

プロGRESSレポート
**システム構築型イノベーションの
重要性とその実現に向けて**

2013年11月



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

エグゼクティブサマリー

日本の製造業は、分厚いそして質の高い部品産業の集積の上に成り立ち、高い品質の製品を効率よく生み出すことのできる優れた生産技術をもっている。その力で1980年代には一部の分野を除いて世界の市場を席巻した。また、オイルショックに対処するための省エネルギー技術、環境破壊に直面して培われた先行的な環境技術、さらに度重なる自然災害によって鍛えられた防災技術がある。それにも拘らず現在日本の技術力は低迷し、それが産業競争力低下の大きな要因の一つになっている。国際経営開発研究所（IMD）の世界競争力ランキングにおいて我が国は2013年で24位であり、主要国の中で最低レベルまで落ち込んでいる。

1990年代前半から、「デジタル化」と「システム化」の進行によって技術の地殻変動が進み、付加価値が要素（もの）からシステム（こと）へ移動しつつあることが顕著になった。この時期、日本では「ものづくり」の技術文化が支配的であり、この技術文化が作り出す個別分野に限定された要素技術、要素研究への強い執着と保守性のために、当時進捗しつつあった科学技術の地殻変動に対応する新しい技術力と「産業エコシステム」を生み出すことに失敗した。これが日本の産業競争力の弱体化を招いた主な原因であると考えられる。

一方、今世紀初頭から日本の科学技術の社会への還元の度合いが低いことを指摘する声が強くなり、この弱点を克服する道が真剣に議論されてきた。その結果、2011年から始まった第4期科学技術基本計画ではそれまでの重点推進分野の振興から課題解決型の研究開発に軸足を移す事が宣言された。製造業における技術力の低下と、科学技術の社会還元の不足はおそらく同根の問題であり、第4期科学技術基本計画が科学技術政策の軸足を転換したことは競争力回復への道のりの第一歩と考えられる。

JST-CRDSのシステム科学ユニットは、この科学技術政策の転換に呼応し、分野の統合を先導する科学の振興とそれを基盤とした科学技術の社会還元を目指す研究開発の戦略を立案するために、2009年10月に発足した。すでに述べた我が国の技術力の弱点は「システム化」の弱さに凝縮されることは多くの識者の指摘するところであり、その意味でシステム科学技術に特化した研究開発の戦略に携わる部門の設置はタイムリーな施策対応であって、その活動は我が国の技術の競争力回復と科学技術のレベルの底上げに極めて重要な意味をもつと考えられる。このプログレスレポートは、システム科学ユニットの発足以来4年余の活動状況を振り返り、解決すべきシステム化の課題と今後必要な施策について述べている。システム科学技術の学術としての定位については「研究開発の俯瞰報告書 システム科学技術分野（2013）」[1]で詳しく調査解析しており、本稿は現実の課題達成に焦点を絞ってそれを補完するものである。

2013年6月に総合科学技術会議は「科学技術イノベーション総合戦略」（以降「総合戦略」とする。）を発表した。「総合戦略」はいくつかの具体的な研究開発の柱とともに、それら

に横串を通す「視点」を提起している。そのひとつとして「システム化」があげられている。確かに「総合戦略」で提示されている課題の多くは「システム化」が課題達成への重要な視点を与えているだけでなく、実際にシステムを構築することがそれらの達成に直結している。しかし「総合戦略」にはシステム化への駆動力をどのように生み出し、それを課題達成にどのように結びつけて行くか、の具体的な施策が見当たらない。このレポートでは「システム化」を日本の科学技術に定着させ、それを通して科学技術の社会貢献を増強するための概念として、「システム構築型イノベーション」を提案する。

「システム構築型イノベーション」は、システム科学ユニットのこれまでの活動から導き出された結論であり、日本の社会が現在必要としているイノベーションの一つの形である。これは望ましいシステムを社会に構築することを目標とする新しいイノベーションの型であり、基礎研究、応用研究、実用化研究を「一気通貫」する理念、枠組み、手法にもとづくプロジェクト型の研究開発がそれを駆動する。具体的なシステムの社会実装が必達の目標とされるために、関連する要素技術はシステムに統合され社会に設置される。孤立した要素研究のたなざらしは排除される。また、作り上げられたシステムは社会的な文脈での正当性が、一段高い一般性のレベルで保障される仕組みを持っている。「システム構築型イノベーション」は、「システムの時代」といわれる現代社会の実相と、要素からシステムに付加価値が移動しつつある科学技術の現代の位相にもっともマッチした、課題達成型を象徴する研究開発のスタイルである。

Executive Summary

The manufacturing industry in Japan is supported by its highly developed device and parts technology, and has superior capability to efficiently produce goods with high quality and performance, which dominated the global market in almost all but a few fields in the 1980s. Japan's manufacturing industry also has superior energy conservation technology in response to the oil shocks, cutting-edge environmental technology amassed through a deep experience with environmental destruction, and disaster prevention technology tempered by multiple natural disasters. In spite of this highly recognized technological superiority, Japanese technology now lost its strength, which caused the drop in competitive power of Japanese industry in the world. In the World Competitiveness Yearbook issued by the International Institute for Management Development (IMD), our country was in 24th place in 2013, dropping to the lowest level of the major countries of the world.

During the first half of the 1990s, the fundamental paradigm shift began to transform modern technology “from analogue to digital” (*digitalization*) and “from components to systems” (*systemization*). According to this paradigm shift, the value of the technology added to the product began to move from components to systems that embody the components. At this point in Japan, however, the technological culture of “monozukuri” (production) was predominant and because of conservativeness and a strong attachment to component research and component technology, which was limited to individual fields created by this technological culture, we failed to create a new technology and an industrial ecosystem that responded to the movements in science and technology that were progressing at the time. We believe this is the main cause for the weakening of Japan's industrial competitiveness.

At the same time, there were stronger voices pointing out that science and technology in Japan since the start of this century had not been sufficiently giving back to society, and serious discussions were held on how to overcome this weakness. As a result, in the 4th Science and Technology Basic Plan that started in 2011, it was announced that the axis shall be shifted from promoting priority areas of the past to research and development with a focus on the resolution of roots. The drop in technological power in the manufacturing industry and lack of societal benefits from science and technology most likely both stem from the same issue, and the fact that the 4th Science and Technology Basic Plan shifted the axis of science and technology policies can be considered a first step in recovering our competitiveness.

The Systems Science Unit in JST-CRDS was established in October 2009, in response to the fundamental transformation of Japan's science and technology policies mentioned above. It had been pointed out by many experts that the weaknesses of our country's technological power could be condensed to a single point, our weakness in systemization. Its mission is to take initiatives in the governmental R&D policy for

proposing strategic plans to really overcome this weakness through promoting systems science and technology. Another important mission of the Unit is to strengthen the transdisciplinary ties among each traditional scientific research field through the construction of techno-social systems. In this respect, it was a well-timed decision to launch the Systems Science Unit in the CRDS. Its missions, therefore, are regarded as important in the future upgrade of the level of Japan's R&D in many respects. This progress report looks back on the four years since the establishment of the Systems Science Unit and discusses the issues with systemization that need to be resolved and measures that need to be implemented in the future. As for the position of systems science and technology as an academic field, we have conducted detailed research and analysis in the "Panoramic View of the Systems Science and Technology Field (2013)" [1], and this report focuses on the actual resolution of issues and provides supplementary information.

In June 2013, the Council for Science and Technology Policy announced the Comprehensive Strategy on Science, Technology and Innovation (hereinafter referred to as "Comprehensive Strategy"). The Comprehensive Strategy proposes several specific pillars in research and development as well as a long-term vision that encompasses all of these principles. One of the pillars is systemization. It is clear that for many of the issues raised in the Comprehensive Strategy, systemization not only provides an important viewpoint to resolving these issues but the actual building of such systems leads directly to such resolutions. However, the Comprehensive Strategy does not provide specific measures for creating the driving force towards systemization and ways to connect that to the resolution of the issues. In this report, we propose *System Building-type Innovation* as a concept to emphasize the importance of systemization in the science and technology of Japan, through which social contributions of science and technology increase.

The System Building-type Innovation is the conclusion we derived from our activities at the Systems Science Unit, and it is a form of innovation that Japanese society is currently in need of. It is a new type of innovation that aims to build a desirable system in our society and it is powered by project-type research and development based on the philosophy, framework and methods that encompass basic research, applied research and commercial research in a unified and seamless way. Since the societal implementation of a specific system is a goal that must be reached in this concept, all related component technologies will be connected to the society that is integrated into the system. Component research that is isolated and not fit for the framework of the system shall be eliminated. A powerful mechanism to judge the legitimacy of the social context of the systems created on a higher level of generality. This style of research and development symbolizes the types of systems that focus on the resolution of issues, and this best fits the reality of modern society, called the "Age of Systems", and the current phase of science and technology in Japan, which is shifting its added-value from components to systems.

目 次

エグゼクティブサマリー	i
Executive Summary	iii
1. システム科学技術の役割	1
2. システム科学ユニットの活動	4
2. 1 活動の経緯	4
2. 2 システム構築の難しさを克服する研究開発の枠組	6
3. システム構築とイノベーション	8
3. 1 「システム構築型イノベーション」とはなにか —新しいシステムの構築を主目的とするイノベーション—	8
3. 2 システム構築の手順 —3つのフェーズからなるステップを踏まえた手順とその方法—	10
(1) プラットフォームの構築 (フェーズ 1)	10
(2) 個別システムの設計 (フェーズ 2)	11
(3) 設計されたシステムの実装と運用・管理 (フェーズ 3)	12
3. 3 プロジェクト実施のスキーム	14
4. 人材育成について	16
5. まとめ	18
【付録】	20
I . システム構築型イノベーションの課題例	20
1. 参画型の環境・エネルギー・経済予測プラットフォーム	20
2. 水循環統合モデリングシステム	23
3. 人間行動のネットワーク情報にもとづく社会的健康保持システムの構築 (N-health)	26
4. 生体モデルにもとづく高齢者の遠隔医療システム	28
5. 分野横断型リスク関連知識プラットフォーム	30
II . システム科学技術分野の概要	33
1. システム科学技術の周辺学問分野における位置づけ	33
2. システム科学技術分野領域俯瞰図	34

1. システム科学技術の役割

「システム」という言葉は日常生活でも多用されているだけでなく、その使われ方は実に多様である。科学技術の文脈で「システム」を議論するときはこの語の持つ多義性が災いして混乱を招くことも少なくない。それだけでなく、システムを取り扱う科学技術についての共通認識が確立されているわけではないので、システム、あるいはシステム科学技術という言葉で何を議論しているかについては常に明確にしておく必要がある。

極めて多義的ではあるが、「システム」という言葉で表現しようとする種々の存在に最低限共通する特徴がないわけではない。それは、ある目的を達成するために複数の、それ自体が独立した機能をもつ要素が結び付いている、ということである。CRDSの戦略提言 [2] では、この特徴をベースに科学技術の対象としての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を適切に結び付けた複合体である。」

「システム」は部品や装置、社会組織のようにその要素が目に見える形で実在する場合もあるし、ソフトウェア、プロトコル、情報収集、評価、意思決定などのように要素となるものが目に見えない場合もある。前者の典型は工業製品であり、後者の典型は業務の体系である。どちらもシステムとよばれているが、両者はシステムの態様や扱い方がかなり異なるので、分けて考えたほうが都合のよい場合が多い。ここでは、「システム」のうち、前者のような製品、社会組織などを**プロダクトシステム**、後者のような目に見えない手順、ソフトウェアなどを**プロセスシステム**と便宜的によぶ。

システムが科学の研究対象として浮かび上がってきたのは、20世紀半ばの理論生物学である。生物の持つたくさんの機能を個々に取り上げて深く探求しても生命とは何かという疑問には答えることができない、という古くて新しい問題が、部分の総和を超えたシステムという概念を科学研究の対象に据えるきっかけとなり、「一般システム理論」の誕生を促した。やがてシステム概念は生物学を超えて物理学や化学にも持ち込まれたが、その背景には力学的世界観と要素還元主義のもとで進んできた近代科学のある種の限界が顕在化し始めたことがある。「一般システム理論」は一つの新しい研究の対象と方法を生み出したが、その行き過ぎた一般性、抽象性のために個別の科学研究にインパクトを与えるに至らないままその研究活動は下火となった。しかし最近ではシステム生物学や人工知能、社会システム論などの分野でその価値が再認識されつつある。

