

科学技術動向

2002
11

No.20

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①食品の調理過程でアクリルアミドが生成する機構が解明された
- ②国家的なバイオリソース戦略の必要性

▶ 情報通信分野

- ①低消費電力 LSI 設計の研究動向

▶ 環境分野

- ①土壌から有害なヒ素を効果的に吸収する植物が開発される
- ②NASA を中心とする米国研究グループによる地球温暖化評価研究

▶ ナノテク・材料分野

- ①ナノ構造を利用して透明絶縁体セラミックスを半導体に変えることに成功

▶ 製造技術分野

- ①シリコン基板上に直接微細なパターンを作製する安価で高速な新手法を開発

▶ 社会基盤分野

- ①房総半島付近で「ゆっくり地震」が繰り返し発生

特集 1 情報通信分野におけるアクセシビリティに関する研究開発と標準化の動向

— 誰にでも使える情報通信機器・サービスを目指して —

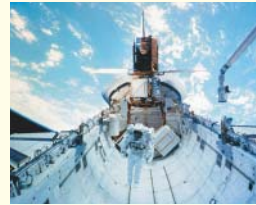
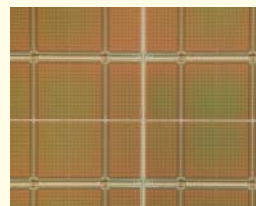
特集 2 単電子エレクトロニクス研究の動向

— 半導体集積回路の限界は突破できるか —

特集 3 水循環を基本とした総合水管理に向けた研究動向

特集 4 エアロゾルの地球温暖化への影響の研究

— 残された課題への取り組み —



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

①食品の調理過程でアクリルアミドが生成する機構が解明された

動物実験で発がん性が指摘されているアクリルアミドという化合物が、高温で調理されたでん粉を含む食品中から検出されたことが今年4月に発表されたが、その後、WHOとFAOの専門家会議により「調理過程でアクリルアミドが生成するメカニズムの解明」等が勧告された。さらに、英国レディング大学とスイス・ネスレ研究センターは、それぞれ、アミノ酸と糖類から高温下でアクリルアミドが生成することを突き止めている。今後、ヒトの発がん性に関する疫学研究などを早急に進めることが強く期待される。

②国家的なバイオリソース戦略の必要性

日本のバイオリソース計画は、直ちに有用になると期待される生物資源・遺伝子資源を対象としており、研究上あるいは産業上で将来的に役に立つ可能性のある生物資源・遺伝子資源にはあまり目を向けていないように思われる。一方、発展途上国では、将来的に有用な自国の生物資源を欧米の医薬品特許戦略から守るために、生物種の国外持ち出し禁止等の国家的な施策を設けている。日本のバイオリソースの問題点は、生物資源・遺伝子資源の維持・保存・保管を、多くの場合、各研究者に任せている事である。別々の施設に保管されているこうした遺伝子資源を体系的に整備し、活用するシステムを作る取り組みを次のバイオリソース計画に盛り込むことを是非提案したい。

情報通信分野

6

①低消費電力LSI設計の研究動向

半導体集積度の向上と高速化はLSIの消費電力増加と熱問題をもたらすため、低消費電力化はLSI設計における最重要課題である。現在、研究対象はデバイスのレベルから、アーキテクチャ（基本的設計）のレベルといった上位概念に移りつつある。最近、開催された国際会議では、ソフトウェアを解析してアクセスされないメモリを不活性状態にして消費電力を抑えるといった研究が目立った。こうしたソフトウェアとの協調で低電力化を目指す研究の流れは注目すべきであろう。

環境分野

7

①土壌から有害なヒ素を効果的に吸収する植物が開発される

現在、重金属等の有害物質による土壌汚染が課題となっている。ジョージア大のRichard Meagherらの研究チームは土壌からヒ素分を効率的に葉に吸収し蓄積する遺伝子組み換え植物を作ったと発表した。この植物は、シロイヌナズナに2つの大腸菌遺伝子を挿入したもので、原生のシロイヌナズナなどに比べ4~17倍早く成長し、単位重量当たり2~3倍の量のヒ素を蓄積する。こうした植物による土壌汚染処理は、物理・化学的処理など従来の浄化技術に比べ環境負荷が低く、安価であると考えられており、今後の進展が注目される。

②NASAを中心とする米国研究グループによる地球温暖化評価研究

本年9月、NASA（米国航空宇宙局）は、19の研究機関、大学、企業が共同で実施してきた地球温暖化予測研究の結果を発表した。今後50年間の温度上昇を、(1)温室効果ガス排出量が現在のペースで増加しつづけるシナリオで1~2度、(2)大気汚染が改善し、さらに化石資源起源の二酸化炭素排出量が安定化するシナリオで0.75度以下、と評価している。これはIPCC第3次評価報告書で示された予測値の範囲内であり、米国の地球温暖化に対する現象的理解が、日本や欧州諸国と一致していることを改めて裏付けたものと言えよう。

ナノテク・材料分野

8

① ナノ構造を利用して透明絶縁体セラミックスを半導体に変えることに成功

東京工業大学応用セラミックス研究所の細野秀雄教授らのグループは、透明で、絶縁体であるセラミックスを半導体に変えることに成功した（Nature Vol.419, 3 Oct. 2002 pp.462-465）。透明酸化物の結晶構造に着目し、ナノメートルサイズの籠（ケージ）に光照射により電子をトラップし、透明性を維持したまま、半永久的に電気伝導性を持つ半導体に変換させた。物質のナノ構造に注目したこうしたアプローチは、従来から知られている材料にも新しい機能を発現させる可能性を示唆するものであり、今後の展開が期待される。

製造技術分野

8

① シリコン基板上に直接微細なパターンを作製する安価で高速な新手法を開発

Princeton大学のStephen Y. Chouらは、シリコン基盤に直接微細なパターンを作製する新しいインプリント法を開発した。この方法は、従来のインプリント法とは異なり、シリコン基板に直接作製するため、「転写パターンが不完全である、パターン作製後に必要なエッチングなどの処理によってパターンニングの精度が落ちるといった問題」が回避できると見られる。また、インプリント法の「短時間で微細なパターンを安価かつ大量生産可能」といった特長に加え、「材料選択の幅が広い」といった新たな長所を備えている。

社会基盤分野

9

① 房総半島付近で「ゆっくり地震」が繰り返し発生

GPSを用いた地殻変動連続観測により、房総半島付近で1～2cmの地殻変動が観測された。これは、プレートの境界において、「ゆっくり地震」（ゆっくりした非地震性すべり）が発生したためと考えられる。この地域は以前にも同様の地殻変動が発生したことが知られている。今回も前回もマグニチュード3.8以下の地震活動が活発化しており、ゆっくり地震との明確な対応が認められたのはきわめて珍しい。こうしたデータは、プレート境界における応力蓄積プロセス（地震発生準備過程）を解明に役立つと期待される。

特集—1**情報通信分野におけるアクセシビリティに関する研究開発と標準化の動向**

10

— 誰にでも使える情報通信機器・サービスを目指して —

我々は、様々な情報通信機器や情報通信サービスに囲まれて、日常生活を送っている。しかし、現時点において、これらの機器やサービスはすべての利用者にとって必ずしも利用しやすいものではない。それらを改善していくことを、「アクセシビリティを向上させる」と言う。高度情報化社会を実現していくには、アクセシビリティの向上は避けては通れない課題である。

主に入出力に関するアクセシビリティを向上するために、専用の支援機器やソフトウェアが開発されており、またOSやソフトウェアレベルにおいて、アクセシビリティ向上を支援する機能が備えられるようになっている。

すべての情報通信機器、サービスにおいて、アクセシビリティに関する機能の提供を標準化しようという動きが各国で始まっている。日本では経済産業省、総務省を中心として、個別に出されていたガイドラインをまとめる形でJIS化への取り組みが行われている。これは、ISOへの提案も視野に入れた動きである。欧州も同様に標準化を進めつつある。一方、米国では政府が調達する情報通信機器、サービスに対してアクセシビリティ確保を義

務づける法律が制定され、業界での対応が始まっている。また、これとは別に利用者個人のニーズに合わせた入出力支援機器と、ATMなどの機器とのインターフェースを標準化しようと言う新しい動き（AIAP）も始まっている。

政府調達の要件となったために民間を含めて研究開発が活発化し、またAIAPといった新しいアイデアが誕生しつつある米国に比べて、わが国の状況は遅れている。しかし、JISをはじめとする標準化によってアクセシビリティの高い機器・サービスが普及するための基礎が固まりつつある。その最初の普及策として最も有効な手段の一つが、政府が調達に関する考慮事項としてアクセシビリティに関するJISを用いることである。その市場が生まれれば、民間市場でもアクセシビリティに配慮して設計した機器・サービスが次第に普及していくものと考えられる。

特集—2

単電子エレクトロニクス研究の動向

— 18

— 半導体集積回路の限界は突破できるか —

シリコンを基盤とした半導体デバイスとそれを用いたコンピュータは急速な発展を遂げてきた。しかし微細化によるデバイスの動作限界と集積度の向上に伴う発熱の問題から限界が近いともいわれている。

このような状況の下、従来の集積回路と比較して、一層の微細化の可能性があり、かつ、消費電力が1万分の1から10万分の1程度と少なく済むことから、発熱により集積回路が機能しなくなるという問題を回避できる可能性があるものとして、単一電子で動作するデバイス・システムにより集積回路を実現するという研究が注目されている。これらのデバイスの動作原理は、ナノメートルサイズの物質において現れる「クーロンブロッケード」という現象に基づいている。

既に室温で動作する単電子トランジスタが試作されているが、従来のトランジスタをすべてこれで置き換えて集積化していくことには技術的な困難が多い。このため、従来のトランジスタと組み合わせて集積化し利用する研究や、カーボンナノチューブのような新材料を導入することによりこの問題を解決する研究が進められている。さらに集積化を進める長期的な研究として、論理回路のアーキテクチャ（基本的設計）を単電子トランジスタに適した新しいものに変えることにより限界を克服する研究や、電気的な配線を使わない新しい情報処理方式、すなわち単電子を使った新しい構造を用いて集積化限界を克服していくような研究などが進展している。

我が国は、米国と共にこれらの研究で世界をリードするポジションにあり、「単電子エレクトロニクスの実現」のような新原理デバイス・システムの構築に取り組む研究に対しては、長期的な視点から、今後もさらに継続的な研究資源の投入が必要であろう。

特集—3

水循環を基本とした 総合水管理に向けた研究動向

— 24

我が国の河川流域、とりわけ都市河川の流域においては、社会経済の発展による人間活動が治水、利水、環境等に様々な影響を与えている。

高度に都市化した流域では緑地や農地、裸地など従来あった浸透機能などが極端に減少し、中小規模での洪水や水質の悪化などの環境負荷により水循環系に弊害が生じている。

この様な水をめぐる諸問題は、国内を問わず全地球的規模で同様に発生している。本年8月に開催されたヨハネスブルグ環境サミットにおいても広く水問題が議論の対象にな

り、水問題に関する多くの事例が報告された。

我が国においても、第2期科学技術基本計画の分野別推進戦略において「流域水循環系健全化・総合水管理」構築等の研究開発が重点領域として位置づけられ鋭意推進されている。

国内の都市河川を中心とした総合水管理の検討においては、水循環を基本に治水、利水、環境保全の3つの要素をいかにバランスをとり、維持継続するかが大きなポイントとなるが、この実現には環境保全の適用技術はもとより、環境指標や評価基準設定などの環境評価手法の確立が重要な要素となる。

また、施策等を進める上では、水循環変動を的確に捉えるための解析モデルの構築が必要不可欠である。地球規模でのマクロな水需給モデルの構築等は、今後の気候変動が懸念される状況下では大きなツールとなるものである。

さらには、複雑な地形や造山運動などによる土砂移動が激しいアジア地域での水循環変動や、水資源評価に関する研究開発を促進することは、アジア地域の持続的発展を支えるためにも重要な視点である。

特集—4

エアロゾルの地球温暖化への影響の研究

— 残された課題への取り組み —

31

二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化への影響は、これまでの研究で科学的知見が集積され、気候変動に関する国際連合枠組み条約締結国会議（COP）の協議を通じて具体的対策が講じられるようになった。一方、直径0.001～10 μm程度の微小粒子であるエアロゾルについては、地球温暖化現象に関わる物質である可能性が指摘されているものの、影響の割合を定量的に推定するまでに至っていない。

地球温暖化に関するエアロゾルの研究は、温暖化の原因となる物質の観測・モニタリング、気候モデルを使ったメカニズムの解明、大規模シミュレーションによる将来予測という3研究領域に区分される。3研究領域には、それぞれの研究領域での成果が他の研究領域の進展に貢献するという相互関係があるが、それらの連携はまだ構築の途上にある。

観測・モニタリング研究では、レーザーによる粒子数分布計測などの技術が確立しているものの、複雑な組成のエアロゾルの化学的性質は解明されていない。観測・モニタリングとメカニズム研究の連携においては、複数の研究グループが独自に得た観測・モニタリング結果をそれぞれのメカニズム研究に活用している。将来予測研究においては、地球シミュレーターなどを用いたシミュレーションのために多量の初期値データを準備する必要があるが、全球的かつ極く短期間内に観測されたデータは未整備である。

今後のエアロゾル研究の推進に当たっては、モデルの精度向上に結びつく観測データの整備、2012年で終了する第1約束期間以降の温暖化対策に向けて広範な研究領域で活躍できる研究者の確保、IPCC等国际的な場に参画する研究者の増加及び彼らを媒介とした国内研究成果の海外への積極的発信、といった課題を解決する必要がある。

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（11月号は2002年10月5日より2002年11月1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食品の調理過程でアクリルアミドが生成する機構が解明された

今年4月にスウェーデン国立食品局は、動物実験で発がん性が指摘されているアクリルアミドという化合物が、高温で調理されたでん粉を含む食品中から検出されたと発表した。報告されたアクリルアミドの量は、ポテトチップ1キログラム中に1,200マイクログラム、ポテトフライ1キログラム中に450マイクログラム等である。毎日40グラムのポテトチップを食べ続けたときの発がんリスクは1万分の7と推計されており、これは、安全域とされる100万分の1から10万分の1と比較して、100倍から1,000倍近く高い。

世界保健機構（WHO）と国連食糧農業機構（FAO）が招集した専門家会議はこの問題を重視し、(1)調理過程でアクリルアミドが生成するメカニズムの解明、(2)ヒトの発がん性に関する疫学研究、(3)

他の食品中のアクリルアミドに関する研究、(4)欧州や北米以外の食物中のアクリルアミドに関する研究、を進めるようにとの勧告を出している。

Natureの10月3日号によると、英国レディング大学のMottramらの研究グループと、スイス・ネスレ研究センターのStedlerらの研究グループは、それぞれ独立に行った研究により、アミノ酸と糖類が高温下でメイラード反応^①によって糖アミノ化合物を生成し、さらに熱によって糖アミノ化合物からアクリルアミドが生成することを突き止めた（Nature 419, 448-451 (2002)）。Mottramらによれば各種アミノ酸の中でアスパラギン、メチオニン、グルタミン、アスパラギン酸が糖類の存在下高温条件でアクリルアミドを生成するが、グルタミン、アスパラギン酸からの生成は僅かであり、その他のアミノ酸からは全く生成しないという。また、反応は溶媒のある条件で起こりやすく、焼いたりトーストを作ったりするような乾燥

した条件では生成し難いという結果を得ている。

ジャガイモ、小麦粉、ライ麦には比較的多くの遊離したアスパラギンが含まれているので、ポテトチップ、フライドポテト、クラッカー（特にライ麦粉を含むもの）等に高濃度のアクリルアミドが含まれている理由が今回の研究結果から説明できる。

今後、上記(2)~(4)に示した、ヒトの発がん性に関する疫学研究などを早急に進めることが強く期待される。

②国家的なバイオリソース戦略の必要性

現在の日本のバイオリソース計画は、直ぐに有用になると期待される遺伝子資源を対象としているように思われる。しかしバイオリソースの有効利用という点では、研究上あるいは産業上で将来的に役に立つ可能性のある遺伝子資源をも対象とすべきである。このことは国内資源の保護の観点でも必要であり、これにより国内のバイオリソースの有用性が飛躍的に増大すると予想される。

最近、中国やマレーシアなどの発展途上国は、自国に生育する野生動植物の遺伝子資源としての価

用語説明

①メイラード反応

アミノ酸などのアミノ基と、糖などのアルデヒド基が反応して、褐色色素を生成する反応。

値に注目し、外国へ生きた状態で持ち出すことを制限する施策を打ち出している。実際、現地メディアや国際ニュース誌等でもよく報道されているように、こうした国々で伝統的医薬品の原材料として用いられてきた野生生物から、欧米の大手製薬メーカーが医薬品を開発し、特許料で利益を生むケースが多々ある。この場合、生物資源の供与国となった国には特許料は支払われず、恩恵を受けることがない。

翻って日本の場合を考えてみる

と、発展途上国の施策のような自国の生物資源・遺伝子資源の保護はおろか、保管施設の体系的な整備すらなされていない。多くの場合、生物資源・遺伝子資源の維持・保存・保管は、各研究者に任されている。例えば植物は、複数の国立の研究機関や大学の植物園等で自国産を中心に多種類のものが正確に種の同定をされた上で維持・保管されている。これに対して、遺伝子資源に関しては、海外学術調査の際に、正式な研究協力関係のある国（ネパールなど）か

