経済産業省 平成19年度技術戦略マップローリング委託事業 (アカデミック・ロードマップ作成支援事業)

学会横断型アカデミック・ロードマップ 報告書

平成 20 年 3 月

株式会社 KRI

横断型基幹科学技術研究団体連合

幹事学会

計測自動制御学会、日本シミュレーション学会、ヒューマンインタフェース学会、 精密工学会

参加学会

応用統計学会、可視化情報学会、形の科学会、計測自動制御学会、国際数理科学協会、システム制御情報学会、スケジューング学会、精密工学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会、日本感性工学会、日本経営工学会、日本経営システム学会、日本計算工学会、日本行動計量学会、日本コンピュータ化学会、日本シミュレーション学会、日本社会情報学会、日本信頼性学会、日本知能情報ファジィ学会、日本デザイン学会、日本統計学会、日本人間工学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本バイオフィードバック学会、日本リアルオプション学会、日本リモートセンシング学会、ヒューマンインタフェース学会、プロジェクトマネジメント学会、および産業界(日本電気、日立製作所、日産自動車)

地球環境問題をはじめ、現代社会は安全・安心に関わるさまざまな問題を抱えており、 その対処には多くの相矛盾する課題の解決が必要である。特にわが国では少子高齢化が進 行し、ものづくりの面で新たな価値創造の基盤を確立することが急務となっている。

これらの諸問題の解決には、横断的視点に立った「知の統合」が不可欠である。横断型 基幹科学技術研究団体連合(略称:横幹連合、おうかんれんごう)では、その発足以来こ の問題に「学」のサイドから取り組み、いくつかの提言を行ってきた。

2005年秋には、それまでの成果を問う第1回横幹連合コンファレンスを開催し、知の統合の新たな戦略目的として「コトつくり」を提唱し宣言した(長野宣言)。これこそ日本の科学技術が再び世界におけるリーダシップを取るための出発点となるものであるとの確信による。 さらに2007年秋の第2回横幹連合コンファレンスでは、社会のイノベーションにつながる新たな学問の展開を重視し、下記の宣言を採択した(京都宣言)。

- (1) 知の統合による社会的・経済的価値の創造 横幹連合は、「コトつくり宣言」を継承して真の知の統合を実現する手法 を体系化し、人類が蓄積してきた知を新たな社会的・経済的価値の創造へ と活用することによって、イノベーションを推進・加速する。
- (2) イノベーションを推進する技術開発マネジメントの確立 横幹連合は、異分野への知の展開を促進する技術開発の的確なマネジメントにより、産業競争力をいっそう高め、イノベーションをより有効とする 方策を、産業界と協力して確立する。
- (3) イノベーションに資する横幹科学技術の構築 横幹連合は、科学技術を活用したコトつくりにイノベーションの本質があ ると認識し、そのあるべき姿の探求を通して、イノベーションに資するさ らに高度な横幹科学技術の体系的構築に全力をあげる。

この宣言は、横幹連合の新たな基本活動指針として制定したものであるが、今後も継続して新しい機軸を求めて自ら革新していく必要があると考える。そのため横幹連合は、経済産業省のご支援と(株)KRI、(財)製造科学技術センターのご協力を得て、今回さらに、将来に向けた新たな構想を練る足掛かりとすべく、横幹アカデミック・ロードマップの策定を試みた。

本報告書は、この研究の成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚である。

平成 20 年 3 月

特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合 会長 吉 川 弘 之

委員 一覧

統括委員会 (横幹ロードマップ委員会)

委員長:江尻正員 産業技術コンサルタント(横幹連合副会長、理事)

幹 事:神徳徹雄 産業技術総合研究所(横幹連合企画委員会委員)

委員:佐野昭 慶応義塾大学(横幹連合理事)

三平満司 東京工業大学(計測自動制御学会)、WG1主査

山崎 憲 日本大学(日本シミュレーション学会、横幹連合理事)、

WG 2 主査

椹木哲夫 京都大学(ヒューマンインタフェース学会、横幹連合

理事)、WG3主查

新井民夫 東京大学(精密工学会)、WG4主査

井上雄一郎 横幹連合事務局長

補 助:富田武彦 横幹連合事務局員

池田理香 横幹連合事務局員

WG1 (ワーキンググループ1)

主 查:三平満司 東京工業大学(計測自動制御学会)

幹 事: 杉本謙二 奈良先端大(システム制御情報学会)

委員:松井正之 電気通信大学(日本経営工学会)

香田正人 筑波大学(日本オペレーションズ・リサーチ学会)

田村義保 統計数理研究所(日本統計学会)

西村千秋 東邦大学(日本バイオフィードバック学会)

高橋 進 東海大学(日本経営システム学会)

山本 栄 東京理科大学(日本人間工学会)

高森 寛 千葉商科大学(客員教授、日本リアルオプション学会)

協 力:神徳徹雄 産業技術総合研究所(横幹連合企画委員会委員)

WG2 (ワーキンググループ2)

主 査:山崎 憲 日本大学(日本シミュレーション学会)

幹 事:大石進一 早稲田大学(日本シミュレーション学会)

小山田耕二 京都大学(可視化情報学会)

委員:中谷祐介 早稲田大学(日本シミュレーション学会)

宮地英生 (株)ケイ・ジー・ティー(可視化情報学会)

高橋 渉 東京工業大学(国際数理科学協会) 山田貴博 横浜国立大学(日本計算工学会) 長嶋雲兵 産業技術総合研究所(日本コンピュータ化学会)

笠 博義 (株)間組(日本リモートセンシング学会)

原 尚幸 東京大学(応用統計学会)

宮本良之 日本電気(株) (産業界からの委員)

WG3 (ワーキンググループ3)

主 査: 椹木哲夫 京都大学(ヒューマンインタフェース学会)

幹 事:中川正樹 東京農工大学(ヒューマンインタフェース学会)

委員:清水義雄 信州大学(日本感性工学会)(横幹連合・理事)

今泉忠多摩大学(日本行動計量学会)山中敏正筑波大学(日本デザイン学会)

武田博直 (株)セガ (日本バーチャルリアリティ学会)

林 勲 関西大学(日本知能情報ファジィ学会)

岩田修一 東京大学(形の科学会)

渡辺富夫 岡山県立大学(ヒューマンインタフェース学会)

土井美和子 (株) 東芝 (ヒューマンインタフェース学会)長嶋祐二 工学院大学 (ヒューマンインタフェース学会)竹村治雄 大阪大学 (ヒューマンインタフェース学会)

下田 宏 京都大学 (ヒューマンインタフェース学会)

森本一成 京都工芸繊維大学(ヒューマンインタフェース学会)

協力:仲谷善雄 立命館大学(ヒューマンインタフェース学会)

橋山智訓 電気通信大学(日本知能情報ファジィ学会) 堀口由貴男 京都大学(ヒューマンインタフェース学会)

WG4 (ワーキンググループ4)

主 查:新井民夫 東京大学(精密工学会)

幹 事:鈴木宏正 東京大学(精密工学会)

委員:竹内芳美 大阪大学(精密工学会)

木下佳樹 産業技術総合研究所(国際数理科学協会)

中野一夫 (株)構造計画研究所 (スケジューリング学会) 木野泰伸 筑波大学 (プロジェクトマネジメント学会)

新 誠一 電気通信大学(計測自動制御学会)

帯川利之 東京大学(精密工学会)松浦 執 東海大学(形の科学会)

遠藤 薫 学習院大学(日本社会情報学会)

大倉典子 芝浦工業大学(日本バーチャルリアリティ学会)

廣田 薫 東京工業大学(日本知能情報ファジィ学会)

舩橋誠壽 (株)日立製作所(産業界からの委員)花井利通 日産自動車(株)(産業界からの委員)

協力:神徳徹雄 産業技術総合研究所(横幹連合企画委員会委員)

事業取りまとめ (兼 WG 事務局)

 宮内 悟
 (株) KRI

 野田泰徳
 (株) KRI

 宮本裕生
 (株) KRI

 平林由紀江
 (株) KRI

事業協力

瀬戸屋英雄 (財)製造科学技術センター 笹尾照夫 (財)製造科学技術センター 橋本安弘 (財)製造科学技術センター 外山良成 (財)製造科学技術センター 間野隆久 (財)製造科学技術センター

アドバイザー

福田賢一 経済産業省 是永基樹 経済産業省 武本直土 経済産業省

はじめに

特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合(略称:横幹連合)は、文理に 跨る43学会が協力して設立した連合組織である。縦に細分化されつつある科学技術の現実 の姿に対して横の軸の重要性を主張し、各分野で蓄積されつつある知の統合を通じて、社 会のイノベーションへとつながる新たな学問の展開を図ることを目的の一つとしている。

異分野融合による知の統合は、新しい学問分野を生み出すための重要な道程でもあり、そのため横幹連合では、今までにも、会員学会同士の知の交流を目指した数多くの活動を行ってきた。特に学会横断型のアカデミック・ロードマップの作成は、横幹連合にとっても最重要の課題であり、そのため従前からその作成には大きな関心を寄せてきた。

折しも経済産業省の主導により、国の重点技術分野についてのテクノロジー・ロードマップが完成し、次の段階として、特に分野横断的な領域でのロードマップの活用や、学界レベルでのより長期的なアカデミック・ロードマップ作りの重要性が指摘されるに至った。そういう機運の中、幸いにも今回、経済産業省からの大きな支援が得られることとなり、横幹連合としてもその分野横断的なアカデミック・ロードマップの作成を主体的に実施することが可能となった。

本計画では、横幹連合内に4つのワーキンググループ (WG) を作り、横幹連合会員学会の中から計測自動制御学会、日本シミュレーション学会、ヒューマンインタフェース学会、精密工学会の4学会にそれぞれ幹事学会としての中心的な役割をお願いすることとし、他の会員学会にはこの4つの WG のいずれかにご協力いただくこととした。

この活動では、今までに顔を合わせることすら殆どなかった異分野の研究者・技術者らが一堂に会し、熱心な議論を積み重ねてきた。平成19年11月に開催された第2回横幹連合コンファレンス(会場:京都大学)の特別セッションでは、その中間成果を広く報告し、その後、その結果を踏まえてさらに改訂が加えられた。

本報告書は、この横幹連合と会員学会によるアカデミック・ロードマップの最終成果について報告するものである。44 学会(平成 20 年 3 月現在)からなる横幹連合にとって、そのうちの4つの学会を中心とした今回のアカデミック・ロードマップは、全体から見ればまだ道半ばという感は免れない。しかしながらこの活動経験は、将来の横幹連合の進むべき方向をさらに深耕するための先鞭として、極めて意義深いものとなった。また、得られた成果は、今後の横幹連合ならびに会員学会の活動にとってはもちろん、我が国の将来のイノベーションに向けた大きな道標になるものと確信する。

このアカデミック・ロードマップ作成の過程では、経済産業省からの支援は言うに及ばず、受託事業取りまとめを担当された株式会社 KRI からの大きな支援と、財団法人 製造科学技術センターからの多くの助言をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

平成 20 年 3 月

特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合 副会長 同 横幹ロードマップ委員会 委員長 江 尻 正 員

目 次

はじめに

第1章	章	事業	色の目的	•	•	•	1
第2章	章	事業	长内容	•	•		2
第3章	章	概	要				
;	3.	1	実施方法	•		•	3
;	3.	2	実施体制	•		•	4
	3.	3	実施スケジュールと実施状況	•	•	•	5
第4章	章	制徒	『・管理技術分野のアカデミック・ロードマップ				
2	4.	1	はじめに	•	•	•	8
2	4.	2	フェーズ1:安全安心への予防社会	•	•	•	9
4	4.	3	フェーズ2:時系列のロードマップに向けて	•	•	•	15
4	4.	4	「複雑化する対象、複雑化するシステム」	•	•	•	16
4	4.	5	「見える化」	•		•	22
2	4.	6	おわりに	•	•	•	28
第5章	章	シミ	ニュレーション分野のアカデミック・ロードマップ				
į	ō.	1	はじめに	•	•	•	29
į	5.	2	知識創造社会を支える未来デザイン技術としての統計科学と				
			予測シミュレーション	•	•	•	33
į	5.	3	未来デザイン技術としての物質科学と分子・物質シミュレーショ	ン			
r	_	4	T1/h1 H-h73/3 1/2 2/23/	•	•	•	42
			エレクトロニクスシミュレーション	•	•	•	53
			ものづくりを支えるシミュレーション技術	•	•	•	61
_	_		プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション	•	•	•	70 70
			信頼性とシミュレーション 一人間・社会とのかかわりー				76
			地球観測技術と防災・環境分野でのシミュレーション	•	•		85
			人間回帰としての可視化技術	•	•		95
ţ	5.	10	おわりに	•	•	•	101
第6章	章	ヒュ	-ーマンインタフェース分野のアカデミック・ロードマップ				
(6.	1	はじめに	•	•	•	105
(3.	2	安全・快適なモビリティ	•	•	•	114
(ŝ.	3	防災・減災の安心社会	•	•	•	119

6	3 .	4	バーチャルリアリティが実現する未来社会	•	•	•	124
6	3 .	5	コンテクスト・アウェアなインタフェース	•	•	•	128
6	S .	6	感性の共有と創造	•	•	•	133
6	3 .	7	感性の対称性から見た産業のヒューマンインタフェース	•	•	•	139
6	5 .	8	脳科学、感性とあいまいさ	•	•	•	145
6	S .	9	身体的インタラクション・コミュニケーション技術	•	•	•	150
6	5 .	10	障害者支援技術	•	•	•	153
6	5 .	11	アンビエント・インテリジェンスとインタラクティブ・マーケテ	イ	ン	グ	
				•	•	•	159
6	i .	12	おわりに	•	•	•	163
第7章	Í	もの	づくり分野のアカデミック・ロードマップ				
7	· .	1	はじめに	•	•	•	167
7	· .	2	2040年のものづくりの姿	•	•	•	168
7		3	ものづくり技術の進展の方向	•	•	•	175
7		4	アカデミック・ロードマップ	•	•	•	187
7		5	おわりに	•	•	•	192
第8章	£	まと	め				
8	3.	1	アカデミック・ロードマップの概要	•	•	•	195
8	3.	2	作成過程で顕在化した問題点	•		•	197
8	3.	3	感想ならびに今後の方向	•	•	•	199
8	3.	4	学会横断型アカデミック・ロードマップの課題	•	•	•	200
おわり	15				•	•	202

付 録 第2回横幹連合コンファレンスでの中間報告

第1章 事業の目的

本事業は、経済産業省の平成 19 年度技術戦略マップローリング委託事業 (アカデミック・ロードマップ作成支援事業) の一環として、学会横断型アカデミック・ロードマップを新規に作成することを目的とする。

経済産業省では、我が国の研究開発投資の戦略的企画や戦略的実施の際のナビゲーターともなるテクノロジー・ロードマップとして「技術戦略マップ」の検討を行い、産学官の知見を結集することによって平成17年3月にこれを完成させた。この技術職略マップは、中・長期的な社会ニーズ・市場ニーズを踏まえながら今後の技術開発成果について考察を加え、それらが社会に出て行くための道筋を提示したものであり、同時に、その実現に必要と思われる重要技術課題についても提示したものである。平成17年以降、毎年度ローリング(見直し)作業が実施され、平成19年4月には第3版となる「技術戦略マップ2007」が公表された。

一方、今後の我が国の技術社会においては、真のイノベーションを起こすために、産学官の密接な連携が極めて重要となり、特に高い学術水準にある学協会等の学術団体と強い技術力・実行力を持つ産業界・官界とが、それぞれのアカデミック・ロードマップ(研究ロードマップ)やテクノロジー・ロードマップ(技術ロードマップ)などを通してコミュニケーションを行うことにより、双方向の「知」の流れを作り出すことが重要とされている。また、学術団体相互間においても、それぞれのアカデミック・ロードマップをコミュニケーション・ツールとして活用することにより、従来の、ともすると閉鎖的になりがちだった研究文化から脱却し、新しい研究文化への変革を促進し、その結果として、複数領域に跨る広範な技術が新規に展開されることが強く期待されている。

本事業は、上述のような背景のもと、新たに学会横断型のアカデミック・ロードマップを作成することを目的とする。このロードマップ策定プロセスの中で、分野横断的な新たな技術シーズ/研究シーズ発掘の手掛かりが得られ、それらがビジュアル化されることによって研究活動の将来に新たな展望が拡がることが期待される。また本事業の成果物としての学会横断型アカデミック・ロードマップを、今後、産学官研究コミュニティで共有化することにより、相互の円滑なコミュニケーションがよりいっそう進展し、これによって、ナショナル・イノベーション・システムの基礎構築に大きく資することも本事業の目的の一つとする。

第2章 事業内容

本事業の全体計画では、上述した学会横断型アカデミック・ロードマップの新規作成という目的に加え、平成18年度に作成されたロボット分野アカデミック・ロードマップの改訂を行い、また、平成18年度アカデミック・ロードマップ作成事業の成果も勘案しつつ、これらの成果と経済産業省の技術戦略マップとの有機的な連携を進めるための分析等を行うことも目的としている。すなわち、具体的には以下の3項目から構成される。

- (1) 学会横断型アカデミック・ロードマップの新規作成 異なる学術領域にまたがる4分野の横断型アカデミック・ロードマップを、分野 ごとの検討会を開催して新規作成する。
- (2) ロボット分野アカデミック・ロードマップの改訂等

平成 18 年度に作成されたロボット分野アカデミック・ロードマップと技術戦略マップ 2007 との関係の明確化を行い、経済産業省にて実施されている技術戦略マップローリング検討会等に対して、アカデミック・ロードマップ側からの提言をまとめる。

また、ロボット分野アカデミック・ロードマップローリング検討会を開催し、平成 18 年度作成版の改訂を行って平成 19 年度版ロードマップを作成する。さらに、本事業に関係する学術学会等においてアカデミック・ロードマップの広報普及活動を実施する。

(3) アカデミック・ロードマップ作成手法の整理およびロードマッピング事例集作成等上記(1) 項および(2) 項で作成されるアカデミック・ロードマップ(横断型およびロボット分野) および平成18年度に作成された応用物理、化学、機械分野のアカデミック・ロードマップを対象として、ロードマップ作成手法を整理する。この結果から、他の学術学会におけるロードマップ作成の際に有用と判断される取り組みモデルを検討し、ロードマッピング事例集として取りまとめる。

本報告書は、上記(1)の「学会横断型アカデミック・ロードマップの新規作成」に関して、特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合(以下、横幹連合)が中心となって実施した成果をまとめたものである。なお、上記(2)は主として財団法人 製造科学技術センターが、また上記(3)は主として株式会社 KRI が実施し、それぞれの成果については、それぞれ個別の報告書としてまとめられている。

第3章 概 要

3. 1 実施方法

これまでのアカデミック・ロードマップは、ある専門分野を担当する学会ごとに、それ ぞれ個別に検討されてきた。一方、現代の科学技術では、多くの専門分野に跨る横断的領域の重みが増してきており、これらの未来像を描くことは、我が国の科学技術を考える上で極めて重要である。

本事業では、分野横断的科学技術を担当する横幹連合が主体となり、異なる学術領域に 跨る横断的な学術に対する未来像を議論するために、まず、典型的かつ重要な横断型科学 技術分野として①制御・管理技術分野、②シミュレーション分野、③ヒューマンインタフェ ース分野、④ものづくり分野の4つを選定した。さらに、それぞれの分野で考察する目標 の枠組みとして以下の4テーマを選定し、この4テーマを対象として、横幹連合に属する 複数の学会が協力しつつアカデミック・ロードマップを作成することとした。

- ① 制御・管理技術が先導する未来社会
- ② シミュレーション技術が先導する未来社会
- ③ ヒューマンインタフェースの革新による新社会の創生
- ④ ものづくりの視点からみた未来社会の構築

この異なる学術領域にまたがる4分野の横断型アカデミック・ロードマップを検討するために、4つのワーキンググループ(以下 WG)を設置することとした。それぞれのWGでは、横幹連合の会員学会である①計測自動制御学会、②日本シミュレーション学会、③ヒューマンインタフェース学会、④精密工学会がそれぞれ幹事学会となり、これらに、横幹連合に属する他の複数学会が協力学会として協力する体制とした。

このように各 WG は、横幹連合に属する関連専門学会の有識者をもとに構成し、それぞれの課題に対して検討会を事業期間内に4回程度開催してアカデミック・ロードマップ作成に向けた議論を行うこととしたが、その際、各 WG 委員は、学会の代表としての立場にこだわるのではなく、当該分野に精通した一個人としての立場で、自由闊達な意見を出し、深く議論できる体制とした。

また、これらの WG を統括し、全体の取りまとめを行う統括委員会として横幹ロードマップ委員会を設け、全体計画の円滑な遂行のための各種の調整作業や各 WG の成果の取りまとめ作業を行うこととした。

さらに、各 WG での検討結果の中間報告を平成 19 年 11 月 30 日に京都で開催された横幹連合コンファレンスにて行い、パネル討論を通して WG 委員以外の参加者からの意見もフィードバックすることを試みた。さらに横幹連合のホームページにて、中間報告とその討論結果を公開することにより、コンファレンス参加者以外の一般からの意見もフィードバックし、より良いロードマップの作成へとつなげることを試みることとした。

3. 2 実施体制

本事業の実施体制の概要を図3-1に示す。株式会社 KRI の全体取りまとめのもと、各 WG については事務的な処理を含む実質運営を株式会社 KRI が担当し、横幹連合は株式会社 KRI からの再委託を受けて統括委員会を運営し、各 WG に対しては技術的側面を支援しつつ成果の最大化を図ることと、得られた成果の取りめとめを行う体制とした。

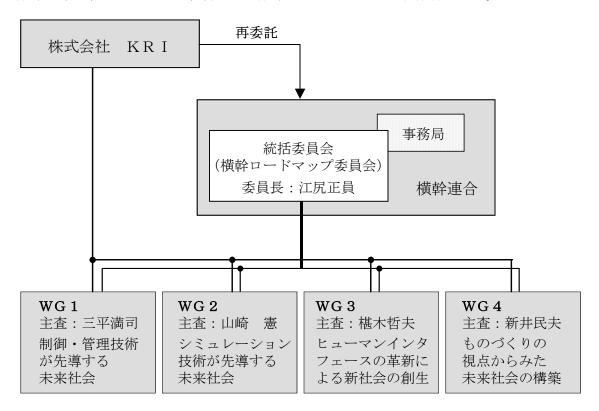


図3-1 アカデミック・ロードマップ作成体制

具体的な実施体制を以下に示す。なお各WGの委員等については前掲したとおりである。

• 統括委員会(横幹ロードマップ委員会)

<業務内容>

以下の4つの WG を統括し、目標の設定、進行スケジュール等の管理・調整を行うと共に、本業務に関連する外部機関との連絡調整に当たる。

• WG1:制御·管理技術分野に関する検討

<検討テーマ>

制御・管理技術が先導する未来社会

<参加する学会>

幹事学会:計測自動制御学会

協力学会:システム制御情報学会、日本経営工学会、日本統計学会、日本人 間工学会、リアルオプション学会、日本経営システム学会、日本バ イオフィードバック学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会

• WG2:シミュレーション分野に関する検討

<検討テーマ>

シミュレーション技術が先導する未来社会

<参加する学会>

幹事学会:日本シミュレーション学会

協力学会:可視化情報学会、日本計算工学会、日本コンピュータ化学会、応 用統計学会、プロジェクトマネジメント学会、日本リモートセンシ ング学会、国際数理科学協会、日本信頼性学会、産業界

• WG3:ヒューマンインタフェース分野に関する検討

<検討テーマ>

ヒューマンインタフェースの革新による新社会の創生

<参加する学会>

幹事学会:ヒューマンインタフェース学会

協力学会:日本感性工学会、日本行動計量学会、日本バーチャルリアリティ 学会、日本知能情報ファジィ学会、日本デザイン学会、形の科学会

• WG4:ものづくり分野に関する検討

<検討テーマ>

ものづくりの視点からみた未来社会の構築

<参加する学会>

幹事学会:精密工学会

協力学会:国際数理科学協会、スケジューリング学会、プロジェクトマネジメント学会、計測自動制御学会、形の科学会、日本社会情報学会、 日本バーチャルリアリティ学会、日本知能情報ファジィ学会、産業界

3.3 実施スケジュールと実施状況

本事業を実施するために図3-2のようなスケジュールを定め、この期間中に統括委員会および各 WG とも 4回程度の会合を持って議論を行うこととした。実際に開催された会合実績を図中に \triangle 印で、またその詳細を表3-1~表3-5に示す。この会合以外に、電子メールによる頻繁な議論を実施し、特にまとめの時期では、各 WG による原稿取りまとめと統括委員会による原稿の精査・編集が電子メールをベースとして実施された。

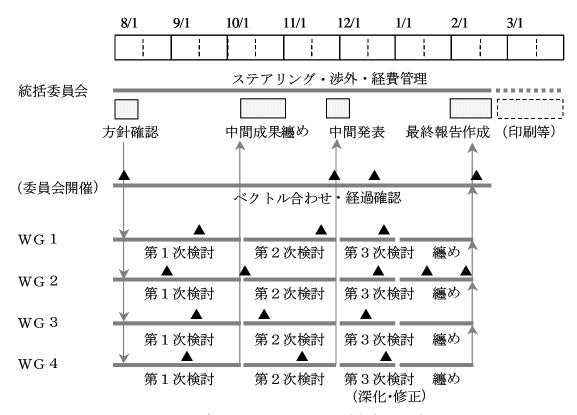


図3-2 アカデミック・ロードマップ作成スケジュール

表3-1 統括委員会(横幹ロードマップ委員会)

	開催日	開催場所	内容
第1回	平成 19 年 8 月 3 日	学士会分館	主旨説明、体制紹介、基本方針確認
(臨時)	平成 19 年 11 月 29 日	京大	進捗状況の確認、中間報告打合 せ、報告書まとめ方の議論
第2回	平成 19 年 12 月 18 日	学士会分館	報告書方針計画、日程確認
第3回	平成 20 年 2 月 13 日	学士会分館	報告書内容確認と精査

表3-2 WG1:制御·管理技術分野に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第1回	平成 19 年 9 月 16 日	東工大 大岡山	計画の確認、先行検討作業の反 省、新計画に向けた方針検討
第2回	平成 19 年 11 月 18 日	東工大 大岡山	「複雑化する対象・複雑化するシステム」に対する検討
第3回	平成 19 年 12 月 25 日	東工大 大岡山	「見える化」に対する検討、全体 のまとめ

表3-3 WG2:シミュレーション分野に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第1回	平成 19 年 8 月 31 日	早大 理工学部	計画の確認、分野動向検討
第2回	平成 19 年 10 月 10 日	早大 川奈SH	技術動向議論、ラフスケッチ作成
	~11 日		
第3回	平成 19 年 12 月 19 日	日本航空会館	全体マップの検討、執筆内容の検
			討
第4回	平成 20 年 1 月 17 日	日本航空会館	原稿の相互検討
第5回	平成20年2月7日	日本航空会館	最終まとめ

表3-4 WG3:ヒューマンインタフェース分野に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第1回 平成19年9月14日		(株)KRI 本社	計画の確認、委員の担当分野の割
			当
第2回	平成 19 年 10 月 19 日	日産MI 箱根	各分野の技術動向議論、ロードマ
	~20 日		ップのスケルトン抽出
第3回	平成 19 年 12 月 13 日	KRP会議室	執筆に際しての共有視点の確認
			と執筆内容の検討

表 3-5 WG 4: ものづくり分野に関する検討

	開催日	開催場所	内容
第1回	平成 19 年 9 月 7 日	東大 工学部	計画の確認、分野動向検討
第2回 平成19年11月11		国際湘南村	技術動向議論、ラフスケッチ作
	~12 日		成、執筆の方向性策定
第3回	平成 19 年 12 月 27 日	東大 工学部	全体マップの検討、執筆内容の検
			討

第4章 制御・管理技術分野のアカデミック・ロードマップ

4. 1 はじめに

ノバート・ウィーナー (Nobert Wiener) は著書「Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine (1948, 1962(2nd ed.))」 (邦訳: サイバネティックス、動物と機械における制御と通信 第2版(1962 岩波書店)) や「The Human Use of Human Being, Cybernetics and Society (1949)」 (邦訳:人間機械論、サイバネティクスと社会(1954 みすず書房)) において、人間の神経系や社会管理システムを含むシステム観としての「サイバネティクス」を提唱し、当時のエンジニアに大きな影響を与えた。ここで提唱されたものは「フィードバック系の科学」、つまり、フィードバックをもとにした社会や人間の理解であり、それは制御工学、経営工学などへ発展してきている。また、そこでは同時にこれらを解析・統合するための数学の大切さが示されている。

サイバネティクスを引き合いに出すまでもなく、制御と経営とはその本質において共通する部分が多い。それは管理対象をある目的とする状況に導き、それを維持し、さらに深化させることである。経営理論の発展初期段階(科学的管理法)において既にフィードバックの概念はその中心的理論部分であった。現在においてもフィードフォワードとフィードバックは、内外の状況の変化に企業経営が素早く対応していかねばならない以上、必要欠くべからざるものである。しかし、現時点において制御と経営とには大きな相違もある。その違いの主なものは

- 制御は物理的存在を主に対象とし、経営は資金(資産)と人(集団)を対象にしている。
- 目的 (goal) は 制御では物理的状況であり、経営では価値や資金 (の増加)、ステークホルダーへの貢献などである。
- 人間や社会への影響については、制御は大規模システムなどでも物理的な影響が主であり、それに対して経営は価値や経済をとおして人間、社会に影響する。

ことなどである。これらの対象・目的の相違は今後も存在し続けると思われるが、それに 対するアプローチとしては共通する部分も多いと考えられる。

一方、ウィーナーは著書の中で人間の機能・行動を理解するためにフィードバックなどの概念が必要であることも主張している。近年、この考え方を裏付けるように生理機能も含めた人間の活動を工学的に理解するためのバイオフィードバックや、人間と機械が共存するシステムを人間工学として考える研究が活発化している。人間工学はもともと人間・機械システムを対象として考えてきているが、近年はこの機械にコンピュータも加わり、さらにはネットワークも加わり、さらにシステムが複雑化している。

このようにサイバネティクスに類する考え方は制御工学、経営工学、人間工学と多種の専門分野で発展してきた。また、これら工学を支える基礎として統計数理、最適化理論、オペレーションズリサーチ(OR)など多くの数学的分野が発展してきた。これらの分野は、共通する概念も多い分野であるが、現状では対象の独立性が強く、それぞれが独立に(または強い関連付けがなく)発展している分野である。

しかし、時代が進むにしたがって、これら制御工学、経営工学、人間工学、統計数理、 OR と融合すべき分野も増えてくると考えられる。例えば自然保護、資源の最適配分、災害 への対処、人間と機械の共存など、相反する多目的の実現問題は制御・経営・人間工学の協力が不可欠になると思われる。もちろんこれらの多くは工学の全分野と社会科学の全てを結集して対処すべき課題であり、こうした問題に諸工学、諸科学が協力して取り組むことにより、異学問分野から相互に、概念、考え方、技術などを学び、新しい展開が可能となると考えられる。

今回は以上のような観点から制御・管理技術分野(制御工学、経営工学、人間工学、統計数理、ORなどの研究分野)に関連深い委員により、これらの分野が協力し発展させるべき方向性をロードマップとしてまとめることを目標としている。

制御・管理技術分野は、方法論を提案するまさに分野横断型の技術分野である。そのため、縦型分野のように具体的な成果物を明確にしているわけではなく、時系列のロードマップを描くことは容易ではない。そのため、我々のロードマップ作成には紆余曲折があった。

我々のロードマップの作成は2つのフェーズに分かれている。「フェーズ1」では経済産業省により推奨されている C-Plan^[4-1]に基づいた議論を行った。ここでは「横幹型のロードマップがどのようなものになるかを模索することを目的としたく横幹メンバーが試行的に作成するロードマップ>」として「安全安心のための予防社会」を実現するためのロードマップ作成の議論を行った。しかし、後に述べるように、「フェーズ1」で定めた主題では「横幹技術分野における」時系列を含めたロードマップの作成は困難であるとの結論に至った。

そこで、「フェーズ2」では「時系列を含んだロードマップ」を作成することを主題に、 最初に「時系列の主軸」を指定したロードマップ作成を行った。ここではサイバネティク スに関連深い制御・管理技術分野(制御工学、経営工学、人間工学、統計数理、OR などの 研究分野)が協力し発展させるべき方向性をロードマップとしてまとめることを目標とし ているため、議論ができるだけ個別化しないように、我々の提供すべきシーズを

- ・対象が複雑で大規模化する「複雑化する対象、複雑化するシステム」
- ・対象に対する素早い理解と対応を可能にする「見える化」

の2つに絞り、時間軸上に配置してロードマップを作成した。

4. 2 フェーズ1:安全安心への予防社会

フェーズ1では、「制御・管理技術が先導する未来社会」を初期課題として、横幹連合から示された C-Plan を参考にロードマップの作成を目指した。

C-Plan では以下のようなロードマップの作成手順が示されている。

[事前準備]

課題を設定し、議題に沿って目標、範囲、体制、スケジュールを具体的に作成。

「ワークショップ1]

課題に対する出席者からの「ウォンツ」の提出、「ウォンツ」項目のグルーピングと「コンセプト」づくり、コンセプトのプライオリティを議論。

[ワークショップ2]

採用されたコンセプトをもとに、課題への変換と機能への展開を実施。

[ワークショップ3]

課題を解決する要素技術を抽出し、課題を解決する全体システム等をダイヤグラムやイメージ図として展開。

[ワークショップ4]

ワークショップ $1 \sim 3$ の検討結果をもとに、コンセプト、機能を考慮しながら、要素技術およびこれらの因果関係を時間軸に照らして整理。 \rightarrow 「技術ロードマップ完成」

C-Plan のほとんどは KJ-法と呼ばれるブレーンストーミングの手法を中心としている。そこで、KJ-法を効率的に行うため、KJ-法をパソコン上で実現するソフトウエアとしてフリーソフトの IdeaFragment2 (窓の杜(http://www.forest.impress.co.jp/)より)を用いた。IdeaFragment の画面をプロジェクタ 3 画面に投影し、広い作業空間をメンバー全員で見ながらディスカッションを行った。また、データの入力・移動・整理・関連付け等のため、学生サポータ 1 名を依頼した。







写真4-1 ロードマップ作成の様子

4. 2. 1 C-Planによるロードマップの作成

<課題設定>

横幹連合の目指す分野におけるロードマップは従来のものと同様になるとは限らず、完成形がどのようになるか予想の付かない状態からロードマップ作成を始めることになった。 そこで、フェーズ1では

・横幹型のロードマップがどのようなものになるかを模索することを目的 とした

「横幹連合のメンバーが試行的に作成するロードマップ」

と位置付け、C-Planに示された丸2日間でのロードマップの作成を目標とした。そのため、ロードマップ課題については中心学会の分野にこだわらず、参加学会のメンバーが興味を持てる横幹らしい課題を設定することとした。

参加者全員が議論できるロードマップにふさわしい課題を設定するため、ブレーンストーミングを行った(図 4-1)。メンバーのシーズとニーズを整理した結果、「安全安心」を課題としてロードマップを作成することにした。本課題は計測・制御、経営、統計、人間、システム、管理など、メンバー関連分野が融合して築いていくべき未来への課題である。

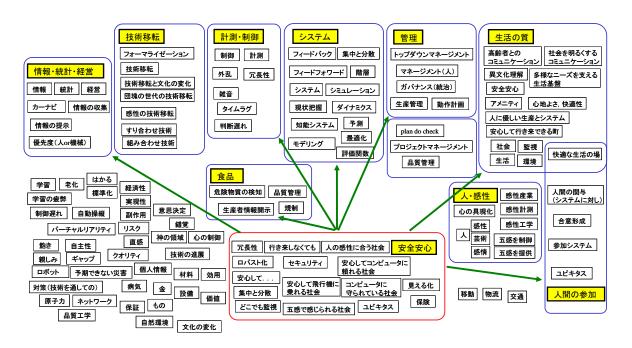


図4-1 課題決定のためのブレーンストーミング

<ワークショップ1>

C-Planに従い、まず、課題に対する出席者からの「ウォンツ」の提出、「ウォンツ」項目のグルーピングと「コンセプト」作りを行った。「安全安心」に関する「ウォンツ」を整理するため、「安全安心」に関する個々の「不安要素」(例えば、交通システム、金融、災害、テロなど)に対する「不安の理由」の整理と、理由に対応した安全安心のためのウォンツとしての「対策(技術を通しての)」を整理した(図4-2)。

さらに議論を明確にするため、不安要素を

・交通システム、金融、犯罪、情報の氾濫・漏洩、自然災害、テロ、情報テロに絞り、その対策技術(ウォンツ)を整理した(2 - 3)。

その結果、「安全安心」のためにはコンセプトとして「安全安心への予防社会」が大切であるとの結論に至った。「安全安心への予防社会」を形成するために考えるべき不安要素は多岐にわたるにもかかわらず、実現すべき対策は

・教育、システム設計、計測、情報、予測 の横幹技術が中心課題であり、横幹連合としてのロードマップとしては適切なコンセプト であると考えた。

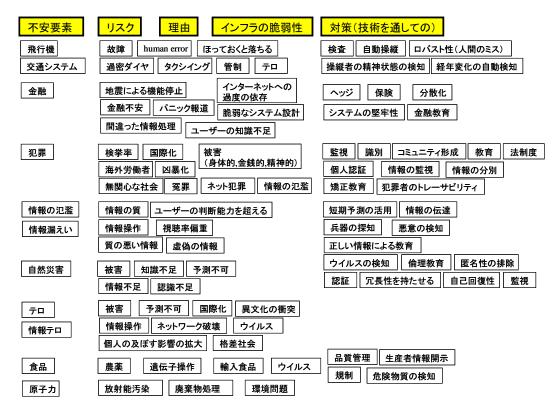


図4-2 不安要素に対する「ウォンツ」(技術を通しての対策)

	教育	システム設計	計測		情報	予測
交通システム		自動操縦 ロバスト性 (人間のミス)	検査 操縦者の精神状態の 検知 経年変化の自動検知		フライトレコーダー	天候予測
金融	金融教育	ヘッジ 保険 分散化 システムの堅牢性	市場・株価		ディスクロージャー	予測
犯罪	教育 矯正教育	コミュニティ形成 法制度	識別 監視	犯罪者のトレーサビリティ		
情報の氾濫・漏洩		短期予測の活用			個人認証 情報の監視 情報の分別	
自然災害	避難訓練 (よりリアルな)	情報の伝達	危険箇所の検査 危険箇所の常時監視	気象情報		予兆検知
구ㅁ	正しい情報による教育		兵器の探知		悪意の検知	
情報テロ	倫理教育	冗長性を持たせる 自己回復性	監視	ウイルスの検知	認証 匿名性の排除	

図4-3 安全安心のためのウォンツ

<ワークショップ 2>

C-Plan に従い、採用されたコンセプトをもとに、課題への変換と機能への展開を実施した。ワークショップ1で整理した不安要素を取り除く技術的対策を機能として整理した結果、

・危機意識の共有、見える化、情報、計測、システム構築 を大きな機能とし、それらの詳細と関係についてまとめた(図4-4)。

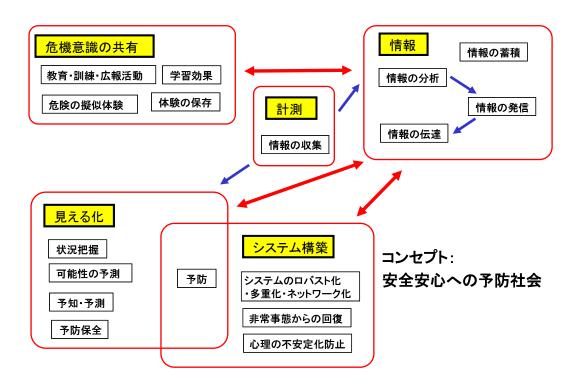


図4-4 コンセプト「安全安心への予防社会」

<ワークショップ 3>

C-Plan に従い、課題を解決する要素技術を抽出し、課題を解決する全体システム等をダイヤグラムやイメージ図として展開することを目指した。

まず、個々の不安事例に関する要素技術をリスト化し(図4-5)、さらに、それらを ワークショップ 2 でまとめた機能の観点から整理した(図4-6)。

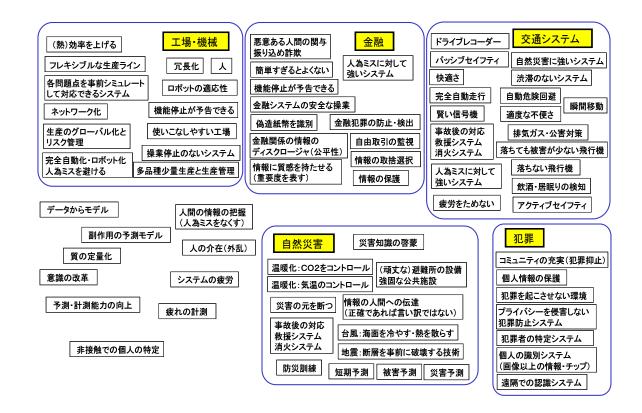


図4-5 要素技術

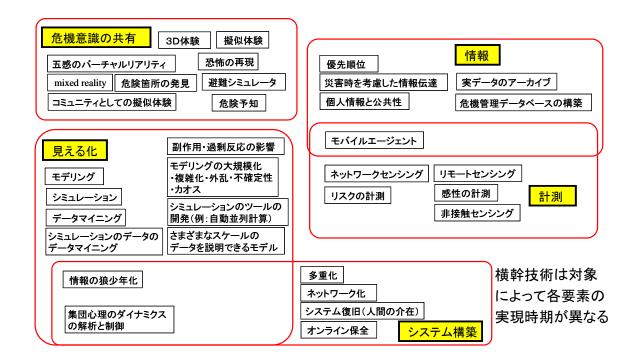


図4-6 機能要素技術

<ワークショップ4>

C-Planに従い、ワークショップ1~3の検討結果をもとに、コンセプト・機能を考慮しながら要素技術およびこれらの因果関係を時間軸に照らして整理し、「ロードマップ完成」を試みた。しかし、要素技術とこれらの因果関係の時間軸は個々の不安要素により異なり、一律にロードマップを作成できないことが問題となった。時間軸を含んだロードマップの例として災害の一例である「地震」に関するロードマップの作成も検討したが、これは主題とする「安全安心への予防社会」の一例でしかなく、本WGの結果としてのロードマップとしてはふさわしくないとの結論に至った。そこで、「安全安心への予防社会」のために

・解決すべき機能と要素技術

(これらは個々の事案で共通し、かつ中心課題となる)

を示した図4-6を

・横幹技術は対象によって各要素の実現時期が異なる

ことを明記して、フェーズ1のロードマップの結論(あえて時系列を示していない)とした。

4. 2. 2 フェーズ1のまとめ

横幹分野はもともと縦型分野を横に貫く分野である。フェーズ1のロードマップ作成においても縦型としての個々の不安事例(交通、金融、災害、など)に対応する共通技術を横型技術として取り上げた。この場合、縦型事例についての時系列ロードマップは描けても、横型技術については技術の成熟時期が縦型事例により異なるため、時系列でのロードマップを描くことが難しくなる。そのため、今回のような「要素技術を整理して示すことまでが横幹分野としての(時系列のない)ロードマップ」であり、これを基礎に「個々の縦型分野と横幹分野が協力して個々の事案の時系列のロードマップを必要に応じて描いていく」というのがフェーズ1のロードマップ作成のまとめとなった。

しかし、横幹技術としての制御・管理技術の時系列を含めた発展に関するロードマップ を作成することは重要であるとの観点から、ロードマップ作成の方法を変え、フェーズ2 として時系列を含んだロードマップの作成を目指すこととした。

4. 3 フェーズ2: 時系列のロードマップに向けて

フェーズ1ではゴールとなる課題を中心に C-Plan を実施した。そのため、個々の事案に関しては時系列のロードマップは描けるものの、横幹技術としてのロードマップを描くことは困難であった。そこで、フェーズ2ではロードマップを描く手法を根本的に変えることとした。ここでは横幹技術の進歩に重要な役割を果たす要素を時系列の主軸として選び、それに肉付けする方法でロードマップを描くこととした。このとき、我々は横幹技術を図4-7のような「多種のシーズと多種のニーズを結びつける技術およびそこから生まれる新しいシーズ」と位置付け、この新たなシーズの発展の予想を、時系列を含んだロードマップとして整理することとした。

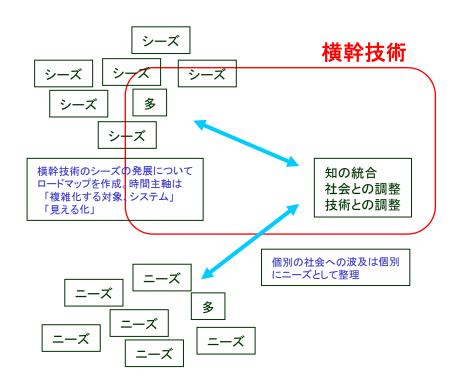


図4-7 横幹技術

この中で制御・管理技術分野(制御工学、経営工学、人間工学、統計数理、OR などの研究分野)に関連が深く、これらの分野が協力し発展させるべき方向性について、かつ、議論ができるだけ個別化しないように、我々の提供すべきシーズを

- ・対象が複雑で大規模化する「複雑化する対象、複雑化するシステム」
- ・対象に対する素早い理解と対応を可能にする「見える化」

の2点に絞り、時間軸上に配置したロードマップを作成した。このようにアカデミック・ロードマップとしては我々の分野共通認識となる概念2つに厳選したが、それを必要とする社会からのニーズとこれらの社会への波及については各論的なものも含めて各ロードマップを示した後の節にて説明する。

4. 4 「複雑化する対象、複雑化するシステム」

4. 4. 1 「複雑化する対象、複雑化するシステム」のロードマップ

制御・管理技術関連分野の対象やシステムは複雑化の一途をたどっている。図4-8のロードマップでは、我々の分野が提供すべきシーズとしてのシステム解析・設計ツールをどのような方向性で複雑化する対象・システムに対処できるように発展させるべきかを示している。

ここではいくつかの切り口での「複雑化する対象、複雑化するシステム」へのシーズを 予測している。 まずは、物理的な大規模化に伴う複雑化や、異種の要素の結合・融合による複雑化への 対処である。ここではハイブリッド制御における連続系と論理系の融合、ネットワークで つながれたシステムの挙動、大規模であるがゆえに大量計算を伴うような対象・システム などに対するシステム解析・設計理論の発展が必要となる。これに伴い、「複雑系」と呼 ばれる分野の理論的発展、および体系化が必要となってくる。

対象・システムの複雑化は物理的に大規模・異種融合をするだけではない。人間という主観的であり、ある種不確定な要素がシステムに介入・共存することによる複雑化も重要である。ここでは人間の主観や不確定性の問題を解決する必要があるのみならず、システム(機械など)と人間のコミュニケーションや相互理解・学習などが望まれる。そのため、人間一機械系を扱う人間工学のみならず、人間の社会性に関する研究、機械システムに関する研究などの融合が必要となってくる。

また、自然環境を守るためには自然環境の詳細なモデル化のみではなく、環境を制御するために必要かつ十分なモデル化をする必要があり、それに伴う解析・予測手法の開発が必要となる。ここでは自然環境を物理的なシステムとしてその入出力を見るのみでなく、各国の政策を入力と考え、それに対する自然環境の変化をモデル化し、有効に制御する手法を開発する必要が出てくると考えられる。ここではまさに物理的な入出力に着目する制御工学と、政策を入力とする社会・経済・経営工学分野の融合したモデル化・解析手法・制御手法が必要となってくる。

経営・社会工学分野としてはダイナミクスの意味ではある種均一な金融デリバティブ理論から、不確定性や主観性の強くなる管理・経済、社会デリバティブ理論へと変遷することが必要とされる。

このように、「複雑化」は単なる「大規模化」のみならず、「異種のシステムの融合」「人間などの主観的・不確定的要素の追加」、また、「価値の多様性」によりもたらされると考えられる。そのため、単一の物理システムを扱ってきた制御工学や、経済や経営システムを扱ってきた経済学・経営工学、システムにおける人間を扱ってきた人間工学、人間そのものを扱ってきたバイオフィードバックなど、あらゆる分野の融合化が必要となる。ある時期にはこれらの融合が体系化・普遍化し、新たな問題への応用が可能となる必要もある。

さて、このように「複雑化する対象・複雑化するシステム」の個々の対象についてはそれぞれの解析・設計法が開発され、先に述べたように融合・体系化されてくるであろう。しかし、それ以上に、これらを統一的に扱うための数学が同時に発展することが重要である。ロードマップでは特に複数の要素・主体からなるマルチエージェントシステムに対する理論的な発展(同質・同目的の複数エージェントから異質・異目的のエージェントへの発展)やそれに伴う新たな価値の創造を生み出すような数学的理論の発展の必要性を示している。

複雑適応系の技術・知識論としては、制御工学分野など伝統的で高度に専門化されたディシプリンとしての技術論に加えて、現時点では未だ萌芽的ではあるが、OR やサービス科学における「サービス可能な知識(Serviceable Knowledge)」の創出とマネジメントを包含するような進展が予想される。この中では、ゲーム理論が重要なツールとなろう。

ゲーム理論は、複数の意思決定主体(マルチエージェント)の問題を取り扱う数学的フ

レームワークであり、経済学、経営学、社会学、政治学、心理学、生物学など、制御工学 以外にも多岐にわたる分野で用いられている。例えば、経済・経営(リスクマネジメント を含む)の分野において、市場理論、競争戦略分析、契約理論、組織と情報の理論は今後 ともゲーム理論が中心的な役割を果たすと考えられる。

また、複雑化するシステムを数学的に統一的に扱うための「多階層モデル」とその発展、 データ同化を用いた解析・予測手法の発展の必要性も示している。離散対象システムのス ケジューリングに関する理論の進展は特に政策決定や経営システムの制御に重要であると 考えられる。このように数学的な発展も必要不可欠である。

以上、ロードマップについてまとめれば、「異種システムの融合」「人間などの主観的・ 不確定的な要素の追加」「価値の多様化」により「複雑化する対象・複雑化するシステム」 に対して従来の分野にこだわらない

- ・分野横断型協力による新たな手法の創出
- と、これらの複雑化を支える
 - ・統一的に扱う数学的理論の発展

が今後の30年間で必要と考えられる。その意味では図4-8では明確には描かれてはいないが、それぞれの流れが互いに干渉しあうことが重要となる。

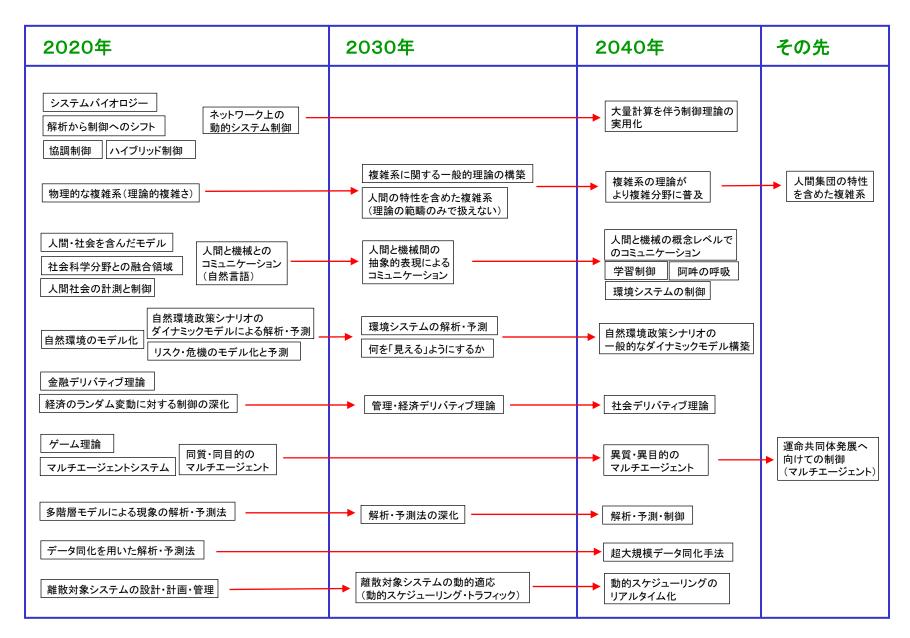


図4-8 複雑化する対象・複雑化するシステム

4. 4. 2 社会からのニーズと社会への波及

前項ではアカデミック・ロードマップとして「複雑化する対象・複雑化するシステム」に対して制御・管理技術分野でなされるべき研究の方向性について述べてきた。ここではこれらの研究を必要とする社会的ニーズや、これらの研究が発展することにより社会へ波及する項目について考える。

これらの事項は「複雑化する対象・複雑化するシステム」の観点からは各論的となる部分であり、フェーズ1と同様に個々のロードマップを作成することは微細に入りすぎるため、制御・管理技術のアカデミック・ロードマップ作成の範疇外と考えている。しかし、これらの社会ニーズや社会への波及を研究者は強く意識する必要があると考える。

(1) 安全安心な社会の構築

安全安心な社会を作るためには人間の心理を含んだ社会自体のダイナミカルシステムとしての扱いが必要であり、複雑システムとしての設計が必要となる。具体的にはフェーズ1で検討した「交通システム」「金融」「犯罪」「自然災害」「テロ」などのほか、24時間休むことなく活動する都市の防犯の工夫としての「どこでもつながる安心情報ネットワーク」の構築とその運用、「緊急医療体制」のための病院受け入れネットワークの構築や救急車を先導する道路信号システムの構築、「渋滞緩和システム」のためのモデル化・シミュレーション・都市設計、災害時のネットワークの構築などが対象となる。

(2)環境問題へのアプローチ

地球の温暖化防止、地球環境保全は地球規模の問題として取り上げられてきている。地球全体を大きなダイナミカルシステムと考えるならば、制御・管理技術分野はその問題解決に大きく貢献することができるであろう。

特に、地球を物理的に考えるならば、どのような物理要素が CO₂ 削減や温暖化防止、環境保全に影響するパラメータであるかが明白にできれば制御論的に環境を制御することが可能となる。もちろん、大規模な地球をシステムと理解するためには物理的に大規模かつ複雑なシステムとして扱うための、そして、その挙動を制御可能なレベルまで簡略化するためのモデル化が必要となってくる。例えば、地殻をメッシュ化した物理モデルを考え、状態空間表現を用いたデータ同化技術が完成すれば、精度の高い地震予測が可能になる。長期の気候変動、環境変動についても同様の技術を用いることが可能となると考えられる。

一方、環境問題への制御入力は法的規制や政策のシナリオである。ここでは国・地域などの利害関係も含めたマルチエージェントシステムに対するゲーム理論的なアプローチや 社会科学的アプローチが必要となる。

制御・管理技術による環境問題へのアプローチが順調に行われ、モデル化が発展すれば、環境予測については、2020 年頃までには限定範囲の短期予想、2030 年には地球環境の予見や気象の広範囲の長期予想が可能になると思われる。自然環境のモデル化とともにマルチエージェントシステムの最適化が進展し、かつ政策シナリオとしての制御方策が確立されれば 2020 年には CO2 のコントロールが、2030 年には温暖化防止方策の提案が、2040 年には環境保全のための方策の提案が可能となるであろう。

(3)幸福かつ人間的な生活のために(人間一機械系)

わが国が直面する最大の問題は、人口減少と人口構造の激変(少子高齢化)である。これに対して機械がいかに関われるか、関わるべきかについて考えるとき、人間が中心にいることを考慮すれば、技術的な議論だけでは十分ではなく、生命倫理的な吟味も必要となることがわかる。

従来人手でしか行えないとされてきた各種作業の機械による支援方法を求めるならば、 当然機械やシステム側が人間のレベルに沿うような形で複雑化しなければならない。その 中核となるのが人間と機械とのコミュニケーションにおいてマッチングをとることである。 その10年ごとの発展は、それぞれ作業支援、問題解決支援、生活支援へと進化していき、 機械と人間との共生関係がよい方向に発展すると考えられる。これを実現するならば、2020 年までには各種作業支援(作業ロボットによる人手の軽減:手術支援ロボットなど)が、 2030年には問題解決支援(人間の発した疑問を了解し、解決へ向けて支援:ロボット秘書 など)が、2040年には生活支援(常日頃から接して生活や思考様式を学習し、生活のさま ざまな場面でパートナーとなって支援する:身辺介護のトータルパートナーシステムなど) が完成されることが予想される。

さて、人間を支援するシステムから一歩進んで、人間が積極的に関与すべき人間一機械システムを考える場合、人間がシステムをコントロールすることに起因する複雑化が重要となる。機械システム部分の自動化により、人間側の負荷を減らすことは可能であるが、逆にヒューマンエラーの問題が発生する。ヒューマンエラーを考えれば、システムに対する人間の意志をできるだけ反映しないシステムの方がロバスト(頑健)であるが、機械だけでコントロールされていることに不安を覚える人々がいるのも事実であり、その場合には人間の積極的な介在が必要となる。システムが複雑になればなるほど人間に対する負荷が強くなるため、負荷を軽減するシステムが必要であるが、同時に人間は負荷が軽すぎると、単調性が強くなり、逆に負担感を生じることがあり、人間には適度な負担感のある作業を課す必要がある。

このような人間にとって適当な負荷がかかり、かつエラーを起こすことが少ない(本当はエラーがゼロになる)システムが大切であり、このような観点から人間が真に幸福になれるシステムは人間の機能を適当に使わせるシステムではないかと考えられる。このようなシステムを設計するためには物理的な機械システムの設計理論のみでなく、生理学・心理学まで含めた人間の理解とこれらを統合した「複雑なシステム」の設計理論が必要である。

(4) 社会的価値・経済的価値の創出のために

社会的価値・経済的価値を創出するためには複雑な3M&Iシステムを扱う必要がある。ここで3M&Iとは、ヒト(huMan)、モノ(Machine/Material)、カネ(Money)および情報 (Information)とからなり、その代表クラスが、ものづくり、生産/企業システムである。これらの科学化は、見える化であり、それによるバーチャル管理化の構築が今後の主要なニーズである。そのため、単なる情報処理機能から脱皮した管理・統合ツールとしての ERP/SCM パッケージツールが存在する(ERP パッケージとは企業の経営資源を有効に活用し経営を効率化するためのソフトウェアパッケージ。SCM (サプライチェーンマネジメント)

とは企業活動の管理手法の一つで、取引先との間の受発注、資材の調達から在庫管理、製品の配送までコンピュータを使って総合的に管理すること)。

未来社会における 3 M&I システムの研究は、従来の営利企業のあり方への見直しから、 今後 30 年でより多様な目的を持つ非営利企業、行政・制度へとシフトしていくことが必要 となる。また、これらのグローバリゼーションにより、あらゆる世界のコネクションが強 化されて、ヘテロな相互関係が対象の複雑化をいっそう加速させる。また、時間的なフローにおいては、スピード化が要求されているが、物流チェーンからバリューチェーン、バーチャルチェーンへ対応可能なシステム設計が必要となる。

これら以外にも、新たに知的財産等の権利資産、契約資産、リスク資産の価値づけをする学術・技術が発展することにより、多様な契約・権利・リスク資産などの無形資産の価値を取引する市場/新しい産業が創出されるであろう。また、サービス・サイエンス (SSME, Service Science & Management Engineering) の推進による、医療・運輸・保険など各種サービスのシステムとしてのイノベーションや、消費者が新製品・新商品の開発に参画するなどの新しい価値創造の仕掛けの導入により、新市場創出が期待される。

わが国のみならず、国際的に、持続可能な産業社会への転換のニーズは急務であり、危機的な状況にある。これは、これまでの市場経済の繁栄を支えてきた「大量消費・競争と市場の原理」そのものを修正し、地球環境の保全と調和させるという手立てを見出すことになる。実現したい未来像としては、省エネルギー社会の実現、環境クリーンな産業生産システム、都市インフラの再構築などが重要と考えられる。

これらはシステムの大きな変革を要求するものであり、そのシステム解析・設計・制御の重要性はさらに増すと考えられる。

(5) ネットワークでつながれた複雑システム

近未来には計算機・通信技術の発達により、至る所にネットワークが張り巡らされ、分散あるいは統合化システムとして制御されるようになろう。その特性は極めて複雑となるが、一方で計算機の高速化により大量のデータ処理が可能となる。現在ではネットワーク技術と制御・管理技術の結びつきは基礎的な段階にあるが、将来の発展により次のようなニーズの開発が見込まれる。

情報家電同士の通信によるホームオートメーション、交通システムの知能化、ネットワークによる協調作業、統合スケジューリング、無線ネットワークによるセンサー統合化、機械の特性変化に応じて切り替わるスーパーバイザ制御、工場での「巧み技」の自動化、オンデマンド少量多品種生産の確立、群ロボットや移動体のフォーメーション制御、災害時の完全無人救助、など。

4.5 「見える化」

4. 5. 1 「見える化」のロードマップ

「複雑化する対象・複雑化するシステム」を理解し、解析し、また制御を行おうとするためにはさまざまなレベルで対象・システムの状況を観測し「見える化」する必要がある。

「複雑化する対象・複雑化するシステム」とあいまって、「見える化」に関する研究がどのように進展すべきかについて議論した結果を図4-9のロードマップとして示す。

ここでは「見える化」を

- ・「測る」ということ センサー(計測技術)、生体計測技術 人間の感情・行動の計測、社会システムの理解
- ・データを「整理統合」すること 計測技術の統合化
- データを「人に提示」すること ディスプレイ技術

の観点からロードマップに描いている。見える化は「測る」「整理する」「提示する」の 3要素が重要であり、それぞれが密接に関係しながら発展する必要があると考えられる。

「測る」という概念においては人間を理解するためや、人間の感覚をロボットに実装するために、人間の五感を物理的に計測するセンサーの開発が一つの大きな流れとなる。これは単なる物理的なセンサーからそれを統合した「感性」「快適性」「センサーフュージョン」や「勘の計測」へと発展していくだろう。また、人間の機能の計測という意味で、脳機能計測から体内各臓器の機能状態の計測は医療・福祉の観点からも重要となるであろう。また、社会における人間の行動を理解するためには「人間の感情・行動の計測」が不可欠である。これは「社会的存在」としての人間を計測するための基礎であり、個人の行動・社会動態から集団のダイナミクス、社会的快適性、生活の質の計測(理解)が必要となろう。また、社会システム・組織の理解も管理技術の一つとしての見える化として重要である。企業の情報開示も、企業の状態に対する透明性をあげるものであり、これに関しては物理的・情報的なものと考えるよりは法律・制度の整備の必要性と考えることができる。いずれにしろ、物・物事の状態を把握するという観点から物理的計測・主観の計測・管理方法・企業の情報開示に関する法の整備などが必要となる。

