

科学技術動向

2003

6

No.27

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①マウス胚性幹細胞（ES 細胞）からの卵母細胞の分化誘導
- ②DNA ブックの開発とその有用性
- ③ポストゲノム戦略としてのゲノム機能解析
— ENCODE 計画が米国で開始される —

▶ 情報通信分野

- ①第四世代に向けた大容量光ディスクの提案相次ぐ
— ODS'03 のハイライトから —
- ②次世代フッ素レーザ・ステッパのレンズ材料：
フッ化カルシウムの大口径単結晶育成に成功

▶ 環境分野

- ①微小炭素粒子（すす）の大きな地球温暖化効果が報告される

▶ ナノテク・材料分野

- ①発光ダイオード材料でも高速の光通信が可能な基本原理を提案

▶ エネルギー分野

- ①メタンハイドレート開発の経済性
および CO₂ 排出量に関する研究成果が公表される

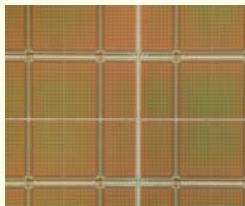
▶ 製造技術分野

- ①世界で最も小型の走査型電子顕微鏡

特集 1 昆虫を用いた生命科学研究の動向

特集 2 Futur

— ドイツにおける需要側からの科学技術政策の展開



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

①マウス胚性幹細胞（ES細胞）からの卵母細胞の分化誘導

胚性幹細胞（ES細胞）を用いて、通常得ることが困難な研究材料を調製する技術や、疾病の治療などに用いる技術が近年非常に進歩してきている。しかし、現在なお、分化誘導できるのはごく一部の細胞種だけである。特に、その生成に減数分裂を必要とする卵母細胞への分化誘導は従来不可能に近いとも考えられていた。米国ペンシルベニア大学のHubnerらは、マウスES細胞から卵母細胞も生じ得ることを示した。この技術は、クローニング技術や生殖医療の研究の進展に大きく寄与するものと考えられる。

②DNAブックの開発とその有用性

本格的な遺伝子機能解析の時代に突入している中で、DNAクローンを簡便に広く頒布させることは、遺伝子研究の発展のために強く期待されているが、書籍の形で頒布するという新しい技術（DNAブック）が、理化学研究所の林崎良英・河合純両氏等により開発された。DNAブックは、DNAクローンを固相化（染み込ませる）し書籍の形で、科学情報と共に利用者に頒布できるものである。本研究成果は、米国の科学雑誌『Genome Research Special FANTOM Issue』に掲載される。

③ポストゲノム戦略としてのゲノム機能解析

—ENCODE計画が米国で開始される—

ヒトゲノム解読プロジェクトの終了が2003年4月に正式にアナウンスされ、本格的なポストゲノム時代に突入した。米国では、ポストゲノムとして、エンコード（ENCODE）計画が開始されようとしている。エンコード計画は、完全解読されたヒトゲノム上に遺伝子の機能を担う領域の注釈をつけていくという計画である。これはゲノム機能情報の集約を意味し、さらに特許化の対象になると考えられる。

情報通信分野

6

①第四世代に向けた大容量光ディスクの提案相次ぐ

—ODS'03のハイライトから—

去る5月11日より4日間、カナダのバンクーバーにおいてODS'03（Optical Data Storage/光ディスク国際会議）が開かれ、第四世代の大容量光ディスクの提案が相次いでなされた。特に、面密度では限界に達しつつある光ディスクの記録方式を、記録面の多層化やホログラフィックな多重記録で記憶容量を向上させようという技術の提案が相次いだ。中でも、透明電極で挟んだ多層記録膜を選択的に電圧印加して活性化し記録再生し、テラバイト級の記憶容量を目指す方式が日立製作所と日立マクセルから共同発表され、注目を集めた。日本の光ディスク産業は、現状ではビジネスと技術の両面で世界をリードしている。この優位性を今後も保持して行く上で、「本命技術を見抜く力」を養い続けることが極めて重要である。

②次世代フッ素レーザー・ステッパのレンズ材料： フッ化カルシウムの大口径単結晶育成に成功

(株)トクヤマは、東北大学の福田承生教授の指導により、昨年秋から今年にかけてチョクラスキー法によるフッ化カルシウム (CaF_2) の大口径単結晶育成に世界で初めて成功し、出荷を開始した。この単結晶は、光源に波長157nmの F_2 (フッ素) レーザーを用いる次世代ステッパ (半導体微細加工装置) のレンズ材料として不可欠であり、その大口径化が強く要求されていた。この成功は、次世代ステッパの光源を、日欧勢の主張する F_2 レーザとするか、あるいは、米インテル社の主張のようにこれをスキップしてEUV (極紫外：波長13.5nm) に飛ぶかの技術選択への影響が大きい。この成果は、日本のメーカーがこれまで圧倒的に優位を保持して来た半導体微細加工装置が、最近、技術・ビジネス両面で国際競争力を弱めており危惧されている中での朗報である。

環境分野

8

①微小炭素粒子 (すす) の大きな地球温暖化効果が報告される

軽油やバイオ燃料、石炭、バイオマスなどの不完全燃焼によって生成する微小炭素粒子 (すす) は大気中に浮遊すると、黒色であるため太陽光を吸収し、地球温暖化を促進する作用を持つ。NASAとコロンビア大の共同研究チームは、大気中の微小炭素粒子の地球温暖化への影響はIPCC (気候変動に関する政府間パネル) による従来の評価に比べ2倍程度大きく、二酸化炭素の約2/3程度になるという評価結果を発表した。

ナノテク・材料分野

8

①発光ダイオード材料でも高速の光通信が可能な基本原理を提案

半導体中を電子が移動するのに必要な時間が、発光している時間よりも短いことに注目し、発光スポットを電界で移動させて光のオン・オフ動作を行なう方法が考案された。この基本原理では、オン・オフ動作の速さが発光時間に制限されないため、今までと同じ化合物半導体材料を用いても、従来より高速の光通信が可能である。したがって、半導体レーザーより安価な発光ダイオード (LED) 用の化合物半導体材料で、コンピュータ間などの短距離光通信を実現できる可能性がある。本提案の基本原理を適用すれば、他の半導体材料系を用いても、相対的に、より高速の光通信が可能であり、今後の幅広い展開が期待される。さらに、発光スポットを電界で移動させるという技術は、複数のネットワーク同士の接続を切り替える光ルータなどへも応用できると考えられる。

エネルギー分野

9

①メタンハイドレート開発の経済性 および CO_2 排出量に関する研究成果が公表される

東京大学藤田教授らの研究グループは、海域におけるメタンハイドレート開発の経済性および CO_2 排出量に関する研究成果を公表した。本試算結果によると、その生産コストおよび CO_2 排出原単位の双方において、減圧法と水平坑井手法を用いたケースが最もよい結果となっており、天然ガスの需要の大半を占める液化天然ガスとの比較で、コストで約3倍高、 CO_2 排出原単位で1割程度低減されるとしている。また、報告では、坑井掘削と海底生産システムの設備費等のコスト削減技術の確立が重要と指摘している。

本報告は、従来の関連研究で不明瞭であった各種パラメータ (坑井数、ガス生産量や水深等) に関して具体的な数値を明記した上で、経済性と CO_2 排出原単位を評価している点が注目される。現在メタンハイドレート開発は未だ研究初期段階にあり、この成果は、今後の開発の指針として大いに役立つといえよう。

①世界で最も小型の走査型電子顕微鏡

材料やデバイスの表面形態の観察で、10000倍程度までの拡大が必要な場合に用いられる走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）において、世界一小型で、かつ低価格および低消費電力の走査型電子顕微鏡（Tiny-SEM）が（株）テクネックス工房により開発された。この小型SEMは机の上に置くパソコン程度の大きさで、100Vの電源のみで従来必要だった水冷や空冷も不要であり、組み立てや観察準備時間も短時間で済む。安定した観察が可能でかつ低価格化を達成できた鍵は、電子レンズ部分に従来の電磁コイルではなく永久磁石を採用した点にある。この小型SEMの基本性能で、SEMが必要な研究開発全体の7～8割の用途には十分対応でき、今後は工場の製造ラインへの導入や教材としての用途も開けると考えられる。また、構造の簡単さにより、他の分析装置との組み合わせで新たな分析方法への発展も期待される。

特集—1

昆虫を用いた生命科学研究の動向

— 11

昆虫は種の数、個体の数ともに動物界のトップに君臨し、地球上で最も繁栄している生物群である。昆虫は、地球上にあまねく適応、棲息する過程で、われわれ人類が有していない、昆虫に独自の機能を獲得してきている。そして、それら特異的機能の多くは、われわれにとって未知のものであり、生物資源としても未開拓の資源である。

昆虫を用いた生命科学研究は、主にカイコとショウジョウバエをそれぞれ材料に用いて行われてきた。特に古典遺伝学の分野における二つの昆虫の貢献は大きなものとなっている。わが国においては、一時は国益の大部分を担っていた蚕糸業を背景に、カイコを研究材料とし、遺伝学をはじめ、生理学、病理学など多くの領域で生命科学研究の先駆的な研究が行われてきた。現在でも、カイコを用いた研究ではわが国が世界をリードしている。

ショウジョウバエについては、発生生物学、分子遺伝学、分子生物学など先端的な研究が欧米を中心に進められている。ショウジョウバエは全ゲノムの解読も終了しており、マウスなどと共に、遺伝子の機能を解析する際に有用なモデル生物となっている。

さらに、このようなモデル生物だけでなく多様な昆虫の特性を活用する際には、各種の昆虫のさまざまな特性をそれぞれの遺伝子がもつ機能から研究する必要がある。例えば、昆虫の多くに休眠という現象がみられるが、ショウジョウバエには休眠がない。

また、産業への応用にはカイコの方がショウジョウバエよりも適していると考えられている。その大きな理由として、均一な絹タンパク質を体外に大量に作るというカイコがもつシステムを使えることなどがあげられる。

昆虫を対象とした生命科学研究はポストゲノム時代に突入しつつある。その意味でも、ショウジョウバエとハマダラカとは進化系統図の上で大きく離れた位置にあるカイコの全ゲノム解読は、昆虫の生命科学領域における理解をより一層深めるものと期待される。特に、カイコを用いた生物学的研究の豊富な蓄積があるわが国においてカイコの全ゲノム解読プロジェクトを推進する意義は大きい。

このような研究基盤の上で、昆虫の発育制御とホルモン研究、昆虫の生体防御機能研究、昆虫の共生微生物研究などに代表される、昆虫が有する特異的機能の解明を進めることは、生命科学研究の一分野としても重要である。

特集－2

Futur

—ドイツにおける需要側からの科学技術政策の展開

— 18

Futurは、ドイツ教育研究省が実施した、将来の社会的需要に基づいて研究開発政策を形成しようとするプロジェクトである。その特徴は、需要志向、将来志向、専門家と市民との間の対話、参加者の多彩さ、学際性である。

プロジェクトは、ほぼ半年の準備期間を経て、2001年6月に開始された。5機関からなるコンソーシアムが実施主体となり、教育研究省Z22課が進行管理に当たった。参加者総数は1,462名である。

プロジェクトの過程は、トピック形成過程と、それに続くテーマの絞り込み過程から構成されている。

トピック形成過程では、まず、8つのワークショップで約2,000のトピックが提案され、21テーマにまとめられた。オープンカンファレンスでの議論の後、1回目のテーマ選択により12テーマが選択された。

テーマ絞り込み過程では、オンラインワークショップ、及びフォーカスグループの会合によってテーマ内容の確定が行われた。その後、2回目のテーマ選択により5テーマが選択され、別途追加された1テーマと合わせ、6テーマが先導ビジョン候補になった。先導ビジョンとシナリオ準備のためのワークショップを経て、追加テーマを除く5テーマの先導ビジョンレポートが作成された。

最終的には、①思考機能を解明する、②将来の学習社会の入り口を拓く、③予防により、一生健康で生き生きと暮らす、④ネット社会での生活：個と安全、の4テーマを先導ビジョンとすることを、教育研究省が決定した。教育研究省は、この先導ビジョンを今年度以降の研究補助金配分の優先度に反映させている。

Futurの意義は、時代背景を見た上で理解する必要がある。ドイツでは、研究所のマネジメントを中核とした研究開発への変革の結果、需要志向の欠如という弊害が生まれた。そこで、1990年代後半から需要志向への移行が図られ、その一方策としてFuturが実施されたのである。

我が国へのFutur手法の導入に当たっては、導入可能性、修正すべき点などの検討が必要と思われる。

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（6月号は2003年5月10日より2003年6月6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マウス胚性幹細胞（ES細胞）からの卵母細胞の分化誘導

