言及され、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領

域の科学技術として、その研究開発を推進することが必要とされた。このことや東日本大震災の影響もあり、2012年度文部科学省戦略目標の一つとして「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の最適化を可能とする、分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論、数理モデル及び基盤技術の創出」が設定され、JST 戦略的創造研究推進事業 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」領域が発足した。システム構築のための理論、数理モデルといったキーワードが明示的に入った戦略目標や CREST 領域は初めてであり、非常に大きな一歩である。研究推進のやり方もシステム構築を目指した統合的・競争的なスタイルを新しく試みようとしており、今後の成果が大いに期待される。

米国では、システム科学分野を対象とした研究開発戦略や基本政策は見当たらないが、NSF 工学局（ENG）では、関連する研究への助成が行われている。工学局の2013年度予算要求8.8億ドル（前年度実績比6.1%増）のうち、2.2億ドルは Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation（CMMI）に割り当てられているが、その中に Systems Science の基礎研究への助成プログラムがある。また、CMMI の下にある4つのプログラム群のうち、Systems Engineering and Design（SED）は、設計・制御・最適化といった工学における意思決定に関する基礎研究を支援している。SED が運営するプログラムは以下の6つである。

- Control Systems
- Dynamical Systems
- Engineering and Systems Design
- Operations Research
- Sensors and Sensing Systems
- Service Enterprise Systems

なお、近年 NSF は、複雑化する社会的課題に対応するために、組織や分野の境界を越えたシームレスな研究支援を目指す「OneNSF フレームワーク」を導入しているが、この枠組みで「Cyber-enabled Materials, Manufacturing, and Smart Systems（CEMMSS）」プログラムが運営されている。「静的なシステム・プロセスを適応力あるスマートシステムに変容させる研究」への支援を目的として、2013年度予算では前年からほぼ倍増の2.6億ドルが要求されている。

一方、欧州委員会、第7次研究・技術開発のための枠組み計画（FP7）では、2011年から、Future ICT プロジェクトとして、10年／10億ユーロ（約1,000億円）規模で、技術・社会・経済複合システムの理解、構築および管理を目標とし、地球規模のセンサネットワーク、グラフ理論、統計物理的アプローチによるマルチエージェントシミュレーション、ビッグデータを、市民や企業、政府団体などが共有、運用可能とするプラットフォームの3テーマを推進している。

さらに、フランスでは、国の研究・イノベーション戦略（SNRI）の「保健、福祉、食糧、バイオテクノロジー」優先分野の中で「シミュレーションや予測に向けた生命組織のモデル化」が、「情報、通信、ナノテクノロジー」優先分野の中で「複雑なシステムの小型化」「スマートシステムの開発」が、それぞれ重要トピックとして掲げられ、国立研究機構（ANR）により、ICT 分野の MN（数的モデル）として、投資の対象になっている。

韓国では、システム科学分野に完全に合致する計画ではないが、次世代を主導する融合技

術（Converging Technology）を体系的に発展させ、医療・健康、安全、エネルギー・環境問題の解決、融合新産業の育成などを図ることを目的に教育科学技術部など7省庁が立案した「国家融合技術発展基本計画（2009-13）」が、2008年に国家科学技術委員会において確定し、実施されている。さらに、本節冒頭に述べた科学技術基本計画において各分野における重要技術の設定などが行われているが、7つの重点分野のうち特に基礎基盤融合技術がシステム科学と関連する可能性がある。

中国では、中長期計画および科学技術12・5に重要な方針が示されている。特に、中長期計画の基礎研究に係る章に「重要数学及びその学際分野での応用」などシステム科学分野と関連の深いテーマが目につく。中国国家自然科学基金委員会（NSFC）でも、システムティックなアプローチが重要課題の解決に不可欠という認識が定着しており、Department of Information Science と Department of Management Science が一般プログラムのシステム科学分野のファンディングを担当している。件数、配布金額ともに徐々にではあるが増加傾向にある。

2.2.4 研究コミュニティ（関連学会、研究機関など）

国内外ともに、システム科学技術の意義を認識し、その一部を研究テーマとして取り組んでいる研究機関などはいくつか存在する。しかし、システム科学技術に特化し、システム構築方法論のディシプリン化に集中して取り組んでいる研究機関や関連学会は存在していない。

米国では、国家科学技術会議（NSTC）、国立科学財団（NSF）、国防高等研究計画局（DARPA）などがシステム科学技術を主要な研究テーマと認識し、研究の助成を行っている。研究組織としては、マサチューセッツ工科大学（MIT）、ボストン大学、サンタフェ研究所（Santa Fe Institute）、ニューイングランド複雑系研究所（New England Complex Systems Institute）、ニュートン研究所（Newton Institute of Mathematical Sciences）、MITRE（MITから1958年にスピンアウトした研究開発NPO）などでシステム科学技術への取り組みが多い。関連学会として重要なのは、米国電子電気学会システムカウンセル（IEEE System Council）であり、ソフトウェア生産性などの発表も多いが、システム科学技術に関する主要な成果の発表先となっている。

欧州全体の研究組織では、国際応用システム分析研究所（IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis）がグローバルな課題にシステムのアプローチで取り組み、その成果は各国の意思決定者の課題解決へ向けた施策判断に用いられている。

英国では、サウサンプトン大学の Seth Bullock 教授（Institute for Complex Systems Simulation）が、上述の GO-Science によるフォーサイト・プロジェクトの一環としてシミュレーション手法の金融システムへの適用を評価・検討などを進めている。

ドイツでは、フラウンホーファー協会システム・イノベーション研究所（Institute of Systems and Innovation, Fraunhofer-Gesellschaft）がシステム科学技術に関する研究成果を多く出している。

中国では、1979年に中国科学院システム科学研究所（Institute of Systems Science）と上海理工大学の上海システム科学研究院（USST）が設立され、ともに中国で最も歴史のあるシステム科学の研究機関である。また、中国科学院自動化研究所（Institute of Automation）も自動化と情報科学に関する国家を代表する研究機関であるが、軍関係の委託が多いためか、

残念ながら研究テーマや成果の詳細は公表されていない。

ジャーナルも研究者コミュニティの活動の重要な場である。システム科学の論文が多く、システム構築方法論のディシプリン化への取り組みが見えるジャーナルを次にあげる。Advances in Systems Science and Applications (ASSA)、IEEE Transactions on Control Systems and Technologies、IEEE Transactions on Systems、Information Systems Research (ISR)、Journal of Computer and System Sciences (JCSS)、Journal of Management Information Systems (JMIS)。

2.2.5 当該分野における各国の研究ビジョンと戦略

システム科学技術に関して、各国の研究ビジョンと戦略は明確に現れていない。ただし、論文数やその増減から、研究領域の重要度を推察することができる。

米国では、リスクマネジメント、モデリング、最適化、制御、ネットワークのいずれの研究領域においても論文数のシェアは高く、数の伸びも大きい。また、データマイニング・機械学習、最適化なども同様である。伝統的に航空・宇宙・軍事研究の分野への利用を考慮した応用研究とこれを可能にするための基礎研究が盛んであるが、計算機ネットワークやエネルギーマネジメント分野での予算措置も強化され、研究成果が顕著に現れてきている。システムの複雑性の際限ない増大についてはアメリカでも大きく問題視されており、それに対決する概念構築や手法の開発への挑戦が始まっている。「システムのシステム」や「ビッグデータ」などの概念はこの分野の研究の方向性を示唆している。

欧州は全般的に米国に次ぐシェアを占め、また論文数の伸びも同様に高い。特にリスクマネジメントや制御、最適化の領域での存在感が大きい。政府や公共団体さらに企業などとの連携により、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、最適化技術や大規模計算などのシステム科学技術を導入して解決する試みが積極的に推進されており、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も進んでいる。

中国は、21世紀に入って、急速に論文数を増やしている。特に制御や最適化、数理モデリング、データマイニング・機械学習の伸びは著しく、論文数では2010年前後に米国を上回った領域もある。また、数理系専門家育成のために300大学に研究拠点を設置しており、数学レベルの向上が顕著である。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、実現象の数理モデリング、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。

日本は、制御やモデリング、最適化の分野では一定の成果を出しているが、論文数は増えておらず、米国、欧州、中国の論文数が急増していることから、残念ながら相対的な存在感が低下している。「システム構築」の重要性は、総論としては共通認識となりつつあるが、さらに一歩踏み込んだ施策を提示することができずに、足踏みしている状態である。第4期科学技術基本計画において初めて「システム科学技術」が言及され、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術として、その研究開発を推進することが明記されたが、そのための政策主体は依然として存在しておらず、システム科学技術を成熟させる研究システムもまだ確立できていない。

2.2.6 当該分野における政策的支援や支援活動と将来展望

・教育

システム科学に関する研究・教育を明示的に行っている組織は存在しないものの、機械・コンピュータ・自然環境などさまざまなドメインのシステムに対して、数理科学的なアプローチをしている教育・研究が行なわれている。対象とされるドメインは、制御・ネットワークなどを含む機械・計算機システムに関する組織が圧倒的に多い。また、ドメインだけではなく、数理科学を主にするようなドメインに依存しない分野横断の研究・教育を組み合わせている組織も存在するが、ごく少数である。すでに述べたように、人類の直面する複雑な課題を貫くシステムとしての視点、さらにその方法としてのシステム科学技術の手法なくしては、課題解決はおぼつかない。2006年に科学技術政策研究所から出された報告書「忘れられた科学：数学」は、科学技術の基盤である数学の世界でわが国が国際競争力を急速に失いつつある姿を実証的に描き出すことにより、関係者に大きなショックを与えたが、数学をもっとも必要とする隣接分野であるシステム科学技術においても同様の現象が起こっているのは想像に難くない。数学・数理科学、システム科学技術の教育体制とそれを支える基盤的な科学を確立することが必要である。

・府省連携のプロジェクト

行政組織の管轄と責任の範囲は基本的には明確である必要があるが、複数の府省の管轄に関連する事項は少なくなく、特に今日のように、社会的課題が複雑化している時代には縦割り行政が効率的で柔軟な対応を阻害することが多い。そのため、必ずしも十分なものとは言えないが、科学技術分野では、早い時期から省庁間の調整を目指した試みがなされてきた。科学技術行政の総合調整機能を目指した科学技術庁の設置（1956年）、科学技術振興のための諮問機関としての科学技術会議の設置（1959年）などがあげられる。また、中央省庁再編（2001年）による内閣府の設置と総合科学技術会議は、科学技術政策における調整機能を実効性のあるものとするための流れととらえることもできる。

総合科学技術会議のもと、縦割り行政の弊害をなくす試みはいくつか行われてきた。例えば、2003年にまとめた報告書「ナノテクノロジー・材料分野の産業発掘の推進について」では、各省庁が一体となって、研究開発から、実証（モデル事業など）、標準化、規格化などの環境整備や、事業化・産業化までを、同一の達成目標に向けて連携して進める取組みとして、内閣府が主導する府省「連携プロジェクト」を提案している。これを契機として、2005年、科学技術振興調整費に「科学技術連携施策群」が新設され、国家的・社会的に重要なテーマについて、総合科学技術会議のイニシアティブの下、各府省の連携を強化すべく、次に示すテーマ群が選定された。2005年に、「生命科学の基礎・基盤」、「水素利用／燃料電池」、「地域科学技術クラスター」、「新興・再興感染症」、「ユビキタスネットワーク－電子タグ技術等の展開－」、「次世代ロボット－共通プラットフォーム技術の確立－」、「ナノバイオテクノロジー」、「バイオマス利活用」の8テーマ、2007年に、「臨床研究・臨床への橋渡し研究」、「食料・生物生産研究」、「情報の巨大集積化と利活用基盤技術開発」、「総合的リスク評価による化学物質の安全管理・活用のための研究開発」、「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発」、「テロ対策のための研究開発－現場探知システムの実現－」の6テーマが選定されている。2011年度からは、府省連携による科学・技術予算のムダの排除と質的

充実に向けた新たな取組の一環として、総合科学技術会議は「科学・技術重要施策アクション・プラン」の策定を始めた。アクション・プランのもと、府省連携プロジェクトとして、「発生した津波の情報のより迅速、正確な把握」、「農地・森林等における放射性物質のより効果的・効率的な除染」、「太陽光発電」、「バイオマス利活用」、「風力発電」、「エネルギーマネージメントのスマート化」、「衛星による地球環境観測」、「幹細胞を用いた再生医療の早期実用化」、「新たな医療機器開発を促進するためのレギュラトリーサイエンスの推進」などが実施されている。

拠点としては、産業競争力懇談会（COCN）の報告書「世界トップレベルの研究拠点について」（第1次 2006年10月31日、第2次 2007年4月5日）を基に、国際産学官ナノテクノロジー連携拠点として、「つくばイノベーションアリーナ」（Tsukuba Innovation Arena：略称 TIA）が 2009 年 6 月に設立された。文部科学省および経済産業省の強力な支援のもと、筑波大学、（独）物質・材料研究機構、（独）独立行政法人産業技術総合研究所、および（社）日本経済団体連合会の 4 機関が中核となっている。

このような枠組みをうまく機能させるには、多くの関係者が介在する複雑な要素間の関係を明確に記述し、全体の機能を向上させるという「システム思考」や「システム化」が重要である。次の 2.2.7 節で述べるように、わが国ではシステムの目標実現とそのためのシステム構築に必要な方法論や制度について数多くの遅れが現存しており、国家的習熟がない。要素研究の成果をシステム構築を通して社会に実装しイノベーションを実現するために、各省庁の緊密な連携の下で国が強いリーダーシップを取り、システム構築を強く意識し主要な出口とするプロジェクトを実施することが望まれる。

2.2.7 研究開発をとりまく状況と今後の方向性

すでに述べたように、科学技術がシステムを介して社会の隅々まで入り込んでくるにつれて、その進歩が生み出す付加価値の重心が要素からシステムへ移りつつある。新しいシステムの構築や既存のシステムの改革は付加価値を生み出すだけではなく、加速して複雑化・巨大化していくシステムにそれを取り扱うシステム科学技術の進歩が追いつけていないために、危機をもたらす。古いシステムの変更や機能付加がシステム全体にどのような影響をもたらすか、システム同士を統合して想定通りの機能を果たすかなどを検証するのは極めて困難な仕事で、今でもしらみつぶしとそれほど変わらない非効率な方法が使われている。また古いシステムになると設計・導入したエンジニアがすでにいなくなり、抜本的な改善もできないまま、対症療法でなんとか運用されている場合も少なくない。非常に複雑なプログラムやロジックでソフトウェアが動いているため、高度な専門知識を持った人間でなければ修正することができない。そのほか、運用管理コストの増大、セキュリティ確保の困難さ、システム技術者の不足など、問題は限りがない。このようにシステムの危機に直面しているなかで、システム科学技術の研究開発により、危機を乗り越え、付加価値を生み出そうとしている。システム科学技術が「ものからコトへの目標の移動」「要素からシステムへの課題の移動」「ハードウェアからソフトウェアへの付加価値の移動」に象徴される現代科学技術の主要な転換を推し進めているといっていよう。

しかし残念ながらわが国は、要素技術／製品の開発には強いが、その成果をシステムとして統合して社会に生かすことが不得手であり、この変化についていけない。上記に述べ

たようなシステムの危機の弊害が海外よりも厳しい形で現れているし、また、一時は世界を制覇した非常に高い要素科学技術力やものづくり能力を有しながらそれを経済価値に変換することができないでいる。例えば、現在の研究開発－産業問題として、

1. 個別の要素開発の研究は優位であるが、製品化のシステム化が遅れる
2. システムを製品とする産業にシステム科学の寄与がない
3. システムを製品とする産業（多くの情報産業）の進展が遅い
4. 医療システムなど公共的システムがまとまらない
5. 公文書記録整理、統計管理、コホートなど典型的なシステムの認知が低い
6. 巨大システムの安全・保安全管理の体系が記述、記録、伝承できない
7. 大型のシステム（ex. 新幹線）開発の記憶が残らず、進化がない

など、システムの目標実現とそのためのシステム構築に必要な方法論や制度について数多くの遅れが現存しており、国家的習熟がない。これらは、縦割行政や分野別ファンディング、規制、産業構造、企業文化、教育体制、最終的には日本特有の文化と歴史にまで絡む根の深い問題であるが、共通項としてシステム思考やシステム科学技術の弱さが表れている。先に述べたように、システムの複雑化・巨大化によって、属人的な能力に頼ってきたこれまでのやり方は限界を迎え、危機に直面している。日本の成長戦略はシステムを欠いては成り立たない。

システム構築の重要性は、総論としては共通認識となりつつあり、各種の官庁文書ではこれについて言及が目立つようになった。しかし、さらに一步踏み込んだ施策を提示することができずに、足踏みしている状態である。現在行われている研究開発は依然として要素技術主導であり、このような事態が続くと、さまざまな政策文書で掲げられているシステム構築が主題となる課題の解決は絵に描いた餅に終わり、日本の産業競争力はさらに低下してしまうおそれがある。社会で生まれる解決すべき「課題」は、科学技術における分野や規範の細分化とは全く無関係に発生する。単一の科学領域における研究で課題解決が達成できるのではなく、複数の領域の協力に基づく研究開発が必要である。同様に、単一の省庁の所掌範囲で完結する社会システムはほとんどなく、決して整合的ではない、関連する各省庁の所掌に基礎を置く価値基準や法制度などを調整し、合意を得る必要がある。さらに、社会への実装を最後に担う企業の利益追求方針との乖離を解消していなければならない。いま、システム構築による課題解決に向けて隘路を乗り越え、日本の科学技術がシステム化に熟達するために、産学官が協調し、必要な技術を決め、集め、統合して、世界で最高に評価される一つのものに仕上げていく行動、そのための仕組、が必要であり、そのための科学技術の振興が切実に求められている。システム科学技術は、特定の分野や対象に依存しない普遍的な科学技術であり、要素間の不整合を取り除き、それらの間の無意味な競合を避け、要素が最大限の力を発揮するように要素の間の関係、あるいはつなぎ方を求め、特性や機能の違う要素をシステムとして統合する手法を提供する。同時に、専門の違うさまざまな人々を結びつけつつ、一部に恣意的に集中することなく全体の利益を最適化するポテンシャルを保有している。現代社会の課題を解決していく際の結節点として、大きく貢献するはずである。

システム科学ユニットでは、2011年3月に取りまとめた戦略提言「システム構築による重

要課題の解決にむけて「～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～」のなかで、システム構築の視点を常に正面に掲げ、その視点から必要な要素研究を抽出、構造化し、要素研究の課題の合目的性を担保するための新しい研究システムとして「システム構築戦略研究」を考案し、①システム構築が主題となるわが国が直面する重要課題において、システム構築戦略研究を本格的に実装すること、②システム科学技術の相乗効果・波及効果を発揮させるため、上記振興策の発展に応じてシステム科学技術の研究拠点を順次創出し、将来的にさらにそれらを統括するシステム科学技術研究の中央組織を設置すること、などを提案している。システム構築が主題となる重要課題とは、例えば、2.2.2 節で述べたオープン型のシステム構築を通じたイノベーションの課題である。今後、こういった実際のシステム構築プロジェクトのなかで実効をあげながら、①課題解決型の科学技術としてのシステム科学技術を発展させること、②異なった専門分野を統合することのできる見識、システムの目標を達成するために要素に仕事を適切な形・タイミングで与えることのできる能力、部分と全体の関係をよく理解できる高度の解析能力、などのシステム思考を養うこと、③プロジェクトの成功をほかの事例に展開できる形で蓄積していくこと、などが必要である。

3. 研究開発領域

3.1 意思決定とリスクマネジメント

2章において述べたようにシステム科学技術の特徴のひとつである、対象を計測し、モデル化し、さらにその評価や予測に基づいて、対策立案、施策にまで結びつける横断性を端的に表す人間の活動と直接的に関係をもつ具体的な分野として、意思決定とリスクマネジメント分野が挙げられる。意思決定は、個人生活のみならず組織や社会全体にとって極めて重要な要素であり、これまでに、意思決定研究は多様な学問分野で進められてきている。これらの研究は「意思決定科学」とも総称されるものの、その多様性ゆえ、各分野に共通の基盤となるような体系が整備されひとつの学問分野として確立されているとはいえない状況である。こうした背景から、ここでの意思決定分野として、世の中に対するインパクトの大きさと今後ますます重要性が高まると予想されることを鑑みて、経済・金融・公共・経営に関するリスクマネジメント領域に焦点をあてることとした。したがって、最初に①リスクの下での意思決定に関して触れ、以降の節で経済・金融・公共・経営に関するリスクマネジメントの重点的研究開発領域として、②リスク概念と尺度、③統合・複合・その他リスク、④市場リスク、⑤信用リスク、⑥リスクマネジメントの数値計算の項目について述べる。

3.1.1 リスクの下での意思決定

（1）研究開発領域名

リスクの下での意思決定

（2）研究開発領域の簡潔な説明

リスクや不確実性のある状況での意思決定の理論、意思決定支援の方法論。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

いうまでもなく、良質な意思決定を行うことは、個人生活のみならず組織や社会全体にとって大変に重要である。現在までに、意思決定研究は、経済学、政治学、心理学、哲学、工学、経営学などの多様な学問分野で進められてきている。これらの研究は「意思決定科学」とも総称されるが、その多様性ゆえ、各分野に共通の基盤となるような体系が整備されひとつの学問分野として確立されているとはいえない。情報通信技術の飛躍的發展を背景に、金融市場はもとより、経済・社会、産業構造などの変化のスピードが速く、「リスク」や「不確実性・曖昧性」の高まっている今日、このような不確実性のある下での意思決定研究に関する基盤研究の整備、それらを踏まえた、さまざまなリスクをかかえる各応用分野への意思決定支援のための応用研究の発展の重要性は、以前にも増して高まっている。

意思決定研究はその発展の歴史的経緯やその担い手となった研究分野から、通常3つのアプローチに分類される。人・集団はいかに意思決定すべきかに関する「規範的アプローチ」、どのように意思決定しているかに関する「記述的アプローチ」、現実を知った

上でどうすれば改善されるかを提案する「処方的アプローチ」である。また、研究の視点として、① 個別の意思決定問題の解決を図ったり、過去の具体的意思決定事例を調べる「意思決定問題」研究、② ①より上位の、意思決定プロセスを対象とし共通のパターンやルールを見いだそうとする「意思決定行為」研究、③ ②を踏まえ意思決定の質の改善を目指す「意思決定支援」研究の3レベルで分けることもできる（小橋、1988）。通常いわれる「意思決定論」は主に②に対応する。近年、②のレベルでの記述的アプローチの中で、人間の意思決定プロセスでも、特に意思決定に至る人間の認知的・情緒的プロセスを研究対象とする「計算的アプローチ」の研究が大きく進展している（Johnson-Busemeyer, 2010）¹⁾。

リスクと不確実性下の意思決定分野において、Tversky-Kahneman (1979, 1992)²⁾ が提唱した「(累積) プロスペクト理論」は、現実における人々の(規範理論からみれば) 非合理的な行動を明示的に記述することに成功した最初のモデルであり、その経済学分野への功績が認められ Kahneman 教授は 2002 年ノーベル経済学賞を受賞した。プロスペクト理論を含めた人間の意思決定の「非合理性」に関する記述的アプローチの諸研究成果は、経済学と融合しながらさらに発展し、行動経済学・行動ファイナンス分野として確立された（Della Vigna, 2009³⁾、Barberis and Thaler, 2004⁴⁾）。

プロスペクト理論は、不確実性下の意思決定研究における記述的アプローチの大きな成果であり（Wakker, 2010）⁵⁾、今日まで、その拡張研究や実証研究が多数行われている（例、Schmidt et al., 2008）⁶⁾。この他、記述的アプローチでは、「ランク依存型効用理論 (rank-dependent utility theory)」(Quiggin, 1993)⁷⁾、「意思決定場理論 (Decision Field Theory)」(Busemeyer-Townsend, 1993)⁸⁾、「デュアル・システム・アプローチ」(Kahneman-Frederick, 2002)²⁾、情緒・感情の意思決定での役割、時間選好（割引率）と危険回避度の関係など、多様な研究がなされて今日に至っている。

記述的アプローチでは主に心理学による方法論が取られるが、経済学・ファイナンス分野でも、実証研究における観察データの分析ではなく、人を被験者として、現実の経済や市場で発生するさまざまな要因を実験室の中でコントロールすることでサンプルを採取し、理論や仮説の妥当性を検証する「実験経済学」、「実験ファイナンス」が発展してきた。例えば、MIT の金融工学センターの Andrew Lo 教授らのグループは、トレーダーの心理的状态や生理的状态を、被験者へのアンケートやセンサによる生体測定による実験によって調べた（Lo et al., 2002, 2005）^{9) 10)}。リスクや不確実性下の意思決定をより理解するために、神経科学の方法を導入する研究が進み、特に、「神経経済学」分野として大きく展開している（Smith and Huettel, 2010）¹¹⁾。例えば、利得や損失によって脳内の特定部位の興奮する部位が異なることの発見などプロスペクト理論と統合的な研究成果も報告されている（Tom et al., 2007）¹²⁾。カリフォルニア工科大学の Peter Bossaerts らのグループは、これらの実験経済学・実験ファイナンス、神経経済学分野にて積極的に研究活動を行っている（Preuschoff et al., 2006）¹³⁾。

意思決定研究は、理論研究、応用研究ともに米国が世界を主導している。意思決定研究全般をカバーした主要な国際学会として、北米の研究者を中心とする SJDM (Society for Judgment and Decision Making)、ヨーロッパの研究者を中心とする EADM (European Association for Decision Making) の2つがある。SJDM のホームページ

に、世界の主要な研究拠点や情報ソースが貼られている。意思決定科学のリサーチセンターとして、カーネギーメロン大学やデューク大学のように、多数の研究者を抱える学部横断的研究拠点を誇る大学もある。ビジネス・スクール内に拠点を設けている大学も多い（デューク大学、ペンシルベニア大学ウォートン校、シカゴ大学、コロンビア大学など）。ビジネス・スクール以外でも、行政大学院（ハーバード大学）、心理学部（ミシガン大学）に研究グループをもつケースもある。米国 NSF では、社会、行動および経済科学（Social, Behavioral & Economic Sciences, SBE）Directorate の下に、行動認知科学（Behavioral & Cognitive Sciences, BCS）、社会経済科学（Social & Economic Sciences, SES）などの Division がおかれている。この中で、SES の下には、Decision, Risk and Management Sciences（DRMS）プログラムがおかれている。このプログラムは「個人やグループ、組織、社会による意思決定の理解を深めたり効果を高めたりすることを目指す科学研究を支援」する。対象分野は「判断や意思決定」「意思決定分析や決定支援」「リスク解析、認知、コミュニケーション」「社会的、公共政策の意思決定」「経営科学と組織設計」とある。

ヨーロッパでは、英国、イスラエル、オランダ、スイス、ドイツなど域内の各地の大学で研究が行われている。英国にはビジネス・スクールに拠点をもち大学がある（LBS、マンチェスター大学など）。ドイツの Max Planck 研究所は記述的アプローチの一大研究拠点である。フィンランドの HIST では、意思決定支援研究を遂行している。EADM が主要な学会であり、米国 SDJM と共同して学会誌 Judgment and Decision Making を出版している。研究の方向性として、政治、異文化の価値観相違、環境問題、ネットワーク時代の大衆社会など大きなテーマの中での研究や、計算機活用による意思決定支援ツールの研究が盛んな印象がある。

日本では、研究スケール、センター数、研究者数ともに十分とはいえない。学会に関しては、日本認知科学会、行動経済学会など、特定の分野にフォーカスした学会はあるが、意思決定科学分野を広く対象とするような学会は存在していない。大学においても、学部・大学院（文学、経済、理工など）などにおいて、あるいは組織横断的に、講座やリサーチセンターがおかれたりしているところもあるが（北大・文学研究科・人間システム科学専攻、阪大・社会経済研究所・行動経済学研究センター、早大・総合研究機構・意思決定研究所、東工大・社会理工学研究科・人間行動システム専攻など）、多くの場合は、教員がその組織とは独立に研究を行っている状況である。

一方、科研費「系・分野・分科・細目表」（H19 年改正版）において、「意思決定」は、神経科学、社会科学／社会学・心理学・経済学・経営学などの関連分野・分科には現れず、「総合・新領域系」「総合領域」分野「情報学」分科「認知科学」細目の中において、キーワード（L）「行動意思決定論」として使われているのみである。

日本を含めアジアの研究者は、本質的な意思決定研究よりも計算的側面に注力する傾向がみられる。（下述のような）オペレーションズ・リサーチ（OR）や人工知能、ファジーモデルなどを含めた意思決定支援の個別分野において貢献しているとの印象があるが、意思決定研究のメインストリームとはいえない。意思決定研究においては、数学などと異なり、説得力のある論理的文章を構成する能力が極めて重要であり、その点でアジア地域の研究者にはハンディキャップがあるのは間違いない。

次に、意思決定研究の応用面であるが、理論研究の成果を踏まえた意思決定支援の研究の中心分野として、特に実務への応用を指向する「意思決定分析（decision analysis）」（DA）がある。DA は、意思決定論を基盤とし、その進展に伴い発展を遂げている、上述の処方的アプローチの分野である。また、その目的（意思決定支援）やアプローチ（モデルによる定量的分析重視）から OR との親和性も高く、世界的な OR の学会である INFORMS の傘下にも DA 学会があり、学会誌 Decision Analysis の出版などの活動を行っている。なお一般に、意思決定支援の研究は DA のみならず、OR に加え、統計学、人工知能、機械学習などにおいても行われる。また、米国には Decision Sciences Institute という学会があり、DA よりも広範囲の経営科学・OR をカバーする学会誌 Decision Sciences Journal を出版している。

個別の意思決定問題の定量的解決に、意思決定分析の実用化、商用化は進んでいる。不確実性下の意思決定における DA の中核的なツールが、ディシジョン・ツリー（DT）であり、モンテカルロ・シミュレーション（MC）である。リアル・オプションを DA ツールに加えることもある。米国 MBA プログラムでは、DT や MC を意思決定のための基本ツールとして、MBA 生に対してマスプロ教育を施している。産業分野における Chevron、GE、DuPont などの世界的企業は、不確実性を考慮した DA を全社的に導入し、成功を収めている例として知られている。米国では、DT や MC を簡単に操作できるソフトウェアが開発され普及している。また、Rand Corporation などの民間のシンクタンクにおける応用研究のほか、DA のコンサルティング会社も存在する。応用研究やその実践が、米国企業を中心にヨーロッパ企業などでも進められているのに比し、国内企業では圧倒的に少ない。

米国での導入が進んだのは歴史的背景が大きい。まず米国で 50 年代までには von Neumann と Morgenstein、Savage らによって期待効用理論が確立され、60 年代に入りハーバード・ビジネス・スクール（HBS）の Raiffa や Schlaifer らによって意思決定論として整備されると、スタンフォード大学 Howard によって DA として確立された。その後 70 年代には HBS が拠点となって DT を中心に DA が普及していった。さらに、先述のように米国では DA に代表される意思決定科学分野の研究グループがビジネス・スクールの中におかれることが多く、経営幹部候補生たる MBA 生に対して、DT の方法論が教えられ、また@Risk や Crystal Ball などのシミュレーションソフトウェアによる MC 法が教えられるなどの実践的教育が行われている。

国内企業でも、総合商社や石油関連会社、製薬会社など、ハイリスク・ハイリターンの案件を複数抱え、その長期にわたるパイプライン（ポートフォリオ）管理の稚拙さが経営に甚大な影響を及ぼしかねない一部の業界で導入されているものの、一般に DA が企業経営において活用されているとはいえない。

（４）科学技術的・政策的課題

不確実性下の意思決定理論および応用（意思決定分析）の研究に関する課題の中で、本質的かつ最も重要なものに、いかに問題のフレームを設定するかというテーマがある。すなわち、意思決定問題の定式化の問題であり、問題・課題をどう見だし、構造化するのか、どのように具体的目標・ゴールを設定し、どう実行可能な選択肢を見いだすか、

そして、どのように将来起こり得る選択肢を書き出すかという要素は、意思決定結果の質に根本的影響をもたらす。意思決定の目標やゴールの設定はそれを行う個人や組織の価値観に依存する部分であり、哲学、倫理学なども含めた理論構築、方法論整理が必要である。そもそも、どのように意思決定の方法論を決めるのかという、メタ意思決定の理論自体が大きな課題である。

データからの推定が難しい、あるいは、データ入手が不能な事象の確率付与については、DA において主観確率を意思決定者から効果的に引き出すための抽出法が研究されているが、確率付与が特に難しいがインパクトの甚大な「極低頻度・高インパクト」の事象に対する対処に関しては有効な方法論は提供されていない。DA を「シナリオ分析法」と併用することで対応すべきだと主張する研究者もいるが有効性が確認されていない。そもそも、不確実性の程度を主観確率分布で表すとしても、そのシナリオが発生した時の帰結（インパクトの大きさ）と独立に評価できるのかなどの本質的な問題は十分に研究されていない。

同時に、利害の対立する、あるいは利害は共通していても、意見の異なる複数の意思決定者による集団意思決定のための研究もやはり重要なテーマである。DA においても、ブレインストーミングの活用やデルファイ法が研究され、「集団の叡智」を引き出す方法論や、専門家の有効な活用法、集団バイアスを和らげるような方法論についても研究されているが、現状では決定的なものはない。社会的選択理論、組織論など周辺領域との協調が不可欠である。

次に、インフラ面であるが、意思決定科学の各分野の研究者を擁し活発に議論し世界に対して情報を発信していくような国内研究拠点の設立が強く望まれる。意思決定科学は学際分野であり、理論研究、応用研究を進めるには多様なバックグラウンドをもった研究者の協調が不可欠である。もとより、十分な研究補助金の配分による若手研究者の育成は当然である。

また、先端的研究の推進を図る上で、裾野を広げること、すなわち、産業界への意思決定研究の応用を促進し研究の重要性の社会的認知を図ることも重要である。とりわけ、その中核となる合理的経営の重要な技法としての意思決定分析が産業界に浸透していくためには、国内の高校レベルの数学教育の質の改善が強く望まれる。意思決定支援のソフトウェアが充実している中、背後にある理論や手法の基本や前提条件を理解していることは支援ツールの正しい適用に不可欠である。

（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）

３点に注目したい。一つ目が、ビッグデータや高速コンピューティングなど情報通信技術の飛躍的發展を活かした意思決定支援技術の進展、二つ目が、大規模ネットワーク社会における意思決定理論の展開、三つ目が、不確実性の高い状況（すべてのシナリオを予想できない状況や、モデルに不確実性のある状況）における意思決定理論・方法論の必要性である。

まず、情報通信技術の飛躍的發展を背景とした、必ずしも構造化されていない大規模データセット、いわゆる「ビッグデータ」の蓄積がさまざまな応用分野で進んでいる中、これらをタイムリーに、定量的・定性的に解析して経営、医療、公共政策などの各分野

における意思決定に活用することが求められている。ビッグデータから自動的かつ効率的にパターンを認識したり、判断ルールを生成したり、情報抽出を行うための機械学習の技術がさらに発展し、実用化されていくものと思われる。遠隔地に大容量ディスクが設置され高速コンピューティングが実行可能な環境（クラウド・コンピューティング）が進展する中、大規模シミュレーションを活用した、経営・業務戦略の立案、リスク計測・管理への応用が進むものとみられる。例えば、人工市場研究などにおいては、コンピュータ上のマルチエージェントによるシミュレーション実験を通じた、非均質的な情報やリスク許容度、戦略をもつ市場参加による価格形成メカニズムの研究が行われるなど、広い意味での集団意思決定の研究が進められている。

地球上のあらゆる場所がネットワークで結ばれ、経済、金融がグローバル化し、国際的な資本の移動が自由に行われる中、地球上の一地域の紛争や政治的混乱など地政学的な政治・経済や社会問題が、ただちに地球のいたる地域の経済や、金融証券市場に影響を及ぼす時代を迎えている。予測市場などインターネット上での人間参加型の既存金融証券市場にはない将来事象の値付け・価格発見、ソーシャル・ゲームなどインターネット上の人間同士のつながりにより生み出されていく新サービスや新市場の誕生など、企業や組織に対して従来とは異なるタイプの意思決定やリスク管理のあり方を問う時代となっている。フェイスブック、企業間取引のネットワークなどさまざまに張り巡らされた各種ネットワークで結ばれた個人や企業などの、ミクロの意思決定行為の相互作用がもたらすネットワーク全体の振る舞いへの影響、ネットワークが個々の意思決定に与える影響など、高度にネットワーク化された現代社会において、両者の関係に関する研究の必要性が高まっている（例、Schweitzer et al., 2009）¹⁴⁾。ゲーム理論を社会ネットワーク理論と融合する試みなどもあるようだが、全般に、意思決定分野の中で研究が進んでいるとはいえない。

2011年3月の福島第一原発事故は、技術的に極めて精緻なレベルと考えられていた原子力技術（確率論に基づくリスク評価・管理＝確率的リスク解析）が、実はそれをマネジメントする個人や組織の意思決定やリスク管理の能力によって大きく制約されてしまうという本質的な脆弱性を明らかにした。一方、2012年5月に発覚した、金融業界へのVaR手法導入のパイオニアであったJP Morganの巨額の評価損は、世界的トップ銀行による精緻な確率統計的方法論に基づく定量的リスク管理の失敗例である。事件の詳細は追って明らかにされるであろうが、モデル・計測方法論の導入を決めそれを実施する決定を下したマネジメントの意思決定に失敗の原因があるのは間違いない。いずれも、（必ずしも実証することのできないいくつかの前提に基づく）定量的モデルによる定量的リスク管理の限界、とりわけ定量的管理に依拠するマネジメントの脆弱性を明らかにした。これらは、定量分析が想定しないいわば「モデルの外」の事象が発生してしまっていることに他ならない。これらの事件や事故は—このような「想定外の」危機は不幸にも発生した場合には的確迅速にマネッジされねばならないのは無論ではあるが—未然・事前にその可能性を予見し発生確率を抑えるような方策を考案し実行するような個人や組織の想像力、「感度の高い」意思決定能力、リスクマネジメント能力の重要性を強く示している。

（６）キーワード

意思決定分析、意思決定支援ツール、不確実性、行動経済学、プロスペクト理論、認知バイアス、ヒューリスティックス、モデル・リスク、ディシジョン・ツリー、モンテカルロ・シミュレーション

（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	△	→	● ゲーム理論など伝統的に強い分野はあるが、規範的、記述的、処方的、いずれのアプローチにおいても、研究者の数、研究成果数ともに見劣り。国内に独自の研究は少なく、海外発信し活躍している日本人研究者は少ない。意思決定研究を幅広くカバーする学会も存在せず、研究拠点も数少ない。意思決定分野内での共同研究も活発であるとはいえず、個人の研究活動が中心。科研費において、「情報学」「認知科学」の下にキーワードとして「行動意思決定論」が現われるのみ。
	応用研究・開発	△	→	● 同上。ただし、意思決定分析の他にオペレーションズ・リサーチや人工知能、ファジーモデルなど周辺関連研究分野を加えれば研究活動は活発といえる。
	産業化	△	→	● 全般に意思決定分析が一般事業会社の経営に活用されているとはいえない。その中でも、総合商社、製薬会社、石油公団など、長期にわたる、ハイリスク・ハイリターンのプロジェクト管理を必要とする業界においてMCを中心とした定量分析が行われてはいる模様。DTその他の手法はほとんど使われていない。
米国	基礎研究	◎	→	● 研究拠点数、研究者数、研究成果数、いずれにおいても米国が主導。米国の学会SJDMがヨーロッパの学会EADMと共同でJudgment and Decision Making (JDM) を出版。これらの学会情報やJDMをフォローすることで最新の研究動向を知ることができる。NSFでは、社会、行動および経済科学 (SBE) Directorateの下に、行動認知科学 (BCS)、社会経済科学 (SES) などのDivisionがおかれている。SESの下には、Decision, Risk and Management Sciences (DRMS) プログラムがおかれている。トップジャーナルの編集委員の多くが米国の大学に在籍。
	応用研究・開発	◎	→	● 米国が主導。上記SJDMの他、米国オペレーションズ・リサーチ学会であるINFORMS傘下の意思決定学会 (DAS) およびその学会誌Decision Analysisを追うことで、最新の研究動向を追うことができる。
	産業化	◎	→	● DTやMCをExcelのアドインとして開発された商用の意思決定支援ツールなどが普及。MBAプログラムを中心に、意思決定分析の基本的技法についてのマスプロ教育。幅広い普及とはいえないが、一般企業においてもかなり意思決定支援ツールが使用されている模様。Chevronなど大手企業の全社的導入事例あり。
欧州	基礎研究	○	→	● 拠点数、研究者数において、米国には見劣りする。イスラエル、英国、オランダ、ドイツ、フィンランドなどに研究者が点在する。ヨーロッパの学会EADMが米国SJDMと協調関係にある。
	応用研究・開発	○	→	● 同上。
	産業化	○	→	● 英国などのビジネス・スクールなどで意思決定分析を教育。米国に比して、企業経営に浸透している度合いは低いものと想像される。
中国	基礎研究	△	↑	● HKUSTに研究グループ。本土の動向は不明。
	応用研究・開発	△	↑	● 同上。
	産業化	×	↑	● 不明。

韓国	基礎研究	×	→	● 不明。ただし、日本より進んでいる形跡なし。
	応用研究・開発	×	→	● 同上。
	産業化	×	→	● 同上。

(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) Johnson, J.G., and Busemeyer, J. (2010). “Decision Making under Risk and Uncertainty,” *WIREs* 1, 736-749.
- 2) Kahneman, D., and Frederick, S. (2002). Representativeness revisited: Attribute substitution in intuitive judgment. In *Heuristics and Biases: The Psychology of Intuitive Judgment* (Gilovich, T., Griffin, D., Kahneman, D., eds), Cambridge Univ. Press.
- 3) Della Vigna, S. “Psychology and Economics,” *J. of Economic Literature* 47, 315-372.
- 4) Barberis, N. and Thaler, R. (2003). “A Survey of Behavioral Finance,” in *Handbook of the Economics of Finance* (Ch18), Vol.1, Part B, 1053-1128.
- 5) Wakker, P.P. (2010). *Prospect Theory: For Risk and Ambiguity*, Cambridge.
- 6) Schmidt, U., Starmer, C., and Sugden, R. (2008). “Third-generation prospect theory,” *J. of Risk and Uncertainty* 36, 203-223.
- 7) Quiggin, J.(ed.) (1993). “Generalized Expected Utility Theory,” Kluwer.
- 8) Busemeyer, J.R., and Townsend, J.T. (1993). “Decision Field Theory: A Dynamic-Cognitive Approach to Decision Making in an Uncertainty World,” *Psychological Review* 100, 432-459.
- 9) Lo, A., and Repin, D. (2002). “The Psychophysiology of Real-Time Financial Risk Processing, *Journal of Cognitive Neuroscience* 14, 323-339.
- 10) Lo, A., Repin, D., and Steenbarger, B. (2005). “Fear and Greed in Financial Markets: An Online Clinical Study, *American Economic Review* 95, 352-359.
- 11) Smith, D.V., and Huettel, S.A. (2010). “Decision Neuroscience: Neuroeconomics,” *WIREs* 1, 854-871.
- 12) Tom, S., Fox C.R., Trepel C, and Poldrack, R.A. (2007). “The Neural Basis of Loss Aversion in Decision Making under Risk,” *Science* 315, 515-518.
- 13) Preuschoff, K., Bossaerts, P., and Quartz, S.R. (2006). “Neural Differentiation of Expected Reward and Risk in Human Subcortical Structure,” *Neuron* 51, 381-390.

