

CRDS-FY2010-XR-07

独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 主催

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

2010年7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

目次

1 はじめに	1
2 科学技術の変貌とシステム科学技術の役割	6
2.1. 変貌する科学技術	6
2.1.1. ものの氾濫：ものからコトへ	6
2.1.2. ますます複雑化する人工物システム：要素からシステムへ	7
2.1.3. 複雑さが凝縮したソフトウェア：ハードからソフトへ	7
2.1.4. 不確かさとリスク増大	9
2.1.5. 科学的合理性と公共的合理性	9
2.1.6. 国家戦略となった科学技術	10
2.1.7. 研究開発の新しいスタイル：知の統合	11
2.2. システム科学技術の課題	11
2.2.1. 新しいシステムの構築	12
2.2.2. 複雑性と不確かさのマネジメント	15
2.2.3. 社会的期待と科学的知識との邂逅	16
2.3. システム技術の発展	17
2.3.1. モジュール化と規格化はシステム技術の出発点	17
2.3.2. 階層化	18
2.3.3. システム技術の発展	19
2.3.4. システム思考	20
2.4. システム科学の系譜	22
2.4.1. システム科学と人工物の科学	22
2.4.2. 要素還元論とシステム科学	22
2.4.3. モデリングはシステム科学の核	23
2.4.4. 計算	23
2.4.5. 制御	24
2.4.6. 適応複雑システム	25
2.4.7. 社会科学との融合：合理的な意思決定の基盤確立を目指して	25
3 日本のシステム科学技術	26
3.1. 日本のシステム技術の歴史	26
3.1.1. 高度成長期の日本のシステム技術	26
3.1.2. 省エネ、省力、環境対策で発揮されたシステム技術の底力	28
3.1.3. ロボット：その光と影	29
3.1.4. その後の退潮と「ものづくり路線」への傾倒	31
3.2. 日本のシステム科学の現状	37
3.2.1. ファンディング	37
3.2.2. 大学組織	40
3.2.3. 学会	43
3.3. システム思考を阻む日本の制度と風土	45
3.3.1. 縦割り行政と実態—科学技術研究の視点から	45
3.3.2. エレメント産業とアンプレラ産業	46
3.3.3. 大学の問題	46
3.3.4. 普遍性の問題	47
4 何をなすべきか	48

1 はじめに

1980年代に日本の製造業は世界を制覇した。家電製品やカメラ、時計、半導体メモリ、AV機器、自動車などの主要な消費製品とそれらの部品や材料で圧倒的な優位を獲得しただけでなく、半導体製造機、ロボット、工作機械など様々の生産技術では他国の追随を許さないレベルを誇ることが出来た。「ジャパン・アズ・ナンバーワン」が流行語となり、「欧米には学ぶことがなくなった」と豪語する一流企業の経営者が現れた。しかし一方では、本格的なダウンサイジングを開始した計算機技術、それと関連した双方向通信ネットワークサービス、これまでにない広がりを見せつつあった生物医療技術、高度化しつつある研究開発用の科学機器、データベースや経営システムのソフトウェアなどの分野では、日本は技術の方向性を定められず、シェアの低迷が続いていたのが実情であった。

1980年代に日本が制圧した分野は、どちらかと言えば、既に市場が確立し技術の方向性もある程度固まっていた従来型の分野である。一方、苦戦を強いられた分野は、市場の形成（あるいは市場の価値観の形成）が未熟であるためにその動向が掴みがたく、技術開発の方向性に様々の曲折が予想される不確かさの大きな未来型の分野であった。今から考えれば、当時日本は従来型の成熟しつつある技術で優位に立ったが、その背後で進行しつつあった技術の地殻変動を捉えることが出来ず、その結果、変化しつつある社会の動向に対応して変化するダイナミズムを失っていたと言えよう。残念ながら、30年後の現在、それなりの努力は行なわれたが状況は改善せず、ミスマッチはむしろ顕在化しつつある。日本が主導する新しい産業分野は現れる兆候がない。

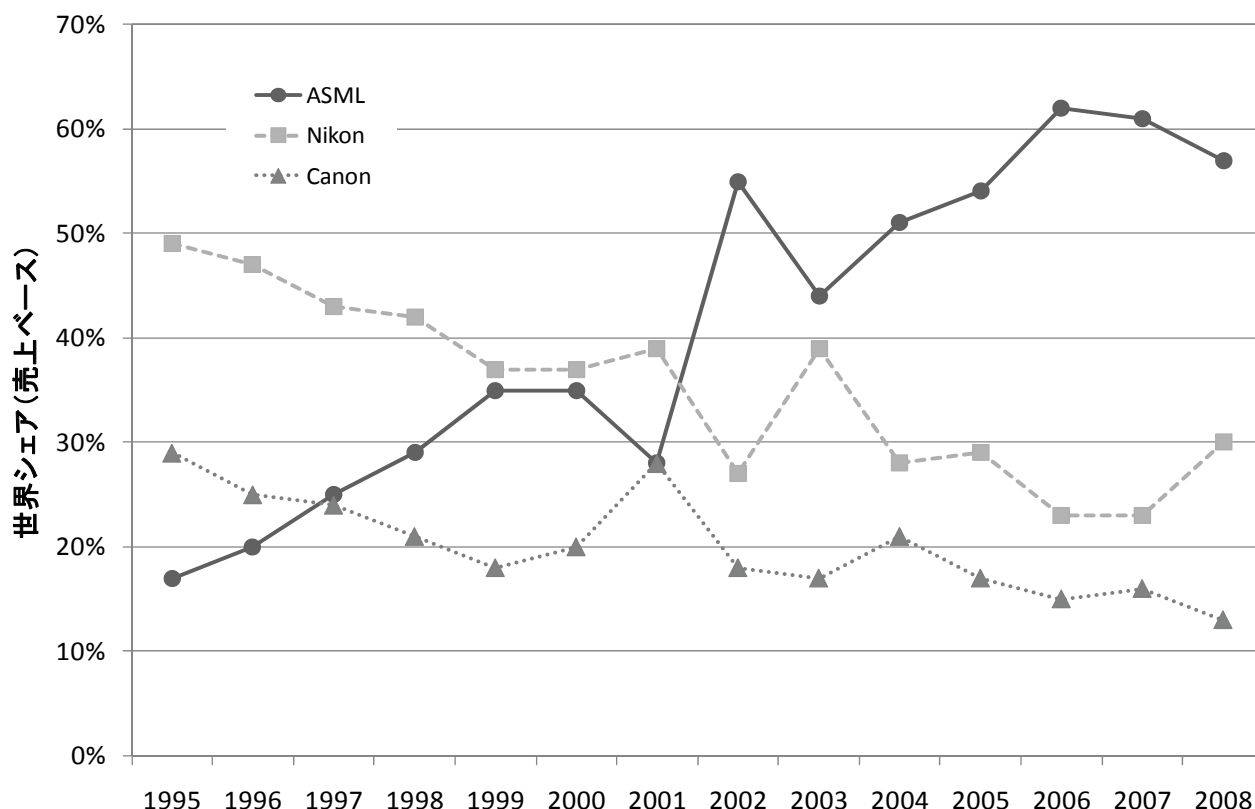
新しい分野で日本の製品のシェアが伸びないだけでなく、最近ではこれまで日本の独壇場と言われてきた分野で日本製品の国際シェアが急減している。例えば、家電製品である。白物家電といわれる日本のお家芸製品については次のようなデータがある。

表 1-1 白物家電における日本メーカーの販売世界シェア（台数ベース）

	冷蔵庫	エアコン
2005 年	12.2%	24.3%
2008 年	10.2%	18.2%

（株）富士経済 グローバル家電市場調査 2006、2009 [1] [2]より

半導体製造機械も絶対の強さを誇っていた分野であるが、シェアが劇的に低下している（図 1-1）。



湯之上隆；日本「半導体」敗戦（図 5-11）、他より [3] [4]

図 1-1 半導体露光装置の世界シェア推移（売上げベース）

既にシェアをほぼ喪失しつつある分野も少なくない。例えば、DRAM メモリ、液晶パネル、DVD プレーヤなどである。その結果、2008 年にはこれまで 28 年間続いてきた日本の貿易収支は赤字に転化している。2009 年には再び黒字に転じたが、その幅はこれまでの半分に減っている。製造業で世界を席卷していた 25 年前に比べると、見る影もないという表現もあながち大げさではない状況となっている。このような状況をもたらした背景を冷静に分析しその原因を探ることは、日本の科学技術の進むべき方向を見定め、産業競争力を回復させるためにはどうしても必要なステップであり、事実これまでに多くの論評がなされている。

言うまでもないことであるが、製品の国際シェアを左右するのは技術力以外にも多くの要因がある。例えば為替レートは支配的な要因の一つである。1985 年のプラザ合意をきっかけとする急速な円高の進行は日本製品の国際シェアに大きな影響を与えたことは事実である。これによるマイナスをできる限り回避するための海外生産の強化が日本の製造業のグローバル化を促進した。アジア諸国の安い労働賃金がコスト面での日本の産業競争力低下の主要な原因にあげる人は多い。しかし、現在の主要な問題はすでに賃金コストの問題ではない。現状ではアジアの諸国、特に中韓台は人件費だけでなく中核となる生産技術によって日本を抜き去ろうとしている。事実、日本製品のシェアを奪いつつあるのはアジア諸国だけではない。図 1-1 で示した半導体露光装置では、日本のシェアを奪ったのは

オランダの企業である。企業のレベルでも製品開発の成否には技術力以外の要素も大いに影響する。例えば製品開発の方針を立てるときに幾つかの可能な選択肢がある場合どれを選ぶかは、技術的な要因だけでなく経営状態からくる様々な制約や競争相手の出方、市場の予測など多くの要因を考慮した経営判断となる。その結果、最初に先行した企業が開発に失敗し、後発の企業が製品化に成功して利益を最初に得る場合は少なくない。製品の開発は技術の展開だけでなく、市場の動向や企業の経営資源の大きさ、国際的な力関係など様々な要因が絡み合った複雑なプロセスであり、不確かさに満ちている。

また、税制、法規制、教育、雇用、社会福祉、さらには文化まで、様々な技術外の政治的社会的な要因を指摘する意見もある。企業数の多い業界の構造、知財戦略を含めた「ビジネスモデル」の貧困さ、リスクをとることを極端に嫌う保守的・微温的な経営手法に責任を帰着させる声もある。このような意見は、技術力は依然として他国に負けていないという主張が含意されている場合が多い。

技術力以外の多くの要因が製品の世界シェアに影響を与えていることは事実であるが、やはりなんと言っても最後に国際競争の帰趨を決めるのは技術力である。円高の影響を回避するための国際展開力、状況の変動を迅速に読み取り情勢に応じて研究開発の方針を調整できるかどうか、世界市場の動向を的確に把握し市場をリードできるかも結局は技術力の問題に帰着される。技術外の要因を指摘するのであれば、それらが最終的にはどのような技術力の欠如を生み出し、それが実際にどのような弱点となったか、を分析しなければ、それを克服するための実のある方策は生まれないであろう。

日本の製造業が 1980 年代に世界を制覇したその時、既に以後の長期低落傾向を引き起こす弱点が露呈し始めたことは上に述べた通りである。その弱点は、研究システムや科学技術文化、科学技術政策も含めた総体としての日本の科学技術が、大きく変貌しつつある科学技術の世界動向とミスマッチを起こしたことから来ている。逆説的に言えば、日本の科学技術の強さが弱さに転化したのである。1990 年代はそれが顕在化し、日本の産業全般に波及した時期である。今世紀の 10 年間は、アジア諸国の技術力の底上げが製造業前半に及ぶことにより、その危機がさらに深まった時代と言える。

現代科学技術の変貌はキャッチフリーズ風に表現すると次のようになる。

- (1) ものから「コト¹⁾」へ科学技術の目標が移動
- (2) 要素からシステムへ科学技術の課題が移動
- (3) ハードウェアからソフトウェアへ付加価値が移動

このうち (1) と (2) は最近起こったことではなく、科学技術が進歩すれば必然的に生じる長期的なトレンドであるといっていよい [5]。(3) は (1) と (2) の変化が引き起こした結果である。これらのトレンドは、最近になってはっきりと顕在化し、上記 (1) (2) (3) の移動が分水嶺を越え、「コト/システム/ソフト」の比重が「もの/要素/ハード」のそれをはっきりと上回った。その具体的な事例については本文で詳しく述べる。

日本の科学技術は、これらの大きな科学技術の変化のうねりに対応を怠っていたため、日本のイニシアティブによる新しい製品や産業を作り出すことが出来なかった。従来技術

¹⁾ ものが生み出す使用者と環境の様々な相互作用

での成功体験に安住して、次の時代の動向を見据える努力を怠ったと言ってよい。それを象徴するのが 1990 年代前半に出現し、やがて日本の製造業の代名詞となった「ものづくり」（「ものづくり」）という大和言葉である。日本の伝統的な工芸と現代の製造業を重ね合わせる作爲を感じさせるこの言葉は、人々に好意的に受け入れられ、短期間のうちに流布した。また、「ものづくり」は法律の名称に使われて公用語となり、日本の強みを代表するだけでなく、日本がよって立つ基盤とされ、日本人の誇りの表現ともなった。しかし残念ながら「ものづくり」が目指す技術は、先に述べた現代科学技術の潮流に逆行する方向、すなわちコトではなくもの、システムではなく要素、ソフトではなくハード、を尊重している。このような意味での「ものづくり」を目指す科学技術の捉え方（これを便宜的に「ものづくり路線」と呼ぶ）は、90 年代後半から現在に至る日本の科学技術の支配的な枠組みとなったが、この「ものづくり路線」こそが、日本の科学技術と世界の科学技術が目指す方向のミスマッチを生み、現在の日本の製造業に苦戦を強いている大きな要因の一つである。これについては具体的な検証を 3.1.4 節で行う。「ものづくり路線」と決別し、システム科学とシステム技術（以降システム科学技術と称す）の役割を踏まえた新しい科学技術研究開発の枠組みを作ることは、緊急の課題である。

本報告では、現代技術の転換がいつどのような形で起こり、それがどのような形態をとって現れているかを具体的に述べ、更に、転換の背後にあり、それを駆動しているのがシステム科学技術（コラム 1 参照）であることを明らかにする。次に、日本の科学技術がこの転換に対応しきれていない状況を、科学技術政策の制度や技術文化的な側面も含めて分析する。

現代技術の新しい要素として情報技術（IT）をあげ、「IT 化」に乗り遅れたことが日本の技術の低迷の原因であるとの意見が聞かれることが多くなった。システム科学技術は IT が誕生する以前から科学技術の主役として技術のシステム化を推し進めてきたことは本報告の核心の一つであり、2 章で詳しく述べるように IT はシステム科学技術の一つのツールに過ぎない。従って、IT 化に乗り遅れたということ（事実としてはその通りかもしれないが）は、現代の日本の科学技術の低迷を説明するには不十分である。それは原因ではなく結果にすぎない。3 章では、日本はシステム科学技術とは逆方向の「ものづくり路線」を科学技術の枠組みとして採用してきたこと、そしてそれがある意味で日本の技術文化の DNA が生み出したものであること、そしてこれらが日本の科学技術が陥っている低迷の根本的な理由であることを明らかにする。IT の背後にあって IT をツールとして動かしているシステム科学技術の深い水脈に分け入らなければ、問題の本質に触れることは出来ない。

この状況を克服するために何をなすべきかについては、政策提言「システム科学技術の振興策（仮題）」について詳しく述べる予定であるが、本報告でも 4 章にその基本的な考え方を述べる。

本報告は、CRDS システム科学ユニットが主催している「システム科学技術推進委員会」の 6 回にわたる討論結果²に、ユニットの調査活動を加えた中間的な報告書である。具体的な推進策を提言する前提となる、システム科学技術の歴史、現代技術における位置づけ、そして日本の現状を明確化することを目的としている。

²委員会各回の詳細は、記録集として順次刊行している。開催一覧は巻末を参照のこと。

コラム 1 システム思考・システム科学・システム技術

システム思考、システム科学、システム技術に関しては、様々な人間がそれぞれの立場で既に定義をしているが、システム科学ユニットでは、下記のように定義する。

システム思考（暫定）

「対象を全体として見通すことができる能力」

システム科学の定義（暫定）

「人間・社会・人工物をシステムの視点から探求し、俯瞰的統合的な手法で課題を解決するための科学」

システム技術の定義（暫定）

「要素間の関係を重視し、それを通して全体の機能を認識、設計するための技術」

2 科学技術の変貌とシステム科学技術の役割

2.1. 変貌する科学技術

現代科学技術の変貌は、具体的にどのような姿をとって社会に現れているのかを、科学技術の内部の要因と科学技術が直面している課題に分けて検討する。それを通じて「ものづくり路線」の問題点を浮き彫りにしたい。

2.1.1. ものの氾濫:ものからコトへ

物質文明の成熟は工業製品の氾濫をもたらした。社会にも家庭にももの（人工物）が溢れており、人々はものに頼って快適な生活を追い求めている。新しく作られたものが人々に受け入れられるためには、既に存在している沢山のものとうまく整合し、出来ればそれらとプラスの相乗効果を生活にもたらしことが期待される。場合によっては今あるものを押しのけて存在価値を主張しなければならない。ものが増えるにつれて新しいものの価値と魅力は相対的に減少し、新しい製品やサービスへの人々の評価は厳しくなる。物が増えるにつれて人々はもの自体の価値よりも、ものの持つ機能が実現することを通じて生活の様々な場で生み出す様々な出来事やシナリオや価値、すなわち「コト」に関心を移している。ものから「コト」への価値の転換が起こっているといつてよい。

一世紀前の技術は衣食住や医薬など人間が生存するための基本条件と交通や通信、建築土木など社会が存続するための基本条件に主としてかかわってきた。しかし最近の技術はそれらを超えて、趣味、スポーツ、教養、娯楽、健康など人間の文化的な側面に大きくかかわるようになった。それによって人々の価値観や生活スタイルの多様化に貢献している。生活の多様化は同時に技術の多様化を引き起こす。多様化はコトを通じて実現する。コトは多様性の源泉である。ものから「コト」への価値の転換が生じる原因はここにもある。

近代文明 200 年の経験を通じて、人類は科学技術が生活の快適さをもたらした反面、様々のマイナスをもたらしたことを認識している。交通事故、医療事故、薬害、食品災害、大気や河川の汚染、などはますます深刻化しつつある。最近ではマイナス要因の影響は地球規模に達しつつあり、なかでも地球温暖化はその影響が長期かつ広域にわたる点で、科学技術が生み出した文明の総体に対する大きな脅威として認識されている。「持続する地球」の概念は、すでに 30 年も前に科学技術の負の側面に対する国際社会の共通認識を表現するものとして国際機関から提案され、現在数々の国際協力の基盤となっている。これらの負の側面はものが引き起こした「コト」である。しかも、ものからは単純に予測しにくい「コト」である。薬害の場合は、「コト」を引き起こしたものが同定しにくく、しかも多くの場合、様々の環境因子が複合的に働いて引き起こされる「コト」である。薬害によるものでなくても病気には原因が特定できていないものは少なくないが、新しい薬品や製剤が問題となっている場合は、臨床事例も少なく原因を科学的に同定することは難しいことが多い。様々の環境汚染も同様である。

ものだけを見ていてもこのような技術の負の側面は予測も対応もできないし、それを克服する科学や技術への構想も生まれにくい。科学技術のマイナスの影響が多面化しつつある現在、「コト」に対する配慮がこれまで以上に求められている。

2.1.2. ますます複雑化する人工物システム:要素からシステムへ

技術の発展とともに製品が次第に複雑になることは自然の傾向である。果てしない人間の要求に応じて製品に要求される性能はますます高くなり、それを実現するために製品が達成すべき機能や性能は多元化しレベルが上がる。そのために製品はますます複雑かつ大規模化する。製品の複雑さの一つの指標は、製品で使われている部品の数である。例えば輸送機関を例にとると、自動車は2万5千点、大型旅客機は25万点、そしてスペースシャトルは250万点と、それぞれ10倍ずつ上がっている。

製品をこのように複雑にすることができるのは、まず製品の要素である部品の性能が上がり信頼性が高まり、それぞれの部品を手際よく組みつけるための加工精度や自動化が進んだからである。アクチュエータやセンサ、材料、パッケージ技術などが飛躍的に向上し、製品の複雑化への道を切り開いた。これらの部品技術が向上することに日本の技術は大きく貢献した。部品開発や要素技術と並んで、あるいはそれ以上に重要なのは、それぞれの部品の機能を全体の機能と整合させ、環境変動に応じて製品全体の機能が無駄なく発揮させるためのシステム技術である。製品を手にとると、それぞれの部品に目が行きがちであるが、実際に製品が使われる場で適切に「コト」を生み出していくには、部品を統合するシステム技術が製品の死命を制している場合が多い。にもかかわらず、目に見えにくいシステム技術への認識はわが国では低い。