胚性幹細胞（ES細胞）を用いて、通常得ることが困難な研究材料を調製する技術や、疾病の治療などに用いる技術が近年非常に進歩してきている。しかし、現在なお、分化誘導できるのはごく一部の細胞種だけである。特に、その生成に減数分裂^①を必要とする卵母細胞^②への分化誘導は従来不可能に近いとも考えられていた。

米国ペンシルベニア大学のHubnerらは、マウスES細胞から卵母細胞も生じ得ることを示した（Science online express publication、2003年5月1日）。

この卵母細胞はシャーレの中で卵子のような状態となり、受精せずに初期段階の胚まで成長した。生体外で哺乳類のES細胞から生殖細胞が作られたのは初めてのことである。同グループは、シャーレにマウスES細胞を厚く敷いて培養し、生殖細胞で機能するOct4などの遺伝子の働きをマーカーとして細胞分化の状況を観察した。その結果、卵原細胞が減数分裂して卵母細胞となり、26日後に卵子のような細胞が分離し、43日後には、精子なしで胚盤胞と呼ばれる

子宮に着床する直前の初期胚まで成長した。

この技術は、クローン技術や生殖医療の研究の進展に大きく寄与するものと考えられる。

②DNAブックの開発とその有用性

ヒトゲノムの完全解読やマウスゲノムなど多数のゲノムの解読、完全長cDNA^③クローンの網羅的収集などにより、遺伝子資源が整備され、本格的な遺伝子機能解析の時代に突入している。このような状況の中で、DNAクローンを簡便に広く頒布させることは、遺伝子研究の発展のために強く期待されている。従来は凍結法（DNAクローンを形質転換した大腸菌を凍結すること）による送付やDNA自体をそのまま送付する方法であったが、書籍の形で頒布するという新しい技術（DNAブック）が、理化学研究所の林崎良英・河合純両氏等により開発された。

用語説明

①減数分裂

卵や精子を形成する際に起こる細胞分裂。

②卵母細胞

卵子のもととなる細胞。

DNAブックは、雑誌などにDNAクローンを固相化（染み込ませる）し、書籍の形で通常の宅配便などで利用者に届けるものである。利用者は、固相化されたDNAクローンをPCR法^④、または、大腸菌へ形質転換することにより容易にかつ短時間にDNAクローンを増やすことができ、これを用いて研究を行うことができる。また、DNAブックには様々な長さや種類のDNAクローンを収載することができ、そのDNAクローンは書籍の出版、輸送、保管の際にさらされる低温から高温（マイナス40度/14時間から140度/5秒）までの温度変化、高圧（17メガパスカル）、長期保存（3ヶ月以上）に耐えることができる。

さらに現在DNAバンク^⑤ではマ

用語説明

③完全長cDNA

タンパク質をコードする部分だけをもつDNA配列。

④PCR法

DNA配列を利用して目的のDNA部分のみを増幅させる方法。

⑤DNAバンク

DNAクローンなどの長期保存や移譲（販売）を行う機関。

マイナス80度の冷蔵庫の中に入れてDNAクローンを保管しているが、DNAブックの技術は同じDNAクローンを常温で研究者自身の本棚に保管することを可能にする。このようにDNAブックは、全世界の研究者にとって極めて便利なものになるであろう。

また、固相化されたDNAクローンは、DNAブックに印刷された科学情報とともに頒布できるので、科学専門誌に発表される論文に添付されたり、多数の遺伝子が添付された遺伝子百科事典が作製されたりすることも将来的には可能になるだろう。

本研究成果は、米国の科学雑誌『Genome Research Special FANTOM Issue』に掲載される。

(理化学研究所 林崎 良英氏)

③ ポストゲノム戦略としてのゲノム機能解析 — ENCODE 計画が米国で開始される —

国際協力の下で実施された研究プロジェクトであり、かつ生物学としては初の“ビッグサイエンス”であったヒトゲノム解読プロジェクトが完了し、人々は自らのゲノムの青写真を手に入れた。今後は、個々の遺伝子や遺伝子間に存在す

るDNA配列の意味、遺伝子同士の相互作用、一見無意味に見えるようなDNAの繰り返し配列、機能を持たないと考えられているため遺伝子など、ゲノム解読だけでは知ることの出来なかったゲノムの機能の解析に焦点をあてる研究が必要とされている。

実際に、米国はポストゲノム戦略として新しいプロジェクトを複数立ち上げ、ゲノム機能解析に集中的に研究者や研究予算を投入し始めた。そのうちのひとつが、米国NIHの国立ヒトゲノム解析研究所 (National Human Genome Research Institute) によるエンコード (ENCODE) 計画である。エンコード計画はこれから正式に開始されるプロジェクトである。

エンコード計画の“ENCODE”とは、Encyclopedia of Human DNA Elements (ヒトDNAの百科事典) の頭文字から命名され、完全解読されたヒトゲノム上に、遺伝子の機能を担う領域を全て書き込んでいくという計画である。つまり、文字通り、全ヒトゲノム (DNA) の百科事典を作成するという壮大な計画である。

これは、個々の遺伝子の働きやその場所の特定という従来のゲノム解析で対象にしていた次元での解析ではなく、遺伝子の働きを調

節する機構、遺伝子同士の相互作用や遺伝子ネットワークなど高次元のゲノム機能の解析を目的としている。

エンコード計画は国際プロジェクトとしてはまだ開始していないが、2003年3月にNIHで米国、英国、カナダ、日本などから研究者等が集められたエンコード会議が開かれている。その会議で、エンコード計画は2003年9月から正式に開始され、最初の3年間はゲノムの1%にあたる3000万塩基に関して、個々の遺伝子やゲノムの位置やその役割および調節機構などを明らかにする試験的プロジェクトを行い、その後、全ゲノムに関して同様なことを行なうことを明らかにした。この試験的プロジェクトの予算として、NIHは機能部位同定に1000万ドル、技術開発に200万ドルを投入することを決定している。

ヒトゲノム配列、完全長cDNA、タンパク構造といった構造情報は、それだけでは特許として認められない。しかし、機能情報と結びついたエンコード計画の最終目的物はほとんどが特許の対象になると考えられる。つまり、ゲノム特許の大競争時代が到来すると考えられる。

情報通信分野

① 第四世代に向けた大容量光ディスクの提案相次ぐ — ODS'03 のハイライトから —

去る5月11日より4日間、カナダのバンクーバーにおいてODS'03 (Optical Data Storage/光ディスク国際会議) が開かれ、第四世代の大容量光ディスクの提案が相次いでなされた。光ディスク

を光源の短波長化に伴って世代付けすれば、第一世代は、'82に製品化された音声用CD (Compact Disk)。第二世代は、'94に製品化されたDVD (Digital Versatile Disk)、そして、第三世代は、今年度より青紫色半導体レーザ (波長405nm) を使って記憶容量を27GBにまで拡大した“Blu-ray disk (BD)”が、ソニー、松下、日立など日欧韓9社の提唱によって製品化が始まっている。また、

東芝、NECなどのグループは、仕様の異なる“Advanced Optical Disk (AOD)”の技術的な優位性を主張して同じ第三世代の主導権を競っている。この先の第四世代光ディスクはどうなるのであろうか。これまで優位に立って来た光ディスクの面記録密度は、既にGMR (Giant Magnetic Resonance) ヘッドを用いた磁気ディスクに追い越されている。光ディスクは、非接触・媒体可換という磁気ディ

用語説明

①エレクトロクロミック

電圧を印加すると着色する誘電体材料。

②ホログラフィックな多重記録

情報光と参照光の間で形成される干渉縞を媒体の一方所に入射角を変えて多重記録する方式。

スクにない特長を持っているため、即淘汰される状況ではないが、開発者の間には危機意識が高揚しており、記録密度向上への挑戦が続いている。

このような背景から最も期待されているのは、光ディスク記録の3次元化（厚み方向へ拡大）技術である。中でも今回注目を集めたのは、日立製作所と日立マクセルが共同発表した多層膜記録方式である。多層化技術は、光の透過性を利用した技術であり、光スポットの焦点位置を光ディスクに垂直に移動させて任意の記録層だけに焦点を合わせることによって選択的に記録再生を行う。層の選択は、透明電極層に挟まれた各層への電圧印加によって不透明化することで実現される。電圧が印加されていない残りの層は活性化されず透明状態が保たれる。このため、光スポットは他の層の影響を受けることがなく、隣接層の間隔を0.3ミクロンにまで薄くすることができる。原理的には100層もの多層化が可能であり、テラバイト級（BDの約100倍）の情報を記録再生できるという。今回は2層のエレクトロクロミック^①有機材料に、2Vの電圧を選択的に印加して一層だけ活性化し、記録再生する原理実験によって実証した。今後上記材料の均一化、安定化などの技術開発を進め2007年の実用化を目指す。一方、このような多層化技術とは異なるアプローチとして、ホログラフィックな多重記録方式が提案されており、今回もその進捗が発表された。この技術は、時系列情報を一旦、二次元の並列情報に変換し、情報光と参照光の

なす角度を変えながら干渉縞としてホログラフィックに多重記録^②するものである。米国や日本のベンチャーなどの活発な動きがあり記録媒体の経時劣化など実用化のための課題も多いが、将来技術としての期待がある。日本の光ディスク産業は、現状では標準化を含むビジネスと技術の両面で世界をリードしている。この優位性を今後も保持して行く上で、「本命技術を見抜く力」を養い続けることが極めて重要である。

②次世代フッ素レーザー・ステッパのレンズ材料：フッ化カルシウムの大口径単結晶育成に成功

（株）トクヤマは、東北大学の多元物質科学研究所の福田承生教授の指導により、昨年秋から今年にかけてチョクラルスキー法によるフッ化カルシウム（ CaF_2 ）の大口径単結晶育成に世界で初めて成功し、出荷を開始した。この単結晶は、光源に波長が157nmの F_2 （フッ素）レーザーを用いる次世代ステッパ（半導体微細加工装置）のレンズ材料として不可欠であり、その大口径化が強く要求されていた。

今日の、半導体プロセッサやメモリなど高集積半導体デバイスの微細加工には、ステッパと呼ばれる縮小投影露光装置が使われている。この装置は、マスクに描いた回路パターンを紫外光を発振するレーザーで照明し、約30枚におよぶレンズ群からなる結像光学系によってその回路パターンの縮小像

を形成する。そしてその縮小像をフォトレジストを塗布したシリコンウェファ上に投影露光し、ウェファを水平方向にステップしながら露光を繰り返して数多くの潜像を焼き付ける装置である。半導体の集積度を決める縮小像の線幅は、照明光の波長が短いほど微細化できるため、世代を追う毎に光源の短波長化が進んでいる。また、半導体デバイスのサイズが大型化しており、これに伴ってレンズ群からなる結像光学系も大型化し、直径が約300mm以上、高さが約1mにまで達している。

現代のステッパは、光源に KrF （248nm）や ArF （193nm）レーザーが使われており、そこで主に用いられるレンズ材料は合成石英である。しかし、波長が157nmと短くなると合成石英の透過率が急激に低下し、 F_2 レーザーを光源とするステッパには使えない。このため、波長157nmでの透過率が十分高いフッ化カルシウム（ CaF_2 ）の大口径単結晶育成が強く要請されていた。これまで、均一な結晶を育成するのにチョクラルスキー法が有利であることは知られていたが、大型単結晶が育成可能な装置がなく、その実現性が疑われていた。

チョクラルスキー法は、従来のブリッジマン法に比べて装置が高価であるが、フッ化カルシウム熔融液から種結晶を用いて回転引き上げを行うため育成時に無理な応力がかからず、物性のバラツキが少なく、また、強度が高くて加工性が良いなど優れており、今回の直径300mm以上の大型単結晶でもそれらの特長が実現された。同社はさらに、フッ化バリウム（ BaF_2 ）単結晶の大型化にも成功したと発表している。これらのレンズ材料があれば、結像光学系を二種類の材料からなるレンズ群で構成できるため解像特性が改善されて F_2 レーザー型ステッパのさらな

る性能向上が実現する。

ニコンやキヤノンははじめとする日本のステッパメーカーは、ドイツの光学メーカーの老舗であるツァイスからレンズ光学系の供給を受けている欧州のASML社とともに、

次世代はF₂ステッパを選択する方針であり、CaF₂単結晶とBaF₂単結晶の大口径化の成功を歓迎している。一方、米インテル社は、現世代のArF (193nm) ステッパを延命し、F₂レーザ型ステ

ッパをスキップしてEUV (極紫外：波長13.5nm) に飛ぶという方針を発表しており、内外各社の今後の動向が注目される。

環境分野

①微小炭素粒子 (すす) の大きな地球温暖化効果が報告される

地球温暖化の原因物質には、温室効果ガス、オゾン、エアロゾル^(注1)などがある。この中で、特にエアロゾルの作用や影響については科学的知見が不十分であり、地球温暖化予測における不確実性の大きな要因となっていた。