- 14) Schweitzer, F., Fagiolo, G., and Sornette, D. (2009), “Economic Networks: The New Challenges,” *Science* 325, 422-425.

3.1.2 リスク概念と尺度

（１）研究開発領域名

リスク概念と尺度

（２）研究開発領域の簡潔な説明

リスクのある対象に対して適切な意思決定を行うためには、対象のリスク特性を「発生頻度」と「重大性」という２軸を中心に、端的に定性的あるいは定量的に表現することが必要となる。特に、金融機関はリスクに対する経済資本の規模・配分法をリスク尺度の数値を利用して策定することが求められており、リスク尺度の改良および効率的な計量法の研究・開発が急務となっている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

経済学の分野では、「リスク（risk）」を結果は不確実だが確率分布は特定できる場合に、「不確実性（uncertainty）」を確率分布の特定が困難または不可能な場合に、それぞれ用いるという流儀があるが、以下ではすべてリスクという用語に統一することをお断りしておく。

一般的に、リスクを「発生頻度（確率）」と「重大性（深刻度、損失の大きさ）」という２軸で大まかに見ると、「高頻度・低損失」と「低頻度・高損失」に多くが分類され、データからの定量的アプローチが困難な後者を問題にすることが多い。伝統的なファイナンスでは、リスクとは正規分布を仮定した資産変化率の標準偏差とされていたが、90年代に金融機関の資産ポートフォリオにおける高損失の可能性を評価するために、VaR（Value at Risk）と呼ばれるリスク尺度が提唱された。VaRは、統計用語でいえば、損失額の確率分布の上位の分位点であり、わかりやすく比較的計量もしやすいため、金融機関が標準的なリスク尺度として採用するようになっている。

しかし一方で、VaRは実務的にはしばしばリスクを過小評価してしまうという点で、学術的には分散投資を勧める根拠となる劣加法性を一般に満たさないという点で、批判を受けてきた。学術サイドでは、Artzner et al.(1999)¹⁾による“coherent risk measure”の提唱を契機に、リスク尺度が備えるべき公理・性質についての議論が盛んになり（convex risk measure、spectral risk measure、リスク鋭感的価値尺度など）、VaR以外の具体的なリスク尺度（期待ショートフォールなど）の研究も盛んになっている^{2) 3)}。また、異なるカテゴリ間のリスク統合や多期間リスク尺度といった比較的新しいテーマも注目されている。

実務的には、企業は経営理念に沿ってリスク尺度を適切に選択し、各種データに基づき効率的にリスクを測定し、それをリスクマネジメントに関する経営判断に活かすことが望ましい。金融機関は、大きな損失発生リスクへの備えのために準備しておくべき経済資本の規模の決定や、各事業セクションへの経済資本配分の決定のために、リスク尺度およびリスク尺度の微分に相当するリスク寄与度の数値を参考にしている。金融危機以後、より保守的なリスクマネジメントを求められているが、そもそも金融分野であっても低頻度高損失のリスクを数理モデルに基づいて計量するのは技術的に難しく、ストレステストのように恣意性の避けられない方法でのリスク計測への対応も迫られてい

る現状である。

最近では「モデル・リスク（誤ったモデル使用に起因する損失の可能性）」に対する注意も喚起されている（Morini（2011）が詳しい）⁴⁾。

（４）科学技術的・政策的課題

リスク尺度を実際に活用することを企図した場合に、「どのように活用すべきか」「どのリスク尺度を選択すべきか」「どのように算出すべきか」といった問題に対して極めて具体的な解決を図る必要がある。リスク尺度の活用法としては、リスクを客観的に把握できるように監督官庁が規制目的で導入したり、銀行がリスク管理目的あるいは経営効率化のための経済資本配賦の意思決定の目的で導入したりすることが想定される。リスク管理目的という活用法はある程度わかりやすいが、経済資本配賦への応用に関しては、特に国内では一部の金融機関を除いて、十分に理念を含めて浸透しているとはいえない。リスク尺度の選択も規制ルールへの対応から決まるので善かれあしかれ議論の余地はないように思える。しかし、実際には銀行独自の目的から演繹的にベストなリスク尺度が見いだせるはずであり、規制とは別の視点でリスク尺度を選択して経営に活かすことが可能であるが、そのような動きは目立っていない。

技術的にはリスク尺度の活用法とそれにあうリスク尺度を選択しても、実際に信頼のある数値としてリスク尺度の値を算出できなければ意味がない。教科書的には過去の観測データから統計的に推定するといった話になるが、実際には統計的議論に耐えるだけのデータの質・量を確保することが難しかったり、リスク尺度に関連する各モデルが不完全であったり、採用する算出方法のパターンも多数あって積極的に特定のものを採用する理由が見いだせなかったり、といった状況であり、いろいろな方法論が提示されては各銀行や研究機関で試行錯誤がなされているといった面がある。規制という点ではルール化はされているものの、次項で述べるように常に見直しが行われているという状況である。

（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）

2012年5月3日にバーゼル銀行監督委員会が「トレーディング勘定の資本賦課に対する抜本的見直し」という文書を公表した。その中では「VaRから（テイルリスクをより適切に捕捉するリスク指標とされる）期待ショートフォール（ES）への移行」など、新しい規制枠組み（バーゼル3などと呼ばれる）導入に向けた市場リスク計測についての見直し提案が記されている。また、少し遅れて金融業界での新たな火種になりうるJP Morganの巨額損失の問題が明るみになった。これらを踏まえると、銀行業界全体の規制強化の動きがより強まる可能性がある。そうした情勢の中、リスク尺度およびそれに基づく経済資本配賦のあり方などについては、理論面・実証面のいずれからでも議論が再燃すると想像される。

（６）キーワード

リスク尺度、VaR、ES、coherent（convex, spectral）risk measure、リスク鋭感的価値尺度、ストレステスト、経済資本配賦理論、リスク寄与度、バーゼル3

（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	○	→	● 数学系の研究者（宮原、楠岡など）を中心にリスク尺度に関連する理論的研究が引き続き行われているが研究者個人の力量によるところが大きく、研究プロジェクトとして立ち上がっている状況ではない。
	応用研究・開発	○	↗	● 統計分野、オペレーションズ・リサーチ分野の研究者や一部実務家が、データの活用を通じて適切なリスク尺度の選択や効率的なリスク計測法などを研究しており、学会などでしばしば報告される。 ● また、2012年1月の日本銀行主催ワークショップにおいて、金融機関の経営効率を向上させるための経済資本の活用法などをテーマに実務家と研究者が議論した ⁶⁾ ⁸⁾ 。このことから金融業界においてリスク尺度の経済資本活用への応用面についてさまざまな試みがなされていることがうかがえる。保険業界でも日本アクチュアリー会などで、保険会社のリスク評価の方向性について適当なリスク尺度を含めて活発に議論をしている。
	産業化	○	↗	● 国際的に評価される成果をあげるのは難しいが、国内金融機関向けにリスク計測アプリケーションの開発・販売を行う専門会社も少なからず存在している（ニューメリカルテクノロジーズ社、金融工学研究所、金融エンジニアリング・グループなど）。
米国	基礎研究	○	→	● 米国の研究者がリスク尺度の理論研究で先導しているという状況ではないが、研究は行われている。ただし、欧州研究者との共同研究なども多く見られるので、米国単独で論じるのはあまり意味がないと思われる。
	応用研究・開発	◎	→	● 統計分野、オペレーションズ・リサーチ分野など、さまざまな分野の研究者や一部実務家が、データの活用を通じて適切なリスク尺度の選択や効率的なリスク計測法などを研究している様子は、学術誌やRisk magazineなどでうかがえる。
	産業化	◎	→	● もともとVaRが金融業界に普及したのは有名投資銀行のJP MorganのRiskMetricsというモデル普及によるところが大きかった。リスクマネジメントのツール開発専門企業も多い。金融システム全般について世界をリードしているといえるが、リスク尺度という観点では特に目立った商用モデルは思い当たらない。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 数学系の研究者を中心にリスク尺度の理論的研究が引き続き行われている。特にリスク尺度の公理に関する理論研究の大半は欧州の研究者による論文が中心であり、最新のリスク尺度や経済資本配分に関するものも少なくない。また、スイスのETH（チューリッヒ工科大学）はファイナンスや保険分野のリスク研究の中心であり、日本人研究者も短期ないし長期研究滞在をしている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 統計分野、オペレーションズ・リサーチ分野など、さまざまな分野の研究者や一部実務家が、データの活用を通じて適切なリスク尺度の選択や効率的なリスク計測法などを研究している様子は、学術誌やRisk magazineなどでうかがえる。
	産業化	○	→	● 銀行や保険の国際規制に対応する動きは常にあり、英・仏・独・スイスなどを中心に十分産業化は進んでいると思われる。ただ、欧州危機にからんで目立った動きを捕捉できていない。
中国	基礎研究	△	↗	● 中国（あるいは中国系）研究者による論文やワーキングペーパーを目にする機会は増えている。Wu編のハンドブック ⁵⁾ などから中国（あるいは中国系）研究者の勢いは、リスクマネジメント分野で増してきている印象がある。
	応用研究・開発	△	↗	● 同上。
	産業化	×	→	● この辺は評価できる材料がない。

韓国	基礎研究	△	↗	● 韓国（あるいは韓国系）研究者による論文やワーキングペーパーを目にする機会は増えている。
	応用研究・開発	△	↗	● 同上。
	産業化	×	→	● この辺は評価できる材料がない。

（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) Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J.-M., and Heath, D. (1999) “Coherent Measures of Risk,” *Mathematical Finance* 9 (3) : 203-228
- 2) Kusuoka, S. (2001) “On law-invariant coherent risk measures,” *Adv. Math. Econ.* 3, 83-95
- 3) McNeil, A., Frey, R., and Embrechts, P. (2005), *Quantitative Risk Management : Concepts, Techniques, and Tools*, Princeton University Press.
- 4) Morini, M. (2011), *Understanding and Managing Model Risk: A Practical Guide for Quants, Traders and Validators*, Wiley
- 5) Wu, D.D. ed. (2011), *Quantitative Financial Risk Management (Computational Risk Management)*, Springer
- 6) 日本アクチュアリー会国際基準対応 PT「国際的な監督基準・会計基準の議論における保険会社のリスク評価に関する論点—中間報告書—保険債務（保険負債と所要資本）の評価について」2008年6月
- 7) 日本銀行金融研究所編（2012），ファイナンス・ワークショップ「金融機関における経済資本の活用と経営効率の向上」の模様，ディスカッションペーパーシリーズ（日本語版）2012-J-4
- 8) 宮原 孝夫（2011），「リスク鋭感的価値尺度によるプロジェクトの評価」，名古屋市立大学 Discussion Papers in Economics No. 531

3.1.3 統合・複合リスク・その他リスク

（１）研究開発領域名

統合・複合リスク・その他リスク

（２）研究開発領域の簡潔な説明

金融機関や一般事業会社が抱えているさまざまなリスクを統合的に評価・管理するための研究、あるいは、金融資産ポートフォリオ全体のリスクの計測・管理に関する研究で、ALM に関する研究まで含めて考える。同種で多数のリスク間の関連性や、市場リスク、流動性リスク、信用リスク、オペレーショナルリスク、事業リスクなど異種のリスクの統合評価手法や管理手法に関する研究・開発。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

銀行を代表とする金融機関や製造業などの一般事業会社はさまざまな種類のリスクを抱えている。それらを包括的に評価・管理する理論や手法に関する研究が進められている。対象としている主なリスクはいわゆる金融リスク、具体的には市場リスク、流動性リスク、信用リスク、オペレーショナルリスクなどであるが、広くコンセンサスの得られた分類・定義は存在せず、使用する人・場面によって多少異なる。また、近年の事業リスクマネジメント（Enterprise Risk Management, ERM）の重要性の高まりは、2000年代初頭の企業不祥事の多発とそれに対処するための企業行動規制への厳格化が背景となっている。米国のサーベンス・オクスレー法（Sarbanes-Oxley Act of 2002）や日本の会社法および金融商品取引法をはじめとした一連の法令において、内部統制体制の構築や財務報告の適正化に対する会社経営者の責任を明確に定めており、企業の経営者はこれらの履行を義務づけられている。ERM は、金融機関と製造業などでは事業内容が大きく異なるように、具体的な内容は業種・企業により異なる。金融機関や保険会社では業務遂行上のリスクが与信、投資、決済、保険契約の引き受けといった財務的なものであり、一方、製造業や流通業などの一般事業会社では、リスクの種類が多岐にわたる。従来、企業は、オフィスの火災、工場における労働安全衛生対策、必要な保険の手配などでリスク管理を行ってきた。近年においてはリスク管理の対象領域が拡大しつつある。個別リスクごとの管理だけでは対応できない課題を解決するため、近年においてリスクを全社統合的に管理しようという ERM の発想が採り入れ始められた。なお、ERM の定義は、現時点では統一的なものがなく、代表的なものとしては、米国・トレッドウェイ委員会支援組織委員会（Committee of Sponsoring Organization of the Treadway Commission, COSO）の策定した COSO-ERM があげられる。COSO-ERM は、事業体の戦略策定において事業体全体にわたって適用され、事業目的の達成に関する合理的な保証を与えるために事業体に影響を及ぼす発生可能な事業を識別し、事業体のリスク選好に応じてリスクの管理が実施できるように設計されたプロセスを意味する。COSO-ERM のフレームワークではビジネスを行う上で想定されるあらゆるリスクを対象にするとして、経営・事業リスク、コンプライアンスリスク、事故・災害・環境・天候リスクなども含めているが、これはリスク管理に関する概念的なもので、科学的な定量評価はあまり進んでいない。

次に、金融・年金・保険などの分野で古くから行われてきたポートフォリオのリスク計測・管理や資産負債管理（Asset Liability Management, ALM）に関する研究開発の動向、さらに、近年注目されている流動性リスクとオペレーショナルリスクなども含めて説明する。金融資産の価格づけも当該資産のリスクに対する包括的な評価のひとつであるが、こちらの説明は割愛する。

年金・保険分野では、20世紀半ば頃から主にALMの観点から金利リスクの評価・管理手法が研究され、主に感応度分析の面で今日まで有効なリスク尺度や運用手法が提案されてきた。また、1950年代以降は金融資産ポートフォリオの最適化に関する議論が始まり、1970年代以降は計算機の劇的な性能向上を背景にさまざまな最適化手法が導入され、実践的な研究開発が進められた。さらに1990年代には、今日の金融リスク計測モデルの先駆けとなるポートフォリオの市場リスクまたは信用リスクを評価するモデルが提案され、以後はそれらを精緻化し拡張する方向で研究開発が進められてきた。特に、ポートフォリオの信用リスク、すなわち多数の取引相手の信用リスクを統合評価する手法の研究は1990年代末以降活発に議論されてきた。一方、他のリスクに比較して、個々の研究が多くなされてきた市場リスクと信用リスクなどの異種リスクの統合評価に関する研究はあまり進んでいない。実務的なリスク計測モデルのほとんどは、市場リスク計測モデルや信用リスク計測モデルなど、ポートフォリオに内在する同種のリスクを評価するモデルである。異種のリスクを統合評価可能としているモデルも見られるが、それらの理論的妥当性は必ずしも明確ではない。

また、サブプライム問題が顕在化して以降、市場リスクとの関連性から流動性リスクの把握の重要性が高まってきている。流動性リスクは、実際にそれが顕在化したときは銀行の経営破綻に直結する危険があり、イベント性が高い性質をもつ。市場リスク、信用リスク、オペレーショナルなどのリスクマネジメントは、リスク顕在化の際の損失を自己資本によりカバーするのが基本原則であるが、流動性リスクの場合は実際にリスクが顕在化したときの大量の資金流出に対して自己資本をリスクバッファとする考え方だけでは対応するのは困難と考えられる。流動性リスクは、市場リスクや信用リスクと比較するとリスク評価が難しいため、現状では一定の仮定をおいて流動性状況を把握するシナリオテスト、ストレステストなどが重要な分析手法となっている。

流動性リスクと同様に近年において関心が高まってきているのが、オペレーショナルリスクである。オペレーショナルリスクとは、内部プロセス・人・システムが不適切であること、もしくは機能しないこと、または、外生的事象が生起することから生じる直接的あるいは間接的に損失を被るリスクである。オペレーショナルリスク管理を積極的に行うことへの関心が高まってきている理由は、ERMの発想、新しい規制上の資本要件の導入、市場リスクや信用リスクなど異なるリスクの種類ごとに計量化が重視されるようになったことが背景にある。オペレーショナルリスクは、伝統的な監査およびコンプライアンス機能を通じて対処されてきたが、リスクが顕在化した後に認識するという結果に終わることが多い。そこで、あらかじめリスクを把握する方法が重視されはじめてきている。その理由は、オペレーショナルリスクが、人的ミスやプロセスの欠陥のリスクであり、企業経営において本質的な部分と関係しているからである。さらに、オペレーショナルリスクは、信用リスクや市場リスクと相互関係があり、加えて、企業のレ

ピーテーションに損害を与える。

世界経済がグローバル化するにつれて、企業の経営破綻は最悪の場合、地球規模で壊滅的な影響を及ぼす危険性がある。近年の世界的な金融危機（クライシス）の前後から、金融システムをネットワークモデルとして表現して解析することによるシステミックリスクの研究も行われるようになってきた。また、ある国の金融機関の相互依存性の分析や、ある金融機関がデフォルトしたときの波及効果の分析モデルも提案され始めている。

（４）科学技術的・政策的課題

リスクの評価にあたっては頻度と規模の視点から考える必要があるが、リスクの種類によって推計手法の洗練度や推計数値の信頼性が大きく異なるため、企業の擁するリスクの内容と割合によって、頻度・規模の把握に要求される精度や手法が変わる。リスクの統合評価はこれからの研究課題である。

理論的には、さまざまな損失を引き起こす元凶となるリスクファクターの同時分布を推定できれば、望ましいリスク尺度の選択という問題を除き、リスクの統合評価は可能である。リスクの統合評価においては、ポートフォリオ全体の時価または損失額の分布の裾を特に詳細に分析することになる。ところが、分析に際して常に適切なデータの不足が問題となる。近年では、よりまれな事象の発生時に損失評価を求める傾向が高まっているので、この問題は深刻になるばかりである。なお、金融危機以降は、過去データに依存したリスク評価に対する批判も多い。過去データを用いて通常の手法で評価を行う限り、巨大損失につながる事象が過去に一度も発生していなければ、将来的の巨大損失について議論することはできない。そこで、仮想的なリスクシナリオを用いたストレステストの重要性が指摘されているが、蓋然性のあるシナリオ、特にさまざまなリスクを内包するシナリオの作成は難しい。

政策的な観点からは、リスク相互の依存関係や時間的な連鎖関係などが具体的なイメージを伴って掌握できるリスク統合評価モデルが望ましい。なぜならば、そういった相互関連性のあるモデルを土台として議論することにより、リスク管理上望ましい市場や制度を具体的に検討する道が開かれるからである。

（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）

- 最近欧米で進み始めたネットワークモデルを用いたシステミックリスクの研究は、今後の市場や制度のメカニズムデザインや金融クライシス分析に直接役立つ可能性がある。
- 保険デリバティブやキャットボンドなどリスクファイナンス手法の研究。保険デリバティブとは、従来の保険が担保してきた保険関連リスクに連動する指標の変動などを対象としたデリバティブ取引である。また、キャットボンドは大災害債券ともいわれるが、一定の条件が満たされると元本の償還が免除される変動利付社債として発行される。大規模な環境・天候災害などのクライシスに対する伝統的な再保険の代替策として使用されることが多い。これらのリスクファイナンス手法は、保険リスクを金融・資本市場の複数の投資家に移転する点に特徴があり、保険と金融・資本市場との統合リスクとして評価研究を行うことが重要となる。

- ERM との関係で、企業戦略、レピュテーション、ブランド力、組織構造などの企業の無形資産（intangible assets）に関連した新たなリスクとしての企業戦略リスク、レピュテーションリスク、ブランドリスクなどの研究。無形資産は、物理的形態または金融商品としての形態を有しない将来のキャッシュフローをもたらすもの（請求権）であり、技術力、特許、ブランド力、経営戦略、組織構造などを意味する。企業経営では、無形資産がライバル企業に対して競争優位性をつくり出す重要資産としての戦略的視点が重要である。なお、特許などの知財や商標など権利化された無形資産を除くと、一般に無形資産の価値評価やその企業収益力への効果の評価は困難であるが、今後、新たな研究領域として発展する可能性が大きい。
- オペレーショナルリスクとの関連で行動ファイナンス理論を取り込んだリスク評価の研究。

（６）キーワード

リスク評価、リスクモデリング、金融リスク（市場・流動性・信用・オペレーショナル）、ERM、資産運用・年金リスク、システミックリスク、無形資産、クライシス対応、保険、制度

（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	○	↑	● コピュラを用いたリスク計測や最適投資などの議論が進められている。数学者らによる基礎研究も進められている。国内では活発とまではいえないかもしれないが、特に後者では学術的に重要な成果もいくつかあげられている。オペレーショナルリスクの評価研究は、データの機密性から企業内部で行われており、学術サイドではあまり行われていない。
	応用研究・開発	○	↑	● 金融資産ポートフォリオのリスク計測に関しては、金融機関やシステムベンダーによる実装が進められている。その他のリスクの統合はおそらく進んでいない。欧米の金融機関に比べると遅れているといわれるが、不明。国内研究集会や学術誌を見渡すと、実務家による応用研究やモデル開発は比較的活発といえるが、国際的なプレゼンスは、まだ相対的に低いと思われる。
	産業化	△	→	● 金融資産ポートフォリオのリスク計測に関しては、金融機関やシステムベンダーによる実装が進められている。その他のリスクの統合はおそらく進んでいない。国内金融機関の水準はさまざまで、水準に応じたシステムと実装が進められている。その意味では玉石混交か。流動性リスクやオペレーショナルリスクの評価は、市場リスクと信用リスクとの関連で、金融機関を中心に定量的に把握することが重視されている。一方、製造業や流通業などの一般事業会社ではERMを実施する必要性を認識しつつも導入に至っていない企業数は少なくない。東証一部上場企業においても全社のリスクを統一的な基準で数値により把握せず、定量化は限定された範囲でのみ行っている企業が多いと思われる。なお、メガバンクなどの金融機関でのリスク把握の技術力は欧米と比べて見劣りするものではないと考えられる。
米国	基礎研究	◎	↑	● 進んでいる。どちらかという、モンテカルロ法を使った研究が盛んという印象がある。
	応用研究・開発	◎	↑	● 進んでいると思われる。大学の研究者と連携した金融機関やベンダーもある。しかし、どの程度まで進んでいるのかわからない。また、金融危機以後の規制強化の方向性が影響を与えているかもしれない。

	産業化	○	→	● 金融資産ポートフォリオのリスク計測に関しては、金融機関やシステムベンダーによる実装が進められている。その他のリスクの統合はおそらく進んでいない。一般事業会社におけるERMに関しては、個別では進んでいる企業もあると思われる。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 進んでいる。特に、スイスやフランスを中心に学術的な基礎研究が展開されている。どちらかというと、解析的な手法を用いた研究が盛んという印象がある。
	応用研究・開発	○	→	● 進んでいると思われる。大学の研究者と連携した金融機関やベンダーもある。しかし、どの程度まで進んでいるのかわからない。また、金融危機以後の規制強化の方向性が影響を与えているかもしれない。
	産業化	△	→	● 金融資産ポートフォリオのリスク計測に関しては、金融機関やシステムベンダーによる実装が進められている。その他のリスクの統合はおそらく進んでいないと思われる。一般事業会社におけるERMに関しては、個別では進んでいる企業もあると思われる。
中国	基礎研究	×	→	● あまり進んでいないと思われる。
	応用研究・開発	×		● 不明。
	産業化	×		● 不明。
韓国	基礎研究	×	→	● あまり進んでいないと思われる。
	応用研究・開発	×		● 不明。
	産業化	×		● 不明。

(注 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

(注 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

(注 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) James Lam (2003), Enterprise Risk Management :From Incentives to Controls, Wiley Finance.
- 2) Leonard Matz (2011), Liquidity Risk Measurement and Management : BASEL ・ and beyond, Xlibris Corporation.
- 3) Sim Segal (2011), Corporate Value of Enterprise Risk Management, John Wiley & Sons, Inc.
- 4) 林良造 (2010), 『ケースで学ぶ ERM の実践』, 中央経済社.

3.1.4 市場リスク

（１）研究開発領域名

市場リスク

（２）研究開発領域の簡潔な説明

市場リスクとは金融資産（株式や債券など）の市場価格の予期せざる変動、特に大幅な下落に伴う資産価値の損失に関するリスクを意味する。サブプライムローン危機やユーロ危機などの金融危機が続く現代の金融市場において、保有するポートフォリオ（資産構成）のリスクの計測と管理はすべての金融機関や投資家にとって危急の課題である。また、金融市場における取引価格を極めて短い間隔で収集することが利用可能になったことから（そのようなデータを高頻度データと呼ぶ）、理論と実証の両面で金融市場における価格決定メカニズムの精緻な研究が行われるようになった。この新しい領域は市場のミクロ的構造（マーケットマイクロストラクチャー）の研究と総称され、金融市場の制度設計に新たな知見を与えてくれると期待されている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

市場リスクの研究はポートフォリオ理論と密接な関係にある。それは最適なポートフォリオの選択規準が市場リスクの規準そのものになるためである。ポートフォリオ理論のアカデミックな研究は、1950年代にマーコヴィッツの平均分散モデルによって先鞭がつけられた（Markowitz（1952）¹⁾）。マーコヴィッツの平均分散モデルでは市場リスクはポートフォリオの価値変動の分散（あるいは標準偏差）で規定される。その後、半世紀を超えるポートフォリオ理論の研究の中で分散に代わるさまざまなリスク規準が提案されてきた。また近年の相次ぐ金融危機の影響もあり、ダウンサイド・リスクと呼ばれる価格下落のリスクに関心が集まっている。代表的なダウンサイド・リスクの規準には、バリュアットリスク（VaR）や期待ショートフォール（ES）などがある。

続いて1960年代に平均分散モデルに基づきCAPMと呼ばれる資産価格評価モデルが提案された（Sharpe（1964）²⁾）。CAPMは市場全体の動きで個々の資産価格の変動を説明するものであったが、その後CAPMの限界が広く認識されるようになったことから、複数の価格変動要因（ファクター）を含むマルチファクター・モデルが考案され、研究者のみならず実務家の間でも広く使われるようになった（Elton et al.（2006）³⁾などを参照）。

一方、1970年代にブラック・ショールズの公式が発見され（Black and Scholes（1973）⁴⁾）、資産価格変動の分散がオプション価格の評価において重要な役割を果たしていることもわかった。しかし、ブラック・ショールズの公式における分散が一定であるという仮定がボラティリティ・スマイルやボラティリティ・クラスタリングなどの現象と整合性がとれないことから、1980年代以降にさまざまな分散がランダムに変動するモデル（確率ボラティリティ・モデル）が提案されることとなった。代表的なボラティリティ・モデルには、ARCHモデル（Engle（1982）⁵⁾、Bollerslev（1986）⁶⁾）やSVモデル（Taylor（1986）⁷⁾）などがある。

確率ボラティリティ・モデルでは日々変動する分散を未知の値として推定しなければ

ならない。しかし、21世紀に入る頃になると、高頻度データを使えば取引時間中の分散を容易に近似できることがわかった。これを実現ボラティリティという(Andersen et al. (2001))⁸⁾ ⁹⁾。実現ボラティリティの研究は、マーケットマイクロストラクチャの研究とも密接に関係しつつ盛んに行われている。

（４）科学技術的・政策的課題

金融市場のグローバル化と複雑な金融商品の登場により、金融機関が保有する資産の種類は数を増す一方である。そのため各資産の価値の変動がバランスシートリスクに与える影響を的確にとらえることはリスク管理の担当者にとってかなり難しい作業となってきた。このような状況に対処するため、さまざまなモデルの高度化が試みられている。特に多数の資産のリスクを同時に評価するためには、確率ボラティリティ・モデルの多変量化が必要不可欠であろう。また、過去の金融危機の経験より、リスク回避のため資産を売却あるいは購入しようとしたときに望み通りできないリスク（流動性リスク）は、特に深刻な危機の際に顕著になることが知られている。流動性リスクは取り扱いが難しいが、マーケットマイクロストラクチャとの関連で理解が進むものと期待される。

しかし、一方でモデルの高度化はモデル構築と維持管理のために高度な知識を要する。そのため高度なモデルを駆使したリスク管理を現場で活用できる人材は、金融機関においても監督官庁においても絶対数が不足しているのが現状である。リスク管理を任せられる人材の育成はもちろん必要であるが、現場の実務家が理解しやすく使いやすいリスク管理のシステムを提供できるかが重要な課題となってくるであろう。

（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）

多数の資産からなるポートフォリオのリスクを評価するためにさまざまな多変量確率ボラティリティ・モデルが提案されている。また、実現ボラティリティの時系列構造をモデル化する試みもなされている。近年、盛んになってきた高頻度アルゴリズム取引がマーケットマイクロストラクチャに与える影響の研究も注目に値するだろう。

（６）キーワード

市場リスク、平均分散モデル、ダウンサイド・リスク・モデル、確率ボラティリティ・モデル、マルチファクター・モデル、流動性リスク

（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	○	↑	● ベイズ理論に基づく確率ボラティリティ・モデルの分析や実現ボラティリティの理論的研究で世界的な成果をあげている研究者が何人かいる。
	応用研究・開発	△	↑	● 応用研究はまだまだ発展途上である。
	産業化	△	→	● リスク管理の商用分析ツールで国産のものは質・量とも不十分である。

米国	基礎研究	◎	↗	● マルチファクター・モデル、確率ボラティリティ・モデル、実現ボラティリティ、マーケットマイクロストラクチャなどすべての分野で研究が盛んであり、世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 当該領域の応用研究においても米国は世界をリードしている。
	産業化	◎	↗	● 各種のリスク管理のため商用分析ツールが市販され、実務家の間で利用されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 研究の水準は質・量とも米国に匹敵する。研究者の分布もEU諸国（英、仏、独、北欧、南欧）に分散しており、極端な偏在は見られない。
	応用研究・開発	◎	↗	● 応用研究においても米国にひけはとらない。
	産業化	○	→	● リスク管理の商用分析ツールはまだ質・量とも米国には及ばない。
中国	基礎研究	○	↗	● 香港の大学に優れた研究者がいるが、本土では目立った研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 目立った研究は見られない。
	産業化	△	→	● 目立った動きは見られない。
韓国	基礎研究	△	→	● 目立った研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 目立った研究は見られない。
	産業化	△	→	● 目立った動きは見られない。

（注 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

（注 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

（注 3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Markowitz, H. (1952), "Portfolio selection," Journal of Finance, 7, 77-91.
- 2) Sharpe, W.F. (1964), "Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk," Journal of Finance, 19, 425-442.
- 3) Elton, E.J., M.J. Gruber, S.J. Brown, and W.N. Goetzmann (2006), Modern Portfolio Theory and Investment Analysis, Wiley
- 4) Black, F., and M. Scholes (1973), "The pricing of options and corporate liabilities," Journal of Political Economy, 81, 637-654.
- 5) Engle, R.F. (1982), "Autoregressive conditional heteroskedasticity with estimates of the variance of U.K. Inflation," Econometrica, 50, 987-1008.
- 6) Bollerslev, T. (1986), "Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity," Journal of Econometrics, 31, 307-327.
- 7) Taylor, S.J. (1986), Modeling Financial Time Series, Wiley.
- 8) Andersen, T.G., T. Bollerslev, F.X. Diebold, and H. Ebens (2001), "The distribu-

tion of realized stock return volatility,” *Journal of Financial Economics*, 61, 43-76.

- 9) Andersen, T.G., R.A. Davis, J.-P. Kreiß, and T. Mikosch (eds.) (2009), *Handbook of Financial Time Series*, Springer.

3.1.5 信用リスク

（１）研究開発領域名

信用リスク

（２）研究開発領域の簡潔な説明

銀行の企業向け融資や企業の発行する社債取引などにおいて懸案となる債務不履行（デフォルト）の確率やデフォルト時の損失額の評価モデルの研究・開発。多様なクレジット・デリバティブの評価モデルの研究・開発。最近では、デリバティブ取引相手の信用リスク（カウンターパーティリスク）の評価や国債発行者としての国家の信用リスク（ソブリンリスク）などが重要なトピックである。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

信用リスクとは、お金を借りた側（債務者）が債務不履行（「デフォルト」と表現される）におちいることによって、お金を貸した側（債権者）は契約通りに貸したお金を返済してもらえずに金銭的損失を被るという可能性を表す概念であり、銀行は主に信用リスクを収益に変換するというビジネスモデルであるといえる。

特に、銀行の企業向け貸出についての可否判断や信用力に応じた内部格付の付与などを目的として、企業の財務指標を主たるデータとして、統計学・数理計画などの分野の方法を導入したデフォルト判別分析モデルあるいは格付予測モデルが長きにわたって研究・開発されてきている¹⁾。計算機能力の向上に伴い、非常に大きいサイズのデータを基に、非常に多くの変数を取り込んだモデルの比較・検証なども行われるようになっていく。

また、銀行全体での貸出ポートフォリオの信用リスク評価・管理も、銀行に対するさまざまな規制への対応上とても重要なテーマである。特に、連鎖倒産に象徴される信用リスクの依存関係をどのように定量化し、全体のリスク量算出に関連づけるかは、ポートフォリオの規模や構成される企業の特性に依存するため、非常に重要だが難しい問題と位置づけられており、研究が最も盛んなテーマのひとつといえる²⁾。

銀行貸出のような非市場性の金融商品に対して、社債のような信用リスクを含む市場性商品の理論価値評価も重要なテーマである。特に 90 年代以降、対象債務者のデフォルト発生の有無に応じて支払額が変化する「クレジット・デリバティブ」と呼ばれる金融商品の市場での取引量が爆発的に増えてきた。サブプライム問題に始まる一連の金融危機後は複雑なクレジット・デリバティブ市場は低迷していたが、CDS（クレジット・デフォルト・スワップ）と呼ばれる基本的取引は流動性も比較的大きく、市場の CDS の取引値に基づいて他のクレジット・デリバティブ評価を行うのが常態化している。

さらに、金融危機以降、多くの市場参加者がカウンターパーティリスクを主要な信用リスクと考えるようになり、少なくとも国内外を問わず大手金融機関どうしの取引では担保付き取引が一般化し、それ以外でも CVA（Credit Valuation Adjustments）と呼ばれるデリバティブ価値調整法が採用されてきており、それが金融機関の利益にも影響を及ぼしている。また、2011 年の欧州危機によって国家の信用リスク（ソブリンリスク）もホットな話題になっている。

（４）科学技術的・政策的課題

大きく分けて以下のような課題があると考えられる。

ひとつは、銀行の貸出ポートフォリオや債券投資ポートフォリオ、クレジット・デリバティブに関連するポートフォリオや証券化商品のリスク管理に不可欠となる信用リスク依存関係の理論研究および実証研究である。これは理論的にも技術的にも困難な課題が多く、今後も信用リスク研究の主要テーマとして残り続けると思われる。第一に質と量ともに確保された低コストのデータベース整備が不可欠である。そもそも信用リスク関連では、債務者プライバシーの秘匿性や乏しい市場性といった理由から、必要とされるデータの入手可能性が低く、入手できたとしても良質とはいえないデータを比較的高価で購入する必要が生じている。第二に、依存関係のモデル化では理論的に深く追究することと実装における計算効率性のトレードオフの状況が見られる。したがって、実務の見地からはある程度強い仮定を要請する必要がある、理論自体を深化する必要があるながらそれが難しい側面がある。また、こうした研究は最近注目されている「誤方向リスク」を考慮したカウンターパーティリスク調整法（CVA）算出のためにも不可欠である。

他には、上記とも関連するが、信用リスクのある金融商品について、複雑な条件を伴う現在価値評価やそれに基づく CVA の具体的な数値計算、およびヘッジングやポートフォリオの最適化への応用も、もっと研究が必要な分野である。さらに、高速かつ精緻に大量の計算を実行するための数値計算技術の研究・開発、換言すれば「情報分野のイノベーション」も信用リスクというトピックに欠かせない課題となっている。ただし、必ずしも CVA などが信用リスクの課題として俎上に載るとは限らない。

（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）

最新の研究潮流を探るには、DefaultRisk.com のウェブサイト <http://defaultrisk.com/> が有用であり、タイトルのキーワードを追うだけでもどのようなトピックが話題なのかをつかむことができる。

一方、現実を見ると 2012 年 5 月に金融業界での新たな火種になりうる JP Morgan の巨額損失の問題が明らかとなり、規制強化の動きは避けられない可能性がある（ただし、純粋な信用リスクのトピックという位置づけではないともいえる）。いずれにしても、バーゼル銀行監督委員会による新しい規制枠組み（バーゼル 3 などと呼ばれる）の最終形によって信用リスク研究の潮流も変化することになり、バーゼル 3 の方向性を見極める重要な局面にさしかかっていることは間違いなく、ここしばらくはその動向に注目しておくことは欠かせない。

またソブリンリスクとしては、ユーロ離脱・デフォルトが懸念されていたギリシャをはじめとする南ヨーロッパ諸国の財政問題などが好例であろう。

（６）キーワード

判別分析、一般化線形モデル、スコアリングモデル、確率選択モデル、構造モデル、ハザードモデル、格付推移モデル、コピュラ、極値理論、伝播モデル、カウンターパーティリスク、CVA、ソブリンリスク

（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	△	↑	● CVA（東大経済の高橋教授ら）やコピュラ再考（東大数理の楠岡教授）などのプロジェクトが見られるが、個人ベースのものが多い。また、理論指向の強い研究が多い印象がある。国内データを用いた実証研究も増えてきたが、国際学会や国際学術誌でのプレゼンスは、まだ相対的に低いと思われる。
	応用研究・開発	△	→	● 上記と同じく、国内研究集会や学術誌を見渡すと、実務家による応用研究やモデル開発は比較的活発といえるが、国際的なプレゼンスは、まだ相対的に低いと思われる。
	産業化	○	→	● 信用リスクマネジメントのシステム開発専門企業なども少なくない。それらの技術力も欧米と比べて見劣りするものではないと考えられる。ただし、日本発といった点で注目されるものはほとんどないと思われる。
米国	基礎研究	○	→	● 国内研究集会や学術誌などからの類推だと、実務への応用も意識した理論研究が盛んな印象がある。特に実証研究という点では、裏づけデータなども豊富であり断トツという印象がある。
	応用研究・開発	◎	↑	● 基礎的な実証研究を踏まえて、応用や開発に言及する論文もDefaultRisk.comのサイトなどで数多く目にする。金融危機後は民間企業に在籍する著者たちによる論文が、カウンターパーティリスクなどのトピックで増えているように見える。
	産業化	◎	→	● 世界最大の金融マーケットを背景にもっていることも影響していると思われるが、データベースも含めて信用リスクマネジメント・システム（特にCVAなどを含む金融システム全般）の産業化においては、グローバルに最先端をいっていると考えられる。
欧州	基礎研究	◎	→	● 国内研究集会や学術誌などからの類推だと、数学ベースでも米国よりやや抽象指向の理論研究（カウンターパーティリスクなどについても）が十年近くヨーロッパ各地（個人的な関連もあるが特にフランス）の大学・研究所で非常に盛んな印象がある ^{1) 2)} 。
	応用研究・開発	○	↑	● 実務家による市場指向の応用研究も少なくないが、米国にやや及ばないという印象が強い。市場指向よりは国際的な銀行や保険の信用リスクに関係する資本規制ルールに関連する研究に強みがあるように思われる。特に、今後はバーゼル3という新たな規制導入をめぐって活発化するとと思われる。
	産業化	○	→	● 英・仏・独・スイスなどを中心に十分産業化は進んでいると思われる。ただ、欧州危機にからんで目立った動きを捕捉できていない。
中国	基礎研究	△	↑	● 中国（あるいは中国系）研究者による論文やワーキングペーパーを目にする機会は増えている。Wu編のハンドブック ³⁾ などから中国（あるいは中国系）研究者の勢いは、リスクマネジメント分野で増してきている印象がある。
	応用研究・開発	△	↑	● 同上。
	産業化	×	→	● この辺は評価できる材料がない。
韓国	基礎研究	△	↑	● 韓国（あるいは韓国系）研究者による論文やワーキングペーパーを目にする機会は増えている。
	応用研究・開発	△	↑	● 同上。
	産業化	×	→	● この辺は評価できる材料がない。

（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) Cesari, G. et al. (2010), Modelling, Pricing, and Hedging Counterparty Credit Exposure : A Technical Guide, Springer
- 2) Gregory, J. (2010), Counterparty Credit Risk : The new challenge for global financial markets, Wiley
- 3) Wu, D.D. ed. (2011), Quantitative Financial Risk Management (Computational Risk Management), Springer
- 4) 富安 弘毅（2010），『カウンターパーティーリスクマネジメント：トレーディングとの融合によるリスク管理の収益源化』，きんざい

3.1.6 リスクマネジメントの数値計算

（１）研究開発領域名

リスクマネジメントの数値計算

（２）研究開発領域の簡潔な説明

リスクマネジメントにおいて数値計算は、①対処すべきリスク事象（債券・株式市場の暴落、政府・企業の破綻など）のモデルの推定と診断、②推定されたモデルによるリスク事象発生予測、③モデルに基づくリスクの重大性の定量的評価、④実行可能なリスク回避策の立案などの作業において必要不可欠な役割を果たしている。特に近年のコンピュータ技術の飛躍的進展は、数値計算を集中的に活用するリスク管理手法を実行可能なものとし、この研究領域の学術的研究の進展と研究成果の実務への応用を加速させている。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

