

忘れられた科学 ― 数学

主要国の数学研究を取り巻く状況及び我が国の科学における数学の必要性

2006年5月

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

細坪 護拳

伊藤 裕子

桑原 輝隆

本 POLICY STUDY の内容は、執筆者個人の見解に基づいてまとめられたものである。

Mathematics as deserted science in Japanese S&T policy
— Current situation on mathematical sciences research in major countries and
need for mathematical sciences from the science in Japan —

May 2006

Moritaka Hosotsubo
Yuko Ito
Terutaka Kuwahara

Science and Technology Foresight Center
National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)
Japan

目 次

概要	3
1. はじめに	5
2. 世界における数学論文等の状況	6
【何を以って「数学研究」とするのかー「数学研究」の定義】	15
【基礎的な数学に関する論文分析】	17
3. 数学研究に関する各国の状況及び政府の取り組み	20
3-1 日本	20
【日本の国立大学における数学研究を取り巻く環境変化】	26
【科学研究費補助金配分実績から見る日本の数学研究】	29
3-2 米国	31
【日本数学会と米国数学会　ー応用数学の位置付け】	49
3-3 フランス	53
3-4 ドイツ	58
3-5 日本、米国、フランス及びドイツにおける数学研究に関する状況比較	63
【数学専攻学生数減少の背後にあるもの】	68
4. 日本の数学研究ニーズについてのアンケート調査	70
4-1 背景と目的	70
4-2 調査の概要	72
4-3 調査の結果	73
4-4 まとめ	101
5. 結論	104
5-1 日本の数学研究を取り巻く状況	104
5-2 数学研究の強力な振興の必要性	106
5-3 日本の数学研究と科学技術振興のためにとるべき喫緊の対策の提案	108
6. 謝辞	112

参考資料	113
参考資料 3-1 米国の数理科学の国際評価に関する上級評価委員会報告	115
参考資料 3-2 米国のマルチスケール数学プログラムの概要	159
参考資料 3-3 ドイツにおける数学研究に関する国家プログラムについて	172
参考資料 3-4 ドイツ「キーテクノロジーのための数学研究センター」について	179
参考資料 4-1 アンケートご協力をお願い	184
参考資料 4-2 「研究分野における数学のニーズ」に関するアンケート	186

忘れられた科学 ―数学

主要国の数学研究を取り巻く状況及び我が国の科学における数学の必要性

【概要】

1. 日本の数学研究を取り巻く状況

- (1) 数学研究には他分野に見られるような大規模な実験施設や多額の設備投資は不要だが、数学研究者が定常的に研究情報を得て研究活動を行うための経費（雑誌購入費や旅費、人件費など）が必要である。米国、フランス、ドイツなどの数学研究の主要国と比較して日本の数学研究費に関する状況は極めて厳しいと推測される。現状の日本の数学研究費の規模では、数学研究レベルの現状維持又はレベル低下を緩和する程度にしか寄与していない可能性がある。
- (2) 日本の大学における数学博士取得者数は米国、フランス、ドイツと比較して少ない。海外のトップクラスの数学研究者からは、日本のトップクラスの数学研究者を継ぐ人材が不足していると警鐘が鳴らされており、日本の数学研究振興には今が最後のタイミングではないか。全学教育（教養教育）や入試への対応、事務量の増加などにより日本の大学における数学研究者のオブリゲーションが増加したことで、研究時間は大幅に減り、日本の数学研究環境は悪化を続けていると推測される。
- (3) ライフサイエンス、情報工学、ナノテクノロジー等の多くの分野の研究者は、今後の研究発展に対する数学の必要性を感じている。欧米ではそのための数学研究者との協力体制が整っているのに対して、日本では遅れていると彼らは考えている。
- 米国、フランスなどでは産業界でも数学研究者が活躍している一方、日本ではそのようなケースは少ないと推測される。この背景には、日本の企業が企業研究に対する数学の意義や可能性をまだ十分に理解していないとともに、数学博士などを送り出す側の学術界もその意義や可能性を十分に企業に伝えてこなかったためと考えられる。これは日本の産業研究の発展を損ねている可能性がある。

以上を総合すると、日本の数学研究のポテンシャルは著しく低下したわけではないものの、予断を許さない状況にあり、広範な科学技術分野からの期待に応えられていない。

2. 数学研究の強力な振興の必要性

- (1) 数学は諸科学の基盤となる科学である。そのため、数学の進歩を他分野に還元することは他分野の更なる発展の可能性を産み出し、数学-他分野融合研究から得られる社会的利益は巨大であると推測される。既に米国やドイツは数学-他分野融合研究に関する国家プロジェクトを実施しており、日本の他分野研究者も数学との共同研究に対し

て強い期待を寄せている。日本においても、数学-他分野融合研究を振興すべきである。また、基礎となる数学自体の強力な振興も必要である。

(2) 新興の研究開発分野における研究では、「モノや構造を支配する原理を見出す」ことがブレークスルーの重要な要因となっていることが特徴とされており、数学はその「支配原理」を見出すための普遍的かつ強力なツールでもある。即ち、数学研究の振興は、イノベーションの可能性を間接的に増加させるという意味でも極めて重要である。これまで日本では十分には行われてこなかったと思われる数学と産業、あるいは数学と他分野との共同研究実施に向けた検討や体制整備が必要である。

(3) 他国における数学研究成果をそのまま利用する、いわば「タダ乗り」を狙うだけでは、研究能力が低下し独自の研究成果を生み出せなくなるのみでなく、重要な数学的成果を速やかに利用することもできなくなる。また、広範な研究開発分野を振興している日本にとって、数学研究は他分野の発展にも必要であり、その強力な振興が必要不可欠であると考えられる。

以上から、最新の数学研究成果の動向に対応しつつ新たな成果を生み出すとともに、数学によって他分野の革新的な発展を後押しし、産業のイノベーションに貢献するため、日本において数学研究を強く振興することが必要不可欠である。

3. 日本の数学研究と科学技術振興のためにとるべき喫緊の対策の提案

(1) 施策の提案

- ① 基礎的な数学研究を強力に振興するため、数学研究に対する政府研究資金を拡充する。
- ② 数学と他分野との融合研究を推進するため、数学-他分野融合研究の推進拠点を構築する。
- ③ 数学者と産業界との相互理解を促進し、共同研究の実施について具体的に検討する。

(2) 数学研究振興における留意点

- ① 数学者が思考を繰り返し、その成果を論文にまとめるための研究時間を確保するとともに、数学者が互いにインスピレーションを受け、新しいアイデアが閃くような意見交換の場と時間を確保する。
- ② 過去の良質な数学論文は時間を超えて最新の研究に影響を及ぼし得ることから、数学研究においては図書や文献の量及び質が重要な意味を持つことを認識する。
- ③ 基礎的な数学研究から短期間に具体的効果を求める性急さを避ける。

1. はじめに

2006年4月から第3期となる科学技術基本計画が始まる。この第3期基本計画の策定に資するため、2003年頃から科学技術政策研究所ではこれまでの科学技術基本計画の達成効果の評価のための調査や、科学技術の中長期的発展に係る予測調査などを体系的に実施してきた。これらの調査における各分野の論文の数や質の変化などのポートフォリオ分析、海外トップクラスの科学者・研究者による日本の研究活動の評価、注目科学技術領域の発展シナリオ調査（数学に関する執筆者は広中平祐氏及びピーター・フランクル氏）を通じて、諸外国と比べて「忘れられた」日本の数学研究を取り巻く状況が臍げながら分かってきた。

このような状況に関して、当研究所は所内で数学研究者を招いて講演会等を開催して日本及び世界の数学研究を取り巻く状況について情報収集を実施し、2005年4月に「米国における数学と生命科学の研究協力」に関する特集記事を当研究所機関誌『科学技術動向』に発表した。

さらに、数学研究を取り巻く状況などについて産学官関係者の認識を共有するため、当研究所は2005年5月に（社）日本数学会との共催により「数学の将来シナリオを考える ― 数学を基点とする分野横断型研究の展開に向けて―」と銘打ったワークショップを開催した。このワークショップでは、日本の数学研究を取り巻く厳しい状況が報告されるとともに、生命科学などの他分野研究者、金融・保険業や情報セキュリティなどの企業関係者など数学研究者以外から日本における数学の今後の発展に対する熱い期待が寄せられた（本ワークショップの結果は『科学技術動向』2005年6月号に掲載）。

このような関係者からの意見などを踏まえ、主要国における数学研究を取り巻く客観的かつ具体的な状況や、日本の各分野からの数学研究に対するニーズを定量的に把握することが必要となった。

かかる問題意識から、数学研究を取り巻く状況に関する各国の統計資料などのデータの収集とともに、数学研究のニーズを把握するために日本の各分野の研究者に対してアンケート調査を実施した。本報告書はその調査分析結果をとりまとめたものであり、国別比較分析（第2章及び第3章）、及びアンケート調査分析（第4章）の各章から構成されている。各国の統計が不揃いであることや定義の相違などの問題から国際比較に一定の限界はあるものの、本報告書の調査分析結果から日本の数学研究を取り巻く状況の厳しさ、そして数学研究振興の必要性が浮き彫りになった。

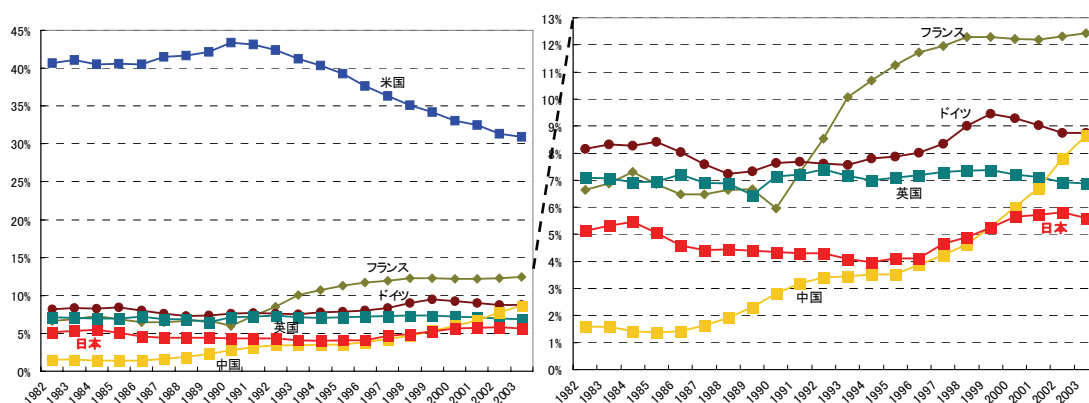
本報告書が日本の数学研究と科学技術振興の一助となれば幸甚である。

2. 世界における数学論文等の状況

どのような国々が数学研究※の上位を占めるのか。

数学研究成果の状況について論文数の観点から分析を行う。各国の状況をなるべく同条件に近くして比較するため、Thomson Scientific社のScience Citation Index(SCI)データベースから各年における各国の数学研究に関する論文数を算出した。論文総数は年によって異なる（凡そ年とともに増加する傾向にある）ため、論文数全体に対する論文1本の重みは年によって異なる。従って、数学研究における各国のポジションの推移を分析するため、当該年の論文数全体に対する各国の論文数の世界シェアを計算し、その時系列比較を行う（図表2-1）。図表2-1から、数学論文数シェアではトップから米国、フランス、ドイツの順となっており、近年、中国がドイツに肉薄していることが分かる。日本は英国に次いで世界第6位の地位を占め、世界の数学論文数の約5～6％に相当している。全体的な動向としては、90年以降に米国の世界シェアが減少する一方、90年代前半のフランス及び90年代後半からの中国の伸びが著しい。ドイツ、英国、日本についてはこの20年間で世界シェアの大きな変化はない。この状況だけでは、日本は必ずしも何らかの問題を抱えているように見えないが、近年、日本は全論文数で世界第2位となっている状況を鑑みると、日本における科学技術全体に対する数学研究のウェイトが下がっている可能性がある。それに加えて、ほぼ全ての研究領域で首位と思われる米国で数学研究のウェイトがどのように変化してきたのかは図表2-1から判別できない。

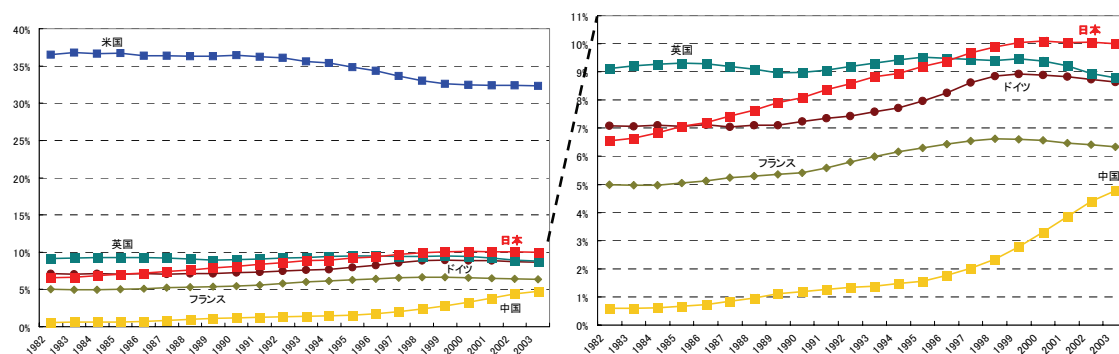
※ 本報告書において「数学研究」とは、基礎的な数学（いわゆる純粋数学）、応用数学、統計学、確率論などを含む数理科学（mathematical science）における研究を意味するものとする（章末囲み記事参照）。



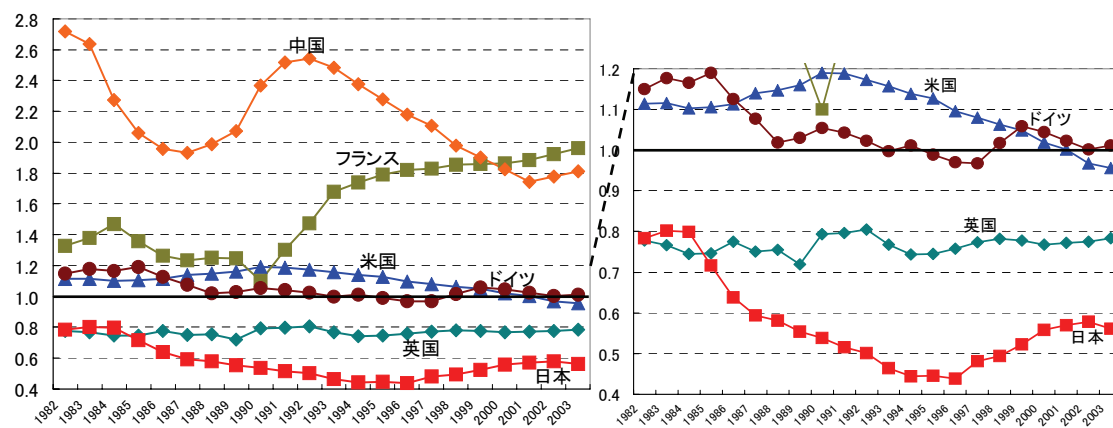
図表2-1 主要国の数学研究論文数の世界シェアの推移（経年変化のグラフは3年移動平均、以下本報告書全ての図表で同じ。右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計）

そこで、ある国に対して（同国の数学研究論文数の世界シェア） / （同国の全論文数の世

界シェア) という世界シェア比を導入する (図表2-3)。この世界シェア比が 1 を超えれば、同国の数学研究論文数は同国の全論文数と比べて世界シェアが高く、数学研究は全分野平均と比較して活発であり、逆に 1 未満であれば、同国の数学研究論文数は同国の全論文数と比べて世界シェアが低く、数学研究は全分野平均と比較して活発でないこととなる。



図表2-2 主要国の全分野論文数の世界シェアの推移 (右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計)

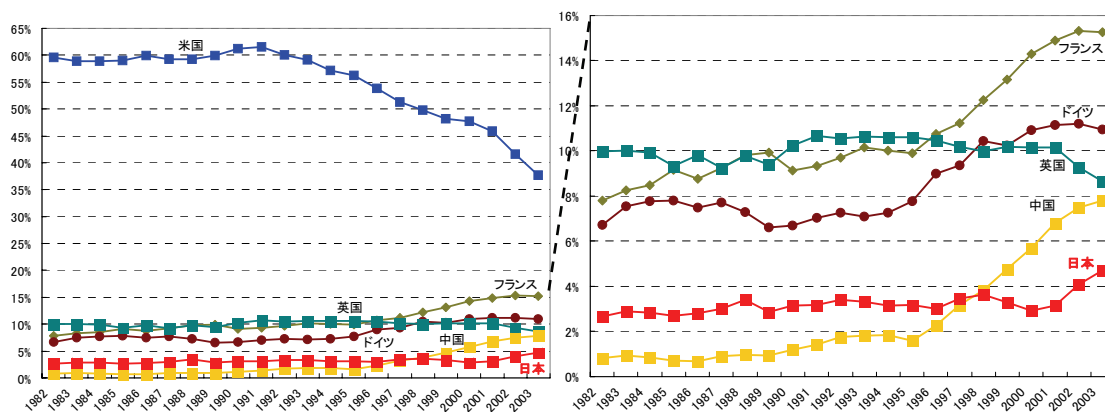


図表2-3 主要国の (数学研究論文数の世界シェア) / (全分野論文数の世界シェア) の推移 (右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計)

図表2-3から、フランス及び中国では数学研究論文数の世界シェア比が大きく、両国では数学研究が活発であることが推測される。一方、米国及びドイツではこの世界シェア比は最近20年間で若干減少傾向にあるものの、03年でも 1 近くにあり、論文数全体の世界シェアと数学研究論文数の世界シェアとは大差ないことが分かる。ここで、日本の世界シェア比は80年代前半の約0.8から80年代後半に0.6を下回り、90年代半ばには0.4~0.5程度まで落ち込んだ。その後現在まで若干回復したものの依然0.6に届かず、上位国の中では世界シェア比は最低となっている。日本の論文数全体の世界シェアが増加する中、数学研究論文

数の世界シェアはほぼ横ばい又は低下したためと考えられる。

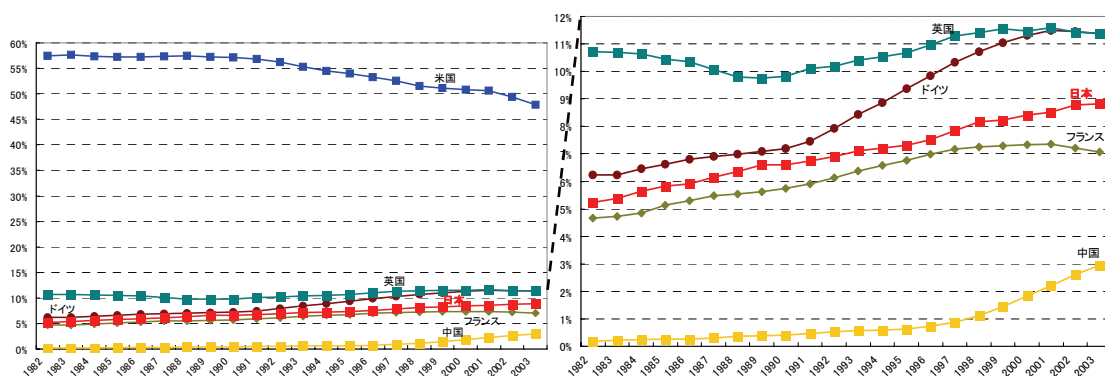
以上の分析では論文の質を全く考慮していない。そこで、各分野毎に被引用数で各論文の順位を付け、その上位10%に入る論文数を算出したもの（上位10%論文数という）を使用して、上記と同様の分析を行った（図表2-4～図表2-6）。



図表2-4 上位10%数学研究論文数に関する主要国の世界シェアの推移（右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計）

分析に入る前に上位10%論文数の分析において、ごく近年のデータの信頼性が低いことに注意しなければならない。というのは、上位10%論文を決定するのは論文の被引用数であり、論文の出版年からある程度時間が経過しなければ論文の評価、即ち被引用数の多寡が定まらない場合も考えられるからである。そういう意味で長期間に亘る動向を分析することが有効である。

図表2-4の状況を図表2-1と比較すると、米国については、数学研究論文数及び同上位10%ともに世界シェアが減少しているが、常に同上位10%の世界シェアが同論文数の世界シェ



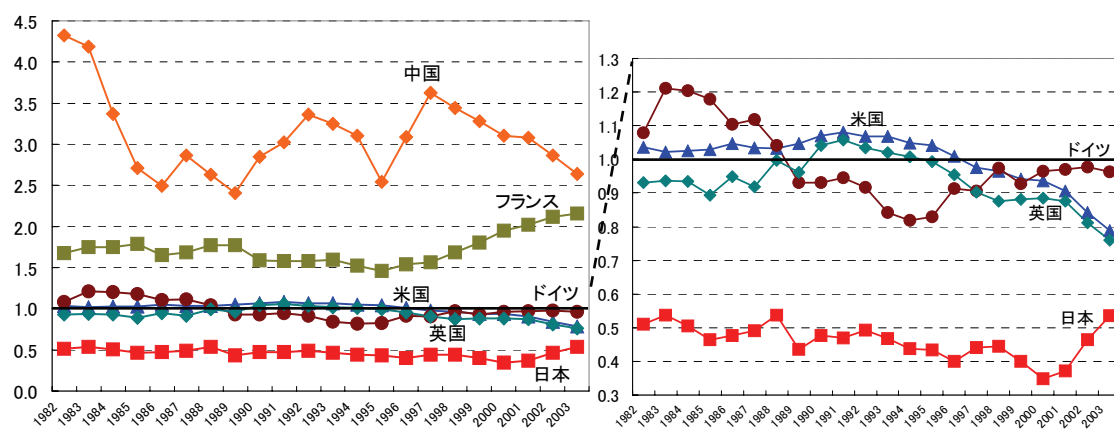
図表2-5 主要国の上位10%全分野論文数の世界シェアの推移（右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計）

アを上回っており（00年前半：数学論文数の世界シェア約30%、同上位10%の世界シェア約40%）、世界的に相対的に高い数学研究の質を維持している。

また、フランス、ドイツ及び英国についても上位10%数学論文数の世界シェア（図表2-4）が同論文数の世界シェア（図表2-1）より高く、世界的に高い数学研究の質を保っているといえる。

日本及び中国については、上位10%数学論文数の世界シェア（図表2-4）が同論文数の世界シェア（図表2-1）よりもやや低く、数学論文の質は必ずしも世界的に十分なレベルではないと考えられる（近年、日本の上位10%数学論文数は世界第9位）。

図表2-6は上位10%数学論文の世界シェア比の時系列を示している。この指標は全分野に対する数学研究の相対的な質の変化を示すと考えられる。この図表から、米国及び英国の世界シェア比は1.0前後であるものの、長期的な減少傾向にある。近年の大幅な減少はデータの信頼性に係る可能性もあり今の段階では断定できない。また、フランスの世界シェア比は長期的な増加傾向にあり、中国及びドイツはほぼ横ばいである。日本における数学研究の世界シェア比は長期的な低下傾向にあり、ここ数年で回復しているが、この回復が統計的に有意なものかどうかは今のところは分からない。



図表2-6 主要国の（上位10%数学研究論文数の世界シェア） / （上位10%全分野論文数の世界シェア）の推移（右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計）

次に日本国内における数学研究論文状況を分析する。今回我々が利用することができた論文データベースは2種類であり、Thomson Scientific社のSCIデータベースと科学技術振興機構（JST）の論文データベースJ-Dream II（06年2月現在試行サービス中）である。数学研究論文の分析を行う前に、それぞれの論文データベースの特徴とともに数学論文の検索方法を取りまとめると次のようになる。

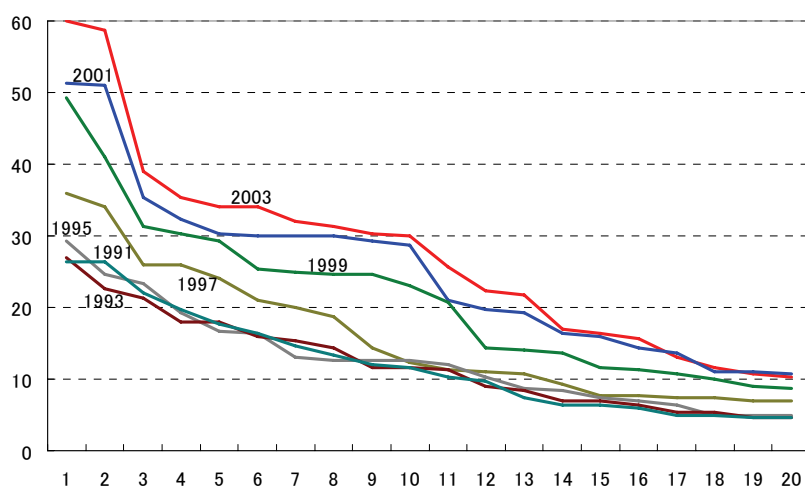
○ SCIとJ-DreamⅡの違い

- ① 数学研究論文に関して、SCIとJ-DreamⅡとで論文雑誌の重複は確認されなかった。それぞれ異なる論文雑誌を登録していると考えられる。
- ② SCIには和文雑誌類（雑誌、紀要、論文集、学会誌など）は登録されていない。一方、J-DreamⅡには多くの和文雑誌類が登録されている。
- ③ SCIは数学専門雑誌を多く含む。一方、J-DreamⅡに登録されている数学専門雑誌は極めて少なく、工学関連雑誌が多い。
- ④ 数学研究論文の検索に当たって、SCIでは「数学専門雑誌などに掲載された論文」を数学研究論文に集計している。一方、J-DreamⅡでは掲載誌の分野に関係なく、シソーラス「数学」分野に分類された論文を集計している。

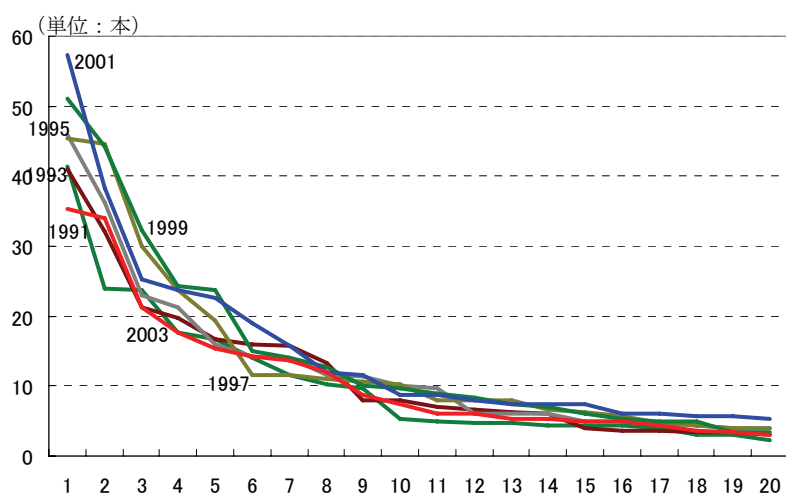
これらの両データベース間の差は、数学研究論文といってもSCIでは「基礎的な数学（いわゆる純粋数学）又は応用数学に関する論文」、J-DreamⅡでは「他分野における数学的な研究に関する論文」というニュアンスの差に繋がると考えられる。

これらの違いを踏まえ、相互のデータベースの機関別分布を調べたところ、全く異なる分布が得られた（図表2-7、図表2-8）。

（単位：本）



図表2-7 数学研究論文数の上位20機関の分布の推移（その1）（大学内の理学部、工学部などは区別せず、大学で一機関として集計。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index（1982-2003）” に基づき科学技術政策研究所が集計）



※ SCIにおける数学研究論文数上位35機関を調査対象としている

図表2-8 数学研究論文数の上位20機関の分布の推移（その2）（科学技術振興機構J-Dream IIに基づき科学技術政策研究所が作成。大学の理学部、工学部などは区別せず、大学で一機関としている）

図表2-7のSCIでは上位10位近辺の機関でも1位の約半数程度の数学論文数を有する（機関分布がブロード）一方、図表2-8のJ-Dream II では上位機関が論文数を独占している状況に近い（機関分布がシャープ）。定量的に分析すると、数学研究論文数上位5、10又は20機関が日本全体に占める割合は図表2-9となる。ここで数学研究論文数上位機関に関するSCIとJ-Dreamの集中の度合の差は上位5機関の占有率の差であることが分かる。

	上位5機関	上位10機関	上位20機関
SCI	23%	39%	56%
J-Dream II	40%	56%	72%
J-Dream II とSCIの占有率の差	17%	17%	16%

図表2-9 数学研究論文数上位機関に関するSCIとJ-Dream II の占有率の比較（99-03年平均、Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” 及び科学技術振興機構J-Dream IIに基づき科学技術政策研究所が集計）

すると、図表2-7と図表2-8に現れた機関分布の差は「基礎的な数学（いわゆる純粋数学）又は応用数学に関する論文」では上位機関だけでなく中堅機関の寄与も大きい一方、「他分野における数学的な研究に関する論文」では上位機関の独占に近い状況を示している可能性がある。

なお、SCIに登録された数学研究論文総数は概ね年々着実に増加している一方、J-Dream II では90年代後半以降減少している。更に、相互の数学研究論文数を比較するとSCIは

J-DreamⅡの2倍以上多い。しかし、これは『基礎的な数学（いわゆる純粋数学）又は応用数学に関する論文数が増加する一方、他分野における数学的な研究に関する論文が減少しており、基礎的な数学（いわゆる純粋数学）又は応用数学に関する論文数が他分野における数学的な研究に関する論文よりはるかに多いことを意味する』とは限らない。何故ならば、相互のデータベースの論文網羅率が常に同程度とは限らないからである。民間企業であるThomson社によるSCIでは論文網羅率が高いことが重要とみなされている可能性がある。一方、公的機関であるJSTが運営するJ-DreamⅡの論文網羅率は年度予算の増減の影響を受けやすい。このように、そもそも目的や運営方針が大きく異なる両データベース間の論文数の比較は意味がないと推測される。

以上では、米国以下日本までの数学研究論文数の多い国上位6カ国と日本国内を対象に時系列で分析してきたが、異なる見方で分析してみよう。03年において全分野論文数の多い国と地域上位20（上位から、米国、日本、英国、ドイツ、フランス、中国、イタリア、カナダ、スペイン、ロシア、オーストラリア、オランダ、韓国、インド、スウェーデン、スイス、ブラジル、台湾、ベルギー、イスラエル）を対象に、数学研究の世界シェア比と研究開発費（国内総研究開発費、政府研究開発費）との関係を調べた（図表2-10）。国内総研究開発費や政府研究開発費は、その国がどれだけ研究開発に取り組んでいるか、取り組む能力があるかの一つの指標とも考えられる。

結果を詳細に分析するため、これらの国を研究開発費の規模に応じてグループに分ける。国内総研究開発費の規模から、分析対象とする20カ国は次の2群に分類することができる。

【第1群：（国内総研究開発費100億ドル未満）】

スウェーデン、オランダ、台湾、スイス、スペイン、オーストラリア、ブラジル、ベルギー、ロシア、イスラエル、インド

【第2群：（国内総研究開発費100億ドル以上）】

米国、日本、ドイツ、フランス、英国、中国、カナダ、韓国、イタリア

政府研究開発費の規模から分類してもこの2群の分け方は同じであり、各群の中で順位が変動することはあっても、群を跨ぐことはない（図表2-10の点線）。

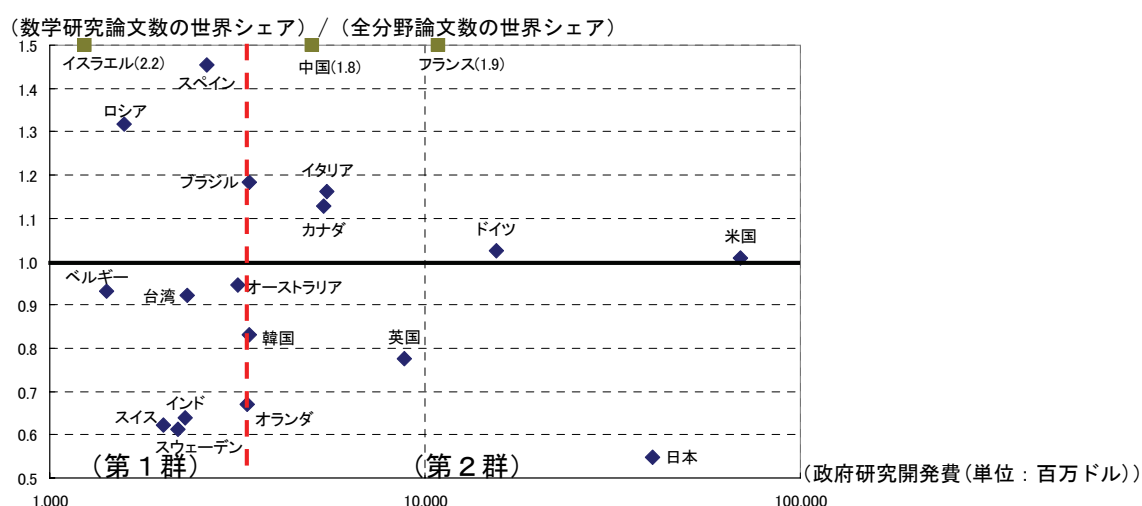
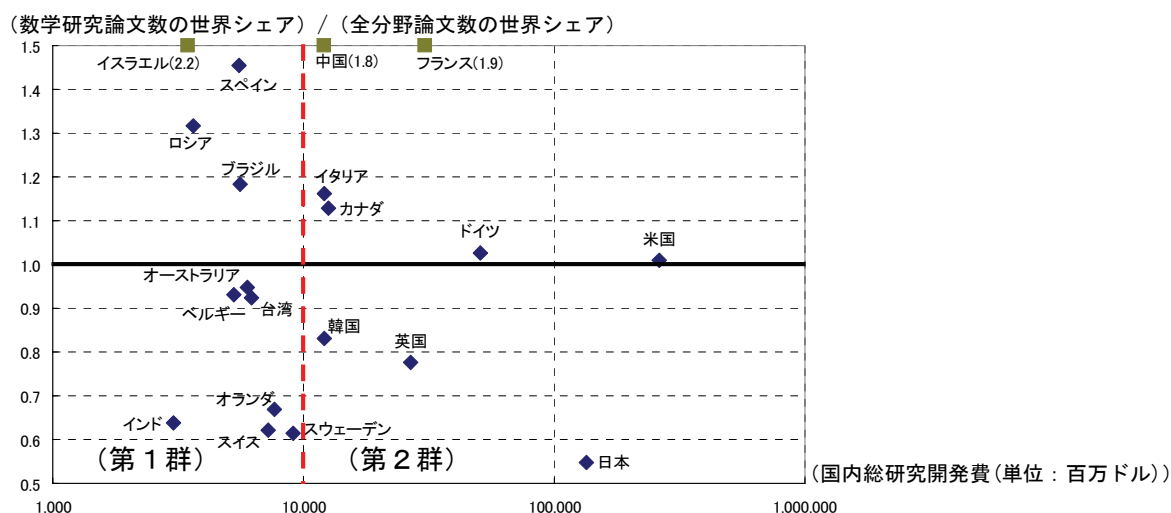
第1群では、数学研究論文数の世界シェア比の高低が幅広く（高い国：イスラエル、低い国：スウェーデンなど）、シェア比が1より小さい国が多い（7/11）。第1群における平均シェア比は1.05である。

第2群でも、数学研究論文数の世界シェア比の高低が分散する（高い国：フランスなど、低い国：日本）が、シェア比が1より大きい国が多い（6/9）。第2群における平均シェア比は1.13である。

規模が小さいなどの理由から国内総研究開発費が比較的小さい国（第1群）では、調達

可能な資金、人的資源量の限界などから科学技術の振興は特定分野や領域に特化しがちであり、数学研究の世界シェア比の高低の大きな格差はその特化領域に数学研究が入るか否かの差と考えられる。一方、広範な研究開発に取り組んでいる又は取り組む能力がある国内総研究開発費が比較的大きい国（第2群）では、振興対象となる科学技術分野は第1群の国や地域より網羅的に実施されていると考えられる。これら第2群の国々で数学の世界シェア比が大きいのは、後述する米国などのように他分野の発展に数学研究の振興が欠かせないことを認識の上、数学研究を振興しているというように政策の結果である可能性がある。

つまり、広範な研究開発分野を振興する国にとって数学研究は必須の研究分野である可能性があり、世界第2位の国内総研究開発費を擁する日本で数学研究の世界シェア比が非常に小さいことは大きな問題である可能性がある。