らDNAサンプルを日本に持ち帰ってくるケースが多々あり、これらの保管は研究者の所属の研究室等で行っているのが現状である。

こうした遺伝子資源を体系的に整備し、活用するシステムを作ることで、科学技術研究投資はさらに有効に機能するものと思われる。そうした取り組みを、次のバイオリソース計画に盛り込むことを是非提案したい。

（岡崎国立共同研究機構 基礎生物学研究所 塚谷 裕一氏）

情報通信分野

①低消費電力LSI設計の研究動向

微細加工技術の進歩による半導体集積度の向上と、トランジスタの高速化により、LSIの単位面積当たりの消費電力は増加していき、現在の傾向のままでは2020年頃にはパソコン用CPUの発熱密度は太陽の表面並になるといえる。そのため、低消費電力化はLSIシステムの最重要課題である。低消費電力LSIの研究動向に関して、2つの国際会議、ISPLED (International Symposium on Low Power Electronics and Design)、COLP (Compiler and Operating Systems for Low Power) についての報告があったので紹介する。

ISPLEDの主なトピックは、近年のVLSIシステムで電力消費の多いメモリの低電力化と、特にマイクロプロセッサで電力消費の多い命令発行機構の低電力化であった。

半導体加工技術の微細化に伴い、トランジスタの待機時（オフになっている時間）におけるリーク電流増大が問題となっている。

特に待機が多いメモリでは影響が大きい。そこで、メモリの待機時には電源電圧を落とすなど不活性化してリーク電流を減少し、実際にアクセスされる場所だけを活性化する研究が多く発表されていた。そのために、次のアクセスを予測するハードウェア機構を備える研究が行われている。また、待機時にトランジスタの特性を変化させ、リーク電流を減少する半導体技術を活用するものもあった。高速のマイクロプロセッサでは計算時間よりもメモリとのデータのやりとりが速度上のボトルネックになることが多い。そこで、プログラムの先読みをして、予想される命令やデータをあらかじめキャッシュメモリに取り込むことが行われる。そのため、実際には実行されないのに命令発行部には供給される命令が多いことに着目し、アーキテクチャ上で命令発行部に供給する命令数をあらかじめ絞り込む手法も注目されていた。

COLPでも、メモリシステムの低消費電力化が注目されていた。コンパイラがプログラムを解析することによりメモリアクセスを予

測し、実際にアクセスされる部分だけを活性化し、メモリシステムにおける無駄な電力消費を抑える研究の発表が多かった。また、LSI全体の設計では、OSのタスクスケジューリングを工夫することで、そこそこの速度を出せるように与えられたタスクの締切り（デッドライン）を守りつつ、総消費電力を抑える研究が多かった。

また、Texas Instruments社の実際の商用DSP (Digital Signal Processor) における電力消費を、TI社提供の評価ツールを用いて詳細に報告した米国ライス大学の発表は、かなり詳細かつ現実的なものであり、関心を集めていた。

低消費電力化の研究は、研究対象がデバイスレベルからアーキテクチャレベルへと次第に設計抽象度の上位レベルへ移動してきていた。最近では、ハードウェアレベルだけでなく、コンパイラやOSといったソフトウェアとの協調で低電力化を目指す研究が増えてきており、この流れは注目すべきであろう。

（東京大学先端科学技術研究センター 中村 宏氏）

環境分野

① 土壌から有害なヒ素を効果的に吸収する植物が開発される

土壌が重金属等の有害物質により汚染されると、有害物質の溶出により汚染された地下水の飲用等によって、人の健康に影響を及ぼす恐れがある。近年、土地再開発、売却等に伴う土壌調査等でその汚染が判明する事例が多発しており、この問題に対する関心が高まるとともに、対策が喫緊の課題となっている。そこで、わが国は土壌汚染対策法を公布(2002年5月)し、現在その施行にむけた取り組みを行っている。

植物の環境汚染物質を蓄積・分解する性質を利用したファイトレメディエーションは、物理・化学的処理など従来の浄化技術に比べて環境負荷が低いこと、安価に低濃度・広範囲の土壌汚染浄化ができることから、近年注目されている。

こうした状況の中、ジョージア大学のRichard Meagherらの研究チームは、ヒ素で汚染された土壌からヒ素分を効率的に葉に吸収し、蓄積する遺伝子組み換え植物を作ったとNature Biotechnology誌(Vol.20, No.11 (2002))に発表した。今回、同研究チームが遺伝子組み換えにより作成したシロイヌナズナは、原生のシロイヌナズナに2つの大腸菌遺伝子を挿入したもので、原生のシロイヌナズナもしくはどちらか一方の遺伝子を挿入したものと比較して4~17倍早く成長し、単位重量当たり2~3倍の量のヒ素を蓄積する。

インドやバングラディシユの西ベンガル周辺で、地下水のヒ素汚染が世界で最も大きな規模で発生していることが明らかになってか

ら久しい。しかしながら、その実態の把握と飲料水確保の方策を立てることは急務であるにも関わらず、遅々として進んでいない。また、わが国では、広範囲にわたり微量に存在する有害な内分泌攪乱化学物質(いわゆる環境ホルモン)によって引き起こされている環境汚染の対策が求められている。このような環境ホルモンに代表される広範囲にわたる汚染の処理は、物理・化学的処理など従来技術では対応が困難な分野である。本研究の手法は多種多様な植物にも応用できるとされ、こうした課題の解決策として期待できる。しかしながら、現在、遺伝子組み換え微生物に対する安全性に関連する研究成果は少なく、今後十分な検証が必要である。こうした研究も並行して進めつつ、パイロットスケールでの実証例を積み重ね、信頼性を向上させていくといった研究開発の着実な進展が期待される。

② NASA を中心とする米国研究グループによる地球温暖化評価研究

今日、地球温暖化問題に対する米国の政策に注目が集まっている。昨年、米国は京都議定書の枠組みからの離脱を宣言し、地球温暖化問題への対応に関して国際的に孤立している状況にある。こうした中、9月に米国国家航空宇宙局(NASA)は同局をはじめとする19の研究機関や大学、企業が共同で実施してきた地球温暖化予測研究の結果を発表した。

本研究では地球気候モデルGISS SI2000を用い、過去50年間の気温データの再現を試み、計算値と実測値の良好な一致を確認した。その上で、今後50年間の温

度上昇を、(1)温室効果ガスの排出削減がなされず排出量が現在のペースで増加しつづけるシナリオ(business-as-usual scenario)、(2)大気汚染が改善し、さらに化石資源起源の二酸化炭素排出量が安定化するシナリオ(alternative scenario)について予測評価した。その結果、前者のシナリオでは1~2度の上昇、後者のシナリオでは0.75度以下の上昇と評価された。

今回の結果は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が昨年公表した第3次評価報告書で発表された2050年時点での予測値(~0.7~2.7度の上昇)と整合している。また、後者のシナリオを達成することは容易ではなく、エネルギー効率率の向上、再生可能エネルギーや二酸化炭素の回収・貯留技術の導入促進、さらには、原子力発電の利用促進等といったいくつかの施策を組み合わせることが必要と述べられている。この点も日本や欧州諸国の考え方と基本的に一致している。

現在、京都議定書は米国抜きで発効される見通しとなっている。このような状況の中で発表された本研究は、結果こそ穏当なものであるものの、内外の注目を集めよう。今回の結果は米国の地球温暖化に対する現象的理解が、日本や欧州諸国と一致していることを改めて裏付けたものと言えよう。

一方、対策面に目を向けると、米国の基本的スタンスは経済成長なくして地球温暖化防止なしということであり、肝心の地球温暖化防止対策の具体像が不透明である。最大の温室効果ガス排出国である米国の取り組みは、他の諸国の取り組みに大きな影響を及ぼすことは間違いない。今後の米国の環境・エネルギー政策の動向が注目される。

ナノテク・材料分野

① ナノ構造を利用して透明絶縁体セラミックスを半導体に変えることに成功

科学技術振興事業団の創造科学技術推進事業「細野透明電子活性プロジェクト」(総括責任者:細野秀雄 東京工業大学 応用セラミックス研究所教授)の林克郎研究員らは、透明で絶縁体であるセラミックスを半導体に変えることに成功した(Nature Vol.419, 3 Oct. 2002 pp.462-465)。

透明な半導体は、液晶ディスプレイ、発光ダイオードや太陽電池などの透明電極材料として広く使われており、その需要は増加傾向にある。従来、透明で半導体の性質を示す酸化物は、ITO(インジウム・スズ酸化物)に代表される様に、遷移金属や重金属イオンの

希少資源から成るものに限られており、酸化カルシウム(生石灰)や酸化アルミニウム(アルミナ)などの典型的なセラミックス成分のみから構成される物質は、電気絶縁体であり、半導体にはならないと考えられてきた。

本研究では、セメントの原料にも使われている透明酸化物 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7)のナノ構造に着目し、電気伝導性を与え半導体化に成功した。典型元素のみから構成される酸化物では世界で初めて電子伝導性を示し、セラミックスの新たな可能性を見出した。

C12A7の結晶構造にはナノメートルサイズの籠(ケージ)がある。このケージ中では通常では不安定なマイナスイオンが高濃度に保持される性質がある。この性質を利用して、水素を含む雰囲気での熱処理により水素マイナスイオンをケージ中に導入した。これに紫外

線を照射すると、水素マイナスイオンから電子が放出され、放出された電子はケージ中にトラップ(捕捉)される。ケージ中にトラップされた電子は、動きやすい性質を持っているので、絶縁体だった同材料が半永久的に電気伝導性を持つ半導体に変換された。この物質は半導体状態に変化しても透明性を維持したままであった。

現状での電気伝導度はITOには及ばず、半導体としては未だn型しか確認されていないが、物質のナノ構造に注目して光照射によって電子を生成させキャリアをつくるというアプローチは材料に新しい機能を付与する可能性を拓く新機能探索分野であり、今後の改良研究によって透明な電気配線、電子回路、薄膜ディスプレイなどへの応用が期待される。

製造技術分野

① シリコン基板上に直接微細なパターンを作製する安価で高速な新手法を開発

Princeton大学のStephen Y. Chouらは、シリコン基板表面に直接微細なパターンを作製する新しいインプリント法を開発したとNature(vol.417, pp. 835-837, 2002年6月20日号)に報告した。

基板上に微細なパターンを作製する場合、通常、フォトリソグラフィ(加工する材料上に感光性樹脂皮膜を形成し、これを光や電子線でパターンに感光し、現像して樹脂パターンを作り、これをマス

クとして加工材料をエッチングしてパターンにする方法)が採用されている。これに対し、インプリント法は、「先ず凹凸のパターンを有する鋳型を作製しておき、その鋳型を感光性樹脂皮膜の上に押しつけてパターンを転写する」手法をいい、フォトリソグラフィに比べて、安価で高速である点が注目されている。しかしながら、従来のインプリント法は感光性樹脂皮膜の塗布および除去の必要があるために、転写パターンが不完全である、パターンニングの精度が落ちるという問題を抱えていた。

今回、Chouらが開発した新インプリント法では、まず電子線描画によって10 nm程度の石英鋳型

を作製し、この鋳型をシリコン表面に押し付け、透明な鋳型の上から308 nmのレーザーパルス照射することでシリコンの表面を溶解し、鋳型のパターンを転写するというものである。Chouらの実験では、幅140 nm、高さ110 nm、長さ8~17 μmの細線を作製し、その細線パターンに沿って作製した幅10 nm、深さ15 nmの溝の形状も鋳型からの転写に成功、このインプリントに必要な時間は250 nsであったとしている。この方法では、直接シリコン基板にパターンを作製するため、感光性樹脂皮膜の塗布および除去の必要が無くなり、パターン作製時間の短縮、パターンニング精度が落ちない

などのメリットがある。

フォトリソグラフィ技術を用いて10 nmのパターンを作製するには電子線描画を行う必要があるが、シリコンウェーハ1枚ずつに電子線描画をしては時間がかかりすぎて大量生産には向かな

い。しかし新インプリント法では、短時間のうちに8インチウェーハ全体に微細なパターンを作製できるため、微細パターンの大量生産に有望であると考えられている。また、新インプリント法ではレーザー波長を変化させることで、結晶

性シリコンだけでなく、アモルファスシリコン、ゲルマニウム、III-V族化合物半導体、絶縁体などへのパターンの転写が可能であるなど、材料選択の幅が広い手法であることも特徴的である。

社会基盤分野

①房総半島付近で「ゆっくり地震」が繰り返し発生

国土地理院は、GPSを用いた地殻変動連続観測により、本年10月前半に房総半島東部が南東側に向けて1~2cm移動するという地殻変動を観測した。こうした現象の原因は、陸側のプレートと、この下へ潜り込んだフィリピン海プレートとの境界において、「ゆっくりした非地震性すべり」（ゆっ

くり地震）が発生したためと考えられる。今回のすべり量は最大で10cmと見られ、これにより、モーメントマグニチュードにして6.5程度の歪みエネルギーが解放されたと推定される。

この地域では1996年5月中旬にも同様の地殻変動が発生したことが知られている。気象庁の地震観測資料によれば、これら2回の地殻変動が発生した期間のいずれもマグニチュード3.8以下の地震活動が活発化した。

非地震性すべりは、現在、東海

地方西部においては進行中のものなど、これまでもいくつかの観測例がある。しかし、今回のように同じ場所で2度も観測され、しかも地震活動とはっきりした対応が認められたのはきわめて珍しいケースである。

今回得られたデータは、プレート境界における応力蓄積プロセス（地震発生準備過程）を解明する上で大いに役立つものと期待される。（国土交通省国土地理院 熊木 洋太氏）



特集①

情報通信分野におけるアクセシビリティに関する研究開発と標準化の動向

—誰にでも使える情報通信機器・サービスを目指して—

客員研究官 山田 肇*
情報通信ユニット 山崎 哲也



1. はじめに

我々は、様々な情報通信機器や情報通信サービスに囲まれて、日常生活を送っている。パソコンやPDA、インターネットに接続できる携帯電話をはじめ、金融機関のATM、駅の券売機や観光案内のキオスク端末、双方向性をもつデジタルBSテレビなどもその一部である。今後社会の情報化が進むにつれて、日々の生活がこれらの機器やサービスに依存する程度は増加して行くであろう。

しかし、現時点において、これらの機器やサービスはすべての利用者にとって必ずしも利用しやすいものではない。たとえば、キーボードとマウスというパソコンの標準的入力方法は、肢体障害者にとって使いやすいものとはいえない。また、視覚障害者にとって画像を多用したウェブページを利用することは困難であろう。それら

を改善していくことを、専門的には「アクセシビリティを向上させる」と言う。アクセシビリティとは、機器やサービスを利用者が利用するときの使いやすさ・わかりやすさのことである。「情報利用のバリアフリー化」や「情報へのユニバーサル・アクセス」なども類似の概念である。

アクセシビリティに問題を抱える利用者としては、高齢者や障害者が典型的である。しかし、パソコンをはじめとする情報通信機器が操作しづらいのは、これらの人々に限られるわけではない。アクセシビリティを向上することは、より多くの利用者にインパクトを与える。それによって、情報通信機器・サービスは、一層日常生活の中に入りこむようになるだろう。高度情報化社会を実現していくには、アクセシビリティの向

上は避けては通れない課題である。本稿では、情報通信機器・サービスのアクセシビリティに的を絞って、研究開発や標準化の動向を紹介する。

なお、この課題に関連して、情報の作り方そのものから研究するという分野がある。たとえばウェブ画面をどのように構成すれば理解がしやすいかといった研究や、多くの情報の中から必要な情報を組み合わせ、加工して利用者のニーズに合わせて提供するという研究である。前者は人間が情報を理解する過程に関する研究であり、後者は機械に情報の意味を理解させる研究といえる。これらの研究の多くはまだ基礎段階にあり、これから発展させていかなければならないが、本稿ではこの情報の作り方の問題には言及しない。

2. アクセシビリティ市場の規模

わが国は高齢化の方向に進んでいる。「高齢社会白書」2001年度版によると、全人口に占める65才以上の人口の割合は、現在は約17%であるが、十年後にはそれが25%を越えるという。また、厚生労働省の統計によれば、身体障害者および身体障害児の合計は334

万人(2001年度)ということである。

法令や統計という高齢者や障害者は、何らかの基準を超えたものを指す。しかし、その基準以下であってもアクセシビリティに問題を抱えている人がいる。聴覚障害者は聴力レベルが両耳とも70デシベル以上が基準となっている

が、実生活上は40デシベルくらいから支障が出てくるという。

情報通信機器・サービスを普段はなんら問題なく利用している人でも、様々な事情によって問題が生じるときがある。たとえば、腕を骨折した人にとって、マウスとキーボードは使いやすい入力装置

とはいえないだろう。このような一時的な支障を抱えた人々も、アクセシビリティ問題の対象である。高齢者・障害者に、この一時的な支障のある人などを加えれば、アクセシビリティという課題の対象となる人口は膨大である。

高齢者・障害者等のアクセシビ

リティに関する議論は、社会貢献という発想からされることが多い。しかし、上に説明したように考えると、対象となる数は数千万人といった規模になる。大きく、かつ確実に存在する市場としてみることが可能である。また、高齢者等を単に保護の対象として扱う

ことは、その数の膨大さからも現実的ではない。情報通信機器、サービスのアクセシビリティ向上によって高齢者、障害者の社会参加を促進していくこと、さらにその能力を活用することが、社会全体の活動を発展させるために必要である。

