

CRDS-FY2009-IC-02

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTC GCC 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
2009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21年5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

電子情報通信分野は技術の進歩が極めて速く、特にインターネットの普及に伴い新たなサービスが次々と生まれ、それを可能にする技術の研究開発が展開されている。全般的な技術動向として、情報の大規模化・多様化・グローバル化に対応するための技術、環境問題の深刻化に伴い消費電力低減のための技術などの重要性が一層高まっている。

国別に見ると、米国はほとんどの分野で研究技術力、技術開発力、産業技術力、いずれについても世界をリードしており、多くの新しいアイデアは米国から提案されている。欧州は伝統的に基礎的な研究技術力についての強みを有し、産業技術力でも優位性を保っている。アジアでは、中国が急速に実力を高めており、韓国も半導体をはじめ産業技術力で世界をリードする強みを持つ。日本は多くの分野で世界トップクラスの技術レベルを維持しているが、相対的な国際競争力は低下しており今後一層の取組が必要である。

2008 年後半からの世界的な経済情勢の悪化に伴って各国ともに研究開発投資が抑制される傾向にあり、今後の技術レベルに与える影響に注目する必要がある。

以下に、国際的な技術力比較と注目される技術動向について主要なトピックスを記す。

半導体デバイス技術の研究開発は、特にロジック回路集積化技術に関して米国ニューヨーク州立大学アルバニー校ナノスケール科学工学カレッジ (CNSE)、欧州 IMEC などが代表的な拠点になっている。日本では Selete/MIRAI プロジェクトを中心に研究開発力強化に取り組んでいるが、よりグローバルな展開をはかる必要がある。

有機薄膜太陽電池の研究では欧州が先行している。特に色素増感型ではスイス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 EU 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。欧州では長期戦略として、プリンタブル（フレキシブル）回路と有機太陽電池の研究開発が主要な潮流を成しつつある。韓国でも有機太陽電池の研究開発への関心は急速に高まっている。

光通信の分野では日本で先駆的な研究が行われており、世界の技術トレンドを牽引している。しかし企業レベルでは、世界的な企業統合により市場の争奪が激化し世界市場におけるシェアは必ずしも高くない。米国では大学がデバイス・伝送関係の研究の中心となり、企業との共同研究を推進している。企業では、光デバイス／モジュールメーカやルータメーカが高い競争力を持っている。欧州では超高速光通信関連の EU プロジェクト (EURO-FOS 等) による産学連携が行われている。中国では Huawei の発展途上国市場での台頭がめざましい。

ネットワーク上に仮想計算機環境を提供するいわゆるクラウドコンピューティングが注目を集めている。IBM、Google、Microsoft など米国大手企業が精力的に研究開発に取り組んでいる。クラウドコンピューティングは Google Android に見られるように、携帯端末まで巻き込んだ動きが出ており、インターネットを超え通信ビジネスの根幹も変える可能性が出てきている。日本でも研究開発は始まっているが、現在は米国の後追いの段階である。

データベース関連技術では、米国 Google、Yahoo! 等の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ている。特に Google の動きが注目されるが、Amazon.com および Microsoft も盛んに研究開発を進めている。欧州でもプライバシー保護制約下での情報統合やデータベースシステムの研究が進んでいる。我が国では、ウェブ上あるいは非ウェブ上の多様な情報を対象として、科学技術連携施策群「情報の巨大集積化と利活用基盤技術開発」が推進されている。

マルチメディア技術(ハードウェアを含む)では日本のレベルは高いが、新サービスの展開の面に弱さがある。自然言語処理については、過去の研究投資によりレベルは高いものの長期戦略の点で明確さを欠く。

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環境では、日本が世界で最も普及している。しかしその強みが IT 機器産業の優位性に結びついていない。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。

電子マネー、特にオフライン型のサービスでは、交通系サービスが拡大しているほか、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。国際的に見ても日本はサービスの普及が最も進んでいる。海外においては、電子マネーや身分証明証に広く用いられている MIFARE Classic 非接触 IC カードが解析され脆弱性が指摘されて問題となった。導入が再検討される例も出ており、ハードウェアや暗号方式のセキュリティ評価の重要性が再認識される結果となった。

ロボティクス分野では、コモディティ化したハードウェア、オープンソースソフトウェアを用いて低価格ロボットを目指す方法論が米国ベンチャー企業によって取り組まれており、新しいロボット産業への試みとして注目される。また、欧州を中心に生活空間でロボットを利用する際の安全性の研究が安全認証も視野に入れ活発化している。

環境問題が深刻化する中、IT 設備・システム自体の消費電力削減 (Green of IT)、IT を活用した環境問題への対応 (Green by IT) が積極的に進められている。前者については、半導体の低消費電力化に関する研究開発が加速している。この分野では我が国はいち早く研究開発に着手して成果を上げてきており優位性

を保っている。データセンターの低消費電力化の研究も進んでおり、Google、Oracle などの米国企業がシステム全体の消費電力を分析し、あるいはモデル提案を行っている。一方、後者への取組の一例としては 2008 年 4 月に京都で「ICT と気候変動に関するシンポジウム」（総務省・ITU（国際電気通信連合）共催）が開かれ、気候変動対策における IT 利活用の重要性について議論された。ITU 内に「ICT と気候変動」を検討するフォーカスグループも創設されている。

目 次

1 目的および構成	1
目的および構成	3
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	10
(1) VLSI システムアーキテクチャ	10
(2) 集積回路 (デジタル)	12
(3) 集積回路 (高周波・アナログ)	14
(4) 集積回路 (メモリ)	16
(5) 集積回路 (インテグレーション)	18
(6) 実装技術	20
(7) センサ技術	22
(8) パワーデバイス	26
(9) 設計支援技術 (CAD)	28
(10) 有機材料・デバイス	30
(11) 無機系新デバイス	34
2.2 フォトニクス分野	36
2.2.1 概観	36
2.2.2 中綱目ごとの比較	38
(1) 光通信	38
(2) 光メモリ	42
(3) ディスプレイ技術	46
(4) 固体照明	48
(5) 光学材料・コンポーネント・光学設計	52
(6) 光計測	55
(7) 量子情報	58
(8) フォトニック結晶・メタマテリアル	62
(9) シミュレーション解析・解析ツール	66
2.3 コンピューティング分野	70
2.3.1 概観	70
2.3.2 中綱目ごとの比較	73
(1) 基礎理論 (特に並列計算関係: 計算モデル、データ構造とアルゴリズム)	73
(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)	76
(3) データベースとデータマイニング	79

(4) ソフトウェア開発技術／ツール	84
(5) ビジネス応用とサービスサイエンス	89
(6) Web 情報システム	92
(7) マルチメディアシステム	96
(8) 自然言語処理	99
(9) スーパーコンピュータ	102
(10) 並列コンピューティング・クラスタコンピューティング	105
(11) チップマルチプロセッサ	108
(12) リコンフィギュラブルシステム	112
(13) ディペンダブル情報システム	114
(14) 省電力情報処理技術	118
2.4 情報セキュリティ分野	120
2.4.1 概観	120
2.4.2 中綱目ごとの比較	122
(1) 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）	122
(2) 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）	126
(3) 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）	129
(4) 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）	132
(5) 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）	135
(6) 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）	139
2.5 ネットワーク分野	143
2.5.1 概観	143
2.5.2 中綱目ごとの比較	144
(1) ネットワークが提供する環境	144
(2) ネットワーク応用（サービス技術）	148
(3) アーキテクチャ（ドライビングコンセプトを含む）	150
(4) ネットワークシステム	153
(5) ネットワーク制御・管理・運用	156
(6) 情報通信端末技術	159
(7) ヒューマンインタラクション	164
(8) 要素技術	167
(9) 基礎理論	172
2.6 ロボティクス分野	176
2.6.1 概観	176
2.6.2 中綱目ごとの比較	178
(1) 実世界応用技術	178

(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） —	182
(3) 理論・アルゴリズム 2 — 移動（ロボットの環境／自己位置認識などを含む） —	186
(4) 理論・アルゴリズム 3 — コミュニケーション —	189
(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） —	192
(6) 理論・アルゴリズム 5 — 制御理論・制御技術 —	194
(7) アクチュエータ・メカニズム・エネルギー源	197
(8) センサ・センシング技術	200
(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）	203
3 注目すべき研究開発の動向	210
3.1 エレクトロニクス分野	211
3.2 フォトニクス分野	214
3.3 コンピューティング分野	220
3.4 情報セキュリティ分野	230
3.5 ネットワーク分野	236
3.6 ロボティクス分野	239
付録：海外の政策動向	245
略 語 集	251
執筆者・協力者一覧	262

1 目的および構成

目的および構成

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、2009 年度版では、「エレクトロニクス」「フォトリソグラフィ」「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は極めて広範な技術分野にまたがっている。ここではエレクトロニクス技術の根幹をなす電子デバイスについてまとめる。電子デバイスを大別すると、現実の物理世界の量と電子データや電気エネルギーを相互に変換するトランスデューサと、電子データや電気エネルギーを処理する電子デバイスに大別される。

トランスデューサとしては、物理量を電子データに変換するセンサが最も重要なので「センサ」という項目でまとめた。イメージセンサ、加速度、温度、音量、光量などをモニタする各種センサが含まれる。電子データを処理する電子デバイスとしてはシリコン集積回路が産業規模としては最も大きく重要なので、「システムアーキテクチャ」、「デジタル集積回路」、「高周波・アナログ集積回路」、「メモリ集積回路」、「インテグレーション」、「設計支援技術（CAD）」、「実装技術」の中綱目に分類し、最新技術の動向を探った。電気エネルギーを処理するデバイスに関しては「パワーデバイス」にまとめた。これらに、将来を展望するときに基礎となる「有機デバイス・材料」、「無機系新デバイス」といった技術項目を加え、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。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) 半導体デバイス技術に関しては、米国アルバニーと欧州 IMEC の 2 大拠点に世界の研究開発リソースが集中しつつある。約 3000 億円が投下されているといわれる米国アルバニーの CNSE、総勢 1600 人以上の陣容を誇るベルギーの IMEC は、日本企業や多くの世界企業、および欧米の大学が参加する欧州最大の電子デバイス研究開発拠点になっている。このような研究開発のグローバル化が進む中で、日本の研究開発拠点も、よりグローバルな展開と、日本ならではの独自性を追求する必要がある。

(3) 日本は、低消費電力化や 3 次元集積回路実装などは優位を保っており、これらは総合力が発揮しやすい分野である。材料から始まって製造技術、デバイス技術、パワーデバイス、実装技術、ソフトウェア、システム技術およびア

アプリケーション技術に至るまで、国際競争力のある産業がコンパクトに集積した日本の独自性が生かしやすい分野でもある。自動車、家電、半導体、製造装置、ファインケミカルなどの異分野産業がこれほど狭い面積に凝縮している国は世界に例がなく、すり合わせなどの連携が取りやすい。この特徴を生かすためには、デバイスからシステムまでを見渡せる視野の広い技術者の育成が急務である。

(4) 従来のエレクトロニクス技術の高度化とともに、米国や韓国などでは各種や無線技術を融合したネットワークなど、新しいシステムの研究が盛んになってきている。また、欧州ではバイオや化学系の技術との融合も始まっている。これらの技術は、環境問題、エネルギー問題、食糧問題、高齢化問題など、現在世界が直面している現実世界の問題を解くことが期待されているが、現実世界では信頼性などのディペンダビリティがことさら重要になる。日本が注力しているディペンダビリティの研究開発との融合が期待される。

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。CREST など新しいプロジェクトによる研究の活性化が行われている。低消費電力化や実装技術の面では優位を保っている。

【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。各種や無線技術を融合した新しいアーキテクチャの研究も盛んである。

【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。バイオや化学系の技術との融合も始まっている。

【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、無線通信関連に特に注力しており、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。

VLSI システムアーキテクチャ

国・地域	フェーズ	現状	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。ディペンダビリティなど新しい概念を作るプロジェクトが始まったことは明るいニュースである。
	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産業界では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。低消費電力化や実装技術においては、優位を保っている。
	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。ネットワークなど無線通信と融合した技術に強みがある。
	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。オンチップマルチプロセッサの研究開発が盛んである。MEMS やバイオ、化学分野との連携も盛んである。
	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。国際会議での存在感も増してきた。
	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。組み込みシステム分野の研究が盛んになってきた。
	技術開発水準	○	↗	情報家電を中心に開発は伸びている。また、組み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、縮小傾向にあるが、新しい方向を模索する動きも出ている。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。				

(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]

(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低下傾向にある。企業、大学ともに研究発表件数が減少している。技術開発や産業競争力の面でも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。アジアからの頭脳流入がそのパワーの源泉であったが、アジアの経済発展に伴い還流が始まっている。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。

【台湾・中国】台湾の研究力にやや陰りが現れた。大学教官数を急増した際に似通った研究分野に偏った弊害も一部見られる。

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。

【韓国】携帯電話に注力して、マルチメディアや無線通信用の信号処理の技術力が高い。研究力にはやや陰りが現れた。Samsung は、技術流出を防ぐために、研究発表を控えているとも聞く。

【インド】組み込みシステムの開発力が高い。Intel や TI などが設計分室を開設し、人材を交流させ、国際回線で繋いでレイアウトの設計や検証などを協業している。技術レベルは非常に高い。

【その他】イスラエルにおける開発技術力の進歩が著しい。ベトナムは発展途上だが、勤勉で将来性がある。

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、それをいかに生産や設計の現場に生かすかは、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的な取り組みが重要になる。

集積回路（デジタル）

国・地域	フェーズ	現状	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。しかし、企業や大学の研究力が次第に低下し始めている。特に大学の研究力が欧米に比べて低く、大学強化は重要課題。
	技術開発水準	○	↘	産業力の低下に伴い技術開発力が次第に低下し始めている。
	産業技術力	○	↘	高い品質や使い勝手の良い機能設計では国際競争力を有するが、新製品の提案力と国際標準化力は欧米に比べて弱い。ヒット商品が最近少ない。
米国	研究水準	◎	→	企業も大学も研究者の層が厚く、活躍する若手研究者が継続的に現れる。
	技術開発水準	◎	→	プロセッサやデジタル信号処理では、Intel や TI が世界をリードしている。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 の開発力が非常に高い。世界への発信力が強い。
欧州	研究水準	○	↗	IMEC や企業での研究力が向上している。基礎研究に強い。
	技術開発水準	△	→	EU 経済圏で技術開発連携も進んでいるが、世界をリードするレベルにはない。
	産業技術力	△	→	ARM コアは組込みプロセッサの世界標準であるが、他には目立つ技術が少ない。
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	○	↗	MediaTek など台湾のレベル向上が進んでいる。米国帰りの技術者が原動力。
	産業技術力	△	↗	パソコンや通信用 LSI、LCD を中心に台湾の台頭が著しい。特に最先端から少し遅れた分野で強みを発揮している。
韓国	研究水準	○	→	Samsung と KAIST、SNU の一部が活発。Samsung の研究発表が減少。
	技術開発水準	○	→	Samsung の技術力が高い。
	産業技術力	○	↗	Samsung1 社しかない。メモリに比べると世界的競争力はまだ足りない。
全体コメント：米国が圧倒的に強い。韓国と台湾にやや陰りが始まった。インドやイスラエルの開発技術力が高い。中国とベトナムはこれから発展。				

(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]

(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、ミリ波関連の東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。しかしながら最近では台湾などの新興勢力に押され、かつての勢いが感じられない。

【欧州】米国に比べれば技術開発力は弱い、無線や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。特に最近では超低電力技術の開発で多くの成果を上げている。

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。また国際連携や、人材招聘も活発になっているほか、ベンチャー企業もいくつか出現している。

【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や少人数での開発が可能なこと、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の利用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。

集積回路（高周波・アナログ）

国・地域	フェーズ	現状	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る。
	技術開発水準	△	↘	チップ間伝送や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。しかしながら最近従来に比べれば勢いが弱くなった。
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。最近、超低電力技術でリードしている。
	技術開発水準	○	↗	米国に比べれば弱い、無線や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。また中国でもベンチャーの実績が上がってきた。
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イスには強いが、分野全般では弱い。また専門メーカーやベンチャーが少ない。
全体コメント：				

(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]

(4) 集積回路（メモリ）

2007 年、ウィンドウズ・ヴィスタの予想外の売れ行き不振などにより、DRAM は年初の価格の数分の一に暴落した。大量に在庫を抱え込んだシステムメーカーが放出したことが主因であるといわれる。この不況を乗り切るためとますます膨大になる開発費を分担するため、世界で 5 社あった汎用 DRAM メーカーが互いに次世代技術開発を共同して行う動きが活発化し、次世代は 3 社に集約されようとしている。

【日本】エルピーダメモリ社は、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 社と合併会社を設立し、台湾と日本で韓国勢を追い上げる体制を整えつつある。また、ドイツ・キモンダ社と共同で次世代 DRAM 技術を開発することを発表している。量産工場の共有計画は発表していない。一方で、この不況により中国に投資した新工場の立ち上げを 1 年先送りすることを発表した。

【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。世界的な業界内での合従連衡の波に乗り遅れており、その動向が注目される。

【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、インフィニオンから独立したキモンダ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。また中国への投資を活発化させているが、この不況で業容がおもわしくなく、2008 年夏、エルピーダとの次世代 DRAM の共同開発を発表した。現時点で量産工場の共有計画は発表していない。

【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が、この不況により操業の削減を強いられている。

【韓国】サムスン、ハイニックス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めており、デッドヒートとなりつつある。この 2 社は韓国政府の強い指導により急速に接近している。ゆくゆくはメモリ部門の合併も視野に入れているといわれ、ファウンドリを除けば、汎用 DRAM は世界で 3 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インテルやスパシオン社は NAND 型フラッシュにも参入してきた。しかし、NAND 型フラッシュに関しては韓国のサムスン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ハイニックス社、ルネサステクノロジー、マイクロン社（米国）、ST マイクロ社（欧州）、その他が食い合っている状況であるが、あらゆる集積回路を巻き込んだ半導体不況により、フラッシュの分野でも合従連衡がささやかれている。

集積回路（メモリ）

（この不況で全体的にアクティビティは落ちているが、相対関係は大きく変わっていない）

国・地域	フェーズ	現状	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。ただ、不況で苦闘。
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 社が健闘しているが、合従連衡の波に乗り遅れ、今後の動向は未知数。
欧州	研究水準	△	→	IMEC 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	△	→	IMEC 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、インフィニオンから分離したキモンダ社が健闘。ただ、次世代開発をエルピーダと共同で行うので、独立して存続するかは予断を許さない。
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。中国本土もファブリービジネスを背景に着実に力をつけているが、この不況で操業短縮を強いられている。
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、ハイニックスは低下傾向である。ただ、両社の共同開発が発表され、メモリ部門の合併がささやかれている。
全体コメント：新規不揮発性メモリ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。2007 年に始まった半導体不況は世界での合従連衡を加速している。DRAM は世界で 3 社、フラッシュもいくつかのメーカーの売却・合併がうわさされている。この不況を脱したときに、いくつの集積回路メーカーが生き残っているか予断を許さない状況である。				

（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]

(5) 集積回路（インテグレーション）

現在のトランジスタの物理的ゲート長は 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」に立った連携体制やプロジェクトがいずれも組まれている。特に、32 nm 以細のデバイス製造技術に関しては、世界的に米国アルバニーと欧州 IMEC に世界の研究開発リソースが集中しつつある。

【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。しかし、上述のような研究開発のグローバル化が進む中で、日本も門戸を開放し、よりグローバルな展開に腐心しないとガラパゴス化が起こる懸念は払拭できない。

Selete/MIRAI によって 45 ～ 32 nm 技術ノードまでのプロジェクトは用意されており、CREST などの新しいプロジェクトで活性化は行われているが、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研究開発体制、連携体制は整備されていない。萌芽的領域を含め研究開発・技術水準は、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を懸念。

【米国】米国ニューヨーク州立大学アルバニー校の College of Nanoscale Science and Engineering (CNSE) は約 3000 億円が投下されているといわれ、日本企業なども参加する一大世界研究開発拠点になっている。ハーバード、MIT、Purdue、ジョージア工科大学などの大学とインテル、IBM、TI など多数の企業が産学連携で研究開発を進めている。

その他、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】ベルギーに本部を置く IMEC は総勢 1600 人以上の陣容を誇り、日本企業や多くの世界企業が参加するナノテクの欧州最大の研究開発拠点になっている。2008 年 10 月には東芝が IMEC のリコンフィギュラブル・プロセッサ技術をライセンスするなど、製造以外の、アーキテクチャ分野でも世界をリードしている。このように、IMEC がシステムレベルから製造に至る広い範囲の技術を持っているところは脅威である。

EU 全体では、“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 などの他分野技術と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った観点が強い。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、産学官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。

集積回路（インテグレーション）

国・地域	フェーズ	現状	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	◎	→	半導体メーカーは依然として苦戦。材料メーカーは好調。
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 が強い。
欧州	研究水準	○	→	IMEC、Si Saxsony、MINATEC は注目すべき。
	技術開発水準	○	↗	ENIAC (European 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 リソグラフィ装置。
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	◎	→	多方面からの技術開発を行っている。
	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の強化を図る。特に、米国では海外戦略を強化しつつある。				

(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]

(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 次元集積化技術などの実装・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・低電力化・大容量化の鍵を握っている。また、これらの技術は、日本が得意とする高性能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。半導体メーカーでは、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。

世界各国で積極的な開発が行われている最先端の 3 次元集積化技術開発では、2008 年度より NEDO プロジェクトとして、技術研究組合 超先端電子技術開発機構 (ASET) が中核となり、東京大学や東北大学等も共同して、世界に先駆けた技術開発が進みだしたが、日本の電子産業の構造的な理由もあり、現時点ではその優位性を生かすことができる応用製品の提案を検討中である。

一方、実装・パッケージング技術は全体に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必要があるために、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。

なお、実装用材料分野は世界のトップレベルであり、装置も比較的高い技術力とシェアを誇る。

【米国】軍事・航空宇宙産業からの研究予算をもとに、DARPA や MIT リンカーンラボ等が中心となり、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。また、ニューヨーク州立大学 (アルバニー) や、SEMATECH におけるコンソーシアム、さらに IBM やインテルといった民間企業でも、高性能デバイスに向けた 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】Fraunhofer IZM や IMEC、CEA-LETI といったヨーロッパを代表するコンソーシアムや研究機関を中心として、3 次元集積化技術の次世代対応の研究・開発が進められている。さらに、民間企業との一体となった、MEDIA+TRAVIATA、e-CUBES といった、開発プロジェクトも積極的な動きがみられる。

【アジア】日本を除くアジア諸国では、実装・パッケージング工程の生産の中心となっているが、3 次元集積化等先端の実装技術開発の動きはあまり活発ではない。

実装技術

国・地域	フェーズ	現状	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	◎	↗	一般的には、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が、世界各国で積極的な開発が行われている最先端の3次元集積化技術開発では、2008年度よりNEDOプロジェクトとして、技術研究組合 超先端電子技術開発機構（ASET）が中核となり、東京大学や東北大学等も共同して、世界に先駆けた技術開発が進みだした。
	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。また日本の電子産業の構造的な理由により、現時点では3次元集積化技術等最先端技術の優位性を生かすことができる応用製品が明確化されていない。生産拠点はアジアへシフトしている。
米国	研究水準	◎	→	DARPA や MIT リンカーンラボ等が中心となり、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	◎	↗	ニューヨーク州立大学（アルバニー）や、SEMATECH におけるコンソーシアム、さても、高性能デバイスに向けた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	○	→	IBM やインテルといった民間企業でも、高性能デバイスに向けた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	◎	↗	Fraunhofer IZM や IMEC、CEA-LETI といったヨーロッパを代表するコンソーシアムや研究機関を中心として、3次元集積化技術の次世代対応の研究・開発が進められている。
	技術開発水準	◎	↗	民間企業との一体となり、MEDIA+TRAVIATA、e-CUBES といった、開発プロジェクトも積極的な動きがみられる。
	産業技術力	○	→	生産技術は、アジアはじめとして海外が中心である。
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	◎	→	生産の中心が中国などの海外に移行しつつあり、台湾の追い上げも強い。
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]

(7) センサ技術

世界的な傾向として、バイオセンサ、ガスセンサ、イメージセンサ等への取り組みが活発である。センサに CNT 等の新材料や MEMS を応用する試みも多く見られる。特性・機能面では、ダイナミックレンジの拡大 (CMOS センサ、ガスセンサ)、高速応答・検出時間短縮 (バイオセンサ、ガスセンサ)、センシング対象の拡大、低消費電力化、小型化 (CMOS センサ、MEMS センサ、加速度センサ)、非破壊・非接触化等への取り組みが顕著である。また、センサとその信号処理回路 (含む無線送受信回路、独立電源等) を一体化する研究開発が活発化している。

応用分野は、車載用、携帯機器用、医療・福祉・介護用 (高齢者の健康管理モニタ)、環境用、食の安全、建築物 (ビル、橋梁等) 用途等で研究開発が活発化している。またゲーム用途のモーションセンサに関する研究開発も活発になってきた。

以下に国別の技術力を述べる。

【日本】研究水準では、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、構造物ひずみセンサ等の分野は世界的にも先行し研究レベルも高い。更に世界的傾向であるバイオセンサ研究やセンサネットワーク関連の研究が日本でも活性化しており、多くの大学が取り組はじめている。CMOS イメージセンサでは測定ダイナミックレンジの拡大や画素数拡大、ガスセンサでもダイナミックレンジ拡大の研究が活発である。またホルムアルデヒド、トルエン等の揮発性有機化合物 (VOC) 検知用のガスセンサ、NO、NO₂、NO_x 等検知用の環境モニタセンサの高感度化 (AIST、愛媛大、熊本大、九大、慶大、静岡大、東大、長崎大、新潟大、阪大、立命館大等) の取り組みも活発である。他の注目すべき取り組みとして、防犯、高齢者モニタ用の大面積圧力センサ (東大) の取り組みがある。またファイバセンサの応用研究も大学、ファイバメーカー研究部門で力をつけている。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も活発である。

技術開発水準の高い分野も偏っている。イメージセンサ (CMOS、CCD)、ガスセンサ等の大量消費の見込まれる物は、大企業中心に取り組まれており、これらの技術開発力は世界のトップレベルにある。CMOS イメージセンサでは画素の補間技術、多層有機光電膜を用いたカラー画質の向上技術、ダイナミックレンジ拡大技術や S/N 比向上技術等の開発が行われている。発表は少ないが CMOS イメージセンサで銀塩写真の解像度を越えることを視野にいった 2000 万画素をこえる報告 (ソニー、キャノン) や 60 field/s の高品質動画画像の報告 (松下) 等も日本の実力を示している。ガスセンサや電極の改質研究も活発である。

産業技術力も同様な偏りが有り、車載用等は大企業が牽引しているが、他の関連ではベンチャー企業が育っていない。

【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いる。研究水準では、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)

等がある。バイオセンサでは RNA（リボ核酸）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）、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報告（Scripps Res. Inst.）、音響インピーダンスモニタリングによる in Vitro アテローム性動脈硬化プラーク測定法（Stanford 大）、ChIP-Seq データからの in vivo でのタンパク質-DNA 結合部位の全ゲノムにわたる同定（米 NIH）の報告等がある。

磁気センサでは NIST より世界最高感度と思われる 70 fT の感度を持つ電池駆動可能な超小型の発表、新材料探索、電極修飾方法の研究等の広い分野で世界をリードしている。

技術開発水準では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。

産業技術力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、TI 社、GE 社等）が牽引し、ベンチャー企業（例：オムニビジョン社、オプティマイメージング社、VAS 社等）の活躍も目覚ましい。

【欧州】EU 全体の研究開発は米国と同様に広く行われているが、基礎研究を重視している。研究水準では、多くの大学や公的研究所が取り組んで、EU 全体の研究水準の底上げに繋がっている。ZnO や WO_3 を用いたガスセンサ研究や電極の修飾研究等は世界的にもトップレベルにある。またバイオセンサの研究も活発であり、ホログラムを用いた乳酸センサの研究（ケンブリッジ大）、血液中のグルコース非破壊測定（フィンランド Oulu 大）や伊 Parma 大・フィンランド Joensuu 大・仏 Lyon 高等師範学校の共同研究での超分子センシングの報告等も注目される。

技術開発水準では、EU の FP7 による研究支援も追い風となって、この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。

産業技術力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）も育っていることは注目される。また米国で法制化された Tire Pressure Monitoring System (TPMS) 装着義務付けに対応したシステムでは、半導体大手企業の Infineon 社が世界をリードしているが、他にも英 Schrader Electronics 社（センサは村田製作所製）、独 Robert Bosch GmbH 社の動きも活発である。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、研究水準では国策として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おり、その成果が論文発表に顕著に出てきている。主要論文誌（J. Phys. Chem.、Solid State Electronics、IEEE Sens. J.、Nature 等）に分野全体で約 400 件以上の報告がある。（米：約 1300 件、EU：1000 件、日：約 650 件、韓国：約 150 件、台湾：約 100 件）

数・質共に充実してきており、研究水準では、韓国、台湾を追い越した様に思われる。米国企業との共同研究（DNA における上海大と米国 Gene Fluidics 社）がスタートしているが、中国の技術レベルが上がった事の一つの現れとも言える。技術開発水準、産業技術力はまだこれからであるが、韓国、

台湾と共に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、研究水準では大学、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。技術開発水準、産業技術力のレベルは研究水準と同様にまだ低いが、サムソン電子、LG 電子が国内外の大学と共同研究を始めている。

【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。発表論文数は韓国と同程度。技術開発水準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るが、レベル的には韓国と同程度と考えられる。

【その他】カナダとイランでの研究から技術開発での動きが活発化している。

センサ技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↘	特定の分野のセンサ（イメージ、ガス、ファイバ、味覚、磁気）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。（パナソニック、村田製作所、東芝、キヤノン、ソニー、日立等）
米国	研究水準	◎	↗	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	◎	↗	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。また各国の国研がリード。
	技術開発水準	○	↗	センサネットワーク開発活性化。
	産業技術力	○	↗	中小メーカー主導でベンチャーも台頭してきている。タイヤ圧力システム（TPMS）ではInfineon 社が世界をリードしている。
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、主要論文誌（J. Phys. Chem., Solid State Electronics, IEEE Sens. J., Nature 等）で約 400 件超（2007 年より 4～5 倍多い）の論文が 2008 年にだされている。質・量とも充実し、Tsinghua 大、Nanjing 大、南西大等が活発である。分野としてはバイオセンサ、DNA センサ、ガスセンサをはじめとして広く取り組まれている。研究水準では韓国、台湾を追い越したと思われる。
	技術開発水準	×	→	わずかであるが大学／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（KA IST）で進められている。
	技術開発水準	△	→	大企業（サムソン電子、LG 電子）が取り組み始めた。
	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（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。中国の研究水準上昇、その他：カナダ、イランの台頭が顕著。				

- (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]

(8) 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、通信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（PE）分野を中心に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、データセンターなどの情報通信機器電源、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デバイスの高速・低損失化が着実に進んでいる。

SiC、GaN などの WBG 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ートデバイスに対して、WBG や新しいシステム研究に米国は NSF や DARPA が公的資金を投入している。

【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、社会インフラ型 PE の成功体験から十分に脱却できていない。大学での博士課程などの高等教育も含めて研究開発環境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。この結果を活用し、PE システムをさらに小型、軽量化するため、デバイスだけでなく、材料、受動部品、回路・制御、実装技術などとの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 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 技術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近い将来脅威になる可能性が出ている。低電圧のパワー IC を中心にファウンドリビジネスで欧米と連携が進み、将来の独自技術開発への発展の可能性はある。ファウンドリでのパワーデバイス製造プラットフォームによる産業技術力が向上。情報通信用パワー IC や MOSFET のコスト力で台湾、中国が台頭。中国政府は国家重点研究所を浙江大学、西安大学、武漢大学に設置し、パワーデバイスを含む PE の技術力と人材育成を強化。

【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急速に向上している（IGBT など）。

パワーデバイス

国・地域	フェーズ	現状	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の減少で顕在化。ワイドバンドギャップ半導体 (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 で米国メーカーに差をつけられている。
	産業技術力	◎	→	エビ技術、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 もベンチャーと大学双方で研究活発。NSF の Engineering Research Center 制度や DARPA の支援による、産学官連携の研究水準は人材育成含めて高い。
	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。IT のパワーマネージ、省エネ化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。製造は台湾をふくむ中国などとファウンドリ展開することで競争力をトータルで強化している。
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、フランフォーファ 研究所、IMEC などと企業との産官学連携が機能している。STMicro、Infineon など企業の研究水準も高い。パッケージ、実装技術でも一歩先をゆく。
	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 技術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	△	↗	政府がパワーエレクトロニクスの重点拠点研究所を西安、浙江、武漢大学に設置し人材育成と研究を強化。香港大学などの一部の研究水準はトップレベル。最近、論文数は急増しており、研究水準は向上。
	技術開発水準	△	↗	低電圧のパワー IC を中心に欧米とファウンドリで連携。将来の独自技術開発への発展の可能性はある。高耐圧デバイスの開発も進んでいる。
	産業技術力	○	↗	ファウンドリのプラットフォームを使ったパワーデバイス開発により産業技術力が向上。情報通信用パワー IC・MOSFET はコスト力で台頭しつつある。
韓国	研究水準	○	↗	KA IST、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急速に向上している。
	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 年代までに強い競争力を構築した大電力を軸としたビジネスモデルから完全に離脱できていない。市場が拡大している IT 系、省エネ家電、自動車などへの IC を含む次世代デバイス技術やシステム集積化技術の競争力強化が必要。パワーエレクトロニクスは Cool Earth の部門横断技術として重要視されており、対応する研究環境作りと人材育成が急務。

(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]

(9) 設計支援技術 (CAD)

【日本】ごく少数の国産 CAD ベンダはあるものの、半導体メーカーの CAD の研究やシステム開発は、少数の例外を除きほぼ停止状態。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、全般的には手薄な状況にある。

【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・カンパニーも多数うまれており、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 CAD の研究と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などシステムレベルでの設計支援に関する研究も活発に行われている。アナログ回路設計用の 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】台湾では、政府の支援のもとに、CAD の研究、研究者や技術者の育成が活発に行われてきた。国際会議での論文の発表も活発である。

メインランドでは、国の支援のもとに、CAD の研究は活発になりつつある。論文の質は別としても、国際会議への論文投稿数は着実に増加している。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】国の支援のもとに、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。国際会議での論文発表数も増加しつつある。また、これと並行して、上記の Center for SoC Design Technology で CAD ツールの研究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) 多数のプロセッサを持つシステム LSI (マルチプロセッサ SoC、マルチコア SoC、メニーコア 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) 動的再構成可能プロセッサ (DRP) を用いたシステムの最適化技術、(4) 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、(5) 高信頼度化のための設計技術があげられる。

設計支援技術 (CAD)

国・地域	フェーズ	現状	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はいるが、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]

(10) 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がやや遅れ気味のためメーカー、有機半導体エレクトロニクスに関する研究開発を本気でけん引する姿勢が弱い。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昨年から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。そのターゲットはプリンタブルであり、環境問題と絡めた展望を描いている。米国はやや短期的な判断も含めてプリンタブル技術に集中してきている。

【日本】ソニーが 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、ディスプレイ部はサムソン製ながら、携帯電話の主画面を有機 EL とした製品を、日立、東芝などが宣伝、販売している。このため、有機 EL に対する社会一般の認知度は格段に高くなり、エレクトロニクス企業並びに関連部材企業の関心は更に高まっている。また、2008 年 1 月の CES2008 では、ソニーは 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たがその後トーンダウンしている。パナソニックは有機 EL テレビ開発に向けた活発な研究開発を継続している。

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、販売開始当初は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。しかし、最近では韓国の素材メーカーから一部であっても優れた部材が供給され始めており、予断は許さない。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、コダック社を残してほぼさめてしまい、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。最近ではアクティブ駆動有機 EL の技術もキャッチアップができてきており、韓国に続いて生産開始を狙っている。中国においては、嘗て有機 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

術水準にはないと推定されるが、香港では大学、企業ともに活発に動いており、台湾の水準に引けをとらない状況にある。

【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。現時点でのサムソン、LG 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、生産技術においては日本の技術をすべて吸収して、さらに進歩しつつある。生産技術に関しては実践的に日本の技術レベルを越えたというべきかもしれない。事実、2008 年 5 月の米国 SID、そして 11 月の横浜の FPD International においては有機 EL 技術の展示は韓国勢（サムソンと LG）そして台湾勢が、日本勢を圧倒していた。

②有機トランジスタ

有機トランジスタに関しては、材料、デバイス、作製法いずれの観点からと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。プリンタブル技術への期待が大きく、ディスプレイバックプレーンへの応用が考えられるが、ようやくデモ製品が作製できる段階であり、生産技術の開発が本格化する段階ではない。一方透明酸化物トランジスタ技術の進展が著しく、この方向での競争は激化している。

【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）、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るわけではない。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。完全固体の薄膜型太陽電池についても NEDO などの支援もあって、大きく進展している。変換効率が 5% に達する勢いにあり、今後の進展が期待される。

【米国】コナルカ社など、技術力があるベンチャー企業が薄膜型太陽電池の研究を精力的に行っている。政府の支援も環境エネルギー関係で、有機太陽電池と有機 EL 照明にはある。

【欧州】有機薄膜太陽電池の研究では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 EU 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、プリンタブル（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。

【中国、韓国】日本以外のアジア諸国の関心はまだあまり高くないが、韓国では有機太陽電池の研究開発への関心は急速に高まっている。

④有機メモリ、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にくい状況が続いている。

有機材料・デバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	有機 EL 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。有機太陽電池関係の進展も著しい。
	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、世界水準にある。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 EL 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 EL テレビは製品化された。
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 EL 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。製品化は台湾などのアジアの企業で行う前提で企画されている。
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 EL に関しては少し熱が冷めてきてはいるが、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 EL 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 EL 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 EL、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 EL 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、すでにその製品が出始めた。30 インチクラスの大型有機 EL テレビについても生産を立ち上げる準備が整いつつあると想定される。

全体コメント：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。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]

(11) 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。一方、最近ではグラフェン(炭素元素 1 層からなる膜)を電界効果トランジスタに応用する試みが注目を集めており、米国・欧州・日本で活発な研究が行われている。

【日本】新デバイスに関する材料・物性研究では明らかに日本は進んでおり、米国・欧州と肩を並べている。しかし集積ナノエレクトロニクスへの応用に関しては、産学連携体制が必ずしも整っておらず進みが遅いのが現状である。

【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。

無機系新デバイス

国・地域	フェーズ	現状	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で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でた技術開発を行っている。
	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。				

(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]

2.2 フォトニクス分野

2.2.1 概観

フォトニクスは光子（フォトン）の発生、変調、検出技術を基盤として広く情報の伝送、記録、処理、表示、計測などを扱う技術分野で、通信システムや表示システム、そのキー部品である光源や変調器など、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) ディスプレイ技術、(4) 固体照明、(5) 光学材料・コンポーネント・光学設計、(6) 光計測、(7) 量子情報、(8) フォトニック結晶・メタマテリアル、(9) シミュレーション解析・解析ツールを設けた。

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と米国の水準が高い。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。

ビジネスの面では、いわゆる IT バブルの崩壊により光通信分野で不況の時期もあったが、映像情報技術のデジタル化が大きな流れを形成するなど、フォトニクス分野全体としては堅調な伸びを見せていた。しかし、最近の金融危機による未曾有の不況や円高により、設備や研究開発への投資の縮小や凍結などが予測され、特に技術開発力や産業技術力に対し、多大の影響を与え始めている。変化は予想以上に速く、また、国や分野によって事情が異なるため、将来予測を難しくしている。したがって、現時点での評価が、半年、一年後に大きく変わる可能性がある。

光通信では、インターネットの継続的な成長をドライビングフォースとして、大容量・長距離伝送の発展が確実に進んでいる。この分野では日本と米国が、研究、技術開発ともに高い水準を維持している。日本は光ファイバ（FTTH）の普及率で世界をリードしている。米国は大学と企業の共同研究の推進等で、産業技術力を含めて全綱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が、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。さらに、次世代の光メモリ方式が見えて来ないのが悩みである。

ディスプレイ技術は、家庭用テレビの市場において、地球規模で、フラットパネルディスプレイの出荷台数が CRT を抜き、世代交代が成った観がある。産業化が進み、大学等における研究水準は日本を始め各国で停滞気味である。技術開発水準、産業技術力については、日本がトップレベルにあるが、アジア諸国の追い上げにより、相対的な地位は低下している。特に韓国が発展が目覚ましく、世界第一位の地位を奪われたと言ってよい状況にある。

固体照明では、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・光学設計は、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発展しつつある。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まで全般的に高い水準にある。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に結びついていない。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っている。

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に向けて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である。

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 と同様の状況にある。

2.2.2 中綱目ごとの比較

(1) 光通信

光通信分野の研究開発面では、コア・メトロネットワーク分野として、1 波長あたり 100Gb/s 容量の大容量波長多重伝送方式が盛んに検討されている。これらの基盤技術確立にむけ、国内外で、様々な研究開発プロジェクトが推進されている [1, 2]。今年度は、本分野の主要な国際会議である OFC (Optical Fiber Communication Conference) や ECOC (European Conference on Optical Communication) 等において、1 本あたりの伝送容量・距離積の世界記録が更新 (48.2 Pb/s・km) され、10Tbps を超える伝送容量で 3000km を超える長距離伝送実験が報告された [3]。