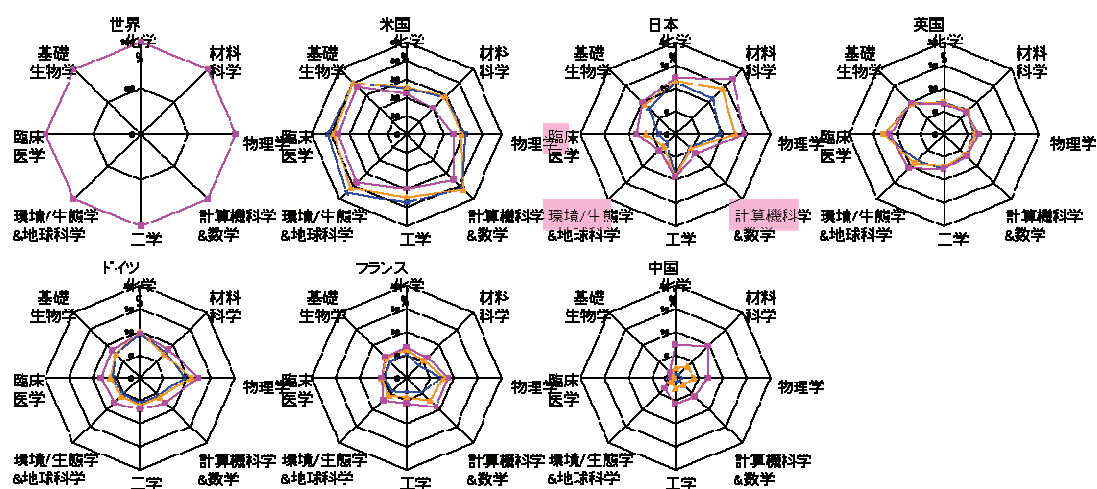


図表 2-10 全分野論文数上位 20 ヶ国における研究開発費（国内総研究開発費、政府研究開発費）と（数学研究論文数の世界シェア）/（全分野論文数の世界シェア）の関係（98-03

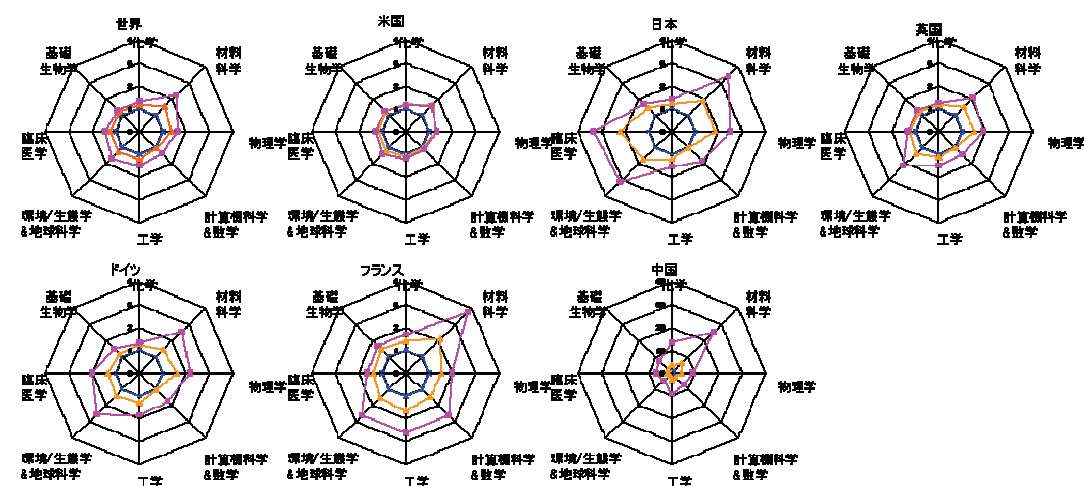
年平均、Thomson Scientific 社 ” Science Citation Index (1982-2003)” 及び IMD 世界競争力年鑑に基づき科学技術政策研究所が作成)

参考までに、計算機科学 (computer science) にはアルゴリズム開発など比較的数学と関係の深い領域が多いと考えられる。計算機科学分野において前述と同等の分析を行ったところ、日本は世界第5位の論文数、上位10%論文数は第7位であり(上位国は順に米国、英国、ドイツ、フランス)、日本の状況は数学分野より若干よい。

また、数学以外の分野も含めた主要国の分野別論文の様相はどのように変化しているのか紹介する。



図表2-11 各国の論文産出における論文の世界シェアのバランス (青：83-87年、橙：91-95年、桃：99-03年、NISTEP REPORT No. 99「我が国における科学技術の状況と今後の発展の方向性」(2005年5月科学技術政策研究所) から抜粋)



(注) このグラフは、1980年代の各国の各分野の論文生産量を1とした場合の1990年代、2000年代の変化を表したものの。

図表2-12 主要国の分野別論文産出量の変化 (青：83-87年、橙：91-95年、桃：99-03年、

NISTEP REPORT No. 99「我が国における科学技術の状況と今後の発展の方向性」（2005年5月
科学技術政策研究所）から抜粋）

図表2-11から、日本の計算機科学&数学論文数の世界シェアは他国及び日本の他分野と比べて低い。また、計算機科学&数学の産出量変化（図表2-12）から、80年代に比べて00年代初頭で産出量は2倍近くとなり世界平均を上回っているが、フランスはそれ以上、ドイツも日本とほぼ同じ増加を示しており、もともと日本の産出量が大きくないことから、日本とこれらの主要国との差はあまり縮まっていないと考えられる。

以上の論文分析を総合すると、日本における数学研究は他国と比較して特に優れているとはいえず、国内の他分野と比較して活発でもないことが分かった。この結果から、日本の数学研究に関する研究者数や環境、振興策などが不足していることが推測される。もはや日本の数学研究者に卓越した能力を求めることはできないのか。しかし、必ずしもそうではない。

その根拠の一つにフィールズ賞の受賞実績がある。同賞は4年に一度開催される国際数学会議において、顕著な業績を挙げた原則40歳以下の数学研究者に対して授与される賞であり、数学研究に対する賞としては最高の権威を有するものとされている。同賞が設立された1936年以降、現在までに受賞した45名の数学者のうち日本人は3名（小平邦彦氏（1954年）、廣中平祐氏（1970年）、森重文氏（1990年））である（米国：14人、フランス：8人、英国：5人、ドイツ：1人）。

また、国際数学会議を主催する国際数学連合（67カ国参加）において、03-06年においては10人の理事のうち1人は日本人であり副会長を務めている（柏原正樹氏）。

このように数学研究のトップにおいて日本は一定の存在感を示しており、日本における数学研究能力が他国と比較して見劣りするとまではいえないのではないのか。

それでは、日本における数学研究を取り巻く状況に問題があるのか。米国などにおける数学振興策はどのようなものか。次章ではこの点について調査分析を行う。

【何を以って「数学研究」とするのか―「数学研究」の定義】

本報告の調査分析対象「数学研究」とは、具体的にどのようなものなのか。

数学的手法を駆使して新しい数学定理の発見を目指すことや、既存の数学の定理に関して新しい証明方法を試みることはまさしく「数学」の研究そのものであり、明らかに「数学研究」としてよいと思われる。しかし、例えば、情報通信分野のソフトウェア関連領域などではしばしば非常に数学的な問題が研究対象となる。また、自然現象の観察結果や実験結果のモデル解析やシミュレーション分析において、非線形微分方程式や悪条件下の連立方程式などが主な研究対象となることもあると推測される。それら

の研究課題を「数学研究」として取り扱うか、「他分野の研究」として取り扱うかは、「数学研究」の汎用的かつ厳密な定義がない現状では、現実的に、研究の実施主体や資金配分機関などによる意思に委ねられている。そのため、第三者が厳密な「数学研究」の定義を設定して、あらゆる課題を再分類するようなことは事実上不可能である。**したがって、本報告では「研究主体や資金配分機関などが『数学研究』と主張するもの」を以って「数学研究」と分類した。**これは、他分野への数学の活用が極めて活発であり、「数学研究」が必ずしも数学の中だけに留まるのもではなくなっている現状を示唆する。

その現状を示す一例として、米国数学会による数学の領域分類が挙げられる。同会が発行する数学専門誌「Mathematical Reviews」では数学を以下の63もの領域に分類している。

「一般」「歴史と伝記」「数理論理及び数学基礎論」「組合せ論」「順序、束、順序代数構造」「一般代数系」「数論」「体論と多項式」「可換環と可換代数」「代数幾何学」「線形と多重線形代数;マトリックス理論」「結合的環と代数」「非結合的環と代数」「カテゴリー論、ホモロジー代数」「K理論」「群論とその一般化」「位相群、リー群」「実関数」「測度と積分」「複素変数関数」「ポテンシャル論」「複素多変数関数と解析空間」「特殊関数」「常微分方程式」「偏微分方程式」「力学系・エルゴード理論」「差分方程式と関数方程式」「列、級数、総和可能性」「近似と展開」「フーリエ解析」「抽象調和解析」「積分変換、演算子法」「積分方程式」「関数解析」「作用素論」「変分法、最適制御、最適化」「幾何学」「凸幾何と離散幾何」「微分幾何学」「一般位相空間論」「代数的位相幾何学」「多様体と胞複体」「大域解析、多様体上の解析」「確率論と確率過程」「統計学」「数値解析」「計算機科学」「質点と質点系の力学」「変形可能な固体力学」「流体力学」「光学、電磁気学」「古典的熱力学、熱の移動」「量子論」「統計力学、物質の構造」「相対論と重力理論」「天文学と宇宙物理学」「地球物理学」「OR理論、数理計画法」「ゲーム理論、経済学、社会科学および行動科学」「生物学およびその他の自然科学」「システム理論、制御」「情報と通信、回路」「数学教育」

特に後半では数学以外の分野名を連ねているととれるほど、領域は広範である。もちろんこの領域分類は、例えば「地球物理学」が全て数学である、と言っているのではない。「地球物理学」の中に数学的に表現し、解明していかなければならない問題がある、ということを表している。

「数学研究」の定義の問題はこれだけではない。「数学」の定義自体にも問題がないわけではないのだ。

例えば、統計学と数学の関係は微妙である。統計学はその発展の経緯において自然科学分野全般から受けた影響が極めて強く、統計学と数学を全く別の科学分野とする考え方がある。一方、大学の全学教育（教養教育）などに見られるように、統計学を数学の一部とする考え方もある。何故このような差が生まれるのか。それは統計学の基本原理や根幹となるシステムが数学的手法であると考えるかどうかの差ではないかと思われる。例えば、現在、(社)日本数学会における数学の分類では「統計学」というカテゴリーはなく、「統計数学」というカテゴリーを設けている。**本報告における「数学研究」では、「数学の一部と見なされる統計学は数学研究に含まれるものとし、数学とは別のものと見なされる統計学は数学研究に含まれない」と整理する。**つまり、現状のカテゴリーをそのまま利用している。統計学が数学に含まれることが適切かどうかについてここでは議論しない。ただ、そういう問題が現実にあることを紹介しておく。

また、「応用数学」の相反概念として「純粋数学」という言葉がある。簡単に述べると「応用数学」が数学的概念の現実への応用を課題とする研究、「純粋数学」は数学的概念の新規構築や発展改良を課題とする研究というイメージである。この「純粋数学」こそが本当の数学であるという考え方もあるらしい。しかし、**本報告では、「純粋数学」だけを数学とする考え方は採らない。**その理由は、いわゆる「純粋数学」と「応用数学」は数学的概念の抽象と具体という表裏の関係であり（往々にして具体がない場合もある

と推測されるが)、数学や他の科学の発展のためには互いに全く別のものとして整理されるべきではないと考えるためである。参考までに米国のオドム・レポート(98年、全米研究会議、参考資料2-1参照)における考え方を以下に紹介する。

『「応用数学」と「純粋数学」が物理的に別個の学科として存在しているために、数学が何に應用でき何に應用すべきかという問題について、しばしば狭い見方が永らえることになっていたのである。歴史的には「応用数学」は、細分化された領域の「分析」を物理科学とエンジニアリングの問題に應用することを意味してきた。このような応用数学の見方が、数学すべてを現実世界の問題に應用することを非常に制限していたのである。現在は多くの機会が得られるのであるから、見方は「数学のあらゆる領域は他の専門領域並びに産業及び商業との相互交流に貢献でき、その相互交流から利益を得ることができる」というものでなければならない。「純粋」と「応用」の区分は学問にとってきわめて破壊的であり、修復されなければならない。』

【基礎的な数学に関する論文分析】

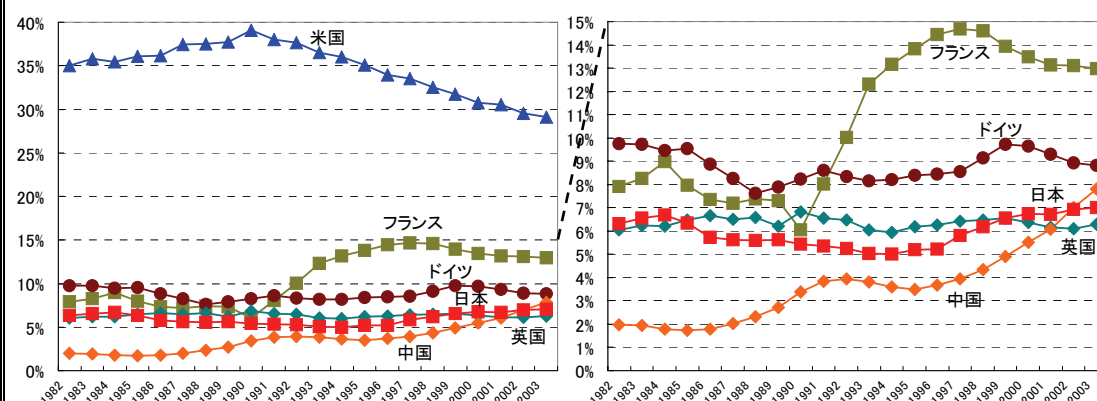
Thomson社のSCI論文データベースの数学カテゴリーが数学研究論文のスペクトルを正確に反映していないのではないかと指摘がある。その理由として、SCIデータベースの対象は主に国際的に一定の評価が与えられた英語論文雑誌等が中心だが、数学研究の世界では大学の数学科などが研究成果をとりまとめた紀要(university bulletin)も大きな役割を果たしている。数学研究では、論文誌と同様に紀要においてもレフェリーが事前に掲載論文の審査も行い、紀要と雑誌掲載間の違いにより論文の扱いが異なることは比較的少ないらしい。SCIデータベースにおける紀要の割合は比較的低いと考えられるため、数学の中でも紀要への掲載割合が若干低いと考えられる応用数学(雑誌等の数で全体の約3割)、統計学(同約1割)などの数学領域の特徴が強く反映されている可能性がある、ということである。

しかし逆に、数学研究論文スペクトルの「正しさ」に関する判断基準はない。先の囲み記事で述べたように「数学」の定義は極めて広範であり、国によって異なることも推測される。そのため、このような「正しさ」を追求すること自体に意味はない。その一方、第2章の論文分析とは別に、基礎的な数学(いわゆる純粋数学)に関する論文分析を行う価値はあると思われる。何故ならば、数学研究の中の領域として、基礎的な数学は大きな割合を占めると推測され、それがどのような状況となっているのかを分析することは、数学研究全体の分析に対して有意義と考えられるからである。それでは、基礎的な数学に関する論文分析は可能なのか。

第2章のSCIデータベース論文分析では、各論文雑誌をいずれか一つの分野にのみカウントすることで数学を含む22分野に分類する方法を使用した。一方、この分野分類とは別にThomson社の論文データベースでは、各論文雑誌を約190の領域(年によって領域数が異なる)に分類している。この分類では一つの雑誌が複数の領域に分類されている場合もある。この分類方法では数学分野の雑誌は「数学」、「応用数学」、「確率統計」などの領域に分類される。これらの領域の数学分野への寄与を調べてみると、99-03年平均では、数学分野の雑誌数150のうち、「数学」に分類される雑誌は86、「応用数学」は52、「確率統計」は25となっている。同時期の論文数を見ると、数学分野全体で12,714本、「数学」では7,412本、「応用数学」

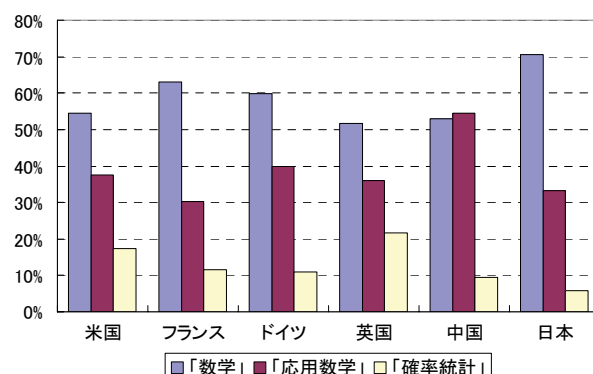
では5,024本、「確率統計」では1,673本となっている。このように、世界全体で見ると数学分野においては基礎的な数学が約6割、応用数学が3～4割、確率統計が1～2割の寄与となっていることが分かる。ここでは、最も大きな寄与を示す基礎的な数学に関する分析を行うため、「数学」領域論文の分析を行う。

「数学」領域論文数シェア（図表2-a）を図表2-1と比較すると、日本は英国を僅かながら上回っていることが分かる。米国や英国、中国では「数学」領域より数学研究の方で世界シェアが高く、日本やフランスでは数学研究より「数学」領域の方で世界シェアが高い。ドイツでは「数学」領域と数学研究の世界シェアはほぼ同じである。これは各国の数学研究の基礎と応用のどちらが相対的に強いかを表しているものと考えられ、日本では相対的に応用数学や統計学より基礎的な数学の方が強いようである。



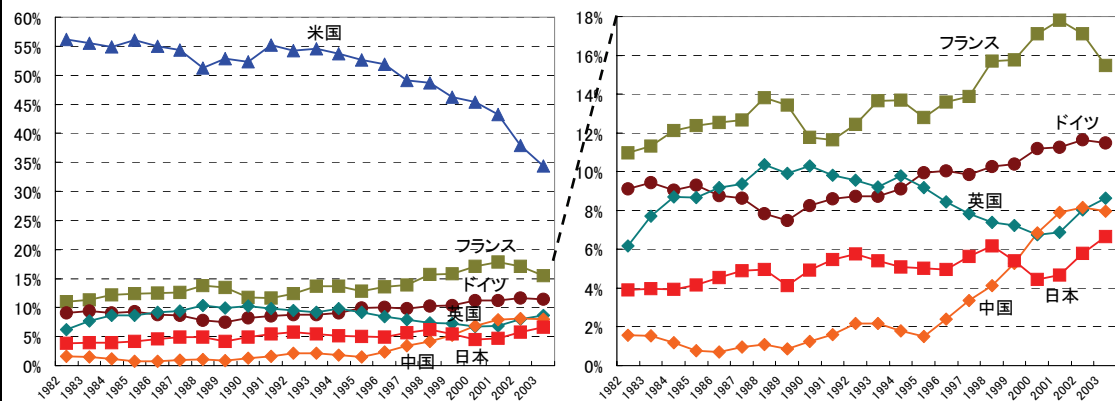
図表2-a 主要国の「数学」論文数の世界シェアの推移（右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 " Science Citation Index (1982-2003)" に基づき科学技術政策研究所が集計）

日本では相対的に応用数学や統計学より基礎的な数学の方が強いことは、第2章で分析した数学研究論文数に対する「数学」、「応用数学」、「確率統計」のそれぞれの領域の論文数の比率（図表2-b）からも分かる。ここでは、「数学」、「応用数学」、「確率統計」領域は相互の重複が可能であるため、合計が100%を越え得ることに注意しなければならない。この図表から、第2章で分析した数学研究論文では、特に日本では、応用数学や確率統計ではなく、基礎的な数学の影響が最も強く反映されていることが分かる。



図表2-b 数学研究論文数に対する「数学」、「応用数学」、「確率統計」領域の論文数の比率（99-03年平均。Thomson Scientific社 " Science Citation Index (1982-2003)" に基づき科学技術政策研究所が集計）

また、上位10%論文の世界シェアの動向（図表2-c）を図表2-4と比較すると、米国や英国では「数学」領域より数学研究の方で世界シェアが高く、日本やフランス、中国では数学研究より「数学」領域の方で世界シェアが高い。ドイツでは「数学」領域と数学研究の世界シェアはほぼ同じである。この状況は図表2-aの場合と大差ないと思われる。



図表2-c 上位10%「数学」論文数に関する主要国の世界シェアの推移（右図は左図の拡大。Thomson Scientific社 ” Science Citation Index (1982-2003)” に基づき科学技術政策研究所が集計）

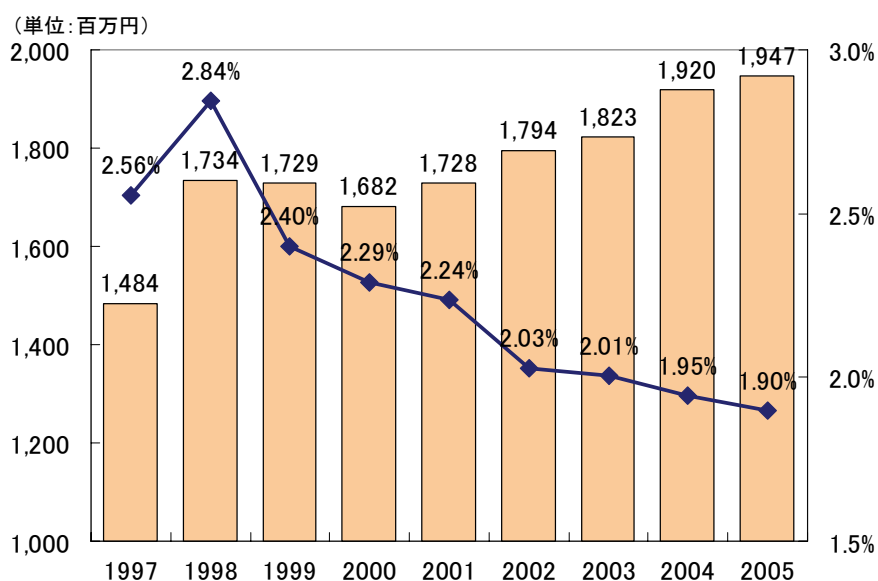
以上の分析から、日本では相対的に応用数学や統計学より基礎的な数学の方が強いが、論文数を見る限り基礎的な数学でも日本が世界で非常に高い地位を占めるとまでは言えない状況にあることが分かった。

3. 数学研究に関する各国の状況及び政府の取組み

3-1 日本

①政策と全体状況

日本における全政府研究開発費のうち数学研究費は集計されていない。しかし、文部科学省及び日本学術振興会（JSPS）による科学研究費補助金の一部の領域（萌芽、若手、基盤及び奨励研究）においては、物理学、化学など学術分野毎に課題が整理されているため、この「数学」領域の課題を集計することによって日本の数学研究費をある程度推測することができる（図表3-1）。



図表3-1 科学研究費補助金における数学研究費の額及び割合の推移

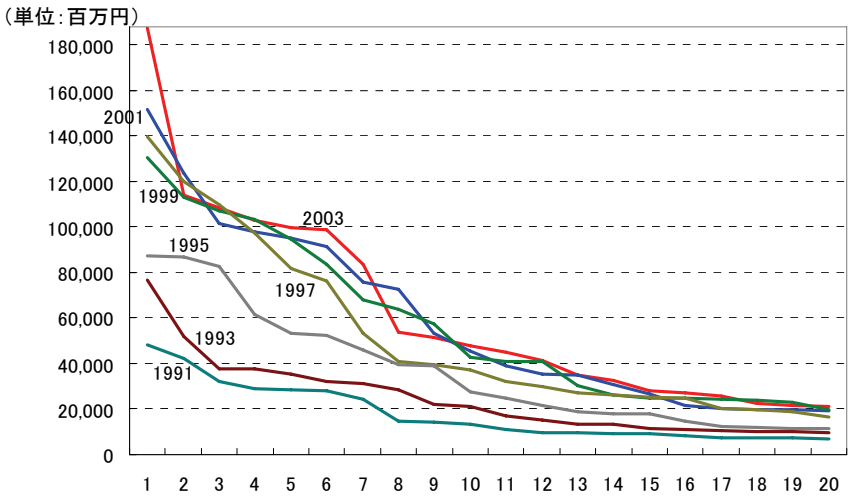
(科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧から作成)

図表3-1から、科学研究費補助金における数学研究費の額は増加しているが、全分野に対する数学シェアは減少していることが分かる。この科学研究費補助金については機関別の配分額も明らかとなっている（図表3-2）。基本的に科学研究費補助金は、機関に対してではなく研究者個人に対して配分される性格のものであり、分野毎の申請件数や申請金額に応じた配分がなされている。図表3-2から、年に応じて上位20機関は異なるものの、概ね年を経るにつれて、配分額において上位機関に対する集中が進んでいることが分かる。

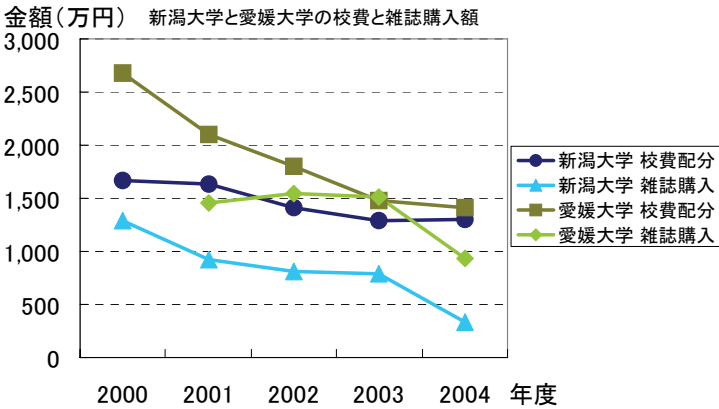
また、日本では数学研究費全体に対する大学の校費の寄与が大きいと推測されるが、その全貌は不明である。しかし、一部の大学では数学研究に対する校費の集計がなされている（図表3-3）。ここで新潟大学と愛媛大学は、数学の科学研究費補助金配分額や数学論文数(SCIデータベース)の機関別シェア約1%（01-03年平均）を擁する数学研究の主要機関である。それに関わらず両大学の校費や雑誌購入額は減少している。また、東北大学の

雑誌購入額は年々増加しているにもかかわらず、雑誌の購入数は横ばいとなっており、数学研究雑誌の価格高騰が読み取れる。

以上を総合すると、図表3-1からでは数学の科学研究費補助金は増加しているが、図表3-3から校費を巡る状況はこの科研費の増加を上回る程厳しい状況である可能性が示唆される。



図表3-2 科学研究費補助金の数学研究費の上位20機関の分布の推移（科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧から作成。大学内の理学部、工学部などは区別せず、大学で一機関として集計）



東北大学数学専攻※における雑誌購入額

年度	96年度	98年度	00年度	02年度
雑誌購入額（万円）	1,679	2,596	2,974	3,176

※ 雑誌の購入数は横ばい

図表3-3 新潟大学及び愛媛大学における数学研究校費配分の推移、並びに東北大学、新潟大学及び愛媛大学における数学研究雑誌購入額の推移（数学ワークショップにおける東北大学理学研究科森田康夫教授の講演資料から抜粋）

日本の数学研究に対する政策について、これまで数学研究振興に焦点を合わせた政府の施策は見当たらなかった。例えば、科学技術基本計画では数学研究振興を明示的に示す文言はなかった。また、数学研究振興に焦点を合わせた国家プログラムは実施されてこなかったと思われる。日本学術振興会の21世紀COEプログラムでは数学研究拠点に対しても補助金が交付されているが、数学は多くの対象とされる学術分野の一つに過ぎない（数学、物理学、地球科学分野に対して約30億円（05年度））。

また、数学者と行政との関わりも弱い。政府内で数学研究振興を専任する課、係などは存在しない。そして、総合科学技術会議の議員をはじめとして、政府の審議会委員などにおいても数学者はほとんど見当たらなかった（総合科学技術会議専門委員1人のみ確認）。また、我が国の人文・社会科学、自然科学全分野の科学者の意見をとりまとめる役割を担っている日本学術会議において、会員210人のうち数学者は2人（0.95%。現行第20期、哲学：4人、基礎生物学：9人、物理学：7人、化学：11人、情報学：13人）である。

しかし、最近2006年3月28日に決定された総合科学技術会議の分野別推進戦略では数学研究に関連する次の記述がなされた。これは政府が科学技術基本計画の文脈において始めて数学研究の重要性を明示したという意味で重要なものである。日本における数学研究政策の新たな展開が期待されている。

『分野別推進戦略（総合科学技術会議、06年3月28日）』

Ⅱ 情報通信分野

4. 推進方策

（1）総論

⑤ 産業に直結する基礎研究についての新たな認識形成

(b) どのような情報通信技術も、数学的成果を利用していることは明らかである。数学者の育成の強化は、今後30年を考えた場合の情報通信技術、さらには他の領域における科学技術の進展に必須の政策である。基礎研究を実施する人材育成と総合的なキャリア育成プログラムの実施は官民で精力的に取り組むべき課題である。

②研究組織及び研究者数

本質的に数学研究の多くが基礎研究の性格を有する面が多いと推測されることから、数学研究組織の大部分は大学の学部学科と思われるが、研究所や研究センターのような比較的独立した数学研究組織も数学研究に対して重要な役割を果たしていると考えられる。そのような独立組織はどれくらいあるのか。しかし、そのような集計データはどの国にも存在しないため、一定の判断材料とするために次のような簡単な調査を行った。政府、大学、公的研究機関、非営利団体（NPO）が設置し、「研究所」「研究センター」等の複数の研究者の存在を示唆する組織をWEB検索により調査した。その結果、次の組織が見られた（図表3-4）。

設置機関	数学研究組織名
情報・システム研究機構	統計数理研究所
津田塾大学	数学・計算機科学研究所
早稲田大学	数学・応用数学研究所
会津大学	総合数理科学センター
京都大学	数理解析研究所
大阪市立大学	数学研究所
大阪電気通信大学工学部	数理科学研究センター
明治大学	数理科学研究所

図表3-4 日本における数学研究組織の例（順不同、WEB検索により作成）

この中には、京都大学数理解析研究所（1963年設立）や情報・システム研究機構の統計数理研究所（1944年設立）など世界的に有名で歴史の長い研究所が含まれているものの、確認されたのは全部で8箇所である。これらの中には独立した本格的な研究所ではないものも含まれると推測されるが、判断が難しいためその点は追及しないことにする。

また、日本に数学研究者は一体どれくらいいるのか。詳細は不明だが、参考までに数学研究関連学協会の会員数を示す（図表3-5）。

学協会名	会員数	備考
(社)日本数学会	約5,000	米国、ロシアに次ぎ世界第3位の規模の数学会
日本数学協会	906	2006年2月時点
日本応用数理学会	約1,800	—
日本統計学会	1,546	2003年1月時点

図表3-5 日本における数学研究関連学協会の例（順不同、WEB検索により作成）

勿論、これら以外の学協会にも数学研究者がいる可能性があり、逆にこれらの中に数学研究者でない方もいると推測される。(社)日本数学会関係者によると、当学会に対する日本の数学研究者の加入率は高く、当学会員約5,000人のうち大学の数学研究者は約3,000人、他は学生会員がほとんどで、企業関係者は非常に少ないとのことである。

更に、科学技術振興機構（JST）が整備している研究開発支援総合ディレクトリ(ReaD)によると、全登録研究者数159,401人（うち大学等133,406人、公的研究機関21,058人、企業23人）中、数学研究者数は1,943人（2006年3月1日時点）となっており、数学研究者数の割合は約1.2%である。このデータベースは悉皆でも無作為抽出でもないものの、これに含まれる大学研究者の総数は政府統計の約半数（291,147人、総務省科学技術研究調査報告、05

年)に及ぶことから、大学に多いと推定される数学研究者数も凡そ逆算できるとも考えられる。

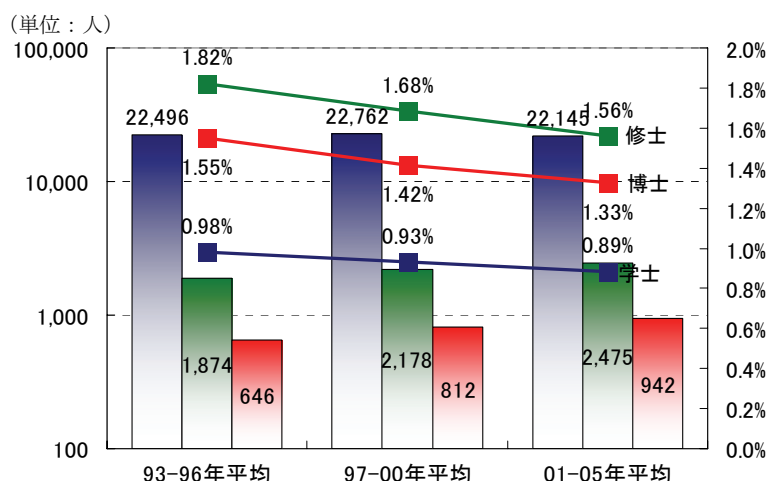
以上を総合すると、日本の大学等学術研究機関における数学研究者は3,000～4,000人程度ではないかと推測される。

③学生数及び学生の進路

本報告書では数学研究の状況分析が課題であり、数学教育の状況について誌面を割くことは目的ではない。しかし、大学における数学専攻学生の状況調査は、数学研究を取り巻く状況や数学研究者数の推測に有益であり、ひいては近い将来の数学研究の状況も予測できると推測される。そのような観点から数学専攻学生の状況を調査する。

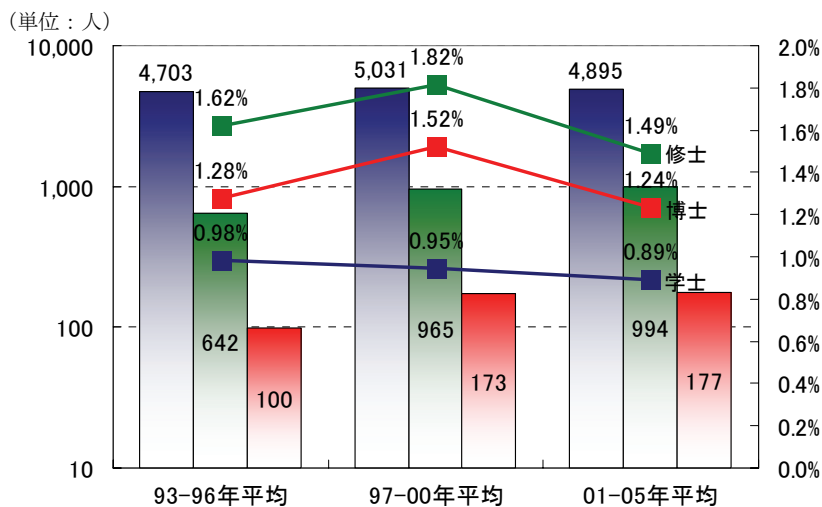
在学生に関しては、最近10年間で数学関係学部生数は横ばい、数学専攻大学院生（修士・博士ともに）数は増加したが、全ての課程において全分野に対する割合は減少している（図表3-6）。

また、卒業生についても在学生とほぼ同じ状況下にある（図表3-7）。



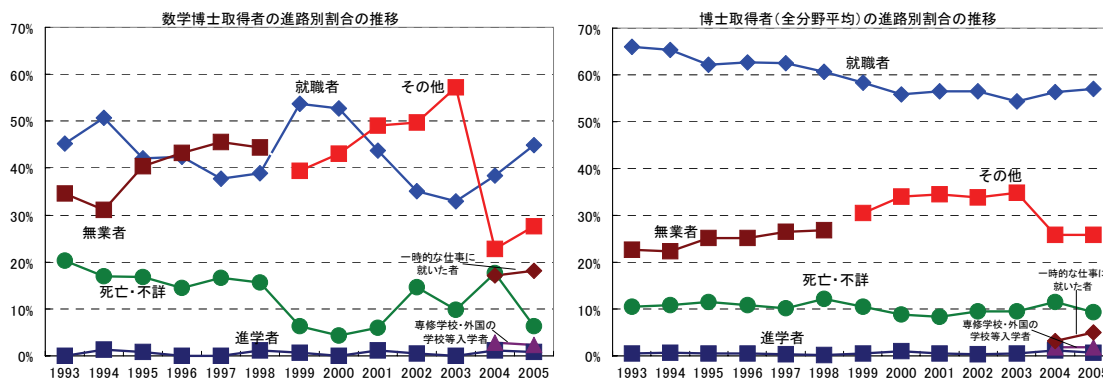
図表3-6 日本の数学学科関係学部生（青）、数学専攻修士課程大学院生（緑）、数学専攻博士課程大学院生（赤）の人数及び割合の推移（学校基本調査報告書から作成）

