

科学技術動向

2004

2

No.35

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ① ヒトとチンパンジーのゲノム比較によるヒトの遺伝子進化の解明が始まった
- ② タンパク質の機能を損なわない含水ゲルが開発された

▶ 情報通信分野

- ① PC はデジタル家電を取り込むか
—CES2004 に見る米国 PC 企業の戦略—

▶ 環境分野

- ① オゾンホールを巡る最近の状況

▶ ナノテク・材料分野

- ① 径の小さな貴金属ナノチューブの合成に成功

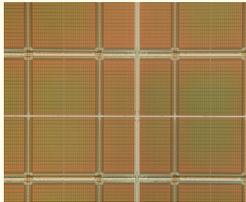
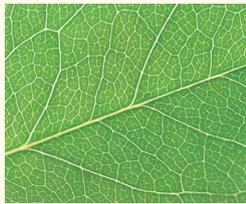
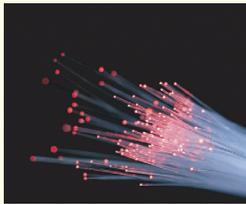
▶ 製造技術分野

- ① 自転車タイヤ用の走行時空気補充装置が実用化

特集 1 研究開発プロジェクトの評価
—ヨーロッパの事例—

特集 2 化学物質の生態リスク評価に関する
近年の動向
—化学物質審査規制法の改正を迎えて—

特集 3 パワーエレクトロニクスによる
エネルギーインフラの強化に向けて



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

① ヒトとチンパンジーのゲノム比較によるヒトの遺伝子進化の解明が始まった

Celera Diagnostics 社の研究者らは、500 万年前にヒトとチンパンジーが両者の共通祖先から分岐した時点以降に両者の遺伝子に起こった変化を調べるために、ヒトのゲノム配列中の遺伝子をコードしている部分に対応するチンパンジーの塩基配列を解析し、ヒトの塩基配列と並列比較した。各々の遺伝子の機能は、マウスの塩基配列から推測した。その結果、ヒトにおいては聴覚および嗅覚に関係する遺伝子群などに大きな変化が起こっていたことがわかった。これとは別に国際コンソーシアムによるチンパンジーゲノムのドラフトゲノム配列の解読が終了（2003 年 12 月）しており、今後は、ゲノム比較からヒトの遺伝子進化の解明を行う研究が各国で盛んになると思われる。

② タンパク質の機能を損なわない含水ゲルが開発された

DNA マイクロアレイチップはバイオ研究分野の重要なツールであるが、この技術はタンパク質の解析には利用されてこなかった。なぜなら DNA マイクロアレイチップは乾燥状態で用いるので、生体に存在する時と同様な機能を示すために水の存在が不可欠であるタンパク質の解析には適切ではなかったからである。九州大学の浜地 格教授のグループは、ナノ網目構造をもつ含水率の高いゲルを開発し、これがタンパク質の機能を損なわずに包含できることを発見した。今後、この含水ゲルが、プロテインアレイチップのみならず、医薬品開発や診断技術などに広く利用されることが期待される。

情報通信分野

6

① PC はデジタル家電を取り込むか —CES2004 に見る米国 PC 企業の戦略—

2004 年 1 月に米国ラスベガスにて CES2004 (Consumer Electronics Show) 開かれ、米国 PC 企業のトップから今後 PC にデジタル家電を取り込んでいく戦略が打ち出された。デルは、薄型テレビへも参入し、構築した強力な直販モデルによって低価格攻勢をかけようとしている。マイクロソフトは、PC 機器やネットワークで結合される各種端末に AV (音響・映像) 機能を実現させるソフトウェアの普及に力を入れている。インテルは PC や各種端末にて AV 機能を実現させるプロセッサの開発に力を入れている。

日本が先導しているデジタル家電は現在好調であるが、米国企業、韓国企業がこの市場に攻勢をかけてきている。また、ネットワークによってあらゆるものがつながる時代に突入しており、米国が得意とする新概念提案型の製品が次々と出現することが予想され、日本企業からの新アイデアの提案が望まれる。最終的には、ユーザーが新製品を受け入れるかは、PC であれ、デジタル家電であれ、その使い勝手の向上が重要なポイントとなることも忘れてはいけない。

環境分野

6

① オゾンホールを巡る最近の状況

南極上空のオゾンホール改善に向け、各方面で努力が続けられてきているが、最近、米国の研究グループから、オゾン層の破壊進度の低下やオゾンホールの減少を確認したという観測結果があいついで発表された。これはオゾンを分解するクロロフッ素化炭化水素等

に関して、世界的に進んでいる使用規制が有効に働いている結果と分析されている。一方、カリフォルニア工科大学の研究グループは、将来の水素エネルギー社会では、地球規模で水素関連施設や装置から漏れ出す水素が成層圏中で、オゾン層を破壊するメカニズムをもたらす恐れがあるという論文を発表した。仮定にもとづく予測ではあるが、今後の研究開発において配慮すべき視点として興味深い。

ナノテク・材料分野

7

①径の小さな貴金属ナノチューブの合成に成功

カーボンナノチューブの応用可能性が広がるに従い、無機ナノチューブの合成も盛んに行なわれている。白金などの貴金属は触媒や電極の材料として非常に有用な元素であるが、チューブの内径が10～100nm程度のものしか合成できず、ナノ材料としては問題があった。宮崎大学工学部の宮崎剛教授らは、界面活性剤により6方晶系の棒状液晶ミセル（会合体）を作り、これを貴金属ナノチューブの鋳型にするという新しい合成方法により内径3～4nm、外径6～7nmというこれまでの最小径を有する貴金属のナノチューブを合成したと発表した。この方法は貴金属のみならず他の物質系への適用が可能と考えられ、今後の研究の進展が期待される。

製造技術分野

7

①自転車タイヤ用の走行時空気補充装置が実用化

中小規模の企業やスタートアップ企業の強化には、高付加価値化によるオンリーワン製品のコンセプト探しが大きな課題である。身近な製品のなかで高付加価値技術が実用化された最近の例として、自転車用の走行時空気補充装置が注目されている。空気充填装置「エアハブ」は、自転車を漕ぐことにより空気がチューブに自動補充される仕組みであり、この装置を搭載した世界初の自転車が製品化された。このような装置が自動車タイヤ用にも開発されれば波及効果はさらに大きい。

特集-1

研究開発プロジェクトの評価

— 9

— ヨーロッパの事例 —

本稿では、ヨーロッパにおける競争的研究資金制度について報告する。

欧州連合では、フレームワーク・プログラムと呼ばれる、産業競争力の強化等を目的とした研究開発プログラムが推進されてきた。このプログラムは公募型で、研究者は少なくとも3ヶ国以上の加盟国研究組織を募って、提案書を事務局である欧州委員会に提出する。これが評価・審査され、適切な提案が選定される。

事前評価は二段階に分けて実施される。評価委員による内容の審査と、その後に実施される事務局による調整である。評価委員選任の原則は、専門家であり、提案に利害関係がないことである。このために、域外からも専門家が集められる。

各評価委員は、それぞれ独自に提案書を評価する。その後、調整者を交えた会合で一次評価結果が出る。さらに評価委員全員で議論して結論を出す。大きな計画では、ヒアリングも実施される。結果は提案者に通知され、提案者は異議申立が可能である。

このような評価プロセスに、研究費総額の2%程度を投じていると推測される。厳密な事前評価の理由は、欧州委員会には加盟各国に対して説明責任があること、意欲ある研究者の提案を採択したいことなどで説明できる。域外から専門家を招くことには、ヨーロ

パに対する理解者を増やすというねらいもある。

すべての提案書は英語で記述されている。これは、科学技術分野では英語が唯一の公用語となっていることを意味する。これによって、異なる国籍の評価者が評価に参加できる。

事後評価も実施されている。成果を高く評価し、今後の継続を強く推奨するものになっている。しかし、情報通信分野について貿易統計を調べると、先進国との間では輸入超過が続いており、必ずしも競争力強化に結びついていないことがわかる。

ヨーロッパと比べると、わが国の場合、国外からの評価がないことが問題である。研究開発に国境はない。英文による提案と報告を義務付ける制度を拡充していくべきである。

特集—2

化学物質の生態リスク評価に関する近年の動向

— 化学物質審査規制法の改正を迎えて —

— 15

近年、地球環境問題の重要課題の1つとして、生物多様性の減少が議論されている。生物多様性とは、単に生物の種数や個体数の大小を意味するものではなく、生物種内の遺伝子の変異、種数の豊かさ、群集における種組成の変異、生物群集と地形から構成される景観の変異という様々な階層レベルでの多様性を包含する概念である。地球上に現存する生物種数は1,000万～1億とも言われ、これだけの膨大な数の種によって多様な遺伝子プールが維持されると同時に、多様な生態系が地球上の様々な地域に展開されている。生態系の多様さは、地球レベルから地域レベルに至るエネルギーおよび物質の安定した循環をもたらしている。

生物多様性の崩壊は、遺伝子資源の消失と生態系機能の低下を招き、最終的には人類の生活基盤の損壊につながると考えられる。近年の生物多様性の著しい減少を招いている最も重要な要因は、生物種の生息地での破壊であり、人工化学物質による環境汚染は熱帯林の破壊と並んで深刻な問題とされる。これまで行われてきたヒトの健康影響を重視した化学物質の安全性評価も、生物多様性保全の観点から、ヒト以外の生物に対する影響も重視しなくてはならないという考えが近年世界的趨勢になりつつある。

この考えに則り、化学物質の生態リスク評価のための調査や試験研究が様々な国や研究機関で進められている。化学物質は産業利用を目的とした生産物であるため、生態リスク評価もその生産、流通、排出に関する規制、あるいは審査・登録上のデータ取得を目的とした試験が主流を占める。こうした試験は当然国内での流通を念頭に置いて行政機関によってその手法が規格化されているが、特に近年の国際自由市場の情勢に則り、国際的にも試験法・評価法の規格を統一する動きが活発となっている。

OECDを中心として工業先進国各国が化学物質の審査・規制において生態系保護の対策を進める中、長らく我が国だけが生態影響評価の法的実施を行わずにいたが、2003年に化学物質審査法が改正され、新規化学物質の届出に際して生態毒性が新たに審査項目に加えられた。具体的には藻類、ミジンコ、および魚類（メダカ）に対する急性毒性試験の実施を求めることになった。この法改正により、たとえヒトへの悪影響がなくとも「動植物への悪影響」が認められた物質については製造・輸入数量の監視が行われることになる。

一方、欧米では、たった3種の室内毒性試験で広大な生態系への影響が評価できるのかという議論から、現在、実験個体群や実験群集レベルでの評価法の検討も行われているが、いずれの試験系も結局は複雑で多様な生態系を完全に再現することは不可能であり、普遍的評価法として確立することは難しいと考えられる。むしろ今後の生態リスク評価の発展のために必要な研究は、室内のピーカーレベルで検出された毒性データと野外での生態系におけるイベントのギャップを埋めるための理論構築とモデル化を試みることで、そしてそれを裏付ける実証研究を積み重ねることであろう。

また、ようやく化学物質の審査に生態リスクが項目として加わったばかりの我が国で、さらなる生態影響の研究分野を発展させるためには、研究者層の充実と育成が必要であり、生態影響研究を専門とする大学の講座および研究機関の拡充が望まれる。

特集-3

パワーエレクトロニクスによる エネルギーインフラの強化に向けて

— 22

パワーエレクトロニクスは、電気エネルギーの有効利用を担うエネルギーインフラの基盤技術である。直流出力の燃料電池等の分散型電源の導入拡大、直流を電源とする情報機器の増大により、電力系統とパワーエレクトロニクス機器は、これまで以上に様々な箇所インターフェースを形成することが予想されている。

我が国では、過去に、Si（シリコン）を用いた大容量パワー半導体デバイス開発に成功し、パワーエレクトロニクス技術で世界のトップレベルに躍り出た。現在は、電力システムや燃料電池自動車等に用いられるパワーエレクトロニクス機器の超低損失化・小型化・軽量化を目指して、SiC（シリコンカーバイド）等を対象にした超低損失電力素子技術開発プロジェクトが終了し、今後の展開を考慮すべき段階にきている。

今後は、材料開発に重点が置かれていたこれまでのプロジェクトに続く実用化を見据えたプロジェクトの企画・検討が必要である。パワーエレクトロニクスのカバーする領域は、電力システム、交通・輸送システム、家電機器等、多様化しており、各分野に必要とされる技術開発ニーズを踏まえてロードマップを検討し研究開発を推進すべきである。我が国の電力システムでは、近年の分散型電源の導入拡大にともなう電力品質への影響が懸念されていることから、特に、分散型電源大量導入時の電力系統の安定化に資するパワーエレクトロニクス機器の実用化に向けた取り組みを急ぐべきである。

我が国では、企業が新しいパワー半導体デバイス開発に積極的に投資できない状況にあり、その企業に人材を供給する大学においても人材教育の面で課題を有している。論文数から推測すると、欧米では、我が国よりもパワーエレクトロニクスに関する研究が活発であり、産学連携も着々と進行している。実用化を見据えたプロジェクトは、パワーエレクトロニクス技術の次世代を担う研究者・技術者の養成を産学官が一体となって行うという視点のもとで推進されるべきである。

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（2月号は2004年12月20日より1月30日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

① ヒトとチンパンジーのゲノム比較によるヒトの遺伝子進化の解明が始まった

Celera Diagnostics 社（米国カリフォルニア州）の Michele Cargill 博士らはヒトとチンパンジーのゲノムを比較することによって、ヒトの進化の歴史の解明を試みている。500 万年前にヒトとチンパンジーが両者の共通祖先から分岐した時点以降に、両者の遺伝子に起こった変化を調べるために、Cargill 博士らは、ヒトのゲノム配列に存在する全てのエクソン^①に対応するチンパンジーの塩基配列を解析し、ヒトの塩基配列と並列比較した。次に、この〈ヒト・チンパンジー〉配列とマウスの塩基配列とを比較して、類似性を示したマウスの塩基配列の遺伝情報により、それらの遺伝子の機能を推測した。そして、その結果得られたヒト、チンパンジーおよびマウスで共通している 7,600 個の遺伝