一方、技術では機械が部品からなることは産業革命以来自明のことであり、システムの考え方はごく自然に受け入れられてきた。機械工学の初期の段階から機械の設計は種々の機械要素を結び付けること、すなわち部分と全体の調和を追求することであった。他の工学分野でも同様である。工学のどの分野でも製品が複雑になりそれにとまって製造方法や製造工程が複雑になると、システムという属性が自然にたち現れる。製品を構成し製品が体现するシステムが**プロダクトシステム**であり、製造工程を構成し支配しているのが**プロセスシステム**である。プロダクトシステムもプロセスシステムも設計により生み出される。工学ではこの二つのシステム化が手を携えて進んできたといってもよい。システム化の発想はこの過程で自然に生まれ、次第にそれが大きな役割を演じることになる。システム化がどれだけ進んだかが、その分野の技術の成熟度をあらわす指標になるといってもよい。生物学と違って技術、工学では設計という視点から部分と全体は常に調和が図られ、両者

の関係をとことさらに探求する必要は特になく、技術は発達してきた。

技術で部分と全体の問題が意識されるようになったのは、オートメーションが大きく進んだ第二次世界大戦直後であろう。オートメーションの発展は製品のシステム化に対応する製造工程のシステム化をさらに進めることになり、システムという概念が技術の中で占める位置の大きさを明らかにし、「システムの時代」を切り開く先導役となった。システム構築にかかわる工学が急速に進んだのもその頃である。ウィーナーの提案したサイバネティックスはフィードバック制御に新しい広がりを与え、機械相互の通信を媒介とした新しい人間と社会を含む全体システムとして発展する技術の未来展望を提示した。さらにこの頃、計算機技術の発展に伴ってモデリングの理論と技術が飛躍的に発展した。モデリングは制御や予測の精度を大きく改善し、システム化のキーテクノロジーとなった。最適化と意思決定の技法を含むオペレーションズリサーチ（計画数学）も、同時期に急速な進歩を遂げたシステム化を担う分野である。アポロ計画で生み出されたアポロ宇宙船はプロダクトシステムであるが、アポロ計画を遂行するために発展したシステム工学は、巨大化したプロセスシステムを対象とした最初の本格的なシステム技術であった。

システムの発展とそれにかかわる科学技術の発展の経緯をごく簡単に概説した。その発展の頂点にあらゆるものがシステム化された現代の技術と社会が位置している。われわれが使う工業製品はすべて高度なプロダクトシステムである。様々なプロダクトシステムが結びついてさらに上位のプロダクトシステムが作られつつある。そして、プロセスシステムが、プロダクトシステムを結びつける糸の役割を担っている。われわれはプロセスシステムを使った様々なサービスを受けているが、プロセスシステムはそのサービスのレベルをますます上げつつあるとともに、地域、社会を超えて社会システムとしてさらに広がりつつある。工業製品をはじめ多くのプロダクトシステムは人間が注意深く設計し作り上げたものであるのに対し、現存するプロセスシステムの多くは必要性が生み出した自然発生的なものであり、合理的に設計されたものはむしろ少ない。技術におけるシステムの部分と全体の矛盾が顕在化してきたのは、技術が社会の隅々にまで浸透し、人間・社会という不分明な領域と密接なかかわりを持つようになってからのことである。こうしてシステムは技術の大きなそして困難な対象となった。科学技術の部分性と人間社会の全体性の間の対立は、古典的なシステムにおける要素と全体の対立が最も鋭く立ちあらわれたものである。

システム化が難しいことがシステムへの付加価値の移動を生み出した。かつてカメラの性能はレンズの明るさが決めていた。自動車はエンジンの性能が勝負であった。ステレオはアンプとスピーカがすべてを決めていた。そのような時代は過去のものとなった。今、工業製品の付加価値は部品（要素）からシステムへ急速に移行しつつある。携帯電話の開発費はすでにシステムを開発するソフトウェアが70%以上を占めるようになった。デジタルカメラの性能とコストは光の像を電子に変換する信号処理システムに依存するようになった。現代の自動車は、車体系と駆動系を統合した車載制御系が膨大なネットワークシステムを構成しているだけでなく、道路交通やエネルギーマネジメントと結びついて社会システムの機能要素となりつつある。かつてのコピー機はLANと結びついた複合機となり、業務システムの重要な要素となりつつある。

システム化の難しさは社会システムに最も顕著に現れる。たとえば都市の住民は農業に従事していないが食料を手に入れることができる。これは食料の流通システムのおかげで

ある。このシステムは都市の発生とほとんど同時に自然発生的にできあがったものであり、市場を媒介として成立し、交通や運搬のための技術が発展するにつれて次第に規模が大きくなり構造が複雑となった。現代では欲しいものをすぐになるべく安く食べたい、という現代人の欲望が食料生産者、食品加工業、食品販売業を巻き込んだ驚くほど効率のよいグローバル化した食のサプライチェーンを作り上げる駆動力となった。これは自然発生的というよりは、巨大食品企業が、システムを構築するための様々な手法を駆使して意識的に作り上げたシステムである。いつの季節も豊富な品揃えの巨大スーパーマーケットの食品棚は、その背後にある食のサプライチェーンの巨大さのあらわれであり、現代がシステムの時代であることを象徴している。しかしこのような巨大なサプライチェーンには大きな弱点と欠点がある。たとえば流通網の一箇所が何かの理由で遮断されると供給が止まってしまい深刻な問題に発展する可能性がある。実際にそのようなことはすでに発生している。大量の食品が消費されずに廃棄されてしまうこと、生産者の生産能力が効率向上の圧力で単能化し、そのため不作や価格変動の影響を受けやすくなる、食品の安全性の確保が困難になる、などの問題もすでに指摘されている。このような弱点、欠点は業界が作ったシステムが短絡的に利益をあげることを至上命令としていることから生じる。

食だけでなく、エネルギー、水循環、金融、医薬品などでもグローバル化した効率のよいサプライチェーンが国際的な巨大企業によって構築されている。これらの分野も食と同じような問題を抱えている。現代人はシステムに取り囲まれて生きている。システムがわれわれの生活を支え、それ抜きにわれわれは生きていけないだけでなく、システムの質が生活の質を大きく左右する。科学技術が現代文明を支えているとすれば、システムは科学技術が社会に浸透する先導役となり、科学技術の力を社会に生かす枠組みを与えているといつてよい。システムの構築の仕方は一意ではない。同じ機能を果たすことを目的としたシステムでも、様々なシステムがあり得る。システムの構築の仕方によってそこで発揮される科学技術の力、そのシステムの機能を享受する人に与える恩恵の度合いに大きな差が生じる。「システム構築型イノベーション」は、「よいシステム」を構築することによって実現されるイノベーションである。

このようなシステム構築の重要性に鑑み、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。」[2]

もちろんその背景には、部分と全体の関係を科学として深く研究するシステム科学があり、同時に設計の視点から部分と全体の関係を探求してきたシステム技術がある。これについてはシステム科学技術分野の俯瞰報告書 [1] を参照されたい。

2. システム科学ユニットの活動

2.1 活動の経緯

JST 内に CRDS が設立されたのは 2003 年 7 月である。約 6 年後の 2009 年の 10 月に、それまで活動していた 5 分野の担当ユニット（電子情報通信、環境技術、ライフサイエンス、臨床医学、ナノテク・材料）に新しく加わる形でシステム科学ユニットが創設された。すでに述べたように、その背景には第 4 期の科学技術基本計画のなかで科学技術政策の軸足が分野別の振興から課題達成型に移ったことがあげられる。その軸足移動を促したのが、科学技術の社会貢献が不足していることへの強い反省と、孤立した要素研究の集積が終着点となってしまう縦割りの研究開発スタイルのもたらす弊害であった。システム科学ユニットは日本の科学技術のこの弱点を克服することを課題にかかげて発足した。すなわち、

- ① 分野別振興から課題達成型へ、
- ② 基礎研究を社会的期待につなげる、
- ③ 要素研究を統合するための科学の探索、

の 3 点をミッションとしており、これらを達成するために「システム科学」分野の研究を強化発展させることが求められたのである。それに加えてシステム科学ユニットは、心理学、論理学、言語学、数学など、より基盤的な「領域」からスタートし、それらを統合して「システム」を構築するための手法を提供する新しい「臨時領域」を形成することが期待された。これは「文理融合」の本当の意味での実現である。上記①－③が社会的なミッションとすれば、文理融合を通じて臨時領域を形成することは科学的なミッションである。「システム科学」という日本では聞き慣れない言葉がユニットの名称に使われたのは、上記のような二種類のミッションを背負っていることの反映である。

新しいユニットとして市民権を得るには、この二つのミッションのうち、当面切迫感の強い社会的ミッションに力を置いて活動せざるを得ないと判断し、その活動の主軸を①－③においた。科学的なミッションは、社会的なミッションを達成する中でより鮮明になって行くことを期待した。

活動の核のひとつが「システム科学技術推進委員会」の活動である。この委員会は 18 名のシステム科学技術の研究者および学識経験者と 9 名の CRDS フェローからなり、2010 年の 2 月から 11 月に至る 9 ヶ月間に 10 回の会合を行った。そのなかで日本の科学技術におけるシステム科学技術の弱さとそれがもたらした日本の産業技術の劣化、それを克服するための手順についてきわめて密度の高い議論が行われた。この委員会には「制御」「モデリング」「社会と数理」の三つの分科会がおかれ、それぞれの分野でのシステム科学技術の現状と課題が話し合われた。この活動内容の一部は 2010 年に出した「システム科学技術の役割と日本の課題」[3] にまとめられている。

「システム科学技術推進委員会」の活動の集大成として 2011 年 3 月に「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～」[2] を発信した。この戦略提言は「システム科学技術」を取り上げその振興策をまとめた日本でははじめての政策文書である。そこでは他の分野と異なるシステム科学技術特有の施策の必要性を明らかにし、「システム構築戦略研究」とよぶ、基礎研究でも応

用研究でもない新しい研究のカテゴリーを提案している。また、システム科学技術が基盤技術となる以下三つの具体的なプロジェクトの提案を行っている。

- ① 分散再生エネルギー源を含む安定かつ持続可能なエネルギー供給を可能とする社会システムの構築
- ② 高齢化社会に対応した生活支援ロボットの構成とその実用化
- ③ 地域社会の構造に適合した水循環システムの構築

このうち①は文科省の 2012 年度の戦略目標に取り上げられ、現在 CREST の研究領域「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」として採択され研究が開始されている。この研究領域は CREST の範疇の中であるが研究開発システムに新しい考え方を採り入れ、CREST の限界を打破するための新しいスタイルを模索している。これまで行われていなかった「ステージゲート方式」を取り入れ、社会貢献と結びつくことの可能な要素研究のシステム化を展望している。システム科学ユニットの検討課題である「一貫通貫」の研究プロジェクトを実施しているという点でも期待される。

また、③については 2012 年の戦略プロポーザルとして「水循環システム」[4] を提出した。このプロポーザルは残念ながら戦略目標として取り上げられるには至らなかったが、国交省に注目され国交省・文科省の合同勉強会のテーマの一つとなった。

CRDS の基本的なミッションとして各分野の俯瞰図作成がある。システム科学技術は新しい分野であり参考になるような過去の類似文書はないので、システム科学技術とは何か、という基本的な設問から出発する必要があった。俯瞰図作成のための「俯瞰ワークショップ」[5] には外部有識者を 40 名以上招集し、活発な議論のなかで俯瞰図の基本的な骨格についての合意を得ることができた。俯瞰図を付録Ⅱに示す。なお、この俯瞰活動は後述する 2012 年の俯瞰報告書作成作業に引き継がれる。

2011 年 8 月に閣議決定された第 4 期科学技術基本計画 [6] の策定においては、システム科学技術の重要性を認識し、その振興策を盛り込むように総合科学技術会議と何回か会合を持ち、理解を求めた。その結果、基本計画の中では、「領域横断的な科学技術の強化」として、「・・・数理科学、システム科学技術など・・・」の研究開発を推進することが明記された。

2012 年 3 月、システム科学ユニットでは、科学技術シンポジウム「システム構築による重要課題の解決にむけて」を開催した [7]。社会科学を含めた各方面の有識者から、「システム科学技術の役割と可能性」の示唆を受け、意見交換を行っている。この年には、「都市インフラシステム」[8]、「統合防災」、「リスクの発見、構造化」など、社会的課題に対して戦略プロポーザルを作成する取り組みを行った。また、「システム化」と産業競争力劣化の関係を探るために、産業競争力懇談会（COCN）の協力を得て産業界の「システム科学」に関する意識調査アンケート [9] を行った。その結果、両者の間に強い相関があることが明らかになり、われわれの推測の正しさが実証された。