3. アクセシビリティ改善に向けた三つのアプローチ

情報通信機器やサービスに関するアクセシビリティを改善していくには、次の三つのアプローチがある。

まず、利用者が、障害に対応した専用の補助機器などを利用することで機器・サービスの利用しやすさを改善しようというのが第一のアプローチである。

どのような障害を持つ人でも利

用できるように、入出力方法を調節できるようにしたり、複数の入出力方法を用意したりするというのが、第二のアプローチである。パソコンでは、オペレーティング・システム（OS）やよく使用されるソフトウェアの中に、このような機能が標準装備されている場合もある。

さらに、情報通信機器・サービ

スは必ずアクセシビリティを保証するようにしておこうという、後者を発展させた第三のアプローチがある。すなわち、機器・サービスの標準化という考え方である。情報通信機器・サービスの提供法について、高齢者・障害者等のニーズに配慮して標準を作成しようという動きが世界各国で起きている。

4. 技術開発の動向

4-1

技術開発の現状

第一のアプローチの実例を紹介しよう。筋萎縮性側索硬化症（ALS）の患者は体の自由が奪われ、話すことも困難になる。そこで、わずかに動かすことができる目やまぶたの動き（瞬き）を検出するセンサーが開発された。コンピュータに大きく文字盤を表示し、目の動きをセンサーで検出してカーソルを動かす、まぶたの動きで入力を決定する。図表1はALS患者のための意思伝達装置一例を示す。

この他、筋力を使う複雑な操作ができない障害者のために、モールス信号を用いて文字を入力できるようにした丸型のプッシュ式入力装置が開発されている。マウスを動かす代わりに数字キーで操作できるようにしたソフトウェアや、トラックボールやタッチパネ

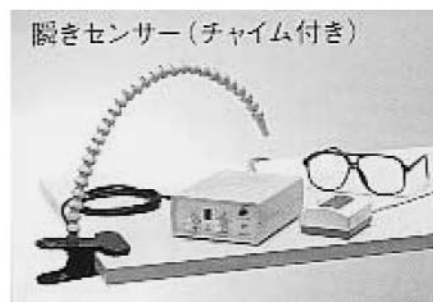
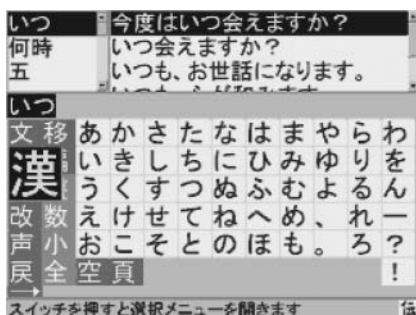
ルといったマウスを代替する装置もある。出力についても同様である。音声でウェブの内容を読み上げるテキスト読み上げソフトウェアは、その一例である。また、点字を使った出力装置（点字ディスプレイ、点字プリンタ）等も開発されている。これらは、障害の種類とレベルに応じて特別な入出力機器を用意しようというアプローチである。

最近のパソコンで使われるOSやソフトウェアには、表示の拡大率や文字の大きさ、文字の色、背

景色や、キーボードやマウスの反応速度等を変更できるものが多い。どのような障害を持つ人でも利用できるように調整可能にしたという点で、第二のアプローチの一例といえよう。

以上はパソコンの例であるが、アクセシビリティに問題のある機器はパソコンに限らない。郵便局や銀行で利用されているATM装置は、最近タッチパネルを使用するものが増えたため、視覚障害者には使いづらいものとなっている。そこで、タッチスクリーンと

図表1 ALS患者のための意思伝達装置



(日立製作所「伝の心」)

キーの両方を利用できるようにしたものがある。これは代替入出力手段を用意したという点で、第二のアプローチに分類できる。ただし、キーの配置が装置によって統一されていないなど、改善するべき点は多い。

視覚障害者に文字情報を伝達するために音声合成技術が、聴覚障害者に音声情報を伝達するには音声認識技術が利用されることが多い。すでに触れたウェブ情報の読み上げソフトウェアは音声合成技術を利用している。しかしウェブには画像など二次元情報も表示されている。また、文字だけであっても、表のように二次元的な配置に意味がある場合がある。これをどのように伝えるかという課題は、まだ基礎研究の段階である。NHK ニュースでは、アナウンサーの声が自動認識されて字幕として表示されている。このように文法的に正しい文章を、きれいな発音で読み上げるものには対応できるが、騒音のある環境で、大勢の人が会話をするといった場合には音声認識はうまくいかない。ここにも基礎的な研究課題がある。

ウェブの音声読み上げで、たとえばリンクについて「<http://www.nistep.go.jp>」を「エイチティーティーピーコロソ」などと延々と読み上げるのは不親切である。その部分に来たときに「科学技術政策研究所へのリンク」といった音声が出るようにHTMLテキストを作っておくことが望ましい。同様に画像についてもそれを説明するテキスト情報を付与しておくべきである。このようなアクセシビリティの高いウェブページの作り方に関するガイドライン（ウェブアクセシビリティガイドライン1.0）が、インターネット技術全般に関する国際的フォーラム W3C（World Wide Web Consortium）の委員会 WAI（Web

Accessibility Initiative）によって1999年に設定されており、これが事実上の国際標準となっている。

これに関連して、我が国では、1999年に郵政省と厚生省（いずれも当時）がW3Cガイドラインを下敷きにした「インターネットにおけるアクセシブルなウェブコンテンツの作成方法に関する指針」を出している。総務省ではウェブアクセシビリティ実証実験で、ウェブページの作成者が自ら、この指針に基づいているかを検証し、ある程度自動的に修正するシステム（ウェブヘルパー）を作成している。今年度中には地方公共団体などに配布される予定である。

4 - 2

我が国における技術開発への支援

経済産業省では「障害者等向け情報システム開発事業」を推進している。その目的は、障害者・高齢者等にとって使いやすい情報通信機器・システムの開発及び実証・評価実験を支援することにより、障害者・高齢者等が情報化社会に積極的に参画できるような環境を早期に整備することである。

この事業の中では、2000年度は「聴覚・発語障害者のための通信・電話装置」や「ブルートゥースインタフェースを持つ視覚障害者向けPDA」など14件、2001年度は「漢字読み能力に応じた障害児向け電子メールソフトの開発・実証」、「IT技術の活用によるバリアフリー情報の収集と活用」など14件の研究開発プロジェクトが推進されている。2002年度には、「USBに対応した利用者適応情報入力装置の開発・実証」（障害に対応するPDA型のUSB接続可能な入力装置の開発）や「重複障害（肢体・視覚）者のための意思伝達ソフトウェア」など8件が採択

された。ただし、1件当たりが3000万円以下（内容により5000万円まで）と、大きなプロジェクトではない。

「聴覚・発語障害者のための通信・電話装置」では、電話着信を大音量や振動、光で知らせる機能、通信方式として通常の電話（音声）とペン入力やキーボードによる文字通信を選択できる機能、および音量・音程を調節できる機能をそなえた装置が開発された。「ブルートゥースインタフェースを持つ視覚障害者向けPDA」については、市販のPDAのようなタッチスクリーンではなく、ダブル・アクション・キーボード（キーを軽く押すとキーに割り振られた文字・機能を音声で知らせ、さらに押し込むと入力されるキーボード）を採用した専用ハードウェアが視覚障害者のために開発されている。

同様に厚生労働省は（財）テクノエイド協会などを通じた福祉機器開発助成の一環として、情報通信分野の支援機器開発助成も行っている。2002年度の場合、「障害者にも使いやすく自由度の高い“空中マウス”の研究開発」など3件が採択されている。

また経済産業省の補助によって運用されている「こころWeb（www.kokoroweb.org）」や、厚生労働省が支援する「ノーマネット（www.normanet.ne.jp）」などで、コンピュータ操作を補助する装置・ソフトウェアなどの情報を提供している。たとえば、キーボードの操作に障害がある場合には、一度入力した単語や文章を学習し、次回からは先頭の1文字を入力するだけでその単語や文章が変換候補として表示される「入力予測」機能を持つソフトウェアが紹介されている。

5. 標準化活動の動向

5 - 1

ISOの動向

1998年、ISOの消費者政策委員会総会において、日本からの提案によって、「高齢者・障害者のニーズに適合した製品および環境を設計する方法に関する基本的原則と考慮事項を規定する文書」を作成する作業部会を設置することが議決された。これは、すべての施設、製品、サービスに対して、高齢者、障害者、健常者の区別なく、すべての人が使いやすいものにしようという「ユニバーサルデザイン」の考え方に基づいている。作業部会は日本人がリーダーとなって精力的に活動を進め、基本的原則はガイド71（高齢者・障害者を考慮した規格策定に関するガイド）として、2002年の早い時期に完成した。このガイド71は、すべての標準化活動に適用されるべき包括的なガイドとなっている。

ISOでは、この後、情報通信分野など分野ごとに、すべての機器やサービスが、守るべきアクセシビリティ基準を作成しようという動きになっている。後述するように、わが国でも国内活動がスター

トしているが、その理由のひとつは、ISOの活動に対して技術的提案を行い、それによって世界をリードしていきたいということである。

5 - 2

我が国における動向

我が国においては、これまで図表2に示すように情報処理機器と電気通信設備について個別にガイドラインが作成されてきた。

各ガイドラインは具体的な標準仕様ではなく、機器、サービスが備えるべき要項を抽象的に定めている。その例として、障害者・高齢者等情報処理機器アクセシビリティ指針の概要を以下に示す。

(a) 共用機能の標準化の推進

機器操作上の広範な障壁に可能な限り対応するため、共用化すべき機能について標準化を図り、汎用の情報処理機器への搭載を実現する。具体的にはキーボードの感度条件設定やマウスに替わってキーで操作する方法（キーボードナビゲーション）、マウスの移動量やクリックに対する反応速度を調節などの機能を標準化し、すべてのアプリケーションで使用で

きるようにする。

(b) 専用機能の開発の推進

共用機能では利用者固有の要求を満たせない機器操作上の障壁に対して、きめ細かく対応できる専用機能を開発する。具体的には点字キーボード、点字ディスプレイなどの代替機器や音声入出力の実現を要求している。

(c) サービスの充実

アクセシビリティ製品の活用や専用機能の開発を促進するため、障害者・高齢者等の利用者及びその支援者並びに専用機能の開発者に対するサービスの充実を求め。具体的にはインタフェース仕様の公開やコンテンツ、マニュアルをわかりやすくすることを求めている。

(d) 開かれたシステムへの配慮

アクセシビリティに配慮した市販の情報処理機器に対する容易な接続等、互換性の高い開かれたシステムを重視する。

これまで個別に定められてきた情報処理機器と電気通信設備に対するガイドラインは、できる限り

図表2 個別の技術分野でのガイドライン作成の動き

情報処理機器（通商産業省を中心とする動き）	
1974～1976	日本電子工業振興協会（JEIDA）「障害者のリハビリテーションに対する貢献策の調査研究」
1988	JEIDA「電子機器アクセシビリティ指針作成のための調査研究」
1990	JEIDA「情報処理機器アクセシビリティ指針」
1995	告示第231号「障害者等情報処理機器アクセシビリティ指針」
2000	「障害者・高齢者等情報処理機器アクセシビリティ指針」の改訂告示
電気通信設備（郵政省を中心とする動き）	
1998	告示第515号「障害者等電気通信設備アクセシビリティ指針」
1998	「電気通信アクセス協議会」設立
1999	郵政省及び厚生省「インターネットにおけるアクセシブルなウェブコンテンツの作成方法に関する指針」
2000	電気通信アクセス協議会による「障害者等電気通信設備アクセシビリティガイドライン」

整合がとられることが望ましい。技術の進歩とともに情報処理と電気通信の区別はますますあいまいになりつつあるし、また似てはいるが異なる基準で製品が販売されれば、消費者は混乱するからである。

情報通信分野に共通するガイドラインを作成しようという動きが始まったのは、2000年のことである。日本規格協会には情報技術標準化研究センター (INSTAC) という内部組織がある。2000年9月、このINSTACの自主活動として「情報バリアフリー実現に資する標準化調査研究委員会」が結成され、その活動が開始された。そして、その結論を受けて、改めてINSTAC内に「情報技術分野共通及びソフトウェア製品のアクセシビリティの向上に関する標準化調査研究委員会」が組織され、政府から委託調査を受ける形で2001年4月に活動が開始された。

同委員会については、その体制に特徴がある。図表3はその概要を示すものである。この図に見られる第一の特徴は、総務省と経済産業省が共に参加をして活動を支えているということである。高齢者・障害者等に役立つ日本工業標準 (JIS) を提供しようということについて両省から理解が得られ協力体制が組まれたことは、ともすれば省間の争いが起きやすいわが国では特筆すべきことである。

第二の特徴は、個別の製品群ごとにアクセシビリティに関するガイドラインを作成したり、関連す

る活動を進めていたりした多くの団体(工業会等)が委員会に参加をしたことである。

以上の官庁、団体に加えて、アクセシビリティの専門家、企業および障害者団体の関係者によって、調査研究委員会は構成された。現在、JIS原案を作成することを目標に活動が進められており、2003年春にはJIS化される予定である。

JIS化は、アクセシビリティに配慮した機器・サービスの普及に役立つものである。政府は、1995年、関係省庁の申し合わせとして、「コンピュータ及びサービスの調達に関わる総合評価落札方式の標準ガイド」を決定している。この中には、「国際標準、国内標準等に準拠して評価する項目を設定する」との一文があるため、政府調達においてはアクセシビリティに配慮して設計されたことが要件となる。これによって市場が拡大すれば、このような機器・サービスの民間への普及の起爆剤になるものと考えられる。

今回JIS化されるのは、情報通信分野のすべての機器やサービスに共通する設計指針であって、今までの機器ごとのガイドラインよりも上位の位置づけになる。これからは、この共通設計指針に基づいて、個別のガイドラインを見直しつつ、それらのJIS化を図っていくことになる。

ウェブページのアクセシビリティに関しては、前述のように1999

年に「インターネットにおけるアクセシブルなウェブコンテンツの作成方法に関する指針」を、郵政省と厚生省 (いずれも当時) が出している。それに基づいて2001年には「行政情報の電子的提供に関する基本的考え方」が各省連絡会議で決められた。行政組織のウェブサイトは、今後この指針に対応することが要求される。

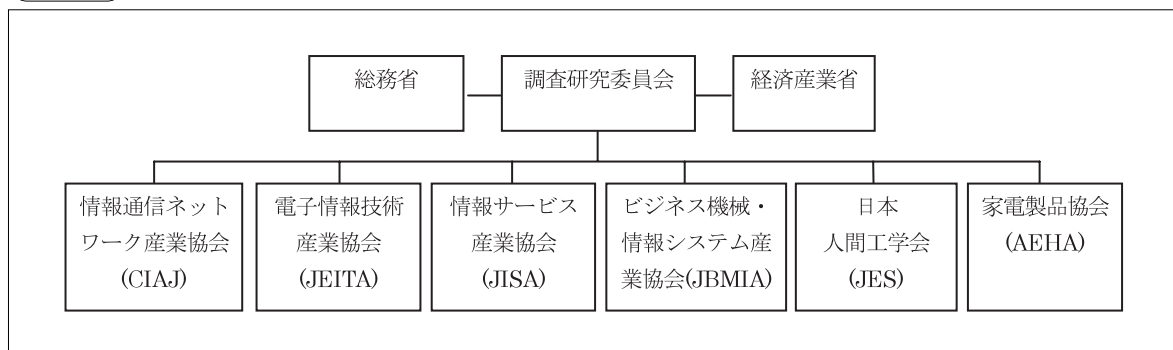
またJIS原案については、前述の作成方法に関する指針とともに、W3Cガイドラインとの整合を取りながら作成されている。2003年にはJIS化が終了する予定である。

5 - 3

米国の動向

米国において障害者の権利を規定している基本法は、1990年に制定されたAmericans with Disabilities Actである。これは、保護意識の強かった障害者福祉の観点を脱却し、雇用やアクセスなどを障害者の権利として明確にした点で画期的な法律である。この法律の考え方が、1998年におけるRehabilitation Actの改正に反映された。この改正により第508条 (改正508条と呼ばれる) に、「連邦政府機関が電子機器を購入またはリースする場合には、障害を持つ職員が障害のない人と同じように電子機器を利用できるようにすること」という条項が追加された。この条項は、過度の負担を課さな

図表3 調査研究委員会の構成



い範囲で、連邦政府機関が調達する情報通信機器・サービスにアクセシビリティの確保を求め、また、アクセシビリティの欠如に対して職員・利用者が不服を申し立てることも可能としている。

つまり、政府が購入するさまざまな情報通信機器、ソフトウェアや事務機器、あるいは提供するウェブページやサービスは、職員向けでも市民向けでもアクセシビリティが確保されていることが要求される。2001年6月から、改正508条に従った政府調達が始まっている。

アクセシビリティ基準は、2000年に公表されているが、その考え方は、日本の各ガイドラインと大きな差は無い。しかし、たとえば行政機関で使われている情報キオスクに対して、車椅子での使用ができるように操作部の高さや位置を決めるなど、比較的具体的かつ広範囲なものである。

この改正508条は、米国でのビジネスのあり方を大きく変えつつある。連邦政府の調達額は大きい。そこでアクセシビリティが要求されるのであれば、いっそ市場に出す全製品をアクセシビリティが改善されたものにしようと、米国企業は動き始めた。米国に多くの情報通信機器を輸出している日本企業も、これへの対応を迫られている。