これらから、数学研究に関する学部の入学定員数はほぼ横ばいであるものの、これまで定員を割っていた大学院に学生が進学するようになった、又は大学院の研究室数が増加したことが分かる。その一方、数学研究以外の学部や大学院が新設されたため、全分野に占める数学研究の割合が減少していると考えられる。



図表3-7 日本の数学関係学部卒業生（青）、数学専攻修士課程修了生（緑）、数学専攻博士課程修了生（赤）の数及び割合の推移（学校基本調査報告書から作成）

また、これに関連して数学専攻博士課程修了生の進路先別割合の推移を調べた（図表3-8）。比較として、数学を含む全分野平均の博士課程修了生の進路先別割合も示す。



※ 就職者：給料、賃金、報酬、その他の経常的な収入を目的とする仕事に就いた者。
 自家・自営業に就いた者（継続的に本業として家業に従事する場合）は就職者とみなす。
 その他：臨時的な収入を目的とする仕事に就いた者（例えば、アルバイト、パート等で一時的な仕事に就いた者）や家事の手伝いに就いた者など、進学でも就職でもないことが明らかな者（03年まで）。
 家事の手伝いなど進学でも就職でもないことが明らかな者（04年から）。

図表3-8 日本における博士取得者（数学専攻、全分野平均）の進路別割合の推移（学校基本調査報告書から作成）

図表3-8から、日本の数学専攻博士課程修了者は全分野平均と比較して就職者の割合が低い（近年、数学専攻：4～5割、全体：5～6割）。また、04年の統計から項目「一時的な仕事に就いた者」が追加されており、全分野平均でこれに含まれるのは約5%に過ぎない

一方、数学専攻博士では約18%も含まれている（05年）。就職者及び「一時的な仕事に就いた者」の割合の和は、数学と全分野平均ではほぼ一致する。

このことから、他分野の博士と比較して、数学では大学のポストは少なく、博士の受入れに対して企業が積極的ではない可能性がある。

【日本の国立大学における数学研究を取り巻く環境変化】

日本における数学研究の大半は大学で実施されていると推測される。日本の大学、特に国立大学における数学研究を取り巻く環境はどのように変化してきたのか。

○ 国立大学法人化などによる数学教官数の変化

95年に科学技術基本法が制定され、96年以降、同法に基づく科学技術基本計画が策定、実施されている。また、90年代前半から中盤にかけて全国的に大学の教養部が廃止された。04年には国立大学が法人化され、国立大学がより主体的に自らの組織運営に取り組むこととなった。これら近年の一連の流れによって、分かりやすい研究成果や経済効果などを短期間に得るという目標には必ずしもそぐわない数学研究に対して、大学当局のインセンティブが低下している可能性が指摘されている。その結果、数学科の常勤教員数が減少した大学もある（図表3-a）。

大 学 名	92-98 年頃	06 年 4 月見込み	増△減	備 考
東北大学理学部数学科	33(01 年 4 月)	29(05 年 4 月)	△ 4	
神戸大学理学部数学科	21	20	△ 1	92-98 年頃は推測値
岡山大学理学部数学科	16	14	△ 2	06 年 4 月見込みは推測値
新潟大学理学部数学科	17	15	△ 2	
金沢大学理学部数学科	13(01 年)	11	△ 2	
熊本大学理学部数学科	17	16	△ 1	
愛媛大学理学部数学科	19	17	△ 2	
島根大学総合理工学部数理・情報 システム学科(うち数理分野)	17(02 年 4 月)	15	△ 2	
茨城大学理学部数学科	14	13	△ 1	
琉球大学理学部数理科学科	19	18	△ 1	
山形大学理学部数学科	21	20	△ 1	
佐賀大学理工学部数学科	14	12	△ 2	
お茶の水女子大学理学部数学科	14	13	△ 1	
埼玉大学理学部数学科	16	16	0	数年後に 14 となる見込み
静岡大学理学部数学科	14	12	△ 2	

鹿児島大学理学部数学科	23	20	△ 3	
合 計	311	280	△ 31	

図表 3-a 主要大学における数学科の常勤教員数の推移(各大学数学科関係者の協力により作成。順不同)

○ 入学試験対応の変化

大学における入学試験の問題作成、採点などは基本的に大学教官（多くは研究者）が行う。他の入学試験科目と比べて「数学」では、記号や短い語句等による解のみを求める形式の問題の割合は比較的低く、解だけでなく解の導出経緯も記述させる方式の割合が高いと考えられる。数学の試験で記述形式の問題を採用している理由として、関係者は「入学者の論理的説明能力を判断するため」と説明する。加えて、課題解決力の測定という観点もある（下記参照）。

『(1)数学

理系学部の学部長アンケートでは、「受験生に対する課題解決力の測定を最も重視する」という結果であり、大学の学部教育との関連を重視する傾向があった。』

（「大学入試改革の現状と展望」、Bennese教育研究開発センターから抜粋）

つまり、入学志望者の論理的説明能力、課題解決力といった非常に重要な判断材料を大学に提供するため、入学試験科目の数学では昔から変わらぬ手法が採られてきたといえる。そのため、入学試験における数学の採点には他の科目より手間がかかると考えられる。また、数学では解法は一つとは限らない。複数の解法が存在するため、異なる解法間で不公平とならないように、それぞれの解法の部分点の基準作成や採点判断なども行う必要がある。また、近年ではセンター試験などにおいて試験科目の選択が行われており、難易度を調整しなければならない場合もあると考えられる。そのため、センター試験を含めた入学試験科目の数学には、数学の専門家である理学部数学科などの教官が中心となって対応することが多いようである。一方、物理、化学や生物といった他の入学試験科目では理学部のみならず工学部の教官も担当になり得ると推測されることと比較すると、数学教官の試験に係る労力は他の学科の教官よりも大きいと思われる。

一方、近年、試験制度は変遷を遂げている。80年代後半から国立大学では入学試験を2回実施する制度（A日程・B日程）が導入され、現在の分離分割方式に至っている。確かに、これは数学だけに限らず、全ての大学や学部で数学の試験が2回となったわけではない。大学独自の数学の入学試験を行わなくなったケースもある。しかし、入学志望者の資質に関する重要な情報を提供し得ることから、数学の入学試験を実施する大学は、主要大学を中心に依然少なくないようだ（下記参照）。

『数学だけ5時間入試 ―東工大今秋から センター試験不要 面接なし

数学1教科だけの5時間の試験と書類選考だけで合否を決める――。“究極の1科目受験”と言えるユニークな入試を、東京工業大学理学部が今秋実施することを決めた。（中略）物事を深く考え、じっくり課題に取り組む能力が落ちているとの見方から、公式や知識を問う難問ではなく、考える力や解き方が重要な問題を出す。大学側

は、物理や化学などの能力も数学の試験で類推できると判断している。(後略)』

(2006年3月11日(土)読売新聞夕刊1面から抜粋)

そのため、問題作成や採点に携わる数学教官の労力は増大したと考えられる。更に、国立大学法人化を経て、現在、大学の入学試験は更なる多様化が進みつつある。一部の大学では推薦入試やAO入試などが導入され始めており、そのような入試にも数学を試験科目として導入する大学が増えているようである。

こうして、年々、多くの国立大学の数学教官は入学試験対応に益々大きな労力を割くようになっていると考えられる。

○ 全学教育（教養教育）対応の変化

数学を基盤とする学問は多い。従来からの理学や工学などの自然科学分野に留まらず、最近では経済学や経営学、社会学などの社会科学分野でもふんだんに使用されている。今や入学試験だけでなく、全学教育（かつての教養教育）においてもほぼ全ての学生が数学を履修すべきであると言えるかと推測される。このような状況を踏まえ、必修科目単位総数における数学のウェイトを増加させる大学もある（図表3-b）。

	文科 一類	文科二類	文科 三類	理科 一類	理科 二類	理科 三類
平成 18 年度 以降入学者	0/70	(「経済Ⅰ、経済Ⅱ、数学Ⅰ、数学Ⅱ」から4を含む10以上の「社会科学」)/70	0/70	12/76	12/76	12/76
平成 17 年度 以前入学者	0/53	0/53	0/53	8/61	4/61	4/61

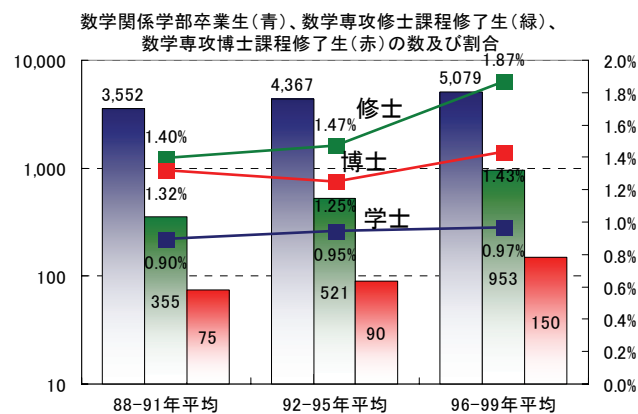
図表 3-b 東京大学教養学部における（「数理科学」必修単位数/必修単位総数）の推移

一方、一部の大学では、高等学校までの数学の履修が十分でないために大学の講義を理解することが困難となる学生が出始めてきたと聞いている。そのため、予備校の講師や数学教官などによって高等学校数学の補習講義が行われることもあるようである。

かつて学生に対する数学の教養教育は主に大学の教養部所属の教官によって行われていた。数学に限らず、教養部は教養課程の学生に教養教育を教授することが主目的であり、教養課程を終えた学生は各学部などに所属する教官から専門教育を受け、研究室などに入って専門分野の勉強を進めていた。90年代前半から中盤にかけて、全国的に大学の教養部が廃止され、教養部の数学教官の多くは学部や大学院に配置換えとなった。その結果、専ら教養教育に対応する教養部の教官、専ら専門教育に対応する学部や大学院の教官といった教養部時代の役割分担的な構図から、全学教育や専門教育に対応する学部や大学院の教官（従来からの教官と旧教養部からの教官）といった構図に変わった。

これは組織編制の変更に過ぎず実質的に大きな変化ではないと思われると推測される。しかし、教養部廃止の時期において学生数の増加と比較して数学専攻大学院生の増加が顕著であり（図表3-c）、教養教育

全体に占める数学の割合は高かったと推測される。これは、教養教育において数学の比率が大きかったと推測されることと一致する。



図表3-c 日本の数学関係学部卒業生(青)、数学専攻修士課程修了生(緑)、数学専攻博士課程修了生(赤)の数及び割合の推移(学校基本調査報告書から作成)

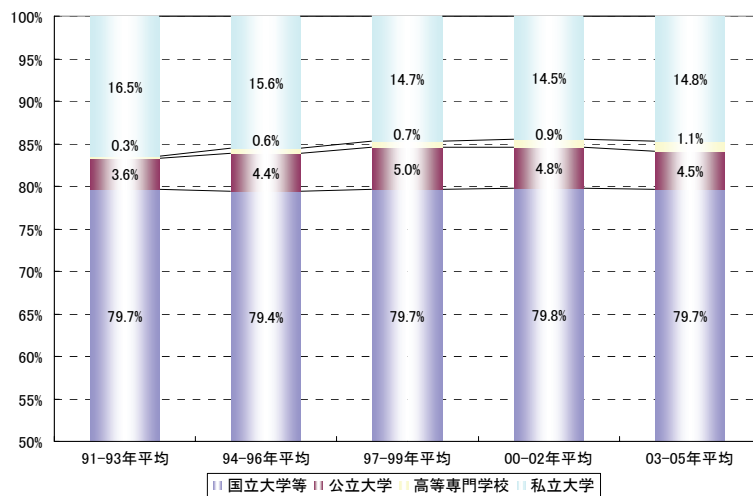
つまり、大学の教養部廃止により、教養部の数学教官が理学部などに移り自ら研究室を有するようになった結果、以前の教養教育(全学教育)に加えて、新たに自らの研究室の大学院生の教育を引き受けることとなったため、教育に割かれる数学教官の労力は増加したと考えられる。

更に、一般的に大学の教官の人数が減らされた結果として特定の領域の教官がいなくなった場合、その大学でその領域を学生に講義することはまずないと思われる。しかし、数学の場合、特定の領域の教官がいなくなったとしても、他の領域の数学教官が代わりに講義を受け持つことが多いようである。例えば、解析学や統計数学の教官がいなくなったからといって、その大学では解析学や統計数学の講義を開かないなどということはある得ないのではないか。つまり、数学では教官数が減少しても、教育に要求される教官の労力全体はほとんど減少しないと思われる。

以上の状況を総合すると、国立大学における数学教官を取り巻く状況はより厳しくなっていると推測される。

【科学研究費補助金配分実績から見る日本の数学研究】

前節において、数学研究に関する日本の政府研究費として、科学研究費補助金の配分額について説明した。この研究資金の細目や内訳を分析することによって、日本の数学研究に関する状況の変遷を垣間見ることができると推測される。まず、数学に関する科学研究費補助金では、国立大学等の研究者への配分割合は高く、8割前後でほとんど変化していない(図表3-d)。

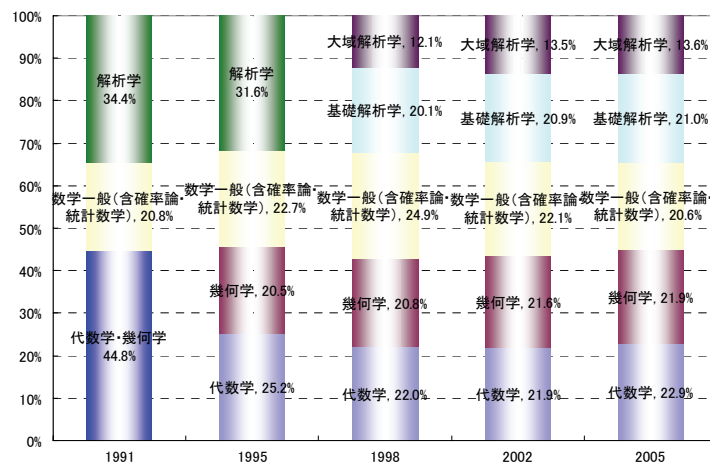


国立大学等：国立大学（法人）、大学共同利用機関法人など

図表3-d 数学に関する科学研究費補助金配分額の研究代表者所属機関別割合の推移

（科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧から作成）

また、数学の細目（領域）別割合の推移も大きな変動はなく、応用数学や統計学の割合は低い（図表3-e）。



代数学：数論、代数幾何、群論、環論、代数一般等

幾何学：微分幾何、複素多様体、位相幾何、複素解析幾何、微分トポロジー等

数学一般（含確率論・統計数学）：数学基礎論、確率論、統計数学、応用数学、組合せ論、情報数理、離散数学、数値数学、数理モデル等

基礎解析学：複素解析、実解析、関数方程式、関数解析、確率解析、代数解析等

大域解析学：関数方程式の大域理論、変分法、非線形現象、多様体上の解析、力学系、作用素環、可積分系等

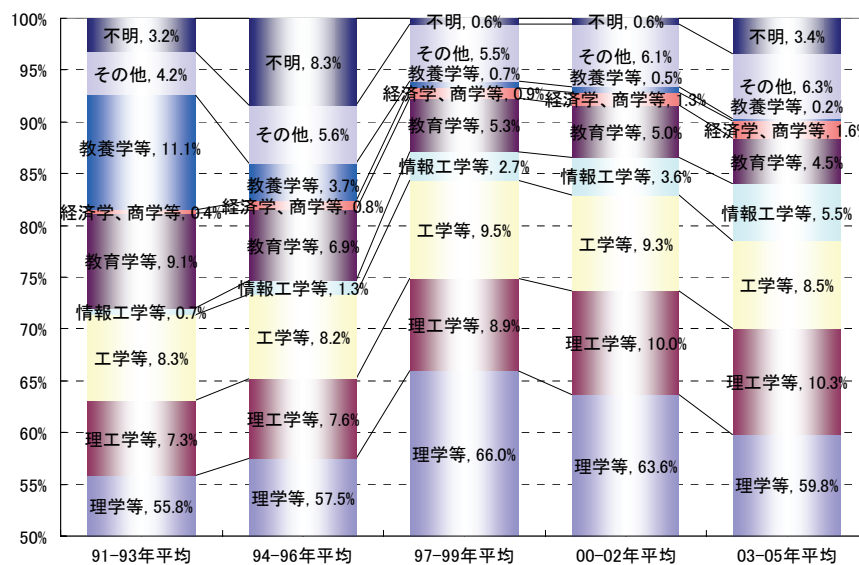
図表3-e 数学に関する科学研究費補助金配分額の細目別割合の推移

（科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧から作成）

これらの研究代表者所属機関別、細目別割合の不変性は、数学研究の変遷というより科学研究費補助金の

配分方針に拠るものと推測される。しかし、これらの2つの図表から、数学に関する科学研究費補助金の特徴として、国立大学等と基礎的な数学（いわゆる純粋数学）の状況が大きく反映されていると言える。

これらを踏まえて研究代表者所属学部・研究科の推移を見てみると（図表3-f）、基礎的な数学研究でも研究者の学部や研究科が変動しており、91-93年には理学部などに次ぐ割合を有していた教養部や教養学部、教育学部などの割合は減少し、情報工学研究科や経済学研究科の割合が増加していることが分かる。



図表3-f 数学に関する科学研究費補助金配分額の研究代表者所属学部研究科割合の推移（科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧から作成）

また、理学部や理学研究科の割合が最も高いのは当然と推測されるが、理工学部や理工学研究科と合計しても全体の約7割程度に過ぎない。逆に言えば、基礎的な数学研究の3割は、工学研究科、情報工学研究科、教育学研究科、経済学研究科などにおいて実施されている。理学研究科など数学を専攻する組織以外における数学研究のレベルがどれほどのものであるか指標となるようなデータは入手できなかったが、これらの組織は応用分野に近い立場にあり、最新の基礎的な数学の研究成果などを他分野などに活用しやすいという利点を有すると推測される。

数学研究の振興に当たっては、理学研究科など以外の組織における数学研究にも配慮するべきである。

3-2 米国

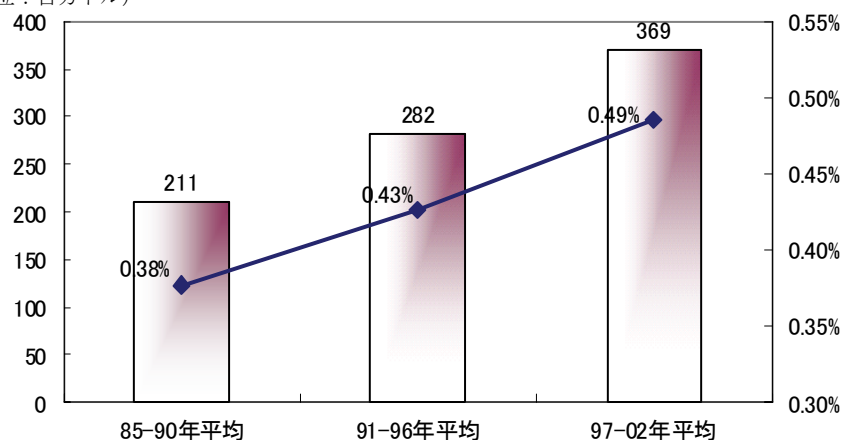
①政策と全体状況

米国の数学研究に対する政府研究開発費及び政府研究開発費全体に対する割合は増加している（図表3-9）。

83年から02年までの研究費の平均年間増加率は約4.9%である。また、図表3-9の出典元の報告書によると、数学研究費のうち基礎研究が81%を占め、残りが応用研究である。更に、数学研究費のうち大学が50%を実施しており、残り50%を国立研究所やNPO、企業

などが実施している（02年）。

（単位：百万ドル）

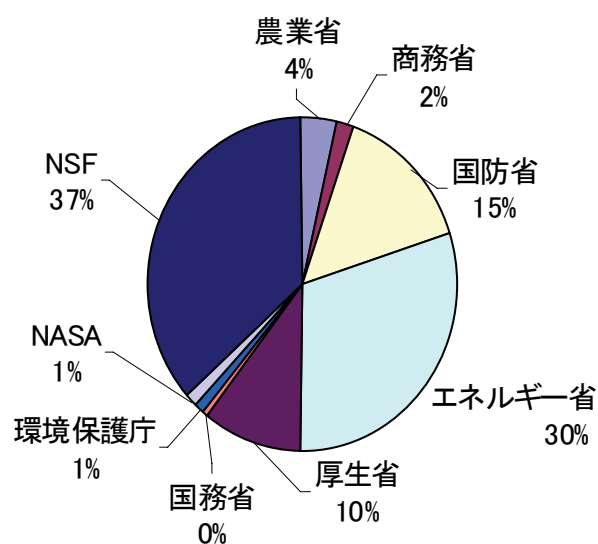


図表3-9 米国の数学研究開発費の額及び割合の推移（Federal Funds for Research and Development: Fiscal Years 2002, 2003, and 2004, NSFから作成）

加えて、数学研究開発費に関してNSF(国立科学財団、37%)、エネルギー省（30%）を初めとして多くの省庁が実施している（図表3-10）。

米国における数学政策を概観してみよう。

同国では数学研究の振興政策に関して、数学と他分野の分野横断研究の強化などを目指し、様々な機関において報告書作成等の取組みが行われてきた（図表3-11）。



図表3-10 米国の数学研究開発費の省庁別割合（02年、Federal Funds for Research and Development: Fiscal Years 2002, 2003, and 2004, NSFから作成）

年	内 容
1981	数理科学研究所(カリフォルニア大学バークレー校)、数学応用研究所(ミネソタ大学)の設立
1981	米国の数理科学研究の健全さを確認し、支援するデヴィッド委員会(全米研究会議)の設立
1983	数学合同政策会議(米国数学会、米国数学協会、産業及び応用数学会)の設立
1984	米国数学の刷新:未来への決定的資源(全米研究会議の報告書)
1984	数理科学会議(全米研究会議)の設立
1985	数理科学教育会議(全米研究会議)の設立
1986	数理科学会議による科学技術週間シンポジウム
1987	数理科学2000年プロジェクトによる大学の数学事業のレビューの開始(全米研究会議)
1987	科学技術センター:原則と指針(全米研究会議の科学技術センター委員会による報告書)
1988	統計科学における分野横断研究(数理統計学会の報告書)
1988	境界の除去:分野横断研究の見通し(シグマXiの報告書)
1990	米国数学の刷新:90年代の計画(全米研究会議の報告書)
1990	学際研究:生命科学、薬学、物理科学及び工学間の協力促進(全米研究会議及び医学機構の共同報告書)
1991	数理科学、技術及び経済競争力(全米研究会議の報告書)
1991	超高速情報通信網に関する数学的基盤(全米研究会議の報告書)
1993	材料科学における数学研究:機会と見通し(全米研究会議の報告書)
1993	科学技術と連邦政府:新時代の国家目標(全米科学アカデミー、全米工学アカデミー、医学機構の報告書)
1994	数理科学の認識と報酬(数学合同政策会議の報告書)
1994	現代の学際的大学統計教育:シンポジウム議事録(全米研究会議)
1995	産業における数学に関する産業及び応用数学会報告書
1995	理論・計算化学からの数学的挑戦(全米研究会議の報告書)
1996	生物システムのモデル化:ワークショップ(NSFの資金を配分されたワークショップの報告書)
1997	挑戦に取り組む間の強さの保存:数理科学のための活動に関するワークショップの概要報告(全米研究会議の報告書)
1997	米国の数学研究の国際ベンチマーキング(全米科学アカデミー、全米工学アカデミー、医学機構の評価書)
1997	21世紀における研究開発の創立:学術、産業、政府研究者の統合的見通し(NSF及びDOEの資金を配分されたアイゼンベルガー他の報告書)
1998	米国の数理科学の国際評価に関する上級評価委員会報告(NSFが後援した全米研究会議の報告書)
1998	米国における健康研究の強化:慈善団体の役割(アメリカ癌学会他に後援されたワークショップ報告書)

1998	我々の未来を開く:新しい国家科学政策に向かって(米国下院議会の報告書)
1998	計算機科学におけるDOE及びNSFのイニシアチブ(DOE及びNSFの共同後援によるワークショップ)
1998	複雑な特徴の遺伝的構成に関するワークショップ報告書及び勧告、複合生物学過程研究の新しいアプローチに関するワークショップ報告書(NIHの報告書)
1999	優秀に向かって:21世紀における指導的な数学科(米国数学会タスク・フォースの報告書)
2000	科学と数理科学間の連結強化(全米研究会議の報告書)
2004	国土安全保障における数理科学の役割:ワークショップ議事録(全米研究会議)
2005	数学及び21世紀の生物学(全米研究会議の報告書)

図表3-11 数学と他分野の分野横断的研究の強化等に関する取り組みの例(“STRENGTHENING THE LINKAGES BETWEEN THE SCIENCES AND THE MATHEMATICAL SCIENCES”, National Research Council, 2000等から作成)

このうち、98年の全米研究会議の報告書「米国の数理科学の国際評価に関する上級評価委員会報告」(参考資料3-1に要約、結果及びNSFへの勧告等の仮訳を示す)は座長の名から別名オドム・レポートとも呼ばれ、数学研究に関する世界的に有名な報告書である。この報告書は主に次の点を主張している。

- ・米国数学の状況は旧ソ連など外国出身の研究者に依存しており脆く、数学研究資金は不足。
- ・学術数学と大学外における数学研究や他分野との連結は不十分。
大学構造と数学科の狭い視野は、数学と他分野との分野融合研究に反している。
- ・極度に複雑な未来の科学的問題には、数学モデル、シミュレーション、視覚化等の導入が必要。
- ・資金配分機関が分野融合活動を認識し、それに資金援助を行うことが必要。加えて分野融合の遂行には長い時間が必要。

この報告書はNSFからの資金を受けて作成されており、明示的に示されていないものの、数学研究振興を促した意味でNSFの政策に影響を及ぼした可能性がある(下記参照)。

「... 1998年に、米国の数理科学を評価した国際委員会をまとめたウィリアム・オドム司令官にちなんで名付けられた、いわゆるオドム・レポートは数学における米国のリーダーシップをひそかに害する恐れがある不穏な傾向を警告した。

一例として、連邦機関による数学への支援は断たれ続けていた。今日、学術研究に対する連邦政府の支援の2/3以上は国立科学財団から来る。NSFが全ての科学技術を支援し、数学が究極の分野横断領域であるなら、数学への活発な支援は我々の最も重大な責任の1つである。...」
(NSF Director, At Society for Industrial and Applied Mathematics 50th Anniversary Meeting, 2002)

また、00年の全米研究会議の報告書「科学と数理科学間の連結強化」では、科学技術と数理科学を連結する分野横断的な活動から得られる利益は本当に巨大であり、かつ大きく広がるという前提の下、主に次の勧告を行っている。

- ・数理科学と他分野間の既存連結の強化、新連結の構築のために追加資金を与えること
- ・数理科学と他分野間で活発な協力プログラムを実施する責任を学術研究機関が負うこと
- ・学術界と産業の両方で数理科学と他分野間の連結改善に長期的焦点を当てた新たな常務委員会を設立すること

この報告書は、数学と他分野との連結強化という比較的限定された課題に対して、過去の具体例の分析などを通じて詳細な分析を展開しており、数学研究の大きな可能性に対する全米研究会議の期待の大きさを伺い知ることができる。

更に、05年にも数学と生物学との共同研究に関して報告書が発行されており、数学と他分野との連結強化について米国の研究界は強い関心を持ち続けていると推測される。

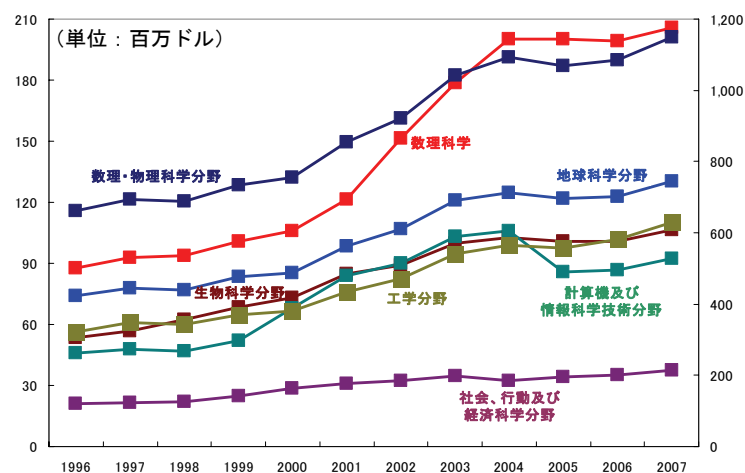
また、同国の科学技術に関する国家政策を形成する大統領科学技術顧問委員会 (President's Council of Advisors on Science and Technology: PCAST、委員24人中、数学学士号1人、同修士号1人) は、2004年に報告書「国家イノベーション生態系の維持」 (Sustaining the Nation's Innovation Ecosystems) を大統領に提出した。その中で国家を自然環境に準え、米国の革新的な生態系の健康を維持するため、「**米国の大学における数学、科学及び技術に関する基礎研究の資金を増額すること**」 (Increase Funding for Basic Research in Math, Science and Engineering in Our Universities) を勧告している。

また、大統領行政府の国家科学技術会議 (National Science and Technology Council) は2004年の報告書「21世紀の科学」 (Science for the 21st century) において数学研究の重要性について以下のように述べている。

「科学発見を活気づける数学

数学は洞察の強力な道具であり、科学技術を横断する統一力である。科学上の発見に対する数学の重要性は、多くの学際研究の増加する複雑さと大規模データセットに取り組む必要性を伴って増し続ける。精巧な数学的モデルと計算アルゴリズムは、測定値から研究したいと思う現象への連結を提供する。基礎数学の進歩はヒトゲノムの断片の生成や組み立てにおいて極めて重要な役割を果たした。また、新しい計算アルゴリズムは、映画スクリーンとテレビゲームに現れる多くの今日の劇的な連続アニメーションの背景にもある。基礎数学に対する連邦政府の支援はNSFによって提供される。海軍研究事務所とエネルギー省を含む他の政府機関は、特定の応用に関連する数学の新しい進歩のための基金を提供する。」

米国政府の中で最も多い数学研究費を持つ NSF には、数学研究を担当する数理科学課 (Division of Mathematical Sciences : DMS)がある。基礎研究への資金配分を主な業務とする NSF では数学を含む多くの分野における基礎研究への資金配分が行われている。その分野別研究費の推移において、近年、数理科学（数学研究）の研究費は他分野より急増している（図表 3-12）。



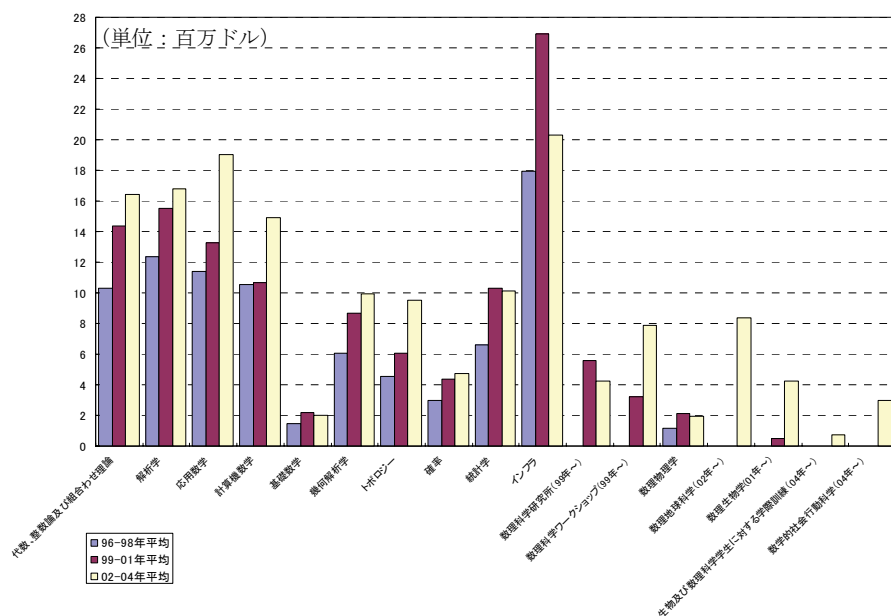
(96-05年は実績、06年は現行計画、07年は要求ベース)

図表3-12 米国NSFにおける数理科学等分野別研究開発費の推移（数理科学のみ左軸、NSF budget requestから作成）

この急増時期は、前述した全米研究会議の報告書（98年、00年）の直後に当たることも注目される。また、この数理科学研究費の配分状況（図表 3-13）及び図表 3-12 から、NSFの数理科学研究費において、解析学や応用数学など伝統的な領域の研究費は年々増加していること、数理科学予算が増加した初期の 99-01 年の間にはインフラ（基盤経費）や研究所経費が増額され、その後の 02-04 年間に数理地球科学や数理生物学などの分野融合研究が増加している傾向が読み取れる。

NSFによる分野融合研究の振興策を示す一つの例として、数学研究と他分野の連携をミッションの第一に掲げてきた米国のミネソタ大学数学応用研究所（Institute for Mathematics and its Applications: IMA）への対応が挙げられる（下記及び図表3-11参照）。NSFはIMAの活動を非常に高く評価し、05-10年には対前期比77%増の約2千万ドルもの資金（NSFの数学資金配分では過去最高額）が交付されることとなった。

「IMAの第一ミッションは、最高の数学能力と他分野や産業からの重要な科学技術課題の間に連結を設立して、真に学際的な自然研究を育成することである。このミッションとともにIMAは、そのような課題に適用されたり、関連した数学研究に従事する基本能力を拡大し、強化することも目指す。」（“The mission of the IMA”, Annual Report 2004-2005, IMA から抜粋）



図表3-13 米国NSFの数理科学研究費の配分状況（NSF Award Searchシステムから作成。複数領域に登録された事項の研究費は当該各領域に均等配分。）

「NSF数理科学課長のRundell氏は次のように述べた。『IMAは世界中の他の研究所の手本になる抜群の数学研究所になった。その革新的な学際的プログラムはNSFの資産の必須成分である。』」（Annual Report 2004-2005, IMA から抜粋）

米国政府全体の分野別研究開発費は02年までしか判明していない（図表3-9）が、数理科学研究費の最大割合を占めるNSFの分野別研究開発費の動向（図表3-12）から推測する限り、少なくとも04年までは政府全体の数理科学研究費が増加していることが予想される。

NSFに次いで数学研究費が大きいエネルギー省には、数学研究の振興を担当する数理情報計算科学課（Mathematical, Information, and Computational Sciences Division）があり、数学研究を対象とした国家プログラムを実施している。05年4月に発表された内容によると、この“Multiscale Mathematics”（マルチスケール数学）プログラム（参考資料3-2）は05年度～07年度の3年間で実施され、規模は2,000万ドル。その対象となる13研究分野において17大学及び8国立研究所の100人以上の研究者が参画することとなっており、クリーンエネルギーの生産、汚染除去、より小さいコンピュータチップの製造、新しいナノ物質・材料の作成などの問題解決に資するため数学を使用して、伝統的な数学だけでは対応できない広い時間幅（フェムト秒～年）、並びに広いスケール（原子レベル～巨視的レベル）に亘る科学的課題に取り組むこととしている。それに含まれる個別課題を見てみると、物質材料科学分野が最も多く、実施規模は大学と国立研究所でおよそ半分ずつとなっている（図表3-14）。

