

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC T CTCAGACC

電子情報通信分野
科学技術・研究開発の国際比較
2008年版

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011

平成 20 年 2 月



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

Executive Summary

電子情報通信系を 6 分野（エレクトロニクス、フォトニクス、コンピューティング、情報セキュリティ、ネットワーク、ロボティクス）に分け、各分野の専門家（計約 60 名）による国際技術力比較を行った。技術力を 3 フェーズ、すなわち①研究水準（大学・公的研究機関における研究レベル）、②技術開発水準（企業における研究開発レベル）、③産業技術力（企業における開発・生産技術力レベル）に分けて比較した。以下に各国・地域の特徴的な点を記す。

■日本

多くの分野で米に先行を許しているが、以下のような分野では米国と対等レベルあるいは部分的には優位にあるものもある。

- ・半導体メモリ、LSI 実装技術、ディスプレイ、有機材料・デバイス
- ・光メモリ、固体照明・発光デバイス、光学材料・コンポーネント、フォトニク結晶
- ・並列コンピューティング、クラスタコンピューティング、ストレージシステム
- ・組込ソフトウェア、家電・携帯ベースの組込システム用セキュリティ技術
- ・超高速光伝送技術
- ・ブロードバンド環境、モバイルインターネット環境の整備
- ・実世界ロボティクス

しかし、組込ソフトウェア、実世界ロボティクスなどについては、これまでの優位性にやや陰りが出てきているとの懸念が示されている。

逆に、以下のような分野は国際的に見て弱い、あるいは弱体化傾向にある。

- ・VLSI システムアーキテクチャ、高周波・アナログ集積回路、パワーデバイス、CAD
- ・基盤ソフトウェア、リコンフィギュラブル・システム（企業の技術レベル）
- ・情報セキュリティソフトウェア（企業の技術レベル）

■米国

電子情報通信系全般にわたり、研究者層の質的水準と厚み、新技術創造力、産業技術力などいずれについても伝統的に強く、ほとんどの分野で圧倒的に優位である。あえて言えば以下の分野は比較的弱い。

- ・半導体メモリ、光メモリ、ディスプレイ、有機材料・デバイス
- ・エレクトロニクス生産技術
- ・ブロードバンドネットワーク環境、モバイルインターネット環境

■欧州

伝統的に基礎領域に強みがあり、EU 統合により FP7 などを通じて各国の連携が強化されつつある。とくに以下の領域で強い。

- ・パワーデバイス、CAD（研究水準）
- ・ソフトウェア基礎理論、ヒューマンインタフェース、情報セキュリティ
- ・ネットワーク基礎理論およびシステム
- ・ロボティクス（知能化、医療、福祉応用）など

また国際標準化の面でのリーダーシップが目立つ。

■中国

多方面で日米欧をキャッチアップしつつあり、研究者数、発表論文数ともに急速に増加してきている。とくにレベルアップが著しいのは以下の分野である。

- ・LSI、ディスプレイ、データベース、並列コンピューティング、光通信など
- この背景には、マイクロソフト、IBM、Cisco などが中国に設立した研究所や留学からの帰国組などを通じて欧米研究者との連携が進んでいることが一つの大きな要因となっている。

■韓国

国際分業の観点から戦略的集中と選択を図っており、半導体（とくにメモリ）に注力、コンピュータ（ハードウェア）には投資していない。以下の分野で進展が著しい。

- ・メモリ、ディスプレイ、有機デバイス、携帯など情報通信端末の産業技術力
- ・ワイヤレスブロードバンド環境
- ・ロボティクス（国のフロンティアプロジェクトで技術開発水準が向上）

■その他注目すべき国・地域

- ・台湾：VLSI システムアーキテクチャの研究開発で日本を越える勢い
- ・インド：ソフトウェアに強いことはよく認識されているが、最近では VLSI の研究開発も注目に値する
- ・イスラエル：セキュリティの研究開発水準、VLSI の技術開発水準が高い
- ・シンガポール：光メモリ、ロボティクス（移動アルゴリズム）の研究水準が高い
- ・オーストラリア：ロボティクス（移動アルゴリズム）、量子情報の研究水準が高い

目 次

1 目的及び構成	1
2 国際技術力比較	5
2.1 エレクトロニクス分野	7
2.1.1 概観	7
2.1.2 中綱目ごとの比較	8
(1) VLSI システムアーキテクチャ	8
(2) 集積回路（デジタル）	8
(3) 集積回路（高周波・アナログ）	9
(4) 集積回路（メモリ）	10
(5) 集積回路（インテグレーション）	11
(6) 実装技術	12
(7) センサ技術	12
(8) ディスプレイ技術	15
(9) パワーデバイス	16
(10) 設計支援技術（CAD）	17
(11) 有機材料・デバイス	18
(12) 無機系新デバイス	20
2.1.3 比較表	21
2.2 フォトニクス分野	33
2.2.1 概観	33
2.2.2 中綱目ごとの比較	34
(1) 光通信	34
(2) 光メモリ	36
(3) 固体照明・発光デバイス	37
(4) 光学材料・コンポーネント・光学設計	38
(5) 光計測	41
(6) 量子情報	42
(7) フォトニック結晶・メタマテリアル	43
(8) シミュレーション解析、解析ツール	44
2.2.3 比較表	47
2.3 コンピューティング分野	55
2.3.1 概観	55
2.3.2 中綱目ごとの比較	58
(1) 基礎理論（計算モデル、データ構造とアルゴリズム）	58

(2) 基盤ソフトウェア	59
(3) データベースとデータマイニング	61
(4) ソフトウェア開発技術／ツール	63
(5) ビジネス応用とサービスサイエンス	65
(6) Web 情報システム	67
(7) スーパーコンピュータ	68
(8) 並列コンピューティング／クラスタコンピューティング	70
(9) チップマルチプロセッサ	72
(10) リコンフィギュラブルシステム	73
(11) ディペンダブル情報システム	74
(12) 省電力情報処理技術	76
2.3.3 比較表	77
2.4 情報セキュリティ分野	90
2.4.1 概観	90
2.4.2 中綱目ごとの比較	91
(1) 基盤技術	91
(2) 生体認証および人工物認証	93
(3) アプリケーション	95
(4) ソフトウェアシステム	97
(5) ハードウェア	98
(6) 管理・運用・評価認証	100
2.4.3 比較表	103
2.5 ネットワーク分野	109
2.5.1 概観	109
2.5.2 中綱目ごとの比較	110
(1) ネットワークが提供する環境	110
(2) ネットワーク応用（サービス技術）	112
(3) アーキテクチャ（ドライビングコンセプトを含む）	113
(4) ネットワークシステム	114
(5) ネットワーク制御・管理・運用	116
(6) 情報通信端末技術	118
(7) ヒューマンインタラクション	120
(8) 要素技術	123
(9) 基礎理論	127
2.5.3 比較表	132
2.6 ロボティクス分野	141
2.6.1 概観	141

2.6.2 中綱目ごとの比較	142
(1) 実世界応用技術	142
(2) 理論・アルゴリズム 1 —マニピュレーション—	144
(3) 理論・アルゴリズム 2 —移動—	147
(4) 理論・アルゴリズム 3 —コミュニケーション—	148
(5) 理論・アルゴリズム 4 —知能化—	150
(6) 理論・アルゴリズム 5 —制御理論・制御技術—	152
(7) アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源	153
(8) センサ・センシング技術	155
(9) インテグレーション技術 (ソフトウェア・アーキテクチャ)	157
2.6.3 比較表	160
 3 注目すべき研究開発の動向	 169
3.1 エレクトロニクス分野	171
3.2 フォトニクス分野	179
3.3 コンピューティング分野	184
3.4 情報セキュリティ分野	194
3.5 ネットワーク分野	200
3.6 ロボティクス分野	204
 略語集	 209
 執筆者一覧	 218

1 目的及び構成

1 目的及び構成

独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センターでは、国が行うべき研究開発の戦略立案を行い、科学技術政策立案者に提言を行っている。的確な戦略提言のためには、我が国の技術力の国際的なポジションを把握するとともに、新しい技術の芽にも注意を払う必要がある。

本調査は、上記二つの目的のため、電子情報通信分野に関して行ったものである。

電子情報通信分野のうち、今回は、「エレクトロニクス」「フォトニクス」「コンピューティング」「情報セキュリティ」「ネットワーク」「ロボティクス」の各分野について実施した。

本報告書は、二つの章で構成されている。

第2章「国際技術力比較」は、各国の技術力に関して、専門家の評価を技術カテゴリごとに集めたもので、各国の技術力を比較する際のベンチマーク資料と位置づけられる。

きめ細かい比較のため、上記6分野を更に中綱目（分野の中を更に細かく分類したもの）に分けて調査した。また、技術力の比較は、「研究水準」「技術開発水準」「産業技術力」という3つの観点で行った。研究水準とは、大学・国立研究機関における研究レベルをいう。技術開発水準とは、企業における研究レベルをいう。産業技術力とは、企業における開発力・生産力をいう。

第3章「注目研究開発動向」は、国際技術力の現状比較とは別に、今後重要性が増してきそうな技術の芽や、新しい動向をとらえることを目的に、注目すべき内外の研究開発動向を調査した。

国際学会等での最新の動向をふまえながら、上記6分野ごとに注目すべき研究開発動向についてとりまとめた。

2 國際技術力比較

2.1 エレクトロニクス分野

2.1.1 概観

社会基盤を支えるエレクトロニクス製品（電子デバイス）は極めて広い技術分野にまたがっている。デバイスを機能面から大別すると、①電荷の流れを制御して利用するデバイス、②物質の発光現象を利用するデバイス、③外界との物理・化学的な相互作用により特性を変える（センサ）デバイス、となる。

①の電荷の流れを用いたデバイスの例としてはシリコン集積回路、超高速半導体デバイス、パワーデバイスなど、②の発光現象を利用したデバイスには LED や半導体レーザの他、ディスプレイ（プラズマ、液晶、有機 FPD）などがある。③の代表例としては CMOS イメージセンサや CCD のイメージセンサ、加速度、温度、音量、光量などの物理量をモニタする各種センサがある。これらのデバイスを製造・販売するための支援技術として、コンピュータ支援設計（CAD）、プロセス・テスト装置、実装技術なども重要である。以下では、生産規模が最も大きなシリコン集積回路に関連する技術として「システムアーキテクチャ」、「デジタル集積回路」、「アナログ・高周波集積回路」、「メモリ集積回路」、「プロセスインテグレーション」、「設計支援技術（CAD）」、「実装技術」に分類し、最新技術の動向を探った。その他、「パワーデバイス」、「ディスプレイ」、「有機デバイス・材料」、「無機系新規デバイス」などの技術項目を加え、それぞれの技術分野の調査を行った。

（1）集積回路技術、実装技術、ディスプレイ技術など、多くの技術者が共通の目標に向かって協力的に開発することが必要な技術分野では、日本や韓国は強い。一方、与えられた規格の下で人手をかけて製作できるパソコンボードや一部のデジタル設計（組み込みソフトも含む）の分野では、人件費の安いインド、中国などが技術力を持ち始めている。台湾は日本・韓国と中国・インドとの中間的な位置づけにある。欧米は、優秀な人材が少人数で開拓する技術分野（LSI アーキテクチャ、アナログ・RF 集積回路、CAD、超高速回路など）などで優れた技術力を有している。このような現状分析から、国・地域別技術力マップ（比較表）には各国・地域の産業基盤や技術者教育の影響が反映されていることが分かる。

デジタル集積回路設計については、東アジア圏（韓国、台湾、シンガポール、中国）に加えて、インドやイスラエルの台頭が目立つ。また、ギリシャ、ポルトガルなどが高周波、アナログ、電力線通信の分野に参入し始めている。

（2）最近のエレクトロニクスの進展は材料とシステム応用（LSI）がその両輪となっている。わが国の国際競争力は材料・デバイスなどの面では強いものの、

それらを組み合わせたシステム化には弱い。システム的な技術開発に適した視野の広い技術者の育成が急務である。

2.1.2 中綱目ごとの比較

(1) VLSI システムアーキテクチャ

【日本】技術開発が縮小傾向にある。特に産業界では研究者・技術者の数が減少傾向にある。

【米国】次々と新しい応用を目指したプロジェクトを立ち上げ、研究、技術開発、産業競争力のすべての面で高い水準を保っている。エレクトロニクス面で他国を圧倒しようとする意気込みが感じられる。特に軍事面からの影響力が大きい。

【欧州】VLSI アーキテクチャの研究は盛んであるが、必ずしもビジネス的に成功している訳ではない。産学連携面からの研究は盛んであり、通信、車載などの分野で目立った成果が得られている。また、ベルギーの IMEC の活動のように、世界的な標準を確立するための活動も盛んである。

【その他】韓国は、組込みシステムに産学挙げて注力しており、情報家電を中心に技術開発力は伸びている。台湾は日本に迫るか日本を越える研究開発拠点となっている。また、インドの研究開発も注目に値する。セキュリティなど特殊な分野では、イスラエルの開発力も見逃せない。

微細加工技術の進展とともに一つのチップ上に搭載できるトランジスタ数は依然増大し続けている。その一方でマスクコストや設計コストが急増しているため、新規設計の数は減り、同じチップを複数のアプリケーションに利用する方向に進みつつある。

(2) 集積回路（デジタル）

【日本】低消費電力技術に関しては、高い国際競争力を有している。いち早く低電力技術の研究に着手して成果を上げてきたことや、日本人が電力の無駄使いを減らすきめ細かなエンジニアリングに向いていることや、低電力技術が求められる携帯民生機器の分野は日本の市場が世界のリーダーであることなどの要因による。

研究レベルでは高い技術水準を維持しているもののやや低下傾向にある。技術開発や産業競争力の面で立ち遅れ気味である。

【米国】研究者・技術者の層が厚く、高い技術水準を維持している。製造技術と設計技術の融合として重要な DFM (Design For Manufacturing) では米国の CAD ベンダの力が強い。

【その他】中国では、大学での LSI 設計教育が進行しており、技術レベルの向上が著しい。台湾の研究力にやや陰りが現れた。イスラエルにおける開発技術

力の進歩が著しい。

デジタル集積回路で今日最も重要な課題は低消費電力技術であり、次に重要な課題はデバイスばらつきを考慮した設計技術 (DFM) とシステム・イン・パッケージ (SiP) 技術である。

DFM では、ばらつき要因の物理的理解と、それに基づく知見を設計に導入するシステムが重要である。すなわち物理モデルと EDA システムである。物理的理解については不十分な点が多く、大学を中心とした基礎研究が求められる。EDA システムについてはアメリカの EDA 産業界がリードしているが、それを生産や設計の現場にいかにかすかは、日本の垂直統合型デバイス製造企業にとって重要な研究課題である。

SiP に関しては、Moore の法則の減速と相まって、近い将来大きく発展する可能性が高い。チップ設計とパッケージ実装を統合的に扱える EDA システムと設計手法が、各社の標準設計フローに取り込まれるであろう。元来、実装技術については、日本は高い技術力を有していたが、今後はチップ設計との連携を緊密にするシステムの取り組みが重要になる。

(3) 集積回路 (高周波・アナログ)

【日本】あまり勢いが無い。企業では東芝や Sony、富士通などが開発力を持っているが、その他の企業における開発力は確実に低下している。大学では、A/D 変換器やセンサ処理における静岡大学、チップ間伝送における広島大学・慶応大学、東京工業大学、ノイズ関連の神戸大が一定の存在感を示している。

【米国】大学と企業が中心となって相変わらず世界トップレベルを維持している。産業技術力部門において、ADI, Atheros, BroadCom などの専門メーカーを中心に強い技術力を持っている。TI などの大手もデジタル RF 技術などの新技術を開発している。

【欧州】米国に比べれば技術開発力は弱い。無線やセンサ周辺を中心に一定レベルを維持。IMEC などを中心に生体応用技術など将来技術が盛んになっている。アナログ IP の世界的なベンダが多数存在している。Philips, Infineon などの老舗も高い技術力を有する。

【台湾】急激な追い上げは目を見張るものがある。NSoC 国家プロジェクトにより本分野の大学教員数を年 40 名程度増やし、発足後 2 年で成果を出している。独創的というよりは製品を意識した実用性が高い発表が多い。実際、無線ネットワークの分野ではすでに米国勢の脅威になっている。

【中国】国際学会にはまだあまり出てこないが、近年大学での研究開発が活発になってきている。オリジナリティーはともかく、実用に近い集積回路を多数開発しており、今後、国際学会での発表も急増するものと思われる。

【韓国】国際学会での発表件数は横ばいであるが、韓国は超高速チップ間伝送

に用いられる PLL/DLL 技術や WCDMA や無線ネットワークに強い。無線技術はかなりのレベルに達しており、韓国国内で開催された無線用 LSI の発表のレベルは日本をしのいでいる。

【その他】北欧、ポルトガル、ギリシャ、エジプトなど世界各国の大学およびベンチャー企業が参加し、大競争時代を迎えている。技術の性格上、研究開発者の能力依存が高いことと少人数での開発が可能なことと、大学での設計力の向上、ファウンドリやシャトルの普及によりシリコンプロセス利用のコストが劇的に低下したためと思われる。

いずれにしても高周波・アナログ集積回路技術はデジタルを含む全ての集積回路や電子機器システムの中核技術となっており、この部分が弱体化すると全ての電子機器の開発力が衰退していくことは肝に銘じておく必要がある。この分野は技術の取得が困難であるので、研究開発者教育と併せて強化する必要がある。

(4) 集積回路（メモリ）

【日本】エルピーダは得意のモバイル用のみならず PC 用にも大型投資を決定し、すでにその一部はシェア拡大につながっている。Powerchip semiconductor 社はエルピーダメモリと合併会社を設立し、台湾と日本で韓国を追い上げる体制を整えつつある。

【米国】Micron 社が健闘しているがシェアに低下傾向が見られる。

【欧州】IMEC を中心に開発に当たっているが成果としては顕在化していない。産業技術力では、Infineon から独立した Qimanda AG が高いシェアを確保しており、高い技術水準を維持している。中国への投資を活発化させており、今後の動向には目が離せない。

【中国、台湾】ファウンドリとして世界のシェアを伸ばし、近年着々と実力をあげている。

【韓国】Samsung, Hynix Semiconductor がメモリの高密度化の大きな要素であるメモリセルの構造をあらゆる角度から検討しており、技術力はきわめて高い。エルピーダ（日本）の巻き返しが実り始まっており、デッドヒートとなりつつある。ファウンドリを除けば、汎用 DRAM は世界で 5 社に絞られた。

フラッシュメモリは、NOR 型と NAND 型に分類できる。前者は速度面での優位性はあるが、集積度の面が課題となっているため、最近では NAND 型 FLASH メモリが不揮発性メモリの主流となっている。この技術動向を受け、従来、NOR 型 FLASH メモリを主に生産していた Intel や Spansion 社は NAND 型 FLASH にも参入してきた。しかし、NAND 型 FLASH に関しては韓国の Samsung が世界トップシェアを握っていたが、ここにきて東芝も大型の投資を確定し、巻き返しを図っている。残りのシェアを韓国の Hynix 社、

ルネサステクノロジー、Micron 社（米国）、STMicro 社（欧州）、その他が食い合っている状況である。

(5) 集積回路（インテグレーション）

シリコン集積回路は、CMOS トランジスタを基本素子として、スケーリングにより大規模集積化と高性能化を実現してきた。現在のトランジスタの物理ゲート長は 45 ～ 32 nm であるが、技術的困難さは益々増大し、10 ～ 15 年先には大きな原理的・技術的変革が必要となる。このような技術的困難を打開するため、米国、EU、アジア諸国では、ナノエレクトロニクス関係の「長期的視野」に立ったプロジェクトがいずれも組まれている。

【日本】製造装置メーカーに技術力があり、現状の技術開発力は世界トップレベルにある。Selete/MIRAI によって 45 から 32 nm 技術ノードまでのプロジェクトは用意されているが、長期的展望に立った将来のナノエレクトロニクスに対するプロジェクトや連携体制は整備されていない。また萌芽的領域の研究水準は、決して米国や EU、アジア諸国に劣っている訳ではない。その強みを将来に亘って発揮するためにも長期的視野に立った研究開発体制を至急整備するべきである。将来の人材不足と技術開発力低下が懸念。

【米国】SEMATECH (45-32 nm)、GRC (32-22 nm)、Focus Centers (22-16 nm)、NRI (11-6 nm) と、10 ～ 15 年以上先を見越して、各技術ノードに即したプロジェクトを階層的に組んでいる。これは、所謂、“More Moore”と言われるスケーリング延長技術領域から、“Beyond CMOS”と呼ばれる新しい動作原理・物理に基づく将来のナノエレクトロニクス領域までを含んでおり、産学（官）が連携した包括的な国家プロジェクトとなっている。特徴的な点は、多くの大学の参加と研究施設あるいは設備の有機的連携を図っていること、新しい種々のデバイスの研究開発を並列的に行う点である。これにより、研究開発投資の効率化やリスク回避と共に、将来にナノエレクトロニクス分野を先導するために必要な技術的・学術的掘り起こしが可能になっている。

【欧州】2004 年 5 月に ENIAC を設置し、2020 年までの戦略的研究開発アジェンダを発表している。EU では、“More Moore”領域の研究開発を強化し、さらに“More than Moore”と言われる集積回路技術とバイオ、MEMS などの他分野技術のインテグレーションによって新しい応用 / 産業分野を発展させるという観点が強い。いずれにしても、長期的視点に立って、大学と各研究機関をネットワーク化し、産学連携体制でナノエレクトロニクス分野の研究開発促進をねらっている。

(6) 実装技術

SoC (System on Chip) 技術とともに、SiP (System in Package) 技術、ことに 3 次元積層化技術などの実装・パッケージング技術がエレクトロニクスシステムの高速化・大容量化の鍵を握っている。また、これらの技術は、日本が得意とする携帯電話やデジタル TV をはじめとするデジタルコンシューマ製品の高機能化のみならず、低コスト化、短サイクル化に答える重要技術となっている。

【日本】大学・研究機関における一部分野の基礎研究は活発である。生産技術に対する国の研究予算が少なく、また、産学連携研究も少ない。各企業における製品種別に関する統廃合が進められているものの、企業戦略に曖昧な点が多い。実装・パッケージング技術はサイエンスに立脚した技術になっていないのが実情である。実装技術が非常に広範囲な学際領域にわたり、単一の研究部門ではカバーしきれないことや、常に多分野の最先端技術を活用することのために、エレクトロニクス生産技術の対象となる材料データベースの整備、信頼性評価の物理的意味の明確化などが行われていないことにある。技術立国“日本”を維持・発展させて行くには、国家戦略として、これら実装技術をサイエンスとしてとらえ、基礎理工学に立脚した技術開発が必須である。

【米国】軍事・航空宇宙産業からの研究予算をもとに、次世代電子システム構築に向けた多くの産官学の研究・開発が進められている。3 次元実装の実用化研究など、次世代対応の技術開発が積極的に進められている。システムソフトウェアとしての産業技術力は伸びているが、実装生産技術は海外生産が主流である。

【欧州】国・大学やコンソーシアムの研究所を中心として、次世代対応の研究・開発が進められている。3 次元実装の実用化研究、樹脂実装技術など、次世代対応の技術開発が積極的に進められている。

【韓国】生産の中心が中国などの海外に移行しつつある。

(7) センサ技術

センサはニーズ（センシング対象）が牽引する形で研究開発が行われている。ここ 1 年（2007 年）で化学センサ（バイオセンサ）関連の研究開発の活性化は目を見張るものがある。また最近の研究の取り組みの特徴として、新材料探索（特にバイオセンサ）、小型化、低消費電力化、高ダイナミックレンジ、高 S/N 比も志向している。更に直近の取り組みとして、車載用、携帯機器用、医療・福祉・介護用（高齢者の健康管理）、環境用、食の安全、建築物（ビル、橋梁等）用途のセンサ等は社会の強い要求を反映して、特に研究開発が活発化している。以下に国別の動向を述べる。

【日本】研究が活発な分野は偏っており、大学と大企業の研究部門が中心となっ

て車載用・カメラ用の CMOS イメージセンサ、ガスセンサ、環境モニタ用ガスセンサ、構造物健康モニタ等に取り組んでいる。これらの分野は世界的にも先行し研究水準も高い。更にこの 1 年で世界的傾向である化学センサ（バイオセンサ）研究が日本でも活発であり、多くの大学が取り組んでいる。

CMOS イメージセンサでは少し出遅れていたが、測定レンジの拡大や画素数拡大に関して多数の報告（例：東京理科大学、北海道大学、東北大学、静岡大学、奈良先端科学技術大学院大学等）が出され、着実に力をつけている。ガスセンサでは、ボール状 SAW センサにより、世界で初めて水素濃度を 10 ppm ～ 100% まで検出可能とした取り組み（東北大学と凸版印刷の共同研究）や Pd 電極を用いたダイオード型センサで 10 ppm ～ 10^4 ppm までの検出可能とした水素センサ取り組みも注目される（長崎大）。またホルムアルデヒド、エタノール、トルエン、アセトン等の揮発性有機化合物（VOC）源検知用のガスセンサの研究も活発である（愛媛大、熊本大、九大等）。環境モニタ用センサとしてガス（NO、NO₂、NO_x 等）センサの研究（例：立命館大学、大阪大学、富山大学、長崎大学、横浜国立大学、名古屋大学、九州大学等）も活発である。

また他の注目すべき取り組みとして、防犯や高齢者モニタ用の大面積圧力センサ（東京大学）、化学センサの過渡応答波形のパターン認識を用いた単一センサによる複数ガス検出センサ（埼玉大学）等がある。またファイバセンサの応用研究も力をつけてきている。日本のセンサ技術とネットワーク技術の優位性を生かしたセンサネットワーク研究の活性化が始まってきた。（東京大学・日立、東京電機大学、工学院大学、大阪大学、立命館大学等）

研究と同様に技術開発水準の高い分野も大企業に偏っている。大量消費の見込まれるイメージセンサ（CMOS、CCD）、ガスセンサ等の技術開発力は世界のトップレベルにある。イメージセンサでは画素の補間方式の研究（三菱電機）、多層有機光電膜を用いたカラー画質の向上研究（富士フィルム）、CMOS センサのダイナミックレンジ拡大研究（三洋、東芝等）や S/N 比向上研究（キヤノン、ソニー）、CCD イメージセンサでは銀塩写真の解像度を越える 1020 万画素の報告（ソニー）や 60 field/s の高品質動画画像の報告等も日本の実力を示している。ガスセンサの取り組みも広く行われており、鉛フリーの酸素センサ（ユアサ）、コスモス・AIST の水素センサや、センサ電極の改質研究も活発である。

産業技術でも同様な偏りが有り、車載用センサは大企業が牽引しているものの、ベンチャー企業が育っていない。車載用途のセンサは本年に入ってからあまり報告がされておらず、研究開発から実用領域でのノウハウの蓄積段階に入ってきたためと推測される。またセンサネットワークの研究が活性化し始めた所である（東大・日立）。

【米国】研究水準、技術開発水準、産業技術力のすべてで世界のトップレベルを走っており、ユニークなセンサが創出される下地が整っている。

例えばナノワイヤセンサ（カリフォルニア大）、節足動物の毛細胞センサ受容体の原理に基づく高分子人工毛細胞センサ（イリノイ大）、ホログラムを用いた乳酸センサの研究（ケンブリッジ大）があり、スポーツ医学等への展開が期待される。更に注目される報告として、RNA（リボ核酸：RNA は生体内タンパク質合成の中心部位）の構造的特性及び酵素的特性として、 Mg^{2+} を必要とする性質を利用した細胞内 Mg^{2+} のセンシングに関する研究（ワシントン大）等世界をリードしている。また磁気センサでは NIST より世界最高感度と思われる 70fT の感度を持つ電池駆動可能な超小型センサの発表があった。化学センサ（バイオセンサ）では Scripps Res. Inst. よりの報告で、LXR が肝臓のグルコース代謝と脂肪酸合成を統合する転写スイッチであることを明らかにする等、化学センサ（バイオセンサ）分野でも世界をリードしており、新材料探索、電極修飾方法等の研究も活発に行われている。

技術開発面では、コンソーシアムなどは外部発表をしておらず、実用化研究に近い取り組み段階と推察される。ベンチャー企業の開発部門や軍研究所がリードしている。

産業技術では半導体メーカー（例：アナログ・デバイセズ社、フリースケール・セミコンダクター社、マイクロンテクノロジー社、HP 社等）がセンサにも取り組んで牽引し、またベンチャー企業（例：クロスボーテクノロジー社、スタンダード MEMS 社等）の活躍も目覚ましい。

【欧州】EU 全体の研究はセンシング対象が米国と重ならないセンサに戦略的に特化している。センサに取り組んでいる多くの大学が EU 全体の研究水準の底上げに繋がっている。たとえばポーランドアカデミーからの「食品試料中のアクリルアミドを検出するための新ボルタンメトリーセンサ」では強力な発ガン物質であるアクリルアミド検出の直接測定に初めて成功や、フランスの CNRS からの「DNA バイオセンサに対する物理的機構としてのメニスカス波の共鳴周波数」と題する発表では空気 - 水界面に存在する化学物質（DNA 鎖の種類）にきわめて敏感で、一本鎖 DNA と二本鎖 DNA を区別し、二本鎖 DNA の変性を観測することが可能とする基礎研究に根付いた報告があり、世界的にもトップレベルにある。

技術開発面では、EU のフレームワークによる研究支援も追い風となって、センサ分野やそのシステム応用であるセンサネットワーク分野の活性化を後押ししている。

産業技術では中小メーカー主導（例：独 Continenta、AG、Dallmeierelectric、EPCOS 社等）であるが、ベンチャー企業（例：独 Microsonic 社、独ファースト・センサ・テクノロジー社、英キネティック社等）も育っている。米国と

共に直近の日本の競争相手である。

【中国】全体的なレベルはまだ低い、研究では国策としてのセンサへの取り組みや海亀政策により、大学中心に活発になってきている。センサ分野全体の研究発表は約 100 件となっており、昨年より一桁増え、数・質共に充実してきている。中国に底力がついてきていることが窺え、ここ 1 年で確実に韓国、台湾を超える力をつけたと思われる。技術開発、産業技術はまだこれからであるが、韓国、台湾と共に少しずつレベルを上げており、いずれ日本の競争相手になるであろう。

【韓国】状況は中国と似ており、国策としての取り組み効果が大きく、研究では大学、国研（例：KAIST）を中心に活性化しているがレベル的にはまだ低い。技術開発、産業技術のレベルは研究水準と同様にまだ低い。

【台湾】研究水準は、韓国と同程度であり、大学主導で進められている。発表論文数も韓国程度である。技術開発でも見るべきものはないが、産業技術力では、ファウンダリーサービスによる力は侮れないものがあり、レベル的には韓国より上。

(8) ディスプレイ技術

家電製品をはじめとしてあらゆる装置のマン・マシンインターフェースとして画像表示器が付加されるようになってきた。このため、簡単な小型軽量ディスプレイから、高解像度、大画面、高品位ディスプレイなどと、需要が急速に伸びると共に、多様なディスプレイが開発されている。

【日本】ディスプレイの部材については日本が基礎研究から応用まで幅広い技術分野で優位性を保っている。前半工程は設備産業化の傾向が強くなり、後半（組立）工程についても空洞化（中国などへの生産移管）が進んでいる。製造企業数は減少気味であり、海外への人材流出が増加している。基本的な技術はこの 20 ～ 30 年をかけて日本が開発・育ててきたものが大半を占めるが、アジア諸国が国を挙げて猛追してきたこと、技術流失が行われたこと、日本がバブル崩壊で防衛や更なる研究開発を行う余力がなかったことなどで国内における生産技術の優位性が低下している。

【欧米】製造が行われていないために、研究者も減少し、開発課題の不明確化とモチベーションの低下が見受けられる。SID（The Society for Information Display）での論文発表から判断すると、米国はディスプレイシステム、欧州は基礎研究が盛んである。

【韓国、台湾】日本や欧州の部材メーカーからの技術を導入して、急速に力をつけている。台湾、韓国が国策としてディスプレイ技術の開発を進め、2005 年には台湾、韓国がほぼ日本と同等の生産量にまで追いついてきた。十数年以上前から国を挙げて大学や企業を支援してきた成果が出ている。但し、材料や

設備などの面で裾野は広くない。

【中国】特に液晶モジュールの組立工程（後半工程）を中心に生産量を急拡大しており、近い将来、前半工程での生産においても大きなシェアを占めると予想され、日本にとって大きな脅威となるだろう。中国政府は、台湾のサイエンスパークの運営方法を学び、そこでの成功例を参考にして新規参入企業の合併などを押し進めながら企業の育成を図っている。将来、液晶ディスプレイの主要生産・消費拠点としての可能性は高い。液晶の生産額においてはすでに世界一のシェアを確保している。特に組立工程において、生産能力とコスト力の優位性が顕著である。

(9) パワーデバイス

1990 年代の初頭まで、MOSFET、IGBT、GTO など、現在、主流のディスクリートパワーデバイスが、産業用モータ・ドライブ、新幹線や都市交通、電力系統などの社会インフラ型のパワーエレクトロニクス分野で大量に使われていた。しかし、1990 年代後半に入ると市場の重心は、ハイエンド CPU、モバイル機器、データセンタなどの情報・通信用電源、デジタル家電、省エネ家電、自動車などの中小電力の量産型 PE とそれを支える汎用パワーデバイスに移行し始めた。この市場動向に応じてパワーデバイスの高速・低損失化が着実に進んでいる。

【日本】量産型パワーエレクトロニクスへの市場変化に対応した開発競争において世界的な競争力を相対的に低下させている。日本のパワーデバイスの研究は相対的に、社会インフラ型 PE の成功体験から脱却できていない。大学の教育も含めて研究開発の再構築が必要である。

パワーデバイスの基本機能である高速・低損失スイッチング能力の向上は VLSI 技術、WBG 半導体の導入で今後も大きく進展する。このため、パワーエレクトロニクスシステムをさらに小型化する幅広い学際的な研究が求められる。

【米国】PC、CPU、モバイル機器のパワーマネージメントに使われる 100 V 以下のパワー IC 分野では CMOS 技術の実績と中国に投資した製造ファブをベースに米国の半導体メーカーの競争力が急速に増している。特に、ナショセミ、TI、フェアチャイルドなどの LSI メーカーがパワー IC の開発力を強化している。

【欧州】伝統的に強い高耐圧ディスクリートデバイスに加えて、MEMS を組み込むなど低電圧パワー IC の技術開発力も高い。WBG 半導体も含めた新しい分野へのバランスある開発水準を維持。STMicro 社、Infineon 社を筆頭に欧州のパワーデバイス産業技術力は日本と比べて高い。特に、パワー IC のプロセス技術とシステム化技術で日本を大きくリードし始めており、それを使っ

たシステム IC の産業技術力は強い。

【中国】当該分野論文数が急増しており人材育成も含めて将来脅威になる可能性が出ている。低電圧のパワー IC を中心に米国が投資しているファブでの連携。将来の独自技術開発への発展の可能性がある。米国企業投資のファブによる産業技術力が成長。情報通信用パワー IC・MOSFET のコスト力で台湾、中国が台頭。

【韓国】KAIST、ソウル大学他の公的機関の研究水準レベルアップは要注意。サムソンの個別半導体部門を買収した韓国フェアチャイルド社の技術開発水準は向上している。

SiC、GaN などの WBG 半導体は、パワーデバイスとその応用を視野にした研究が世界的に進められている。SiC の実用化研究は、既にダイオードの商品化で実績のある欧米はベンチャーを中心に、日本は NEDO および企業の自主開発の両面から行われている。Si で日欧が独占している高耐圧ディスクリットデバイスに対して、米国は DARPA が公的資金を WBG 半導体に投入している。

(10) 設計支援技術 (CAD)

【日本】ごく少数ではあるが国産 CAD ベンダはあるものの、半導体メーカーの内製 CAD システムは縮小傾向。ほとんどの企業が米国製の CAD システムを導入している。STARC が NEDO のプロジェクトで製造を意識した設計 (DFM) でソフト開発を行っているが、全般的に手薄な状況にある。

【米国】UCB を中心とする国家規模の GSRC を設立し、研究開発を積極的に行っている。著名な国際会議での発表も、米国の大学からの発表が圧倒的に多い。大手 CADENCE, SYNOPSYS に加えて、新規の CAD ベンダの活躍も目立つ。スタートアップ・カンパニーも多数生まれ、CAD 産業の活性化の原動力になっている。集積回路の設計支援ソフトについては米国ベンダの独壇場になりつつある。

【欧州】IMEC、TIMAなどで CAD ツールの試作を行っている。大学でのコンパイラの研究開発も活発に行われている。アナログ回路設計 CAD の研究も活発。上流設計およびアナログ設計の CAD ベンダがいくつか立ち上がっている。

【中国】現時点では、CAD システムの開発の情報はほとんどないが、数年後には上記の研究成果をもとに CAD システムの開発が活発化する可能性が高い。

【韓国】ソウル大学、KAIST を中心とする Center for SoC Design Technology を設立し、SoC プラットフォームの研究を推進している。論文数も増加しつつある。上記の Center for SoC Design Technology で試作

を行い、CAD ツールの開発を進めつつある。

設計支援技術の最近の研究開発動向として特筆すべき技術としては、(1) 非均質な構成要素を持つシステム LSI (SoC) の設計技術、(2) 携帯機器 (バッテリー駆動) を考慮した消費電力量削減技術および発熱を抑えるための消費電力削減技術、(3) 微細化による素子ばらつきに対応した歩留まり向上のための設計技術、(4) 高信頼度化のための設計技術があげられる。

(11) 有機材料・デバイス

①有機 EL 関係

日本のエレクトロニクス企業は、有機 EL ディスプレイの実用化の進展がやや遅れ気味のため、有機半導体エレクトロニクスに関する研究開発に本気で取り組む姿勢がやや弱い。しかし有機 EL を用いた薄型大画面テレビの開発に関しては幾つかのエレクトロニクス企業が具体的な動きを開始している。欧州では、有機エレクトロニクスは直近の開発課題としてではなく、長期戦略課題と受け取って腰を落ち着けて研究開発に取り組みは始めている。米国はやや短期的な判断からプリンタブル技術に集中してきている。

【日本】2006 年 2 月の三洋電機の有機 EL 研究開発、生産からの全面撤退の発表以来、アクティブマトリックス駆動のフルカラーディスプレイを生産する方向でのエレクトロニクスメーカー側からの動きは弱かった。しかし 2007 年 1 月にソニーが薄さと画質において他の薄型ディスプレイの追随を許さない高性能の有機 EL テレビのデモをして以後、国内のエレクトロニクス企業の動きに変化が生まれている。ソニーは 2007 年 12 月に 11 インチの有機 EL テレビの製品出荷を開始しており、2008 年 1 月の CES2008 では、27 インチの試作品を公開した。更にプラスチック基板と有機トランジスタを用いたフレキシブル有機 EL ディスプレイのデモも行い、有機 EL テレビの潜在的な実力を見せつけた。東芝は 21 インチクラスの有機 EL テレビのデモを行い、塗布法による大面積有機 EL テレビの開発に本格的に取り組むことを宣言し、他のエレクトロニクス企業も同様の体制を整えつつある。

パッシブマトリックス駆動の小型有機 EL ディスプレイについては、東北パイオニア他数社が生産を行っている。しかし、一昨年まで売り上げで世界トップにあった東北パイオニアは、現在、韓国、台湾勢の後に付く状態となっており、コスト競争に勝てない状況にある。

一方、低分子系材料の生産と供給においては、日本企業が依然として世界を支配しており、出光興産をはじめとする国内数社が供給する低分子系素材の性能は他国の追随を許さない。また、高分子系素材の供給については、住友化学がドイツのメルク社と世界を二分する立場にある。

【米国】有機 EL ディスプレイを開発する熱気はほぼさめてしまい、ターゲッ

トを照明利用に変えているが、これも開発意欲を長期的に支えうるとは思えない。

【欧州】長年この分野を引っ張ってきたフィリップスがほぼ研究開発を終結した。ドイツのノバルレッド社が新しいタイプの高性能有機 EL 開発で目立っている程度で、全体的には欧州の有機 EL 研究開発も停滞気味であり、ターゲットをディスプレイから照明に変えて生き残りを図りつつある。

【台湾】韓国に若干遅れて日本の水準をキャッチアップできているが、その一方で、有機 EL の研究開発から撤退する企業も出始めている。特にアクティブ駆動有機 EL の技術の壁は依然高いようである。中国においては、有機 EL の生産ラインを建設中であるとの情報もあったが、まだ現実的には実用デバイスを生産できる技術水準にはない。

【韓国】サムソン SDI が携帯電話主画面用のアクティブ駆動フルカラーディスプレイを 2007 年に市場投入した。しかし、市場投入の規模は必ずしも拡大しているとは言えないのが実状であり、また製品の性能も若干期待はずれ。現時点でのサムソンの有機 EL 関連の技術開発力は日本の水準をキャッチアップした段階にある。生産技術に関しては実践的に日本の技術レベルを越えつつある。

②有機トランジスタ

有機太陽電池に関しては、材料、デバイス、作製法いずれの観点からもまだ探索研究の段階であり、長期的視野で技術開発が必要である。

【日本】物性物理、デバイス物理、デバイス作製技術、材料物性、材料合成まで幅広い研究が展開されている。プロトタイプデバイスの作製についても、LCD のアクティブ駆動（日立・産総研、ソニー）、有機 EL のアクティブ駆動（NHK 技研、パイオニア、ソニー）、センサ、アクチュエータの駆動（東大）など活発に実施されている。

【欧米】材料研究や物性物理関係の研究では進展が大きく、学術的な成果はあがっているが、実用化を視野に入れた研究開発の成果が見えていたわけではない。例えば IBM やフィリップスなどは、一応の研究展開を終了して、続けての開発課題はペンディング状態である。

③有機太陽電池

【日本】湿式ないしは擬固体型のグレッツェル型有機太陽電池の研究開発がこの数年精力的に実施されてきて技術的には高いレベルにあるが、太陽電池としての実用化の壁は高い。

【欧州】有機薄膜太陽電池の研究が大きく先行している。オーストリアの大学と企業が最も進んだ研究開発の実績を持っており、ドイツ、オランダなど EC 諸国の大学、企業が共同して研究開発を活発に展開している。但し、長期的な観点での環境調和型エネルギー源の候補として捉えており、すぐに企業ベースで実用化することは必ずしも想定していない。欧州では長期戦略として、プ

リントブル（フレキシブル）と有機太陽電池とが、主要な潮流を成しつつある。
【韓国、中国】日本以外のアジア諸国の関心はまだあまり高くない。

④有機メモリ、センサなど

有機薄膜メモリの研究が国内、欧米ともに目立つようになってきた。まだ原理確認の段階を越えるものではないが、技術動向を見守るべき分野である。有機薄膜のセンサ応用に関しては、如何に実用ターゲットを把握するかが常に問題であるので、まとまった研究分野に育ちにくい状況が続いている。

(12) 無機系新デバイス

米国・欧州ともに、将来のテクノロジーの覇権を狙って各種国家プロジェクトを立ち上げ、カーボンナノチューブ、スピントロニクスなど“Beyond CMOS”の研究を盛んに行っている。日本は産業界の動きは鈍いものの、国家プロジェクトなどで欧米を追いかけている状況である。日本以外のアジア各国では韓国が特にメモリの分野で研究を進めている。【米国】は、10～15年以上先を見越して、各技術ノードに即したプロジェクトを階層的に組んでいる。これは、所謂、“More Moore”と言われるスケーリング延長技術領域から、“Beyond CMOS”と呼ばれる新しい動作原理・物理に基づく将来のナノエレクトロニクス領域までを含んでおり、産学（官）が連携した包括的な国家プロジェクトとなっている。

【欧州】長期的視点に立って、大学と各研究機関をネットワーク化し、産学連携体制でナノエレクトロニクス分野の研究開発促進をねらっている。

2.1.3 比較表

◆ VLSI システムアーキテクチャ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	研究者はほとんど増えていない。産業界の研究者の減少が問題。
	技術開発水準	○	→	一時のシステム LSI ブームが去り、多額の投資を恐れて技術開発のプロジェクト数が減少。CREST などのプロジェクトの成果が出始めている。
	産業技術力	○	↘	研究、開発体制の弱体化が技術力の下降に繋がる。
米国	研究水準	◎	→	画期的なヒットは無いが、コンスタントに研究力を維持している。
	技術開発水準	◎	→	新しい形の応用分野を設定したプロジェクトを起こし、開発力を維持。特に軍事面の影響が大きい。
	産業技術力	◎	→	研究力と開発力を背景に産業技術力を維持。
欧州	研究水準	◎	↗	研究は極めて盛んである。特に産学連携で、通信、車載など新しい応用分野に対する研究が盛んである。
	技術開発水準	○	↗	企業でも研究は盛んであるが、かならずしもビジネス的に成功しているわけではない。
	産業技術力	○	→	ビジネス的な不振を技術開発力でカバーしている。
中国	研究水準	△	↗	まだ、他国のコピーをしている段階であるが、研究者は増加。
	技術開発水準	△	→	産業レベルでのオリジナルな開発は少ない。
	産業技術力	×	↗	振興政策により上昇機運。
韓国	研究水準	○	↗	サムソンを中心に産学で意欲的に取り組んでいる。
	技術開発水準	○	↗	情報家電を中心に開発は伸びている。また、組込みシステムに産学挙げて注力している。
	産業技術力	○	↗	急速に実力をつけている。
全体コメント：日本の研究開発は拡大が止まり、縮小傾向にある。欧米はまだ盛んに研究開発が行われている。上記の表には無いが、台湾が日本に迫るか日本を越える研究開発拠点となっている。また、インドの研究開発も注目に値する。セキュリティなど特殊な分野では、イスラエルの開発力も見逃せない。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆集積回路（デジタル）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↘	低電力技術の研究は強い。企業の研究力が次第に低下し始めている。
	技術開発水準	○	↘	技術開発力が次第に低下し始めている。
	産業技術力	○	↘	
米国	研究水準	◎	→	層が厚く、若手研究者が活躍。
	技術開発水準	◎	→	DFM のソフトについてはアメリカの EDA 産業界がリードしている。
	産業技術力	◎	→	システム力と併せて VLSI の開発力が高い。
欧州	研究水準	○	→	IMEC や企業での研究力が向上している。
	技術開発水準	○	→	
	産業技術力	○	→	
中国、台湾	研究水準	○	↗	大学での LSI 設計教育が進行しており、技術レベルの向上が著しい。台湾の研究力にやや陰りが現れた。中国本土は発展途上。
	技術開発水準	○	↗	台湾のレベル向上が進んでいる。
	産業技術力	○	↗	パソコン用 LSI、LCD を中心に台湾の台頭が著しい。
韓国	研究水準	△	→	KAIST と SNU の一部が活発。
	技術開発水準	△	→	
	産業技術力	○	↗	
全体コメント：米国の圧倒的な強さと台湾の進展が著しい。イスラエルの開発技術力が極めて高い。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆集積回路（高周波・アナログ）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	×	→	学術研究としてきちんと取り組まれていない。
	技術開発水準	△	↘	チップ間伝送やセンサ周辺などは健闘しているが、総じて弱い。大学では実用性の高い集積回路は殆ど開発されていない。
	産業技術力	○	↘	世界をリードする製品が少なく、無線用 LSI や IP は外国から導入していることが多い。
米国	研究水準	◎	→	ミリ波用シリコン LSI 技術、微細 CMOS 用アナログ回路、ソフトウェア無線用 LSI 技術などが最近の傾向である。
	技術開発水準	◎	→	ベンチャーを中心に活発。大学においても実用性の高い LSI を開発。
	産業技術力	◎	→	ADI, Atheros, BroadCom などの専門メーカーを中心に強い技術力。TI などの大手もデジタル RF 技術などの新技術を開発。
欧州	研究水準	○	→	KUL, IMEC, ETH などの大学や公共研究所を中心に一定レベルを維持。
	技術開発水準	○	↗	米国に比べれば弱い、無線やセンサ周辺を中心に一定レベルを維持。IMEC などを中心に生体応用技術など将来技術が盛んになっている。
	産業技術力	◎	→	アナログ IP の世界的なベンダーが多数存在。Philips, Infineon などの老舗も高い技術力を有する。
中国、台湾	研究水準	△	↗	基礎レベルは欧米に比べればさほど高くないが、ミリ波など進んでいる分野もある。
	技術開発水準	○	↗	台湾のベンチャーを中心に製品力が向上、大学でも実用性の高い LSI を開発。
	産業技術力	◎	↗	DVD や液晶用回路技術は従来から強かったが、近年無線用 LSI でも実績が出てきた。
韓国	研究水準	△	→	PLL/DLL, WCDMA, 無線 LAN など特定分野で強い技術を有する。
	技術開発水準	○	→	大学での開発レベルは実用性が高い。
	産業技術力	△	→	サムソンはインターフェースは強いが、分野全般では弱い。また専門メーカやベンチャーが少ない。
全体コメント：				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆集積回路（メモリ）

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	新材料を使った不揮発性メモリの研究が散発的に行われている。
	技術開発水準	◎	→	最先端企業群の中でデッドヒートしている。
	産業技術力	○	→	東芝が NAND フラッシュ、エルピーダは DRAM で健闘。
米国	研究水準	○	→	次々世代の新型メモリについては基礎研究面で成果がみられる。
	技術開発水準	○	→	Intel, Micron などメモリでも依然として高い技術水準を有する。
	産業技術力	○	→	DRAM で Micron 社が健闘している。
欧州	研究水準	△	→	I M E C 中心に団結して研究に当たっているが成果としては顕在化していない。
	技術開発水準	△	→	I M E C 中心に団結して開発に当たっているが成果としては顕在化していない。
	産業技術力	○	→	DRAM では、Infineon から分離した Qimanda 社が健闘。
中国	研究水準	△	→	研究自体の水準は高くない。低い水準で横ばい。
	技術開発水準	△	↗	外国企業からの技術移転の流用という観点では向上している。
	産業技術力	○	↗	台湾勢がシェアを拡大している。中国本土もファンドリービジネスを背景に着実に力をつけている。
韓国	研究水準	◎	→	すべての種類のメモリに対して多方面からアプローチしている。
	技術開発水準	◎	→	メモリの高密度化の大きな要素であるメモリセルの構造をあらゆる角度から検討しており、技術力はきわめて高い。
	産業技術力	◎	→	サムソンが強い支配。Hynix は低下傾向。
全体コメント：新規不揮発性メモリーに開発投資したが成果は見えていない。メモリ全体として生き残りを賭けて数社がデッドヒート。産業競争力に関しては DRAM だけでなく、不揮発性（フラッシュ）メモリビジネスが評価に影響を与える状況に変化している。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆集積回路（インテグレーション）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	依然として、ナノエレクトロニクス分野での長期的戦略が無い。
	技術開発水準	◎	↘	現状の技術開発レベルでは負けてはいないが、将来の人材不足と技術開発力低下が懸念。製造装置メーカーに技術力がある状況。
	産業技術力	◎	→	半導体メーカは依然として苦戦。材料メーカは好調。
米国	研究水準	◎	↗	新たに NRI を発足させ、Beyond CMOS の研究開発体制を整備。
	技術開発水準	◎	↗	SEMATECH、GRC、Focus Center などの技術ノードに合わせた階層的プロジェクトで着実に成果を上げつつある。また、海外戦略活動も積極的に行っている。
	産業技術力	◎	→	Intel
欧州	研究水準	○	→	IMEC、MINATEC
	技術開発水準	○	↗	ENIAC(Eurpean Nanoelectronics Initiative Advisory Council) により、ナノエレクトロニクス分野の研究開発を強化。
	産業技術力	○	→	ASML の EUV リソ装置。
中国	研究水準	○	↗	研究レベル・研究環境も含めて急上昇。
	技術開発水準	○	↗	
	産業技術力	◎	↗	外国企業との合併、ファウンドリーサービスで台頭。
韓国	研究水準	○	↗	バイオや有機トランジスタ、不揮発性メモリの研究が増加。
	技術開発水準	◎	↗	Hynix も 300 mm 研究開発工場を整備。
	産業技術力	◎	↗	サムソンは依然として脅威、DRAM 世界 1 位、FLASH の追い上げ。
全体コメント：米国は NRI を、EU は ENIAC を発足し、10～15 年以上の長期的視野に立った産学連携でのナノエレクトロニクス開発体制を整備。また、各国とも大学間連携 COE で、施設・設備の有効利用と人材育成を図る。特に、米国では海外戦略を強化しつつある。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆実装技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	大学・研究機関における一部分野の基礎研究は活発であるが、生産技術に対する国の研究予算が少なく、また、産学連携研究も少ない。
	技術開発水準	◎	→	現行の製品生産技術が中心であり、次世代対応の技術開発への対応が遅れている。
	産業技術力	◎	→	各企業における製品種別に関する統廃合が進められているが、企業戦略に曖昧な点が多い。
米国	研究水準	◎	→	軍事・航空宇宙産業からの研究予算をもとに、次世代電子システム構築に向けた多くの産官学の研究・開発が進められている。
	技術開発水準	◎	↗	3次元実装の実用化研究など、次世代対応の技術開発が積極的に進められている。
	産業技術力	○	→	システム・ソフトウェアとしての産業技術力は延びているが、エレクトロニクス生産技術は海外生産が主流である。
欧州	研究水準	◎	↗	国・大学やコンソーシアムの研究所を中心として、次世代対応の研究・開発が進められている。
	技術開発水準	○	↗	3次元実装の実用化研究、樹脂実装技術など、次世代対応の技術開発が積極的に進められている。
	産業技術力	○	→	生産技術は、海外が中心である。
中国	研究水準	△	→	日本、欧米の研究の後追いの感がある。
	技術開発水準	△	↗	日本、欧米の技術を導入し、技術開発水準を高めてきている。
	産業技術力	○	↗	安価な労働力を背景に、量産化が急速に進んでいる。
韓国	研究水準	△	→	日本、欧米の研究の後追いの感がある。
	技術開発水準	○	↗	メモリと液晶を中心とした技術開発が目覚ましい。
	産業技術力	◎	→	現在は、高度成長しているが、生産の中心が中国などの海外に移行しつつある。
全体コメント：				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆センサ技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↘	特定のセンサ分野（イメージセンサ、ガスセンサ、ファイバセンサ、味覚センサ、磁気センサ）では世界トップレベルである。全体的には、ベンチャーが育っておらず又研究者層も薄い。「バイオ」が嘗ての「ナノ」と同じようなはやり言葉として多く使われている。
	技術開発水準	○	→	イメージセンサ（CMOS、CCD）、車載用イメージセンサ、ガスセンサ、加速度センサなどの特定センサは米国と同様世界のトップレベルにある。
	産業技術力	◎	→	CMOSイメージセンサ、加速度センサ、ガスセンサ、等の大量に使われる車載用、家電用センサは大企業が牽引。
米国	研究水準	◎	↗	センサ分野全体に基礎分野の実力は充実している。
	技術開発水準	◎	↗	コンソーシアムや企業の研究所の成果が公表されないステージになってきている。ベンチャー企業の開発部門や軍研究所がリード。
	産業技術力	◎	↗	大企業が半導体と一緒に牽引しており、同時にベンチャー企業の活躍目立つ。
欧州	研究水準	◎	↗	国策として米国が注力していない分野に特化。特定の大学に偏らず多くの大学が取り組んでいる。
	技術開発水準	○	↗	米国と同様にコンソーシアムや企業の研究所の成果が公表されないステージになってきている。各国の国研がリード。
	産業技術力	○	↗	中小メーカーが中心であるが技術的に少し飽和しかけている。
中国	研究水準	○	↗	国策として大学での基礎研究が成果を出し始め、センサ分野で約 100 件（2006 年より 1 桁多い）の論文が 2007 年にだされており質・量とも充実し、論文数では Tsinghua 大、Nanjing 大、南西大等が活発である。全論文中の約 1 / 3 はバイオセンサ関連で有ことは注目される。
	技術開発水準	×	→	わずかで有るが大学／企業の連携が見え始めてきた。
	産業技術力	×	↗	他の半導体デバイスと比較してまだまだこれから。
韓国	研究水準	△	↗	国策として大学、国研（KAIST）で進められている。
	技術開発水準	△	→	大企業の取り組みがない。
	産業技術力	△	↗	他の半導体デバイスと比較してまだまだこれからであるが少し活性化の機運が出てきている。
全体コメント：化学センサ（バイオセンサ）の研究開発が世界中で活性化している。台湾は研究水準では韓国レベル。産業技術力では韓国より上。日本は米国やEUと違い、他の分野同様にベンチャーが育っていない。その他シンガポール、インドの台頭が顕著。				

（注 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ディスプレイ技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	企業が減少しており、研究者が減少している。人材確保と育成のシステムの確立を要する。
	技術開発水準	◎	→	企業が減少しており、海外への人材流出が増加している。また、大学での電子工学志望も減少傾向にあり、人材確保と育成のシステムの確立を要する。
	産業技術力	◎	↘	前半工程での設備産業化の傾向と、後半（組立）工程の空洞化（中国などへの生産移管）が進み、国内における生産技術の優位性が低下している。
米国	研究水準	△	↘	製造が行われていないために、研究者も減少し、開発課題も不明確になり、モチベーションの低下が見受けられる。
	技術開発水準	△	↘	同上
	産業技術力	△	↘	同上
欧州	研究水準	○	→	基礎研究では現状を維持している。
	技術開発水準	△	↘	製造が行われていないために、研究者も減少し、開発課題も不明確になり、モチベーションの低下が見受けられる。
	産業技術力	△	↘	同上
中国	研究水準	△	↗	国の基幹産業にすべく、国を挙げて大学や企業を支援している。
	技術開発水準	○	↗	同上
	産業技術力	◎	↗	液晶の生産額においてはすでに世界一のシェアを確保している。特に組立工程において、生産能力とコスト力の優位性が顕著である。
韓国	研究水準	○	↗	十数年以上前から国の基幹産業にすべく、国を挙げて大学や企業を支援してきたが、最近その成果が出始めている。
	技術開発水準	◎	↗	十数年以上前から国の基幹産業にすべく、国を挙げて大学や企業を支援してきたが、その成果が出ている。但し、材料や設備などの面で裾野は広くない。
	産業技術力	◎	↗	同上

全体コメント：基本的な技術はこの20～30年をかけて日本が開発し育ててきたものが大半を占めるが、アジア諸国が国を挙げて猛追してきたこと、技術流失が行われたこと、日本がバブル崩壊で防衛や更なる研究開発を行う余力がなかったことなどで厳しい状況にある。

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆パワーデバイス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↘	パワー IC とそれを組み込んだシステム化技術や新デバイスコンセプトの発信力弱体化が論文数に顕在化。ワイドバンドギャップ (WBG) デバイスの研究水準は維持。
	技術開発水準	○	→	ディスクリートデバイスで開発力を維持、高耐圧の開発力で欧州に、またサブミクロン CMOS 技術を入れた低電圧 IT 系のパワー IC で米国メーカに差をつけられている。
	産業技術力	◎	→	エピ技術、トレンチ技術、パワー IC などのコアプロセスが弱体化。新構造デバイスのもの作り力の強化が必要。自動車用パワーデバイスで競争力あり。
米国	研究水準	◎	↗	IT 系のパワー IC を中心に企業および大学の研究水準は高い。WBG もベンチャと大学双方で研究活発。留学生教育もふくめ、大学を核にした産学官連携機能。
	技術開発水準	◎	↗	低電圧分野を中心に LSI 技術をパワー IC へ展開し、IT のパワーマネージ、省エネなど成長分野の開発力は高い。WBG はベンチャー企業の数が増加。
	産業技術力	◎	↗	上記の成長分野を中心にナショセミ、TI、フェアチャイルドなどの LSI メーカーがパワー IC の開発力を強化。製造を台湾をふくむ中国などにファブ展開することで競争力をトータルで強化。
欧州	研究水準	◎	↗	スイス連邦工科大、ケンブリッジ大、ブレーメン大学、フランクフルト研究所、IMEC などと企業の産官学連携が機能。STMicro、Infineon など企業の研究水準も高い。
	技術開発水準	◎	→	伝統的に強い高耐圧ディスクリートデバイスに加えて、MEMS を組み込むなど低電圧パワー IC の技術開発力も高い。WBG 半導体も含めた新しい分野へのバランスある開発水準を維持。
	産業技術力	◎	→	STMicro 社、Infineon 社を筆頭に欧州のパワーデバイス産業技術力は日本と比べて高くなっている。とくにパワー IC とそれを使ったシステム IC の産業技術力は強い。
中国	研究水準	△	↗	ディスクリートデバイスの研究で後追い。政府の目立った研究予算は今のところない。香港大学の研究水準は高い。論文数が急増しており、研究水準は向上。
	技術開発水準	△	↗	低電圧のパワー IC を中心に米国が投資しているファブでの連携。将来の独自技術開発への発展の可能性はある。
	産業技術力	○	↗	米国企業投資のファブによる産業技術力が成長。情報通信用パワー IC・MOSFET のコスト力で台頭してきている。
韓国	研究水準	○	↗	KAIST、ソウル大学他の公的機関の研究水準レベルアップは要注意。
	技術開発水準	○	↗	サムソンの個別半導体部門を買収した韓国フェアチャイルド社の技術開発水準は向上している。
	産業技術力	○	↗	韓国フェアチャイルド社が IGBT、MOSFET で競争力アップ
全体コメント：1990 年代まで強い競争力を構築した大電力を軸とした社会インフラ型パワーエレクトロニクスから完全に離脱できていない。世界的に市場が拡大している IT 系、省エネ家電、自動車などへの汎用デバイスと IC 技術の競争力強化。世界の急激な変化に対応しうる高等教育・人材確保が必要。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆設計支援技術 (CAD)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	大学の研究室では個別に、物理レベルの下流設計とシステムレベルの上流設計の分野で研究を行っている。少数の例外を除いて企業での研究はほぼ停止状態。
	技術開発水準	△	→	大手半導体メーカーの研究組織はほぼ壊滅状態。スタートアップ・カンパニーもいくつか出来始めているが、まだ弱体。
	産業技術力	△	→	ほとんどの企業が米国製の CAD システムを導入している。ごく少数ではあるが、国産 CAD ベンダーはある。半導体メーカーの内製 CAD システムは縮小傾向。
米国	研究水準	◎	→	UCB を中心とする国家規模の GSRC を設立し、研究開発を積極的に行っている。著名な国際会議での発表も、米国の大学からの発表が圧倒的に多い。
	技術開発水準	◎	→	「御三家」に加えて、新規の CAD ベンダーの活躍も目立つ。スタートアップ・カンパニーも多数生まれ、CAD 産業の活性化の原動力になっている。
	産業技術力	◎	→	「御三家」を中心にした米国の CAD ベンダーの世界支配の構図（ビジネスモデル）は安定しており、毎年多数のスタートアップ・カンパニーの M&A が行われている。
欧州	研究水準	◎	↗	IMEC、TIMA などを中心に、従来から上流 CAD に力を入れていたが、これまでの研究が開花しつつある。組込み SW も CAD の研究範囲に入ってきた。
	技術開発水準	◎	↗	IMEC、TIMA など CAD ツールの試作を行っている。大学でのコンパイラの研究開発も活発に行われている。アナログ回路設計 CAD の研究も活発。
	産業技術力	○	→	上流設計およびアナログ設計の CAD ベンダーがいくつか立ち上がっている。
中国	研究水準	○	↗	研究テーマが上流に移行しつつあるが、まだ下流設計が主流である。国家レベルでの支援により、若手研究者は活発に研究を推進している。
	技術開発水準	△	→	現時点では、CAD システムの開発の情報はほとんどないが、数年後には上記の研究成果をもとに CAD システムの開発が活発化する可能性が高い。
	産業技術力	×	→	現時点では産業としての CAD ベンダーはほとんどないが、CAD システムの開発が順調に進めば産業技術力も向上すると思われる。
韓国	研究水準	○	↗	ソウル大学、KAIST を中心とする Center for SoC Design Technology を設立し、SoC プラットフォームの研究を推進している。論文数も増加しつつある。
	技術開発水準	○	↗	上記の Center for SoC Design Technology で試作を行い、CAD ツールの開発を進めつつある。数年後には成果が出ると思われる。
	産業技術力	△	→	現状では CAD ベンダーの数は少ないが、上記の研究成果をもとに、数年後には CAD ベンダーが増加すると思われる。
全体コメント：CAD の研究開発の重点は、上流と下流に分離しつつあるが、両者の協調も必要である。台湾の研究開発動向調査も必要であろう。現時点では、韓国・台湾・中国は設計技術が中心であるが、いずれ CAD の開発に進むと考えられる。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆有機材料・デバイス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	有機 E L 関係では世界水準を維持しており、企業における技術開発も継続して活発である。有機トランジスタ関係では欧米と競い合っている。有機太陽電池関係がやや出遅れの感がある。
	技術開発水準	◎	↗	フレキシブルデバイス、プリンタブルデバイスの面で大きく進展しており、世界水順にある。企業サイドの積極性がやや弱いのが気になる。
	産業技術力	◎	→	有機 E L の生産技術においては世界で唯一の高い水準を誇っていたが、LCD と無機 LED との経済性競争において優位性を必ずしも主張することができず、生産技術の立ち上げが若干遅れているが、11 インチの有機 E L テレビは年内の製品化の見通しが立っている。
米国	研究水準	◎	↗	非常に活発な状態が続いているが、欧州に比べれば上滑り感もある。
	技術開発水準	○	→	有機 E L ディスプレイへの関心がやや薄れてきており、フレキシブルデバイス中心になってきている。
	産業技術力	○	→	企業の関心は引き続き高いものの、目立った動きはないように見える。
欧州	研究水準	◎	↗	ドイツ、イギリスを中心として、有機化学や物性物理学の伝統的な潜在力があり、スピードはそれほど速くはないが、着実に研究水準は世界をリードする域に達しつつある。
	技術開発水準	○	→	有機 E L に関しては少し熱は冷めてきてはいいるが、ドイツを中心として EU 諸国では、有機半導体技術や、プリンタブル技術は 21 世紀の技術として不可欠であるとの見方がなされていて、長期的な視点で力が注がれている。
	産業技術力	○	→	フィリップス、シーメンス、メルクなど、エレクトロニクス、化学の巨大企業を中心に企業の関心は高く、ある程度の準備を整えつつある。
中国	研究水準	○	↗	学術論文においては優れたものも見られるが、全体としてはまだ日本や欧米との差は大きい。
	技術開発水準	△	→	有機 E L については、進歩も見られるが、全体としてはまだ水準に達してはいない。
	産業技術力	△	→	幾つかの有機 E L の生産ラインが建設されているとの伝聞情報はあがるが、実態としては実質的に生産が可能な技術水準には達していないものと判断される。
韓国	研究水準	○	↗	有機 E L、有機トランジスタ、有機太陽電池関係の材料・デバイス研究では、ほぼに日本に追いついたものと思われる。
	技術開発水準	◎	↗	有機半導体材料、部材関係については、まだ日本とかなりの差があるが、全体としては、ほぼキャッチアップが完了している。
	産業技術力	◎	↗	有機 E L については、サムソン、LG を中心に小型ディスプレイの大規模生産ラインの立ち上げが継続しており、すでにその製品が開始した。世界中がその成り行きを注目している。
全体コメント：日本のエレクトロニクス企業は、有機 E L ディスプレイの実用化の進展がやや遅れ気味のため、有機半導体エレクトロニクスに関する研究開発に本気で取り組む姿勢がやや弱い。しかし有機 E L を用いた薄型大画面テレビの開発に関しては幾つかのエレクトロニクス企業が具体的な動きを開始している。一方有機半導体素材・部品関連の企業は意欲的に研究開発を進めており、世界をリードする立場にある。欧州では、有機エレクトロニクスは直近の開発課題としてではなく、長期戦略課題と受け取って腰を落着けて研究開発に取り組みは始めている。米国はやや短期的な判断からプリンタブル技術に集中してきている。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆無機系デバイス