(注1) 化石資源やバイオマスの燃焼、火山の噴火などで発生し大気中を浮遊する直径1nm～10μm程度の微小粒子。

エアロゾルとしては、硫酸エアロゾルと微小炭素粒子 (すす) が代表的なものである。この内、硫酸エアロゾルは太陽光を反射するため、地球温暖化に対しては負に作用する。一方、微小炭素粒子は

軽油、石炭、バイオマスなどの不完全燃焼によって生成するが、黒色であるため太陽光を吸収し、地球温暖化を促進する作用を持つ。

NASAとコロンビア大の共同研究チームは、微小炭素粒子による地球温暖化効果が、IPCCによる従来の評価に比べ2倍程度大きいという評価結果を発表した (Proceedings of the National Academy of Sciences, May 27, 2003)。

同研究グループは、グローバルエアロゾル測定ネットワークAERONETにより、エアロゾルによる紫外域から赤外域までの太陽光の吸収量を測定した。その結果、微小炭素粒子による吸収量は従来の評価に比べ2～4倍大きく、その放射強制力^(注2)は二酸化炭素のほぼ2/3に相当する約1W/m²と評価した。微小炭素粒子の存在量がこれまで過小評価されていたとしている。

(注2) 地球大気システムのエネルギーバランスへの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。IPCC地球温暖化第三次報告書ではCO₂の放射強制力を1.46W/m²と評価している。

本研究は、地球温暖化防止に向け、温室効果ガスだけでなく微小炭素粒子の排出を削減する取り組みの重要性を示唆している。微小炭素粒子は大気浮遊時間が短いため、長期的な地球温暖化への影響については限定的との意見もあるが、まだ科学的知見が不十分であるのが現状であり、今後の研究の進展が期待される。なお、本研究成果はNASAのホームページ (<http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/2003/0509pollution.html>) でも公表されている。

(株)いずず中央研究所 中田 輝男氏)

ナノテク・材料分野

①発光ダイオード材料でも高速の光通信が可能な基本原理を提案

発光ダイオード (LED) に使われる化合物半導体材料は、各波長に対応できるように元素構成比を制御し結晶成長させて作られている。さらに波長を揃えて発光できるようにしたものが半導体レーザ

ーで、高速の光通信や情報記録に使用することができる。しかしながら、半導体レーザーに比べるとLEDのほうが安価に作製できるため、LEDを用いてコンピュータ間の通信など短距離での光通信を行なうことができないかという探索がなされている。

光通信の基本として、光を高速でオン・オフ動作させて光信号を発生する素子が必要である。オ

ン・オフ動作は材料固有の発光している時間の長さで決まってしまうため、各化合物半導体材料において、この時間の長さを短くしようと材料の組成制御や結晶制御を向上させる研究が行なわれてきた。

このたび、米国エール大学の研究者らは、オン・オフ動作が発光時間の長さに制限されず、LEDでも高速通信が可能であるFAST (Field Aperture Selecting Trans-

port) という基本原理を提案した (T.D.Boone, H.Tsukamoto and J.M.Woodall, Appl.Phys.Lett., Vol.82, No.19, p.3197 (2003))。彼らは、半導体中を電子が移動するのに必要な時間は、発光している時間よりも短いことに注目し、発光スポットを電界で移動させることで、従来より速いオン・オフ動作ができることを示した。実験では、まず、化合物半導体のひとつである GaAs のサンプルに外部光を照射し、電子と正孔の対を発生させ、電子が正孔と再結合する際に出てくる光子を検出することで、これをオン状態とした。また、

そのサンプルは、電極によって電界を印加し、電界によりそれらの電子を検出位置の外に掃き出すことができるようになっている。発光スポットは電界をかけたことで電子の移動先へと動いてしまい、検出位置の光の強度はゼロに近くなるため、これをオフ状態とした。この方式では、オン・オフ動作の速さが、発光時間の長さではなく、GaAs 中を電子が移動する速度によって決まっている。実験結果によると、オン・オフ時間を GaAs 材料の発光時間の 4～6 倍短い 50 ピコ秒とすることができ、毎秒 10 ギガビット以上の光通信が期待で

きると試算されている。

本提案の基本原理は、どのような半導体材料系の場合でも、その固有の発光時間に制限されず、相対的に、より高速の光通信が可能であることを示しており、GaAs 以外の化合物半導体やシリコン半導体の発光にも適用できることから、今後の幅広い展開が期待される。また、この論文では、光スポットを電界によって移動させる技術を、光ルータ（複数のネットワーク同士の接続を切り替える機器）へ応用することについても言及している。

エネルギー分野

①メタンハイドレート開発の経済性およびCO₂排出量に関する研究成果が公表される

我が国は、地球環境問題の観点から CO₂ 排出量の少ない一次エネルギー源として、天然ガスへの移行を進めているところである。とりわけ、非在来型の天然ガス資源であるメタンハイドレート（以降 MH と表記する）は、日本周辺海域に相当量の賦存が期待されており、21 世紀における有望な新たな国産エネルギー資源として、その商業的開発に向けた国家プロジェクトが行われている。

東京大学藤田教授らの研究グループは、海域における MH 開発の経済性および CO₂ 排出量に関する研究成果を公表した（日本エネルギー学会誌 2003 年 4 月号）。本研究は、現在までに提唱

されている MH ガス生産手法として、MH 分解手法^{（注1）}と坑井掘削手法^{（注2）}について 3 通りの組み合わせを設定している。今回の試算では、MH ガスの生産コストおよび CO₂ 排出原単位^{（注3）}の双方において、減圧法と呼ばれる MH 分解手法と水平坑井による掘削手法を用いたケースが最もよい結果となっており、天然ガスの需要の大半を占める液化天然ガスとの比較で、コストで約 3 倍高、CO₂ 排出原単位で 1 割程度低減されるとしている。報告では、この MH ガス生産コスト増大の要因として、坑井掘削と海底生産システムの設備費等を挙げ、こうした分野でのコスト削減技術の確立が重要と指摘している。

（注1）今回試算では、MH 層内を減圧させてハイドレートを分解させ、その分解ガスを生産する減圧法と、蒸気や熱水を MH

層に注入し、熱によりハイドレート層を分解させ、その分解ガスを生産する熱水注入法で検討。（注2）垂直坑井ならびに層に沿って水平に坑井を掘削する水平坑井で検討。

（注3）液化天然ガスやメタンハイドレートの生産に関わるものと生産ガス自体の消費による CO₂ 排出量を合算した値 [g-C/Mcal]。

今回の報告は、MH 層に至る迄の損失や、流体の流動損等が考慮されていない等の不確実性もみられる。しかしながら、従来の関連研究では、不明瞭であった各種パラメータ（坑井数、ガス生産量や水深等）に関して具体的な数値を明記した上で、経済性と CO₂ 排出原単位を評価している点が注目される。現在 MH 開発は未だ研究初期段階にあり、今回の研究成果は、今後の開発の指針として大いに役立つといえよう。

製造技術分野

①世界で最も小型の走査型電子顕微鏡

材料やデバイスの表面形態の観察において、10～1,000倍程度の倍率までは光学顕微鏡を用い、それ以上の10,000倍程度までの拡大観察が必要な場合には、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）を用いるのが一般的である。近年のSEMは操作が容易になってきており、定常的な材料やデバイスの研究開発においては、以前の光学顕微鏡と同じような手軽さで、ますます頻繁に用いられるようになってきている。ただし、光学顕微鏡に比べればまだ装置も大掛かりで価格も高い分析装置である、ということが常識となっていた。

ところが、マイクロマシン展や応用物理学会にて、ベンチャー企業の(株)テクネックス工房から、これまでの常識を破る、世界一小型で、かつ低価格および低消費電力の走査型電子顕微鏡（Tiny-SEM）が紹介された。

この小型SEMは机の上に置くパソコン程度の大きさで、装置の

組み立ては10分弱で完了し、移動も簡単にできる。電源は100Vのコンセントを用意すればよく、従来必要だった水冷や空冷は不要である。観察したい試料を入れる試料室が小さいため、小型ターボ分子ポンプを使って真空状態にするための時間は3～4分しかかからない。試料室が小さいことのひとつの利点として、検出器が試料に近いこと、焦点深度が深く、試料を傾斜させても全面で焦点のあった像が得られる。倍率も40,000倍まであげることができ、数nmの太さをもつカーボンナノチューブの成長する様子などを観察可能である。安定した観察が可能でかつ低価格化を達成できた鍵は、電子レンズ部分に従来の電磁コイルではなく永久磁石を採用した点にある。最先端の機種は高い装置性能を維持するために入念な整備や保守が必要になるが、この小型SEMは構造が簡単のために保守も容易になっている。研究開発の現場では、最高性能の数十万倍というような倍率は要求されないことが多く、この小型SEMの基本性能で、SEMが必要な研究開発全体の7～8割の用途には十

分対応できる。

従来のSEMの数分の1という低価格であることから、材料やデバイスの研究室だけでなく、工場のラインに複数台を備えることや、教育機関でも用いることが容易になる。例えば、大学の学部実習や中学・高校の教材として用いられれば、若年齢のうちに電子顕微鏡の世界に触れることができる。この装置はユーザー組み立ても推奨されており、学生が自分で装置を組み立てることで装置構造への理解を深めるためにも役立つ。また、構造の簡単さにより、他の分析装置との組み合わせで新たな分析方法への発展も期待されている。

なお、東京大学先端科学技術研究センターでは、さらに小型の「親指SEM」（Finger-Size Ultra-Miniaturized Electron Microscope）を目指すプロジェクトも進められている。財機システム振興協会が2003年3月にまとめた「モバイル型分析装置の現状と将来展望に関する調査研究」報告書のなかでも、観測したい任意の場所に持っていけるような小型装置の実現と普及への期待が述べられている。

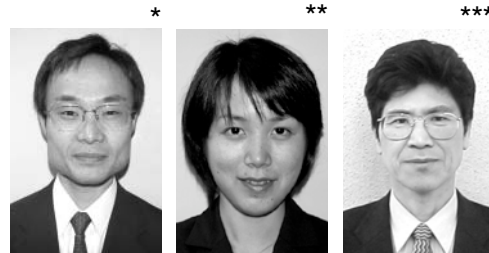
特集①

昆虫を用いた
生命科学研究の動向

ライフサイエンス・医療ユニット

茂木
島田
竹田伸一*
純子**
敏***

客員研究官



1. はじめに

生物学、生命科学研究分野における昆虫研究は、主にカイコとショウジョウバエをそれぞれ材料に用いて行われてきた。特に1910年代の古典遺伝学においては、これら2種類の昆虫が学問的に大きく貢献した。例えば、植物を用いてメンデルの遺伝の法則が発見されたのは1865年であるが、動物で最初にメンデルの法則を発見したのは、カイコを材料とした東京帝国大学の外山亀太郎博士の研究であり、1910年のことである。また、1910年代に米国のモルガン博士（コロンビア大学）がショウジョウバエを研究材料に用いて、突然変異の誘発や、唾腺染色体操作技術の開発など、遺伝学の基礎的研究をしている。そして、米国カーネギー研究所の鈴木義昭博士は

カイコを用いて1972年に真核生物で初めて遺伝子のメッセンジャーRNA（絹タンパク質フィブロイン）を単離することに成功しており、これは、分子生物学における卓越した研究である。

ショウジョウバエを用いた研究は、唾腺染色体を用いた染色体操作技術、遺伝子導入技術、突然変異と遺伝子機能を結びつけた実験的手法の確立などを通じて、生物学の進展に重要な役割を果たしてきた。ショウジョウバエは、2000年に昆虫では初めて全ゲノムが解読され、昆虫の分子生物学研究におけるモデル生物としての地位が確立された。

一方、モデル生物として用いられるショウジョウバエだけを材料としていては、多種多様な昆虫が

それぞれ独自にもつ機能や生命現象を解析することはできず、特殊機能をもつさまざまな昆虫を材料にして研究する必要がある。例えば、昆虫の重要な特性のひとつである休眠という現象がショウジョウバエにはない。また、昆虫の特異的機能を支える多様な生体物質の多くは未知のものであり、生物資源として未開拓の資源である。そのような生物資源を生み出す多様な昆虫機能を解析することは、生命科学研究に貢献するだけでなく、生物資源の活用をはかる応用研究により産業の振興に多大な貢献を果たすことが期待される。

本稿では、このような生命科学研究における昆虫研究に焦点をあてて、最近の研究の動向の一端を紹介する。

2. 動物界における昆虫の位置づけと昆虫研究の重要性

昆虫は、体が頭部・胸部・腹部の3つに分かれていて6本の脚をもつ生物である。昆虫は、同じように節がある脚をもつエビやカニなどの甲殻類や、クモ類などとともに節足動物という動物群に属している。