マルチスケール数学プログラムの課題一覧

課題名	分野	研究機関	配分額
計算機トポロジーを使用する非線形系のマルチスケール分析	電力網と情報ネットワーク	ジョージア工科大学	\$552, 108
		ジョージメイソン大学	\$297, 833
		フロリダ大西洋大学	\$284, 003
マルチスケール選択流動のモデル化、分析及びシミュレーション	環境科学と地球科学	オレゴン州立大学	\$647, 329
プラズマ動力学のためのマルチスケール数学	核融合	カリフォルニア大学ロサンゼルス校	\$630, 901
		ローレンス・リバモア国立研究所	\$1, 155, 274
空間的に分配した生物系のマルチスケールモデル化	生物科学	デラウェア大学	\$1, 120, 747
混合非経験的準連続体法に基づく高機能物質のマルチスケール設計	物質材料科学	ミネソタ大学	\$922, 088
		カリフォルニア大学サンディエゴ校	\$797, 032
		パシフィックノースウエスト国立研究所	\$600, 121
目標指向型誤差評価及び制御に基づく適応型マルチスケールモデル化	物質材料科学	テキサス大学オースチン校	\$1, 162, 242
マルチスケール数学及び適応型教育戦略に関する北西部共同体、並びに材料の熱機構における重大問題	物質材料科学	ワシントン州立大学	\$1, 000, 093
		パシフィックノースウエスト国立研究所	\$1, 621, 401
微小管の自己組織化へのマルチスケールアプローチ	物質材料科学	アルゴンヌ国立研究所	\$1, 013, 862
マルチスケール数学及び科学における局所化スケール結合及び新教育パラダイム	物質材料科学化学	ロスアラモス国立研究所	\$825, 132
		カリフォルニア大学サンタバーバラ校	\$386, 688
		ニューメキシコ大学	\$375, 000
		サンディア国立研究所	\$825, 000
海洋及び気候モデル化におけるマルチスケール結合	気候	ロスアラモス国立研究所	\$494, 713
		ウィスコンシン大学マディソン校	\$351, 345
触媒作用又は固体表面に亘る異種化学反応流の微小メゾスコピックモデル化	化学燃焼	オークリッジ国立研究所	\$1, 260, 000
		エームズ研究所	\$330, 000
磁化プラズマのマルチスケール回転運動粒子シミュレーション	核融合高エネルギー密度物理	プリンストンプラズマ物理研究所	\$1, 576, 900
		コロンビア大学	\$122, 869
原子連続体論のマルチスケール結合方法の数学的解析	物質材料科学	サンディア国立研究所	\$1, 210, 513
		コロラド州立大学	\$213, 833

		フロリダ州立大学	\$380,215
		レンセラー科学技術研究所	\$450,000
合計			\$20,607,242

分野別配分額（重複あり）

物質材料科学	\$11,783,220	57%	機関別配分額		
化学	\$4,001,820	19%	大学	\$9,244,326	45%
核融合	\$3,485,944	17%	国立研究所	\$11,362,916	55%
高エネルギー密度物理	\$1,699,769	8%	合計	\$20,607,242	100%
燃焼	\$1,590,000	8%			
電力網と情報ネットワーク	\$1,133,944	6%			
生物科学	\$1,120,747	5%			
気候	\$846,058	4%			
環境科学と地球科学	\$647,329	3%			

図表3-14 米国マルチスケール数学プログラムの課題一覧及びその分野別、機関別配分額（”FISCAL YEAR 2005 MULTISCALE MATHEMATICS RESEARCH AWARDS”, DOEから作成。分野については各課題のアブストラクトから政策研で判別・分類した）

最後に、米国政府で第三の数学研究規模を有する国防省ではどのような取り組みが行われているのか。同省の取り組みのうち、年間予算約3百万ドルと比較的規模は小さいものの、グラント「数理科学グラントプログラム（Mathematical Sciences Grants Program）」（国家安全保障局）が興味深い。その目的では次のように謳っている。「国家安全保障局（NSA）は暗号学を伴う数学領域において米国大学院から学位を取る米国民の割合が減退していることを心配している。NSAグラントプログラムは暗号分野の開発を刺激し、米国民にこれらの数学分野の職業がより魅力的になるようにし、そのような数学者の可能な雇い主としてNSAを知られるようにする。」（グラント紹介HPから抜粋）

このように、米国政府は自国の数学専攻大学生が減少していることを把握しており、それを懸念し、更にそれに対して小規模ながら直接的な対策を執っている。

以上の調査結果から、米国政府の数学研究に対する政策や行政体制、認識の程度は、日本より充実しているといえる。

②研究組織及び研究者数

米国で組織として独立した数学研究組織はどれくらいあるのか。日本の場合と同様に、政府、大学、公的研究機関、非営利団体（NPO）が設置し、“Institute”又は“Center”等の複数の研究者の存在を示唆する組織をWEB検索により調査したところ、次の組織が見られた（図表3-15）。

設置機関	数学研究組織名
(Government)	National Institute of Statistical Sciences (NISS)
Boston College	Boston College Mathematics Institute
California Institute of Technology	Center for Integrative Multiscale Modeling and Simulation (CIMMS)
Carnegie Mellon University	Center for Nonlinear Analysis (CNA)
Claremont Graduate University	Claremont Research Institute of Applied Mathematical Sciences (CRIAMS)
Cornell University	Center for Applied Mathematics (CAM)
Delaware State University	Applied Mathematics Research Center (AMRC)
Indiana University	Center for Statistical and Mathematical Computing
Los Alamos National Laboratory	Center for Nonlinear Studies (CNLS)
New York University	Courant Institute of Mathematics
(NPO)	American Institute of Mathematics (AIM)
(NPO)	Clay Mathematics Institute (CMI)
(NPO)	Institute for Advanced Study
(NPO)	Mathematics Sciences Research Institute (MSRI)
Rutgers, the State University of New Jersey, Princeton University, AT&T Labs – Research, Bell Labs, Telcordia Technologies, NEC Laboratories America	Center for Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science (DIMACS)
Stanford University	Mathematics Research Center
Stanford University	Institute for Computational and Mathematical Engineering (ICME)
University of California	Institute for Pure and Applied Mathematics (IPAM)
University of Alberta	Applied Math Institute
University of Colorado	Center for Computational Mathematics (CCM)
University of Maryland	Center for Scientific Computation and Mathematical Modeling (CSCAMM)
University of Massachusetts	Center for Geometry, Analysis, Numerics, and Graphics (GANG)
University of Michigan	Center for Statistical Consultation and Research
University of Minnesota	Institute for Mathematics and its Applications (IMA)
University of Minnesota	Minnesota Center for Industrial Mathematics (MCIM)
University of South Carolina	Industrial Mathematics Institute

図表3-15 米国における数学研究組織の例（順不同、WEB検索により作成）

大学の学部学科や”Institute”、”Center”の語を含まない名称の組織は調査対象としておらず、結果として図表3-15は米国の数学研究組織の一部しか表していないと考えられる。

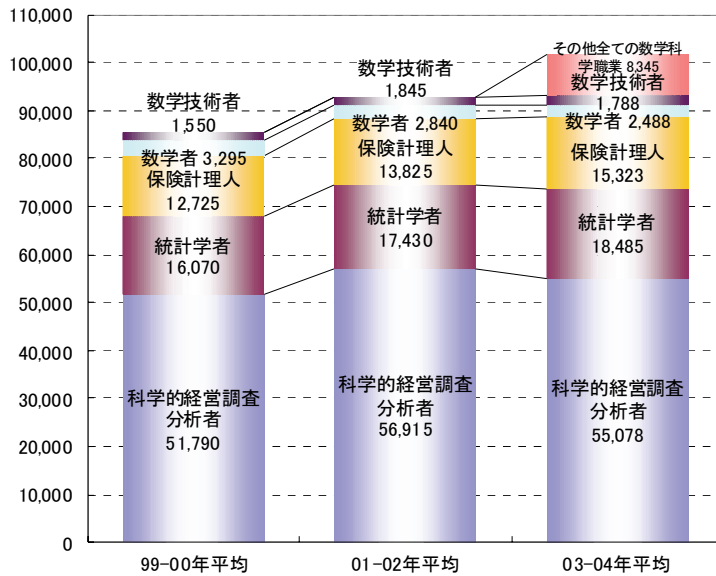
そういった意味では日本と同条件であるが、それでもWEB検索により26組織が確認された。

これらの組織にはスタンフォード大学やカリフォルニア大学、ミネソタ大学など数学研究論文の被引用数が世界的に極めて多い大学（出典：SCI-Thomson Scientific）に設置された組織が含まれている。特にスタンフォード大学の数学研究センター（Mathematics Research Center）は1998年と比較的最近に設置されており、米国の大学組織における数学研究が今なお活発に行われていることを示唆している。

一方、米国の数学研究者数については、米国労働省の労働統計局（Bureau of Labor Statistics）が実施する職業雇用統計（Occupational Employment Statistics：OES）の見積もりから推測することができる（図表3-16）。この統計では職業によって分類されており、厳密には数理科学関係の職業従事者数となり、研究者以外の者も含むことになる。そのため、ここではそれらを一括りに「数学研究者等」と呼ぶこととする。この図からまず気付くのは米国内の数学者の少なさ（約2,400人）であり、その減少傾向である。即ち99年から04年まで10年と経たないうちに30%近く減少している。しかしこれは必ずしも米国内で数学研究の地位が低下していることにはならないと考えられる。というのは、数学者以外の職業に分類されている者、例えば統計学者などでも、その中には研究に携わっている者が存在すると考えられるためである。図表3-16から、99年以降、最も大きな割合を占める科学的経営調査分析者（OR）数は横ばいであるものの、他の統計学者、保険計理人（アクチュアリー）及び数学技術者数は増加しており、これらに加えて04年には、その他全ての数理科学職業が新たに加わり、この項目には約8,300人が見積もられている。このような数理科学関係の職業従事者全体の挙動から、数学研究者自体の人数も年とともに増加し、その活動範囲も多岐に亘ってきたと解釈することができるのではないかな。

このことは、これらの数学研究者等が所属する産業別割合の推移（図表3-17、図表3-18）からも分かる。即ち図表3-17によって、数学研究者等が特定の産業に集中する構造からより多くの産業に分散する傾向が読み取れる。例えば、02年には数学研究者等の多くが所属した専門的、科学、工学サービス（約3割）や公務（約2割）は、最大の構成要因である科学的経営調査分析者の割合減少により比率を下げ、逆にこれまで少数だった情報や会社、事業経営などが急速に比率を伸ばしている。ここで、専門的、科学、工学サービスとは、コンピュータシステム設計や科学技術コンサルタント業、科学研究開発サービスなどを含む。

このように、これまで米国の数学研究者は新たな活動領域を開拓し続けてきたと言える。これは米国の産業界において今なお数学研究が最新の技術革新をもたらす可能性があるものと捉えられていることの現われと推測される。



【用語の定義】

科学的経営調査分析者 (Operations Research Analysts) : 意思決定、政策形成又は他の管理職務に伴う管理を補助する情報を開発、解釈するため、コンピュータを使って数学的モデル及び他の最適化法を定式化して、適用する。関連ソフトウェア、サービス又は製品を開発すると推測される。しばしば、データ収集、分析や意思決定支援ソフトウェアの開発に専念する。プログラム評価、レビュー又は実行に対する最適な時間、費用又はロジスティクス・ネットワークを開発、供給すると推測される。

統計学者 (Statisticians) : 使用可能な情報を提供するため、数値データを収集し、系統立て、解釈し、要約するための数学理論の開発に従事したり、統計理論や統計方法を適用する。生物統計学、農業統計、ビジネス統計、経済統計又は他分野などの分野を専攻すると推測される。数理統計学者を含む。

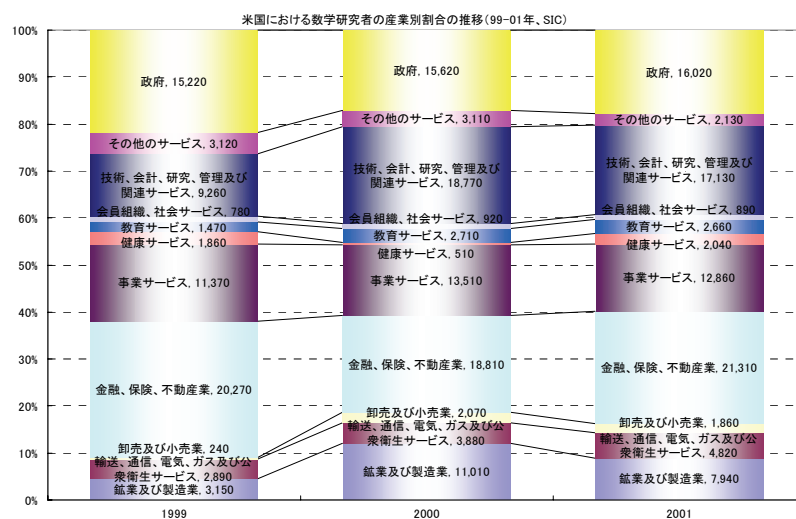
保険計理人 (Actuaries) : 未来収益の支払いに対するリスクや義務を予測するため、死亡率、事故、病気、障害、引退率や構造物確率表などの統計データを分析する。必要とされる保険料率を確かめ、未来利益の支払いを確保するために必要な積立を現金化すると推測される。

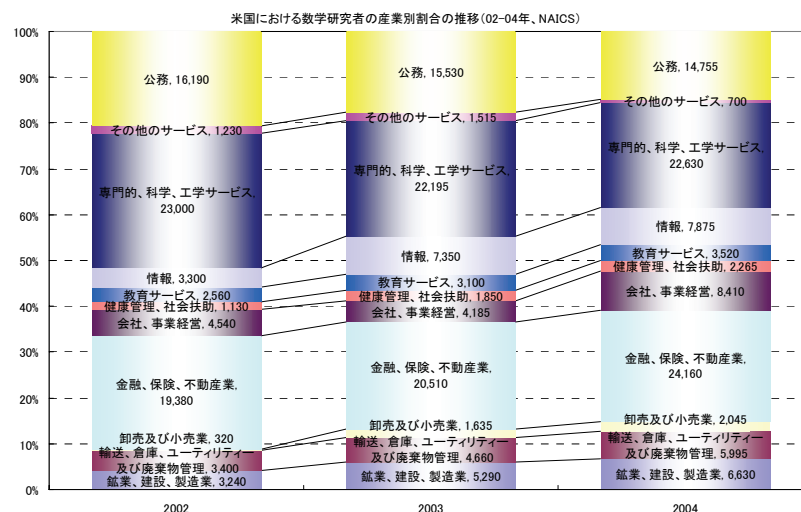
数学者 (Mathematicians) : 基礎数学又は数学的方法の科学、管理及び他分野への適用において研究を実施する。数学的方法により様々な分野の問題の解を解決、又は指示する。

数学技術者 (Mathematical Technicians) : 特定の産業及び研究目的、過程、設備及び製品に関連して、工学や自然科学における技術的問題に対して、標準化された数学の公式、原則及び方法論を適用する。

その他全ての数学科学職業 (Mathematical Science Occupations, All Other) : 個々に記載されていない全ての数理科学者

図表 3-16 米国における数学研究者等の人数の推移 (Occupational Employment Statistics : OES, Bureau of Labor Statisticsから作成)





図表3-17 米国における数学研究者等の産業別割合の推移（99-04年、Occupational Employment Statistics : OES, Bureau of Labor Statisticsから作成。02年から産業分類が国際標準産業分類（SIC）から北米産業分類システム（NAICS）に変更されたため、2図に分けている）

科学的経営調査分析者

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
専門的、科学、工学サービス	—	—	—	27%	25%	23%
連邦、州及び地方政府 (= 公務)	18%	13%	15%	15%	14%	12%
保険業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	9%	5%	6%	6%	8%	9%
金融仲介業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	—	—	—	6%	6%	7%
インターネットサービスプロバイダ、Web検索及び データ処理業（「情報」の細分類）	—	—	—	1%	5%	6%

統計学者

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
連邦、州及び地方政府 (= 公務)	35%	30%	32%	31%	29%	33%
専門的、科学、工学サービス	—	—	—	22%	21%	22%
教育サービス	4%	7%	7%	7%	7%	10%
保険業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	4%	5%	6%	6%	6%	7%

化学工業（「鉱業、建設、製造業」の細分類）	-	-	-	4%	4%	5%
-----------------------	---	---	---	----	----	----

保険計理人

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
保険業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	52%	56%	60%	57%	59%	59%
専門的、科学、工学サービス	-	-	-	22%	21%	21%
会社、事業経営	-	-	-	7%	8%	10%
連邦、州及び地方政府（= 公務）	5%	5%	5%	4%	4%	4%
管理及びサポートサービス（「輸送、倉庫、ユーティリティ及び廃棄物管理」の細分類）	-	-	-	2%	2%	2%

数学者

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
連邦、州及び地方政府（= 公務）	43%	47%	44%	43%	54%	52%
専門的、科学、工学サービス	-	-	-	28%	25%	29%
教育サービス	-	8%	8%	-	5%	4%
保険業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	2%	2%	2%	3%	3%	2%
輸送機器製造（「鉱業、建設、製造業」の細分類）	-	-	4%	-	2%	2%

数学技術者

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
専門的、科学、工学サービス	-	-	-	11%	16%	24%
連邦、州及び地方政府（= 公務）	17%	13%	17%	16%	18%	22%
保険業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	16%	22%	17%	17%	15%	13%
コンピュータ及び電気機器製造 （「鉱業、建設、製造業」の細分類）	-	-	-	2%	9%	10%
教育サービス	-	3%	4%	3%	7%	9%

その他全ての数理科学職業

産業分類	1999	2000	2001	2002	2003	2004
会社、事業経営	-	-	-	-	-	49%
専門的、科学、工学サービス	-	-	-	-	-	27%

金融仲介業及び関連活動 （「金融、保険、不動産業」の細分類）	-	-	-	-	-	5%
連邦、州及び地方政府（= 公務）	-	-	-	-	-	4%
教育サービス	-	-	-	-	-	3%

図表3-18 米国の数学研究者等の上位5産業別割合の推移（Occupational Employment Statistics : OES, Bureau of Labor Statisticsから作成）

更に、比較のために米国の数学研究関連学協会の会員数を示す（図表3-19）。当然、図表3-19が米国の厳密な数学研究者数を表しているわけではない。それは日本の場合と同様の理由の他に、特に米国の学会では外国人研究者が会員となっているケースが多いと思われるためである。

これらを総合的に考慮すると、米国の数学研究者数は1万人から数万人と推測される。

学協会名	会員数
米国数学会（American Mathematical Society）	29,000
米国応用数理学会（Society for Industrial and Applied Mathematics）	10,000
米国統計学会（American Statistical Association）	16,000

図表3-19 米国における数学研究関連学協会の例（順不同、WEB検索により作成）

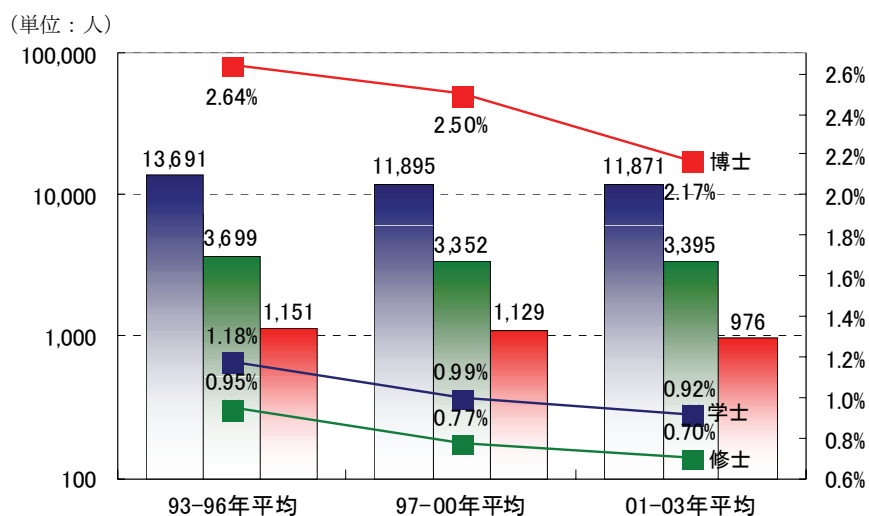
③学生数及び学生の進路

米国における数学専攻学生の在学生数は不明だが、数学又は統計学を専攻した卒業者数は判明している（図表3-20）。図表3-20を日本の場合（図表3-7）と単純に比較することはできないが、全体に対する割合の減少は日米ともに共通した傾向であり、学部生の割合（約0.9%）も類似しているように思われる。但し、日本では比較的修士の比率が高い（約1.6%）一方、米国では博士の比率が高い（約2.2%）。米国の大学院博士課程で数学研究を行う方が日本より都合がよいのと推測されるが、博士割合が学士や修士割合の2倍以上であることから、米国における数学博士の多くは外国人学生ではないかと考えられる。外国人学生の寄与については後に述べる。

米国では数学専攻博士課程修了者は具体的にどのようなキャリアをたどるのか。米国の博士課程修了者の活動計画、並びに実際に課程修了後の最初の活動内容について統計が得られている（図表3-21及び図表3-22）。

図表3-21から、米国の数学専攻博士は他分野と比べて、勉強を続ける割合が高く（約37%）、就職率は若干低い（約56%）。また、経年変化で見ると、数学博士取得者の就職率はこの10年間で約9%低下しているが、これは米国内にある程度、数学研究者が行き渡ったためと推測される。しかし、その内訳を見ると、数学専攻博士の就職率が下がってきているのは近年教育機関への就職率が大幅に減少していることが主因であり、産業又はビジネスで活動

する割合は長期的には増加しているようにも見える。

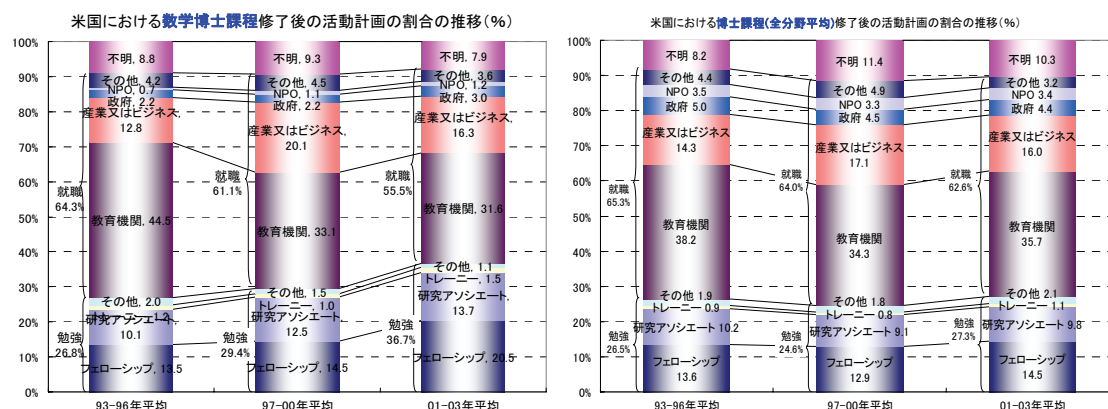


図表3-20 米国の数学又は統計学関係学部卒業生（青）、数学又は統計学専攻修士課程修了生（緑）、数学又は統計学専攻博士課程修了生（赤）の数及び割合の推移 (Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成)

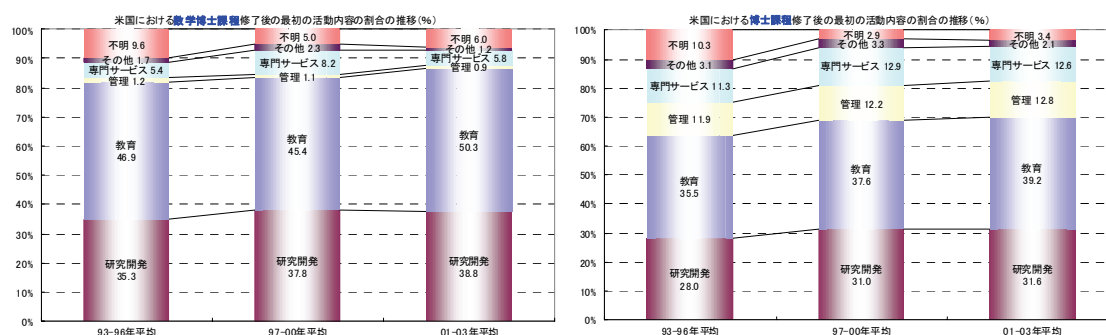
一方、実際の最初の活動内容（図表 3-22）を見ると、米国の数学専攻博士は平均と比較して教育業務や研究開発業務に就く割合が高く、それらの割合はほぼ年々増加している。活動計画段階（図表 3-21）では教育機関で働く者の割合は減少しているにも関わらず、実際の業務内容では教育業務に就く者の割合が増加している。これはフェローシップなどに就く予定の者が教育業務にも携わるためではないかとも考えられる。その反面、産業又はビジネス、研究アソシエートなどに就く予定の者が研究開発業務に携わっているのではないか。この他、図表 3-22 から、数学専攻博士は全分野平均と比較して、管理業務や専門サービス業務に携わっている者の割合が少ないことが分かる。これは数学の性質から考えれば特段問題があることではなく、米国の数学博士の多くは課程修了後も自らの専門を活かした業務に携わっているように見える。

このような状況から、単純比較はできないと推測されるが、数学博士の就職率が4～50％程度の日本の場合（図表3-8）より、米国の数学博士の進路は比較的拓けているように思われる。

なお、米国特有の事情として、外国人学生の寄与が大きいことが考えられる。その点に関連して調査を行ったところ、数学博士取得者は全体と比較して米国公民権を有する者の割合は低く、一時ビザを有している者の割合が非常に高い（全分野平均：約25％、数学：約44％、01-03年平均）ことが分かった（図表3-23）。また、この一時ビザ所有者の割合は



図表3-21 米国における博士課程（数学博士（左）、博士課程平均（右））修了後の活動計画の割合の推移（単位：％、Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成）

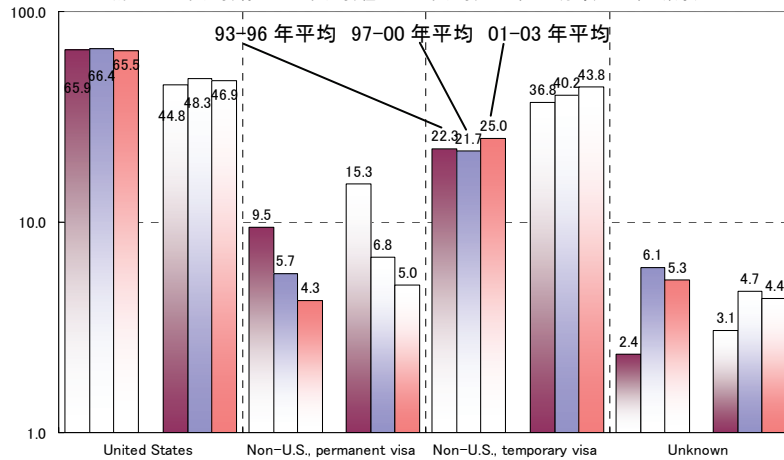


図表3-22 米国における博士課程（数学博士（左）、博士課程平均（右））修了後の最初の活動内容の割合の推移（単位：％、Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成）

年々増加している。それでは、彼らはどのような国々から来ているのか。その直接的な回答となるデータはないが、人種別割合の推移（図表3-24）から、例えば東欧からの学生が多いのではないかと推測される。近年、数学博士取得者では白人の割合が最も大きく（約83％、01-03年平均）、全体と比較して人種構成に大きな差は見られない。

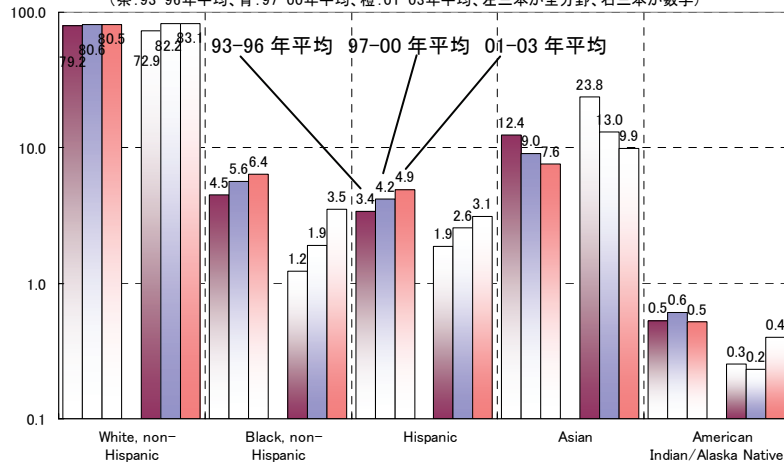
更に、これらの外国人学生は博士取得後どこで働くのか。博士取得者の雇用地域（図表3-25）によると、全分野平均と比較して数学博士の雇用地域に特段大きな差はない（全分野平均及び数学博士取得者ともに外国で働く者の割合は約10％）ことから、数学博士を取得した外国人学生の多く（8～9割）は引き続き米国内に滞在すると推測される。

(単位：%) (茶：93-96年平均、青：97-00年平均、橙：01-03年平均、左三本が全分野、右三本が数学)

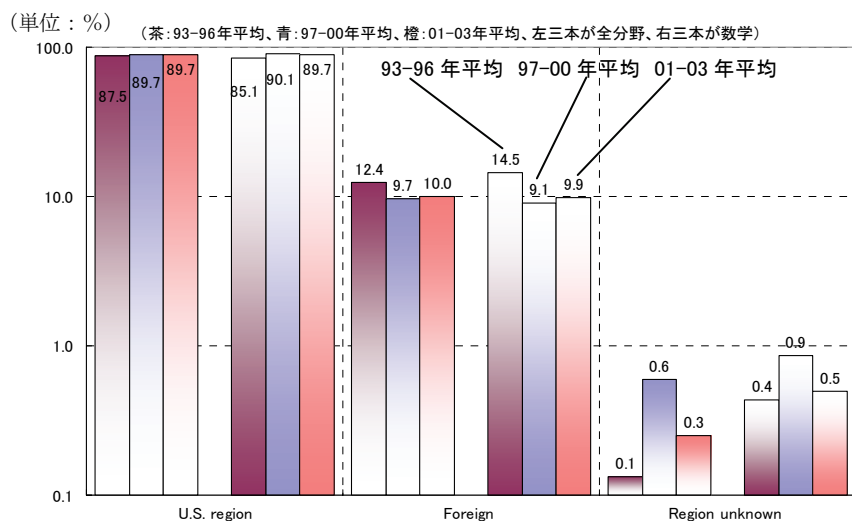


図表3-23 博士号取得者（全分野平均（左三本）、数学専攻（右三本））の公民権割合の推移（Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成）

(単位：%) (茶：93-96年平均、青：97-00年平均、橙：01-03年平均、左三本が全分野、右三本が数学)



図表3-24 博士号取得者（全分野平均（左三本）、数学専攻（右三本））の人種別割合の推移（Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成）

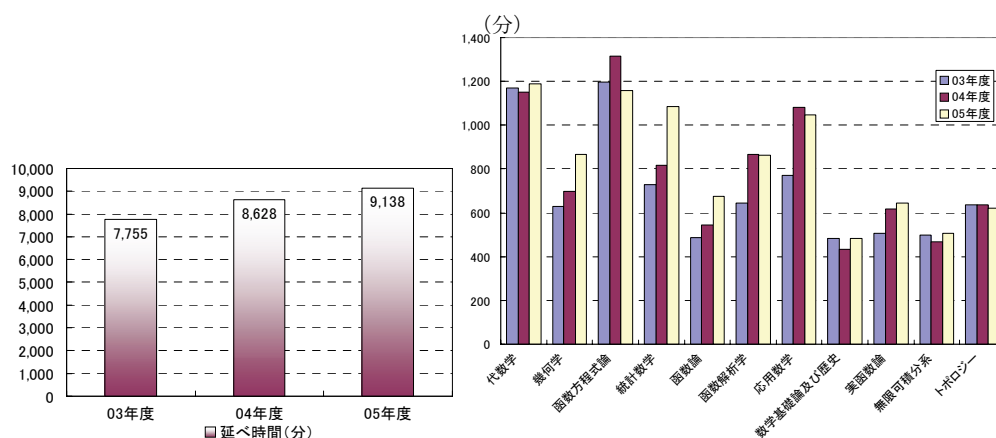


図表3-25 博士号取得者（全分野平均（左三本）、数学専攻（右三本））の雇用地域の推移（Digest of Education Statistics, National Center for Education Statistics, Department of Educationから作成）

【日本数学会と米国数学会 ー応用数学の位置付け】

本文中に述べたとおり、日本、米国ではそれぞれ国内に数学会を有している。これらの数学会の活動を調査することによって、日本、米国で実施されている数学研究の内容が垣間見られると推測される。

まず、(社)日本数学会では、年2回総会（春の年会と秋の総合分科会）が開催されている。総会は毎年ほぼ固定された11のセッションを有する。全延べ発表時間の合計の推移、及びそれぞれのセッションにおける近年の発表時間の推移を調べた（図表3-g）。

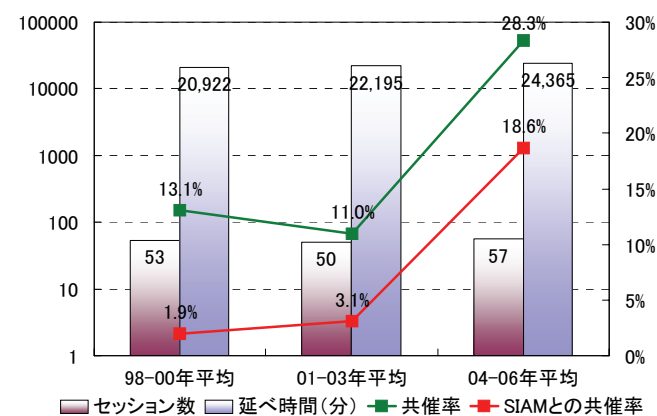


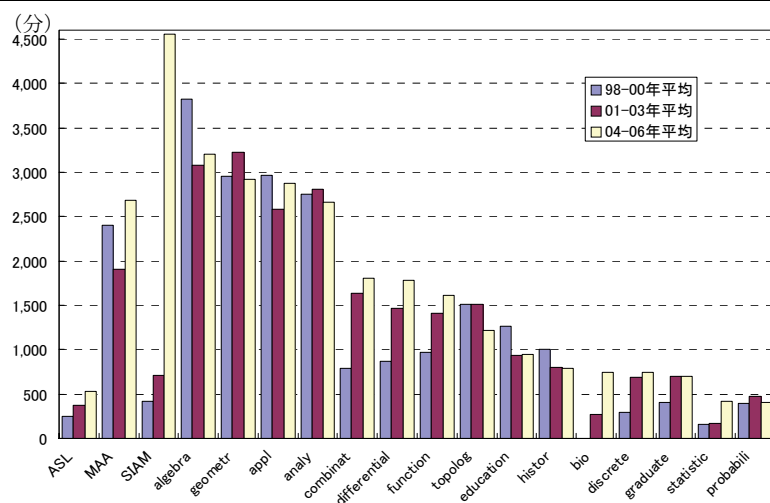
図表3-g (社)日本数学会の年会及び秋季総合分科会における発表時間配分（通常セッション及び特別講演）等の推移（(社)日本数学会年会及び秋季総合分科会プログラムから作成）

図表3-gから、全延べ発表時間は増加傾向にあり、(社)日本数学会の発表活動は活発であることが分かる。また、セッション別で見ると、幾何学や統計数学、函数論、函数解析学、応用数学、実函数論などの発表時間が増加している。しかし、日本応用数理学会など他の学会関係者などによる発表は比較的少なく、外部との研究協力は十分とは言えない。また、応用数学の発表時間は増加傾向にあるとは言え、まだ全体の1割程度に過ぎない。

一方、米国数学会（AMS）では年に1回（1月）、米国応用数理学会（SIAM）や米国数学協会（MAA）、米国記号論理学会（ASL）などと共同して総会を開催している。この総会のセッション数は日本の場合よりもはるかに多く、固定されたセッションはほとんど存在せず領域自体が毎年変わる。この共同総会のうち米国数学会が主催する全延べ発表時間の合計の推移等と、セッションの名称に含まれるキーワード毎の近年の発表時間の推移を調べた（図表3-h）。

図表3-hから(社)日本数学会と同様、米国数学会が主催するセッションでも全延べ発表時間は増加傾向にあり、米国数学会の発表活動は活発であることが分かる。注目すべきはその全延べ発表時間に対する他学会との共催セッションの時間割合、特に米国応用数理学会（SIAM）との共催セッションの時間割合が近年急速に増加している（約19%：04-06年平均）ことである。また、セッション名に含まれるキーワードで見ると、combinat（組合せ）やdifferential（微分）、function（函数）、bio（生物）、discrete（離散）、graduate（学部生又は大学院生）、statistic（統計）などを含むセッションの時間が増加している。加えて、各年の総会における米国数学会主催のセッションのうち、発表時間の長さ上位3セッションを列挙する（図表3-i）。





