

1 2006
No.58

科学技術動向

科学技術動向研究

光インターコネクション技術動向
—「京速計算機システム」への適用を目指して— ..

P.1

P.9

無機材料研究における
マテリアルインフォマティックスの動向

P.2

P.20

トピックス

情報通信分野

P.3

1 シリコンフォトリソグラフィの研究開発が活発化

環境分野

P.4

2 気候変動枠組条約締約国会議並びに京都議定書締約国会合の開催

ナノテク・材料分野

P.5

3 国際宇宙ステーションでフォトリソグラフィ結晶生成実験を開始

エネルギー分野

P.6

4 米国エネルギー省がシステムバイオロジー利用ロードマップを発表

5 固体触媒を利用したバイオディーゼル燃料の低コスト製造技術

製造技術分野

P.8

6 高性能銅合金実現のための製造プロセス開発

ワークショップ報告

学際的研究をどう進めていくか
—生活支援ロボティクスをめぐる
ヒトとロボティクスの関係—

P.30



光インターコネクション技術動向 —「京速計算機システム」への適用を目指して—

科学技術の発展を目的としたスーパーコンピュータの開発は、日米とも技術的な優位性を確保すべく激しい競争が繰り広げられている。我が国は、2010 年度に 10P（ペタ）FLOPS 超級の演算能力を持つ、次世代スーパーコンピュータ「京速計算機システム」の実現を目指している。

しかし、従来の電気配線方式で次世代スーパーコンピュータを実現しようとする、膨大な物量が必要となるほか、伝送速度にも限界があり、ハード的に実現の困難が予想される。この問題を解決する技術の最有力候補として期待が高まっているのが、光インターコネクションである。光インターコネクションとは、チップ内、チップ間、ボード間、装置間等の近距離の相互接続に光通信を用いる技術である。光通信の利点を生かすことで、物量および伝送速度の問題の多くは解決される可能性がある。

我が国では、「京速計算機システム」のプロジェクトに先立ち要素技術開発を先行すべく、2005 年から 3 年間の光インターコネクションに関するプロジェクトを開始し、次世代スーパーコンピュータにおいて伝送のボトルネックとなると考えられているノード間ネットワーク、及び、CPU-メモリ間に、この技術を適用することを目指している。しかし、米国では、既に 2003 年から政府主導で光インターコネクション技術の研究開発に着手しており、日本はデバイス開発の面では先行されている状況にある。

地球シミュレータの例を見てもわかるように、これまで我が国は、単発的にスーパーコンピュータの開発を行ってきた。単発のプロジェクトでは、要素技術開発にも継続性が望めない。ロードマップに基づいた長期的戦略は極めて重要である。これをスーパーコンピュータのロードマップだけに留めるのではなく、今後高速化が切迫してくると思われる超大容量ルーターのロードマップとも合致させ、配線技術全般に光技術が取り入れられていく大きな流れを示す戦略的ロードマップとして展望すべきであろう。

過去のスーパーコンピュータの性能が、既に民生品レベルになっていることからわかるように、民生品の PC においても、電気配線方式が問題になるのはもはや時間の問題である。近い将来、光インターコネクション技術と CPU は切り離せない状況が来る。これからの開発競争を通じて、市場勢力が変化する契機となるかもしれない。チップ内あるいはチップ間のインターコネクションは、高い技術力が必要であり、長期的に優位性を保つことができる要素技術である。光インターコネクションの技術力向上は、次世代 CPU、それを取り巻く周辺メモリ等の覇権争いの布石となりうる。

光インターコネクションの技術開発は、まだ始まったばかりである。戦略的ロードマップにしたがって、当分野へ投資すべき好機であろう。

無機材料研究における マテリアルインフォマティックスの動向

セラミックス、ガラス、半導体といった無機材料科学の分野では、マテリアルインフォマティックスと呼ばれるデータ駆動型の新しい開発手法が注目されている。この手法は、異なる材料合成プロセスや材料データの情報を相互に有機的に結びつけ、素早く材料開発に適用することを目的としている。

インフォマティックスは、情報科学を活用して情報の収集と分類を行い、新しい知識体系を構築するための手法である。先行しているバイオインフォマティックスでは、自動解析装置が開発され、大規模な遺伝子配列データを処理することで、遺伝情報データベースの構築や数理統計を用いたデータ解析が行われている。一方、有機材料の分野でも、組み合わせによって多数の化合物群を一度に合成することができるコンビナトリアル手法が触媒などの開発に有効であることが認識されており、この手法で得られた大量のデータを解析し新材料の開発に結びつけるためにインフォマティックス構築の重要性が出てきている。しかし、無機材料の研究開発では、過去に蓄積された多くの材料特性や結晶構造などの材料データの形式が様々であり、他とのデータ交換ができないという問題があり、さらにひとつの材料が多面的な性質を持ち、特性が「ある」「なし」で単純に表現できないことも問題となって、マテリアルインフォマティックス構築は、まだ研究が始まったばかりである。

マテリアルインフォマティックスの要素には、計算機科学やデータベースを使った材料設計、合成実験計画の作成、材料探索のための自動合成装置、高速評価法、得られた結果を整理したデータベース、ネットワークを介したデータベースの共有化、データの視覚化や新材料を予測するデータマイニングなどがある。評価項目が多岐にわたる材料研究では、単純な手法でデータを自動的に計測し共有することは困難であるが、現段階では、まずサーバを介して研究機関が互いにデータベース情報を共有し、互いのデータを補完できる状況にすることが必要である。この作業は単独の機関では不可能であり、国内はもちろん国際協調のもとでの長期的な作業が必要になってくる。

我が国では残念ながら、この分野の重要性の認識が諸外国に比べて遅れている。すべての製造産業の基盤は材料にあることを考えると、我が国でも革新的な材料開発が期待できるマテリアルインフォマティックスの重要性を強く認識し、特に無機材料の研究開発に関しては系統的なデータの蓄積を始める時期に来ている。

シリコンは、従来、固有の性質上光デバイスには不向きであり、実用化障壁は高いとされてきた。しかしここ数年、シリコン集積化回路が高性能化し、化合物半導体よりも低コスト化できる可能性があることから、シリコンフォトンクスという技術分野が注目されている。2005 年秋に開催された第 11 回微小光学国際会議では、シリコンフォトンクスのシンポジウムが開催され、関連発表も 15 件に急増し、インテル社など海外から光源、変調器、導波路などの技術が発表された。この会議以外に、国内からも、横浜国大の Si 細線導波路、東大の CMOS 上の集積化技術、NTT の Si 導波路、NEC の Si 光検知器などの注目される報告が相次いでいる。省電力仕様に応え得るかという課題を見極める必要があるものの、今後の発展が期待される分野である。

トピックス 1 シリコンフォトンクスの研究開発が活発化

2005 年 10 月 31 日～11 月 2 日、東京で開催された第 11 回微小光学国際会議（MOC'05：Micro Optics Conference／応用物理学会・日本光学会・微小光学研究会主催／参加者約 300 名）において、“Silicon Photonics（シリコンフォトンクス）”のシンポジウムが企画され、多くの参加者の注目を集めた。シリコンフォトンクスに関する発表件数は、過去数年間の MOC では毎回数件程度であったが、今回は 15 件に急増した。

光デバイスは、半導体レーザ、光増幅器、光検知器、光スイッチなどのアクティブデバイス（光電・電光変換素子）と、光ファイバ、レンズ、合・分波器などのパッシブデバイスに、大きく二分できる。

これまで前者で用いられてきた材料は、GaAs（ガリウム砒素）、InP（インジウム燐）などの III-V 族化合物半導体、あるいは LiNbO₃（ニオブ酸リチウム）などの誘電体である。後者にはガラス（SiO₂／二酸化珪素）が多く使われてきた。

従来、光デバイスに Si（シリコン）が使われてこなかった理由はいくつかある。Si の発光が、格子振動を介在する間接遷移型であるため、原理的にレーザ発振の効率が低く、省電力化が困難であること、小型化が可能であるが、逆にファイバや半導体レーザからの出力光を Si 導波路に導入するときの結合効率を高くし難いこと、加えて高い製作精度や平滑性が要求されることなどである。このため、実用化障壁が高いとされてきた。

しかし、その一方で、集積化回路技術としては、特に Si 集積化回路の高速化と集積化が急進展し、従来は高速性などの点で優位を保っていた GaAs などの化合物半導体を凌駕する勢いである。Si 集積化回路が高性能化し普及したため、低コスト化のメリットが加わって、光デバイスでも Si 材料への期待が高まってきた。そこへ 2004 年末に、これまで光分野ではアクティビティを示してこなかったインテル社（CPU では世界の主導権を握る）が、

変調速度 1GHz の光通信用 Si 変調器を発表して、にわかに脚光を浴びた。現在、アクティブ、パッシブを問わず、Si を用いた各種の光デバイスの研究開発が、国内外の多くの研究機関で加速されるようになっている。

今回の MOC'05 では、アクティブデバイスとしては、インテル社が上記変調器の発展版である変調速度 10Gbps のデータを発表し、既発表のラマン型 Si 光増幅器とともに、同社の技術優位性を示した。また、カリフォルニア大ロスアンゼルス校も、光励起ラマン型 Si 半導体レーザ（波長：1.68μm・出力 2.5W／励起波長：1.54μm・励起出力：17W）を発表し、歯科機器へ応用の可能性を示した。カリフォルニア大アーバイン校は、電流注入による Si-PN 接合型半導体導波路からの発光スペクトルを実験・理論両面から解析し、電流注入型半導体レーザ発振の可能性を検討した。スタンフォード大も、Si のフォトリソ結晶構造を用いて、光を止める、貯蔵する、さらには後戻りさせる光バッファメモリ（光通信のパケット方式で必要）への応用の可能性を示した。一方、パッシブデバイスとしては、ベルギーのヘント大が、Si 導波路のコアとクラッド間の高い屈折率差を利用すると、波長多重光通信に使われる合・分波器（AWG：Arrayed Waveguide）が大幅に小型化できる可能性を示した。

以上の MOC'05 での報告以外に、国内でも、例えば、横浜国大の Si 細線 AWG、東大の CMOS 上の集積化技術、NTT の Si 導波路、NEC のプラズモン Si 光検知器など、注目される報告が相次いでいる。

Si フォトンクスは、トータルとして省電力仕様に応え得るかという課題を抱えているため、“研究開発の筋”を見極める必要があるものの、低コスト化などのメリットも多く、今後の発展が期待される分野である。

地球温暖化防止に向けた気候変動枠組条約第11回締約国会議（COP11）並びに京都議定書第一回締約国会合（COP／MOP1）が2005年11月28日から12月9日までカナダのモントリオールで開催された。第二約束期間がスタートする2013年以降の国際的な温暖化対策である「ポスト京都議定書」に向けて、2006年から長期的な「対話」の場を設けることを盛り込んだ「モントリオール行動計画」が採択された。参加を拒否していた米国は、「対話」の結果が将来の行動を拘束するものではないことを条件に受け入れた。締約国は2006年4月15日までに「対話」の議題について見解を提出することで合意がなされた。一方、第一約束期間が終了する2012年までの温暖化ガスの排出削減を決めた京都議定書について、COP7の「マラケシュ合意」で決められた内容が正式に採択され、2005年5月には議定書を批准した国々の2013年以降の排出削減に関する議論も始まり、京都議定書が名実ともに動き出すことになった。

トピックス 2 気候変動枠組条約締約国会議並びに京都議定書締約国会合の開催

地球温暖化防止に向けた気候変動枠組条約第11回締約国会議（COP11）並びに京都議定書第一回締約国会合（COP／MOP1）が2005年11月28日から12月9日までカナダのモントリオールで開催された。

COP11では、第二約束期間がスタートする2013年以降の国際的な温暖化対策である「ポスト京都議定書」に向けて、2006年から長期的な「対話」の場を設けることを盛り込んだ「モントリオール行動計画」が採択された。これまで参加を拒否していた米国は、「対話」の結果が将来の行動を拘束するものではないことを条件に参加を受け入れた。気候変動枠組条約に基づく検討は、「すべての条約締約国が参加できる新たなワークショップを設け、条約の実施強化に向けて長期的な協力関係について対話を開始する」ことになった。「対話」は2年間に4回開き、気候変動枠組条約の第12回と13回の締約国会議に内容を報告する。「対話」の主なテーマは、①持続可能な開発の推進、②温暖化による影響への対応、③技術開発の実現、④排出量取引制度など市場メカニズムの活用であり、締約国は2006年4月15日までに「対話」の議題について、何らかの見解を提出することで合意がなされた。

一方、COP／MOP1では、第一約束期間が終了する2012年までの温暖化ガスの排出削減を決めた京都議定書について、COP7の「マラケシュ合意」^(注)の内容が正式に採択された。この採択により、森林などのCO₂吸収源が吸収する量の算出方法や、各国の削減状況を監視する「遵守委員会」の設置など遵守規定や運用ルールが確定し、議定書の削減目標を達成できなかった場合に罰則を設けることなども合意され、京都議定書が名実ともに動き出すことになった。さらに、「ポスト京都議定書」

の議論のうち、議定書を批准した国々の将来の削減目標を検討する議論は、「新たなワーキンググループでの検討を2006年5月から開始し、第一約束期間と第二約束期間に空白が生じないように結論を得る」ことで合意がなされ、議定書を批准した国々の2013年以降の排出削減に関する議論も始まる。

主な成果

1. 京都議定書の運用ルールの完全な確立と CDM などの改善
COP／MOP1で、京都議定書の実施に関する「マラケシュ合意」(COP7)の採択により、森林等の吸収源に関する算定ルール、京都メカニズムに関するルール、京都議定書に基づく排出吸収量の推計、審査等に関するルールなど議定書の運用ルールが確立
遵守ルールとして、京都議定書の数値目標に関する不遵守の措置に関する手続きや遵守委員会に関する事項等が法的拘束力を持たない形でCOP／MOP決定
各種委員会（遵守委員会、共同実施に関する第6条監督委員会）の設置と委員の選出
CDMのさらなる推進・改善に向けた具体的方策の合意
2. 将来の行動にかかる対話のプロセスの開始等
条約プロセスの下で、全ての国の参加による長期的協力のための行動に関する対話（モントリオール・アクションプラン）が成立。対話を、先進国1名、途上国1名の共同議長による最大4回のワークショップの開催を行うこと。対話の結果のCOP12(2006)、COP13(2007)への報告、2006年4月15日までに各国の考えを提出し対話を開始することなど具体的作業手順とプロセスが合意
議定書3条9に基づく附属書I国（議定書先進国及び市場経済移行国）のさらなる約束に関する検討の開始と手順に合意
議定書9条に基づく議定書レビューの準備手続きに合意し、各国は関連の情報と意見を2006年9月1日までに提出

<http://www.env.go.jp/earth/cop/cop11/hyoka.pdf> を基に作成

(注) マラケシュ合意：2001年にモロッコのマラケシュで開催されたCOP7において合意された決定。京都議定書に定められた諸制度（排出量取引制度等）を実施するために必要な運用ルールを定めている。

2005年12月22日、我が国の3次元フォトニック結晶(3DPC)生成実験装置が国際宇宙ステーションへ向けて送られた。3DPCとは複数の誘電体を光の波長程度の周期で交互に積層した構造物であり、大規模な情報伝達や処理を小型・低エネルギーで実現できる次世代の光デバイス材料として期待されている。地上では重力の影響で規則的に配列された大型の結晶を作ることができないため、宇宙船の中のような微小重力環境での結晶生成が必要である。今回の実験は約3ヶ月間の期間で行われ、結晶生成過程の観察や結晶生成に重力が与える影響の評価などを目的としている。2006年中に2回目の実験装置打上げも予定されており、実用的なサイズの3DPCを宇宙で作製できるかどうかの見当をつける。

トピックス 3 国際宇宙ステーションでフォトニック結晶生成実験を開始

2005年12月22日、ロシアのプログレス補給船が打ち上げられ、我が国の3次元フォトニック結晶(3DPC)生成実験装置が国際宇宙ステーションへ向けて送られた。ロシアのサービスモジュール「ズヴェズダ」で約3ヶ月間にわたって結晶の生成実験が行われる予定である。

半導体結晶が電子の流れを制御できるように、フォトニック結晶は光の伝播特性を制御することが可能な材料である。例えば、光の結晶内伝播速度を遅くしたり、閉じ込めて貯蔵したり、特定の波長だけを反射させるというような動作が可能である。このような特性を利用して、フェムト秒高出力パルスレーザ加工装置、記憶装置、光の波形整形、特殊ミラーなど種々の用途が考えられ、より大規模な情報の伝達や処理を、小型かつ低エネルギーで実現できる次世代の光デバイス材料として期待されている。フォトニック結晶の中でも、3DPCは複数の誘電体を光の波長程度の周期で交互に積層した構造物であり、例えば、二酸化ケイ素の微粒子と高屈折率を持つ材料の微粒子を結晶化させたものは、天然オパールの遊色効果と類似の光学特性を持つ。

例えば、ピーク強度数テラワットというフェムト秒レーザ装置は、現行技術で作製するとパルス波形制御部は1.5m×1mの大きさになるが、3DPCを用いると15cm×15cm程度まで小型化できる可能性がある。

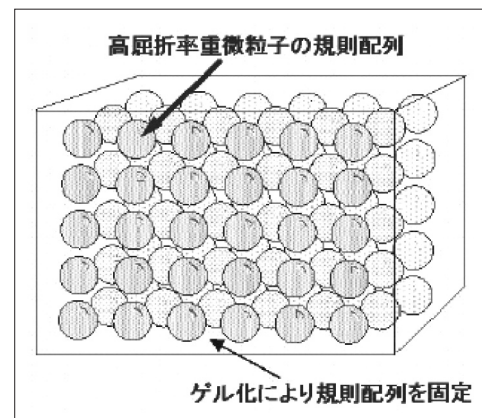
3DPCを地上で生成しようとしても、重力の影響で結晶構造にゆがみを生じ、規則的に配列された大型の結晶を作ることができないが、宇宙船の中のような微小重力環境では高品質の大型3DPCを生成することができる。まず、100nmサイズの高屈折率微粒子をコロイド状にして微小重力下で静置すると、微粒子同士の電気的反発力による自己組織化作用によって規則的な配列になり、結晶化

する。結晶が熟成したところで紫外線を照射して分散液をゲル化し、結晶を回収する。最後にこの結晶を圧縮して、結晶の格子間距離を調節し、様々な波長に対応する素子を作る。すなわちゲルの弾性を利用して格子間隔を調節するという点が、この作製方法の特徴である。

国際宇宙ステーションでの結晶生成実験では、3DPCを実用的なサイズ(例えば20cm立方)で作製できるかどうかの見当をつける。実験は2回に分けて行われ、第1回目は、結晶生成過程の観察や結晶生成に重力が与える影響の評価などを目的としている。2回目の実験装置は2006年中に打上げを予定している。