2 - 1

動物界における昆虫の
位置づけ

地球は今から46億年前に誕生し、

生命が誕生したのは約40億年前といわれる。そして、昆虫は3.5億年前に誕生し、ヒトは0.05億年前に誕生したと推定されている。

動物の進化系統図の上では、ヒトが脊椎動物の中で最も進化した動物であるのに対して、昆虫は優れた感覚機能を持ち、社会性を有する種が存在することなどから、無脊椎動物の頂点に立つ動物であると考えられている（図表1）。

また、およそ100万種と推定されている動物種のうち、ヒトを含

む脊椎動物が約4%であるのに対して、昆虫は約70%を占めている（図表2）。

昆虫が地球上で繁栄を勝ち取っている要因として多くの事柄があげられる。ショウジョウバエで10日～14日、カイコで50日程度と短期間に行われる世代交代と抜群の生殖能力、苛酷な生息環境を克服するのに役立つ休眠・変態、外敵から身を守る効果的な生体防御機構などである。これらはいずれも長年の進化の過程で獲得した環

境への適応能力である。このようなさまざまな適応能力によって実現した無限ともいべき多様性をもつ昆虫は、生物資源という観点からも非常に魅力的な研究対象である。

2 - 2

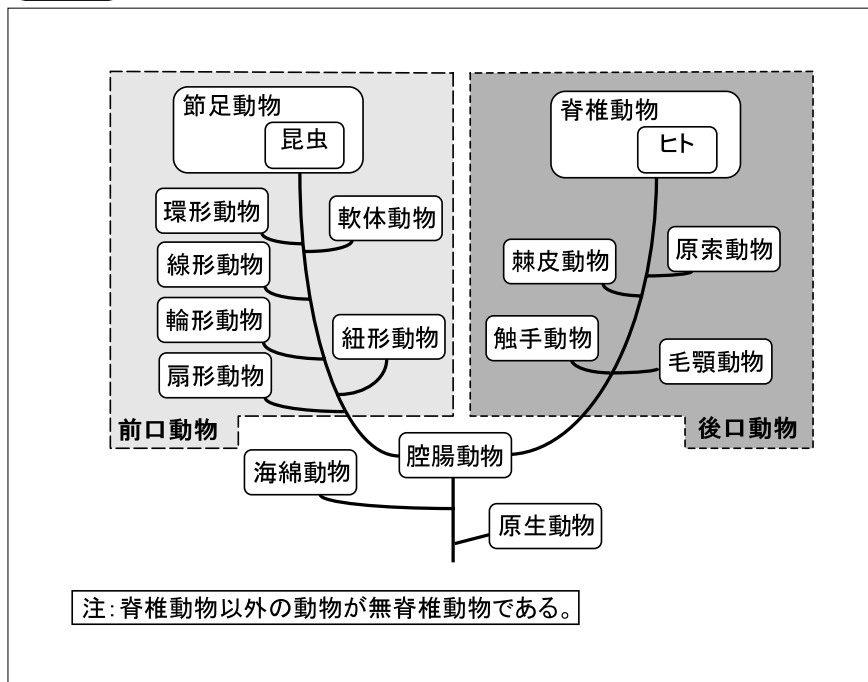
生命科学における昆虫研究の重要性

ショウジョウバエやカイコを用いた研究により、発生生物学、遺伝学、分子生物学などの基礎的知見が得られている。この成果のひとつとしてショウジョウバエやカイコにおいて遺伝子組換え操作が可能になった。カイコと人畜の間には共通の病原菌がないので、カイコの遺伝子を組み換える手法により生産させた有用物質にはヒトや家畜への病原菌が含まれないという点で安全性が高いと考えられている。実際に外来遺伝子を導入したウイルスを用いてカイコでインターフェロンなどの有用物質を生産させる技術が開発されている。現在、ネコのインターフェロンについては商品化されている。

一方、無脊椎動物の頂点にたつ昆虫は、ヒトとは異なる生命の仕組みを数多くもっている。それら昆虫の生命活動の特異性を解明することは、生命科学研究に新たな切り口からの示唆を与える。例えば、脊椎動物のような抗原抗体反応による免疫システムを持たない昆虫が生産する抗菌性物質の中には、多剤耐性菌（MRSA）に効果を示すものがあり、昆虫由来医薬品としての応用が注目されている。

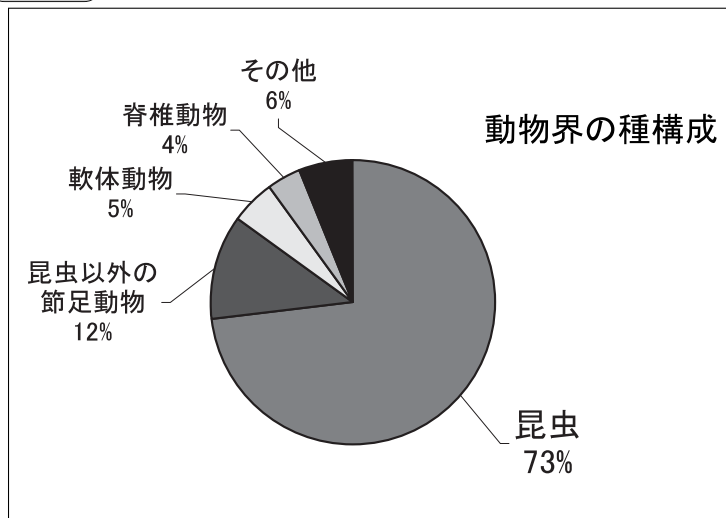
また、医療分野や産業分野への応用研究としての昆虫研究も重要である。マラリア原虫を媒介するハマダラカや、眠り病の原因となる原虫トリパノソーマを媒介するツェツェバエなど、病気のベクター（運び屋）になる昆虫に関する研

図表1 昆虫の動物進化系統図における位置づけ



理化学研究所 名取俊二特別招聘研究員作成資料をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変

図表2 昆虫は動物種の約70%を占める



E.O.Wilson 「The diversity of life」 Harvard University Press, Cambridge, 1992；大貫昌子・牧野俊一 翻訳「生物多様性」岩波書店、1995、をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変

究も世界的に重要な研究分野である。ハマダラカについてはショウジョウバエに続いて昆虫では2番目に全ゲノムが解読されている。昆虫ホルモンの研究などにより人為的に昆虫の発育を制御することができるようになれば、これらベクターの駆除にも役立つと期待される。

さらに、昆虫からは各種の生理活性物質や有用生体高分子物質が見つかり、昆虫が、産業に有用な新しい化合物の探索源として注目されている。例えば、昆虫の共生微生物が産生する有用物質は、ヒトや家畜などの医薬品の探索源として期待されている。

3. 生命科学領域における昆虫研究の近年の重要な研究成果と動向

本章では、生命科学領域における昆虫研究の近年の重要な研究成果と動向の一端を紹介する。具体的には、大学などを中心として進められた基礎的・学術的研究から、すべての生命科学研究の基盤となる「昆虫の分子生物学研究」、昆虫が有する特異的機能の解明研究として「昆虫の発育制御とホルモン研究」、「昆虫の生体防御機構研究」、「昆虫の共生微生物研究」を取り上げる。

これらの基礎的な研究をふまえた応用研究には、例えば、農林水産省が取り組みつつある、昆虫機能を利用して産業化を目指す研究「昆虫テクノロジー」プロジェクトがある。このプロジェクトには、カイコゲノムの解読の集中的な推進と、それと並行して、ゲノム情報を活用して標的害虫を選択的に防除できる新しい農薬を作ること、遺伝子組換え技術を活用して

昆虫の有用タンパク質をカイコで大量に生産させること、そして、昆虫特有の物質を改変・加工して医療分野に適用が可能な新規素材の開発を進めることなどの研究目標が含まれている（図表3）。

3 - 1

昆虫の分子生物学研究^{1,2)}

昆虫における分子生物学研究においては、ショウジョウバエ研究が最も進んでいる。

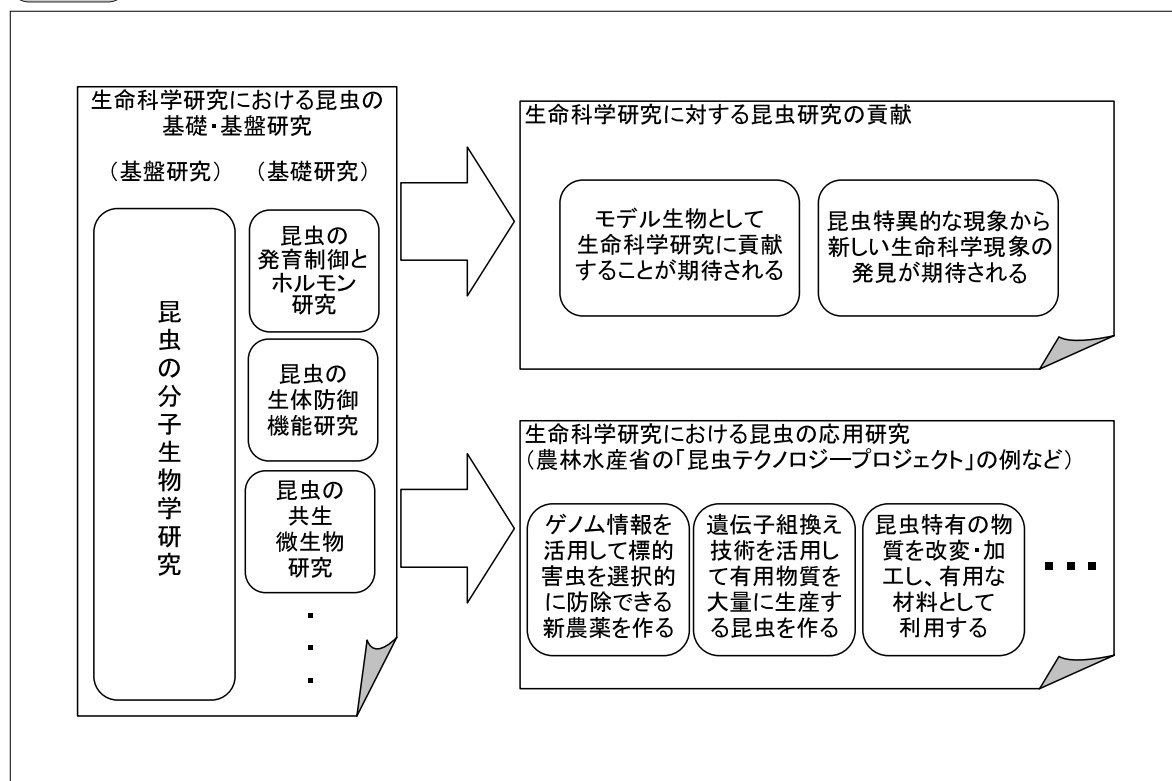
ショウジョウバエが生物学の実験材料として注目を浴びたのは、1910年代に米国のモルガン博士（コロンビア大学）によって遺伝学研究の材料として用いられて以来である。その後、突然変異誘発法、唾腺染色体の利用した遺伝子マッピング、一度起こった突然変異を保持するためのバランス染色体（致死的な遺伝子を保持する

こともできる）の活用など、生物学的実験材料としての優位性を高めていった。

ショウジョウバエについては、さらに、1980年代に、P因子というトランスポゾン（動く遺伝子）の発見とその利用による形質転換技術が確立され、遺伝子の導入が自由に行われるようになった。2000年には、昆虫で最初に全ゲノムが解読され、モデル生物としてのショウジョウバエの地位は確立された。ショウジョウバエでは、ゲノム解読に基づくゲノムインフォマティクスを用いた遺伝子機能の解析のほか、マイクロアレイを用いた遺伝子発現解析、RNAi（RNA interference、RNA干渉）法による遺伝子発現の抑制、遺伝子ターゲッティング（遺伝子破壊）などの手法を用いて遺伝子機能の解明が進められている。

モデル生物の全ゲノムの解読は

図表3 生命科学領域における昆虫研究の動向



科学技術動向研究センターにて作成

これまでの遺伝子の機能解析の手法を根本的に変えた。つまり、逆遺伝子解析といわれるもので、ゲノムデータベースから当該遺伝子の機能を類推できるようになったからである。この方法を用いると、ショウジョウバエのゲノム情報から他の生物のホモログの遺伝子（相同遺伝子）の機能を推定できる。このように、ひとつの生物種における全ゲノムの解読は、その生物のあらゆる生命活動の解明に寄与するだけでなく、周辺分野に対してさまざまな波及効果をもたらす。