2013 年には CRDS の通常業務としてシステム科学技術分野の俯瞰報告書 [1] を公表した。報告書作成には 5 分野（制御、最適化、モデリング、ネットワーク、リスクと意思決定）の専門家を 60 名以上動員して行った。システム科学技術を分野として特定し、その分野の現状を包括的に俯瞰するのはおそらく世界でも初めてのことである。

すでに 1 章で述べたように、システム化は困難な課題であり、要素からシステムに付加

価値が移動した主な原因になっている。それゆえ、システム化がなぜ難しいかの理由を明らかにし、それを克服する研究開発の枠組を探求することはシステム科学ユニットの設立以来の大きな課題であった。このテーマに取り組む過程で「システム構築戦略研究」[10]とよばれる新しい研究開発のカテゴリーを定式化することができた。この概念をまとめてIEEEのSystems Conferenceで発表したところ、多くの注目を浴びた。この概念はシステム構築の困難に対応するための科学技術の枠組になると考えている。これについては次の節で述べる。

以上の活動を通じて科学技術行政と研究者のコミュニティにシステム化とシステム構築の重要性についての認識を深めることができたと思われるが、これまでの分野に分断された縦割りの研究スタイルの慣性は強く、システム構築の視点を研究開発の現場に根付かせるには至っていないのが現状である。また、府省庁にシステム科学技術の振興を担当する課や室がなく、その振興を助言する審議会や委員会もおかれていない。これまでの活動の未熟さを踏まえて次のステップで必要とされる施策を検討した結果生まれたのが次章で述べる「システム構築型イノベーション」の概念である。

2.2 システム構築の難しさを克服する研究開発の枠組

企業の業務をシステム化したソフトウェアシステムは、システム構築の典型的な例であるとともに、システム構築に関する経験がもっとも豊富に蓄積された成熟した分野である。にもかかわらず、ソフトウェアシステム構築の成功率は日本で約20%に過ぎないといわれている。失敗した中の17%はシステム構築から実際に撤退している。残りの63%は、工期、コスト、性能などについて当初の計画通り行かなかったものである。ソフトウェアという限定された範囲に限ってもこのようにシステム構築は難しいことが明らかになっている。ハードウェアも含むシステム、さらに社会に開かれたシステムの構築ははるかに難しい。

それではなぜシステム構築は難しいのであろうか？考えられうるいくつかの理由はいずれも現代の科学技術が直面している新しい壁と密接に関連している。この壁を克服するためには先端的なシステム科学技術をシステム構築の過程に応じて適切に動員し、使いこなさなければならない。システム構築とシステム科学技術の橋渡しを行うための研究開発の枠組みを提供するのが「システム構築戦略研究」である。「システム構築戦略研究」は最適化、ネットワークなどの体系的理論やプログラムマネジメントなどの技法を含む幅広いシステム科学技術のツールをシステム構築に生かす場を提供する新しい研究開発のカテゴリーである。

システム構築の難しさはそれが広い意味での設計であるということに起因する。ただし従来の機械設計のような同種類の要素を組み合わせるのではなく、異なる分野で生まれた異なる機能を持つ要素を統合することが必要である。出自が違う要素はそれぞれ異なる知を背負っており、従って異なる専門領域の共業が不可欠となる。プロセスシステムの設計の場合は、時間的な前後関係を考慮しなければならないので、問題はさらに複雑になる。設計は「概念」から「存在」を作り出す知的な作業であり、その逆である認識よりは一般的にはるかに難しい。

「設計」のもうひとつの難しさは、解がひとつではないことである。目的を達成するシステムは幾通りもあるのが普通である。システムが複雑になり要素の数が増えると、可能なシステムの数はいくらでも爆発を起こすほど多い。設計者はシステムを構築する過程でどの部品、どの要素、どの方式を選ぶか、の選択が迫られる場面に何度も遭遇する。そのたびに設計者は意思決定を迫られる。その際、部分最適と全体最適の矛盾が発生する。その場合、意思決定はリーダーシップの問題でもある。

構築されたシステムは社会に設置され、開かれた環境の中で不特定多数の人々がシステムの機能を享受する。「構築されたシステムがどのような状況と対面するか」はシステムの仕様を決定する際のもっとも重要な因子である。しかし、システムが遭遇する環境をすべてあらかじめ想定することは不可能である。それだけでなく、遭遇すると想定される環境が多くなればなるほどシステム構成は爆発的に複雑になる。これが今システム構築で遭遇している最も大きな困難である。この困難は「無限に豊かな実世界」と「有限の論理操作しかできないシステム」の間のギャップでもある。このギャップは人工知能の壁として知られる「フレーム問題」¹と似ている。プロセスシステムの場合は時間の因子が加わるので、問題はさらに難しくなる。

「システム構築戦略研究」は「システム科学技術がシステム構築にどのように役に立つか」あるいは「どのように役に立たせるか」を明らかにしている。図1はその概念図である。システム構築戦略研究は、関連するプロジェクトの各要素をシステムとして統合する方策を明示し、そのために必要な意思決定を合理的に行うための全体研究を担う。特に各時点で構築すべきシステムのイメージをできるかぎり明示的かつ定量的に記述し、そのもとでプロジェクト進行における既知と未知、確実さと不確かさ、達成と未達の境界を常に明らかにし、全体としての目標管理を行うとともに、それによって得られた知見をもとに未知を既知とし、不確実性を縮小し、達成度を高める。これまでの我が国のプロジェクトでは、いったん開始すると計画に大幅な修正を加えたり目標を環境条件の変動に合わせて進化させたりすることはほとんど不可能であり、プロジェクト遂行に柔軟性が欠けていることが指摘されていた。システム構築戦略研究によってプロジェクトの時間的な進化を担保することが可能となる。詳しくは文献[10]を参照されたい。

¹ 「フレーム問題」とは、人工知能研究における重要で、最大の難問の一つ。有限の枠（フレーム）の中でしか情報処理能力を発揮できないロボットは、現実には起こりうるすべての問題には対処することができない。例えば、「部屋に入って、そこにある台車を持ってこよう。」とロボットに命令した場合、その台車に爆弾（危険物）が載っていても構わず持ち出してくるといったこと。人間ならば当然判断の入る場面にロボットを対応させようとするには、ありとあらゆる条件をインプットしなくてはならないが、それは不可能である。

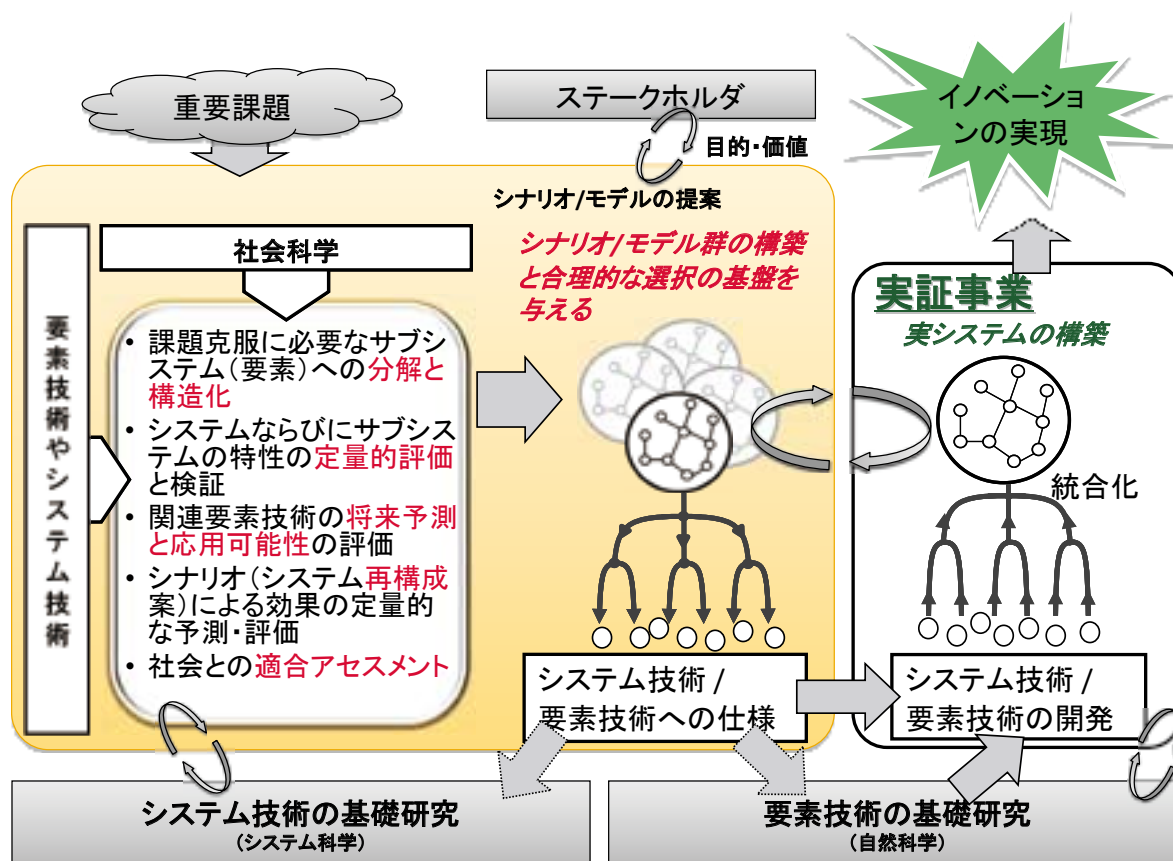


図 1 システム構築戦略研究

3. システム構築とイノベーション

3.1 「システム構築型イノベーション」とは何か

「システム構築型イノベーション」は新しいシステムの構築を主目的とするイノベーションである。システム構築には合理的な目的の設定と周到な計画と厳密な事前審査と行き届いた設計、そして正確で誠実な社会への実装が必要である。すでに述べたように、現代人は種々の社会システムに囲まれて生きているが、それらのシステムの多くは自然発生的かあるいは企業が利益を目的として作り出したものである。国の事業もその多くはシステム構築の一種といえる。道路や橋、建物などを作る公共事業、年金や税制、医療など国の行政機能、外交や防衛、危機管理など政治的な体制もシステム構築の結果に他ならないが、多くの場合それらのシステムは、次節で述べるようなシステム構築の手続きが十分には考慮されずに作られ、その結果様々の人為的な限界や不要なリスクが付きまとい、その運用管理には多くの歪みが伴う。「システム構築型イノベーション」が実現するシステムは、そのシステムの存在理由が合理的に明らかにされ、計画の実行可能性が担保され、さらにその後の円滑な管理運用のプロトコルが確立されていることも担保される。

「システム構築型イノベーション」が単なる公共事業と異なる点は、構築されるシステムが最先端の技術を取り入れていることである。最先端の技術は通常は要素技術として存在している。質の高い要素技術の集積は我が国の科学技術の大きな財産である。これらの財産から必要かつ有用な成果を抽出してシステムにまとめ上げてその真価を発揮させることは、「システム構築型イノベーション」の主要な目標の一つである。もしシステムを構築する上で現存する要素技術のレベルが十分でなければ、要素技術の開発をあらためてテーマの一つとして設定することもシステム構築の視野のうちである。その場合、要素の研究開発はその達成目標、制約条件などがシステムに組み込まれることを前提として設定される。「システム構築型イノベーション」が包含する要素研究では、「とりあえずできるところから着手する」、「作っておけばそのうち使い道も出てくる」などのあいまいな動機で着手されることは認められず、明確に、システムのビジョンを達成するための要素としての機能を実現させるために開発の資源が集中される。

ただし、要素の研究開発によって要素単体の機能が実現したとしても、それを用いて実効的な社会システムを構築できなければ意味がない。その典型的な失敗例が、東日本大震災で全く存在感がなかった日本の災害ロボットである。システムが社会と科学技術の橋渡しになる、という視点のもとに、技術の受け手となる社会の価値観の変動や将来の可能性を予測した柔軟なシステムの社会設置が必要である。特に、社会の変動を視野に入れた進化の余地を十分に残すシステムの構築が望まれる。また、システムの全体機能を達成するためには機能要素が適切に配置統合されていなければならない。システムを構成する要素は、オーケストラの各楽器のようにシステム全体の構造にきちんと組み込まれ、全体の動きに調和してその機能を発現し、それを通してシステムの目的達成のために貢献しなければならない。部分と全体の調和である。このことがプロダクトシステム、プロセスシステムを問わずシステムにとって最も大切な要件である。