強制規格とは、その国内で提供されるすべての機器やサービスについてそれへの準拠を義務付ける規格である。たとえば、感電事故を防ぐために規定されている電気機器でのアースの取り方などがそれに当たる。改正508条に基づくアクセシビリティ基準は連邦政府の調達に対象を限定しているので、正確には強制規格ではない。しかし、その規模ゆえに、米国ではこれが準強制規格として扱われ始めたのである。

さらに、このアクセシビリティ基準を作成した関係者等にヒアリ

ングしたところ、米国はそれをカナダ、メキシコを始めとして、世界に「輸出」したいと考えているという。米国企業は改正508条に準拠した機器やサービスを提供できアクセシビリティが優れているが、わが国の企業にはそれが提供できないとなれば、貿易上大きな不利となる危険がある。

改正508条に基づく政府調達が開始された米国で新しい動きが起きている。それぞれの障害者に専用の入出力機器を提供して、その入出力機器が仲介することによって、あらゆる情報通信機器・サービスを利用できるようにしようという新しい試みである。これは、改正508条とは一見逆を向いた興味深い動きである。

この試みを主導しているのは International Committee for Information Technology Standards というグループである。個人の入出力機器と ATM、券売機、その他の情報通信機器との間に、インタフェースとして Alternative Interface Access Protocol (AIAP) というものを規定する。そして、このプロトコルを守って入出力機器と情報通信機器との間をつなぐことで、利用者の要求を情報通信機器に伝えることができるようになる。入出力機器は一人一人の障害に応じて用意すればよいというのである。この活動には、情報通信分野での有力企業20社が参加している。そして、今後、AIAPを普及させていく考えであるという。

すべての情報通信機器・サービスをだれにでも利用しやすいものにするか、それとも、一人一人にとって使いやすい専用機器を仲介にして情報通信機器・サービスを提供するか、アクセシビリティを実現する戦略として思案のしどころである。しかし、前者を目指していたはずの米国で後者に関わる活動が開始されたということは、前者の路線には限界があるという

ことを意味するのかもしれない。おそらく、できる限りすべての機器・サービスのアクセシビリティを改善した上で、専用機器による更なる使用性の向上を図るのが正しい方向なのだろう。

5 - 4

ヨーロッパの動向

ヨーロッパでは、各国の政策と欧州連合全体としての政策が互いに影響を及ぼし合いながら、情報のバリアフリー化に関する活動が展開されている。欧州委員会で進めている研究開発プログラムは、ヨーロッパ全体にアクセシビリティに関する大きな市場を作るということを目標に1990年代に入って開始された。それまでは機会の均等という観点での議論だけが行われていたが、この研究開発プログラムのスタートとともに、技術的な側面での議論が開始された。標準化が意識され出したのも、これ以降である。

また、ヨーロッパ全体としての情報化社会への取り組みが、eEurope計画として発表されている。その中では「障害者には特別な配慮を払い、情報からの排除に対して戦う」とした上で、欧州委員会と各国政府による次のようなアクションが明記されることになった。

その第一は、特別なニーズを持つ人々の雇用可能性を改善し社会への参加を促進するために、情報技術に関連する製品について Design for all の基準を2002年末までに発表するということである。第二は、法律と基準がアクセシビリティに関する考え方に合致しているかについて、2001年末までに検証するということである。さらに、公共団体のウェブサイトは、前述の W3C が作成したガイドラインによって2002年末までに改善するということが明記された。

上述の「Design for All」、また

「eAccessibility」を合言葉に、地域標準化団体が情報・通信分野に関するガイドラインの作成に動き

出している。これは欧州委員会の要請に基づくもので、1万ユーロ程度と小額ではあるが活動資金も

援助されている。2002年の間には、その成果が公表される予定になっている。

6. 利用者への情報提供とリテラシー向上

アクセシビリティの高い情報通信機器・サービスを普及させるには、そもそもそのような機器・サービスがあるということ自体を利用者に知らせる必要がある。特に高齢者のようにはじめから情報機器の利用を嫌ったり、利用をあきらめたりしている人にも受け入れてもらえるように、その便利さを体験する場を提供することが必要である。また、現在のパソコンなどは、残念ながら誰にでもすぐ使えるとは言い難いので、ある程度の訓練（慣れ）の場を提供することも必要である。必要に応じて、コンピュータ・ウイルスや個人情報流出などの危険性についての教育も行わなければならない。「情報通信（IT）リテラシーの向上」という言葉は、これらを意味している。

たとえば、聴覚障害者の間で携帯電話の普及が急激に進んでいる。最初は電話ということで敬遠されていたが、電子メールを交換できることに気づいてから、普及し始めたということである。この例でも、このサービス自体につい

ての情報提供が重要だったことがわかるだろう。

わが国ではe-Japan計画の中で、リテラシー向上のための教育の推進がうたわれている。この分野でのe-Japan計画の目標は次のとおりである。

- (1)2005年のインターネット個人普及率予測値の60%を大幅に上回ることを目指し、すべての国民の情報リテラシーの向上を図る。
- (2)小中高等学校及び大学等のIT教育体制を強化するとともに、社会人全般に対する情報生涯教育の充実を図る。
- (3)IT関連の修士、博士号取得者を増加させ、国・大学・民間における高度なIT技術者・研究者を確保する。併せて、2005年までに3万人程度の優秀な外国人人材を受け入れ、米国水準を上回る高度なIT技術者・研究者を確保する。

情報通信に対する社会人の理解を増進するため、関係する総務省、

内閣府、経済産業省、農林水産省によって、図表4のような施策が展開されてきた。

リテラシー向上の重要性は高齢者・障害者にとっても同様で、情報通信に関する基礎的な教育の機会を作ることが重要である。「2002年度版情報通信白書」には、これらの人々に向けた講習会等の事例が紹介されている。たとえば、全国視覚障害者インターネット接続支援連絡会は、①視覚障害者の自宅を訪問し、パソコン画面の文字及びホームページを音声化するためのソフト等をパソコンにインストールするなどの支援、②地方公共団体等からの委託による、視覚障害者のためのIT講習会の開催、③月一回の頻度でオープンサポートという視覚障害者のための「よろず相談」の実施、などを行っている。

今後、高齢者・障害者を含め、広く国民全体に対して、情報通信を使いこなすための教育機会をいっそう充実していくことが期待される。

図表4 「IT普及国民運動」の事業例（2001年度）

事業内容	受講者数
パソコンの基本操作、文書の作成、インターネットの利用、電子メールの送受信等を習得するためのIT基礎技能講習	約550万人
中小企業経営者向けにITが経営に与える影響等の理解の促進するためのIT講習等	約29万人
消費生活に関する情報を自由に取得・活用する技術を習得するためのIT講習等	約18万人
都道府県の女性センター等におけるIT講習等	約2万人
企業経営者による戦略的情報化投資の企画立案を支援するためのIT講習等	約1.5万人
農林漁業者等を対象としたIT講習等	約1万人

7. まとめ

アクセシビリティの分野では、政府調達要件となったために民間を含めて研究開発が活発化し、またAIAPといった新しいアイデアが誕生しつつある米国に比べて、わが国の状況は遅れている。ヨーロッパとは、ほぼ同一のレベルである。この状況を、ある専門家は「遅々として進んでいる状況」と評している。

JISをはじめとする標準化によってアクセシビリティの高い機器・サービスが普及するための基礎が固まりつつある。アクセシビリティの高い機器・サービスが普及すれば、それを利用する人も増え、そのフィードバックにより、さらにアクセシビリティの高い機器・サービスが提供されると言うサイクルに入ることが期待できる。

その最初の普及策として最も有効な手段の一つが、大量の調達先である政府が調達に関する考慮事項として今回制定するアクセシビリティに関するJISを用いることである。その市場が生まれれば、民間市場でもアクセシビリティに配慮して設計した機器・サービスが次第に普及していくものと考えられる。



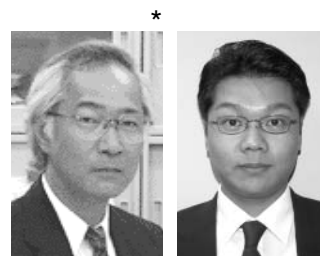
特集②

単電子エレクトロニクス研究の動向

— 半導体集積回路の限界は突破できるか —

客員研究官 小口 信行*

材料・製造技術ユニット 高野潤一郎



1. はじめに

シリコンを基盤とした半導体デバイスとそれをういたコンピュータはムーアの法則に乗って急速な発展を遂げてきた。しかし微細化によるデバイスの動作上の問題と集積度の向上にともなう発熱の問題から限界が近いともいわれている。

科学技術振興事業団は「戦略創造プログラム」として、国（文部科学省）が2002年度に新たに示した6つの戦略目標の下に13の研究領域を設け、総額約44億円の資金を投入して革新的技術シーズの創出を目指した基礎的研究を進めている。その戦略目標の1つに「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」があり、集積化限界の克服に向けた重点的・集中的な取り組みが始められている。

また、2002年6月科学技術・学術審議会の策定した「ナノテクノロジー・材料に関する研究開発の推進方策」は、次の世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバ

イス・システムの構築に取り組む必要性を指摘している。この中で、従来の集積回路に使われてきたトランジスタとは異なり、単一の電子（単電子）で動作する新しい動作原理のデバイス・システムおよびその集積化に関する研究の重要性が指摘されている。

単電子で動作するデバイス・システムで集積回路を作ることができれば、従来の集積回路と比較し、消費電力が1万分の1から10万分の1程度と少なく、動作限界が緩和されるとともに、発熱によって集積回路が機能しなくなるという問題を回避できそうだという期待がある。

単電子で動作するデバイス・システムは、クーロンブロックードと呼ばれる単電子に固有の新しい動作原理に基づいて機能する。その集積化のアプローチは次の3つに大別される。

(1)回路のアーキテクチャは現方式を踏襲し、従来の集積回路

- に使われてきたトランジスタを単電子トランジスタで置き換えることにより集積化限界を克服していこうとする研究（10年以内の実用化を目指す）
- (2)回路のアーキテクチャを単電子による動作に適した「二分決定グラフ方式」と呼ばれる新しい形に変えることにより、集積化限界を克服していこうとする研究（10年から15年後の実用化を目指す）
- (3)電気的な配線を使わない新しい情報処理方式、すなわち単電子を使ったセルオートマトンと呼ばれる構造を用いて集積化限界を克服していこうとする研究（(2)よりさらに将来の実用化を目指す）

本特集においては、このような単電子で機能する集積回路の実現に向けた研究開発の現状と将来展望をまとめる。

2. クーロンブロックード現象

単電子で動作するデバイス・システムの動作原理はクーロンブロックードと呼ばれる現象に基づいている。この現象は金属または半導体等の物質のサイズが小さくなると現れる。

非常に小さな金属あるいは半導

体島（クーロン島と呼ばれる）にナノメータの隙間（トンネルギャップと呼ばれる）で電極をつないだ場合、電子は電極からトンネル現象でこれらの島に移動する。金属あるいは半導体島が大きい場合はこの電子の移動は自由におこる

が、これらの島がナノメータサイズまで小さくなると、この電子の移動が阻止（ブロック）されてしまう。しかし電極にある一定以上の電圧を加えれば、電子は移動する。これをクーロンブロックード現象という。

3. 単電子トランジスタの集積化

3 - 1

単電子トランジスタ

従来のトランジスタは1~10万個の電子からなる「電流」によって動作していた。しかし単電子トランジスタは、上に述べたクーロンブロッケード現象に基づき「電子1個（単電子）」により動作する。単電子トランジスタの構造を図1に示す。これは従来のトランジスタと同じソース、ドレイン、ゲートと呼ばれる3つの電極からなっているが、従来のトランジスタとは異なりこれらの電極の間に微細なクーロン島が配置されている。

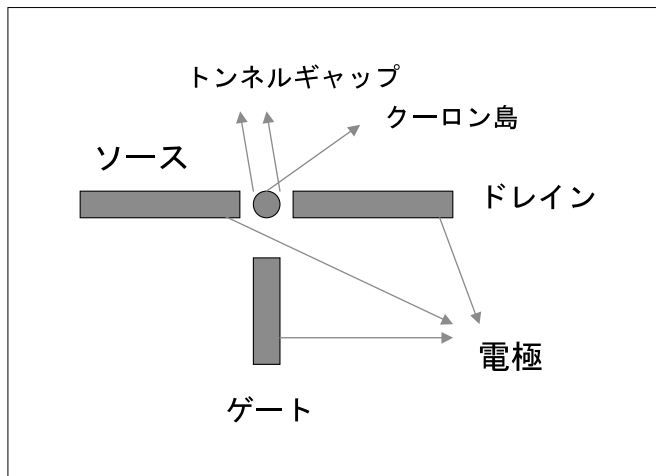
単電子トランジスタについては世界各所で多くの研究が行われており、研究対象材料も多い。この単電子トランジスタを実用化するためには、クーロン島の大きさをナノメートル程度まで小さくして室温で動作させる必要がある。研究の初期段階では、小さいサイズのクーロン島がなかなかできず低温でしか動作しなかったが、現在では金属、半導体などのいくつかの材料において単電子トランジスタとしての室温動作が確認されているものもある。

3 - 2

集積化

単電子トランジスタは構造自体が本質的に小さく高密度集積化に適しているが、この集積化に関する研究はまだ初期の段階にある。

図表1 単電子トランジスタ



東京工業大学の小田俊理教授は、単電子トランジスタの集積化に関する将来展望として次のコメントを寄せている。「従来のシリコン集積回路を構成しているデバイスに単電子トランジスタで置き換えることには困難がある。すなわち、多くの単電子トランジスタを微細な配線を用いて結ぶ必要があるが、ナノメータスケールの微細配線はまだ作製が困難である。また単電子トランジスタは単電子で駆動させるため、この出力を利用して動作できる次段の単電子トランジスタの数が制限されてしまう。今後は、単電子トランジスタだけでなく、シリコン集積回路と同一チップ上に形成する混成回路の研究が必要である。そのため、単電子トランジスタの材料としてはシリコンプロセスに整合する材料が求められる。単電子トランジスタの材料としてシリコンを使えば、現在のシリコン集積回路製造

ラインをほぼそのまま使える点が大変有利である。」

最近、東芝の内田博士らにより、単電子トランジスタと通常トランジスタの混成回路が1つのシリコンチップ上に作製されている。また同様な混成回路はNTT猪川博士らによっても作製されている。さらに日立製作所の矢野博士らのグループではクーロンブロッケード現象を利用することにより、シリコンを用いた単電子で動作するメモリを試作している。

シリコン以外の有望な材料としてはカーボンナノチューブをあげることができる。産業技術総合研究所の松本和彦博士らのグループは、最近カーボンナノチューブを用いた単電子トランジスタの集積化技術を開発した。カーボンナノチューブにより微細な配線も一緒にできてしまう。今後単電子トランジスタの集積化技術としてさらに発展していくと予想される。

4. 二分決定グラフ論理回路

現方式のシリコン集積回路においては、論理アーキテクチャとして、AND, OR, NOTなどの動作を行わせるためトランジスタを多

段に縦続接続している。この場合、配線も長くなり大電流が必要となる。

一方上述の単電子トランジスタ

は電流に換算すると非常にわずかな値である単電子で動作し、また周囲の微細な電気的変化によって誤作動が起こりやすい電荷敏感デ

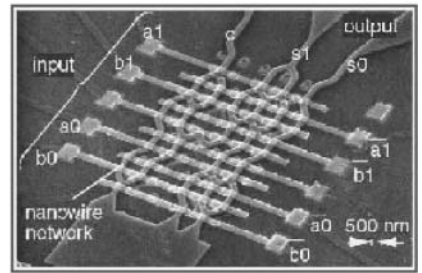
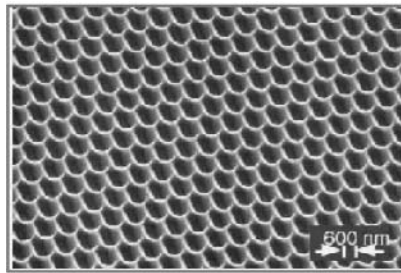
バイスである。そのため、従来の論理アーキテクチャを採用する限り、そもそもこの単電子トランジスタは上記第3章で述べたように、従来方式での集積化には適してはいないという懸念も指摘されている。

そのため、論理アーキテクチャを単電子による動作に適した形に変えることにより、単電子トランジスタの集積化とは別の概念で集積回路の限界を克服していこうとする研究も行われている。集積回路のアーキテクチャを単電子による動作に適した形、すなわち「二分決定グラフ」という新しいアーキテクチャに替えていこうという研究が行われている。

二分決定グラフに基づいて論理回路を構成することにより、簡便な回路設計が可能になると考えられている。また論理回路を構成するための基本動作は単純な二分岐スイッチであり、回路構成のためには入力にしたがって信号媒体の転送方向を切り替えることのできるさまざまな物理現象を利用できる。なかでも単電子で動作するデバイスでは集積化、低消費電力化の要請に合致している。

図2に北海道大学の長谷川英機教授らのグループにおいて、あらかじめ微細加工を施した基板上に形成されたインジウムガリウム砒素 (InGaAs) ヘキサゴナル量子細線ネットワーク、およびこの技

図表2 加工基板上に形成されたInGaAsヘキサゴナル細線ネットワーク(左)、およびこの技術を利用して作られた二分決定グラフ集積回路(2bit加算器)



北海道大学長谷川研究室のweb siteから引用
http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/iiede/2_naiyou_j.html