国際標準化に関しては、国連の下部組織である電気通信連合 ITU-T SG15 (International Telecommunication Union-Telecommunication Study Group 15) において、次世代高速イーサネット信号等の多様な信号を WAN (Wide Area Network) に多重・収容し、長距離伝送する新しい超高速信号階梯: OTU4 (Optical Transport Unit 4) の国際標準化推進が合意された。OTU4 は、現在、光ネットワークの ITU-T 国際標準 G.709 勧告で標準化されている 40Gbit/s 信号 (OTU3) の上位の信号階梯であり 1 波長で 100Gbps 容量を伝送する。各国通信会社間等での 100Gbit/s 級の超高速光信号の相互接続、並びに長距離伝送を目的にしており、伝送速度や多重化構造等について標準化が加速すると考えられる。1 波長 100Gb/s の長距離伝送実現に向け、超高速 LSI 技術を駆使することにより、無線通信で実用化されているデジタル信号処理技術を光ファイバ通信に適した方式として応用し、飛躍的な伝送特性の改善を可能とするデジタルコヒーレント光伝送方式の研究開発が進んでいる。これらのデジタル信号処理技術は、今後、様々な領域でますます実用化が加速されていくと考えられる。一方、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) の 802.3ba 委員会では、LAN (Local Area Network) の高速化にむけ、実用化されている 10Gbit/s Ethernet (10GbE) の次なるイーサネット規格として、40Gbit/s Ethernet (40GbE) ならびに 100Gbit/s Ethernet (100GbE) 規格の 2010 年完了を目標にした標準化推進が合意された。4 波長の波長多重伝送を用いたパラレルリンク伝送技術による比較的短距離 (40km 以下) の経済的なリンクの実現にむけて、関連する部品技術の実現性に向けた研究開発が盛んになっている。

一方、実用ビジネス面 (技術開発水準・産業技術力) といった面では、IT バブル崩壊からようやく回復基調になってきたが、最近の世界的な金融危機により、再び IT 投資も今後影響がでてくると思われる。部品・光送受信モジュール・システムの各レベルでのコストダウン圧力は大きく、競争力強化と市場におけるシェア拡大に向け、業界ごとに国際的な企業間の統合がすすんでいる。このため、国別比較の分解が難しくなってきているが、以下に各国の事情にふれる。

【日本】総務省の統計 [4] によれば、日本のブロードバンドサービスの契約者数は、2008 年の 6 月の時点で 2934 万加入となった。このうち光ファイバ

を用いたアクセスである FTTH(Fiber to the home)は全体の 45%以上(1308 万)を占め、FTTH が、初めて DSL (Digital Subscriber Line) の契約者数を上回り、世界で最も光アクセスサービスが普及した国となっている。光の広帯域性を活用した様々なアプリケーションの発展により、データ通信トラヒックは増え続けており、光アクセスネットワークと共に、メトロ・基幹光ネットワークの更なる大容量化、経済化が必須となっている。国内では、すでにコアネットワークに 1 波長あたり 40Gb/s の大容量波長多重システムが実用化されているがさらなる大容量化にむけ、1 波長 100Gb/s 級の大容量波長多重の実現にむけ研究開発が活発化している。大学研究機関等の研究水準では、東大、東北大などデジタルコヒーレント光通信方式分野で、世界に先がけた活発な研究が行われている。また企業の研究開発においても、主要な国際会議 (OFC, ECOC) における採択数において本分野における日本の貢献は大きい。一方産業技術力に関しては、国際的な企業間の統合の中で、各分野において競争が激化しており、国際競争力を保つための施策が求められている。

【米国】 DARPA のプロジェクト等に大学・企業が参加し、共同研究がすすんでいるが、シスコ、ジュニパー等のルータベンダをのぞくと、北米市場では、主なシステムベンダとして、カナダの Nortel や、EU の Alcatel Lucent (ALU) や、Nokia Siemens Network (NSN) 等外国ベンダの勢いが強い。モジュールベンダとしては、LAN 系の 10G XFP モジュールで高いシェアをもつ Finisar が 10G 300pin モジュールベンダの Optium を買収するなどの動きがあった。AMCC、Cortina といった通信用の大規模システム LSI ベンダも堅調である。

【欧州】 超高速光通信関連の様々な EU 横断プロジェクトによる産学連携が進み、大学研究機関等の研究水準ならびに、企業の研究開発水準・産業技術力もうまく連携がとれている。大学では UCL (ロンドン大学)、アイントホーフエン大、デンマーク工科大、ゲント大などが活発な研究活動を行っている。システムベンダとしては、フランスを中心とした ALU の Bell 研究所を中心として、研究開発水準・産業技術力とも高い水準を維持している。南ドイツを中心とした地域ではデジタル信号処理分野を中核技術とした CoreOptics 等の光モジュールベンダが高い競争力を持っている。またフランス、イタリアの合併会社である ST マイクロエレクトロニクスは、通信用 LSI においても高い技術をもっている。

【中国】 最近の主要な国際会議における論文採択件数や、ITU-T などの国際標準化機関への寄書数が急激にふえており、本分野における研究開発ならびに戦略的な国際標準化に力を入れている。おもにシステムベンダとして Huawei が企業の研究開発水準と産業技術力において高い競争力を有している。Huawei は、世界市場において ALU に次ぐシェアを獲得しつつあり、ZTE、Fiberhome といった中国システムベンダと共に、今後の動向に注目すべきであろう。

【韓国】 光アクセス系において、WDM - PON 等に関し、大学、国の研究機関を中心に精力的な研究がなされているが、最近の主要な国際会議における論文採択件数では、中国の方が多くなっている。光通信関連の主要なシス

テムベンダはない。FTTH はあまり普及していない。

〈参考文献〉

- [1] Europe's Research Network on Photonic Systems: http://www.eurofos.eu/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=68&Itemid=97
- [2] 情報通信研究機構 (NICT) 委託研究、ユニバーサルリンク技術の研究開発
<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h20/080806/080806.html>、
2008 年 8 月 06 日
- [3] A.Sano, E. Yamada H. Masuda, E.Yamazaki, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, S. Matsuoka, R. Kudo, K.Ishihara, Y. Takatori, M. Misoguchi, K. Okada, K. Hagimoto, H. Yamazaki, S.Kamei, and H. Ishii, "13.4-Tb/s (134 x 111-Gb/s/ch) No-Guard-Interval Coherent OFDM Transmission over 3600 km of SMF with 19-ps average PMD," Proc. European Conf. on Optical Communications (ECOC2008) , Th3E1 (2008) .
- [4] http://www.soumu.go.jp/s-news/2008/080917_2.html

光通信

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	光伝送・光デバイス技術レベルは世界トップクラスであり、特にコアネットワークの革新技術として、デジタル信号処理を用いたコヒーレント光通信技術で先導。
	技術開発水準	◎	→	1 波長あたり 100Gb/s の波長多重伝送分野で、ITU-T SG15 国際標準化、代表的な国際会議 (ECOC, OFC 等) での技術トレンドを先導。アクセスネットワーク分野では、10Gb/s 級 PON 用バースト送受信技術を牽引。LAN においては IEEE802.3ba 委員会において、40G イーサ / 100G イーサの標準化推進に貢献。
	産業技術力	○	↗	日本の FTTH の加入者数は、2008 年 6 月現在で 1308 万加入を超え、光ファイバによる超高速ブロードバンドが世界でもっとも普及。システムベンダとしては富士通、NEC 等が北米市場を確保。光送受信モジュール市場において、Opnext は 10G 300pin MSA モジュールで高い市場競争力。
米国	研究水準	◎	→	光伝送・光デバイス技術水準は世界トップであり、その位置づけは 2007 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。
	技術開発水準	◎	→	北米システムベンダとしては、Nortel が伝送技術を牽引。特に Nortel は、デジタルコヒーレント信号処理の分野を先導。AMCC、Cortina など光通信システム LSI ベンダが堅調。
	産業技術力	◎	↗	CATV が普及している北米では、FTTH の普及は遅れている。北米市場では、外国システムベンダ (Alcatel-Lucent (ALU)、Nokia Siemens Network (NSN)、Fujitsu) の勢いが強い。モジュールベンダでは、LAN 系の 10G XFP モジュールで高い市場をもつ Finisar が、300pin MSA ベンダの Optium 等を買収し、市場を拡大。
欧州	研究水準	◎	→	超高速光通信関係の様々な EU プロジェクト (EURO - FOS 等) による産学連携により、研究水準は高い。企業ではテレコム系、大学では、ロンドン大 (UCL)、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	◎	→	システムベンダでは、ALU (仏) を中心として高い水準を維持。超高速 MSA モジュールや、電気分散補償等デジタル信号処理分野を中核に CoreOptics 等が高い競争力をもつ。
	産業技術力	○	→	システムベンダでは Alcatel-Lucent (ALU) が、合併により、戦略的に市場競争力を強化 (US と EU の市場拡大)。また NSN が北米に、Ericsson が欧州に市場を確保。40G MSA モジュール・超高速デバイス分野では Bookham、CoreOptics など有力企業あり。FTTH の需要は未だ立ち上らず。
中国	研究水準	△	↗	この 1 ～ 2 年で国際学会 (ECOC および OFC) での国別採択数が急上昇 (4 ～ 5 位) しており、研究開発が盛んである。デバイス関連はほとんどなく、ネットワーク構成等が多い。
	技術開発水準	○	↗	システムベンダとして、Huawei が ITU-T 等の国際標準化を戦略的に強化。
	産業技術力	◎	↗	システムベンダでは、豊富で安価な労働力と、大きな市場を背景に Huawei が世界市場において ALU に次いで、高いシェアを拡大。ZTE と FiberHome もシェアを拡大中。日本の産業界は注意を要する。
韓国	研究水準	△	→	光アクセス系では WDM-PON を主として検討しているが、KAIST、ETRI 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	△	→	FTTH は遅れ気味。

全体コメント：光通信における日本の立場は、光伝送方式技術分野、光デバイス技術分野において、技術トレンドを牽引し続けている。技術開発水準、産業技術力面では信頼性、性能面において高い技術力を維持している。しかしながら、世界的な企業統合による市場の奪い合いが激化し、世界市場におけるシェアは決して高くない。また、開発費が拡大し、一社単独での戦略部品開発が難しくなっているように思われる。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。Finisar、JSDU を代表とする光デバイス / モジュールメーカ、ルータ市場を寡占するシスコ・ジュニパーなどが、スケールメリットを生かし、研究から産業技術力まで万遍なく力を持っている。欧州は国家プロジェクトをうまく活用し、デバイスモジュール関係は CoreOptics、Bookham、システム関係は Alcatel-Lucent が主であり、ADVA、Nokia Siemens 等が続く。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 の発展途上国市場での台頭が目覚ましい。OFC・ECOC 等の学術分野や国際標準においての台頭も注目すべきだろう。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。

(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]

(2) 光メモリ

【日本】研究水準：大学と大企業におけるホログラフィックメモリの研究者が増えてきた。しかるに 2008/7/13-18 に開催された ISOM/ODS2008（光メモリ国際会議）における学会発表を見る限り、昨年に比較してそれほど進歩しているようには思えない。また、期待されている近接場光（SIL：Solid Immersion Lens 方式もある意味では一部の企業が称しているように近接場光ではあるが、ここではビットサイズが 10-30nm 程度の超微細に光を収束させる本来の意味での近接場光）応用メモリの研究も大学教員の定年退官などもあり、この 1 年を見る限り、やはり進展していない。もうひとつ期待されている方式に超多層記録がある。然るにこの方式に必須なものは超小型高性能光源の開発であり、半導体レーザ並みの小型で低価格を目指した 2 光子吸収用超高速パルス発振レーザ装置の研究が極めて遅れているのが現状である。研究者は依然として大型で高価なチタン・サファイヤレーザを光源に多層記録の研究を行っている。しかし、光源ではなく、信号受信方式の研究に進展が見られた。通常の記録層を多層化すると境界面でのフレネル反射損失が多くなり、信号光が微弱化するのが問題であるので、日立は光通信における微弱信号を再生する際に使われるホモダイン受信を適用する方式を研究し光メモリ国際会議にて報告した。光源がマルチモードでも良いという。これからの実用化が期待される。

技術開発水準：Blue-ray（BD）方式の特徴は、対物レンズと記録層の間にあるカバーレイヤー（すなわちポリマーカバー）の厚さを従来の DVD に比較して $1/6$ の $100\ \mu\text{m}$ にし、対物レンズの NA を 0.85 と高倍率化している点である。厚さを薄くするだけでなく、その厚さ精度を $\pm 3\ \mu\text{m}$ に制御しなければならないという困難さがあり、従来の HD DVD 派（HD DVD は従来の DVD と同様に射出成形が使用できる厚さがあり、厚さ精度も $\pm 10\ \mu\text{m}$ で、光ディスクの製造タクトタイムも 3-4 秒程度が特徴）は光ディスクが容易に製造できる点を主張していた。射出成形技術では 120mm 直径の場合に厚さ $400\ \mu\text{m}$ 以上の厚さが無ければ成形できないので BD には利用できない。BD 派は $100 \pm 3\ \mu\text{m}$ のポリマーカバーを実現するために 1.1mm のディスク基板のセンター孔の上に、如雨露をさかさまにしたような円錐形構造物を被せた方式の特殊なスピンコーティングを TDK とパナソニック共同開発によって実現した。また、対物レンズと光ディスクポリマーカバー間のギャップ（ワーキングディスタンス）が HD DVD では 1mm もあったのに対して BD ではわずか 0.2mm しかなく、ディスクのポリマーカバーが傷付くことやディスク表面への塵埃付着を防ぐために従来の BD では、ポリマーに金属も結合させた特殊オーバーコート剤を TDK が開発した（2008 年の財団法人光技術産業振興協会の櫻井健二郎記念賞受賞）。この技術によって、CD や DVD 同様にケースの不要な（裸で利用できる）BD が誕生した。2 層記録層の場合やポリマーカバーの厚さ精度が $\pm 3\ \mu\text{m}$ に満たない場合でも、どちらも対物レンズによる球面収差が発生し、スポットサイズが広がってしまうが、液晶素子による球面収差補正やコマ収差補正、ならびに若干の偏向も可能になっている。

産業技術力：日本国内では HD DVD の PR もほとんど無くアジア域を含めても HD DVD は劣勢のように見えていたが、欧米にては BD よりも HD

DVD の方が多く売れていたという統計データが 2008 年 2 月 21 日の日本経済新聞に掲載されている。しかしその 3 日前の 2008 年 2 月 19 日に、HD DVD 方式の盟主である東芝の社長が突然 撤退を宣言し、次世代 DVD は BD 方式に事実上決まった。

一方、HD DVD 派の東芝では、少ない記録容量でハイビジョン映像を長時間記録するための新帯域圧縮技術を開発しており、この技術を DVD レコーダーに適応させて、すでに HD DVD レコーダーに適応して従来の DVD レコーダー（RD-X7 など数機種）にも DVD レコーダーでハイビジョン映像を長時間記録できるといううたい文句で市販していたが、2008 年には RD-X8 という新機種（MPEG2 エンコーダーと MPEG4AVC トランスコーダーを搭載、帯域圧縮率を大きくして DVD-R 片面 1 枚でハイビジョン映像を 2 時間以上録画できる方式で、1 テラバイトの HDD に記録した地上波デジタル放送やハイビジョン衛星放送を 10 回まで DVD-R に録画する機器）が良く売れている。BD-R 等のディスク媒体よりも 1/10 程度も安価な DVD-R が使えるためかもしれない。HD DVD を放棄した東芝が DVD レコーダーにて高帯域圧縮のソフト技術で高密度記録に挑戦している。

1 個の対物レンズで CD、DVD、BD 兼用のピックアップ技術は BD 陣営ではあまり使われず、CD/DVD 用の対物レンズ（NA=0.6）と BD 用の対物レンズ（NA=0.85）の二個搭載ピックアップ方式が一般的になってきている。

【米国】研究水準：光アシスト磁気記録の研究（HAMR）が政府援助により少しずつ進展しているように思われる（ピッツバーグ市のシーゲート社とカーネギーメロン大学）。しかしながら、10nm 程度の局部加熱に必要な近接場光による 600℃程度までの局部加熱はまだ実現されていない。FDTD 法によるシミュレーションならびに光導波路へレーザ光を導入する部でのカップリング損失克服がポイントである。したがって 2008 年内には未実現。

技術開発水準：ホログラフィック光ディスクシステム開発にけるコロラド州インフェーズ（Inphase）社の開発力は圧倒的である。もともとホログラム媒体材料開発が中心であったが、最近では周辺技術開発も急速に進んでいる。

産業技術力：米国は民生品である光ディスク分野での産業技術力が弱く、機器の開発設計後は日本の企業にゆだねるのが通常であった。しかし、前述 Inphase 社は自ら装置開発を行っており、近いうち（2010 頃まで）には世界で初めてホログラフィック光ディスクならびに装置を市販しようという意気込みが強い。期待されていた 2 光子吸収方式の光ディスク装置を開発しているカリフォルニア州サンディエゴの Call/Recall 社における製品化はかなり後退している模様。

【欧州】研究水準：光ディスク生みの親（1972 年レーザーディスクを開発・発表）であった欧州企業のトップのフィリップス社が光ディスク事業から完全に撤退した影響もみられ、欧州では事業よりも基礎研究に力を入れているようである。これは欧州連合が欧州全体の大学や研究機関に豊富な研究費を投じている結果である。

技術開発水準：日本での次世代 DVD 闘争で、BD が生き残ったことを反映し、BD の次に来るであろう新技術開発にも力をいれている。それは、ディス

ク 1 枚で 400GB 以上の記録容量を目指す新しい光ディスクの研究・開発が Deutsche Thomson OHG で強力に進められている。対象は日本で生まれた超解像ディスク方式(産総研が Super-Rens 方式として 2000 年に発表)であり、現在、日本の産総研と韓国メーカーの LG 社が共同で開発中の GST (GeSbTe) 系材料は半導体であり、その記録密度は欧州の InSb 系(結晶系)の方がはるかに高いことを明言している。

産業技術力：欧州では、フィリップスが光ディスク開発からの撤退後は前述 Deutsche Thomson OHG 程度しか行われていなく、米国よりも産業技術力は弱い。

【中国】研究水準：日本の ISOM (International Symposium on Optical Memory：光メモリ国際シンポジウム) や米国の ODS (Optical Data Storage) にちなんで、ISOS (International Symposium on Storage) を 8 年前に立ち上げているが、国外からの招待講演が中心であり、中国内研究は学生達のポスターセッションがほとんどを占めている。まだ見るべきものが無い。

【韓国】研究水準：延世大学の CISD (記録研究所) が中心であり、大学教授・准教授陣の大部分が機械系出身のために、HAMR 関連や高速回転の SIL 応用装置がらみの研究がほとんどである。まだ特筆すべきレベルにはない。

【台湾】研究水準：国立台湾大学、交通大学、台湾中央大学などが中心に基礎研究が盛んである。ITRI (半官半民の研究組織) や TISA (TAIWAN INFORMATION STORAGE ASSOCIATION) も強い関心を示している。近接場光学や超解像分野での研究が多い。

技術開発水準：あまり活発でない。企業規模が小さいからであろうか？

産業技術力：CD-R や DVD-R などの量産ができる光ディスク媒体の大部分は台湾企業製であるように、比較的低価格のものはほとんど全て台湾で作られている。(機器本体も台湾や中国製であることが多い)。

【シンガポール】研究水準：国立シンガポール大学の記録研究所が中心であり、あらゆる新規研究設備や開発設備を整えている点は注目される。しかし、まだ、目に見える形での研究成果は現れていない。

光メモリ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	△	→	大学での研究はホログラフィックメモリや二光子吸収方式に関してのみ少し増えてきた。企業では光ディスク事業では利益が出ないうえに 2008 年 2 月に HD DVD が撤退したことにより次世代 DVD の覇権争いが BD 方式に決着。次の新しい研究が実を結ばないために、光ディスク業界では目標を失ったように見える。その結果、研究開発に従事する人材が減っている。
	技術開発水準	◎	↘	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 兼用レンズの技術開発が行われた。経産省主導の高密度光メモリの成果と業界での実現性が見えてこないの、産業界の技術開発はほとんどストップ状態。代わって従来技術の改良によるメモリ容量の増大化技術開発が各社で行われている。
	産業技術力	◎	→	次世代 DVD として BD 方式が残ったものの、高価であり、ディスク媒体も安くないので、普及があまり進まない。シチズンが液晶素子による収差補正デバイスを生産し、月産 3000 万個に達している（生産は中国）。
米国	研究水準	◎	→	テラビット /in ² を目指しカーネギーメロン大学の協力を得てシーゲート社が光アシスト磁気ディスクヘッドを研究しているが、研究のみに終わりそうな雰囲気。ホログラフィックメモリの研究が進んでいる。アリゾナ大学でも斬新な研究はストップしている。
	技術開発水準	○	→	ホログラフィックメモリ技術開発に関してインフェーズ社が精力的に展開中。
	産業技術力	△	→	上述 Inphase 社がホログラフィック方式製品化中、といわれるが発売時期は来年度以降か？
欧州	研究水準	◎	↗	超解像光ディスクの研究が、Deutsche Thomson OHG から発表が盛んである。
	技術開発水準	○	↗	Philips が撤退したが Deutsche Thomson OHG の技術開発のみ盛んである。
	産業技術力	△	↘	ほとんど無い状態。
中国	研究水準	×	↘	ほとんど無い状態。
	技術開発水準	○	→	日本企業が現地で開発中。
	産業技術力	◎	↗	日本企業が中国の工場で生産中。
韓国	研究水準	◎	→	延世大学のメモリ研究所（CISD）と LG が目立つ程度。
	技術開発水準	◎	↗	CISD と LG が特に活発。サムスンはほとんど新しい開発をしていない。
	産業技術力	○	→	LG が目立っている程度。
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（研究者：院生の数が多い）。
	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	◎	→	前年と比べて代わり映えしない。
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）のみ。国が力を入れているので、DSI の研究者数では世界最高。
	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いたし、産業としても成長を続けていたが、次世代 DVD が決着後は、あたかも火が消えたようである。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、トムソン OHG が日本から発せられた超解像技術（Super Rens 技術）を改良中。				

(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]

(3) ディスプレイ技術

ディスプレイは、人間が情報を得るためのマン・マシンインターフェイスとして大変重要であり、フォトニクス分野を含む広範な技術が集積されたものである。ディスプレイの主戦場とも言える家庭用テレビの市場においては、長らく CRT がその王座にあったが、国内の出荷台数では 2005 年にフラットパネルディスプレイ (FPD) に追い越され、世界の出荷台数でも、2008 年には LCD 単独で CRT を上回ることが予想されている。FPD は、小型の携帯機器向けから大型テレビに至るまで、画面サイズの大型化と用途の拡大が両輪となって、長年にわたり技術の進歩と市場の拡大が好循環で続いた結果、現在では 10 兆円を超える巨大産業に育っている。FPD の技術開発も、現在市場にある FPD の改良技術から新規の FPD 技術まで、引き続き活発に行われている。

【日本】ディスプレイ産業の基盤である部材と製造装置については、日本が引き続き優位性を保っている。前工程（パネル製造）は設備産業化の傾向が強くなり、後工程（組み立て）については海外展開が進められている。パネルの製造企業数は減少しており、有力企業に集約されてきている。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であるが、アジア諸国が国を挙げて猛追してきたことなどで、国内における生産技術の優位性が低下している。また、自社の新技術を公開しない方針の企業が増えており、学会でのプレゼンスも低下している。

【欧米】本格的にパネル製造を行っている企業が存在しないため、材料などの要素技術や新規方式の提案など、特許のライセンスを目指すような研究開発が中心となっている。特に、有機 EL 材料や電子ペーパー関連など、先端分野のキー技術にフォーカスした研究開発では、独創的な成果もあげており、引き続き強みを発揮している。また、ファブレス方式での量産など、米国ベンチャー企業ならではの大胆な事業戦略も注目されている。

【中国】パネルを自前で生産できる企業はまだほとんど無いが、液晶モジュールの組立を中心に生産量を拡大しており、近い将来、前工程での生産にも進出してくる可能性がある。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企業の育成を図っている。巨大市場を抱えているだけに、今後、世界一の FPD 生産・消費拠点となる可能性があり、その動向が注目される。

【韓国】大手企業が大学や公的研究期間を先導することで、製造のみならず、研究開発でも今や世界のトップに躍り出た。外部からの技術を取り入れることにも貪欲で、それが急激な成長を支える一因となっている。部材や製造装置についても、国産化して産業の裾野を広げようとしている。

【台湾】技術的には韓国の後塵を拝することが多いものの、大学での研究も盛んであり、研究水準は着実に向上している。パネル製造企業ではビジネス志向の考え方が徹底しているが、製造技術の実力も向上してきている。また、化学産業から転進した財閥系企業が多いこともあり、近年は部材も取り込んで垂直統合を図っている。

ディスプレイ技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↘	大学でのディスプレイ研究は企業に比べて活発とは言えず、独創性、実用性の両面で、学会でのプレゼンスが低下している。
	技術開発水準	◎	→	実用性の観点で、完成度の高い技術開発成果が多い。液晶ディスプレイではシャープ、日立、東芝、ソニーなど、プラズマディスプレイではパナソニックが、技術開発をリードしている。有機 EL では 2007 年末にソニーが世界初となる有機 EL テレビを発売した。また、光学フィルムなどの部材開発も活発に行われている。
	産業技術力	◎	↘	ディスプレイ産業の基盤である部材と製造装置については引き続き優位性を保っている。テレビ用の大型パネル製造については、液晶はシャープ、プラズマはパナソニックにほぼ集約された。韓国、台湾の猛追により、パネル生産技術の優位性は相対的に低下している。
米国	研究水準	○	→	基礎的分野に限られるが、いくつかの大学で独創性とインパクトのある成果が出ている。
	技術開発水準	○	→	短期志向の投資家が多く、長期のディスプレイ開発に必要な投資を集めるのが困難。要素技術では有機 EL 用の材料開発で Kodak、Dupont、UDC などが強みを発揮している。
	産業技術力	△	↘	パネル製造が行われていないが、台湾のパネルを用いて低価格の液晶テレビを販売し、米国で高シェアを獲得した Visio のようなファブレスメーカーも出ている。部材では唯一、3M が液晶テレビ用の輝度向上フィルムで高いプレゼンスを有している。
欧州	研究水準	○	→	ドイツと英国を中心に、基礎研究では高い水準を維持している。日米欧の中では大学や公的研究機関での研究比率が最も高い。
	技術開発水準	○	→	パネル製造が行われていないために、開発課題が不明確で、研究者も減少。要素技術では、高分子有機 EL デバイスの開発に CDT (英)、Novaled (独) が注力。
	産業技術力	△	↘	テレビ事業では Philips が唯一大きな市場シェアを有しているが、全体的には産業の裾野は広くない。
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が、学会発表できるレベルの成果はまだ少ない。
	技術開発水準	△	↗	台湾に学びながら企業を育成しているが、まだ有力企業は育っていない。
	産業技術力	○	↗	液晶モジュールの組立工程においては生産能力とコスト競争力で優位性がある。
韓国	研究水準	◎	↗	大手企業が大学や公的研究機関を先導し、質・量ともに世界トップの研究水準である。
	技術開発水準	◎	↗	本質的な課題に取り組む姿勢があり、実用的でインパクトのある成果が出ている。SID の発表件数でも、サムソングループと LG グループが他企業を大きく離して 1、2 位であり、LCD、PDP のほか、有機 EL や酸化物半導体 TFT の開発でも業界をリードしている。
	産業技術力	◎	↗	パネル製造技術では、サムソン、LG が積極的な設備投資をして、業界をリードしている。また、部材や製造装置も国産化して、産業の裾野を広げようとしている。液晶テレビでは Samsung が世界シェアトップの座をソニーなどと競っている。
台湾	研究水準	○	↗	大学でのディスプレイに関する研究が盛んで、発表件数では韓国に次いで世界第 2 位となった。パネル製造産業の存在が、研究水準を引き上げている。質の向上が今後の課題。
	技術開発水準	○	↗	年々力をつけており、AU Optronics 等のパネル製造メーカーの存在感が増している。
	産業技術力	◎	↗	パネル製造技術は世界トップ水準。部材の事業も取り込み、垂直統合を図っている。

全体コメント：日本は総合的に見て世界のトップレベルにはあるが、アジア諸国の追い上げにより、相対的な地位は低下している。特に韓国は、研究水準、技術開発水準、産業技術力のいずれにおいても日本と同等あるいはそれ以上の力をつけるに至っており、ディスプレイ技術においては世界 No.1 の地位を韓国に奪われたと言ってもよい。韓国はサムソン、LG の 2 社の技術開発力が強いことに加え、大学においてもディスプレイ技術の研究が活発であることが、全体の技術水準を底上げする結果となっている。台湾も液晶パネルの生産技術では韓国、日本と並んで世界トップ水準にあり、研究水準や技術開発水準も向上しつつある。特に大学での研究に韓国と同様、力を入れている点が特筆に値する。中国は、LCD の後工程では世界 No.1 の生産基地となっているが、パネル製造は行われておらず、全体としてはプレゼンスが低い。一方、元気なアジア諸国に比べ、欧米では FPD の製造がほとんど行われておらず、産業技術力では引き続き劣位なポジションにある。しかしながら基礎研究においては、量的には少ないものの、独創的でインパクトのある成果をあげており、技術開発においても、分野は限定されるが、材料等の要素技術分野でトップレベルの水準を保持している。

(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]

(4) 固体照明

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、蛍光ランプ、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いけない。

固体照明

国・地域	フェーズ	現状	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・ディスプレイに特化した研究を推進している拠点となる大学・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 LED 照明の研究プログラムの構築、および人材育成が不可欠である。熱設計プロセス・実装プロセスの研究は皆無に近い。第 1 回白色 LED と固体照明国際学会(2007 年)が開催されたが、海外で行われる LED 照明学会での日本の大学研究者の発表が皆無である。大多数は、窒化物半導体での発表になり、LED 照明の教育が根付いていない。
	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、企業に総合力が見つからない。
	産業技術力	◎	↗	1998 年 LED 照明技術による“21 世紀のあかり”国家プロジェクトをスタートさせた。海外において、非常に優れたプロジェクトであると評価されている。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、さらに必要。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。2010 年以降、大手照明メーカーは電球の製造中止を発表した。今後、国内の大手照明メーカーは独自の販売網に頼ったビジネス展開をする予定。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。太陽電池の二の舞いにならないようにする。このままでは、国益を損じる可能性がある。経産省は産業再生法に「LED 照明」技術を取り入れる方向である。
米国	研究水準	○	↗	拠点大学として、UCSB、GIT 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、MRS、米国照明学会)が強力に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。2005 年に発足された DOE の Energy star、Caliper プログラムが、機能し始めた。大学や国立研究所の寄与が 2006 年から活発化してきた。
	技術開発水準	◎	↗	Philips・Lumileds(米)の技術開発力が格段に強く、将来固体照明の分野では、世界制覇を狙っている。web を通し、目に見える努力をしている。
	産業技術力	◎	↗	企業のビジネスモデルが明確である。国として、DOE が積極的に支援している。最近、ANSI、IESNA、NIST 等が全面的な支援を行って、新しい標準化プログラムの構築と民間での取り組みを促進している。SPIE、MRS 学会での発表が活発になっている。
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製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・研究資金などが十分ではない。最近、UK、フランスを中心に、学術研究への取組みに積極的で、光源の物理と工学に関する国際学会が主導権を握っている。
	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。Osram の 1mm2 薄膜チップ技術は最近、ドイツ首相賞を獲得した。
	産業技術力	◎	↗	Philips が Lumileds と連携し、Color kinetics 等を買収し、世界的に産業技術力は最高水準にある。IEC に重要なポストをもって、標準化に強い。
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、ベンチャー企業と人材育成がなされている。多くの大学、国立研究機関が参加し、将来非常に期待される研究分野である。
	技術開発水準	○	↗	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、廈門、深圳等)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	○	→	
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。現在、世界の研究拠点大学院を目指そうとしている。
	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。LG 電子が日本へ LED 照明製品の売り込みをかけている。
	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。政府は、2013 年までに多額の資金を投入し、バイオ、グリーンカー、ヘルスケア等を含む重点研究テーマを支援する方針。その 1 つに LED 照明を取り上げている。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。国内に、SSL の組織学会が出来た。中・大型 LCD BLU の製品化に力を入れている。

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のレベルを超えている。大学におけるLED応用が活発になっている。第2回白色LEDと固体照明国際学会が2009年12月台北にて開催予定である。
	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、EPISTAR、ARIMA等有力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多い。
	産業技術力	◎	↗	昨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。MOCVDメーカーのアキシترون社（独）が結晶成長装置を数百台納品し、精力的なバックアップを行っている。企業間連携が進むと同時に、青色LEDチップのコストを決める主導権を握っている。

全体コメント：省エネルギーとCO₂の排出削減につながるエコ関連の事業が追い風になり、固体照明の技術革新は世界的に加速している。世界の技術・産業競争力が上がる中で、日本がどのようなイニシアティブをとるかが注目される。日本は、世界に先駆けて、電球製造中止をアナウンスした。しかしながら、この10年間で、固体照明の技術がまだ未成熟のまま、非常に早いスピードでLED照明が産業に取り込まれている。アメリカはDOEを中心に学会・産業界のまとまりを強化し、欧州と協力して、LED照明の標準化を行おうとしている。アジア諸国は、これに追随し、製品を生産する拠点作りを行ってくる可能性がある。すでに、日本の市場状況を見ながら、台湾、韓国などの低価格製品が流入してきており、蛍光灯の代替品まで出回っている。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。

- (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]

(5) 光学材料・コンポーネント・光学設計

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〔1〕、ナノコンポジット材料〔2〕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、コンピューティショナル・フォトグラフィなどの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。

【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〔3〕、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〔4〕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〔5〕、日本ゼオンのプラ材料〔6〕、精密機械加工技術による非球面、自由曲面、回折素子〔7〕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〔8〕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。〔9〕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。中でもドイツはフ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。〔10〕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〔11〕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】大学研究機関のレベルは高いとは言えないが、北京理工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。

一方、企業からの研究発表はまだ少ない。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。ZQCOT の薄膜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。

【台湾】国立中央大学、国立交通大学などで、活発な研究が行われている。特に、ODF2008 での台湾勢の論文数には、目を見張るものがあった。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。大立光電や揚明光学の一部のレンズは、日本を脅かす存在になりつつある。

【韓国】光州フォトリ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、サムスンや 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、サムス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。

〈参考文献〉

- (1) 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
- (2) H. Sugimoto et al., "Preparation and properties of poly(methylmethacrylate) - silica hybrid materials incorporating reactive silica nanoparticles", Polymer 47, pp.
- (3) <http://www.opt.utsunomiya-u.ac.jp/center/intro.html>
- (4) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070423/pr20070423.html
- (5) 沢渡, モールドレンズ用光学ガラス, OPTICS DESIGN, No.37, pp. 15-21 (2004)
- (6) <http://www.zeon.co.jp/randd/pdf/16.pdf>
- (7) 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)
- (8) <http://forum.stanford.edu/research/techrep/cstr-2005-02.pdf>
- (9) J. H. Burnett et al., "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride", Phys. Rev. B64, 241102 (2001)
- (10) J. A. Dobrowolski et al., "Optimal single-band normal-incidence antireflection coatings," Appl. Opt. 35, pp. 644-658 (1996)
- (11) H. Feldmann et al., "Catadioptric projection lenses for immersion lithography", Proc. SPIE 5962, 59620Y (2005)
3754-3759 (2006)

光学材料・コンポーネント・光学設計

国・地域	フェーズ	現状	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、インダストリ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研究をスタンフォード大が行うなど、分野也多岐に亘る。政府系の研究機関では NIST 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・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	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。
	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	研究水準	△	↗	レベルは高いとはいえないが、北京理工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。
	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て、薄膜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。
台湾	研究水準	○	↗	国立中央大学、国立交通大学などで、活発な研究が行われている。特に、ODF2008 での台湾勢の論文数には、目を見張るものがあった。
	技術開発水準	△	↗	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	○	↗	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。
韓国	研究水準	○	↗	光州フォトニックスクラスターなど、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	○	↗	サムスンや 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。
	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、コンピューショナル・フォトグラフィなどの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。

(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】

(6) 光計測

一般に光計測というものは計測対象があつ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、日欧と米国ではそのベクトルが異なっているようである。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なうアイデアがある。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すた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、学会で先導して特定の分野を高めていくというスタンスはあまり感じられない。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。学会でも積極的にセッションがスクラップ&ビルドされ、分野を盛り上げていく傾向が強い。ファンドの関係で研究動向は産業動向と深く結びついている。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あまりなく、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。

日本の技術開発は、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、先端的で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。米国における技術開発は大学・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することができる。技術は人とともに流動するため、全体として共有がすすみ、国全体としての技術力が高まっていくと思われる。欧州の技術開発力は、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。中国は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。韓国についても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ようである。

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つ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は不明である。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。液晶関係や半導体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、特定分野について政府が産業育成に力を入れている。

光計測

国・地域	フェーズ	現状	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。理論、原理実験など基礎的な水準は高いが、実用化を見据えた研究は主流ではない。実用化にあたっての問題点を洗い出すという部分へのサポートが不足している。
	技術開発水準	◎	→	商業ベースに直結した開発が主流である。各社研究所は独自技術の開発に力を入れていて知財の共有意識が不足している。新しい計測機器の独自開発には消極的と思われる。
	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。計測機器メーカーの淘汰が進んでいる。研究に直結した新しい計測機器はベンチャーが中心に対応している。
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。企業が大学等に研究を委託して実用化レベルまで大学・研究所で行っている。基礎的研究にも政府や軍のサポートがある。
	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	◎	→	軍や政府の国策による極限計測技術、特定目的用途の機器が強い。民生用の計測機器はあまり力を入れていない。
欧州	研究水準	○	→	潜在的なポテンシャルが高い。各国それぞれの大学で独自の伝統を持っていて研究水準を維持している。
	技術開発水準	△	→	新しい計測方法の開発については消極的。計測精度の向上などに力を入れている。標準となる機器開発が中心で産業応用についての対応は遅く海外への技術流出がある。
	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。知財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。特定の機器については政府のプロジェクトとして大学にファンドが出ている。それらについては産業界との連携が強い。
	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。量産機器については後追いの状態が続いている。知財についての感覚は高くない。
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。実用化を意識してなく、知的好奇心で行われる研究が多い。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。産業的にも未成熟である。韓国は高精度面計測など液晶ディスプレイ、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国家的に支援している。なお、上記比較に THz 非破壊計測は除いている。				

(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]

(7) 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であった。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ンクスとは限らないが、フォトン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ン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）を発案するなど、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（今のところフォトンクスのみ）が進みつつあることが挙げられる。

量子情報

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	フォトニクス・量子暗号は◎。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も◎。しかし量子コンピューティングは欧米が若干進んでおり○。今後重要となる新しい物性・デバイスを開拓する研究は遅れをとっていて△。
	技術開発水準	◎	→	NEC や 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。フォトンカウンター開発は後追いだが立ち上がっている。
	産業技術力	△	↗	実用量子暗号開発の動きが NEC や三菱等の企業に見られ、デバイスからシステムまで技術力はある。
米国	研究水準	◎	↗	理論・実験に強い（フォトニクス関連の量子情報、ダイヤモンド NV センター、イオントラップ実験、超伝導光子検出器開発等）。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。
	技術開発水準	◎	→	ボーイング社等光子検出器開発。
	産業技術力	○	→	MagiQ 社から、量子暗号装置の製品が出ている。量子情報特有ではないが使用するレーザー光源・多層膜コーティング・フォトンカウンターの製品が強い。
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（特に衛星間・地上衛星間量子暗号：日本では NICT が参加）。プロジェクトを渡り歩くドクターやポストドクが優秀。ダイヤモンド NV センター、イオントラップに強い。東欧も理論計算だけでなく実験視野。
	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。スイスの銀行が興味を持っている。選挙等での量子暗号試用の動き。
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。国際会議の招致に熱心。
	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。国際会議の招致に熱心。
	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、光子を用いた実験、核スピン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	×	→	実用化に向けた開発は行われていない。
シンガポール	研究水準	△	↗	NUS（シンガポール国立大学）を拠点とする非常に大きなプロジェクトが立ち上がり、オクスフォード大のエキート教授の指導のもとに欧州の実力派理論家実験家達をリーダーに活動している。今後目が離せない。
	技術開発水準	×	→	量子情報に利用できる技術開発は行われていない。
	産業技術力	×	→	実用化に向けた開発は行われていない。

全体コメント：

量子情報処理には短期開発が見込まれる量子暗号および長期研究の必要な量子コンピュータがある。どちらにしても、(1) 現テクノロジーの範囲で最高性能を目指す研究開発と (2) 将来を見据えたリスク大だが新しい理論・物性・デバイスに立ち戻った研究がある。(1) に関して日本は欧米とともに世界の先端を行っているが、アジアー特に中国の光子情報処理への猛迫に晒されている。(2) に関しては最近新展開が見られる欧米に遅れをとっている。日本の道としては (1) のみならず (2) の基礎研究に力を入れる必要がある。

(1) が先端を行っている点を補足すると、量子暗号は基礎研究と実用化研究にわかれ、前者は大学中心の「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新しい方式の基礎実験」であり後者は企業中心の「方式は decoy-BB84、光子検出器は通信波長帯、性能評価は速度・距離・経済性を考慮」した開発である。量子コンピュータは開発でなく基礎研究であるが、従来の「量子回路のモデル」から「クラスタ状態を用いた測定誘起型コンピューティング」が進んでいる。日本はどれも世界先端レベルにある。

- (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]

(8) 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・フォトリソの枠内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・フォトリソ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きいと思われるが、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。