上述のようにシステム構築は基礎研究から社会実装までを含む「一気通貫」の研究開発プロジェクトである。従って、基礎研究でも応用研究でも、あるいは目的基礎研究でもない新しい研究のカテゴリーである。吉川の「本格研究」[11]の一つの例といってよい。社会実装まで視野に入れることによって「事業責任」の問題が生じる。従って「システム構築型イノベーション」は基本的には行政が科学技術上の側面も含めて最終的に責任を負うプロジェクトとして位置づけられなければならない。これまでの競争的資金によるトップダウンの研究開発プロジェクトの多くは実質的な最終責任がプロジェクトを統括する研究者に負わされているが、この点を改める必要がある。

システム構築は課題達成型の研究開発プロジェクトであるから、多くの異なる研究分野の研究者の共同作業が不可欠である。課題は分野を選ばないからである。このことについてはこれまで「分野融合」「文理融合」などの言葉で表現され、その必要性はそれなりに認識されてきたが、実質的には分野の細分化の傾向が依然として強くそれに抗する有効な手段を見出し得ないままに不十分にしか実行されてこなかった。システムを社会に実装するには人間・社会の全体性をシステムが体現せざるを得ないので、複数の分野の知が統合されなければならない。すなわち、「システム構築型イノベーション」が実現するためには否応なしに「分野融合」をイノベーションのための必要不可欠な枠組みとして推し進めざるを得ない。

以上に述べた「システム構築型イノベーション」の特長を以下に要約する：

—システム構築型イノベーションの特長—

- ① 構築しようとするシステムの目的、機能、構成手順、運用、などの合理性が一段高い一般性のレベルで明示的に担保される。
- ② 現存する最先端の要素技術が動員され、それらが全体との調和のもとにシステムの部分として統合される。
- ③ 必要に応じて要素技術のレベル向上を図る基礎研究を設定する。
- ④ システム構築は「基礎研究」から「応用・実用化研究」、さらに「運用・管理」まで一気通貫の研究開発プロジェクトであり、行政が事業責任まで負う必要がある。
- ⑤ 分野融合が必要条件である。
- ⑥ 社会の変動を考慮したシステムの進化の可能性を十分考慮した構成になっている。

3.2 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、システムを構築することは多くの人と年月、コストを要する。そのステップは大きく分けて三つのフェーズからなる。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）を作り上げること、次いでそれを用いた詳細なシステム設計と実証試験、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である。これらをそれぞれフェーズ1、フェーズ2、フェーズ3とよぶ。その構造を図2に示す。以下、それぞれのフェーズについて説明する。

(1) プラットフォームの構築（フェーズ1）

ここでプラットフォームという言葉が使われているが、この言葉は本来、その上で仕事が行われる板状の台のことである。最近ではテクニカルタームとして様々な意味で用いられ、その用法について多少混乱が見られるようになった。そのためこのレポートで用いるプラットフォームの定義をコラム1で述べた。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持ち、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。例えば我々は後にフェーズ1の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」を述べるが、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作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することが可能となる。

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様々なデータを獲得し、構築されるシステムの挙動を様々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性能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など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でも同様な形でとりあげられる。

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の研究開発のみに目的を絞っ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持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か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利害関係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) 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は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も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構造を実現するための最大限の努力が望まれる。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設計される必要があるが、そこでは予測できなかった様々の事態の変化が起こり得る。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、ネットワークなどの高度なシステム科学技術が作り出したツールが必要とされる。

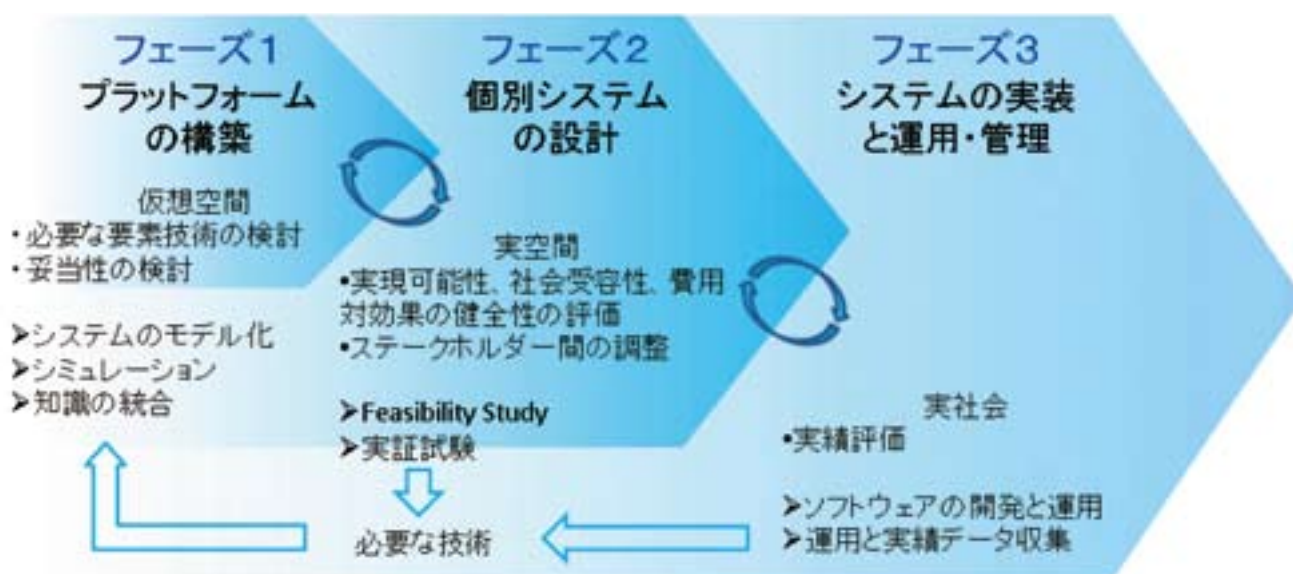


図2 システム構築の手順

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3）。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システム構築の本質的な性格でもあるので忘れてはならない。なお、すでに2章で述べたシステム構築戦略研究と3つのフェーズの関係を図4に、システム構築型イノベーションの可能な具体例を付録に示す。

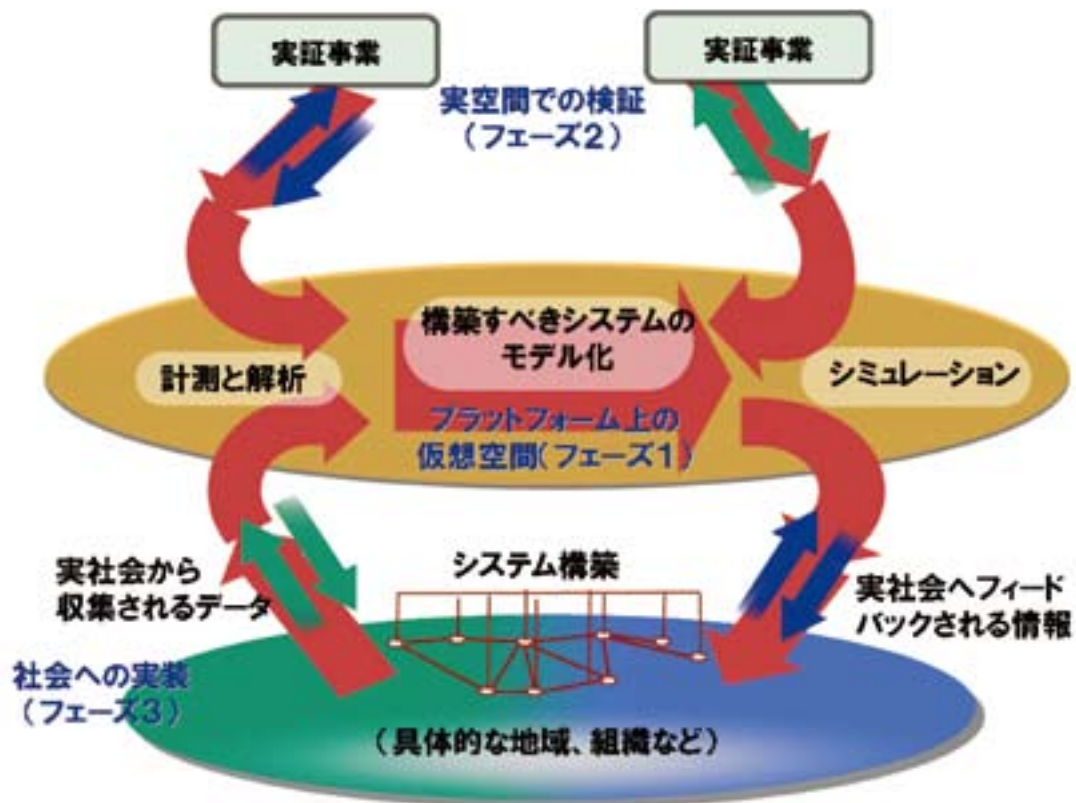


図3 システム構築における各フェーズの相互関係



図4 システム構築戦略研究とフェーズ

コラム1：プラットフォームの概念

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こしやすくなる。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あげられる。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作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。

3.3 プロジェクト実施のスキーム

3.1 節において列挙した「システム構築型イノベーションの特長」からも推測されるように、我が国の現代社会における重要課題の解決 / 達成を必達目標とする本プロジェクトにおいて求められるシステムは、必然的に大規模で長期間必要とされるものが多くなる。このことは、付録に示した 5 つの課題例からもご理解いただけるであろう。一方で、基礎研究から社会実装までを強く意識した「一気通貫」型のシステムでもあるため、各要素の研究開発からシステム構築の遂行までを支援できる我が国の大型の公的ファンディングプログラムはかなり限られている。**JST** には基礎研究から実用・製品化までを含む様々な種類のファンディングプログラムがあり、それらをうまく組み合わせることによって現

状でも「一気通貫」を実現することは可能である。しかしながら、ある課題の解決/達成に向けたシステムの社会実装という「出口」から出発し、必要とされる要素を遡って探した時に、その要素技術が確立、あるいはそれに関する基礎研究が実施されているとは限らない。システム構築型イノベーションの実現に向けて、望ましいシステムが最大限の効率を発揮できるように、各要素は最適化されていなければならない。このような場合、各要素の技術開発の実現可能性も吟味しつつ、要素統合によるシステム構築の研究開発も並行して進めていく必要がある。

JST を代表する大型ファンディングプログラムである CREST において、「システム」の名がついた研究領域、あるいは研究課題は少なくはない。しかしながら、それらのほとんどは「基礎研究」あるいは「基盤技術の創出」の域を出ていないか、もしくは、本プロジェクトで意味する社会実装までを意識した各要素技術の統合によるシステム構築とは異なっている。このことは、CREST は課題達成型ではあるが「基礎研究」を支援する JST の戦略的創造研究推進事業の一つとして組み込まれていることにも起因している。このような状況が続いていたが、2.1 節でも紹介した CREST の研究領域「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」では本プロジェクトで想定しているシステム構築の具現化にもつながるような新たな取り組みが試みられている。領域名に「融合展開」の文言が含まれていることからその内容が推測できるであろう。

本プロジェクトのシステム構築に必要な JST のファンディングプログラムとしては、このような新たな仕組みでの CREST が有力な候補となる。さらには、要素研究にある程度目処が立っていれば、戦略的創造研究推進事業の外の枠組みにある COI プログラムや産学実用化開発事業などの、より実用化、社会実装を強く意識した最近のプログラムも利用できるであろう。この他にも総合科学技術会議が主導して新たに推し進めている戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) は注目に値する。SIP では基礎研究から出口までを見据え、将来の規制・制度改革なども視野に入れているが、本プロジェクトにおけるシステム構築も社会の変動を視野に入れ、進化の余地を残していることから、両者の親和性は高いと思われる。

4. 人材育成について

我が国の大学において「システム」の名称を含む学部・学科・専攻の数は100を超える。しかし、その大部分は、電気工学や機械工学などの伝統的な専門領域に帰属する学科の名称に「システム」という言葉が付け加わったものに過ぎず、その教育、研究の実態は旧態依然としており、システム構築に必要不可欠な、横断型の人材育成を重視した態勢になっていない。

システム構築による課題解決を実現するには、システム科学技術を担う研究人材の育成、大学学部教育を通じた裾野の拡大、システム構築戦略研究に参加できる人材の育成の3つの柱が必要である。2010年に発した戦略提言[2]では、それぞれの方策として以下の3つをあげている。

- ① 研究教育拠点の形成
- ② 大学学部における数理科学教育の重視
- ③ 専門職大学院の設置

これに先立ち、人材育成に関して、同年に開催した第8回システム科学技術推進委員会において「システム科学と人材育成」を議論した[12]。求められる人材像、それに向けた教育などは、解のないテーマであり一朝一夕にしての解決は困難ではあるが、そんな中、慶應義塾大学による新たな試みなどが紹介されている。また、これらの人材育成には、産業界、アカデミアの連携が不可欠であることが確認された。