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	新デバイスに結びつく新材料の研究で世界をリードしている。
	技術開発水準	○	↗	実用化に向けての開発はやや弱い。
	産業技術力	○	→	実用化につながる産業競争力はやや弱い。
米国	研究水準	◎	↗	新デバイスに結びつく新材料の研究で世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	多数のベンチャー企業を中心に開発水準も極めて高い。
	産業技術力	◎	↗	多数のベンチャー企業と半導体大手を中心に産業競争力も極めて高い。
欧州	研究水準	◎	↗	将来の VLSI 応用を見越して基礎研究・開発研究ともしっかり行っている。
	技術開発水準	◎	↗	将来の VLSI 応用を見越して基礎研究・開発研究ともしっかり行っている。
	産業技術力	◎	↗	将来の VLSI 応用を見越して基礎研究・開発研究ともしっかり行っている。
中国	研究水準	×	→	新デバイス分野では研究・開発・産業競争力ともほとんど知られていない。
	技術開発水準	×	→	新デバイス分野では研究・開発・産業競争力ともほとんど知られていない。
	産業技術力	×	→	新デバイス分野では研究・開発・産業競争力ともほとんど知られていない。
韓国	研究水準	○	↗	新メモリデバイスに限ると世界で抜きん出た研究開発を行っている。
	技術開発水準	○	↗	新メモリデバイスに限ると世界で抜きん出た研究開発を行っている。
	産業技術力	○	↗	メモリデバイスを実用化に結びつける産業技術力が非常に強い。
全体コメント：新材料を中心とする基礎研究では明らかに日本がリードしているが、それを産業に結びつける力が日本は弱い。韓国はメモリに関しては明らかに世界をリードしている。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.2 フォトニクス分野

2.2.1 概観

フォトニクスはこれまで「オプトエレクトロニクス」といわれていた分野を含む広い技術分野で、情報の伝送、記録、処理、表示、計測などにおける装置、システムやそのキー部品である光源など、様々な産業分野に関わっている。この分野の国際比較にあたって、中綱目として、(1) 光通信 (2) 光メモリ (3) 固体照明・発光デバイス (4) 光学材料・コンポーネント・光学設計 (5) 光計測 (6) 量子情報 (7) フォトニック結晶・メタマテリアル (8) シミュレーション解析・解析ツールの8つを設けた。

フォトニクス分野を総合的にみると、研究水準、技術開発水準、産業技術力とも日本、米国の水準が高い。ただし、各中綱目を個別にみると状況は必ずしも同じではない。

光通信は、インターネットの継続的な成長との相乗効果で、大容量・長距離伝送の発展が再開している。日本、米国が、研究、技術開発の高い水準を維持している。米国は企業との共同研究の推進等で、産業技術力を含めて全項目で高い水準にある。

光メモリは、日本が高い技術開発力、産業技術力を維持しており、産業としても成長を続けている。企業における光ディスク関連事業は、利益が出ない体質となっているのが悩み。このような状況下で低コスト化を可能とする技術も注目されている。

固体照明・発光デバイスでは、白色LED照明が産業として急速に立ち上がっている。日本は高い産業技術力を持っており、基盤技術である窒化物半導体や蛍光体の研究は世界的にも高い水準にあるが、「照明」という観点からは研究体制が整っていない。産業技術力としては欧州が最高水準にあるが、最近、台湾、韓国、中国が急速に高い競争力をつけてきている。

光学材料・コンポーネントは、これまでの機械加工による非球面／自由曲面光学素子から、ナノインプリント等、微細形状制御技術を駆使した光学素子やナノコンポジット材料へと進みつつある。日本の技術開発力、産業技術力は世界的にも最高水準にある。米国では、大学に世界屈指の光学センターがあり、高い研究水準を誇っている。中国、韓国は国策として研究開発力強化を図っている。

光計測は、日本、米国が研究から産業技術の全項目で高い水準にある。日本は、技術開発が民生機器を中心に行われているが、大学での研究が必ずしも実用化と結びついていない。米国では、大学・研究所が中心となって技術開発を進め、産業界からのニーズに素早く対応しているのと対照的である。韓国は半

導体産業に直結した研究を育成し、ベンチャー産業を支援している。

量子情報は、当初量子コンピューティングでは米国、量子暗号では欧州がそれぞれ先行していたが、現在は米国、欧州とも量子情報全般に亘って高い水準にある。日本は後発ながら、理論、基礎実験、応用開発ともトップグループに追いついているといつてよい。

フォトニック結晶とメタマテリアルはもともと同じコミュニティから勃興してきたが、研究の進展は応用分野や国によって状況が異なる。日本はフォトニック結晶の研究、技術開発で世界的に高い水準にある。一方、メタマテリアルは欧米で急速に研究が拡大している。応用開発では、フォトニック結晶ファイバや発光素子への応用が各国で急速に技術開発が進んでいる。メタマテリアルは電波周波数帯での研究が活発。

シミュレーション解析・解析ツールの研究、技術開発は日、米、欧とも高い水準にある。ただし産業技術力は米国、カナダの水準が日本、欧州に比べて高く、世界で利用されている光導波路デバイスや光半導体デバイスのシミュレータの多くは米国製、カナダ製である。これは半導体の CAD と同様の状況である。

2.2.2 中綱目ごとの比較

(1) 光通信

【日本】世界の中での位置づけは、研究力・技術開発力は先頭付近を走っており、特に FTTH は突出して事業化を推進している点が目立つ。2007 年末の FTTH 加入の推定値（2007 年 9 月末の総務省発表データから推定）は 1,130 万に達している。次世代・次々世代情報ネットワークインフラの整備の観点から歓迎される傾向であろう。ただし国際標準化や産業技術力で米国・中国に遅れを取っている傾向が見られる。標準化会議に積極的に出席し、主要ポストを確保するなどにより主導的立場をとろうとの意識は高まっており、今後の中核技術の標準化にまで組み込めるよう期待したい。

【米国】大学がデバイス・伝送関係の研究の中心となり、企業との共同研究をうまく推進している。そのため今年も変わらず全項目について高い技術力を維持できていると考えられる。ただし、中国が急激に輸出額を伸ばしてきている煽りを食う形で輸出額の減少している分野も見られている。

【欧州】米国ほどは目立ってはいないが着実にデバイスや通信面で高い技術力を維持している。超高速光通信技術や電気分散補償、誤り訂正技術に強みを持っている。近年利益率が下がっている傾向が気になる。

【中国】近年、システム系を中心に産業技術力から研究開発力まで急激に伸びており、Huawei Technologies がルータ市場の世界の上位に入っていること、OFC・ECOC の採択論文数で上位 5 位以内に入るようになったことなど、

目を離せない存在となってきた。

【韓国】エレクトロニクスに世界的に強みを発揮しているサムスンが光通信関係に目だって進出していない傾向があるため、他地域と比較するとどうしても遅れている印象が否めない。アクセス系では WDM-PON を積極的に研究している面が今年も見られたが、実用化できるかどうかはまだ明確ではない。

研究開発面を概観すると、光通信市場のバブル崩壊の影響からようやく回復基調にのり、またインターネットの継続的な成長との相乗効果で大容量・長距離伝送の発展が再開した。主要国際会議である OFC、ECOC において、1 本当たりの伝送容量の世界記録が更新された (Alcatel-Lucent, 25.6 Tbps)。また 1000 km を超える実用的な長距離伝送を実現するための分散の影響を軽減するため、高スペクトル利用効率の変調方式の検討が継続的に行われており、位相変調への移行と多値変調技術 (DQPSK, 16QAM など) に注力されてきている。更に、高スペクトル利用効率に注目して無線伝送ですでに実用化されている OFDM 変調の光通信への応用も急激に注目度が上がっている。それぞれの変調技術に対応可能な光変調器や光受信回路の集積化・小型化も進展している。

デバイスではシリコン・フォトニクスの完成度が上がっているのが注目すべき技術であろう。CMOS 製造の技術が使えて低電圧駆動が実現できる変調器や、高 Q 特性の共振器により超小型の光遅延の実現可能性がある。ただし共振特性の向上による遅延量の増大と、帯域制限のトレードオフがあるため、40 Gbps 以上の信号に適用できるかどうかは今後の動向に注目すべきである。発光素子はいまだシリコン材料では難しく、III-V 化合物半導体をシリコン導波路に融着する技術が有力である。

光バッファ・メモリに対する明確な有望技術は模索中であるが、海外ではすでに DOD-N のプロジェクトで光パケットスイッチの必須技術として集積化技術を含めた取り組みが進んでおり、国内でも光 RAM 実現を目指す大型プロジェクトが始まっている。その過程で、単一機能では実現できないバッファ・メモリの入出力インターフェース部、制御部、光のビット単位の保持部など最適技術の絞込みが明確になることを期待したい。

少し将来にまで目を向けると、ポスト IP を睨んだ (Next Generationではなく) 新世代ネットワークのプロジェクトも米国で始まっており、日本でも開始の機運が高まっている。NGN では明確に導入が期待される光デバイスは ROADM くらいであり、新規の光デバイスの研究開発に明確につながらないとの危機感がある。次世代において光デバイスに至るまでのアクティビティにつながることも期待したい。

(2) 光メモリ

【日本】研究水準：大学や国立研究所における研究はホログラフィックメモリや二光子吸収方式に関してわずかに増えてきたが、今騒がれている次世代 DVD 関連や次世代 DVD 後の数 100 GB メモリに関する研究が大事なときに、現実離れした研究ばかりが多いことが気になる。一方、企業における研究では、光ディスク関連事業は現実的に利益が出ていない上に、次世代 DVD (HD DVD と BD の二大規格が存在する) 以降の目標がほとんど無いため、研究に従事する人材が松下電器やオムロンなどほんの数社を除いて軒並み減らされている。経産省主導の高密度光メモリの成果や内容が、使用した研究費額に対して非常に貧弱である (実現性が乏しい)。しかし、その中では、ナノパターンメディアを応用したハイブリッド磁気記録 (熱アシスト磁気メモリによる超常磁性限界の克服による数 Tb/in²) では成果が出つつある。(これは、米国の研究目標とほぼ同じであるがナノパターンメディアを使っている点がユニークである。ただし、光は手段であり、あくまでも垂直磁気ディスクメモリの研究である)。

技術開発水準：二層から四層までの多層記録にかかわる収差補正に関する新光システム提案 (NEC や日立) やデバイス開発・販売 (シチズン：液晶デバイスによる DVD/BD/HD DVD 収差補正微小光学素子) が注目される。なかでも BD 光ディスクのカバープラスチック膜厚 $100\mu\text{m} \pm 3\mu\text{m}$ で制御技術開発が進んでいる。次世代 DVD (BD や HD DVD) と従来の DVD/CD 兼用レンズの研究 (リコー、コニカミノルタ、NEC、日立など) が行われている。

産業技術力：HD DVD 媒体のカバープラスチック膜厚は従来 DVD と同じ $600\mu\text{m}$ であり、射出成形方式での製造が可能であるのに対して、BD 媒体は、カバープラスチック膜厚を薄く ($100\mu\text{m} \pm 3\mu\text{m}$) する必要があるため、射出成形で製造できず、コストの高い製造プロセスになってしまう。松下電器 (BD) は、これに対してスピンコート法での新生産技術開発などにより、低価格化に取り組んでいる。また、光記録ドライブの低価格化も両規格陣営で取り組んでいる。シチズンが開発した液晶による位相変調技術が、BD におけるカバー厚誤差による球面収差補正や DVD/HD DVD におけるディスク傾きによるコマ収差補正に応用され、活況を呈している。青紫色半導体レーザの生産も活発であるが、他の光学部品に比較してレーザ単価が下がらず、BD や HD DVD 青色光ディスクへの応用が数量的に進まない状態である。

※本原稿の脱稿後、米映画会社のワーナー・ブラザーズが BD への転向を表明 (2008 年 1 月)、東芝が HD DVD 事業撤退を発表し (2008 年 2 月)、事態は急展開している。

【米国】研究水準：シーゲート (カーネギーメロン大学と緊密) が 150 Gb/in² を超えて、超常磁性限界を克服するために、光アシスト磁気ディスクヘッ

ド研究を強力に進めているのが目立つ。光ビームを近接場光並みに絞る目的で、25 年前に日本の東芝総研や阪大が実験発表した光導波路カップリング用グレーティングレンズを応用して超微細磁気ヘッド先端へ導波路で光を導き、磁気媒体の局部ヘナノサイズ加熱を行い、記録媒体を高温にし媒体保磁力を低下させることにより超微細記録（1 ～ 10 nm）を実現することを目的にしている。記録後に媒体温度が常温に戻れば再び高い保磁力となるために、熱擾乱により超微細記録（1 ～ 10 nm）ができないという問題は起こらないというもの。計算的な研究が多いがアリゾナ大学光学研究所は活発。

技術開発水準：日本・韓国に比較すると水準が低い。光メモリではホログラフィック媒体（Inphase 社）開発とその機器製造がコロラド州デンバー近郊で進んでいる。イスラエルの Mempile 社が関係する二光子吸収技術による 3D 多層メモリ用媒体の研究水準が高いが、半導体レーザ並みのサイズ・価格によるフェムト秒小型格安光源開発で行き詰まっている。

産業技術力：Inphase 社のホログラフィック方式や Data Play 社、Call-Recall 社も製品を発売しつつあるが、ほとんどの場合に米国で製品を作っていない。

【欧州】新しい知見が、フランス（CNET）、スイスやイスラエルから発せられている。Philips など光ディスク関連研究の後退面もあるが、欧州全体では欧州連合プロジェクトによる新技術開発には取り組んでいるように見受けられる。

【中国】まだ勉強中といった段階。DVD に対抗するもの（日本のほとんどデッドコピー）を出そうとしているが失敗に終わりそう。しかし、日本への特許料の問題のためか、不思議と VCD（ビデオ CD）が中国国内で大発展している（DVD の 1/5 の低価格であり、観光地では DVD よりも VCD が大繁盛）。

【韓国】延世大学のメモリ研究所（CISD）と LG 社の活躍が目立つ。日本国内に光メモリ研究所が無いいためか日本企業約 6-7 社（日立・富士通・リコー・コニカミノルタなど）も CISD に投資している。従来ほどではないがサムスンも少しは研究を継続しているようである。しかし LG が特に活発である。LG は日本の松下・ソニー・東芝について研究開発・試作品発表を行っている。次世代 DVD の互換機（HD DVD と BD）もいち早く試作・展示しているのが注目される。

(3) 固体照明・発光デバイス

白色 LED は、約 10 年前に登場し、半導体照明または固体照明という新しい研究分野における発光素子であるが、現在普及している白色光源は半導体 LED 励起光源と蛍光体との組合せによって成り立っている。従って、固体照明という概念自身が、非常にあやふやであり学問的な定義はないが、急速に市

場の製品に応用されている。

白色 LED 照明技術は、白熱電球、蛍光灯、高圧放電ランプ（HID）を代替可能な次世代省エネルギー型固体照明光源として期待されている。1997 年頃日本から世界に発信され、この 10 年間で、日本の技術を基に一般照明光源への応用を目指し、“見る” あかりから“照らす” あかりとして、世界各国で学術的・産業的な規模で研究が進められている。米国では、光工学協会(SPIE) が 2000 年より毎年、固体照明 (Solid State Lighting) 国際会議を開催している。既に固体照明技術に関する国際会議は、この 10 年間で米国 SPIE (8 回)、中国 SSL アライアンス (4 回)、台湾 Blue 200X (6 回)、韓国 KOPTI (5 回)、英国 Photonics Cluster (4 回) と世界各国で毎年活発に開かれている。しかしながら、これまで日本では白色 LED と固体照明に関する国際会議は一度も開催されたことがなく、国内外の学会と産業界（エレクトロニクス、自動車、素材・化学系）からその開催を強く要請されており、2007 年 11 月 26 日～30 日、東京にて第 1 回白色 LED と固体照明国際学会が開催された。

白色 LED 照明研究は新しく、将来、一般照明システムへの代替には多くの学術的・産業的課題を解決していかなければならない。そのためには、半導体工学、照明工学、光環境・システム工学及び照明デザインの異分野の融合研究が必要不可欠である。近年、発光効率が 100 lm/W を越え、平均演色評価数 95 以上の高性能白色 LED 光源が開発された。さらに、蛍光体・樹脂・放熱基板等材料分野の研究も活発に行なわれる様になり、実装・プロセス技術に係る後工程が高度化してきている。

しかしながら、依然として日本の大学は窒化物半導体研究が活発である。一方、照明メーカーはひたすら光源・器具開発を行っているのが現状である。産学連携の研究をみても、材料・デバイスの研究と照明応用の研究に大きなギャップがある。現在は、発光効率の向上が製品化に結びついており、白色光の質を議論するところまできていない。100 lm/W 以上の製品も間近であるが、新しい技術による新しい光源の出現が待たれている。しかしながら、材料（蛍光体、樹脂、封止剤等）によってがらりと変化する研究開発分野であり、まだ未成熟である。しかしながら、LSI、液晶 TV 等において日本が経験してきた様に、国際競争力の観点から見ると、台湾、韓国の企業と大学が日本の技術のキャッチアップおよびコストの低下が研究開発に直接大きな影響を及ぼし始めている。一般照明には、世界各国の研究者の参加が必要である。今後、日本が一般照明市場で世界制覇を狙うためには、標準化に関する取り組みを強化しなければならない。

(4) 光学材料・コンポーネント・光学設計

【日本】大学の研究レベルは高水準にあるが、光学全般を牽引する研究機関が

なく、大学の講座数も減少傾向にある。但し、2007 年には宇都宮大 [1]、東大で新たな講座が開設され復興の機運が出てきた。国プロでは、産総研が微細光学素子 [2] などで高レベルの研究を行っている。

企業の研究開発・産業競争力は、材料、コンポーネント、光学設計の各分野において、世界最高水準である。住田光学ガラスのモールド用硝材 [3]、日本ゼオンのプラ材料 [4]、精密機械加工技術による非球面、自由曲面、回折素子 [5] などは日本の誇る技術と言える。しかし、最先端で欧米の後追いとなる分野がある一方、日本からの技術流出をレバレッジとした中韓の追い上げが急である。【米国】大学では、ロチェスター大やアリゾナ大に世界屈指の光学センターがあり、研究レベルも高水準である。ピントフリーカメラのように、パラダイムシフトをもたらす可能性のある先端的研究をスタンフォード大 [6] が行うなど、分野也多岐に亘る。政府系研究機関では、NIST が単なる計測に留まらず、リソグラフィの光学材料研究で高い成果を挙げている [7]。研究機関は、広い分野で世界中から人材を集め、成果を出す体制を取っている。軍事・宇宙関連の光学材料、薄膜関係技術に特徴があり、大学からスピノフするベンチャーも多い。

コダック、ゼロックスなど既存のコンシューマー・オフィス用光学産業は、日本に対し劣勢であるが、最先端分野では、光学設計の ORA、非球面のティンズリー等が技術力を活かした強みを発揮している。素材分野ではコーニングが存在感を維持している。

【欧州】大学研究機関は、ドイツ、フランス、イギリスがそれぞれの伝統を持つ。中でもドイツはブラウンホーファー研などの研究機関が高水準で、大学も独自の伝統を保持している。薄膜ではロシアの研究レベルも高い [8]。また、最近ではヨーロッパ連合としての共同研究体制も整ってきた。最先端では、サジェムのように米国と同じく宇宙・軍事に関わる分野が活発である。

産業界では、光学機器のツァイス [9] や光学材料のショットを擁するカール・ツァイス財団、石英のヘラウス、薄膜のメルクなどドイツ系の企業が高い競争力を有している。その他、ガラス材料の仏サンゴバンなど特徴のある企業も多くある。

【中国、台湾】大学研究機関のレベルは高いとは言えないが、国立中央大学、国立交通大学など一部の大学で、積極的に研究に取り組みつつあり、論文数も急激に増加している。企業からの研究発表はまだ少ないが、研究開発水準は向上しているとみるべきであろう。国策で光学技術の振興が図られ、工業技術研究院などから企業の研究機関へ技術移転が図られている。日本からの技術導入も盛んで、光コンポーネント産業の競争力の底上げが着実に行われている。大立光電の一部のレンズや成都光明のガラス材料は、日本を脅かす存在になりつつある。また、結晶光学材料の産出国であるメリットを活かした戦略も見られ

る。

【韓国】光州フォトニッククラスターなど、国策として光学技術の振興が図られ、ヨンセイ大学などが活発に発表している分野もある。企業活動では、サムソンやLGの光学機器特許取得件数増加に見られるように、日本の後追いから脱却し独自の研究が開始されているが、材料研究にまで裾野が広がっていない。光コンポーネントは競争力を増しており、サムソンテックウィンが一部のレンズで市場参入を積極的に図っている。

光学材料・コンポーネントは、機械加工技術による非球面、自由曲面レンズから、ナノテクを駆使した微細光学素子[10]、ナノコンポジット材料[11]へと進みつつある。現在、日本の研究開発・産業技術力は、既存の産業分野の材料、コンポーネント、光学設計において圧倒的に強いが、より広い分野を眺めると、最先端で欧米が先行する例もある。今後これらの分野の強化が必要となろう。また、後発の中国や韓国は国策として研究開発力強化を図っている。日本は技術協力とともに、流出防止も含めて戦略を考えていく必要がある。

〈参考文献〉

- [1] <http://www.opt.utsunomiya-u.ac.jp/center/intro.html>
- [2] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070423/pr20070423.html
- [3] 沢渡, モールドレンズ用光学ガラス, OPTICS DESIGN, No.37, pp. 15-21 (2004)
- [4] <http://www.zeon.co.jp/randd/pdf/16.pdf>
- [5] T. Nakai et al., "Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses", DOMO2002, OSA Technical Digest, pp. 5-7 (2002)
- [6] <http://forum.stanford.edu/research/techrep/cstr-2005-02.pdf>
- [7] J. H. Burnett et al., "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride", Phys. Rev. B64, 241102 (2001)
- [8] J. A. Dobrowolski et al., "Optimal single-band normal-incidence antireflection coatings," Appl. Opt. 35, pp. 644-658 (1996)
- [9] H. Feldmann et al., "Catadioptric projection lenses for immersion lithography", Proc. SPIE 5962, 59620Y (2005)
- [10] 機能性ガラス光学素子をインプリントで実現, 日経エレクトロニクス, 2007年8月13日号, pp. 77-86
- [11] H. Sugimoto et al., "Preparation and properties of poly (methylmethacrylate) - silica hybrid materials incorporating reactive silica nanoparticles", Polymer 47, pp. 3754-3759 (2006)

(5) 光計測

一般に光計測というものは計測対象があってはじめて成り立つものである。研究の位置づけと方向性において、日欧と米国では多少そのベクトルが異なっている。日本および欧州では、研究者は製品動向やニーズなどに基づいて研究方針を決めるというより、アイデアが先行しシーズ的に研究を行う傾向がある。このことは、研究の水準を高めるという大きな利点がある反面、出口がなかなか見えないままに廃れていくという無駄も生じる。研究は受け継がれていくので高い水準の研究が応用に結びつくこともあるが、学会ではそうした観点からの評価が欠けていた。一方、米国では、実用的なニーズに基づくものが要求され、それに答える研究がより高い価値をもつとされる傾向がある。基礎的なものより、技術開発や産業応用と一体になった研究がその動向を牽引している。中国や韓国はこれまで計測機器を自国で開発することはほとんどなく、現在は独創的な計測研究は少ないが、米国から帰国した留学生を中心に今後米国的な研究環境を整えていくと思われる。

【日本】技術開発は、民生機器を中心に行われている。つまり、数多く出荷され技術開発のリスクが小さいものに力点が置かれ、最先端であったり大きな投資が必要となる新しい分野に対する技術開発には消極的である。技術開発のおもな担い手は企業であり、産業機器の性能向上に必要な高い実力を維持し続けている。同一分野の機器の技術開発は企業ごとに独立におこなわれているが、近年、技術開発のアウトソーシングも見られるようになり、大学・研究所、企業ともに意識が変わりつつある。これにより、技術の共有が可能になりつつあり、国際競争力が高まっていくであろう。

【米国】技術開発は大学・研究所が中心になって進められており、産業界からのニーズに素早く対応している。大学が技術をうまく切り分けて企業に提供することにより研究費を得、企業は効率的な開発力を維持できる。技術は人とともに流動するため、全体として共有が進み、国全体としての技術力が高まっていくと思われる。

【欧州】技術開発力は、めざましい進歩がないかわりに安定している。標準の計測器として必要な安定性、信頼性を維持し続けている。

【中国】未だ独自技術の開発のフェーズには至っていないようであるが、今後政策次第では劇的な転換があるであろう。

【韓国】全体的には技術開発は低調であるが、液晶パネル産業など国家的に推進している産業分野については、それに付随する光計測ベンチャー企業の立ち上げと技術支援に力が入っている。こうした特定の分野の技術開発力は世界的なレベルにある。

日本の産業技術は民生用機器を中心に推進されていて、たとえばパワーメー

ターやウェーブメーターのように数量がでるものについては安定した品質を保持している。先端的極限計測分野や特定目的専用の計測機器は、軍事や宇宙産業の後押しもあってか米国が独走している観がある。一方、標準となるような計測機器については、依然、欧州がシェアを占めている。中国の独自の計測機産業については、国際的に通用する機器が生産されているかどうか不明である。国内需要に応じてデッドコピーを作っていると思われる。今後の国策次第では、世界的に通用する機器を生産する可能性もある。韓国は日本の計測機器のデッドコピーを作り、日本のアジアの市場に食い込もうとしている。その技術内容には未だ独自のものはみられないが、今後の動向が注目される。液晶関係の光学的検査装置については世界に供給可能なものも市販されつつあり、産業育成に力を入れている。

(6) 量子情報

量子情報処理の研究は 1985 年頃欧米で生まれ、1990 年台に入ってから育ち始めたこともあり、日本は後追いであった。英語圏のオーストラリアも欧米につられて先行しており、人口と GNP にして日本の 1/10 でありながら 2000 年以前は量子情報の年間論文数は日本と同程度あった。しかし日本も 1993 年頃から参入する研究者・研究室が現れ始め、2000 年前後から JST の領域探索プログラムや大小プロジェクトが現れるようになり、現在では人口と GNP に恥じない量子情報先進国の仲間入りを果たしている。ただし研究人口は（人口と GNP に比べ）まだ西側先進国に比べ少ない。なお量子情報は必ずしもフォトニクスとは限らないが、フォトニクス分野の役割は当初から大きく今後も大きいと考えられるので、以下の記述はフォトニクス量子情報処理についての記述と読み替えても問題はない。

米国は当初量子コンピューティングの理論と基礎実験に強かったが、現在は量子暗号の応用開発も含めまんべんなく強い。欧州は当初量子暗号の理論と基礎実験に強かったが、現在は新しい量子コンピューティング（クラスターステート計算）を立案するなど、やはりまんべんなく強くなっている。オーストラリアは伝統的に実験が弱かったが、最近では実験も行うようになっている。技術開発と産業技術は依然として弱い。日本は理論・基礎実験・応用開発ともに進んでおり、どの分野の研究者も先進国として対等に渡りあえる状況にある。ただし理論はまだ欧米の成果が質・量ともに若干多めである。

欧米・オーストラリア・日本以外では、中国がこれに続く。中国は院生やポスドクの欧米滞在が日本よりはるかに活発で、そういった若い研究者が中国に戻って分野を立ち上げていることが最近のめざましい進境の要因である。ただし中国が強いのは光を用いた基礎実験と一部の理論分野であり、理論全般・光子以外の基礎実験・応用開発はまだ弱い。しかし最近の進境ぶりは、他の全般

でも強くなって来る恐れを十分感じさせる勢いがある。

それ以外の地域では韓国と台湾の研究者達が量子情報に興味を持っていることが挙げられるが、まだ国際会議招致や研究者招聘の形がメインであり、自前の研究としてはとりあえず設計理論あたりから入っている状況である。もちろん技術開発までは至っていない。基礎研究に対する余裕がどの程度あるかという観点からすると、両者がこの先急激に脅威となることは考えにくい。また表にはないが東欧諸国も理論研究は行われており、韓国や台湾よりは進んでいる。

地域比較はひとまずおき、最近の話題として注目すべき研究傾向としては、(1) 量子暗号の安全性の理論および光子検出器の性能の向上により、量子暗号が「BB84+ デコイ方式」中心にいくつかの方式実験が進んで来たことと、(2) 従来の量子回路方式に加えて「クラスターステート量子計算」の理論と実験（今のところフォトニクスのみ）が進みつつあることが挙げられる。

(7) フォトニック結晶・メタマテリアル

フォトニック結晶とメタマテリアルは同じ研究コミュニティから勃興してきたが、その経緯には時間的なずれがあり、その後、研究が拡大していったコミュニティは必ずしも同じではない。そのため、議論される応用分野、国やグループの競争関係、応用技術の現状も異なる。

フォトニック結晶は 1980 年代後半から物理研究が活発化し、1990 年代後半から応用研究が世界的に広がった。それから約 10 年が経過し、フォトニック結晶構造を利用したファイバや LED に関しては、実用化のための開発が行われている。前者は、光伝搬方向に沿って孔が開けられた光ファイバであるが、必ずしも大規模な周期構造をもつわけではないので、ホーリーファイバとも呼ばれる。単一モード条件や分散特性を自由に制御できることから非線形の研究が多く、最初は欧州がリードしていたが、現在は日米欧が拮抗している。実用を目指した開発ではむしろ曲げ損失が小さい点が注目され、FTTH で屋内の光ファイバの自由な引き回しに利用されようとしており、この点は FTTH の導入が進む日本がリードしている。後者は LED の発光層の表面や裏面に周期的な凹凸を刻んで光取り出しを向上させるもので、米国が基本特許を出し、日本が実証した。単なる平面 LED の 1.5 ～ 3 倍の輝度が見込まれる。周期性が不完全な構造（テクスチャー構造と呼ばれる）から完全な周期構造まで、安価な製造法との兼ね合い開発が行われているが、層構造や電極も含めた全体設計も重要で、まだ製品としては改善の余地がある。ただし各社とも開発研究は活発で、今後、日米欧で製品が出てくる可能性がある。日本では有機 EL への導入も研究されている。一方、分野発足当初から期待されてきた微小かつ高機能な光集積回路は、まだ実用から遠い。ナノレーザ、共振器 QED、スローライト光バッファ、非線形スイッチング、負の屈折光学など、関連する話題が続々

と生まれているが、いずれも基礎研究段階である。ただし 3 年ほど前まで単純な共振器や導波路が研究されていたことを思えば、デバイスが次々と実証されるようになったことは格段の進展と言ってもよい。これらの研究は、日米から基本構想が出されたものがほとんどであるが、近年の実証実験は日本がリードしている。これらのデバイスの実用化には集積技術の進歩が不可欠だが、その意味では、最近、話題が高まっているシリコン・フォトニクスの中での進展が理想的である。現在、主流の細線導波路をベースとしたシリコン・フォトニクスは日米が基礎研究を競ってきたが、最近ではインテル、ラクスセラ、IBM といった米メーカーが優位で、欧州プロジェクトも進行中なので、日本も対策を急ぐ必要がある。

一方、メタマテリアルは基礎概念の提唱が 1960 年代までさかのぼるが、実現可能性が議論されるようになったのは 1990 年代後半の欧州の理論研究以降である。インダクタンスとキャパシタンスを併せ持つ金属スプリットリングにより負の屈折率と透磁率が同時発生し、それによる点光源の完全集光や迂回光路（透明人間的な技術）が可能になると予測されたことが、最近の研究ブームの発端となった。ただし金属を利用していることから、光波帯では吸収損失が避けられない。そのため、欧米の共同研究は電波を利用してこれらの現象を実証した。光波帯の吸収損失を減らす研究が日米欧で並行して行われているが、現時点では難しそうである。一方、金属薄膜の微小開口での高効率な光透過、金属薄膜中での集光や光伝搬といった現象は、プラズモニクスと総称される分野で近年特に活発に研究されている。メタマテリアルとは別物であるが、金属を利用し、負の屈折率とも関連していることから、しばしば同一のコミュニティで議論されており、最近、米 DARPA プロジェクトの後押しのおかげで、研究人口が急増している。金属薄膜中での集光は損失が大いと思われるが、回折限界を超える解像度が実証されており、検証が進めば、リソグラフィなどに実用化される可能性はある。

(8) シミュレーション解析、解析ツール

フォトニクス分野におけるシミュレーション解析は、光導波路解析（光ファイバ解析を含む）と光半導体デバイス解析とに大別される。

光導波路解析では、まず、光導波路を伝搬する導波モード（固有モード）解析を行うことが基本となる。次に、光導波路を曲げたり、分岐させたり、あるいは複数の導波路を接続、結合させたり、さらにはテーパ構造やグレーティング構造を導入したりした場合には光波伝搬解析が必要になる。こうした光導波路解析を解析的に厳密に行うことは難しく、特に最近登場したフォトリソグラフィ結晶導波路、高屈折率差導波路、メタマテリアル導波路などのようにスカラー波近似が成り立たない場合には、マクスウェルの方程式をフルベクトル解析す

る必要がある。このための解析ツールの開発に最もよく利用されている数値シミュレーション技術が有限要素法 (FEM) と時間領域差分法 (FDTD) であり、これらの方法の高度化研究が進展している。なお、反射波を無視できる場合には、光波の伝搬方向に逐次計算を行って計算負荷を大幅に低減することが可能なビーム伝搬法 (BPM) が威力を発揮する。最近では、双方向 BPM といった反射波の影響を取り入れるための研究も進められている。

一方、光半導体デバイス解析の場合には、光学系の解析に加えて、電子と正孔の分布、バンド構造、発光分布などの解析が必要で、場合によっては、熱伝導特性を考慮する必要もある。特に半導体レーザでは、電子系の方程式と光学系の方程式を連立させて自己無撞着 (セルフコンシステント) に解かなければならない。こうした光半導体デバイス解析にも FEM、BPM、FDTD などが利用されるが、この他にも、差分法、光線追跡法、モンテカルロ法など、さまざまな数値シミュレーション技術が導入されている。

比較表にも記載したとおり、光導波路・ファイバ、光半導体デバイスのいずれのシミュレーション解析においても、日本、米国、欧州の研究水準は高い。また、シミュレーション解析のための FEM、BPM、FDTD などに基づく解析ツールの新規開発や高度化研究においても、日本、米国、欧州の技術開発水準は高い。高被引用度のインパクトのある論文を世に送り、この分野を先導している拠点も数多く存在する。

米国では、解析ツールの開発を専門とする技術者・研究者の層が厚く、これがプリ・ポストプロセッサを装備したシミュレータ (解析ソフトウェア) 開発に係る国際競争力の強化につながっており、米国 (カナダを含む) のソフトウェア分野の産業技術力は、日本、欧州に比べて総じて高い。

欧州では、EU 諸国をはじめ、欧州各国間の協力の下に「COST (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research)」を組織し、科学技術研究の強化を図っている。フォトニクス分野に関連するプロジェクトとして「COST P11 (Physics of linear, nonlinear and active photonic crystals)」があり、こうした取組が欧州全体の研究水準や技術開発水準の向上に寄与していると考えられる。この「COST P11」では、WORKING GROUP 1 (Fabrication and characterization of properties of photonic crystal structures)、WORKING GROUP 2 (Modelling of linear and non-linear optical properties)、WORKING GROUP 3 (Active and non-linear properties of photonic crystals) の三つのワーキンググループが活動している [1]。

WORKING GROUP 2 では、まさしくシミュレーション解析や解析ツールを調査研究対象としており、フォトニック結晶に限らず、Slow-wave structures、Second-harmonic generation in 1D photonic crystal

slabs、Losses in photonic crystal membrane waveguides、An exercise in plasmonics、Photonic wire exercise、Exercise on polarization rotation in bent waveguides、Slit-groove diffraction problem、Task on modelling of spontaneous emission in organic light emitting diodes with photonic crystals to improve the outcoupling など、関連するテーマを幅広く取り扱っている。WORKING GROUP 2 の成果の一つとして、漏れ構造フォトニックワイヤのモデリングに関して、様々なモードソルバーの性能比較を行った結果が報告されている（“Modelling leaky photonic wires: A mode solver comparison,” Optical and Quantum Electronics, Vol. 38, pp. 731-759, 2006）。

中国、台湾、韓国の研究水準・技術開発水準は、日本、米国、欧州に比べると、まだ十分ではないが、特に、ナノフォトニクス分野のシミュレーション解析やそのための解析ツール開発に関する論文がIEEE（アメリカ電気電子学会）、OSA（アメリカ光学会）などが出版する著名な国際学術誌に掲載され始めており、研究水準・技術開発水準は着実に向上しつつある。中国、韓国はもちろんのこと、インド、シンガポールなど、アジア諸国も、フォトニクス分野におけるシミュレーション解析、さらには解析ツールの開発に関して成果を挙げつつあり、我が国が、欧米とともに引き続きこの分野の研究開発を先導していくには、関連する技術者・研究者の連携・協力、さらにはそのための体制づくりが必要であると考えられる。

なお、光導波路・ファイバ解析技術については、OSA が Topical Meetings の一つとして主催している国際会議 IPNRA（Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications）[2] が毎年開催されており、「モデリング、数値シミュレーション、理論（Modeling、Numerical Simulation and Theory）」という Subcommittee が毎回組織されている。また、光半導体デバイスについては、IEEE-LEOS（Lasers and Electro-Optics Society）が技術共催している国際会議 NUSOD（Numerical Simulation of Optoelectronic Devices）[3] が毎年開催されており、市販のシミュレータ（解析ソフトウェア）を含め、最新の研究開発動向を知ることができる。

<参考文献>

[1] <http://w3.uniroma1.it/energetica/>

[2] <http://www.osa.org/meetings/topicalmeetings/ipnra/>

[3] <http://www.nusod.org>

2.2.3 比較表

◆光通信

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	伝送・光デバイス・制御全体のレベルは世界トップクラスであり、その水準は今年も維持されている。また FTTH は世界トップ水準。ただし事業レベルに移行した F T T H 関係は、あまり学会に出てこなくなっている。また学会の発表件数と水準が高いことが、必ずしも世界市場のシェアに結びついていない面もある。
	技術開発水準	○	→	デバイスなら◎、ネットワーク制御関連技術も水準は高いが、国際標準を取る戦略が欧米と比べて弱い面がある。
	産業技術力	○	→	長距離のもの（レガシー系）は強いが、インターネット関連（インターネット系）のネットワーク機器については弱い。F T T H の実用レベルは、2007 年 6 月現在で 966 万加入を超えており、ダントツの状況を誇る。研究・開発水準の高い光デバイスについては、光送受信器市場における Opnext、三菱電機、NEC 化合物半導体などはシェアは高いものの、半導体市場全体におけるオプトエレクトロニクスの割合が低いのが難点か。
米国	研究水準	◎	→	伝送・制御・デバイスに関する水準は世界トップであり、その位置づけは昨年と大きく変わらない。DARPA のプロジェクトに産学が参加し、良い連携の下で先端研究を推進している。すでにポスト I P も睨んでいるとのこと。ただし FTTH についてはかなり遅れている。
	技術開発水準	◎	→	インターネット系のネットワーク機器を始め、システム化が非常にうまい。デバイスについても技術力は高いが、日本ほど強力な企業が多くなく、Agilent, JDSU を中心とした寡占状態。
	産業技術力	◎	↗	インターネット系に通信がシフトしている状況を常にリードし、産業的にも高いシェアを維持し続けている。ルータ市場は未だにシスコ・ジュニパーの寡占状態が続いている。システム・デバイスにわたりベンチャーが次々と登場し、その中での生き残り競争が良い循環を作り出している。
欧州	研究水準	○	↘	FTTH について遅れ気味。超高速光通信系の研究水準は高い。パケットスイッチ関連については国レベルでの研究開発プロジェクトが一段落。最近は低調。企業ではテレコム系、大学ではアイントホーフェン工科大、デンマーク工科大、ゲント大などが中心である。
	技術開発水準	○	→	ドイツの T-Systems, DT、フランスの Alcatel-Lucent を中心として高い水準を維持している。F E C や電気分散補償を中心に中核技術に集中的に食い込んでいる戦略がありそう。
	産業技術力	○	→	Alcatel が Lucent と組むことによって、生き残り戦略をとっている。デバイス系は Bookham など少数ながら有力企業あり。情報通信関係の利益率が下がり気味。
中国	研究水準	△	↗	独自の成果は見られなかったが、この 1～2 年で OFC および ECOC での国別採択数が急上昇（4～5 位）しており、独自性・完成度の観点から無視できない存在となりつつある。内容はデバイスはほとんどなく、制御系・ネットワーク構成が多い。
	技術開発水準	○	↗	ネットワーク機器を仕上げる開発技術力が向上してきており、その成果が Huawei Technologies を中心に世界市場のシェアに現れ始めている。
	産業技術力	◎	↗	Huawei Technologies が高いシェアをとりはじめており、日本の産業界は注意を要する。特に利益率はまださほど高くはないものの、輸出額だけを見ると米国の低下と対応して急激に増加している。
韓国	研究水準	△	→	光アクセス系では WDM - PON で独自の位置を得ているが、KAIST, KIST などの研究機関が中心である。ただし OFC・ECOC での採択数が伸び悩み、中国に抜かれた。
	技術開発水準	△	→	サムスンが光通信では目立たず、光通信関連技術の有力企業がほとんどない。
	産業技術力	△	→	サムスンが光通信では目立たない。半導体市場では存在感が高いが、光通信機器や基本コンポーネントになると存在感が薄くなる。
全体コメント：光通信における日本の立場は、高信頼性の光デバイスと高い先端研究開発力を持つとの位置づけであり、その傾向は依然として継続できていると思われる。しかしながら、システムの世界市場におけるシェアは決して高くなく、特に IP 系の中心的システムであるルータ市場での存在感は低いと言わざるを得ない。米国は大学がデバイス・伝送関係の研究の中心となり、企業との共同研究をうまく推進している。Agilent, JDSU を代表とする光デバイスメーカー、Alcatel-Lucent を中心とする通信関係メーカー、ルータ市場を寡占するシスコ・ジュニパーなど、研究から産業技術力まで万遍なく力を持っている。欧州は米国ほどではないが、デバイス関係は Bookham、伝送関係は Alcatel-Lucent が頑張っており、ある程度の存在感を示している。中国は近年、システム系を中心に産業技術力から研究開発力まで急激に伸びており、Huawei Technologies がルータ市場の世界 3 位になったこと、O F C ・ E C O C の採択論文数で上位 5 位以内に入ることになったことなど、目を離せない存在となってきた。一方、韓国はアクセス系で独自の位置を占めているが、全体的には存在感が薄い。				

◆光メモリ

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	大学での研究は少し増えてきたが、現実離れの場合が多い。企業では光ディスクで利益が出ない うえ、次世代 DVD (HD DVD や BD) 以降の目標が無いため、研究に従事する人材が減らされて いる。経産省主導の高密度光メモリは内容や成果の実現性が見えていない。しかしナノパター ンメディアやハイブリッド磁気記録では成果が出つつある。
	技術開発水準	◎	↗	多層記録に関する開発が多く見られる。カバープラスチックの膜厚 $100\mu\text{m} \pm 3\mu\text{m}$ で制御技 術開発が進んでいる。次世代 DVD と従来の DVD/CD 兼用レンズの研究開発 (リコー、コニカ ミノルタ、NEC、日立など) が行われている。
	産業技術力	◎	↗	松下 (BD)、東芝 (HD DVD) 等が異なる光記録の規格を採用した企業間で、低価格化を競っ ている。シチズンが液晶による位相変調を利用した収差補正デバイスを生産 (DVD, BD, HD DVD 用途) し注目を浴びている。405 nmLD 生産も活発化。
米国	研究水準	○	→	シーゲート (CMU と共同) が開発。ホログラフィックメモリの開発が進んでいる。二光子吸収 技術による多層メモリの研究水準が高いが小型格安光源開発で行き詰まっている。 アリゾナ大学では研究が活発。
	技術開発水準	○	↘	日本・韓国よりも低水準。
	産業技術力	△	→	モノを作っていない。Inphase 社のホログラフィック方式、Call-Recall 社も製品を発売しつ つある。
欧州	研究水準	◎	→	新しい知見が、オランダ、スイスやイスラエルから発せられている。
	技術開発水準	○	→	Philips が後退面もあるが新技術開発には取り組んでいる。
	産業技術力	△	→	Philips が後退。
中国	研究水準	×	→	勉強中といった段階。
	技術開発水準	○	↗	DVD に対抗しているものを出そうとしている。
	産業技術力	◎	↗	日本で一般的な DVD ではなく、VCD (ビデオ CD) を使っている。
韓国	研究水準	○	↗	延世大学のメモリ研究所 (CISD) と LG が目立つ。日本企業も CISD に資金を投入している。
	技術開発水準	◎	↗	LG が特に活発である。サムスンも従来ほどではないが、活発。
	産業技術力	○	↗	LG がかなり目立って活発。
台湾	研究水準	○	↗	国立台湾大学、交通大学、中央大学などの研究層は厚い。
	技術開発水準	○	→	DVD に対抗して独自のものを出しているが日本の光ディスク方式にはかなわない。
	産業技術力	◎	→	CD-R や DVD-R の生産技術は高い。
シンガ ポール	研究水準	○	↗	シンガポール大学のメモリ研究所 (DSI) が中心。研究者数では世界最高 (国が力を入れている)。 る)。
	技術開発水準	△	→	日本の後塵をトレースしている感がある。
	産業技術力	○	↗	まだ十分に育っていない。
全体コメント: 日本が高い技術開発力、産業技術力を維持しており、産業としても成長を続けている。米国はシーゲートがカーネギー メロン大学と共同で 150 Gb/in^2 を超える光アシスト磁気ディスクヘッド研究を強力に進めているのが目立つが、技術開発水準、産 業技術力は低調。欧州では、フランス、スイス、イスラエルなどから新しい知見が発せられている。中国では VCD が国内で大発展。 韓国は LG が研究開発・試作品発表で活発。				

◆固体照明・発光デバイス

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	△	↘	窒化物化合物半導体の研究水準は非常に高いが、固体照明に関係した研究を推進している大学・国立研究機関はほとんどない。研究体制が偏っている。半導体研究者と固体照明研究者とのギャップが大きいと思われる。今後この分野の研究を発展させるためには、大学における研究プログラムの構築、および人材育成が不可欠である。
	技術開発水準	○	↘	LED と照明メーカーは世界一多いにもかかわらず、技術がブラックボックス化していることと、知的財産の取り扱いに問題があり、企業に力がかからない。
	産業技術力	◎	→	地球環境に対して有効な省エネ光源の開発を支援する国の体制作りが必要。現在、経済産業省、環境省が省エネに積極的に取り組んでおり、企業の協力体制も徐々にできあがってきている。標準化においてイニシアティブをとるために、大学と企業を支援する新しいプログラムの構築が必要。
米国	研究水準	○	→	UCSB を中心に、力のある大学の研究成果が十分に生かされているように見えるが、産業界のレベルが高すぎるので、学会（SPIE、米国照明学会）が支援をする必要がある。有機 EL は、国家プロジェクトがあるので、有機 EL 照明の取り組みは活発である。ただし、大学や国立研究所の寄与が少ないのは問題。
	技術開発水準	◎	↗	Philips・Lumileds（米）の技術開発力が格段に強く、Osram 社（独）に十分に対抗できる。将来固体照明の分野では、世界制覇を狙っている。
	産業技術力	○	?	主導権を握ろうとして、反対されている。CIE、IEC が主導権を争っている。
欧州	研究水準	△	↘	化合物半導体の光物性の評価に対して、基礎研究に才長ける大学が数多くあるが、固体照明デバイスを作成するに至っていない。多くの研究者は固体照明分野に興味を抱いているが、政府の支援などが十分ではない。
	技術開発水準	×	↘	Osram, Philips 以外は、大中小のエレクトロニクス企業がほとんど固体照明に関する研究開発に手をつけていない。ただし、蛍光体材料の研究に関しては、大学と連携をしながら新しい材料開発に着手している。
	産業技術力	◎	↗	Osram, Philips が Lumine を買収し、世界的に産業技術力は最高水準にある。
中国	研究水準	○	↗	政府の支援で北京大学、清華大学を中心に、結晶成長、LED プロセス、照明応用、という一貫したプログラムのもとで、研究が進んでいると同時に、人材育成がなされている。将来非常に期待される研究分野である。
	技術開発水準	△	↗	まだ未知であるが、政府の支援が十分なされることによって、企業と大学の連携がうまく進むような仕組みを作ると、世界トップレベルの成果が生まれる可能性がある。5 都市（北京、上海、アモイ、深セン等）が特区になっており、アライアンスセンターを形成。台湾等の企業が入ってきている。
	産業技術力	◎	↗	中国政府（CSA というアライアンス団体）がバックアップしている。自動車産業、宇宙産業、固体照明の三大産業がある。
韓国	研究水準	○	↗	多数の大学の研究室で窒化物半導体の研究が盛ん。産学連携も活発。ほぼ完全に日本の研究システムをキャッチアップしながら進めている。
	技術開発水準	○	→	サムスングループ、LG 電子、を中心に Seoul 半導体等中規模クラスの企業が力をつけつつある。KOPTI という政府の支援団体が産学連携の中心となって半導体照明（固体照明）の研究を積極的に推進している。
	産業技術力	◎	↗	政府の支援があり、半導体照明国家プロジェクトが推進されている。日本の現状をキャッチアップし、常に高い目標値を設定したロードマップを作成している。
台湾	研究水準	◎	↗	主要大学（台湾国立大学、台湾中央大学等）の研究が活発。特に、結晶成長の成果が日本とほぼ同程度である。LED のプロセス技術は日本の大学を超えている。
	技術開発水準	○	↗	ITRI を中心に、企業の支援体制が充実している。また、産業界における固体照明の業界団体（TEOS）が中心に、ベンチャー企業（EPISTAR、ARIMA 等）LED メーカーの知財の保護、製品開発支援を行っている。中国への技術提携を政府を中心に行っている。さらに、海外の結晶成長メーカー、LED メーカーが、積極的に台湾企業をバックアップしている。研究の人口密度は世界で一番高い。
	産業技術力	◎	↗	今年から第二期目の固体照明プロジェクト（Ho-Yi プロジェクト）が発足。ITRI からスピンアウトしたベンチャー企業が中国へ移行していくという仕組みが働き、競争力が上がっている。
全体コメント：日本は LED、照明メーカーが多いにもかかわらず、情報がブラックボックス化してまとまらない。アメリカも同様の傾向にある。世界的に見ると、台湾、韓国、中国を中心に、日本の化学メーカーのバックアップを受けて、非常に高い国際競争力をつけている。一方、それを支援する欧州の照明メーカーの組織力で、固体照明の標準化が欧州を中心に行われる可能性がある、一方日本は、産業界のまとまりが悪く、国際標準化に乗り遅れる可能性がある。早く固体照明産業を世界と協力しながらまとめていかなければならない。				

◆光学材料・コンポーネント・光学設計

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	大学の研究レベルは高水準にあるが、光学全般を牽引する研究機関がなく、大学の講座数も減少傾向にある。但し、2007 年には宇都宮大、東大で新たな講座が開設され復興の機運が出てきた。国プロでは、産総研が微細光学素子などで高レベルの研究を行っている。
	技術開発水準	◎	→	各分野とも、企業の研究機関は世界最高水準である。しかし、最先端では、米国や欧州の後追いとなる分野もある。
	産業技術力	◎	→	各分野において、コンシューマー、インダストリー機器とも世界最高である。しかし、日本からの技術流出をレバレッジとした韓国・中国企業の追い上げが急である。
米国	研究水準	◎	→	大学ではロチェスター大やアリゾナ大など世界屈指の光学センターがあり、研究レベルも高水準である。また、パラダイムシフトをもたらす可能性のある先端的な研究をスタンフォード大が行うなど、分野も多岐に亘る。政府系の研究機関では N I S T が単なる計測に留まらず、光学材料研究でも高い成果を挙げている。
	技術開発水準	○	→	研究機関は、広い分野で世界中から人材を集め、成果を出す体制を取っている。軍事・宇宙関連の光学材料、薄膜関係技術に特徴があり、大学からスピノフするベンチャーも多い。
	産業技術力	△	→	コダック、ゼロックスなど既存のコンシューマー・オフィス用光学産業は、日本に対し劣勢であるが、最先端分野では、光学設計の O R A、非球面のティンズリー等が技術力を活かした強みを発揮している。素材分野ではコーニングが存在感を維持している。
欧州	研究水準	○	→	ドイツ、フランス、イギリスがそれぞれの伝統を持つ。中でもドイツはフ라운ホーファー研などの研究機関が高水準で、大学も独自の伝統を保持している。薄膜ではロシアの研究レベルも高い。
	技術開発水準	◎	→	最近ではヨーロッパ連合としての共同研究体制も整ってきた。最先端では、サジェムのように米国と同じく宇宙・軍事に関わる分野が活発である。
	産業技術力	○	→	光学機器のツァイスや光学材料のショットを擁するカール・ツァイス財団、石英のヘラウス、薄膜のメルクなどドイツ系の企業が強い競争力を有している。その他、ガラス材料の仏サンゴバンなど特徴のある企業も多くある。
中国、台湾	研究水準	△	↗	レベルは高いとはいえないが、国立中央大学、国立交通大学などの一部の大学で、積極的に研究に取り組みつつあり、論文数も急激に増加している。
	技術開発水準	△	↗	企業からの研究発表はまだ少ないが、研究開発水準は向上しているとみるべきであろう。国策で光学技術の振興が図られ、工業技術研究院などから企業の研究機関への技術移転が図られている。
	産業技術力	○	↗	日本からの技術導入が盛んに行われ、光コンポーネント産業の競争力の底上げが着実に行われている。一部のレンズや材料で日本を脅かす存在になりつつある。また、結晶光学材料の産出国であるメリットを活かした戦略も見られる。
韓国	研究水準	△	↗	光州フォトリソニッククラスターなど、国策として光学技術の振興が図られ、ヨンセイ大学などが活発に発表している分野もある。
	技術開発水準	○	↗	サムソンや L G の光学機器特許取得件数増加に見られるように、日本の後追いから脱却し独自の研究が開始されているが、材料研究にまで裾野が広がっていない。
	産業技術力	○	↗	光コンポーネントは競争力を増しており、一部のレンズで市場参入を積極的に図っている。
全体コメント：光学材料・コンポーネントは、機械加工技術による非球面、自由曲面レンズから、ナノテクを駆使した微細光学素子、ナノコンポジット材料へと進みつつある。現在、日本の研究開発・産業技術力は、既存の産業分野の材料、コンポーネント、光学設計において圧倒的に強いが、より広い分野を眺めると、最先端で欧米が先行する例もある。今後これらの分野の強化が必要となろう。また、後発の中国や韓国は国策として研究開発力強化を図っている。日本は技術協力とともに、流出防止も含めて戦略を考えていく必要がある。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆光計測

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	大学、研究所レベルの基礎的な計測方法の研究が活発である。水準は高いが、実用化への意識は低い。
	技術開発水準	◎	↗	商業ベースに直結した開発が盛んである。各社独自技術の開発が盛んで知材の共有意識が不足。
	産業技術力	◎	→	パワーメーター、ウェーブメーターなど民生用計測機器が強い。近接場計測、非線形計測機器はベンチャーが中心。
米国	研究水準	◎	↗	応用に直結した基礎研究に対する支援が盛んで高い水準を維持している。新規的な計測技術についての底力がある。
	技術開発水準	◎	↗	安定したデバイスエレメントの供給と明確な応用が高い技術水準を維持している。
	産業技術力	◎	→	極限計測技術、特定目的用途の機器が強い。
欧州	研究水準	○	→	潜在的なポテンシャルが高い。
	技術開発水準	△	→	新しい計測方法の開発については消極的。計測制度の向上などに力を入れている。
	産業技術力	○	→	標準的な計測機器については安定した技術力を維持している。
中国	研究水準	△	↗	人的ポテンシャルは高い。知材に対する意識改革が必要。
	技術開発水準	△	→	独自開発には至っていない。政策的に問題がある。
	産業技術力	×	→	未成熟である。
韓国	研究水準	△	→	水準は低い。
	技術開発水準	○	↗	国家的なプロジェクトで半導体産業関係の計測機器開発に力を入れている。
	産業技術力	○	↗	一部のベンチャー企業の技術力が高い。
全体コメント：日本では基礎研究から開発・実用化への移行がスムーズに行われていない。逆に実用化まで意識していない研究が多い。米国では産業と研究・開発が連携したものが積極的にサポートされている。欧州の技術や産業は米国に流出し、技術的に枯れてきているが、安定した計測機器産業がある。中国は政策的な問題があり、計測関係の研究者が育っていない。産業的にも未成熟。韓国は高精度面計測など半導体産業に直結した研究を育成し、それによるベンチャー産業を支援している。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆量子情報

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	フォトンクス・量子暗号は◎。量子コンピューティング全般で見ると理論は欧米が若干進んでいる。量子テレポーテーション、エンタングルメントの基礎理論等◎。
	技術開発水準	◎	↗	NEC や三菱、NTT 及び大学の量子暗号に関する実験の成果が世界的にも評価が高い。
	産業技術力	△	↗	量子暗号実用開発の動きが企業に見られ、デバイスからシステムまで技術力はある。
米国	研究水準	◎	↗	昔から実験が強い（JPL 等、フォトンクス関連の量子情報関連の実験等）。
	技術開発水準	◎	↗	ロスアラモス研究所等で、光ビームを使った衛星間実験を目指している。光子検出器開発に強い。
	産業技術力	○	→	MagiQ 社から、量子暗号装置の製品が出ている。
欧州	研究水準	◎	↗	欧州共同体でのプロジェクトがうまくいっている。ポスドクの力が非常に上がっている。
	技術開発水準	◎	↗	デバイス開発よりは既存デバイスの組み合わせ力に優れる。欧州共同体での協力関係あり。
	産業技術力	○	→	idQuantic 社（スイス）から、量子暗号装置の製品が出ている。実用性が高い。スイスの銀行にニーズあり。
中国	研究水準	○	↗	米国や欧州からの帰還者が活躍中。非常に高速度にレベルが上昇している。
	技術開発水準	△	↗	産業化を目指した基礎研究はなされていない。
	産業技術力	×	→	産業はない。
韓国	研究水準	△	↗	理論的研究はあるが、実験研究がない。
	技術開発水準	×	↗	進んでいない
	産業技術力	×	→	実用化開発は行われていない
オーストラリア	研究水準	◎	↗	従来から理論に強い。最近、実験も強くなる傾向にある。
	技術開発水準	△	→	進んでいない
	産業技術力	×	→	実用化開発は行われていない

全体コメント：量子暗号は基礎研究と実用化研究にわかれる。前者は大学中心の「各種方式において装置の現実的不完全性を考慮した安全保証条件を求める理論と基礎実験」であり後者は企業中心の「方式は BB84 + デコイで、ハードは光子検出器性能向上で経済性も考慮した開発」である。量子コンピューターは依然として基礎研究であるが、いわゆる「量子回路の組み合わせ」から最近では「クラスター状態を用いた測定誘起型コンピューティング」も進んでいる。日本はどれも世界先端レベルに追いついている。

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆フォトリック結晶・メタマテリアル

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎/△	→	フォトリック結晶に関しては、京大、横浜国大、NTT、東大などの主要機関が基礎物理やアイデア、作製、応用全てに関して世界をリードしている。ただし直近の応用に結びつく研究が不足気味なのが悩みの種。メタマテリアルに関しては、欧米に比べて遅れている。光吸収の問題が大きいフォトリックス分野よりも、電波の周波数で無線技術として研究されている。
	技術開発水準	◎/△	→	NTT、NEC などの大企業が国プロで実施している基礎研究は世界最高レベル。その他、ブラックボックス化しているものの、小規模な研究を行う企業は多い。ただし一部を除いては、ここでも産業応用の壁に当たっているため、アクティビティは横ばい。メタマテリアルは研究水準と同様。
	産業技術力	◎	→	作製技術が比較的容易なフォトリック結晶ファイバは、世界に先駆けて、ネットワーク (FTTH) に導入されようとしている。フォトリック結晶 LED や偏光子などの光学部品への導入も、世界で数少ない実用レベルの製品を完成しつつある。ただしこれに続く応用が登場するには、5 年程度の時間がかかる。
米国	研究水準	○/◎	↘/↗	フォトリック結晶に関して、基礎物理の研究は Caltech や Stanford 大学、UCSB などが活発だが、発光素子などに限定されており、全般的には日本に押されてやや下降気味。これに対して、メタマテリアルの研究は爆発的に拡大中。欧米で協調した研究が世界をリードしている。光の周波数での動作を目指す研究も多い。
	技術開発水準	○	→	基礎研究と応用研究の内容が分離気味なため、企業での研究事例が少ない。シリコンフォトリックスにおけるフォトリック結晶まで議論を拡大すると、IBM などの大企業が活発に研究している。
	産業技術力	○	→	日本と同様に、LED への応用に限っては、高い産業技術力がある。その他の本格的な産業応用の兆候はまだ見られない。
欧州	研究水準	○/◎	↘/↗	米国と同様の傾向である。
	技術開発水準	○	→	米国と同様の傾向である。
	産業技術力	△	→	フォトリック結晶ファイバの開発で世界をリードしていたが、各国が追いついた。その他、いくつかベンチャーが現れたが、現在は消えている。目立った産業応用が見られない。
中国	研究水準	△	↗	日米欧を追いかける立場だが、研究者人口は急増している模様。米国から帰国したフォトリック結晶研究者が牽引し始めている。メタマテリアルは、基礎物理の理論か、電波周波数帯に限定されている。
	技術開発水準	?	↗	急増している模様。フォトリック結晶 LED の開発は盛んになっている、もしくは盛んになると予想される。
	産業技術力	?	?	未知数だが、いったん、企業の技術開発が本格的に始まれば、一気に進む可能性がある。
韓国	研究水準	○	→	KAIST やソウル大学で、米国から帰国したフォトリック結晶研究者が活躍し、レーザや LED の分野では世界的な研究を発表している。メタマテリアルは日本と似た状況。
	技術開発水準	○	→	あまり表には出てきていないが、LED やディスプレイに対するフォトリック結晶の応用研究は活発な模様。
	産業技術力	○	→	実用的な製品が発表された事例はまだない。

全体コメント：フォトリック結晶は基礎物理の研究、5 年以上を要する未来の応用研究、3 年以内の実用化を目指す応用の技術開発の三種類に分離しており、全体を一言で俯瞰するのが難しい状況。フォトリック結晶自体の基礎研究のプレーヤーはやや固定化してきており、分野は横ばい。むしろフォトリック結晶を一種のツールとして考え、他分野がそれを利用する傾向が顕著になってきたため、この分野以外で目にするものの方が多くなってきた。技術開発に進んでいるフォトリック結晶ファイバや LED といった応用は、各国で急速に技術開発されており、細かい技術の優位性によって産業化の勝敗が決まると思われるが、全般的に日本はリードしている。一方、メタマテリアルはフォトリック結晶と同じコミュニティから登場した分野ではあるが、原理が異なるところがあり、光の周波数帯では本質的に光吸収の問題があるため、電波周波数帯の研究の方がはるかに活発である。

※「現状についての比較」「近年のトレンド」について二つ記載のところは、下記の通り区別して記載。

左側：フォトリック結晶／右側：メタマテリアル

◆シミュレーション解析、解析ツール

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	光導波路・ファイバ、光半導体デバイスのいずれのシミュレーション解析においても、インパクトのある論文が多数発表されており、研究水準は高い。特に、フォトニック結晶導波路・ファイバ、高屈折率差導波路など、ナノフォトニクスと呼ばれる新規分野にも積極的に参入し、欧米と共に世界を先導している。ただし、メタマテリアルに関するシミュレーション解析については、欧米に遅れをとった感がある。
	技術開発水準	◎	↗	光導波路・ファイバ解析技術、光半導体デバイス解析技術のいずれにおいても、技術開発水準は高い。特に、有限要素法（FEM）、ビーム伝搬法（BPM）、時間領域差分法（FDTD）など、解析ツールに関する技術開発水準は世界のトップレベルにある。
	産業技術力	○	→	光導波路・ファイバ、光半導体デバイスの開発にシミュレーション解析は不可欠で、初期設計から詳細設計、さらには最適設計を支援する解析ツールの技術開発力はものづくりを含めた産業技術力に直結し、その意味で、シミュレーション解析の研究水準、解析ツールの技術開発水準の高さがものづくりを下支えしている。ただし、プリプロセッサ（前処理装置）、ポストプロセッサ（後処理装置）を装備した光導波路デバイスシミュレータや光半導体デバイスシミュレータとして製品化された事例はいくつかあるものの、欧米に比べて、その産業技術力が高いとは言い難い。
米国	研究水準	◎	↗	日本と同様に、光導波路・ファイバ、光半導体デバイスのいずれのシミュレーション解析においても、インパクトのある論文が多数発表されており、研究水準は極めて高く、研究者の層も厚い。ナノフォトニクスの分野はもちろんのこと、メタマテリアル、スローライト現象、超高速光現象といった新規分野においても高い研究水準を維持している。
	技術開発水準	◎	↗	解析ツールの開発に携わる技術者・研究者の層が厚く、光導波路・ファイバ解析技術、光半導体デバイス解析技術のいずれにおいても、技術開発水準は世界のトップレベルにある。FEM、BPM、FDTDに加えて、差分法、光線追跡法、モンテカルロ法など、様々な解析ツールの高度化技術開発が進展している。
	産業技術力	◎	↗	フォトニクス分野における米国のシミュレーション解析、解析ツールについては、カナダを含めて評価する必要がある。世界で利用されている光導波路デバイスシミュレータや光半導体デバイスシミュレータの多くは米国製、カナダ製で、ソフトウェア分野における産業技術力も高い。
欧州	研究水準	◎	↗	日本、米国と同様に、光導波路・ファイバ、光半導体デバイスのいずれのシミュレーション解析においても、イギリス、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ベルギー、スイスなど、西欧諸国を中心にインパクトのある論文が多数発表されており、研究水準は総じて高い。
	技術開発水準	◎	↗	光導波路・ファイバ解析技術、光半導体デバイス解析技術のいずれにおいても、国によって多少の差はあるものの、技術開発水準は総じて高い。FEM、BPM、FDTDといった数値シミュレーション技術のみならず、等価屈折率法、摂動理論、結合モード理論など、高速設計を可能とする解析的あるいは準解析的な理論の高度化技術開発も進展している。
	産業技術力	○	→	フォトニクス分野におけるシミュレーション解析の研究水準、解析ツールの技術開発水準の高さを反映して、ほとんどのフォトニクス関連企業は内製のソフトウェアで対応してきたが、1990年頃から光導波路デバイスシミュレータや光半導体デバイスシミュレータ専門のソフトウェア会社が設立されるようになった。ただし、産業技術力は、米国、カナダと肩を並べるには至っていない。
中国	研究水準	○	↗	光導波路・ファイバ、光半導体デバイス、特に、ナノフォトニクス分野のシミュレーション解析に関する論文が増え始めており、研究水準は台湾を含めて向上しつつある。
	技術開発水準	△	↗	シミュレーション解析に必要な解析ツールに関する技術開発水準は、まだ十分とは言えないが、台湾の大学を中心に解析ツールの高度化技術開発が進みつつある。
	産業技術力	×	→	光導波路デバイスシミュレータや光半導体デバイスシミュレータを製品化するまでには至っておらず、この分野を専門とするソフトウェア会社はまだ育っていない。
韓国	研究水準	○	↗	日本における「21世紀COEプログラム」や「グローバルCOEプログラム」と同様に、世界水準の教育研究拠点形成を目指した「BK (Brain Korea 21 Project)」が1999年に事業を開始したのに伴い、科学技術全般にわたり研究水準が向上しつつあるが、フォトニクス分野のシミュレーション解析においても、その成果が出始めている。
	技術開発水準	△	↗	中国と同様に、シミュレーション解析に必要な解析ツールの技術開発水準は、まだ十分とは言えないが、米国で解析ツールの技術を習得した研究者を中心にその高度化技術開発が進みつつある。
	産業技術力	×	→	中国と同様に、光導波路デバイスシミュレータや光半導体デバイスシミュレータを製品化するまでには至っておらず、この分野を専門とするソフトウェア会社はまだ育っていない。