昆虫ゲノム解読に関しては、2000年にショウジョウバエのゲノム解読（米国セセラ・ジェノミクス社と大学との共同研究チーム）、2002年にハマダラカのゲノム解読（米国セセラ・ジェノミクス社とヨーロッパの国際共同研究チーム）がそれぞれ終了した。わが国が進めている昆虫ゲノム解析研究としてカイコゲノム研究がある（図表4）。

カイコは鱗翅目昆虫に属しており、ゲノム解読が終了したショウ

図表4 昆虫ゲノム解読プロジェクトの状況

	昆虫の種類	ゲノムサイズ	ゲノム解読プロジェクト
カイコ	鱗翅目昆虫	5.4億塩基対	進行中（日本）
ショウジョウバエ	双翅目昆虫	1.8億塩基対	2000年終了（米国）
ハマダラカ		2.8億塩基対	2002年終了（欧米）

参考文献³⁾より引用

ジョウバエやハマダラカが属する双翅目昆虫とは、生物進化の過程での分岐が今から少なくとも2億4千万年前といわれるほどに隔たりのある。この隔たりは、哺乳類と鳥類とのものに相当し、ショウジョウバエ、ハマダラカという昆虫でゲノム解読が終了したからといって、カイコのゲノム解読の必要性が薄れる性質のものではない。

カイコのゲノム研究は現在、昆虫生命科学研究の重点領域としてわが国のみならず世界的にも注目を集めている。農林水産省では2002年度補正予算によりカイコ全ゲノムをショットガン方式による解読に着手した。このショットガン方式による解読は2003年度以降も「昆虫テクノロジー」プロジェクトの中で精力的に推進し、で

きるだけ早い時期に解読を終了することとしている（図表5）。現状ではカイコゲノムの全塩基配列の解読は緒についたばかりで、遺伝子の機能解析、ゲノム創薬などゲノムの利用という観点からは、早急に解読を達成する必要がある。カイコ的全ゲノムの早期完全解読に向けて、わが国においてヒトやマウスあるいは各種微生物ゲノムの解読を行った実績のある機関などからのより一層の研究支援が必要である。

遺伝子操作により有用物質を昆虫で生産させる手法を産業に応用する際には、カイコの方がショウジョウバエよりも向いていると考えられている。その大きな理由として、均一な絹タンパク質を体外に大量に作るというカイコ特有のシ

図表5 カイコゲノム研究を進めてきた主なプロジェクトと成果

年代	プロジェクト	成果
1996～1998年度	戦略基礎研究「昆虫ウイルスと宿主との分子応答機構とその応用」	カイコEST ^① データベースの構築、BAC ^② ライブラリーの作成等
1999～2003年度	未来開拓事業「昆虫の性決定の遺伝子ネットワーク」	カイコ性染色体の構造解析、カイコESTデータベースの構築、ESTマイクロアレイ作成、物理地図（BACコンティグ）作成 等
1999～2002年度	農林水産省「動物ゲノムの解析—昆虫ゲノム」	
2000～2004年度	生研機構「カイコの遺伝子機能解析システムの構築」	
2002年度	農林水産省「動物ゲノムの解析—昆虫ゲノム」（補正予算による）	全ゲノムショットガン方式で全ゲノム解読開始
2003年度～	農林水産省「昆虫テクノロジー」	

科学技術動向研究センター作成（一部略称で表記）

用語説明

①EST（expressed sequence tag 発現配列タグ）

メッセンジャーRNAの相補的（complementary）DNA（cDNA）の部分塩基配列をESTと呼ぶ。cDNAは細胞内で発現された遺伝子の塩基配列を表し、ESTは細胞内で発現している遺伝子に到達する手段のひとつと考えられている。

②BAC（bacterial artificial chromosome バクテリア人工染色体）

100キロ塩基を超えるゲノム断片を挿入できるバクテリア由来の人工染色体。BACは取り扱いが容易なため、全ゲノムを網羅する整列化ライブラリーを構築する際に用いられる。

図表6 主な昆虫のホルモンの機能と構造決定

昆虫ホルモン名	分子種	主な機能	単離と構造決定
脱皮ホルモン	ステロイド	脱皮・変態の制御	Butenandtら（ドイツ）（1954）
幼若ホルモン	テルペノイド	脱皮・変態および生殖の制御	Röllerら（ドイツ）（1967）
ペプチドホルモン			
ボンビキシン	ペプチド	細胞増殖の誘導・促進	長澤寛道、鈴木昭憲ら（1984）
前胸腺刺激ホルモン	ペプチド	脱皮ホルモンの分泌制御	川上厚志、鈴木昭憲ら（1990）
休眠ホルモン	ペプチド	カイコ卵休眠の誘導	今井邦雄、山下興亜ら（1992）

科学技術動向研究センター作成

ステムを使えることなどがあげられる。ただし、カイコの卵には固い卵殻があり、卵の遺伝子操作がやや難しいという不利な点もある。

3 - 2

昆虫の発育制御とホルモン研究

昆虫ホルモンとしては、脱皮ホルモンと幼若ホルモンが脱皮・変態などを制御することが比較的早くから知られていた。そして、最近、脱皮ホルモンと幼若ホルモンを制御する脳ホルモンとして各種のペプチドホルモンの構造が明らかになった。図表6に示したように、昆虫ホルモン（特にペプチドホルモン）の研究分野は、前胸腺刺激ホルモンや休眠ホルモンの構造決定など、わが国が独壇場の研究領域である。

特に、前胸腺刺激ホルモンの研究は、昆虫発育制御の鍵となるホルモンでありその意義は大きい。わが国においてホルモン精製の実験材料となるカイコを大量に入手することができたことが、この研究成果につながったことも特筆すべきである。

1989～1992年度にかけては、文部省科学研究費補助金（科研費）特別推進研究「前胸腺刺激ホルモンを中心とした昆虫脳ペプチド類の構造、機能および動態」で、東京大学農学部鈴木昭憲博士が中心となり、前胸腺刺激ホルモンをはじめ、脳に存在する数多くのペ

プチドホルモンの構造決定を世界に先駆けて成功し、その機能解析を進めた。

また、科研費重点領域研究「昆虫の変態・休眠の分子機構」（代表者：山下興亜博士、1996～1999年度）において、カイコ休眠ホルモンの作用機構、環境応答性、神経内分泌制御系の解明など昆虫におけるホルモン作用の解析を中心にした研究が進められ、ペプチドホルモンの生合成と分泌調節、血中での動態と標的器官での作用、脱皮ホルモン受容体の遺伝子発現機能などの解明が行われた。これらの研究課題は未来開拓事業における「昆虫特異機能の発現機構と開発」（代表者：山下興亜博士、1999～2003年度）に引き継がれ、さらに推進される。

3 - 3

昆虫の生体防御機構研究

昆虫の繁栄の原因のひとつとして、自己を守る生体防御能力が発達していることがあげられる。

昆虫が体表に傷害を負うと、体内に抗菌性の化学物質を作って、侵入する微生物に対抗することが知られている。理化学研究所の名取俊二博士は、1996～1999年度の科研費重点領域研究「昆虫の生体防御機構」や、1999～2002年度の科学技術振興事業団（JST）の戦略的基礎研究推進事業（CREST）における「生体防御のメカニズム」などで、センチクバ

エの抗菌性タンパク質に関わる研究を進めてきた。その結果、センチクバエが外敵から身を守るための手段として、低分子化合物からペプチド、タンパク質に至るまで各種の生体防御に関わる化学物質を産生することを明らかにしている。さらに、これらの生体防御物質は、単に体表に傷をつけたときにのみ誘導されるのではなく、昆虫の変態期においては、成虫原基の発育因子としても作用しているという新たな知見を示した。

昆虫の生体防御物質は、センチクバエだけではなく、カイコ、カブトムシなど数多くの昆虫から見つかっている。初めての物質が1980年代に報告されて以来、これまでに200種類以上が知られている。

昆虫の生体防御物質のうち、抗菌性タンパク質の例を図表7に示した。抗菌性タンパク質はアミノ酸配列の類似性からいくつかのグループに分類されている。

農業生物資源研究所の山川稔博士は、1996年度から科学技術振興調整費によって進められた中核的研究拠点（COE）育成プロジェクト「昆虫機能利用研究」の中で、カイコ、カブトムシなどから抗菌性タンパク質を単離し、その作用メカニズムを研究してきた。その研究は2001年度から生物系特定産業技術研究推進機構（生研機構）の「昆虫の抗微生物タンパク質の特性解明と改変」プロジェクトに引き継がれ推進されている。抗菌性タンパク質のうち、セクロピン

図表7 昆虫由来の抗菌性タンパク質の例

物質の種類	発見された主な昆虫種	作用対象
セクロピン型	カイコ、センチニクバエ、キイロショウジョウバエなど	グラム陽性細菌、グラム陰性細菌 ^③
ディフェンシン型	センチニクバエ、セイヨウミツバチ、マダラヤンマ、カメムシの一種、カブトムシなど	主にグラム陽性細菌
アタシン型	カイコ、センチニクバエ、キイロショウジョウバエなど	グラム陰性細菌
高グリシン含有抗菌性タンパク質型	センチニクバエ、キイロショウジョウバエ、セイヨウミツバチ、ゴミムシダマシの一種、ホシカメムシの一種など	グラム陰性細菌
高プロリン含有抗菌性タンパク質型	カイコ、ショウジョウバエの一種、セイヨウミツバチ、カメムシの一種など	グラム陰性細菌

参考文献⁴⁾をもとに科学技術動向研究センターにて一部改変

用語説明

③グラム陽性細菌、グラム陰性細菌

細菌はグラム陽性細菌とグラム陰性細菌に大きく分けられる。グラム陽性細菌はグラム染色法で紫色に染色される細菌であり、乳酸菌などが含ま

れる。多剤耐性菌（MRSA）もグラム陽性菌の一種である。グラム陰性細菌はグラム染色法で染色されない細菌であり、大腸菌などが含まれる。

型のもとのディフェンシン型のものは、細菌の細胞膜に穴を開けることにより殺菌効果を示す作用があり、院内感染菌として知られる多剤耐性菌（MRSA、グラム陽性細菌の一種）にも効果があることが明らかにされており、昆虫由来医薬品としての応用が注目されている。

3 - 4

昆虫の共生微生物研究

昆虫は全部の動物種の7割程度を占める。そして、全昆虫の6割が共生微生物を持っていると推定されている。昆虫体内に住み着いている共生微生物は、未知有用物質の宝庫とみなされている。また、昆虫と微生物との共存関係の研究が進めば、生物における生命現象の基本的メカニズムだけでなく、生物進化の過程を理解することに貢献することも期待される。

農業生物資源研究所の渡辺裕文博士は、シロアリ体内に生息している共生微生物がもつセルラーゼ（セルロース分解酵素）に加えて

シロアリ自身もセルラーゼをもっていることを明らかにした。地球規模でのバイオマスとしてのセルロースの利用にシロアリとその共生微生物のセルラーゼを活用する研究が進んでいる。

その他、昆虫に共生している微生物の進化生物学的観点からの研究が進められている例として、昆虫の性や生殖活動をいくつかのやり方で制御・支配しているウォルバキア（昆虫を含む節足動物の約17%程度に共生している微生物）と、アブラムシの共生微生物であるブフネラがあげられる。これらの研究は、生研機構の「新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業」の中の「昆虫・微生物寄生共生系の分子機構の解明と利用」（1996～2000年度、代表者：石川統博士）で進められた。原核生物で細胞内共生微生物であるウォルバキアは真核生物であるアズキゾウムシへ遺伝子の水平転移（ある生物の遺伝子が種を越えて他の生物のゲノムに取り込まれる現象）を起こすことが最近、実験的に示され、遺伝子転移のメカニズム解

明の糸口を与えてくれる生物として注目されている。また、アブラムシの共生微生物ブフネラについては、昆虫共生微生物としては世界で初めて、2000年に全ゲノム配列が解読された。

昆虫の共生微生物はこれまで、人工培養が不可能であったことから研究が立ち遅れていたが、共生微生物を人工培養しなくてもDNAを増幅させて配列を解析する技術が進み、興味ある現象が明らかにされつつある。例えば、昆虫に寄生するある種のRNAウイルスの遺伝子翻訳開始には、AUGという一般的な開始コドンが必要としないことが明らかになった。これは、遺伝子翻訳機構の定説を変え、新たな発見であり、昆虫の共生微生物の研究が生命科学研究の新しい展開の糸口になることを示唆している。昆虫の共生微生物は、将来のいろいろな医薬品や農薬の貴重な探索源になると考えられ、その遺伝子ライブラリーを構築することは、昆虫に関連した新しい産業の展開などの研究基盤となるものである。

4. おわりに

昆虫を対象とした生命科学研究は各種昆虫の全ゲノム配列を研究基盤のひとつとするポストゲノム時代に突入しつつある。ショウジョウバエとハマダラカに続いて、これらとは進化系統図の上で大きく離れた位置にあるカイコの全ゲノム解読が完了することにより、ショウジョウバエやカイコなどのモデル生物のあらゆる生命活動の解明に寄与するだけでなく、昆虫の生命科学領域における理解がより一層深まることが予想される。カイコを用いた生物学研究の豊富な蓄積があるわが国においてカイコの全ゲノム解読プロジェクトを推進する意義は大きい。

このような研究基盤の上で、昆虫の発育制御とホルモン研究、昆虫の生体防御機能研究、昆虫の共生微生物研究などに代表される、昆虫が有する特異的機能の解明を進めることは、生命科学研究の一分野としても重要である。

謝 辞

本稿は、科学技術政策研究所において2003年4月16日に行われた理化学研究所の名取俊二特別招聘研究員による講演会「昆虫を用いた研究の動向と今後の見通し」を参考に我々の調査を加えてまとめたものである。本稿作成にあたり、農業生物資源研究所の研究者

の方々には各種情報をいただきました。文末にはなりますが、関係各位に深甚な感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本分子生物学会編「ショウジョウバエの発生遺伝学」丸善、1989年
- 2) 相垣敏郎「ショウジョウバエゲノムの機能解析」蛋白質核酸酵素 pp.2436 - 2440、2001年
- 3) 竹田敏「昆虫機能の秘密」工業調査会、2003年
- 4) 鈴木幸一、竹田敏、桑野栄一、山川稔、伴戸久徳、本田洋、田村俊樹、木村澄「昆虫機能利用学」朝倉書店、1997年

.....