さらに2012年にCOCNと共同で行った企業に対するアンケート[9]において、日本の科学技術に「システム化」を根づかせるために政策としての取り組みが必要なものとしても「人材育成」があげられており、産業界においても「システム化」を担う人材の育成が強く望まれていることが明らかになった。このことは逆に「人材育成」の面でシステム化が遅れていることの表れでもある。

大学などの高等教育機関におけるシステム科学分野の人材育成方策に加えて、すでに特定分野のディシプリンを修め、社会で活躍している専門技術者に対して、システム科学の基本的な概念と方法論を習得させることが重要である。システム構築には、対象領域の専門知識に加えて、他分野が生み出したシステム要素の役割を理解し、それらを有機的に構成しなおす能力が必要である。また、他分野の専門用語を理解するとともに、共同する技術者とのコミュニケーション能力も必要とされる。システム構築は広い意味で「デザイン」活動であり、そのためには、特定の専門知識に加えて幅広い知見が必要となる。このことは、ひとつ以上の専門領域を縦方向に習得することに加えて、横方向に様々な専門領域で活動できるという意味において、T型、II型人間の育成が重要であるという、最近の主張に通ずる[13]。この文献では、世界各国の高等教育機関における「デザイン思考教育」のカリキュラムがこの方向の実践例として紹介されている。

人材育成がうまく進まないもう一つの重要な理由は、システム構築技術を体系的に教えるための適切な教科書が存在しないことである。システム科学の研究者の多くが、個別のシステム科学の研究に埋没しており、実問題を題材として様々な要素技術とシステム科学技術を必要に応じて組合せて実問題の課題に解決を与えるシステムにまとめ上げる教育の方法論を持ち合わせておらず、またそのような教育方法の研究を怠ってきたことに原因がある。システム科学の研究者の多くが、システム科学の理論と技法には通じていても、そ

れらを実問題に適用した経験がないことが、そのような教育方法の研究を躊躇する理由としてあげられよう。

一方、産業界の技術者は実問題を解決するシステム構築の経験は豊富にあるものの、たとえ同じ業界の技術者であっても、所属する企業が違えばシステム構築の手順、価値の優先順序や見方が異なり、所属する企業の技術文化に強く依存した経験しか持たない。そのため、技術者によるシステム構築は必ずしも理論に裏付けられた技法にまで昇華したものにはなっていない。これらを打開し、体系的な教科書を纏めることは急務であり、そのためにはシステム科学の研究者とシステム構築の経験が豊富な実務家が、共同で執筆作業を進めることが肝要である。

その際に重要な柱となるのが、前章で述べたシステム構築型イノベーションの3つのフェーズからなる「システム構築の手順」である。システム構築は基礎研究から社会実装までを含む「一気通貫」の研究開発プロジェクトであるため、大学などでシステム構築技術を教える際には、学生の実務経験の不足やフェーズ3の「設計されたシステムの実装と運用・管理」などの困難性が教育上の障壁となると指摘されることもある。しかしながら、学生の身の回りの日常生活上の課題や大学内で発生している解決すべき課題を題材として取り上げることで、実務経験が少ない学生であっても課題の認識や社会実装へと容易に繋げることが可能となる。実際、そのような教育方法を採用する大学も増えてきている。システム構築技術を体系的に教えるための適切な教科書の作成に向けて、研究者と実務家との共同作業を助成する仕組みを早急に立ち上げることは科学技術行政の重要な課題の一つである。

システム科学技術の推進において、このような「人材育成」は喫緊の課題であり、システム科学ユニットでも引き続き検討し、提言していくべきものと考えている。

5. まとめ

CRDS システム科学ユニットは 2009 年 10 月に発足し、「システム構築が社会的価値を生み出す原動力である」との考え方にに基づき、「要素研究の統合」「科学技術の社会還元」「分野別振興から課題解決型へ」を実現するための科学的探索を使命として活動してきた。

本プログレスレポートは、科学技術の研究開発における「システム化」と「システムの考察」の重要性を指摘するとともに、これまでのシステム科学ユニットの活動を通じて得られた、「システム化」を推進するための方法論をまとめたものである。

第 4 期科学技術基本計画（2011 年度～2015 年度）では、それまでの重点推進分野別の振興から課題解決型の研究開発の推進に軸足を移すことが宣言され、さらに「システム科学技術」が振興を図るべき融合分野の一つとしてあげられた。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においても、「システム化」が政策推進のための 3 つの視点の内の一つになっており、その重要性は共通認識となりつつあるが、それをどのような形で日本の科学技術の研究開発の場に根づかせるか、については残念ながら施策として具現化されていない。

現在、公的施策として基礎研究から社会実装までを見据えた一貫通貫のプロジェクトとして、以下のようなプログラムが発表されている。これらのプロジェクトを実施するに当たり、社会実装に繋げる上で、「システム化」の方法論は欠かせないポイントであると考ええる。

○ JST センターオブイノベーション（COI）プログラム

ハイリスクではあるが実用化の期待が大きい異分野融合・連携型の基盤的テーマに対し、集中的な支援を行う。産学が連携する研究開発チームを形成し持ち寄り方式で運営。

○ JST 産学共同実用化開発事業

企業ニーズを踏まえた企業による大学等の研究成果に基づく実用化開発を支援。

○ 総合科学技術会議 府省横断型戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

基礎研究から出口（実用化・事業化）までを見据えたインパクトの大きい戦略的な研究開発等を推進。

上記のプロジェクトを計画実施する過程で、本プログレスレポートで提案しているシステム化のステップとその具体化する方法が明確に取り込まれ、それがシステム化を駆動するエンジンとなることを強く期待する。

この他、「国際廃炉研究開発機構」が立ち上がり、福島第一原発の廃炉について技術開発が始まろうとしている。人類がはじめて直面するきわめて深刻なこの課題についても、システムの考察と計画が必須であると考ええる。

このレポートを読んで抽象的概念的な記述のみに終り、具体性に乏しいことを感じられる向きも多いと思われる。実際はシステム科学ユニットではこれまで多くの具体的なテーマやプロジェクトをシステム構築の視点から精力的に検討してきた。これらの具体例のいくつかを本文の記述を補足する意味で付録に掲載する。これらのプロジェクトはシステム構築が課題達成の柱となるものであるが、「システム構築型イノベーション」の対象はこれらに限るものではなく、これらは例に過ぎない。あえていえば「科学技術イノベーション総合戦略」に揚げられた課題のかなりの部分がシステム構築型イノベーションとして実現すべきと考えられる。

実際に本レポートで述べたシステム構築の手順に従って具体的なプロジェクトを考察、遂行しようとした過程で、内容的に不足している点や困難な点が見つかった場合には、それは、まさにシステム科学ユニットの探索課題であり、今後解決していくべきポイントとなる。ご指摘いただけると幸甚である。

【参考文献】

- [1] CRDS-FY2012-FR-07「研究開発の俯瞰報告書 システム科学技術分野（2013年）」.
- [2] CRDS-FY2010-SP-04「戦略提言 システム構築による重要課題の解決に向けて ～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～」.
- [3] CRDS-FY2010-XR-07「CRDS システム科学ユニット中間報告書 システム科学技術の役割と日本の課題」.
- [4] CRDS-FY2012-SP-03「戦略プロポーザル 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～」.
- [5] CRDS-FY2010-XR-19「俯瞰図作成報告書 2010年度版 システム科学技術 領域俯瞰図の作成」.
- [6] 第4期科学技術基本計画.
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/fieldfile/2011/08/19/1293746_02.pdf
- [7] 科学技術シンポジウム「システム構築による重要課題の解決に向けて」.
<http://www.jst.go.jp/crds/sympo/sys2012/index.html>
- [8] CRDS-FY2011-SP-06「戦略プログラム 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」.
- [9] CRDS-FY2012-RR-01「産業競争力と「システム化」関連調査報告書」.
- [10] Kimura,H., Toyouchi,J., Takeuchi,R., Homma,K., Yasuoka,Y., Mori,T., Takeda,H., Proposal of Strategic Research on Building Systems, Systems Conference (SysCon), 2012 IEEE International, Vancouver, BC.
- [11] 吉川弘之. 本格研究. 東京大学出版会. 2009.
- [12] CRDS-FY2010-XR-12「システム科学技術推進委員会記録 第8回システム科学と人材育成」.
- [13] 黒川利明. 大学・大学院におけるデザイン思考(Design Thinking)教育. 科学技術動向. 2012年9・10月号, pp. 10-23.

【付録】

I. システム構築型イノベーションの課題例

システム構築戦略研究に基づき、システム構築型イノベーションが起こりうる課題を「科学技術イノベーション総合戦略」の中の4つの柱である「エネルギー」、「インフラ」、「健康」、「防災」から抽出したものが、「参画型の環境・エネルギー・経済予測プラットフォーム」（エネルギー）、「水循環統合モデリングシステム」（インフラ）、「人間行動のネットワーク情報にもとづく社会的健康保持システムの構築（N-health）」（健康）、「生体モデルにもとづく高齢者の遠隔医療システム」（健康）、「分野横断型リスク関連知識プラットフォーム」（防災）の5つのプロジェクトで、それらの概要を以下に詳しく述べる。システム構築型イノベーションの課題は他にも無数にあり、ここであげたものは、あくまでも例示である。

なお、1. 参画型の環境・エネルギー・経済予測プラットフォームと3. 人間行動のネットワーク情報にもとづく社会的健康保持システムの構築（N-health）は、横断型基幹科学技術研究団体連合（横幹連合）で作成した研究テーマである。後者については東京大学の山本義春、中村亨の両氏にもご協力いただいた。

表1 システム構築型イノベーションの課題例

戦略分野	構築すべきシステム	研究開発フェーズ
エネルギー	参画型の環境・エネルギー・経済予測プラットフォーム	I、II、III
インフラ	水循環統合モデリングシステム	I
健康	人間行動のネットワーク情報にもとづく社会的健康保持システムの構築（N-health）	I、II、III
健康	生体モデルにもとづく高齢者の遠隔医療システム	I、II、III
防災・復興	分野横断型リスク関連知識プラットフォーム	I

1. 参画型の環境・エネルギー・経済予測プラットフォーム

目的 環境・エネルギー・経済というトリレンマ問題は、現代に生きるすべての人々に影響を及ぼすものであり、社会的合意を得ながら解決していくべき問題である。したがって、希望すれば誰もが、長期にわたる展望を描いて意思決定に関わっていくことが望まれる。知識情報化社会のあるべき姿として、市民、企業人、行政人、研究者がそれぞれの立場で自由に未来予測を行い、将来の社会のあるべき姿を探索できるモデルのシステムを公共的な資産（プラットフォーム）として構築する。

内容 我が国のいくつかの研究機関が開発してきた環境・エネルギー・経済に係るモデルは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC: International Panel for Climate

Change)でも高く評価されているが、それらを利用できるのは専門家だけである。たとえば、一般市民は、自分たちの想定する前提条件の下での将来予測を希望している筈である。また、企業人も、環境・エネルギーの分野は大きな市場が期待され、自分たちの技術開発、事業開発がどのようなインパクトをもたらすかを予測したいという希望を持っている。しかし、現在そのような一般人がアクセスできるモデルは存在しない。

本課題は、我が国で先端的に構築されてきた、環境・エネルギー・経済モデルおよびそのシミュレーション・ソフトウェアを部品（要素モデル）に分解して蓄えておき、利用者による想定スコープ（前提条件、要因群）の指示に基づいて、部品を結びつけ、いわばカスタマーベースのモデルを作成し、前提条件であるデータを入力してシミュレーションを実施し、結果を利用者に提示する情報環境をシステムとして構築するものである。

システムの概要は、図5に示すとおりである。ここでは、シミュレーション・ニーズに合わせて部品化した要素モデルやデータを、シミュレーション・バスを介して結合し、シミュレーションを実行する。このシステムにより、市民、企業人は自らの知りたい欲求を満足すると同時に、これを通じて、行政人は社会の環境・エネルギー・経済分野の関心事を知ることができる。また、モデル研究者はこれまでのように行政の要求に応えるためのモデル開発だけではなくて、直接的に市民、企業の関心事を知ることにより、先行的なモデル開発を行うこともできるようになる。アーキテクチャが公開されることにより、プラットフォームがオープンな環境のもとで進化することも可能となる。