フォトリック結晶・メタマテリアル

国・地域	フェーズ	現状	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、応用全てにわたり世界をリードしている。ただしそれ以外の機関が登場してこないのが悩みの種。ファンドリーサービスの登場が状況を変えるかもしれない。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	◎/△	→/→	企業では NTT が世界最高レベルの基礎研究しているほか、東北大発ベンチャーのフォトリックラティスの偏光子をベースとした独自の製品が軌道に乗りつつある。その以外にも小規模な技術開発を行う企業は多いがブラックボックス化しており、産業応用の壁に当たっているようだ。ファンドリーサービスの拡大で開発環境が変われば、盛り上がる可能性はある。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	○/◎	↘/→	フォトリック結晶の基礎研究は全般的には日本に押されてやや下降気味。量子情報応用やセンサ応用が目立つ。これに対して、メタマテリアルの研究は依然として活発。プラズモニクスと分野が合体し、発光増強、光学クローキングなど、様々な話題が登場している。欧米で協調した研究が世界をリードしている。
	技術開発水準	◎/○	↗/→	将来のフォトリック結晶による光集積はシリコン・フォトリックスをベースにすると目され、シリコン・フォトリックスの開発が IBM、インテル、SUN、HP など、多くの企業で活発である。そしてシリコン・フォトリックスのファンドリーが他の機関の研究も支え始めている。メタマテリアルは技術よりアイデア勝負の電波応用と、フォトリック結晶より技術的に難しい光応用に分離気味。
	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。シリコン・フォトリックスまで含めれば、上記の企業が技術力を急激に高めつつある。メタマテリアルについては、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	○/◎	→/→	フォトリック結晶で活発だったゲント大がシリコン・フォトリックスという大枠の中で積極的に研究を展開。光集積、各種デバイス、センサ応用、量子情報応用など、アイデアでは日米を追いかける形だが、技術的には同レベル。メタマテリアルは米国と同じ状況。
	技術開発水準	◎/○	↗/→	ゲント大を中心とした連合組織 IMEC が拡大させているシリコン・フォトリックスのファンドリーサービスは、世界で最も広いレシピを揃え、一般にも開放されており、フォトリック結晶の研究でも多くの利用が見込まれる。日本の同様の環境から見ると脅威になるかもしれない。
	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。むしろ IMEC の技術力が産業に及ぶと脅威かもしれない。メタマテリアルは米国と同様。
中国	研究水準	○/○	↗/↗	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。ファンドリーサービスの利用を始めれば、技術的には日米欧と大差なくなるはず。ただしアイデアに乏しく、現状ではほとんど真似をしている感じ。メタマテリアルは、基礎物理の理論か、電波応用に限定されている。
	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。またここでもファンドリーサービスの利用が始まれば、日米欧との差が縮まる可能性が出てくる。
	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きたが、やや減速気味。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技術開発はある。ただし一時よりも減速気味。メタマテリアルは日本と似た状況。
	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。基礎研究や未来の応用研究には高度な装置が必要なので、最近ではプレーヤーが固定化される傾向があったが、主に海外のいくつかのシリコンフォトニクスファクトリーがサービスを開始したことで、状況が一変しそうである。つまり誰でも手軽に自分が設計したデバイスを手に入れ、研究を展開できる可能性が出てきた。日本でも同様のサービスを早急に整備する必要がある。また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おり、同分野以外で目にすることが多くなってきた。ファイバや LED 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、原理や技術的難易度が異なるところがあり、光波帯では本質的に光吸収の問題があり作製も困難なため、電波応用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

- (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) シミュレーション解析・解析ツール

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。

フォトリソグラフィ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 という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。特に半導体レーザーでは、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。

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) 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、EEE-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) 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。

シミュレーション解析・解析ツール

国・地域	フェーズ	現状	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 IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology の 2007 年 9 月号（Vol. 25、No. 9）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。また、2008 年 5 月 1 日には、IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 発刊 25 周年記念号（Vol. 26、No. 9）が出版され、15 篇の招待論文が掲載されている。この記念号に掲載された Doerr 博士と Kogelnik 博士による論文「Dielectric Waveguide Theory」（pp.1176-1187）では、光導波路・ファイバのシミュレーション・解析技術開発の歴史的経緯や具体的事例が 100 篇の参考文献とともに紹介されている。

（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]

2.3 コンピューティング分野

2.3.1 概観

コンピューティング分野を大枠として (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、(7) マルチメディアシステム、(8) 自然言語処理。

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 (ただし 2008 年 9 月の金融危機に端を発する大不況は、この米国 IT 産業にも少なくない影響を与えるものと考えられる)。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 の統合の進展により各国間の連携が共同研究プロジェクト等を通じて強化されてきている。近年では幾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興隆に符合して、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、技術レベルは全般として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)、欧州とは匹敵する高レベルにあると言える。マルチメディアシステムや自然言語処理の技術水準は世界最高レベルと言えるが、新サービスの創出力、長期目標設定の点で弱さが見られる。この弱点は他のソフトウェア分野にも共通している。

ソフトウェア産業の全体規模は大きく、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比は 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、初期の頃からハードウェアの付随物として捉えられがちであったソフトウェアの位置付け、均質的な国民性、品質改良は得意だが新コンセプト構成力の弱さなどが語られてきている。ただし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。

ソフトウェア開発人材の質と量の点でも問題が顕在化してきており、経団連、文科省、経産省が連携し、高度 IT 人材養成プログラムが実施されている。しかし、学生から受注開発主体のソフトウェア産業は 3K(きつい、帰れない、給与が安い)と見なされ、優秀で創造力を有する学生が向かわない状況も大きな問題である。ソフトウェア制作は元来創造的作業のはずであり、ソフトウェア産業界も協力してこの問題点を解消し、創造力あふれる若者が集まる状況に改善する必要がある。

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技術の進展、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 に関する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。単に国内市場での成功に満足することなく、如何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。

2008 年 9 月の金融危機に端を発する世界大不況は、IT 産業地図にも少なくない影響を与えるものと推察される。世界の IT を先導してきた米国も変調する可能性があり、新しい技術や勢力が伸びるチャンスの時でもあると言えよう。

(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。Web サービスやクラウドコンピューティング（注目動向参照）のバックエンドとなる大規模(分散)サーバー、データベース(及びその関連ソフトウェア)技術も、重要性を増しつつある。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。(9) スーパーコンピュータ、(10) 並列コンピューティング・クラスタコンピューティング、(11) チップマルチプロセッサ、(12) リコンフィギュラブルシステム、(13) ディペンダブル情報システム、(14) 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は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、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。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出来るかどうかである。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 年から 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京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。

中国はコンピュータハードウェアに関して、独自の先端技術を伸ばしつつあり、研究者数、発表論文数は増加してきている。PC とサーバーの製造で世界の拠点になっている台湾との垣根も低くなりつつあり、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、今後日本の研究開発戦略を考える上で参考になるだろう。）

2.3.2 中綱目ごとの比較

(1) 基礎理論（特に並列計算関係：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きている。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。

〈参考文献〉

- [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>

基礎理論（特に並列計算関係：計算モデル、データ構造モデルとアルゴリズム）

国・地域	フェーズ	現状	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	○	→	
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	×	↗	
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：				

(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]

(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）

この項では、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一段と進み研究者・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 やサーバーのための汎用 OS は、ネットワーク接続の一般化や利用高度化に伴い、外部からの悪意を持った侵入などのリスクへの対応、システム管理の効率化などが重要な研究テーマとなっている。この中で仮想マシン（VM）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いる。VM を介すことは、利用者の望む API を保ちながらセキュリティを強化することが容易となること、ハードウェア機器とは切り離して計算環境を提供できることに大きな優位性がある。ことに、ネットワーク上に仮想計算機環境を提供する、いわゆる cloud computing（cloud はインターネットを図示する際に雲として描く習慣から）が注目を集めている。Cloud computing には、ハードウェアの調達・管理を利用者個別に行う必要がないというメリットがあり、大量の計算時間を必要とする場合にはこのメリットが特に大きい。一方、コンピュータ単体の仮想化の場合とは異なる種類の性能上のオーバーヘッド、ネットワーク経由のアクセスが必須であることから来る安全性への不安、競争相手となる低廉なサーバーの高性能化などの中で、今後どこまでその適用範囲を広げられるかは注目されるところである。

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、大きな影響を与えた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 は、2001 年開設以来初めて米国以外の機関であるドイツのマックスプランク研究所所属の Peter Druschel に贈られたが、Druschel も 2005 年までの活動の場は米国であった。

一方、商用の OS としても、マイクロソフト社の Windows のさまざまな版が、合計 90% 程度を占める寡占状態にあり、近年ややシェアを伸ばしているアップル社の Mac OS が 10% 弱、サーバ用を中心に一定のシェアを持つ Linux, SunOS などを含め、米国製システムの独占であるといっていよい。組み込み機器用の OS についても、かつては実行速度や容量の制約から特殊な専用システムを用いることが通例だったところが、ハードウェアの低廉化・高性能化に伴い、PC と同様の多様な機能を持つ汎用 OS をベースにすることが多くなってきており、汎用 OS のトレンドがほぼそのままあてはまる状況である。

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。日本ではオブジェクト指向の研究功績に対して米澤明憲が Dahl-Nygaard 賞を受賞した。

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 が新規開発にあたって最大のシェアを獲得しているが、C# もシェアを伸ばし、Java と肩を並べる程度まで成長してきている。これらはいずれもオブジェクト指向プログラミング言語であり、オブジェクト指向機能は完全に定着したといえる。また、いずれも米国発のプログラミング言語で、よく用いられる処理系も（フリーソフトウェアも含めて）米国中心に開発されたものがほとんどである。

高性能・大容量のハードウェアの低廉化・普及により、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ソフトウェア開発が容易なスクリプト系の言語を用いる場合が多くなってきている。この傾向の中で、JavaScript, Perl, PHP, Python のシェアが大きくなっており、松本行弘の設計による日本発の言語である Ruby の利用拡大も続いている。

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）

国・地域	フェーズ	現状	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

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索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。とりわけ後者の「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、すなわち、高度なアラートや配信を可能とするアルゴリズムやシステム、流れるデータに対するマイニングアルゴリズムに関する研究が盛んに行われている。また、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。ビジネスインテリジェンス (BI) 向けに多くのデータベースアプライアンスがスタートアップしており、そのニーズが窺える。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の新たな課題を生み出し、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。スペースプ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 等のメガサービス企業においては、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。特に Google の動きは依然として印象的であるが、Amazon および Microsoft も盛んに研究開発を進めており、動向を注視する必要があるであろう。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。

【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 アーキテクチャの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であり、Pay-As-You-Go の思想に沿ったあらゆる情報源を対象にしたデータスペース検索技術が、Provenance や確率的問い合わせなどの要素技術の収束点としてもクローズアップされてきた。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であり、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。マルチコア技術やクラウドコンピューティング、大規模 SSD などの新しいプラットフォーム技術に応じたデータベースシステムも模索されている。

【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包含した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。

データベースとデータマイニング

国・地域	フェーズ	現状	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 FAST 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値する。
	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材があり、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会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づけ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 FP 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。

- (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]

(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、ここではこれら 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。

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 [1] や変更管理手法 [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 6 社による、「非機能要求グレード検討会」は、「システム基盤の非機能要求に関する項目一覧」[3] を成果として得ている。

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。特に近年では、ソフトウェアの保守性や多様なニーズを考慮した、プロダクトライン工学の考えに基づき、要求変更を適切かつ効率的に扱う技術が進展している。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 [4] では、その成立から技術開発まで世界をリードしている。そのほかに、価値の概念に着目した要求工学の研究が注目されだしている。

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、上述した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] 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.
- [2] D. Tanabe, K. Uno, K. Akemine, T. Yoshikawa, H. Kaiya, M. Saeki. Supporting Requirements Change Management in Goal Oriented Analysis. Proc. of RE' 08, pp. 3-12,.
- [3] <http://www.nttdata.co.jp/nfr-grade/>
- [4] 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。

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が、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、特に組み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。さらに近年では、特にモデル検査の応用に関して、急速な進展を見せている。たとえば、関西電力（株）を中心とした「モデル検査によるソフトウェアテストの実践研究会」[5] は、ツールの開発・公開や、応用事例の蓄積を進め、またキャッツ（株）は、リアルタイムシステム向けモデル検査ツール UPPAAL [6] の国内販売を開始した。

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 [7] と SMV (Symbolic Model Verifier) [8] や、プログラム検証における SMV [9] 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 [10] における英 B-Core 社の B-Toolkit [11] や仏 ClearSy 社の Atelier B [11]、および形式仕様記述言語 VDM [12] におけるデンマーク IFAD 社の VDMTools [13] 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。加えて、モデル検査の分野に

についても、検証の効率化技術において目立った成果を挙げてきている。

韓国はまだ遅れている。また中国も遅れていたが、モデル検査を中心に今年度において研究成果を急速に増やしており、今後注目される。

〈参考文献〉

[5] <http://www.modelcheck.jp/>

[6] <http://www.uppaal.com/>

[7] G. J. Holzmann. The SPIN model checker: Primer and reference manual. Addison Wesley, 2004.

[8] Edmund M. Clarke, Orna Grumberg, and A. Peled, Model Checking. MIT Press, 1999, CLAE 99: 11.Ex.

[9] J.-R. Abrial. The B-book: assigning programs to meanings. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1996.

[10] <http://www.b-core.com/btoolkit.html>

[11] <http://www.b-core.com/index.html>

[12] http://www.atelierb.societe.com/index_uk.html

[13] C. B. Jones. Systematic Software Development Using VDM (2nd ed.) . Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1990.

[14] <http://www.vdmttools.jp/>

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	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	○	↗	業界標準の概念体系の構築など、一定の進展がみられる。
	産業技術力	△	↗	全般的に遅れているが、上記標準体系を各企業が取り入れようとしている。
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、プロダクトライン工学といった新規分野においても進展している。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おり、価値に基づく要求工学といった新規分野も開拓している。
	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	○	↗	米国と比較して遅れていたが、教育の充実などの努力がみられる。
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。				

(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]

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	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く、ソフトウェア開発技術への発展にもつながりつつある。
	技術開発水準	○	↗	各種プロジェクトが始動し、ツール開発も盛んになりつつある。
	産業技術力	△	↗	従来の VDM に加え、モデル検査の実適用も急速に進展している。
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 SDV 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。他国を引き離している形式仕様記述手法に加え、モデル検査についても進展が見られる。
	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	△	↗	急速に研究成果が生み出されつつある。
	技術開発水準	×	→	まだ遅れているが、研究水準の向上に応じた進展が期待できる。
	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。特に日本では技術開発と実適用が急速に進展し始めており、また中国における研究状況の進展が目立ってきている。				

(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]

(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、ビジネス・ソフトウェアに限らず、第三次産業の生産性向上とイノベーションを目指すサービスサイエンスの研究動向に注目し、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、製造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、サービスサイエンスを数学・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社会経済生産性本部を事務局として「サービス産業生産性協議会」が設立され、文部科学省の公募事業「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（平成 19 年度に 6 大学、20 年度に 7 大学を選定）。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。平成 20 年 4 月に産業技術総合研究所に「サービス工学研究センター」が設置された。世界的に見て多くの研究が情報通信技術や数理科学の応用を中心としている中で、米国 IBM や京都大学等における文化人類学的手法（定性的研究法）の試行が注目される。

日本でサービスサイエンスを推進しているのは日本 IBM、富士通等の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高くない。大学における研究と人材育成は、上記の文科省公募事業に選定された大学が中心となっている。サービスサイエンスに特化した学会は存在しないが、情報処理学会、日本 OR 学会、人工知能学会等の研究会や雑誌特集で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。州政府や病院での公共サービスの質向上への取り組みも成果が報告されている。

欧州では、情報通信関連が新サービスの基盤とされ、テレコム、ソフトウェア、運輸、健康ケア、販売、旅行、金融、保険サービス等が重要な領域とされている。イギリスでは、Oxford 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。オランダでは 2008 年 11 月に Amsterdam Academic Centre for Service Innovation (AMSI) が設立された。北欧でもテレコム、金融等のイノベーションを目指している。

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、北京大学、清華大学、ハルビン工科大学、上海交通大学等で研究・教育が進められ、サービスサイエンス国際会議も 4 回を数えている。国家統計局の統計年報によれば、第三次産業の対 GDP 比は 40%程度である。「世界の工場」と呼ばれる中国では、地方政府が製造業を重視し、業績評価の難しいサービス産業が軽視されているようである。

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。その後、2007 年 5 月に Service Science National Forum (SSNF)、2008 年 9 月に Society of Service Science (SOSS) が設立された。西江大学にサービスサイエンスのコースが設置されているほか、KAIST、浦項工科大学、高麗大学、建国大学などで研究が進んでいる。産業界では、韓国 IBM や SK C&C が支援している。

〈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。
- [7] 吉川弘之、サービス工学序説ーサービスを理論的に扱うための枠組みー、シンセシオロジー, Vol.1, No.2, pp.111-122, 2008 年 4 月。
- [8] 人工知能学会誌、特集：サービスイノベーションと AI その 2、23 巻 6 号、2008 年 11 月。

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	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	文部科学省公募事業「サービスイノベーション人材育成推進プログラム」に選定された 13 大学、産業技術総合研究所サービス工学研究センター、日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所等を中心に研究が進み始めた。
	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。世界的金融危機の誘発により、金融サービスへの評価が落ちた。
欧州	研究水準	◎	↗	イギリス、ドイツ、オランダ、北欧等で研究活動が盛んである。情報通信をサービス・イノベーションの基盤とし、運輸、健康ケア、販売、旅行、金融、保険サービス等に研究投資がなされている。
	技術開発水準	○	↗	EU 各国の研究機関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。
中国	研究水準	○	↗	清華大学、北京大学、ハルビン工科大学、上海交通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。情報システムの研究が多い。
	技術開発水準	△	→	地方政府や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・産業界が連携する組織の設立が始まった。サービスサイエンスのコースや科目を提供する大学が出てきた。独創的研究活動は今後待つ。
	技術開発水準	○	↗	第 3 次産業よりも、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、社会により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、情報通信技術や数理学を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・韓国・インド等では、情報通信システムを活用したサービスサイエンスの研究開発が盛んになっても、一般社会でのヒトへの対面サービスの浸透は遅れるのではないかと。				

(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]

(6) Web 情報システム

WWW（以下 Web）は社会の情報流通・共有の実質的インフラストラクチャに成長し、この周辺に多数の新産業が興り、新ビジネスが展開されている。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、2008 年はさらにそれが継続されている。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 (Ri サーバー ite 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。

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。日本における Web 検索のシェア第一位は Yahoo! である。Yahoo! を追うのは Google であるが、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。

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 が連携、買収などのダイナミックな三つ巴の競争を展開しており、研究水準、技術開発水準、産業技術力とも抜きん出ており、なおかつ、新興勢力も台頭しつつある。例えば、2005 年創業の Powerset は 自然言語による検索、すなわち日常使用している文による質問を可能にする検索サービスを展開し、Google を将来は凌ぐのではないかととも言われた [5]。そして 2008 年 8 月に Powerset は Microsoft によって買収されるなど、Web 情報システムに関する米国のダイナミズムはその勢いを維持している。検索ではないが、Google は Google Map およびそれに関連する Street View のサービ

スを無料提供し、今後その上での新しい（広告）ビジネスを生み出す勢いが見られる。

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少ない状態に留まっている。

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、2007 年に日本に進出し、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。

このようにアジアにおいて Google が優勢になることができていない理由は、Google が Web サービスのローカライゼーション (現地化) を行わないためと思われる。一方、日本の Yahoo!、中国の百度、韓国の NAVER は自国の文化風土に立脚したサービスを展開することにより、その優位性を維持している。

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。まだ主要形が定まっている訳ではないが、Web2.0 の先の Web3.0 とも言うべき次世代 Web プラットフォーム、サービスの動きも垣間見られるようになってきた。これはクラウドコンピューティングの動きにも関連しており、今後のネットワーク OS, Web-OS として情報やサービスの提供、共有、交流、共創のグローバル基盤に繋がるものである。日本はこのようなグローバルな次世代 Web 基盤への貢献、取り組みが弱体であり、OS で米国勢に支配されてしまったような事態が、次世代 Web でも起こることが懸念される。

〈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イ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>

[5] 渡辺弘美: ウェブを変える 10 の破壊的トレンド、ソフトバンククリエイティブ(株)、2008 年 1 月。

Web 情報システム

国・地域	フェーズ	現状	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、新興企業の台頭もあり、技術開発水準は高さが維持されている。
	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) が日本に進出し、日本人向けのサービスを展開し、また中国における Web 検索のシェア第一位を維持するなど、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。NAVER は韓国における Web 検索のシェア第一位を維持している。
	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。				

(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]

(7) マルチメディアシステム

“マルチメディア”は、人と情報システムとの間での情報のやり取りに関わる処理を扱う課題であり、人が最終的にどれだけの恩恵を情報システムからうけることができるかを左右するといっても過言ではない。日本の一部ではマルチメディアというと、90年初頭にはやり、PCにCD-ROMがついたものだったといった古い偏見を聞くこともある。しかしながら、諸外国を含めて広く一般には、情報・通信のハード、ソフトの基盤的技術が大きな進展を見た現在、これからはマルチメディアの時代だとみなされている。

現に、映像を中心とするマルチメディア情報は、情報機器・通信基盤の発展のおかげで、昨今隆盛を極めている。個人がデジタルカメラやビデオカメラで画像や映像を撮影・所有したり、インターネットのFlickrやYouTubeやニコニコ動画などで膨大な数の画像、映像を共有し、そのアーカイブの中から拾って視聴するようになってきた。今やインターネットトラフィックの80%が映像であるという。また、商業映像である放送や映画は、それぞれが完全デジタルへ移行する途上にあり、その制作過程のみならず、ユーザへの配信や劇場での上映までがデジタル化されはじめている。

映像情報は膨大であるため、その管理が課題であり、効率的な検索や要約等が研究課題になってきた。映像はそのままでは単なる信号にすぎないため、検索等の処理をするにしても、言語で書かれた文書を対象とするのとは状況が大きく異なっている。初期から試みられたことは、類似度検索であり、映像から色などに基づく低次の特徴量を取りだし、その特徴量から定義される類似度の大きさに応じた順位づけを行い、候補を抽出することが行われてきた。現在では、さらに内容に立ち入った処理が進み、意味を持つ高次の概念（例えば建物、スポーツ、屋外といったキーワードに相当する）の抽出を行うことで、言語による映像の検索の可能性が模索されている。その場合、人手で正解なデータが付されているコーパスに基づき機械学習に基づく処理が行われる。おおよそ数10から100程度の概念の抽出を自動的に行うが、今のところ、検索結果に対しての精度は低い。

大分類をすれば、マルチメディアの研究課題は次のように分けられる。

1. Multimedia Content Analysis, Processing, Retrieval
2. Multimedia Networking, Systems
3. Multimedia Tools, Applications

1は、前述の検索等の課題である。最近では、単独の映像データベースばかりでなく、インターネット上のFlickr、YouTubeといった映像共有の環境が進み、そのUGC（User Generated Content）を扱う研究も増えている。

2では、マルチメディアのストリーミング、圧縮等のマルチメディアにとってのインフラが課題になる。映像圧縮に関していえば、H.264が既存の標準方式を大きく凌ぐ方式としてその実用化が進められた。

3では、マルチメディアの絞り込んだ応用や課題が取り上げられる。マルチメディアのプレゼンテーション、インターフェイスや、携帯端末でのマルチメディアが扱われる。処理の対象には、位置情報等の付加的な情報まで含まれ、

映像と音響にとどまらない。

さらに、ごく最近の傾向として、人の体験を対象とする研究も増えつつある。スマートオフィス、スマートホーム、ライフログなどもその中に含まれる。マルチメディアの代表的な会議では、新たに Human Centered Computing という領域が設けられた。また、同会議では、マルチメディア技術を用いたアートも取り上げられ、注目を集めるようになった。

マルチメディアの研究開発は、近年は、ヨーロッパ、アジアで盛んであるように見受けられる。EU では、積極的な取り組みが行われており、European Commission の Framework Programme 7 では、情報通信は引き続き重要課題の一つとしてとり挙げられている。その中の具体的な課題の一つとして、Networked Media が推進され、研究開発へ 90 億ユーロもの投資が行われている。なお、フランス、オランダでは、国を挙げて放送映像のアーカイブが構築されている。マルチメディアの主要会議の一つであり、採択が厳しい ACM Multimedia2008 における発表論文（long、short の合計）の分布の主要なところを記すと、EU 24（UK7、ドイツ 6、フランス 3 他）アジア 63（中国 26、台湾 9、香港 8、シンガポール 8、日本 7 他）、米国 35 である。学術的な発表の場で、中国の躍進が著しい。日本は、これまで映像技術で長じており、その実用化で進んでいる。しかし、昨今、日本の企業研究所から学術的な会議への参加は全般に減少し、論文は大学が中心である。中国では、マイクロソフトリサーチアジアから多数の論文が発表され、その存在感が大きい。しかし、取りくむ課題の多様性に欠ける傾向がある。シンガポールでは、メディア技術を国が推進する 3 つの科学技術の一つにとりあげるまでして、取り組みを進めている。

米国 NIST（標準技術局）が 2001 年より TRECVID という映像解析技術評価のワークショップを毎年開催している。そこでは 100 時間を超える放送映像が方式評価のために提供され、シーンカットの検出といった比較的低次の処理から概念検出にいたるまでタスクが設定され、世界中から参加する研究機関の方式の相互比較が行われる。

マルチメディア関連の国際会議としては、ACM Multimedia、IEEE ICME（Int. Conf. Multimedia & Expo）、CIVR（Int. Conf. Image and Video Retrieval）、PCM（Pacific Rim Conf. Multimedia）、MMM（Multi Media Modeling）などの複数の会合が毎年開かれている。新しいものを加えるともっと多い。

マルチメディアシステム

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	映像技術に関しては、伝統もあり強い。映像解析関係では、大学を中心に研究が行われている。マルチメディア全般に関しては、企業の研究所でも研究が進められているが、国際的な学会会議では、十分に見えない。
	技術開発水準	◎	→	AV 機器、デジカメ、モバイル機器などハードの観点からの技術開発水準は、従来どおり、高い。(デジカメにも顔検出、笑顔検出などの新機能まで組み込んでいる)
	産業技術力	○	→	ハードの観点からの産業力は高いものの、マルチメディアを基にした新しいサービスの展開に弱い。
米国	研究水準	◎+	→	コロンビア大学、カーネギーメロン大学を始めとした大学、マイクロソフトリサーチ、IBM、FXPAL 等の企業研究所の活動とも学術的な技術レベルは高い。
	技術開発水準	◎	→	NIST での TRECVID は、世界的な評価ワークショップとして機能し、映像解析分野の先導役を果たしている。
	産業技術力	○	→	新しい広告手法など、マルチメディアを利用した新しいサービス展開の力がある。
欧州	研究水準	◎	↗	EU 内の多くの組織で取り組みが行われており、研究活動の多様性に優れている。この分野への重点的な振興もそれを推している。
	技術開発水準	◎	→	ノキアなどのモバイル関係、フィリップスなどの映像関係と技術水準も高い。
	産業技術力	○	↗	マルチメディアとアートの融合を主導し、新産業の創出にも力を入れているように思われる。
中国	研究水準	◎	↗	国際的な学会会議での論文が急増し、存在感が大きくなった。ただし、マイクロソフトリサーチアジア（北京）との連携のものが多く、特定の課題に集中し、多様性に欠けるところがある。
	技術開発水準	◎	↗	マイクロソフト、インテル、IBM といった企業の研究所が活躍し、技術開発水準は高まっている。
	産業技術力	△	→	不明。
韓国	研究水準	△	→	存在感が薄い。
	技術開発水準	○	→	サムスン 1 社がハード関係で目立つが、それ以外に目立つものがない。
	産業技術力	△	→	不明。
全体コメント： マルチメディア応用については、映像、音響以外のデータへの注目が高まり、Human Centered Computing へつながる様々な課題についての取り組みが活性化しており、モバイル機器などの情報環境の変化に対応するマルチメディアへの取り組みが進んでいる。マルチメディアのコンテンツ処理に関していえば、高次処理へ向けての研究活動が活発化しており、TRECVID という評価ワークショップがその促進の役目も果たしている。なお、映像の検索に関しては、10 年以上にわたり研究が進められてきたが、具体的な実用化に至っていない。今後、具体的なサービスへつながる試みが期待される。マルチメディア技術を用いたアートへの取り組みも注目を集めるようになり、新産業創出の期待を感じさせる。				

(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]

(8) 自然言語処理

Web 中のテキスト量の急激な増大、多様な情報機器との自然なインターフェイス、グローバル化に対応する多言語情報処理など、自然言語処理技術を組み込んだ情報処理システムへの要望が急激に高まっている。この急激な要望の高まりに応じて、耐性が高く効率もよい言語処理技術が開発され、これまでのアカデミックな研究から離陸し、実際の応用システムに組み込まれる現実的な技術となってきている。本項目では、次世代のウェブ技術（セマンティック・ウェブ）やデジタルライブラリ技術など、知識社会を支える基盤の技術としての自然言語処理という観点から、各国の技術動向を比較した。

言語は、国や社会のあり様と密接に関係している。このため、必要とされる言語処理技術も国家目的や国の産業政策に依存し、他の技術に比べて言語処理技術への取り組みは国や地域の差が大きい。

この傾向が特に顕著なのは、機械翻訳に代表される多言語処理技術への取り組みである。唯一のスーパーパワーとしての米国では、国家安全政策との関連もあって、Web 中に存在するすべての情報へのアクセスとその有効利用を目指した研究が大規模な国家プロジェクト（DARPA GALE - Global Autonomous Language Exploitation）でとり組まれている。特に過去 5 年間、アラブ語、中国語への関心が高く、中英、英中、アラブ語・英語の機械翻訳への投資が大きく、目覚ましい成果をあげてきている。

また、ヨーロッパも多言語社会として域内の言語を対象とした言語処理技術への関心が高いが、過去の機械翻訳研究の経験から、現時点では機械翻訳技術そのものへの関心はあまり高くなく、むしろ、多言語処理技術を支えるためのインフラストラクチャとしての言語資源（コーパスや機械辞書）の構築とその標準化に集中した投資を行っている。

中国では、米国の中英・英中の機械翻訳への関心の高まりに歩調を合わせて、機械翻訳への関心が高い。また、世界的な中国語処理への関心の高さから、マイクロソフト、グーグル、日本のメーカーなどの中国研究所が自然言語処理（すなわち、中国語処理）の研究をコア・トピックの一つとしていることから、非常に多くの研究グループがこの分野に集中しており、急速に研究レベルを上げている。

これに対して、日本は、日本からの情報発信を促進するために 1980 年代から 90 年代初頭までに機械翻訳に多大な資源を投入した。この投資の結果、言語処理技術の研究水準は向上し、その高い水準は現在でも維持されているが、現在では日本語以外の言語への関心は薄くなっている。このことから、日本では、ウェブ中のテキストからの評判分析や高度検索といったテキストマイニング技術に関心が集中している。ただ、中国、台湾、インド、韓国などアジア諸国の経済発展に伴って、アジア圏内での情報流通の向上への関心が高まりつつあり、科学振興調整費による日中機械翻訳の研究が開始されるなど、アジア圏の言語を対象とする多言語処理への関心も一部復活しつつある。

テキストマイニング技術では、これまでの技術がデータマイニング技術のテキストへの適用という、量の技術であったのに対して、言語の構造を取り扱う

自然言語技術を適用することで、量と質の両面を取り扱う技術へと発展しつつある。日本の研究者が現在取り組むテキストマイニング技術はこの種の技術(情報抽出、関係抽出、感情抽出、評判抽出などと呼ばれる)であり、米国の Gale プロジェクトでも積極的に取り組まれている。

過去10年間、大量の言語データが比較的簡単に入手できるようになったこと、また、計算機の処理能力の向上と大量データからの機械学習技術の研究の目覚ましい進展があったことから、統計的手法による言語処理技術が急速に進展した。ただ、この統計的な言語処理技術の限界も比較的明確に意識されるようになり、米国を中心に活発化した統計的な機械翻訳の研究も曲がり角に差し掛かっているとの認識も強く、「意味」を取り扱うセマンティック・コンピューティングへの志向が高まりつつある。

単一の言語を対象としたテキストマイニング技術では、この「意味」への関心が高く、この技術を人工知能研究からのオントロジー技術と結びつけることで、次世代のセマンティック・ウェブやデジタルライブラリの技術を構築しようとする動きが顕在化しつつある。韓国 KAIST のセマンティック・ウェブ研究センターやドイツ・ザール大学 DFKI、生命科学の文献を対象とする英国マンチェスター大学の国立テキストマイニングセンター(NACTEM)などは、この方向の技術開発を組織的に取り組む試みとして注目される。また、テキストマイニングではないが、米国スタンフォード大学の BMIR センターやニューヨーク大学の国立バイオ・オントロジーセンターなども、同様な技術開発を一部にふくむものとなっている。

<参考文献>

- (1) DARPA GALE: <http://www.darpa.mil/ipto/programs/gale/gale.asp>
- (2) 欧州 FlareNet: <http://www.ilc.cnr.it/flarenet/>
- (3) 韓国 SRC: <http://swrc.kaist.ac.kr/eng/swrc.asp?submenu=2>
- (4) 英国 NACTEM: <http://www.nactem.ac.uk/>
- (5) 米国 BMIR: <http://bmir.stanford.edu/>
- (6) 米国バイオ・オントロジーセンター <http://bioontology.org/about.html>

自然言語処理

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↘	多言語処理では後れをとるが、1980年代の投資効果が維持され、研究グループの質、量ともに世界の最高水準を維持している。ただ、長期にわたる研究目標が希薄で、競争力を失いつつある。
	技術開発水準	○	→	抽象的な理論構築よりも具体的なシステム構築を行うのが得意で、水準は高い。ただ、米国のベンチャーを中心とした迅速な技術開発と比べるとスピード感がない。
	産業技術力	○	→	グーグル、マイクロソフトのように、言語処理に大きな資本を投入できる企業がない。また、ヨーロッパのようなこの分野の SMC に対する補助も少ない。
米国	研究水準	◎	→	多言語処理、機械翻訳、情報分析に大きなプロジェクトをもち、研究者人口も格段に多い。
	技術開発水準	◎	→	ウェブ検索に大きな資本を投入する企業が次世代技術のコアとして言語処理に大きな資本を投入。また、小規模な企業でも、優秀な技術者を抱えて迅速な技術開発を行う。
	産業技術力	◎	→	米国製というよりも、米国発の多国籍企業が市場を寡占している。また、小規模な企業で言語処理に特化した製品をもつ企業も多い。
欧州	研究水準	◎	→	地域の特性を生かして多言語処理の研究水準はたかい。また、理論言語学と言語処理を結びつける理論の研究では、米国を凌駕する面もある。
	技術開発水準	○	→	理論への偏りが強く、技術に結びつかない面がある。
	産業技術力	◎	→	グーグル、マイクロソフトのような世界を支配するような産業技術力はない。ただ、米国と並んで出版業が強く、言語処理技術を組み込んだ新たな出版形態の創出、各国語を対象とする技術をもった SMC も多い。
中国	研究水準	○	↗	機械翻訳、中国語処理では世界水準に達したグループも多い。ただ、それ以外の言語処理技術（情報抽出、関係抽出など）では、米国・日本・ヨーロッパの技術水準と比べると劣る。
	技術開発水準	○	↗	米国・日本の企業の研究所が中国にあり、そこで技術開発を行っている。一部では、本体企業の研究所の力を超えた技術開発を行うところもある。
	産業技術力	○	↗	中国語処理を使った検索エンジンなど、独自技術の産業化も進む。日本企業よりもスピード感がある技術開発を行う。
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	○	→	韓国語処理を取り込んだ検索エンジン、韓国語・英語の機械翻訳システムなど産業化する技術はある。
全体コメント：言語処理技術は、国ごとの特殊性が強く、比較が難しい面がある。ただ、地域や国を超えた、影響力のある研究・技術開発を行うことができるのは米国、日本、ヨーロッパで、その中でも米国がリードしている。米国、ヨーロッパが言語処理技術に関する国家戦略を持つのにに対して、日本がそれを欠いていることから、日本の研究水準の維持が困難になりつつある。アジア圏の言語をとりあつかう技術の研究・開発に焦点を当てるなどの戦略が必要。				

- (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]

(9) 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 ISC (International Supercomputing Conference) と 11 月に開催される SC (Super Computing) 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、米国ロスアラモス国立研究所に設置されている IBM Roadrunner であり、1PFLOPS 以上の LINPACK スコアを達成した。また、日本では日立のクラスタが 28 位で最高である。(2008 年 11 月の Top500 リストより)

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、約 60% 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 30% 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。中国が日本とシェアで肩をならべるまでになった。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。

Top500 とは別に、HPC チャレンジベンチマークは、新たにクラス 2 というエレガントに並列プログラムを書くという分野が創設され注目を集めている。今回は、X10、Chapel、UPC で記述されたプログラムが表彰された。また、従来からのクラス 1 では、Cray の XT-5、IBM BlueGene/P が部門別トップをとった。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、2～3 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。産業技術力の観点からは、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。2008 年には、各社から次世代スーパーコンピュータの前触れとなるシステムが設置され、着実な進歩を示した。

【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した。

また、2011 年から 2012 年には、複数の 10 ～ 20PFLOPS のスーパーコンピュータの納入が検討されている。

【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。2008 年 11 月の Top500 リストでは、曙光社の Dawing 5000A が 10 位にランクされるまでになった。

【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。

【インド】財力のある財閥が先んじて導入し、国内に広めるという動きがある。

スーパーコンピュータ

国・地域	フェーズ	現状	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	○	↗	
	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 社がペタフロップスを達成した。技術開発の成果が広く普及し始めてきた。
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。				

(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]

(10) 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 (IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid)、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実施し、2008 年 6 月より稼動している。

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、サーバー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。2008 年には、より高速な 40Gbps のインターコネクトが市場に投入され使われ始めた。

【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、今後が注目される。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 とサーバー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。

2008 年には、大型のクラスタシステムを稼動させることができる技術力を備えてきた。

【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、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。

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	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。大学とメーカーの協同プロジェクトにより、研究が活発となった。
	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実施し、2008 年 6 月より稼働している。
	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。40Gbps のインターコネクト技術が市場に投入された。
	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。大規模システム技術が確立し始めている。
	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	△	→	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。				

(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]

(11) チップマルチプロセッサ

現在、サーバー用・PC 用・組み込み用などあらゆる分野で、多くのマイクロプロセッサがオンチップのマルチプロセッサ技術を採用するようになってきている。これは、単一プロセッサでクロック周波数をあげたり命令レベル並列性を追求したりするよりも、マルチプロセッサ化による中粒度以上の並列化のほうが、性能・電力・製作コストのバランスの点で優ることが大きな理由である。今以上にクロック周波数をあげることが電力・発熱の点で困難になり、さらに命令レベルの並列化・投機などの技術が飽和しつつある現在、チップマルチプロセッサの技術はますます重要なものとなった。

これまでのチップマルチプロセッサの研究開発は、比較的小規模な並列性を前提としたものが多かった。レジスタファイル間のリングバスによる通信同期方式、スヌープバスによる共有メモリの実現、スレッド単位の投機技術などがこれである。近年では、これらの技術を前提とした商用プロセッサの開発とともに、数百プロセッサ規模以上の大規模並列処理を行うチップの研究も進められている。この動きとともに、ソフトウェアの重要性が改めて見直され、並列性の記述や自動並列化、最適化などについて、改めて国際会議などの場で議論がなされている。

米国では、早く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を維持し続けている。また、汎用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よって生産されており、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。さらに、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技術にいち早く取り組むとともに、より先進的なソフトウェア技術に関する産学連携も盛んである。

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 を基盤に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多くの先進的な仕事があり、各社とも優れた製品を市場に出している。しかし、初期においては、それを商業的な成功に結び付けられなかった。これには、プロセッサを支援するソフトウェア技術の不足、国際的デファクトへの努力不足、人材不足などが理由として考えられる。一方で、組み込み型のチップマルチプロセッサはこれから日本の技術が活躍する場が大きく、ますます大切となる分野である。性能・電力に加えて信頼性・安全性を確保するなど、課題も多い。車載や医療用など応用分野も日本の重要分野である。このような状況下、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、産業界と学会が一体となって取り組んでいくことが喫緊の課題となっている。

【日本】1990 年代前半から先進的な研究開発が行われた。現在も引き続き活発に高度な研究が行われている。自動車への応用などを前提として、技術開発が活発に行われている。製品開発に注力し、技術力も高い水準にあり、独自のアーキテクチャで VLSI チップを製作・販売することができる。ただし、カスタム向けの発想から抜けられず、はじめからデファクトをめざす ARM 社と Intel 社に大きく市場を支配される結果を招いている。これからも市場が広がる分野ではあるが、市場開拓とともに発想の転換をはかり、国際的なデファクトをめざす必要がある。また、研究者の層が米国に比べて薄く、産学連携も十分ではなく、国際交流も十分でない点が不安材料である。

【米国】代表的な大学や IBM 社、Intel 社、SUN 社などで主要研究テーマとなっており、サーバー用、PC 用、組み込みなどすべての分野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く、いわゆる X86 系マルチコアとして国際的にデファクト化している。サーバーや PC 用のチップマルチプロセッサの高いシェアをもっており、技術力も最高水準である。最近では、Microsoft、Google などのソフトウェア会社が熱心に参入しており、ソフトウェアにおいても大きな成果をあげている。