本研究は、原料の微粒子作製を富士化学(株)、コロイド結晶生成条件を富山大学・名古屋市立大学・名古屋工業大学、結晶の機能・構造評価を(独)物質・材料研究機構、製品化検討を浜松ホトニクス(株)、実験装置製作を(株)IHIエアロスペース、宇宙実験の実施を(独)宇宙航空研究開発機構がそれぞれ分担する形で行われている。地上では作製が困難な材料を、国際宇宙ステーションにおいて定常的に製造することを目指す試みである。

3次元フォトニック結晶(3DPC)



米国エネルギー省は2005年10月、次世代の生物科学であるシステムバイオロジーを、エネルギー・環境分野に適用していく中長期目標とスケジュールを示す「ゲノミクス：GTL (Genomics To Life) ロードマップ」を発表した。これは、2002年から開始したGTL研究の計画をさらに発展、拡張したもので、DNA配列の解析や生物シミュレーションモデリングなどのシステムバイオロジーを、安全・クリーンなエネルギー源の確保や、二酸化炭素の隔離による温暖化対策などに役立てる構想である。本ロードマップでは、今後20～30年程度の中長期なスケジュールとして、①ゲノミクスからシステムバイオロジーへの展開（2002年からの8年間）、②技術統合（9年目から16年目）、③知の応用展開（17年目以降）の3つの段階を想定している。まず、初期段階である①では、複雑な微生物の機能を基礎実験等により分子レベルで明らかにすると同時に、生物システムを理解するための高性能なコンピューターシミュレーションなどの研究基盤設備を開発する。そのため、有機廃棄物発電などを含む6プロジェクトへ、今後5年間にわたり総額約92百万ドル（約110億円）を投入することが決定された。

トピックス 4 米国エネルギー省がシステムバイオロジー利用ロードマップを発表

米国エネルギー省 (DOE, Department of Energy) は、システムバイオロジーを石油代替燃料の生産、環境修復、二酸化炭素回収などに応用する「ゲノミクス：GTL (Genomes To Life) ①ロードマップ」を2005年10月に発表した。今後20～30年程度の中長期目標とスケジュールが示され、直近5年間で有機廃棄物発電等を含む6つのプロジェクトに総額92百万ドル（約110億円）が投入されることが決まった。

本ロードマップは、2002年から開始したGTL研究の計画をさらに発展、拡張したもので、DNA配列の解析や生物シミュレーションモデリングなどのシステムバイオロジーを、安全・クリーンなエネルギー源の確保や土壌汚染などの有害廃棄物除去、二酸化炭素隔離による温暖化対策などに役立てる構想である。本ロードマップのスケジュールは大きく3つのステップから構成され、目標は下記のようになる。

①ゲノミクスからシステムバイオロジーへ(初期の8年)

エネルギー・環境への取り組みに利用できる複雑な微生物の機能を、基礎実験等を駆使して分子レベルで明らかにすると同時に、生物システムを理解するための高性能なコンピューターシミュレーション及びモデリングツールなどの研究基盤設備を開発する。応用展開を意識した主要ツールの選択とデータ整備も行う。

②技術統合（9年目から16年目）

①で明らかにした有用な知見や整備した研究ツールで、微生物システムの研究を加速、予測システムの開発を行い、応用展開につながる微生物シ

ステムの解析時間を数年から数ヶ月に短縮する。

③知の応用展開（17年目以降）

②で統合化した知見や研究ツールを、エネルギーと環境の最重要課題の解決に資する革新的プロセスや新製品に応用展開する。

本ロードマップで蓄積される知見データベースは、微生物の機能を理解、予測するのに役立ち、標識をつけたタンパク質分子創生レベル、その分子相互作用レベル、全タンパク質レベル、細胞レベルの4つのレベルにおける実験、モデリングから獲得される。

ボドマン・エネルギー長官は、「ヒトゲノムプロジェクトがバイオメディカル、バイオテクノロジー産業の成長を促進したように、本ロードマップは新しいバイオテクノロジー産業の成長を促すだろう。微生物は、21世紀の経済競争力の原動力となる製品などに応用できる。」と述べている。

プロジェクトのテーマ、主な実施機関、予算

テーマ	実施機関	予算(万ドル)
1 有機廃棄物発電等につながるゲノムベースのモデル	マサチューセッツ大、テネシー大等	2180 / 5年
2 自然微生物の分子同定に関するプロテオゲノミクスアプローチ	カリフォルニア大バークレー、オークリッジ国研等	1050 / 5年
3 微生物の細胞分裂等を制御する多タンパク質複合物の動的空間的組織	スタンフォード大、オハイオ大等	1790 / 5年
4 多タンパク質複合物構造同定等の高効率化	ローレンスバークレー国研、カリフォルニア大バークレー等	2580 / 5年
5 効率的に統合された分子集合体、染色体、ゲノムの研究	ローレンスバークレー国研、カリフォルニア大バークレー等	1290 / 5年
6 知識基盤統合	オークリッジ国研	300 / 3年

参考：DOE ホームページ

http://www.energy.gov/engine/content.do?PUBLIC_ID=18903&BT_CODE=PR_PRESSRELEASES&TT_CODE=PRESSRELEASE

① GTL：石油化学では「Gas To Liquids（天然ガスから灯油などの液体燃料を製造する技術）」の意味があるが、DOE ロードマップでは、「Genomes To Life（ゲノムから生命へ）」として用いられている。

バイオディーゼル燃料の製造コストを、従来より2～3割削減できる見込みの新しい生成法が、同志社大学、(独)産業技術総合研究所、白石工業(株)、(株)けいはんな、らにより共同開発された。植物性廃食用油等から生成されるバイオディーゼル燃料は、地球温暖化対策のひとつとしても注目されている。全国でその普及に向けた活動が展開されているが、燃料生成コスト削減が大きな課題となっている。バイオディーゼル燃料の一般的な生成法では、反応を促進させる触媒として強アルカリを使用するため、強アルカリ廃液の処理費用が必要である。新しい生成法では、塩基性固体触媒の使用によって強アルカリ廃液を排出しないため、その処理工程等が不要になり、燃料生成コストを削減できる見込みである。なお本技術は、今後実用性能評価が進められる予定で、1～2年後の実用化を目指している。

トピックス 5 固体触媒を利用したバイオディーゼル燃料の低コスト製造技術

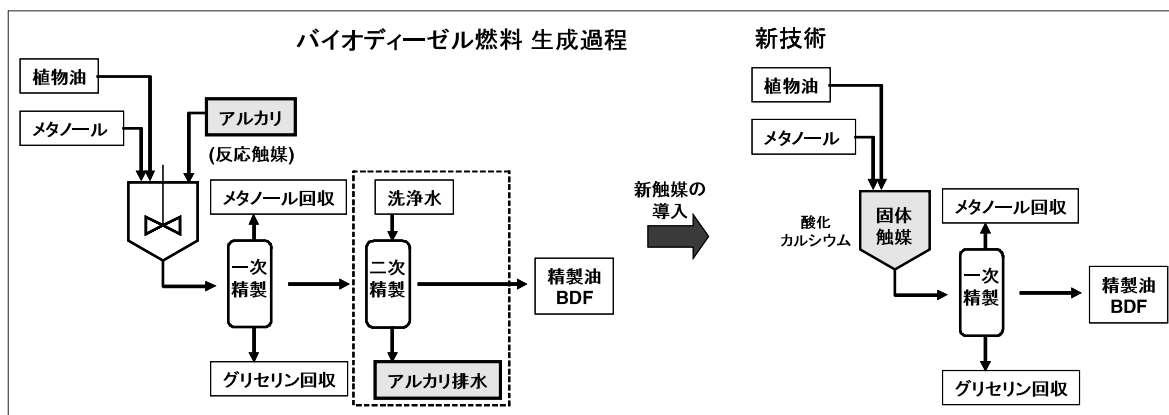
家庭や飲食店等から排出される植物油（植物性廃食用油）は、そのまま排水に流せば水質汚染の大きな原因となるが、その廃食用油を精製して粘性や引火点を低くすることにより、ディーゼルエンジンの燃料（バイオディーゼル燃料：BDF）として有効利用することができる。また、その燃焼で発生する二酸化炭素は、もともと大気中から光合成によって植物に取り込まれたものであるため、化石燃料のように新たに二酸化炭素を発生させないことから、バイオディーゼルの普及は、地球温暖化対策のひとつとして注目されている。植物油から生成されるバイオディーゼル燃料を軽油の代替燃料として活用する取り組みは、日本では全国の地方自治体を中心として展開されている。しかし、さらなる普及を促進させるには燃料生成のコスト削減が大きな課題である。

バイオディーゼル燃料の一般的な生成法は、植物油（油脂）とメタノール（アルコール）を反応（エステル交換反応）させる。反応を促進させる触媒としては、水酸化カリウムや水酸化ナトリウムといった強アルカリが使用されている。燃料生成過程で発生する廃液は強アルカリとなるため、塩酸等の強酸による中和処理が必要となり、コストの増大を招いている。

このような従来法に対し、製造コストを抑えることが期待できる新技術が、2005年10月に同志社大学、(独)産業技術総合研究所、白石工業(株)、(株)けいはんな、らにより共同開発された。新規の生成法では、植物油とメタノールを塩基性固体触媒である酸化カルシウム入りの容器に注いで、1時間程度加熱（約60℃）することにより、バイオディーゼル燃料を得ることができる。従来法と大きく異なる点は、反応促進のための触媒として、水酸化アルカリの代わりに塩基性固体である酸化カルシウムを使用することにより、強アルカリ廃液を排出しない点である。ここで使用される酸化カルシウム触媒は、炭酸カルシウムを二酸化炭素のない条件下（ヘリウムガス中）で加熱（900℃、1.5時間）することにより、二酸化炭素の吸着・吸収を防いで製造される。この触媒は、従来法の水酸化アルカリ触媒とほぼ同等の性能があることが確認されている。

新技術を用いたバイオディーゼル燃料の製造コストは、従来法で必要な強アルカリの廃液処理工程等が不要になるため、2～3割の削減が可能となる見込みである。なお、本技術は1～2年後の実用化に向けて、触媒の劣化挙動や耐久性等の実用性能評価が進められる予定である。

バイオディーゼル燃料生成過程



電子機器の軽量化や配線の高密度化に伴い、リレー、コネクタなどの導電性バネ材には、高強度と高導電性を同時に向上させた銅合金材料が求められている。(独)物質・材料研究機構は、2005年12月5日、超鉄鋼研究センターの坂井義和主幹研究員らが、強度と導電率のバランスが極めて優れた銅・銀合金の開発に成功したと発表した。従来の高強度材料の熱処理では常識外の熱処理を加えた熱処理プロセスを考案することにより、銀を最大限に析出させるとともに銅を100%再結晶化することができ、強い加工を施すほど高強度が得られるようになった。この結果、かつて開発された銅・銀合金の10分の1程度の銀の添加量で高強度と高導電性を両立させることができ、他の多くの銅合金をしのぐ特性が得られた。

トピックス 6 高性能銅合金実現のための製造プロセス開発

銅合金は、電線、整流子片、モーターやマグネットのコイル、リードフレームのほか、導電性バネ材（リレー、コネクタなど）などに使われている。導電性バネ材の銅合金は、電子機器の軽量化、配線の高密度化が進むにつれて、機械的強度と導電性のさらなる向上が望まれており、より幅が狭く薄いものが必要とされている。しかし通常、強度と導電性はトレードオフの関係にあり、両立が難しい。

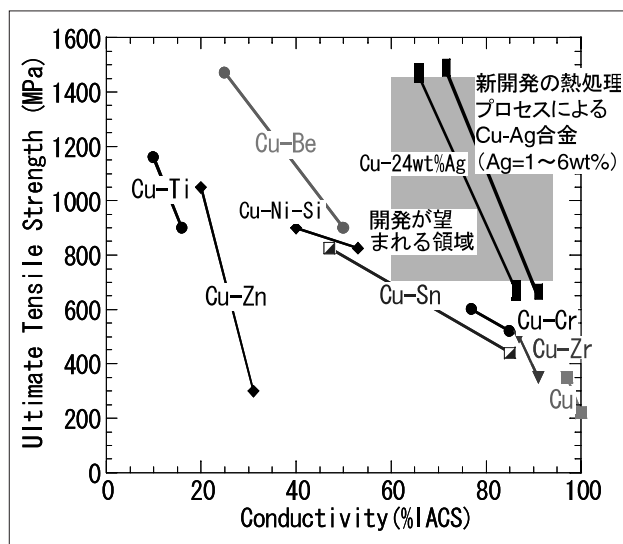
2005年12月5日、(独)物質・材料研究機構(NIMS)は、超鉄鋼研究センターの坂井義和主幹研究員らが、熱処理と加工の条件を工夫することにより、これまでに開発されていた銅・銀合金の銀の含有量を大幅に削減し、かつ優れた両特性を有する銅・銀合金(Cu-Ag合金)を開発したと発表した。NIMSでは12年前にそれまでの銅合金の性能をはるかに超えたCu-Ag合金を開発したが、数十%(重量%)ものAg量を必要としたため、コストパフォーマンスの点で利用は限られていた。今回は、新しい製造技術を開発することでCu合金の再結晶化^①の過程を制御し、1~6%のAg含有量でも高強度と高導電性の両立を実現した。その強度は、実用化されている銅合金のなかで最も高強度であるベリリウム銅合金(Cu-Be合金:Beの有害性のため、製造管理が必要)に匹敵し、導電率はその3.5倍である。また、この材料は薄帯化するための強い加工を施すほど高強度が得られるため、多様なサイズや形状の部品製造に有利であると考えられる。

新しい合金製造方法は、熱処理プロセスに工夫があり、800℃の溶体化処理^②後の冷間加工^③途中に、再結晶が起こる温度(400~550℃)で長時間保持するという従来の高強度材料の熱処理では常識外の熱処理を加えることを特徴としている。この熱処理により、Agを最大限に析出させるとともにCuを100%再結晶化することができ、薄帯化す

るための強い加工を施すほど高強度が得られるようになる。Ag含有量が多いほど強加工に対して高い強度が得られるが、かつて開発された合金の10分の1程度のAg含有量である2%Ag合金の場合でも、強度1200MPaかつ導電率が約80%IACS^④と、他の多くの銅合金よりも両特性のバランスのとれた特性が得られる(図参照)。

今後は、民間企業に今回の研究成果を積極的に紹介し、共同研究を通して実用化を推進していく予定である。

種々の銅合金の強度と導電率の関係



①再結晶化：金属を加熱することにより、新しい歪の無い結晶粒を発生させ成長させること。

②溶体化処理：合金中の添加元素の均一分散のため、合金の温度を上げて急冷する処理。

③冷間加工：通常、再結晶温度未満または常温で行なわれる加工のこと。

④IACS(%)：導電率の単位。標準軟銅の導電率(20℃で1.7241 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$)を100%とした相対的な導電率。

光インターコネクション技術動向

—「京速計算機システム」への適用を目指して—

竹内 寛爾

情報・通信ユニット

1 はじめに

我が国は、2010年度に10P（ペタ）FLOPS^①超級の演算能力を持つ「京^②速計算機システム」の実現を目指した大型プロジェクトを計画している（注^①）。スーパーコンピュータ開発の真の目的は、単なるスピード競争ではなく、他の科学技術分野への貢献、さらには産業界への波及効果にある。次世代スーパーコンピュータが実現したとき、医療、ライフサイエンス、自動車、ナノテクノロジー・材料等、多くの分野に革命的な影響力をもたらすことが予想される。例えば、遺伝子から全身の血流に至るまでのシミュレーション、車全体の衝突シミュレーション、高精度メッシュによる地球全体シミュレーション等が実現できると考えられている。シミュレーション時間の短縮はもちろん、これまで不可能だった対象物全体のシミュレーションがきめ細かに行えるようになり、解を得るまでの時間(Time to Solution)の短縮とシミュレーション結果の両者が、国際競争力の優位性につながる。スーパーコンピュータの開発は、今後期待される技術進展の鍵を握るともいえる重要な開発プロジェクトのひとつと言えるだろう。

米国エネルギー省が2003年に提示した大型施設研究開発の展望によると、同国は今後20年間で優先すべき技術開発のなかで、

「UltraScale Scientific Computing Capability（超高性能コンピュータの開発）」の優先順位を第2位に位置づけた^①。さらに、情報技術研究開発（NITRD）の2003年度予算18.8億ドルの4割以上を高性能コンピューティング（HEC）に重点配分するなど、米国は国家戦略プロジェクトとしての位置づけを強めている^②。2004年には日本のスーパーコンピュータである「地球シミュレータ」が、LINPACK ベンチマーク^③という限定された性能測定にしろ、米国IBM社製BlueGeneに世界最速の座を奪われた。このような背景において、次世代スーパーコンピュータ実現のための大型プロジェクトが開始されるわけである。

次世代スーパーコンピュータの実現において、解決しなければならない課題は数多く存在する。例

えば、システムアーキテクチャや、そのシステムに適したソフトウェアの開発といったコンピュータ開発時にはつきものの課題がある。ハード的には、次世代スーパーコンピュータの要求特性は従来の電気配線方式では物量の面、伝送速度の面から実現不可能な領域に到達しようとしている。このため、スーパーコンピュータの配線問題を解決する最有力候補として、光インターコネクションへの期待が高まっている。

本稿では、スーパーコンピュータ、グリッドコンピューティング、クラスタサーバー、超大容量ルーター等を包含した超高速計算機の中で、とりわけ次世代スーパーコンピュータの取り組みを中心に、光インターコネクション技術動向について述べ、日本のとるべき方向性について考察する。

（注1）「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」。2006年度より7年間で総額1,154億円（予定）の大規模研究開発プロジェクト。

■ 用語説明 ■

① P（ペタ）FLOPS

P（ペタ）は 10^{15} の接頭辞。PFLOPSは1秒間に 10^{15} 回の浮動小数演算を意味する。

② 京（けい）

1兆の1万倍（ 10^{16} ）を意味する単位で、1京回の浮動小数演算を学術的に記述すると10PFLOPSとなる。

③ LINPACK (LINear equations software PACKage) ベンチマーク

主に浮動小数点演算のための連立一次方程式の解法プログラムで、世界で最も用いられている計算機性能測定テスト。

2 電気配線方式の限界

2 - 1

物量における限界

図表1はスーパーコンピュータの構成を模式的に示したものである。スーパーコンピュータは主としてCPU（中央演算処理装置）とメモリ（記憶装置）からなるノード^④を単位に、並列処理を行うため複数のノードで構成される。並列処理にともなうノード間のデータ通信は一般的にスイッチにて通信相手の制御が実現され、このスイッチを含めた構成をノード間ネットワークと呼ぶ。ハードの観点からは、CPU（図表1の③）、CPU-メモリ間（図表1の②）、ノード間（図表1の①）のデータ転送を、それぞれ高速化することがシステム全体の高速化につながる。