プロジェクト概要図：

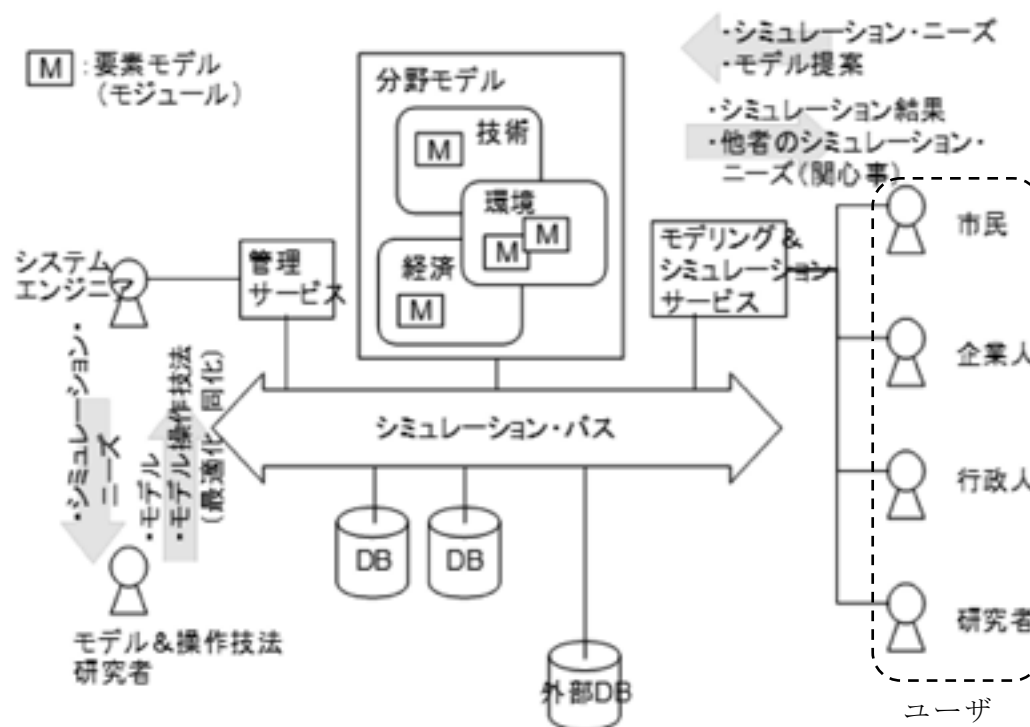


図5 環境・エネルギー・経済分野に関する社会意思決定支援プラットフォーム

研究課題

■「フェーズ1」(プラットフォームの構築)

図5に示した通り、環境・エネルギー・経済分野に関する社会意思決定支援プラットフォームは、シミュレーションの部品となる分野モデル、ユーザと分野モデルを仲介しユーザが求めるシミュレーションを実行するモデリング&シミュレーションサービス機能、分野モデルとデータを計算論的に接続するシミュレーション・バス、モデルや接続するデータを改訂・拡張するための管理サービス機能からなる。実空間での有用性を検証するフェーズ2へ進むためには、最小限のモデルやデータでプラットフォームを構成することとなるが、そのために以下の課題を解決する必要がある。

① オントロジー (シミュレーション・バス論理基盤) 開発技術

アルゴリズムやシミュレーション・ソフトウェアを適切に部品化するためには、環境・エネルギー・経済分野で使われる言葉に対して、その定義と相互関係を定める必要がある。このような定義・関係づけは、オントロジーとよばれる。オントロジーの開発は、巨大システムやシステムのシステムを作る上で必須であるが、多くの労力を必要としている。既存の文書を手懸りにした言葉の抽出、構造化の自動化技法の開発が必要である。

日本では、オントロジー工学を提唱した溝口理一郎氏 (北陸先端科学技術大学院大学) がこの分野で著名である。

② あいまい指示の下でのモデル合成

ユーザには専門家ではない一般市民も想定しているので、環境・エネルギー・経済分野、および、モデリング技術の非専門家が、自らのスコープをシステムに提示することを想定している。非専門家の漠然としたイメージやあいまいな概念を学術的な用語に翻訳し、非専門家の用語とシステムが保有している言葉とその関連性を調べ、所要のモデルを創出する必要がある。ファジィ検索技術が、本機能実現の入口となるが、検索においてモデル合成という演算への対処が求められる。

また、利用者はその関心に応じた分解能 (空間的、時間的、カテゴリー的) のモデルを要求する。このためには、要求に応じた分解のモデルを既存のモデルから変換作成することが必要であり、モデルの同定技術が要求される。これらの変換作成技術は、これまではモデル研究者が必要に応じた開発してきており、この知見をシステムに組み込むことが必要である。

③ シミュレーション・バスの実装技術

複数の要素モデルを合成してシミュレーションを実施するための国際標準として、米国 MITRE が開発した High Level Architecture (HLA) が著名である。これは、主として軍事シミュレーションへの適用を想定して開発されたものであるが、分散的なシミュレーション一般に適用可能な方式であり、提案システムの国際貢献を考えると HLA 準拠は有用な方策と思われる。

ユースケース候補例

- ・火力プラント製造業：世界にどんな需要があるのか、競争力ある基本仕様の将来パスを試算したい。
- ・自動車製造業：EV を手中に収めた。エネルギー流通の大きな一角を占めうる。どんな事業がありうるか。
- ・スマートコミュニティ推進地域 NPO 法人：様々な環境変化が予想される中で、他地域との連携も含めて、持続性のある分散エネルギーシステム構築ビジョンを描きたい。
- ・主婦：原子力の永久停止がどんな生活を要求するのか、前提条件をはっきりさせてイメージしてみたい。

HLA は、シミュレーションオブジェクトを規定するものであり、グリッド環境への適用についてはさらなる開発が必要で、多くの研究発表があるが、MITRE でも継続開発されている。

研究課題①～③がフェーズ2やフェーズ3に進むためには、具体的なシステムの利用方法（ユースケース）を想定することが極めて重要である。

■フェーズ2～3

ネットワーク環境下でのサービスビジネス発展のモデル化と制御

提案するシステムが社会に受容され、国民的な議論の基盤となるには、そのコンテンツとユーザの要求に対する応答の質に依存する。この構造は、一種のサービスシステムと捉えることができる。サービスシステム論では、システムの発展はユーザとサービス提供者の共創活動の結果と定義されるようになってきているが、その発展過程のモデル化や制御因子の抽出はこれからの課題とされている。とくに、ユーザ同士のつながりが有用な要求を生み出していく素地を形成して、ネットワーク構造を想定したシステム論の展開が求められる。

インパクト 環境・エネルギー・経済に関する政策の様々な知恵を生み出すプラットフォームとして、意思決定の判断基準の醸成や知の交流促進をもたらし、専門知だけでは解決できない課題に対する道を拓く先行的システムと位置付けられる。

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・経済環境など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我が国においても、少子高齢化など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、様々なシミュレーションなど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 研究課題 水循環統合システムモデルとそれを用いたシミュレーションの実現は、技術、コスト、人材、制度などの制約から、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、様々なシミュレーションなど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。ここでい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などである。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などを含む）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6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、管路などの人工物モデル、河川・湖沼・地下水などの自然環境モデル、各種用水などの水利用モデル、社会・経済モデルなどがあり、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。国内外の様々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。

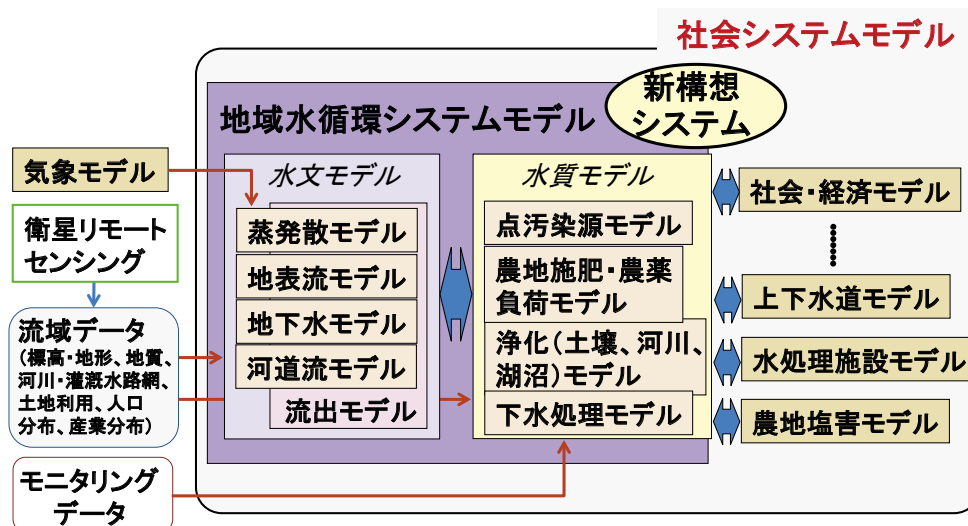
インパクト 統合モデリングシステムの適用が有効と考えられる流域圏水問題や実装が望まれる人工的システムやサービスなどの具体例を、以下に示す。

(世界共通)

- ・ 水・エネルギー・食料を視野にいたった最適な都市設計・水施設設計
- ・ 災害（地震、渇水、洪水など）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、再生水を統合的なモデルで把握
 - 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。



※「異種モデル連携のための統合プラットフォーム」は図中には明示されていないが、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

図6 地域水循環システムを記述した社会システムモデルの構造例

3. 人間行動のネットワーク情報にもとづく社会的健康保持システムの構築 (N-health)

目的 健康社会を実現するためには、個人、組織、地域・社会レベル間で複雑に絡み合った様々な健康に関連する要因要素を総合的に考慮する必要がある。個人の生体情報に加え、個人を取りまく社会・生活・地域環境から健康に関連する情報を統合的時空間センシングによって抽出し、それを通して、個人、社会の身体的かつ精神的な健康を維持するためのシステムを構築する（図7）。

内容 個人の健康は生理状態だけでなく、社会環境（労務状況、労働環境、所得、コミュニティなど）や、生活環境（食生活、運動習慣など）、地域環境（気象、交通、健康関連施設など）にも強く依存している。これら健康に重大な影響を及ぼす個人と環境との相互作用はネットワークのログデータとしてトレース可能となっただけでなく、個人の身体や住宅に装着されたスマートセンサーからもオンラインで計測することが可能となった。本プロジェクトでは、これらの膨大なデータからコミュニティや社会の健康状態を推定し、さらにそれに基づいて個人の健康を維持するための社会システムを構築することを目指す。

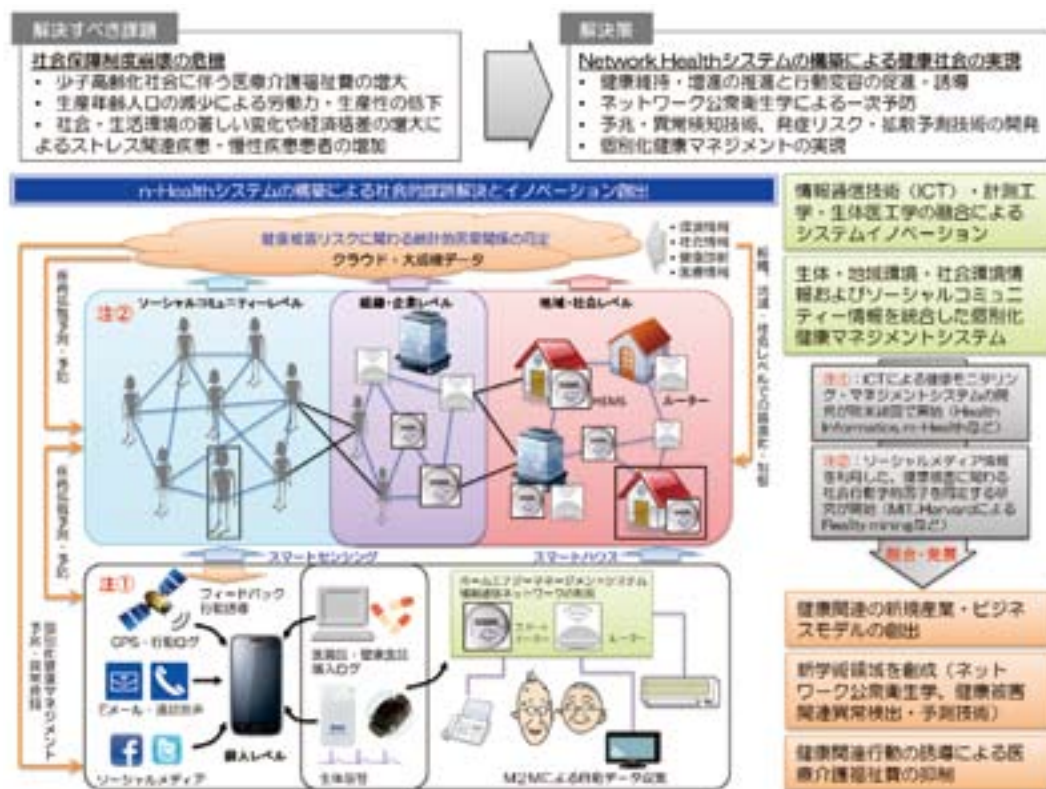


図7 N-Healthシステムの構築による社会的課題解決とイノベーション創出

研究課題

■「フェーズ1」（プラットフォームの構築）

N-Health システムのプラットフォームの構築は、大きく「モニタリング」と「モデリング」の2つに分けられ、それらを統合することによって汎用性と有用性が生まれる。