子について、ヒトとチンパンジーにおいて大きな変異率を示したものを報告した（Science, vol.302, 1960 - 1963, 2003）。

ヒトにおいては聴覚と嗅覚に関係する遺伝子群に大きな変化が起こったことがわかった。言語の発達はヒトの進化に重要な役割を果たすことが既に知られているが、聴覚に関係する遺伝子はこれに関与していると考えられた。また、嗅覚遺伝子群の変異は、ヒトの生活環境の変化により嗅覚が退化したことを示すものと考えられた。一方、チンパンジーは骨格の形成に関係する遺伝子が大きく変化していた。

そのほか、ヒトについてはタンパク質の分解酵素に変化が見られた。これについて Cargill 博士らはヒトがチンパンジーから分岐して以降、肉食をはじめ種々の蛋白質を摂取するようになったためであると考えている。また、ヒトにおいて変異を示した遺伝子には、代謝系を含め数多くの疾病関連遺伝子があることが見出された。これらの遺伝子は損傷を受けると疾病に結びつくものであり、今後、この知見が遺伝病の研究に役立つものと考えられる。

チンパンジーのゲノムについては、国際コンソーシアムのドラフ

トゲノム配列が 2003 年 12 月に決定したところであり、今後はこのデータを用いてゲノム比較からヒトの遺伝子進化の解明を行う研究が各国で盛んになると思われる。

（参考文献：Science, Vol.302, 1876 - 1877）

（味の素(株) 都河 龍一郎氏より）

① タンパク質の機能を損なわない含水ゲルが開発された

DNA の転写情報などを知ることが出来る DNA マイクロアレイチップが、バイオ研究分野の進展に重要なツールであることは既に証明済みである。同様に、タンパク質の機能を知り、その知見をバイオ研究および産業上で役立てるには、プロテイン（タンパク質）アレイチップが有効であると考えられる。タンパク質が生体に存在する時と同様な活性や機能を示すためには水の存在が不可欠であるが、タンパク質の機能を保持できるような高度に含水性（セミウエット状態）の材料がないため、生体内の状態に近いプロテインアレイチップの実現は困難であると考えられていた。

九州大学の浜地格教授のグループは、ナノ繊維網目構造をも

用語説明

①エクソン

最終的にタンパク質など機能に関与するものに翻訳される領域。

つ含水率の高いゲルを開発した (Nature materials, Vol.3, 2004)。浜地教授らは、この含水ゲルがペプチドおよびタンパクの機能を損なわずにこれらを包含し、この状態のままチップ上に固定することが可能であることを発見した。この含水ゲルは糖アミノ酸誘導体を

親水部、メチルシクロヘキシル環を疎水部として持つ分子であり、水中における自己凝集によって形成される。またこの分子の利点は、親水部に酵素などのタンパク質を生体に近い状態で固定し、疎水部はその活性を測定する部位として利用できることである。

今後、この含水ゲルがプロテインアレイチップのみならず、医薬品開発や診断技術の開発などに利用されることが期待される。

(参考文献: Nature materials, Vol3, 7 - 8, 2004)

(神奈川大学 南俊輔氏より)

情報通信分野

① PC はデジタル家電を取り込むか —CES2004に見る米国PC企業の戦略—

2004年1月に米国ラスベガスにてCES2004 (Consumer Electronics Show) が開かれ、米国PC企業のトップから今後PCがデジタル家電を取り込んでいく戦略が打ち出された。

デルは、2003年のパソコン世界シェアを15%としてHPを抜き1位となった。強力な直販モデルを構築し、低価格攻勢を強めている。昨年11月には社名もデルコンピュータからデルに変え、薄型テレビへも参入した。PCのみならずデジタル家電にも低価格攻勢をかけようとしている。

マイクロソフトは、PC用映像再生ソフトであるMedia Playerを普及させてきたが、それを発展させたAV機器(音響・映像)制御機能を持つソフト「Media

Center」を開発しており、PCがAV機能を持つことができるようになってきている。さらに、Media Centerを内蔵したPCと接続する専用ネットワーク端末MCXをデル、HP、サムソン電子等と開発を進めており、Media Centerとの接続可能なテレビでは、PCに録画されたコンテンツを見ることができるようになる。PCを家庭内での中心機器に据えようとしている。

インテルはCES2004にてパソコンは「コンテンツを創造するための道具」から「コンテンツを消費する装置」となるとし、新しい家庭用PCのコンセプトEPC (Entertainment PC)を提唱した。EPCを使えば、音楽や映画、テレビ番組などを管理したり再生することがリモコン操作で気楽にできるとし、複数のAV機器で実現していた機能をPCに統合することを目指している。また、デジタル家電にも各種プロセッサが使用される時代になっており、デジタル家電の変革をムーアの法則^①で促

進していくと述べている。

このように米国PC関連企業は、PCをテレビやオーディオなどのデジタル家電と統合させようとして、各社それぞれのビジネスモデルの強化に向けたコンセプトを打ち出し、日本が先導しているデジタル家電市場に構成をかけていっている。また、ネットワークによってあらゆるものがつながる時代に突入しており、米国が得意とする新コンセプト提案型の製品が次々と出現することが予想され、日本企業からの新アイデアの提案が望まれる。最終的には、ユーザーが新製品を受け入れるかは、PCであれ、デジタル家電であれ、その使い勝手の向上が重要なポイントとなることも忘れてはいけない。

用語説明

①ムーアの法則

半導体の性能が一定期間で倍増するという経験則

環境分野

① オゾンホールを巡る最近の状況

1980年代初め頃から南極上空のオゾン全量が、通常9~10月にかけて著しく少なくなることが観測

されるようになった。こうした成層圏のオゾン層が破壊されることによって出現するオゾンホールは、皮膚がんや白内障の増加の原因として深刻な問題となっている。

こうしたオゾンホールの改善に向けては各方面で努力が続けら

れているが、このほど米アラバマ大と米航空宇宙局の研究グループは、衛星や地上の観測データを分析し、オゾン層破壊のペースが1997年以降急速に鈍化していることが確認されたと発表した。これは、オゾンを分解するクロロ

フッ素化炭化水素や、ハロゲン化合物の使用規制が世界的に行われていることの有効性を示すものと述べている。さらに、米海洋大気局の研究グループは、米アラスカ州やハワイ、南極など10カ所で、8年以上続けてきたハロンや臭化メチルなど臭素関連物質の観測結果からオゾンホールを減少を確認した。消火剤に利用されているハロンの濃度は増え続けているものの、臭化メチルの濃度が大きく減っており、これが臭素濃度の減少に貢献したとみている。

一方、カルフォルニア工科大学の研究グループは、将来の燃料電池が普及した水素エネルギー社会において、水素が成層圏中のオゾン層を破壊する恐れがあるという論文を発表した。この研究によると、化石燃料から水素燃料への転換が100%完了した場合、水素の10～20%がパイプラインや貯蔵施設、処理工場、自動車や発電所の燃料電池から漏れ出すと見積もっている。こうして漏れた水素と自然の水素を合わせ、現在の2～3倍の水素分子が成層圏に到達し

て酸素と結びついて水になると予測しており、その結果、下部成層圏の温度が下がりオゾンの化学反応が乱れ、やがては北極と南極で、今より大きくしかも簡単にはふさがらないオゾンホールが出現すると述べている。

この研究は仮定に基づく予測であるが、今後、水素エネルギー社会に向けた研究開発においては、二酸化炭素削減という正の側面だけでなく、オゾン層への影響といった負の側面も予想すべきという指摘として興味深い。

ナノテク・材料分野

①径の小さな貴金属ナノチューブの合成に成功

カーボンナノチューブは、発見以降そのユニークな特性により触媒、燃料電池、センサー、分離システム、電子デバイスなどへ応用可能性が広がっている。これにともない、無機においてもナノチューブの合成が盛んに試みられており、現在までに、窒化ホウ素、硫化金属、金属酸化物、金属などのナノチューブが報告されている。

貴金属などの金属元素は、触媒や電極の材料などとして非常に有用な元素であるが、ナノチューブとしては、無機多孔材料を鋳型

にして合成した内径10～100nmという径の大きなチューブが得られているのみで、ナノ材料としてはまだ径が大きいという問題があった。

宮崎大学工学部の宮崎剛教授らは、内径3～4nm、外径6～7nmというこれまでの最小径を有する白金、パラジウムおよび銀のナノチューブを合成したと発表した(Angew. Chem. Int. Ed., 43, 228 (2003))。界面活性剤により6方晶系の棒状液晶ミセル(集合体)を作り、これを貴金属ナノチューブの鋳型にするという新しい合成方法で、2種類の異なる分子サイズの界面活性剤を用いたことがポイントである。具体的に

は、60℃で塩化白金酸などの貴金属の水溶性塩、界面活性剤(1)、界面活性剤(2)、水を1:1:1:60のモル比で混合・攪拌し、15～25℃に冷却して30分静置後ヒドラジンで金属塩を金属に還元する。こうして得られた生成物は長さ100nm以上のナノチューブの凝集物で、使用した界面活性剤が一部残存しているとの事である。

宮崎教授らの開発した方法は貴金属のみならず他の物質系への適用が可能と考えられる。合成された貴金属ナノチューブの応用に関する研究の進展に加え、他の物質系への展開も期待される。

製造技術分野

①自転車タイヤ用の走行時空気補充装置の実用化

「ものづくり」力を強化するうえで、高付加価値化によるオンリーワン製品のコンセプト探しが大きな課題である。高付加価値技術の特許化は、中小規模の企業やスタ

ートアップ企業の強化に欠かせない要素である。身近な製品のなかで高付加価値技術が実用化された最近の例として、自転車用の走行時空気補充装置が注目されている。

自転車タイヤのチューブからは自然に空気が少しずつ漏れており、半年間放置すると当初の約2/3が無くなってしまい、空気圧が低下

した状態で自転車に乗ると、ペダルが重くなり、パンクもしやすくなる。このことは自転車という乗り物の最大の弱点とされてきた。

自転車ハブ部品専門の株式会社中野鉄工所で開発された空気充填装置「エアーハブ」は、車輪ハブ軸の回転によって空気をシリンダー内で圧縮しチューブに送り込む

装置である。自転車を漕ぐことにより空気がチューブに自動補充され、これは一種の自己修復機能とも言える。このほど、この空気補充装置を搭載した世界初の自転車がブリジストンサイクル株式会社によって製品化された。設定空気圧（約3気圧）を超えた場合には、余分の空気はシリンダーから外に放出する安全装置も備えている。長期間放置しない限りはメインテ

ナンスフリーの自転車である。

本装置の詳しい構成や内容は、特許申請中であるため開示されていないが、基本的には、前後車輪のハブ内に独自のカムによる回転運動（ロータリー方式）で動作するエアポンプを内蔵し、車輪の回転によりハブ内のエアポンプ部が動作して、圧縮空気を専用ホースでつないだエアバルブへ送り込む。また、タイヤの空気圧が適

正值に至った時点で、余分な空気はホース途中に設けられた装置から排出される。株式会社中野鉄工所では、現在、移動量の少ない車椅子用の装置も開発中である。

同じような空気圧の低下は自動車用のタイヤでも見られ、自動車タイヤ用にもこのようなシステムの登場が期待される。



特集①

研究開発プロジェクトの評価

—ヨーロッパの事例—



客員研究官 山田 肇

1. はじめに

政府が推進する研究開発プロジェクトには、公募型と非公募型の2種類がある。わが国では、従来、随意に契約する非公募型の比重が大きかったが、広く提案書を受け付けて、その中から適切なものを選択する公募型が増えつつある。

総合科学技術会議の中に設置された「競争的資金制度改革プロジェクト」の報告を元に、会議は内閣総理大臣等に2003年4月、意見を具申した。そこには、2003年度政府予算で競争的研究資金の総額が3,490億円と科学技術関係予算の約10%に達していることなどを踏まえた上で、今後いっそうの充実を図っていくべきであるとして、具体的な政策提言が書かれている¹⁾(注1)。

さらに、競争的な研究資金を拡充する動機が、次のように記述されている。

世界最高水準の研究開発成果の創出には、意欲ある研究者の優れた提案に基づいて実施される研究開発に対して、重点的に資金を提供することが必要である(途中省略)。米国では、日本の約10倍の規模の競争的研究資金を、公正で透明性の高い評価に基づいて、主に独立した配分機関が大学等に配分し、競争的な環境での研究開発活動の下、世界最高水準の研究開発成果の創出と経済活性化のための技術革新を実現している。

確かに、競争的な制度を拡充するには、評価システムを構築していく必要がある。具申書が指摘するように、利害関係者を排除しつつ、若手を含め優秀な研究者・技術者に事前評価をゆだねること。一方、申請者に対しては評価意見等の開示を行うこと。さらに、採

(注1) この意見では競争的研究資金を次のように定義している。「資金配分主体が、広く研究開発課題等を募り、提案された課題の中から、専門家を含む複数の者による、科学的・技術的な観点を中心とした評価に基づいて実施すべき課題を採択し、研究者等に配分する研究開発資金をいう。」

択後も中間評価や事後評価を適切に実施することなどが、制度の確立のために重要である。

ところで、この競争的資金制度改革プロジェクトは、主に米国の動向を調査し参考になっているが、ヨーロッパでも競争的な方法が実施されている。筆者は、最近、この事前評価プロセスに参加する機会を得たので、わが国と比較しつつ、その状況を報告する。

2. フレームワーク・プログラム

欧州連合では、1984年以来、フレームワーク・プログラム(枠組み計画と翻訳される場合もある)と呼ばれる研究開発プログラムが推進されてきた²⁾。これは1期5年(実質4年)のプログラムで、2002年から2006年が第6期に相当する。その前の第5次が1998年から2002年、第4次は1994年から1998年の5年間であった。