金融機関におけるリスク管理の実務では、バリューアットリスク（VaR）や期待ショートフォール（ES）などに代表されるリスク測度を保有するバランスシートに対して評価して、自社が抱えるリスクを絶えずモニタリングしていかなければならない。しかし、金融市場のグローバル化による投資先の多様化とデリバティブなどの複雑な金融商品の登場により、金融機関が保有する資産の価値の変動がバランスシートのリスクに与える影響を的確にとらえることはリスク管理の担当者にとってますます困難となってきた。このため株価、債券利回り、短期金利、外国為替レートなどの間の相互の関連性を説明できるような複雑で大規模な時系列モデル（例えば高次元の多変量 GARCH モデル（Silvennoinen and Terasvirta（2009）などで詳しく説明されている）¹⁾ や多変量 SV モデル（Chib, Omori, and Asai（2009）などで詳しく説明されている）²⁾ の研究が積極的に進められている。しかし、モデルの複雑化と大規模化は、モデルのデータに基づく推定と妥当性の診断および将来のリスク事象の予測のための計算負荷を著しく重くすることとなった。そこで研究者たちは効率的な数値計算手法の開発にしのぎをけずることとなった。特に複雑で大規模なモデルを使った解析に威力を発揮するのがモンテカルロ・シミュレーションである。モンテカルロ・シミュレーションは人工的に生成した疑似乱数を利用してモデルやシステムの解析を行う手法の総称であり、実装が比較的容易で非線形で高次元のモデルにも応用可能であるため、大規模モデルの解析手法として広く利用されている。例えば近年注目されているベイズ理論に基づくモデルの解析では、数値積分法の一つであるマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法（Metropolis et al.（1953）、Hastings（1970）、Gelfand and Smith（1990））³⁾ やカルマンフィルタを一般化した粒子フィルタ（Kitagawa（1996））⁶⁾ などの利用がさかんである。また、乱数による変異と交配、そして選別によって生物の進化理論における自然淘汰をコンピュータ上で再現する遺伝的アルゴリズムも従来の方法では推定や最適化が難しいモデルに適用されている。

（４）科学技術的・政策的課題

ネット技術の革新によるオンライン決済などのウェブサービスの普及により、以前よりもはるかに容易に大量のデータを収集することが可能となった。そして、この「ビッグデータ」と呼ばれる大量のデータをさまざまな意思決定に活用する動きが実業界で広がりを見せている。金融機関のリスク管理においても、住宅ローンや個人向け小口融資の貸し倒れリスクや日々の膨大な決済業務におけるオペレーショナルリスクの評価などでビッグデータの活用が重要なテーマとなってくると思われる。ビッグデータの計算処理のためには高速かつ大容量のコンピュータシステムが必要不可欠であるが、一握りの大手を除いて中小の金融機関が大規模なシステムを独自に構築・維持していくことは困難である。クラウドコンピューティングなどの活用によって比較的安価に高速な計算処理手段を金融機関に提供していくことは重要である。さらにハードウェアの整備に加えて効率的な数値計算のアルゴリズムの開発も進めていく必要がある。

（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）

大規模なデータ解析を行う際にボトルネックとなる逐次計算の限界を超えるため、並列計算を全面的に利用する分散コンピューティングシステムが使われることが多い。この分散コンピューティングシステムによる並列計算の新しい潮流として、GPU（Graphics Processing Unit）を使う試みが始まっている。GPUは本来パソコンのグラフィックスを処理するための装置である（これを汎用的な数値計算に利用できるように最初から設計したものを特にGPGPU（General Purpose Graphics Processing Unit）という）。GPUは多数のコアをもち単独でも大規模な並列計算を実行するのに適した構造をしているが、多数のGPUを組み合わせることでもっと大規模な分散コンピューティングシステムを構築することが可能となる。さらにGPUは量産され比較的安価に市場で入手可能な汎用部品であるため、大規模な分散コンピューティングシステム構築のためのコストを削減できると期待されている。GPUで数値計算を実行するためのプログラミング環境としてはCUDAやOpenCLなどがある（Kirk and Hwu (2010)⁵⁾、Kandrot and Sanders (2010)⁷⁾）。産業界でもGPUの応用への関心は高まりつつあり、ファイナンスのビッグデータを用いたリスク管理にGPUを応用する研究が今後進んでいくことが期待される。

（６）キーワード

モンテカルロ・シミュレーション、ビッグデータ、並列アルゴリズム、ベイズ理論、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法、粒子フィルタ

（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	○	↗	● 疑似乱数生成法、MCMC法、粒子フィルタなどの研究が盛んに行われており、研究水準も世界的に見ても高い。
	応用研究・開発	△	↗	● 数値計算の研究者の層は厚いものの、リスクマネジメントへの応用は緒についたばかりである。
	産業化	△	→	● まだまだ不十分である。
米国	基礎研究	◎	↗	● モンテカルロ・シミュレーション発祥の地であり、研究の歴史は半世紀以上に及ぶ。コンピュータサイエンスの中心地でもあることから、数値計算の研究はハードウェアとソフトウェアの両面で世界の最先端を行っている。
	応用研究・開発	◎	↗	● リスクマネジメントにおける応用研究においても米国は世界をリードしている。
	産業化	◎	↗	● シリコンバレーのIT関連企業を中心にビッグデータ解析の産業への応用が進められている。ウォール街の大手金融機関や投資ファンドでは高速コンピュータを駆使した高頻度取引が盛んに行われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	● MCMC法、粒子フィルタなどの研究は米国に十分対抗できる水準に達している。
	応用研究・開発	○	↗	● リスクマネジメントにおける応用研究も米国に肩を並べるところまでできている。
	産業化	○	↗	● 米国ほどではないが金融機関を中心に産業への応用も進みつつある。
中国	基礎研究	△	→	● 目立った研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 目立った研究は見られない。
	産業化	△	→	● 目立った動きは見られない。
韓国	基礎研究	△	→	● 目立った研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 目立った研究は見られない。
	産業化	△	→	● 目立った動きは見られない。

（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) Silvennoinen, A. and T. Terasvirta (2009), “Multivariate GARCH models,” in Andersen, T.G., R.A. Davis, J.-P. Kreiß, and T. Mikosch (eds.), Handbook of Financial Time Series, Springer, 201-232.
- 2) Chib, S., Y. Omori, and M. Asai (2009), “Multivariate stochastic volatility,” in

- Andersen, T.G., R.A. Davis, J.-P. Kreiß, and T. Mikosch (eds.), Handbook of Financial Time Series, Springer, 365-402.
- 3) Gelfand, A. E., and A.F.M. Smith (1990), “Sampling based approaches to calculating marginal densities,” Journal of the American Statistical Association, 85, 398-409.
 - 4) Hastings, W.K. (1970), “Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications,” Biometrika, 57, 97-109.
 - 5) Kirk, D.B., and W.W. Hwu (2010), Programming Massively Parallel Processors : A Hands-on Approach, Morgan-Kaufmann.
 - 6) Kitagawa, G. (1996), “Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian non-linear state space models,” Journal of Computational and Graphical Statistics, 5, 1-25.
 - 7) Kandrot, J., and E. Sanders (2010), CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming, Addison-Wesley Professional.
 - 8) Metropolis, N., A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller (1953), “Equations of state calculations by fast computing machines,” Journal of Chemical Physics, 21, 1087-1092.

3.2 モデリング

3.2.1 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

実社会の諸問題を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ことを受けて、従来は扱うことが困難だった実社会の複雑な諸問題を数理的手法によって解決することが世界的に期待されている。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。既存の数学を異分野へ一方的に応用するのではなく、実現象や実問題に即した適切な数学的定式化を行うことで、制御や最適化による実社会の問題解決が可能となる。また、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で、分野横断的应用が可能なモデリングの基礎技術が確立できると期待される。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、物理や工学だけでなく生命現象、ライフサイエンス、エネルギー問題、経済などを含む幅広い対象への分野横断的应用は今後ますます重要になっていくと思われる。

近年では現実のシステムがもつ性質を反映したいいくつかの数理モデルの枠組みが世界的に大きく注目されている。具体的な例を以下にあげる。①電力網、通信網、神経網、人の接触関係などの現実の複雑なネットワークにおける構造とダイナミクスを表現するネットワークモデルの研究が世界中で急速に広まりつつある。②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システムを統合的に扱うためのマルチスケールモデルやミクロモデルとマクロモデルの中間に位置づけられるメゾスコピックモデルが諸外国で活発に議論されてきており、生物、生態系、気象、材料工学などへの応用が期待されている。③連続変数と離散変数を含む電子回路や物理的作用と化学的作用を含む生物の組織形成などのように異質なシステムが相互作用するシステムを記述するための、ハイブリッドモデルやマルチフィジックスモデルが注目されている。

数理モデリングにおいては、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・抽象化はトレードオフの関係にあるので、実現象に通じた実験・開発研究者と数理モデリングを行う理論研究者との間の連携は非常に重要である。そのような連携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、欧米に比べてまだ本格的な融合研究や学際的研究は遅れているという印象を受ける。他方で、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定式化を行ったりする必要があることが多い。その意味で、異なる数理モデリング技術にかかわる理論研究者間の連携も不可欠であり、数理モデリング技術を包括的に体系化・共有化できるような組織が今後重要性を増すと考えられる。欧米では、そのような役割を担う複雑系科学に関する大学研究センターや研究所が数多く存在してい

る。わが国では、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および同拠点の内閣府合原最先端数理モデルプロジェクト（平成 21-25 年度）、明治大学先端数理科学インスティテュートおよび同拠点の GCOE プログラム「現象数理学の形成と発展」（平成 20-24 年度）、JST 戦略的創造推進事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」（平成 19-27 年度）などにおいて、社会的ニーズの高い課題の解決を目指した複雑系の数理モデリング技術の開発が行われている。中国や韓国の数理モデル研究は諸外国のトレンドを追う形で進んでおり、オリジナリティの高い成果はまだあまり見受けられないが、外国で実績を積み帰国した若い世代の研究者がこれから質の高い研究成果を生み出していくと予想される。

（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など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。こうした大量のデータから実際の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。

実験や実践的応用の現場では、経験則に基づいて物事を決めるプロセスが重要視されていることも多く、数理モデルの有用性に関する認識の低さや数学的手法の難解さが原因となって、数理モデリングを応用する際に障害となることがある。数理モデリングを行う理論研究者と個別の現象に通じた実験・開発研究者との間の垣根を低くする機会を増やすことは課題である。

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の把握を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、全世界の社会的な重要課題を敏感に察知できるような体制づくりが望まれる。また、欧米と日本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）

センサ技術の発達やブログ、Twitter などのソーシャルメディアの普及により、人の行動・移動・情報伝達データが取得できるようになりつつある。これらのデータを反映したヒトの社会行動・移動、感染症伝播、情報拡散、意見・文化形成、ミーム（meme）などの数理モデリングが特に欧米で急速に進んでいる。2011 年くらいから欧米では多くのプロジェクトが発足しファンディングも増加している^{1) 2) 3)}。

米国の NSF、NIH、USDA、および英国の BBSRC が共同で、約 15 億円を投じて 2012 年から 5 年間のプロジェクト「感染症の生態学と進化（Ecology and Evolution of Infectious Diseases）」を発足しており、その目標の一部として、感染症抑制のための生態学的、進化学的、社会生態学的原理の数理モデリングを掲げている⁴⁾。

DOE は、応用数学分野のプロジェクト編成の枠組みに関する指針において、今後どのような数理モデリング研究やアルゴリズム研究にファンディングを配分していくかを示している⁵⁾。

英国の EPSRC は 2010 年から 4 年間、災害に強く持続可能な社会の実現にあたって

の諸問題を解決するための複雑系科学のプロジェクトに約 11 億円を投じており、その一部として数理モデリングが期待されている⁶⁾。

（６）キーワード

数理工学、複雑系科学、ネットワークモデル、マルチスケールモデル、メゾスコピックモデル、ハイブリッドモデル、マルチフィジックスモデル

（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	◎	↑	● 例えば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、各大学の数理工学科や複雑理工学科などにおいて、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。 ● 2009年から内閣府合原最先端数理モデルプロジェクトが行われており、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が活発に行われており、世界的にも存在感を示している。 ● 明治大学では、2011年に先端数理科学研究科が発足しており、2013年には総合理工学部内に現象数理工学科が設置される予定で、実現象の数理モデリングを専門とする人材が増えると期待される。 ● 2007年からJST戦略的創造推進事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」において、実世界の諸現象の数理モデリング研究が個人レベルおよびグループレベルで推進されている。 ● 2012年3月に日本学術振興会とヨーロッパ科学財団の主催による日本－欧州先端科学セミナーが「革新に向けた数学：大規模複雑システム」というテーマで行われ、数学の方向性が議論され、実世界の大规模複雑システムの数理モデリングの重要性が確認された⁷⁾。 ● 2012年に開始したJST戦略的創造推進事業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、数理モデル及び基盤技術の創出」では、将来のエネルギー問題に貢献する数理モデリングが大きく進展すると期待される。
	応用研究・開発	○	↑	● 東京大学では、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。 ● 渋滞学という省エネなどの実問題に役立つ新しい数理モデルベースの研究分野が創成されている。 ● 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	○	↑	● 新日本製鐵は溶鉱炉の数理モデルを構築するため、2008年に先端技術研究所内に数理科学基盤研究グループを立ち上げている。 ● 数理モデルの産業応用を目指す機運が高まっており、文科省は数学と諸産業の連携を強化するためのワークショップを開催している⁸⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	● 1980年代に設立されたサンタフェ研究所を筆頭に、実社会の複雑系研究を目的とする多くの学術研究機関が設置されており、研究者人口も多く、世界の先端的数理モデリング研究をリードしている。 ● 全球気候モデルや大気循環モデルの開発が多くの大学・研究機関で行われており、地球温暖化の影響予測や原因の推定などに用いられている⁹⁾。 ● ブログやTwitter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¹⁾ ²⁾ ³⁾。 ● 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。 ● NSFやNIHががん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¹⁰⁾。

	応用研究・開発	◎	↗	● 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値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	◎	↗	● 多くのIT企業、製造業、金融機関などで数値モデルが開発されソフトウェアなど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、信号処理システムなど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。
	基礎研究	◎	↗	● ドイツのマックスプランク研究所などのように、複雑系研究に関する世界的に著名な研究機関が多く存在し、最先端の数値モデリング研究が行われている。 ● 各国の数値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¹¹⁾。 ● 英国は数値生物学のレベルが高く、生態系、感染症、がんなどの数値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値モデリングが研究されている¹²⁾。 ● スイス連邦工科大学 (EPFL) を中心としたBlue Brain Projectでは、神経細胞の数値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が構築されている¹³⁾。 ● 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¹⁰⁾。
欧州	応用研究・開発	◎	↗	● 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、数値モデリングに注目が集まっている。
	産業化	◎	↗	● ライブラリのパーツを組み合わせることで、複雑な物理現象など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、自動車会社などの産業界で利用されている ¹⁴⁾ 。
	基礎研究	○	↗	● 中国政府は数学研究予算を急激に増加しており、実現象の数値モデリング研究を担う人材が今後増えていくと予想される。 ● 数値モデルを用いた研究論文は増えてきているが、日欧米諸国と比較すると新規性や独創性の高い研究はあまり見受けられない。 ● 中国科学院では、生命科学分野の数値モデリング研究に一定の成果が見られる。
中国	応用研究・開発	△	↗	● 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、数値モデルの応用を行う人材が育っている。
	産業化	×	→	● 特筆すべき活動・成果は見られない。
	基礎研究	△	→	● 実現象や複雑系の数値モデリングを専門とする世界的に有力なグループが大学・研究機関に見られない。
韓国	応用研究・開発	△	→	● 特筆すべき活動・成果は見られない。
	産業化	×	→	● 特筆すべき活動・成果は見られない。

(注 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

(注 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

(注 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（８）引用資料

- 1) NSF Funding : Meme Diffusion Through Mass Social Media
<http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=1101743>
- 2) NSF awards Truthy team \$905,000 to develop tools for real-time social media analysis
<http://newsinfo.iu.edu/news/page/normal/19178.html>
- 3) James S. McDonnell Foundation, 21st Century Science Initiative Grant: Studying Complex Systems
<http://www.jsmf.org/grants/2011022/>
- 4) NSF, NIH, USDA, BBSRC, Ecology and Evolution of Infectious Diseases
<http://www.nsf.gov/pubs/2011/nsf11580/nsf11580.htm>
- 5) DOE : A New Paradigm for DOE Applied Mathematics (2012)
<http://science.energy.gov/~media/ascr/ascac/pdf/meetings/Mar12/LandsbergAS CAC03272012.pdf>
- 6) EPSRC FUND, Complexity of science unraveled to tackle societal issues
<http://www.epsrc.ac.uk/newsevents/news/2009/Pages/complexityofscience.aspx>
- 7) 日本－欧州先端科学セミナー、Mathematics for Innovation: Large and Complex Systems
<http://www.jsps.go.jp/esf-jsps/yotei.html>
- 8) 文科省「数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ」
http://www.mext.go.jp/a_menu/math/index.htm
- 9) NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS)
<http://www.giss.nasa.gov/projects/gcm/>
- 10) 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
- 11) European Conference on Complex Systems 2012
<http://eccs2012.eu/>
- 12) SocioPatterns
<http://www.sociopatterns.org/>
- 13) Blue Brain Project
<http://bluebrain.epfl.ch/>
- 14) Modelica
<https://modelica.org/>

3.2.2 エージェント・ベース・モデルとマイクロ・マクロ連携

（１）研究開発領域名

エージェント・ベース・モデルとマイクロ・マクロ連携

（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マイ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

エージェントの定義は、センサ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というものである。つまり、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いえる。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。

ひとつは設計指向をも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。もうひとつのアプローチが、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いわれている。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。マイ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、マイクロ主体の行動が変化する。このような関係を、マイクロ・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を提供し、社会学者がさまざま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り、主に EU 域内の社会的文化的背景が異なる国々の社会学者が中心となって、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。ゲーム理論を拡張すべく米国の社会学者が開始したマルチエージェントモデルを用いた社会シミュレーション研究は、欧州に加えて日本にも広がりを見せ、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¹⁾⁴⁾。一方、中国や韓国の動きは緩慢ではあるが、台湾では近年、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おり、情報発信も活発となっている⁵⁾⁶⁾⁹⁾。

応用研究では、米国が大規模モデルの研究で進んでおり、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発展して

いる²⁾。また、考古学分野では、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³⁾。このように、社会学、経営学、マーケティングなど社会科学者を中心に、さまざま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。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与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ことである。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ときに、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プロトコル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、社会科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科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 1 社のみ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）

- 欧州において、2008 年から EU 域内の土地利用と経済活動の政策効果を分析する

ためにマイクロシミュレーションとマルチエージェントモデルを利用したPRIMA (Prototypical Policy Impacts on Multifunctional Activities in rural municipalities) プロジェクトがスタートしている¹⁰⁾。

- 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、社会科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¹¹⁾。
- 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⁷⁾。

（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	◎	→	● 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。
	応用研究・開発	◎	→	● 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与え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。 ● 応用分野では研究が進んでいるが、これらを統合する方向性は見えていない。
	産業化	○	→	● 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も始まっている。 ● 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。

米国	基礎研究	◎	→	● 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。
	応用研究・開発	◎	↗	● 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、ミクロ・マクロ連携に加えてミクロ・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。
	産業化	○	↗	● 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Maison、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、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。 ● 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	◎	→	● 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。
	応用研究・開発	◎	↗	● 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さまざま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。
	産業化	○	→	● 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。

中国	基礎研究	○	→	● 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の手法のひとつとして、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	△	→	● 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⁸⁾。
	産業化	×	→	● 特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	● 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	△	→	● 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。
	産業化	×	→	● 特筆すべき活動・成果は見られない。
台湾	基礎研究	○	↗	● 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、ファイナンス理論など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	○	↗	● 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・金融研究研究などが進んでいる。
	産業化	△	→	● 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) Proceedings of the seventh international workshop on agent-based approaches in economic and social complex systems, 2012,
<http://paaa.asia/aescs2012.html>
- 2) Proceedings of the Computational Social Science Society of America Annual Conference 2011,
<http://computationsocialscience.org/conferences/17-2>
- 3) Proceedings of the seventh conference of the European social simulation association 2011,
<http://www.essa2011.org/>
- 4) Proceedings of Joint Agent Workshop and Symposium 2011,
<http://jaws-web.org/event/jaws2011/>

- 5) The 14th international conference on principles and practice of multi-agent systems 2011,
<http://www.prima2011.org/>
- 6) Proceedings of the 6th Pacific Rim International Workshop on multi-agents 2003,
<http://prima.uos.ac.kr/>
- 7) Centre for Research in Social Simulation CRESS,
<http://cress.soc.surrey.ac.uk/web/home>
- 8) Chao Yang, et.al., 2009, 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 vol. 12, no. 25
- 9) Artificial Intelligence Economic Research Center,
http://www.aiecon.org/index_e.php
- 10) PRIMA: Prototypical Policy Impacts on Multifunctional Activities in rural municipalities
<https://prima.cemagref.fr/>
- 11) The center of connected learning (CCL) and computer-based modeling
<http://ccl.northwestern.edu/>

3.2.3 統計モデル

（１）研究開発領域

統計モデル

（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計量モデリングの統合的活用を実現し、一挙に海外との格差を解消する。そのために、計量的モデリングの非専門家である研究者・産業界と、計量モデル専門家の間での知の利活用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

（3-1）標準的統計手法活用から現象にフィットした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。関心のある現象を自在にモデル化するということは国内外ともにまれであったが、第二次大戦後この時期までは、正規線形モデルの効果的適用については、科技庁系の（財）日本科学技術連盟、通産省系の（財）日本規格協会の開発した産業界向け標準教程と、それを基にした先進企業独自の社内教育もあり、産業界においてはおおむね 1990 年代前半まで、わが国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、計量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。またそれに先立つ 1970 年代から、以下で述べるように統計科学、特に計量経済学、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。

（3-2）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

米国では、1980 年代後半から商用統計・計量ソフトウェアの 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）が急成長し、柔軟かつ広範なモデルの知の諸学術・産業界への展開が加速した。特に、SAS 社（1976 年 North Carolina State University のプロジェクトとして開始、1985 年日本支社設立、現在世界 55,000 サイトで採用、日本では 1,500 社 2,300 サイト採用）は、当初の米国 FDA (Food and Drug Administration) に保証された医薬品開発研究支援から、現在は、企業経営課題解決に焦点を当てたソフトウェア企業に脱皮している。SPSS 社（1988 年設立、世界で 250,000 ユーザ、国内で 20,000 ユーザ）は 2009 年 IBM に 12 億ドルで買収された。IBM 社の狙いは企業経営のモデリング観点からの支援環境を充実させることにあった。一方、S-plus（日本では 3,000 サイト、数理システム社が販売してきたが、NTT Data

に吸収）は、GNU-S というべきフリーソフトウェア R の全世界の研究者による共同開発を通じ、今日では自由に利用可能なモデルツールに変貌しつつある。IBM は、SPSS の機能拡張方法として R との接続ツールを開発している。

これに対して、日本では 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。特に、品質管理活動支援とその教育的側面に特化したソフトウェア STATWORKS は、早稲田大学の棟近雅彦教授（品質管理）を委員長とする 10 名の大学関係者が開発委員会として助言に当たり、海外にも輸出されている。ただ、わが国開発のソフトウェアは、米国の 3 つの巨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。

（3-3）わが国モデルの知を支える専門家層の欠如

今日わが国では、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モデリング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いわざるを得ない。一方、この種のモデリングの知の統合的理解は、米国、英連邦諸国では通常大学に設置されている統計学科（含む、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。英国王立統計協会、アメリカ統計学会はすでに、統計研究者のアカデミックソサエティというよりは、これらモデルの知に基づき産官学のプロジェクトを支える職業専門家の集団に変貌している。米国政府は、数理的方法を用いてデータの分析・解釈に当たる職業統計家の総数は、2009 年現在 29,208 名（学部卒、望ましくは修士卒とされている。研究者となるためには Ph. D が要求される、平均年収は\$72,830、平均時給は\$35.02 である）としている。就業先は 20%が連邦政府、研究職 12%、大学 9%、地方政府 8%、保険関係 7%である。2010 年から 2020 年に至る職業統計家の増加率は、連邦政府は 14%と推定している (<http://www.bls.gov/ooh/Math/Statisticians.htm>)。統計家以外も含め、関連する数理科学・モデリング分野で活躍する米国の職業人についてまとめたものが、表 3-1 である。

表 3-1 米国におけるモデル関連専門職

関連職種と就職に必要な学位	職業数	2010-2020伸び率 (%)	平均年収 (\$)
統計家 (学士)	25, 100	14	72, 830
保険計理士 (学士)	21, 700	27	87, 650
経済専門家 (学士)	15, 400	6	89, 450
金融分析 (学士)	236, 000	23	74, 350
マーケット分析 (学士)	282, 700	41	60, 750
数学家 (修士)	3, 100	16	99, 380
OR専門家 (学士)	64, 600	15	70, 960
高等教育教員 (博士)	1, 756, 000	17	62, 050
調査士 (学士)	19, 600	24	36, 050

一方、わが国では、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（各省統計部局の職員数は判明しているが、このすべてが統計専門職という位置づけではない）。ちなみに、米国統計学会は事実上国際学会であるが、会員数は 43,000 名であり、ほぼすべての米国内職業統計家が所属している。これに対して日本統計学会の規模は 1,200 名であり、政府・産業界の関係者（非大学系会員）は 500 名程度にすぎない。米国政府 Census 局の統計数理専門職求人の場合、24 学期間の数学、統計学の講義履修を基に、数値解析、数理モデル、線形代数、解析、ベクトル解析、数論、微分方程式、確率論、回帰分析、数理統計学、数理的 OR 技法、標本理論、確率過程、調査票設計、データ収集法、調査技術などの専門知識を求めているとともに、調査設計のみならず時系列モデリングや予測にかかわる職業への関心も求められている。なお、この種のモデル開発技能やモデルに基づくコンサルティング機能を有する専門家育成について、わが国にその学部・修士レベルの学科・専攻レベル別の教育拠点が僅少なこと（理工系学部レベルでは慶應義塾大学理工学部数理科学科統計コース、修士課程では総合研究大学院大学複合科学研究科統計科学専攻）は述べたが、中国では国策で 300 大学、韓国では 70 大学にこの種の教育拠点を設置しており ASEAN 諸国でもこの種の拠点設置のないのは日本だけである。

（3-4）わ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、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（Shibata, R, and Sibuya, M. (1991) User interface provided by D&D (Data and Description), *Bulletin of the International Statistical Institute*, 1, pp. 1-25.）。この方法論については、横内、柴田（2001）「インターデータベース—D&D インスタンスのエージェント化」統計数理 Vol.49, No.2, pp. 317-331. において、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にまで進展したが、国際的なものとなっていない。しかし、わが国のモデリング専門家層欠如の中で、モデルにかかわる知自体の統合的理解と再利用を加速する大きなテーマのひとつとして注目できる。

（4）科学技術的・政策的課題

（4-1）統計モデルの発展に追いつかないわが国の応用

1980 年代、すなわち重回帰分析に代表される標準的統計的方法の適用時代までは、わが国の産業界・学术界は、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、モデル全盛の現在、ごくわずかなモデラーと、偶然的にインターフェースを形成できた学術分野を除いては、先進諸国が 1970 年代以降開発してきた次に示すような発展モデルへの学术界・産業界の応用ないしは浸透は全く不十分である。ここでは、そのことを方法論に関する新規性・展開性についての単純な尺度を用いて示す。行ったのは、Google Scholar を用いた全世界文献と日本語文献との検索結果である。検索手順例を示す。

① “Statistical Modeling” を世界全体、日本語で検索する。その際、2001 年以降と全体とを検索する。その結果、世界全体で 41,700 件、日本語で 32 件、2001 年以降に

については、世界全体で 17,100 件、日本語で 20 件という検索結果が導かれる。

②次に、上記の検索結果の中で **Application** という語が用いられているものを絞り込むと、その結果、世界全体で 27,200 件、日本語で 10 件、2001 年以降については、世界全体で 16,000 件、日本語で 7 件という検索結果が導かれる。

これらの分析をさらに進めると、第一に、国際的な研究動向については先端的な計量モデルも理論的論文よりは諸分野への適用研究がかなり多く存在するという意味でわが国とは対照的な状況となっている。一方、全体として海外応用研究では、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方法についての応用率が、学術レベルではすでに小さくなっている。

（4-2）統計モデル発展に関する俯瞰

1970 年代以降の統計モデル発展の方向を以下の①から⑤のように分類する。計量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。わが国でも、時系列モデル、空間時系列モデルなどで、いくつかのオリジナルな貢献が認められる。しかし、わが国の多くの学术界、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。

①変動を記述する情報の多様性拡張

統計的実験計画法発祥の地であるロザムステッド農事試験場の **Nelder and Wedderburn**（1972）の一般化線形モデルに代表される、被予測変数として、質的変量、順位変量、多項選択変量などさまざまなタイプの変量の変動について記述するモデルの開発。これに関しては、国内外で医学・生物学領域でのリスク分析適用が制度的になされ、生物統計学専門家育成などが、大橋靖雄氏（東京大学医学部教授）を中心に日本科学技術連盟を端緒に、大学院レベルでは東京理科大学工学部で製薬会社専門家などを対象にした医学統計コースなどが開設されていたこともあり、他分野に比べるとそれほど遅延状況はない。一方、計量経済学分野でも質的選択問題としてこの領域は独自に発展しており、2000 年にシカゴ大の **D. McFadden** がノーベル経済学賞を受賞し、その方法はわが国マーケティング・サイエンス分野でも盛んに応用されている。質的選択問題については、スタンフォード大学経済学科の雨宮健名誉教授など日本人の貢献も大きい。また、1990 年代には三菱経済研究所などでこの問題に特化したモノグラフなども発刊されていた。なお、**McFadden**（1973）の理論は計量生物学分野では、英国の **Cox**（1972）の比例ハザードモデルと呼ばれている体系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** の文献の引用回数は（累積ではなく）増大している。非ガウス変量のモデル開発にわが国が本質的な役割を果たしていないのは、この種の情報のモデリングというよりは記述多変量的方法開発が、「数量化理論」という枠組みで林知己夫、駒沢勉ら統計数理研究所のグループによって推進され、フランスデータ解析学派の「多重対応分析（Correspondence Analysis）」とともに一定の評価を受けていたという事情もある。今日的には、これら記述多変量解析的方法論は、一般化線形モデルと非線

形モデル（乗法モデル）との中間領域の研究と見なすこともできる。

②系統的変動記述方法の柔軟化

①で述べた Cox の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なものとした代表的なものであるが、一般化線形モデル以降、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なモデリングの開発が多数行われた。その代表的なものが Tukey の影響を受けたベル研究所データ解析学派の Hastie and Tibshirani (1990) が中心となって開発した、一般化加法モデル (Generalized Additive Model) である。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モデル（射影追跡回帰モデル、R）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ひとつであり、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的方法論ともモデル上密接な関係がある。すでに、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な利用が行われていないわが国応用計量モデル学上の後進分野である。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。

③時空間の動的モデル

時系列モデルについては、Box and Jenkins (1976) の ARIMA モデル提案以降、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。おおよそ、特に、Durbin and Koopman (2001) らの欧州グループとともに世界の先端を走ってきた。

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ある尾形良彦らの ETAS モデルが国際水準を抜くものとなっている。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、シートベルト着用の政策効果の検証を含めて英国 Durbin が十分な成果をあげている。わが国では、政策部局のモデル利用はこれまで ARIMA モデル周辺が中心であったが、近年は東京大学経済学部国友直人教授らの貢献もある。

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としての ARCH、GARCH モデルの研究が米国の計量経済学者 Engle (1982) らによって開始され、2003 年の Nobel 経済学賞を受賞している。この分野はわが国でも産業界が参入している状況もあり、その理論的理解は別として産業界への展開自体は欧米にわず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。この点でも東京大学の吉田

朋広教授などが国際的な水準の理論・応用研究を展開している。

④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 (1970) による LISREL 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、宮川雅巳らテクノメトリックス分野で 1990 年代後半以降 Graphical Model を産業界で活用する動きが活発となり、(株) Ricoh の廣野元久氏などが独自のソフトウェア GGM、LGM を開発した。

これに対して、構造方程式モデルは SPSS 社の AMOS や Stanford 大学 Bentler 開発の 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、わが国は米国に次ぎ、AMOS ユーザ数では世界第 2 位である。共分散構造モデルのわ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。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、理工学分野でのパターン認識でも進められている。

⑤Stochastic 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。

(5) 最近の注目動向 (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

今日、諸分野で注目されているベイズモデルは、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。古典的な 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英国派 Bayes ではなく、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、現在最尤推定量に基づく諸モデルを 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ている。

例えば、Graphical Model や因果モデルの Bayes Model としての Bayesian Net モデルなどは、通常のグラフィカルモデルよりすでに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すでにベイズモデルへの対応を完了している。

（６）キーワード

ベイズモデル、一般化線形モデル、グラフィカルモデル、潜在クラスモデル、非線形モデル、状態空間モデル、確率的フロンティアモデル、セミパラメトリックモデル、構造方程式モデル

（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	△	→	● 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。
	実用評価	×	↓	● 1980年代の計量モデル産業利用全盛の時代からは、後退が続いている。
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	◎	↑	● 応用研究も活発。
	実用評価	○	↑	● 高度計量モデルの利用の広がりは限定的。
英国	基礎研究	◎	↑	● 米国に次ぐ基礎研究。
	応用研究	○	→	
	実用評価	△	→	● 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	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	△	↑	● 欧米と類似の研究・コンサルテーション体制整備。
	実用評価	△	→	● 産業界への適用状況については不明。
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	△	↑	● 欧米と類似の研究・コンサルテーション体制整備。
	実用評価	△	→	● 産業界への適用状況については不明。

（注 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

（注 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) Aigner, Lovell and Schmidt (1977) Formulation and estimation of stochastic frontier production functions. *Journal of Econometrics*, 6, pp.21-37.
- 2) Box and Jenkins (1976) Time series analysis, Wiley.
- 3) Cox (1972) Regression models and life tables, *Journal of Royal Statistical Society, Ser. B*, 34, pp.187-220.
- 4) Durbin and Koopman (2001) *Time series analysis by state space methods*, Oxford University Press.
- 5) Engle (1982) Autoregressive conditional heteroskedasticity with estimates of the variance of UK inflation, *Econometrica*, 50, pp. 987-1008.
- 6) Goodman (1974) Exploratory latent structure analysis using both identifiable and unidentifiable models, *Biometrika*, 61, pp. 215-231.
- 7) Hastie and Tibshirani (1990) *Generalized Additive Models*, Chapman and Hall.
- 8) Heston (1993) A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options, *The Review of Financial Studies*, 6, pp.327-343.
- 9) Jöreskog Jöreskog (1970). A general method for analysis of covariance structures. *Biometrika*, 57, pp. 239-251.
- 10) Kitagawa (1987) Non-Gaussian state-space modeling of non-stationary time series, *Journal of American Statistical Association*, 82, 1032-1041.
- 11) McFadden (1973) Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, in P. Zarembka (ed.), *Frontiers in Economics*, Academic Press.
- 12) Nelder and Wedderburn (1972) Generalized linear models, *Journal of Royal Statistical Society, Ser. A*, 135, pp.370-384.
- 13) Ogata (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of the American Statistical Association*, 83, pp.9-27.
- 14) Takezawa (2005) *Introduction to Nonparametric Regression*, Wiley.
- 15) Hayashi Hayashi and Yoshida (2005) On covariance estimation of non-synchronously observed diffusion processes, *Bernoulli*, 11, pp. 359-379.
- 16) 宮川雅巳（1997）グラフィカルモデリング，朝倉書店。

3.2.4 動学的経済モデルと統計整備

（1）研究開発領域

動学的経済モデルと統計整備

（2）研究開発領域の概略

マクロ経済政策や年金制度設計に必要な動学的モデリングと、その実証分析に適合した経済統計データの整備に関する研究開発。

（3）研究開発領域の詳細な説明と内外の動向

国民経済（マクロ経済）の舵取りや政策決定は、供給サイドにどう影響するかを見極めることが重要となっている。一時点の政策変更であっても、家計が労働供給意欲を削ぐものであれば、数年ないし数十年にわたって、経済全体の生産性上昇に悪影響を及ぼし続けることがあり得る。このため、近年の経済政策の立案にあたっては、経済状態の時間的遷移を明示的に取り扱う動学的分析が欠かせない。政策浸透が時間を追って変化する金融政策や、国民の間で利害が一致しにくい年金制度を考える際には、動学的一般均衡モデル dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) model が世界的に主流となってきた。

計量経済モデルの歴史を振り返ると、ケインズ経済学を直感的にモデリングした IS-モデルが 1970 年代に興隆をみた。このモデルは、半年間といった所定の期間に生み出される所得が過不足なく設備投資に充当されるという意味で、投資 (I) と貯蓄 (S) を均衡させる条件と、金融資産のうちで利子を生まない貨幣残高 (M) が国民の間で保有される需要 (L) に一致する条件の 2 つに専ら焦点を当てて、国民経済全体の生産総量を導こうとする体系である。しかし、IS-LM モデルでは、設備投資の中身によって、それが将来生み出す所得が増えも減りもするという経済社会のうねりが大方捨象されてしまう。また、政策論議を通じて国民が政策変更を先取りして、自身の経済活動を変えるような学習過程も取り込めず、過去出現した政策反応が経済情勢の異なる局面で繰り返されるという誤った予測で止まってしまう。政策選択を表現できるモデリングは容易に見いだせないという「ルーカス批判」(Lucas (1976))¹⁾ は、経済に関するモデリングが対象である国民経済に対して中立でいられないことを示した。90 年代になり、国民が先々を見越して貯蓄や労働供給を変化させる行動を組み込む動学モデル、中でも数値解析可能なアプローチに、米国の経済学界の関心が集まった。制約条件が時間的に変化する環境で、外的ショックに対して人々や企業がとる経済行動を、最適制御を応用して解明するもので、それと整合的な金利あるいは金融環境を見いだすアプローチである。これを forward looking model と呼び、米国の中央銀行 (Federal Reserve Board) を皮切りに、主要国の政策現場で採用されるようになった。過去の経済活動（企業投資や生産性変化など）を再現できる体系に仕上げられれば、将来変化のシミュレーションも可能なモデルと期待される。

21 世紀に入り、日本や米国で金利をほぼゼロ水準まで低下させる政策が続き、マイナス金利という選択肢がない状況に至って、金融緩和と金融引締めを対称的に運営することができないこと、あるいは金利に関する人々の反応が線型でないことが認識されるよ

うになった。この非対称性を提示できる経済モデルは DSGE しか見当たらず、DSGE の頑強性が一層明確になっている。

日本も含めて先進国の中央銀行が用意している DSGE モデルは、企業行動、家計行動、および財政運営や金融政策に対する民間主体の反応（期待インフレ率の変化）を定式化するものとなっている。これに輸出入や為替相場の変化を加えて、日本のような貿易立国（開放経済）を表現する計量モデルが待望される。それには、動学的モデリングに組み込まれる状態変数が自己回帰過程に従うなどの検定を、あらかじめ行う必要がある。また、日本と米国では、儉約指向や転職行動に明確な差異が観察される。こうした差異を人々の行動選択という観点に立って、定量的に検出することも、モデリングの巧拙につながる。モデルを性格づける **deep parameter** の検出である。経済モデリングでは、カリブレーション作業に位置づけられる。

年金財政の制度設計・抜本改定など、半世紀を超えるマクロ経済の経済厚生や成長力を考える上でも、最適制御を組み込んだモデリングが重用される。**overlapping generation model (OLG)** と呼ばれる複数世代の重層構造を前提とし、代表的個人（あるいは国民総和）の経済厚生を最適化する。**Blanchard (1985)**²⁾ や **Gertler (1999)**³⁾ が先駆である。年金問題は数十年に及ぶ長期間の経済変動を対象とするため、インフレの有無に対する国民の予想をモデルに組み込むと、現実適合性が高まる。こうした問題設定では OLG と DSGE を結合して、最適解を求めることになる。

さて、動学的モデリングの実証には、経済変数に対応する統計データを用意しなくてはならない。統計データが名前どおりとは限らない。例えば企業の設備投資額という変数には、日本の付加価値を生産するために必要な資本ストック総量の減耗前変化分を表現するデータが望ましい。しかし、日本の資本ストック総量に関するセンサス統計は存在しない。内閣府では「民間企業資本ストック」統計を四半期ベースで作成しているが、これは 1970 年実施の国富調査をベンチマークとするフロー推計を積算したものである。民間企業の資本ストック総量を每期正確に計測したものと見なしてデータ処理することは、適切でない。内外いずれの国においても、マクロ経済統計は統計作成部局により推計されているデータであることに注意を要する。ほぼ常に推計誤差を含んでいる。国友・佐藤 (2010)⁴⁾ は、観測誤差を含む成分から構成される時系列データに対しては、状態空間モデルで表現し、状態推計することで首尾一貫したモデリングが可能であることを例示した。なお、観測誤差を承知の上で、真の値を顧みずに、1 次速報値の時系列のみで（すなわち、確報訂正值が入手できても参照しない）実証する手法が、時間に追われるエコノミストの間で横行することがある。1 次速報というリアル・タイム・データが金融市場の期待を席卷しているのであれば、それ自体が経済現象であり、それに基づく投資のモデリングも可能となる。

動学的モデリングを進めるには、多くの場合、経済統計の長期時系列に関する精緻な検討が必要となる。政府財政データに関する岩本・榎本 (2008)⁵⁾ や、物価・賃金変動を解析した宮尾・中村・代田 (2008)⁶⁾ や齋藤ほか (2012)⁷⁾ は、長期時系列データとしての経済統計を扱っている。経済変数の定常性など多方面からの検定を前提に、藤原・渡部 (2011)⁸⁾ は DSGE モデルに日本の時系列データを実装する手法を提示している。

これまでの DSGE モデルは、解析しやすいように、代表的な家計のみの最適行動に依存している。吉川（2010a）⁹⁾、同（2010b）¹⁰⁾ は DSGE に対する批判的検討から統計物理のアプローチを提唱している。この成否には、力学系に対する観測技量と同様に、刻々変化するマクロ経済に対する適切な 3 次元観測が待たれる。

このように経済モデリングの進展には、モデル選択だけでなく、経済統計データを観測誤差の段階から仔細に検討し直す必要がある。モデリングに適合する経済統計の整備という研究課題につながる。

（４）科学技術的・政策的課題

経済分析のモデリングに関しては、最適制御のさまざまな進展を援用することが期待される。DSGE が多用している制御問題の解法は、数値解に到達できる配慮から、驚くほど少ない。モデルで選択された変数に合致する経済統計データが十分揃っていない問題もかかわってくる。

そこで、既存の経済統計以外に、企業間取引の POS データや個人からの発信情報をデータマイニングして、マクロ経済を部分的にせよ表象する時系列データに変換する処理が研究されている。一方、経済統計に関しても、企業財務情報が次第に精緻化してきたことから、標本誤差を抑えた集計や歪みの少ない指数作成が視野に入ってきた。実際に、2012 年から導入された経済センサス活動調査の成果が注目されている。

