

2. 俯瞰対象分野の全体像

2.1 分野の範囲と構造

2.1.1 分野の定義

1) システムとは何か

「システム」という言葉は日常的にもよく使われており、その使われ方は極めて多義的である。外来語にありがちなことであるが、頻繁に使っていながらあらためてその意味を問い直してみると漠然としていて日本語で表現することが難しい事に気がつく。おそらくその理由は、言葉のもつ多義性と同時に、システム自体は通常、目で見ることができないことにあると思われる。しかし、ある問題意識のもとで対象をシステムとしてひとたび認識すると、それによってそのシステムに対する新しい視点と知見が生まれてくる。

対象の例として自動車を考えてみよう。自動車はユーザにとっては移動の手段であり、移動の手段として捉えるだけでは自動車はシステムではない。しかし、次のように考えていくことによって自動車をシステムとして認識することができるようになる。このことによってどのような新しい視点と知見が得られるだろうか？まず、2万点におよぶ部品の結合体としての全体構造を大雑把に捉えることができる。しかし、その結合体自体はシステムとは言えない。次に、各種部品が担当するさまざまな機能の集まりとしての自動車を捉えることができる。ここでシステムとしての自動車がみえてくる。さらに、設計から製造、販売、保守にいたるライフサイクル全体を把握すると、その中におけるシステムとしての自動車の位置づけに関する知見が生まれてくる。さらに進むと、社会全体における自動車の役割や機能（エネルギーの生産分配消費、運転や走行に関する情報の蓄積・通信等）に関する知見が生まれてくる。この最後の視点が社会全体にとっては最も重要であり、自動車を社会全体におけるひとつのシステムとして捉えることによって初めて得られる知見である。こうしたことは自動車に限られることではなく、すべての工業製品に通じることである。工業製品と社会との接点は工業製品の役割や機能を社会全体の中で理解することにより得られるが、その糸口を与えるのがシステムの視点である。

もうひとつの例として病院でのサービスを考えよう。大きな病院では予約・検査・診察・調剤・支払い等を来院者が楽にスムーズに行えるようにその手順が整えられている。診察の途中で検査が必要になっても、検査の予約は不要であるし検査結果を診察室に持っていく必要はなく、結果は担当医師に電子的に伝達される。われわれはこれを病院のシステム化が進んでいると感じる。実際、大きな病院は、医師や看護師、薬剤師等の医療スタッフ、検査装置や治療器具等の医療機器、医療データの記録や保険手続きを含む経理・事務を一体化した病院診療システムを、情報通信技術（ICT）を用いて構築している。それによって病院は診療の質を上げ事務コストを低減させることができるだけでなく、来院者へのサービスの質を向上させることができる。

ただし、移動の手段として捉えたにすぎない自動車や、診察等の病院での一つ一つのサービス自体はシステムというわけではないことに注意が必要である。繰り返しになるが、システムは対象をある問題意識のもとでシステムとして認識したときに生まれてくる概念である。システムは多義的な言葉であることを冒頭で述べたが、それを反映してシステムの定義は数

多くある。例えばシステムに関する国際規格の一つである ISO/IEC 15288 では、システムを「1 つ以上の明記された目的を達成するために組織された相互に作用する要素の組合せ」と定義している。それと大きく異なるものではないが、システム科学ユニットではシステムを次のように定義している。

システムとはある目的を達成するために機能要素が適切に結びついた複合体である。

2) システムの分類

上の定義からも分かるようにシステムは抽象的な概念であるが、理解を深めるためにシステムの分類を2つ述べる。一つは「自然システム」と「人工システム」であり、もう一つは「プロダクトシステム」と「プロセスシステム」である。

自然システムの最も大きなものである宇宙において「機能要素」という小さなものを連想しがちな言葉を使うのはふさわしくないかもしれないが、古代の思想家が求めたのは天体を機能要素とする複合体、すなわち宇宙のシステムとしての理解であった。地球が宇宙の中心にあり、太陽を含め、他の天体は地球の周りを公転しているというプトレマイオスらの天動説による宇宙の見方は古代の思想家が捉えた宇宙システムの一つである。その後、近代科学の誕生はそれを否定する新しい宇宙システム、すなわち地動説による宇宙の見方を提示した。太陽やそれを周る地球を含めた惑星は太陽系というシステムを形成しているということである。このことが体系的に記述されているアイザック・ニュートンの著作「プリンキピア」第3巻のタイトルは「世界のシステム」である。ただし、太陽系というシステムは、宇宙全体をシステムとしてみたときはその下位に位置している。地球というシステムは太陽系の下位、生命体はさらに地球の下位に属する部分システムとみることできる。このように、自然システムには上位から下位に連なる階層構造をもつという特徴がある。後述するように、生命体をシステムとして捉える研究は「一般システム理論」を生み出し、システム科学技術の源流となった。本俯瞰報告書では自然システムについてはあまり深く取り上げないが、自然システムは、それ自身の理解に加え環境問題や災害対策等の観点からも、社会と相互作用する部分システムあるいは要素としての見方が必要とされる重要な研究対象である。

これに対して人工のシステムは、意図的につくられたシステムと自然発生的に生まれたシステムの2つに分けられる。先に述べた自動車や病院診療システムは意図的につくられたシステムである。私たちが利用する工業製品や公共物の多くはこのような意図的につくられたシステムであるが、自然発生的につくられたシステムも世の中には数多く存在する。公共システムや社会組織・制度の場合はむしろ自然発生的に生まれ、その後、意図的に整備されている。都市や市場、学校、軍隊等は、そのような例である。その逆に、最初は意図的に設計され構築されたが、その後、最初の設計の枠を超えて自然発生的にその様相を変えていく場合も少なくない。例えばインターネットはその典型例である。現代におけるその領域の爆発的な広がりや機能拡大は当初の意図を大きく超えている。電力ネットワーク等もそのような範疇に入る。このような意図されていなかった新しい性質がシステムの進化の過程で生み出される現象は「創発」とよばれている。こうしたネットワークはシステムの一つであり、「創発」を生み出しやすいシステム構成になっているとも言える。設計と創発、意図的なものと自然発生的なものとのバランスは相乗効果を生み出すためのシステムの研究開発において重要なテーマでもある。

もうひとつの重要なシステムの分類は「プロダクトシステム」と「プロセスシステム」である。システム自体は目に見えないことを強調してきたが、システムを体現するもの（つまりシステムの要素）も目に見えないというわけではない。要素が目に見えるものをプロダクトシステム、目に見えないものをプロセスシステムとよぶことにする。プロダクトシステムは自動車等の工業製品や社会インフラ、企業等の社会組織である。プロセスシステムは金融システムやソフトウェアシステム等の主として手順や判断、約束事などが組み合わさってつくられたものである。プロダクトシステムはすでに存在している対象の中にシステム原理が静的に体現されている。一方、プロセスシステムは手順の時間的な推移が重要であり、システム原理は動的に体現されていると言ってよい。先ほどの例では自動車はプロダクトシステム、病院診療システムはプロセスシステムと言える。ただし、両者の分類はシステムを理解するための便宜的な手段であり、実際のシステムは両者の側面が渾然一体となっている場合が多い。

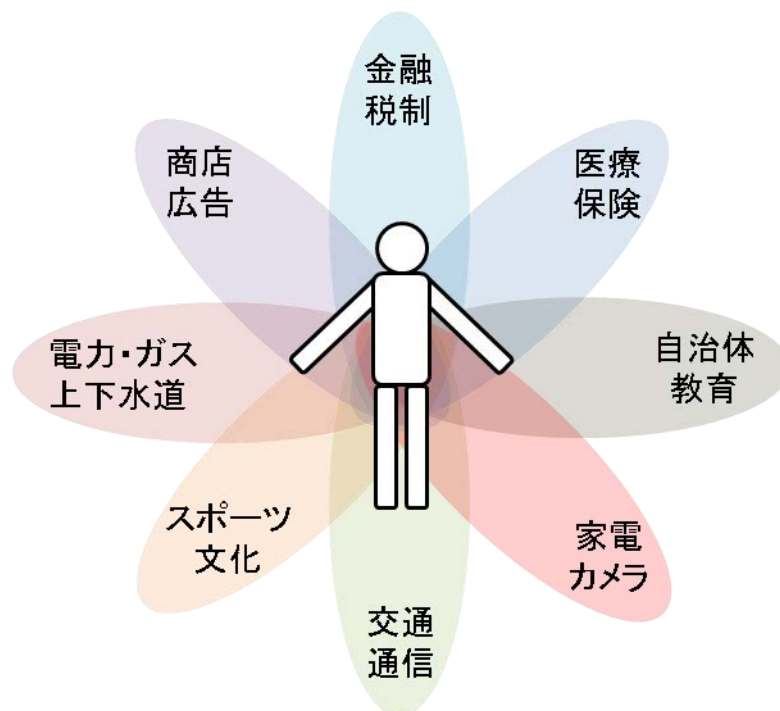
宇宙や地球、生命体などの自然システムは人間が誕生する以前から存在したことは言うまでもないが、人工のシステムはおそらく人間が誕生した時から存在したに違いない。原始人たちの行った狩猟は、獲物の探索、待ちぶせ、攻撃、運搬、加工に至る一連のプロセスに人員を配置したおそらく自然発生的に生まれた一つのプロセスシステムである。何十年もかけてつくり上げられたピラミッドの背後には、おそらく精密な計画のもとに何万人もの奴隷を組織的に動かし、建設資材を適切に供給するシステムが存在していたはずである。ヨーロッパの大都市に聳え立つ巨大なゴシック寺院も、その設計、建造にあたっては教会の威信をも担うシステムが動いていたはずである。人間を「ものをつくる存在」（ホモファーマー）と規定したのはフランスの哲学者アンリ・ベルグソンであるが、ものをつくるためにはそのためのシステムが不可欠である。システムをつくる能力はものをつくる能力と同じくらい重要であり、この能力は人間としての存在をも規定する人間固有のもののようにも思われる。

3) システム科学技術とは何か

交通も含めた通信の概念を人間同士だけではなく機械にまで拡張し、通信が現代社会の本質的な要素の一つであることを初めて主張したのは、サイバネティックスの創始者であるノーバート・ウィーナーである。彼は来るべき情報化時代を予測し、情報化が社会にもたらす恩恵と陥穽を描いて見せたが、その行きつく先が「システムの時代」であることまでは予測していなかったかもしれない。

現在、私たちの身の回りには沢山の人工のシステムがある。まさに「システムの時代」である（図 2.1）。これらのシステムはインターネットなどのネットワークシステムを通じて互いにつながり、われわれに多くの恩恵をもたらしてくれているが、それと同時にさまざまなリスクを伴う問題も引き起こしている。また、システムの中には使いにくい上にコストばかりかさんで目的をなかなか達成できないシステムもあれば、安全に使いやすく低コストで目的を容易に達成してくれるシステムもある。私たちは通常、後者のような「よいシステム」を求めている。また、そうしたよいシステムを効率的に運営・管理していく上でのシステムも必要としている。

私たちはさまざまなシステムに囲まれて生きている



私たちは「システムの時代」に生きている

図 2.1 さまざまなシステムに取り囲まれた「システムの時代」

しかしながら、よいシステムを構築することは決して容易なことではない。その大きな理由として次の3つが挙げられる。まず、システムに対する人々の要求のレベルが高まってきたことである。次にシステムが複雑・大規模になってきたことである。このことはシステムを全体として捉えることを難しくし、また、システムの細部にわたる性能の検証を困難にさせる要因となっている。システムの解析が複雑で難しくなっているとも言える。最後にシステムが社会に深く組み込まれていくにつれてシステムに関わるステークホルダーの数が増え、それらの中の調整が難しくなってきたことである。物理的な部品や、陽に定義された手順などの集合を超えた不定形の人間にかかわる要素が加わってきたのである。これらの3つの理由をさらに要約すると、システム科学技術に求められている主要な役割として以下の2つがあることが分かる。

(1) システムをよく理解する（正確なシステム解析）

(2) よいシステムをつくる（望ましいシステム構築）

これら2つの役割は現代社会が直面しているさまざまな困難を解決することと密接にかかわっていると同時に、それらを解決すること自体がシステム科学技術分野における先端的な研究課題となっている。

システム解析とシステム構築を分けて書いたが、実際には両者は表裏一体の関係にある。このシステムをどのような意図でつくったのか、あるいは、このようにつくればもっとよいシステムになっていたはずだ、などの構築の視点はシステム解析においても重要となる。逆に、よいシステムを構築するためには細部にわたるシステムの解析が設計段階で予め必要で

ある。そうでなければシステム構築の計画性や合理性は生まれない。ただし、解析と構築のどちらがより難しいか、と言えども明らかに構築である。解析は解が一つであるが構築は解が複数（場合によっては無数）あることがその大きな要因の一つである。

以上のような観点に基づき、システム科学ユニットではシステム科学技術を次のように定義している。

システム科学技術は、システムを正確に解析し望ましいシステムを構築・管理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。

4) システム科学技術の背景

上でシステム科学技術を定義したが、それが具体的にどのような科学技術であるのかについてはまだ述べていない。これについては後節で紹介することになるが、その前にシステム科学技術の背後にある考え方について触れておきたい。

システムの構築は、まず対象全体をシステムとして認識するところから始まる。つまり、対象から関心のある事象だけを取り出して考えるのではなく、関心のある事象と関連する要因をなるべく広く視野に入れ、全体像の下で関連する要素間の相互作用として事象を理解することから出発するのである。これによって対象を深く理解、認識することができる。これを行うのが「システム思考」であり、システム科学技術を生かす源でもある。システム思考の理解のために次のような例を考えてみたい。

人と人、人との（ウィーナーの言葉では機械）、ものとの繋がりが増大は世の中を複雑にする。これまではAという事象が発生すればBという事象が発生することは自明であることが多かったが最近では必ずしもそうではない。要するに、事象の原因となる要因が増えてきて単純ではなくなったのである。典型例は最近のグローバルな経済現象である。例えば為替レートが円安になれば現地価格は下がるから輸出は増えるというのは、ある時点までは多くの場合成り立ってきた経験則であるが、現在ではそうならないことも多い。円安に見合って輸出が必ずしも増えるわけではない。実際には現地価格以外に、日本企業の生産の海外移転や新興国の追い上げなどのさまざまな要因が複雑に絡まっているからである。このように事象を狭い範囲で切り出して考えただけでは有効な事象の理解には行きつかないことが多くなっている。言い換えれば、関連するさまざまな要因の相互関係を洗い出し、それらを全体として把握しなければ事象を理解できなくなっているのである。これは、「事象をシステムとして理解しなければならぬ」事に通じる。もう少し正確に言えば、「事象を引き起こす対象をシステムとして捉える」ということである。私たちは日常生活で「事態の流れをつかむには読みの深さが必要だ」といった表現を使うことがある。この「読み」（あるいは「深読み」）が対象をシステムとして捉えることの世俗的な表現と言ってよい。「読む」ことは事態を全体として把握するだけでなく、先ほど述べたシステム思考のもっとも原初的なかたちである。

このような説明をするとシステム思考は解析を行うことのように思われるかもしれないが、実際は解析よりも構築プロセスにおける設計において威力を発揮する。設計ではシステム全体を構想するが、システム思考によりシステム全体の機能実現に求められる要素とその要素技術に関する研究が広い視野をもって位置づけられ、機能実現に不要な要素と要素研究（あるいは基礎研究）は最初から排除される。システム思考を通して要素は全体にスムーズに結

合されるだけでなく、要素を構成するために使われた要素技術もシステムに無理なく統合され、基礎研究から実用化研究までの研究開発が効率的に実現される。

このようなシステム思考によってシステム科学技術がより生かされることになるが、そのシステム科学技術の源の一つとなったのがシステム工学である。システム工学が大きな役割を果たした代表的なプロジェクトとして1960年代の米国のアポロ計画があるが、そこで使われた主要なツールの一つにPERTがある。正式名称は「Program Evaluation and Review Technique」である。工程のなかの各タスクを矢印で表し、タスクの同時的経時的な構造をグラフで示したのがPERT図である。膨大な数のタスクが長期にわたって同時に進行するアポロ計画のような巨大プロジェクトでは、工程の設計、その運用管理、評価にPERT図はなくてはならないものであった。PERT図によって担当者がプロジェクトの全体像を掴み、プロジェクトの進捗について認識を共有することができる。PERTはアポロ計画全体をシステムとしてみるシステム思考を具現化する上で極めて有効なツールだったのである。この場合、アポロ計画は大きなプロセスシステムであり、各タスクはその要素である。

現代における巨大システムは要素も膨大な数にのぼり、その結び付きの構造は極めて複雑である。それに伴ってその表現法に関する数多くの手法が提案されてきており、それらは対象とするシステムの種類や性質等によって使い分けられる。例えばシーケンス図、状態遷移図、クラス図、ユースケース図等がある。これらの図をある定められた標準に基づいて自動的に生成するための言語もつくられている。これらの表現法はシステム科学技術の実用的な側面を如実に表している。

5) システム科学技術が依拠する「論理」と「価値」

システム科学技術が対象とするものは主として人工的に構築されるシステムであるため、多くの場合、その規範的な原理を他の多くの科学技術分野のように自然の法則に求めてはいない。一方、物理学や化学はもちろんのこと、機械工学、電気工学、化学工学等の自然現象を利用することを目的としている学術分野では、その存立の基盤となる規範的な原理は自然の法則である。すでに述べたように自然システムもシステム科学技術の対象であるので、システム科学技術の手法をそれらに適用することができるし、それによって自然科学やその周辺分野に対して新しい成果をもたらすことも可能である。しかし、システム科学技術が原理として依拠するものは自然法則ではない。自然法則の代わりにシステム科学技術が依拠しているものは「論理」と「価値」である。論理はシステム構築の過程で異分野の知識を統合することの正当性を保証するものであり、価値は構築されたシステムの機能に対する評価である。論理も価値も抽象的なものであるだけでなく、人によってその見方は大きく異なり、このことがシステム科学技術に対する人々の理解を難しくしていることの要因の一つになっている。