術を利用して作られた二分決定グラフ集積回路(2bit加算器)の走査電子顕微鏡写真を示す。

二分決定グラフ集積回路においては、六角形が繰り返された網目状のナノスケール細線がネットワークを形成し、さらに直線状の微細な金属電極が配置されている。ナノスケール細線が接続するY字型の分岐が単電子トランジスタのスイッチとなっており、その動作が金属電極で制御される。これらにより論理回路が構成されている。

この二分決定グラフ集積回路の提唱者である長谷川教授は以下のコメントを寄せている。

「この二分決定グラフ回路方式は、論理アーキテクチャが従来の集積回路と異なり、出力を次段の入力とする現在の集積回路でとられている縦続接続方式ではないので、大電流駆動が不要となる。また、同じ機能を実現するのに必要なデバイスの数は、論理ゲート方

式より本方式の方が少ないこともわかっている。さらに、規則正しい構造で、細線ネットワークが配線をかねており、かつ個々の分岐スイッチには、ソース・ドレイン電極がないので、配線長の問題が大きく緩和され高密度集積化に適している。」

長谷川教授らはこの回路の材料としては、細線ネットワーク構造製技術が成熟している化合物半導体が現時点では最も適切な材料であると考えている。しかし、このような回路方式は化合物半導体ばかりではなく様々な材料に適用可能であり、近い将来シリコンで化合物半導体に匹敵する細線ネットワークが実現できれば、その方が現在のシリコン集積回路製造ラインをほぼそのまま使えるという観点から実用性が高いだろうとしている。

5. 量子ドットセルオートマトン

単電子トランジスタを利用した集積回路あるいは二分決定グラフ論理回路の集積化がさらに進んでいけば、やがては配線でつないだ単電子トランジスタ間の距離あるいは量子細線ネットワークのサイズも10ナノメートル以下になり、電子のトンネル効果が顕著になってくると予想される。このようにトンネル効果が顕著になると集積

回路は機能しなくなる。

デバイス間の長い配線が必要なく、単一電子による近接相互作用によって動作するセルオートマトン、特にナノメートルスケールの量子ドットを用いた量子ドットセルオートマトン(Quantum Cellular Automata; QCA)はこのような限界に対応できるものとして期待されている。

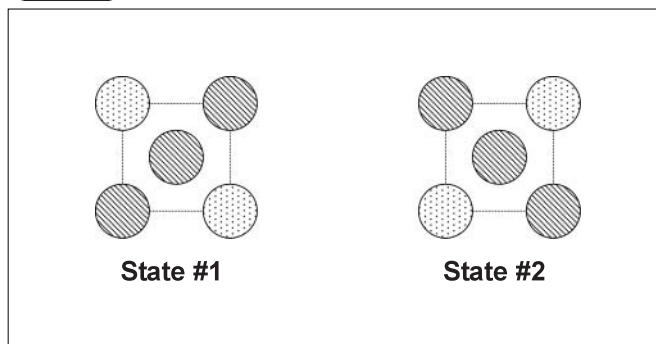
図3に5つのクーロン島(量子ドットとも呼ばれる)と2個の電子からなるセルを示す。

QCAはこのセルが単位となって機能する。2個の電子が左斜めの対角線の島に入っているとき(state #1) または右斜めの対角線の島に入っているとき(state #2) が一つのセル全体としてみてエネルギー的に一番低い状態にあるの

で、電子はどちらかの配置をとろうとする。このセルを2つ並べた場合、2つのセル内電子の並ぶ方向が直角になると（すなわち一つのセルはstate #1にありもう一方のセルはstate #2にある）2つのセルで近くにいる電子はお互い反発して異なるセル内の電子の配置は平行になろうとする。図4のようにたくさんセルを並べると、電子の配向は全部のセルで平行になろうとする。これをなんらかの方法で、一番左端のセル内電子の配向を90度反転させると、隣のセル内の電子も端のセル内電子の配向と平行になろうとし、ドミノ倒しのように全てのセル内の電子はその配向をそろえようとする。このように多くのセルの結合により、左端の情報を、配線を介さないうで反対側のセルに伝えることができ、このセルの配列を工夫することによりコンピュータに必要ないろいろな論理演算を行わせることができると思われる。

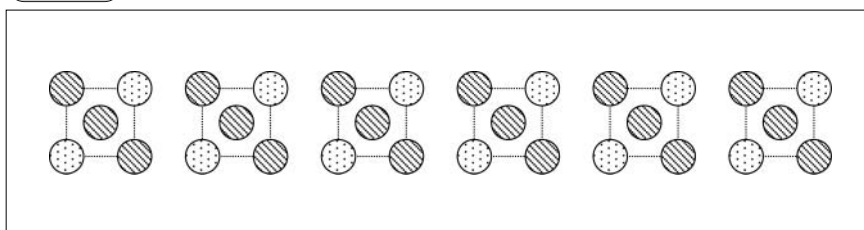
QCAは、現在まだ概念だけが提案されて原理的な実験が行われているにすぎない。今後室温で動作するQCAを実現するため、サイズの小さい量子ドット等の超微細構造を制御性よく、自己組織化などを活用して配列させる技術が確立することが必要である。最近では半導体などのいわゆる量子ドットばかりではなく、これらよりはるかに小さな構造の混合原子価をもつ4価のルテニウム錯体を使

図表3 5つのクーロン島からなるセルの模式図



点模様の島には電子が1個ずつ余分にはいっており、斜線の島にはこの電子がない。2個の電子の安定な配置としては左斜めの対角線の島にはいる場合 (state #1) と右斜めの対角線に入る場合 (state #2) がある。5つのクーロン島の間では電子のトンネルが起こる。

図表4 セルオートマトンの原理



セルを並べると各セル内の電子の配置は全部のセルで並行になろうとする。各セルの間では隣接するセルからの静電力は働くが、電子のトンネルは起こらない。

うことにより室温で動作するQCAが実現できそうだという提案があり、実現に向けた実験も米国で行われている。

QCAの動作シミュレーションに関する研究をかつて行っていた東芝研究開発センターLSIラボラトリーの榎本哲史氏はQCA研究の現状と将来展望に関して次のコメントを寄せている。

「米国ノートルダム大学のLentらにより提案されたQCAは微細化の極限デバイスとして考案されたが、量子ドットを正確に作製し、

かつ電子1つ1つを正確にコントロールする必要がある。まずこの方法を確立する必要があるだろう。また、今後LentらのQCAとは異なる新しい形のいろいろなセルオートマトン構造を追究していくことも必要であろう。」

QCAはまだまだ先が不透明な部分も多いが、実現できれば電子1個ずつを制御するぐらいの小さなエネルギーで駆動でき、また配線の問題もなくなるため現在の集積回路の集積度を飛躍的に高めることが期待できる。

6. 単電子エレクトロニクスに関する各国の研究開発状況

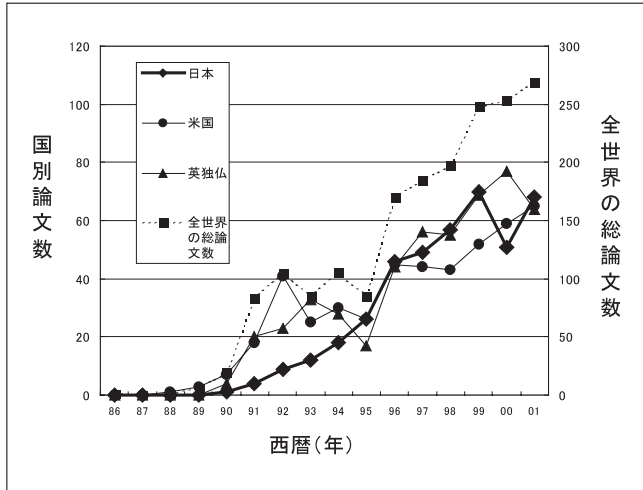
米国ISI社のデータベースにより、過去21年間（1981年1月～2002年10月）にわたり全世界で発表された論文のうち、単電子に関する論文の件数を調べた結果を表1にまとめた。単電子による新しいデバイス、システムの動作原理である「クーロンブロッケード (Coulomb Blockade)」というキー

ワードで検索される論文は合計1934件ある (図表5)。またこのうち単電子トランジスタ (single electron transistor) に関する論文は631件である (図表6)。単電子デバイス・システムの集積化を志向していると考えられる論文を検索するため、「単電子 (single electron)」 and 「論理 (logic)」 or

「メモリ (memory)」 or 「集積化 (integrated)」 というキーワードで調べると合計345件であった (図表7 - c)。さらに二分決定グラフによる論理回路に関する論文は11件、量子ドットセルオートマトンに関する論文は81件であった (図表7 - d)。

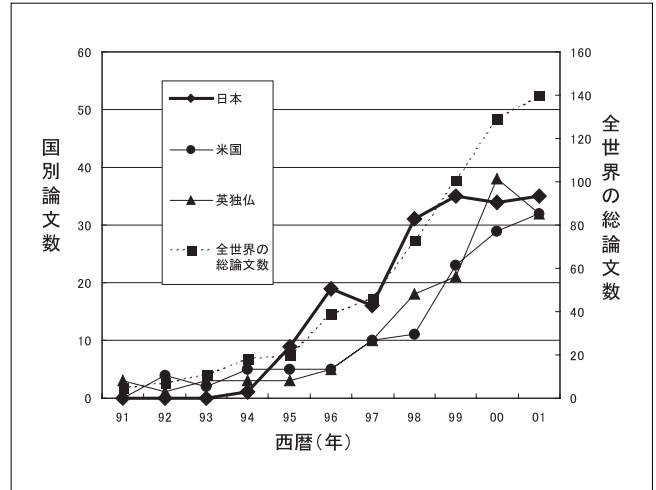
この表より我が国の「クーロン

図表5 coulomb blockade をキーワードとして検索



1986年以降合計1934件（うち日本464件）、1985年以前はいずれの国からも発表はない。

図表6 single electron transistor をキーワードとして検索



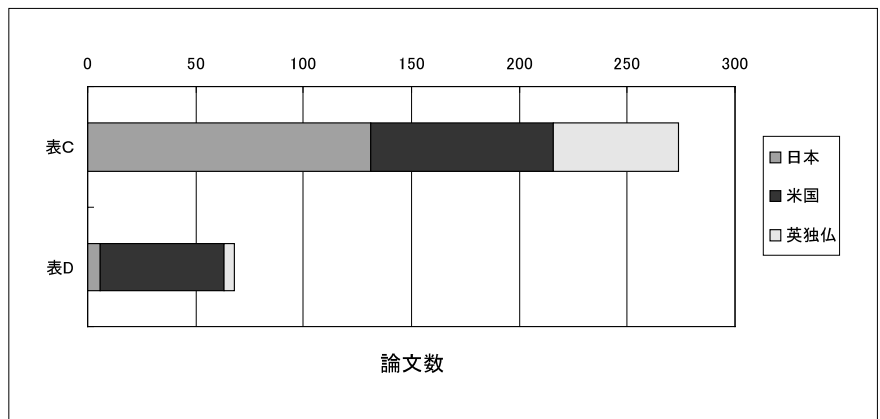
1991年以降現在まで631件（うち日本205件）、1990年以前はいずれの国からも発表はない。

ブロッケード」「単電子トランジスタ」に関する研究は、米国、ドイツとともに群を抜いて多いことがわかる。特に「集積化」という応用を志向した研究は世界で一番活発に研究が行われていると言える。

「二分決定グラフに基づく論理回路」は、北海道大学の長谷川教授らにより提唱され、まだ研究が開始されて日も浅いため現在まで同大のグループからの発表が中心になっている。しかしこの方式はシリコンを含めた多くの材料に適用できると考えられ、今後研究の拡がりを見せてくると予想される。

また「量子ドットセルオートマトン (QCA)」に関しては米国からの発表が圧倒的に多い。QCAは1993年に米国ノートルダム大学のC. S. Lentらにより提唱され

図表7 (c) single electron and (logic or memory or integrated) をキーワードとして検索、(d) quantum-dot cellular automata or (quantum cellular automata and dot) or quantum dot cells or (cellular automaton and single electron) をキーワードとして検索



(c) 1991年以降現在までの総論文数345件（うち日本138件）、1990年以前はいずれの国からも発表はない。(d) 1993年以降総論文数81件（うち日本6件）

現在米国では同大学を中心に研究が活発に行われているが、日本ではわずかの動作シミュレーション

に関する研究はあるものの実験的な研究は一切行われてはいない。

7. おわりに

以上、次の世代の情報処理・通信を担うデバイスのうち、単電子で機能する集積回路の実現に向けた研究開発の現状と将来展望をまとめた。

我が国においては、単電子デバイス・システムの集積化を志向している研究は世界で一番活発に研究が行われている。二分決定グラ

フに基づく論理回路に関しては、我が国を中心に研究が立ち上がりつつある。量子ドットセルオートマトン (QCA) に関しては、米国で活発に研究が行われているが、我が国ではわずかの動作シミュレーションに関する研究はあるものの実験的な研究は一切行われてはいない。このQCAはまだま

だ先が不透明な部分も多いが、実現できれば現在の集積回路の集積度を飛躍的に高めることが期待できる。我が国においても今のうちに何らかの研究を始めておかないと完全に米国の後塵を拝する結果になりかねない。

長期的な視点から、「単電子エレクトロニクスの実現」のような

新原理デバイス・システムの構築に取り組む研究に対しては、第1章で紹介した科学技術振興事業団の「戦略創造プログラム」にとどまらず、今後もさらに継続的な研究資源の投入が必要であろう。

謝 辞

本特集をまとめるにあたり、東京工業大学量子効果エレクトロニクス研究センター小田俊理教授、北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻量子界面エレクトロニクス研究センター長、長谷川英

機教授、東芝研究開発センターLSIラボラトリー棚本哲史氏、独産産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門松本和彦総括研究員に多くのコメント、情報をいただきました。ここに深く感謝いたします。



特集③

水循環を基本とした 総合水管理に向けた研究動向



総括ユニット 山口 充弘

1. はじめに

我が国は河川流域を単位として自然の水循環を中心とした国土基盤に都市が成立し、日々の暮らしを営んできた。しかし、社会経済活動の発展による環境負荷等が影響し様々な弊害が生じている。

これは国内を問わず全地球的規模で同様に発生している。世界の水をめぐる諸問題は量・質両面から自然地形の改変や人間活動との相互作用によって引き起こされている。

本年8月に行われたヨハネスブルグ環境サミットにおいても、世界の水需給の現状と予測なども報告され、広く水問題が議論の対象になっている。さらに、2003年3月に日本で開催される第3回世界

水フォーラムにおいても多くの研究事例の報告が行われ、研究に基づく議論が展開されるものと思われる。

水問題の根元的な視点に立つと、いかに水資源を有効に利活用するか、さらには、清浄で豊富な水が連続と循環する、健全な水循環系を確立・維持するかが大きなポイントといえる。

我が国でも、第2期科学技術基本計画分野別推進戦略において、「環境」及び「社会基盤」各分野で「流域水循環系健全化・総合水管理」構築等の研究開発が重点領域として位置づけられ鋭意推進されている。

総水循環機構を明らかにする水

循環モデル等については、都市流域における基本モデル、地球的規模での水資源需給解析モデルが構築されかなり定量的評価が可能となっており、今後は、土砂移動や複雑な地形等も反映可能なモデルの精度アップが望まれるところである。これは取りも直さず水循環変動モデル構築へつながり、日本を含むアジア地域の水循環変動や水資源評価の大きなツールとなるものである。

総合水管理関連では、都市河川流域をケーススタディーとして、検討が進められているが、治水・利水の研究に比べて、これらと深く関係する環境指標や環境評価手法の研究は遅れているのが現実で

図表1 環境分野の重点課題

重点課題	イニシアティブ	概要
自然共生型流域圏 都市再生技術研究	都市・流域圏環境モニタリングプログラム	生態系と都市の現状について、自然環境基盤（水循環、物質循環、生物多様性等）及び社会環境基盤（都市河川、沿岸等）双方から観測・診断評価する技術開発
	都市・流域圏管理モデル開発プログラム	水循環モデル、生態系モデル等要素モデルの開発と統合管理モデルの開発
	自然共生化技術開発プログラム	水循環に焦点を当て、生態系と生活空間の修復再生技術開発
	自然共生型創造シナリオ作成	総合的推進のためのシナリオ構築とそれに基づく実践技術開発
地球規模水循環 変動研究	全球水循環観測プログラム	観測・モニタリング体制の充実及びデータベース整備
	水循環変動モデル開発プログラム	エネルギー輸送・水循環自然変動機構の解明及び人間活動による水循環変動・環境変動予測モデルの開発
	人間社会への影響評価プログラム	水循環変動が食糧生産や社会・経済に及ぼす影響評価
	対策シナリオ・技術開発の総合的評価プログラム	水問題に関する最適な対策シナリオの提示

科学技術基本計画 分野別推進戦略より作成

ある。

本報告では、第2期科学技術基本計画における水循環に関連した

重点領域に着目し、地球規模での水需給解析モデル開発等水循環を基本とした総合水管理に向けた研

究動向について述べる。

2. 分野別推進戦略における研究目標

第2期科学技術基本計画によると「環境(図表1)」、「社会基盤(図表2)」各分野の推進戦略プログラムにおいて下記の通り、水循環に関する研究開発の重点課題が規定されている。