全体コメント：IEEE（アメリカ電気電子学会）とOSA（アメリカ光学会）とが共同出版している国際学術誌 Journal of Lightwave Technology の2007年9月号において、「光導波路デバイスのモデリング (Modeling of Guided-Wave Photonic Devices)」という特集が企画された。特に、日本、米国、欧州における最新の研究開発動向を知ることができる。

2.3 コンピューティング分野

2.3.1 概観

コンピュータ分野を大枠として (i) コンピュータソフトウェア、(ii) コンピュータハードウェアとに分けて、以下に概観を記す。

(i) コンピュータソフトウェア

情報化社会あるいは情報技術 (IT) 分野でソフトウェアの役割、比重は年々増しつつあり、また多様になってきている。ソフトウェアについては、次の 6 つの中綱目に着目して、国際比較を行っている。(1) 基礎理論 (特に並列計算関係)、(2) 基盤ソフトウェア (OS、組み込み OS、プログラミング言語、分散システムソフトウェア基盤)、(3) データベースとデータマイニング、(4) ソフトウェア開発技術／ツール、(5) ビジネス応用とサービスサイエンス、(6) Web 情報システム。

詳細は各中綱目で記しているが、米国は研究者層の厚さ、新技術創造力、産業力・国際競争力のいずれの面でも世界をリードしてきている。欧州は伝統的に大学を中心に基礎領域に強みを発揮してきたが、EU の統合が進展し、各国間の連携は、共同研究プロジェクト等を通じて強化されてきている。ソフトウェア売上高世界第 3 位の企業である SAP (本拠地：ドイツ) が存在するが、近年ではいくつかの国でソフトウェアベンチャー企業が興っており、元々多国籍的なところが多いことから、産業に関する国際舞台でも存在感を増してきつつある。

ソフトウェア開発に関しては、オフショア化 (インドや中国への移行) を中心とした国際的構造変化が進行している。これらの国の新技術創出力はまだ高いレベルではないものの、ソフトウェア開発の技術者層の拡大、欧米で教育を受け企業を経験した高度技術者・研究者の母国への還流などにより、次第に力をつけ、レベルを向上させていくものと予想される。韓国についても国際的エレクトロニクス産業の隆興に符合して、ソフトウェアを含む情報技術のレベルは向上しつつある。

さて我が国であるが、ソフトウェアに関する研究レベル、技術レベルは米国には後塵を拝するが、(個々に得意分野があるので一概に比較はできないものの) 欧州に匹敵する高いレベルにあると言える。全産業規模が大きいことからソフトウェアの国内産業規模も大きいものがあり、大中小の多数のソフトウェア企業が存在している。但し、これらの企業のソフトウェア開発は受注開発が主体となっており、世界に通用し競争力を持つソフトウェアは極めて少ない状況にある。国内マーケットでもそこそこの生存が可能であるので、国際マーケッ

トへ向かう推進力が弱いと感じられる。我が国のソフトウェアの輸出入金額は1:100（但し、ゲームソフトは除く）と言われており、国際的に競争力を持つソフトウェアが極めて少ないことが大きな問題である。この要因として、初期の頃からソフトウェアからハードウェアの付随物との位置づけで捉えられがちであったこと、均質的な国民性、品質改良は得意だが新コンセプトの構成力は弱いことなどが挙げられている。第一の要因に関連して、ハードウェア製品に内蔵される組み込みソフトウェアに関しては、我が国は最高レベルを保っている。

米国、欧州で進む新時代の情報環境に対応する新しいソフトウェアの伸展、インド、中国、韓国の台頭の間で、我が国は国際的競争力を持つ創造的ソフトウェアを伸ばし、産業としても国際的に通用するものにしていく必要がある。ITの技術や環境は高速度で変容しつつあり、新情報環境、社会をもたらす新ソフトウェアが必要とされ受け入れられる余地、チャンスは大きく、我が国でもこのような新しいソフトウェアの芽が生まれ出ている。これらを単に国内市場での成功に満足することなく、いかにして国際的に通用するものに育成していくかが、今後の情報化社会、情報産業の重要性を考慮した時、大きな政策課題であろう。

ソフトウェアの関連領域は多岐に渡るが、ここでは上記（1）～（6）の中綱目に着目して国際比較を行った。他の考慮すべきソフトウェア関連綱目としては次のような領域がある。

- ・社会基盤ソフトウェア（電子政府システム、高度交通システムなど）
- ・自然言語処理関連
- ・マルチメディアシステム
- ・先進的インターフェース

(ii) コンピュータハードウェア

ITの中軸技術としてのコンピュータハードウェアやコンピュータシステムの位置付けは変わらず、その高速化、高性能化に支えられて、多くの新しいコンピュータ応用の世界が切り拓かれて来た。この枠組みは今後も続くと考えられ、情報化社会あるいは情報関連産業の中軸として重要性は変わらない。高速化に関しては、単一CPUでの性能向上が飽和に近づいてきていることから、多重CPU、クラスタコンピュータなどの形態が追求されており、その帰趨が今後の国際競争力に直結するようになってきている。高速化以外のディペンダビリティや低消費電力性、リコンフィギュラブル性なども新しい性能要因になってきている。コンピュータハードウェアについては、次の中綱目に着目して、国際比較を行っている。(7)スーパーコンピュータ、(8)並列コンピューティング／クラスタコンピューティング、(9)チップマルチプロセッサ、(10)リ

コンフィギュラブルシステム、(11) ディペンダブル情報システム、(12) 省電力情報処理技術。

詳細は各中綱目で記しているが、コンピュータを産み出して育て、産業を興し主導してきた米国は、今日でも全体的に他国を圧倒する技術力、産業力を保持している。

欧州がコンピュータハードウェア製造の産業力を失っている状況にあるので、日本は世界の中で米国に次ぐ位置にある。1980 年代には改良技術と高い製造技術とにより、日本のメインフレームコンピュータは高い国際競争力を持っていた。潮流の変化により産業的には成功したとは言えないが、この時期には国（通産省）主導で第 5 世代コンピュータの研究開発という、世界をリードしようとし国際的に大きく注目されたプロジェクトも実施された。現在でも、クラスタコンピュータ、マルチチッププロセッサ、リコンフィギュラブルシステム等の研究及び技術レベルは国際的に見ても高いが、課題は世界マーケットで競争力を持つ製品にできるかどうかになる。スーパーコンピュータについては、地球シミュレータ（NEC 製）が 2002 年～2 年半の間、世界最高速の地位にあった。現在は再び、世界最高速を目指す汎用高速計算機の開発が始まっている。

欧州はコンピュータハードウェア製造の産業力は失っているものの、クラスタコンピュータのアプリケーションやリコンフィギュラブルシステムのアルゴリズムなど、ソフトウェアも関連する部分については強みを有している。チップマルチプロセッサについてもアーキテクチャ研究が進んでおり、その製造については米国との共同化による形態が採られている。ディペンダブル情報システムに関しては、欧州の研究開発は活発であり水準は高い。

中国はまだコンピュータハードウェアに関して、独自の先端技術開発のレベルに至っていないが、研究者数、発表論文数は増加してきている。PC とサーバの製造で世界の拠点になっている台湾との垣根が低くなりつつあり、その製造技術が伝わることにより、中国は今後、技術力を向上させていくものと考えられる。

韓国は情報家電やメモリを中心とする半導体製造で世界のトップレベルになっている。しかし、コンピュータ自体の研究開発への投資が向けられておらず、この分野には注力されていない。（国際分業の観点から集中と選択を行い国際競争力の強い領域を持つこのような戦略は、今後必要で意味のあるものであろう。）

2.3.2 中綱目ごとの比較

(1) 基礎理論（計算モデル、データ構造とアルゴリズム）

ソフトウェア基礎理論は学問分野としてのコンピュータサイエンスの根幹をなすとともに、高信頼かつ高性能なソフトウェアの実現に重要な役割を演じる。反面、現実には生産されるソフトウェアの複雑さと、理論がカバーできるソフトウェア規模との間には大きなギャップがあり、理論サイドから実践サイドへの要素技術の移転には非常な時間を要してきた。たとえば自動メモリ管理技術の Java 等の主流言語への採用や、モデル検査技術のソフトウェアへの適用などをみても、技術の誕生から本格採用までには 20 年以上のタイムラグがあり、このことを念頭に技術評価や技術政策を考えなければならない。基礎分野を先導しているのは欧米であり、中国、韓国をはじめとする他の地域（ただしシンガポール、オーストラリアなど少数の例外が存在）は遅れているため、以下では欧米との比較を行う。ただし、中国国内研究の基礎分野への貢献は、米国の中国人研究者との交流を通じて急速な増加の兆しを見せている。

基礎理論がカバーする範囲は、(i) アルゴリズム論、(ii) 計算量理論、(iii) 計算モデル（ラムダ計算、並行計算、関数型プログラミング、制約プログラミングなど）、(iv) プログラム解析・検証技術、などに分類できる。この中で (i) アルゴリズム論および (ii) 計算量理論は国内研究が（特定領域研究等を通じて）比較的良く組織され、また工学的観点を重視する風土ができています。その観点からは、欧米と同等以上の競争力を保持することが期待できるが、計算プラットフォームの変化（逐次計算から manycore への変化等）を敏感にとらえるという点では米国が抜きん出ており、日本においてもこの潮流を意識した技術開発を行うことが期待される。

一方、(iii) 計算モデルは、安全で記述性の高いソフトウェア構築の理論基盤を与えるとともに、プログラミング言語の進化を先導するという長期的意義をもつ分野である。本分野は基礎研究を重視する欧州が伝統的に最も強いが、日本の研究水準も高い。ただし並行計算や制約プログラミングなどの新分野に限ると研究者層が大変薄くなる。出口指向の強い米国の研究者層は本分野については薄い。欧州では英国とフランスが伝統的に強く、マイクロソフト研究所も本分野の代表的研究者を多数擁している。

(iv) プログラム解析・検証技術は、プログラムの実行効率改善（最適化）と安全性（セキュリティ）保証の二つの重要な役割をもつ。代表的技術として、型体系（type system）、抽象解釈技術、モデル検査技術などがある。これらの技術は安全かつ高性能なソフトウェア構築技術として実用的意義が高く、欧米双方で活発に研究が行われている。日本の研究水準は、伝統的なプログラム解析（型体系に基づくものを含む）については欧米に並んでいる。一

方、モデル検査に代表されるソフトウェア検証技術については、産総研にシステム検証研究センターが開設されて以来注目度は向上したものの、理論研究と実用化研究の両面の大幅な強化が必要である。注目すべき世界動向としては、Singularity Project（マイクロソフト研究所）、seL4（National ICT Australia）、Formal Verification of Compilers（INRIA）など、オペレーティングシステムやコンパイラのような基本システムソフトウェアの信頼性向上に向けた動きが活発になっていることが挙げられる。

なお、ソフトウェア検証や並列処理の根本原理は、いくつかの国や大学でグランドチャレンジとして大所高所から議論されており、我々も、基礎研究者を取り込んだ形で同様の取り組みを行うことが重要である。

- [1] Workshop on the Verification Grand Challenge, 2005.
<http://www.csl.sri.com/users/shankar/VGC05/>
- [2] Grand Challenges in Computer Research homepage, 2005.
<http://www.ukcrc.org.uk/grand%5Fchallenges/>
- [3] Tony Hoare and Jay Misra, Verified software: theories, tools, experiments. Vision of a Grand Challenge project, 2005. <http://vstte.ethz.ch/pdfs/vstte-hoare-misra.pdf>
- [4] Krste Asanovic et al., The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley. Tech. Report UCB/EECS-2006-183, EECS Dept., UC Berkeley, 2006.
<http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2006/EECS-2006-183.pdf>

(2) 基盤ソフトウェア

この中綱目では、オペレーティングシステム（OS）、プログラミング言語とその処理系、分散処理ソフトウェア基盤について検討する。この分野では研究開発においてもグローバル化が進み、研究者・技術者と企業などの組織の国籍が異なる場合が多く、企業の研究施設も世界各地に展開する例が多い。企業が他国に研究所等を設置する場合でも、その技術は設置先国の技術として定着するよりも、企業の技術として定着することが多いため、主として企業や研究機関の国籍に注目して比較を行った。

PC やサーバのための汎用 OS については、ネットワーク接続の一般化・利用の高度化に伴い、外部からの悪意を持った侵入などのさまざまなリスクへの対応、分散したシステムの管理効率化などが重要な研究テーマとなっている。ことに仮想マシン（VM：Virtual Machine）上にさまざまな機能を提供する手法が有力な流れとなっており、VM でセキュリティ機能を提供する手法が注目を集めている。

新たなアイデアの多くは米国から提案されてきており、欧州や日本などの貢献も小さくはないが、比較的影響力の小さい改良などにとどまっているもの

が多く、革新的な提案で広く注目されているものは見当たらない。たとえばこの領域の主要な研究コミュニティのひとつである ACM SIGOPS の Mark Weiser Award の受賞者は、2001 年開設以来すべてが米国の大学あるいは企業の研究者に贈られている。近年サーバ OS として普及が進み、オープンソースであることから多くの研究のベースにもなっている Linux も、初期のカーネル開発者であるフィンランドの Linus Torvalds がその後も最終的な調整役を果たしてきているが、商用に至るシステム開発や種々の改良・拡張の研究は米国が中心であり、Torvalds 自身も活動場所を米国に移している。商用システム市場では、マイクロソフト社の Windows が 90%以上を占める寡占状態にあり、アップル社の MacOS が数%を占めている他、サーバ用に一定のシェアを占める Linux, SunOS などを含め、米国製の独占状況にあるといっている。

組み込み機器用の OS については、かつては比較的簡素な機能のみの提供で十分であったことから、ハードウェアコストを抑えるため、低性能の CPU と小メモリ容量で実現できるシステムが広く用いられてきた。坂村健(東京大学)の提唱に基づく TRON のひとつである ITRON はこの需要によく応えるため、かなりの普及を見ていた。また、組み込み対象製品のために特化した機能提供がコスト低減に効果的であったため、製品開発に直結する日本の技術は一定の優位性を有していた。しかし近年に至り、組み込み OS においてもネットワーク接続などの多彩な機能を充実する要請が高まり、一方でハードウェアコストが大幅に低廉化してきたことから、汎用 OS に基づく OS を利用するケースが多くなってきている。このため日本のこの分野での技術優位性は低下してきている。

プログラミング言語と処理系については、ソフトウェア開発効率性の追求は従来どおり重要な研究主題であるが、ネットワーク接続が当然になってソフトウェアのバグによるシステムの脆弱性が問題となることが多くなったことから、近年ではセキュリティ対策が重要性を増し、コンパイル時のバグ検出や正当性の解析などが主要なテーマとなっている。この分野でも米国の研究水準が最も高いが、欧州や日本でも注目を集める研究例が少なくない。

実際に用いられているプログラミング言語のシェアを見ると、十年程前まで主流であった C, C++, Visual Basic から、ここ数年は Java がシェアを奪って来ていたが、ごく最近では C# の利用が増加する傾向が見られる。これらはいずれも米国発のプログラミング言語であり、処理系も米国製のものがほとんどである。一方、ハードウェアの低廉化に伴い、従来ならば実行効率を最重視してきた分野でも、実行効率面でやや劣っても記述が容易なスクリプト言語を用いる例が多くなってきている。この傾向の中で、Javascript や松本行弘の設計による日本発の言語である Ruby の利用も大きく広がってきている。

プログラミング言語そのものではないが、ソフトウェア開発におけるミドルウェアの重要性が高まってきている。特に大規模な分散処理においては、多様な OS で動作する分散したシステムを統合動作させるグリッドコンピューティングのためのミドルウェアとして Globus Toolkit が標準としての地位を確立している。このツールキットは分散処理のためのさまざまな標準規格を実装したもので、米国のアルゴンヌ国立研究所などの機関が連携した Globus Alliance が開発しているもので、この面でも米国が主導的役割を果たしている。

(3) データベースとデータマイニング

21 世紀に入り、人類の創出する情報量は爆発的に増大しつつあり、情報爆発時代に突入したと言える。大きく分けて 2 つの視点からのアプローチが存在する。一つは、人々が情報オーバーロディングとなっていることに対応し、真に欲する情報を容易に獲得できる様に、高度な検索機構を探求する方向の研究である。もう一つは、従来は手にできなかった膨大な情報が利用できることに対応するもので、そこから何らかの価値を生み出す機会ととらえる方向の研究である。とりわけ「大量情報からの価値創出」は情報研究分野において、今後、新たな、最も大きなチャレンジの一つとなろう。大量情報を入れる器としてのデータベース技術はより高度化が進められている。多様なセンサからの情報を管理するストリームデータ管理、高度なアラート、配信を可能とするシステム、流れるデータに対するストリームマイニングアルゴリズムが挙げられる。膨大なデータを高速に探し出すべく、確率的探索手法や、多様な軸からの検索を可能とするスカイライン技法なども研究が活発である。コンプライアンスの必要性を背景として、リネージ管理（データの履歴管理）に関する研究も活発化しつつある。一方、個人情報の取り扱いに関しての社会的な関心が高まる中、プライバシーを保持したデータマイニング手法の研究もある。情報の多様性は、一層の情報統合技術の進展を促し、ラッパ技術の高度化が進むとともに、半構造やグラフ構造を対象としたより複雑なデータを対象としたデータマイニングの研究が活発化している。システム技術の観点からは、極めて多機能化し、複雑化した DBMS (Database Management System) の管理のオートノミック化が企業を中心に大きな課題となっている。多くのデータベースアプリケーションのスタートアップが生まれていることからそのニーズが伺える。とりわけ、ERP (Enterprise Resource Planning) など高次アプリのエンジンとしての DBMS では巨大かつ複雑なスキーマが生成され、今後も重要な研究対象となろう。多様なセンサの低廉化はアクティブなセンサデータ管理の研究、パワーアウェアな問合せ処理などを生み出すとともに、グリーングリッドの設立を受けて、電力指向のデータ管理が今後大きな課題と言えよう。スペースブ

ロビジョニング機構などストレージ技術における仮想化が大きな革新をもたらしつつあることは注目に値するものであり、超大規模データ管理における重要な技術と見做せる。Google, Yahoo, Amazon 等、メガサービス企業において、超大規模データ管理を可能とするソフトウェア基盤の構築プロジェクトが活発化し注目される。膨大なデータを自由に操作可能な基盤が生命線との認識が見受けられるものの、我国では対応が十分とは言えない。10 万台のディスクドライブの動作特性を調査し従来の常識を大きく覆す結果を提示しベスト論文を取るなど Google の動きはとりわけ印象的である。

【日本】研究面では、文部科学省情報爆発プロジェクト、リーディングプロジェクトや経済産業省情報大航海プロジェクトにより、ウェブ上あるいは非ウェブ上の多様な情報を対象とした検索基盤の構築やデータマイニング技術が進みつつある。総務省情報信憑性プロジェクトにより、情報の質に関するプロジェクトが本年より立ち上がったものの、信頼性やプライバシーを保護したデータベース利用技術はまだ弱い。データ処理基盤アーキテクチャの構築では、特に技術開発面で Naregi 等グリッド構築技術に優れるが、Google のような新世代ソフトウェアアーキテクチャ構築には至っていない。検索エンジン構築用オープンソースなど、研究面の準備は整いつつある。

【米国】研究面では、XML データベースや実世界の多様な監視イベントから生じるストリームデータ処理専用 DBMS 等が進む。技術面では、Google や Yahoo の研究所を中心に、「あらゆるデータの収集と検索のためのデータベース的な機構の提供」の動きが加速。XML や関係データベースを含むキーワード検索機構や企業内情報統合技術も盛ん。特に、プライバシー保護や漏洩情報の出自を追跡する技術などの斬新でニーズの高い信頼性保証技術に優れる。データベースクレンジング技術でも進む。技術面と産業面で、研究成果を作ったベータ版を公開して技術的フィードバックを高速化し、技術開発を効率化する場が出来ているところが特徴。

【欧州】大学や INRIA、マックス・プランク研究所などで、プライバシー保護制約の下での情報統合やデータマイニング、テキスト検索などの情報検索技術を含んだデータベースシステムの研究が進む。データベースクレンジングも強い。総じて、高品質化技法の理論面に優れる。

【中国】香港の大学ではグラフデータマイニング、高次元データ検索、関係データベースや XML データベースのキーワード検索機能、情報統合機能などが盛ん。マイクロソフト・アジア研究所の活動も検索に関してとりわけ注目される。産業面では百度 (Baidu) に見られるように、基本的なアーキテクチャ技術は有しているが、プライバシー保護などの信頼性保証技術の研究は少ない。

【韓国】IR と DB の融合、マイニング、主記憶データベース技術、プライバシー保護の制約下のデータベース利用技術など理論的には優れた試みもある。

(4) ソフトウェア開発技術／ツール

ソフトウェアの大規模化や市場ニーズの変化の急速化に伴い、体系的なソフトウェア開発技術への要求がますます高まっている。特に、欠陥のあるソフトウェアが、社会に対して大きな影響を及ぼすようになりつつあるため、信頼性が重要視されるようになってきている。そのために、なるべく上流段階で、ソフトウェアへの要求を抜け・漏れ・不整合なく明確にするための要求分析技術、および、開発プロセス全体にわたって、成果物が正しく作成されていることを、数学的に厳密に保証する形式手法技術の2つが、特に重要な技術として認識されている。そこで、本綱目ではこれら2つの技術について報告する。

① 要求分析

ソフトウェア開発の前提として、ユーザの要求に対して、抜け・漏れや不整合がなく、明確に定義された要求仕様書を記述する必要がある。そのために必要な情報を、効率よく抽出する作業を実施する、要求分析工程の重要性が、近年強く認識されている。このため、要求分析技術は、ソフトウェア開発の要素技術として必須のものとなっている。特に米国と欧州においては、このような要求分析技術へのニーズが高いため、この分野では常に世界をリードしてきた。

米国は、要求分析工程を、開発プロセス全体において位置付ける観点から、開発方法論の一部として要求分析技術を発展させてきた。たとえば、構造化手法における構造化分析、およびオブジェクト指向手法におけるオブジェクト指向分析などである。さらに、方法論の標準化を通じて、体系的な技術開発と産業界への迅速な展開を強みとしている。また、そのようなトップダウンのアプローチに加えて、アジャイル手法と呼ばれる、コーディング作業に密着したボトムアップの手法における要求分析手法でも先導している。

欧州は、数理論理学や知識工学といった、基礎的な理論や技術に基づいた手法に強みを持っている。中でも、ゴール指向要求分析手法、特に KAOS 手法 [1] では、その成立から技術開発まで世界をリードしている。

日本は、米国と欧米に比べて、明確な文書化を避ける文化的特徴のために、要求分析技術では遅れていたが、ソフトウェア開発のグローバル化に伴い、遅れを取り戻す努力が目立ってきている。まずゴール指向手法の研究においては、AGORA 手法 [2] が世界的に認められるなど、一定の成果がある。また、(株) NTT データを含む9社は、「実践的アプローチに基づく要求仕様の発注者ビュー検討会」 [3] に参画し、現実的な要求分析手法・ノウハウの確立を目指している。

中国は遅れているが、欧米で活躍している研究者は輩出しつつあるので、将来大きく進展する可能性はある。また韓国も同様に遅れているが、関連分野として、プロダクトライン工学に関しては急速に進展しているので、やはり将来

の発展が見込まれる。

〈参考文献〉

- [1] A. Dardenne, A. van Lamsweerde, and S. Fickas. Goal-directed requirements acquisition. Science of Computer Programming, Vol. 20, No. 1-2, pp. 3-50, 1993.
- [2] H. Kaiya, D. Shinbara, J. Kawano, and M. Saeki. Improving the detection of requirements discordances among stakeholders. Requirements Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 289-303, 2005.
- [3] <http://www.nttdata.co.jp/cview/>

②形式手法

数学的に厳密なモデルや仕様記述言語を用いてソフトウェア開発を行う形式手法は、高信頼システムを開発する手法として、長い間一定の重要性を認められている。ただし形式手法は、世界的に見て、その学習コストの高さから、まだ広く生産現場に適用されてはいない。しかし、近年の高信頼システムへのニーズの高まりにより、産業界からも急速に注目を集めつつある。従来の中心的な適用分野である公共システムや宇宙・航空・国防システムでは、米国と欧州が世界をリードしている。

米国は、モデル検査技術とプログラム検証技術に強みを持っている。高い研究水準、モデル検査における SPIN [4] と SMV [5] や、プログラム検証における SLAM [6] といった実用レベルのツール、および NASA や Microsoft 社における生産現場での適用など、先導的な役割を担っている。

欧州は、形式仕様記述に強みを持っている。研究水準の高さはもちろん、B メソッド [7] における英 B-Core 社の B-Toolkit [7] や仏 ClearSy 社の Atelier B [8]、および形式仕様記述言語 VDM [9] におけるデンマーク IFAD 社の VDMTools [10] などの商用ツールも充実している。さらに、公共システムの分野を中心に産業適用も進んでいる。

日本は、研究水準については、本来数学的理論の研究に強みがあったこともあり、特に代数仕様記述の分野で世界をリードしている。応用に関しては遅れていた。しかし、前述した高信頼システムへのニーズ、特に組込みシステムへの信頼性の要求が高まるにつれて、急速にレベルを上げてきている。たとえば、モバイル FeliCa チップの開発や、CSK システムズ社の証券会社向けシステムの開発に、VDM が適用されるなど、成果が上がりつつある。

中国と韓国はまだ遅れている。しかし中国に関しては、日本と同様に数学的理論の研究に強みがあるので、今後の進展が予想される。

〈参考文献〉

- [4] G. J. Holzmann. The SPIN model checker: Primer and reference manual. Addison Wesley, 2004.
- [5] Edmund M. Clarke, Orna Grumberg, and A. Peled. Model Checking. MIT Press, 1999. CLA e 99:1 1.Ex.
- [6] J.-R. Abrial. The B-book: assigning programs to meanings. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1996.
- [7] <http://www.b-core.com/btoolkit.html>
- [8] http://www.atelierb.societe.com/index_uk.html
- [9] C. B. Jones. Systematic Software Development Using VDM (2nd ed.) . Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1990.
- [10] <http://www.vdmttools.jp/>

(5) ビジネス応用とサービスサイエンス

ビジネスソフトウェアは企業の基幹業務システム（会計、物流、販売、人事など）や CRM（Customer Relation Management）、SCM（Supply Chain Management）、PLM（Product Lifecycle Management）などを中心に企業活動を支える幅広いソフトウェア群を指し、ソフトウェアビジネスで大きな割合を占めている。このようなビジネス面のソフトウェアの新しい潮流として、最近「サービスサイエンス」が注目されるようになってきている。ここではこのサービスサイエンスの観点に注目し、国際比較を行う。

「サービス」という言葉は実に多様な使われ方をするが、最近の「サービスサイエンス」が主な対象とするのは、組織や個人の経済活動（価値創造）としてのサービスである。先進各国では産業構造のサービス化が進展し、第三次産業が就労人口と GDP において大きな比重を占めているにも拘らず、工業に比べてその生産性が低いと言われている。そこで、サービスにおいても技術革新を達成し、産業全体の振興に繋げようというサービスイノベーションの動きが起こっている。サービス業務の研究は、もちろん以前から商学分野（サービス・マーケティング）で行われていたが、Service Science を数学・計算機科学・経済学・経営学・心理学等を融合した学際的分野として確立することを提唱したのは、2004 年 12 月に公開された米国競争力評議会の報告書 Innovate America（通称 Palmisano Report）である。日本でも、第 3 期（平成 18～22 年度）科学技術基本計画、経済成長戦略大綱（平成 18 年 7 月）等でサービス産業の革新と研究推進が謳われ、平成 19 年度には、経済産業省の主導で「サービス産業生産性協議会」が設立され、文部科学省でも「サービスイノベーション人材育成推進プログラム」が始まった。経産省では、健康・福祉、育児支援、観光・集客、コンテンツ、ビジネス支援、流通・物流を「重点サービス 6 分野」としている。

日本でサービスサイエンスを推進しているのは情報関連企業であるが、製造業でも関心が高まっている。一方で、本来のサービス業界は、小規模企業が多いこと、業種多様性のため共通基盤が見えないこと等のためか、科学的アプローチへの関心は低い。東京大学ではサービス工学研究会が2002年に発足し、北陸先端科学技術大学院大学では社会人向け MOT コースで、筑波大学では MBA コースで授業が開設されている。情報処理学会、日本 OR 学会、人工知能学会等でサービスサイエンスが取り上げられている。

米国では、IBM が SSME (Service Science, Management and Engineering) と称して研究部門・コンサルティング部門が積極的に研究と大学の研究支援を推進し、California 大学 Berkeley 校等に修士レベルの教育課程が設置されている。サービス分野の伝統的学会 Frontiers in Service に SSME 関係者が増え、IEEE、ACM、INFORMS 等の学会で研究会が開催されている。企業と大学の連携組織 Service Research & Innovation Initiative (SRII) が注目される。

欧州では、イギリスで、Cambridge 大学等で研究会が活発に開かれ、サービスイノベーション、サービス情報の質と流通等が議論されている。ドイツでは Karlsruhe 工科大学等を中心に、生産管理工学の手法（プロセス管理、原価企画等）をサービスに適用しようとする方法が主流である。また、北欧にも研究者が多い。

アジアでは、中国が、第 11 次五ヵ年計画（2005 年 9 月）においてサービス産業を持続可能な経済発展と雇用創出の核とみなし、清華大学等で研究・教育を進め、サービスサイエンス国際会議も第 3 回を数えている。韓国では、2006 年に企画予算処が社会サービス向上企画団を発足させ、財政経済部がサービス産業競争力強化総合政策を発表したが、学会での顕著な活動は見られない。一方、観光立国を目指すタイやシンガポールからの研究者が欧米の学会に積極的に参加している。インドは米国の下請けをしているに過ぎない。

〈参考文献〉

- [1] 日高一義, サービス・サイエンスにまつわる国内外の動向, 科学技術動向, No.57, pp.12-22, 2005 年 12 月。
- [2] 安部忠彦, 「サービスサイエンス」とは何か, Economic Review, Vol.10, No.2, pp.10-26, 2006 年 4 月。
- [3] 一橋ビジネスレビュー, 特集: サービスを科学する, 54 巻 2 号, 2006 年秋季。
- [4] 人工知能学会誌, 特集: サービスイノベーションと AI, 22 巻 6 号, 2007 年 11 月。
- [5] 亀岡秋男監修, サービスサイエンス 新時代を拓くイノベーション経営を目指して, エヌ・ティー・エス, 2007 年 4 月。
- [6] 経済産業省編, 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, 経済産業調査会, 2007 年 10 月。

(6) Web 情報システム

WWW（以下 Web）は社会の情報流通・共有の新しいインフラストラクチャに成長し、この周辺に多数の新ビジネス、新産業も興っている。Web 情報空間は現在も成長中であり、今後の社会や情報産業を始めとする全産業に及ぼす影響は計り知れないものがある。Web は最近ではビデオ情報も含み多様になってきているが、ここではその中心である Web 検索に特に焦点を当て、国際比較を行っている。

2005 年に登場し、2006 年に盛り上がりを見せた Web2.0 が一段落し、2007 年は実質的な研究開発、実用化が行われた。Web 検索に関しては、クローリングなどを分散・並列処理することにより高速化する従来の傾向に加えてパーソナル化に関する研究開発が活発化している [1]。

Web マイニングに関しては、Web 上の情報を収集する検索エンジンの重要性が高まってきた。検索エンジン自体にマイニングにとって有用な機能、例えば情報の知識化機能を具備させるという傾向が見えてきた [2]。

Web プログラミングに関しては、Web サービス API を使ったマッシュアップ、JavaScript の HTTP（HyperText Transfer Protocol）通信機能を用いた Web 応用構築技術である Ajax、読みやすく、作成、編集が容易な構造化データ用フォーマット YAML（YAML Ain't Markup Language）、Ajax を用いた Web プログラミングに適したデータフォーマット JSON（JavaScript Object Notation）、豊富なプラグインが用意され、RSS（Rich Site Summary）などのフィード情報の収集、配信が可能なフィードアグリゲータ Plagger、Web 応用構築におけるサーバからクライアントへの効率的送信技術 Comet、といった技術を中心に研究開発が進展した。

次に各国の状況について記述する。

Web 情報システムに関しては米国が世界をリードしている。Google、Yahoo!、Microsoft が三つ巴の競争をしており、研究水準、技術開発水準、産業技術力とも抜きん出ている。

日本は、情報爆発、情報大航海といった国家プロジェクトを積極的に展開しており、プリファードインフラストラクチャー社による大規模全文検索エンジン Sedue の開発 [3] など、今後の追い上げが期待できる。また Google の日本人技術者が大規模日本語 N-gram データを公開し [4]、好意的に受け取られている。

中国では、中国の Google と呼ばれ、中国インターネットユーザの過半数が利用している検索サービス「百度」を保持する百度（Baidu）が、日本に進出し、日本語版の検索サービスを開始した。Baidu は、Yahoo China、Google を抑えて中国で検索首位に立っており、今後も上昇傾向にある。

家庭へのブロードバンドインターネットの普及率が世界有数である韓国にお

いてブログ、アバタ、SNS（ソーシャルネットワーキングサービス）を組み合わせたサービスを展開している Cyworld は 20 代の若者を軸に、きわめて多数のユーザを得ている。また韓国最大手のポータルサイトを運営している NAVER は検索サービスにおいても韓国内で優勢を保っている。このように韓国はこの分野において技術開発水準、産業技術力を維持している。

欧州は、HTML（HyperText Markup Language）、HTTP を生んだ Tim Berners-Lee の本拠地であり、米国と共に W3C（Web 技術に関する標準化団体）の中心となって活動しており、技術開発水準を維持している。BtoB 向けをはじめとする Web サービスが積極的に研究開発されており、携帯からの Web アクセスは米国を上回っており、産業としての拡大が見込まれる。W3C に関しては、日本にも拠点が置かれているが、残念ながら日本の Web 国際標準への独自の貢献は極めて少ない状態に留まっている。

コンピュータにも Web コンテンツの表す意味を把握できるようにすることを目指す次世代 Web 基盤としてのセマンティック Web は、米国・欧州が主導して W3C で標準化が進められてきた。しかし現状では、当初想定していたような情報の収集、分析のために広く使用されるという状況に至っていない。そうではあるものの欧州ではこのセマンティック Web に強い執着をみせており、この技術を活用した知的な新 Web サービスとその基盤を狙いとした研究開発を活発に継続している。

〈参考文献〉

- [1] 特集「利用者の好みをとらえいかすー嗜好抽出技術の最前線ー」, 情報処理, Vol.48, No.9, pp.956-1007, 2007 年 9 月。
- [2] 松尾豊: 世界へのインターフェースとしての検索エンジン, 電子情報通信学会誌, Vol.90, No.10, pp.884-888, 2007 年 10 月。
- [3] 大規模全文検索エンジン Sedue: <http://preferred.jp/sedue/>
- [4] 大規模日本語 N-gram データ公開
<http://googlejapan.blogspot.com/2007/11/n-gram.html>

(7) スーパーコンピュータ

スーパーコンピュータの国際比較をするにあたっては、世界中の最も高性能なコンピュータシステムで構成された上位 500 機のリストである「Top 500 list (<http://www.top500.org>)」から多くの情報が得られる。Top 500 list は 6 月に開催される ICE (International Supercomputing Conference) と 11 月に開催される SC (Supercomputing) において更新され、性能測定には LINPACK ベンチマークが用いられる。なお、現在の世界最速のスーパーコンピュータは、米国ローレンス・リバモア国立研究所に設置され

ている IBM BlueGene/L であり、478.2TFLOPS の LINPACK スコアを達成した。また、日本では 56.43TFLOPS の性能を達成した東京工業大学の TSUBAME Grid Cluster が 16 位で最高である。

トップ 500 スーパーコンピュータにおける国別のシェアを見ると、57% 近くのスーパーコンピュータが米国内にあり、他を圧倒している。また最近の傾向として、米国内のシェアがさらに高まる傾向にある。欧州各国においてもスーパーコンピュータを導入するサイトが増加しており、最新のリストではトップ 500 内の 25% 近くを占めている。日本では、トップ 500 に占めるスーパーコンピュータの数が年々減少している。1990 年代は 10% 以上のシェアを占めていたが、最新のリストではそれが 4% にまで低下している。注目すべきは、中国や台湾、インドといった国々のシェアが高まりつつある点である。それぞれ、2%、2.2%、1.8% を占めており、今後も Top500 内でのシェアを伸ばしていくと予想される。

次にベンダ別のシェアを見ると、トップ 500 の内のおよそ 80% が IBM と HP 社開発のシステムで占められ、また他の米国企業の開発のものも含めると 95% 程度になる。このように、スーパーコンピュータでは米国が圧倒的な技術水準の高さ、および産業競争力の高さを誇っている。

最近のスーパーコンピュータの開発動向としては、直近の性能ターゲットとして PFLOPS レンジが視野に入っており、数年後に 10PFLOPS 以上のシステムを実現するためのプロジェクトが、日本および米国でそれぞれ進められている。日本では、「汎用京速計算機」プロジェクトが国主導で進められ、再び Top 500list の頂点に立つべく、2010 年度に 10PFLOPS 以上のシステムの実現を目指して開発が続けられている。また、米国でもほぼ同時期に同程度の性能を達成することを目的とした「High Productivity Computing Systems program (HPCS)」が進行している。

日本で開発された地球シミュレータが 2002 年から約 2 年半にわたり処理性能でトップの座を占めた。その後、一次低迷が見られた日本の開発力は、次世代スーパーコンピュータプロジェクト（汎用京速計算機）により復活しつつある。これを持続させるための施策が重要である。産業技術力の関連からは、日本のスーパーコンピュータの開発コスト、システムコストが欧米に比べて高いことは、今後の普及に対して問題になるであろう。日本のスーパーコンピュータの開発は、半導体の開発と直結している観があり、半導体の開発の遅れが、スーパーコンピュータの開発に波及するおそれがある。日本の垂直統合型研究開発が裏目に出る可能性がある。主要学会は、SC (Super Computing)、ISCA (International Symposium on Computer Architecture)、ICS (International Conference on Supercomputing) などがある。

【日本】次世代スーパーコンピュータプロジェクトにより、著しい向上が見られ始めた。既存のスーパーコンピュータを中心に安定した技術力を有している。

【米国】ここ 10 年持続して高い研究水準を保っている。日本の次世代スーパーコンピュータプロジェクトに対抗するために、資金が投入されており、DOE (Department of Energy)、DOD (Department of Defense)、NSF (National Science Foundation) によるファンディングが 3 つの大きな柱となっている。産業技術力は、引き続き高い水準を保っている。2008 年には、IBM 社と CRAY 社がペタフロップスを達成する予定。

【欧州】一時期ソフトウェアでリードしていたが、近年競争力が失われつつある。欧州の主なコンピューティングセンターはクラスタ型に移行しつつある。スーパーコンピュータ本体の開発は以前から行われていなかった。ソフトウェアについては分散的に行われている。

【中国】国家としての重要項目となっているため、著しく研究が進展しつつある。

中国国産のシステムが、ようやくスーパーコンピュータと呼べる段階に達した。今後さらに進展が見込まれる。日本にとっての最大の競争相手になりうる。従来米国で活躍していた技術者が、中国で独自のスーパーコンピュータを作り始めている。(Galactic Computing 社等 2 ～ 3 社立ち上がっている) Galactic Computing を立ち上げた Steve Chen は、CRAY 社の X-MP というマルチプロセッサのスーパーコンピュータのチーフデザイナーであった。

【韓国】研究の中心がより生活に密着した情報技術に移っているために、スーパーコンピュータの研究は盛んではない。半導体開発力はあるものの、スーパーコンピュータへの適用は見られない。従って、スーパーコンピュータの産業への適用はない。

(8) 並列コンピューティング／クラスタコンピューティング

並列コンピューティングは、並列処理を実施し高速な処理性能を追求する技術であり、クラスタコンピューティングは、汎用プロセッサとネットワーク（インターコネクト）により、高速な処理性能を追求する技術である。

システムの重要要素である汎用プロセッサを搭載したサーバは台湾、中国製が中心となっている。したがって、台湾、中国がソフトウェア技術力をつけた場合には、大きな脅威になりうる。ハードウェア技術者は米国から中国に戻りつつあるが、ソフトウェア技術者はまだそれほど戻っていない。日本のソフトウェアの研究水準は、世界のトップレベルにある。次世代（2010-2012）でどのように戦うかが重要である。多くのシステムでは、Linux を並列化して使用している。また、スーパーコンピュータ応用には、マイクロソフトが強い関心を示している。学会としては、CCGRID、ICDCS (International Conference on Distributed Computing Systems)、PPOP (Principles

and Practice of Parallel Programming) などが著名である。

【日本】世界で広く使われている SCore 技術 (Linux 用 クラスタ計算機用超並列プログラム実行環境) を中心に、ひきつづき高い研究水準にある。

新しい局面として、大学と日本のメーカーが協力して並列技術を用いたスーパーコンピュータの実用化に注力している。筑波大学、京都大学、東京大学の計算機センターがメーカーと共同で並列コンピューティングシステムの開発を進めており、広く産業界に使われるようになるだろう。

日本は高い設計技術を保有している。ただし、サーバを作る技術が台湾に移行しており、製造技術が失われつつあることが、今後どのように影響するかは注意を要する。

【米国】インターコネクトの高速化技術をもとにした、クラスタ技術が盛んになりつつある。インターコネクト技術 (InfiniBand、Gigabit Ethernet) に関するベンチャーの動きが活発であり、それらが技術開発を牽引している。米国のスーパーコンピュータセンターでは、すでに大規模クラスタコンピューティングが中心的に用いられ、ソフトウェアツール等の開発も盛んである。また、IBM ロードランナーという CELL (Cell Broadband Engine : ソニー社のゲーム機 PS3 の CPU) を使ったクラスタコンピューティングシステムが、来年度ローレンス・リバモア研究所に納入予定である。

【欧州】一時盛んであった欧州主体の標準化が下火となり、米国の標準を用いて米国と共同研究するようになってきている。ハードウェアを開発する力は失われていて、新たには出てきていない。アプリケーションソフトウェアには、見るべきものがある。ハードウェアの産業技術力は失われており、見るべきものはない。

【中国】スーパーコンピュータを作るための並列技術が課題となっているために、研究者の数、論文数が一般的学会では増加している。SC、ICS 等のトップレベルの学会では、まだ注目されていないが、今後注目される。中国独自の技術開発力を急速につけはじめている。特に、台湾と中国の技術者の交流が活発化し、台湾の PC を作る技術が中国に導入され、近年技術力を持ち始めている。

技術開発力は着実につけているが、現在のところ、産業的なレベルではまだ高い水準にはなっていない。ただし、PC とサーバで世界を制覇した台湾との融合により、着実に力をつけている。

【韓国】研究の中心がより生活に密着した情報技術に移っているために、並列コンピュータの研究は盛んではない。半導体開発力はあるものの、並列コンピュータ、インターコネクト、グリッド、並列オペレーティングシステム等の技術の開発は見られない。産業技術力についても見るべきものはない。

(9) チップマルチプロセッサ

チップマルチプロセッサは、市販の汎用マイクロプロセッサの多くがその構成を採用するなど、近年では主流のプロセッサアーキテクチャとなっている。これは、消費電力や発熱量の限界から、クロック周波数向上や複雑化を伴う命令レベル並列性抽出技術による高性能化が望めなくなり、マイクロプロセッサの性能向上手段として、比較的シンプルかつ周波数も低く抑えたコアを複数用いて並列処理をする方が、性能や電力面で優れることが大きな理由である。チップマルチプロセッサに関しては、メモリ階層の構成やチップ内ネットワークなど、これまでも数多くの研究がなされてきたが、近年では更に活発な研究が行われており、国際学会などでチップマルチプロセッサがキーワードとなることも多い。また、ここ数年の特徴としては、「チップマルチプロセッサをどう作るか」から、「どう効率よく使うか」、つまり効率的に並列化プログラミングを行う手法や、多くのコアで並列プログラムを効率的に実行する技術などに研究・開発動向がシフトしている。

米国では、従来からチップマルチプロセッサに関する研究が活発に行われ、ハードウェアからソフトウェアに至るまで、その技術水準は世界トップである。また、市販のチップマルチプロセッサのほとんどが、Intel、IBM、Sun、AMD といった米国の企業に占められており、産業競争力においても、米国が圧倒的に優位な立場にある。また近年では、投機的マルチスレッディングや、トランザクショナルメモリといった先進的な技術にいち早く取り組んでおり、今後もイノベーター的な役割を果たしていくものと予想される。

欧州では主に組み込みシステムに関連する研究者のネットワークを作る目的で HiPEAC (High-Performance Embedded Architecture and Compilation) という団体が 2004 年に設立され、現在も活発な活動が続いている。この、HiPEAC をベースとした国際学会なども開催され、チップマルチプロセッサのアーキテクチャやコンパイラ技術の発表も多い。

日本には、チップマルチプロセッサ分野では多くのパイオニア的な仕事があった。各社も優れた製品をマーケットに出しているが、小さい市場にしか進出できておらず、持続した研究開発が将来も続けられるかについて不安が残る。チップマルチプロセッサを ISSCC (International Solid-State Circuit Conference) で最初に発表したのは日本企業であったが、それを商業的な成功に結び付けられなかった。プロセッサを支援するソフトウェア技術 (OS 技術) の不足はひとつの要因であろう。日本でチップマルチプロセッサ技術をどのように育てていくかについては、産業全体で検討することが急務である。

【日本】チップマルチプロセッサは、SMT (Simultaneous Multi Threading)、CMP (Chip Multi Processor) を含め、パイオニア的な研

究開発が行われた。現在も引き続き活発に研究が行われている。自動車への適用を含む組み込み応用として、技術開発が活発に行われている。製品開発に非常に力を入れてきて、技術力も高い水準にあり、実際にチップを作ることができるが、ARM 社と Intel 社に大きく市場を支配されており、製品を売る新たな市場を見つけない限り、市場は限定され先細りになる可能性が大きい。

【米国】大学や IBM 社、Intel 社、SUN 社などの主要研究所では、主要研究テーマとなっており、汎用、組み込み、すべてのプロセッサで研究が盛んに行われている。汎用では Intel 社、AMD 社の技術開発力が圧倒的に強い。チップマルチプロセッサのシェアはほぼ独占状態で高いシェアを誇っており、技術力も高い。

【欧州】スペインに、Mateo Valero が率いるアーキテクチャ研究拠点（DAC-UPC）が確立し、研究が活発に行われている。また、スウェーデンのウプサラ大学等でも、アーキテクチャの研究が盛んに行われている。研究水準は上昇中である。ARM 社が組込システム向けでリード。

【中国】従来研究レベルは低かったが、一般的な学会での論文数は増えており、研究者層も厚くなりつつある。中国独自のチップマルチプロセッサはいまだ作れない状況にある。ただし、半導体関連技術は上昇中である。

【韓国】チップマルチプロセッサ技術に関して、研究的にも見るべきものはない。半導体技術力はあるが、チップマルチプロセッサ開発への投資は行われていない。

(10) リコンフィギュラブルシステム

リコンフィギュラブルシステムは、専用 LSI と汎用 CPU+ プログラムの中間に位置すると言える。FPGA（Field Programmable Gate Array）が主流であり、近年ダイナミックリコンフィギュラブルシステムが注目を集めている。

研究水準としては日本が高い分野なので、レベルを保つ施策が必要。IP（Intellectual Property）技術を育て、標準化することが課題である。欧米の技術に依存することは、非常にもったいないことである。産業の中で、技術を育て、標準化を担う人材が不在なのが心配である。製品を作るにあたって、信頼のある技術を購入してくればよいという開発体制になっているため、後続く技術が育たないのが心配である。従来、IP があれば SOC（System on Chip）などはすぐにできると言われていたが、IP の品質が問題になって（正常に動作しない場合が多い）、限られたメーカーのみが生き残っている。

【日本】学会（Field Programmable Technology, International Conference FPGA, IS FPGA）での研究発表が盛んで、いくつかの非常に優れた研究が

ある。

一方で日本企業における研究開発プロジェクトの中止があいつぎ、チップ自身を自分たちで作らなくなっている。チップ製造は Xilinx 社、Altera 社の 2 社に集約している。通信分野（無線関係のリモート局等）で FPGA を適用する技術力は高い。

【米国】計算、信号処理を中心に幅広い応用研究がなされている。新しい半導体テクノロジーにもとづく FPGA が続々と開発されている。Xilinx 社と Altera 社が、世界シェアの 9 割を占めている。SGI 社及び CRAY 社から、FPGA を組み込んだスーパーコンピュータが発売されている。また、多くの通信、信号処理についても、幅広く FPGA が使われている。

【欧州】トップレベルの学会では、多くの研究発表が見られ、FPGA を使ったアルゴリズムの研究等が広く行われている。

CAD 環境では、米国をキャッチアップできていない。産学連携で、HANDEL C という言語を使った FPGA を設計するシステムは、ケンブリッジ大学で開発されているが、主流とはなっていない。

また、FPGA そのものは作っていないが、一部、設計技術では、みるべきものがある。フランスの PLD Applications 社の IP 技術は広く使われている。【中国】研究水準は低かったが、研究者は増えている。分野は応用に限られる。FPGA 自身又はそのソフトウェアを開発する力はないが、その応用技術力はある。

産業技術としては成熟していない。

【韓国】研究として、特に見るべきものはない。産業としても見るべきものはない。FPGA への投資は注力されていない

(11) ディペンダブル情報システム

情報システムの提供するサービスが良質で信頼でき、人の生活と社会の活動が安心してそれに依拠できるならば、この情報システムはディペンダブル (dependable) である、という。ディペンダビリティ (dependability) とは、「(情報システムによって) 提供されるサービスが良質で信頼でき、そのユーザ (人、組織、人工物、他の情報システムなど) が安心してそれに依拠できる」という性質であり、社会基盤である情報システムが具備すべき第一義的属性である。

ディペンダブル情報システムの研究は多岐に亘る。ディペンダビリティが元々包含する属性概念は reliability, availability, integrity, safety, maintainability であり、1960 年代から汎用分野ではコンピュータメインフレームの基本設計技術として、特定用途分野では、宇宙開発、航空機、鉄道、通信ネットワークなど、特にディペンダビリティへの要求が強い分野における

フォールトトレランス技術として、理論と実用の両面で研究開発が進められてきた。また、同時に、フォールト発生そのものを減少させるフォールトアボイダンス技術も、ハードウェアにおける信頼性工学および、バグの少ないプログラミングスタイルを目指したソフトウェア工学として長い研究開発の歴史がある。その結果、ハードウェアの経年劣化や電磁干渉など、主として物理的、自然現象的フォールトを想定したディペンダブルシステム実現技術、および、プログラムミスなどの過失による人為的フォールトを想定したソフトウェア開発技術に関しては、成熟した技術の膨大な蓄積がある。この分野で先導的かつ圧倒的な役割を果たしてきたのは米国である。またソフトウェア工学分野の研究では、欧州からもいくつかの先駆的な研究が生まれた。

最近では、情報システムの大規模化、複雑化、ネットワーク化が進み、そこで提供されるサービスとその利用者の多様化が急速に進んだ結果、サイバーテロ、情報漏洩、システム侵入など、セキュリティを損なう悪意の人為的フォールト、および、システム設計ミス、操作ミス、保守ミスなど、過失による人為的フォールトがディペンダビリティを阻害する新たな脅威になってきている。また、それが発生し、影響を受けるシステム階層も、VLSI、アーキテクチャ、システムソフトウェア、ネットワーク、ミドルウェア、サービス・アプリケーションなど、広範囲に渡る。このため、現在最も活発に研究が進められているのは、ネットワーク化情報システムにおける悪意及び過失による人為フォールトに対処する技術であるが、この分野でも米国の研究水準が圧倒的に高い。

一方、ディペンダビリティのモデリング、計測、ベンチマーキングを含む評価技術の分野では、欧州が進んでいる。しかし、まだその成果は部分的であり、多様なシステム階層、応用分野のそれぞれにおいて適切なディペンダビリティ評価指標あるいは価値指標と呼べるものはまだ確立していない。このため、企業における技術開発のインセンティブは十分ではなく、ディペンダビリティ実現が技術開発の主要目標には成りにくい状況に留まっている。また、適切な評価指標がないため、それぞれが勝手に高信頼性を標榜しても企業の技術開発力を製品レベルで客観的に比較することは困難である。ディペンダビリティの評価指標を定め、ベンチマーキングのための、テストベッドとデータセットの構築は現在の国際的な課題である。

なお、ディペンダブル情報システムに関する研究成果は主として、毎年6月末に開催される旗艦国際会議 International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)、及びアジア・太平洋地域の Pacific-Rim Symposium on Dependable Computing (PRDC)、欧州の European Dependable Computing Conference (EDCC)、中南米地域の Latin American Symposium on Dependable Computing (LADC) で発表されている。

(12) 省電力情報処理技術

コンピュータシステムの省電力化は、現在もなお重要な課題として認識されている。モバイル計算機のバッテリー駆動時間の延長という要求はもちろんのこと、商用サーバ、さらには科学技術計算用途などのハイエンドなシステムにおいても、放熱の問題から消費電力削減は必要不可欠なためである。また、計算機システムが社会基盤として今後さらに普及することを考えると、限られた地球上のエネルギーでこの社会が要求する情報処理能力を実現するためには、現在よりも格段に省電力なコンピュータシステムを実現することが必要不可欠である。

省電力情報処理技術は、2000 年前後より急速に研究が広まり、非常に多数の論文や技術が発表された。特に、Dynamic Voltage Scaling をベースとする電源電圧制御技術や、今後深刻化すると予測されるリーク電流への対処を目的とした各種技術、省電力を意識した半導体設計技術の発展が目覚ましい。現在は研究フェーズがひと段落し、いかに研究成果を実現していくかという技術開発フェーズに以降しつつある。

米国は、回路技術からアーキテクチャ技術、設計技術に至るまで、世界をリードする存在である。また、センサネットワークに代表されるような、応用を強く意識した分野での技術水準が高い。また、産業界では米国企業が大きなシェアを持つ高性能汎用 CPU や FPGA といった再構成可能デバイスなどにも、多くの省電力技術が既に組み込まれている。

日本では、伝統的にデバイス・回路実装分野の研究・開発水準が非常に高く、多くの企業が省電力技術を応用した製品開発にも積極的である。また、携帯電話をはじめとした組み込み機器の省電力化に強みを持つ。

欧州では主に組み込みシステムに関連する研究者のネットワークを作る目的で HiPEAC (High-Performance Embedded Architecture and Compilation) という団体が 2004 年に設立され、現在も活発な活動が続いている。世界を代表する組み込みシステム向けチップを提供する ARM 社も省電力技術に対して積極的であり、組み込みシステム向けの省電力技術、特に設計技術における技術水準が高い。さらに、Nokia、Ericsson などの通信機器メーカーによる省電力技術の開発も目立っている。

2.3.3 比較表

◆ 1. 基礎理論

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	研究水準は高いが、研究の組織化や産業界への技術移転において課題が多い。
	技術開発水準	△	→	政策によってソフトウェアの信頼性向上への動機付けがなされることが望ましい。
	産業技術力	△	→	基礎理論の重要性認識や産業応用への取組みが期待される。
米国	研究水準	◎	→	出口を明確にした基礎研究が多い。
	技術開発水準	◎	→	基礎研究者の流動性が他国よりも高い。
	産業技術力	○	→	基礎研究者の流動性が他国よりも高い。
欧州	研究水準	◎	→	出口を明確とは限らないが研究者層が大変厚い。
	技術開発水準	○	→	アカデミーの層の厚さに支えられている。
	産業技術力	○	↗	基礎理論の産業応用への意識は高い。
中国	研究水準	△	↗	国内での研究水準はまだ高くないが、世代交代で伸びる可能性もある。台湾では形式的技法への意識の高まりが見られる。
	技術開発水準	△	↗	外資導入や人的交流の増加によって、国内技術水準が急速に伸びる可能性がある。
	産業技術力	×	↗	外資導入や人的交流の増加によって、国内技術水準が急速に伸びる可能性がある。
韓国	研究水準	△	↗	基礎理論の研究者層の増大はこれからである。
	技術開発水準	△	↗	国力増大に伴い、基礎理論の比重が次第に高まる可能性がある。
	産業技術力	×	↗	キャッチアップのための技術移転が進む可能性がある。
全体コメント：				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 2. 基盤ソフトウェア

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	さまざまな研究が活発になされているが、部分的な改良を目指すものがほとんどで、本質的な革新に至るような動きは見えない。
	技術開発水準	○	↘	組み込み用のシステムにおいては競争力のある技術を開発してきたが、その優位性は失われつつある。プログラミング言語では近年日本発の技術である ruby が利用を伸ばしてきている。
	産業技術力	△	↘	組み込み用基礎ソフトウェアでは ITRON など独自技術を有していたが、近年その技術優位性が薄れつつあり、欧米の技術への依存度が高まっている。
米国	研究水準	◎	→	主要な新技術の提案はほとんどすべてが米国発であるといつてよい。
	技術開発水準	◎	→	主要な技術開発は米国において行われる傾向に変化は見られない。
	産業技術力	◎	→	あらゆる基盤ソフトウェア分野において米国製の製品が市場を寡占している状態にあり、有力な対抗勢力も見当たらない。
欧州	研究水準	○	→	種々の新たな提案が見られ、研究は高い水準にある。
	技術開発水準	○	→	研究が実用的な技術に結実していない。
	産業技術力	△	↘	産業面では米国の技術への依存度が高まっている。
中国	研究水準	△	↗	研究は活性化してきているが、まだ国際水準には至っていない。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発力は発展途上である。
	産業技術力	×	↗	発展途上にあるが、産業技術として独立した力はまだ有していない。
韓国	研究水準	△	→	研究活動はある程度活発であるが、広い注目を集める成果は得られていない。
	技術開発水準	△	→	製品に直結する技術の開発力は一定の水準にあるが、国際水準には至っていない。
	産業技術力	△	→	基礎ソフトウェアについては欧米の技術への依存度が高い。
全体コメント： どの面においても米国がリーダーシップを取っており、わけても産業技術力においては他国を圧倒している。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 3. データベースとデータマイニング

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	Web 上のあらゆる情報を対象としたデータベースシステム技術、検索やデータマイニング技術では先端的である。一方、収集した実世界のデータベースの公開・再利用促進のための、信頼性やプライバシーを保護したデータベース利用技術で米国に劣る。データ処理基盤アーキテクチャの構築は漸進的。
	技術開発水準	○	→	ストレージシステムやグリッドなどの計算機アーキテクチャは先進的。Web 上のテキストマイニングの領域でも研究開発力にすぐれる。Google 的な新しいデータ処理プラットフォームにそれ程注力していない。
	産業技術力	○	→	データベースソフトウェアは依然として圧倒的に米国優位であるが、ストレージシステムは世界 2 位に付け (IT 製品では稀に見る強い国際競争力と言える)、大規模データシステムへのこれからの展開が期待される。全文書エンジンなどニッチな強みも見られるが、全体的にはインテグレーションを中心とした産業構造が形成されている。新しい 2.0 ビジネスへの対応が弱い。
米国	研究水準	◎	→	XML データベースやストリームデータ処理専用データベースシステム、トップ K、スカイラインなど、大学の研究は依然として力強い。大学への研究費が大きく縮小してきたため、システム作りは以前に比べると少なくなりつつある。著名研究者の企業研究所への移籍が目立つ。
	技術開発水準	◎	↗	Google や Yahoo の研究所を中心にした「あらゆるデータの収集と検索のためのデータベース的な機構の提供」の動きが加速。従来からの関係データベースや XML データベースも含めたキーワード検索機構やエンタープライズ規模の情報統合も盛ん。データ分析の信頼性保証技術も試行錯誤しつつ漸進。
	産業技術力	◎	↗	研究所で試行されているデータベース技術を使ったベータ版情報分析サービスを検索エンジンポータルを通して公開することにより、技術的なフィードバックが過去の常識よりもはるかに速くなっていることに注意すべき。新しいビジネスセグメントへの適応が極めて機動的になされている。
欧州	研究水準	◎	→	Framework Program を中心に強い分野も出てきている。XML データベースの標準化と併せて、プライバシー保護制約の下での情報統合や P 2 P、データマイニングも優れた試みが続いている。情報検索技術を包含したデータベースシステムの研究も盛ん。データベースクレンジングも盛ん。INRIA、マックスプランク研究所などで情報統合や情報保護下のデータベース構築技術が進む。
	技術開発水準	○	→	sap などの極めて限られた企業では先進的な研究が進められているものの、通信事業が強く、データベースそのものではなく、情報個人化などの技術がコンテンツ提供の観点で強い。
	産業技術力	△	→	sap 等の強力な企業があるものの、データベース本流技術は特段の強みが無い。情報検索との連動に関して F A S T を始めとする複数の企業が高い技術力を有する。加えて、仏や独でもクエリなど国家プロジェクトによりマルチメディア検索技術と産業化が強化されつつある。
中国	研究水準	○	↗	中国のみの著者執筆による論文がトップレベルの国際会議に採択され始めており、又、極めて現代的な研究開発環境の充実により急速に、研究水準が向上しつつある。データベース関係の中国国内の最大学会集会では 600 人以上が参加し、研究者層も厚い。また大学の教官に対し研究資金獲得に対する大きなインセンティブを付与するなど戦略的な研究促進策がなされている点も特筆に価する。
	技術開発水準	○	↗	現時点ではマイクロソフト・アジア研究所が圧倒的であり、Web データベースの研究や XML データベース技術が進む。米国大学や米国マイクロソフト研究所、Yahoo 研究所にも多くの人脈があり、米国の高い技術開発水準と連動して開発力を急速に向上させている。Baidu も高い技術開発力を有している。その他、極めて多数の企業が生まれつつあり、これから大きな勢力となると予想される。
	産業技術力	△	→	米国の西海岸的に、大学の研究者と企業との連携も進みつつあり、産業技術力の向上は今後著しく伸びることが予想される。
韓国	研究水準	○	→	主記憶データベース技術、データマイニング、プライバシー保護の制約下のデータベース利用技術、情報検索とデータベースの融合、フラッシュ記憶の活用など、大学技術の産業移転もなされ、一部に高い技術も存在する。
	技術開発水準	○	→	データベース技術に関して特段の産業は見受けられないが、韓国固有の検索エンジンが米国社に比べて圧倒的に強力であり、ブロードバンドの優位性を利用した多様なデータベース関連技術が生み出されつつある。
	産業技術力	○	→	狭義のデータベース技術ではなく、広義のシステム技術に関連して多様な産業がデータベース周辺の要素技術に関して技術力を有している。
全体コメント：情報爆発時代を迎え、大量情報の格納基盤とも言えるデータベースシステム技術、ならびに、膨大なデータからの有益情報のマイニング技術は益々重要となり、ストリーム管理、PUB・SUB、匿名マイニング、スカイライン検索、topK 検索、高次構造マイニング、IR・DB 融合、自律管理機構、電力指向最適化、ストレージ仮想化など、新しい研究課題が数多く生み出され、極めて躍動的な研究領域として発展しつつあることが予想される。その中で、米国ではやや大学への予算縮退が見られ、大規模システム開発は少なくなったものの依然として高い研究水準を保っている。google, yahoo, e-bay, amazon などインターネットメガサービス企業が好調であることを受け、学からの人材流動も多い。シンガポール、香港、中国、インドなどアジアが強力になりつつある。ヨーロッパは F P 下で多様な研究が進められつつあるが、通信系のインダストリーが強いこともあり、横ばいと言える。我国は、いくつかの研究領域で高い成果をあげつつあるものの、今後、とりわけ超大規模データに関するシステム技術開発の促進と研究環境の整備は極めて重要と言える。				

◆ 4. ソフトウェア開発技術 / ツール (要求分析)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	ゴール指向手法では一定の成果があるが、その他については遅れている。
	技術開発水準	△	↗	一般的に遅れていたが、活動的な技術者や研究者のリードにより急速に立ち上がりつつある。
	産業技術力	△	↗	一般的に遅れている。以前は文化的独自性により表面化しなかったが、国際競争の激化に伴い問題化しつつある。
米国	研究水準	◎	→	オブジェクト指向手法を中心に、欧州と共に世界をリード。なお、ゴール指向手法では、むしろカナダが先行している。
	技術開発水準	◎	→	ソフトウェア開発プロセス全体に関する標準技術開発に伴う、要求分析工程の標準化を特徴として、世界をリードしている。その一方で、アジャイル手法のような、コーディング作業に密着した技術でも先導している。
	産業技術力	◎	→	自国で開発した技術を迅速に現場に適用することにより、先導的な役割を維持している。
欧州	研究水準	◎	→	オブジェクト指向手法やシナリオ指向手法など、米国と共に世界をリード。特にゴール指向手法については先導し続けている。
	技術開発水準	◎	→	ゴール指向手法を中心に米国を追っている。
	産業技術力	○	→	米国と比較して全体的に遅れが目立つ。
中国	研究水準	△	↗	国内は遅れているが、欧米で活躍している研究者は輩出しつつあるので、将来大きく進展する可能性はある。
	技術開発水準	×	→	国内での開発はもとより、日本、米国、欧州の技術の導入も目立っており、進展が見られない状況である。
	産業技術力	×	→	上述のように、技術的基盤が未整備のため、進んでいない。
韓国	研究水準	△	↗	まだ遅れているが、プロダクトライン工学など、急速に進展している関連分野を持っているので、将来の発展が見込まれる。
	技術開発水準	×	↗	現在はまだ低いが、やはり関連技術の進歩に伴い、将来の発展が見込まれる。
	産業技術力	×	→	関連技術が開発現場に導入されれば進展の望みはあるが、現在はまだ遅れている。
全体コメント：要求仕様を抜け・漏れなく明確かつ詳細に記述する必要な欧米に比べて、明確な文書化を避ける文化的特徴のために、日本は遅れていたが、ソフトウェア開発のグローバル化に伴い、遅れを取り戻す努力が目立ってきている。一方、ソフトウェア開発プロセス全体に関する技術の多様化に伴い、要求分析技術も多様化し、各国・地域がそれぞれの特徴を活かして発展する可能性が高まっている。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 4. ソフトウェア開発技術 / ツール (形式手法)