【欧州】少数の優れた拠点で集約的に展開しているのが欧州の現状であり、スペインのカタルーニャ工科大学、スウェーデンのウプサラ大学等で、アーキテクチャの研究が盛んに行われている。産業界では、ARM 社が組込システム向けでリードしているほか、通信機器などの分野で組み込みプロセッサをチップマルチプロセッサ化する動きがある。全体として、高い技術はあるが、米国ほどの全面的な展開に成功しているわけではない。

【中国】従来研究レベルは低かったが、国際会議での論文数は増えており、研究者層も厚くなりつつあるが、中国独自のチップマルチプロセッサアーキテクチャはいまだ知られていない。しかし、半導体関連技術は急速に向上中であり、キャッチアップから独自技術の開発への転換までは遠くないと予想される。

【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。半導体の技術力はあるが、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。アーキテクチャおよびソフトウェア技術は独自のものを産み出すレベルにはないと考えられるが、戦略の転換によって本分野に強力に参入する可能性はある。

チップマルチプロセッサ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	先進的な研究開発が行われ、現在も引き続き活発に研究が行われているが、カスタマ指向が強すぎて国際的デファクトをめざす方向性がない。研究者の層が薄く、技術水準の高さに比べて成果は局所的なものにとどまっている。
	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が、汎用技術としては十分とは言えない。
	産業技術力	○	→	カスタマ向けの発想から抜けられず、はじめからデファクトをめざす ARM 社と Intel 社に大きく市場を支配される結果を招いている。これからも市場が広がる分野ではあるが、市場開拓とともに発想の転換をはかり、国際的なデファクトをめざす必要がある。
米国	研究水準	◎	↗	代表的な大学や IBM 社、Intel 社、SUN 社などで主要研究テーマとなっており、サーバー用、PC 用、組み込みなどなどすべての分野で研究が盛んに行われている。
	技術開発水準	◎	↗	汎用では Intel 社、AMD 社の技術開発力が圧倒的に強く、いわゆる X86 系メニーコアとして国際的にデファクト化している。最近では、Microsoft、Google などのソフトウェア会社が熱心に参入しており、ソフトウェアにおいても大きな成果をあげている。
	産業技術力	◎	↗	サーバー向け、PC 向け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。組み込み分野も強い。
欧州	研究水準	◎	↗	スペインのカタルーニャ工科大学、スウェーデンのウプサラ大学等で、アーキテクチャの研究が盛んに行われている。このように、少数の優れた拠点で集約的に展開しているのが欧州の現状である。
	技術開発水準	○	→	組込システム向けが強いほか、通信機器などの分野で組み込みプロセッサをチップマルチプロセッサ化する動きがある。全体として、高い技術はあるが、米国ほどの全面的な展開に成功しているわけではない。
	産業技術力	○	→	ARM 社が組込システム向けでリードしている。
中国	研究水準	○	↗	従来研究レベルは低かったが、国際会議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アーキテクチャはいまだ知られていない。半導体関連技術は上昇中である。
	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にあるが、キャッチアップから独自技術の開発への転換までは遠くない。
韓国	研究水準	△	→	今のところ、見るべき物はない。
	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	△	→	アーキテクチャおよびソフトウェア技術は独自のものを産み出すレベルにはないと考えられるが、戦略の転換によって本分野に強力に参入する可能性はある。
全体コメント：日本には、チップマルチプロセッサ分野で多くの先進的な仕事があり、各社も優れた製品を市場に出している。しかし、初期においては、それを商業的な成功に結び付けられなかった。これには、プロセッサを支援するソフトウェア技術の不足、国際的デファクトへの努力不足、人材不足などが理由として考えられる。一方で、組み込み型のチップマルチプロセッサはこれから日本の技術が活躍する場が大きく、これからますます大切となる分野である。性能・電力に加えて信頼性・安全性を確保するなど、課題も多い。車載や医療用など応用分野も日本の重要分野である。このような状況下、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、産業界と学会の全体ではかることが喫緊の課題となっている。カスタマ主義を改めデファクトをめざすこと、産学連携を一層強化することなど、発想・方法の転換をはかることが急務である。				

(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]

(12) 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、ハードウェアをプログラム可能にして、出荷後に最終設計ができるようにしたものである。特に、利用時にプログラムできるダイナミックリコンフィギュラブルシステムが研究開発の主流となっている。現在、FPGA (Field Programmable Gate Array) が主力だが、実行時に高速な書き換えのできるアーキテクチャに注目が集まっている。

日本の研究開発水準は高く、学会活動も盛んである。国の事業として産学連携の流れをしっかりとつけ、国際標準を得るような成果をあげることが必要である。産業的には、米国が基本特許および産業化の面で圧倒的な力があつたが、近年は日本企業も健闘をしている。ただし、本分野に携わる技術者の数は多いとはいえ、いくつかのプロジェクトが廃止になるなど、基盤が強力であるとは言い難い。

【日本】研究面では、国際会議での研究発表が盛んで、いくつかの研究は高く評価されている。国内でも、電子情報通信学会リコンフィギュラブルシステム研究会を中心に研究発表、論文誌特集号の編集など、活発な活動が進められている。

産業界では、NEC エレクトロニクスによる XBridge の発表があつたほか、日立、パナソニック、東芝、三洋などによって、粗粒度リコンフィギュラブルシステムが開発され、一部商用化されている。細粒度は、後に述べる米国の 2 社に集約されているものの、携帯端末用や車載用として日本メーカーによるリコンフィギュラブル VLSI は大いに期待が持てる。宇宙や深海での利用についても、すでに実験がなされている。

【米国】デバイスから応用まで、網羅的で高い水準の研究がなされている。特に細粒度のリコンフィギュラブル VLSI では、Xilinx 社と Altera 社が、世界シェアの 9 割以上を占めており、デファクト化によりこの数字は揺らぎそうにないのが現状である。一方で、両社のもつ基本特許の期限が切れたため、新しいベンチャー企業が起きている。FPGA については、さまざまな応用分野が開拓されており、スーパーコンピュータ、通信、信号処理についても、幅広く用いられている。

【欧州】基礎研究のレベルが高く、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。英国 Imperial College が最も進んでおり、IMEC の研究所なども有力である。なお、CAD 環境や実用ツール面では、米国に一步譲る。ケンブリッジ大学で HANDEL C による FPGA 設計システムが開発されている。

【中国】研究水準は低かったが、応用分野で研究者は増えている。従って、応用技術力は向上しており、基礎に転じると強力な存在になる可能性がある。

【韓国】応用中心。Samsung などの半導体企業は大きな関心を示していない。

リコンフィギュラブルシステム

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	国際会議での研究発表が盛んで、いくつかの研究は高く評価されている。国内でも、電子情報通信学会リコンフィギュラブルシステム研究会を中心に研究発表、論文誌特集号の編集など、活発な活動が進められている。
	技術開発水準	◎	↘	近年は日本企業も健闘をしてきた。ただし、本分野に携わる技術者の数は多いとはいえず、いくつかのプロジェクトが廃止になるなど、基盤が強力であるとは言い難い。
	産業技術力	◎	↗	NEC エレクトロニクスによる XBridge の発表があったほか、日立、パナソニック、東芝、三洋などによって、粗粒度リコンフィギュラブルシステムが開発され、一部商用化されている。細粒度は、後に述べる米国の 2 社に集約されているものの、携帯端末用や車載用として日本メーカーによるリコンフィギュラブル VLSI は大いに期待が持てる。宇宙や深海での利用についても、すでに実験がなされている。
米国	研究水準	◎	→	デバイスから応用まで、網羅的で高い水準の研究がなされている。
	技術開発水準	◎	→	細粒度のリコンフィギュラブル VLSI で最高水準を保っている他、さまざまな応用分野が開拓されており、スーパーコンピュータ、通信、信号処理についても、幅広く用いられている。
	産業技術力	◎	→	細粒度のリコンフィギュラブル VLSI では、Xilinx 社と Altera 社が、世界シェアの 9 割以上を占めており、デファクト化によりこの数字は揺らぎそうにないのが現状である。一方で、両社のもつ基本特許の期限が切れたため、新しいベンチャー企業が起きている。さまざまな応用分野で商用化されつつある。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究のレベルが高く、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。英国 Imperial College が最も進んでおり、IMEC の研究所なども有力である。CAD 環境や実用ツール面では、米国に一步譲る。FPGA を設計するシステムは、ケンブリッジ大学で HANDEL C による FPGA 設計システムが開発されている。
	技術開発水準	○	↘	実用ツール面（CAD など）では、米国に一步譲る。
	産業技術力	○	↘	FPGA を含みリコンフィギュラブルな VLSI を製造していないが、設計などの技術力は高い。
中国	研究水準	○	↗	研究水準は低かったが、応用分野で研究者は増えている。従って、応用技術力は向上しており、基礎に転じると強力な存在になる可能性がある。
	技術開発水準	△	→	システムそのものを開発する力はないが、応用技術力は高まっており、基礎に転じる可能性を秘めている。
	産業技術力	△	→	産業技術としては発展途上である。
韓国	研究水準	○	→	応用中心で、システムとしては未熟。
	技術開発水準	△	→	半導体企業は大きな関心を示していないが、システムに転じれば強力な存在になると考えられる。
	産業技術力	△	→	Samsung などの半導体企業は大きな関心を示していない。
全体コメント：日本の研究開発水準は高く、学会活動も盛んである。国の事業として産学連携の流れをしっかりとつけ、国際標準を得るような成果をあげることが必要である。産業的には、米国が基本特許および産業化の面で圧倒的な力があつたが、近年は日本企業も健闘をしてきた。ただし、本分野に携わる技術者の数は多いとはいえず、いくつかのプロジェクトが廃止になるなど、基盤が強力であるとは言い難い。すぐに対策が必要な分野である。				

(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]

(13) 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、情報社会の基盤である情報システム、ネットワーク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、銀行システムなど、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。reliability と availability が数学的に定義された指標として存在するが、ユーザ視点からの適切な計測法、評価法がないため、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なのが現状である。

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。

最近欧州では、情報システム・ネットワークが技術の進歩、社会・環境の変化に遭遇してもなおディペンダビリティを保持する性質を *resiliency* と呼び、時間の経過によって生じるリスクに対するディペンダビリティの研究プロジェクトが EC のファンドで進められている。

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) で発表されている。そのほかアジア・太平洋地域の Pacific-Rim Symposium on Dependable Computing (PRDC)、欧州地域の European Dependable Computing Conference (EDCC)、中南米地域の Latin American Symposium on Dependable Computing (LADC) がそれぞれ時期をずらして開催されている。

ディペンダブル情報システム

国・地域	フェーズ	現状	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／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]

(14) 省電力情報処理技術

省電力情報処理技術は、モバイル情報機器のバッテリー寿命を延ばすこと、熱によるデバイスの劣化や空調費の高騰を防ぐこと、電力使用量の低減、エネルギー消費の低減などを目的としてさかんに研究開発されている。スーパーコンピュータから組み込み VLSI まで、さまざまな情報処理機器において、省電力情報処理技術が重要になっている。

省電力情報処理技術は、情報機器がユビキタス化を始める 1995 年頃から研究開発が進んだ。DVS (Dynamic Voltage Scaling) に代表される電圧制御技術、省電力素子、クロックゲーティング、使わない機能の停止など、さまざまな技術が定着してきている。

【日本】学会などで研究発表が盛んであり、深い議論がなされている。デバイス、回路は国際的に見ても最高水準にあり、アーキテクチャも盛んであるが米国には及ばない。ソフトウェアはさらに今一步の感がある。個々の研究サイトは優れており、問題は研究従事者が十分な数に達していないことにあると考えられる。さらに、デバイス、アーキテクチャ、ソフトウェアを横断するような研究開発力に乏しい。技術開発においてもデバイス・回路は一流だが、アーキテクチャはあまりやられていない。データセンター、スーパーコンピュータなどでは、省電力化研究でも優れたものがある。携帯電話などでは、産業のガラパゴス化を指摘する声もあり、世界標準をめざす動きが必要といえる。

【米国】デバイス、回路、アーキテクチャ、ソフトウェアまで広範に研究が進められており、世界トップといえる。特にユビキタス系やセンサネット系に強い。産業的にも、デバイス、回路、アーキテクチャ、ソフトウェアまで、全般的に最も強力である。応用分野についても、Google のデータサーバなど、優れた技術が開発されており、複数サイトの協調などの動きも活発である。

【欧州】デバイスや回路は中程度の研究レベル。アーキテクチャについては、スペインなどで盛んに研究されているが、拠点は少なく、連携の動きも見られない。メーカーは米国・日本に比べると弱い、組み込み向けで成果をあげている。NOKIA、Ericsson などモバイル分野が中心。

【中国】省電力情報処理については、今のところあまりやられていないように見える。製品も目に見えるものに乏しい。

【韓国】回路からアーキテクチャまで、ソウル大学を中心に、優れた研究がなされている。デバイス技術については、Samsung が注目されるが、産業界にはアーキテクチャ技術に参入する意欲が乏しいように見受けられる。

省電力情報処理技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	学会などで発表が盛んであり、深い議論がなされている。デバイス、回路は国際的に見ても最高水準にあり、アーキテクチャも盛んであるが米国には及ばない。ソフトウェアはさらに今一步の感がある。個々の研究サイトは優れており、問題は研究従事者が十分な数に達していないことにあると考えられる。さらに、デバイス、アーキテクチャ、ソフトウェアを横断するような研究開発力に乏しい。
	技術開発水準	○	→	技術開発においてもデバイス・回路は一流だが、アーキテクチャはあまりやられていない。
	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。データセンター、スーパーコンピュータなどでも優れたものがある。携帯電話など、産業のガラパゴス化を指摘する声もあり、世界標準をめざす動きが必要といえる。
米国	研究水準	◎	→	デバイス、回路、アーキテクチャ、ソフトウェアまで広範に研究が進められており、世界トップといえる。特にユビキタス系やセンサネット系に強い。
	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	◎	→	デバイス、回路、アーキテクチャ、ソフトウェアまで、全般的に最も強力である。応用分野についても、Google のデータサーバなど、優れた技術が開発されており、複数サイトの協調などの動きも活発である。
欧州	研究水準	○	→	デバイスや回路は中程度の研究レベル。アーキテクチャについては、スペインなどで盛んに研究されているが、拠点は少なく、連携の動きも見られない。
	技術開発水準	○	→	米国・日本に比べると弱い、組み込み向けで成果をあげている。
	産業技術力	○	↗	NOKIA、Ericsson などモバイル分野が中心。
中国	研究水準	△	→	今のところあまりやられていない。
	技術開発水準	△	→	今のところあまりやられていない。
	産業技術力	△	→	目に見えるものに乏しい。
韓国	研究水準	○	↗	回路からアーキテクチャまで、ソウル大学を中心に、優れた研究がなされている。
	技術開発水準	△	→	デバイス技術については、Samsung が注目されるが、アーキテクチャ技術やソフトウェア技術には目立ったものが見受けられない。
	産業技術力	○	→	デバイス技術については、Samsung が注目されるが、産業界にはアーキテクチャ技術に参入する意欲が乏しいように見受けられる。
全体コメント：省電力情報処理技術は、モバイル情報機器のバッテリー寿命を延ばすこと、熱によるデバイスの劣化や空調費の高騰を防ぐこと、電力使用量の低減、エネルギー消費の低減などを目的としてさかんに研究開発されている。スーパーコンピュータから組み込み VLSI まで、さまざまな情報処理機器において、省電力情報処理技術が重要になっている。今後は、さまざまな要素技術を改良・実用化するとともに、デバイス、アーキテクチャ、ソフトウェアのバランスをとりながら最適な省電力を行う技術が重要となる。				

(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レベルが高い。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、ID 連携、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。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。ただし、日本においてホログラムの光学的特性を測定する手法の開発・標準化に向けた検討が開始されていたり、欧米において PUF (Physical Unclonable Function) の実用化に向けた開発が進展していたりするなど、人工物認証の今後の動向が注目される。

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びつつある。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、経済学、心理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（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）

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。また、推奨暗号リスト策定から数年が経過し、暗号技術に対する解析・攻撃技術の高度化や、新たな暗号技術の開発が進展していることから 2012 年度を目途にリストを改定するための検討も行っている [14]。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} 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。2009 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。日本でも 2012 年度を目途に推奨暗号リストを更新する予定 [14] であり、情報セキュリティ基盤技術の評価能力は高い。

一方、ID 連携、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。産業的にも、自動車の電子鍵などに採用されている暗号方式の 1 つである KeeLoq や、非接触式 IC カード MiFare に採用されている暗号方式である CRYPTO1 のアルゴリズムが暴かれ、それにより解読方法 [10-13] が見付き問題になっており、アルゴリズムを秘匿することによる安全対策の限界が再認識されつつある。

これら暗号基盤技術については、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。

〈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](http://csrc.nist.gov/CryptoToolkit/aes/round2/r2report.pdf) 2000.10
- [2] CRYPTREC, [http : //www.cryptrec.jp/](http://www.cryptrec.jp/)
- [3] NESSIE, [http : //www.cryptonessie.org/](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](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](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 Canni`ere and F. Mendel. In Rump Session of Fast Software Encryption (FSE07) , [http : //fse2007.uni.lu/slides/rump/](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
- [10] A. Bogdanov “Attacks on the KeeLoq Block Cipher and Authentication Systems.” In 3rd Conference on RFID Security, <http://rfidsec07.etsit.uma.es/slides/papers/paper-22.pdf> 2007.07
- [11] N. T. Courtois, G. V. Bard and D. Wagner “Algebraic and Slide Attacks on KeeLoq” In Proc of Fast Software Encryption (FSE08) , pp. 97-115, 2008.02
- [12] S. Indesteege, N. Keller, O. Dunkelman, E. Biham and B. Preneel, ” A Practical Attack on KeeLoq.” In Proc. of Eurocrypt 2008, pp.1-18, 2008.05
- [13] N. T. Courtois, N. Karsten and O. Sean “Algebraic Attacks on the Crypto-1 Stream Cipher in MiFare Classic and Oyster Cards.” Cryptology ePrint Archive. <http://eprint.iacr.org/2008/166> 2008.04
- [14] “電子政府推奨暗号リストの改訂に関する骨子（案）,” <http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=Pcm1010&BID=145207347>

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	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、ETC 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、PC、OS、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	△	↗	
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]

(2) 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）

【日本】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技術の研究開発が活発に行われているほか、国内はもとより、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、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。セキュリティ評価に関する研究については、生体認証同様に低調である（わが国だけでなく世界的にも同様の傾向となっている）ものの、ホログラムに関しては光学的特性を測定する手法の開発・標準化に向けた検討が産総研を中心に進められており、今後セキュリティ評価手法への適用可能性という観点から注目される（日本工業標準調査会 [1]、産業技術総合研究所 [2]）。

【米国】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 [3]）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 [4] をはじめとして活発な研究活動が行われているほか、個々の半導体に固有の物理特性を利用して IC チップの認証や鍵生成を行う技術（PUF： physical unclonable function）の実用化に向けた開発も進展している（Verayo 社 [5]）。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】英国（NPL： National Physical Laboratory [6]）、イタリア（ボローニャ大学 [7] 等）、ドイツ（TeleTrust [8]）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、米国同様に PUF の開発が進展しているほか（Philips 社 [9]）、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】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（情報処理推進機構 [10]）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】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 [11]) が KISA 傘下に設置され、顔画像を用いた認証装置の自動評価ツールが開発されている。こうした K-NBTC による精度評価のお墨付きを有する生体認証装置がすでにいくつか市場に投入されており、今後もこうした動きが増えると思われる。それに伴って、生体認証装置の市場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思われる。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] 日本工業標準調査会、TS Z 0019 : ホログラム用記録材料—フォトポリマー—光学的特性測定法、日本規格協会、平成 18 年 1 月 20 日
- [2] 産業技術総合研究所、平成 18 年度産業技術総合研究所年報、平成 19 年 (http://www.aist.go.jp/aist_j/outline/annual_report/h18/h18_annual_report.html)
- [3] CITER のホームページ (<http://www.citer.wvu.edu/>)
- [4] ロスアラモス国立研究所のホームページ (<http://www.lanl.gov/>)
- [5] Veray 社のホームページ (<http://www.verayo.com/technology.html>)
- [6] NPL のホームページ (http://www.npl.co.uk/scientific_software/research/biometrics/)
- [7] ボローニャ大学のホームページ (<http://biolab.csr.unibo.it/home.asp>)
- [8] Teletrust のホームページ (<http://www.teletrust.de/index.php?id=352>)
- [9] Philips 社のホームページ (<http://www.research.philips.com/initiative/intrinsic-id/index.html>)
- [10] 情報処理推進機構、バイオメトリクス評価に関する調査、2005 年 3 月 (<http://www.ipa.go.jp/security/fy16/reports/biometrics/documents/biometrics2004.pdf>)
- [11] K-NBTC のホームページ (<http://www.knbtc.or.kr/knbtc.html>)

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	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	○	↗	人工物認証の分野では、ホログラムの光学的特性等の評価手法に関する開発が進められており、光学デバイスの技術開発力へのプラス効果が今後期待される。
	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ほか、PUF を実現する半導体の実用化が注目される。
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している。米国同様に、PUF を実現するデバイスの開発も注目される。
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	△	↗	
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おり、認証を得た装置も出てきている。
	産業技術力	○	↗	
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ものの、ウルフ攻撃確率に基づくアプローチ等も活発化しており、注目される。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ものの、ホログラム等の光学デバイスにおける光学的特性等の評価手法の開発が関連する動きとして注目される。				

(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]

(3) 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）

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

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「デジタル著作権管理 (DRM)」” 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/>

◆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	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。				

(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]

(4) 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）

【日本】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、国内ベンダの製品は世界的競争力を有しているとはいいがたい。日本においては、市場を支配する OS や航空産業など、ソフトウェアセキュリティ技術の出口となるアプリケーションに乏しく、そのことが研究の産業化においては不利に働いていると考えられる。

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 [1,2]。

【米国】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、実用的な応用についてもソフトウェア検証技術が OS デバイスドライバの検証に用いられるなど、発展が著しい。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である。

【欧州】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 Isabelle [3] 及び Coq [4] は、どちらも欧州及び米国の研究機関（Isabelle：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。

【中国および韓国】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。また特に中国は国策との関係から自国内にソフトウェア産業の潜在力があり、産業化の出口がある程度確保されていることに留意すべきである。

〈参考文献〉

- [1] JP Vender Status Notes. <http://jvn.jp>
- [2] 「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
- [3] Isabelle. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/hvg/Isabelle/>

- [4] The Coq Proof Assistant. [http : //coq.inria.fr/](http://coq.inria.fr/)
- [5] DAEDALUS project. [http : //www.di.ens.fr/~cousot/projects/DAEDALUS/synthetic_summary/index.shtml](http://www.di.ens.fr/~cousot/projects/DAEDALUS/synthetic_summary/index.shtml)

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	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	△	→	

- （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]

(5) 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）

Pay-TV、電子決済システム、あるいは TPM (Trusted Platform Module) 技術 [1] など、製品の多様化とサービスの拡大を支えるセキュリティ技術の中で、物理的な攻撃に対抗する耐タンパー技術の重要性は、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く、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を評価する基準の作成が依然として大きな課題となっている。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、米国の FIPS PUB 140-2 [2] に基づく CMVP (Cryptographic Module Validation Program) [3] やその ISO/IEC 化、そしてそれらに則った国内の JCMVP 制度 [4] 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、09 年上旬にはサイドチャネル攻撃を盛り込んだ FIPS PUB 140-3 [2] の標準化が予定されており、その具体的な試験要件である DTR (Derived Test Requirements) の策定も急がれている。そこで、この分野の研究成果の集約が求められており、サイドチャネル攻撃の実験・試験環境の統一に向けた標準評価プラットフォームの開発などが急ピッチで進められている [5]。一方、近年になって、欧米では、Cambridge、Computer Laboratory の Markus Kuhn [5]、あるいは、MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory の Silvio Micali ら [6] 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。人工物認証の技術とも関連し、今後の発展が期待される分野となっている。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 [7,8]。この分野のトップレベルの国際会議である CHES (International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems) [9] は企業からの参加者が非常に多く、組み込み製品等のセキュリティ実装技術 [10] に対する関心が世界的に高まっていることがわかる。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、代表的なプロトコルについては、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 [10,11,12]。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も取り上げられるなど、名実ともに実際に利用される可能性のある暗号技術として認識されるようになっている。

2008 年度、特に注目すべき動向として、欧州における二つの活動を挙げておく。一つは、FP6 の中で行われていた大規模プロジェクト (SECOQC) [13]

の総括として行われた QKD ネットワークデモンストレーションである。これは、信頼できるノード間を異なる量子鍵配送ラインで結びネットワーク状の鍵配布システムを構築したものである。いわゆる量子リピータの技術を利用した本格的な量子ネットワークの構築とは区別すべきものではあるが、現存の量子鍵配送技術を用いて、中規模の都市圏をカバーすることに成功しており、実用上の価値は高いと考えられている。もう一つは、このような技術開発とは別の動きとして、欧州電気通信標準化協会（European Telecommunication Standards Institute, ETSI）において、工業仕様策定ワーキンググループ（Industry Specification Group）が発足したことである。量子暗号装置の、通信機器や暗号装置としての仕様の策定を目的とし、既にキックオフミーティングが行われている。このような動きを通じて、今後量子暗号の利用環境や利用条件に関する考察が加速することが、予測されている。一方、国内においても現在のところ、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 [14] 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、国際会議 UQC2008 [14] が 2007 年に引き続き開催されるなど、世界的動向に呼応した動きが見られる。

〈参考文献〉

- [1] Trusted Computing Group <https://www.trustedcomputinggroup.org/home>
- [2] NIST, Computer Security Division, Computer Security Resource Center <http://csrc.nist.gov/publications/PubsFIPS.html>
- [3] Cryptographic Module Validation Program, <http://csrc.nist.gov/cryptval/>
- [4] 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 (JCMVP®)」
<http://www.ipa.go.jp/security/jcmvp/index.html>
- [5] AIST 独立行政法人 産業技術総合研究所「サイドチャネル攻撃用標準評価ボード SASEBO」
<http://www.rcis.aist.go.jp/special/SASEBO/>
- [6] Computer Laboratory, University of Cambridge, <http://www.cl.cam.ac.uk/>
- [7] MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, <http://www.csail.mit.edu/index.php>
- [8] CRYPTREC、および、暗号モジュール委員会, <http://www.cryptrec.jp/system.html>
- [9] CHES (Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems), <http://www.chesworkshop.org/>
- [10] 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」
- [11] MagiQ Technologies, <http://www.magiqtech.com/>
- [12] ID QUANTIQUE, <http://www.idquantique.com/>
- [13] SmartQuantum, <http://www.smartquantum.com/smartquantumcontent.html>
- [13] SECOQC project, <http://www.secoqc.net/>
- [14] Updating Quantum Cryptography, UQC 20078, <http://www.the-convention.co.jp/uqc2008/index.html>, <http://www.the-convention.co.jp/uqc2007/index.html>

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	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が活発化しているが、この分野の研究開発拠点がいないため、総合力においては欧米に遅れをとっている。
	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まだ低いものの、組み込みセキュリティ技術などにおいて今後高い成長が期待される。
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燐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]

(6) 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）

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。また、産業界を中心として情報セキュリティ教育についての関心も高まりつつある。これには二つの背景があり、一つは情報セキュリティを専門とする技術者の不足である。もう一つは IT の普及によりそれまで無縁であった多くの人々が情報セキュリティとかかわりを持つようになり、そのような人々に対しても適切な情報セキュリティの知識と技能を提供することが必要不可欠となっているためである。このような教育活動の例としては、日本における情報セキュリティ事業者連合会 [7] などが挙げられる。

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。また、経済学の応用のほかに心理学を応用した研究もアメリカを中心として進んでいる。情報セキュリティにおいてはコンピュータシステムの技術的問題と共に人間自身の問題が重要である。このため人間の集団としての振る舞いを対象とする経済学の応用と共に、個々の人間の心の動きや行動を扱う心理学の応用も必要となる。具体的な研究としては米国の CMU で行われている Insider Threat Research [6] などが挙げられる。日本においても情報処理学会において「情報セキュリティ心理学とトラスト研究グループ」[8] が設置され、利用者や不正行為者を心理学やヒューマンファクタ、安全工学等の面から研究が進められている。

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/>
- [6] Insider Threat Research, http://www.cert.org/insider_threat/
- [7] 情報セキュリティ事業者連絡会, <http://www.jnsa.org/isepa/>
- [8] 情報セキュリティ心理学とトラスト (SPT) 研究グループ WEB, http://lab.iisec.ac.jp/~uchida_lab/spt/

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	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 authorizing 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 authorizing 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 authorizing 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	△	↗	
	産業技術力	△	↗	
韓国	研究水準	△	↗	今後の動向に注目。
	技術開発水準	○	↗	
	産業技術力	○	↗	2006 年 CCRA 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つの中綱目に分類した。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「中綱目ごとの比較」で述べるが、研究水準、技術開発水準、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。ただし、中国に代表されるアジア勢力が産業技術力を高め、製品シェアを高めている点に注目すべきである。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き、40Gbps などの最先端製品の普及においても日本に勝っている。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 光伝送システムを世界に先駆けて実用化し、また、高速性能で世界のトップレコードを保持するなど、技術力において世界を先導している。第4世代の携帯無線技術でも日本が世界をリードしている。

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。しかし、今後特に大きな市場は中国、インドをはじめとするアジア、アフリカ諸国である。日本、韓国などの技術先行投資企業にとって、これらの国で先進的技術が必要とする時期の見極めが重要である。

ネットワークサービス分野においては、ネットワークの高速化・高可用化とコンピュータの低廉化の進展から「クラウドコンピューティング」が注目を浴びている。ICT ビジネスモデルに大きな影響を与える可能性がある。

ワイヤレス技術とサービスの進展が著しく、移動体通信と有線通信の融合への動きが現実化しつつある。米国を中心に新しい携帯端末ソフトウェア技術を投入する動きと合わせて注視していく必要がある。

環境問題が深刻化する中、ICT 消費電力の上昇に危機感が高まっており、「グリーンネットワーク」への取り組みが世界的に本格化している。ネットワーク技術の性能評価指標として、消費電力は今後ますます重要な指標となっていくと予想される。

2.5.2 中綱目ごとの比較

ネットワークが提供する環境

【日本】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、2008年9月末には1億942万端末に達している。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、2008年6月末時点での固定網および携帯電話を含んだ実績値は1億2,487万となっている。因みに、全世界の携帯電話加入数（2008年6月末、推定値）は約36.7億であり、北米；4.3億、欧州；4.7億、アジア；14億、という内訳である。また、インターネットユーザ数（2008年6月末、推定値）は全世界で約14.6億ほどであり、北米；2.5億、欧州；3.8億、アジア；5.8億、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もっと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、2008年6月末時点でのFTTH加入の実績値は1308万に達し、DSLの実績値（1229万）を初めて追いついた。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。

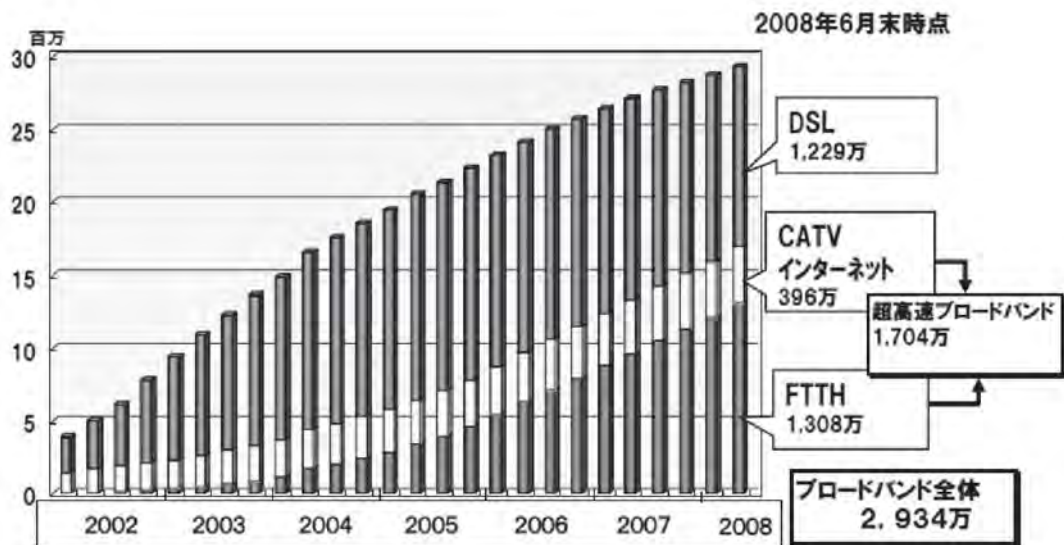


図1 日本のブロードバンドアクセスの動向

出典：総務省発表データを用いてグラフ化

（ブロードバンド：日本では、概ね500kbps以上の回線のこと）

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開発には、日本は通信業界を挙げて取り組んでおり、ITU-T（International Telecommunication Union Telecommunication

Standardization Sector) などの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 月より開始された。NGN では、既存のインターネットに比べて、通信品質や信頼性が大幅に向上しており、また、セキュリティや新サービスの点でも検討が進められている。

さらに、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検討する必要性が指摘されており、新世代ネットワークと称され、大学、省庁、研究機関を中心とした研究会が立ち上がり、検討が開始されたところである。

【米国】携帯電話加入数は約 2.6 億（2008 年 3 月）、インターネットユーザ数は 2.2 億（2008 年 6 月末）である。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、通信事業者が新たにケーブルテレビサービスに参入するなど、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 (National Science Foundation) 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】現在の携帯電話の世界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 月から実験を実施していたが、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、アクセス回線は当面メタリックも利用し 2011 年までには全国に展開する計画だが、進捗は思わしくなく 2008 年移行計画を当所の 50% から 15% へ下方修正している。また、2012 年までに最大 1000 万世帯に FTTH を提供する計画を発表している（2008 年 8 月）。

【中国】携帯電話加入数は約 6 億（2008 年 6 月末）、インターネットユーザ数は 2.5 億（2008 年 6 月末）となった。ネットワーク環境整備は急速に進んではいるものの、通信インフラの遅れを先進国並みにすること、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 年に北京オリンピックが開催され、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が一部の都市で実施され、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

揮した。

【韓国】携帯電話加入数は約 4,400 万（2008 年 1 月）、インターネットユーザ数は 3,500 万（2008 年 6 月末）である。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 年ほどの技術開発効果は大きい。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 10Mbps 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。

ネットワークが提供する環境

国・地域	フェーズ	現状	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。通信、放送、コンテンツ業界の融合により、ユーザへのトリプルプレイサービスの提供環境はリードしており、FMC によるブロードバンドサービスも進展している。
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ニ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。ブロードバンドは DSL が中心だが、英、仏など政府主導による FTTH 促進措置の成果が今後期待される。
中国	研究水準	×	→	通信事業者の研究力は低く、政府のサポートにより大学に依存して研究している場合が多い。
	技術開発水準	△	↗	TD-SCDMA など 3G では独自方式を開発し、国際標準化するなど開発力をつけている。
	産業技術力	△	↗	Internet 利用者は 2.5 億人を超え（日本の 2 倍以上）、携帯電話加入者は約 6 億人となり（日本の 5 倍以上）、巨大市場を背景に 3G 環境が急速に整備され、MID など IP およびテレビ携帯電話も今後も進展する様相。
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：産業面でインターネット主体のネットワーク環境整備が世界で益々活発化し、特に中国、インドなどの新興国での発展が目覚ましい。日本の FTTH が本格化し、欧米も政府主導の取り組みで追従が検討されている。トリプルプレイなどブロードバンドのサービス・アプリケーションでは、継続して米国の強さが顕著である。日本は IPTV や超高速データ移動通信などが整備され、米国を急追している。インターネットを越える新世代のネットワーク技術の研究が活発化していく。				

(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]

(2) ネットワーク応用（サービス技術）

【日本】3Gの携帯電話等によるブロードバンド・ワイヤレス通信環境や、NTTによる次世代ネットワーク（NGN）の提供開始、地上デジタル放送環境の展開など、サービスにおいては先進的であり、世界を先導する立場にある。しかし、ネットワーク応用（サービス技術）に関しては、おもに米国発の技術をフォローする状態にある。ネットワークとしては、放送網、携帯網、NGN・インターネットに加えて、今後ユビキタスネットワークが台頭すると考えられ、研究としてはユビキタスサービス技術などをはじめとして、日本は世界と比較しても進んではいるが、ネットワーク応用研究の実用化に時間がかかっており、産業へのインパクトがあまり大きくないのが要因の1つである。別の要因としては、技術が普及する状態になる際のマーケットの大きさが英語圏向けのもののほうが格段に大きく、英語圏向けを指向している技術開発チームのサービスが発展しやすいことが挙げられる。

【米国】ネットワーク応用の技術開発が非常に盛んであり、新しいネットワーク応用でのビジネスモデルも継続して提案されている。大学などにおける研究についても、新しい研究開発テーマが生まれているが、ネットワーク応用の研究レベルは日本と同程度である。ただし、研究テーマに対してNSF（National Science Foundation）やDARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）からスポンサリングがなされているほか、大学の研究フェーズからベンチャー企業を立ち上げて成功する例が多い。また、民間での技術開発がとくに盛んであり、たとえば、企業が自社のWebサービスの機能をインターフェイスとして提供してプラットフォーム化する技術、ストレージをネットワーク越しに利用する技術、サーバーを仮想化して大規模化する技術など、ネットワークを経由してITリソースを使用する技術が注目されている。これらの技術を先導するGoogle、Amazon.com、Yahoo!、Microsoft、IBMらが競争しながら技術を進歩させている。

【欧州】ネットワーク応用に関しては米国に対して遅れている状況である。EUは研究開発に力を入れており、EUが推進する研究開発プログラムFP7（The EC Seventh Framework Programme for Research and Technological Development：2007-2013）における重要分野の一つとしてInternet of Services, Software and Virtualizationを挙げており、積極的に推進していく試みが行われている。

【中国】いまだネットワーク応用という分野においては、米国、日本等で普及する技術・サービスを追従する傾向が強い。ただし、海外からの技術・サービスをキャッチアップし、中国国内で力をつけている企業も増えている。たとえば検索サービス企業の百度は日本でも正式サービスを開始しており、技術力の向上が進んでいる。

【韓国】インフラとしてのブロードバンド環境・携帯電話環境が成熟しており、WiBroなどのワイヤレスブロードバンド環境構築にも果敢に挑戦している。しかし、ネットワーク応用技術が世界に向けての普及とまでは至っていない。政府系研究機関であるETRI（Electronics and Telecommunications Research Institute）などでの研究開発は行われており、今後は本分野の取り組みが強化される可能性はある。

ネットワーク応用（サービス技術）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	先行研究力は高いが、実用化へ結びつけるフェーズで力を出しきれていない。
	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	○	→	良いネットワーク環境に比して、各種サービスやコンテンツ関連産業の伸びが不十分。
米国	研究水準	◎	→	大学での先進的コンセプトに基づく研究や、ベンチャーによる挑戦的な研究などの層が厚い。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、検索サービスが引き続き強いほか、Web サービス技術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、コンテンツサービスなど引き続き世界をリード。
欧州	研究水準	○	→	先進的コンセプトの提案、研究力は十分あり、活発に活動している。
	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。自力でのネットワークサービスの産業化の例も出てきており、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ある。
	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。				

(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]

(3) アーキテクチャ（ドライビングコンセプトを含む）

第3期科学技術基本計画においても「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、個別の要求にアドホックに対応するのではなく、長期的な視野に立って、新たなアーキテクチャに基づく固定電話網、NGN（Next Generation Network）、の構築が開始され、さらには新たなインターネットアーキテクチャが必要であると広く認識されている。

NGN は、IP 技術による固定電話網の再構築であり、ITU において国際標準化が行われ、その研究開発はヨーロッパにおいて活発である。日本においても、その構築が開始されている。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重要な課題である。したがって、相互接続性に関し配慮が必要であろう。

インターネットに関しては、さらなる社会基盤の役割を担うために高信頼性（広くディペンダビリティとも呼ばれる）と高効率性を必要とされている。社会インフラの役割を担う電話網の場合は 99.999%等の高い可用性を実現するよう設計されているが、現在のインターネットはそうではない。さらには、インターネットは多様なアクセスネットワークを接続する。特に無線ネットワークを効果的に用いるためには、従来の階層化アーキテクチャでは非効率となり、そのような概念に囚われない様々なクロスレイヤ（cross-layer）手法が用いられている。これに対し、根本的なアーキテクチャの検討の必要性が認識されている。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。

このような背景の中、これらに取り組むために、ヨーロッパにおいては、研究開発への投資が活発であり、ネットワークアーキテクチャに関しても同様である。具体的には、FP7（Framework Programme 7）ベースの活動の一つである FIRE（Future Internet Research & Experimentation）は本年 EU から 4000 万ユーロの資金調達を受けることが決定し、インターネット及びコンピュータ関係の開発研究者が共同利用できるネットワークやデータセンターの構築を開始した。さらに、FEDERICA（Federated E-infrastructure Dedicated to European Researchers Innovating in Computing network Architectures）は EU 基金により 2006 年から構築準備が進められている環欧州次世代ネットワークテストベッドである。ギガビット以上の高速広帯域通信技術で構成されるこのネットワークは、来年半ばには運用が開始されると発表されており、欧州の企業や大学などの研究開発機関がこのネットワーク上で新技術の実験を行う予定である。米国においては FIND（Future Internet Design）イニシアティブによる次世代インターネットアーキテクチャ