同時に、GDP などの加工統計において、速報値（リアル・タイム・データ）で市場の先行き予測が形成されて、自己実現過程をたどる傾向が最近見られている。モデリングとデータ適合の関係を周知し、政策決定への相互依存関係を包括的に検討することも必要となってこよう。

（５）最近の注目動向

マクロ経済分析の枠組みで特定分野の構造を検討する研究が広がっている。例えば Hirata（2012）¹¹⁾ は労働市場の摩擦を国際横断的に検証した。

個々の家計の支出行動を観測したミクロ・データを採用する研究が始まっている。阿部・新関（2010）¹²⁾ はマーケティング会社が集めた商品ごとの購買履歴データを、伝統的な総務省作成「家計調査」と比較している。類似のアプローチとしては、MIT など欧米の大学の呼びかけで、インターネットに掲載される価格情報を迅速に集約する共同研究や、一橋大などが POS データから物価指数を導出する実験が進んでいる。

また、インターネットの世界的な検索サイトである Google 社では、検索に入力されたキーワードを集計することにより、各国の支出傾向を瞬時に表現するデータを開発した（同社によれば、経済統計と符合する短中期変動を描出している）。価格や取引数量そのものでない、定性的な情報が、数値に写像できる可能性を示したものであり、今後の経済データの観測方法に一石を投じている。

（６）キーワード

最適政策、年金制度、動学的モデリング、動学的一般均衡モデル（DSGE）、金利の非負制約、合理的期待、統計整備

（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さない。）

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	○	↑	● DSGEモデルの専攻者は増えている。もともと、モデリングの開発は米国の大学からの移入による面がなお大きい。 ● モデル実証に適合する統計データの検討は遅れていたが、経済センサスの導入で、今後本格化することが期待される。
	応用研究	◎	↑	● 金融政策に関しては、日本銀行の研究者が金融危機の発生・収束を描出できるモデリングを試作するなど、モデリング対象期間に応じたバリエーションが広がってきた。 ● 東大・一橋大ほかで年金制度にOLGを応用した実証分析が輩出してきた。 ● 大規模ミクロ・データからのパラメータ検出に、統数研が着手しているが、マクロ統計データとの乖離が大きい。
	実用評価	×	→	● 日本銀行と一部の研究者以外に、経済モデリングの必要性が認知されていないため、研究当事者以外からの助言や批判が僅少で、日本における経済モデリングの活発化につながっていない。 ● モデル研究者ニーズを充足する公的統計の見直しは、政府の統計委員会でも取り上げられているが、進展が緩慢である。
米国	基礎研究	◎	↑	● 最適制御の操作性が高いソフトの導入により、基礎研究者の厚みが増している。
	応用研究	◎	↑	● 米国のゼロ金利政策が長期化し、FRB内部および学界の双方から、非伝統的金融政策が及ぼす中長期的影響に関する実証研究が相次いでいる。 ● 米国の対外金融取引が膨張している実態を、統計が捕捉できていない。モデリングにおいても金融仲介機能に関する変数設定における課題となっている。 ● MITなどの呼びかけで、インターネットに掲載される価格情報を集約するなど、代替データの研究が進んでいる。
	実用評価	○	→	● DSGEによる政策提案は難解で、FRBの外側にそのまま説明できない。また、採用していない経済データに関する説明に苦慮することがあり、国民に広く理解されるに至っていない。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 欧州中央銀行（ECB）もゼロ水準に肉薄する低金利政策を採用したことを契機に、ユーロエリアの各国中央銀行の研究者がECBと共同で、米国にないような多様なモデリングを進めている。 ● DSGEに限らず、経済モデルに充当できるミクロ・データの整備に、EU当局は取り組んでいる。
	応用研究	◎	→	● 欧州単一通貨ユーロを採用していないスウェーデンの中央銀行（Svensson（1997）¹³⁾、同（2006）¹⁴⁾）は、いち早く金利の非負制約を掲げたモデリングを組み立てた。ユーロエリアではないが、英国など他の欧州の中央銀行関係者による実証研究も増加傾向。
	実用評価	△	→	● 域内加盟国の合意による政策決定が優先され、経済モデルの検討が政策運営に直結するプロセスからは程遠い。
中国	基礎研究	△	→	● 米国大学院留学経験者は増えていて、今後の研究充実が期待される。
	応用研究	△	→	● マクロ政策の主眼は為替相場の運営にあり、DSGEを開放経済モデルに拡張する研究は低調。
	実用評価	×	→	● 政策評価に経済モデルの是非が持ち出されることは皆無である。今後の高成長鈍化を控えて、成長論議に経済モデルを活用する動きが始まっている。

韓国	基礎研究	△	→	● 米国大学院留学経験者は増えていて、今後の研究充実が期待される。
	応用研究	△	→	● 経済統計の整備に力を入れ、モデルへの実証分析も漸増傾向にある。もっとも、マクロ政策の主眼は為替相場の運営にあり、DSGEを開放経済モデルに拡張する研究は低調。
	実用評価	×	→	● 政策評価に経済モデルの是非が持ち出されることは皆無である。

（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) Lucas, R. (1976), “Econometric policy evaluation: A critique,” in K. Brunner and A. Meltzer, *The Phillips Curve and Labor Markets*, Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy, 1, New York: American Elsevier, 19-46.
- 2) Blanchard, O. (1985), “Debt, deficits and finite horizons,” *Journal of Political Economy*, 93, 223-247.
- 3) Gertler, M. (1999), “Government debt and social security in a life-cycle economy,” *Carnegie-Rochester Conference on Public Policy*, 50, 61-110.
- 4) 国友直人・佐藤整尚（2010）, 「GDP速報の推定法の改善について」, 『経済学論集』（東大）, 76-3, 2-21.
- 5) 岩本康志・榎本英高（2008）, 「長期低迷・デフレと財政」, 『経済学論集』（東大）, 74-2, 56-79.
- 6) 宮尾龍蔵・中村康治・代田豊一郎（2008）, 「物価変動のコストー概念整理と計測ー」, 『経済学論集』（東大）, 74-2, 2-39.
- 7) 齋藤雅志・笛木琢治・福永一郎・米山俊一（2012）, 「日本の構造問題と物価変動：ニューケインジアン理論に基づく概念整理とマクロモデルによる分析」, 日本銀行ワーキングペーパーシリーズ, 12-J-2.
- 8) 藤原一平・渡部敏明（2011）, 「マクロ動学一般均衡モデルーサーベイと日本のマクロデータへの応用ー」, 『経済研究』（一橋大）, 62-1, 66-93.
- 9) 吉川洋（2010a）, 「マクロ経済学における統計物理学的方法（1）」, 『経済学論集』（東大）, 76-2, 47-71.
- 10) 吉川洋（2010b）, 「マクロ経済学における統計物理学的方法（2・完）」, 『経済学論集』（東大）, 76-3, 99-135.
- 11) Hirata, W. (2012), “Reconciling the relevance of labor market institutions in search and matching models with international evidence,” *Bank of Japan Working Paper*, 12-E-2.
- 12) 阿部修人・新関剛史（2010）, 「Homescanによる家計消費データの特徴」, 『経済研究』（一橋大）, 61-3, 224-236.

- 13) Svensson, L.E.O. (1997), “Inflation forecast targeting: Implementing and monitoring inflation targets,” *European Economic Review*, 415, 1111-1146.
- 14) Svensson, L.E.O. (2006), “Monetary policy with judgment: Forecast targeting,” *NBER working paper*, 11167.

（9）その他参考資料

- 1) 石崎寛憲・加藤涼（2003）, 「労働市場における硬直性の日米比較と構造調整」, 日本銀行ワーキングペーパーシリーズ, 03-J-7.
- 2) 加藤涼（2007）, 『現代マクロ経済学講義』, 東洋経済新報社.
- 3) 小黒一正・島澤諭（2011）, 『Matlab によるマクロ経済モデル入門』, 日本評論社.
- 4) 西村清彦（1990）, 『経済学のための最適化理論入門』, 東京大学出版会.
- 5) 笛木琢治・福永一郎（2011）, 「Medium-scale Japanese Economic Model (M-JEM) : 中規模動学的一般均衡モデルの開発状況と活用例」, 日本銀行ワーキングペーパーシリーズ, 11-J-8.
- 6) 渡部敏明（2009）, 「DSGE-VAR モデルの日本のマクロデータへの応用」, *ESRI Discussion Paper Series*（内閣府経済社会総合研究所）, 225-J.
- 7) An, S., and F. Schorfheide (2007), “Bayesian analysis of DSGE models,” *Journal of Monetary Economics*, 26, 113-219.
- 8) Aoki, K. (2001), “Optimal monetary policy responses to relative-price changes,” *Journal of Monetary Economics*, 48, 55-80.
- 9) Christiano, L., M. Eichenbaum, and C. Evans (2005), “Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy,” *Journal of Political Economy*, 113, 1-45.
- 10) Fueki, T., I. Fukunaga, H. Ichiue, and T. Shirota (2010), “Measuring potential growth with an estimated DSGE model of Japan’s economy” , *Bank of Japan Working Paper*, 10-E-13.
- 11) Fukunaga, I., N. Hara, S. Kojima, Y. Ueno, and S. Yoneyama (2011), “The quarterly Japanese economic model (Q-JEM) : 2011 version,” *Bank of Japan Working Paper*, 11-E-11.
- 12) Gali, J., M. Gertler, J.D. Lopez-Salido (2005), “Robustness of the estimates of the hybrid new Keynesian Phillips curve,” *Journal of Monetary Economics*, 52, 1107-1118.
- 13) King, R.G., C. Plosser, and S.T. Rebelo (1988) , “Production, growth and business cycles I: The basic neoclassical model,” *Journal of Monetary Economics*, 21, 195-232.
- 14) King, R.G., C. Plosser, and S.T. Rebelo (1988) , “Production, growth and business cycles II: New direction,” *Journal of Monetary Economics*, 21, 309-341.
- 15) Kiyotaki, N., and J. Moore (1997), “Credit cycles,” *Journal of Political Economy*, 105, 211-248.
- 16) Kydland, F.K., and E.C. Prescott (1982) , “Time to built and aggregate fluc-

- tuations,” *Econometrica*, 50, 1345-1370.
- 17) Lucas, R. (1978), “Asset prices in an exchange economy,” *Econometrica*, 46, 1429-1445.
 - 18) Romer, C.D., and D.H. Romer (2004), “A new measure of monetary shocks: Derivation and implications,” *American Economic Review*, 94, 1055-1084.
 - 19) Shioji, E., V.T. Khai, and H. Takeuchi (2011), “Fiscal policy in a new Keynesian overlapping generations model of a small open economy,” 『経済研究』(一橋大), 62-1, 30-43.
 - 20) Smets, F, and R. Wouters (2003), “An estimated dynamic stochastic general equilibrium model of the Euro area,” *Journal of the European Economic Association*, 1, 1123-1175.
 - 21) Smets, F, and R. Wouters (2007), “Shocks and frictions in US business cycles: A Bayesian DSGE approach,” *American Economic Review*, 97, 586-606.

3.2.5 データ同化：新しい戦略分野の開拓

（１）研究開発領域名

データ同化：新しい戦略分野の開拓

（２）研究開発領域の簡潔な説明

データ同化法に基づくモデリング・数理・計算基盤に関する基礎研究を推進するとともに、戦略的応用分野の開拓事業として、物理、生物学、医薬品開発、医療・情報産業、防災、工業製品設計、社会科学などの分野で、データ同化に基づく新しい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、観測データの情報や科学的・事前知識をモデルの設計プロセスに適切に取り込み、モデル単独では決して得られない高精度なシミュレーション予測を実現することにある。モデルは仮説の総体である。したがって多くの場合、仮説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、さまざまなモデリング・エラーが積み重なることで、シミュレーションの予測性能は著しく阻害されることとなる。データ同化はシミュレーションの過程で、モデルの不完全性に結びつくシナリオを生成しながら、現実をよく説明できるものを選択、あるいは合わないものを淘汰する。このような解析作業をシステムティックに行うための科学技術計算がデータ同化の本質である。その概念と技術はもともと気象・海洋物理学に由来する。われわれの身近な例でいうと、気象庁の台風進路予測、天気予報、エルニーニョ予報、局地的集中豪雨の予測等でデータ同化システムが活用されている¹⁾。

本研究開発領域は、①データ同化の数理・計算に関する基礎研究の推進、②シミュレーションを予測や知識発見に活用している分野への技術普及の促進、③戦略的応用分野の新規開拓事業から構成される。データ同化の数理的基盤は、統計科学、計算科学、物理学、非線形システム科学など、実にさまざまな要素のもとに成り立っている。さらに、ユーザの多くは大規模なシステム・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ム開発スキルが要求される。このような分野横断型の特性をもつ研究領域を国内に創生し、高いレベルの研究者および技術者を育成・維持していくには、一研究グループ・一研究所規模の活動には限界があり、ある程度大掛かりな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。また、従来のデータ同化の研究は、大気・海洋、津波、地震、宇宙など、地球物理学の現象を主に取り扱ってきたが、その汎用的な解析技術はモデリングやシミュレーションが活用されているより広範な分野に適用可能である。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的付加価値につながるような、防災や医療、情報産業、工業製品の設計・品質管理、社会シミュレーション等の分野で大きな威力を発揮する可能性が高い。このような戦略的応用分野の新規開拓事業を展開する上で、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、研究期間：平成 16

年度から平成 22 年度）が、データ同化の概念と技術を国内のさまざまな応用分野に普及させたという点で大きな貢献を果たしてきた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、また一研究所内のグループで構成された比較的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、津波を対象とした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の拡大につながるようなものではない。また、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の名前があがるくらいである⁵⁾。その一方で近年は、大気・海洋、津波、地震だけでなく、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、個別研究のレベルでは、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も決して引けをとるものではない。しかしながら、研究者人口や研究組織、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おいて大きな差が見られる。米国では NCAR (The National Center for Atmospheric Research)⁸⁾、アメリカ航空宇宙局 (NASA)、SAMSI (統計科学・応用数理研究所、Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute)⁹⁾、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)¹⁰⁾、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)¹¹⁾ など、多数の研究組織が大小さまざま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)¹²⁾ 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。特に近年は、気候変動予測モデルのコンテストを開催するなど、技術水準の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 年ごと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¹³⁾ においてデータ同化に関するセッションが毎年企画されているが、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)¹⁴⁾、EGU (European Geosciences Union)¹⁵⁾ をはじめ、データ同化を大きく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システム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必要不可欠である。

- わが国では、小規模なグループによる地道な啓蒙活動が、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、システム科学、HPC 技術など、データ同化の要素技術を総合的に学ぶことができる大学の専攻および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もつ科学技術を振興していくには、少なくとも中規模以上の研究プロジェクトを継続して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や HPCI 戦略プログラムなど、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へと発展していくことは期待し難い。産学連携による総合型研究プロジェクト・教育プログラムが立ち上がることが望ましい。
- ビッグデータ時代という言葉に象徴されるように、過去十年間に極めて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において研究開発のあ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ますます高まっている。

（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、データ同化を研究課題に掲げ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技術の本格運用が進むことが期待される。
- 近年は、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⁵⁾、英国の Reading 大学のセンター¹⁰⁾ など、データ同化に特化した研究開発ユニットの新設が相次いでいる。
- 米国の統計科学系の公的研究機関 SAMSI 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⁹⁾。これに象徴されるようにデータ同化は統計科学のひとつの研究分野として確立されつつある。SAMSI 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は、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。
- わが国では、東日本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、実社会にかかわりの深いところで、ユニークなデータ同化技術の開発が進んでいる。
- 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¹⁶⁾。

（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	○	→	● 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の創設⁵⁾ やJST・CREST型研究²⁾ など、今後のコミュニティの今後の発展・拡大へとつな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にある。 ● 生命科学やいく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	○	↗	● 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、国民生活と密接に結びつきながら発展している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。 ● 東日本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、実社会にかかわりの深いところでデータ同化の応用が進んでいる。これは日本独自のものである。
	産業化	○	→	● 気象庁のデータ同化システムはすで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	◎	↗	● 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）⁵⁾、アメリカ航空宇宙局（NASA）をはじ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、大小さまざま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⁹⁾。
	応用研究・開発	◎	↗	● 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あげている。 ● 水・エネルギー循環系シミュレーションをはじめとする環境問題、医学・分子生物学、エージェントシミュレーションなど、数多くの新規応用分野が開拓されている。

	産業化	○	→	● 気象局のデータ同化システムはすでに実用化に成功しており、今後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	◎	↗	● 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¹⁰⁾。 ● 欧州ではReading大学のデータ同化研究開発センター¹⁰⁾、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）¹¹⁾ など、多数の研究組織で大小さまざま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、大小さまざま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	◎	↗	● 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あげている。 ● 水・エネルギー循環系シミュレーションをはじめとする環境問題、医学・分子生物学、エージェントシミュレーションなど、数多くの新規応用分野が開拓されている。
	産業化	○	→	● 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¹⁶⁾。 ● 欧州各国気象局のデータ同化システムはすでに実用化に成功しており、今後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	△	→	● 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。
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 http://www.mri-jma.go.jp/Dep/oc/research_oc2-sjis.html
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) 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/>
- 6) 樋口知之他『データ同化入門 一次世代のシミュレーション技術―』朝倉書店
- 7) 樋口知之他『統計数理は隠された未来をあらわにする―ベイジアンモデリングによる実世界イノベーション―』
- 8) National Center for Atmospheric Research
<http://ncar.ucar.edu/>
- 9) SAMSI（統計科学・応用数理研究所、Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute）
<http://www.samsi.info/>
- 10) Reading 大学 データ同化研究開発センター
<http://darc.nerc.ac.uk/>
- 11) ヨーロッパ中期予報センター
<http://www.ecmwf.int/>
- 12) 世界気象機関（World Meteorological Organization；WMO）
http://www.wmo.int/pages/index_en.html
- 13) 日本地球惑星科学連合大会
<http://www.jpogu.org/>
- 14) American Geophysical Union（AGU）
<http://www.agu.org/meetings/>
- 15) European Geosciences Union（EGU）
<http://www.egu.eu/>
- 16) 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>

3.2.6 データマイニング・機械学習

（１）研究開発領域名

データマイニング・機械学習

（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ひとつで、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、さまざま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などにより、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、さまざま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、関連学会などを調査してみると、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）科学技術的・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つくっており、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。
- わが国では、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、わが国の大学には、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、わが国には、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つくるためにも、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。

（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⁾。わ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。
- スマートメータが先行導入され、スマートグリッド構築が進みつつある米国において、需要家から収集される大量のデータを用いたエネルギー消費分析などに関する新たなプロジェクトがスタートしそうである。そのプロジェクトでは、機械学習を用いたエネルギー消費分析や、需要家から収集される大量のデータを扱う新たな機械学習技術の開発が中心になりそうである。わが国では、従来エネルギー

一供給者側の視点からのデータ分析が中心であったが、国民全体の利便性向上などを考え、需要家側の視点からのエネルギー消費に関するデータ分析、大量データの分析技術（機械学習技術）の開発が必要となると予測される。

- 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ならびに脳の理解の改善を目指したプロジェクトだった。わ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、国際会議などからうかがえる。

（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

（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 Learning⁶⁾ 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。
	応用研究・開発	○	→	● 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。 ● 学会発表などから応用研究・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しておらず、本研究領域の世界的な潮流をつくることができていない。
	産業化	○	→	● 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	◎	↗	● 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、基礎研究の進展が著しかった。 ● 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、さまざまな分野に優秀な人材が動ける強みをもつ。 ● 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もつ。

	応用研究・開発	◎	↗	● 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。 ● がん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。
	産業化	◎	↗	● 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。 ● カード会社など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	◎	→	● 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、基礎研究のうち、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⁷⁾ が出版されている。
	応用研究・開発	◎	→	● 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。
	産業化	△	→	● 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。
	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、米国など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。
	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.ht>

ml

- 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) 4th Asian Conference on Machine Learning 2012
<http://acml12.comp.nus.edu.sg/>
- 7) Pattern Recognition and Machine Learning
<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/cmbishop/prml/>

3.2.7 モデル合成による社会課題解決の展望

（１）研究開発領域名

モデル合成による社会課題解決の展望－気候変動政策を例に

（２）研究開発領域の簡潔な説明

社会に存在するさまざまな諸問題についてモデル化し、構築されたモデルを用いて問題解決に向けた政策を評価するためにシミュレーションを行うことは、さまざまな分野において行われている手法である。本稿では、気候変動政策に関する分野を例に、どのようにモデル化が行われ、その成果が社会に還元されているかについて、近年の研究動向を踏まえて説明する。

気候変動問題を対象とした研究は、人間の社会・経済活動を起源として排出される温室効果ガスが大気中に蓄積し、気温や降水量の変化などを通じて、食料や健康、水需給などのさまざまな分野に及ぼす影響を分析対象としている。分析対象となる事象は、社会経済活動から、大気システム、生態系など、多岐にわたり、それぞれの事象が不確実性を有しており、また、対象となる空間領域は世界全域であり、時間スケールも100年を単位とする極めて長期的な問題である。こうした対象領域の大きさは、極めて大きな不確実性をもたらし、科学による原因の解明を待って対策を講じると手遅れになる可能性があり、政策と科学が両輪となって対応していく必要がある。そうした状況下において有効なツールが統合評価モデル（Integrated Assessment Model）であり、それを用いた将来シナリオの開発が行われている。気候変動問題については、気候変動の科学的な知見を評価する第一作業部会、気候変動による環境、社会、経済への影響を評価する第二作業部会、気候変動への対応戦略を評価する第三作業部会の3つの作業部会からなるIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が、最新の科学的知見をとりまとめ、政策決定者に対して気候変動政策（気候変動そのものを抑える緩和策と、気候変動の影響を抑える適応策）の判断材料を提供してきた。そうした知見の中でも、将来シナリオやシナリオを定量化する統合評価モデルは3つの作業部会をつなぐ役割を担っており、SRES（Special Report on Emissions Scenarios）と呼ばれる社会経済および温室効果ガス排出についての長期シナリオが、特別報告書として2000年に出版された。SRESで示されている4つの将来像は、その後の環境分野におけるシナリオ研究（Millennium Ecosystem AssessmentやUNEP/GEOなど）において参照されるなど、中心的な役割を担ってきた。また、2012年現在、SRESに代わる新たな将来シナリオの作成が行われている。

わが国では、1997年に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）に向けた削減目標の検討において、国立環境研究所を中心に開発されたAIMモデルの結果が利用された。当時は、モデルに対する認識が十分ではなく、国内の議論の場において前提となる数値が異なるだけで「モデルは破綻した」といった批判を受けてきた。また、2009年にコペンハーゲンで行われたCOP15で議論される予定であった2020年を対象とした温室効果ガス排出削減の中期目標検討では、複数の機関で開発された技術モデルや経済モデルなどのモデルを用いた選択肢づくりが行われ、2009年6月には麻生首相（当時）が日本の中期目標を「国内対策として2005年比15%削減（1990年比8%

削減)」と決定した。同年 9 月には、鳩山首相（当時）が国連気候変動首脳会合において、わが国の温室効果ガス排出量を「主要国の参加を前提に 1990 年比 25 %削減」することを宣言し、そうした目標達成の可能性についてもモデルを用いた分析が行われてきた。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

緩和策とは、温室効果ガス排出量を抑制することで将来の気候変動を抑える政策である。温室効果ガスと呼ばれる気体は多く存在するが、二酸化炭素がその中心であることから、これまでエネルギー問題と一体で分析されてきた。また、SRES をはじめとするシナリオ研究から、将来進む社会の方向性によっても温室効果ガス排出量は大きく変化することが示され、モデルを用いた定量的な分析と、叙述的なストーリーラインを組み合わせることで、将来の社会像とそれに対応したエネルギー需給、温室効果ガス排出量の姿が示されるようになっていく。

国際的には、IPCC によって作成された IS92 と呼ばれる 6 つの排出シナリオを出発点に、前述の SRES を経て、現在、新たなシナリオ開発が進められている。SRES から IPCC 第 4 次評価報告書に至る分析の過程は、「社会経済シナリオ→温室効果ガス排出量→気候変動予測→影響評価」という一方通行の流れで行われてきたが、現在行われているシナリオ開発では、「温室効果ガス排出量→気候変動予測および社会経済シナリオ→影響・適応評価」という並行した作業を含めて、シナリオ開発全体に要する時間の短縮が試みられている。将来の温室効果ガス排出量は、統合評価モデルから RCP (Representative Concentration Pathways) として報告されており、RCP に基づく気候モデルの比較は CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) にて、世界の代表的な気候モデルが参加して行われている。また、社会経済シナリオは、統合評価モデルと影響分野の研究者が連携して SSP (Shared Socio-economic Pathways) と呼ばれるシナリオを現在開発している。なお、SSP の開発と並行して、影響分野でのモデル比較研究が、ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) や Ag-MIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) といった研究プロジェクトのもとで実施されている。

また、IPCC の評価報告書への入力を目的として、さまざまなモデル比較プロジェクトが世界で行われている。代表的なものとして、スタンフォード大学が中心となって行われている EMF (エネルギーモデリングフォーラム) があり、世界全体を対象とした分析や、米国についてのモデル比較が行われている。EMF の世界モデルを対象とした比較分析では、大気中の温室効果ガス濃度を 450ppm (二酸化炭素換算) や 550ppm に抑えるとともに、再生可能エネルギーや原子力、CCS (炭素隔離貯留) の効果や影響を分析している。また、EMF は、アジアを対象とした AME (アジアモデリングエクササイズ) についても主導してきた。ヨーロッパでも、EMF の下でモデル比較研究が行われているほか、EU 委員会の下でさまざまなモデル比較プロジェクトが行われている。代表的なものが AMPERE や LIMITS と呼ばれる研究プロジェクトであり、世界の平均気温を産業革命前と比較して 2℃に抑えるための検討などが、ヨーロッパのグループを中心に行われている（日本や米国からも参加している）。なお、世界の主要な統合評価モ

デル開発チームは、IAMC（統合評価モデリングコンソーシアム）を形成し、情報の共有や研究の連携を積極的に行っている。IAMCでは、EMF、IIASA（国際応用システム分析研究所）と並んで国立環境研究所が幹事となっている。

国内では、2050年脱温暖化社会プロジェクト（環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-3）が、わが国における長期にわたる継続した地球環境政策の方向性を提示することを目的として行われ、さまざまなモデルが開発されるとともに、わが国を対象として2050年までに二酸化炭素排出量を1990年比80%削減するための方策が検討された。このほか、アジアでは、モデル分析の人材育成や政策担当者との議論も念頭においたモデル開発が、アジア低炭素研究（環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト S-6）として行われ、2050年の世界の温室効果ガス排出量を1990年比半減させるような目標に対する道筋の検討が行われている。また、わが国における温室効果ガス排出量の削減目標を決定する際の判断材料として、モデルによる選択肢づくりが政府主導で行われており、モデルによる削減ポテンシャルの評価や対策導入時の経済影響の解析は、この分野では中心的な位置づけとなっている。

（４）科学技術的・政策的課題

気候変動問題は、極めて長期的かつ広範囲に及ぶ大規模な課題であるとともに、不確実性の程度が高く、科学と政策が両輪となって取り組むべき課題となっている。モデルが取り扱う領域は、社会経済分野を対象とした工学や経済学から、大気や海洋を含めた気候システム分野、気候変動影響まで考慮する場合には生態学や疫学、さらには緩和策や適応策の検討においては政策科学までが対象となるなど極めて広範囲にわたる。このため、個々の学問領域を統合し、科学と政策決定者の間のプラットフォームとしての役割を有する統合評価と呼ばれる概念と、それを数理モデルにより表現した統合評価モデルの役割が重要となる。統合評価モデルにおける科学技術的な課題としては、個々のモデルの改良とそれらのモデル統合という点があげられる。

政策的には、さまざまなモデルが統合されることで、整合性をもった将来像が描けるようになる一方、課題としては、モデルが巨大化、ブラックボックス化するという問題点があげられる。また、気候変動問題以外にも解決すべき政策的な課題は山積しており、こうした気候変動以外の問題とどう関連づけるかといった点が課題となっている。ただし、すべての課題をひとつのモデルに盛り込むことは、モデルのさらなる巨大化、ブラックボックス化を引き起こす要因となり、適切な境界条件の設定が重要な鍵となる。

また、モデルによる分析結果をいかに伝えるかということも重要な政策的課題、科学的課題のひとつである。モデルの結果は、前提条件の設定によって変わり得ることから、その運用にあたっては透明性が求められる。特に、東日本大震災以降において議論されている原子力発電の問題については、将来の電力需要に対する価格弾力性の想定によって、結果が大きく変わり得る。あわせて、今回のような大震災後の社会の記述や、低炭素社会の構築に向けた分析では、これまでのトレンドを単純に延長するのではなく、これまでに経験したことのない行動を反映させることが求められる場合がある。モデル上では、係数の変更という形で簡単に行うことができる事象も、現実の社会では多大なコストを払って実現されることになる。モデルを用いた分析結果について、分析の前提を

どのように設定し、その前提が社会のどの部分を反映させたものであるかという説明とあわせて、いかに簡潔にわかりやすく説明するかが、モデル分析を行う側に求められている。

（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）

これまで、気候変動分野におけるモデル分析は、気候モデル、統合評価モデル、影響モデルと個別の分野ごとに発展してきた。今後は、前述の RCP や SSP、さらには CMIP5、ISI-MIP、AgMIP といった比較プロジェクトを通じて、各モデル分野間の交流が盛んになると思われる。あわせて、気候変動対策をより効果的、効率的に行うための分析が求められると考えられる。そのひとつが、短寿命物質の対策に関する分析であり、これまでの気候変動における分析の中心であった二酸化炭素をはじめとする長寿命の物質以外の対策を取り込むことで、長期的な緩和策の実現に向けた時間を稼ぐことが可能かについて、国内外で検討が開始されている。こうした分析は、統合評価モデルをはじめ、個別の各モデルやそれらを用いた分析による成果が得られるようになったために実現が可能となったものであり、今後はさらにモデル連携といった点を中心に、研究が進展すると思われる。

また、モデルを用いた理論的な分析やシナリオ開発は既に多くの成果をあげており、今後は、モデルで示されたような対策や施策をいかに現実の社会に反映させるかといった点も注目されている。この場合、モデル研究者と政策決定者の間の連携は不可欠であり、前述のモデルの拡張、精緻化といった発展の方向性とは異なって、わかりやすさが求められ、簡略化したモデルの開発、活用が行われている。アジア低炭素研究では、アジア主要国の政策決定者とモデル研究者を巻き込みながら行われており、その成果が注目されている。

（６）キーワード

統合評価モデル、将来シナリオ、緩和策、適応策、IPCC

（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	応用研究・開発	○	↑	● 1997年の京都会議（COP3）以前からモデルを用いた分析は積極的に進められており、エネルギー需給と温室効果ガス削減をあわせた分析が、大学、研究機関などで開発されたさまざまなモデルを基に行われている。特に、東日本大震災以降は、原子力発電の有無による分析などが、政府主導で行われているが、アカデミックなモデル研究そのものに関しては、各機関が独自に進めており、米国や欧州に見られる大規模なモデル比較研究は行われていない。代わりに、国際的なモデル比較研究には多くの研究機関が参加する。アジアに拡張した分析もいくつか行われており、アジア各国における研究の底上げ（人材育成など）も期待されている。

米国	応用研究・開発	◎	↑	● スタンフォード大学が主宰するEMF（エネルギーモデリングフォーラム）を中心にモデル比較研究が進んでおり、さまざまなモデル（世界全体から米国、州）の開発や比較分析が行われている。科学的なモデル比較研究に、DOEやEPAの政策担当者も一緒に議論するなど、温暖化政策は進んでいない印象があるが、研究面では世界をリードしている。大学や研究機関では、米国以外の研究者も受け入れ、中国などのモデル開発も行っている。また、モデルの基礎となるデータベース開発も行われ、共通インフラとして活用されている。
欧州	応用研究・開発	◎	↑	● オランダのPBL、オーストリアのIIASA、ドイツのPIKなど欧州各国の機関で、世界を代表する統合評価モデルが開発されている。同時に、EU委員会の下、これらの機関が中心となって、将来の世界平均気温上昇を2℃以下に抑えることを目的としたプロジェクトが組織されるなど、政策担当者も巻き込んだモデル開発、分析が盛んに行われている。こうした分析は、欧州内にとどまらず、米国や日本などにも参加が呼びかけられており、国際的な比較研究の場としても位置づけられている。具体的な比較研究プロジェクトとして、AMPERE、LIMITSなどがある。
中国	応用研究・開発	○	↑	● 低炭素経済開発が政策目標として掲げられ、いくつかの省や都市ではパイロットスタディが行われるなど、気候変動問題への関心は高くなっている。モデル開発については、日、米、欧州の各機関と協力した分析が行われてきたが、近年は中国人研究者による独自分析も清華大学や能源研究所、中国科学院などを中心に行われている。国際的なモデル比較研究にも積極的に参加しており、存在感が大きくなっている。
韓国	応用研究・開発	△	↑	● エネルギー政策を中心に、いくつかの研究機関がモデル開発を行い、関連した緩和策に関する定量的分析が行われているが、情報の開示は十分とはいえない。政府をあげてGreen Growthを打ち出すなど、環境政策への関心は高く、経済評価も試みられているが、こちらも公開はされておらず、国内対応にとどまっている。こうした状況に対して、近年は統合影響評価システムの気候変動政策への積極的な適用に関する議論も行われている。国際的なモデル比較研究への参加は現時点では積極的ではない。

（注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

（注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

（注3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) IPCC (1992) Climate Change 1992 : the Supplement Report to The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press.
- 2) 宮川公男（1994）政策科学の基礎，東洋経済新報社
- 3) IPCC (2000) Emissions Scenarios, Cambridge University Press.
- 4) Alcamo, J. (2001) Scenarios as tools for international environmental assessments, European Environment Agency, Environmental issue report, No.24.
- 5) 松岡謙（2003） AIM モデル開発と展開，
http://www-iam.nies.go.jp/aim/AIM_workshop/AIMmm/Matsuoka_j.pdf
- 6) 小林光（2003） AIM モデルと日本の環境政策決定，
http://www-iam.nies.go.jp/aim/AIM_workshop/AIMmm/Kobayashi_j.pdf
- 7) UNEP （2002） Global environment outlook3 , Earthscan.

- 8) Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being, Vol.2 Scenarios, Island press.
- 9) 森田恒幸・増井利彦（2005）排出シナリオ，新田尚・野瀬純一・伊藤朋之・住明正編，気象ハンドブック第3版，朝倉書店，746-751.
- 10) IPCC (2007) Climate Change 2007, Cambridge University Press.
- 11) Korea Environment Institute (2010) Development of Integrated Impact Assessment System to Support Climate Change Policy for Mitigation and Adaptation in Korea (in Korean).
- 12) Moss R. et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature, Vol.463, 747-756.
- 13) van Vuuren D. et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change, 109(1-2), 5-31.
- 14) Assessment of climate change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of mitigation cost Estimates (AMPERE), <http://ampere-project.eu/web/>
- 15) Low climate IMPact scenarios and the Implications of required Tight emission control Strategies (LIMITS), <http://www.feem-project.net/limits/>
- 16) Energy Modeling Forum (EMF) , <http://emf.stanford.edu/>
- 17) Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC), <http://iamconsortium.org/>
- 18) Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP) , <http://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/research/rd2-cross-cutting-activities/isi-mip>
- 19) Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (Ag-MIP), <http://www.agmip.org/>
- 20) 脱温暖化 2050 プロジェクト http://2050.nies.go.jp/s3/index_j.html
- 21) 2050 低炭素社会シナリオ http://2050.nies.go.jp/LCS/index_j.html
- 22) 日本温室効果ガス排出量2020年削減目標達成に関する AIM モデルによる分析結果 http://www-iam.nies.go.jp/aim/prov/middle_report.htm
- 23) 麻生内閣総理大臣記者会見「未来を救った世代になろう」
<http://www.kantei.go.jp/jp/asospeech/2009/06/10kaiken.html>
- 24) 国連気候変動首脳会合における鳩山総理大臣演説
http://www.kantei.go.jp/jp/hatoyama/statement/200909/ehat_0922.html

3.2.8 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

計算機の進歩に従い情報処理技術は格段に進歩した。これまで、統計学をはじめ、信号処理、制御理論、ほとんどの分野で連続信号を扱う場合、基本となる考え方は信号のパワー、すなわち信号の2乗に基づく理論であった。しかし、疎性に基づく方法は信号の絶対値の和である L1 ノルムを用いるなど、これまでとは異なる考え方を用いる。こうした新しい考え方によって、既存のさまざまな情報処理技術が書き換えられ、新しい技術が生まれようとしている。以下で説明する。

1990年代から、複数の分野でモデル化の際に疎性が重要であることが認識され、特に海外では疎性に基づくモデルの推定法が大きな流れとなっている。疎性とは、多次元からなる情報源が成分として0を多く含むという仮定である。この過程が正しい場合、限られた観測値から情報源が正確に推定できることが理論的に示され、さまざまなデータを用いて実践されている。こうした研究は統計学では LASSO¹⁾ と呼ばれる手法、情報学では圧縮センシング²⁾ という手法が広く知られている。実際に、センシング技術の進歩によって以前より高精度で大量のデータが観測できるようになってきたが、そうした高次元のデータは多くの0を含んでいる。こうしたデータの解析にはこれらの手法が不可欠となっている。

統計学における線形回帰の問題では、説明変数の2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とらえることができる。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、モデル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を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、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学の文脈で現れた手法である。そのため、統計学の正則化の観点とは異なる問題意識が基礎になっている。情報源が疎である場合、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。こうしたセンシングと疎性を積極的に結びつけている、という点で圧縮センシングは新しい考え方である。

これらの方法では、理論とともに最適化の方法が重要である。疎性を素朴に表せば値のある成分を選ばなければならないため組み合わせ最適化となるが、大規模な問題ではこうした離散最適化を現実的な時間で解くことは難しい。この問題を連続変数による凸最適化の問題へ緩和しても、多くの場合適切な解が得られることが示された。こうした理論的な研究は今世紀に入って盛んに行われている。また、欧米ではこうした凸最適化

を高速で計算するための研究も盛んに行われている。対象ごと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最適化問題を高速に解く研究が広く行われている。

こうした疎性に基づく方法はさまざまな分野で応用され、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だと考えられる。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。こうしたモデルの複雑によって最適化の方法は困難になるが、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2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、モデルの構造をより高所から概観できる柔軟さが必要である。
- 一方、こうした方法はデータ科学であり、さまざま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。
- わ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る。したがって、こうした方法論も特定の分野での話題にとらえられることが多い。広い分野で疎性に基づく新たな視点をどのように広げていけばよいのかが問題である。

（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見られ、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。残念ながら日本人の貢献は多くない。
- 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、2011年に第4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にかけての傾向である。例えば、DARPAでは Knowledge Enhanced Compressive Measurement (KECoM)⁵⁾ というプロジェクトが2010年から2011年に立ち上がった。総額2100万ドル程度である。

（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	△	↑	● 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。 ● 筆者は過去4回の SPARS という会議に出席し、発表しているが、会議に参加している日本人はほとんどいない（出席した2回で、それぞれ筆者のほか一人ずつ）。SPARSは信号処理に関する小さな研究会である。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。しかし、疎性を用いたモデリングに関する貢献は大きくない。 ● 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⁵⁾。筆者もそのいくつかにかかわっているが、興味をもつ研究者が増加していることを強く感じる。 ● 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	△	↑	● 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行われている。 ● 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さまざまな分野で解析の際に用いられている。 ● しかし、既存の手法を用いてあてはめた研究がほとんどであり、日本からの発信というものは少ない。
	産業化	△	→	● 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	◎	↑	● 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、どの分野でも最も大きい貢献を行っている。 ● 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	◎	↑	● DARPA、NSF 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	◎	↑	● 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	○	↑	● 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）、とヨーロッパを中心に継続されている。

	応用研究・開発	○	↗	● 信号処理、情報理論における応用の研究は広く行われている。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	△	→	● 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が、他国に比べて際立った研究活動や成果が中国から見えていたとはいえない。しかし、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。また、中国本土には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所ができています。こうした研究所の研究者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、上記の現状から考えると、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., and Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information, IEEE Trans. on Information Theory, 52 (2) pp. 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://ecos.maths.ed.ac.uk/SPARS11/>
- 5) Knowledge Enhanced Compressive Measurement(KECoM)プロジェクト
[http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Knowledge_Enhanced_Compressive_Measurement_\(KECoM\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Knowledge_Enhanced_Compressive_Measurement_(KECoM).aspx)

6) 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）

http://dex-smi.sp.dis.titech.ac.jp/DEX-SMI/cs2011_2

圧縮センシングとその周辺（3）

<http://dex-smi.sp.dis.titech.ac.jp/DEX-SMI/cs2012>

(9) 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, Vol.25, issue 2, 2008

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

国内での文献

田中利幸(2010)圧縮センシングの数理、電子情報通信学会, Fundamentals Review, 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.