資金規模は、第4次の総額が132億15百万ユーロ、第5次が149億60百万ユーロで、第6次には175億ユーロが当てられている。第6次の資金は、1ユーロ130円で換算すると、2兆2,750億円に相当する。つまり、1年あたりに換算すれば、わが国の競争的研究資金総額以上の規模である。

このフレームワーク・プログラ

ムを実施する理由は、産業競争力強化に関わる政策、さらには消費者や環境の保護などの政策を推進していく上で、研究開発が重要であるとの認識にある。1993年に発効したマーストリヒト条約に基づいて通貨統合を進めてきた欧州連合では、新たに1999年5月にアムステルダム条約が発効した。この新しい条約にはわざわざ研究開

発の章が設けられ、その重要性が強調されている。

第6次フレームワーク・プログラムにおける、研究分野ごとの資金配分の概要を、図表1に示す²⁾。わが国でも重点4分野が決められて、傾斜的な資金配分が行われている。ヨーロッパでも同様に、ライフサイエンスや情報社会、ナノ

テクノロジー、環境関連技術等が重点分野となっている。これに加えて、航空宇宙が独立項目として強調されていることは、エアバスに象徴されるこの産業が、重要産業と位置づけられていることを示すものである。

フレームワーク・プログラムは、公募型のプログラムである。研究

者は、細分化されて実施される個別の公募に対して、少なくとも3ヶ国以上の加盟国研究組織を募って、提案書を事務局である欧州委員会に提出する。これが評価・審査され、適切な提案が選定されるようになっている。

図表1 第六次フレームワーク・プログラムにおける資金配分計画
(単位：100万ユーロ)

重点分野		13,345
内 訳	ライフサイエンス	2,255
	情報社会	3,625
	ナノテクノロジー、材料	1,300
	航空宇宙	1,075
	食品安全	685
	持続的な開発、環境	2,120
	知識ベース社会における市民と統治	725
	その他	2,060
研究人材の流動化など		2,605
研究協力体制の構築		320
その他		1,230
合計		17,500

欧州委員会資料に基づいて作成

3. 公募案件の事前評価

事前評価は、2段階に分けて実施される。専門家による内容の審査と、その後に実施される、事務局による調整である。

後で詳細に説明するが、専門家は提案の内容に学術的価値があるか等について審査する。研究者は複数の計画を提案することが許されているので、専門家による審査の段階では、2つ以上の研究開発プロジェクトが合格となる可能性がある。このような場合には、どれを優先するか、時期をずらすか、あるいは代替の研究者を指名するかといった調整が必要になる。また、要求額が満額認められなかったときにも、調整がかかる。この調整を進める役割が、欧州委員会に与えられている。

(注2) 筆者が参加した評価プロセスでは、実際に約100件の提案が審査された。これはフレームワーク・プログラムのごく一部である。どの提案を評価し、その結果がどうなったかを明らかにすることは、契約によって禁止されているので、本稿に記述することは出来ない。

以後、専門家による事前評価のプロセスについて説明する。

公募によって研究開発プロジェクトを募集すると並行して、評価を担当する委員が集められる。評価委員選任の原則は、専門家として評価されていることと、提案に利害関係が無いことである。1つの提案に対して3人ないし5人の評価委員が評価を実施する。このため、1人の評価委員が10件を評価するとしても、100件を審査するためには、40人程度の専門

家を集める必要がある(注2)。

しかし、専門家の数は限られるから、利害関係の無い者だけを必要数集めることは難しい。そのために取られる対策の1つが、欧州連合に加盟していないヨーロッパ諸国、さらにはヨーロッパ域外からも専門家を呼ぶということである。それでも不足するときには、利害関係のある者も呼ばざるを得ない。この場合には、関係ある提案の評価から外し、また、関係ある提案に関わる議論を行うときに

は、その者を退席させるという方法が取られている。

すべての評価委員は1箇所に集められ、1週間、缶詰になる。書類の持ち出し、またパソコンや携帯電話の持込は禁止される。評価委員には、その場ではじめて提案書が手渡される。

研究開発プロジェクトはその状態に応じて、図表2に示すように、5つに分類されている。研究開発そのものに加えて、地域内に数多く存在する研究組織間の協力体制を強化するNOEやCA、あるいはシンポジウム開催といった間接的活動SSAにも、資金を提供しようとしていることは注目し値する。我が国では研究開発拠点Center of Excellence (COE)の構築に動いているが、ヨーロッパのNOEはいわばCOE間の協力関係を緊密化しようとするもので、その対比も興味深い。

この5つは分類ごとに評価項目が定まっている。これを一覧表の形で図表3に示す。各項目は5点満点で評価され、○の項目は3点以上、◎の項目は4点以上が合格の基準である。その上で、合計点が基準以上となる必要がある。

各評価委員は、まず、それぞれ独自に提案書を評価する。その後、調整者を交えた会合が持たれ、3名ないし5名の評価者の合意として、一次評価結果が出る。この後、評価委員には、自分の担当した10件以外の提案書を読む時間が与えられる。こうして、さまざまな提案の全貌を把握したところで、全員が集められる。

全体会合では、分類ごとに、一次評価結果が提示される。それについて評価委員全員で議論して、結果が調整される。すでに説明したように、利害関係のある提案に

(注3) 女性研究者の育成は、政治的な課題になっている。

図表2 研究開発プロジェクトの様態

名称	略号	内容
Integrated Project	IP	大規模なリソースを投じる大型の研究開発プロジェクト
Network of Excellence	NOE	複数の研究所間で緊密で大規模な協力関係を構築し、大型の研究を推進する計画
Specific Targeted Research Project	STREP	特定の目標の実現を目指す、個別の研究開発計画
Coordination Action	CA	研究者間の協力を促進する継続的な活動、たとえば知識プラットフォームの運営といった活動
Specific Support Action	SSA	シンポジウムの開催といった特定の支援活動

欧州委員会資料に基づいて作成

図表3 評価項目の一覧

プロジェクトの様態	IP	NOE	STREP	CA	SSA
フレームワーク・プログラムの目的との整合性	○	○	○	○	◎
潜在的なインパクト	○	○	○	○	○
科学技術的な優越性	◎		◎		
研究チームの研究能力	○	○	○	○	
マネジメント能力	○	○	○	○	○
要員・資金計画の妥当性	○		○	○	○
協力関係の緊密度		◎			
協力促進活動の質				◎	
支援活動の質					○
合計点の基準 / 満点	24/30	20/25	21/30	21/30	17.5/25

欧州委員会資料に基づいて作成

関わる議論を行うときには、その者は退席させられる。この全体会合では、「地域外から研究者が参加することになっているが、それは妥当か」、「女性研究者を意図的に排除していないか」(注3)、「個人情報など保護すべき情報が、みだりに利用されていないか」といった問題についても、議論が行われ、評価される。

規模が比較的小さなSTREP、CA、SSAについては、こうして出揃った2次評価結果が、専門家による最終的な評価として扱われる。

これに対して、資金規模の大きなIPとNOEについては、合格点に達した提案についてだけ、日を改めて提案者が招集されて、ヒアリングが実施される。このヒアリングにも専門家が立会い、1次評価

のための全体会合でリストされた質疑事項に基づいて、専門的な質疑が交わされる。そして、合議によって、最終的な評価結果が出る。採択率は10%から20%台である。

この後、事務局から提案者に結果が開示される。提案者は異議を申し立てることが出来る。事務局は、事前評価の各段階での記録に基づいて、異議に対応する。

筆者が実際に参加した経験では、わずか100件の提案を評価するために、欧州委員会は40名の専門家を1週間拘束し、その旅費、謝金等を負担したことになる。これから推測すると、中間評価や事後評価まであわせれば、このような評価のプロセスに、研究費総額の2%程度を投じているということになる。

4. 厳密な事前評価の理由

フレームワーク・プログラムで、今まで説明してきたような厳密な事前評価を行うのはなぜだろうか。それにはいくつかの理由が考えられる。

各国政府から資金が拠出されて、欧州連合が成り立っているということが、最大の理由である。採択の結果、ある国からの提案が多く選択されれば、他国から苦情が出る。それに抗弁するには、専門家によって公平に評価したということが不可欠である。つまり欧州委員会には評価結果に関する説明責任があり、それを果たすために厳密な評価を行っているわけだ。

どのようにして評価を進めるかというプロセスは、文書にして公開されている。誰でもそれを見る

ことが出来る。これも説明責任があるからだ。一方で、評価委員の氏名は秘密に保たれて、中立性が維持されるようになっている。

日本と同様に、意欲ある研究者の優れた提案を採択したいという意図があることも、間違いない。研究開発は国際的な競争の中で実施されている。提案の優劣判断を地域内の専門家だけで行うと、判断が偏る危険がある。そのためにも、ヨーロッパの範囲を越えて地域外から専門家が招かれ、その意見は尊重される。

地域外から専門家を招くことは、ヨーロッパの「理解者」を増やしていくことにもつながる。その専門家を基点に、ヨーロッパの考え方を世界に広めていくことが

期待できるからだ。研究開発の分野では、米国、アジアとヨーロッパが主導権争いをする事が多い。この争いにより影響を与えようという意図も隠されているものと考えられる。

なお、すべての提案書が英語で記述されていることに、注意を払う必要があるだろう。欧州連合では、各国の公用語を全部、公用語として用いている。しかし、フレームワーク・プログラムに関する提案書が英語のみで記述されていることは、科学技術分野では英語が実質的に唯一の公用語となっていることを意味する。評価の観点からは、異なる国籍の多くの評価者から客観的な評価を得ようという意図に基づくものと解釈できる。

5. フレームワーク・プログラムの事後評価

フレームワーク・プログラムを事後評価する委員会が欧州委員会の外に組織され、中立的な立場で評価した結果が、2000年7月に公表された³⁾。この報告書はフレームワーク・プログラムを高く評価し、今後の継続を強く推奨するものになっている。産業界と学会とが連携して研究開発を進めたことや、その過程で、中小企業に参加の機会が与えられたことが高い評価につながっている。一方で、欧州委員会による管理が複雑で、時間がかかりすぎるとの批判が書かれていた。

次に、ACTSを例として、より詳しく事後評価について議論しよう。ACTSは1994年から1998年まで、第四次フレームワーク・プログラムの一環として実施された情報通信分野のプロジェクトである⁴⁾。

ACTSの研究分野はインタラクティブなデジタル・マルチメディア・サービス、光技術、高速ネッ

トワーキング、移動通信ネットワーク、ネットワークとサービスのインテリジェント化、通信システムとサービスの品質とセキュリティというように、分野を広くカバーするものであった。

第4次には、このほかに情報通信分野のプロジェクトとして、マイクロエレクトロニクス関連のESPRITや、教育などに特化したTELEMATICSと呼ばれるものがあつた。情報通信分野全体で、研究費の総額は36億46百万ユーロ(プログラム全体の28%)、このうちACTSには6億71百万ユーロが投じられた。

ACTSでは89件の提案が採択され、約1,060の組織が研究に参加した。このうち、研究機関や大学といった学術的な組織は30%で、これに対して企業が48%を占める、企業主導のプロジェクトであつた。

参加した組織に対して、「研究

成果が世界的に見てどんな水準と評価するか」を調査した結果が、ACTSのホームページに掲載されている。それによると、55%の研究プロジェクトについては「世界最高の水準に達した」との自己評価となっている。3分の1以上の参加組織は「米国や日本よりも高いレベルに達した」と回答している。また、ほぼ半数の参加組織は、「投資リスクが低減された」、「製品やサービスの開発期間が短縮された」、「ビジネス戦略を絞り込むことができた」などという肯定的な評価を与えている。

域外への貿易統計から、情報通信分野におけるヨーロッパの産業競争力が本当に強化されたかを評価してみよう⁵⁾。

図表4から、1990年には輸入が大幅に超過していたものが、1990年代後半には輸出超過を記録するほどに改善し、その後、再度、大幅な輸入超過に転じたことがわかる。

米国および日本に対する輸出入統計からも類似の結果が得られる。これを図表5および図表6に示す。米国からの輸入超過額は年々増加しているし、日本との間でも1996年にはいったん半減した輸入超過額が、その後、再び年々増加していることが読み取れるだろう。

参照した貿易統計には、「通信、音響、テレビ、ビデオ分野」という大分野についての数値しか掲載されていなかった。このため、日本との貿易収支については、コモディティ化しているテレビやビデオの影響が出ている可能性がある。しかし、アメリカとの場合には、インターネット等のハイテク分野での競争力の差が、この結果を生んでいるものと推察される。

なお、研究開発の成果が貿易統計に現れるまでは、当然、時間がかかる。一方で情報通信は、フレームワーク・プログラムではどの期においても、重点分野として位置づけられている。したがって、図表に示した貿易統計は、第4次のみならず、それ以前の期の成果も反映しているものと解釈することもできる。

ACTSのレポートには楽観的に産業競争力が強化されたと書かれているが、米国や日本といった先進国との間では輸入超過が続いており、これによって域外とのこの分野での貿易全体も赤字基調であるというのが、貿易統計を分析しての結論である。

参加組織による自己評価にも関わらず、貿易統計上、ヨーロッパの競争力強化を示すようなデータが得られなかったのはどうしてだろう。

これは自明のこのように思われる。参加組織にすれば、研究開発資金が補助されるということは歓迎すべきことであっても、拒否

(注4) 単純に1/3.4/5を計算するとおよそ6%になる。

図表4 通信、音響、テレビ、ビデオ分野の域外との貿易統計 (単位：100万ユーロ)

年	1990	1996	1997	1998	1999	2000	2001
輸出額	5,969	20,316	27,272	28,076	31,282	44,295	41,879
輸入額	14,044	19,665	22,963	26,475	32,381	49,294	48,729
バランス	- 8,075	651	4,309	1,601	- 1,099	- 4,999	- 6,913