特集②

※Futurに関する調査は、文部科学省振興調整費政策提言で採択された「需要側からの科学技術政策の展開」研究の一環として実施されたものである。

Futur

—ドイツにおける需要側からの科学技術政策の展開※

客員総括研究官 丹羽 富士雄



1. はじめに

Futur^(注1)は、ドイツの教育研究省（BMBF）が実施した、将来の社会的需要に基づいて研究開発政策を形成しようとするプロジェクトである。需要側からの科学技術政策の展開を検討する際に、参考にすべき点が多い。

（注1）Futurはラテン語であり、英語のfutureの語源である。なお、将来あるいは未来を意味するドイツ語はZukunftである。

Futurの性格は、次の5点に要約できる。

(a)需要志向である

「何が可能か」ではなく、「何が必要か」を志向する。すなわち、研究開発の現場において研究者が強く意識するフロンティア開拓ではなく、将来の社会が必要としているものから研究開発の目標を設定することを最重要視する。

(b)将来（2020年頃）の社会需要を前提にしている

望ましい将来社会像を想定

し、その実現のためには今何をしなければならないか、あるいは、将来社会の問題を想定し、それを乗り越えるためには今何をしなければならないかを考える。

(c)ドイツ研究対話

（Der deutsche Forschungsdialog）を標榜している。

近年の科学技術に関する市民参加論の趨勢を踏まえ、ドイツの研究開発あるいは科学技術政策に関する専門家とあらゆる階層の市民間の対話を前提にしていると表明している。しかも、思いつきや偏った価値観ではなく、熟慮した上での普遍性の高い価値観に基づく対話を志向する。

(d)多彩な参加者を求めている。

(e)学際的テーマを検討の対象としている。

これらをながめると、最初の2つは目標系（目標の内容を示す）に属し、後半の3つは手段系（手段の性格を示す）に属することがわかる。需要志向と将来志向という目標を達成するためには、研究対話、多彩な参加者および学際性が必須の条件であると言える。

Futurの成果は、Leitvisionen（社会を先導するビジョンの意。以降、先導ビジョン）に集約される。それは、将来社会の中心的な問題を提起し、その解決に向けてどのような研究プロジェクトが必要であるかを示すことである。Futurの開始時に、先導ビジョンに必要な性格が検討され、それに基づいて次のような選定基準が決められ参加者に周知徹底された。

- 社会的目標を志向していること。
- 社会ニーズを技術革新や社会革新と結びつけていること。
- ドイツの経済競争力に貢献すること。
- 複雑性と学際性が高いこと。
- 全体的にわかりやすいこと。

技術革新ばかりでなく、社会革新まで視野に入れていることは注目に値する。文理融合ならぬ、技社融合の視点は、今後の科学技術政策に必須と思われる。また、政策内容をわかりやすく提示することは、科学技術の非専門家が大部分を占める需要側からの科学技術政策形成に必須の要件であろう。

2. Futurの設計

本章では、Futurがどのように設計されたかを紹介する。Futurの前経験として、インターネットを介したオープンな討議プロセスによるFutur0（ゼロ）があり、これは見事に失敗している。この失敗を踏まえ、かなりの時間と準備作業を経て、今回のFuturが開始された。

Futurの進行管理を担ったのは、教育研究省Z 22課（戦略、計画形成、研究調整を担当）である。またプロジェクトは大臣の強いリーダーシップの下で実施された。

Futurの発足に当たって、教育研究省は、先導ビジョンとその選定基準という、成果と手法に関する明確なイメージをすでに持っていた。複雑かつ広範なプロセスが必須であり、多様な手法や道具を使用せざるを得ないこと、また、プロジェクトの遂行には訓練された有能な人材が必要であることが予想された。プロセスの中核は直接顔を合わせた討論でなければならないことは、先のFutur0の経験から明らかであった。そこでイメージの具体化、詳細化といった準備作業に半年を要した。実際にプロジェクトが開始されたのは、2001年6月である。実施期間は1年間であった。

プロジェクト費用には、携帯電話用の電波使用権の売却益のほぼ半額が充てられたとのことである。

2 - 1

コンソーシアムの形成

教育研究省は、2000年暮れに公募を行った。3つの提案内容と参加組織の実績の審査およびその後の調整を経て、IFOK^(注2)（プロセス設計とマネジメント、コミュニケーションを担当）、ISI^(注3)（科学技術面のアドバイス、未来予測手法や国際比較の提供）、IZT^(注4)（シナリオ・ライティングと未来ワークショップに貢献）、VDI/VDE-IT^(注5)（科学技術専門知識を組織化して提供）、Pixelpark AG^(注6)（インターネット・ワークスペースの設計、主催）、Science & Media（PR担当であったが、初期に離脱）から成るコンソーシアムに実施を委託した。一方、教育研究省側では、省内各部局、Projektträger（教育研究省資金を外部に分配する機関。全部で11機関ある）、及び、イノベーション諮問会議（Innovationsbeirat, 2001年7月に教育研究大臣が設置。学界、経済界、社会の著名人12名から構成）が、プロジェクトに関与した。

2 - 2

プロジェクトの概要

Furturの特徴の一つは、広範な参加者からの問題指摘と新鮮なア

イデアの提供にある。これを実現するため、様々な専門的背景（例えば科学技術、行政、私企業、経営等）と専門領域をもった異なるグループを構成する工夫がなされた。このために採用したのが、連鎖指名（co-nomination）手法である。それは以下の手順で実施された。

原初段階

コンソーシアムが原初メンバーとして152名を指名。

第1段階

各原初メンバーが、決められた基準に基づいて4、5名の候補者を推薦。プールされた候補者を明確な任命基準に従って選任。

第2段階

原初メンバーと第1段階の連鎖指名で選任されたメンバーとが候補者を推薦。以下第1段階と同じ。回数は適宜行われた。

Futurでは、全過程の情報流通、透明性の確保、意思疎通の有効な道具として、インターネットが効率的に利用された。参加者は、実際に顔を合わせて討議を行う内部サークルと、主としてインターネットを通じて参加する外部サークルに分けられ、ホームページ上にそれぞれ専用のワークスペースが用意された。参加者の通信はほとんどインターネットで行われた。会議日程やニュースレターのやり

（注2） Institute für Organisationskommunikation

<http://www.ifok.de/index.html>

（注3） Fraunhofer-Institute für Systemtechnik und Innovationsforschung

<http://www.isi.fhg.de/>

（注4） Institute für Zukunftsstudien und Technologie-bewertung

<http://www.izt.de/>

（注5） VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH

<http://www.vdivde-it.de/>

（注6） <http://www.pixelpark.de/>

取りのほか、内部サークルスペースでは討論が行われ、外部サークルスペースでは情報のやりとりが行われた。

内部サークルが議論や検討を行う際、外部サークルのメンバーを参加させる必要が生ずることがある。Futurでは、サークル間のメンバー移動、ホームページを通じた外部サークルメンバーの内部サークル議論への参加等が柔軟に行われた。

2002年5月現在の参加者数を図

表1に示す。参加者総数は1,462名、内部と外部の比はほぼ6対4、原初グループのほとんどは内部サークル、自薦のほとんどは外部サークルである。連鎖指名によって選ばれた参加者は1,148名で、全参加者の80%弱を占めている。

参加者の性別、分野別内訳を図表2に示す。性別では、男性が女性のほぼ3倍である。分野別では、科学技術専門家がほぼ半数を占める。科学技術専門家のうち、半数が理工系、半数が人文社会系である。

図表3に示すように、Futurは6つのステップから構成されている。最初のステップは討論ラウンドで、2001年6、7月に開催された。第2ステップはカンファレンスである。なお、これらは正式には、第1回討論ラウンド、第1回カンファレンスと呼ばれている。第1回とは1回目のFuturの意味であり、実施が予定されている第2回Futurで、同様の討論ラウンドが開催されれば、それが第2回討論ラウンドと呼ばれることになる。以下、本稿では単に討論ラウンド等と記す。この最初の2ステップはアイデアを発散させてトピックを形成し、それを分類・整理する、発散型のトピック形成過程である。一方、第3ステップ以降は、形成されたトピックを絞っていく、収束型のテーマ絞り込み過程である。

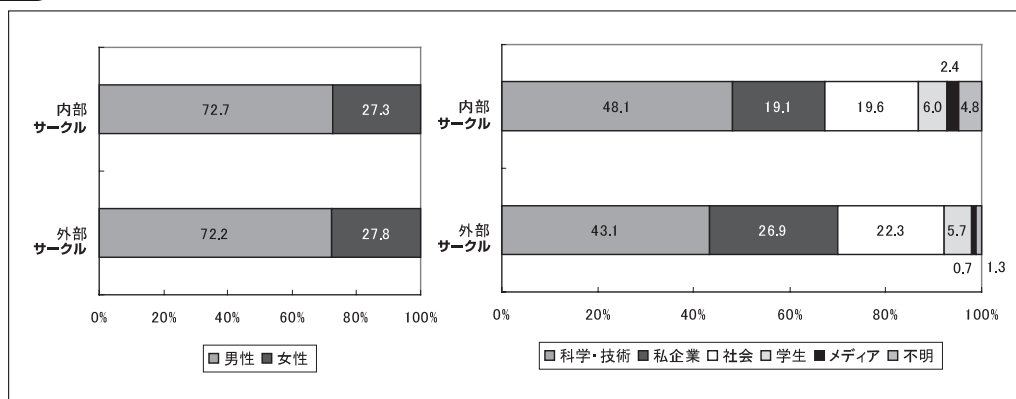
図表1 参加者数

選出方法	内部サークル	外部サークル	合計
原初メンバー	152	4	156
第1連鎖指名* (co-nominarion)	194	120	314
第2連鎖指名	489	345	835
自薦	30	125	155
合計	865	597	1,462

*：原初により指名された参加者

出所：K.Cuhls, "The German Research & Dialog" 2002(unpublished)

図表2 参加者の性別、分野別構成



出所：前掲K.Cuhlsより著者が作表

図表3 Futurの過程

No.	時期	過程	内容	備考
1	2001年6,7月	討論ラウンド	トピックと将来傾向の収集	トピック形成過程
2	2001年9月	カンファレンス (オープンスペース)	傾向に関するクラスターの形	
3	2001年秋～冬	12フォーカスグループの選択	オンラインワークショップと 未来ワークショップ	テーマの絞り込み過程
4	2002年春	フォーカストピックの選考	シナリオの第1稿作成	
5	2002年春～夏	先導ビジョンの検討	シナリオワークショップ	
6	2002年夏～秋	実効化	先導ビジョンの具体的 プロジェクトでの実効化	

出所：最右欄を除いてhomepage (<http://www.futur.de/en/index.htm>) による。最右欄は前掲K.Cuhlsによる。

3. Futurの過程 I：トピック形成過程

トピック形成過程は、討論ラウンドとカンファレンスで構成される（図表4参照）。20年後の将来を予測し、その問題点を予想して必要な解決策を考え、あるいは望ましい社会を構想し、その実現に必要な科学技術対応をトピックとして列挙する。列挙された膨大な数のトピックをグループ分けし、テーマを作成した。