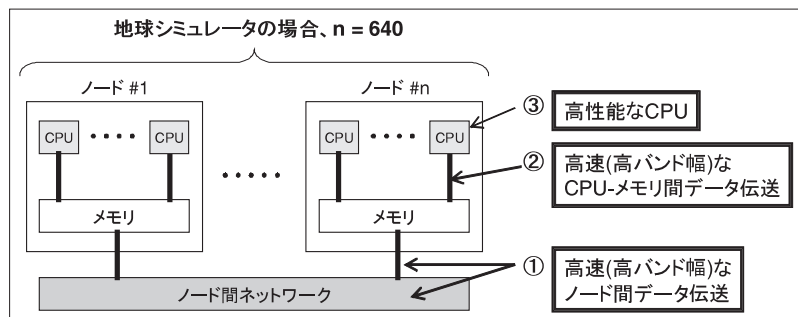
近年の動きに注目すると、2002年に我が国の地球シミュレータがLINPACKベンチマークで35TFLOPSを記録したが、2004年には米国IBM社のBlueGeneが137TFLOPS、さらに2005年11月には同じくBlueGeneが280TFLOPSに記録を更新し、現在トップの座を維持している。我が国では、2010年頃に「京速計算機システム」の実現によって再び世界最速を目指す計画となっている。このように、スーパーコンピュータ開発は日米の熾烈な開発競争の歴史である（注2）（図表2）。

これまでの開発競争は、ムーアの法則に従って処理能力が飛躍的に向上したCPUの存在と、メモリ容量の増大および並列化によって支えられてきた。しかし、10PFLOPS超を目指す次世代機では、従来のアプローチだけでは到達し得ない速度領域に突入する見込みだ。

（株）富士通研究所の試算によれば、ピーク性能3PFLOPSのスーパーコンピュータを同社の現行製品技術にて実現しようとする、ノード間の電気ケーブル（同軸ケーブル）が20,000km、空調を含めた消費電力は30MW、設置面積が8,500m²にも達するという。これは、ノード間の電気ケーブルの距離だけで地球半周に相当し、電力消費量は小さな発電所が必要な規模となる（図表3）。実際に目指す「京速計算機システム」の性能は10PFLOPS超であり、本試算よりもさらに大きな障壁となるのは間違いない。このように、次

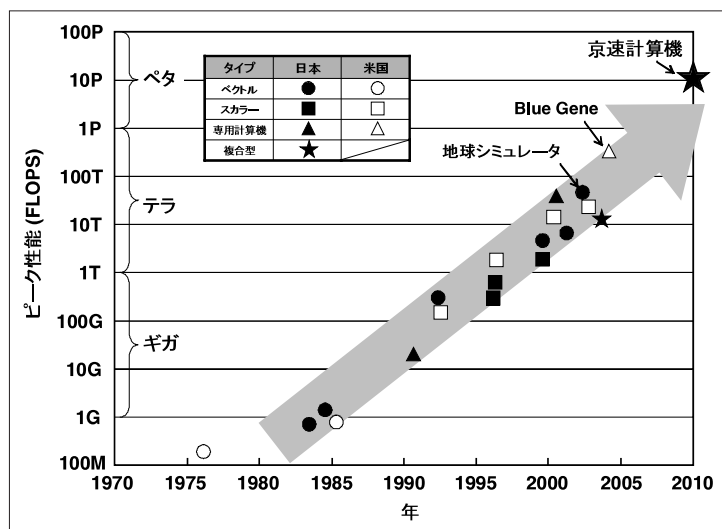
（株）富士通研究所の試算によれば、ピーク性能3PFLOPSのスーパーコンピュータを同社の現行製品技術にて実現しようとする、ノード間の電気ケーブル（同軸ケーブル）が20,000km、空調を含めた消費電力は30MW、設置面積が8,500m²にも達するという。これは、ノード間の電気ケーブルの距離だけで地球半周に相当し、電力消費量は小さな発電所が必要な規模となる（図表3）。実際に目指す「京速計算機システム」の性能は10PFLOPS超であり、本試算よりもさらに大きな障壁となるのは間違いない。このように、次

図表1 スーパーコンピュータの基本構成例（模式図）



参考資料³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 日米スーパーコンピュータ開発競争の歴史



参考資料⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

用語説明

④ノード

CPUとメモリを含むシステムの構成要素。ノード単独で1つのコンピュータシステムとみなせる。大規模スーパーコンピュータでは1つのプログラムを複数のノードで分担して並列処理し、高速化を図っている。

（注2）現在、欧州はスーパーコンピュータの独自技術開発を行っていない。欧州はむしろ利用技術の推進に特化しているといえる。最近の動向としては、2005年12月に仏Bull社のスーパーコンピュータについて報道がある。詳細は参考文献4を参照されたい。

世代スーパーコンピュータを従来の電気配線方式のみによって実現することは、物量面の観点から極めて困難であると言わざるを得ない。

2 - 2

データ伝送における限界

図表 1 に示したように、高速化のポイントは CPU の性能、CPU - メモリ間の伝送帯域、ノード間の伝送帯域の向上となる。CPU 単体の高速化は言うまでもないが、「京速計算機システム」クラスの演算能力を実現するにはシステム上、CPU へのデータ供給のための伝送を如何に高速に行うかが性能を決める大きな要因となる。

「京速計算機システム」が登場する 2010 年頃には、CPU - メモリ間およびノード間のチャンネルあたりの伝送速度もより一層高速化が必要とされる。ところが、従来の電気配線方式では、高周波数に対して電気抵抗が増加する。さらに、プリント基板やケーブル材料に起因する信号減衰から、信号の高周波成分が劣化するという根本的な問題が生じる。つまり、伝送速度を上昇させようとすると伝送距離を短くせざるを得ないという制約がある。伝送距離の制約はボード設計、システム設計にも大きな制約を与える。

電気配線方式のままトータルの伝送容量を向上させるには、並列

図表 3 現行技術のみを用いたペタフロップス級スーパーコンピュータと地球シミュレータとの物量比較（推定値）

		ペタフロップス級 スーパーコンピュータ (ピーク性能 3PFLOPS と仮定)	(参考) 地球シミュレータ (ピーク性能 40TFLOPS)
クロスバースイッチ		600 台	130 台
ノード間接続に 使用する 電気ケーブル	本数	270,000 本	83,200 本
	総延長	20,000km (地球規模)	2,400km (日本列島規模)
	重量	450ton	140ton
消費電力 (含空調)		30MW (小さな発電所規模)	5.5MW (変電所規模)
設置面積		8,500m ²	3,590m ²

参考資料^{6, 7)} を基に科学技術動向研究センターにて作成

チャンネル数を増加するか、多値化によってチャンネルあたりの伝送容量を増加させる、といった手法が考えられる。しかし、並列チャンネル数の増大は LSI パッケージのピン数が増大すると同時に、データの到着時間にばらつきが生じる可能性が増す、いわゆるスキュー問題が顕在化する。このような問題に対処すべく、スキュー調整回路、あるいは多値化用の符号回路の追加や、長距離伝送するために、周波数の高域成分を予め強調するプリエンファシス技術、受信時に周波数成分を調整するイコライズ技術など様々な技術改良の導入が試みられている。しかしながら、これらの手法は LSI の回路規模を著しく増大させ、消費電力増大を招く結果となる。さらに、この他にも特殊な基板材料が必要になり、基板層数が増大し、スルーホール等基板設計の最適化も必要になるなど、基板設計の負荷が著しく増加する。このような

問題から電気配線方式は、チャンネルあたり 10Gbps (ビット/秒) を超えることが難しいと考えられている³⁾。

地球シミュレータの場合でさえ、1 ノード内の CPU - メモリ間の総信号本数は約 20,000 本であったが、地球シミュレータよりも 2 桁以上高速になる次世代機を考えると、CPU の大幅な並列化は避けられない。したがって、その実現は電気配線方式のみでは規模的にも実装的にも困難を極めると考えられる。

高性能サーバーや超大容量ルーター等でも同様に、装置間、ボード間に相当するデータ伝送がボトルネックとなり問題視されつつある。今後、装置内外のデータ量はさらに増大の一途をたどることは明らかであり、来るべき配線ボトルネック問題に対応すべく、電気配線方式に代わる新たな伝送方式の検討が急務である。

3 光インターコネクションとは

3 - 1

光インターコネクションの定義

このような電気配線方式の問題を解決する最有力候補が、光イン

ターコネクションである。光を用いたコネクション (接続) という意味では、光ファイバ通信という形で既に 20 年以上にわたって実用化され、都市間や大陸間といった長距離伝送に主として用いられてきた。しかし、電気配線方

式が問題視されつつあり、これまでニーズが薄かった近距離間の光通信による接続が求められるようになってきた。

「光インターコネクション」は、単に「光配線」や「光インターコネクト」とも呼ばれ、その語意は

「光通信を用いた相互接続」というような広い意味で解釈されることもある。したがって、本稿においては超高速計算機への適用に注目し、長距離接続とは区別してチップ内から装置間までの数十m以下の距離の接続を「光インターコネクション」と定義し、議論の対象とする（図表4）。

3 - 2

光インターコネクションの特徴

光インターコネクションは電気配線方式と比較して、次のような特徴を有する。

①伝送距離と関係なく高速伝送が可能

光は周波数に依存した減衰、抵抗が極めて小さいため、電気配線方式に比べ高速かつ長距離伝送が可能。

②高密度な多重化および自由度の高い実装が可能

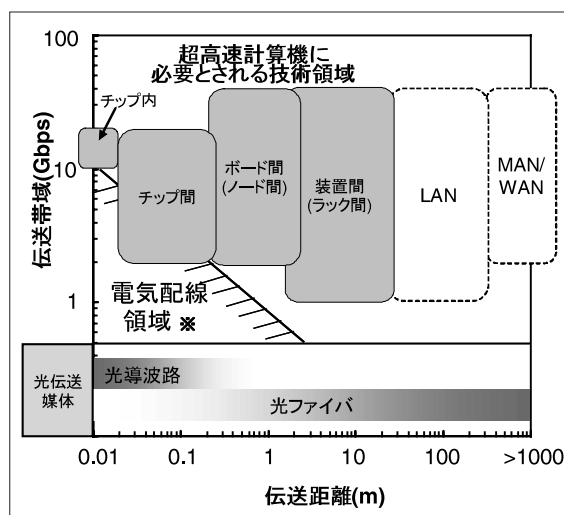
無誘導性のため不要輻射がなく、また非干渉性であるため光学的クロストークがない（注3）。したがって、空間を利用した三次元実装ができるうえ、同一チャンネル上に複数の波長を多重化する波長多重（WDM）技術の適用が可能。すなわち、入力波長数に応じた飛躍的な伝送帯域の増大が可能。

③物量の削減が可能

上記①、②の特徴から、チャンネルあたりの伝送速度を高速にでき、波長多重技術も適用できるため、伝送チャンネル数の削減、さ

（注3）ただし、光導波路も数十 μm まで近接させると光クロストークが問題となる。

図表4 伝送距離と伝送帯域の関係（概念図）



LAN : Local Area Network
MAN : Metropolitan Area Network
WAN : Wide Area Network

光の伝送帯域は単位チャンネル、一波長当たりとして表記

※単線または伝送ペア線当たり

科学技術動向研究センターにて作成

らにはシールド線不要による媒体断面積の削減、配線重量の削減が見込める。すなわち物量の削減が可能となる。

このように、光インターコネクションは伝送帯域を大幅に増加させるとともに物量を削減することができる。

一般的には、伝送距離が短くなるにつれてチャンネル数が増加する傾向があり、それを構成する伝送媒体は基本的には伝送距離に応じて使い分けられる。およそ10cm以下であれば光導波路、それ以上では光ファイバ（単芯またはリボンファイバ）が用いられることが多い。

光インターコネクションを実現するための主な開発要素は、発光デバイスとしてアレイ実装が可能なVCSEL（Vertical - Cavity Surface - Emitting Laser：面発光レーザ）、受光用フォトダイオード、光導波路および送受信回路の各デバイス・材料開発と、高密度実装

設計、熱設計、電気 - 光ハイブリッド設計手法等が挙げられる。

3 - 3

これまでの取り組み

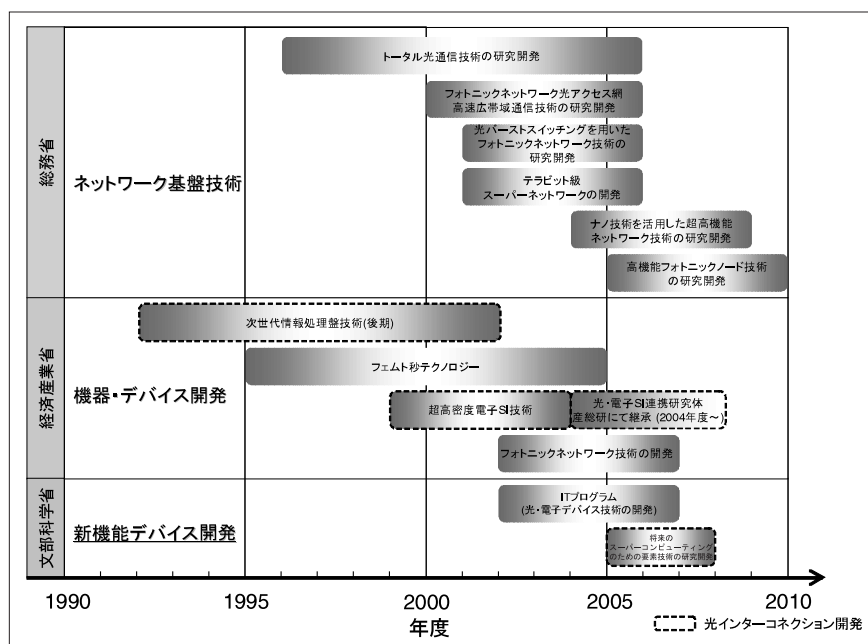
これまで日本は、光通信分野の黎明期から半導体レーザの室温連続発振、光ファイバの実用化等、現在に至るまで光通信分野で世界的に大きな役割を果たしてきた。1990年代から2000年にかけては、米国の活況に追従するように、日本企業は長距離・大容量伝送への光通信システムの実用化を目指し、伝送媒体、発光／受光デバイスといった要素技術開発から装置に至るまで多額の投資を行ってきたことは記憶に新しい。

図表5は過去10年間に政府が推進した光通信関連のプロジェクトの一覧を示している。企業の動きに連動して、現総務省のトータル光通信技術の研究開発、現経済産業省のフェムト秒テクノロジーは長距離・大容量伝送への光通

信システムを目指した開発であった。唯一、リアルコンピューティングワールドを目指した次世代情報基盤技術のごく一部で、光インターコネクションの要素技術開発がいくつか取り組まれた程度であった。

このように数々のプロジェクトによって光通信技術の研究開発が取り組まれてきたが、次世代スーパーコンピュータや超大容量ルーターのような装置の内部通信に必要なテクノロジーとして期待が高まったことを契機に、メトロ系、アクセス系からなる光通信に加えて光インターコネクション技術にも研究開発の重きが置かれ始めようとしている。

図表5 日本政府が推進する光通信関連プロジェクト一覧



参考資料⁸⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 超高速計算機に向けた光インターコネクション技術の動向

4 - 1

日本の研究開発

(1) 将来スーパーコンピュータ実現のための要素技術開発

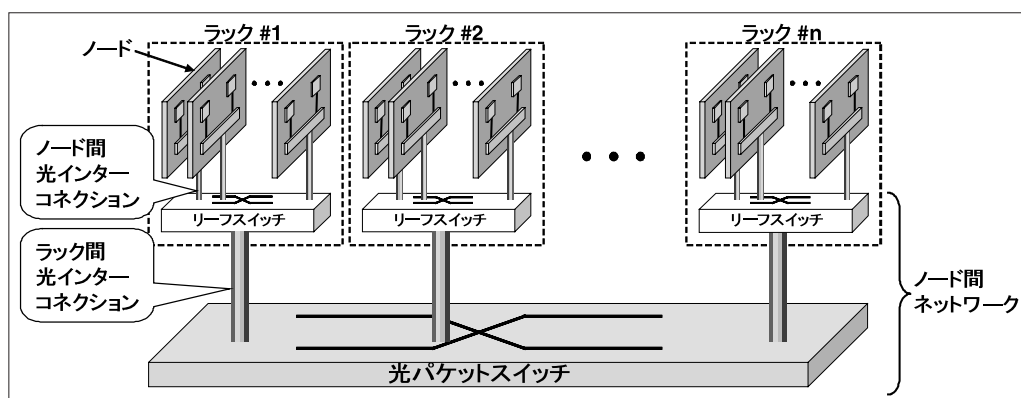
我が国は2010年度に10PFLOPS超級の演算能力を持つ「京速計算機システム」の実現を目指したプロジェクトを計画している。2005年5月、「将来のスーパーコンピューティングのための要素技術の研究開発」を開発領域として、そ

のうち光インターコネクション関連で次の2件が選定された⁹⁾。期間は2007年までの3年間である。いずれのテーマも「京速計算機システム」の実現を念頭に置いた要素技術開発であり、企業と大学が共同で開発を行う体制となっている。

①ノード間ネットワークへの適用
九州大学と富士通㈱はノード同士の伝送ボトルネックを解消するため、ノード間の光インターコネ

クションを計画している。まずはノードとリーフスイッチ間を光化することにより、高速通信を可能とする（図表6）。各基板のインターフェース仕様・設計から、小型・高速化を両立した光モジュールの開発まで総合的な開発を行う。このノードとリーフスイッチ間の光化によって、図表3で示したように20,000km以上にもなる見積もられていた電気ケーブルの物量が1/10以下になるという。さらに本テーマでは、ラック間

図表6 ノード間ネットワーク光インターコネクションの構成例



参考資料⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

の光インターコネクションも開発対象となっている（図表6）。これら二つを合わせて、図表1の①で示したノード間およびノード間ネットワークの高速化を図る。本方式のポイントは、現行の電気クロスバースイッチを光で置換した光パケットスイッチの導入にある。その要素技術として、ナノ秒オーダーのスイッチング速度を有する半導体光スイッチを新規に開発する。光パケットスイッチ導入の効果として光のまま信号をスイッチングできるため、波長多重技術の適用によるケーブル本数の削減はもとより、一括スイッチによるスイッチ数削減、光・電気または電気・光変換モジュールが不要となり、物量面の大幅削減、消費電力の削減が期待できる。

② CPU・メモリ間への適用

CPU性能の向上速度に比較して、CPU・メモリ間のデータ伝送性能の向上速度は遅く、将来的に計算機全体の実効性能がCPU・メモリ間で制限される懸念がある。

日本電気㈱と東京工業大学は、実現すれば世界初となるCPU・メモリ間の光インターコネクション技術に取り組んでいる。これは図表1に示した②の高速化を図るための技術である。開発目標はCPUあたり20Tbps以上の信号伝送能力を持つ光伝送技術の開発である。

日本電気㈱の試算によれば、2010年頃にはCPUあたりの処理速度が100GFLOPS以上に達する（図表7）。これに対し、地球シミュレータと同様、信号線あたり0.5Gbpsと仮定し、単純に並列数を増加した場合、CPUあたりの信号数は25,000本にも達することになり実現は困難を極める。加えて前述のセキュア問題も考慮すると、信号線あたりの伝送速度を向上させ、信号線自体の本数を削減することが望ましい。このような考えに基づき、地球シミュレータと比較して、CPU・メモリ間の伝送速度は40倍以上となる20Gbps超とし、さらにCPUあたりの信号数は半分の1,000信号の光伝送