複雑さは単品の製品だけでなく、交通システムなどのインフラ系、金融、販売などのサービス部門にも及んでいる。ITS、ATM、ネットショップなどはその典型例である。このような複雑な製品やサービスを設計・製造し、そして販売するには、複雑さをマネージするための技術体系とその背後にある科学が必要である。それがシステム科学技術である。その詳細については次節で述べる。

2.1.3. 複雑さが凝縮したソフトウェア:ハードからソフトへ

要素をまとめあげ、全体としての機能を生み出す最後の段階でそれを製品に実装するのがソフトウェアである。計算機にプログラムを書き込み、様々な使用条件での製品の機能を実現する。かつては一部の高級な製品だけが計算機を内蔵していたが、最近では広範な工業製品が計算機を内蔵するようになった。これにより製造過程に「ソフトウェア生産」という新製品の死命を制する重要な工程が加わった。現在どれくらいのソフトウェアが製品に内蔵されているか、代表的なケースを以下表 2-1 に示す。

表 2-1 ソフトウェアの分量比較

DVD	100 万行
カーナビ	300 万行～500 万行
携帯電話	500 万行～1000 万行
自動車（レクサス）	1000 万行
銀行主勘定系	1000 万行～

日経エレクトロニクス記事 [6]、先端計測分析技術・機器開発小委員会講演資料 [7]より

これだけの量のソフトウェアを間違いなく書き下すのは、膨大な人手と時間を要する大仕事である。ハードウェアの開発製造に劣らない多大なコストが必要であるし、その開発実装のための方法論も必要である。特に、出来上がったソフトウェアが実際に機器の置かれた環境のもとで想定通りの機能を果たすかどうかを検証するのは極めて困難な仕事で、しらみつぶしとそれほど変わらない非効率な方法が今でも使われている。出荷時のチェックで発見できなかったソフトウェアのバグによって製品回収を余儀なくされ、その結果、莫大な営業損失を生み出して経営不振に陥った企業の例も少なくない。また、ハードウェアの変更や機能付加が機器全体にどのような影響をもたらすかなどの問題もあいまいなままに作業が進められている場合も少なくない。

ソフトウェアが製品の性能を左右する度合いが増すにつれ、最近では多くの製品でソフトウェアの開発費がハードウェアのそれを上回りつつある。つまり、ハードからソフトへ付加価値の軸足が移動したのである。付加価値の指標となる研究開発費のハードとソフトの比率の例を挙げる（表 2-2）。

表 2-2 研究開発費のハードとソフトの比率

	ハード	ソフト
携帯電話	20%	80%
DVD レコーダー	40%	60%
上記含め自動車、情報家電 など組込みシステム平均	50%	50%

経産省「組込みソフトウェア産業活性化プラン」スライド 8 [8]、日経 BP 社記事 [9]より

ハードからソフトへと軸足が移動した背景には、汎用の計算装置（CPU）が安くなり、手軽にセンサやアクチュエータと接続できるようになったことがある。これによって、製品の計算化のラッシュが起こったのである。表 2-3 は、ソフトウェア規模を決める汎用の計算装置（プロセッサ）の記憶容量の増大、すなわちソフトウェアの格納コストの低下（プロセッサ価格はほぼ一定）の実情を示したものである。

表 2-3 汎用プロセッサのソフトウェア格納用記憶容量の増大 [10]

年代	記憶容量
1990 年	1MB
2000 年	10MB
2010 年	100MB

2.1.4. 不確かさとリスク増大

2.1.1～2.1.3 節で科学技術に変貌をもたらしつつある 3 つの要因を述べたが、これらに共通するのが「複雑さ」である。科学技術の進歩が複雑さの増大をもたらすことは自然な流れである。しかし、その時代の科学技術で対応できる限界を複雑さが超えてしまうと、科学技術を脅かす要因に転化する。その度に科学技術は新しい手法を生み出し、複雑さに手綱をつけて制御してきた。それがシステム科学技術である。これについては 2.2 節に詳述する。ここでは現代科学技術の複雑さがもたらす新しい脅威、すなわち不確かさの増大について述べておきたい。

常識的には科学技術の発達によって不確かさは少なくなると思われがちである。例えば、天気予報の精度が上がることによって不確かさは減る。しかし、科学技術は生活スタイルを豊富にすることを通じて新しい複雑さをもたらし、それが科学技術の進歩をはるかに超える速度で不確かさを生み出してきた。そして、その様相はますます深刻になりつつある。複雑さが直接もたらす脅威は、意思決定に現れている。複雑さが生み出す意思決定における選択肢の増大は、意思決定には常にリスクが伴うことを意味する。

1986 年 1 月、スペース・シャトルチャレンジャー号が打ち上げ後間もなく爆発し、乗組員全員が亡くなった。事故後間もなく、O リングとよばれるゴム製品の弾性が低温によって低くなり、そのために燃料が漏れたことが原因であったことが明らかになっている。低温下で O リングの弾性が低下することはよく知られていたが、それが当時の打ち上げ環境でどの程度危険であるかについては NASA とロケットの製造企業の間で意見が分かれた。両者は打ち上げ直前まで激論を交わし、最終的に打ち上げが強行された。結果として予測は裏目に出たわけであるが、O リングの弾性低下がロケットの機体に与える影響を推定することは、チャレンジャー号の複雑な構造と、打ち上げから大気圏外の定常飛行に移るまでの複雑なシナリオ（コト）を考慮すると、技術的に極めて難しい判断であったことは確かである。打ち上げを延期した場合、それによるコスト増だけでなくスペースシャトル計画全体の信頼性へのダメージも考えなければならない。打ち上げたときのリスクと打ち上げを延期したときのリスクをどのようにバランスさせるべきであるか、というリスク評価の問題である。チャレンジャー号の事故は、シャトルの複雑さ（ものとしてだけでなくコトとしても）が生み出した不確かさが、チャレンジャー号を隅々まで知っているはずの数多くの優秀な技術者の能力を超えてしまった。

チャレンジャー号に限らず、不確かさのもとでの意思決定問題は、我々自身、あるいは我々が属する様々な組織、さらには国家が日常的に直面する問題であるが、そこにおける不確かさのレベルは、科学技術の発展とともに着実に上がりつつある。今や意思決定には、合理的な基盤に基づくリスク評価が不可欠である。これは変貌しつつある科学技術が社会にもたらしたリスク管理という新しいニーズであり、科学技術が引き受けなければならない新しい課題である。

2.1.5. 科学的合理性と公共的合理性

不確かさのもとでの意思決定が直面するもう一つの重要な側面を述べる。例として、製薬技術が高度化するにつれて増加している薬害訴訟を考えよう。薬害が起こった時、薬の

摂取と症状との因果関係を科学的に立証することは極めて難しい場合が多い。原理的に不可能な場合すらある。しかし、救済が急がれる被害者を目の前にした裁判所は、早く司法判断を下すことが要求される。このような場合、司法は科学的な合理性が得られないままに判断をせざるを得ないが、その場合でも恣意的・政治的な判断を下すことは許されず、何かの意味での合理性を求めざるを得ない。この種の合理性は「公共的な合理性」であり、科学的な合理性に社会・倫理・心理などを絡めた、より統合的な合理性である。統合的な合理性を担保する論理は、薬害プロセスを広い角度から全体的にとらえるシステム科学技術が提供できるはずである。これはリスク管理とも強く結び付いている。

同じことが、有害物質の排出基準を決める自治体にも当てはまる。有害と無害の境界を定める排出基準を科学的に決定することは極めて難しい場合が多い。しかし被害の広がりを防ぐためには迅速に決定することが望まれる。公共的な合理性を選択しなければならないもう一つの事例である。

すべてのステークホルダーを満足させる公共の合理性をどのように担保するかは、科学技術の変貌がもたらした極めて重要な現代の科学技術の課題であり、システム科学技術だけではなく、人文社会科学を巻き込んだ科学技術総体としての取り組みが必要である。

2.1.6. 国家戦略となった科学技術

かつて科学は国家とは無縁の科学者の思考の産物であり、技術は企業に雇われた技術者の営みであった。第二次世界大戦の帰趨を決めたオペレーションズ・リサーチ（OR）、レーダー、原子爆弾の開発は、国家が戦略的に取り組むことによって、科学技術が世界を変えることができる実例を示した。戦後の科学技術の歴史は、国家が科学技術を体制内に取り込み、それぞれの国家の状況に応じてそれを戦略化するプロセスでもあった。この経過を通して、現代の科学技術のかなりの部分が国家事業となり、各国は競って科学技術の研究開発に巨額の予算を投じるようになった。その理由は、科学技術が国家の存立の基盤となりつつあるからである。かつての軍事の地位に科学技術が取って代わった感がある。

科学技術が国家戦略に取り込まれるようになったもう一つの要因として、2.1.5 節で述べたような科学技術のマイナス面がグローバル化しつつあることが挙げられる。特に温暖化による気候変動問題は、国家として対応しなければならない問題である。一方、科学者コミュニティの側でも、科学技術のマイナス面を科学技術の責任として引き受け、マイナス面をできる限り緩和することに科学技術が貢献すべきであるという認識が高まってきた。その頂点に位置するのが1999年に国連教育科学文化機関（UNESCO）と国際学術連合会議（ICSU）の主催で開催された「世界科学会議」（WCS: World Conference on Science）で採択された「科学と科学的知識の利用に関する世界宣言」（通称ブダペスト宣言）である。ここで「社会における科学と社会のための科学」という科学の機能が大きくクローズアップされ、これからの科学技術で重要な位置を占めることへの認識が世界の科学者コミュニティの総意としてはじめて示された。この会議でICSU会長（当時）として基調講演を行ったのは吉川弘之氏（現CRDSセンター長）であり、それをその年の科学技術白書で報告したのが有本建男氏（現CRDS副センター長）である。

ブダペスト宣言の精神は、その後各国の科学技術政策のなかで具体化されていったが、それを代表するのが「課題解決型の科学技術」である。これは科学技術の基本的な性格付

けであり、国として科学技術の方向を定める指導原理として、現在策定中の第4期科学技術基本計画で科学技術政策の柱として採用される方向にある。「社会のための科学」をさらに一歩進めた概念である。科学技術はこれまで分野、規範の深まりとしてその発展が評価されてきたが、「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人間社会の文脈で発生する。科学技術の内的な力の源泉として課題解決能力を捉えようとすることは、必然的に分野や規範の相対化をもたらす。分野の相対化を課題との比較において推し進めることは、科学技術政策の大きな転換であり、同時にこれからの科学技術の巨大な変貌をもたらすことは確かである。システム科学技術はこの転換に大きく貢献できる。これについては2.2.3節を参照されたい。

2.1.7. 研究開発の新しいスタイル: 知の統合

課題解決型の科学技術は、研究システムに新しいスタイルを必要とする。既に述べたように、科学技術が解くことを期待される課題は、細分化された科学技術の分野とは全く無関係に発生する。逆にいえば、科学技術の細分化は科学技術が解決すべき課題とは無関係に、科学技術の内的な論理に従って進んできたものである。従って、課題を解決するためには分野を横断した知の統合が必要となる。

異分野の知の統合の必要性は、科学者コミュニティでは既に受け入れられており、「統合」「融合」「総合」など様々な形で知の統合を推進するための研究組織や教育組織が作られ、研究プロジェクトが進められてきた。しかし、残念ながらその実効が上がり、依然としてこの問題は挑戦課題に留まっている。課題解決型の科学技術が実質的に推進されることが決まった現在、この問題を本気で実施ベースに写す必要がある。それを通じて科学技術の新しい姿が浮かび上がってくるだろう。知の統合にシステム科学技術がどのようにかわるかは、少し違う視点から次節で議論する。

2.2. システム科学技術の課題

前節では、変貌しつつある科学技術を7つの側面から述べた。最初の3つ、すなわち「ものからコトへ」、「要素からシステムへ」、そして「ハードからソフトへ」は、いわば科学技術の内的な変貌を述べたものであり、科学技術の知のかたちの変化にかかわっている。後の4つ、すなわち「複雑さと不確かさ」、「科学的な合理性と公共的な合理性」、「国家戦略化」、「知の統合」は、科学技術の外的な変貌、すなわち科学技術と社会の接点が生み出した新しい課題を述べたものである。両者は複雑に絡みあい、影響しあって、現代の科学技術の劇的な変化のダイナミズムを作り出している。

本節では、急速に変貌しつつある科学技術の背後にあり、それを駆動しているのがシステム科学技術であることを明らかにし、現代の科学技術が生み出す多岐にわたる課題をシステム科学技術が知の結節点となつてとらえ、解決してきたことを述べる。

2.2.1. 新しいシステムの構築

システム技術に最初に注目したのはカール・マルクスと言われている。マルクスは、産業革命の時期の紡績機械が、道具機と原動機、両者を結ぶ伝達機の三つの部分からなることを観察し、機械はシステムとして進化することを予言した。マルクスの経済学上の予言は当たらなかったが、この予言はまさにその通りとなった。

システム技術の主な役割は、要素を結びつけてシステムを作り、要素にはない、あるいは要素を超える、新しい機能を実現することである。システム技術が先導して新しい機器を作り出したり、機器の既存の性能を大きく突破したりした例を以下にいくつか挙げる。あくまでも例に過ぎず、成功例がこれに尽きるものではない。

(1) 電力供給網の発展

19 世紀末から始まった各国の電力供給網の発展は、最も使い勝手のよいエネルギー形態である電力を社会の隅々にまで届ける、いわば現代文明の血管を構築した、技術の歴史でも特筆すべき成果である。要素（この場合は発電所と電力のユーザ）の増加とともに次第に困難になる課題とそれを解決していくシステム技術の進展によって彩られている。そこには電力供給網が置かれる地域や国の社会的経済的政治的な状況が反映しており、社会との相互作用を強く受けるシステム技術の典型的な性格が現れている。

初期の電力供給網の構築で最も貢献したのはトーマス・エジソンである。エジソンは蓄音機や映写機などの電気機器の発明者として専ら知られているが、彼の発明家としての資質は、要素ではなくシステムで最も発揮されるタイプであったと言われている [11]。彼が白熱電灯を発明した時期には、既に照明器具はいくつか使われていたが、彼の発明が商品として他の照明器具を制圧したのは、彼の発明した方式が電力供給システムに最も適していたからである。つまりシステム思考の勝利である。

電力供給網の技術的な発展のピークは、直流から交流への送電方式の転換であろう。交流送電によって可能になった変圧器の出現により、高圧送電と低圧利用が同時に実現した。変圧器はシステムが必要とした要素技術であったが、同時に交流送電はシステムに一大変革をもたらした。交流の送電方式の導入により、電気工学は一挙に数学的になり、回路理論と呼ばれる数理科学の一分野とも考えられる抽象的な分野が生まれ、それがシステム科学技術を大きく前進させる道を切り開いた。

現在、電力供給網は再び科学技術の大きな課題となっている。各種の再生エネルギーを大規模な電力供給網に取り込む際に引き起こされる様々な課題は、システム科学技術にとって大きな挑戦課題となるであろう。

(2) フォードの流れ作業：オートメーションの源流

ヘンリー・フォードは、1913 年に自動車製造に組み立てライン方式を導入し、その製造プロセスに革命をもたらした。自動車のシャーシ³の原型がコンベアの上を動いていくうちに、多くのオペレータの手を経て次第に部品が組みつけられていく方式である。それ

³ シャーシ (chassis) はフランス語でフレームのことであり、自動車の骨格となるフレーム自体を指す。

以前は、自動車は固定台の上で一台一台部品を組み付け、長い時間をかけて調整をしながら作り上げられていた。コンベアによる流れ作業は、食品加工やミシン製造では実現されていたが、一万点以上の部品をもち、焼結や表面処理などの複雑な作業を含む機械製品に適用されたのは初めてのことである。流れ作業によって自動車生産のスループットは一挙に上がり、価格が4分の1に下がったと言われている。いかに大きな変革であったかがよく分かる。

フォード社のシステムは、製品としての自動車の生産効率を向上させただけでなく、部品のモジュール化と標準化を徹底して導入することを通して、自動車の複雑さを処理する新しいシステム科学技術の手法を確立した。つまり、自動車をシステムとして捉えることによって、自動車製造の様々なプロセスをシステムとして統合化したのである。人間のオペレータは、やがてハンドリングマシンやトランスファーマシンに置き換わり、本格的なオートメーションの時代が到来した。オートメーションはロボット化への道を開き、多品種少量生産という現代の生産方式を可能とした。

(3) タンデム圧延機

製鉄は、文明の最も初期から人間が携わってきた古い技術であり、物質の変形という意味では、おそらく最も複雑で、しかも大規模なプロセスであろう。赤茶けた鉄鉱石から、自動車のボディに使われる光沢のある薄板や長く伸びる鉄道用のレールが作られる製鉄プロセスは、物質の変容という意味で一つの奇跡とも思われる。

製鉄プロセスには、固体・液体・気体・粒体・溶融体など、あらゆる物質の態様が混在して出現する。また、温度の幅も高炉内部の2000度を超えるガスから、製鋼に使われるマイナス210度の液体酸素まで広範囲に及ぶ。このように複雑で困難なプロセスであるがゆえに、数あるプロセス産業のなかで、鉄鋼産業ではシステム科学技術が早い時期から数多く使われてきたが、その中でもタンデム圧延は典型的な成功例である。

圧延は製鉄プロセスの中で最も下流にある工程で、作り出された鋼鉄の塊に物理的な力を加えて変形させ、板やレール、パイプなどを作り出す。板を作るプロセスは、文字通り鋼鉄の塊を力で押し延ばすのであるが、タンデム圧延機は円形のロールを上下相対して幾つか並べて回転させ、その間隙を鉄の塊が通り抜けることによって、一挙に所定の厚さの鉄板に押しつぶす巨大な機械である。タンデム圧延機が出現する前の圧延工程は、一つのロールに鋼板を何度も通すことによって次第に厚さを減らす、リバース運転のプルオーバー方式が用いられていた。熟練したオペレータが赤熱した鉄板を手動で挟みこむ極めて危険で過酷な作業であった。

タンデム圧延機の導入によって、圧延作業の効率は著しく改善され、品質も向上した。圧延プロセスをシステム化することによって実現した、システム思考の巨大な成果であると言ってよい。圧延には熱間と冷間の二種類があるが、なかでも熱間圧延は鉄鋼プロセスの華といわれている。赤熱した板が大音響とともに火花を散らしてタンデムロールに噛みこまれていく瞬間は、迫りに満ちている。

(4) コンバインドサイクル発電

コンバインドサイクル発電は、内燃力発電の排熱で汽力発電（水蒸気で蒸気タービン発

電機を回し、電力へ変換する発電方法）を行う、熱エネルギーを有効に回収して利用する複合発電システムである。内燃機関としては主にガスタービンエンジンが使用され、ガスタービンの高温化に伴って効率が上昇する。蒸気タービンの単純サイクルによる火力発電は、再熱サイクルや臨界圧プラントの導入等による蒸気条件の向上によって、50年前に比べ約15%の高効率化が実現されてきたが、1970年代には、理論的な限界に近い40%（LHV）に到達し、既に頭打ちの状態にあった。その壁を打破し、一気に発電の熱効率を10%以上押し上げたのがコンバインドサイクル発電システムである。

コンバインドサイクル発電が世界で初めて実用化されたのは、1949年のオクラホマ電力のベルアイル発電所においてである。既存の汽力発電所にガスタービンを付加し、その排熱を汽力発電所に導いて利用するもので、汽力発電単独よりも5~6%効率が向上する程度のものであった[12]。1960年代ごろまではこのような方式が主流であったとみられるが、1970年代の空冷技術の進化によって状況が変わる。空冷技術によってガスタービンの燃焼温度が大幅に上昇し、排熱回収ボイラーに高温排気を取り入れ、高温高圧の水蒸気を蒸気タービンへ送るより高効率なシステムへと移行し、コンバインドサイクル発電の効率が単純サイクルの汽力発電を一気に抜き去ることとなった。東京電力 川崎火力発電所長 兼 川崎火力建設所長の菅井茂勝氏は「汽力発電は45年以上かけて、やっと5%の効率向上を果たしてきたのに対し、コンバインドサイクル発電はたった10年で同じだけの進化を遂げてきた」と述べている[13]。要素を結びつけてシステムを作り、要素を超える機能（効率）を実現した一つの例である。