3 - 1

討論ラウンド（ワークショップ）

討論ラウンドの目的は、2020年頃の社会に重要と思われる動向を参加者から収集することである。ベルリンとフランクフルトで8つのワークショップが開催され、内部サークルのメンバー約400名が参加した。専門や所属分野をほぼ同じくする者が同じワークショップに属し、人数が多い場合は20人弱のグループに分割された。ワークショップは、自由な雰囲気の中で各自の考えを出し合うことができるよう設定された。このワークショップには1日間が当てられた。

ワークショップは次の2段階で運営された。

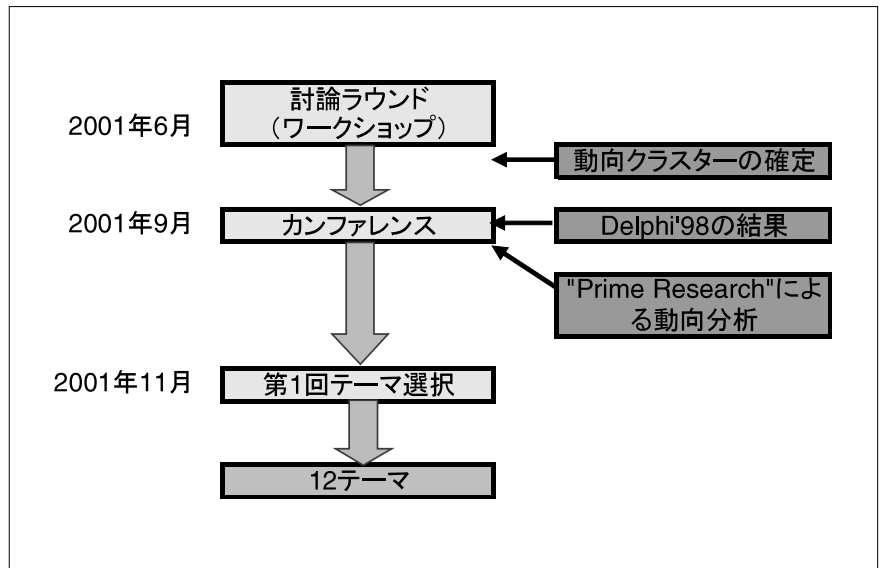
第1段階

「2020年の社会はどのようなか？」という質問が出され、参加者は心に描いた動向を出し合った。

（注7）ドイツで実施された2回目のデルファイ調査であり、取り上げられた1,000を超す技術課題の約1/3は、日本の第6回技術予測調査（1998年）の技術課題が用いられている。

（注8）ドイツおよび米国の未来研究誌に掲載された予測研究を分析し、将来の労働、自然資源・持続性、科学と研究、学習と教育など、20分野について予測結果をまとめた報告書である。実施したPrime Researchは、ドイツの新聞社に属するシンクタンクである。

図表4 トピック形成過程



第2段階

自分の仕事の領域で将来生ずると思われる問題は何か、を出し合った。

結果は内部サークル向けホームページで公開され、ワークショップ参加者はそれにコメントすることができた。

ワークショップで提案されたトピックは約2,000項目、重複したものや類似したものを含めると10,000項目近くに達した。クラスター化の作業により、これらから63の素クラスターが形成され、さらに21の動向クラスター（以後、テーマと呼ばれた）にまとめられた。コンソーシアムが、中心となる動向を推察し、各クラスターに示唆に富む（暗示的な）表題をつけ、その下に3つの副題を

付した。以後の討論を深化させるため、さらに、キーワードとして、具体的な、あるいは代表的な将来予測や課題を添付した。いずれもワークショップで話題になったものである。

3 - 2

カンファレンス（オープンスペース）

カンファレンスは2001年11月26日にベルリンで開催された。目的は、討論ラウンドの議論を深め、将来社会に影響を及ぼす動向を見極めること、及び、見極めた動向を詳述することである。カンファレンスでは、参加者の思いつきや個人的願望を排除するため、関連する予測研究の分析結果が提示された。これらを提示されることによって、参加者は討論ラウンドでなされた将来動向予測の位置づけを知り、より客観性や普遍性あるいは確信性の高い、将来動向が予測できるようになる。提示されたのは、“Delphi '98”^{（注7）}の結果とthe Institute Prime Researchによる動向分析^{（注8）}であった。前者の方法は文部科学省科学技術政策研究所が実施している技術予測調

査と同じである。

カンファレンスには、内部サークルのメンバー約300名が参加した。カンファレンスの過程は次の通りである。選択や判断に際しては、社会的ニーズ、学際性、研究開発との関連性、テーマの焦点性（焦点を絞れる可能性）等の基準が示された。

- ①グループの形成：ワークショップの結果である21のテーマが提示され、参加者は最も興味のあるテーマのグループに参加した。新しいグループの形成、テーマの表題変更も可能であった（結果的に新グループの形成はなかった）。大きなグループはいくつかのサブグループに分割された。
- ②グループ討論の準備：テーマごとのグループにおける討議によりテーマが再定義され、テーマ概要が作成された。その後、参加者が最も興味あるテーマの議論に参加できるよう、グループの再編成が行われた。
- ③本格的グループ討論：詳細な討論により、広範な見地からテーマに関して中心となる課題が抽出された。さらに、他テ

ーマとの重複、潜在的なテーマ、類似グループとの統合が検討され、他テーマとの差別化が図られた。

- ④テーマのプロファイリング：テーマのプロファイルが明確にされた。次に、最も優れたテーマが最良事例として選ばれ、さらに深い論議がなされた。

討論に当たっては、ファシリテーターとサブジェクトアドバイザーを配し、円滑で生産的な進行を図った。それぞれの役割は次の通りである。

ファシリテーター：討論の始めの段階では議論の進行を務めた。その後は、議論の進行、あるいは進行の支援を行った。

サブジェクトアドバイザー：テーマに関する専門知識によって、コンソーシアム内から選拔された。ファシリテーターを助け、討論分野について専門の科学技術知識を提供、あるいは科学技術面でのターゲット案を準備した。また、会議録と付属討論文書に手を加え、専門的に正確なものにすることに貢献した。

3 - 3

第1回テーマ選択

カンファレンス終了後、以下の方法で1回目のテーマ選択が行われた。

- オンライン投票：内部及び外部サークルのメンバー680人による投票
- VDI/VDE-ITによる技術評価：テーマの技術的内容について簡単な事前評価を実施
- 教育研究省のワークショップ：Z 22課主催の内部ワークショップに、各部局長とProjektträgerの代表者が参加し、投票
- イノベーション諮問会議による意見表明
- コンソーシアムと教育研究省Z 22課とのワークショップ

最も重視されたのは、参加者、教育研究省内部局、およびイノベーション諮問会議であった。実際は、それらの結果がほぼ同じであったため、深刻な事態には至らなかった。最終決定は、ブルマーン（E.Bulmahn）教育研究大臣が行った。選択された12テーマを図表5に示す。

図表5 選択された12テーマ

1	知識社会における先見的な計画作りと生きがいのある仕事の形成
2	学習の場ドイツ—学習社会の将来の要因
3	効率的、自律的で、安全なネット社会での生活
4	文化融合力の推進
5	知識の操作
6	流動性の維持
7	医薬品と健康2020
8	社会変動の中でも持続する栄養文化への道
9	地球規模の責務の中での農業生産の維持
10	グローバルな変化—地域規模の変化：グローバルな変化への挑戦を考え、ローカルに行動する
11	地方分権—経済と生活を持続させる戦略になるか？
12	明日の社会のための知的生産物とシステム／知的生産物

注：このうち、最終的な先導ビジョンに選ばれたのは、2、3、7（表題の表現は多少異なる）である。

出所：www.futur.de

4. Futurの過程Ⅱ：テーマの絞り込み過程

トピック形成過程の最終結果である12テーマが、テーマ絞り込み過程の出発点である。絞り込み過程の目的は以下の4つである。

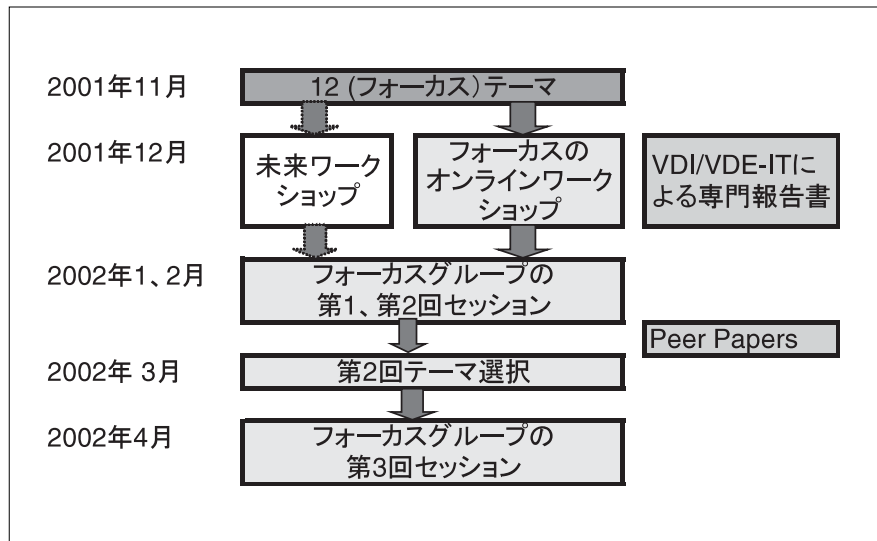
- ① Futurの基準に基づいてテーマを絞り込み、具体化する。
- ② 当該分野が発展するために鍵となる要因を明らかにし、その重要性、不確実性、他の要因との関係を評価する。
- ③ 研究開発の必要性を明確にする。
- ④ 各先導ビジョンとシナリオの基本的なアイデアを形成する。

絞り込み過程の参加者は、カンファレンスの参加者、内部サークル追加メンバー、外部サークルから内部サークルへの移動者の中から、コンソーシアムが指名した。参加者が12テーマの中の一つを選択し、その選択に基づいて12のグループが組織された。さらに、グループメンバーからの指示により適切な人材が補充された（連鎖指名）。このようにして形成されたフォーカスグループが、以降の絞り込み過程の基盤組織になった。

フォーカスグループの作業は、2つのイベントで構成された。

- オンラインワークショップ
- 3回のフォーカスグループセッション：最初の2回は全12テーマを対象とした。第2回セッションの後テーマ選択が行われ、第3回セッションでは5テーマを対象とした。

図表6 テーマの絞り込み課程



この絞り込み過程には、本来の絞り込みとは直接関係ない未来ワークショップが組み込まれた。未来洞察をより確信性の高いものにし、テーマの内容を充実するため必要と考えられたためである。以下、順を追って紹介する（図6）。

4 - 1

未来ワークショップ (Zukunftwerkstätte、Future Workshop^(注9))

未来ワークショップ手法とは、望ましい（規範的な）未来を描き出し、その具体化策を見つけ出す手法である。取り上げられたテーマは、健康と幸福の未来、仕事と生活のバランス、持続する社会での高齢化、明日の都市の集積、未来の学習社会、の5つであった。参加者は、内部および外部サー

クルのメンバー125名である（1テーマ当たり25名）。

各ワークショップは、①問題意識やアイデアの収集、②克服しなければならない問題の明確化、③持続的社会的な問題解決を支援する研究開発の貢献度合いの推測、の3段階で構成された。結果は、インターネットのワークスペースに掲載され、個人のアイデア形成やフォーカスグループセッションに活用された。

4 - 2

オンラインワークショップ

オンラインワークショップは、2001年12月12日から18日に開催された。目的は、①フォーカスグループを組織すること、②各テーマ領域の情報を参加者に提供すること、③テーマ選択の条件を明確にすること、の3点である。さらに副目標として、討論の開始準備とフォーカステーマの明確化があった。テーマ毎のホームページが設けられ、関連情報、ワーキングペーパー、トピック形成過程での討論内容等が掲載された。内部サークルのメンバーが、それぞれ自

（注9）オーストリアの未来学者Robert Jungkが1960年代の前半に開発した未来予測手法である。詳しくは、Robert Jungk & Norbert Mullert, "Future Workshops, Institute for Social Inventions, London (ISBN 0 948826 07 X)"

分の所属する1テーマのホームページに参加した。

4 - 3

第1回および第2回フォーカスグループセッション

セッションの機能は、テーマの内容を固めつつ選択していくことである。ここではファシリテーターが重要な役割を果たした。その役割は、次の5点である。

- ①セッションを誘導した（専門的な知識面ではサブジェクトアドバイザーが協力、支援）。
- ②セッション前には参加者の窓口となり、討論を構成、誘導した。セッション後には、サブジェクトアドバイザーと協力して会議録を作成した。
- ③討論の構成のまとめ、参加要請など、ホームページの作成に関与した。
- ④第1回および第2回セッションでは、テーマに関する参加者の意見を収集し、議論すべき具体的な課題を明確化した。2回のセッションの間には、情報の相互交換や、活発な議論が展開されるよう尽力した。第3回セッションでは、内容の弱い部分を確認し、専門家の協力を受け入れるなど、プロファイルの強化に尽力した。
- ⑤最終的にセッションの討論を総括した。