3.2.9 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・セキュリティが十分であることの評価と検証、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かかわっていて、情報システムを通し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生じる想定外の問題が発生しやすくなり、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かかわっており、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ともに、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 3-1 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が 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、リアルとバーチャルな世界をつなぐ 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、開発効率を向上させることができる。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。開発ステップごと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。

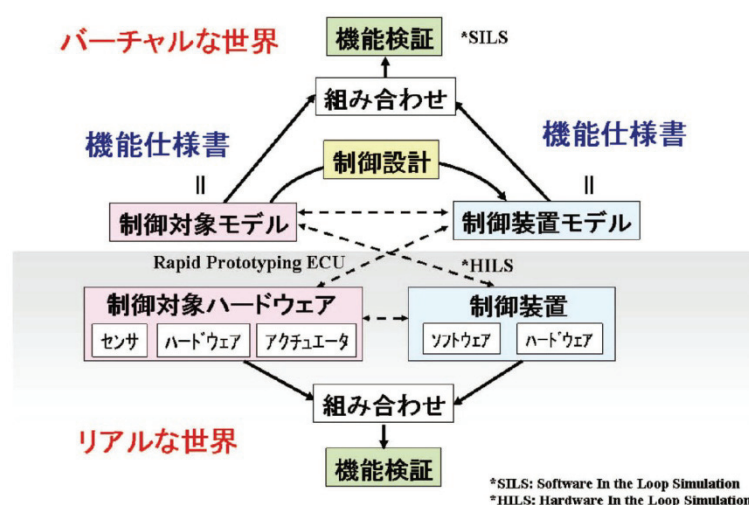


図 3-1 モデルベース開発（MBD）の概念

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いだすことができる。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ことにある。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）²⁾ こと、コンピュータの計算速度が急速に上がったこと、Auto-Code Generation 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 SysML ⁵⁾ 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し、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。制約はアクチュエータの上下限值や達成できる速度の範囲、自動車エンジン開発の領域ではノック限界、失火限界、排気ガス規制値などがある。また、利用可能な制御装置のメモリ容量、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。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、大きな問題は対象をモデル化することである。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実験モデリングがある。

前者は明示的にモデル構造をもつのでホワイトボックスモデリングと呼ばれ、後者は内部構造をもたないのでブラックボックスモデリングと呼ばれる。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。実験モデルは汎用的な関数の係数を計測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る。制御の領域ではシステム同定と呼ばれる計測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、機械学習では主に静的なモデリング手法が発展している。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領域や開発者の依存度が強く、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でき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、ますます、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もつことから、CPU やコンピュータの動向も重要である。実は、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。複数のコアをもつマルチコア、そして、多数のコアをも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律束されてしまう。メニコアの恩恵を受けるためには、従来の計算方法から並列性の高い計算方法にアルゴリズムを変換し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、「的を射た簡易なモデルを初めから開発すること」、「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」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うことができる。

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とどまり、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 Lund 大学や Linköping 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) 11) 12) 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¹⁹⁾。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。Modelca、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。そうはいつても、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ごと、産業分野ごとに利用され成果をあ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も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あまり見られない。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限界があり、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・企業がうまい連携をもち、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。日本では、大学・研究所から企業をつなぐエンジニアリング会社は育っておらず、分断があるように思う。

（4）科学技術的・政策的課題

モデルと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 MODELISAR¹³⁾ 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 Euro 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 をはじめ各大学とも 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、ほとんど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つながりかねない。そのなかでも、内閣府の最先端研究支援プログラム「複雑系数理モデル学の基礎理論とその分野横断的科学技术応用」は数理モデルに関した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、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	○	→	● 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	○	→	● 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。 ● モデリングツールなどは海外のものに頼っている。

	産業化	○	↗	● 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、国内にとどまり、十分成功しているとはいえない。
米国	基礎研究	○	→	● 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	○	→	● 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	○	→	● 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	◎	↗	● 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支援している。
	応用研究・開発	◎	↗	● 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	○	↗	● 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	△		● 注目すべきものは見られない。
	応用研究・開発	△		● Huzhong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研究が行われている。
	産業化	△		● 欧米の技術コンサルタント会社は次々と中国に拠点をつくっている。

韓国	基礎研究	△	● 注目すべきものは見られない。
	応用研究・開発	△	● 注目すべきものは見られない。
	産業化	△	● 注目すべきものは見られない。

(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) 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 ホームページ : <http://jmaab.mathworks.jp/>
- 3) Mathworks のホームページ : <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. (available from <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. (Available from <http://www.otij.org/research/index.html>)
- 6) Ohata, A. (2012). Identification for Automotive Systems, Lecture Notes in Control and Information Science, a Desired Modeling Environment for Automotive Powertrain Controls, Vol. 418/2012. pp. 13-34
- 7) iSiD のホームページ : <http://ecust.isid.co.jp/public/product/isight/outline/>
- 8) Enns D.F. (1984). Model reduction with balanced realizations: and error bound and a frequency weighted generalization. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 127-132, Las Vegas, NV.
- 9) Glover K. (1984). All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems in their L^∞ -error bounds. *International Journal of Control* 39 (6), 1115-1193.
- 10) Modelica association のホームページ : <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) のホームページ : <http://www.ieta2.org>
- 13) MODELISAR のホームページ : <http://www.modelisar.com>
- 14) AUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture) のホームページ : <http://www.autosar.org>

- 15) Ashenden, A., Peterson, G., and Teeqarden, D. (2003) . The System Designer's Guide to VHDL-AMS, Analog, Mixed-Signal, and Mixed-Technology Modeling. Morgan Kaufmann Publishers
- 16) 徳田 (2008). 自動車のエレクトロニクス化と標準化. 晃洋書房. Pp.105-190
- 17) Lee, A. (2006). Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?
(Available from 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
(Available from <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.
(Available from <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
(Available from <http://www.itea2.org/project/index/view/?project=1132>)

3.2.10 モデルの評価技術

（１）研究開発領域名

モデルの評価技術

（２）研究開発領域の簡潔な説明

システム開発のために作成されたモデルの妥当性、信頼評価。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システム開発におけるモデル評価は極めて重要であり、より精微なモデル構築の際に PDCA サイクルを回す際の Check にあたることになる。モデルを実世界のデータに当てはめるにあたっては、歴史的には R. A. Fisher（1922）¹⁾ の、モデル設定、モデルのパラメータ推定、推定の精度の三原則から始まる。モデル評価は推定の精度の議論と密接に関係しており、複数のモデルの比較はわが国の赤池博士によって開発された、AIC（赤池情報量規準：Akaike's Information Criterion）最小化技法が有用され、国内外で幅広く活用されている。この評価技法には、不確実性を表現するための厳密な確率構造が必要であり、尤度と呼ばれるデータとモデルとの乖離を測るための評価方法がベースとなっている。AIC は現在得られているデータに対して、提案されているモデルの中で最もよいモデルを選び出すものであり、モデルの相対的評価ということになる。尤度基準をも含む応用範囲の広い、よりよいモデル評価の技法は、今後さまざまな分野で必要となるはずである。

モデル評価は対象から抽出される情報の種類や精度、あるいは対象とするシステムが工学系、医学系、社会学系のいずれなのかによって異なる。また国によっても得意分野が異なる。例えば、人間の脳機能の解明におけるモデル構築では、欧米を中心として理論、応用研究が世界を一步リードしている、モデルは線形モデルおよび確率場が中心であり、モデル評価の際には標準脳へのモデルパラメータのマッピングが必要になる。これを行うためのソフトウェアも開発されているが、日本人の脳が標準脳とはなっていないことは、着目すべき点である。

（４）科学技術的・政策的課題

- モデル評価技術をうんぬんする前に、データを分析する研究者とデータを利用して新たな新案をして製品化する部門との連携が十分にできていないのが現状である。産と学が十分に連携できるような仕組みが必要である。イノベーションには異分野が融合するだけでなく、シーズの創出が必要である。この取り組みの中に、システムモデル論とその評価技術が必要である。連携の際の課題は、データ分析する研究者が、コンサルティングとして分析に参加するべきではないということである。九州大学がマスフォーインダストリーを立ち上げたが、こうした取り組みが幅広い領域において日本の各拠点で行われるべきである。
- 上記の問題が解決されなければ、モデル評価は有効に行われない。
- 映画評価システムのように、本来映画産業の発展のために必要とされる評価システムが、日本は米国に比べて非常に立ち遅れている。米国ハリウッド映画界では

一般公開前に複数の人を対象に試写し、その評価データに基づいた予測モデルを推定し、映画の興行成績を予測し、興行収入を伸ばすことがすでに行われている。欧米に負けない作品作りのためには、こうした評価システム関連の開発を行うことも、評価技術という観点から大いなる発展が必要な分野である。

（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）

- ゲノム分野におけるモデル開発およびモデル評価技術の開発が重要なテーマとなってきた。ゲノム自体の不確実性に対しての確率モデルが十分でないことと、3次元立体構造のランダム性に対しての確率構造が解明されていないこともあり、これはひとつの研究分野であるといえる。また、データマイニング技術が手法のひとつとして用いられることもあり、探索的データ分野に対しても、評価手法が検討されなければならない。対象としては見込みのある領域と考える。
- Netflix 社が1万ドルの賞金を懸けて、映画評価システムの公募²⁾を行ったことは有名であるが、こうしたデータの公開（あるいは特定の研究者への公表）は、よりよい評価システムを構築する際にはぜひとも必要な条件であるといえる。
- さまざまな分野でのマシンラーニングを用いた新たな複合的なモデル開発も行われているが、単なるモデルフィッティングに終わらせないために、比較的長期にわたる一定期間の、安定した構造を反映できるプロジェクトにしていく必要がある。

（６）キーワード

AIC 最小化、田口メソッド、尤度、ベイズ情報量規準、最小記述長

（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	○	→	● モデル選択に関する研究は世界に先駆けて研究を行ってきたAICの研究開発機関である統計数理研究所を擁しており、世界屈指であるといえる。 ● 最近ではマシンラーニング技報の研究者もおり、基礎研究は進んでいるといえるが、モデル評価技術については十分とはいえない。 ● モデル評価の際非露なモデルのロバスト性についての研究も進みつつある。
	応用研究・開発	○	→	● バイオ系を中心に遺伝子データのモデリングの研究が進んでいるが、必ずしも確率構造が明確ではないので、モデル評価に成功しているとはいえない。 ● 工学系では、極値統計学や空間上の点過程解析の分野で破壊のメカニズムや地震の確率予測などに貢献している。 ● 社会学との関連領域の分野ではAICを活用したモデル選択技法を用いたコーホート分析技法や、個人情報保護しながらも個人のデータ活用公開するための研究（個票データの開示）などがセキュリティ保護の研究と歩調合わせ進行している。
	産業化	○	↑	● 情報系のユビキタス関連分野においてセンシング技術とアルゴリズムとして統計モデルが組み込まれ、産業化も進みつつある。日本が新しい産業としてアルゴリズムとハードウェアを組み合わせた物作りとして将来有望視されている。 ● ロボットの視覚認識や音声認識技術においても同様なことがいえる。

米国	基礎研究	◎	↑	● 米国の大学や研究機関において基礎研究のレベルは非常に高く、北米全体の国際会議として知られるJMSだけでも6,000人を超える研究者が一堂に会して研究成果を公表している。 ● 階層型ベイズ推論、大規模な高速演算を利用したシミュレーション研究、高次元データの可視化など、新しい統計モデルの開発が進み、これらに対する評価法についての論文も数多く出ている。
	応用研究・開発	◎	↑	● 映画の評価にかかわる大規模かつ数多くの欠測を含むような評価データの分析が行われ、予測モデルに対しての懸賞賞金がかけられたプロジェクトも公開された（Netflix社）。実社会のデータを分析という意味で、応用研究は極めて活発であるといえる。
	産業化	◎	↑	● Googleを中心としたWebデータの分析、自動車の自動ナビゲーションの開発など、世界に先駆けての産業化に結びつけられるものが、米国発であることが多い。 ● GPSによる位置推定など、システムに組み込まれたアルゴリズムにおける統計的推定に関してのモデルについて、注意しておく必要がある。これらもすべて米国主導である。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 英国を中心として、統計的モデル理論についての優れた研究がなされている。日本で開発された田口メソッドなど、有効であるということがわかれば、理論的に検証し、再評価するというように、歴史的にも優れた研究環境をもっている点が理論研究において世界をリードしている一要因であると解釈される。
	応用研究・開発	◎	↑	● ドイツでは、フンボルト大学を中心に統計モデリングにかかわるソフトウェア（ExploRe）が開発され、計算機を高度に活用する応用研究が盛んである。 ● フランスは、アンケートデータのモデルに関する研究が世界を一步リードしており、パリ大学を中心としたコレスポネンス分析の歴史に起因するものと思われる。社会学系の評価データの分析に今後も非常に重要となってくる分野である。 ● フィンランドにおけるSOM分析手法は、国政に使われるまでの実績をもっている。
	産業化	○	→	● 地理情報データの分析ツールが開発されてきている。
中国	基礎研究	○	↑	● 中国の国際的活躍には目覚ましいものがある。米国における主要な国際会議での中国人の占有率は非常に高い。出席者の3割、4割を占めることもある。数多くの優秀な人材が米国の大学院に進学することがその要因といえる。この留学生が帰国し、研究水準を高めつつある。 ● 最近では北京、上海を中心として中国の研究者が主導する国際会議も数多く開かれるようになってきた。
	応用研究・開発	○	↑	● トレンドとしては増加傾向と考えられるが、台湾に実績をあげている研究者が多い。
	産業化	○	↑	● 中国と台湾との関係において、アジアの輸出は台湾を通じてという「台湾活用型対中投資」ビジネスモデルができ上がりつつある。
韓国	基礎研究	○	↑	● J. C. Lee 教授が国際統計協会の会長をしており、基礎研究は活発である。日本にはない統計学科の存在が大きくクローズアップされる。 ● 日本の統計学関連学会との連携もあり、国際会議を共同開催していることは、理論展開に貢献している。
	応用研究・開発	○	↑	● 応用統計やモデリングに対しての貢献度は、日本と比較して今のところ大きな差は見当たらないが、日本学術会議 数理科学委員会数理統計学分会の報告書³⁾によれば、「韓国や中国などの近隣諸国と比較しても、人材育成の基盤整備に関する格差が拡大しているとの懸念がある」となっており、研究体制・教育体制レベルと見ると韓国の優勢がうかがえる。
	産業化	○	↑	● 欧米に比べて、韓国、日本はモデル、モデル技術の産業化は遅れていると評価されるが、トレンドとしては、上向いている。

(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. On the mathematical foundations of theoretical statistics. Royal Society of London, Philosophical Transactions (Series A), 1922, 222, 309-368.
- 2) Bell, R., Bennett, J., Koren, Y. and Volinsky, C. The million dollar programming prize. IEEE Spectrum, 2009, 46 (5), 28-33.
- 3) 報告 数理科学分野における統計科学教育・研究の今日的役割とその推進の必要性. 日本学術会議 数理科学委員会数理統計学分会, 2008.

3.3 制御

3.3.1 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。

（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、制御器内のパラメータ適応則の開発や、そのパラメータの収束性など、どちらも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⁾。なお、リアルタイムに適応させるような制御機構は一般には複雑になるが、1980年代には、構成を格段に簡単にした単純適応制御³⁾も提案され、現在でも継続的に発展研究がなされている⁴⁾。また、不確かさに対するロバスト性についても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相補的な関係については、有機的な融合はしておらず現在に至っている。

一方、理論的に大きな壁であった相対次数の問題（動特性を記述する微分方程式の微分回数に絡んだ問題）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⁶⁾など、1990年代には理論的に注目すべき発展的研究がなされた²⁾ ⁷⁾。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⁸⁾。そして、2000年代に入ると、目標とする評価関数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⁹⁾も提案され、国内外で実応用も含め、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¹⁰⁾ ¹¹⁾ ¹²⁾。

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¹³⁾。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⁾¹⁵⁾。そのほか、非線形 H^∞ 適応制御⁷⁾や、最近ではマルチエージェント系の適応制御も活発に研究されている¹⁵⁾。

適応制御の理論の発展と並行する形で、計算機の高速度化および高精度化に伴い、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応用も積極的に行われている。また最近では医用工学、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。さらに、適応制御においては対象のモデルをリアルタイムで同定するが、その考え方をういた適応同定、適応推定¹⁶⁾なども活発に研究されている¹⁰⁾。

そして、適応制御では、データを基にしてモデリングと制御をリアルタイムに行うが、その究極形として、モデル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¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。ただし、これらはオフラインのチューニングであるため、リアルタイム化に向けた発展研究も今後望まれる。

(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¹⁹⁾、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。そして、学習制御とは、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、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²⁰⁾。

国外でも、**Iterative Learning Control (ILC)** として学習制御が提唱され²¹⁾、精力的に研究が行われている。そして、医療や福祉機器への応用が盛んに行われている様子である。また、イギリス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¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

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** という学習スキームが提案された²²⁾。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調整していくものとした学習のモデルである。そして、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²³⁾。

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²⁴⁾。これには運動生理学の分野におけるベルンシュタインの冗長自由度問題が大きなヒントとなっていることも興味深い。また、近年「移動知」という新たな領域も提案され²⁵⁾²⁶⁾、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。

（４）科学技術的・政策的課題

- 適応制御の基礎的な理論は習熟してきたともいえるが、実用化に向けて現実の問題に適用としたとき、まだ解決すべき研究課題は多いと考えられる。ひとつには産学の共同研究があまり多くないことも原因ではないかと考えられる。引用資料¹⁵⁾のような産学が同じ土俵で交流する機会を増やした方がよいと考える。
- より広い意味での「学習」の領域との融合が望まれる。先述のように、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とも考えている。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のではないかと考えている。今後、このような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。
- 大規模かつ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されていない。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回を数えるほどになった¹⁰⁾。毎回世界各国からのこの分野の研究者による最新の成果が発表されている。11回目は2013年度にフランスで開催される予定である。なお、2004年には第8回が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²⁷⁾。
- イギリス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。国際会議で積極的にOSを組み研究成果をアピールするなど、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) 11) 12)}。
- 文部科学省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^{25) 26)}。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。

- 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 という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、2013 年の ALCOSP '13 でも予定) 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、2011 年の統計数理研究所の公開講座のテーマとしてもとりあげられている¹⁷⁾。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、実産業における制御器チューニングにおいて顕著な成果をあげている¹⁸⁾。

（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、データ駆動制御、実応用

（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	◎	↑	● 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^{7) 14) 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¹⁷⁾。 ● 移動知^{25) 26)}、人間の先手技量や学習メカニズムの理解²⁴⁾といった研究も見られる。
	応用研究・開発	○	↑	● 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^{14) 15)}。
	産業化	○	↑	● 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²⁾。 ● 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¹⁸⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	● 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^{9) 10) 11) 12)}。 ● 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¹³⁾。
	応用研究・開発	○	→	● 論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる^{10) 11) 12)}。
	産業化	○	→	● 論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる^{10) 11) 12)}。
欧州	基礎研究	◎	↑	● イギリス、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^{10) 11) 12)}。 ● 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^{10) 11) 12) 27)}。
	応用研究・開発	◎	↑	● 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^{10) 11) 12) 27)}。
	産業化	◎	↑	● 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²⁷⁾。 ● 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^{10) 11) 12)}。

中国	基礎研究	◎	↗	● 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 ^{10) 11) 12)} 。 ● 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 ^{10) 11) 12)} 。
	応用研究・開発	○	→	● 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 ^{10) 11) 12)} 。 ● 論文や国際会議などでいくつかの成果が見られる ^{10) 11) 12)} 。
	産業化	△	→	● 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	△	→	● 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	△	→	● 応用研究で特筆すべき成果は現状で見られない。
	産業化	△	→	● 産業界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) テレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 鈴木 隆, アダプティブコントロール, コロナ社 (2001)
- 2) 適応制御におけるニュートレンド, 計測と制御, 第35巻, 第6号 (1996)
- 3) I. Bar-Kana, Parallel Feed-forward and Simplified Adaptive Control, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol.1 pp.95-109 (1987)
- 4) 岩井, 水本, 大塚, 単純適応制御, 森北出版 (2008)
- 5) 金井 喜美雄, ロバスト適応制御, オーム社 (1990)
- 6) M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P.V. Kokotovic, Nonlinear and Adaptive Control Design, John Wiley and Sons (1995)
- 7) 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)
- 8) A.S. Morse, Control Using Logic-Based Switching, Springer (1997)
- 9) K.B. Ariyur and M. Krstic : Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control, Wiley-Inter Science (2003)
- 10) Preprints of 8th, 9th, 10th IFAC Workshop on Adaptation and Learning on Control and Signal Processing, (2004, 2007, 2010)
- 11) Preprints of 17th, 18th IFAC World Congress (2008, 2011)
- 12) Proceedings of 43rd, 44th, 47th 50th IEEE Conference on Decision and Control (2004, 2005, 2008, 2011)
- 13) M. Krstic, Delay Compensation for Nonlinear, Adaptive, and PDE Systems, Birk-Hauser (2009)
- 14) 適応・学習制御の新潮流, 計測と制御, 第48巻, 第8号 (2009)
- 15) 計測自動制御学会第3回プラントモデリング第12回適応学習制御合同シンポジウム (2012)

- 16) G.C. Goodwin and K. S. Sin, Adaptive filtering, Prediction and Control, Prentice-Hall (1984)
- 17) 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)
- 18) 加納, 直接的 PID 調整法 E-FRIT サイト <http://e-frit.chase-dream.com/>
- 19) 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, 第 22 巻, 第 1 号, pp. 56-62 (1986)
- 20) M.C. Campi, T. Sugie, and F. Sakai, An iterative identification method for linear continuous time systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.54, No.7, pp.1661-1669 (2008)
- 21) K.L. Moore, Iterative Learning Control for Deterministic Systems, Springer-Verlag (1993)
- 22) M. Kawato, Feedback error learning Neural network for supervised motor learning, Advanced Neural Computers (R Eckmiller eds.) Elsevier Science Publishers, pp.365-372 (1990)
- 23) A. Miyamura and H. Kimura, Stability of feedback error learning scheme, Systems and Control Letters, Vol.45, pp.303-316 (2002)
- 24) S. Arimoto, Optimal linear quadratic regulator for control of nonlinear mechanical systems with redundant degrees-of-freedom, SICE JCMSI Vol.4, No.4, pp.289-294 (2011)
- 25) 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)
- 26) <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/~ota/mobiligence/index.html>
- 27) IFAC Symposium on Advances in PID Control (2012)

3.3.2 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の設計を考える点にある。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

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、日本初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、制御に関係する研究予算が、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^{17) 18)}。
- 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^{19) 20)}。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²¹⁾。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。

（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	○	→	● 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 ¹⁸⁾ 、データ駆動型制御 ²⁰⁾ など、萌芽的研究成果などあり。 ● 資金導入力や研究成果の教育への還元力が弱く、研究の広がりに限界。
	応用研究・開発	○	→	● 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	○	→	● 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	○	↗	● 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²¹⁾。
	応用研究・開発	○	↗	● 実験室レベルでの実証実験は多数あり。
	産業化	○	→	● 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	◎	↗	● 確率的ロバスト性はイタリアで顕著な研究成果あり¹⁷⁾。 ● 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⁾ 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¹⁹⁾。
	応用研究・開発	○	→	● 産学連携による萌芽的な研究はあり。
	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	○	↗	● 論文数は増加。
	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	○	→	● 論文数はそれなり。
	応用研究・開発	△	↗	● 日本企業との研究交流により技術情報を収集中。
	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) G. Zames. Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverses. IEEE Trans. Automat. Contr. 1981, vol. AC-26, pp.301-320
- 2) H.Kimura. Robust Stabilizability for a Class of Transfer Functions. IEEE Trans. Automat. Contr. 1984, vol. AC-29, no. 9, pp. 788-793
- 3) J.C. Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar, and B.A. Francis. State Space Solutions to Standard H_2 and H^∞ Control Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1989, vol. 34, pp. 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) K. Zhou, J.C. Doyle, and K. Glover. "Robust and Optimal Control". Prentice Hall, 1996.

- 6) Y. Yamamoto. A Function Space Approach to Sampled Data Control Systems and Tracking Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1994, vol. 39, no. 4, pp.703-713
- 7) S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan. "Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory". SIAM, 1994.
- 8) 岩崎徹也. LMI と制御. 昭晃堂, 1997.
- 9) S. Boyd, and L. Vandenberghe. "Convex Optimization". Cambridge University Press, 2004.
- 10) T. Iwasaki and S.Hara. "Generalized KYP Lemma : Unified Frequency Domain Inequalities With Design Applications". IEEE Trans. Automat. Contr. 2005, vol. 50, no. 1, pp. 41- 59
- 11) G. Chesi, A. Garulli, A. Tesi, and A. Vicino. "Homogeneous Polynomial Forms for Robustness Analysis of Uncertain Systems". Springer, 2009.
- 12) J. Löfberg. 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> (accessed 2012-09-09)
- 14) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Computational Aspects of Control System Design".
<http://staff.polito.it/fabrizio.dabbene/TC-CACSD/index.html> (accessed 2012-09-09)
- 15) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Systems with Uncertainty".
<http://www.eee.hku.hk/~chesi/TC-SU> (accessed 2012-09-09)
- 16) 計測自動制御学会 50 年史, 計測と制御, 2011, vol. 50, no. 8/9.
- 17) R. Tempo, G. Calafiore, and F. Dabbene. "Randomized Algorithms for Analysis and Control of Uncertain Systems". Springer, 2004.
- 18) 藤崎泰正, 大石泰章. ランダマイズド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, pp. 189-196.
- 19) M. C. Campi, A. Lecchini and S.M. Savaresi. Virtual Reference Feedback Tuning: a Direct Method for the Design of Feedback Controllers. Automatica, 2002, vol. 38, pp. 1337-1346.
- 20) 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, pp. 903-908.
- 21) US National Science Foundation. "Cyber Physical Systems".
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286, (accessed 2012-06-11)

3.3.3 最適制御／予見制御／予測制御

（1）研究開発領域名

最適制御／予見制御／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。一般的にいて、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、ポントリャー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⁾ 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、制御にとって最悪の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¹⁰⁾ 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ー（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¹¹⁾。

(3-2) 予見制御

通常のフィードバック制御では、現在までの目標値や出力が既知であって、それらの情報から制御入力を決める制御器を設計する。なぜなら、未来の情報を使う演算は非因果的であり実現不可能と考えられるからである。しかし、問題設定によっては未来の情報が利用できる場合もある。例えば、人間が自動車を運転する際には、進行方向の情報（すなわち未来の情報）に応じて適切なハンドル操作を行っている。また、工作機械など、あらかじめ追従すべき経路がわかっている場合もある。そこで、ある程度未来の情報も利用して制御性能を向上させる最適制御問題が考えられる。特に、線形システムにおいて、与えられた目標値に対する追従誤差の2次形式評価関数を最小化する最適制御問題では陽に最適制御を求めることができ、固定ゲインのフィードバック制御に未来の目標値のフィードフォワード項を加えた制御器となる。これを、予見制御という。予見制御は1960年代末から1980年代にかけて日本を中心に研究が進んだ¹²⁾。その後、次に述べる予測制御との関係も明らかになってきた¹³⁾。

(3-3) 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において最適化する場合もある。したがって、予測制御は予見制御より一般的な問題設定といえる。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⁾ ²⁰⁾ ²¹⁾ ²²⁾ ²³⁾。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²⁴⁾。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²⁵⁾。

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²⁶⁾や自動車の運動制御とエネルギー管理²⁷⁾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²⁸⁾、さらに、先端的な予測制御の適用可能性を検討する産学共同研究も活発になりつつある²⁹⁾。

（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⁾ 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²⁶⁾。
- 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、HYSDEL³⁰⁾、最適化計算ではMPT¹⁹⁾、自動コード生成では、AutoGenU²⁰⁾、ACADO²¹⁾、CVXGEN²²⁾、FiOrdOs²³⁾ がある。

（６）キーワード

最適制御、予見制御、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	○	↑	● 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⁾ ⁹⁾。 ● 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²⁴⁾。
	応用研究・開発	○	↑	● 予測制御の自動コード生成ソフトウェアAutoGenU²⁰⁾ 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共同研究が活発になりつつある²⁹⁾。
	産業化	○	→	● 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²⁸⁾。 ● 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	◎	→	● 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	◎	↑	● 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CVXGEN²²⁾ 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	◎	→	● 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	◎	→	● 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	◎	↗	● 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 ²⁶⁾ 。 ● 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、HYSDEL ³⁰⁾ 、最適化計算ではMPT ¹⁹⁾ 、自動コード生成では、ACADO ²¹⁾ 、FiOrdOs ²³⁾ がある。
	産業化	◎	→	● 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⁾ 。
中国	基礎研究	○	↗	● 最適制御および予測制御に関する学术论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 ³¹⁾ 。
	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) E. Bryson Jr. Optimal Control - 1950 to 1985. IEEE Control Systems Magazine. 1996, vol. 16, no. 3, p. 26-33
- 2) E. Bryson Jr. and Y.-C. Ho. Applied Optimal Control. Hemisphere. 1975
- 3) D. O. Anderson and J. B. Moore. Optimal Control - Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall. 1989
- 4) 大塚敏之. 非線形最適制御入門. コロナ社, 2011, 232p. (システム制御工学シリーズ 18)
- 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) M. Bardi and I. Capuzzo Dolcetta. 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) T. Ohtsuka. Solutions to the Hamilton-Jacobi Equation with Algebraic Gradients. IEEE Trans. Automat. Contr. 2011, vol. 56, no. 8, p. 1874-1885

- 10) 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
- 11) 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
- 12) 土谷武士. 予見制御の理論. 日本機械学会誌. 1990, vol. 93, no. 856, p. 192-197
- 13) 江上正, 土谷武士. 最適予見制御と一般化予測制御. 計測と制御. 2000, vol. 39, no. 5, p. 337-342
- 14) J.M. Maciejowski. 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) D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao, and P. O. M. Scokaert. 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) M. Diehl, H. J. Ferreau, and N. Haverbeke. “Efficient Numerical Methods for Nonlinear MPC and Moving Horizon Estimation”. Nonlinear Model Predictive Control. In L. Magni et al., eds. Springer, 2009, p. 447-460
- 19) MPT, <http://control.ee.ethz.ch/~mpt>, (accessed 2012-6-26)
- 20) AutoGenU, http://www-sc.sys.es.osaka-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index_j.htm, (accessed 2012-6-26)
- 21) ACADO Toolkit, <http://acadotoolkit.org>, (accessed 2012-6-26)
- 22) CVXGEN, <http://cvxgen.com>, (accessed 2012-6-26)
- 23) FiOrdOs, <http://fiordos.ethz.ch/dokuwiki/doku.php>, (accessed 2012-9-4)
- 24) 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
- 25) Alessandri, M. Baglietto, G. Battistelli, and V. Zavala. Advances in Moving Horizon Estimation for Nonlinear Systems. Argonne National Laboratory, 2010, Preprint ANL/MCS-P1743-0410. <http://www.mcs.anl.gov/uploads/cels/papers/P1743.pdf>, (accessed 2012-6-26)
- 26) <http://control.ee.ethz.ch/~building/research.php>, (accessed 2012-6-26)
- 27) S. Di Cairano, “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
- 28) 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, (accessed 2012-6-26)
- 29) 中川繁政, 大塚敏之. モデル予測制御を活用した熱延鋼板の蛇行制御. ふえらむ. 2011, vol. 16, no. 3, p. 156-160

- 30) HYSDEL, <http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel>, (accessed 2012-6-26)
- 31) W. H. Kwon, and S. Han. Receding Horizon Control : Model Predictive Control for State Models, Springer, 2005, 400p.

3.3.4 分散制御／分布制御

（１）研究開発領域名

分散制御／分布制御

（２）研究開発領域の簡潔な説明

大規模で複雑なシステムの制御・管理する方法論である分散制御と分布制御に関する領域。分散制御は、分散化された情報に基づいたシステムを制御する手法であり、分布制御は、センサ・制御器が空間的に分布されたシステムを制御する手法である。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

（3-1）分散制御

いくつかのサブシステムが何らかの形で相互に干渉し合い、それらの複合体が全体としてひとつの大きなシステムを構成するとき、このようなシステムを大規模システムと呼ぶ。大規模システムの管理・制御をする際には、膨大な情報を交換する必要性から生じるコスト高が問題となるため、通常はそれを分散的、分布的、階層的な制御構造とする方が効率的な管理が可能となる¹⁾。

分散システムの制御の問題点として、分散管理・制御システムは集中管理・制御システムとは情報結合構造が異なるため、可制御性、可観測性などの集中制御システムにおける理論結果をそのままの形で当てはめることができない。例えば大規模線形時変システムで、サブシステムを最適化／安定化することが必ずしも全体システムが最適／安定となるとは限らないことがシステム理論的に証明されている。

このような大規模複雑系とその分散制御に関する研究の第一の隆盛期が 1970 年代にあった。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大規模複雑系と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や H_∞ 制御へと流れ、その余波を受けて、分散制御、最適制御に関する研究は下降線を辿る。ただし米国では航空・宇宙・軍事研究の分野では研究が継続される。

H_∞ 制御理論が体系化され、応用例が次々と発表される完成期を迎え、ロバスト制御に関する研究が一段落した 2000 年を過ぎた頃から、アメリカを中心に、ダイナミカルシステム理論とグラフ理論が融合した新しい協調制御理論に関する研究が突如として現れ、一大ブームとなった。さらには、この協調制御理論が、1970～1980 年代に隆盛を極めた分散制御理論を巻き込んで、2010 年頃から始まった両者の融合展開に関する研究が、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。マサチューセッツ工科大学などで分散協調制御理論の構築を目指した研究が盛んであり、世界の制御理論界をリードしている。

応用研究・実用化の側面からは、米国では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以来、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の発表件数が顕著に増加している。またエネルギー問題と電力自由化に伴い、リアルタイムプライシングの制度設計に関する研究も世界的に大きな流れとなっている。米国の電力網は日本

に比べて信頼性が低く、サイバーテロリズムに対する防御に関する研究も盛んに行われており、耐故障性や故障検出、故障診断に関する研究も米国においては必要な課題のひとつとなっている。

日本でも鳩山政権が温暖化ガス 25 %減を提唱し、それを契機に再生可能エネルギーの分散制御に関する検討が始まったが、東日本大震災後、電力需要の逼迫により、分散電源の大量導入が緊急課題となっている。保守的な電力工学の分野は、一見不安定に見える分散電源と分散制御方式の導入に対しては懐疑的であり、本領域を中心とした制御研究者との接近と協力が、今後の日本のエネルギー事情の好転には必要不可欠である。

韓国では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をソウル大学が中心となっており、その際に分散制御理論の応用について検討を行っている。

一方、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の結果を大きく凌駕する。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。

(3-2) 分布制御

分布制御とは、空間的に分布（Distributed）しているセンサやコントローラ、制御対象が協調・調和して動作する大規模システムの事を指し、近年システムが大規模、複雑化している分布システムの制御問題などを対象としている。前述の分散制御と非常に近い概念であるが、分散制御は主に、大規模システムの管理・制御側からの視点で分散していることを議論するのに対して、分布制御では制御対象自体が広く空間的に分布・分散している問題を指しており、制御器の構造は必ずしも複数個に分散している必要はなく、単一でも構わない。

具体的には、センサネットワークや群ロボットの制御、また MEMS の制御問題、AFM の制御、交通流・ITS の制御、水路・水流の管理・制御、コンピュータネットワークの輻輳制御、バイオシステムの制御問題などがあげられる。前述の電力網の制御もこの分布制御の中にも含まれるであろう。

分散システムは大規模システムを分割する際の離散的なサブシステムを表現するが、分布システムは、前述の離散システムに加え、連続体の無限次元システムも含む。制御理論の応用分野が拡大するに伴い、大規模に空間分布する対象の制御問題が扱われるようになってきた。

空間分布システムとして、広く研究されている研究課題のひとつがコンピュータネットワークの輻輳制御である。2000 年頃にカリフォルニア工科大学やマサチューセッツ大学を中心に情報科学と計算機工学、制御理論の融合が進み、ここではコンピュータネットワークの空間分布に伴う通信遅延と通信容量制約が大きな課題であったが、有力な制御手法がいくつか提案されている^{2) 3)}。

同様にセンサネットワークの分布制御も制御理論が貢献できる重要な課題である。カリフォルニア大学サンタバーバラ校、サンディエゴ校のグループは空間分布する複数のセンサを広域なセンシング領域を効率よく被覆する問題に対して、グラフ理論と最適化理論、アルゴリズム論を駆使して最適配置位置を導出している。2000 年を超えた頃から省エネと環境問題の社会的な意識の高まりから急速に研究の裾野が広がり、センサネットワークは分布制御の必要な研究分野のひとつとなっている⁴⁾。

カリフォルニア大学バークレイ校のグループは ITS に関して PATH (Partners for Advanced Transportation Technology)⁵⁾ 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。

2000 年を超えるころからは分布システムの中でも特に流体のモデリングと制御に関しては、カリフォルニア大学、ミネソタ大学などで盛んに研究が行われた。流体のダイナミクスを表現するナビエ・ストークスという偏微分方程式を基にその挙動解析と有限個のアクチュエータの配置や制御方策を考えることにより、流体の損失を減少させる結果が得られており、そのジェットエンジン制御への応用展開についても積極的に研究が行われた。近年日本でも、作用素論や関数解析、偏微分方程式で記述される無限次元システムの離散化に関する研究も報告されはじめており、新しい研究分野として脚光を浴び始めている⁶⁾。

(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、つまり分散システム、サブシステムの最適化（安定化）が、全体システムの最適化（安定化）と矛盾するような問題に対して、問題解決もしくは適当な妥協点の提案方法が求められている。これらを分散制御と最適制御の観点から、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と期待されているが、基礎的な研究課題が山積している。
- 典型的な問題例は、再生可能エネルギーを含む電力ネットワークであり、2012 年度より、JST 戦略的創造研究推進事業において CREST 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」⁷⁾ が開始された。
- 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 プロジェクトのような大きな誘引剤となる施策の継続が必要である。

(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）

- 米国では分散制御／分布制御の基礎研究を世界的にリードしている。例えば、スタンフォード大学では分散システムの最適制御に関してさまざまな評価関数を導入して、新しい制御方策に関して研究を進めている。
- 同様に米国カリフォルニア工科大学では、分散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。
- 同じく米国マサチューセッツ工科大学ではゲーム理論的な観点から個々のサブシステムが個々の評価関数を有しながら、近隣の情報結合しているサブシステムと情報を共有する手法である分散協調最適制御を提案している。70 年代の分散制御方式と 2004 年以降に隆盛期を迎えた協調制御の見事な融合となっている。

- 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分散制御／分布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ルンド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制御に関して研究が進んでいる。
- アジアでは米国や欧州のような分散制御／分布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。例えば韓国ではソウル大において、非線形制御理論や、モデル予測制御に関する研究が盛んであるが、分散制御・分布制御に関する研究は見受けられない。一方で離島における分散電源の必要性から、済州島で分散電源やスマートグリッドへの応用研究に関する大規模な実証実験を行っている。
- 同じくアジアにおいて、中国ではマルチエージェントシステムの協調制御に関する研究は盛んであるが、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。韓国同様、分散制御、分布制御に関する研究成果の発表例は見られない。これはまだ国家が発展途上にあり、製造業の業績が好調であるため、従来のメカトロニクス・ロボット制御に利用された集中管理型の制御方策に対する需要が小さくないためではないかと推察される。

（6）キーワード

分散制御、分布制御、協調制御、大規模システム、ゲーム理論、チーム理論、分布定数システム、無限次元システム、センサネットワーク、複雑系、無限次元システムの離散化、電力ネットワーク、群ロボットの制御

（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	○	↑	● 東日本大震災後、分散制御／分布制御の必要性が見直され、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。基礎研究の重要性が急速に増してきている。
	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	○	↑	● 鳩山政権が温暖化ガス25%減を提唱し、再生可能エネルギーの分散制御に関する検討が始まり、東日本大震災後、電力需要の逼迫により、分散電源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	◎	→	● 米国では航空・宇宙・軍事研究の分野での分散制御／分布制御の重要性から、昔から継続的にこれらの分野の基礎研究が盛んであるが、最近はさらにこれらの基礎技術に対する期待と需要が高まっている。例えば、NSFにおいて「Local Distributed Power Systems」に関する研究が募集されている。このほかにもDARPAなど、科学技術に関するさまざまなファンディングがオープンになっている。

	応用研究・開発	◎	↗	● 米国ではこの分野での基礎研究が強いため、それに牽引される形式で、応用研究も盛んである。分散化電源、スマートグリッド、センサネットワーク、リアルタイムプライシング、さまざまな分散制御／分布制御への応用研究が世界に先駆けて行われている。
	産業化	○	↗	● 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	◎	→	● 隣接国との国際連携の必要性から分散制御／分布制御に関する研究は昔から行われている。基礎研究も盛んで、例えば、スウェーデンのルンド大学ではLCCC (Lund Center for Control of Complex Engineering Systems) という名の研究機関が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制御に関して研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	● 基礎研究と同様、国際連携の必要性から応用研究・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	○	↗	● 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制御／分布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	○	→	● 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はいえない。日本と同程度の進展と見られる。
	応用研究・開発	△	→	● 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	△	→	● 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	△	↗	● 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はいえない。日本や中国に比べてもそれほど強くない。
	応用研究・開発	△	↗	● 基礎研究はあまり盛んではないが、それに比べ、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	○	↗	● 韓国では産業化／実用化への積極性が感じられる。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・産業化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) 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
- 2) C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley and W. Gong. Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows. IEEE Trans. Automat. Contr. 2002, vol. 47, no. 6, p. 945-959.