とすることで目標の20Tbpsを実現する計画となっている。

技術的には図表8に示すように、通常のLSIが実装される同一基板上に実装可能な高密度光モジュールを作製し、現行技術ではおよそ畳サイズにもなるモジュールを数cm角に収めるよう目指す。その要素技術開発として、同グループは20Gbps超の高速光素子、高密度実装に関する研究に加え、従来のLSI技術と光技術を融合すべく、光・電気統合設計に関する研究を行い、上記目標を実現する予定としている。

(2) 超大容量ルーターへの適用

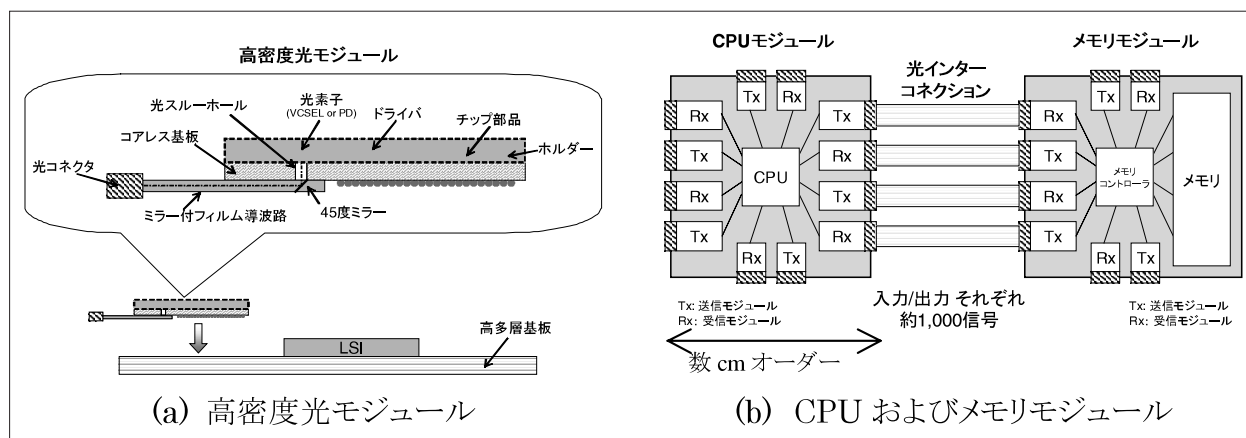
インターネット上のデータは、従来のテキストデータ、音声データに加え、映像データの普及が予想されている。その結果、スイッチ容量は年率約2倍の勢いで増大していく見込みとなっている¹⁰⁾。ルーターはそのボトルネックとなるといわれており、電気配線方式の限界が間近に迫っている分野のひとつである。

図表7 次世代機と地球シミュレータのCPU・メモリ間伝送の推定仕様比較

		次世代スーパーコンピュータ (2010年頃の推定)	地球シミュレータ (ピーク性能40TFLOPS)	地球シミュレータ比
CPUあたりの処理速度		>100GFLOPS	8GFLOPS	>10倍
CPU・メモリ間伝送	信号線あたりの速度	>20Gbps	0.5Gbps	>40倍
	CPUあたりの信号数	1,000信号(光)	2,000信号	1/2

参考資料³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表8 CPU・メモリ間光インターコネクションの構成図



参考資料³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

（株）日立製作所は、スイッチファブリック当りの伝送容量が 2Tbps を超える超大容量ルーターでは、電気配線方式のままでは LSI の消費電力増大、ピン数増大によるコスト高になるだろうとの見通しを示し¹⁰⁾、ルーターの装置内あるいは装置間の光インターコネクションを開発中である。まずは入出力ピンを削減するために、電気スイッチを中心にバックプレーンを構成する形になると考えられる。

しかし、本質的にはノード間ネットワーク同様、電気スイッチを光パケットスイッチに置き換えた光ルーターの構成が望ましい。光ルーターは、経済産業省の「フォトリックネットワーク技術の開発」や、総務省で推進しているフォトリックネットワークのプロジェクトでも研究が進められており、ノード間ネットワーク光技術開発の成果、あるいは光ルーター開発の成果が相互に活用されることが期待される。

(3)さらに高速化を目指す

チップ内技術

さらに処理能力が増大すると、光化はノード間からチップ間へ、

⑤プラズモン

金属などの導電体表面の電子の集団振動のことで、光などの電磁波と結合して光の伝播を制御する効果を持つ。

そしてチップ内へと移行すると考えられる。これは図表 1 に示す③の高速化するための技術の一つである。将来的なチップ内ボトルネックに対応すべく、チップ内光インターコネクションの要素技術開発も行われている。近年、特にシリコンフォトリクスと呼ばれるシリコン電子デバイスと光集積回路の融合に関する研究が注目されている。

2005 年 2 月に日本電気(株)は、その受光デバイスとなるシリコン(Si)製のフォトダイオードを開発したと発表した¹¹⁾。従来、シリコンは化合物半導体に比べキャリア移動度が低い、受光感度が低い等の問題があり高速応答することが困難であったため数 GHz の動作周波数にとどまっていた。そのため、長距離通信で用いられてきた受発光デバイスは高速化の要請から化合物半導体が用いられてきた。これに対し同社は受光デバイスとして、シリコンの表面プラズモン^⑤

共鳴機構に着目し 20GHz を実現し、さらに 12 月には 50GHz を達成している¹²⁾。この技術を用いると、受光面積をさらに縮小化することで原理的には 100GHz 以上も可能との報告がされている。同技術の応用範囲はチップ内配線の技術にとどまらないが、チップ内光インターコネクション実現に向け新たな可能性を示したといえる。

その他、チップ内で高密度に集積し高速かつ低損失に光を送送するために、シリコンをエッチングにより導波路として使用するシリコン細線導波路 (Photonic Wire) の研究も報告¹³⁾されている。この細線導波路技術は、光変調器、フィルタ等にも応用ができることからシリコン上の高集積化技術として今後の開発動向が注目される。

4 - 2

米国の研究開発

(1)国家プロジェクトの動向

米国政府は伝送距離に関わらず光通信関連技術に対し積極的に推進しているように見える。図表 9 に米国国防総省国防高等研究計画局 (DARPA) が推進する光関連技術プロジェクトの一覧を示す。プロジェクトの応用範囲が多岐にわたっていることからわかるように、光技術の多面的な開発推進体制が整っていることが窺える。

光インターコネクションに限定すると、DARPA より “Chip to Chip Optical Interconnects (C2OI)” プロジェクトが 2003 年より 4 年計画で進行している。これは文字通りチップ間のインターコネクションを目指したものである。図表 10 の C2OI の構成メンバーから

図表 9 DARPA の光関連技術プロジェクト一覧

プロジェクト名	期間	研究費	概要
Analog Optical Signal Processing	2002 - 2005 年	3,700 万ドル	光アナログ信号処理技術による、RF システムの性能向上を目標。
Chip to Chip Optical Interconnects	2003 - 2007 年	4,500 万ドル	チップ間の光接続技術。プロセス間の高速接続を目標。
Chip-Scale WDM	2002 - 2005 年	4,000 万ドル	WDM を利用した次世代ダイナミック、リコンフィギュラブル網、およびそのコンポーネント研究。
Data in Optical Domain-Network	2002 - 2006 年	6,000 万ドル	エレクトロニクス、フォトリクス、MEMS 技術を用い、100Tbps 以上のスケーラブルな光ルーターを目標。
Optical CDMA	2003 - 2007 年	4,500 万ドル	光 CDMA のハードウェア技術、およびネットワーク方式の提案。
Photonic A/D Technology	1998 - 2001 年	4,000 万ドル	光処理による信号デジタル化処理技術の確立。モード同期レーザーや高速変調器の開発が中心。

DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency

※期間および研究費は公募時の計画案に基づく

参考資料¹⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

わかるように、企業、大学、国立研究所がこれまでの研究内容を活かした開発内容となっており、産学官の連携のプロジェクトとして見てとれる。この中でも特に注目されているのが IBM 社と Agilent Technologies 社が共同研究している“Terabus”である。同研究だけに、4年間で3,000万ドルが出資されている。

取り扱う情報量の増加にしたがって、サーバー内部の総伝送帯域は4年で10倍のペースで増加し続け、2010年にはプロセッサ間で40Tbpsもの総伝送帯域が必要とIBM社は予想している。Terabusはまさにこの問題解決を開発ターゲットとし、2010年までに低消費電力、低コスト、小型化を最終目標としている。Terabusの構成は、基板実装が可能な光トランシーバモジュール（Optochip）を、導波路を包含したプリント基板（Optocard）に実装する形となる（図表11）。

当面の目標は、チャンネルあたりの伝送速度の目標を20Gbps超（開始当初の目標は15Gbps）とし、48チャンネルで1Tbps超の伝送帯域の実現となる。光導波路を62.5 μ mと近接させて高密度実装を行い、1cm²に収める予定である。将来的な目標は、チャンネルあたり40Gbpsを実現することになっている。

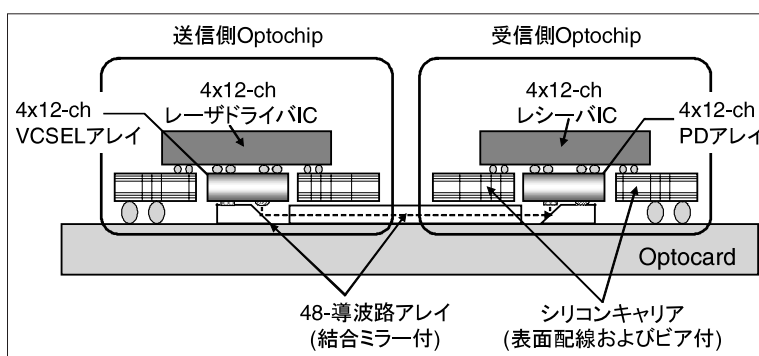
2005年9月、IBM社とAgilent Technologies社はスコットランドで行われた欧州最大の光通信関連学会であるECOC2005で招待講演を行い、チャンネルあたり送信20Gbps、受信14Gbpsで48チャンネルの平行伝送を達成したとの発表を行った¹⁷⁾。高速ドライバ、レシーバを0.13 μ m-CMOSテクノロジーで実現し、1チャンネルの1Gbpsあたりの消費電力が10mW以下と省電力化が図られている。着実にロードマップに従った開発を実行しており、これから

図表 10 C2OI プロジェクトの構成メンバー

構成メンバー	開発内容
IBM, Agilent	システムデモ、40Gbps 送信デバイス技術
University of California Santa Barbara University of Texas at Austin	40Gbps 送信デバイス技術 40Gbps 増幅器不要の光受信機デバイス技術
Colorado State University	高速 VCSEL 技術
Mayo Foundation	評価機
US army Research Lab	集積化技術 低消費電力送受信デバイス設計 (University of Delaware)
The Air Force Research Lab	ポリマー材料評価、導波路作成
MIT Lincoln Lab	アーキテクチャー

参考資料¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 11 Terabus 構成図



参考資料¹⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

本格的な開発を始動する日本はデバイス開発で米国に先行されている状況にある。

このような高速光インターコネクション技術開発は、米国政府の高性能コンピューティング（High-End Computing：HEC）計画にあるハードウェアロードマップにも合致しており¹⁸⁾、近い将来、HEC実現に向けた技術となる可能性が高い。前述のBlueGeneを手がけたIBM社がTerabusの研究開発を行っていることから、今後HEC計画に深く関与していくことが予想される。

(2)その他の動向

Intel社は将来的な電気配線方式の限界に備えて、同社のシリコンテクノロジーを発展させるべくシリコンフォトリソの研究開発を行っている。同社のPatrick P. Gelsinger 副社長は、「現在、光技術は用途が限定されているが、将来的にはIntelのあらゆるチップ

の主流となるだろう」とコメントしており¹⁹⁾、積極的に光技術に対し研究開発を推進している。

特に注目されるのがチップ内の光インターコネクションの動向である。2005年2月、Intel社はSi製のラマンレーザ^⑥の連続発振に世界で初めて成功したと発表した。製造には標準的なCMOSシリコンが使用される。この技術はシリコン上の光集積の可能性を示すものであり、実現されれば同社のシリコン製造手法を用いて、安価な光デバイスの量産が可能になる。他にもシリコンチップ上に集積化できる光変調器²⁰⁾や受光器の開発も進めており、チップ内光インターコネクション技術を総合

■用語説明■

⑥ラマンレーザ

外部入射光に対し、内部構造に応じて波長が変化するラマン効果を利用したレーザ。

的に開発している。

4 - 3

技術課題

光インターコネクション技術は、まさにこれからの技術ということで配線に用いる材料から実装方法に至るまで、製造方法が確立されているとはいえず、技術的課題は多い。例えば、光インターコネクションは並列伝送が基本であるため、発光デバイスは並列アレイが実現容易な VCSEL が用いられることが多いが、並列化するほど単体の信頼性要求は厳しくなる。直近の課題は、送信側のキーデバイスでもある VCSEL の頓死^⑦であろう。頓死のメカニズムについて近年報告が多数なされて

おり^{21, 22)}、完全に解決されるのは時間の問題であるという見解もある。しかし頓死問題は、利用者側にとっては信頼性問題に直結するだけに、光インターコネクション技術の実用化を阻む要因と成り得る。産業界全体として VCSEL の頓死問題の早期解決が望まれる。

別の課題として、熱問題が挙げられる。高密度実装を追及すると単位面積あたりの発熱量が増加することが予想されるが、例えば、図表 8 で紹介した数 cm 角の CPU モジュールの発熱量は 200 ～ 300W にも達する見込みである。熱問題はデバイスの寿命も左右する問題であり、冷却技術の新規開発が期待される。

最終的には全光化したシステムが期待されている。全光化すると、

■用語説明■

⑦頓死

動作時に突然破壊され、故障モードに至る現象。

電気 - 光変換モジュール数を削減でき、消費電力を大幅に削減できる利点がある。しかしながら、光の状態をバッファするメモリ、スイッチそのもののデバイス実現が未だ困難であることから、電気では容易な経路スイッチングに課題を残している。

以上の状況も踏まえて、全ての高速電気配線がいきなり光化されるとは考え難い。技術的難易度から見ても、ノード間、CPU - メモリ間、チップ内の順で実用化が進むと考えられる。

5 今後の方向性

5 - 1

戦略的ロードマップの必要性

地球シミュレータの例を見てもわかるように、これまで我が国は、単発的にスーパーコンピュータの開発を行ってきた。単発のプロジェクトでは、要素技術開発にも継続性が望めない。2005 年 11 月に行われた総合科学技術会議による「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」の評価においても、後続機ロードマップの欠如が米国の後塵を拝している理由の一つとして挙げられている²³⁾。ロードマップに基づいた長期的戦略は極めて重要である。また、これをスーパーコンピュータのロードマップだけに留めるのではなく、今後高速化が切迫してくると思われる超大容量ルーターのロードマップとも合致させ、配線技術全般に光技術が取り入れられ

ていく大きな流れを示す戦略的なロードマップとして展望すべきであろう。

長期的な戦略ロードマップは、単発プロジェクトでは取り組むことが難しいような、より挑戦的な要素技術開発への着手を可能にするだろう。例えば、チップ内の光インターコネクションといった将来的な技術が、国家プロジェクトのもとで先行開発されるようになる。もちろん、産業界において各企業レベルで光インターコネクション技術が開発されていく必然性はあるが、直近のビジネスと関係が薄ければ、利益追求が企業の理念である以上、おのずとその規模や開発スピードには限界がある。現在の日本の状況を冷静に判断すれば、国家的な取り組み無くして当該分野を優先特化しようとする日本の企業はほとんど無いだろうと思われる。

戦略的ロードマップのような継続的な計画があれば、我が国は光

インターコネクション技術のような戦略的要素技術を一過性のものではなく、次世代の「京速計算機システム」、次々世代機、さらに超大容量ルーターを含む超高速計算機実現のコア技術の一つとして明確に位置づけ、長期的に推進していくことが可能となる。

5 - 2

将来への布石

過去のスーパーコンピュータの性能が、既に民生品レベルになっていることからわかるように、民生品のコンピュータにおいても電気配線方式が問題になるのは、もはや時間の問題である。近い将来、光インターコネクション技術と CPU は切り離せない状況が来る。現状では、民生品のコンピュータの CPU は米国 Intel 社のほぼ独占市場となっているが、光インターコネクション技術がチップ間、チップ内へと浸透していけば、

従来のアーキテクチャが変わる時期が到来する。これは、市場勢力が変化する契機となるかもしれない。光インターコネクションの技術力向上は、次世代CPU、それを取り巻く周辺メモリ等の覇権争いの布石となりうる。チップ内あるいはチップ間のインターコネクションは、高い技術力が必要であり、長期的に優位性を保つことができる要素技術とも言える。光インターコネクションの技術開発は、まだ始まったばかりである。したがって現在は、戦略的ロードマップを作成し、光インターコネクション技術へ投資すべ

き好機であろう。

既述のように超高速ルーターの分野でも、バックプレーンにおいて電気配線方式の問題が浮上しており、同様に光インターコネクション技術が市場に普及すると考えられる。キャリア向けのルーターにおいては、世界市場の大半が米国製であり日本企業がほとんど参入できていない状況にある。この分野は、ソフトウェアとのバランスや過去からの機能継承といった、単に高速性能だけでは語れない参入障壁が存在するが、光インターコネクション技術の導入は、この分野でも日本の置かれ

ている現状を打破するきっかけになりうる。

一方、超高速ではないが、不要輻射や配線スペースの観点から携帯電話、自動車の中へ光インターコネクションの導入が検討されている。今後普及拡大が予想されるロボットの分野にも、脳に相当するプロセッサの演算結果を神経のように伝達する配線として、光インターコネクションが適用されることも考えられる。最先端の技術開発で培った技術をこのような分野に横展開できる可能性も十分に期待できる。

6 終わりに

本稿では超高速計算機について、とりわけ次世代スーパーコンピュータ開発の要素技術の中で、特に光インターコネクション技術に焦点を当て、技術動向を紹介し、日本のとるべき方向性について述べた。光インターコネクション技術は我が国が得意とする光技術分野の一つであり、光技術開発で世界の先端を走ってきた過去の経験や実績からも研究開発の素地は整っていると言える。将来のスーパーコンピュータ開発はもちろん、次世代CPUやルーター開発において日本の置かれている現状を打破する契機となるかもしれない。「京速計算機システム」のような次世代スーパーコンピュータ開発への取り組みを通じ、光技術への転換期において日本勢の巻き返しに期待したい。

謝 辞

本稿の執筆にあたって、日本電気(株)コンピュータ事業部 野口孝行室長、佐藤達夫シニアチーフエンジニア、同生産技術研究所 古宇田光主任研究員、(株)富士通研究所 ペタスケールコンピューティ