の研究開発が活発に行われている。さらには、テストベッドネットワークを構築する GENI (Global Environment for Network Innovations) の活動が活性化し始めた。今年度 1200 万ドルの資金が大学、産業界の各研究グループに提供され、2008 年 10 月には 3rd GENI Engineering Conference が多くの参加者を集め盛大に開催された。

日本においては、新世代ネットワーク推進フォーラムが 2007 年に設置され、産学官をあげた取組みの重要性が認識されている。(独) 情報通信研究機構 (NICT) は、今後数十年の ICT 基盤を支えるものとして期待されている新世代ネットワークの実現を目的とし、2008 年 9 月に「新世代ネットワークビジョン」を発表した。そして新世代ネットワーク研究として AKARI プロジェクトを推進し、研究開発用ネットワークテストベッドである JGN2plus も整備しつつある。さらには、米国 NSF、GENI および欧州との連携を強化すべく合同ワークショップなども行っている。ただし、欧米と比較すると、国内全体の産学官連携によるさらに強力な推進が必要である。

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	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	15～20年後を想定した新世代ネットワークの研究開発が NICT を中心に開始された。
	技術開発水準	◎	↗	電話網の置換目的の NGN 関連開発が盛ん。に加えて新世代ネットワークの研究開発が開始された。
	産業技術力	○	→	NGN 網の構築は開始されたが、新世代ネットワークの構築はこれから。
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 イニシアティブがテストベッドを開発する GENI を立ち上げ、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 PlanetLab 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	◎	↗	US キャリアは NGN に及び腰であるが、依然として 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、新装置をベンチャー企業が続々商品化。
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を立ち上げ、RFID やネットワークサービスにも注力。
	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。
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まだ無い。
	技術開発水準	○	↗	ITU を中心に NGN 標準化に注力する。低価格の商用 IP ルータ開発など、技術開発力が向上。
	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とともに、次世代インターネットへの取り組みを開始。
	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 NGN 開発。
	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 技術の支配を継続とするとともに、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むとともに、次世代インターネットの研究開発を開始した。				

(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]

(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。大容量化に向けた研究は引き続き進められているが、光ファイバ内の電力密度自体も新たな制限要因となり始めてきたことから、多値変調による周波数利用効率の向上に対する研究が注目されており、コヒーレント受信とデジタル信号処理を組み合わせた技術へと進んでいる。ECOC2008 でも 5.6bit/s/Hz の高い効率が報告された。また、40G とともに 100Gb/s の検討が本格化しているが、100G に関しては、現場実験など一部の欧米研究機関は日本よりも進んでいるところがある。ノード機能については、光のレイヤ 0 とともにレイヤ 1、2 くらいまでを融合させ、光と電気の役割を考慮しながら、装置としての小型化、省電力化を進める動きも大きく、この分野では、わが国は世界の第一線で互角に貢献している。省電力化はこの分野でも全体的に大きな関心事になっており、装置の仕様にも反映されるなどしてきた。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 FTTN 導入も本格化しており、2008 年 6 月には、1,300 万加入に達するとともに、ADSL の加入者数を越え、ブロードバンドアクセスの中心的技術となった。日本が、諸外国に較べて光化が大きく進んでいることには変りがないが、米国でも光ファイバの加入者が急拡大しており、Verizon や AT&T の GPON による FTTN の導入により、日本との差を縮小しつつある。また、CATV 会社により、従来の同軸伝送との親和性のよい方式の検討も進んできた。これらは、TV の画像信号の配信や個人の作った画像信号をやり取りするサービスの進展とともにトラフィックが急増しており、その通信品質の確保、規制の是非の議論、設備の負担、料金体系などの多くの議論が進行中である。欧州の通信キャリアはこれまで FTTN の導入にかなり慎重であったが、上記の画像信号の急増に伴い、FTTN の導入を推進する方向に変わってきた。

そして、現在の GE-PON、GPON より更なる大容量化を実現する技術として、IEEE802.3av と ITU-T の FSAN で議論されている 10G-PON とともにユーザ毎に波長を割り当てる WDM-PON の検討がなされている。WDM-PON については、海外の方が活発に議論されているようである。

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いるが、韓国、中国も活発化してきている。現在の主要なテーマは、100Mbps から 1Gbps の高速伝送を実現する第 4 世代ブロードバンド・ワイヤレス方式 (IMT-Advanced) の確立である。これを実現する技術としては、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ー技術や最適リソース割当てなどの研究が挙げられる。第 3 世代の高速化については HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) による 7.2 Mbps のサービスが既に開始されているが、上りの伝送路の高速化を目指した HSUPA (HighSpeed Uplink Packet Access) も開発が進ん

でいる。更には 100Mbps 以上の高速化に向けた 3G-LTE (3G-Long Term Evolution) では日本が主導的立場に立ち、その標準化と研究開発を積極的に進めている。

一方、WiMAX は、IEEE802.16a、802.16d、802.16e などの関連標準が完成しており、韓国をはじめ、日本、米国、中国、カナダ、英国などでも実用化されつつある。更にその高速化を目指した 802.16m の研究も各国で進められている。

一方、欧米においては、新たな可能性をもつコグニティブ無線やセンサネットワークなどの研究が非常に盛んになっており、日本も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。これらはワイヤレス技術の新たな適用領域として、世界的に期待が高まっている。

LAN 分野については、イーサネットの更なる高速化を実現する 100GbE/40GbE の標準化が進展している。2006 年にスタートした IEEE802.3ba は、2008 年 11 月 (Dallas) 会合において Draft1.0 を決定している。今後 2 回の修正を経て 2010 年までには標準が確定する見通しであり、GbE から 12 年、10GbE から 8 年を経てのスピードアップとなる。100GbE、40GbE とともに波長グリッドは異なるもののいずれも 4 波長 WDM を基本構造としており、Draft を受けて、今後デバイス等の開発が急速に進展するものと見られる。そして、100GbE は若干時間を要すると思われるが、40GbE インターフェイスの実装は、早ければ 2009 年辺りには先行商品が出てくる可能性もある。

これら標準化については相変わらず Cisco 社などの北米企業の強力な牽引が見て取られ、そこに現れている様に、ルータ、スイッチ分野の世界市場の大半は Cisco、Juniper、そして Nortel などの北米企業が席巻している状態が続いている。日本企業は国内では一定のシェアを持つものの世界市場での位置づけは弱く、一方で Huawei などの中国企業の進展が顕著である。

ネットワークシステム

国・地域	フェーズ	現状	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 (IMT-Advanced) 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。ただ、100G 関連の現場実験などでは、欧米が先行している。ワイヤレス通信では、HSDPA、3G-LTE、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 FTTH 加入計画は 3000 万から 2000 万加入に修正されたが、依然とし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、コグニティブ無線、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-Lucent、Nokia-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-Lucent、Nokia-Siemens などのプレゼンスは大きい。Wireless では Nokia、Ericsson が研究開発や標準化をリードしている。
	産業技術力	○	→	総合力では米国に少しの遅れかもしれない。欧州のキャリアはアクセスの光化については慎重であったが、計画を発表し始めている。
中国	研究水準	△～○	↗	以前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 2.5 億人を越え、携帯電話加入者は約 6.24 億人となり、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有り。
	産業技術力	○	↗	Samsung、LG-Nortel などメジャーなベンダ有り。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あり、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。				

(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]

(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する注目研究開発動向として、P2P トラフィックや DDoS トラフィック等、ネットワーク（以下、NW）の品質劣化の要因となる長大高レートフローの検出・制御技術が挙げられる。国内では阪大 [1]、NTT [2] [3]、京大 [4] 等、海外では主に多くの ISP が競合している欧米を中心に研究が盛んである（米 [5] [6] 欧州 [7] [8]）。近年は特にアプリケーション種別等に依存せずにフローのトラフィック量をベースに輻輳時にトラフィック制御を行うアプローチの議論が行われている（[9] [10] 等）。また、多くの ISP は、NetFlow, sFlow^{*1} から得られるサンプルフロー統計に基づく NW 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 NW 異常を検出する技術が近年進展してきた。この技術を実現した製品としては、米国 Arbor Networks 社の PeakFlow [11] が有名である。国内では日立製品がフロー測定機能に対応している。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）[12] 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 [13]）。その他の帯域制御・トラフィック管理装置としては、米国パケッティア社 [14]、Sandvine 社 [15]、Cisco の SCE、Ellacoya 社等の製品が有名である。

SLA 管理に関しては、欧米、日本、韓国等の NW 事業者、MSP^{*2} が企業ユーザ向けに展開している。評価尺度として、NW 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 MIB を取得しかつパッシブ型を兼ねる製品として富士通の Proactnes、米国の FireHunter、eHealth、ClearSight、AdventNet、Netcool やフランスの Infovista 等がある。各社ともに、多くのネットワーク管理製品と連携したソリューションを提供しており、近年顧客のセグメント化・ビジュアル化機能への対応が顕著である。韓国・中国での目立った発表や製品は見当たらない。

網内の経路を最適化し信頼性や品質を制御する技術である MPLS（Multi-Protocol Label Switch）と GMPLS（Generalized-MPLS）、網の品質（QoS）を実現する転送技術、QoS を考慮した経路最適化計算を行う PCE（Path Computation Element）に関しては、学術パイロットネットワークや標準化・国際相互接続による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 実現転送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、PCE などの高度な 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的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。欧米では 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。日本でも MPLS/GMPLS/PCE 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、ITU-T と IETF が主な場であり、ITU-T では従来から欧州の主導力があるが、日米ともに役職者を増やしつつあり、中国も続いている。IETF では本技術は欧米の主導力があるが、日本も役職者を増やしつつある。

*1 NetFlow, 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

〈参考文献〉

- [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] R. Hayashi, T. Miyamura, E. Oki, and K. Shiimoto, “QoS Control Mechanism Based on Real-Time Measurement of Elephant Flows,” IEICE Trans. Commun., Vol.E90-B No.8, pp.2081-2089, Aug. 2007.
- [3] R. Kawahara, T. Mori, and T. Abe, “QoS control to handle long-duration large flows and its performance evaluation,” IEEE ICC'06, June 2006.
- [4] 横田, 朝香, 高橋, “フロー情報の集約に基づくエレファントフロー制御方式”, 2008 年電子情報通信学会総合大会, no. B-6-16, March 2008.
- [5] R. Mahajan, S. Floyd, and D. Wetherall, “Controlling High-Bandwidth Flows at the Congested Router,” ICNP2001, Nov. 2001.
- [6] L.Guo and I. Matta, “The war between mice and elephants,” ICNP2001, Nov. 2001.
- [7] I. A. Rai, E. W. Biersack, and G. U.-Keller, “Size-based scheduling to improve the performance of short TCP flows,” IEEE Network, Jan./Feb. 2005.
- [8] B. Briscoe, “Solving this Internet resource sharing problem...and the next, and the next,” IETF P2P infrastructure workshop, May 2008
(<http://www.funchords.com/p2pi/slides/>) .
- [9] <http://ietf71.comcast.net/wp-content/files/Comcast-IETF-P2Pi-20080528.pdf>
- [10] <http://www.comcast.net/terms/network/>
- [11] http://www.arbornetworks.com/products_platform.php
- [12] <http://www.genienrm.com/>
- [13] http://www.terilogy.com/ngn/anagran-fr1000_top.html
- [14] <http://www.packeteer.co.jp/products/packetshaper/>
- [15] <http://www.sandvine.com/>

ネットワーク制御・管理・運用

国・地域	フェーズ	現状	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 (JGN2plus、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/PCE (パス制御機能) 等含め活発。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でてきている。国際標準化では、従来から ITU ではリーダーを多数出しているが、IP 系標準化団体 IETF でもリーダーのポジションを保持している。
	産業技術力	○	→	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。システムベンダは世界市場を中心に活性度が低下しつつある。
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 ITU-T、IP 系標準化団体 IETF で役職者を維持している。
	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。
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ーを継続的に輩出している (IETF、ITU-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ーを増加しつつある (ITU-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 による総合網を構築中、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 /PCE については、国策あるいは学術パイロット NW や国際標準化・国際相互接続による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]

(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。

各種情報通信端末は、種々のアプリケーションを実現するために、HW (Hardware)、SW (Software) から構成されている。(図 2 参照) SW の中の MW (Middleware) 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 としては OSGi [1] がある。技術的には、欧州≧米国≧韓国≧日本>中国の順であるが、日本でも OSGi ユーザフォーラム等があるように、産業界では多く活用されている。一方、Java 関係の技術は依然として、米国主導で開発が続けられている。セッション処理では、IMS と連動した形で SIP の開発が欧州、米国、日本での開発 / 標準化が進められている。メディア処理では、DLNA [2] が開発されたが、端末への実装はあまり進んでいない。一方で、コントロール処理である UpnP [3] は、米国、欧州、日本等で汎用的であるゆえ各種プロトコル開発や、ルータ等 IP 機器への搭載が進んでいる。

OS では、組込み OS としては日本 TRON [4]、VxWorks、Linux 等が開発 / メンテナンスされてきた。汎用 OS として米 Windows (Mobile、CE 等)、携帯用 OS では英 Symbian、米 Qualcomm BREW 等が開発されている。これらは HW プロセッサや、基本開発キットとセットで短期に市場投入されるため、OS だけでなく、MW まで一体化した開発が進められている。近年、米 Google の Android [5]、LiMo Foundation の LiMo Platform [6]、日 ACCESS 社の ALP [7]、米 Apple 社の iPhone 用 OS (Mac OS X ベース) [8] など、OS、MW、さらには Widget 等サービスソフト (各種アプリケーション) をセットで提供する新しい形の携帯用プラットフォームが米国等で開発されてきた。

一方、ハードウェア (HW) をみていくと、HW は、メディア処理 HW、プロセッサ、デバイスに整理される。メディア処理では、音声メディア、映像メディア、画像メディア等の処理を担当する。音声メディアでは、MPEG4 AAC 等蓄積系音声符号処理技術と、リアルタイムの音声符号化技術、エコーキャンセルを行う技術などがある。近年、7KHz の広帯域を利用可能とする G.711.1 が国際標準化されるなど、ネットワークの進化 / IP 化に伴い、リアルタイムの音声符号化技術も進化している。一方映像メディア処理では、SD 規格に対応する MPEG1/2、HDTV に対応する H.264、DCI (Digital Cinema Initiatives) 規格の 4K、さらには、スーパーハイビジョンを狙った 8K 映像など高画質化に向けた開発が各国で進められている。

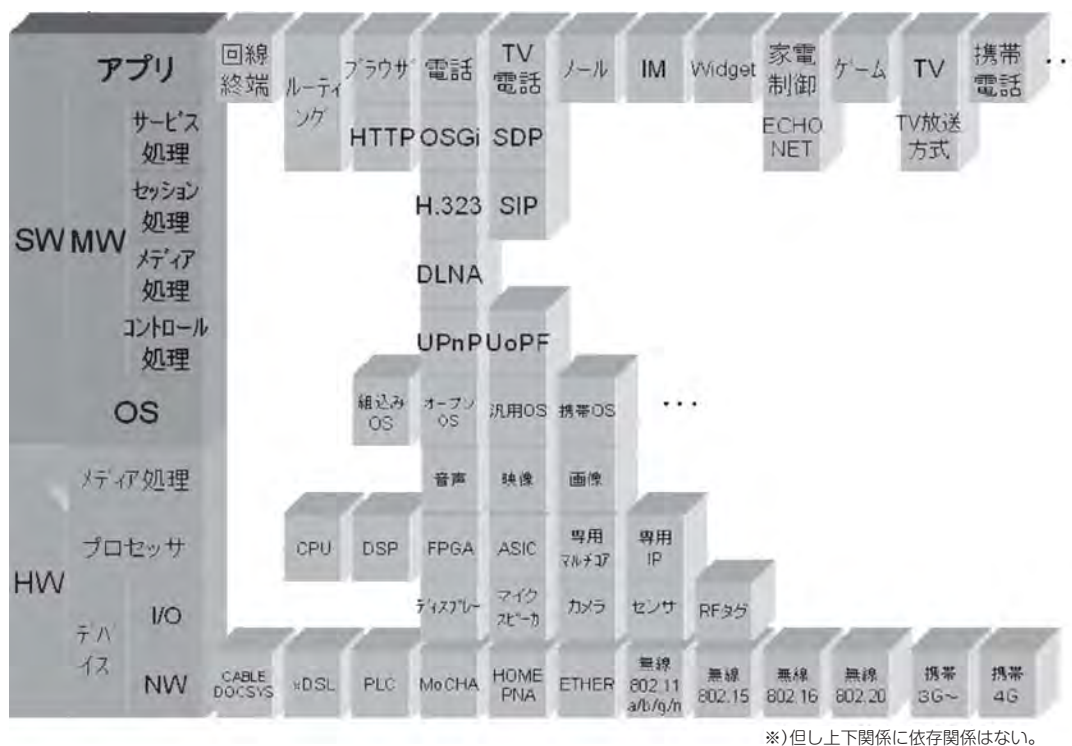


図2 情報通信端末技術 階層図

汎用プロセッサとしては、依然、英 ARM、米 FreeScale/IBM PowerPC 等のように IP（Intellectual Property）を販売する方法と、米 Intel のようにチップを直接製造・販売する方法が主流である。米 Intel は、小型 PC 向けに ATOM 等チップセット数を少なくし、小型省電力化、低価格化を目指すとともに、WiMax の無線部分との連携を強めたサービスを検討するなど単なる CPU の域を脱し始めている。一方、専用プロセッサや比較的用途を絞った CPU として、ゲーム、マルチコアに適した Cell Broadband Engine™（SONY、IBM、東芝）[9]、や Cell ベースの PC や AV 用チップとして SpursEngine™（東芝）、Giga IP 処理に適した NW プロセッサ RENA-CHIP（NTT）[10]、車載 / モバイル用のマイコン（ルネサステクノロジー等）、マイコンから携帯電話、携帯端末用プロセッサ（NEC エレクトロニクス等）、携帯電話用プロセッサ（東芝等）など日本では、汎用というよりも特定用途にフォーカスした CPU が盛んに開発されるようになった。

表示デバイスとして、液晶ディスプレイ、PDP ディスプレイ、有機 EL、光学センサ付き LCD、3D 表示 LCD などは、携帯用から、PDA さらには、TV 向け、デジタルサイネージ向け等の分野で日本は高い技術力を持っている。単なる PC 用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 タグの開発は日立 μ チップ、大日本印刷、デンソーウェーブ、米 Alien Technologies、蘭 Philips Semiconductors 等で行われており、日本の RF タグ技術、利用技術は高い。

有線／無線等伝送デバイス関連として、電力線を利用する PLC では 3 団体 HPA [11]、CEPCA [12]、UPA [13] が設立されている。CEPCA の代表チップとしては、日 Panasonic が主導的にチップ製造および HD-PLC の普及を進めており、各種の HD-PLC を利用した商品がそろった。一方、AV 系の無線伝送デバイスとして、HD 映像をワイヤレスで TV まで伝送するために米 SiBeam 社や米 Broadcom 等のチップを利用した WirelessHD 技術が商品化されてきた。ZigBee [14] は米、英 Embar 社、米 Freescale 社などが開発しているが、AV 系の無線制御デバイスとして TV リモコンに利用されるなど、工場等での利用以外に家庭での利用も検討されはじめた。無線としては、WiFi に代表される 802.11 a、b、g、n が PC 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 100Mbps を目標に、米 Qualcomm 社、米 Broadcom 社、米 TI 社、米 Atheros 社等が開発および標準化（Draft2.0 が策定済み）を繰り返している。PAN（Personal Area Network）では、IEEE802.15 で規格化される 802.15.1（Bluetooth）、802.15.3a（UWB）、802.15.4（ZigBee）などが主力。また、低消費電力化という形で、Bluetooth は、WiBree と統合することにより、単なる AV 伝送デバイスから、超低消費電力型制御デバイスへの拡張を目指すとともに、高速化の観点から、WiMedia Alliance [15] の UWB 規格「MB-OFDM」（ISO/IEC 26907：2007）を採用した Bluetooth V3 仕様を策定中である。WiMax に代表される IEEE802.16 では、802.16、802.16a、802.16d、802.16e など、サービス／エリア／方式に応じて種々の方式やチップセットと端末が実用化されてきている。一方、携帯電話の方式は、Super3G（Long Term Evolution）から、4G（IMT-Advanced）を目指して開発が進められており、チップベンダーとしては、米 Qualcomm、米 TI などがプラットフォームの共通化、世界市場を狙って開発を推進。

情報通信端末に入ってきた放送技術としては、日本では、ワンセグに代表される ISTB-T 通信方式、米国では、ATSC のモバイル版「ATSC-m/h」などが検討され始めた。一方、地上波の放送ではなく、種々の映像をカーナビや携帯で見るための放送方式が数々開発され、実用化されてきた。米 Qualcomm の MediaFLO は Verizon や AT & T で利用されるなど本格的な普及を見せている。日本では、ISDB-Tmm、MediaFLO などの技術開発が進められている。

〈参考文献〉

- [1] OSGi、<http://www.osgi.org/>、<http://www.osgi-ufj.org/>
 - [2] DLNA、<http://www.dlna.org/>
 - [3] UPnP、<http://www.upnp.org/>
 - [4] TRON、<http://www.tron.org/>
 - [5] Android、<http://code.google.com/android/>、<http://www.openhandsetalliance.com/>
 - [6] Limo、<http://www.limofoundation.org/>
 - [7] APL、<http://jp.access-company.com/products/linux/alp.html>
 - [8] MacOS X、<http://www.apple.com/macosx/>
 - [9] CELL Broadband Engine TM、<http://cell.scei.co.jp/>、<https://www.ibm.com/developerworks/power/cell/>、http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2006/06/61_06pdf/a03.pdf 等.
 - [10] 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.
 - [11] HPA、<http://www.homeplug.org/>
 - [12] CEPCA、<http://www.cepca.org/>
 - [13] UPA、<http://www.upapl.org/>
 - [14] ZigBee アライアンス、<http://www.zigbee.org/>
 - [15] WiMedia、<http://www.wimedia.org/>
- ※ CELL Broadband EngineTM は、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメントの商標。
- ※ SpursEngineTM は、株式会社 東芝の商標。

情報通信端末技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	HW から、MW までの研究開発を実施するが、市場特化型か、ばらばらであり総力が結集されていない。
	技術開発水準	○	→	携帯電話等無線の技術開発は進められているが、世界でのシェアが低いと、日本主導となりにくい。
	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、ポータル技術を中心として積極的に HW から、MW、アプリまでの研究開発を実施。
	技術開発水準	◎	↗	米国の大学でのコア技術開発。ベンチャーでの商品化のビジネススキームがよい商品、要素技術を開発している。
	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、Google 等の PC 技術、ポータル技術を中心にサービスから商品開発まで強力。
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	○	→	技術革新がゆるやかなため、商品技術開発も比較的ゆっくりとしている。
	産業技術力	○	↗	欧州各国が連合して、各種端末の標準化を推進し、端末開発コスト、価格低減を狙っている。
中国	研究水準	△	→	独自技術にこだわるところが多い。
	技術開発水準	△	↗	「WiBro、T-DMB」など積極的に最新技術を諸外国から導入したり、独自仕様を導入するなど、独特な技術開発を志向。
	産業技術力	◎	↗	膨大な労働力を活用し、ODM 形で業容拡大。AUO などディスプレイパネルなどの供給能力は高い。
韓国	研究水準	○	→	独創的な研究開発はあまり見受けられない。ETRI が主導。
	技術開発水準	○	↗	サムスン等、ディスプレイパネルは膨大な投資により、高い技術力。
	産業技術力	◎	↗	同上により、全世界での商品供給能力は日本に匹敵。
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]

(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り組みが進んでいる。コンピュータ開発が先行した米国での取り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。また、韓国、中国の躍進も目立つ領域である。コンピュータシステム、ネットワークシステムと人のインターフェイスは、視覚、聴覚メディアが中心となるが、触覚メディアも多様な方式が開発され製品分野が確立している。また近年は嗅覚メディアの研究開発も進んでいる。

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。また、近年では、Google Street View のような画像技術を活用したインターネットサービスも提供され、高度な技術が一般ユーザにとっても身近な存在となった。

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 つの流れがある。一つは、講演や会議、映像等メディアに含まれる音声を、字幕、会議録、翻訳用原文として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大きい力を持つ。

触覚メディアの分野は、米国 SensAble Technologies [1] (1993 年設立) 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。日本でも日本バーチャルリアリティ学会 [2] を中心として、活発な研究発表が行われ活発な領域である。産業では、先にあげた SensAble Technologies 社 (米国)、Immersion 社 [3] (米国)、等が商用化触覚インターフェイス装置を開発している。

嗅覚メディアの研究では、近年は日本の機関の活動が目立つ。慶應大、ATR、名城大、東京大、東京工業大、東海大、奈良先端大、北陸先端大、等で取り組まれている。慶應大の匂い提示技術 [4] は、キヤノンのインクジェットプリンタの技術を基に匂いの高精度な提示を達成した。また、Trisenx 社 [5]、Microscent 社 [6] 等は、匂いメディアの商用化に取り組んでいる。匂いのセンシングに関しては国際会議 isoen [7] 等がある。

このようにヒューマンインタラクションの構成要素となるメディア技術の研究開発が進む一方で、新しいインタラクションの手法やデザイン、ユーザビリティの評価手法等、多様な側面からの研究開発が進んでいる。ヒューマンイン

タラクションはこれらを総合して実現される技術分野である。今回の調査では、総合的な研究開発レベルの評価を行うために、主要学会での論文採録数を参考に調査を行った。コンピュータヒューマンインタラクションの分野で評価が高い ACM の国際会議 CHI'08 [8]、UIST'07 [9]、及び近年注目を集める研究分野として、机上に表示された情報とのインターフェイスをテーマにした IEEE の国際ワークショップ Tabletop2007 [10]、複合現実感に関する国際会議 ISMAR2007 [11] を対象に、国別の論文採録数を集計し、各国の状況を判断する参考とした。

全体として、米国のアクティビティが高く（論文採録数の約 58%）、それに欧州（同 22%）、カナダ（同 14%）が続き、日本はその次（同 3.6%）となる。ただし、日本は国際会議での件数は相対的に少ないが、国内学会等での活動レベルは高く、研究水準は高いと考える。中国、韓国は件数が伸びつつあるが、依然発展途上である。欧州は Tabletop2007、ISMAR2007 では米国を凌いでおり、この新しい領域への関心と活動レベルの高さを示している。たとえば、複合現実感分野の ISMAR では米国（同 19%）に対し、ドイツ（同 31%）、日本（同 17%）、イギリス（同 14%）であった。

日本で 2008 年に発売された米国 Apple 社の iPhone は、複数の点を指で指示して画面上の情報を操作するインターフェイスを採用し、メディアや製品自体を通じて多くの人の目に触れた。また、それに類するインターフェイスの未来像が映画「マイノリティリポート」で表現され、多くの人の目に触れた。これらを通じてヒューマンインタラクションの技術が確実に変化していることを一般のユーザが感じるようになった。これらの技術を生む土壌となった米国・カナダの人材の豊かさは明らかであるが、技術が産業に結びつく可能性の高さが相乗効果によって人材をさらに集めている。技術開発に共通する課題であるが、学界・産業界での技術・人材の円滑な流通が、日本における当分野の発展の課題であると考えられる。

〈参考文献〉

- [1] SensAble Technologies, Inc. <http://www.sensable.com/>
- [2] 日本バーチャルリアリティ学会 <http://www.vrsj.org/>
- [3] Immersion Corporation, <http://www.immersion.com/>
- [4] 佐藤 淳太、門脇 亜美、大津 香織、坂内 祐一、岡田 謙一、" 順応効果を軽減できるパルス射出による香り提示手法 "、情報処理学会論文誌、Vol.49、No.8、pp.2922-2929 (2008 年 8 月)
- [5] Trisenx. <http://www.trisenx.com/>
- [6] Microscen. <http://www.microscen.net/>
- [7] isoen. <http://www.isoen.org/>
- [8] CHI 2008, <http://www.chi2008.org/>
- [9] UIST 2007, <http://www.acm.org/uist/uist2007/>
- [10] Tabletop 2007, <http://www.ieeetabletop2007.org/>
- [11] ISMAR 2007, <http://www.ismar07.org/>

ヒューマンインタラクション

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	米国に比較すると数は少ないが、各分野においてコンスタントに成果を出している。インタラクション技術に関する大規模なシンポジウムが定着し、毎年多くの新しいインタラクション技術の提案がなされると同時に、次世代の人材も育っている。
	技術開発水準	○	→	テレビや PC 上のマルチメディアの新しい操作方法など、大企業からベンチャー企業まで多様なインタラクションの提案・開発がおこなわれている。
	産業技術力	○	→	地デジや NGN 等の導入で家庭のメディアのデジタル化の急速な進展、街頭でのデジタルサイネージの普及など、大型フラットパネルディスプレイに表示された情報とのインタラクション技術の重要性が高まっている。
米国	研究水準	◎	↗	各分野において、圧倒的に多数のアクティビティがあり、成果も多くあがっている。最近では、iPhone や Microsoft Surface 等で注目を集めるマルチタッチのセンシング方式と操作インターフェイスの事例のように研究と産業の距離も縮まっている。
	技術開発水準	◎	↗	マイクロソフト、アップル等のパソコン OS に加えて、Google 等のネットワーク上のサービス提供の形態も定着し、サービス技術の開発・提供のループが加速されている。
	産業技術力	◎	↗	ハリウッドに代表される映画産業に最新の CG 技術が次々と導入され、新しい価値創造を進め産業が確実に成長している。最近では、3D 映画館も増え、コンテンツの質が問われる時代に移行した。
欧州	研究水準	◎	↗	各分野において多数の研究成果の報告がある。最近では、テーブルトップインタフェースや複合現実感の分野で米国を上回る数の学術発表があることもあり、研究フェーズの活性化がみられる。
	技術開発水準	○	→	米国に比べてやや弱い。
	産業技術力	○	↗	Nokia 等の携帯電話メーカーのデザイン性に優れた製品開発力は強い。
中国	研究水準	○	→	マイクロソフトの研究所のアジア拠点があり、当分野に関する業績も出始めている。
	技術開発水準	△	→	画像等の要素技術の開発は活性化している模様だが、ヒューマンインタラクション分野での総合的な技術開発力は発展途上。
	産業技術力	△	↗	先進国の技術をキャッチアップしている段階。
韓国	研究水準	○	→	日本、米国と同様に各分野の取組みが行われ、米国大学との連携も盛んだが、量的には少なく今後伸びていくであろう段階。
	技術開発水準	○	→	欧州、日本と同等のレベル。
	産業技術力	○	↗	技術力としては、欧州、日本と同等のレベルにある。デザイン等にも力を入れ、サムソン等の電機メーカーのブランド力が高まっている。
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。触覚インターフェイスについては、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]

(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

光ファイバ通信システムに関しては、この所グローバルにも堅調な伸びを見せ、2007 年から 2008 年前半は年率 20% を越える成長を見せたと言われている。これには、地域としては、欧州、中東、アフリカ地域の伸びが大きく貢献している。その他の地域も、ビデオ、ワイヤレス、データ応用の伸びが大きく、triple-play service や NGN の旗の下、PON、ROADM、40Gbps システム等の新技術の普及促進となって現れている。

光アクセスは Gbps-PON への進展に続き、WDM や 10Gbps 化の研究開発、標準化が進みつつある。欧州等では局配置の簡略化や経済化の視点から、100km を越える長距離の PON や 1PON あたりの分岐数が 100 を越える多分岐方式の検討が盛んである。また、さらに新たな方向性として、OFDM や CDM の検討も真剣に受け止められ始められている。

メトロ、地域網ではネットワーク網の運用の効率化、経済化、大容量化の観点から、遠隔波長制御機能を備えた次世代 ROADM システムや WDM/SONET/パケット融合システム構築の動きが活発である。また、Cisco 等からは IPoDWDM といってルータ内に DWDM 伝送系を取り込む話も出てきており、この領域のシステムは、ネットワークアーキテクチャを含めて大きく変革される可能性も出てきている。

幹線系では、40Gbps システムの普及がすでに終盤にあるキャリアもあり、研究開発では 100Gbps 化の議論が盛んである。QPSK 等の多値変復調技術とデジタルコヒーレント受信方式を組み合わせ、周波数利用効率が高く、しかも分散補償能力の大きなシステムを構築する動きがあり、国際会議等でも開発競争が激しく行われている。

市場における競争状況の変化も激しく、特に 2006 年 12 月のアルカテルとルーセントの合併、2008 年 4 月のノキアとシーメンスの通信部門の合併、2008 年 9 月のノーテルの通信事業売却報道などに加え、08 年後半は世界的な経済危機の影響で減速が予想されており、IT 産業の成長性は誰もが認めるものの、先の見えにくい時代に再び突入する恐れが出てきている。

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、ついで欧州で移行が進みつつあるが、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。既に第 3 世代の導入を終えた日本、韓国、欧州では、第 3 世代の機能向上版であ

り、第 4 世代の技術を先取りした 3.9 世代と呼ばれるシステムの標準化を進め、伝送速度 30 ～ 100Mbps を可能とする技術開発が進められている。さらに 100Mbps を超える第 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、製品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。WiMAX の発展版は IEEE802.16m として、3.9 世代システムの標準化の候補ともなっている。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は今後の課題である。

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テレビ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。MPEG-2 はデジタルテレビ放送の他、DVD においても広く普及している。標準化に関する具体的な組織としては、MPEG (ISO/IEC JTC1/SC29/WG11)、ITU-T の 2 つがある。但し、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) と呼ばれる規格では両者の協同作業が行われている。移動体端末向けテレビ放送 (ワンセグメント放送)、次世代 DVD (Blu-ray Disc、HDTV の録画用)、民生用デジタルビデオカメラで使われている。ネットワーク経由でのテレビ伝送にも採用されている。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。最近では韓国からの参加者数が増えている。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、ICIP2008 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、香港、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 の中でも検討作業が進められている。SVC は、時間、空間、画質 (S/N 比) におけるスケーラビリティ (階層性) を扱う。標準化作業としては、初期の規格化が完了し、空間、画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効率良く符号化するための標準である。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。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 7680 × 4320 等の超高解像度映像にも注目が集まっている。この他、符号化・復号に必要なツール群とこれらのツールの組合せ方を表す復号器用の記述言語を規定し、符号化器・復号器を柔軟に構成できるようにするために RVC (再構成形ビデオ符号化) の検討が始まっている。

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) (または Distributed Source Coding) 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により表現する。エンコードの負荷を従来法に比べ軽くすることができる。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。また、オープンソースでフリーな汎用動画像符号化方式として Dirac 方式が開発されている。スーパーハイビジョン映像の圧縮符号化方式としても採用されている。

④ マルチメディア応用技術

画像圧縮以外の MPEG の活動の中では、コンテンツ流通の促進を図るために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) について、欧州、米、オーストラリア、日本などで実用化への取り組みが進められている。また、これまでに策定された MPEG の様々な標準 (MPEG-1、-2、-4、-7、-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 として進められている。具体的アプリケーションとしては、音楽プレーヤー、写真プレーヤー、携帯ビデオプレーヤー、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) の標準が設けられている。

ネットワークとマルチメディアという点では、以上の他に、デジタルシネマ、IPTV、ネットワークロボットに関する動きが注目される。デ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。IPTV 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。平成 18 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、従来の欧米主動の放送規格策定活動と比して、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、相次いで取り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] ICIP2008 (IEEE International Conference on Image Processing 2008) : <http://www.icip08.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.
- [11] 八島由幸：“SC29/WG11 におけるビデオ圧縮符号化最前線、” http://www.itscj.ipsj.or.jp/topics/nl79_2911.html

要素技術

国・地域	フェーズ	現状	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、10G-PON、WDM、100G 等先端技術で欧米と拮抗しトップを走っている。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。画像圧縮・通信技術について活発に研究開発が行われているが、オリジナルな研究という点では、米国にやや遅れをとっている。
	技術開発水準	◎	↗	光通信では、NGN 等の下、GPON、40Gbps 実用化開発、ROADM、光インターコネクション開発等で先行している。画像圧縮・通信技術では、全般に企業の技術開発力は高い。H.264 準拠製品の開発という観点から見ると、業務用ハードウェアでは NTT、富士通、NEC、業務用ソフトウェアでは KDDI 研究所、民生用ハードウェアではソニー、松下、東芝等の企業が挙げられる。
	産業技術力	◎	↗	全般に企業の技術力は高い。G-PON の商用化は日本がリードし世界を牽引している。WDM、ROADM 等のメトロ、地域網で、メーカーの力も強い。画像通信についても、H.264 方式を実時間で実行する民生機器向け LSI の開発では他国に先行している。
米国	研究水準	◎	↗	光分野では、WDM、100G コヒーレント方式等で世界のトップレベル。画像圧縮・通信分野においても、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 40Gbps の普及では日本に勝っている。無線通信分野は IEEE802 委員会を中心とした標準化活動が活発である。画像通信分野においても MPEG とは別の方式（マイクロソフトの VC-1 など）も開発されている。企業の技術開発力は高い。
	産業技術力	◎	↗	10-40Gbps の現市場は巨大で多数のプレーヤーが活動。部品、システム等多数が実用化。システムでは Alcatel-Lucent、Nortel、光部品で JDS、大容量ルータで Cisco、Juniper が牽引。画像通信分野においても企業の技術力は高い。
欧州	研究水準	◎	↗	光分野において欧州内で着々と研究開発推進、フォロアーの印象を払拭。画像圧縮・通信分野では、独、UK（例えば BBC 研究所による Dirac 方式の開発など）、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	◎	↗	長距離 PON 等独自の開発を展開。無線通信分野の製品開発では、インフラ・端末共に大きな力を有する企業が存在する。H.264 準拠製品（通信以外の用途も含めて）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	◎	↗	光分野で Alcatel-Lucent、Nokia-Siemens の合併で競争力を強化。画像分野でも企業の技術力は高い。
中国	研究水準	×	→	光分野の研究レベルは遅れている。画像通信分野では研究が活発化してきているが、まだ、欧米や日本には遅れをとっている。
	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。第 3 世代携帯電話の独自開発で苦戦している。画像分野では、AVS と言われる中国独自のコーデックの開発もなされるようになってきている。
	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）がシェア大幅拡大。要注意。画像通信では 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	△	→	本領域での弱体化が感じられる。画像符号化では、研究が活発であるが、欧米や日本には遅れをとっている。
	技術開発水準	○	→	WDM-PDS を国策で進めている。WiMAX の開発や第 3.9 世代の技術開発で実力をつけている。画像通信分野の今後の伸びに注意が必要である。
	産業技術力	○	↗	サムソンが巨大だが、光通信領域は集中力が弱く、韓国国内レベルに留まっている感強いが、一方で携帯電話の製品開発力の向上が近年著しい。汎用部品には注力しているがあまり強くはない。画像通信分野では、LG 電子、サムスン電子、TOSYS 社を始めとして、企業の技術力は伸びてきている。
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。				

(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]

(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

情報源の無ひずみ符号化は、情報源の統計的性質に依存せずに符号化・復号化が行えるユニバーサル符号の研究が中心に行われている。Kieffer（ミネソタ大、米国）と Yang（ウォータールー大、カナダ）あるいは Rissanen（IBM 社、米国）は、2000 年以降も新しいユニバーサル符号の提案を行っているが、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、Yang と He（ウォータールー大、カナダ）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 Orlitsky、Santhanam、Zhang（カルフォルニア大、米国）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。

有ひず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ずみ符号化が、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、Girod、Aaron、Rane、Rebollo-Monedero（スタンフォード大、米国）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 (Stephan 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、線形計画法 (Feldman、米国) や凸計画法 (和田山) を用いた復号法、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、Ahlswede、Cai (ビエルフェルド大、ドイツ)、Li、Yeung (香港中文大、香港) 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米国 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、伝統的に欧州方面での研究機関がこの分野で活発に活躍しており、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の国々が発表の半数を占め、続いて米国・カナダでおよそ 4 分の 1、日本・中国・アジアで全体の約 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機関を中心に研究が活発化してきている [6]。

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。この方面では従来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・トゥ・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 [7] [8] や、マルチホップ無線網におけるエンド・トゥ・エンドの遅延特性を不動点理論により導出するアプローチ [9] [10] が注目を集めている。

〈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] Y.Tamura, S.Kasahara, Y.Takahashi, S.Kamei and R.Kawahara, "Inconsistency of Logical and Physical Topologies for Overlay Networks and Its Effect on File Transfer Delay," Performance Evaluation, vol.65, no.10, pp.725-741, 2008.
- [7] F.Ciucu "Network Calculus Delay Bounds in Queueing Networks with Exact Solutions," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.495-506, 2007.
- [8] J.Joung, J.Song and S.Lee, "Delay Bounds in Tree Networks with DiffServ Architecture," 20th International Teletraffic Congress (ITC20), pp.533-543, 2007.
- [9] A.Kumar, E.Altman, D.Miorandi and M.Goyal, "New Insights from a Fixed Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11 WLANs," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.15, no.3, pp.588-601, 2008.
- [10] Y.Gao, D.-M.Chiu and J.C.S.Lui, "Determining the End-to-End Throughput Capacity in Multi-Hop Networks: Methodology and Applications," Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMetrics/Performance' 06), pp.39-50, 2006.