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	代数的仕様記述の分野では世界をリード。理論的基礎の研究も強いが、ソフトウェア開発技術への発展は遅れている。
	技術開発水準	△	↗	組込みソフトウェアの分野を中心に、急速に進展しつつある。
	産業技術力	△	↗	欧米に比べて遅れていたが、モバイル FeliCa チップの開発や、CSK システムズ社の証券会社向けシステムの開発に、形式仕様記述言語 VDM が適用されるなど、急速に進展してきている。
米国	研究水準	◎	→	欧州と共に世界をリード。特に、モデル検査技術とプログラム検証技術は他国を引き離している。
	技術開発水準	◎	→	世界をリードしていると思われるが、国防産業が中心のため、詳細は不明な部分が多い。なおモデル検査技術に関しては、NASA の SPIN、Cadence 社の SMV、および Microsoft 社の SLAM など、多くのツールを輩出。
	産業技術力	○	→	モデル検査技術を中心に世界をリード。たとえば、NASA では各種制御プログラム、また Microsoft ではデバイスドライバに対し、モデル検査技術を適用し、多大な成果を挙げている。
欧州	研究水準	◎	→	米国と共に世界をリード。特に、形式仕様記述手法は他国を引き離している。
	技術開発水準	◎	→	形式仕様記述手法に関する商用ツールが充実するなど、この分野を中心に世界をリード。たとえば、B メソッドにおける英 B-Core 社の B-Toolkit や仏 ClearSy 社の Atelier B、および VDM におけるデンマーク IFAD 社の VDMTools など。
	産業技術力	○	→	公共システムの分野を中心に世界をリード。たとえば、鉄道システムへの形式仕様記述言語 Z や B メソッドの適用が報告されている。
中国	研究水準	△	↗	まだ遅れているが、基礎となる数学的理論の研究には伝統的な強みがあり、今後の進展が予想される。
	技術開発水準	×	→	研究水準と同様に、潜在能力はあると思われるが、まだ発揮されていない。
	産業技術力	×	→	目立った成果がなく、遅れている。
韓国	研究水準	△	↗	一部の大学や研究機関が研究グループを有しているが、特筆すべき成果はまだない。
	技術開発水準	×	→	政府による原子力プロジェクトへの適用事例などが報告されているが、全体的に大きな進展は見られない。
	産業技術力	×	→	目立った成果がなく、遅れている。

全体コメント：形式手法は、その基盤である数学的理論の応用に強みを持つ欧米が常に世界をリードしてきたが、産業応用の有効性に限界があると考えられたため、日本を含む他地域は遅れていた。しかし、近年組込みシステムや高信頼システムなど、形式手法が有望視される分野の広がりに伴い、それら他地域の追い上げが見られるようになってきた。特に日本と中国は、数学的理論そのものの研究にはそれぞれ強みがあり、今後の進展が予想される。

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 5. ビジネス応用とサービスサイエンス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	△	↗	現状では、学界におけるサービスサイエンスとしての研究は、米国・欧州のみならず、中国よりも遅れていると思われる。
	技術開発水準	○	→	ビジネス・プロセスが組織内部や個人の知恵・技能として継承されていることが多く、モジュール化・モデル化・標準化・文書化が不十分である。また、組織間でオープンに交流する慣習がない。
	産業技術力	○	↗	サービスサイエンスの精神を取り入れた企業や業界では、それぞれに業績や顧客満足度が向上すると期待できる。但し、国際展開は望めない。
米国	研究水準	◎	↗	政府（NSF）や企業が大学でのサービスサイエンスの研究・教育を積極的に支援しているし、専攻分野に関して柔軟な思考をもつ研究者が多い。研究集会には世界から研究者が集まる。
	技術開発水準	◎	↗	産学の連携で研究開発を推進する組織的活動がいくつもあるので、企業における技術水準も向上すると思われる。
	産業技術力	○	→	ITを利用したB to BやB to Cのサービスは向上するが、ヒトの対面サービスの向上は望めない。
欧州	研究水準	◎	↗	イギリス、ドイツ、北欧で研究活動が盛んである。ドイツでは、学問分野が確立していて、異なる学界間の交流があまりないようなので、サービスサイエンスに求められる学際的アプローチが難しい。
	技術開発水準	○	↗	EUや大手企業によるサービスプロセスの標準化が進むと思われる。特に、サービスのグローバルな展開に強みがある。
	産業技術力	○	↗	北欧諸国でのホテルや航空会社サービスは、ホスピタリティと企業業績が結び付いた好例になっている。効率はよくなくても、効果のあるサービスの展開が期待できる。欧州全体のサービスは、国により大差がある。
中国	研究水準	○	↗	清華大学、北京大学、ハルビン工科大学、中山大学等で研究が進んでいる。この分野の国際会議を自国で開催し、欧米での会議にも積極的に参加している。米国の研究者との連携が強い。
	技術開発水準	△	→	企業等における技術開発は、当分、工業製品の生産性向上に重点が置かれると思われる。
	産業技術力	△	→	一般社会におけるサービスの浸透は、急速には進まないと思われる。
韓国	研究水準	△	→	学界に目だった研究活動は見られない。
	技術開発水準	○	↗	サービス業界よりも、製造や情報通信分野の企業で、サービス業務の技術開発が進むと思われる。
	産業技術力	△	→	一般社会におけるサービスの浸透は、急速には進まないと思われる。
全体コメント：「サービス」においては、「生産現場」は顧客から離れた工場ではなく、生産者が消費者に接する場所・時間であるので、「産業技術力」は、社会によいサービスが普及する度合いとして評価した。欧米のサービスサイエンスは、統計処理やITを活用した顧客管理と労働生産性の向上に重点が置かれている。欧州は、サービスでも、ビジネスの国際展開や国際標準の制定に乗り出すと思われる。米国・中国・インド等では、サービスサイエンスの研究開発が盛んになっても、一般社会でのヒトの対面サービスの浸透は遅れるのではないか。				

（注1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 6.Web 情報システム

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	情報爆発、情報大航海といった国家プロジェクトを積極的に展開している。
	技術開発水準	○	→	モバイル環境における Web 情報サービスに関する優位性を保っている。
	産業技術力	○	↗	大規模全文検索エンジンの開発などでベンチャー育成に関する効果が出てきている。
米国	研究水準	◎	↗	大学、ベンチャー企業、大企業による層の厚い研究が展開されている。
	技術開発水準	◎	↗	検索エンジンにおける Google、Yahoo!、Microsoft が三つ巴の競争に象徴されるように、多くの組織が切磋琢磨しており、技術開発水準は高い。
	産業技術力	◎	↗	ベンチャー企業群による高い産業技術力がさらに強くなりつつある。
欧州	研究水準	○	→	研究への投資は少なかったが、EU プロジェクトである FP7(Framework Program 7) が 2007 年より開始され、その中に情報通信技術が入っていることはプラス材料である。
	技術開発水準	○	→	技術開発力はあるが、その強化が課題である。
	産業技術力	△	→	米国、日本と比較し、環境整備が現状では遅れている。
中国	研究水準	△	↗	大学を中心に研究が展開されており、水準は向上しつつある。
	技術開発水準	○	↗	米国追従の技術開発が主体であるが、検索サービス「百度」を保持する百度 (Baidu) が日本に進出するなど、その水準は高まりつつある。
	産業技術力	△	→	マーケットは巨大であり、技術力も高くなりつつあるが、登録制など産業発展の支援に必ずしも資さない現状もある。
韓国	研究水準	△	→	KAIST などを軸に研究が展開されている。
	技術開発水準	○	→	家庭へのブロードバンドインターネットの普及率が世界有数であり、Web サービス会社 Cyworld、最大手ポータルサイト運営会社 NAVER など技術開発水準の高い企業が存在している。
	産業技術力	○	→	産業技術力は十分にある。

全体コメント：Web 情報システムに関しては、研究水準、技術開発水準、産業技術力とも米国が世界をリードしており、各国がそれを追いかけているという状況が続いている。日本は、情報爆発、情報大航海といった国家プロジェクト、未踏ソフトウェアなどの産業育成が功を奏し始めており、今後の追い上げが期待できる。欧州、中国、韓国も米国キャッチアップの状態からの脱却を目指し、各種の施策を実施しつつある。

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 7. スーパーコンピュータ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	次世代スーパーコンピュータプロジェクトにより、著しい向上が見られ始めた。
	技術開発水準	○	↗	次世代スーパーコンピュータプロジェクトにより、著しい向上が見られ始めた。
	産業技術力	◎	→	既存のスーパーコンピュータを中心に安定した技術力を有している。
米国	研究水準	◎	→	ここ 10 年持続して高い研究水準を保っている。
	技術開発水準	◎	↗	日本の次世代スーパーコンピュータプロジェクトに対抗するために、資金が投入されている。DOE、DOD、NSF によるファンディングが 3 つの大きな柱となっている。
	産業技術力	◎	→	引き続き高い水準を保っている。2008 年には、IBM 社と CRAY 社がベタフロップスを達成する予定。
欧州	研究水準	○	↘	一時期ソフトウェアでリードしていたが、近年競争力が失われつつある。欧州の主なコンピューティングセンターがクラスター型に移行しつつある。
	技術開発水準	○△	→	コンピュータ本体の開発はもとより行われていなかったが、ソフトウェアについては分散的に行われている。
	産業技術力	○	→	欧州独自の技術は少ないが、産業に密着した技術力を使っている。
中国	研究水準	△	↗	国家としての重要項目となっているため、著しく研究が進展しつつある。
	技術開発水準	○	↗	中国国産のシステムが、ようやくスーパーコンピュータと呼べる段階に達した。今後さらに進展が見込まれる。日本にとっての最大の競争相手になりうる。従来米国で活躍していた技術者が、中国で独自のスーパーコンピュータを作り始めている。
	産業技術力	△	→	スーパーコンピュータの応用としては、いまだ科学技術にとどまり、産業界へ影響を及ぼすには至っていない。
韓国	研究水準	△×	↘	研究の中心がより生活に密着した情報技術に移っているために、スーパーコンピュータの研究は盛んではない。
	技術開発水準	×	→	半導体開発力はあるものの、スーパーコンピュータへの適用は見られない。
	産業技術力	△	→	スーパーコンピュータへの産業への適用はない。
全体コメント：一時低迷が見られた日本の開発力は、次世代スーパーコンピュータプロジェクトにより、復活しつつある。これを持続させるための施策が重要である。日本のスーパーコンピュータの開発コスト、システムコストが欧米に比べて高いことは、今後の普及に対して問題になるであろう。日本のスーパーコンピュータの開発は、半導体の開発と直結している観があり、半導体の開発の遅れが、スーパーコンピュータの開発に波及するおそれがある。日本の垂直統合型研究開発が裏目に出る可能性がある。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 8. 並列コンピューティング・クラスタコンピューティング

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	世界で広く使われている SCore 技術を中心に、ひきつづき高い研究水準にある。
	技術開発水準	◎	→	新しい局面として、大学と日本のメーカーが協力して並列技術を用いたスーパーコンピュータの実用化に注力している。筑波大、京都大学、東京大学の計算機センターがメーカーと共同で並列コンピューティングシステムの開発を進めており、広く産業界に使われるようになるであろう。
	産業技術力	◎	→	日本は高い設計技術を保有している。ただし、サーバーを作る技術が台湾に移行しており、製造技術が失われつつあることが、今後どのように影響するかは注意を要する。
米国	研究水準	◎	→	インターコネクトの高速化技術をもとにした、クラスタ技術が盛んになりつつある。
	技術開発水準	◎	→	インターコネクト技術やソフトウェアに関するベンチャーの動きが活発であり、それらが技術開発を牽引している。
	産業技術力	◎	→	すべての局面で、クラスタコンピュータが、主力で用いられている。
欧州	研究水準	○○	↘	一時盛んであった欧州主体の標準化が下火となり、米国の標準を用いて米国と共同研究するようになってきている。
	技術開発水準	○	→	ハードウェアを開発する力は失われていて、新たには出てきていない。アプリケーションソフトウェアには、いくつか見るべきものがある。
	産業技術力	△	→	ハードウェアの産業技術力は失われている。見るべきものはない。
中国	研究水準	○	↗	スーパーコンピュータを作るための並列技術が課題となっているために、研究者の数、論文数が増加している。SC、ICS等のトップレベルの学会では、まだ注目されていないが、今後注目されるだろう。
	技術開発水準	○	↗	中国独自の技術力を急速につけはじめている。特に、台湾と中国の垣根がなくなり、台湾のPCを作る技術が中国に導入され、近年技術力を持ち始めている。
	産業技術力	○	→	現在のところ、産業的なレベルではまだ高い水準にはなっていない。ただし、PCとサーバーで世界を制覇した台湾との技術者の交流により、着実に力をつけている。
韓国	研究水準	△	↘	研究の中心がより生活に密着した情報技術に移っているために、スーパーコンピュータの研究は盛んではない。
	技術開発水準	△	→	半導体開発力はあるものの、並列コンピュータ、インタコネクト、グリッド、並列オペレーティングシステム等の技術の開発は見られない。
	産業技術力	△	→	見るべきものはない。
全体コメント：クラスタシステムの重要要素であるサーバーは台湾、中国製が中心となっている。したがって、台湾、中国がソフトウェア技術力をつけた場合には、大きな脅威になりうる。ハードウェア技術者は米国から中国に戻りつつあるが、ソフトウェア技術者はまだそれほど戻っていない。日本の研究水準は世界のトップレベルにある。次世代（2010-2012）でどのように戦うかが重要。多くのシステムでは、Linuxを並列化して使っている。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 9. チップマルチプロセッサ

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	チップマルチプロセッサは、SMT (Simultaneous Multi Threading)、CMP (Chip Multi Processor) を含め、パイオニア的な研究開発が行われた。現在も引き続き活発に研究が行われている。
	技術開発水準	◎	→	自動車を含む組み込み応用として、技術開発が活発に行われている。
	産業技術力	○	→	製品開発に非常に力を入れてきて、技術力も高い水準にあるが、実際にチップを作ることができるが、ARMとIntelに大きな市場を支配されており、製品を売る新たな市場を見つけない限り、先細りになる可能性が大きい。
米国	研究水準	◎	↗	大学やIBM、Intel、SUNなどの主要研究所では、主要研究テーマとなっており、汎用、組み込み、すべてのプロセッサで研究が盛んに行われている。
	技術開発水準	◎	→	Intel、IBM、Sun、AMDなどの企業を代表として、技術開発水準は世界トップ。
	産業技術力	◎	→	マルチプロセッサのシェアはほぼ独占状態で高いシェアを誇っており、技術力も高い。
欧州	研究水準	○	↗	スペインにアーキテクチャ研究拠点が確立し、研究が活発に行われている。また、スウェーデンのウプサラ大学等でも、アーキテクチャの研究が盛んに行われている。研究水準は上昇中である。
	技術開発水準	○	→	特に組込システム向けのチップの技術水準が高い
	産業技術力	○	→	ARM社が牽引
中国	研究水準	○	↗	従来研究レベルは低かったが、一般的な学会での論文数は増えており、研究者層も厚くなりつつある。
	技術開発水準	△	→	中国独自のチップマルチプロセッサはいまだ作れない状況。ただし、半導体関連技術は上昇中
	産業技術力	△	→	中国独自のチップマルチプロセッサはいまだ作れない状況。
韓国	研究水準	△	→	チップマルチプロセッサ技術には注力していない。
	技術開発水準	△	→	半導体技術力はあるが、チップマルチプロセッサ開発への投資は行われていない。
	産業技術力	△	→	半導体技術力はあるが、チップマルチプロセッサ開発への投資は行われていない。
全体コメント：日本は、チップマルチプロセッサでは多くのパイオニア的な仕事があった。各社も優れた製品をマーケットに出しているが、小さい市場にしか進出できておらず、持続した研究開発が将来も続けられるかについて不安が残る。チップマルチプロセッサをISSCCで最初に発表したのは日本企業であったが、それを商業的な成功に結び付けられなかった。プロセッサを支援するソフトウェア技術（OS技術）の不足はひとつの要因であろう。日本でチップマルチプロセッサ技術をどのように育てていくについては、産業全体で検討することが急務である。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 10. リンコンフィギュラブル・システム

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	学会 (Field Programmable Technology, International Conference FPGA, IS FPGA) での研究発表が盛ん。
	技術開発水準	◎	↘	企業における研究開発プロジェクトの中止があいつぎ、チップ自身を自分たちで作らなくなっている。チップ製造はザイリンクス、アルテラの 2 社に集約している。
	産業技術力	○	↘	通信分野 (無線関係のリモート局等) で F P G A を適用する技術力は高い。
米国	研究水準	◎	→	計算、信号処理を中心に幅広い応用研究がなされている。
	技術開発水準	◎	→	新しい半導体テクノロジーにもとづく F P G A が続々と開発されている。
	産業技術力	◎	→	ザイリンクスとアルテラが、世界シェアの 9 割を占めている。S G I 及び C R A Y 社から、F P G A を組み込んだスーパーコンピュータが発売されている。また、多くの通信、信号処理についても、幅広く F P G A が使われている。
欧州	研究水準	◎	→	トップレベルの学会では、多くの研究発表が見られ、F P G A を使ったアルゴリズムの研究等が広く行われている。
	技術開発水準	○	↘	C A D 環境では、米国をキャッチアップできていない。産学連携で、H A N D E L C という言語を使った F P G A を設計するシステムは、ケンブリッジ大学で開発されている。
	産業技術力	○	↘	F P G A を作っていない。一部、設計技術では、みるべきものがある。フランスの P L D アプリケーションズ社の I P 技術は広く使われている。
中国	研究水準	○	↗	研究水準は低かったが、研究者は増えている。分野は応用に限られる。
	技術開発水準	△	→	F P G A 自身又はそのソフトウェアを開発する力はないが、その応用技術力についてはついてきている。
	産業技術力	△	→	産業技術としては成熟していない。
韓国	研究水準	○	→	見るべきものはない。
	技術開発水準	△	→	見るべきものはない。F P G A への投資は注力されていない。
	産業技術力	△	→	見るべきものはない。F P G A への投資は注力されていない。
全体コメント: 研究水準としては日本が高い分野なので、レベルを保つ施策が必要。I P 技術を育て、標準化することが課題である。欧米の技術などに依存することは、非常にもったいないことである。産業の中で、技術を育て、標準化を担う人材が不在なのが、心配である。信頼のある技術を購入してくればよいという開発体制になっている。従来、I P があれば S O C などはずぐにできると言われていたが、I P の品質が問題になって (正常に動作しない場合が多い)、限られたメーカーのみが生き残っている。				

(注 1) 現状について [◎: 非常に進んでいる、○: 進んでいる、△: 遅れている、×: 非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向]

◆ 11. ディペンダブル情報システム

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	伝統的にハードウェア・アーキテクチャの研究者が多く、ソフトウェア分野が少ない。
	技術開発水準	○	→	ディペンダビリティの価値が評価されないので、企業の技術開発の主流にはなれない。
	産業技術力	○	→	伝統的な信頼性向上技術、ゼロディフェクト運動など、ボトムアップアプローチが主流であり、トップダウンのシステムティックなアプローチがない。
米国	研究水準	◎	↗	イリノイ大学アーバナシャンペン校、カーネギーメロン大学など、いくつかの研究拠点で、国家安全保障の視点から重要インフラの防衛に関する研究が始まっている。
	技術開発水準	◎	↗	IBM の Autonomic Computing は一つの概念的な流れを作りつつある。
	産業技術力	○	→	宇宙開発、国家安全保障を旗印に開発された技術が産業技術力としての裾野へ広がりを見せている。
欧州	研究水準	◎	↗	フランスの LAAS はこれまでディペンダビリティの概念形成で世界をリードする拠点になっている。ディペンダビリティ評価技術、ベンチマーキング、重要インフラの依存性解析などでも世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	→	エアバス、高速鉄道、メルセデスなどの企業でも組み込みシステムのディペンダビリティの技術開発研究は活発であり、水準は高い。
	産業技術力	○	→	ディペンダビリティが必ずしも製品レベルの産業技術力として現れていない。
中国	研究水準	△	↗	論文投稿は急増しているが、従来技術の後追いあるいは他国のコピー的色彩がまだ強い。ネットワーク関連の論文が多い。
	技術開発水準	△	→	企業の技術開発力はまだよく見えない。
	産業技術力	△	→	不明
韓国	研究水準	△	→	ディペンダビリティの研究に目立った動きはまだない。
	技術開発水準	△	→	サムスンを中心に情報家電は強いが、ディペンダビリティの価値評価が確立していない現状では、特に目立った動きはない。
	産業技術力	△	→	不明
全体コメント：機能や性能とは異なり、情報システムのディペンダビリティは、適切な評価指標やそれに基づく経済価値を定める市場もない状況で、産業技術力の比較・評価は困難である。研究レベルでは、物理的なフォールトを対象とするフォールトトレランス技術とソフトウェアバグに対するフォールトアボイダンス技術は成熟しつつある。最近では、ディペンダビリティの評価、ベンチマーキング、ネットワークにおける侵入検知、システム回復技術、アドホックネットワーク／センサネットワークのディペンダビリティなどの研究が盛んである。設計ミス、操作ミスを含む人為フォールト、システム同士の相互作用フォールトに関する研究は、その必要性が指摘されながら、まだほとんど成果は挙がっていない。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ 12. 省電力情報処理技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	特にデバイス、回路技術分野の研究水準が高い。他の階層との統合的な研究が望まれており、近年ではそのような動きが出てきた。
	技術開発水準	○	→	デバイスや回路技術における企業の技術開発水準は高い。また、組み込みシステム用途分野にも、省電力技術に強みがある。
	産業技術力	◎	→	携帯電話をはじめとした、組み込み機器の省電力化に強みがあり、高い産業技術力がある。
米国	研究水準	◎	↘	デバイスからアーキテクチャ、設計記述に至るまで、省電力技術の研究が活発。特に、センサネットワーク分野での研究水準が高い。最近の研究動向としてはやや下火になりつつある。
	技術開発水準	◎	→	デバイスからアーキテクチャ、ソフトウェア分野に至るまで、技術開発水準は世界トップ。
	産業技術力	◎	→	ハイエンドからコンシューマまでの幅広い情報処理機器において高い産業技術力を持つ。
欧州	研究水準	○	→	回路技術や設計技術が強い。組み込みシステムに関する研究も活発。
	技術開発水準	○	↗	特に組み込みシステム向けに技術開発水準が比較的高く、近年ではその水準が高まりつつある。
	産業技術力	○	↗	携帯電話などのモバイル通信機器分野に強みがある。
中国	研究水準	△	→	特に目立った動きは見られない。
	技術開発水準	△	→	企業の技術開発力はまだよく見えない。
	産業技術力	△	→	インパクトのあるほどの企業は存在しない。
韓国	研究水準	○	→	論文の投稿数も比較的多い。
	技術開発水準	△	→	サムソンの技術開発水準は高いが、他にインパクトのある企業は存在しない。
	産業技術力	○	→	サムソンの産業技術力は比較的高い。
全体コメント：省電力情報処理技術は、2000 年前後より急速に研究が広まり、非常に多数の研究がなされた。現在は研究フェーズがひと段落し、いかに研究成果を実現していくかという技術開発フェーズに移行しつつある。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.4 情報セキュリティ分野

2.4.1 概観

情報セキュリティ技術分野の傾向は大きく、基盤技術、生体認証および人工物認証、アプリケーション、ソフトウェアシステム、ハードウェア、管理・運用・評価認証に分類して見ることができる。

基盤技術に関しては、その設計・評価に高度かつ広範囲の専門知識が必要とされるため単独の組織で独自に行うことは難しくなっており、近年では、学会や公的な評価プロジェクトなどによる強度評価結果を参考にするという手法が主流になりつつある。日本におけるこの分野は CRYPTREC などの評価プロジェクトが運営されていることや、家電、携帯、放送、小額電子決済、ETC (Electronic Toll Collection System) などの分野において国産技術が複数あることなどから高い。しかしながら、ハッシュ関数に衝突が見つかるなど、経年劣化に伴う安全性の見直しが求められていると共に、プライバシー保護、情報漏えい対策、長期の安全性などの視点に立った新たな基盤の整備が求められている。

生体認証に関しては、欧米および韓国において統一的な認証精度評価の枠組み構築に向けた取り組みが進んでいるが、評価手法に関する研究はあまり行われていない。人工物認証に関しては、特殊用紙等の開発において日欧米が高い技術力・競争力を有しているものの、生体認証ほど認証精度およびセキュリティの評価に関する統一的な基準作りは進展していない。

アプリケーションに関しては、匿名性や不正利用の防止・追跡技術等の理論研究が 80 年代から盛んに行われており、強い安全性を理論的に証明できる域に達している。しかしながら、現実のアプリケーションでは、手軽に利用できる SSL/TLS や IC カード等を用いて実現されている例がほとんどであり、高度な暗号技術が適用される例は極めて少なく、理論と実践の乖離が広がっていた。そのような中、両者を橋渡しすべく、高度な暗号技術を用いながらも実用を強く意識するといった、新しい技術開発の潮流が生じている。

ソフトウェアシステムに関しては、米欧において研究および産業化が盛んに行われている。特に安全性検証分野においては、研究レベルの技術が実産業界におけるソフトウェアの信頼性や安全性の保証に用いられるケースが報告されている。一方、日本においては、研究のレベルは一定水準に達していると考えられるが、セキュリティ分野のソフトウェア産業自体が立ち後れており、研究技術の産業化においても弱みがある。

ハードウェアに関しても、他の綱目と同じく学会や公的な評価プロジェクトなどによる強度評価結果を参考に評価基準を作成するという手法が主流に

なりつつある。日本においても JCMVP (Japan Cryptographic Module Validation Program) などの認証制度が導入されると共に、それを支える研究プロジェクトや委員会活動が存在し、日本の国際競争力は欧米と並んで高い。また、量子技術については、日本は基礎的研究開発に非常に高いレベルを維持しているが、より積極的に産業化を促進すべき時期にきている。

管理・運用・評価認証に関しては、近年、情報機器やネットワークが社会基盤として広く一般に浸透し、多くの非専門家がかかわりを持つようになってきたことから、その重要性が認識されるようになってきた。これらは主に、ISO の二つの国際規格、ISO15408 (機器等の情報セキュリティ認証規格) と ISO27001 (情報セキュリティ管理規格) を中心に経験の蓄積すなわちベストプラクティスの集積を柱として発展してきたが、近年は、経営学や経済学といった社会系諸科学の理論や手法を取り入れた学術的な研究も進みつつある。

2.4.2 中綱目ごとの比較

(1) 基盤技術

情報セキュリティ基盤技術とは、情報の安全性を高めるために必要となる基盤技術であり、暗号、認証、鍵共有、PKI (Public-Key Infrastructure)、暗号プロトコル、情報ハイディングなどの各要素技術、およびそれらの強度評価技術からなる。コスト、処理速度、使い勝手などの評価が比較的容易に行えるのに対して、安全性の評価はありとあらゆる攻撃を考慮に入れる必要があり、また、個々の攻撃に対する安全性評価についても非常に高度な知識が要求される。そのため、これら要素技術の設計・評価を、単独の組織で独自に行うことは難しくなっており、近年では、学会や公的な評価プロジェクトなどでの強度評価結果を参考にしながら方式の安全性を判断するという手法が主流になりつつある。また、産業的にも独自の要素技術を開発し販売するビジネスモデルから、安全性の評価された標準的な要素技術を採用しサービス面を強化する方向にシフトしつつある。そのため、公的かつ大規模な安全性評価プロジェクトの果たす役割は大きくなってきていると言える。

評価プロジェクトのうち有名なものとしては、AES (Advanced Encryption Standard) プロジェクト [1]、CRYPTREC (Cryptography Research and Evaluation Committees) プロジェクト [2]、NESSIE (New European Schemes for Signature, Integrity, and Encryption) プロジェクト [3] などがある。AES プロジェクトは DES (Data Encryption Standard) に代わる米国標準共通鍵暗号を決めるプロジェクトであり、1997 年 9 月に NIST (National Institute of Standards and Technology : 米国標準技術局) により開始された。このプロジェクトによ

り 2000 年 10 月に選定された共通鍵暗号方式は、2001 年 3 月に AES として FIPS PUB 197 に公表され、その後米国に留まらず世界中で利用され、現在欠かせない要素技術の一つとなっている。CRYPTREC は 2000 年から開始されたプロジェクトであり、総務省及び経済産業省が共同で開催する暗号技術検討委員会などにより運営されている。2003 年 2 月 20 日に日本の電子政府における調達のための推奨暗号リスト（電子政府推奨暗号リスト）を公表した。その後は、推奨暗号の安全性評価、監視や暗号モジュール評価基準等の策定などを行っており、情報セキュリティ基盤技術の安全性に関する重要な情報発信元となっている。NESSIE は European Union Sixth Framework Programme のプロジェクトの一つであり、ベルギーの Katholieke Universiteit Leuven を代表とする組織により運営された。2000 年 1 月より 2003 年 3 月までの間にアルゴリズムの公募、ワークショップ、評価などを行い、2004 年 4 月に公募されたアルゴリズムの評価結果をまとめた最終報告書を出している。

日、米、欧における情報セキュリティ基盤技術の評価能力は、これらのプロジェクトなどからもうかがえるように高い。ただし、大規模な評価が終了してから数年経過しており、経年劣化に伴う見直しが必要となってきた。実際、2004 年にはハッシュ関数 MD5 に衝突が報告され [4]、2005 年にはハッシュ関数 SHA-1 の衝突が理論上 2^{69} 乗回の繰り返しで見つかること [5] およびその計算量を 2^{63} まで削減できること [6] が報告されている。2007 年現在、実際に SHA-1 の衝突が見つかったという報告はないが、段数を 80 段から 70 段に削減した SHA-1 の衝突は実際に見つかっており [7]、また、大量の計算量を掛けて 80 段の SHA-1 の衝突を見つける試みもなされている [8]。これらを受けて米国の NIST では次世代のハッシュ関数を公募 [9] し、2012 年頃までにアルゴリズムの選定を行う予定である。ここで選定されたアルゴリズムが事実上次世代ハッシュ関数の世界標準になる可能性が高く、米国標準の強さを示している。

一方、形式手法を用いたプロトコルの安全性自動検証技術、情報漏えい対策技術、プライバシー保護技術、長期安全性を提供する技術、楕円曲線上のペアリング技術などより高度な機能の実現や、無線センサネットワークや RFID など制約のある環境向けの情報セキュリティ技術や強度評価手法に関する研究も進みつつある。また、産業界では、ID 連携など使いやすさを向上させるためのアライアンスが進みつつある。これらはいずれも、日、米、欧が強いが、前述のハッシュ関数の衝突が数年前に中国で発見されていた事実が示すように、今後、中国やインドなどで新たな発見が行われたり、中国やインド発の取り組みが出てきたりする可能性は高い。いずれにせよ、将来的にはこれらの新しい技術を取り込みながらより高度な基盤を構築することが重要になる。

〈参考文献〉

- [1] J. Nechvatal, et al. "Report on the Development of the Advanced Encryption Standard (AES)," <http://csrc.nist.gov/CryptoToolkit/aes/round2/r2report.pdf> 2000.10
- [2] CRYPTREC, <http://www.cryptrec.jp/>
- [3] NESSIE, <http://www.cryptonessie.org/>
- [4] X. Wang, X. Lai, (D. Feng and H. Yu), "Collisions for hash functions MD4, MD5, HAVAL-128 and RIPEMD," Crypto 2004 Rump Session, <http://eprint.iacr.org/2004/199.pdf> 2004.08
- [5] X. Wang, Y.L. Yin, and H. Yu, "Finding Collisions in the Full SHA-1," Advances in Cryptology (Crypto'05), <http://www.infosec.sdu.edu.cn/paper/sha1-crypto-auth-new-2-yao.pdf> 2005.08
- [6] X. Wang, A. Yao and F. Yao, "New Collision Search for SHA-1," Crypto 2005 Rump Session, 2005.08
- [7] C. Rechberger and C. De Cannière and F. Mendel. In Rump Session of Fast Software Encryption (FSE07), <http://fse2007.uni.lu/slides/rump/sha.pdf> 2007.03
- [8] SHA-1 Collision Search Graz, <http://boinc.iaik.tugraz.at/> 2007
- [9] NIST, "Announcing Request for Candidate Algorithm Nominations for a New Cryptographic Hash Algorithm (SHA-3) Family," Federal Register, Vol. 72, No. 212, http://www.csrc.nist.gov/groups/ST/hash/documents/FR_Notice_Nov07.pdf 2007.11

(2) 生体認証および人工物認証

日本では、身体内部の情報（血管パターン等）を用いた生体認証技術をはじめとする新技術の開発が日立・富士通・三菱を中心に活発に行われているほか、これらの技術の海外展開に向けた動きも活発化している。こうした動きを背景に、今後の技術開発水準と産業技術力が向上する見通しである。研究については、認証精度向上に関する研究は引き続き活発であるものの、セキュリティ評価手法や脆弱性対策技術に関する研究が低調であり、情報セキュリティの観点からの研究水準の引き上げが今後の課題である。ただし、テスト物体アプローチやウルフ攻撃アプローチといった新しい評価手法の研究が日本で開始されており、今後の動向が注目される。人工物認証の分野では、ホログラムや磁性繊維入り特殊用紙等について高い技術力を有しているものの、市場は国内が中心となっている。

米国は、産業技術力、技術開発力の点で世界のトップの座を占めている。実用性の高い生体認証技術に対する政府からの需要（主に国防用途）が引き続き強い。政府および民間企業の資金をベースとした産官学連携プロジェクト（Center for Identification Technology Research [1]）も整備され、研

究活動が本格化してきている。生体検知手法をはじめとする最先端の情報セキュリティ技術に関する研究も進められており、今後も研究水準が向上していくとみられる。人工物認証の分野でも、ロス・アラモス国立研究所 [2] をはじめとして活発な研究活動が行われている。技術開発水準および産業技術力は高く、今後も引き続き高水準が続くものと予想される。

欧州では、英国 (NPL: National Physical Laboratory [3])、イタリア (ボローニャ大学 [4] 等)、ドイツ (TeleTrust [5]) を中心に、精度評価技術 (NPL 作成の精度評価方法指針の開発等) やセキュリティ対策技術 (ボローニャ大学 Biometric System Laboratory による人工物検知技術の開発等) に関して研究水準が向上している。また、今後の生体認証装置への需要拡大に対応すべく、イタリアでは政府による生体認証装置の評価・認証の枠組みについて検討されているほか、ドイツ (TeleTrust) では生体認証装置の選択基準 Criteria Catalog の作成が行われている。こうした状況下、当該分野の技術開発競争の高まりを反映して、技術開発水準や産業技術力は引き続き高水準を維持する見通しである。人工物認証においては、特殊用紙や光学識別デバイス等を中心に高い産業技術力、技術開発力、研究水準を維持している。

中国では、研究水準、技術開発水準、産業技術力のいずれも低位に止まっている。ただし、中国科学院・自動化研究所をはじめとして生体認証に関する研究体制が整備されつつある [6] ほか、中国国内の生体認証市場の拡大も予想されることから、研究水準を中心に今後の向上が見込まれる。

韓国では、KISA (Korea Information Security Agency) を中心に産官学連携による生体認証の研究開発が推進されており (ヨンセイ大学の BERC: Biometrics Engineering Research Center 等)、今後の研究水準の向上が見込まれる。また、2006 年 6 月に生体認証装置の認証精度評価の実施等を担当する K-NBTC (Korea National Biometric Testing Center [7]) が KISA 傘下に設置されている。今後は、K-NBTC によって精度評価のお墨付きを有する生体認証装置が市場に投入されることとなり、そうした装置の競争力が向上するほか、より高い認証精度の装置開発の競争にも拍車がかかると考えられることから、産業技術力や技術開発水準の向上につながっていくとみられる。人工物認証については特に目立った動きはみられていない。

〈参考文献〉

- [1] <http://www.citer.wvu.edu/>
- [2] <http://www.lanl.gov/>
- [3] http://www.npl.co.uk/scientific_software/research/biometrics/
- [4] <http://biolab.csr.unibo.it/home.asp>
- [5] <http://www.teletrust.de/index.php?id=352>

- [6] <http://www.ipa.go.jp/security/fy16/reports/biometrics/documents/biometrics2004.pdf>
- [7] <http://www.knbtcr.or.kr/knbtcr.html>

(3) アプリケーション

主要なアプリケーションとしてコンテンツ保護、電子商取引、電子マネー、電子投票および電子政府の動向を紹介する。

コンテンツ保護技術は、電子透かし、結託耐性符号、アクセス制御、放送暗号、耐タンパー、難読化技術などの要素技術から構成される。産業的には、もともと自由度が高い PC- インターネット環境で、強固なコピー制限を目指した各種 DRM 技術が苦戦する中、コピー制限を緩和した Apple 社の FairPlay (iTunes 等) が成功を収めたことで、コンテンツ保護に対する産業の考え方が変化しつつある。他方、携帯電話やゲーム機などの組込み機器ではハードウェア的にコピー制限を行うことで成功を収めている [1]。今後の方向として、PC- インターネット環境から TPM (Trusted Platform Module) [2] 等の耐タンパー技術を利用した方式への移行が進み、利便性の高いコンテンツ保護が実現されると期待されている。

国際的には、PC- インターネット環境で米国がリードしているのに対して、携帯電話環境でのコンテンツ保護は日本や北欧、情報家電 / DVD 等のメディア機器で日本がリードしている [3]。基礎研究分野では日米欧の技術力に大差はない。

電子商取引については、その要素技術として電子オークション、匿名認証技術、公平交換 (Fair Exchange) 技術、ID 管理技術などに代表される種々の技術の開発が進んでいるが、実際に利用されている技術は依然として SSL / TLS が支配的である。また、インターネット標準技術においても米国がリードしている。また、インターネットの匿名性を利用した各種犯罪 (フィッシング詐欺、コンテンツ不正流通、スパムメールなど) が横行しており、今後はインターネットアーキテクチャをセキュリティの観点から見直すなどの抜本的な対策が求められる。

電子マネーの要素技術としては、ブラインド署名、耐タンパー技術などがある。インターネット専門銀行やポイント交換ネットワークなどのネットワーク型の決済技術と Felica 等の非接触 IC カードを用いたオフライン型がある。ネットワーク型ではオークションの仲介をするエスクローサービスや、ワンタイムパスワード・トークンを配布して本人認証精度を高めるなどの取り組みが行われている。オフライン型の Felica では、交通系のサービスが急速に拡大しているほか、携帯電話に搭載してネットワーク経由のサービスとオフライン決済を統合する動きが活発化している。国際的には、日本のオフライン決済サー

ビスが欧米を圧倒しており、また、ETC も普及している。今後は強みを生かしつつ安全性／匿名性を高めることが課題である。

電子投票方式としては、投票内容と投票者の結びつけを秘匿しつつ集計の公正性を公開検証可能な方式として MIX-NET 方式、準同型暗号方式、ブラインド署名方式などがある。しかしながら現状は、米国等において投票所における投票行為にタッチスクリーンやマークシートなどを用いることで、集計作業の省力化が実現された段階に留まっている。国際的には米国が実用化で先行しており、日本はようやく地方選挙などでタッチスクリーン方式等が試行されている段階にある。しかし、米国でも記入ミスやソフトウェアバグが集計結果に影響を与える問題が指摘されており [4]、誰もが使える方法で暗号技術を利用することにより匿名性と集計の公正性を検証可能な新たな方式が提案されつつある [5]。今後は、これらの性質を備えた技術を実際の投票へ適用し、より実際の観点から技術水準を高めていくことが求められる。

電子政府としては、暗号技術や電子署名技術等の CRYPTREC による安全性評価が挙げられる。しかしながら、実用的には電子商取引と同様に依然として SSL/TLS が支配的である。国際的には、産業として SSL/TLS などのインターネット標準技術で米国がリードしているが、安全性評価の観点から見ると、日本の CRYPTREC [6]、米国の NIST 標準 [7]、欧州の NESSIE プロジェクト（現 ECRYPT）[8] が 3 極を構成している。今後は、暗号モジュール、暗号プロトコル等に公的な安全性評価を拡大することに加えて、電子文書の長期保存に備えたロングタームセキュリティ技術の開発、電子商取引の節で述べた内容と同様に、インターネットアーキテクチャをセキュリティの観点から見直すなどの抜本的な対策が求められる。

〈参考文献〉

- [1] 経済産業省商務情報政策局文化情報関連産業課, “コンテンツ産業の現状と課題～コンテンツ産業の国際競争力強化に向けて～”, http://www.meti.go.jp/policy/media_contents/
- [2] Trusted Computing Group, TPM (Trusted Platform Module) Specification Version 1.2 Revision 94, <https://www.trustedcomputinggroup.org/groups/tpm/>
- [3] 特許庁, “平成 17 年度特許出願技術動向調査報告書「デジタル (DRM) 著作権管理」”, http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/17info_digital_right.pdf
- [4] Michael I. Shamos, “Paper v. Electronic Voting Records-An Assessment,” <http://euro.ecom.cmu.edu/people/faculty/mshamos/paper.htm>
- [5] International Association for Voting Systems Sciences, <http://www.iavoss.org/>
- [6] 総務省, 経済産業省, “CRYPTREC: Cryptography Research and Evaluation

Committees”, <http://www.cryptrec.jp/index.html>

[7] NIST, “Federal Information Processing Standard,” <http://www.itl.nist.gov/fipspubs/>

[8] European Commission IST-1999-12324, “NESSIE: New European Schemes for Signatures, Integrity, and Encryption,” <https://www.cosic.esat.kuleuven.ac.be/nessie/>

(4) ソフトウェアシステム

米国では、ソフトウェアセキュリティの研究開発は概して盛んで、研究から実用までの連携も取れている。安全性検証技術については、大学の研究者によって多くの基礎的な成果が産み出されてきていることに加え、例えばマイクロソフトにおいてソフトウェア検証技術を用いて Windows のデバイスドライバの検証 [1] が行われるなど、実用的な応用が行われている。また、産業面で見ても、多くのソフトウェアセキュリティに関連した製品は米国・欧州産のものが多く、十分な市場が形成されていると考えることができる。また、Trusted Computing に対する取り組みについても、実製品を多く保有している米国が優勢 [2] である。

欧州は、米国と並んで研究・応用共に盛んである。現在主流の論理検証ソフトウェアである Isabell [3] 及び Coq [4] は、どちらも欧州及び米国の研究機関 (Isabell: ミュンヘン工科大 & ケンブリッジ大、Coq: 仏 INRIA) によって開発され広く用いられている。また、論理的検証手段を用いてエアバス A340 型機の組み込みソフトウェアの無謬性が証明されたり [5]、スマートカードのソフトウェアの検証に論理的検証手段が応用されるなど、産業面での活用も進んでいる。

日本では、ソフトウェアセキュリティのトップレベルの研究者は世界に誇れる水準を確保していると考えられるが、その人的規模はあまり拡大しておらず、全体として不足している。そのため、産業界との連携も、欧米と比較すると一段弱い状態にある。また、産業面では上記で述べた通り、有力なセキュリティ製品のほとんどが欧米系企業から産み出されており (1 社が東京に本社を持つが、元は米国で創業された企業である)、国内ベンダの製品は世界的競争力を有しているとは言いがたい。

なお、運用面においては、ソフトウェア脆弱性の情報について、欧米では情報の管理を積極的に行う機関が現状存在していないため、ソフトウェア開発者と脆弱性発見者が直接情報を交換するか、または脆弱性情報が先に開示されてしまうかのいずれかであるが、日本においては、経済産業省主導の脆弱性届出制度が整備され、公的機関に脆弱性情報を寄託して開発者への連絡及び一般への情報の開示を任せることができる制度が運用されている [6]。

中国および韓国では、国際会議等での発表件数等から推測する限り、当該国内でのソフトウェアセキュリティ研究分野の研究は、少なくとも欧米に伍するレベルには達していないと考えられる。但し、近年米国系のソフトウェア開発企業が中国への研究所の展開を進めるなど、今後研究開発が活発化する要素もある。

〈参考文献〉

- [1] Introducing Static Driver Verifier: Compile-time verification for WDM kernel-mode drivers. <http://www.microsoft.com/whdc/devtools/tools/sdvintro.mspx>
- [2] Trusted Computing Group. <https://www.trustedcomputinggroup.org/>
- [3] Isabelle. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/hvg/Isabelle/>
- [4] The Coq Proof Assistant. <http://coq.inria.fr/>
- [5] DAEDALUS project. http://www.di.ens.fr/~cousot/projects/DAEDALUS/synthetic_summary/index.shtml
- [6] JP Vender Status Notes. <http://jvn.jp>
- [7] 「情報セキュリティ早期警戒パートナーシップ」の運用開始について. http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/press/0005399/0/040708jyoho.pdf

(5) ハードウェア

Pay-TV、電子決済システム、あるいはTPM (Trusted Platform Module) 技術 [1] など、耐タンパー技術に関して、それを仮定としたセキュリティ技術の重要性は、ますます高まっている。しかしながら、耐タンパー性そのものに関する研究は、従来、系統的に行われてきたとは言い難い状況であり、暗号アルゴリズムをハードウェア、ソフトウェア、あるいはそのハイブリッド形式で実装したいわゆる暗号モジュールの安全性や信頼性について、その評価基準の作成が急務の課題となっている。各国では独自の政府調達基準、あるいはそれに準ずる制度の策定が進められ、日本におけるJCMVPの開始 [2]、あるいは米国におけるCMVP (Cryptographic Module Validation Program) [3] やそれらが基礎としているFIPS PUB 140-2のISO/IEC化など、産官学各分野を巻き込んだ活発な動きを見て取ることができる。特に、07年7月上旬に公開されたFIPS 140-3 (ガイドライン) のドラフトでは、サイドチャネル攻撃が具体的に取り上げられており、今後、試験要件 (Derived Test Requirements) の策定に向け、この分野の研究成果の集約が求められている状況にある。一方、近年になって、欧米では、Cambridge、Computer LaboratoryのMarkus Kuhn [4]、あるいは、MIT Computer Science and Artificial Intelligence LaboratoryのSilvio Micaliら [5] によって、暗号学的基盤のしっかりした耐タンパー技術の概念整備も行われつ

つある。日本においても、理論的研究の充実と、さらにそれらを基礎として上記制度等への具体的貢献を目指したバランスのよい発展が期待され、いくつかの委員会活動や研究プロジェクトなどが行われている [6,7]。この分野のトップレベルの国際会議である International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES) の参加者数は著しく増加しており、情報セキュリティとハードウェア実装技術の関連性に対する認識は世界的に広まっていると考えてよい。また特に TPM については、関連するサマースクールがヨーロッパ（英、独）に続き中国において開催されるなど、積極的な利用に向けた動きが見られる。また従来、検討がやや遅れているハードウェアとしての安全性の部分についても議論が始まっている。

量子暗号技術の研究開発は、その基本的成果が徐々に開花しつつあり、商品化を含めた競争的研究開発が加速している状況にある [9,10,11]。量子光学技術の著しい発展を背景とし、ある種の量子鍵配送プロトコル (BB84) が、実験室レベルを超え実用化されるまでに至った。またこのようなシステムについては、すでに商品化され販売が行われているだけでなく、それらを対象とした輸出入規制に関する国際的な議論が、既にワッセナーアレンジメントなどの枠組みにおいて行われている。現在のところ、さまざまな技術的制約により、理論的に「無条件」安全性を達成することができる物理的状況は、通信距離 40 km 程度（速度は 1 Mbps 程度）とされているが、これらの数字は、理論的に最も強い攻撃者を想定したものであり、実際には、攻撃者にも技術的制約が存在することを考えると、より高い性能と安定性を持って安全な鍵配布を達成していることが期待できる。暫定的には無条件安全性を達成しないまでも、現在調達可能な量子暗号技術を有効に活かすことにより高度な安全性を提供しつつ、今後達成されるであろう技術革新に応じてシステム全体のアップグレードを行うことにより、無条件安全性を満たす情報セキュリティ基盤への段階的な移行を穏やかに促進することができる有望な技術として位置づけることができる。このようなアイデアで暫定的に達成された状況について、暗号学的位置付けを行うことは、正しい安全性の根拠を与えるために必要不可欠なプロセスであり、そのような観点からの研究が特に望まれる。また、現在、我が国が国際的に見ても高いレベルを維持している基礎的分野についても、引き続き発展させることが、将来的な競争力の強化にもつながるであろう。

注目すべき動向としては、国際会議 UQC2007[12] など、実用上の量子暗号装置の安全性を考える上でのコンセンサス作りに向けた議論が挙げられるであろう。また、今年度は、欧州における SECOQC (FP 6) の最終年度にあたり、次期研究計画の方向性について注目が集まっている。

〈参考文献〉

- [1] Trusted Computing Group <https://www.trustedcomputinggroup.org/home>
- [2] IPA 独立行政法人 情報処理機構「暗号モジュール試験及び認証制度」試行運用開始のお知らせ <http://www.ipa.go.jp/about/press/20060418.html>
- [3] Cryptographic Module Validation Program, <http://csrc.nist.gov/cryptval/>
- [4] Computer Laboratory, University of Cambridge, <http://www.cl.cam.ac.uk/>
- [5] MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory
<http://www.csail.mit.edu/index.php>
- [6] CRYPTREC, および, 暗号モジュール委員会 <http://www.cryptrec.jp/system.html>
- [7] 文部科学省 科学技術振興調整費 重要課題「組込みシステム向け情報セキュリティ技術」 http://www.mext.go.jp/b_menu/////houdou/18/05/06051814/001/014.pdf
- [8] Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES)
<http://www.chesworkshop.org/>
- [9] MagiQ Technologies, <http://www.magiqtech.com/>
- [10] ID QUANTIQUE, <http://www.idquantique.com/>
- [11] SmartQuantum, <http://www.smartquantum.com/smartquantumcontent.html>
- [12] Updating Quantum Cryptography, UQC 2007,
<http://www.the-convention.co.jp/uqc2007/index.html>

(6) 管理・運用・評価認証

情報セキュリティの管理・運用・評価認証といった技術の重要性が社会に認められてきたのは最近のことである。当初は軍などの特殊な分野での機器の調達や管理・運用のための技術として開発されたが、コンピュータやネットワークなどの IT 技術が社会に浸透し社会の基盤となるにつれて、非専門家である一般の人たちにおいても IT 技術を信頼し安全に使用する必要性が生じてきた。このためシステムやネットワークといった情報機器技術としてのセキュリティ技術だけでなく、使用・管理・運用する人間や組織さらには社会といった側面も含めた総合的な対策が強く望まれるようになった。また、情報システムおよび情報セキュリティへの投資が増えるにつれて投資対効果が重要視されつつある。特に情報セキュリティへの投資は直接的な利益は生まないコスト要因と考えられているため、コストを抑えるために不十分な対策しかとらず大きな損害を発生させてしまう場合もある。逆に恐怖心より過剰であったり不要であったりする情報セキュリティ投資を行い十分な効果が得られていない場合もある。そこで管理運用も含めて情報セキュリティへの投資をどこにどのように行うべ

きかを評価する技術にも注目が集まっている。

評価認証制度は、ISO の二つの国際規格、ISO15408 と ISO27001 を中心として発展してきている。ISO15408 は情報セキュリティ機器の評価の国際規格であり、その起源は 1983 年に米国国防省が作成した TCSEC および 1991 年に欧州委員会が策定した ITSEC にまでさかのぼることができる。TCSEC の開発に際してセキュリティポリシーモデルの開発は 1970 年ごろより進められており、また、ITSEC は製品のみでなく情報システム全体を評価の対象に含めている。その後、各国の規格を統一した Common Criteria が 1996 年に作られ、一部機能の追加を行い 1999 年に ISO15408 として ISO の国際基準となっている。この国際規格の評価・認証の相互承認を行う協定 CCRA (Common Criteria Recognition Arrangement) が 1998 年に結ばれており、米国、カナダおよびイギリス、フランス、ドイツ、オランダのヨーロッパ諸国が当初からの参加国となっている。なお、日本は 2003 年に認証国として参加し、韓国も 2006 年に認証国として参加している。

ISO27001 は情報セキュリティ管理の国際規格である。原型は BSI (英国規格協会) で 1995 年に作成された BS7799 である。BS7799 は英国政府と産業界が協力して情報セキュリティ管理のベストプラクティスをまとめ規格化したものである。日本においては 2002 年に「ISMS 適合性評価制度」として ISO27001 に沿った情報セキュリティ管理評価制度として JIPDEC が行っている。

米国では、NIST (米国国立標準研究所) [1] が SP800 シリーズと呼ばれるコンピュータセキュリティ関係の文書を出している。この文書にはセキュリティマネジメントやリスクマネジメント、インシデント対応といったセキュリティ管理・運用に関する項目も含まれている。さらに、組織の IT ガバナンスの指針として米国の ISACA (情報システムコントロール協会) が開発した COBIT[3] がある。これは、34 の IT プロセス、5 つの IT 資源、7 つの IT 基準からなるフレームワークであり 1996 年に第 1 版が発行され、2005 年に COBIT 4.0 が発行されている。主に、IT 投資の評価やリスクコントロール、システム監査の基準などに使われている。

米国の大学などの活動の例としては、CMU の Network Systems Survivability Program[2] がある。これは同大学に設置されている CERT/CC (コンピュータ緊急対応センター) での経験を基にしてネットワーク化されたシステムに攻撃からの耐性を持たせ被害を抑え重要なサービスを継続させるためのシステム技術や管理技術を開発するものである。このプログラムの中から OCTAVE (Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation) [4] といった評価システムも開発されている。

研究開発の動向としては、「経済と情報セキュリティ」の研究がアメリカや

ヨーロッパを中心として盛んになってきている。これは経済モデルを利用して、情報セキュリティへの投資行動や損害分析、保険、情報セキュリティ投資評価、攻撃者の行動分析など、情報セキュリティの社会的側面の研究を行っている。この分野を扱う国際会議としては、例えば WEIS (Workshop on the Economics of Information Security) [5] があり、2002 年より毎年開催されている。

以上のように、情報セキュリティの管理・運用・評価認証において、米国およびヨーロッパが歴史を持つとともに現在の研究開発や標準化の推進に当たって主導的な立場にある。産業技術力、技術開発水準、研究水準ともに高い水準にあり、今後ともこの傾向は続くと考えられる。日本においては近年、産業界等においても情報セキュリティ管理への関心が高まっており、標準化等について積極的な取り組みも見られるようになった。しかし欧米に比して学問・研究としての取り組みはまだ多くはなく、これらの面での充実が望まれる。

〈参考文献〉

- [1] NIST Computer Security Special Publications, <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/>
- [2] Networked Systems Survivability, <http://www.sei.cmu.edu/programs/nss/>
- [3] COBIT, <http://www.isaca.org/Template.cfm?Section=COBIT6&Template=/TaggedPage/TaggedPageDisplay.cfm&TPLID=55&ContentID=7981>
- [4] OCTAVE, <http://www.cert.org/octave/>
- [5] The Sixth Workshop on the Economics of Information Security (WEIS 2007) , <http://weis2007.econinfosec.org/>

2.4.3 比較表

◆基盤技術（暗号、認証、鍵共有、PKI、暗号プロトコル、情報ハイディング、要素技術に対する強度評価）

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	強度評価能力高い（CRYPTREC など）。ただし、経年劣化に伴う安全性の見直しが求められていると共に、プライバシー保護、情報漏えい対策などの新たな視点に立った技術開発が求められている。
	技術開発水準	◎	→	家電、携帯向けの開発力高い。
	産業技術力	◎	→	家電、携帯、放送、小額電子決済、E T Cなどにおいて国産技術複数あり。
米国	研究水準	◎	→	研究開発能力は高い。
	技術開発水準	◎	→	インターネット、P C、O S、ソフトウェア向けの開発能力高い。
	産業技術力	◎	→	標準化の主導的立場（AES プロジェクトなど）。
欧州	研究水準	◎	→	強度評価能力高い（NESSIE プロジェクトなど）。
	技術開発水準	○	→	スマートカード、携帯向けの開発力高い。
	産業技術力	○	→	スマートカード、携帯向けの技術力高い。
中国	研究水準	○	↗	論文投稿数急増。
	技術開発水準	△	↗	国内技術を保護しており今後の発展が見込まれる。
	産業技術力	△	↗	国内技術を保護しており今後の発展が見込まれる。
韓国	研究水準	○	↗	国際会議の論文数では日本を抜く。
	技術開発水準	○	→	家電向けの開発力高い。
	産業技術力	○	→	家電向けの産業技術力は高い。
全体コメント：基盤技術の設計および評価は学会や評価プロジェクトなどが重要な役割を果たしつつある。ハッシュ関数に衝突が見つかるなど、経年劣化に伴う安全性の見直しが求められていると共に、プライバシー保護、情報漏えい対策、長期の安全性などの視点に立った新たな基盤の整備が求められている。				

（註 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（註 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆生体認証および人工物認証（生体認証・検知、人工物認証、耐クローン性）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	セキュリティ評価手法の研究が総じて低調であるものの、新しい評価方法（ウルフ攻撃アプローチ）の提案がみられ、今後の検討が注目される。
	技術開発水準	○	↗	
	産業技術力	○	↗	金融分野を中心として生体認証製品の実用化に拍車がかかっている。
米国	研究水準	○	↗	産官学連携による研究体制の整備の進展（CiTeR ほか）。生体検知手法の研究も活発化。人工物認証の分野では、ロス・アラモス国立研究所をはじめとして活発な研究活動が行われている。
	技術開発水準	◎	→	
	産業技術力	◎	→	生体認証については、国防向けに加え、民生向けへの実用化に向けた動きが活発化している。人工物認証については特殊用紙等の産業技術力が高い。
欧州	研究水準	○	↗	英国（National Physical Laboratory）、イタリア（ボローニャ大学）、ドイツ（TeleTrust）では生体認証に関する研究が進められている。
	技術開発水準	◎	→	
	産業技術力	◎	→	人工物認証（特殊用紙の製造等）の分野で高い産業技術力を保持。
中国	研究水準	△	↗	中国科学院をはじめとして生体認証の研究体制が整備されてきている。
	技術開発水準	△	↗	今後の動向に注目。
	産業技術力	△	↗	今後の動向に注目。
韓国	研究水準	○	↗	ヨンセイ大学 BERC が立ち上げられ、産官学連携による研究体制の整備が進展している。生体検知の技術についても検討が進められている。
	技術開発水準	○	↗	K-NBTC による生体認証装置の認証精度評価等に向けた動きが活発化している。
	産業技術力	○	↗	K-NBTC による生体認証装置の認証精度評価等に向けた動きが活発化している。
全体コメント：生体認証においては、欧米および韓国において統一的な認証精度評価の枠組み構築に向けた取り組みが進んでいる。セキュリティ評価については研究が遅れている。人工物認証については、特殊用紙等の開発において日欧米が高い技術力・競争力を有している。ただし、生体認証ほど、認証精度およびセキュリティの評価に関する統一的な基準作りが進展していない。				

（注 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆アプリケーション（コンテンツ保護、電子商取引、電子マネー、電子投票、電子政府）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	理論的な分野での研究が強い。
	技術開発水準	○	↗	家電・携帯向け DRM および小額電子決済の開発力が高い。PC ベース電子商取引・電子政府の主なセキュリティ技術は米国製に依存している。電子投票は米国の主流の方式が試行されている段階である。
	産業技術力	○	↗	家電・携帯向け DRM および小額電子決済の技術力高い。ETC の普及率高い。
米国	研究水準	◎	→	外国からの研究者の流入も多く、理論から応用まで幅広い範囲で研究が活発。
	技術開発水準	◎	→	電子投票の公正性と匿名性の確保に向けた取り組みが開始されている。
	産業技術力	◎	→	コンテンツ保護に関しては利用制限の少ない保護方式が市場を確立している。電子投票の実績多数。公正性と匿名性の確保は今後の課題。
欧州	研究水準	◎	→	理論的な分野での研究が強い。
	技術開発水準	○	→	電子商取引・電子政府の主なセキュリティ技術は米国製に依存している。
	産業技術力	○	→	北欧の携帯向け DRM の技術力高い。
中国	研究水準	△	↗	論文投稿数急増。
	技術開発水準	△	↗	今後の発展が見込まれる。
	産業技術力	△	↗	今後の発展が見込まれる。
韓国	研究水準	○	→	論文数急増。
	技術開発水準	○	→	今後の発展が見込まれる。
	産業技術力	○	↗	家電・携帯向け DRM および小額電子決済の技術力高い。
全体コメント：PC ベースのアプリケーション関連情報セキュリティ技術は総じて米国に遅れを取っている。家電・携帯ベースの組込システムの情報セキュリティ技術、小額電子決済、DRM については、日本が優位にある。強みを生かした範囲の拡大が今後の課題。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ソフトウェア・システム（安全性検証技術、不正侵入対策、アクセス制御、Trusted Computing）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	研究レベルでは一定水準を確保しているが、人的規模はあまり拡大していない。
	技術開発水準	△	→	
	産業技術力	△	↘	近年、有力なソフトウェアセキュリティ分野の製品があまり提供されていない。海外製品の輸入に押されている。
米国	研究水準	◎	→	多数の有用な技術が開発され、ソフトウェアとして公開されている。
	技術開発水準	◎	→	
	産業技術力	◎	→	航空機等の搭載ソフトウェアの論理検証など、ソフトウェアセキュリティに関連した技術が広く産業に生かされている。
欧州	研究水準	◎	→	多数の有用な技術が開発され、ソフトウェアとして公開されている。
	技術開発水準	◎	→	
	産業技術力	◎	→	航空機等の搭載ソフトウェアの論理検証など、ソフトウェアセキュリティに関連した技術が広く産業に生かされている。
中国	研究水準	△	↗	国際会議等への採録件数は低調。
	技術開発水準	△	↗	有力な米国企業の研究所が北京等に設立され、研究開発拠点が形成されている。
	産業技術力	△	↗	今後の動向に注目。
韓国	研究水準	△	→	国際会議等への採録件数は低調。
	技術開発水準	△	→	
	産業技術力	△	→	
全体コメント：ソフトウェアセキュリティ分野の製品は海外製品の輸入に押されぎみ。				

（注 1） 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

（注 2） 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ハードウェア（耐タンパー技術、TPM、スマートカード、量子技術）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	耐タンパー技術研究などに意識が高まりつつあるが人的規模がやや小さい。
	技術開発水準	○	↗	量子技術に関しては、世界に伍する水準を保っている。一方、全体として、技術開発のための大規模な取り組みが少なく、個々の能力に頼っている現状。
	産業技術力	○	↗	ハードウェアそのものの産業技術力に比べ、情報セキュリティを提供するハードウェア技術としての産業力は低い。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究において質・量ともに充実。
	技術開発水準	◎	→	耐タンパー性評価技術のほか、量子技術に関しても研究機関、ベンダー混在型の技術開発体制が既に整っている。
	産業技術力	◎	→	一定の成果が見込めた技術に関しては、有力企業や新興ベンダーによる産業化が盛ん。
欧州	研究水準	◎	→	EUを基盤としたプロジェクトなどにより推進。
	技術開発水準	◎	→	実装評価技術に関して仏独澳などを中心に高い技術力をもっている。また量子技術など新しい技術に対しても大規模なプロジェクトによる技術開発が行われている。
	産業技術力	◎	→	高い技術開発水準を背景とした評価ビジネスなどが国際的地位を保持。量子技術についても、プロジェクトからのスピノフ等により健全な産業化が促進されている。
中国	研究水準	○	↗	海外からの帰国者らを中心に基礎研究が充実しつつある。
	技術開発水準	○	↗	有力な米国企業の研究所が北京等に設立され、研究開発拠点が形成されている。
	産業技術力	○	↗	今後の発展が見込まれる。
韓国	研究水準	○	↗	国際会議等における存在感は増加しつつある。
	技術開発水準	○	↗	情報収集を背景とした今後の発展が見込まれる。
	産業技術力	○	↗	今後の発展が見込まれる。
全体コメント：研究室レベルから産業化への流れが欧米に比べて日本はやや弱い。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆管理・運用・評価認証（情報セキュリティマネジメント技術、フォレンジクス、ネットワーク監視・管理技術、セキュリティ評価基準、セキュリティポリシー、法律、保険、セキュリティ教育、情報倫理）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	幾つかのプロジェクトが存在。
	技術開発水準	○	↗	日本の実情に合わせた独自の評価制度・能力の確立が必要。
	産業技術力	◎	↗	ISMS、プライバシーマークの普及率高い。JVN 等の脆弱性届出制度が整備されており、統一的な取り扱いが可能になっている。CC Certificate authorising participants。J-CMVP の立ち上げ。
米国	研究水準	◎	↗	軍の調達に端を発した製品評価等の研究が盛んに行われており、また、経営学、会計監査等の関連から情報システムに係わるマネジメントの研究も盛んに行われている。
	技術開発水準	◎	→	軍の調達に端を発した製品評価等の技術開発は盛んに行われている。
	産業技術力	◎	→	標準化の主導的立場。証明書認証機関等、セキュリティの実現に必要なサービス分野も充実している。CC Certificate authorising participants。Cryptographic Module Validation Program (CMVP)。
欧州	研究水準	◎	↗	イギリスにおいてはマネジメントや経済性等の研究が盛んに行われている。
	技術開発水準	◎	→	ISO15408 はヨーロッパの ITSEC が基になっており、世界を先導して管理基準や製品評価基準を開発するほどの技術水準がある。
	産業技術力	◎	→	情報セキュリティ管理実施基準 BS7799（イギリス）の発祥地。CC Certificate authorising participants（フランス、ドイツ、イギリスなど）。
中国	研究水準	△	↗	今後の動向に注目。
	技術開発水準	△	↗	今後の動向に注目。
	産業技術力	△	↗	今後の動向に注目。
韓国	研究水準	△	↗	今後の動向に注目。
	技術開発水準	○	↗	今後の動向に注目。
	産業技術力	○	↗	2006 年 C C R A に加盟。
全体コメント：管理・運用ノウハウの蓄積および規格化は進みつつある。一方、評価・認証・認定を受ける際に提供した資料から（権利化し難い）ノウハウが流出することを懸念する声もある。				

- (注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
- (注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.5 ネットワーク分野

2.5.1 概観

ネットワーク分野の国際技術力比較をするにあたって、当該分野を9つの中網目に分類した。すなわち、(1) ネットワークが提供する環境、(2) ネットワーク応用（サービス技術）、(3) アーキテクチャ、(4) ネットワークシステム、(5) ネットワーク制御・管理・運用、(6) 情報通信端末技術、(7) ヒューマンインタラクション、(8) 要素技術、(9) 基礎理論、である。