ング推進室 木村康則室長、(株)日立製作所 ネットワークシステム研究部 西村信治主任研究員、(独)産業技術総合研究所 光技術研究部門 森雅彦主任研究員、(独)海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター 北脇重宗特任技術員、東京工業大学 精密工学研究所 宮本智之助教授、古河電気工業(株)横浜研究所 影山健生博士のご意見を参考にさせていただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 米国エネルギー省のホームページ、大型研究開発計画：
http://www.sc.doe.gov/Sub/Facilities_for_future/20-Year-Outlook-screen.pdf
- 2) NITRD Blue Book FY2004：
<http://www.nitrd.gov/pubs/bluebooks/2004/04BB-final.pdf>
- 3) 野口孝行、“次世代スーパーコンピュータのための光配線技術”、計算科学技術シンポジウム、2005年9月
- 4) 仏原子力庁のプレスリリース：
<http://www.cea.fr/gb/>

actualites/article.asp?id=39

- 5) 理化学研究所 情報基盤センターのプレゼンテーション資料：
http://acc.riken.jp/HPC/HimenoPresen/050405_Himeno.pdf
- 6) 木村康則、“ペタフロップスコンピュータと光技術”、次世代光情報通信技術シンポジウム、2005年9月
- 7) 幡田伸一 他、“地球シミュレータのハードウェア” 情報処理 2004年2月号
- 8) 立野公男、“光通信技術と産業動向と今後の進め方への提言”、科学技術動向 2004年12月号
- 9) 文部科学省のプレスリリース：
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/17/05/05052401.htm
- 10) 西村信治、“光技術の超大容量ルーターへの適用”、次世代光情報通信技術シンポジウム、2005年9月
- 11) 日本電気(株)のプレスリリース：
<http://www.nec.co.jp/press/ja/0502/2303.html>
- 12) 日本電気(株)のプレスリリース：
<http://www.nec.co.jp/press/ja/0512/0604.html>
- 13) 例えば、馬場俊彦 他、“Si 細線

- 導波路”、電子情報通信学会論文誌 C Vol.J88 - C No.6, 2005.
- 14) DARPA 光関連技術のプログラム：<http://www.darpa.mil/mto/radprograms.html>
- 15) DARPA C2OIプロジェクト資料：http://www.darpa.mil/mto/c2oi/kick-off/Athale_DARPA.pdf
- 16) 米国 IBM 社光インターコネクションに関する報告書：
<http://www.research.ibm.com/journal/rd/494/benner.pdf>
- 17) L. Schares et al., “Terabus -A Waveguide-Based Parallel Optical Interconnect for Tb/s-Class On-Board Data Transfers in Computer Systems,” ECOC 2005, Sept. 2005.
- 18) 野村稔, “米国政府の高性能コンピューティングへの取り組み”、科学技術動向 2005 年 2 月号
- 19) Intel 社のシリコンフォトニクスホームページ：<http://www.intel.com/technology/silicon/sp/>
- 20) 例えば, L. Liao et al., “High Speed Silicon Mach-Zehnder Modulator,” Optics Express, vol. 13, No. 8, 2005.
- 21) 米国 AOC 社 VCSEL 信頼性レポート：<http://www.adopco.com/publication/documents/PW2005.pdf>
- 22) C.Helms et al., “Reliability of Oxide VCSELs at Emcore,” Proceedings of the SPIE, vol. 5364, Bellingham, WA, 2004.
- 23) 例えば, 総合科学技術会議が実施する国家的に重要な研究開発の評価「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」について 2005 年 11 月 28 日：<http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu50/siry04.pdf>

執筆者



情報・通信ユニット

竹内 寛爾

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



企業にて光ディスク用高出力半導体レーザーの事業化、光伝送の研究開発に従事。
現在、情報通信分野における科学技術政策および価値観の多様化が企業の研究開発戦略に与える影響に興味を持つ。

無機材料研究における マテリアルインフォマティックスの動向

知京 豊裕
客員研究官

1 はじめに

インフォマティックスとは、コンピュータやネットワークを使って情報の収集と分類を行い、新しい知識体系を構築することである。この手法を材料科学に適用し、革新的な材料開発をめざすものがマテリアルインフォマティックスである。その構成としては、計算科学やデータベースを使った材料設計、材料合成実験計画表、材料探索のためのコンビナトリアル材料自動合成法、材料高速評価法、得られた結果のデータベース化、ネットワークを介したデータの共有、データの視覚化と新材料を予測するデータマイニングなどの要素があり、これらを統合してマテリアルインフォマティックスは構築される¹⁾。

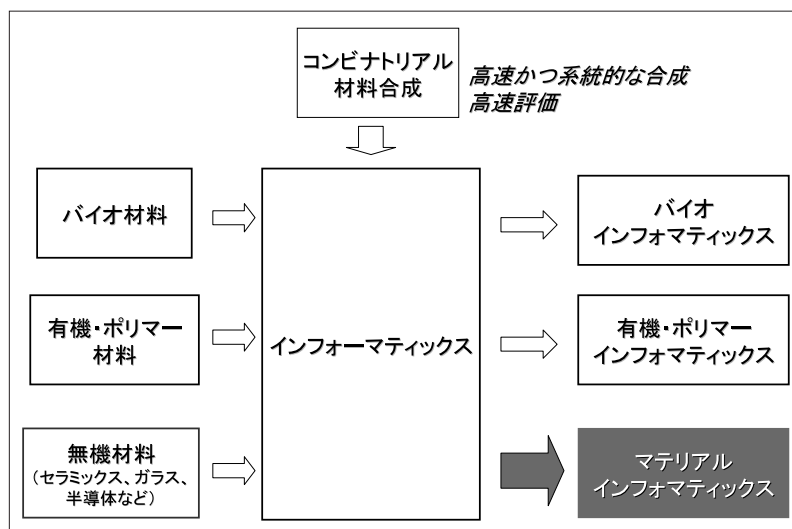
インフォマティックスに関して先行しているのはバイオインフォマティックスや有機材料のインフォマティックスである。バイオインフォマティックスは、自動解析装置が開発され、大規模な遺伝子配列データの処理が可能になっており、これらのデータから遺伝情報データベースの構築や数理統計

を用いたデータ解析が行われている。解析結果を使ったテーラード医療は、バイオインフォマティックスの発展成果のひとつである。また、有機系材料やポリマー（高分子）開発でもコンビナトリアル手法を使った大量かつ系統的な合成手段と大量データ処理技術を使った新材料の開発が進められている。

従来、セラミックス、ガラス、半導体といった無機材料のインフォマティックスは構築されてい

なかったが、近年、コンビナトリアル材料を使った触媒材料合成の過程に対し、材料設計からデータ蓄積までをひとつのセットとして研究開発する機関が出現してきた。特に企業の研究において、システムティックな材料探索が進められ、それに伴って大量のデータ解析も必要となり、この分野でもマテリアルインフォマティックスの重要性が唱えられるようになってきた²⁾。

図表1 各種材料開発とインフォマティックスの関係



2 他のインフォマティックスとの類似点と相違点

無機材料のマテリアルインフォマティックスを考える際に、先行する他のインフォマティックスと

の比較を行うことにより類似点と相違点がより明確になると思われる。上記に述べたように、先行す

るインフォマティックスとしてはバイオインフォマティックスや有機合成におけるインフォマティッ

クスがある。

バイオインフォマティックスは、すでに盛んに研究されている分野であり、遺伝子情報、遺伝子統計学などを融合してバイオインフォマティックスが構築されている⁴⁾。バイオインフォマティックスでは、ゲノムと呼ばれる生物の遺伝子情報を系統的に整理することを目的としており、DNAの塩基配列データの収集、系統的保管などのデータベースに関する機能、データを視覚化して直感的に比較検討するようなデータ解析ソフトから構成されている。現在のバイオインフォマティックスは、解析装置が自動的に大型のデータベースを作成している。そのために、最新のコンピュータ技術が導入され、大量のデータを高速に取り扱えるようになっている。異なる研究機関で生成されるデータはそれぞれ独自の形式であるために互換性の問題があるが、互いのデータを共有するためのツールを使い、機関間のデータ共有が行われている。

その他の分野でインフォマティックスの開発が進んでいるのは有機合成の分野である。組み合わせによって多数の化合物群を一度に合成することができるコンビナトリアル手法による有機合成は、材料合成の速度を飛躍的に向上させ、他の先駆けて新しい材料を創製することが可能であるため、新ポリマー材料開発から医薬品開発に展開されている。コンビナトリアル合成を用いることで、分子構造がよく似た大量のライブラリを作製することが可能になり、特定の化学構造、官能基との特定の反応に対しての活性の有無が調べられている。その結果、目的に合致する可能性のあるものがあれば、その組み合わせを集め、商品化することができる。ここでもロボットによる自動化が進みつつあり、これらに関する多くのベンチ

ャー企業が設立されている。ただし、ここでのインフォマティックスは、構築の目的が他の企業に先行して結果を独占することであるために、各企業やグループ内で閉じたデータベースとなっている。

セラミックス、ガラス、半導体といった無機材料の研究でも、過去に多くの材料特性や結晶構造などの豊富な材料データが蓄積されてきた。しかし、この分野での過去のデータは、研究の過程で得られた成果を報告されたままの状態を集めたものであり、ひとつひとつの閉じた研究の中で蓄積されたものである。したがって、データ形式は様々であり、あるデータは数値データであり、他のデータはグラフのみで与えられているために、データ交換ができないという問題がある。さらに無機材料研究におけるインフォマティックス構築の難しさは、ひとつの材料が多面的な性質を持ち、しかも各特性が単純な「ある」「なし」で表現できないことに起因している。これは、比較的デジタル的に特性を表現しうる有機材料やバイオ研究の場合と大きく異なっている。たとえば、酸化ジルコニウム (ZrO_2) は、一方ではゲート絶縁膜材料として、他方ではイオン伝導体として知られている。ゲート絶縁膜材料としての ZrO_2 は、できるだけ酸素空孔を少なくして絶縁特性を向上させることが求められる。したがって、ここでは絶縁特性を向上させるための添加材料や絶縁特性などが中心的データとして蓄積されている。一方、イオン伝導体やセンサーとしての ZrO_2 は、逆に空孔濃度を増やして伝導性を確保することが求められる。したがって、ここでは電気抵抗を下げるための作製条件と伝導性を高める不純物材料が中心的データとして蓄積されている。同じ材料でありながら、研究目的が異なると、蓄積データがまったく異なったもの

になっている。したがって、ひとつひとつの材料をそれぞれ異なった手法で合成し、特定の特性だけを評価するという従来の実験データの蓄積方法では、マテリアルインフォマティックスを構築することは不可能である。

この状況を変えることができるのがコンビナトリアル材料合成手法の導入であり³⁾、実際に無機材料開発にも適用されはじめている。組み合わせによって多数の化合物群を一度に合成することができるコンビナトリアル手法は、上記で述べたように触媒などの材料開発では有効であることがすでに認識されている。さらに、インフォマティックス構築のためには、材料開発の各段階で、系統的かつ自動的にその特性が計測され、データとして残るようなシステムが必要である。したがって、「コンビナトリアル材料合成」に、さらに「高速材料評価手法 (High Throughput Screening)」の確立も必要であり、これらはマテリアルインフォマティックス構築のためには不可分の関係にある。

すなわち、各実験は、組成や成長条件などを系統的に変化させることが可能であるコンビナトリアル材料合成に、それらの特性を系統的に評価することが組み合わされたものでなければならない。上記の ZrO_2 の例を取れば、 ZrO_2 という材料の合成に対して、製造条件のほかに、酸素分圧や電気抵抗といった材料特性を自動計測し、これらをデータセットとして蓄積する。このデータセットの一部は高誘電体ゲート絶縁膜情報として利用でき、別の一部はイオン伝導体情報として利用することができる。このようなデータセットでの収集と蓄積がマテリアルインフォマティックス構築の第一歩となる。つまり、今後の材料開発は、マテリアルインフォマティックスを構築するためのデータフォー

ットを意識しながら行うことが必要になる。コンビナトリアル手法で得られた大量のデータには、処理の自動化も不可欠である。

このような視点で考えると、有効な蓄積データセットはまだ少ない。また、このようなマテリアルインフォマティックスを構築しはじめた研究機関はあるものの、今

のところ、それぞれの研究機関が異なる目的でマテリアルインフォマティクスを構築しようとしているために、結果が分散している。マテリアルインフォマティクス構築の基礎的段階にある現状では、まず、互いにデータを共有することでデータベース情報を補完する状況を実現することが必要で

あろう。評価項目が多岐にわたる材料研究では、すべてのデータを一度に自動計測することは現実としては困難であり、複数の機関間でデータを補完しあうように進めるほうが、無機材料の研究開発全体のために有効である。

3 マテリアルインフォマティックスの現状と課題

無機材料のマテリアルインフォマティクス構築に関する研究活動は、各国、各研究グループが個別に開発しているというのが現状であり、そのために成果はかなり限られたものとなっている。現時点は、コンビナトリアル実験に関係するデータ管理や保存についての議論の段階にとどまっており、そのデータを使って新材料を見つけ出すデータマイニングまでには進んでいない。その原因は、各研究グループが個別の方法でのデータ蓄積を行っているために互いにデータの共有ができないことであり、結果的にデータマイニングに値するデータが蓄積できていないためである。また現状では、特性評価に時間がかかっており、短期間に多くのデータを集めるということができていない。これらの問題のために、データマイニングを通じて新材料を予測するというマテリアルインフォマティクスの本来の目的までは、まだかなりの距離がある。

しかし、この最終的な目的を意識した取り組みは、特定の分野ではすでに行われている。特に、触媒ではその特性が触媒能の「ある」「なし」で判断できることから、研究が盛んである。計算科学に基づいて材料物性を予測する研

究は、東北大学の宮本／久保グループなどが、触媒開発などで新しい材料の予見と企業による実証などで成果を上げている⁵⁾。

近年、多くのコンビナトリアル手法を使った材料開発が報告され始めているが、マテリアルインフォマティクス構築に寄与すると考えられるデータセットになっているものは、全体のわずか10%程度であろうと見積もられている。しかも、その内容は、バイオインフォマティクスなどの他のインフォマティクスの手法を、そのまま触媒開発など限られた材料開発に適用しようとするものである。

一方、現存するデータベースをマテリアルインフォマティックスの構築に使えないかという検討も行われている。例えば、X線回折のデータベース、Linus Pauling ファイルなどの相図に関係したデータ、自由エネルギー計算に必要な JANAF 表などのデータが、National Institute of Standards and Technology (NIST) など、海外の国立研究所から多く提供されている。日本でも (独) 物質・材料研究機構などが複数の国際データベースへのアクセスをサービスしており、これらは材料開発に必要な基礎的なデータを提供している。しかし、これらのデータは、

前述したように、あるものは数値データであり、あるものは図表で表現されたデータである。そのために、現実的には、これらは新しい材料を予測するためのデータベースにはなっていない。

これらのことを念頭におき、今後、マテリアルインフォマティクス構築に必要な課題をまとめると、以下のようになる。

- ① データ共有をめざしたデータベース形式の再定義
- ② データベースのネットワーク化とデータ共有のためのソフトウェア開発
- ③ データの解析ソフトとデータの視覚化ソフト開発
- ④ データベースからのデータマイニングに関するソフトウェア開発
- ⑤ データマイニングと計算科学の融合による新機能予測
- ⑥ これらを統合するプラットホームの標準化

特に⑥は今後のマテリアルインフォマティックスの根幹をなすものとなる。これらの実現は、単独の機関では不可能であり、国内はもちろん国際協調のもとでの長期的な作業が必要になってくる。

4 マテリアルインフォマティックスの具体化

4 - 1

コンビナトリアル手法の導入とデータ形式の共有

材料開発プロセスの効率化も、マテリアルインフォマティックス構築の目標のひとつである。無機材料における従来の実験では、個別に試料を作製し個別に評価をおこなってきた。しかし、コンビナトリアル手法を使うことで一度に数百種類という規模で試料合成が可能になるため、マテリアルインフォマティックスを構築するためには、この手法の導入が前提となる。実際、コンビナトリアル手法を使った新しい無機材料研究が始まっている^{6~8)}。

コンビナトリアル手法を取り入れた合成過程では、材料合成、評価、解析の順でデータが蓄積される。これをできるだけ効率的に進

めるために材料設計から合成まで各プロセスを統合、管理し、律速となる段階をできるだけ短時間で行えるようにするために、各合成プロセスを管理できる装置が必要である。評価と解析は個別の要素が強いために個別の評価装置が必要になり、データ収集にもっとも時間を要する箇所である。また、得られた系統的な結果を効率的に解析するために、データ管理や解析ツールが必要となる。これらの過程をすべて自動化できれば、より望ましい。

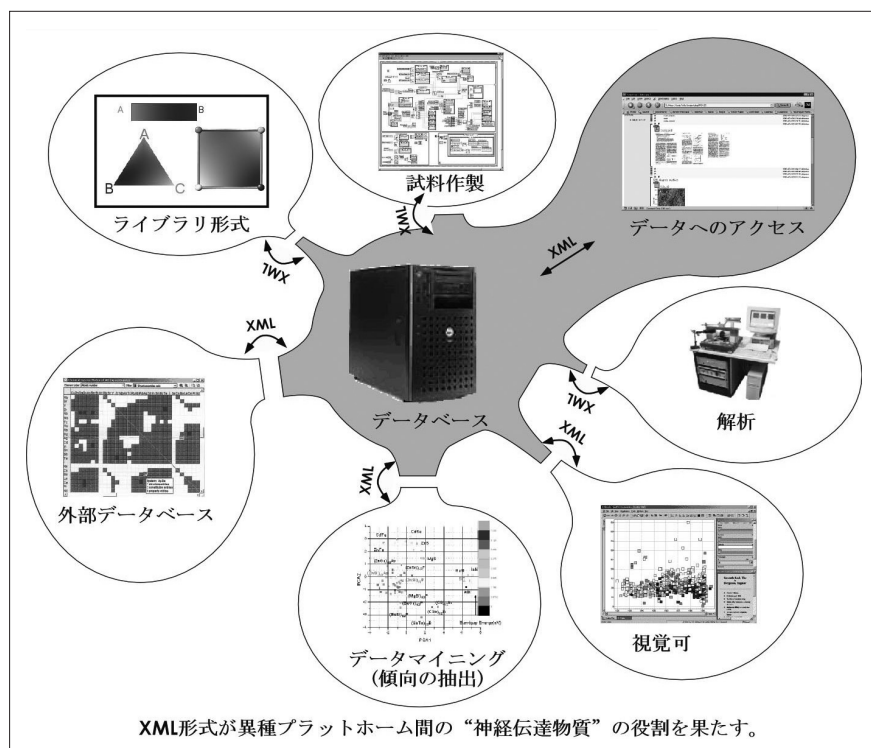
どのような特性を評価するかは、これまでは各材料研究開発の目的に依存していた。しかし、インフォマティックスの構築をめざしてデータを共有するためには、最低限の共通事項の計測、例えばX線回折による構造評価や電気抵抗などの計測に、それぞれの材料特有の特性評価を加えた、ひとつ