システム科学技術は自然法則に依拠しないと述べたが、自然法則と無関係であることを意味するわけでは決してない。要素がハードウェアの場合はその解析には自然現象の知識も必要である。システムが大きくなれば要素には電気、化学、機械など、さまざまな自然法則に従うものが含まれる。自然法則はシステム科学技術では原理ではなく、むしろ制約条件と言った方がよい。システムを構築するには要素を統合して機能の総合を成し遂げる必要があり、その際に原理的な基盤となるのが論理である。

価値については伝統的な科学技術の分野ではこれまであまり考慮されてこなかった。価値が含意する目的論を排除することは近代科学が成立する前提条件であったからである。もっと強い理由は、価値は科学技術の進歩に必要な中立性、客観性を乱す要因である、とみなされてきたからである。しかし、現代の科学技術は社会に深く浸透し、人々は科学技術の成果を十分享受する生活を日々送っている。そして科学技術の進歩やその成果に対する人々の考え方も多様化している。それだけでなく、科学技術と社会・人間の関わり方に関する議論は多くの異なる社会科学や人文科学のコミュニティでも広く行われ、さまざまな知見が得られつつある。

現代における科学技術の成果は多くの場合、システムを通して社会に結びつけられる。したがって、システムを社会に実装するには多くのステークホルダーの期待にできるだけ沿うように、それらの間の異なる価値観を整合しなければならない。このことは、システム構築に関する研究開発では価値の問題は避けられないことを意味する。さらに言うならば価値の問題は、経済的、社会的、公共的システムを構築する際の最も重要な課題の一つでもある。この解決を通じてシステムは社会に適合する。

ただし、価値の問題は微妙であり多様な取り組みが必要である。論理のような普遍的、客観的な取り扱いが難しい。そもそも価値は個別性、主観性をもつがゆえに意味がある概念である。論理と価値は対極的な概念であるが、システム科学技術はこの両者を考慮しつつ社会にうまく適合するシステムを構築するためのさまざまな方法論を提供する。次節ではそのシステム構築を効果的に進める手順について、システム科学ユニットが提唱している方法を紹介する。

2.1.2 システム構築の手順

構築すべきシステムの規模にもよるが、よいシステムを構築するには多くの人と年月、コストを要する。システム科学ユニットではよいシステムを構築するための効果的な手順についてさまざまな検討を行ってきた。その結果、現時点では次のような手順が望ましいと考えている。まず対象システムの大枠の構想とそれにもとづく構築のためのツール（プラットフォーム）をつくり上げること（フェーズ1）、次いでそれを用いた詳細なシステム設計と実証試験（フェーズ2）、そして最後に設計されたシステムを社会に実装しそれを運用管理すること（フェーズ3）である（図2.2）。このように3フェーズに分けて戦略的にシステムを構築するプロセス、研究開発手法をわれわれは「システム構築戦略研究」とよんでおり、2012年に開催された6th Annual IEEE Systems Conference (SysCon) で発表を行った。以下ではシステム構築戦略研究における各フェーズについて説明する。

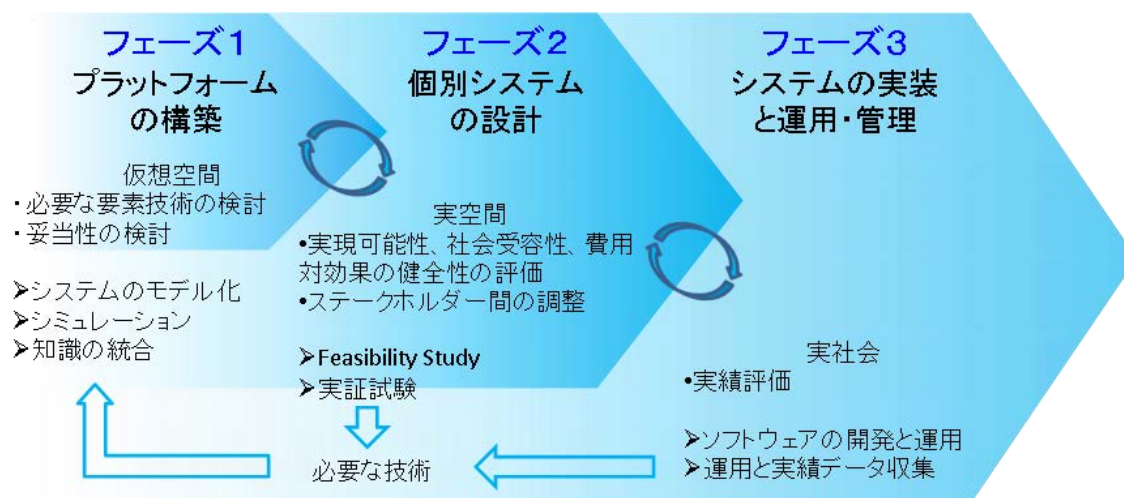


図 2.2 システム構築の手順

1) プラットフォームの構築（フェーズ1）

プラットフォームという言葉は本来、その上で仕事が行われる板状の台のことであるが、最近ではテクニカルタームとしてさまざまな意味で用いられ、その用法について多少混乱が見られるようになってきている。したがって、われわれがここで想定しているプラットフォームの概要をコラム1で述べた。

コラム1：プラットフォームの概要

プラットフォームとは、個々の応用システムが共通に利用することを可能とする場や環境を意味する。例えば、コンピュータを利用する場合は Windows や Linux のようなオペレーティング・システム (OS) がプラットフォームとなる。このような OS は、仕様や機能が共通で応用システムの開発者や利用者側から見るとコンピュータのハードウェアには依存しない。そのため、共通の OS の上で応用システムを開発・実行することで、開発コストや開発効率が改善される。応用システム利用者にとっても同じ方法でシステム機能が使えるという利点がある。

プラットフォーム自体は応用システムそのものの機能を提供するわけではないが、開発者にとっても利用者にとっても共通の場が提供されることで、開発、実行、利用の効率が改善され、その結果イノベーションを起しやすくなる。ビジネスの世界では、最近、プラットフォームを確立することが重視されるようになってきている。Google や Amazon のようなインターネットに関連するビジネスが良い例である。

複数の分野にまたがり大勢の研究者が参画するような、大規模な研究開発プロジェクトにおいてもプラットフォームの概念は重要である。プラットフォームの確立により、データの生成・取得・加工・変換が容易に実行できること、得られた専門知識やノウハウが必要な場所・時間で得ることなどが可能となる。プラットフォームは仮想的

なものでもかまわないが、提供される機能仕様が共通かつ明確になっていること、開発者・利用者が同じ環境にアクセスでき知識共有ができることが重要な要件である。

もう一つの重要な要件として、それが進化可能なことが挙げられる。特に公共的な社会システムのプラットフォームの場合は社会の構造変動やそれに伴う新しい制約条件の出現、価値基準の転換など当初考えていなかった新しい要因が加わり古いプラットフォームでは対応が難しくなる場合が生じる。このような場合はプラットフォーム自体が新しい状況に応じて進化することができるようにつくられていなければならない。誰でも自由に使ってよいという意味のオープン化だけでなく、このような進化に対しても開いていることはプラットフォームのオープン化にも必要なことである。

システム構築におけるプラットフォームの役割は、構築しようとしているシステムが社会的に合理的な意義をもち、それが構成可能であることを、特定のプロジェクトによらない一段上の一般性のレベルで検証する手段を与えることである。フェーズ1におけるプラットフォームの例として「水循環統合モデリングシステム」をコラム2で紹介している。これは〇〇川という特定の対象を想定したものではなく、一般的な河川を対象としている。このようなプラットフォームをつくり上げることによって、水循環の問題に共通する本質的な課題が抽出され、それを通して水循環のシステムを具体的に設計するツールが与えられる。また、プラットフォーム構築を通して、水文学や土木工学、水質学、気候学、森林学など広範にわたる関連諸分野の知識を統合し、次のフェーズ2で構築される具体的な個別システムの合理性を、フェーズ1で検証した基準に基づき評価することが可能となる。

コラム2：水循環統合モデリングシステム

目的 水不足や水質の低下、あるいは洪水・氾濫の頻発など、水に由来する社会・経済への被害の規模や範囲は拡大の一途をたどっている。持続的な水利用環境を実現するには、これまで以上に水資源の有効活用、環境負荷の抑制、省エネ・省資源化を推進しなければならない。そのためには、従来は個別に進められてきた、治水、利水、環境という水に関する3つの視点を統合した上で、人々が住む地域それぞれの水循環をシステムとして総合的にとらえ、課題解決のための全体的な最適化、および管理・運用を行う必要がある。

内容 世界の緊急の課題である水問題の本質的な解決を図るには、自然、風土、社会・経済環境等を把握し考慮した上で、水資源をいかに有効かつ持続可能に活用するかという、大局的かつ総合的な戦略が必須である。特に社会インフラが未熟で水問題が露呈している新興経済国においては、このような水の総合的マネジメント戦略を、基本計画から設計、実装、そして運用・保守までのプロセスに明示的に取り込んだ、新しい社会インフラの形を早急に提示していかなければならない。

一方、上下水道の高い普及率や優れた水質、および安定供給を誇っているわが国においても、少子高齢化等に伴う需要や税収の減少が予想されている。その中で、老朽化が進む水インフラをどのように維持・保全・管理していくか、さらには現在のエネルギー大量消費型の上下水道システムをどう見直していくかなど、百年単位の長期間にわたる持続可能性や大規模災害や事故への耐性強化をも考慮した上での、水サービスの根本的な見直しが求められている。

これらを支援する、空間的／時間的に入り組んだ複雑で大規模な水循環システム全体を表現し、さまざまなシミュレーション等に適用できるモデリングシステムと複数のモデルの連携を可能とするプラットフォームを構築する。これは、システム構築の三つのレベルにおける「フェーズ1」に相当する。

研究課題 水循環統合システムモデルとそれをういたシミュレーションの実現は、技術、コスト、人材、制度等の制約から、現状では容易ではない。重大な技術的制約の一つは、空間的／時間的に入り組んだ複雑で大規模な水循環システム全体を表現し、さまざまなシミュレーション等に適用できるモデリングシステムが存在しない点にある。ここで言うモデリングシステムとは、個々のモデル自体ではなく、複数の異なるモデルを接続・連携させるための基盤システムを意味する。

研究課題は、大きく「基盤」と「水問題」の2種類に分類され、さらにそれぞれの連携と成果の統合とによって達成される。

・「基盤」の研究課題

地域水循環システムをモデル化することを前提に、既存の水関係モデル群を連携させられる統合モデリングシステムの仕様を設計する。具体的には、統合プラットフォームとの接続方法、モデルとのデータの入出力の手順、入

出力データの構造やモデル自体の機能や表記方法等である。そして、その仕様に基づき統合プラットフォームをソフトウェアとして実装する。その際には、基盤となる統合プラットフォームと接続するために必要な、既存のモデルのソースプログラムの修正が最小限になるように、実装の方式（言語やデータ交換方式等を含む）を注意して選択する必要がある。

・「水問題」の研究課題

統合モデリングシステムを用いなければ解決できないであろう地域と流域圏の水問題を選択し、社会システムモデル（図 2.3 に例）として地域水循環システムを記述し、最適な新構想システム（本件の場合は、人工的な水インフラ設備など）の構築を通じて課題解決を図る。

特徴 水循環システムに関係するモデルには、ダムや水処理施設、管路等の人工物モデル、河川・湖沼・地下水等の自然環境モデル、各種用水等の水利用モデル、社会・経済モデル等があり、これらは個々の分野の専門家によって独自に研究され、発展してきた。水循環に関する複雑な問題は、このような単独のモデルだけでは解くことは容易ではないため、複数の異なるモデルを連携させる必要があるが、その連携や統合の基礎となるべき研究は十分には行われてこなかった。

地域水循環システムには多くのステークホルダーが関係し、多くの場合、治水、利水、環境という相反する課題を扱わねばならない場合が多い。限られたコストや人材を再配分し、時には既得権を失う場合や既存の制度を乗り越える必要もあるような合意を得るには、すべてのステークホルダーが納得でき、客観的に検証できる情報を共有することが大前提となる。

水循環統合モデリングシステムは、多種多様なモデルの連携を可能とする統合的なモデリングシステムであり、地域水循環システムの目指す姿の全体を精密に可視化することを支援する。国内外のさまざまな地域とその地理的、水文・水理的、社会・経済的な特徴や個々の課題に応じて、必要なモデルのみを選択的に連携、統合することを可能とする。

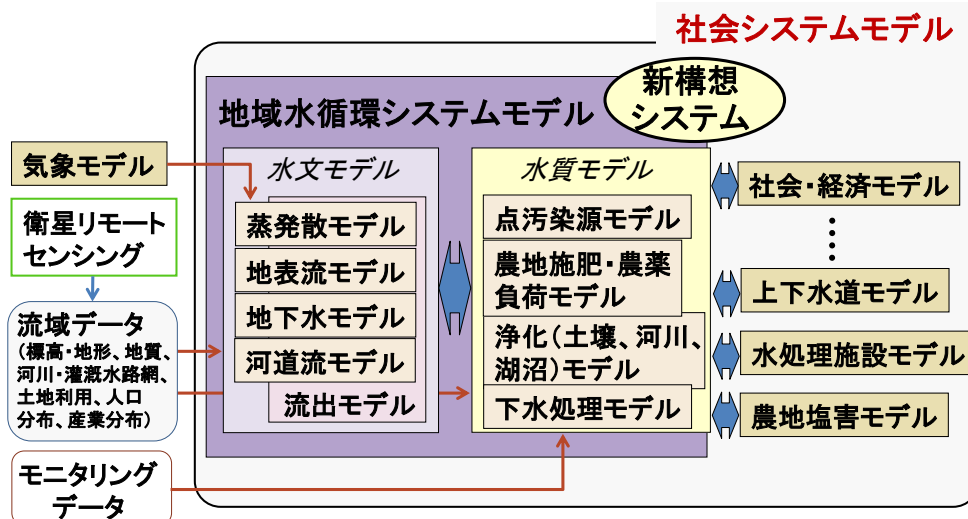
インパクト 統合モデリングシステムの適用が有効と考えられる流域圏水問題や実装が望まれる人工的システムやサービス等の具体例を、以下に示す。

（世界共通）

- ・ 水・エネルギー・食料を視野にいれた最適な都市設計・水施設設計
- ・ 災害（地震、渇水、洪水等）への対応力が強い都市設計・水施設設計
- ・ 配水のスマート化：
 - 計測・制御機能の追加と、それによって実現されるメリットの評価
- ・ 消費の社会的コントロール（料金制度等）
- ・ 都市の水資源・水循環の一体管理：
 - 現状では統合できていない、表流水、地下水、再生水を統一的なモデルで把握
 - 都市サービスとしての上下水や地下水利用の適正管理
- ・ 施設群の効率や環境性能の客観的評価

（国内）

- ・ 社会変化にも対応した数十年先までのインフラ設計：
 - 日本の人口減に対応して、サービスを確保しながら設備を縮小する手順



※「異種モデル」の連携のため、統合各モデルを記述した社会システムモデルの構造はないが、社会システムモデルの中で、データ交換やモデル間の連携などの役割を担っている

プラットフォームはそれに具体的な要件や条件をあてはめることによって設計の指針が得られる程度に十分な有用性と表現力がなければならない。ただし、一般性があまりにも高すぎると具体的な有用性が損なわれるので、ある程度、対象を限定してプラットフォーム設定をすべきである。先ほどの例でいえば、水循環そのものを対象としたプラットフォームということになれば、おそらく漠然とし過ぎて有用性がない。

また、プラットフォームの中核となるのは対象のモデル群である。モデルを通してシステム構築に必要なさまざまなデータを獲得し、構築されたシステムの挙動を多様な条件のもとでシミュレートし、結果を予測することができる。モデリングとシミュレーションはプラットフォームを構成しそれを使って具体的なシステムを構築する上でコアとなるツールである。

フェーズ1ではシステム構築のために必要となる要素技術のレベルを検討することが求められる。水循環の例では、下水浄化の純度や速度、海水淡水化の容量や使用電力等が要素技術にあたる。要素技術がレベルに達していなかったり、現存の要素技術がシステムの要素として使えそうになかったりする場合は新しい要素研究のテーマを策定することも考えられる。この問題は次のフェーズ2でも同様な形で取り上げられる。

フェーズ1のプラットフォームが存在していない場合は、フェーズ1の研究開発のみに集中してプロジェクトを実行する場合がある。この場合も全体の基礎研究から社会実装までの全体を視野に入れた計画の中のフェーズ1であることが明確に意識されなければならない。すなわち、プラットフォームが次のフェーズ2、フェーズ3で十分使える形に構築されなければならない。フェーズ2に集中するプロジェクトも同様である。

2) 個別システムの設計（フェーズ2）

対象を限定した特定の目的をもつシステムの設計を行い、場合によっては実証試験を行うフェーズである。日本で現在行われている国のシステム構築のプロジェクトの多くはこの範疇に入る。ここで重要なことは設計に先立ってシステムを構築することの「実現可能性」、「社会受容性」、「費用対効果の健全性」を十分検討することである。システム構築に時間とコストが掛かる社会システムを構築する場合はこれが極めて重要である。社会の変動が激しくそれに伴う価値観の変動を予測することが極めて難しいだけでなく、ステークホルダー間の調整が事前に必要となるからである。これはフェーズ1で構築されたプラットフォームを用いて行う。

プロジェクトの事前の Feasibility Study (FS) に関しては、日本のシステム構築プロジェクトではこれまで技術面が重視され、社会的な側面までを含めた検討があまり真剣には行われてこなかった傾向がある。設計段階では実装を見据えて、システムユーザをはじめシステム構築にかかわるステークホルダーを FS および設計のプロセスに漏れなく参画させることが重要である。実証試験の段階で要素技術の不十分さが明らかになる場合も往々にして発生する。その場合はフェーズ2の中で要素研究への取り組みを包含することも視野に入れる必要がある。

3) 設計されたシステムの実装と運用・管理（フェーズ3）

システムを実際に社会に実装するフェーズである。このフェーズは企業の手による場合が多いが、フェーズ1で設定された合理性の基準、フェーズ2で設計されたシステムを実現するための最大限の努力が求められる。社会システムはそれが構築された後の効率的な運用と管理が構築することと同じくらい重要でしかも難しい。フェーズ2のシステム設計は当然運用管理のやりやすい方式まで含めて行われる必要があるが、そこでは予測できなかったさまざまな事態の変化がフェーズ3では起こり得る。そのような変化を想定しつつ運用管理を進化させていくには制御や最適化、ネットワーク等の高度なシステム科学技術を駆使してつくられたツールが必要となる。