コンバインドサイクル発電システムのさらなる進化のために、高温・高圧の主蒸気及び再熱蒸気にさらされる翼の冷却技術、高温強度・耐食性・耐酸化特性に優れた耐熱材料技術、精密 casting 技術、タービン、燃焼器、ボイラーなどの構成機器の効率化、プラント設備の最適構成および最適運用技術など、多数の要素技術とそれらを組み合わせるシステム技術の研究開発が現在も行なわれている。コンバインドサイクルにさらに燃料電池を組み合わせたトリプルコンバインドサイクルという新たな発電システムの研究開発も進行中で、実現すれば60%を超える高効率発電が可能となるだろう。

(5) 集積回路

半導体集積回路は、テキサス・インスツルメント社のジャック・キルビーによって1958年に発明され、同時に試作検証された。当時は、1947年のベル研究所でのトランジスタ発明から約十年が経っており、それまでの電気回路は真空管からトランジスタへの移行が進んでいた。また、より高密度な実装技術としては、米国陸軍が主導するマイクロ・モジュールと呼ばれる、技術開発も進んでいた。マイクロ・モジュールは、0.36インチ角のセラミック基板上に半導体やその他の素子を配置し接続するものであった。そのような状況の中でも、キルビーは、将来回路の小型化には限界が来ると考えていた。そこで飛躍的技術として、トランジスタと同じ材料で、同一基板上にトランジスタ、抵抗、コンデンサおよび導電路を、塗布、蒸着、拡散、腐食などの物理的、化学的加工技術を組み合わせ、一気に形成する半導体集積回路を考案した。また、考案に基づいて発信器など実際に機能する回路を試作し稼働させた。同様の考案は、1952年英国のジェフリー・ダマー（考案のみ）、1959年米国フェアチャイルド社のロバート・ノイス（試作成功）によっても行われ

た [14] [15]。

今や半導体集積回路は、情報システムを支える最も基本的なものの一つとなっている。社会の情報化は、ムーアの法則（10 数年で 1000 倍の高密度化）に従って集積度を向上させてきた半導体を基盤として成り立っている。このような電子回路の高集積化を数十年にわたり実現し続けることを可能としている基本技術は、従来技術の延長線上に誕生したわけではない。同一材料でトランジスタ、抵抗、コンデンサなど全回路要素を構成するという、材料における標準化のアプローチ、また一つの基板上での回路要素と接続の 3 次元的構造を、上記の物理的、化学的な加工技術の組み合わせで一括形成する手法など、標準化、プロセスのシステム化により初めて今日の半導体技術の源流が生まれたといえよう。

以上、システム技術がインパクトを与えた例をランダムに 5 つ述べた。いずれの例でも、システム技術と要素技術がぴったりと寄り添って開発が実現していることが分かる。例えば電力供給網の場合、白熱電灯はシステムに適した要素であり、そうであるがゆえに最終的に製品として他を制圧した。タンデム圧延の場合は、回転速度を正確に制御できることがこのシステム技術の前提である。電動機速度制御の進歩がタンデム圧延機を生み出し、逆にタンデム圧延機が生み出すニーズが電動機速度制御の進歩を助けた。要素技術とシステム技術の相補的な関係は、システム技術の本性を理解する上で重要である。

2.2.2. 複雑性と不確かさのマネジメント

組織は仕事が広がると部署が増え、機構が複雑になる。複雑な機構にうまく仕事を配分し、各部署間の情報の流通をスムーズにし、全体の効率化を図ることが必要である。それは機械のような人工物でも同じことである。前節に記した例でも既に明らかのように、システムに要求される機能や性能が高くなるとシステムの要素は増え、その結果、システムは複雑となる。複雑さがあるレベルを超えると、それが生み出す不確かさがそのシステムの利用者にとって脅威となることは既に 2.1.4 節で述べた通りである。現代のシステム科学技術にとって最も困難で、そして最も期待されているのが、複雑さのマネジメントと複雑さが生み出す不確かさの克服である。

フォードが組み立てライン方式を導入したときの自動車（T 型フォード）の部品数は 1 万点以下であったというが、現在の自動車の部品数は 2 万 5 千点を超える。また、部品数が多くなっただけでなく、外から変えられる可変部分が多くなっていることが、開発・設計・製造のそれぞれのフェーズでの複雑さを増やす結果になっている。可変であれば選択肢が発生し、それぞれの選択に伴う効果とリスクを評価しなければならない。

エンジンを例にとろう。環境制約によって排気ガス浄化が義務付けられた際に、ガソリンの注入機構が気化器から電子制御のノズルに変わったことは、エンジンの可変部分が増えていく序曲であった。それ以降、主として燃費を下げることを至上命令として、様々な可変機構がエンジンに取り付けられていき、現在では排気ガス再循環システム（EGR システム：Emission Gas Recirculation）、可変バルブタイミング機構、可変圧縮比など、実に 11 種の可変機構が標準的な自動車エンジンに装着されている。これらの可変機構の幾つかは設計時にパラメータが決定できるが、多くは、使用時の制御でパラメータを実時間で決めていかなければならない。選択を誤ると性能が劣化したり、場合によっては事故に

つながったりすることもある。このような可変機構の増大は、エンジンだけでなく自動車の他の部分でも起こっている。トヨタのハイブリッド車で、回生ブレーキと ABS が干渉を起こし、停止距離の増大を引き起こして問題となったのはつい先日のことである。

複雑さの増大は、開発・設計・製造のそれぞれのフェーズで様々の困難を引き起こす。この問題をよく用いられる PDCA (plan, do, check, action) のループに即して考えてみよう。まず、Plan の段階では極めて大きな数の選択肢の存在に圧倒される。Do では、試行錯誤によって選択肢を絞り込むこれまでのやり方は、組み合わせ数の増大によって極めて困難になるか、あるいは不可能になる。Check については、考えられうる環境変動の種類があまりにも多すぎ、そのすべてを検証するのは困難となる。このように複雑さは深刻な問題を科学技術に投げかけるが、システム科学技術は、例えば共通化、標準化などの手段によって組み合わせ数を減らしたり、階層化によって複雑性を封じ込めたりすることによって対処してきた。モデルを用いて、合理的、論理的に全体としての最適解を求めていくこともシステム科学技術が生み出した複雑性への対抗手段である。

複雑さの増大は、開発・設計の最終段階であるソフトウェア作成の際にも猛威を振るう。ハードウェアの複雑さの何十倍の複雑さがソフトウェア作成で生じる。多くの複雑な手順を踏んで膨大なソフトウェアが作成された後に、ハードウェアに新しい装置が付加されたとする。それに応じてソフトウェアを書き換えるのは困難な作業であるだけでなく、大きなリスクを伴う。新しい機能が古い機能と整合せず、システム全体の機能を損なってしまう可能性があるからである。新しい装置がもたらした新しい機能が既存の装置や機能と整合するかどうかを確認し、必要な場合は手直しを入れるのはシステム技術の役割である。

複雑さとそれがもたらす不確かさに対抗するには、システムを全体として見通すことのできる能力、すなわちシステム思考と、対象に対する論理的な分析を通して多様な環境の下でのシステムの挙動をあらかじめ予測できるだけの情報を得ておくことが望ましい。システム科学技術はそのことを可能にする。

2.2.3. 社会的期待と科学的知識との邂逅

産業競争力の向上や地球温暖化といった現代社会の課題に科学技術が応えるためには、2.1.7 節でも述べたように、細分化された科学技術の各分野を横断した知の統合が必要となる。システム技術は特定の分野や対象に依存しない普遍的な技術であり、またそれを支えるシステム科学も同様の特徴を持っている。そのため、システム科学技術は、現代社会の課題を解決して行く際の結節点の役割を果たすことができると考えられる。

このような、システム科学技術、さらには前項でも示したシステム思考が果たしうる役割は、現代の科学技術が社会的期待に応えて行くための CRDS による研究開発戦略の考え方 [16]を踏まえると、次のように説明することができる。

CRDS による研究開発戦略の考え方においては、持続性社会の実現のために、社会的期待と科学技術の研究成果（科学的知識）をどう結び付けていくかについて、次のように述べている。

まず、社会的期待そのものを厳密に体系化することについては、それ自体が困難であるだけでなく、個人、国家、権力などの独善性、恣意性、価値観などに左右されるため、むしろ危険であるとしている。その上で、社会的期待に応えるには、社会的期待と科学的知

識による実現の可能性を組にして考えること、すなわち「期待と実現解の両者からの接近」が必要であると述べている。そのためには、社会的期待をその充足方法が見出せるよう機能によって詳細化し、これに基づいて科学技術課題へと遷移していくことが必要であるとしている。特に、複雑化した現代社会の社会的期待を充足させるために必要な複数の分野にまたがる科学技術課題の組み合わせと連携⁴が必要であるとしている。

例えば、パンデミック対策という社会的期待について機能による詳細化を考える。パンデミック対策では、感染症の原因となる病原体を医学的・生物学的に壊滅させる科学的知識が第一に必要であることは言うまでもない。これに加えて、病原体の特定と発生現場の個別性に応じた状況判断にもとづいたワクチン等の予防薬の効果的な接種計画の策定と確実な実施、感染ルートの解明と感染拡大に備えての予測、検疫方法の簡便化、医療体制の拡充、市民の冷静な対応、さらには、これらの対策についての情報提供やマスコミによる報道など、パニック状態をもたらさないために必要な様々な技術的・社会的機能の組み合わせが必要となる。

システム科学技術の存在は、こうした社会的期待の機能による詳細化において、それぞれの機能の実現にリアリティーを与えることができる。例えば、予防薬の接種計画における数理科学の貢献、感染ルート解明におけるモデリングの科学やネットワーク理論の適用等、があげられる。さらに、パンデミック対策に必要な個別の技術的・社会的機能を適切に結びつけ、全体として有効な機能を実現していくためには、パンデミック対策という目的に向けてシステム全体を見渡せるシステム思考と、システム思考に支えられたシステム科学技術の適用が不可欠である。

社会的期待と科学的知識の邂逅において、システム科学技術及びシステム思考の果たす役割は大きい。

2.3. システム技術の発展

システム技術がもたらした成果の一端を 2.2.1 節で述べた。ここでは、システム技術の内容を具体的に述べる。

2.3.1. モジュール化と規格化はシステム技術の出発点

システム化が大量生産で効果を発揮するためには、要素の自由な結びつきを可能とするモジュール化と規格化が必要である。これは銃の製造において最初に起こった。アメリカ陸軍はマスカット銃やライフル銃の部品を完全に規格化し、銃を軍に納入するすべてのメーカーと工場で作る部品の間の互換性を厳重に義務付けた。19 世紀前半のことである。これによってアメリカで性能のよい工作機械が発達したことはよく知られている。銃は火薬の爆発による高熱と衝撃を常時受ける過酷な環境で使われる機械である。部品の故障を常に予期して交換品を用意しておかなければならない。これが当時としては異常なまでの規格化へのこだわりを生んだ原因であろう。部品が互換性を持つことによって、部品の故

⁴ これを「機能的最小ネットワーク」と呼ぶ [16]

障による戦力の低下を防ぐことができる。既に南北戦争が始まる前に、アメリカ陸軍では銃器の部品の完全互換性が確立されていた。イギリスでも同様の措置が取られていたようである。ちなみに日本では太平洋戦争が終わるまで銃器の部品完全互換性は実現していない。日本はモジュール化、規格化の面ではアメリカやイギリスに 100 年遅れていたと言える。

2.2.1 節でフォードの流れ作業をシステム技術の典型的な成功例の一つとして述べた。産業革命から始まっていたシステム化はフォードの流れ作業による自動車の生産方式で一つの頂点を迎える。フォードの流れ作業が画期的であったのは、工程のモジュール化が製品の部品のモジュール化に対応していたことである。製品（この場合は自動車）の複雑さに対応してその部品をモジュール化規格化することによって生産のモジュール化を推し進め、複雑さに対抗するシステム化がこのとき始まったのである。フォードの流れ作業は、不確かさに対して工程を頑健（robust）にした。すなわち、部品の不良品が出た場合、固定した作業台で一台ずつ自動車を作っていた場合は不良品が取り替えられるまで対応する自動車の製造が停止する。しかし流れ作業では不良品は除去されるだけで生産は長時間停止することはない。

モジュール化と規格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。モジュール化をどのように行なえば効率的で高品質の製品が得られるか、はそれほど簡単なことではなく、対象に対する詳細な知識とその挙動の分析が必要になる。フォードは、流れ作業を実施するまでに 2～3 年かけて様々の検討を行なったことが知られている。

モジュール化はその後ハードウェアからソフトウェアに広がり、ソフトウェア開発の基本的な手法となった。分散型の情報処理やオブジェクト指向のプログラミングは、モジュール化と規格化に基づいている。

2.3.2. 階層化

モジュール化と関連するシステム技術は階層化である。階層化によりシステムの各要素は秩序付けられ、複雑性を取り扱うことが容易になる。システムの各要素は上の階層に向かっては従属する部分として振る舞い、下の階層に向かっては指令する全体として振舞うことになる。階層化に伴うこのような要素の持つ二重性を、ケストラーは「ホロン」と呼んだ。「ホロン」は生物の階層構造を模倣したものであり、一時わが国でも多くの生物学者の注目を集めた。階層性は演繹論理やプログラミング言語、解の探索手法など様々なシステム科学のテーマとも関連している。

階層化と関連して自律分散という考えが特にわが国で主張されたことがある。これは意思決定の仕組みに関連しているが、要素が広域に分散している場合、中央に情報を集中させて意思決定を行なうのではなく、幾つかの主要な要素にある程度意思決定の権限を与えて自律的に行動する分散した主体の集まりとしてシステムを構築しようとする考え方で、柔軟で強靱な機能達成の能力をもつシステム構築が得られるということで一時話題となった。

2.3.3. システム技術の発展

システム技術は、第三の科学革命（コラム 2 参照）のあとモデルや制御、計算などの主要なシステム科学の成果にもとづいて大きく発展する。システム技術は産業技術としては、研究開発、設計、製造、販売のあらゆるフェーズで多様な形で使われる。システム技術は現状でははっきりと定義されていないし、体系化もなされていないが、それぞれの技術の背後にはそれを支える科学と論理が存在し、その習得抜きにはシステム技術を使いこなすことが出来ない、という意味では他の技術と同じである。以下にシステム技術として知られているものを示す。

モジュール化、モデル化、最適化、標準化、ネットワーク解析、可視化、ヒューマンインタフェース、ソフトウェア技法、プロジェクトマネジメント、デザイン、データマイニング、階層化、分散化、制御、意思決定

システム技術は交通や通信、上下水道、エネルギー供給網、警備、医療など公共施設やインフラの運用制御には欠くことのできない技術である。社会インフラは既にその存在形態自体がネットワークでありシステムである。その設計・実装・運用はまさにシステム技術そのものと言ってよい。

コラム 2 第三の科学革命

システム技術の発展はやがてその体系的科学的な基盤を必要とするようになる。それに応えて 1930 年代から第二次大戦後にかけて生み出されたのがネットワーク、計算、制御、最適化など人工物を対象とする一連の科学の成立である。人工物科学の誕生は 20 年ほどの短期間で起こった科学史上画期的な出来事なので、これを第三の科学革命とよぶ。詳しくは「ものづくり敗戦」 [5]を参照されたい。

システム技術の特徴を上げておこう。

- (1) どの分野、どの対象にも適用できる普遍的な技術である。
- (2) 特定分野に適用するには当該対象に関する十分な知識を必要とする。
- (3) 明確な目標と価値規定のもとで使われる。
- (4) システム技術の多くが、解析と設計の二つの側面を併せ持つ複合的な技術である。

特に (4) のポイントを図示したのが図 2-1 である。システム技術は必要であれば対象を解析し、制御するための科学的な手法を入手する。

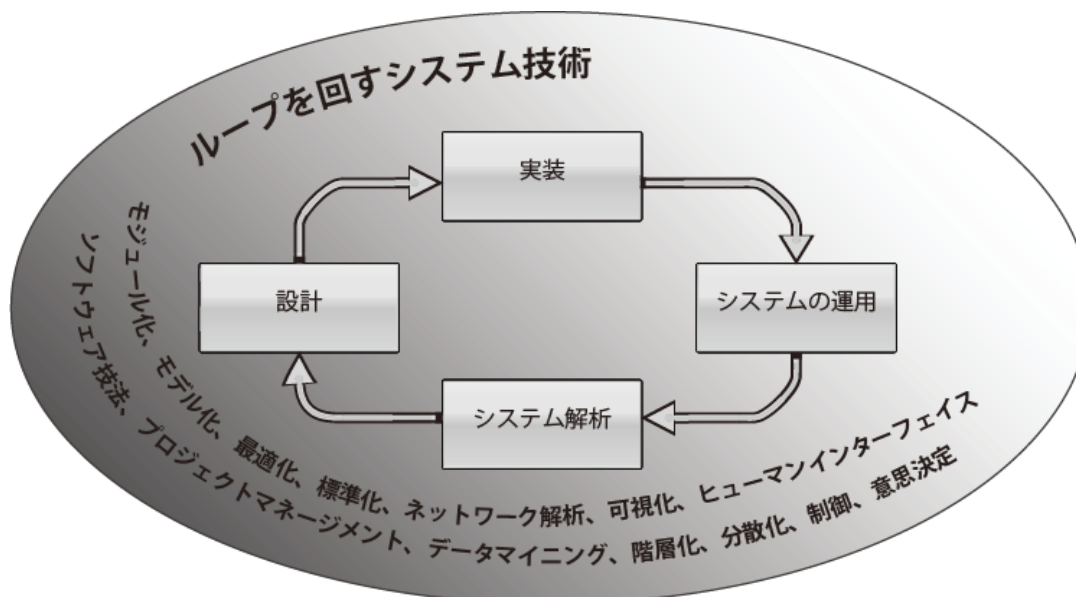


図 2-1 システム技術

2.3.4. システム思考

「システム思考」は単純な「心構え」に帰着されるような実体のない言葉ではない。極めてはっきりとした思考の形態であり、システム科学技術を考える場合にどうしても避けて通ることの出来ない重要な概念である。そして、これが日本人の苦手とする思考方式であることは多くの識者によって指摘されている。

システム思考は言葉通り「対象をシステムとして捉える」考え方である。これは過度に要素の detail だけに目を奪われるのではなく、あるいは単に要素の集まりとしてみるだけでなく、全体と部分（要素）をバランスよく考える、ということであり、なるべく問題を広い文脈で捉えることである。人工物が本来の機能を達成するのは環境との相互作用を通してである。環境との相互作用を各要素あるいは部分がそれぞれの特性に応じて担当し、それが統合された結果、本来の人工物の機能が出現する。従って、環境との相互作用の中で現れる部分と全体の関係を、様々な要因を総合的に考慮しつつ全体像を捉えることがシステム思考の根幹である。これは、言うほど簡単なことではない。特に要素と全体の利害や特性が相反する場合（人間を要素とするシステムの場合はほとんどそうである）はこのことは特に重要である。

対象をシステムとして捉えることが直接必要となる明らかな問題はリスク管理である。リスク管理は考えられうる可能性をなるべく広い環境のもとで捉えその間のバランスをとることである。一つの要因だけに集中してもリスクの視点は出てこない。まさにシステム思考が躍動する場所である。しかし日本人はリスク管理が下手とされている。というよりもリスクがゼロでない気がすまない国民とも言われている。このことは日本人がシステム思考を苦手とする一つの証左と言える。

ロボットの導入がシステム思考を必要とすることは前に述べたが、工場という限定的な場所へのロボットの導入は、システム思考の不足を現場の柔軟性が補うことが出来た。しかし、ロボットを公共的な場所に導入しなければならない次世代ロボットの市場化が遅々として進んでいないのは、公共空間という環境におけるロボットのシステムとしての思考が進んでいないからである。

特性や機能の違う要素をシステムとして統合するには、要素間の不整合を取り除き、それらの間の無意味な競合を避け、要素が最大限の力を発揮するように要素の間の関係、あるいはつなぎ方を求める必要がある。それには要素の特性を十分理解することが必要である。要素がデバイスや素子の場合は、電気や機械や化学など様々なエネルギー原理に従うものを結びつける必要がある。システムが人の場合は、専門の異なる人々を結びつける必要がある。システム思考はそのような状況で一部に注意を集中することなく全体の利益を図るために発揮される。

システム思考を養うには、異なった専門分野を統合することのできる見識、システムの目標を達成するために、要素に仕事を適切な形・適切なタイミングで与えることのできる能力（プロジェクトマネジメントにあたる能力と言える）、部分と全体の関係をよく理解できる高度な解析能力が必要である。