データの「整理統合」の観点からは情報収集の「ネットワーク化」「ユビキタス化」およびそれに伴う「多層化・大規模化・統合化」が重要な要素となる。これに伴い、計測・モニタリングの理論の開発(計器・個体から人・社会へ)が重要となる。数学的には「データマイニング・特徴抽出」から「多次元情報を縮約して人に提示できるデータに整理統合する」理論を発展させる必要がある。

これら「測り」「整理統合」されたデータを「人に提示」する方法も大きく発展するものと思われる。従来の「可視化」を中心としたディスプレイから「人間の五感に訴える」提示方法が発展の方向性になる。

「見える化」を「測ること(センシング)」ととらえると個別理論となってしまうが、 人間の主観につながる「感性」などの計測や、データの「整理統合」、「人への提示技術」 を考えるならば、これらは従来いろいろな分野で独立に行われていた方法を改めて整理統 合し、さらに発展させることにより大きな進展が得られると考えられる。

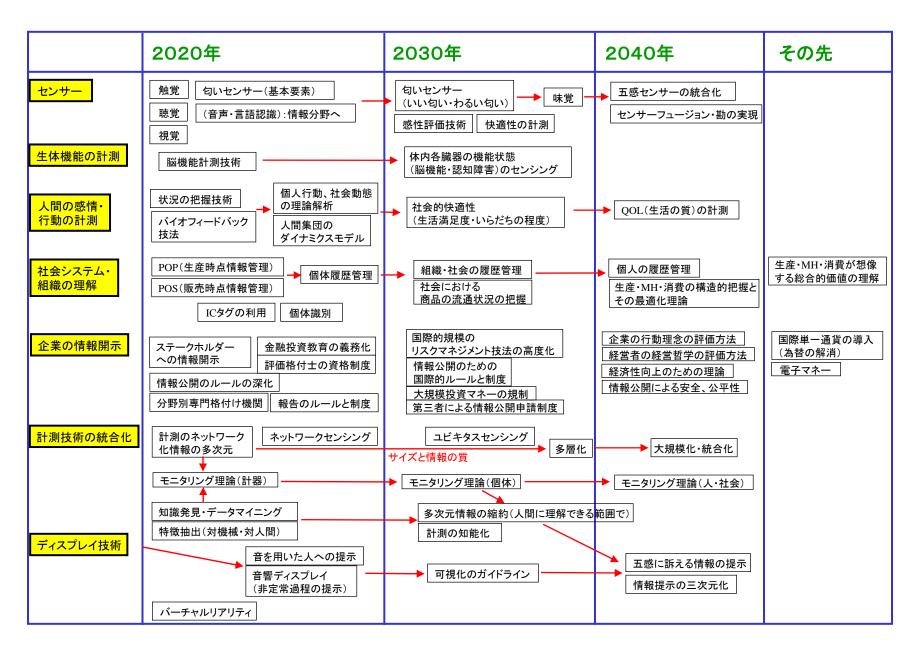


図4-9 見える化

4. 5. 2 社会からのニーズと社会への波及

前項ではアカデミック・ロードマップとして「見える化」に対して制御・管理技術分野でなされるべき研究の方向性について述べてきた。ここではこれらの研究を必要とする社会的ニーズや、これらの研究が発展することにより社会へ波及する項目について考える。

これらの事項は「見える化」の観点からは各論的となる部分であり、フェーズ1と同様に個々のロードマップを作成することは微細に入りすぎるため、制御・管理技術のアカデミック・ロードマップ作成の範疇外と考えているが、これらの社会ニーズや社会への波及を研究者は強く意識する必要があると考える。

(1) 安全安心な社会の構築

災害などの緊急事態や、現在の救急医療体制では「見える化」としての状況の把握が困難であることが問題となっている。見える化のニーズはこのような場所にも多く存在する。例えば医療現場の救急搬送などでは受け入れ可能病院を把握し、それを救急車に提示するシステムが有用であると考えられる。このような病院の受入余力マップ・救急搬送指示マップの考え方は緊急災害時の緊急情報マップ、緊急救援マップとして整備される必要があるだろう。災害時には救援物資の保管状況、救援人材の配置指示、物資の移動指示などのマップが局所的な市町村レベルから広域的な県・地方・国レベルで利用可能となることが必要であると考えられる。ここでは収拾すべき情報の取捨選択から情報の統合化、人への提示方法まで、幅広い見える化の技術の利用が考えられる。

(2) 人間の健康な生活のために

人間の快適生活の維持・発展を目指して、人間に関する情報をいかに適切に本人に伝えて、その正しい判断を可能ならしめたり、問題対処へ向けての意欲を引き出すか、しかも、それをなるべく人間側に負担をかけずにどのようにして実現するかなどが課題となる。まず当面は、高齢化する人口の中で疾病の与える全社会的負担を軽減するために、個々の人間においての疾病予防・健康増進を図ることが必要である。

特に必要な生体機能の計測や人間の感情・行動の計測を行い、それを日常的に人に提示することが必要となっていくと考えられる。これらの発展は大まかにいえば、2020年頃には疾病予防と健康増進(個人レベル:生理機能の自己制御による日常健康管理、罹病者発見・監視を通じての新型感染症拡散防止を目的とする危機管理、など)、2030年には快適空間の創出(個々の人間に合わせてダイナミックに快適空間を創出できるシステム/居住空間・作業空間・宇宙や深海等の孤立閉鎖空間)、2040年には加齢による Quality-of-Life (QOL) 低下の防止(個人の生活場面に応じた対応ができるシステム)を実現することになると考える。

(3) 人にやさしいシステムのために

人にやさしいシステムでは、人間の感性に合うものが求められる。これは人間の五感に合うようなものの設計であり、その評価法の確立である。人間の五感では視覚、聴覚は先行して研究されてきている。しかし総合的に人の感覚に合うためには、単独での感覚ではなく、マルチモーダル(複数モードの相互作用)的な意味での複数の感覚に適合すること

が望ましい。特に触覚はこれまで、目の不自由な人用という理解がなされてきたが、健常な人でも視覚や聴覚だけでなく、触覚を組み合わせると人間の大脳の活性化がさらに図られることが知られている。そこでこの触覚を中心としてその特性を明らかにする必要がある。触覚とはそれほど単純ではなく、痛覚、温熱、冷感等複雑になっている。そこでシステムのインタフェースに役立つ情報の提供という観点で調べる必要がある。

その後、システムが人間に与える負荷を計測し、また大脳の活動を十分に起こさせるための計測技術の開発が必要となる。 大脳活動を調べるための方法は f -MRI (磁気共鳴画像装置を用いた脳機能についての研究) や NIRS (近赤外分光法) が現在使われているが、装置が大きく臨床の場以外ではその使用は難しい。もっと簡易で、かつ人の大脳活動を反映する計測方法の開発がハードウェアを含めて求められている。2030 年頃までにはそのような装置の開発が完了すると考えられる。

この装置ができると、いわゆる人間の高次機能活動を計測する方法が確立される。これにより人間の脳とシステムを結ぶインタフェースの開発につながることが予想される。そうすれば2020年には「人にやさしい感性にあうシステム、触覚インタフェース」が、2030年には「マルチモーダルインタフェース」、2040年には「ブレインコンピュータインタフェース (BCI)」が利用可能となるだろう。

社会的なニーズとしては人にやさしい、人の感性にあうインタフェースが開発されることが望まれる。まず触覚に基づいたインタフェースの開発ができると、これまでよりもミスの少ないシステム開発が可能となる。これにより、人間のシステムの操作においても、感性にあうシステム開発が可能となるであろう。さらにマルチモーダルとしてのインタフェースを開発し、これにより人にやさしいシステム評価が可能となる。

(4)システムの信頼性向上と故障診断

原子炉、高炉、化学プラント等においては内部状況を多数配置した温度センサーや流量計などによって、「可視化」しようとしている。音を聞いて、内部状況を把握することも良く行われているが、主観によるものである。まずは、音の変化を数量化しグラフ化することにより、状況の変化を主観ではなく客観的に把握できるようになる。このことは、時系列信号の特徴の分類に帰着するために、比較的、早い時期に実現可能である。逆に、電流変動や温度変動をグラフとして見るのではなく、音情報や匂い情報に変換して知らせるような装置を開発することにより、システムの運転状況が正常であるかどうかを把握するのに、メーターやディスプレイのみで把握するよりも、すばやくできるようになるものと考える。人間の聴覚を用いた変化の把握は、視覚を用いた変化の把握よりも敏感であるため、グラフの微妙な変化を視覚的にとらえるよりも、音の変化をとらえるようにする方が、センシング方法としては効率的である。複数のセンサー情報を複数の音源で音信号に変換し、合成する方法が必要であり、これらの技術の完成を待たねばならない。

ロードマップとしては 2020 年頃には状況変化を把握するために、「時系列信号(電流、温度でもよい、また最初から音でもよい)を分類するための方法」の開発、2030 年頃には複雑なシステムの状況を把握(可視化)するために「センサー情報を音にするための方法」の開発、2040 年頃には複雑なシステムの状況を把握(可視化)するために「複数のセンサー情報を音や匂いの変化にするための方法」の開発を完了する必要があるだろう。

このような方法が完成すれば、30年後には、システムの故障診断がしやすくなり、重大な故障の前に、その前兆をとらえることが可能になり、大規模事故を未然に防ぐことが可能となる。

(5) 社会システムの管理のために

未来社会における 3 M&I システムの制御・管理においては、見える化が必須になってきている。経営工学での見える化は、プロセス(コト)を目に見えるようにするというよりは、問題を顕在化、標準化させることに主眼がある。これは、ものづくりにおいては発展してきているが、今後は IC タグによる標準化、履歴管理へとシフト要求が強まると思われる。その結果、統一的個体管理が可能となり、これによるあらゆるライフサイクル管理が一般化してくる。

現在の企業の見える化の代表である ERP/SCM パッケージは、それをベースとした戦略化から、先見的リアルバーチャル化(リアルタイムに、リアルな現実を見える化して、未来を仮想的に多次元的に自由に考えられるようにすること)が求められる。また、時間的フロー面では、ロジスティックス、スケジューリングによるフローの顕在化が求められ、世界的な高度の需給バランスの達成が求められるであろう。そして見える化の対象は今後30年で監視下の対象から制御下の対象、先見管理下の対象へ、そして見える化も戦略的ERP/SCM からリアルタイム化、先見バーチャル化が必要となる。

以上のような経営戦略的なもの以外にも、企業の情報をステークホルダー(利害関係者:一般には消費者、従業員、出資者、経営者)に提示する仕組み(法律・規則)を作成していく必要がある。現状では、重大欠陥情報、財務情報以外は公開すべき情報すら定められていない。内部告発制度、外部監査人制度、公正取引委員会制度などもあいまいなところがある。実効性のあるルールと制度を早急に整備すべきである。

情報公開のグローバル化も進めなければ、国際的な公正な競争もできない。外国産の製品、食品などの安全も確保できない。情報公開をとおして、ステークホルダーすべてに、つまり消費者一般には自然保護・商品の安全性・風俗・文化の向上、従業員に対しては生活と福祉の向上、株主には投資資金の健全なリスク対応機会の提供、そして経営者には企業の成長などを開示できるようにするのが望ましい。

企業情報の提示がシステム化されると次には企業価値の測定と評価が必要となる。企業 価値の測定としては会計の分野では、人類最大の発明のひとつとされる複式簿記がほぼ確立され、それによる財務情報の開示も制度化されている。より重要なのは

- ・正しい情報を記載し、開示するかについての経営者の意識
- ・開示された情報の評価

である。正しい情報の開示はその企業の過去の開示実績、経営風土、経営者の言動、不祥事の有無などから判断せざるをえない。企業評価は、会計や金融の基本知識が必要である。 その上で、開示された情報を評価者の知識と主観で評価を行うものである。格付け機関の評価も各機関の評価方式を評価者個人が信頼するかいなかによって異なる。このような観点からの「見える化」の発展も必要となる。

(6) 遠隔システムの実用化

バーチャルリアリティのような仮想空間の発展には見える化の発展が重要な課題である。 これは遠隔地間でのコミュニケーションや協調作業を可能とするものである。この分野に おいては今後30年間で以下のような項目が可能となると考えられる。

触覚伝達と3次元モニタによる遠隔医療・介護支援、アクティブビジョンとホログラムによる遠隔会議、遠隔パーティや遠隔セミナー、遠隔会議に複合現実感技術を援用、現実と区別のつかないe-learning、仮想教師、など。

4. 6 おわりに

我々は横幹技術を

- ・多種のシーズと多種のニーズを結びつける技術
- およびそこから生まれる新しいシーズ

と位置付けて、制御・管理技術分野に新たに生まれるであろうシーズを

- ・「複雑化する対象、複雑化するシステム」
- 「見える化」

をキーワードとして時系列のロードマップとして描いてきた。同時に、これらに対する社会からのニーズやこれらの社会への波及についても示してきた。

しかし、今まで、制御・管理の横幹技術はパラダイムシフトにより大きく変革し、発展してきている。例えば、制御工学の分野では蒸気機関におけるガバナなどの「工夫としての制御」から数学的な解析へ、1入出力伝達関数で制御対象を記述していた古典制御理論から状態方程式を導入することで多入出力系へ対応した現代制御理論へ、さらに定量的な評価関数を導入した最適制御へ、さらに公称モデルのみを対象としていた制御理論から誤差のモデルを定式化したロバスト制御へなど、制御理論の大きな変革は新たな定式化の導入により起こってきた。本報告でのロードマップは現在我々が考えうる未来としてのロードマップを描いているが、このロードマップが覆るほどのパラダイムシフトが起こることがもっとも望ましいシナリオであることを明記し、本章のまとめとする。

参考文献

[4-1] 経済産業省研究開発課: テクノロジー・ロードマッピングを方法論として活用した 異分野技術融合促進のためのディスカッションマニュアル (Ver. 1.0) C-Plan (Convergence Plan), 平成 18 年 6 月.

第5章 シミュレーション分野のアカデミック・ロードマップ

5. 1 はじめに

現在の社会において、シミュレーション技術はさまざまな分野で利用されている。図5.1 -1で示されるように、これまでのシミュレーションは、理論、実験、製品・現象(情報、サービスを含む)の三者とは独立した存在で、これら三者を繋ぐものとして位置付けられていた。例えば、理論に基づくシミュレーションにより実験結果や現象の検証を行うことなどがあげられる。

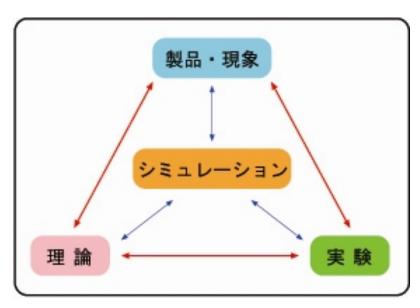


図5.1-1 シミュレーションの現状

しかし、近年ではシミュレーション自体が実験となっている場合や、シミュレーション の結果がそのまま現実の製品に使われている場合(ゲーム等)が見受けられるようになっ てきた。

科学技術の対象とする現象は年々大型化・複雑化・高精度化しており、それに伴い実験のコストは指数関数的に増大している。また、社会のニーズは多種多様化の一途を辿っている。一方でシミュレーションを支えるコンピュータ環境は価格が線形的な上昇に対し、性能は指数関数的に進歩していくように予想される。このことから、実験を全面的あるいは大幅に取りやめてシミュレーションのみで検証を行う分野が多数現れることが予想される(例えば、超高速車両設計、原子力、核融合、宇宙工学など)。これらのことを踏まえると、未来社会においては、シミュレーションが上記三者もしくはその一部と一体化すると共に、シミュレーションが担う、もしくは担うことのできる領域が拡大することが予想される。これにより、ほとんどの場合、図5.1-2で示されるようにシミュレーションが三者間をほぼ直接に仲介する形態になると考えられる。

以上から、本アカデミック・ロードマップでは、シミュレーションが上記で述べた方向 に進むことを前提として、

- (1) シミュレーションを利用する各技術分野では
 - ・いつ頃何がおこるのか?
 - ・いつ頃何が必要なのか?
- (2) シミュレーションはどこまでその対象を拡大し、詳細化できるのか?を示すことにより、シミュレーション技術が先導する未来社会を考える。

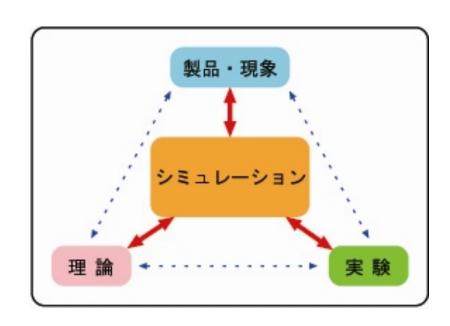


図5.1-2 シミュレーションの将来

ワーキンググループで作成したアカデミック・ロードマップの概略を図 5.1-3に示す。 この図の意図するところは次のようにまとめられる。

- (i) シミュレーションの対象は複雑かつ多様化すると思われる。これを横軸にとった。一方、その高精度化、高信頼化も大きな目標となる。これを縦軸とした。そして、第3軸に可用性、適用性(使いやすさ)を置いた。
- (ii) 2050 年までのアカデミック・ロードマップを俯瞰する際に、超巨大なシステムのシミュレーション、超高精度なシミュレーション、精度と規模をともに追求するシミュレーションの大きな3つの流れが考えられる。これを矢印で示した。
- (iii) 超巨大なシステムシミュレーションとして半導体システムシミュレーション、物質 シミュレーション、地球シミュレーション、1,000 年行動シミュレーションなどが考え られる。ミクロの原理からシステムへいたるマクロまでの超大規模システムのシミュレ ーションが達成されると、実験を経ないでものがつくれる一発製造や長時間にわたる地 球の動態を調べることによる安全な世界の実現などへ大きく貢献する。
- (iv) 一方で、超高精度シミュレーションが達成されることにより、創薬、高精度予測、数学証明、防災への応用、個人への適用状況をシミュレーションにより予測するオーダーメイド医療、高的中天気予報などへの方法論が確立することが予測される。

- (v) 規模と精度を共に追求するシミュレーションもプロジェクトシミュレーションや分子 シミュレーション、数ヶ月単位の予測など非常に重要な課題がある。
- (vi) さらに、システムに人間の要素を取り入れたシミュレーション (人間シミュレーション) も非常に重要となることが予測される。ここでは個人としてあるいは集団としての人間のモデル化とシミュレーション技術の確立が重要となろう。また、環境のモデルとシミュレーション、数値予測とアンサンブル予測などもキーワードとなりうる。図 5.1 3においては、社会シミュレーションなどは、人間シミュレーションの技術が確立すると、その時点から、シミュレーションの精度が格段によくなることを予測している。
- (vii) 非常に大規模なデータからの知の獲得においては、帰納と演繹の2つのパラダイムの螺旋が重要となる。統計はこのようなインタラクションの要となる。
- (viii) シミュレーション技術そのものも議論の対象と考えている。量子論の視点と統計力学の視点の違い、また、それの延長上にある量子デバイスに関する議論。シミュレーションを行うソフトウェア環境の将来予測。また、精度保証付き数値計算などの信頼性を得る手法の革新的な進歩に伴う、シミュレーション概念の変革、可視化なども重要な話題となる。

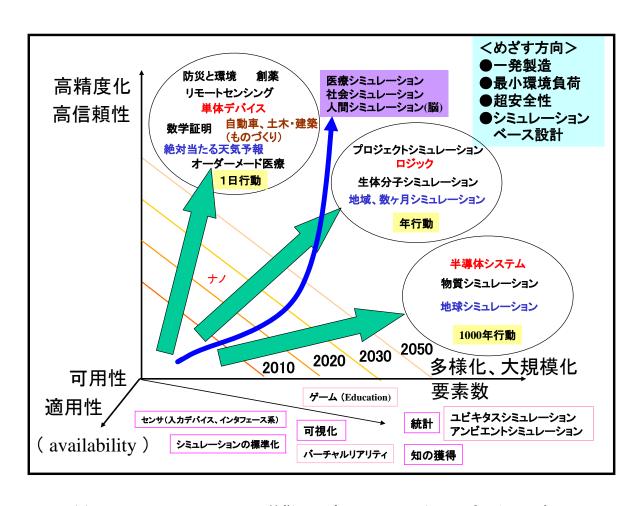


図 5.1-3 シミュレーション技術アカデミック・ロードマップのイメージ

本報告書では 5. 2 \sim 5. 9 の各節において、シミュレーション技術を利用する技術分野毎に各々検討を加えてロードマップ図を提示している。

なお、本稿では図 5.1-4 に示すように、ここ 20 年の計算機性能向上のトレンドが当分続くこと(少なくとも 2030 年ぐらいまでは、5 年で 10 倍速くなる傾向) $^{[5.1-1]}$ を期待している。

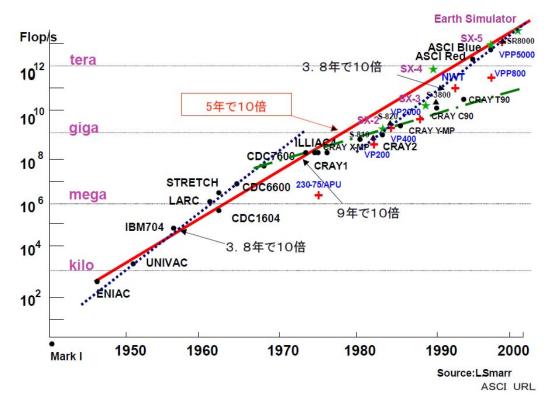


図 5.1-4 計算機性能向上のトレンド[5.1-1]

参考文献

[5.1-1] http://accc.riken.jp/hpc/HimenoPresen/mechanobio2008himeno3.pdf.

5.2 知識創造社会を支える未来デザイン技術としての統計科学と予測シミュレーション

5. 2. 1 統計科学のシミュレーション分野における今後の役割

近年の高度情報化社会の実現とその深化により、さまざまな分野で大規模データに基づく複雑システムに対する統計的モデリング、そのモデルを用いた予測シミュレーション、 不確実事象に対するリスク評価手法の研究開発は重要な社会的課題となっている。

通常シミュレーションというと、演繹的に導かれた支配方程式を数理モデル化して計算機上で実装し、高度可視化技術を利用して科学知を発見する技術を意味することが多い。このような演繹的推論に対し統計科学におけるシミュレーションとは、現象を支配する規則・関係式を経験則として観測データ・実験データを用いて推定し、得られたモデルを用いてシミュレーションを行うという帰納的なアプローチによる推論を意味する。統計科学は対象を実体的かつ精緻にモデル化するのではなく、対象に関する入出力関係などのシステムの機能を模倣し、内包する不確実性を確率分布の形で組み込んだモデルを創出するためのプラットホームを提供するという技術であると言える。近年では帰納・演繹の融合的手法によるシステムのモデル化に関する研究開発も進められている。現実問題として演繹的手法によるシミュレーションだけでは物理現象の再現が適切に行えないことはしばしば起こる。また支配方程式、あるいはそれに基づく数理モデルや境界条件の情報には不完全性・不確実性が存在することもある。対象によってはシステム自体がブラックボックスであり、モデルに関する事前的な情報が存在せず、システム同定によって得られる知識発見自体が目的となる状況も数多く存在する。統計科学はこうした場面において有力な科学技術となり得る。

近年のハードウェア、データベース、インターネット技術の急速な進展により、統計科学における予測シミュレーション技術を取り巻く環境ではパラダイムシフトが起こっている。そのひとつはデータ環境の劇的な変化があげられる。20世紀後半までは、統計科学において対象となるデータの容量はせいぜい KB〜MB 程度のオーダーであった。またハードウェア、調査技術の限界から、実験・調査段階では巨大なデータであったとしても、過度の情報縮約を強いられる場面もしばしば存在していた。しかし 1990 年代以降、ハードウェアの進歩に伴い、データの大容量化が急激に進み、またインターネットの普及やデータベース技術の進歩によってそうした巨大データへのアクセシビリティは飛躍的に向上した。地球科学における人工衛星による観測システム、バイオインフォマティクスにおける DNA マイクロアレイデータ、社会科学におけるインターネットアンケート調査、マーケティング分野における POS データ、高頻度証券取引データなどがその例としてあげられ、そうしたデータの規模は大きいものでは TB〜PB スケールとも言われている。こうした状況に伴い、データを有効に活用した新たな知識発見へのニーズがさまざまな分野で生じている。

また科学技術に求められる社会的な要請にも変化が起こっている。20 世紀戦後の我が国は、高度経済成長に象徴的に見られるような、不特定多数を対象とした大量生産・大量消費を目指した成長志向の社会であったと言える。統計科学もそうした社会的要請に呼応して発展をとげ、品質管理、農事試験、臨床試験などの分野でマクロ的な情報抽出のための手法として20世紀社会を支えてきたと言える。しかし今日では20世紀における人間活動の増大と発展の代償として地球環境問題が表面化し、現在では産業の発展と地球環境資源

の持続可能性との調和が自然科学・社会科学の両面において世界的な課題となっている。 このような背景の中で、大規模で複雑なモデルを用いた地球上の自然現象・社会現象を高 精度かつ長期的に予測するシステムに対するニーズが高まってきた。

一方、情報社会へと変貌していく中で、20世紀社会の発展に中心的な役割を果たした不特定多数への大量生産によるサービスの提供方式は、オンデマンド・オーダーメイドといった、個人に焦点を合わせた方式が求められるようになり、いわゆるパーソナライゼーション技術が注目されるようになっている。そうした中で創薬、オーダーメイド医療、副作用研究などを目指した遺伝子ネットワーク推定、たんぱく質構造推定や、個人に焦点を当てたマーケティング戦略であるマイクロマーケティングによる顧客行動の予測などの新たな複雑システムの予測技術の研究開発も始まった。

さらに近年、不確実性は意思決定に付随するリスクであるという認識が急速に高まってきている。統計的シミュレーションの場合、出力は一般に確率変数の実現値や確率分布として得られ、これらによって不確実性を表現する。医薬・食品、環境科学、金融・保険などの分野ではこのような不確実性を古くからリスクと呼び、その科学的評価手法と管理・リスクヘッジのための方法論の研究開発が進められてきている。特に金融・保険の分野において、市場リスク・信用リスクのマネジメント手法の研究開発は大きな発展をとげている。近年ではリスクの形態も気温・降水量・積雪量などの天候条件や自然災害、さらにはプロジェクト遂行に関わる不確実性など、主体が意思決定を行う場面で直面する不確実性が広くリスクと解釈されるようになっている。この意味でリスクは不確実性を伴う現象に横断的に付随する概念であると言え、その科学的見地からの定量的評価、管理手法の研究開発に対するニーズが高まっている。リスク管理はシミュレーション結果を有効活用するための方法論と解釈することができ、したがってその研究開発も重要な統計科学における課題であると考えられる。

以上のような背景から、シミュレーション分野での未来社会における統計科学の役割は、地球・生命・人間社会という、大規模かつ複雑で不確実性を有するシステムを統合的に解明するためのモデル構築法と予測アルゴリズム、情報抽出、知識発見における分野横断的な方法論を実際問題に即応する形で提供すると同時に、不確実性に伴うリスクの科学的評価・管理のための手法を確立することにあると言える。そしてこれからの統計科学は、科学技術に求められる社会的要請に柔軟に対応し、現代社会が抱える不確実性に関わる新たな問題を開拓し、そこからの知識発見を通じて、安全な国家社会、地球環境の改善、持続可能な社会といった未来社会をデザインしていくことを目指す方向に向かうべきであると思われる。

こうした複雑システムの統計シミュレーション技術の研究開発は、近年になって地球・ 生命・人間社会に関わるさまざまな分野との融合研究の形で行われるようになっている。 個別な事例としては例えば以下のようなものがある。

- I. 地球^{[5.2-1], [5.2-2]}
 - (i) エルニーニョ・ラニーニャ現象予測
 - (ii) 津波・地震・台風・ハリケーンなどの自然災害予測
 - (iii) 気象予測

II. 生命^{[5.2-3], [5.2-4]}

- (i) 遺伝子ネットワーク推定・遺伝子構造探索
- (ii) たんぱく質構造推定
- (iii) 分子系統樹推定
- (iv) 人工知能、機械学習、ロボティクス
- III. 人間社会^[5.2-5]
 - (i) 高頻度取引データを用いた金融商品価格予測
 - (ii) POS を用いた購買行動パターン分析
 - (iii) マイクロマーケティングにおける顧客行動分析
 - (iv) 人口社会

今後はこうした分野においてもさらに複雑で高精度、また長期予測も可能なシステムの 構築を目指していくことになるであろう。また上にあげた各構成要素を要素間のインタラ クションを考慮した形で統合し、地球・生命・人間社会のトータルな理解に迫るようなシ ステムの構成も目指していくべきであろうと思われる。

以下で今後50年の統計的予測シミュレーションのロードマップイメージを具体的に述べていく。統計科学の役割は主としてモデルを創出するためのプラットホーム、すなわち方法論を提供することにある。以下の5.2.2~5.2.4項において方法論の視点からのロードマップを述べる。最後に5.2.5項で実用の視点から具体的な問題への適用可能性を地球・生命・人間社会をキーワードにロードマップイメージとしてまとめる。

5. 2. 2 システム推定手法・データ処理手法の確立

複雑システムの統計的予測は、推定するシステムに関する事前情報が支配方程式や対象 に関する専門知識などから十分に得られるような問題から実用化へと向かうものと考えら れる。前項にあげた例で言えば、自然現象の予測、遺伝子ネットワーク推定、マイクロマ ーケティングにおける消費者行動モデル推定などがこの状況にあたる。システムに関する 事前的な情報が利用できる場合には、モデルの同定のプロセスが軽減されるため、実用化 に向けて問題になるのは主として推測アルゴリズムの開発である。複雑システムの推定に は高次元データ解析、時系列解析、機械学習理論、データマイニング、状態空間モデル、 ベイジアンネットワーク、グラフィカルモデル、離散選択モデルなどの要素技術が主に用 いられる。このような統計技術によって推定を行う際に直面する共通の課題として新*np* 問 題[5.2-6]と呼ばれる問題がある。統計学では一般にデータのサイズをn、モデルの次元、す なわちパラメータの自由度を p で表す。20 世紀における統計的モデリングは、モデルのパ ラメータ数を小さく設計することを推奨されてきた。パラメータ数が増加すれば、モデル の記述能力は向上する一方、汎化能力は減少するために予測精度は低下する。そのため従 来の推測理論の枠組みでは*n≥ p*を想定している場合がほとんどであり、実際に予測を行う 場合には現実のシステムを大幅に単純化したモデルを用いる傾向にあった。しかし近年対 象とされるようになった大規模複雑システムでは p が膨大化する一方である。また先にも 述べたとおりデータ量も巨大化しているが、これは主としてデータの次元(pに比例する

量)の巨大化であり、観測数nを一定以上増やすことは技術的な限界や社会的な制約などにより困難な場合がしばしば起こる。この問題へのひとつの有力な解決策はベイズ法にある。ベイズ法ではパラメータのばらつきを事前分布で表現することにより実質的なパラメータ数が減少し安定的なモデルの推定を可能にする。またネットワークシステムなどのように、変数間の階層が存在するモデルではベイズモデルを考えることが自然な場合もある。ベイズ法によるシステムの推定はマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC) [用語] のブレークスルーにより、近年適用事例が自然科学・社会科学の両面で急激に増加している。一方、尤度に基づく古典論と言われる推論は新npの状況では適用ができないが、 $n \ge p$ ではあるもののモデルの次元pが非常に高い状況ではベイズ法よりもモデルとして自然でかつ実用上有用なことがある。古典論による複雑システムの推測アルゴリズムの研究も近年急激な進展をとげている。しかしいずれの場合もモデルが巨大化、複雑化したときに、数値的に安定な推定値を得ることが困難になるという問題を抱える。また計算コストの意味で効率的なアルゴリズムの開発も現時点では発展途上である。こうした問題は今後 $10\sim20$ 年の間に数値計算・最適化・組み合わせ論・代数幾何学などの分野との研究交流を通じて実用化されていくことが予想される。

遺伝子ネットワーク、学習ネットワークなどのネットワークモデルを用いた推論では、フィードバック制御が存在しないようにモデルに制限を加えることが多い。これはフィードバック制御が存在するモデル(複結合ネットワーク [用語])はシステムの推定自体が困難であることに起因する。しかし例えば、遺伝子ネットワークにおいてフィードバック制御がないという仮定は、必ずしも現実的とは言えない。複結合ネットワークにおける推測アルゴリズムの実用化は近年の統計科学、学習理論、情報理論などの分野において最も重要な研究課題のひとつであり、今後 20~50 年の間に実用可能なアルゴリズムの開発がなされていくことが予想される。

またデータの巨大化に伴い、個人消費、医療・診察データなどの個人情報が含まれるデータも数多く電子化されるようになってきている。そのため個人情報保護の観点からデータ秘匿法の開発が、特に社会科学の分野を中心として進められている。現存する手法は平易なモデルでしか適用できないものがほとんどであるが、今後 10~20 年の間に複雑システムに対しても適用可能な手法の開発が期待される。

5. 2. 3 システム同定法の確立

システムの構造に対する事前情報が少ないために、客観的に最適なモデルを同定することが求められることはしばしばある。またそのモデルの同定自体が知識発見として求められる状況も存在する。遺伝子・たんぱく質の構造探索、機械学習、ロボティクスなどはその例としてあげられる。また POS データを用いた購買行動分析における中心的な技術であるパターン認識もこの範疇にあると言える。

システムの同定はモデルの次元が低い場合には AIC などのモデル選択規準 【用語】を用いることで行えばよい。しかし高次元のシステムを同定する場合、次元に対して候補となるモデルの数が一般には指数的に増加するため、数え上げに基づくモデル選択規準を用いた最

適モデルの同定は事実上不可能である。実際の問題ではデータ間の相関行列が疎であるなどの事前情報が得られるため、それを活用することによってモデルの同定が可能になる場合もあるが、一般にはネットワーク構造推定や、因果構造の推定などのモデル同定・システム構造推定に関する研究は未成熟な段階にあり、実用上は前項に述べた遺伝子ネットワーク推定の場合のようにモデルに対して必ずしも現実的とは言えない制約を加えて構造推定を行っている場合が多い。しかし近年、ベイズ的なアプローチや組み合わせ論を駆使した構造探索の研究開発が進められており[5.2-7]、今後20~50年の間で大きな進歩が期待できると予想される。

5. 2. 4 性能評価・リスク管理手法の確立

予測を実用化するためには、システムの推定とシミュレーション技法の確立だけではなく、予測結果を有効活用するための方法論を確立することも重要な課題である。予測性能評価、システムの推定性能評価、そしてそれらをフィードバックしたシステムの高精度化はその中の重要な課題であると言える。予測誤差評価、適合度検定、信頼区間などの手法がこれに当たる。こうした手法も複雑システムの場合や新 np 問題の状況下では従来型の統計的漸近理論が直接的に適用できない場合が多く、実用上は容易な問題ではない。

またシステムが複雑な場合には、推定されたシステムからいかにして知識発見を行うかという問題も存在する。これは先に述べたシステム同定・パターン認識とも関連する問題である。ネットワークモデルの場合、推定されるモデルが膨大な数のノードを結ぶネットワークであれば、そこから有益な知識発見を行うことは容易ではない。このような問題に対する方法論も確立していく必要がある。こうした方法論は特に遺伝子ネットワークを用いたターゲット遺伝子探索、データマイニングを用いたマーケティングにおける購買行動の探索などの場面で求められている。

またリスクの科学的評価と管理手法の研究開発も重要な課題である。予測技術は不確実な現象に対し、システムを高精度に推定して現象に対する知識発見をした上で、それをもとに不確実性に伴うリスクの低減化が実現して初めて未来デザイン技術となると言える。リスクが定量化されれば、リスクを軽減させるようなシステムの制御の方法がシミュレーションを通じて発見することを可能にする。リスクという概念は医薬・食品、環境、金融・保険などの分野では独自に用いられてきており、その管理手法においても成果が存在する。しかし近年不確実性をリスクとする認識が高まったことでリスク自体が多様化しており、その分野横断的な管理手法の確立が望まれている。こうした技術も今後10~50年の間で大きく進展していくであろう。

5. 2. 5 実用面からのロードマップイメージ

これまで述べてきたように、統計科学を用いたシミュレーションは、地球・生命・人間 社会をキーワードとした各分野で今後 50 年の間に実用面でも大きく発展していくものと思 われる。以下では地球・生命・人間社会それぞれについて実用の観点から統計的予測のロ ードマップイメージを整理していく。

地球現象予測が目指すものは、地球環境問題に関わる自然現象の解明・リスク軽減、自然災害による人間社会のリスク軽減であろう。個別の問題としては5.2.1でもあげたとおり気象予測(気温変動、降水量、積雪量など)、エルニーニョ・ラニーニャ現象の解明、津波、地震、台風、ハリケーンなどの自然災害の予測などがあげられる。これらに関しては、すでに大規模な融合研究が進行しているものもあり、推測手法の確立と足並みを揃える形で今後10~20年の間には実用化に向かうものと思われる。またその後30年の間にシステムの複雑化・高精度化、さらには予測の長期化を目指していくものと思われる。こうした個別の現象に対する高精度予測が達成されれば、特に地球環境問題の解明、自然災害が抱えるリスクの軽減に向けて、個々のシステムを統合したマクロ的な地球変動を予測するシステムの開発を目指す方向に進んでいくであろう。

生命システムの予測技術は、例えば、創薬、オーダーメイド医療、機械学習・ロボティクス、脳のシステム解明などの分野で大きな貢献が期待される。中でも特に今後10~20年の間に分子系統樹推定、遺伝子ネットワーク推定、遺伝子・たんぱく質構造推定といったバイオインフォマティクス分野において、生命体に関する新たな知識発見システムの構築が期待されている。分子系統樹推定は現時点で実用化に近い段階にあると言えるだろう。また遺伝子ネットワークは、フィードバック制御が存在しないという制約のもとでは実用化に近い段階と言え、多くの成果が得られている。今後は30~50年の間により一般のモデルを用いたシステムの開発が進めば、新たな遺伝子制御構造の発見につながっていくであろう。また、遺伝子・たんぱく質など、生命体の個別構成要素の構造が解明されれば、生命のトータルな理解のためにそれらを統合したシステムの開発に移行していくものと思われる。

人間社会に関しては、特にファイナンス、マーケティングの分野において、社会生活におけるリスク軽減を目的としたさまざまな社会現象に対する実用的な予測システムの研究開発が進められている。特にマーケティングの分野における POS データを用いたデータマイニングによる購買行動のパターン分析、マイクロマーケティングでは多くの成果が得られている。今後システム同定法・パターン認識技術が確立すれば、こうした分野でも飛躍的な進歩が予想できる。また消費者行動論の発展に伴って新たな展開も期待される。

また社会科学の分野では近年人口社会シミュレータによる社会現象の予測、政策提言に関する研究が精力的に行われている。人口社会が扱う問題は、持続可能社会、社会秩序、人口問題、環境・資源・エネルギー問題、都市計画などさまざまであるが、いずれも 10~30 年の間に実用化されていくと言われている。しかし現状はいずれもミクロ的な経済主体の行動を扱うものが多い。今後 30~50 年の間に、階層的に各構成要素をマクロへと統合していくことで、終局的には持続可能社会を目指した地球レベルでの社会活動を模倣する大規模シミュレータを用いた未来社会デザインの実用化が期待できるであろう。

参考文献

- [5.2-1] K. Nakamura, T. Higuchi and N. Hirose: Sequential data assimilation: information fusion of a numerical simulation and large scale observation data, *Journal of Universal Computer Science*, 12, pp. 608-626, 2006.
- [5.2-2] N. Terui and W. D. Dahana: Price customization using price thresholds estimated from scanner panel data, *Journal of Interactive Marketing*, **20**, pp. 58-71, 2006.
- [5.2-3] S. Imoto, T. Goto and S. Miyano: Estimation of genetic networks and functional structures between genes by using Bayesian network and nonparametric regression, *Pacific Symposium on Biocomputing*, **7**, pp. 175-186, 2002.
- [5.2-4] H. Shimodaira and M. Hasegawa: CONSEL- for assessing the confidence of phylogenetic tree selection, *Bioinformatics*, 17, pp. 1246-1247, 2001.
- [5.2-5] G. Ueno, T. Higuchi, T. Kagimoto and N. Hirose: Application of the ensemble Kalman filter and smoother to a coupled atmosphere-ocean model, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **3**, pp.5-8, 2007.
- [5.2-6] 樋口知之(監修): 統計数理は隠された未来をあらわにする ーベイジアンモデリングによる実世界イノベーション、東京電機大学出版局、2007.
- [5.2-7] 鷲尾隆, 樋口知之, 井元清哉, 玉田嘉紀, 佐藤健, 元田浩: グラフマイニングと その統計的モデリングへの応用, 統計数理, **54**, pp. 315-332, 2006.

用語

マルコフ連鎖モンテカルロ法:

ある分布から乱数を生成してモンテカルロ積分を行うときに、目的の分布から直接乱数を発生させることが困難な場合がある。そうした場合にマルコフ連鎖を用いて、定常分布が目的の分布になるような乱数を生成し積分計算を行う手法をマルコフ連鎖モンテカルロ法と言う。

複結合ネットワーク:

向きを考慮に入れずに閉路が含まれるようなネットワーク。フィードバック制御などを表現するネットワークである。複結合ネットワークの場合、確率計算の収束性が保障されないため、パラメータ推定などを行う場合に困難が生じる。これに対し、閉路のないモデルを単結合ネットワークと呼ぶ。

モデル選択基準:

モデルの複雑さと、データとの適合度とのバランスのとれたモデルを選択するための指標。通常はパラメータ数に比例する量と最大対数尤度との差によって表される。モデル選択基準には AIC、 BIC、 MDL が特に有名である。

多様化、大規模化

図5.2-1 統計科学と予測シミュレーション領域のロードマップイメージ

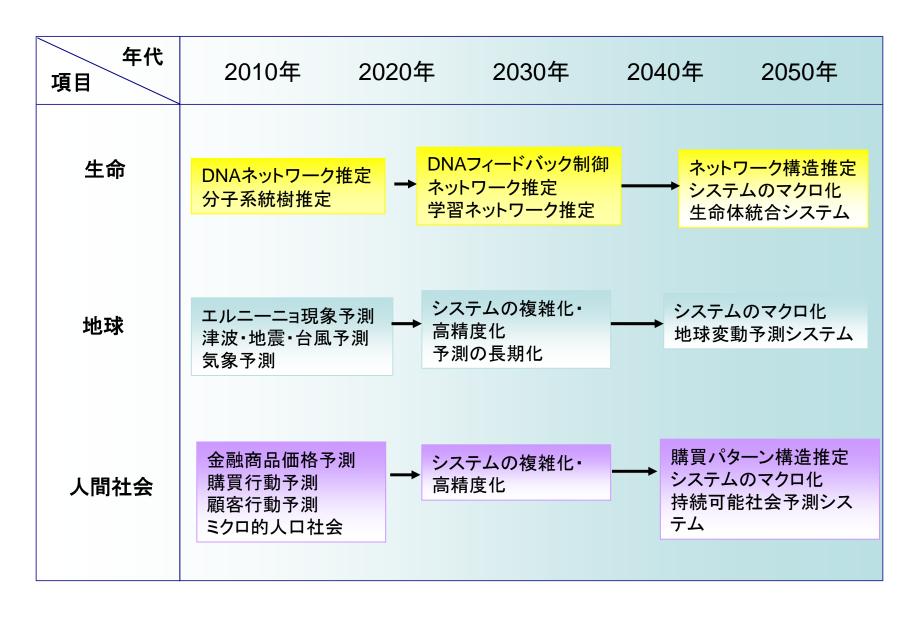


図5.2-2 統計科学と予測シミュレーション領域のロードマップ

5. 3 未来デザイン技術としての物質科学と分子・物質シミュレーション

5. 3. 1 物質科学と分子・物質シミュレーション

物質科学は、空間規模で分子レベルの 10⁻¹⁰ mから地球および大気圏規模の 10⁵ mのオーダーを持ち、時間規模で水分子の衝突時間 10⁻¹⁵ 秒から地殻変動など 10¹⁰ 秒の超大規模・複雑な広がりを持っている。そのため物質科学の研究や開発には実験や理論などさまざまな知識の統合が必要とされ、なかでも計算機を用いたシミュレーションは、研究開発のツールとして重要であり、何をどのように生産するかというプロセスの効率化に特に大きな役割を果たしている。分子・物質の計算機シミュレーションは 1980 年代より物質開発の実験・理論に鼎立する位置付けを得られ、1980 年代後半に出現したスーパーコンピュータの進歩とともに急速に普及・発展している。

分子・物質シミュレーションは、人間の暮らしと健康を守る新薬開発(創薬)、技術の発展を支える新材料開発などを支援するシミュレーション技術として進歩を続けてきている。シミュレーションシステムとしては大きく理論化学計算を利用したシミュレーション/モデリング系のシステムと、データベースや知識処理技術に基づく情報化学系のシステムに分かれるが、最近では汎用的なシステムは衰退し、医薬品や高分子材料などの個々の応用分野において、研究開発プロセスに対応した特殊な機能を持つプログラム群が数多く用意されるようになってきた。分子・物質シミュレーションを使った研究開発の流れが確立されつつあり、2000年代には研究開発者にとっての身近な道具になってきている。ただ、分子・物質シミュレーションソフト開発は相変わらず欧米に偏っており、輸入超過である。この傾向は当分変わらない。またシミュレーションの対象は医薬品偏重の傾向が強くなっている。

分子・物質シミュレーションのトレンドは、これらの超大規模・複雑系の長時間シミュレーションを実現する効率的な計算手順を確立し、最適化設計問題・連成解析などの先端シミュレーション技術を最先端のコンピューティング環境を駆使して開発することにある。これにより、創薬や物質開発の安全・簡易・高速な実行が可能となる。分子・物質シミュレーションのゴールは、未来デザイン技術の一つとして、環境負荷の少ない新規物質設計および物質生産の効率化を実現することにより、人類にとってより安全で快適な生活空間を実現することにある。

本節ロードマップ図に示すように分子・物質シミュレーションの精度と規模はトレードオフの関係にあり、本稿では、分子・物質シミュレーションの方法論のロードマップを概観した後、おおむね3種類(小規模精密シミュレーション、中規模複合シミュレーション、大規模混成シミュレーション)のトレンドについて述べ、そして、最後にまとめる。

5. 3. 2 分子・物質シミュレーションの方法論に関するロードマップ 古典力学的方法 — 中規模複合・大規模混成シミュレーションの方法 —

分子・物質シミュレーションにおける古典力学^[用語] 的手法の歴史は古く、量子力学^[用語] 完成以前から行われており、計算機の発達とともにより巨大な系のシミュレーションが実

行されている。その方法は分子力学法^{【用語】}(Molecular Mechanics: MM 法)あるいは分子力場計算と言われる。

分子の全エネルギーは原理的には分子軌道法などの量子論的計算によって得られるが、量子論的計算は分子を構成する原子および電子の数が多くなると計算量が系のサイズの4乗かまたはそれ以上に比例するため、要求される計算機資源が急激に増加し、実行不能となる。ところが、多くの分子の部分構造は共通性が高く、原子の種類や結合様式が同じならば、別の分子でもほぼ同じであることが広く知られている。これは、分子内の原子間に働く力がほぼ共通であることを示唆しているため、この力を、原子間の結合距離、結合角、二面角などを変数に用いて、原子の種類や結合様式によって決まる関数で表す。

ポテンシャル関数の例を以下に示す。

$$U_{TOTAL} = U_{bond} + U_{angle} + U_{torsion} + U_{vdW} + U_{Coulomb}$$

ここでそれぞれの項の詳細は説明しないが、多くは以下のような形を仮定する。

$$\begin{split} \boldsymbol{U}_{bond} &= \sum_{bonds} \boldsymbol{K}_r (r - r_{eq})^2 & \boldsymbol{U}_{angle} = \sum_{angles} \boldsymbol{K}_{\theta} (\theta - \theta_{eq})^2 \\ \boldsymbol{U}_{torsion} &= \sum_{torsions} \frac{V_n}{2} (1 + \cos(n\phi - \gamma)) & \boldsymbol{U}_{vdW} = \sum_{i < j}^{atoms} \left(\frac{A_{ij}}{R_{ij}^{12}} - \frac{B_{ij}}{R_{ij}^{6}} \right) \\ \boldsymbol{U}_{Coulomb} &= \sum_{i < j}^{atoms} \frac{q_i q_j}{\varepsilon R_{ij}} \end{split}$$

こういった関数として有名なのはここで、 U_{vdW} で示したレナードジョーンズポテンシャルである。またこの形のポテンシャル関数としてはたんぱく質の3次元構造計算に広く使われているアンバーポテンシャルなどが有名である。これら以外、さまざまなポテンシャル関数が提案されているが、現在ではポテンシャル関数を分子軌道法などの量子化学的手法を用いて、実験値をうまく説明できるよう求めることも多く行われている。

分子力学法は計算量が系のサイズのほぼ2乗に比例して増加する。計算を実行するための計算機資源が量子化学的手法に比べてきわめて少ないため、原子数の多い分子においても容易に計算結果が得られる。しかし、解の質がポテンシャルに強く依存することが問題であり、また電子状態や化学結合パターンが変化する化学反応などの解析に用いることができない。

分子力学法と古典力学法の融合である古典分子動力学計算と言われる分子・物質シミュレーションは、

- (1) dp/dt = -grad E ニュートン方程式 (古典力学)
- (2) E = E (MM) 分子力学的エネルギー (経験的知見)

として(1)と(2)を連立させて解く方法であり、(1)のエネルギーEを分子力場で表したものである。たんぱく質のシミュレーションにはアンバー力場が多く用いられる。性能の良い力場の開発が、2020年までの大きな課題である。古典モンテカルロ計算にもこれらの分子力学的力場パラメータが用いられている。

一方、古典分子動力学計算における計算機の性能を飛躍的に向上させるための試みは、

分子力学法の持つ高い並列性を背景にして、パソコンなどによる並列分散処理システム (PC クラスタ) の構築や専用計算機の開発等が最近進められてきている。大規模分子の分子動力学計算専用機として、MDGRAPE や MDE の開発などの試みがある。

残念なことに、古典モンテカルロ計算専用機開発の試みは、1980 年代後半に伊藤や泰地などがイジングモデル向けに作成した試みがあるだけであり、分子・物質シミュレーションのためのミネアポリス型のシミュレーション専用機開発の試みはない。モンテカルロ計算に関しては、特に並列計算機システムにおける乱数の発生法など基本的に解決されなければならない課題が多いが、専用計算機化によって大幅な性能の向上が期待できる。

しかしながら、現状では、その様な専用計算機を用いたとしても生体分子や物質材料等の大規模混成系の古典分子動力学計算を行うことは依然として難しい。

本方法は大規模混成シミュレーションの大きな武器となっており、系のサイズと精度は 計算機性能の向上にほぼ比例する。

5. 3. 3 量子論に基づいた方法(分子軌道法^[用語]・第一原理計算法) - 小規模精密シミュレーションの方法 --

分子シミュレーションの基礎方程式は、量子論に基づくシュレディンガー方程式であり、その理論と計算方法の大部分は、1950 年代後半に完成した。かの P. A. M. Dirac は 1929 年に「物理学の大部分と化学の全体の数学的理論に必要な基礎的物理法則は完全に判っているということであり、困難はただ、これらの法則を厳密に適用すると複雑すぎて解ける望みのない方程式に行き着いてしまうことにある。したがって量子力学を応用するための実用的な近似方法を発展させ、過度の計算を行うこと無しに複雑な原子集合体の主だった性質を説明できるようになることが望ましい。」と述べている[5.3-1]。以来半世紀、分子の電子状態の実用的な計算方法として、分子軌道法が発展してきた。

なかでも非経験的分子軌道法は、いかなる経験的パラメータも陽に含まないことから、さまざまな機能性分子の設計や開発に対して最も基本的でかつ重要な手法となっている。しかし、その計算量は一番近似の荒いハートリーフォック(Hartree-Fock)計算の場合でも、用いる基底関数の4乗に比例するため、生体内や固体表面での化学反応解析等の大規模系の電子状態計算には膨大な計算コストが必要になる。現実的には、非経験的分子軌道法は、設計したい大きさの大規模分子系ではなく、それを簡素化した小規模モデル分子への適用がせいぜいである。 1990 年代前半までは数百基底(数十原子)の分子軌道計算でさえ、その当時のスーパーコンピュータシステムを必要としていた。そのため、現在でも分子設計に必要な情報を十分な精度で得ることができないでいる。

1990 年代後半における計算機の進歩、特にスーパーコンピュータや高性能ワークステーションのような大規模並列計算機の進歩により、ようやく生体分子などの高分子を意識した 1,000 基底を超える分子軌道計算が行われつつあるが、これらの計算機は高価であり、かつ設備の維持管理も大変であるため、研究者が研究室レベルで「現実を反映した大規模分子系」の分子軌道計算を実現することは容易なことではない。

「現実を反映した大規模分子系」の分子軌道計算を、「低コスト=パーソナルユース」で

実現するためには、計算量を軽減するための近似法を取り入れ、さらに計算機の性能を飛 躍的に向上させることが必要である。

量子論的計算法の計算量を軽減するためには、2つの方法が考えられる。一つは、経験的または半経験的分子軌道法のように必要な計算をまともにする代わりに実測値を用いて計算量を削減する方法である。この方法は演算量が大幅に軽減されるにも拘らず、炭化水素などの系では計算される物理量が実測値をよく再現することから、研究室レベルで非常に広範囲に利用されている。有機化学反応におけるフロンティア軌道理論や遷移状態理論などの普及は、経験的分子軌道法や半経験的分子軌道法なしには考えられなかった。しかしながら、経験的または半経験的分子軌道法は、実測が無い系や金属のように周辺の環境によってさまざまな状態を容易にとる系には利用できないこと、さらに計算結果の信頼性にばらつきがあることがよく知られている。

他は、実測値をパラメータとして用いる代わりに、ハミルトニアンに近似を導入することで計算すべき積分自体を簡素化して計算量を軽減する方法である。この方法の例として密度汎関数法 「用語」がある。この方法では、積分自体を簡素化するために、シュレディンガー方程式を波動関数ではなく密度汎関数で表す。密度汎関数法は経験的パラメータを陽に含まないことから、第一原理分子軌道計算または第一原理計算とも呼ばれる。実質的にはいくつかのパラメータを実験値に合わせるので、正しく計算する代わりにパラメータを用いるという点で、先の半経験的分子軌道法と同じと言うことができる。第一原理計算法の演算量は、基底関数のほぼ3乗に比例する演算量となる。このように近似ハミルトニアンを用いる計算法は、計算量や結果の信頼性などの面から非経験的分子軌道法と半経験的分子軌道法の中間に位置付けられている。密度汎関数の表現方法は多様であり、見たい現象によってさまざまな方法を使い分ける必要がある。

これらとは異なる計算量削減のアプローチとして、北浦らのフラグメント分子軌道法 (FMO 法) があり、たんぱく質など巨大生体分子の計算に大きな役割を果たしている。これは、巨大分子をフラグメントに分割して、小さな系の量子論的計算を正しく行い、結果を再構成するという方法である。この方法は並列性が高く、最近のスーパーコンピュータの主流である並列計算機向けの計算手法となっている。

一方、分子・物質シミュレーションにおける計算機の性能を飛躍的に向上させるための 試みは、分子軌道計算法の持つ高い並列性を背景にして、パソコンなどによる並列分散処 理システム (PC クラスタ) の構築や専用計算機の開発等が最近進められてきている。大規 模分子の非経験的分子軌道計算専用機として、分散小メモリ型並列アーキテクチャである 分子軌道計算専用並列計算機 MOE の開発などの試みがある。しかしながら、現状では、そ の様な専用計算機を用いたとしても生体分子や物質材料等の大規模系の分子軌道計算を行 うことは依然として難しい。

本方法は、小規模精密シミュレーションのための武器となっており、系のサイズと精度は計算機性能の向上の3乗根にほぼ比例する。

5. 3. 4 量子論と古典論の融合による計算量の削減

一 中規模複合シミュレーションの可用性の拡大:

より大規模な系を取り扱うために 2010年~2020年の課題 -

最近、さまざまなシミュレーション分野でもマルチスケールシミュレーションまたはマルチフィジックスという言葉が認知されてきた。これは、一言で言えば、空間および時間スケールの異なる現象について、色々なシミュレーション手法を連成させて、注目している現象を効率よく再現しようとする計算科学の手法である。分子・物質シミュレーションの領域では、伝統的には量子論と古典論を空間的に結合した QM/MM (Quantum Mechanics/Molecular Mechanics) 法がよく知られている。特に 1996 年に諸熊らが発表した ONIOM 法が著名である。

この背景には、いかに計算機が高速になろうとも、一般に水溶液中で機能を発現している生体分子の挙動をまともに量子力学的な手法で再現することは、計算時間の観点から現実的ではないためである。特に非経験的分子軌道法が広く適用されてきた有機分子単体の計算に比べて、生体分子の計算には著しい困難さがいくつかある。まず、たんぱく質など生体分子は一般に数千から数万原子からなる巨大分子系で、Hartree-Fock 法による原子核の位置を固定して行ういわゆる1点計算ですら依然として困難である。さらに生体分子の化学事象におけるエネルギー変化は大体数 kcal/mol のオーダーで、定性的な議論でさえ、ポスト Hartree-Fock 法による精密計算が求められる。加えて生体分子は一般に水溶液中で、その機能を発現するため、自由エネルギーによる考察が本質的に求められ、アンサンブル法による計算が必須である。自由エネルギーの経験的ポテンシャルを用いた古典的計算では、座標を変えて1千万回ほど計算を繰り返すと言われており、非経験的分子軌道法ではまともにできない。これらの課題を克服して、たんぱく質などの生体分子の水溶液中での振る舞いを明らかにするための計算手法として、いくつか QM/MM (Quantum Mechanics/Molecular Mechanics) 法が提案されている。

たんぱく質の QM/MM 計算では、活性部位近傍を、この部分では電子が直接関与するので、非経験的分子軌道法や密度汎関数法 (QM) で取り扱い、それ以外の大部分を分子力場法 (MM) で取り扱う。非経験的分子軌道法の計算量は、Hartree-Fock 法の場合、だいたいその空間に含まれる原子数の3乗に比例して増減する。一方、古典力学的な取り扱いでは、ポテンシャルエネルギーを経験的な力場パラメータ (原子の結合距離、結合角、2面角、ファンデルワールス力など) についての簡便な数式で与えるので、量子力学的な取り扱いに比べて、計算時間が極めて短くて済む。それらの長所を巧く取り込んで、QM 空間に含まれる原子数をできるだけ少なくして高速化を図り、その他の大部分を、計算時間のかからない古典力学的な計算手法で高速化するのが、QM/MM 法の基本的考え方である。

QM/MM 法の実用的な完成が中規模複合分子・物質シミュレーションの 2020 年程度までの課題である。大規模系の計算の実行や QM/MM 法の提案は、日本人の研究者が世界をリードして久しく、世界的に認められているが、国内での認知度は低く、諸熊の ONIOM (Gaussian) や中辻の SACCI (Gaussian) 、北浦の FMO (GAMESS) などプログラムの開発と普及を欧米、特にアメリカによって評価され普及されて、日本に逆輸入されている。日本の先端科学技術に対する評価技術の稚拙さが垣間見られる現状である。

本方法は、小規模精密および中規模複合シミュレーションのための武器となっており、 系のサイズと精度は計算機性能の向上の3乗根にほぼ比例する。

5.3.5 量子力学と古典力学そして統計力学の融合

- 2020年~2030年の課題 -

物質科学における古典力学と統計力学 【用語】の融合は、量子力学の完成とともにレナードジョーンズポテンシャルやアンバーポテンシャル等の量子力学的力の古典的力場への近似をもとに分子動力学や分子モンテカルロ計算によって実現されてきた。2000 年初頭までには、分子力学法によるエネルギーの代わりにシュレディンガー方程式を解くことによって得られた力を用いて行う方法が開発された。これは、(3)式と(4)式を連立させて解く方法であるが、半古典的分子動力学法と言うべき方法である。

- (3) dp/dt = -grad E ニュートン方程式 (古典力学)
- (4) $\mathbf{H}\Psi = \mathbf{E}\Psi$ シュレディンガー方程式(量子力学)

1991 年にはイオン化直後の分子内水素結合のダイナミクスを見るために、本法を用いた報告が世界に先駆けて長嶋らによって報告されている^[5.3-2]。 本計算法のネックは(4)式のシュレディンガー方程式の計算であり、この計算の改良は分子・物質シミュレーションの根幹となる。

5.3.6 流体力学、構造力学、電磁気学と分子・物質シミュレーション手法の融合 - 大規模統合系の精密計算を目指して 2030 年~2050 年の課題 -

計算機の性能が順調に伸びるとしても、物質を構成する粒子数は桁違いに大きく、分子・物質シミュレーションの需要は増大する一方であろう。特に、現在は計算機の性能が貧しいので、分子や物質の固有の物性のシミュレーション程度しか実行できないが、今世紀中頃には、表面構造や多相環境など境界条件を陽に考慮した複合的なシミュレーションのニーズが増大する。特にターゲット分子の物性のみならず、ターゲット分子をどのように合成するか、得られた材料をどのように成型するかということは、マルチスケール・マルチフィジックスに関係する。現在これらは、熟練技術者の勘と技に頼っているところであるが、若者の高学歴化による高年齢化と中小企業の後継者不足など熟練技術者育成の目処が立ちにくい状況を考慮すると、さまざまな製品開発プロセスに対応した特殊な機能を持つシミュレーション技法の開発と流体力学、構造力学、電磁気学と分子・物質シミュレーション手法を統合した大規模系の統合シミュレーションプログラムの開発が急務である。

これにより、回路シミュレーションや構造シミュレーションなどの、より広範囲な分野のシミュレーションの高精度・高信頼化を実現することが可能となる。

また、より大規模高精度な分子・物質シミュレーション実行の可能性として新しい疎視 化理論の開発をあげることができる。これは、スーパーコンピュータなど巨大計算機資源 を持つ計算機システムで行われた計算結果を統合して大規模原子運動情報を得、それから 疎視化パラメータを取り出して、より高度で広範囲なシミュレーションを高効率に実現することを目的にした技術である。新たな疎視化変換技法の開発と疎視化理論の構築は、大規模計算システムを持たない研究者にも大規模分子・物質シミュレーションを可能とする技術である。

次にシミュレーションの適用範囲並びに小規模精密シミュレーション、中規模複合シミュレーション、大規模混成統合シミュレーションに関するロードマップについて述べる。

5. 3. 7 シミュレーションの規模と対象に関するロードマップ

現在計算化学を中心とする材料分野の分子・物質シミュレーションが計算機の技術的な壁にぶつかって停滞する一方で、医薬分野はコンビナトリアルケミストリー(コンビケム)やハイスループットスクリーニング(HTS)さらにはバイオインフォマティクスなどの新技術の応用が可能となり、分子シミュレーションが活気を帯びるといった状況が続いている。欧米においてもこの状況は変わっていない。

現在の状況は、小規模精密シミュレーションにより有機素反応のシミュレーションが可能となっており、一種類の分子単位から構成される高分子などの素反応設計が可能となっている。最近見られる計算化学を中心とする材料分野の分子・物質シミュレーションが停滞する一方で、医薬分野での分子シミュレーションの隆盛は原子分子の単一シミュレーションの陳腐化と、分子シミュレーションの二一ズの分子集合体シミュレーションへの移行を反映していることを示している。

2020 年頃までには並列計算技術やグリッド計算技術などを用いた大規模計算環境の実現などもあり、細胞内反応や機能性高分子反応等の複雑な反応経路シミュレーション並びに合成シミュレーションが可能となり細胞や組織などの混成複合シミュレーションの実現が可能となるであろう。2040 年頃までには、膜や組織の構成再生反応を取り扱うことが可能となり、生体細胞や組織のシミュレーションが可能となり、例えば生体の混成統合シミュレーションが可能となることが期待される。

これらの実現に向けた技術的な問題点は、計算速度の向上に加えて大規模データの保持法の解決が見えているが、技術ロードマップ的には楽観的な見通しがある。

細胞や組織などの混成統合シミュレーションの実現が可能となると、例えば小規模精密シミュレーションから患者一人ひとりの特性に合わせた特定器官のがん細胞のみに作用する抗がん剤・制がん剤の開発の可能性が期待できるようになり、高精度ピンポイントパーソナル創薬が実現する期待が持てる。これにより、抗がん剤の激烈な副作用を最小限に抑え、手術や放射線治療無しにがん治療が行えるようになる。また、中規模複合シミュレーションからは、器官全体に広がる高血圧症や高脂血症・糖尿病などの器官の情報を得ることが可能となり、それらのピンポイントパーソナル医療の実現や、金属と生体分子の親和性解析などにより、器官再生医療を用いた義足や補聴器などの外部補助機器の改良が期待できる。また、大規模混成シミュレーションを用いれば、人体全体のシミュレーションが可能となるので、うつ病や更年期障害などの神経性・ホルモン性の治療にシミュレーションが適応できるようになることが期待できる。

5. 3. 8 分子・物質シミュレーションの今後の50年

分子・物質シミュレーションは、技術面から分子モデリング、ケムインフォマティクス、バイオインフォマティクスの3つの分野に分類される。このうちバイオインフォマティクスは、ポストゲノム時代の情報技術分野と位置付けることができ、大量の遺伝子データを扱うための各種のソフトウェアが登場しており、世界的なバイオブームに乗って急成長している。ここでも新薬開発が具体的なアプリケーションのターゲットである。現在バイオインフォマティクス技術をいかに新薬開発に適用するかで、ユニークな技術が数多く出現しており、この分野の発展の予想は難しい。

少し趣を異にするが、分子・物質シミュレーションの生み出す巨大データの取り扱いは、巨大データベースの統合管理システムと強い関連を持っており、情報技術関連の学術的問題点を多く抱える。現在でも医薬分野などで利用される各種のデータベースの統合管理システムの開発が進められており、研究開発における豊富なコンテンツを持つ強みを増強させる方式の確立を狙っている。情報技術そのものとしても、巨大データベース管理は情報システム管理技術の中核にあり、分子・物質シミュレーションを含む物質設計システムの大きな柱となるであろうと予想される。このデータベース管理は試薬の管理や発注など業務システム面にも強く関連する。そのため情報処理技術開発としては、ウェブ技術を積極的に取り入れ、eコマース時代への対応に精力を注ぎ込んでおり、巨大データベース管理技術がeビジネスと分子・物質シミュレーションの結合をより強固にしていく可能性があることを示唆している。これに加えて物質開発全体の傾向とニーズにシミュレーション技術を統合することで分子・物質シミュレーションの新しい応用分野が開かれる可能性が生まれる。

創薬における分子・物質シミュレーションの役割に目を向けると、バイオインフォマティクスを使った新薬ターゲットの特定、モデリングやコンビケム技術を核にした医薬分子設計、そして医薬品として有用な物性を予測することによる候補化合物の評価の段階があり、それぞれ単純な組成の物質の探査を行う小規模精密シミュレーションと、複合的な組成の物質の探査を行う中規模複合シミュレーションの役割が大きい。複合組成物質の分子シミュレーションは、特に副作用や構成物質の相乗効果による毒性の誘因などの解析に期待が持たれている。近い将来、これらは統合され、知識マネジメントのワークフローとして統合されることになろう。

先に材料系シミュレーションは停滞していると書いたが、その停滞を反映して医薬分野でのコンビケム技術などを材料分野に適用することを目指したシミュレーションの受託研究が活発化するであろう。それは、いかに分子・物質シミュレーションが普及したとはいえ、まだ誰もがその原理やノウハウを知らずにシミュレーションを実行するまでにはなっていないことに起因する。分子・物質シミュレーションを正しく実行できる人材の育成が問題となろう。

再度、今後の分子・物質シミュレーションをになう人材の育成が、本ロードマップ実現のキーとなることを指摘して筆を置くことにする。

参考文献

[5.3-1] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. (London), A123, 714, 1929.