基礎理論

国・地域	フェーズ	現状	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、高効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。				

(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]

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等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、システムを構築するための理論・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、システムインテグレーション技術について国際比較を行った。

欧米では理論的研究が進んでいるが、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、ロボティクス分野に関する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。後述するように、米国ではロボット産業に対する新しい挑戦が行われるとともに、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られるかどうか予断を許さない。

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。従来からの NASA 主導の宇宙関連研究以外にも、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、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供給していることで知られているし、パワーアシストスーツも、軍用ではあるが、実戦配備目前の驚異的な性能を有するものが、すでに開発されている。また、新しいロボット産業への挑戦も試みられており、例えば、Willow Garage [1] では、コンピュータにおけるメインフレームコンピュータからパーソナルコンピュータへの流れを、ロボティクスの世界で実現することを目指し、パーソナルロボットアプリケーションのためのハードウェアとオープンソースソフトウェアの開発を行っている。また iRobot の設立に携わった MIT の R.Brooks 教授が設立した Heartland Robotics [2] においては、コモディティ化した部品を用いた安価なロボット開発を目指していると伝えられている。日本が得意とする従来のロボット産業とは異なり、価値の源泉となるのはソフトウェアであり、米国におけるこれまでの理論的な成果がソフトウェア化されると、従来のロボット産業を凌駕する新しいロボット産業が立ち上がる可能性がある。

日本は、ヒューマノイドを初めとして、ロボットの智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それなりの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、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が混在しており、それらの研究目的をはっきりと区別するとともに、分野を絞った大規模投資が必要であると思われる。また、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。

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、EU から多額の研究開発費が提供され、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、日本のネットワークロボットに相当する URC (Ubiquitous Robot Companion) プロジェクトが終了し、約 1,000 世帯の家庭に家庭用ロボットを配布するとともに、空港、郵便局などにおいても実証実験、評価が行なわれた。また、ロボット開発用ソフト Anybot Studio も開発が進んでおり、2015 年には 1 家に 1 台のロボットを目標とし、サービスロボットの分野でトップを狙う戦略が着々と進められている。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。URC プロジェクト終了後、省庁再編で、ロボットは知識経済部の管轄下になり、また、2012 年 7 月オープンを目指しロボットランドの建設が 2009 年から仁川にて始まる予定である (予算 8 億 2700 万米ドル)。内容的にはテーマパークと研究施設を合わせたものである。

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。

〈参考文献〉

[1] <http://www.willowgarage.com/>

[2] <http://heartlandrobotics.com/>

<http://www.xconomy.com/boston/2008/09/02/irobot-co-founder-brooks-leaves-to-launch-new-robotics-firm-aiming-to-revitalize-us-workforce/>

2.6.2 中綱目ごとの比較

(1) 実世界応用技術

我が国では総花的に研究開発が行われているが、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とともに、分野を絞った大規模投資が必要であろう。前者の場合には近未来の実応用を期待してはいけないう、後者の場合には、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。2008 年度が最終年度であり、福岡（公開済）、けいはんな・大阪（公開済）、かながわに環境プラットフォームが公開されつつあり、ソフトウェアシミュレータ OpenHRP3 もすでに 1000 件以上がダウンロードされ、利用が広がりつつある。一方、産業用ロボットの生産額も市場が拡大しつつある。専用機が高度化されロボット化の傾向が増えていると、日経ものづくり（2008 年 5 月）では特集が組まれた。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。さらに、最近では実証できるレベルのものが増えており、一段階進んだ開発が多い。ショッピングセンターや公共施設においてもロボットの実証実験が多く行われている。自動車会社からも人の作業支援というコンセプトでパーソナルモビリティや歩行アシストなど本格的に開発を進めている。

国の施策に関しても、経産省を中心に継続的な研究開発が続いており、次世代ロボット知能化技術開発、オープンイノベーション促進プロジェクト、また生活支援関連のロボットが計画されている。とくに知能化技術開発では、ソフトウェアの標準化を強く意識し、共通プラットフォーム技術も取り込まれている。さらに、ロボット産業政策研究会も設置され議論が始まった。内閣府では、社会還元加速プロジェクトや革新的技術戦略などでも生活支援ロボットが挙げられている。

早稲田大学の人間共存ロボット TWENDY-ONE、東大 IRT 研究機構のホームアシスタントロボットを始め、ロボットハンドの技術開発に注力されるようになった。実世界でのロボットを目指したつくばチャレンジや RT ミドルウェアの普及を促進する RT ミドルウェアコンテストなど、多方面で日本のロボット技術展開が著しい。

【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、パワードスーツも SARCOS 社において、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、クリーナロボット Roomba を販売している iRobot 社が、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大きなインパクトを与えている。最近では、2030 年頃の高齢化社会をターゲットとした日常生活を科学する CMU 金出教授のプロジェクト（QoLT）が生活支援関係のロボット研究を開始するなど、生活分野への取り組みが進んでいる。また、ビジネスを意識した、RoboDevelopment、RoboBusiness といった展示会・講演会が継続して開催されている。

【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（European Robotics Network）が構築され、EU による研究投資が行われている。また、欧州技術プラットフォーム EUROP（European Robotics Technology Platform）では産業界主導で研究開発戦略が行われている。一方、産業用ロボット分野も活気があり、2006 年、2008 年と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る。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質量比 1:1 という高性能なもので、KUKA 社が産業用に応用している。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。人との共存を目指した開発も進み、DLR では人に衝突させても安全なように衝突力制御の研究開発を進めた。

【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。

【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するとともに、空港、郵便局などにおいても実証実験、評価が行なわれた。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“一家”に“一台”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、日本と同等レベルにあり、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、実用化には難航しているが、サービスロボットの分野でトップを狙う戦略が進められている。URC が終わり、省庁の再編で、ロボットは知識経済部の管轄下になった。また、ロボットランドが 2012 年 7 月オープンを目指し 2009 年から仁川にて建設が始まる。予算は 8 億 2700 万米ドル。ただし、内容的にはテーマパークと研究施設を合わせたものである。また、共通プラットフォーム技術 CommonPlatformTechnology も韓国では国の施策に取り込まれた。

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が進んでいる。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。ISO では Robots in Personal Care (ISO/TC184/SC2) で人間への接触力や動作速度が議論され始めた。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。また、ロボット技術のロードマップについては経産省中心で作成され、毎年見直されている。また、アカデミアロードマップを日本ロボット学会、人工知能学会、日本人間工学会の 3 学会が協力して作成するなど、以前に比べて横断的な研究・開発・活動が進んでいる。

実世界応用技術

国・地域	フェーズ	現状	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。その後、実用化されるもの、実証実験レベルのものが開発されている。
	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。日常生活の科学。
	技術開発水準	◎	↗	グラウンドチャレンジ・アーバンチャンレンジ等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（ダビンチ）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 Robots Learning and Cooperating Multimodel Robots 等のプロジェクトがある。
	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。知識経済部が新たにロボットの管轄官庁となった。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。ロボットランドを建設予定(2012年)。
	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。その他の分野は日本同様苦戦。RobotWorld2008 開催。
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、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っており、日中韓で MOU が結ばれた。とくに、生活分野へのロボットが世界的に研究開発され始めた。				

(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]

(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技術は、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だシステムとしての評価を行う。

【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、理研バイオメディ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メーカーが多く、従来から産業技術力は高い。ファナック [1] 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 [2] 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 [3] 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 らによる径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。

直近の米国で注目される動きは、新しいロボット産業への試みであろう。

Willow Garage [4] では、コンピュータにおけるメインフレームコンピュータからパーソナルコンピュータへの流れを、ロボティクスの世界で実現することを目指し、数人の製造現場で用いることが可能となる安価なロボットを開発している。また Heartland Robotics [5] においても同様の方向の研究を進めていると伝えられる。コモディティ化した部品を用いて、Low Cost Robotics を目指すという方法論は注目したい。Willow Garage は Google の資金をバックにしており、また Microsoft は Robotics Studio でロボティクス分野に進出している。コモディティ化した部品を用いた Low Cost Robotics において、価値の源泉となるのはソフトウェアであり、米国におけるこれまでのマニピュレーションの理論的な成果がソフトウェア化されると、従来のロボット産業を凌駕する新しいロボット産業が立ち上がる可能性があるだろう。

【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. におけるバイオミメテ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 [6] 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。国家重点研究室にハルビン工大と瀋陽科学技術院自動化研究所が選ばれており、多大の予算が投入される予定である。この二拠点を中心にして今後のロボティクスの研究開発が進むであろう。宇宙用マニピュレーションに関してはハルビン工大、産業用ロボットを初めとするオートメーションにおけるマニピュレーションでは、瀋陽科学技術院自動化研究所がリーダーシップを取られる。

【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。韓国においては、World Class University Program が始まり、ロボティクスの分野で採用があれば優れた研究拠点になると思われる。

〈参考文献〉

- [1] <http://www.fanuc.co.jp/>
- [2] <http://www.yaskawa.co.jp/>
- [3] <http://www.hds.co.jp/>
- [4] <http://www.willowgarage.com/>
- [5] <http://heartlandrobotics.com/>
<http://www.xconomy.com/boston/2008/09/02/irobot-co-founder-brooks-leaves-to-launch-new-robotics-firm-aiming-to-revitalize-us-workforce/>
- [6] <http://www.kuka.com/en/>

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）

国・地域	フェーズ	現状	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ー多数。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）。Heartland Robotics 等 Low Cost Robotics。
	産業技術力	○	→	企業数は少ない。
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）などが有力。
	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）などが有力。
	産業技術力	◎	→	KUKA 等のロボットメーカー、自動化機器のメーカーが多い。
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。国家重点研究室にハルビン工大と瀋陽科学技術院自動化研究所。
	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ー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（R IST）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ーが限られている。
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。Low Cost Robotics は新しい流れになるか。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？				

(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]

(3) 理論・アルゴリズム 2 —移動（ロボットの環境／自己位置認識などを含む）—

「移動」技術では世界の全体を地図として認識・把握し、目的地まで到達するための自分の動きを計画して制御する「知能」、並びに、屋内や屋外の複雑な地形の中をより自由に動き回るためのメカニズムの設計論とその制御方法の2つがとくに重要である。

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なロボット研究者に取り扱われてきた。この話題は1990年代の後半より 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研究は世界的に活発化した。この研究成果及びその普及により、ロボットが自らのセンサと自己が有する環境情報（地図）を用いて自己の環境内の位置を認識することの意義、重要性が世界的に改めて認識され、この「機能」はここ数年急速に移動ロボットにとっての「普通」の能力となりつつある。その潮流については米国と欧州がリードしており、我国は理論的に世界をリードするという状況にはほど遠い。

また、このロボットによる空間の認識の問題は、ロボットの自律的な行動決定とは切り離して、ロボットを遠隔操作する際にオペレータに与える環境やロボットの状況情報の呈示という視点からも重視されるようになっており、ロボット技術全体の中でもその重要さは益々増大している。

また、不整地を脚ロボットや特殊クローラ機構等の移動ロボットが安定に踏破する走行／移動制御技術についても、計算機処理能力の進歩等により近年大きな進歩が見られている。これについては、軍事や宇宙利用を目指した米国での研究開発が光っている。また、我国でも、二足歩行システムや瓦礫の上を走行するレスキュー用クローラ車輛の制御などで研究の進展が見られている。

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、

【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の特長として進められてきた。従って、実機を作ってそれを動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。

【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。

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、日本の優位性も失われている。

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専用機化が進んでおり、移動ロボット技術が中心ではなくなる傾向にある。

移動ロボット技術については、我国の特徴である民生用産業技術・モノづくり技術のための産業界と研究者とのコミュニケーションの良さが薄れつつあり、我国の産業現場に根ざした研究開発水準の高さはその優位性を失いつつある。

理論・アルゴリズム 2 移動（ロボットの環境／自己位置認識などを含む）

国・地域	フェーズ	現状	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及びその制御方式には強いが、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。ここ数年レスキューロボット等のための遠隔操作ロボットとしての研究開発も進んでいる。
	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。なお、中堅センサメーカーである北陽電機が開発し 2004 年より発売された小型測域センサのシリーズは、世界的に見ても、知能移動ロボット技術の実世界への適用と普及に大きく貢献しうるものと予想される。
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 のグラントチャレンジ・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。また、圧倒的な軍用技術開発や、家庭用掃除ロボット Roomba のビジネスとしての成功など、新しい技術が実用化につながるパスがあり、これが研究水準にも良いフィードバックを与えている。
	産業技術力	◎	↗	実力のある中堅企業が多く、ベンチャーも活発である。Roomba（掃除機ロボット）の商業的成功は特筆すべきであり、これに続くような企業も多い。
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。EU のいくつかの研究プロジェクトでも重要な要素技術として位置づけられている。
	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	○	→	移動ロボット自体としてはマーケットが立ち上がるのを待っている状態。
中国	研究水準	△	↗	中国より香港ではハイレベル。最近論文数は多くなったが、とくに大きな特徴はまだない。
	技術開発水準	△	→	現状は外からはよく見えない。
	産業技術力	○	?	相変わらず外からはよく見えないが、興味を有している企業は多い。
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が活発。
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 年来的課題であるが、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]

(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、そのインターフェイ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イス技術は、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イス研究、タグやセンサを用いた実世界でのインターフェイス技術など、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いないのである。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。

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	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、東芝、ホンダなど着実な技術開発を続けている。
米国	研究水準	◎	↗	人工知能研究や認知科学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、研究が活発になってきた。特に他のロボット研究から人間と関わるロボットへと方向転換しつつある。
	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。むしろ生体と融合したロボット技術に注力している。
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、韓国に続くようとしているが、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	○	↗	情報メディアとも融合した実証実験を中心とした研究開発に注力している。全体的な予算は削減されつつある。
	技術開発水準	△	→	以前の勢いは感じられなくなってきた。
	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。				

(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]

(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） —

ロボットの知能化研究開発は、単なる人や生物が持つ知的機能の実現のみならず、産業用ロボットの知能化技術開発（柔軟物ハンドリング、セル生産へのロボット技術の導入など）、サービスロボットに必須となる知能の研究開発（無限定環境における適応機能開発、安全を含む人とのインタラクション研究、多様な対象物のマニピュレーションなど）をはじめとして、実用化・事業化にむけての開発において非常に活発化している。その傾向が最も顕著なのが日本であり、ヨーロッパがそれに続いている。特に医療ロボットなどの人が直接操作するロボットや、パワーアシストなど人が身につけて動作させるロボットにおける、安全を含む人とのインタラクションのための知能化技術についても、米国と日本において精力的に開発されている。ただし、アシストに関しては、日本は福祉応用が主体であるのに対し、米国は軍事応用が主体である。基礎研究として注目すべきは、BMI（Brain Machine Interface）と呼ばれる、生体の脳から直接機械を操作する技術開発などである。

日本が主導的に研究開発を行ってきた、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に関しては、欧米でも活発化し、基礎研究から開発研究へ移行しつつある。自律分散化は、さらに環境知能化へと展開しつつある。これは、センサネットワークやユビキタスコンピューティング技術の発展と、様々なサービスの実用化・インフラ整備というニーズが原動力となっている。

知能化の基礎研究としては、日本の移動知研究〔1〕をはじめとして、生物から学ぼうとする研究の動向にも大きな期待が寄せられる。このような研究は欧米や、ごく最近では韓国でも、個別に行われ始めている。

一方、実用指向のシステム知能化の動向として、RT モデルウェアをはじめとする、モジュール標準化の動きが活発化している。これに関しては、日本および韓国が主導的に活動を行っている。なお、韓国のサービスロボット関連プロジェクトはほぼ終結しつつあり、多くのサービスロボットが開発され、ベンチャー企業が起業された。ただし、事業としてどこまで成功させるには、まだ課題も多い。

〈参考文献〉

〔1〕 科研費特定領域「移動知」：<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>

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）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	センシング・認識・計画・制御・学習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、群ロボットなどの研究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。実用化という点においても、高い技術開発力を維持している。
	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、事業化に関してはさらなる強化が必要である。
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	◎	→	知能化に関する技術開発水準は、日本同様に高い。特に、軍事応用、BMI（Brain Machine Interface）に関しては、圧倒的な優位性を保っている。
	産業技術力	◎	→	DOD や DARPA が巨額の開発費を投入している。テロ対策、セキュリティなど、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。
	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、概して向上の傾向にある。
	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	△	↗	ロボットプロジェクトによって、研究水準が向上した。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。特にオリジナリティが弱い。
	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。特に、数多くのサービスロボットが短期間で開発されたことは驚異的であると言える。
	産業技術力	○	→	ロボットの知能化技術を積極的に事業化しようとしているが、課題も多い。
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。軍事関連ロボット、BMI などで優位性を有している。日本は、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。				

(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]

(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・分散制御（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・分散制御の研究では、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。また、最近では、協調制御から分散制御に研究トピックが移動してきた傾向が見られる。

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ロボットのプロトタイプも開発され、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 大学に作られるなど、NSF を中心に大型プロジェクトが Cyber-Physical Systems（CPS）と称して情報分野の最優先課題となっている（Supplement to the President's Budget for Fiscal Year 2009 の Networking and Information Technology Research and Development Program, pp. 14 を参照）。EU では、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）とともに、2007 年より超大型産学連携プロジェクト ARTEMIS [1] 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、近年より計測自動制御学会において、ポスト組込み制御システムに向けた調査研究会が数多く設置され、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。

〈参考文献〉

- [1] Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence and Systems、2007-2011、<https://www.artemis-ju.eu/>

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	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。しかしながら、プロジェクトとしての研究水準は欧米に比べてかなり低い。
	技術開発水準	○	→	計測自動制御学会では、組込み制御システムに関する調査研究会を複数設置し（2008～）、企業と大学による連携を探る組織体制が整いつつあるが、大型の予算が絡むプロジェクトは立ち上がっていない。
	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（2008～）が NSF の情報分野で最優先課題となっている（ http://www.cra.org/crc/cps ）。
	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（2002～2006）、HYCON（2004～2008）、ARTEMIS（2007～2011）。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、日本の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。				

(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]

(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。汎用モータに関しては、日本の技術力、生産力は世界のトップと言えるが、数～数 10W の小型のサーボモータに関しては、欧州の企業が優位の状態が続いている。

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。また、数 10MPa の高圧圧縮空気ポンプを用いることで、自立的に動作するロボットや自動車エンジンが開発され、近年注目されている。安全性、経済性など今後の課題は多いと思われるが、空気圧アクチュエータの新しい可能性を示すものである。

【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 カ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。

特に、DC モータを中心とした小型のサーボモータに関しては、その種類が豊富で、小型のロボット機構では、欧州製のサーボモータを用いざるを得ない状況が続いている。例えば、ドイツ空港宇宙研究所が開発した軽量ロボットアームも、このような小型サーボモータの技術力を背景にしたものである、

一方、ドイツの空圧メーカーのフェストと、フランスのベンチャーが、それぞれ、圧縮空気を利用した、ロボットと自動車を開発するなど、空圧アクチュエータに関しても新たな動きがみられる。

【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、小型磁気軸受け、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。

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	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。圧縮空気を用いた空圧アクチュエータの開発が進められている。
	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。軽量ロボットの開発につながっている。
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。				

(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]

(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、SiP (System in Package) および SoC (System on Chip) 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低消費電力化と小型化が実現した。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、大きな環境変動を伴う屋外における監視や ITS センシングなどに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、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思われていたビジュアルサーボイングも可能となった。ロボット用の 3D 計測としては長らくドイツ SICK 社のレーザ・スキャナおよびその類似品が主流であったが、タイムオブフライト方式を用いた 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、スイス CSEM 社などが市販している。また、我が国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 を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。また、音響に限ることではないが、台湾の TSMC、UMC、シンガポールの CSM などの半導体製造ファウンドリが、センサと処理系を一体化した欧米の半導体商品の背景に控えていることも留意する必要がある。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、単なる信号処理ではなく音声認識までの一貫した技術開発が必要である。この点において我が国ではサービスロボット関連技術として大きく進展している。

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步先を行っているが、我が国では、車のエアバッグが主要なマスマーケットであった加速度が、任天堂ゲーム機のインターフェイスとして急速に普及するなど新しい展開を見せている。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するには、未だ課題が多い。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。最近、屋内で GPS と同様の情報を取得する各種の方式が研究から実証段階になりつつあり、アクティブ RFID などとの比較が注目される。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。

一方、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。RT ミドルウェアとの関連からもネットワークの標準化動向には引き続き注意が必要であり、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。さらに、広い意味でのロボット技術としてワイヤレスセンサネットワークおよび複数のセンサと処理系を複合したスマートセンサの動向も注目すべきであるが、この分野でも米国が基本技術を抑える傾向にある。

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・欧州および中国・韓国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。また、韓国では「知能型ロボット開発及び普及促進法」により、包括的なロボット技術開発と産業化の促進を開始した。我が国も独自の活性化策を考えるべきである。

センサ・センシング技術

国・地域	フェーズ	現状	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	◎	→	多様で活発な研究開発。
	技術開発水準	◎	→	IT との結合など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（軍事関係は不明）。
	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	△	↗	水準はまだ低いが、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。ロボット普及促進の法制化で加速するか？
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]

(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 における標準規格が制定された（2008 年 4 月）ことにより、RT コンポーネントのフレームワークは確立した。OMG では引き続き、ロボットの位置情報に関して Robotic Localization Service の日韓統一原案を採択（2008 年 6 月）するとともに、最終文書策定作業に入った。国内的には、開発フォロー継続性が鍵で、次世代ロボット知能化技術プロジェクトで RTP（RT プラットフォーム）として開発環境整備が推進されている。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、無人ビ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。

注目動向としては、Willow Garage [1] から ROS（Robot Operating System/Robot Open Source）に基づく、UNIX ベースのオープンプラットフォームとしてモジュラーソフトウェアと無償提供予定のハードウェア（PR2）の開発進展がめざましい。

【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。

〈参考文献〉

[1] <http://www.willowgarage.com/>

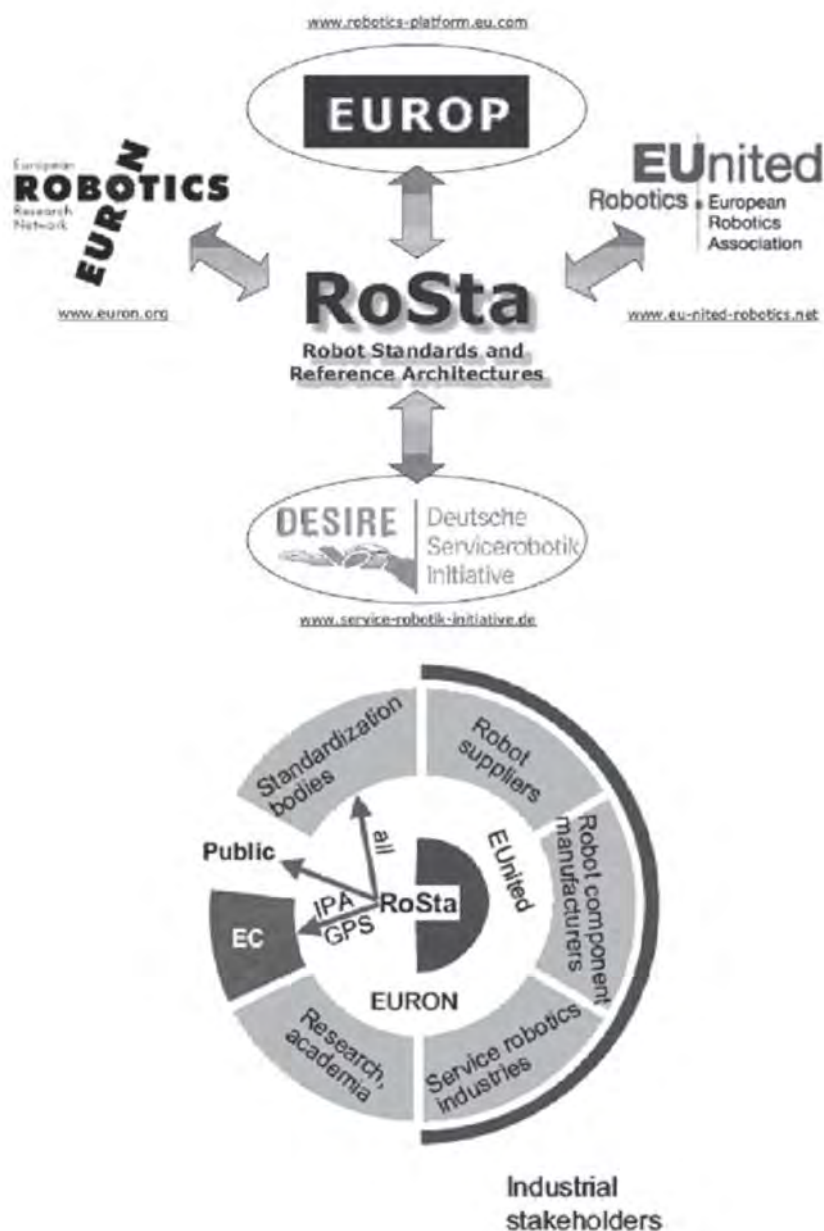


図 3 RoSta (OMG robotics/2007-03-18、Robot Standards and Reference Architectures for Service Robots and Mobile Manipulation、Erwin Prassle)

RoSta Overall Structure

RoSta

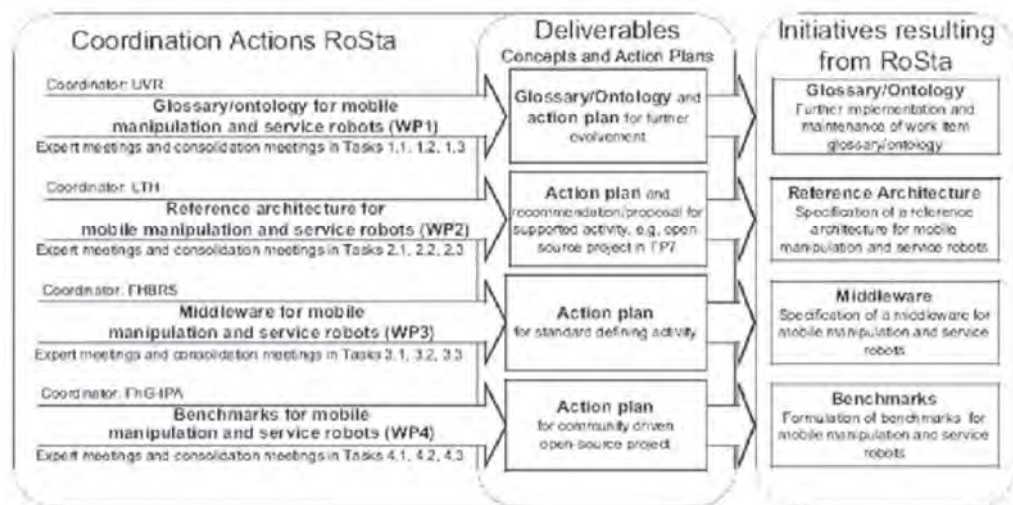


図4 RoSta 組織構成 (OMG robotics/2007-03-18、Erwin Prassler、Robot Standards and Reference Architectures for Service Robots and Mobile Manipulat

Relationship among Organizations in Standardization Process

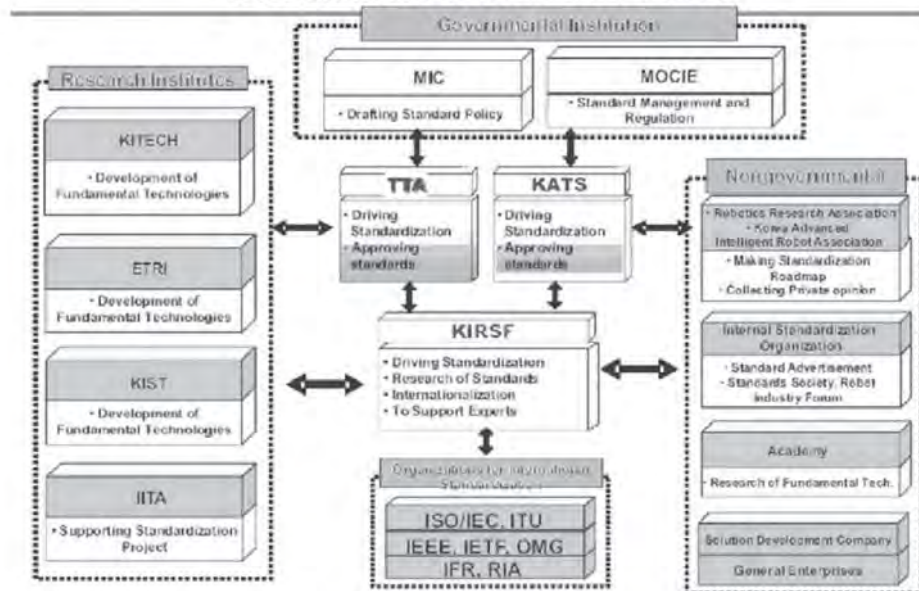


図5 KIRSF (Korea Intelligent Robot Standard Forum) 体制 (Sukhan Lee、OMG document robotics/2007-06-11 Korean Thrust for Intelligent Service Robot Standards、June 25、2007)

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	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 における標準規格制定 (2008 年 4 月) により、RT コンポーネントのフレームワークは確立した。開発フォロー継続性が鍵で、次世代ロボット知能化技術プロジェクトで RTP (RT プラットフォーム) として開発環境整備が推進されている。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注目されるが、継続と関連学会の取り込みが必要。
	技術開発水準	◎	↗	NEDO 次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト (2007 年度完了) 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と充実が期待される。
	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、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、および次世代ロボット知能化技術プロジェクトによる知能ソフトウェアモジュール化など、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。
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 SYSMML 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、無人ビ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。Willow Garage によるオープンソースによるソフト、ハードプラットフォームの提供姿勢は要注目。
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うけ、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、韓国システム自動制御学会 (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。さらに、関連学会の多数開催も注目活動。
	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、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先導的研究開発プロジェクト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。

- (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 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) 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
- ・ 3 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。特に、最近の電源電圧が低電圧化された環境では、しきい値電圧のばらつきによって、集積回路が動作しなくなるなどの現象が見られ、特に SRAM など大きな技術課題になっている。

(2) パワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスは、産業、鉄道などの大電力応用を対象とした製品展開が技術を牽引して来たが、最近では、車載エレクトロニクス、情報機器電源や家電エレクトロニクス製品で低消費電力化を目指すパワーデバイスの方向に流れが変わっている。例えば、情報通信機器や家電製品では、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半導体デバイスが注目されている。数 100V の耐圧で SiC-MOSFET で $2\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 前後の低オン抵抗化が報告されている。Si の新構造デバイスでは SJ-MOSFET が SiC と同じ耐圧領域で $10\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 前後の低オン抵抗化が報告され、また、電子注入促進効果 IGBT もさらなる低損失化の可能性が検討されている。

効率向上に加えて、情報機器電源や車載インバータなどを中心にパワーエレ

クトロニクス機器の高パワー密度化（小型、軽量化）が強く求められており、デバイスの低損失化はこの視点からも非常に重要になっている。低損失の次世代パワーデバイスを活用するには、デバイス研究に加えて、システム統合設計技術やパワーエレクトロニクス実装技術の研究開発が益々重要になりつつある。

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。Green IT に関連し、Power Electronics と Microelectronics の境界が曖昧になってきているのが現状である。また、Cool Earth 50 に関連し、パワーエレクトロニクスは Cool Earth 技術革新計画の 21 のエネルギー革新技術の部門横断技術として位置づけられている。パワーエレクトロニクスは IT 技術を含む Microelectronics との融合も視野にいった新しい基盤技術としての展開を検討する時期にきている。

(3) センサ技術

ナノ加工技術を応用した、超高感度熱電子ナノ放射エネルギーボロメータ（米 Rutgers 大等）は注目される。テラヘルツ帯の宇宙線を使った宇宙観測に用いられるボロメータの検出素子をナノスケールに超小型化する事で、熱の出入りを極限まで抑え、感度を現在の技術より 2 桁以上大きくできる提案がある [1]。

DNA アダプタマーは、抗体では認識できない物質の認識や捕捉手法として重要であり、多くの新しい物質センシングに応用可能な重要技術と思われる。糖尿病血管合併症早期発見につながる AGEs（終末糖化合物）の定量化（慶大）簡易測定の実験報告がある [2]。

グラフェンのセンサ応用に注目すべきである。グラフェン表面への遷移金属（Ti 及び Fe）の吸着が、グラフェン Fermi 領域近傍の電子状態密度を大きく変える事がブラジル Ceara 連邦大学等複数大学の共同研究で示されている [3]。こうした特性を活用することで、微量な元素の吸着をセンシングするセンサヘッドへの応用の道が開ける可能性がある。

その他、ワイヤレスセンサネットワーク実現へ向けて、欧米では国レベルでの取り組みが多い点には留意が必要である。例えば、EU の FP7 では、FEEDNETBACK（既存の無線制御技術におけるフィードバック理論の革新を目指す）、CHOSEN（特に自動車や航空機での応用を目指して RF のベースバンドレシーバーやネットワークプロトコルの開発を行う）、GINSENG（大学と企業の共同研究により大規模な企業環境でのワイヤレスセンサネットワーク研究例を示そうとしている）、などのプロジェクトがある。

〈参考文献〉

- [1] Nature Nanotechnology, Vol.3 No.8 p.496-500 (2008)
- [2] <http://www.jst.go.jp/pr/info/info587/index.html>
- [3] J Phys Chem C., Vol.112 No.25 p.9163-9167 (2008)

(4) 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 CMOS を置き換えるデバイスと位置付けられる。いわゆる「Beyond CMOS」である。スピンを利用したデバイス、強相関材料を利用したデバイス。原子スイッチ、分子デバイスなどが考えられている。メモリにはこれらの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（すなわちロジックデバイス）に関しては現在のところ CMOS に代わる具体的な集積デバイスが存在しない。基本的にスケラブル（微細化可能）で、かつオンオフ比が優れていることが条件であるが、非 CMOS デバイスでこの条件を満たしているものは残念ながら今のところ見当たらない。

したがって、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 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も多大な資源を投資すべきである。

このような状況のもと、最も注目される新デバイスは、「カーボン系電界効果トランジスタ（FET）」であろう。もともとカーボンナノチューブ FET は高い性能を有することから研究が盛んに行われてきたが、最近では、グラフェン FET でも極めて高い性能が得られることが明らかとなり、各国ともこぞって研究に乗り出した。

また、シリコンベースではあるが、チャネル部分を革新するような技術が米国などで大きな進展を見せている。特に、チャネル部分にトンネル接合を入れてリーク電流を低減し、オンオフ比を高めようとする技術やアバランシェ効果をチャネル部に取り入れたトランジスタ、あるいはナノワイヤを利用したものである。この部分は日本では少ないが、注力の必要があろう。

産業への貢献という観点からは、“More 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 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

無線通信で実用化されているデジタル信号処理技術を、超高速シリコン LSI 技術を駆使することにより光ファイバ通信に適した方式として応用することにより、飛躍的な伝送特性の改善を可能とするデジタルコヒーレント光伝送方式の研究開発が進んでいる。デジタル信号処理技術を駆使することにより、従来は難しかった光の周波数や位相を用いたデジタル変復調方式の適用に道が拓かれ、1 波長 100Gb/s 級の長距離波長多重伝送の実現に関し、研究開発が盛んになっている。キー技術としては、リアルタイム動作を可能とするデジタル信号処理 LSI、ならびに、コヒーレント方式に必要な光集積回路であろう。今後コンポーネントレベルではこれらの分野での技術革新が注目される。

(2) 光メモリ

BD 以降の光ディスク関連の研究開発がシュリンクしているように見える。なぜならば半導体レーザの発振波長が短波長側の限界にまで達していること、それに対物レンズの高 NA 化もほぼ限界に到達していると考えられるからである。もちろん SIL (Solid Immersion Lens) は 1 以上の NA が可能であり、すでに 1.84 とか 2.4 という試作品も登場しているが、高密度記録容量サイズに対する製造コストやレンズ重量の問題を考えると事業化の点から考えて、フィリップスやソニーがいち早く事業化を中止したいきさつがある。したがって今後の高密度光ディスクの開発方向は次の 4 種類に限定される。①超解像 (SUPER-RENS) 光ディスク方式、②ホログラフィックメモリ方式、③ナノ・インプリントによる大量複製が可能なカートリッジ方式テラバイト光ディスク、④超小型フェムト秒レーザ搭載による 2 光子吸収方式超多層光ディスクである。すなわち、この順で実用化されると思われる。

特に今後注目すべきは ①の光ディスクのタイプである。これは日本で発明され、2008 年から欧州で積極的に開発が進められているものである。この方式によると、1 層で 200G byte が可能であり、片面 2 層で 400G byte、両面 2 層で 800G byte になりうる極めて有望な近未来製品となろう。ディスク媒体さえ開発できれば従来の BD プレーヤや HD DVD プレーヤなど 405nm 半導体レーザ搭載プレーヤーがそのまま利用できるという強みがある。

②の方式は近々実用化されると思われるが、二つほど問題がある。

第一に ROM ディスク生産は難しいという点であり、CD や DVD のようなソフトの量産化はできない。第二に一般家庭には入らないように思われる。すなわち、日本の企業が得意とする量産 (コンシューマー) 製品にはならないであろう。したがってその用途は大容量のメモリを必要とする市役所や博物館などの限られたユーザ限定品になると思われる。

③はかなり有望であり、表面プラズモン共鳴をたくみに利用する。詳しくは前年度の報告書を参照していただきたい。

④は条件付である。原理は一番優れているが、肝心の光源がまだ存在しないので、現在の半導体レーザ並みの小型超短パルス光源が開発されたらという条

件が付いている。以上の理由で、今年度以降は①の超解像光ディスクに期待したい。

(3) ディスプレイ技術

FPD の画面サイズは引き続き大型化開発が進み、試作品レベルではあるが、PDP で 150 型、LCD で 108 型が発表されている。また、高精細化ではフル HD (1920 × 1080 画素) がより小さなサイズのテレビまで導入され、LCD では 32 型、PDP では 42 型までのフルハイビジョンテレビが製品化されている。高コントラスト化については、LCD は部分駆動バックライト (ローカルディミング) の技術で向上させる製品が発売され、PDP も駆動方式等の改善により実用上十分な 30、000 : 1 まで製品レベルで実現されている。また、広色域化についても、拡張色空間規格 xvYCC に対応した製品が増えてきている。

最近特に各社がしのぎを削っているのは、薄型化である。これまでは薄型テレビと言っても 10cm 程度の厚さがあったが、2007 年には 2 ~ 4cm の LCD テレビが発表ないしは発売され、2008 年には 40 型で 1cm を切る (最薄部 9.9mm) LCD テレビが製品化された。これはバックライト部に導光板を使う等の工夫で実現している。PDP も薄型化の発表を行っているが、薄型化という点で最も有利なのは有機 EL ディスプレイである。

2007 年 12 月に、11 型という小型サイズではあるが、有機 EL を用いたテレビが世界で初めて発売され、大きな注目を集めた。厚さはわずか 3mm (最薄部) であるほか、高コントラスト、高色再現性、動画対応力の高さなど、画質的にも大変優れている。今後の大型化、低コスト化に向けての技術開発が期待される。

また、地球環境問題への対応として、テレビの省エネ化に各企業とも力を入れており、32 型で 89W という、従来製品に比べ消費電力を半減した LCD テレビも、バックライトの改善や光学フィルムの活用で実現された。

要素技術では、ZnO や InGaZnO などの酸化物半導体 TFT が注目を集めている。これは、LCD テレビに使われている従来のアモルファスシリコン TFT に比べ、高移動度のトランジスタを蒸着により作ることができることから、次世代の LCD や有機 EL 向けに期待されている。

3D (立体) 映像への対応も、最近の注目すべき動きの一つである。3D の映画コンテンツが増えており、衛星放送でも 3D 放送が試験的に流れている中で、過去何度かブームにはなっても事業にはならなかった 3D が事業として立ち上がるのかどうか、各企業は技術開発には力を入れながらも様子見の状況である。

(4) フォトニック結晶・メタマテリアル

① シリコン・フォトニクスによるファンドリーサービス (フォトニック結晶)

シリコン・フォトニクスは、高度な CMOS プロセスや大規模な集積技術を使って従来を大きく凌駕する高度かつ低コストな光デバイス・回路を実現する試みである。2000 年代前半に MIT、横国大、NTT が SOI 基板上光導波路デバイスを開発したことが契機となり、2004 年からインテルが研究を開始したことが各国研究者や計算機メーカーに衝撃を与えた。さらに 2005 年、製造部門

を持たない米国ベンチャー企業ラックステラがモトローラのファンドリーサービスを利用して低価格の光トランシーバーモジュールをリリースしたことが、その後の研究開発を象徴する、さらに大きな衝撃を与えた。2007～2008年、欧州 IMEC、シンガポール IME、日本 NTT-ATN が一般向けのファンドリーサービスを開始し、この流れが加速しつつある。

このようなサービスは、シリコン・フォトニクスだけでなくフォトニック結晶など微細光デバイスの研究スタイルを大きく変えるかもしれない。近年、フォトニック結晶のレベルが上がり、高度な設備を持たないと研究競争に参加できないため、研究機関が徐々に絞られていた。しかし市販の計算ツールも増えてきているため、アイデアと計算ツールさえあれば新しいデバイスを考えることはできる。ここでファンドリーサービスを利用すれば、テーラーメイドのデバイスが入手できることになり、研究機関を劇的に増やす契機になるかもしれない。またファンドリーサービスを使うと、従来よりも桁違いに大規模な光集積回路が容易に得られるので、基礎研究にとっても「単体デバイス開発」から「機能の合成と利用」へというパラダイムシフトが生まれ、未開の基礎テーマが数多く生まれると予想される。フォトニック結晶を他のナノ構造デバイス、電子回路、MEMS、バイオ・流体回路などと組み合わせれば、極めて広い応用分野の強力かつ主要なツールになることは間違いない。事実、米国ではこのような傾向が顕著になってきており、日本の立ち後れが特に懸念される状況となっている。