フェーズ1～3は必ずしも時間的な経過の順番を示すものではない（図2.4）。フェーズ2から始めてその経験を基にフェーズ1のプラットフォームを構築する場合も考えられる。要素研究がすでに十分成熟し、実際のシステム構築が可能になっている場合はフェーズ3からスタートする場合も考えられる。その場合でも、フェーズ2、フェーズ1に戻って問題を一般的に定式化し、より高い視点からシステム構築の意義を確認することはよいシステムを構築するための本質的な性格でもあるので忘れてはならない。

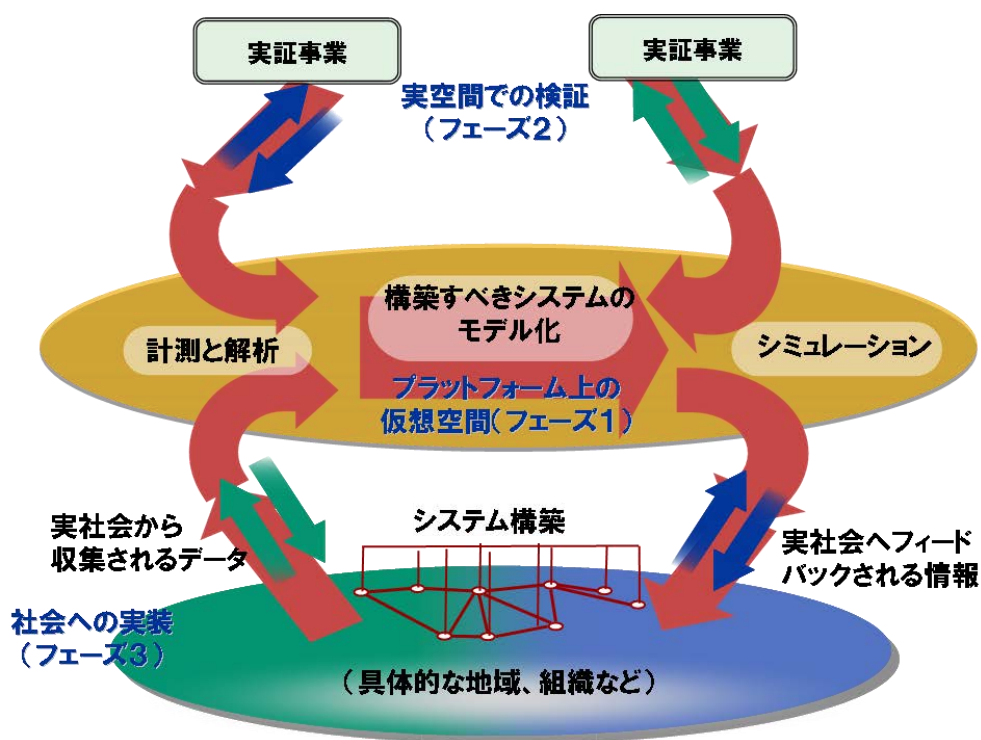


図 2.4 システム構築における各フェーズの相互関係

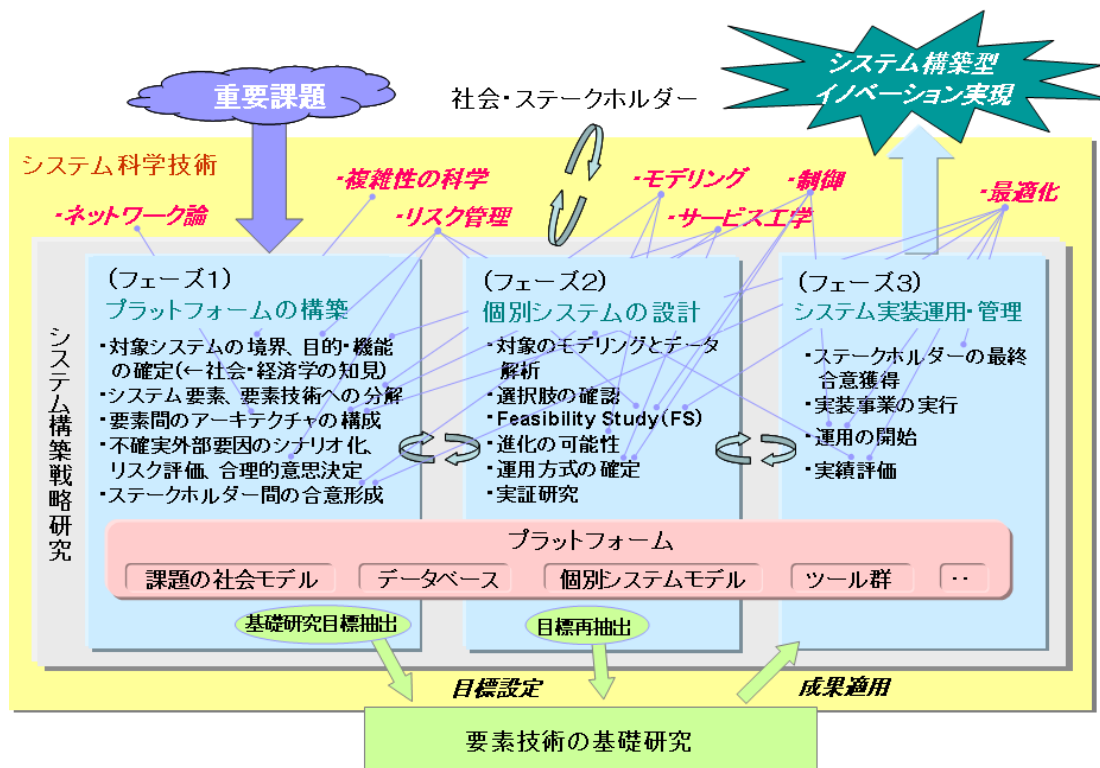


図 2.5 各フェーズにおけるシステム構築戦略研究

なお、フェーズ1から始まるシステム構築の標準的な手順を重視して表現した図2.2と内容が重なるところがあるが、各フェーズにおけるシステム科学技術やプラットフォームの役割等も含めた、より具体的な研究開発の内容（システム構築戦略研究）を図2.5に示した。

2.1.3 俯瞰の枠組

1) 4つの「合」

システム科学技術には諸分野を統合する横断的な学術としての性格、実用性を重視する性格など多様で複雑な側面があり、システム科学技術分野の位置づけを1枚の図で端的に表現することは至難の業である。しかしながら、あえてそれを行ったのが図2.6であり、これがシステム科学技術分野の俯瞰図となる。

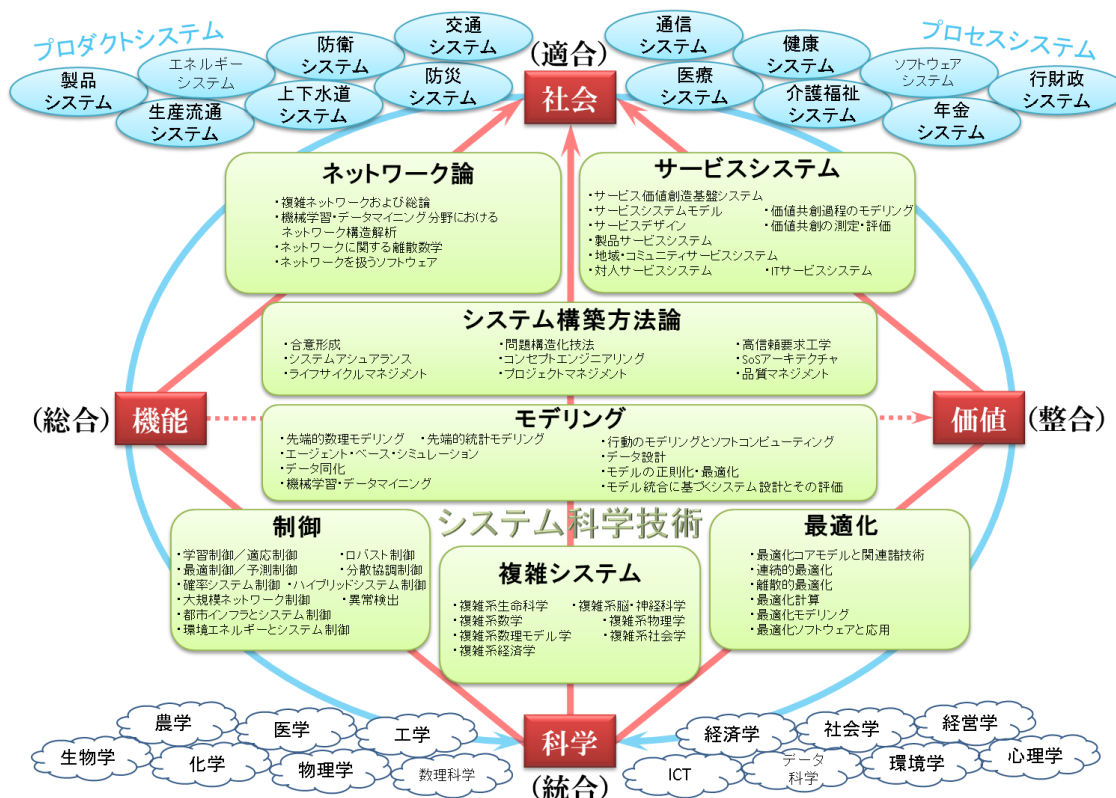


図 2.6 システム科学技術分野俯瞰図

まず位置づけを二次元で表現するため、二つの軸を設定した。縦軸は学術的な基盤(科学)から社会的な実装(社会)に至る軸である。社会的な実装とはシステムの構築およびその実装を意味しているから、上部にはその成果としての各種のシステムを表記した。プロダクト、プロセスシステムに分けているが、大規模、複雑なシステムになるほど、その境界を明確に示すことは困難であり、それらの性質は融合され社会に深く溶け込んでいく。上部中央にはそのようなシステムを記載したつもりであるが、人によってもその受け取り方は異なるからあくまでも参考程度で見ていただきたい。一方、横軸は機能から価値に至る軸である。システム科学技術は論理に加え価値を重視すること、価値とは機能の評価であることをすでに述べたが、ある程度の客観性(論理)と可視性をもつ機能から主観性と不可視性を伴う価値への移行の度合いを横軸(点線)は表現している。

図2.6は抽象的ではあるが、これを表現する「4極」としての科学、社会、機能、価値はシステム科学技術が取り扱う基本的な概念と言える。これらに対するシステム科学技術の課題と目標を以下の「4つの合」で示した。

- (1) 機能の総合
- (2) 価値の整合
- (3) 科学における統合
- (4) 社会への適合

「機能の総合」とは、システムがさまざまな異なる機能要素の集合であることを示している。それぞれの要素が互いに相互作用をもちながら総合的な性能を発揮させることを意味する。最近「システムのシステム」(System of Systems) が話題になっているが、「機能の総合」はそのこととも関係している。

「価値の整合」は現代社会において最も困難な課題である。価値はすでに述べてきたように主観的な側面が強い。システムのもつ機能は、ある人にとっては利益をもたらす満足すべきものであっても、他の人にとっては損害を与える忌避すべきものであることは少なくない。システムに関与するさまざまなステークホルダーとの調整を適切に行い、なるべく全体で最大の価値をもたらすように整合をとり、それに沿ったシステムの機能実現することが「よいシステム」を構築するために求められることである。

よいシステムを構築しそれを運用するにはさまざまな専門領域における知識が必要となる。例えば水循環システムを構築するには、水利学、水質学、土木工学、地質学、流体力学、気象学等の専門知識が必要となる。スマートシティを構築するには、エネルギー、交通インフラ、環境問題、建築デザイン、衛生学等の専門知識が必要となる。そうした専門知識をも包含する基盤的学問分野を下部に記載している。このように「科学における統合」(知の統合)は、システム科学技術が媒介となって実現すべき大きな課題となる。

システムが社会やコミュニティに実装された時、さまざまな規制や制度、組織、慣習、さらには文化や伝統まで含めた社会のあり方に適合することが求められる。現存の社会やコミュニティにおけるそれらすべてに完全に適合はしていなくても、システムの運用ではそれらと基本的に調和がとれていなければならない。これが上部の各システムの「社会への適合」の意味である。

2) システム科学技術分野の俯瞰区分

第3章ではシステム科学技術分野の俯瞰区分として表2.1に記した7つを取り上げている。システム科学ユニットではこれらがシステム構築において重要な役割を果たす基盤的学術領域と考えている。(なお、前回2013年版の俯瞰報告書で取り上げた「意思決定とリスクマネジメント」区分もシステム構築において欠かせない学術領域であるが、現在、内容の大幅な拡充を検討しているところであり、本報告書での俯瞰は見送ることにした。)

これらの俯瞰区分は図2.6の俯瞰図の中にも示されている。俯瞰区分の中には、対象領域が非常に広いものもあるので、図2.6上ではそれらの位置はかなり大きく広がっている。しかしそれらは各俯瞰区分の大まかな特徴を考慮して配置されている。例えば「モデリング」と「システム構築方法論」はシステム科学技術の中核であるため、俯瞰図の中央に位置している。「最適化」と「サービスシステム」は価値との関連が強いため、右側に位置している。なお、図2.6における各俯瞰区分の枠内および表2.1には、第3章で詳述する各研究開発領域の名称が記載されている。

表 2.1 システム科学技術分野における俯瞰区分と研究開発領域

俯瞰区分	研究開発領域
モデリング	先端的数理モデリング
	先端的統計モデリング
	行動のモデリングとソフトコンピューティング
	エージェント・ベース・シミュレーション
	データ設計
	データ同化
	モデルの正則化・最適化
	機械学習・データマイニング
	モデル統合に基づくシステム設計とその評価
制御	学習制御／適応制御
	ロバスト制御
	最適制御／予測制御
	分散協調制御
	確率システム制御
	ハイブリッドシステム制御
	大規模ネットワーク制御
	異常検出
	環境エネルギーとシステム制御
	都市インフラとシステム制御
最適化	最適化コアモデルと関連諸技術
	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
	ネットワークを扱うソフトウェア
複雑システム	複雑系生命科学
	複雑系脳・神経科学
	複雑系数学
	複雑系物理学
	複雑系数理モデル学
	複雑系社会学
	複雑系経済学

サービスシステム	サービス価値創造基盤システム
	サービスシステムモデル
	価値共創過程のモデリング
	サービスデザイン
	価値共創の測定・評価
	製品サービスシステム (Product-Service Systems)
	地域・コミュニティサービスシステム
	対人サービスシステム
	IT サービスシステム
システム構築方法論	合意形成
	問題構造化技法
	高信頼要求工学
	システムアシュアランス
	コンセプトエンジニアリング
	System of Systems (SoS) アーキテクチャ
	ライフサイクルマネジメント
	プロジェクトマネジメント
	品質マネジメント

3) システムドメイン

わが国が現在直面している問題をシステム構築の視点から考えると、幾つかの主要な課題領域が浮かび上がってくる。システム科学ユニットでは「よいシステム」を構築することが社会的な価値に結びつく度合いの大きい7つの課題領域を「システムドメイン」として選び、重点的にファンディングを行うことを提案している（表 2.2）。これらのドメインは、いずれも「人間」、「社会」が主役を演じ、その意味で、物理的には割り切れない不定形な要素を含むシステムからなる。これら以外にも重要なシステムドメインは存在するが、現在の日本が直面している少子高齢化やエネルギー問題、インフラの老朽化やパッケージ輸出等の深刻な課題を優先し、また、限られている予算を考慮し、この7つを最重要なシステムドメインとして抽出した。

表 2.2 7つのシステムドメイン

① エネルギー・環境システム
② 社会インフラシステム
③ 防災とリスク管理システム
④ ヘルスケアシステム
⑤ 食糧確保のための農業システム
⑥ 国民経済計量と予測システム
⑦ 地域再生システム

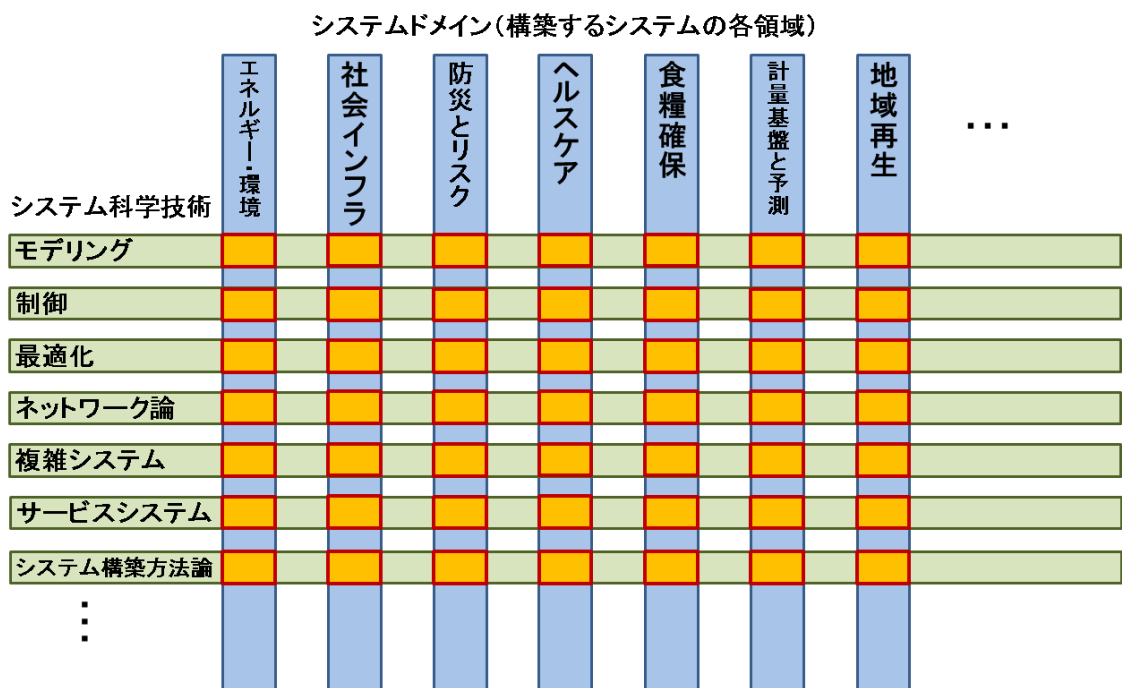


図 2.7 システムドメインとシステム科学技術

これらのシステムドメインにおけるシステム構築が、今回俯瞰したシステム科学技術の 7

つの俯瞰区分の各領域と交差していることを示したのが図 2.7 である。縦の柱であるシステムドメインと横の柱であるシステム科学技術の俯瞰区分の交差点がシステム科学技術の社会的、実用的な適用の場であり、同時にシステム科学技術が学術としての養分を得る場所でもある。図 2.7 には $7 \times 7 = 49$ 個の交差点が存在するが、それぞれの交差点は多彩な特徴や性格をもっているはずである。ただし、第 3 章で詳述する各研究開発領域においては性質的には「横方向」の俯瞰を試みているが、それらのシステム科学技術の 7 つのシステムドメインにおける役割に関する具体的な俯瞰はまだ途上であることに注意しておく必要がある。また、各システムドメインからの視点、つまり「縦方向」の俯瞰も、あるシステムにおいて各俯瞰区分のシステム科学技術がどのように用いられているかを知る上で興味深い。これも今後の課題として残されている。