[5.3-2] U. Nagashima, S. Nagaoka, S. Katsumata, *J. Phys. Chem.*, **95**, pp. 3532-3538, 1991.

用語

古典力学:

ニュートンが作った力学。次の3法則からなる。慣性の法則:物体は、力の作用を受けない限り、静止の状態、あるいは等速直線運動を続ける。運動法則:運動量の変化の割合は、その物体に働く力に比例し、その力の向きに生ずる。作用・反作用の法則:物体1が物体2に力を及ぼす場合、物体2は物体1に大きさが同じで逆方向の力を及ぼす。

量子力学:

従来の古典力学では説明できない素粒子・原子・分子などの微視的な系に適用される力学。

統計力学:

個々の気体分子に関するミクロな理論から、マクロな性質を無理なく導出するための理論。平衡系の理論はかなり完成度が高いが、非平衡系のそれについてはまだ不完全で未知の部分が多い。

分子力学法:

分子の立体配座の安定性や配座間のエネルギー差を原子間に働く力によるポテンシャルエネルギーの総和によって計算する手法。

分子軌道法:

分子全体に広がる一電子空間軌道関数である分子軌道によって、分子を構成する個々の電子の状態が記述されると考え、この分子軌道を計算して、分子の電子状態を求める方法。

密度汎関数法:

密度汎関数理論 [用語] に基づく電子状態計算法。コーンとシャムが 1965 年、有効ポテンシャルを外部相互作用としてもつ仮想的な独立粒子系の一粒子波動関数 (Kohn-Sham 状態) から電子系の全エネルギーを計算する方法を考案した。その一電子波動関数から全運動エネルギーと電子密度は正確に計算できるが、交換相関エネルギーのユニバーサルな汎関数を知ることは不可能であるため、局所密度近似などを用いる必要がある。いろいろな系に対するいろいろな密度汎関数が提案されている。

密度汎関数理論:

計算機を用いた材料科学の基礎となる理論。複雑な電子の多体問題を、電子の密度分布の汎関数による一体のポテンシャルと置き換える近似を行い、電子の波動関数をセルフコンシステントに決定する。基底状態と電荷密度は一対一に決まることが厳密に証明され、今日までその応用が進んできた。

多様化、大規模化

図5.3-1 分子・物質シミュレーション領域のロードマップイメージ

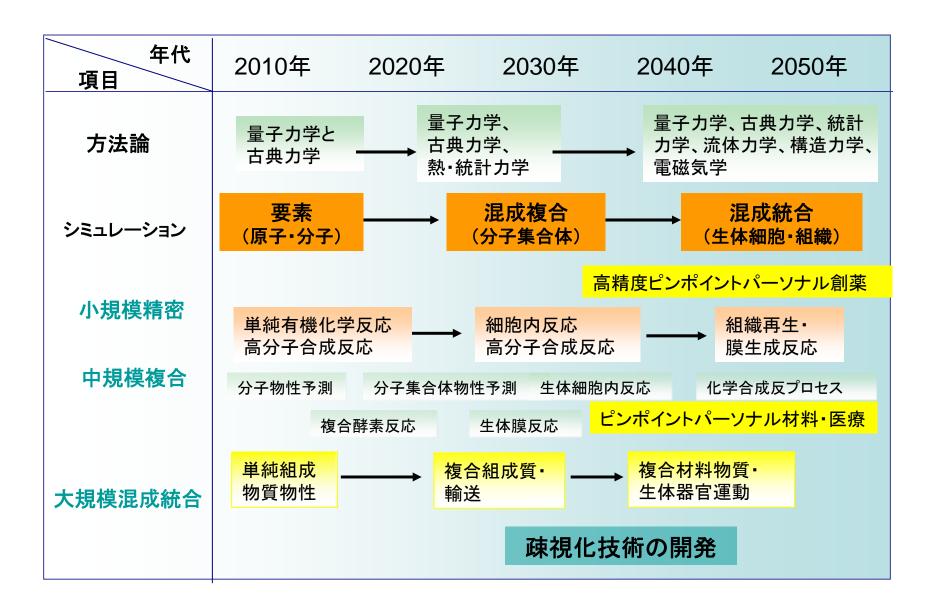


図5.3-2 分子・物質シミュレーション領域のロードマップ

5. 4 エレクトロニクスシミュレーション

5. 4. 1 エレクトロニクスシミュレーションの今後の50年

熾烈な競争下にあるエレクトロニクス産業において、研究開発・製品設計のコストの低減は重要であり、シミュレーション技術は実験による技術開発を先導する必須なアイテムとなっている。これまでのシミュレーション技術では、半導体物理における有効質量近似の成功のおかげで、量子力学をあからさまに取り込むことなく、平衡状態を前提としたボルツマン(Boltzman)確率方程式と古典電磁気学との組み合わせにより、満足いく精度で実験的データの補間・予測に対応することができた。また、多少の実験値とのずれも簡便なモデルを考えた示威的な変数による補正を入れることで対応でき、予測性の高いシミュレーションが行われてきた。

近年は、電子回路の低消費電力化、動作周波数の増加にともない、デバイスのダウンサイジング、動作電圧の低電圧化が要求されている。例えば電界効果トランジスタにおけるチャネル層の幅は35nm以下のものが半導体ロードマップで考えられている。このような'ナノ'の世界に迫る領域でのシミュレーションにおいて、従来のような平衡状態を前提とし、複雑な散乱機構の詳細を単なる緩和時間として繰り込むような簡便なシミュレーション技術はもはや通用しないことが懸念されている [5.4-1]。この状況において、エレクトロニクスシミュレーションは、材料、デバイス、ロジック・システムの3分野において転換期を迎え、本節ロードマップ図に示すような方向へとシミュレーション技術がシフトしていくものと思われる。縦軸はシミュレーションの精度、横軸はシミュレーションの規模を表し、さまざまなシミュレーションのターゲットおよびシミュレーション技術を配置している。左上から右下へ延びる斜めの線は、同じ年次を示す。また、双方向矢印は、3つのシミュレーション技術における相関を示す。

以降に、ロードマップ図の3本の矢印に示したそれぞれのシミュレーション技法の今後について詳細を述べる。今までは、デバイスの実験的研究とのかかわりが比較的薄かった材料シミュレーション技術が、今後はもっとも鍵となる基礎技術となるので、それから述べることにする。

(1) 材料シミュレーション

材料シミュレーションは、材料内における構成原子の原子番号・位置を入力データとするだけで、その材料の安定性および電子物性を予測するものである。その根幹となる計算技術は、量子力学による材料内の電子の波動関数の計算で、この計算を実行することにより、材料の内部エネルギー、電子のエネルギー準位、電子スピン密度などの物理量を計算することが可能である。過去の30年にわたり、密度汎関数理論とそれを応用する計算技術の進歩と、計算機のめざましい進歩のおかげで、多くの原子を含んだモデルを精密に計算することが可能になってきた[5.4-2]。今後、この基礎的な理論は、国境を越えた研究者の交流を通じて、電子の励起エネルギーの精度、磁性予測の精度においてもますます発展・向上するものと期待される。さらには、電子の定常状態の計算から、時間に依存した過渡的現象の計算技術も進歩することが期待される[5.4-3]。計算精度の高度化の方向とは別に、材料シミュレーション技術の大規模化の方向は、材料の原子スケールの情報を取り込んだま

まデバイス構造をも反映できることを目標に進むと考えられる。この 10 年以内に、キャリアーのチャネル部、絶縁層、電極との接合層など、複数の材料による実際の構造を想定して、電子構造、伝導特性をシミュレートすることが当たり前のように行われるようになり、20 年から 30 年以内には論文を書くレベルではなく、工場における新製品設計のための多くの計算がなされるものと想定される。もちろん、このような段階では計算を担当するのは研究職ではなく、それのみを専門とする技術職になることもありうる。(そのような技術職に対する技量認定制度も、国際標準化されて発展するかもしれない。)30 年以降は、標準的な材料シミュレータが出現し、その中身を知る極少数の研究者たちによる大規模化、高速化に適したプログラム開発・商品化が行われ、多くのユーザーがそれを応用することになろう。

一方で材料そのものの種類を探索する研究が持続する。ここ 10 年の間に、既存半導体材料、絶縁性と高誘電率を共有するゲート向け材料から、高温、高電流下での耐性を持つ過酷条件デバイス用材料や、室温超伝導の可能性を有する超低消費電力材料まで広範囲な探査がシミュレーションにて行われることが考えられる。これは、デバイスへの要求が従来の低消費電力かつ高周波動作のための高集積性に加え、乗り物や宇宙環境など過酷な環境における高信頼性[5.4-4]、身の回りのあらゆる物に組み込みやすい高フレキシブル性[5.4-5]や易加工性へと広がるためである。

従来から継続してきた既存半導体材料に変わる材料の研究は今後30年以上継続し、例えばダイヤモンドやカーボンナノチューブ [用語] のようなチャレンジングな材料ですら、それらの確かな合成方法が発見された場合には、30年を待たずしてAll Carbon Device が世界標準となるような材料のパラダイムシフトの可能性もある。また、万が一室温超伝導体が発見されれば、エレクトロニクス工業は量子干渉、量子計算を前提として設計されるような大変革も起こりうる。このような材料研究を先導するのが、精密なシミュレーション技術になることは間違いない。この場合、シミュレーションによる可能性探査だけでなく、いくつか提案されている材料のうちいくつかをふるいにかけて落とす、スクリーニングの役目をシミュレーションが担うことになるであろう。

材料シミュレーション技術を、信頼性の高い予測が可能なレベルに引き上げるための要請として、量子力学的シミュレーション技術の発達(高精度化と高効率化)と平行して、デバイス動作を再現するような電磁気学的シミュレーション技術、果ては電子のダイナミクスを扱うシュレディンガー(Schrödinger)方程式と電磁場のダイナミクスを扱うマクスウェル(Maxwell)方程式の実効的な融合によるシミュレーション技術が必要になると想定される。(これは、QED [用語] のような電磁場の量子化までをも取り込んだシミュレーションではなく、あくまでマクスウェル方程式の部分は古典的に扱うレベルを想定している。なぜならば、QED にまでさかのぼってしまうと複雑な現実物質の計算はほとんど不可能に近いからである。) [5.4-6] このような理論の研究は今後 20 年間は続き、30 年以降に電子状態計算の標準プログラムと融合した標準プログラムが出現すると予想される。

また、材料を想定するシミュレーションは、想定した材料がそのまま作成可能かどうかを探索することにまで及ぶことが想定される。現在まで、このような事例を報告するような参考文献は見当たらないが、今後はこのようなノウハウが、産業界、あるいは大学の先端的な研究センターを中心に蓄積することが考えられる。ハイスペック材料は、そのまま

では環境負荷が高いことが多い。そのような材料を用いたデバイスの使用後の廃棄までを考えると、研究段階においてさえ、実際にデバイスを試作する回数は減らすべきである。 また、作成条件として、高温高圧といった極限状態が必要になる場合にも、安全性を考えるとむやみと実験を繰り返すわけにはいかない。材料の作成シミュレーションは、これらの実験負荷を極力減らすことに貢献できると考えられる。

また、材料シミュレーション技術はエレクトロニクス分野から他の分野にまたがって進化・応用が進むことが予想される。現在でも、鉄鋼業分野では、鉄の高温下での相、炭素不純物の振る舞いと製鉄後の機械物性との相関の研究などが、シミュレーションを用いながら行われている。今後は、触媒技術を中心とした環境・エネルギー工学、有機プラスチック材料を用いた医療工学、ナノテクノロジーを利用した MEMS、NEMS 材料の設計がますます盛んに行われ、材料シミュレーション技術が当然のように使用されていることが考えられる。

(2) デバイスシミュレーション

材料シミュレーションの技術を基礎に、3次元的なデバイス構造を精密に取り込んだ、デバイス動作のシミュレーション技術が今後30年に高精度化すると予想される。材料シミュレーションの項でも少し述べたが、実際のデバイスは複数の材料の組み合わせにより構成されるので、異なる材料の界面における詳細な原子配列の情報がデバイスの特性にかかわることになる。例えば金属半導体界面におけるシリサイド合金の詳細な原子配列が、実効ショットキー障壁の高さに影響することも報告されている[5.4-7]。

また、電界印加による電位分布変化をシミュレーションで探るには、実際の材料が薄膜上になった状態での誘電関数を考慮した局所的な電界分布が精密に再現されることが望ましく「5.4-8」、10年後にはデバイスを構成する材料の多層構造から電界印加までをまるごと扱ったシミュレーションの可能性が試されることが予想される。そして、材料シミュレーションの項で述べたように電子のシュレディンガー方程式と電磁場のマクスウェル方程式を融合した計算手法により、デバイスの内部の動的な電流変化、それが及ぼす周辺への電磁場の発生と、それによる自分自身の発生する電流変調をすべてセルフコンシステントに解いたシミュレーション技術の発展が望まれる。あるいは、そのような計算を、電子状態の計算の部分のみを粗視化した有効質量近似を越える精度の近似手段が出現することもあるだろう。

事実、2006 年度の半導体ロードマップ^[5.4-1]によればナノサイズ化するデバイスシミュレーションに、原子スケールから連続体にまでつながるスケールの違うシミュレーション手法を融合し、不純物、欠陥、界面をうまくモデル化したシミュレーション技術が重要になることが指摘されている。このようなマルチスケール化のシミュレーション技術は、材料シミュレーションの章に述べたように、エレクトロニクス以外の産業にとっても必要不可欠の技術であるが、ここ 10 年間は、標準となる技術は現れないことが予想される。それは、異なるスケールのモデルをつなぐ境界条件の設定において、一般的な記述方法が見つかっていないからである。しかしながら、マルチスケールシミュレーションへの要請は年々高まっているなか、ごく少数の天才的な研究者達のひらめきによって、突然効率の良い近似方法が見つかり予想外の進歩が起こる可能性もある。

最後に、材料シミュレーションの項で述べた、材料作成のシミュレーション手法がそのままデバイス作成(半導体プロセス)に応用される可能性があることを付け加えておく。多層構造を基板に形成する成膜時の構造のばらつき、結晶に発生する歪みとアニーリングによる歪み緩和の結果をシミュレーションで予測し、予測された構造をデバイス動作のシミュレーションの設定パラメータにそのまま取り込むこと、不純物の注入[5.4-9]を大規模分子動力学計算にて調べ、注入後の結晶劣化とアニーリングによる回復、注入不純物の拡散分布、残留水素との複合体がそのまま、デバイスの電子の伝導、印加電界分布のシミュレーションに反映されることになるだろう。

(3) ロジック・システムのシミュレーション

また、デバイス単体の動作をシミュレートできたあかつきには、次の段階として実際の回路(ロジック・メモリー等)において、複数のデバイスがどのように練成するかをより精密にシミュレーションする技術が重要になり、これが'ナノ'領域での回路設計技術の標準になることが考えられる^[5.4-10]。

従来方法では、ある単体デバイスへの input とそこからの output は周辺デバイスの動作に対して独立に決定されるという前提でシミュレーションが行われているが、実際に回路をナノ化すると、デバイスを動作させるために印加する電界はそのデバイスに近隣するデバイスへもいやおう無く影響を与えることになる。また、あるデバイス素子に発生する電流の発熱、誘導磁場も近隣デバイスに影響を及ぼす。寄生抵抗、寄生容量が回路のどの部分で定義できるかも、回路がナノスケールになればあいまいになるので、I-V 特性を出すために回路まるごとシミュレーションすることが必要になると考えられる。以上のことからナノスケールの回路を作成するために、従来の等価回路モデル [用語] では描ききれない複雑な問題を解くことが必要になると考えられる。

また、加工時におけるデバイス一つひとつの性能ばらつきを具体的に考慮した論理回路 設計技術も進歩するものと思われる。現在でも、トランジスタの性能ばらつきを想定した 設計技術が存在するようだが、中央演算部分の並列化が進めば進むほど、性能ばらつきが 与える性能への影響は高まるため、ばらつきを想定したシミュレーション技術はますます 重要になるであろう。

ある目標の動作をする回路を設計する際には、その論理的な構成のデザインのもと、要求されるパフォーマンスが実際に発揮できるかどうかを予測しなくてはいけない。この目的で、回路動作をばらつきまで含めて数学的な関数としてモデル化して検証する技術が発達してきているが、今後は回路を構成する材料特性の加工時に起こるばらつきにまで遡ってシミュレーションが行われることになり、あらたな数学モデルが提唱されるかもしれない。しかし、このようなシミュレーションは、材料シミュレーション、デバイスシミュレーション技術の発達を待って行われることになるので、実際には、20 年先になることが予想される。一方で、それまでの時間の間に、「まるごと計算」が可能になるまでの「つなぎ」の技術として、ある種の簡単化したモデル(例えば、デバイス動作をイベントベースモデルとして模擬する関数)による、従来の等価回路の考えにも似たマルチスケールシミュレーション技術を発達させておくことが必要である。デバイスシミュレーションの項でも述べたが、このようなシミュレーションでは、異なるスケールのモデルをつなぐ境界条

件の設定方法に多くのノウハウがあり、産業応用に近くなればなるほど、それは広く公開されにくくなる可能性もある。回路・ロジック設計シミュレーションにおいても、その傾向が強くなるかもしれない。

5. 4. 2 エレクトロニクスシミュレーション総括

まず、もっとも基礎となる材料シミュレーションでは、シミュレーションのこれまでにない高精度化が要求される。また、実験をあたかも行ったように、材料の作成・評価・性能達成までのプロセスをシミュレーションで擬似的に行えることが求められる。

次に、デバイスシミュレーションでは、材料シミュレーションとの連携、ロジック・システム回路のシミュレーションとの連携による発展が要求される。想定したデバイス構造における性能を、材料シミュレーションから取り出した物質情報をもとに予測し、実際に複数個のデバイス(素子)に、電界をかけて連立して動作させた場合のパフォーマンス予測が精度良く行われることも要求される。また、デバイス加工時の条件ばらつきによる性能ばらつきの値もシミュレーションされることが要求されるであろう。

そして、ロジック・システム回路のシミュレーションは、材料シミュレーション、デバイスシミュレーション技術の発展のもとに、どんなに複雑なシステムでも設計したとおりに、実際に作ったものが動くという、信頼性の高いものになることが要求される。

最後に総括として、材料、デバイス、ロジック・システムデバイスにおけるシミュレーション技術の発展の時系列を同じくロードマップ図に簡単にまとめておく。

参考文献

- [5.4-1] 半導体ロードマップ、年次ごとに更新されている。日本サイトの URL http://strj-jeita.elisasp.net/strj/ の最新版へアクセスが可能、そのうち modeling simulation のうち Nano-scale modeling も参考にしていただきたい。
- [5.4-2] 例えば、これらの材料シミュレーションツールの国内版と、その応用事例を手っ取り早く知るには、編集(赤井久純, 押山 淳, 小口多美夫, 笠井秀明, 常行真司, 藤原毅夫, 吉田 博): 計算機ナノマテリアルデザイン, 「固体物理」特集号, 第39巻 が便利である。
- [5.4-3] 編集- M. A. L. Marques, C. A. Ulrich, F. Nogueira, A. Rubio, K. Burke, E. K. U. Gross: Time-Dependent Density Functional Theory, *Lecture Note in Physics*, **706** (Springer 社)、あるいは、杉野修,宮本良之,日本物理学会誌,**59**,224,2004.
- [5.4-4] 例えば、JEITA の平成 16 年度報告書 (http://it.jeita.or.jp/eltech/re port/index2005.html) のうちの、電子材料・デバイス技術委員会 調査報告書概要の中の「極限 CMOS デバイス技術調査研究報告書Ⅱ (05-基-1)」.
- [5.4-5] 例えば、国内の研究では、 K. Nomura *et al.*, *Nature* (London), **432**, 233, 2004. 、 または、ネイチャーインタフェイス, 2005 年 1 月号, 38 (和文).

- [5.4-6] 張紀久夫著: Optical Response of Nanostructures Microscopic Nolocal Theory, Springer Series Solid-State Sciences, 139.
- [5.4-7] 例えば、Yu *et al*.: Structural and electronic properties of metal sili-cide/silicon interfaces, *J. Vac. Sci. Technol.* **B19** (4), 1180, 2001.
- [5.4-8] 中村淳, 名取晃子: 半導体超薄膜の誘電特性, 表面科学 26 (7), 392, 2005.
- [5.4-9] 例えばシリコンへのボロン注入のシミュレーション例として、S. Chakravarthi and S. T. Dunham, *Journal Appl. Phys.* **89**, 3650, 2001.
- [5.4-10] [5.4-1] に紹介した半導体ロードマップの modeling and simulation の High-frequency device and circuit modeling.

用語

カーボンナノチューブ:

グラファイト膜を円筒状に巻いた構造をなし、直径が数 nm から数十 nm のものを総じて言う。グラファイトの巻き方にはさまざまな螺旋度が許されていることを 1991 年に飯島によって示された。

QED:

Quantum Electrodynamics (量子電磁気学)の略称。古典電磁気学と異なり光を場としてではなく光子として扱い、電子間相互作用を媒体するものとして扱う。一般的に方程式を実際の複雑物質に適用して解くのは困難なので、単一原子の問題、素粒子の問題に適用されることが多い。

等価回路モデル:

実際に構成されるデバイス構造を、抵抗、容量、時にはインダクタンス部分に切り分けた同等の回路構成で理解する方法。

図5.4-1 エレクトロニクスシミュレーション領域のロードマップイメージ

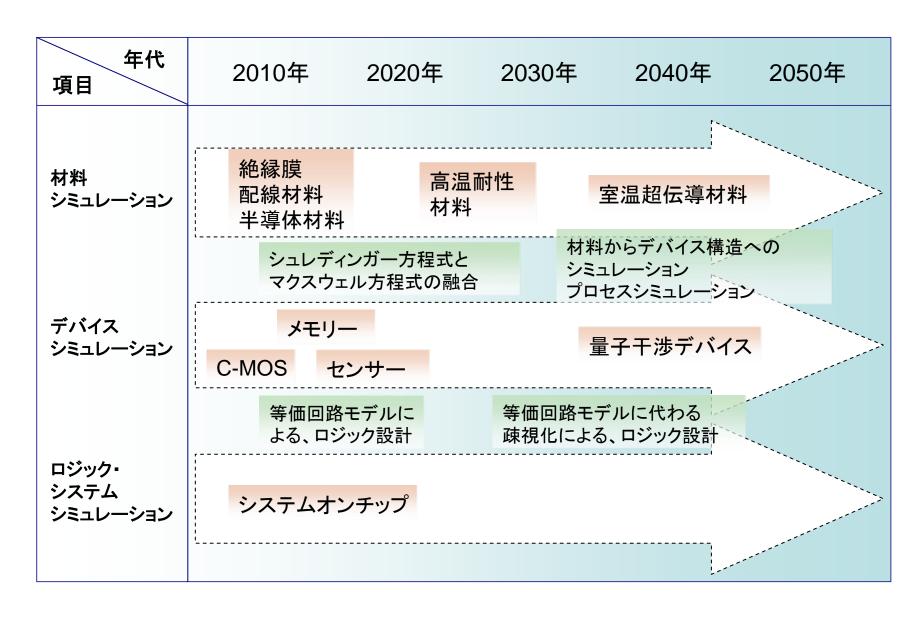


図5.4-2 エレクトロニクスシミュレーション領域のロードマップ

5. 5 ものづくりを支えるシミュレーション技術

5. 5. 1 ものづくりにおけるシミュレーションの位置付け

電化製品、自動車、プラントなどに代表される機器、構造物の製造業におけるものづくりにおいて、シミュレーション技術は段階毎に以下の目的で利用される。

(1) 現象の理解

ものづくりを行う前に、現れる種々の物理現象をシミュレーションによって正しく 理解することで、新たなものの開発可能性を判定し、その設計、製造を適切に行うた めの基礎技術を確立する。

(2) 現象の予測

ものづくりを行う過程において、作られるものの挙動とその製造工程をシミュレーションによって予測、評価を行うことにより、適切な設計、製造を実現する。

(3) 現象の解析・事後評価

既にできあがったものにおいて、事故や不具合などが発生した際に、シミュレーションによって現象を再現し、解析・評価を行うことで、事故、不具合の原因の究明とその対策を行う。

このように用いられるシミュレーション技術は、その基本は共通ではあるが、必要とされる精度、問題の規模、あるいはシミュレーションを実施する技術者の立場、スキルは異なったものとなる。

(1)(3)で必要となるシミュレーション技術に対しては、基本的に現象を忠実に再現することが求められる。したがって、複雑度の高いシミュレーションを高い解像度をもって実施するものとなり、非常に大きなコンピュータ資源が必要とされる大規模計算となっていく。このようなシミュレーション技術の具体的なものとしては、対象全体を高解像度で再現する「まるごとシミュレーション」と原子レベルの素過程から積み上げて構造物スケールで発現する物理現象を再現する「全スケールシミュレーション」が考えられる。また、このようなシミュレーションは基本的には一定以上のスキルを持つ研究者、技術者が実施するものとなる。

一方、(2)のカテゴリーは設計、製造を支援する「ものづくり支援シミュレーション」と位置付けられる。そのシミュレーションは、基本的には(1)(3)において確立した技術が利用される。このとき、製品の設計者や工場の製造技術者のようなシミュレーションの専門家ではない担当者がシミュレーションを実施することが必要であり、製品設計や金型設計などにおける CAD 等のツールにシミュレーションの実行環境が組み込まれることとなる。このように、シミュレーションを専門としない技術者の利用を想定したシミュレーション技術に対しては、その結果をそのまま設計、製造に反映可能な高い信頼性が要求されるとともに、使用者のスキルによらず適切な結果を与えるロバスト性も重要となる。

以下では、まるごとシミュレーション、全スケールシミュレーションおよびものづくり 支援シミュレーションを中心として、ロードマップを考える。

5. 5. 2 まるごとシミュレーション

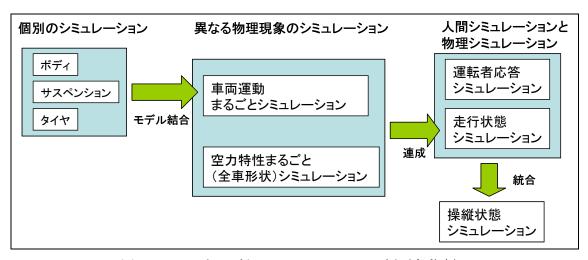
コンピュータの高性能化にともない、大規模な数値計算が可能になることで、従来は計算資源の制約から機器、構造物の構成要素毎に行われてきたシミュレーションが機器、構造物の全体に対して実行することが可能となってきている[5.5-1]。このようなシミュレーションを近年は「まるごとシミュレーション」と呼んでいる。まるごとシミュレーションによって、構成要素単位でのシミュレーションでは評価することのできなかった全体としての挙動や局所的な挙動が全体に与える影響などを評価することが可能となる。

まるごとシミュレーションの真価が発揮されるのは、流体と構造の連成など複数の物理 現象の相互作用を考慮したいわゆるマルチフィジックスシミュレーションであると考えら れる。すなわち、機器・構造物に作用する環境、使用状態を物理現象毎に切り離して検討 するのではなく、考慮すべき物理現象すべてを機器・構造物の全体において評価すること で、試作・実験に完全に置き換わりうるシミュレーションが実現される。さらに、以下の ような物理系以外のシミュレーションとの統合も考えられる。

- 制御システムを含めた運転状態
- 操作する人間の特性、反応
- マネジメントプラン

その結果として、使用特性や寿命予測、保守計画などが非常に高い精度で予測できる稼働 環境下の状態に対するシミュレーションも可能となる。

以上のようなまるごとシミュレーションを、自動車を例に構成したものを図 5.5-1 に示す。



まるごとシミュレーションは、既存の物理現象に対する数値計算技術を大規模化し、種々のシミュレータを統合することが基本となり、技術的課題もこの2点が中心となる。

大規模化に関しては、大規模計算は並列処理と成らざる得ないことから、計算機環境に 適応した並列処理技術が必要である。このような並列処理技術は現在までにおおむね確立 していると考えられるが、計算が大規模化した際に生じる丸め誤差の蓄積とその対策を行 った高精度大規模計算手法の研究が今後必要である。

一方、まるごとシミュレーションにおける大規模化に伴い、用いられる数値計算モデルの大規模化、複雑化に対する考慮も必要となる。現在、実用化されているシミュレーションでは、現実には CAD データの修正など計算モデルの作成に手作業を必要とする場合も多く、まるごとシミュレーションの実現にはモデル作成技術の進歩が必要不可欠である。これに対して、現在研究レベルで試行されているまるごとシミュレーションでは、計算モデル作成の自動化が容易な数値計算手法を選択することでモデル作成の困難さを克服している。しかしながら、このような数値計算手法は、必ずしも現象の表現に適したものとはなっておらず、精度を確保するためにはさらなる大規模化が必要となる。したがって、今後は、物理現象を適切に表現可能な数値計算手法のための自動モデル生成の開発も必要となると考える。

まるごとシミュレーションとして種々のシミュレータを統合し、マルチフィジックスシミュレーションやシステムレベルのシミュレーションを実施するためには各種シミュレータの統合化技術が必要となる。現在行われているマルチフィジックスシミュレーションでは、専用のプログラムが用いられることが多いが、今後は各現象に対するより高度なシミュレータの統合が必要となると考えられ、シミュレータを統合化するためのプラットホームの開発、相互の情報を交換するインタフェースの規格化も必要である。さらに、大規模なシステムに対するまるごとシミュレーションを実現するためには、仮想物理空間「用語」というような空間・時間に広がる物理量などの情報を操作、共有するシステムの構築が必要である。

5. 5. 3 全スケールシミュレーション

ものづくりにおいて予測・制御を行うべき物理現象は、図 5.5-2 のようにさまざまなスケールの現象が関連し合い発現したものとなっている。このような問題に対応するための高精度、高解像度なシミュレーションとして、量子力学に基づく原子、分子のシミュレーションを出発点とし、ほぼ均質な材料を仮定できる連続体としての構造物のシミュレーションまでをつなぎ合わせることによって得られる、全スケールの相互作用を考慮したシミュレーションすなわち「全スケール(オールスケール)シミュレーション」が、計算機の性能向上によって実現可能となると考えられる。全スケールシミュレーションにより、根源的な素過程における物理定数の設定から出発し、シミュレーションをつみあげることで、機器、構造物における挙動シミュレーションで得られる物理量の絶対値が、実測・実験データとの合わせ込み等を行うことなく予測可能なものとなる。

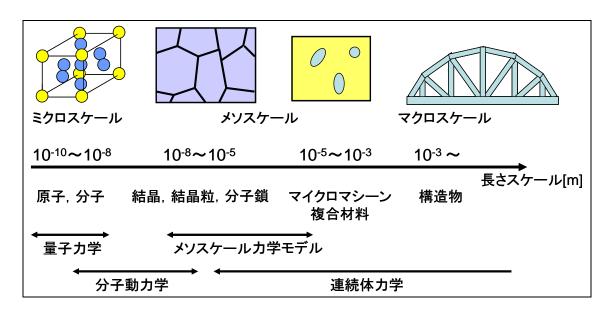


図5.5-2 固体材料における現象スケール

現在は、このようなシミュレーションを目指すものとして、複数(2から3)の現象を考え、10⁵程度のスケールの違いを考慮できるマルチスケールシミュレーションとして、各スケールの現象のモデル化やスケール間の橋渡し技術が精力的に研究されている^[5,5-2]。実際に原子スケールから構造物スケールまですべての現象をつなぎ合わせるためには、原子と構造物の中間に存在するいくつかのメソスケールの現象を適切にモデル化することが鍵となると考えられる。メソスケールの現象に対して現在研究レベルで提案されているモデル化は、現象論モデルとして、本質的に特定の理解可能な現象に焦点を当て、それを記述するものとなっている。このようなモデル化は、現象のメカニズムの理解に役立つものであっても、スケール間で伝達されるべき情報が恣意的に選択されるプロセスが介在することとなり、考えられる現象をすべて表していることにはならず、定量的に評価しうるシミュレーションとはなりにくい。したがって、全スケールシミュレーションが実現するためには、メソスケールの現象に対して基本原理に基づく多数の計算結果から、規則性を見いだし、統計的な推論により適切なモデルを自動的に決定する帰納的モデル生成手法「円部1の開発が必須であると考える。

5. 5. 4 ものづくり支援シミュレーション

現在、機器、構造物の設計、製造段階においてシミュレーションを利用することで、期間、コストを削減する製品の開発プロセスが大企業では一般的となってきている。このようなシミュレーションは、製品の設計者や工場の製造技術者のようなシミュレーションの専門家ではない担当者が実施可能なものとして、製品設計や金型設計などにおける CAD 等のツールに組み込まれることで、広く製造業に普及していくものと考えられる。また、雇用の流動化等によって減少した熟練技術者がもつ高度な技術、豊かな経験を補うものとしてシミュレーションを活用することが今後は必須となって行くであろう。したがって、も

のづくりを支える中小企業の技術者に対しても、それを支援するシミュレーション技術を 普及させることが、ものづくり産業における日本の競争力を維持するためにはきわめて重 要であると考える。

このようなシミュレーションを専門としない技術者の利用を想定したものづくり支援の ためのシミュレーション技術に対しては、その結果をそのまま設計、製造に反映可能な高 い信頼性が要求されるとともに、使用者のスキルによらず適切な結果を与えるロバスト性 も重要となる。

ものづくり支援のためのシミュレーション技術は、設計時シミュレーションと製造シミュレーションの2つに大別できる。

設計時シミュレーションは、設計プロセスにおいて設計者が機器、構造物の挙動を予測するものであり、信頼性、ロバスト性とともに、設計プロセスの進行を阻害しない計算時間でシミュレーションが実行可能であることが要求される。したがって、基本的に研究レベルで開発、利用された各種の技術が、計算機性能の向上によりパソコンなどのユーザーレベルの計算機環境で十分高速に実行可能となった段階で、CAD等のツールに組み込まれ、実現するものとなる。現在の計算機の性能では、応力解析に関しては非線形問題まで既にCADに組み込まれており[5.5-3]、[5.5-4]、今後、連成問題等が設計時シミュレーションとして利用されるようになると考えられる。また、その次の段階では、上述のまるごとシミュレーションや全スケールシミュレーションも設計時シミュレーションに取り込まれていくであろう。

製造シミュレーションは、金型設計などの製造技術者が製造工程のシミュレーションを行い、現在、経験や試行、試作に頼っている製造プロセスの設計、計画を効率的に行うものである。製造シミュレーションは製造プロセス特有の物理現象が対象となることから、通常のシミュレーション技術を利用しつつ、独自の改良や問題に特化した方法なども必要となる。現在、プレス成形加工[5.5-5]や樹脂成形[5.5-6]などの分野に関しては、シミュレーションがある程度実用化されている。今後は、切削のような切除加工や溶接、熱処理のような相変態現象等を含む加工技術に関するシミュレーションの開発、実用化が行われると考えられる。

さらに、すべての製造工程をコンピュータの中で再現するシミュレーション技術すなわち仮想製造が設計時シミュレーションと一体となって実現することで、出荷される製品の製造までの過程で一切の試作が行われない真の試作なし製造である「一発製造」が可能となる。

一方、土木、建築構造物や宇宙構造物などに関しては、規模や環境の要因により試作等が不可能であり、現在でもシミュレーション技術に基づき設計、製造が行われている。このような分野は、用いる材料が自然物(砂、砂利)を利用したコンクリートや自然物そのものである地盤材料(土、砂等)であることや、構造物に作用する外力が地震などであり、設計、製造に際してばらつきや不確定性が多いものとなっている。このような状況から、シミュレーション技術は現時点では実測、実験を補間する形で利用され、試作のプロセスは存在しないものの先に述べたシミュレーションを利用した「一発製造」の状況とは異なっている。しかしながら、ばらつきや不確定性を帰納的モデル生成手法によりシミュレーションに精度良く取り込む技術と、ばらつきや不確定性を減らすための観測技術の発展に

より、高度なシミュレーション技術の導入も可能となり、より合理的で安全性、信頼性の 高い設計、製造につながっていくものと考えられる。

5. 5. 5 リアルタイムシミュレーションによるものづくりの新たな可能性

計算機の性能向上と各種の計測技術の進歩がシミュレーション技術と組み合わされることにより、機器、構造物の設計、製造プロセスだけではなく、設計思想などの変革が行われる可能性を指摘したい。 このようにしてできた製品をシミュレーションベース製品と呼ぶ。

例えば、医療計測機器などの分野においては、従来は情報処理によって分析可能な計測 データを得られるものと計測機器が設計されている。これに対して、新たなシミュレーション技術の開発によって、計測データのリアルタイムシミュレーションを介した分析などが可能となり、高性能かつ浸襲性の低い計測機器が開発されることが考えられる。

また、自動車において、モニタリングされた周辺環境と操作による車両運動がシミュレーションによってリアルタイムに予測可能となれば、破壊的な衝突事故をほぼ回避する可能性が生まれる。このような状況が生み出されれば、自動車設計においてはもはや現状のような衝突時による安全性の評価は必要ではない。衝突安全性を確保する必要がなければ、車体の構造は現状とは全く異なった形態で、軽量化等が行われる。このような自動車に関しては、当然、製造時および使用時のコスト、環境負荷は軽減される。

50 年後を楽観的に予想すれば、このようにシミュレーションがものづくりを変革する兆しが見えているのではないか。

参考文献

- [5.5-1] 例えば、梅谷浩之, 飯島和宏, 伊藤保, 田神章一, 三好勝宏: 車まるごとリアル タイム高精度シミュレーションの検討, 自動車技術, **60**(6), pp. 36-40, 2006.
- [5.5-2] J. Fish: Multiscale Computations: Boom or Bust, *IACM Expressions*, **22**, January 2008.
- [5.5-3] SolidWorks, ソリッドワークス・ジャパン株式会社, http://www.solidworks.co.jp/.
- [5.5-4] Abaqus for CATIA V5, Dassault Systèmes, http://www.simulia.com/products/afc_v5.html.
- [5.5-5] JSTAMP, 株式会社日本総研ソリューションズ, http://www.jstamp.jp/.
- [5.5-6] Moldflow, Moldflow Corporation, http://www.moldflow.com/.

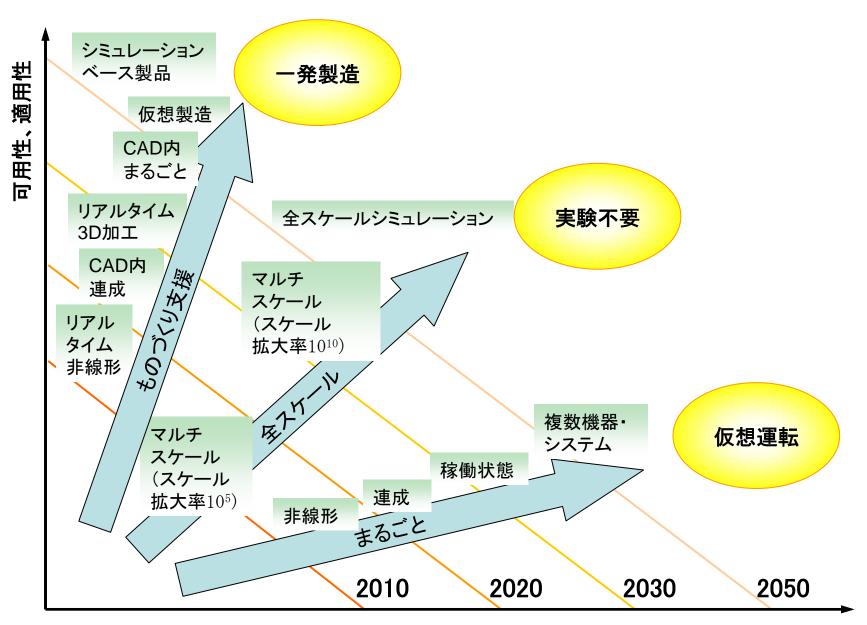
用語

仮想物理空間:

多数の機器に対して、精度の高いシミュレーションを独立に構成し、それらを並列実行し、統合することでシステムとしてのシミュレーションを実施するためには、各シミュレータが互いに同じ物理空間上の情報を交換するためのプラットホームを導入しなければならない。このようなプラットホームとしては、現在ヒューマンインタフェースやコミュニケーションなどのために用いられている仮想空間のようなシステムを、シミュレータが物理量などを操作、共有するものとして定義した仮想物理空間の開発が2050年頃までに必要となる。

帰納的モデル生成手法:

多数のシミュレーションによって、メソスケールの現象における規則性を見いだし、 統計的な推論手法によって、より大きなスケールで評価できる平均的なモデルを自動的 に生成する手法として帰納的モデル生成手法が 2030 年頃までに開発されることが必要 である。



大規模化、高精度化

図5.5-3 ものづくりシミュレーション領域のロードマップイメージ

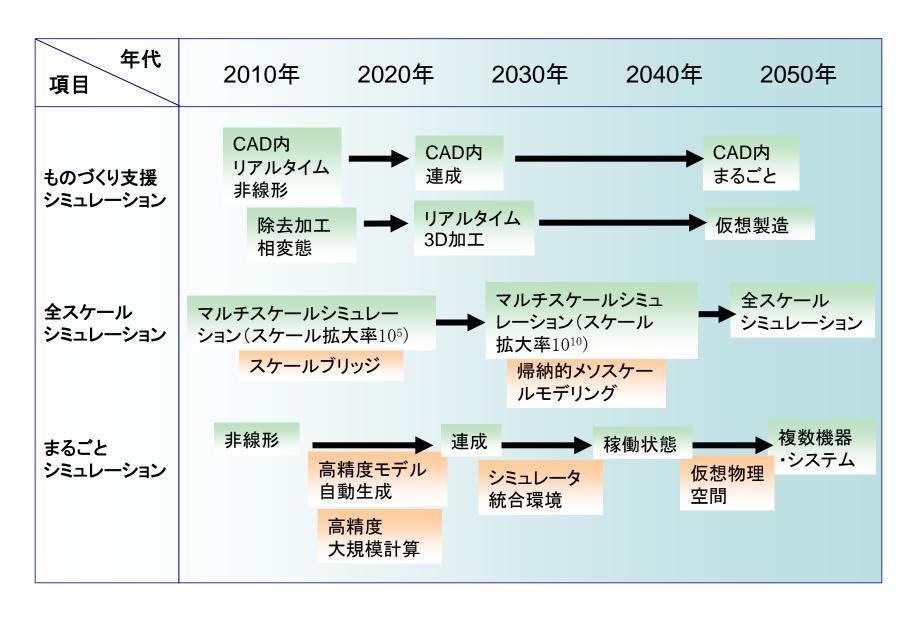


図5.5-4 ものづくりシミュレーション領域のロードマップ

5. 6 プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション

プロジェクトは、独自性のある製品やサービスを創出する、期限の決められた活動である^[5.6-1]。また、プロジェクトの初期段階において最終成果物^[用語]や計画の詳細が決定しているわけではなく、プロジェクトの進行に伴って詳細化されるという特性を持っている。このことから、プロジェクトには、多くの不確定要素が内在する。そのため、早い段階で最終成果物や計画について、シミュレーションを行い、より確かな見通しをつけることは、プロジェクトを成功させるうえで、非常に重要な要素となっている。

プロジェクトにおいて何をシミュレーションするのかという観点から検討すると、大きく次の二つが考えられる。一つは、プロジェクトの最終成果物である製品やサービスについてのシミュレーションである。そしてもう一つは、プロジェクトの作業工程に対するシミュレーションである。以下では、はじめに、プロジェクトの工程に関するシミュレーションについて検討し、その後プロジェクトの製品やサービスに関するシミュレーションを検討する。

5. 6. 1 プロジェクト工程に関するシミュレーション

(1) 現状と課題

プロジェクトを適切に運用するためには、精度の高い計画を立案することが重要である。 計画を立案するためには、はじめにプロジェクトの目的、目標、最終的な成果物を明確に し、それを達成するために必要となる作業に分解する。そして、一つひとつの作業に、期間やコストを見積り、それらを統合して全体の概要計画が出来上がる。このことから、計画を立案するということは、将来の作業や進捗を予測することであるといえる。

プロジェクト計画は、ネットワーク図を用いて作成されることが多い。従来より、PERT (Program Evaluation and Review Technique) 「 $^{[\Pi
ightarrow I]}$ や CPM (Critical Path Method) 「 $^{[\Pi
ightarrow I]}$ が開発され、使用されてきた。その後もリソースの競合、例えば、離れた場所で同時に同一人物が作業することはできない、といった制約を考慮することによって精度の向上を図ってきた。

ところで、プロジェクトには、見積り精度の高い作業と低い作業がある。過去のプロジェクトで既に多くの類似の作業を実施していたり、機械化が進んでいる作業は、見積り精度が高くなる傾向にある。一方、類似の作業が少なく、また、人が実施する場合は、見積り精度が低くなる傾向にある。特に頭脳労働など、知的な作業が必要になるものについては、実施する作業者のスキルや知識、そして体調など、多様な要因に影響され、見積り精度が悪化してしまう。このようなケースでは、残念ながら、PERT などの技法を十分な精度で利用することができない。

例えば、ソフトウェア開発プロジェクトでは、多くの作業が、頭脳労働に依存しており、 作業者による生産性に大きな差があり、工場などの生産計画や建設プロジェクトなどに比 べると、見積り精度が落ちるという問題を抱えている。

(2) 30年後に期待されるシミュレーション

人、特に頭脳労働が中心となるプロジェクトでは、個々の作業をどのようなスキルや知識を持った人が担当するかによって、生産性に大きな差が存在する。そのため、計画時における作業の見積りに十分な精度が得られず、そのデータをもとにシミュレーションしても、やはり高い精度が得られない。このことから現在より精度を上げていくためには、入力データである、人が実施する作業の見積り精度の向上が欠かせない。

ソフトウェア開発の分野では、PSP (Personal Software Process) ^[5,6-2] と呼ばれる方法が注目を集めている。これは、プロジェクトメンバー一人ひとりが、プログラミングの演習問題を通じて、自分自身の生産性や信頼性を把握することを目標としている。このようにメンバー一人ひとりが自分の生産性を把握することにより、はじめて精度の高い見積りが可能となり、その結果として、より良いシミュレーションが実現できるようになる。このような訓練が今後一般化することにより、今よりも精度の高いプロジェクト計画のシミュレーションが可能となる。ただし30年の先を見越した場合、これだけで十分であるとはいえない。

プロジェクトは、複数の人が作業を分担し、コミュニケーションをとりながら目標に向かって進んでいく。そのため、他のメンバーが行っている作業や作業者自身の感情に影響を受ける。そこで、従来の工学的な視点だけではなく、生理学、心理学、社会学など人に関する幅広い分野の成果を動員して、作業者の動きを予想していくことが重要となる。例えば、従来のモチベーション理論をさらに推し進め、プロジェクトで頭脳労働をする場合には、どの要因が影響しているかを分析することが重要であり、また、組織として、どのような個性の組み合わせが、生産性に影響するかも分析していく必要がある。さらに、ストレスとの関係、家庭など仕事以外での悩みも影響を与える要因となる。これらの要因を整理し、分析することにより、30年後には、現在の倍から10倍くらいの安定した精度で見積りができるようになり、プロジェクトのシミュレーションができるようになると考えられる。

5. 6. 2 製品やサービスに関するシミュレーション

(1) 現状と課題

プロジェクトは、ある特定の製品やサービスを創出するための期限のある活動である。たとえ、似た製品やサービスが既にあっても、必ず独自の要素があり、大量に同じ製品やサービスを提供する場合と違った特徴を有している。その一つは、プロジェクトの開始時点では、プロジェクトが作り出す最終的な製品やサービスが十分には明確になっておらず、設計作業を進めることによって明確化することである。そのため、プロジェクト・オーナー(発注者)も、プロジェクト実施者(受注者)も、プロジェクトの初期段階では最終成果物について、明確で詳細なイメージを持っていない。このことから、プロジェクトの終盤になり、最終成果物が見えるようになった段階ではじめてオーナー(発注者)が頭の中で描いていたイメージと、できてきたものが異なっているという事実に気付くことがある。その場合、修正や手戻りの作業が発生し、プロジェクトが遅延したり、コスト超過に陥る

可能性がある。また、期待していた機能や性能が得られないケースがあり、プロジェクト を実施するうえにおいて、重要な問題となっている。

このような事態を避けるために、建築等の分野では、紙で模型を作製するなどして、可能な限り早い段階で、関係者間の認識を合わせるように努めてきた。この行為自体がシミュレーションであり、近年は、コンピュータ上で可視化し、評価するようになっている。このようなことは、新製品開発プロジェクトにおいても同様である。そしてシミュレーション技術を用いて評価している内容は最終的な成果物やサービスの、機能、性能、安全性、デザインなど多様である。これらの要素に対して、どのようにシミュレーションするかは、適用分野によって違いがある。ところで、プロジェクトマネジメントの立場から見ると、最終的な成果物やサービスをより早い段階で明確化し、プロジェクト関係者間で認識を合わせることが重要である。そして、その結果を設計や製造のプロセスに組み込むことが重要であり、そのようなことが効率的に実施できるシミュレーション技術の発展が望まれる。その意味においては、現在直面している課題として、プロジェクト・オーナー(発注者)が頭の中で望んでいることをいかに明確化していくかという技術や方法論である。

(2) 30年後に期待されるシミュレーション

プロジェクトの早い段階において、最終的な成果物やサービスをシミュレーション技術を用いて明確にすることは、プロジェクトを成功させるうえにおいて重要である。これを 実現する手順として、以下が考えられる。

- ① 自分のほしい製品やサービスのイメージを図や文章でコンピュータに入力する。
- ② コンピュータは、製品やサービスの概要を可視化して提示する。
- ③ 必要があれば修正を加え、細部を詳細化する。
- ④ ①から③を繰り返す。
- ⑤ プロジェクトの製品やサービスが完成。

現在、設計やシミュレーションを行うのは、実際に最終成果物を利用するプロジェクトのオーナー(発注者)ではなく、主として技術者である。しかし、理想的には、実際に利用する側の人間が自ら行うことが望ましい。このことから、今後はユーザー・フレンドリーなインタフェースや、より使いやすいシミュレーション技術が開発され、30年後には実際に最終成果物やサービスを利用する人が、シミュレーション技術を用いて、プロジェクトの早い段階で、製品やサービスのイメージを詳細化できるようになると思われる。

参考文献

- [5.6-1] Project Management Institute: A Guide to the Project Management Body of Knowledge Third Edition, 2004.
- [5.6-2] Watts Humphrey: A Discipline for Software Engineering, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

用語

最終成果物:

プロジェクトが作成する製品やサービスのこと。プロジェクトは、製品やサービスを作成する過程において、設計書をはじめとして多くの文書類や中間的な成果物を作成する。 その中間に作成される成果物と最終的な成果物である製品やサービスを区別するために、 用いられる用語。

PERT (Program Evaluation and Review Technique) :

1950 年代後半、アメリカ海軍がポラリス艦隊弾道ミサイルの開発を円滑に行うために開発した手法。ネットワーク図を用いてプロジェクト全体の日程計算を行う。

CPM (Critical Path Method) :

1950 年代後半、デュポン社が化学プラント建設の設備投資額と日程を総合的に管理するために開発した手法。PERT と同じくネットワーク図を用いるが、時間とコストを関連付けて考えているところに特徴がある。

大規模化、高精度化

図5.6-1 プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション領域のロードマップイメージ

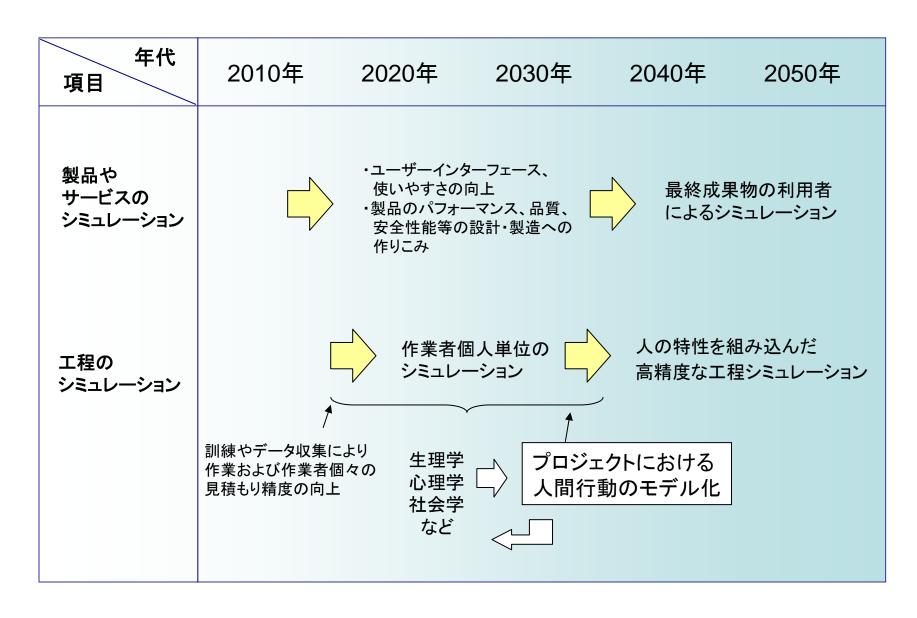


図5.6-2 プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション領域のロードマップ

5. 7 信頼性とシミュレーション -人間・社会とのかかわり-

人間が共同生活を営む際に、自然的に発生した集団を社会とした場合、この社会をシステムとして捉え、人間と社会との関係を信頼性の観点から考察する。信頼性を論じる場合、シミュレーションが、予測や検証、並びに評価に多用されている。

例えば、現実のシステムで実験すると多大な費用や長時間を要する、あるいはシステムに与える影響が許容できない危険を含む、また多くの条件や要因さらに実験環境が作れないために測定が困難であるなどの要件により、システムその物(者)での実験またはシステムが稼動する環境を作ることが不可能な場合にシミュレーションが用いられる。

シミュレーションが信頼性や安全性とどのようにかかわっているのかを鳥瞰することによって、30年後のロードマップを検討する。

5. 7. 1 信頼性の変遷

信頼性の対象とする「アイテム」は当初、その多くが部品であった。Reliabilityの訳として信頼性が用いられ、部品の信頼度を高めることがその対象であった。すなわち部品の故障率が少ない、高い品質を作り上げる手段や方法が研究され、それらは、統計学と結合して信頼性工学という領域が生まれた。当時、電子部品を使用した製品は、部品数が少なく、製品の故障率は部品故障率に依存する度合いが高かったので、部品故障率から製品の寿命が予測でき、初期故障、偶発故障、磨耗故障という故障曲線で議論されていた[5.7-1]。

しかし、製品そのものが複雑化し、システム化されると単なる部品故障率のみで製品の 信頼性を議論できなくなってきた。また、大量製品で小型のものは、初期故障があるにも かかわらず、短寿命化により磨耗故障に至る前に新しい製品が誕生してきているので、信 頼性を予測する必要性が薄らいできた。

システム全体を評価するという考え方は、アベイラビリティ(availability)という概念で、例えば鉄道のIEC規格であるRAMS(IEC 62278: Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety)では、構想から撤去と処分までの14段階において、アベイラビリティの作業項目を規定している。

このように、複合した形での信頼性が議論されるようになってきたが、この段階においても、製品の信頼性は数式で対応可能であった。しかし近年は、信頼性の対象であるアイテムに人間がかかわるようになり、サービス・医療・社会システムの信頼性等、人間を対象とする事例が出てきている。信頼性も Dependability と呼ばれるようになり、この段階では、単に信頼性のみではなく安全性も非常に重要になってきた。

表 5.7-1 信頼性用語の変遷

項目	初期 20 世紀中	中期 20 世紀末	現在 21 世紀初
信頼性用語	Reliability	Availability	Dependability
アイテム	部品	部品、システム	部品、システム(人間)
学問分野	技術/工学 (信頼性)	技術/工学(信頼性、品質管理、その他)、自然 科学、医学、産業(運輸 /交通、通信)	技術/工学、社会科学、自然科学、医学、産業(運輸/交通、 通信)
対象物	人工物の個々	人工物の全体	人工物、天然物 (地球の全体)
要件	壊れないこと	動くこと	持続すること
学問分野	信頼性工学	信頼性工学、品質管理、 システム工学	社会科学、自然科学