図表2 社会基盤分野の重点領域

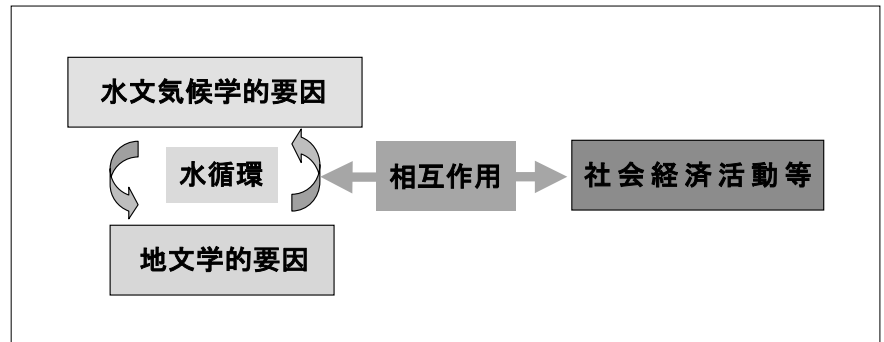
重点領域	研究項目	研究開発目標
美しい日本の再生と質の高い生活基盤創成	流域水循環系健全化・総合水管理	重要な水系、主要中小都市河川、地盤沈下防止等対策要綱対象地域(関東平野北部、濃尾平野、筑後・佐賀平野)及び世界数河川流域の水循環系健全化の研究開発

図表1に同じ

3. 水循環—水資源システム

水循環—水資源システムとは水、土地、人間が織りなすシステムであり、降水、蒸発散、気温、日射等の「水文気候的要因」と、地形、地質、土壌等の「地文的要因」が、社会経済活動等の「人工的要因」との相互作用によって、それぞれの要因がまた変化するというダイナミックなシステムである。これらの要因が水問題の特徴づけているものといえる。

図表3 水循環—水資源システム概念図



※科学技術政策研究所講演録No.93「水循環と水資源—ローカルな視点からグローバルな視野へ」より作成

4. 流域水循環系健全化・総合水管理の研究動向

4-1

水循環健全化に資する技術

健全な水循環を構築・維持するための基本的な技術の1つに貯留・浸透技術がある。

森林や農地などはそれ自体が大きな貯留・浸透施設といえるものであるが、高度に都市化された河川流域においては、いかに水を土中に貯留・浸透させて、さらに、地下水流動に乗せて河川などに還元させるかが清浄かつ豊富な量の水循環確保の要といえるものである。このためのインフラとして、浸透施設(浸透升、浸透トレンチ等)がある。良好な浸透能力を持つ浸透施設を設置するには、地

形・地質条件がポイントとなる。一般的には台地、扇状地、丘陵地、砂地などが適地であるが、空気間隙率が低く締め固まった地盤、粘性土、地下水位が高い箇所などは避けた方がよい。この浸透施設は各戸で設置し雨水を土中に導水している。又、下水道雨水幹線とも接続され、豪雨時には余剰水が雨水幹線に流れる仕組みとなっている。

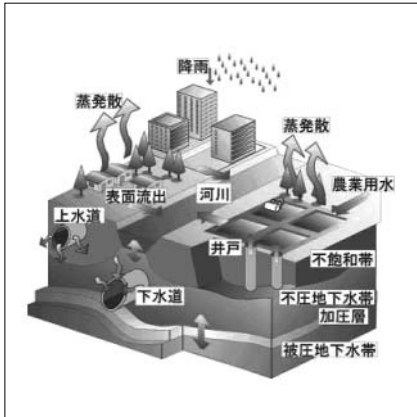
又、歩道などでも従来の標準的構造の舗装に代わって、透水性舗装が都市域を中心に普及している。この舗装は表面アスファルトに適度な空隙を持たせ、路盤を通じて地下に浸透させる構造のものである。

4-2

流域水マネジメントにおける環境評価手法

健全な水循環系とは「流域を中心とした水循環の場において、治水と利水と環境保全に果たす水の機能を、持続性があり、適切でバランスのとれた状態にする。」と定義され、世界的に共通の概念となっている。人間との係わりから見ると、治水、利水、環境保全という、価値観と利害が異なる3つの側面が有る。ここで問題となるのが環境とのバランスをどう評価するかという事である。環境というある意味抽象的で主観的判断・評価が支配する対象であることか

図表4 水循環概念図



※鶴見川流域水委員会資料より

ら、関係者間で合意形成を図るのは非常に困難である。

各側面での要求の相違や利害の対立などを新たな技術の適用とそれに伴う制度的な対応で和らげ、水循環系と人間との好ましい関係を構築する。このことが、流域水マネジメントの目標であり、成果ともいえる。

現在、環境省、国土交通省等で生態系調査、水質調査、河川水辺の国勢調査などが毎年実施され基礎的データの蓄積と特性、分布などの解析評価が行われている。又、森林や農地・緑地の涵養機能評価や遮熱性評価なども実施されている。

これらの基礎データから適切な環境指標を設定し、流域に生息する生物の種や生息場について治水、利水との関係から総合的に評価し、環境配慮型対策事業や自然再生事業に反映させるための評価手法が進められている。

4-3

水循環モデル

健全な水循環を基本とする、流域水マネジメントの構築に当たっては、関連する各種観測データを蓄積しこの基本データに基づき、施策の効果や影響を定量的に把握し、評価する様々な解析モデルの開発が必要不可欠である。

ここでは、水文、地質、地形、土地利用などのデータから流域に

図表5 水循環モデルにおける入力データ

水循環系を構成する要素	自然系	雨量、蒸発散量
	人工系	雑排水、上水道漏水、下水道漏水、農業用水、地下水揚水、流出抑制施設
流域情報	地表面	標高、勾配、流下方向、不浸透域分布、土壌被覆、窪地貯留能
	表層土壌	表層土壌特性
	帯水層	水理地質構造、境界条件
	自然系	河道諸元

図表4と同じ

図表6 流域内設定条件

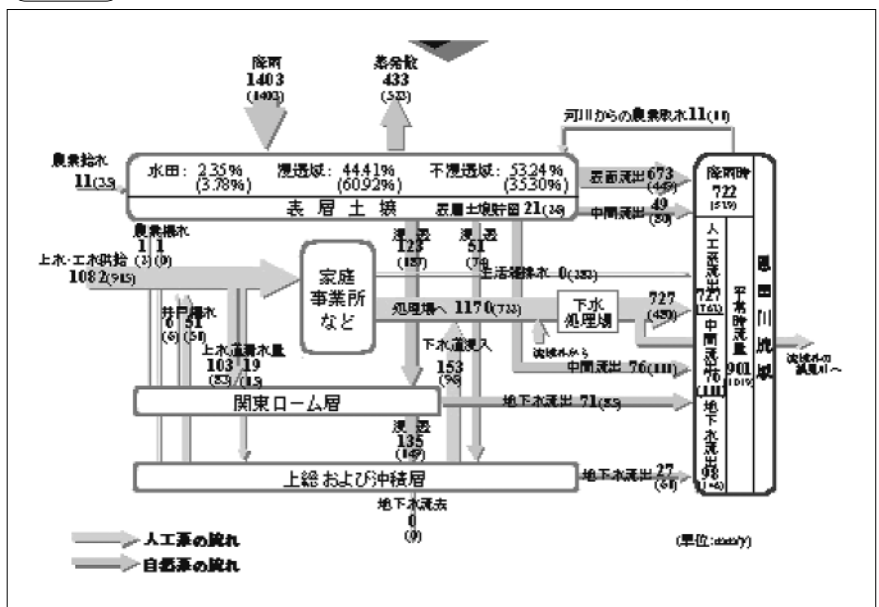
	現在 (1994)	将来 (95%開発時)
不浸透面積率	細密数値情報	法的に担保された自然地以外は開発されると仮定
流域人口	住民台帳	新規市街地に現在の市街地人口密度から仮定
上水道使用水量	使用水量原単位を人口に乗じる。	現在の使用原単位に人口を乗じる。
雑排水量	下水道普及率、水洗化率より算出	下水道普及率100%とし、排出0。
上水道漏水量	無効水量から推定	現在の無効水量が維持されると仮定
地下水揚水量	自治体資料	現在と同量とする
農業用水量	水田面積に減水深*を乗じる。	同左
農業揚水量	自治体資料	現在と同量とする
下水道浸入水量	不明水量から算出	現在の不明水量が維持されると仮定
処理場放流量	自治体資料	使用水量から推定

*減水深とは溜まった水の減少量を表す。通常1日当たりの減少深さを用いる。

図表4と同じ

図表7 水循環モデルによる将来予測結果例

()内は将来予測値



図表4と同じ

における水の挙動を把握し評価できる「水循環モデル」について詳述

する。水循環系を解析する手法の中で

最も精緻なものとして、「分布型物理モデル」がある。

これは、流域を一定間隔の格子状に分割し、各メッシュの水分移動を追跡することで流域の水循環系を表現するモデルである。水循環機構の概念を図表4に示す。

地表面及び河道では従来の洪水解析手法、表層土壌部分では飽和不飽和浸透流計算、地下水層では準3次元地下水計算を行い、地表、地中、地下水層における水の移動をそれぞれ追跡できる。

主な入力データについては図表

5のとおりである。

ここでは、鶴見川における、解析事例を示す。解析に当たっては、1994年現在における流域の状況を「現在」とし、流域内で最大開発が行われ、流域内市街化率が95%になった場合を「将来」と設定している。

上記条件下で、将来予測の解析結果を図表7に示す。

これは、鶴見川支川恩田川の小流域における将来水収支の予測結果であるが、①降雨の浸透量が減少し表面流出が増大、②河川への

地下水流入量が減少、③河川流量の内下水処理水の占める量が増大する等の変化が予測されている。この様に水循環の変化を定量的に捉える事が可能である。又、流域内の何処に、どんな対策をすると水循環が変化するかなども定量的に解析可能で、効果的な対策を立案する上で大きなツールとなる。この他、水質評価のための「分布型汚濁負荷流出モデル」も開発され、水循環の「質」の部分においても評価、予測が可能となっている。

5. 地球規模水循環変動に関する研究動向

5-1

社会的背景

「World Water Vision、2000」(オランダハーグで開催された第2回世界水フォーラムにおける報告書)において21世紀には世界全体での取水量は主に灌漑用水の需要増加が原因で、1995年の3,800 km³から2025年には4,300～5,200 km³にまで増加すると予想されている。又経済成長は過度の水利用を引き起こし、自然生態系に深刻な影響を与え、さらに、水問題も含め国際的な衝突や緊張を引き起こす懸念があると報告された。

地球規模での水資源評価の研究は従来、国毎にラフに算定した水量からの評価であったが、最近、地域的特性を評価可能な河川流域毎の水資源評価モデルの研究が国際的にも開始されている。

5-2

水供給モデル

全地球0.5°メッシュ(緯度・経度換算)の陸面水文植生モデルにより、降水量から蒸発散量を引いた量が陸地の表面流出や地下への浸透により最終的に河川に流出

するものとして流出量をメッシュ毎に算出する。次に世界の地理分布に基づき河川流域毎に河川流量を算出し流域の水資源賦存量(注1)とみなす。河川における年間総流量が最大利用可能な水資源であると仮定する。

基本的には雨量の多い熱帯域や大陸東岸、アジアモンスーン地域などで流量が多く、上流からの流下により、エジプト等ではナイル川沿いに利用可能な水が多く存在する。

(注1) 水資源賦存量とは降雨量から蒸発散量を引いた量に面積を乗じたもの。人間が使える最大可能水量といえるものである。

5-3

水需要モデル

生活用水、工業用水は国毎に人口当たりの原単位を求め、人口分布に従い国別総取水量を各国内地域に割り振る。同様に農業用水も灌漑農地面積当たりの原単位を国毎に求め、灌漑農地面積分布に従い国別総取水量を分布させる。世界の灌漑農地面積の47%を占めるインド、中国、アメリカは国単

位ではなく、州あるいは郡単位の統計データに基づき農地面積分布が推定されている。

アメリカ西海岸、東欧を含むヨーロッパ全域から西アジア、インド北部、中国、日本等で大量に取水されている。

5-4

水資源需給分布の現状

現状の水資源需給を評価する指標として水利用率 R_{ws} を用いる。年取水量を W 、塩水の淡水化により賄われている年水資源量を S 、年水資源賦存量を Q とすると、 $R_{ws} = (W - S) / Q$ と定義される。この R_{ws} の値により渇水レベルを分類する。 $R_{ws} < 0.1$ でストレス無し、 $0.1 < R_{ws} < 0.2$ で低い、 $0.2 < R_{ws} < 0.4$ でやや高い、 $0.4 < R_{ws}$ で高い(水不足状態)と評価する。

結果を示す図表8を見ると、アメリカ西部、中近東、インドパキスタン国境付近、インド北部チベット南縁、中国北部黄河流域～華北平原付近が利用可能な水資源量に対して実際に利用している水量が多く、変動に対して脆弱で水ストレスがかかっている状態と言える。

また図表9に示すもう1つの水資源需給指標として1人当たり年使用水量 (W-S) / C、C：人口) を算出すると、特にアメリカ合衆国西部において突出して多くなっている。これは、他地域へ出荷する農業生産物用であると考えられる。

この農産物等の生産に伴い消費される水は仮想水 (Virtual water) と呼ばれ、日本は農産物の輸入と共に大量の水を輸入していることとなります。これはまさに、日本人の生活は仮想水の輸入に頼っている事で、その恩恵を世界に還元することを考えることも必要である。

5 - 5

水資源需給の将来予測

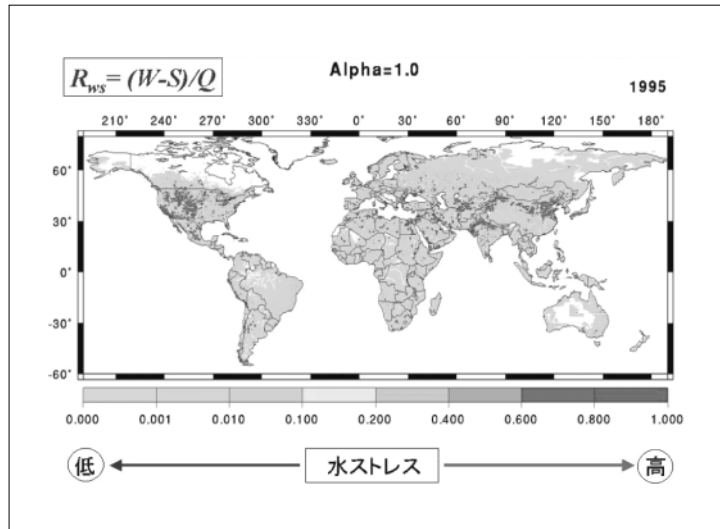
将来予測に当たっては、現状分析と同様、水資源量と水需要量とのバランスを考える。

水資源量の推計に関しては、東京大学気象システム研究センターと国立環境研究所が開発した「大気大循環モデル (GCM)」によるCO₂ 倍増時の数値計算結果を利用。これは、ほぼ2050年頃の状況に対応する。この降水量予測から河川流出量を算定し、水供給モデルの場合と同様に将来の河川流量を求める。予測の結果からは、中国北部、インド、インド・パキスタン国境付近～アラル海方面にかけて流量が増加し、水資源供給面では緩和が期待できる結果となっている。

一方、需要予測に当たっては、人口に関しては国連による中位推計に従い増加し、農業用水取水量は人口増加に比例して増加するとしている。生活用水、工業用水の水需要原単位の増加についてはRaskin等の将来推計を利用している。

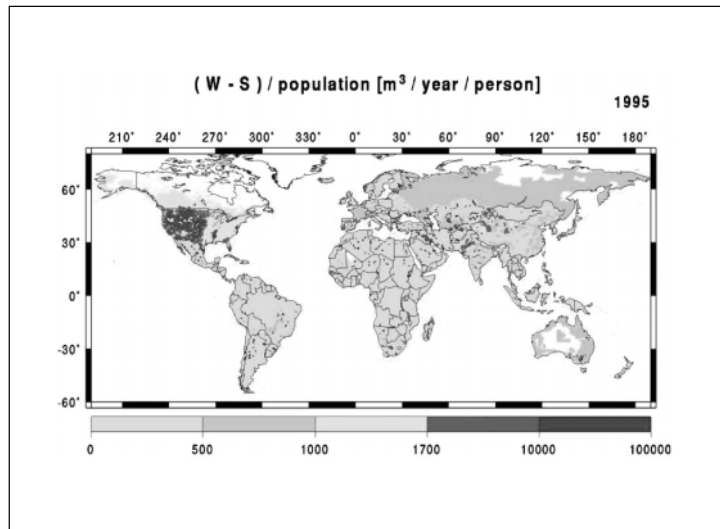
以上の条件から算出された、河川流域毎の2050年までの経年的な水利用率変化の予測を図表10

図表8 水ストレス指標 (年利用量/潜在的年利用可能量)



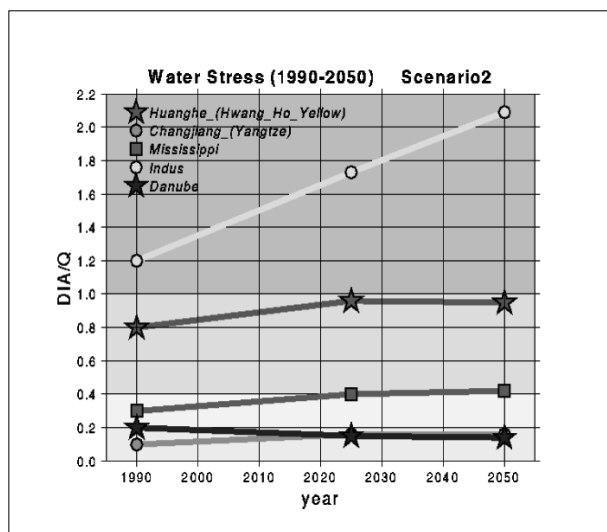
図表3と同じ

図表9 一人当たり年使用水量 (m³/年・人)