図表3-h 米国数学会が主催するセッションの発表時間配分等の推移（米国数学会総会プログラムから作成）

1998			1999		
1	1470	Homotopy Theory	1	1000	Singularities in Algebraic and Analytic Geometry
2	1120	Commutative Algebra and Algebraic Geometry	2	880	Discrete Models and Difference Equations
3	890	Difference Equations and Applications	3	860	Commutative Algebra and Algebraic Geometry
2000			2001		
1	870	AMS-MAA in Memory of Gian-Carlo Rota	1	890	Integral Transforms
2	860	Quantum Computation and Information	2	780	Analytic Number Theory
3	860	Recent Advances in Complex and Harmonic Analysis	3	770	Geometric Group Theory
2002			2003		
1	965	Low-Dimensional Topology	1	920	Wavelets, Frames and Operator Theory
2	950	The Many Lives of Lattice Theory and the Theory of Ordered Sets, with Connections to Combinatorics	2	890	Homotopy Theory
3	835	Combinatorics and Graph Theory	3	860	Algebraic Topology Based on Knots

2004			2005		
1	920	Nonlinear Partial Differential Equations and Variational Problems	1	930	AMS-MAA-SIAM Research in Mathematics by Undergraduates
2	890	Low-Dimensional Topology	2	880	Analysis
3	800	Discrete Dynamics and Difference Equations	3	845	Combinatorics
3	800	The Many Lives of Lattice Theory and the Theory of Ordered Sets, with Connections to Combinatorics			
2006					
1	810	AMS-SIAM Frames and Operator Theory in Analysis and Signal Processing			
2	805	Combinatorics			
3	705	AMS-SIAM Nonlinear Dynamical Systems			

図表 3-i 各年の総会における米国数学会主催のセッションのうち、発表時間の長さ上位3セッション

図表3-iから、近年では米国応用数理学会（SIAM）などとの共催セッションが上位を占めるようになっている一方、上位セッションの時間は減少しており、セッション間の時間差が小さくなっていることが分かる。

この日米の数学会の活動を比較すると、応用数学の位置付けが大きく異なることが分かる。日本の数学会では応用数学は多数の数学領域の一つという扱いだが、米国の数学会では応用数学は数学的課題解決に向けた見方の一つであり、多様な基礎的数学と広く協働しているように思われる。日本では応用数学が狭い領域に押し込まれているようにも見えるが、その背景として日本の数学研究者の間では「現実への数学の応用問題（数学の活用）」は価値が低いと見なしているのではないかという指摘がある。数学研究者のうち特に数学自体を追究している「数学者」は、より高度で「数学的に美しい」（＝「抽象的、一般的かつ簡明」という翻訳が適当か？）成果に重きを置く風潮があると推測される。

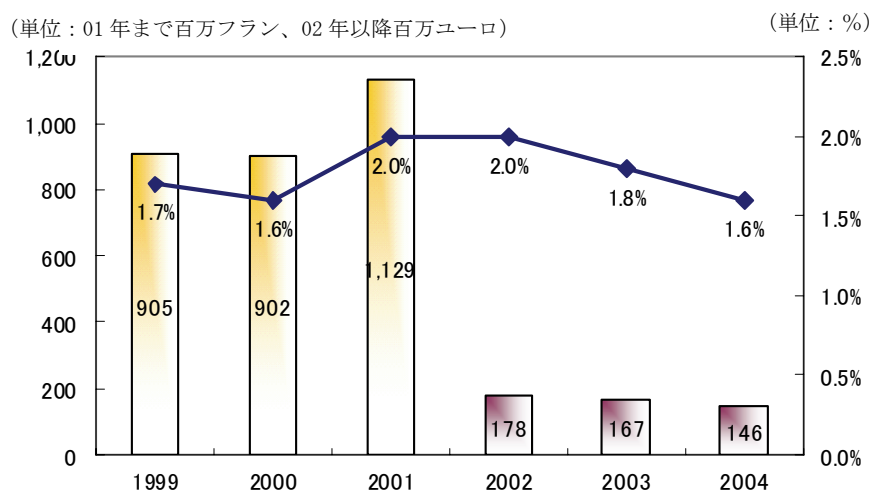
しかし、現実の問題を解決するためには、抽象的な論理だけではうまくいかないことも多い。現実問題の解決に寄与するためには、往々として、抽象的な論理に加えて様々な補正や限定が施され、その結果、特定の状況にしか使えない論理構造になり得る。問題解決に貢献しても、そのような論理構造では数学者からはあまり評価されないのと推測される。だが、これは価値観の混同である。確かに抽象的概念で完結する数学だけの世界では「数学的に美しい」ことが重要と推測される。しかし、それを現実の問題に適用し、その解決に寄与することには大きな社会的意義がある。研究者はその研究成果によって評価されるが、その成果にどれほど学問的意義があるかという尺度だけで評価されるのではなく、その成果による社会への貢献という尺度によっても研究者は評価される。どちらがより尊いかという議論は無意味であり、どちらも尊いとされるべきである。

日本の数学研究者や数学会は、数学自体の追究だけでなく、日本応用数理学会などとも協力して現実の困難な問題に数学を活用していくという視点を多く導入するべきではないか。

3-3 フランス

①政策と全体状況

フランスの数学政府研究費及び全分野に占める割合は近年減少傾向にある（図表3-26）。しかし、それでも同国の数学研究費の割合（2.0%：02年）は米国（0.5%：02年）よりはるかに高く、金額も米国の約半分程度に及ぶ（米国：約590億円、フランス：約280億円、02年）。両国間の経済力の差を考慮すれば、フランスの数学研究への傾注ぶりが伺える。



図表 3-26 フランスの政府研究開発費における数学研究費の額及び割合の推移（“Recherche et développement en France”, Ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche から作成）

また、数学研究に対する政府研究費のうち基礎研究は約80%を占める（00-04年）。

数学研究を対象とした大規模な国家プログラムは実施されていないと思われる。青少年・国民教育・研究省研究局には数学研究振興を担当する組織がある（研究局HP）。

②研究組織及び研究者数

フランスの数学研究組織の状況はどうなっているのか。日本、米国の場合と同様に、政府、大学、公的研究機関、非営利団体（NPO）が設置し、“Institut”又は“Centre”等の複数の研究者の存在を示唆する組織をWEBの検索で調査したところ、次の組織が見られた（図表3-27）。

設置機関	数学研究組織名
(Government)	Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées (CIMPA)
(Government)	Centre International de Rencontres Mathématiques (CIRM)
(Government)	European Research Consortium for Informatics and Mathematics (ERCIM)
Ecole des Mines de Paris	Centre de Mathématiques Appliquées (CMAP)

Ecole des Mines de Paris	Centre de Morphologie Mathématique (CMM)
École Normale Supérieure Cachan	Centre de Mathématiques et de Leurs Applications (CMLA)
École Normale Supérieure Cachan, INSA de Rennes, Université de Rennes 1	Institut de Recherche Mathématique de Rennes (IRMAR)
École Polytechnique	Centre de Mathématiques (CMAT)
École Polytechnique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines	Centre de Mathématiques Appliquées (CMAP)
Informatique et Calcul Scientifique (CERMICS)	Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques
Institut National de Recherche en Informatique (INRIA)	Institut d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble (IMAG)
Institut National des Sciences Appliquées (INSA)	Centre de Mathématiques
Université Aix Marseille II	Institut de Mathématiques de Luminy (IML)
Université Catholique de l'Ouest	Institut de Mathématiques Appliquées
Université de Bordeaux 1 / 2	Institut de Mathématiques de Bordeaux
Université de Bourgogne	Institut de Mathématiques de Bourgogne
Université de Bourgogne	Centre International de Mathématiques Gaspard MONGE
Université de Grenoble 1, Joseph Fourier	Institut Fourier
Université de Montpellier 2	Institut de Mathématiques et de Modélisation de Montpellier (I3M)
Université de Nice, Sophia Antipolis	Institut Non Linéaire de Nice-Sophia Antipolis (INLN)
Université de Paris 1	Centre de Recherches de Mathématiques, Statistiques et Economie Mathématiques (CERMSEM)
Université de Paris 6 / 7	Institut fédératif de mathématique et informatique de Chevaleret
Université de Paris 6 / 7	Institut de Mathématiques de Jussieu (IMJ)
Université de Paris 9	Centre de Recherches en Mathématiques de la Decision (CEREMADE)
Université de Provence	Centre de Mathématiques et Informatique (CMI)
Université de Toulouse 1 / 2 / 3 - INSA de Toulouse	Institut de Mathématiques de Toulouse
Université Henri Poincaré, INRIA	Institut Élie Cartan Nancy (Mathématiques)
Université Louis Pasteur, Strasbourg 1	Institut de Recherche Mathématique Avancée (IRMA)
Université Paul Sabatier Toulouse 3, INSA Toulouse, Université Toulouse 1	Mathématiques pour l'Industrie et la Physique (MIP)
Université Pierre et Marie Curie	Institut Henri Poincaré

図表 3-27 フランスにおける数学研究組織の例（順不同、WEB 検索により作成）

日米の場合で既に述べたとおり図表3-27自体に網羅性はないが、それでもフランスにおいて31もの数学研究組織が確認された。特に数学研究論文の被引用数が世界で最も多いパリ大学（出典：SCI-Thomson Scientific）に設置された数学研究組織が4つもある。これらの組織の設置時期は不明だが、自然科学分野を専門とするパリ第六、七大学のみならず、人文・社会科学を網羅するパリ第一大学や、経営・管理分野を専門とするパリ第九大学においても数学研究組織が存在することから、同国の数学研究は広範な分野に影響を及ぼしていることが推測される。

また、フランスにおいて約4,000人の数学研究者が学術部門で働いている一方、約2,000人の数学研究者が産業界で働いている（CNRSのHP）。参考までに数学研究関連学協会の会員数を示す（図表3-28）。なお、これらの数学研究者のうち約3,000人がフランス数学会又はフランス応用産業数学会に所属している（CNRSのHP）。

学協会名	会員数
フランス数学会（Société Mathématique de France）	1,900
フランス応用産業数学会（Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles）	不明
フランス統計学会（Société Française de Statistiques）	1,000

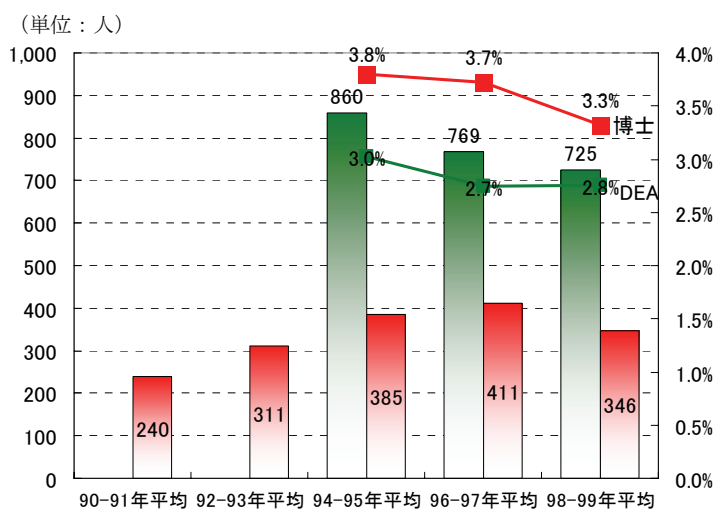
図表 3-28 フランスにおける数学研究関連学協会の例（順不同、WEB 検索により作成）

図表3-28及びCNRSのHPの記述から、フランスにおける数学研究者数は約6,000人程度と推測される。この規模は、HPの簡単な用語検索によって30以上の数学研究組織が見つけられたこと、米国の半分に匹敵する数学研究研究費（上記①参照）などからも裏付けられ、フランスの数学研究者の活動の機会は日本の場合より多いのではないかと類推される。

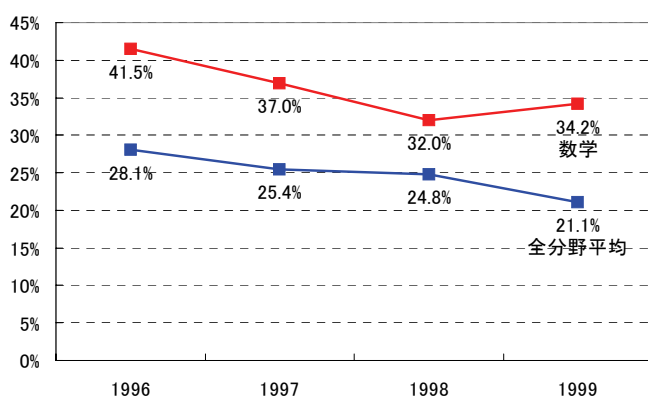
③学生数及び学生の進路

フランスにおける数学専攻学部生数のデータは見つからなかったが、若干時期が古いものの数学に関するDEA（日本の修士にほぼ相当）学位取得者数及び博士取得者数は判明した（図表3-29）。数学に関するDEA学位取得者数は減少しているが、DEA全体に対する割合は下げ止まっているようにも見える。また、数学博士取得者数が90年前半から急増しているが、これは冷戦の終結に伴い旧共産圏から学生が大量に流入した可能性がある。数学博士取得者数の全分野に占める割合は90年代後半に減少しているが、日本で1%前半、米国で2%前半であることを考えると、フランスの3%という値は依然極めて高いことが分かる。すると、米国と同様にこの数学博士取得者数に対する外国人学生の寄与は大きいのかどうかという点が課題となる。それに関連して、博士における外国人の割合が判明している（図表3-30）。この図から、数学博士取得者数における外国人の割合は全分野平均よりも常に高く、約3～4割である。また、90年代後半において博士取得者（数学、全分野平均）にお

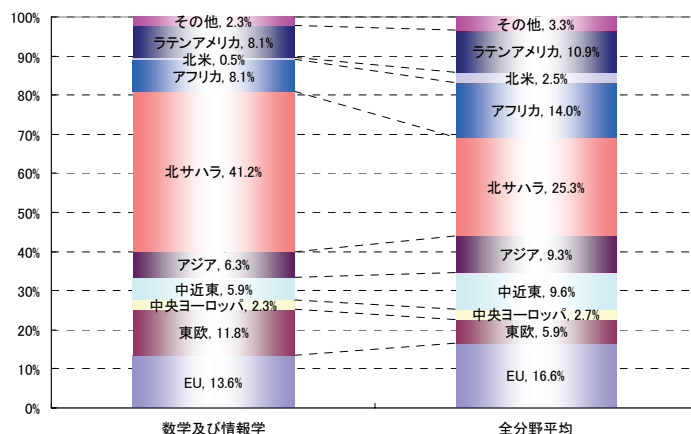
ける外国人の割合は減少傾向にある。これは冷戦の終結に伴う学生の流入傾向が弱まってきたためと推測される。外国人の博士取得者（数学及び情報学、全分野平均）に対する出身国別割合（図表3-31）から、数学及び情報学における東欧出身者のシェアの高さがそれを物語る。



図表 3-29 フランスの数学専攻 DEA 学位取得者数（緑）、数学専攻博士課程修了生（赤）の数及び割合の推移（Formation doctorale enjeux, bilan, propositions 及び Rapport sur les Etudes Doctorales, Ministère de l'Education Nationale Ministère de la Recherche から作成）



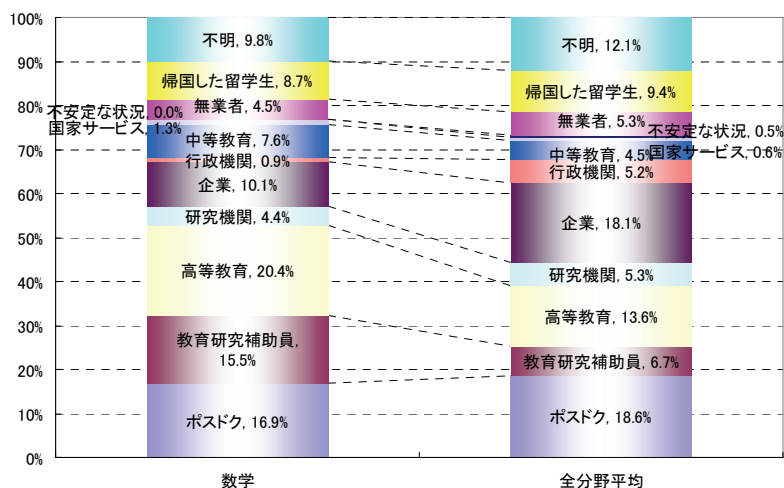
図表 3-30 フランスの博士号取得者（数学、全分野平均）における外国人の割合の推移（Rapport sur les Etudes Doctorales, Ministère de l'Education Nationale Ministère de la Recherche から作成）



図表 3-31 フランスの外国人の博士取得者（数学及び情報学、全分野平均）の出身国別割合（99 年、Rapport sur les Etudes Doctorales, Ministère de l'Education Nationale Ministère de la Recherche から作成）

また、数学及び情報学における外国人の博士取得者では東欧出身者が多いほか、アルジェリア、モロッコなどの北サハラの出身者割合が極めて高い。

このようにフランスでは日本と比べて数学博士取得者数が非常に多い。彼らが進むキャリアについてもデータが整備されている（図表3-32）。



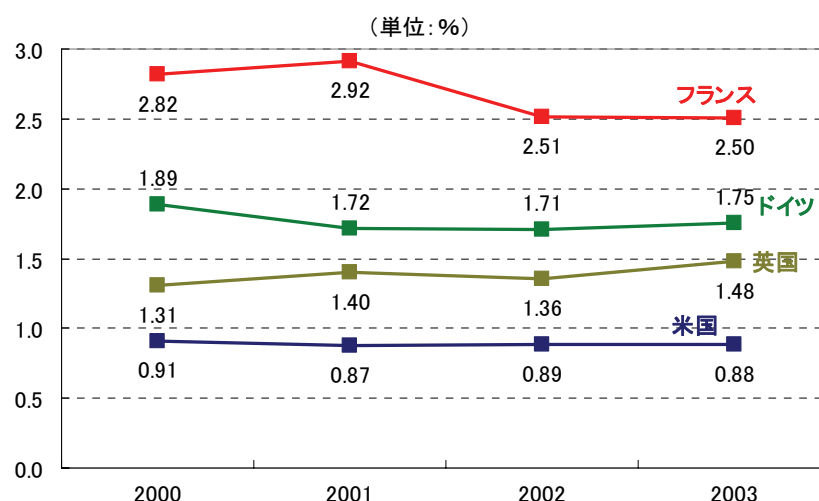
図表 3-32 フランスの博士取得者（数学、全分野平均）の進路別割合（98-99 年平均、Rapport sur les Etudes Doctorales, Ministère de l'Education Nationale Ministère de la Recherche から作成）

図表3-32から、フランスの数学博士取得者のうち、教育研究補助員や高等教育に就く者の割合が高い。帰国した留学生の足跡が不明であることから単純な比較は難しいが、就職

を教育研究補助員、高等教育、研究機関、企業、行政機関、中等教育、国家サービスに就く者とする、数学博士取得者の就職率は60.1%、博士取得者の全分野平均の就職率は54.1%となり、数学博士取得者の就職率は全分野平均よりも高い。また、この数学博士取得者の就職率は米国に匹敵する。また、帰国留学生の割合が約9%であることから、フランスで数学博士を取得した外国人学生の7～8割は引き続き同国内に滞在すると思われる。

なお、フランスにおける数学専攻学部生の資料は見つからなかったが、OECDが発行している教育資料において、数学又は統計学専攻卒業生の割合が判明している（図表3-33）。

この資料にはフランス以外に米国、ドイツ、英国などの主要国のデータも含まれているが、日本の値はない。そのため、図表 3-33 から得られた情報をそのまま日本の数学専攻卒業生数の推移（図表 3-7）と比較することはできない。というのは、図表 3-33 の「統計学」博士号の問題、「高等教育卒業生」の定義（学部生のみか、大学院生（修士課程・博士課程）を含むのか等）の問題、及びそのデータの出所の違いの問題などが存在する可能性があるからである。しかし、図表 3-33 の米国の数値は図表 3-20 の教育統計資料と類似しており、フランスの数学専攻卒業生数の全体に占める割合が日本よりはるかに大きい可能性は高い。



図表 3-33 高等教育卒業者のうち数学又は統計学専攻者の割合の推移（OECD、Education at a Glance から作成）

3-4 ドイツ

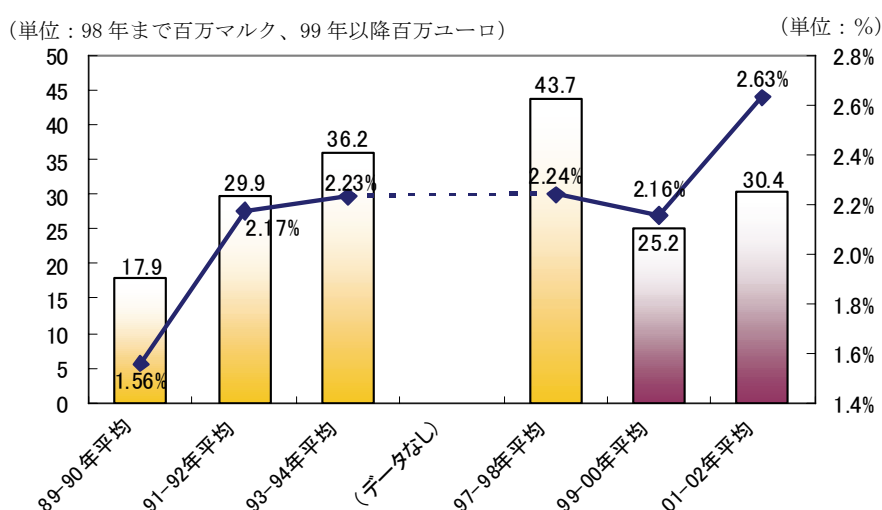
①政策と全体状況

ドイツでは日本の場合と同様、政府の数学研究費は集計されていない。一方、ドイツ学術振興会（略称DFG。基礎研究に対するグラント交付等の業務を実施。）のグラントにおける数学研究費及びグラント全体に対する割合は増加している（図表3-34）。通貨単位の不連続時期を除いた99年以降の数学研究費の平均年間増加率は11%に及ぶ。

また、同国ではこれとは別途、„Mathematik für Innovationen in Industrie- und

Dienstleistungen”（「産業及びサービスのイノベーションのための数学」プログラム（参考資料3-3参照）（04-07年、9.7百万ユーロ、連邦教育研究省）など数学研究を対象とした国家プログラムが実施されている。このプログラムは93年から同国で実施されている数学研究プログラムの第4期に相当しており、ドイツでの数学研究国家プログラムの歴史は長いことが分かる。

また、ドイツの大学における数学研究に関する経費についてもドイツ学術振興会からデータが提供されている（図表3-35）。これらの図表から、ドイツの大学では数学研究経費の8割を通常資金に頼っており、この割合は他分野と比較しても高い。また、大学経費において全分野に占める数学研究の割合（1.4％）は、学術振興会のグラントにおけるその割合（2.2％。図表3-34）より低い。これは図表3-35における「生物学、医学」の管理収入の多くは大学病院の収入であるためと考えられる。この管理収入を除いて考えると、ドイツ学術振興会のグラントにおける数学研究の全分野に占める割合は、大学経費におけるその割合とほぼ同じであることが分かる。



図表3-34 ドイツ学術振興会における数学研究費の額及び割合の推移（Bundesbericht Forschung 2004, 2000, 1996, 1993及びFaktenbericht Forschung 2002（共に連邦教育研究省）から作成）

研究領域 (単位： 百万ユーロ)	全体	管理収入		第三者資金収入		通常資金	
	金額	金額	割合 (%)	金額	割合 (%)	金額	割合 (%)
人文・社会科学	2,323.7	21.7	0.9	298.0	12.8	2,004.0	86.2
生物学、医学	12,338.6	8,127.2	65.9	882.0	7.1	3,329.4	27.0
自然科学	1,755.1	11.4	0.6	469.6	26.8	1,274.2	72.6
うち数学	303.1	1.6	0.5	55.1	18.2	246.6	81.3

技術科学	1,933.6	59.4	3.1	663.5	34.3	1,210.7	62.6
全体	21,456.0	8,358.4	39.0	2,575.6	12.0	10,522.1	49.0
数学/全体	1.4%	0.0%		2.1%		2.3%	

※ 主要 80 大学が対象。「生物学、医学」の管理収入の多くは大学病院の収入。

図表3-35 ドイツにおける研究領域毎の大学経費（99-00年平均、Funding Ranking 2003、ドイツ学術振興会から作成）

更にドイツ学術振興会では、同会から大学への資金配分額について大学毎の金額を公表している（図表3-36）。

数学順位	大学名	数学① (Mio. €)	全分野② (Mio. €)	全分野 順位	数学/全分野 (①/②)
1	ハイデルベルグ大学	2.6	31.4	6	8.2%
2	ボン大学	2.2	27.2	12	8.2%
3	ベルリン工科大学	2.2	22.5	20	9.8%
4	ビーレフェルド大学	1.8	14.1	31	13.0%
5	ミュンスター大学	1.6	23.0	19	7.0%
6	ベルリン・フンボルト大学	1.2	30.0	9	4.1%
7	ミュンヘン工科大学	1.2	38.8	3	3.0%
8	シュツットガルト大学	1.0	31.1	7	3.1%
9	ベルリン自由大学	0.8	25.5	13	3.3%
10	アーヘン工科大学	0.8	39.7	1	2.1%
	全体	28.2	1,031.8		2.7%

図表3-36 ドイツ学術振興会からの数学研究資金配分額上位 10 大学（99-01年平均、Funding Ranking 2003、ドイツ学術振興会から作成）

図表3-36から、数学研究の資金配分額の機関別分布は全分野の分布とはあまり関係がないと言える。例えば、全分野合計額が最も多いアーヘン工科大学は数学配分額では10位であり、逆に数学の資金交付額が4位のビーレフェルド大学は全分野では31位である。これらのことから、ドイツの大学における数学研究の質は大学規模とはあまり関係ないと思われる。なお、数学研究資金配分額上位10校のうち旧東ドイツの大学はベルリン・フンボルト大学1校のみである。

②研究組織及び研究者数

ドイツの数学研究組織の状況に関連して、これまでの国と同様に、政府、大学、公的研究機関、非営利団体（NPO）が設置し、“Institut”又は“Zentrum”（英語のCenterの意味）等

の複数の研究者の存在を示唆する組織をWEB検索で調査した。しかし、ドイツ語のInstitutが学科の意味も有することが事態の把握を困難にする。つまり、その組織が研究所などの独立した数学研究組織を指すのか、大学の数学科を指すのかはHPの内容だけでは判断できない。そのため、残念ながらドイツの数学研究組織の数は推測不可能である。

一方、近年、ドイツの公的機関は複数の数学研究センターを設立している。その具体例として次の2つが挙げられる。

- ・01年に技術的・組織的・経済的問題に解を与える技術としての数学に焦点を合わせ、フラウンホーファー研究機構が„Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik”(ITWM, フラウンホーファー産業数学研究所)を設立したこと
- ・02年にドイツ学術振興会がベルリン工科大学に„Mathematik für Schlüsseltechnologien“(キーテクノロジーのための数学)研究センター(MATHEON)を設立したこと(参考 2-4 参照)。また、本研究センターには連邦教育研究省から年間5百万ユーロの資金が供与されていること

ドイツの数学研究者数については、大学職員に限られているがドイツ学術振興会が統計を取っている(図表3-37)。この表からドイツの大学における数学教授は約1,200人、助手などを含めた研究者全員で約4,000人であることから、大学における数学研究者数はおよそ1,000~4,000人程度であると推測される。また、それぞれの全体に対する割合は5.8%、3.0%となっており、これは他国の学生数割合と比較するとこの割合は高いと言える推測される。

研究領域	教授(人)	全研究者(人)	教授の割合(%)
数学	1,225	4,001	30.6
全体	21,288	134,146	15.9
数学/全体(%)	5.8	3.0	

※ 主要79大学が対象。(研究者数データのないウィッテン-ヘルデッケ大学を除く)

図表3-37 ドイツ学術振興会の研究領域における教授及び全研究者数(00年、Funding Ranking 2003、ドイツ学術振興会から作成)

加えて、参考までに数学研究関連学協会の会員数を示す(図表3-38)。図表3-5の日本の場合と比較して、図表3-38、図表3-37などからドイツの数学研究者数は日本とほぼ同数程度と思われる。

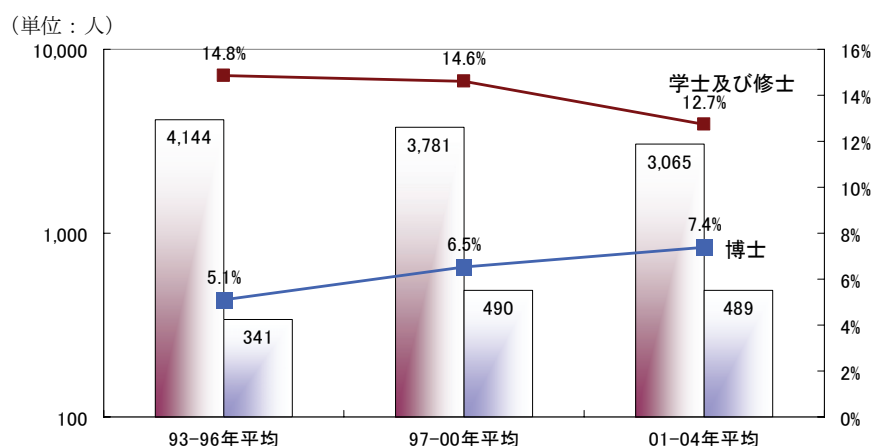
学協会名	会員数
ドイツ数学会(Deutsche Mathematiker-Vereinigung)	3,500
ドイツ応用数学機械学会(Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik)	2,500

図表3-38 ドイツにおける数学研究関連学協会の例（順不同、WEB検索により作成）

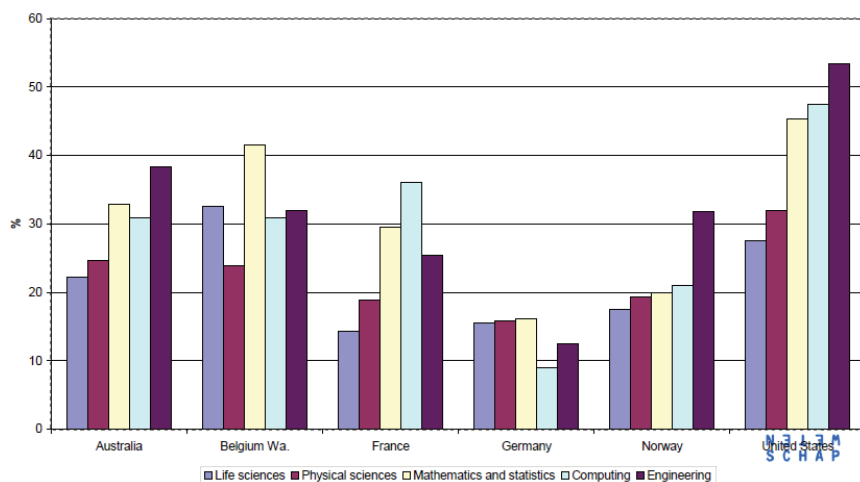
③学生数

ドイツ技術者協会 (Verein Deutscher Ingenieure : VDI) がドイツの数学関係学生数を集計している (図表3-39)。図表3-39から、ドイツにおける数学専攻学部生の数は減少している一方、数学博士取得者数は増加している。割合についてもほぼ同じことが当てはまる。ここで気を付けなければならないのは、人文社会科学分野を含む全分野の卒業生、修了生数は集計されておらず、ここの割合は自然科学分野全体に占める割合となっていることである。いずれにしても、このように学部生 (及び修士修了生) と博士の状況が相反する状況はこれまでの国には見られない現象である。このデータを各国の状況と比較すると、ドイツの数学関係学部卒業生数は、日本のその約6割程度 (ドイツの学生数は修士を含むため実際はそれ以下) しかない一方、日本の2.5倍以上の人数の数学博士取得者が生み出されていることになる (図表3-7)。米国と比較しても、数学学部生数は米国の4分の1以下である一方、数学博士取得者数は半分に匹敵する (図表3-20)。また、この数学博士取得者数の約15%が外国人学生であると推測される (図表3-40)。

このように、これまで調査してきた各国と比較して、とりわけ数学専攻博士の状況が突出しているドイツであるが、彼らが社会のどのような場で活躍しているのかは不明である。



図表3-39 ドイツにおける数学関係学部卒業生及び修士修了生 (茶)、並びに博士修了生 (青) の数及び自然科学分野全体に対する割合の推移 (Statistik PORTAL VDIから作成)



図表 3-40 主要国における科学技術分野の博士課程の外国人割合（“Declining Student Enrolment in Science and Technology”の OECD 資料から抜粋）

3-5 日本、米国、フランス及びドイツにおける数学研究に関する状況比較

3-1から3-4では、日本、米国、フランス及びドイツにおける数学研究を取り巻く状況などを概観してきた。本節では、以上の調査を踏まえて更なる比較分析を行う。しかし、3-1から3-4の調査から明らかなように数学研究に関して整備された統計や資料は少なく、厳密に国際的相互比較可能な資料は皆無に近いと言える。そのため、可能な限り客観的かつ公平に分析を行うことを心がけたものの、各国間の数学研究の状況分析に推測を含むことは避けられなかった。本節を御覧になる方は以上御留意願いたい。

まず、各国の状況理解を助けるために、3-1から3-4の調査結果の概要を表にまとめる（図表3-41）。この図表とこれまでの調査結果を基に、各国の状況を分析する。

① 日本

日本における数学研究費について、科学研究費補助金の助成額及び一部の大学校費の状況、研究教育拠点形成を目的とする「21世紀COEプログラム」などから、政府の数学研究費の総額は数十億円程度と推測される。これは米国などと比較して低いと考えられる。

科学技術基本計画などで数学研究振興を明示的に示す文言はなく、数学研究振興に焦点を合わせた政府の施策は見当たらなかったが、今年3月に策定された分野別推進戦略において数学研究の振興に関する記述がある。また、数学研究者と行政との関わりは弱い。

一方、日本は大学等で3,000～4,000人（フランス、ドイツよりやや少ない規模）の数学研究者を擁していると推測される。日本国内で確認された数学研究所等は情報・システム研究機構統計数理研究所や京都大学数理解析研究所、早稲田大学数学・応用数学研究所、大阪市立大学数学研究所など8つである。

数学博士取得者（約180人、全分野の1.2%）やその就職率（45%）などから、日本の

数学博士取得者の置かれる環境は他分野より厳しいと推測される。

② 米国

米国における数学研究費は調査対象国の中で最も大きく（約440億円）、増加しており、NSF、DOEなど複数の連邦政府省庁が数学研究予算を有し、数学研究振興を専任する課がある。

数学研究を取り巻く状況や分野融合研究の必要性などについて80年代初頭から検討が始められ、98年には下記内容の世界的に有名なオドム・レポート（全米研究会議）がとりまとめられた。

- ・米国の数学状況は旧ソ連などの人材に依存し、学術数学と大学外の数学研究や他分野との連結は不十分
- ・大学構造と数学科の狭い視野は、数学と他分野との分野融合研究に反している
- ・極度に複雑な未来の科学的問題には、数学モデル、シミュレーション、視覚化等の導入が必要
- ・資金配分機関による分野融合活動の認識、資金援助が必要。分野融合の遂行には長い時間が必要

それ以降、NSFの数理科学研究予算は急速に増加（97-06年平均で年間増加率10%）し、インフラ（基盤経費）や研究所経費、融合分野の研究費などが増加している。

また、現在でもDOEがマルチスケール数学に関する国家プロジェクト（05年度から、約24億円）を実施するなど、数学研究の振興に対する同国政府の関心は高い。

数学研究者数は産業界も含めて1万人から数万人と推測される一方、同国で確認された数学研究組織数（26）はフランス（31）より少ない。これは産業界で数学研究者が多くの業種に広がっているように、同国の数学研究者も他分野の研究所などに広がっているためではないかと推測。

数学博士取得者の就職率は56%。全分野平均（63%）との差は主に教育機関で働く割合の差と考えられる。

更に、同国特有の事情として、数学又は統計学博士取得者（約980人、全分野の2.2%）に対する外国人学生の寄与が大きい（約5割）。彼らの8～9割は博士号取得後も同国内に滞在しており、同国の数学研究力の大きな源泉となっていると思われる。

③ フランス

政府の数学研究費は約190億円である。同国は全分野に占める数学研究の割合（研究費は1.6%、学生数は2.5%）が極めて高いことが特徴である。

同国では31の数学研究所等が確認され、学術界に4,000人、産業界に2,000人の数学研究者が活躍。

数学博士取得者は減少傾向だが、その数は多い（約350人、全分野の3.3%）。米国ほど

ではないが、数学博士取得者に対する外国人学生の割合は高く（約3割）、彼らの7～8割は博士取得後もフランスに滞在すると考えられる。更に、数学博士取得者の就職率は60%と日本（45%）より高い。