- 3) S. Low, F. Paganini and J. Doyle. Internet Congestion Control: An Analytical Perspective. IEEE Control Systems Magazine. 2002, vol. 22, no. 1, p. 28-43
- 4) J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo. Coverage Control for Mobile Sensing Networks. IEEE Trans. Robotics and Automation. 2004, vol. 20, no 2, p. 243-255
- 5) ITS Berkley. “California PATH”. <http://www.path.berkeley.edu/>, (accessed 2012-06-27)
- 6) 石崎孝幸, 加嶋健司, 井村順一. 単入出力動的ネットワークシステムにおける一次元反応拡散構造の抽出. 計測自動制御学会論文誌. 2010, vol. 46, issue 12, p. 774-782
- 7) JST 戦略的創造研究推進事業. “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,
(accessed 2012-06-27)

3.3.5 合意・同期・被覆制御

（１）研究開発領域名

合意・同期・被覆制御

（２）研究開発領域の簡潔な説明

ネットワークで接続された複数の「エージェント」とよばれる動的なサブシステムにより構成される動的ネットワークシステムにおいて、個々のエージェントが局所的な情報交換の下で分散協調的に行動することで全体最適化を達成するための理論・基盤技術に関する研究開発。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

合意・同期・被覆制御は、ネットワーク化された複数のエージェントから構成されるシステムにおいて全体目的を達成する協調制御と呼ばれる研究分野に属する。

合意制御と同期制御の目的は類似しており、両者とも全体目的は着目する内部変数（状態変数）が同じ値に収束した状態の達成である。また、両者とも自状態の更新規則が近傍エージェントの状態と自状態との偏差を抑制する相互負フィードバック構造によって記述されるという点も類似する。ただし、合意制御の出自は計算機科学分野にあり、その主眼は全体目的を達成するための規則の「設計」にあるのに対して、同期制御はもともと物理学の分野で盛んに研究されてきた問題であり、その主眼は現実世界で実際に生じる同期現象の「解析」にある。また、合意制御は最終的な変数の値が初期値の平均値になるなど、収束値に工学的な意味を求めるのに対して同期制御の興味は共通の値への収束のみに注がれる、合意制御の自状態の更新が線形の微分方程式で記述されるのに対して同期制御は非線形の方程式で記述される、なども相違点としてあげることができる。なお、以上は一般論であって、中間的な研究も多数報告されている。

被覆制御は、複数の移動可能なセンサをある空間に最適に分散させることを目的とする。一般に、被覆制御の分散配置なる目的は、合意・同期制御とは逆に自己の状態（位置）が他エージェントのそれと遠い値をとることによって達成される。したがって、自状態の更新規則は状態偏差に対して正フィードバック、すなわち両者に斥力が働くような構造を有する。また、被覆制御問題は合意・同期制御とは異なり、エージェントが存在する「環境」を陽に考慮し、重要度の高い環境地点からは強い引力を得るという制御を課す。すなわち、自状態の更新規則は多エージェントからの斥力と環境からの引力の重ね合わせで構成される。

合意・同期・被覆制御およびこれらを含む協調制御の「大規模なシステムを分散的に制御する」という概念は、大規模システム制御という名称で1970年代に活発な研究がなされた¹⁾。しかし、協調制御は大規模システム論の単なる焼き直しではない。大規模システム論で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のに対して、協調制御は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。この特徴ゆえ、協調制御は突然の個体の追加や除去に対してロバストに適応する Plug and Play 機能を有する。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、必ずしも理論体系が確立されたとはいえない。

合意・同期・被覆制御の研究は 2002～2004 年の間に米国を中心に始まり、2004 年には IEEE Transactions on Automatic Control において特集が組まれた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⁴⁾。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。特に中国からの関連研究の報告数および技巧レベルの伸びは顕著である。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、初期の研究はシステム制御情報学会講演会チュートリアル講演資料にもまとめられている⁶⁾。さらに、現時点までの最新情報を含めたリレー講座が雑誌「システム/制御/情報」に掲載予定であり⁷⁾、その書籍化も企画されている。

現在は初期の研究を主導した主要グループを中心に、以上の研究を基盤とした上でそれを包含する発展研究が進められており、合意・同期・被覆制御の研究は次のフェーズに進化しつつある。これについては（5）で詳述する。

（4）科学技術的・政策的課題

現代社会が抱える問題の多くは、合意・同期・被覆制御が対象とする「大規模・複雑・不確かなシステムをいかに効率よく管理・制御するか」という問題に行き着く。特に、環境・エネルギー分野において注目を集めている分散協調型エネルギー管理システムの構築はその典型例といえる⁸⁾。実際、JST 戦略的創造研究推進事業において 2012 年度より開始された 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」において、合意・同期・被覆制御はその達成に向けた基礎理論と設定されている⁹⁾。しかしながら、その実現に向けては、基礎研究から応用研究への科学技術的進化が必要となる。特に、以下の点での発展が課題としてあげられる。

- ① より現実的な問題に利用可能な形に理論自体をカスタマイズする必要がある。例えば、合意制御で実現される平均値の分散計算という機能がそのまま社会課題の解決に資するとは考えづらく、より意味のある合意値に到達させるべく、問題設定そのものをスケールアップする必要がある。
- ② これらの理論が解決に貢献する社会課題を明確化し、その道筋を提示する。研究開始当初より、当該分野のアプリケーションとしてはセンサネットワーク¹⁰⁾ があげられることが多く、その側面での研究は現在でも一定のインパクトをもつが、これのみでは社会への貢献は限られたものとなる。
- ③ 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、社会課題の解決に向けては人間も含むシステムを問題として記述する方法を創出する必要がある。また、社会ネットワークにおける人間自体の相互作用を解析するという方向の進展も魅力的である。
- ④ 研究課題自体が発散傾向であるので、個別の課題を統括的に表現する枠組みを提示する必要がある。

（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）

わが国における環境・エネルギー分野への上述の取り組みのみならず、国際的にも合意・同期・被覆制御の本分野への貢献を示した研究が盛り上がりを見せている。例えば、カリフォルニア大学のグループによる同期制御の知見を活かした電力網の周波数安定化問題への取り組み¹¹⁾は当該分野における主要国際会議の最優秀論文賞を受賞するなど大きなインパクトを与えている。これに限らず、関連する研究は多数報告されており、環境・エネルギー分野へのさらなる貢献可能性を強く感じる。

米国マサチューセッツ工科大学の研究グループは個々のエージェントが有する局所目的と集団全体の目的を定式化した上で、局所的な情報交換と局所的な知識の下で集団目的の最適化を図るマルチエージェント最適化問題なる枠組みを提案し、合意制御の知見を活かした上でそれを発展させ、解法を与えている¹²⁾。

社会ネットワークへの発展も注目される¹³⁾。一般論は確立されていないが、いくつかの研究では、社会ネットワーク上の人間心理の発展を合意制御の形式でモデル化しており、解析にも合意制御の豊富な知見が活用されている¹⁴⁾。

社会ネットワークのようなマクロなネットワークとは対照的に、一個体の神経の挙動も複雑なネットワークとして記述される。マサチューセッツ工科大学の研究グループは同期制御を発展させ、神経ネットワークの同期現象を解析している¹⁵⁾。加えて、同グループは一般の複雑ネットワークについても「制御」の観点から新たな知見を与える試みも行っており、注目される¹⁶⁾。これらの研究はライフサイエンスへの協調制御理論の貢献を予感させるものである。

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して、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開始している¹⁷⁾。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。

個別の研究課題の統合一般化に関する研究としては、ジョージア工科大学の研究グループが、合意・同期・被覆制御といった多くの代表的な協調制御問題があるクラスのゲームとして表現できることを示すと同時に、経済学の知見を活かすことで従来の協調制御法では実現できない多くの機能を一般の問題に対して実現できることを示している¹⁸⁾。さらに、本ゲーム理論と上記のマルチエージェント最適化理論の統合・一般化も図られている¹⁹⁾。また、カリフォルニア大学のグループを中心に、アルゴリズム論の書式を用いて個別の問題を統一的に記述する方法も提案されている²⁰⁾。

（６）キーワード

合意制御、同期制御、被覆制御、協調制御、分散制御、マルチエージェントシステム、動的ネットワークシステム、エネルギー管理システム

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	● 計測自動制御学会制御部門において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、現時点までの最新情報を含めたリレー講座が雑誌「システム/制御/情報」に掲載予定であり ⁷⁾ 、その書籍化も企画されている。さらに、2012年度より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・基盤技術の創出と融合展開」が開始され、合意・同期・被覆制御理論を有力な基盤技術として進められる。
	応用研究・開発	△	↑	● 上記CRESTに関連して、応用研究・開発への発展も期待されるが、現状では特筆すべき動きはない。
	産業化	×	→	● 上記CRESTに関連して、産業化の動きも期待されるが、現状では特筆すべき動きはない。
米国	基礎研究	◎	↑	● 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いっても過言ではない。初期の枠組みでの研究は落ち着きを見せており、その発展研究や応用研究への移行が盛んである。合意制御の発展に関しては、米国マサチューセッツ工科大学の研究グループによる局所的な情報交換と局所的な知識の下で集団目的の最適化を図るマルチエージェント最適化理論の開発 ¹²⁾ やカリフォルニア大学、ジョージア工科大学のグループによる社会ネットワークへの発展が注目される ¹³⁾ ¹⁴⁾ 。同期制御の発展として、マサチューセッツ工科大学の研究グループによる神経ネットワークの解析 ¹⁵⁾ ¹⁶⁾ はライフサイエンスへの貢献可能性を示すものである。また、従来のマルチエージェントに人間を含める試みが、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によって始められている ¹⁷⁾ 。
	応用研究・開発	△	↑	● カリフォルニア大学のグループによる同期制御の知見を活かした電力網の周波数安定化問題への取り組み ¹¹⁾ など、一部の研究者が基礎研究から現実の問題への応用へとシフトしているが、具体的に開発にまで進んだ事例は知らない。
	産業化	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
欧州	基礎研究	○	↑	● 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。もともと欧州の研究グループが得意とするモデル予測制御を発展させた研究が多いのが特徴である。また、スウェーデンのグループを中心いくつか革新的なアイデアも提案されており、安定した発展を遂げてきている印象である。
	応用研究・開発	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
	産業化	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
中国	基礎研究	○	↑	● 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、社会に貢献する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り、研究者数の多さを鑑みると、今後本分野をリードしていくポテンシャルを感じる。
	応用研究・開発	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
	産業化	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
韓国	基礎研究	○	↑	● 寡聞にして知らないが、おおよそ日本と類似の傾向であると考えられる。
	応用研究・開発	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。
	産業化	×	→	● 基礎研究の段階であり、特筆すべき動きはない。

（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) M. Athans Ed. Special Issue on Large-scale systems and decentralized control. IEEE Trans. Automat. Contr. 1978, vol. 23, no. 7
- 2) 計測自動制御学会. 特集, 自律分散システム. 計測と制御. 1990, vol. 29, no. 10
- 3) P. Antsaklis, J. Baillieul Ed. Special Issue on Networked control systems. IEEE Trans. on Automat. Contr. 2004, vol. 49, no. 9
- 4) P. Antsaklis, J. Baillieul Ed. Special Issue on Technology of networked control systems. Proceedings of the IEEE. 2007, vol. 95, no. 1
- 5) 計測自動制御学会. 特集, 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) 藤田政之, 畑中健志. 協調制御—合意から被覆まで—. 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, チュートリアル講演. 2008, p. 1-6
- 7) リレー講座, マルチエージェントシステムの協調制御. システム/制御/情報. 2013, vol. 57
- 8) 畑中健志, 藤田政之. システム科学技術のための分散協調最適化とポテンシャルゲーム. 計測と制御. 2012, vol. 50, no. 1, p. 49-54
- 9) JST 戦略的創造研究推進事業. “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>, (accessed 2012-06-01)
- 10) 飯野穰, 畑中健志, 藤田政之. センサネットワークと制御理論. 計測と制御. 2008, vol. 47, no. 8, p. 649-656
- 11) F. Dorfler and F. Bullo. Synchronization and transient stability in power networks and non-uniform Kuramoto oscillators. Proceedings of 2010 American Control Conference. 2010, p. 930-937
- 12) A. Nedic and A. Ozdaglar. Distributed subgradient methods for multi-agent optimization. IEEE Trans. on Automat. Contr. 2009, vol. 54, no. 1, p. 48-61
- 13) Interdisciplinary Workshop on Information and Decision in Social Networks, 2011, <http://wids.lids.mit.edu/>, (accessed 2012-06-01)
- 14) A. Mirtabatabaei and F. Bullo. On opinion dynamics in heterogeneous networks. Proceedings of 2011 American Control Conference. 2011, p. 2807-2812
- 15) G. Yu, and J. J. E. Slotine. Visual grouping by oscillator networks. IEEE Trans. on Neural Networks. 2009, vol. 20, no. 12, p. 1871-1884
- 16) Y.Y. Liu, J. J. E. Slotine and A. L. Barabasi. Controllability of complex networks.

- Nature. 2011, vol. 473, p. 167-173
- 17) Center for Human and Robot Decision Dynamics,
<http://people.bu.edu/johnb/CHARDD.html>. (accessed 2012-06-01)
 - 18) J. R. Marden, G. Arslan and J. S. Shamma. Cooperative control and potential games. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2009, vol. 39, no. 6, p. 1393-1407
 - 19) N. Li and J. R. Marden. Designing games for distributed optimization. Proceedings of 50th IEEE Conference on Decision and Control. 2011, p. 2434 - 2440
 - 20) F. Bullo, J. Cortes and S. Martinez. Distributed control of robotic networks. Princeton Series in Applied Mathematics. 2009

3.3.6 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、こうしたクラスに属する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、および組み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。

ネットワーク化制御系（networked system）^{1) 2)} 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いう。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やセンサネットワークなどの応用を指す。そこでは、おのおののエージェントは通信によって得たローカルな情報を基に行動するが、系全体では所望の仕様を達成するような協調制御を実現する制御システムをいう。

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。

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。一般には、遅延時間が変動するため、それを考慮した制御器設計が課題となっている。
- 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。
- 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。今後、重要性が増すことが予想され、実際、米国国土安全保障省は最近、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⁵⁾。
- 日本においては、大規模ネットワーク制御の領域における研究は、大学と企業の研究者が独立して行っている面があり、総合的な研究推進を促す仕組みが求められる。

（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）

- 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、学術的に深い意義をもつ。
- 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、協調制御を行う際に最低限もつべき性質について興味深い知見がいくつも得られている。
- 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、大規模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、継続的に立ち上がっている。現在、活動が行われているものでは、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バークレイ校を中心とした全米 10 大学からなる研究グループ Multiscale Systems Center⁶⁾ があげられるが、そこでは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、多岐にわたる研究を行っている。
- 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）⁷⁾ が 2004 年より継続的に続いている。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国の機関が参加するものは多数立ち上がっている。フランスの INRIA やスイス工科大学を中心とした FeedNetBack : Co-Design for Networked Control Systems⁸⁾、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 Systems⁹⁾ があげられる。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¹⁰⁾。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・制御システム

（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	○	→	● 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	○	→	● 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	○	→	● 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	◎	↗	● 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盛んに行われている。 ● 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）の Control Systems Society では、本領域を対象とした新しい論文誌の発刊が企画されている。
	応用研究・開発	◎	→	● 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である。
	産業化	◎	→	● 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	○	↗	● 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 Technical Committee on Networked Systems¹¹⁾ 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	○	→	● 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	○	→	● 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。
中国	基礎研究	○	↗	● 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¹²⁾。
	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) P.J. Antsaklis and J. Baillieul, eds. Special Issue on the Technology of Networked Control Systems. Proceedings of the IEEE. 2007, vol. 95, no. 1.
- 2) A. Bemporad, W.P.M.H. Heemels, and M. Johansson, eds. Networked Control Systems. Springer, 2010, 371p., (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 406)
- 3) F. Bullo, J. Cortes, and S. Martinez. 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. Dec. 2010, <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd-report-2010.pdf>, (accessed 2012-06-18) US-CERT.
- 5) U.S. Department of Homeland Security, Control Systems Security Program”. http://www.us-cert.gov/control_systems/icsjwg/, (accessed 2012-06-18)
- 6) Univ. of California, Berkley. “Multiscale Systems Center”. <http://www.musyc.org/>, (accessed 2012-06-18)
- 7) The FP7 NoE HYCON2. “HYCON 2”. <http://www.hycon2.eu/>, (accessed 2012-06-18)
- 8) “FeedNetBack”. <http://www.feednetback.eu/>, (accessed 2012-06-20)
- 9) “WIDE : Decentralized and Wireless Control of Large-Scale Systems”. <http://ist-wide.dii.unisi.it/>, (accessed 2012-06-20)
- 10) KTH Royal Institute of Technology. “ACCESS Linnaeus Centre”. <http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>, (accessed 2012-06-20)
- 11) IFAC Technical Committee. “TC1.5. Networked Systems”. <http://tc.ifac-control.org/1/5>, (accessed 2012-06-20)
- 12) “Cyber-Physical Systems Week”. <http://www.cpsweek.org/>, (accessed 2012-06-20)

3.3.7 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、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、一般的な数学理論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¹⁶⁾。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¹⁷⁾、スウェーデン王立工科大学¹³⁾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³⁾、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^{6) 8) 11)}、量子力学系^{14) 18)}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¹⁾や電力ネットワークへの応用にかかわる研究¹²⁾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¹⁵⁾、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⁷⁾。
- 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^{6) 8) 11)}。

（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	○	↑	● 理論研究のレベルは比較的高く長い歴史をもつ¹⁵⁾ 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	○	↑	● 東京大学のグループ（およびその共同研究者グループ）¹⁾ 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¹²⁾。
	産業化	△	↑	● 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	◎	↑	● 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⁸⁾。 ● 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⁷⁾。 ● 非線形フィルタリングに関する結果²⁾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、高度な確率論的な成果が得られている。
	応用研究・開発	◎	↑	● 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³⁾。 ● カリフォルニア大学サンタバーバラ校⁴⁾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	○	↑	● 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	◎	↑	● 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¹⁷⁾、スウェーデン王立工科大学¹³⁾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	◎	↑	● 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	○	↑	● 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	○	↗	● 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	△	→	● 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。
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) <http://www.cyb.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/>, (accessed 2012-06-27)
- 2) Van Handel, R. Observability and nonlinear filtering. Probability theory and related fields. 2009, vol. 145, p. 35-74
- 3) <http://soe.stanford.edu/research/japrimbs.htm>, (accessed 2012-06-27)
- 4) <http://www.ece.ucsb.edu/ccdc/index.html>, (accessed 2012-06-27)
- 5) <http://control.ee.ethz.ch/>, (accessed 2012-06-27)
- 6) <http://www.opticontrol.ethz.ch/>, (accessed 2012-06-27)
- 7) J. Marden, , G. Arslan, J. Shamma. Cooperative control and potential games. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2009, vol. 39, p. 1393-1407
- 8) Kelman, A. ; Daly, A. ; Borrelli, F. , Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage: Modeling, Stimulation, and Experiments, 2012, IEEE Control Systems Magazine, vol. 32, p. 44-64
- 9) E. Baeyens, E.Y. Bitar, P.P. Khargonekar, K. Poolla, Wind Energy Aggregation: A Coalitional Game Approach, 2011, IEEE Conference on Decision and Control
- 10) Eilyan Bitar, Kameshwar Poolla, Pramod Khargonekar, Ram Rajagopal, Pravin Varaiya, Felix Wu, Selling Random Wind, Proceedings of HICSS-45. IEEE, 2012
- 11) EU VIKING Project, <http://www.vikingproject.eu/new2/index.php>
- 12) <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>
- 13) KHT, ACCESS Linnaeus Centre,

<http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>

- 14) Special Issue on Control of Quantum Mechanical Systems , IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 57, no. 8, August 2012, Guest Editors: Claudio Altafini, Anthony M. Bloch, Pierre Rouchon
- 15) <http://sci-sss.org/sss2012/>
- 16) <http://control.ee.ethz.ch/~ssb/>
- 17) <http://www-control.eng.cam.ac.uk/>
- 18) <http://pracqsys2012.com/>

3.3.8 故障検出／信頼性設計

（１）研究開発領域名

故障検出／信頼性設計

（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、故障や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。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

故障検出・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、システムの状態を計測したデータから統計的にモデルを構築し、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。故障や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、設備の故障検出・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) 11) 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。

安全確保のために故障検出や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故障検出・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。

（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

故障検出、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）

（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	◎	↑	● 半導体のインテル、製薬のファイザー・メルクなど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。 ● 欧米のトップレベルの大学院で博士を取得した研究者が本国で活躍する流れがある。
	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) R. Isermann. Model-based fault-detection and diagnosis - status and applications. 2005, vol. 29, p. 71-8
- 2) V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and K. Yin. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. 2003, vol. 27, p. 293-311
- 3) V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis Part III : Process history based methods. 2003, vol. 27
- 4) T. Kourti. 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) J. Ma and J. Jiang. 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) Y. Zhang and J. Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. Annual Reviews in Control. 2008, vol. 32, no. 2, p. 229-252
- 7) P. Kadlec, B. Gabrys, and S. Strandt. 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, (accessed 2012-06-01)
- 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) M. Kano and M. Ogawa. 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/>, (accessed 2012-06-01).
- 15) Texas Wisconsin California Control Consortium. “TWCCC Overview”. <http://twccc>.

- che.wisc.edu/, (accessed 2012-06-01).
- 16) National Science Foundation Blue Ribbon Panel. Simulation-Based Engineering Science. 2006, 66p., http://www.nsf.gov/pubs/reports/sbes_final_report.pdf, (accessed 2012-06-01).
- 17) “Research and Development in Simulation-based Engineering and Science”. <http://www.wtec.org/sbes/>, (accessed 2012-06-01)

3.3.9 制御の基盤としてのシステム理論

（1）研究開発領域名

制御の基盤としてのシステム理論

（2）研究開発領域の簡潔な説明

システム理論は、制御の問題を議論する上で必要となる数学的基盤を提供する。制御系設計の対象となるシステムの特性解析、コントローラ設計法の展開、コントローラ設計後の全体システムの性能評価を可能とする数理的ツールが、システム理論により提供される。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

（3-1）システムの表現

システム理論やこれを基盤とする制御における考察の対象を、ここではシステムと呼ぶ。システムの表現のひとつとして、外部からシステムへの影響をあらわす入力、その結果としてのシステムからの出力、およびシステム内部の状態をあらわす状態変数による微分方程式を考えるのが標準的である。非線形の微分方程式により表現可能な物理システムは多岐にわたり、非線形システムと呼ばれる¹⁾。非線形システムの形式による表現は汎用性の高い表現形式であるが、一般に解析が困難である。そこで、平衡点（一定の入力とその入力で実現される一定の状態の組）の近傍での振る舞いに着目し、詳細な解析を可能とする線形微分方程式で表現される線形システムがよく用いられる²⁾。標準的な微分方程式以外の表現形式を考えた場合のシステム理論も重要である。例えば、分布定数システム、離散事象システム、ディスクリプタシステム、ビヘイビアによる表現、ハイブリッドシステムなどをあげることができる。これらに関する事項は、(5)で簡潔にまとめる。

（3-2）安定性

安定性は、システムの最も基本的な特性であり、これを特徴づける数理的理論とツールの研究が古くから行われてきた。ここでは、基本的な安定性の概念である、内部安定性と入出力安定性を考える。内部安定は、入力をゼロとして、どのような初期状態からも平衡点に収束することをいい、入出力安定は、初期状態をゼロとして、指定されたクラスの安定な入力信号に対して、出力が（一般には入力のクラスとは別の）指定されたクラスの安定な信号となることをいう。

内部安定性の特徴づけとして、Lyapunov 関数の構成を内部安定の十分条件とする Lyapunov の定理をあげることができる³⁾。Lyapunov の定理は、無数の初期状態に対する応答を求めることなく、単一の Lyapunov 関数を構成するだけで、内部安定性を判定できる。しかしながら、与えられたシステムに対して Lyapunov 関数を構成する問題は単純ではない。さまざまな Lyapunov 関数の構成法が提案されており、実際の課題にも利用されているが、非線形システム全般に対して常に実用的な手法の提案は困難であり、現在も精力的な研究がすすめられている。なお線形システムの場合は、Lyapunov 方程式と呼ばれる方程式に解が存在することと Lyapunov 関数の存在が等価であり、存在するならば容易に Lyapunov 関数が構成される。Lyapunov の定理は、単純な安定性の判定のみならず、制御系の設計においても重要な数理的ツールとなっている。Lyapunov 関数の構成法をはじめ、今後も継続した研究と発展が必要である。

入出力安定性の議論における入力信号および出力信号のクラスとして、 L_2 -ノルムや L_∞ -ノルムで計った信号の大きさが有界なクラスが用いられ、問題に応じて使い分けられている⁴⁾⁵⁾。信号のクラスを定義するノルムで計った出力信号の入力信号に対する比は、ゲインあるいは誘導ノルムと呼ばれ、システムの入出力安定の度合いを特徴づける値となっている。入出力安定性の議論では、単純に安定であることの判定に加えて、具体的なゲインの値を求めることが重要になる。例として、入力信号、出力信号の大きさを L_2 -ノルムで評価した L_2 -誘導ノルムを考える。線形システムを対象とする場合、ゲインの値の評価は、凸最適化問題に帰着される。したがって厳密なゲインの値が評価される。非線形システムを対象とする場合は、Hamilton・Jacobi・Bellman 方程式と呼ばれる偏微分方程式の解を求めることにより誘導ノルムの評価が可能なが明らかにされている。しかしながら、偏微分方程式の求解は一般には困難であり、さまざまな解法が現在でも研究されている段階にある。誘導ノルムは、(3-4)で考えるスモールゲイン定理や、これを基盤とするロバスト制御の展開における中心的な道具立てとなっている。対象を特化した場合の誘導ノルム評価精度の尖鋭化や数値最適手法との融合など、今後の研究と発展が必要となっている。

内部安定性と入出力安定性の関連も明らかにされている。線形システムを対象とする場合、緩い仮定の下で、内部安定性と入出力安定性が等価な概念となることが明らかにされている。また非線形システムを考える場合も、指数安定（内部安定よりも強い概念）、かつシステムの振る舞いを平衡点の近傍に限るなどの条件の下で、入出力の意味でも安定となることなどが示されている。なおここでは、入出力安定性を誘導ノルムに注目して考えた。しかしながらシステムの安定性は、システムの内部に蓄積されるエネルギーに着目した消散性の概念⁶⁾⁷⁾などを利用して特徴づけることができる。

安定性は、システムを特徴づける最も基本的な特性であり、実際の課題に適した議論がさらに展開される必要がある。例えば近年では、内部安定性と入出力安定性の両方の特徴をとらえることを可能とするような、入力状態安定性⁸⁾や積分入力状態安定性⁹⁾といった新たな概念が提案され、研究が進展している。これら新たな展開を含め、より精密な安定性の議論を可能とする発展が必要である。

(3-3) 可制御性と可観測性

制御系の設計を議論する上で重要となる概念として、可制御性と可観測性がある¹⁰⁾。

可制御性は、入力と状態のつながりの特徴づける概念であり、またシステムを安定化するコントローラ設計のための基盤を与える。ある制御入力をシステムに加えることによって、有限な時間で任意の初期状態を指定された状態へ移すことができるならば、システムは可制御と呼ばれる。可制御性は、システムへの入力を変化させて状態を自由に制御できることを意味することから、システムに要請される基本的な特性ととらえることができる。

可制御性の重要性を示す結果として、線形システムを対象とした安定化をあげる。この問題では、状態の線形フィードバック制御則を設計することによってシステムを安定化することが可能かどうかを考える。このとき、システムが可制御であれば安定化する制御則が設計できることが明らかにされており、可制御性が重要な概念であることを示す結果となっている。

与えられたシステムが可制御か否かを判定できることは実際の課題において重要である。非線形システムの可制御性は、Lie 微分をもちいた条件により特徴づけられることが明らか

になっている。しかしながら、一般には平衡点近傍での振る舞いに限った場合の議論になることや計算手順が複雑になるなどの課題もあり、継続した進展が必要となっている。一方、線形システムを対象とする場合は、数多くの判定法が明らかにされており、その可制御性は厳密に評価される。

可観測性は、出力と状態のつながりを特徴づける概念となっている。入力に加えられたときのシステムの出力を考える。このとき、入力と出力の有限時間の観測データから、システムの初期状態を一意に決定できるならば、システムは可観測と呼ばれる。可観測性は、入力、出力の観測データから初期状態を曖昧性なく決定できることを意味する。初期状態が決定されれば、任意の時刻における状態も一意に決定されるから、可観測性は、入力、出力の観測データから状態を知るために、システムに要請される基本的な性質ととらえることができる。

可制御性の項目では、状態フィードバック制御則による安定化を考えた。しかしながら実際の応用の場面では、システムの内部状態全体が観測可能で制御に利用できることはまれである。したがって、観測可能な入力、出力のデータのみを用いた制御則の構成が必要となる。可観測なシステムに対しては、出力の観測により真の状態に漸近的に収束する状態の推定値の構成が可能である。したがって構成された推定値を利用した制御則の利用が考えられる。このとき、推定値を利用した制御によって、実際にシステムが安定化されることが明らかにされており、可観測性が重要な概念であることを示す結果となっている。

可観測性に関する多くの問題は、数学的には可制御性に関する問題の双対な形式で表現される。したがって、可観測性の判定法についても、可制御性での結果に対応した双対な結果が多くの場合に成立する。なお可制御性、可観測性は、システムをより簡易なモデルによって表現することを議論するモデル低次元化においても、その基盤を与える重要な概念となっている。

(3-4) 結合システムの安定性

単体のシステムの安定性に加え、制御の展開では、複数のシステムの結合からなる全体システムの安定性を特徴づけることが重要になる。典型的なシステムの結合の例として、図 3-2 に示すフィードバック結合を考える。ここで例えば、システム 1 を制御すべき制御対象、システム 2 を設計すべきコントローラとしたフィードバック制御系の設計問題では、フィードバック結合により構成される全体システムを安定とする必要があり、これを特徴づける数理的ツールが必要となる。

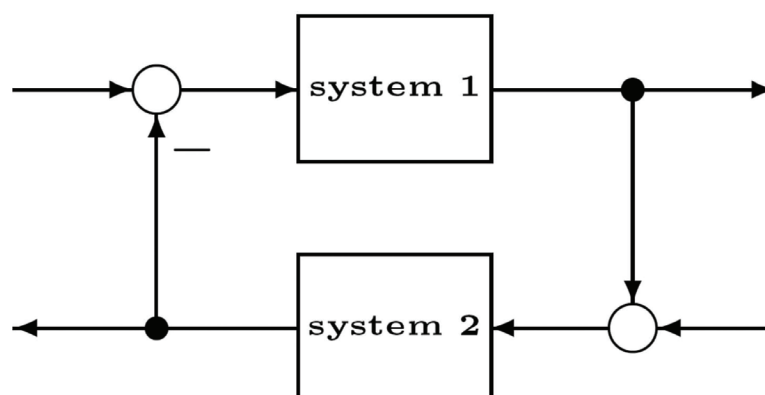


図 3-2 システム 1、システム 2 のフィードバック結合

スモールゲイン定理は、フィードバック結合した全体システムの安定性判別法を展開する基盤となっている^{11) 12) 13)}。ここでシステム1は入出力安定であり、同様にシステム2も入出力安定とする。このときスモールゲイン定理は、システム1のゲインとシステム2のゲインの積が1より小さければ、フィードバック結合した全体システムがやはり入出力安定あることを保証する。スモールゲイン定理は、その適用可能範囲が極めて広く、ロバスト制御理論を展開する上での中心的な道具立てでもある重要な結果となっている。

スモールゲイン定理は、一般のシステム全般に対して成立する条件であるがゆえに、基本的にはフィードバック結合した全体システムが安定となるための十分条件を与えるのみである。フィードバック結合を構成する個々のシステムの特性を考慮することで、より精密な安定性の判別へと展開することも、実際の課題を議論する上では重要となる。ここでシステム1およびシステム2がともに線形システムの場合は、Nyquistの安定判別法と等価であり、フィードバック結合した線形システムの安定性を厳密に評価することができる。システム1を線形システムとし、システム2をフィードバック制御系に存在する非線形な特性をあらわす要素とした場合の安定性の判別は、実際の課題において重要である。システム2が、セクター条件と呼ばれる特性をみたす静的な要素からなる場合の安定性は、Popov条件により判定可能である。またシステム2がセクター条件をみたし、かつ時間とともにその特性が変化し得る場合は、円板条件による安定性判別が可能である。非線形特性をもつシステム2が、静的な要素ではなく動特性をもつ場合の安定性は、超安定性として議論できる。

ここでは、結合システムの特性解析のひとつとして、スモールゲイン定理を基礎としたフィードバック結合システムの安定性判別について概観した。結合システムの安定性については、システム内部に蓄積されるエネルギーに着目した受動性などの概念によっても¹⁴⁾、議論できることが明らかにされている。ネットワーク結合型の大規模システムの安定性解析問題などが近年重要性を増してきている。結合システムの特性解析は、継続した研究が必要な重要分野である。

（4）科学技術的・政策的課題

- 線形システムを対象とした場合は、体系化されたシステム理論が構築されているととらえられる状況にある。
- 線形システムを対象とする場合でも、数値最適化などの研究成果との融合により、より実用性を高めた解を与える必要がある。例えば、モデルの不確かさを考慮したロバスト性解析や時変システム、周期システムのなどの解析では、数値最適化の手法を取り入れた実効的な解の導出が必要である。
- 非線形システムの振る舞いは多様であり、未解決の課題は多い。最も基本的な安定性の解析問題を含めて、継続した研究が必要である。
- 非線形システムの解析では、数値最適化などの研究成果との融合による、特定のシステムに特化した展開は重要と考えられる。
- 日本では、システム理論に関連する数学者と制御理論の研究者の交流が欧米と比較した場合活発ではない。
- 最適化に関連する研究者および数学者と制御理論の研究者の交流も、日本では欧米に比較した場合低調である。

（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）

- ビヘイビアアプローチでは、システムへの入力、出力の定義を行わず、システムの振る舞いを直接的に利用しその特徴づけが行われる^{15) 16)}。ビヘイビアアプローチは、より柔軟な物理システムのモデリングや制御系の設計を実現する可能性を有しており、今後の展開が注目される。
- 標準的な微分方程式と比較し、より柔軟なシステムのモデリングを目指したディスクリプタシステムや特異摂動システムが考察されている。ディスクリプタシステムの安定性解析や制御系の設計法が提案されてきており、継続した発展が必要となっている。
- コントローラの切り換えやロボットの歩行動作などに代表されるような不連続な動作を考慮することにより、システム理論や制御はより広範な実際の課題に対して展開可能となる。微分方程式により表現される連続な特性とオートマトンにより表現される不連続な特性が混在したシステムは、ハイブリッドシステムと呼ばれ、1990年代中盤以降大きく注目されている^{17) 18)}。
- システム理論と制御の科学領域への展開は重要である。システムズバイオロジーの分野では、生体内タンパク質ネットワークの安定性が結合システムの安定性としてとらえられ議論されるなど、システム理論と制御からのアプローチが重要となっている¹⁹⁾。量子力学を基盤とする量子通信などの新規な展開においても、量子系の安定化などの問題においてシステム理論と制御からのアプローチの重要性が増している²⁰⁾。
- ネットワーク技術の発展、普及に伴い、大規模ネットワークシステムの安全性は重要な課題となっている。情報セキュリティの問題などへのシステム理論と制御からのアプローチは大きな貢献となり得る。
- ハイブリッドシステムに関する理論は、その多くが発展の途上にある。例えば、ハイブリッドシステムを表現するモデルのひとつである区分的線形システムの可制御性や可観測性は、モデル予測制御の実装などの観点からも重要であるが、さまざまな概念が提案され検討されている状況にあり、今後の発展が必要である。またハイブリッドシステムの入出力ゲイン解析は、モデル表現に特化した理論の展開により、実用的な解へと発展する必要がある。
- 計算機ネットワーク、タンパク質ネットワークやエネルギー需要供給ネットワークなどに見られるようなネットワーク結合型の大規模システムに対しては、安定性の解析やモデル低次元化における新たな展開が重要になってくると考えられる。
- システムの不変集合は、安定性の解析や制御の性能の解析、不連続な特性をもつ制御系の設計、モデル予測制御の実装などにおいて重要な役割を果たす。不変集合を具体的に構成することは、非線形システム全般に対しては困難であり、数値的な手法の発展が必要となっている。
- 時相論理を利用した制御仕様の記述と達成可能性の解析に関する問題は、ごく最近大きな進展を示しており注目すべきである。達成可能性の解析は、区分線形システムの可制御性などとも関連すると考えられ、不変集合などの解析ツールは、これらの問題においても今後その重要性を増すと考えられる。

（６）キーワード

システム表現、線形システム、非線形システム、安定性、可制御性、可観測性（system representation, linear system, nonlinear system, stability, controllability, observability）

（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	○	↘	● 基礎研究の質・量ともに一定以上のレベルを維持し続けている。ただし個別の研究者による個別の研究である点が特徴的である。情報ネットワーク分野やエネルギーマネジメントシステムなどでの発展を目指した組織的な活性化が必要と考えられる。
	応用研究・開発	○	↘	● 製造業分野における応用はある程度の量を維持していると考えられるが、情報ネットワーク分野やエネルギーマネジメントシステムなどの新たな分野における発展が必要である。
	産業化	◎	→	● プラント産業、自動車産業、ロボット産業などの製造業分野においては、長いシステム制御応用の歴史をもつが、情報ネットワーク分野やエネルギーマネジメントシステムなどの新たな分野においては、さらなる活性化が必要と考えられる。
米国	基礎研究	◎	→	● 質・量ともに本研究分野をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	● 伝統的に軍事面への利用を考慮した応用研究とこれを可能にするための基礎研究が盛んであるが、計算機ネットワークやエネルギーマネジメントシステム分野などでの予算措置も強化されている。
	産業化	◎	↗	● 日本で活発な製造業分野における大きな動きはないと思われるが、情報ネットワーク分野における応用やシステム制御に関連したソフトウェア産業などは米国での発展が中心である。
欧州	基礎研究	◎	→	● 応用数学を背景とする長い研究の歴史があり、安定して高いレベルの研究が続けられている。
	応用研究・開発	◎	→	● EU内のシステム制御関連研究プロジェクトなどが設定されており、安定した活発な研究活動を見せている。
	産業化	○	→	● 自動車関連、精密機器分野などを中心に安定した技術力を維持していると考えられる。またエネルギーマネジメント分野などでも EU内での共同研究が盛んであり、今後の産業発展が予想される。
中国	基礎研究	△	↗	● 米国で学位を取得した研究者が多いため、米国の動向に敏感である。
	応用研究・開発	△	↗	● 同上。
	産業化	△	↗	● 経済の発展を背景に急速な進展が考えられる。
韓国	基礎研究	△	↗	● 米国で学位を取得した研究者が多いため、米国の動向に敏感である。
	応用研究・開発	△	↗	● 同上。
	産業化	△	↗	● 経済の発展を背景に急速な進展が考えられる。

（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) H. K. Khalil, Nonlinear Systems, 3rd ed. Prentice Hall, 2002.
- 2) L. A. Zadeh and C. A. Desoer, Linear System Theory. McGraw-Hill, 1963.
- 3) A. M. Lyapunov, The General Problem of the Stability of Motion, A. T. Fuller, Ed., Taylor & Francis, 1992.
- 4) G. Zames, “Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 26, no. 2, pp. 301 – 320, 1981.
- 5) M. Vidyasagar, “Optimal rejection of persistent bounded disturbances,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 31, no. 6, pp. 527 – 534, 1986.
- 6) J. C. Willems, “Dissipative dynamical systems Part I: General theory,” Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 45, pp. 321–351, 1972.
- 7) “Dissipative dynamical systems Part II: Linear systems with quadratic supply rates,” Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 45, pp. 352–393, 1972.
- 8) E. D. Sontag, “Smooth stabilization implies coprime factorization,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 4, pp. 435–443, 1989.
- 9) “Comments on integral variants of ISS,” Systems & Control Letters, vol. 34, no. 1-2, pp. 93 – 100, 1998.
- 10) R. E. Kalman, “On the general theory of control systems,” in Proceedings of the 1st World Congress of the International Federation of Automatic Control, vol. 1, 1960, pp. 481 – 493.
- 11) G. Zames, “On the input-output stability of time-varying nonlinear feedback systems –part i: Conditions derived using concepts of loop gain, conicity, and positivity,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 11, no. 2, pp. 228 – 238, 1966.
- 12) “On the input-output stability of time-varying nonlinear feedback systems –part ii: Conditions involving circles in the frequency plane and sector nonlinearities,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 11, no. 3, pp. 465 – 476, 1966.
- 13) I. W. Sandberg, “On the L2-boundedness of solutions of nonlinear functional equations,” The Bell System Technical Journal, vol. 43, pp. 1581 – 1599, 1964.
- 14) P. Moylan and D. Hill, “Stability criteria for large-scale systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 23, no. 2, pp. 143 – 149, 1978.
- 15) J. C. Willems, “Paradigms and puzzles in the theory of dynamical systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36, no. 3, pp. 259 –294, mar 1991.
- 16) J. W. Polderman and J. C. Willems, Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. Springer, 1998.
- 17) Hybrid Systems I-V, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 736, 999, 1066, 1273, 1567. Springer.
- 18) Hybrid Systems: Computation and Control, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1386, 1569, 1790, 2034, 2289, 2623, 2993, 3414, 3927, 4416, 4981, 5469.

Springer.

- 19) M. Khammash, C. J. Tomlin, and M. Vidyasagarj, “Joint special issue on systems biology,” IEEE Transactions on Automatic Control & IEEE Transactions on Circuit and Systems I, vol. 53, no. 1, 2008.
- 20) C. Altafini, A. M. Bloch, M. R. James, A. Loria, and P. Rouchon, “Special issue on control of quantum mechanical systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 57, no. 8, 2012.