システム科学ユニットでは 7 つのシステムドメインのうち⑤を除く 6 つのシステムドメインに対して「戦略プロポーザル」を作成提示している。表 2.3 はそれらの一覧である。そのうち①における「システム構築による重要課題の解決にむけて」については、この戦略プロポーザルが基になり、すでに 2012 年度から JST における代表的なファンディングプログラムの一つである CREST の中で研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が発足している。

表 2.3 システム科学ユニットが中心となって作成した（している）戦略プロポーザル

① エネルギー・環境システム
<ul style="list-style-type: none"> ・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） ・将来水問題の解決に向けた統合モデリングシステムの研究～システム構築戦略研究の具体化～（CRDS-FY2012-SP-03）
② 社会インフラシステム
<ul style="list-style-type: none"> ・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（CRDS-FY2011-SP-06） ・課題解決型研究開発の提言（2）強靱で持続可能な社会の実現に向けた社会インフラ統合管理システムの研究（CRDS-FY2014-SP-02）
③ 防災とリスク管理システム
<ul style="list-style-type: none"> ・共通利用可能な分野横断型リスク知識プラットフォームと運用体制～リスク社会に対応する知識の構造化を目指して～（CRDS-FY2013-SP-02）
④ ヘルスケアシステム
<ul style="list-style-type: none"> ・健康リスク制御システム～予測医療のためのシステム科学技術～（現在、戦略プロポーザル作成中）
⑥ 国民経済計量と予測システム
および
⑦ 地域再生システム
<ul style="list-style-type: none"> ・地域創生政策立案のための計算論的システムズアプローチ（現在、戦略プロポーザル作成中）

4) 各学問分野におけるシステムのアプローチの発展

近年、生物学や農学、医学等の分野でシステムのアプローチが急速に進んでいる。これもシステム科学技術の進展を示すものであり、今や伝統的な学問分野の進化にもシステム科学技術が必要になってきていることの証左である。図 2.8 ではそのような分野をアカデミックドメインとして図 2.7 のシステムドメインと同じような形式で抜き出した。このような視点からの俯瞰も今後の課題である。

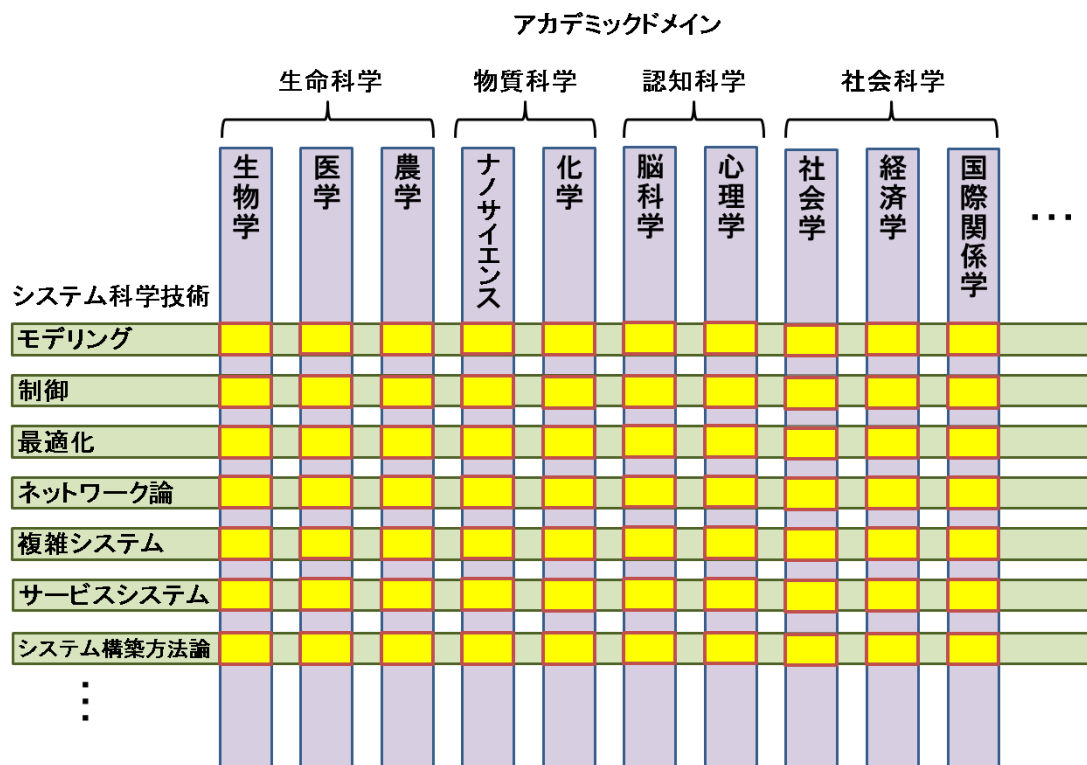


図 2.8 アカデミックドメインとシステム科学技術

2.1.4 各俯瞰区分における研究開発領域の概要

以下に、第3章で詳述する研究開発領域について俯瞰区分ごとに概括する。

1) モデリング

システム科学にあつて、現象や行動のモデル化の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る。多くの学術的、社会的課題は、多くのモデルを適切に合成し、モデルのパフォーマンスを与えられたさまざまな課題に対して多目的最適化するようなソリューションを発見することを通じて達成される。

図2.9のモデリング区分俯瞰図では、モデリング・プロセスをその時間軸で表現した。

第1ステージはモデルの表現の選択と設計である。ここでは、分野固有の演繹的モデル表現の知に基づく「数理モデリング」(①先端的数理モデリング)と分野固有の事実(データ)から帰納的にモデルを構築する「統計(計量)モデリング」(②先端的統計モデリング)が2つの伝統的アプローチである。しかし、今回はこれに新しく2つのアプローチを追加して俯瞰を行った。すなわち、モデリングの対象となる事象やプロセスの明確な定義が困難な「人間行動のモデリング」(③行動のモデリングとソフトコンピューティング)とモデリングによって理解したい世界を支配するマクロな構造が未知の場合のマイクロなモデリングに基づく全体理解としての「④エージェント・ベース・シミュレーション」である。後者は、シミュレーション科学を出発点とするモデリングと位置づけることもできよう。いずれにせよ、第一ステージの各項目の俯瞰の意義は、モデラーがモデリングの目的や対象、それに対する事前知識に応じてどのようなモデルを選択できるかを示すことにある。

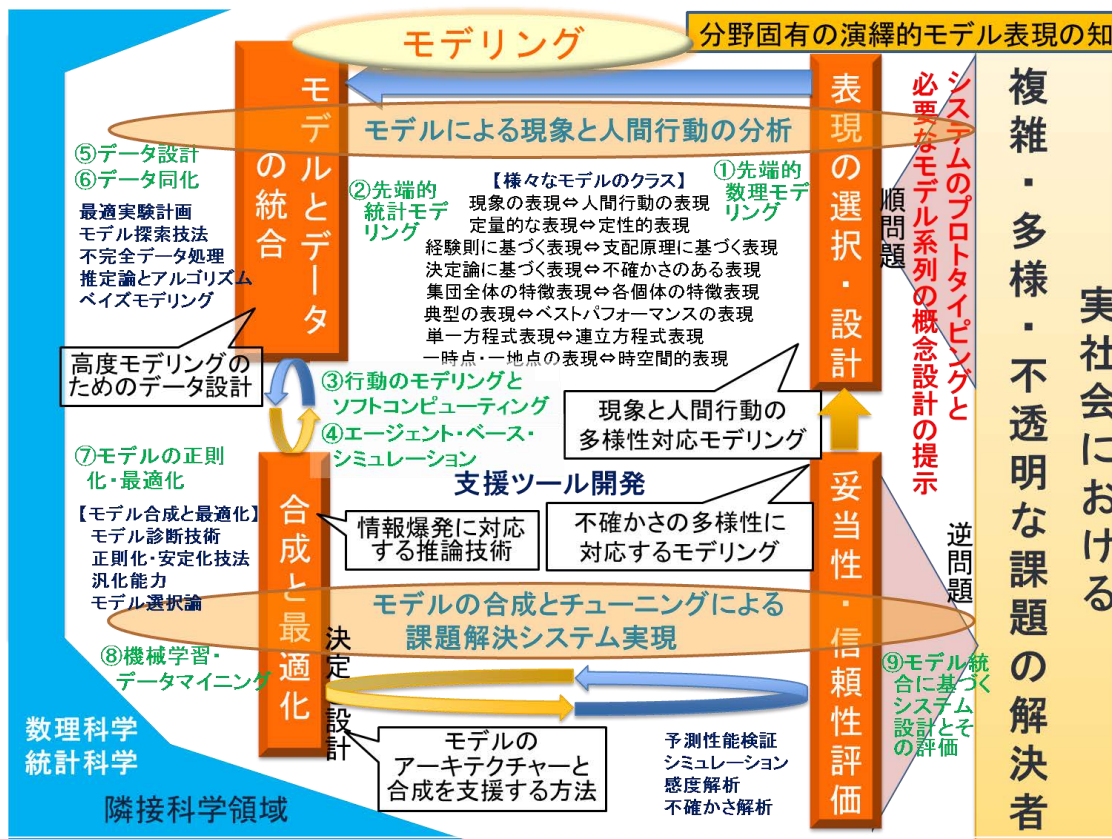


図 2.9 モデリング区分俯瞰図

モデリングの第2ステージとしてのモデルとデータの統合は、次の2項目を設定した。まず、事実としてのデータと高度モデリングとの統合を前提にしたとき、最適にデータを収集する方法論を俯瞰した。これは古典的には実験計画法とよばれるもので、ここでは「⑤データ設計」と名づけた。次に収集したデータとモデルとの乖離を最小化する計算科学的方法論としての「⑥データ同化」であり、これはデータを用いてモデルを改善する学習理論と考えることもできる。

モデリングの第3ステージは、モデル自身を予測や制御のために合成、最適化するステージである。ここでは、モデルに含まれる多くのパラメータをスパース化しモデルの性能を向上させる正則化技術等の「⑦モデルの正則化・最適化」理論を研究開発領域として設定するとともに、多くの複雑な現象に基づく予測精度向上技法としての「⑧機械学習・データマイニング」自体をモデルの合成や最適化の有力な方法論として取り上げることとした。

モデリングの最終ステージとしてモデルの妥当性・信頼性評価を掲げたが、当然このステージはモデルが如何に利用され効果を発揮するかという意味で、予測・制御や意思決定・リスクマネジメント分野で十分議論されるべきである。ここではシステム科学におけるモデリングという意味で、「⑨モデル統合に基づくシステム設計とその評価」を研究項目として設定した。複雑なシステムのモデル合成による近似がどのように実現し、その動的ふるまいはどのようなものになるかを検討することを重視した。

2) 制御

「制御」は、電気、機械、科学、航空、自動車等、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するなかでそれぞれに発展し、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2.10の制御区分俯瞰図では、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、安全性や信頼性等を評価しながら、システムの実装・運用につなげるといふ、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、制御仕様と制御対象で分類した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、制御区分の基軸である制御系設計の領域から8つ、具体的課題に的を絞った領域から2つを選んだ。

「①学習制御／適応制御」、「②ロバスト制御」、「③最適制御／予測制御」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を続けている領域である。

「④分散協調制御」は、特に現代社会の大規模化、ネットワーク化を伴うさまざまなシステム構築における新たな制御の必要性から生まれ、急速に展開している研究開発領域である。この領域は、分散／分布等の制御形態・構造に着目する従来の分散制御／分布制御の機能に

加えて、制御形態・構造の変更も含めた協調や合意等の新たな機能を実現する制御の研究開発領域である。現代の課題における対象システムの固有性と構造の特徴に注目した研究開発領域としては、「⑥ハイブリッドシステム制御」、「⑦大規模・ネットワーク制御」を俯瞰した。

「⑤確率システム制御」、「⑧異常検出」はシステムの大規模化及び複雑性の増大、並びに環境との接触面の拡大に伴う不確かさに由来する課題の解決に向けた研究開発領域である。

目的の機能を実現するために高度の制御が不可欠となる大規模、複雑かつネットワーク化された具体的なシステムとして、環境エネルギーシステムと都市インフラシステムという現代社会を支える二つのシステムを取り上げた。「⑨環境エネルギーとシステム制御」、「⑩都市インフラとシステム制御」は、二つのシステムそれぞれに対して、そのシステムの個別性及び課題の個別性に適合した制御を研究開発する領域である。これらの研究開発領域は、対象や課題の個別性に左右されない普遍的な制御設計に関する研究開発領域の成果に基礎を置くと同時に、「④分散協調制御」、「⑦大規模・ネットワーク制御」等を典型例とするように、個別課題を解決する過程の中から新たな制御の研究開発領域を生み出しながら進展している領域である。

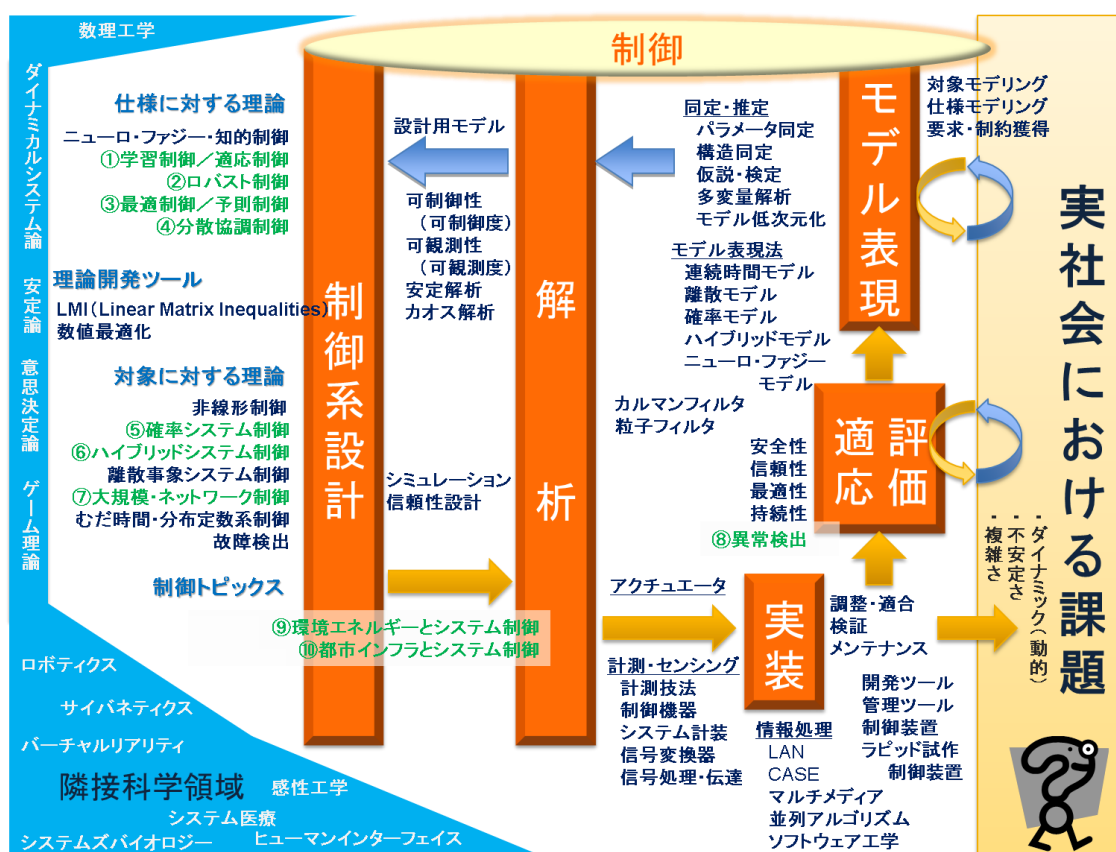


図 2.10 制御区分俯瞰図

3) 最適化

システムデザインやモデリングの大きな目的は「現実システムをできるだけ適切にモデル化」して「同定されたシステムやモデルに基づく最適な意思決定を行う」ことである。それゆえに「最適化」はシステム科学で基本的な手法の一つとなる。そして、最適化を「計算手段」と捉えるだけではなく、「システム/モデル構築技術」と関連付けて俯瞰することが重要である。図 2.11 の最適化区分俯瞰図における研究開発領域「①最適化コアモデルと関連諸技術」、「⑤最適化モデリング」、「⑥最適化ソフトウェアと応用」はシステム構築やモデル構築の立場から最適化を俯瞰したものである。一方、「②連続的最適化」、「③離散的最適化」、「④最適化計算」は、最適化を、関数を最適化する手法として捉え、その現状を俯瞰したものである。以下では各研究開発領域を「コア」、「モデル」、「ソフト」、「連続」、「離散」、「計算」と略して参照する。