以上から、同国では数学研究の意義が広く認められ、社会的地位が高いと推測される。

④ ドイツ

政府の数学研究費の全貌は不明だが、ドイツ学術振興会のグラントの数学研究費は約36億円であり、全分野に占める割合は2.6%である。

同国では93年から数学研究に関する国家プログラムが実施されており、現在は第4期の「産業及びサービスのイノベーションのための数学」プログラム（約13億円、連邦教育研究省）を実施中である。

同国では近年、分野横断や大学と企業との連結強化を目的として、フラウンホーファー産業数学研究所（01年）、ベルリン工科大学「キーテクノロジーのための数学」研究センター（02年、連邦教育研究省から年間約6.5億円の資金供与）を新設した。

同国の大学における数学研究者数は約4,000人。数学博士取得者数は約490人で増加中であり、このうち外国人学生は15%程度である。数学博士取得者数の多さから、数学研究者の社会的な活躍の受け皿が充実している可能性がある。

以上から、同国では歴史的に数学研究と産業界との繋がりが強く、現在でもその関係強化に積極的に取り組んでいると思われる。

	日本	米国	フランス	ドイツ
【数学研究に関する政策状況】				
数学研究に対する 政府研究開発投資	数学研究に対する投資額は未集計。 科研費(萌芽、若手、基盤及び奨励 研究)における数学研究費は19億円 (全体の1.9%、05年)。額は増加して いるが割合は減少傾向。	数学研究費は369百万ドル(全体の 0.5%、97-02年平均)。額及び割合は増加 傾向。NSF(4割)、DOE(3割)を始めとし た多くの省庁で実施。	数学研究費は146百万ユーロ(全体の 1.6%、04年)	数学研究に対する投資額は未集計。ドイ ツ学術振興会のグラントにおける数学研 究費は30.4百万ユーロ(全体の2.6%、 01-02年平均)。額及び割合は増加傾 向。
数学研究振興に関 する報告書等、国家プ ロジェクト、数学研究 振興を専任する行政 組織	分野別推進戦略(06年3月、総合科 学技術会議)の情報通信分野に「数 学研究者の育成強化は、情報通信 技術や他の科学技術の進展に必須 の政策」旨の記述	オドム・レポート(88年、全米研究会議)、 「国家イノベーション生態系の維持」(04 年、大統領科学技術顧問委員会)など報 告書多数。 マルチスケール数学プログラム(05-07年 度、2,000万ドル、DOE) 数理科学課(NSF)、数理情報計算機科学 課(DOE)など	-	「産業及びサービスのイノベーションのた めの数学」プログラム(04-07年、9.7百万 ユーロ、連邦教育研究省)。数学研究の 国家プログラムは93年から実施されてお り、本プログラムは第4期に相当。
【数学研究組織及び研究者数】				
「研究所」「研究セン ター」など専ら数学研 究を行う組織の数 (WEB検索による)	8(情報・システム研究機構統計数理 研究所、京都大学数理解析研究所、 早稲田大学数学・応用数学研究所、 大阪市立大学数学研究所など)	26(スタンフォード大学数学研究センタ ー、同大学計算・数理工学研究所、カリフ オルニア大学純粋・応用数学研究所、ミ ネソタ大学数学・数理応用研究所、同大 学ミネソタ産業数学センターなど)	31(パリ第1大学数学、統計及び経済 数学研究センター、パリ第6及び第7大 学 Chevaleret 数学・情報研究所、同大 学 Jussieu 数学研究所、パリ第9大学 意思決定数学研究センターなど)	不明(マックス・プランク数学研究所、ワイ ヤーシュトラス応用解析・確率研究所、フ ラウンホーファー産業数学研究所(01年 設立)、ベルリン工科大学「キーテクノロジー のための数学」研究センター(02年設 立)など)

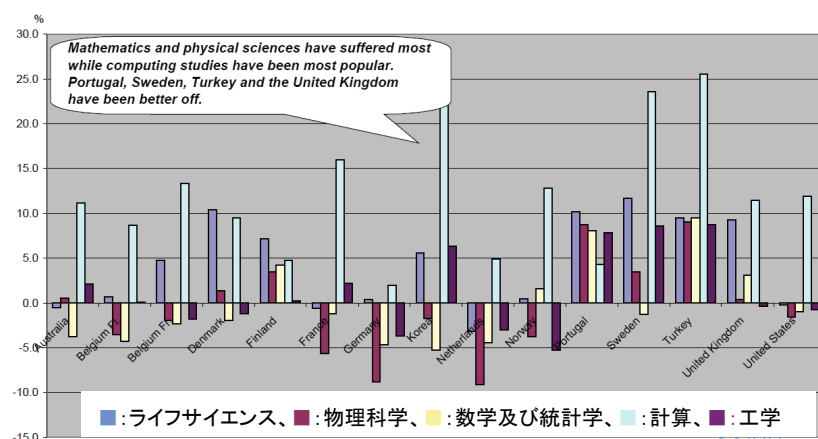
数学研究者数	登録数学研究者数 1,930 人 (全体の約 1.2% に相当。研究開発支援総合データベース(ReaD)から) 及び (社) 日本数学会の会員数から、大学の数学研究者数は 3,000 ～ 4,000 人と推測	数学研究者等 101,507 名 (内訳 科学的経営調査分析者: 55,078 名、統計学者: 18,485 名、保険計理人: 15,323 名、数学者: 2,488 名、数学技術者: 1,788 名、その他全ての数理科学職業: 8,345 名、03-04 年平均)。総数は増加傾向。	学術部門で働いている数学研究者: 約 4,000 名、産業界で働いている数学研究者: 約 2,000 名 (数学研究者のうち約 3,000 名がフランス数学会又はフランス応用産業数学会に所属)	大学の数学教授は約 1,200 名 (全体の 5.8%)。助手などを含めた数学研究者は約 4,000 名 (全体の 3.0%)。
	数学研究学会の規模	(社) 日本数学会: 約 5,000 名、日本数学会: 906 名、日本応用数理学会: 約 1,800 名、日本統計学会: 1,546 名	フランス数学会: 1,900 名、フランス応用産業数学会: 不明、フランス統計学会: 1,000 名	ドイツ数学会: 3,500 名、ドイツ応用数学機械学会: 2,500 名、ドイツ統計学会: 800 名
【数学研究学生数及び学生の進路】				
数学専攻卒業生数	数学学部生: 4,895 名 (0.9%)、同修士: 994 名 (1.5%)、同博士: 177 名 (1.2%) (01-05 年平均、括弧内は全体に対する割合)。学部生数は横ばい、修士及び博士数は増加傾向。学部生の全分野に対する割合は減少傾向。	数学又は統計学学部生: 11,871 名 (0.9%)、同修士: 3,395 名 (0.7%)、同博士: 976 名 (2.2%) (01-03 年平均、括弧内は全体に対する割合)。いずれの人数も横ばい又は減少傾向で、全分野に対する割合は減少傾向。	数学専攻博士: 346 名 (98-99 年平均)。数は横ばい、割合は減少傾向。高等教育卒業者のうち数学又は統計学専攻者の割合は 2.5% (米国: 0.9%、ドイツ: 1.8%、03 年)	数学学部生又は修士: 3,065 名、同博士: 489 名 (01-04 年平均)。学部生又は修士数は減少傾向だが、博士数は増加傾向。
	数学専攻博士課程修了者の進路	数学専攻博士の就職率は 56% (うち産業又はビジネス 18%)。全分野では 63% (同 16%) (01-03 年平均)	数学専攻博士の就職率は 60%。全分野では 54% (98-99 年平均)。	-

図表 3-41 日本、米国、フランス及びドイツにおける数学研究に関する状況比較 (－は不明を表す)

【数学専攻学生数減少の背後にあるもの】

数学研究を取り巻く状況に関して、日本、米国、フランス、ドイツにほぼ共通する傾向がある。それは、博士を除いて数学専攻学生数が増加している国はないことである。この背景には一体何があるのか。

2005年11月にOECD/GSFが主催した会議「科学技術学生数の減少」の資料に興味深いデータが示されている。図表3-jから、科学技術分野の中でも数学及び統計学専攻卒業生数の減少は顕著であり、一部の国を除き、先進国にほぼ共通した傾向といえることが分かる。一方、計算（Computing）専攻学生数は図中の全ての国で増加傾向にあり、どうやら数学や統計学の人気を奪う形になっているようだ。なお、参考までに日本の大学理学部数学科における卒業生数（学士、修士及び博士の合計）の年平均増加率（95-03年平均）は0.1%（学校基本調査報告書）であり、ほぼ横ばいである。計算科学については日本ではデータが整備されていないようである。

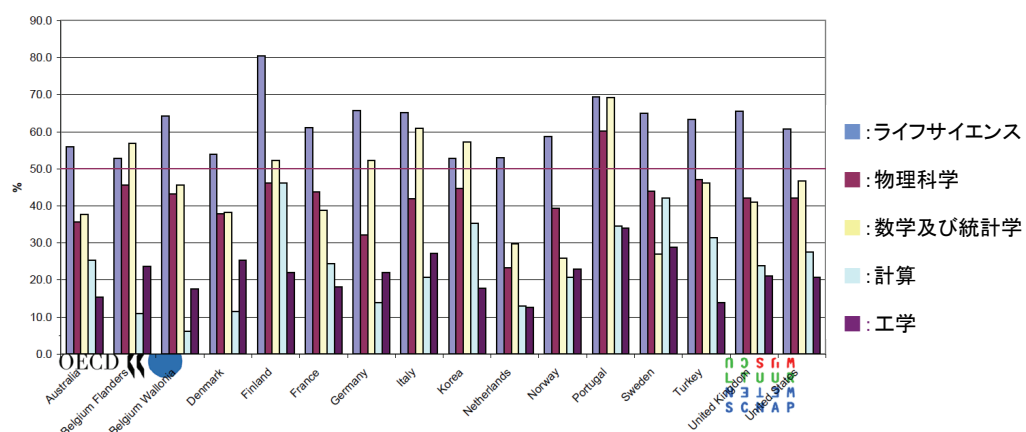


図表3-j 大学卒業生数の年平均増加率（95-03年平均、“Declining Student Enrolment in Science and Technology”のOECD資料から抜粋）

図表3-jではあたかも計算（Computing）が数学や統計学の株を奪うような状況となっているが、卒業生数の女性比率を見ると、逆にほとんどの国で数学や統計学は計算（Computing）を圧倒していることが分かる（図表3-k）。数学専攻卒業生における女性比率の低い国（ノルウェーやスウェーデン、オランダなど）は、一般的な印象としてはむしろ女性の活躍が顕著な国であるところが面白い。

なお、日本の大学理学部数学科における卒業生数（学士、修士及び博士の合計）に占める女性比率（05年）は19.7%に過ぎない（学校基本調査報告書）。統計学の取扱いから厳密な比較は不可能だが、この図の国々と比較する限り、日本の数学研究における女性比率は極めて低いといえる。

以上から、日本では数学専攻学生における女性の割合増加という視点も必要ではないか。



図表 3-k 大学卒業生数における女性の割合（03 年又は利用可能な最新年、“Declining Student Enrolment in Science and Technology” の OECD 資料から抜粋）

4. 日本の数学研究ニーズについてのアンケート調査

本章では、数学以外の各分野に所属する我が国の研究者に対して実施した「数学研究の必要性」のアンケート調査結果を示す。

4-1 背景と目的

数学は、既に別章でも述べて来たように、例えばひとつの定理が物理現象の解明に役立てば、経済現象にも適用できるという具合に、様々な科学分野の基礎を支えている。翻ってみれば、科学技術の構造変革をもたらしたコンピュータの開発や、数理ファイナンス、複雑系等の学問分野の創造は、数学研究から端を発しており、数学の成果は、社会を根底から変革する可能性を秘めている（参考1：数学が各分野に影響を与えた例）。

欧米各国は、このような数学の特徴を踏まえて、国家として数学研究や他分野における数学の活用を推進している。

現在、日本では欧米のような数学研究の推進のための科学技術政策は実施されていないが、日本の多くの研究分野において数学の重要性や必要性が示されるのであれば、政策上で取り上げていく必要があると考えられる。

このような観点から、2005年5月に科学技術政策研究所は、日本数学会と共催で「数学の将来シナリオを考える ―数学を基点とする分野横断型研究の展開に向けて―」のワークショップを開催し、産学官の様々な立場の参加者が数学研究に対する支援の意義や必要性についての意見交換を行った。その結果、数学研究の重要性については産学官で認識が一致し、多くの分野から数学研究の具体的な必要性（ニーズ）が示された。

具体的には、産業界からの出席者より、「半導体産業はバラツキとの戦いの産業であり、従来は経験や勘でしのいで来たが、より良いものをつくるために今後はシミュレーションやモデリングなどの技術が必要となる。欧米ではエンジニアと数学者が共同で回路設計などを行っているが、日本ではそうではない。非常に困っているので日本の数学者にご協力をお願いしたい」というご意見があった。また、金融、暗号技術、バイオインフォマティクスにおいて、産業人及び生命科学分野の研究者から、数学者の各分野への参画の必要性が述べられた（参考：科学技術動向誌 2005年6月号『数学の将来シナリオを考える』開催報告）。これらの数学ニーズが、一部においてであるのか、それとも日本の各分野に普遍的であるのかは、ワークショップでは明らかにならなかった。

従って、わが国の各研究分野において数学は必要であるのか、もし必要であるならばどのような数学研究が必要とされているのか、数学を取り入れるためにはどのような方策が必要であり、現在どのような問題点があるのかなど、を検証するために、各研究分野の研究者に対して「数学の必要性（ニーズ）」のアンケート調査を実施した。

参考 1 数学が各分野に影響を与えた例

○ラドン変換（1900 年代前半発表）＜積分変換の一種＞

ラドン変換の応用により、1973 年に医療用断層診断装置である CT スキャン装置が開発された。開発者は 1979 年にノーベル生理学・医学賞を受賞した。現在の医療現場で、CT スキャンは欠かせないものとなっている。

○ファジー集合論（1965 年発表）＜あいまいさを扱う理論＞

ファジー制御は厳密な推論が保証できないあいまいさの残る状況に対する制御で、従来の安定制御、ニューラルネットなどを応用する適応制御と並んで応用が早くから期待されていた。仙台地下鉄は 1987 年より知的（予見ファジー）制御によって自動運転されている。東京都大江戸線などにも利用されている。さらに、従来のマイコン制御とは異なるファジー制御を応用した洗濯機などの家電製品が 1990 年頃から市販された。ファジー制御家電は現在の家電の標準になっている。

○ブラックーショールズ方程式（1973 年発表）＜もとは幾何ブラウン運動という確率過程を記述する確率微分方程式だが、平均値の部分だけ見れば熱方程式である偏微分方程式の境界値問題と見ることができる＞

オプションの理論価格の計算モデルである。本モデルは数学的に完成され、開発者は 1997 年にノーベル経済学賞を受賞した。様々なオプション取引引き上で利用された。しかし、このモデルはすでに破綻しているといわれている。現在、金融業界では、非線形微分方程式のコンピュータによる数値計算の結果が興味の対象になっている。

○ウェーブレット解析（1980 年代初頭発表）＜時間周波数解析＞

石油探査技師モルレーによって地下資源の探索に用いるために開発され、その後、数学者が研究に参入した。現在では、画像処理におけるデータ圧縮（携帯電話の画像）などに応用されている。また、医療から経済までの広い分野でウェーブレット解析を応用した研究や技術開発が進められている。

○RSA 暗号（1977 年発表）＜公開鍵暗号アルゴリズム＞

ひとつは他人に広く公開するために「公開鍵」、もう片方は本人のみがわかる「秘密鍵」という対になる 2 つの鍵を使ってデータの暗号化・復号化をおこなう公開鍵暗号方式である。RSA 暗号は、大きい数の素因数分解の困難さを暗号化手法としている。他の公開鍵暗号として、楕円曲線上の離散対数問題を利用した楕円曲線暗号などがある。RSA 暗号は、現在、インターネットセキュリティの標準になっている。

上記以外に、コンピュータ（電子計算機）の発明や計算理論、NP 完全問題（巡回セールスマン問題）、ゲーム理論、群理論、天体の 3 体問題、カオス理論などの多くの数学理論が、経済学、社会学、生命科学、農学、物理、化学、天文学などの広い分野の発展に影響を与えた。

4-2 調査の概要

4-2-1 調査対象者

科学技術動向研究センターの専門調査員 2,017 名に依頼し、402 名から回答を得た（回収率 20%）。

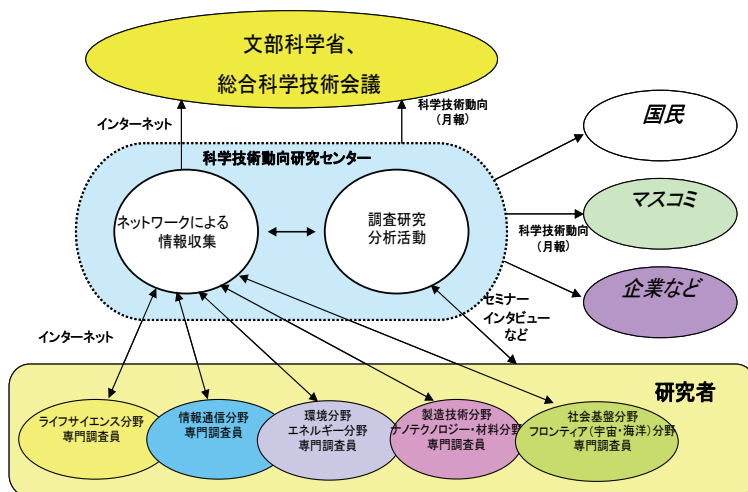
専門調査員については下記（参考：科学技術専門家ネットワークについて）を参照のこと。

（参考：科学技術専門家ネットワークについて）

科学技術動向研究センターは、重点 8 分野の研究開発等の動向分析を的確に行うことを目指している。そこで、第一線の研究現場にいる産学官の研究者に参加を仰ぎ、その方々を情報提供者、すなわち「専門調査員」として、最新の情報を提供して頂く「科学技術専門家ネットワーク・システム」を構築している。

国内の専門家約 2,000 名の方に専門調査員を依頼しており、このシステムの参加者は、いつでも Web 上に書き込みができる。その情報は専門調査員の方々の専門分野、興味のある分野における国内外の動向についての解説、各位のご意見に基づく今後の方向性等、専門調査員の方々の主観に基づく幅広い見解である。こうして専門調査員から提供された情報を、毎週、分野別に整理・分析を行い、「週報」として取りまとめている。これは、専門調査員、総合科学技術会議、文部科学省関係部局のスタッフがネットワーク上で閲覧することができる。

さらにこれらの情報に、センター独自の分析を加え、『科学技術動向月報』誌の「トピックス」として掲載し、同時に Web サイトにおいて一般に公表している。



4-2-2 調査項目

調査は以下の項目について行った。

- (1) 回答者の研究テーマと数学との関わり

(2) 回答者の研究分野と数学との関わり

(3) 数学に関する意見（自由記述）

調査に用いた調査票は、参考資料 2 として巻末に収載している。

4-2-3 調査方法

科学技術動向研究センターの専門家ネットワークアンケート機能を利用して実施した。具体的には、専門家ネットワーク専用 Web にアンケート回答用のページを用意し、そこに直接記入を求める形で実施した（参考資料 4-1, 参考資料 4-2）。

4-2-4 調査期間

2005 年 10 月 5 日から 2005 年 10 月 26 日までアンケートを実施した。

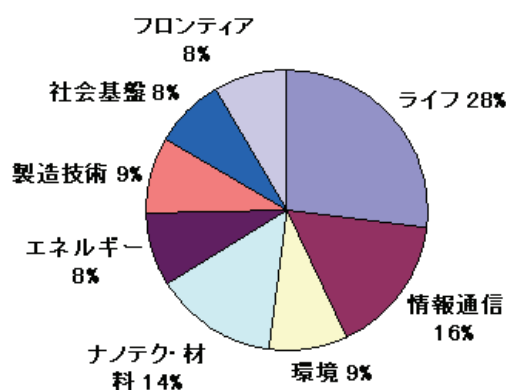
4-3 調査の結果

4-3-1 回答者の属性について

(1) 専門分野

回答者の研究が該当すると考える研究分野を 8 分野（ライフサイエンス分野、情報通信分野、環境分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野、製造技術分野、社会基盤分野、フロンティア分野）から 1 つ選択して回答して貰った。

その結果、ライフサイエンス分野が 28% (108 人) で一番多く、次いで情報通信分野が 16% (65 人)、ナノテクノロジー・材料分野が 14% (57 人) であった。また、環境分野 (36 人)、エネルギー分野 (34 人)、製造技術分野 (35 人)、社会基盤分野 (34 人)、フロンティア分野 (33 人) の回答者は、全体の 8~9% であった（図表 4-1）。この回答者の分野別の構成は、専門家ネットワークの構成とほぼ同じであり、大きな偏りは見られなかった。



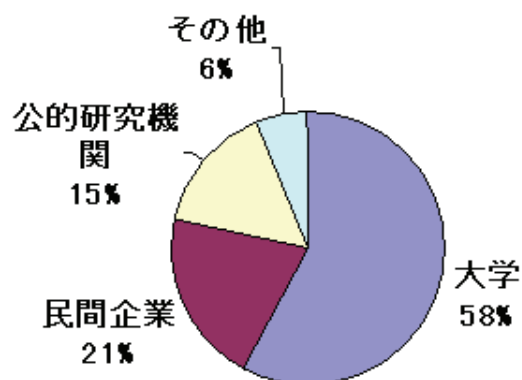
図表 4-1 回答者の専門分野

(参考) 専門家ネットワーク構成員の分野別割合

	(人)	(%)
ライフサイエンス	575	30
情報通信	433	21
環境	149	7
ナノテク・材料	238	12
エネルギー	121	8
製造技術	148	7
社会基盤	205	10
フロンティア	128	8
その他	20	1

(2) 回答者の所属について

回答者の所属は、大学が 58% (232 人)、民間企業が 21% (83 人)、公的研究機関が 15% (62 人)、その他 6% (25 人) であり、大学に所属している回答者が半数以上である (図表 4-2)。専門家ネットワーク構成員の属性の割合と比較すると、大学に所属している者の割合がやや低くなり、民間企業に所属している者の割合がやや高いことが示された。



図表 4-2 回答者の所属

(参考) 専門家ネットワーク構成員の属性

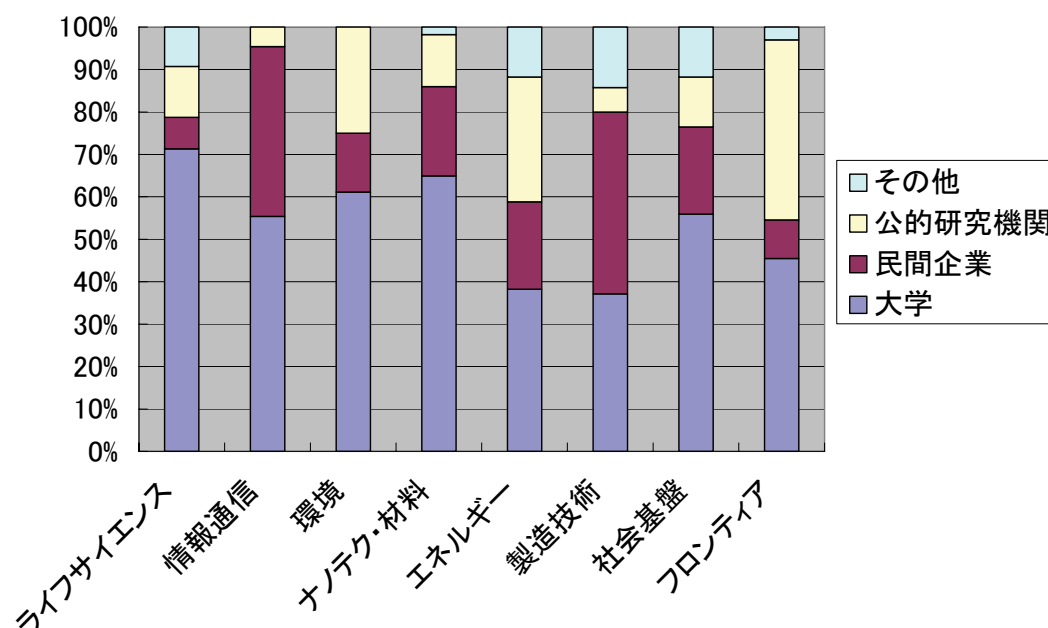
	(人)	(%)
大学	1209	80
民間企業	349	17
公的研究機関	279	14
その他	180	9

また、各研究分野における回答者の所属機関を図表 4-3 に示した。

ライフサイエンス分野の回答者は、70%が大学に属し、民間企業に属する者は 7%であり、大学に属する者の割合が高いことが示された。ナノテクノロジー・材料分野では、大学に属する者は 65%であり、大学に属する者の割合が高いが、民間企業に属する者は 21%であり、ライフサイエンス分野に比べると、民間企業に属する者の割合が高い。環境分野では、大学に属する者は 61%、公的研究機関に属する者は 25%、民間企業に属する者は 14%であり、大学に属する者の割合が高く、公的研究機関に属する割合もやや高い。社会基盤分野では、大学に属する者は 56%であり、民間企業に属する者は 21%である。

情報通信分野の回答者は、大学に属する者は 55%、民間企業に属する者は 40%であり、民間企業に属する者の割合が高い。製造技術分野は、大学に属する者は 37%であり、民間企業に属する者は 43%であり、情報通信分野よりも民間企業に属する者の割合は高い。

一方、エネルギー分野では、大学に属する者は 38%、公的研究機関に属する者が 29%、民間企業に属する者が 21%であり、公的研究機関に属する者の割合は高い。フロンティア分野は、大学に属する者は 45%であり、公的研究機関に属する者が 42%であり、公的研究機関に所属する者の割合はかなり高い。



	大学	民間企業	公的研究機関	その他	合計(人)
ライフサイエンス	77 (71%)	8 (7%)	13 (12%)	10 (9%)	108
情報通信	36 (55%)	26 (40%)	3 (5%)	0 (0%)	65
環境	22 (61%)	5 (14%)	9 (25%)	0 (0%)	36
ナノテク・材料	37 (65%)	12 (21%)	7 (12%)	1 (2%)	57

エネルギー	13 (38%)	7 (21%)	10 (29%)	4 (12%)	34
製造技術	13 (37%)	15 (43%)	2 (6%)	5 (14%)	35
社会基盤	19 (56%)	7 (21%)	4 (12%)	4 (12%)	34
フロンティア	15 (45%)	3 (9%)	14 (42%)	1 (3%)	33
合計(人)	232	83	62	25	402

図表 4-3 回答者の研究分野別の所属機関

4-3-2 アンケート結果

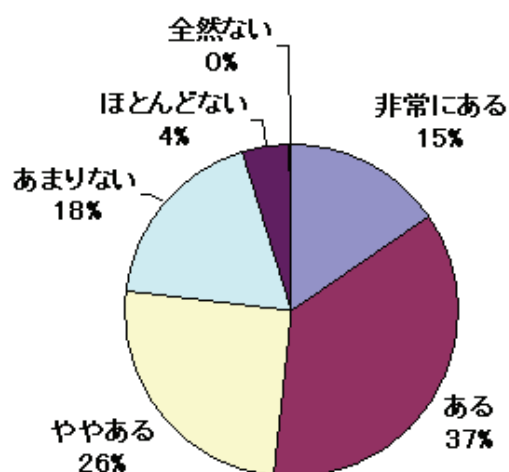
(1) 回答者と数学との関わり程度

① 回答者の研究テーマ及び研究分野と数学の関わり程度

回答者の数学に対するニーズと現在の状況を明らかにするために、回答者自身の研究テーマと数学との関わりについて質問した。

数学との関わりが「非常にある」または「ある」と答えたのは、回答者（401 人）の半数以上の 207 人(52%)であった。さらに、「ややある」と答えた回答者を加えると、全体の 8 割近くの回答者（307 人）が自身の研究テーマと数学とに関わりがあると回答した（図表 4-4）。

また、回答者の研究が該当する研究分野と数学との関わりについても質問をしたが、同様な回答が得られた。



	(人)	(%)
非常にある	62	15
ある	145	37
ややある	102	28
あまりない	73	18
ほとんどない	18	4
全然ない	1	0

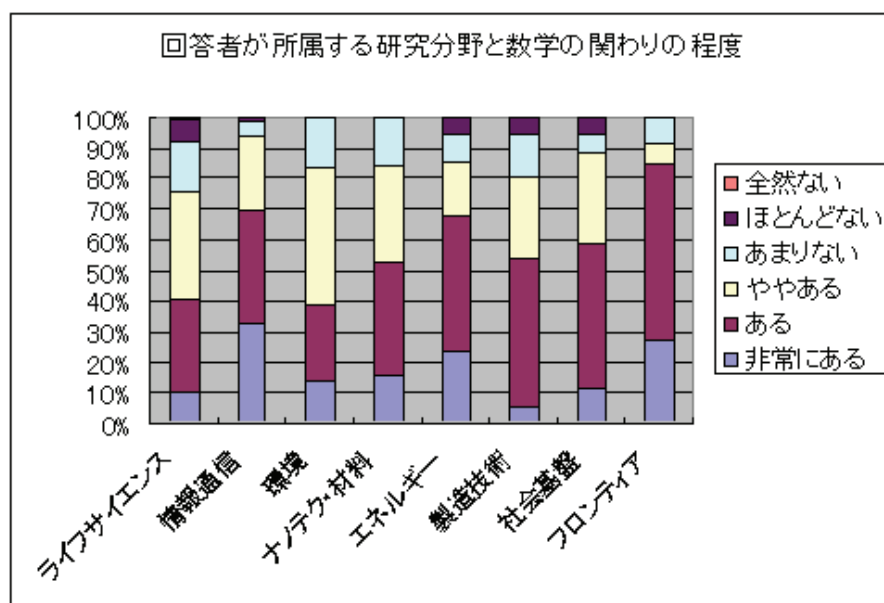
図表 4-4 回答者の研究テーマと数学との関わりの程度

② 回答者の研究分野と数学の関わりの程度（分野別）

研究分野ごとに数学との関わりに差があるのではないかと考え、②の結果（回答者が所属する研究分野と数学の関わりの程度）を研究分野ごとに分析して、図表 4-5 に示した。

数学との関わりが「非常にある」及び「ある」と回答した割合が8割以上であるのはフロンティア分野であり、8分野中では一番数学との関わりが高いことが示された。同様な回答が7割程度であるのは情報通信分野、エネルギー分野である。5割から6割であるのが、ナノテクノロジー・材料分野、製造技術分野、社会基盤分野であり、4割程度がライフサイエンス分野と環境分野であることが示された。

しかし、「非常にある」、「ある」、「ややある」と回答した割合を合計すると、8分野の全てにおいて8割前後から9割前後であり、8分野いずれも数学との関わりが高いことが示された。



	非常にある	ある	ややある	あまりない	ほとんどない	全然ない	合計 (人)
ライフサイエンス	11 (10%)	33 (31%)	38 (35%)	17 (16%)	8 (7%)	1 (1%)	108
情報通信	21 (32%)	24 (36%)	16 (25%)	3 (5%)	1 (2%)	0 (0%)	65
環境	5 (14%)	9 (25%)	16 (44%)	6 (17%)	0 (0%)	0 (0%)	36
ナノテク・材料	9 (16%)	21 (36%)	18 (32%)	9 (16%)	0 (0%)	0 (0%)	57
エネルギー	8 (24%)	15 (43%)	6 (18%)	3 (9%)	2 (6%)	0 (0%)	34
製造技術	2 (6%)	17 (48%)	9 (26%)	5 (14%)	2 (6%)	0 (0%)	35
社会基盤	4 (12%)	16 (47%)	10 (29%)	2 (6%)	2 (6%)	0 (0%)	34
フロンティア	9 (27%)	19 (58%)	2 (6%)	3 (9%)	0 (0%)	0 (0%)	33
合計(人)	69	154	115	48	15	1	402

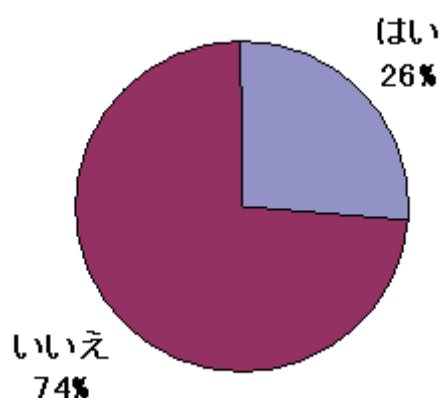
図表 4-5 回答者の研究分野と数学との関わり の程度（分野別）

（２）回答者の数学研究人材に対するニーズ

① 研究チーム内の「数学をバックグラウンドに持つ人」の有無

次に、回答者の研究に対する数学研究の人材のニーズを明らかにするために、研究チームにおいて、「数学をバックグラウンドに持つ人」の有無を質問した。ここでは、「数学をバックグラウンドに持つ人」とは、学部以上で数学専攻及びそれに類する高度な数学知識を有する人としている。

その結果、回答者の研究チームに「数学をバックグラウンドに持つ人」は「いない」と回答したのは、回答者（401 名）の内、74%（295 名）であることが示された（図表 4-6）。



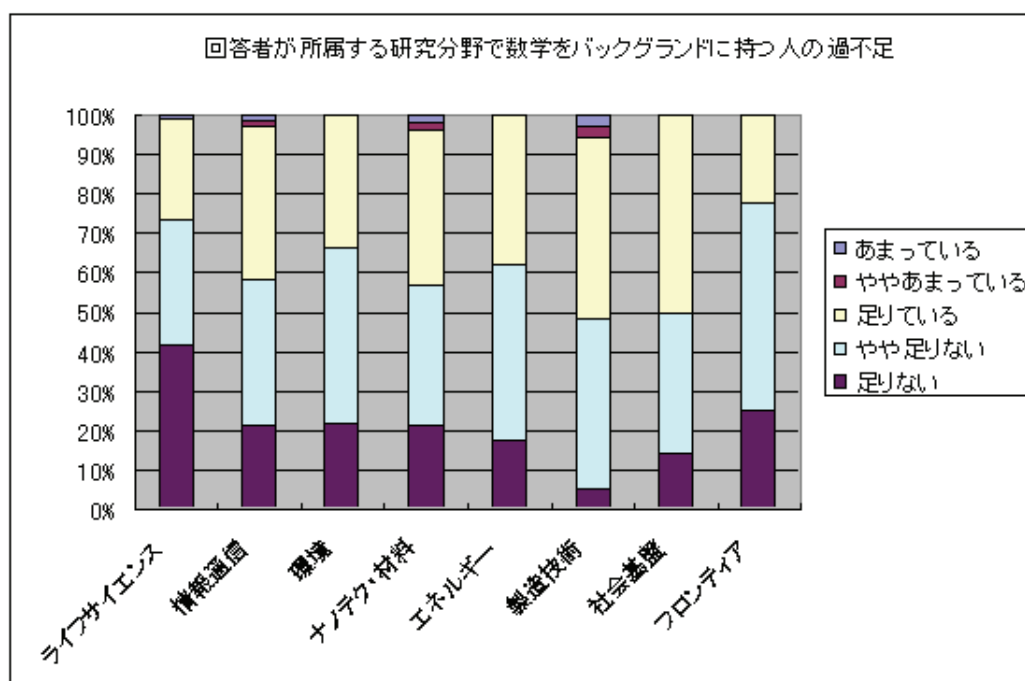
図表 4-6 回答者の研究チーム内に数学をバックグラウンドに持つ人がいるか

② 研究分野における「数学をバックグラウンドに持つ人」の充足感

次に、回答者が所属する研究分野における「数学をバックグラウンドに持つ人」の充足感

について尋ねた。その回答を研究分野ごとに分析して、図表 4-7 に示した。

「数学をバックグラウンドに持つ人」が「やや足りない」と「足りない」を合わせた回答が、各分野の全回答の 50%前後と中程度の「不足感」が示されたのは、製造技術分野と社会基盤分野である。60%前後とやや高い不足感が示されたのは、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野である。環境分野、ライフサイエンス分野及びフロンティア分野は、70%程度以上と高い不足感が示された。