詳細は「中網目ごとの比較」で述べるが、研究水準、技術水準、産業技術力、いずれにおいても、全体的に米国の技術力が世界をリードしている。インターネットとコンピュータ応用で世界をリードしている米国が、検索サービス等のネットワーク応用においても優位な立場を築いているのは、当然の成り行きとも言える。アーキテクチャ関連では、NSF が推進する FIND (Future Internet Design) や GENI (Global Environment for Networking Innovations) といった先導的な研究推進活動に注目する必要がある。

ネットワークシステムにおいても、ルータやスイッチなどのシステム分野を北米企業が席巻しており、強いビジネス基盤を築いている。ただし、光通信システム分野では、特に超高速技術に関して日本は 40 Gbps 光伝送システムを実用化するなど、世界を先導している。

一方で、日本は携帯端末によるインターネット利用環境、ブロードバンドアクセスともに世界で最も普及している点で、ネットワークが提供する環境では最も進んでいる。韓国においては、政府主導でワイヤレス環境の整備が意欲的に進められており、ワイヤレスブロードバンド環境では、世界で最も進んでいる。

要素技術の中では、画像圧縮技術に関連して複数台のカメラで同時に撮影された多視点映像を扱う技術が進展している。MPEG における自由視点テレビの標準化作業では日本が先導性を発揮している。また、IP-TV の具体化に向けて、アプリケーションごとに品質の異なる種々の技術や著作権管理などの要素の最適な組合せ可能とする枠組みなど、マルチメディア応用の技術が急速に発展しており、これらの標準化では日本のみならず韓国、中国を含めたアジア勢が意欲的に活動している。

2.5.2 中綱目ごとの比較

(1) ネットワークが提供する環境

日本においては、携帯電話が1995年頃の極めて低い普及率の状態からこの10年ほどでほとんど全ての個人に普及して2007年9月には1億429万端末に達している。同様にインターネットのユーザ数もこの10年ほどで急成長し、2007年11月の推定値は約8,750万となっている。因みに、全世界の携帯電話加入者数（2006年末、推定値）は約26億であり、北米；2.5億、欧州；4億、アジア；10億、という内訳である。また、インターネットユーザ数（2007年11月、推定値）は全世界で約12.6億ほどであり、北米；2.4億、欧州；3.4億、アジア；4.6億、という内訳である。

日本におけるインターネットの特徴は、移動通信によるインターネット利用環境が世界で最も進んでいることと、ブロードバンドアクセスの普及率が高く特にFTTH（Fiber To The Home）の普及が世界で最も進んでいることである。日本のブロードバンドアクセスの普及状況を図1に示すが、2007年末のFTTH加入の推定値は1,130万に達している。移動通信においても、3.5世代と言われる数Mbpsのブロードバンドアクセス環境が整いつつある。これらのブロードバンドサービスを支える光通信によるコアネットワークの充足度は高い。

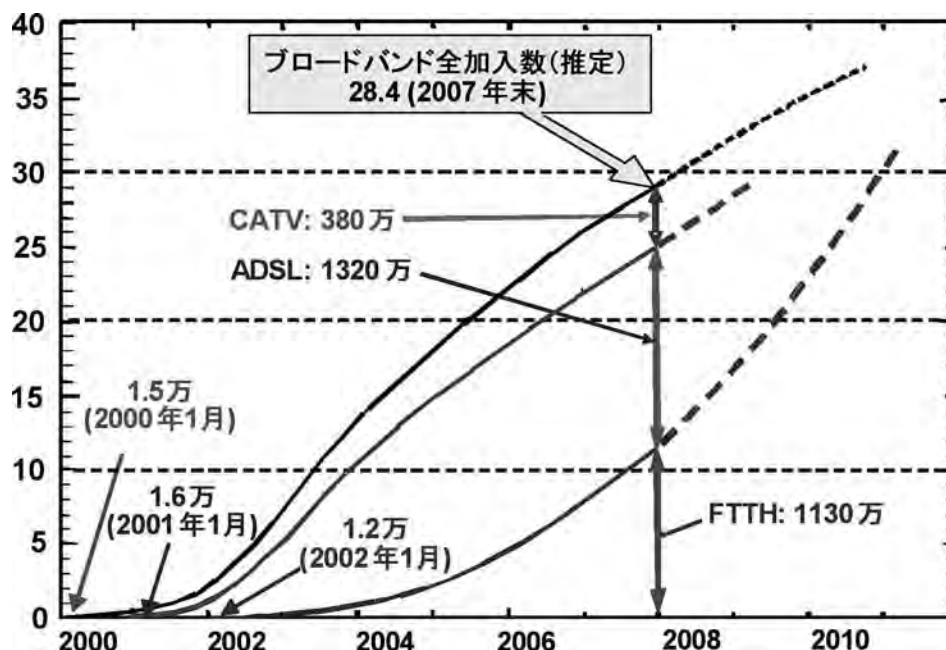


図1 日本のブロードバンドアクセスの動向

出典：総務省発表データを用いてグラフ化（ただし、2007年末の数値は、2007年9月末のデータから推定した数値である。）

一方、インターネットプロトコルをベースとしてユビキタスな情報通信環境を目指す NGN (Next Generation Network) と呼ばれる次世代のネットワークの開発には、日本は通信業界を挙げて取り組んでおり、国際標準化にも寄与しており先端的な技術開発水準にある。日本での NGN によるサービスは、2008 年 3 月から開始される予定である。NGN では、既存のインターネットに比べて、通信品質や信頼性は大幅に向上すると見なされているが、セキュリティや新サービスの点ではインターネットプロトコルを脱却する新たなネットワーク環境を模索する必要性が指摘されている。新世代ネットワークと一般的に称されているが、未だ研究の緒についたところである。

米国においては、携帯電話加入数は約 2.3 億 (2006 年末)、インターネットユーザ数は 2.2 億 (2007 年 11 月末) と推定される。ブロードバンドアクセス環境では日本や韓国に及ばないが、インターネットの利用環境では、世界で最も充実しており、総合的には優れた環境にある。NGN については、本格的なサービス提供のアナウンスは未だなされていない。

米国における研究開発では、ベンチャー企業の開発力が旺盛であり、またインターネットプロトコルに捕らわれない新たなネットワーク技術を模索する NSF の研究プロジェクトとして、FIND (Future Internet Design) や、その研究成果を実験するテストベッドとしての GENI (Global Environment for Networking Innovations) といった先導性の高い研究推進活動が行われている。

欧州においては、現在の携帯電話の世界的普及に寄与している GSM (Global System for Mobile Communications)、ワイヤレスパケット通信、デジタル放送などの研究開発を推進し成果を収めた実績は大きい。また、1988 年に始まった RACE (R&D in Advanced Communications in Europe) プロジェクトによる EU 加盟国間の共同研究が成果を収めており、高い研究水準を維持している。しかし、実際のブロードバンドアクセス環境や、ワイヤレスインターネット環境においては、日本、韓国、米国に及んでいない。

欧州における NGN では、英国が最も進んでおり、既に 2004 年 10 月から実験をしていたが、2007 年 7 月から正式に商用サービスを開始している。英国の NGN は 21CN と称しており、2011 年までには全国に展開するとアナウンスしている。

中国においては、携帯電話加入数は約 4 億 (2006 年末)、インターネットユーザ数は 1.6 億 (2007 年 11 月末) と推定される。ネットワーク環境整備は急速に進んではいないものの、通信インフラの遅れを先進国並にすること、すなわち電話の普及を主体とした環境整備中であり、普及率においては依然として発展途上である。インターネットの普及が急速に進んでいるが、IPv4 におけるアドレス数の制約問題があり、IPv6 への移行に意欲を持って取り組んでいる。

中国における研究開発では、2008 年開催の北京オリンピックに向けて第 3 世代携帯電話の導入、FTTH を含むブロードバンドアクセスの導入を一部の都市で進めており、オリンピックがネットワーク環境整備の面でも大きな効果を発揮している。

韓国においては、携帯電話加入数は約 4,020 万（2006 年末）、インターネットユーザ数は 3,400 万（2007 年 11 月末）と推定される。政府主導の IT 産業政策をベースとして、ネットワーク環境整備とそれに必要な新技術開発を極めて意欲的に進めており、この 10 年ほどの技術開発成果は大きい。もともとの通信インフラもそれほど整備されていなかったことから、最新技術の導入がスムーズであり、ワイヤレスでの CDMA 技術の導入、ADSL 技術の導入、WiMAX 規格を先取りした WiBro (Wireless Broadband) と呼ばれる 10 Mbps オーダーの移動通信技術の先進的な導入により、世界でも最も進んだブロードバンド環境を実現している。

(2) ネットワーク応用（サービス技術）

日本においては、全国隅々に行き渡るワイヤレス通信環境、ブロードバンド環境や HDTV 放送環境の先進性は世界のトップレベルにある。これらの先進的な環境を活かしたサービスとしては、携帯電話からのインターネットアクセスサービス（i モード）を世界ではじめて提供、地上波デジタル放送による HDTV 番組提供とその普及度などにおいて世界を先導している。しかし、これからの最も重要なネットワークインフラであるインターネットにおけるサービス技術に関しては見るべきものが少なく、ほとんどは欧米発の技術をフォローしている状態になっている。インターネット応用の多くはコンテンツに関わるサービスであるが、日本ではネットワークを介するコンテンツサービスに対する制約の多いことが一因であり、結果として技術開発の推進力が発揮できていない。同様に、研究レベルでは先進的な研究事例はあるものの、研究レベルに止まり、産業化にまで結びついていないものが多い。

米国においては、ベンチャー企業を中心にネットワーキング技術の開発が非常に盛んであり、新しいネットワーク応用のビジネスモデルもほとんどが米国発である。大学などにおける研究においても、既成概念にとらわれないチャレンジ精神に富むテーマに多くの研究者が挑戦しており、研究の量と質においても世界を完全にリードしている。電子商取引の eBay や Amazon.com、検索サービスの Google、映像サービスの YouTube などは、それらの典型例である。

欧州においては、携帯電話やデジタル放送の普及については先導性を発揮したものの、ネットワーク応用に関しては米国にかなりの遅れを生じている。EU は、この状況を打破するための研究開発には力を入れており、EU の研究

推進プログラムである 2007 年からの FP7 (Framework Program 7) の情報通信技術の中では、特にアプリケーション研究として、社会問題に対応する ICT、コンテンツ・創造性・能力開発のための ICT、企業・業界を支援する ICT、に重点化して研究開発を推進することを宣言している。

中国においては、ネットワーク応用は全て米国、日本、欧州での普及を追従する形での取り組みになっている。依然として、通信インフラ整備と基本的なサービスの普及が主体であり、高度なサービス技術については技術導入が主であり、研究水準、技術開発水準は共に低い。

韓国においては、ブロードバンド環境、携帯電話環境は世界のトップレベルにあり、ネットワーク応用についても急速にキャッチアップを図ってきている。現状では、インターネットの普及率も高く、産業技術力は日本、欧州と同等のレベルにまで達したと見なせる。ただし、研究と技術開発の実績は少なく、依然としてキャッチアップ中である。トップ企業である Samsung や政府系研究機関である ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institute) などでは、十分な技術開発力を有しており、欧州のレベルに達しつつあると推測される。

(3) アーキテクチャ (ドライビングコンセプトを含む)

日本においては、第 3 期科学技術基本計画において「国家の神経網として今後のネットワークは、あらゆる社会活動の基盤であり、ビジネスにおける生産性やスピード、文化・消費活動がネットワークの能力と信頼性に大きく依存するようになる。」と述べられている。ネットワークに対する期待は大きくなり、要求もさらに多様化していくものと考えられる。特に日本で推進しているユビキタスネットワーク社会は、ネットワークが隅々にまで行き渡った社会を指し、しかも安全で安心な社会を目指している。

それらを実現するために、様々な研究開発が行われているが、個別のニーズに対応する技術開発とは別に、長期的な視野に立った新たなアーキテクチャに基づく NGN (Next Generation Network) の技術開発が進められている。当面の NGN は現在の IP (Internet Protocol) をベースとしているが、それとは別にインターネットにとらわれない新たなアーキテクチャが必要であると広く認識され、将来指向の研究が始まったところである。これらは「新世代ネットワーク」という範疇の研究として立ち上りつつあるが、方向性は未だ不明確であり、基礎研究段階である。

米国においても、新たなアーキテクチャが必要であるとの認識は同様であり、既に NSF のプロジェクトとして FIND (Future Internet Design) イニシアティブが立ち上がり、次世代インターネットアーキテクチャの研究開発に活発に取り組んでいる。さらには、テストベッドネットワーク GENI (Global

Environment for Network Innovations) の構築が検討され、多額の研究費が投入されようとしている。オーバレイネットワーク PlanetLab の構築、センサネットワークの研究開発などが特筆すべきテーマである。

欧州においては、携帯電話網を用いたインターネットとマルチメディア応用の観点から、電話と IP を統合する IMS (IP Multimedia Subsystems) についての検討を推進していたが、これを NGN へと発展させており、研究開発は盛んであり ITU における国際標準化も推進している。さらに将来のテーマとして、無線ネットワークを効果的に用いるためには様々なクロスレイヤ (cross-layer) 手法が必要となっており、インターネットの階層化概念にとられないアーキテクチャが研究されはじめている。既に、研究プロジェクト Euro-NGI (Next Generation Internet) が立ち上がり、FP7 の一環として取り組まれる事になる。

NGN は、IP 技術による固定電話網の再構築であり、2010 年頃を目標としており、固定網と移動網の融合、さらにはインターネットとの融合が主要な課題である。したがって、既存のネットワークとの相互接続性に関する制約が大きい。

これに対して、さらに将来の社会基盤の役割を担うネットワークには、本質的にディペンダブルなネットワークアーキテクチャが必要となる。また、ネットワークが大規模化、複雑化していく中で自律的な制御・管理手法も必要である。携帯電話、RFID、インターネット等を融合するアーキテクチャと新たなサービスの創造、認証やセキュリティ機能を具備したアーキテクチャ、多様なネットワーク接続を可能にするアーキテクチャ、多様なネットワーク環境に対応するアーキテクチャ (例えば DTN (Delay Tolerant Network) Architecture) など、検討すべき課題は数多くある。日米欧の先端的な研究機関では、これらの研究力が高いが、中国、韓国ではその力は未だ不十分である。技術開発力、産業技術力については、例えば ITU-T における NGN の SG (Study Group) には両国も参加しており、特に韓国は SG の議長を出しており、日本と同等の水準にせまりつつある。

(4) ネットワークシステム

幹線ネットワークについては、日本は伝送分野の研究開発で 40 Gbps 光伝送システムを実用化するなど、世界をリードしている。研究水準では、最近の研究成果として 14 Tbps の伝送実験 (ECOC2006 にて発表) あるいは 25 Tbps の伝送実験 (OFC2007 にて発表) を行うなど高いレベルを維持している。商用レベルの産業技術としては、WDM (Wavelength Division Multiplex) 伝送システムは、敷設してあるファイバの種類の違いのため、日本では L バンドの利用が優先、海外では C バンド優先と使用波長帯は異なるが、

インターネットトラフィックの急増とともに、導入が進んでいる。海底幹線についても、敷設済のシステムの波長数増加などによる容量増強が進められており、当初のシステムを開発した日本企業の技術が世界に展開されている。

アクセス分野については、日本では、NTT の 2010 年に 3,000 万加入とする目標は 2,000 万加入へと下方修正されたが、他の事業者による FTTH 導入も本格化しており、2007 年 12 月末には推定 1,130 万加入に達している。また、政府のデジタルデバイド対策としても過疎地のブロードバンド化が政策的に進められており、光化の推進が後押しされている。米国でも FTTH の導入が進みはじめ、Verizon 社が FSAN (Full Service Access Network) で標準化された GPON (Gigabit Passive Optical Network) を採用し、2010 年までに 1,800 万加入分の敷設を計画している。米国では、長期的には 3,300 万世帯の加入と 360 万のビジネス加入を目標としている。欧州は、FTTH の導入にはビジネスモデルの観点から慎重であるが、一部に自治体の援助により、敷設を開始したところもある。韓国では、国を挙げて WDM-PON システムの実用化に戦略的に取り組んで来たが、その初期の導入が始まったところである。中国では、2008 年開催のオリンピックを契機として、一部で FTTH システムの導入を行うことを計画しているが、その後の本格的な導入に関しては未定である。

次世代の 10 Gbps クラスの光アクセス技術に関しては、IEEE802 委員会において、IEEE802.3av 10G EPON Task Force が標準化を推進している。2008 年に物理レイヤの標準化完了を目指している。一方、ITU-T の FSAN でも 2006 年 9 月に 10G-PON の議論を開始している。さらに、現状の 3 波長ではなくユーザ毎に波長を割り当てる WDM-PON の検討も進んでいる。

ワイヤレス分野については、研究水準においては日米欧が互角に推進しており、現在のテーマは第 4 世代に向けた 100 Mbps 以上の高速化が主要な目標となっている。これを実現する技術として、複数の送受信系を用いる MIMO (Multi-Input Multi-Output)、それに適した空間・時間変調符号化、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)などを高度化した送受信技術、また高速移動での IP 通信の性能を確保するための高速ハンドオーバ技術などの研究が非常に盛んである。一方、新たな可能性をもつアドホックネットワークやセンサネットワークの研究が、米国において非常に盛んになっており、日本、欧州がそれに続いているが、韓国、中国においても一部で研究が始まっている。一方、第 3 世代の発展系として高速化と多様化が進んでいる。第 3 世代の標準である WCDMA をベースとした HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) による 14 Mbps 程度までのサービス、WiMAX による数 10 Mbps のサービスの提供に向けて、日米欧さらに韓国、中国の多くのキャリアが活動している。WiMax は、IEEE802.16 として標準

化が進み、802.16、802.16a、802.16d、802.16e など、ローミングなど音声通信・データ通信等に必要とされている機能に応じて種々の方式が実用化されつつある。韓国では WiBro (802.16e) と称していち早く商用化をしており、また日本、米国、中国、カナダ、英国などでトライアルが実施されている。

LAN 分野については、10GbE の次の高速化イーサネットの標準化が 2006 年 7 月に米国サンディエゴで開催された IEEE802.3WG で提案され、SG としてスタートすることが承認された。100 Gbps の超高速イーサネットの標準化が現在 IEEE802.3 Higher Speed Study Group (HSSG) で審議されており、2010 年までに新しいイーサネットの標準化の完了を目指して研究開発が進んでいる。これらには、米国のベンチャー企業によってリードされている技術も多い。

ルータとスイッチの分野については、世界の市場の大部分を Cisco、Juniper、Nortel などの北米企業が席巻しており、日本企業は、国内では少しシェアを持っているが、世界市場での位置づけは弱い。一方、Huawei などの中国企業が最近、急速にシェアを伸ばしてきている。ルータにおいても、そのインターフェース速度は 10 Gbps とともに 40 Gbps を装備するものが出てきている。

(5) ネットワーク制御・管理・運用

トラフィック制御技術に関しては、P2P トラフィックや DDoS トラフィック等、ネットワークの品質劣化の要因となる長大高レートフローの検出・制御技術が現在の特徴的な研究開発動向である。世界的に多くの ISP は、サンプルフロー統計に基づくネットワーク監視を実施しており、これらのサンプルデータからトラフィックパターンを分析することにより異常を検出する技術が近年進展してきた。日本では阪大 [1]、NTT [2][3]、京大 [4] 等、海外では多くの ISP が競合している米国、欧州で研究が盛んである（米 [5][6] 欧州 [7]）。この技術を実現した製品としては、米国 Arbor Networks 社の PeakFlow [9] が有名である。日本では日立の製品が sFlow^{*1} に対応している。韓国・中国での目立った発表は国際会議では特に見当たらないが、GenieNRM 社（台湾）[10] で不正トラフィック検出装置を開発している。また、サンプルフロー統計によらずフロー毎の管理制御を実現する技術・製品もある（米国アナグラン社 [8]、Cisco Guard、SCE）。

SLA (Service Level Agreement) 管理に関しては、日米欧のネットワーク事業者、MSP^{*2} が企業ユーザ向けに展開している。韓国では一般ユーザ向けにブロードバンドの SLA 導入を開始した。評価尺度として、ネットワークの可用性、故障回復時間、稼働率、伝送遅延時間、パケットロス、ジッタ値等があり、アクティブ型測定^{*3}とパッシブ型測定^{*4}の手段がある。アクティブ

型では（パッシブ型を兼ねる）、富士通の Proactnes、米国の FireHunter、eHealth、ClearSight やフランスの Infovista 等、パッシブ型ではパケットのペイロード部分までを測定する製品として米国 NetWorrier 等がある。韓国・中国での目立った発表や製品は見当たらない。

MPLS (Multi-Protocol Label Switch)、GMPLS (Generalized-MPLS)、QoS に関しては、学術パイロットネットワークの研究開発が牽引力となっている。日本では JGN2、SINET3 に対して、日本のシステムベンダが継続的に製品を提供し、米国、欧州でも Internet2、SURFnet 等の多くの学術ネットワークとそこで採用された欧米製品の技術が発展している。MPLS 技術、QoS 技術は既に商用化フェーズであり、日本では KDDI、NTT、JT が採用を表明している。欧米でもそうした動きが盛んに発表されている。今後は GMPLS や高度な QoS 制御技術（パス制御技術、リソース制御技術等）及びそれらの連携技術が重要な開発目標になると考えられる。中国、韓国でも国策として学術ネットワークを持ち、研究、実証を始めている。また、こうした活動に参加しているプロバイダ、ベンダ、学術機関が積極的に研究発表を行っている。米国では MPLS 関連の国際会議が活発で学術研究から実用化紹介まで幅広く発表が行われている。欧州はそれに続いている。日本でも MPLS/GMPLS に特化した国際会議 iPOP^{*5} を 2005 年から開催しており、ここでの MPLS/GMPLS と QoS 制御の統合や運用ポリシーとの連携などの発表が注目されている。

国際標準化活動は、従来から ITU を中心に欧州の主導力があるが、日米ともに役職者を増やす等積極的に活動している。注目すべき動きとして、中国が最近 ITU の役職者を増やしつつあり、技術のグローバル発展を戦略的に検討していると思われる。

*1 sFlow：フロー測定機能

*2 MSP：マネージメント・サービス・プロバイダ

*3 アクティブ型測定：測定装置から ping 等のコマンドを送信して遅延時間や応答時間等を確認する測定方法

*4 パッシブ型測定：各種ノードや伝送路等を流れる情報を捉えてパケットロス率やジッタ等を計測する測定方法

*5 iPOP：International Conference on IP+Optical Network

[1] 山 垣, 戸 出, 村 上, "DMFQ: Hardware Design of Flow-based Queue Management Scheme for Improving the Fairness," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.4, Apr. 2005.

[2] 林他, "エレファントフローのリアルタイム測定によるネットワーク品質制御技術の検討", 信学技法 CQ2005-71, 2005-11.

- [3] 川原 他, "QoS control to handle long-duration large flows and its performance evaluation" 信学技法 CQ2006-15, 2006-04.
- [4] 田中, 朝香, 高橋, "全てのフローに公平な資源割当を実現する Sampling LAS 方式", 信学会総合大会, no.B-7-28、March 2006.
- [5] R. Mahajan, S. Floyd, and D. Wetherall (ワシントン大), "Controlling High-Bandwidth Flows at the Congested Router," ICNP2001, Nov. 2001.
- [6] L.Guo 他 (ボストン大), "The war between mice and elephants," ICNP2001, Nov. 2001.
- [7] I. Rai et al., "Size-based scheduling to improve the performance of short TCP flows," IEEE Network, Jan. 2005.
- [8] <http://www.terilogy.com/press/20050412-Anagran.html>
- [9] http://www.arbornetworks.com/products_platform.php
- [10] <http://www.genienrm.com/>

(6) 情報通信端末技術

情報通信端末技術は非常に多岐にわたるため、図2のようにレイヤに区切って国際技術力の比較を行う。

ミドルウェア (MW) のレイヤでは、各種アプリを実現する上でのサービス処理を実現する MW として OSGi[1]、Jini、Havi 等がある。OSGi では、技術水準は欧州>米国>韓国>日本>中国であり、Jini 等の Java 関係の技術は米国主導で開発が続けられている。さらに、ホームゲートウェイ (HGW) に特化した団体として HGI [2] があり、欧州のキャリアとベンダが主となって HGW の統一仕様を検討している。一方、セッション処理では、IMS (IP Multimedia Subsystems) と連動した形で SIP (Session Initiation Protocol) の開発が欧州、米国、日本で進められている。メディア処理、コントロール処理では、DLNA [3] は松下などの家電企業が中心になって開発が続けられている。一方、UPnP [4] など米国 Intel 主導で端末機器ベンダの搭載が進んでいる。

組み込み OS としては、日本 TRON、T-ENGINE フォーラム [5]、VxWorks などにより開発され、発展してきた。汎用 OS としては米 Windows (Mobile, CE 等) さらに、携帯 OS では英 Symbian、米 Qualcomm BREW 等が開発され、プロセッサとセットで OS 技術の開発が進められている。

一方、ハードウェア (HW) については、音声系メディア処理では、AAC (Advanced Audio Coding)、MPEG 等の音声符号処理を行うチップ、エコーキャンセラチップ (沖、NTT 等) などの技術開発が進められている。一方、メディア処理では、HDTV に対応する H.264, DCI (Digital Cinema Initiatives) による 2K/4K 映像に関する技術が開発されている。さらには、IP-TV[6] などインターネット上での TV 放送技術が日本を初め欧米で開発されている。

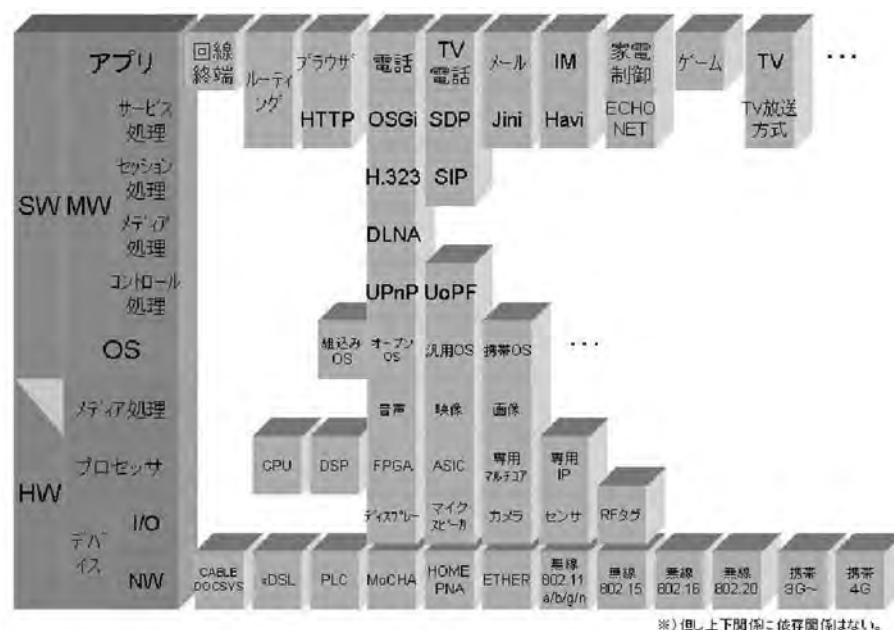


図2 情報通信末端技術 階層図

専用プロセッサとしては、ゲーム、マルチコアに適した Cell（SONY、IBM、東芝）[7]、Giga IP 処理に適した RENA-CHIP（NTT）[8] など、日本の開発が進んでいる。

端末用デバイスとしては、表示器として、液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイ、SED（Surface-conduction Electron-emitter Display）等、高画質・高品質の大型パネル化、TV 向けの高画質化チップ、および携帯等の小型パネル、両面パネル、3D 表示などの技術分野では日本は高い技術力を持っているが、中級のディスプレイや中小型の領域では、高い量産能力を持つ、韓国、中国が技術開発および産業技術力を持っている。入力装置としてのセンサ、RF タグの開発は、日本では日立 μ チップ、大日本印刷、デンソーウェーブ、米 Alien Technologies、Philips Semiconductors があるが、日本の RF タグ技術、利用技術は水準が高い。

ネットワーク端末用デバイスとしては、特に、宅内では、日本国内で規制が緩和される電力線を利用する PLC（Power Line Carrier）が最も注目されている。PLC 標準化団体としては、主に 3 団体 HPA [9]、CEPCA [10]、UPA [11] があり、HPA は米 Intellon、CEPCA は松下、UPA はスペイン DS2 を中心に標準化団体とチップの製造メーカーが一体となったビジネス展開を進めている。また、欧州は、PLC（Power Line Carrier）フォーラム [12]、OPERA [13] など欧州全体での規制化、商品化が進められている。無線としては、WiFi に代表される 802.11a,b,g,n がパソコン搭載を牽引力として低価格化が実現し大衆化が実現。特に最近では 802.11n でのスループッ

ト 100 Mbps を目標に、米 Airgo 社、米 Broadcom 社、米 TI 社等が開発および標準化を繰り広げている。PAN (Personal Area Network) では、IEEE802.15 で規格化される 802.15.1 (Bluetooth)、802.15.3a (UWB: Ultra Wide Band)、802.15.4 (ZigBee) [14] などが主力となっている。特に、UWB では、イスラエルの Wisar 社、NEC エレクトロニクス、米 Staccato 社などがチップの提供を開始している。ZigBee では、英 Embar 社などが開発している。

放送関連サービスとしては、ワンセグに代表される TV 放送方式が種々開発されている。米 Qualcomm の MediaFlo、欧州のノキア、NEC、ソニーが主導する DVB-H、韓国サムソン電子、中国の T-DMB、さらには衛星を利用した S-DMB、また日本の方式としては ISDB-T 等の数々の方式が開発されおり、主流争いとなってきている。

情報通信端末全体での産業技術力として特筆する点は、今までは単なる製造拠点機能が中心であった中国が、製造だけでなく設計などの機能まで業容を拡大しつつあることが挙げられる。

〈参考文献〉

- [1] OSGi, <http://www.osgi.org/>, <http://www.osgi-ufj.org/>
- [2] HGI, <http://www.homegatewayinitiative.org/>
- [3] DLNA, <http://www.dlna.org/>
- [4] UPnP, <http://www.upnp.org/>
- [5] TRON, T-ENGINE フォーラム, <http://www.tron.org/>, <http://www.t-engine.org/>
- [6] 特集：IPTV の最新技術動向 NTT 技術ジャーナル, 2006 年 8 月号, P.6-22.
- [7] Cell 誕生, 日経エレクトロニクス, 2005 年 2 月 28 日号, P.89-121.
- [8] 特集：高性能・低価格なネットワークアダプタを実現する RENA-CHIP, NTT 技術ジャーナル, 2006 年 7 月号, P.6-31.
- [9] HPA, <http://www.homeplug.org/>
- [10] CEPCA, <http://www.cepca.org/>
- [11] UPA, <http://www.upapl.org/>
- [12] PLC フォーラム, <http://www.plcforum.org/>
- [13] OPERA, <http://www.ist-opera.org/>
- [14] ZigBee アライアンス, <http://www.zigbee.org/>

(7) ヒューマンインタラクション

コンピュータシステム、ネットワークシステムとのヒューマンインタラクションの向上のために多様な取組みが世界的に進んでいる。全般的には、コンピュータ開発が先行した米国での取組みが圧倒的な強さを持つが、欧州や日本

でも長く取組まれ成果をあげている。最近では、韓国、中国の躍進も目立ってきている。以下、ヒューマンインターフェースの中心となる視覚、聴覚、触覚メディアのインターフェース技術を中心に概観する。

視覚メディアに関しては、コンピュータグラフィックス、特に近年発達している自由視点映像技術を中心に取り上げる。コンピュータグラフィックスの分野で世界各国から集まる人材とハリウッドの映画産業を抱える米国が、研究水準、技術開発水準、産業技術力のすべてにおいて他を凌駕している。映画産業の高いレベルの技術が学会で発表され活況を呈している。外資系企業によりコンピュータ科学者が厚遇されている中国においては、研究水準が年々高まっている。中国・韓国からの標準化提案が、ここ数年で急激に増加している点も注目すべき点である。また、撮影した画像を元に対象を色々な方向から見ることを可能にする自由視点映像技術は、今後のデジタルメディアの更なるインタラクティブ化を加速するものと期待されるが、この分野ではカーネギーメロン大学 [1]、スタンフォード大学 [2]、MIT [3]、マイクロソフト社 [4,5]、マックス・プランク研究所 [6]、東京大学 [7]、京都大学 [8]、名古屋大学 [9] などが活発な研究開発を進めており、アメリカが中心的な役割を果たし、欧州と日本がこれに追従している、コンピュータグラフィックスの国際会議 SIGGRAPH はこの領域の中心的な存在で、産業と学術研究のつながりを強化している。コンピュータによる認識技術では国際会議 ICCV が毎年開催されている。また、最近では自由視点映像の入力となる多眼画像の符号化について MPEG/JVT による標準化の動きもある。

聴覚メディアに関しては、人がシステムに意思を伝えるために使われる音声認識技術が主要なテーマである。音声認識の分野には目的が異なる 2 つの流れがあり、一つは講演や会議音声、映像などのメディアに含まれる音声の字幕、会議録・翻訳用原文として音声を忠実に文字に変換するディクテーションを目的とした流れである。もう一つは、操作対象の機器とのインタラクションの手段として音声入力を利用する事を目的として課題を解決しようとする流れである。音声認識全般では、米国が非常に大きい力を持つが、後者に特化して述べると、電話自動音声応答の入力、カーナビゲーションシステムの入力などへの導入で米ニュアンス社、IBM 社の実績が高い。また、研究分野ではユビキタスの研究に関して欧州が活発で、特に SmartKom プロジェクト [10] を主導したドイツ人工知能研 (DFKI) が注目される。Interspeech (Eurospeech, ICSLP の交互開催)、ICASSP などの国際会議で活発な研究発表が行われている。産業向け技術の国際標準化については、W3C および IETF などで議論がなされている。

触覚インターフェースの分野は、米国 SensAble Technologies [11] による 1993 年の PhanToM により活発化し、それを生み出した MIT 等が研究分

野をリードした。Haptics Symposium[12], WorldHaptics[13] 等の国際会議で活発に研究発表が行われ、研究を牽引している。Stanford 大学(米国)、東京大学[14](日本)、McGill 大学(カナダ)等が活発に発表を行っている。日本の東京工業大学、大阪大学、ATR 等も活発な発表を行っている。産業では、先にあげた SensAble Technologies 社(米国)、Immersion 社[15](米国)、サイヴァース社[16](日本)等が商用化触覚インターフェース装置を開発している。他の各国でも、機械、計測制御等の工学分野を中心に触覚提示装置の研究開発が取組まれている。バーチャルリアリティの国際会議 ICAT は、2004 年は韓国で開催され、韓国から活発な研究発表がなされた。中国ではマイクロソフトの研究所の開設により、今後この分野も活性化することが予想される。五感の他の感覚として、嗅覚、味覚に関する研究開発も活発化している。なおの提示インターフェースについては、フランステレコム、東京大学、慶応大学、ATR 等が活発に研究開発を進めてきた。

〈参考文献〉

- [1] T. Kanade, P. J. Narayanan, and P. W. Rander: "Virtualized Reality: Concepts and Early Results", In Proc. of IEEE Workshop on the Representation of Visual Scenes, pp.69-76 (1995) .
- [2] M. Levoy and P. Hanrahan: "Light Field Rendering" In Proc. of SIGGRAPH '96, pp. 31-41 (1996) .
- [3] W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S. J. Gortler, and L. McMillan, "Image-based visual hulls," SIGGRAPH 2000, pp.369-374 (2000) .
- [4] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen: "The Lumigraph" , In Proc. of SIGGRAPH '96, pp.43-54 (1996)
- [5] C. L. Zitnick, S. B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder, and R. Szeliski: "High-Quality Video View Interpolation Using a Layered Representation" , In Proc. of SIGGRAPH 2004, 600-608 (2004)
- [6] M. Li, M. Magnor, and H.-P. Seidel: "Hardware-Accelerated Visual Hull Reconstruction and Rendering", In Proc. of Graphics Interface 2003, 65-71 (2003)
- [7] 苗村, 金子, 原島: "光線情報の補間に基づく Ray-Based Rendering", 3次元画像コンファレンス '96, pp.7-12 (1996).
- [8] 松山, 高井, ウ, 延原: "3次元ビデオ映像の撮影・編集・表示", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.521-532 (2002).
- [9] P. N. Banchang, M. P. Tehrani, T. Fujii, and M. Tanimoto: "Realtime System of Free Viewpoint Television", 映情学誌, 59, 8, 1191-1198 (2005).
- [10] <http://www.smartkom.org/>
- [11] <http://www.sensable.com/>
- [12] <http://www.hapticssymposium.org/>

- [13] <http://www.worldhaptics.org/>
- [14] T. Iwamoto and H. Shinoda: "Two-dimensional Scanning Tactile Display using Ultrasound Radiation Pressure", Proc. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (IEEE Haptics Symposium 2006), pp. 57-61, 2006
- [15] <http://www.immersion.com/>
- [16] <http://www.cyverse.co.jp/Products/spidar.html>
- [17] <http://www.sigchi.org/>

(8) 要素技術

近年のネットワーク分野での重要な要素技術には、通信機能では光通信技術とワイヤレス通信技術があり、端末機能では画像圧縮技術、マルチメディア応用技術がある。以下に、それらの動向を述べる。

① 光通信技術

光通信分野の技術に関しては、市場全体が上向きになったことに刺激されて、要素技術開発が再び活発になっている。市場の回復を含む活発な動きには、アクセス系の光化が進み、通信・放送融合サービスが急速に進展しているという状況や、NGN の導入が始まろうとしていることが大きく貢献している。光アクセスは 100 Mbps レベルの PON から Gbps クラスの PON へと実用化が進み、さらに WDM や 10 Gbps 化へ発展する動向が見られる。この分野の技術開発は、日本が先導し欧州、米国、韓国へと急速に広がりつつある。

アクセス系の大容量化の影響は、次にメトロ系の進展となって現れている。このメトロ系では ROADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) システムが導入され初め、その基本デバイスである光スイッチや波長合分波回路が北米を中心に開発され実用に至っている。光スイッチに関しては、回線交換的な ROADM や光クロスコネクタ装置の他に、光バーストスイッチ、光パケットスイッチ等高速の切り替えを特徴とする将来方向の研究としては、欧州 (FP7 における IST 等)、北米 (NSF、DARPA 等) 日本 (NICT、NEDO 等) での政府支援によるプロジェクト研究が盛んに進められている。

幹線系光通信の要素技術では、40 Gbps システムが実用に向けて動き始めたこともあり、研究レベルでは 100 Gbps 化や、WDM による超大容量化等、トップ技術をさらに押し上げる動きが出始めている。これらを進めるコア技術として、DQPSK などの変復調技術や電気回路的な分散補償技術が研究され、特に日米で研究が盛んである。

市場における競争状況としては、北米市場では Nortel、Lucent、日本では NEC、富士通、三菱、欧州はアルカテル、中国では Huawei が拮抗している。

② ワイヤレス通信技術

ワイヤレス通信分野では、最も重要な要素技術は無線アクセス技術である。携帯電話用の無線アクセス技術は、現在第2世代から第3世代に移行しつつあるが、その移行の速度は世界的にみると、日本と韓国が先行しており、ついで欧州で導入が進みつつあるが、米国、中国はじめその他の地域では導入が遅れている。このように先進的な市場が世界的には限定されているため、技術的に先行投資を行った企業は十分な先行者利益を得るまでには至っておらず、技術開発力と市場シェアが一致しないアンバランスな状態が続いている。第4世代の無線アクセス技術の研究では日本が世界をリードしているが、今後特に大きな市場は中国、インドを始めとするアジア諸国であり、これらの国で先進技術を必要とする市場が成熟する時期には、日本、韓国など技術先行投資企業にとって重要な時期となろう。中国は携帯電話利用者数が世界一の携帯電話市場であり、政府主導で第3世代方式の開発を進めてきたが、独自技術の育成に時間がかかり、未だに第3世代の導入が始まっていない。第3世代以降のブロードバンド無線伝送の要素技術としては MIMO (Multiple Input Multiple Output) があり、米国、欧州、日本、韓国で研究開発レベルはほぼ同等である。

米国は無線 LAN の標準化を IEEE が行うことで世界をリードしたが、単価が低いため無線 LAN 自体の市場規模はあまり大きくない。そこで無線 LAN の技術を拡張した技術をより広い範囲の分野に応用することが検討されている。そのひとつに韓国が中心となって推し進める WiMax がある。また今後成長が期待される分野としてユビキタスワイヤレスデバイスや社会基盤としてのセンサネットワークがあるが、ここでのキーワードはアドホック通信ネットワーク技術である。この分野は古くから軍用技術として米国中心に研究が進められてきたが、最近は無線 LAN 技術をベースとして多くの研究が大学中心に進められている。日本、欧州などでも研究が盛んになってきているが、市場が未成熟であること、無線特有の通信の不安定性を克服できるかどうかが今後の課題である。

③ 画像圧縮技術

画像圧縮に関する技術動向の特徴の一つとして、世界的な標準化活動の体制がしっかりしていることが挙げられる。このことはデジタル放送における画像圧縮方式として、MPEG-2 が世界的な統一方式として選択されたという画期的な事実で代表される。具体的な組織としては、MPEG (ISO / IEC JTC1 / SC29 / WG11)、ITU-T の2つである。ただし、MPEG とは異なる方式も、米国マイクロソフトなどで開発されている (VC-1 方式が米国 SMPTE の標準方式になっている)。

MPEG、ITU-T は異なる組織であるが、MPEG-4 / AVC (H.264) では

両者の協同作業が行われている。標準化活動を支えているのは、欧州、米国、日本を中心とした 20 数カ国からの専門家である。最近は韓国からの参加者数が大きく増えている。この他、アジア圏からは中国、台湾、シンガポールからの参加がある。

標準化活動と並行して、画像圧縮・通信関連の国際会議における研究成果の発表も活発である。国際会議としては PCS(最近の開催は PCS2007)、PV(最近の開催は PV2007) が代表的である。この他、ICIP2007 など画像処理関連の国際会議においても画像圧縮・通信関連の発表が数多くなされている。参加国としては、米国、欧州 (UK、オランダ、伊、仏、独が多い)、日本が多く、この他、オーストラリア、アジア圏の中国、シンガポール、韓国からも発表がある。

画像圧縮・通信に関わる技術動向としては、MPEG-4 / AVC(H.264)をベースに、機能の向上として、Scalable Video Coding (SVC)、Multi-view Video Coding (MVC) に関する研究開発が活発であり、MPEG の中での標準化作業も進められている。SVC は、時間、空間、品質 (S/N 比) におけるスケーラビリティを扱う。標準化作業としては、初期の規格化が完了し、空間、品質スケーラビリティを高い圧縮効率で実現した。MVC は、複数台のカメラで同時に撮影された多視点映像を扱う。圧縮効率の向上だけでなく、並列処理、視点映像スケーラビリティ等の機能が検討されている。MPEG の中では自由視点テレビ (FTV) の標準化作業も行われている。この他、画像の高品質化として、4:4:4 形式を含む高品質映像の圧縮方法である “Professional Profiles” が策定されている。画素数 7,680 × 4,320 等の超高解像度映像にも注目が集まっている。MPEG-4 / AVC から更なる機能の向上を目指す活動として、ITU-T で “H.265” が設けられている。

上述の様に、標準化活動がこの分野の発展の大きな牽引車になっている。特に、企業では製品に直結することから、標準化への意識が高い。一方、欧米の大学を中心にして、新しい画像符号化のアイデアが出されてきている。代表的なものとして、Distributed Video Coding (DVC) がある。相関を有する 2 つのデータを独立に符号化しても、一方を参照して符号化した時と同様に効率的に圧縮できるという理論をベースとした方式である。動画像に対して、動ベクトル検出を行うことなく、隣接フレーム間での違いを誤り訂正符号化を用いて表現する。エンコーダの負荷を従来法に比べ軽くできる。従来とは大きく発想を異にした方式であり、国際会議でも複数のセッションが設けられるなど、大きく着目されている。これ以外にも Joint Source-Channel Coding、Multiple Description Coding 等々の研究がある。ワイヤレスネットワークでの画像伝送などに関わる研究も出ている。

④ マルチメディア応用技術

今後のマルチメディアコンテンツに対応する技術としては、コンテンツ流通の促進を図る上で重要となる画像を含む著作権などの権利保護が確保される仕組みが必要であり、この観点からの研究開発が進展している。MPEG の活動の延長として著作権保護の枠組みの策定を行った MPEG-21 (マルチメディアフレームワーク) は、欧州、米、オーストラリア、日本などで実用化への取組みが始まっている。また、これまでに策定された MPEG の様々な標準 (MPEG-1、MPEG -2、MPEG -4、MPEG -7、MPEG -21) について、具体的なアプリケーションごとに最適な標準を組合せた MAF (Multimedia Application Format) を定める活動が、MPEG-A として始まっている。具体的アプリケーションとしては、音楽プレーヤ、写真プレーヤ、携帯ビデオプレーヤ、デジタルマルチメディア放送、等々である。要素技術ごとに異なる標準名を付けた MPEG-B (システム関連)、MPEG-C (映像関連)、MPEG-D (オーディオ関連)、MPEG-E (マルチメディア・ミドルウェア関連) の標準が設けられた。

以上の他に、ディジタルシネマ、IP-TV、ネットワークロボットに関する動きも注目される。ディジタルシネマは映画の配信・上映のデジタル化を目指したものである。IP-TV はブロードバンドネットワークを利用した映像配信サービスである。従来の単一 MPEG-2 ビデオを RTP で配信する MPEG over IP に対し、MPEG-2 SPTS / MPTS (Single / Multiple Program Transport Stream) の配信が可能な DVB (Digital Video Broadcasting) over IP が用いられる。ビデオ情報だけでなく、サービス情報、データ放送コンテンツなどの伝送もでき、デジタル放送との共通化につながる。2006 年 7 月から ITU-T での標準化が始まった。アジア (中国、韓国、日本) からの参加者が 4 割を占め、従来の欧米主導の放送規格策定活動と比べて、アジア勢の活動が意欲的である。

ネットワークロボット [10] は、ネットワーク技術とロボット技術をつなげた技術として日本で始まった技術である。海外でも、韓国、欧州、米国で、相次いで取組みが始まっている。ネットワークロボットには、ビジブル、バーチャル、アンコンシャスの 3 つのタイプがある。アンコンシャス型は、ユビキタスコンピューティング、ユビキタスネットワークと関連が深い。

〈参考文献〉

- [1] MPEG Home Page : <http://www.chiariglione.org/mpeg/>
- [2] ITU-T Home Page : <http://www.itu.int/ITU-T/>
- [3] “小特集 ブロードバンド時代に臨む MPEG 標準化動向とコンテンツ管理技術,” 情報処理, vol.48, no.10, pp.1111-1141, 2007.10.
- [4] “画像工学の研究最前線,” 電子情報通信学会, 情報・システムソサイエティ誌,

vol.12, no.3, pp.4-11, 2007.11.

- [5] PCS2007 (Picture Coding Symposium 2007 : 26th PCS) : <http://www.pcs2007.org/>
- [6] PV2007 (16th International Packet Video Workshop) : <http://www.pv2007.com/>
- [7] ICIP2007 (IEEE International Conference on Image Processing 2007) : <http://www.icip2007.org/>
- [8] 貴家仁志、他：“映像情報メディア年報 3-2. メディア工学,” 映像情報メディア学会誌, vol.60, no.8, pp.1221-1232, 2006.8.
- [9] 西敬、徳満昌之、中川總、山崎貴宏：“動画像符号化技術動向,” 沖テクニカルレビュー, vol.73, no.4, pp.68-71, 2006.10.
- [10] 土井美和子、萩田紀博、小林正敬：“ネットワークロボット—技術と法的問題—,” オーム社, 2007.

(9) 基礎理論

ネットワークに関わる基礎理論は多岐にわたるが、ここではデジタル通信の基礎となる符号化理論として、(1) 情報源符号化、(2) 誤り訂正符号について、同一情報をマルチキャストする上でのネットワーク上での符号化理論として最近出てきた (3) ネットワーク符号化、パケット通信の品質制御などの基礎となる (4) 通信トラフィック理論、また、これからのネットワーク研究に非常に重要なセキュリティに関連する理論として、(5) 暗号、(6) 電子透かし、(7) ネットワーク強度について、それぞれ以下に述べる。

① 情報源符号化

情報源の無ひすみ符号化については、米の Kieffer と Yang あるいは Rissanen を中心に 2000 年以降も新しいユニバーサル符号の研究が行われているが、日本国内では既に提案されたユニバーサル符号の改良あるいは性能評価が中心であり、新たな独自の符号の提案は殆ど行われていない。他方、理論面の研究では、可算無限アルファベットを有する情報源に対する 2 種の Lempel-Ziv 符号化法が植松と金谷によって提案された。この研究が契機となり、カナダの Yang と He は可算無限アルファベットを有する情報源の集合に対し、ユニバーサル符号が存在するならば、常に具体的なユニバーサル符号が構成できることを示した。

これらの研究は、最終的には米国の Orlitsky、Santhanam、Zhang による未知の情報源アルファベットを有する情報源の符号化問題という情報理論の新局面を導いた。しかし、残念ながら、この新しい符号化問題は日本国内ではまだ殆ど研究されていない。

有ひすみ符号化については、通信路符号として知られていた LDPC (Low Density Parity Check) 符号を利用した新しい有ひすみ符号化が、松永と山

本によって示された。また、より一般的な情報源に対する拡張が三宅と村松によって行われている。海外においては、単純な有ひずみ符号化問題はあまり取り扱われていないが、画像符号化の研究の一端として、相関を有する副情報源を伴う有ひずみ符号化において LDPC 符号を用いる方法が、米国の Girod、Aaron、Rane、Rebollo-Monedero によって提案されている。

② 誤り訂正符号（通信路符号化）

近年 LDPC 符号が大きな注目を集めている。LDPC 符号に関する最近の重要な成果としては、低計算量で実行可能な Belief Propagation と呼ばれる反復復号法の性能解析法である Density Evolution の開発（Richardson、米国）と、それを基にした性能評価法と最適化法の開発（ローザンヌ工科大学、スイス）が挙げられる。これらにより理論限界に迫る LDPC 符号の設計が可能となった。

また、Luby（Digital Fountain 社、米国）による DPC 符号を定義するグラフの非正則化、笠井による同時次数分布の導入、Richardson（米国）によるグラフの構造化、NASA（米国）による容易な実装を可能にする Protograph LDPC 符号の提案、などが行われており、LDPC 符号のより高い復号性能を引き出すための一般化として注目される研究である。

さらに、相互情報量の変化を近似することによって性能を評価する EXIT chart 法（ten Brink、米国）情報幾何（池田、田中）や統計力学（田中、樺島）を用いた復号性能の解析、パケット通信の消失復元への応用である Digital Fountain 社（米国）の Raptor 符号なども特筆に値する。

③ ネットワーク符号化

ネットワーク符号化は、Ahlsvede、Cai、Li、Yeung によって 2000 年に提案された比較的新しいテーマであるが、最大フロー問題の情報理論版と位置づけられる。彼らは、エッジ上のフローを情報伝送速度とみなしたとき、ソースノードから複数のシンクノードに対して情報を伝送する際、ソースから各シンクノードまでの最大フローの最小値で定まる情報伝送速度までは、途中のノードで適切な符号化を行うことで常に情報伝送が可能であることを示した。その後、Li、Yeung、Cai によって、そのような符号化が線形符号（加減算）で実現できることが明らかにされた。現在、ネットワーク符号化は MIT の Medard のグループなどを中心に、活発な研究が行われている。

④ 通信トラヒック理論

通信トラヒック理論は、デンマークの技術者アーランによって 20 世紀初頭に創始され、およそ一世紀の間、情報通信システムの技術的変遷とともに理論も整備されてきた。そのため、伝統的に欧州における研究機関がこの分野で活発に研究しており、続いて北米、アジアの順で盛んである。通信トラヒック理論の最新の研究が発表される International Teletraffic Congress (ITC)

の最近の国別発表傾向を見ると、オランダ、ドイツ、フランスを中心とした欧州各国の発表が半数を占め、続いて米国、カナダの発表が4分の1、日本、中国などアジア全体の約8分の1程度の発表割合である。発表内容としては、アプリケーションのエンド・ツウ・エンド通信品質評価、無線網やP2Pネットワークの性能評価が大多数の発表を占め、数は少ないながらも理論の発展に貢献する研究発表も散見される。

従来のマルコフ解析的なアプローチによる情報通信システムの性能評価に関しては、無線LANのMAC層技術やマルチホップ無線通信を対象とした研究が近年活発に行われている。具体的には、IEEE 802.11 標準 MAC 層の再送制御を考慮に入れたスループットの厳密解析 [1,2] や、マルチホップ無線メッシュ網におけるスループット劣化問題の原因解明 [3] 等が行われ、有用な知見の獲得に成功している。また P2P 技術についても、ユーザの挙動やピア母集団の時間発展を考慮に入れた理論モデル [4,5] がさかんに研究されている。この方面については米国、欧州の大学・研究機関で研究が先行していたが、最近では日本国内でも大学を中心に研究が活発化してきている。

トラヒック理論の新潮流として、エンド・ツウ・エンドの遅延特性やパケット棄却率に関する理論研究も近年さかんになってきている。このようなテーマでは、従来は待ち行列網理論による解析的アプローチが中心であったが、最近ではトラヒックフローを確定的に特徴付けることによってエンド・ツウ・エンドの遅延性能上界値を導出するネットワーク算術 (Network Calculus) と呼ばれる解析アプローチも注目されるようになってきた [6,7]。

⑤ 暗号

暗号の研究に関しては、安全性の定義など基礎理論については、MIT を中心とする米国、Weizmann Institute of Science を中心とするイスラエルが最も基本的な成果を出している。共通鍵暗号アルゴリズムについては、国際標準の共通鍵暗号 AES の基本アルゴリズムを提案した Katholieke Universiteit Leuven ルーベン大学 (ベルギー)、NTT と三菱の Camellia、三菱の Misty、公開鍵では RSA-OAEP を提案した RSA 社 (米国) が先導している。暗号アルゴリズムについては、安全性証明可能暗号が重要になっているが、日本、米国、欧州はその研究が盛んである。暗号解読については、米国が最も進んでいるが、日本の三菱が提案した線形解読も国際的な評価が高い。米国、欧州、日本はトップ学会での論文発表が多く、韓国も最近論文発表が増えつつあり、また中国も第一線の研究者が育ってきた。

暗号の技術開発に関しては、実際に最も多く利用されている共通鍵暗号として AES (欧州)、Triple DES (米国)、公開鍵暗号では RSA (米国) がある。しかし、近年は日本の暗号も国際的な評価が高く、ISO の標準化では多数の日本提案が残った。これらのうち、共通鍵暗号については、Camellia (NTT /

三菱)、Misty1 (三菱)、MUGI (日立)、MULTI・S01 (日立) が、また公開鍵暗号については、HIME (日立) が進んでいる。

暗号の産業化については、Windows が標準採用して最多数の実装実績をもつ。Certicom 社 (米国)、Infinion 社 (ドイツ) などのカード実装がある。米国が最も進んでいるが、日本も社会の様々な部分 (デジタル放送、DVD、スイカカードなど) 全体で多くの実用化経験を有する。

⑥ 電子透かし

電子透かし技術に関しての研究としては、Purdue Univ. (米国)、Univ. of Cambridge (英国)、Laboratoire et des Signaux (フランス)、Louvain-la-Neuve (ベルギー)、Philips 社 (オランダ)、東大 (日本) がある。韓国は KAIST を中心に多数の研究者が育っている。

電子透かしの技術開発においては、Digimarc 社を中心とする米国、Philips 社 (オランダ) などの欧州、日本 IBM、日立的日本、MarkAny 社の韓国が力を持っている。

電子透かしの実装技術に関しては、韓国でデジタル映像や音楽の保護に多数利用され、実績を持っている。また、Digimarc 社の静止画用電子透かしも多数利用されており、日立、NTT の技術がそれに次いでいる。

⑦ ネットワーク強度

ネットワークの強度を確保する、技術として次の 2 つが注目される。

i 民生品ソフトウェアのロバストネス評価

特注品ではなく市場に出回っている民生品 (いわゆる、COTS プロダクト) を利用したシステム開発が求められてきている。そうした COTS ソフトウェアを過負荷な状況下で動作させて、ロバストネスを定量的に評価することが行われている。

ii 不正侵入に対するトレラントシステムの構成技術

システムへの不正侵入があったとしても、システムの提供する機能サービスを維持できるようにする技術である。特に、分散システムにこの耐性を持たせることが重要になってきている。

これらの研究分野での水準の評価を、ディペンダブルシステムに関する代表的な国際会議である DSN (International Conference on Dependable Systems and Networks)、および PRDC (International Symposium Pacific Rim on Dependable Computing) での発表によって比較すると以下ようになる。米国の大学 (例えば、CMU、MIT など)、欧州の研究所 (例えば、IBM 研究所、LAAS など) が世界をリードしている。日本では純粋な理論的研究よりも、(未だ実用化には至っていないが、その方向性を意識した) プロトタイプ作製に関心が集中している。設備・人材面での取り組みで目を引くのが、中国、韓国の積極的な姿勢である。

この分野で注目される技術に「モデル検査を利用した検証技術」があり、これは検証したいシステムをモデルとして入力し、満たしてほしい性質をやはり入力としてモデル検査ツールに与えれば、完全に自動的に結果を返してくれるものである。定理証明ツールに比べ遙かに実用的になりうると注目されている。このような検証技術には、SMV, SPIN, UPPAAL などがもっともよく知られているツールであるが、米国、欧州を中心に開発が進んでいる。日本もそれを追う形で、大学、研究所を中心に活性化してきている。中国、韓国については、未だほとんど研究者がいないようである。

〈参考文献〉

- [1] A.Baiocchi, A.Todini and A.Valletta, "Analytic Modeling of Ad Hoc 802.11 Networks with Hidden Nodes Applied to a Split Channel Solution for Performance Improvement," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.295-308, 2007.
- [2] C.H.Foh, M.Zukerman and J.W.Tantra, "A Markovian Framework for Performance Evaluation of IEEE 802.11," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.6, no.4, pp.1276-1285, 2007.
- [3] P.T.Giang and K.Nakagawa, "Improvement of Fairness by PCRQ Scheduling in Multihop Wireless Ad Hoc Networks," Asia-Pacific Symposium on Queueing Theory and Network Applications 2007 (QTNA2007), pp.339-348, 2007.
- [4] I.Norros, B.Prabhu and H.Reittu, "On Uncoordinated File Distribution with Non-Altruistic Downloaders," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.607-617, 2007.
- [5] K.Leibnitz, T.Hobfeld, N.Wakamiya and M.Murata, "Peer-to-Peer vs. Clinet/Server: Reliability and Efficiency of a Content Distribution Service," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.1161-1172, 2007.
- [6] F.Ciucu "Network Calculus Delay Bounds in Queueing Networks with Exact Solutions," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.495-506, 2007.
- [7] J.Joung, J.Song and S.Lee, "Delay Bounds in Tree Networks with DiffServ Architecture," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.533-543, 2007.