②スローライトやストップライトを利用した光バッファ・メモリーや波長変換（フォトニック結晶）

ある冷却原子が示す巨大な一次分散を用いると光の群速度を著しく遅くできることが1990年代にハーバード大で実証され、スローライトと呼ばれるようになった。同様の光は光デバイスの構造分散を用いても起こり、2001年にNTTがフォトニック結晶導波路で約100分の1の光速を観測した。これらの手法は、次世代に期待される光ルータにおいて光パケットを所望時間だけ蓄積する光バッファを実現すると期待され、米国 DARPA がプロジェクトを立ち上げている。ただし一般にスローライトは帯域が狭く、二次以上の高次分散も巨大なため、変調された光信号に適用できないという問題があった。2004年に横国大は、高次分散をなくしつつ帯域を拡大する手法を初めて議論し、スローライトの最も重要な性能指標は遅延と帯域の積（これは蓄積信号ビット数と等価）であることが認知された。オンチップのスローライトデバイスでは、2007～2008年にIBMが約10ビット、セントアンドリュース大が約20ビット、横国大が約30ビットを報告している。また横国大は、外部制御による±10ビットの遅延のチューニングを実現し、光バッファの基本動作を初めて実証した。今後、デバイスの長尺化により光パケットに相当する数千ビットのバッファは可能と思われる。

スローライトと関連して、光のスペクトルを瞬時に狭くし、上記の遅延帯域積を保ったままで遅延時間を極大化させるストップライトが2004年にスタンフォード大より提案され、ビット単位の光メモリーを実現すると期待され、動

的制御と呼ばれて実証研究が活発になった。例えば、フォトニック結晶共振器やスローライト導波路、結合リング共振器などの屈折率を局所的に変化させると、共振 Q 値を高めたり弱めたりすることができる。光がやってきたときに瞬時に Q 値を上昇させると、光パルスを完全停止させることができる。このような基本動作を 2007 年に京大とコーネル大、2008 年に NTT が成功させている。またこのような動的制御は波長変換を伴うが、この種の変換は原理的に効率が 100%なので、光の停止に関係なく波長変換の新しい原理になり得ることが NTT によって議論されており、特に MEMS 技術を用いれば数 100nm クラスの超広範囲の連続波長変換が可能なが示唆されている。上記の三つのグループでは、既に 1nm 程度の波長変換を実際に観測している。

③共振効果やプラズモニクスによる発光増強（フォトニック結晶、プラズモニクス）

特定の光学モードを強く閉じ込める微小共振器があると、モード真空場密度が高まり、電子の自然放出レートが増大する。こういった研究は 1980 年代から始まっていたが、2000 年以降、フォトニック結晶微小共振器などで実証が進められた。この効果は、例えば LED の効率を高めると期待されたが、LED では実用的な構造で電流注入や光取り出し効率も含めた総合的な設計が必要なため、既に最高効率が 70%に達しようとする高効率な LED では必ずしも有効に働かない。むしろ、もともと発光効率が低いシリコンなどの材料の発光効率を高める研究が盛んである。バルクシリコンの発光効率は 10^{-6} 程度と極めて低いが、これをフォトニック結晶やマイクロディスクといった微細構造に加工すると外部量子効率が 10^{-3} 程度まで上昇することが 2005 ～ 2008 年に東大、武蔵工大、京大、Caltech など観測されており、光取り出し効率の向上と分離した評価も含めて、多くの研究者が取り組んでいる。単なるシリコンだけでなく、ナノ結晶シリコンや Si/Ge など、関連する材料もいろいろである。これがすぐにシリコン・フォトニクスの有力な光源になるとは思えないが、例えば効率が数%に達すれば、何らかの応用が現れるのではないかと予想する。

同様の発光増強では、プラズモン効果も期待されている。金属／誘電体境界面に発生する表面プラズモンモードの強い電場局在は、到来する光のエネルギーを受け取って、強く局在、散乱させることがこれまで主に議論されてきた。しかし発光層自体が金属／誘電体境界の近くにあると、表面プラズモンモードの真空場が直接的に自然放出レートを増強し、発光効率を増大させることが 2005 年に Caltech（同研究者は現在、京大に在籍）から報告され、国内外で注目を浴びている。これは単に半導体発光層近傍に金属膜（例えば Ag）を蒸着するだけで起こり、普通は光りづらい材料の発光の外部効率を桁違いに向上させることが示されている。上記のシリコン発光と同様に何らかの応用が期待され、しかも極めて簡単に作ることができるので、さらに有効と考えられる。

④スロット構造光デバイス（フォトニック結晶を含むフォトニックナノ構造）

通常、光は屈折率が高い箇所を通りたがると一般に考えられている。例えば多くの光導波路は、低屈折率のクラッドで囲まれた高屈折率のコアを光が伝搬

する。しかし、もしコアの中央に極めて狭い空気スロットを形成し、コアと空気の屈折率差がきわめて大きいと、伝搬モードがスロット部分に強く局在することが 2004 年にコーネル大により発見された。これは境界面のモード電界の法線成分が大きな不連続を起こし、二つの不連続な電界が狭いスロット内で結合することで発生する。このような現象は古典的なモード解析で説明でき、物理的に新しいことではないが、このような現象が顕在化する高屈折率差デバイスが従来は存在しなかったため、議論されてこなかったと思われる。驚くのは、スロットの幅を光学波長の $1/10$ 以下にしても、光エネルギーのほとんどがスロットに閉じ込められることであり、回折限界を超える光の局在が単なる誘電体構造で可能になるという事実である。同様の光局在は、中心部に空気スロットや空気穴をもつ共振器でも起こる。

光が空気に局在するので、例えば導波路や共振器をガスや液体にさらして成分を分析するセンサに応用すると、大きな感度を発生させることができる。液体中で微小球を捕獲する光ピンセットとしても、巨大な引力を生むことができる。また③で述べた発光増強に関連して、例えば気体原子をスロット内に捕獲し、発光の増強や抑制、電子と光の強結合状態の生成など、量子情報に向けた応用も考えられる。

⑤環境・バイオセンシングデバイス（フォトニック結晶、プラズモニクス）

最近、フォトニクス関連の国際会議に出席すると、非常に発表数が多いことに驚かされる。大気中の CO_2 や窒素酸化物などを検出する技術として、2 ミクロンを超える波長域で感度をもつ材料による光検出器や光源の研究が多いが、最近、光検出器をアレイ状に並べて、 CO_2 など特定のガスの排出を直接可視化できる撮像素子の実現されている。一方、空気中に露出された微小共振器の共振波長の強度や波長シフトを観測することでガスを検知する研究も欧米では活発である。

同様の微小共振器はバイオ検出にも利用することができ、特にマイクロ流体光学（マイクロフルイディクス）と絡んで、液体の屈折率や液体と共に移動する微小流体や DNA などの生体分子を検出する研究も数多い。2007 年に Caltech は極めて Q 値の高いシリカトロイダル共振器で単一 DNA やタンパク質の検出を行っている。ロチェスター大やゲント大は温度シフトを保証する構造を採用し、シリコン・フォトニクスを利用した安価なセンサを報告している。

(5) 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。また、大学発のフリーソフトが急速に普及しつつあり、とりわけナノフォトニクス向けの代表的なものに、MIT の MIT Photonic-Bands Package : MPB [1]、MEEP (MIT Electromagnetic Equation Propagation) FDTD Package [2]、シドニー大学の CUDOS (Centre for Ultrahigh bandwidth Devices for Optical Systems) MOF (Microstructured Optical Fibers、also known as photonic crystal fibers or holey fibers) Utilities [3] などがある。

〈参考文献〉

[1] <http://ab-mit.edu/mbp>

[2] <http://ab-initio.mit.edu/meep/>

[3] <http://www.physics.usyd.edu.au/cudos/mofsoftware>

3.3 コンピューティング分野

(1) クラウドコンピューティング

クラウド (cloud) とは雲のことであり、クラウドコンピューティングはネットワークに接続されたサービスを、その物理的位置やハード及びソフトの実体を意識することなく雲のように使用するコンピュータの利用形態である。サーバ・クライアント型とは異なり、2007 年よりコンピュータ利用の新パラダイムとして大きな注目を集めるようになり、今日 (2009 年) に至っている。ユーザ (企業や個人) は自前サーバーを所有するのではなく、有料あるいは無料 (広告付き) でサービスを利用する。ユーザのデータは多くの場合、雲の中の大規模サーバーで蓄積、管理される。

2006 年 8 月に Google CEO のエリック・シュミットがこの用語を使用した最初とされる。しかし関連する動きはそれ以前から存在していた。古くはサンマイクロシステムが “The Network is the Computer” を創業 (1982 年) のコンセプトとした。1990 年代の ASP (Application Service Provider)、更には 2000 年に入ってから SaaS (Software as a Service) はソフトウェアベンダの視点から捉えたクラウドコンピューティング形態を表していると言える。SaaS の形態をとる Web サービスも Web と共に伸びてきていた。グリッドコンピューティングは、ネットワークを介して多数の小型コンピュータを協調させて利用する形態であるのに対し、クラウドコンピューティングは多数のコンピュータであることは関係なく、一つあるいは少数の高性能サーバーであってもよく、そのようなケースが多い。

ソフトウェア機能の提供が SaaS とすると、プラットフォーム機能 (仮想マシン) の提供は PaaS (Platform as a Service)、ハードウェアリソース (仮想ディスクなど) の提供は IaaS (Infrastructure as a Service) とも言われる。

このクラウドコンピューティングが次のコンピュータ利用の大きな潮流になるのではないかと見なされている。そのプラットフォームを支配することがこれまでの OS のように次の覇権を握ることになると考えられ、米国大手 IT 企業は精力的に取り組み、開発を開始した。2007 年 11 月に IBM は実用可能なクラウドコンピューティング製品ライン “Blue Cloud” を発表した。2008 年 3 月に Yahoo! とインドの CRL (Computational Research Lab.) がクラウドコンピューティングの研究支援を発表。2008 年 5 月に Google が PaaS に位置付けられる Google App Engine の一般公開を発表した。これは Google 独自のファイルシステムである GFS (Google File System) や大規模分散ストレージの Big Table、自動負荷分散機能などを基盤としており、このような堅固なプラットフォーム上でサービスを開発、運用できる。Microsoft も PC 用の Windows-OS とは対極となるこの分野の重要性を認識し、2008 年 10 月にクラウドコンピューティング用プラットフォーム Microsoft Windows Azure を発表し、進出を始めた。

クラウドコンピューティングを支える技術としては、Web の標準規格や、サーバーの OS として Linux、仮想化技術としてオープンソースの Xen、分

分散処理フレームワークとして Apach Hadoop (Google の分散処理技術 MapReduce のオープンソース実装) などが現在使われている。このようなオープン技術であれば参入障壁は低いのであろうが、上記の Google のプラットフォームの例のように独自技術も使われ、技術力による差別化が進むと考えられる。

調査会社 Gartner は 2008 年の戦略的技術トップ 10 に「Web プラットフォームと SaaS」、2009 年の同トップ 10 に「クラウドコンピューティング」、「Web 指向アーキテクチャ」を選んでいる。日本でもコンピュータ利用の新パラダイムとしてのこのようなクラウドコンピューティングに大きな関心が寄せられてきているが、急いで米国の後追いを始めたといった段階である。基盤としてのプラットフォームの支配権が一旦確立すると、それは 20 年程に亘って続くことになり、OS においての状況がここでも生じることが懸念される。主流部分は難しいとしても、日本は何か独自の(部分)領域で存在価値、競争力を獲得するようにしたいものである。

(2) 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。例えば、2008 年 10 月にイタリアのエリーチェで OECD 加盟国の科学研究分野における政策立案・国際協力の勧告を行う場となっている OECD Global Science Forum の一環として「OECD GSF Workshop on Applications of Complexity Science and Public Policy」が開催され、地球規模の複雑な課題の一つとして Resilience and Vulnerability to Extreme Events が取り上げられている。

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。この2回の EU-US Summit を経て EC FP7 のもとで International Co-operation in Trustworthy, Secure and Dependable ICT infrastructures (INCO-TRUST) と称する国際共同プロジェクトがスタートし、地球規模の大規模ネットワークサービスセキュリティ、プライバシー、ディペンダビリティをテーマに、欧州、米国に加えて、日本、カナダ、オーストラリア、韓国の研究者、政策担当者が参加するワークショップが2009年3月末にスペインのマドリッドで開催される予定である。

(3) スーパーコンピュータ

Top500の第1位となったIBMのRoadrunnerは、Sonyのプレイステーションに利用されているCellと呼ばれるプロセッサを利用している。また、東工大のTSUBAMEは、GP-GPU（General Purpose Graphics Processing Unit）を利用しており、今後こうしたよりコストが安く計算能力の高いプロセッサを利用しスーパーコンピュータを実現することが主流となりそうであり、システムの構成法を変化させる可能性がある。

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。

(4) 並列コンピューティング・クラスタコンピューティング

計算センターでの利用を前提としたときに、複数人による計算機の使用となるため、ファイルシステムが課題となる。すなわち、クラスターの大規模化にスケーラブルに対応できるファイルシステムの技術に注目が集まってきている。

(5) チップマルチプロセッサ

チップマルチプロセッサは、約15年前から研究が進められたが、近年急速にコモディティ化が進み、サーバー用、PC用からユビキタスデバイスまで、広範に利用されるようになった。今後は、中小規模のチップマルチプロセッサにおけるシステム技術として、トランザクショナルメモリ、ディペンダビリティ、省電力、自動並列化ソフトウェア、並列プログラミングなどが研究され、飛躍的に進歩すると考えられる。

より大規模なチップマルチプロセッサについては、オンチップネットワーク

と通信・同期方式、大規模並列プログラミング、資源管理方式、ディペンダビリティ、省電力などの研究開発が進められなければならない。

応用として、現行のサーバー、PC、組み込み系などで対象とするもの以外にも、リアルタイムシステムやデータマイニングなどが重要性を増すであろう。

このような状況下で、メニコアアーキテクチャの研究者や並列プログラミングを行える人材の育成が、大学や産業界における急務となっている。

(6) リコンフィギュラブルシステム

FPGA ベースの HPC（ハイパフォーマンス・コンピューティング）がますます盛んになる。動的リコンフィギュレーションの技術が進み、実用化が進むと考えられる。粗粒度リコンフィギュラブルシステムについて、車載やゲームマシンを含む組み込み系で大きな発展が期待される。この分野で日本の優位性を確保できるかどうかの一つの鍵になるであろう。

(7) 省電力情報処理技術

今後は、静的もれ電流の抑止技術、アーキテクチャによる細やかな電力制御、ソフトウェアと組み合わせた省電力などが重要となる。特に、デバイス、アーキテクチャ、ソフトウェアの各技術の統合が課題であり、これを現実の情報処理システムの環境に応じて最適化することが最重要のテーマとなっている。

(8) Web 情報システムのプライバシーとセキュリティ問題

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 [1] とセキュリティ問題であろう。

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、Google Street View の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考ええる。

また、セキュリティ問題に関しては、この 1 年間にエストニアやグルジアといった国がサイバー攻撃され、これらの国のネットワークが麻痺するという事件が発生した。このような攻撃をしかけるグループの技術は向上していると言われ、日本も社会インフラを麻痺させられる危険に晒されている。よって、インターネットセキュリティに関する国家的検討も急務であると考ええる。

〈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」、ニューヨークだより 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>

(9) データベースとデータマイニング

データベースシステムとデータマイニング技術は今世紀に入ってから最も進展の速いコンピュータ科学の領域の一つと言える。その理由は、当該技術が、大規模で様々なデータの管理・検索・利用・高付加価値化を研究の主対象とする技術であり、超高速インターネット、Web 情報基盤、超大規模 Web 検索エンジン、クラウドコンピューティング、データセンター、超大規模ストレージ、高付加価値化のための高度なデータベース処理アルゴリズム、などの先端的技術潮流を統合し、国の活力に直結すると見做せる新しい大規模な情報知識インフラストラクチャに大きく寄与するものと考えられるからである。そのため、データベース領域は、年単位で著しい技術進化が生まれている。以下、前年度にあげた項目の進展も含め、新しい技術潮流を列挙する。

① プライバシー保護データマイニング

今日に至るまで多様なデータマイニング技法が研究されているが、その一方で、データベースを公開するときに、個人の特定を不能とするプライバシー保護を行う必要がある。この考え方を、プライバシー保護データマイニング (Privacy Preserving Data Mining) と呼ぶ。伝統的な統計的技法の流れでは、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。

一方、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 個存在する事を常に保証し、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]。しかし、そのような最適なデー

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。最近では、近似計算アルゴリズムが考案されたり [3]、k-匿名性とは異なる別のデータ保護基準（l-多様性）が提唱されている。また、現実には効率よく計算可能な範囲の品質で k-匿名性や l-多様性を大規模データベースに実現する試み [4] が続いており、計算量を下げるアルゴリズム理論的研究を主役とした時代から、現実には数十万件級のデータベースを対象とする工学的な時代に入ってきた。その意味でも、ベンチマーク用のデータセットの整備が求められる。

〈参考文献〉

- [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.
- [4] B.-C. Chen, K.LeFevre, R.Ramakrishnan, “Privacy Skyline: Privacy with Multidimensional Adversarial Knowledge,” VLDB' 07, pp.770-781, 2007.

② データベースの Provenance（出所検証）と Lineage（履歴追跡）：情報の検証と監査のための技術

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 の漏洩原因となった質問（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。情報検索システム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。似た動機に基づいた研究として、不確実な情報を含むデータベースへ問い合わせを行った際に、その答えの正当性に関し適切な説明を付与するという試みがある [7]。とりわけ、情報抽出のように、もともと曖昧な情報を対象としたときは、あるデータが情報抽出問い合わせの答えになかったときに、なぜそうなるのかを納得の行くように説明する必要が生じる。このように、データベースシステムへの問い合わせの結果自体が妥当であることを合理的に説明しようという考え方を、Provenance（出所の検証）と言う。

近い技術として、データウェアハウスなどの記録データ管理機構において、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法がある [5]。この概念は、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必須になりつつある。このように、長期記録データの保管が現実には普及し、しかもある程度不完全なデータであることが多い結果として、Provenance や Lineage といった合理的説明能力がデータベースシステムに強く求められる時代になってきた。とりわけ米国の技術対応は動きが速く、2008 年度も SIGMOD などの

主要国際会議で複数の発表セッションが組まれている [8、9]。

〈参考文献〉

- [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.
- [7] J.Huang、T.Chen、A.Doan、J.F.Naughton、"On the Provenance of Non-Answers to Queries over Extracted Data," VLDB' 08、pp.736-747、2008.
- [8] Thomas Heinis、Gustavo Alonso. Efficient Lineage Tracking For Scientific Workflows. Proc. of SIGMOD 2008.
- [9] Adriane Chapman、H.V. Jagadish、Prakash Ramanan. Efficient Provenance Storage. Proc. of SIGMOD 2008.

③ データスペースと Pay As You Go : 漸進的な情報統合技術

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可能とする研究を、情報統合 (Information Integration) と呼ぶ。現在では、あらゆる非構造データ、XML などの半構造データ、関係データベースなどの構造データを対象にして、要求に応じて妥当な情報統合環境をすみやかに実現しようという研究が注目されている。このような考え方を、過去の異種関係データベース間の情報統合技術と区別して、データスペース (Data Space) と呼ぶ [12]。

具体的には、ユーザによるフィードバックを通しながら適当な情報源自体を見つける技術、相異なる情報源のうち対応する可能性の高いスキーマや属性の半自動検出や統合検索の技術、あるいは、複雑な情報スキーマ情報が無くとも適切に質問できるようにキーワード検索を統合グラフデータモデル上で実現する、等の試みがなされている。とりわけ、構造データベースや半構造データベース、グラフデータベース、ストリームデータベースへのキーワード検索は要素技術として主力になってきた [10、11]。

また、適用対象も、単にインターネット上の公開データのみならず、企業内情報のようなレガシーデータベース上のエンタプライズサーチや、e-Science などの科学データ分散環境でのメタデータ統合検索、などが指向されており [12]、単純な Web 検索エンジンとは用途が異なる。また、既存の情報統合技術と違い、情報源間の対応関係などは不確定で確率的なものを許し、利用時にユーザからのフィードバックを使って徐々に品質や速度を改善していこう、という精神が伺える。この考え方は、Pay As You Go と呼ばれ [13]、データベースの高付加価値技術の基本思想として重視されている。

〈参考文献〉

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

- [12] A.Halevy, D.Maier, “Dataspaces: The Tutorial,” VLDB’ 08, tutorial, 2008.
- [13] M.A.V.Salles、他、“iTrails: Pay-as-you-go Information Integration in Dataspaces,” VLDB’ 07, pp.663-674. 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生成される大量の時系列データをストリームデータと呼ぶ。ストリームデータを扱うデータベースシステムは、2000 年以後、スタンフォード大 (STREAM) などで試作され、既に主要データベース製品への取り込みや独立ベンダによる複合イベント処理製品として市場に出ている [14]。

一方で、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 [15] や、ストリームで扱うデータとしてセンサ出力などの単純な観測数値を扱う場合、あるいは、監視イベントなどのデータベースレコードを扱う場合 [16] など、実際の応用領域に基づいた多様性がさらに広がりつつある。ほか、問合せ記述言語の標準化に関する提案 [17] もなされている。データストリーム用途に特化し空間索引を提案し、地図ポータルサイトアプリケーションを用いて評価した論文 [18] が注目されたほか、新たに情報家電などが取り扱う個人情報のプライバシー保護機構に関する提案 [19] も行われている。学界での関心も高く、VLDB なる国際会議では、必ずしも新しい手法を提案するものではないもののデータストリームから頻出アイテムを発見する古典的な問題に対する様々な手法を比較実験した論文 [20] がベストペーパーに選出された。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ことは確実であり、センサ技術が日本の強い領域であることから、個々の成功した適用例を精査して促進すべき段階に入ったといえる。

〈参考文献〉

- [14] M.Lefler, J.Gehrke, M.Spicer, J.Goldstein, D.Gawlick, “Panel: Data Streams Go Mainstream”, ACM SIGMOD 2007 (industrial session), p.971, 2007.
- [15] Bandi, A.Metwally, D.Agrawal, A.E.Abbadi, Fast Data Stream Algorithms using Associative Memories, ACM SIGMOD2007, pp.247-256, 2007.
- [16] J.Agrawal, Y.Diao, D.Gyllstrom, N.Immerman, “Efficient Pattern Matching over Event Streams,” ACM SIGMOD 2008, pp.147-159, 2008.
- [17] Stan Zdonik, Namit Jain), Shailendra Mishra, Anand Srinivasan, Johannes Gehrke, Jennifer Widom, Hari Balakrishnan, Mitch Cherniack, Ugur Cetintemel, Richard Tibbetts. Towards a Streaming SQL Standard. Proc. of VLDB 2008.
- [18] Yanif Ahmad, Suman Nath. COLR-Tree: Communication Efficient Spatio-Temporal Index for a Sensor Data Web Portal. Proc. of ICDE 2008.
- [19] Rimma Nehme, Elke Rundensteiner, Elisa Bertino. A Security Punctuation Framework for Enforcing Access Control on Streaming Data. Proc. of ICDE 2008.

- [20] Graham Cormode, Marios Hadjieleftheriou. Finding Frequent Items in Data Streams. Proc. of VLDB 2008.

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。Google に端を発する MapReduce 等の分散格納・処理機構などは、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ており [21、22]、Microsoft の分散型データ処理基盤に関する論文は OSDI でベストペーパーを受賞するに至っている [23]。

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。手法としての斬新さはないものの並列処理を駆使す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。なお、一方で従来型の定型データを対象とした堅牢なデータベース技術への要求も依然として高く、トランザクションの分離性というコア技術に関する論文 [24] が SIGMOD においてベストペーパーを受賞している。

〈参考文献〉

- [21] William Chang, Raghu Ramakrishnan, Wei Ying Ma. Large Scale Analytics. Proc. of SIGMOD 2007.
- [22] Giuseppe DeCandia, Deniz Hastorun, Madan Jampani, Gunavardhan Kakulapati, Avinash Lakshman, Alex Pilchin, Swami Sivasubramanian, Peter Voshall and Werner Vogels. Dynamo: Amazon's Highly Available Key-Value Store. Proc. of SOSP 2007.
- [23] Yuan Yu, Michael Isard, Dennis Fetterly, Mihai Budiu, Úlfar Erlingsson, Pradeep Kumar Gunda and Jon Currey. DryadLINQ: A System for General-Purpose Distributed Data-Parallel Computing Using a High-Level Language. Proc of OSDI 2008.
- [24] Michael Cahill, Uwe Rohm, Alan Fekete. Serializable isolation for snapshot databases. Proc. of SIGMOD 2008.

⑥データベースの消費電力を低減するグリーン技術

データセンターにおいて消費される電気エネルギーの増大が注目され、殊更、デジタルデータが年々指数関数的に増大している下では、データベースを支えるシステムのグリーン化は極めて重要な課題と言えよう。従来のグリーン技術は、比較的応答時間を許容する余裕のあるエンドユーザ環境で発展してきたが、性能要求の厳しいエンタープライズシステムではこれとは異なるアプローチが必要である。Web サーバー等については、サーバー仮想化と筐体間プロセスマイグレーションが導入されつつあり、サーバコンソリデーションにより電力使用効率を改善する効果大きい。一方、データベースサーバは、本質的にディスクと切り離しが不可能であり、また当該システムではサーバーよりむしろディスクストレージの消費電力が支配的であることから、より問題は複雑である。Google はデータセンターにおける 1000 台以上のマシンの消費電力を分析した論文 [25] を発表したほか、Oracle はトランザクションベンチマークシステムを対象としたシステム全体の消費電力モデルを提案 [26] しており、今後、膨大なデータを蓄えたストレージ装置を含めて、システム全体の動的な性能・電力バランスを如何に実現するかが重要な課題となるだろう。

〈参考文献〉

- [25] Xiaobo Fan、Wolf-Dietrich Weber、Luiz Andre Barroso. Power provisioning for a warehouse-sized computer. Proc. of ISCA 2007.
- [26] Meikel Poess、Raghunath Othayoth Nambiar. Energy Cost, The Key Challenge of Today's Data Centers: A Power Consumption Analysis of TPC-C Results. Proc. of VLDB 2008.

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) 要素技術・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) ID 連携技術の高度化に関する研究
- (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) 人工物の偽造防止技術における耐クローン性を評価する手法の開発
- (4) 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：

- (5) 自然治癒型高信頼性セキュリティ (Homeostasis Dependable Security)
- (6) 超細粒セキュリティ (Ultra fine-grain Security)

C) に関する研究：

- (7) ICT 利用における自己修復的社会システムの構成の研究

D) に関する研究：

(8) 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) ID 連携技術の高度化に関する研究

多くの人々がネット上のサービスを利用するために複数の ID を持つようになった現在、ID を関連付け利用者とサービス提供者の負担を軽減する ID 連携・ID 管理技術は、その重要性が今後増すことが予想される。しかしながら、利用者と複数のサービスを関連付けるこれらの技術は、場合によっては、利用者のプライバシーを損ないかねない。また、認証が一箇所もしくは数か所に集中するため、認証方式やサーバーの危殆化、端末の乗っ取りなどに脆弱になるという欠点がある。一方、ネットワーク監視機能の強化、証拠保全や内部統制の整備など、利用者の挙動の把握は年々容易になりつつあり、また、個人情報保護法の施行により、個人データの安全管理のために必要かつ適切な措置を講じなければならないようになった現在、利用者のプライバシーが確実に保護されなければならないサービス（例えば、内部告発や匿名での医療相談、いじめ相談、なやみ相談など）の実現は技術的に困難になりつつある。

本テーマでは、今後重要となる ID 連携・ID 管理技術に、より高度な保護機能を組み込むための研究を推進する。具体的には、以下に挙げる課題が考えられる。

A) 利用者の匿名性を確保しつつ、その乱用を防止可能な ID 連携技術に関する研究。より具体的には以下に挙げるメカニズムの実現に関する研究を含む。

- 1) サービス提供者、認証提供者（Identity Provider: IdP）、ネットワーク接続サービス提供者が結託したとしても、そのサービス利用者の特定を困難とするメカニズム。
- 2) 通信を行うためのアドレス（IP アドレスや MAC アドレスなど）から利用者の特定や関連付けを困難としつつ、匿名性の目的外利用を防止するためのメカニズム。
- 3) 匿名サービスを利用するための特別な登録手続きを不要にするメカニズム。

B) 認証方式やサーバーの危殆化、端末の乗っ取りなどにも強い ID 連携技術に関する研究。より具体的には以下に挙げるメカニズムの実現に関する研究を含む。

- 1) Malware、Bot などによる端末乗っ取りに対しても耐性のあるサービス利用手法
 - 2) サーバーの危殆化に強い認証および情報保存方式
- これらの研究の推進により、利用者の匿名性を確保しつつ、その乱用を防止可能な ID 連携技術や、認証方式やサーバーの危殆化、端末の乗っ取りなどにも強い ID 連携技術の実現および普及が期待できる。

(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ルラブル・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）人工物の偽造防止技術における耐クローン性を評価する手法の開発

住民票、パスポート、免許証、健康保険証カード、銀行券、その他の紙の重要書類等の人工物には、すかし、ホログラム、マイクロ文字等、偽造を困難にする（あるいは偽造を検知する）のためのさまざまな技術が実装されている。こうした技術の有効性は、基本的には、製造に必要な技術情報の非開示や材料の供給制限といった手段によって担保されている。ただし、これらの人工物は非常に重要な書類・帳票として機能するにもかかわらず、通常人間の目や触覚による安定的（あるいは統一的）とはいえない方法によって真偽判定が行われているほか、人工物の偽造（偽造されたものをクローンと呼ぶ）への対策の有効性（耐クローン性と呼ばれる）に関する定量的な評価方法が確立していないのが実情である。その結果、ユーザがこれらの偽造防止技術を横並びで定量的に比較・評価し、合理的に適切な技術を選択することも事実上困難となっている。

一方では、微細加工技術やナノテクノロジーに代表されるように、非常にミクロな世界での物質の加工技術の高度化が進んでおり、こうした技術を攻撃者が利用可能な環境下においては、従来は「クローンの製造が困難」と考えられていた人工物が今後リーズナブルなコストで複製されてしまう可能性も高まっているといえる。

こうしたなか、人工物の認証や偽造防止に関する先端的研究として、横浜国立大学の松本勉教授らの研究チームによる「人工物メトリクス」の研究が挙

げられる。人工物メトリクスとは、各人工物に固有の特徴を利用して認証を行う技術であり、松本教授らによって提唱されているものである。人工物メトリクスに範疇に入る技術としては、IC における PUF (physical unclonable function) や、紙表面の凹凸によって生じるレーザ光のスペックル・パターンを利用した認証方式が挙げられ、これらを実現するシステムが既に実用化されている。これらの技術のポイントは当該人工物が十分な耐クローン性を有していることにあるものの、残念ながら現時点では、どの程度の耐クローン性なのか定量的に示されていないという課題が残されている。

こうした人工物メトリクスをはじめとする人工物の偽造防止技術における耐クローン性の定量的な評価手法および評価尺度の確立を目的とする研究開発が必要となっており、今後の研究動向が注目される。

(4) 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を検証の対象としてきた。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、機械的な証明の実践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おり、証明の正しさの検証は重要になってきていると考えられる。実際、暗号の比較的単純な紙上の証明であっても、定理証明器上でそのままの証明を検証しようとすると困難にぶつかることが多く、証明で「自明」と省略された部分が厳密には自明と言い切れない例が散見されている。

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、これらの不整合がしばしば問題となっている。例えば、暗号の設計に用いられる Random Oracle Model の仮定（ハッシュは衝突せず、ハッシュ値については何も事前に推測できない）に対し、実際の暗号実装で用いられるハッシュ関数は特定の出力サイズを持ち、公開鍵暗号の鍵長とは一致しないため、その取りうる値の可能性の偏りの排除は自明でない。また、暗号プリミティブの設計では計算機上で具体的な 2 進数表現を行うためのパディングなどを考慮せず、理想的な自然数で設計が行われることが多く、それを実際に実装した際の特性を突いた脆弱性も報告されている。

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、日本国内での研究グループの研究も進捗しつつある。現在のところ、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り、実用化には相当の研究期間が必要であるが、将来的には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強く期待される。

(5) 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。

(6) 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。

(7) ICT 利用における自己修復的社会システムの構成の研究

科学技術を使う際に事故は付き物であり、ICT においても例外ではない。事故を防止するためには技術的対策も必要であるが、同時にこれら技術的対策を活用し、事故の防止のための適切な社会システムが必要となる。本研究は、

ICT 利用において安全で安心な社会の実現のために、自立的に個人や組織が適切な役割を担う社会システムとはどのようなものか、情報通信技術と社会・人間系諸科学（社会学、経済学、法学、心理学など）を融合した研究である。

現在、情報セキュリティ技術の研究など ICT を安全・安心に利用する技術についての研究は盛んに行われている。しかし ICT を利用するのは人間であり、人間及び人間の集団がどのように技術と接するかは重要な問題である。情報セキュリティ事故の多くは不適切な人間の行動に原因の一部がある。またせっかく開発された有効な技術も個人や社会と整合性が欠如していたり、導入のための社会制度が不十分であったりすると利用されない。また報道等でも知られる通り、現在は ICT 技術が社会に広範囲に広まり ICT 利用に関係する事故は多く発生し、重大な社会的な損失も発生している。事故を防ぐ技術的な対策とともに、技術と人間および人間集団との関係を研究し、どのような社会システムを作り上げるべきか研究することは喫緊の課題である。

(8) 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、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。

3.5 ネットワーク分野

(1) ネットワーク応用（サービス技術）

クラウドコンピューティング技術に今後注目が集まる。コンセプトは“ネットワークコンピューティング”や“ユーティリティコンピューティング”など、過去にも出されてきていたが、昨今、現実的なサービスとして提供されつつあり、注目を浴びている。背景にはコンピュータハードウェアの低廉化とネットワークの高速化・高可用化が挙げられる。

技術的には、グリッドコンピューティングや分散ファイルシステム・分散データベースなど多くの挑戦的な面もあるが、最大のポイントは、ソフトウェアを所有せずに利用可能になってきた（SaaS：Software as a Service、と呼ぶ）というビジネス的側面であり、ソフトウェアの流通やアップデート・保守などのビジネスモデルに大きな影響を与える可能性がある。

信頼性、運用容易性、ネットワークとの親和性、セキュリティなど課題も多いが、これらが克服されれば、ネットワーク応用分野での新たなイノベーションを生み出す基盤となりうる。

(2) コグニティブ無線ネットワーク / ダイナミック・スペクトラム・アクセスネットワーク

無線周波数（スペクトラム）のほとんどは、TV、携帯電話等の各種無線通信システムのために割り当てられており、新たな通信のための無線周波数が枯渇しつつある。この問題を解決するために、各周波数に対するアクセス権を持たないユーザ（セカンダリユーザ）がアクセス権を持つユーザ（プライマリユーザ）への影響を回避しつつ利用することでスペクトラムの有効利用の実現を目指すのが本ネットワークである。

米国連邦通信委員会（FCC）は 2008 年 11 月 4 日、300MHz ～ 400MHz の TV 周波数をコグニティブ無線ネットワークに開放する案を採択していた。日本においても、総務省が 2008 年 10 月に「電波政策懇談会」を開始し、今後の周波数の有効利用に関して検討し始めた。国際標準化活動も、ITU、IEEE802.22、IEEE802.22.2（IEEE1900）、ETSI-ETRS において行われており、今後コグニティブ無線ネットワークが実現されると予想される。

(3) ICT と気候変動に関する取り組み・グリーンネットワーク

環境問題、エネルギー問題は喫緊の課題である。ITU（国際電気通信連合）においてもその問題が取り上げられ、2008 年 4 月に京都において「ITU Symposium on ICTs and Climate Change」が開催され、気候変動対策において ICT 利活用の重要性が共有認識化された。ITU 内に「ICT と気候変動」に関する検討を行う FG（Focus Group on ICTs and Climate Change）も創設された。このプロジェクトは、英国と日本が牽引しており、今後、CO₂ 排出量の削減に向けた取り組みのための通信業界におけるガイドライン並びに当該取り組みを評価するためのツール作成に向け、活動が益々活発化する見込みである。

現行のイーサネットではアイドル時にもアクティブ時と同レベルのエネル

ギーを消費していることが判明し、アイドル時のエネルギー消費を抑制する、省エネ効果のあるイーサネットに関する国際標準化が IEEE P802.3az Energy Efficient Ethernet において行われている。

日本においても、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構による「グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト(グリーンIT プロジェクト)」等において省エネ通信機器に関する研究開発が推進されている。今後さらにグリーンなネットワーク技術の研究開発が期待される。

(4) ディレイ・トレラント・ネットワーク技術

DTN (Delay/Disruption/Disconnection Tolerant Networks) 技術は、遅延が極めて大きい、あるいは、パケットロスや回線中断が極めて頻繁に起こる、そもそも回線がたまにしか繋がらない、など、従来は End-to-End 通信が困難なネットワーク(劣通信環境)が途中にあっても、時間・空間的な「不連続性」を克服して、End-to-End の非同期情報伝達を効率的・経済的に実現するための技術の総称である。

このような技術は、低電力・短距離通信による広域情報収集・配布を考えるモバイル・アドホックネットワークや、劣通信環境がメインのシナリオである特殊環境での情報交換、例えば、衛星間通信、海中通信、災害時のインフラ損傷下での通信などに対して個別に研究が行われてきた。それらを一般化・汎用化して、DTN として捉える機運、すなわち、従来個別に扱われてきた劣通信環境に対応するネットワークに関して、モデル・理論・要素技術を統一的に扱い、方式の標準化・実用化を目指す動きが始まった。

具体的には、IRTF において、現状の TCP/IP 上での利用を考慮した基本的枠組みの標準化が行われ、2007 年に RFC 化された。また、DARPA や FP-7 の資金により、テストベッド構築と実証実験が進められている。さらに、TCP/IP アーキテクチャの限界を超える技術として、新世代ネットワークの研究にも取り入れられるようになってきた。

(5) 情報通信端末技術

情報通信端末技術といわれると、ただ単に、端末の技術開発と考えられがちであるが、Google Android、iPhone、Chumby に代表されるように、米国や、既存企業が作り上げてきたソフトウェア資産を活用したり、新たに、ソフトウェア資産の流通の場(Google Market、iTunes Store など)までを用意したビジネスモデルが主流となっていており、それにより、以前は、キャリア主導での情報通信端末技術の開発が主流であったが、メーカー+ソフトウェア資産+ソフトウェア流通の場をセットにしたビジネスモデルを持つメーカーの台頭が著しい。

情報通信端末技術の鍵は、現在のネットワーク化された主力デジタル機器である、携帯、TV、カーナビ、PC、ゲーム機等の市場をどの程度支配しているかが各国の国際競争力に比例してくる。世界規模で見ると、日本のメーカーの携帯も、世界規模で見ればシェアが低く、また、デジタル家電の代表格である、TV の市場も SAMSUNG、LG 電子などがシェアを伸ばしており、シェアをい

かに取るか、とともに、単に、価格競争だけでなく、技術開発を利用した国際競争力強化に注力しなければならない。

(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、真のユーザニーズの把握が不可欠となる。

視覚、聴覚以外の嗅覚、味覚、触覚情報の提示装置が開発されつつあり、人間の五感情報を扱う通信技術が現実的な研究の対象になりつつある。

人間共存型ロボット（人型であるか否かは問わない）が徐々に家庭や職場など一般社会に普及しつつある。これらのロボットをネットワークに接続させることにより、人間生活をより豊かに便利にすることが期待できる。ユビキタスネットワーク、ユビキタスコンピューティングとも密接に関係する技術分野として「ネットワークロボット」が提唱され研究が進められている。

(7) 通信トラヒック理論

情報通信ネットワークシステムは今後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エンドユーザに提供しなければならない。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科学（サイエンス）的観点からのキャッチアップが必要不可欠である。また近年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の理論的研究が欧米を中心に活発化してきているが、国内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。

3.6 ロボティクス分野

(1) バイオロボティクス・移動知研究

現在開発が行われているサービスロボットには、人を含む無限定な環境において、安定かつ安全に動作することが求められる。その適応的に動作する知的機能を生物から学ぼうとする研究が活発化しつつある。従来からも Biomimetics や Bio-inspired Robotics と呼ばれる研究分野が存在したが、移動知 (Mobiligence) 研究 [1] では、さらにそれを、生物が適応的行動を生成するメカニズムの解明にまで掘り下げた研究が行われている。移動知研究は、それを神経生理学なども含め、生工連携によって構成論的に明らかにしようとする研究であり、動的システムのモデリングやハイブリッドシステム (サイボーグ) 構築のためのメカトロ要素技術にロボティクス技術が活用されている。しかし、この研究において最も重要なポイントは、これによって人を含む無限定な環境において適応的に動作可能なロボットの設計原理の導出が期待されるということである。

また、BMI (Brain Machine Interface) などの、生体とロボットを融合するための研究開発が活発化している。人間の脳からの信号で直接人工的なボディを動作させることが可能になる可能性がある。パワーアシスト装置としてのロボットにおいても、バイオロボティクス技術の活用が期待されている、これらのことから、生物学、医学、生体工学とロボティクスの学際領域であるバイオロボティクスの研究開発は、今後非常に注目すべき研究であると考えられる。

〈参考文献〉

[1] 科研費特定領域「移動知」: <http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>

(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ており、人間から隔離され利用されることを前提としている技術である。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。