	あまっ ている	ややあま っている	足りてい る	やや足り ない	足りない	合計(人)
ライフサイエンス	1 (1%)	0 (0%)	27 (26%)	33 (31%)	44 (42%)	105
情報通信	1 (2%)	1 (2%)	25 (38%)	24 (37%)	14 (22%)	65
環境	0 (0%)	0 (0%)	12 (33%)	16 (44%)	8 (22%)	36
ナノテク・材料	1 (2%)	1 (2%)	22 (39%)	20 (36%)	12 (21%)	56
エネルギー	0 (0%)	0 (0%)	13 (38%)	15 (44%)	6 (18%)	34
製造技術	1 (3%)	1 (3%)	16 (46%)	15 (43%)	2 (6%)	35
社会基盤	0 (0%)	0 (0%)	17 (50%)	12 (35%)	5 (15%)	34
フロンティア	0 (0%)	0 (0%)	7 (22%)	17 (53%)	8 (25%)	32
合計(人)	4	3	139	152	99	397

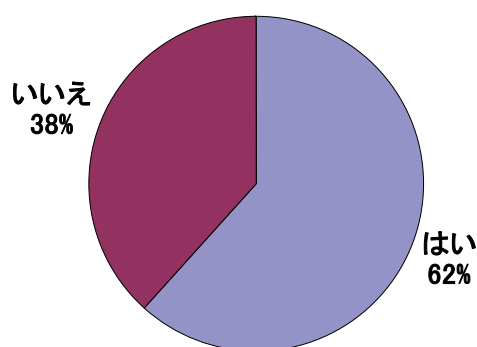
図表 4-7 回答者が所属する研究分野で数学バックグラウンドに持つ人の過不足

③ 「数学をバックグラウンドに持つ人」についての欧米の研究チームの状況

今度は、回答者のライバルである欧米の研究チームに、「数学をバックグラウンドに持つ人」がいるかを尋ねた。

その結果、回答者（396 名）の内、62%（244 名）が、ライバルの欧米の研究チームには、「数学をバックグラウンドに持つ人」が「いる」と答えた（図表 4-8）。

図表 4-6 において回答者の研究チームに「数学をバックグラウンドに持つ人」が「いる」と回答した者は 26%であり、日本と比較して欧米の研究チームには多くの数学研究人材が存在することを日本人研究者が認識していることが示された。

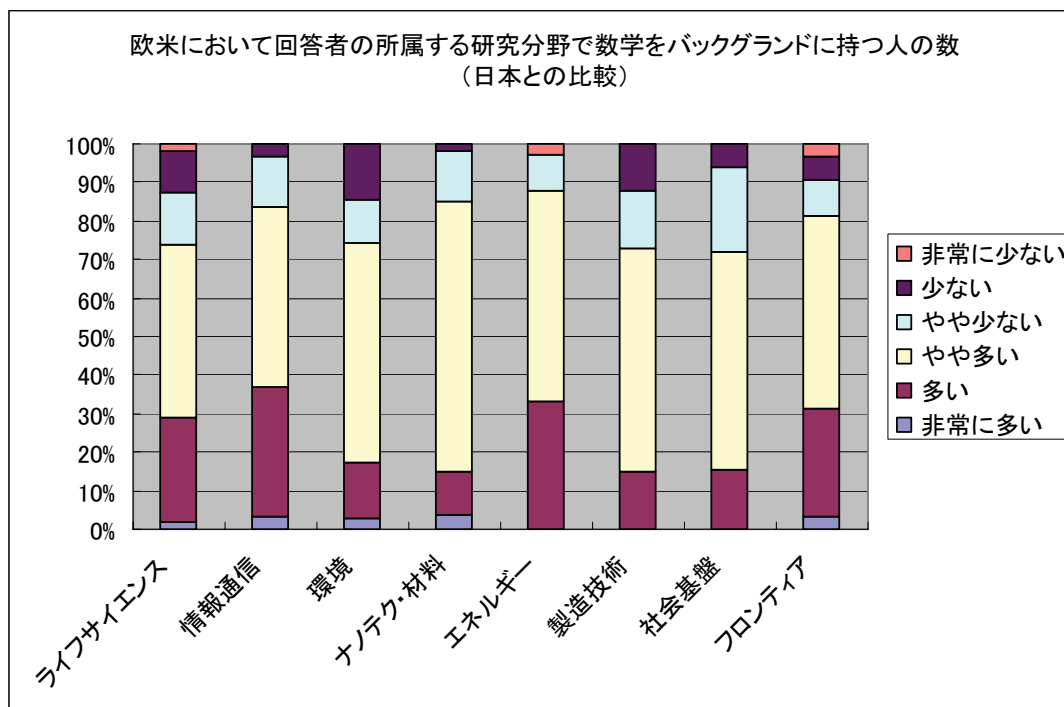


図表 4-8 回答者のライバルの欧米の研究チームに数学をバックグラウンドに持つ人がいる

④ 欧米における各研究分野の「数学をバックグラウンドに持つ人」の数

さらに、欧米の各研究分野において「数学をバックグラウンドに持つ人」の数は、日本と比較して、どの程度であるかを質問した。

その結果、欧米における「数学をバックグラウンドに持つ人」の数は、全ての研究分野において、「非常に多い」、「多い」、「やや多い」と回答した数の合計が、全回答数の 70%以上であることが示された。分野間に大きな差はなかったが、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野、フロンティア分野では、他の 4 分野（ライフサイエンス分野、環境分野、製造技術分野、社会基盤分野）に比べて、「数学をバックグラウンドに持つ人」が多い（「非常に多い」、「多い」、「やや多い」の合算）と回答する割合が高い傾向が見られた（図表 4-9）。



図表 4-9 欧米における各研究分野における「数学をバックグラウンドに持つ人」の数

⑤ 「数学をバックグラウンドに持つ人」の将来的な必要性

次に、回答者の研究チームに将来的に「数学をバックグラウンドに持つ人」が必要であるかどうかを尋ねた。その結果、回答者（398 名）の内、65%（257 名）が、数学をバックグラウンドに持つ人は将来的に必要なであると答えた（図表 4-10）。



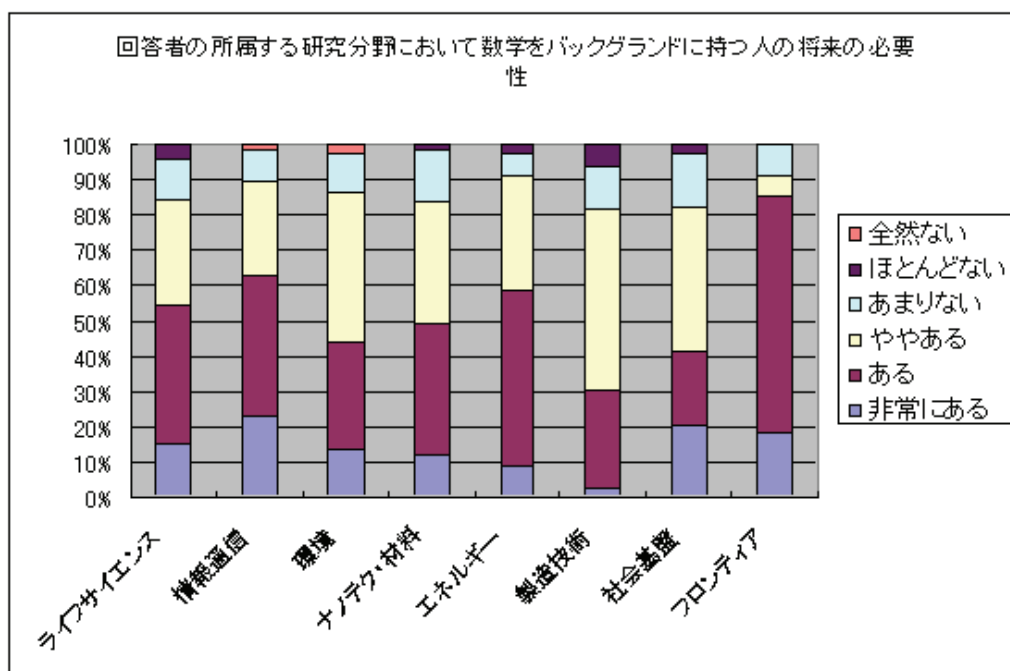
図表 4-10 回答者の研究チームに将来的に数学をバックグラウンドに持つ人が必要であるか

⑥ 研究分野における「数学をバックグラウンドに持つ人」の将来的な必要性

回答者の属する研究分野における「数学をバックグラウンドに持つ人」の将来的な必要性を質問した。

その結果、「非常にある」、「ある」、「ややある」と回答した者は、それぞれの研究分野で80%から90%を示し、全ての分野において、将来的に「数学をバックグラウンドに持つ人」は必要であると認識されていることが示唆された（図表 4-11）。

フロンティア分野では、将来的な数学をバックグラウンドに持つ人の必要性に、「ある」と回答した者の割合が、他分野と比較して際立って大きいことが示され、数学人材に対するニーズが高いことが推測された。



	非常にある	ある	ややある	あまりない	ほとんど ない	全然ない	合計(人)
ライフサイエンス	17 (%)	42 (%)	32 (%)	12 (%)	5 (%)	0 (0%)	108
情報通信	15 (%)	26 (%)	17 (%)	6 (%)	0 (0%)	1 (%)	65
環境	5 (%)	11 (%)	15 (%)	4 (%)	0 (0%)	1 (%)	36
ナノテク・材料	7 (%)	21 (%)	20 (%)	8 (%)	1 (%)	0 (0%)	57
エネルギー	3 (%)	17 (%)	11 (%)	2 (%)	1 (%)	0 (0%)	34
製造技術	1 (%)	9 (%)	17 (%)	4 (%)	2 (%)	0 (0%)	33
社会基盤	7 (%)	7 (%)	14 (%)	5 (%)	1 (%)	0 (0%)	34
フロンティア	6 (%)	22 (%)	2 (%)	3 (%)	0 (0%)	0 (0%)	33
合計(人)	61	155	128	44	10	2	400

図表 4-11 回答者の属する研究分野における数学をバックグラウンドに持つ人の将来の必要性

(3) 回答者の数学研究に対するニーズ

① 回答者の研究テーマにおいて数学の貢献を期待したい課題の有無

回答者の研究テーマにおいて、数学の貢献を期待したい課題があるかどうかを質問した。その結果、回答者（396 名）の内、63%（名 244 名）が数学の貢献を期待したい課題が「ある」と答えた（図表 4-12）。



図表 4-12 回答者の研究テーマにおいて数学の貢献を期待したい課題があるか

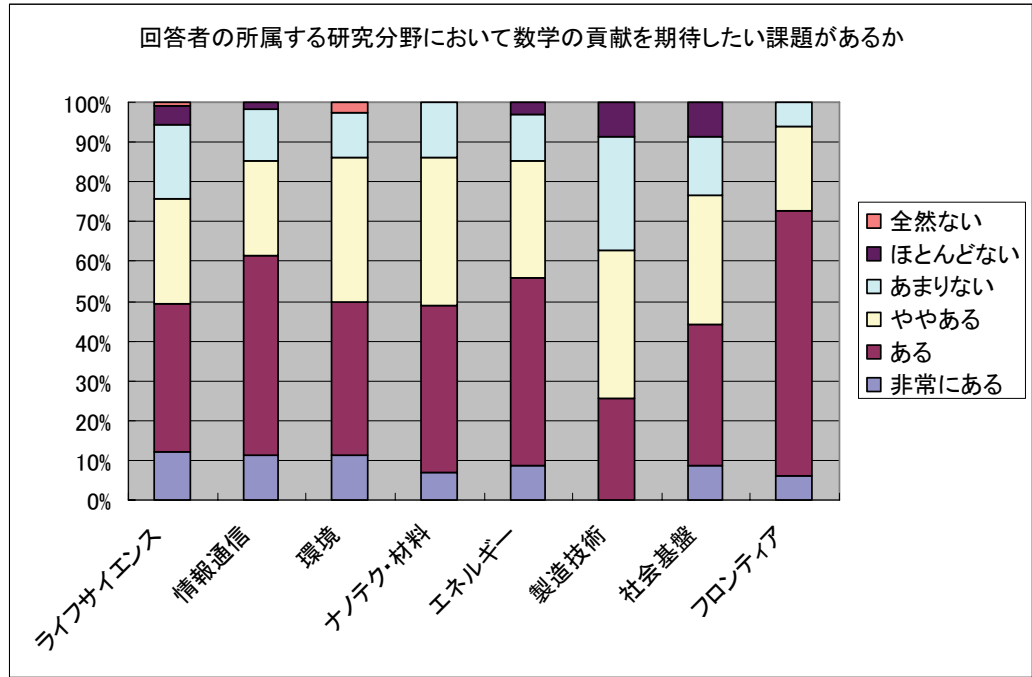
② 回答者の研究分野において数学の貢献を期待したい課題

回答者の属する研究分野において、数学の貢献を期待したい課題があるかを質問し、そ

の結果を分野ごとに分析した。

「非常にある」、「ある」、「ややある」と回答した者は、フロンティア分野では90%以上と8分野の中で一番高く、数学に対する具体的なニーズが存在することが推測される。

一方、製造技術分野では、同様な回答をした者は60%程度であり、数学の貢献に対する期待は8分野の中では一番低いことが示された。ライフサイエンス分野及び社会基盤分野は75%であり、情報通信分野、環境分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野は85%であることが示された（図表 4-13）。



	非常にある	ある	ややある	あまりない	ほとんどない	全然的ない	合計(人)
ライフサイエンス	13 (12%)	40 (37%)	28 (26%)	20 (19%)	5 (5%)	1 (1%)	107
情報通信	7 (11%)	31 (50%)	15 (24%)	8 (13%)	1 (2%)	0 (0%)	62
環境	4 (11%)	14 (39%)	13 (36%)	4 (11%)	0 (0%)	1 (3%)	36
ナノテク・材料	4 (7%)	24 (42%)	21 (37%)	8 (14%)	0 (0%)	0 (0%)	57
エネルギー	3 (9%)	16 (47%)	10 (29%)	4 (12%)	1 (3%)	0 (0%)	34
製造技術	0 (0%)	9 (26%)	13 (37%)	10 (29%)	3 (9%)	0 (0%)	35
社会基盤	3 (9%)	12 (35%)	11 (32%)	5 (15%)	3 (9%)	0 (0%)	34
フロンティア	2 (6%)	22 (67%)	7 (21%)	2 (6%)	0 (0%)	0 (0%)	33
合計(人)	36	168	118	61	13	2	398

図表 4-13 回答者の研究分野において数学の貢献を期待したい課題があるか

（４）回答者が数学の貢献を期待したい具体的な課題

回答者の研究チームにおいて数学の貢献を期待したい具体的な課題を複数回答で記述して貰った。さらに、回答者の属する研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題を同様に複数回答で記述して貰った。

① ライフサイエンス分野

＜回答者の研究チームにおける課題＞

ライフサイエンス分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 70 課題が挙げられた。

遺伝子発現、バイオインフォマティクス、脳、実験データ及び臨床データの統計的解析、感染、に関する課題が多く挙げられた（図表 4-14）。

病虫害管理における数理モデルや数理統計的手法の開発 集団におけるウイルス感染拡大あるいはワクチン効果についての予測 感染症伝播と対立遺伝子数の相関に関する数理モデル 実験データや臨床データの統計的解析 リハビリテーション評価における統計学 多因子病の病因検索における統計学 肝疾患の重症度の予測 生体防御反応のシミュレーション 細胞内シグナリングのシミュレーション 生体内代謝経路の数式化 血管から体腔内に向けての物質移動の解析 多変量解析によるがん関連遺伝子発現プロファイルによる癌診断 癌遺伝子の情報伝達系の数理モデル 遺伝子発現ネットワーク解析 ゲノム遺伝子解析における重要な遺伝子の抽出の数理モデル 細胞及び生体分子集団の情報科学 タンパク質や核酸による生体高分子複合体の構造予測 バイオインフォマティクス 細胞分化の数理モデル構築 既存の動物実験データを基にニューラルネットワークの利用による動物実験予測 環境汚染物質の生体影響のリスク評価 海洋生態系の数値モデルによる将来予測 生殖戦略のモデル化 大脳皮質、海馬系などにおける大域ダイナミクスの研究

精神行動学的パラメーターの解析における数学的方法の応用 脳活動の時空間パターンの非線形モデル化 脳機能解析 新しい逆問題の解法からの生体内部の断層画像 ヒトの行動のモデル構築

図表 4-14 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋（30/70）

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-14 の課題と大部分重複していた。図表 4-15 には、図表 4-14 で挙げられていなかった課題を示した。

蛍光による高感度計測 システムバイオロジー 遺伝子の変異発生の確率予測 薬物動態の <i>in silico</i> 予測 脳磁図の逆問題 視覚情報処理モデル （図表 4-14 で挙げた課題は省略）

図表 4-15 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

② 情報通信分野

＜回答者の研究チームにおける課題＞

情報通信分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 63 課題が挙げられた。

ソフトウェアの検証、LSI（半導体集積回路）、暗号及びセキュリティ、通信トラフィック、量子コンピュータなどに重複課題がみられた（図表 4-16）。

ソフトウェアの検証法の開発
電波系のシステム形成に必要な符号理論
暗号化技術
通信における暗号化、セキュリティ
通信トラフィック(予測・理論)
数値計算手法の理論的裏づけ
形状のモデリングと制約問題
量子情報理論(量子コンピュータや量子テレポーテーションの実現のための)
複雑系におけるリアルタイムの信号変化の予測
光導波路回路の設計
電磁界問題に対するウェーブレット解析
カオス・アトラクタ、フラクタル引力圏境、大域分岐現象の数理構造
LSI テストにおける品質とコストとの最適化や統計処理による評価
LSI の統計的タイミング設計、LSI の歩留まり考慮設計、LSI の統計的適応回路
デバイスモデリングや回路シミュレーション
半導体レーザーにおける非線形現象
素子特性のばらつきの統計
三次元の離散周期構造系に対する解析モデル
ヒルベルト変換を用いた新しい変調技術
ネットワークサービス
社会シミュレーション、社会モデリング
学習アルゴリズムの開発
心地よさの定量化

図表 4-16 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋 (29/63)

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-16 の課題と大部分重複していた。図表 4-17 には、図表 4-16 で挙げられていなかった課題を示した。

画像、通信、音声用 LSI 開発における回路規模の削減(簡単化)
非線形揺らぎ現象、エラー発生確率などを統一的にまとめる
動画像の最尤解釈
データマイニング
ヒューリスティックな解法の体系化
移動通信などで利用可能な周波数の利用効率を高めた高能率通信方式
トッパダウンナノ加工における形状発展の物理 CAD
センシングシステムの環境変化に対する相互情報量の変化
不均質媒質中及び非線形媒質中の波動伝搬理論
視覚情報処理のモデル化やこれを抽象化した工学手法の開発
感性情報の数学的扱い
(図表 4-16 で挙げた課題は省略)

図表 4-17 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

③ 環境分野
 <回答者の研究チームにおける課題>

環境分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 35 課題が挙げられた。

環境予測、環境や生態系のシミュレーションやモデル化などに重複課題がみられた（図表 4-18）。

ライフサイクルアセスメントによるエネルギー・環境評価
エアロゾルの化学組成データに基づく発生源解析(多変量解析)
空間的、時間的変動を含む海洋環境の支配要因の多重連関分析
環境予測モデルにおける数値解析
酸性雨による森林土壌の化学的变化に関する長期予測(モデルの構築)
生態系変動予測、全地球生元素循環シミュレーションモデルの確立
生物間の相互関係のモデル解析
微生物生態学、進化関係の諸現象のモデル解析
放射性物質の環境における挙動データからのシミュレーションモデル作成
乱流及び乱流燃焼の統計理論
船の摩擦抵抗低減のための Kelvin-Helmholtz Instability の解明
循環型社会の形成の数学モデル化
環境意識に関する心理的、統計的解析

図表 4-18 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋（14/35）

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-18 の課題と大部分重複していた。図表 4-19 には、図表 4-18 で挙げられていなかった課題を示した。

大気環境現象(地球温暖化など)の数値シミュレーションモデルの開発
食料生産予測における数値解析
境界のあるメッシュ領域に分布したもの(人、穀物、資金等)の移動現象モデル化
地球環境に及ぼすバイオマスエネルギー利用の影響等の統計的・数学的解析
立地環境が河川水質に及ぼす影響のモデル構築
森林土壌からの CO₂ 放出速度に関するモデル構築
(図表 4-18 で挙げた課題は省略)

図表 4-19 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

④ ナノテクノロジー・材料分野

＜回答者の研究チームにおける課題＞

ナノテクノロジー・材料分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 38 課題が挙げられた。

デバイスシミュレーション、結晶成長のシミュレーションや拡散などに重複課題がみられた(図表 4-20)。

高度な反応シミュレーション技術の開発
 帯電微粒子クーロン結晶及び微粒子クラスター構造の形成過程の解析
 液体の高圧水噴霧による細粒化限界予測
 表面形状の変形、結晶成長のシミュレーション
 拡散挙動に関するシミュレーション
 劣化、イオン浸透などのシミュレーション解析
 自己組織化などの複雑系現象を用いた材料作製における数理的予測と解析
 材料の組織構造のトポロジーと物性との相関の数学的解析
 極微細な細孔内における電場存在下における物質移動現象
 半導体素子中の局所的励起状態の緩和過程計算
 ー高分子ダイナミクス
 超伝導デバイス設計
 デバイスシミュレーション、プロセスシミュレーション、回路シミュレーション
 ナノデバイスに最適な非ノイマン型情報処理アルゴリズム
 ナノ構造の物性解析
 熱流体における流動と伝熱の数値シミュレーション
 マイクロ化学反応における乱流攪拌(混合)理論
 圧電単結晶板の振動解析
 ポリマーネットワークの形成、構造と機能の予測
 光の多重散乱・干渉の解析理論

図表 4-20 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋 (22/38)

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-20 の課題とある程度重複していた。図表 4-21 には図表 4-20 で挙げられていなかった課題を示した。

材料開発やナノ物性等に関する計算シミュレーション技術の高度化
 ナノ構造体の電子の電荷、スピン、軌道の新しい量子効果、ダイナミクスモデル
 ナノ構造における電子輸送
 バンド構造解析
 ウェーブレット解析
 環境問題に対応した材料設計
 数理科学に基づく複雑系物質材料の設計
 液晶の弾性論
 (図表 4-20 で挙げた課題は省略)

図表 4-21 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

⑤ エネルギー分野

＜回答者の研究チームにおける課題＞

エネルギー分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 30 課題が挙げられた（図表 4-22）。

三次元熱流動及び構造連成モデルの定式化と高速数値解法の開発 非線形逆問題 流体シミュレーション 流体と生体材料との連成解析 材料の照射欠陥の理論的解明 放射線防護における確率論的評価 反応場の非線形的、カオスの性質を取り込んだ反応装置設計技術の開発 エネルギー機器の熱流体分析、設計、トラブル解決 分子レベルでの複雑系物質移動解析 高分子機能性材料の分子設計のシミュレーション 電磁現象の解析 核融合プラズマ挙動の理論解析 プラズマ波動のプロセスに関するノイマン級数の適用 乱流現象の数学的モデル化 リスクコミュニケーションに関する動的解析モデルの定式化と数値解法の開発 確立論的安全評価 多目的意思決定アルゴリズム
--

図表 4-22 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋（17/30）

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-22 の課題とある程度重複していた。図表 4-23 には図表 4-22 で挙げられていなかった課題を示した。

大型超伝導コイル・システムの動的挙動の予測 複雑なシステムの信頼性評価 エクセルギー概念に基づく省エネルギー技術 エネルギー収支、機器設計、信頼性安全性検討のシミュレーション エネルギー戦略などの人間活動も盛り込んだ将来予測 （図表 4-22 で挙げた課題は省略）

図表 4-23 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

⑥ 製造技術分野

＜回答者の研究チームにおける課題＞

製造技術分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 18 課題が挙げられた（図表 4-24）。

分子集合体を対象にした分子シミュレーションの高度化 複雑で微小な流体流動の解析及びモデル化 材料の微細構造化及びモデル化 高分子の強度予測 中性子輸送と燃料燃焼のカップリング問題に関する数値解析 化学反応装置のモデリングや分離メカニズムの解明 船体運動の解析 ソルバー開発 複雑な建築生産計画における最適化評価などの分野 ある事象が起こった時にビジネスに対するインパクトの数式化 技術が市場を拓く大きさ、方向の数式化
--

図表 4-24 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋（11/18）

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-24 の課題とある程度重複していた。図表 4-25 には図表 4-24 で挙げられていなかった課題を示した。

種々の製造工程を統合の最適化（投入資源やエネルギーを最小にするなど） 建築物の耐震安全性や災害による被害予測や安全性の解析技術 清算技術分野のシミュレーション技術 新製鉄法のプロセス解析 成形シミュレーション （図表 4-24 で挙げた課題は省略）

図表 4-25 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

⑦ 社会基盤

＜回答者の研究チームにおける課題＞

社会基盤分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 17 課題が挙げられた（図表 4-26）。

高温岩体発電の出力及び寿命の予測の3次元連成解析システムの開発
 ダム貯水池に発生する波の振動を抑制して、水位の真値を知る方法
 輸送中の振動衝撃の解析
 様々な流体運動の解析解
 ランダム振動における構造物の時刻歴応答の統計解
 科学技術活動の計量分析
 地球大気環境の将来予測とコンクリートの中性化進行や高分子材料の劣化
 材料の強度解析、非破壊診断の逆問題における理論
 騒音や地盤振動などの伝播特性の数値化
 地理的情報についてのデータマイニング
 地盤の接触構造の数式化
 水質データの地理的、時代的变化の有意性の検証

図表 4-26 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋 (12/17)

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-26 の課題とある程度重複していた。図表 4-27 には図表 4-26 で挙げられていなかった課題を示した。

地すべり発生の可能性の確率論
 包装開発のための製品強度解析輸送環境データ解析、材料データ分析
 水産加工品の消費者嗜好の統計学的手法
 (図表 4-26 で挙げた課題は省略)

図表 4-27 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

⑧ フロンティア

＜回答者の研究チームにおける課題＞

フロンティア分野に属する回答者の研究チームにおいて、数学の貢献を期待したい具体的な課題として、のべ 31 課題が挙げられた (図表 4-28)。

地下深部における粘弾性挙動の理論化
 宇宙空間の自然現象のシミュレーション
 空間情報の位相を保持したジェネラリゼーション
 ステレオ画像空間における幾何構造認識
 構造物の多数箇所の温度履歴の予測

沿岸の流動場の特性の解明
 水塊指標海産動物プランクトン出現種の変動と海洋の物理・化学的要素の変動
 地殻、マントル中の流体移動に関するシミュレーション
 地下不均質系の物質移動解明への非整数階微分の有用性
 地質過程モデルの作製における確率論概念の応用
 情報処理に向けた地質学理論の体系化
 大気補正の高精度化
 空力弾性システムに対する幾何多元環による数学モデル構築
 軌道推定、飛翔体周りの空気流れの数値計算
 航空機の設計(3次元形状を部品化)
 宇宙開発設計における文章や言葉などの知識ベースのコンピュータの開発
 低軌道衛星通信システムにおける複数衛星の軌道配置の最適化問題
 宇宙における軌道計算(国際宇宙ステーションにランデブー、大気圏に再突入)

図表 4-28 回答者の研究チームにおける具体的な課題例の抜粋 (18/31)

＜研究分野における数学に期待したい課題＞

回答者の研究分野において、数学の貢献を期待したい具体的な課題は、図表 4-28 の課題とある程度重複していた。図表 4-29 には、図表 4-28 で挙げられていなかった課題を示した。

超極限状態での物質に関わるダイナミクスの研究開発
 固体と流体が共存する場での物質と熱の移動現象
 各種反応を含む流体モデルの作成と運動方程式の解析
 遷音速フラッタの非線形数学モデル構築
 浮体に対する波浪衝撃の数理解析
 深宇宙からの帰還物体の熱防御予測、宇宙船の熱制御予測
 衛星通信におけるデータ伝送誤り訂正技術の高度化
 順天頂衛星補完による高精度リアルタイム測位
 (図表 4-28 で挙げた課題は省略)

図表 4-29 研究分野における数学に期待したい課題の抜粋

(5) 現状の数学に関する問題点と施策（自由記述）

自由記述欄に回答者が記した内容から、数学を取り入れるためにはどのような方策が必要であり、現在はどういった問題点があるのか、に関する記述を抜き出し、下記ように分類して示した。

① 基礎科学としての数学の重要性を認識することが必要である

- 短絡的に数学の有用性や経済性のみを考えないで、数学を推進すべきである
- 応用数学の基盤として純粋数学も必要である

(回答例)

- ・ 数学などの基礎科学の水準の高さこそは、何十年先の日本の科学技術にもっとも影響を及ぼすものである。現在、日本の経済的な競争力の弱体化が懸念されているが、基礎科学に対する正しい認識を持つことなしに短絡的に学問の有用性のみを論じていると、いずれ同じ過ちを犯すことになりかねないことを憂慮する。＜情報通信＞
- ・ 数学は全ての科学技術のベースであり、国家の技術レベルに比例すると考えてよい。従って、目先の役に立つか否かに関係なく、国として、数学力の向上（国民の数学レベルの向上）に注力すべきと考える。＜製造＞
- ・ 抽象数学や基礎数学に対して、目に見える経済性などを無視して、国威発揚的な観点から、その研究規模の国家的目安を構築する必要がある。＜情報通信＞
- ・ 数学は基礎学問であり、今すぐに「数学の貢献」を云々すべきではない。数学が進歩すれば、それを応用する分野が出てくると考えるべきである。＜情報通信＞
- ・ 現実の産業分野では応用数学の活用が重要であるが、その基盤として純粋数学に関する研究も必要と考える。＜情報通信＞
- ・ 応用技術では数学の貢献がないと出来ないと言う課題は少ないが、課題解決のアプローチの仕方や発想の柔軟性などを含め、無形のメリットもあると考えます。＜製造＞

② 数学者が応用分野や実学に興味をもって欲しい

- 数学者自身が（も）現実的な問題（応用研究）に積極的に取り組んで欲しい
- 応用数学の分野で活躍する数学者が欧米と比較して少ない

(回答例)

- ・ 数学を専門とする方は現実的な応用の分野にもっと目を向けていただきたい。自分の専門分野の興味だけでなく、実用的な応用への可能性を探って欲しい。＜情報通信＞
- ・ 的外れの希望ですが、数学者も現実（現象）を知る努力をして欲しい。＜情報通信＞
- ・ 数学のバックグラウンドをもつだけでなく、その能力を現実の問題に適用できる才能が必要だと思われる。残念ながら、日本で数学を研究してきた人たちは、その適用能力が乏しいように感じる。＜情報通信＞
- ・ 数学の方からは物理で扱う数学は最先端の数学ではないとよく聞かされる。情報関係での暗号、新しいコンピュータでのロジック構築などに数学の力は必要である。興味のミスマッチがあるように思える。＜情報通信＞
- ・ 数学者からの積極的なアプローチがあったらよいと思う。因みに、応用物理専攻では、物性研究者と数理科学者が同じ専攻にいる。＜ナノテク＞
- ・ 数学をバックグラウンドに持つ人が応用分野に積極的な研究上の関心を持つ必要である。＜環境＞
- ・ 欧米のように数学者が純粋数学だけではなく応用数学にも興味を持ち、積極的に活動してほしい。＜環境＞
- ・ 外国では数学者が、工学のテーマに乗り出して、新しい分野を開く例が多い。例は、電波工学の Perfectly Matched Layer の提案者 Berenger、符号理論で活躍した多くの数学出身者、がある。彼らが組織の中でどういう立場だったか、私は知らないが、こういう数学応用をとことんやるという気概が必要と思う。＜情報通信＞
- ・ わが国と欧州諸国では特に応用数学の質がかなり異なる。わが国には自然現象を研究対象とする数学者が全くいない。例えば Cambridge 大学では海洋学、地震学、火山学等も応用数学として研究されている。＜フロンティア＞
- ・ 日本の数学は、これまで純粋数学の研究が重視され応用数学の分野で活躍する人材が少ないと感じております。さまざまな応用分野での数学の貢献を期待しております。なお、私自身、学部まで数学を学び、その後専攻を変更した経歴を持っております。＜社会基盤＞

③ 応用分野や実学に取り組む数学者の育成（教育）が必要である

- 数学だけでなく他分野もわかる研究者の育成のための教育システムが必要である

(回答例)

- ・数学者に対する実学との接点教育が望まれる。 <情報通信>
- ・数学を専攻しながら、さらに情報、化学、工学、経済なども専攻する、複数専攻の学生を育成する必要がある。欧米では、このような学生は多いと思う。 <情報通信>
- ・数学は非常に重要な学問であるが、わが国においては、純粋数学への傾倒が強く、すでに出来上がった体系をさらに発展させるのに集中して来た。数学以外の分野で強く必要とされる数学、全く新しい分野を開拓する数学の研究は非常に弱いのが問題である。このように全く新しい応用を創造する数学を創出しようとして、現実の問題に果敢に取り組む数学者が本当に必要とされているが、わが国ではそのような数学者を育成するようなシステムがないように見える。 <情報通信>
- ・数学を利用する立場から見ると、応用数学の教育と普及に力を入れる必要があると思っている。特に、「工学の諸問題における数学モデル」に関する体系的な教育が望まれる。 <情報通信>
- ・数学の教育において、数学の適用分野に興味を持たせることや、数学の適用の仕方の教育に、工夫がないと思われる。数学を適用するには適用対象の概念整理が必須であるが、この概念整理の段階をクリアできていないと思われる。 <情報通信>
- ・理論脳研究における数学、特に力学系（に必要性がある）。ただし、既存の”数学者”、数学教育によって”純粋に”育てられた人材が、このような課題に適応できるとは思われない。米国の例ですが、NIHの脳研究部門では、(かつて J. Rinzel が率いていた) 数学研究部門をもち、”現場”の課題のすぐ傍らで仕事をしている。
<ライフサイエンス>
- ・海外との競争に勝ち抜くためには、数学をバックグラウンドにもちながら工学の専門性を追求していける研究者が必要になると考える。数学だけがわかるのではなく、工学的応用などに理解が示せる研究者に育成していく教育システムが必要なのではないだろうか。 <環境>
- ・大学の数学科は抽象的な基礎数学の研究者を養成しているという印象がある。この教

育は否定しないが、それだけではなく、実用的な高等数学の訓練を受け、情報関連は無
論、物理・化学・生物学・社会科学・人文科学、と云った他分野に基礎研究だけでなく
応用研究においても貢献できる人材を養成する必要があるのではなかろうかと感じて
いる。＜ナノテク＞

④. 数学者と他分野研究者が交流する「場」が必要である

○ 数学者とそれ以外の分野の研究者が交流する「場」を増やす

(回答例)

・どちら先か分かりませんが、数学者が他の分野を多少は理解するか、他の分野の研究
者が先端的な数学を多少理解するか、の必要があると思います。これがないと全てが前
には進まないと思います。そのためには、まず、両者が顔を合わせ、会話を始めること
かと思います。そのような場が作られることが望めます。＜情報通信＞

・数学をバックグラウンドにもつ研究者とそうでない研究者とが交流する場が現在あま
り多いとは思えないので、この点につき改善の余地があると思われます。

＜フロンティア＞

・海洋流体工学あるいは自由表面での水波と浮体の相互作用の研究分野において、海外
の研究者を見ると、応用数学出身者が非常に多く、国際会議では応用数学者と議論する
ことも多い。それに比べて日本では数学者と工学者との節点がありません。希薄な気がす
る。＜フロンティア＞

・高次脳機能の解明には数学的な解析やシミュレーションが必要と考えられ、既にその
研究は行われているが、実際の脳から得られた実験結果を同じ研究室で解析する事が、
脳の機能をより詳細に理解するためには重要。外国の研究者から自発性の興奮性シナプ
ス電流のデータを送ってもらえれば、それを解析して何か新しいことが云えるかも知れ
ないなどと共同実験を申し込まれることがある。その点、日本では同じ研究室に多様な、
特に数学などの全く分野が違う人がいることは少なく、そのような解析の仕方があるこ
とも思いつかない。＜ライフサイエンス＞

・そもそも、数学者と実際に話す機会がほとんどないので、どの程度コラボレートでき
るかわからない。数学者側がどのような課題を求めているかがわかれば、面白い材料は
かなり転がっているのではないかと思う。＜ライフサイエンス＞

- ・ 純粋数学ではなく、応用数学が必要であり、またひとりよがりの数学モデルをつくる危険性があるので、それを避けるため専門の研究者とのコミュニケーションと共同作業が大事であると考え。＜エネルギー＞
- ・ 数学専門分野と数学を必要とする分野の交流が重要。＜製造＞
- ・ 工学に関して言えば、専門分野ごとに研究手法が固定されていて、数学者との連携がほとんど行われていない。これを改めるべきである。＜社会基盤＞