5. 7. 2 信頼性とシミュレーション

(1) 社会について

社会システムに関連するシミュレーションの事例としての気象予報は、社会での一般的な利用のほか、種々の産業分野、さらに航空機や船舶の最適コースの選択などに利用されている。気象予報は、それぞれ固有の時間・空間スケールを持ち、相互作用がある。現在の予報技術の基本は、物理法則に基づく方程式を数値的に微分や積分する数値予報^{【用語】}である。

数値予報モデルは非線形系であり、非線形系では初期条件がわずかに異なる二者の場合、 それらの時間的、空間的振る舞いはしばしばまったく異なる道筋に発展し、結果は実際に やってみないとわからないことがある。このような大気の性質をカオスと呼ぶ。我々は、 真の初期値を観測することは不可能だから、モデルの結果を利用する場合、初期値敏感性 を考慮しないわけにはいかない。

アンサンブル予報^{【用語】}の基本原理は、数値予報である。大気のカオスにより起こり得る 初期値の誤差の拡大性(初期値敏感性)をモデルの中で実際に評価することにより、最も 実現性の高い予測およびその精度情報を得ようとするものである。具体的には、実際の観測値から調整されるただ1組の初期値の周囲に、観測誤差と同じ程度の小さな誤差を持つ 集団的(アンサンブル)多数の初期値群を与えて、それぞれの初期値ごとに独立して数値 予測を行う。これにより、より精度の良い予測が可能となる^[5.7-2]。

課題は数値予報の格子点(GPV:グリットポイントバリュー)^{【用語】}の詳細化による密度向上、時系列観測データの収集、領域を超えた情報交換の確立である。

次に、災害時における建築物構造の安全性評価については、建築構造物の個別性により、 構造計算で検証される。建築構造物の構成材料や個別の部材、柱や梁、耐震壁の破壊実験 は可能であり、それらの形状は試験における境界条件の中で明確にされている。しかし、 システムとしての安全性が不十分である。その理由は、建築構造物は、個別の地盤の上に建築され、あらゆる荷重、外力(地盤変形)から逃れられないため、常に、個別のある荷重・外力に曝され、その構造安全性を明確に示せないところに問題がある。

実際の地震から得られたその建築物に加わる加速度波形からは、建築物に作用する加速度(力)と変形が得られる。これを要求曲線と称する。一方、建築物に水平力が作用したときの水平力と水平変形の関係を性能曲線と呼ぶ。この2曲線の評価により、構造物の耐震性、耐用性が精度よく予測できるようになった^[5.7-3]。しかし、現場のデータ量の不足からまだ十分な精度が得られるまでになっていない。

これら二つの事例から、自然災害等の被害を極力減少させるためには、観測点の大幅な増加、観測データの時系列的な収集と観測点の共有化・立体化による数値予報技術の向上が必然である。

(2) 集団について

輸送システムを集団として捉えた場合について考察する。道路交通システムでは、ITS (Intelligent Transportation System) の研究が行われ、情報化が進み、実時間交通情報提供は実用化され、運転支援システムも実用化が進められている。これら情報提供システムからリアルタイムの交通情報を得て地図上に道路の混雑状況を示すことが可能となった。自動運転ステージでは、走行誘導制御システム [用語] を応用して自動運転が研究開発されている。走行誘導や制御を常時機械側で行うようになったものが自動運転である。自動運転の目的は、人間による誤扱い等をなくして事故をなくすこと、さらに、利便性を高めてより使い勝手のよいシステムとすることである。

高速道路における自動運転は、自動運転システムの信頼性が問題となっているが、自動車専用道路に専用車線を設け、特定の整備された装置を搭載した専用車両が車群走行を行うのは実現性が高い。一般道路は、予期しない障害物が路上に何時出てくるかわからない場所であり、このような環境での自動運転は非常に困難で、何らかの隔離が必要になる。これは、社会全体としての交通網のあり方を考慮して実現する必要がある。しかし、一般道路では自動運転システムの提案はまだない^[5.7-4]。将来は、歩道と車道の分離による車道上の自動運転により、交通事故ゼロが目標となる。

比較的信頼性・安全性が高い鉄道分野においては、特にシステムの検証・評価にシミュレーションが多く利用されている。設計段階では、交通流予測、ダイヤ作成支援システム、また製造段階では、連動装置、運行管理装置のデバック試験・検査、運用段階では、運転手訓練用シミュレーション、現場機器の不具合監視をするリモートセンシングの保守支援システムなどの分野で利用されている。

人は思った時間に思った場所に思った方法で行きたいという願望がある。それはさながら孫悟空の"きんとん雲"にも似ている。これを実現するためには、列車間隔は少なくとも5分以内、いつでも座れる、家から歩いて数分に乗降できる場所があるなどが考えられる。さらにシステムから見たときには、保守に時間がかからない、システム不具合があったときは自動で回復する、乗客数、環境の変化に対応できる運転が可能であるような柔軟性があるフレキシブルシステムが望まれる^[5,7-5]。

(3) 脳について

脳すなわち心とシミュレーションの関係を医療問題とヒューマンエラーで検討する。

医療は、紀元前から人類の健康と深く関わって発展してきた経緯があるので、誤った医療行為によって不利益を被る事例は、最近になって突然現れた問題ではない。しかし、医学・医療の進歩に伴い、より侵襲的な診断手法や治療手段が開発されてきたため、医療過誤によってもたらされる危険もより重大なものとなっている。医療は命の危機管理といった側面をもつことから、医療を受ける者が、医療によって逆に危機に陥れられることがあってはならない。このような医療過誤は、最終的な判断や治療をするのがヒューマンであるために必ず起きる。医療機器の発達、検査方法の充実で初期判断の誤りは少なくなってきているが、手術等は医師の技量によることになり、ミスを減らすためには訓練しか方法がない。この訓練は、実際の対象者で行うことが不可能なため、対象者に近い状態で訓練するために考案されたのがシミュレーション医療であり、その一つが人間型ロボットである。

このロボットは、さまざまな心疾患や呼吸器疾患のシミュレーションを行うことが可能であり、気道確保困難例に対する緊急気管切開や緊張性気胸に対する胸腔穿刺など、緊急の外科的治療にも対応できるので、被検者は、実際に患者を診察しているような環境でトレーニングを行え、極めて効果的に臨床対応能力を向上させることができる。その結果、個人個人の判断・対応能力の評価はもとより、医療チーム全体としての重症患者対応能力の評価にも役立っている^[5,7-6]。

今後はこれらのロボットの精度向上、他の医療事故に関するデータ収集とその安全対応が必要となる。2006年8月26日に「モデル&シミュレーション医学教育研究会」が発足し、シミュレーションによる医学知識と技能の付与に関し、チーム医療における個人の役割分担と救急という時間軸の2つの考えを導入することにより、コンピュータソフトと人体モデルを用いたシミュレーションの効果的な教材作成を促進する場が設けられた。

ヒューマンエラーに関して、人間は間違いを起こす。この間違いによって多くの重大な 事故を発生させている。人間個人の信頼性は基本的に組織の信頼性に立脚している。

ヒューマンエラーの分類法で代表的な Swain が提唱している行動心理学的視点からの分類、Norman と Reason による認知心理学的視点からの分類がある。これらの分類法は、エラー結果の分類と原因分析には役立つが、エラー誘発要因を知ることは難しい。

エラーの誘発しやすさを人間行動と脳内情報処理の関係の深さから捉えた人間行動の制御モデルがある。また、人間の行為を技能、規則、知識ベースのパフォーマンスレベルから分類した Rasmussen の SKR モデルがある。E. Hollnagel は、人間の心理・行動特性のモデルとして、人間の行動の制御は全般的に情況によって決定されるという視点を持った情況決定制御モデル(COCOM)を提案している。COCOM は主観的利用可能時間を主要制御パラメータの一つにしており、時間余裕が心理や行動に影響を与えるモデルを組み入れている。緊急事態に直面した人間の心理・行動をも対象としている点が興味深い[5.7-7]。

今後のヒューマンエラーに関する技術的動向は、犯人探しのための個人責任追求型ではなく、再発防止のための原因究明型とすることで、参加型人間工学の技術を導入し、組織の安全意識を高めることが重要となる。

5. 7. 3 シミュレーションと信頼性についての今後

現状の技術的特長とその事例、現象を、表 5.7-2に示す。

ひとつは、短寿命化である。これは製品が使用されている期間が短くなってきて、製品が使用可能な状態で廃却されてしまうことである。よって、初期故障を直すよりも新しい機能の開発に力が注がれているということで、信頼性という概念が欠如してくるのではないかと危惧される。

次は、人工物の複雑化、複合化、統合化が同時に進行しているということである。最近、 航空機搭乗システム、銀行オンラインシステム、電話の不通等の障害により社会的損失を 多く出している。さらに、アイテムの対象に人間がかかわると、医療事故、バイオエフェ クト、環境問題、ヒューマンエラーのようにその影響を直接確認できないし、長期間のデ ータで推測する以外に方法がない状況の克服手法が重要課題となる。これはまさにシミュ レーションが活躍する領域と理解する。

例えば、1度しか設計されない大規模システムや非常にまれにしか動作しないようなシステムは、ソフトウェア欠陥の排除、機能の確認、異常時対応や緊急事態の処置をシミュレーションで確認するしか方法がない。

技術的特長	事例	現象	30 年後のロードマップ イメージ
短寿命化	携帯電話 家電製品	初期故障が大きいが直 さない	初期故障を少なくする 手法の開発
複雑化 複合化 統合化	・カードシステム・航空機搭乗システム・銀行オンライン・電話の不通・医療事故・バイオエフェクト・環境問題・宇宙船・ヒューマンエラー	・社会的混乱が大 ・システム更新が困難 ・確率的影響と確定的 影響の混在 ・現象の再現性がない ・対象物での試験・検証 が不可能	・自己診断機能 ・自動運転 ・修復機能 ・機能増殖 ・医療ロボット ・安全文化 ^[用語] の醸成 と常識化 ・緊急事態の安全対応

表 5.7-2 シミュレーション技術と信頼性の今後

人間は誤りを起こす。それを避ける方法のひとつは、人間の介在を少なくすること、即ち自動化で、他のひとつは、誤りを起こさないように常に訓練をすることである。前者は、 交通機関の自動運転、製造業におけるロボットなどであり、後者は、医療ロボットのよう に直接対象物では十分な訓練ができない場合のシミュレーションによる対応が有効である。

機能の複合化・統合化については、産業用機器およびシステムは、いろいろな機能が複合化してきているが、基本機能はあまり変わらない。物やサービスの提供を受けて、代金を払うという行為、また、端末機の基本機能である情報の読み取りは、POS [用語]、ATM [用語]、

ゲート、売店等異なる端末機であるが機能は同一である。携帯のカードや携帯電話等で仕様の統一によりすべての機能は共通化できる。さらに、決済処理機能なども機能の共用化ができると考える。

これによるメリットは、異常時対応の情報提供、システム全体として機能の補完、情報の共用化ができることであり、それによりサービスの向上が格段と向上する。

医療の信頼・安全に関しては、医療は人間による人間への処置であり、ヒューマンエラーが考えられる。ヒューマンエラーの対応として訓練がある。シミュレーション医学教育は、日本では、単純なマネキンを用いた心肺蘇生法教育や看護教育は既にかなり普及しているが、ダイナミック・シミュレータを用いた医学教育は未だ殆ど行われていない。

実地臨床に即したさまざまなモデルを開発・普及させることにより、医学教育手法を開発し、知識、技能、判断力に優れた医師、看護師、救急救命士を育成すると共に、patient safety を高めるための研究も平行して行い、医療に対する国民の信頼を回復させることが求められている。

5. 7. 4 まとめ

現在社会においては、信頼性の対象に人間が含まれるようになってきたために、部品からシステム、さらに人間の生活環境をも含め、安全性と深くかかわる広い意味での信頼性の概念が議論されてきている。

危険がないということはありえない、しかし危険を現在より少なくすることは可能である。そのためには、人間環境のあり方を基本的に検討することが重要であり、信頼性・安全性の概念を地球規模で考える必要がある。その際、実際のシステムで実験できない環境や莫大な費用を必要とする情況、システムが複雑でサブシステムに分解して評価をしなければならない場合にシミュレーションが絶対的に必要である。

この意味で、信頼性と安全性についての新たな認識を深め、シミュレーションとの融合を図り、さらに、信頼性・安全性が満足できるような社会システムをシミュレーションの発展とともに実現することが重要である。

参考文献

- [5.7-1] 信頼性の歴史, 日本信頼性学会, 1993年11月.
- [5.7-2] 古川武彦: 天気予報と信頼性の評価, 信頼性, **26**(4), pp. 120-129, 2004.
- [5.7-3] 勅使河原正臣: 建築構造物の安全性向上に向けて, 信頼性, **27** (1), pp. 8-14, 2005
- [5.7-4] 影沢政隆: 高度道路交通システムにおける信頼性について, 信頼性, **25** (7), pp. 421-430, 2003.
- [5.7-5] フレキシブル信号システムに関する共同研究委員会: フレキシブル信号システム 研究委員会報告,電気学会技術報告第1007号,2005.

[5.7-6] 益子 邦洋: 医療における信頼性確保の方策,信頼性,**24**(3), pp. 121-126, 2002. [5.7-7] 谷井克則: 安全に係わる個人要因と組織要因, 信頼性,**26**(11), pp. 636-643, 2004.

<u>用語</u>

数值予報:

予報技術には、経験的予報、統計的予報、物理的(力学的予報)がある。数値予報とは、気象現象を支配する物理法則に則って導かれた「支配予報方程式系」に、初期条件(世界一斉の定時観測の値など)を与えて、数値的に時間積分を行い、時間的に先の気温や風の場を予測することである。

アンサンブル予報:

従来の単一の初期値に基づく単一の予測値を求める手法と異なり、集団的な初期 値群と対応する予測値群を得る手法 アンサンブル予報に基づく確率的予報。

GPV (グリッドポイントバリュー):

予報モデルの計算結果は仮想的な格子点上で得られこの格子点の値(気圧、風、 温度、湿度など)を GPV と言う。

走行誘導制御システム:

路車間通信システムを用いて、道路側に車両センサーや障害物センサーおよび路車間通信装置を設置しセンサーの情報を通信して、本来検知できない部分の情報を取得し、交差点の衝突、曲線の対向車などを車両側に情報として伝えることで事故予防をすることを目的としている。

安全文化:

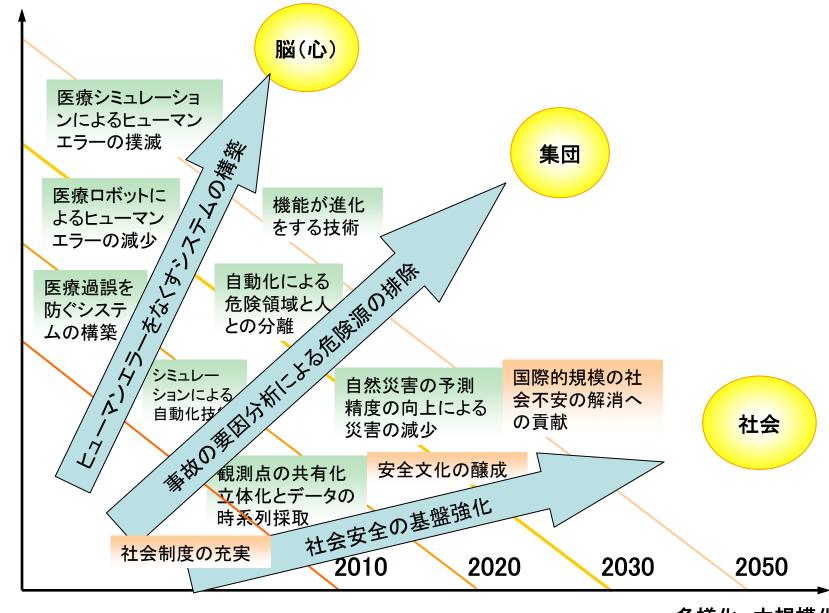
国際原子力機関(IAEA)では、安全文化の定義について、1991 年に発表した国際原子力安全諮問グループ(INSAG)の INSAG-4 (Safety Culture 報告書)の中で、「原子力の安全問題に、その重要性にふさわしい注意が必ず最優先で払われるようにするために、組織と個人が備えるべき統合された認識や気質であり、態度である」と定義付けている。

POS (Point of Sale) :

販売時点情報管理と訳され、小売店等での物品販売の商品名、価格、数量、販売 日時などの売上実績を単品単位で集計する手法。

ATM (Automated Teller Machine) :

金融機関や現金出納を行う事業者が提供するサービスで、顧客自身が操作して取引できる機械のことであるが、小売店や公共設備等に広く設備され現金を介さない取引にも利用されるようになった。自動取引装置、自動窓口機とも呼ばれる。



多様化、大規模化

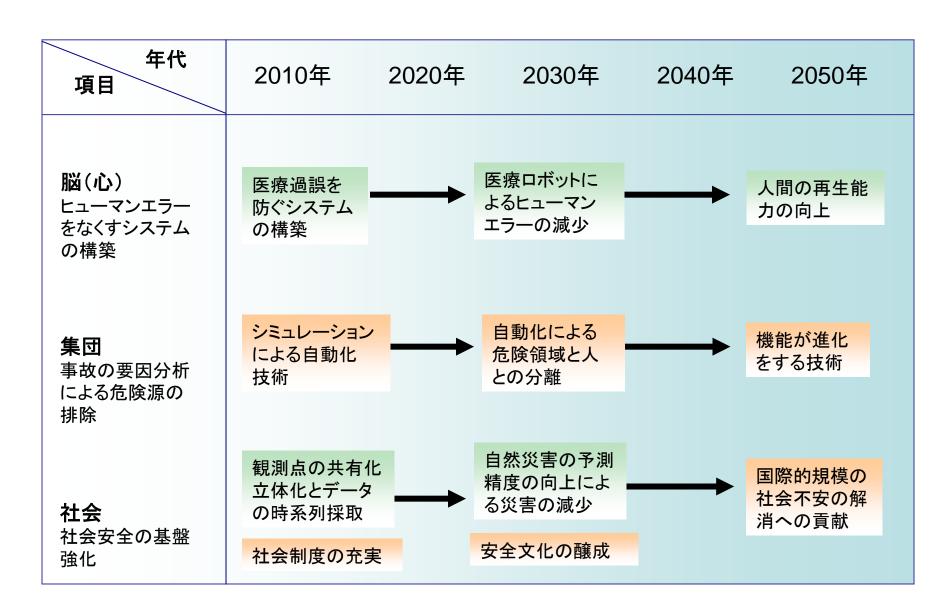


図5.7-2 人間社会シミュレーション領域のロードマップ

5.8 地球観測技術と防災・環境分野でのシミュレーション

防災・環境分野におけるシミュレーション技術としては、大規模な地球環境変動予測から、斜面崩壊などの局所現象の予測に関わるものまで、極めて広い対象と技術分野が含まれることとなる。こうした中で、ここでは主としてリモートセンシング^{【用語】}を初めとする地球観測技術とシミュレーションの関係を中心に検討を行うものとする。

なお、ここでは、幅広い防災・環境分野のうち、①自然災害予測、②気象予測、③地球環境予測の3項目についてまとめるものとする。

5.8.1 自然災害の予知・予測

自然災害には、地震、火山災害、台風等の風水害、土砂災害、雪氷災害等に加えて、旱魃や異常高温などがある。以下に、地震、洪水、火山、土砂災害について地球観測技術とシミュレーションの現状と今後の技術開発で解決すべき課題と方向性について示す。なお、雪氷災害や旱魃、異常高温、低温などの気象災害があるが、これらについては気象条件が大きく影響しており、次章で示す気象予測の検討対象に含まれるものと考えられる。

(1) 地震災害

地震に関しては既に世界中の研究機関においてその発生予知技術が研究されているが、その発生メカニズムの複雑さに加えて観測体制を構築するためにも多大な費用を要することなどから、これらの技術は現時点では実用化の域には達していないものと判断される。なお、2007年10月からは地震発生の直前予報として緊急地震速報が報じられるようになったが、これは地震発生数日~数時間前の予知が極めて困難であることから、地震発生直後に警報を発し、被害を減少させる試みであることは周知の通りである。

これに対して、現在この分野における、地球観測データを用いたシミュレーションとしては、地震による被害発生状況の把握^[5.8-1]、発生後の火災による延焼予測や避難予測に用いるための研究等が進められている^[5.8-2]。 しかし、現段階では観測周期や気象条件などによりデータ取得頻度が期待されるほど上がっていないことなどの問題点が指摘されており、シミュレーション技術の高度化以上に観測技術の高度化やネットワーク化が課題であると考えられる。こうした課題に対しては、衛星観測網の充実に加えて、全天候型センサーである合成開口レーダー(SAR)^[用語]や航空機等の活用技術も含めた機動性に富んだ観測技術の開発が必要である。

今後、リアルタイムで必要な観測データが取得されるようになった場合、災害発生後の 状況把握や復旧のための情報取得において、地球観測データは大きく貢献することが予想 され、こうした情報をもとにしたシミュレーションによって最適な救助・復旧計画の立案 が可能になるものと考えられる。

(2) 洪水

現在、台風や梅雨前線による洪水の被害を予測し、防災計画を進める上で、ハザードマップ 【用語】の整備が各方面で進められている。この中で、地形、土地利用などの地理情報 【用語】

の作成においてはさまざまな地球観測データが用いられ、また洪水範囲の予測などのシミュレーション技術において利用されている^[5.8-3]。一方で、降雨状況の変化により予想を超える水位上昇が生じたり、独居老人世帯の増加など社会構造の変化によって災害の発生形態が変わりつつあり、防災体制についても再構築が求められている。このため、よりきめ細かな気象予測技術の開発と合わせて、常に最新の土地利用状況や住居状況の把握などに利用できる各種観測技術や情報収集システムとともに、実際に災害弱者救済に適用可能な洪水予測シミュレーション技術の開発・高度化などが望まれている。すなわち、洪水による被害軽減に対しては、洪水発生の素因となる地形や土地利用、住民情報などの情報基盤の整備と、降雨量や範囲などを正確に予測する気象観測技術との融合が大きな効果をもたらすものと考えられる。

一方、近年は、極めて限定された範囲に短時間で大量の降雨をもたらす、いわゆる「ゲリラ豪雨^{【用語】}」の多発や、豪雨と旱魃が繰り返し生じる現象などが世界中で見られるようになってきた。これらの現象の発生要因には、地球温暖化の影響があるとされており、今後は地球環境問題と災害発生との関連性を評価できる地球観測データの整備とこれらを用いた降雨予測等のシミュレーション技術が必要となってきている。

(3) 火山災害

火山災害は、他の自然災害に比較して観測対象が限定されており、有珠山や桜島など活動が活発な火山に対しては地震計や監視カメラなどの装置による観測体制も充実してきたため、こうした火山では有効な災害予測が可能となりつつある。しかし、富士山や浅間山など過去に噴火による大きな被害を出したものの、その後の活動が活発ではない火山に対しては、防災面ではまだ不十分な面があることは否めない。さらに、より長い間隔で巨大噴火が発生している南九州の巨大火山群等においては学術的な情報も少なく、噴火の予測や防災に資することができる情報は十分ではない。

こうした火山災害については、洪水と同様に溶岩流・火砕流および土石流等の流下範囲や降灰域等を予測したハザードマップが作られている。また、最近では合成開口レーダーによるインターフェロメトリ^{【用語】}技術により、広範囲の地盤変動の把握が可能となりつつある^{[5.8-4],[5.8-5]など}。

以上のように、火山災害においては、特定の火山に対しては、現段階でも地球観測データや被害範囲予測シミュレーション技術が防災に大きく寄与しているが、それ以外の火山に対しては、観測網の整備を進めると同時に、データが少ない中での被害予測を行うことができるシミュレーション技術の開発が望まれている。

(4) 土砂災害

地すべり、斜面崩壊、土石流などの土砂災害は、小規模なものは民家の裏山の崩壊から 大規模なものは数 km²以上におよぶ巨大地すべりまでさまざまな規模・形態のものがある。 また、その発生誘因は豪雨や地震に伴うものも多いが、建設工事など人為的なものも少な くなく、多岐に渡っている。このため、斜面の安定性評価については、これまで砂防分野 と土木分野を中心に研究が行われてきた。この中で、建設工事に伴う特定斜面の安定解析 技術は広く普及しているが、広域を対象とした土砂災害の発生(位置、規模、時期)を正 確に予測できるシミュレーション技術はまだ開発されていない。

こうしたことから、広域を対象とした土砂災害の予測を現地における直接計測によらず 効率よく実現する上では、人工衛星による高分解能データ^{【用語】}を高頻度で取得するための 観測体制の構築と同時に、高い精度で斜面の安定性を評価するためのシミュレーション技 術が求められている。また、この分野では地質構造が崩壊要因として大きく影響すること が多いが、現在の地質情報は必ずしも十分ではなく、精密な地質情報を効率よく収集する ための技術開発も、シミュレーションの精度向上においては強く望まれている。

(5) 自然災害の予知・予測における技術開発

上述したように、自然災害は、その発生状況やそれに対する防災対策の技術的なレベルも多様である。このため、自然災害予測という範疇に対する今後の技術開発におけるロードマップは本来ならば、個別の災害に対して、個々に検討する必要があるものと考えられる。こうしたことから、ここでは、大局的に自然災害を捉えて、発生予測に対するシミュレーション技術の研究開発の方向性について以下にまとめて示した。また、自然災害予測・防災と地球観測技術とシミュレーションの関連性について図5.8-1にその概念を示した。

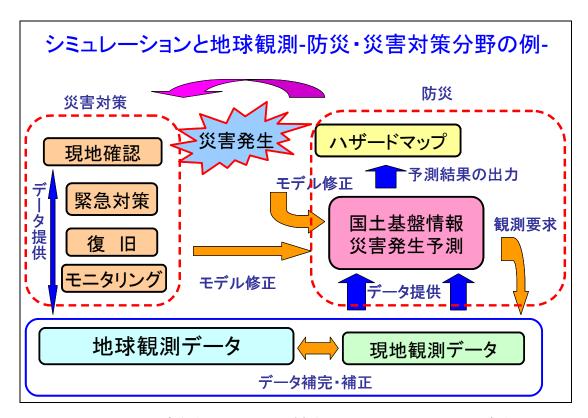


図 5.8-1 防災分野における地球観測とシミュレーションの関連性

この図に示したように、自然災害の予測においては、観測・蓄積されたデータをもとに 災害予測(シミュレーション)が行われ、防災計画(ハザードマップ作成など)が検討さ れる。さらに、実際の災害や自然現象の発生を経て、予測モデル(シミュレーション技術) が改良され、それに応じてさらに必要なデータが収集されるというサイクルを繰り返すこ とが必要である。こうした検討サイクルにより災害発生予測の精度は徐々に向上するもの と考えられる。

なお、ここでいうシミュレーション技術の改良とは、例えば岩盤崩壊などのシミュレーションにおいて、弾性モデルから弾塑性モデルへ、連続体から不連続体モデルへ、2次元から3次元モデルへと進化するようなものであり、コンピュータ技術の進展に伴って発達してきたものである。こうした解析技術の発展は、今後もより高速で大容量の計算が可能となることにより大きく進展するものと考えられる。以下に災害分野におけるシミュレーションの今後の展望と課題を整理する。

- ①自然災害の発生位置・規模の予測:リモートセンシングや各種地理情報などを用いて 広域防災で実用レベルに達することが可能と考えられる。このためには、観測技術の 高度化と観測網の充実が不可欠であり、合わせて災害発生メカニズム(またはプロセ ス)の研究などに立脚したシミュレーション技術の開発が必要である。
- ②災害発生時期の予測:洪水発生時期については、データ取得頻度を大幅に向上させるための観測体制の充実と、高精度の気象観測により実用レベルの予測が可能となるものと考えられる。火山災害や土砂災害について現地観測網の充実が実現されれば、比較的精度の高い予測が可能となるものと思われるが、こうした観測が行われていない範囲での予測は困難であり、類似の事例などをベースにした被害発生シミュレーションなどの果たす役割はいっそう大きいものと考えられる。一方、地震の発生時期の予測は、高密度の現地観測網を構築することにより、ある程度は予測可能になるものと思われるが、実用レベルの予測の実現には大きな課題があるものと思われ、今後も地震発生後の被害予測や避難誘導においてシミュレーション技術の重要性が増すものと想定される。
- ③地球観測体制:災害に対する常時観測体制が整うことによって、土砂災害のように比較的小規模なものに対しては局所的な予測が、また火山や洪水などの予測においてはリアルタイム予測の実現に近づくものと考えられる。これには、必要な分解能のデータが必要な時に入手され、特殊な処理などを必要とせずに実現できる、いわば「ユビキタスリモートセンシング」技術の確立が必要であると考えられる。
- ④周辺環境の整備:技術的な高度化に合わせて、こうした観測結果やシミュレーション 結果を効果的に防災に活用するための法整備や観測体制の構築が必要である。また、 リモートセンシングなどの分野における技術を下支えするためには、民間における新 規市場開拓などの努力も不可欠であると思われる。

5.8.2 気象予測における技術開発

気象予測分野においては、既に天気予報において人工衛星データが活用され、数値予報が導入されて以降はかなり高い精度での予報が実現している。また、地球シミュレータ^{[5.8-6],} [用語] のような高度なシミュレーション技術も用いられるようになってきた。このように、

この分野は地球観測においてもシミュレーションにおいても、他の分野に比較して実用化がかなり進んでいる分野であると言うことができる。特に、台風の進路予想や一週間程度の天気予報の精度はかなり向上しているのは周知のとおりであるが、後述する局所的な気象現象やより長期の予想においては、今後の技術開発を必要とする項目が少なくない。局所的な気象現象としては、竜巻や前述の「ゲリラ豪雨」などがあるが、こうした中で、竜巻については 2008 年より一般向けの予報が発せられるようになったが、その的中確率は10%程度とされており、今後のデータ蓄積と予測技術の高度化が強く望まれている。これらの気象現象は、現在の観測網や人工衛星観測システムのみでは捉えきれない現象であるため、今後はメソスケールまたはさらに局所的なスケールでの気象現象を対象とした観測システムの構築が必要になるものと考えられる。また、こうした現象は極めて短時間で発生することから、観測の時間間隔もより小さくすることが必要である。合わせて、こうした現象はまだ、その発生メカニズムも十分に解明されていないことから、気象学や流体力学等での研究成果を反映したシミュレーション技術の高度化が不可欠である。

一方、長期予報も現在のレベルではまだ精度が高くないことから、より長期の高精度予報に関わる技術開発が必要となっている。これは、1ヵ月、半年または1年以上という時間スケールとなった場合、初期条件のわずかな差が大きく解析結果に影響することから、さらに詳細な観測データと高度なシミュレーションデータが必要となるものと考えられる。このように観測技術と予測技術の高度化により気象における中~小規模予測および長期予測が可能となるものと考えられる。また、気象現象の予測においては地球規模での観測網の構築が不可欠であるため、国際的な観測・協力体制を発展させていくことが重要である。

以上のように、観測網の充実と気象予測シミュレーション技術の高度化によって、規模としては中・小規模の予測が、時期的には半年以上の長期に渡る高精度予想が可能となるものと思われる。気象分野における観測とシミュレーションの関連性について図 5.8-2 に示した。この図に示したように、気象分野も防災分野と同様にシミュレーション技術と観測技術は相互に関連しあって、双方がうまく噛み合うことにより予測精度が向上し、観測システムも高度化していくと言うことができる。

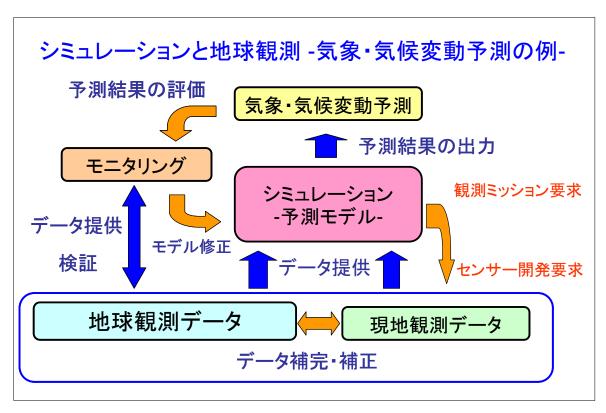


図 5.8-2 気象分野における地球観測とシミュレーションの関連性

5.8.3 地球環境予測

地球環境分野では、前述の地球シミュレータによる未来予測が行われており、地球温暖化や砂漠化などの研究が進められている。こうした技術は気象予測分野とも共通する部分が多く、大気や海洋に関するさまざまな観測データを用いてそれらの相互関係を検討する研究も進められている。すなわち、地球環境変動の正確な予測においては、高度で緻密な観測データの収集ネットワークとそれらを適切に取り扱うことが可能な高度なシミュレーション技術が必要である。

また、地球環境予測においては、人間活動との因果関係の評価や、人間活動によるインパクトのシミュレーションデータへの入力方法などが大きな意味を持ってくる。例えば、森林伐採や植林が地球環境に与える影響や、人口増加と CO_2 排出量の関連性や温暖化と海面上昇の関連性などは、気象予測でも重要であるが、地球環境分野で特に大きな検討課題である。

一方で、自然災害発生状況も近年、大きく変化する傾向を示しており、地球環境問題と 気象条件および自然災害の発生が密接に関係していることが指摘されている^[5.8-7]。具体的 には、東南アジア諸国による森林伐採により、土壌保水能力が低下し、下流域での大規模 水害の発生や、温暖化に伴う氷河の縮小が氷河湖の決壊危険性を増大させているとの指摘 があり、これ以外にも多くの現象について相互の関連性が検討されている。

このように、ここで取り上げた自然災害、気象、地球環境はそれぞれが密接に関連しており、これまでも述べてきたように高度な観測体制とシミュレーション技術の高度化がそ

れぞれの項目の予測精度を向上させ、多様な現象に対応できるようにするためには極めて重要となってくる。また、この分野の研究は京都議定書やバリロードマップに基づく国際的な CO_2 削減目標の達成においても極めて重要な位置付けにあることから、国家戦略として今後も加速度的に関連技術の開発が進展することが予想され、現時点ではモデルによって大きな差が生じている CO_2 排出量と海水面変動のより正確なシミュレーションが可能となってくるものと考えられる。

こうした技術の進展は、現在世界各国で取り組んでいる CO_2 削減に向けた努力が今後の地球環境変動にどのように影響してくるかを正しく推測するためには不可欠であり、その結果を新たな行動目標に反映させると言った、人類が今後取り組むべき課題を明確にする上でも非常に大きな役割を担っているものと言うことができる。

参考文献

- [5.8-1] 安部真理子,成行義文,源貴志,平尾 潔:垂直航空写真の輪郭線情報に基づく 建物被害エリアの判別に関する基礎的研究,第 31 回土木情報利用技術論文集, 2006 など.
- [5.8-2] 辻原治,寺田和啓,澤田勉:延焼解析に基づく地震火災消火優先順位意思決定支援システムに関する研究,第32回土木情報利用技術論文集,2007 など.
- [5.8-3] 建設省土木研究所: 氾濫シミュレーションマニュアル(案), 1996 など.
- [5.8-4] 大倉博: インターフェロメトリ SAR による岩手山の火山性地殻変動の検出. 岩手山の火山活動に関する研究, 平成 10 年度科学技術振興調整費成果報告書, pp. 42-54. 2001 など.
- [5.8-5] 飛田幹男: SAR 画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動,変動速度,体積変化,国土地理院時報第95集,pp.37-48,2000.
- [5.8-6] 海洋研究開発機構: 地球シミュレータセンター 研究推進室ホームページ, http://www.es. jamstec.go. jp/index.html.
- [5.8-7] K. Sakamoto, Y. Otsuka, H. Kasa, N. Tsuda, T. Chaishi: Geohazards in Asia and the Role of Engineering Geology, Asian Regional Conference on Geohazard in Engineering Geology, 2007.

用語

リモートセンシング:

人工衛星や航空機に搭載された各種センサーにより気象、地形、地質、土地利用、 植生、海洋などのさまざまな対象を計測する技術の総称であり、可視・近赤外線領 域センサーやマイクロ波を用いたレーダーなどが用いられる。

合成開口レーダー(SAR):

Synthetic Aperture Radar の略で、人工衛星や航空機に搭載し、移動しながらレ

ーダー観測を行うことにより仮想的に大きなアンテナを有するレーダーを構築する 技術で、高い地上分解能の情報を取得できる。

ハザードマップ:

洪水や土砂災害などの被害区域やその規模を想定し、その予測結果を地図情報として示したもので、通常、自治体等が整備し、その情報を公開することで住民の防災意識を高めるとともに、地域防災計画に活用される。2000 年の有珠山の噴火災害等で活用された実績がある。

地理情報:

空間情報と呼ばれることもあり、地球上の位置情報と関連付けられた各種の情報。一般的には地図情報として提供され、デジタル情報としてGIS(地理情報システム)によってさまざまな分析を行うことができる。防災や環境分野では地形・地質などの自然情報や土地利用などの人為的な情報とが複雑に作用しあうことが多く、こうした分析には地理情報が不可欠である。

ゲリラ豪雨:

降雨の範囲が極めて局所的で、短時間に非常に大量の降雨量がある雨のことで、特に都市部で顕著に発生していることから都市型のゲリラ降雨と言われており、建造物の地下室での被災など新しい災害形態が生じている。発生原因ははっきり解明されていないが、ヒートアイランド現象も要因の一つといわれている。

インターフェロメトリ:

SAR を用いた解析技術の一つであり、同一地点を異なった日時で観測したデータを干渉させることで地表面のわずかな変位について検出する技術。これにより地震前後の地盤の隆起・沈降状況を面的に把握することが可能であり、阪神淡路大震災前後での淡路島の地殻変動が明瞭に捉えられた事例などがある。

高分解能衛星データ:

高い地上分解能を有する衛星データを示す。時代によって、高分解能衛星データと呼ばれるものは異なっているが、現時点では地上分解能1mクラスの分解能を有したデータを示すことが一般的である。最新の商用人工衛星データでは地上分解能60cm程度のものもあり、空中写真の代替としての利用も広く行われている。

地球シミュレータ:

海洋科学技術センターが保有するスーパーコンピュータのことで、スーパーコンピュータ 640 ノードを高速ネットワークで接続し、コンピュータ上に仮想的な地球モデルを構築している。これによって、地球規模の気候や海洋の変動などをシミュレーションすることができ、地球温暖化の予測などに威力を発揮するものと期待されている。

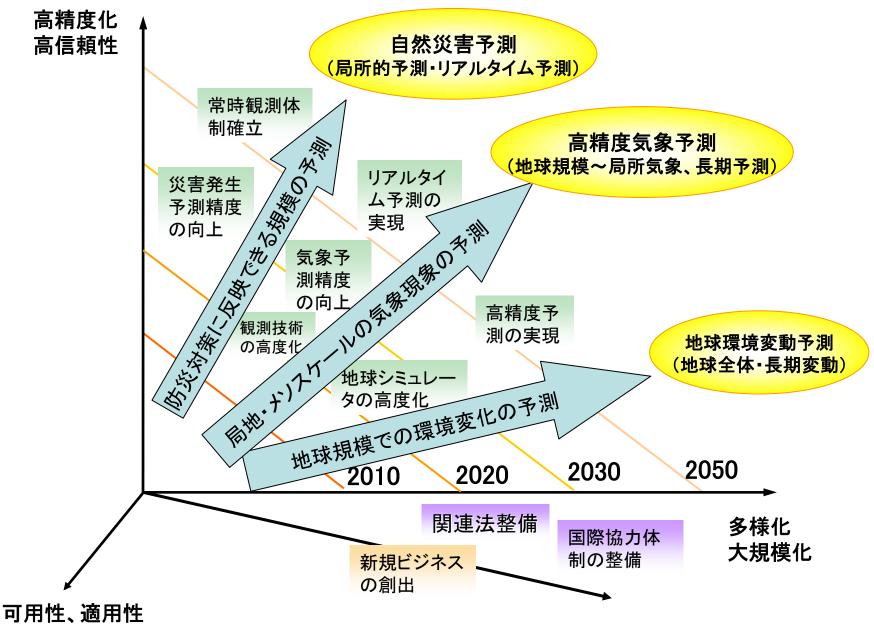


図5.8-3 防災・環境とシミュレーション領域のロードマップイメージ

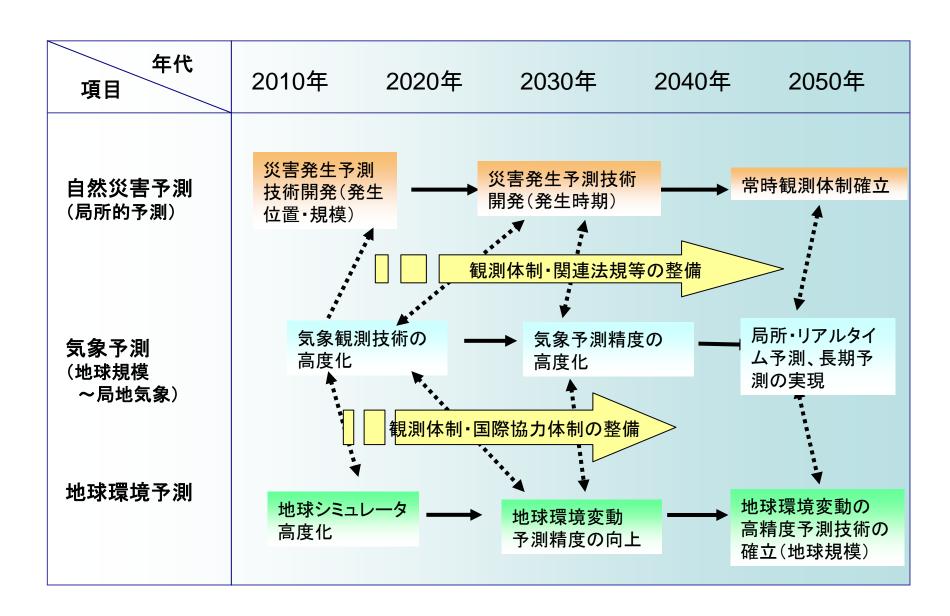


図5.8-4 防災・環境とシミュレーション領域のロードマップ

5. 9 人間回帰としての可視化技術

シミュレーション技術の向上によりこれまでは思いもよらなかった複雑高度化された問題に対する適用も行われるようになってきた。複雑高度化した問題に対応するモデルを使ったシミュレーション結果の解釈を一専門家だけに委ねるのは困難であり、したがって関連する複数の専門家による解釈が必須となる。この場合、背景の異なる人間の共通言語のひとつが視覚であることを考えると、可視化技術が重要となることが理解できる。膨大なシミュレーション結果をいかに迅速に検討できるか、また第三者にわかってもらえるかが勝負になる。 "百聞一見に如かず"のように百ページの数値表を一ページの図で理解させる可視化技術は重要で、シミュレーション技術の研究には欠かせない技術である [5.9-1]。本稿では、「シミュレーション技術が人間をより知的にするために、可視化技術が重要な役割を果たしてほしい」という願いをこめて、アカデミック・ロードマップ作成を行った。

5.9.1 可視化技術の高度化

可視化という言葉が市民権を得るようになったのは、ACM から ViSC (Visualization in Scientific Computing) レポートが出版された 1987 年である。この年は可視化元年と位置付けられている。これ以降、コンピュータグラフィックス研究の世界的権威である国際会議 SIGGRAPH において、等値面表示 [用語] やボリュームレンダリング [用語] 表示など多くの可視化技術が提案され、科学技術計算分野や医用画像処理における可視化技術の認知度は十分に広まった。現在では最新の可視化技術の発表の場として国際会議 IEEE Visualizationの地位が確固たるものとなった。

2007 年時点でもボリュームレンダリングに代表される基本的可視化技術の性能向上に関する発表が今なお活発であるように、シミュレーション高度化・複雑化への対応が今後も重要なテーマと考えられる。特に大規模分散環境でのシミュレーション結果については単一のシステム資源に集めることが困難であるために、分散されたシミュレーション結果をどこかの局面でひとつに集合させる必要のある可視化処理では、いかにボトルネックを回避するかについて画期的な技術の提案が期待されている。

問題に対する適用範囲が広がるにつれてシミュレーションモデルの精度への要求も高くなっている。シミュレーションモデルの精度を向上させるにはデータマイニング技術を相補的に活用する必要がある。シミュレーション技術は、数学モデルがきちんと確立している場合には予測技術として有効である。ところが背景となる原理が複雑あるいは不明確な場合、データマイニング技術を利用すれば、簡単なモデルを仮定しそのモデルパラメータを多くの実例から予測することでモデル精度を向上させることができる。データマイニング技術は、このような場合有効となる[5.9-2]。

シミュレーション技術にとっては、データマイニング技術と可視化技術とが融合したビジュアルデータマイニング技術が重要となってくるものと考える。ビジュアルデータマイニングとは、多量のシミュレーション結果から意味のあるデータを発掘するという研究、およびそのための新しいアルゴリズムの開発に関する研究である。可視化情報学会ではビジュアルデータマイニング研究会[5.9-3]を立ち上げ 2002 年に開催された第4回研究会では

"ビジュアルデータマイニングとは"と題したパネル討論が開催され、ビジュアルデータマイニングの本質的意義 "AI (Artificial Intelligence) から IA (Intelligence Amplification) へ"すなわち "発掘の主体は、計算機ではなく、あくまでも人間であること"を再確認することができた。

企業におけるものづくりでは、設計時の性能評価や製品使用時の不具合原因解析におい て、すなわち製品のライフサイクルの初めと終わりにおいて、計算力学に代表されるシミ ュレーション技術は必要不可欠となっている。製品のライフサイクル全体にわたって、例 えば製品の通常使用時にバックグラウンドでシミュレーションプログラムが稼動していれ ば、劣悪環境使用における製品故障を予防する可能性が高くなると期待できる。ノートパ ソコンなどは、設計者には思いもよらない環境で使用され、熱的には負担の大きい状況が 発生しうる。環境情報をもとに熱解析を実行し、熱的に問題がある場合には警告を発する ことはユーザーやメーカーにとっても有益と考えられる。ノートパソコンよりも安全性・ 信頼性が重視されるような、橋・建物といった構造物については通常使用時のシミュレー ション技術の利用はより重要であろう。今後、シミュレーション研究においては、いつで も・どこでも構造物を見守ってくれているシミュレーション(ユビキタスシミュレーショ ンと言うのが適切であろうか)への熟成に向けた活動が望まれる。ユビキタスシミュレー ションが実現され、いつでもどこでもシミュレーション結果が可視化されて多くのユーザ ーに提示されると仮定すると、ユーザーを巻き込んだシミュレーションモデルの高精度化 が可能となる。このときリモート可視化技術やビジュアルデータマイニング技術の役割が 重要となってくる。

5.9.2 可視化効能の明確化

最近では、情報爆発時代における不可欠な技術として情報可視化技術「用部」の開発や先進的利用が注目されるようになってきた。また、隠蔽するよりも開示することのメリットを強調する観点で、テレビ番組においても可視化という言葉を耳にするようになっている。可視化は人類共通の言語であり、意識に直接働きかけるという効能をもっている。可視化元年からほぼ 20 年経って IEEE から出版された VRC (Visualization Research Challenges Report) レポートでは、現在は、可視化技術の整備から可視化の意義:よい可視化とは何か?の探求に焦点が移ってきていると強調されている。よい可視化とは、遠藤功著の「見える化」でも述べられているように、行動誘引になるかどうか、すなわち人々のやる気を起こすきっかけや未知の現象を理解する手がかりになるかどうかで判断されるであろう。日本では、世界に先駆け、「見える化」の効能をものづくりの現場に活用してきた。また、意識を「見える化」するマンガに代表されるビジュアルメディアはすでに世界に誇る文化といっても過言ではないであろう。今後、脳認知科学枠組み理論[5.9-4]の発展に伴って、おぼろげながら世間で認められつつある可視化の効能が科学的に明確にされていくものと考える。

世の中全般を眺めると科学技術の発展により物事が便利になっている反面、大量の製造物や多量のエネルギー消費によりこれまで想像し得なかった解決困難な問題が噴出してい

る。インターネット技術の発展によりグローバリゼーションが促進され、これらの問題が複雑高度化している。複雑高度化された問題を適切にモデル化し、その挙動をさまざまな観点で観察することを可能とするシミュレーション技術が"仮説発見"にとって重要であることは多くの人が認めるところである。シミュレーション技術により発見された仮説を信頼性の担保された手段で検証することにより仮説は知識へと昇華する。

ここで、シミュレーションによる知識創造について考えてみよう。野中郁次郎らの提唱する知識創造理論^[5.9-5]で知識創造において重要とされる相互作用の対象一形式知と暗黙知ーにおいて、前者はシミュレーションの拠り所とする数学モデルに、そして後者はメンタルモデルに対応すると仮定することができる。シミュレーションというと計算機によって実現されると思われているが、Jeff Hawkins は人間の頭脳では常にある種のシミュレーションが行われ、その結果が人間の知性と関係すると述べている^[5.9-6]。脳内シミュレーションで構築されるモデルがメンタルモデルであると仮定すると、数学モデルとメンタルモデルとのインタフェースが可視化技術となる。これは、可視化を通してシミュレーションが人間の知性向上 -メンタルモデルの精錬- と関係があることを示唆している。脳科学の深化に伴い、意識の可視化 -メンタルモデルの可視化- 技術が開発され、これまで困難とされてきた暗黙知共有の実現に近づくものと期待される。

5.9.3 可視化効能の適用

シミュレーション技術は、特に横断型研究分野で見られる複雑高度化された問題を解決する糸口を与えるものとして期待がますます大きくなっていくであろう。横断型研究の例としては、地球規模の紛争解決手段の策定、地球規模の循環・環境変動の予測、次世代ものづくりの支援、効率的な創薬のプロセスの実現、そして個人毎に最適な薬剤や治療法を見出すオーダーメイド医療の実現などがある。これらを支援するシミュレーション技術は、高精度・高分解能化されていく傾向があり、そのシミュレーション結果は大規模・複雑化し、ある分野の専門家だけでは理解が困難となると予想される。

複数メンバーが地球規模の困難な問題を解決するために、明確化された可視化効能をうまく活かした遠隔協調研究支援環境を用いることとなろう。複数メンバーによる議論を促進するにはそれぞれの視点で可視化画像が提示される必要があるが、現在の表示装置では、多視点対応が十分ではない。一部、制限された視点数における多視点表示装置や解像度を犠牲にした全方位型表示装置が存在するが、複数メンバーによる議論を促進する段階にあるとは言えない状態である。

シミュレーション結果を共有できる遠隔協調研究支援環境の構築については、日本では、世界に先駆けて可視化技術の効能を認識し、IT プログラムのひとつの柱として可視化に関する国家プロジェクト「VizGrid(代表 北陸先端大学松澤照男教授)」を実施した。高速ネットワーク技術や高臨場感インタフェース技術といった多地点対応の可視化技術開発に必要とされる基盤が未整備の状況ながら、何十年もの先を見越した将来展望の開ける研究成果が残されたものと評価されている。

長期的には、コトつくりの基盤として可視化が重要な役割を担うものと予想する。コト

つくりとは、社会的課題の解決に役立つ真の「知の統合」を実現するために個別分野の「知の相互関係を探求」することとされている。知の統合という観点では、収斂技術^{【用語】}と深い関係があり、人間を知的にするという目標が共通している。相互関係といった数値ではないデータの可視化としては、最近発展の著しい情報可視化技術の果たす役割が大きくなるであろう。また、コトつくりの性能:「人間をどの程度知的にしたか」を評価する上でメンタルモデルの可視化は必要不可欠な基盤となることが期待される。

参考文献

- [5.9-1] 塩谷真: シミュレーションに思うこと、シミュレーション、23 (2)、1、2004.
- [5.9-2] 土肥俊: トランスレーショナルリサーチ, シミュレーション, 23 (1), 1, 2004.
- [5.9-3] 可視化情報学会研究会, http://www.vsj.or.jp/groupj.html.
- [5.9-4] 仁木和久: ヒト知能の再設計―脳イメージング研究からヒト構成的知能へ(日本認知科学会編)認知科学の探求,高次認知のコネクショニストモデル,共立出版, pp. 60-89, 2005.
- [5.9-5] I. Nonaka, H. Takeuchi: The Knowledge-Creating Company, Oxford University Press, 1995.
- [5.9-6] 小野治: 脳の中のシミュレーション,シミュレーション, 24 (2), 1, 2005.

用語

等値面表示:

3次元空間で定義されたスカラーデータ場(以降、3次元スカラー場)に対してデータ値が等しくなるような点の集合であり、一般的に曲面となる。立方格子で定義された3次元スカラー場から等値面を生成するためのアルゴリズムとしてはLorensenらが提案したマーチングキューブ法がよく用いられる。

ボリュームレンダリング:

3次元スカラー場を色のついた雲で表現する可視化手法のことであり、Sabella らの提案したアルゴリズムがよく用いられる。3次元スカラー場に対して定義される密度関数に従って発生させた不透明・発光粒子をスクリーンに投影して画像を生成する。

情報可視化技術:

データベースで扱うような多次元データ、階層データ、リンクデータなどを可視 化する技術のことである。情報爆発の問題を解決する技術として注目を浴びている。

収斂技術:

ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、情報技術および認知科学(4つの頭文字をまとめて"NBIC")の4分野を基盤とした科学技術の分野融合的な収斂を実現する技術として脚光を浴びている。

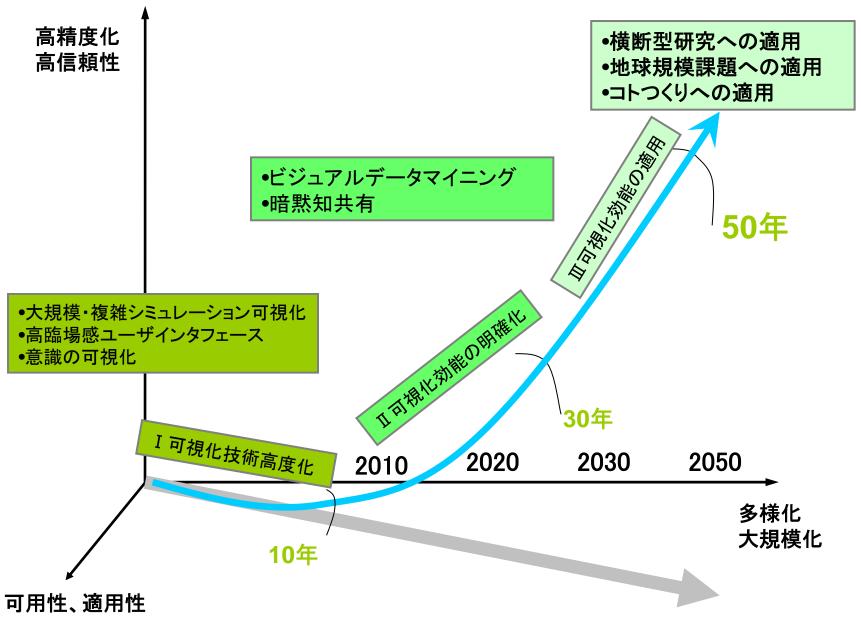


図5.9-1 可視化技術領域のロードマップイメージ

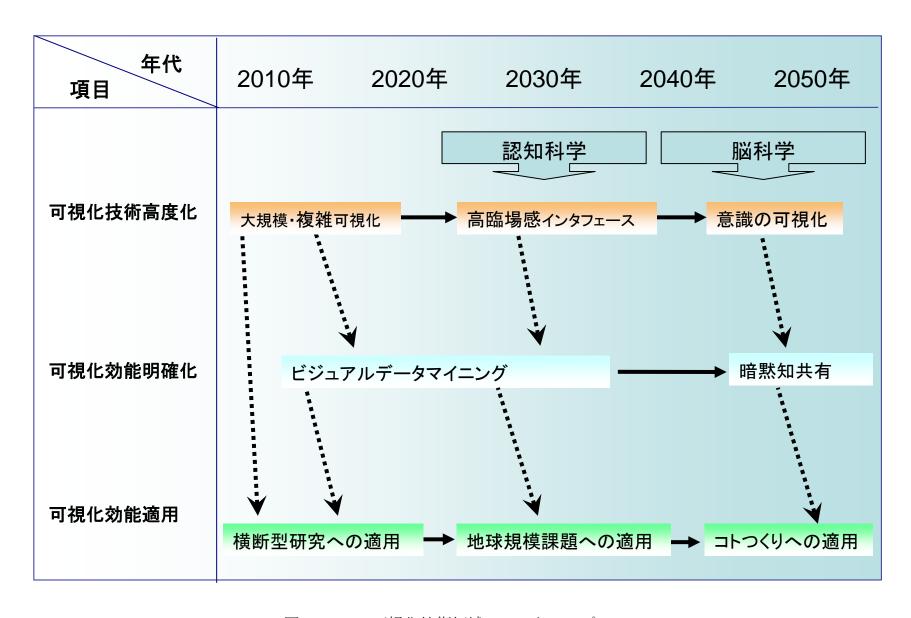


図5.9-2 可視化技術領域のロードマップ

5. 10 おわりに

シミュレーションとは「模擬すること」であると素朴には考えられる。「模擬する」ことは、現象のもたらす結果を予知する手段を与えるが、非常に複雑な現象を、巧みに予知できる「熟練工の技」もこれに当たるともいえる。「人間の知」とは何か、あるいは「知」を得る過程である「認識」とは何かという問への答の一つとして、「複雑なものをシンプルに模擬すること」あるいは「それが可能となること」もあり得る。模擬が「自在」にできれば、自然の理に従って自由に「もの」が造れることになる。(シミュレーションが高精度化すると"模擬"を超えた段階になる場合もある。その例を脚注¹に示す。)

さて、現代におけるシミュレーションにおいて、「計算機によるシミュレーション」は非常に大きなウエイトを占める。計算機の発明以来、「10年間で5倍」という指数関数的な性能向上を計算機は示してきた。現代の人間生活における計算機の発展に対する要望の高さは維持されるであろうから、今後50年間はこのような計算機性能の指数関数的な発展は継続されると仮定できそうである。「計算機によるシミュレーション」の特徴は、危険な材料や、廃棄物を生み出すことなく、さらには、ものを実際に造るという実験のコストも人的なあるいは社会的なリスクも伴うことなく、「自然科学の知」とそれに基づく「工学的創造」を生み出すことができる点にある。「計算機によるシミュレーション」は持続可能社会の基となる、低環境負荷の「自然科学知」と「工学的創造」のための仕組みを達成する手段と成り得る。

「シミュレーション技術のアカデミック・ロードマップ」を作成した目的は、今後 50 年間、計算機性能の指数関数的な発展は継続すると仮定した上で、「計算機によるシミュレーション」に重点をおいて、低環境負荷の「自然科学知」と「工学的創造」のための仕組みを達成する手段としてのシミュレーションについて、今後の 50 年間にわたる研究レベルでの課題と目標をサーベイすることであった。将来予測の議論を、

- (1) 「大規模化し多様化される方向性」
- (2) 「高精度化され、高信頼度を得る方向性」
- (3) 「可用性、適用性が増大する人間にやさしい技術となる方向性」
- の3次元的に論じていることも本ロードマップの特徴である。

以下に、各節ごとのまとめを述べ、最後に全体にわたる総括を述べることにしよう。

「5. 2 知識創造社会を支える未来デザイン技術としての統計科学と予測シミュレーション」では、「シミュレーションによる知識創造」のための学問体系構築の課題につい

 $^{^{1}}$ 注 実験を長年続けるだけでは得がたい知見をシミュレーションにより先んじて得ることがある例を、過去に見ることができる。

カーボンナノチューブの発見に触発された理論家が、グラファイトと同様の層状物質である窒化ホウ素によるナノチューブを思いつき、構造安定性の計算を行うと想像した物質は安定に存在することが示された。今日では、窒化ホウ素ナノチューブは実験的に生成されており、その物理的性質の研究は、実験による測定とシミュレーションによる予測がタイアップして続いている。(1993 年頃)

もうひとつの例は、かつて世界を騒がせた捏造論文、強電界によるキャリアー注入でフラーレン膜の高温超伝導が実現するとした実験的報告を、シミュレーションが否定したことである。実験で報告された超伝導を説明しようとした日米の大学の研究室で、正孔を多量に注入するシミュレーションを行うと、計算の過程でフラーレンが対称性を下げ、超伝導を実現するのに必要な高い電子の状態密度が達成できない、という結果が出ており、現在では計算結果は当然のこととして受け入れられている。(2003 年頃)

て議論している。「自然科学知」は帰依する点を「これ以上は分解できない自明の公理」 や「実験事実」から出発して万物を説明する「演繹知」の構築であると考える。これは古 代ギリシャの人々の環境・特性に基づく少なくも 2000 年強の伝統であり、その上に現代の 高度な科学技術が構築されてきた。「演繹知」パラダイムに対する他のパラダイムの「共 存」として、自然科学的「帰納知」パラダイム構築のための課題が今後 50 年間にわたって 研究され続けるであろうというのが本章の結論である。「実験」の設計において鍵をなす のは「原理」を抽出するための巧みなトリックであるのに対し、「計算による知の創出」 においてのそれは、容易に実質的に計算不可能となる計算複雑性の壁を破って「意味ある」 結果を出力することである。帰納モデリングにおける不確かさは「統計的モデル」あるい はパラメータに含ませる「幅」によって表現される。「平均値」や「分散」のようなスカ ラー量は巧みに計算する手法を創出できる可能性が高いが、統計モデルはより高次の統計 量の総体から成る「無限次元」的な統計量によって「知」の方向を指し示すことがある。 これからどうやって「単純性」を基本的属性とする「知」を創出するかが課題となる。一 方、パラメータの「幅」は、計算を進めるに当たって分解能を減少させ、「意味ある結果」 の創出を困難にする。また、解の集合を計算するのに NP 完全性以上のより高い計算複雑度 をもたらすこともある。このような困難をうまく回避して、「意味ある結果」を創出する ための「統計的手法」や「区間解析的手法」の研究がずっと続けられるであろう。一方、 工学的には、不確定性が存在しても、不確定性を減少させるためのコントロールを施し、 所望の目的値を達成することを可能としてきた。このような「工学的創造」のための「帰 納的方法」論も多く研究されるであろう。さらに、「人的」不確定性、「社会的」不確定 性が大きくクローズアップされてくるであろうと言うのも本章の結論である。