3.4 最適化

3.4.1 基盤分野としての最適化：分野融合的な視点から

（1）研究開発領域名

基盤分野としての最適化：分野融合的な視点から

（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、「さまざまな制約条件を満たしつつ関数を最小化（最大化）するための数理とアルゴリズム、そして、それにこだ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、優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つある。前者は線形計画を代表とする数理に裏づ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など、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、よ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こだわらない。本研究開発領域では、数理最適化に重点をおくが、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おく。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などといった、有用な構造をもち、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とらえるのではなく、あくまでも、最適化はモデリングにかかわる。数理的には単に数理モデルで表現された問題に対して最適解を与える「道具」に過ぎないが、最適化モデルとここで呼ぶ一連の標準モデルがあるために、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こだわりである。「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単純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、半正定値計画などの「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うまでもない。一方、世の中で最適化が利用されるときには、ユーザは「よい使いやすい解」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、そのパラメータの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） 豊富なよい構造をもち、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） 豊富なよい構造をもち、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など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、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の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あげておく。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。

（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などの最適化であるが、これらの最適化問題においては、目的関数を改善する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速度や記憶容量が追いつ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などが重要になり、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。例えば、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、ネットワーク計画問題など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では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、情報幾何など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・統計などとも関係がある。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」をひと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回帰とのつながり、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など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以降のことである。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、線形計画法を基礎として、連続的最適化の分野では、最急降下法や Newton 法、準 Newton 法などのアルゴリズム、そして、最適性条件など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る。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もち、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ゆえんである。

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・アルゴリズムはいま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）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、あるいは融合的に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。

（3-9）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も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・多目的最適化など

（3-10）分野の国際的な位置づけ

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

（3-11）わが国の位置づけ

わが国は、最適化分野で優れた仕事を着実に輩出している。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

などの分野において世界トップレベルの業績（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務める、あるいはトップジャーナルの編集者を務める）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。従来の蓄積の上に立ってさらに、幅広い視野をもち、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

（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など、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、広い視野をも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などに関する最適化、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産業界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などが、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など研究集会など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、層の厚みも相まって、この点でも世界トップである。
	産業化	◎	→	● ソフトウェア、コンサルティング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いくつかある。
	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 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 をあげておく。

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 など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 会議録などを参照のこと。

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），pp.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。

3.4.2 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 programming、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り、理論的にはかなり完成されている。しかしいまだ、微分不可能問題や均衡条件を含む最適化問題など、困難な問題に対応する研究がなされている。特に近年、データの大規模化とモデリング技術の発達に伴い、例えば目的関数の値を 1 回評価するために数値シミュレーションが必要になるなど、ひとつひとつの計算に非常に時間のかかる最適化問題が現れ始めている。このような問題は實際上、1 次微分または 2 次微分が計算できないので、最適化が極めて難しい。このため、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。

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。有力な基礎理論がないため、実験をただけの論文も多い。実用的な規模の問題を解くことは今後も難しいと予想される。

ただし、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。この解法は理論的に強力であるのみならず、実際に従来なかったレベルの解が得られることが報告されており、将来有望と思われる。

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。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フリーで手に入るようになり、応用に関する研究が発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

- 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。この文脈で、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、理論的に新たな結果がいくつか得られているが、これを実際に用いて大規模な最適化ができるのかどうか、今後しばらく話題となるものと思われる。
- 大規模データや複雑なモデルを扱うことができるようになり、目的関数の評価に非常に時間のかかる問題がさまざまな場面で現れるようになった。このような問題では微分の計算が不可能な場合があり、微分不可能問題として取り扱わなければならない。微分不可能問題や均衡条件をもつ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。
- 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、突然重要な発見がなされたり、流行したりすることがある。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⁾、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。このように、いつ重要になるかわからない技術が詰め込まれているのが連続最適化という分野である。そのため、近隣分野との交流を増やしていくことが特に重要と思われる。
- 新しい最適化技術である SDP については、まだ広く知られているとはいえず、隠れた応用がたくさんあると思われる。これに関しても、近隣分野との交流が大切である。
- SDP は、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。しかしながら、そのための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である。今後しばらくは、この方面の技術に関して研究が必要である。
- SDP を発展させた錐線形計画問題に関しては、錐がより複雑な場合の理論とアルゴリズムが未解決である。これに関して、理論的展開が待たれる。

（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）

- SDP の仲間であるがより容易である 2 次錐計画に関しては、近年、商用ソルバーへの搭載が進んでいる（例えば、Gurobi Optimizer⁵⁾）。これらのソルバーは数値的にも安定して、大規模な問題にも対応している。今後、この最適化問題の応用が急激に広がることが予想される。
- 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。
- 研究者レベルでのソフトウェア開発では、MATLAB（アメリカに本社をおく Mathworks 社の数値計算言語）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、ILOG CPLEX、Gurobi⁵⁾、FICO Xpress が有名である。どれも米国の会社である（ただし、ILOG はもともと本社がフランスであったが 2009 年に IBM により買収された）。日本では、(株)数理システム（2012 年に NTT データの子会社化）が NUOPT 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 Mosek 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。

（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	◎	→	● 日本の大学・公的機関における基礎研究レベルは、層の厚みで米国や欧州には見劣りがするものの、個々の研究者の研究レベルは高いものが多い。 ● 特に、東工大（現中央大）の小島教授の仕事など、内点法研究の初期から SDP の理論的研究にかけては日本の存在感が高い。
	応用研究・開発	○	↗	● 世界に発信しているものもあるが、全体に層が薄い。特に最適化ソフトウェアの開発は弱点となっている。 ● SPDA プロジェクト⁶⁾ は世界に発信している数少ない例のひとつである。 ● 制度的な理由で、大学教授が企業相手に最適化コンサルタントを行うことが難しい。このため、企業が先端技術に触れたり、研究者が現実の問題に触れたりする機会がなかなかない。
	産業化	△	→	● 日本の産業においては、モデルを立てて定量的に分析することが軽視される傾向にあり、最適化技術が活用されていない。あらゆる領域で最適化技術を利用し、人を納得させようとする米国と対照的である。 ● 最適化を生業とする企業が少ない。

米国	基礎研究	◎	↑	● 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内点法・SDP関連の強力な若手研究者を輩出している。 ● これらの有力大学に限らず、さまざまな大学に優秀な研究者がいる。
	応用研究・開発	◎	↑	● 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（ILOG CPLEX、Gurobi、FICO Xpress）はすべて米国で開発されている。このうちILOGはIBMの資本が入り、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	◎	↑	● 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。 ● INFORMS⁷⁾（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	◎	↑	● 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	◎	↑	● 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。 ● YALMIP⁸⁾ 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	◎	↑	● 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次錐計画のソルバーとして名を馳せたMOSEK、非線形計画ソルバーのLanceloなど、独自のソフトウェアが生産されている。
中国	基礎研究	×	↑	● 近年、特に古典的な技術に関して大量の論文が投稿されている傾向があるが、レベルの高いものは多くない。 ● 中国人で優秀な研究者は主に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。
	応用研究・開発	×	→	● ソフトウェアの開発などでは存在感を示せていない。
	産業化	△	→	● 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。しかしいまだそのような段階には至っていない。
韓国	基礎研究	○	→	● 研究は盛んではない。
	応用研究・開発	△	→	● 特に存在感がない。
	産業化	△	→	● 特に存在感がない。

(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) （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>, (accessed 2012-06-18)
- 2) 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>, (accessed 2012-06-20). 小島政和、Nimrod Megiddo、水野真治、野間俊人、吉瀬章子が受賞（1992 年）
- 3) 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>, (accessed 2012-06-20)
- 4) Emmanuel Candès. “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>, (accessed 2012-06-21)
- 5) Gurobi Optimization, Inc. “Gurobi Optimizer 5.0 Overview”.
<http://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/gurobi-overview>, (accessed 2012-06-21)
- 6) SDPA Project. “SDPA (Semidefinite Programming Algorithms) Official Page”.
<http://sdpa.indsys.chuo-u.ac.jp/sdpa/>, (accessed 2012-06-21)
- 7) Institute for Operations Research and the Management Sciences. “informs online”
<http://www.informs.org/>, (accessed 2012-06-21)
- 8) “YALMIP Wiki”.
<http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip/pmwiki.php?n=Main.HomePage>, (accessed 2012-06-21)

3.4.3 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枝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的高速化の他に、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法に移行している。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 Gharen, 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、Sebő（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。

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、入力が入力さ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、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	○	↗	● 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	○	→	● 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	○	→	● 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	◎	→	● 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	◎	→	● 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	◎	↗	● 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	◎	→	● 各国に研究拠点があり、互いに連絡を取り合って、サマースクールや研究集会を実施し、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きている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ある上に、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集会を開催して、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	○	↗	● 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	○	↗	● 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	△	→	● 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	△	→	● 応用研究・開発の動きについては不明。
	産業化	△	→	● 産業化の動きについては不明。
韓国	基礎研究	△	→	● 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	△	→	● 応用研究・開発の動きについては不明。
	産業化	△	→	● 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.opt.math.tu-graz.ac.at/IPCO/>, (accessed 2012-06-07)
- 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>, (accessed 2012-06-07)
- 3) 株式会社数理システム. “NUOPT の機能仕様”.
<http://www.msi.co.jp/nuopt/products/spec.html>, (accessed 2012-06-07)
- 4) Carnegie Mellon Univ. “ACO program”. <http://aco.math.cmu.edu/>, (accessed 2012-06-07)
- 5) School of Mathematics, Georgia Institute of Technology. “Georgia Tech's Ph.D. Program in Algorithms, Combinatorics, and Optimization”.
<http://www.aco.gatech.edu/>, (accessed 2012-06-08)
- 6) “Egerváry Research Group on Combinatorial Optimization (EGRES)”.
<http://www.cs.elte.hu/egres/>, (accessed 2012-06-08)
- 7) “DFG Research Center MATHEON”.
<http://www.matheon.de/>, (accessed 2012-06-08)
- 8) “ARRIVAL: Algorithms for Robust and online Railway optimization: Improving the Validity and reliability of Large scale systems”. <http://arrival.cti.gr/>, (accessed 2012-06-08)
- 9) 清華大学. “ITCS: Institute for Theoretical Computer Science”.
<http://itcs.tsinghua.edu.cn/en/>, (accessed 2012-06-08)

3.4.4 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）、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。一方、日本では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いるが、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に関しては一部を除いて活発に推進されているとはいえない状況である。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の必要性が高まりつつある。

（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、最適化計算分野の活躍できる人材育成のシステムが確立されていない。

（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

- 2011 年度より JST 戦略的創造研究推進事業 CREST の領域「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」が開始されている¹⁾。この研究領域では 2010 年代半ば以降に多用される、メニコア化された汎用型プロセッサや専用プロセッサ（現在 GPGPU と呼ばれるものを含む）を用いて構成されるスパコンの特徴を生かし、その上で実行されるアプリケーションを高効率・高信頼なものにするシステムソフトウェア、アプリケーション開発支援システム、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。

（5-2）米国

- ジョージア工科大学²⁾ 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³⁾ が推進されている。これに関連して AIMMS MOPTA Modeling Competition⁴⁾ 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ィスコンシン大学で開発された CONDOR Grid⁵⁾ 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⁶⁾ 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 ZIB⁷⁾ 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 Matheon⁸⁾ 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 のアルゴリズム工学⁹⁾ 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。

（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	◎	→	● 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	○	↑	● 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	○	↑	● 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	◎	↑	● 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	◎	↑	● 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で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	◎	↑	● 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	◎	↑	● 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	◎	↑	● 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	◎	↑	● 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	○	↑	● 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	○	↗	● 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	△	↗	● いくつかの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。
	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るとはいえないが、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している。

(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) テレンド

↗：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) ジョージア工科大学リサーチラボ
<http://www.isye.gatech.edu/research/labs-centers-groups/>
- 3) COIN-OR ホームページ <http://www.coin-or.org/>
- 4) AIMMS MOPTA Modeling Competition
<http://www.aimms.com/community/modeling-competitions/mopta-2012>
- 5) CONDOR ホームページ <http://www.condor.com/us/index.jsp>
- 6) NEOS サーバーホームページ <http://www.neos-server.org/neos/>
- 7) ドイツ ZIB 国立研究所 <http://www.zib.de/en/home.html>
- 8) ドイツ Matheon プロジェクト <http://www.matheon.de/index.asp?lang=de>
- 9) DFG のアルゴリズム工学 <http://www.algorithm-engineering.de/index.php?lang=en>

3.4.5 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ことを目的として現象を数理的に記述する手法である。ただし、現象を記述するのみならず、記述されたモデルを「解く」こと、すなわち具体的な数値解の取得を第一義としていることに大きな特徴がある。よい最適化モデリングとは、効率よく妥当な解が得られ、一般性、不変性、ロバスト性を備えたものであると定義できる¹⁾。

これまでモデリング自体が研究対象となることはまれであった。解決すべき具体的な問題の解決手順のひとつとして何らかの最適化モデルが提案される、もしくは、所与の最適化モデルに対するアルゴリズムが提案されるといった流れで「最適化モデリング」が論文などの中で副次的に言及されるにとどまっている。一方、近年のコンピュータの性能向上と、モデリング言語などソフトウェア技術の進歩、さらに最適化アルゴリズム分野の著しい発展の下、最適化モデル記述と最適化アルゴリズムの選択肢が広がり、適切な最適化モデルを選択できれば汎用アルゴリズムによっても最適解もしくは質の高い解を与えることが可能になっている。しかしながら最適化モデルと最適化アルゴリズムの選択肢の多様化は、最適化技術に関する専門知識をもたない実務家を惑わせる原因となっており、現状では最適化技術が広く問題解決に利用されているとはいえない。さらに、モデリングとアルゴリズムには未解決の技術的問題も存在することがこの状況に拍車をかけている。例えば最適化技術においては目的関数を一意に設定することが求められるが、一般に潜在的な評価尺度が複数あることは珍しくなく、目的関数の設定は一般に困難な課題である。また、数値化しにくい人間の満足度やバランス感覚の表現も数値演算を基本とする最適化技術の分野では難しい。そういったケースにおいて便宜上の適当な目的関数を設定したモデルを与える「最適解」は、仮に効率よく得られたとしても実務的には無意味となり得ることはいうまでもない。

最適化研究の次の目標として、最適化技術の普及、すなわち最適化技術を知らない実務家・一般人でも最適化技術の恩恵を享受できることを設定するならば、最適化モデリング技術はその目標の達成のために欠くことのできない技術であるといえよう。

（3-1）モデリング技法

国内外を含め、これまで行われてきた最適化モデリングの技法を以下に整理する。

①見立て

対象を既知の構造にあてはめて（「見立て」で）、すでに確立された線形計画法、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のは最適化モデリングの主要なテクニックである。モデルの「見立て」は一意とは限らない。例えばトラヒック制御問題で、ノードやアークを共有しない複数の経路を選択したい場合²⁾には、ネ

ットワーク上のフローを最小費用流としてではなく、より巨視的に経路としてとらえて候補経路を列挙し、二部グラフ上の割当問題としてとらえるモデリングが有利である。

②分割

最適化モデリングが解を求めることを目的とする以上、扱う対象の構造に着目して計算量を減らすモデリング技法は重要なものとして古くから知られる。実務で頻出する大規模問題の典型例としては、配送の現場において、手持ちの複数台の車両が巡るルートを決定するという問題（配送計画問題）がある。これは「車両」が一般に多数存在し、それぞれが（配送先）を「取り合う」ために車両相互の計画が関連しあうところに問題の複雑さの源があり、問題のサイズは「車両」の数に従って増大する。このようなケースには、ラグランジュ緩和、あるいは列生成法と呼ばれるアルゴリズムの利用を前提としたモデリングが有効である³⁾。

③階層化

社会における意思決定は、単一のモデルの解として表現されていることはほとんどなく、多くは階層化されている。最適化モデリング技法においても階層化は用いられる。航空産業におけるクルースケジューリングは、まずは複数の機体の集合（fleet）を運行便（fright leg）の集合に割り当てたのち、fleetに属する各機体のメンテナンスを考慮した機体のスケジュール、クルーの勤務地や移動を考慮したスケジュールを時系列ネットワークの巡回路を作成する問題として解き、意思決定を分離している。具体的な人員割当てでもさらに階層化することができ、スタッフを「パイロット」「客室乗務員」などに抽象化して各人に共通な属性や業務規則を考慮するフェーズと、スタッフの個性（休暇の希望や居住地）を考慮するフェーズが分離している^{4) 5)}。この他、制約の多い夜勤シフトを決定してから、日勤シフトや休みを決定する2交代ナーススケジューリング⁶⁾などもこのアプローチの実例である。「階層化」アプローチは「全体最適」という理想論に対比する意味での「部分最適」、あるいは「縦割りの」といった批判もあるものの、結合が緩い部分でモデルを分けることにより無意味に大規模化するのを防ぎ、分けられた問題に対して別の「見立て」を行ってそれぞれに適したアプローチを選択する余地を生む点で、大規模で複雑な対象にアプローチする上での重要な指針である。

(3-2) 目的関数の設定

次は目的関数の設定についても整理してみるが、②、③は技術的な困難として認識されている。

①自然なケース

配車計画では、所定の配送を行う制約の下、車両の固定費、変動費を目的関数として最小化する。ネットワーク流量を最大化する場合には、目的関数をネットワークの総流量として、最大化問題を解く。このように目的関数が「コスト」や「流量」であり、変数が物理的実体と結びついたものを表現している場合には、目的関数の設定において特段の配慮は不要である。

②考慮が必要なケース

人員配置問題において各部署に各人を割当てた場合の「満足/不満度」など、数値化しにくい指標を目的関数にした最適化モデルは、アルゴリズムが導いた「最適解」が人間の直観と合致するとは限らない。アルゴリズムの便宜上、制約の違反量の「重み」付き線形和を目的関数として最小化するという最適化モデリングを行ってアルゴリズムを適用することが多い

が、このモデリングでは制約違反を複数人で分かちあう解と一部の人に制約違反を集中させる解の優劣を目的関数の値によって区別させることができない。制約違反の合計値と結果（この場合にはスケジュール表）の善しあしがかならずしも万人にとって連動しないため、納得性の乏しい結果となりやすい。

③目的関数の限界

あるメンバーの休暇希望を無視した解と、別のメンバーの夜勤の回数を超過した解のいずれがよいのかといった選択が人間にとっても難しいのであれば、制約の違反量の「重み」付き線形和として定義された目的関数は、絶対的な指標ではなくアルゴリズムの探索範囲を絞って具体的な解を導くための便宜上の存在に過ぎないと考えらるべきである⁶⁾。もちろん、「重み」を動的に変更すれば、より意図に沿った解を得ることができる可能性は残るが、重みに対する解の振る舞いを予測したり制御したりすることはかなり難しい。

(3-3) 国内の動向

以下に、わが国の最適化モデリングにかかわる活動についてあげておく。

①日本 OR 学会

オペレーションズ・リサーチ誌⁷⁾におけるモデリング特集（池上敦子・土谷隆・企画）

2005 年 4 月号「モデリング —最適化モデリング—」伊理正夫，森戸晋，茨木俊秀，野末尚次，草刈君子，山下浩，田村明久，前田英次郎，久保幹雄，相澤りえ子

2005 年 8 月号「モデリング —広い視野を求めて—」赤池弘次，木村英紀，今野浩，小島政和，柳井浩，逆瀬川浩孝，鈴木久敏，石渡裕政，田口東，土谷隆，池上敦子

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—」川瀬武志，深谷賢治，樺島祥介，伊藤栄明，佐々木成朗・三浦浩治，蒲地政文・碓氷典久，笹川卓，井元清哉，宇野毅明，中森真利雄

②統計数理研究所

研究集会「最適化：モデリングとアルゴリズム」（研究代表者：田辺國士～土谷隆）

最適化には「認識論的枠組」としての側面と「計算アルゴリズム（最適化法）」の技術という側面があり、この側面に対応する「モデリング」と「アルゴリズム」の研究が近代科学技術の方法における基本的パラダイムに根ざしたものであるといった考え方で毎年研究集会が開催されている⁸⁾。

③東京大学

サービスイノベーション研究会サブワーキンググループ「最適化モデリング」（主査：室田一雄）

サービスの最適化を対象とし、「よくわからない」対象であるサービスを扱う際に最も問題となるのがモデリングと位置づけ、何を最適にすればいいのかについて検討を進めたとされる⁹⁾。

④京都大学数理解析研究所講究録¹⁰⁾

2006 年 12 月 数理解析研究所講究録 1526 「モデリングと最適化の理論」（研究代表者：森田浩）

2009 年 7 月 数理解析研究所講究録 1629 「21 世紀の数理解析：最適化モデルとアルゴリズム」（研究代表者：久野誉人）

また、汎用ソルバーを容易に利用するためのさまざまなモデリング言語（AIMMS、AMPL、

GAMS、Mosel、OPL、SIMPLE）も提案されている。

（４）科学技術的・政策的課題

妥当な解を与える限りにおいて、モデルは単純なほどよい。複雑なモデルは、解くのが難しいのはもちろんのこと、直観の働きを妨げて結果の妥当性の検証の手間が増大するので、結果のフィードバックによって質を高める機会を失う点でも好ましくない。(3-1) に紹介した最適化モデリングの技法は、解法の効率性を向上するのみならず、大規模で複雑な問題を変形して見通しをよくする手段であると解釈することもできる。よく用いられるモデルの変形の具体的な手段としては制約の「緩和」があげられる。すなわち一部の制約を絶対的なものではなく違反量をできるだけ減らす対象（「目標」）としてとらえる、あるいは一時考慮から外すことである。(3-1) で紹介した「モデルの分割」は、モデルを大規模ならしめている制約（Linking Constraint）を緩和して（「目標」としてとらえて）モデルを分離する手法であるし、「階層化」は適切な順番で制約を付け外してモデルを分離する手法である。このように適切に制約の緩和を行うと、モデルから「枝葉」を除き、構造を整理することができる。

離散変数を連続変数に置き換える手法も、変数の「緩和」として知られている。こうすることによりモデル（の一部）が離散系から連続系になり、計算コストを所要する場合分けではなく、より効率的な代数的手続きで解に関する有益な情報（例えば下界値や解の存在範囲）を得ることができる。現在、汎用の離散計画問題のアルゴリズムのスタンダードとして多くのソルバーに組み込まれている分枝限定法は変数の「緩和」により、探索を効率化する方法であるとしてとらえることができる。

一方で制約式あるいは変数の緩和には注意が必要なことも事実である。緩和する制約式の選択を誤ると、モデルを分離して縮小したつもりが逆に解きにくくなってしまい、実行可能解が得られないといった不具合が生じる。変数の緩和についても、緩和する変数の選択が適切でない場合には、緩和した問題の解から何ら示唆が得られなくなってしまう。特に大規模で複雑な問題においては、緩和すべき制約式の選択（分割や階層化アプローチの方法）と、緩和すべき変数の選択（代数的な手法の利用のタイミング）は相互に関連しているため、特に慎重な扱いが必要である。

しかしながら、これらの選択の方法論は最適化モデルを作成する人間のノウハウにゆだねられており、体系化はおろか、学問領域が取り扱う問題として明確に意識されていないのが現状である。より深い、数学的な議論の結果として、緩和してもよい変数・制約のガイドラインが得られ、その知見が利用可能となれば、それは最適化技術の普及において大きな前進であり、実務界に与える影響は計り知れない。

目的関数の選定においても、より深い考察が必要である。最適化は金銭的な「利益」を最大にする、「損失」を最小にする、という意図の下で出発したが、社会（モデル）が成熟してくるにつれ、例えば「職場の活性化」「モチベーションの維持」「環境保護」など、必ずしも数値化されない価値が求められることも増えている。そのような目的に最適化を応用しようとする場合、社会学・経済学的な多様な尺度を数学的に表現する、という難問に挑まなければならない。そういった場合に意識すべきことは唯一絶対の最適解は存在しないことであり、さまざまな利点をもった良解の集合を導くことが最適化技術に求められよう。そういった観点からは、例えば現状のスタンダードな最適化アルゴリズムである分枝限定法のように「最

良」の解以外を「捨てる」ことによって速度を実現している方法では不十分なケースも生じ得るだろうことは明らかである。実行可能領域やそれをさらに絞り込んだ最適解の分布に関する情報を得るといった学術的な研究がより盛んになることを期待したい。

最後に最適化モデルの導いた結果をいかに社会に還元するのか、という問題意識についても指摘しておきたい。最適化モデルが人間の所作の結果であり、例えば目的関数の選定など技術的な限界を含むものであれば、最適化モデルの結果によって現場を「支配」といったことは起こり得ず、最適化モデルが与える解は「支援」としてあくまで人間系との相互作用において価値をもつことになることは明らかである。したがって、最適化モデルが与える解が不完全であることを認めつつも、そこから（これ以上大幅によい解はないという意味での）「安心」や（あるルールで調べ尽くした結果であるという意味での）「納得」といった価値を引き出す方法が重要になる。引用資料 11) では良解を多数出力する、というメタヒューリスティクスアルゴリズムの性質を使い、「最適解」の分布の性質から信頼性の高い知見を得ようと試みているが、このようなケーススタディの中から最適化モデリングと最適化アルゴリズムによって何ができるのかあらためて問い直す必要がある。

（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）

近年、数値化が難しい価値を追求するマネジメント問題は増加する傾向にある。蓄積されたデータと最適化手法の力を借りてビジネス上の意思決定をより合理化しようというビジネスアナリティクス、サービスをより科学的に扱おうというサービスサイエンスはそのような流れの一部を表現する用語であると解釈することができる。広告や流通といった分野にも最適化技術の浸透が図られており、JST でも戦略的創造研究推進事業として「問題解決型サービス科学研究開発プログラム」で提案募集を行っている。また、最適化以外の分野においては、human-centered design といった考え方も定着してきた。最適化においても human-centered optimization といった流れが始まっていると考えてもよい。

具体的には、ヘルスケア、サービス、勤務スケジュールなどが対象となりやすいが、ヘルスケアにおいては、ユーロのワーキンググループ ORAHS (The European Working group on Operational Research Applied to Health Services) が、毎年 1 回国際会議を開き、活動研究者の数を大幅に増やしている。また、昨年 2011 年には、カナダで IMFOMS HelthCare2011 が開催された。最適化にかかわる各ジャーナルもヘルスサービスに関する特集を組んでいる。一方、勤務スケジュール作成についてはユーロのワーキンググループ WATT (the EURO Working Group on Automated Timetabling) や、隔年で開催される国際会議 PATAT (The International Series of Conferences on the Practice and Theory of Automated Timetabling) などの活動がある。

この流れの中で、潜在的な評価尺度つまり人間の暗黙知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、現在の情報検索のように提供できる技術が生まれることが大いに期待される。

（６）キーワード

潜在的評価尺度、納得、解空間、可視化、修正、連続緩和、ラグランジュ緩和、列生成法、

最適化アルゴリズム、メタヒューリスティクス、スケジューリング、ネットワーク、小規模ビジネス OR、サービスサイエンス

（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	△	↑	● 小規模な最適化問題（小規模ビジネスOR）を対象に、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た。 ● 最適化モデリング自体の研究への意識がまだ薄い。 ● 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	△	不明	● 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	△	不明	● 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	△	不明	● 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	△	↑	● ユーロのヘルスケア・ワーキンググループ（ORAHS）に見られるように、最適化グループに医師が含まれているなど、最適化の評価尺度についても議論がされている。 ● ただし、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く、明らかではない尺度を無視したままの研究も多い。 ● 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	△	↑	● オランダでは、ワークシェアリングから雇用形態のバリエーションが多く、これらに対応するための人間を中心とした最適化システムも開発されている。
	産業化	△	↑	● スウェーデンにおいては、高齢者へのサービス提供に関するシステムもすでに利用されている。
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) 伊理正夫, モデリング, bit 臨時増刊, 15:8(1983), pp.898-903.
- 2) S.G.Kolliopoulos, C.Stein, Approximating Disjoint-Path Problems using Packing Integer Programs, Mathematical Programming (Ser.A), 99:1 (2004), pp.63-87.
- 3) G.Desaulniers, J.Desrosiers., M. M.Solomon, (EDT): Column Generation, Springer, Boston (2005).
- 4) R.E.Marsten, M.R.Muller, C.L.Killion, Crew Planning at Flying Tiger : A Successful Application of Integer Programming, Management Science, 25:12(1975), pp.1175-1183.
- 5) N.Papadakos, Integrated Airline Scheduling, Computers & OR, 36:1 (2009), pp.176-195.
- 6) A.Ikegami, A.Niwa, A Subproblem-centric Model and Approach to the Nurse Scheduling Problem, Mathematical Programming (Ser.B), 97:3(2003), pp.517-541.
- 7) 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関紙
<http://www.orsj.or.jp/e-library/elcorsj.html>
- 8) 統計数理研究所「最適化：モデリングとアルゴリズムホームページ」
<http://www.ism.ac.jp/~tsuchiya/sympo/>.
- 9) 東京大学産学連携本部「サービスの最適化とモデリング（大学における福利厚生を例として）」
<http://www.ducr.u-tokyo.ac.jp/jp/research/ucr-wg/swg-3.html>.
- 10) 京都大学数理解析研究所講究録
<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/24851>
- 11) 田辺隆人、岩永二郎、多田明巧、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）， pp.169-173.

3.4.6 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、もうひとつは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。航空産業の分野¹⁾などでは古くから最適化を実務に役立たせることが指向されてきたため、その中から大規模な問題を分割、あるいは階層化してアルゴリズムとソルバーが適用しやすい形に変形する技術が生まれ、その成果が広まっている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視座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。第２次世界大戦下における人的資源と物資の利用技術としてDantzigによる単体法というアルゴリズムの開発が、最適化分野の始まりとなった。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完全とはいえないながらも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であり続けている。

しかしながら、理論的な解析の充実に比べれば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かかっており、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といえ、IT ビジネス界の昨今のトレンドである「ビジネスインテリジェンス」あるいは「ビジネスアナリティクス」と称される流れはこのような状況を背景として生まれている。ただ、最適化を効果的に成立させるには、データが潤沢にあるのみでは足りない。単なる「集計」を超えた予測や意思決定には最適化が必要であり、最適化のためには前述の 2 つの要素とデータとの有機的な組み合わせが必須である。機械学習アルゴリズムの文脈での報告には、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できる、とあり、モデル・アルゴリズム・データの有機的な組み合わせが大きな可能性をはらんでいることを示している。

（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）

FORTRAN や C、C++である。計算機に計算を行わせる手段として、最適化の黎明期には唯一取り得るものであった。90 年代までは、数学的アルゴリズムを表現するには十分な機能を有し、数値計算ライブラリが充実しているために、FORTRAN が最適化の分野で最もポピュラーな汎用言語であった。現在も多くの最適化アルゴリズムが FORTRAN あるいは C、C++で記述されている。しかし、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は相応のテクニックが必要であり、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。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に用いられているが、これらは高機能なアプリケーションをドライブするために使われることが多い。

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データのサイズに比例して入力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、汎用の簡易的な言語のインターフェースをもっている。これらパッケージが備えている言語は特に大規模なデータに関する処理を簡便に記述する上で重要であり、最適化との親和性が高い。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、あるいは内部に組み込んでおり、モデルのパラメータ推定などに積極的に利用している。

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、といった機能もつ。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いが可能となった。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、といった技術が最適化計算の可能性の拡大に大きなインパクトを与えてきた。現在では 10 万円台で購入できるパソコンにおいて、1 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、NUOPT、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て続けており、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、性能は微妙に異なり、インターフェース、品質はさまざまである。そのために、商用でサポートされている以外のソルバーをあえて実務的な問題解決のために使う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、モデルおよび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単純な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）が非常に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「ユーザ」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」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合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）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可能性もある。

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が、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リソース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大きなコストをかけて新しいデータを整備する結果を招くのでは最適化の応用はうまくいかない。既存のデータをうまく利用できるよう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、それぞれに携わる人の立場の違いによって、相互の接点において多くの問題が生じ得る。上述した問題点はすべてモデル、データ、アルゴリズム相互の「刷り合わせ」にかかわるトピックであると要約できよう。

解消の方向性としては、潜在的な利用者層の拡大を図るための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、そのうちの一部は非常に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ですが、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、関心を引き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人員の拡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可視化機能の充実

最適化は数値を入力して数値を出力するため、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。技術的にも最適化アルゴリズムの動作やその過程を直観的に示すのは難しい技術的課題であるし、得られた解が最適であることを数学的な方法によらず簡便に示す方法は開発されていない。そのため最適化のユーザには「数字を読む」能力が必須となり、ユーザ層が広がらない。ここに述べたような最適化の「可視化」の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、最適化の適用は飛躍的に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「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、ユーザニーズ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、未解決な課題を学問的に整備することで、最適化ソフトウェア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

最適化はよさがコストなど少数の尺度によって定量化できる分野に対して応用されてきたが、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）はユーザが最適化したい関数を数式で記述する必要はなく、関数値を与えるプログラムをリンク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) R.E.Marsten, M.R.Muller, C.L.Killion, Crew Planning at Flying Tiger: A Successful Application of Integer Programming, Management Science, 25:12(1975), pp.1175-1183.
- 2) N.Papadakos, Integrated Airline Scheduling, Computers & OR, 36:1 (2009), pp.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), pp.169-173.
- 4) 茨木俊秀, 「問題解決エンジン」への道, 応用数理, Vol.14, No.1, pp.67-70, 2004.
- 5) Makoto Yamashita, Katsuki Fujisawa, Mituhiro Fukuda, Kazuhiro Kobayashi, Kazuhide Nakata, Maho Nakata, 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 Miguel F. Anjos and Jean B. Lasserre, Springer, NY, USA, Chapter 24, pp. 687-714 (2011)
- 6) Tobias Achterberg, SCIP: Solving Constraint Integer Programs, Mathematical Programming Computation Nr. 1(1), pp. 1-41, 2009

3.5 ネットワーク論

3.5.1 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、2013 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、感染症伝搬、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、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よりも、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ことは特徴的である。イタリアとスペイン、ハンガリーとフィンランドは、それぞれ共同研究などを通じた連絡が密接である。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、2012年時点では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2013年時点での注目動向である。
- 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、Twitterのデータ解析、人間の移動行動や携帯電話による通話行動などが織りなすネットワークにおける感染現象、人間の病気のネットワークの解析などがBarabásiチームの、2013年現在での主要プロジェクトとされている。

（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	○	↑	● 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、物理学会、情報処理学会、電子通信情報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。

米国	応用研究・開発	△	↗	● 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	△	→	● 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年程度の間に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。
	基礎研究	◎	→	● 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⁾。 ● 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	◎	→	● 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	◎	↗	● 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。 ● Taleoが、ネットワークの構造解析を用いて、人材探索機能の商品化を行っている¹¹⁾。
	基礎研究	◎	→	● 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。 ● 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	○	↗	● 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。
	産業化	△	→	● 世界的に知られるような産業化の動きはなし。
	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。
中国	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	○	→	● 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¹⁴⁾。
	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. and Barabási, A. L., Statistical mechanics of complex networks. Rev. Mod. Phys., 74, 47-97 (2002) ; Newman, M. E. J., The structure and function of complex networks. SIAM Rev., 45, 167-256 (2003) ; Boccaletti, S. et al., Complex networks: structure and dynamics. Phys. Rep., 424, 175-308 (2006).
- 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. and Strogatz, S. H., Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 393, 440-442 (1998) ; Barabási, A. L. and Albert, R., Emergence of scaling in random networks. Science, 286, 509-512 (1999).
- 5) Netsci, <http://netsci2012.net/>
- 6) Center for Complex Network Research, Northeastern University <http://barabasilab.com/>
- 7) Center for Complex Networks and Systems Research, Indiana University
<http://cnets.indiana.edu/people/alessandro-vespignani>
- 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) Taleo 社 Talent Exchange の HP
<http://www.taleo.com/solutions/talent-grid-talent-exchange>
- 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, 104, 7332-7336 (2007).
- 14) Ahn, Y. Y., Han, S., Kwak, H., Moon, S. and Jeong, H., Analysis of topological

characteristics of huge online social networking services. In: Proceedings of International World Wide Web Conference (2007).

3.5.2 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、より科学的な動機をもつものに対して、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、より具体的に「与えられたネットワークにおける知識発見や予測を行う」という応用的な志向が強い（ただし、近年では両者の興味は次第に近づきつつある）。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。

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博士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大きく広がっている。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は、ネットワーク上でのノードの分類や順序づけ、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があげられ、それぞれが重要な応用をもっており、さまざまなモデルやアルゴリズムが提案されている。

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ため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ここ数年で注目すべき出来事は、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において、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。そ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。

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、中国の研究も増加している。

（４）科学技術的・政策的課題

近年、「ビッグデータ」と呼ばれる、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、社会的な実問題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、量、スピード、多様性の3つがあげられる。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、3番目の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など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 Mellon 大学の Christos Faloutsos 教授によ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。

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 ⁵⁾ 。
	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	○	↑	● Mixiなどの国内ソーシャルメディアにおける友人の推薦、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教授とその一派は大規模なグラフ解析を積極的に進めている。Stanford大のDaphne Koller教授、Maryland大のLise Getoor教授のグループなどが、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教授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	△	↗	● 特に目立った動きはないが、Microsoft Research Asiaや有力大学からは一定数の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. In Proc. SIGMOD Conference, pp. 207-216 (1993).
- 2) Getoor, L. and Diehl, C. P.: Link Mining: A Survey, SIGKDD Explorations, Vol. 7, No. 2, pp. 3-12 (2005)
- 3) Netflix Prize, <http://www.netflixprize.com/>
- 4) Pagasas project, <http://www.cs.cmu.edu/~pegasus/>
- 5) Inokuchi, A. and Washio, T. and Motoda, H.: An apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data, In Proc. Principles of Data Mining and Knowledge Discovery (PKDD), pp. 13-23, 2000

3.5.3 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、5点の完全グラフと完全2部グラフ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ている性質に関して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のが、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、NP 困難な問題に対して、ある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 による証明成果であろう。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、電気、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いる。ネットワークセンシングに関連しては、点对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 Whitely 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た。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り、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ォンの概念を導入し、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、グラフォン

(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	△	→	● 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	○	→	● 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）¹⁾。
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²⁾。
	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）³⁾。
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⁴⁾。
	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⁵⁾。
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⁶⁾。
	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.j-tokkyo.com/1999/G11C/JP11238396.shtml>
- 2) FIRST, <http://flexweb.asu.edu/software/first/>
- 3) Communications Network Ring Router, US patent number 5533016
- 4) MATHEON, <http://www.matheon.de/>
- 5) LEDA, <http://www.algorithmic-solutions.com/>

3.5.4 ネットワーク解析用ソフトウェア

（１）研究開発領域名

ネットワーク解析用ソフトウェア

（２）研究開発領域の簡潔な説明

共起や相関、依存関係などの社会／生物／人工物システムに見られる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、分析に適したデータ構造でデータを保持し、ネットワークを特徴づける諸統計量を計算し、ネットワークを低次元空間（主に２次元）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、あるいは両方をもつものである。ひとつは①ネットワークという構造がもつ性質を統計的に、あるいは統計以外の意味で数値的に定義された指標として評価するための計算機能。もうひとつは②論理的には高次元の空間でのみ矛盾なくレイアウト可能なネットワークを、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。また、そのような処理のためのデータ入出力機能とデータ構造化機能も本稿の対象である。主たる対象とする学術領域、実装される分析アルゴリズムの種類、スケーラビリティなどの意味での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、依然その選択肢は豊富である。

①の構造分析機能については、技術的に高度かつ多くのネットワーク関連分野で頻用される機能として、ネットワークを表す行列の固有値を解析する機能、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、相互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の３つをあげることができる。その他に次数（ノードにつながるリンク数）やモチーフ（あらかじめ定義された、ネットワークの小単位構造）の分布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。固有値解析機能について、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、その行列のもつ数学的、もしくは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もつ。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、ネットワーク構造としてのウェブ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。このような行列表現に関する数値計算手法は工学的にも長い歴史をもっており、商用／非商用を問わずさまざま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に、数多くの計算アルゴリズムとその実装例が存在する。それは、これらの指標の応用分野で先行するものが、制御や最適化といった工学の多岐にわたるからである。したがって、これらの計算機能は、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でもある。すなわち、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。近年では、単に前述し

た分析機能を提供するだけではなく、複数の機能を駆使してネットワークを多面的に解析・吟味することを可能にするソフトウェアが増えてきている。そのような意図で開発されたソフトウェアは、以下で述べる視覚化機能も同時に提供している場合が多い。

②の視覚化機能については、古く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った。そして、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、社会科学的应用の要請から、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リンク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った²⁾。ネットワーク自動描画の国際会議 Graph Drawing³⁾ は 1992 年、ネットワークの最適描画を含む情報可視化の国際会議 InfoVis⁴⁾ は 1995 年が第 1 回の開催年である。時期を同じくして Pajek⁵⁾ や Graphviz⁶⁾ といったネットワーク可視化ソフトウェアが、それらのレイアウトアルゴリズムを実装してユーザを集めた。これらのソフトウェアは、現在でもよく用いられる。初期のソフトウェアの多くは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生成するものであった。一方、クラスタリングや経路探索を例にとっても①で述べた分析機能については多様なアルゴリズムと実装が存在し、すべての分析機能を網羅した万能なツールは存在しない。したがって、分析用のソフトウェアを用いてネットワークの構築や属性づけを行い、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用のソフトウェアで画像を生成するといった作業は一般的である。そのためツール間の入出力データの形式互換性も重要となる。多くのツールがサポートするデータ形式として、例えば Graph Modeling Language (GML)⁷⁾ が有名である。近年では、ファイル入出力を基本とする従来の手順を必ずしも踏まずに、レイアウトやカラーをインタラクティブに変更する機能や、さらには中心性指標やクラスタリングを行い、その結果をひとつのソフトウェアの中で直接視覚表現に反映する機能を備えたソフトウェアも増えてきている。扱うネットワークが大規模になればレイアウトアルゴリズムの計算負荷は一般に高くなるため、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。

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したのは、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もった研究者個人、ネットワーク科学を牽引する研究者グループ、あるいはそのスピンオフ企業のような専門性をもった企業である。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。表 3-2 に現在利用可能と考えられるソフトウェアのリスト（プロジェクト名、開発主体、開発開始年）を年代順に古いものから示す。表にあげた例は、主観的に一定規模の開発活動あるいは利用ユーザが存在すると認めたものだが、過去には 100 を優に超えるプロジェクトが存在したと考えられ、全体を網羅するのは困難である。表中で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）の面で特に重要と思われるソフトウェアに網掛けを施した。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。欧州ではドイツが頭ひとつ抜けていると考えられ、フランスやハンガリー、イタリアなどでも特徴的な活動は認められる。日本では大学の研究室などの小規模なレベルで開発、公開された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たことはなく開発も継続的ではない。同様に中国、韓国でも目立った活動は見られない。

補足 1：先に述べたページランクが成功した要因のひとつとして忘れてはならないのは、膨大なリンク構造の蓄積や巨大な行列計算を支える分散処理ソフトウェア⁸⁾の存在であり、ハードウェアとソフトウェアが一体となったシステムレベルでのブレイクスルーである。このようなデータベースとの連携も今後大規模なネットワークを扱う場合に要求される機能である。2004年にGoogle社が提案したMapReduceフレームワークが有名である。

補足 2：ここまでの議論は主に広く自然科学や社会科学、経営コンサルティングに応用可能な汎用のネットワークソフトウェアについてである。一方で、遺伝子ネットワーク解析ソフトウェアのような特殊性の高いネットワーク分析ツールも存在し、その開発は医療や創薬という明確な市場を背景に高度に産業化しているものと考えられる。

表 3-2 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／開発開始年)

Tom Sawyer Perspectives (商用)	米：Tom Sawyer Software社	1992
KrackPlot (フリー)	米：カーネギーメロン大学	1994
Pajek (フリー) ⁵⁾	スロベニア：Vladimir Batagelj	1996
Otter (フリー)	米：CAIDA研究所	1998
Graph Template Library: GTL (フリー)	独：パッサウ大学	1999
SNA Tools (+R) (フリー)	米：カリフォルニア大学アーバイン校	2000
Graphviz (フリー) ⁶⁾	米：AT&T研究所	2000
NetVis (フリー)	米：デューク大学	2001
Sentinel Visualizer (商用)	オーストリア：FMS社	2001
SNAP (商用)	米：Aptech Systems社	2001
yFiles (商用)	独：yWorks社	2001
StOCKNET (フリー)	蘭：グローニンゲン大学	2001
siena (フリー)	英：オクスフォード大学	2001
nevada (フリー)	独：トリアー大学	2001
LEDA (商用) ⁹⁾	独：Algorithmic Solutions Software GmbH社	2001
visone (フリー)	独：コンスタンツ大学	2002
UCINET for Windows (商用) ¹⁰⁾	米：Analytic Technologies社	2002
aiSee (フリー)	独：AbsInt社	2002
Cytoscape (フリー) ¹¹⁾	米：Institute for Systems Biology研究所	2002
NetDraw (フリー)	米：Analytic Technologies社	2002
SoNIA (フリー)	米：スタンフォード大学	2002
ORA (フリー)	米：カーネギーメロン大学	2003
statnet (フリー)	米：ワシントン大学	2003
Tulip (フリー) ¹²⁾	仏：ボルドー大学	2003
LGL: Large Graph Layout (フリー) ¹³⁾	米：テキサス大学オースティン校	2003
Zoomgraph (フリー)	米：HP研究所	2003
NetMiner (商用)	韓：CYRAM社	2004
SocNetV (フリー)	ギリシャ：Dimitris V. Kalamaras	2004

igraph (+R) (フリー) ¹⁴⁾	ハンガリー：科学アカデミー	2005
JUNG (フリー) ¹⁵⁾	米：カリフォルニア大学アーバイン校	2005
CFinder (フリー)	ハンガリー：エトヴェシュ・ローランド大学	2005
GUESS (フリー)	米：HP研究所	2006
Network Workbench (フリー) ¹⁶⁾	米：インディアナ大学	2006
Starlight (商用)	米：Future Point Systems社	2006
Commetrixプロジェクト (フリー)	独：ベルリン工科大学	2006
OGDF (フリー)	独：ドルトムント工科大学	2007
Visual Network Analysis (商用)	米：Centrifuge Systems社	2007
GraphStream (フリー)	仏：ル・アーヴル大学	2007
NetworkX (フリー) ¹⁷⁾	米：LANL研究所	2008
NodeXL (商用)	米：Microsoft Research	2008
Gephi (フリー) ¹⁸⁾	仏：Gephi コンソーシアム	2008
Socilyzer (商用)	デンマーク：Socilyzer ApS社	2008
InFlow (商用)	米：Valdis Krebs	2009
graph-tool (フリー)	独：ダルムシュタット工科大学	2009
Cuttlefish (フリー)	スイス：チューリヒ工科大学	2009
CoSBiLab Graph (フリー)	伊：トレント大学	2010
EgoNet (フリー)	米：フロリダ大学	2011