図表3と同じ

図表10 河川流域毎の経年的な水利用率変化



図表3と同じ

に示す。

- インダス川 (Indus) では温暖化の影響で水資源量が増加する。しかし、水利用率は90年から2025年、2050年と線形に高くなっている。これは、

持続的な人口増加によるものである。この流域においては、人口増加の影響の方が気候変動の影響を上回ることを意味している。

- 黄河流域 (Huang he) では人口増加率が低下するため、

水利用率は2025年から2050年まで安定する。

なお、気候変動と比較すると人口増加の方が水利用率に対して主要な影に対して影響を与えるという同様の研究報告事例がある。

6. 日本を含むアジア地域の特性を考慮した研究の視点

全球水循環の評価モデルの構築により、マクロな水の変動を捉える事は地球温暖化などの影響による対応を考える上で大きなツールとなる。従来の研究は欧米を中心に進められてきたため、欧米の持つデータに基づく解析となっている。しかし、多くの都市が沖積平野に位置し、造山運動の影響を直接受ける等の自然特性を持つアジア地域における水循環—水資源システムの解明も重要な視点である。今後の途上国における持続的発展を支えるためにもこの種の研究を推進する必要性はたかいものと言える。現在、日本が中心となり、アジア太平洋水文水資源協会設立に向けて活動が始まっている。主な研究課題は以下の通りである。

- ① ヨーロッパで共同開発された分布型水文モデル (水の浸透、

流出、蒸発散等の定量的解析モデル) はなだらかな地形を対象としていることから、鉛直浸透のみのモデルとなっている。これは山地・丘陵地での適用性が低いもので、斜面流成分を含むモデル化によりアジア地域の山地に適用できる新たなモデルの開発を推進。

- ② 欧米では特殊な水循環過程をもつ石灰岩地帯を対象に「石灰岩地帯水文学」が成立しているが、アジア地域—火山地帯は特殊な水循環過程と土砂生産・流出過程をもっており、「火山水文学」の体系化が必要。
- ③ 欧米での土砂生産の主体は雨滴による土壌剥離と地表流による浸食として定式化している。アジア地域では浸食の他、山地崩壊、地滑り、火山噴火、土石流などの不連続な土砂生

産の効果が大きく、これらの現象を反映した解析技術が必要。

- ④ その他、アジアモンスーン地域に特有な研究課題として、次の様な課題がある。
 - アジアモンスーン地域の降水機構、水資源変動、エルニーニョの効果
 - 水田稲作地帯の灌漑排水技術と水管理
 - 沖積低地に立地する都市の治水、利水、環境問題
 - 水の絶対量が多いが、需要とのインバランスによる大都市の水不足と水域汚染問題
 - 多量の土砂生産、流出に対する対策 (砂防技術、沖積河道の安定化など) が必要
 - 気象学、農業工学、河川工学、林学、地下水学等それぞれの分野で、安定帯 (欧米) と異なる研究課題の抽出と研究開発。

7. おわりに

国内の河川流域を単位とした総合水マネジメントにおける基礎技術や水循環モデル、水循環系健全化に向けた具体的な研究動向について地球的規模での研究を含め概観してきた。これらは、まさに今後の水管理対策の重要なツールである。総合水マネジメントにおける様々な検討はいわば壮大な社会実験であるといえる。しかし、多くの課題が山積していることも事実である。以下、現段階で考えうる視点を提起する。

- 水循環モデルの様な現象を視覚的に把握できるモデリング手法をより精度よく、広範囲な領域に広げることが重要である。環境評価については、合意形成の上でキーとなる領域であることから、研究開発を強力に推進する必要がある。
- 土地利用に水循環系の視点を取り入れる。必要であれば、法的規制を行使できる等社会科学からの検討も十分考慮す

る。

- 市民、企業、自治体、国が役割分担と連携を図り取り組むのは当然であるが、とりわけ、流域における都市づくり、治水対策、防災対策等多くの事業・行政を担当する自治体側の主体的取り組みが大きなポイントとなる。国側でも地方分権の推進や技術協力を積極的に推進することが求められている。
- 日本はこれまで欧米のモデル

に基づき研究が進められてきたため、アジアとの共通性を意識する姿勢が少なかった。日本がこれまで培ってきた水循環—水資源システムにおける様々な施策や精度、技術等、成功と失敗を含め提示、発信して、特にアジア諸国への適用性を検証する。さらに、アジア地域特有な地形や社会経済活動等から規定される水循環—水資源システムについても世界に発信し、必要な研究開発を推進する。

- 今や水問題は世界の共通認識となっている。健全な水循環系の構築に資する社会・技術システムについて、日本からアジア諸国等への技術移転の

円滑かつ適切なシステムを構築する時期である。従来のODA等の海外援助システムを改善していく際、相手国特有の習慣、風土等を大切した視点も効果的技術移転において重要である。

謝 辞

本稿は、科学技術政策研究所において2002年8月7日に行われた東京大学生産技術研究所教授虫明功臣氏による講演会「水循環と水資源 —ローカルな視点からグローバルな視野へ」を基に、我々の調査を加えてまとめたものである。

本稿をまとめるに当たって、虫明教授にはご指導を賜ると共に、関連資料を快くご提供いただきま

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・引用文献

- 1) 総合科学技術会議第2期科学技術基本計画分野別推進戦略（平成13年9月）
- 2) 科学技術政策研究所講演録No.93「水循環と水資源 —ローカルな視点からグローバルな視野へ」
- 3) 鶴見川とその流域の再生（平成14年4月）
- 4) 「気候変動を考慮したグローバルな水資源需給の将来」東京大学生産技術研究所：沖大幹、虫明功臣、鼎 信次郎、安形 康、(株)ニュージェック：猿橋崇央

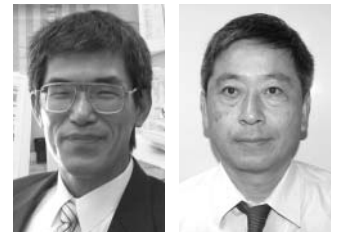


特集④

エアロゾルの地球温暖化への影響の研究

— 残された課題への取り組み —

環境・エネルギーユニット 根本 正博*
客員研究官 小林 博和



1. はじめに

人間活動が大気中に微量に含まれる温室効果ガスを増加させ、地球規模の気候変動に対し長期的に影響を与えているという概念は、既に広く知られるようになってきている。温室効果ガスには、大部分の量を占める二酸化炭素 (CO₂) をはじめとして、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O)、ハイドロフルオロカーボン (HFC) ・パーフルオロカーボン (PFC) のフロン類、6 フッ化硫黄 (SF₆) という合計6種類がある¹⁾。これらの温室効果ガスの作用を取り込んだ気候理論が精緻になることにより、多くの気温上昇予測のモデルを使ったシミュレーション結果の差が小さくなり、温室効果ガスによる影響の科学的信頼性が高められてきている。このような温暖化効果の定量的評価の積み重ねを基に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は今後100年間のCO₂濃度の増加や平均気温の上昇に関する予測結果を含む評価報告をまとめ、これまでに第1～3次の評価報告書¹⁻³⁾を公表している。

IPCCによって地球温暖化現象に関する科学的知見が積み重ねられるのに伴って、気候変動に関す

る国際連合枠組み条約 (略称：国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC)) 締結国会議 (COP、1995年～) で温室効果ガス削減の数値目標などが議論された。第7回会合 (COP7、2001年) では、第3回会合 (COP3、1997年) における京都議定書の運用規則についての合意がようやく成立し、京都議定書の発効に向けた動きが関係国で活発になっている。京都議定書が発効された場合、我が国は、2008～2012年の第1約束期間において、温室効果ガスの総排出量を1990年基準比で6%削減することを義務付けられる^{4, 5)}。これを受けて、2002年政府は地球温暖化対策推進大綱⁴⁾を決定し、我が国における具体的な温暖化対策を提示するとともにその促進を図っている。

しかし、地球温暖化現象に関わる物質は温室効果ガスばかりではない。火山の噴火で大気中に放出される火山灰で日光が遮られ気温が低下する現象などのように、大気中を漂う微小粒子が気温に与える影響は大きい。化石燃料の燃焼や火山の噴火などによって発生し大気中を浮遊する直径000.1～10 μm程度の微小粒子はエアロゾル

(エアロゾルとも表記される) と呼ばれている。エアロゾルによる地球温暖化の促進および抑制効果^{6, 7, 8)}、実証が難しいとされる雲により最高気温と最低気温の差が縮まる効果⁹⁾ などについては、未だ十分な科学的信頼性が確立されていない状況にあり、科学的知見のより高度な集積を目指して研究が進められている。

本稿では、エアロゾルの影響評価に関する科学的信頼性を確保する三つの研究領域、即ち、観測・モニタリング研究、モデリングによる地球温暖化メカニズム研究、シミュレーションによる温暖化の将来予測研究、を対象として議論する。第2章では地球温暖化研究の分類を行い、三つの研究領域の関連付けに言及する。第3章ではエアロゾルを中心とした観測・モニタリング研究の現状、第4章では観測・モニタリング研究とメカニズム研究との連携の在り方、第5章では将来予測研究を推進させるために必要となる取り組みを述べる。第6章で、エアロゾルに関する地球温暖化研究の今後の課題をまとめる。

2. 地球温暖化研究の区分けと連携関係

地球温暖化に関する国際的な枠組みにおいて、IPCCの取りまとめる科学評価のベースとなる科学

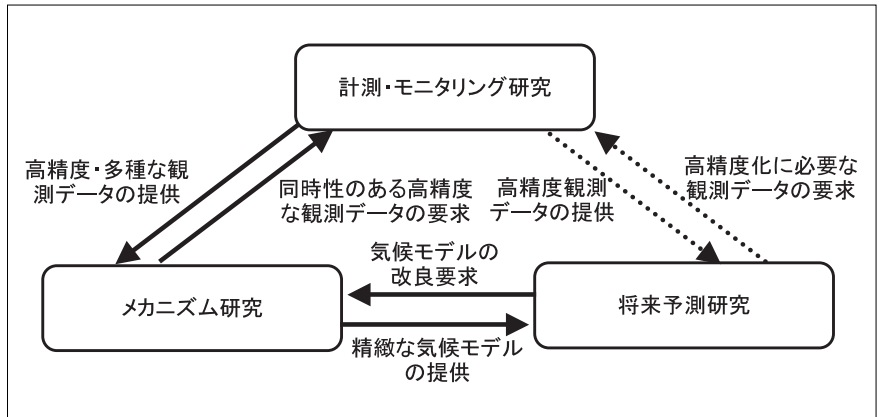
的研究成果は、(i) 地球規模での気候システムの解析などを目的とする「世界気候研究計画」(World

Climate Research Programme : WCRP)、(ii) 地球規模での気候変動に関する生物学的・化学的プロ

セスに関する知見の集積を目的とする「地球圏—生物圏国際協同研究計画」(International Geosphere-Biosphere Programme: IGBP)、(iii) 地球変動の人文社会科学的側面からの研究を行う「地球環境変化の人間・社会的側面に関する国際研究計画」(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change: IHDP)、という3つの国際研究計画の共同出資によって進められている「解析・研究・研修システム」(START: Global Change System for Analysis, Research and Training (IGBP-WCRP-IHDP))でとりまとめられている。

IPCCによる科学的評価の集積は、国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)による国際的枠組みでの政策決定と連携関係にある。科学的評価は、①温暖化を引き起こす物質の観測・モニタリング、②モデリングによるメカニズムの解明、③大規模シミュレーションなどによる将来予測、④自然・人間居住環境などへの影響評価、⑤温暖化対策・適応策の策定、という区分けにおいて研究成果が政策動向に密接に関連するようになっている。この区分けのうち、①②③は科学的な面での取り組みが主体であり、エアロゾルの影響評価に関する殆どの研究がこの取り組

図表1 科学的な取り組みが主となっている3領域の連携関係の概念



(科学技術動向研究センター作成)

みに含まれる。

エアロゾルに関する科学的な研究は①②③の3領域に区分できるが、それぞれの領域は図表1に示すような連携関係があると言える。複数の観測・モニタリング手法により高精度のデータセットが得られれば、気候モデル研究者がそれらのデータセットを夫々の気候モデルに適用することによって気候モデルの精緻化が進むと期待できる。すなわち、それぞれの気候モデルにおいて過去の自然現象やその変動プロセスが再現できるようになると同時に、それぞれの気候モデルで使われている様々な仮定値や初期設定値の整理が図られることによって気候モデルの収斂化が予想される。気候モデルの精緻化は、シミュレーションによる将来予測の確からしさを高める

ことにつながる。また、シミュレーションの試行において、さらなる高精度化に必要なデータセットが明らかになれば、観測・モニタリング研究者に対し、一層の観測・モニタリング技術開発を求められることになる。

ここで注意することは、第1に、国内外の多くの研究機関が地域的な観測・モニタリングで得ているデータを地球上で比較すると、観測時刻が異なっており時間的な同時性が確保されていないということである。第2に、将来予測で用いるシミュレーションモデルの信頼性はまだ完全には確立していないということである。現状では、過去の気候変動の再現性を確認することによってモデルの検証を行っている段階にある。

3. 観測・モニタリング研究の現状

温暖化に関する観測・モニタリングには、利用する原理・手法、対象物、場所、観測時間、観測頻度の選択によって、極めて多様な方法がある。エアロゾルには、硫酸塩、すす、黄砂や火山灰のようなミネラルダストなどがあり、

これまでの研究によってそれらの物質を観測・モニタリングする方法が実用化されている。

3-1 エアロゾル観測の重要性

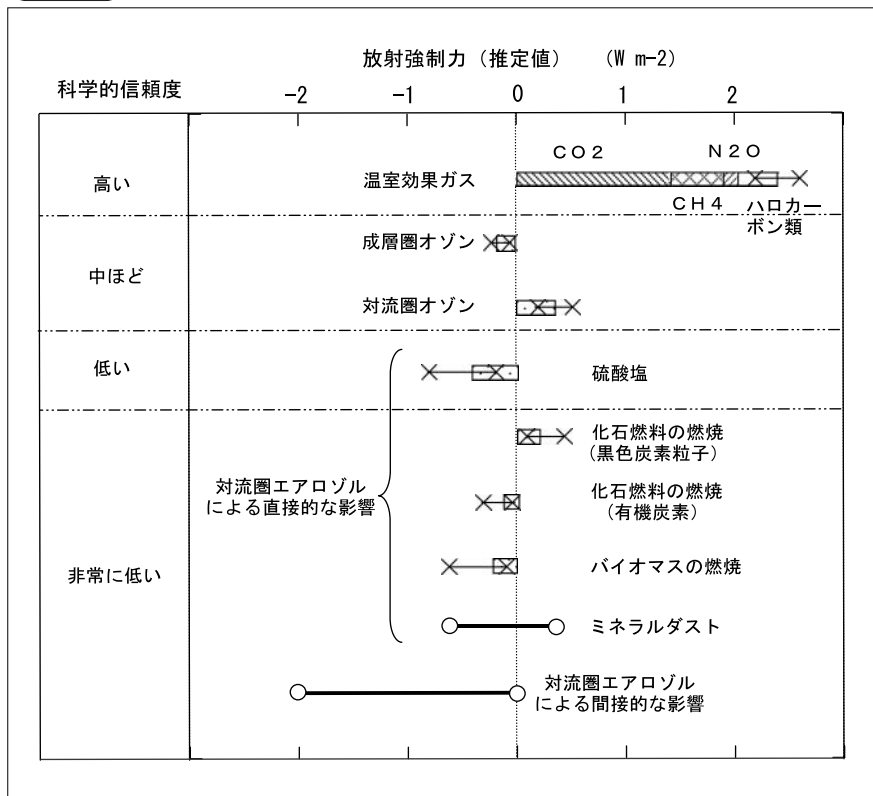
地球温暖化の原因物質には、温室効果ガスに加え、オゾン、エアロゾルなどがある。それぞれの物質がどの程度の温暖化効果・冷却化効果(負の温暖化効果)をもたらすかを示す指標として、放射強制力^①という物理量がある。放射強制力がプラス側に高いことは温暖化効果が高いことを意味し、マイナス側に高いことは逆に冷却化効果が高いことを意味する。これまでにIPCCに集積された科学的

用語説明

①放射強制力

ある因子が地球大気システムに出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力の尺度であり、気候を変化させる可能性の大きさを示す量である。

図表2 様々な物質の放射強制力の評価結果



棒グラフに「×」で区切られた直線は不確実性 (誤差量) の推定範囲である。「○」の付いた直線は、不確実性が大きいために放射強制力を代表する値を得ることが出来ないものである。

(参考文献⁶⁾ を基に科学技術動向研究センターが作成)