半導体メモリ製造工場での話である。256M のメモリを作る工程数が多いのに驚いて、ある工程がなぜ必要かを設計者に聞いたら、「これは 128M のメモリを作るときにあったものですから、256M になっても当然必要と思って入れました」と言われたそうである。確かに 256M は 128M よりも高度のプロセスである。しかし、だからといってプロセスの要不要は別の話である。そこで 128M のときの工程設計者に同じ質問をすると、「64M のときにあったから当然必要と思って入れた」と答えたそうである。64M のときの工程責任者はやはり、「32M のときにあったから」と答えたそうである。このエピソードは工程設計が「全体」を考えてなされていないだけでなく、「全体」を知る人がいないこと、さらには全体を考えることが苦手な技術者が多いことを物語っている。この話はそのままでは受け取りにくい面もあるが、このようなことがあっておかしくないと思えるような、広い文脈で考える技術者の払底がものづくりの現場にあることも確かである。

システム思考はシステム技術を作動させる前提となる考え方である。システム技術を使うための目的と評価をはっきりさせるための問いかけを含んでいる。システム思考を持つか持たないかはパーソナリティにも依存している面があり、サイエンスの課題として語りにくい点もあるが、システム思考なきシステム技術は有効に作動しないことも確かである。

2.4. システム科学の系譜

2.4.1. システム科学と人工物の科学

システムという言葉が科学技術の研究対象として現れたのは、少なくともニュートンまでさかのぼることができる。近代科学の原典といえる「プリンキピア」の第三部は万有引力が議論される最も重要な部分であるが、そのタイトルは「世界のシステム」(*De mundi systemate*) である。

「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*)と題する論文を書いているから、その前後にはシステム科学という言葉が既に使われていたと思われる。ニュートンのシステムは物理世界のシステムであり、ベルタランフィの「一般システム理論」は物理世界だけでなく生命や人間、工学そして社会も含む極めて広範なシステムを対象としている。

2.4.2. 要素還元論とシステム科学

システム科学技術は、要素還元論の有効性に疑問を呈するところから出発する。システムは要素の有機的な集まりであるが、要素の和を超える機能を創発するがゆえにシステムなのである。要素を詳しく知っても全体を把握することは出来ない。「全体は要素の総和以上の何かである」という視点はシステム科学技術の本質的な前提である。

ニュートン以来、要素還元論は自然科学の世界で大きな成功をおさめた。ベーコン以来の仮説・実験・検証のサイクルも、要素還元論を前提としている。最近では、分子生物学が要素還元主義の目覚ましい成功例である。しかし、要素還元論への物足りなさや不満は、ニュートンの時代から底流として存在していた。パスカルやゲーテがそのような不満を述べている。不十分さは指摘できても、それに変わるものが出せないうちは犬の遠吠えに過ぎなかったが、心理学の分野において、要素還元主義を否定して「全体」を学問として主張する正統的な学派が最初に出現した。20世紀前半の心理学は、ヴント、ジェームス以来の内観主義の心理学への批判から、要素としての刺激-反応の関係を重視する行動心理学が優勢であった。しかしながら、心理現象はそのような要素には還元できないとして心理現象の全体性を重視する立場をとったのがゲシュタルト心理学であり、現代の認知科学の源流となっている。

我々がシステム科学技術というときのシステムは、人工物のシステムに限定する。生命や物理世界のシステムは他でも取り上げられているというだけではなく、今問題にしなければならないシステムは人工物であると考えているからである。

「全体は要素の総和以上の何かである」というシステム科学技術の前提が典型的に当てはまる人工物はネットワークである。ネットワークは、科学技術が社会に浸透していくときに必ず現れる。19世紀前半、アメリカでは電話網と電力供給網が次第に拡大しつつあり、それに伴って深刻な問題が起こっていた。ユーザが勝手に電力を使うことによって負荷が変動し、そのために電圧や周波数が変動し、場合によっては配電が不可能になってしまうのである。「全体は要素の総和以上の何かである」のは明らかであり、システム科学

が解かなければならない問題であった。これを解いたのがヴァネバー・ブッシュである。彼はネットワークのモデルを実際にハードウェアで作ることによってネットワークの特性を予測し、発電機と電力供給網の制御に成功した。当時「微分解析機」と呼ばれたブッシュのモデルはその後アナログ計算機に進化し、一時はデジタル計算機を上回るほどの性能を示した。微分解析機は、実在する大規模な工学系を計算機上でモデル化した最初の例であり、その後のシステム科学の進むべき道を指し示した。

2.4.3. モデリングはシステム科学の核

ネットワーク以外にもモデルが有効な結果をもたらすことを示した例がオペレーションズ・リサーチ (OR)、すなわち作戦研究である。第二次大戦が始まって、島国であるイギリスはドイツ潜水艦の脅威にさらされていた。イギリス海軍はパトリック・ブラケットら科学者を集め、ドイツ潜水艦による犠牲を最小に抑える物動計画の検討を行う委員会を作った。ブラケットらはドイツ潜水艦の過去の行動パターンを徹底的に分析し、その上に立って最適な船団編成と護送方式を提案した。その方式は驚異的な成果をもたらした。この場合のシステムとは編成された船団であり、要素は護衛艦も含めた船団に属する船である。OR は船団のシステム化に成功したのである。

OR が科学技術にもたらした影響は大きい。その第一は、モデルがシステム化の重要なキーテクノロジーであることを、戦争という最も厳しい状況のもとで示した点である。第二は、モデルは意思決定の合理性を担保するという思想を確立したことである。これはその後経営学で広く採用される見解となる。第三は、モデルに基づく最適解の計算と言う重い課題を提起したことである。船団編成の場合は場合の数もそれほど多くなく、最適解を得るために特に大規模な計算を必要としなかったはずである。しかし、一般的な問題では紙と鉛筆では計算不可能となり、モデルも宝の持ち腐れになる。意思決定には計算が必要であることを受け止め、それを解決したのが計算機であった。

2.4.4. 計算

20 世紀前半の論理学と数学の融合は、文理融合の成功例の一つである。19 世紀までの論理学は、アリストテレス以来進歩のない分野としてカントに嘲笑されるような眠った領域であった。これが一転して極めて魅力のある研究分野に躍り出たのは、非ユークリッド幾何学の確立を経緯とした、数学とは何であるか、という数学者の本質的な議論に論理学が投げ込まれてからである。数学を論理学によって基礎付けるという課題は、結局は数学、特にその最も原初的な「算術」とは何であるか、という問いかけに帰着される。そこでの議論を計算の問題として捉えなおし、論理学の課題を計算手順 (アルゴリズム) の問題に翻訳したのがアラン・チューリングである。計算機技術の理論的な基礎となる計算の科学はこのとき始まったと言ってよい。現在のデジタル計算機が実際に作られ実用化されたのは第二次大戦後であるが、既に述べたように微分解析機を源流とするアナログ計算機は第二次大戦中に様々な形でシステムの問題を解くために使われ、その後 1960 年代の終わりのころまで使われていた。デジタル計算機がその後継者であることを考えると、計算機とシステム科学技術は切っても切れない関係にある事が分る。1980 年代に「情報化社会」の

到来が叫ばれ、計算機の社会的なインパクトが論じられたが、「情報化社会」を到来させたのがシステム科学技術であること、情報化をその背後で駆動しているのが、実は科学技術と社会の「システム化」であることに気がついていた論者はほとんどいなかった。

計算機技術は、通信技術や信号処理技術と結びついて情報技術（IT、あるいは ICT）と呼ばれるようになった。日本の科学技術の「IT 化」の遅れを指摘する声がよく聞かれるようになり、それに応じて IT 振興のために様々な施策も実施されている。しかし、IT が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ことを考えれば、システム科学技術から切り離れた IT 振興策は実を結ばないことは明らかである。

2.4.5. 制御

制御工学が始まったのはワットの遠心调速器以来であるから、機械工学とほぼ同じくらいに古い工学である。しかし、それが体系的な科学として展開され始めたのは、19 世紀中葉で物理学者マクスウェルが调速器の安定性をモデルを用いて解析してからであった。さらに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ときである。また、ボードは当時ベル研究所の発明として広帯域の電話回線に用いられていたフィードバック増幅器の設計理論を数学的に体系化し、フィードバックという言葉を定着させた。フィードバック制御の理論はやがてウィーナーによってサイバネティクスの基本原理に取り上げられ、人工物科学の中心的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た。現在そのフロンティアは生物学や脳科学、材料科学に広がり、それぞれの分野に大きなインパクトを与えつつある。

ネットワークから始まる人工物科学⁵の成立はシステム科学に大きな影響を与えた。人工物科学の成立を「第三の科学革命」（コラム 2 参照）と呼ぶ人もいる。その科学技術に与えた影響の大きさを表現するために「革命」という言葉が使われた。第三の科学革命の成熟はサイバネティクス、通信理論、一般システム理論を生み出した。その中でも最後の「一般システム理論」はシステム科学に大きな影響を与えた。「一般システム理論」の名のもとに諸科学を糾合し、新しい領域を作ろうとする動きが 1950 年代初めにベルタランフィを中心に起こった。しかし、「システム」という抽象的な概念で文理にわたるすべての学問分野にインパクトを与える新しい研究分野を創造することは難しい。「一般システム論」はやがて忘れられることになる。

⁵「人工物科学」という言葉を最初に使ったのはおそらくハーバート・サイモンが初めてであろう（彼の 1968 年の著書のタイトルが“The Science of the Artificial”である）。その後まもなく、サイモンの著書とは独立に吉川が「人工物工学」の概念を提唱した。どちらもデザインを中心に論じている点で共通性がある。吉川の場合は実際に東大に人工物センターを設立し、その思想を現実化している。

2.4.6. 適応複雑システム

その後システム科学の中心に躍り出たのは、1984年に設立され、「複雑適応系」を中心的な研究対象としたアメリカのサンタフェ研究所である。サンタフェ研究所は「複雑性」と「進化」を対象とする新しいシステム科学の必要性を明らかにし、様々な分野の著名な研究者を呼んで活発な研究活動を行った。カオス、進化的最適化はこの新しいシステム論の大きな成果と言える。カオスは物質や現象のこれまで見られなかった新しい存在様式を提示し、進化的な最適化は進化論に新しい現実性を与えるだけでなく、これまで手の付けられなかった困難な最適化の問題を解決する手法をもたらした。セルラ・オートマタ (cellular automata) を複雑系解析の普遍的な武器に鍛え上げたのも、この流れの研究によるものである。現代のシステム科学はこの流れの中にある。ますます複雑になりつつある製品のなかで「複雑適応系システム」は依然として解決すべき課題が多い。

2.4.7. 社会科学との融合: 合理的な意思決定の基盤確立を目指して

これからのシステム科学は、大胆に社会経済問題に踏み込んでいくことであろう。例えば経済予測である。計量経済学者が経済モデルにもとづく予測に自信を失って久しい。それは、将来起こりえる環境が予測できないからと言われている。天気予報でも予測精度が少しでも保障できるのは一週間が限度であるから、一年先の雇用や GDP を予測するのは不可能に決まっている、と言われる経済学者もいる。そのとおりかも知れないが、一方では 1971 年に出たローマクラブの予測が、25 年後の人口や食料や汚染を的確に当てていることにも指摘したい。

この種のモデルのパラメータは、様々なデータを使って常に修正し続ける必要があるが、そのようなことを実行している経済モデルが多数あるとは思えない。悲観論に陥る前に、現代の最先端のモデリングの技法を試してみることが強く勧められる。

人文社会科学と科学技術との接点が拡大しつつあることの背景には、科学技術の公共性に対する期待が広がっていることがある。2.1.5 節で述べたように、科学技術の負の側面が広がるにつれて、科学技術にかかわる司法や行政の意思決定が要求される場面が増えてきた。例えば、薬害訴訟に判決を下す裁判所の判決や有害物質の排出基準を決める行政の判断である。原因と結果の因果関係を科学的に立証するには多くの時間がかかるだけでなく、本来不可能である人体実験以外には因果関係の立証は難しい場合もある。一方原告からは迅速な救済を迫られている。排出基準も科学的に有害無害の境界を正確に決定するのは極めて難しい場合が多いが、科学的な結論が出るまで放置しておく被害が拡大する場合がある。別の言い方をすれば、「科学的な合理性」と「社会的な合理性」が一致しないのである。

このような場合必要なことは、両者のバランスを考える新しい合理性を導入することであろう。リスク管理などシステム科学がこの問題に新しい視点を導入できる可能性がある。いずれも「モデル」が重要な役割を演じるであろう。すなわち、「合理的な意思決定」の新しい形態とその基盤を確立することが求められている。

3 日本のシステム科学技術

前章では変貌する現代の科学技術をいくつかの側面から捉え、その変貌を演出しているプレーヤがシステム科学技術であることを示した。この章では、日本におけるシステム科学技術の発展を跡付け、高度成長期には世界の先頭を切っていたシステム科学技術が、「ものづくり路線」が日本の科学技術の主要な方向軸になるとともに停滞し、日本の産業競争力の負の要因となっていることを示す。最後の節では、システム科学技術のファンディングや研究教育組織の現状について調査した結果について示す。

3.1. 日本のシステム技術の歴史

3.1.1. 高度成長期の日本のシステム技術

新幹線システム

1964 年に開業した東海道新幹線は日本技術の誇るべき成果であり、同時に当時の日本のシステム技術が決して世界に遅れをとっていなかったことを示す金字塔と言ってよい。

当時東海道線は既に旅客数が輸送能力を超え、新しい路線の建設が急務となっていた。新しい路線を建設するとすれば従来方式ではなく、全く新しい方式とすることは既に戦前からの既定方針に近いものであったようである。新方式の路線を建設運用するにはシステム思考がキーとなることを当時の島技師長は理解していた。時速 200km の列車を安全に高頻度で走らせるためには、これまでにない様々のインフラと実時間の運転制御システムが必要であり、旅客を効率よく獲得するためには専用の通信路を使った実時間の自動予約システムが必要なことは明らかであった。これらはいずれも高度のシステム技術の課題である。島技師長の指導の下に国鉄内にオペレーションズ・リサーチ（OR）とサイバネティクスの導入を主目的とする「鉄道通信委員会」がスタートしたのは 1954 年である。アメリカで OR 学会（The Operations Research Society of America）が作られたのが 2 年前の 1952 年、また、サイバネティクスが邦訳されたのは 1962 年であるから、国鉄の OR とサイバネティクスへの取り組みがいかに先進的であったかがわかる。「鉄道通信委員会」に続いて「電子研究委員会」が 1959 年に設置され、国鉄のシステム技術は電子工学の積極的な導入によってさらに力を得た。こうして世界に先駆けて、時速 200 キロの列車が営業を開始した。自動列車制御装置（ATC: Automatic Train Control）や列車集中制御装置（CTC: Centralized Traffic Control）など先進的なシステム技術が実装され、インフラも車両も電動機もほとんどすべての技術が国産であった。翌年には新幹線用のオンライン予約システムであるマルス 102 が導入され、営業の著しい効率化が実現した [17]。

なお、新幹線の建設が動機となった「鉄道サイバネティクス協議会」は今でも活動している。

電電公社の DIPS 開発

日本の計算機開発の歴史は国産技術重視とアメリカ追随の間を触れる試行錯誤の歴史であった。システム科学技術の視点からみるとその歴史は失敗の歴史であったと言っても

過言ではない。その中で比較的成功し実用化のレベルまで達したのが、旧電電公社が開発した DIPS (Dendenkoshia Information Processing System) である。このプロジェクトは、旧電電公社が電信、電話の次の事業としてデータ通信を手掛けるために、メインフレーム計算機を独自の仕様と構造で作り上げようとした野心的な試みで、スタートしたのが 1960 年代末である⁶から、世界的にも早い試みと言ってよい。このプロジェクトのソフトウェアは当時としては破格の 150 万行という極めて規模の大きいものであったため、その作成は現代ではプロジェクトマネジメントとよばれる様々なシステム工学のツールが使われた [18]。

このプロジェクトにおける計算機作成の一翼を担った日立製作所は、「ソフトウェア工場」という当時世界でも初めての試みを実現し、属人的な作業とされていたソフトウェアの生産を規格化とモジュール化を通してハードウェアと同じような手順で作成する方法を定着させた。名人芸とされていたソフトウェアの生産を、ものと同じように製造、組立、評価する商品と考える「ソフトウェア工学」の概念を確立したといえる。この考えのもとに、キャッシュメモリーの先駆的な形態や、ページ管理の新しい手法などが実装されたことは特筆に値する。これらはシステム思考が実を結んだ例であり、当時の我が国のシステム技術がソフトウェアとともに優れた水準にあったことを示している。DIPS はメインフレーム計算機として作られ、それを他の企業が使っただけでなく電電公社のデータ通信のベンチマークとしても使われた。この計算機は NTT の全国規模のオンラインシステムに用いられるとともに、NTT 以外の金融向けオンラインシステムや社会保険などの公共向けシステムにも用いられた。DIPS シリーズは延べ 2, 500 台の出荷が行われたが、コンピュータのダウンサイジングの流れの中で役目を終えた [19]。現在この計算機は NTT の業務には全く使われていない。

年産 1000 万トン一貫製鉄所の生産管理

高度成長期、日本の鉄鋼業は生産量が拡大しただけでなく、それが生産する良質の製品がやがて世界の認めるところとなり、世界への道を切り開いた。この時期、日本の鉄鋼業は競って大型一貫製鉄所を各地に作った。例えば 1965 年に操業を開始した新日本製鐵(当時八幡製鐵)の君津製鐵所は、1971 年に年間 1000 万トンの粗鋼を生産することができた。当時最大規模を誇った US スチールの工場の二倍近い生産量である。大型の設備からなり、スケールメリットが明らかな製鉄で伝統を誇るアメリカの製鉄業が年産 500 万トン以下の生産量に甘んじていた原因は、製鉄が注文生産であり、それぞれの注文品の仕掛かりを常時人間が追跡して状況を把握しておく必要があったからである。人を使ってこれを行うには生産量に制限がある。人を使った生産管理が極めて複雑で、その面から大量生産に限界があったのである。君津製鐵所は、計算機を大量に導入して自動生産管理システムを構築し、その限界を突破した。A 自動車が B 日に発注した C 鋼板のスロット D が今どの工程にあるかが、リクエストによって計算機のモニタにすぐに現れるようなシステムを作り上げた。これによって生産管理の限界は原理的になくなり、思い切って設備を大型化し生産量を上げることができたのである。このような計算機が活かされた生産管理システムは、当時としては世界で例のないオリジナルなものであり、日本の鉄鋼業におけるシステム技

⁶ 実験機 DIPS-0 計画策定は 1966 年。DIPS-1 計画は 1969 年スタート。

術が極めて高いレベルにあったことが推測される。

3.1.2. 省エネ、省力、環境対策で発揮されたシステム技術の底力

火力発電所の負荷追従制御

日本の電力消費量は、戦後、ほぼ一貫して伸びてきている。その特徴として、季節や1日の時間帯により需要が大きく変化することがあげられ、電力の安定供給を確保するために、他国よりも厳しい条件での運用が発電所には求められてきた。二度のオイルショックが起こった1970年代には、エネルギーの効率的利用を進めるために、経験に基づく節約運動ではなく、理論的に一貫した手法が導入されていたが、そのうちの一つが火力発電所の負荷追従制御である。

当時、日本の電力供給の7割近くを火力発電が占めており、日単位の需要曲線の変化に対応して電力供給するために、火力発電所の柔軟な負荷追従運転が求められた。例えば、1971年から運転を開始した東京電力鹿島火力発電所では、1分間に、最大出力の5%（第5号ユニットの場合、最大出力100万kWであるので、5万kW）の負荷追従変化率、すなわち発生蒸気量の変化率が求められている[20]。同時に、蒸気タービンの保護やエンタルピーの変化を防ぐために、蒸気タービンの燃焼温度は550度を中心に±8℃、わずか1.5%の範囲内で保たなければならない。それまで定格定常運転を行っていた火力発電所が、蒸気タービンの温度・圧力をほぼ一定に保ちながら、発電量を変動させることは、非常に難しい技術であった。火力プラントの制御方式には、ボイラー追従方式やタービン追従方式が用いられていたが、より調和のとれた方式で調整するために、協調制御方式（DEB:Direct Energy Balance）を新しく導入し、需要の変動に柔軟に対応できる火力発電所の運転が可能となった。これによる省エネルギー効果は大きなものであったと言われている。