（４）科学技術的・政策的課題

- 技術的には、大規模データに対する適用可能性が、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、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といった新しい研究成果を積極的にソフトウェアに取り込む開発体制が重要である。
- 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も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）¹⁹⁾ 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もつスキルをもった研究者である。学部から大学院につながる一貫性をも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）

- 最近では新しい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²⁰⁾。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、このような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。今後、ブラウザベースのソフトウェアについて、可視化ソフトウェアが構造分析機能を取り込んでいった流れと同様の動きが生じてくると予測される。例えば、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。
- Gephi（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ツール）、Cytoscape（システム生物学のための専門的ツール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ツールとして多くのユーザを集める）、NetworkX（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）などは、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ながら積極的に開発が進められており、近年注目度の高いソフトウェアの例である。その他に、igraph（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ツール “R” のパッケージとして提供される）は R ユーザという潜在的に多数のユーザを抱えており、また、Network Workbench（インディアナ大学のプロジェクトチームが開発。メンバーにネットワーク科学の第一人者である Albert-László Barabási を含む）は完成度が高いソフトウェアのひとつだが、それぞれ 2010 年と 2009 年に更新は停止している。

（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

（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ける基礎研究とプロトタイピングの差は他分野に比べて非常に小さいと考えられるため、「応用研究・開発」でまとめて述べる。
	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プロジェクトは存在する。しかし、自前のソフトウェア開発、あるいはそれに結びつく組織的・継続的な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がある。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ツールとしてよく利用されている（表1も参照）。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。Microsoft Research社は表計算ソフトExcelのテンプレート機能としてネットワーク可視化ツールNodeXLを提供している。ネットワーク分析の老舗企業Tom Sawyer Software社は国際会議Graph Drawingの一貫したスポンサー企業である。
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（表3-2も参照）。
	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	×	-	● 同下。
	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	△	→	● 同下。
	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, Patent No. US 6,285,999 B1 (1998).
- 2) 例えば Fruchterman, T. M. J., et al., Graph Drawing by Force-Directed Placement, Software—Practice and Experience 21, 11, 1129-1164 (1991); Kamada, T., et al., An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs, Information Processing Letters, 31, 7-15 (1989).
- 3) Graph Drawing, <http://graphdrawing.org/symposia.html>
- 4) IEEE Information Visualization (InfoVis), <http://conferences.computer.org/infovis/>
- 5) Pajek, <http://pajek.imfm.si/doku.php>
- 6) Graphviz, <http://www.graphviz.org/>
- 7) <http://www.fim.uni-passau.de/en/fim/faculty/chairs/theoretische-informatik/projects.html>

- 8) 例えば Ghemawat, G., Gobioff, H., Leung, S.-T., The Google File System (2004) ; Dean, J. and Ghemawat, S., MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters (2004).
- 9) LEDA, <http://www.algorithmic-solutions.com/leda/>
- 10) UCINET for Windows, <http://www.analytictech.com/ucinet/>
- 11) Cytoscape, <http://www.cytoscape.org/>
- 12) Tulip, <http://tulip.labri.fr/TulipDrupal/>
- 13) LGL: Large Graph Layout, <http://lgl.sourceforge.net/>
- 14) igraph (+R) , <http://igraph.sourceforge.net/>
- 15) JUNG, <http://jung.sourceforge.net/>
- 16) Network Workbench, <http://nwb.cns.iu.edu/>
- 17) NetworkX, <http://networkx.lanl.gov/>
- 18) Gephi, <https://gephi.org/>
- 19) （独）情報処理推進機構 未踏 I T 人材発掘・育成事業,
<http://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/>
- 20) 例えば d3.js, <http://d3js.org/> ; sigma.js, <http://sigmajs.org/>

専門用語説明

■システム構築方法論

- 感度解析

材料特性、幾何学特性、境界条件などのパラメータの変更によって、モデルの構造的応答がどのような影響を受けるかを推定する計算技術。

- システムダイナミックス（SD）

図式でモデルの要素間因果関係を記して、ソフトウェアにより数値シミュレーションモデルを自動生成する。要素間の関係を把握しやすく、個々の理解している問題現象や因果関係をダイレクトにモデルにできる。

- ソフトシステム方法論（SSM）

かかわる人々の立場によって、見方や考え方が違うような状況の時に、何が問題か、あるいは何を目標とすべきかを明らかにするため、立場によって異なる、考え、思いなどの世界観を調整し、合意形成や折り合いを付ける方法論。

■意志決定とリスクマネジメント

- CVA（Credit Valuation Adjustments）

取引相手のデフォルトリスク（カウンターパーティーリスク）を時価価値する手法、金利スワップなどの店頭デリバティブ契約やレボ取引などの証券金融取引に際し、取引相手が将来デフォルトした際に受ける期待損失の現価値。

- OR（Operations Research、オペレーションズ・リサーチ）

数学的・統計的モデル、アルゴリズムの利用などによって、さまざまな計画に際して最も効率的になるよう決定する科学的技法。

- ゲーム理論

相互作用を及ぼしあう複数、又は単独の主体の振る舞いに関して、戦略的な状況における未来の行動を予測したり、過去の行動を客観的に評価することを目的とする。

- 期待効用

市場において不確実性が存在し、複数の状態があり、それぞれの状態が起きる確率が与えられている場合の効用の期待値。

- アノマリー

ある法則・理論からみて異常、または説明できない事象や科学的常識、原則からは説明できない逸脱、偏差を起こした現象。

- 確率ポラティリティモデル

確率的な価格変動率のモデル。

- ダウンサイドリスクモデル

積立不足になる確率とその大きさ（ダウンサイドリスク）が最も小さくなるようなポートフォリオ（資産配分）を導き出すモデル。

- システィミックリスク

ひとつの金融機関や証券会社の決済不履行が他の金融機関や証券会社の流動性リスクを顕

在化させて決済不履行を引き起こし、その決済不履行がさらに他の金融機関や証券会社の決済不履行の原因となるといったように、決済不履行がドミノ倒しのように連鎖してしまうリスク。

● プロスペクト理論

不確実性下における意思決定モデルのひとつ。選択の結果得られる利益もしくは被る損益および、それら確率が既知の状況下において、人がどのような選択をするか記述する。

● バーゼル

バーゼル銀行監督委員会による新しい規制枠組み。

● コピュラ

変数間の相互依存関係を表す関数。

● バリューアットリスク（VaR）

現有資産の損失可能性を時価推移より測定する分析指標。

● 期待ショートフォール（ES）

Expected shortfall: 数理ファイナンスにおいて、確率変数 X に関してある閾値 μ を超える部分の期待値。損失が VaR (Value at Risk) を超える場合の平均損失となる。CVaR (Conditional Value at Risk) と呼ばれることもある。

■モデリング

● ロバスト・パラメータ設計

田口玄一博士が体系化した、品質を向上させるための技術方法論で、使用環境条件などの誤差因子に対してロバスト（頑健）になるように制御因子を設計することにより、特性や機能性のばらつきを低減する方法。田口メソッドとも呼ばれる。

● ミーム

文化を形成する、習慣や技能、物語といった様々な情報であり、人々の間で、会話や文字、振る舞い、儀式等によって人心から心へとコピーされる情報のこと。

● マルチエージェントモデル

複数の異なった判定アルゴリズムなどの特徴を持ったエージェントから構成されるシステムであり、個々のエージェントやモノリシックなシステムでは困難な課題をシステム全体として達成する。

● 状態空間モデル

システムや力学系の状態を完全に記述可能な変数系をとり、その変数系が満たす（微分方程式などの）力学的方程式によってシステムを記述したモデル。

● 動学的一般均衡モデル

Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) model: リアルビジネスサイクル理論などミクロ経済学的基礎付けを持つマクロ経済学のモデルを、新ケインズ学派の立場から発展させたもの。さまざまな仮定を設定してモデルを構築し、経時的变化を考慮する動学的分析を行う。ケインズ学派と古典学派の考え方を統合するもので、金融・財政政策の提言などに用いられる。

● データ同化

観測データとシミュレーションを統合し、より精度の高いシステムの再現、適切な諸変数

の推定や初期値の構成を行なうこと。

- データマイニング

統計学、パターン認識、人工知能等のデータ解析の技法を大量のデータに網羅的に適用することで知識を取り出す技術。

- サポートベクターマシン

教師あり学習を用いる識別手法のひとつ。訓練サンプルから、各データ点との距離が最大となるマージン最大化超平面を求めるという基準（超平面分離定理）で線形入力素子のパラメータを学習する。

- カーネル法

パターン認識において使われる手法のひとつで、判別などのアルゴリズムに組み合わせて利用するもの。サポートベクターマシンと組み合わせて利用する方法が良く使われている。

- アンサンブル学習

個々に学習した識別器を複数個用意し、それらを、単純には出力の平均を用いるなどをして、まとめ合わせてひとつの識別器を構築する学習法。

- ベイジアンネットワーク

因果関係を確率により記述するグラフィカルモデルのひとつで、複雑な因果関係の推論を有向グラフ構造により表すとともに、個々の変数の関係を条件つき確率で表す確率推論のモデル。

- IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル、国際的な専門家で作る、地球温暖化についての科学的な研究の収集、整理のための政府間機構。

- LASSO

Least Absolute Shrinkage and Selection Operator：統計や機械学習において、過学習を抑止する正則化の一種で、パラメータベクトルの絶対値の和を正則化項とする。

- AIC

Akaike's Information Criterion：赤池情報量規準、統計モデルの良さを評価するための指標で、モデルの複雑さと、データとの適合度とのバランスを取るために使用される。

■ 制 御

- ニューロ制御

人間の脳を模した神経回路網（neural network）を制御装置に導入したもので、最適化機能・学習機能のうち多層神経回路網を用いた学習機能を主に用いる。

- ファジー制御

点がある集合に属するか属さないかのいずれかとなる通常の集合と異なり、中間の状態を許容したファジィ集合（fuzzy set）を利用して制御モデルや制御系を構成した制御。

- 知的制御

ニューラルネットワーク、ファジィ論理、学習、遺伝的アルゴリズムなど、ソフトウェアアルゴリズムを使用した情報工学を発祥とした制御手法。

- LMI

Linear Matrix Inequalities：線形行列不等式。変数に関して線形な対称行列が（半）正定

値となるような解を見つけるもの。

- VRFT

Virtual Reference Feedback Tuning：データ駆動型制御器設計法のひとつ。

- FRIT

Fictitious Reference Iterative Tuning：擬似参照信号を使い、運転データからプロセスモデルを用いないで直接、制御パラメータを調整する方法。

- ロバスト制御

制御対象の実際の特性が、制御系設計の際想定したモデルと多少異なっても制御性を余り損なわない制御。

- H_∞ 制御

制御入力、外乱入力、制御出力、評価出力の 4 つの入出力を持つ汎用的な制御モデルを対象に、制御出力から制御入力に適切なフィードバックを施すことで外乱入力から評価出力までの伝達関数の H_∞ ノルムを小さくするという制御系設計手順を取る外乱信号の影響を抑制する制御系を構築するための制御理論。

- 被覆制御

効率的なセンサネットワークの構築や可動ロボットによる危険場所の探索、施設の監視など重要度の異なる領域を効率よく覆うように、複数の移動体を配置するための制御。

- ランダムイズドアルゴリズム

乱択アルゴリズム、論理の一部に無作為性を導入したアルゴリズムである。通常、このようなアルゴリズムは擬似乱数を使うよう実装される。ランダムなビット列を補助入力とし、アルゴリズムの動作を誘導することで「平均的に」よい性能を実現することを目的としている。

- CPS

Cyber Physical System：実世界（フィジカル）と IT（サイバー）空間のコンピューティング能力を組み合わせることで、社会にとって有益となるシステムを構築しようとする試み。

- 焼きなまし法

Simulated annealing：大域的最適化問題への汎用の確率的メタアルゴリズムである。広大な探索空間内の与えられた関数の大域的最適解に対して、よい近似を与える。

- MSPC

Multivariate Statistical Process Control：多変量統計的プロセス管理。変数間の相関関係を考慮して高度な管理を実現するための方法。

- VM

Virtual Metrology：仮想計測。半導体製造装置/プロセスパラメータおよび製品に関するコンテキスト情報、それ以前の工程の情報などを活用して、実際に計測を行わずウエハの加工特性を予測するもの

■最適化

- 最適化

関数・プログラム・製造物などを最適な状態に近づけること。システムの構成要素間の調和をとって、システムの状態や動作を最適に近づけること。

● 准ニュートン法

最適化問題のアルゴリズムのひとつ。可変計量法とも呼ばれる。ニュートン法と同様な手法で最小値を探す。ただし、2 階偏微分であるヘッセ行列を直接計算するのではなく、1 階偏微分を使い更新公式からヘッセ行列の逆行列を近似する。

● マトロイド理論

マトロイド (matroid) という言葉は、マトリックス (matrix) のようなもの、という意味で、線形独立性のもつ性質を抽出した抽象的な離散構造のこと、大規模システムの設計や解析において有効な理論。

● 乱択アルゴリズム

ランダムイズドアルゴリズム。論理の一部に無作為性を導入したアルゴリズムである。通常、このようなアルゴリズムは擬似乱数を使うよう実装される。ランダムなビット列を補助入力とし、アルゴリズムの動作を誘導することで「平均的に」よい性能を実現することを目的としている。

● 線形計画

いくつかの 1 次不等式および 1 次等式を満たす変数の値の中で、ある 1 次式を最大化または最小化する値を求めることで線型計画問題を解く手法。

● 凸 2 次計画問題

資産運用のポートフォリオ選択など一般の非線形最適化問題では、大域最適解を求めるのが難しいが、目的関数が凸関数となる二次計画問題では、極小値が最小値になることで、大域最適解を求める手法。

● 半正定値計画問題

Semidefinite Program、SDP：凸 2 次計画問題の一種で、線形計画問題を拡張したもの。多項式最適化問題への応用で、ロバスト最適化、量子化学などへの適応もなされている。

● EM アルゴリズム

Expectation Maximization：期待値最大化アルゴリズム。統計学において、確率モデルのパラメータを最尤法に基づいて推定する手法のひとつであり、観測不可能な潜在変数に確率モデルが依存する場合に用いられる。その一般性の高さから、音声認識、因子分析など、広汎な応用がある。

● NP 困難

NP とは、計算量理論における問題の集まりで、Non-deterministic Polynomial time（非決定性多項式時間）の略。NP 困難問題は、yes となる証拠が与えられた時、その証拠が本当に正しいかどうかを多項式時間で検算可能な問題で、現実的な時間で解を求めることができない問題である。

● PCP 定理

Probabilistically checkable proof: 確率的検査可能証明、決定問題の複雑性クラスで、た、可能な近似度の下界値を示す近似不可能性に関する定理。

● GPGPU

General-purpose computing on graphics processing units：GPU の演算資源を分子動力学法、格子ボルツマン法などのシミュレーションや、機械学習、音声処理、最適化問題など画像処理以外の目的に応用する技術。

- 暗黙知

経験や勘に基づく知識のことで、言葉などで表現が難しいもの。

- DFO

Derivative Free Optimization：微分情報を用いず関数値の値のみを用いる最適化技術。

- fleet スケジューリング

航空産業におけるクルースケジューリング問題。まずは複数の機体の集合（fleet）を運行便（flight leg）の集合に割り当てたのち、fleet に属する各機体のメンテナンスを考慮した機体のスケジュール、クルーの勤務地や移動を考慮したスケジュールを時系列ネットワークの巡回路を作成する問題として解く。

- VR

Vehicle Routing：複数のサービス車（Vehicle）がスタート地点から需要のある地点の巡回を行いゴール地点へ向かうようなケースにおいて、全ての需要を満たし、総経路コストを最小化することを考える問題。

- SAT

Satisfiability：命題論理の充足可能性判定問題。与えられた命題論理式の充足可能性を判定する問題であり、最初に NP 完全性が証明された問題でもある。

- RCPS

Resource Constrained Project Scheduling Problem：資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題。資源に関する条件がある中で各作業の開始時刻および終了時刻を決定する問題。

■ ネットワーク論

- スモールワールド現象

もともと社会心理学の分野で生まれた概念だが、自然界、人工物、社会における多くのネットワークに共通する性質である。旅先やパーティーなどで、初めて会った人と思いがけず共通の知人を発見して、「せまい世界ですね。（It's a small world!）」と驚いた経験などが、スモールワールド現象と呼ばれる。

- クラスタ近似

距離（非類似度）関数に基づいたデータ要素の近似集団を表すクラスタと呼ばれるグループに分類し、複雑な現象の近似解を求める方法。

- カスケード故障

連鎖故障、小さな故障が故障を呼び、ネットワークの大部分が死滅するというもの。

- big data

情報通信、とくにインターネットの発達にともなって爆発的に増大した構造化されていない莫大な量のデータ。それら様々な局面に発生した巨大データの集まりを分析することでビジネス傾向の特定、病気の予防、犯罪の対策などにメリットがあると言われている。

- スケールフリー

一部のノードが膨大なリンクを持つ一方で、ほとんどはごくわずかなノードとしか繋がっていないようなネットワーク構造。新しいノードが次々に参入しても、ネットワークの形状が変化しないフラクタル性をもっている。

● データマイニング

統計学、パターン認識、人工知能等のデータ解析の技法を大量のデータに網羅的に適用することで知識を取り出す技術。

● グラフマイナー理論

複雑なグラフに対し、頂点を取り除く、辺を取り除く、辺を縮約することで、グラフの性質がどのようになるのかを調べ、定理化するもの。

● ページランク

ウェブページの重要度を決定するためのアルゴリズムであり、検索エンジンの Google において、検索語に対する適切な結果を得るために用いられている中心的な技術。名称の由来は、ウェブページの"ページ"と、Google の創設者の一人、ラリー・ページの姓をかけたもの。

● GML

Graph Modeling Language : グラフのモデリング言語、 グラフを記述する ASCII ベースの階層のファイル形式で、グラフ メタ言語ともいう。

（付録1）索引

- 0-1 最適化180
2 次錐計画184, 185
ACADO135, 136
AIC (Akaike's Information Criterion) 最小化117, 118, 236
AIM (Asian Pacific Integrated Model)97
ALM (Asset Liability Management)43, 44
ARCH (Auto-regressive conditional heteroscedasticity) モデル48, 75
AutoGenU135
Betterment Process122
CAPM48
CVA (Credit Valuation Adjustments)52, 53, 54, 234
CVXGEN135
Cyber Physical System (CPS)113, 114, 129, 151, 153, 154, 237
Cytoscape229, 231
DMC (Dynamic Matrix Control)134
DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium) モデル79, 80, 81, 82, 83, 235
EADM (European Association for Decision Making)31, 32, 36
eigenfactor215
EM アルゴリズム176, 238
ERM (Enterprise Risk Management) 43, 44, 46, 47
Euclidean Jordan 代数177
Feedback Error Learning122
FiOrdOs135, 136
FRIT122, 124, 237
Gephi230, 231
GPC (Generalized Predictive Control)134
Graph Modeling Language (GML)228, 240
 H^∞ 制御127, 129, 139, 237
 H^∞ 適応制御122
HYCON (Highly-Complex and Networked Control Systems)153
HYSDEL135, 136
I&I 法121
ICH (日米 EU 医薬品規制調和国際会議)162
IEEE19, 24, 25, 112, 114, 128, 146, 154
IFAC123, 124, 128, 154
IFT122
Igraph230, 231, 233
IPCC (気象変動に関する政府間パネル)97, 98, 100, 236
Iterative Learning Control (ILC)122
L1 回帰178
L1 ノルム103
LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)103, 104, 105, 236
Machine to Machine (M2M)152
MATLAB63, 110, 114, 184
MBD (Model-Based Development)108, 109, 110, 112, 114
MHE (Moving Horizon Estimation)134
MPT135, 136
Netflix Prize219
NetworkX230, 231
Newton 法178
NP 困難187, 188, 189, 190, 222, 223, 238
OLG (Overlapping Generation) モデル80, 82
 p^* モデル218
PATH (Partners for Advanced Transportation Technology)76, 141
PFC (Predictive Functional Control)134
Plug and Play 機能145
Python205, 231
Receding Horizon 制御 (RHC)134
SILS (Software In the Loop Simulation)109
SJDM (Society for Judgment and Decision Making)31, 36
Sum of Squares (SoS)128
SysML (OMG Systems Modeling Language)110
UML (Unified Modeling Language)68, 110
VaR (Value at Risk)35, 39, 40, 41, 48, 56, 235
Virtual Metrogy (VM)162, 164, 237
VRFT122, 124, 237
アイザック・ニュートン2, 18
圧縮センシング103, 104, 105, 106, 176, 179, 181, 183
アルゴリズム論140, 147
意思決定科学11, 30, 32, 33, 34
意思決定分析 (DA)32, 33, 34, 36
一般化線形モデル53, 74, 75, 77
一般システム理論18
遺伝的アルゴリズム56, 175, 179, 236
伊藤解析156
ウォーターフォール型開発10
エージェント指向開発10
オイラーの一筆書き178

オートマトン	171	構造的グラフ理論	222, 223, 224, 225
オブジェクト指向開発	10	構造分析	227, 228, 231
オペレーショナルリスク	43, 44, 46, 57	高速コンピューティング技法	206
オペレーションズリサーチ (OR)	18, 19, 20, 32, 33, 36, 41, 73, 76, 182, 183, 185, 190, 192, 194, 199, 202, 234	行動経済学	31, 32, 36
オンライン最適化	178, 180, 189, 190	行動ファイナンス	31, 46
解空間	201	国際応用システム分析研究所 (IIASA)	19, 24, 99
カウンターパーティリスク調整法	53	古典制御理論	127
可観測性	139, 168, 169, 171, 172	コピュラ	46, 53, 54, 235
可制御性	139, 168, 169, 171, 172	コミュニティ構造	213, 214, 227
確率計画法	156, 158, 177, 179	混合整数計画問題	177
確率的最適化	177, 180, 189	コンピュータサイエンス	58, 66, 67, 192, 194, 195
確率ボラティリティ	48, 49, 50	最急降下法	178
カルマンフィルタ	56, 156, 158	最小木問題	187
確率計画法	156, 158, 177	最大カット問題	176, 188
感染症伝播	61	最大原理	132
感染症伝搬	212, 213	最大流問題	187
緩和問題	105, 175, 176	最短路問題	187
機械学習	13, 16, 17, 25, 33, 35, 75, 92, 93, 94, 105, 106, 111, 113, 114, 123, 176, 177, 178, 180, 183, 205, 206, 209, 213, 218, 219, 236, 238	最適解	15, 20, 80, 175, 176, 177, 182, 187, 188, 197, 198, 200, 201, 209, 223, 237, 238
規格化	18, 19, 26	最適化計算	15, 25, 111, 134, 135, 136, 192, 193, 194, 195, 196, 206
気象・海洋データ同化	89	最適化の数理	177
期待ショートフォール (ES)	39, 40, 48, 56, 235	最適化モデリング	15, 178, 179, 197, 198, 199, 200, 201, 202
帰納論理	218, 221	最適化モデル	15, 175, 176, 178, 179, 197, 198, 199, 200, 201, 206, 210
キャットボンド	45	最適化問題	15, 69, 104, 147, 168, 175, 176, 177, 178, 179, 182, 183, 184, 185, 187, 188, 192, 193, 194, 195, 196, 202, 204, 206, 207, 237, 238
協調制御	139, 141, 142, 145, 147, 151, 152	最適化理論	105, 140, 147, 148, 192, 193, 194, 195
極値制御	121	サイバネティックス	18, 19
近似アルゴリズム	187, 188, 189, 190	債務不履行 (デフォルト)	45, 52, 53, 234
金融工学	20, 31, 41, 177	サポートベクターマシン	75, 92, 94, 176, 183, 236
組合せ剛性理論	223, 224, 225	サンタフェ研究所	19, 24, 62
組合せ最適化	187, 188, 189, 190, 192, 195	サンプル値制御	127
クラスタリング	48, 193, 227, 228, 231	視覚化	227, 228
グラフフォン	224	事業リスクマネジメント	43
グラフ解析	194, 220	時系列モデル	56, 74, 75, 76
グラフマイナー理論	222, 223, 224, 225, 240	市場リスク	12, 30, 40, 43, 44, 46, 48, 49
グラフマイニング	219, 220	指数安定	168
グラフ理論	17, 23, 139, 140, 177, 179, 183, 212, 222, 223, 224, 225	システミックリスク	45, 46
クレジット・デフォルト・スワップ (CDS)	52	システム構築戦略研究	3, 4, 5, 6, 8, 11, 21, 29
経路探索	227, 228, 231	システムダイナミクス (SD)	10, 19, 234
計測自動制御学会	114, 128, 146, 148, 152	システム同定	111, 113
ゲーム理論	9, 10, 18, 20, 35, 36, 65, 68, 69, 141, 142, 147, 158, 183, 225, 234	時相論理	171
現代制御理論	121, 127, 142	自律分散システム	145
厳密最適解	175	実験経済学	31
高階調整法	121	実験ファイナンス	31
高性能計算技術 (HPC)	86, 88, 193, 194, 195, 196	実験モデル	111, 112, 113, 114
構造推定	213	実現ボラティリティ	49, 50

実代数幾何	177	単純適応制御	121
シナリオ分析法	34	中心性	213, 214, 228
シミュレーション最適化	175, 179	ディシジョン・ツリー (DT)	33, 36
社会的期待	7, 20, 21	ディスクリプタシステム	167, 171
社会ネットワーク理論	35, 67	ディペンダブルシステム	161, 162
準 Newton 法	178	データ同化	13, 86, 87, 88, 89, 90, 111, 113, 177, 178, 235
巡回セールスマン問題	176, 189, 194	データマイニング	9, 16, 17, 25, 81, 92, 93, 94, 104, 118, 123, 180, 192, 213, 218, 219, 220, 236, 240
情報幾何	177	データ駆動型制御	124, 129, 130, 237
将来シナリオ	97, 100	データ型異常検出	161
人員配置	179, 180, 198, 202	テキストマイニング	92, 94
神経経済学	31	電子情報通信学会	152
信用リスク	12, 30, 43, 44, 46, 52, 53, 54	テンポラル・ネットワーク	214
錐線形計画	183, 184	動学の一般均衡モデル	79, 81, 235
推薦システム	219, 220	統計解析パッケージ	205
数値最適化	175	統計モデル	13, 71, 73, 74, 118, 119, 236
数値ファイナンス	75, 157, 158, 176, 235	動的計画法	132, 135, 197
スケールフリー性	212, 213	動的ネットワークシステム	145, 147
スタッフスケジューリング	179	特異摂動システム	171
ステークホルダ	3, 21	凸 2 次最適化	176
スプレッドシート	205, 206	凸解析	177, 178, 179, 182, 188, 189
スモールゲイン定理	168, 170	凸計画	178, 182, 184
整数計画問題	176, 177, 188, 189, 192, 195	凸最適化	103, 128, 130, 168, 177, 179, 180
制約モデル	110, 113	内点法	104, 176, 177, 178, 179, 180, 183, 184, 185
切除平面法	188, 190	内部安定性	167, 168
セルフチューニングレギュレータ	121	入出力安定性	167, 168
線形計画	175, 176, 177, 178, 179, 182, 188, 192, 197, 206, 223, 238	ネットワークフロー	179
線形行列不等式 (LMI)	128, 130, 236	バーゼル 3	40, 53, 54
潜在的評価尺度	201	配送問題	180
相対次数	121	ハイブリッドシステム	110, 153, 167, 171
双対問題	176	ハイブリッド制御	121
双対理論	177, 178	バックステッピング法	121
相補性問題	179	ハミルトン閉路	178
ソフトシステム方法論 (SSM)	11, 234	半正定値計画	175, 176, 177, 179, 180, 184, 188, 190, 209
ソルバー	183, 184, 185, 189, 194, 199, 200, 204, 206, 207, 209, 210	半正定値計画問題	105, 128, 176, 177, 178, 182, 192, 238
第 0 近似	176	汎用プログラミング言語	205
大規模混合整数計画	179	非線形最適化	71, 176, 179, 238
大規模最適化問題	177, 193, 194, 195	非線形・時変システム	121
大規模整数計画法	179	非線形制御理論	121, 142
大規模ネットワーク	34, 151, 152, 171, 187, 193, 220	ビッグデータ	12, 23, 25, 34, 35, 57, 58, 88, 92, 93, 177, 219
楕円体法	178	微分幾何	177
田口メソッド	118, 119, 235	微分不可能問題	182, 183
多項式最適化	128, 177, 182, 183, 238	ビヘイビアアプローチ	171
多項式時間解法	178, 187	ヒューリスティクス	179, 182, 187, 190, 201, 202
多変量 GARCH モデル	56	フィードバック制御	20, 132, 133, 134, 135, 151, 162, 168, 169, 170
多変量 SV モデル	56		
多変量統計のプロセス管理	161, 164, 237		
多目的最適化	179, 180		

フィードフォワード制御	132, 133, 134
フィルタリング	156, 157, 158, 220
フォールトトレランス	156, 161, 162
複雑系	9, 19, 60, 61, 62, 63, 68, 69, 93, 94, 113, 139, 142, 143, 213
複雑適応系	19
輻輳制御	140
符号長最短化	177
ブラック・ショールズの公式	48
プリンキピア	2
プログラム・マネジメント	10
プロジェクト・マネジメント	5, 10
プロスペクト理論	31, 36, 235
プロセス・マネジメント	10
不変集合	171
物理モデル	111, 112, 113, 114, 161
分岐限定法	176
分枝限定法	182, 188, 190, 197, 200
平均・分散モデル	176
ベイジアンネットワーク	92, 94, 236
ベイズモデル	76, 77
ベイズ情報量規準	118
ベイズ統計学	218
ページランク	215, 227, 229, 240
変分原理	178
ポートフォリオ	33, 39, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 157, 209, 234, 238
保険デリバティブ	45
マイナー	222, 223, 224, 225, 240
マスター方程式	157, 158, 212
マトロイド	188, 190, 238
マルコフ連鎖モンテカルロ法	56, 57, 156, 158
マルチエージェントモデル	65, 66, 67, 69, 235
マルチファクター・モデル	48, 49, 50
メタヒューリスティクス	179, 187, 190, 201, 202
目的関数	176, 177, 182, 183, 188, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 204, 238
モジュール化	18, 19
モデリング言語	111, 113, 195, 197, 199, 204, 206, 210, 240
モデル空間	3
モデル同定	177
モデルの正則化	13, 103
モデルベース開発	108, 109, 113, 114
モデル規範型適応制御	121
モデル型異常検出	161
モデル合成	13, 97
モデル予測制御	134, 135, 136, 142, 148, 156, 157, 158, 171
問題の大規模化	177
有限サイズスケリング	212
誘導部分グラフ	223
要求モデル	110, 113
ライフサイクル管理手法	10
ラグランジュ緩和	198, 201
離散数学	17, 190, 191, 212, 213, 222, 224, 225
離散的最適化	175, 178, 187, 189
離散凸解析	179, 188, 189
リスク尺度	39, 40, 41, 44, 45
リスクマネジメント	8, 9, 11, 12, 25, 30, 35, 39, 41, 43, 44, 54, 56, 58, 234
リフティング表現	127
流動性リスク	43, 44, 46, 49, 234
リンクマイニング	218, 220
列生成法	198, 201
劣モジュラ関数最適化	175, 179, 180
連続的最適化	175, 177, 178, 179, 182, 189
ロバスト最適化	177, 183, 209, 238
ロバスト制御	14, 121, 127, 128, 129, 130, 139, 142, 168, 170, 237

（付録 2）執筆協力者一覧

※敬称略、所属・役職は本報告書作成時点

《 2.俯瞰対象分野の全体像》

■ 2. 1. 3 研究開発領域

津田 博史	同志社大学 理工学部 教授
椿 広計	情報・システム研究機構 統計数理研究所 副所長
内田 健康	早稲田大学 理工学術院 教授
杉原 正顕	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授
増田 直紀	東京大学 大学院情報理工学系研究科 准教授

《 3. 研究開発領域》

■ 3. 1 意思決定とリスクマネジメント

林 高樹	慶應義塾大学 大学院経営管理研究科 教授
中川 秀敏	一橋大学大学院 国際企業戦略研究科 准教授
津田 博史	同志社大学 理工学部 教授
室町 幸雄	首都大学東京 大学院社会科学系研究科 教授
中妻 照雄	慶應義塾大学 経済学部 教授
中川 秀敏	一橋大学大学院 国際企業戦略研究科 准教授
中妻 照雄	慶應義塾大学 経済学部 教授

■ 3. 2 モデリング

田中 剛平	東京大学 生産技術研究所 特任准教授
倉橋 節也	筑波大学 大学院ビジネス科学研究科 准教授
椿 広計	情報・システム研究機構 統計数理研究所 副所長
櫻庭 千尋	日本銀行 調査統計局 審議役
吉田 亮	情報・システム研究機構 統計数理研究所 モデリング研究系 准教授
小野田 崇	電力中央研究所 領域リーダー
増井 利彦	国立環境研究所 社会環境システム研究領域 統合評価研究室長
池田 思朗	情報・システム研究機構 統計数理研究所 数理・推論研究系 准教授
大畠 明	トヨタ自動車株式会社 理事
鎌倉 稔成	中央大学 理工学部 教授

■ 3. 3 制御

金子 修	金沢大学 理工研究域 電子情報学系 准教授
藤崎 泰正	大阪大学 大学院情報科学研究科 教授
大塚 敏之	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
滑川 徹	慶應義塾大学 理工学部 准教授

藤田 政之	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
石井 秀明	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 准教授
加嶋 健司	大阪大学大学院 基礎工学研究科 准教授
加納 学	京都大学 大学院工学研究科 教授
平田 研二	長岡技術科学大学 機械系 准教授

■ 3.4 最適化

土谷 隆	政策研究大学院大学 教授
村松 正和	電気通信大学 情報工学科 教授
岩田 覚	京都大学 数理解析研究所 教授
藤澤 克樹	中央大学 理工学部 教授
池上 敦子	成蹊大学 情報科学科 教授
田辺 隆人	株式会社数理システム 数理計画部 部長

■ 3.5 ネットワーク論

増田 直紀	東京大学 大学院情報理工学系研究科 准教授
鹿島 久嗣	東京大学 情報理工学系研究科 准教授
岩田 覚	京都大学 数理解析研究所 教授
橋本 康弘	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 講師

（付録３）研究開発の俯瞰報告書（2013年）第2版全分野で対象としている研究開発領域一覧

1. 環境・エネルギー分野（CRDS-FY2013-FR-02）

俯瞰区分	研究開発領域
化石資源エネルギー	低品位・未利用固体炭素資源の革新的な改質転換・輸送・利用技術（短期）
	メタンハイドレート利用技術（中長期）
	超高温材料と伝熱技術（中長期）
	革新的電気化学的反応器の基盤技術（中長期）
	超高効率固体酸化物形燃料電池（短期）
	負荷運用性に優れCO ₂ の大幅低減が可能な高効率石炭火力発電技術（短期）
	劣質・未利用固体炭素資源を使用した高度製銦技術（中長期）
	吸熱反応による排熱回収のための低温作動型触媒（中長期）
	石油化学品の革新的製造プロセス（中長期）
	次世代型バイオ燃料（中長期）
再生可能エネルギー	浮体式洋上風力発電システムの大規模普及に向けた革新的技術（短期）
	バイオマスエネルギー増産加速化のための生物機能解析基盤技術（中長期）
	地域環境適合型高性能太陽光発電システム技術（短期）
	超高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術（中長期）
	未利用温泉エネルギーによるバイナリー発電システム（短期）
	高温地熱エネルギー革新的利用技術（中長期）
	太陽熱利用の革新的技術・システム（短期）
エネルギー利用技術・システム	低コスト・高効率燃料電池（短期）
	次世代二次電池（中長期）
	高効率ガソリンエンジン（短期）
	中低温熱利用基盤技術（短期）
	エネルギーキャリア基盤技術（短期および中長期）
	再生可能電力による化学品生産技術（中長期）
	次世代エネルギーネットワーク基盤技術（短期および中長期）
	電力国際ネットワーク基盤技術（中長期）

2. ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2013-FR-03）

俯瞰区分		研究開発領域
ヒトの理解につながる生物学		ゲノム科学
		構造生物学
		分子・細胞生物学
		ケミカルバイオロジー
		発生・再生科学
		脳・神経科学
		数理情報生物学
		物理生物学（生物物理学）
医療・福祉	疾患	悪性新生物
		循環器・代謝疾患
		感染症
		免疫疾患
		精神・神経疾患
		疫学
	医療技術	医薬品創薬および医薬品開発
		医療機器開発
		再生医療
		医療IT
		医療技術評価
ヒトと社会		ヒト由来試料
		幹細胞・再生医学に伴う倫理的、法的、社会的課題
		脳・神経倫理
		デュアルユース、バイオセキュリティ、生物化学兵器、バイオテロ対策、など
		被験者保護
		研究不正
		リテラシー・アウトリーチ
食料・バイオマス生産		作物増産技術
		持続農業
		機能性作物
物質・エネルギー生産		バイオ燃料
		化成品原料
		医薬品・食品原料
		資源回収・リサイクル

環境保全	微生物生態・環境ゲノミクス
	動物生態
	植物生理・生態
	生物多様性

3. 電子情報通信分野（CRDS-FY2013-FR-04）

俯瞰区分	研究開発領域
デバイス／ハードウェア	アンビエント・アジャイル・プラットフォーム
	極低電力ICT基盤技術
	ハイパフォーマンスコンピュータ基盤技術
ネットワーク	エラスティックネットワーク
	グリーンネットワーク
	フィールド指向ネットワーク
ソフトウェア	ソフトウェア工学
	プログラミングモデルとランタイム
ロボティクス	リアルワールドにおける機能提供技術
	QoLを向上させるためのロボット技術（あるいはサービスを実現するためのロボット技術）
	ロボット技術の社会的受容
知能/インタラクション	知能システムの基礎
	言語、メディア理解
	ヒューマンインターフェイス・インタラクション
	データ認知科学またはソーシャルサイエンス
	統合的人工知能
	強い人工知能
データベース	モバイル・センサデータベース
	トレーサビリティ、データプロヴェナンス、不確実データのためのデータベース技術
	グラフ・ストリームマイニング
	データのセキュリティとプライバシー
	ソーシャル・クラウドソース
	ポリシー（プライバシー）
	ポリシー（著作権）
ITアーキテクチャ	社会システムアーキテクチャ
	柔軟なアーキテクチャ
	CPSアーキテクチャ
レジリエントICT	レジリエント・システムソフトウェア
	レジリエントネットワーク
	レジリエントデバイス

	レジリエント情報社会
CPS （ Cyber Physical Systems）	センシング
	アクチュエーション
	プロセッシング
	人間・社会のモデリング
ビッグデータ	大量データ処理プラットフォーム技術
	データマイニングによるビッグデータ分析活用基盤技術
	ライフサイエンス分野におけるビッグデータ
	天文科学分野におけるビッグデータ
	ITメディア分野におけるビッグデータ
	ソーシャルコンピューティング
知のコンピューティング	知のメディア
	知のプラットフォーム
	知のコミュニティ

4. ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2013-FR-05）

俯瞰区分		研究開発領域
グリーンナノテクノロジー	エネルギーを創る	太陽電池
		人工光合成
		燃料電池
		熱電変換
	エネルギーを運ぶ・貯める	蓄電デバイス
		パワー半導体デバイス
		高温超伝導送電
	エネルギーを節約する	グリーンプロセス触媒
		ナノ組織構造制御材料
	環境を守る	元素戦略・希少元素代替技術
		分離機能材料による水処理
		放射性物質除染、減容化
バイオナノテクノロジー		生体材料（バイオマテリアル）
		ナノ薬物送達システム（ナノDDS）
		ナノ計測・診断デバイス
		バイオイメーjing
ナノエレクトロニクス		超低消費電力ナノエレクトロニクスデバイス
		異種機能三次元集積チップ
		センシングデバイス・システム
ナノテクノロジー・材料科学技術基盤		超微細加工技術
		MEMS／NEMS
		ボトムアップ型プロセス（原子・分子制御、自己組織化）
		分子技術
		界面制御
		空間・空隙構造制御
		バイオミメティクス
		ナノ計測
		物質・材料シミュレーション
		リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容

5. システム科学技術分野（CRDS-FY2013-FR-06）

俯瞰区分	研究開発領域
意思決定とリスクマネジメント	意思決定
	リスク概念と尺度
	統合・複合リスク・その他リスク
	市場リスク
	信用リスク
	リスクマネジメントの数値計算
モデリング	先端的数理モデリング
	エージェント・ベース・モデルとミクロ・マクロ連携
	統計モデル
	動学的経済モデルと統計整備
	データ同化：新しい戦略分野の開拓
	データマイニング・機械学習
	モデル合成による社会課題解決の展望
	モデルの正則化・最適化
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価
	モデルの評価技術
制御	学習制御／適応制御
	ロバスト制御
	最適制御／予見制御／予測制御
	分散制御／分布制御
	合意・同期・被覆制御
	大規模・ネットワーク制御
	確率システム制御
	故障検出／信頼性設計
	制御の基盤としてのシステム理論
最適化	基礎分野としての最適化
	連続的最適化
	離散的最適化
	最適化計算
	最適化モデリング
	最適化ソフトウェアと応用
ネットワーク論	複雑ネットワークおよび総論
	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
	ネットワーク解析用ソフトウェア

謝 辞

本報告書の作成にあたっては、研究開発戦略センター（CRDS）内外の多くの方々にご協力いただいた。各俯瞰区分を取りまとめる代表者を務めていただいた有識者各位からは、研究開発領域の抽出に際し、それぞれの分野における深く広範な専門知識をご教示いただいた。また、第3章の各研究開発領域における現状と課題、国際比較などに関する分析の執筆を多くの有識者各位が引き受けてくださった。CRDS 関係者各位からは俯瞰作業の各段階において適切なアドバイスをいただいた。本報告書を上梓するにあたり、ご協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げたい。

研究開発戦略センター
システム科学ユニット一同

■研究開発の俯瞰報告書作成メンバー■

木村	英紀	上席フェロー
金子	健司	フェロー
シン	ジャワ	フェロー
武内	里香	フェロー
富川	弓子	フェロー
豊内	順一	フェロー
藤井	新一郎	フェロー
安岡	善文	フェロー
鈴木	久敏	特任フェロー
津田	博史	特任フェロー
椿	広計	特任フェロー
本間	弘一	特任フェロー
増田	直紀	特任フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2013-FR-06

研究開発の俯瞰報告書

システム科学技術分野

(2013年)第2版

Panoramic View of the Systems Science and Technology Field (2013) 2nd Edition

平成 26 年 3 月 March 2014

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
システム科学ユニット

Systems Science Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds>

©2014 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA CCTAACT CTCAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