第1回セッションは2002年1月15日と17日に開催され、約160人が参加した。その目的は、フォーカステーマを実現するイノベーション分野を確定すること、及び、そのイノベーション分野と関係する具体的な研究領域を明確にすることであった。このセッションにより、フォーカステーマがより具体的になり、イノベーション研究

図表7 選択されたテーマ 5 + 1

1	学習の場ドイツー学習社会の将来の要因
2	効率的、自律的、安全なネット社会での生活
3	知識の操作
4	医薬品と健康2020
5	明日の社会のための知的生産物とシステム／知的生産物
6	思考機能の解明

出所：www.futur.de

分野と研究課題が明確になった。

第2回セッションは2002年2月19日と20日に開催された。その目的は、フォーカステーマの内容を確定すること、具体的には、①最重要と考えられるイノベーション分野の選択、②鍵となるアイデアを構成するテーマの表題の作成、③明解な表題、具体的な応用分野、研究ニーズ、研究の重要性の明確化などにより、的確なイノベーション分野を定めること、④テーマ分野の開発に貢献する主要な要因を確定すること、⑤テーマに関連して、可能な未来開発を表すビジョンを作成することであった（ただし、⑤は任意）。第2回セッションでは、ファシリテーター、教育研究省等の要請により専門家が追加され、さらに、研究資金の配分に当たる教育研究省の部局とProjekträgerの職員がセッションの参加を許された。

討論結果は、社会的需要、応用分野、必要な研究と見通し、分野の将来発展のための主要要因毎にまとめられ、テーマ選択の基盤情報として活用された。さらに主題分野のハイレベル専門家（peer）によるコメントが付加された。

4 - 4

第2回テーマ選択

第2回フォーカスグループセッションの後、12のテーマを5つに絞ることを目的として、2回目のテーマ選択が次の方法を用いて実施された。

- オンライン投票：内部および外部サークルの332名が参加。選択基準は、先導ビジョンとしての重要性、研究の見通しおよび社会的需要。
- Projekträgerと教育研究省の専門家による序列化：研究の妥当性、社会的必要性、テーマの熟度、政治的有効性で序列化。
- イノベーション諮問会議での議論：革新性とテーマの質に関して、よりよい生活、健康、長命など広範な視野で研究政策の戦略的な方向付けを議論。

最終判断の段階では、まず教育研究省が、コンソーシアムの支援を受けてFutur基準に沿って報告書を吟味し、ブルマーン大臣が最終決定を行なった。この時、1回目のテーマ選択過程で選択から漏れた“思考機能の解明”が復活し、選択されたテーマは結局6つになった（図表7）。

4 - 5

第3回フォーカスグループセッション

第3回セッションは、「先導ビジョンとシナリオ準備のためのアイデアに関するワークショップ」と呼ばれている。2002年4月16日にベルリンで開催された。このセッションの目的は、先導ビジョンの方向付けとシナリオ作成により、フォーカステーマを深化させることであった。ここでは、テーマと人々の生活との関連、テーマ

の将来見通しが議論された。討論結果は、先導ビジョン最終案とシナリオの作成に利用された。

4 - 6 シナリオと 先導ビジョンの作成

シナリオと先導ビジョンの作成は、フォーカスグループの使命である。シナリオ作成は以下の手順で行われた。

- ①テーマ毎のプロファイルが検討に供され、当該分野の高名な専門家が専門情報を付加した。
- ②前課程の検討を基に、追加された「思考機能の解明」を除く5つのフォーカステーマのシナリオが、IZTにより作成された。
- ③フォーカスグループ、参加者、コンソーシアムからのコメントに基づき、シナリオが修正された。

図表8 先導ビジョンレポートの構成

表題	
目標とビジョン	
解説	<ul style="list-style-type: none"> ●社会的と経済的重要性 ●取り組むべき課題 ●課題克服の可能性 ●課題解決先送りの危険性
シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ●既存の研究プログラムを含む研究の現状 ●将来の研究における焦点 ●科学的重要性に関する情報 ●研究上の課題 ●可能な解決手法 ●関連する研究領域

出所：www.futur.deで提供されている4つの先導ビジョンレポートから構成

先導ビジョンレポートは以下の手順で作成された。

- ①テーマ毎に先導ビジョンチームが結成された。チームはIZT、VDI/VDE-IT、ISI、IFOK、教育研究省、フォーカスグループの参加者で構成された。

- ②Projekträgerの専門家、当該分野の高名な専門家による研究の現状と既存のプログラムに関する情報が先導ビジョンに統合された。
- ③IFOKにより先導ビジョンの初稿が準備され、他のチームが修正を加えた。

5. Futurの成果：先導ビジョン

先導ビジョンは、最終的には教育研究省により決定された。決定された先導ビジョンは、①思考機能を解明する、②将来の学習社会の入り口を拓く、③予防により、一生健康で生き生きと暮らす、④ネット社会での生活：個と安全、の4テーマ（図表7の項目1、2、4、6に該当）である。「明日の社会のための知的生産物とシステム／知的生産物」は教育研究省各部局が横断的なテーマとして取り組むようにと推薦され、「知識の操作」は将来のフォーカステーマとすることにされた。

ただし、教育研究省が追加した「思考機能を解明する」は、シナリオワークショップをバイパスしており、シナリオの完成が遅れた（2003年6月15日にはPDFで提供。但しドイツ語版だけ）。この

点で、Futur過程の不透明性を批判する向きもあるが、他方それはプロセスの柔軟性や政治の責任を明確にするものであるとも評価できる。

その後の展開としてまず求められるのは、先導ビジョンの実効化である。その中心的な役割を担う教育研究省では、すでに内部に実効化チームの設置を計画し、研究補助金配分における優先度の変更を予定している。また、省内ワークショップを2002年8月27日に開催し、Futurのトピックやアイデアを総括して、Futur IIに向けて始動することを確認した。このワークショップには、Futur像や内容をさらに鮮明にすること、アイデアを触発すること、部局内で横断的なブレインストーミングを実施すること等の目的もあった。

科学技術政策においてもイノベーションが必要であり、そのためには政策部局の意識改革が必須であるとの強い認識が背後にあった。

Futurの成果として、ドイツの関係者は次のような点を挙げている。

- 新しい研究補助金の新設はせず（正確にはできず）、来年度以降、先導ビジョンを研究補助金配分の優先度に反映させる。
- 医療関連については教育研究省と厚生省との密な協力関係が作られた。
- 教育研究省内の組織横断的な政策の作成が容易になった。いわゆる縦割りの政策形成がもつ深刻な問題がFuturへの参加によって認識された。
- 将来の組織形成において、横

断的な組織を強化し、縦割りの組織を弱める方向を強化した。このような組織再編はすでに実行に移されており、中枢的課題や戦略を扱うZ局が強化された。

●省内に意識変化が見られ、需

要指向重視が定着し始めた。

Futurの国際的な外部評価が2002年10月に実施され、「良」の評価がなされた。2002年12月12日、13日には、Futur IIに向けた国際ワークショップが開催され

た。Futurについては、ここ数年は先導ビジョンに採択されなかったテーマを、2、3件／年先導ビジョンにし、それ以後は新しい形のfutur IIを実施する計画とのことである(2003年5月15日現在)。

6. おわりに

Futurは現在進行中であるので、これを評価することは時期尚早のきらいがある。ただ、その意義は時代背景を見た上で理解する必要がある。

FuturはSPDのシュレーダー政権になって急に現れたものではない。すでにCDUのコール政権時代にもその芽はあった。教育研究省のトーマス事務次官によると、ドイツの科学技術政策の転換期は2度あった。

第1期

1970年代後半から80年代前半。改革の内容は、主として個人の研究者の好奇心を中心に実施されていた研究を、マックスプランク等の研究所の研究計画中心に変革したことである。これは、研究開発マネジメントの世代論でいう、研究者の個人中心の研究開発である第1世代から、研究所のマネジメントを中核にした第2世代への移行に対応するものである。

第1世代では、個人の好奇心や関心が中心であったために、研究の重複や重要な研究の欠如、同種研究所の林立など、様々な問題が露呈していた。さらに、当時は宇宙開発、高速大型コンピュータ開発、原子力開発、高速交通システム開発、環境保全、製造技術の高度化が始まっていたが、ドイツはそのすべてでかつての優位を失い、米国や日本の後塵を拝するようになったという強烈な問題意識

もあった。このような中で、研究所の統廃合や再編成を実施し、研究開発の効率を向上させ、国際的な競争力を持つ科学技術力を確保しようとした。

第2期

1990年代後半から2000年代初め。これも研究開発の世代論に対比される。すなわち、科学技術のシーズ志向の研究開発という第2世代から、市場や社会のニーズを志向する第3世代への移行である。大研究所を中心とした研究開発は、資金配分の硬直化につながっていった。使途目的を明確にしない経常研究費的な資金が研究所に配分されるようになり、所内の資金配分はシニアの研究者の強い影響力に左右されるようになった。それによって生まれた弊害は、需要志向の欠如である。国民レベルにおいても、切実な社会問題を解決していないのではないかとという強い疑義が生まれた。このような背景を踏まえて、教育研究省がまず実施したのは、経常研究費の廃止である。次いで、需要志向を明示したFuturの実施である。

このような歴史的経緯を経て、ドイツでは従来の資金配分の問題点として次の3点が論じられている。

①教育研究省の既存の研究資金配分方式、伝統的な方式や優先付けはシーズ志向が強いので、新鮮なアイデアを導入す

ることが望まれる。

②関係者間の相互交渉が不透明で、閉鎖的であり、開放的・透明にすることが望まれる。

③新しい重要な課題を見過ごす危険性があり、そのような危険を少なくすることが要請される。

このような背景の基に、Futurは次のような性格を持つに至ったのである。

①イノベーション志向の研究政策に、将来の社会的な需要に基づいた政策を付加する。誤解はないと思われるが、決して、それがすべてではない。

②学際的で問題解決型の社会先導的なビジョンを掲げる。

③広範な参加者による異質な創造性、意思疎通、分析等の手法の組み合わせでなければ、そのような目的は到底達成できない。このような手法の開発も目的の一部である。

さて、Futurの国際的な普遍性あるいは利用可能性はどうであろう。例えば、フィンランドでは議会に置かれた未来特別委員会(The Special Parliamentary Committee for the Future)でほぼ同じような試みを実施されている。我が国に導入することは可能か、可能だとしてもどのような修正が必要か、などの検討が必要と思われる。

科学技術動向センターとは

平成13年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。本センターでは、第2期「科学技術基本計画」に示されたライフサイエンス、情報通信等の重点分野の最新動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供いたします。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1

「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

わが国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱して（2002年度実績約2800人）、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する体制「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加

え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布いたします。なお、この資料は<http://www.nistep.go.jp>において公開します。

2

重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

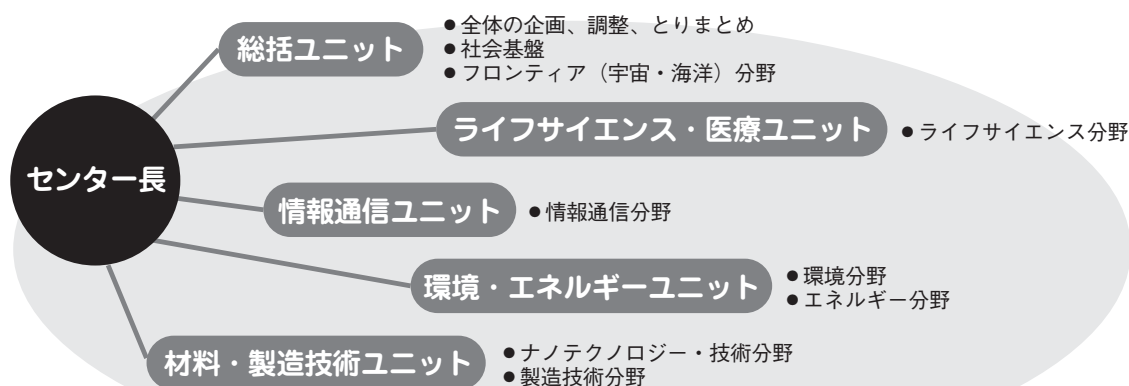
さらに、重要な科学技術分野・

領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、わが国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3

技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法による技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。これは、今後30年間の重要技術を抽出して、重要技術の重要性評価や実現予測時期を分析するものであり、センターは、多くの専門家の協力により本調査を引き続き実施いたします。



*それぞれのユニットには、職員の他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

June 2003
(NO.27)

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