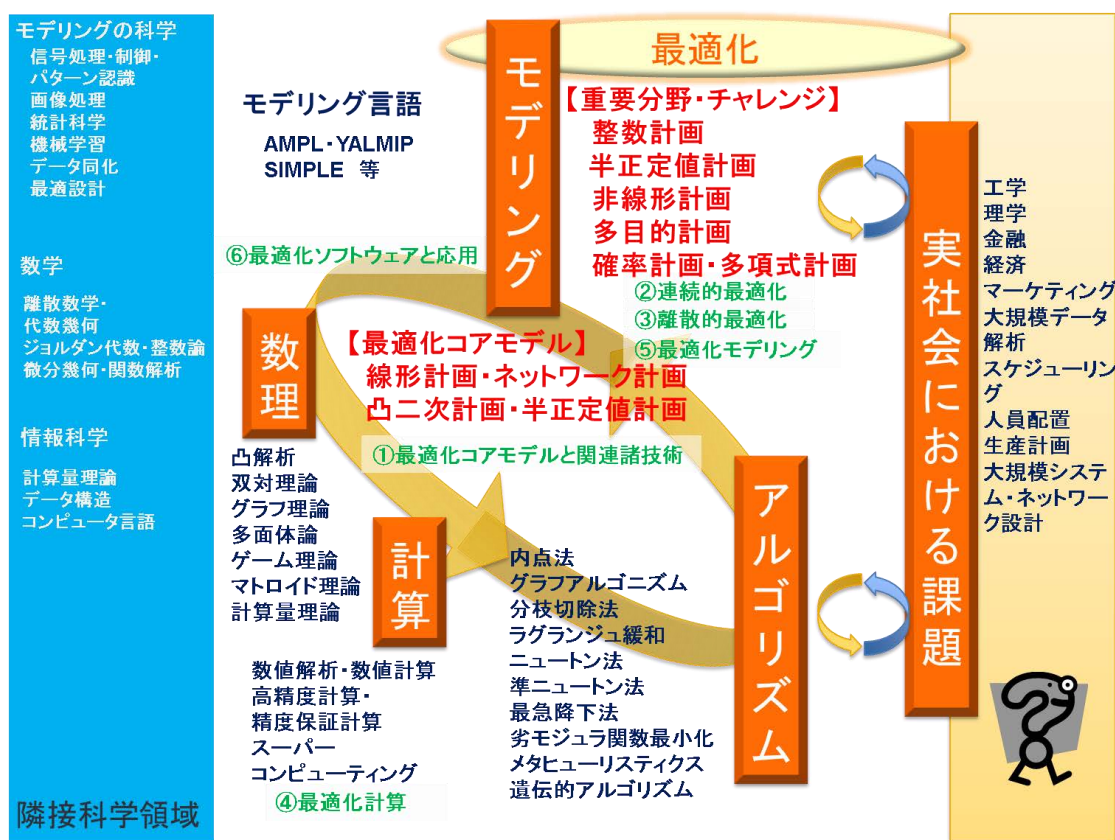


図 2.11 最適化区分俯瞰図

まず、最適化コアモデルについて説明する。モデル記述力があり、効率的に大域的最適化が可能であり、モジュール化されている最適化問題のクラスに、線形計画問題、凸2次計画問題、半正定値計画問題、劣モジュラ最適化、ネットワーク流等の最適化問題がある。これらを最適化コアモデルと呼ぶ。これらの問題は豊富な数理的構造を有し、その構造をモデリングに有効に生かすことができる。「緩和」や「分解」等の手法を駆使して、現実の問題をうまくこれらの定番問題に帰着させることが、最適化モデリングの核心である（関連項目：コア、モデル、ソフト）。これらの最適化コアモデルでは解法の研究もさることながら、モデリングの道具立てを磨くことも重要となる。その観点からは、半正定値計画問題によるモデリ

ングが重要な研究テーマである（関連項目：コア、連続）。また、劣モジュラ関数の最適化は機械学習等の分野で注目されている（関連項目：コア、離散）。

より難しい問題ではあるが、非常に強力なモデル記述力を有する問題として、連続的最適化では非線形計画問題（関連項目：コア、連続）、離散的最適化では（混合）整数計画問題がある（関連項目：コア、離散）。最近は、実用レベルで混合整数計画問題が解けるようになりつつある（関連項目：離散、ソフト、計算）。（凸最適化を含む）非線形最適化においては、機械学習等をはじめとする応用分野の広がりによる大規模化に対応するためにさらなる研究の深化が必要である（関連項目：連続）。そのために、勾配法等の一次法系統の方法が見直されている。

また、計算機の発展は目覚ましく、10年前のスパコンが研究室あるいは一般企業レベルで利用可能という状況にあり、スパコンによる超大規模最適化問題、大規模グラフ計算、混合整数計画や半正定値計画問題への挑戦は重要である（関連項目：計算）。

最適化モデリングは、最適化の考え方や基本的最適化問題を徹底的に利用してモデルを立てる。近年、計算機やソフトウェアの性能が格段に向上し、現実問題を解くという実践を通じてかえってモデリングの重要性が際立ってきている。現在は、曖昧な目的関数を扱う需要が増大しており、利用者が潜在的に考えている真の評価尺度と定式化された目的関数にずれが生じる、という問題に取り組むことが重要である（関連項目：モデル）。

最適化ソフトウェアと応用、最適化計算の俯瞰においては、モデル・データ・アルゴリズムの摺合せ技術の重要性が指摘されている。これは、モデリング言語の登場により、モデル・データ・アルゴリズムをより整理して分離した形で扱うことが可能になったこと、最適化手法を適用する前提となるデータの取得についての環境が大きく改善されつつあることを背景としている（関連項目：モデル、ソフト）。しかし、モデル・データ・アルゴリズムの摺合せ技術は学問として体系化されたものではなく、その体系化が必要である。これは、最適化分野のみではなく、システム科学全体の大きな課題である。

本俯瞰区分では、米国が総合的に見て研究の厚み等で疑いなくトップを走っている。また、欧州も EU による連携の枠組みを生かして、混合整数計画を中心とした分野で、トップレベルの研究と応用の実践が進められている。中国は、現段階では欧米のレベルには及ばないが、米国一流大学の中国系の教授の下に優秀な学生を留学させて教育することで優秀な人材が育ってきており、研究のレベルはかなりの速度で上昇している。

総じていえば、わが国においては、過去 20 年のスパンで見れば、内点法と関連ソフトウェア、非線形最適化と関連ソフトウェア、相補性問題や変分不等式、劣モジュラ関数最適化や離散凸解析、スパコンによるグラフ解析や半正定値最適化等の分野で世界トップレベルの成果がある。総合力で米国には譲るものの、一国の水準としては米国以外の他国に引けをとらないものである。この伝統と財産を足掛かりに、システム科学他分野との有機的な結び付きを意識し、さらに、統合的・横断的に研究を展開していく必要がある。半正定値計画や混合整数計画・非線形混合整数計画等の分野は今後力を入れて研究を展開してもよい分野である。

本俯瞰では横断的分野としての最適化において簡単に取り上げるに留めたが、遺伝的アルゴリズムに代表されるシミュレーションベースの最適化手法の工学的分野への浸透には目覚ましいものがある。また、目的関数が陽に計算できない状況での最適化等も重要な研究分野

であろう。この問題に挑戦するには、システム科学各分野の垣根を越えた共同研究体制が必要である。

4) 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、社会等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。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、二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、ケーブル等をリンクとするネットワークである。俯瞰区分「ネットワーク論」では、そのようなネットワークに関わる理論や技術を開発する。要素が持つ個別の情報を取り除き、具体的対象をネットワークという抽象化されたシステムとして扱うので、対象の分野を問わない解析や技術の適用が可能である。そのため、さまざまな分野と隣接し、諸分野の問題解決のためのプラットフォームとしての機能を果たしている。この様子を図 2.12 のネットワーク論区分俯瞰図で表現した。

本俯瞰区分の要となるネットワーク科学は、1998 年以降、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、さらに、さまざまな応用が進んだことで形成された。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、各分野におけるネットワークの個別性を明らかにしてきたこと、統計物理学者や工学者、応用数学者が参入することによりネットワーク構造の解析、ネットワークの生成の理論やネットワーク上のダイナミクスを解析する技術が一挙に発展したことが特徴的である。例えば基礎理論を土台に、感染症制御、生態系保全、電力網のコントロール等の研究が行われている。図 2.12 における研究開発領域「①複雑ネットワークおよび総論」は、そのようなネットワーク科学の発展を概括し、本俯瞰区分の総括を行う。

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、ネットワークの膨大なデータ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。具体的にはノードの分類やランク付け、リンク構造の予測や特徴的な部分構造パターンの発見といった技術の開発を基本タスクとし、その技術はオンラインショッピングモールの推薦システムや創薬等に活かされている。「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」ではこうした領域を概括する。

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。グラフに関する数学の歴史は 17 世紀にまで遡る。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。「③ネットワークに関する離散数学」がこの領域を概括する。

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、製薬等、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等をグラフィカ

ル・ユーザ・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。「④ネットワークを扱うソフトウェア」は、ネットワークが持つ性質を統計的・数値的に評価するための計算機能や複雑に結合したネットワークをなるべく自然な形で二次元空間に埋め込むための可視化機能をもつソフトウェアの開発、競走、淘汰を概括する。

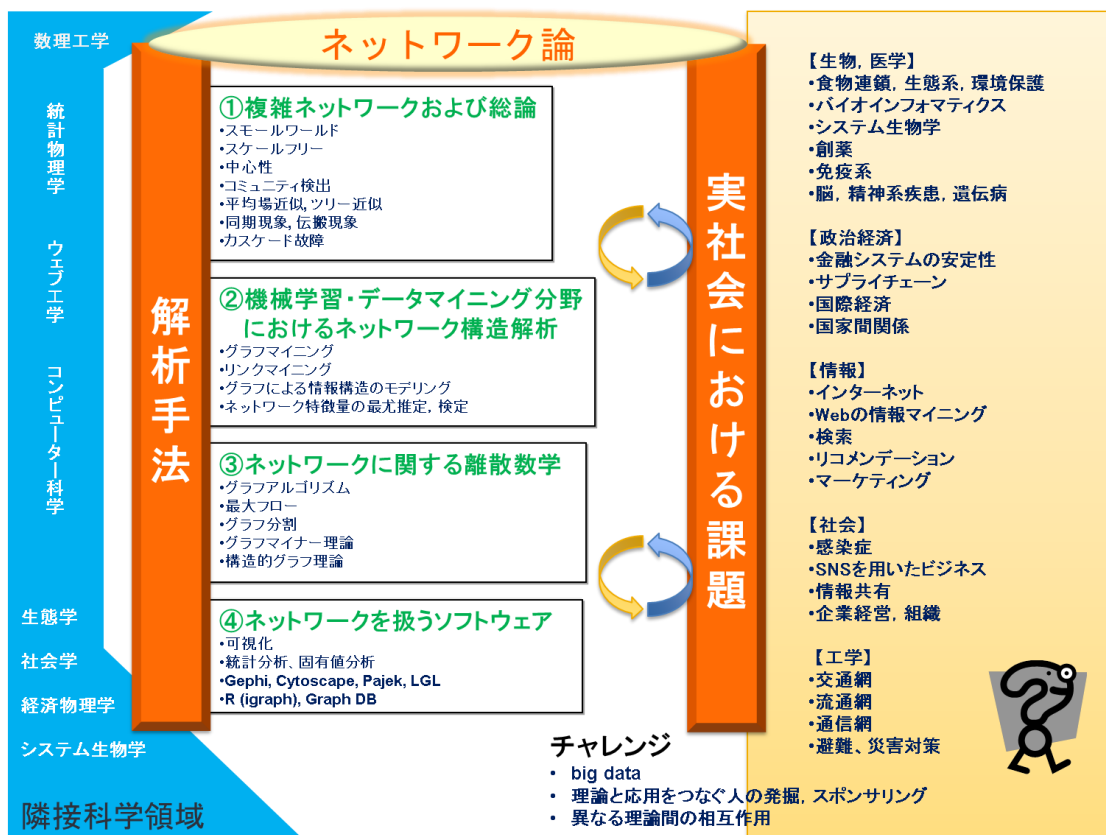


図 2.12 ネットワーク論区分俯瞰図

5) 複雑システム

「複雑システム」は、一般に多種多様な非線形要素が非線形相互作用するシステムであり、要素群と全体の間には階層的フィードバックを生じる。すなわち、全体は部分が集まって構築されるが、各部分は全体の性質で規定されるという階層的循環を生じる。したがって、要素還元論的理解も全体還元論的理解も、どちらか一方だけでは複雑システムを理解するために不十分である。

歴史的には、複雑システム研究の重要な背景となったのは、1948年に出版された W. Weaver の論文である (W. Weaver, Science and Complexity, American Scientist, 36, 536-544, 1948)。Weaver はこの論文の中で、17世紀以降の自然科学研究を、以下の3つに分類した。

- (1) 17世紀から19世紀にかけて主として行われた、少数変数の決定論的法則を研究する「単純さの問題」(Problems of Simplicity)、
- (2) 1900年前後から行なわれた、無数の変数からなる系の平均的挙動の確率・統計的法則を研究する「組織されない複雑さの問題」(Problems of Disorganized Complexity)、

俯瞰対象分野の全体像

(3) この論文が出版された 1948 年の時点において今後本格的に研究すべき問題として挙げられた「組織された複雑さの問題」(Problems of Organized Complexity)。

この(3)の「組織された複雑さの問題」が、今日的意味での複雑システムの研究に対応している。Weaver は、その具体例として、生命システム、経済システム、社会システム等を挙げるとともに、その研究のためには、第 2 次世界大戦中に開発が加速された電子計算機が重要な役割をはたすだろうと述べている。

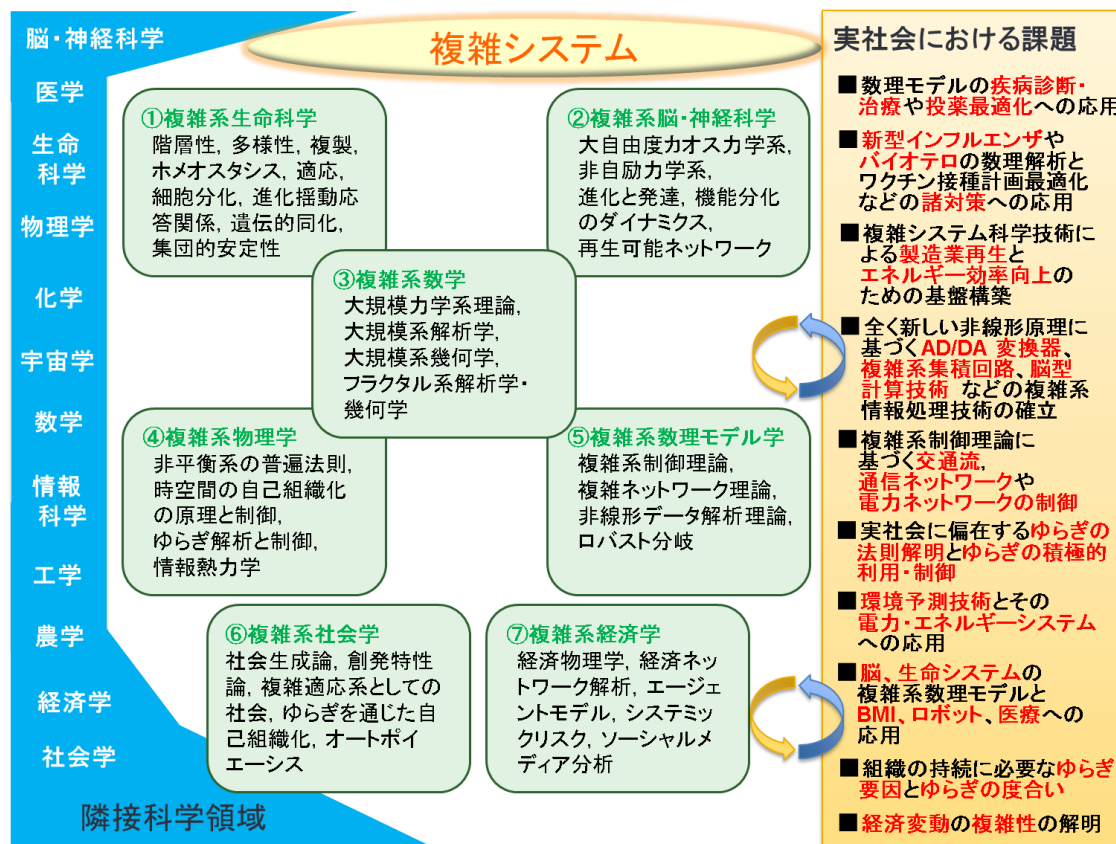


図 2.13 複雑システム区分俯瞰図

この Weaver の予想通りに、複雑システムは世界中で活発に研究されている。また、本俯瞰報告書のモデリング、制御、最適化、ネットワーク論等の俯瞰区分とも密接に関係しながら、複雑システム研究が発達してきている。

本俯瞰区分「複雑システム」では、以上の点を踏まえて、「①複雑系生命科学」、「②複雑系脳・神経科学」、「③複雑系数学」、「④複雑系物理学」、「⑤複雑系数理モデル学」、「⑥複雑系社会学」、および「⑦複雑系経済学」の 7 つの研究開発領域を設定し、各領域の第一人者による調査を行なった。図 2.13 に複雑システム区分俯瞰図を示した。

6) サービスシステム

サービス研究開発は、1980年代から、ホテル、旅行、交通、教育等の既存のサービス業を対象に、サービスの効率化、高収益化を狙ったマネジメントやオペレーションズ・リサーチの研究として、主にマーケティング分野で行われてきた(第1世代)。サービスマーケティングに代表されるように、この時代のサービスの研究は経営分野が対象である。1990年代に入り、IT技術の進展に伴い、情報ビジネスでサービスが注目を浴びてきた。ITサービスマネジメント、Service Oriented Architecture (SOA) 等、情報分野のサービス研究が始まり、情報技術者がサービス研究に取り組みだした(第2世代)。サービスは、マーケティングやIT等、システム科学とは異なる分野の研究開発領域と捉えられてきた。

21世紀に入り、Service-Dominant Logic (S-D Logic) というサービスに関する新しい概念が提案された。そこでは、サービスはサービス提供者とサービス利用者が価値を共創する行為と定義されている。サービスをサービス提供者とサービス利用者が価値を共創するサービスシステムとして捉え、システムの目的をサービス価値の最大化とすれば、サービスに対して、さまざまなシステム科学的な研究開発を行うことができ、これによってサービス化する産業の進展に大きな貢献ができると考える。すなわち、サービスを、顧客価値を最大化するサービスシステムと捉え、システム科学として研究開発しようというアプローチである(第3世代)。「サービスシステム」俯瞰区分では、この第3世代のサービス研究を対象にする。