欧州委員会資料に基づいて作成

図表5 通信、音響、テレビ、ビデオ分野の米国との貿易統計 (単位：100万ユーロ)

年	1990	1996	1997	1998	1999	2000	2001
輸出額	705	1,743	2,646	3,109	3,802	5,402	5,437
輸入額	1,550	4,436	5,860	7,033	8,405	12,366	10,677
バランス	- 845	- 2,93	- 3,214	- 3,924	- 4,603	- 6,964	- 5,240

欧州委員会資料に基づいて作成

図表6 通信、音響、テレビ、ビデオ分野の日本との貿易統計 (単位：100万ユーロ)

年	1990	1996	1997	1998	1999	2000	2001
輸出額	86	995	912	645	1,022	—	—
輸入額	6,579	4,136	4,307	4,613	5,793	8,103	7,335
バランス	- 6,493	- 3,141	- 3,395	- 3,968	- 4,711	—	—

—はデータなし

欧州委員会資料に基づいて作成

図表7 大手通信機器メーカーの1998年の研究開発費 (100万ユーロ単位)

年	1998
Alcatel	1,809
Siemens	4,664
Ericsson	3,143
Bosch	1,778
Nokia	1,150
合計	12,550

各社のアニュアル・レポートより引用

すべきものではない。その資金供給源側がプログラムの成否を問えば、補助金を受領する側は「成功した」あるいは「効果があった」と回答するのが当然であると思われるからだ。

しかし実際には、その補助の規模は驚くほどのものではない。ACTSなどが実施されていた期間のうち1998年における研究開発費を、ヨーロッパの情報通信大手企業5社について、各社のアニュアル・レポートから引用すると図表7のようになる。

5社の研究開発費の合計額は、フレームワーク・プログラムで情報通信分野に投じられた総額36億46百万ユーロのおよそ3.4倍である。5年間のプログラムで、その上、これらの5社だけに補助されたわけではないことを考慮すると、研究開発補助金が各社の研究開発費に与えた影響は数%以下と計算することができる(注4)。

地域レベルで研究開発プログラムをおこすとなると、総額は一見大きなものになる。しかし、それは多くの組織に配分され、希釈化

されていく。1社当たりで計算すれば小額になってしまう。したがって、このような研究開発プログラムを実施するだけで産業競争力

が強化されると期待することは、むずかしいということだろう。

わが国でも政府が研究開発支援の施策を打ち出すと、産業界がそ

れを支持する動きを見せることがある。しかし、本当にそれが効果を上げるのかということについては冷静な判断が必要である。

6. おわりに

本稿では、ヨーロッパにおけるフレームワーク・プログラムを対象にして、公募型の研究開発プログラムにおける評価の進め方について、議論してきた。

わが国でも、冒頭に記したように、競争的研究資金制度が拡充される方向にある。前述の総合科学技術会議の資料によれば、49%を占め最大の事業が文部科学省と日本学術振興会で交付を行っている科学研究補助金、第2位が戦略的創造研究推進事業である。

科学研究費は、大規模な特別推進研究と個別の基盤研究に二分される。特別推進研究では、第三者による書面審査、委員会形式での合議審査、ヒアリングの順に、事前評価が実施され、不採択の場合は理由が通知される。基盤研究では、書面審査と合議審査が実施され、不採択の場合、希望すれば、おおよその順位などを知ることが出来る⁶⁾。

フレームワーク・プログラムに比較して、より透明な点は、評価者のリストが公開されていることである。一方で、書面審査の段階では合議のプロセスがない。評価プロセスのコストを下げるという点では有効であるが、本当に利害の対立が無いかを顔を合わせて確認できないという点では、透明性に欠ける。

他の事業でも書面審査と合議審査、さらにはヒアリングが組み合わされていることが多く、我が国でも、行政は、しっかりとした事

前評価を行う方向に向き始めているということができるだろう。また、不採択の場合の理由通知は、説明責任を果たすことにつながるものである。

フレームワーク・プログラムとの最大の相違点は、我が国の場合には国外からの評価がほとんど行われていないことである。これには、提案書が日本語で書かれ、外国人には評価が難しいという理由があるだろう。

しかし、国内だけでは専門家の数が限定され、利益相反が起きる可能性が高い。また、研究開発に国境は無く、国内競争というよりも、むしろ国際競争として展開されているという点にも留意すべきである。国際的な視点で、世界的な基準を持って、公正に評価を実施することは、優秀な研究提案を選定することにも結びつく。

国際的な事前評価を実施するには、提案書を英語で記述する必要がある。研究者は、よい研究成果が出たときには、それを国際的な雑誌に英文で投稿することが日常的であるので、提案書を英文で書くように義務付けても支障は少ないだろう。今後、英文による提案と報告を義務付ける競争的資金制度が拡大していくことが期待される。

一方、事後評価については、ヨーロッパの例を見ても、客観性に欠ける部分があると思われる。事後評価そのもの、また、事後評価の客観性をいかに保っていくかに

ついて、今後も試行錯誤が必要である。

事後評価方法を確立させるのに時間を要するのであれば、いっそう、事前評価や中間評価をしっかりと実施する必要がある。優秀な提案にあらかじめ絞り込むことによって、事後の成績を向上させることが期待できるからである。この観点では、まず事前評価の仕組みを改善していくことに力を注ぐべきものと考えられる。

参考文献

- 1) 総合科学技術会議、「競争的研究資金制度改革について 中間まとめ (意見)」(2003年4月)
- 2) European Commission, "Participating in European Research" (2002)
- 3) Independent Expert Panel, "Five-year Assessment of the European Union Research and Technological Development Programmes, 1995 - 1999"
- 4) "ACTS - Advanced Communications Technologies and Services," : www.cordis.lu/acts/home.html/
- 5) European Commission, "External and intra-European Union Trade - statistical yearbook," (2000) および同 (2002)
- 6) 文部科学省・科学研究費補助金ホームページ : http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/main5_a5.htm

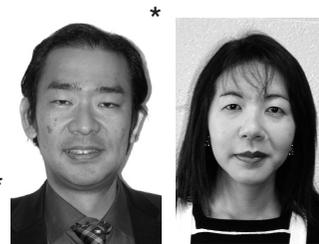


特集②

化学物質の生態リスク評価に関する 近年の動向

—化学物質審査規制法の改正を迎えて—

客員研究官 五箇 公一*
環境・エネルギーユニット 浦島 邦子



1. はじめに

近年、地球環境問題の重要課題の1つとして生物多様性の減少が議論されている。地球上に現存する生物種数は1,000万～1億とも言われ、これだけの膨大な数の種によって多様な遺伝子プールが維持されると同時に、多様な生態系が地球上の様々な地域に展開されている。生態系の多様さは、地球レベルから地域レベルに至る、エネルギーおよび物質の安定した循環をもたらしている。

生物多様性の崩壊は、遺伝子資源の消失と生態系機能の低下を招き、最終的には人類の生活基盤の損壊につながると考えられる。

近年の生物多様性の著しい減少を招いている最も重要な要因は、生物種の生息地での破壊であり、人工化学物質による環境汚染は熱帯林の破壊と並んで深刻な問題とされる。

これまで行われてきたヒトの健康影響を重視した化学物質の安全性評価も、生物多様性保全の観点から、ヒト以外の生物に対する影響も重視しなくてはならないという考えが、近年世界的趨勢になりつつある。この考えに則り、化学物質の生態リスク評価のための調査や試験研究が様々な国や研究機関で進められているが、特に化学

物質は産業利用を目的とした生産物であるため、その生産・流通・排出に関する規制あるいは審査・登録上のデータ取得を目的とした試験がひとつの主流を占める。

こうした試験は当然、国内での流通を念頭に置いて行政機関によってその手法が規格化されているが、近年の国際自由市場の情勢に則り、国際的にも試験法および評価法を統一化する動きが活発となっている。本稿では、現在の国内外における化学物質の生態リスク評価をとりまく状況について解説し、今後の生態リスク評価の方向性について考えてみたい。

2. OECDにおける化学物質の生態リスク評価に対する取り組み

化学物質の生態リスク評価における国際基準の整備は、OECDが中心となって進められている。OECDで定めた試験法は、テストガイドラインとして世界各国の国内における試験法にも取り入れられている。OECDでは1970年代後半から化学物質の流通に関して、各国での規制が異なることによって各国間の貿易が阻害されるという、非関税障壁の解消を目的

とした取り組みがなされている。OECDに設置されている化学品プログラムにおいて、化学品の安全性評価に関するシステムが検討され、化学物質の環境運命（動態）、生態影響、健康影響などの試験法標準化や、データと評価に関する様式の統一を進めている。この中で生態影響に関する試験法として、水生生物を中心に室内試験法を整備している。

特に水生生物に対する影響評価が重視されるのは、多くの化学物質の最終到着点は水界であると考えられること、さらに水環境は人の生活にはなくてはならないものであることから、水環境を維持している生物相に対する影響評価がまず一番重要であるという認識からである。

3. OECD におけるテストガイドラインの整備

OECD における生態影響評価のためのテストガイドラインについては、OECD のホームページで詳しく閲覧することができる。現在も暫時試験法は追加・改正が検討されており、2003年3月現在で採択済みのガイドラインは No.201～217 までの 17 試験があるが、ここでは主な試験法の概要を図表 1 に示す。

これら採択済みの試験法だけでは評価が不十分として、さらに新

しい試験法の検討が続いている。以下に主な検討課題を紹介する。

3 - 1

魚類繁殖 / ライフサイクル試験

現在の魚類の試験法には慢性毒性試験法がないため、ライフサイクル試験法が検討されている。この試験は、魚類の卵から成魚への全成長段階において化学物質を暴露し、次世代を産出する数（適応

度）への影響をみる試験法である。魚類の生涯を通しての影響発現を評価するため、ライフサイクルが短いメダカも試験魚種として候補となっている。

3 - 2

底生生物に対する試験法

甲殻類や貝類などの底生生物は、底質中の有機物を摂食して水中環境の浄化に大きな役割を果た

図表 1 主な OECD テストガイドライン（採択済みのもの）概要

No.	試験の名称 (主な使用生物種)	試験目的	方法の概要
201	藻類成長阻害 (Selenastrum capricornutum)	生態系の一次生産者である単細胞緑藻類に対する影響評価	段階的な濃度の被験物質を含む試験培地に藻類を接種し、成長速度の変化を調べる
202	ミジンコ急性遊泳阻害 (Daphnia magna)	生態系の一次消費者である微小無脊椎動物に対する急性毒性評価	段階的な濃度の被験物質を含む試験水中にミジンコ幼体を入れ、48時間暴露して遊泳阻害(行動異常)を調べる
211	ミジンコ繁殖阻害 (Daphnia magna)	生態系の一次消費者である微小脊椎動物に対する慢性的影響評価	段階的な濃度の被験物質を含む試験水中にミジンコ幼体を入れ、21日間給餌しながら暴露して暴露期間中に遊泳阻害された親ミジンコ数および産仔数を調べる
203	魚類急性毒性 (メダカ、ゼブラフィッシュなど)	生態系における高次消費者であり、水生生物の代表種である魚類への急性毒性評価	段階的な濃度の被験物質を含む試験水中に供試魚を入れ、96時間暴露して死亡率を測定する
204	魚類延長毒性 (メダカ、ゼブラフィッシュなど)	脂溶性が高く、徐々に魚体に蓄積して毒性を発現するような物質に適用する	段階的な濃度の被験物質を含む試験水中に供試魚を入れ、14日間給餌しながら暴露して暴露期間中死亡および行動の異常などの有無を観察する
210	魚類初期生活段階毒性 (メダカ、ゼブラフィッシュなど)	魚類の胚から仔魚に至る生活史の初期段階における致死的な影響の有無を調べる	段階的な濃度の被験物質を含む試験水中に供試魚の受精卵を入れ、ふ化させる。卵のふ化率やふ化後の仔魚の生存、成長などへの影響を調べる
209	活性汚泥呼吸阻害	生態系における分解者である微生物の集合体と見なされる活性汚泥への影響を調べる	下水処理場からの活性汚泥に段階的な濃度となるよう被験物質を添加し、呼吸率の変化を調べる
205	鳥類経口(混餌)毒性 (マガモ、ウズラなど)	鳥類への急性毒性の強さを調べる	段階的な濃度の被験物質を含む餌を5日間摂食させた後、死亡率を調べる
206	鳥類繁殖毒性 (マガモ、コリンウズラ、ウズラ)	鳥類の繁殖性への影響を調べる	段階的な濃度の被験物質を含む餌を8週間摂食させた後、数週間で産卵させる。親鳥の死亡、体重、症状、産卵数、卵の殻の厚さ、卵のふ化率、若鳥の生存率および体重を調べて繁殖性に対する影響を評価する
207	ミミズ急性毒性 (Eisenia foetida)	土壌分解者としてのミミズに対する影響を調べる	段階的な濃度となるよう被験物質をしみ込ませた濾紙にミミズを接触させ、死亡率を調べる
203	陸上植物成長試験	陸上植物の発芽や初期の成長への影響を調べる	段階的な濃度の被験物質を含む土壌を調整し、供試植物を育て、発芽率および収穫物の重量を測定して発芽阻害濃度および成長阻害濃度を算出する
213	ミツバチ急性経口毒性 (セイヨウミチバチ)	有用昆虫であるミツバチの成体に対する急性経口毒性を評価する	適切な濃度の被験物質を含む50%シロ糖水溶液を100～200ug 与えて死亡率を調べる
214	ミツバチ急性接触毒性	有用昆虫であるミツバチの成体に対する急性接触毒性を評価する	適切な濃度の被験物質を含む溶液を1ulをミツバチの胸部背面にマイクロapplicatorで塗布して死亡率を調べる

している。また、底質は水中環境に流入した残留性の化学物質を蓄積しやすいので、現行の藻類、ミジンコ、魚類など水中で浮遊する生物種に対する試験だけではなく、底質に生息する生物種の試験法の開発も重要課題となっている。現在のところユスリカ幼虫やミミズを用いた試験法が提案・検討されている。