省エネ家電

我国では、エアコンディショナー、冷蔵庫、テレビを始めとする家電のエネルギー効率は著しく改善されてきた。下表は、省エネ法トップランナー制度導入前後の97-98年から、目標年度03-04年までの、主な家電機器のエネルギー効率改善を実績で示している。例えば、エアコンディショナーで67.8%、電気冷蔵庫で55.2%、効率が改善されている。

このような家電のエネルギー効率の改善は、オイルショック以来進められ、テレビでは液晶化以降は画面の明るさ自動調節／無操作電源オフ、エアコンではインバータ制御／ヒートポンプ効率化／省エネ除湿／フィルター自動掃除、冷蔵庫ではインバータ制御／自動省エネ運転／断熱放熱機構などにより実現されてきた。

家電の省エネには、断熱材の改良や、機械設計の改善などが果たす役割も大きい。温度センサを始め各種センサ情報から、状況を判断しモーター回転数を適切に制御するインバータ運転制御や、人間とのヒューマンインタフェース設計など、きめ細かなシステム技術が果たす役割が大きい。

表 3-1 省エネ法 トップランナー制度⁷（'99 年導入）の下での省エネ実績

機器名	エネルギー消費効率改善（実績）
テレビジョン受信機	25.7%（1997 年度→2003 年度）
ビデオテープレコーダー	73.6%（1997 年度→2003 年度）
エアコンディショナー	67.8%（1997 年度→2004 年度）
電気冷蔵庫	55.2%（1998 年度→2004 年度）

NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発成果報告会（2007/2/2 開催）

三木健氏講演スライド 17 より抜粋 [21]

自動車エンジンの電子制御

自動車の排気ガスが大気汚染の元凶として被告席にのぼったのは 1960 年代の後半である。排気ガス中に含まれている 3 種類の有害物質、すなわち炭化水素と一酸化炭素、窒素化合物を減らすことが大気浄化のカギとみなされ、それを実現することが自動車のメーカーに義務付けられた。その代表が 1970 年のアメリカ議会によるマスキー法である。マスキー法は 5 年後に販売される自動車の排気ガスの有毒物質の量が現在の 10 分の 1 に減っていることを要求している。この要求はあまりにも厳しいとして欧米の自動車メーカーは反対のキャンペーンを行ったが、日本のメーカーはこれをエンジン技術と触媒技術を革新するよい機会ととらえて排気ガス浄化技術に取り組み、この法律の要求を期限内に基本的に達成している。特に、ホンダは CVCC（Compound Vortex Controlled Combustion）という全く新しい機構の低公害エンジンを開発し、マスキー法の要求をわずか 2 年でクリアしている。

排気ガスの規制を達成した技術的な背景は、まず触媒の機能が飛躍的に向上したことがあげられるが、それと並んで大きく貢献をしたのが、電子制御を用いた空燃比制御である。触媒が最も効果のある空気とガソリンの混合費を、運転中のすべてのフェーズにわたって最適な状態に保つことによって有害物質の排気を抑えようとするものである。従来の気化器に代わる電子弁の利用と、エンジンと触媒機能をトータルに捉えたシステム思考がこの際の切り札となった。

ちなみに日本では 1978 年からマスキー法と同じレベルの規制が法律化されたが、アメリカでは 1974 年にメーカーの圧力でマスキー法は廃案となった。アメリカのメーカーがマスキー法と同レベルの規制をクリアしたのは 1990 年代の半ばである。

3.1.3. ロボット：その光と影

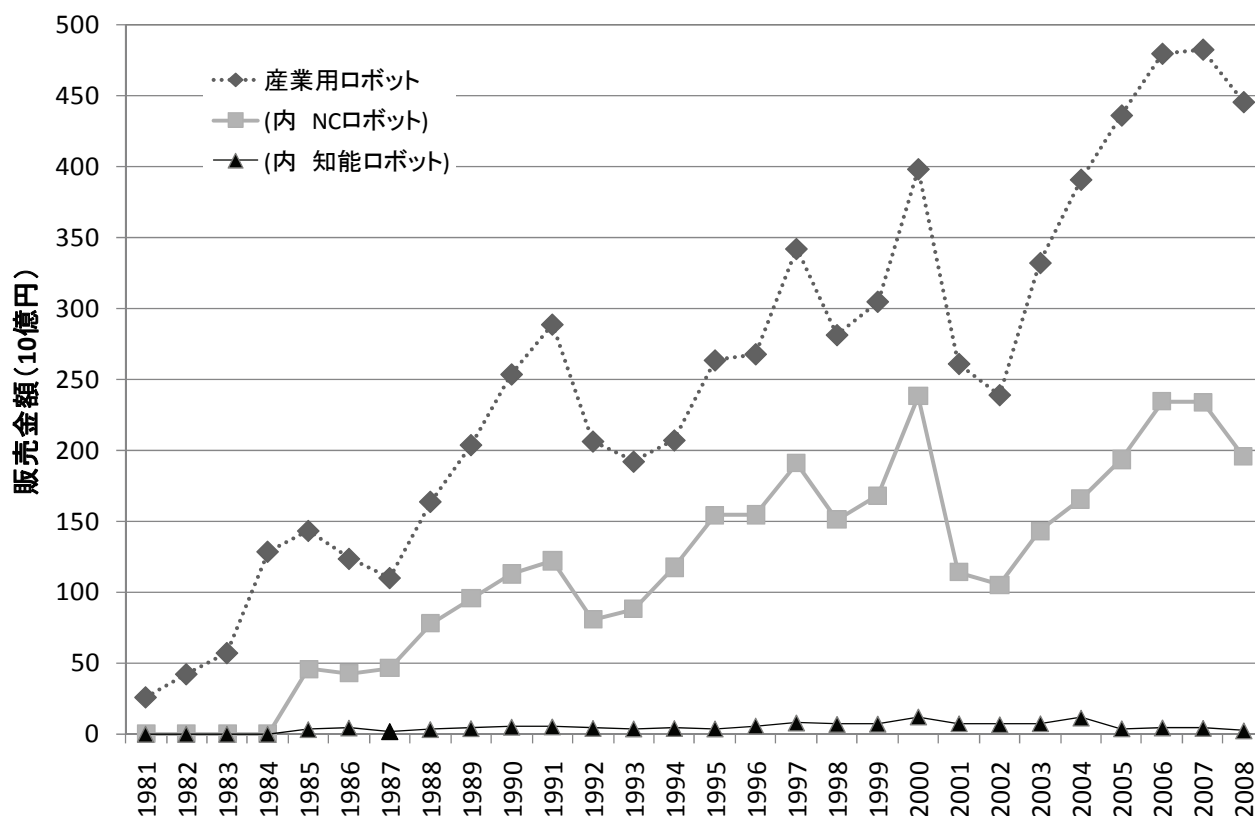
1980 年はロボット普及元年と言われている。この年産業用ロボットの本格的な市場が確立した。そのなかで日本のシェアは圧倒的であった。日本のシェアの推移を表 3-2 で示す。

⁷目標年度での省エネ基準を、現在の同種の製品の中で最も優れている機器の性能以上に設定し、基準に満たない製品は販売を規制する制度

表 3-2 産業用ロボット 国内稼働台数の世界シェア

	‘85	‘90	‘95	‘00	‘05	‘08
国内稼働台数 世界シェア	67.2%	60.3%	64.0%	51.9%	40.5%	34.3%

(社) 日本ロボット工業会統計データ [22]より



機械統計年報 [23] [24] [25] [26] [27] [28]より作成

図 3-1 日本メーカーの産業用ロボット販売金額

産業用ロボットは様々な業種の様々な工程で使われる。導入目的の多くは省力化、すなわち人がやっている仕事をロボットにやらせることである。用途に応じて溶接、塗装、組み立て、搬送、加工などに大別されるが、導入先の用途に応じてロボットに業務を「教育」することが可能である。つまり、多種類の業務と工程と設置条件に適応可能であるという柔軟性・汎用性がロボットの特徴である。実際の工程にロボットを導入するには、人がやっていた作業を単にロボットに置き換えるだけではうまくいかない場合が多い。人の能力は多くの点でロボットより勝っているため、その作業をロボットで代替するには、工程の安定性や精度を高める必要があるだけでなく、人の裁量に任せていた様々な手順や判断をロボットができるように単純化する必要も生じるのである。ロボットの導入が効率化されるよう、工程自体を新たにシステム化することが必要で、高度のシステム技術を必要とする。

る。

図 3-1 で示すように、80 年代から 90 年代にかけてわが国の製造業、特に機械産業では急速なロボット化が進んだ。このことはわが国のシステム科学技術が、このレベルでは順調に作動していたことを示している。その後事情は暗転する。それについては次章で述べる。

3.1.4. その後の退潮と「ものづくり路線」への傾倒

高度成長期にはわが国のシステム技術は世界のトップを走っており、新幹線の建設と年産 1000 万トン級の超大型一貫製鉄所の相次ぐ建設はその象徴であったことを述べた。1980 年代に世界の製造業市場を制覇したときも、ロボット技術に見られるように日本のシステム技術は健在であった。しかし、1990 年代に入るとともに次第にその存在感は薄れる。システム技術が現代技術の核心を形成するようになりつつあったそのときに、日本では逆にシステム技術ばなれともいえる現象が起こったのは不思議である。

1990 年代前半は日本の製造業に逆風が吹き始めたときである。外国の製造業が立ち直りつつあり、日本のシェアに陰りが見え始めた。幾つかの有名企業の製品で故障が続出し、日本の製造業が危ない、と言う記事がマスコミに踊ったのもその頃である。さらに、団塊の世代が大量に引退することによって、製造業の現場を支える技術が失われ継承が不可能になるのではないかという、「2007 年問題」への懸念も話題になった。円高を契機とした海外生産へのシフトも日本の製造技術の「空洞化」として危機感を煽った。危機感が発生すると伝統に回帰しようとする傾向が現れるのは自然の成り行きである。

「ものづくり」という大和言葉がいつ頃使われ始めたかははっきりしていないが、おそらく 90 年代の前半であろう。この言葉に対応する英語はおそらく **manufacture**=製造 であろうがそれとは若干ニュアンスが違うのは、「ものづくり」という大和言葉の語感から来ている。ものづくりという言葉には「日本的な」製造生産という意味がこめられているのである。「日本的」の意味は多様である。江戸時代の工芸品に使われた「匠の技」につながる手作りの精神をこめる場合もあれば、経験を重んじ心配りの行き届いた日本的な生産方式を表現する場合もある。ものづくりという言葉には日本人の誇りがこめられていると言ってよい。その背景には既に述べた 80 年代における日本の製造業の世界制覇がある。

ものづくりが国策にまで高められたのは、1999 年に成立した「ものづくり基盤技術振興基本法」である。「ものづくり」という大和言葉が法律の正式な名前として公的に認知されたのは、この言葉が広く人々の心を捉えその価値が共有できたからだろう。この基本法は製造業を国家の基幹事業として位置づけ、その振興を図ることを国家の義務として明記している。この法律を実施するための具体策としてもものづくり基盤基本計画を策定し、さらに「ものづくり大学」の創設を決めている。また、この法律では政令を通して、成型、圧延、染色、巻き取りなど 26 種類のものづくり基盤技術を定義しているが、いずれもシステム技術とはほとんど無縁の典型的な要素技術である。この法律ではものづくり産業を定義しているが、奇妙なのは「ソフトウェア産業」がものづくり産業に含まれていることである。しかし、ものづくり基盤技術にはソフトウェア作成にかかわる「要素技術」は含まれていない。既に述べたように、科学技術の趨勢は「ものづくり基盤技術振興法」が成立した世紀の変わり目には既に「コトづくり」に大きく舵を切っていた。

高度成長期にはわが国のシステム技術は堅調であったと言っても、そこでのシステム技術がわが国の科学技術の深いところに根ざしていたわけではない。わが国は、システム技術を生み出した 1930-40 年代の科学革命を実感をもって受容したわけではない。むしろ、戦後のわが国の科学技術はシステム科学技術が生まれる前の科学技術のイメージ、すなわち「技術は自然科学の応用である」という古いイメージから出発している。このイメージは明治の文明開化における科学技術のイメージであり、日本が欧米に急速にキャッチアップできた戦前の成功体験を支えたものである。そのイメージのもとでは基礎研究重視がうたい文句になるが、その場合の基礎研究は自然科学、特に物理学と化学である。特に戦後は原子力の平和利用は原爆の被害を受けた唯一の国であるわが国にとって大きな問題であったが、このことが人々に上記の古いイメージを戦後再び定着させる原因ともなった。新幹線などの高度成長期に見られるシステム科学技術の突出は、必要に迫られて取り入れざるを得なかったことから来る一種の外圧であったが、これをわが国の科学技術の世界に豊かに根付かせるには至らなかったと言えよう。

1995 年に科学技術基本法が施行されて、科学技術が本格的な国家戦略の一環に取り込まれるようになると、システム技術は次第に忘れられていく。基本法のもとに策定された科学技術基本計画は分野別の振興策を取り、分野を横断する規範としての色彩が強いシステム技術は各分野が競ってその重要性を主張する中でその存在を主張する根拠と場所を失ってしまった。科学技術基本計画は巨大な財政支出を伴うが、そのために科学技術の研究計画には予算の確保が最重要課題となる。システム科学技術は設備や機器もそれほど必要としない分野であり、行政的にはあまり重点に置きにくい分野である。もう一つ、システム科学技術に吹いた逆風がある。基本計画が巨大な財政負担を強いたためにその説明責任が生じたこともあって、研究者が競ってマスメディアで成果を発表するようになったことである。目に見えない科学技術の典型であるシステム科学技術は、マスメディアでは報じにくい。システム科学技術が研究者にとっても魅力が薄れてきた原因の一端がここにある。マスメディアを通して研究の成果を世の中に発信することは決して無駄なことではないが、評論家やジャーナリストが研究内容が無批判に賛美するという風潮が、日本のものづくりは文句なく強いという「ものづくり神話」を生み出したのではなかろうか。

次世代ロボットの遅れ

ロボット技術は日本のお家芸であり、次世代ロボット産業は日本がリードすることが期待されてきた。3.1.3 節で示したように、確かに産業用ロボットでは日本の存在感は依然として高い。しかし、次世代ロボット、すなわち製造業以外の分野に進出するロボットに大方の予測や期待を裏切り依然として市場は開けていない。一方、医療手術ロボット（da Vinci、Zeus など）と自動掃除ロボット（Roomba、Robomop など）では既に数十億ドルの市場が生み出されたと言われており、日本は先を越された形である。両者とも人間が操作あるいは監視することが必要で、日本のロボット技術者が重視する自律性に欠けているため、日本ではロボットと称することに躊躇する面もある。しかし、環境に応じて動きを選択する知能を備えた機械であることは間違いなく、ロボットの一つのカテゴリーに入ることは明らかである。

日本ではなぜ次世代ロボットの市場化が遅れているのだろうか。理由は単純ではないが、

まず考えられるのは、技術開発が遅れて実用化のレベルに達していないということである。もう一步踏み込んで考えてみると、開発のターゲットが必ずしもはっきりしていなかったのではないと思われる。例えば、2005 年に行われた愛知万博は別名ロボット万博とも言われ、経済産業省からの巨額の交付金に基づいて独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は「次世代ロボット実用化プロジェクト」を推進した。愛知万博では、プロジェクトに応募した 2 百数十件のうち採択された 60 数件のテーマにかかわるロボットが展示されたが、その多くは市場創出を目指した本格的な実用化研究とは程遠いものがほとんどであった。博覧会という場である以上やむを得ない面もあるが、展示中のロボットの故障が多く、肝心の観客の前で予告された通りのデモが故障で実施できなかったロボットがかなり目に付いたことは残念であった。このプロジェクトの一部は 5 年後の 2010 年には実用化レベルに到達することが公募の条件であったが、その期日が来た現在、実用化されたものが本当にあるのかどうか疑わしい。マスメディア用のデモを重視し、実用性を軽視する日本のロボット開発の問題点が象徴的に表れたといつてよい。

次世代ロボットはいずれも環境が多様に、しかも劇的に変動する場所で使われるため、工場内で使用される産業用よりもはるかにシステム思考・システム科学技術が本質的な役割を演じる。日本の次世代ロボット開発は、インフラの整備を同時に含めて開発のターゲットを絞って着実に進めるべきであった。

ゲノムシーケンシング

2001 年に予定より早く終了したヒトゲノム計画の立役者が、ロボットやセンシング技術を駆使したオートメーションであることは既に明らかになっている。機械オートメーションをベースにしてゲノム情報を自動的に解読しようという試みは、1980 年代に日本で始まった。しかし、その先進的な試みは科学技術庁の支援を得られず、中止を強いられたのである [29]。「機械が自動的にシーケンシングを行なうなどもってのほかである」という考え方が当時の日本の遺伝学や分子生物学の主流であったから、科学技術庁を責めることはできない。やがて、アメリカやイギリスが前述の手法をヒトゲノムに適用し、ヒトの遺伝子をすべて解読しようとする野心的なヒトゲノム計画を発進させ、日本もこの計画の一部分を担当することによって貢献することができたが、本来は日本が世界の主導権をとって進めるべきプロジェクトであった。またしてもシステム思考の欠如が招いた残念な結果である。

ゲノムを一つのシステムとして捉え、そこに含まれた情報を順序良く読み取る、というシステム化の課題としてシーケンシングを捉えていれば、オートメーションが重要なキーテクノロジーとなることは当然のことである。ロボットやセンシングなどの必要な技術は揃っていたにもかかわらず、当時の日本の生物学には、オートメーションへの理解もその基盤となるシステム技術の認識もなかったのである。これは生物学者だけの問題ではなく、日本の科学技術が陥っていた縦割り文化が招いた災厄である。

システム半導体の遅れ [30]

1980 年代、日本の半導体は DRAM（Dynamic Random Access Memory）で世界を制した。しかし、その後のマーケット変化（大型計算機から PC へ）や、韓国、台湾の追い上げにより競争力を失い、90 年代後半には一社を残しメモリ事業から撤退し、各社はシス

テム半導体（システム LSI、SoC（System on Chip））にリソースを投入してきた。しかし、システム半導体は、欧州メーカーが強く、日本メーカーは苦戦を強いられている。その原因は、半導体の産業構造が垂直統合型から水平分業型にグローバルに変化する中、設計から製造プロセスまですべて自社技術、自社設備で賄う垂直統合型の日本メーカー（IDM⁸メーカー）がついていけなかったためであるといわれている。

システム半導体産業は、個別顧客要求に合わせ、チップ上で標準 CPU や IP コア（機能回路設計資産）を、ゼロから最適に組み合わせ提供するモジュラー型の産業である。そこでは、システム構築技術が競争力の源泉であり、メモリなどの従来製品のように、少しずつ設計・製造技術をすり合わせながら改善する技術開発手法が主ではない。欧州のシステム半導体メーカーは、このようなシステム技術に基づく設計に特化したファブレスメーカーとして成長し、製造は台湾などの専業メーカー（ファウンドリ）に任せた。一方、ファウンドリメーカーは、プロセスの微細化と効率的製造に注力し、世界から製造を受託し成長した。半導体産業構造の世界的変化のなか、総合経営の日本メーカーは、アナログ半導体、センサなど、設計・製造技術の擦り合わせ技術を必要とする製品群も持っており、プロセス開発技術や製造部門を維持している。その結果、総体としてシステム構築力強化にリソースを集中できず、システム半導体で遅れを取り戻せないでいる。

以上のように、システム半導体における日本の遅れの原因には、チップ上で機能回路を個別要求に合わせ最適に組み合わせるシステム技術の弱さとともに、半導体産業構造が垂直統合型から水平分業型に変化することをフォアキャストし、適切な対応ができなかった事業経営上のシステム思考の弱さが挙げられる。