ISO TC184/SC2 でパーソナルケアロボットに関する安全性とサービスの標準化活動を開始することは、注目に値する。

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対する丈夫さ、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。2008 年 4 月には産総研・NEDO・ロボット工業会において推進してきた RTC (Robotics Technology Component) の標準規格が OMG にて制定・正式公開されたこと、位置情報の標準化原案が採択されたことは、上記において大きな進展である。

d) 環境知能化

現在日本の産業活性化において、最も注目されている施策のひとつがサービス創造である。サービス工学では、人が満足するサービスを創造する方法論に関する研究が行われている。ユーザやその状態の多様性、ダイナミズムに対し、適応的にサービスを提供するコンセプトとして、サービスメディアという概念が提案されている [1]。これは、まさに我々が生活する環境に、センシング機能・アクチュエーション機能・情報処理機能を埋め込み、環境自体を知能化し、それによって人のニーズをオンラインで把握しながら、適応的にサービスを実時間で提供しようとするものである。人のニーズや価値観などを直接把握することは困難であるが、これらが人の行動や状態変化に表れると仮定するなら、人の行動や状態変化を何らかの計測手段によって計測することで、人のニーズや価値観、意図、提供したサービスに対する満足度を推定することが可能になるであろう。RT (Robot Technology) やユビキタスコンピューティング技術を活用した環境知能化技術は、ユーザに適応的にサービスを提供するのに最も有効な手段であり、今後実用的なサービスシステムを構築する上で、注目すべき動向のひとつである。

〈参考文献〉

- [1] 浅間一: サービス工学とシステム・インテグレーション、計測と制御、vol. 44、no. 4、pp. 278-283 (2005)

(3) 移動ロボットの環境と自己位置の認識技術

ロボットがその環境を知りその中で自分の位置を知ることは、ロボットの自律的な行動決定のみならず、操作をオペレータにゆだねる場合もロボットからオペレータに与えるきわめて重要な情報であり、移動ロボットにとっての基本的要素技術である。1990 年代後半より 2000 年代初頭にかけて SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の名の下で活発に研究開発されたこの技術は、ここ数年移動ロボットの基本技能要素としていろいろなロボッ

トシステムにおいて実現化されるようになり、また、近年では米国や欧州の企業や大学からも一部パッケージソフトウェア等として提供されている。

一方、この技術にはロボットに搭載する外界センサやロボットが働く環境の種類に応じて種々のものがあり、確率的推定理論などの基礎理論と実用化の間にはギャップがある。そのため、どのような手法や考え方が今後の世界の標準になるか、まだ混沌とした状態にある。今後、理論のみならず利用するセンサやその性能とセットで実質的な標準が決まって行くものと予想される。

(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、全ての製品がそうであるように、最終的には人間が保守しなければならない。コミュニケーションロボットにおいては、想定外に難しい対話を強いられる場合に、人間の手助けは必要不可欠である。必要に応じて遠隔操作できる機能は、パソコン上のソフトウェアのネットワークを介したメンテナンス同様に、持続的に発展し続けるロボットを実用化する上で重要である。

このようなコミュニケーションロボットの実用はすでに始まりつつある。産総研で開発されたアザラシ型ロボット「パロ」は世界中の老人介護施設で、その実用性が認められている。(株) ココロが開発した「アクトロイド」と呼ぶアンドロイドも多くの展示会でガイド役を務めている。またおもちゃの世界においては、コミュニケーション機能を持たないロボットはほとんど無いと言っても過言ではない。上記に述べた技術開発課題は、日ごとに進歩を続けており、

コミュニケーションロボットが携帯電話やパソコンに次ぐ、新しいメディアとして実用される日は近い。

(5) 制御技術

今後の研究動向として、大きく2つの方向性がある。一つ目は、大規模・複雑なシステムの制御系設計のための理論構築に関する研究である。米国 NSF は、CPS (Cyber-Physical System) と称した、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を、情報分野の最優先課題としている [1]。これは、欧州連合のポスト組み込み制御システムの超大型産学連携プロジェクト ARTEMIS (Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence and Systems) に対抗した新しい研究の流れであり、制御、ネットワーク、計算の3つを統合した新しい制御系の枠組みを模索しており、より具体的には、組み込み制御技術、ネットワーク化制御、ハイブリッドシステム、そして分散制御技術を中心技術として、大規模・複雑なシステムの解析・設計・最適化・制御のための基礎理論と方法論の構築を目指している [2]。また欧州でも、2008 年 10 月に、大規模システムの制御に関するプロジェクト設置に向けた会議を実施している [3]。

二つ目は、外部環境に対して「開いた」制御系設計のための理論構築に関する研究である。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。米国では、CPS の次のキーワードとして「適応」を次世代の制御の中心に位置づける動きがある。この具体的な研究開発課題としては、例えば複雑な状況を抽象化して捉える「環境のリアルタイムモデリング」や分散制御を含む「リアルタイム最適制御」などが挙げられる。

〈参考文献〉

- [1] Supplement to the President' s Budget for Fiscal Year 2009 の Networking and Information Technology Research and Development Program pp. 14.
- [2] CPS Week、2008 年 4 月実施、2009 年 4 月予定、<http://www.cra.org/cc/cps.php>
- [3] http://cordis.europa.eu/fp7/ict/necs/events-20081020_en.html

(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基盤技術要素の一つである。アクチュエータの性能向上やニューアークチュエータの実現は、世界のロボット市場制覇や、先端科学分野での画期的手法提供につながる可能性が大きく、今後注力すべき分野である。

ここでは3点に絞って述べる。

①高性能サーボモータの実用化

我が国は汎用モータの生産においてトップの状態にある一方、数～数 10W

の小型サーボモータの生産は、欧州が優位の状態にある。特に、DC モータを中心とした小型のサーボモータに関しては、その種類が豊富で、小型のロボット機構設計では、欧州製のサーボモータを用いざるを得ない状況がしばしば生じている。ドイツ航空宇宙研究所が開発した軽量ロボットアームが注目されているが、このような欧州の小型サーボモータの技術力を背景にしたものである。

②ニューアクチュエータの研究開発

電磁モータや油空圧シリンダに対して、例えば、圧電セラミック、磁歪素子、形状記憶合金等の固体アクチュエータ、機能性ポリマやソフトアクチュエータ等の人工筋肉、その他新しい原理のアクチュエータを一般にニューアクチュエータと呼ぶ。この分野では、我が国では文科省の科学研究補助費特定領域の活動がこれまで5年間実施され、世界をリードする研究成果が生まれている。ニューアクチュエータは様々な分野へ極めて大きな波及効果がある。例えば、超高速精密アクチュエータによるビデオレートの原子間力顕微鏡の動画撮影、強磁場や極低温下等特殊環境下で動作するアクチュエータによる、新しい医療診断治療の実現や高精度の化学分析など、先端科学分野に画期的な手法を生み出しつつある。また、力の強いマイクロ筋肉により、狭あい箇所点検マイクロロボット等の実現も期待されている。

③空圧源

空圧アクチュエータは、その空圧源が最大の問題と考えられている。しかし、近年、数 10MPa の高圧圧縮空気ポンプを用いることで、自立的に動作するロボットや自動車エンジンが開発されている。例えば、フランスのベンチャー MDI エンタープライズが開発した小型自動車用空圧エンジンは、時速 50km の速度で小型自動車を駆動することに成功している。安全性、経済性など今後の課題は多いが、空気圧アクチュエータの新しい可能性を示すものである。

付録：海外の政策動向

米国

当分野は大統領イニシアティブの下、NITRD (National Information Technology Research and Development) プログラムとして省庁横断的に取り組まれており、コンピュータ、情報通信、ソフトウェアにおけるパラダイムシフトを目指している。2009 年度予算案では前年比 6% 増の 35.7 億ドルが計上され、この予算規模は 2001 年度の NITRD 予算の 2 倍となる。これにより、2001 年度以降の予算の総計で約 209 億ドルが投資されることになる。予算配分を見ると、ACI (米国競争力イニシアティブ) にて予算倍増の対象機関となっている NSF (国立科学財団)、DOE (エネルギー省) 科学局、DOC (商務省) の NIST (国立標準技術研究所) の予算が増額されており、NITRD の予算増加は ACI の影響を強く受けている。また、国防を目的とした DOD (国防総省) の IT 研究開発への投資は NITRD 予算の中で最大額を占め、次に基礎研究を目的とした NSF (国立科学財団) への投資が続いている。

研究開発は主にハイエンドコンピューティング、先進的ネットワーク、サイバーセキュリティの 3 分野で進められている。HEC (ハイエンドコンピューティング) 分野は NITRD の中で最も優先度の高い分野に位置づけられており、2009 年度予算案では HEC 分野のインフラ整備と HEC 研究開発の双方が大幅に増額されている。本方針により、2004 年に策定された HEC に関する連邦政府の戦略計画通り、2010 年までにペタスケールコンピュータが DOE 科学局と NSF により開発される予定である。優先度が第 2 位の先進的ネットワーク分野も 2009 年度予算案にて増額されており、急速に開発が進行しているペタスケールコンピュータが完成し次第、直ちにペタスケールコンピュータでの計算結果をネットワーク上で活用できるように、大規模ネットワーク技術を開発する予定である。サイバーセキュリティ分野は NITRD にて優先度が第 3 位に位置づけられているが、最近では政府と市民の双方が IT インフラをデータ管理や金融サービスに用いているので、その安全性の向上が非常に重要になってきており、2009 年度予算案においては重点的に予算が配分されている。

連邦政府の重点分野としても当分野は重視されており、今後の NITRD における研究開発課題の明確化や、エネルギー、気候、天気予報、医療、新素材、国家安全保障などの複雑な事象における革新的な研究の推進を目的とし、高性能コンピューティング研究開発の継続を行う予定である。

欧州委員会

2007 年から 2013 年に研究開発へ欧州委員会から投資される資金の総額は 505 億ユーロ (7 年間) となっている。そのうち「共同研究」への助成が 323.65 億ユーロあり、「情報通信技術」への研究に 91.1 億ユーロが配分される予定。また、長期的かつ多額の資金が必要なハイリスク研究で、産業界の支援が明確な領域を優先的に支援する「ジョイント・テクノロジー・イニシアティブ (JTI)」を立ち上げており、その中に、「組み込みシステム」、「ナノエレクトロニクス」が含まれている。重要な戦略として 2005 年に発表された「i2010 イニシアティブ」があり、その進捗状況について毎年報告書も発表されている。

欧州の巨大市場を活用し、公共調達、標準化、規制と連動して新しい需要を

創出する「リードマーケットイニシアティブ (LMI)」には、「eヘルス」が含まれている。

「ヨーロッパ・テクノロジー・プラットフォーム (ETP)」では、関連する利害関係者が参画し、特定分野（現在 30 以上）の研究開発投資戦略を立案しており、その中に、「ナノエレクトロニクス」、「統合衛星通信」、「移動・ワイヤレス通信」、「組み込みコンピュータシステム」、「統合スマートシステム技術」、「ネットワーク化・電子化メディア」、「ネットワーク化・ソフトウェアサービス」、「ロボティクス」、「フォトニクス」などがあり、これらの戦略は参考になる点もある。

英国

英国政府出資の情報通信分野の研究費は、主に工学・自然科学研究会議 (EPSRC)、技術戦略審議会 (TSB)、高等教育資金会議から拠出されている。EPSRC からの「情報通信技術」の研究には 7,900 万ポンド (2008 年度)、そしてトレーニングには 2,100 万ポンドが配分されており、主な助成分野には、通信、コンピュータ科学、人との双方向性、デバイスへのセミコンダクター材料 (モデリング含む)、電子光学機器などがある。「数理科学」の研究に 1,600 万ポンド、トレーニングに 1,600 万ポンドを配分、また産業指向のプログラムとして「デジタルエコノミー」の研究に 4,600 万ポンド、トレーニングに 3,400 万ポンドを配分。

技術戦略審議会では、「エレクトロニクス・フォトニクス・電気システム」および「情報通信技術」を重要技術領域として選定し、助成を行っている。また研究から調達・規制も含めて戦略的なプログラムの推進を検討し実践するイノベーションプラットフォームの一つに、ネットワークセキュリティがある。

2007 年 10 月に発表された「包括的歳出見直し (CSR)」では、研究会議横断・重点戦略研究プログラムに 6 つの分野を指定し、その中に「デジタル経済」が掲げられており、2008～2010 年の間に 5,800 万ポンドが配分される。

情報通信にかかわる主なインディペンデント・レビュー (政策評価および提言) として「次世代アクセス (2008 年 9 月発表)」がある。

科学技術会議 (CST) が発表した、5 年先に最も有望な技術・分野に、「eヘルス」、「プラスチック・エレクトロニクス」、「広帯域電子通信」、「パーペシブシステム」、「シュミレーション・モデリング」が選定された。

ドイツ

2006 年に発表されたハイテク戦略に基づき、研究開発投資を増強している。ハイテク戦略では 2006 年～2009 年の間に、情報通信技術に 11.8 億ユーロ、光科学技術に 3.1 億ユーロを投資する方針。

連邦研究教育省 (BMBF) が発表した「情報通信 2020」は、商品化を視野にいたる産業と公的研究機関の共同研究への助成を行い、具体的な対象分野は、電子、マイクロシステム、ソフトウェア、情報操作、通信技術、通信ネットワークなどで、2007 年～2011 年に 14.8 億ユーロを投資する予定。「OLED イニシアティブ」では、ドイツの強みである光学系産業の強化を図ることを目的として 2.8 億ユーロを配分する予定であり、有機 LED や高性能レーザーダイ

オードなどに重点を置いている。「マイクロシステムフレームワークプログラム 2004-2009」では、2.6 億ユーロを、多様な産業を対象にした研究開発に対し助成している。

科学の振興を目的としたドイツ研究協会（DFG）からの研究資金のうち、電気工学・計算機科学・制御工学への配分は 8%程度（1 億ユーロ、2005 年）となっている。

主な研究機関は、基礎研究を司るマックスプランク協会、応用研究を主に行うフランクフルト協会、大型研究施設を持つヘルムホルツ協会など多岐にわたる。また大学における研究拠点を設立するエクセレンスイニシアティブを立ち上げ、情報通信関係の拠点も設立されている。

2008 年 9 月には、世界的な競争力を有する 5 つのトップクラスターのうち、エネルギー効率化を目的としたマイクロ・ナノ・エレクトロニクスの開発に取り組むクール・シリコン・クラスターとしてザクセン州が、有機エレクトロニクスの開発に取り組むライン＝ネッカー郡が選出された。

中国

中国の科学技術政策は国家中長期科学技術発展計画綱要（2006 - 2020 年）に基づき展開されている。本計画は、比較的短期間で対応可能な産業技術である「重点領域」、大規模プロジェクトを通じて技術の空白領域を埋めることを目的とした「重大特定プロジェクト」、世界最先端レベルの応用研究課題である「先端技術」と「基礎研究」に分類されている。電子情報通信分野に係る重点分野として掲げられた主な内容は次の通りである。

■ 重点領域

- ・ 情報産業および近代的なサービス業：近代的なサービス業の情報支援技術および大規模なアプリケーションソフト、次世代ネットワークのキーテクノロジーとサービス、高効率で信頼性の高いコンピュータ、センサーネットワークおよびインテリジェント情報処理、デジタルメディア・プラットフォーム、ハイビジョン大型薄型ディスプレイ、重要システム向けの情報セキュリティ
- ・ 製造業：設計製造のデジタル化およびインテリジェント化
- ・ 交通運輸業：ITS
- ・ 都市化および都市発展：都市の情報プラットフォーム

■ 重大特定プロジェクト：重要電子部品、ハイエンド汎用チップと基本ソフトウェア、超大規模集積回路製造技術、次世代ブロードバンド・モバイル通信

■ 先端技術

- ・ 情報技術：知能センシング技術、自己組織ネットワーク技術、バーチャルリアリティ技術
- ・ 先進製造技術：知的サービスロボット

■ 基礎研究

- ・ 国家の戦略ニーズに基づく基礎研究課題：情報技術の発展を支える基礎科学

- ・ 重大科学研究計画：量子制御の研究（量子通信の担体と制御原理・制御方法、量子計算・電荷 - 自転 - 位相 - 軌道等に関連する法則及び新しい量子の制御方法、限定された小量子システムの新量子効果、量子制御の特徴・測量的新原理、その他関連する新技術の基礎）

なお、今年の政府方針を示す政府活動報告（2009 年 3 月の全人代で温家宝総理が発表）によると、2009 年は特に重大特定プロジェクトの推進と第 3 世代移動通信、3 ネットワーク（電話、計算機、ケーブルテレビを指す）の統合を重視するとの方針である。

韓国

韓国では基礎研究を所管する教育科学技術部の「先進一流国家に向けた李明博政権の科学技術基本計画(第二次科学技術基本計画-2008-2012 年-)」と応用・開発研究を所管する知識経済部の「新成長動力ビジョン」が基本的な政策となる。電子情報通信分野に係る重点分野として掲げられた主な内容は次の通りである。

■第二次科学技術基本計画で指定された重点育成技術

- ・ 主力基幹産業技術高度化 (Cash Cow)：知能型生産システム技術、次世代ネットワーク基盤技術、携帯インターネット及び第 4 世代移動通信技術、メモリー半導体技術、次世代半導体設備技術、次世代ディスプレイ技術
- ・ 新産業創出のための核心技術開発強化 (Green Ocean)：次世代システムソフトウェア技術、次世代超高性能コンピュータ技術、次世代 HCI (Human Computer Interaction) 技術
- ・ 知識基盤サービス産業 (Knowledge Based Science & Technology)：融合型コンテンツ・知識サービス技術、先端物流技術
- ・ 懸案関連特定分野 (Risk Science)：IT ナノ素子技術
- ・ 基礎・基盤・融合技術開発活性化 (National Platform Technology Initiative)：知能型ロボット技術

■新成長動力ビジョン

- ・ 緑色技術：LED 応用
- ・ 先端融合産業：ロボット、IT 融合システム、放送通信融合
- ・ 高付加価値サービス：コンテンツ・ソフトウェア

なお、李明博大統領が昨年打ち出した方針により、現在「緑色成長基本法」を整備中であり、今後全ての研究開発において「グリーン化」を重視する姿勢が打ち出される見通しである。

略 語 集

A

- **ACM** : Association for Computing Machinery 76, 90, 97, 165, 174, 226, 227, 228
- **ADSL** : Asymmetric Digital Subscriber Line 146, 153
- **AES** : Advanced Encryption Standard 122, 123, 125
- **AIST** : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 22, 137
- **ALU** : Arithmetic Logic Unit 39, 41
- **ALV** : Autonomous Land Vehicle 186
- **API** : Application Program Interface 76, 92
- **ARTEMIS** : Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence and Systems 194, 196, 243
- **ASET** : Association of Super-Advanced Electronics Technologies 20, 21
- **ASML** : オランダの半導体装置メーカー 19
- **ASP** : Application Service Provider 221
- **ATOM** : Intel 社製小型PC 向けチップセット名 160
- **ATR** : Advanced Telecommunications Research Institute International 164

B

- **BD** : Blu-ray Disc 42, 43, 45, 215
- **BERC** : Biometrics Engineering Research Center 127, 128
- **Bluetooth** : エリクソン社が開発した無線方式の一つ 161
- **BMI** : Brain Machine Interface 178, 192, 193, 240
- **BMIR** : Biomedical Informatics Research 100
- **BPM** : Beam Propagation Method 66, 68, 219

C

- **CAD** : Computer Aided Design 7, 12, 28, 29, 37, 66, 112, 113
- **Caltech** : California Institute of Technology 218, 219
- **CAN** : Controller Area Network 197
- **CC-Link** : Control & Communication Link 201
- **CCD** : Charge Coupled Device 22, 25, 200
- **CCGRID** : IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid 105
- **CCRA** : Common Criteria Recognition Arrangement 139, 142
- **CDM** : Code Division Multiplex 167
- **CDMA** : Code Division Multiple Access 146
- **CEA-LETI** : Electronics and Information Technology Laboratory

- of the French Atomic Energy Commission 20, 21
- CELL : Cell Broadband Engine 162
 - CEPCA : Consumer Electronics Powerline Communication Alliance 161, 162
 - CERNET : Central European Regional Network for Education Transfer 152
 - CG : Computer Graphics 166
 - CHI : Computer-Human Interaction 165
 - CISD : Center for Information Storage Device 44, 45
 - CiTeR : Center for Identification Technology Research 128
 - CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor 15, 18, 19, 22, 25, 26, 27, 34, 200, 213, 214, 216
 - CMU : Carnegie Mellon University 140, 179, 182, 185, 186, 191
 - CMVP : Cryptographic Module Validation Program 135, 142
 - CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique 199
 - CNSE : College of Nanoscale Science and Engineering 7, 18
 - CNT : Carbon Nanotube 22
 - COBIT : Control Objectives for Information and related Technology 139, 141
 - CPS : Characters Per Second 194, 196, 243
 - CPU : Central Processing Unit 26, 71, 160
 - CRM : Customer Relation Management 89
 - CRT : Cathode Ray Tube 36, 46
 - CRYPTREC : Cryptography Research and Evaluation

Committees 120, 122, 123, 125, 130, 137

- CSM : Chartered Semiconductor Manufacturing Ltd 200

D

- DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency 防衛高等研究計画局 20, 21, 26, 27, 39, 41, 63, 99, 100, 148, 188, 193, 194, 196, 203, 208, 209, 217, 238
- DBMS : Database Management System 79, 80
- DCI : Digital Cinema Initiatives 159
- DDoS : Distributed Denial of Service 156
- DES : Data Encryption Standard 122
- DFKI : Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH ドイツ人工知能研 100
- DFM : Design For Manufacturing 12, 13, 28
- DLNA : Digital Living Network Alliance guideline 159, 162
- DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 177, 179, 181, 183, 185
- DNA : Deoxyribonucleic Acid 23, 25, 213, 219
- DOD : Deptment of Defense 103, 104, 193, 223
- DOE : Department of Energy 50, 51, 103, 104, 223
- DRAM : Dynamic Random Access Memory 16, 17, 19
- DRM : Digital Rights Management 129, 130, 131, 235

- DRP** : Dynamically Reconfigurable Processor 28
- DSN** : International Conference on Dependable Systems and Networks 115
- DTN** : Delay Tolerant Network 238
- 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 15, 42, 43, 44, 45, 129, 168, 215
- DVD-R** : Digital Versatile Disk Recordable 43, 44
- DVS** : Dynamic Voltage Scaling 118
- DWDM** : Dense Wavelength Division Multiplexing 167

E

- ECOC** : European Conference on Optical Communication 38, 39, 41, 157
- EDA** : Electronic Design Automation 12, 13
- EL** : Electroluminescence 30, 31, 33, 46, 47, 50, 62, 160, 216
- ENIAC** : European Nanoelectronics Initiative Advisory Council 19
- ERP** : Enterprise Resource Planning 79
- ESCHER** : The Embedded Systems Consortium for Hybrid Embedded Research 194, 196
- ETC** : Electronic Toll Collection 120, 125, 129, 131
- ETH** : Eidgenössische Technische Hochschule 15
- ETRI** : Electronics and Telecommunications Research

Institute 41, 147, 148, 149, 155, 163, 181, 203, 208

- EUROP** : European Robotics Plafom 179, 203, 208, 209
- EUV** : Extreme Ultra-Violet 19

F

- FA** : Factory Automation 201
- FCS** : Future Combat System 203, 208
- FDTD** : Finite Difference Time Domain method 43, 66, 68, 219
- Felica** : 非接触型 I Cカードの技術方式。ソニーの登録商標。 129
- FEM** : Finite Element Method 66, 68, 219
- FFT** : Fast Fourier Transform 200
- FIND** : Future Internet Design 143, 145, 150, 152
- FIPS PUB** : Federal Information Processing Standards Publication 122, 135
- FL-net** : FA control network イーサネット(Ethenet)をベースとしたFA用の制御ネットワークの名称 201
- FMC** : Fixed Mobile Convergence 147, 155
- FP7** : Framework Program 7 23, 95, 148, 150, 152, 213, 223
- FPD** : Flat Panel Display 31, 46, 47, 216
- FPGA** : Field Programmable Gate Array 112, 113, 224
- Fraunhofer IZM** : Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit Mikointegration 20, 21
- FSAN** : Full Service Access NetWork 153
- fT** : femto Tesla 23

- FTTH : Fiber To The Home 36, 39, 40, 41, 62, 64, 144, 145, 147, 153, 155
- FTTX : Fiber To The X 153, 155
- FTV : Free Viewpoint Television 169

G

- G-PON : Gigabit Passive Optical Network 171
- GA : Genetic Algorithm 219
- GaN : Gallium Nitride 窒化ガリウム 26, 212
- GE-PON : Gigabit Ether Passive Optical Network 153
- GENI : Global Environment For Network Innovations 143, 145, 151, 152, 235
- GeSbTe : Germanium-Antimony-Tellurium 44
- GFS : Global File Systema 221
- GMPLS : Generalized Multi-Protocol Label Switching 156, 158
- GPS : Global Positioning System 201
- GRC : Global Research Collaboration 18, 19
- GSM : Global System for Mobile Communications 145, 147
- GTO : Gate Turn-Off thyristor 26

H

- HAMR : Heat Assisted Magnetic Recording 43, 44
- HD : Hard Disk (HDD: H a r d Disk Drive) 42, 43, 45, 161, 215, 216
- HD DVD : High Definition DVD 42, 43, 45, 215

- HDTV : High Definition Television 159, 168
- HID : High Intensity Discharge (Lamp) 48
- HPA : Home Plug Powerline Alliance 161, 162
- HPC : High Performance Computing 102, 224
- HSDPA : High Speed Downlink Packet Access 153, 155
- HTML : HyperText Markup Language 93
- HTTP : HyperText Transport Protocol 93
- HW : Hardware 159, 163
- HYCON : Hybrid Control:Taming Heterogeneity and complexity of networkd embedded systems 194, 196

I

- IC : Integrated Circuit 26, 27, 120, 123, 126, 129, 228, 234
- ICASE : Institute of Control, Automation and Systems Engineers 208
- ICDCS : International Conference on Distributed Computing System 105
- ICROS : Intel 社製小型PC 向けチップ セット名 208
- ICT : Information and Communication Technology 73, 143, 151, 223, 231, 235, 236, 237
- ID : Identification 120, 123, 129, 137, 224, 225, 231, 232, 242
- IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers 23, 25, 38, 67, 69, 90, 97, 105, 157, 165, 168,

- 170, 173, 174, 182, 208, 227, 238
- **IETF** : The Internet Engineering Task Force 152, 157, 158
 - **IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor 26, 27, 212
 - **IMEC** : Interuniversity Microelectronics Center ベルギーにある欧州の独立研究機関 7, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 27, 28, 29, 64, 112, 113, 217
 - **IMS** : IP Multimedia Subsystems 159
 - **Internet2** : 米国のネットワーク関連コンソーシアム 156, 158
 - **IP** : Intellectual Property 14, 15, 160
 - **IP** : Internet Protocol 147, 149, 150, 152, 153, 157, 158, 159, 170, 232, 238
 - **iPOP** : International Conference on IP + Optical Network 157
 - **IPTV** : Internet Protocol Television 147, 170
 - **IPv6** : Internet Protocol Version 6 145, 152
 - **IRT** : Information and Robotics Technology 178, 181, 241
 - **ISACA** : Information Systems Audit and Control Association 情報システムコントロール協会 139
 - **ISDB-T** : Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial 161
 - **ISMAR** : International Symposium on Mixed and Augmented Reality 165
 - **ISMS** : Information Security Management System 139, 142
 - **ISO** : International Organization for Standardization 121, 135, 139, 161, 168, 180, 204, 208, 240
 - **ISO/TC184/SC2** : International Organization for Standardization /Technical Committee184 /Sub-committees2 180
 - **ISP** : Internet Services Provider 156
 - **IST** : Information Society Technology 25, 27, 130, 185
 - **ITSEC** : Information Technology Security Evaluation Criteria 139, 142
 - **ITU** : International Telecommunication Union 38, 39, 41, 145, 150, 152, 153, 157, 158, 168, 170, 204, 208, 237
 - **ITU-T** : International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector 38, 39, 41, 145, 153, 157, 158, 170
-
- ## J
-
- **JARA** : Japan Robot Association 180
 - **JAUS** : Joint Architecture of Unmanned System 203, 208
 - **JCMVP** : Japan Cryptographic Module Validation Program 121, 135, 137
 - **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 156
 - **JIPDEC** : Japan Information Processing Development Corporation 139
 - **JSON** : JavaScript Object Notation 92
 - **JVN** : Japan Vulnerability Notes 142

K

- **K-NBTC** : Korea National Biometric Testing Center 127, 128
- **KAIST** : Korea Advanced Institute of Science and Technology 13, 24, 26, 28, 29, 41, 64, 90, 95, 100, 147, 155, 203, 208
- **KIRSF** : Korea Intelligent Robot Standard Forum 203, 206
- **KISA** : Korea Information Security Agency 127
- **KIST** : Korea Institute of Science and Technology 203, 208
- **KUKA** : 大手産業用ロボット企業名 179, 181, 183, 185
- **KUL** : Katholieke Universiteit Leuven 15

L

- **LAAS** : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes 116, 186
- **LAN** : Local Area Network 15, 38, 39, 41, 154, 155, 168, 173, 235
- **LCD** : Liquid Crystal Display 13, 31, 33, 46, 47, 160, 216
- **LDPC** : Low Density Parity Check 172
- **LED** : Light Emitting Diode 33, 36, 48, 50, 51, 62, 64, 65, 218
- **LIRMM** : Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier 183, 185
- **LSI** : Large Scale Integration Circuit 7, 11, 12, 13, 14, 15, 26, 27, 28, 38, 39, 41, 48, 171, 212, 215
- **LXR** : Liver X Receptors 23

M

- **MAC** : Media Access Control 173, 232
- **MEMS** : Micro Electro Mechanical Systems 11, 18, 22, 26, 27, 179, 181, 197, 198, 199, 200, 217, 218
- **MIMO** : Multi-Input Multi-Output 153, 168
- **MINATEC** : Microelectronics Nanotechnology Innovation Center 19
- **MIT** : Massachusetts Institute of Technology 18, 20, 21, 86, 135, 137, 164, 173, 176, 191, 216, 220
- **Moore** : Moore の法則の提唱者（米 Intel 社創立者の一人） 12, 18, 34, 214
- **MOSFET** : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor 26, 27, 212, 213
- **MOU** : Memorandum of Understanding 181
- **MPEG** : Moving Picture Experts Group 168, 169, 170, 171
- **MPLS** : Multi-Protocol Label Switching 152, 156, 158
- **MPU** : Micro Processing Unit 202
- **MSP** : Management Service Provider 156, 157
- **MW** : ミドルウェア 159, 163

N

- **NACTEM** : The National Centre for Text Mining 100
- **NASA** : National Aeronautics and Space Administration 85, 88, 172, 176, 187, 188
- **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 20, 21, 26, 28, 31, 208, 241

- **NESSIE** : New European Schemes for Signature, Integrity, and Encryption 122, 123, 125, 130
- **NGN** : Next Generation Network 144, 145, 148, 149, 150, 152, 155, 166, 167, 171
- **NICT** : National Institute of Information and Communications Technology 独立行政法人情報通信研究機構 40, 60, 151, 152
- **NIST** : National Institute of Standards and Technology 米 国 標 準 技 術 局 23, 50, 52, 54, 97, 98, 122, 123, 124, 130, 139, 141, 203, 208
- **NO** : Nitric oxide 22
- **NOX** : Nitrogen Oxide 22
- **NPL** : National Physical Laboratory 126, 127
- **NRI** : Nanotechnology Research Initiative 18, 19
- **NSF** : National Science Foundation 26, 27, 91, 103, 104, 143, 145, 148, 151, 152, 194, 196, 223, 235, 243
- **NSoC** : National SoC (System on Chip) 14

O

- **OCTAVE** : Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation 140, 141
 - **OFC** : Optical Fiber Communication Conference and Exposition 38, 39, 41
 - **OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplex (直交周波数分割多重) 40, 153, 161, 167
 - **OMG** : Object Management Group 180, 181, 203, 204, 205, 206, 208, 241
 - **OpenHRP3** : Open-architecture Human-centered Robotics Platform version 3 178
 - **ORA** : Optical Research Associates 52, 54
 - **OS** : Operating System 70, 76, 78, 93, 125, 132, 159, 166, 171, 221, 222, 229, 235
 - **OSA** : the Optical Society of America 53, 67, 69
 - **OSGi** : Open Services Gateway initiative 159, 162
-
- ## P
-
- **P2P** : Peer-to-Peer 156, 157, 173
 - **PAN** : Personal Area Network 161
 - **PCE** : Path Computation Element 156, 158
 - **PCS** : Personal Communication Services 168, 170
 - **PDA** : Personal Digital Assistants 160
 - **PDP** : Plasma Display Panel 47, 160, 216
 - **PE** : Power Electronics 26
 - **PFLOPS** : Peta Floating point Operations Per Second 102
 - **PKI** : Public-Key Infrastructure 122, 125, 147
 - **PLC** : Power Line Carrier 161
 - **PLL/DLL** : Phase-Locked Loop / Delay-locked loop 14, 15
 - **PLM** : Product Lifecycle Management 89
 - **PON** : Passive Optical Network 39, 41, 153, 167, 171
 - **PPOP** : Principles and Practice of

Parallel Programming 105

- PRDC : International Symposium Pacific Rim on Dependable Computing 115
- PV : Association of Super-Advanced Electronics Technologies 169

Q

- Q : Quality Factor, 共振器における電磁波閉じ込めの尖鋭度 218, 219
- QED : Quantum Electrodynamics 62
- QKD : Quantum Key Distribution 136
- QoLT : Quality of Life Technology 179
- QoS : Quality of Service 156, 157, 158
- QPSK : Quadrature Phase Shift Keying 167, 171

R

- RACE : R&D in Advanced Communications in Europe 145
- RDB : Relational Database 229
- RF : Radio Frequency 7, 14, 15, 160, 213
- RFID : Radio Frequency Identification 123, 124, 152, 201
- RIST : Research Institute of Industrial Science and Technology 浦項産業科学研究所 183
- RNA : Ribonucleic Acid 23
- ROADM : Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer 167, 171
- Robotics-DTF : Robotics Domain

Task Force 180

- ROM : Read Only Memory 96, 215
- ROS : Robot Operating System 203
- RoSTa : Robot Standards and Reference Architectures 203, 209
- 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 234
- RSS : Rich Site Summary 92
- RT : Register Transfer 178, 180, 192, 201, 203, 208, 209, 241
- RTC : RTP Control Protocol 241
- RTP : Real-time Transport Protocol 170, 203, 208
- RVC : Reconfigurable video coding 169

S

- SaaS : Software as a Service 221, 222, 237
- SAE : Society of Automotive Engineers 203, 208
- SCA : Software Communication Architecture 203, 208
- SCM : Supply Chain Management 89
- SECOQC : Secure Communication based on Quantum Cryptography 135, 137
- 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 ウェ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） 18
- SHAKEY : 世界最初の知能ロボット。ふらふら歩く様子から、shake → Shakey と名付けられた 186
- SiC : Silicon Carbide 炭化ケイ素

- 26, 212
- **SID** : The Society for information Display 31, 47
 - **SIL** : Solid Immersion Lens 42, 44, 215
 - **SINET3** : 次世代学術情報ネットワーク 156, 158
 - **SIP** : Session Initiation Protocol 159
 - **SiP** : System in Package 12, 20, 200
 - **SJ** : Super Junction 212
 - **SLA** : Service Level Agreement 156
 - **SLAM** : Simultaneous Localization and Mapping 186, 187, 188, 241
 - **SMV** : Symbolic Model Verifier 85, 88
 - **SNS** : Social Networking Service 93, 224
 - **SNU** : Seoul National University 13
 - **SoC** : System on Chip 20, 28, 29, 200
 - **SPIN** : Simple Promela Interpreter 85, 86, 88
 - **SRAM** : Static Random Access Memory 212
 - **SSD** : Solid State Drive 80
 - **SSL** : Secure Sockets Layer 120, 129, 130
 - **SSL** : Solid State Lighting 48, 50
 - **SSL/TLS** : Secure Sockets Layer/Transport Layer Security 120, 129, 130
 - **SSME** : Service Science Management and Engineering 89
 - **STARC** : Semiconductor Technology Academic Research Center 28

- **SW** : Soft Ware 29, 159

T

- **T-DMB** : Terrestrial-Digital Media Broadcasting 163
- **TCSEC** : Trusted Computer System Evaluation Criteria 139
- **TI** : Texas Instruments 12, 13, 14, 15, 18, 23, 26, 27, 161
- **TIMA** : Techniques of Informatics and Microelectronics for Computer Architecture 28, 29
- **TLS** : Transport Layer Security 130, 234
- **TO** : Topology Optimization 219
- **TPM** : Trusted Platform Module 129, 130, 135, 138, 235
- **TPMS** : Tire Pressure Monitoring System 23, 25
- **TRECVID** : Text REtrieval Conference Video Retrieval Evaluation 97, 98
- **TRON** : The Real-time Operating system Nucleus 159, 162
- **TSMC** : Taiwan Semiconductor Manufacturing Company 200

U

- **UAV** : Unmanned Air Vehicle 194
- **UCB** : University of California, Berkeley 28, 29, 74
- **UCL** : University College London 39, 41
- **UGC** : User Generated Content 96
- **UIST** : UIST (ACM Symposium on User Interface Software and

Technology 165

- **UMC** : United Microelectronics Corp. 200
- **UPA** : The Usability Professionals' Association 161, 162
- **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。 85
- **URC** : Ubiquitous Robotic Companion 177, 179, 180, 181
- **USC** : University of Southern California 182
- **UWB** : Ultra Wide Band 155, 161, 201

V

- **VDM** : Virtual DOS Machine 85, 86, 88
- **VLSI** : Very Large Scale Integration 10, 11, 13, 26, 35, 109, 112, 113, 114, 118, 119
- **VM** : Virtual Machine 76
- **VOC** : Volatile Organic Compounds 22
- **VxWorks** : WindRiver 社のリアルタイムオペレーティングシステム 159

W

- **W3C** : World Wide Web Consortium 93
- **WAN** : Wide Area Network 38, 235
- **WBG** : Wide Band Gap 26, 27
- **WCDMA** : Wideband Code Division Multiple Access 14, 15
- **WDM** : Wavelength Division Multiplex 39, 41, 153, 154, 155, 167, 171

- **WDM-PDS** : Wavelength Division Multiplex-Passive Double Star 171
- **WDM-PON** : Wavelength Division Multiplex-Passive Optical Network 41, 153
- **WEIS** : Workshop on the Economics of Information Security 140, 141
- **WFM** : Wavefront Matching 219
- **WiBro** : Wireless Broadband 146, 148, 155, 163
- **WiFi** : Wireless Fidelity 161
- **WiMAX** : Worldwide Interoperability for Microwave Access 146, 154, 155, 168, 171
- **WWW** : World Wide Web 92

X

- **XML** : Extensible Markup Language 80, 82, 227

Y

- **YAML** : YAML Ain't Markup Language 92

Z

- **ZigBee** : 家電向けの短距離無線通信規格の一つ。 161, 162
- **ZQCOT** : Zhejiang Quartz Crystal Optoelectronic Technology 53

数字

- **3D** : Three Dimension 160, 166, 200, 216
- **3G** : 3rd Generation Partnership Project 147, 148, 154, 155

- 4G：4th Generation Language
155, 161, 171

記号

- 理研BMC：理研バイオミメティックコントロールセンター *185*

◆執筆者・協力者一覧（順不同 / 分野毎、敬称略）

■エレクトロニクス分野

桜井 貴康	東京大学生産技術研究所 教授 【総括責任者】
伊東 義曜	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 主任調査員
今井 正治	大阪大学大学院情報科学研究科 教授
大橋 弘通	独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ プロジェクトマネージャー
嘉田 守宏	技術研究組合超先端電子技術開発機構 三次元集積化技術研究部 部長
黒田 忠広	慶應義塾大学理工学部 教授
財満 鎮明	名古屋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・バイオ融合科学研究所 客員教授
筒井 哲夫	九州大学 名誉教授
平本 俊郎	東京大学生産技術研究所 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 理事・副学長

■フォトリクス分野

黒田 和男	東京大学生産技術研究所 教授 【総括責任者】
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
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	キャ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
進藤 典男	ソニー株式会社技術戦略部 担当部長
田口 常正	山口大学大学院理工学研究科 教授
馬場 俊彦	横浜国立大学大学院工学研究院 知的構造の創生部門 教授
宮本 裕	NTT 未来ねっと研究所フォトリックトランスポートネットワーク研究部 主幹研 究員

■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】
相澤 清晴	東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
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
坂井 修一	東京大学大学院情報理工学系研究科 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
辻井 潤一	東京大学大学院情報理工学系研究科 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 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
佐藤 証	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 ハードウェアセキュリティ研究チーム 研究チーム長
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

市川 晴久	電気通信大学電気通信学部 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ネットワークサービスシステム研究所 主幹研究員
植松 友彦	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
尾家 祐二	九州工業大学情報工学部 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 准教授
金子 正秀	電気通信大学大学院電気通信学研究科 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

鹿田 實	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
田島 公博	日本電信電話株式会社研究企画部門 R & D 推進担当 担当部長
本橋 健	日本電信電話株式会社情報流通プラットフォーム研究所 主任研究員
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	慶應義塾大学理工学部電子工学科 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
2009 年版

CRDS-FY2009-IC-02

平成 21 年 5 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
電子情報通信ユニット

〒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 2009 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。

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA C CTAAC T CTCAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