3 - 3

陸生生物に対する試験法

鳥類、ミツバチ、土壤微生物など陸生生物の試験法は主に農薬を対象としたものであり、試験データの蓄積も水生生物と比較すると少ない。現行法の改定も含め、試験法の策定には多くの課題がある。

3 - 4

難水溶性物質の試験法

世界各国において、生態リスク評価試験は OECD により標準化されたテストガイドラインに従って実施されることが多く、特に魚類、ミジンコおよび藻類に対す

る影響試験が主流を占める。これらの水生生物に対する試験は、長年の議論とデータの蓄積から開発されたものであり、試験の再現性についても信頼性は高いとされるが、本来、水溶性の物質の試験を想定して作られたものである。しかし、化学物質の大半は難水溶性であり、試験の実施に困難を伴うケースも多々ある。従来、こうした難水溶性物質については、溶剤や界面活性作用のある分散剤などの助剤を用いて試験水を調整し、試験が行われてきた。

しかし、試験物質と助剤の相互作用の問題から助剤の使用の見直しが 1990 年代よりヨーロッパを中心に活発となり、2000 年に OECD の「試験困難物質および混合物の水生毒性試験に関するガイダンス文書」が策定された。この中で、試験水については原則として分散剤の使用は認めないこととされている。さらに OECD のテストガイドラインについても、水溶解度以上での試験は行わないという原則が統一されつつある。

分散剤使用中止の根拠として、まず試験生物にとって生物的利

用能 bioavailability があるのは溶液中に「溶解」している被験物質のみで、水溶解度以上の被験物質が「浮遊物」として存在していても、生物体内にはほとんど取り込まれないという研究結果が挙げられる。被験物質が水生生物の体内に取り込まれるメカニズムとしては、エラなどの生体膜を介した受動拡散がメインであり、溶解していない物質は生体膜と相互作用をほとんど起こさないとされる。

また、非溶解物質による「毒性」以外の物理的影響が、見かけの毒性として発現する可能性がある。非溶解性物質が凝集塊を形成し、水生生物の鰓や生体膜に吸着したり、呼吸器官や摂食器官を詰まらせることで、被験物質自体に毒性がなくても遊泳障害や死を招く結果となり得る。その他、水溶解度以上の高濃度で化学物質が存在することは自然界では起こり得ないことであり、よって非現実的であるという意見もあり、現在の分散剤使用の原則不可にいたっている。

4. 米国および EC 諸国における試験法

米国および EU では、世界に先駆けて生態影響評価に取り組んでおり、試験方法についても多くの生物種を用いて様々な方法が確立されている。米国および EU の試験法開発は、OECD での新しいガイドライン策定作業にも大きな影響を及ぼしている。

米国では代表的なガイドラインとして、ASTM (American Society for Tests and Materials) およびアメリカ合衆国環境省 US - EPA のものがある。ASTM のテストガイドラインは化学物質に限らず、排水の毒性評価にも対応している。

EPA のテストガイドラインは

かつては工業化学品を対象とした OTS (Office of Toxic Substances) テストガイドラインと農薬化学品を対象とした OPP (Office of Pesticide Program) テストガイドラインの 2 つがあったが、現在、OPPTS (Office of Prevention, Pesticide and Toxic Substances) が両者を統合し、OECD テストガイドラインとの整合性を図った新ガイドラインを策定した。この中で生態リスク評価関連のテストガイドラインは、米国独自の生態影響テストガイドラインとして 850 シリーズと呼ばれ、1996 年より EPA のホームページで公開されている。

一方、EU はもともと OECD の主体をなし、その試験法が OECD に取り入れられた経緯から、現在は OECD テストガイドラインを標準法としている。

以上の試験方法は、各国において新規に製造、あるいは輸入される化学品の届出の際に安全性評価に要求されるデータを得るための試験に用いられる。各国の試験要求項目の一覧を図表 2 に示す。

米国の場合は諸外国とはかなり異なり、新規化学物質の申請に際して前もって準備すべきデータ提出の項目が定められておらず、手持ちのデータの提出でよいとされ、EPA が構造活性相関 (化学

物質の構造と生理活性の相関関係に関するデータベースに基づき、新規化学物質の構造式からその生理活性や毒性を推測する)などによって評価した上で、必要データの提出を要求されることがある。

日本においては「化学物質の審査および製造等の規制に関する法律」(化審法)が工業化学品の安全管理に適用されてきたが、その目的が環境経由のヒトへの健康影響評価であったため、これまで生

態影響試験をデータ要求項目とはしてこなかった。しかし、2003年5月に化審法が改正され、生態影響評価も審査項目として追加されることとなった。

図表2 各国における新規化学物質届出時に要求される生態影響試験データ

国名	米国	カナダ	EU	日本
規制対象となる生産量	>10t/年	>10t/年	>1t/年/1業者	>1t/年
	手持ちデータで可			
魚類急性毒性	(場合により要求)	○	○	○*
ミジンコ急性毒性	(場合により要求)	○	○	○*
藻類成長阻害	(場合により要求)	—	○	○*
活性汚泥呼吸阻害	(場合により要求)	—	○	—
生分解性	(場合により要求)	○	○	○
生物濃縮性	(場合により要求)	—	—	○
加水分解性	(場合により要求)	—	○	—
吸脱着スクリーニング	(場合により要求)	—	○	—

* 化審法改正後要求されることになった項目

5. 日本における化学物質の規制・管理 —化審法の改正—

上記のように、OECDを中心として工業先進国各国が化学物質の審査・規制において生態系保護の対策を進める中、長らく我が国だけが生態影響評価の法的実施を行わずにいた。こうした遅れは世界的な時流に反するものとして、2002年1月のOECD環境成果レビューにおいても我が国に対し、「化学物質対策に関して生態系保全を含むように規制の範囲をさらに拡大すること」との勧告がなされた。

国内の環境政策についてみると、「自然との共生」を長期的目標の1つとして掲げた環境基本計画や生物多様性国家戦略において、化学物質対策についても「生態系に対する影響の適切な評価と管理の推進」が掲げられた。このような状況を背景に、化審法の改正が実施されるにいたった。本改正法では、まず、目的規程が改正され、「人の健康を損なう恐れまたは動植物の生息もしくは生息に支障を及ぼす恐れがある化学物質

による環境の汚染の防止」と明記されている。

また、新規化学物質の届出に際して、生態系への何らかの影響が示唆される化学物質を特定するため、生態毒性を新たに審査項目に加えている。具体的には欧米と同様に、生態系における食物連鎖の構成員を代表する生物種として藻類、ミジンコ、および魚類(メダカ)に対する急性毒性試験の実施を求めている。

我が国における化学物質の審査制度のフロー概略図を図表3に示す。この新しい法体制により、「人への長期毒性の疑い」がなくとも「動植物への毒性」が認められた物質についても製造・輸入数量の監視が行われ、さらに環境汚染の恐れがある場合には、有害性調査として実際に被害を受ける可能性のある動植物に対する「慢性毒性試験」を行うよう事業者に指示を出し、その結果、人の生活環境に関係するような動植物(有用動植

物や身近な動植物など)への被害の恐れがあれば、人への健康に対する被害の恐れのある物質と並んで、第二種特定化学物質として製造・輸入予定数量および実績の届出を義務づけ、必要な場合には製造・輸入数量の制限も講ずることになる。

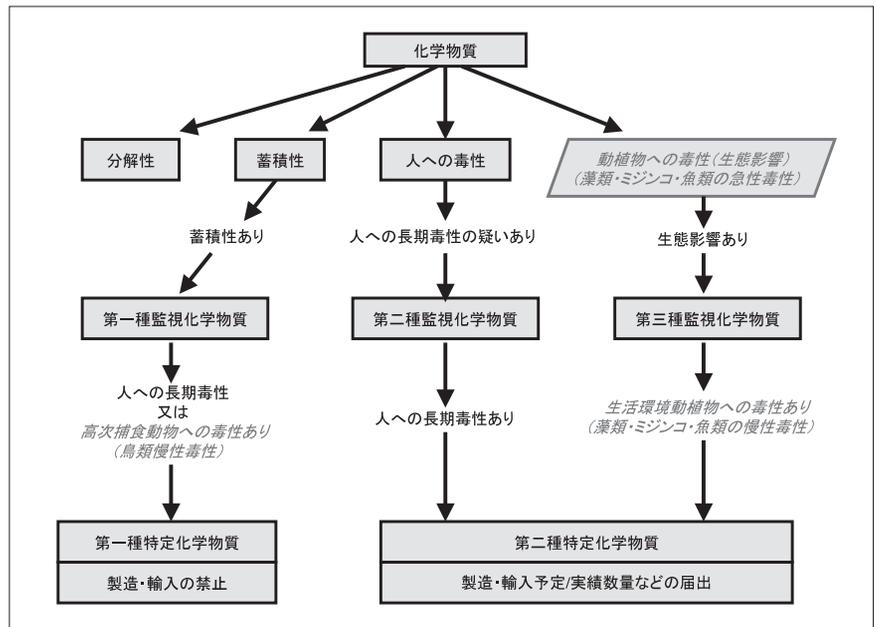
また、PCBのように難分解性かつ高蓄積性で人への長期毒性があるものは、「第一種特定化学物質」として製造輸入が禁止されているが、新たに鳥類や哺乳類のような食物連鎖の上位にある動物への毒性がある場合も(たとえ人への長期毒性がなくとも)同様の規制対象となる。

以上の動植物に対する毒性、すなわち生態影響評価は全てOECDのテストガイドラインに則って行うことを目指しており、新規化学物質の事前審査に要求される「藻類・ミジンコ類・魚類の急性毒性試験」のガイドラインはほぼ完成している。また、「第二種特定化

学物質」に指定するにあたり、審査する「生活環境動植物への毒性」の評価は当面「藻類・ミジンコ類・魚類の慢性毒性試験」を想定している。さらに、「第一種特定化学物質」に指定するにあたり、審査する「高次捕食動物への毒性」評価は「鳥類繁殖試験」が想定されている。

これらの慢性毒性および繁殖試験については、国内での試験実績が乏しく、今後、試験法の整備とともにOECDが定める優良試験所規範（Good Laboratory Practice；GLP）に適合した試験機関の拡充も図っていかなくてはならない。

図表3 改正化審法における化学物質の審査・既製制度の大まかな概要



斜体部分が改正によって盛り込まれた生態影響審査項目

6. 改正化審法における難水溶性物質の扱い —世界経済との整合性—

ところで我が国の生態影響評価を化審法に組み込む過程で、一点だけ議論が集中した項目がある。それは「難水溶性化学物質」の扱いである。先にも述べたとおり、現行のOECDテストガイドラインでは難水溶性物質については、助剤等は一切使用せず、純水に溶解し得る濃度、すなわち水溶解度以上の試験はしないことと定められている。しかし、実際に生理活性の高い物質ほど脂溶性が高いものが多く（例：殺虫剤、殺菌剤）、水に溶けにくいものが多い。現行の化審法では物質の水溶解度を求めて様々な毒性試験を設計することが規定されており、水に全く溶けない物質は「水に溶けないので生態影響なし」と判定されることにもなりかねない。

OECDに加盟しているアメリカやEUでは既にこの問題を先取りし、水に溶けにくい物質は水環境中では底質に移行しやすいという

性質を考慮して、現在、底生生物に対する影響試験の検討を、ユスリカ幼虫などを材料として行っている。この底生生物影響試験が正式にOECDのテストガイドラインになれば、将来的に日本もこの試験法を取り入れることになるのが考えられるが、諸外国に比べても河川・湖沼の水資源への依存度が高い我が国において、難水溶性物質の問題をそれまで放置しておいていいのであろうか、という疑問が生じる。化審法改正にあたり、環境省に設置された環境省生態影響試験・評価技術検討会において委員の一人である筆者はこの問題点を指摘し、分析機器を用いても水溶解度の測定が困難とされる極難水溶性物質については、助剤等の使用をある程度認めて、水中に分散させた状況で水生生物に対する活性を見るべきではないかと提案した。生態影響試験は水生生物のみを用いて行われるが究極的な

目的は「生態系保全」であり、野生生物に対する毒性を藻類、ミジンコ、魚というわずか3種の生物試験から少しでも多く見いだすためには、多少のオプションが必要と判断したからである。この案を盛り込むにあたって一番問題となったのは、OECDの基準に適合しないため、外国から輸入される新規化学物質に、新たに助剤使用の試験を追加要求したり、あるいは、日本から外国に新規化学物質を輸出する際、助剤使用の日本の生態影響データは外国では通用しない、などの貿易上の支障が生じる恐れがあるということであった。議論の末、水溶解度測定不能で、水生生物に対する急性毒性試験データを得ることが困難な場合に限り、助剤等を使用して分散系での試験を行うことを要求するという省令案ができた。化学物質審査の背後に国際自由市場という大儀が存在することを示唆した一例と言える。

7. 新しい生態リスク評価の必要性と方向性

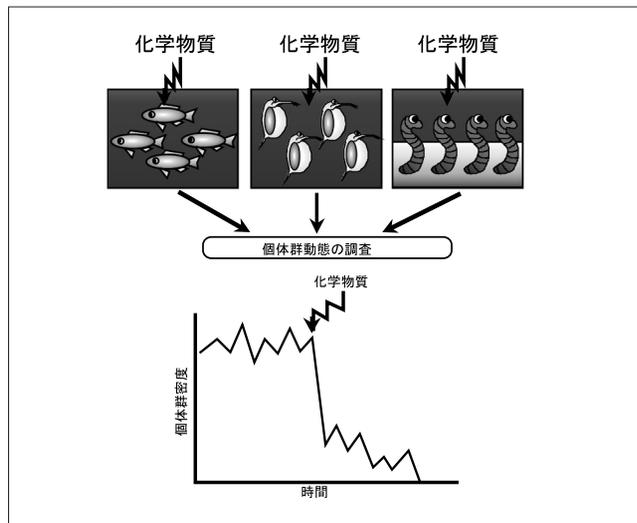
日本も諸国に遅ればせながら、化学物質による生態リスク評価に乗り出すことになる。ただし、その評価法はあくまでも国際基準に照らし合わせた数種の試験生物の毒性試験に過ぎず、これだけの評価で生態系を守るなどできるわけがないという批判の声も少なからずある。