の共通のデータ形式として保存されることが望ましい。この場合、データマトリックスの中に空白の項目もありうるが、この点は他の領域のインフォマティックスとは異なる点である。

データはまず個々の研究機関のもつデータサーバに蓄積され、これらのサーバが互いにリンクされてひとつの巨大な仮想データベースを構築する。最も便利で現実的な手法はWeb技術を用いることである。さらなる合成プロセスの効率向上のために、Webを介したデータのやりとりで他の機関の合成条件などを入手し、それらを基に次の合成計画ができれば研究効率を飛躍的に上げることができる。

新しい材料開発に求められる既存のデータ(相図や熱力学データ)が分散していても、Webを介して入手することができれば、従来よりは材料設計を加速することができる。これまでの無機材料分野には、合成で使用したデータやその結果を、研究者や研究機関の壁を越えてその後の合成に再利用できる仕組みが無い。従来の実験報告は、合成結果報告の記録に実験の詳細がほとんど記載されていないため、他者による後日の実験で、同じ試みを再び繰り返している場合が多い。また、情報交換が不足しているために、異なる目的のために、別の研究者が同じ材料を同じ手法で合成していることもある。例えば燃料電池用の触媒と集積回路の金属ゲート材料の探索は、ほぼ同じ材料であり、計測する項目も仕事関数と表面電位計測とかなり似通ったものである。これらの2つの領域の研究が同じ手法で合成、評価されれば、材料合成の研究速度を加速度的に向上さ

図表2 異種プラットフォーム間のデータベース化の概略



Lippmaa 助教授による資料を参考に作成

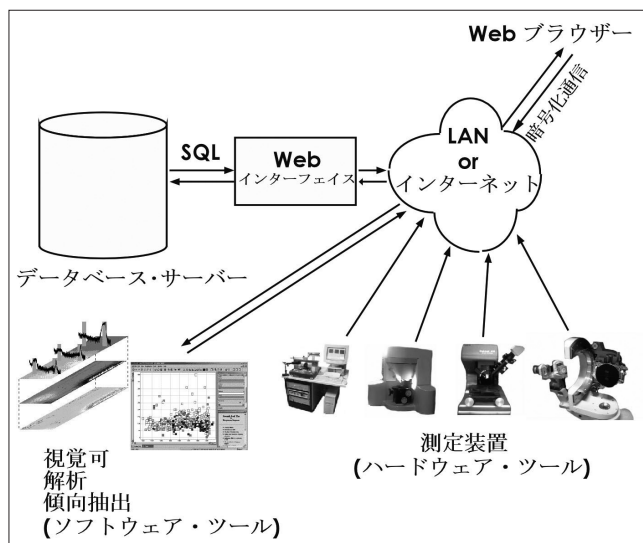
せることができるはずである。そのためには、各機関が情報を共通形式によるデータとして記録し、Webを介して検索できる状況としなければならない。したがって、まず共通のデータ形式を開発し、共有できるデータを充実させることが重要である（図表2）。

4 - 2

共通のデータフォーマット形式

インフォマティクスシステムとは、データベースと実験工程に必要なソフトウェアツールの集合体とみることができる。システムの中心部は、実験で集められたデータを共有するデータベースである。現時点で一部の機関で構築されようとしているマテリアルインフォマティクスは、まだ、閉じた系でのデータ共有とデータ検索などのアクセスは可能という程度である。また、そのデータの記述形式にはリレーショナルデータベース形式、例えばSQL（Structured Query Language：構造化問合せ言語）方式が多く用いられている。データを1機関で独占し、材料合成と評価を比較的短時間で行なうという目的のためには、SQL形式でも十分であると考えられる。しかし、より広い範囲でのインフォマティクスシステムの構築、すなわち、他の材料研究への展開は期待できない。

図表3 XMLを介したマテリアルインフォマティクス構築の例



Lippmaa 助教授による資料を参考に作成

マテリアルインフォマティクスでは、合成手法やその工程など多くの種類のデータが蓄積される必要があり、そのデータ形式も多種多様にならざるを得ない。したがって、できるだけ拡張性のある形式でデータ保存する必要がある。現時点で最も有効なデータ形式は、記載内容をあらかじめ定義したXML（extensible markup language：拡張マークアップ言語）であると考えられる。XMLファイルはテキストファイルであるため、複数の機関でマテリアルインフォマティクスを共有する際に有効である。最大の利点は、データの拡張性である。XMLによるデータ表記は多くの互換性の問題を解決するだけでなく、既存の多くのソフトウェアを利用できる点

が特徴であり、既存の各種解析ソフトを用いて解析を行うこともできる。この形式の採用は、2005年8月、イギリスで開催されたゴードン会議で東京大学のLippmaa助教授によって提案された⁹⁾。各国からの注目を集めており、今後、世界標準的なデータフォーマットとなる可能性が高い（図表3）。

共通のデータフォーマットで大量のデータが蓄積され始めると、これらのデータを使った新材料探索、つまりデータマイニングが可能になる。データマイニングとは、大規模なデータから情報を抽出し、埋もれた関係を見出すものである。データマイニング技術は、すでに有機合成の場合には、様々な化学反応の原理やモデルを構築するのに使われている。

5 各国のマテリアルインフォマティクスへの動き

コンビナトリアル手法を取り入れた有機化学および触媒などは、世界的に見て、すでに産業としての市場が確立されている。米国の市場調査会社であるFreedonia Group, Inc. の“Combinatorial Chemistry: Products & Service”によれば、コンビナトリアル化

学市場は、1996年以降2011年まで年15%～21%の割合で増加し、その規模は63億ドルになると予想されている¹⁸⁾。このうち、触媒開発では13億5,000万ドル、ポリマー開発でも4億100万ドルの市場規模になるとされている。これらに、無機系の電子材料やデバイ

スへの応用など、調査項目以外の市場が加わると、関連業種も入れて将来的に80億ドル規模の産業への成長が期待されている。したがって、諸外国では、このような研究開発をさらに効率的なものにするために、インフォマティクスを構築しようとする試みが行わ

れている。

各国のインフォマティックス構築への取り組みの現状をまとめたものを図表4に示す。

5 - 1

米国の状況

米国は、最もコンビナトリアル材料研究が盛んな国である。最近では、そのコンビナトリアル材料研究を発展させて、材料設計、合成手法、データ蓄積までをひとつのセットとしてデータベース化しようとする機関が増えてきている。特に、企業において、材料発掘を目的としたシステム開発が進

められており、それに伴う大量のデータ処理のためにインフォマティックスの重要性が高まっている。

(1)企業の研究開発

米国のなかでも、コンビナトリアル手法を材料開発に積極的に活かしてきた企業のひとつに、General Electric (GE) 社がある。GE Global Research では、不均一触媒から、構造材料、バイオ研究に至る様々な開発にコンビナトリアル手法を使ってきた¹⁰⁾。ここには、現在、マテリアルインフォマティックスを開発しようとする研究者が2名おり、そのうちの一人はデータ管理とデータベース作

成を行っている。材料の効率的な設計を行うために、効率的な実験計画の立案とデータ取得プロセスの自動化を行おうとしている。彼等が現在使用しているソフトウェアは、データベース用 Oracle や Visual Basic である。コンビナトリアルライブラリーからのデータを可視化することで、より効率的な材料開発を目指している。

また、Symyx 社¹¹⁾ は、コンビナトリアル手法を用いて材料開発をするベンチャー企業のなかで、最も成功した例である。この企業は、材料開発のための装置とマテリアルインフォマティックスを構築するためのソフトウェア販売も

図表4 各国のインフォマティックス構築への取り組みの状況

地域	機関名、大学名	研究分野	備 考
米国	NIST	有機ポリマー、触媒	1999 年より ATP プログラムでコンビナトリアル材料研究を支援。多くの企業ベンチャーが支援を受ける。有機ポリマーに関するインフォマティックスを構築中。また無機材料に関するデータベースを持ち、アメリカの研究拠点
	ジェネラル エレクトリック社	金属材料、触媒など	幅広い材料開発と独自のインフォマティックス構築
	シミックス (Symyx) 社	触媒、各種材料、評価	自社ソフトを他社にもライセンス供給
	アクセリーズ (Accelrys) 社	触媒計算科学	インフォマティックスのためのソフトウェアを開発。EU にも拠点
	メリーランド大学	誘電体、薄膜	NSF の IMI の一環として CoSMIC プロジェクトを遂行中
	マサチューセッツ工科大学	触媒	インフォマティックスのための計算科学手法
	デラウェア大学	触媒	不均一触媒開発とインフォマティックス
	レンセラー工科大学およびアイオワ州立大学	インフォマティックス理論	CoSMIC 内でデータマイニングソフトを共同開発 (研究者の所属が途中で変わったため)
EU	ドイツ	hte 社	触媒開発のための高速評価装置とソフトウェアの開発
		ザーランド (Saarland) 大学	新アルゴリズムで触媒開発を加速
	オランダ	アインホッフェン大学	オランダ・ポリマー研究所とも関係。独自のインフォマティックスを構築
	フランス	TOPCOMBI	CNRS が主導。EU 内の 22 の国立研究機関、大学、企業が参加。リヨンに研究拠点。
	イギリス	サザンブトン大学	COE 組織。イギリスの研究拠点
アジア	韓国	韓国科学技術院 (KAIST)	韓国のコンビナトリアル、インフォマティックスの拠点を目標としている。
	中国	アクセラジー (Accelergy) 社	拠点はバルアルト (カリフォルニア、米国) と上海
	日本	旭化成(株)	独自のインフォマティックスを構築。サザンブトン大学に研究室を持つ
		(独) 物質材料研究機構	COMET プロジェクト (1999 年～2005 年)
		(独) 産業技術総合研究所	市販のソフトをつかったインフォマティックス
		東京工業大学	CREST プロジェクト研究 (1995 年～2000 年)
		東京大学	薄膜材料、計測技術
	東北大学	酸化物、薄膜、計算科学	酸化物エレクトロニクスへの応用。コンビナトリアル計算科学

行っている。他の企業からの材料開発の委託ビジネスも行っており、そのビジネスモデルは他のベンチャー企業の参考になっている。

(2)国立研究所の研究開発

National Institute for Standard and Technology (NIST) は、1999年から、Advanced Technology Program を使って、コンビナトリアル材料研究を行う企業を支援してきた。2001年には、NIST 内にも Combinatorial Method Center (NCMC) が設立された¹²⁾。このセンターでは、現在は有機ポリマーに焦点を絞っているが、積極的にインフォマティックスの立ち上げを行っている。材料開発研究を加速度的に進めるために、コンビナトリアル研究の作業工程を合理化することを目的に、Laboratory Research Informatics というシステム (LRIS) が設計された。このシステムは、様々なコンビナトリアル装置の自動制御、データ収集、保存、データベース作成を担っている。言語形式としては SQL が用いられているが、データベースは Web 上で公開され、外部からの閲覧が可能となっている。

(3)大学の研究開発

Combinatorial Sciences and Materials Informatics Collaboratory (CoSMIC) は、レンセラー工科大学、メリーランド大学とフロリダ国際大学の3大学を中心とする大学間連携の研究組織であり¹³⁾、このなかでマテリアルインフォマティックスに関する活動が行われている。CoSMIC は、国際的な材料研究を進める International Materials Institutes (IMI) の一環として、National Science Foundation (NSF) から研究費を得て活動している。

CoSMIC でのマテリアルインフォマティックスに関する活動で重要なものは、既存データベースを活用したデータマイニングと材料予測である。現実的なデータマイニングを行うために、既存の相図とコンビナトリアル手法で得られた結果を比較する手法を採っている。フロリダ国際大学の Saxena は、材料に関する膨大なデータベースの立ち上げに中心的な役割を担っている。レンセラー工科大学の Rajan (現アイオワ州立大学) が率いるグループでは、データマイニングに関する様々な解析ソフト開発のプロジェクトを進めている。メリーランド大学の Rubloff と竹内らは、コンビナトリアルライブラリーで得られるデータからマテリアルインフォマティックスを立ち上げる研究を進めており、コンビナトリアル材料合成にフィードバックを与えることができるようなデータのハンドリングツールを開発している。例えば、データの可視化や簡単な視覚化技術などを使い、何百もの X 線回折スペクトルのデータを同時に立体的に示すソフトウェアを開発して、材料の研究開発を加速している。CoSMIC は、今後、インターネットを利用して国際間で共同研究者とのデータ交換も行う Web ポートの開発を目指している。

その他の米国の大学でもマテリアルインフォマティックスに関連する研究活動が進められている。例えば、デラウェア大学では、化学工学科の Lauterbach らのグループによって、不均一系触媒に関するコンビナトリアル研究が精力的に行われており、ここでもインフォマティックスの構築を目指している。また、マサチューセッツ工科大学の材料科学工学科の Morgan らは、コンビナトリアル

材料合成やデータマイニングに第一原理計算を取り入れた研究を行っており、あらゆる化合物に対して、その結晶構造や物理的特性を計算し、計算結果の妥当性を、実験結果や既存データベースとの比較によって行おうとしている。ここでは、計算結果として得られた膨大なデータベースを、新材料予測のために使用しようとしている。今後、このような計算科学による材料スクリーニング手法が、材料開発のひとつの手法として確立されていくことになるかもしれない。

5 - 2

欧州の状況

欧州はもともと触媒に関する研究開発が盛んであることから、触媒や有機ポリマーに関するコンビナトリアル研究が活発であり、早くからインフォマティックスの重要性が認識されてきた。

(1)企業の研究開発

ドイツの hte 社では、“virtual library” という計算科学によるスクリーニング手法を用いて触媒開発が行われてきた¹⁴⁾。最近、彼らは、マテリアルインフォマティックスを意味する “MatInformatics” という用語を提唱し、アクセリーズ (Accelrys) 社との共同開発として、MatInformatics に関する環境整備およびソフト開発を行っている。遺伝的アルゴリズムを模倣したデータ相関の解析ツールである Descriptor Property Relationships (DPR) が開発されている。

(2)大学の研究開発

ドイツのザーランド大学の Maier らは、コンビナトリアル材

料研究のフローチャート（実験計画表）を用いて、新触媒開発を活動に行っている。彼らは、進化論的アルゴリズムを採用して、500種以上の候補材料から目的とする触媒活性に対する組成の最適化を目指して、マテリアルインフォマティックスの構築とデータマイニングを行おうとしている。また、オランダのアインホッフェン大学の Schubert らは、産学官連携のための機関としてオランダポリマー研究所（DPI）を立ち上げ¹⁵⁾、この機関内で共有するマテリアルインフォマティックスを構築しようとしている。

(3) EU としての取り組み

2005 年に、欧州委員会の多国籍間プロジェクトとして、コンビナトリアル材料開発とマテリアルインフォマティックスに関する“TOPCOMBI”と呼ばれるプロジェクトが始動し始めた。“TOPCOMBI”には、EU 内の 11 国から、22 の企業、大学、研究機関が参加している¹⁶⁾。フランスの CNRS が主導しており、代表者は CNRS の Mirodatos である。予算規模は約 45 億円とされている。このプロジェクトは、コンビナトリアル手法による触媒開発を EU として積極的に進めることを目指したものであるが、マテリアルインフォマティックス構築にも力を入れようとしている。

5 - 3

アジア各国の状況

マテリアルインフォマティックスに関係する中国系企業として、アクセラジー（Accelergy）社が挙げられる¹⁷⁾。この企業は上海とバルアルトに拠点をもち、米国で

受注した材料開発を、上海にある大規模な開発拠点で行うことで研究開発のコストを削減し、短期間の委託事業として完成させるビジネスモデルを採っている。主として触媒開発用にコンビナトリアル材料合成システムとマテリアルインフォマティックスのソフトウェア販売を行っているが、電子材料の開発も行っている。同社は、米国で生まれた関連のベンチャー企業を積極的に買収しようとしていることが特徴的である。

韓国でもコンビナトリアル材料研究が盛んになるにつれ、マテリアルインフォマティックスへの関心が高まっている。現時点で韓国科学技術院はマテリアルインフォマティックスを持っていないが、多大な関心を示しており、コンビナトリアル材料研究に関する国際会議に頻繁に参加し情報を集めている。

5 - 4

日本の状況

(1) 企業の研究開発

日本国内でもコンビナトリアルケミストリーによる有機・分子合成や創薬への展開を目指す企業はかなり多い。これらの研究のためのホームページも開設されている¹⁹⁾。しかし、コンビナトリアル材料科学やマテリアルインフォマティックスの構築を目指している企業は残念ながら少ない。国内の企業の中でコンビナトリアル材料合成とマテリアルインフォマティックス構築に熱心なのは旭化成(株)である²⁰⁾。旭化成(株)は 2001 年に、サザンプトン大学にコンビナトリアル材料研究のための研究室を設置し、主に新材料の開発と独自のインフォマティックスの構築を進めている。またコンビナトリアル

材料合成システムでは(株)モリテックスや(株)日立ハイテクノロジー、(株)パスカルがその装置を販売している。特に(株)パスカルの移動式コンビナトリアル材料合成装置は薄膜コンビナトリアル材料合成において標準的な仕様となっている²¹⁾。

コンビナトリアル材料科学のための計算科学は(株)菱化システムや(株)帝人システムテクノロジー、住商エレクトロニクス(株)（現、住商情報システム(株)）などが販売しているが、これらの会社の多くは海外のソフトウェア会社との連携に留まっている。

(2) 大学、公的機関の研究開発

国内ではじめてコンビナトリアル材料科学を始めたのは東京工業大学で、1995 年にその基本概念を示している。その後、このコンビナトリアル手法を材料開発に取り入れて研究を進めている機関としては、(独)物質・材料研究機構、産業技術総合研究所関西支部、東京工業大学、東京大学、東北大学がある。このうち、(独)物質・材料研究機構、東京大学、東北大学、東京工業大学で進めているコンビナトリアル材料研究プロジェクト“COMET”は、米国の研究プロジェクト、“CoSMIC”と協力関係にあり、互いのサーバをリンクしてデータを補完しあう試みが始まっている。

しかし、諸外国がコンビナトリアル材料科学のための研究拠点を形成し、長期的な視点でマテリアルインフォマティックスに関する研究を推進しているのに対して、日本ではまだ機関内のプロジェクト研究に留まっている段階と言える。

6 マテリアルインフォマティックスに関する国際会議

2005年1月、国際間の競争と共同歩調の重要性が指摘されるコンビナトリアル手法によるマテリアルインフォマティックスに関して、NIST (National Institute of Standards and Technology) と CoSMIC - IMI (Materials Institute for the Combinatorial Sciences and Materials = Informatics Collaboratory) によって、今後の方向性を議論し合うワークショップが開催された。このワークショップは“Data Driven Materials Research”と題して、材料科学と