本俯瞰報告書では、サービスシステムの研究開発を俯瞰するに当たり、既存の業種別の具体的なサービスやこれまでに開発が行われている個別の要素技術とは独立した、サービス価値創造システムを考える。そして、サービス価値創造システムの構造を明らかにして、その構成要素を研究開発領域名とする。図2.14にサービスシステム区分俯瞰図を表した。ここでは、サービスシステムを、3つの階層(レイヤ)で構成する。第1レイヤは、センシング等の要素技術と価値創造システムのインタフェースを構成する「①サービス価値創造基盤システム」である。サービス価値創造に必要なデータを収集しそれらを処理するツール群で構成する。第2レイヤは、中核としての価値創造プラットフォームであり、価値創造を実現するシステム的な要素技術群として、「②サービスシステムモデル」、「③価値創造過程のモデリング」、「④サービスデザイン」、「⑤価値共創の測定・評価」の4つの要素で構成する。第3レイヤは、価値創造プラットフォームの上位レイヤとして、さまざまなサービスの価値創造メカニズムの共通性に着目したタイプ別サービス価値創造システムを考える。ここでは、「⑥製品サービスシステム」(モノとサービスの融合による価値創造)、「⑦地域・コミュニティサービスシステム」(地域・コミュニティにおける価値創造)、「⑧対人サービスシステム」(対人サービスにおける価値創造)、「⑨ITサービスシステム」(ITサービスにおける価値創造)の4つの価値創造パターンを研究開発の対象とする。サービスシステム区分では、こうした視点に立って、国内外の研究開発動向を俯瞰する。

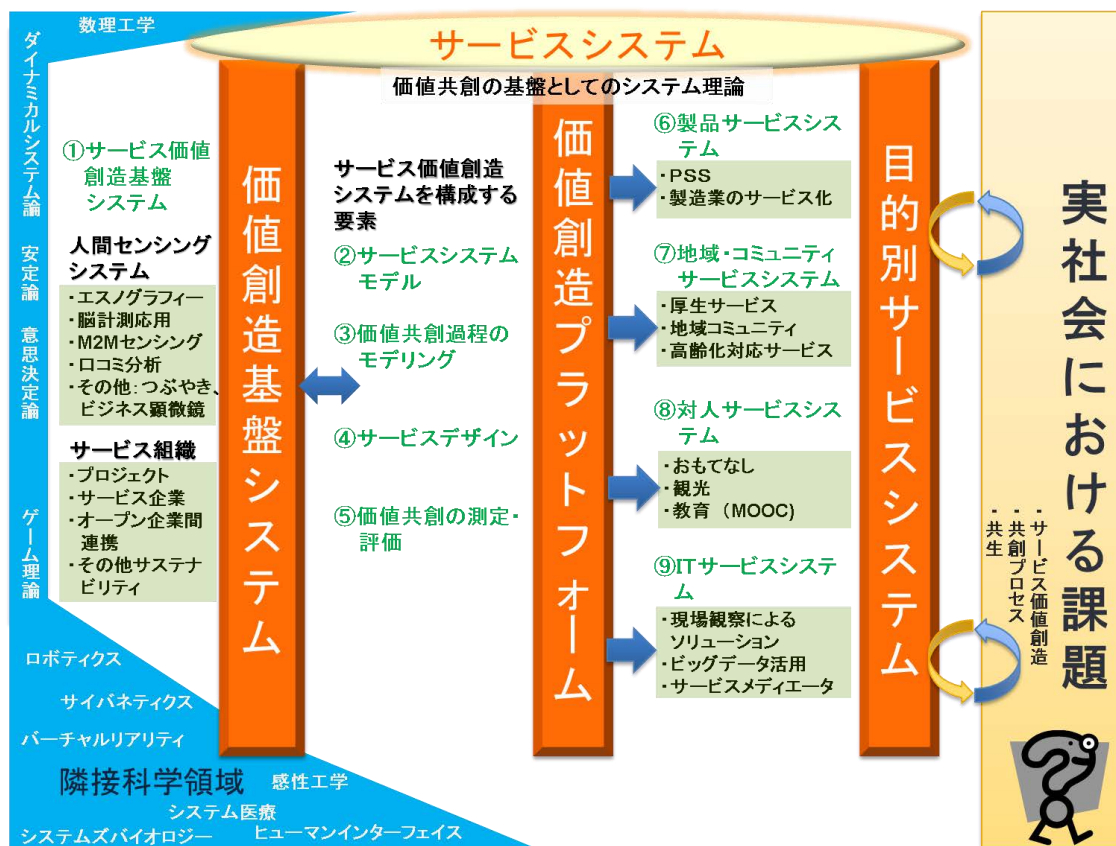


図 2.14 サービスシステム区分俯瞰図

7) システム構築方法論

「システム構築方法論」の分野は、1950年代にシステム工学 (System Engineering) の名の下で始まり、それ以降システム構築に関わるさまざまな方法、認識モデル、ツールが提示されているが、いまだに一つの学問体系として整理されておらず、また明文的に定義、統一され、定着した技術用語でもない。しかしながら、今日、システムは、巨大化、複雑化し、社会の隅々にまでますます深く浸透し、日々、われわれ人間の生活を豊かにしている。そのため社会にとって真に必要とされるよいシステムを構築し、適正に運用していくことが、これまで以上に強く求められている。その際、今日のシステムを取り巻く環境を次の3つの視点から認識することが重要である。

- (1) 価値の転換・創造: 社会が豊かになりモノが溢れる時代となり、人々の要求や満足は、単なるモノの所有から、モノの使用やイベントの体験等から生み出される精神的満足感 (これらはモノに対してコトと言われる) へと移っており、それら多くのコトはシステム構築によって実現されている。すなわち、システム構築が今日の価値創造の源泉となっている。
- (2) 社会技術との接点: システムが社会に広範に普及するに連れ、システムを取り巻く利害関係者 (Stakeholders) が膨大となり、その要求も多様化する。環境や技術制約を考慮しつつ、これら膨大な数の多様な要求をバランス良く満たすシステム構築が求められ、システム的设计、社会実装に当たり利害関係者との関係性マネジメントが重要

となっている。

- (3) SoS (System of Systems) の時代：システムは単に巨大化、複雑化するだけでなく、これまで単独で機能していたシステムもネットワークを介して相互に接続し、新しい機能・付加価値を生み出す一方、他のシステムとの相互作用や他のシステムを介して想定外のトラブルが拡大伝播するリスクが増大し、これまでと異なる様相を示している。

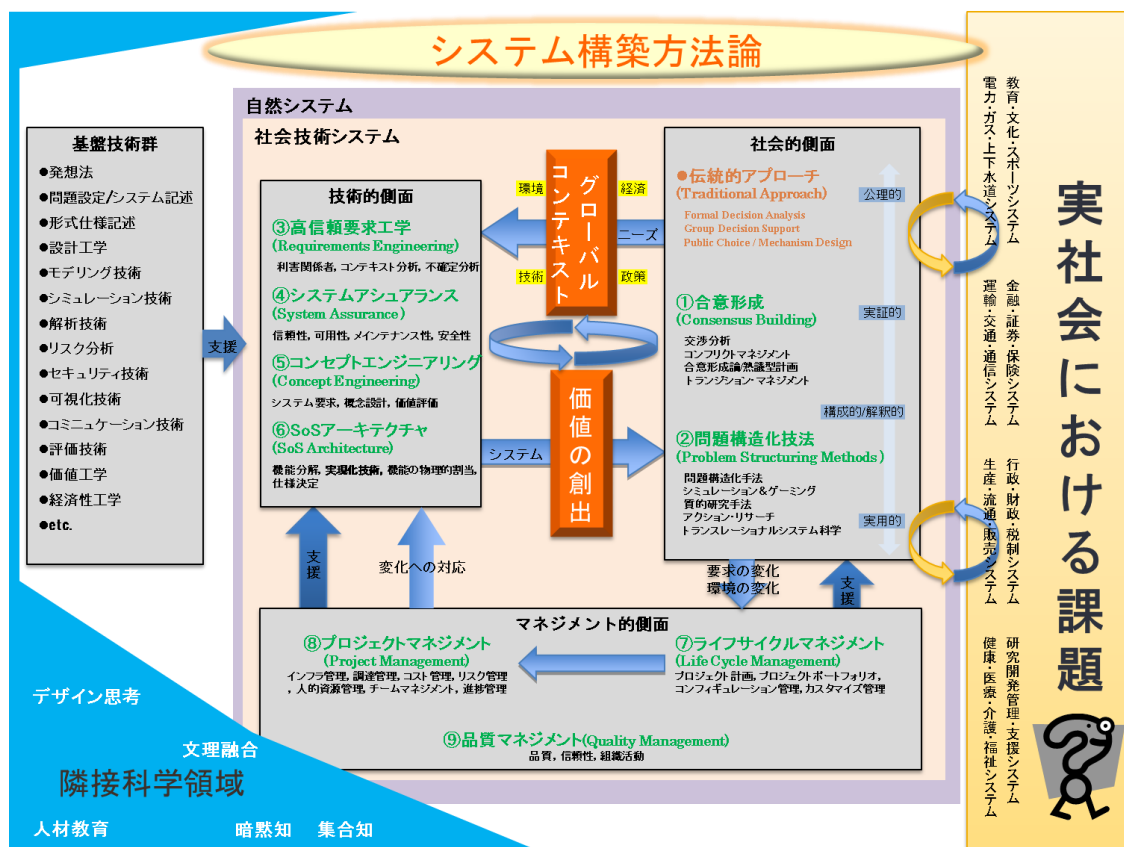


図 2.15 システム構築方法論区分俯瞰図

したがって、今日のシステム構築方法論は従来のシステム工学の範疇では説明しきれず、システム関連の国際協議会 INCOSE (The International Council on Systems Engineering) においても、システム工学 (System Engineering) ではなく、システムズエンジニアリング (Systems Engineering) と、複数形で呼称するようになっている。

システム構築は現実の課題に対してある種のソリューションを提供するものである。現実の社会における課題をどのような対象システム (System-of-interest) として捉え、どのように分析し (認識)、構成し (設計)、導入し (社会実装)、運用・保守するかについては、システムの目的、規模や複雑さ、システムの動作環境に大きく依存し、本質的に状況依存の傾向が強い。そこで、本俯瞰の中では、システム構築方法論をシステム構築の3つの側面、(i) 社会的側面、(ii) 技術的側面、(iii) マネジメント的側面から捉え、図 2.15 に示すように9つの研究開発領域を設定して、それぞれの領域において最新の動向を俯瞰した。いずれも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、また更なる深化が期待され

る一方で、その適用がシステム構築の段階や対象システムの特性・環境等に大きく依存するため、成熟した領域とそうでない領域との差が見られる。

この中で、(i) 社会的側面とは、現実の社会とシステムの工学的な設計（技術的側面）とをつなぐために必要となる方法論群である。具体的には、社会の期待やニーズを捉え、工学的仕様へと変換する局面、また具現化した実システムを社会に提供して社会的経済的価値を生み出す局面で、さまざまな利害関係者との関係を調整する活動・プロセスを支える科学技術の体系である。本俯瞰区分の研究開発領域としては、実社会の課題について、システム概念やシステムモデルを用いて、組織や集団・社会等、多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の把握・改善・解決を支援する「②問題構造化技法」と、人々が有する多様な見解や選好に関して相互理解を図りながら共通の理解や解決策に繋げる実践的かつ系統的な取り組みとそのプロセスとしての「①合意形成」の2つを取り上げた。

(ii) 技術的側面とは、実際にシステムを工学的に設計し、製造し、運用する際に必要となる方法論群である。設計、製造の面ではソフトウェア開発技法として体系化されてきた方法論を中核に取り上げつつ、システム構築への適用可能な方法論群を俯瞰した。実社会の課題解決には、課題の把握や利害関係者の特定を行い、SoSを考慮し対象システムが意図しない機能性をもつことを防ぎつつ、価値の最大化をもたらす全体アーキテクチャを設計することが重要である。通常であれば、システム境界（boundary）を定め、コンテキスト分析を行うことが可能であるが、対象システムの外側にある複数のシステムが不確実性をもって相互作用するため、グローバルにコンテキスト分析を行ない、不確実性を分析する「③高信頼要求工学」が必要となる。また、SoSとしての信頼性、可用性、メンテナンス性、安全性、セキュリティ、ディペンダビリティを確保する「④システムアシュアランス」により、リスクの分析やマネジメントが求められる。利害関係者の要求が明確化になると、価値創出の枠組みを形成する「⑤コンセプトエンジニアリング」が必要となる。続いて、システム間の相互作用、対象システムの機能特定、機能分析、実現化技術を考慮したシステム機能の物理的割当と、不確実性や変更対応に配慮した設計を導く「⑥SoSアーキテクチャ」が必要となる。

(iii) マネジメント的側面とは、システム構築のすべてのフェーズで、構築プロセスに関わる人や組織の活動をマネジメントする方法論群である。複雑で大規模なシステムの構築は、システムの計画段階と運用（オペレーション）段階に大別できる。計画段階では、対象システムに求められる機能を満足するシステム構成（アーキテクチャ）を構想・設計し、実システムを製造・設置する。システムの運用段階では、さまざまに変化する環境において実システムを稼働させ、常に要求を満たす機能の実現を図る。「⑦ライフサイクルマネジメント」は、システム機能を具現化する際の企画、設計、製造、運用、廃棄といったライフサイクルの各段階において、システムの実現性を確認し、進捗を管理するものである。「⑧プロジェクトマネジメント」は、システム構築プロジェクトを組織として成功へ導くための技術の体系である。「⑨品質マネジメント」は、顧客や社会のニーズを満たすシステム価値の提供と質の維持および構築プロセスで働く人々の満足を通して、組織の長期的な成功を目的に、各プロセスの維持向上、改善、革新を組織の全部門・全階層の参加を得て、内外の環境変化に適した効果的かつ効率的な組織運営を実現する活動である。

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歴史

システム科学技術における実用的側面（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、主として道具機と原動機、およびその両者を結ぶ伝達機の三つの要素からなることを観察し、機械はそうした要素が適切に組み合わせられた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そのようなシステム化は、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。その後自動車製造各社は、自動車部品（要素）の多様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（システム）を効率よく生産することに成功した。複雑さに対抗するための新たな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、販売等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。それに応じて 1930 年代から第二次世界大戦直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、計算アルゴリズム等の、主として人工物を対象とする一連の科学である（コラム 3 参照）。これらの科学の成立を「第三の科学革命」とよぶ人もいる。

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、一般システム理論等のシステム科学を生み出した。このような成果例を表 2.4 に記した。なお、「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 2.4 第三の科学革命の成果例

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	ハイゼンのサーボ機構の理論
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	ベルタランフィの一般システム理論
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科学はいっそう発展する。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（米国電気電子学会; 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。世界全体を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。同じ年にオーストリアに米国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、緊張緩和にも貢献があったと思われる。

その後、システム科学研究の中心に躍り出たのが「複雑適応系」という新しい領域を中心的な研究対象とした米国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。複雑適応系の特徴としては、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もち、自らを自己組織化して環境に適応しようとするなどがある。具体的には、組織・集団、経済、証券取引、生態系、脳、免疫、細胞等が挙げられる。21世紀の科学として着目されている複雑系（複雑適応系等も含む）に関する研究は、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、経済等のさまざまな分野に大きな影響を与えている。現代のシステム科学はこの流れの中にあるとあってよく、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の幅広い分野において成果を上げている。

わが国は、第二次世界大戦後の高度経済成長時代において、第三の科学革命の巨大な成果を取り入れ、一時は工業国として世界を代表するシステム力を有していた。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・リサーチやサイバネティクス等のシステム科学の積極的な導入のもと、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が国産で、敗戦後の日本復活を物語る誇るべき成果であった。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（Dendenkoshi 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、属人的な作業と思わ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行う方法を定着させた。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、産業用ロボット等において、1990年代初頭までは、わが国におけるシステム力は健在であった。しかしそれ以降、次第にその存在感は薄れ、要素技術にくらべてシステム科学技術の蓄積・進歩が産学ともに弱まってしまっている状況にある。

コラム 3：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で定着させた。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ッ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後にマンハッタン計画をはじめ米国の戦時研究を指導したヴァネヴァー・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、局所的な異常現象が電力網全体に与える影響を計算した。

微分解析機等のアナログ計算機は第二次世界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ことがわかる。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）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）や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等、経済的関心からもORの応用研究が進んでいる。

2.2.2 よいシステムの構築を通じた社会ニーズ、産業ニーズへの対応

前節でも述べたように、科学技術の成果を社会的価値を実現するイノベーションにつなげるには、多くの場合、システムを介することが必要である。工業製品だけでなく、交通機関や電気、水道、ガス等のライフライン、電話やインターネット等の通信など、さまざまな形のシステムがあらゆる側面でわれわれの生活を支えている。このような状況の中で、システムに要求される機能や性能は社会が発展していくにつれて高まり、それを満たすシステムはより複雑かつ大規模なものとなり、よいシステムを社会に構築していくためには数多くの新しい課題を解決しなければならないようになってきている。

システムと社会との関係を考える上では、2.1.1節で定義した「自然と人工」および「プロダクトとプロセス」によるシステムの分類とは別に、システムをその性質によって次の2つの型で考えると分かりやすい。自動車や家電、プラント等の機械的システムは、それ自体は社会の構造とは直接的には無関係に本来の機能を発揮することができる。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、最終的には限定された科学技術や企業等の枠内に閉じており、解決可能であることが多い。

一方、エネルギー供給や交通・通信等のインフラシステムや医療介護システム等では、サービスの供給側と需要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。つまり、これらの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、システム構築を進めなければならない。進める過程で状況が変化すれば、それに応じ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際に、2.1.2節で紹介した「システム構築の手順」におけるフェーズ1の取り組みがきわめて重要となる。