ソフトウェアの退潮

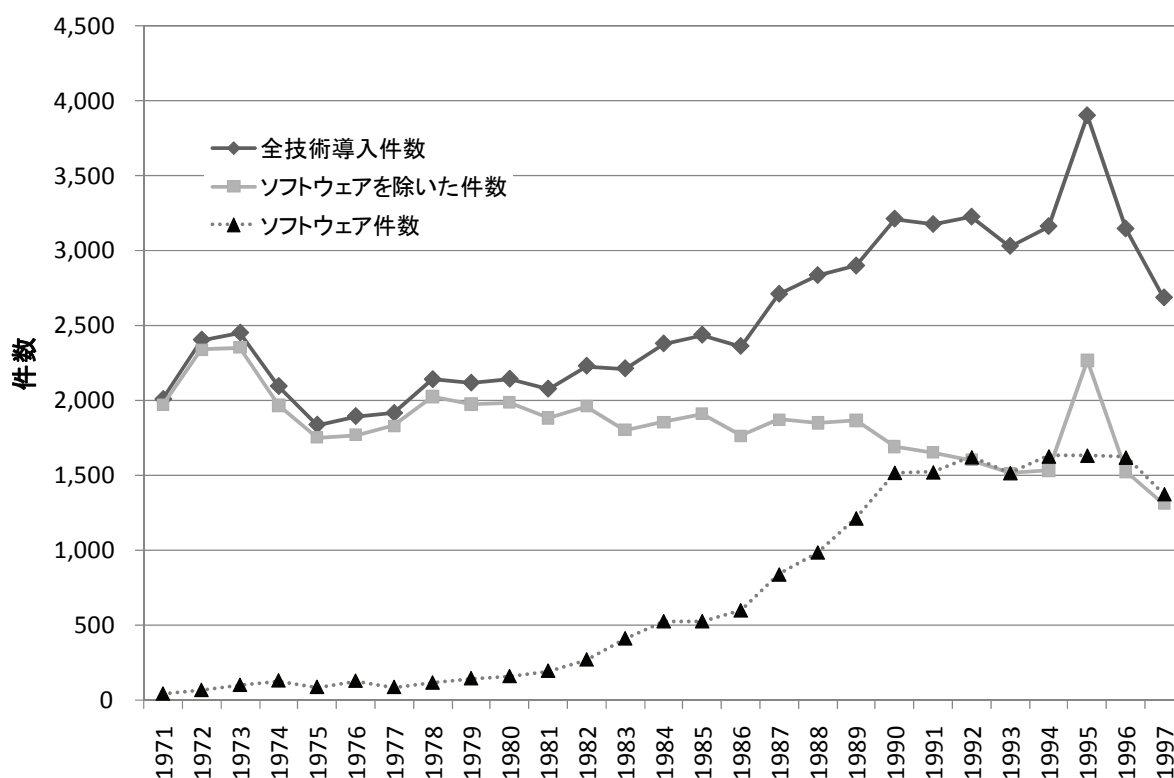
高度成長期の日本の計算機技術はシステム技術の高いレベルに支えられて世界に伍するレベルにあったと言えよう。その一つとして 3.1.1 節で電電公社の DIPS を挙げたが、それ以外にも新幹線の予約システム MARS は当時のアメリカの飛行機予約システムに匹敵する性能を誇っていた。また、1964 年に行われた東京オリンピックでの同時計時指示システムは、計測とデータ通信ソフトウェアを結びつけた画期的なシステムであった。

しかし、日本のソフトウェア開発はその後活気を失い、いくつかの国家プロジェクトによる後押しにも関わらず低迷の道を歩む。

日本のソフトウェア産業の国際的競争力の弱さは、次のような統計データからも裏付けることができる。

- (1) 外国技術導入におけるソフトウェア件数の推移において（1971 年度～1997 年度）、技術導入件数の増加はソフトウェアによるものとなっている（図 3-2）
- (2) 技術貿易額の収支比（対価受取額／対価支払額）をソフトウェア業について見ると圧倒的に支払額が多い状況が続いている（1996～2006 年）（表 3-3）

⁸ Integrated Device Manufacturer



科学技術庁科学技術政策研究所「外国技術導入の動向分析」等による⁹ [31]

図 3-2 外国技術導入におけるソフトウェア件数の推移

表 3-3 技術貿易額の収支比（対価受取額／対価支払額）

	8('96)	9('97)	10('98)	11('99)	12('00)	13('01)
ソフトウェア業	0.035	0.075	0.078	0.015	0.121	0.067
ソフトウェア・情報処理業	—	—	—	—	—	—
情報サービス業	—	—	—	—	—	—
全産業	1.558	1.897	2.130	2.324	2.386	2.274

	14('02)	15('03)	16('04)	17('05)	18('06)	19('07)
ソフトウェア業	—	—	—	—	—	—
ソフトウェア・情報処理業	0.077	0.069	0.097	X	0.445	—
情報サービス業	—	—	—	—	—	0.665
全産業	2.560	2.682	3.117	2.882	3.371	3.494

総務省統計局「科学技術研究調査報告」による¹⁰ [32]

⁹出典資料の発行は 1998 年まで（データは 1997 年度まで）となっている。これは、分析対象としてきた日本銀行「技術導入契約の締結に関する報告書」（外国為替及び外国貿易管理法に基づき、導入企業等が日本銀行に提出するもの）の利用目的外となるため、当報告書が利用できなくなったことによる。

¹⁰ 1996 年にソフトウェア業が追加された。2007 年の「日本標準産業分類」改訂により、ソフトウェア業の項目がなくなったので情報サービス業のものを示す。

また、大手企業の情報システム部門を分社化・移転して設立した「ユーザ系情報システム子会社」という日本特有のものとされている業態があることも、日本の産業のシステム思考の弱さを表しているのではないだろうか¹¹。

ユーザ系情報システム子会社は、1970年代に見られた銀行でのオンライン開発のための自社向け子会社化にはじまり、現在では製造業のほか、電力会社、エネルギー会社、運輸・情報通信等、多岐にわたる業種で見られる。分社化の理由は、本社のコスト削減、担当者のポスト確保、成長産業である情報産業への進出による収益への期待などが上げられている。しかし、欧米や外資系企業では、自社内での開発（内製）を続けており、情報システム部門を分社化するケースは珍しい。特に、1980年代に見られた製造業での情報システム部門の子会社化によって、基幹業務の流れ全体をシステムとして見て行く能力が弱まっていくことにつながったのではないかと、という見方もある。

分社化の理由には様々なものが上げられており、特に日本の終身雇用制で専門職が流動しにくいという雇用慣行による面も強い。だが、システム思考が弱かったためにシステム思考を具体化していく部門の分社化を容易にした面は否定できないと言える。情報システム部門の分社化は、日本の産業のシステム思考の弱さを表しており、システム思考の弱さゆえに、分社化が盛んに行われたと考えられる。

現在いくつかの業種で、分社化したシステム子会社を自社に再び呼び戻そうとする動きがあるとのことであるが、システム技術の再評価が行われつつある証左として心強い。

表 3-4 ユーザ系情報システム子会社に関する基本データ

会社数：	
◇グループ内の情報システム子会社の有無 [33] ※有効回答 464 社中	
・全体	30.3%
・大企業	41.3% (従業員 1000 人以上)
◇調査対象とした情報サービス企業 8928 社のうち、9.7%が該当 [34]	
設立年： 平均値 1988 年 [34]	
・1980 年以前	19%
・1980 年代	40%
・1990 年代	27%
・2000 年以降	14%

¹¹ ここで問題にしている分社化は、汎用性のあるソフトウェアを商品化したことによるものでなく、自社の基幹業務のシステム化を担うべき部門の分社化である。

3.2. 日本のシステム科学の現状

3.2.1. ファンディング

システム科学技術の各論（例えば、数理科学やサービス科学等）とみなせる領域を含むファンディングは行われているが、コラム 1 で定義したようなシステム科学技術そのものを対象とした総合的・体系的な施策はない。また、領域の対象の一部として含まれていても、実際の採択数はわずかである。システム技術に関しては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業等で数多く行われているが、実用化段階の近い個別的な狭い領域に対してのものがほとんどである。中長期的視野に立ち、システム科学技術を幅広く推進・育成する目的基礎研究を目指したファンディングはほとんどないといってよい。

本報告書でこれまでに述べてきたシステム科学技術をテーマとした採択例を下記に示す。いずれも全体のうち、ほんのわずかな採択数でしかない。

戦略的創造研究推進事業

平成 10 年（1998 年）以降に、国が定める戦略目標の達成へ向けた政策課題対応型（トップダウン型）で推進された領域は、CREST が 50 領域、さががけが 41 領域である。そのうち、対象が「人・社会・人工物」であり、システム科学的視点・手法を含むと思われる領域は、下記の 8 領域だけである。

表 3-5 JST 戦略的創造事業における過去のファンディング

年度		領域名称
平成 21 年 (2009)	CREST	持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム
平成 19 年 (2007)	CREST さががけ	数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索
平成 18 年 (2006)	CREST	実用化を目指した組込みシステム用 ディペンダブル・オペレーティングシステム
平成 17 年 (2005)	CREST	マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション
平成 14 年 (2002)	CREST さががけ	シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築
平成 13 年 (2001)	CREST	水の循環系モデリングと利用システム
平成 10 年 (1998)	CREST	資源循環・エネルギーミニマム型システム技術

なお、JST 社会技術研究開発センター¹²では、問題解決型のイノベーションを行うことを目的として社会技術研究開発事業を行っており、発足した平成 13 年度から現在までに、「問題解決型サービス科学研究開発プログラム」、「コミュニティで創る新しい高齢社会のデザイン」など、システム科学技術を多く含んだプログラムが実施され始めている。

科学研究費補助金

科学研究費補助金について、国立情報学研究所の科学研究費補助金データベース¹³の情報を利用し、アブストラクトが掲載されている 1998 年～2007 年の期間に実施されていた課題について分析を行った。

課題については、以下の 3 つのグループでまとめている。

- (1) **全課題**：科研費データベースに登録されている当該期間の全課題
- (2) **「システム」を含む課題**：上記の課題のうち、タイトルもしくはアブストラクトに「システム」を含む課題
- (3) **「システム科学的観点」を含む課題**：上記の「システム」を含む課題のうち、タイトルもしくはアブストラクトに、「モデル」「数理」「理論」の少なくとも一つを含む課題

配分金額で示した図では、科研費全体の金額が増加するなか、「システム」を含む課題は、2002 年をピークに微減する傾向にあることがわかる（図 3-3）。システム科学的観点を含む課題も同様である。

分野別構成比を見ると、工学が多いが、全体的な比率は明らかな低下傾向を示している（図 3-4）。一方、情報学や社会学が増加傾向にあるのが目につく。ただし、情報学については、2003 年から総合領域として「情報学」ができていたため、「工学」から「情報学」へ研究者が移行した可能性を考慮する必要がある。

¹² <http://www.ristex.jp/>

¹³ <http://kaken.nii.ac.jp/>

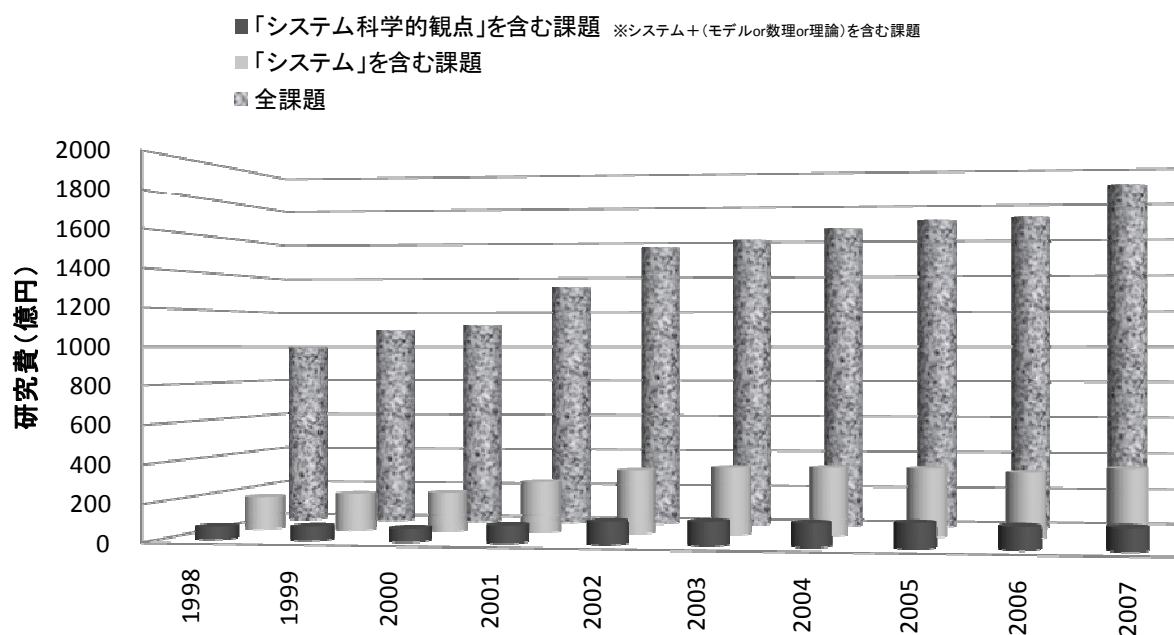


図 3-3 科学研究費補助金におけるシステム科学の配分（金額ベース）

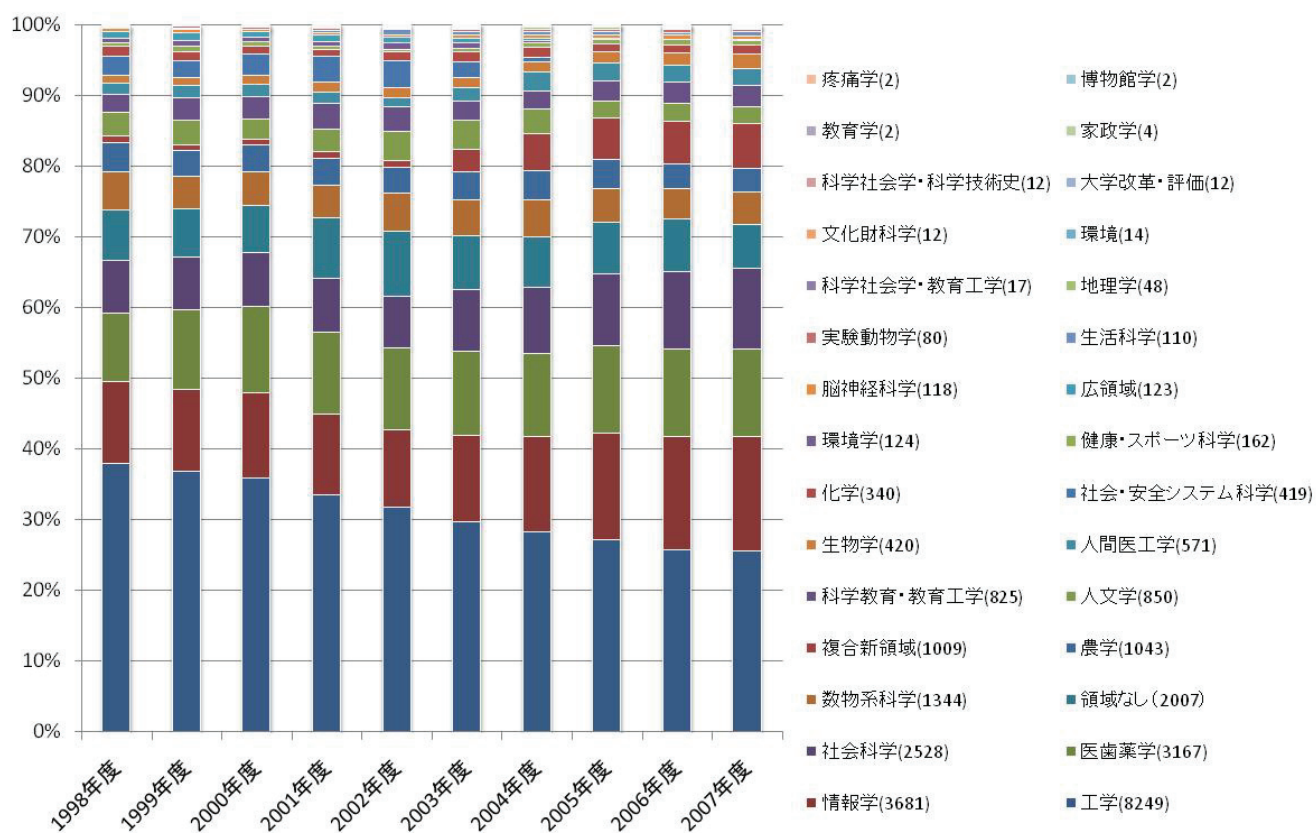


図 3-4 「システム科学的観点」を含む課題の分野別構成

研究拠点

「大学の構造改革の方針」（2001 年 6 月）に基づき、2002 年から新たに開始された文部科学省研究拠点形成費等補助金事業「21 世紀 COE プログラム」（平成 14 年度～16 年度）において採択された 274 件の拠点、その後継の精度として実施されている「グローバル COE プログラム」（平成 19 年度～21 年度）で採択された 140 件の拠点に関して、システム科学技術と関連するものは、表 3-6 に示した通り、わずか 3 拠点しかない。

表 3-6 21 世紀/グローバル COE プログラムにおけるシステム科学関連の拠点

採択年度	拠点のプログラム名称	中核となる専攻名
平成 15 年度	知能化から生命化へのシステムデザイン	慶應義塾大学 理工学研究科開放環境科学専攻
平成 16 年度	エージェントベース社会システム科学の創出	東京工業大学 総合理工学研究科知能システム科学専攻
平成 20 年度	環境共生・安全システムデザインの先導拠点	慶應義塾大学 理工学研究科総合デザイン工学専攻

3.2.2. 大学組織

システム科学に関する研究・教育を行っている学科・専攻について調べるために、J-Global¹⁴に搭載されている大学・研究所の情報や、全国大学一覧（昭和 33 年～平成 20 年） [35] [36] [37]を参照し調査を行った。

「システム科学」という単語を学部・学科・専攻名に含む組織は、平成 22 年現在で、12 組織ある（表 3-7）。「システム」を名称に含む組織では、400 弱の学部・学科・専攻が存在している。各学部・専攻・学科の Web サイトで、研究・教育内容を参照すると、コラム 1 で定義したようなシステム科学に関する研究・教育を明示的に行っている組織は存在しないものの、機械・コンピュータ・自然環境など様々なドメインのシステムに対して、数理科学的なアプローチをしている教育・研究がおこなわれている学部・学科は存在している。対象とされるドメインは、制御・ネットワークなどを含む機械・計算機システムに関する組織が圧倒的に多い。また、ドメインだけではなく、数理科学を主にするようなドメインに依存しない分野横断の研究・教育を組み合わせている組織も存在するが、ごく少数である。

¹⁴ <http://jglobal.jst.go.jp/>

表 3-7 システム科学を名称に含む大学組織 (2010 年 6 月調査時)

A BC X	京都大学	大学院情報学研究科	システム科学専攻
A	玉川大学	大学院工学研究科	システム科学専攻
A	千葉大学	大学院工学研究科	人工システム科学専攻
A	大阪大学	大学院基礎工学研究科	システム創成専攻 システム科学領域
B	日本大学	文理学部	地球システム科学科
B	日本大学	文理学部	物理生命システム科学科
ACD	秋田県立大学	システム科学技術学部	
D	横浜国立大学	経営学部	経営システム科学科
DE	北海道大学	大学院文学研究科	人間システム科学専攻
D	千葉工業大学	社会システム科学部	
D	千葉工業大学	大学院社会システム科学研究科	
ABCE	東京大学	大学院総合文化研究科	広域科学専攻 広域システム科学系 (元教養部)

注)

A 制御理論・通信・ロボティクス・生産システムなどが中心

B 自然科学をシステムとして捉える

C 都市環境や土木インフラなどをシステムとして捉える

D 経済・経営をシステムとして捉える (経営工学・ファイナンスなどを含む)

E 社会をシステムとして捉える

F その他

X ドメインと独立してシステム科学的分析を行う研究グループが存在

次に、主要 8 大学（北海道大学、東北大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学）における「システム」を名称に含む学科・専攻数の変遷を図 3-5 に示す。システムを名称に含む学科・専攻は、大学院の専攻には 80 年代から少数存在しているが、1990 年代以降の大学院重点化に伴い、一気に増加の一途をたどり、2000 年半ば以降やや減少している。学科数に関しては、大学院と同様に、90 年代に入って増加するが、1990 年代半ばにはピークに達し、その後徐々に減少傾向にある。冒頭に述べたように、システムを名称に含んでいても、システム科学技術を主に研究・教育している組織は少ない。例えば「機械システム工学科」のように機械工学が主で、システムは単に語尾のような形で付けられている場合がほとんどである。しかし、システムを組織名称に含むこと自体は、システムの重要性を認識していることの証左とは考えられる。

調査対象とした 8 大学の中で、システムを名称に含む学科が初めて登場したのは、学部の学科レベルでは 1992 年、大学院の専攻レベルでは 1975 年であるが、もちろん、システムのアプローチを基盤とする組織はさらに以前から存在している。これらの組織は、昭和 30 年代半ば、高度経済成長を成し遂げつつある時代に生まれている。