「5.3 未来デザイン技術としての物質科学と分子・物質シミュレーション」では、 支配方程式からのまるごと製品創造を目標とする研究の課題について議論している。計算 機は、「需要の方向性に基づく汎用性」をもっている。それは「科学的知の創出」のため の観点とは異なった方向性であることもある。例えば、シミュレーションの基礎となる浮 動小数点数計算も 1985 年までは、メーカーごとにばらばらに設計され、その値と数学的な 「実数」の計算との関係は単純な四則演算(加減乗除)ですら明示されていなかった。1985 年になって、「IEEE754 2進浮動小数点数規格」が制定され、semi-morphismという数学的 な原理によって単精度浮動小数点数 (32bit)、倍精度浮動小数点数 (64bit) とその四則 演算が標準化された。これによって、浮動小数点数演算と「実数」の四則演算に「不等式 で与えられる数学的に厳密な関係」が成立し、数値計算誤差の計算が飛躍的に容易になっ た。この標準に基づき、数値計算のすべての誤差を把握して、実用的な計算時間で数値計 算の誤差を厳密に計算するための「精度保証付き数値計算」の研究が大きく進展を開始し た。そして、現代では線形計算においてはこれが実用的なレベルに研究が進展している。 このような正しい結果を導く数値計算の理論の確立が今後の50年間の大きな課題となろう。 本節では、物理現象の支配方程式から現象の再現までを、支配方程式の近似モデリングの 精度による計算量と結果の精度という一貫した観点で論じている。「有効な近似モデリン グを創出する課題」と「モデルに基づきどのような現象が出現するかを計算する技術」が 主要な論点である。「有効な近似モデリングを創出する課題」は自然科学の基本的な問題 であることとそれが工学的な創造において鍵となることが豊かな例により記述されている。 一方、「モデルに基づきどのような現象が出現するかを計算する技術」には、「自然科学知」を得るための計算機の創出の課題から、要求された精度での解を出力するための計算メカニズムの研究課題まで、独創的な研究を要求する課題が山積することを指摘している。 それらの課題のブレークスルーを得るためには、課題を果敢に研究する若手研究者の育成の課題に取り組むことが重要であると指摘している。

「5.4 エレクトロニクスシミュレーション」では、まず、材料の作成・評価・性能達成までのプロセスをシミュレーションで擬似的に行えることが求められるようになるであろうことが述べられている。そのために、従来は陽的に取り込まれていなかった「量子力学に基づくシミュレーション」が模索されるようになるであろうことが述べられている。そして、デバイスシミュレーションでは、想定したデバイス構造における性能を、材料シミュレーションから取り出した物質情報をもとに予測し、実際に複数個のデバイス(素子)に、電界をかけて連立して動作させた場合のパフォーマンス予測が精度良く行われること、さらには、デバイス加工時の条件ばらつきによる性能ばらつきの値もシミュレーションされることが要求されるであろうことが指摘されている。

そして、ロジック・システム回路のシミュレーションは、材料シミュレーション、デバイスシミュレーション技術の発展のもとに、どんなに複雑なシステムでも設計したとおりに、実際に作ったものが動くという、信頼性の高いものにするための研究課題が述べられている。

- 「5.5 ものづくりを支えるシミュレーション技術」では、数値計算技術と計算環境の飛躍的向上によって、構成要素のみならず、工学的製品や「もの」をまるごとシミュレーションする方向での課題についてサーベイしている。計算量の爆発によって、どんなに進んだ計算機環境を用意しても、それによっては計算できない問題が出現しうるが、この50年間の計算機の指数関数的発展を前提として、どのような研究課題が克服されると、「まるごとシミュレーション」が現実的となるかが詳細に議論されている。
- 「5.6 プロジェクトマネジメントにおけるシミュレーション」では、プロジェクトという「人的な要素」が色濃く反映するプロセスにおける、シミュレーション技術の研究課題について議論した。プロジェクトにおいて何をシミュレーションするのかという観点から、大きく次の二つの課題に分類して議論した。一つは、プロジェクトの最終成果物である製品やサービスについてのシミュレーションの課題である。そしてもう一つは、プロジェクトの作業工程に対するシミュレーションの課題である。
- 「5.7 信頼性とシミュレーション -人間・社会とのかかわり-」では、信頼性や安全性に関わるシミュレーション技術の研究課題について鳥瞰している。信頼性の分野では、システム全体の信頼性を議論するための尺度であるアベイラビリティの議論から、デペンダビリティと呼ばれる単に信頼性のみではなく安全性も対象とする尺度が論じられるようになってきている。これは、信頼性の対象であるアイテムに人間がかかわるようになり、サービス・医療・社会システムの信頼性等、人間を対象とする事例が出てきていることによる。本章では、危険を現在より少なくするためには、人間環境のあり方を基本的に検討することが重要であり、信頼性・安全性の概念を地球規模で考える必要があることを指摘している。その際、実際のシステムで実験できない環境や莫大な費用を必要とする状況や、システムが複雑でサブシステムに分解して評価をしなければならない状況では、シミュレ

- ーションが絶対的に必要となり、その方向での研究課題について議論した。
- 「5.8 地球観測技術と防災・環境分野でのシミュレーション」では、防災・環境分野におけるシミュレーション技術の中から、主として「リモートセンシング」を初めとする地球観測技術とシミュレーション技術に関わる研究課題を述べた。

具体的には、幅広い防災・環境分野のうち、①自然災害予測、②気象予測、③地球環境 予測の3項目についてまとめた。

「5.9 人間回帰としての可視化技術」では、シミュレーションから「知」を得たり、「シミュレーション技術の応用」を行う際に、「可視化」を行うことが鍵となる研究課題について将来展望を行った。「知」とは「見えるようになる」ことであるという理解の仕方がある。見えなかったものを見えるようにすることも含めて、「可視化技術の高度化」、「可視化技術の効能の明確化」、「可視化効能の適用」という観点から研究課題を整理した。

以上が「シミュレーション技術のアカデミック・ロードマップ」の概要である。ここではシミュレーション技術に関わる研究課題を

- (1) 「大規模化し多様化される方向性」
- (2) 「高精度化され、高信頼度を得る方向性」
- (3) 「可用性、適用性が増大する人間にやさしい技術となる方向性」

の3次元から立体的に俯瞰した。この5章で提示された諸課題等の追求と、そのための研究者の人材育成を行うことにより、「シミュレーション」を「自然科学知獲得」と「工学的創造」のための低コスト・超安全かつ低環境負荷な技術として持続的、かつ、飛躍的に発展させることが望まれる。

第6章 ヒューマンインタフェース分野のアカデミック・ロードマップ

6. 1 はじめに

アカデミック・ロードマップ(以後、ARM)の策定に当たり、本ワーキンググループ(WG)に与えられた分野は「ヒューマンインタフェースの革新による新社会の創生」である。(以後、インタフェースを I/F と称する場合がある。)

「"もの"の開発ありき」のロードマップは、すでに経済産業省による技術ロードマップ (TRM) として提供されている。そこで本 WG では、「"コト"の論理」、すなわち、インタフェースの技術がどのように媒介することで、人の生活行動や、思考、認識、思い、感性、をどのように変容させ、それが社会や規範、文化に至るまで、どのような影響を与えうるのか、を明らかにしていくこととした。

まず、近年の生活や社会の革新をもたらした個別技術についての事例(あるいは近未来で実現可能と思われる事例)を対象として、それがどのような背景と社会的ニーズに合致してその革新に結びついたのかを把握することから、議論を始めた。さらに、人間の活動を支える技術として、個人や社会にとって、光の部分のみならず、影の部分、すなわち新たな技術によって抱え込むことが予想される矛盾、へも配慮しながら、それへの解消に向けてどのような技術革新が必要になるかの観点からロードマップの展開を考えることとした。最終的には、現状までの技術からの外挿的な展開のみならず、技術革新の可能性を明らかにし、その一般化に基づいて将来の社会がどのように変容し得るのかを明らかにしていきたいと考えている。

6.1.1 インタフェースと社会

本WGでは、まずブレーンストーミング形式の自由討議で、現状でのインタフェース研究におけるデマンド、シーズの両面から、目指すべき将来の社会とともに、現状での研究において何が欠落し、どのような研究分野の開拓が今後期待されるかについての議論から開始した。

そこで提起された主な内容を以下に掲げる。

実感のインタフェース

- 6. 2 安全・快適なモビリティ
- 6.3 防災・減災の安心社会
- 6.4 バーチャルリアリティが実現する未来社会
- 6.5 コンテクスト・アウェアなインタフェース

感性のインタフェース

- 6.6 感性の共有と創造
- 6.7 感性の対称性から見た産業のヒューマンインタフェース
- 6.8 脳科学、感性とあいまいさ

かかわりのインタフェース

- 6.9 身体的インタラクション・コミュニケーション技術
- 6.10 障害者支援技術
- 6.11 アンビエント・インテリジェンスとインタラクティブ・マーケティング
- 安全・安心から精神の健康・健全へ
- ヒューマン・ソサイエティ・インタフェース
- 次世代クルマ社会におけるインタフェース
- どんな人にもやさしいインタフェース
- コンテクスト・アウェアなインタフェース
- 脳とインタフェース (Brain Machine Interface)
- セカンドライフが切り開く新社会
- インタフェースのデザイン論

本WGのテーマは言うまでもなく、「人間」と「社会」である。そこでまず、WGとして人間の「認知」を共通視点として据え、前述の各分野において、人の認知をどのように捉え、インタフェースの技術がそれをどのように支援するのか、それにより人間の認知がどのように変容し、認知の対象はどこまで拡がりを見せるのか、等の観点から、次世代インタフェースが創生する社会について考えていくこととした。さらに、人間の活動として、人間の内部での脳内現象から、社会や文化に至るまで、人を取り巻くさまざまな文脈のもとでの人間活動を想定し、それぞれの中でのインタフェースの革新がどのような新しい社会の創生につながるかを多面的に考えていく。

6.1.2 次世代インタフェースが目指す社会

ここでは、これまでの本WGでの議論の内容をもとに、鳥瞰的な観点から3点に絞って、 今後のインタフェース研究の展開とそれにより可能となる新社会の姿についてまとめる。

(1) 真の現実感とは:「納得」のモデリング

議論はまず、現状でのインタフェース技術が、何を提供できており、何が抜け落ちているか、に関する議論から始まった。そこで提起されてきたのが、人間にとって実感できる「現実感」とは何かという課題である。木村^[6-1]によれば、科学的に研究される"リアリティとしての現実"と並んで、主観的にのみ実感しうる"アクチュアリティとしての現実"の様態があると述べている。西洋では世界や自然を客観的に観察することにより、これを「もの」として眺め、自然科学や合理的世界観が発達してきたのに対して、「こと」の世界に対する静かな共通感覚的感受性こそ、欧米には見られない日本独自の心性であるという。原子力や防災分野においても、リアリティとしての安全をことさらに強調すればするほどにアクチュアリティとしての安心が遠のいてしまうという現実がある。避難誘導を目的として行政が住民に対して発せられる情報が、必ずしも受け手側の避難行動につながって

おらず、リスク情報が住民に届いていないという問題も指摘された。さらに、地球温暖化の問題をはじめ、いま社会が壊れ始めているが、その危機感が本当に個人に実感されているのかは疑問であり人を突き動かすまでには至っていないということが議論された。そして、生身の人間と生き写しになるように模写したロボットが、必ずしも人間にとって望ましいパートナーと感じられるわけではなく、むしろ「不気味の谷」を生み出してしまう現象はなぜに起こるのかという観点からの問題提起もなされた。

以上の議論を通じて行き着いたのは、そもそも現状のITあるいはICTで扱われている情報によって、何が人に伝わっているのか、「実感する」とはどういうことかという問題である。「頭では理解できても、納得できない」ということがある。逆に「細かいことは理解できないけれど、何となく納得がいく」こともある。「理解」は普遍的・論理的であるが、納得、あるいは「わかる」ということは極めて個人的・個別的な営為である。後者を支援するためのインタフェースとしては、現実を模写して与える技術ではなく、むしろ受け手側に現実を構成させるための技術が必要になる。これにより、「人を動かすインタフェース」「が可能になる。前掲の木村によれば、アクチュアリティと呼ばれる現実は、絶えず現在進行形で動き続けている現実である。それをキャッチするためには、現実を突きつけられる側も常にそれに即応した動きの中に入り込むことができ、自分自身の心の動きによってそれに参加できなくてはならない。この行為的実践的な参加がスムーズに運べるように支援することが次世代インタフェースには求められる。アクチュアリティとしての実感を伴わないリアリティを突きつけるだけでは人は動かないし、「おのずから」とか「自然さ」とは程遠いところの感覚を強要するだけで、真の納得は生み出せない「6-2」。

(2) 見えないものを見せる:技能・感性・意識

ユビキタス・コンピューティング、あるいはアンビエント・インテリジェンスという言葉に象徴されるように、人間の日常行動を、環境の側から具に捉え、そこでの意図を推し量り、人間の行動を認識していくことで、リアルタイムでの支援を提供していくための技術開発が進められている。そこでは、生産現場のように作業環境がある程度構造化され、その目的も明確に規定できる場での生産活動とは異なり、極めて多様性に富む悪構造下での生活活動がその対象になってくる。そこでは表層的に観測できる時系列データの背後にある、意図や感情などの人の内面に踏み込んだ理解を可能にするための技術が求められる。ここでも「わかる」とは何かという問題に行き着く。システム側が何をどこまで同定できれば、対象としての人をわかったことになるのかという問題である。

一方、2007年問題としてしばしば議論されてきたように、技能(技術)伝承をシステム化したいとするニーズは産業界にも大きい。暗黙の知を形式知に変換することには無理があり、さらに技能は、伝える側と伝えられる側の間でのシャノン流の情報伝達の図式では捉えきれない。技能の定量的表現方法は、人に(あるいは人が)与えた刺激とそれに対する応答(主観的、客観的評価)の関係をもとにしている。例えば、熟練した作り手の動作や力のかけ具合や、それによる対象となる「もの」の変形程度を数値で表現し、取得することは技術的に可能である。しかしそれは、作り手とものとの接面で起こっているコトを

.

¹ 仲谷委員による。

捉えていることにはならない。ましてや、アートにかかわる感性的な技能の側面については、まだまだ未知なところが多く、部分を組み合わせることで全体がわかるとする要素還元論的見方がなかなか成立し得ない対象でもある。

技能と感性、いずれも「伝えあうこと、やりとりすること」の価値に主眼をおく人間の特性であるはずのものが、ICTとの融合が目指された瞬間に人工科学になってしまい、目先のテクノロジーに目を奪われることによって、発信者から受信者への一方向的な情報伝達の構図で捉えられようとしているが、よりインタラクティブな世界、あるいは、情報の発信者と受信者の区別を取り払った「対称性の価値」²について考えていくべきであろう。

1990 年代の後半以降、ブロードバンド通信網やモバイル通信網の拡大・普及にともない、多様な背景を持つ人々が情報通信機器を身近に利用するようになり、コミュニケーションの相手や形態も多様化が進んでいる。これにともない、メッセージ伝達の効果や情報の価値的な側面が注目されるようになった。大量のメッセージを、高品質でかつ意味的に正確に伝達しても、それが受け手にどのような効果を生じさせるかは、受け手の価値観に依存する。送り手と受け手の間での価値観のズレは、直ちにコミュニケーションギャップを生み出す。感性工学会による議論では、この克服のためには、送り手と受け手それぞれの価値観(情報を評価する基準)のモデル化技術、相互の価値観にマッチしたメッセージの表出・理解技術などが重要な研究課題として上がってくると予測されている[6-3]。

さらに近年、BMI(Brain Machine Interface)を始めとする分野で、脳計測技術の発展により、思考などの現象を信号として取得することが可能になってきており、生体情報レベルでのインタフェースの構築可能性が見えてきた段階にある。一方、全脳主義への懐疑的見方、すなわち脳の反応を全部とれれば「こころ」が読めるか、という課題も出始めている。脳内現象の解明が進むにつれて、自らの意識の及ばないところで働いている脳の側面があることが明らかになってきた。プラグマティックな意味では無意味な情報も、感覚器官で受け止められ、脳内を通過するだけで、感覚器官や脳神経系を大いに緊張させ活動させる。そこではノイズも情報の一種であり、このような情報に満ちた世界に対して感覚器官、脳神経系は常に働き続けている。「閉じた脳」ではなく、「関係を持ちたがっている脳」、いわゆる「社会脳」としての脳内活動の解明も、新しい社会の創生に向けた重要課題となるであろう。

これまでのインタフェース研究により、人間は自分自身と外的環境におかれた機械との間の境界を克服できる段階に到達しつつある。しかしその一方で、インタフェースが埋めるべきギャップとして、人間と機械の間のズレではなく、「ユーザーが理想としているものと現状の認識のズレ」をいかに見せるか、そしてさらに突き詰めれば、「意識と無意識の間のインタフェース」をとることの必要性も重要な課題として現実味を帯びてきている。インタフェース研究と脳科学との横断研究が待望される。

(3) かかわりのデザイン: 共感場のモデリング

以上の議論からの延長として、本 WG では、かかわりの場をどのようにデザインするかについて議論を行った。清水[6-4]は「場」とは「生成する場」、「他者に向けて自らを開く場」

٠

² 清水委員による。

と定義している。また、伊丹^[6-5]は「場とは、人々が参加し、意識、無意識のうちに相互に観察し、コミュニケーションを行い、相互に理解し、相互に働きかけ合い、共通の体験をする、その枠組みのこと」と定義している。そして、こうした情報的相互作用の結果として、人々の間の共通認識が増し、人々の間の心理的共振が自然発生的に起こるところ、それが即ち「場」であるとしている。本 WG の渡辺委員は、この点について、身体的インタラクションのコミュニケーションに早くから着目した研究を展開、共感インタフェースや人を引き込むコミュニケーション技術の実現によって、「多様なかかわりの中で共感して暮らせる社会」への実現につながるとしている。

このような「共感の場」のデザインに関する研究はいま端緒についたばかりである。従来の人間特性を調べ、標準モデルを同定し、それを想定してできるだけ多くの人にとっての使いやすさをデザインするというこれまでのアプローチとは根本的に異なる視点が要求される。「全く同じ」から、「全てが違う」という設計思想への転換である^[6-6]。

この転換が円滑に進むことで、高齢者や障害を持つ人が「幸せになれる」福祉を考えていくことができる。これらの弱者を特別扱いするのではなく、個人の特性として対応していくことができ、その個性や潜在的能力を引き出していくことのできるようなインタフェースである(「やりすぎないその人に適切なインタフェース」³)。個別仕様の差異をそぎ落とすことでの使いやすさとわかりやすさを求めた「ユニバーサル・デザイン」に代わる新たなデザイン原理が求められる。

以上の設計思想の変換は、インタフェースに留まらず、社会の潮流や産業構造の変化の観点からも共通点を有する。人間が機械や企業の論理にあわせるという考え方から、機械や企業の側が、変容し得る人間の多様性に適応的に変わっていくことのできる社会である。多品種少量生産に言い表されるように、ユーザー毎に一つひとつニーズは異なる。この潜在ニーズをユーザーとメーカーが深いコミュニケーションを通じてものづくりや新たなサービスを生み出していくことが必須となっている。実際、ウェブの使い方は、Web 2.0 の時代を迎え急速に変化を見せている。送り手と受け手が流動化し、誰でもがウェブを通して情報を発信できるように変化してきている。

このような傾向を受けて、ユーザーとメーカーの間での「共感」を獲得していけるかどうか、それがインタラクティブ・マーケティングの鍵となる。売り手からの一方的な提供ではなく、ユーザーの側にまず技を出してもらう、あるいはユーザーの側で進行しているプロセスを出してもらい、これらを共有していくことで、よりユーザーニーズに適合したサービスを提供していくことが考えられている(New Knowledge Circulation)。事実、現在においてもこのような試みは現実のものとして機能している(例えば、米国ボーイング社の航空機飛行状態管理システム AHM: Aircraft Health Management)。このような変化は、従来の、価値は企業が生産し、消費者が受容し、対価を支払うという構図からの大きな変貌である。消費者は情報という価値を発信し、価値を増大させる生産の担い手となる社会、このような社会が今後ますます拡がりを見せてくることは疑う余地がないであろう。

以上のような今後の社会の傾向について、今泉委員は『「120%ものづくり」から「60%ものづくり+30%コトつくり+30%こと売り」へ』というフレーズでまとめている。今後

_

³ 長嶋委員による。

の産業構造の変容を占う上で誠に本質をついた表現である。今日、これまでの、生産者中 心、少品種大量生産・大量消費、生産者から消費者へ一方通行の経済・社会システムには 限界が見え始めている。生産品は全世界の市場に溢れ過ぎ、消費者の需要がこの供給に追 いつかないばかりか、一方で、大量生産体制に応ずる大量消費・大量廃棄型社会に対し、 市場や社会、自然環境から拒否され出している。このような消費者不在の、過ぎたるもの づくりの社会を生み出しているのが「120%ものづくり」の産業構造である。ここに欠落し ているのは、自分たちで作ったものを使う知恵や力である。消費者が欲しいものは、いま やものそれ自体としての「クルマ」や「電化製品」ではなく、「クルマや家電製品を通じて 得られる価値」である。それは、味わいであり、豊かさであり、楽しさであり、これらは すべからく「コトとしての実感」に通じるライフスタイルである。「ものそれ自体」の生産 は極力最小限に抑え(「60%ものづくり」)、むしろ企業が顧客の声を十分に商品開発や供給 に反映させ、顧客と企業が一体となって供給連鎖を維持していく仕組みを生み出していか ねばならない(「30%コトつくり」)。そして多様化する人の価値観に応えられ、環境や地域 との共生を重視したサービスを売っていく社会、これが「60%ものづくり+30%コトつく り+30%こと売り」によって表現された産業構造である。今後の望ましい我々の社会の姿 は、常に人間が絡み合い、福祉や環境を取りこんで、人が育ち、商品を生みながら、限り なく改良・改善が成されていく社会システムの実現である。このような社会の創成に向け てインタフェースがどのような役割を担うのかについて本章では考えていく。

6.1.3 アカデミック・ロードマップの策定

以上、本 WG での議論の内容を取りまとめた。以上の内容を委員の間での共通認識として作り上げ、その上で、それぞれの領域における具体的な個別課題の 2040 年までを見越した時系列的な展開を考えていくことにした。

現段階での ARM の骨格となるものを図 6-1 に示す。インタフェースの革新による新社会の創生として、人間の活動を、生活活動、生産・労働活動、社会・環境活動、学習活動、移動活動の分類に沿って、今後の 40 年間の展開を描き出した。

まず近未来の10年間は、脳科学やアンビエント・インテリジェンスによる計測技術の発展とともに、徹底した人間計測が進められ、大量の人間行動・人間特性に関するデータの蓄積が進むことは間違いないであろう。ただし、データの蓄積のみでは、何ら本質的な進歩は期待できず、そこに認知科学からの人間特性のより深い理解に基づいた、人間のモデリング技術との融合が必須となる。データマイニングやテキストマイニングといった技術の進歩は現状でも目覚ましいが、これに加えて、人間の生み出す振舞い(ビヘビア)を対象として、従来の帰納的、あるいはパターン認識的な処理ではなく、より構成論的にモデルベースで対象を理解していくアプローチ(著者は「ビヘビアマイニング」と称している)の確立が必須になると考えられる。

さらに人間特性の解明が進むということは、同時に人間がおかれる環境や作業対象の特性に関する認識も同様に進むことが期待できるが、人間特性と環境変化が、システムによって有機的に繋がれた中で、多様な人それぞれのニーズや価値観にあったサービスが生成

され、享受できる社会への展開が期待できる。

そしてその先にあるゴールとして、経済産業省の技術ロードマップで提起されている以下の4つのゴールであることに異論は呈しない。

- ・ 心身ともに健康な生活の実現
- ・ 楽しく安らげる暮らしの実現
- ・ 安全・快適なモビリティの実現
- ・ 安全・安心で働きがいのある環境の実現

しかし、上記の4つのゴールによって創生される社会は、あまりに人間にとっては「やさしすぎる」社会ではないだろうか。インタフェース分野での格言に以下の言葉がある。

"Too-kind interface may kill the people."

もともとは、Aviation Automationの分野で、人間と自動化の関係を説いた関連での言葉である。さらに遡れば、ロボットのような自動化機械が現れた当初の1970年代に、「技能の低下仮説 (Deskilling Hypothesis)」 [6-7]として、人間から労働機会を奪い取ることでの弊害について警鐘が鳴らされている。これらのことに鑑み、ここでは、上記の4つのゴールに加えて以下を追記したい。

・ 人間力の持続性を保証できる社会の実現

前項でまとめた3つの次世代インタフェースの目指す方向である、現実感(納得)、技能・感性、共感場……いずれもが人間の側の主体的なコミットメントなしには意味をなさない要件であり、まさに横幹連合が目指すところの「コトの設計」にほかならないことを再確認しておきたい。

6.1.4 本章の構成

次節以下では、前述した各領域において、当該領域における技術開発の現状についてま とめたあと、今後求められる課題について取りまとめる。特に、

- (1) 人間側の認知の多様性から
- (2) 環境側の状況認識の高度化から
- (3) 上記の人間と環境を繋ぐインタフェースがどのようなコトを可能にするか

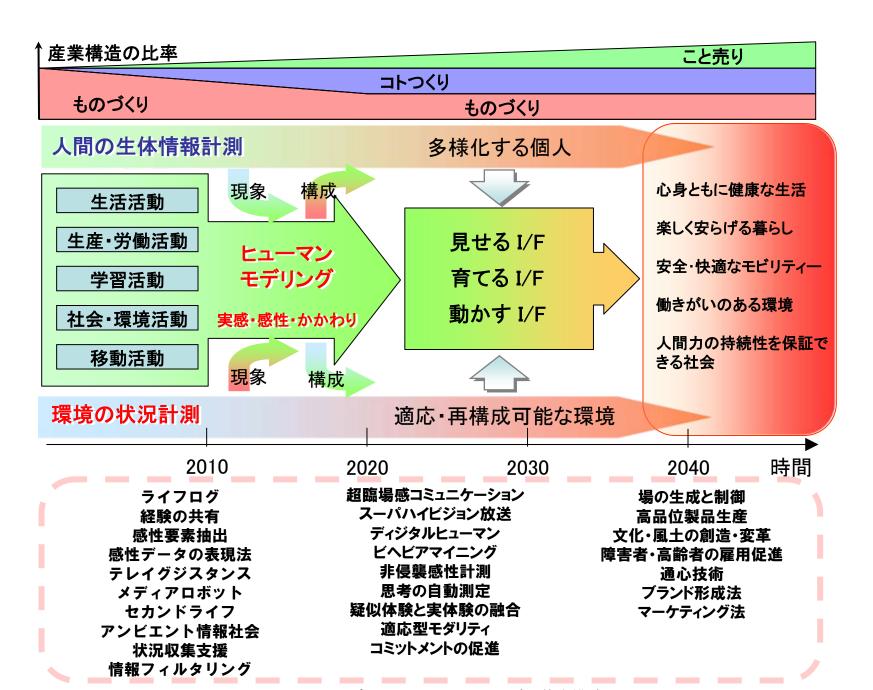
について、以下の3つの観点から概説する。

- ・「見せる」インタフェース
- 「育てる」インタフェース
- 「動かす」インタフェース

また、当該領域における技術開発の光の部分の展望のみならず、影の部分についても明らかにしていく。

参考文献

- [6-1] 木村敏: 心の病理を考える, 岩波書店, 1994.
- [6-2] 木村敏: 偶然性の精神病理, 岩波書店, 1994.
- [6-3] 清水義雄ほか: 感性工学専門委員会:現代社会における感性工学の役割,日本学術会議・人間と工学研究連絡委員会報告,2005.
- [6-4] 清水博, 前川正雄: 競争から共創へ:場所主義経済の設計, 岩波書店, 1998.
- [6-5] 伊丹敬之: 場のマネジメント: 経営の新パラダイム, NTT 出版, 1999.
- [6-6] 滋野浩毅: 地域のものづくり人材の育成とその人々の活躍: 共創型産業への転換に向けて求められること, 地域産業政策大賞論文, http://web.kyoto-inet.or.jp/people/h-sigeno/industry.htm.
- [6-7] Harry Braverman, Labor and Monopoly Capital: The Degradation of Work in the Twentieth Century, (Monthly Review Press, New York), pp. 70-84, 1974.



6. 2 安全・快適なモビリティ

本節では、人々の身近なモビリティとして主に自動車を取り上げ、ヒューマンインタフェースの観点からそのロードマップを概観する。

移動、すなわちモビリティの変容は、社会のあり方に大きな影響を与え得る。人とモビリティの関係を論じるにあたって、人と環境の位置付けはさまざまに考えられる。人がドライバ、環境が歩行者にもなり得るし、歩行者に対して自動車が環境にもなり得る。一方、インタフェースとしても、車内でのインパネ、操縦系、ドライバ支援技術はもちろんのこと、車両自体およびその振舞いも、歩行者や他のドライバに向けた広義のインタフェースとなり得る。すなわち、自動車はドライバにとってその身体性境界を拡張する道具であり、ドライバにとっての身体的直接性を感知できるような自動車の進化の形態が考えられる。

一方、モビリティについて切り離せないのが、もう一つの環境問題、すなわち地球温暖化に向けたエコとしての環境対策である。この課題については、技術的な取り組みは各方面で活発に議論されているが、ここでは、あえてドライバに対する環境への意識をいかに誘起し、情報環境から人を動かすためのインタフェースの役割について考えてみたい。

6. 2. 1 自動車モビリティにおける技術開発の現状

自動車関連の技術開発では、「安全」「快適」「環境負荷低減」を目標に、自動車および そのインフラの技術開発が進められている。

自動車は他のモビリティに比べて事故によるリスクが大きい。そのため、未来のモビリティとして存続するためには事故の防止技術や事故時の災害低減技術の開発が不可欠である。事故の防止技術としては、アンチロックブレーキ、旋回時のスリップ防止、ブレーキ予圧、居眠り運転検知・警告等の技術があり、さらに、障害物検知による自動ブレーキ、ドライバの注意力低下検知・警告等の技術開発が行われている。一方、事故時の災害低減技術としては、コックピットの高剛性化、多面エアバック等の技術があり、さらに、衝突直前での減速、事故の自動通知等の技術が開発されている。

快適性に関しては、運転・乗車のような自動車そのものの快適性と ITS (Intelligent Transportation System) に代表される道路情報システムのインフラが提供する快適性がある。自動車の快適性については、吸音・アクティブ消音、振動吸収、アクティブサスペンション、オートエアコン、ナビゲーションシステム等のさまざまな技術があり、さらに、デザイン・音・振動・質感等を総合的に設計する感性設計技術の開発が進められている。一方、道路インフラが提供する快適性では、VICS (Vehicle Information and Communication System) による渋滞情報と最適経路探索、ETC (Electronic Toll Collection System) による料金所渋滞の緩和等の技術があり、さらに、AHS (Advanced Cruise-Assist Highway System) のような ITS を活用した路車協調、車車協調による渋滞回避/交通の円滑化が進められている。

環境負荷低減では、高燃費エンジン、ハイブリッド自動車、軽量高剛性材料、低摩擦材料等の技術があり、さらに、水素自動車、電気自動車の導入に向けた技術とインフラの開発が進められている。

6. 2. 2 安全・快適なモビリティ実現への課題

ここでは、安全・快適なモビリティを実現するための課題を、(1) ドライバの認知の 多様性、(2) 環境の状況認識の高度化、および、(3) インタフェースとしての自動車が 実現するコト、の3つの観点から概観する。

(1) ドライバの認知の多様性

運転時のドライバは、自動車というインタフェースを通じて外界の状況を認識し、運転装置を操作することで自らが乗る自動車を移動させる。すなわち、ドライバである人間と外界の環境との間に自動車がインタフェースとして介在すると考えられ、運転時にはドライバがそのインタフェースを介して外界の状況を認識している。インタフェースを高度化することにより、自動車が介在しながらもドライバの感覚を使ってより直接的に道路状況や周囲の歩行者・二輪車・障害物等を認識する方向と、道路に設置されたセンサーや自動車のセンサーを使ってドライバの感覚を越えた認識を提供する方向に向かう。すなわち、ドライバにさまざまな状況を見せる技術が開発される。ドライバの感覚による直接的な状況認識では、これまで主に視覚と聴覚に頼っていた認識から、身体に感じる振動やハンドルへの力覚提示により路面状況等を提示する技術の開発が望まれる。一方、センサーを使ってドライバの感覚を越える認識を提供する技術では、道路に設置されたセンサー、自動車のセンサー、近隣の自動車のセンサーからの情報を無線通信により収集・提示し、広域の交通状況認識や周囲の状況認識により渋滞回避や出会い頭事故等の回避を目指す。このようにインタフェースを高度化することによりドライバへの多様な認知を提供する。

また、ドライバの感覚に関連して、運転時の快適・楽しさの追求、すなわち自動車の感性設計の高度化も望まれる。自動車が人間の感性に影響を与える要因としては、外観・内装デザインや質感・触感のような静的なものから、運転時の音・振動・ハンドリング等の動的なものがあるが、これらを統合して運転者の感性に訴える設計技術の高度化が必要になる。

一方、自動車は人々の日常のモビリティとなっているが、その事故リスクは人々が感じる以上に高く、不安を感じないこと自身が不安全行為を誘発していることもある。すなわち、現在、人々の自動車に対するリスク認知は実際のリスクより低く見積もられている場合が多く、これが居眠りや注意力の低下を招いている場合もある。そのため、将来は自動車交通に関するリスクを正しく見せる技術の開発が望まれる。また、これに関連して、移動という手段全体の観点から見ると、自動車のみによる移動から公共交通機関と自動車を組み合わせた新しい移動手段へのモーダルシフトも望まれる。現在の自動車は主に化石燃料をエネルギーとしているが、安全の向上と地球温暖化防止対策の観点からは、より安全でエネルギー効率の良い公共交通機関をなるべく利用する方が良い。そのためには、人々の環境意識を育て、自動車のみによる移動から公共交通機関の利用へ人々を動かすインタフェースと社会構造への移行も必要であろう。

(2)環境側の状況認識の高度化

移動を目的としたモビリティとしての自動車を考えた場合、人間から見た環境とはイン

タフェースである自動車と外界の二つの意味がある。

自動車側の運転者状況認識の高度化の観点からは、安全に関連して、ドライバの居眠り 検出・注意力低下検出、高齢ドライバの運転支援、運転特性適応の技術開発が望まれる。 特に、運転特性適応では、ドライバの運転技能を補助するだけでなく、積極的に運転技能 を育てる技術が求められる。そのためには、ドライバ個人の心理特性を非侵襲に計測する 生理的手法の技術開発が必要である。

一方、外界である道路側の状況認識の高度化の観点からは、ITS を活用した路車協調や車車協調により、危険情報提供、出会い頭事故防止、カーブ進入危険防止等の実現が望まれる。これらの技術は、自動車側・環境側の状況認識技術だけでなく、両者の協調により実現されるものである。また、快適に関連しては、ITS による渋滞回避/交通の円滑化がある。これらは直接的にはヒューマンインタフェースに関連するものではないが、これらの状況認識の結果をドライバに見せる方法に関してはヒューマンインタフェースの技術が必要であろう。

(3) インタフェースとしての自動車が実現するコト

上記の技術開発によりインタフェースとしての自動車が実現するコトをまとめると次のようになろう。

・ 安全なモビリティ

自動車というインタフェースを介して、外界の状況、近未来に起こる状況、自動車の リスクを見せることにより、より安全なモビリティとしての自動車の利用を実現する。 また、単に運転を支援するだけではなく、ドライバに適応することで積極的にドライ バの運転技能を育てる。

・ 快適なモビリティ

ドライバの身体を包み込む自動車は、すべての人間の感覚と操作を扱うという意味で 究極のインタフェースである。さらに、自動車はドライバが操作することで道路を移動することが目的であるため、直接的には人間ー自動車のインタラクションであるが 間接的に人間ー外界のインタラクションが本質である。これまで、自動車の快適性を考えた場合、音・振動・操作のような人間ー自動車間の直接的なインタラクションを 扱ってきたが、インタフェースの高度化により人間ー外界の間接的なインタラクションをより直接的に扱い、直接操作感の向上により運転の快適性と楽しさを向上させる。

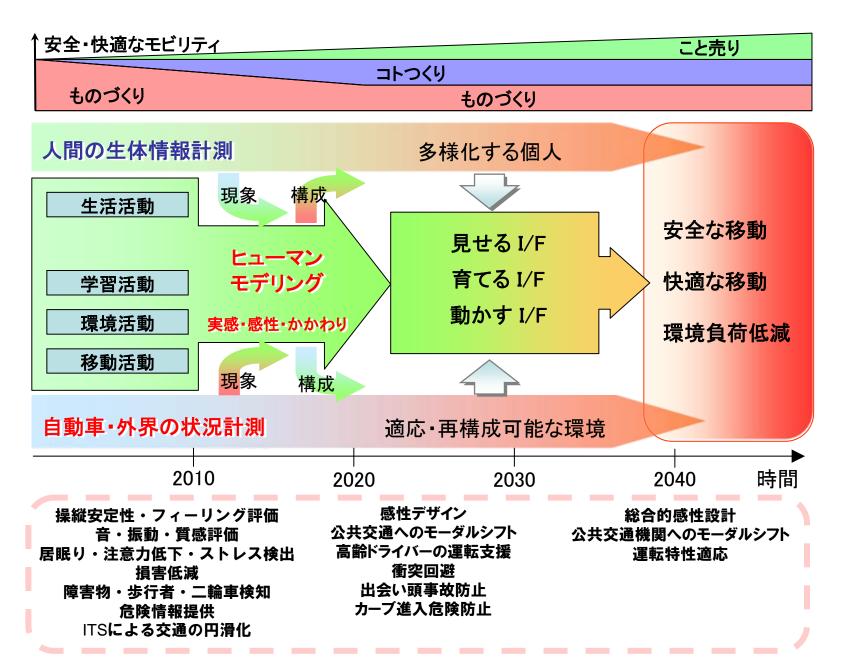
• 環境負荷低減

現在の自動車は主に化石燃料をエネルギーとしているため、環境負荷が大きい。今後、地球温暖化防止の観点から電気や水素をエネルギーとした自動車や高剛性材料の開発が望まれるが、それに加えて人々の移動方法の変革が必要である。すなわち、これまでの自動車と効率の良い公共交通機関を組み合わせて、利便性と環境負荷低減を両立するモビリティへのモーダルシフトである。そのために、両者をシームレスに結びつける仕組みが必要であると同時に、人々の環境意識を育て環境配慮行動を促進し、人々を公共交通機関利用へ動かすインタフェースが必要である。

6.2.3 当該領域における技術開発の光と影

モビリティとして自動車を考えた場合、安全の向上と環境負荷低減が急務の課題である。 自動車は本質的に個人または少人数の移動手段であるため、利便性は高いもののエネルギー効率は悪い。この課題を解決するためには、上述のように公共交通機関の積極的な利用へとモーダルシフトすることが望まれるが、利便性とエネルギー効率はトレードオフの関係にあるためそのモーダルシフトは難しく、人々の意識改革が必要である。

また、道路や自動車にセンサーを設置することによるドライバの状況認識の向上やドライバの運転特性適応では、誰がいつどこをどのように運転したかの情報が取得・収集されるため、プライバシーの問題を解決する必要がある。



6.3 防災・減災の安心社会

安全・安心社会の実現を目的として、自治体をはじめとする行政と住民とのコミュニケーションの課題がますます重要になりつつある。IT、ICTの技術により、「情報」を届けるためのインフラは整備が進んでいるものの、はたしてそこで送り手の意図した通りに受け手に伝わっているのか、という課題が露呈してきている。リスク感性工学というキーワードが現れ始めているが、リスクを正しく伝え、それによって人を避難という行動に繋げていくためには、人のリスクに対するアウェアネス、すなわち、何が起こっているのか(what)、どうしてこのようなことが起こったのか(why)、このままではどのようになってしまうのか(how)、という認識ができ、人を納得させるためのインタフェース技術、さらには災害発生時のみならず、普段から意識を持たせ続けるための技術のあり方が重要となってくる。本節では、リスク感覚をいかに見せて、人を動かし、リスク感覚を育てていくための諸課題と今後の展望についてまとめる。

6.3.1 防災から減災へ

阪神淡路大震災を契機として、わが国の災害対策は、それまでの災害の発生を防止するという「防災」から、災害の発生を前提として、そこで発生しうる被害を最小限に抑えるという「減災」へと大きく舵を切った。そこでは「情報」の果たす役割がクローズアップされる。第一に、災害の発生を予知、あるいはいち早く発見するための「情報」、第二に、予知あるいは発見された災害を国民に報知するための「情報」、第三に、被害が発生した場合にいち早く被害の規模や程度を把握するための「情報」、第四に、避難所などで生き延びるための「情報」、第五に、被災地を中心とする国民の合意に基づいて復旧復興するための「情報」、第六に、災害に関する意識を向上させるための教育的な「情報」、である。このような観点から、国は情報の収集・管理・提供に関する情報通信技術の研究開発や配備に注力してきている。

しかし気仙沼市におけるひとつの調査が、これまで推し進められてきた災害対策に大きな疑問を投げかけることとなった。片田らによる調査によると、2003 年に発生した宮城県沖の地震の直後に、津波による被害を避けるための避難をした住民は、わずかに 1.7%であった [6-8]。住民は地震後、津波の危険性を知らされてから津波襲来の可能性のあった時刻までの十数分の間、テレビやラジオから情報収集していたという。津波の常襲地域であり、大きな被害も経験し、津波の発生の危険性を伝える情報は住民に届いていたにも関わらず、実際に避難行動が取られなかったことに、災害対策の専門家が大きなショックを受けたのである。多くの災害専門家は、自らの判断で行動できない住民を生み出した防災情報教育の不備を指摘したが、本当の問題はそうではなく、「情報が伝わるだけでは人は動かない」ということを忘れている行政および専門家の認識不足にあると考えられる。この人間の特性は、社会心理学においては「認知的不協和理論」としてよく知られたものである [6-9]。これは、「互いに矛盾する 2 つの認知(環境・自分の行動・態度・情緒に対する知識)が存在し、どちらかを選ばざるを得ない状態において、心理的な葛藤(認知的不協和)が生じるが、このとき人間は、認知的不協和を軽減するように対応する」というもの

である。軽減する方法としては、自分にとって変えやすい方の認知を変える、2つの情報を協和的に理解できるような新たな情報を探す、どちらかの認知の重要度を変える、などがある。いずれの場合も、現状の認知や行動をできるだけ「変えないですむ」ように対応する点が重要である。逆に、それまでの自分の認知や行動と反しても、新たな認知の方を選ぶ場合(態度変容)も存在する。その場合、態度変容の最大の要因は「納得」である。

6.3.2 「納得」とは何か

人間には、「頭では理解できても、納得できない」ということがある。避難勧告を聞いても避難しない場合では、リスクの存在は情報として入手していてリスクの存在を「理解」はできるが、自分が今、ここで、なぜ避難しなければならないのかという必然性を「納得できない」のだと考えられる。入手した情報にリアリティが感じられていないとも換言できる。理解だけでは、人間は新たな知識を受け入れられず、避難行動に出ないのである。従来の災害情報研究やヒューマンインタフェース研究が取り組んできたことは、情報を「理解しやすい」ように加工し、確実に伝えることが中心であり、「納得を促進する」ためのヒューマンインタフェース研究は十分ではなかったと言える。

では、納得とは何か。英語では「納得いくまで」は"until I'm satisfied"と表現する。また「納得がいく」を"That makes sense"と表現する。ここには、「満足できるかどうか」「意味があるかどうか」という視点が含まれている。「満足」とは、①望みが達せられて不平のないこと、②十分であり完全であること、③ある条件に合うこと、である。意味とは「価値」に関することであり、自分の価値観と合致するという「共感性」と、自分の生き方や信条と照らし合わせて重要であるという「価値性」を含む。ここには「個人の観点」が大きく働いており、そのため、「理解は普遍的、納得は個人的」と言える。

以上のことから、いくつかの納得の形態が存在すると整理できる。

- O 真理に対する納得 ・・・ 普遍的世界に対する感動。「世界はそういう風になっているのか!」という感動や満足感。
- O 説得者への信頼 ・・・ 自己の責任において、相手を信頼し、その指示に従う 決意をする。「Aさんの言うことだから納得しよう」。
- O 他者の言動の背景への共感 ・・・ 「そういう背景があるなら、君の言うことは納得できる」。

災害に関してこれらを当てはめる場合、個人の「避難しない」理由は実に多様であるため^[6-10]、ひとつだけではなく、多面的に取り組む必要があると思われる。例えば、災害の発生メカニズムに関する教育を行うことによって、真理に対する納得を促進でき、日ごろから行政の担当者との接触を増やすことによって、説得者への信頼を促進できる。

6.3.3 人を動かし育てるインタフェース

避難行動に繋げるための情報提供として、おそらくもっとも重要なことは、災害に関心 を持たせることであると思われる。これについては、個人にとって実感の持ちやすい方法 で、リアリティのある災害情報を提供することが有効である。例えば、災害が発生したと きに、人それぞれの日常生活の中でどのような場面が起こりうるのか、そのときには何を 考えなければならないのかなどを、できるだけ具体的な事例などを用いることによって分 かりやすく示す研究が行われてきている^[6-11]。このようなアプローチでは、仮想現実感や 複合現実感などのヒューマンインタフェース技術を用いて、臨場感を高め、リアリティに 富んだ情報提供を行うことで、納得をより強力に支援することが可能となると期待される。 またこのような教育を、学校教育の中で実施し続けることによって、災害に関心を持つ人 口を着実に増やす努力が求められる。また、成人に対しては、地域および職場での教育が 重要となる。職場での防災意識を高めることが、企業などを守ることになり、それが企業 の立地する地域をも守ることになるという BCM (Business Continuity Management:事業 継続管理)の考え方が次第に浸透してきている[6-12]。また、地域においては、地域の防災 上の課題となる箇所や災害時に役立つ場所を住民自らの調査によって整理して、紙の地図 に記入する DIG (Disaster Imagination Game) などの活動が活発に実施されるようになっ てきている。地図を用いて住民自らが調査した結果を整理するという作業は納得を強力に 促進する。DIG のプロセスや結果の電子化などの試みが行われ始めているが、これもヒュ ーマンインタフェースのテーマであると言える。

このように、避難が必要な場面において納得を支援するためには、災害発生時におけるヒューマンインタフェース技術の開発だけではなく、災害発生前の教育におけるヒューマンインタフェース技術の開発が重要となる。図 6-3 に以上をまとめた防災・減災の安心社会へのロードマップに関する図を掲載する。この図では、個人の状況や、災害の進展状況などのリアルタイム情報に基づいて、その状況における個人にとってもっとも納得しやすい内容や形式で情報を提供するとともに、他者に対しても、納得の上に立って情報を提供できるような技術の開発に注目している。これらを実現するためには、単に技術だけでなく、人間の心理や行動に関するより深く広い洞察が不可欠と考える。

参考文献

- [6-8] 片田敏孝, 児玉真, 桑沢敬行, 越村俊一: 住民の避難行動にみる津波防災の現状 と課題 -2003年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-, 土木学会論文集, No. 789, II-71, pp. 93-104, 2005.
- [6-9] L. Festinger: A Theory of Cognitive Disonance, Stanford University Press, 1957. (レオン・フェスティンガー (著), 末永俊郎(監訳): 認知的不協和の理論, 東京: 誠信書房, 1965)
- [6-10] 仲谷善雄: 防災におけるリスクコミュニケーションの在り方, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 (第 20 回), 講習会「リスクコミュニケーションとヒュ

- ーマンインタフェース」講習会資料集, pp. 151-162, 2004.
- [6-11] 山本知彦, 仲谷善雄: 個人の生活環境に適応した防災意識啓発システム, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 (第 23 回), pp. 689-692, 2007.
- [6-12] 仲谷善雄: 企業情報システムの動向: 特集「企業情報システムの過去・現在・未来」, システム/制御/情報, **51** (3), pp. 2-7, 2007.

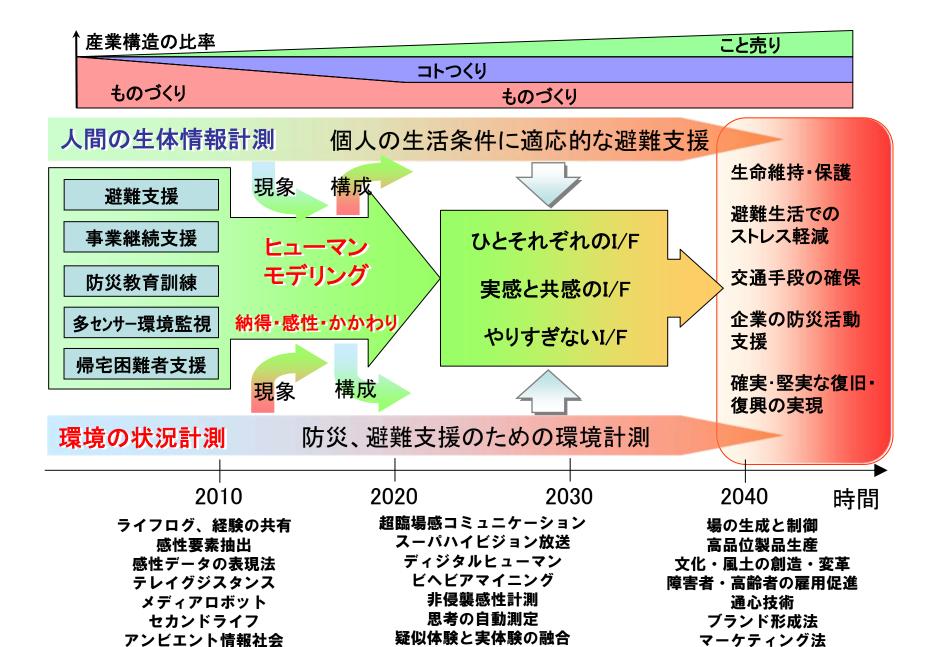


図6-3 防災・減災の安心社会へのロードマップ

状況収集支援

情報フィルタリング

適応型モダリティ

コミットメントの促進

6. 4 バーチャルリアリティが実現する未来社会

「バーチャル」という言葉は、実体・事実ではないが「本質」を示すもの、という意味である。バーチャルリアリティ(VR)の技術は、我々の生活にとってますます身近な技術になりつつある。本節では、人間は何をもって現実的であると実感できるのか、「"もの"としての現実」と「"コト"としての現実」の様態の違いは何によるものなのか、など、環境側からの技術発展と人間側から知覚心理の究明が結びつく新たな領域の将来像について展望する。

6. 4. 1 体験が再現できる社会

バーチャルリアリティ(VR)とは、実際の形はしていないか、形は異なるかも知れないが、機能としての本質は同じであるような環境を、ユーザーの感覚を刺激することにより理工学的に作り出す技術およびその体系である。したがって、この概念はヒューマンインタフェースを含んでいるのだが、さらにそれを超えるアプリケーションまでも含んだ概念を規定していることになる。

ここでは、バーチャルリアリティ技術が今後発展し、社会に浸透した場合に、どのような形で未来社会の構築に活用できるかという観点から考察する。なお、バーチャルリアリティの日本語訳として「仮想現実」という言葉があるが、この表現は適切でなくここでは以後 VR として標記する。歴史的に見ると、今日につながる VR 技術の応用は、特定の環境における体験・訓練を実施するためのシミュレータとして発達してきた。これらにはフライトシミュレータ、ドライブシミュレータ、操船シミュレータ、そしてゴルフなどのスポーツシミュレータ、内視鏡手術などの医療シミュレータなどがある。ここでは、それぞれの対象をモデル化し、それに対する操作インタフェースを組み合わせることによって、シミュレーションが実現されている(限定的体験再現)。

一方、セカンドライフなどに見られるような、現実世界をコンピュータグラフィクス (CG) で再現して、その中で人間の社会活動を再現するという環境 (汎用的体験再現) についても、CG の品質が向上し、かつ頭部搭載型の表示装置 (HMD) や没入型投影技術 (Immersive Projection Technology - IPT) を用いることによって、より現実感あふれる体験ができる可能性がある。

将来的には、特定分野のシミュレーションとバーチャル空間上でのバーチャル体験的なアプリケーションが融合して行くであろうと仮定してロードマップを考えると、図6-4のようになるだろう。

このロードマップでは、現状での VR のアプリケーションが、徐々に進化し、最終的には体験創造産業というような、ある種の「体験に対して対価を払う」産業に利用されるまでを想定している。

例えばバーチャル火星旅行では、実際に火星上に設置されたセンサー類から得たデータに基づいて火星をコンピュータ上に再現し、そこへの旅行をVRインタフェースで体験する。世界中のセンサーからのデータを統合処理して、「実際に移動することなく旅行ができる」バーチャル・エコトラベルも想定できるだろう。こういった環境の実現には、初期の技術

課題としての五感プレゼンテーションや、シミュレーションエンジンに関する技術が重要であるが、同時に人間の生体情報を的確に計測しそれによるフィードバックを構成する、いわゆる体験のフィードバック制御が可能になっている必要がある。

さらに、VR 空間での体験が実環境に影響し、また実体験が VR 体験に影響するという環境を実現するためには、何らかのバーチャル・リアル・ユニフィケーション(VRU)を実現する技術が、これに伴って開発されることが好ましい。ここで VRU とは、VR 世界と現実世界がきちんと関連付けられている、と言うことである。このようなことは、今日でも、例えばセカンドライフ上での経済活動が現実世界で通用する貨幣価値を生じさせているなど、一部では関連付けが行われ始めているが、より広汎に一種のインフラとして整備されることが望ましい。それによって人間は、VR 世界と現実世界とを同じ価値判断、評価基準で行き来することが可能になり、VR がもたらす恩恵を享受することができるだろう。また、そのために、VR 空間中での事象について、プライバシーを侵害しない形で見守ることも必要になるだろう。コミュニティ・モニタリングと仮に呼ぶとすれば、そういったことが可能な VR 環境の構築が必要であると思われる。

6.4.2 四畳半の狭い部屋に住みながら、豪邸感覚が享受できる社会

前項のようなシミュレーションやテレイグジスタンスの究極的な応用を待つまでもなく、例えばディスプレイ技術が進歩することで、家庭用壁面ディスプレイによって狭い部屋から太平洋に沈む夕日を眺める、といった体験が可能となる。ある意味では、今まで物理的な制約や経済的な制約から体験できなかったことが、体験可能になるのだ。これは人間の欲望を満たすための活動に必要とされるエネルギーを、劇的に減らせることになるだろう。こういった環境を実現するためには、室内の照明装置にプロジェクターが組み込まれているとか、薄型かつ大型の有機 EL ディスプレイの開発などの技術的な要素が必要である。また、超高精細画像を圧縮し、伝送するといった課題も存在している。

6.4.3 バーチャルと現実の境界の消失がもたらす社会

現在のネット社会では、ネット上の活動と現実社会での活動が、必ずしもシームレスに接続されているとは限らない。もちろん、オンラインショッピングで買い物をすれば宅配便でそれが届く、といった事実は、それらが連続していることを明らかにするが、売り手や買い手が直接見えるわけでなく、信頼が成り立たない場面ではネットオークションを悪用した犯罪が生じたりもしている。

このような状況を緩和するためには、各種規制だけでなく、ネット上での活動においても現実環境と同じリアリティを作り出し、利用者が自らの経験や知識を活用して信頼関係を結べるようにするべきであろう。例えば、オンラインショッピングを、ブラウザの画面でなく VR 空間中の商店で買い物をするといったことにすれば、少なくともその商店に買い物に来ている他のユーザーの動向を知ることができると同時に、買い手同士のコミュニケーションもとれる可能性がある。違和感なしに、いろいろなことが行えるはずである。

これらのことが、30年後に実現するための最大のブレークスルーは、リアリティあるいはリアリティから生じる実感、体感をコントロールする技術の開発である。

従来は、現実の環境から人が受ける刺激と同じ刺激を提示することができれば、現実と区別ができないバーチャルな世界を提示でき、そのことがリアリティを再現する唯一の手法であると考えられてきた。しかし、リアリティから生じる実感、体感を「主体」の側から考えれば、仮に異なるリアリティを体験しても、そこから得られる実感や体感が同じであれば、やはり現実と等価であることになる。このためには、利用者の実感や体感をモニタリングし、適切なフィードバック技術によって、ユーザーが体験の提供者側が意図した実感、体感を得ているということが保証されるようなVR技術の開発が必要となろう。

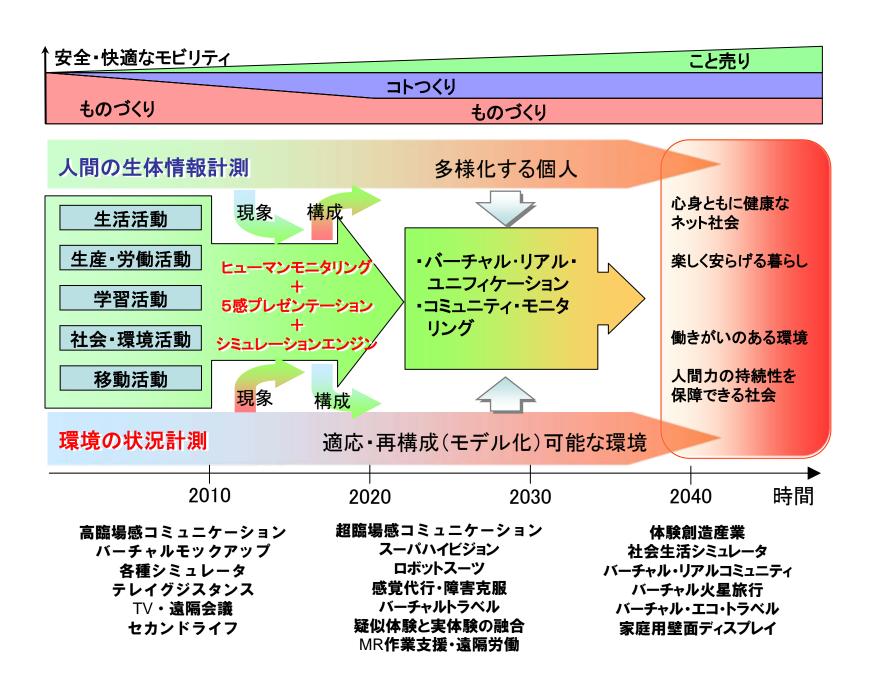


図6-4 バーチャルリアリティが実現する未来社会へのロードマップ

6. 5 コンテクスト・アウェアなインタフェース

6. 1節では、現実の様態として、リアリティとアクチュアリティがあることが述べられた。技術の側から、リアリティをより現実感の伴う迫力や臨場感を感じさせることができるようにするための展開は、今後十分に予想されるところである。さらに現実を写し取るだけの現実感ではなく、そこに創意工夫を凝らした情報を重畳提示することで、それはリアリティの技術からアクチュアリティの技術へと転換される。すなわち、提示される側のユーザーが、常にそれに提示された情報に対して即応した動きの中に入り込むことができ、自分自身の心の動きによってそれに参加できるような、行為的実践的な参加を促すための情報デザインが今後ますます重要性を帯びてくるものと考えられる。本節では、このような観点から、ユーザー目線でのコンテクスト・アウェアなインタフェースを実現するための人工現実・拡張現実技術と、これらが可能にする新たなサービスのあり方を含めてまとめる。

6. 5. 1 リアリティの「しきい値」

博覧会やテーマパークなどでは大型画面の映像が観客の視野の「3分の2以上」を占めていることで、観客はその映像に対して極めて深い没入感(臨場感)を感じている。観客の没入感が大画面によって高まることは、大規模アトラクション施設の展示技術における重要な知見で、Universal Studiosの人気アトラクション『Back to the Future: The Ride』の開発者である特殊撮影技術の第一人者ダグラス・トランブルが生理学的な実験を行って(1974年頃に)これを発見し、(体感劇場に関して)その特許を取得している。なお、没入感の深さについては、そこに「しきい値」があるようで、画面のサイズを視野の3分の2以上に大きくしても、その効果に変わりはない。大規模アトラクション施設においては、ストーリーが始まって、ものの数十秒で観客を物語の世界に引き込んでしまうための有用な手段として、多くの施設でこの知見が用いられてきた。

ところで、NHKでは、2011年に普及が完了する「ハイビジョン」規格の地上デジタルテレビ放送のまた次の規格として、SHV(スーパーハイビジョン、画素数に換算してハイビジョンの最大 16 倍)という規格を、2025年の本放送開始を目標に開発しているという。NHK技術研究所の「技研公開 2007」では SHV の圧倒的な映像が、10 m×4.5 m の大画面に投影されていた。「ただいま」と家に帰ってテレビをつけると、一般家庭ではハイビジョン放送を、お金持ちの家庭では大画面の SHV を見ることになる。(正確に言えば、SHV の家庭用は現行のハイビジョンの縦横 2 倍。画素数で 4 倍のサイズである。)将来の日本で、社会的インフラとして SHV が活用されている状況を想定することは、極めて自然であろう。これを例えば、TV 電話として使用した場合には、相手とまるで一つの場所にいるような気持ちで対話ができるのだが、その相手はコンピュータが作ったリアルな「人間そっくりの介助ロボット」の画像だという場合もあるであろう。

また、米国では2006年以来のガソリン価格の高騰で、家族が車で出かけて観る映画館の 入場者数に深刻な落ち込みが見え始めた。ハリウッドでは2002年に映画の収益が歴史上の ピークを向かえたのだが、2006年には入場者数が、そこから16%も減ってしまった。2006 年に開かれたシンポジウムで、ジョージ・ルーカスやジェームズ・キャメロンなどの著名なプロデューサーは映画館ばなれを打開するために、迫力ある「立体映像」による映画製作を積極的に進めることを中心に議論していたという。実際に、シネマコンプレックスでの立体映画の上映は、最近珍しいものではなくなってきた。(大口孝之氏の報告による。)さらに日本でも、特殊な眼鏡を使わなくても臨場感あふれる映像が楽しめる「立体テレビ」の開発に、総務省が民間企業と共同で乗り出す方針を明らかにした。2025年の家庭向け放送の開始を目指すという。(2008年1月の報道による。)立体視メディアが普及すれば、例えば内視鏡手術のようなインタラクティブな環境下の作業で、操作が分かりやすくなるといった効果も見込むことができるであろう。