確かに生態系は生物種集団が生物間相互作用によって結びついて形成される複雑な有機的ネットワークであり、また地域によってもその系のあり方は様々であり、ましてや冒頭で述べたように地球上の生物多様性を構成する生物種数は膨大なものである。これだけ複雑で多様な生態系を保全する上でたった3種（藻類、ミジンコ、魚類）の、しかもビーカーの中での毒性試験の結果が何の役に立つのかという意見はもっともであろう。

こうした生態学分野からの意見を踏まえて、個体レベルの影響評価からより高次のレベルの評価方法がないか模索はされている。例えば欧米では、魚類の毒性試験を5種類以上の魚種で行うなど試験生物種の幅を広げることや、個体群（集団）レベルでの試験が考案されている。あるいはまた、試験生物の発育段階ごとに化学物質による影響を試験し、それらのデータから化学物質が生物種の増殖能力（適応度）にどれだけの影響を及ぼすのかを計算し、最終的に個体群の絶滅確率がどれだけ上がるかを推測するモデル開発も行われている（図表4）。

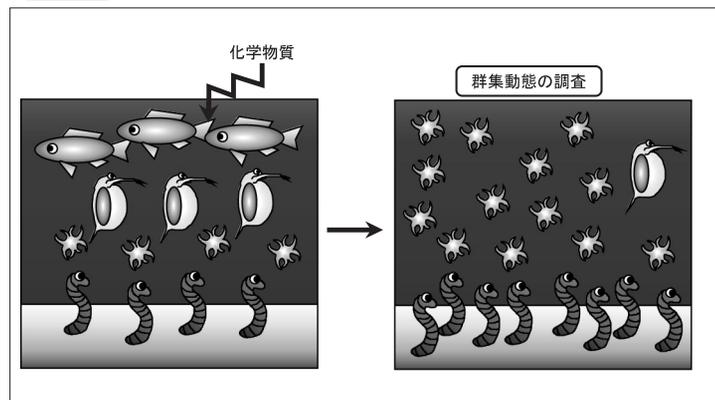
さらに、実験室内や温室内の大きな水槽に様々な生物種を投入して「実験生態系」を構築し、そこへ化学物質を投与することにより、生態系レベルでの影響を評価するマイクロコズム試験^①も検討されている（図表5）。これらの「高

図表4 個体群レベルの生態影響試験



試験生物の実験個体群に化学物質を暴露し、個体群密度の推移を調べる

図表5 群衆レベルの生態影響試験



ユスリカ、藻類、ミジンコ、魚類など様々な生物種から構成される実験群集をつくり、そこへ化学物質を投与することにより、群集構造（生物種の組成と個体群密度）の変化を調べる。

用語説明

①マイクロコズム試験

マイクロコズムは「小さな宇宙」を語源とし、個体群や群集をある容器内で培養した系、つまりフラスコレベルでの制御環境下における試験を意味する。ちなみに隔離水界を用いる大規模なレベルでの試験は、メソコズム試験という。

次試験系」は、複雑な生態系を可能な限り再現して化学物質の生態影響をより「現実的」に捉えようとする試みと言えるが、どんなに実験系を複雑にしても、地域や季節ごとに多様性がある自然生態系を全てカバーすることは事実上不可能であり、結局はひとつのケーススタディとなるだけであろう。

一方、メダカなどの生物個体を

用いるのではなく、遺伝子レベルでの化学物質の毒性評価手法の開発も進められている。トキシコゲノミクス (Toxicogenomics) と呼ばれるこの新しい毒学分野は、DNA マイクロアレイという技術を用いて、生物の全遺伝子の発現レベルを定量的に測定することにより、化学物質がどの遺伝子発現に影響を及ぼすのかを捉えて、その

生物体に対する毒性を推定しようというものである。この手法が確立されれば、試験生物の飼育や標準化などの時間的・経済的コストが大幅に削減され、生態影響評価も高効率に行われることが期待されるが、遺伝子発現の異常から即、生態系レベルでの異常を予測することの有効性については、まだ慎重に検討を重ねる必要がある。

むしろ、これからの生態リスク研究に必要なことは、室内での試験系と野外の自然生態系のギャップを埋めるためのモデル構築と検証研究であろう。遺伝子発現も含めた室内レベルの毒性試験により得られた生物に対する影響データから、いかにして自然生態系で起こり得る影響イベントを推測するかを毒性学の見地に加え、個体群

生態学、群集生態学および集団遺伝学など様々な集団生物学的見地から検討し、数理モデルを構築する。そのモデルの有効性を確認する検証データの蓄積のために上記の「高次試験系」は利用されるべきであり、また様々な野外フィールドでデータ収集が行われる必要があると考える。

8. 我が国の生態リスク評価研究の発展に必要なこと

このような理想的モデルが作られるには、まだかなりの時間を要すると考えられるが、特に我が国において生態リスク研究を遅らせている最大の要因は、この研究分野における研究土壌の脆弱さと研究者の不足である。「保全生態学」や「生物多様性保全」という言葉がもてはやされて久しいが、生態系や生物多様性に影響する要因である、化学物質とその生産・排出の問題に真正面から取り組む生態学者、特に個体群生態学や群集生態学分野の研究者は極めて少ない。例えば、アメリカの生態毒性学分野を代表する学会 SETAC (The Society of Environmental Toxicology and Chemistry) は会員数が5,000人を越えるが、日本の環境毒性学会では会員数は約400人しかいない。この数字からわかるように、欧米と比べても日本は環境毒性や生態リスクに関する研究者層が薄いと云わざるを得ない。また、他の要因として、化学物質の生態影響を専門とした大学の研究室や研究機関が少ないため、研究者の育成が十分に行われていないことがあげられる。生態学分野において、環境学のみにとらわれない問題意識を持ってこの研究分野に取り組んでくれる研究者を育成することが、日本の生態リスク研究に課せられた当面の課題である。その目的達成のためには、毒性学分野と生態学分野などの学

問分野間の乖離を取り除くための学会間のリンケージ機構を構築する必要がある、学会連合などの複合体組織も検討すべきであろう。

また、生態リスク研究を進展させるためには、この研究分野により多くの注意と関心が集まるような社会的環境づくりも必要であろう。生態リスク評価をクリアした物質に「生き物にやさしい」といった表示を添付するなど、一般の人にも生態リスク評価の意義が分かり易く伝わるような社会的アピールも検討してみるべきである。生態リスク評価は、化学物質を製造・販売する企業にとっては規制が厳しくなるといって、大きな負担となると考えられがちであるが、逆にこの規制をクリアすることで化学物質の安全性を際だたせ、差別化をもたらす効果も期待される。環境に優しい化学物質という新しい市場ジャンルを生み出す可能性も秘めている。さらに、生態リスク評価が商業ベースでなんらかの利益をもたらす可能性があれば、このような研究分野に関わる企業が増え、よって新規性および魅力のある研究テーマのひとつとして、今後の日本において注目される研究分野となることも期待できる。

OECDのテストガイドラインも日本の化審法も、人間の経済発展と環境の保全という、どちらも人間社会に必要でありながら、対峙

する2つの概念の狭間で誕生したものである。今回の化審法改正で、我が国においても生態リスク評価が義務づけられたことは大きな一歩といえる。しかし、今後、生態リスクの評価項目および評価基準は、国際的にもますます厳しいものとなることは間違いなく、貿易大国である日本は、この分野においてもリーダーシップをとる立場に立たなくてはならない。工業大国であり、輸入大国である我が国において、化学物質による環境影響評価は、環境保全の重要必須事項であり、自然を愛する学者であるならばなおさら環境破壊の至近要因である化学物質にもっと関心を寄せるべきである。そのためにも我が国は、生態リスク評価研究の発展にさらなる努力をしなくてはならない。

参考文献

- 1) OECD ホームページ：
<http://www.oecd.org/oecd/pages/home/displaygeneral/0,3380,EN-document-519-14-no-6-25073-0,FF.html>
- 2) 若林明子 (2000) 化学物質と生態毒性、産業環境管理協会、東京
- 3) 藤田正一 (編) (1999) 毒性学、朝倉書店、東京
- 4) ECOFORUM Aquatic Report (1999) : Ecological Committee on FIFRA Risk Assessment Methods

特集③

パワーエレクトロニクスによる エネルギーインフラの強化に向けて



環境・エネルギーユニット 橋本 幸彦

1. はじめに

電気エネルギーを取り巻く環境は、民生部門を中心とした電力需要の伸び、電力化率の増加、中国を中心とした開発途上国の電力需要の増大等により大きな転換期を迎えている。

パワーエレクトロニクスは、電気エネルギーの有効利用を担うエネルギーインフラの基盤技術である。身近なところでは、エアコン、モータ等の電気機器の出力を滑らかに調整し消費電力を抑える「インバータ制御」が知られており、我が国のみならず、地球規模でのエネルギー・環境問題を解決する技術として重要である。

現在、研究開発が行われている超低損失のパワーエレクトロニクス機器が普及した場合、2020年

には我が国において、燃料電池自動車、分散型電源用インバータ、モータ制御インバータ等の各分野で、合計 29.78TWh (T: 10^{12}) の電力消費を削減できるとする試算も報告されている¹⁾。この数字は、100万kW級の原子力発電4基分の年間発電電力量に相当するものである。

総合科学技術会議のエネルギー分野推進戦略(2001年9月)では、エネルギーインフラを高度化していくために必要な研究開発として、超低損失電力素子(パワー半導体デバイス)等、新材料のエネルギー機器・インフラへの適用、実用化を目指した基盤研究を掲げている。

我が国では、これまで産業界が

中心となってパワーエレクトロニクスを用いたエネルギーインフラの構築がなされてきた。国内経済が低迷するなか、企業単体ではコスト面の問題から新たな技術開発に積極的になれないという状況にある。また、大学においても人材教育の面で課題を有している。一方、欧米ではこの分野の重要性に着目し、産学共同の研究センターを発足させるなど研究が活発に行われている。

このような状況を踏まえて、本稿では、我が国のパワーエレクトロニクス技術を維持・進展させるにあたって求められる方策について考察する。

2. パワーエレクトロニクスとは

石油や石炭等の一次エネルギーを、二次エネルギーである電力として使う割合である「電力化率」は年々上昇し、近年、我が国では40%を超えるに至っている²⁾。社会の情報化や高齢化の進展にともない、電気エネルギーの持つ利便性や安全性の観点から、この「電力化率」は、今後とも増大することが予想されている。

パワーエレクトロニクスは、パワー半導体デバイスを用いて、電力の形態を、交流から直流へ、直流から交流へ、あるいは周波数を

変換する技術である。IEC(国際電気標準会議)では、パワーエレクトロニクスを「電力工学、電子工学および制御工学の技術を総合した電力変換及び電力開閉に関する技術分野」と定義している。電気信号の変換・情報処理を目的としたエレクトロニクスに対して、パワーエレクトロニクスは、電気エネルギーの変換・処理を目的としたものである。

今後、直流出力の燃料電池等の分散型電源の導入拡大、直流を電源とする情報機器の増大により、

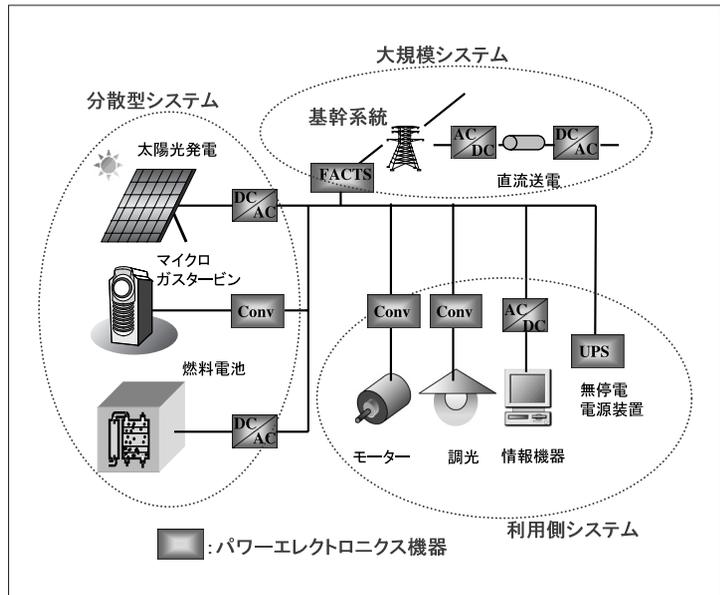
図表1に示すように、電力系統とパワーエレクトロニクス機器は、これまで以上に様々な箇所で、インターフェースを形成することが予想される。パワー半導体デバイスにより電力の変換や制御を行うパワーエレクトロニクスは、電力化率の増加により今後増大する電気エネルギーの効率的利用に大きな役割を果たすと考えられている。

我が国では、電力システムや燃料電池自動車等に用いられるパワーエレクトロニクス機器の超低損失化・小型化・軽量化を目指し

て、新しいパワー半導体デバイスの要素技術開発が行われた。この超低損失電力素子技術開発プロジェクト（1998年～2002年）の次世代パワー半導体デバイス実用化調査委員会では、シリコンカーバイド（SiC）やガリウムナイトライド（GaN）等の超低損失電力素子の応用分野として、自動車、モータ制御インバータ、CPU電源^{（注1）}、UPS（無停電電源装置）、分散型電源用インバータ、および通信基地局発信素子を想定し、新素子導入に伴う2020年時点での我が国における省エネルギー効果およびCO₂排出削減量効果を試算している（図表2参照）。1年間のCO₂排出削減量1,093万tは、我が国の1990年のCO₂排出量1,119百万tの0.98%に相当し、省エネルギーによる地球温暖化対策として、超低損失電力素子の導入が有効であることを示している。