昭和 30 年代後半以降、日本経済・社会は急速な発展を遂げ、並行して、昭和 23 年に発足した新制大学を中心とする高等教育制度も量的発展を遂げた。特に理工系の学生数の伸びは顕著で、昭和 29 年度から 39 年度までの 10 年間に、理学は 2.3 倍、工学は 2.5 倍に増加している [38]。これは、重化学工業の発達や第 3 次産業の展開に対応するために、昭和 32 年度から新長期経済計画の一環として実施された理工系学生増募計画¹⁵に沿って行われた理・工学部の増設や学生増募の結果によるものである。この流れの中で、工学部は体系的に整理されながら拡張し、システムのアプローチを基盤とする学科が登場した (表 3-8)。例えば神戸大学には「システム工学科」が 1970 年に誕生したが、国立大学で

¹⁵ 昭和 35 年度までに約 8,000 人の理工系学生の定員増が実施され、引き続き昭和 36 年度を初年度とする計画のもとで、昭和 38 年度までに約 2 万人の定員増が実施された。

カタカナを正式名称に含む学科の嚆矢として話題になった。また、学科の増加に伴って総科目数も急増し、システム理論や統計学、オペレーションズ・リサーチ等、システム科学の学科目がカリキュラムに取り込まれ、理工系のみならず文系においても広く教えられるようになった。70年代初頭には、大学院の役割も問われ¹⁶、学部にと引き続いて大学院も拡大された。

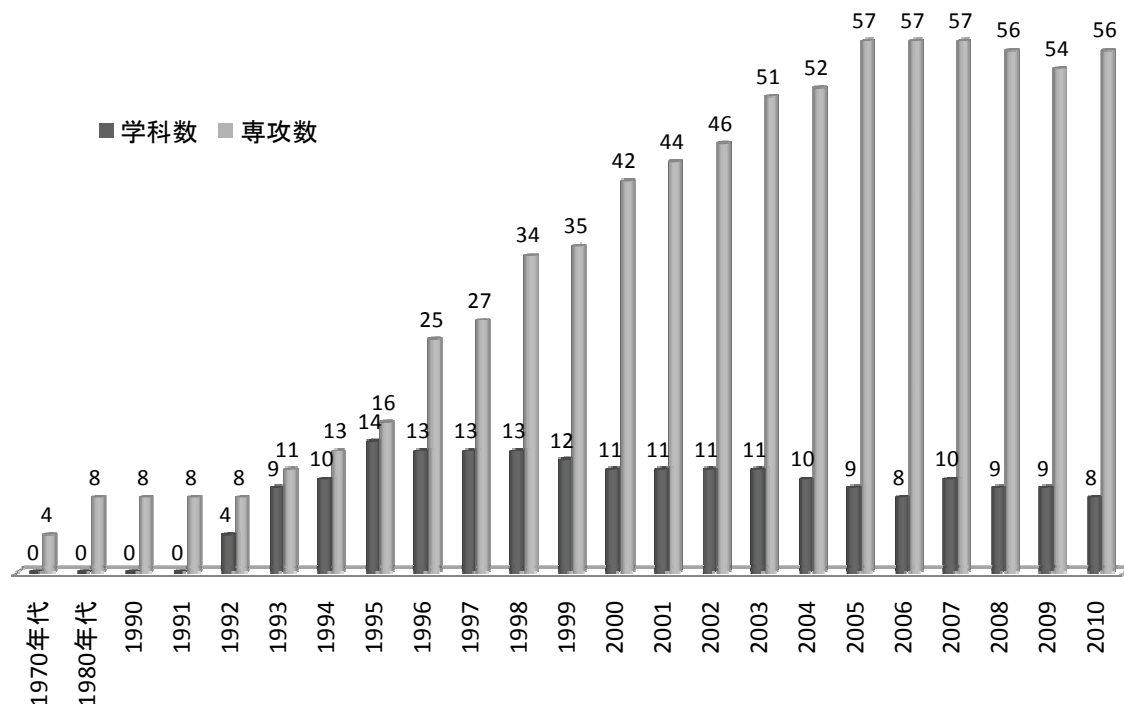


図 3-5 「システム」を名称に含む学科・専攻数の推移

表 3-8 システム的アプローチを基盤とする学科・専攻の設立

1957年	早稲田大学	工学部	計数工学科
1959年	京都大学	工学部	数理工学科
1960年	東京工業大学	工学部	制御工学科
1961年	東北大学	工学部	化学工学科
1962年	東京大学	工学部	計数工学科
1962年	大阪大学	基礎工学部	制御工学科
など			
1973年	東北大学	大学院工学研究科	情報工学専攻
1973年	名古屋大学	工学部	情報工学専攻
1975年	京都大学	理学系研究科	数理解析専攻
1977年	東京工業大学	大学院総合理工学研究科	システム科学専攻
など			

このように理工学教育・研究の量的発展の中で、日本の大学の中にシステム科学は取り込まれたが、その後1980年代から巻き起こった質的な変革の中で、次第に抜け落ちていくこととなる。

¹⁶大学院設置基準が1974年に制定

急速な科学技術の進歩に伴う社会情勢の変化を背景に、大学・大学院は、高度な先端科学技術知識を持つ優れた技術者・研究者の育成が求められた。多様なニーズに対応して各大学の自主的な改革が容易になるよう、数次にわたり大学ならびに大学院制度の弾力化が図られている [39]。高度化・細分化していく学問分野に対応して、総科目数が急増する中で、幅広い必修科目や共通科目は徐々に減少していったと考えられる [40]。1980 年代に入ってコンピュータが中枢の役割を果たすようになると、情報システムがあらゆる分野に入り込み、各分野の尖鋭化が更に進んだ。その中で、かつては広く教えられていたシステム科学に関連した学科目は抜け落ちていき、局所的・極端な形で一部の学科・専攻に残されていった。

90 年代に進められた大学院重点化では、先進的な学問を取り入れつつも単純化・整理して改組をしたため、システムや情報という単語を冠する専攻が急増したと考えられる。

3.2.3. 学会

日本学術会議の協力学術研究団体、つまり日本国が公式に認めている団体のうち、2010 年 6 月 1 日現在で、「学会」と名前のつく団体は 1580 団体存在する。そのうち、システムという単語を名称に含むものは、わずか 17 団体である（表 3-9）。組織の変革が進められた大学の学科・専攻と異なり、学会では、制御・ネットワークなどを含む機械・計算機システムに関する組織（A グループ）は少ない傾向にある。なお、システムという単語を含まないが、システム科学に深く関連している学会の例を表 3-10 に示す。

表 3-9 システムを名称に含む学会

AX	情報システム学会
A	日本フルードパワーシステム学会
AX	システム制御情報学会
BX	環境システム計測制御学会
B	システム農学会
B	地理情報システム学会
C	日本雨水資源化システム学会
D	日本経営システム学会
E	共生社会システム学会
E	社会・経済システム学会
E	日本フードシステム学会
E	日本ロジスティクスシステム学会
F	教育システム情報学会
F	システム監査学会
F	日本発達障害支援システム学会
F	日本未病システム学会
F	包括システムによる日本ロールシャッハ学会
A	制御理論・通信・ロボティクス・生産システムなどが中心
B	自然科学をシステムとして捉える
C	都市環境や土木インフラなどをシステムとして捉える
D	経済・経営をシステムとして捉える（経営工学・ファイナンスなどを含む）
E	社会をシステムとして捉える
F	その他
X	ドメインと独立してシステム科学的分析を行う研究グループが存在

表 3-10 システム科学に関連する学会例

スケジューリング学会	日本バイオメカニクス学会
テラメカニクス研究会	日本リアルオブション学会
ヒューマンインタフェース学会	日本リモートセンシング学会
プロジェクトマネジメント学会	日本ロボット学会
応用統計学会	日本ロボット学会
可視化情報学会	日本応用数理学会
形の科学会	日本画像学会
経営情報学会	日本感性工学会
経済統計学会	日本機械学会
計測自動制御学会	日本経営工学会
研究・技術計画学会	日本計算機統計学会
行動経済学会	日本計算工学会
国際数理科学協会	日本計算数理工学会
情報メディア学会	日本計量生物学会
情報科学技術協会	日本言語学会
情報処理学会	日本行動計量学会
情報知識学会	日本社会情報学会
人工知能学会	日本情報経営学会
数学教育学会	日本信頼性学会
数理社会学会	日本人間工学会
制振工学研究会	日本数学会
精密工学会	日本生産管理学会
地域農林経済学会	日本生物工学会
電子情報通信学会	日本塑性加工学会
土木学会	日本知能情報ファジィ学会
日本オペレーションズ・リサーチ学会	日本伝熱学会
日本シミュレーション&ゲーミング学会	日本統計学会
日本シミュレーション学会	日本燃焼学会
日本ソフトウェア科学会	日本品質管理学会
日本デザイン学会	品質工学会
日本バーチャルリアリティ学会	物理探査学会
日本バイオフィードバック学会	

3.3. システム思考を阻む日本の制度と風土

日本の現状について述べてきた締めくくりとして、制度的な要因がシステム思考の円滑な発展の阻害要因になっている可能性を述べる。

3.3.1. 縦割り行政と実態—科学技術研究の視点から

縦割り行政とは一般に、府省庁間の横の連絡・調整がほとんどなく、行政事務の処理・遂行がそれぞれの府省内の縦のつながりの中だけで行われているため、類似した施策が別々の府省で実施されていたり、複数の府省間にまたがる事項への取り組みに弊害をもたらしていたりする状況をいう。縦割り行政の弊害については既に多くの指摘がある。科学技術推進の枠組みが課題解決型になったので、この弊害はさらに強まることが予想される。CRDS では課題解決型の科学技術の営みを、社会の課題を適切に「期待」として定式化し、観測と分析にたずさわる研究者群、設計と構成に携わる研究者群、成果の実装にあたる担当者をループでつなぐ情報循環として捉えているが、縦割り行政はこのループを分断し情報循環のスムーズな展開を妨げる可能性がある。

例えば「ものづくり基盤技術振興法」は、主管官庁は経済産業省である。その1年後に「高度情報通信ネットワーク社会形成基本法（IT 基本法）」が成立したが、その主管官庁は総務省である。この二つの法律はいずれも産業技術の将来にかかわる重要な国家戦略を表現したものであるが、少なくとも法律の条文を見る限りお互いに全く独立の記述となっている。例えばものつくりとネットワークの関連、ものつくりに果たす IT の役割などは、両者のはざまの盲点として忘れられてしまったように思われる。「ものづくり路線」が行き過ぎた伝統回帰の方向をたどった原因の一つが、縦割り行政にある。

後にも触れるが、もう一つの例として次世代ロボットを挙げておく。次世代ロボットの核である医療・介護ロボットは、ロボット技術の開発とインフラの整備は軌を一つにして進めなければならないのは、ロボットというシステムの性格から明らかなことである。しかし、後者についての整備が進まないままにいたずらに適切な目標を欠いたロボットの要素技術（例えば抱き上げや搬送など）の開発だけが進行し、膨大な研究資源を無駄に費やしてしまったと思われる。これはロボット技術が経済産業省、医療・介護現場が厚生労働省というすみ分けが災いしてしまった面が否めない。

行政組織の管轄と責任の範囲は基本的には明確である必要があり、組織への忠誠心につながり一定の範囲内では効率的であるというメリットがある。しかし、複数の府省の管轄に関連する事項は少なくなく、特に今日のように、社会的課題が複雑化している時代には縦割り行政が効率的で柔軟な対応を阻害することが多い。そのため、必ずしも十分なものとは言えないが、科学技術分野では、早い時期から省庁間の調整を目指した試みがなされてきた。

まず、科学技術行政の総合調整機能を目指した科学技術庁の設置（1956 年）、科学技術振興のための諮問機関としての科学技術会議の設置（1959 年）があげられる。

中央省庁再編（2001 年）による内閣府の設置と総合科学技術会議は、科学技術政策における調整機能を実効性のあるものとするための流れと捉えることもできる。総合科学技術会議のもとに縦割り行政の弊害をなくす試みは幾つか行われた。例えば省庁連携施策群

は国家的・社会的に重要で関係府省の連携の下にすべきテーマを総合科学技術会議が定め、テーマ毎に、コーディネータを中心に各府省において実施される関連施策の最大化をはかる仕組みである。

分野を横断的に結びつける結節点の役割を果たすシステム科学技術の推進には、科学技術政策における府省間の連携が不可欠である。行政官庁のどこにも引き受け手のないシステム科学技術は、連携の中に活路を見出すしかない。昨年来検討されている、国家戦略室の構想や総合科学技術会議の改変の検討の過程で、基盤システム科学技術を担当する部署が生まれることを強く期待したい。

3.3.2. エレメント産業とアンブレラ産業

日本の産業界でシステム思考が弱体化していることを示す概念として、「アンブレラ産業」が CRDS で提案されている。最終製品を提供する産業をそれぞれアンブレラ産業、要素技術や素材を提供する産業をエレメント産業と呼び、アンブレラ産業を構成するエレメント産業とそれにつながる要素技術を分析した上で、日本の強みが活かせる戦略的な要素技術の選択とこれらを組み合わせたアンブレラ産業の育成についての戦略提言を行ったものである [41]。

この戦略提言の中で、例えば携帯電話で使用するリチウムイオン電池の世界シェアの 80% 近くが日本企業であるのに対し、最終製品としての携帯電話の世界シェアはノキア、サムソン等の外国企業が大半を占めていることが紹介されている。また、2.2.1 節で述べたコンバインドサイクル発電の例では、いくつかの国家プロジェクトでガスタービン技術に対してファンディングがなされ、要素技術としての成果があがってきたにも関わらず、大型ガスタービンを独自開発しているのは三菱重工業株式会社 1 社のみしかない。日本のガスタービンメーカーにより製造・設置された国内の複合発電設備は、全発電設備の 5% である [42]。

競争力のあるアンブレラ産業が少ないことが、現在の日本の産業競争力の低下につながっていると言えるが、その背景には、要素技術を組み合わせて複合的な最終製品を構想していくために必要な、システム思考の弱さがある。要素技術を戦略的に選択しながら統合的するには何よりもシステム思考が必要であり、システム思考に媒介されることによって、システム科学／システム技術が産業技術に生かされる。アンブレラ産業は、そのようなシステム思考の豊かな土壌の上に育成される。

3.3.3. 大学の問題

日本の大学では、システム科学技術の教育と研究が行えるような学部学科編成が十分ではないことは、既に見た通りである (3.2.2 節)。このことは日本の大学の中で縦割り文化が優勢で横の交流の少なさにも表れている。例えば、同じ大学でも学科による運営方式が大きく違うことがよくある。その違いは文化の違いとしか言いようがなく、違いをなくすよりは違いを残す方に精力が注がれるのが通例である。また工学部では卒業学科がキャリアを通じて技術者のアイデンティティとなる。電気工学科を出た人間は退職するまで「電気屋」である。このような現象は日本でしか見られない。最近では大分改善されてきたが、

自分が属する組織や領域に人を囲い込もうとする傾向、その背景に専門別の「文化」が根を張っている状況はまだ続いている。大学内での横のつながりの弱さに加え、システム思考の弱さは、大学と外（社会）という横の関わりの弱さにも見られる。

大学と社会との関わりの弱さは、システム科学の基盤となる領域の一つである、数理科学の分野にも顕著に見られる。近年は、数学者が現実の課題解決に参画するというプロジェクトも行われているが¹⁷、数学者の中に数学によって解決しうる現実の問題にアプローチして行こうとする意識が弱かったと言える。応用数学も含めた研究機関の設置を目指したが、結局は純粋数学を中心とした研究所となってしまったという組織の例もある。純粋数学そのものの体系的な発展の意義は大きい、純粋数学の成果が現実問題へ適用できると考えられていない。欧米では数学者が企業に入って経験を積んだ後、ふたたび大学に戻るといった例が珍しくない。日本ではこのような例はほとんど皆無であるが、これも日本の社会が数理をシステム思考の視点から考えることが出来ないことの弱さの表れと言えよう。

3.3.4. 普遍性の問題

日本のシステム科学技術・システム思考の弱さについては多くの証言が既になされている。しかし、「日本のシステム科学技術はどのように弱いのか」という問いに明快に答えることができる人はそれほど多くないであろう。これは日本の科学技術文化にかかわる根の深い問題であり、簡単に答えの出る問題ではない。本報告書の 2.3 節で述べたシステム科学技術の特徴に、この問題に答えるヒントがあると考えられる。

本報告書では、システム科学技術の特徴として普遍性を上げている。システム科学技術には属人的な側面は少なく、教科書に書くことができるような事実、手順、理論が中核となっている。もちろん、システム科学技術を使いこなすためには経験も必要であるが、経験よりも頭脳で理解することが何よりも先行しなければならない。一方、日本の科学技術の世界では「暗黙知」が重視される。人には真似の出来ない「私の技術（技能）」が名人芸として尊重される科学技術の文化風土が、江戸時代から連綿と続いている。日本の企業の強さを、暗黙知を形式知に変換することの巧みに帰着させた経営学者もいる。このような文化風土がシステム科学技術と対照的な「ものづくり路線」と共鳴し、その強化を下支えしたと思われる。ただし、このような文化風土は、明確に目標が与えられていた高度成長期には顕在化しなかったのである。

もし上述のように、日本のシステム科学技術の弱さの根源が科学技術の普遍性に対する感度の低さにあったとすれば、それを克服することはそれほど難しいことではない。経験を乗り越えて普遍性に到達する道を繰り返し教育することによって、普遍性を尊重する気風を作り上げることは出来ないことではない。

¹⁷ マス・フォア・インダストリ教育研究拠点（平成 20 年度採択文部科学省グローバル COE プログラム重点配分拠点）：<http://gcoe-mi.jp/>

4 何をなすべきか

1 章から 3 章までに述べてきたことを要約すると次のようになる。

システム技術は大量生産と大量消費を実現する手段として 19 世紀半ばに生まれ、それを支えるシステム科学が自然科学に対比される人工物の科学として 20 世紀の中葉に発達した。科学技術が社会に浸透しその機能が増大する中で、システム科学技術は「ものからコトへの目標の移動」、「要素からシステムへの課題の移動」、「ハードウェアからソフトウェアへの付加価値の移動」に象徴される現代科学技術の主要な転換を推し進めている。

これらの転換は、システム科学技術に新しい重要な問題を提起している。すなわち不確かさの増大に対処するリスク管理、科学的合理性を包含するさらに広い公共的合理性へのアプローチ、国家戦略となった科学技術を性格づける課題解決型科学技術の実現手法、そのために必要な知の統合のための研究システムの提示などである。

1. 日本のシステム科学技術は、日本の経済力や産業競争力が右肩上がりに上昇していた高度成長期には、決して諸外国に劣ることなくその役割を果たした。特に新幹線の建設は、システム技術が中核となって実現した世界でも抜きん出た先進的な事業であり、日本の誇るべき成果と言ってよい。
2. 1990 年代後半、日本の製造業に様々な問題が顕在化し、技術の危機が叫ばれるようになった。この時期に日本の科学技術の方向として採られた「ものづくり路線」は、文字通り「もの」を尊重し、「要素」技術の深掘を評価し、「ハードウェア」を重視する伝統的な科学技術への回帰であり、既に述べた現代科学技術の転換と逆の方向性をもつ。「ものづくり基盤技術振興基本法」が 1999 年に成立したことは、この傾向を加速した。「ものづくり路線」のなかに位置を占めることのないシステム科学技術が日の当たらない存在となったことは、研究費の配分などからも見て取ることができる。

以上を踏まえて何をなすべきか、詳細は戦略提言「システム科学技術の振興策（仮）」で今後明らかにする予定であるが、現在における考え方の概略を以下に述べておきたい。既に 2.1.4～2.1.7 節で述べた 4 つの課題が以下の項目の背景にあることは言うまでもない。

I. 総論 1

まずこれまでの「ものづくり路線」(ものづくりそのものではないことに注意されたい)を見直し、「コト」「システム」「ソフトウェア」で象徴される科学技術の現在の発展の方向に沿って日本の科学技術の発想を転換することが必要である。そしてその発想転換を研究開発の枠組みとして提示し、それを体現し現場での実現を支援する具体的な組織が必要である。それには設置が検討されている科学技術戦略本部に IT を含有した基盤システム技術を推進する部局を置くことが望ましい。

II. 総論 2

既に発想転換を成し遂げ新しい枠組みのもとで成果を上げている研究システムと組織が日本にある。産総研における「本格研究」である。これはシステム科学技術を対象としたものではないが、システム科学技術がその力を発揮できる研究開発の枠組みである。「もの」と「コト」のギャップを解消し得る優れた日本発の研究開発の考え方であり、もっと大規模に実現する方向で考えるべきである。