2.5.3 比較表

◆ネットワークが提供する環境

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	光通信によるコアネットワーク、FTTH、モバイルネットワークなどの研究実績は大きい。セキュリティ関連では部分的にリード。IP に次ぐネットワーク研究力では米国に劣る。
	技術開発水準	◎	↗	Gbps 級 FTTH および B3G によるブロードバンドネットワーク環境に向けての開発では世界をリード。
	産業技術力	◎	↗	FTTH の導入では世界を圧倒しており、ブロードバンド環境は世界一安いビット単価を提供し優れている。企業活動に必要なグローバルなネットワーク環境については米国にやや遅れている。
米国	研究水準	◎	→	PKI などセキュリティ関連の研究でリード。グリッドコンピュータネットワークなどハイエンドの研究や、IP に次ぐネットワーク研究で先行している。
	技術開発水準	◎	→	現実的なニーズによる開発の層が厚く、世界をリードしている。
	産業技術力	○	↘	ブロードバンド環境の整備で、日本、韓国に比べてやや遅れ。
欧州	研究水準	◎	→	GSM、GPRS、デジタル放送、などでの研究実績あり。欧州をあげてフォトリックネットワーク環境に向けた基礎研究に力を入れている。
	技術開発水準	○	→	開発テンポが速くなり、米国流のベンチャー主導の技術開発に対して遅れが出ている。
	産業技術力	○	→	米国、日本、韓国、中国の環境整備に比べて遅れが目立つ。
中国	研究水準	×	→	通信事業者の研究力は低く、大学に依存して研究している場合が多い。
	技術開発水準	△	↗	3G では独自方式の開発力をつけている。
	産業技術力	△	↗	Internet 利用者は 1.5 億人を越え（日本の 2 倍以上）、携帯電話加入者は約 4 億人となり（日本の約 4 倍）。巨大市場を背景に 3G 環境に向けて急速に整備しつつある。
韓国	研究水準	△	→	ETRI, KAIST などを中心として研究のレベルを上げてきている。米国との研究者人脈が強く、日本を追い上げている。
	技術開発水準	○	↗	ETRI, KT 研究所、Samsung などが主体となって急速に技術開発の実力をつけている。
	産業技術力	○	↗	ブロードバンド環境の整備では、政府主導で推進し産業力強化に成功している。
全体コメント：電話、データ伝送主体のネットワーク環境からインターネット主体のネットワーク環境に変化し、コンピュータ通信で先行していた米国の強さが顕著になってきている。日本は米国を急追しているが、全般的にはやや遅れている。欧州は全般に遅れ気味。韓国が日本と同格に米国を急追している。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ネットワーク応用（サービス技術）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	先行研究力はあるが、実用化へ結びつける力量不足。
	技術開発水準	○	↗	モバイル環境での各種サービス開発では世界をリード。
	産業技術力	○	→	ネットワーク環境の良さに比して、コンテンツ関連産業の立ち上がりが不十分。
米国	研究水準	◎	→	大学での先進的コンセプトにもとづく研究や、ベンチャーによる挑戦的な研究の層が厚い。ベンチャーによる実用化への移行も例が多い。
	技術開発水準	◎	→	E コマース、検索サービス、e- ラーニング、オンラインジャーナル、などで世界をリード。
	産業技術力	◎	→	インターネットのアプリケーションサービス、コンテンツの面で世界をリード。
欧州	研究水準	○	→	先進的コンセプトの提案、研究力では伝統的に実力あり。
	技術開発水準	○	→	電子決済、e- ラーニング、オンラインジャーナル、などで先進的な技術開発実績と実力がある。
	産業技術力	○	→	研究力、技術開発力に見合う産業技術力が発揮できていない。
中国	研究水準	×	→	大学における単発的な研究はあるものの産業に結びつく研究活動はほとんどない。
	技術開発水準	×	→	インフラ整備、基本サービスの普及が主体であり、新サービスの技術開発は遅れている。
	産業技術力	△	↗	欧米、日本などの産業技術を現地化するタイプの技術力は十分あるが、自力でネットワークサービスを産業化するレベルにはまだ達していない。しかし、急速にレベルを高めている。
韓国	研究水準	△	↗	ETRI や Samsung などの研究所では、サービス研究の実力を高めているが、実績はまだ少ない。
	技術開発水準	△	↗	現実のニーズ対応の技術開発は欧米追従だが、NGN 関連の開発には大きな力を注いでおり、関連するサービス技術の成果が今後出てくる可能性が高い。
	産業技術力	○	↗	キャッチアップ型での産業技術力は十分高いレベルにある。

全体コメント：近年のネットワーク応用は、電話・データ主体のサービスからインターネット主体のメール、検索、グループウェア、IP-TV など極めて多様に展開している。サービス技術のレベルはネットワーク環境およびユーザの潜在ニーズと極めて密接な関係があるため、その国の経済力、産業力と高い相関を示すこととなる。インターネットとコンピュータ応用で世界をリードしている米国がネットワーク応用においても先導的立場を築いているのは当然の成り行きである。欧州は全般にやや遅れ気味であり、日本は米国を急追している。

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆アーキテクチャ（ドライビングコンセプトを含む）

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	ユビキタスネットワーク関連研究が推進されているが、本格的な次世代インターネットアーキテクチャへの取り組みは不十分である。研究開発用テストベッドのギガビットネットワーク JGN-II は 2007 年度で終了予定。
	技術開発水準	◎	↗	電話網の IP への置換を目的とする当座の NGN 関連の開発が盛ん。
	産業技術力	○	→	上記 NGN は未だ実験段階。網構築はこれから。
米国	研究水準	◎	↗	NSF 資金で次世代インターネットのアーキテクチャを研究開発する FIND イニシアティブを立ち上げ、関連するテストベッドである GENI の構築が検討され、研究活動が盛んで、世界をリード。
	技術開発水準	◎	↗	全米レベルのオーバレイネットワーク PlanetLa b 構築やセンサネットなどの新しい技術開発で世界をリード。
	産業技術力	◎	↗	米国キャリアは NGN に及び腰であるが、Cisco, Juniper などが IETF での標準化や IP 機器市場を支配するとともに、ベンチャー企業が新しいアーキテクチャによるシステムを続々商品化。
欧州	研究水準	◎	↗	EC 資金による FP7 等において EU 全体を睨んだ研究投資盛ん。次世代インターネットのアーキテクチャの研究プロジェクト Euro-NGI を立ち上げ、P2P、センサネットにも注力している。
	技術開発水準	◎	↗	固定・移動網を IP 技術で統合する NGN の標準化(TISPAN, 3GPP, ITU)を中心となって推進。キャリアも参画した NGN 開発が始まっている。
	産業技術力	○	↗	既存移動体網を足がかりに新 NW の構築計画および投資が始まった。NGN での IP 機器市場での巻き返しを画策している。
中国	研究水準	△	→	テストベッド CERNET を構築し、IPv6 などの研究を実施するも次世代インターネットアーキテクチャへの取り組みは不明。
	技術開発水準	△	↗	ITU を中心に NGN 標準化に注力する。ただし電話交換網をベースにした旧アーキテクチャを踏襲。
	産業技術力	△	↗	IPv6 を起爆剤にルータベンダを育成。
韓国	研究水準	△	→	テストベッド KOREN を構築し、QoS、MPLS の研究を推進するも、次世代インターネットへの取り組みなどは不明。
	技術開発水準	○	↗	ITU を中心に NGN 標準化に注力。キャリアとベンダが密に連携した技術開発体制により急速にレベルを上げている。
	産業技術力	○	↗	サムソン社など NGN、IP 機器開発に積極的な投資。キャリアによる実験網構築開始。
全体コメント：欧州が中心となって、米国のインターネット支配から脱却するため、IP 技術の改良による固定・移動網の融合を目指した NGN に注力している。一方、米国は、IETF を中心として IP 技術の支配を継続するとともに、NGN 後を見据えて次世代インターネット、センサネット等の新アーキテクチャに関する学術研究を立ち上げている。日本は固定電話網置換の活動が進んでいるが、次世代インターネットの方向性は見えない。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ネットワークシステム

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	光通信は超大容量 WDM 伝送技術、フォトニック NW ノード技術とも日本の産官学の研究機関が主導的にリードしている。ワイヤレス通信は、4G に向けて研究開発が活発に行われている。ただし、基礎的研究、研究の幅の広さにおいて米国、欧州に対して今一步の状況。
	技術開発水準	◎	→	光通信システム、光ケーブルの分野で日本には強力なベンダが競合しており、高いレベル。ワイヤレス通信では、HSDPA、Beyond 3G、WiMAX などのシステム技術開発できわめて活発。ルータ分野では、日本は世界をリードする米国を追うが、世界での日本の競争力は不十分。標準化活動では欧米のリードを許している部分が多い。
	産業技術力	◎	→	NTT の F T T H 3000 万加入計画に支えられて光アクセスでは世界をリード。ワイヤレスシステムの産業技術力も十分高いが、グローバルマーケットでの競争力は高くない。
米国	研究水準	◎	→	著名な大学、国際的な研究機関が多数あり、世界から優秀な研究者を集めて高い研究水準にある。ラムダネットワーク用システム技術、UWB 関連技術、センサネットワーク用システム技術、超高速ルータ技術などの研究が活発。
	技術開発水準	◎	→	LAN、ルータ、コンピュータ通信システム分野では、米国は世界の勝負市場であり、次世代の 100GbE などの標準化でも世界を牽引。産学軍が連携して層の厚い技術開発人材を擁している。
	産業技術力	◎	→	光通信ではメトロネットワーク用製品、FTTX 製品などが急速に活発化している。ルータ分野は特に強く、CISCO が圧倒的であるが、Juniper Networks ほか多くのベンチャー企業が競合しており高い産業技術力を持つ。ベンチャー企業を育てる風土があり、大学からの転身なども活発。
欧州	研究水準	◎	→	FMC や NGN の分野では戦略的な研究開発が行われており、コンセプト作りで先行している。大学における基礎研究は伝統的に強く、また、EU Project による汎欧州の産官学の連携研究が成功を収めている。多くの大学やキャリアの研究機関、また、Alcatel、Siemens といった大企業の研究機関も活躍している。
	技術開発水準	◎	→	Alcatel、Siemens などのプレゼンスは大きい。(Wireless では Nokia、Ericsson も)
	産業技術力	○	→	総合力では米国に少しの遅れかもしれないが、欧州のキャリアはアクセスの光化については慎重であり、現状では遅れている。
中国	研究水準	△~○	↗	以前は研究水準はさほど高くなかったが、米国帰りの研究者などを中心に欧米との連携を強めており、レベルも上がってきた。
	技術開発水準	○	↗	日欧米の技術導入が中心であったが、新興企業は製品実用化技術を低価格で実現し国際競争力を増強している。ルータ分野では、中国 Huawei が世界第 3 位のシェアにまで成長。世界中から中国系の人材を召還し、技術開発力の底上げに注力。
	産業技術力	◎	↗	Internet 利用者は 1.5 億人を越え（日本の約 5 倍）、携帯電話加入者は約 4 億人となり（日本の約 4 倍）、まだ急速に伸びている巨大市場の中で、人件費が低く Huawei、ZTE などの台頭が顕著。
韓国	研究水準	○	↗	ETRI, KAIST を中心として研究水準は高い。米国との人脈も強く、日本を追い上げている。
	技術開発水準	○	↗	新方式 (WiBro など) の実用化には国を挙げて戦略的に進めている。モバイル関連の世界市場では極めて競争力のある位置にある。Samsung, LG-Nortel などメジャーなベンダー有り。
	産業技術力	○	↗	Samsung, LG-Nortel などメジャーなベンダー有り。ただし、コアシステム・幹線系での韓国企業の実績は強くない。
全体コメント：日本は、研究水準では高い位置におり、世界をリードしている、といえると思うが、技術開発水準では、標準化など折衝力も必要であり、必ずしも強いとは言えない。産業技術力全般では、Global 化が課題である。米欧は基礎研究の伝統もあり、ベンチャービジネスの風土もあるため、競争力が強い。アジア、特に中国の、巨大市場を背景にした進展が強い。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ネットワーク制御・管理・運用

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	学術系 NW (JGN2、SINET3) で MPLS/GMPLS/QoS 技術を採用 (予定含む) し、大規模ネットワークを目指した研究ではキャリア研究機関を中心に、MPLS/GMPLS、パス制御機能等を含め活発。米国に比して大学の研究力が限られている。
	技術開発水準	◎	↗	フロー監視技術の実装など先導的なネットワーク制御技術を開発する力を持つメーカーが出てきている。国際標準化では、従来から I T U ではリーダを多数出しているが、最近 IP 系標準化団体 I E T F でもリーダのポジションを獲得している。
	産業技術力	○	→	システムベンダ、サービス運用事業者は、米国には及ばないが活発に事業化している。
米国	研究水準	◎	→	大学の研究水準が高い。学術系 NW (Internet2、DRAGON、National Lambda Rail 等多数) で MPLS/GMPLS/QoS 技術を採用 (予定含む) し、国際会議、研究発表も多数の大学、ベンダを中心に非常に活発。
	技術開発水準	◎	↗	従来から I T U -T では役職者を維持しているが、最近 I P 系標準化団体 I E T F でも役職者を獲得している。
	産業技術力	◎	→	監視制御では Arbor、Cisco が先導している。国際的に力のあるシステムベンダが他の地域 / 国より多数存在する。
欧州	研究水準	○	→	学術系 NW (SURFnet 等) で MPLS/GMPLS/QoS 技術を採用 (予定含む) し、大規模ネットワークの研究ではキャリアと少数のベンダが、主にパス制御機能や運用・制御手法を中心に活発。
	技術開発水準	◎	→	従来より、国際標準化のリーダを継続的に輩出している (I E T F、I T U -T)。
	産業技術力	○	→	国際的に力のあるシステムベンダ、サービス運用事業者がいくつかの国に存在している。
中国	研究水準	×	→	国策として学術パイロットネットワークを構築している。研究発表は一般にあまり活発ではない。
	技術開発水準	△	↗	品質制御を中心に、国際標準化でのリーダを増加しつつある (I T U -T)。
	産業技術力	○	↗	システムベンダはごく少数 (Huawei 等) であるが、国際市場での活動が活発化している。
韓国	研究水準	×	→	国策として MPLS による統合網を構築中、また先端技術のパイロットネットワークも構築しているが、研究発表は一般にやや低調である。
	技術開発水準	△	→	本技術領域では目立った国際標準化役職者は存在しない。
	産業技術力	△	→	国際的に力のあるベンダーが育っていない。
全体コメント：米国のトラフィック監視制御装置メーカーの勢力が強い。MPLS/GMPLS/QoS 技術については、国策あるいは学術パイロット NW の研究開発が牽引する構図で、日米欧を中心に活性化状況が続いている。国際標準化活動で中国・韓国が比較的活発に活動しており、国家パイロットを活用した技術の創出とグローバル発展を戦略的に検討していると思われる。MPLS/GMPLS と QoS 制御の統合・融合が国際会議等で提案の主流となりつつある。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆情報通信端末技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	ハードウェアからミドルウェアまでの研究開発を実施するが、米国に比べ OS、ソフトウェア技術が弱く総合的な研究水準ではひけを取る。
	技術開発水準	◎	→	モバイル機器用ワイヤレス技術、HI 技術、光技術などの強みに支えられてレベルは高いが、端末チップやソフトの主導力が弱く今後の水準維持には懸念がある。
	産業技術力	◎	↗	情報家電を中心とした技術（ディスプレイ、高画質化チップ、製造等）で世界と伍する技術を持つ。
米国	研究水準	◎	↗	インターネット技術、PC 技術を中心として積極的にハードウェアから、ミドルウェアまでの通信端末関連研究を行っている。
	技術開発水準	◎	↗	主要企業（ワイヤレスではモトローラなど）およびベンチャー企業による実用化技術開発は極めて活発である。
	産業技術力	◎	↗	キャリア等も積極的に新しい技術を導入したサービスを開発。INTEL 等の PC 技術を中心にサービスから商品開発まで、世界トップの産業技術力を有する。
欧州	研究水準	○	↗	欧州独特の事情に応じた研究開発が活発に実施されている。
	技術開発水準	○	→	モバイル端末における Nokia、コンピュータ端末における Siemens などのプレゼンスは大きい。
	産業技術力	○	↗	欧州各国が連合して、PLC 等の標準化を推進し、端末開発コスト、価格の低減を狙っている。
中国	研究水準	△	→	大学を中心にしてデジタル放送用機器の研究を行っている事例（清華大学）などの事例はあるものの、研究は欧米の後追的なものが多い。
	技術開発水準	△	↗	WiMAX、T-DMB、などの最新技術を積極的に諸外国から導入している。
	産業技術力	○	↗	膨大な労働力を活用し、OEM 形で業容を拡大している。AUO などディスプレイパネルなど部品レベルの供給能力は高い。
韓国	研究水準	○	→	サムスン等一部の有力企業での研究力は高いが、広がりはいくつか大きい。
	技術開発水準	○	↗	ディスプレイパネル・LSI などにおいて、サムスン等による特化した高い研究開発力と膨大な投資力を有する。
	産業技術力	◎	↗	同上により、全世界への商品供給能力は日本に匹敵する。
全体コメント：米国主導のインターネット型（PC 型）ビジネスにより、米国、欧州はもとより、中国・韓国も技術開発力を増している。日本は、情報家電等のデジタル家電による高付加価値化に向けて高い産業技術力を有しており、これを活かして多様なサービスの端末技術を実現するためのハードウェア開発からミドルウェア開発までの技術力を一層高めることが期待される。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆ヒューマンインタラクション

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	音声認識では、音声対話コンソーシアム（I S T C）をはじめとした国内研究機関の連携が進んでいる。また、触覚提示に関する独自の研究開発が活発に行われている。
	技術開発水準	○	↗	ロボット、情報端末等に音声認識を適用した実証用システムが多数存在している。
	産業技術力	○	→	画像・映像系、マルチメディア系では米国より弱い。
米国	研究水準	◎	↗	音声認識に関する有力研究組織が多く、また DARPA でのコンペティションなど常に先進的で大規模な取り組みがあり、新技術の提案も多い。先行した触覚インタフェースの研究は継続して活発である。
	技術開発水準	◎	↗	画像・映像の利用技術、マルチメディアの活用技術などにおいてリードしている。
	産業技術力	◎	↗	映画産業において、自由視点映像など新規 CG 技術を積極的に利用している。音声認識においても Nuance 社、I B M 社などが電話自動応答、組み込み用認識エンジンなどを開発している。触覚インタフェースでも、SensibleTechnology 社等の先行的企業が活躍している。
欧州	研究水準	◎	→	音声系、画像・映像系、マルチメディアいずれにおいてもトップレベルの研究が行われている。
	技術開発水準	○	↗	米国、日本に比べてやや弱い。
	産業技術力	○	→	音声認識分野では、携帯電話、カーナビゲーションなどで携帯電話会社、自動車メーカーの後押しがある。
中国	研究水準	○	↗	CG 分野等でマイクロソフトの研究所などに優秀な学者が集結し、年々、成果を上げてきている。今後伸びてくる可能性が高い。
	技術開発水準	△	↗	ここ数年、MPEG/JVT による標準化への寄書が増加しており、自由視点映像分野で開発力が向上している。
	産業技術力	△	↗	先進国の技術をキャッチアップ中である。
韓国	研究水準	○	↗	触覚インタフェースに関する学会等での研究発表が活発化している。
	技術開発水準	○	→	自由視点映像分野で、ここ数年、MPEG/JVT による標準化への寄書が増加している。
	産業技術力	○	→	欧州、日本と同等のレベルにある。

全体コメント：コンピュータグラフィックスの分野では、世界各国から集まる人材とハリウッドの映画産業を抱える米国が、研究水準、技術開発水準、産業技術力のすべてにおいて他を凌駕している。自由視点映像技術も含め、大学から産業まで人材・技術が活発に流通している。また外資系企業によりコンピュータ科学者が厚遇されている中国においては、研究水準が年々高まっている。中国・韓国からの標準化提案が、ここ数年で急激に増加している。音声認識に関しては、米国に有力な研究機関があるが、言語固有の課題もあり、各国で研究開発が進んでいる。日本ではカーナビでの利用が活発であったり、ロボットへの応用など、活発に応用されている。また、欧州では携帯電話会社、自動車メーカーの後押しがある。触覚インタフェースについては、Phantom を生んだ米国が先行しているが、日本の大学、基礎研究機関における新規技術の研究も活発である。韓国も活発になりつつある。

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆要素技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	光通信では、WDM 伝送、QPSK 変復調、等の先端技術で北米と拮抗しトップを走っている。また、量子光通信の研究も米国とならび活発である。光 SW 関係は漸く北米に追いついてきた。ワイヤレス通信は、4G に向けて研究開発が活発に行われている。
	技術開発水準	◎	↗	40 Gbps 光伝送、光インターコネクション、フォトニッククリスタルファイバー等の開発で先行している。測定・試験技術では特に光測定、LSI 試験などの領域で世界のトップである。コンポーネントでは、従来日本は圧倒的に先行していたが、現在は欧米と同等のレベル。
	産業技術力	◎	↗	全般に企業の技術力は高い。光通信モジュール、光測定、LSI 試験では日本がリードし世界を牽引しており、ワイヤレス通信用技術においてもメカ力の力は強い。
米国	研究水準	◎	↗	光分野では、WDM 伝送、QPSK 光変復調、等で世界のトップレベル (Lucent, Tyco 等)。無線分野では、CDMA、OFDM、MIMO 技術などで世界をリード。新しい符号化アルゴリズムの提案など研究水準は高く、この分野をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	超高速技術 (40 Gbps など) では日本に多少遅れ気味。しかしながら、新技術開発でのベンチャが活発であり、画像符号化でのマイクロソフトの VC-1 など、全般に技術開発力が高い。
	産業技術力	◎	↗	10 Gbps の現市場は巨大で多数のプレーヤが活動。システムでは Lucent、Nortel、光部品では JDS、大容量ルータで Cisco、IC では broadcom など、国際的な実力を持つ企業が多い。
欧州	研究水準	◎	↗	ITS: 欧州内の国際プロジェクトで光バースト NW など先端的な研究などが盛ん。画像符号化では、独、UK、仏、伊、オランダ等を中心に研究活動が活発である。
	技術開発水準	◎	↗	40、100 Gbps でのデバイス、高速電子回路に強み (HHI)、EDFA 等のファイバ研究開発も盛ん。画像符号化でも、H.264 準拠製品を数十社が開発するなど、企業の技術開発は活発である。
	産業技術力	◎	↗	通信用要素技術ではアルカテルが欧州市場を席巻している。また、他の企業も全般に技術力が高い。
中国	研究水準	×	→	研究レベルはまだ高くない。
	技術開発水準	△	→	WDM、QPSK、デバイスともキャッチアップ中の印象。
	産業技術力	△	↗	安い WDM の製品化等で独自の道を歩んでいる。華為 (ファーウェイ) が安売りでシェア拡大。画像符号化では、TCL、康佳、創維などの企業があるが、まだ、自前での産業技術力を備えるには至っていない。
韓国	研究水準	△	→	光バースト SW を国策で進めている。
	技術開発水準	○	→	WDM-PDS を国策で進めている。
	産業技術力	○	↗	サムソンが巨大だが、この領域は集中力が弱く、韓国国内レベルに留まっている感が強い。汎用部品はあまり強くはないが、画像符号化では LG 電子、サムスン電子、TOSYS 社などが技術力を伸ばしてきている。
全体コメント：情報通信の要素技術としては、かつての部品中心のハードウェア技術に加えて、OS、ミドルウェア、組み込みソフトなどソフトウェア技術が重要になってきている。日本は、ハードウェア技術では圧倒的な強さを有しているが、ソフトウェアの比重が高まると共にその地位が脅かされつつある。韓国、中国は製品レベルでは力があっても、一部の部品技術ではキャッチアップしているものもあるが、全般的な水準は未だ低い。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆基礎理論

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	情報理論、トラヒック理論、暗号理論、符号理論、通信理論、音声・画像信号処理、などにおいて米国、欧州とならんでトップレベルにある。
	技術開発水準	○	→	理論的研究の成果を実用技術に展開する力が米国、欧州に比して弱い。
	産業技術力	◎	↗	高い製品開発力と進んだ市場に支えられ、米国、欧州に並ぶ産業技術力を有する。
米国	研究水準	◎	→	世界のトップレベルの頭脳を集めており、全ての領域で高い研究水準を保っている。
	技術開発水準	◎	→	理論的研究の成果を応用して製品化へ結びつけるチャレンジ精神が豊富であり、高い技術開発力を有する。
	産業技術力	◎	→	世界トップの研究水準、技術開発力と先端的な市場、軍用へのニーズに支えられ、高い産業技術力を有する。
欧州	研究水準	◎	→	伝統的な情報理論、トラヒック理論に加えネットワーク設計理論の水準が高い。
	技術開発水準	◎	→	研究成果を実用化へ結びつける技術開発でも成果が多い。
	産業技術力	◎	↗	音声・映像など信号処理の応用、セキュリティ関連、高能率通信技術など多くの強みをもつ。
中国	研究水準	○	↗	トップレベルの大学において、多くの研究領域で研究レベルを急速に高めつつある。
	技術開発水準	△	→	理論的研究を新規の技術として開発する力は未だ弱い。
	産業技術力	△	↗	キャッチアップ型の製品化は行われている。
韓国	研究水準	△	→	大学や研究機関において理論研究の成果も有るが限定的である。
	技術開発水準	△	→	理論的研究を新規の技術として開発する力は未だ弱い。
	産業技術力	○	↗	日欧米の技術に追従する産業技術力は高まりつつある。
全体コメント：基礎理論では、長い研究の歴史と世界の頭脳を集積する高いレベルの研究環境を維持している米国とそれに次ぐ欧州が世界を牽引している。日本は研究水準において、同等に多くの領域で成果を挙げ高いレベルにあるが、それを産業に結びつける起業精神に基づく技術開発力が弱い。中国、韓国は、研究の歴史が短く、個人的な研究力に依存しており、全体的にキャッチアップの途上と言える。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.6 ロボティクス分野

2.6.1 概観

ロボットは、センサ、アクチュエータ、メカニズム、それらを統合して機能を発現させるための理論・アルゴリズム、システムを構築する際のインテグレーション技術からなるシステムである。そこで、システムとしての実世界応用、システムインテグレーションのための理論・アルゴリズム、システムを構成するアクチュエータ・メカニズム・エネルギー源、センサ等のデバイス、インテグレーション技術について国際比較を行った。

従来から、ロボティクスに関しては、欧米では理論的研究が進んでいるが、産業用ロボットを筆頭に、宇宙などの特殊な分野を除いては、日本は実世界でのロボットに強いというのが従来からの定説であるが、この定説は崩れつつあるように思われる。また、中国や韓国も急速に力をつけつつあり、いつまでも日本がロボット大国であり続けることは予断を許さない状況である。

米国は、基礎研究や理論的研究において、優れた研究成果が多くの分野で見られ、非常に高い研究水準を保っている。特に、BMI (Brain Machine Interface)、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)、人工筋肉などの新しいアクチュエータなどでは圧倒的な優位性を保っている。従来からの NASA 主導の宇宙関連研究以外にも、DARPA のグランドチャレンジやアーバンチャレンジ、FCS (Future Combat System) など、軍関係のシステム開発を目的とした研究・開発に、巨額の予算が投入されるようになり、直接的・間接的に非産業用分野における産業技術力が非常に強化されている。例えば、掃除用ロボット Roomba を開発した iRobot は、軍用ロボットを開発していることで知られている。

日本は、ヒューマノイドを初めとして、ロボットの知能化やコミュニケーション技術に関するプロジェクトが数多くあり、それなりの研究成果が出ていると思われる。また、産業応用だけではなく、サービスロボット分野でも高い技術開発力を有しており、実際のロボットシステムの開発において高い技術力があると思われる。しかし、軍事関係で多額の研究費が投入されている米国や、大型の国家プロジェクトが行われている韓国と比べると、制度上の問題もあり、実証試験から実用化まで、ロボットの研究・開発が、迅速かつスムーズにおこなわれているとは言い難く、応用面でのブレークスルーが待たれている。

欧州では、ロボットに関する多数の意欲的なプロジェクトが開始され、特に、バイオリボティクス、医療、福祉関係では、非常に先端的な研究を行っている。特に、イタリア、ドイツ、フランスなどでは、ロボティクス関係の研究開発が活発に行われているとともに、特に、イタリアでは、ベンチャービジネスも数

多く誕生していると聞く。また、ドイツでは、DLR (Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt) が開発した軽量高剛性アームが企業にそのまま移転されるなど、研究機関の成果が、産業技術力の向上に結びつきつつある。また、産業界も、EU 内のプロジェクトに積極的に参加し、次世代のロボット技術の研究開発を行っている。

韓国では、ロボットに関する複数の大型プロジェクトが進行中である。ネットワーク端末としてのサービスロボットが開発され、一般家庭を対象とした、大規模なフィールドテストが行われている。また、空港や駅、郵便局などでも長期実証試験を行うなど、次世代ロボットの研究・開発が国主導で円滑に進められている。特に、知能化技術の応用については、積極的に産業界と連携が行われており、サービスロボットの製品化のスピードに関しては、制度面で導入が遅れている日本を追い抜く可能性もある。中国のロボティクスは、まだまだ発展途上であるが、米国や日本から中国に戻った研究者が、質の高い研究を行っており、近い将来、強力なコンペティターとなるものと思われる。

2.6.2 中綱目ごとの比較

(1) 実世界応用技術

ヒューマノイドロボットの研究開発に関しては、日本が一歩リードしているが、運動制御の観点からは韓国や中国も追いついて来ている。また、日本の産業界が、海外の研究機関に積極的にロボットの研究開発資金を提供し、海外においても新しい技術開発が行われるようになってきている。ロボットのソフトウェアに関しては、ドイツ KUKA 社とも提携したマイクロソフト社のロボット開発ツール MSRS (Microsoft Robotic Studio) がどれくらい実際のロボット開発に取り入れられるか今後注目されるところである。

アジアに目を向けると、韓国の国を挙げてのロボット研究への集中投資は脅威であるが、現時点では、実応用に関してはあまり先が見えていないように思われる。しかし、制度上の制約が少なく、公共施設におけるサービスロボットの実証実験も行われており、今後は、予断を許さない状況である。中国も次第に力をつけて来ており、注意しておかないと産業用ロボットは自動車産業の二の舞となりかねない可能性がある。市場性がある実応用と言う観点では、ダビンチなど医療用ロボット、グランドチャレンジを用いた軍事用ロボット、ドイツで着実に発展している産業用ロボットが強い。

日本では総花的に研究開発が行われているように思われるが、分野を絞った大規模投資が必要であろう。また、curiosity-driven の科学としてのロボット研究と、実応用としてのロボット研究開発とをはっきりと区別する必要がある。後者の場合は関連産業や制度設計も巻き込んだ開発を行わないと、地に足

の着いた開発にならないであろう。以下、個別に概要を述べる。

【日本】経産省を中心としたロボット施策が 2005 年愛地球博以降も継続している。2005 年からは総合科学技術会議科学技術連携施策群が設置され、次世代ロボット連携群を中心として府省間での連携強化が進んでいる。一方、産業用ロボットの生産額も市場が拡大しつつある。サービスロボットも愛地球博以降、ビル清掃ロボット、血液検体搬送ロボットなど、少しずつ実用機が出始めた。また、市場創出、産学連携が盛んとなり、大阪ロボットラボラトリーなど地域での産業インキュベーション化が進み、中小企業の参入が増えてきた。このようにそれぞれの分野で質の高い研究開発が進められているのが日本の特徴でもある。

【米国】医療用ロボット、軍事応用、BMI (Brain Machine Interface) 等の分野で先行している。手術支援ロボット、ダビンチは順調に世界展開中であり、導入する病院が増えている。軍事応用としては、DAPRA のアーバンチャレンジでの屋外自律走行ロボット技術の成果ばかりでなく、Boston Dynamics 社の 4 脚移動ロボット Big Dog では外乱に強い歩行を実現、パワードスーツは UC バークレイ校と SARCOS 社が先行しており、SARCOS 社では非常に機敏で機動性に優れたものが開発されている。また、iRobot 社はクリーナロボット Roomba を 250 万台以上売り、NASDAQ に上場されたことも特筆すべきであろう。Scientific American 誌 (2007 年 1 月号) のマイクロソフト社ビルゲイツ会長の解説記事は米国内外でも大きなインパクトを与えている。

【欧州】認識を中心にロボットの研究が進められている。研究ネットワーク EURON (EU Robot Network) が構築され、産業用ロボット、サービスロボット、宇宙・セキュリティを対象としたプラットフォーム開発 EUROP (EU Robot Platform) のように、横断的に EU プロジェクトが実施されている。一方、産業用ロボット分野も活気があり、2006 年に開催された自動化に関する展示会 AUTOMAICA は、日本の国際ロボット展以上とも言える規模であった。とくに食品応用では日本を上回り、全体のシェアも伸ばしている。大手産業用ロボット企業である KUKA 社がマイクロソフト社と組んでいることも注目である。ドイツ航空宇宙研究所 DLR で開発された宇宙用アームは力制御可能で自重対可搬重量比 1:1 という高性能なもので、KUKA 社が産業用に應用している。フランスではソフトウェアに重点が置かれ、認知・認識のほかに、実世界応用としては移動ビークルのナビゲーション技術の研究開発が進められている。

【韓国】日本のネットワークロボットに相当する URC (Ubiquitous Robot Companion) では約 1,000 世帯の家庭に家庭用ロボットを配布し実証実験、評価が行なわれた。現在は、空港、郵便局などでユーザを含めたパイロットプ

プロジェクトが始まっている。また、ロボット開発用ソフト Anybot Studio も開発が進んでいる。2015 年には 1 家に 1 台のロボットを目標としている。家庭用クリーナロボットでは数社が参入し市場が形成されている点は注目される。小型のヒューマノイドロボットでも、日本同等レベルにあり、すでに商品化もされている。国のプロジェクトの成果としては、日本同様に実用化には難航しているが、サービスロボットの分野ではトップを狙う戦略で進められている。

【中国】国主導で 863 High-Tech R&D Program の中で MEMS を含め、日本のプロジェクトを包括するように広範囲なロボットの研究開発が行われている。ヒューマノイドロボットでは北京工科大学を中心に開発され日本、韓国と似たような形、運動性能が実現されるなど、これからの研究開発に注目したい。

次に標準化についての概要を以下に述べる。科学技術連携施策群が推進する次世代ロボット共通プラットフォーム、総務省のネットワークロボット、経産省で開発されて RT ミドルウェア、民間中心の RSi (Robot Service Initiative) 間の連携が進み、サービスロボットに関してソフトウェア標準化団体 OMG において国際標準化を目指した協力が見られる。とくに日本発のネットワークロボットは韓国 URC、イタリア DustBot、スペイン URUS などのプロジェクト、および米国を含め国際展開を進めている。OMG に対しては、日本、韓国、米国が中心となり OMG ロボット技術部会 (Robotics-DTF) にて RT ミドルウェアがサービスロボットのミドルウェアの標準仕様として採択された。現在は、ロボットの位置取得に関して検討が進められている。一方、サービスロボットの安全性に関しては、JARA が中心となって、ISO へ働きかけを行なっている。また、規格化に向けては国内では経産省やロボットビジネス推進協議会にて、次世代ロボットの安全性確保ガイドライン、サービスロボットの運用が可能なエレベータの検査運用指針などが策定されている。

(2) 理論・アルゴリズム 1 マニピュレーション (指、把持戦略、物体の操りなども含む) —

マニピュレーションの理論やアルゴリズムは、ハードウェアとしてのハンドや指の機構に強く依存する。そこで本比較では、ハードウェアを含んで評価を行う。

【日本】研究水準は高く、ハンドや指のメカニズムや制御に関する研究、視覚や触覚フィードバックを有するハンドの制御に関する研究が従来から広く行われてきた。近年では、東京大学石川・並木研究室における高速ビジュアルフィードバックと高い機械的応答性を有する多指ハンドによる高速マニピュレーション

ンに関する研究、九州大学や岐阜大学における多指ハンドの開発と制御に関する研究、立命館大学における柔軟な指先を有するハンドによる把持と操りの研究、産総研のヒューマノイドプロジェクトにおける包み込み把握に関する研究開発、理研バイオメテックコントロールセンターにおける触覚フィードバックを用いたホールアームマニピュレーション等、世界的に注目されている研究がある。産業用ロボットや自動化機器の製造メーカーが多く、従来から産業技術力は高い。ファナック (<http://www.fanuc.co.jp/>) は、視覚センサを用いたバラ積み部品のピッキングや力フィードバックを用いた精密位置決め・精密挿入の技術を有しており、また安川電機 (<http://www.yaskawa.co.jp/>) は指モジュールと多指ハンドを市販している。ファナックは、視覚機能を搭載したロボットのコントローラを標準で販売しており、視覚を用いたマニピュレーションが実用化されつつある。前述の東京大学の高速ハンドはハーモニックドライブシステムズ (<http://www.hds.co.jp/>) が開発した小型高トルクモータを用いていることに代表されるように、このような部品レベルでの産業技術力も高い。経済的な状況やセル生産方式の普及に伴い、過去 10 年近くは自動化に関する研究開発が少なくなっていたが、昨年からは自動化に対する再認識が始まっており、過去少なかった自動化への研究開発への投資が期待できる。

【米国】理論的な研究の水準は最も高く、90 年代より把持やマニピュレーションの理論的解析とプランニング技法に関する研究、パーツフィード等に代表される確率的マニピュレーションや分散マニピュレーション (Distributed Manipulation) に関する研究開発、柔軟物操作計画に関する研究等、理論的な研究を先導している。特に、CMU の Mason や Northwestern University の Lynch らのマニピュレーション理論、Stanford University の Latombe らによる経路計画に関する研究は、理論研究の基盤になっている。近年では、Stanford University の Saha らによる柔軟物操作計画や USC の Schaal らによるダイナミックマニピュレーションに関する研究が注目される。ロボットハンドのみならず、フィード等による物体操作に関する理論的な研究も活発である。たとえば振動を用いた分散物体操作に関して、任意の位置決めが可能であることが実証された。オートメーションに関する研究では、2005 年に始まった IEEE Conf. on Automation Science and Engineering が重要な会議になりつつある。学術的な研究レベルの高さに比べると、産業技術力は特定の分野を除くとそれほど高くない。産業用ロボットでは、Adept Technology (<http://www.adept.com/>) が、ダイレクトドライブロボットならびにビジョンガイドシステムの開発と製造で目立っている。一方、ベンチャー企業としては、Barrett Technology (<http://www.barrett.com/robot/index.htm>) が高速アームと高速多指ハンドという特

微的な製品を市販しており、NASA 等における特殊環境用のマニピュレーションシステムや大学や研究所における実験用装置として高い評価を得ている。企業数は少ないため今後の産業技術力の広がりでは疑問符が付くが、NASA を始めとする世界的な数多くの研究機関、政府の研究開発予算がベンチャー企業に手厚いことを考慮すると、特定の領域で高い技術力を持つ企業群が産業技術力の高さを支えると考えられる。

【欧州】現時点で学術的な研究と産業界における技術開発との相互作用が最も確に作用しているのが欧州である。把持やマニピュレーションに関する研究は、米国ではコンピュータサイエンスとして認識されることが多い。欧州では、力学や制御に基礎を置く研究者が多く、ハードウェアとしてのハンドや指の開発と相まって、高い研究成果を近年誇っている。Scuola Superiore S. Anna（イタリア）の ARTS Lab. におけるバイオメディックアプローチに基づく物体把持と操作の研究、University of Pisa（イタリア）におけるマニピュレーション計画に関する研究、DLR（ドイツ）における宇宙作業用ハンドと物体操作に関する研究、LIRMM（フランス モンペリエ）におけるパラレルメカニズムを基にした小型ハンドに関する研究等、注目を集める研究が増加している。また、KUKA(<http://www.kuka.com/en/>)等のロボットメーカーや自動機器のメーカーが多く、EU の拡大に伴う産業投資の広がりとともに良好な業績を維持している。なお KUKA は 2007 年に日本法人を設立した。EU 内の複数の大学や研究機関、企業を EU が組織して研究開発プロジェクトを組むことが多く、良い循環を生んでいると考える。

【中国】研究水準は急速に上昇しており、国際会議における発表の増加に繋がっている。現時点では独自の研究分野を開拓するまでには至っていないが、10 年以内に世界水準にキャッチアップできると見る。特徴的な研究としては、ハルビン工大における宇宙用ロボットハンドの開発がある。これは DLR（ドイツ）との共同研究であり、DLR に中国から参加しているスタッフがハンドの設計や試作を手がけていると聞く。産業技術力の点で特徴的な動きは、瀋陽や北京で科学技術院自動化研究所を核に自動化機器のメーカーが立ち上がりつつある点である。産業用ロボットの一部はパーソナルコンピュータと同様にコモディティ化しつつあるので、そのような分野からキャッチアップが始まると見る。

【韓国】ロボティクス全般に関する研究水準は高いが、マニピュレーションに関して新しい発表は少ない。浦項産業科学研究院（RIST）でロボットハンドのプロジェクトが、サムソン自動化研究所で柔軟物操作のプロジェクトが計画されていると聞く。韓国の製造業は、サムソンや現代を始めとする少数の世界的企業が圧倒的で、自動化に関連するメーカーが限られているという現状がある。学術的な研究とハードウェアの開発とが両輪となってマニピュレーションの研究は進む。その点で韓国のマニピュレーションに関する研究が目立たない

のかも知れない。

(3) 理論・アルゴリズム 2－移動－

ロボット技術のうち実世界に作用する技術として物体操作（マニピュレーション）と並んで、物理的実体を有する機械であるロボット自身が何らかの目的に沿って動きまわるための技術は 2 つの柱の一つとして世界的にも認識されている。人々は、生物のうち植物には「知能」を感じないが動物には「知能」を感じる。このことは「知能」が深く自分自身の移動能力と関係していることを示しており、世界的に移動ロボットは知能を持つ機械の一形態として研究が行われてきた。

特にロボットが、自分自身で動きながら環境内の（メンタルな）地図を作成する問題は、地図を用いて（不確実な）外界センサ情報より自己位置を認識し、それらを用いて環境の地図を更新してゆくという「知能」の問題として 1980 年代より多くの人工知能オリエンテッドはロボット研究者に取り扱われてきた。この話題は最近 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) と呼ばれるようになり、2000 年頃より確率的とり扱いなども含めて活発化している。

① 研究開発の歴史・経緯

歴史的には、知能ロボットとしての SHAKEY（米国 SRI）に始まり、フランス LAAS の継続した研究などが世界中に大きな影響を与えてきた。人工知能を有する機械としての移動ロボット研究は現在でも欧州・米国で脈々と引き継がれている。

従来の世界的な研究の潮流としては、

【米国】 SHAKEY 以来脈々と引き継がれている人工知能の一環としての知能ロボット、及び、ALV に端を発して 1990 年代より活発化した実世界対応ロボット技術（CMU など）、いずれも世界の先端を切った。

【欧州】 フランス LAAS の知能移動ロボット研究及びドイツの各大学で行われたポジショニング、環境地図作成の研究には、大いに見るべきものがある。1990 年代の一時期に活発化した英国 Oxford 大学の移動ロボット研究も特筆すべきであろう。

【豪州】 英国 Oxford 大学における移動ロボット研究がシドニー大学のフィールドロボティクス研究センターに引き継がれ、実環境で働く移動ロボットの研究が精力的に行われている。

【日本】 日本における移動ロボットの研究は、メカニズムの研究が重視され、歩行機械や脚車輪ハイブリッド機構、全方向移動機構などの物理的実機を作ることを特長として進められてきた。従って、実機を作ってそれを働かせることによる実世界問題にはそれなりの強みを有しており、特殊な移動機構が必須な

レスキューロボットの実用化等に強みを見せている。

② 現在の状況

理論的研究としては、米国・欧州に強みがある。とくに、数学的バックグラウンドをベースとする移動ロボットの環境理解や自己位置推定、SLAM などの課題は、米国と欧州が一步先を進んでいる。

また、実世界対応技術としては、多機能のシステムを確実に動かす為の制御システムのアーキテクチャとそれを実現するためのソフトウェアシステムの構成を問題として、理論的な立場からも欧州や米国（NASA など）で精力的な研究が行われており、日本はこの点でも遅れていると言わざるを得ない。

一方、実機を製作して実際の環境に適用させようとした時に発生する多くの問題については我が国もそれなりの強さを有している。歩行機械における歩容制御、あるいは、屋内外の実環境における自律走行システムなどがその例である。しかし、最近、とくに米国では NASA による火星探査ロボットの研究開発と実現、多くの組織による自律空中ロボット（ヘリコプターなど）の実機実験、一部軍技術に重なる水中用自律ロボットなど、実機による実世界対応について極めて幅広い研究が進められており、日本の優位性は主張しにくくなっているのが実情と言えよう。

また、一時期建設機械のロボット化として日本が優位を占めていた、実機を複雑な屋外環境で行動させる技術であるフィールドロボティクスについても、オーストラリアや米国の研究は世界の中で大きな位置を占めており、屋外環境ロボット技術における日本の優位性も失われつつある。

ただし、工場内の自律搬送システムについては、現在なお日本の優位性が維持されていると認められる。とくに、半導体等の製造過程におけるクリーンルーム用の搬送システムにおける複数台の移動ロボットの協調制御技術は群を抜いたものと言えよう。しかし、これについても、近年韓国に追い上げられており、また、クリーンルーム内搬送システム自体、天井のレール上を走らせることによる高速化など、移動ロボット技術が中心ではなくなる傾向にある。

(4) 理論・アルゴリズム 3－コミュニケーション－

人間とロボットが直接関わる技術がコミュニケーションである。従来、人間とロボットや人間と機械は特定のタスクのみを介して関わってきた。故に、そのインターフェース技術は古くは注目されていなかったが、近年、パーソナルコンピュータのように、様々な作業を通して人間と多様な関わりが持てる機械の登場によって、その研究の重要性が広く認識されるようになった。このような背景のもと、近年の科学技術全体が目指すのは、人間とより多様に、より柔軟に、よりストレス無く関わる機械であり、コミュニケーション技術やインターフェース技術は、そのような機械の実現の根幹をなすものである。そして、こ

のコミュニケーションに関わる技術には、人間そのものに関わる認知科学的・心理学的研究から、その知識に基づき設計される様々なヒューマンインターフェースまで、幅広い研究分野が関わる。

認知科学的・心理学的研究において、特にヒューマンインターフェースに関する研究は、圧倒的に米国が強い。これは、言葉の問題等により日本人研究者が参加しにくいという事情に加えて、コンピュータ研究の先陣を切り、シリコンバレーを中心として様々なコンピュータの利用を早くから研究してきたという歴史的背景も後押ししている。コンピュータグラフィックスを用いたインターフェース研究、タグやセンサを用いた実世界でのインターフェース技術など、多くの発想は米国から提案され、それを追うように日本やヨーロッパで研究が進められている。このような米国に先導される技術の中で、特に日本が強いのは、ゲーム関連の技術であろう。ゲーム分野に関しては日本が世界を先導している。

一方、ヨーロッパは伝統的に認知科学や心理学等な研究分野に強い。人間との関わりを研究する分野であるが故に、人間そのものの理解は重要である。近年は特に意識のメカニズムや感情のメカニズム等、言語対話以上の人間のコミュニケーション機能についての研究が、小さい規模ながら継続的に進められている。またヨーロッパが強みを持つ技術としては、その地域的な状況から、多言語音声認識技術がある。

これら欧米の研究開発と比較して、日本が強みを持つのは、ヒューマンインターフェースのハードウェア開発である。小型・高性能のデバイス開発では日本が圧倒的な力を持つ。すなわち、ヨーロッパの伝統的人間理解研究を元に、米国でヒューマンインターフェースというコンピュータを介した新しいメディア研究が生まれ、日本がデバイス開発を担うというのが、世界的な情勢である。

しかしながら、米国の研究開発は、コンピュータに留まり、コミュニケーション技術としてのロボット開発には及んでいない。すなわち、全ての発想が従来のコンピュータ技術の延長であり、人間のように身振り手振りで、人と柔軟に対話するという、より人間に近いコミュニケーションの研究開発まで、研究領域が広がってないのである。コミュニケーションロボットについて、最も研究開発が盛んなのは日本である。コミュニケーションロボットには、様々な形態があるが、概ね人間型をしている。これは人間が対話相手を常に擬人化するという脳を持つことと、ロボットに期待されるコミュニケーション能力が、単なる言語対話ではなく、マルチモーダル対話であることによる。加えて、軍事等の目的を持たない日本においては、ロボットの応用として人間の日常活動の支援が大きく期待されている。このような理由から、人間型ロボットのハードウェアにおいて世界を先駆ける日本において、日常生活を支援する目的において、コミュニケーションロボットとして人間型ロボットが多く開発されている。

(5) 理論・アルゴリズム 4 — 知能化（自律分散、分散知能、チームワークなども含む） —

ロボットの知能化の研究の原点は、1960 年代に遡る。当初は、人工知能研究の応用分野の一つとして研究が行われ、組立における作業計画問題、環境認識問題、障害物回避動作生成問題などの研究が主流であった。当時は、米国が知能ロボット研究をリードしていた印象がある。その後、ロボットのマニピュレーションや移動などにおける知能化の研究が活発化するとともに、日本でのロボットの知能化研究が盛んになった。特に、産業用ロボット元年である 1980 年を境に、産業用ロボットの知能化技術開発が盛んに行われるようになったが、これに関しては日本が中心的な役割を演じた。様々なロボット言語が開発されるとともに、教示に関する技術開発や、ビジョンを用いたマニピュレーションなどの技術が開発された。またその一方で、遠隔操作に関する知能化技術開発もその頃から活発化し、テレプレゼンス（テレグジスタンス）と呼ばれる技術開発や、VR（Virtual Reality）、AR（Augmented Reality）、パワーアシストなどにおける知能化研究が行われるようになった。

1980 年代後半より、当時注目されていた自律分散システム概念がロボットにおいても議論されるようになり、自律分散型ロボット、自己組織化ロボット、モジュール型ロボットなどのシステムや、複数のロボットやモジュール（ユニット、エージェント）の協調技術などのシステム知能化技術開発が活発になった。ここでも、日本が主導的な役割を演じた。ヒューマノイドの研究開発もこの頃から行われていたが、本格的に活発化したのは、ホンダが P2 を発表してからであろう。ヒューマノイドロボット研究開発をリードしてきたのも日本である。さらに、1990 年代以降、生物規範型ロボットに関する研究が盛んに行われるようになった。1986 年に米国 MIT の Rodney Brooks が、Behavior-based のアプローチによる Subsumption architecture を提案したのをきっかけに、Biomimetics や Bio-inspired robot system などの知能化研究が活発化した。これに関しては、欧米日が主導権争いを激しく行っている。また、米国では、現在でも軍事予算によるロボット研究開発が主体であるのに対し、日本では 2000 年以降、ロボット産業育成の戦略もあって、個々のロボット応用分野での知能化技術開発が行われている。製品化され注目されたロボットは、手術ロボット、ペットロボット、掃除ロボット、セラピーロボットなどである。

各国のロボットの現状の知能化技術の状況については、以下のようにまとめられる。

【日本】ヒューマノイドを初め、マニピュレーション、移動における計画・学習、センシングにおける判別、認識などの知能化で高い研究水準を保っている。自律分散（含バイオロボティクス）、自己組織化、学習、創発ロボティクス、群

ロボットなどでも優位性を保っている。注目すべき知能化に関するロボット関係の先端的プロジェクトとして、移動知（文部科学省科学技術補助金特定領域研究）、共創知能システム（科学技術振興機構 ERATO 浅田プロジェクト）などがあげられる。産業応用だけでなく、サービスロボット関係でも、高い技術開発力を有している。単なるシミュレーション研究でなく、実際のロボットシステムの開発（ものづくり）において、高い技術開発力がある。しかし、産業技術力に関しては、経産省や文部科学省を初めとして、各省庁でロボット関連予算を重点化課題として予算化・実施し、生産技術や安全・安心を出口としているものの、軍事応用が中心の米国に比べ弱い。米国や韓国では、実証試験から実用化までを迅速にかつスムーズに行っているのに対し、日本ではそれが困難な状況になっている。制度上の問題などが大きい。2007 年度から、経産省が、次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトをスタートさせ、知能モジュール（ソフトウェア）開発など、知能化技術の実用化を加速する施策が推進されているものの、欧米や韓国の産官学一体となった戦略的なロボット技術開発施策に対抗し、競争力を維持するには、人材育成から事業化支援まで、規制緩和・制度設計も含め、さらなる方策を継続して施していくことが求められる。

【米国】米国の知能化研究は、DOD や DARPA などの軍事予算による研究がほとんどであり、軍事応用の色が圧倒的に強い。NSF 予算による基礎研究、NIH 予算による医療・福祉関係の研究も根強い。知能化に関しては、理論的研究において優れた研究があり、研究水準は高い。BMI（Brain Machine Interface）、SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）などににおいては圧倒的な優位性を持っている。医療ロボットなどにおける知能化技術は米・欧・日でほぼ肩をならべているが、実用化においては、Da Vinci を製品化した米国が最も早かった。ただ、全般的傾向として、DOD や DARPA が巨額に開発費を投入していることもあり、軍事応用としての産業技術力が非常に強い。DARPA による Distributed Robotics Program [1] などがその典型的な例である。DOD、DARPA は、ロボットと人工知能に関する日米ワークショップを主催するなど、日本のロボット研究への投資や共同研究にも強い意欲を示している。

【欧州】米国、日本を追っている印象もあるが、バイオロボティクス、医療・福祉関係での知能化研究では、非常に先端的な研究を行っている。EU のプロジェクトや、各国での RT プログラムの立ち上げもあって、サービスロボットの知能化技術も技術水準は高くなっている。ただし、新しい若手の人材は近年あまり輩出されていない。知能化の技術開発力に関しては、国によってかなりばらつきがある。イタリア、ドイツ、フランス、スイスなどは高い技術開発力を有する。基礎研究に偏っていたり、総合的に技術開発力が低い国も多々あるが、総じて向上の傾向にある。産業技術力に関しては、日本と同等、応用面で

ブレークスルーが必要となっている。

【中国】知能化研究のレベルはまだ低く、発展途上であるが、加速度的に進化しており、これから急激に伸びる可能性もあり、脅威である。近年論文数は飛躍的に増加しているが、全般的には研究の質は低い。しかし、米国や日本から中国に戻った研究者は、高いレベルの研究を行っている。技術開発水準もまだ低いが、国外の技術を吸収し、著しい速度で向上している。産業技術力もまだ低いが、研究水準、技術開発水準の向上とともに、上向いてくると考えられる。人件費が安く、労働力も豊富な中国において、ロボットの必要性に関する議論もあるが、ロボット技術は、ロボット開発ということだけでなく、要素技術やシステム化技術の応用性が極めて広いことから、その開発の推進に積極的である。国際会議を積極的に誘致し、海外の著名な研究者に中国国内で講演をさせ、若手研究者に聞かせることによって、人材育成を積極的に図っている。

【韓国】発展途上であるものの、中国よりはかなり研究ポテンシャルが高い。国策として、ロボットプロジェクトに多額の資金を投じて推進している。また、韓国企業も、ロボット関係の研究開発に積極的に投資している。それによって、技術開発水準は飛躍的に向上した。すでに日本や欧米で開発されている知能化技術を吸収し、再構築する技術力は驚異的である。多くのロボットベンチャーが立ち上がり、かなり小型で高性能なロボット部品やロボットシステムが、次々に製品として出されている。サービスロボットの製品化のスピードに関しては、制度面で導入が遅れている日本を抜く可能性が高い。人材育成にも極めて積極的で、研究水準も加速度的に向上しつつある。そのレベルは日本や欧米に比べまだ低いものの、日本や欧米に追いつきつつある。

〈参考文献〉

[1] <http://www.darpa.mil/mto/drobotics/overview/>

(6) 理論・アルゴリズム 5 —制御理論・制御技術—

制御理論・技術分野では、現在、協調制御（群制御を含む）、ネットワークを介した制御（ネットワーク化制御と呼ぶ）、そしてハイブリッドシステムの制御が主流の研究テーマとなっている。以下では、主に、この3つの研究動向について言及する。

協調制御の研究では、近年、米国の国防総省の研究・開発部門 DARPA による財政支援が大きな原動力になり、無人飛行機（UAV, Unmanned Air Vehicle）の編隊飛行制御などの研究が精力的になされている。そのため、現在は米国が主導権を握っており、2000 年以降において、主にグラフ理論をベースにした制御理論を体系化しつつある。まだ実用化の段階には至っていないようであるが、すでに実験装置などは開発されてきている。

ネットワーク化制御に関する研究も、近年の著しいネットワーク技術の進展により、ネットワークを介した制御手法の重要性が高まってきていることを背景にして、DARPA の支援によって米国を中心に、その制御理論が整備されてきている。また技術面でも DARPA の Trauma Pod Program や米国カリフォルニア州の独立系研究開発・調査機関 SRI International のプログラムの支援によって野外手術用遠隔制御用のプロトタイプロボットも開発され、小型化、簡易化に向けて野外レベルでのテスト実験がなされつつある（2006）。一方、日本では、個々の研究者レベルではネットワーク化制御やサンプル値制御に関する理論研究は世界レベルであるが、プロジェクト研究は見当たらない。ヨーロッパでは、主にハイブリッドシステムと関連してネットワーク化制御の研究が個人レベルだけでなく、EU としてのプロジェクトレベルでも盛んである。

ハイブリッドシステムの制御分野は、欧米において 1990 年代より精力的に研究されてきた。最近の動きでは、進展の著しい組込み制御技術に、ハイブリッドシステムの理論を融合させたプロジェクトなどが欧米で幾つか立ち上がっている。例えば、米国では、研究成果の民間移転を目指したコンソーシアム ESCHER (The Embedded Systems Consortium for Hybrid Embedded Research) が Vanderbilt 大学に作られたり、NSF を中心に大型プロジェクトが Cyber-Physical Systems (CPS) と称して立ち上がろうとしている。EU では、ハイブリッドシステムの制御も含む組込み系設計プロジェクト ARTIST2 (2002-2006) , やハイブリッド制御のプロジェクト HYCON (Hybrid Control : Taming Heterogeneity and complexity of networked embedded systems, 2004-2008) などが、また 2007 年より大型産学連携プロジェクト ARTEMIS (Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence and Systems, 2007-2011) が 2016 年にこの分野の世界シェア 50%を目指して立ち上がった。スイス・イタリアの研究グループはハイブリッドシステムのリアルタイム最適制御のためのソフトウェアツール (MPT ツールボックス) を開発し、それによる企業との共同研究によって研究・技術開発が先行している。一方、日本では、大きな予算のプロジェクトはないが、2005 年に計測自動制御学会の理事会直下に組込み・ハイブリッドシステムの調査研究会が設置され、この分野での産業界との連携を検討し始めている。また日本では、人間行動のハイブリッドシステムモデルの研究・技術開発が先行している。

(7) アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源

近年の注目すべき研究開発動向として、圧電アクチュエータの応用研究（含、超音波モータ）とポリマーアクチュエータを用いた人工筋肉の研究の進展が挙げられる。また、アクチュエータのマイクロ化に関する研究も成果を挙げ、マ

イクロ昆虫、マイクロフライト等のマイクロロボットの実現を目指す研究が進んでいる。また、理化学研究のツールとして、強磁場、高温、超真空等の特殊環境下で動作するアクチュエータの研究が進められている。また、韓国、台湾では、特に圧電アクチュエータや電磁アクチュエータを用いたナノポジショニングメカニズムやマイクロメカニズムに関する研究プロジェクトが、大学を中心に多数進められている。

産業技術に関しては、中国、韓国における、小型電磁モータの生産拡大と、圧電アクチュエータを用いた応用開発が挙げられ、小型カメラ等への搭載が進んでいる。また、アクチュエータのモジュール化を目指した開発も行われ、CAN 等の通信規格の普及も進んでいる。

高エネルギー密度のエネルギー源は、ロボット実用化の最大の技術課題の一つであるが、電気エネルギーに関しては、ロボット研究領域では高性能電池の研究開発に期待するにとどまり、特筆すべき動向は見られない。空圧アクチュエータのエネルギー源としては、液状物質の化学 / 物理反応を利用した研究が米国で進められている。

【日本】大学や公的研究機関におけるニューアクチュエータや機構に関する研究は、種類、数とも極めて多く、色々な成果が生まれている。文科省科学研究補助費でも特定領域として「アクチュエータ」が取り上げられ、2005 年度より 5 ヶ年計画のプロジェクトが実施されている。産業界のアクティビティも高く、電磁モータの生産数は世界一（海外生産分を含む）である。また、超音波モータやハーモニックドライブ減速機等、特徴あるアクチュエータ・メカニズムを量産している点が大きな特徴となっている。

【米国】ポリマーを用いた人工筋肉や MEMS アクチュエータの研究開発でトップの座にある。特に、SRI で開発された人工筋肉に関しては、よいものができるつつあり今後の展開が注目される。また、マイクロフライト / マイクロ昆虫等、マイクロ、バイオを志向した研究が進んでいる。

また、液状物質の化学 / 物理反応を用いて、通常の電気エネルギー + 電磁アクチュエータよりも 1 桁エネルギー密度の高いアクチュエータシステムが研究室段階で実現されている。

【欧州】圧電アクチュエータの研究開発が盛んで、特に、ディーゼルエンジン用の燃料噴射の研究が車メーカーを中心に急速に進められている。フランスでの超音波モータの研究も盛んである。産業界では、マクソンやミニモータをはじめ、ロボット・メカトロニクス機器用サーボモータの生産が特徴的である。

【中国】圧電アクチュエータの材料、および応用研究も積極的に進められている。また、生産技術の急速な発展とともに、電磁モータの生産が急増し、韓国とともに、現在生産量トップの日本を追い越す可能性もある。

【韓国】圧電アクチュエータ、小型次期軸受け、医療用柔軟アクチュエータ等

の研究開発が盛んに行われている。生産技術は優れており、研究開発から産業化への移行速度が速い。圧電アクチュエータに関して、日本の後追いの構造も目立つが、既にカメラのレンズ駆動、手振れ補正等に用いられている。

【台湾】圧電アクチュエータを用いたナノポジショニングメカニズムやマイクロメカニズム等の応用研究が大学等を中心に多数進められている。また、圧電以外にも、MEMS、ボイスコイル、空圧等、各種の研究プロジェクトが近年誕生している。

(8) センサ・センシング技術

センサ技術の最近の動向は、デバイス材料技術、MEMS および SiP などの実装関連技術と信号処理のソフトウェア技術の融合のもとに、高性能化と多様化が進んでいるといえる。

画像センシングでは、CMOS 撮像技術が一般化し高精細カメラの小型化が実現した。一方、紫外～近赤外領域対応カメラが安価になり、人物認識あるいは可視領域外での環境認識などに使えるようになってきた。また、計測用途では、高ダイナミックレンジ（高階調）カメラも一般化して、冷却 CCD カメラでは 16 bit 階調の製品が出ている。カメラのダイナミックレンジの拡大は、近年ニーズの高い屋外における監視や ITS センシングなど、大きな環境変動を伴う状況にまで画像センシングの適用範囲を広げている。特に日本における自動車産業での画像及びセンサフュージョンのシステム化技術は、国際的にも高い評価を得ている。時間分解能に関しても、フレームレート 18 万コマ／秒程度が商品化される一方で、ロボットの機械系の動的制御に十分な 1 ミリ秒サイクルの画像処理系（撮像、処理、情報出力を含めて）も実現されており、これまでビジョンでは実現不可能とされていたビジュアルサーボイングも可能となった。ステレオ計測、タイムオブフライト方式等を用いた 3D カメラもビデオ並のフレームレートと解像度で距離動画像を取得可能になり、ロボットにおける周辺環境の実時間認識において有用なセンサの 1 つとなっている。特に日本で開発された全方位実時間ステレオビジョンは、リアルタイムで死角のない環境把握が可能なセンサとして、知的車いすへの搭載等、ロボットビジョンとしての実利用が検討されている。

民生用のカメラなどでは我が国の優位は継続しているが、セキュリティ・軍需など特殊用途では米国が先行している。また、3D センサなどでは欧州から新しいデバイスが精密計測等の産業的な応用を伴って提案されている。フラットパネルディスプレイデバイスにおける韓国の飛躍を考えると標準的な画像センサでは、韓国の台頭が予想される。

音響センシングでは、マクロアレイの精密化と独立成分分析、FFT のチップ化などの信号処理技術の発展と併せて、新しい展開を見せている。また、

MEMS のベースとしたオンチップマイクロホンも注目される。センサおよび音響信号処理の分野では米国と我が国の研究開発力が優れており製品も多く出ているが、過去の実績を見ると欧州も潜在的な能力に大きな差はないと思われる。しかしながら、世界的に見てまだビームフォーミング、音源分離、ローカリゼーションなどの技術がロボットに十分に活かされているとはいえない。実ロボットでの音響センシングにおいては、音源定位、音源分離、雑音除去といった処理を比較的少ない数のマイクロフォンを用いたコンパクトな構成で実現しなければならないという制約がある。音響センサのロボット応用を進めるためには、ハードウェア、ソフトウェア両面において更なる技術開発が必要であろう。

トルク、加速度、圧力などの力学量のセンシングに関しても MEMS の貢献は大きく、小型、高性能で使いやすいデバイスが登場した。さらにこれらの集積による触覚センシングについても、ロバスト性や後段の処理系に多くの課題があるものの多くの面的な力学センサが提案されており、日米欧の技術がそれぞれの特徴を持ちながら競い合っている。製品化については米国が一歩先を行っている。触覚については感度、分解能において人間の触覚機能を超えるところまで来ている。しかし、人間の触覚は、4 種類の触覚受容器を元に複合的に、そして各受容器によって刺激が選択的に知覚されており、これらのセンシング機能を全てロボットの指先に実装し、触覚として知覚させるには、未だ課題が多い。特に、圧覚センサと滑りセンサなど、機能の異なる複数のセンサを同時に指先皮膚下に埋め込む場合、機械的刺激から各々のセンサを通して物理量として識別することは困難である。より高度な触覚センシングの実現のためには、工学、ロボティクスの分野だけでなく、医学、脳神経学、認知心理学など、学際的な研究開発が不可欠であると思われる。

このようなセンサ技術の発展と多様化に加えて、GPS あるいは RFID など外部インフラを利用するセンシング技術も進展している。GPS や RFID の情報を利用したロボット制御の実証実験も行われている。GPS は軍事目的で発達した技術であるので米国主導であるが、欧州も独自の衛星技術を有している。我が国は車載 GPS のコンシューマ分野で高度な技術を有するが、衛星本体系に係る研究は実績が少ない。RFID については、法規制の問題を除けば日米欧は同等の技術水準にあるが、規制緩和に関して欧州の対応は早いことが顕著である。

センサネットワークの様々なプロトコルも検討されているが、FA 用フィールドバスの標準化については、欧州と米国が主導権を握っており、我が国からは CC-Link と FL-net を除いては目立った提案はないことから次世代ロボット関連では主導権を取りたいところである。ある意味では地味な分野であるが、将来のロボット産業の要として産官学の効果的な連携が期待される。ま

た、UWB など新しいアイディアは米国が発信源になることが多いのが我が国にとっての課題である。

総じて、センサ関連の研究開発では、米日欧の順で最先端を行っている感がある。ソフトウェア技術では強くなった韓国・中国にとって、デバイスがらみのセンサ関連技術はキャッチアップが難しいところと思われる。センサ技術ばかりではないが、米国・欧州は軍需というテストフィールドがあるため、斬新なアイディアを実験できる強みがある。また、米国では研究活動から生まれた技術を製品化する勇敢なベンチャーを育成する環境がある。欧州では、研究段階から産業界と連携する例が多い。中国はこれらに学んで研究開発体制を組み替えてきている。我が国も独自の活性化策を考えるべきである。

(9) インテグレーション技術（ソフトウェア・アーキテクチャ）

【日本】2025 年のロボット普及を目指し、経産省を中心に技術開発ロードマップに基づき、先導プロジェクトを RT ミドルウェアとコンポーネントに関する研究開発を実施するとともに、内閣府連携施策群で各省庁のロボット技術連携の相互連携をはかっている。産総研を主体とする RT ミドルウェアの OMG における標準原案採択（2006 年 9 月）を受け、最終文書化作業に入り、RT コンポーネントのフレームワークは確立した。開発環境整備と、開発フォロー継続性が鍵である。第 3 期科学技術基本計画にも反映されているように、国策として、標準化と技術開発を同期して実施し、継続的なスパイラルアップを可能とするフォローアップ施策が必要である。特に、インテグレーション環境の充実が急務である。また、産業界では、潮流はできつつあるが、既存ロボットメーカーの将来を見越した総体としての積極的採用と標準化活動への積極的な参画が課題である。

【米国】民生プロダクトをターゲットに、次世代 PC マーケットとして、ロボットソフトウェアを想定し、マイクロソフトを主体に圧倒的な開発力と全世界の PC ユーザ実績を武器にロボット用ソフトウェアと開発環境、モジュールを押さえにかかっている。一方、DARPA をスポンサーとして、実世界でのロバストなロボットシステム構築運用技術をプロモートし、グランドチャレンジ、アーバンチャレンジなど実課題をトップダウンで設定している。本方式は、軍採用を前提に、強力なスポンサーシップによる、実用技術のインテグレーション技術の実証開発による急速なレベル向上を促す効果がある。FCS（Future Combat System）では、通信システム、情報処理システム、ロジスティクス、無人ヴィークルを統合した作戦支援運用システムを開発している。さらに、アメリカ自動車技術会（SAE）規格と対応した無人システムのアーキテクチャ（JAUS: Joint Architecture of Unmanned System）、NIST が中心となるデバイス接続規約 IEEE1451、OMG のソフトウェアプロセス間通信規約を

規定する SCA (Software Communication Architecture)、システム記述言語 SYSML など、インタオペラビリティ、ポータビリティを保証するフレームワークの規格化が進展している。

【欧州】EUROP および RoSta プロジェクト (図 3,4) で産官学連携し、産業競争力強化のためアーキテクチャ体系化とミドルウェアの研究開発を推進している。

【韓国】2003 年より産業牽引エンジンとして知能サービスロボットを位置づけ、KIRSF (Korea Intelligent Robot Standard Forum) (図 5) を中心に、国策による重点投資を背景に、ETRI、KIST、KAIST 等有力研究機関を軸として、日常サービスロボットに関する実証実験を行うとともに、ISO、OMG、ITU を舞台に連携して開発技術の標準化を積極的に推進している。

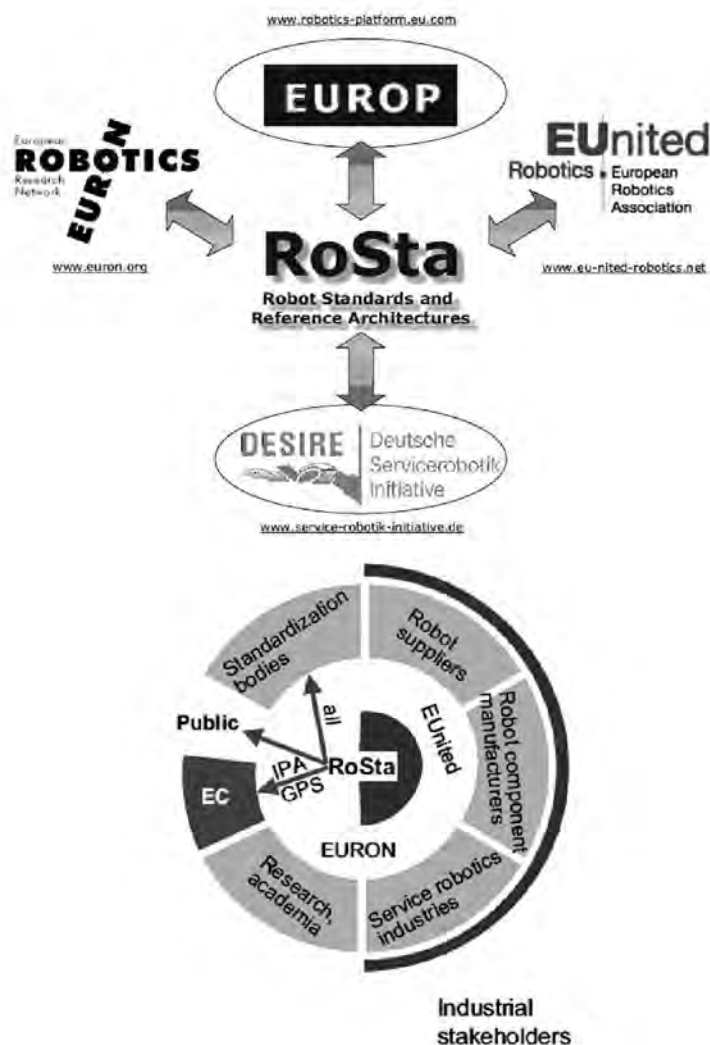


図 3 RoSta (OMG robotics/2007-03-18, Robot Standards and Reference Architectures for Service Robots and Mobile Manipulation, Erwin Prassle)

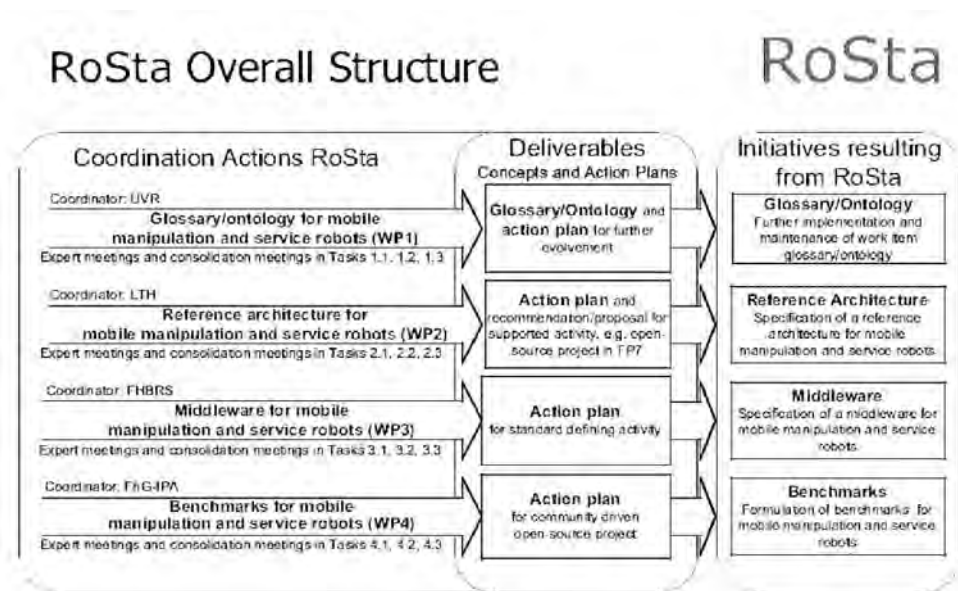


図4 RoSta 組織構成 (OMG robotics/2007-03-18, Erwin Prassler, Robot Standards and Reference Architectures for Service Robots and Mobile Manipulation, June 2007)