・生体、環境、行動情報の統合モニタリングのプラットフォーム構築

個人の様々な生体信号（身体活動、GPS、心拍、血圧、体温、通話音声など）や個人を取りまく環境情報（気象情報や周辺環境の物理的情報）、個人の採った社会行動（メール、Twitter、交通機関利用ログ、食料品・市販医薬品・健康食品の購入履歴など）の多変量同時連続計測を行うスマートセンシングシステムの研究・開発を行う。また、地域や居住空間に分散配置されたセンサー群を用い、情報端末のみに依存しない健康情報のスマートセンシングを行うシステムを開発する。これによって、子どもから高齢者まで幅広い年齢層を対象とした汎用性のあるモニタリングシステムを構築する。

・生体、環境、行動情報の統合モデリングのプラットフォームの構築

モニタリングプラットフォームで収集可能な多種多様の大規模データと健康・医療情報を組み合わせることによって、生活習慣病・精神疾患などの発症に関わる健康リスク因子とそれらの相互関係を個人レベル、組織レベル、地域・社会レベルで抽出・モデル化する。また、個人の保健行動が組織や地域・社会レベルでの生産性に与える影響や、逆に、労働環境や労務状況、インフラ環境などの組織や地域・社会レベル因子が個人の健康維持に与える影響など、階層間の相互関係もモデル化する。ここで得られる健康被害リスク因子と階層内・階層間の相互関係のモデルは、統合モデリングプラットフォームに組み込まれる。

さらに、フェーズ2での実証研究で得られる知見・経験則に基づき、疾患の発症予測や先制制御、健康関連問題の最適化がシミュレーション可能なプラットフォームを構築する。例えば、食生活や運動習慣といった個人の生活習慣行動の改善への取り組みや企業の労働環境・労務状況の改善、インフラ環境の整備などが個人の疾患の発症や健康維持・増進に与える影響、さらには、それに付随する組織・地域レベルでの生産性・医療費などの増減額などの具体的数値がシミュレーションによって提示可能なプラットフォームである。

■「フェーズ2」（実証研究）

・健康問題の先制制御・最適化技術の開発

健康問題への先制制御や最適化に関する技術を統合シミュレーターに組み込むためには、特定の企業や自治体などを対象とした実証研究が不可欠である。フェーズ1で得られた健康被害リスク因子とそれらの相互関係に基づき、生活習慣行動の誘導や労働環境の改善などの介入を行い、その効果を検証する。これにより、経験則に基づく健康問題の最適化法を導出する。ここで得られる知見・経験則は、フェーズ1の統合モデリングプラットフォームの構築に利用する。

・健康情報のプライバシー保護のための倫理課題の抽出・解決に関する研究

スマートセンシングによって得られる個人の生体情報や周囲の環境・生活習慣などに関する情報、また将来的には遺伝情報など効果的な健康マネジメントに有用と考えられる情報は、従来の医学・疫学研究などで対象とするデータと比較しても、その詳細さゆえ個人識別性も高い。このような情報の活用と保護に関する倫理課題を実証研究を通じて抽出し、その解決を目的とした技術的および制度的研究を行う。

■「フェーズ3」(社会への実装)

・組織・地域・社会レベルでの活用

企業や自治体の具体的な要件や条件のもとでシミュレーションを行うことにより、課題解決へ向けた最適な方策とその予測結果を具体的な数値で示す。実践的課題を通して、構築システムの有用性を示すことにより、企業・自治体での普及や国への政策提案などでの活用を図る。

特徴 情報通信技術（ICT）の健康・医療分野への応用は、ヘルスインフォマティクスとよばれる新たな概念を産み出し、国際的にも精力的に研究が開始されている。また欧米諸国では、大規模な国家プロジェクトも実施されている（EU FP7 の MONARCA や PSYCHE プロジェクトなど）。これに対し我が国では、スマートセンシング技術に関する基礎研究の水準は高いものの、本格的な実装を見据えたプロジェクトは未だ存在せず、世界的潮流から取り残されつつあり、国による積極的な施策が必要である。一方、EU でのプロジェクトは、生体信号と社会行動ログデータのモニタリングシステムの開発に重点が置かれており、蓄積される大規模データのマイニングやモデリングに関する研究は不十分である。また、社会・生活・地域環境情報などの多階層データや、コミュニティ情報との統合は成されていない。本プロジェクトでは、これらの欠点を補いつつ、ICT による健康モニタリング・マネジメントシステムの融合・発展を図る。

インパクト このシステムが実現すれば、国民の健康維持・増進、医療介護福祉費の削減に直接的効果をもたらす。データ科学・ネットワーク科学に基づく公衆衛生学や一次予防・介入法の確立など新たな学問の創成をもたらす。

4. 生体モデルにもとづく高齢者の遠隔医療システム

目的 高齢者個人の生理統合モデルにもとづく推定予測技術を用いて高齢者の生理状態を常時遠隔地からモニターし、異常検出、生活指導、投薬指示、検査指示などを遠隔地からの意思伝達・指示が行えるシステムを構築する。これによって在宅医療の範囲を広げ高齢患者、医療スタッフ双方の負担の軽減と医療費の削減をもたらすことが可能となる。

内容 現在行われている人間ドックなどの検査は主として異常があるかないかの分類を行うためのものであり、データの意味するところをさらに一步踏み込んで全体の生理状態のバランスを解析するには至っていない。動的な生理モデルを用いれば、異常正常の分別を超えてデータから生理状態の大雑把な状態推定と将来予測を行うことが可能である。ただし、人間の生理的な特性は個人差が大きく、日々変動する。一般的な数理モデルでどこまで正確に記述できるか、という問題は常に医学の側から提起され、人間の生体構造における普遍性と特殊性の問題として議論されてきた。最近検査技術の発達により、この問題には大きな進展が得られつつある、と考えられる。特に高齢者は長期にわたる医療機関との接点があるために、信頼のおける個人の生理モデルをデータに即

して作ことは可能と考えられる。遠隔地の医療施設に個人の生理モデルをデータベースとして置き随時更新しつつ精度を向上させ、それを用いて医療施設の医師が高齢患者の生理動態をモニターし、必要に応じて各種の指示（生活様式改善、投薬、検査など）を行えるようなシステムの構築をめざす。

研究課題

「フェーズ1」

■生体統合モデルの構築

人間の生理モデルについては長い研究の歴史があるが、これまで作られたモデルのほとんどは、循環器系、呼吸器系、内分泌系、消化器系、温熱系、免疫系など部分的な機能モデルであり、それらを統合した生理モデルはその確立の試みが始まった段階である。最近「フィジオーム」²が提唱されその研究が活発化しているが、それに刺激されて統合生理モデルの研究も進みつつある。

■生体モデルのデータベース化とその更新

特に最近では免疫系、自律神経系、内分泌系の三者一体となった生体防御系の仕組みが明らかとなりつつあり、病気の発生とその成長、消滅の数理的な表現も活発に研究されるようになった。その意味でも、医療におけるモデル活用の気運は上昇している。また最近検査の方法や精度も大きく向上したため、モデルを新しい検査データの取得に応じて随時更新して精度を保つことが可能となった。特に、高齢者の場合は日常的に医療機関との接点がある場合が多く、検査データにもとづいてモデルを随時更新することを高い頻度で行うことが出来るので、モデルによる診断と治療が効果を発揮すると思われる。生体統合モデルとそれにもとづく診断／治療のシステムを構築することがフェーズ1の内容である。

「フェーズ2」

■各医療機関にあてはめたシステム開発

実時間の医療データの採取と転送は精度の高いしかも安価な通信機能付きのセンサーと通信プロトコルの開発が必要であり、さらにそれらを結び付けて処理を正確かつ迅速に処理する介護用ロボットが必要となる。これらは実用化をみすえて対象の特性を考慮した個々の医療施設に適用を検討、実施する。これが、フェーズ2である。

「フェーズ3」

■各医療機関での実施

医療機関に各自治体の指導にもとづいて実際にシステムを構築する。保険や年金、介護施設など既存の制度組織との整合性をはかり、効率的かつ公平な医療の実現を図る。

インパクト このシステムが実現すれば、高齢者の健康ケアに伴う医療従事者の負担を著しく軽減することが可能となる。また、医療機関が患者のデータを「統合生理モデル」として集積することになる。これは新しい形の医療データベースであり、活きた形で次世代の医療の高度化に寄与する。

² フィジオーム：生命をあらわす「physio」と総体をあらわす「ome」をつなげた合成語で、ゲノムやプロテオームと並ぶ新しい生物学における研究対象である。個体の生理的状態と機能的振舞の関連を蛋白質から個体に至る各スケールで明確にすることがフィジオーム研究の目的である。

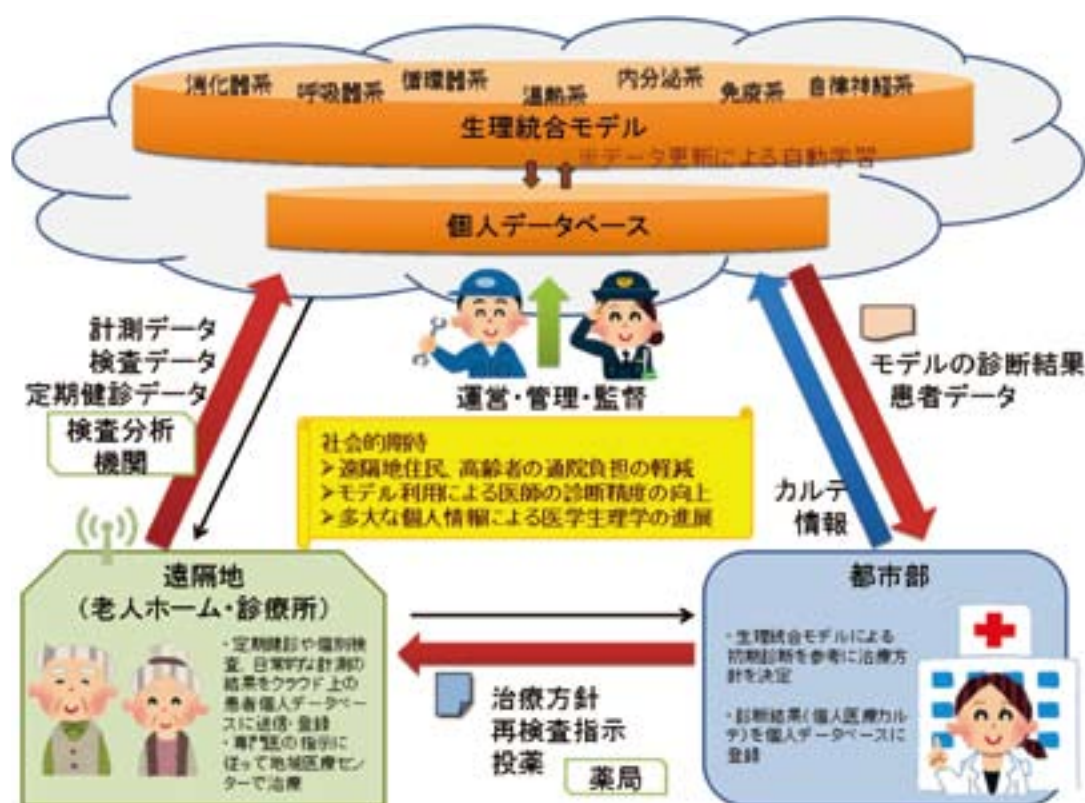


図8 生体モデルにもとづく高齢者の遠隔医療システム

5. 分野横断型リスク関連知識プラットフォーム

目的 自然災害、事故、感染症の流行、食害、金融崩壊など現代人は様々のリスクに囲まれて生きている。それぞれのリスクについてその可能性、発生原因、それが引き起こす影響、それを防止する手立てが研究されている。しかしそれらの研究は互いに関連がなく、個別的な研究にとどまっている。実際にはそれらは互いに関連しており、共通の構造をもち、従って対処の方法にも共通のものがあるはずである。このような共通性を明らかにするには、個別の研究領域を要素としてとらえ、これらの関連リスク構造をシステムとして理解する必要がある。本研究では、社会全般に影響を与える全体リスク（システムック・リスク）を効率的かつ的確に把握するための、分野横断的な共通フォーマットを開発し、共通モデルで俯瞰・議論ができる知識プラットフォームとリスク対応システムの構築を目的とする。