インフォマティックスとを結び付けた取り組みが紹介され、例えば、Bowling 社はアルミ合金の開発の歴史を交えてインフォマティックスの具体例を示した。同時に他の研究分野から大量データの国際間共有などに関する紹介があり、例えば、天文学の分野からは、この分野の1年間に得られるデータ量は2010年までにペタバイトの単位に達し、そのような膨大なデータから情報を引き出すことそのものが新しい科学研究の分野になりうると指摘された。この会議では、

今後のマテリアルインフォマティックス構築の課題、特に、データを共有しようとする際にデータやモデルの精度が異なる問題なども議論された。

また、これに続いて Maryland 大学で開催された「第1回マテリアルインフォマティックスに関する国際ロードマップ会議」では、前述した東京大学の Lippmaa 助教授による XML ベースのデータ構造とインフォマティックス構造が紹介され、今後の標準的なデータ形式としての可能性が議論された。

7 マテリアルインフォマティックス構築に向けての日本の課題

マテリアルインフォマティックスは、異なる材料合成プロセスや材料データの情報を相互に有機的に結びつけ、素早く材料開発に適用することを目的としている。その過程の中で、複雑な測定結果を取り扱いつつもできるだけ視覚的にその結果を表示しようとする機能も持っており、今後の材料科学の方向を大きく左右する分野であると考えられる。諸外国では触媒などの分野でコンビナトリアル手法を取り入れた企業が存在し、確実に産業化が進んでいるため、中心的な研究拠点を形成し、それらをリンクすることでインフォマティックスを構築しようとする動きが見られる。しかし、無機材料系のマテリアルインフォマティックスについては、世界的にも始まったばかりの段階である。

諸外国の急速な動きに対して、残念ながら我が国では、材料研究のなかでもインフォマティックス構築の重要性が十分認識されていない。第2期科学技術基本政策分野別推進戦略では、技術的目標の

一例としてコンビナトリアル手法による材料開発が明記されていたが、インフォマティックスへの発展性は認識されていない。また、日本の最大の課題は、これらの研究開発が、各機関内のプロジェクト研究に留まっていることである。

すべての製造産業の基盤は材料にあることを考えると、我が国でも革新的な材料開発が期待できるマテリアルインフォマティックスの重要性を強く認識し、特に無機材料の研究開発に関しては系統的なデータの蓄積を始める時期に来ていると思われる。今後、日本ではこの分野を推進していくためには、以下のような施策が望ましいと考えられる。

①日本国内に長期的視点に立つマテリアルインフォマティックスのための中心的研究拠点を設置する。この研究拠点を中心として、複数の研究機関や大学が、XML ベースの標準的なデータフォーマットを使い、Web 上で情報を交換して、次の材料開発

に生かすというマテリアルインフォマティックスのシステム構築を進める。この研究拠点では、ファンドリ設備やデータベース整備も行ない、企業など外部の機関がマテリアルインフォマティックスをベースとした材料開発やプロトタイプデバイスを作製する場を提供する。

②マテリアルインフォマティックス構築は単独の機関では不可能であり、国内はもちろん、国際協調のもとでの長期的な作業が必要である。データフォーマットの標準化に関しては、国際的な場で積極的に発言し、日本が主張する XML ベースのデータフォーマットの国際化を推進していくことが望ましい。

参考文献

- 1) 平成16年度電子情報技術部会調査報告書(社団法人新化学発展協会編、2005)「新生代材料開発のためのマテリアルインフォマティックスとコンビナトリアルナノテクノロジー」第6章「外

- 国でのインフォマティックスの現状」p.113
- 2) 例えば、①コンビナトリアルテクノロジー（鯉沼秀臣、川崎雅司監修、丸善、2004）、第7章「マテリアルインフォマティックス」p187、②知京豊裕、鯉沼秀臣「コンビナトリアルケミストリーと電子材料開発への展開」、現代化学、11、27（2002）、③ H.Koinuma and I.Takeuchi, “Combinatorial solid-state chemistry of inorganic materials” Nature Materials, 3(7): 429 - 438 (2004)
 - 3) 例えば① H.Koinuma, “Quantum functional oxides and combinatorial chemistry”, SOLID STATE IONICS 108 1 - 7, 1998、② X.D.Xiang, X.D.Sun, G..Briceno, Y.L.Lou, K.A.Wang, H.Y.Chang, W.G.Wallacefredman, S.W.Chen and P.G.Schults, Combinatorial Approach to materials discovery, Science 268 1738 - 1740 (1995)
 - 4) 平成 16 年度 電子情報技術部会 調査報告書（社団法人 新化学発展協会編、2005）「新生代材料開発のためのマテリアルインフォマティックスとコンビナトリアルナノテクノロジー」、第3章「バイオインフォマティックスとマテリアルインフォマティックスの類似点と相違点」p.11
 - 5) コンビナトリアルテクノロジー（鯉沼秀臣、川崎雅司監修、丸善、2004）、第3章3.3「コンビナトリアル計算科学」p.58、あるいは <http://www.aki.che.tohoku.ac.jp/soft-j.html>
 - 6) Y.Matsumoto, M.Murakami, T.Shono, T.Hasegawa, T.Fukumura, M.Kawasaki, P.Ahmet, T.Chikyow, S.Koshihara, and H.Koinuma “Room - Temperature Ferromagnetism in Transparent Transition Metal-Doped Titanium Dioxide” Science 291 854 - 856 (2001)。
 - 7) A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S. F. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, M. Kawasaki, “Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light emitting diode based on ZnO” Nature Materials 4 42 - 46 (2005)
 - 8) K.Hasegawa, P.Ahmet, N. Okazaki, T.Hasegawa, K.Fujimoto, M.Watanabe, T.Chikyow, and H.Koinuma; “Amorphous stability of HfO₂ based ternary and binary composition spread oxide films as alternative gate dielectrics” Appl.Surf.Sci. 223 229-232 (2004)。
 - 09) 2005年ゴードン会議“Combinatorial & High Throughput Materials Science” プログラムと概要：
<http://www.grc.uri.edu/programs/2005/combhigh.htm>
 - 10) General Electric 社 GE 国際研究所ホームページ：
http://gegloalresearch.com/06_about/ourLabs.shtml
 - 11) Symyx 社ホームページ：
<http://www.symyx.com/>
 - 12) 米国標準技術研究所 (NIST)、コンビナトリアルセンターホームページ：
<http://polymers.msel.nist.gov/combi/index.html>
 - 13) メリーランド大学 CoSMIC プロジェクトホームページ：<http://www.isr.umd.edu/CoSMIC/>
 - 14) hte 社ホームページ：
<http://www.hte-company.de/>
 - 15) オランダポリマー研究所ホームページ：<http://www.polymers.nl/pro1/general/default.htm>
 - 16) EU の国際コンビナトリアル研究プロジェクト “TOPCOMBI” ホームページ：
<http://www.topcombi.org/>
 - 17) Accelergy 社ホームページ：
<http://www.accelergy.com/>
 - 18) “Combinatorial Chemistry : Products & Service” (Freedonia Group, Inc レポート)
 - 19) 日本コンビナトリアルケミストリー研究会ホームページ：
<http://www.jccfinfo/index.html>
 - 20) 旭化成株式会社ホームページ：
<http://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/>
 - 21) 株式会社パスカホームページ：
<http://www.pascal-co-ltd.co.jp/>

執筆者



客員研究官

知京 豊裕

独立行政法人 物質・材料研究機構
ナノマテリアル研究所

1989 年 早稲田大学大学院 博士課程修了 (工博)。現在、独立行政法人物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所ディレクター。1993 年～1994 年 ノースカロライナ州立大学客員研究員、1995 年～ワシントン大学材料工学科客員準教授、2003 年より現職。

コンビナトリアル手法による新材料開発それを使った電子材料開発研究に従事。2004 年より「コンビナトリアル材料科学の創製と先端産業への展開 (COMET)」プロジェクトリーダー。

ワークショップ 学際的研究をどう進めていくか —生活支援ロボティクスをめぐるヒトとロボティクスの関係— 開催報告

奥和田 久美
材料・製造技術ユニット

1 ワークショップの全体概要

文部科学省科学技術政策研究所は、2005年7月21日に六本木アカデミーヒルズでワークショップ「学際的研究をどう進めていくか—生活支援ロボティクスをめぐるヒトとロボティクスの関係—」を開催した。本ワークショップ開催の目的は2つあり、その第1は学際的研究の例として生活支援ロボティクスをめぐるヒトとロボティクスの関係を議論することであり、第2はこのような例を通じて学際的研究というものをどう考えていくかを議論することである。

今回取り挙げた「生活支援ロボティクス」というテーマは、先に科学技術政策研究所が中心となって実施した「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」²⁾のなかで学際的研究が強く求められたテーマのひとつであった。また、ロボティクス自体に対しては、分野を問わず、多くの他テーマの執筆者から非常に高い関心が寄せられた。

ワークショップ当日は、この分野に関心を持つ研究者・技術者および行政関係者など約80名が集まり、活発な意見交換が行なわれた。冒頭の開催挨拶において、科学技術・学術政策局の河村潤子

総括官から、「システム改革のひとつの指針として学際性を重視している。本テーマは既にそれだけでもひとつの融合的な分野であるが、今後、どのような学際的な時系列変化が起きるか関心を持っている」との期待が示された。次いで、科学技術政策研究所の桑原輝隆総務研究官および奥和田久美上席研究官から科学技術政策研究所の行なった種々の調査結果に見る学際的研究の必要性について紹介がなされ、同時に本ワークショップ開催の主旨が説明された。

講演プログラムの前半では、上記「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」において「生活支援ロボティクス」の執筆者である小菅一弘氏および萩田紀博氏から、それぞれの発展シナリオが発表された。小菅氏は地球全体にわたる高齢化現象を生活支援ロボティクス発展のニーズと捉え、特にサービス科学あるいはサービス工学に注目していくことを提案した。一方、萩田氏は、現在は個々に研究が進んでいるメカロボットとコミュニケーションロボットが2015年頃には融合する形で生活の場に入っていくという

道筋を示し、コミュニケーションメディアとしてのロボティクス発展に多くの学際的研究を必要とするという見解を述べた。

講演プログラムの後半では、前2者の発展シナリオの発表を受けて、サービス科学あるいはサービス工学についての話題が日本IBM(株)水田秀行氏および東京大学浅間一氏から、ロボットとヒトとのコミュニケーションに関する話題が(独)理化学研究所谷淳氏および慶応義塾大学医学部加藤元一郎氏から、また日常生活のなかの認知科学についての話題が成城大学野島久雄氏から、それぞれ提供された。

最後に、講演者全員を囲んで各講演への質疑や学際的研究の進め方に対するディスカッションが行なわれた。閉会挨拶では、科学技術政策研究所の小中元秀所長から「ロボット研究は以前とは全く違ったフェーズに来ており、学際的研究を促進するには制度やシステムの見直しも必要であろう」との意見が述べられた。

以下に、各発表の内容概要を示す。

2 開催の意図

2 - 1

調査結果に見る 学際的研究の必要性

(桑原輝隆氏／

科学技術政策研究所総務研究官)

(1)「科学技術の中長期発展に係る 俯瞰的予測調査」¹⁾について

「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」は、科学技術政策研究所が、2006年から始まる第3期科学技術基本計画に向けての議論のために、基礎調査として行ったものである。中心となる「デルファイ調査」⁴⁾は、将来の科学技術に関するアンケートにより専門家のコンセンサスを得ようとするものであるが、少数派の貴重な意見が埋没してしまう可能性もあり、これを補うために、今回の予測調査に「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」²⁾が加えられた。書かれた全85編の将来的なシナリオのうち、約半数の執筆者は各々の分野の発展のためになんらかの学際的なアプローチが必要と考えており、文理融合の重要性を説くものも多かった。

(2)急速に発展しつつある 学際的・融合的研究領域

今回の予測調査のうち、論文分析の新しいアプローチである「急

速に発展しつつある研究領域調査」³⁾においても、学際的研究の必要性を見ることができた。過去6年分の論文データベースから、引用度上位1%に入る論文を共引用という関係でグルーピングする作業を繰り返した結果、約150の急速に発展しつつある研究領域が抽出できた。これらをマッピングしてみると、その1/3は、複数の分野が同程度に混ざっている学際的・融合的な研究領域であることが判明した。また、それらの学際的・融合的な研究領域での日本人研究者のポテンシャルは決して悪いものではなかった。

(3)望まれる分野間連携

今回の予測調査では、長年継続してきた「デルファイ調査」にも新しいアプローチがいくつか加えられ、種々のメッセージが得られている⁴⁾。融合・連携を進めるべき相手となる分野については、至近の2015年までの間と2016年以降の希望を分けて回答していただいた。その結果、2015年までの10年間においては、情報通信分野が融合・連携の中心となっているが、その後2016年からの10年を見ると、ライフサイエンス、環境、エネルギー・資源、社会技術などの分野が連携の中心になっていくと考えられている。

2 - 2

発展シナリオ調査とは

(奥和田久美氏／

科学技術政策研究所上席研究官)

「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」⁵⁾とは、第3期の科学技術基本計画策定のために様々なデータを収集した予測調査のうちのひとつである²⁾。特定の領域の今後10年から30年の科学技術の発展シナリオを、ある個人の卓越した見通しのもとに描いていただき、合わせて日本のとるべきアクションを引き出そうというものである。

この調査では、注目すべきテーマとして48テーマが選ばれたが、その中のひとつが「生活支援ロボティクス」である。シナリオ執筆者は関連学協会や業界団体からの推薦・投票方式で選ばれたが、当テーマに関しては3章の小菅氏と萩田氏の2人にお引き受けいただいた。両者ともシナリオのなかで、学際的研究の必要性を強く説いておられる。また、書かれた全85編のシナリオは基礎科学から社会インパクトまで幅広いテーマを扱ったものであるが、ロボティクスに対する関心は非常に高く、40%にあたる34編のシナリオのなかに「ロボティクス」あるいは「ロボット」というキーワードが記述されていた。なお、4-4項の加藤氏も別テーマ「脳科学に基づく認知と情動神経機構の統合的理解」の執筆者である。

3 生活支援ロボティクス —「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」⁵⁾からの講演—

3 - 1

生活支援ロボティクス

(小菅一弘氏／

東北大学大学院工学研究科

バイオロボティクス専攻教授)

(1)世界的な高齢化傾向と生活支援

現在、日本など6カ国を除いて世界中のほとんどの国では、65歳以上の高齢者人口が15歳以下よりまだ少ない。しかし2030年には、世界のほとんどの国で65歳以上の高齢者が13%以上という状態になり、特に日本は2020年には27～28%、2050年には35%という高齢社会に達する。そこで生活支援と言え、まず、ロボティクスによってヒトの高齢期までのQOL (Quality of Life) を維持し、活力ある日常生活を実現することを思いつく。

(2)生活支援技術の現状

現在、「空間の知能化」に関する数多くの研究がウェブ上で公開されている。しかし、まだ生活支援に必要なサービスに直結しているものはなく、必要なサービスを具現化するシステムとしての技術開発はほとんど行われていない。日常生活の中で我々が無意識に行なっている活動を「サービス」という観点から見直し、それらのサービスに対するロボティクスを、サービスプロバイダの存在を前提として展開することで、高齢者を中心としたQOLを維持することを考えてはどうだろうか。

このようなサービス提供は、ロボット単体では実現できないため、まず「空間の知能化」が必要である。そのうえで、サービスサ

イエンスをベースとし、情報技術とロボット技術を融合したシステムインテグレーション技術を発展させることで、各ユーザーに応じた快適空間や、場所を選ばないシームレスなサービスの提供が可能になる。

日本には高機能機械あるいは知能化機械といった単体としてのロボットの研究開発が多いが、それだけでは不十分であり、目的にあったシステムをインテグレーションする科学技術が重要である。例えば、日本の高機能機械の代表例はヒューマノイドロボットであるが、同じ「移動する」というキーワードのもとに、欧米では、より「移動することの本質」に迫る技術開発、例えば、センサーを使って地図を作りながら自分の位置を決めていく技術 (SLAM: Simultaneous Localization and Mapping) という研究開発が中心的に進められている。

(3)サービスの科学的解明

まず、提供すべきサービスをきちんと科学的に解明する必要がある。産業用ロボットは、組み立てなどの作業が工学的に解明されているからこそ高性能化できるのである。サービスは多種多様で、抽象的な議論だけでは真のサービスは提供できない。まず、目的の明確化が必要である。どのようなシステムを構築すれば、生活をきちんと支援されたことになり、我々は豊かな生活を送れるのか、きちんと議論しておく必要がある。

ロボットはサービスを提供するツールあるいはメディアであると考え、必要とされている支援サービスを科学的に解明し、そのう

で、そのサービスをロボティクスで実現する。そのためには、提供されるサービスを客観的に評価するための尺度が必要であり、多くの学際的な側面からの知見が必要である。これらが新たな学問領域として確立されなければ生活支援という目的を達成できない。生活支援ロボティクスという目的は、社会科学や人間科学を包含した新たな学際的な研究領域を形成するのではないかと考えられる。

自動車や飛行機には約100年の歴史があるが、産業用ロボットでさえ誕生してからまだ約45年と若い技術である。今後必要とされる生活支援という目的により、新しいロボティクス技術を研究開発していくことが必要ではないかと考えている。

3 - 2

生活支援ロボティクス

(萩田紀博氏／(株)ATR

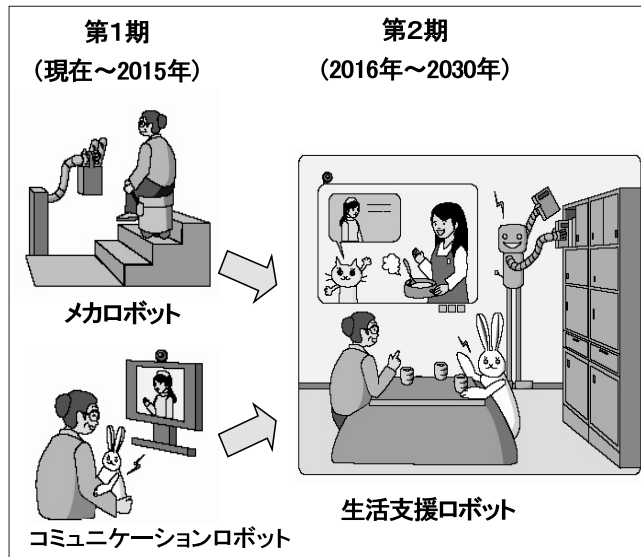
知能ロボティクス研究所所長)

(1)第1期 (～2015) および第2期 (2016～) の進展

生活支援ロボティクスの今後の進展については、まず2015年頃までの第1期にはメカ的なロボットとコミュニケーションロボットが別々に発展し、それ以降の第2期にそれらの技術がミックスされて実際にヒトの生活のなかに入っていくのではないかとと思われる (図表1)。特にコミュニケーションロボット開発には、学際的な研究が必要と考えられる。