（注1）CPUに電力を供給する際、パワー半導体デバイスを用いて、交流-直流変換し、さらに直流-直流変換（DC/DCコンバータ）して、CPUが必要とする電圧に変換している。

図表1 電力系統とパワーエレクトロニクス機器との接点



FACTS：Flexible AC Transmission Systems
Conv：Converter、一般的にはAC-DC-AC電力変換器

産業技術総合研究所パワーエレクトロニクス研究センター資料をもとに科学技術動向研究センターにて作成

図表2 2020年時点における新デバイス（SiC、GaN）導入効果の試算例

応用	導入量 (2020年)	省エネルギー量 (TWh/y)	CO ₂ 排出削減量 (万t-CO ₂ /y)
EV/FCEV	500万台	6.25	229
モータ制御	4,100万台	9.96	366
CPU電源	6,500万台	2.73	100
UPS	2,300万台	4.71	173
分散型電源	2,002万kW	3.83	141
通信基地局（GaN）	50万基	2.3	84
計		29.78	1,093

(CO₂排出原単位：0.367kg-CO₂/kWh)

●計算例：EV/FCEV [電気自動車/燃料電池自動車] のケース
平均出力50kW、年間500時間走行、500万台導入（2020年：燃料電池実用化戦略研究会）
インバータ損失（Si：7%→SiC：2%）→5%が適用効果、省エネ量/CO₂排出削減量
= 50 (kW) × 500 (h/Year) × 0.05 × 500 (万台) = 6.25 (TWh/Year) = 229 (万t-CO₂/Year)

3. パワーエレクトロニクスの応用技術

図表3に示すように、パワーエレクトロニクスの応用先として大規模型および分散型の電力システム、さらに交通・輸送システム、家電機器・オフィス、産業用機器等の分野がある。本章では、電力システムと交通輸送システムを中心にして、現状の主な適用箇所と今後の技術開発ニーズ、さらに将来的に導入が想定される適用箇所等について述べる。

3-1

電力システムにおけるパワーエレクトロニクス利用技術

(1)大規模システム

我が国の電力の基幹系統では、交流送電システムの他に、「北海道-本州」「本州-四国」の直流送電、「50Hz-60Hz」の周波数変換設備が導入されており、これらの設備ではパワー半導体デバイスである

サイリスタ素子が運転電圧に応じて、多数個、直列接続されて運用されている。このため、機器が大型化しており、高性能パワー半導体デバイスを用いた低損失・小型パワーエレクトロニクス機器の実現が求められている。また米国では、送電系統が複雑であることから特定の送電線が送電限界となる可能性を有しており、送電線利用率向上（潮流制御）、系統安定化を目的に、FACTS（Flexible AC

Transmission Systems) という概念が米国電力中央研究所 (EPRI) より提唱されている。これは、交流電力システムの弱点を改善するパワーエレクトロニクス機器を用いた電力制御のことであり、自励式 SVC (Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置) や UPFC (Unified Power Flow Controller) 等が、米国を中心に実用化されている。

図表3 パワーエレクトロニクスの主な適用箇所

分野		現状の主な適用箇所 (今後の主な技術開発ニーズ)	想定される新たな適用箇所
電力システム	大規模	● 直流送電 (低損失化、小型化)	● 系統安定化装置 (FACTS)
	分散型	● 分散型電源用インバータ (低損失化)	● ループコントローラ ● 直流給電システム
交通・輸送システム (運輸部門)		● HEV (小型、軽量化) ● 電気鉄道 (小型、軽量化)	● EV / FCEV
家電機器・オフィス (民生部門)		● 電磁調理器 ● エアコン ● 冷蔵庫 ● パソコン ● 照明	
産業用機器 (産業部門)		● エレベータ ● FA 機器 ● 無停電電源装置	

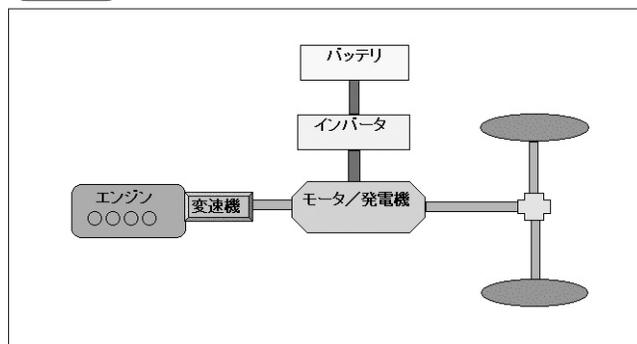
科学技術動向研究センターにて作成

(2)分散型システム

近年、新エネルギーやコージェネレーションシステム等の分散型電源が、需要地近傍 (配電系統) に導入されるケースが増加している。太陽光発電、燃料電池等の分散型電源は、直流出力のため、パワーエレクトロニクス機器であるインバータを介して直流電力を交流電力に変換し電力系統と連系している。分散型電源用インバータの損失は、Si が 6%、新パワー半導体デバイスである SiC が 2% になると試算されている。2010年に、燃料電池 220 万 kW、太陽光発電 482 万 kW、風力発電 300 万 kW³⁾ の新エネルギーの導入が想定されており、また、コージェネレーションシステムも既に 650 万 kW が導入され⁴⁾、ESCO 事業の伸展により今後も大量のシステム導入が見込まれることから、これらの分散型電源が電力系統とインターフェースを形成するパワーエレクトロニクス機器での損失低減が求められている。

また、分散型電源が大量に導入された場合に、その出力変動にともなう電圧変動等の電力品質への影響が懸念されており、系統全体として影響を緩和するための方策が求められている。我が国では、電力中央研究所を中心に、パワー半導体デバイスから構成されたループコントローラと呼ばれる装置を用いて系統電圧の適正化や事故電流の抑制を行うための研究が行

図表4 ハイブリッド自動車 (HEV) の例⁶⁾



われている⁵⁾。

さらに、我が国の電力系統は交流系統を基本としているが、ルータやサーバ等の直流を電源とする機器の増大や太陽光発電、燃料電池等の原理的に直流出力の分散型電源の導入拡大に伴い、建物内 (家庭、オフィス) や需要エリア内で、直流電源を中心とした給電システムを構築しようとする考えもある。直流電圧の変換に不可欠な DC / DC コンバータもパワーエレクトロニクス機器の1つである。

3 - 2

交通・輸送システムにおける パワーエレクトロニクス利用 技術

近年、ハイブリッド自動車や燃料電池自動車をはじめとして、低燃費化、低騒音化、排出ガスの低減を目的に、自動車の電動モータ駆動が脚光を浴びている。ガソリンエンジンと電気モータを組み合わせたハイブリッド自動車 (HEV)

が既に開発販売されており、また、燃料電池自動車 (FCEV) の開発競争も盛んに行われ、リース販売も開始されている。さらに、1990年以降、地球環境問題の高まりや米国カリフォルニア州の ZEV (Zero Emission Vehicle: 無排出ガス車) 規制の施行等により、ほとんどの自動車会社が中断していた電気自動車 (EV) の開発を再スタートした⁶⁾。このように、ガソリンを動力源としてきた自動車が、将来的には、パワーエレクトロニクス機器であるインバータを介してバッテリーに蓄えられた電気エネルギーでモータを駆動し動力を得る傾向が大きくなる可能性がある (図表4 参照)。

さらに、近年の自動車は、車両の安全性や快適性、利便性の追求により、車載電気システムが増加・複雑化している。このため、現状の 14V 電源システムの電源容量の限界を背景に、電源電圧の 42 V 化も検討されている。パワーエレクトロニクスは、自動車電源の 42 V

化に対応した次世代自動車電源システムの要となるものである(注2)。

また、電車では、ブレーキ時のエネルギーを架線側に返還する電力回生ブレーキが広く用いられている。電力回生ブレーキとは、ブレーキをかけた時、モータを発電機として使用し電車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、発生した電力を架線に戻し、他の電車の走行等に利用するシステムのことである。この回生時に、パワーエレクトロニクス機器である

電車用インバータを介して電力が架線側に返還されている。

ハイブリッド自動車や燃料電池自動車の本格的普及、電車の一層の省エネを図るために、インバータに用いるパワー半導体デバイスの小型化、軽量化、低コスト化が求められている。

以上述べたように、パワーエレ

クトロニクスは、我が国の産業・民生・運輸の各分野で、エネルギーインフラを支える基盤技術となっているとともに、ループコントローラを用いた分散型電力供給システムや直流給電システム等の将来的に導入が想定される電力システムにおいても欠かすことのできない技術となっている。

(注2) 14V (42V) は、車両電気システム動作中の回路電圧公称値であり、使用バッテリーは12V (36V)。

4. パワー半導体デバイスの開発動向

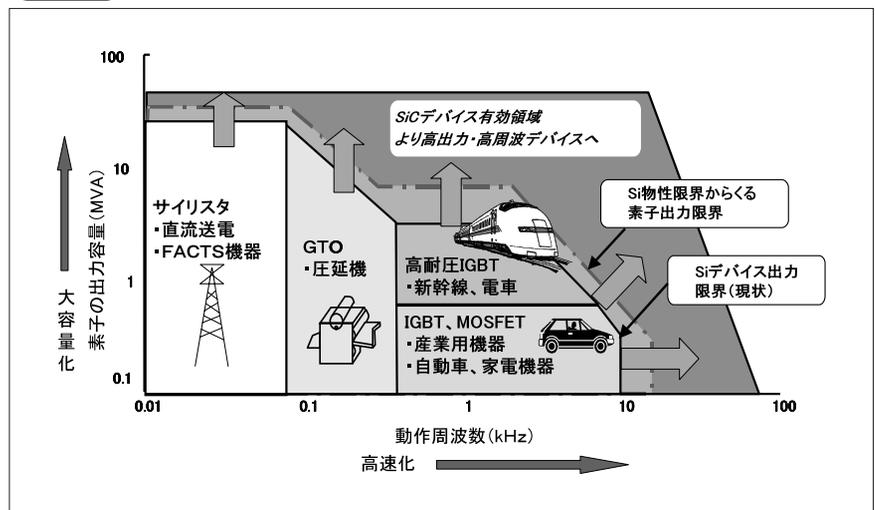
4-1

デバイス開発の変遷

パワー半導体デバイスは、フィルタや冷却装置等から構成されるパワーエレクトロニクス機器において、最も重要な構成要素であり、「オン」と「オフ」の2つの状態を切り替えて使われる。導通損失が少ないほど、また、オン・オフ時の損失が少ない(スイッチング速度が速い)ほど、高効率な電力変換が可能である。

現在の主要なパワー半導体デバイス材料はシリコン(Si)である。パワーエレクトロニクスの発展のきっかけとなったサイリスタが米国のGeneral Electric社により開発・実用化されたのは1956年である⁷⁾。我が国では、1970年頃の電気自動車に関するプロジェクトの成果として、大容量のパワー半導体デバイスの開発に成功し、これにより、欧米に遅れをとっていた我が国のパワー半導体デバイス開発は、世界のトップレベルに躍り出た⁸⁾。その後、1980年代後半にかけて、GTO(Gate Turn-Off Thyristor)、光トリガサイリスタ、MOSFET(Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)、IGBT(Insulated

図表5 パワー半導体デバイスの適用分野



出典：産業技術総合研究所 パワーエレクトロニクス研究センター資料

Gate Bipolar Transistor)等が急速に進歩し、小容量から大容量にいたる様々な電力変換ニーズへの対応が可能になった⁹⁾(図表5参照)。さらに、1990年代から現在までは、LSIの微細加工技術の導入等により高性能化を目指した研究開発が行われてきた。

しかしながら、従来の高性能化手法では、Siの材料限界に近づきつつある。将来的に導入の進展が予測される燃料電池自動車では、インバータの小型・軽量化や冷却系の簡素化による燃費向上が求められている。また、モータ制御においても耐熱性の向上により、モータと一体化したインバータ

の開発が望まれている。このような技術開発ニーズを背景とした「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトでは、SiC、GaN等の新材料を対象にしている。プロジェクトの事後評価報告書¹⁾によると、基盤技術開発として、結晶の大口径および高品質化等の開発が行なわれ、また素子化技術としては、SiC基本素子においてSi素子の1/10以下のオン抵抗、10倍以上の電力密度が実証されたとしている。実用化に向けては、基板の低コスト化、実装技術、周辺技術の開発等の様々な課題を有している。

4 - 2

SiC パワー半導体デバイスの適用効果

SiC 半導体は、バンドギャップが Si 半導体の約 3 倍、絶縁破壊電界が約 10 倍、熱伝導率が約 3 倍と、パワー半導体デバイスとしての性能指数が優れている。素子が開発されれば、高耐圧化、高速動作化、電力変換損失の低減、高温動作化への対応が可能である。例えば、高温動作化を例にとると、高バンドギャップにより 1,500℃ 以上の高い温度まで半導体の性質を維持でき、400℃ 以上の高温動作が期待できる¹⁰⁾。SiC 半導体を用いることによるパワーエレクトロニクス機器の小型化等の性能向上の可能性を以下に示す。

(1)高耐圧化

現在のパワーエレクトロニクス機器は、デバイスの耐圧が、高いところで 6 ~ 8 kV 程度であり、定格直流電圧が 250kV の紀伊水道 HVDC (High Voltage DC) のようにこれ以上の耐圧を必要とす

る場合は、デバイスを直列接続して等価的に高耐圧デバイスを実現している。SiC 半導体の絶縁破壊電界が Si 半導体の約 10 倍であることから、10 倍程度の高耐圧化が期待されている。デバイスが高耐圧化されれば、直列デバイス数を削減することができ、機器の小型化につながるとともに、導通損失やスイッチング損失の低減が可能となることから、低損失化にもつながる。