6. 5. 2 スケーラブル VR (バーチャルリアリティ)

ところで、現在は、まだまだ博覧会やイベントでしか見られないのが臨場感に溢れた大画面の映像である。これが一般にも普及して、身近なものとなる過程は、次のように想像される。先ず、このような映像は街頭の広告画面などに多用されて見慣れたものになる。それに引き続いて、一部の家庭に普及してゆくことになる。

そうした普及を想像するとき、「スケーラブル VR(バーチャルリアリティ)」という考え方は、示唆を与えるに違いない。これは、2003 年に国立科学博物館(東京上野)などで開催された『マヤ文明展』で初めて公開された映像展示技術で、13.5 m×4 m の大画面などを使用して非常に好評であった。高精細プロジェクター3台を使用し、大画面の前に立つ解説者の話の内容にあわせて復元されたコパン遺跡の立体映像を、自由に拡大したり俯瞰したりして見せた。開発者は、廣瀬通孝教授(東京大学 先端科学技術研究センター)ほかである。さらに、大画面の映像の一部は別室のパソコン画面でも(スケールを変えて)見ることができ、パソコンではインタラクティブな操作も可能であった。

この考え方を応用して、SHV 放送の一部分を切り抜き、資料としてパソコンに蓄積することもできるだろう。同様に、携帯電話の画面でも SHV の画面の一部が参照できる。NHK 技術研究所のある方のご意見では、SHV では背景の隅の映像であっても従来のテレビ並みの品質で映ってしまうことから、これを切り出して学術用に使用することなどは、(著作権のクリアは必要だが)十分に考え得るとのことであった。また逆に、パソコンで分散的に構築された研究の成果の映像などを、どこかのデータベースに統合するなどの方法で、例えば地球規模の災害データをリアルタイムに表示するといったことも可能になる。

「ユビキタス」(人にその存在を感じさせずに、コンピュータによる高度な生活の支援を行う技術)という概念のシステムでは、特に「コンテクスト・アウェアネス」、ユーザーの目線で見た周囲の環境や必要な情報をコンピュータが把握してサポートするので、ユーザーは抵抗感なくシステムが使える、ということが求められている。映画『マイノリティ・リポート』(2002 年作品。物語の舞台は 2054 年)には、ビルの壁面の CM 画像が「あなた一人のために」広告を囁きかける場面が登場した。ここでは、コンピュータは広く情報を蓄えて、まるで友人のような口調で (ストレスを感じさせずに) ユーザーをアシストする。

6.5.3 複合現実感による推定支援型展示手法

これも国立科学博物館で 2003 年から実験展示されている「推定支援型展示手法」では、 目の前にある現実の恐竜の骨格にバーチャルな映像をスーパーインポーズして、その恐竜 が生きていたときの姿などを見ることができる。

具体的には、写真メール機能つきの携帯電話でステゴザウルスの骨格模型などを写真に撮る。このとき、デザインされた四角形の「記号」を実際の空間内に適当に配置しておくと、画面の隅に写り込んだ記号の大きさとゆがみを計測して、そのカメラから記号までの距離やカメラの接写角度が計算できる。それで、このカメラが写した骨格模型に、Webページ上で、そのステゴザウルスの過去の雄姿を重ねたり、動画を示したりすることができる。作者は、近藤智嗣准教授(メディア教育開発センター研究開発部)ほかである。ステゴザウルスの復元された姿に諸説あるという場合は、複数の学説からユーザーが映像を選択することもできる。

この技法は、博物館の展示に限らず、日常の生活空間で活用することもできる。例えば、ある家具が自宅の応接間に入るかどうかを検討する際に、四角形の「記号」を床に配置して携帯電話で写真を撮り、家具メーカーのWebページに送信すれば、その写真にスーパーインポーズされて応接間に家具の置いてある様子が確認できる。いま現在でも利用できる手法ではあるが、数多くの家具などのデータの標準化と社会的な蓄積、そして適切なセキュリティ技術が、このサービスの普及の前提となることであろう。

6. 5. 4 高齢化社会という、またとないチャンス

一般的に言えば、「若者」を主要なターゲットとしたメディア開発では、身体的な条件にばらつきが少ないため大雑把なレベルでの標準化が可能である。また、携帯電話を使っての終電時刻の検索など、若者は新しいメディアやサービスを簡単に使いこなす。他方、高齢者は人により視力や聴力に大きなばらつきがあるので、メディア機器にもユーザーごとのカスタマイズが求められる。一般の高齢者は体力も落ちているし、それほど器用でもない。超高齢社会になるので日本の将来が心配だ、と思う人がいるのも当然のことである。

しかし、今の高齢者は、昔の「老人」と違って知的好奇心もあり、生きがいも探求し、 老後の蓄えも十分に保有し、しかも若者が享受しているのと同じようなサービスを期待し ている。このような高齢者が大量に巷に溢れている現在の状況は、コンテクスト・アウェ アな社会を実現するには、願ったりかなったりの絶好のチャンスにあると考えられる。

「推定支援型展示手法」を使えば、現実の世界に映像による解説をスーパーインポーズできることを述べた。こうした技術を五感のすべてに拡張することで、大量にいる若者が少数の高齢者を支えるという 19-20 世紀様式の社会は、180 度逆転できるかも知れない。

センサー技術が安価になり、秋葉原に行けば学生でも購入して使える状況が 90 年代以降に生じている。ロボコンや IVRC (国際学生対抗 VR コンテスト) といった学生の技術コンテストを見ても、センサー技術で人間の五感が確実に拡張されつつあることが分かる。 老人が社会的な弱者で被介護の対象とだけ見られているのは、彼らの感覚器官や運動能力の低下によるものなので、団塊の世代の老人達(当人達は老人だと思っていない) を支援

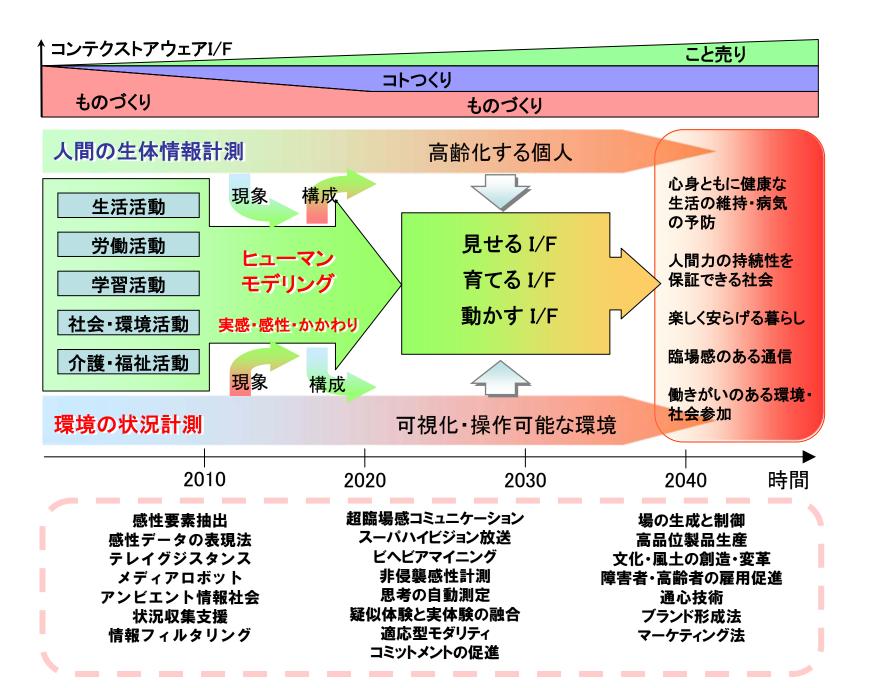
して、体力も日本のお家芸のロボット技術で支えて「スーパー高齢者」の活躍を促すことができれば、高齢者は自らの蓄積した職能を生かして若者(可愛い子供や孫)の世代を支え、納税額も増加し、日本にとっては極めて有利な社会が現出できるはずである。

先ず、スーパー高齢者達には、「バイタル座椅子」や「ウェアラブル(身につける)PC」に接続したセンサーを用いて自身のバイタルデータ(血圧や心拍数)を常時モニタできるようにしておきたい。「万能のロボットが開発されて、気働きをして弱い老人の介護をする」といったイメージしかないことでは、コンテクスト・アウェアな社会が実現できないのではないだろうか。自分が何をしたいか、何ができるかの判断は、老人自身がすれば良い。感覚器官を補強すれば、社会参加も可能になる。バイタルデータを一日に一度、病院のかかりつけの医師に届けておけば、予防医療も可能になる。

また、同じシステムで「快や不快」といった感性データをモニタすることもできるので、 例えば「目安箱」をどこかの統計学者のもとに設けておけば、国民投票を大規模に行わな くても、社会政策への賛否などの意識調査が世代単位で可能である。

その結果は、大画面の街頭のメディアに表示して社会的なコンセンサスが形成される。 地球観測衛星からの観測データを含めた地球各地のリアルタイムの映像も、求めさえすれ ば大画面に表示できるので、生活者の発信する情報と可視化された環境からの情報が分か りやすく表示されることで、温暖化対策や生物資源の保護といった国際間にまたがる合意 も、できやすい社会が形成できるかも知れない。

こうした夢の社会の実現を阻んでいるのは、大雑把なレベルの標準化で製造費をコストダウンする能力しかないので、(今や少数者である)若者向けの製品だけしか開発できない、過去の大企業の貧困な商品開発力である。彼らは、そのようにして大雑把に作った商品のシェアを中国や東南アジアに奪われながら、既存の販売チャネルに依存した生産を続けるという愚を冒しているのではないか。大変に困ったことだと言えよう。



6.6 感性の共有と創造

20世紀後半のコンピュータ技術は、情報の得かた、蓄めかた、使いかた、味付けかた、伝えかたを大きく変換させてきた。そして 21世紀を迎えたいま、人間にとっての情報の原点に立ち戻り、現代の先端情報処理技術が追い求めてきた情報の量的な側面のみならず、それによって積み残された、感性や情緒といった、いわば情報の質的な側面の課題のあらましを理解することがますます重要になってきている。感性を伝え合い、共有し、創り上げていく人間の営為を科学していくためには、これまでの情報通信の理論のみでは究明し得ない、さまざまな困難な課題の解決が求められることになる。同様に感性に訴えることのできる製品を開発し利用者の満足を得るためには、設計者と利用者との間でのインタラクティブな製品開発が必須となる。本節では、このような感性の対称性が実現する社会・コトについてまとめ、またこのような対称的なやり取りの上に生み出される新しい価値観(インタフェースの価値観)についても展望する。

6.6.1 感性インタフェース

ヒューマンインタフェースの目的は人と人、人と機械とのコミュニケーションを円滑にすることで、すべての人が安全で安心して健康に暮らせる生活環境を作ることにある。そのためには使いやすい製品をユーザーに提供することに加えて、ユーザーの感性を刺激する製品の提供も必要である。例えば、部品から出る種々の音を録音し、心理的に不快感を与える音を取り除く技術が開発されている。また、自動車のキャデラックのレザーシートには「ニュアンス」というさわやかな香りを漂わせる物質を混入させ、高級車としての風格をかもし出すということがなされている。さらに、製品の機能とは関係のないパッケージを捨てるのがもったいないと思わせるデザインもある。

こうしたものづくりと同時に生き甲斐とか癒しといったコトの提供も必要となる。そのためには、感性の共有を実感できるヒューマンインタフェース技術の開発や新たな感性の創造に発展するインタフェース技術の展開に焦点を当てた研究や製品開発が重要である。スポーツの世界とか、経営やものづくりの現場では「心・技・体」の3つの充実が要求される。インタフェースデザインにおいても、これらが個別に優れていても不十分で、これら3つの調和のとれた関係が重要とされる。例えば、製品を作る技はあってもそこに心が通っていなければ、将来はユーザーに受入れられない。また、製品を作る技を磨くには体力も必要になる。こうした3つの要素をバランスよく繋いで、調和のとれた関係を保つ媒体としての役を感性インタフェース技術が担うと考える。

6.6.2 感性技術の課題

デザイナーの感性とユーザーの感性: ノーマンは使いにくい製品が作られる背景には、製品をデザインする側とそれを使う側のメンタルモデルが異なることがあると指摘した [6-13]。彼はユーザーのメンタルモデルに適合したシステムをデザインすべきであると述べ

ている。これまでにメンタルモデルの記述法はいくつか提案されているものの、それらが必ずしも使いやすい製品のデザインに結びつかない場合が多い。そのため、ものづくりの早い段階で設計や評価にユーザーを参加させる方法がとられる。しかし、ユーザーのシステムに対する反応をどのように製品の再設計に結びつけるかのアイデアは、そうした評価結果に直接現れるわけではない(改善策も得るような評価法が開発されつつあるが、まだ検討段階にある)。改良のためのアイデアの善し悪しはデザイナーの感性によるところが大きい。一方、使いやすいと感じるか否かは、ユーザーの感性に負うところが大きい。ユーザーの感性を刺激するような魅力的な製品を生むためには、デザイナーの感性がユーザーのそれと整合する必要はなく、むしろ、異なる方が何らかの感動をユーザーに提供することが可能になる場合がある。したがって、"もの"を作るデザイナーの感性と"コト"を使うユーザーの感性の関係性に焦点を当てることが重要となって来ている。

また、技能(美的感性)の伝承あるいは教育のための技能表現モデルの開発はほとんどなされていない。ノウハウの表現には限界がある。言語や映像に頼らないで感性を共有できる技術はない。これまでの技能の定量的表現方法は、人に(あるいは人が)与えた刺激とそれに対する応答(主観的、客観的評価)の関係をもとにしている。例えば、作り手の動作や力のかけ具合や、それによる"もの"の変形程度を数値で表現する。これは可能であるが、作り手と"もの"との接面の情報を計測することは困難である。その接面の計測値が技能者の感性の働きと密接に関係している部分である。したがって、接面についての客観的な計測手法の開発が今後必要になる。たとえ感性による結果として生成される部分を、従来法で客観的に説明できても、接面に関係している暗黙知を表現できなければ、技能を正しく表現したとは言えないし、それを伝達できない。

生理計測値と主観評価尺度値の関係: "もの"の使いやすさを評価するために、主観評価尺度値(質問紙や尺度構成法など)と生理計測値(眼球運動計測、筋電計測、心拍、発汗、血流、脳波、温熱など)との相関を考察することが行われているが、そこで明らかになった関係がなぜ生じるかについての解明はほとんどなされていない。主観評価尺度値と客観評価値との関係を示しているに過ぎない。

計測とモデル化: さまざまな手法で人体計測が行われているが、得たデータをどのようにすれば活用できるかの展望が必ずしもはっきりしていない場合がある。モデル化(出力)が人を果たして表現できているかについて、常に注意する必要がある。そうでないと単なる数値遊びになる。特に、感性のモデル化の際は、何を表現しようとしているかの明確な記述が必要である。

6.6.3 感性技術の開発

ユーザーの認知負担が少なく、かつ快適な使用感を与える機器をデザインする必要がある。しかし、ユーザーの感性は個々で異なる。したがって、感性を共有するためには個々の認知力などの多様性を認め合い、"もの"の利用環境やコトに対する状況認識の異なることも受入れる必要がある。そして、ものづくりやコトつくりのための感性技術は、これまでの「見せるインタフェース」がさらに開発され「魅せるインタフェース」へとシフト

するであろう。さらに、デザイナーとユーザーが感性を共有するための、感性を「育てるインタフェース」が必要になる。また、人を感動させ「動かすインタフェース」の開発の後に、人を「活かすインタフェース」の開発が必要となる。このような感性技術は人間生活技術の開発において重要な位置を占めると考える。

魅せるインタフェース:近年は、高機能インタフェースから高品質インタフェースのデザインへと進む。そのために、見せるインタフェース技術の開発には、製品のどのような見え方がユーザーに違和感を与えないで、使いやすく感じさせるかを表現するための感性データが必要である。次いで、魅力のあるインタフェースを開発するには、魅力を演出するデザイナーの創造力が要求される。そのために感性データベースを用いた発想支援技術、デザイナー育成技術、ものづくり支援技術などの開発が進む。デザイナーの感性を共有することで、ユーザーは創造力を刺激されるので感性の鍛錬になる。一方、機器の使いこなしに対するユーザーの達成感をくすぐるような、使いにくさが魅力のインタフェースも出てこよう。

また、知と情と意の関係の解明による新しい情報伝達の可能性が高くなる。そのために、 ノンバーバル情報の高感度計測法の開発、ノンバーバル情報のもつ意味の自動解釈技術の 開発、感性情報の通信技術などの研究が進む。さらに、眼は口ほどに"もの"を言うと言 われるように、例えば眼球運動、表情、動作などと心の動きの関係が解明され、黙って座 ればピタリと当たる非接触の感性計測技術の開発が進む。

育てるインタフェース:ユーザーが共感するような"もの"や"コト"をデザインするインタフェースデザイナーの役割がいっそう強くなる。そうしたインタフェースデザイナーを育てるために、ノウハウに関する感性データの表現法と蓄積技術(データベース技術)、感性をベースにした意思決定法の開発(美感覚、共感覚など)が進む。また、五感に関する計測データ間の関係を表現する手法が開発され、高度技能の表現手法と定量化法(暗黙知の一部形式知化)に関する研究が進む。そこではインタフェースデザインの技能を伝授する側と伝授される側との共通言語の解明と、動作の解明がなされる。ひいては、非侵襲計測法による高度技能者の感性の自動表現法の開発が進む。

品質から品位インタフェースへ:そうして、インタフェースデザイナーはこれまでのような使いやすい機器をデザインすることに加えて、品位の感じられるインタフェースデザインの開発に主眼をおくようになる。インタフェースデザイナーはユーザーが使いやすい"もの"から品位のある"もの"を求めさせるように、"もの"や"コト"をデザインするようになると、品位を生む技能をもつ人達の組織化(共同体)が進み、インタフェースデザイナーを育てる環境整備が進む。

以上のように、デザイナーとユーザーの感性の対称性(共有や創造)が実現する社会では、感性に関する共通語が使用され、デザイナーとユーザーの互いの認知的な負担や誤解が軽減する。また、インタフェースデザインの分業体制は確立しやすくなる。さらに、感性産業の発展をさせるために、感性を基としたブランド形成法やマーケティング法の開発、デザインマネジメント技術の開発が進む。

活かすインタフェース:感性技術は軽負担で心地よさを演出するための手法でもある。 しかも、それは高機能を提供しユーザーを自然と「動かすインタフェース」というだけで はなく、ユーザーにデザインに対する共感を持たせて、彼ら自信の豊かな生活を演出し、 使って楽しいとか、満足するとかの感覚を与え、彼らを活かすための手法でもある。それにより、感性インタフェース技術による弱者支援技術の開発やインタフェースデザイナーの雇用促進が可能になる。また、インタフェースデザイナーの能力の定量化とその活用方法(教授システム)の開発が進む。

6.6.4 感性技術開発の光と影

感性技術の光と陰:感性技術の進展により、例えば以心伝心のための感性表現技術とか、 阿吽の呼吸インタフェース生成技術といった、通心(心の通信)インタフェースデザイン のステージが生まれ、新たな脳機能計測法、感覚計測法、官能検査法、統計解析法などが 開発される。それにより、デザイナーとユーザーの感性の共有のための表現法が開発され る。また、ノンバーバル情報の中に感性が潜んでおり、それの伝達の重要性が認識される ことにより、感情認識技術の開発が行われる。一方、感性を体系的に表現する手法は確立 されていないので、場当たり的研究が多く感性技術の検証が困難である。また、芸術性の 高い製品を産出する高度技能者や工場で機械を操る技術者の技能は必ずしも高く評価され ていない。前者は研ぎすまされた感性により作品を作るが、後者の機械を操るための各ス テップでの技術は高くない場合がある。しかし、それらの積み重ねによる技術の向上(複 合的技能)は感性に関係する部分であり、一見簡単そうな技術の蓄積についての体系化が 重要になる。感性の共有と創造にはそうした技術の体系化が必要であるが、その方法の確 立には感性データの取得と感性技術の表現法開発のための長い年月が必要であろう。これ までは熟練者の思考のプロトコル、動作データや生理計測値で感性を表現しようとしてい るが、計測データに含まれるノイズに重大な意味が隠されているかも知れない。また、熟 練者の感性と共有できるように後継者の感性を磨くための方法論への展開や、ユーザーの 感性を共有できるインタフェースのデザインについての論理的な展開も必要である。また、 育てるインタフェースのための、感性インタフェースのデザインに関する教育プログラム はまだまだ貧弱である。

仮想世界におけるインタラクションの光と陰:仮想現実空間の表現手法の開発と並行して、その世界でのアバタによるインタラクションのための感情表現技術の開発が進む。そのため、自己とアバタとの関係性がインタラクションに与える影響に関する研究が必要になる。また、仮想と現実をシームレスに繋げる技術開発も進む。その際に、その技術開発の意味は何かを明らかにしておく必要がある。つまり、ユーザーの錯覚を利用する世界を作り、そこでユーザーにどのような生活あるいは体験を何のためにさせるかを明示して、開発をしなければならない。単に、感性技術を取り入れた仮想世界を構築するだけでは無責任である。インタフェースデザイナーは仮想世界でのインタラクションのデザインをあらかじめユーザーに提示し、目的に応じて感性技術をどのようにそこに取入れるかを決める必要がある。

感性ロボットとのインタラクションの光と陰:人とロボットとのインタラクションに関する研究が進んでいる。特に、感情のコミュニケーションに関する議論が盛んである。今後もロボットとのインタラクションで感情の伝達が可能な技術開発が進むが、人がロボッ

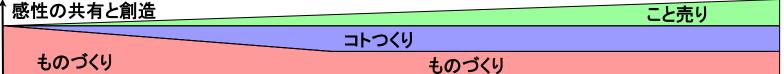
トに対して抱いているイメージと実験に用いたロボットに対する応答を測定したにすぎないことを認識しておく必要がある。ロボットの形状や色や動きや応答のタイミングなどが変われば当然、人がそれから受ける印象も変わり、インタラクションの仕方が変わる。将来はロボットにあたかも感性が備わっているかのような技術開発が進むが、その場合も、何のための感性技術かを見定めた開発が必要である。人と同程度の柔軟性を備えない限り、常に人がロボットに合わせた行動や判断を強いられる状況が生まれる。

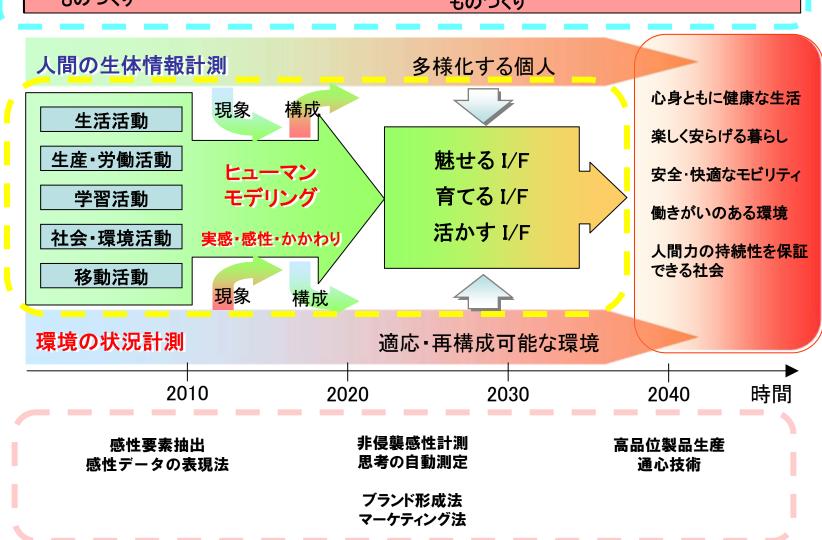
6.6.5 まとめ

感性技術はデザイナーとユーザーのそれぞれの世界で生み出される新しい価値観を共有し、あるいは創造する。この新たなインタフェースの価値が感性産業を生む。そのためにはデザイナーもユーザーも感性を磨くことを目標としなければならない。それにより互いを認め合い、活かし、品位のある"もの"や"コト"のデザインを促進することができる。こうした感性技術により安心で安全なコミュニティ(人と人、アバタとアバタ、人とロボットなど)のインタフェースデザインが必要な社会になる。

参考文献

[6-13] Donald A. Norman and Stephen W. Draper (Eds.), User Centered System Design: New Perspectives on Human-computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ. 1986.





6. 7 感性の対称性から見た産業のヒューマンインタフェース

21世紀を迎えた今日、物質的な豊かさを追究し続けてきた従来からのものづくりの在り方はいま大きく変わろうとしている。「"もの"中心・経済優先」から、「心中心・生活優先」を基盤に据えた「生活技術力」への転換である。そしてこれに付随して転換が迫られているのが、これまでのコミュニケーションの構図、すなわち発信者から受信者への一方向的な情報伝達の構図から、よりインタラクティブな世界、あるいは、情報の発信者と受信者の区別を取り払った「対称性の価値」に意義を見いだしていくことであり、感性工学・感性情報処理が果たすべき中心的な役割がそこにはある。本節ではインタフェースにおける感性の対称性の観点から、今後の社会を展望する。

6. 7. 1 感性の対称性

我々人間は、何らかの行為をし続けることによって生き続ける。行為は他者に向けての働きかけであり、結果として他者はさまざまな様相を呈する。この様相によって、我々は変化を感じ、時間を感じ、自分の行為が他者の行為に変換されたことを知る。我々は行為の変換の連鎖によって生き続けるが、行為の変換特性は感性と呼ばれる。我々は、自身の身体のみならず、さまざまな道具を作って行為の強調や複雑さを演出し、より豊かな人生を送りたいと願う。この道具は、人と人、人ともの、人と社会あるいは環境などの間に介在し我々の行為を支援するものでありヒューマンインタフェースと呼ばれる。ヒューマンインタフェースは、時には人でありデバイスでありシステムであり、それぞれ固有の感性を持っており、行為者と被行為者の変換を仲立ちしている。変換が対称性を持つ場合には、被行為者から行為者に向かって反作用が生じ、この時変換は交換と呼ばれ、感性の対称性が成り立つと考える。ヒューマンインタフェースは、感性の対称性を有する交換を仲立ちし、行為者と被行為者の間の交換は価値を生ずることになる。以上の事柄を図示すると図6-7のようになる。

感性の対称性によって生ずる価値という視点は、対称性を欠いた従来型大量生産の次の時代、すなわちポスト大量生産時代の産業を考えるに重要である。本節では、ものづくり、コトつくり、モノコトつくり、すなわち産業におけるヒューマンインタフェースの役割を、感性の対称性に注目し、ロードマップ(RM)を考えてみる(図6-8)。

6. 7. 2 生産技術の現状と問題点 (RM/ステージI)

第二次大戦後、我が国は大量生産多量消費の技術開発を中心として経済ならびに産業を展開させてきた。多くの"もの"は、プロダクトアウトの大量生産方式により工場で見込み生産され、既製品として市場に大量に放出された。物不足の時代には余剰品はなく、全てが消費者に利用されて、現在のように売れ残り品が環境負荷になって汚染原因になるようなことはなかったが、今では大量生産方式は環境問題を引き起こしている大きな原因の一つである。その大量生産(①)の工場は、今では安い生産コストを求めて海外に移転し、

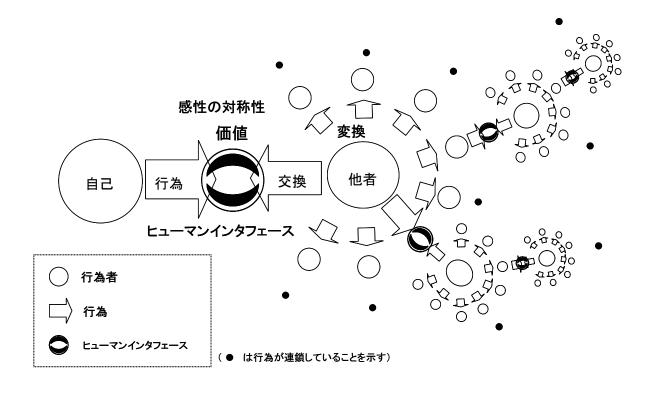


図6-7 感性の対称性と価値

多くの分野で国内産業の空洞化を招いている。国内産業は、海外との競争力に勝つためにあらゆるコスト削減の方法を行っており、技術革新による効率化のみならず、アウトソーシング(①)などによる雇用形態の変革や企業合併などを行って、国際競争に打ち勝とうとしている。アウトソーシングは、感性の対称性という点から考えて、それとは反対側にある人材活用方法である。アウトソーシングは、人材を安く使用し人件費を削減するために作られたシステムであり、被雇用者は、多様な企業において都合良く使役されるが、雇用者と被雇用者との関係を感性の対称性という視点から考えるとき、非常に問題の多い雇用システムである。

しかし時代は徐々に変わりつつある。大量生産によって産出される製品や商品に消費者が物足りなさを感じて、より高級な"もの"、より贅沢な"もの"、より意味のある"もの"、より消費者のニーズに合致した"もの"へと多様化している時代である。これによって産業技術も変化し、多品種少量生産(②)へとシフトし、消費者需要に沿った生産が行われ、より細やかな、B to B、あるいは B to C 対応となって、感性の対称性が重要になってきている。より先端的な企業では、部品一つでさえも即納する一品生産(②)の企業も現れている。このような細やかなものづくりは、従来日本の職人が得意とするところである。例えば友禅の着物を製作するプロセスは、B to B ではあるが、日本に特徴的なハイコンテクスト社会の利点をいかし、スムーズに情報が伝達されて高品位のものづくりが行われている。この場合のインタフェースとしては、インターネットや情報管理システムなどと共に日頃の人間関係が重要な役割を果たす。

大量生産の工場が海外に移行しつつある現在、日本に生産拠点を持つ企業は生き残りを

かけて、多品種少量生産・一品生産(②)からさらに一歩進めて、実時間受注生産方式す なわちオンデマンドプロダクション(③)のものづくりを行って、消費者とのやり取りを 密にして感性の対称性を増し商品の価値を高めようとしている。レストランなどの飲食業 や医療業のように直接消費者と接して消費者の欲求に応える産業は、本来オンデマンド性 が強く感性の対称性を中心とする産業であり、消費者に対応した適切なモデルを持つこと が競争優位性を持つことになり、商品企画、販促などに当たっては、消費者モデルを反映 した優れたヒューマンインタフェースをいかに構築するかが重要である。また、元来オン デマンド性が強かった衣服は(1970 年代まで既製服よりも注文生産が多かった)、今では 工場生産が主となり、海外輸入に依存している現状である。衣服のような自己表現性の強 い商品のほとんどを既製品として海外から入手しているという現状は、日本の衣服文化の 低下を物語っている。しかし、海外生産品もコストが上がってきている現状では、再び国 内生産の機運が盛り上がってくることが予想される。海外との差別化を考えると、オンデ マンドのものづくりが行われ、従来のプロダクトアウトの大量生産方式とは異なった視点 が要求される。つまり、オンデマンドによるものづくりは、単なるものづくりでなく、消 費者とのやり取りにより消費者欲求を反映させたものとなり、消費者の着装動機や目的な どを含んだモノコトつくりとなっている(④)。単なるものづくりやコトつくりは、生産者 や企画側の能力やコンセプトに左右されて作られるが、モノコトつくりは生産者と消費者 の間にやり取りが必要であり、生産プロセスに感性の対称性が成立する生産システムであ

しかし労働者を取り巻く環境はますます厳しくなっており、競争力向上のために、極限まで人間を働かせる工夫がなされている面もあり、人間力が疲弊し感性力が低下している時代と考えられる。例えば、アッテンティブワークベンチ(⑤)などの労働者支援システムの研究がなされている。これは作業者の疲労、ストレス、緊張状態などのバイタルデータを計測し、それによって作業者の生理的心理的状態を把握し、安全で効率の良い生産システムを構築しようとするものである。しかし、このような支援システムは、一歩運用を間違えば、労働者酷使の方法にもなりかねない。むしろ労働者が楽しく快適に作業できる感性の対称性が成立する労働環境を用意する方が、人々の感性力を増大し創造的な製品開発や生産性を上げるに有効であろう。そういう意味では、人々が人間関係に患わされることなく働けるように労働環境を調整するインタフェースが生産性に不可欠であるが、これについては次項で言及する。

以上現代生産技術の現状と問題点について感性の対称性という視点から考えてきたが、革新的な生産技術に立ち向かう我々の気持ちの根底にあるのは、グローバリズムにおける恐怖心であるかもしれない。何とかして勝ち残って勝者になりたい、勝者になればきっと生き残れるかもしれないとの思いが、革新的技術開発を行わせている。しかし、いくら新しいものを開発しようが、発明しようが、それは人々によってすぐに使われ、使われてはじめて価値を生むので、誰か特定の人々だけが優位性を保つようなことはないと言うことは肝に銘じておく必要がある。

6.7.3 感性の対称性に向かって (RMステージⅡ)

現代はストレス社会と言われている。IT の出現もあり、多種多様な情報の洪水に囲まれてストレスは溜まる一方である。毎日を過ごすことで精一杯であり、自分がどのような状況にあるかなど知るよしもない。重篤な病気にかかっていても気がつかないで手遅れになることはいくらでもあり、ましてや無意識下にある身心の状況などは把握する術がない。自分がどのような状況にあるかが、せめて無意識の世界と意識の世界の整合性ぐらい計りたいが、自分自身の中でもやり取りがなされていないので、感性の対称性が成り立っていない状況にある。そこで、呼吸、心拍、心電図、脳波、呼気などの生理的計測を継続的に行って、身体や潜在意識の状況を推測し、意識の世界との整合性を図ることにより、より快適に生きていくためのインタフェース、パーソナル I/F(①)が出現するだろう。また自己のみならず、相手に対しても、話すときの声の調子、瞳の変化、立ち居振る舞いなどから心理状態を推察することもできるので、他者用のパーソナル I/F も可能となる。孫子の兵法に「敵を知り、己を知らば、百戦危うからず」と言うが、自他共に良く理解し合うためのインタフェースの開発が望まれる。具体的形状としては、各種のセンサーを布置する物や方法によってさまざまなタイプが考えられる。例えば衣服型、腕時計型、ネックレス型、めがね型、帽子型などである。

さて、生産技術に視点を移そう。プロダクトアウトの生産方式が、消費者モデルを内包したモノコトつくりへと変化して、その先にはどのようなモノコトつくりがあるのか。そこには消費者と生産者とのコラボレーションによるモノコトつくりがある。消費者は商品に対して最も良い理解者であると同時に最も厳しい批判者である。この消費者の商品に対する思いとデザイナーの力とを用いて、感性の対称性の原理により大きな価値を生み出そうとするのが、対話型生産である(②)。この生産方式には、いくつかのタイプがある。例えば、生産者側のデザイナーと消費者のコラボレーションの方式があげられる。これは、人と人との直接のやり取りを通じて互いの感性をぶつけて新しいモノコトを生産しようとする方法である。ここでは、いかに自分の考えを相手に知らせるか、あるいはいかに相手の考えを知るかのインタフェースが重要になる。また別の方法では、一人あるいは幾人かの人々がチームを組んで、商品企画や事業計画を行う。これらの人々はモノコトつくりのエキスパートで、製造者と消費者とを結びつけるインタフェースの役割をする。人の集団がインタフェースそのものとなりモノコトつくりを行う例である。

職場において、あるいは活動するに当たって、人々が苦労するのは、人間関係である。 固定化された人間関係では、人間関係のトラブルが発生しても、容易に解消することは難 しい。人間関係に患わされることなく快適に働けるように労働環境を調整するインタフェ ースの存在は、仕事を遂行するメリットばかりでなく、生産性も格段に上がることが期待 される(③)。このインタフェースも、ソフトウエアとしての IT 技術よりも、優れた人間 の経験とチームワークがつくるインタフェースである。

産業の役割は、人々の生活の安定と豊かさを維持することである。産業のグローバル化は、人々にプラスとマイナスの両面から影響を与えているが、近頃は人口爆発や資源枯渇の問題など不安な要因が増大している。したがって我々が安定して生活していくためには、食料の安定供給や生活文化の回復など、安全保障上、グローバリズムの産業活動とは別に、

生活域内に食料や生活用品の生産システムを維持するための域内生産 I/F (④) を作る必要がある。地産地消の仕組みを充実させて、野菜や穀物のみでなく、衣服や燃料なども生活域内生産を行う。域内に住む人々の間でのやり取りの対称性が成り立つように作られることが要求される。

また、生活域内生産 I/F を支えるためのインフラストラクチャとして、チューブネットワーク輸送システム(⑤)を作る。これは、筒状の輸送管を空気流やリニアなどで駆動させ、低エネルギーで高速に"もの"を相互に輸送させるシステムである。これにより、域内の産業経済は飛躍的に発展すると考えられる。

6.7.4 感性社会におけるヒューマンインタフェース (RMステージⅢ)

人が人である一つの理由は、物事を考える力が強いことであろう。思考力としてどのような分野があるかというと、人間や環境に対応するモデル作り、あるいは従来にないモノコトを作り出す能力などがある。このような人間の思考力を支援して、物事を考える力を増大するためのインタフェース、すなわち思考のための I/F(①) が開発されると、人々はより多くの人々のことを理解し互いに尊敬するようになるだろう。このインタフェースの機能としては、類似メタファーの提示、異感覚イメージの組み合わせ表現などがあげられる。

人と人とのやり取りにおいて、非対称性が生ずるにはさまざまな理由があるが、誰かが何かを独り占めしたり蓄えたりし始めると、社会の構造に非対称性が生じ、階層構造になったり、凝集構造になったりする。するとフラットな双方向のやり取りのあるネットワーク構造に比べて、モノコトの流通量が低くなる。巨大な人口を支え、有限な資源を有効に活用するためには、人間と人間との間に双方向のやり取りが保たれるような仕組みを維持することは不可欠である。そこで、感性対称性のあるフラットな構造を持ち、人々が平等に繋がっているネットワーク生成を促進するインタフェースとして、フラットネットワーク生成 I/F (②) を提唱する。

感性社会の実現には、社会全体の生産性を考えることが必要になる。必ずしも私企業の 論理によってばかりでなく、社会全体の生産性を考えると、企業の枠を越えたところで、 生産性を考える仕組み、すなわちソーシャルプロダクション(③)が必要になる。

団塊の世代が熟年になりつつある。彼らが十分に年老いてくると、モータリゼーションの代わりに、あまり歩かなくても便利な社会を作りたいと思うだろう。そのような時代はもうすぐ来ているが、その実現にはまだ相当な時間がかかるだろう。朝起きて爽やかな空気の林の中を散歩し、昼には仲間達と将棋を指して、夜には温泉に浸かってゆったりとそんな住みやすいコンパクトシティ(④)が出現して欲しい。

感性の対称性から見たヒューマンインタフェース コトつくり こと売り モノコトつくり モノコト売り ものづくり もの売り 人との対称性 活性化する感性 構成 現象 身心ともに健康な生活 生活•文化活動 楽しく安らげる暮らし 学習·教育活動 ヒューマン 生活する I/F モデリング 安全・快適なモビリティ 労働・生産活動 生産する I/F 実感・感性・かかわり 思考の I/F 働きがいのある環境 流通•消費活動 人間力の持続性を保証 社会 · 環境活動 できる社会 社会・環境との対称性 持続可能な社会・環境 2010 2020 2030 2040 時間 ステージ | 2009-2020 ステージ川 2020-2035 ステージ || 2035-2050 (我慢の時代) (感性力向上) (感性社会) ①パーソナルI/F 1大量生産・アウトソーシング 1)思考のためのI/F ②多品種少量生産・一品生産 ②対話型生産 ②フラットネットワーク生成I/F ③オンデマンドプロダクション ③労働環境I/F ③ソーシャルプロダクション 4 モノコトつくり 4)域内生産I/F 4 コンパクトシティ **⑤アッテンティブワークベンチ** ⑤チューブネットワーク輸送システム

6.8 脳科学、感性とあいまいさ

社会は、環境と多数の脳が相互作用を起こしながら、継続的に変化し存続し続ける仮想的空間である。そして、我々の脳は、その社会の中で、自己と他者そして環境の持つさまざまな要因を考慮に入れながら、社会的リスクを最小化しつつ自己の要求を最大化するように働いている。このような社会的脳機能は、取り扱う変数が膨大なため従来の科学的探索にのせにくく、その機能はこれまでのところ、殆ど解明されていない。一方、インタフェースは、これまで人間と対象機械、あるいは自分と他者の間を繋ぐものとの認識であったが、「ユーザーが理想としているものと現状の認識のズレ」をいかに見せるか、そしてさらに突き詰めれば、「意識と無意識の間のインタフェース」をとることの必要性も重要な課題と考えられる。以下本節ではこれらの観点からまとめる。

6.8.1 脳科学と感性における技術の現状

人間は論理的思考と直感的思考を併用していると言われている。人間の論理的思考に着目した従来の人工知能の研究に対して、人間の直感的思考を解明する試みが 1960 年頃より始まっている [6-14]。人間のあいまい性や柔軟性を取り扱うファジィ理論、脳神経系の学習機能を模擬するニューラルネットワーク、生物の生命進化をモデル化した遺伝的アルゴリズムなどである。これらは人工知能の新たな手法として注目され、相補的かつ融合的に利用して、使いやすさ、頑健性、低コストを達成し、不精密性や不確実性を許容する計算様式を構築した。これらを、ソフトコンピューティング(Soft Computing)と呼ぶ [6-15]。ソフトコンピューティングの各モデルは、特に人間の感性や論理との親和性や融合性に優れているので、いま感性インタフェース構築の技術として注目されつつある。

一方、最近、脳と外界機器とを相互に結合するブレインマシンインタフェース (BMI) やブレインコンピュータインタフェース (BCI) の研究が推進されている [6-16], [6-17]。脳は外界からの情報により環境のダイナミクス性を学習し、同時に、外界の機器は脳の可塑性の学習機能により適応制御が可能となる。この相互インタラクションの効用により、脳の可塑性と機器の適応性がアウフへ一ベンされ、全体システムが環境ダイナミクスに対応してより高度化される。人間の意思に関係なく脳から直接生体情報を計測できるので、人間の意識や意図のズレを自動認識する脳インタフェースの実現や仮想インタフェース技術との融合により仮想疑似的感覚な世界を構成できる。この技術の波及分野は広く、生活、生産、労働、教育、福祉、医療などの各分野において大きな発展性を秘めている。

ここでは、脳・感性インタフェースの今後の技術発展性をアカデミック技術ロードマップに従い順次詳細に議論を進めていく。

6. 8. 2 脳・感性インタフェースの技術展望

(1) 人間の生体情報計測から

脳科学と感性論を基盤とするインタフェース技術を確立するには、人間の脳の仕組み、 特に、脳神経信号処理過程、知覚構造認識、ボトムアップ処理とトップダウン処理による 多層構造化と信号並列処理、局部的・広範的信号処理、注意機能による効率化など、脳の 生体情報計測の観点から人間の生理・感性・認知機能を捉えることが必須である^[6-18]。

最近では、脳内活動の計測技術の進歩により、ブレインマシンインタフェース(BMI)やブレインコンピュータインタフェース (BCI) に代表されるように、脳を真理探究の学際的対象として捉えるだけでなく、脳を社会や機械との統合システムモジュールの一つとして見做し脳機能を工学的に活用する脳工学が推進されつつある。この新たな研究分野はその波及分野が広く、一般的な生活活動や生産労働活動分野だけに止まらず、教育、福祉、医療など他分野においても大きな発展性を秘めている。

この脳生体情報技術をインタフェース技術として活用することは、それぞれの研究分野での発展性を考えるとより高度な寄与を与える。図6-9に脳科学と感性におけるインタフェースの技術展望を示す。これらの技術寄与により、将来、自己と他者との個人差の意識や意図のズレを脳生体情報から自動認識し、自己と他者とが意識・意図を共感する自他共感インタフェース技術や自己が意識することなく脳生体情報を取得し自己の意識や認知を定期的かつ自動的に計測して健康検査が可能な無意識インタフェース技術を確立できる。その結果、実現される技術イメージとして、インタフェースを介して人間関係の蟠りや争いを軽減させ人環境での意思疎通を楽しくさせる社会を実現でき、また、ブレインインタフェース技術を発展させたサイボーグ生成技術や通心技術により、リハビリを必要としない再生感覚技術によるハンディキャップのない脱ストレス社会を実現できる。

しかしながら、その実現には、解決すべき技術的課題も多い。今後、侵襲的・非侵襲的な神経信号計測の確立、身体ロボットの要素技術の確立、感性要素抽出法の確立などの近未来的技術課題から、認知コーディネイトモデル、思考の自動測定法、場の身体化と制御法などを確立し、サイボーグ生成のための基盤技術を確立する必要がある。なお、これらの技術課題は、脳科学と感性論によるインタフェース技術の基盤技術である脳・感性モデルにとってもその実現に必須である。

(2)環境側の状況認識の高度化から

人間の生体情報計測技術は脳科学と感性論を基盤とするインタフェース技術の確立に 必須な要件であるが、社会は自己と他者のみで成立せず、自己や他者以外の要件として場 や環境を考慮する必要がある。しかし、いかに場や環境の条件を自己認識に取り入れるか によって、自己と他者の間には個人差の意識や意図にズレが生じる。このズレを脳生体情 報から自動認識する必要がある。この自動認識によって、例えば、人間が自ずから自己を 知ろうとする際に、自己であっても知り得ない自分の意識や意図を自分が意識することな く測定することが可能ならば、自己と他者とが場を介して自動的に意識や意図をやり取り する相互インタラクションが可能となる。この相互インタラクションの技術はより高度な 脳インタフェース技術の確立に必須な要件となる。

一方、脳や生体は日々成長している。ブレインマシンインタフェース (BMI) やブレインコンピュータインタフェース (BCI) では、生体と機器とをシステムモジュールの一部として相互接続させるが、場や環境を考慮した自己と他者との認知機能向上を目的にするには、機器と生体との両機能での学習性の向上や協調性の向上が必要となる。この学習性・

協調性向上には"認知コーディネイト"が必要となる。この認知コーディネイトを実現するシステムモデルは、環境側の状況認識を考慮したインタフェース技術の確立に不可欠な要件である。

これらの技術要件を解決した場合、場や環境における自己と他者との個人差の意識や意図のズレを脳生体情報から自動認識し意識や意図を共感する自他共感インタフェース技術や、脳への外部刺激によって現実社会に擬似的な感覚を構成し仮想でも現実でもない感覚を生成する疑似感覚インタフェース技術を確立することができる。その結果、実現される技術イメージとして、インタフェースを介して人間関係の蟠りや争いを軽減させ人環境での意思疎通を楽しくさせる社会を実現でき、また、仮想でも現実でもない感覚生成を実現してハンディキャップのない脱ストレス社会を実現できる。

しかしながら、その実現には、解決すべき技術的課題も多い。今後、ブレイン・マシン・インタフェースを基盤として感性要素抽出法、感性データの計測法を確立し、状況収集支援を行う必要がある。また、仮想・現実一体化社会を構成して脱ハンディキャップ社会を促進するため思考の自動測定法を確立し、認知コーディネイトモデルを構築して超臨場感コミュニケーションを実現する必要がある。そのためには、場の身体化と制御理論の確立、および、通心技術の確立は必須である。なお、これらの技術課題は、脳科学と感性論によるインタフェース技術の基盤技術である脳・感性モデルにとってもその実現に必須である。

6.8.3 脳・感性モデリング技術の光と影

脳や生体を統合システムモジュールの一つとして見做し、脳機能を工学的に活用する脳工学は、その波及分野が広く、生活、生産、労働、教育、福祉、医療などの各分野において大きな発展性を秘めている。脳・感性によるインタフェース基盤技術の確立により、人環境での意思疎通を楽しくさせる社会やハンディキャップのない脱ストレス社会や仮想でも現実でもない感覚生成による脱ストレス社会を実現できる。

しかしながら、このインタフェースの実現には、自己と他者との個人差の意識や意図の ズレを脳生体情報から自動認識し意識・意図を共感させる必要があり、脳への外部刺激に よって現実社会に擬似的な感覚を構成し、仮想でも現実でもない感覚を生成する必要があ る。これらの技術は、いわゆる、機械が脳を乗っ取る脳制御や人格を操る人格取得の危険 性を孕み、倫理的にも人権保護の面においても厳粛なる議論を必要とするところである。 今後、脳倫理や意図倫理について詳細でかつ奥深い議論を行い、新たな法ルール整備を行 う必要がある。

参考文献

[6-14] 人工知能学会(編): 人工知能学事典, 共立出版, 2005.

[6-15] 日本ファジィ学会(編): ファジィとソフトコンピューティングハンドブック,共立出版, 2000.

[6-16] M. A. Lebedev, J. M. Carmera, J. E. O'Doherty, M. Zacksenhouse, C. S. Henriquez, J. C. Principe, and M. A. L. Nicolelis: Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator controlled by a brain-machine interface, *Journal of Neuroscience*, **25**, No. 19, pp. 4681-4693, 2005.

[6-17] 櫻井, 八木, 小池, 鈴木: ブレイン・マシン・インタフェース最前線,工業調査会, 2007.

[6-18] 乾(編著): 認知と学習, 丸善, 1993.

脳科学・感性論 環境との相互性を解明する 感性をモデル化する 脳活動を計測する 脳の仕組みを解明する 人間の生体情報計測 脳内活動の計測 社会脳の基盤技術の 達成 現象 構成 生活活動 人環境での意思疎通 を楽しくさせる社会 生産・労働活動 自他共感 I/F 脳・感性 ハンディキャップのな モデリング 無意識 I/F 教育活動 い脱ストレス社会 疑似感覚 I/F 福祉活動 実感・感性・かかわり リハビリを必要としな い再生感覚技術 医療活動 現象 構成 仮想でも現実でもな い感覚生成 環境の状況計測 自己・他者・環境のズレ計測 2010 2020 2030 2040 時間 超臨場感コミュニケーション ブレインマシンインタフェース 場の身体化と制御 認知コーディネイトモデル 身体ロボット サイボーグ生成 思考の自動測定 通心技術 感性要素抽出 非侵襲感性計測の確立 感性データの計測法 脱ハンディキャップ社会の促進 疑似体験と実体験の融合 状況収集支援 仮想·現実一体化社会

図6-9 脳科学と感性におけるインタフェースの技術展望

6. 9 身体的インタラクション・コミュニケーション技術

実際の我々の共有場を通じたコミュニケーションにおいて、実際交わされているのは発話される言語そのものだけではない。そこで、人間のインタラクションやコミュニケーションにおける身体のはたらきに着目し、情報機器・メディアを介して人間とのインタラクションを円滑に促進し、コミュニケーションを支援するためのヒューマンインタフェース技術が注目される。分子やニューロンのようなミクロな要素の運動では、一つの要素の運動が他の要素の運動を誘う働き(引き込み現象)が生まれるために、要素の運動が相互にコヒーレンス(関連性)をもってくることがよく知られている。このような引き込み現象は、人と人との間でも生起し得るものであり、そこで重要な役割を果たすのが、身体性である。共同作業としての秩序がどのように生まれでるのか、さらにこのような身体的コミュニケーションを通じて、前もって入れておかなかったことがどちらのレベルに還元されることなく、自発的に生成される仕組みが何なのか、を明らかにしていくことで共感のインタフェースへの道が拓けるものと期待される。本節では、このような身体的コミュニケーションの実現するかかわりの場の設計論についてまとめる。

6.9.1 技術の現状

身体的インタラクション・コミュニケーション技術は、人間のインタラクションやコミ ュニケーションにおける身体性(身体のはたらき)に着目し、情報機器・メディアを介し て人間とのインタラクションを円滑に促進し、コミュニケーションを支援する、人を繋ぐ ヒューマンインタフェースの主要な技術である。情報機器を介することで、直接的には解 析が困難な人間のインタラクションやコミュニケーションを合成的に解析しモデル化して、 人間の本質的な特性に根ざした、親和性の高いインタフェースの開発が可能になる。各種 のコミュニケーション情報を制御できる仮想環境で、対話者のノンバーバル情報や生体情 報を計測処理することで身体的コミュニケーションを合成的に解析するための身体的バー チャルコミュニケーションシステムの開発などはその例である[6-19]。特に対話者とそのア バタとの身体的行為をあえて矛盾させるなどの矛盾的誘導法(無意識化されている知覚-運動系に矛盾を生起させて明在化させ、その矛盾が解消されていく過程をコンテクストの 生成と関係付けて解析)により、身体的行為がコミュニケーションに果たす役割など、身 体的インタラクション・コミュニケーションを体系的に解明することができる。セカンド ライフなどの仮想社会でのアバタを介したかかわりの技術にも開発展開されている。また テレイグジスタンスを用いる相互コミュニケーション技術、五感通信技術、ロボットメデ ィア技術などの臨場感を高めるコミュニケーション技術や、身体と非分離で無意識に存在 が喚起される身体の影に着目して互いの存在感を送受信して観客を取り込んだ場の統合に よるコミュニケーション技術の開発が進められている。これらの研究開発は、コミュニケ ーションの前提となる一体感や共有感、さらには安心感や信頼感に通じるもので、実感し 共感する場の設計論の萌芽的試みとして期待されている。

6.9.2 今後の研究開発

実感し共感するかかわりの場のヒューマンインタフェースの観点から身体的インタラク ション・コミュニケーション技術のアカデミック・ロードマップを図6-10 に示す。前項 の研究開発等が基盤となって、人間の生体情報計測や環境の状況計測に基づいて人間や人 工物とのかかわりを合成的に解析して、身体的インタラクション・コミュニケーションモ デルを体系的に解明することで、本格的に一体感や共有感、そして安心感や信頼感が実感 できる「共感のインタフェース」の研究開発が望まれる。共感のインタフェースは、実世 界でもアバタを介した仮想世界であっても、自身が参加することによって完結する場にお いて身体を介してかかわることで、思いが共有される実感を伴うインタフェースである。 まず10年から15年後に、遠隔でも現場に共にいるような超臨場感で自然にコミュニケー ションできる、思いを伝え合える支援技術の基盤として超臨場感コミュニケーション技術 が、20年後には、かかわりの場的観点から人を引き込む感動や共感の仕組みを解明して場 の雰囲気や場の盛り上げなどの場の生成と制御技術が研究開発されることで、「いま、ここ」 でのかかわりが実感できる共感のインタフェースで多様なインタラクション・コミュニケ ーションが可能になり、「多様なかかわりの場で共感して暮らす社会」への実現に繋がるで あろう。本技術は、身体性を活かして思いを飛躍的に伝え合えるだけに一歩間違えれば煽 動の技術としての危険性をはらんでいる。この点は成果を早く公開して身体性やかかわり の場の重要性とともに周知させる必要がある。

デカルト以来、自己と対象を完全に分離して客観視することで飛躍的な科学技術の進展がもたらされてきた。しかし、これらの成果は本質的に人間がかかわっていない領域での成果であって、この方法論をそのまま人間あるいは社会に適用できると考えたところに、大きな矛盾が生じている。特に人間とのかかわり、関係性を対象としたヒューマンインタフェースの分野においては、自他分離的手法だけでは明らかに不十分で、場をともにつくるかかわりの設計論が切望されている。身体的インタラクション・コミュニケーション技術の展開により、かかわりを支援するものづくりから、かかわりの場をともにつくるコトつくりに、そしてかかわりの場をともに楽しむコト伝授へと産業構造も進展し、かかわりが実感できる共感のインタフェースを核に「多様なかかわりの場で共感して暮らす社会」の創生に向けた夢のある研究開発が望まれる。

参考文献

[6-19] 渡辺富夫: 身体的コミュニケーション技術とその応用,システム/制御/情報,**49**, No. 11, pp. 431-436, 2005.