このように、オープン型のシステム構築は人間、社会との相互作用を考慮しつつ進めていかななければならないため、バウンダリー型の場合と比べるとその困難さが高いのは明らかである。もちろん、バウンダリー型のシステムにおいても、システムが個々のユーザにどう使われるかを考慮するとオープン型の側面が一举に拡大し、その社会性がクローズアップされる。このような状況も鑑みれば、国が戦略的に支援し目指さなければならないのは、困難の度合いやリスクの大きいオープン型のシステム構築であり、また、それを通じた科学技術イノベーションである。その過程において、システム科学技術には、社会的期待を実現するよいシステムと要素科学技術とを結びつける役割を果たすことが求められる。なお、表2.2に挙げた7つのシステムドメインは、こうしたオープン型のシステム構築が国の支援によって戦略的に実施されていかななければならない領域でもある。

2.2.3 各国における研究開発のためのビジョン、戦略、およびファンディングの状況

システム科学技術は分野横断性が高く、また、世界共通の定義が存在するわけでもないため、その研究開発に関する各国の研究ビジョン等を明確に知ることには困難が伴う。また多くの場合、システム構築の研究開発の中にシステム科学技術が埋め込まれている。したがって本節ではシステム構築とシステム科学技術に関する各国の研究開発の状況を合わせて概括する。

1) 日本

わが国では、過去5年ほどの間に新成長戦略(2010年6月)、第4期科学技術基本計画(2011年8月)、日本再生戦略(2012年7月)、科学技術イノベーション総合戦略(2013年6月)、日本再興戦略(2013年6月)、科学技術イノベーション総合戦略2014(2014年6月)、日本再興戦略改訂2014(2014年6月)等が閣議決定されているが、そのいずれにおいても科学技術による社会的な「課題解決/達成」が掲げられている。こうした課題解決/達成を実現する上で、オープン型のシステム構築が大きな役割を果たすであろうことは前節で述べた通りである。

科学技術イノベーション総合戦略および科学技術イノベーション総合戦略2014においては、5つの政策課題(エネルギー、健康寿命、次世代インフラ、地域資源、復興再生)の解決に向けて、「スマート化」、「システム化」、「グローバル化」の3つの戦略的視点を踏まえて取り組みを実行していくこと、とされている。この中で、システム化については製品・技術を単体ではなく、組み合わせてシステム化し、高付加価値化して市場展開を進めていくべきことが指摘されている。

2014年より科学技術イノベーション総合戦略等に基づき2つの大型のファンディングプログラム、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)と革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)が創設された。これらのプログラムにおいても実用化までを見通した課題解決型の研究開発が求められており、わが国の研究開発において、システム化の重要性に対する認識は高まってきていると言える。SIPにおける10課題のうちの一つ「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関して言えば、高度なインフラマネジメントの実現ためにシステム化が重要であることが科学技術イノベーション総合戦略2014にも記されている。

一方で、わが国においてはシステム化に必要となるシステム科学技術そのものに関する認識はそれほど高いとは言えない。システム科学技術分野の一部としてもみなせる領域、例えば制御工学やサービス科学といった領域へのファンディングは独立行政法人日本学術振興会(JSPS)やJST等により行われているが、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、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による事業等で行われているが、環境・エネルギー、電子・情報通信、機械システム分野等における実用化段階に近い個別的な領域に対してのことが多い。

このような中、第4期科学技術基本計画においては「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、融合領域の科学技術として、その研究開発を推進していくことの重要性が指摘された。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、システム科学技術と密接に関係する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、システム科学技術を今後振興していく上で大きな一歩となった。また、本 CREST 領域の研究開発の推進方法においては、ステージゲート方式等、よいシステムの構築を目指した統合的・競争的なスタイルが新しく試みられており、今後の成果が期待される。

2) 米国

システムの複雑性の際限ない増大についての問題が注目されてきており、それに対応するための概念の構築や手法の開発が近年活発に進められている。「システムのシステム」、「ビッグデータ」、「サイバーフィジカルシステム」等はシステムの複雑性、オープン型システムに関連する典型的な研究対象である。

近年、米国科学財団（National Science Foundation: 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」を導入した。この枠組みの中で「Cyber-enabled Materials, Manufacturing, and Smart Systems (CEMMSS)」プログラムが 2012 年度から運営されており、2014 年度は 2.6 億ドルの予算が割り当てられている。理学、工学分野のさまざまな研究活動を統合化することによって、物質科学、先進製造技術、ロボティクス、サイバーフィジカルシステム等の領域におけるブレークスルーを見出すことが目的とされている。

NSF の工学局にはシステム科学 (Systems Science) を一つの領域としてとらえたファンディングプログラムが存在する。工学局の 2015 年度予算要求 8.6 億ドルのうち、2.1 億ドルは Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation (CMMI) Division に割り当てられている。また、CMMI Division の下にある 4 つの分野のうち、Systems Engineering and Design (SED) では、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。2014 年現在、SED では以下の 5 つの領域に対してファンディングが実施されており、この中に Systems Science がある。

- Engineering and Systems Design
- Operations Research
- Sensors, Dynamics, and Control
- Service Enterprise Systems
- Systems Science

前回の 2013 年版俯瞰報告書作成時点では上記の Systems Science 領域はなかったことから、この領域追加は NSF のシステム科学に対する認識の高まりを示している。

NSF の Engineering Research Centers (ERC) プログラムは米国の産業競争力強化のために、大学に拠点を設立し、異分野融合を促進しつつ効率的なシステム構築を目指す特色あるプログラムである。1985 年の創立以来、時代の変化に応じてその内容を徐々に変更しつつも現在まで続いており、NSF を代表するファンディングプログラムの一つとなっている。このプログラムでは最大で 10 年間という長期間にわたって、1 年あたり約 400 万ドルの支援が続けられる。

米国大統領への科学技術に関する勸告機関である PCAST (President's Council of Advi-

sors on Science and Technology) は、2014年5月に“Better health care and lower costs: Accelerating improvement through systems engineering”と題する勧告書をオバマ大統領に提出した。現代の米国が直面する最も深刻な社会問題の一つである医療制度に関連して、Systems Engineering（日本語のシステム工学よりも広い意味を含む）を活用し、医療費の低減と医療の質を高度化させることを勧告している。

3) 欧州

欧州では、欧州委員会による第7次研究枠組み計画（FP7、2007年～2013年）において、FuturICTプロジェクトが2011年から開始された。このプロジェクトでは、持続可能性やレジリエンスの観点を重視した上で、複雑かつグローバルで、社会との相互作用があるシステムを理解、構築し、さらに管理することを目的としていた。FP7におけるパイロット研究の後、FP7の後継プログラムであるHorizon 2020（2014年～2020年）において、10年間で10億ユーロ規模のファンディングプログラムであるFuture and Emerging Technologies（FET）Flagshipsの獲得を目指して活動が進められていたが、その選考においては落選することになった。しかしながら、FuturICT全体構想の一部であった地球社会シミュレーターに関するプロジェクトはHorizon 2020 FET Proactiveのカテゴリーにおける3つのInitiativesの一つであるGlobal Systems Science（GSS）において引き継がれることになった。Horizon 2020のWork Programme 2014-2015においてGSSは1,000万ユーロの予算を獲得している。

ドイツでは、教育研究省（BMBF）による研究開発およびイノベーションのための包括的な戦略である2011年からの「ハイテク戦略2020」におけるアクションプランとして、未来プロジェクト「Industrie 4.0」が推進されている。Industrie 4.0ではサイバーフィジカルシステムを基盤とし、工場内外のモノやサービスを関係させることで、新しい価値やビジネスモデルを創出する次世代製造業のための研究開発が進められている。Industrie 4.0における分野横断的な課題として、「標準化」や「複雑なシステムのモデル化」等が掲げられており、まさにシステム科学技術が必要とされるプロジェクトとなっている。なお、ハイテク戦略2020の後継にあたる、2014年に発表された「新ハイテク戦略」においてもIndustrie 4.0は引き続き推進されている。

Industrie 4.0に関連して実施されている代表的なファンディングプロジェクトの一つとしては、連邦政府による先端クラスター競争プログラムit's OWL（Intelligent Technical Systems Ost-Westfalen Lippe）がある。スマートファクトリー構築等の主要な研究課題に対して、システム工学や自己最適化等に関する、システム科学技術とも関連性の高い研究プロジェクトが推進されている。連邦政府からは5年間で計2億ユーロが支援され、参加企業には同額以上の出資が求められるマッチングファンドである。

フランスでは、「国の研究・イノベーション戦略」（SNRI、2009年～2012年）における「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、重要トピックスとして掲げられた。これらのトピックスは、国立研究機構（ANR）により、ICT分野の「デジタルモデル（MN）」というファンディングプログラム領域で2013年まで公募の対象になっている。MNプログ

ラムでは複雑システムのモデリング、シミュレーションやデザイン、最適化等の研究が特に求められている。

SNRI が分野別振興型の戦略であったのに対し、それに続く戦略として位置づけられている 2013 年および 2015 年に発表された France Europe 2020 では社会的課題の解決に向けた戦略がとられている。システム科学技術が特に必要とされる社会的課題としては「省資源管理と気候変動への適応」や「持続可能な輸送・都市システム」などがある。また、5 項目のテーマ別計画の一つとして「システム生物学とその応用」が取り上げられている。

4) 中国

中国では、国家中長期科学技術発展計画（2006 年～2020 年）および第 12 次 5 カ年計画（2011 年～2015 年）に国の科学技術政策に関する重要な方針が示されている。国家中長期科学技術発展計画においては、科学における先端的課題として「純粋数学及びその学際分野での応用」、国家の重大な戦略ニーズに対応した基礎研究として「複雑システム、突発災害およびそれらに対する予測制御」など、システム科学と関連の深いテーマも掲げられている。中国国家自然科学基金委員会（NSFC）では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、NSFC の Department of Information Science と Department of Management Science が一般プログラムにおけるシステム科学分野のファンディングを担当している。過去には NSFC による意思決定に関するシステム研究の大型プロジェクト「Metasynthetic systems with combination between man and machine for decision support of macroeconomics」（1999 年～2003 年）が実施されている。

5) 韓国

韓国では、第 2 次科学技術基本計画（2008 年～2012 年）に基づき、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、融合新産業の育成等を目的とした「国家融合技術発展基本計画（2009 年～2013 年）」が策定された。融合技術は統合化のために必要となるシステム科学技術と重なっている部分が多い。第 3 次科学技術基本計画（2013 年～2017 年）では「スマート物流・交通システムの構築」、「国土インフラの先進化」、「社会的災害対応システムの確保」等の推進課題がシステム科学技術と関連して注目される。

2.2.4 研究者コミュニティ（関連する研究機関、学会など）

システム科学技術に関連する研究者コミュニティ、組織は非常に多岐にわたるが、その中でも比較的規模の大きい、あるいは関連性の高いものを以下に挙げる。

1) 日本

システムの名がついた比較的規模の大きな研究機関として情報・システム研究機構が存在する。本研究機構においてはモデリングやサービス科学等、本報告書で取り上げている俯瞰区分とも関連した研究組織が個別には設置されているが、システム科学といった、より大きな枠組みでの研究部門はまだできていない。学科（専攻）、センターレベルでシステム科学技術に対する取組みが進められている大学としては東京大学、京都大学、東京工業大学、筑波大学、慶応義塾大学、北陸先端科学技術大学院大学、秋田県立大学等が挙げられる。

関連学会（会員概数）としては、電子情報通信学会（31,100名）、情報処理学会（19,600名）、日本物理学会（17,400名）、計測自動制御学会（6,100名）、プロジェクトマネジメント学会（3,300名）、人工知能学会（3,200名）、日本品質管理学会（2,400名）、日本オペレーションズ・リサーチ学会（2,000名）、日本応用数理学会（1,600名）、日本統計学会（1,500名）、システム制御情報学会（1,300名）、日本知能情報ファジィ学会（900名）等が挙げられる。

2) 米国

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)、MITRE(MITから1958年にスピアウトした研究開発NPO)、ベル研究所(Bell Laboratories)、ランド研究所(RAND Corporation)、国際一般システム研究研究所(International Institute for General Systems Studies; IIGSS)、国際システム研究所(International Systems Institute; ISI)等の研究機関でシステム科学技術に関連した研究開発が活発である。関連学会としては、米国電気電子学会システムカウンシル(IEEE Systems Council)が特に重要である。ここは、ソフトウェア生産性やシステム科学技術等に関する研究成果の主要な発表先となっている。

3) 欧州

欧州全般に関係する研究機関としては、国際応用システム分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis; IIASA)が有名である。まだ冷戦期にあった1972年、東西両陣営の主要国が中立的に参加することを目指す非政府系の国際研究所としてオーストリア国内に設置された。ここは、グローバルな課題に対してシステム科学的アプローチで取り組んでおり、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も用いられている。

英国ではアイザック・ニュートン研究所(Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences)がよく知られている。さまざまな分野に対する数理科学を用いた基礎研究が多く行われているが、その中にはネットワーク科学や複雑システム等、本報告書の俯瞰区分とも関連した研究も含まれている。

ドイツではフラウンホーファーシステム・イノベーション研究所(Fraunhofer Institute

for Systems and Innovation Research) やマックス・プランク複雑技術システムダイナミクス研究所 (Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems)、マックス・プランク複雑系物理学研究所 (Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems) 等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。とりわけ、複雑システムに関連した研究に強みをもつ。

フランスではフランス国立科学研究センター (National Center for Scientific Research; CNRS) の中に解析・システムアーキテクチャ研究所 (Laboratory of Analysis and Architecture of Systems; LAAS) および情報学・統計システム研究所 (Institute for Research in IT and Random Systems; IRISA) が設置されている。LAAS ではネットワーク科学、意思決定と最適化、IRISA では大規模システム、ネットワークとサービスといったシステム科学技術に関する研究も行われている。

4) 中国

1979 年に中国科学院 (Chinese Academy of Sciences; CAS) のシステム科学研究所 (Institute of Systems Science; ISS) と上海理工大学の上海システム科学研究院が設立され、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, CAS; CASIA) も自動化と情報科学に関する中国を代表する研究機関である。

5) 韓国

韓国では、ドイツの Max Planck Institute を目指して、Institute for Basic Science の中に、すでに 20 以上の研究センターを設置している。その中には、複雑システムに関係する研究センターも含まれている。また、大邱・慶北科学技術院 (DGIST) には CPS グローバルセンターが設置されている。

なお、日本、海外におけるシステム科学技術に関連する研究機関、学会を以下の表 2.5 から表 2.8 にまとめた。繰り返しになるが、システム科学技術は分野横断性が高いため関連する組織は多岐にわたり、関連性の強弱を考慮しなければ、この表に含まれていない組織も多くあることには留意しておく必要がある。ただし、第 3 章の各区分における研究開発領域の文章中に言及がある組織については、参考のために、組織名の後ろにそれらの区分を次のように略記した。モデリング… (モ)、制御… (制)、最適化… (最)、ネットワーク論… (ネ)、複雑システム… (複)、サービスシステム… (サ)、システム構築方法論… (構)。

表 2.5 システム科学技術に関連する日本の研究機関（五十音順）

- ・秋田県立大学システム科学技術学部
- ・九州大学マス・フォア・インダストリ研究所（最、複）
- ・京都大学数理解析研究所（複）
- ・京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻
- ・京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻
- ・慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
- ・産業技術総合研究所サービス工学研究センター（サ）
- ・情報・システム研究機構統計数理研究所（モ、複）
- ・筑波大学大学院システム情報工学研究科社会システム工学専攻
- ・筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻
- ・筑波大学大学院ビジネス科学研究科経営システム科学専攻
- ・東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻
- ・東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻
- ・東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
- ・東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻
- ・東京大学工学部計数工学科
- ・東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（複）
- ・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（複）
- ・東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
- ・東京大学大学院工学系研究科レジリエンス工学研究センター
- ・東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻
- ・東京大学大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻
- ・東京大学複雑生命システム動態研究教育拠点（複）
- ・東北大学原子分子材料科学高等研究機構（複）
- ・北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科（サ）
- ・北海道大学数学連携研究センター（複）
- ・明治大学先端数理科学インスティテュート（複）
- ・理化学研究所生命システム研究センター（複）
- ・理化学研究所脳科学総合研究センター（モ）
- ・早稲田大学意思決定研究所（モ）

表 2.6 システム科学技術に関連する海外の研究機関（国・地域ごとにアルファベット順）

米国：

- ・ Center for Services Leadership, Arizona State Univ. (サ)
- ・ Center for Excellence in Service, Univ. of Maryland (サ)
- ・ Division of Systems Engineering, Boston Univ.
- ・ Institute for Systems Research, Univ. of Maryland
- ・ MIT Engineering Systems Division
- ・ MIT Media Lab (サ)
- ・ MITRE
- ・ New England Complex Systems Institute (NECSI) (複)
- ・ Santa Fe Institute (複)

欧州：

- ・ International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

英国：

- ・ Cambridge Service Alliance (サ)
- ・ Data Assimilation Research Centre (DARC), Reading Univ. (モ)
- ・ Institute for Complex Systems Simulation (ICSS), Univ. of Southampton
- ・ Institute of Mathematics and its Application (IMA) (モ)

ドイツ：

- ・ Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research
- ・ Institute of Complex Systems, Forschungszentrum Jülich (複)
- ・ Köln International School of Design (KISD) (サ)
- ・ Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization (複)
- ・ Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems (複)
- ・ Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems (複)
- ・ Zuse Institute Berlin (ZIB) (最)

フランス：

- ・ Institute for Research in IT and Random Systems (IRISA), National Center for Scientific Research (CNRS)
- ・ Laboratory of Analysis and Architecture of Systems (LAAS), CNRS

スウェーデン：

- ・ ACCESS Linnaeus Centre, KTH (制)
- ・ Service Research Center, Karlstad Univ. (サ)
- ・ Technical Research Centre of Finland (VTT) (サ)

中国：

- ・ Academy of Mathematics and Systems Science (AMSS), Chinese Academy of Sciences (CAS) (制)
- ・ Beijing Computational Science Research Center (複)
- ・ Institute of Automation, CAS (CASIA) (制)
- ・ Institute of Systems Science (ISS), AMSS, CAS
- ・ National Center for Mathematics and Interdisciplinary Sciences (NCMIS), CAS (モ)