内容 リスクの概念は一般に、事象生起の確からしさと、それによる負の結果の組合せで定義されるが、社会経済システムに大きな影響を与えるシステムック・リスクは、「確からしさ」の測定と「負の結果」に対する評価バイアスの観点から評価することは難しい。また、これは、単独の原理原則では見通すことは不可能であり、分野をまたがる複雑な因果関係を考慮した対策が必要となる。

その一方、現状は、環境・医療・金融・ITなど、様々な分野において、研究の蓄積があるが、分野ごとに主要概念の意味の違いが存在し、分野横断的な、概念の翻訳やデー

タ・知識の互換性を保証するシステムは存在しない。また、信頼性工学・リスク学・レジリエンス工学等の最近の研究成果が普及していない現状がある。

したがって、このようなリスクの全体像を効率的かつ的確に把握し、リスクと総体的に向き合う対策を確立するためには、様々なリスクを分野横断的な共通フォーマット、共通モデル、共通言語で俯瞰、議論できるプラットフォームの構築が必須である。そして、このプラットフォーム上で、リスク概念を管理し、システムミック・リスクに関するシナリオ分析を可能とする運用組織の構築が望まれる。

研究課題 本研究課題は、国主導の研究プロジェクトを実施する研究開発ステージと、リスク知識プラットフォームを管理・運用する（仮想的な共同利用）組織の構築を目指す運用管理ステージの二つから構成する。研究開発ステージは、システム構築のフェーズ1：プラットフォームの構築に相当し、共通して利用できるプラットフォームを実現するには、国主導の研究開発支援が必要となる。一方、運用管理ステージは、システム構築のフェーズ3：システムの実装と運用・管理に相当し、各研究分野で集積したリスク情報を利用し、管理することになる。また、各研究分野でのリスク構造化に関する成果は、システム構築のフェーズ2：個別システムの設計に相当し、各々の専門分野の研究の進展とともに内容が充実することが期待される。

研究開発ステージにおいては、次の3点が課題となる。(1) 知識構造化の一般理論として集合知を構築運用するための社会科学的な理論づけ；(2) ICTを適用したデータ処理・変換・知識化・共有化のための技術開発；(3) 各分野の専門家が容易に利用でき、リスク概念を共有化できるようなプラットフォーム機能の整備。

運用管理ステージでは、次の3点が課題となる。(1) 政策立案で利用できるような「包括的なリスク評価」手順の構築；(2) 当事者を含むステークホルダーがリスク評価できるようなリスクコミュニケーションの方法とツールの提供；(3) 専門家による研究プロジェクトの提案時・リスクアセスメント時に利用できるような運用方式の実現。

インパクト 次の4点によってシステムミック・リスクに関する構造的情報が整備され、リスク概念の正しい理解と市民へのリスク概念の普及をはかることが可能となる。

- ・社会的リスクに関する主要概念の同定とその時間的変化の計測。
- ・各専門分野におけるリスク研究成果をICTによって統合して、その関連性の分析研究を促進する。
- ・リスク研究拠点を設置し、「潜在リスク研究」を普及させ、リスク評価作業の容易化をはかる。
- ・証拠に基づく客観的な「リスク知識」の基盤を確立する。

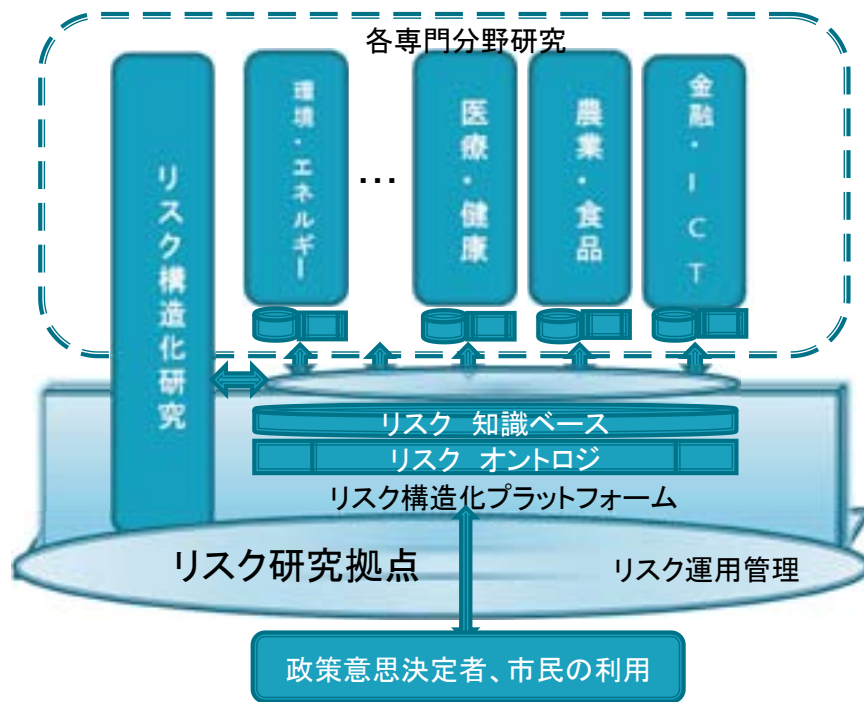


図 9 分野横断型リスク関連知識プラットフォーム

Ⅱ. システム科学技術分野の概要

「システム科学技術」分野の詳細な俯瞰については、研究開発の俯瞰報告書システム科学技術分野（2013 年）[1] を参照いただきたい。ここではその概要を紹介する。

1. システム科学技術の周辺学問分野における位置づけ

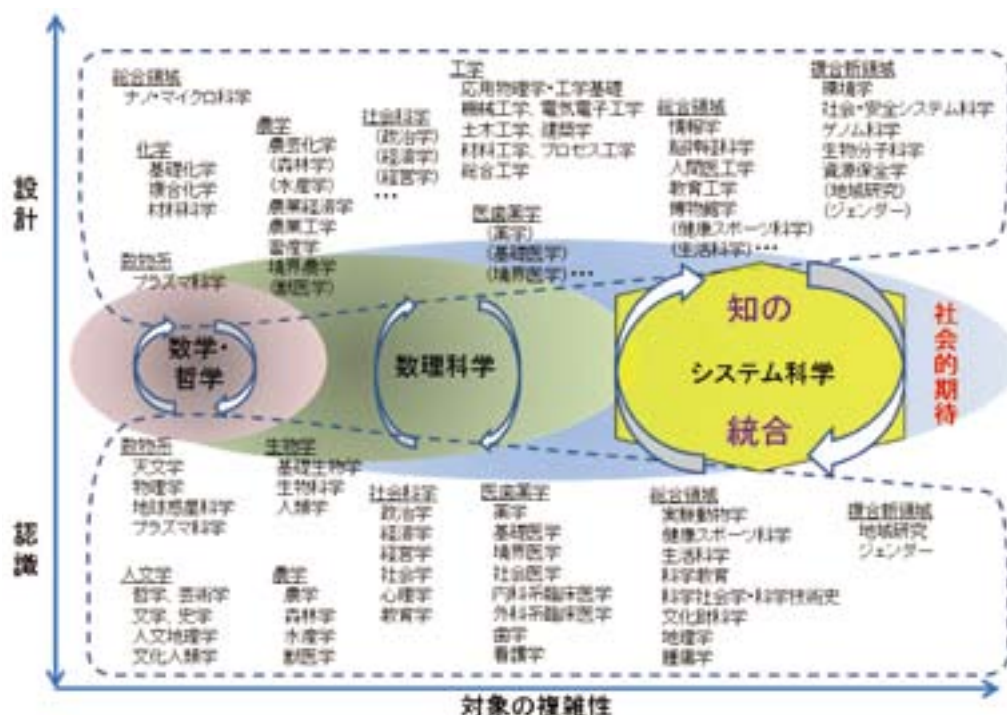


図 10 システム科学技術の周辺学問分野における位置づけ

縦軸に認識と設計という観点を設定し、横軸には対象の複雑性（自己完結的から複合的）という観点を設定した。二次元平面上に科学研究費補助金の平成 20 年度公募の「分野」「分科」を分野名としてそれぞれプロットした。

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複合的な分野においてはシステム科学が担っていることを示している。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づけられる。

2. システム科学技術分野領域俯瞰図

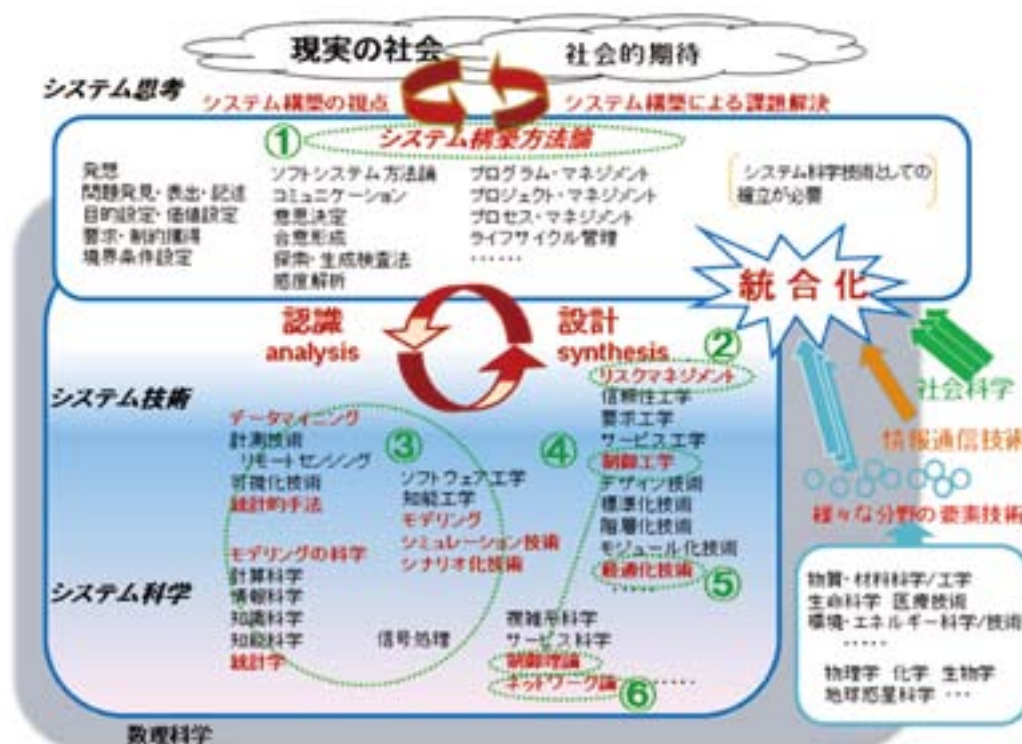


図 11 システム科学技術分野領域俯瞰図

システム科学技術は、抽象化や一般化を行うことで、実社会における複雑で多様な対象を認識するところに特徴がある。また、対象の認識（analysis）と設計（synthesis）の両側面を有するところに特徴がある。これらのシステム科学技術の特徴を明示的に示すことにより、システム科学技術の領域俯瞰構造を示したものが図 11 である。ここでは、システム構築において活用される方法論を、すでに学問分野として確立し体系化されている方法論と、実用上は重要であるが未だその方法論が確立し体系化されていない方法論に分けて示した。前者にはモデリング、最適化、制御、ネットワーク論、リスクマネジメントなどのシステム科学技術における方法論が含まれるが、これらの方法論を図の下部に位置付けた。また、後者には主に実空間における課題を抽象化し一般化する過程で使われる方法論や操作手法が含まれるが、これらを「システム構築方法論」と名付け、図の上部に位置付けた。

■報告書作成メンバー■

木村 英紀	上席フェロー	(システム科学ユニット)
シンジャワ	フェロー	(システム科学ユニット)
寺野 隆雄	フェロー	(システム科学ユニット)
富川 弓子	フェロー	(システム科学ユニット)
豊内 順一	フェロー	(システム科学ユニット)
藤井新一郎	フェロー	(システム科学ユニット)
鈴木 久敏	特任フェロー	(システム科学ユニット)
船橋 誠壽	特任フェロー	(システム科学ユニット)
本間 弘一	特任フェロー	(システム科学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2013-XR-03

■プロGRESSレポート

システム構築型イノベーションの 重要性とその実現に向けて

平成 25 年 11 月 November 2013

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/report>

© 2013 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.