(2)高速動作化

スイッチングデバイスの高速動作化とは、高周波数化を意味する。絶縁破壊電界が高くなると層の厚さを薄くできることから、デバイスの長さ (キャリア走行長) を短くでき高速動作化が可能となる。また、トランス等の磁気部品を有する場合は、スイッチング周波数に逆比例してパワーエレクトロニクス機器の小型化が可能となる。さらに、高速動作化により制御能力が向上し、入出力電圧・電流波形の改善、高調波の抑制につながり、フィルタ装置の省略や小型化が可能となる。

(3)電力変換損失の低減

デバイスが低損失ということは、パワーエレクトロニクス機器の低損失化に大きな影響を与える。SiC 半導体は、電力変換損失が、理論的に Si 半導体の 100 ~ 300 分の 1 になるといわれている。絶縁破壊電界が高くなると層の厚さを薄くできることなどから、電気抵抗が大幅に低減され、低損失化が期待できる。

(4)高温動作化

デバイスが高温領域でも動作可能ということは、パワーエレクトロニクス機器の冷却設計の自由度が増すことを意味する。従来デバイスでは、熱的な制約からある程度のデバイス面積を必要としていた。また、デバイス冷却を水冷式から空冷式へ簡略化することにより、機器の小型化を図ることが可能となる。例えば、ハイブリッド自動車では、冷却系が放熱器等からなる非常に多くの部品から構成されており、小型化が実現すれば、燃費上昇も期待できる。

5. 我が国の現状

5 - 1

産業界の構造変化

これまでの我が国のパワーエレクトロニクス技術の進展は、重電メーカーを中心とした産業界の貢献によるところが大きい。現在、我が国の重電産業は、日本経済が停滞する中、厳しい経営環境に置かれている。

パワーエレクトロニクスは、自動車、家電機器のような個々の消費者の購買意欲を誘うアメニティ指向の分野においても利用されているものの、主に電力システムのようなエネルギーインフラに利用

されており、社会インフラ型の技術としての意味合いが強い。我が国では近年、電力会社を中心とする国内の投資抑制に伴う受注の減少等を背景にして、電力系統事業に関して、重電メーカーの 2 極化が進行している (株東芝 + 三菱電機 (株) → TMT & D (株)、(株)日立製作所 + 富士電機 (株) + (株)明電舎 → (株)日本 AE パワーシステムズ)。

これまで急速に増大してきた我が国の電力需要に対応するため発展してきた重電産業は、日本国内の電力需要の飽和に伴う新規事業の減少、中国を中心とする開発途上国の電力需要の増大等を背景に、新たな転換期を迎えている。

すなわち、国内においては、事業をいかにして維持するのが課題となっており、追加的コストの発生する新しいパワー半導体デバイス開発には積極的に投資できない状況となっている。また、海外展開についても、世界の価格競争が激化している中で、どのようにして事業拡大を図るかが課題となっている。

5 - 2

大学における人材教育と電気学会の取り組み

ハード指向のパワー半導体産業 (パワーエレクトロニクス) に興

味を抱く学生は、半導体産業（エレクトロニクス）に対して興味を抱く学生よりも少ない。1973年に米国のNewellが発表した「パワー（電力・電気機器）とエレクトロニクス（デバイス、回路）とコントロール（制御）の3つの技術分野が完全に融合したもの」との定義が示すとおり、パワーエレクトロニクスはこれらの技術分野の発展に支えられ進化し、そのカバーする領域は多様化、複雑化している¹¹⁾。

「何をパワーエレクトロニクスの基礎と捉えるか?」「学生に対

して動機付けを行える魅力ある講義とは?」「パワーエレクトロニクスの領域の広さ、重要性をいかにして伝えるか?」等について、教育現場において、議論がなされている。

一方、電気学会では、パワーエレクトロニクス教育方法について実例調査を含めた調査研究を行い、その改善指針を得ることを目的として、「パワーエレクトロニクス教育調査協同研究委員会」(2000. 4～2002. 3)、「IT時代のパワーエレクトロニクス教育調査協同研究委員会」(2002. 10～

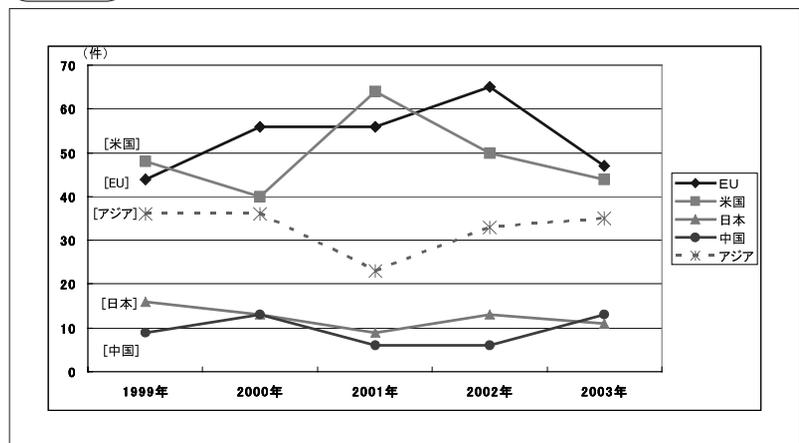
2004. 9)を設置している¹²⁾。パワーエレクトロニクス教育を今後一層魅力あるものにするためにどのような観点が必要かという問題意識のもと、①カリキュラムとシラバスの内容の取捨選択と整理、②学生の興味を喚起するマルチメディアの効果的な活用法、③ハードとソフトの適切なバランス、④シミュレーションの効果的な利用法、⑤国際舞台での活躍を視野に入れての徹底的な訓練、等について議論が行われている。

6. 研究動向

パワーエレクトロニクスに関する国内外の研究動向を把握するために、パワーエレクトロニクスに関する国（地域）別の論文数比較を行った（図表6参照）。Thomson ISI社の論文データベースから、論文のタイトル・概要・キーワードのいずれかに、パワーエレクトロニクスに関するキーワードである「power electronics」「power electronic」「power semiconductor」のいずれかを含んでいるものを抽出した。検索対象期間は、1999年から2003年までの5年間とした。また、論文が2カ国以上の国による共著の場合は、それぞれ1件としてカウントした。

5年間の論文数は、EUが268件とトップで、次いで米国が246件、日本が62件、中国が47件、図表には示していないが、カナダが30件、台湾が22件、オーストラリアが20件、と続いている。論文数から推測すると、パワーエレクトロニクス研究に関して、米国と欧州の2極化が進行しており、それに続いて、我が国と中国がほぼ同レベルで推移している（1999年の中国は香港を含む）。また、日本、中国を含めたアジア諸国を累計すると点線に示すように

図表6 パワーエレクトロニクスに関する論文数比較



Thomson ISI社の論文データベースをもとに科学技術動向研究センターにて作成

なり、米、欧に次ぐ勢力となり得る可能性を示している。

我が国の状況を見ると、重電メーカー、電力会社等の産業界の参画する論文が37件、大学が参画する論文が35件あり、産業界と大学の参画数は、ほぼ同じレベルにある。論文執筆が産業界よりも重視される大学と比較して、産業界の論文数が同レベルにあるということを見ても、パワーエレクトロニクスに対する産業界の貢献が大きいと言える。

次に、パワーエレクトロニクス機器の重要な構成要素であるパワー半導体デバイスの国内外の研究動向を把握するために、上記論文

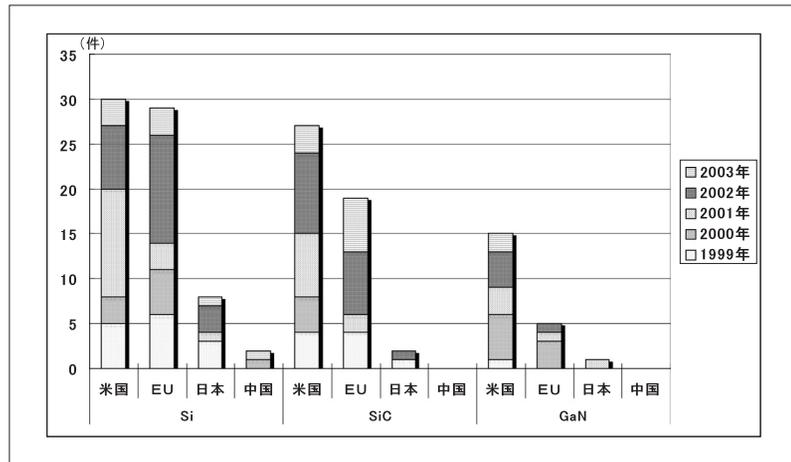
のうち、デバイス材料であるSi(“Si”または“Silicon”)、SiC(“SiC”または“Silicon Carbide”)、GaN(“GaN”または“Gallium Nitride”)をタイトル・概要・キーワードのいずれかに含む論文の件数を図表7に示す。件数は、Si、SiC、GaNのいずれも、米国、EU、日本、中国の順となっており、特に米国では、SiCやGaN等の新パワー半導体デバイスに関する研究が他の国(地域)よりも活発であることが分かる。

また、欧米では、パワーエレクトロニクス分野での大学と産業界との連携が促進されている。

米国では、全米科学財団(NSF)のエンジニアリング研究

センターの1つとして、1998年8月にCPES (Center for Power Electronics Systems) が設立された¹³⁾。5大学からなるコンソーシアムが形成され、各大学は専門的技術領域を有し、統合システムプログラムにおいて強力な学際的アプローチを形成し、80以上の企業と産業協力プログラムにより連携を図っている。また、欧州でも、パワーエレクトロニクスに関する研究、教育、技術移転等を促進することを目的に、ECPE (Engineering Center for Power Electronics) が設立されている¹⁴⁾。

図表7 パワー半導体デバイスの論文数比較



Thomson ISI社の論文データベースをもとに科学技術動向研究センターにて作成

7. おわりに

パワーエレクトロニクスは、エネルギーインフラの基盤技術であるとともに、電力システムや自動車等に用いられる様々な機器の超低損失化・小型・軽量化等のニーズへの対応が可能な技術であり、エネルギー・環境問題を解決する技術として重要である。

我が国では、過去にSiを用いた大容量パワー半導体デバイス開発に成功し、パワーエレクトロニクス技術で世界のトップレベルに躍り出た。現在は、Siの性能を上回ることを目的とした「超低損失電力素子技術開発プロジェクト」が終了し、今後の展開を考慮すべき段階にきている。今後は、材料開発に重点が置かれていたこれまでのプロジェクトに続く実用化を見据えたプロジェクトの企画・検討が必要である。これまでに得られた新材料に関する研究開発成果を実用化に結びつけていくという観点のもと、デバイス開発からシステム応用にいたる一連の研究開発を継続して行う必要がある。

パワーエレクトロニクスのカバーする領域は、電力システム、交通・輸送システム、家電機器等、多様化している。このため、各分野に必要とされる技術開発ニーズ

を踏まえてロードマップを検討し研究開発を推進すべきである。我が国の電力システムでは、近年の分散型電源の導入拡大にともなう電力品質への影響が懸念されていることから、特に、分散型電源大量導入時の電力システムの安定化に資するパワーエレクトロニクス機器の実用化に向けた取り組みを急ぐべきである。

パワーエレクトロニクスはこれまで、重電メーカーを中心とした産業界が中心となって技術開発が進められてきたが、企業単体では、新しいパワー半導体デバイス開発に積極的に投資できない状況にある。また、その企業に人材を供給する大学においても人材教育の面で課題を有している。さらに、論文数から推測すると、欧米では、我が国よりもパワーエレクトロニクスに関する研究が活発であり、産学連携も着々と進行している。また、今後電力需要の増大が予想され、本技術の波及効果が大きいと考えられる中国もパワーエレクトロニクスに関する論文数比較で我が国と既に同じレベルにある。実用化を見据えたプロジェクトは、パワーエレクトロニクス技術の次世代を担う研究者・技術者

の養成を産学官が一体となって行うという視点のもとで推進されるべきである。

謝辞

本稿は、科学技術政策研究所において、2003年11月6日に行われた、電気学会会長・武蔵工業大学教授・深尾正氏による講演会「パワーエレクトロニクスとエネルギーマネジメント」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。東京工業大学原子炉工学研究所・嶋田隆一教授、東京工業大学大学院理工学研究科・大橋弘通教授、産業技術総合研究所パワーエレクトロニクス研究センター・荒井和雄センター長、産業技術総合研究所電力エネルギー研究部門・石井格総括研究員にも各種資料のご提供あるいは貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所、超低損失電力素子技術開発事後評価報告書、2003年8月
- 2) 総合エネルギー統計、資源エネルギー庁、平成13年度版

- 3) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会、今後の新エネルギー対策のあり方について、2001年6月
- 4) 日本コージェネレーションセンターホームページ
<http://www.cgc-japan.com/japanese/info/info01.html>
- 5) 例えば、小林、七原、石井、21世紀の電力系統—需要地システムの構築—、OHM、2002年3月
- 6) ㈱日本自動車研究所ホームページ：
<http://www.jari.or.jp/ja/denki/denki.html>
- 7) 赤木泰文、21世紀のパワーエレクトロニクス技術の展望と期待、電気学会誌、121巻1号、2001年
- 8) 高電力用固体デバイスに関する研究開発専門委員会報告書、日本学術振興会、1999年3月
- 9) 大橋弘通、最新のパワーデバイスの動向、電気学会誌、122巻3号、2002年
- 10) 菅原良孝、次世代半導体 SiC パワーデバイスの開発動向、電気評論、2003年4月
- 11) 植田、大口、松井、新世紀におけるパワーエレクトロニクス教育を考える、電気学会論文誌D、122巻6号、2002年
- 12) 松井、大口、パワーエレクトロニクス教育の現状と課題、OHM、2003年4月
- 13) CPES ホームページ：
<http://www.cpes.vt.edu/>
- 14) ECPE ホームページ：
<http://www.ecpe.org/en/index.html>



- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2004年2月号》

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