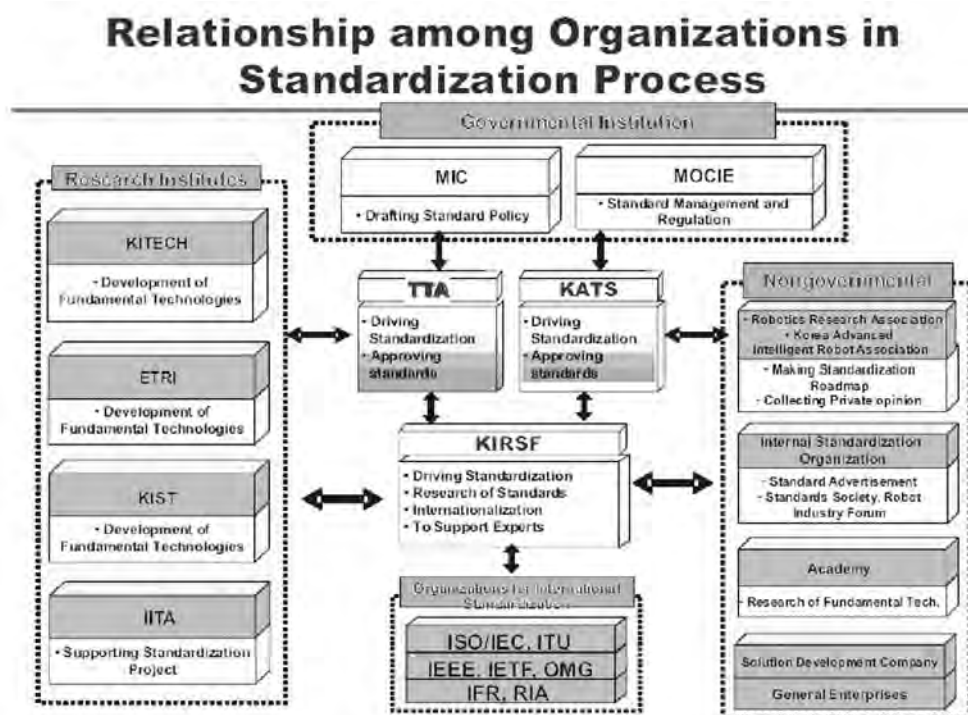


図5 KIRSF (Korea Intelligent Robot Standard Forum) 体制 (Sukhan Lee, OMG document robotics/2007-06-11 Korean Thrust for Intelligent Service Robot Standards, June 25, 2007)

2.6.3 比較表

◆実世界応用技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	高い水準を維持。数多くのロボット施策の実施。
	技術開発水準	◎	↗	愛知万博を契機に多様なサービスロボットプロトタイプが開発された。
	産業技術力	◎	↗	産業用ロボット市場（7,000 億円）の拡大、サービスロボットの実用化着手。
米国	研究水準	◎	↗	ブレインマシンインタフェース、インタラクション。
	技術開発水準	◎	↗	グランドチャレンジによる屋外環境移動技術の獲得。
	産業技術力	○	→	手術支援ロボット（ダヴィンチ）の普及、マイクロソフトによるロボット開発ツールの影響力が懸念。
欧州	研究水準	○	↗	ヒューマノイドは学術的な研究としている。認知系に注力。SFB588: Humanoid Robot Project
	技術開発水準	◎	↗	ドイツは製造力に技術が高い。DLR の宇宙ロボットも KUKA が実用化するなど着実な歩み。
	産業技術力	◎	↗	産業用ロボットに活気（AUTOMATICA 展示会）。
中国	研究水準	△	↗	日本、韓国を目指した研究開発を進めている。ヒューマノイド（BHR → 2）も話題になっている。
	技術開発水準	△	↗	殆どの分野のロボット開発を行っている。MEMS も含めて研究開発。
	産業技術力	△	↗	自動車、オートバイを中心にロボット応用が伸びている。
韓国	研究水準	○	→	URC、インテリジェントロボットの 2 つの施策で研究開発をリード。URC は日本のネットワークロボットと同じ。ヒューマノイドロボット（HUBO）もレベルが上がってきた。
	技術開発水準	○	↗	国（ETRI）がプロトタイプ開発、実用化を資金面で強力に支援。
	産業技術力	○	↗	家庭用クリーナロボットの市場が創出された。
全体コメント：軍事応用、手術実応用を除き、日本が世界をリード。ネットワークロボット関係は、米国、欧州でも立ち上がりつつあり、世界で IRT 化が浸透している。サービスロボットの標準化に関しても、OMG など日本、韓国が盛んに推進している。アジアではサービスロボット開発に盛り上がり、日中韓で MOU が結ばれた。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆理論・アルゴリズム 1 マニピュレーション

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	東京大学（高速マニピュレーション）、九州大学、岐阜大学（多指ハンド）、立命館大学（柔軟指操作）。
	技術開発水準	◎	→	産総研（ヒューマノイドハンド）、理研 BMC（ホールアームマニピュレーション）。
	産業技術力	○	↗	ロボット、自動化機器のメーカ多数。自動化の再認識。
米国	研究水準	◎	→	カーネギーメロン大（CMU）（物体操作プランニング）、スタンフォード大（経路計画、柔軟物操作計画）。
	技術開発水準	◎	→	バレットテクノロジー（多指ハンド）。
	産業技術力	○	→	企業数は少ない。Adept Technology
欧州	研究水準	◎	→	ARTS Lab., Scuola Superiore S. Anna（バイオミメティックアプローチ）、University of Pisa（マニピュレーション計画）
	技術開発水準	◎	→	DLR（宇宙作業用ハンド）、LIRMM（モンペリエ パラレルメカニズム）
	産業技術力	◎	→	KUKA 等のロボットメーカ、自動機器のメーカが多い。
中国	研究水準	△	↗	国際会議での発表増加。
	技術開発水準	○	↗	ハルビン工大における宇宙用ロボットハンドの開発。
	産業技術力	△	↗	科学技術院自動化研究所を核に自動化機器のメーカが立ち上がりつつある（瀋陽、北京）。
韓国	研究水準	○	→	マニピュレーションに関して新しい発表は多くない。
	技術開発水準	○	↗	浦項産業科学研究院（RIST）でロボットハンドのプロジェクトの予定。サムソン自動化研究所：柔軟物操作のプロジェクト？
	産業技術力	○	→	自動化に関連のメーカが限られている。
全体コメント：数年前のセル生産万能の流れが変わりつつあり、新しい自動化への要求が始まっている。生物組織のハンドリングなど新しい分野が広がりつつある。これらを支える基礎理論、新しい機器の設計や製造が定着するか？				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆理論・アルゴリズム 2 移動 (SLAM など含む)

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	移動メカニズムの設計には強いが、数学やコンピュータサイエンスを基礎とする SLAM やナビゲーション理論は欧米に比して弱い。
	技術開発水準	◎	→	実機を動かす研究者は多く、研究開発も活発。しかし、本当に役立つ技術開発はまだ不十分。
	産業技術力	○	→	多くの企業で努力されているも、継続できないケースもあり。クリーンルームの自律搬送システム等については、産業的競争力は高い。
米国	研究水準	◎	→	世界から有能な人材を集めている。基礎的な数学や人工知能の理論から、それを応用した実機システムの実現まで幅広く先行した研究が行われている。
	技術開発水準	◎	↗	DARPA のグランドチャレンジ・アーバンチャレンジなど、活発な研究・技術の振興策があり、これが先端研究を牽引している。
	産業技術力	◎	↗	実力のある中堅企業が多い。Roomba (掃除機ロボット) の商業的成功は特筆すべき。
欧州	研究水準	◎	→	研究者の層は厚い。数学など基礎的な研究は強い。
	技術開発水準	○	↗	幅広く多くの研究開発が進められている。
	産業技術力	○	→	
中国	研究水準	△	↗	中国より香港ではハイレベル。
	技術開発水準	△	→	現状は外からはよく見えない。
	産業技術力	△	?	同上
韓国	研究水準	○	↗	急速に日本を追従中。得意分野は日本と重なることが多い。
	技術開発水準	○	↗	急速に日本を追従中。得意分野は日本と重なることが多い。大型プロジェクトも多い。若い研究者が多い。
	産業技術力	○	↗	大企業とベンチャーとによる産業化。
オーストラリア	研究水準	◎	→	SLAM などについて理論とその実世界対応についてもレベルが高い。
	技術開発水準	○	→	
	産業技術力	△	→	
シンガポール	研究水準	○	↗	近年活発化してきており無視できない存在になりつつある。
	技術開発水準	○	↗	国として振興策あり？
	産業技術力	○	↗	

①知能移動ロボット技術の技術は日米欧ほぼ同レベルにあるが、日本では理論的研究に遅れが目立つ。② SLAM 技術は 20 年来の課題であるが、最近センサの発達に伴い急激に世界的にも実用的になってきた。③米国は実世界対応技術でも、宇宙 (NASA) や空中、水中などを対象として環境のモデル化などに強い技術力を有する。

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆理論・アルゴリズム 3 コミュニケーション

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	Human Robot Interaction 等の国際会議においてもトップクラスの研究成果を見せている。また大学等での関連のポジションも増えている。
	技術開発水準	◎	↗	人間型ロボットの開発等に関係して、非常に高い統合化技術を持つ。
	産業技術力	○	↗	産業化はこれからであるが、三菱重工や東芝など着実な技術開発を続けている。
米国	研究水準	◎	↗	人工知能研究との関連から研究水準は高く、今後も MIT、CMU を中心にのびる可能性は高い。
	技術開発水準	○	→	技術開発は、他のロボットプロジェクトに比べ、さほど高くない。
	産業技術力	○	→	特定のロボットやおもちゃに関しては、高い技術を持つが、全体的には横ばい。
欧州	研究水準	◎	↗	ドイツやイタリアでは大型研究機関が発足し、今後さらに活発になる兆しがある。
	技術開発水準	○	↗	日本に追いつこうとする勢いが感じられる。
	産業技術力	○	→	産業技術の開発はこれから。
中国	研究水準	△	→	ロボットそのものの研究が未だ活発ではない。
	技術開発水準	△	→	日本、韓国に続こうとしているが、技術水準は高くない。
	産業技術力	△	↗	大量生産のおもちゃ関連に関してはのびる可能性大。
韓国	研究水準	○	↗	現在年間 30 億円程度の研究予算であるが今後、他の分野と一緒にのびる可能性が高い。
	技術開発水準	△	↗	日本の技術にキャッチアップする勢いが感じられる。
	産業技術力	○	→	産業育成に力を注いでいるが、未だ産業としての見通しは明らかではない。
全体コメント：ロボットの他の分野にくらべて世界的に高い期待感がある。特に欧州、韓国は先行する日本に追いつくための投資を始めている。				

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆理論・アルゴリズム 4 知能化

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	ヒューマノイドをはじめ、マニピュレーション、移動における計画・学習、センシングにおける判別、認識などの知能化で高い研究水準を保っている。自律分散（含バイオロボティクス）、自己組織化、学習、創発ロボティクス、群ロボットなどでも優位性を保っている。
	技術開発水準	◎	→	産業応用だけでなく、サービスロボット関係で、高い技術開発力を有している。単なるシミュレーション研究でなく、実際のロボットシステムを開発している点で、高い技術開発力を評価できる。
	産業技術力	○	↗	生産技術や安全・安心を出口としているものの、軍事応用が中心の米国に比べ弱い。
米国	研究水準	◎	→	知能化に関しては、理論的研究において優れた研究がある。
	技術開発水準	◎	↗	知能化に関しては、日本に比べ理論的研究が多く、技術開発水準は日本の方がやや高い。ただし、BMI（Brain Machine Interface）に関しては、圧倒的な優位性を持っている。
	産業技術力	◎	→	DOD や DARPA が巨額の開発費を投入している。軍事応用としての産業技術力が強い。
欧州	研究水準	◎	↘	バイオロボティクスなど、知能化に関する高い研究水準のプロジェクトが進行している。ただし、新しい人材は近年あまり輩出されていない。
	技術開発水準	◎	↗	知能化に関しては、国によってかなりばらつきがある。イタリア、ドイツ、フランス、スイスなどは高い技術開発力を有するが、基礎研究に偏っていたり、総合的に技術開発力が低い国も多々あるが、向上の傾向にある。
	産業技術力	○	→	日本と同等、応用面でブレークスルーが必要となっている。
中国	研究水準	△	↗	近年論文数は飛躍的に増加しているが、研究の質は低水準である。米国や日本から中国に戻った研究者が、高いレベルの研究を行っている。
	技術開発水準	○	↗	技術開発水準もまだ低いが、国外の技術を吸収し、著しい速度で向上している。
	産業技術力	△	↗	産業技術力もまだ低いが、研究水準、技術開発水準の向上とともに、上向いてくると考えられる。
韓国	研究水準	△	↗	国策でロボットが重点化され、フロンティアプロジェクトが立ち上がり、研究水準が向上しつつある。しかしながら、そのレベルはまだ、日本や欧米に比べ低い水準にある。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発水準に関しては、上記プロジェクトなどに伴い、飛躍的に向上した。
	産業技術力	○	↗	ロボットの知能化技術を積極的に応用しようとしている。
全体コメント：米国の知能化研究は、軍事応用の色が圧倒的に強い。BMI、SLAM、医療ロボットなどで優位性を有している。日本は、ヒューマノイド、自律分散、創発など知能化研究が非常に活発であるが、その応用面ではまだまだである。欧州は、米国、日本を追っている印象もあるが、バイオロボティクス、医療・福祉関係での知能化研究では、非常に先端的な研究を行っている。中国の知能化研究のレベルはまだ低く、発展途上であるが、加速度的に進化しており、これから急激に伸びる可能性もあり、脅威である。韓国も発展途上であるものの、中国よりはかなり研究ポテンシャルが高い。日本や欧米に追いつきつつある。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆理論・アルゴリズム 5 制御理論・制御技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	個人レベルでの研究が主であるが、ネットワーク化制御（ネットワークを介した制御）やサンプル値制御は世界レベル。人間行動のハイブリッドモデル研究先行。
	技術開発水準	○	→	予算的には小規模。計測自動制御学会に理事会直結の組込み・ハイブリッドシステム調査研究会を設置し（05→07）、企業と大学による連携を探る。鉄鋼協会と企業と連携し、実用化に向けた研究組織が立ち上がっている（05→07）。
	産業技術力	◎	→	現在は制御に関する産業技術力は世界に君臨しているが、国内企業の欧米への投資が近年急速に拡大するなど、プロジェクトの予算レベルで遥かに日本は遅れている。
米国	研究水準	◎	↗	群制御、ネットワークベース制御の理論先行（DARPA や SRI International による支援）、ハイブリッドシステムと組込み制御技術の融合に関する機構 ESCHER の創設や、NSF を中心にして計算機・情報と物理システムが融合した Cyber-Physical Systems (CPS) が立ち上げ準備開始（2006～）。
	技術開発水準	◎	↗	手術用遠隔制御（DARPA による支援 Trauma Pod Program）など様々なプロトタイプが開発されつつある。
	産業技術力	○	↗	産業技術と軍事技術が直結して技術力が向上している。
欧州	研究水準	◎	↗	ハイブリッドシステムと組込み制御技術の融合に関する EU プロジェクト：ARTIST2（02～06）、HYCON（04～08）、ARTEMIS（07～11）。スイス、イタリアではリアルタイム最適制御の研究が先行。
	技術開発水準	◎	↗	EU が一丸となって、年間数億円の複数の大型プロジェクトにより企業などを巻き込み、技術開発も盛ん。
	産業技術力	◎	↗	たとえば、ARTEMIS では、EU 主要企業 27 社を含む。
中国	研究水準	△	→	制御理論の研究もあるが、問題設定が後追いになっているなど、研究レベルは低い。
	技術開発水準	△	→	プロジェクトなどの動向が見えていないが、潜在的な脅威はある。
	産業技術力	×	→	まだ見るべきものはない。
韓国	研究水準	△	→	制御理論の研究はほとんどないため、制御理論研究の水準はいまだ低い。しかし、産業技術と直結する応用研究には力を入れている。
	技術開発水準	△	↗	応用研究・技術のレベルは、古い制御理論を使う場合が多いため、平均的には高いとはいえないが、潜在的な脅威はある。
	産業技術力	×	→	まだ見るべきものはない。

全体コメント：制御分野では現在、協調制御（群制御を含む）、ネットワーク化制御（遠隔制御を含む）、ハイブリッドシステムの制御の研究が盛んである。特に、協調制御およびその周辺研究分野は、米国の軍事・航空関連の研究開発が大型資金により牽引。また米国 NSF を中心に CPS (Cyber-Physical System) と称したプロジェクトの新しい動向は要注目。欧州も組み込み系とハイブリッドシステムの制御から成る大型プロジェクト ARTEMIS が 2007 年より立ち上がった。それに対して日本は研究レベルは低くないが、個人レベルの研究に留まっている。

(注 1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注 2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	ニューアクチュエータや機構に関する研究の種類、研究者数等、非常に豊富。現状では世界トップ。文科省科研費特定領域研究「アクチュエータ」も大きな推進力。
	技術開発水準	◎	→	盛ん。高いレベルを維持。圧電、インテリジェント化。
	産業技術力	◎	→	現時点では世界のトップ。電磁モータの生産数世界一（海外生産分を含む）。超音波モータを量産している唯一の国。ただし、韓国、中国の追い上げが厳しく、抜かされる可能性有り。
米国	研究水準	◎	↗	人工筋肉、MEMS アクチュエータの研究でトップ。マイクロフライト、マイクロ昆虫など、バイオ研究に基づいた新アクチュエータ研究も多く見かけるようになった。また、油圧駆動システムに関する研究プロジェクトが立ち上がり、近年中に油圧アクチュエータが新展開する可能性もある。
	技術開発水準	◎	↗	5年ほど前から SRI における人工筋肉の研究が注目されており、多額の研究費が投資されている。生産技術に苦労しているという情報もある。MEMS プロセス、高効率モータ。
	産業技術力	◎	→	パワースーツ用に小型の液圧アクチュエータが開発され、応用されている。
欧州	研究水準	○	→	フランスで、CNRS や大学への超音波モータに関する集中投資が5年前に行われ、急速にレベルが上がった。
	技術開発水準	○	↗	圧電アクチュエータの燃料インジェクタ等への応用研究が盛ん。
	産業技術力	◎	→	メカトロニクス用小型モータの設計、生産に関してトップクラス。
中国	研究水準	△	→	圧電材料技術の研究が優れている。現状では、他にはオリジナリティの高い研究は少ない。
	技術開発水準	○	↗	生産技術の急速な進展。圧電アクチュエータの開発も積極的。
	産業技術力	○	↗	電磁モータの生産が急速に進展。
韓国	研究水準	◎	↗	圧電アクチュエータ、電磁アクチュエータ、医療用柔軟アクチュエータ等の研究開発が盛ん。
	技術開発水準	◎	↗	生産技術は優れており、研究から開発への移行速度が速い。圧電アクチュエータに関しては、日本のコピー品も目立つ一方、サムソン、LG 等が積極的に取り組んでおり、実用化が近い。
	産業技術力	◎	↗	電磁モータに関しては生産が急速に進展。超音波モータに関しては、カメラのレンズ駆動、手ブレ補正など、日本の後追いではあるが、既にサムソンのカメラ等に搭載され、量産が始まっている。
全体コメント：研究に関しては、マイクロアクチュエータ、柔軟人工筋肉、昆虫等の模倣によるマイクロ昆虫、マイクロフライト等の研究が盛ん。技術開発に関しては、圧電素子を用いた超音波モータや具体的応用開発が加速。産業技術に関しては、中国、韓国の生産の進展が、注目される。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆センサ・センシング技術

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	デバイスから信号処理まで活発。
	技術開発水準	◎	→	研究投資も活発、標準化で何処までやれるか。
	産業技術力	◎	→	カメラなど民生用で特に強い。
米国	研究水準	◎	→	多様な研究開発。
	技術開発水準	◎	→	研究から企業化へのモチベーションが高い。
	産業技術力	◎	→	信号処理 MPU など標準、ベンチャーも活発。
欧州	研究水準	◎	→	ナノ、バイオ関連センシング。
	技術開発水準	○	↗	先端技術で EU 内協力が活発。
	産業技術力	○	↗	生産ライン用などで標準化も進む。
中国	研究水準	△	→	画像処理などで研究は少なくないが、センシングまでは手が回っていない？
	技術開発水準	△	↗	同上
	産業技術力	×	↗	日米欧の下支え的な役割を担っているソフト開発力は侮れない。
韓国	研究水準	△	↗	水準はまだ低い、国家プロジェクトなどで急速に活性化。
	技術開発水準	○	↗	生産技術に関する吸収力は大。
	産業技術力	△	↗	新規技術の産業化は未だ。
全体コメント：センシング技術に信号処理技術を含めて考えるべきであるが、信号処理専用ハードウェアをどう扱うかによって見方が変わる。最近の組み込みデバイス技術について言えば、日米欧が新しいフェーズに入ろうとしているように見える。				

(注1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている] ※
※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

◆インテグレーション技術 (ソフトウェア・アーキテクチャ)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	産総研を主体とする RT ミドルウェアの OMG における標準原案採択 (2006 年 9 月) を受け、最終文書化作業に入り、RT コンポーネントのフレームワークは確立した。開発環境整備と、開発フォロー継続性が鍵。実世界ロボット技術チャレンジとして、RWRC (Real World Robot Challenge, 通称つくばチャレンジ) を開始した。アカデミアでは、ロボットアカデミアロードマップの作成が目されるが、関連学会を取り込みが必要。
	技術開発水準	◎	↗	2007 年度完了予定の NEDO 次世代ロボット共通基盤開発プロジェクトにて、要となるビジョン、音声認識、運動制御の RT コンポーネント化とリリースが進むとともに、2007 年度開始経産省次世代ロボット知能化技術プロジェクトの開始により、ソフトウェアモジュールの整備が期待される。
	産業技術力	○	→	トヨタ自動車のサービスロボットへの取り組み、RT ミドルウェア実装ソフトハウスの既存デバイスのコンポーネント作成への参画、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの実課題解決への取り組みなど、潮流はできつつあるが、既存ロボットメーカの将来を見越した総体としての積極的採用と標準化活動への積極的な参画が課題。
米国	研究水準	○	↗	DARPA グランドチャレンジ、アーバンチャレンジなど実課題をトップダウンで設定、採用を確約した強力なスポンサーシップによる、急速なレベル向上。
	技術開発水準	◎	↗	アメリカ自動車技術会 (SAE) 規格と対応した無人システムのアーキテクチャ (JAUS)、NIST が中心となるデバイス接続規約 IEEE1451、OMG のソフトウェアプロセス間通信規約を規定する SCA、システム記述言語 SYSML など、インタオペラビリティ、ポータビリティを保証するフレームワークの規格化が進展。FCS (Future Combat System) では、通信システム、情報処理システム、ロジスティクス、無人ヴィークルを統合した作戦支援運用システムを開発している。
	産業技術力	◎	↗	マイクロソフト社 Robotics Studio の既存開発環境をロボット分野への適用による、デファクト化プロモーションと産業界、大学を巻き込んだ国内外のコンソーシアム化が急進展している。ソフト開発力とサポート環境をバックにした、継続性は Windows の歴史と対比でき、大きな流れを作る可能性が大。
欧州	研究水準	◎	→	独 DESIRE (German Service Robotics Initiative) は "Able Service Robots in the Everyday" をキーワードに、日常生活支援ロボットの自律コンポーネント、ミドルウェアを中心に、IEEE などでの活動を積極化。
	技術開発水準	○	→	日米韓の技術開発プログラムの展開を受け、RoSta (Robot Standards and Reference Architecture) はサービスロボットの主導権確保をねらいに、他の EU プロジェクト (EUROP、DESIRE、EURON、Eunited) と連携して、リファレンスアーキテクチャとミドルウェアの規格化を推進。
	産業技術力	○	→	EUROP (EUropean RObotics Platform) を中心に、産業用からサービスロボットまでを対象に、EU 競争力強化戦略 (SRA : Strategic Research Agenda) に基づき、産官学連携を強化。
中国	研究水準	△	↗	国外留学、活躍していた、研究者、教育者が国内に戻り、積極的に研究体制を構築しつつあるが、アーキテクチャに関しては不明。
	技術開発水準	△	→	同上
	産業技術力	△	↗	同上
韓国	研究水準	○	↗	国策による重点投資を背景に、ETRI、KIST、KAIST 等有力研究機関を軸として、日常サービスロボットに関する実証実験を行うとともに、ISO、OMG、ITU を舞台に連携して開発技術の標準化を積極的に推進。韓国ロボット工業会の設立、韓国計測自動制御学会 (ICASE) が韓国計測自動化ロボット学会 (ICROS) に改名するなど、研究分野の重点化が進展している。
	技術開発水準	○	↗	同上
	産業技術力	○	↗	大は Samsung、小は多くのベンチャー企業が積極的に商品開発を実施。現状はコピー的なシステムが多いが、すぐに追従開発できる実力は侮れないレベルで、数年先にはトップに出る可能性がある。

全体コメント：2025 年のロボット普及を目指し、先導プロジェクトを経産省を中心に RT ミドルウェアとコンポーネントに関する研究開発を実施するとともに、内閣府連携施策群で各省庁のロボット技術連携の相互連携をはかっている。国策として、継続的なスパイラルアップを可能とするフォローアップ施策が必要。米国は民生プロダクトをターゲットに、次世代 PC マーケットとして、ロボットソフトウェアを想定し、マイクロソフトを主体に圧倒的な開発力と全世界の PC ユーザ実績を武器にロボット用ソフトウェアと開発環境、モジュールを押さえにかかっている。一方、DARPA をスポンサーとして、実世界でのロバストなロボットシステム構築運用技術をチャレンジ形式でプロモートし、軍採用を前提に、実用技術をインテグレーションし実証開発に力を入れている。欧州は、EUROP および RoSta プロジェクトで産官学連携し、産業競争力強化のためアーキテクチャ体系化とミドルウェアの研究開発を推進している。韓国は、技術開発と標準化を両にらみで、世界マーケットをとる覚悟で推進している。

3 注目すべき研究開発の動向

3.1 エレクトロニクス分野

1980 年代前半まで右肩上がりの成長を続けていた国内のエレクトロニクス産業は 1980 年代後半からは伸び悩む状況に変わってきた。この背景には、韓国、台湾などの東アジア圏の追い上げに加え、EU 連合が国家安全保障と産業競争力を確保するために実施してきた各種プロジェクトの結果、エレクトロニクス先進国との相対的な技術力の差が縮まったことによる。

シリコン集積回路を中心としたナノエレクトロニクスは、コンピュータを始めとして、携帯端末やディスプレイ、車、産業機器等あらゆる分野の発展を支える共通基盤技術であり、10 年～15 年先を見越した技術開発を先導することが出来れば、産業競争力全体を著しく高めることができる。その中の注目すべき技術としては下記のものがある。

(1) マルチプロセッサ

マルチプロセッサベースのリアルタイム OS、組込みシステム用マルチプロセッサアーキテクチャ、通信アーキテクチャ（Network on Chip など）の研究が盛んに行われている。MPSoC（Multi-Processor System on Chip）に関する研究の進展とともに、コンパイラや命令レベルシミュレータ（ISS）の自動生成に関する研究も行われている。MPSoC では、処理される応用（データ処理、通信制御、機器制御など）に適した複数種類のプロセッサが部品として使用される。ソフトウェアで記述される機能を、マルチプロセッサへの効率的なマッピング（いわゆる並列コンパイル）技術は、実行するタスクの特質を考慮して、応用毎にアーキテクチャをチューニングする必要がある。これまで、この種のプロセッサには、米国や欧州のメーカーの汎用プロセッサを採用する傾向が強かったが、アーキテクチャ最適化と応用プログラム開発を支援する CAD システムがあれば、製品の高付加価値化と競争力の強化が達成できる。

上記のマルチプロセッサオンチップ（MPSoC）の流れに加えて、再構成可能論理（リコンフィギュラブルプロセッサ）も注目を浴びている。これは FPGA（Field Programmable Gate Array）の考え方をさらに発展させたものである。プロセッサを搭載してマルチプロセッサオンチップ（MPSoC）との融合も行われている。今後、マルチプロセッサ・プラットフォームへ無線通信機能を追加することで、大きな市場展開が考えられる。

(2) コンピュータ設計支援技術

設計支援技術の最近の研究開発動向として特筆すべき技術としては、①非均質的な構成要素を持つシステム LSI（SoC）の設計技術、②高信頼度化のための設計技術があげられる。

SoC の設計技術としては、IP (Intellectual Property) ベース設計手法、計算モデル、アーキテクチャの最適化 (HW/SW 協調設計)、NoC (Network on Chip) アーキテクチャ、マルチプロセッサ SoC (MPSoC)、OS の自動生成などの研究開発が行われている。この分野では、従来の LSI よりも複雑で大規模な非均質的なシステムを設計対象としているため、動作レベルでの設計記述からの RT (Register Transfer) レベルの設計記述の生成手法 (いわゆる「C 言語レベル設計」) や IP 再利用設計を支援する新たな設計パラダイムの構築が行われつつある。また、これらの設計記述から、最適なコンポーネントの選択を行い、これらのコンポーネントを接続する共有バスまたは通信経路の構造を最適化するための研究が進められている。SoC の設計では、従来の設計制約条件である、性能・面積に加え、消費電力も考慮する必要があるために最適化問題が複雑化し難度が上がってきている。

高信頼度化のための設計検証技術では、LSI の規模の増大、システムの複雑化の結果従来のシミュレーションベースの設計検証では限界となり、形式的検証技術の適用範囲を広げることにも引き続き重要である。また、微細化にともなうソフトエラーの頻度増大を考慮した高信頼度化設計技術も重要な研究課題となりつつある。

(3) 低消費電力化技術

消費電力削減技術に関しては、システムレベルから回路レベルまでの各階層および複数の階層にまたがる低消費電力化と電力制御手法を確立するための研究開発が盛んである。並列化、動的再構成プロセッサ、アーキテクチャレベルでの省電力化、可変閾値電圧制御、可変電圧制御などに対して、適切なタスク・スケジューリングによって適応的にエネルギー管理を行う省電力化の試みがなされている。大規模集積回路の設計手法を見直す中で、電力の無駄を見つけて改善できる機会は多い。また、電力と動作速度やレイアウト面積とのトレードオフを精緻にとることも重要になる。

チップ設計レベルあるいはシステムレベルで省電力化の研究がこれからの鍵になる。たとえば、デジタル信号処理においてできるだけ多くの並列性を見出して電力低減に活用する設計技術は、マルチメディアや無線通信などの応用分野で有効である。あるいは、電源電圧としきい値電圧とクロック周波数は、ますますきめ細かく時空間的に適応制御することで大幅な省電力化が行える。

デバイス面では、リーク電流を低減して駆動電流を増大させる技術の研究が行われている。High-k ゲート絶縁膜や金属ゲートなどの材料に関する研究、ひずみシリコンによる移動度の向上、ボディを薄くしたりマルチゲートにするなどのトランジスタの構造に関する研究が広く行われているが、デバイスのレベルでの省電力化は、汎用性が高いものの大きな効果を上げることは難しい。

(4) システム・イン・パッケージ技術

集積回路の共通部分であるプロセッサ、メモリ、インタフェース、基本ソフトウェア、バスアーキテクチャなどを部品化・標準化する考え方。共通汎用部品を個別生産して SiP (System in Package) に組み上げ、外見上は SoC (System on Chip) に見せかける方法である。最近、この SiP の設計、実装、テストなどの総合技術が重要になってきている。特にチップを積層して貫通シリコンビアやマイクロバンプで接続したり、誘電結合などを利用した無線接続技術は急速に発展している。

日本の半導体産業の発展にとって、SiP は SoC 以上に期待される。汎用チップを組み合わせて専用のシステムをパッケージ内に集積する SiP の方が、巨大資本と世界戦略を用いて先端的なカスタムチップを開発する SoC ビジネスよりも、少品種を大量生産ができて製造業が利益を追求しやすいからである。かつて CMOS ロジックや DRAM などの汎用品ビジネスで日本の半導体産業が大きく発展したように、SiP に必要な総合技術力がある日本にとってもチャンスが広がる。また、主な応用となる携帯民生機器の分野では、日本市場は世界的に最も重要な市場であり、顧客が近くにいることは産業・技術の発展の上で優位な条件である。こうした技術的・産業的環境の中で、産官学が連携して戦略的な研究開発を行い、日本の電子産業の国際競争力を高めることは急務である。異分野異業種を融合する総合技術の構築や他社のチップを相互接続できる標準化作りには、国家レベルでの取り組みが必要である。

(5) 高周波シリコン集積回路

①再構成可能なソフトウェア無線用 LSI 技術

マルチバンド・マルチモード化が無線の世界の大きな潮流である。今後、携帯端末には 10 程度の無線規格が使用されると想定されている。この要求に対し、現在はそれぞれの無線規格を実現する LSI が実装技術によりボード実装されているが、アナログ特性や高周波特性を可変にできる他、場合によっては構成を変化させることのできる再構成可能なソフトウェア無線用 LSI 技術が模索されている。これにより一つの回路により複数の無線規格を実現しようとするものである。技術としては MEMS などのデバイス技術、高周波信号の標準化技術、A/D 変換技術、超高速信号処理技術など学際的な取り組みが必要である。

②ミリ波用シリコン集積回路技術

CMOS による無線ネットワーク技術については 5 GHz 程度までの技術はすでに実用化されている。研究の最先端ではシリコン集積技術による 60 GHz 帯などのミリ波用無線ネットワーク技術の開発が始まっている。ミリ波は電波の直進性や減衰のため実用化は楽観できないが、アンテナのオンチップ化や伝

送線路を用いた回路設計など、新たな集積技術を拓くものとして期待される。

(6) 微細化に起因する揺らぎ克服技術

LSI の性能向上に向けて 45 nm から 22 nm ノードに向けた技術開発が進んでいる。このような微小デバイスでは、素子特性の揺らぎが不可避であり、製造プロセス面での技術開発や揺らぎを克服する技術の開発に注目しておく必要がある。

- ・揺らぎ／ばらつきの計測技術と極限計測
- ・揺らぎや欠陥を考慮したデバイス・システム設計とそのシミュレーション技術
- ・三次元構造化と揺らぎ制御のための自己組織化／自己整合化技術

さらに、回路設計面では、従来の最悪値設計では対応が困難となっており、素子の遅延時間などのばらつきを考慮した統計的（確率的）な設計手法などの研究が行われている。

(7) 新メモリ材料技術

不揮発性メモリについては従来のフラッシュに加え、新しい材料に基づく半導体メモリの可能性が調べられている。数年前の強誘電膜や磁性膜などの研究に加え、カルコゲナイド膜や遷移金属酸化膜など、印加する電界や熱によって I-V 特性にヒステリシス特性が現れる材料が検討されており、今後、用途に応じてフラッシュメモリとの棲み分けが進むと期待されている。これらの新しい材料を用いたメモリは高速での書き換えができる点が注目されているが、寿命の点で DRAM を、動作安定性の点でフラッシュメモリを凌駕してはならず、それらを置き換える市場を獲得できるかどうかは予断できない状況である。

新しい不揮発性メモリ材料として下記のものがある。

① スピンメモリ

実用化が近いとされる現在の MRAM とは異なり、電流注入によりスピンを反転させるタイプのメモリデバイス。大容量の不揮発性メモリとして内外で広く研究されている。スピン新材料の研究は日本は非常に強い。

② 抵抗変化メモリ

一般的には MIM (Metal-Insulator-Metal) 構造を有し、電圧を印加すると抵抗にヒステリシスが現れるデバイス。Metal 電極に挟まれた真ん中の Insulator には、酸化物、カルコゲナイド材料、ポリマー材料などさまざまな材料が用いられる。メモリ機能発現のメカニズムは材料によって異なり、まだ完全には明らかになっていないケースが多いが、将来の不揮発性メモリとして期待される。

③ NEMS (Nano Electro Mechanical System) メモリ

電子状態ではなく、材料のメカニカルな動き（例えば物理的な接触・非接触）により 2 値を記憶するメモリデバイス。非接触を用いるとリーク電流の大幅削減が期待できる。

(8) パワーエレクトロニクス

従来のパワーエレクトロニクスは、1000 V、100 A と言った大電力を対象とした製品展開が主流であったが、最近は、車載エレクトロニクスや家電エレクトロニクス製品の低消費電力化を目指すパワー素子の方向に流れが変わっている。例えば、家電製品では、ボード上で時空的にきめ細かなタスク・スケジューリングを行いエネルギー管理が行われている。

Si デバイスの低損失化限界を突破する技術として、スーパージャンクション (SJ) MOSFET や電子注入促進型 IGBT などの新構造デバイスと SiC および GaN などのワイドバンドギャップ (WBG) 半導体デバイスが注目されている。また、100 V 以下の耐圧領域では、ディープサブミクロンの CMOS 技術を使った低損失横型 MOSFET によるパワー回路の集積化の研究が活発化している。新構造デバイスの開発では、数年前まで SiC デバイスの領域であった数 100 V の耐圧で $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 前後の低オン抵抗の縦型 SJ-MOSFET や電子注入促進効果による IGBT のさらなる低損失化の可能性が報告されている。Green IT に関連し Power Electronics と Micronics electronics の境界が曖昧になってきているのが現状である。

(9) センサ技術

ワイヤレスセンサネットワーク時代が到来する事が予想され、欧米では国レベルでの取り組みが行われている（例：米国 DARPA による Smart Dust や、EU フレームワークによるプロジェクト等）が、まだ真の実用化という意味ではこれからであり、ボトルネックは電源と思われる。

ここ 1 年の大きな流れとしては

- ・化学センサ（バイオセンサ）の研究開発が活性化しており、特に検出電極の化学的修飾による多くの取り組みが進行している。化学的修飾は多くのバリエーションが期待できるので、画期的センサ出現の可能性を持っている。
- ・CNT による電極改質や腐食センサの研究が活性化。新規な原理に基づくセンサの発表 はないように思われるが、従来法を大きく改善した報告はいくつか挙げられる。
- ・従来の溶存二酸化炭素の測定は、ヘンリーの法則により圧力と温度から二酸化炭素以外の溶存ガスも測定していたため、他の溶存物質の影響をうけ

ていたが、米国の TFS 社が開発した中赤外線減衰反射率法はオンラインで二酸化炭素のみを選択的に測定可能とした。

- ・従来気体濃度はガスクロマトグラフィーで測定されており、分～秒程度の時間分解能しかなかったが、AIST から超音波送受信部の間を流れる気体濃度で受信超音波信号が変調される原理を用いた msec レベルの時間分解能を要する測定法が報告された。
- ・米国ジョージア工科大より、光ファイバのコア周囲を多孔質材料で囲み、多孔質径をコントロールして選択的にこの多孔質部分に取り込まれる物質により屈折率が変化する原理に基づく新構造ファイバセンサが発表された。

(10) ディスプレイ

画像はエレクトロニクス全般の中心的役割を演じることからも、高い表示性能、薄型、軽量、高品位、生産性の向上などの研究開発は必須である。このため、新しい表示方式、高性能化、理論による解析設計、材料、測定技術、製造装置などの研究開発を支援すべきである。

①発光型ディスプレイとしては、PDP（プラズマディスプレイ）と FED（冷陰極電子放出型ディスプレイ）がある。前者は、発光効率、寿命、表示品位などの点で改善が進み、現在、輝度 $350 \sim 500 \text{ cd/m}^2$ 、発光効率約 $1.5 \sim 2 \text{ lm/W}$ を上回る値も報告されている。後者に関しては、高輝度、高効率、高コントラスト、広視野角などの優れた特長が期待できるものの、大型化には課題が多い。小型、高輝度ディスプレイでまず基盤を築くのが得策と考えられる。

②非発光型ディスプレイ（液晶ディスプレイ）は、コントラスト、視野角、応答速度の一層の改善、動作温度範囲の拡大、低電力化、大画面化のための構造や製造プロセスの改良などが要求されている。最近は、VA 方式や IPS 方式などの液晶配向技術により 170 度以上の広視野角化が実現され、TV や DSC、携帯電話向けに実用化されている。高速化については、1 フィールドごとに $1/3 \sim 1/2$ フィールドの期間、黒レベルを挿入した擬似インパルス方式の導入が試みられた。これによって動画特性の大幅な改善が達成されつつある。また、画面の明るさや周囲の明るさに応じてバックライトの輝度を変えて、電力とコントラストの向上を図る方式が提案され、一部で実用化されている。

(11) 有機系新デバイス

①電流注入型有機レーザー

技術的な難易度はかなり高いターゲットであるが、成功すれば学問的インパクトも大きく、また有機デバイス応用としては、既存分野の代替ではない用途が設定できる。技術開発の方向性が明確であるので、研究目標の説明は容易で

ある。

②有機薄膜センサ、有機アクチュエータ

センサ、アクチュエータ単独でなく、トランジスタやメモリなどと組み合わせ集積型で動作するデバイスとしての技術開発に注目すべきである。オール有機物の集積型センサ、アクチュエータは従来型のシリコンとの組み合わせで動作させるデバイスと明確に差別化できる。特に、有機（ポリマー）アクチュエータの研究開発は、難易度は高いが注視しておくべき技術である。

③プリンタブル工学、フレキシブル工学の確立

有機デバイスは究極的には何らかの安価なプリント技術が伴わなければ、実践的な価値が少ない。プリンタブル関連技術を小手先の技術解決課題とするのではなく、本格的な科学技術の課題と捉える必要がある。「プリンタブル工学」、「フレキシブル工学」の構築を課題に掲げる必要がある。

(12) 無機系新デバイス

「新デバイス」は、一般には現在のシリコン VLSI を超えるデバイスと位置付けられる。メモリには新材料の開発により今後もさまざまな新デバイスの可能性が期待されるが、新情報処理デバイスに関しては現在のところ CMOS に代わる具体的なデバイスが存在しない。最も有望とされる CNT-FET も、回路を構成するには CMOS 回路が用いられる可能性が高く、その意味では「Beyond CMOS」というより、「CMOS の延長技術」と捉える方が自然である。

一方、現在の CMOS に、新デバイスを付加するという考え方も重要である。例えば、CMOS に MEMS、センサ、光デバイス等を融合させると、現状の高性能 CMOS にこれまでにない新機能が追加され、トータルシステムとしてみた VLSI の性能が大幅にアップする可能性がある。

CMOS デバイスの置き換えを狙う「Beyond CMOS」の開発が進むのは早くても 15-20 年後以降と考えられ、その間、Beyond CMOS のみに研究資源を集中するのは非常に危険である。CMOS の延長技術と CMOS への新機能付加の研究開発を中心とした CMOS ベースのナノエレクトロニクスの研究開発に多大な資源を投資すべきである。

①ナノチューブ・ナノワイヤトランジスタ

リソグラフィを用いて作製する現在のトランジスタと異なり、材料の自己形成機構によるボトムアッププロセスで作製する。特にカーボンナノチューブ（CNT）をチャンネルとする電界効果トランジスタは、伝導特性が極めて良好で、将来の集積回路デバイス候補として期待される。

②スピンデバイス

電子のスピンを利用したデバイス。CMOS にはない新機能の発現が期待さ

れる。

③その他の新材料

強相関電子系材料デバイス、分子デバイスなどが挙げられるが、研究途上であり具体的な情報処理デバイスへの応用はあまり進んでいない。

産業への貢献という観点からは、“More than Moore” から “Beyond CMOS” への境界領域の技術開発が重要である。なかでも、新物性・新材料・新機能のシリコンテクノロジーとの融合 / ナノテクノロジーとシリコンテクノロジーとの融合が鍵である。従って、我が国に於いては、最先端シリコン集積技術を基盤として、“More than Moore” から “Beyond CMOS” への境界領域をターゲットとした研究開発が重要であり、産学官連携のネットワークやプロジェクト体制の確立を図る必要がある。

3.2 フォトニクス分野

(1) 光通信

高スペクトル利用効率の変調方式に注目が集まっており、位相の多値変調技術である DQPSK がこの 3 年ほど研究開発の中心に移行し、対応可能な光変調器や光受信回路の集積化・小型化も進展している。その流れを更に加速する技術として、無線伝送ですでに実用化されているマルチキャリア方式である OFDM 変調の光通信への応用も急激に注目度が上がり、OFC・ECOC という主要国際会議での発表件数が急増するなど、実用化まで至るかどうかしばらく注目すべきであろう。

(2) テラバイト光メモリ

今日の次世代 DVD 技術では、どれほどがんばっても 200 Gbyte が限度。今後はテラバイト (Tbyte) をねらうべき。一つはホログラフィックメモリが候補であるが、ROM が不得意。光ディスクが生き残るのは HD との違いが明白な複製が容易な ROM ディスクであるから、ナノ・インプリンティング技術を利用した近接場メモリディスクがテラバイト ROM ディスクの最大の候補になる。また、超並列 VCSEL 二次元アレイヘッドによる 10 Gbps の連続書き込み再生が期待できる近接場 RAM ディスクも魅力であろう。実現は 2015 年前後かと思われる。

二光子吸収の小型固体光源が開発できれば、多層記録を利用することで、テラバイト級の RAM メモリになる。しかし、超小型固体光源不在がネックになっている。光のパルス幅がフェムト秒オーダーで、ピーク値がワットオーダーのものが数千円以下で供給される必要がある。一方、二光子吸収の感度の高い材料開発も重要である。実現は 2018 年前後であろう。

(3) 色調可変白色 LED 照明光源

白熱電球および蛍光灯の発光原理は、それぞれ、熱放射および放電によっているため、任意の発光スペクトルを得ることは不可能である。そのため、例えば、蛍光灯の光源の色温度は一義的に決定され、電球色 (3000 K 前後)、温白色 (3500 K 前後)、白色 (4200 K 前後)、昼白色 (5000 K 前後)、昼光色 (6500 K 前後) と区別される。1 つの光源から、色度座標の黒体放射曲線にそって、上述した色温度を得ることができると理想的な白色照明光源となる。

色温度の制御が可能な理想的な光源は、蛍光式白色 LED で実現可能であり、注目すべき技術である。これまで、R (赤)、G (緑)、B (青) の 3 色 LED を用いて白色光を得る試みは、フルカラーディスプレイへの応用として考えられてきたが、LED 特有の狭いスペクトル線幅と特定された波長のため、演色

性の優れた照明光源を作製することは不可能であった。そこで、近紫外～青紫 LED (405 nm 近辺の波長) を用い、R、G、B 蛍光体を、それぞれ、独立に励起・発光させることにより、発光スペクトルが連続分布に近く、かつ、平均演色評価数の高い ($R_a > 95$) チューナブル光源を作製することが可能である。従って、照射面の色、色温度、平均演色評価数、彩度等一般照明光源に最も重要なパラメータおよび発光効率を自由に制御可能な完全色調変調固体光源となる。

〈参考文献〉

Proc. of the 1st Int. Conf. on White LEDs and Solid State Lighting, 26-30, Nov., 2007, Tokyo.

(4) 光学材料・コンポーネント・光学設計

ナノテクを駆使したナノコンポジット材料や微細光学素子、能動光学素子や補償光学素子など、新規材料・コンポーネントの研究開発が盛んである。一方、使用波長域の拡大や画像処理技術の進展が、光学材料や光学設計に影響を与えつつあるのも興味深い。

【光学材料】薄膜では、ナノ粒子膜を用いた超低屈折率層により反射防止膜の角度特性を改善する研究、プラスチック材料では、ナノコンポジットを分散して低分散特性・熱的安定性を改善する研究や THz 帯用の材料開発などが興味深い。

【コンポーネント】波長以下の微細構造を利用した反射防止膜、波長板、バイナリレンズなど、液体を用いた可変焦点レンズ、および液晶、MEMS などを用いた収差補償光学素子の研究開発が注目される。

【光学設計】使用波長域の拡大に伴い、例えば、極端紫外線域を用いたリソグラフィで、屈折系に代わり反射系の設計が盛んである。また、画像処理技術を駆使した画像復元、超解像などのコンピューティショナル・フォトグラフィの研究開発が光学設計に与えるインパクトも注目される。

(5) 生体 3 次元計測

社会の高齢化がすすむにつれ、医療の現場で超早期診断の必要性が高まってきている。また、生活の質 (QOL) の向上の観点からも、健診などでの定量的なスクリーニングのニーズがある。アーリーヘルス (予防医学) とよばれる、異常を感じる前に診断する環境も、今後重要になってくると思われる。光を用いたイメージングは、無被曝、非侵襲で行うことができ、被験者への負担が少ない。また、NMR や X 線 CT、PET-CT が高価で巨大な設備が必要であるのに対し、光源、光学系、検出器、コンピュータというように小型低コストの

単純な構成で、高感度のイメージングを行うことができる。光を用いた診断は日常的な健康管理モニターに最適といえるだろう。

光コヒーレンストモグラフィー (optical coherence tomography: OCT) や光 CT (optical computed tomography) など実用化されつつあるが、今後はデジタルホログラフィーや、従来の光学顕微鏡に新しい機能を付加した 3 次元計測機器が開発されていくであろう。工業計測では波長という目盛りでいかに正確に形状などを計測するかがキーであるが、生体計測においては、膨大な散乱光からいかに有用な情報を抽出するかという観点から計測器を開発する必要がある。

(6) 量子情報

量子コンピュータは依然として基礎研究であるが、理論は新しい計算方式が検討されるようになり、実験は、方式がどうなろうと必要となる「雑音下で量子情報を忠実に送る／保持する」研究が進んでいる。送るのは光で、保持は物質で行うとすると、光と物質の間の量子情報の受け渡しが重要になってくる。記録媒体としては、原子単体、半導体結晶等が考えられる。物質の中で量子情報処理をする際の制御光に関する研究も増えてきている。(光を情報の BUS として使う)。上記「理論研究における新しい計算方式」とは、いわゆる量子回路の組み合わせでなく「クラスター状態を用いた測定誘起型コンピューティング」の可能性と簡便性を追求する動きのことである。

量子暗号は大学や国研中心の基礎研究と企業中心の応用研究が活発である。前者については優劣乱れる種々の方式が複数出てきており、一つに収束していない。まだしばらく、出てくるであろう。後者については当面方式は「BB84 + デコイ」で、ハード的には非古典的光源よりは高性能光子検出器の開発を中心とし、経済性も考慮した開発が続こう。単一光子の発光と受光に使われるデバイス (Ⅲ-V 族半導体) の研究もなされている。受光素子には、上記基礎研究の段階ではあるが、ダークカウントの少ない超伝導素子も開発されている。カロリメーターを使った素子も開発されている。

コンピューティング、暗号以外に、各人の情報を開示しないで大勢を計算するという応用 (選挙・ゲームなど) に関する研究も出始めている。これは量子暗号が実用近い研究、量子コンピュータが実用が簡単でない研究ということから、その間を埋める意義もあり、量子情報研究を持続的なものとするものである。

(7) スローライト光バッファ技術

ある冷却原子の準位が示す巨大な材料分散を利用すると、光の群速度を著しく (例えば自転車の速度まで) 遅くできることが 1990 年代にハーバード大学

で実証され、スローライトと呼ばれるようになった。その後、同様の光は構造分散を用いても起こることがわかり、NTT がフォトニック結晶導波路に対して 100 分の 1 の光速を評価した。ただし一般にこれらのスローライトは帯域が狭く（自転車の速度が得られる帯域は 1 kHz 以下）、また高次分散も巨大なため、変調された光信号に適用できなかった。2004 年に横国大は、高次分散をなくしつつ帯域を拡大するフォトニック結晶構造を考案し、最近、その実証に成功した。現在の性能は数 THz 帯域で 50 分の 1 程度の速度であり、デバイス内部で 100 ps 程度の遅延が得られている。もし帯域を光通信の 1 チャンネルに対応した 100 GHz 以下に狭め、デバイスを長くすれば、3 桁以上の遅延時間が得られると見込まれている。これは小型の光遅延素子や、光信号を光のまま蓄積する光バッファを実現する。次世代の光ネットワークはノード部分の速度がボトルネックになると予想され、これを解決する光パケットスイッチに大きな期待がある。しかしパケット同士の衝突を回避する時間調整に利用される光バッファに技術的な見通しが無い。フォトニック結晶光バッファが実現できれば、重要なブレークスルーになる可能性がある。

(8) 動的制御による高効率・広帯域波長変換技術

光が通過中にその場の媒質の屈折率を変化させると、その光が位相変調されることが知られているが、例えばステップ的に媒質の屈折率を変化させると、光の波長が線形的にシフトする現象が研究されている。屈折率が変化したままの状態では光が媒質を通過すると、波長がシフトしたまま光が出力されるので、波長変換器として働くことになる。このような動作は従来の位相変調器でも可能なはずだが、光は短時間に通過するので、光がいる間に屈折率変化を起こさせるには、長い媒質長と迅速かつ一様な屈折率変化が必要となり、容易ではない。一方、フォトニック結晶では、光を微小共振器やスローライト導波路により長時間（例えばナノ秒）とどめることができるので、このような動的制御が容易になる。話題の発端は、短パルス光を高 Q 値微小共振器に蓄積させる手法を議論したスタンフォード大学の研究であり、その後、NTT がその機構を波長変換として解釈し直した。最近、コーネル大学は、リング共振器に蓄積された光の波長を 1 nm 程度シフトさせることに実際に成功した。京都大学も同様の実験を始めている。また NTT は、MEMS 技術を使って微小共振器の形状を短時間のうちに変えることができれば、機械／光エネルギー変換によって最大 400 nm に及ぶ連続的な波長変換が起こることを理論的に予測した。分野外では詳しく理解されていない話題だが、原理的に変換効率は 100% であり、従来の波長変換とは異なる手法として、具体的なデバイス応用が期待される。

(9) 超解像リソグラフィー、超解像顕微鏡

通常の光学レンズで点光源を別の点に結像しようとする、光源からの放射成分は伝搬し、近接場成分は伝搬しないため、像にボケが生じる。もし近接場も伝搬できればボケのない完全な結像が得られるので、リソグラフィーや解像に大きなインパクトをもたらす。これを実現する構造として、メタマテリアルなど負の屈折率媒質が注目されている。正負の屈折率境界では光がスネルの法則の逆向きに曲がるので、平坦面でも伝搬光が集光される。メタマテリアルではさらに負の透磁率を実効的に発生させて近接場成分も伝搬させ、理論的には完全な結像を実現する。ロンドン大学は 1998 年にこれらを予測し、具体的な構造として微小な金属スプリットリング配列を提案した。2004 年にはマイクロ波に対する構造が UCSD により作製され、動作が確認された。しかし光領域では金属に強い吸収損失があるため、動作が明確ではない。ところで金属自体は負の屈折率をもつので、損失を無視すれば、それ自体でも集光が起こり、超解像が得られたとする報告がある。さらに誘電体と金属の交互配置によって、回折限界以下の物体が拡大表示されたという報告もある。一方、1998 年に NEC 北米研は、金属の微小開口の周期配列で異常に高い光の透過が起こることを発見した。その後の研究では、周期構造が入射波から表面プラズモンを効果的に励起し、それが裏面に伝達されて、高微小開口により従来の近接場光学の性能も改善できる可能性がある。現在、これら様々な研究がメタマテリアルやプラズモニクスというキーワードで研究され、背景理論は混濁気味ではあるが、上に書いた回折限界を打破する可能性がある技術として注目される。

(10) シミュレーション解析、解析ツール

最近、日本、米国、欧州の各国において、光デバイスの構造最適化技術に関する研究開発が注目されている。最適化問題へのアプローチには、遺伝的アルゴリズム (GA)、トポロジー最適化法 (TO)、焼きなまし法などの確率論的手法、波面整合法 (WFM) や最急降下法などの決定論的手法、さらにはニューラルネットワーク法など、様々な方法があるが、GA、TO、WFM などが、各種光デバイスの最適設計に成果を挙げている。いずれの方法も最適化プロセスの中で FEM、BPM、FDTD といった数値シミュレーション技術を繰り返し用いることになるので、大規模高速計算技術、高信頼度計算技術の確立が重要な課題になっている。

3.3 コンピューティング分野

(1) 基礎理論（計算モデル、データ構造とアルゴリズム）

ソフトウェアの社会における役割はますます増大しており、特に（1）国や社会のインフラストラクチャを構成するソフトウェア、（2）Safety critical システムの制御ソフトウェア、（3）非常に多数の分散した機器上（PC や携帯電話等）の基盤ソフトウェアは、不具合がもたらす社会的損失が莫大である。この認識に立って、基盤ソフトウェアの信頼性確保という目標の下で基礎理論（特に検証技術）の研究を強化推進することが第一に必要である。また、あらゆるソフトウェアのあらゆる側面を検証することは現実的ではないものの、基盤ソフトウェアが備えるべきいくつかの重要な性質については、検証（品質保証）を奨励・要求する制度を設ける方向で社会的合意や議論・政策をまとめてゆく必要がある。

第二に、現在のソフトウェア技術は、マルチコアプロセッサへの急速な流れに代表されるコンピューティング環境の大きな変化に追隨しておらず、大規模並列マシンの有効利用をみても依然としてソフトウェア技術がボトルネックとなっている。効率と正当性の保証された並列ソフトウェアの構築を支える基礎理論の強化は急務である。

第三に、技術の進歩は放置すると技術の細分化を招くが、細分化した技術の再統合を目指す基礎研究が重要である。たとえば、数値計算技術と非数値計算技術は、結果保証や並列実行など多くの面から、再統合に向けた努力を始める段階にきている。さらに、ソフトウェア品質保証社会に向けて、プログラム開発作業と検証作業との統合を促進する理論や枠組みの整備も重要である。

[1] The Economic Impacts of Inadequate Infrastructure for Software Testing, Planning Report 02-3, U.S. Dept. of Commerce Technology Administration, 2002.

(2) データベースとデータマイニング

① プライバシー保護データマイニング

データベースを公開するとき、有益な情報を検出するデータマイニング技法と、そこから個人の特定を不能とするプライバシー保護とは両立が困難な関係にある。プライバシー保護データマイニング技法は、2000 年に相関ルールデータマイニングの提唱者である Rakesh Agrawal（当時 IBM）が個々のデータの値をある程度かく乱しつつもデータの自動分類木作成を適切に行う方法 [2] を提案している。個々のデータの識別子（ID）を隠蔽しても、データマイニングの分析結果から容易に特定の性質を持ったデータの ID を判定できる可能

性がある。これを防ぐため、データの属性値を部分的に隠蔽し、ある性質をもったデータが少なくとも k 個存在する事を保証し、当該データ間では識別不能にするという技法 (k -匿名性) が考案されている [1] が、そのような最適なデータベースの作成問題は NP 困難 (計算の複雑さを表す「複雑性クラス」の一つ “NP” に属する問題と同等かそれ以上に困難であること) である。その後、最新の研究 [3] に到るまで近似計算アルゴリズムが考案されている。総じて非常に理論的な課題であり、理論面での解析・検討が深められてきたと言える。

- [1] L.Sweeney, k -anonymity: a model for protecting privacy, Int. J. on Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems, 10 (5):557-570, 2002.
- [2] R.Agrawal, R.Srikant, “Privacy Preserving Data Mining”, ACM SIGMOD 2000, pp.439-450, 2000.
- [3] H.Park, K.Shim, “Approximate Algorithms for k -Anonymity”, ACM SIGMOD '07, pp.67-78, 2007.

②情報漏えいの監査追跡技術や分析加工したデータの出自を追跡するリネージ技術、クレンジング技術

漏洩した情報 X の出自がデータベース D であると疑ったとき、 D への全問い合わせ記録から X の情報を取り出した原因となった質問 (の集合) を同定する問題に関する研究がある [6]。一見簡単に見えるが、 X は D から大きく加工されたり書き換えられたりしているため、単純に X と D を照合しても上手くはいかない。情報検索系統の手法とデータベース処理分野の伝統的離散アルゴリズムを組み合わせる必要が生じる。他のアプローチとしては、現在のデータベースシステムは処理記録をインデックスやログに残す為、当該情報がもれる可能性があり、その防止のため、徹底して補助記録情報から指定した情報の痕跡を消去する動き [4] がある。多くのシステムが RDB を永続記録装置として利用しており、今後益々重要な研究となると想定される。

データベース情報の加工技術は、遡ると、不完全なデータベースを (重複と思われる情報を除去するなどして) 使える品質へと直すクレンジング技術に近い。クレンジング自体は伝統的にテキスト処理や統計处理的技法が多くあるが、現在は、情報の保護を考慮しつつデータベースを変換加工したいという視点で改めてアルゴリズムを設計する段階に入っている。又、保護と双対となる技術として、情報の分析結果からある程度の不確定さを伴いつつもその原因となったデータの履歴を追跡する技術 [5] も重要である。当該概念は、リネージ (lineage) と呼ばれ、データウェアハウスにおける記録データ分析結果の説明機構としてデータウェアハウスシステム製品に採用されつつある。

今後、「データ分析結果を履歴から適切に説明する機能」、「デリケートな情報を特定不能とし保護する機能（プライバシー）」、「必要に応じて情報の痕跡をシステムから完全に消去する機能」などが新たにデータベース要素技術として研究開発が進むと想定される。

- [4] P.Stahlberg, G.Miklau, B.N.Levine, "Threats to Privacy in the Forensic Analysis of Database Systems", ACM SIGMOD2007, pp.91-102, 2007.
- [5] O.Benjelloun, A.D.Sarma, A.Halevy, J.Widom, "ULDBs: Databases with Uncertainty and Lineage", VLDB '06, pp.953-964, 2006.
- [6] R.Agrawal, 他, "Auditing Disclosure by Relevance Ranking", ACM SIGMOD '07, pp.79-90, 2007.

③データベースのキーワード検索や Top-K 検索に関する技術

関係データベースや XML データベースなどを対象に、多様な情報を 1 つのデータベースとして統合して検索利用する研究は 1990 年後半から盛んに行われている。2006 年以後精力的に研究が進められている技術の一つとして、検索エンジンに見られるキーワード検索能力を既存の（レガシー）データベースにも与えようとする研究が挙げられる。企業内情報の大半は多くのレガシーデータベースに跨って格納されており、エンタプライズサーチとしてのニーズが大きい。2、3 個のキーワード入力で、スキーマの異なる関係データベースや XML データベースから適切な情報を関連付けまとめた項目としてランキングする。既存の要素技術を組み合わせることにより情報統合を図る試みがある [7]。関係データベースのキーワード検索、XML データのキーワード検索、全情報をグラフ表現してグラフアルゴリズムにより解こうという方向 [8] があげられる。多くの場合、問い合わせに対して上位 K 個の解を高速に取り出す Top-K 技術と原理が近く、大きな潮流となっている。

- [7] M.Sayyadian, 他, "Efficient Keyword Search Across Heterogeneous Relational Databases", IEEE ICDE 2007, pp.346-355, 2007.
- [8] H.He, H.wang, J.Yang, P.S.Yu, "BLINKS: Ranked Keyword Searches on Graphs", ACM SIGMOD 2007, pp.305-316, 2007.

④センサなどによる実世界の監視データを扱うデータストリーム処理技術

無線 IC タグなどに代表される多様なセンサからは大量の時系列データが生成される。ストリームデータを扱うデータベースを構築する動きは 2000 年ごろから米国大学で生まれ、スタンフォード大（STREAM）やブラウン大（Aurora）で試作システムの構築が行われてきた。主要データベース製品の中にはストリーム処理機能に対応しているものも出つつある [10]。連続数値

ストリームを扱うハードウェアを検討する方向 [11] も見られる。ストリームで扱うデータ自体が、センサ出力などの単純な観測数値か、監視イベントなどのデータベースレコード [9] か、など、多様性が認識されつつある。膨大なデータを生み出すセンサに対するデータベース基盤は、従来同様、応用から強くドライブされつつ発展するものと想定される。

- [9] J.Rao 他, A Deferred Cleansing Method for RFID Data Analytics, VLDB 2006, pp.175-186, 2006.
- [10] M.Lefler, J.Gehrke, M.Spicer, J.Goldstein, D.Gawlick, "Panel: Data Streams Go Mainstream", ACM SIGMOD 2007 (industrial session), p.971, 2007.
- [11] Bandi, A.Metwally, D.Agrawal, A.E.Abbadi, Fast Data Stream Algorithms using Associative Memories, ACM SIGMOD2007, pp.247-256, 2007.