かかわりの場をともにつくる

かかわりを支援する

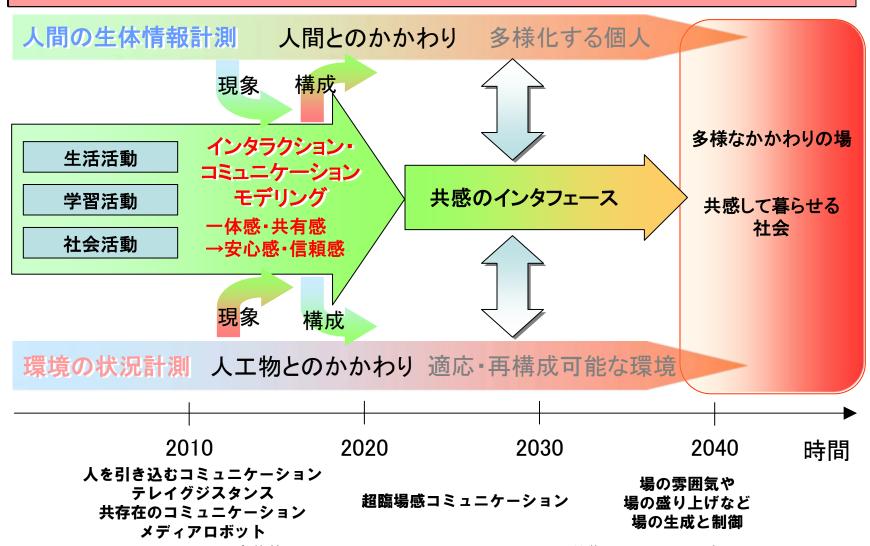


図6-10 身体的インタラクション・コミュニケーション技術のロードマップ

6.10 障害者支援技術

来るべき未来社会においては、高齢者や障害を持つ人が「幸せになれる」ために、弱者を特別扱いするのではなく、個人の特性として対応していくことができ、その個性や潜在的能力を引き出していくことのできるようなインタフェースが必要になる。現状においても、このような高齢者や障害を持つ人に対するインタフェースが提供すべき入力支援技術は、開発が進められている。またユニバーサル・デザイン、あるいはバリアフリーの概念で代表されるように、できるだけ多くの人に、誰にでも利用可能であるようにという設計思想も浸透してきている。しかし、障害者支援では、ユーザーとして想定される人が「全く同じ」から、「全てが違う」という設計思想に転換していかなくてはならない。多様性に併せた選択ができ、「やりすぎないその人に適切なインタフェース」をいかに実現するかが鍵になる。いま一つ、これからの障害者支援で重要なことは、障害をもったユーザーのみに向いたインタフェースではなく、社会全体でこれらの特別な支援を必要とする人を優しく包み込み、自然と手を指しのべられるような環境をデザインしていくことが肝要となろう。以下、本節では、このような共感や相手を理解しようという共同作業性を醸し出すことができるインタフェースの展開も含めてまとめる。

6.10.1 障害者や高齢者の支援

本項では、主に障害者や高齢者に関係する領域への支援技術の目指すべき一つの方向性として、ヒューマンインタフェースの立場からアカデミック・ロードマップを概観する。 国立社会保障・人口問題研究所による2055年の0~14歳と65歳以上の人口構成比(2006年12月中位推計結果)は、それぞれ8.4%と40.5%となっている。このような超少子かつ超高齢社会では、高齢者の障害者の占める割合の増加や介助者の高齢化も現状に増して問題となってくる。福祉分野では、障害者や高齢者をはじめ年齢、性別、国籍などを問わず「誰にでも優しく」、「人が潜在能力を発揮」、「自立した活動・社会参加」、「心身ともに健康を維持」、「安心で安心と感じる状態」を支援するヒューマンインタフェースが望まれる。

6.10.2 障害者・高齢者支援技術開発の現状

障害は、身体障害、知的障害、発達障害、精神障害、高次脳機能障害に大きく分類できる。身体障害は、視覚障害、聴覚・平衡機能障害、音声・言語障害、肢体不自由、内部障害、そしてこれらの重複障害に分類できる。視覚障害は、全盲、ロービジョン(低視覚)、色盲・色弱に分類できる。障害の分類は、多岐にわたり詳細に分類されている。ロービジョンの視野狭窄では、人によって位置、範囲、見えやすさの程度が異なる。視覚障害者への情報受容支援では、拡大することで情報受容を補助したり、読み上げソフトで聴覚情報へ変換したり、点字や振動などの体性感覚へ変換したり、その人に合った適切なモダリティに変換する方法がとられる。聴覚障害者へのコミュニケーション支援では、手話を用いるか、音声日本語と文字を用いるかにより、支援技術が異なってくる。手話は、書記する

ための方法がなく、その言語的特性も未だに十分に解明されていない。筋委縮性側索硬化症 (ALS) における全随意筋麻痺による TLS (Totally Locked-in State) では、有効な意思疎通ができない現状もある。障害は個性であるといわれるように、個人の障害特性は、非常に多様性に富んでいる。

人は加齢により、身体機能、生理機能、認知機能に退行現象が生じる。退行現象は、個人差も大きく多様性に富んでいる。

障害者や高齢者に対する支援では、多様性ゆえに画一的な支援技術を構築することは難しく、その人の身体・生理・認知特性、コミュニケーション手段、生活スタイル、社会参加、介助者の存在などさまざまな側面から考慮することが必要である。

ICT(Information and Communication Technology)、脳科学、再生医療などに関連した福祉分野への発展の期待は大きい。高齢の人や障害のある人をはじめさまざまな人にとって、これらの分野の進展は新たな支援技術を提供できるひとつの重要な機会となっている。例えば、ICT は高度に情報化された社会を生み、新たなコミュニケーション手段の提供や、情報授受の機会を飛躍的に向上させつつある。携帯電話による文字情報の送・受信は、聴覚障害者にとって有効なコミュニケーションや情報授受手段となっている。この携帯電話による文字通信により外出先などでの予定変更など緊急事態に柔軟な対応ができるようになり、飛躍的にその生活の質を向上させているといっても過言ではない。ICT の急速な進展に伴い、障害の有無や年齢を問わずに、情報家電などの操作が複雑となり、デジタルデバイドの拡大が懸念されている。

以上のような現状から、障害者や高齢者の支援技術では、多様性と個別症例の少数性より、個々の問題に対して取り組みはなされているものの、定性的、定量的な統一された実態の解明と必要な支援技術の獲得には至ってないと言える。一般化が難しい部分は、職人的な技術とボランティア的な人材に頼っている。

6.10.3 障害者・高齢者支援技術開発への課題と検討

障害者や高齢者は、多様な能力(年齢や身体・生理・コミュニケーション・認知的能力)をもち、家族やコミュニティや社会などのさまざまなレベルの集団とのかかわりをもっている。ヒューマンインタフェースに求められる役割は、誰にでも優しくもあり厳しくもあるアダプティブでありスケーラブルなインタフェース環境の実現であろう。これら福祉領域での支援技術開発の研究課題は、脳科学を基礎とした認知特性の解明、コミュニケーション確立のためのさまざまなモダリティ特性の解明、身体行動特性の解明、そして認知活動やコミュニケーションなどの基礎をなす言語活動の解明などである。これらの研究や技術開発は、当事者、介助者、取り巻く環境のさまざまな視点から行う必要がある。研究開発の過程で得られる、言語・認知・感覚・生理・身体・行動・モダリティ特性などの人特性データベースの構築は、支援や介護の現場に有益な情報を提供する。見方を変えると、これら解明すべき課題やデータベース構築は、(1)人そのものに対する課題、(2)人を取り巻く環境側の課題、(3)人と環境とのかかわり問題、の3つの視点から整理することができる。

(1) 人間側の課題

誰でもとは、高齢の人、障害のある人、一時的な障害の人、子ども、妊娠中の人、子育て中の人、普通の人、外国の人、特殊環境下にある人であり、性別、国籍を問わない。支援や介助には、人の身体機能、生理機能、運動機能、感覚機能を計測し機能マップを構築する必要がある。障害や加齢により、これらの機能が退行、制限、欠損していれば、その状態を計測し、機能マップを更新して、状況の分析と評価を行う必要がある。

コミュニケーションや情報の授受を考えた時、外界の情報は、聴覚、視覚、体性感覚を通して知覚される。音声は聴覚、手話や文字は視覚、(指)点字や触地図は体性感覚である。通常の音声対話では、聴覚のみならず視覚系からのノンバーバル情報もコミュニケーションに利用されている。人は、さまざまなモダリティにより、情報の授受を行っている。これら個々のモダリティの特性が分からなければ、効果的なコミュニケーション支援は難しい。さらに、音声から手話への変換では、聴覚から視覚へのモダリティ変換となっている。すると、個々のモダリティの特性だけではなく、モダリティ間の変換特性も必要になってくる。意思伝達には、文字、音声、手話などの言語特性と共に、脳内での認知処理過程も必要になる。言語特性と感覚系の多様なモダリティ特性の解明は、必要とする人の能力に応じた、最適なモダリティで情報の授受に必要となる。

これら人間側からの課題解決の第一段階では、障害者や高齢者を含めた、身体運動機能計測技術の確立、脳機能計測手法の確立、モダリティ特性の解明、言語機能の計測手法の確立、コミュニケーション特性の解明を行う必要がある。計測データや解析データは、人特性データベースへ反映させてゆくことになる。計測には、時間および空間分解能の高い、非侵襲か低侵襲の生体計測技術の確立も必要になる。第二段階では、必要とする人に合わせた適応型モダリティ変換手法の確立、適応型コミュニケーション支援法の確立、生体や感覚機能の代替・補完・補助方法の確立へと進むことが可能となる。この時点では、ある程度の意図の抽出・理解、言語・認知機能の解明へとつなげることが必要となる。複雑化したさまざまな情報環境では、その身体そして脳へもたらす影響を考慮した医療、安全基準、倫理規定の確立を必要とする。そして第三段階では、適応型コミュニケーションの促進を期待できる。脳機能計測では、倫理的に深入りしない生体・脳機能計測の促進を期待したい。

(2) 環境側からの状況認知の課題

人は、感覚系を通し外界である環境と接している。環境には、現実世界もあれば、情報により作り出される情報環境も考えられる。

現実世界には、自然環境や社会環境などがある。これらの環境には、地域情報、交通情報、気象情報、事故情報、犯罪情報、災害情報などさまざまな重要度、規模、事象の情報が満ち溢れている。これらの情報の中には、災害のように情報の継承により、重要度の変化するものもある。現実世界の中には、多様な能力の障害者や高齢者が存在する。このことは、緊急避難を考えた時、肢体不自由障害1つでも歩行可能か、歩行器の使用状況などのように、個々の障害の状況により情報の質が変化することが分かる。環境側がこれを判断するためには、高精度に自然や社会などの現実世界の状況やそこに表出されている情報の状態を計測しモニタリングすることが必要になる。これらモニタリングには、環境埋め

込み型のセンサーネットワークの開発が必要となる。

同時に、その環境に接している人の生体活動状況のモニタリングが必要となる。これは、 前項6.10.3(1)で述べた、生体や意図計測技術が確立されれば、環境側の生体の状態のモニタリングが可能となる。

このように、環境側からの状況認知には、環境側からの自分の状態の過去-現在-未来 への変遷と、その環境にいる対象者の生体や意図のモニタリングとが必要になる。

(3) 人と環境とのインタフェースの課題

障害者、高齢者をはじめ、誰にでも優しい人と環境をつなぐ新たなインタフェースは、人間側からと環境からの双方の課題が解決することで提供されると考える。

人の認知、コミュニケーション、言語、意思などの高次認知脳機能と生体・身体・運動機能の解明は、環境から人へ、最適なモダリティ変換を行い、コミュニケーション、意思決定、移動、就労、学習、などの活動に必要な手段の支援ができ、見せる・育てる・動かす・助けるインタフェースの提供を可能とする。

見せるインタフェースでは、最適なモダリティでコミュニケーションを、意図を、時々刻々変化する環境などを見せて活動を支援する。育てるインタフェースでは、さまざまな場面での困難や苦手を回避でき、生活・文化・遊び・学習・社会参加などを支援することで、人や社会を育てる。動かすインタフェースでは、その人に合ったモビリティを支援したり、意図を見せたりすることで、共感などにより心を動かすことも可能になるかもしれない。助けるインタフェースでは、安心感と緊張感と共に必要な支援を可能とする。

これらの結果、ユニークさを許容・共有できる社会、持続的な発展のある社会、新たな価値観を創造できる社会、子供が健やかに育まれる社会が構築されることを願う。

6.10.4 当該領域における技術開発の光と影

これら個人の特性を考慮した状況適応型のアダプティブ&スケーラブルインタフェースでは、過度に手を差し伸べることなく、冒険のできる見守り型で、やりすぎないインタフェースの考え方も必要であろう。人を人たらしめるものは、自分の意志で必要とするインタフェースを選択できることである。他人や環境側は、支援を必要とする人のインタフェースを決定することなく、意思決定を支援する適切なインタフェースを提供することであろう。

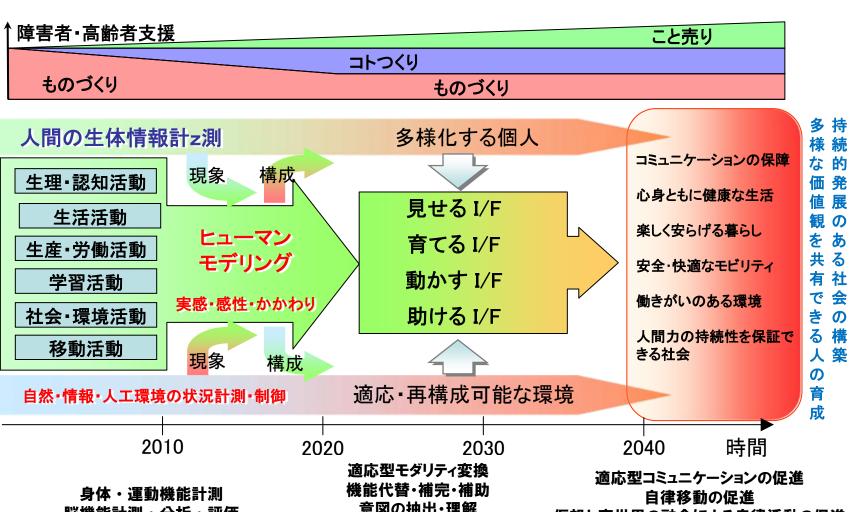
センサーネットワークの整備や人のモニタリングでは、情報の利用やシステムの運用において、個人のプライバシーの管理、保護、倫理が重要な課題となってくる。脳モニタリング技術の進展では、性能の向上とともに倫理的な問題を解決する必要がある。

そして、高度に発達した情報環境が、人の脳にどのように影響するかも未知数である。 人が、安全で安心と感じる心身の状態と健康を維持するためには、人への技術応用と環境 のもたらす影響など多角的に検討するインタフェース情報環境学のような領域の体系化の 検討も必要かもしれない。

インタフェースや医療技術の進展では、消えゆく障害や新たに生まれる障害も予想され

る。また、障害者や高齢者という言葉のニュアンスも大きく変遷していくかもしれない。 そして、現在デジタルデバイドの問題の解決が重要な課題であるのと同様に、高度化され たインタフェース環境では、その人の置かれたさまざまな因子により、インタフェースデ バイドという新たな問題も発生する可能性がある。

最後に、福祉分野でのインタフェースによる支援では、提供可能な手段をリスクととも に提示して、その自信が支援方法を決定できる環境の整備が必要であろう。



脳機能計測・分析・評価 感覚モダリティ特性計測・分析・評価 コミュニケーション特性 生体活動モニタリング 環境モニタリング 情報モニタリング 非侵襲・低侵襲生体計測

意図の抽出・理解 適応型コミュニケーション 認知機能データベース 非侵襲 · 低侵襲意図計測 疑似体験と実体験の融合 情報環境・医療・倫理の確立 (ICTのもたらす安全性計測・評価) ディジタルヒューマン

仮想と実世界の融合による自律活動の促進 深入りしない脳(生体)機能モニタリングの促進 障害者・高齢者感の変革 個人意識の変貌

共同作業感の変貌

多様性のある学習環境の促進 障害者・高齢者の雇用促進

6. 11 アンビエント・インテリジェンスとインタラクティブ・マーケティング

人を取り巻く環境の側に知能が分散され、環境側が人の生活行動に対して適応可能、あるいは再構成可能となる技術が整いつつある。人の方は、これまでのように入力操作を意識しなくとも、環境側がそれを観察して処理し、ユーザーや環境への指令を出して対応していく仕組みである。このような環境側の知性の変化は、その中におかれる人の認知・意識・行動にも変容をもたらすものと考えられる。一方、このような人と環境の間の関係は、ユーザーとメーカーの間の関係も変容させ得る。これまでの人間が機械や企業の論理にあわせるという考え方から、機械や企業の側が、変容し得る人間の多様性に適応的に変わっていくことのできる社会の実現の可能性が見いだせる。送り手と受け手の流動化による、ユーザーとメーカーの間での深いコミュニケーションを通じたものづくりや新たなサービスが生み出されることが期待される。本節では、このような観点からまとめる。

6.11.1 アンビエント・インテリジェンスの現状

インタフェース技術は端的には、IPO (Input, Processing, Output) (入力、処理、出力) 技術から構成されている。従来の入力は、ユーザーがマウスやキーボード、あるいは音声 認識やジェスチャ認識などを用いての陽な操作であった。その操作を解釈するのが、処理 であり、その結果の動作が出力であった。最近では、加速度センサー付のリモコンを用いてユーザーの意識した動作を入力するゲーム機なども盛んに開発されている。

アンビエント・インテリジェンスにおいてもこの IPO の構成は変わらないが、入力として、ユーザーの位置、脈拍や血圧などの、無意識な情報も使うようになる点、および IPO の相手がユーザーだけでなく、ユーザーの周囲にあるものや環境も含むようになってきている点が大きく異なっている。

ユーザーの無意識な情報を入力する例としては、ユーザーの位置情報がある。携帯電話についている GPS (Global Positioning System) などを使って、精度の問題や屋内では使えないなどの問題はあるが、ユーザーの位置情報取得は可能となっている。これを用いて、子供の位置情報を親が知る安否確認サービスなどがすでにサービスインしている。

ユーザー以外の環境も IPO の対象となっている例としては、例えば、ノルウェーのオスロ市道路交通局の街灯調光システムがある。CO2 削減や低コスト化のために、交通量が少ない地域や時間帯では無駄な点灯を避けたい、球切れ確認ための巡回にかかる管理費を削減したい、球切れ時の不安全時間をなくしたいというニーズがあった。これに応えるために、道路状況(交通量、事故情報)、周辺環境(季節、日時計、時間帯、天候)を計測し、それに基づいて街灯の明るさを調整したり、電力通線通信を用いて球切れの検知を行ったりしている。

ユーザー以外のものも IPO の対象となっている例としては、ボーイング社の航空機飛行 状態管理システム (AHM: Airplane Health Management) がある。航空機が運航中に航空機 に取り付けられた各種センサーが計測したデータが通信衛星や地上の基地局を介して、ボ ーイング社に送られる。一方、整備部門からは、航空機の故障分析結果、整備結果もボー イング社に送られる。ボーイング社のモニタリング・アラームシステムは、機体番号、フ ライト番号、ユニット番号、位置情報、稼動状況と、過去の整備履歴などを取得する。モニタリング・アラームシステムは、これらから問題の深刻度、推定故障部位、推測情報などを推定し、これらの情報を整備部門へフィードバックし、不具合の早期発見と改修を可能とするものである。

ボーイング社の例にヘルスモニタリングという名称がついているように、航空機のようなものに対して行われているリアルタイムモニタリングや不具合の整備は、人間の生体情報など無意識情報の計測技術の高精度化と低価格化が実現すれば、人間にも同様に適用されるようになっていく。日本でのメタボ対策などはその流れの予兆にすぎない。

6.11.2 アンビエント・インテリジェンスが切り拓く社会

一方、アンビエント・インテリジェンス社会では、マーケティングスタイルにも大きな変革をもたらすと予想される。従来は、マーケットを調査し、それに基づいて多大な資金をかけ、コンテンツを作成し、流布するというのが、マーケティングスタイルである。しかし、ユーザー特性の多様化により、少ない品種で多くのユーザーに受け入れられるコンテンツ(商品)の開発は、次第に困難になってきている。これに呼応するように、ユーザーが、ブログや SNS(Social Network Service)などにより、個人的に情報を発信することが、ごく一般的に行われるようになってきている。これらの情報を収集し、構造化して、商品のリコメンデーションを行う形態が、Amazon.com などである。これが、「コンテンツありき」から「ユーザーありき」への第1の変革である。

「コンテンツありき」の時代には、ダウンリンクがアップリンクに比較して大量であったが、「ユーザーありき」の現在では、ダウンリンクとアップリンクの量はほぼ対等になり、次第に、アップリンクがダウンリンクを上回るようになってきている。「ユーザーありき」の現代では、Amazon. com などのマーケティングスタイルは、ユーザーが情報入力として陽に意識していない商品購買など、ユーザーの意志が反映された情報を入力としている。しかし、アンビエント・インテリジェンス社会では、さらにユーザーが意識していない情報の収得と活用への発展が期待されているが、実は、そこには、明確な利用方法(Output)がみえていないのが現状である。しかし、先の例にあげたように、ヘルスモニタリングのようにリアルタイムにモニタリングし、そのモニタリング情報をリアルタイムに共有するのが、アンビエント・インテリジェンスのビジネススタイルである。これは、処理された情報の結果をやりとりするスタイルから、処理前の情報の共有、つまり「プロセスの共有」につながるものである。

また、ごく当たり前のことであるが、環境や"もの"の情報、特に事故、失敗事例、不 具合などの情報を安価にかつ安全に入力できるセンサーとそれを送信するために、低消費 電力の無線技術は欠かせない。

「プロセスの共有」においては、セキュリティ管理を適切に行えるようにするための分散リポジトリなどのネットワークインフラやセキュリティインフラが必要となる。

また、リアルタイムでのプロセス共有の付加価値は、リスク低減であるが、リスクを低減するために、必要なコストと、それにより確保される安全性のパフォーマンスとのバラ

ンスを事前にシミュレーションできないと、ビジネスとしては成立しないので、マーケティングが困難となる。これを是正するためには、リスク低減にかかる法改正やインフラ整備などのコストと、それにより生み出される付加価値との連成シミュレーション技術が必須である。

「プロセスの共有」では、集めた情報をリアルに理解しやすくユーザーに提示することも必要である。そのために、高解像度表示技術を使うようになり、実はアップリンクよりはダウンリンクのほうが、ふたたび大量になると予想される。

リアルな提示技術の必要性のさきがけがすでに、自動車では現れている。車の前後左右 4 箇所(フロントグリル、運転窓際サイドミラー、リヤルーフスポイラー、助手席側サイドミラー)に取り付けられた画角 180 度の超広角カメラから、車を上から見下ろしたような映像を車の中のディスプレイに表示するものである。現実の世界では、環境側にあるカメラから撮像した画像のみが真上からみることが可能であったものを、"もの"自身が取得する情報を、画角を変えて合成することで、仮想的に真上からみる画像を合成しているものである。このように、取得データが増えるほど、ユーザーのニーズにあわせて取得した入力情報を加工し、提示する技術がいっそう欠かせないのである。

▲アンビエントインテリジェンスとインタラクティブ・マーケティング プロセスの共有 コンシューマありき ものづくり コンテンツありき 人間の生体・操作情報操作計測 多様化する個人 心身ともに健康な生活 構成 現象 生活活動 空気を読むI/F 楽しく安らげる暮らし 生産・労働活動 ヒューマン 安全・快適なモビリティ 個と環境との モデリング 学習活動 関係強化I/F 働きがいのある環境 社会•環境活動 実感・感性・かかわり プロセス共有 I/F 人間力の持続性を保証 移動活動 できる社会 現象 構成 環境の状況計測 適応・再構成可能な環境 2010 2020 2030 時間 2040 場の生成と制御 ライフログ ビヘビアマイニング 事故情報蓄積 非侵襲感性計測 高品位製品生産 故障/不具合情報蓄積 文化・風土の創造・変革 思考の自動測定 障害者・高齢者の雇用促進 災害情報蓄積 疑似体験と実体験の融合 リアルタイムモニタリング 適応型モダリティ 通心技術 リアルタイム共有 ブランド形成法 コミットメントの促進 経験の共有 リスクコスト練成シミュレーション マーケティング法 アンビエント情報社会 分散リポジトリ 状況収集支援 低消費電力無線技術 環境制御

6. 12 おわりに

以上本章では、「ヒューマンインタフェースの革新による新社会の創生」に関するアカデミック・ロードマップについて、「実感」、「感性」、「かかわり」の分野に大分類し、各々の分野の中でのインタフェース研究の今後の展開についてまとめた。そこでのインタフェースが果たすべき役割として、「見せる」、「動かす」、「育てる」の観点に絞り込み、これらの人に対する機能を実現していくためにどのような課題の解決が必要になるかについて、今後の30年後までを視野にいれ、各分野の専門家から自由に展望を述べてもらった。

最後に、以上の分野別のアカデミック・ロードマップを、まとめたものを図6-13に示す。ここで横軸は、現在から30年後に向けた時間の推移を表しており、縦軸は、6.1節で述べた人間と環境の分類をさらに細分化し、上位から下位に向けて、まず人間個人に関する領域から、複数の人間もしくは人間と人工物の間の相互作用の領域へ、そしてそれが環境あるいは社会の次元に拡大される領域を表しており、それぞれの領域における今後のインタフェース研究の要素課題として提起されたテーマを、その実現時期の予測のもとに配置している。ここで個々の個別テーマ間のつながりについては、前節までの内容を参照されたいが、以下では、「ヒューマンインタフェースの革新による新社会の創生」という本章のテーマに立ち戻り、アカデミック・ロードマップの総括について述べる。

これまでの各々の議論を通して共通しているのは、人を取り巻く環境の多重性である。言うまでもなく、人は自然環境(Natural Environment)の中に生存しており、次いで集団で生きるほかはないことから、社会一文化環境(Socio-cultural Environment)の中で暮らしている。そして、多種多様な物理的機能を実現し、社会一文化環境を表現するために、人工環境(Man-made Environment)を形成している。さらに最近では、情報環境(Information Environment)が注目されるようになっている。このように、人間は同時に幾つもの異なるレベルの環境に重層的に包まれて生きているのであり、生活環境は、こうした多層に及ぶ人間一環境系によって構成されている。そしてこの各層における人間と環境の間を繋いでいくのがインタフェース技術である。このような視点から、本章では、アカデミック・ローソマップの策定に当たり、人間と環境との関係性の観点から、その間に位置付けられるヒューマンインタフェースを捉え直すととともに、人間 - インタフェース - 環境の各要素が、固定されたものでなく、常に変容し得ることを前提として、三位一体のシステムとしてどのような動態をもった変遷が今後考えられるのかについて考えてきた。

ところで個人という分析レベルの上に3つの"センスメーキング・レベル"があると主張する社会学者 Norbert Wiley の分析がある。それらは、間主観(inter-subjective)、集主観(generic subjective)、それに超主観(extra-subjective)で、順にレベルは高くなる。個人的な思考、感情、意図を扱うレベル、すなわち個人の中で閉じた内的対話の状態として特徴づけられる自我の様態が内主観(intra-subjective)であり、この状態が会話や相互作用の中に統合ないし綜合され、自我が"私"から"我々"に移行するとき、この自我のレベルが間主観である。そしてこれが組織や社会構造を通した結びつきに発展すると、各個人は役割やルールに規定される存在となり、このレベルが集主観に当たる。個々人の各意志には依存しないある種の行動様式と判断を、我々の外部に固定し、確立する段階である。そして最後の超主観とは、主体なき文化の体系のレベルである。

本章で議論してきたインタフェースのロードマップ策定の議論においては、このような さまざまな自我のレベルを対象としたインタフェースの展開が提起されたことは、興味深 い点である。

まず人間の生理・運動・心理の観察・計測に関する技術の展開、さらには意図や思考の 非侵襲同定の課題、そして脳科学からの意識と無意識の境界を繋げるインタフェースの課 題は、まさしく、内主観のレベルでのインタフェース研究の展開を示唆するものと言えよ う。つぎに、このような内主観のレベルでの究明が進むのと並行して、間主観のレベルの 研究展開の必要性が、多くの委員から提起された。身体的コミュニケーション然り、そし て、感性に関わる研究課題も、6. 7節で強調されているように、行為者と被行為者との 間で生じる感性の対称性の重要性が指摘されていることからも明らかである。さらに障害 者支援で強調されたのは、障害者・健常者の分け隔てなく、両者が互いをわかり合えて共 存できる関係の構築に向けたインタフェースのあり方である。インタラクティブ・マーケ ティングの動向も合わせ、まさに立場の異なる主体の間での間主観性を実現するためのイ ンタフェースの展開が望まれるという点で符合するところである。そして次なる段階での 集主観のレベルへの言及ともとれるインタフェース研究の展開が複数の委員から提起され た。それは、安全・安心の社会の構築、さらには環境問題、そして障害者・高齢者感の変 革や脱ハンディキャップ社会の促進に関する展望に見ることができる。個人のレベルの認 識もさることながら、これを共同体や組織・社会のレベルで根付かせるためのインタフェ ース研究の重要性が指摘されているが、まさに人を動かし、育てるためのインタフェース として、新社会創生に向けた重要なテーマになることは間違いない。

ところで、テクニカルロードマップ、すなわち"もの"としての技術の今後の動向は、これまでの技術の進化と動向を鑑みて、それを外挿していけばある程度は予測もできるのかもしれない。これに対して、インタフェース分野でのアカデミック・ロードマップとなると、このような手法がまず有効ではない。その主たる要因は、やはり「人間」という要素の介入であろう。

人間を内包するシステム、それは事前に定められた規則や物理科学法則によって生成されるハードな構造として定まるシステムではなく、組織あるいは社会生態系の広がりの中で分散した単位がその置かれた環境を読み取り、それに応じて行動をとることができる「主体性」をもった要素群から構成される「ソフト」なシステムである。物理的配線で働きが決まり変更がきかない回路が「ハードワイヤード」と呼ばれるのに対して、人がつくる社会は、個人個人の多様性に対応できる機器類が柔軟に結びつくことで、社会全体が「プログラマブル」となることから、そこで生起する"コト"としての動態を読み解くことは極めて困難であり、まさに「複雑系」の様相を呈する。したがって、その将来予測を行うためには、システムの維持、発展、崩壊のメカニズムに潜む未知の法則を探りあて、安定と変化を繰り返すシステムの発達の過程を明らかにしていかねばならないのであろう。本ロードマップ策定に際して、各委員に各々の専門分野での光と影の部分に焦点を当てた提言を委ねたのは、かような未知の法則を得るヒントになり得ないかとの思いからである。上述の間主観から集主観への社会の遷移に関する議論とも重ね合わせ、インタフェースが創生する新社会のルール整備に関する議論も、アカデミック・ロードマップにおいて今後言及していくべき重要な視点になってくるであろう。

最後に、今回のロードマップの検討においては、残念ながらインタフェースのデザイン 論に踏み込むことができなかった。狭義の"もの"(人工物)としてのインタフェースが媒 介することで、それを使う人間の捉える意味が変遷を繰り返し活動が変容するという力動 性を考慮に入れた、人間 - 環境系全体としてのデザイン論を確立していくことは、これか らのインタフェース研究のアカデミアで議論をしていくべき最重要課題である。この意味 では、インタフェースのデザイン論は、生命のデザインに似た様相を呈する。生物におい ては、それを構成する物質の分子も、生命という文脈におかれれば自律的で主体的な作用 を行い、その結果が機能の表出となる。たとえ同一の物質であっても、その意味するもの は、それがおかれている系の文脈によって異なり、各分子がそれぞれ単独に存在するとき には持たない役割、意味を、その系に対して持つことになる。機能が先にありきではなく、 また機能への一対一の対応で構造がデザインされているものではないという点が生命の特 徴である。同様に、社会関係のなかにあって人間は同じ情報に対して同じ反応をするとは 限らず、ときに無反応なこともあれば、異なった情報に同じ反応をすることもある。この ようなゆらぎと多様性の根源にあるのが、状況の変化と人間内部での概念構造自体の変化 に基礎づけられた「意味論的情報」であり、ここに大きな役割を果たすのがインタフェー スである。コンテクスト・アウェアなインタフェースの研究が、このような意味から深化 されていくことも今後期待されるところである。

	4-100	操縦安定性・フィーリング評価 音・振動・質感評価	適応型モダリティ変換 機能代替・補完・補助	脳(生体)機能モニタリングの促進		
内主観	運動	居眠り・注意力低下・ストレス検出 身体・運動機能計測 脳機能計測・分析・評価 ブレインマシンインタフェース	思考の自動測定 意図の抽出・理解 適応型コミュニケーション	サイボーグ生成		
間主観	感性	生体活動モニタリング 非侵襲・低侵襲生体計測 感性要素抽出 感覚モダリティ特性計測・分析・評価	認知機能データベース 非侵襲・低侵襲意図計測 認知コーディネイトモデル	総合的感性設計		
			思考の自動測定 5	仮想・現実一体化社会 仮想と実世界の融合による 自律活動の促進		
	身体性	窓 圧 ノー・ア リコー 別ルム	る性デザイン 非侵襲感性計測	通心技術		
		人を引き込むコミュニケーション 共存在のコミュニケーション	超臨場感コミュニケーション	場の生成と制御 場の身体化と制御		
		ダ仲ロホノト 状況収集支援	スーパハイビジョン放送 疑似体験と実体験の融合 コミットメントの促進	運転特性適応		
		メディアロボット	ビヘビアマイニング	公共交通機関へのモーダルシフト		
集主観	環境	状況収集支援 情報フィルタリング 環境モニタリング 情報モニタリング	高齢ドライバーの運転支援 公共交通へのモーダルシフト	脱ハンディキャップ社会の促進 障害者・高齢者感の変革 個人意識の変貌		
未工眖		障害物・歩行者・二輪車検知 危険情報提供	衝突回避 出会い頭事故防止	共同作業感の変貌 文化・風土の創造・変革		
超主観	社会インフラ	ライフログ 事故情報蓄積 故障/不具合情報蓄積 災害情報蓄積	カーブ進入危険防止	高品位製品生産		
			リスクコスト練成シミュレーション 分散リポジトリ 低消費電力無線技術	障害者・高齢者の雇用促進 ブランド形成法 マーケティング法		
3		リアルタイムモニタリング 		-1.55		
		2010 20	2030	2040 時間		

第7章 ものづくり分野のアカデミック・ロードマップ

7. 1 はじめに

ロードマップは技術の進展を可視化する道具であり、今後の技術開発のチャートである。 ものづくり分野の特徴として、経済的競争力なしにはすばらしい技術であっても一般化し ないという大原則があるので、製品技術ほど技術の変化速度は速くない。それゆえ、既存 技術の延長上に未来を描くほうが容易であるが、このアカデミック・ロードマップでは、 持続性社会の構築など現代社会がもつ問題点を解決する方向に社会が変化すると仮定して、 そのために必要なものづくり技術を志向した。同時に、「日本のものづくり競争力を強化(あ るいは維持)する」ことを目標とした。

ロードマップの枠組み

ロードマップを作成するにあたっては、以下のようないくつかの枠組みを設定した。

(1) 時間軸の設定

技術ロードマップでは、時間軸上で技術の発展を示す必要がある。時間軸としては、2008年から12年後である2020年、32年(12年+12年の1.6倍である20年の和)後2040年のものづくり技術の姿を考える。将来予想の精度を高めるために、表7-1に示すように、基準年を2000年におき、2000年からの8年分の技術進歩である現状を掌握した上で、2020年、2040年を想定する。逆に過去からの関係を理解するために、同じ期間を過去へと外挿して、1992年、1980年、1960年が区切りとなる。1960年は日本の製造業が高度成長期に入り始めた時期、1980年は日本の製造業が競争力をつけた時期である。そして1992年ごろまでは大量生産型ものづくり技術において日本が成功を収めたという関係が読み取れる。

西暦	1960年	1980年	1992年	2000年	2008年	2020年	2040年
相対 位置	20 年前	12 年前	8年前	基準年	8年後	12 年後	20 年後
意味	ものづく りが体系 化され始 めた時期	日本が競争力をつけた時期	日本の大 量生力が ピークた 迎えた時 期	技 準 技 形 が る で 化 期 時 り 般 時	現在	もの分業体が出する時期	持続ないのがおいます。 おいかい おいかい おいい おいい おいい おいい おいい おいい おいい お

表7-1 技術ロードマップにおける時代的関係

(2) 技術対象

設計生産を伝統的な表現で分類すれば、図7-1のように区切られた過程となる。伝統的なものづくり技術は設計・生産だけをさすが、本論では、製品のライフサイクル全体を

ものづくり技術で管理すると考え、図のすべての過程を対象とする。

ものづくり技術には大別して、製品技術と製造技術があり、本論では両者は不可分のものと考えるが、最終的に製品を製造する方法まで考察する。製品としては、物質的製品に限定することなく、ソフトウェア、コンテンツなどを含むとする。すなわち、サービスを含む「コト」については、"もの"に付随するコトつくりを含むと仮定する。

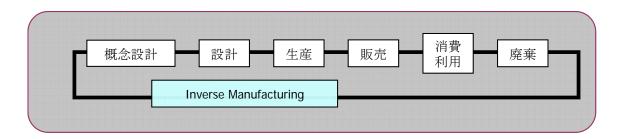


図7-1 ものづくりのシステム構成

(3) ロードマップ利用者

本ロードマップでは、ものづくり技術の利用者を生産技術者のみならず一般人も含めて 検討するが、本ロードマップの利用者は基本的に技術者であるとする。

7. 2 2040年のものづくりの姿

まず 2040 年における"もの"のイメージ、生活のイメージをシナリオとして表現し、 その社会を実現するためのものづくり技術のロードマップを構成する。

7. 2. 1 社会構造

(1) 2040年の社会構造

2040年における社会の状況を次のように想定する。

- エネルギーコスト、水コスト、食料コストはすべて現在の5倍になる。金属材料など は平均して現在の3倍になる。他の原材料コストは現在と同じと仮定する。
- 日本の人口動向については、表7-2のように仮定する。

 年
 総数
 15~64歳
 労働人口

 2008年
 127,686
 82,643
 66,500

 2040年
 109,338
 60,990
 45,000

表 7-2 2040年の労働人口[7-1]

(2) シナリオ

以上の環境条件をもとに、2040年における製品のコンセプトならびに製造技術の利用の

シナリオを作成した。シナリオは次の例のように、製品、ものづくり技術、それらの利用 状況の一例を想起させる文章で表現した。

シナリオの一例:

2040 年 9 月、精密工学会秋季大会が開催される。1933 年にスタートしたこの学会は 100 周年記念行事として「**除去加工**の歴史」を展示した。今年の学会の発表構成を見ると、**機能部品**設計生産技術が約 50%、医療、生命、生活への応用が 20%、社会的な価値生産システム 10%が大きな分野である。

形状創成技術を見るに、切削加工をはじめとする除去加工はその重要性が低下し、代わりに、樹脂金属のレーザー硬化技術と印刷技術が中心である。波長特異性がある材質や多段階硬化性の金属樹脂材料の発達により、CAD データから部品を作り出すまでが今までの100分の1になった。このことは完全な注文生産も可能としている。表面の機能創成には材料のナノ構造から手がつけられるようになり、部品一つ一つの機能が格段に高まった。このことで、機械部品も電子部品と同じような機能部品として使用可能となった。よって、小型機能部品は今でも大量生産・中量生産が続いており、日本は高機能部品に関する世界の供給基地になっている。

持続性社会の構築には「不必要な製品(不必要な情報も含まれる)を世の中に出さない」という大原則が10年前に国際的に制定された。よって、ほとんどの製品はCADとCAEの組み合わせで、機能、使い勝手、他の人工物との関係、顧客満足度がシミュレーションで調べられるようになった。しかしそれでも、すべてシミュレーションで製品価値を評価できるわけもなく、今でも多くの試作品が生産される。それらの多くがWEB上に提示されるので、消費者の代理で新製品検索をしている製品選択エージェントによって検索される。その結果、最低生産単位に達する注文が集まったときに、生産・販売される。自分が何を欲しがっているのかを仕様として明示化するのは楽ではなく、私の場合には、製品選択エージェント(過去の行動から、要求を詳細化してくれるコンピュータソフトウェア)の手助けを借りる。

昨日、母の家の天井組み込みエアコンが壊れたので、エージェントに購入手伝いを依頼 した。既存エアコンはデータベースに載っていないくらい古すぎて、寸法も性能も分から ず、要求機能の段階から検討しなければならず、エージェントも苦労しているようであっ た。最終的には、現物融合技術で寸法を測り、はめ込み具を含めてエージェントがエアコ ン機能サービス社に依頼した。

いまやエアコンは装置を買うのではなく、機能を購入し、Pay-by-use が一般化している。個人で機器購入をし、廃棄費用保険を別途支払うより、Pay-by-use のほうが安いし、環境負荷によって掛かる製品環境負荷税も安く付く・・・・・

このような社会におけるものづくり技術はどのような要素技術からなるのであろうか。 また、それらの要素技術はいかなる手順で開発されるのであろうか。本論では、ものづく り技術の中核として、製品設計の上流過程である要求仕様の決定と、製品生産の出口を決 定付ける製品評価技術の2つから議論を始める。

7. 2. 2 プロシューマ1社会のものづくり

(1) 持続性社会への対応と価値の変化

20 世紀に起きたものづくりにおけるイノベーションで最大のものはフォードによる大量生産方式であろう。それまでは職人による手作りが中心であった。このため、職人ごとに品質も納期も大きな違いがあった。それに対し、流れ作業で自動車を作る仕組みは生産の分業化とマニュアル化を浸透させた。もっとも、多人数による流れ作業は、生産における問題点の隠蔽化にも繋がった。それは生産における品質の責任を曖昧化するとともに、納期遅れの責任も曖昧化した。前工程に問題がある場合、後工程は在庫を積み増すことで自分の仕事への影響を軽減していた。このため、各所で在庫が積みあがり、問題の所在は在庫の山に埋もれる結果となった。

その問題に対する解答はトヨタ自動車を始めとする日本企業が与えた。一つはカンバン利用による在庫削減である。これは JIT (Just-In Time) と呼ばれる活動であり、在庫を削減することで、工程の問題を炙り出し、カイゼンを継続的にかけるものである。このカイゼンを持続させることで短納期、低コスト、品質向上を達成していく仕組みである。このカンバンとカイゼンの両輪に加えて、日本式生産システムの特徴として情報共有化も挙げなければいけない。これは、アンドンに代表される活動である。各設備機器に表示灯を設置し、稼動状態を公開するものである。これは問題発生を周知するだけでなく、発生時に周囲の作業員も含めてカイゼン作業を行う仕組みである。

さて、20世紀は大量生産と日本式生産システムに加え、情報技術が発達した時代でもある。特に、後半はコンピュータの発明、ネットワークの出現、大規模記憶装置の開発と世界を大きく変えてきている。情報技術は情報処理、情報通信、情報蓄積の三つの技術に細分化できるが、この三つともにものづくりに大きな変化を与えている。

処理技術は生産機械の自動化や設計支援ツールという形でものづくりに影響を与えている。実は、コンピュータが理解できるものは数式しかない。そのため、ものづくりにおける数学モデル利用が活発化している。生産でいえば、コンカレントエンジニアリングである。作業を並列化することで短納期化が図られているといわれているが、実態は数学モデルに基づく設計、生産である。最初は数学モデルベースで設計し、次第に実機に置き換えていく SILS (Software In the Loop System) から HILS (Hardware In the Loop System) ヘシームレスにつなぐ手法と、数値データに基づく加工である CAM (Computer Aided Manufacturing)、そして生産システム全体をモデル化する CATIA や NX と呼ばれる CAD (Computer Aided Design) ツールの出現は 21 世紀のものづくりを経験と勘ベースから数学と解析ベースへと変えている。

加えて、通信技術の発達は情報共有の範囲を拡大している。孤立していた各生産設備が連携し、さらに分散された工場が連携し、そして企業群が連携した SCM (Supply Chain Management)が実現されている。ここでは大規模になった蓄積技術が全ての情報を記録し、必要に応じて情報を提供する環境を整えている。

情報技術の発達はものづくり側だけでなく、消費者側も享受している。インターネット

.

¹ 注 アルビン・トフラーが著書の『第三の波』で使った造語. 生産者(プロデューサー) と消費者 (コンシューマー) が一体となったもの。

を閲覧することで、製品の各種情報の所得だけでなく、価格や納期の比較も容易に行われるようになっている。加えて、品質や使い勝手情報も消費者間で瞬時に共有できる環境になってきている。このように消費者間でも情報共有が進んだことで、生産者側にはさらに短納期、低コスト、高品質の圧力が強まっている。

(2) 欲求実現手段としてのものづくり

この生産者と消費者両者の情報化の進展の中で、両者の間でも情報共有が進みつつある。 それは20世紀型の大量に同じ商品を供給するという形ではなく、消費者が個別に求める商品を提供するという形である。簡単にいえば、19世紀の巧みの技を20世紀の大量生産のコストで提供することを消費者は望み始めた。いわば、民主主義の片一方の柱である多数決の論理から、もう一方の柱である少数意見の尊重への軸足の変更である。

しかし、商品開発期間の短縮は生産者と消費者との間隙を顕在化した。それは生産者側が消費者の望みを知らないということであり、そして消費者は自分自身が欲する商品を知らないことである。昔は、マーケットリサーチが有効であったが、開発サイクルの短縮はこの手法を無意味なものに変えようとしている。この短縮化と商品の多様化の狭間にあって生産者も、消費者も売れ筋商品が見えなくなっている。消費者という大きな枠ではなく、個人の要求という細かい枠組みで商品を提供していくと商品が多様化することを避けられない。商品が多様化し、開発サイクルが短いと売れ筋は短期間に大きく変化する。

これは企業側から見ると、会社の浮沈に関わる由々しき問題である。つまり、大きなシェアを保有していても、明日には覆る恐れがある。逆に、新興企業には下克上のチャンス到来でもある。このような先が読めない環境下では、開発サイクルをさらに短縮することで常に売れ筋を追いかけることが必要である。それは、売れ筋を外したときの被害を最小化し、売れ筋の販売機会を最大化する効果がある。

一方、消費者は新しい商品を生み出す技術を知らない。それどころか何が自分に必要か を商品登場前には認識できない。このため、商品が売れ筋か否かは市場に出されて初めて 評価されることになる。

この両者の間隙を埋めるためには、生産と消費の垣根を下げていくしか方法がない。実際、消費者の意見を製品開発に反映するという従来のやり方に留まらず、試作品を消費者に評価してもらうところまで進んでいる。これを加速化すると、開発中の商品を消費者が使用することになる。いいかえれば、消費者の手中の商品を継続的にカイゼンしていくことになる。すなわち、消費者の手元で成長する商品であり、生産者から見ると出荷後も維持管理を続ける商品である。

(3) 所有願望の崩壊と共有指向設計

現在はインターネットや携帯電話が発達し、継続的にソフトウェアを更新することは容易だ。問題はハードウェアである。これを継続的に更新していくためには、モジュール化が不可避である。それに加えて、ハードモジュールの自動統合化も不可欠である。これらを実現していくためには、部品の入出力から始めて最終的には設計図を公開していく必要がある。それも部品単体の設計図だけでは不十分である。その部品がシステムの中でどのように使われているかが分かる必要がある。つまり、最後には部品が含まれるシステム全

体の設計図を共有していくことが必要になってくるであろう。

このようにシステム全体の設計図を各部品が個別に持っているシステムとして生体システムがある。生体の設計図は DNA であり、その DNA には神経や筋肉などの部品に相当する部品の設計情報だけでなく、生体というシステム全体の設計図が含まれる。そして、どの部品にもなれる万能細胞が生体の始まりの基礎となっている。加えて、違う設計図を持っている部品を排除する免疫系の仕組みも生体は持っている。

20世紀後半は、工学が生体に習うという観点から、ニューラルネット、遺伝子アルゴリズム、免疫系、自律分散システムなどの概念を生み出した。これらの概念は計測、制御、スケジューリング、最適化などのものづくりに関連する多方面に大きな影響を与えてきた。ものづくりの原点に設計図があるなら、この設計図情報の共有化のあり方も生体システムに習うべきものがあるだろう。生体システムは、新陳代謝を繰り返し数ヶ月間で細胞が入れ代わっている。しかし、生体自体は一見不変のまま数十年以上の寿命を誇っている。いわば、死ぬことで不老性を保っているものが生体である。生体は常に生産し、消費している。プロシューマの究極の姿の一つが生体にあり、その生体は設計情報の共有化、アミノ酸という形で基本モジュールの共有化を図っている。

以上、未来の製品として生体をターゲットとすると、設計図の公開、共有設計図による 異分子の排除、合法な設計図改変による成長、非合法な設計図改変による致死性の導入な どがプロシューマ的なものづくりには不可欠だろう。

7. 2. 3 感性価値による競争力

前項にも述べられたように、貴族の高尚な趣味として産声を上げた科学技術は、18世紀の産業革命において、蒸気機関をはじめとする新たなエネルギーを用いた種々の生産技術を生み出し、社会における不可欠な基盤として、製品の均一化・低価格化・大量生産を実現し、人々の物質的社会生活を豊かにした。さらに 20 世紀後半に入り、コンピュータが発明された。ここで技術開発は、物理や化学等の自然科学の諸原理を応用することにより、自動車・家電・原子力発電・コンピュータ・半導体等のハードウェアを中心とした産業を支え、物質社会の高度化に大きく貢献した。またコンピュータの高度利用による情報通信技術の発展は、ネットワーク環境という飛躍的に便利な社会生活の道具を人々に提供し、情報を基盤とした経済的な価値が創出された。ここで、これまではお互いの影響力が空間の物理的な距離に依存していたものが、インターネットの誕生によって、物理的な距離を飛び越え情報空間の距離によって影響を与え合う、すなわち情報化社会という物質社会とは異なる新しいパラダイムの社会へと突入したと言える[7-2]。

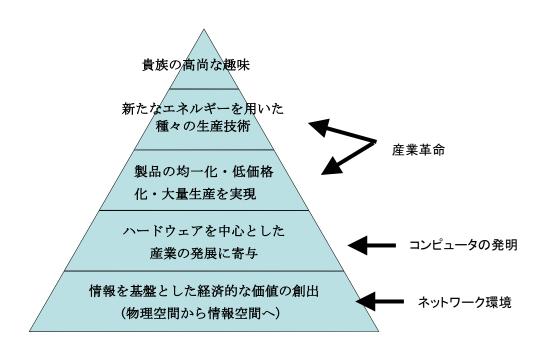


図7-2 科学技術の発展

しかしその一方で、豊かな物質社会の実現は、地球全体に大規模な破壊や生態系の不均 衡を生み、環境破壊や地球資源の枯渇を引き起こした。すなわち、^[7-3]より引用すれば、

従来型科学技術は、物の生産性と人間の活動量を飛躍的に高め、結果として、地球を、「無限の大きさの母なる地球」から「有限の大きさの宇宙船地球号」に変えつつある。我々人類は、無限に大きい宇宙に向かって、再び羽ばたく手段を持つまでのあいだ、宇宙船地球号という閉空間の中で、生活していかなければならない。即ち、我々が直面している問題は、「宇宙船地球号という閉空間の中で、人類は、どのようにして、豊かに、安全に、活き活きと、共生していけるか」という、難問である。

もはや物質的な成長を望めない持続可能な社会への転換における、満足度の質的変換の必要性^[7-4]もさることながら、ある程度必要十分な機能・性能を持ったものが生活にあふれている 21 世紀の日本では、量から質へ、つまり物質的・経済的な豊かさから精神的な豊かさへと、人々のものに対する要求が変化してきているのも事実である。すなわち人々は、良質な生活や豊かな文化をもたらしてくれるもの、言い換えれば快適、健康、楽しみ、喜び、物語性などのある、より感性的側面から価値のあるものを求めるようになってきている(^[7-3]内の文章を一部改変して引用)。この傾向は、今後の発展途上国の科学技術の発展に伴い、日本のような先進国だけの傾向ではなくなるであろう。



図7-3 物質的な豊かさから精神的な豊かさへ

経済産業省は、2007年5月22日に「感性価値創造イニシアティブ」を発表した^{[7-5], [7-6]}。ここでは、人口減少に伴う量的需要減、近隣諸国の追撃などに直面した我が国の産業が競争力を維持・向上させていくために不可欠な差別化やイノベーションの要素を考える上で、改めて「いい商品、いいサービスとは何か」という基本的な問いに立ち帰って検討した結果、生活者の感性に働きかけ、感動や共感を得ることで顕在化する価値として「感性価値」を定義し、従来のものづくりの価値観である機能・信頼性・コストに加え、感性を第4の価値軸として提案している。([7-5]より引用)

1998 年に発行された D. A. ノーマンの著書 "The Invisible Computer" [7-7]によれば、テクノロジーの発達の初期段階において顧客が望むのは高機能化や高性能化だが、その成熟期において大多数の顧客が望むのは、もはや機能や性能ではなく、製品の便利さや優れたユーザーエクスペリエンスである。ここでユーザーエクスペリエンスとは、@IT 情報マネジメント用語事典[7-8]によれば、以下のように定義される概念である。

製品やサービスの使用・消費・所有などを通じて、人間が認知する(有意義な)体験のこと。製品やサービスを利用する過程(の品質)を重視し、ユーザーが真にやりたいこと (本人が意識していない場合もある)を「楽しく」「面白く」「心地よく」行える点を、機能や結果、あるいは使いやすさとは別の"提供価値"として考えるコンセプト

日本のように国土が狭く資源が乏しく科学技術創造立国せざるをえない国が、これからもものづくりにおいて国際的競争力を持ち続けるためには、このような、感性価値を有するものづくり、ユーザーが使って楽しいものづくり、加えて、ユーザーが自ら経験して楽しいもの、すなわち「わくわくするものづくり」を行っていく必要があると考えられる。このようなものづくりは既にもう始まっており、その具体的な事例は文献[7-9]、[7-10] に見られる。そして、日本人の持つきめ細やかな感性から生み出される軽薄短小な商品は、いまや世界中の人々から注目される存在となっており、アジアの発展途上国だけではなく欧米の先進諸国の外国人も秋葉原詣でをする時代である。折しも2007年11月にはミシュランガイド東京版[7-11]、[7-12] が発行され、東京が世界一の美食の町であるということになった。

また日本発のポップカルチャーがフランスやイギリスを始めとする欧米や東南アジアの人々にCool・Kawaiiともてはやされているのも、周知の事実である^[7-13]。さらに世界に先駆けて超高齢化社会へと突入している日本では、高齢な消費者を満足させるためのものづくりが、より高機能・高性能志向ではなく、人生を楽しみながら豊かに暮らすことができるような高ユーザビリティ・高ユーザーエクスペリエンスなものづくりへと、世界に先駆けて変換していく必要があることは自明である。このような日本の利点を積極的に活用し、感性価値の創造を競争力としていくことが、今後の日本のものづくりの方向になるだろうと考えられる。

7.3 ものづくり技術の進展の方向

7. 3. 1 ものづくりコミュニティ

今日我々が予想する持続可能性社会の未来図が現実のものとなっている。2040年には、環境・エネルギー・資源などのさまざまな制約のもとに現代社会とは異なる生活様式が営まれているはずである。その未来図についてはさまざまな予想が行われ、例えば、所有から利用への転換、マスカスタマイゼーション、などについては見解の一致するところであり、また、少子高齢化は確実に現実のものとなる。

消費者について考えると、製品の量的充足・質的充足という「足らざるものを満たす」という段階を超え、「真に豊かな生活とは何か」、「それに必要な"もの"は何か」を重視するようになるというのは直感的には言えるだろうし、少なくともそのような成熟した消費者が増えることは確かであろう。

我々の生活は人工物に囲まれ、それによって成り立っている。このことは、我々の生活が人工物によって、さらには、人工物を提供する製造者によって支配的な影響を受けていることを示す。これは 2040 年であっても同じである。したがって、人工物を提供する製造者は、本来、「真に豊かな生活とは何か」を真摯に考え、それを提案していくべき立場にあるのだが、現実には、どうしても近視眼的に例えば技術シーズを中心とした製品企画や製品開発が行われがちである。しかし、2040 年の社会では、過剰機能や、環境負荷、エネルギー浪費などに対して、消費者は非常に敏感になり、それがコストという形で反映されるだけでなく、前述のように「真に豊かな生活」を見誤った製品や製造者は、おそらく淘汰されてくるであろう。

どのような製品やそのライフサイクルが「真に豊かな生活」に適合するのかを予測することは難しい。しかし、現在のような、生産→物流→販売→使用→廃棄といった単純なフローでは、成熟した消費者を満足させることはできず、また、持続性の制約も満足させることはできないであろう。例えば、製品の機能が、その利用者の家族構成や生活の変化に応じて適合的に変化することによって、製品の長寿命化などが図られるかもしれない。また、自分のほしいものを設計して、製作してもらい、利用する、というマスカスタマイゼーションやパーソナライゼーションのような製品も増えてくるだろう。いずれにしても、製造者と消費者の関係は多様で複雑なものとなり、製造者と利用者の間で適切なサービスを提供する中間的存在が必須となる。

一方、これからも我々の社会が物質的には充足されていることを前提とすると、「真に豊かな生活」とは、「精神的に豊かな生活」を意味し、そのためには、人と人との豊かな関わりが必要になることは言うまでもない。その中で、近年崩壊してきた地域社会の再構築が重要な鍵となってくる。これは例えば、コンパクトシティの考え方などにも現れている。近年急速に進行した郊外化によって、旧市街地は、例えばシャッター通りに象徴されるように大きく衰退した。また、郊外の開発は、自然環境を大きく損ない、持続可能性にも適さない行為である。それに対してコンパクトシティは、適度なサイズの市街地、つまり、歩ける範囲の市街地を考え、その中にコミュニティの再生や住みやすいまちづくりを目指そうとするものである。

前述の製造者と利用者との関係の多様化と、この地域コミュニティの形成は、我々の社会の未来図の中において、自然に調和するストーリーを描くことに気付かされる。例えば、家電品が家族構成の変化に適合し長寿命化するようなことを考えると、製品の改修や保守など、そのライフサイクルにわたって肌理の細かいサービスが必要となる。そのためにはサービスの提供者が身近なコミュニティの中に存在することが理想的である。また、自分のほしいものを設計するといっても、多くの消費者は設計することはできないため、彼らに対して設計を手助けし、さらに、それに従って新製品のパーソナライズやあるいは既にある製品のバージョンアップによってカスタマイズされた製品を作る必要がある。このような生産はその消費者の身近な所、すなわち消費地で行われるのが効果的である。

地域コミュニティは、これらの活動の受け皿として期待されるのである。これを"よろず支援コミュニティ"と呼ぶことにする。よろず支援コミュニティの役割は、そこで暮らす人々の生活面のあらゆる困りごとの相談に乗ったりサービスを提供したり支援したりすることである。そのためにはソフト・ハード両面から必要なインフラを整備すると共に、地域に多数存在する人的資源(有用な技術や知識をもった高齢者)を活用し、コスト面やきめ細かな対応などで利用者のニーズに応えることが必要となる。特に、メーカーの退職者などの有用な人材を活用して、消費者の支援を行う。コミュニティにおけるものづくりの支援は、必ずしもコミュニティ内で自己解決できるとは限らないが、製品メーカー側へのスムーズな橋渡しの役割を果たすものとする。

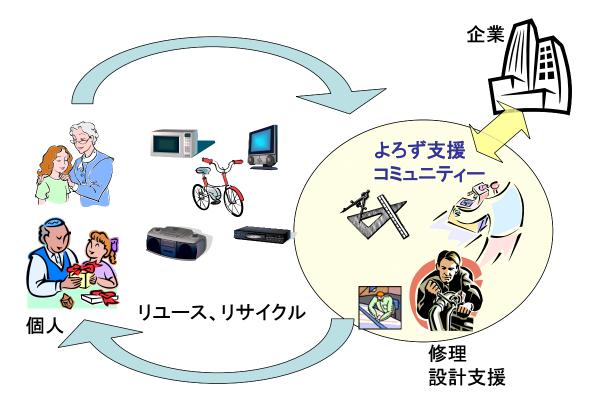


図7-4 ものづくりコミュニティ

このような地域のよろず支援コミュニティにおけるものづくり支援を実現するための 技術課題としては、以下の点があげられる。

- ・ リユース・リサイクル指向設計技術 リユース・リサイクル性を前提とした設計の支援技術
- ・ 共有指向設計技術 複数の利用者が共有するような製品を指向した設計支援技術
- ・ 顧客と設計者の対話型 CAD システム 顧客と設計者が一緒に対話的に設計を行える CAD システム
- ・ 潜在的あるいは無意識的ニーズ顕在化システム 顧客が潜在的にもっているニーズや欲しいものを顕在化させるツール
- ・ 質感までわかるバーチャルプロトタイピング バーチャルなプロトタイプによって製品の質感まで提示できる技術
- わくわく感などの感性計測技術 製品に対する顧客のわくわく感などの感性を計測する技術
- ・ モジュール化技術 顧客ごとのカスタマイズを組み合わせによって容易に実現するためのモジュール化技術
- ・ インテグラル型アセンブリ支援技術 部品を高度に擦り合わせて組み立てることによって高い品質を実現する技術

7. 3. 2 ものづくりはもの育て

本項では図7-5に示すように、作る人すなわち製造者と、使う人すなわち利用者の二つの立場を設定して、ものづくりのロードマップを議論する。

(1) 利用者参加のものづくり

社会のなかに、ものが遍く行き渡って、量的な不足を感じることが少なくなった。つくるものの性能を上げたり、大量生産を誇るだけでは、いまや、社会の要請に応えるのは困難である。しかし、使う人をいかに満足させるか、いかに楽しませるか、使う人のベネフィットをいかにして生み出すかなどを考える立場に立てば、ものづくりの新しい側面を切り開くことができる。現代では、使う人と作る人がわかれてしまい、両者のあいだに壁ができてしまっている。この壁を乗り越える努力が求められている、とも考えられる。

設計―製造―保守―廃棄(再利用)という、もののライフサイクルの各段階に関して、利用者が参加することによって、使う人自身が楽しみを得てベネフィットとすることができる場合がある。消費社会から持続可能社会へもどっていくためには、設計―製造―保守―廃棄という、もののライフサイクル全体にわたる使う人への支援を本格化させることが必要である。本項では、利用者参加のものづくりを支援する技術、という観点からものづくりのロードマップを考える。

(2) なにがほしいかわからない――利用者参加の概念設計

使う人の要求は多様である。それに応えるためには、作る人が提供する選択肢の中から 使う人が好みのものを選ぶのではなく、はじめから使う人の好みに合わせたものを作って 提供するようなからくりが望まれる。作る人と使う人が一緒になって、ものの概念設計を するところからはじめるわけである。概念設計は、今まで専ら作る人が行ってきた。使う 人から見れば、これまでしなくてよかったことをやらねばならないことになるが、特に知 識の豊富な利用者にとっては、自ら概念設計に参加すること自体が楽しみになり、ベネフィットになるという場合も多い。これは、プレタポルテの洋服があふれる世の中になって も、注文服の需要がなくならないことを見てもわかる。さらにイージーオーダー、つまり 半既製服のようなものもあってよいだろう。

使う人々の好みは多様で、全体の方向を見定めることなどはできないから、作る人からみると、使う人たちはいったい「なにがほしいのかわからない」ということになる。使う人が多様になることだけが問題なのではない。使う人を特定しても、彼(彼女)がほしいものをつくろうとして詳しく聞くと、作るために必要な情報が十分得られないのが普通である。いったい彼(彼女)は「なにがほしいのかわからない」。ある意味では当然である。使う人が問題にするのはできあがったものの使い勝手についてであり、どのように作るのかという観点からの興味は使う人は持ちあわせていないのだから。

そこで、利用者参加の概念設計を可能にする技術の第一のものとして、使う人の要求を うまく汲み取るための、聞き取りの技術、インタビューの技術といったものが必要である。 この聞き取りが困難なのは、作る人にとって当たり前の知識や技能が、使う人にとっては 当たり前でない、ということに原因がある。この意味で、異なる文化に属している作る人 と使う人の間の相互の理解が必要である。社会学や文化人類学におけるフィールドワーク の技術を使うこともできるのではないかと考えられる。

一方、作る人が使う人の意図を本当に汲み取ったかどうかを確かめる方法として、迅速に雛形(プロトタイプ)を作ってみせる技術がある。情報工学での rapid prototyping と呼ばれ、user interface の様子を利用者に見せる技術に相当するものが、ものづくりの世界に求められる。また、ものがどのように動くのかを、物理的に構成することなしに見せる、シミュレーション技術も有効であろう。

(3) 工場は農場に――使って楽しむ

概念設計ができたら、あとは作る人に詳細の設計と製造、生産を任せることになる。製造、生産には設備が必要であり、専門的な技術も必要なことから、一般の利用者が生産の詳細にまで手をだすわけにはなかなかいかない。工場を農場と考え、生産インフラを提供する場所とみなすことができるだろう。

ものができ上がったら使う人に渡して、それでおしまい、というわけにはいかない。たいていのものには保守が必要である。保守は、消極的に考えると部品交換や修理作業にすぎないが、積極的にとらえることもできる。例えば、利用履歴を保存し、活用して、ものに関する情報のトレーサビリティを確保することによって、パーソナルヒストリを作成することが考えられる。また、書店のアマゾンで導入されたように、使う人の間で、使う人による商品評価を流通させる、あるいは、使う人自身による改造を可能にするようなオプション選択を用意することなども意義のある方向である。トレーサビリティがあれば、情報の利用度を追跡し、貢献度によって利益を配分することも考えられる。このようにして、ものに関する情報の流通が盛んになれば、プライバシーやセキュリティなどの情報社会における問題を、ものづくりにおいても考える必要がでてくる。ものづくりにおける機械や制御の問題と情報の問題が融合していくことになる。

(4) 自動化と形式化――ライフサイクル期間の短縮

Rapid prototyping などが可能にするのは、要するに、もののライフサイクルの各過程に必要な期間を短縮することである。特に製造過程短縮のためには、CAD、CAM、CAE、CAPPなどの自動化技術を用いて、図面を形式化、あるいは符号化し、ものづくりのさまざまな過程を可能な限り計算機による自動処理に落とし込むことが有効である。それによって、使う人がさまざまな形で製造過程に介在することも容易になり、設計図と現場の整合性をより高めることもできる。また、改造の検証や認識も計算機によって行う可能性が出てくる。

自動化するための一つの方法は、情報工学における形式技法(formal methods)をものづくりに適用することである。ものづくりの技能は、ともすれば暗黙知として伝承されがちであるが、これを客観的に理解できるよう、言葉によって明示化する。計算機による自動化のためには、明示的な言葉によって客観的に記述されたものづくりの過程を、さらに計算機によって処理可能な形式言語によって記述する。ものづくりの過程を形式化すれば、それを計算機によって解釈し、自動的な生産、製造を行うことができる。さらに、その生産や製造過程が設計に適合するかどうかの検証を自動的に行うこともできる。そのために

は、製造過程が「設計に適合する」とはどういう主張(命題)なのかを分析して記述し、 さらに形式化する。形式化すれば、あとは形式論理学(記号論理学)を適用することによって、その主張(製造過程が設計に適合すること)が成り立っているかどうかを自動的に 検証する、あるいは極めて客観的な形(計算機によってチェック可能な形)で論証することができる。以上が形式手法による自動化のシナリオである。

形式手法によるのではなく、パターン認識 (画像認識、音声認識など) の技術を用いて、画像や音声の本質部分を抽出して記録することにより、暗黙知を伝承していく方法も考えられる。高度な職人の仕事ぶりをビデオなどに記録しておくのが、その最も単純な方法であるが、ビデオの記録に画像認識などの技術を適用することにより、適当なパラメータを抽出して、職人の動作を客観的に分析しようとするものである。形式手法が演繹手法であるのに対し、この手法は帰納的である、ということができる。

(5) 部品化——再利用、循環利用

持続可能社会の中で使い手の立場を反映させながら、短納期で使い手の望む製品を納入することを実現するためには、自動化技術によって生産・製造の効率をあげるだけではなく、ものを部品化するモジュール化技術や、部品を組み立てるアセンブリ技術を適用して、ものの再利用(reuse)や循環利用(recycle)をうながすことも効果的である。機械のモジュール化に比べて、計算機ソフトウェアのモジュール化は困難であり、現在も研究が続けられている。したがって、組込ソフトウェアによって制御されるもののモジュール化の方式は、必ずしも自明ではない。また、組立工程を工夫することによって再利用や循環利用の度合いが飛躍的に上がるものと考えられ、この観点から統合的なアセンブリ技術を発展させることが望まれる。

CAD をはじめとする自動化技術と、統合的なアセンブリ技術を含むモジュール化技術の進展により、消費者の参画、納期の短縮化、製品サイクルの変化が起こり、環境にやさしいものづくりの実現が図られ、工業(第2次産業)と情報産業(第3次産業)にまたがる、あらたなものづくりの活動が実現することが期待される。