III. 合理的な意思決定の基盤構築

発想転換を実現するための核となるのが、課題を合理的に解決するための知的基盤を構築することである。政府の「新成長戦略」では日本の将来の望ましい国家ビジョンの一つとして「問題解決モデル国家」を標榜している。これは「ものづくり路線」を超える新しい発想であり、高く評価したい。しかし現実には国は年金、税制、保険、医療制度、雇用などいくつかの深刻な問題を抱えており、その解決の展望がまだ見えてこない状況にある。モデル国家には程遠い状態といつてよい。これらの問題を合理的に解決する方向に導き、具体的なソリューションを政策サイドに提示するとともにそれを学問的な普遍性に高めるための中立的な研究助言機関が必要である。この研究機関はシステム科学技術の研究者だけでは使命を果たすことが出来ない。人文社会科学の研究者の実質的な参加が不可欠である。ここ上記の課題にあわせて、2.1.5 節で述べた「公共的合理性」の概念を掘り下げ、司法や地方自治体などが使えるような形で提起することが望まれる。

IV. 合理的意思決定のためのシステム科学技術のアプローチ

上記の課題解決でシステム科学技術が提示するのは次の 3 種類のアプローチである。これらのアプローチを組み合わせ、日本の直面する課題へのソリューションを提示すること。それを通して、合理的な意思決定を行うことのできる国家を世界に提示できる。

- A) モデルにもとづく最適な意思決定：既に伝統的な意思決定法の範疇に入るが、計算が飛躍的に容易になったために新しい手法（例えば人工社会など）が生まれている。
- B) データベース形の方策決定：モデルが作りにくい状況では、過去に起こった様々の凡例から最適な方策の組み合わせを見つける新しい方法である。データベース技術の発展による。
- C) シナリオベースの意思決定：意思決定が困難である原因の一つは未来の不確かさにある。未来に起こることの可能性をシミュレーションでシナリオとして提示し、それをベース

に意思決定を行う手法である。リスク管理などで使われている。

このような合理的な意思決定の基盤が単なる言葉だけでなく社会の隅々に根を下ろして人々の思考を律するようになるには、何よりもシステム科学技術の教育とそれを支える基盤的な科学、例えばモデリングや数理科学を確立することが必要である。

V. システム医療：健康大国へのシステム科学技術のアプローチ

現在の臨床医療が陥っている一つの困難は、細分化された診療科と生体の全体性の間のギャップである。複数の診療科にかかることによって生じる治療（薬効）の相互矛盾や、集中治療室における処置治療の際の専門医の間の連携欠如は深刻な問題となりつつある。後者の例を挙げると、体温の低下は代謝レベルの低下を意味しており、それを考慮すれば麻酔深度は浅くてもよいはずであるが、現状では体温と麻酔深度はそれぞれ別の専門医に管理されており、お互いの情報交換はない。これは、生体をシステムとして捉え、それに対する処置をシステム化できていないことから来ている。生体は極めて複雑であるだけでなく個人差が大きいので、それを普遍的なシステムとして捉えることは非常に難しい課題であるが、検査手段も急速に高度化しており、個人差をある程度定量化してモデル化することが可能になりつつあると思われる。生体をトータルにモデル化し、それを用いて最適な治療戦略を専門医が協調して作り出すことにより、個人的な条件と制約を考慮した行き届いた治療が可能になるはずである。このような臨床医療への取り組みは「システム医療」あるいは「デジタル医療」と呼ばれ、欧米ではかなり前から真剣に取り組まれている。健康大国への道と医療費削減の柱の一つとしてシステム医療を位置づけ、医工連携を通して強力に推進することが望まれる。

VI. 介護・医療ロボットの知能化とインフラ整備の統合

介護ロボットが市場化するには、ロボットが使われる医療現場、介護現場の革新が不可欠である。ロボット側の要素技術の開発はこれまでもマスメディアを賑わしてきたが、それに劣らず重要なインフラの整備については言葉だけで真剣な努力さがなされてきた形跡は見られない。ものを重視し、それが生み出すコトを軽視してきた「ものづくり路線」の負の側面が現れたと思われるし、ロボットの要素技術を主管する経済産業省と医療の現場を主管する厚労省の連携の欠如、すなわち縦割り行政のマイナスの結果とも考えられる。次世代ロボットは高齢化社会が急速に進みつつあるわが国が何としても先導しなければならない新しいシステム産業である。ロボットの要素技術とロボットが働く環境の整備を統合することは市場化に向けた不可欠のステップであり、システム科学技術が基盤となって脳科学を巻き込む新しい科学技術の巨大な可能性を秘めている。国は介護・医療ロボットのプロトタイプが働くモデル病院の設置を含めて、インフラ整備に思い切った投資を行うべきである。

VII. 低炭素トータル・エネルギー・マネジメントシステムの実現に向けた基盤システム技術

本文 2.2.1 節でシステム技術のインパクトの例として 19 世紀後半の電力供給網の発展について述べたが、現在では、新エネルギー技術（太陽光発電、バイオマス、燃料電池、コジェネレーションなど）や電気自動車といった新たな要素も含め、人間の活動環境におけるエネルギーの生成・供給・蓄積・輸送・需要等を総合的に最適化したエネルギーサプライチェーンを新しく構築することが求められている。

そのためには、省エネルギー技術、新エネルギー技術、電力ネットワークなど個別の研究開発だけではなく、総合的かつ戦略的なエネルギーシステムの実現に不可欠な、全体の最適化・システム化のための研究開発が必要である。具体的には、例えば、

- A) 広域分散型のエネルギーシステムにおける自律分散協調型のセンシング、状態推定、分散制御（→スマートグリッドを支える基盤技術）
- B) エネルギー問題を経済システムとしての側面から挙動解明するための、市場取引モデルなどによるマルチエージェントシミュレーション（→スマートグリッドの実現にむけた経済的根拠の提示）

などである。

エネルギー供給の概念は、分散電源という考え方が出てきたことにより、かつてとは全く異なってきている。電力のユーザとメーカーが分かちがたく、しかもネットワークに分散した発電機（その多くは再生可能電力）の安定性は極めて悪い。このような性能の貧弱な多くの異なった種類の発電機を含むヘテロジニアスな電力供給網による電力の効率的な安定供給は、システム制御の最も得意とする課題であり、おそらく大きな貢献を成し遂げることが出来よう。

以上、今後の施策について幾つかのテーマを例示したが、これについては現在制御・数理科学・モデリングの 3 つの分科会でトップレベルの研究者による検討が進んでいる。具体的なテーマに絞り込んだワークショップも計画している。従って組織的な研究システムの構想やテーマの提案、具体的なツールの提示が期待される。今年度末に作成を予定している「システム科学技術振興策（仮）」において、上述のテーマも全体の枠組みのなかで体系的に位置づけられるはずである。

引用文献

1. ㈱富士経済. グローバル家電市場総調査 2006. 2006.
2. ー. グローバル家電市場総調査 2009. 2009.
3. 湯之上隆. 日本「半導体」敗戦. 光文社, 2009.
4. (社)日本半導体製造装置協会. 半導体・FPD 製造装置 販売統計 (2006 年度版). 2007.
5. 木村英紀. ものづくり敗戦—「匠の呪縛」が日本を衰退させる. 日本経済新聞出版社, 2009.
6. ソフト危機を救う SoC 設計. 日経エレクトロニクス. (オンライン) 2004 年 10 月 11 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
<http://techon.nikkeibp.co.jp/NE/HONSHI/2004/041011/index.shtml>.
7. 鶴保征城. ソフトウェア業界ならびにアカデミアの現状・課題 (先端計測分析技術・機器開発小委員会ご講演資料). (オンライン) 2008 年 7 月 4 日.
8. 経済産業省 商務情報政策局 情報処理振興課. 組込みソフトウェア産業活性化プラン. 地域イノベーションパートナーシップ (RIPs). (オンライン) 2009 年 6 月 11 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) http://www.it-partnership.jp/release/20090615/kumikomi_plan.pdf.
9. オープンソースが組み込み機器にもたらすインパクトとは. nikkei BPnet・IT pro. (オンライン) 2008 年 11 月 22 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20081122/319750/>.
10. 日立グループシナジーを生かした組込みシステム開発強化の取り組み. 小泉忍, ほか. 5, 2009 年 5 月, 日立評論, 第 91 巻, ページ: 25-29.
11. Hughes P. Thomas. Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930. : The Johns Hopkins University Press, 1993.
12. Chase L. David. Combined-Cycle Development Evolution and Future. General Electric Company・GE Power System. (オンライン) 2001 年 4 月 1 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
http://www.gepower.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger4206.pdf.
13. ECO JAPAN 編集部. 第 3 回 注目のエコ製品・サービス 川崎火力発電所. ECO JAPAN・エコ技術・エコ製品. (オンライン) 2008 年 11 月 27 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
<http://eco.nikkeibp.co.jp/article/special/20081208/100203/?P=2>.
14. The Chip that Hack Built. TEXAS INSTRUMENTS/TI People/Jack Kilby. (オンライン) (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) <http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/jackbuilt.shtml>.
15. Kilby S. Jack. Jack S. Kilby - Nobel Lecture. Nobelprize.org. (オンライン) (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2000/kilby-lecture.pdf.
16. 吉川弘之. 研究開発戦略立案の方法論—持続性社会の実現のために. (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 2010.
17. Systems approach in the Japanese National Railways: How was the systems integration of Shinkansen done? SATO Yasushi. 2, History of Science Society of Japan, 2007 年, Historia Scientiarum, 第 17 巻, ページ: 65-88.

18. 電電公社の DIPS-1 計画と日本におけるソフトウェア工学. 佐藤靖. 1, 2009 年, 技術と文明, 第 16 巻, ページ: 1-20.
19. 電電公社時代からの 35 年間にわたる DIPS の歴史にピリオド. NTT コムウェア・メディア情報. (オンライン) 2002 年 4 月 1 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)
<http://www.nttcom.co.jp/news/me02040101.html>.
20. 東京電力鹿島火力発電所第 5 号ユニット向け 1000MW 超臨界圧ボイラの制御. 中田淳治郎, ほか. 6, 1975 年 11 月, 三菱重工技報, 第 12 巻, ページ: 1-10.
21. 三木健. 省エネルギー政策について～省エネルギー技術開発の推進に向けて～. NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発成果報告会. (オンライン) 2007 年 2 月 2 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) <http://www.nedo.go.jp/informations/events/190202/shiyou1.pdf>.
22. 世界の産業用ロボット稼働台数. 社団法人 日本ロボット工業会. (オンライン) (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) <http://www.jara.jp/data/dl/kado.pdf>.
23. 経済産業省経済産業政策局調査統計部(編). 機械統計年報 (1985). 経済産業調査会, 1986.
24. -. 機械統計年報 (1990). 経済産業調査会, 1991.
25. -. 機械統計年報 (1995). 経済産業調査会, 1996.
26. -. 機械統計年報 (2000). 経済産業調査会, 2001.
27. -. 機械統計年報 (2005). 経済産業調査会, 2006.
28. -. 機械統計年報 (2008). 経済産業調査会, 2009.
29. 和田昭允. 物理学は越境する -ゲノムへの道-. 岩波書店, 2005.
30. 佐野昌. 岐路に立つ半導体産業. 日刊工業新聞社, 2009. ページ: 290.
31. 科学技術政策研究所 情報システム課. 外国技術導入の動向分析(1971-1997). 科学技術庁 科学技術政策研究所, 1972-1998.
32. 総理府統計局. 科学技術研究調査報告(1996-2007). 日本統計協会, 1997-2008.
33. 「CIO Magazine IT 投資動向調査 2007」報告 (後編). CIO Online. (オンライン) 2007 年 2 月 21 日. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) <http://www.ciojp.com/contents/?id=00003627;t=0>.
34. (社)情報サービス産業協会. 平成 20 年度 情報サービス産業の取引構造改革に向けて. 社団法人 情報サービス産業協会, 2009.
35. 文部省大学学術局大学課(編). 全国大学一覧 (昭和 39-58 年度). 文部省大学学術局大学課, 1964-1983.
36. 文部省高等教育局大学課. 全国大学一覧 (昭和 59 年-平成 5 年). 東京: 文教教会, 1985-1994.
37. 文部省大学学術局大学課/文部省高等教育局大学課. 全国大学一覧 (平成 6-20 年度). 東京: 文教教会, 1994-2008.
38. 我が国の教育水準 (昭和 39 年度). 文部科学省. (オンライン) (引用日: 2010 年 7 月 15 日.) http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpad196401/index.html.
39. 我が国の文教施策 (平成 2 年). 文部科学省. (オンライン) 1990 年 11 月.
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpad199001/index.html.
40. 講義科目数と分野の変遷. 構造化・可視化東京大学工学部カリキュラム. (オンライン)

2005 年 7 月. (引用日: 2010 年 7 月 15 日.)

<http://ciee.t.u-tokyo.ac.jp/ciee/kozoka/pdf/kougaku.pdf>.

41. JST 研究開発戦略センター 産業技術ユニット. 戦略提言 国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法の開発 ―日本の誇る「エレメント産業」の活用による「アンブレラ産業」の創造・育成―. (オンライン) 2008 年. <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/08sp10.pdf>.

42. 三菱総合研究所. 平成 12 年度経済産業省委託調査 研究開発プロジェクトの技術・産業・社会へのインパクトに関する調査報告書. 三菱総合研究所, 2001.

43. (独)情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター. 組込みソフトウェアレポート 2006. 翔泳社, 2005.

44. 家電製品の省エネルギー技術. 廣田明久, 大塚厚, 吉田隆彦. 5, 2008 年, 第 90 巻, ページ: 50-55.

調査・インタビュー協力

以下の方々には、インタビュー、報告取りまとめ等でご協力を得た。

赤松幹之 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 研究部門長

岩橋良雄 (株)日鉄日立システムエンジニアリング 代表取締役社長

木内里美 大成ロテック株式会社 常勤監査役

桑原洋 (株)日立製作所 特別顧問

合志陽一 国立大学法人筑波大学 監事

小林信一 筑波大学ビジネス科学研究科 教授

谷口恒 (株)ゼットエムピー 代表取締役社長

手計将美 (社)情報サービス産業協会

藤原敏勝 倉敷芸術科学大学産業科学技術学部 教授

安藤健 JST イノベーション推進本部 上席フェロー

石正茂 JST 研究開発戦略センター 戦略推進室長

植田秀史 JST 研究開発戦略センター 副センター長

黒田昌裕 JST 研究開発戦略センター 上席フェロー

佐藤靖 JST 研究開発戦略センター フェロー

倉橋節也 筑波大学大学院ビジネス科学研究科 准教授 (JST/CRDS 特任フェロー)

椿広計 統計数理研究所リスク解析戦略研究センター センター長 (JST/CRDS 特任フェロー)

吉岡真治 北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 (JST/CRDS 特任フェロー)

システム科学技術推進委員会開催一覧

第1回 「システム科学の展望」

(記録集：CRDS-FY2010-XR-01)

日 時：2010年2月24日(水) 10:00～13:00

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

ご講演：

CRDSの活動とシステム科学

[吉川弘之 JST/CRDS センター長]

システム科学の展望

[木村英紀 JST/CRDS 上席フェロー]

システム科学の必要性—産業界の視点から

[桑原洋 (株)日立製作所 特別顧問]

第2回 「日本におけるソフトウェア産業とシステム科学の問題点」

(記録集：CRDS-FY2010-XR-02)

日 時：2010年3月8日(月) 10:00～13:00

場 所：JST 三番町ビル 7階特別会議室

ご講演：

システム思考はなぜ弱くなったのか—製鉄産業の経験から

[岩橋良雄 日鉄日立システムエンジニアリング(株) 代表取締役社長]

日本のソフトウェア産業(参考データの紹介)

[前田知子 JST/CRDS フェロー]

システム思考の重要性と人材育成—ソフトウェア開発企業の経験から

[長田康久 (株)ヒューマンストラテジー 代表取締役]

第3回 「社会と数理科学」

(記録集：CRDS-FY2010-XR-04)

日 時：2010年4月3日(土) 10:00～12:00

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

ご講演：

数理科学の役割とその展望

[甘利俊一 理化学研究所脳科学総合研究センター 特別顧問]

数学振興策の現状と課題

[杉原正顕 東京大学 大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻 教授]

今、数理科学に求められること—科学技術立国の再建のために—

[中村佳正 京都大学情報学研究科数理工学専攻 研究科長・教授]

第4回 「制御工学とシステム科学」

(記録集：CRDS-FY2010-XR-06)

日 時：2010年5月7日(金) 10:00～12:30

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

ご講演：

制御システム分野の役割と展望

[内田健康 早稲田大学理工学術院電気・情報生命工学科 教授]

制御システム分野のファンディングの現況

[三平満司 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 教授]

グリーンイノベーションに向けた制御システム工学の課題

・環境の視点から

[船橋誠壽 (株)日立製作所システム開発研究所 技術顧問]

・エネルギー技術分野の視点から

[飯野穰 (株)東芝電力・社会システム技術開発センター 主幹]

第5回 「日本の産業競争力とシステム科学技術」

日時：2010年5月28日（金）10：00～12：30

場所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

ご講演：

日本の技術開発力を高める - アンブレラ産業・エレメント産業による成長戦略 -

[安藤健 JST イノベーション推進本部 上席フェロー]

JST/CRDS システム科学ユニットからの調査報告

[前田知子・武内里香 JST/CRDS フェロー]

自動車制御システム開発の複雑さについて

[大畠明 トヨタ自動車株式会社 理事]

第6回 「システム科学技術と日本の課題」（公開ワークショップ）

日時：2010年6月21日（月）13：00～17：00

場所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

ご講演：

システム科学技術と日本の課題

[吉川弘之 JST/CRDS センター長]

システム科学による情報循環加速を支えるモデリングとその体系化

[椿広計 統計数理研究所・リスク解析戦略研究センター センター長]

システム創成のマネジメント - ナショナルプロジェクトの進め方 -

[宮田秀明 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 教授]

中間報告書作成に向けて - 日本のシステム科学技術の現状 -

[木村英紀 JST/CRDS 上席フェロー]

パネルディスカッション：システム科学技術の役割を考える

司会

植田秀史 (JST 研究開発戦略センター 副センター長)

パネリスト

安岡善文 (国立環境研究所 理事)

丸山宏 (キヤノン株式会社 DPF 開発本部 副本部長)

赤松幹之 (AIST ヒューマンライフテクノロジー研究部門 研究部門長)

黒田昌裕 (JST 研究開発戦略センター 上席フェロー)

システム科学技術推進委員会 委員一覧

《産業界》

岩橋良雄 日鉄日立システムエンジニアリング株式会社 代表取締役社長
 桑原洋 株式会社日立製作所 特別顧問
 前山淳次 株式会社 富士通エフサス 顧問
 丸山宏 キヤノン株式会社 デジタルプラットフォーム開発本部 副本部長

《学界》

赤松幹之 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 研究部門長
 内田健康 早稲田大学 理工学術院 電気・情報生命工学科 教授
 倉橋節也 筑波大学大学院ビジネス科学研究科 准教授
 三平満司 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 教授
 杉原正顯 東京大学大学院情報理工学研究科 数理情報学専攻 教授
 津田博史 同志社大学理工学部 数理システム学科 教授
 椿広計 統計数理研究所・リスク解析戦略研究センター センター長
 出口光一郎 東北大学 大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻 教授
 中村佳正 京都大学大学院 情報学研究科 教授
 原山優子 東北大工 技術社会システム 教授
 古田一雄 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授
 安岡善文 国立環境研究所 理事
 吉岡真治 北海道大学 情報科学研究科 准教授

《官》

大竹暁 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 総務部長
 市原健介 日本貿易振興機構 産業技術部長

《JST 関係者》

吉川弘之 CRDS センター長
 有本建男 RISTEX センター長
 黒田昌裕 CRDS 上席フェロー
 丹羽邦彦 CRDS 電子情報通信ユニット 上席フェロー
 笠木伸英 CRDS 環境技術ユニット 上席フェロー

《事務局》

木村英紀 CRDS システム科学ユニット 上席フェロー
 本間弘一 CRDS システム科学ユニット フェロー
 前田知子 CRDS システム科学ユニット フェロー
 武内里香 CRDS システム科学ユニット フェロー

■編集担当 メンバー■

木村 英紀	上席フェロー	(システム科学ユニット)
本間 弘一	フェロー	(システム科学ユニット)
前田 知子	フェロー	(システム科学ユニット)
武内 里香	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-FY2010-XR-07

システム科学ユニット中間報告
システム科学技術の役割と日本の課題

平成 22 年 7 月 July 2010

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

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電 話 03-5214-7487

ファックス 03-5214-7385

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

©2010 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.