(2)コミュニケーションメディアとしてのネットワークロボット 歴史上何世紀も続いたメディ

図表1 萩田紀博氏による生活支援ロボティクスのための技術ロードマップ⁵⁾



ア、例えば、壁や紙に描かれた絵、楽器、印刷術などが生まれた背景には、自分の体験を他人に伝えたいという人間の本質的な欲求がある。メディアの進化という観点で言うと、今、これらのメディアがコンピュータネットワーク化さらにユビキタスネットワーク化していく過程にあると言える。メディアの進化の中でロボットはどのようなメディアになるかというヒントのひとつが、パートナーペットとしてのロボットかもしれない。ヒトとロボットとの関係を考える場合に、コミュニケーションは極めて重要なサービスである。また、ヒトとのコミュニケーションと同時に、ネットワークとのコミュニケーションをとり、得られた情報をヒトに伝える、あるいは環境状況を認識して動作にフィードバックする、といったことも極めて重要である。したがって、ロボット単体の知恵を高めるよりは、ネットワーク化することで情報を得て「できること」を増やす方向（チームインテリジェンス）に変わっ

ていくと考えられる。

(3)社会に受け入れられるロボット

生活支援の道具としてロボットを考えようとする場合に、今後、最も重要視されるべきで、かつ最後のポイントになることは、「社会に受け入れられるか」という点である。これにはいろいろな意味での科学的根拠が必要となり、極めて大きな、かつ学際的な研究領域を形成する。例えば、ヒトとのコミュニケーション能力については「ヒトに合わせてくれるのがいいことなのか」、道具としての能力としては「ヒトと同じことができるのがいいことなのか、あるいは、ヒトのできないことができるほうがいいのか」などといった学際的な議論が必要である。

ひとつの方向性として、現在、日常的に使われているパソコンというものの存在がロボットという形に進化する「存在感メディア」としてのロボットが在りうる。例えば、アイコンタクト、挨拶、握手といったマニュアルの要らない

コンタクトができる「存在」である。これは機能的にはコンピュータであるが、今のパソコンとは異なる「存在感」が発生する。

(4)ロボット試作によって可能になった社会科学的あるいは認知科学的研究

一方、社会学的あるいは認知科学的に望ましい方向性を探るモデルとして、ロボット技術で種々の実験を行うことができるようになり、新たに数多くの学際的な研究領域が生まれつつある。

現在すでに1個1個の状況依存モジュールがそれなりに動くロボットを作製することができ、これをヒトの日常生活に投入して「日常にロボットが入ってきた時にどういうことが起きるのか」を調べられるようになってきた。そこではむしろヒトの反応のほうに予期せぬことが起きており、「ヒトを知る」ということにとって非常に重要な学問分野になる可能性がうかがえる。このようなロボットは一種のヒューマンシミュレータであり、例えば「気配りが利くとはどういうことか」「ヒトとヒトがパートナーになるとはどういうことか」「社会的知能の高さ」といった社会科学的あるいは認知科学的研究が可能になっている。

今、これらを共通のエディターで技術的に誰でも簡単に行えるようにしようとしている。そうすれば世界中でテキストデータでのやり取りが可能になり、例えば新しいロボットを買ってきて、誰かが作成した「良い介護ソフト」をダウンロードすれば、すぐに良い介護ロボットとして動くようにできる。我々は、このような時代に入ろうとしている。

4 学際的发展分野からの講演

4 - 1

サービスを科学すること

(水田秀行氏／(株)日本 IBM
東京基礎研究所主任研究員)

(1) サービス科学という学問の 必要性

サービスは産業的には第三次産業全てを含むと言えるが、第三次産業は世界経済のなかで急激に成長しており、すでに最も大きな割合を占めている。しかし、過去の顕著なイノベーションは主に製造業（第二次産業）に限られており、イノベーションという視点においてサービスは取り残されてきたと言える。これまで経験と勘を頼りに行なわれてきたサービスという分野を、より体系的で革新的な学問へと変革する取り組みが必要である。

(2) サービスの特徴

サービスの定義は人によってまちまちであるが、産業的にはクライアントと提供者が協同で経済価値を生み出す活動であると言える。サービスには、intangible であること（さわるができない、はっきりした形が無い）、同時性（作られるのと同時に消費されていく）、不可分性（分けることが難しい）などの特徴が挙げられるが、これらの特徴がサービスでイノベーションを起こすことを難しくしている。

サービスは本質的に融合的あるいは学際的なものであり、異なる知識の融合がサービス科学でのイノベーションを推進する。サービス科学とは、テクノロジー・ビジネス・組織文化の3つの要素が融

合されたものとなる。現実には、これらの各要素の分野間で学際的活動が不足していることが、イノベーションを起こすことを難しくしている。

(3) サービス科学の促進

サービスの定量化を図り、改良手法を体系化し、システムをマネージしていく必要がある。その際、大学等の教育機関とサービス産業の協調が健全なサービス科学発展の形であると考えられる。ロボット工学もサービスと密接な関わりを持って進展していきだろう。

4 - 2

サービス工学と ロボティクス

(浅間 一氏／東京大学
人工物工学研究センター教授)

(1) ロボット産業の現状

日本は産業用ロボットの保有台数も生産額も世界一を維持しているが、産業用ロボットの市場全体は1990年代からすでに飽和期に入っている。現在すでに、日本の産業別GDPの72.3%は第三次産業が占めていることから、今後のロボット産業の進展も第三次産業の効率化あるいは生産性向上のなかで位置付けるべきと考えられる。このような背景において、おのずから高齢化社会への対応がクローズアップされてくる。

(2) 「もの」から「サービス」へ

現代の邪悪を解決し循環型社会を実現するためには、今後「価値の脱物質化」というコンセプトは非常に重要である。ポスト大量生産パラダイムにより持続可能性を実現するために、サービスによっ

て創造される付加価値を増大することを目的とした工学的手法がサービス工学である。

富山らによれば、サービスとは、サービスの発信者と受信者があり、サービスを供給するチャンネル（入れ物＝人工物）によってサービスコンテンツが運ばれ、結果的に発信者が受信者を変化させることであるというグローバルな定義が成されている。また、吉川らによれば、サービスは、受信者に直接的な効果を引き起こすもの（例えばマッサージ）と間接的な効果を引き起こすもの（例えばテレビ放送）に分類でき、結果的にサービスとは、ヒト（受信者＝ユーザー）をハッピーな状態にする行為であるとされている。いずれの場合も人工物はサービスプロバイダを支援するツールとなりうる。特に後者においては発信者と受信者は離れていてもよく、その場合には人工物はサービス伝達する媒体となる。

(3) 人工物を介したサービス提供

従来の工学とは、人工物をどうやって作るかという学問であった。しかし、サービス工学では、ユーザーがそこにどれだけ価値を見出すかという評価（ユーザーの満足度）が重要であり、ヒトと接し、ヒトが価値を感じるサービスを予測し、それを提供する方法論が必要である。ここではユーザーの特性、すなわち、空間的多様性（ユーザーがどこにいてもサービスを提供できること）、実時間性（的確な時間内にサービスを提供できること）、主観性（ユーザーによって、あるいはユーザーの状態によって異なるサービスを提供できること）などを考慮すべきで

ある。人工物を介したサービスの設計をするうえで、まず、ヒトのモデリング技術やヒトに適応する技術が根本的に不足している。

(4)サービス工学の促進

ロボティクスはそれ自身が非常に学際的な分野であり、情報処理技術とともに、サービス工学の技術的方法論として重要である。しかし、サービス工学を促進するためには、これらの技術的方法論とともに、「ヒトと接する科学（ヒトを理解し、ヒトのように適応的に振舞う）」が重要である。生物を理解できれば人工物の設計論に反映できると思われるが、実は生物がいろいろな環境で適応的に動くということ自体もまだよく理解されていない。ここでは「移動知」という考え方（まず動くという行為の結果、初めてセンシング情報が入ってきて、種々の知が蓄積していく）が重要であると考えている。

4 - 3

ロボットとの コミュニケーション —脳科学との接点—

（谷 淳 氏／（独）理化学研究所
動的認知行動研究チームリーダー）

（独）理化学研究所動的認知行動研究チームでは、ロボットを使って人間の動的認知行動についての研究を行なっている。主体と環境の相互作用あるいは他者との相互作用によって、学習し、認知し、行動するという人間の脳のメカニズムを、ロボットと人間の適応的相互作用によって、うかがい知ることが可能であると考えている。

例えば、被験者がゆらぐとロボットもゆらぎ、逆にロボットがゆらぐと被験者がゆらぐというシンクロナイズ現象や、被験者がイニシアティブをとってロボットを引き込ませようとしたり、逆に被験者がロボットに合わせようとするシンクロナイズ現象が観測される。このような無意識的な深層レ

ベルでの心身一体化した人間と機械の相互作用（コミュニケーション）は、人工知能的なツールよりもむしろ力学的な自己組織化技術を使っていくと表現しやすい。また、そのような相互作用からさらにどのような意味ある構造が創発されるか、あるいは客観的なものと主観的なものをどのように繋げていくか、というような発展があると思われる。このような研究は、脳神経科学、現象学、工学構成論等の学際的研究である。

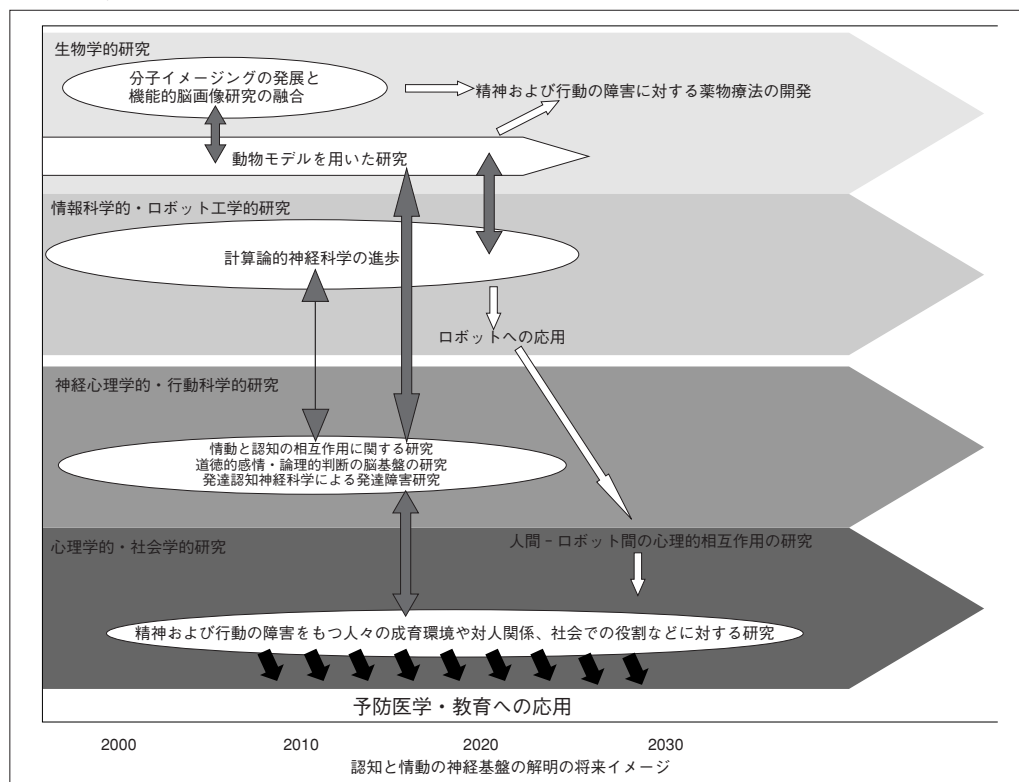
4 - 4

精神科医から見た ロボティクスとの学際的研究

（加藤元一郎氏／慶應義塾大学
医学部精神神経科助教授）

「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」⁵⁾のなかで「脳科学に基づく認知と情動神経機構の統合的理解」の発展シナリオを執筆した。今後30年後までに、図表2のような4つの流れが協調する形で発展していくと考え

図表2 加藤元一郎氏による「脳科学に基づく認知と情動神経機構の統合的理解」の発展シナリオ⁵⁾



ている。この流れの中で、分子イメージング等が非常に進展して精神障害が理解できるようになり、一方でロボット工学が非常に進展して計算論的神経科学が進歩し、それらが融合することによって、今後10年から20年で、これらの統合的理解が大きく進展するだろうと予測している。また、社会認知神経科学といった分野でヒトとロボットの心理的相互作用の研究が進み、対人関係の脳科学に基づいて、本当の意味で利用できるロボットも生まれてくるのではないだろうか。

現在、特に興味を持っているのは、バイオロジカルエモーションとしての視線、コミュニケーション障害と認知リハビリテーション、行動のタイミングなどである。これらをロボットの研究で行なえば非常に面白いと思っている。医者の方立場として、最終的には予防医学や教育への還元を強く求めている。例えば、視線の動きを

知覚する研究では、ヒトとロボットの視線はどう違うのだろうか、我々はロボットと見つめ合えるのだろうか。統合失調症の患者のリハビリテーションを、ロボットを使ってできないだろうか。ヒトの行動というものはタイミングが合うことで成立しているが、ヒトとロボットとの間でそれは可能だろうか。

4 - 5

家の中の認知科学 (野島久雄氏/成城大学 社会イノベーション学部教授)

私は「家」というものを対象に研究を進めているが、今後、ロボットの活躍する場、ユビキタスネットワークの場、といった意味で「家」を考えていくフェーズに入っていくと思っている。これまで様々な形で蓄積されてきた文化人類学、民俗学、心理学、社会学等のなかには非常に面白い情報があ

り、「家の中の認知科学」という本を執筆した。例えば、家の中の全ての物にRFIDタグを付けるとしたら、RFIDタグはいったい幾つ必要になるのだろうかという研究を行なっている（世界中の国々の家の中にはどんなものがあるかを調べた「地球家族」という本もお薦めしたい）。家の中のモノの数は昔に比べて非常に増加しているが、アクセスしやすいような構造化も見られる。日本には今和次郎が提唱した「考現学」という学問もあり、多くのデータの蓄積がある。

ヒトとモノのインタラクションに関する分析やシミュレーションはこれからの研究課題だが、工学系の研究者は前記のようなデータの蓄積があることをあまり認識していない。従来の文科系研究と工学系研究に繋がりを持たせ、両者の活発なコミュニケーションを図っていきたい。

5 ディスカッション

以下に、質疑応答およびその派生議論を、いくつかの論点でまとめる。

5 - 1

生活支援ロボティクスの 今後の方向性

①このワークショップでの議論には、サービスという目的の達成を目指すサービスオリエンテッドなアプローチと、問題を抽象化して体系的な答えを出そうというアプローチの2通りがあり、どちらも重要な研究開発の方向性であろう。サービスに対して、安全・安心を求める反面、

プライバシーなどにセンシティブになる動きもある。しかしサービスオリエンテッドなアプローチ抜きには進められないだろう。

②介護や治療などの分野では、さする・さわる、あるいは、うなづく・話を聞いてあげるなどといった比較的簡単な動作やサービス、さらには、ヒトが介在する補助的なシステムには、近い将来、可能になりそうなものがある。本格的なサービス提供まではまだ遠く、かなり深い探求が必要であるが、簡単なところで経験を積みながら進めることで、新しい研究分野やビジネスが開けていくはずである。また、

近い将来、職場の雰囲気を良くするような、ちょっとしたコミュニケーションサービスくらいは、コンピュータあるいはロボットでも十分にできる可能性がある。

③「存在」をヒトに意識させるという前提においては、ヒトのモノに対する「愛着」「飽き」「個性」などをどう考えていくのか、といったことも興味深い議論である。例えば、コンテンツが増えるあるいは変わることによって愛着が増加する、飽きたからと言って価値が下がるわけではなく一定のサービス機能を維持する、といった対象としてのロ

ボットも考える。サービスは需要側の評価によって決まるものであり、ロボットのディペンダビリティには、ヒトの主観的な側面が多分に含まれる。

④ロボティクスの研究が進むほど、ヒトの認知や行動との本質的な違い、コミュニケーションそのものの理解、あるいはヒトとロボットとの社会的関係などが議論の対象になって、これらの問題が極めて大きいことも認識できるようになってきた。しかし一方で、ロボティクス研究の発展によって、ヒトの認知や

行動の本質を解明できる可能性に対する期待も非常に大きく、すでに「ロボットによってヒトを知る」という研究が始まっている。

⑤本質を理解できないと、サービスという目的は達成できないのだろうか。例えば、ヒトの「子供から大人への発達」はそれ自体が一種の「動きの模倣」の結果であり、ロボティクスのアプローチとは共通点がある。本質との距離はあっても、実用的なサービスができるということもありうる。

5 - 2

学際的研究を進めるためには

異なる分野の研究者が会する機会に加えて、一人の研究者のダブルあるいはトリプルメジャー獲得や兼務の容認、そして、それらの人材を受け入れるあるいは優遇する社会的システム環境が日本でも必要である。これは理系の中だけにとどまらず、社会学や民俗学のような人文科学系の学問領域への呼びかけも必要である。

6 ワークショップを終えて

ロボティクスの研究は、従来中心的であった機械工学・電気工学・人工知能などの工学分野とは異なる方向へ大きく発展しつつある。ロボットが行なうべきサービスを科学的に検討するサービス科学やサービス工学、社会に受け入れられるシステム形成のための認知科学、といった新しい概念の学際的研究が必要とされ、一方で、ロボティクスの研究がヒトの本質を知るうえでの新たな学際的領域を生み出している。

現在までのロボティクスの研究成果を用いても、生活支援という形で社会に還元しうる幾つかのサービスは可能となりつつあり、そこでは提供者であるサービスプロバイダのシステム整備、誰でも容易に利用しうるエディターの提供などが有効であろう。本質的な理解までは程遠くとも、これらの研

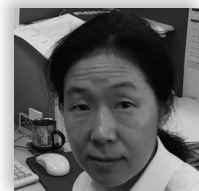
究開発はできるところからやってみることで、確実に次の段階へ展開している。

これらの研究を可能にしていくのは、このワークショップに参加していただいたような学際的な人材であると言えるだろう。

参考文献

- 1) 「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」報告書 NISTEP REPORT No.94 - 99
- 2) 概要を科学技術動向 2005 年 11 月号に掲載
- 3) 概要を科学技術動向 2005 年 10 月号に掲載
- 4) 調査概要を科学技術動向 2005 年 7 月号に掲載
- 5) 「注目科学技術領域の発展シナリオ調査」報告書、NISTEP REPORT No.96

執筆者



材料・製造技術ユニット
奥和田 久美

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



民間企業のエンジニアを経て 2002 年から現職。ナノテク・材料・製造技術分野を担当。2003～04 年度は「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」「基本計画の達成効果の評価のための調査」にも注力。工学博士。

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS



Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレス
または電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき
「報告書一覧科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒 100 - 0005 東京都千代田区丸の内 2 - 5 - 1
【電 話】 03 - 3581 - 0605 【FAX】 03 - 3503 - 3996
【URL】 <http://www.nistep.go.jp>
【E-mail】 stfc@nistep.go.jp



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

科学技術動向2006年1月