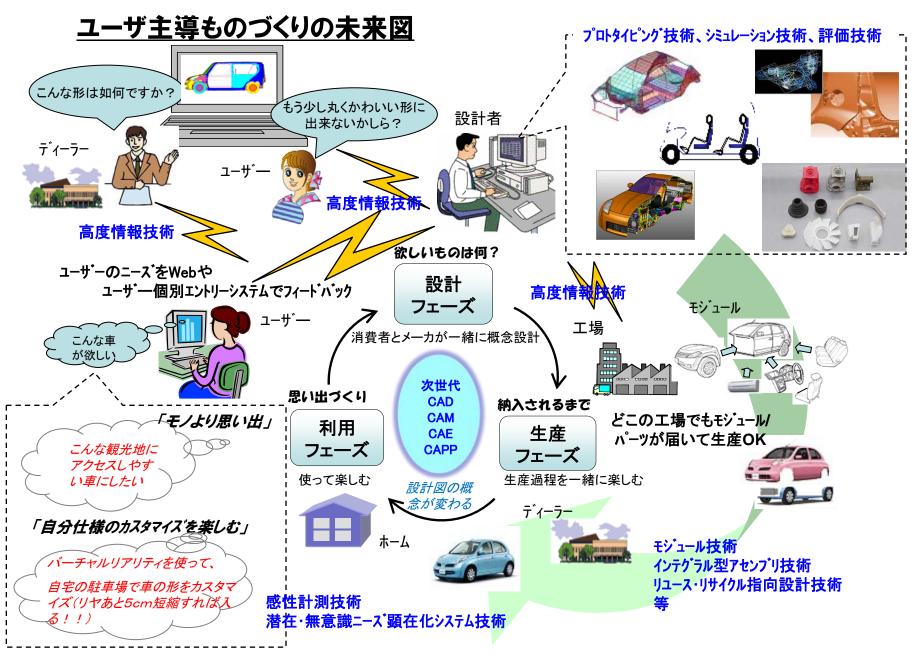


図7-5 ユーザー主導ものづくり

7. 3. 3 ものづくりは価値作り

(1) 未来の情報環境

未来のものづくりの姿を描くには、まず、"もの"の姿を想像しなければならない。手 始めに、情報分野を中心に 2040 年頃の姿を想像してみよう。

情報分野では、2040 年頃にはインタフェース機器に大きな変革が予想されている[7-14]。 すなわち、脳と直結する情報機器の出現である(ここでは、この装置のことを x - ルイカ[7-15]と名付けておこう)。いま我々は携帯電話がもはや通信機能を提供するだけのものではなくなっていることを実感しているが、2040 年には、携帯電話が進化した x - ルイカが、我々人間の知覚や記憶をは計り知れないほど人工的に拡張しているであろう。

テレビのデジタル化・大型化が進行中である。テレビに対して、家族が集うランドマークとしての存在復活が期待されているが、テレビの延長上の機能として、建物の素材や白物家電と一体になって、我々の生活を支えるデジタル建造物となっていてもおかしくはない。また、我々は、2040年になっても、移動手段を手放すことはないであろうが、今の自動車が、知性を備えて、大量輸送手段とも連携してエネルギー効率や環境適合性を格段に向上し、さらに、人にとってやさしい移動手段であり、また、情報環境になっているであるうことも容易に想像されることである。

2040年には、我々は、ほとんどその存在を意識することのない x - ルイカを通じて、情報機器に囲まれた生活をしているが、これは、自らの空間が自分にとっての心地よいものを求めた結果である。この環境を作り上げるのは、自分ひとりではできない。自らも貢献しながら、社会の進歩、技術の進歩を享受する参画型の社会情報環境が生まれているからである。このような、社会とのインタラクションは、リアル空間での近隣の人々との触れ合い(もちろん、この場面でも x - ルイカは頼もしい分身として働いているだろう)と同時に、情報ネットワークを介した、いろいろな事業者、公共機関、NPO、さらには、地球上の見知らぬ人々との情報共有・交換といった形で生まれる。

このような、インタラクションを総称して情報サービスと呼ぶことにする。情報サービスを具体的に形作るには、そのためのソフトウェアの開発やコンテンツの整備、そして、このソフトウェアの実行が必要となる。現在は、情報サービスの消費者は自分の手許に莫大な規模のソフトウェアが詰まった情報機器を持っている。しかし、自分の欲しいものは情報そのものであるとすれば、今の電力、ガス、水道などユーティリティに関する事業モデルと同じように、基本的には、計算機能とデータ蓄積機能を備えたデータセンタにすべてを委ねて、我々が日常接する端末は、データセンタで起こっていることや格納されているコンテンツのインタフェースとして働いているだけのものとなっているであろう。物理的なユーティリティと異なって、ソフトウェアによるサービスであるために、消費者に対する個性化も十分になされていることはいうまでもない。また、部分的ではあろうが、サービスの使われ方によって、提供者も消費者も思ってもみなかった新しいサービスが創発されるということも期待しておきたい。

情報サービスを提供するためには、データセンタにおける実行ソフトウェアやコンテンツが作られていなければならない。多くの実行ソフトウェアやコンテンツは、フレームワークという情報サービス提供の基本形態を予め開発しておき、フレームワークにあてはめ

る部品ソフトウェアや部品コンテンツをグローバルに調達してくることによって実現されているであろう。このような消費者の要求を想定してサービスを開発し、提供する事業者を統合サービス供給者と呼び、これらに部品を提供する事業者をサービス部品供給者と呼ぶことにする(現実には、このサプライチェーンは何重にもなっているであろうがここでは簡単のために2層としておく)。2040年ともなれば、自然言語に対する機械翻訳の水準も向上しており、サービス部品のグローバルな調達が容易に実現できていると思われる。今日、ゲームを除いた日本からのソフトウェアのグローバルな貢献がほとんどないのに対して、2040年には、日本で作られた肌理細やかな配慮をもったソフトウェアが、言語の障壁を乗り越えて、グローバルに活用されていると期待したい。

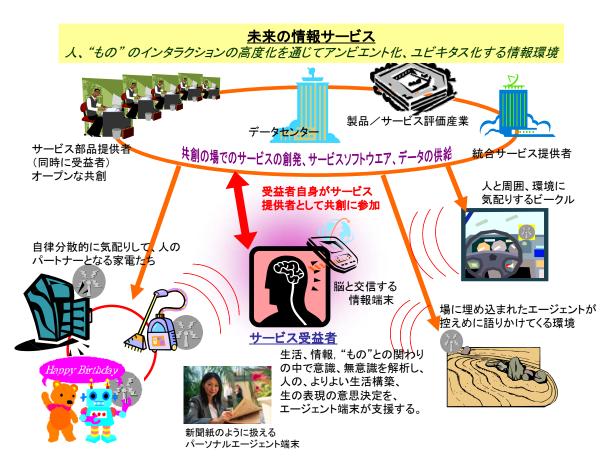


図7-6 未来の情報サービス

(2) 未来の"もの"の姿

情報サービスを一般化して、未来の"もの"の姿を想像しよう。人々の資源環境の制約に関する認識の深化から、多くの"もの"が社会的に共有されており、また、リサイクルの努力が大きく実っていることは当然として、200 年住宅(超長期にわたって循環利用できる質の高い住宅、2007年に政策ビジョンとして提起された) [7-16]のように、利用ニーズの変化には部品の取替えですませるといった"もの"の長寿命化がなされているであろう。資源環境の制約についての認識から、多くの"もの"に対して、人々は自らが必要として

いたことが、"もの"そのものではなくて、"もの"をメディアとした機能サービスであったことに気付き、"もの"は借り物とするレンタル経済が広く行き渡っている。このような状況を想定すると、先に、情報世界の未来を述べたが、"もの"世界も情報サービスと密接に関連しているとみなさなければならない。すなわち、ほとんどすべての"もの"がミニ $x-\nu$ イカを内蔵しており、提供者と消費者とが"もの"を介してつながって機能サービスが実行されている筈である。もちろん、ここに到るには、消費者のプライバシー保護概念や情報ネットワークを通じての"もの"とサービスに関する提供者の製品責任の在り方が確立している必要がある。

情報サービスでは、消費者とのインタラクションを実際的に行うのはデータセンタであり、ここでサービス提供のためのほとんどすべての情報処理が実行される。情報は、計算機、ストレージ、ネットワークという単一のプラットホームで共通的に扱うことができるからである。"もの"の場合は、このようにはいかないように思えるが、加工組立技術の著しい進歩によって、30年後には、いくつかのプラットホームによってかなりの範囲の製品が生産されると想定する。電子機器製品に対しては、製造のみを専門の事業とする EMS (Electronics Manufacturing Services)が、1990年代からはじまって、パソコン、携帯電話、テレビなどに範囲を広げ、また、半導体製品についてはシリコンファンドリーとの呼び名で製造委託サービス[7-17]が始まっているが、このような製造専門事業者が広い範囲で出現するとの想定である。データセンタになぞらえれば、設計図というプログラムにしたがって"もの"を生み出すファブリックセンタ、あるいは、プロダクションセンタとでも呼べそうな製造設備が広く行き渡っている筈といえる。

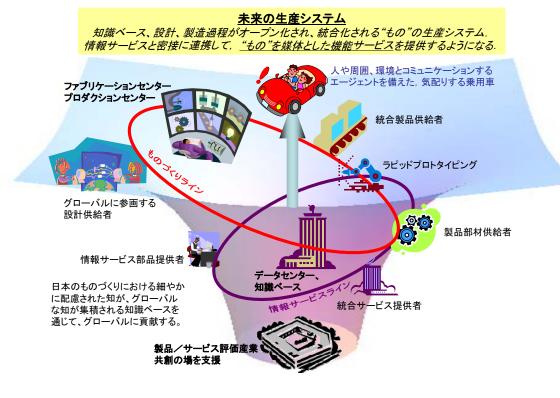


図7-7 未来の生産システム

情報サービスが、統合サービス供給者とサービス部品提供者によって作られるのと同じように、"もの"もフレームワークに相当する構造性部品を骨格として製品組立を行う統合"もの"供給者とこれらに組み込む部品を提供する部品"もの"供給者によって作られるが、加えて、"もの"には情報サービスが含まれることから、統合"もの"供給者は統合サービス供給者の役割も果たさなければならなくなっている筈である。このことは、ほとんどすべての"もの"に情報処理機能が組み込まれ、また、そのライフサイクル管理を行って適切なサービスを継続するために必須である。

今日、製品アーキテクチャがインテグラルかモジュラーかによって、製品を生み出す産業組織はそれぞれ統合と仮想とに分かれるとの認識があり、また、製品アーキテクチャは時間と共にインテグラルとモジュラーを変遷するとの認識がある「7-18」。ここに、製品アーキテクチャがモジュラーとは、部品の機能が完結的で、部品のインタフェースさえ知っていれば独自の部品設計ができて、製品は部品の寄せ集めで機能が発揮できることを指し、一方、製品アーキテクチャがインテグラルとは、製品機能と部品との関係が錯綜しており、すべての部品を相互に調整しなければ製品機能を発揮できないケースを指している(この調整を、藤本は「擦合せ」と呼んでいる「7-19」)。しかし、モデルベースの設計論やラピッドプロトタイピング技術が進展すると、「擦合せ」の自動化が実現できるようになり、"もの"の統合に関する手続きがモジュラーと呼んでいた製品アーキテクチャとは変わらなくなり、統合"もの"供給者と部品"もの"供給者の関係はオープン化するとの見方をここではとっている。

モジュラーとインテグラルアーキテクチャの統合のもとで、サービス機能の共創が進む 医薬品サービス 情報サービスモジュール群が自律分散 情報モジュール 的にはたらき、人と相互作用しつつ、生活の 情報サービス 質を高める提案を行い、機能を発現する。 統合健康サービス || 情報モジュール 体験学習せ フレームワーク 統合学習サ 情報モジュール 部品ソフトウエア 部品コンテンツのあてはめ モジュール化された"もの"の統合的構築によるサービス機能創出とカスタマイズ 部品DNA間相互作用、機能調整 機能自己再生 部品に埋め込まれ た"DNA"(\$二端末) 情報サービス(上段)や, "もの" のDNA(下段)と、人のエージェン ト端末とが交信して, 人にとって のサービスの質を高める - 部品トレーサビリティーの確立 - 機能自己再生, 自己再構成 - 適応機能 - 完全リサイクル *ブ*レームワーク - 使用者と提供者が物理的な"もの"と. サービスモジュールのカスタマイズ プロシューマーデザイン そのDNAとを通じてつながりを持つ

図7-8 未来のものづくりモジュラーアーキテクチャ

(3) 評価産業の出現

消費者と供給者の間には深い溝が存在する。今日、消費者と供給者との溝を埋めるため のサイトとして「空想生活」「lego factory」が出現している。ここでは、「こんなアイテ ムがあったらいい」といった願望を集め、一方では、このためのデザインの提案や実現の ための購買集団や製造事業者の募集などがなされ、実際の商品化へと展開される。一種の 価値共創ネットワークが作られている。また、先に述べたように、統合供給者と部品供給 者との間では、「擦合せ」と呼ばれる価値共創が行われている。この次のステップとしては、 商品を探すという立場からアンビエント・ファインダビリティ関連技術「マー20」や消費者と供 給者を取り持つ評価技術が高度化し、感性価値、エネルギー効率、再利用性、産業持続性 への適応度、種々の生活財との関係性などの観点から、"もの"に関する広範な知識ベース の提唱が始まってくるであろう。すなわち、環境に対する配慮や成熟した社会での経験の 形式知化が進んでゆくとみなされる。供給者間でも、同様に、機能性、相互適合性、資源 環境性、感性など幅広い観点からの供給者同士の"もの"知識ベースの構築が進むと思わ れ、これらを踏まえて、先に述べたモデルベースの統合シミュレーション、ラピッドプロ トタイピングによる価値共創の自動化がなされているであろう。この実現のために、共創 によって得られた新たな知識が、供給者たちそれぞれにフィードバックされていることは 大切な要件となっていることはいうまでもない。

2040年には、人々は自分の周囲から必要なものを自然と見出すことができるほどに知性を高めているべきであるといった期待がある一方で、意識・無意識行動の解析を行う欲求確定エージェントがx-ルイカに組み込まれており、消費者は彼らの助けを得て意思決定を下すとか、"もの"に組み込まれたミニx-ルイカが消費者の行動を知識として取込んでいるといった想定もある。

供給者間で活用されるであろう供給者知識ベースは、グローバルな交易を促進するという観点からも大変に重要な存在である。高度経済成長やオイルショックなどで培われた資源環境技術、どの先進国よりも早い高齢者社会の経験、これらの下敷きとなる日本文化などを、この知識ベースの枠組みとして埋め込んでゆくことは、世界に対して新しい価値を提起するという意味で大きな貢献といえよう。

本稿では、未来のものづくりの姿として、ファブリックセンタやプロダクションセンタの出現を想定した。これによって、供給事業者たちはグローバルに製造設備を共有することとなり、彼らの設備投資のリスク軽減がなされ、景気の振れ幅も縮小されている筈である。このような社会的に共有される生産資源を効果的に運用するには、リアルオプションのような市場取引機構の導入も考えて行く必要がある。ここにおいて、投機的な社会全体に損害をもたらすような市場参画者を排除する叡智が生出されていなければならないことはいうまでもない。生産資源の的確な取引のためにも、供給者知識ベースの整備は大変に重要である。製品価値や生産資源価値を明示化することが、グローバルな環境下でのものづくりに不可欠であり、このような知的基盤一評価産業一がこれからの産業社会を形作ってゆく上での大切な存在になると想定する。

7. 4 アカデミック・ロードマップ

近未来の環境、消費者像を描くことで、ものづくりの将来像を検討してきた。本ロード マップ構築の目的は、

- ・ 技術マップとして、必要技術の構造と重要性を明らかにすること
- ・ 技術ロードマップとして、時間軸に沿って技術の進展を明らかにすること である。それらをひとつの表に統合して、表7-3に示す。ものづくり技術と社会技術は 相互に関連しあう。それゆえ、ものづくり技術の重点化評価項目は、将来のあるべき社会 を構築するに必要な技術として選ばれる。ここではその基準として次の6種を選択した。
 - (A) 持続性社会の構築: 必須でかつ喫緊の目標である。同時に、今後の技術競争の 要となると社会的コンセンサスができている。
 - (B) 高齢社会への対応: 消費構造としては重要であるが、2040年にはほぼ解消する。 ただし、高齢社会への対応技術はその後の世界での製品技術として 50 年ほど継 続する側面を持つ。
 - (C) 価値作りの高度化: 本論で議論した主題である。
 - (D) 生活の質の向上: 人類の進歩の目標であり、すべての技術の根本的な目標であ る。しかし、物質的な質の向上から精神的な質の向上へと移行しつつある。一方 で、将来は環境の劣化で、生活の質が極端に悪化することも予想される。
 - (E) 日本の製造業競争力強化: もっとも重要な目標である。ただし、グローバル時 代の日本があっての製造業の競争力である。
 - (F) 生産科学の強化: 2040年に至った時に、2080年までの競争力保持のために必要 な目標である。

重点化項目について、○を1点、◎を2点として集計すれば、表7−4となる。この値は、 今回の技術ロードマップが総合的に「日本の製造業競争力強化」について深く考えている ことを結果的に示していると解釈することもできる。

持続性社会の構築	16
高齢社会への対応	7
価値作りの高度化	22
生活の質の向上	14
日本の製造業競争力強化	34
生産科学の強化	20

表7-4 重点化項目の必要性

次に、表の読み方を説明する。

- 時間軸は 1960 年から 2040 年までを表 7 1 の示した時代観で示した。「-」は概念が存在する前か、特記すべき内容がないことを意味する。「←-→」はその前の状態が継続する、すなわち、特段の変化がないことを示す。
- 本章内での説明箇所を明示するために「(1) ものづくりコミュニティ、(2) ものづくりはもの育て、(3) ものづくりは価値作り」のいずれで議論したかを、表内で示した。
- 技術マップとして、重点化評価項目に対して、
 - ○:強く関係する、横の項目を伸ばすことが必要である、
 - ◎:極めて強く関係する、横の項目を先行して伸ばすことが必要である、 ことを意味する。
- 分類は、大分類と中分類とで示した。小分類としては、具体的な技術や制度を想定 している。

表7-3 ものづくり分野のアカデミック・ロードマップ

			重点化評価項目						
重	要度	<u></u>	16	7	22	14	34		
ニニュニューショチ (-)	(2)ものづくりはもの育り	(3)ものづくりは価値作:	持続性社会の構築	高齢社会への対応	価値作りの高度化	生活の質の向上	日本の製造業競争力強に	公所利益 ひらん	

		ユ (ニ テ テ -	育 イ	築	築 応	芯 化	化了	上 フ	鱼							
大分類	中分類	ティ	۱ ۲	J				11	Ł	1960	1980	1992	2000	2008	2020	2040
	エネルギー		() (9			0		-	石油危機	多様化	←→	◇燃料電池の普及開始. CO2の分解・固定化技術の実用化. 再生可能エネルギーによる分散的エネルギー供給システムの普及開始.	◇燃料電池普及、水素エネルギー利用の実用化開始、住環境・ワーキング環境の調節と、省エネ・低排出のための知能を持つ建築物の実用化と普及始まる。	◇分散的エネルギー供給システム併用の定着. 再生可能エネルギー, 水素エネルギー利用の定着.
社会背景	都市などの環境・交通		C			0		O		市電	マイカー	←→	←	◇屋上緑化、人工地盤などによる、コンクリート被覆環境から土壌環境への転換の普及開始、主要な人工物の環境、安全、省資源、ライフサイクルに関する情報は公開され、評価される、主要な事故や障害の情報はリアルタイムに、分かりやすく端的に、国民に常時公開される(デジタル放送・インターネット).	◇用途(人・物の移動)に応じた交通手段選択、及び知能的に交信 しあうインテリジェント移動体、および交通システムの実用化、移 動・輸送コストを下げるワークスタイル、生産方式、産業システム への移行、鉄道主要路線のハイブリッド化、その一方で喜びと贅沢 としての旧式鉄道の動体保存、復活。	◇高齢者、自力での移動に不便がある人のモビリティー支援と健康な食事のできる街づくり、高齢者がグローバルな人脈とともに能力を活かし、生きがいをもって生活できるためのものづくりの普及・定着
	製造業の位置づけ		(C)	高度成長	No. 1	失われた10 年	情報元年	◇製造業従事者19%、GDP23%. 加工立国.	◇製造業従事者15%、GDP22%. 高品質立国.	◇製造業従事者数は8%, インフラ(建設) 4%◇製造業従事者数第3次産業にたいするバックヤード.モノはサービスを提供するための媒体.
	規範		()			© ()		_	_	_	_	◇省エネルギー,低排出,リサイクルを基礎的な価値観とする.安全と信頼維持への参与の意識を高める.集合知の創成と活用を認知する. ◇Personalization	◇ローカルな生活、活動を、グローバルな貢献の見地から認識する。 ◇Prosumerの台頭	◇設計知,感性価値の成熟.教育の変革の定着. ◇製品長寿命化→所有の破壊 ◇Prosumer化
	行動・消費利用		C		>	1	0	0		団地	←	バブル崩壊	←→	◇物を中心とした生活スタイルの模索が続きつつも、省エネルギー、排出抑制、リサイクルを、望ましい生活の価値観の共通項として認知する。これらの要素の実現のため、物と機能のネットワークが注目されるようになる。	◇探索技術と評価技術の高度化と普及、環境への配慮、安全技術の 定着とともに、日本的スタイルが新たに再構築されていく。 ◇消費者による商品個性化時代におけるPL概念が確立する。	◇節度ある質の高いサービス、もてなしの享受、尊重、再構築された日本的スタイルの上に立って、生の表現となる生産・消費活動を志向する。 ◇個人情報の扱いに関する社会通念が形成される。
消費者	行動・探索			D)	(0	0 0	0	0	_	_	_	_	◇アンビエント・ファインダビリティー関連技術の多様化.実験的 段階.ファインダビリティー技術の普及とともに、subject- centricな生活感覚、感性価値の認識が定着. ◇欲しい時に欲しい物を直接工場に伝える.		◇情報、工業生産物、環境デザイン、アート、そして自然と、人を取り巻く環境に縫い目のない知、感性、交流、探索、ひらめき、豊かさ、表現が織り込まれ、認識され人間はよく生きることに意欲と安らぎを得られるようになる。人は、環境、自然物の動きなど人を取り巻くものから意味や知を汲み取り、関係性のデザインを認知できるようになる。デザインはそのように表現される。◇欲求確定エージェント:意識・無意識行動の解析、要求機能の登録◇ユーザーの結合:自己形成型ユーザーセグメント、設計情報のユーザーによる再構築、物的負荷の軽減(共有、長寿命化、所有の破壊)
仲介者	評価産業		C)		4	0	0) (O	-	_	-	_	介で構成される価値共創のためのprosumerネットワークの普及(具	の計画を、広範は知識へ一人をもとに提供する。重まれる日本的はスタイルの構築に人工物評価、機能評価を通じて寄与する産業、物の	◇権威付けや認可制度的評価概念からの完全な脱却.評価は複雑な関係性の知能的ナビゲーションとして目立たず、ユビキタス化・アンビエント化する.「伝統的な生活の知恵」と入れ替わる、人々の生の表現を支える知恵となる. ◇製品評価産業:機能評価,Compatibility評価,格付け(侘び・寂び・萌え+カワいい),環境評価指標
	産業構造		(D)		0	0	9	重厚長大産 業	軽薄短小	自動車	情報産業	ングをもつ仮想企業	◇SMBによる仮想企業の形成:擦り合せ自動化による超インテグラルアーキテクチャ(モジュラーをペースとしながら擦り合わせ的統合を実現)への移行 ◇設計・生産サービスの市場化(現物,先物)の進展,これらを支える認定機関の勃興	◇機能組立産業とProsumer支援産業 ◇製品評価産業:機能価,Compatibility評価,格付け(侘び・寂

供給者	製品イメージ		0		0	0 @	9 O	-	_	-	-	◇高品質大量生産	◇機能性部品 ◇環境低負荷製品	◇機能性部品・製品 ◇構造性部品・製品:機能分解技術(機能Primitive,ソフトウェア Primitive),再構成技術 ◇環境低負荷部品・製品:トレーサビリティ,部品・製品に組込ま れたDNA、メンテナンス契約なしには急速に腐る製品,画像認識・ 機能認識による知財保護 [ケーススタディ] □2040年型冷蔵庫:隣はスーパーマーケット,食品有効利用率の向 上,新原理の冷蔵庫:隣蔵 □サービスビークルロボット:パーソナルビークル+秘書ロボット □機能性美的空間:200年家屋+容易な機能改造,健康提供型作業 環境
	ものづくり技術		0		0	•) (O	-	-	-	_	◇ 3 DCAD/CAE、光造形 ◇ナノ加工技術	 ◇機能分解/再構築 ◇部品単位のaging記録 ◇PLM(Product Life cycle Management) 技術の確立 ◇マルチエージェントスケジューリング ◇3D自由構造技術 ◇骨格構造技術 ◇自動モデリング 	◇部品単位の材質のDNA管理 ◇GPSトレース ◇超フロントローディング設計 ◇ラビッドプロトタイピングによる構造材:インクジェット・吹付け、硬化材料、生物型重点材料・構造剤 ◇ハイパーメカトロニクスによる機能部品:情報ネットワークへの接続+個人情報への接続(部品レベル),学習型+共創型機能 ◇機能自己再生機能組込み部品 ◇GPS内蔵タグ
ものづくり文化	ものづくり風土	0		0	0	0		大量生産体 制構築	大量生産	情報化、 100人3色	情報時代	◇ものづくり教育の普及◇ものづくりサークル活動◇ロボットコンテスト◇とり人間コンテスト◇ソーラーカーレース◇フォーミュラーカーレース	◇ものづくり趣味人の増加 ◇地域社会へのものづくり風土の浸透	◇「よろず支援コミュニティ」の形成
	地域コミュニティのものづ くりカ	0		0	0	0		出稼ぎ	均一化	←→	←→	◇自転車の再生	◇地域社会ものづくりコンテスト ◇特注品の設計相談・一般消費財の改良・修理 ◇企業退職技術者の参加 ◇学生のボランティア	◇「ものづくり」を通じての人と人との豊かな関わり ◇テーラーメイド製品の設計支援 ◇企業退職技術者の参加 ◇企業技術者のボランティア ◇学生のボランティア
持続性社会構築	リュース・リサイクル指向 設計技術	0		0		(9 0	_	_	_	_	◇メーカ対応 ◇レンズつきフィルム ◇コピー機		◇ユーザー対応◇部品情報(性能,履歴等)の等公開
技術	共有指向設計技術	0		0		(9 0	_	_	_	_		◇当たり前品質の保証 ◇基本性能重視 ◇長寿命化	◇コミュニティでの共有化促進
	顧客と設計者の対話型CAD システム	0				0	9 0	誕生	2 D	PC化	3 D		◇主に老齢者用アイテムに多用 ◇老齢者では生体計測システムと併用	◇テーラーメイド製品の設計支援広く適用
	潜在的・無意識的ニーズ顕 在化システム	0			0	© C	0	_	_	_	_			◇新しい要求機能の発見と製品づくり ◇新しい価値の発見と製品づくり
設計・生産技術	質感まで分かるパーチャル プロトタイピング	0		0	0 0	0 @	3	_	_	_	_		◇CGによる提示◇質感,光沢、触感(温かさ、滑らかさ、やわらかさ)	◇CG+デバイスによる品位の提示
	わくわく感などの感性計測 技術	0			0	0	9 0	-	-	感性工学開 始	←→		◇デザイン感覚の顕在化 ◇作る喜びを定量化	◇設計・生産に広く普及
	モジュール化技術	0		0	0	(D	_	_	モジュール 組立	モジュール 組立		◇モジュール化でコミュニティものづくりを支援 ◇組立て・部品発注の簡素化	
	インテグラル型アセンブリ 支援技術	0		0	0	0	9 0	-	_	-	_		◇主としてマニュアルによる組み立て	◇技術者との対話型システムによる高度な製品組立て(一品物)
	設計サイクル	0		0	0		0 0	-	2年	←→	1年	10ヶ月 ◇設計図のデータ互換性	1ヶ月 ◇モデル指向設計生産 ◇設計と生産との融合 ◇モジュール化	3日 ◇モジュール化・ユニット化の細分化 ◇シミュレーション ◇改造の検証と認証
	ユーザーの介在	0		0	0	0)	_	消費者センター	オープンプ ライス	_	◇メーカーオフション	要望 ◇ディーラオプション ◇設計段階への介入	参加 ◇ユーザーオプション ◇製品の機能変更
設計・生産技術	製品サイクル	0		0	0	0 @	9 0	大量生産	大量生産 · 大量廃棄	LCA	LCA	廃棄 ◇新製品への買い替え	リサイクル ◇モジュール化の促進 ◇長寿命設計	リユース ◇ライフサイクルに合わせアップグレード ◇新技術の迅速な導入
	生産情報の変化	0	,		0	C	0	生産管理	CAD/CAM/CA E	データベー ス	コンカレン トエンジニ アリング	設計生産の連携 ◇工場内の情報統合 ◇設計ニーズが生産システムとつながる	販売連携 ◇マーケットの連携 ◇市場ニーズが生産システムにつながる	消費者連携 ◇個別エントリーシステム ◇個人ニーズが生産システムと一部つながる
	ものづくりの現場の変化	0		0		C		_	_	_	_	工場仕上げ ◇CAE/CAD	販売店仕上げ ◇CAPP・POS	消費者仕上げ ◇設計システムの開放
	儲かる仕組み	0)			(9 0	_	-	_	_	売り切り	点検改造	維持管理

7. 5 おわりに

本アカデミック・ロードマップの作成と同時並行して、(財)製造科学技術センターが設計システムと生産システムの技術ロードマップを構築している。これらのロードマップでは、既存技術の延長線上にどのような技術を描けるかの検討が行われている。一方、本ロードマップでは、近未来社会を先に描き、その未来社会に到達する道を示すことで技術の進歩の手順を示した。2040年の社会の推定においては、WG内での討論によって信憑性を高めたが、「成長の限界」で用いられるWorld Model3のようなシミュレーションモデル「7-4」に基づくわけでもなければ、多数の専門家によるデルファイ法を用いた科学技術予測のような一定の方法論「7-21」を採用しているわけでもない。それゆえ、アカデミアが供給する技術ロードマップとしては、根拠が弱いとの批判が存在するであろうことはやむを得ない。しかし、討議の結果、この報告書にあるような方向性の定まった技術が描けていることは、高い信憑性を確保したといっても良いであろう。

本論では、2040年までに次の3点の傾向が強まるという仮定をおいた。

- [A] 部品は機能的に統合される。同時に、機能と外形とは分離される。
- [B] 製品は個人へのサービスを指向する。
- [C] 持続性社会の構築は必須であり、物質的供給から非物質的供給へ移行する。

[A] の仮説は産業革命以降、継続して検証されているものである。メカトロニクスで代表される機能と構造との分離は、情報処理の進展と共にいっそう顕著になる。[B] もまた大量生産を離脱する以前から指摘されてきたことで、それが環境問題と組み合わさり、いっそう進展する。特に、ここ数年動き出したサービス科学・サービス工学の研究が個人の要求、個性、個人的な満足度と集団の満足度などを明らかにしていくであろう($[^{7-22]}\sim[^{7-26]}$)。一方、[C] は人類的選択であるが、少なくとも先進工業国では競争力の源となりうる。これらの仮定を満足する社会として、本論では 2040 年のものづくり社会を表現し、それまでの行程を明らかにした。

具体的には、①ものづくりは「コミュニティ作り」、②ものづくりから「もの育て」へ、③ものづくりは「価値作り」、という3つの観点から議論を展開した。その結果、我が国でもサービスを主体としたいわゆる第3次産業が中核となり、第2次産業はそのバックヤードとしてのものづくり産業として、「機能」が前面に出た産業へと変容すること、また消費者もいわゆるプロシューマと変貌して「所有の破壊」が起こり得ること、それによって物的負荷の軽減が図られることが議論された。また、環境低負荷製品が進展して、トレーサビリティが必須技術となることや、消費者が設計に参加する「もの育て」の機運が生まれて、製品の維持管理が儲けの主流となる可能性も指摘された。全体としては、ものを大切にする社会、よろず支援コミュニティの実現へと向かうものと推測された。この予測実現には、消費者の進化を必要とする。逆に、製造者は情報開示から始まり消費者教育への参画まで強い社会的責任を果たすことが要求される。

そのような技術進歩を明らかにするために、技術ロードマップを構成した。技術マップでは、技術の重要性を6つの重点化評価項目への関係度合いで表現した。ロードマップの時間軸は1960年から2040年までの80年間を、2000年を中心とする過去と未来との関係

で考察した。これによって、2040年の社会イメージ、消費者イメージと、そのために必要な設計・生産技術イメージとを明確に表現することができた。

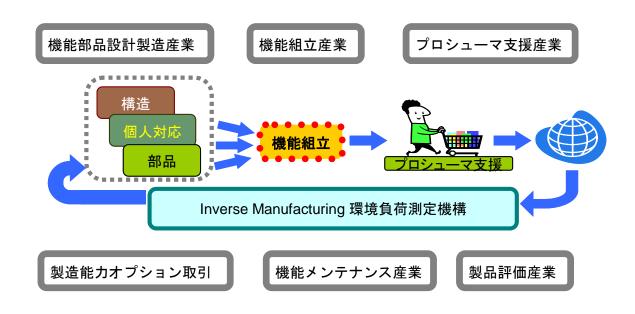


図7-9 2040年のものづくり産業イメージ

最後に、2040年のものづくりに関わる産業のイメージを図7-9に示す。機能部品を機能部品設計製造産業が大量生産で作り、顧客に近い場に機能組立産業があり、顧客の要求に応じてオーダーメイドをする。一方でプロシューマ支援産業が顧客の要求をくみ上げると共に、データ収集によりものづくりの生産管理を指令する。製品は製品評価産業がその機能を保証する。製品の利用に関する教育も製品評価産業とプロシューマ支援産業が共同して扱う。従来の製品技術は製造業者だけが持つ時代から、製品技術を製品評価産業とプロシューマ支援産業が共同ロシューマ支援産業が共有する時代へと変わる。そもそも製造能力は世界中から調達するが、一方で、地産地消の理念が強化され、製造能力を地場で構築し、その能力を販売する産業が生まれる。逆工場は製品をリサイクル・リュースするのだが、不足機能を補う機能メンテナンス産業として存在する。製品評価産業、製造能力オプション取引産業の成立は、製造業が金融業と同等の価値生産をし、かつ、その製造能力が流通可能となったことを意味している。

参考文献

- [7-1] http://www.ipss.go.jp/pp-newest/j/newest02/newest02.html.
- [7-2] 大倉: 人と機械のインタラクションのためのインタフェース, 学術の動向, 10(8), pp. 52-55, 2005.

- [7-3] 木村編: 平成 14・15 年度文部科学省・科学技術振興調整費科学技術政策提言プログラム「横断型科学技術の役割とその推進」成果報告書 資料編、p. 28, 2004.
- [7-4] ドネラ・H・メドウズ他(枝廣訳): 成長の限界 人類の選択, ダイヤモンド社, 2005.
- [7-5] 経済産業省: 「感性価値創造イニシアティブ」について 報道発表, 2007, http://www.meti.go.jp/press/20070522001/20070522001.html.
- [7-6] 経済産業省: 「感性価値創造イニシアティブ」, 経済産業調査会, 2007.
- [7-7] D. A. Norman: The Invisible Computer, The MIT Press, 1998. (D・A・ノーマン (岡本他訳): パソコンを隠せ, アナログ発想でいこう!, 新曜社, 2000.)
- [7-8] アイティメディア株式会社: @IT 情報マネジメント用語事典, http://www.atmarkit.co.jp/aig/04biz/userexperience.html.
- [7-9] 坂井: EMOTIONAL PROGRAM BIBLE エモーショナル・プログラム バイブル 市場分析, ブランド開発のためのマーケティング・メソッド, 英治出版, 2002.
- [7-10] 小阪: そうそう、これが欲しかった! 感性価値を創るマーケティング, 東洋経済 新報社, 2007.
- [7-11] ミシュランタイヤ: ミシュランガイド東京, http://www3.stream.co.jp/www09/michelin/guide/main.html.
- [7-12] ミシュランタイヤ編: MICHELIN GUIDE 東京 2008, 日本ミシュランタイヤ, 2007.
- [7-13] 大倉他: かわいい人工物の系統的研究, 第2回横幹連合コンファレンス予稿集, pp. 263-266, 2007.
- [7-14] 文部科学省科学技術政策研究所: 科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査 デルファイ調査 報告書, 2005.
- [7-15] 関根千佳: スローなユビキタスライフ, 地湧社, 2005. (ここに現れるルイカは、201x 年頃に使われている端末の名称である。ここでは、 その先の世代の端末として、x - ルイカと呼ぶことにする。)
- [7-16] 自民党: 200 年住宅ビジョン, 2007, http://www.jimin.jp/jimin/seisaku/2007/seisaku-007.html.
- [7-17] 浜屋敏: 組立業務の外部委託と製品・市場・企業特性, 富士通総研, 2004.
- [7-18] 楠木健, ヘンリー・W・チェスブロー: 製品アーキテクチャのダイナミック・シフト 藤本隆宏・武石彰・青島矢一(編): ビジネス・アーキテクチャ, 有斐閣, 2001.
- [7-19] 藤本隆宏: アーキテクチャの産業論, 同上, 2001.
- [7-20] ピーター・モービル (浅野紀予 (訳)): アンビエント・ファインダビリティ―ウェブ、検索、そしてコミュニケーションをめぐる旅, オライリー・ジャパン, 2006. (Peter Morville: Ambient Findability, O'Reilly, 2005.)
- [7-21] 文部科学省科学技術政策研究所:科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査: デルファイ調査 報告書, 2005.
- [7-22] 小特集: サービス・サイエンスの出現,情報処理,47(5),pp. 457-472, 2006.
- [7-23] 新井民夫,下村芳樹: サービス工学 -製造業製品のサービス化-,一橋ビジネスレビュー,2006 年秋号,AUT., **54** (2), pp. 52-69,一橋大学イノベーション研究センター編集,東洋経済新報社,2006.
- [7-24] サービス産業におけるイノベーションと生産性向上に向けて,経済産業省編 07 年 10 月 (07 年 4 月報告書).
- [7-25] 特集: 「サービス・イノベーションと AI」, 人工知能学会誌, **22** (6), pp. 747-780, 2007.
- [7-26] 東京大学産学連携本部 サービスイノベーション研究会:提言「サービスを科学する視点の確立と人材の育成によるイノベーション創出に向けて」, http://www.ducr.u-tokyo.ac.jp/materials/200711service-innovation.pdf, 2007年11月.

第8章 まとめ

本事業では、横幹連合に関連する横断型学術分野の中から、最近特に重要視されている「制御・管理技術分野」「シミュレーション分野」「ヒューマンインタフェース分野」「ものづくり分野」の4つの分野について、学会横断型アカデミック・ロードマップを新規作成した。その作成に当っては、横幹連合に属する諸学会から多くの専門家が委員として参画し、4つの分野に分かれてそれぞれワーキンググループ(WG)を構成し、検討を重ねてきた。その成果については前章までに詳述されたとおりである。この章では、この4つのWGを総括したまとめとして、その検討経緯と結果の概要を簡潔に記載し、併せてこのアカデミック・ロードマップ策定の過程で経験した問題点や課題などについても触れる。また、学会横断型アカデミック・ロードマップの課題についても記載し、今後への参考とする。

8. 1 アカデミック・ロードマップの概要

8. 1. 1 制御·管理技術分野 (WG1)

この WG では、制御・管理技術が先導する未来社会について考察した。まず、これらの技術が先導する未来社会とはどういうものになりそうかについて検討した結果、特に昨今の社会不安要因の増加に鑑み、「安全・安心のための予防社会」が大切であるとの観点が浮かび上がった。そういう予防社会を形成するために考えるべき不安要素は多岐にわたるものの、実現すべき対策は教育・システム設計・計測・情報・予測の横幹技術が中心課題となるため、学会横断型ロードマップとしては適切なコンセプトであると判断された。この「安全・安心のための予防社会」の実現のために、解決すべき機能とその要素技術を列挙し、それらの関連図を作成したが、各要素技術の実現時期の推定が困難なことから、時系列でのロードマップ表現は断念せざるを得なかった。

そこで、ロードマップ策定の方針を見直し、横幹技術の進歩に重要な役割を果たす要素を時系列の主軸として選び、それに肉付けすることでロードマップを描く方法へと転換した。ここでは横幹技術を「多種のシーズと多種のニーズを結びつける技術、およびそこから生まれる新しいシーズ」と位置付け、制御・管理技術分野(制御工学、経営工学、人間工学、統計数理、ORなどの研究分野)に関連が深いシーズと、それらを各分野が協力して深耕・発展させるための方向性について議論した。その結果、今後提供すべきシーズを、①複雑化する対象、複雑化するシステム、②対象に対する素早い理解と対応を可能にする「見える化」、の2つに重点化して整理し、ロードマップとして完成させた。また、社会からのニーズと社会への波及についての各論も併せて記述した。特に巨大システムへの対処のためのセンシングの統合化と、複雑システムのモデリングならびにその理論展開の重要性が指摘された。

8. 1. 2 シミュレーション分野(WG2)

この WG では、シミュレーション技術が先導する未来社会について考察した。科学技術の対象とする現象は年々大型化・複雑化・詳細化しており、今後、環境保全・防災技術など、シミュレーションのみでしか検証を行えない分野が多く出現するものと予想される。過去のシミュレーション技術は、①理論、②実験、③製品・現象の3つとは独立した存在であり、この3つをつなぐ存在に過ぎなかったものが、現在ではすでにシミュレーションが実験を代替したり、シミュレーションそのものが製品に変容している例もある。将来はさらに、これら3つとの一体化が進むとともに、シミュレーションが担当する領域がさらに拡大するものと予測される。

そのため、多様化・大規模化を横軸にして、縦軸には高精度化・高信頼化を取って、各種のシミュレーション対象を敷衍し、その将来方向を探った。シミュレーションが目指す方向は多様ではあるが、特に最小環境負荷、超安全性に根ざしたシミュレーションベース設計と一発製造への寄与が重要であるとの結論を得た。またシステムに人間の要素を取り入れたシミュレーション(人間シミュレーション)も重要となり、特に個人としてあるいは集団としての人間のモデル化とシミュレーション技術(医療シミュレーション技術、さらには社会シミュレーション技術)の重要性も指摘された。

今後はこの報告書で提示された諸課題の追及と、そのための研究人材の育成がますます 重要となることが予見され、また、それらを通じてシミュレーションを自然科学知獲得と 工学的創造のための低コスト・超安全・低環境負荷の技術として、持続的かつ飛躍的に発 展させることが望まれる。

8. 1. 3 ヒューマンインタフェース分野 (WG3)

作業効率だけでインタフェースを評価した時代が終焉し、個人の満足度をも考慮したより知的なヒューマンインタフェースが要望されている。そのためこのWGでは、ヒューマンインタフェースの革新によって、今後どういう新社会が創生可能かを考察した。特に人の認知をどのように捉え、インタフェースの技術がそれをどのように支援するのか、それにより人の認知がどのように変容し、認知の対象はどこまで広がりを見せるのかについて議論した。その過程で、納得のモデリング、見えないものを見せる技術、共感場のモデリングなどの重要性が指摘され、①人それぞれのインタフェース、②実感と共感のインタフェース、③やり過ぎないインタフェースなどの必要性が提案された。

以上のような議論で提起された課題を、まず「実感」、「感性」、「かかわり」の分野に大分類し、各々の分野でのインタフェース研究の今後の展開についてまとめた。また、インタフェースが果たすべき役割として「見せる」、「動かす」、「育てる」の観点に絞り、どのような課題の解決が必要になるかについて展望した。

このような、将来に向けた革新的なインタフェースの実現には、人間の生理・運動・心理の観察・計測に関する技術の展開、さらには意図や思考の非侵襲同定の課題、そして脳科学からの意識と無意識の境界を繋げるインタフェースの課題などがあり、これらと、認知科学からのより深い理解に基づいた人間のモデリング技術との融合が必須となるものと

思われる。そして我が国が目指す①健康な生活、②安らげる暮らし、③快適なモビリティ、 ④働き甲斐のある環境に続くものとして、⑤人間力の持続性を保証できる社会の実現、が インタフェースの観点から見て重要なゴールになりうるとの結論を得た。

8. 1. 4 ものづくり分野 (WG4)

この WG では、我が国のものづくりの優位性を将来にわたって確固たるものにすることを主眼に、ものづくりの視点からみた未来社会の構築をテーマとして検討した。すでに作成されている製造技術等に関するロードマップの検討結果も基礎に置きつつ、さらに異分野からの視点を加え、新たな「ものづくり」「コトつくり」の考察を試みた。

具体的には、①ものづくりは「コミュニティ作り」、②ものづくりから「もの育て」へ、③ものづくりは「価値作り」、という3つの観点から議論を展開した。その結果、我が国でもサービスを主体としたいわゆる第3次産業が中核となり、第2次産業はそのバックヤードとしてのものづくり産業として、「機能」が前面に出た産業へと変容すること、また消費者もいわゆるプロシューマと変貌して「所有の破壊」が起こり得ること、それによって物的負荷の軽減が図られることが議論された。また、環境低負荷製品が進展して、トレーサビリティが必須技術となることや、消費者が設計に参加する「もの育て」の機運が生まれて、製品の維持管理が儲けの主流となる可能性も指摘された。全体としては、ものを大切にする社会、よろず支援コミュニティの実現へと向かうものと推測された。この予測実現には、消費者の進化を必要とする。逆に、製造者は情報開示から始まり消費者教育への参画まで強い社会的責任を果たすことが要求される。

この分野での議論の根底には持続性社会の構築がある。大量生産・大量消費に代わる生産方式を追求することは必須であり、その中で、個々人が満足し、社会が発展できる方向を議論した。資源小国の日本では、ものづくりの脱物質化を国際競争力の源と捉えるべきである。その実現のためには、製品技術、製造技術、そして、情報技術が目標に向かって適切に進歩することが必須であることを示している。

8.2 作成過程で顕在化した問題点

以上のような学会横断型のアカデミック・ロードマップ作成は、横幹連合にとっても、また我が国全体からみても初めての経験であり、その作成過程は必ずしも順風満帆ではなく、幾つかの困難が発生し、問題点として浮かび上がった。それぞれに次元の異なる問題点ではあるが、以下にその幾つかを記載し、記録に留める。

第一の問題点は目標設定に関するものである。初めての学会横断型アカデミック・ロードマップということでその雛形もなく、着手時点では各WGとも完成形が予測不能であった。そのため、どのような形に表現可能かも含めて模索することとし、最終的には表現方法を各WGに委ねることとした。したがって出来上がったロードマップの形態は、各WGによって異なっている。横断型ロードマップでは、統一的な形態での表現が難しいことを示唆しているのかも知れないが、さらに経験を積めば、もう少し見通しの良いマップ作成が可能

になる余地も残されていると思われる。

第二の問題点は、各分野領域で用語が完全には同じでなく、各学会の委員間で使用する用語に微妙な差異が感じられたことである。例えば同じ Control に対応する日本語として使われる制御と管理ではあっても、その意味するところはかなり差があるし、また今後のマルチエージェントシステムなどでは、制御や管理という言葉よりも「舵取り」という感じの表現がより適切ではないかとの指摘もなされた。また、現在多用されている用語の「見える化」にしても、「可視化」とは意味するところが微妙に異なる場合がある。音で表現する見える化もありうるなど、データを絵として表現するという以上に、見えない複雑な事象を理解できる形に表現しようという意味合いも強い。

このように今回の異分野間の議論では、その定義を明確化し、差異を把握しつつ議論する必要がかなり発生したが、議論ではなかなか真意が伝わらず、報告書原稿とその用語解説を分担執筆し、それらをお互いに突き合わせてみて初めて「ああそういう意味だったのか」と差異を発見し、互いに納得する光景も見られた。

第三の問題点は、各 WG に、当初は気付かなかった類似した事項や共通して検討すべき 課題が潜在していたことである。すなわち各 WG の検討課題は、それぞれを大きく捉えると 「人間と社会」がテーマということになり、その背景には共通して「安全・安心」という キーワードが隠されていたということである。そのため各 WG とも、この方向での議論が個 別にかなり進展したが、ロードマップ策定の効率を考えると、将来社会に関する議論を最 初の段階で統一的に実施する機会を設けた方が良かったかも知れないという反省もある。

第四の問題点は、前項とも絡むが、ロードマップの策定に際して経済・社会の発展や変貌をどう読むかという問題である。特に社会問題の展開、環境問題の展開との関連をどう捉えるかが大きな課題として立ちふさがった。すべてを現状維持で考えると分かり易いが、決してそのような社会ではありえないという認識から、ものづくりの WG 4 ではエネルギーコスト、水コスト、食料コストなどを現状の5倍と仮定して議論した。またシミュレーションの WG 2 では、シミュレーションの基盤となる計算機が今後も指数関数的に進歩するが、そのコストは緩やかな線形変化に留まるとの仮定を置いた。このような仮定がどの程度正しいかによって、アカデミック・ロードマップは大きく影響を受ける可能性がある。他の縦型技術領域との整合化も含め、今後も継続的なローリング(改訂作業)を必要とする所以(の一つ)である。

第五の問題点は、将来のあるべき製品・システムを想定したとき、それを利用する人や社会にとって、それらの価値をどう評価できるかという難問である。例えば人間の満足度をどう捉え、それを定量化・可視化できるかとか、さらには社会的快適性をどう定量化できるか、人間や人間集団のダイナミクスをどう表現できるか、などである。これらの課題は各WGがもっとも苦しんだ課題でもあり、必ずしもこのロードマップ策定作業で回答が得られたわけではない。

8. 3 感想ならびに今後の方向

以上のような問題点を抱えながらも、本ロードマップ策定作業がここに無事終了をみた。今回携わったほぼすべての委員にとって、ロードマップ策定は初めての経験であったし、このような形での異分野交流もまた初めての経験であったが、各委員ともこの議論の機会を真剣に捉え、真摯な討論を通じて、それぞれに満足感を得ることができた。普段なら顔を合わせ難いメンバーが一堂に介し、普段ではあまり真剣な考察の及ばなかった事項に対して積極的に立ち向かったこと、今回は特にアカデミック・ロードマップということで多くの夢が語られたことで、異分野間の知的交流も図られ、少なくとも参画した委員にとっては大きな収穫があったという自己評価がなされている。これにより今後の日常での学術交流に向けた下地が形成され、今後の研究協力関係の深化が期待される。

なお、この作成作業の途上、以下のような意見や提言があったことも付記しておきたい。 第一に、昨今の公的組織、産業組織、企業組織の怠惰・粉飾・偽装問題をみると、これらはまさに組織の非効率性が露呈したものであり、その背景には組織の衰退や組織論としての不具合があるのではないか。我が国が世界の中で持続的に発展していくにはイノベーションが不可欠ではあるが、このような現状組織ではそれも覚束なく、むしろ組織そのもののイノベーションがまずは必要ではないか、そのためには教育問題にまで遡る必要性もある、という意見である。

第二に、持続可能なイノベーションを図るには、何事もビジュアル化(可視化、見える化)が重要で、特に経済発展に欠かせない企業活動のビジュアル化がまだまだ遅れていて、これが企業の悲劇や産業の衰退の要因となっているという指摘である。我が国のイノベーションの中核を担うのは企業であるので、活動のビジュアル化を通じたいっそうの活力醸成が期待される。

第三には、特にこれからの日本を支えるべきサービス産業も、背後にしっかりしたものづくり産業の存在が重要で、その存在を前提とした上でサービスサイエンスを強化し、サービスに関わるイノベーションを優先してそこからまた新たなものづくりのイノベーションを誘導するということが重要となる(もの育て、コトつくり)、という議論である。

第四に、このロードマップ策定作業では、科学的・客観的であることを心がけながらキーワードを時間軸上に配置してきたが、何が重要であり、何を急ぐべきであるかの観点から、時間軸上の位置を大胆に動かす検討も今後重要となるという議論である。これは、ロードマップ上に価値観を入れることに他ならないので、異論続出で議論の混乱を招く可能性もありうる。しかしロードマップとは、本来そのようなものであるべきで、何が重要で何をいつごろまでに実現したいという明確な願望を持って作る方が、作る者にとっても熱が入る。そういう観点での大胆な改良も今後重要となろう。

第五に、今回のアカデミック・ロードマップで科学技術を4つの側面から表現したことになるわけだが、それぞれに共通の問題意識が多数あったということは、とりもなおさず、科学技術が抱える問題点がすべての側面から見えるくらいに大きくなってきているというふうに考えることもできる。しかし、科学技術の進展方向の本質的変革(あるいは舵取り)については、一般に部分的行動しかデザインできないことが問題であり、横幹連合としては、少なくとも科学技術の各分野間で相互理解が進むような仕組みをいっそう提示してい

くことが重要なのではないか。さもないと科学技術が抱える問題はいつになっても複雑化 するだけで、解決からは遠ざかってしまうという懸念もある。

以上述べたように、この横断型アカデミック・ロードマップ策定作業では、いろいろな問題点や反省事項はあったものの、計4種の枠組みでのアカデミック・ロードマップが一応完成を見た。その作成の過程で、異分野間のコミュニケーションが進み、異分野の知の統合の足掛かりができたようにも思われる。また、この事業がきっかけとなって、将来、横幹連合のカバーする全学術分野に跨った考察がさらに進むと、我が国における横断型アカデミック・ロードマップの更なる充実につながる。本事業はその先鞭として極めて意義深い活動になった。

8.4 学会横断型アカデミック・ロードマップの課題

今回は学会横断型アカデミック・ロードマップへの初挑戦として、制御技術、シミュレーション、ヒューマンインタフェース、ものづくりの4分野を取り上げたが、学会横断型アカデミック・ロードマップはさらに多くの切り口から議論する必要がある。

今回の議論の過程で明らかになったことは、現在の社会課題への対応には多くの学問分野の知の結集が不可欠であるにもかかわらず学会間の連携があまり進んでいないこと、今回取り上げた4分野だけでも相互に関連する事項が多々あり、さらに大きな枠組みでの学会連携の仕組みが必要なこと、工学系/社会・人文系の交流が非常に遅れていること、社会ニーズ・社会の変化に対する共通認識が重要であること、などであった。

このように学問領域でもディシプリンの枠を超えた活動が強く求められており、横幹連合もこれに向けた活動をさらに強化していく所存であるが、同時に、国の政策レベルでの対応も望まれる。

学会横断型アカデミック・ロードマップあるいは学会横断型科学技術政策提言として進めるべき課題は多々あるが、参考までに以下のような当面の課題を掲げておきたい。

(1)社会デザイン

現代社会が直面する課題の解決には、自然科学、社会科学の成果を結集して実証的で予見的な社会デザインの方法論を確立することが喫緊の課題である。社会デザインに関する技術的方法論、科学的社会デザインの成功事例、ヒューマンファクタなどを調査し、ロードマップを作成する必要がある。

(2) 社会システムのシミュレーション

シミュレーションはさまざまな分野で活用され大きな効果をもたらしているが、人間行動がベースとなる社会システムでは十分に活用できていない。人間行動の推定、統計的処理手法、選択肢とその結果の確率的提示手法などの視点から検討を進める必要がある。

(3) 分野横断型人材育成

科学技術が深化・複雑化する中で人間の果たす役割がますます重要となる。中でも俯瞰的に全体像を把握し的確な判断を行える人材の育成が急務である。人の教育にはある程度の年数が必要であり、中長期的な視点に立った人材育成体系を構築しなければならない。さらに、当面のニーズのみならず、今後の科学技術の進化に対応できる教育システムを考

えていく必要がある。

(4) 知の統合の学問体系

学問は必然的に深化・細分化するが、一方でこれらを統合した新たな学問領域が産み出される。またこれらを俯瞰する新たな学問体系が求められる。そしてこれは社会・産業などの人間活動と密接に繋がっている。これまでの科学史を踏まえ、新たな学問体系とその進展を考えることは、人間活動全般への指針として重要である。

(5) 知の統合手法

手法はアカデミック・ロードマップにはそぐわない可能性もあるが、学会横断型アカデミック・ロードマップを進める上では極めて重要なファクタである。単に異分野の人が集まっただけでは知の統合は起こらない。効果的に知の統合を加速するための環境、動機付け、ツールなどについて事例を含めて分析する必要がある。

(6) 信頼性・リスク

信頼性・リスクの定義を社会活動との関連から再確認し、安全・安心を得るための高品質化技術、評価手法、利害調整の基準、などを検討する必要がある。

(7) 意思決定支援

さまざまな要素が複雑に絡み合い、不確定要素のリスクを抱える中で科学的な意思決定 支援手法とその進展を追及する必要がある。

横幹連合では、上述した諸課題についても、今回の学会横断型アカデミック・ロードマップの策定経験を踏まえ、今後着実に実践していきたいと考えている。また、今回完成したロードマップの活用を通じて、横断型基幹科学技術での知の統合を一歩前進させ、いっそうのイノベーション創出に向けた基盤作りへとつなげていきたいものである。

おわりに

横幹連合では、経済産業省の平成 19 年度技術戦略マップローリング委託事業 (アカデミック・ロードマップ作成支援事業) の一環として、学会横断型アカデミック・ロードマップを新規に作成した。本資料はその成果報告書である。

我が国の技術社会において真のイノベーションを起こすには、産学官が連携して双方向の「知」の流れを作り出すことが重要とされている。また、学術団体間においても、アカデミック・ロードマップをコミュニケーション・ツールとして活用することにより、新しい研究文化への変革を促進し、その結果として、複数領域に跨る新たな科学技術の展開が期待されている。

このような背景の中で、横幹連合は、アカデミック・ロードマップの作成に初めて取組んできた。初めての学会横断型アカデミック・ロードマップということで前例もなく、どのような取り組みをするかという出発時点から、大きな課題に見舞われた。分野横断型のロードマップを作成する場合、融合しようとする各分野の要素技術をまず列挙し、それらの厖大な組合せから新しい未来を想定するという正統的なアプローチもあり得るが、このような手法では議論の発散を招く危険性をはらみ、必ずしも有意義な結論に到達するとは限らない。そのため本計画では、横幹連合の主要分野である4つの分野をまずは選定し、理解しやすい「テーマ」として課題を表現し、そこに異分野の専門家が加わって議論することで、新たな未来社会への道標を見出すことを目指した。その結果がこの報告書の内容である。

それぞれの学会から選ばれた異分野の委員らが初めて顔を合わせ、極めて限られた回数での会合ながら、議論を深めてきた。そのため、必ずしも将来課題のすべてを網羅しているとは断言できる状況にはないし、人によっては不満を抱かれ、また不備を指摘される可能性もあるが、委員の方々の真摯なご努力で当初予定した計画については完遂できたと考えている。ロードマップは、得られた結果よりもそれを作成しようとする過程の方がより重要との考え方があるが、参加された委員の方々は今回の作成作業でまさにこのことを実感されたようである。各委員の今後の学術研究の過程で、今回の経験や得られた知見、さらには今回の新たな知己関係が大きな効力を発揮し、今後の横断型基幹科学技術分野の新展開に大きく貢献されるものと思われる。

得られたアカデミック・ロードマップには、今後30~50年にわたる学術の進路が記載されているが、その方向性はかなり不安定であることは否めない。というのは、我が国をはじめ世界が直面している社会問題、例えばエネルギー問題、食糧問題、人口問題、温暖化などの環境問題など、その進展の度合いによっては本ロードマップに大きな影響を与える可能性があるからである。そのため、今後も必要な改訂はローリング作業として継続する必要がある。とは言えここに書かれている事柄には、特に学術研究者、技術開発従事者、事業者にとって、今後に向けた大きなヒントが含まれているはずであり、それをどう読み解き、どういうインスピレーションを得て、どう活用するかは、読む人に任されているわけである。是非、行間も含めて考察いただき、将来のイノベーションに向けての活用をお願いしたい。

本ロードマップ作成は、株式会社 KRI が主契約者として経済産業省からの委託を受け、その再委託の形で横幹連合が担当した。その契約過程、作成過程、およびまとめの過程で、株式会社 KRI からは多大なご指導、ご支援を頂戴した。特に同社 宮内悟氏、野田泰徳氏、宮本裕生氏、平林由紀江氏には、全体取りまとめや各 WG の運営など、広範な分野でお世話を頂いた。ここに厚くお礼申し上げる。また、同じく再委託契約者である財団法人 製造科学技術センターからは、ロードマップ作成の先達として有用な提言を頂くとともに、特に同センターの瀬戸屋英雄氏、笹尾照夫氏、橋本安弘氏、外山良成氏、間野隆久氏には、議論の各過程で適切な助言を頂戴した。併せてここに厚くお礼申し上げる。

また本ロードマップ作成の全過程において、委託元である経済産業省からは多大なご指導を頂いた。特に同省 産業技術環境局 研究開発課 課長の安永裕幸氏(当時)や同課の渡邉政嘉氏(当時)には、本事業の初期検討段階から、継続して暖かいご指導・ご助言を頂いた。また同課 福田賢一氏、是永基樹氏、武本直土氏には、本ロードマップ作成事業のアドバイザーとして、統括委員会やWGにも適時参加いただき、多くの助言を頂いた。さらに、前記の福田賢一氏に加え、経済産業省 産業技術環境局 技術振興課の瓜生和久氏には、横幹連合主催の横幹連合コンファレンスの特別セッションで本アカデミック・ロードマップの中間報告を行った際に特別講演をご快諾いただき、本事業の完遂に貴重な指針を与えていただいた。ここに記して心より感謝申し上げる。

最後に、本アカデミック・ロードマップ作成に携わっていただいた各 WG の主査・委員 と横幹連合事務局の方々、さらに本活動を暖かく見守っていただいた横幹連合会員学会の 各位に対し、横幹連合および横幹ロードマップ委員会を代表してここに厚くお礼申し上げる。

平成 20 年 3 月

特定非営利活動法人 横断型基幹科学技術研究団体連合 横幹ロードマップ委員会幹事 神 徳 徹 雄