知見により、原因物質の放射強制力が評価されている^{2, 3, 6, 7)}。図表2は、最新の評価であるIPCC第3次評価報告において発表された放射強制力の推定値である。さまざまな物質等の推定値に対する科学的信頼度について、IPCCは主観的に評価している。科学的信頼度の評価に当たっては、放射強制力の評価に必要とした仮定、放射強制力を決定する物理的・化学的メカニズムの理解の水準、放射強制力の定量的な推定に関わる不確実性 (誤差量) などが考慮されている。温室効果ガスとオゾンについては信頼度が高～中レベルにあり不確実性も小さいのに比べ、エアロゾルの科学的信頼度は低い。特に対流圏エアロゾルに関する不確実性は著しく大きくなっており、エアロゾルに関する科学的知見が確立していない状況にある。

エアロゾルの放射強制力量を評価するのが難しい原因は、エアロゾルの発生メカニズムが複雑であ

り、地球規模でその発生量を把握することが難しいからである。さらに、大気中の移動に於いては雨による除去があるため大規模分布の把握が難しい。エアロゾルの化学的・物理的性質が複雑であるために、エアロゾルが浮遊する大気がどの程度太陽光を反射・吸収するかの推定も難しく、観測による大規模分布の把握を困難にさせている。このような事情から、現在使われている多くの気候モデルでは、エアロゾルに関する多くの物理的・化学的プロセスが簡略化されて組み込まれている。エアロゾルによって引き起こされる気候変動のメカニズム解明は十分とは言えず、エアロゾルに関する知見の集積が非常に重要になっている。

3 - 2

エアロゾル観測技術の現状

エアロゾル観測は物理的性質および化学的性質を特定するために

行われ、地上、海上、空から数種類の観測機器によって行われている。衛星に搭載された観測装置の性能向上によって、一度に観測できる面積はより広範囲となり、また地上でも多数の地点で観測されるようになったことから、高精度のデータが得られるようになってきた。

この他、情報技術の進歩に合わせて、世界の研究機関におけるデータ整備が進んでおり、研究者が解析対象とする観測時間のデータを世界中の研究・観測機関から短時間で入手できるようになりつつある。

(1)物理的性質の観測技術

エアロゾルの物理的性質についての観測技術は、能動的か受動的か、観測波長領域、観測対象物、観測手法などによって分類できる。図表3は、主なエアロゾルの観測機器に注目して観測技術の分類を行ったものである。

メカニズム研究におけるモデル構築に当たって、3次元的に分布しているエアロゾルの粒子数密度や粒子径分布などの物理的性質を診断する観測は不可欠である。この要求に応えられる観測装置がLIDAR (light detection and ranging)¹⁰⁾である。LIDARは、短パルスのレーザーを発生する部分とエアロゾルからの散乱光を検出する部分とで構成されている。上空のエアロゾルに向けて発射された短パルスレーザー光はエアロゾルの特性によってさまざまに散乱するが、レーザー側に散乱された光からエアロゾルの物理特性を診断することができる。レーザーの波長の選択によっていろいろな物理特性の診断ができ、レーザー光強度を高めることでより上空の観測ができるなどの理由から、LIDARに対する期待は大きい。これまでに精力的に研究が進められた結果、①都市域エアロゾル、

図表3 主なエアロゾルの観測技術の分類

観測機器の種類	観測手法	評価・推定できる物理量	観測機器の据付（衛星名）
放射計 (イメージャー、 分光計も含む)	①雲・地表面・水面からの放射を分析 ②太陽光の地表や雲などからの反射光を分析	①粒子径と種類 ②粒子密度の平面分布 ③物性値 ④雲の特性・分布	①衛星 ●改良型高性能マイクロ波放射計 AMSR - E (Aqua) ●改良型高分解能放射計 AVHRR放射計 (NOAAシリーズ) など
散乱計	発射させた光・マイクロ波の反射を分析	①海上風速（エアロゾル移動速度） ②風向（エアロゾル移動方向）	①衛星 ●コニカルスキャン型散乱計 SeaWinds (QuickSCAT) など
雲レーダ	発射させたマイクロ波の反射を分析	①雲の粒子状態（対流圏）	①地上 ②航空機
LIDAR	発射させたレーザーの散乱光を分析	以下の対流圏～成層圏の高度分布および平面分布 ①粒子密度 ②粒子径 ③材質	①地上 ②航空機 ③船舶 ④試験的に運用したもの ●スペース・シャトル

(科学技術動向研究センター作成)

黄砂、対流圏および成層圏エアロゾルなどの観測用として小型で消費電力が小さい小型LIDAR、②雲の移動状態の観測用としてレーザー光を掃引して観測対象の3次元画像を得るスキニングLIDARが開発され、③散乱による光の波長（周波数）変化から気温や風速の分布を測定できるLIDARの研究も進んでいる。①と②については、地上、航空機、船舶に搭載するLIDARが実用化されているが、③については原理検証レベルに留まっている。

衛星からの観測例は、スペースシャトルにLIDARを搭載してエアロゾルの鉛直方向の観測に成功したLITE実験があるが、未だに本格的な観測は行われていない。一方、地上や航空機からの観測は国内外の機関が精力的に進めている。気象庁は、岩手県大船渡市綾里に大気環境観測所を設置し、LIDARを用いて黄砂の鉛直方向

の分布（数百m～約10 kmまたは約5 km～約35 kmのいずれかのレンジ）や時間的変動を定常的に観測するとともに、中国などと連携し黄砂に関する観測情報を交換している¹¹⁾。独立行政法人 国立環境研究所・大気圏環境研究領域グループは、持ち運びやすい比較的小型のLIDARを用いて、高度約3 km以下の領域を24時間連続観測することにより時間的に精度の高い黄砂の鉛直方向分布データを得ており¹²⁾、観測地点をつくば、長崎、奄美大島、北京などの国内外に設定することにより平面方向の分布データも得ている。その他、千葉大学をはじめ多くの大学でもLIDARによる観測が行われてきており、LIDARは既に確立した観測技術と言える。

(2)化学的性質の観測技術

エアロゾルの化学的性質を得るための観測には専ら航空機が用い

られており、航空機内に導入した空気の分析やフィルターで濾し取った物質の分析を通して、エアロゾルの種類が同定され化学的性質が解明される。大気中を浮遊する組成が簡単なエアロゾルについては、種類や構造を特定する分析技術は既に確立しており、分析装置を搭載した飛行機や船舶による観測によって多くのデータが得られている。また、それらのエアロゾルに関わる化学反応のデータベースも豊富に揃えられており、大気組成の変動予測研究に用いるモデル構築に活用されている。しかしながら、大気中を浮遊するエアロゾルが化学反応をする際の速度定数やエアロゾルと硫化物等が結合した物質（例えば、黄砂 + SO₄や煤 + H₂SO₄）の化学的性質については、ほとんど解明されていないのが現状である。さらに、そのような結合物質の分析装置は開発途上にある。

4. 観測・モニタリング研究とメカニズム研究との連携

エアロゾルに関するメカニズム解明では、衛星や地上における過去の観測で得られたデータセットを用いて、過去のある期間での気候変動を再現できるモデルを構築することが研究の第1歩となって

いる。気候変動を再現できたモデルを利用して、エアロゾルの放射強制力が評価される¹³⁾。そのため、様々な観測においては観測時刻（または観測の時間幅）と観測対象物質の統一化（データの同時性）

が重要であり、さらに観測時刻毎のデータ項目についても不変性が保たれなければならない。従って、地球規模での観測を進める上で、各国および関連研究機関が、観測の手法、観測データの交換・共有、

観測結果の解析などで連携・協力することが必要となる。

現在、関連する研究機関ではいくつかの研究活動の枠組みがあり、それぞれが将来予測に取り組んでいる¹⁴⁾。気象庁は、現業として観測を行っている立場から、世界気象機関(WMO)が1989年に開始した全球大気監視(GAW)計画に基づいてエアロゾルなどのデータベースの構築を進めている¹¹⁾。

3 - 2節で述べた綾里の大気環境観測所は、エアロゾルなどを対象とした地域観測所としてWMOに登録されている。また、気象庁は気象研究所を中心に観測・モニタリングとモデリングを担当する組織を庁内に設け、将来予測研究に一貫した体制で取り組んでいる。

一方、国立環境研究所などの国内研究機関や大学の研究者らは、より高い精度でメカニズム解明を

行うことを目指して、GAW計画の枠組みとは別に、観測装置の開発、観測データの収集、モデルの構築を行っている。国立環境研究所では、それらの研究を担当するグループが組織されている。さらに、東京大学気候システム研究センターは、全国共同利用設備という立場でモデリングを中心とした研究を進めており、必要となるデータの一部を自ら観測して入手している。

5. 将来予測研究の推進への取り組み

今後のとりまとめが想定されるIPCC第4次評価報告書では、第3次評価報告書で残された課題になっている大気中の微量物質に関する研究成果に対し、高い評価が与えられると予想される。即ち、その研究成果での評価ポイントは、科学的知見の蓄積が高いとされた長寿命の温室効果ガスではなく、エアロゾルや対流圏内オゾンなどの短寿命物質が対象となる。これらの短寿命物質のうち、人為起源によるエアロゾルを抑制することが、温暖化対策としての大きな目標のひとつと考えられる。エアロゾルなどが短寿命であるのは、空気中の水蒸気と結合して雨粒になり地上に落下する他に、化学的に不安定であり様々な化学反応によって物質状態が変化することにある。エアロゾルが温暖化に及ぼす影響を予測する場合、エアロゾルの生成・移動・消滅の過程に於いて、それらの様々な化学反応による状態変遷を粒子密度と位置の関数として取り扱う必要がある、その計算量は膨大になる。このため、エアロゾルを考慮した将来予測研究では、膨大なデータ量を使った計算を短時間で行うことが必要不可欠になる。

これまでの将来予測研究はスーパーコンピュータを用いたシミュレーションが中心であったが、新たな推進ツールとして地球シミュ

レーターが完成しており¹⁵⁾、将来予測研究の新たな展開への期待が国内外で高まっている。地球シミュレーターを用いることによって、エアロゾルや排気ガス起源の対流圏内オゾンなど大気中の微量物質による気候変動の影響予測研究が格段に発展するものと期待されている。

地球シミュレーターにおけるエアロゾルに関連する研究では、3 - 2節で触れた未解明の化学的性質を詳細に評価しエアロゾル分布などの時間変化を地図上に表す「化学天気図」を作成すること、エアロゾル分布などの時間変化による全球的な気候変動や炭素循環の変化を予測することが重要な課題になると考えられる。また、地球シミュレーターにおいて全球を対象とした温暖化予測を行う場合、数km~10km程度のメッシュ(計算する地点)の設定が可能であるが、このメッシュ設定レンジでは雲に関する挙動を盛り込むことが出来る。即ち、エアロゾルが核となってできた雲の生成・消滅を温暖化予測に取り込むことができるため、これまでプロセスが複雑で従来のスーパーコンピュータでは取り扱えないとされてきた地球温暖化における雲の効果が明らかになるものと期待される。

計算ツールが従来のスーパーコンピュータから地球シミュレ

ーターに替わり計算性能が向上したことにより、メッシュのサイズは100km~数100km規模から数km~10km程度に緻密化している。これに伴って、雲の生成・成長・消滅過程をモデルに取り込めるようになるが、大きな課題になるのは、緻密化されたメッシュ毎の初期値であるデータセットを準備しなければならないことである。LIDARなどの観測・モニタリング機器が開発されているものの、地球規模でのエアロゾルに関連する観測データは十分に揃っているとは言えない。また、初期値として使う場合には、観測・モニタリングデータが同一時刻に観測されたものでなければならないが、現状でそのようなデータセットを準備することは、対象が中国を中心とする東アジアという限られた地域であっても、極めて難しい。従って、将来予測研究を推進する取り組みにおいては、データの同時性が確保できるように、観測・モニタリングに携わる組織や観測・モニタリング結果から将来予測研究で用いるデータセットを整備する組織などとの連携が不可欠である。即ち、国内外の組織を対象として図表1に示した3要素の連携関係を構築し、モデルの精緻化と観測・モニタリングデータの充実を図る仕組みを機能させることが重要である。

6. 今後のエアロゾル研究推進への課題

温暖化研究に残されたターゲットがエアロゾルであることから、精力的な観測・モニタリングとメカニズム解明、およびそれらの成果に基づく確度の高い将来予測に関する研究の推進が必要であるが、それらの研究課題に総合的に取り組む仕組みは未だ明確でなく、幾つもの解決すべき課題がある。

第1の課題は、モデル構築に必要な観測データが不十分であるため、現状のメカニズム研究の水準では定量的評価が可能なモデルの構築が難しいことである。各研究機関の取り組みにも関わらず、日本上空のエアロゾル分布をきめ細かく測定した観測データはない。衛星による観測・モニタリングが期待できない現状では、航空機による通年にわたる広範囲での観測が必要となる。また、地表付近のエアロゾル分布を観測する観測所が少ないため、モデルの精度を向上できるだけの地上観測網の整備も重要である。アジアについても、中国をはじめとして鉛直方向のエアロゾル分布データが不十分な地域が広く存在しているため、日本のイニシアチブによってアジア地域に関するデータの整備を図る必要がある。

第2の課題は、物理的・化学的知見の豊かなモデル研究者など、複数の研究分野に深い造詣のある研究者が国内には少ないことである。温暖化研究に携わる人材の供給源は大学であるが、エアロゾル観測を含む気候システムの研究をしている大学は、京都大学、千葉大学、東京大学、東京商船大学などのセンターや研究室に留まっており、それらの組織で今後育成が期待できる研究者数は限定される。また、今後、京都議定書の合意に基づく第1約束期間以降の温暖化対策の議論が始まると考えら

れるが、その議論の開始までに長い時間は残されていない。従って、今後短期間のうちに活躍し始めると期待できる研究者数は限られている。日本が今後の科学的知見の集積に貢献するためには、限られた数の若手研究者に観測・モニタリングとモデリングの両領域で研究できる能力を持たせ、さらには将来予測研究にも参画できるというような、より広範な研究領域で活躍できるような組織連携の仕組みの構築が求められる。

第3の課題は、観測・モニタリング研究やメカニズム研究において、日本発の良質の研究成果が十分に外国に伝わっていないことである。日本語論文による成果の発表が多いこともあり、IPCCの第3次評価報告書などでの引用数が少ないことが惜しまれる。ひとつの原因として、国内の関連学会やそれぞれの研究グループなどが幅広い研究領域における成果を網羅的・効果的に外国に発信する仕組みを確立させていないことが考えられる。今後、国内の一線級の研究者がIPCCを含めた国際的なプロジェクトに数多く参画してリーダーシップを発揮するとともに、彼らが媒介役となって国内の研究グループの連携および情報発信の強化を図る必要がある。

謝 辞

本稿の取りまとめに当たって、茨城大学・広域水圏環境科学教育研究センターの三村信男教授には科学技術政策研究所内講演会でご講演いただくと共に、国内外の動向に関する情報をご提供いただきました。京都大学・大学院エネルギー科学研究科の笠原三紀夫教授、東京大学気候システム研究センターの中島映至教授、国立環境研究所・社会環境システム研究領

域・環境計画研究室の原沢英夫室長および大気圏環境研究領域・遠隔計測研究室の杉本伸夫室長、気象庁観測部環境気象課の牧野行雄課長および佐々木徹・全球大気監視調整官、気象庁気象研究所気象衛星・観測システム研究部の永井智広主任研究官、地球フロンティア研究システム・大気組成変動予測研究領域の秋元肇領域長、千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・データベース研究部門の西尾文彦教授には、大変お忙しいところ長時間に亘って実り多い議論をさせていただくと共に、多数の論文・研究報告書、研究情報などをご提供いただきました。本稿は諸先生方に貴重な研究時間を割いて戴いた結実であり、ここに心からの深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) IPCC 地球温暖化第三次レポート、IPCC 編集、中央法規出版株式会社、2002年。
- 2) IPCC94: Climate Change 1994 - Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Cambridge University Press (1994).
- 3) IPCC95: Climate Change 1996 - The Science of Climate Change, Cambridge University Press (1996).
- 4) 地球温暖化対策推進本部ホームページ、<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/index.html>
- 5) 宮本和明、“CO₂地中貯留技術を中心とした温暖化対策技術の開発動向”、科学技術動向、No.15、科学技術政策研究所、pp.28-35、2002年。(http://www.nistep.go.jp/index-j.html)
- 6) IPCC 地球温暖化第三次レポート、IPCC 編集、中央法規出版株式会

- 社、pp.15、2002年.
- 7) 中島映至、“人為起源エアロゾルと気候変動”、科学、岩波書店、Vol.69、pp.838-845、1999年.
- 8) シンビオ社会研究会、“明日のエネルギーと環境”、日工フォーラム社、第4章、pp.141-172、1998年.
- 9) D. J. Travis, et al, "Contrails reduce daily temperature range", Nature, No.6898, Vol.418, 601 (2002).
- 10) 日本光学学会誌「光学」、"地球環境リモートセンシングの展望"、No.9、Vol.29、pp.532-553、2002年.
- 11) 大気・海洋環境観測報告第2号平成12年度観測成果、気象庁、2002年3月.
- 12) T. Murayama, T., et al, "Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia", J. Geophys. Res., Vol. 106, No. D16, 18,345-18,359 (2001).
- 13) 例えば、Nakajima, T., et al, A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters, Geophys. Res. Lett., 28, 1171-1174 (2001).
- 14) 例えば、地球温暖化に関する基礎調査－気候シナリオの検討－報告書、国土交通省、平成14年3月.
- 15) 科学技術動向、No.10、科学技術政策研究所、pp.5、2001年. (<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>)



SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

November 2002
(NO.20)

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：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996
URL <http://www.nistep.go.jp>
Email stfc@nistep.go.jp

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

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2002年11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