韓国：

- ・ Cyber Physical Systems Global Center, DGIST
- ・ Institute for Basic Science（複）
- ・ National Institute for Mathematical Sciences (NIMS)（複）
- ・ Nonlinear and Complex System Laboratory, POSTECH（複）
- ・ Statistical Research Center for Complex Systems, Seoul National Univ.（複）

表 2.7 システム科学技術に関連する日本の学会（五十音順）

- ・ 計測自動制御学会（制）
- ・ サービス学会（サ）
- ・ サービス産業生産性協議会（サ）
- ・ システム制御情報学会
- ・ 情報処理学会（ネ）
- ・ 人工知能学会（サ）
- ・ 精密工学会
- ・ 電気学会
- ・ 電子情報通信学会（モ、ネ、サ）
- ・ 日本応用数理学会（モ）
- ・ 日本オペレーションズ・リサーチ学会
- ・ 日本感性工学会
- ・ 日本経営工学会
- ・ 日本シミュレーション学会
- ・ 日本信頼性学会
- ・ 日本ソフトウェア科学会
- ・ 日本知能情報ファジィ学会（モ）
- ・ 日本統計学会（モ）
- ・ 日本バーチャルリアリティ学会（サ）
- ・ 日本品質管理学会（構）
- ・ 日本物理学会（ネ）
- ・ 日本マーケティング・サイエンス学会
- ・ 日本ロボット学会
- ・ ヒューマンインタフェース学会
- ・ プロジェクトマネジメント学会

表 2.8 システム科学技術に関連する海外の学会（国・地域ごとにアルファベット順）

<p>国際：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Complex Systems Society (CSS)（複） ・ Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS)（最） ・ International Academy for Production Engineering (CIRP)（制） ・ International Council on Systems Engineering (INCOSE)（構） ・ International Federation of Automatic Control (IFAC)（制） ・ International Fuzzy Systems Association (IFSA)（サ） ・ International Society for the Systems Sciences (ISSS) ・ Mathematical Optimization Society (MOS) <p>米国</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ American Marketing Association (AMA)（サ） ・ American Mathematical Society (AMS)（ネ） ・ American Society for Quality (ASQ)（構） ・ American Statistical Association (ASA)（モ） ・ Association for Computing Machinery (ACM)（制） ・ IEEE Computational Intelligence Society (CIS)（モ） ・ IEEE Control Systems Society (CSS)（制） ・ IEEE System, Man, and Cybernetics Society (SMC)（モ、サ） ・ IEEE Systems Council ・ Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)（モ、最） <p>欧州：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ European Mathematical Society (EMS)（モ） ・ European Organization for Quality (EQQ)（構） ・ International Project Management Association (IPMA)（構） <p>ドイツ：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM)（モ） <p>フランス：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Society for Applied and Industrial Mathematics (SMAD)（モ） <p>中国：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ China Society for Industrial and Applied Mathematics (CSIAM)（モ） ・ Chinese Association of Automation (CAA) ・ Chinese Society of Optimization & Overall Planning and Economical Mathematics (CSOOPEM) ・ Operations Research Society of China (ORSC) ・ Systems Engineering Society of China (SESC) <p>アジア：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Asian Network for Quality (ANQ)（構）

2.2.5 各俯瞰区分の研究開発に関する各国・地域の現状

本節では、国・地域ごとの各俯瞰区分における研究開発の現状について、第3章「研究開発領域」で記述されている特に重要な内容を以下にまとめた。

1) 日本

・モデリング

理論研究は伝統的に強く、日本の産業技術を世界トップレベルに押し上げた遠因でもある。研究者数は米国と比べると少ないが、基礎研究は現在でも世界トップレベルにある。産業化は米国よりは遅れているが、少しずつ始まっている。JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」および、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」が2014年度に発足し、モデリングの基礎研究に対する大きな公的支援が始まったところである。

・制御

全般的に米国、欧州に次ぐレベルである。応用、産業化フェーズの研究開発が弱い。学習/適応制御、異常検出の基礎研究のレベルは高いが、研究者層は薄い。ロバスト制御に関しては黎明期に世界的な研究成果を上げている。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」が進行中であり、これに関連した制御関連の論文数が増加傾向にある。

・最適化

大学や研究機関での基礎研究のレベルは総じて高く、内点法、劣モジュラ関数最適化、半正定値計画等で世界トップレベルの成果も出しているが、応用研究や産業界での研究者が手薄で産業化が遅れている。大学等の研究者が産業界の実問題に触れるような施策が望まれる。

・ネットワーク論

全般的に米国、欧州に次ぐレベルである。基礎研究に関しては、データマイニング技術や離散数学等で顕著な成果を上げてきている。また2012年10月よりERATO「河原林巨大グラフプロジェクト」がスタートし、コンピュータ科学の若手研究者の参入が進んでいる。

・複雑システム

基礎、応用研究に関しては米国、欧州とともに世界をリードする成果を上げてきている。近年では第4期科学技術基本計画において数理科学、科学技術イノベーション総合戦略および健康・医療戦略においてBMI研究やiPS細胞による幹細胞研究等が言及されていることもあり、国家レベルによる振興策がとられている。また、ERATO、FIRST、新学術領域研究等の大型のファンディングプログラムにおいて複雑系に関する研究テーマが継続的に採択されてきている。外国為替市場や企業ネットワーク分析に関して質、量ともによいデータに基づいた重要な基礎研究成果も出てきている。

・サービスシステム

サービスシステム概念モデルの構築やデザイン研究の着手など、基礎研究の着実な推進がうかがえる。2012年のサービス学会設立等、研究者コミュニティの基盤は整いつつあるが、研究活動全体としてはまだアクティビティが高いとはいえない状態であり、今後さらなる発展が望まれる。

- ・システム構築方法論

全般的に一定の研究成果を出しているが、自動車等一部の例外を除き産業化が大きく遅れ、社会的認知度は低調である。ただし、品質マネジメント領域は世界をリードしている。また、問題構造化技法、形式アシュアランス、プロジェクトマネジメントは基礎研究で世界的にも一定の存在感を示す。

2) 米国

- ・モデリング

基礎、応用研究で世界をリードしている。NSF や NIH からビッグデータ、脳科学、システム生物学等におけるモデリング技術の基礎研究に対して多額の研究費が投じられている一方、国防、宇宙開発、気象・海洋の研究においても各省の独自予算で大規模に基礎研究が進められている。モデリングツールとしてのソフトウェアやコンサルテーション事業等の産業も多く存在する。

- ・制御

基礎、応用、産業化のすべてのフェーズで世界をリードしている。IEEE の Control Systems Society を中心に 5 つの Society が連携して 2014 年に Transactions on Control of Network Systems を創刊しており、勢いに衰えが見えない。航空・宇宙分野での応用研究も盛んである。自動コード生成ソフトウェア CVXGEN が大学で開発・公開されている。

- ・最適化

世界中から優秀な人材を集め、厚い研究者層に支えられ、基礎、応用、産業化のいずれの面でも世界をリードしている。主要な商用計算ソフトウェアは米国発のものが多く、IBM、Microsoft、Yahoo!、Google といった企業が積極的にこの分野の研究者を採用しビジネスに活用するなど、企業経営者にも最適化等の技術を積極的経営に取り入れる素地がある。日本と文化風土の違いが大きすぎる。

- ・ネットワーク論

1990 年代の終わりにネットワーク科学の幕開けとなった論文を米国の研究者らが発表して以来、基礎、応用、産業化のすべてのフェーズで他国を圧倒的にリードしている。Google、Twitter、Facebook、LinkedIn 等の主要なソーシャルメディアの多くは米国発でもあり、これらで用いられる応用技術の開発も活発である。

- ・複雑システム

基礎、応用、産業化のすべてのフェーズにおいて世界をリードしている。サンタフェ研究所はその設立以来、複雑系研究の発展に大きく貢献してきている。また主要大学には複雑系に関する研究グループが多数組織されており、活発に研究が進められている。オバマ大統領の一般教書演説では数学・数理科学の振興に注力することが力説されている。NIH では Brain Initiative が進められており、脳神経科学研究の振興が活発である。金融分野の基礎研究で成果を上げた研究者がクオンツ等の形でヘッジファンド、金融業界に進出し、産業化とも結びついている。

- ・サービスシステム

全領域にわたり、教育機関ならび企業が積極的な研究開発を推進し、欧州とともにこ

の領域を牽引している。ICT を利用したデータの蓄積技術や分析技術の研究、スマートシティに代表されるビジネス展開等を積極的に推進している。

- ・システム構築方法論

基礎、応用、産業化のすべての面で圧倒的に先行している。国際標準や大学での人材育成も活発である。日本のお家芸であった品質マネジメントでも日本を急追してきている。問題構造化技法等、ごく一部の領域で、基礎研究が低調なものとなっている。

3) 欧州

- ・モデリング

脳科学、ゲノム構造解析等の生物学関係、および、マーケット分析において数理モデルの研究が進んでいる。気象・海洋学におけるデータ同化の基礎研究は米国と並んで世界トップクラスである。産業界におけるモデルベース開発は欧州が先行しており、開発ツールの標準化等の環境整備が始まっている。

- ・制御

全般的に米国についてレベルが高い。ロバスト制御の基礎研究、学習/適応制御の応用研究および産業化においては米国以上に研究成果が出ている部分もある。データ駆動型制御器チューニングの応用開発や PID のオートチューニングのパッケージ化と産業応用等が活発に行われている。福祉、医用機器への産業応用も進んでいる。

- ・最適化

国ごとに強い領域にばらつきがあり、欧州全体としてみると日本と同程度あるいは少し先を行くレベルにある。基礎だけでなく、応用、産業化も盛んである。欧州を通じて連携した人材育成や各国政府支援の社会課題プロジェクトがあり、このままでは日本がさらに遅れを取る可能性が高い。

- ・ネットワーク論

米国に次ぐ力を備えている。とりわけ基礎研究のレベルが高い。NETWORKS、MULTIPLEX、PLEXMATH 等、ネットワーク科学に関する大規模プロジェクトが複数ある。生体ネットワークや薬剤-標的間ネットワーク等をターゲットとしたネットワーク解析に関する応用研究も活発に行われている。

- ・複雑システム

基礎研究ではすべての領域において顕著な研究成果を上げてきており、米国や日本を上回っている部分も少なくない。欧州各国に複雑系関連の研究所、センター等が多くみられる。ドイツや英国ではその傾向が特に強く、活発に研究が進められている。金融機関の連鎖的な危機につながるシステムリスクの応用研究にも強みがある。

- ・サービスシステム

FP7 や Horizon 2020 等における大型のファンディングプログラムの下で多くの研究者が地道な基礎研究に取り組み、米国とともにこの領域を牽引している。基礎研究の成果が、産業化をにらんだ研究へと展開されているとともに、さまざまな技術に関する国際標準化も推進されている。

- ・システム構築方法論

米国と同様に、基礎、応用、産業化のすべてのフェーズで世界をリードしている。伝

統的に基礎研究に強みをもっていたが、近年、応用研究面の強化が目立つ。現在、産業化を強化するプロジェクトが多数進行中である。ただし、品質マネジメントの基礎研究が弱点になっている。

4) 中国

・モデリング

数学のレベルが伝統的に高く、中国科学院数学・システム科学研究院に「数学と分野横断科学に関する国立センター」(NCMIS)を設置して数理モデリングと諸科学の連携を強化している。2012年の政府通知では、ビッグデータ分析ソフト開発と活用サービス創出を重点支援対象に指定している。

・制御

非線形系への適応制御等、理論の発展的研究が活発に行われている。また、米国や欧州等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。中国科学院数学・システム科学研究院を中心に活発に理論研究が実施され、論文数も増加しているが、その質に関しては玉石混濁である。ただし、数学レベルの向上は顕著ともいえる。

・最適化

全体的にはまだそれほどレベルは高くはないが、研究者の多さ、欧米で活躍する中国人研究者との連携や優秀な研究者の帰国等により、基礎研究面では急速に力をつけてきている。応用研究、産業化は未だ途上にある。国家計画立案に使われる傾向がある。精華大学の理論計算機科学研究所の設立や世界1位のスパコン開発等、政府の力強い支援があるため、将来は日本の強力なライバルになりうる。

・ネットワーク論

基礎研究の論文数が増えてきているが、全般的に研究開発のレベルは高いとはいえない。

・複雑システム

基礎研究の成果が上がってきている。中国科学院、北京大学、上海大学等、多拠点で複雑系に関連した研究組織が設置されている。米国で活躍していた研究者を呼び戻し、膨大な研究資金が投入されている。社会・経済分野においては中国市場のデータとして利用者ID付のものが研究に使われており、他の国では実施できないレベルの研究につながっている。

・サービスシステム

現状では、特記すべき事項はみあたらない。

・システム構築方法論

ようやく研究成果が出始めた段階で、まだまだ低調である。応用研究が中心となっている。産業化は不明であるが、国家プロジェクト等には適用されている。

5) 韓国

・モデリング

欧米に多くの学生やポスドクが進出しており、帰国した研究者が国内の研究を牽引していると考えられる。2012年「ビッグデータマスタープラン」が発表され、公共デー

タの公開等、国家規模の政策的取組みが行われている。圧縮センシングは応用分野が広いが、特に信号処理関連の応用研究が多いように見える。

・制御

線形システムの予測制御に関する基礎研究で伝統がある。また、基礎、応用、産業化のすべてのフェーズにおいて異常検出に関する研究開発に強みがある。大学、企業ともに海外からも人材を集めており、特に半導体や鉄鋼分野での産業化のレベル向上が著しい。

・最適化

計算機科学、離散数学では優れた研究者がいるが、全体的には低調である。製造業で大規模な最適化計算を利用するプロジェクトが開始されている。

・ネットワーク論

全般的に日本よりもレベルが低い。ただし、優秀な統計物理学者がかなりの割合でネットワーク研究を行っており、上位の学術誌においては日本よりも多くの基礎研究成果が発表されている側面もある。

・複雑システム

他国の科学技術政策に追従している傾向が強い。ただし、最近では日本人をはじめ優秀な外国人が韓国の大学、研究所のポジションにつき始めており、今後は伸びる可能性を秘めている。米国との交流が盛んであり、ネットワーク科学関連の若手研究者数が多い。

・サービスシステム

サービスデザインに関しては、産業化を推進している企業がある。

・システム構築方法論

ようやく研究成果が出始めた段階で、まだまだ低調である。応用研究が中心となっている。ライフサイクルマネジメント領域で存在感を示している。

なお、各俯瞰区分における全体的な傾向を把握するために、第3章における各研究開発領域の国際比較表の結果を俯瞰区分ごとに平均化したものを表2.9に示す。

表 2.9 俯瞰区分ごとの国際比較表

区分名	フェーズ	モデリング		制御		最適化		ネットワーク論		複雑システム		サービスシステム		システム構築方法論	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	○	↗	○	→	○	↗	◎	↗	○	↗	○	→
	応用	○	→	○	↗	○	→	△	→	○	↗	○	↗	○	→
	産業	○	→	○	↗	○	→	○	→	△	→	△	→	△	→
米国	基礎	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗
	応用	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	→	○	↗	◎	↗
	産業	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	○	→	○	↗	○	↗
欧州	基礎	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	応用	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗
	産業	○	→	○	↗	○	↗	○	→	△	→	○	↗	○	→
中国	基礎	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	○	↗	△	→	△	→
	応用	△	→	△	↗	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	×	→	△	→	△	→
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	○	→	△	→	×	→	△	→
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	×	→	△	→	△	→

(註1) フェーズ
 基礎 … 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 … 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 … 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状
 ※わ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

2.2.6 研究開発をとりまく状況と今後の方向性

科学技術がシステムを介して社会の隅々まで浸透するにつれて、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。システム科学技術は「ものからコトへの価値の移動」、「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機能の移動」に象徴される現代科学技術の主要な転換を推し進める上でも重要な役割を果たす。しかしながら、近年のわが国は、システム科学技術に対する理解がまだ十分ではないこともあって、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、この変化にうまく対応できていない。先に述べたようなシステム危機の弊害が海外よりも厳しい形で現れている。また、一時は世界を制覇した非常に高い要素技術力やものづくり力を有しながら、それらを経済価値の実現にうまく結びつけることができないでいる。例えば、現在の研究開発 - 産業問題に関して、

1. 個別要素の研究開発は優位であるが、製品のシステム化が遅れる
2. システムを製品とする産業が弱く、システム技術をコアコンピテンスとする企業が少ない。また、産業競争力に対するシステム科学の寄与が小さい
3. システムを製品とする産業（多くの情報産業等）の競争力が弱い
4. 医療システム等、公共的システムの構築運用が遅れている
5. 公文書管理、統計管理、コホート等のようなシステムに対する認知度が低い

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り、それが共通してシステムの発想やシステム科学技術の弱さとして表れている。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超えている中で、システム化の遅れは深刻な問題となっている。日本の成長戦略はシステム科学技術の振興を欠いては成り立たない。

社会で生じ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。単一の科学領域だけの研究で課題解決が達成できるものではなく、複数領域の協力を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現状ではほとんどなく、決して整合的ではない。今後、関連する各省庁の所掌に基礎を置く価値基準や法制度等を調整し、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。

システム構築によるイノベーションの重要性は、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の言及が目立つようになった。例えば、内閣府の総合科学技術会議（現：総合科学技術・イノベーション会議）が策定し2013年6月に閣議決定された「科学技術イノベーション総合戦略」では、スマート化、グローバル化と並んでシステム化が科学技術イノベーション政策推進のための3つの戦略的視点の一つとして挙げられている。これに駆動されて戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）や革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）等の新しい大型ファンディングプログラムが府省庁連携により立ち上がったが、システム化に関してさらに一歩踏み込んだ施策が提示されることを期待したい。

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、統合していく行動や仕組み、そのための科学技術の振興が今まさに切実に求められている。

特定の分野や対象に依存しない普遍的な科学技術であるシステム科学技術は、要素間の不整合や無意味な競争を取り除き、要素が最大限の力を発揮するように要素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研究者、技術者を結びつけつつ、全体の利益を最適化するポテンシャルを有している。現代社会における課題を解決していく上で、システム科学技術の果たすべき役割はますます大きくなってきている。

今後、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の要素研究を適切な形、タイミングで実施す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、などのシステムの発想を備えた人材を育成すること、（３）プロジェクトの成功を他の事例に展開できる形で蓄積していくこと、などの強化策を推進することがわが国の科学技術行政に望まれる。