⑤超超大規模データシステム基盤技術

従来のデータベース技術は、主としてトランザクション処理と問合せ処理によって巨大なマーケットを形成してきたと言える。しかしながら、その対象は高価値情報としてのレコード型を対象としており、非構造データはデータモデルの対象外であった。量の観点からは非構造データは圧倒的に巨大であり、利益が少ないものの、市場拡大の観点から当該領域へのシフトがサーチエンジンを起爆剤として生じつつある。GFS (Global File System)、BigTable などは、トップレベルのデータベース系国際会議では発表しうる新規性は無いものの、OS 関連の学会では従来の対象データサイズを遥かに凌駕することから、新鮮さとともに受け入れられつつある。サービスの多様化はシステムの複雑化を招き、検索エンジン企業、アマゾンや e-bay のようなメガサービス企業はデータベースエンジニアを大量に雇用し、巨大プロジェクトを進行させつつある。超超大規模データ領域に対しての研究は大学等では容易ではなく、メガ企業に閉じた形で進展しており、国策として新しい研究形態を工夫する必要がある。ウォールマート、Yahoo などが扱うデータベースはペタバイト級に成長しており、古典的 RDB (Relational Database) の領域を超えている。多様なデータベースアプライアンスベンダーが生まれている背景もここにある。ミドルウェア、OS、データストレージ、パワー制御など、全ての基盤技術を統合する必要が出てきており、今後、もっともホットな領域の一つとなろう。

- [12] Large Scale Analytics: William Chang (BAIDU), Raghu Ramakrishnan (Yahoo), Wei Ying Ma (Microsoft Research Asia) ACM SIGMOD 2007

(3) ソフトウェア開発技術／ツール

要求分析技術に関して、セキュリティに特化した技術の研究が近年多くなっている。その理由は、要求分析技術の目的が、ソフトウェアの欠陥を可能な限り上流工程で検出・防止することであり、一方で、セキュリティに関するソフトウェアの欠陥が、特に大きな経済的・社会的コストをもたらすためである。この方向の研究としては、一般的な要求分析手法（オブジェクト指向やゴール指向など）の拡張、リスク分析技術（故障木解析（FTA：Fault Tree Analysis）、故障モード影響・致命度解析（FMECA：Failure Mode Effect and Criticality Analysis）、および危険操作性解析（HazOp）など）の応用、およびそれらの組合せがある。

形式手法に関しては、次のような研究が注目されている。

1. モデル検査などによるソフトウェア検証に対し、ソフトウェア開発と同様に、体系的な手順を与える、ソフトウェア検証プロセス。特に、ソフトウェア開発において、事実上の標準として使用されているモデル化言語 UML（統一モデリング言語）に基づいて、検証のためのモデル構築工程、検証工程、および欠陥発見・修正工程を、可能な限り自動化する、という方向が主流である。
2. 抽象化に基づくプログラム検証技術。設計モデルと異なり、実際に計算機上で実行することを目的として作成されたプログラムに対し、網羅的検証を行うのはそのままでは事実上不可能である。そこで、検証したい性質の可否だけを保ったまま、複雑さを軽減したプログラムに変換することにより、現実的な検証を可能にする、抽象化技術の進展が近年著しい。このため、より複雑なプログラムの検証が可能になってきている。

(4) ビジネス応用とサービスサイエンス

サービス産業は多岐に渡り、業界も学界も分化しているので、横断的に研究・開発・教育を進める体制がない。サービスは、工業製品とは質的に異なる価値創造の仕組みをもつので、日本が得意としてきた「ものづくり」の手法をそのまま適用できない。最近のサービス業界では、イノベーションや生産性向上を言う前に、違法行為が頻発している。しかし、モノが溢れ少子高齢化が進む 21 世紀の日本の経済を支える基盤として、分野横断的に業界・学界・消費者を巻き込んだ研究・開発・教育の推進が望まれる。

サービスの研究開発は、単一機関でできるものではなく、消費者も含む連携が必要であり、またサービスサイエンスでは、伝統的学問分野の理論を現実的問題に応用して成果を上げなければならない。これは、縦割りで発展してきた日本の業界・学界における従来の研究開発方法とは異なるものである。また、

欧米のサービスサイエンスが統計処理や IT を活用した顧客管理と労働生産性の向上に重点が置かれているのに対し、日本の「おもてなしの精神に基づく質の高いサービス」が科学的に研究できるのかが課題である。

以下のような研究開発課題が挙げられる。

- ①公共サービス（政府、自治体、学校、病院等）の効率と効果（顧客満足度）を高めるマネジメント
- ②サービス業務の原価計算・企画と、その企業会計システムへの取り込み
- ③日本的サービスの価値の定量的測定法
- ④顧客の意識調査法と、その分析に基づく顧客行動のモデル化
- ⑤ヒトの代理をする IT の活用による個々の業務の効率化
- ⑥資源の配分や流通に関する実用的な（ロバスト、高速）数値最適化法とその計算アルゴリズム
- ⑦サービスの法的側面（規制）やグローバル化のための制度調整

(5) Web 情報システム

Web 情報システムに関連する最大の課題はプライバシー問題であろう [1]。

2006 年に起こった AOL による情報漏洩事件においては社会保険番号 (SSN) が公開されてしまった。ネット上でいったん漏洩された情報は回収することは不可能であり、将来にわたり深刻な不安が継続してしまう。

Web 以前から存在したプライバシー問題と Web 世界におけるそれとの大きな差は、Web においては検索技術が高度化し、従来ならば発見が難しい情報も比較的簡単に入手可能となり、また、公開情報である断片的な個人情報を組み合わせて個人を特定する、個人の全体像を再構成することが可能になってきたことである。SNS (Social Networking Service) やブログにより、個人が個人の側から個人の意図で情報を提供する状況において、個人のプライバシーを如何にして保護するかという技術に関する研究も不可欠である。また、日本においても基礎年金番号などの個人 ID が存在する現状において、これら ID を軸に断片的個人情報を再構成する技術が台頭してくることが予想される。すなわち、従来からのミスによる情報漏洩の防止技術、犯罪としての情報窃盗の防止技術だけでなく、Web 検索技術の高度化に起因するプライバシー問題に対応する必要がある。

また、Web 上の情報がテキストのみから、画像（静止画、動画）、音へと拡張されることによる新たなプライバシーの問題も顕在化してきた。例えば、個人がブログ内に貼った写真の背景にたまたま写っていた自動車のナンバープレートから、その個人が意図しなかった情報が漏洩する可能性が出てきた。すなわちプライバシーのマルチメディア化に対応する技術の検討も必要である。

さらに、これまで合意が形成されていなかった Web 世界における個人情報

の取り扱いに関して、グローバルなプライバシー標準策定の動きもある。

日本としてもこれらを直視し、Web 情報システムにおけるプライバシー問題に関する国家的検討をすることが必要であるとする。

〈参考文献〉

- [1] 市川類：「インターネット・サービスとプライバシー問題」，ニューヨーク日より
2007 年 10 月号、独立行政法人 情報処理推進機構
<http://www.ipa.go.jp/about/NYreport/200710.pdf>

(6) スーパーコンピュータ

現在進行中の大規模なスーパーコンピュータの開発プロジェクトとして、日本、米国でそれぞれ進められている「汎用京速計算機プロジェクト」（日本）、「High Productivity Computing Systems program (HPCS)」（米国）が挙げられる。これらは、2010 年あたりに 10 PFLOPS 以上の性能を達成することができる次世代スーパーコンピュータの実現を目指している。詳細の多くは明らかにされていないが、将来的にトップ 1 の性能となることは間違いないと考えられ、今後の動向が注目される。

従来のスーパーコンピュータは、性能至上主義で開発されることが多かった。しかし近年では、特にコストや消費電力が重要視されるようになっている。それらを強く意識して開発されたのが IBM の BlueGene であり、省電力な組み込み向けプロセッサをベースにして開発されている。また、科学技術アプリケーションの広がりに伴い、多くの研究者がスーパーコンピュータを利用するようになっており、幅広いユーザに対して「使いやすい」システムを開発することも求められている。

次世代のスーパーコンピュータの性能である EXA フロップス、Zeta フロップスを目指す検討が DOD、DOE を中心に委員会を作って組織的な検討が開始されている。インテル、IBM、CRAY 社と主要な大学の研究者が集まって検討を行っている。

(7) 並列コンピューティング／クラスタコンピューティング

クラスタコンピューティングは、オープンソフトウェアで構成されているので、中国や台湾等も参加しやすい技術といえる。米国で実績をあげた中国人技術者が中国に帰国し、クラスタによるスーパーコンピュータを製造し始めている。クラスタのノードを構成するサーバの製造技術はすでに中国や台湾にあり、日本にとって脅威となってくる。

2007 年では、トップ 500 に入っているシステムは、日本は 20 システム、中国は 10 システム、台湾は 11 システム。

(8) チップマルチプロセッサ

チップマルチプロセッサは、10 年近く前から多くの研究・開発が行われてきたが、コンシューマ PC への普及など、主流のプロセッサアーキテクチャとなるに従い、近年では更に活発に研究が行われている。とりわけ、今後実現可能となるであろう、1 チップに数十ものプロセッサコアを搭載した「メニーコア (Many Core) プロセッサ」と呼ばれるチップマルチプロセッサに関する研究や開発事例も見られるようになっている。

ここ数年の研究動向としては、「チップマルチプロセッサをどう作るか」から、「どう効率よく使うか」、つまり効率的に並列化プログラミングを行う手法や、多くのコアで並列プログラムを効率的に実行する技術などに研究・開発動向がシフトしている。例えば、投機的マルチスレディングや、トランザクショナルメモリ、スレッドスケジューリングなどの研究が最近では注目されている。

また、当然ながらチップマルチプロセッサではプログラムを並列化しなければ性能向上は得られないため、プログラマやコンパイラに対してこれまでの逐次処理型から並列処理型へのパラダイムシフトが求められており、並列化プログラミングをサポートするための技術が重要視されている。また、並列化プログラミングを行える人材の育成も、大学や産業界における課題である

(9) リコンフィギュラブルシステム

CRAY 社と SGI 社が FPGA をコプロセッサとして組み込んだスーパーコンピュータを商用化している。

日本では、GRAPE7 が、天体シミュレーションにおいて、FPGA を利用することで超低消費電力を実現することに成功した。FPGA を使うことによる低消費電力性は今後も期待される。

(10) ディペンダブル情報システム

情報社会のディペンダビリティとセキュリティに関して、注目すべき動向が 3 つある。

その第 1 は、米国・ニューヨークにおける 2001 年 9 月 11 日の惨事以来、欧米では「これまでは単なる想像に過ぎなかった事柄が今や現実である。これまでは思いも及ばなかった事柄が今は想像できる」という認識が浸透したことである。その結果、社会活動の根幹を支える国の重要インフラ（エネルギー網、交通網、情報通信網、金融網、防災網、防犯網など）の防衛・保全への関心が急速に高まり、国家安全保障の見地から、ネットワーク化情報システムとしての社会重要インフラの相互依存性解析、ディペンダビリティ／セキュリティの確保に関する研究が活発化している。

第 2 には情報社会の安全信頼保障が強く意識されるように成った結果、こ

れまで別々のコミュニティで進められてきたディペンダビリティとセキュリティの研究開発に融合の動きが生まれている。従来のセキュリティ研究では「秘密情報（鍵）は適切に管理されている。情報システムは正しく実現されている」と仮定されてきたが、システム操作ミスによる秘密情報漏洩の可能性、仕様ミス、設計ミス、実装ミスによる脆弱性発生の可能性は情報システムに常に存在しているため、セキュリティ確保にはディペンダビリティ技術が必要である。一方、従来のディペンダビリティ研究は「フォールト（物理的、人為的）の発生は偶発的である」という基本的仮定の上に成り立っているが、実際には悪意ある人為フォールト（侵入、改竄）に偶発性はないので、ディペンダビリティ確保にはセキュリティ技術が必要である。こうした認識が浸透し、ディペンダビリティとセキュリティの融合化が促進されつつある。

第3には、情報システムのディペンダビリティとセキュリティに関する重要研究領域への投資に関して欧州（EC）と米国（NSF, DHS）の政策当局の連携が起きていることである。EU-US Summit Series: Workshop on System Dependability and Security と題する EC/NSF/DHS 共催の非公開ワークショップの第1回が2006年11月にアイルランドのダブリンで、第2回が2007年4月に米国インリノイ州アーバナ・シャンペンで開催され、重要研究分野の提案と EU-US 連携の可能性が議論された。特に、ディペンダビリティ／セキュリティに関する大規模なテストベッドとデータセットの構築が欧米連携の重要課題として認識されている。

（11）省電力情報処理技術

バッテリー動作の携帯型端末の普及や、ハイエンドマシンの増大する電力により冷却が限界に近づいたことにより、2000 年前後より急速に省電力情報処理技術に関する研究が広まり、デバイス、回路、アーキテクチャ、VLSI 設計技術、ソフトウェアの各分野とも、多くの論文が発表された。そのため、可能性のある技術候補の探索や、省電力に関する理論的な研究はかなりの部分が既に行われ、近年は論文数も減少傾向にある。今後は、各種技術を実用化に結びつけるための技術開発が重要視されている。また、半導体プロセスの微細化にともない深刻となるリーク電流への対処を目的とした技術開発も、これまで以上に重要となる。

個別の技術要素として今後注目すべきは、デバイス関連では「ダブルゲート／トライゲート型トランジスタ」が、また回路技術・アーキテクチャ技術としては「near threshold operation 技術」が挙げられる。ダブルゲート／トライゲート型トランジスタは、駆動電流を向上させるために、トランジスタゲートを2つあるいは3つにするものであり、産業界において実用化に向けた開発が活発に行われている。また、near threshold operation 技術は、電源

電圧をトランジスタの閾値電圧領域で動作させるもので、エネルギー効率の面で最適な VLSI 動作を実現できると期待されている。

3.4 情報セキュリティ分野

情報セキュリティ分野における研究開発の特徴としては、以下のような点が挙げられる。

- ①安全性の評価が非常に重要となるが、想定外の攻撃をなくすためにも、考慮すべき点が極めて多く、かつ、個々の事項についても深い知識や考察が要求される。
- ②鎖の強さがそれを構成する一番弱い輪の強度で決まるのと同様に、情報セキュリティシステムの強度もその構成要素の一番弱い点で決まってしまう。そのため、保護に抜けが生じないように時間的にも空間的にも広い範囲を保護の対象とする必要がある。

よって、研究開発の動向としては以下の方向が挙げられる。

- A) 評価技術・体制・制度の強化
- B) 時間軸方向の情報セキュリティの強化
- C) 総合的情報セキュリティの強化
- D) 他分野との連携

なお、A) は①を解決するための研究であり、証明可能安全性、公開可能性、自動化、現実に応じた評価などが重要となってきた。また、評価認証制度や公的機関が果たす役割も重要となってきた。

B) は②の時間的な広がりに対処するための研究である。ビジネスの継続性や、災害・攻撃・障害などからの自然治癒力や回復力、また、ノードや機能の一部が損なわれたとしても、全体に大きな影響を与えないための自律性やサバイバル力が求められてきている。

C)、D) は②の空間的な広がりまたは時間・空間的な広がりに対処するためのものである。技術のみならず、人的要素（ヒューマンクリプトなど）、社会的要素（責任分界、リスクコミュニケーションなど）を考慮する重要性が増していると共に、ディペンダビリティ、文科系分野などの他分野との連携も重要になってきている。

以下では、A) ～ D) に対応する研究として、それぞれ以下のテーマを紹介するが、各テーマ共、A) ～ D) のいずれにしか属していないという意味ではなく、他の項目も考慮した内容となっている。

A) に関する研究：

- (1) 個人情報およびプライバシー保護技術の研究開発、評価および啓発
- (2) 装置内部公開型生体認証・生体検知方式の開発と評価手法
- (3) 暗号実装を含むソフトウェアの総合的な安全性の検証

B) に関する研究：

- (4) 自然治癒型高信頼性セキュリティ (Homeostasis Dependable

Security)

(5) 超細粒セキュリティ (Ultra fine-grain Security)

C) に関する研究：

(6) 情報セキュリティにおける責任分担（または責任分界）の研究

D) に関する研究：

(7) 情報セキュリティ技術と絡み合う周辺科学技術の統合型研究

(1) 個人情報およびプライバシー保護技術の研究開発、評価および啓発

個人情報の活用が進むにつれ、また、ネット上および現実世界における監視が強化されるにつれ、個人情報およびプライバシー保護の重要性が増してきている。これに対して、個人情報の保護が義務付けられるなど法的な枠組みは整備されつつあり、また、個人情報あるいはプライバシーをより確実に保護するための研究も開始されている。しかしながら、以下のような理由によりそれらの研究成果および技術が広く普及するには至っていない。

- 1) 保護効果が利用者に伝わり難い。
- 2) 保護技術の導入は一般に処理を重くし、使い勝手を悪くするため敬遠される傾向がある。
- 3) 保護範囲が、データ送受信者の秘匿、データの秘匿、認証相手の秘匿、検索内容や趣味嗜好の秘匿、統計処理や集計結果における個人情報の削除など多岐に渡り、どの技術を導入すれば何がどの程度保護できるのかに関する十分な情報がない。

そこで、2) に対しては、問題を解決するための研究開発を推進する必要があり、1)、3) に対しては、各技術や効果を公正に評価し、それらを広く一般に浸透させるためのプロジェクトが必要である。これらの研究開発およびプロジェクトにより、情報の活用を阻害することなく、個人情報およびプライバシーが適切に保護されるようになることが期待される。

(2) 装置内部公開型生体認証・生体検知方式の開発と評価手法

生体認証技術は、国防、交通、金融等の分野において利用されはじめている反面、「なりすましをはじめとする攻撃に対してどれだけ耐性があるか」という観点からの検討が非常に少ない。こうした背景には、既存の生体認証方式の限界により、装置の安全性を内部構造の秘匿によって確保せざるを得ないという事情がある。

今後、生体認証装置のアプリケーションが広がると、リバースエンジニアリング等による装置の内部構造に関する情報やテンプレートの漏洩を想定せざるを得なくなる。そのような状況においても安全性を確保できる「装置内部公開型生体認証・生体検知方式」の検討が今後重要となると予想される。「アルゴ

リズムの公開」を前提とすると、内部構造等が攻撃者にとって既知であり、攻撃者にとって最も有利な条件の下での攻撃を想定する必要がある。また、安全性の評価については数学的な意味での「証明可能安全性」が付与されることが望ましくなる。

こうした研究の嚆矢として、まず、攻撃者が最も有利な条件の下でなりすましを試みる場合の攻撃成功確率に関する研究（ウルフ攻撃アプローチ等）が注目される。攻撃者が複数のテンプレートに対して一致と誤判定される入力データを利用した場合、従来の誤受入率に比べてはるかに高い確率で攻撃が成功する可能性が示唆されている。

また、テンプレートが漏洩した場合でも安全性を維持できるようにするキャンセラブル・バイオメトリクスの研究も研究発表数が増えつつある。最近の研究例としては、零知識証明プロトコルとの組み合わせによる実現方法などが提案されており、テンプレートの漏洩対策という観点でプロトコル自体に証明可能安全性を持たせることも可能になりつつある。

(3) 自然治癒型高信頼性セキュリティ (Homeostasis Dependable Security) に関する研究開発

自然治癒型高信頼性セキュリティ (Homeostasis Dependable Security) とは、セキュリティが破られても自動的に自己修復し、サービスを継続するための各種基盤技術に関する一連の研究アプローチを指す。機器レベル、LAN レベル、WAN レベルの各レベルにおいて、自然治癒のダイナミクスを規定する各種の基本原則を募集し、広域テストベッド環境の上での競争を促すことにより、実用的かつ堅牢な新ネットワークアーキテクチャの開発を目指すことが重要となると思われる。

萌芽的なアプローチとして、信頼性・安全性を確実に保証するソフトウェア検証・実装技術や、安全かつ信頼性の高いデータ管理・保護方式などが含まれる。また、本人確認精度を高め、不正行為を犯した際に追跡を免れない「顔の見えるネットワーク」の導入も、集団監視により匿名性を悪用した犯罪の抑止につながると考えられる。しかし、プライバシー侵害の問題や想定できない攻撃に対する自然治癒力を評価するためには、法学者、経済学者、社会学者なども含めた学際的な研究とともに、広域テストベッドを用いた実証的研究アプローチも必要となる。米国 NSF では次世代インターネットを目指した Geni プロジェクト (Global Environment for Network Innovations) が開始されており、日米が協調した研究も可能と考えられる。

(4) 超細粒セキュリティ (Ultra fine-grain Security) に関する研究開発

今後注目すべき研究開発としては、情報漏洩が原理的に起こらないアーキテ

クチャが挙げられる。例えば、情報の最小単位が権利保護カプセルで管理され、TPM のような耐タンパーデバイスで権利保護が執行される構造を考え、全体として効率的かつ完全なアーキテクチャを実現する。情報の最小単位はアプリケーション毎に異なり、適切な定義が求められる。関連する研究としては、活発に研究が行われている DRM 技術や Trusted Computing Group が提案する TPM 技術などがあるが、既存技術の上に DRM を築くのではなく、OS およびネットワークのアーキテクチャレベルから抜本的に再構築することにより、高速処理性とセキュリティを両立するアプローチが注目に値する。

(5) 暗号実装を含むソフトウェアの総合的な安全性の検証

これまで、暗号実装を含むソフトウェアの安全性の検証では、基底にある暗号の数学的設計自体は正しいと仮定した上で、その設計された暗号が正しく実装されていることまでが検証の対象となってきた。一方、証明の機械化や証明自体の正しさの検証可能性については着実に研究が進んできている。これは、ソフトウェアの安全性に対する証明が非常に巨大かつある程度定型的なものとなり、場合分けの十分さなど人手による検証では意味のある知見を得られない（ある意味で検証作業そのものが証明作業に匹敵する）という性質によっている。

他方で、暗号の数学的な正しさの証明では、人手による証明技術の進歩はあるが、機械的な証明の研究はこれまであまりされてこなかった。これは、証明手法自体が必ずしも定型的とは言えないことにも原因があるが、一方で証明が複雑になるにつれて証明自体に誤りを含む可能性を排除できなくなってくるからである。また、暗号プリミティブ（例えば RSA）の設計と暗号プロトコルの設計（例えば TLS）、実際の実装（例えば OpenSSL）の設計の間には常にギャップが存在し、これらの不整合による脆弱性の発見も相次いでいる。

最近、このような 2 つの異なる方向から進んできた安全性証明の手法を統合し、暗号自体の数学的正しさを含む検証可能な安全性証明を導出する事を目指した研究分野が立ち上がりつつある。このような証明には、暗号の証明に含まれる確率的な要素をもち、プログラムの振る舞いなどを記述できる新たな論理体系の構築など多くの課題があるが、欧米においていくつかの先駆的な研究成果が得られており、日本国内でも研究グループが結成されつつある。現在の所、まだソフトウェア検証分野における安全性証明と暗号分野における安全性証明の間にはその取り組み方等にも差異がある状態であるが、今後の研究によりこのギャップを埋め、暗号設計から実装まで一貫した検証可能な安全性証明の手法が開発されることが期待される。

また、ソフトウェア実装のいわゆる耐タンパー性についても、例えば難読化の有効性の暗号理論的見地からの解析や、難読化後のプログラムの正しさの検

証、またハードウェアによるサイドチャネル攻撃（例えば電力解析など）に対する耐性の論理的検証など、様々な課題に対する解決が必要とされていて、今後暗号理論・ソフトウェア理論の両分野の知見を融合して取り組んでいくことが必要となると考えられる。

(6) 情報セキュリティ技術と絡み合う周辺科学技術の統合型研究

昨今の科学技術発展の特徴として、高度に発展した各要素技術が想定されなかった分野へ応用され比較的大きな影響を及ぼす、いわば「領域の侵食」を挙げることができる。情報セキュリティ分野も例外ではなく、そこで考慮されるべき安全性概念が、それを脅かす「攻撃者」にとっての利用可能な能力の向上（すなわち科学技術の一般的な発展）に依存することを考えれば、むしろ、本分野は周辺分野の発展の影響を受けやすいと考えるべきである。計算機資源の増大による暗号アルゴリズムの危殆化はその典型的な例ではあるが、それにとどまらず、ハードウェア上に実装された暗号モジュールに対する攻撃手法の例などでは、他分野で利用されているさまざまな技術を応用したものも既に提案されている。この意味で、情報セキュリティ技術と周辺科学技術の絡み合いは、今後その度合いを一層増すことが予想される。このような背景のもと、関連周辺科学技術の発展について、情報セキュリティとの関連から整理し、統合的にそれらを俯瞰的に把握しておくことは、今後の IT 社会の健全な安全性確保に不可欠な作業であると考えられる。また、今後加速するであろう暗号モジュールの安全性基準の国際化（あるいは標準化）活動においても、他国に先んじてこの種の調査研究を行うことの意義は大きい。具体的研究開発のあり方としては、まず、第一段階として必要な調査研究を行い、その後、ある程度長期的な展望のもと、広範な分野を見通すことができるチームを組織し、周辺技術の監視業務を含む体制を作ることが適切と考えられる。これにより、安全・安心な IT 社会の構築とその健全な発展へ大きな貢献が期待できる。

(7) 情報セキュリティにおける責任分担（または責任分界）の研究

情報セキュリティ対策を誰がどのように行うのか、その根拠は何か、どのような効果が期待できるか、また、残余リスクはどこにどう存在するのかなどについて学術的に追求するのがこの研究内容である。

現在、情報セキュリティ対策としては様々な技法があり、今後も新たな技法が開発されることが予想される。これら対策は、効果も様々であり、有効に作用するには前提条件が必要であったり、様々な広義のコストが掛かったりする。またコンピュータやネットワークを利用したサービスに係わるものとして、サービスの利用者、サービスの提供に係わる者、サービスの開発者、後見的役割を持つ政府と言った様々な個人や組織があり、それらは、当然ながらコスト

を負担することは避ける傾向にあるため、社会としての情報セキュリティ対策は進まず、結果として弱い個人や組織に多大な損害を負担させる結果となる傾向がある。

そこで利用のモデルを構築し、セキュリティ技術の前提条件や限界等の技術要件やセキュリティリスクや対策コストに係わる経済関係および公平感や社会正義の実現のために法理念や法制度からの要請を研究し、学術的かつ総合的な観点から情報セキュリティにおける責任分担をどのようにすべきかについて研究を行う必要がある。

3.5 ネットワーク分野

(1) ワイヤレス移動通信

- ・最近の通信分野の世界的国際会議（ICC や GLOBECOM）では、発表論文の 1/3 はワイヤレス移動通信関係であり、通信・ネットワーク分野では依然としてワイヤレス移動通信ブームである。
- ・多くの論文発表の対象となっているテーマは、要素技術研究では、CDMA、MIMO、Space-Time 符号化、などであり、特に MIMO が最もホットなテーマである。
- ・第 4 世代ワイヤレス移動通信に向けたシステム技術の研究では、日本の研究開発レベルはトップレベルであり、既に 1 Gbps 超高速アクセスの移動通信実験を成功させている。
- ・ネットワーク関係のホットテーマは、アドホックネットワーク、センサネットワーク、ワイヤレス LAN によるネットワーク化などである。

(2) ブロードバンドアクセス

- ・ネットワークのブロードバンド化は、日米欧および韓国に共通する先導的テーマであるが、日本、韓国では固定通信、ワイヤレス通信ともに 10 Mbps を越えるブロードバンド化を追求しているのに対して、米国、欧州においては数 Mbps で良しとしている点で、取組みの差がある。
- ・米国では、ラスト 1 マイルをどうするかが最大の関心事である。日本と違い既設住宅への光ファイバ敷設はほとんど無理であるとあきらめている節がある。なお、新設住宅への FTTH 導入は最近本格的になってきた。
- ・最近では、ワイヤレスアクセスにより固定通信並の速度の実現性が高まり、ワイヤレス LAN の高速化、WiMAX、WCDMA による数 10 Mbps レベルの技術開発が急速に進展している。

(3) NGN (Next Generation Networks)

- ・NGN は、現在のインターネットに替わる品質保証とサービス管理を強化したネットワークであり、通信事業者が今後の電話を含む各種サービスの次世代のインフラとなるものである。ITU による国際標準化検討が強力に進められている。
- ・NGN に関連する研究開発においては、ネットワークサービス機能に関する技術への関心が高い。一方、スイッチング / ルーティングなどの基本伝達機能に関する技術課題に関して日米欧および韓国、中国において活発な研究開発が行われている。
- ・インターネットの基本課題である通信品質の確保およびセキュリティ対策

に関する研究は数年前に比べて活発度は落ちている。すでに研究の峠は過ぎ、実用化に向けたインプリメンテーションの段階に入ったと推測される。

(4) オーバレイネットワーク

- ・従来の Peer-to-Peer ネットワークを含み、インターネットあるいは今後実用化される NGN 上のアプリケーションとして個別のネットワーク機能を形成するものであり、オーバレイネットワークと称する新たな技術として認知されるようになった。多様なユーザグループに対してそれぞれの情報流通要求を柔軟に実現するネットワーキング技術が基本的課題である。
- ・アプリケーション機能としてネットワーキングを行うため、セキュリティの確保、プライバシーの確保など多くの課題がある。
- ・NGN の能力が明確になってくると、重要性を増す可能性が高い。

(5) NSF の GENI および FIND プロジェクト

- ・NGN のさらに将来のネットワーク技術として、インターネットにとらわれない新規のアーキテクチャを追求する研究プロジェクトである。
- ・GENI は、プロジェクトとしては先行しているが、FIND (Future Internet Design) プロジェクトで研究した成果を GENI テストベッドによって検証するという位置づけである。
- ・FIND は米国内のみならず海外との連携も考慮しており、日本、欧州からの関心も集めている。
- ・欧州においては、EU としての研究開発計画である FP7 (Framework Programme 7) における IST (Information Society Technology) にて、同様な研究プロジェクトを開始しようとしている。

(6) 画像を含むマルチメディア応用技術

- ・画像符号化の技術が、単なる帯域圧縮のみならず多様な機能を目指す研究へ発展している。すなわち、高品質化（解像度、色再現等の忠実度の向上）、多視点映像・自由視点テレビ、符号化器・復号器における負荷バランスや情報源符号化と通信路符号化の一体化など新しい符号化の枠組みの可能性が出てきている。
- ・ブロードバンド、モバイルなど異なる特性を有する複数種のネットワーク、多様なマルチメディア端末が存在するという情報通信環境に対して、ユーザインタフェースの統一、ユーザの立場からの使い勝手の向上が望まれている。パソコンを含む現状の通信端末に適応することが難しい情報弱者にも対応するヒューマンインタラクションの開発が不可欠であり、そのようなアプローチの研究も出始めている。

- ・「通信と放送の融合」の議論が聞かれるようになって久しいが、当初と比べると現在は、通信においてはブロードバンドネットワーク、モバイルネットワークの普及・発展、放送においては地上デジタル放送の普及と、状況は格段に進んできている。単なるスローガン、あるいは皮相的な融合ではなく、次世代の通信と放送の本質を見極めた本格的な融合を考えるべき時に来ている。そのためには、技術面だけでなく、真のユーザーニーズの把握が不可欠となる。

(7) 通信トラヒック理論

- ・パケット通信をベースとする今後のネットワークでは、益々増大かつ大変動を伴うデータトラヒックを収容する一方で、ネットワーク資源の利用効率を高めながらかつ高い通信品質を保証しなければならないが、そのためにはデータトラヒックの測定技術、確率統計的性質の解析手法、さらにはネットワーク性能の予測技術をさらに高度化・高精度化することが欠かせない。
- ・特に、測定時系列データの統計解析・確率分布推定手法、通信トラヒック理論で解析可能なクラスへのマッピングと性能予測は今後も重要な研究分野であり、この方面に対して情報理論や応用確率論・応用数学等に代表される数理工学をベースにした理論体系の構築が必要不可欠であるが、日本では欧米に比べてこの分野の研究がやや出遅れている。
- ・近年の動向として、確定的なトラヒック解析アプローチであるネットワーク算術 (Network Calculus) によって、通信品質保証に欠かせないパケットスケジューリングアルゴリズムを理論的に扱うことが欧米を中心に活発化してきているが、日本ではまだこの方面への研究が活性化しておらず、今後の発展が期待される。

(8) 分子レベルのナノスケール通信

- ・蛋白質酵素の相互作用 PPI (Protein-Protein Interaction) によって細胞間の情報伝達が、ナノスケールで行われている現象を解明して、その応用を考える研究である。
- ・PPI には、外部エネルギーによる移動機能、細胞によるゲート機能、スイッチ機能、などがあり、これらを用いる図 6 のような制御された生体内通信の実現の可能性がある。UCI (University of California, Irvine) の Prof. Tatsuya Suda, Prof. Natasa Przulj らの研究はその例である。

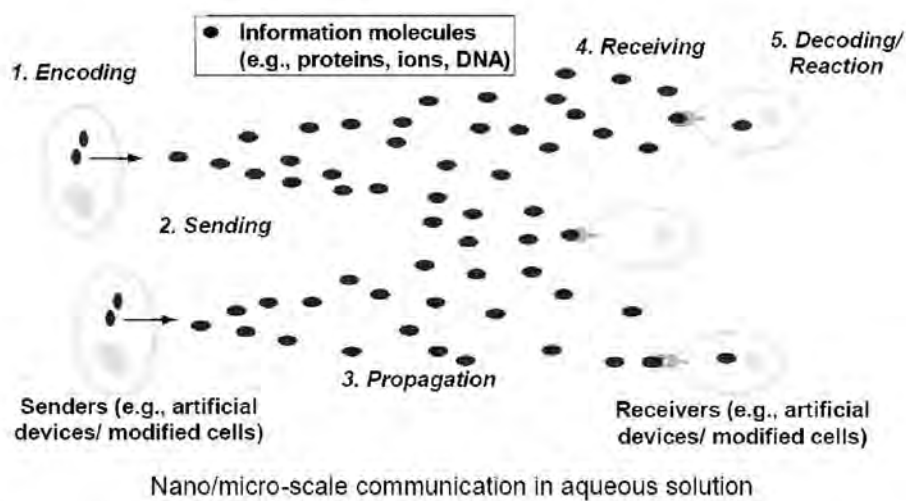


図6 タンパク質酵素の相互作用による細胞間の情報伝達

出典：Tatsuya Suda, et al, "Exploratory Research on Molecular Communication between Nanomachines", Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) 2005, LBP-3-1, June 2005.

3.6 ロボティクス分野

(1) 目的指向型ロボティクス基盤研究開発

ロボットは、センサ、アクチュエータ、メカニズム、それらを統合して機能を発現させるためのソフトウェア（理論・アルゴリズム）からなるシステムであり、ロボティクスの研究開発は、それらの要素技術開発と、システムインテグレーション技術からなる。後者が重要な意味を持つのは、人工物特有の特徴であろう。このような分野では、単なる curiosity-driven な研究は、シーズ開発と言いつつも、応用されることなく、サイエンスで終わってしまうことが多い。

はっきりと目的を指向して、実証試験などを官が積極的に支援し、社会とのインタラクションを通して本当に求められる基礎研究は何かを見定め、それを単発的ではなく持続的に支援する必要がある。米国では、軍用技術開発を目的として、砂漠環境での長距離自律走行システムのコンペティション（DARPA グランドチャレンジ）や模擬市街地における多数の自動車の自律走行システムのコンペティション（DARPA アーバンチャレンジ）など、実世界における問題を設定するタイプの研究開発が行われ、SLAM 理論やその実用化など基盤技術の向上に大きな波及効果を生んでいる。日本では、日本固有の技術を生かした、サービス、生活活性化、農業、水産業、災害救助などの分野において、単発のシステム開発プロジェクトではなく、継続的に研究開発を支援し、それらの分野で、本当に必要とされている基盤研究が何かを見定めて、目的指向型基盤研究を行うことが望まれる。

(2) サービスロボット基盤技術研究開発

現在のロボット技術は、産業用ロボットをベースとした技術である。すなわち、ロボットは、人間から隔離され利用されることを前提としている。今後の発展の期待が膨らんでいる新しい分野におけるロボットは、ユーザと同一環境内で利用することを前提としているが、残念ながらそのための技術開発はほとんど行われていない。たとえば、以下のような基盤技術開発が必要である。

a) 安全ロボット基盤技術開発

人との共存を前提とし、人と共存しても本質的に人に危害を加えない安全なロボット実現のための基盤技術開発および社会の受け入れ体制整備が必要である。

b) ロボットのロバスト化に関する基盤技術開発

第3次産業および第1次産業でのロボットの実用化を考えると、その機能の高度化と併せて、頑健性の確保が重要である。人あるいは環境に対する安全性の確保と同時に、ロボットを「強く」する研究として、自動車のような全天

候性、衝突や落下などの被災にたいする丈夫さ、24 時間稼動などを実現するための機体設計と実装の技術開発、頑健性のためのフェイルセーフ技術をハード、ソフト、システムの面から総合的に研究する必要がある。

c) ロボットのアーキテクチャに関する基盤研究

現在のロボット技術は、モジュール化、ミドルウェア開発など標準化を通して開発の効率化を図る方向にあるが、未だ個別部品を設計者のセンスによって組み合わせる段階にある。コンピュータ技術に比べるとアルゴリズム化が遅れており、開発の度に一から設計を始めなければならない。これはデジタル化以前の電子装置や電気製品の開発の状況に似ている。コンピュータにおけるチューリングマシン、論理回路、コンピュータアーキテクチャに相当する基礎理論の構築を試みる研究を行い、IRT (Information and Robotics Technology) アーキテクチャの概念を確立する必要がある。

(3) 環境構造化

米国、欧州、韓国では、軍事予算を初めとして、国策として IRT に対する投資を行っている。これらは、単なる研究開発ではなく、IT 応用、RT 応用、産業育成を見据えた投資であり、中国でも同様なサービスロボットプロジェクトを立ち上げようとしている。日本でも、単なる研究開発プロジェクトに関する投資だけでなく、IRT 産業育成のための戦略的な投資策を検討し、実施することが必要である。そのためには、ロボット単体の知能化だけでなく、実環境計測・認識技術、実時間制御技術、人間とのインタラクション技術なども IRT として広く捕らえ、国は技術開発を戦略的に支援すべきであろう。そこではロボットが動作しやすい環境設計や、ロボットが動作するためのインフラ技術開発、それらの環境に埋め込み技術なども含まれる。

(4) コミュニケーション

コミュニケーションは今後さらなる研究開発が望まれる技術であり、その応用分野も広い。目指すべきコミュニケーションの研究課題としては、コミュニケーションの基礎研究としての人間理解（意図や感情推定など）、多言語・マルチモーダルコミュニケーション、ユニバーサルデザインがある。コミュニケーションの技術は、常に人間理解の研究とともに発展してきた。これまでは単に言語情報など表層的な人間理解に留まっていたが、これからは、意図や感情までも取り入れた人間理解研究とコミュニケーション技術の発展が期待され、特に、人間理解の知見を生かして新しい工学技術を実現するという目的からは、ロボットを用いた構成的アプローチが重要である。また、多言語対応やマルチモーダル対応を可能とするコミュニケーション技術の実用化も期待されている。マルチモーダルという言葉は、従来視覚・聴覚・触覚等、センサ機能

を意味していたが、近年の研究では、ロボットの身体性をも利用したマルチモーダル技術へと発展してきている。

さらに、ヒューマンインターフェースという意味のコミュニケーション技術では、万人が利用可能なユニバーサルデザインの研究は欠かす事できない。万人が利用可能なユニバーサルデザインの研究には多様な要素が含まれるが、特に、(a) 環境の様々な物体やロボットに装着される皮膚センサの研究、(b) センサや ID タグシステムと結びついた人間を支援するロボットシステムの研究、(c) 遠隔操作型コミュニケーションシステムの研究が重要である。(a) は安全を確保し、より豊かな情報を利用するためには必要不可欠な要素技術である。(b) は、ロボットを含む多様なセンサシステムが人間の行動を把握し、その結果多様なコミュニケーション手段を実現する。(c) については、究極のコミュニケーション技術とは、人間のように人間と対話し、意思疎通が図れる技術である。しかし、その技術は現在の人工知能技術等からみてほど遠い。故に、システムに人間が介在し、システムの限界を補うハイブリッドなシステムが必要不可欠となる。

(5) 制御技術

これまでの制御理論は、外部環境に対して閉じた制御系、すなわち、外部環境を想定しない制御系を論じてきた。今後は、人間を含む複雑な外部環境の変化に対して「開いた」制御系を設計する「オープン制御システム理論」の構築が重要である。この種の研究課題に対する重要性はシステム制御の研究分野において世界的にもまだ陽には認識されていないが、他の対象の運動を意識した群制御の研究に代表されるように、これまでの閉じた制御系から開いた制御系に理論研究の重心がここ数年でシフトし、次世代の制御理論・技術の中心的な一つの柱になっていくと考える。この具体的な研究開発課題としては、「リアルタイム環境モデリング（計測）」や「リアルタイム最適制御」、さらにそれらを統合した「認識と制御の統合化設計理論」が挙げられる。また、欧州連合の大型産学連携プロジェクト ARTEMIS (Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence and Systems) に代表されるように、これらの実装において組込みシステム技術の研究分野とも密接に関係して研究が進んでいくものと考ええる。さらに、複雑さに対応するために、Finite Abstraction (有限状態近似) など信号やダイナミクスをシンボル化・離散化を初めとして、時空間スケールにおける「多分解能的アプローチ」による認識・制御理論の展開も重要である。一方、米国では、計算や情報を中心に据えた、物理環境の計測制御システムを CPS (Cyber-Physical System) と称し、次世代の大規模複雑な制御・情報・通信システム開発を目指したプロジェクトの準備が NSF を中心に始まっており、その動向が注目される。

(6) アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源

アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源は、IT 技術革新に牽引される他の分野に比べると急進的な動向は比較的少ないが、ロボットを実用化する上で最も重要な技術課題のひとつである。この技術の確立が将来の世界のロボット市場制覇につながるとも言え、時間をかけてしっかりと取り組まなければならない重要な分野である。ここでは 6 点に絞って述べる。

① マイクロ化

マイクロロボット、モバイル情報機器、マイクロ流体制御デバイス、ウェアラブル機器といった多様な応用展開先があり、大出力のマイクロ駆動機構の開発が重要である。精密工学と MEMS 工学との両面からのアプローチが必要である。

② 特定用途を目指した研究開発

アクチュエータ、メカニズムとも、基本的な原理はほぼ出尽くしている。特定の用途を目指して、アクチュエータと機構を一体化した駆動機構の研究開発が大きな意義を持つ。

③ バイオとの連携

生物のもつマイクロ構造やマイクロメカニズムをロボット工学の立場から詳細に見直し、新しい駆動機構の設計指針を得る研究手法が近年始まっており、数年前より成果が生まれ始めている。メカニズムの分野で革新的な成果をもたらす可能性があり、今後注力すべきである。

④ ソフト化

近年のポリマーアクチュエータの急速な研究展開、人間と接するロボットの実現に向けてのニーズの高まりを考慮して、重要な分野である。

⑤ 高エネルギー密度 / 高エネルギー効率

空圧アクチュエータにおいて、空圧発生 / 制御源の開発により、今後大きな進展が期待できる。

⑥ インテリジェント化

アクチュエータやメカニズムにセンシングや情報処理機能を持たせ、モジュール化する研究は今後の多自由度ロボット実現のために重要な技術である。

(7) その他

① 実証試験から実用化までを迅速にかつスムーズに行うための制度上の変革と支援

日本は、先端的なポテンシャルを有しているにもかかわらず、米国での医療ロボットの実用化、韓国でのサービスロボットの実環境での実証試験などと比較すると、日本の次世代ロボットの実用化は、制度上の阻害要因のために対応

が遅れがちで、ビジネスにおける競争に弱い。ロボット特区が注目されたが、結局各省庁との折衝が、そのたびごとに必要となり、かつ規制緩和は事実上あまり進まなかった、実用化における制度上の緩和策を設計し、早急に実施することが切に望まれる。また、それと同時に、ビジネスにつながり得る実証試験や実用化研究を戦略的に支援し、それを通して重点化すべき基盤技術を抽出し、その開発への重点化投資をすべきであると考ええる。

②標準化

知能化技術においても、それがビジネスにつなげる際に、標準化は非常に重要な課題となる。欧米や韓国では、国策として戦略的に標準化に力を注ぎ、有利な標準を取得している。日本においても、国策としての標準化戦略をたて、積極的にこれを支援、推進する必要がある。

③人材流出の防止

実用的な研究開発が日本で進めにくいのは、制度上の理由があることはすでに述べた。そのため、今後実用化を目指す研究者は海外に流出することにもなりかねない。また、日本の技術者の待遇は必ずしもよくなく、また企業でもビジネスに直結しない RT 事業を切り捨てるケースが少なからずあり、優秀な技術をもった人材が海外に流出する事態が発生している。高給によって日本から技術者を引っこ抜き、3 年程度で技術だけを移転し、人材を使い捨てるということも海外では行われており、そのような人材流出、技術流出の対策を早急に講じる必要がある。

略 語 集

3

- 3D : Three Dimension 37, 119, 155

A

- A/D 変換器 : アナログ／デジタル変換器 9
- ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line 112
- AES : Advanced Encryption Standard 91, 92, 93, 103, 129
- AIST : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 13, 176
- ALV : Autonomous Land Vehicle 147
- AR : Augmented Reality 150
- A T R : A d v a n c e d Telecommunications Research Institute International 122

B

- BD : Blu-ray Disc 36, 37, 48
- BERC : Biometrics Engineering Research Center 94, 104
- Bluetooth : エリクソン社が開発した無線方式の一つ 120
- BMI : Brain Machine Interface 141, 143, 151, 164
- BPM : Beam Propagation Method 45, 54, 183

C

- CAD : Computer Aided Design コンピュータ支援設計 7, 8, 17, 18, 30, 34, 74, 171
- CAN : Controller Area Network 154
- CCD : Charge Coupled Device 7, 13, 155
- CC-Link : Control & Communication Link 156
- CCRA : Common Criteria Recognition Arrangement 101
- CDMA : Code Division Multiple Access 112, 139, 200
- CELL : Cell Broadband Engine 71
- CEPCA : Consumer Electronics Powerline Communication Alliance 119, 120
- CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor 7, 11, 13, 16, 20, 23, 25, 29, 35, 155, 173, 175, 177, 178
- CMP : Chip Multi Processor 72
- CMU : Carnegie Mellon University 48, 101, 130, 145, 147, 161, 163
- CMVP : Cryptographic Module Validation Program 98, 108
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique 14, 166
- CNT : Carbon Nanotube 175, 177
- CNT-FET : Carbon Nanotube-Field Effect Transistor 177
- COBIT : Control Objectives for

Information and related Technology
101, 102

- **COTS** : Commercial off-the-shelf
130
- **CPU** : Central Processing Unit 16,
56, 60, 71, 73, 76
- **CRM** : Customer Relation
Management 65
- **CRYPTREC** : Cryptography
Research and Evaluation
Committees 90, 91, 92, 93, 96, 100,
103
- **CT** : Computed Tomography 180,
181

D

- **Da Vinci** : 米国 Intuitive SURGICAL
社の開発した手術用ロボット 151
- **DARPA** : Defense Advanced
Research Projects Agency 防衛高等
研究計画局 17, 44, 123, 138, 141, 151,
152, 153, 157, 162, 164, 165, 168, 175, 204
- **DBMS** : Database Management
System 61, 62
- **DCI** : Digital Cinema Initiatives 118
- **DDoS** : Distributed Denial of
Service 116
- **DES** : Data Encryption Standard
91, 129
- **D F K I** : D e u t s c h e
Forschungszentrum fuer
Kuenstilche Intelligenz ドイツ人工知
能研 121
- **DFM** : Design For Manufacturing 8,
9, 17, 22
- **DLR** : Deutsches Zentrum fuer
Luft-und Raumfahrt 142, 143, 146,
160, 161

- **DNA** : Deoxyribonucleic Acid 14
- **DOD** : Department of Defence 35,
70, 151, 164, 190
- **DOD-N** : Data in Optical Domain -
Network 35
- **DOE** : Department of Energy 70,
190
- **DQPSK** : Differential Quadrature
Phase Shift Keying (差動四相位相偏
移変調) 35, 123, 179
- **DRAM** : Dynamic Random Access
Memory 10, 24, 25, 173, 174
- **DRM** : Digital Rights Management
95, 96, 105, 197
- **DSC** : Digital Steel Camera 176
- **DSN** : International Conference on
Dependable Systems and Networks
75, 130
- **DTN** : Delay Tolerant Network 114
- **DVB-H** : Digital Video Broadcasting
for Handheld 120
- **DVD** : 当初 Digital Video Disc、
Digital Versatile Disc から命名された
が、現在はアルファベット3文字とし
ての光ディスク規格 23, 36, 37, 48, 95,
130, 179

E

- **ECOC** : European Conference on
Optical Communication 34, 35, 47,
179
- **EDA** : Electronic Design Automation
9, 22
- **EL** : Electroluminescence 18, 19, 43,
49
- **ENIAC** : European Nanoelectronics
Initiative Advisory Council 11, 25
- **ERP** : Enterprise Resource Planning

61

- **ESCHER** : The Embedded Systems Consortium for Hybrid Embedded Research 153, 165
- **ETC** : Electronic Toll Collection 90, 96, 105
- **ETRI** : Electronics and Telecommunications Research Institute 113, 132, 133, 135, 159, 160, 168
- **Euro-NGI** : Next Generation Internet 114, 134

F

- **FA** : Factory Automation 156
- **FCS** : Future Combat System 141, 157, 168
- **FTD** : Finite Difference Time Domain method 45, 54, 183
- **FED** : Field Emission Display 冷陰極電子放出型ディスプレイ 176
- **Felica** : 非接触型 IC カードの技術方式。ソニーの登録商標 95
- **FEM** : Finite Element Method 45, 54, 183
- **FFT** : Fast Fourier Transform 155
- **FIND** : Future Internet Design 109, 111, 113, 134, 201
- **FIPS PUB** : Federal Information Processing Standards Publication 92, 98
- **FL-net** : FA control network 156
- **FMECA** : Failure Mode Effect and Criticality Analysis 188
- **FP7** : Framework Program 83, 113, 114, 123, 134, 201
- **FPD** : Flat Panel Display 7
- **FPGA** : Field Programmable Gate

Array 73, 74, 76, 87, 171, 191

- **FSAN** : Full Service Access NetWork 115
- **fT** : femto Tesla 14
- **FTA** : Fault Tree Analysis 188
- **FTTH** : Fiber To The Home 34, 43, 47, 53, 110, 112, 115, 132, 200

G

- **GA** : Genetic Algorithm 183
- **GaN** : Gallium nitride 窒化ガリウム 17, 175
- **GENI** : Global Environment For Network Innovations 109, 111, 113, 134, 201
- **GFS** : Global File System 187
- **GLOBECOM** : IEEE GLOBALCOMMUNICATIONS CONFERENCE 200
- **GMPLS** : Generalized Multi-Protocol Label Switching 117, 136
- **GPS** : Global Positioning System 156
- **GRC** : Global Research Collaboration 11, 25
- **GSM** : Global System for Mobile Communications 111, 132
- **GTO** : Gate Turn-Off thyristor 16

H

- **Havi** : Home Audio/Video Interoperability 118
- **HD DVD** : High Definition DVD 36, 37, 48
- **HD** : Hard Disk (HDD : Hard Disk Drive) 36, 37, 48, 179

- **HDTV** : High Definition Television
112, 118
 - **HGW** : Home Gate Way 118
 - **HID** : High Intensity Discharge (Lamp) 38
 - **HPA** : Home Plug Powerline Alliance 119, 120
 - **HSDPA** : High Speed Downlink Packet Access 115, 135
 - **HSSG** : Higher Speed Study Group 116
 - **HTML** : HyperText Markup Language 68
 - **HTTP** : HyperText Transport Protocol 68
 - **HW** : Hardware 118, 172
 - **HYCON** : Hybrid Control Taming Heterogeneity and complexity of networkd embedded systems 153, 165
-
- I
-
- **IC** : Integrated Circuit 16, 17, 29, 90, 95, 186
 - **ICASSP** : IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 121
 - **ICCV** : IEEE International Conference on Computer Vision 121
 - **ICDCS** : International Conference on Distributed Computing System 70
 - **ICSLP** : International Conference on Spoken Language Processing 121
 - **ICT** : Information and Communication Technology 59, 113
 - **IEEE** : The Institute of Electrical and Electronics Engineers 46, 54, 66, 118, 122, 123, 124, 127, 129, 131, 145, 168, 186
 - **IETF** : The Internet Engineering Task Force 121, 134, 136
 - **IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor 16, 29, 175
 - **IMEC** : Interuniversity Microelectronics Center ベルギーにある欧州の独立研究機関 8, 9, 10, 17, 22, 23, 25, 29, 30
 - **IMS** : IP Multimedia Subsystems 114, 118
 - **Internet2** : 米国のネットワーク関連コンソーシアム 117, 136
 - **IP** : Intellectual Property 9, 23, 73, 74, 172
 - **IP** : Internet Protocol 35, 109, 113, 115, 117, 118, 119, 126
 - **iPOP** : International Conference on IP + Optical Network 117
 - **IPS** : In Plane Switching 176
 - **IPTV** : Internet Protocol Television 120
 - **IPv6** : Internet Protocol Version 111, 134
 - **IRT** : Information and Robotics Technology 160, 205
 - **ISACA** : Infomation Systems Audit and Control Association 情報システムコントロール協会 101
 - **ISDB-T** : Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial 120
 - **ISMS** : Information Security Management System 101, 108
 - **ISO** : International Organization for Standardization 91, 98, 101, 124, 129,

144, 159, 168

- ISP : Internet Services Provider
116
- ISS : Instruction Set Simulator 171
- ISSCC : IEEE International Solid-State Circuits Conference 72
- IST : Information Society Technology 97, 123, 201
- ITSEC : Information Technology Security Evaluation Criteria 101, 108
- ITU : International Telecommunication Union 114, 115, 117, 124, 125, 126, 134, 136, 159, 168, 200
- ITU - T : International Telecommunication Union Standardization Sector 114, 115, 124, 125, 126, 136

J

- JCMVP : Japan Cryptographic Module Validation Program 91, 98
- JGN2 : JGN (Japan Gigabit Network : 研究開発用ギガビットネットワーク) を発展させた新たな超高速・高機能研究開発テストベッドネットワーク 117, 136
- Jini : ネットワークを通じて周辺機器の機能を提供する技術仕様。Sun Microsystems 社によって提唱されたもの 118
- JIPDEC : Japan Information Processing Development Corporation 101
- JSON : JavaScript Object Notation 67
- JVT : Joint Video Team 121, 138

K

- KAIST : Korea Advanced Institute of Science and Technology 15, 17, 22, 27, 29, 30, 47, 53, 83, 130, 132, 135, 158, 168
- KISA : Korea Information Security Agency 94
- K-NBTC : Korea National Biometric Testing Center 94, 104

L

- LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes 88, 130, 147
- LAN : Local Area Network 23, 116, 124, 129, 135, 196, 200
- LCD : Liquid Crystal Display 液晶ディスプレイ 19, 22, 31
- LED : Light Emitting Diode 7, 31, 33, 37, 38, 43, 49, 53, 179, 180
- LIRMM : Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microelectronique de Montpellier 146, 161
- LSI : Large Scale Integration Circuit 7, 8, 10, 16, 21, 22, 23, 29, 38, 73, 137, 139, 171, 172, 173, 174
- LXR : Liver X Receptors 14

M

- MediaFlo : 米国クアルコム社が推進する携帯機器向けメディア配信サービスプラットフォーム 120
- MEMS : Micro Electro Mechanical Systems 11, 14, 16, 29, 144, 154, 155,

156, 160, 166, 173, 177, 180, 182, 207

- **MIM** : Metal Insulation Metal 174
- **MIMO** : Multi-Input Multi-Output
115, 124, 139, 200
- **MIT** : Massachusetts Institute of
Technology 65, 98, 100, 121, 128, 129,
130, 150, 163
- **MOSFET** : Metal Oxide
Semiconductor Field Effect
Transistor 16, 17, 29, 175
- **MPEG** : Moving Picture Experts
Group 109, 118, 121, 124, 125, 126, 138
- **MPLS** : Multi-Protocol Label Switch,
117, 134, 136
- **MPSoC** : Multi-Processor System
on Chip 171, 172
- **MRAM** : Magnetoresistive Random
Access Memory 174
- **MSP** : Management Service
Provider 116, 117
- **MW** : ミドルウェア 118

N

- **NASA** : National Aeronautics and
Space Administration 64, 81, 128,
141, 146, 148, 162
- **NEDO** : New Energy and Industrial
Technology Development
Organization 独立行政法人新エネル
ギー・産業技術総合開発機構 17, 123,
168
- **NEMS** : Nano Electro Mechanical
System 175
- **NESSIE** : New European Schemes
for Signature, Integrity, and
Encryption 91, 92, 93, 96, 97, 103
- **NGN** : Next Generation Network
35, 111, 113, 114, 123, 133, 134, 135, 200,

201

- **NICT** : National Institute of
Information and Communications
Technology 独立行政法人情報通信研
究機構 123
- **NIST** : National Institute of
Standards and Technology 米国標
準技術局 14, 39, 91, 92, 93, 96, 97, 101,
102, 168
- **NMR** : Nuclear Magnetic Resonance
180
- **NO** : Nitric oxide 13
- **NoC** : Network on Chip 172
- **NO_x** : Nitrogen Oxide 13
- **NPL** : National Physical Laboratory
94
- **NRI** : Nanotechnology Research
Initiative 11, 25
- **NSF** : National Science Foundation
70, 109, 111, 113, 123, 134, 151, 153, 165,
192, 196, 201, 206
- **NSoC** : National SoC (System on
Chip) 9

O

- **OCT** : Optical Coherence
Tomography 181
- **OCTAVE** : Operationally Critical
Threat, Asset, and Vulnerability
Evaluation 101, 102
- **OFC** : Optical Fiber Communication
Conference and Exposition 34, 35,
47, 179
- **OFDM** : Orthogonal Frequency
Division Multiplexing (直交周波数分
割多重) 35, 115, 139, 179
- **OMG** : Object Management Group
144, 157, 158, 159, 160, 168

- **OS** : Operating System 55, 59, 60, 61, 72, 118, 137, 139, 171, 172, 187, 197
- **OSA** : the Optical Society of America 40, 46, 54
- **OSGi** : Open Services Gateway initiative 118, 120

P

- **P2P** : Peer-to-Peer 116, 129, 134
- **PAN** : Personal Area Network 120
- **PDP** : Plasma Display Panel 176
- **PE** : Power Electronics 16
- **PET** : Positron Emission Tomography 180
- **PKI** : Public-Key Infrastructure 91, 103, 132
- **PLC** : Power Line Carrier 119, 120, 137
- **PLL/DLL** : Phase-Locked Loop / Delay-locked loop 10, 23
- **PLM** : Product Lifecycle Management 65
- **PON** : Passive Optical Network 35, 47, 115, 123
- **PPI** : Protein-Protein Interaction 202
- **PPOP** : Principles and Practice of Parallel Programming 70
- **PRDC** : International Symposium Pacific Rim on Dependable Computing 75, 130

Q

- **Q** : Quality Factor, 共振器における電磁波閉じ込めの尖鋭度 35, 182
- **QED** : Quantum Electrodynamics

43

- **QOL** : Quality Of Life 180
- **QoS** : Quality of Service 117, 118, 134, 136

R

- **Ra** : Average Color Rendering Index 平均演色評価数 180
- **RACE** : R&D in Advanced Communications in Europe 111
- **RAM** : Random Access Memory 35, 179
- **RDB** : Relational Database 185, 187
- **RF** : Radio Frequency 7, 9, 23, 119
- **RFID** : Radio Frequency Identification 92, 114, 156, 187
- **RIST** : Research Institute of Industrial Science and Technology 浦項産業科学研究所 146, 161
- **RNA** : Ribonucleic Acid 14
- **ROADM** : Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer 35, 123
- **ROM** : Read Only Memory 179
- **RSA** : 公開鍵暗号の一つ。発明者である Ron Rivest、Adi Shamir、Len Adleman の頭文字 129, 197
- **RSA-OAEP** : RSA algorithm with the OAEP(Optimal Asymmetric Encryption Padding) method 129
- **RSS** : Rich Site Summary 67
- **RT** : Register Transfer 144, 151, 157, 168, 172, 205, 208

S

- **SAW** : Surface Acoustic Wave 13
- **SCM** : Supply Chain Management

- 65
- **S-DMB** : Satellite Digital Multimedia Broadcasting 120
 - **SED** : Surface-conduction Electron-emitter Display 119
 - **Selete** : Semiconductor Leading Edge Technologies 株式会社半導体先端テクノロジーズ (1996 年に我が国の半導体企業 10 社の均等出資を得て、300mm ウエーハ装置を用いる生産技術の開発コンソーシアムとして創立) 11
 - **SEMATEC** : Semiconductor Manufacturing Technology Institute 11, 25
 - **SG** : Study Group 114, 116
 - **SiC** : Silicon Carbide 炭化ケイ素 17, 175
 - **SID** : The Society for information Display 15
 - **SIGGRAPH** : Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques 121, 122
 - **SINET3** : 次世代学術情報ネットワーク 117, 136
 - **SIP** : Session Initiation Protocol 118
 - **SiP** : System in Package 9, 12, 155, 173
 - **SJ** : Super Junction 175
 - **SLA** : Service Level Agreement 116
 - **SLAM** : Simultaneous Localization and Mapping 64, 81, 141, 147, 148, 151, 162, 164, 204
 - **SMT** : Simultaneous Multi Threading 72
 - **SMV** : Symbolic Model Verifier 64, 81, 131
 - **SNS** : Social Networking Service 68, 189
 - **SoC** : System on Chip 12, 17, 18, 30, 171, 172, 173
 - **SPIN** : Simple Promela Interpreter 64, 65, 81, 131
 - **SSL** : Secure Sockets Layer 90, 95, 96
 - **SSL** : Solid State Lighting 38
 - **S S M E** : Service Science Management and Engineering 66
 - **S T A R C** : Semiconductor Technology Academic Research Center 17
 - **SW** : Soft Ware 30, 139, 172
-
- T**
-
- **TCSEC** : Trusted Computer System Evaluation Criteria 101
 - **T-DMB** : Terrestrial-Digital Media Broadcasting 120, 137
 - **TI** : Texas Instruments 9, 16, 23, 29, 120
 - **TIMA** : Techniques of Informatics and Microelectronics for Computer Architecture 17, 30
 - **TLS** : Transport Layer Security 90, 95, 96, 197
 - **TO** : Topology Optimization 183
 - **TPM** : Trusted Platform Module 95, 96, 98, 99, 107, 197
 - **Triple DES** : IBM 社が開発した暗号方式の一つ 129
 - **TRON** : The Real-time Operating system Nucleus 60, 118, 120

U

- UAV : Unmanned Air Vehicle 152
- UCB : University of California, Berkeley 17, 30
- UCI : University of California, Irvine 202
- UCSD : University of California, San Diego 183
- UPA : The Usability Professionals' Association 119, 120
- UPPAAL : モデル検査ツール。スウェーデンの Uppsala 大学とデンマークの Alborg 大学が共同で開発した 131
- URC : Ubiquitous Robotic Companion 143, 144, 160
- USC : University of Southern California 145
- UWB : Ultra Wide Band 120, 135, 157

V

- VA : Vertical Alignment 176
- VCD : Video CD 37, 48
- VCSEL : Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser 179
- VLSI : Very Large Scale Integration 8, 16, 21, 22, 32, 75, 177, 192, 193
- VM : Virtual Machine 59
- VOC : Volatile Organic Compounds 13
- VR : Virtual Reality 150
- VxWorks : WindRiver 社のリアルタイムオペレーティングシステム 118

W

- WAN : Wide Area Network 196
- WBG : Wide Band Gap 16, 17, 29, 175
- WCDMA : Wideband Code Division Multiple Access 10, 23, 115, 200
- WDM : Wavelength Division Multiplex 35, 47, 98, 114, 115, 123, 135, 139
- WDM-PON : Wavelength Division Multiplex-Passive Optical Network 35, 115
- WEIS : Workshop on the Economics of Information Security 102
- WFM : Wavefront Matching 183
- WiBro : Wireless Broadband 112, 116, 135
- WiFi : Wireless Fidelity 119
- WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access 112, 115, 135, 137, 200

X

- XML : Extensible Markup Language 62, 79, 186

Y

- YAML : YAML Ain't Markup Language 67

Z

- ZigBee : 家電向けの短距離無線通信規格の一つ 120

◆執筆者一覧

■エレクトロニクス分野

谷口 研二	大阪大学 大学院工学研究科 教授 【総括責任者】
今井 正治	大阪大学 大学院情報科学研究科 教授
内田 龍男	東北大学 大学院工学研究科 教授
大橋 弘通	独立行政法人産業技術総合研究所 パワーエレクトロニクス研究センター 副研究センター長
嘉田 守宏	技術研究組合 超先端電子技術開発機構 三次元積層技術研究部 部長
黒田 忠広	慶應義塾大学 理工学部 教授
近藤 正彦	大阪大学 大学院工学研究科 教授
財満 鎮明	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
佐藤 武彦	大阪大学 大学院工学研究科 教授
角南 英夫	広島大学 ナノデバイス・システム研究センター 教授
筒井 哲夫	九州大学 先導物質化学研究所 教授
平本 俊郎	東京大学 生産技術研究所 教授
藤本 公三	大阪大学 大学院工学研究科 教授
松澤 昭	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
安浦 寛人	九州大学 大学院システム情報科学研究院 教授

■フォトニクス分野

波多腰玄一	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー 【統括責任者】
伊藤 雅英	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授
井元 信之	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
植之原裕行	東京工業大学 精密工学研究所マイクロシステム研究センター 准教授
小柴 正則	北海道大学 大学院情報科学研究科 研究科長・教授
後藤 顕也	東海大学 開発工学部情報通信工学科 教授
小山 理	キヤノン株式会社 基盤技術開発本部 オプティクス技術開発センター 専任主席
鈴木 章義	キヤノン株式会社 光学機器事業本部 半導体機器第4開発センター 所長
田口 常正	山口大学 大学院理工学研究科 教授
馬場 俊彦	横浜国立大学 工学研究院知的構造の創生部門 教授

■コンピューティング分野

石塚 満	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授 【総括責任者】
上田 和紀	早稲田大学 理工学部コンピュータ・ネットワーク工学科 教授
尾内理紀夫	電気通信大学 電気通信学部情報工学科 教授
喜連川 優	東京大学 生産技術研究所 教授
近藤 正章	東京大学 先端科学技術研究センター 特任准教授
高木 英明	筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授
近山 隆	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
南谷 崇	東京大学 先端科学技術研究センター 教授 (独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー)
平木 敬	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授
本位田真一	国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系 研究主幹・教授

■情報セキュリティ分野

今井 秀樹	中央大学 大学院理工学研究科 教授 【総括責任者】
今福健太郎	独立行政法人産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 物理解析研究チーム 研究チーム長
宇根 正志	日本銀行 金融研究所 情報技術研究センター 企画役
大岩 寛	独立行政法人産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 研究員
大塚 玲	独立行政法人産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター セキュリティ基盤技術研究チーム 研究チーム長
古原 和邦	独立行政法人産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 主幹研究員
田沼 均	独立行政法人産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 主任研究員

■ネットワーク分野

三木 哲也	電気通信大学 情報通信工学科 教授 【総括責任者】
稲垣 博人	日本電信電話株式会社 サイバーソリューション研究所 主幹研究員
井上 一郎	日本電信電話株式会社 サービスインテグレーション基盤研究所 主幹研究員
尾家 祐二	九州工業大学 情報工学部電子情報工学科 教授

小川 克彦	慶應義塾大学 環境情報学部 教授
笠原 正治	京都大学 大学院情報学研究科システム科学専攻 教授
金子 正秀	電気通信大学 大学院電気通信学研究科電子工学専攻 教授
菊野 亨	大阪大学 大学院情報科学研究科情報システム工学専攻 教授
桑原 秀夫	株式会社富士通研究所 フェロー
小林 稔	日本電信電話株式会社 サイバーソリューション研究所 主幹研究員
齋藤 孝文	NTTソフトウェア株式会社 営業推進本部 コーポレートコミュニケーション推進部門 部門長
坂庭 好一	東京工業大学 大学院理工学研究科集積システム専攻 教授
鹿田 寛	日本電気株式会社 中央研究所 エグゼクティブエキスパート
山尾 泰	電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究所 教授
吉浦 裕	電気通信大学 人間コミュニケーション学科 教授
吉野 秀明	日本電信電話株式会社 サービスインテグレーション基盤研究所 プロジェクトマネージャ

■ロボティクス分野

小菅 一弘	東北大学 大学院工学研究科 教授 【総括責任者】
青木 義満	芝浦工業大学 工学部情報工学科 准教授
浅間 一	東京大学 人工物工学研究センター 教授
石黒 浩	大阪大学 大学院工学研究科 教授
井村 順一	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 教授
鈴森 康一	岡山大学 大学院自然科学研究科 教授
橋本 周司	早稲田大学 理工学部 教授
平井 慎一	立命館大学 理工学部 教授
松日楽信人	株式会社東芝 研究開発センター 技監
水川 真	芝浦工業大学 工学部電気工学科 教授
油田 信一	筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授

**電子情報通信分野
科学技術・研究開発の国際比較
2008 年版**

CRDS-FY2007-IC-06

平成 20 年 2 月

発行者 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
生駒グループ

〒 102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電話 03-5214-7484

ファックス 03-5214-7385

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

Copyright 2007 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
無断での転載、複写を禁じます。引用を行う際は、必ず出典を記述願います。