⑤. **数学以外の分野専攻の大学生に対する数学教育の改善と充実も必要である**

- 数学を駆使できる研究者の育成のために、数学以外の分野専攻の大学学部生の数学教育を改善することが必要である
- 文系理系を問わずに基礎的な数学教育が必要である

(回答例)

- ・ 様々な分野において数学の貢献が必要であるが、現在の大学教養課程の数学教育は、数学の他分野への応用を意識してカリキュラム編成されておらず、また、教育方法にも大きな問題があり、理系の諸学部においてすら数学離れが深刻である。文系、理系全般の教養課程における数学教育を見直し、初等の大学生に数学を必要とし利用する程度の基礎は身につけさせなければならないと思う。＜ライフサイエンス＞
- ・ 数学は全ての基礎であり、数学教育は重要です。特に専門家を育成するよりも数学を駆使できるような研究者の育成が必要と感じます。わかりやすい数学教育が望まれます。＜ライフサイエンス＞
- ・ 理系出身の人間でも線形代数にすら精通していない事がある。理系文系を問わず基礎的な数学教育の必要性を痛感している。＜環境＞
- ・ 米国の数学強月間のように、現代社会の基礎（3d 画像，認識など）に数学概念が活躍していることを強調して欲しい。＜ナノテク＞
- ・ 数学はコンピュータの採用によりその活躍場面が飛躍的に増え、各分野の発展に著しく貢献している。しかし、これを駆使するためには各分野の専門家が数学の基礎学力を有することが必要であり、教育の場も含めてレベルアップを図ることが重要である。＜環境＞

・数学の基礎は重要なのである程度の能力は維持していることが望めます。＜製造＞

・数学が重要な研究分野の学部や専攻は、現状の数学関係のカリキュラムと教授法を再検討して、より良い教育体系としっかりとした教授法を見出してゆく努力が重要である。

＜製造＞

⑥. 初等・中等教育における数学教育の改善が必要である

- 論理的思考を身に付けるために、小中高における数学の基礎教育及び数学教師の改善が必要である

(回答例)

・数学の高校以下基礎教育が不十分で、数理的発想や論理的思考が出来ない、訓練を受けていない学生、一般人が増えている。トップレベルの数学の貢献について考える必要もあるだろうが、国民全体の数理的思考力の底上げが急務と思われる。＜情報通信＞

・中高生の数学力は、10年後、20年後の産業競争力、国際社会への数学の貢献度に反映する。中高生のレベルアップを図るため、例えば、数学コンクール（スケールが大きくかつ深く考えさせる良問が多い）のようなところで賞をとった学生に奨励金をだすことや、中高生にコンクールへの参加インセンティブを大きくするなどの方策が必要と考えます。＜情報通信＞

・医学領域も理数・工学領域も生物学も自然科学に立脚した分野の基礎部分には不可欠な数学的知識である。自然科学のルーツは一つであり、基礎教育については高校レベルで、学ぶ方がよい。理工医に進む者には数学に関するハードルを高くするべき。

＜ライフサイエンス＞

・子供たちに数学の面白さを教える必要がある。数学嫌いができることはある程度はやむを得ないかもしれないが、面白さを伝えて数学の人気が出るようにして欲しい。

＜ライフサイエンス＞

・極めて一般的ですが、数学は論理的思考の原点ですので、小・中・高での基礎的な数学を優れた教師が教育することが重要だと考えています。＜ライフサイエンス＞

・小学校、中学校レベルでの数学教育の充実化。子供を数学好きにするための数学教育と数学教師の改善。＜エネルギー＞

- ・ 数学の教育は国民の論理的思考能力を養ううえで非常に大事である。このことを考慮した学校教育を行うことが今一番求められていると思う。＜ナノテク＞
- ・ 小・中・高校を含めた数学教育（関わりあう教員の教育も含めて）の再検討をする時期が来ているように感じる。＜ナノテク＞
- ・ 数学が科学技術開発の道具として重用される側面は益々高まるだろうし、その面の教育とソフト開発はかなり進んできている。しかし、初等教育から始めて、数学的なものの考え方やアプローチ方法を植えつける教育面での努力のほう为数段重要であると考ええる。教育界や世間で数学は特殊と思われがちな風潮が無くなるような教育法を模索することが大切と考える。＜フロンティア＞
- ・ 義務教育時代に、学童に数学への関心を持たせる教育と教育環境の整備を強く望む。＜社会基盤＞
- ・ 数学は、理学、工学に限らず、理論的な思考の基礎となるものです。高度な数学ももちろんですが、小中学校や高等学校において、数学の基礎をしっかりと学べるシステムを作る必要があると考えます。＜社会基盤＞

4-4. まとめ

本調査は、わが国の各研究分野において数学は必要であるのか、もし必要であるならばどのような数学研究が必要とされているのか、数学を取り入れるためにはどのような方策が必要であり、現在どのような問題点があるのか、について明らかにする目的で実施された。以下に、調査の結果を示す。

本調査の結果から、次のことが示された。

1) アンケートの集計結果より、分野に関わらず、**全ての研究分野において、数学に対する強い必要性と期待があること**が示された。

- ・ 回答者の8割は、回答者の研究テーマと数学との関わりについて、「関係がある」と回答した
- ・ 回答者の7割強は、回答者の研究チームに「数学をバックグラウンドに持つ研究者」が「いない」と回答した
- ・ 回答者の6割は、回答者のライバルの欧米のチームには、「数学をバックグラウンドに持つ研究者」が「いる」と回答した
- ・ 回答者の6割以上は、回答者の研究チームに、将来的に「数学のバックグラウンドを持つ研究

者」が必要であると回答した

- ・ライフサイエンス分野とフロンティア分野の回答者の7割、情報通信分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野、環境分野の6割、製造技術分野、社会基盤分野の5割の回答者は、それぞれの研究分野において「数学をバックグラウンドに持つ研究者」が「不足している」と回答した
- ・情報通信分野、環境分野、ナノテクノロジー・材料分野、エネルギー分野の回答者の8割以上、ライフサイエンス分野、社会基盤分野で7割以上、製造技術分野で6割以上の回答者は、それぞれの研究分野において、数学に期待したい研究課題があると回答した

2) 次の例のように、回答者から**数学の貢献を期待したい研究課題が多数示され、数学に対する強い必要性と期待は、具体性をもつことが示された。**

- 例) ライフサイエンス分野: 癌遺伝子の情報伝達系の数理モデル、大脳皮質・海馬系などにおける大域ダイナミクスの研究、新しい逆問題の解法からの生体内部の断層画像 など
- 情報通信分野: 通信トラフィック(予測・理論)、電磁界問題に対するウェーブレット解析、ヒルベルト変換を用いた新しい変調技術 など。
- ナノテクノロジー・材料分野: 材料の組織構造のトポロジーと物性との相関の数学的解析、ナノデバイスに最適な非ノイマン型情報処理アルゴリズム など。
- 環境分野: 空間的、時間的変動を含む海洋環境の支配要因の多重連関分析、循環型社会の形成の数学モデル化 など

3) 回答者の自由記述から、**数学を他分野に取り入れるためにはどのような方策が必要であり、現在ではどのような問題点があるのか、に関する記述を次のように集約した。**

① 基礎科学としての数学の重要性を認識することが必要

- ・ 短絡的に数学の有用性や経済性のみを考えないで数学を推進すべきである
- ・ 応用数学の基盤として純粋数学も必要である

これは、研究者に対してというより、国などの科学技術の推進・振興を担う側の意識改革を望むものであると考えられる。また、国による数学振興の際に応用志向一辺倒になることに危惧を抱いており、応用数学の基盤となる純粋数学の振興も併せて実施することを望んでいる。

② 数学者が応用分野や実学に興味をもって欲しい

これは、数学以外の研究者が、数学者側の意識改革を望んでいることを示している。勿論、全ての数学者が応用に関心を向ける必要はない。上の段で述べたように、他分野の研究者は、数学が応用一辺倒になることを望んではない。従って、ここでは、他分野との

境界領域に関心を向ける数学者が今よりも増えるか、応用志向の日本の数学者が欧米の数学者のように目立つ存在になり、他分野と共同して研究課題を解決するようになることを望んでいると考えられる。

③ 応用分野や実学に取り組む数学者の育成が必要

④ 数学者と他分野研究者が交流する「場」が必要

数学者と他分野研究者が協力し合うためには、国の施策として、応用分野に取り組む数学者の育成を実施すること、数学者と他分野研究者が交流する場所（拠点）の形成が必要であることを示唆している。

⑤ 数学以外の分野専攻の大学生に対する数学教育の改善と充実が必要

また、数学者と他分野研究者が協力し合うためには、数学以外の分野の研究者も、数学者と協力して研究ができるだけ十分な数学の能力を身に付ける必要がある。数学に強い研究者の育成のためには、全ての分野の大学学部における数学教育の改善が必要であることを示唆している。

⑥ 初等・中等教育における数学教育の改善が必要

さらに、義務教育において数学の基礎をしっかりと学ぶことが、それ以降の高等教育などにおいて数学の力を身につけるために必要であることを示唆している。

5. 結論

5-1 日本の数学研究を取り巻く状況

（１）米国などと比較して日本の数学研究費に関する状況は厳しく、この規模では数学研究レベルの現状維持又はレベル低下を緩和する程度にしか寄与していない可能性がある。

数学研究の実施に当たっては、他分野に見られるような大規模な実験施設や多額の設備投資は不要である。一方、数学研究者が定常的に研究情報を得て研究活動を行うための経費、即ち、論文雑誌の購入経費や他の研究者と意見交換を行うための旅費、研究者の人件費など必要経費は存在する。

数学研究に対する科学研究費補助金の配分額は年々増加しているものの、全分野に占めるシェアは低下してきており（図表3-1）、一部の大学における数学研究に充てられる校費（図表3-3）から、日本の数学研究費全体は大きく減少していることが推測される。単純に比較できるデータは得られなかったものの、日本の数学研究費は米国、フランス、ドイツと比較して極めて厳しいと考えられる（3-5）。日本の数学研究者の間には、『分かりやすい研究成果や経済効果などを短期間に得るという政策目標には必ずしもそぐわない数学研究に対して、政府や研究機関の投資インセンティブが低下し、日本の数学研究に対して大きなダメージを及ぼしている』と懸念する声もある。日本における現在の数学研究費の規模では、更なる研究振興というより研究レベルの現状維持又はレベル低下を緩和する程度にしか寄与していない可能性がある。その結果、日本には世界を代表するトップレベルの数学研究者が少なくないにもかかわらず、他国と比較して数学論文数の状況が振るわないなど日本の数学研究界全体の状況は厳しいと推測される（第2章）。

（２）米国などと比較して日本の数学博士取得者数は少ない。海外のトップクラスの数学研究者からは日本の数学研究者を継ぐ人材に対して警鐘が鳴らされており、日本の数学研究振興には今が最後のタイミングではないか。日本の数学研究を取り巻く環境は悪化を続けている。

網羅的な調査ではないものの、日本で確認された数学研究所又は数学研究センターの数（8）は、米国（26）、フランス（31）のそれに及ばない（図表3-4、図表3-15、図表3-27）。また、数学関連の学協会員数などから推測された数学研究者数についても、日本（大学等で3,000～4,000人）は、米国（1～数万人）、フランス（約6,000人）、ドイツ（大学で約4,000人）と比較して多いわけではない（3-5）。しかし、日本と主要国間の数学研究者数の差は、数学研究費や数学研究所又は数学研究センターの数などの差と比較して小さいと思われる。そのため、日本の数学研究を取り巻く研究環境はこれらの国より厳しい可能性がある。また、逆に考えると、米国など主要国では数学研究者数に対する外国人学生の寄与が大きい（図表3-23、図表3-30、図表3-40）一方、日本でこれだけの規模の自国出身の数学研究者数がこれまで維持されていることは重要な資産であるともいえる。しかし、日本における年間数学博士取得者数（約180人）は、米国（約980人）、フランス（約350人）、ドイツ（約

490人) よりもはるかに少なく (図表3-7、図表3-20、図表3-29、図表3-39)、日本の数学研究の現状について海外のトップクラスの数学者は、『日本の主要な数学者は高齢となりそれを継承する人材がない。長期的に見て日本の数学研究能力は低下している』と指摘し (「我が国の研究活動のベンチマーキング報告書」、Nistep Report No.90)、日本の数学者の人材に対して強い警鐘を鳴らしている。日本にとっては今が数学研究振興の最後のタイミングと推測される。

数学者によると、日本の大学における数学研究科の多くは他分野と異なり伝統的に講座制を採っておらず、助教授や助手であっても一人の研究者として自立して研究する体制となっている。そのため、法人化等に伴う近年の事務職員の削減による研究者の事務量の増加は、講座制を採って組織的な対応が可能な他分野に比べ、数学者の場合、より大きいとのことである。更に、数学では他分野と比較して、他分野学生も含む全学教育 (教養教育) への対応 (講義、試験など) や大学入試への寄与 (問題作成、採点など) など、増加傾向にある教育関係のオブリゲーションが少ない教官に集中しがちであると言われている。物理学や化学であれば理学部だけでなく工学部の教官も学生教育や入学試験に携わることもできるが、数学は理学部の教官しか担当できないこともある。その結果、大学における数学者ポスト数の減少、研究時間確保の困難化、数学者間の意見交換機会の減少などの状態を招き、日本の数学研究を取り巻く環境は悪化を続けている。

(3) 米国などでは産業界でも数学者が活躍している一方、日本ではそのようなケースは少ないと推測される。これは日本の産業研究の発展を損ねている可能性がある。

(2) で述べたとおり、日本における年間数学博士取得者数は米国などよりはるかに少なく、数学の学部生数に対する博士数の比率も日本が最も低い (図表3-7、図表3-20、図表3-29、図表3-40)。更に、人数が少ないにも関わらず、日本の数学博士の就職率は米国やフランスより低い (図表3-8、図表3-21、図表3-32)。これは日本の学術界において数学者数が少ないだけでなく、産業界において数学者の就職口が少ないことが一因と考えられる。米国やフランスの数学博士には外国人学生の寄与が大きい、数学者として産業界で活躍できるキャリアパスが用意されていることは外国人学生にとっても大きな魅力と考えられる。

数学者によると、日本の数学博士が企業に就職後、数学研究能力を活かすことのできるポストに就くことは比較的少ないという。このようなミスマッチの背景には、企業側が企業研究に対する数学の意義や可能性をまだ十分に理解していないとともに、数学博士を送り出す側の学術界もその意義や可能性を十分に企業側に伝えてこなかったためと考えられる。産業における数学の役割が大きくなりつつある今 (後述5-2(2))、米国の産業界では既に数万人規模と推測される数学者が多く、多くの産業の業種において (図表3-17) 着実に増加しており (図表3-16)、ドイツでは数学と産業との共同研究に関する国家プログラムが進められている (参考資料3-3)。その一方、これらの国々と比較して日本の社会で

数学者の能力が十分に活用されているとは考えられず、日本の産業研究の発展が損なわれている可能性がある。

以上を総合すると、日本の数学研究のポテンシャルは著しく低下したわけではないものの、予断を許さない状況にあると考えられる。

5-2 数学研究の強力な振興の必要性

『日本ではこれまで数学研究を強力に振興してきたとは言えないが、大きな問題が発生したわけでもなかった。そのため今後も数学研究の振興はそれほど必要ではない』とする見解が出てくることもあり得る。

そのような見解に対する反論として、次に数学研究振興の必要性について述べる。

（１）数学-他分野融合研究から得られる社会的利益は巨大であると推測され、日本でも数学-他分野融合研究を振興すべきである。また、基礎となる数学自体の振興も必要である。

数学は、ライフサイエンス、ナノテクノロジー、情報工学、環境科学、材料科学、物理学、化学、金融工学、経済学、社会学など様々な分野の科学技術の基盤となる科学である。そのため、数学における進歩を他分野へ還元することは、他分野の更なる発展の可能性を産み出す。数学-他分野融合研究の必要性は、98年のオドム・レポートを始めとした米国の多数の報告書等において繰り返し強調され（図表3-11、参考資料3-1）、その考えに基づき同国の国家プロジェクト『マルチスケール数学プログラム』（図表3-14、参考資料3-2）は実施されている。また、数学研究に関する日本の研究者に対するアンケート結果（第4章）でも、日本の他分野研究者の多くは数学者との共同研究に強い期待を寄せていることが分かる。その一方、例えば非線形偏微分方程式に関する研究などに見られるように、他分野から良質な問題が提供されることによって、数学自体も大きく発展することがある。

このように、他分野が数学の進歩から受ける恩恵の可能性は巨大であり、社会全体として数学から大きな利益を享受する可能性がある。そのような観点から、他分野研究者が数学との分野融合研究を進めることはもちろん、数学者が他分野との分野融合研究に対してインセンティブを持ち続けられるような仕組みを整備することも必要である。

更に、数学-他分野融合研究を効果的に実施するためには、数学者と他分野研究者が互いの研究分野に対して最低限の知識を備えた上で、相互理解を深めることが必要である。他分野研究者は最低限、大学の全学教育（教養教育）程度の数学知識を有することが必要と考えられる。一方、日本の多くの他分野研究者は数学者に広い関心を持って欲しいと考えている（第4章）。他分野から良質な問題が提供されることによって数学自体も大きく発展することがあり、より多くの数学者が他分野に関心を持つことが必要である。加えて、数学者が他領域の数学者や他分野研究者と意見交換を行うことができる

場、並びに相互の分野領域を理解するための時間を確保することが必要である。

しかし、『数学-他分野融合研究だけ行えばよいのであり、数学研究の振興は必要ない』という安易な発想は適当ではない。何故ならば、将来、数学のどの領域が他分野の発展を大きく促すのかは分からず、あらゆる数学領域が他分野発展への巨大な可能性を秘めているともいえる。更に、ツールとしての数学のレベルが低ければ他分野の大きな発展に資することは難しくなる。米国NSFの資金配分においても見られるように（図表3-13）、基礎となる数学研究も振興しながら、数学-他分野融合研究を進める、といった健全な推進体制が必要である。

（２）「モノや構造を支配する原理を見出す」観点から数学によるイノベーションへの寄与の可能性があり、数学と産業、数学と他分野との共同研究実施に向けた検討や体制整備が必要である。

現在、従来の改善・改良的手法を研究開発に適用することにより得られる効果が徐々に小さくなり、イノベーションへの道程が不透明感を増しているといわれる。そのような状況の下、ライフサイエンスや情報工学などの今後大きな発展性があると見なされている研究開発の新興分野を中心に、基礎研究から直接実用化に結びつくような研究成果が得られ始めており、今後もそのような研究成果が生まれる可能性があるとされている*。このような分野や領域における研究では、「モノや構造を支配する原理を見出す」ことがブレークスルーの重要な要因となっていることが特徴とされており※、数学はその「支配原理」を見出すための普遍的かつ強力なツールでもあるといえる。即ち、数学研究の振興は、イノベーションの可能性を間接的に増加させるという意味でも重要であり、これまで日本では十分に行われてこなかったと思われる数学と産業、あるいは数学と他分野との共同研究実施に向けた検討や体制整備が必要である。

実際に、米国では産業界における数学研究者数が増加を続け（図表3-16）、その活躍分野も拡大を続けている（図表3-17）。ドイツでは「産業及びサービスのイノベーションのための数学」国家プログラム（参考資料3-3参照）が実施され、フラウンホーファー産業数学研究所（01年）などが設立されている。

* 米国NSFの数理科学課によると、一例として、確率系（stochastic system）の数理的解析、モデル化などはナノテクノロジーや金融工学の発展に資するとしている。

※ 「（IT、バイオテクノロジー）の産業では、『技術進歩を実現するための技術』が従来の産業とは異なっている。そこでは、既存の日本のシステムは適合的でない可能性がある。急速な科学の進歩とコンピュータの能力の向上により、試行錯誤や経験の蓄積にもとづく新技術の開発から、**モノや構造を支配する原理を見出し**、それを高度な機器を用いてテストしたり、コンピュータの上でシミュレーションをおこなうという方向へと技術開発の方向が変化しつつある。」

（「イノベーションと日本経済」、後藤晃 東京大学先端科学技術研究センター教授（元科学技術政策研究所勤務）

著、岩波新書、2000から抜粋。ゴシック箇所は政策研による)

(3) 他国による数学研究成果への「タダ乗り」を狙うだけでは、重要な数学的成果を速やかに利用することもできなくなる。広範な研究開発分野を振興している日本にとって、数学研究は他分野の発展にも必要であり、強力な振興が必要不可欠であると考えられる。

それでも、通常、数学の研究成果は特許の対象とはならないため、他国における数学研究成果をそのまま利用すればよいのではないかという見解もあり得る。しかし、この見解は、数学研究成果は公表されたからといっても「誰もが」「速やかに」活用できる程度のものではないという点を見過している。即ち、現代数学の研究成果の背景には非常に複雑な思考過程などが存在するため、これを理解できなければその成果の理解はしばしば表層的なものに留まり、本質的な活用は難しいと言われている。重要な研究成果はより平易な数学的表現に書き換えられることもあるが、それにはおそらく長い年月が必要となり、平易な表現の登場を漫然と待っているようでは到底「速やかに」その成果を活用することはできない。この思考過程などの理解は、その成果から思考過程などを遡れるほどの数学的能力を有している者、実際には当該研究成果を挙げた研究者と匹敵するほどの実力のある研究者でなければ難しいと言われている。このため、最先端の数学研究成果を十分深く理解できるような実力を備えた数学研究者は常に必要である。

また、基本的に大きな研究経費を必要としないという数学研究の特徴にも関わらず、数学研究論文の上位を占める国々（米国、フランス、ドイツ、英国など）は規模の大きい国ばかりであり、これら以外の規模の大きい国（中国、ロシアなど）でも、数学研究に対して日本以上に注力している（図表2-10）。このことは、日本のように広範な研究開発分野を振興する国にとって、数学研究は他分野の発展にも必要であり、その強力な振興が必要不可欠であることを示唆している。

以上から、最新の数学研究の動向に対応しつつ新たな成果を生み出すとともに、数学によって他分野の革新的な発展を後押しし、産業のイノベーションに貢献するため、日本において数学研究を強く振興することが必要不可欠である。

5-3 日本の数学研究と科学技術振興のためにとるべき喫緊の対策の提案

5-1 及び 5-2 を踏まえ、日本の数学研究と科学技術の振興に対してとるべき喫緊の対策を提案する。

(1) 施策の提案

①【基礎的な数学研究の推進】

基礎的な数学研究を強力に振興するため、数学研究に対する政府研究資金を拡充する。

日本における政府の数学研究費の全貌は必ずしも明確ではないものの、科学研究費補

助金などから推測する限り米国などの主要国と比べて少ない。この少ない研究費が現在の日本の数学研究を取り巻く窮状の背景にあるといえる。日本の基礎的な数学研究が現在のこの危機的状況を脱し、研究者層を取り戻すため、更にそれを進めて、他分野の革新的な発展を後押しし、産業のイノベーションに大きく貢献するため、政府は基礎的な数学研究費を拡充すべきである。

ここで注意すべきことは、数学研究の領域間に大きな差を設けることなく、数学領域のそれぞれの研究者コミュニティの規模などに合わせて適正に数学研究を振興すべきことである（５－２（１））。資金配分に当たって、現在や近い将来、どの数学領域がより発展的であるかはある程度考慮すべき事項ではあるが、どの数学領域がより大きな可能性を秘めているのかを正確に把握することはできない。

②【数学と他分野間の分野融合研究の推進】

数学と他分野との分野融合研究を推進するため、数学-他分野融合研究の推進拠点を構築する。

日本において数学と他分野間の学際的、分野融合研究を推進するためには、欧米で実施されているように、各分野について一定以上の知識を有する数学研究者が他分野研究者とチームを組み、専任で研究開発に共同して携わることが理想である。しかし、現在の日本でこの方法を採用すると多数の分野毎に数学研究者が必要となり、講義や試験などで研究時間の確保すらままならないような日本の数学研究者の現状では到底対応できない。研究者間で業務をやりくりすることによって数学研究者の参画を得たとしても、残された僅かな数学研究者だけではその抜けた穴を埋め切ることができず、日本の基礎的な数学研究領域が歪む可能性がある。また、他分野において数学研究者がやるべき仕事が長期かつ継続的にあるとも限らない。

そのため、日本の代表的な数学研究機関の幾つかが共同して、他分野全体に対する窓口となり、数学-他分野融合研究の拠点として機能することが望ましい。この拠点ではポスドクの数学研究者などを雇用して、数学と他分野との専門用語の翻訳、他分野問題の数学への変換などを行い、自らが解決できる場合は解決し、難しい場合は協力研究機関の研究者に解決を依頼する。また、問題に対する認識が進み、数学的に意義の大きい応用問題が抽出されれば数学-他分野共同研究チームで、基礎的かつ挑戦的な数学問題には異領域の数学研究者を含む共同研究チームでそれぞれ研究を実施することが考えられる。

更に重要なことは、この拠点が日本における数学-他分野融合研究の中心的機関として、日本の異領域の数学研究者間や他分野研究者間の交流を活発化する機能を担うとともに、外国、特に数学研究でも急速に成長している中国（中国の研究者にとって、日本は米国と母国との中間にあり、日本には立ち寄りやすいと考えられている）などアジアの一流数学研究者との間の交流を活発化させることにある。

こうして、数学研究における欧米に次ぐ第三極として、この推進拠点はアジアの数学-

他分野融合研究のハブを目指すべきである。

③【数学者と産業界の共同研究実施に向けた対応】

数学者と産業界との相互理解を促進し、共同研究の実施について具体的に検討する。

日本において数学者と産業界の共同研究はほとんど実施されていないように思われるが、米国など主要国の例からもその必要性は明らかである（5-2（2））。日本では、数学者は産業界の動向にほとんど関心を持たず、逆に産業界も数学研究の動向に大きな関心を示してこなかったように思われる。米国などと比較して日本の数学博士の就職率が低いことは、産業界における数学研究の必要性の認識が低いためではないか。このような事態を改善し、日本の産業界が数学研究によるイノベーションの可能性を大いに活用できるようにならなければならない。

このため、(社)日本数学会、日本応用数理学会などの学会や②で述べた推進拠点などの数学者コミュニティは、経済団体などと協力して、最新研究の動向や相互の関心事項などについて積極的かつ定期的に意見交換などを行う場を設けるべきである。その場では、意見交換に留まらず、個別の産業技術研究に対する数学の適用の可能性などを追究し、feasibility study や数学者と産業界との本格的な共同研究実施に向けた検討も行われるべきである。

また、この数学者と産業界との間の活動を加速させるため、政府は必要な資金を供与すべきである。

（２）数学研究振興における留意点

数学研究の振興に当たっては、数学の研究が基本的に研究者の頭の中で完結するという特徴を踏まえないといけない。つまり、研究者が様々な思考を繰り返し、インスピレーションを受け、新しいアイデアを閃く機会を増やすような環境整備が必要である。

具体的には、次の事項に対して特段の注意が必要である。

① 研究時間と意見交換の場を確保する。

数学者が思考を繰り返し、その成果を論文にまとめるための研究時間を確保するとともに、数学者が互いにインスピレーションを受け、新しいアイデアが閃くような意見交換の場と時間を確保する。現代数学はそれぞれの領域の追究が進み、深遠で巨大なものとなった。昔のように数学者が独力で新しい研究を切り拓くには限界がある。そのため、数学研究の進展に数学者相互の意見交換を欠かすことはできない。

② 数学研究においては図書や文献の量及び質が重要な意味を持つことを認識する。

数学研究の論文では、他分野に見られるような代替技術の進展などによる陳腐化は少

ない。過去の良質な数学研究論文は時間を超えて最新の数学研究に影響を及ぼし得ると言われている。

③ 基礎的な数学研究から短期間に具体的効果を求める性急さを避ける。

基礎的な数学研究にはあまりに抽象度が高いために、実際に何に活用できるのか想像が付かないものもある。しかし、過去の経験から基礎的な数学でも平易な表現になったり、理解が進むことによって現実の問題の解決に寄与する可能性はある。そのため、基礎的な数学から具体的効果を得るには時間がかかることへの理解が求められる。

6. 謝辞

本報告書のとりまとめに当たって、多くの方々の御助言と御協力を戴いた。

森田康夫（社）日本数学会前理事長（東北大学教授）には、2005年の数学ワークショップの発表資料を参考にさせていただき、データの掲載にも快諾して下さった。また、新潟大学及び愛媛大学の理学部数学科の方々にもデータの掲載に快諾していただいた。儀我美一東京大学教授には、数学者として数多くの御助言を戴いた。小島定吉（社）日本数学会理事長（東京工業大学教授）にも、数学研究を取り巻く状況について御助言いただいた。

また、鈴木均 上席研究官（科学技術政策研究所）には本報告書の内容を丁寧にチェックしていただいた。所内研究成果発表会においては、多くの方々から貴重な御意見などを戴いた。

ここに謝意を表したい。

参考資料

(参考資料 3-1)

米国の数理科学の国際評価に関する上級評価委員会報告

(1998 年 3 月、仮訳)

まえがき

1993 年、全米科学アカデミー、技術アカデミー及び医学研究所の科学技術公共政策委員会 (Committee on Science, Engineering and Public Policy : COSEPUP) は『新時代の科学技術及び連邦政府の政策目標』と題する報告書を提出した。その報告書で COSEPUP は、米国が主要科学分野で先頭集団にいるための基本方針を採択するよう提言した。この基本方針は米国がいかなる分野の科学的進歩をも速やかに応用しそれを発展させることを可能にするものである。さらに報告書は、米国が国家目標に結びつき、社会の想像力をとらえ、他の科学の進歩に乗数的に影響を及ぼす分野で、疑いようのないリードを維持するよう勧告した。国際的な主導権があるかを測定するために、同報告書は特定の研究分野の科学業績について国際比較評価をする独立委員会の設立を勧告した。

1995 年から国立科学財団 (NSF) は政府業績評価法 (Government Performance and Results Act, GPRA) に対する様々な対応を調査してきた。同法は以下の戦略目標についての同財団の達成度を評価するよう求めている。

- ・米国が科学・数学・技術のあらゆる面で世界の主導的地位を維持すること
- ・社会に奉仕する新知識の発見・統合・普及・採用を促進すること
- ・米国の科学・数学・工学・技術教育をあらゆる水準で最高のものとする

COSEPUP の勧告を受け、政府業績評価法の求めに対応する模範的プロジェクトとして、数理科学に関する国際調査を行なうことが決定された。それにより 1997 年 3 月にそのような評価を行う委員会が組成された。委員会は、その多くが米国外から招聘された有数の数学者たちと、数学に大きく依存している米国の主要なコミュニティの個人からなっている。数学研究について最近 NSF からの助成を受けている者はいない。本報告書は委員会の検討結果である。

本報告書の意見、調査結果、結論または勧告は参加者のものであり、NSF の公式見解、意見または政策を表明するものではない。

序文

数学者でもない者が世界における米国の数学の地位についてなぜ関心を持たねばならないのか。素人、政策立案者、立法者にとってその答えは明らかというには程遠い。本報告書の良いところは、そのような人間が理解できる答を出していることである。報告書は、なぜ我々の社会、経済、安全保障のあらゆることがらが、次第に数学（単に既に発見されている数学ではない）に依存するようになっているかを説明している。これは、今も続く

「純粋」数学における新発見にも依存しているということである。

本報告書には様々な意見が含まれている。米国の数学研究は世界で支配的な地位を占めているが、それを損なう反対の動きもいくつかある。そのうちのいくつかはどこでも数学に対して不利に作用するもので、米国であれその他の国であれ直接コントロールできない。その他は米国に特有のものである。米国の幼稚園から高校までの数学教育が弱いというようなことは、本調査の対象外の問題領域である。これらでは基本的に NSF の資源配分政策に対する感度があまり高くないからである。しかしそのほかでは NSF の政策に極めて影響される可能性がある。

我々は目を覚まして、米国の数学研究の優越的地位が低下するのに任せていたこと、技術・科学・経済生産性の上記の進歩に高いつけを我々が払うことになることに気付かねばならない。政策当局、立法者及び数学を取り巻くコミュニティが等しくこの危険性に気付くことによってのみ、このような事態を効果的に回避することができるのである。少なくとも 2 つの行動が急務であることははっきりしている。a) 数学にもっと資源を投入すること、b) 資源をもっと有効に利用すること、である。

より多くの資源を率直に要求する報告書が客観的であるためにはどうしたらよいのか。委員会の委員の特に高い資質のみが、この報告書が偏狭ではないかという疑念を取り払うものである。しかし一人が国防省から助成を受けているのを除き、誰も NSF から助成を受けていないことにも注意しなければならない。その多くは、NSF の資金援助を受ける可能性はない、国際的に名のある外国の数学者である。委員会には「利害関係者」、つまり産業界、金融、その他大学の科学分野で働いている数学者や科学者も含まれている。これらの委員が、委員会の関心事項を純粋数学研究分野の狭い関心の外に広げるのに寄与している。委員会に与えられた任務は本質的に曖昧なものとなりやすいのであるが、本報告書は客観的なものであると確信している。

委員長であり委員会では最も数学者とはかけ離れている人間として、NSF 数理科学部門ディレクターのドナルド・ルイス博士に対して、調査の全過程で知的なガイドと支援をして下さったことに感謝の意を表したい。

米国退役中将 ウィリアム・E・オドム

要約

現代社会は、安全保障、医学技術から始まりコンピュータソフト、通信、投資政策まで、次第に数理科学に依存するようになっていく。役員室から組立ラインまで、ますます多くの米国労働者が数学的スキルなしには仕事ができなくなっている。数学分野に強力な資源がなければ、米国は産業及び商業での優越性を維持できないだろう。

現在のところ米国は数学分野での世界のリーダーの地位を享受している。しかしこの地位は危ういのである。この地位は外で数学的訓練を受けた移住者、特に旧共産圏からの専門家の大量流入に非常に多くを依存している。後者は少なくとも継続することはないだろう。

う。流出する人材はほとんど残っておらず、新しい人材が教育されることはさらに少ないからである。

若い米国人は数学の分野の仕事に魅力を感じていない。大学院での勉強への助成金は、特に他の科学部門への助成金及び西ヨーロッパで起きていることと比較すると、限られている上に額も少ない。さらに、過剰な教育によって気を散らされ、博士号を取得するのは非常に時間がかかる。学生は誤って、数学教育を受けた者の仕事は限られ給与も低いと信じている。幼稚園から高等学校までの数学教育が弱いことが、米国労働力の能力を蝕んでいる。

現在の趨勢からすると、米国が数学分野で世界のリーダーであり続けることができるというのは、ありそうにないことである。しかし米国にとって、重要な分野領域（サブフィールド）でリーダーであり続け、全ての分野領域で十分な力を維持することは必須である。大学及び国立科学財団（NSF）が救済する行動をとらなければ、米国は数学分野で優位を保ち続けることはできないだろう。米国で教育を受けた優秀な数学者が十分にはおらず、かといって国の必要を満たすために外から十分な専門家を輸入するのも現実的ではないと予想されるのである。

ピタゴラスの時代から数学は文明の知的頂点の一つとされてきた。多くの数学者は外の世界を参考にすることなく自己の主題を純粋論理構造として発展させるが、いかに純粋に見えようとも数学のどの領域でも重要な応用がある。優れた純粋数学は常に助成に値する。しかし国と米国数学界の利益のためには、数学者と数学の利用者との間でもっと効果的な交流が必要である。数学に関与する者すべてがこの交流を改善させる責任を分かち合わなければならない。

国立科学財団の任務は大学の科学活動を支援することであり、我々は財団が以下のプログラムを奨励するよう勧告する。

- ・学部及び大学院での数理科学の教育を拡充すること
- ・数理科学の全日制学部学生に他の科学と同程度の援助をすること
- ・数学専門家としての経験を広め強化するために、学術研究者を目指す者の大学院終了後の研究機会を増やすこと
- ・大学の数理科学者と、産業界、政府の数学の利用者及び他の大学の専門家との間の交流を支援促進すること
- ・米国が世界のリーダーの地位を維持しながら、知的探求と応用の基礎として、学術的な数理科学の歴史的強みを維持発展させること

I. はじめに

急速に変わりつつ時期にある数学

数理科学にとり過去 50 年は、基礎理論から現実世界での応用まで、全てにわたり偉大な発見と新しい発展をみた黄金時代であった。基礎理論の業績は多岐にわたり、その中には

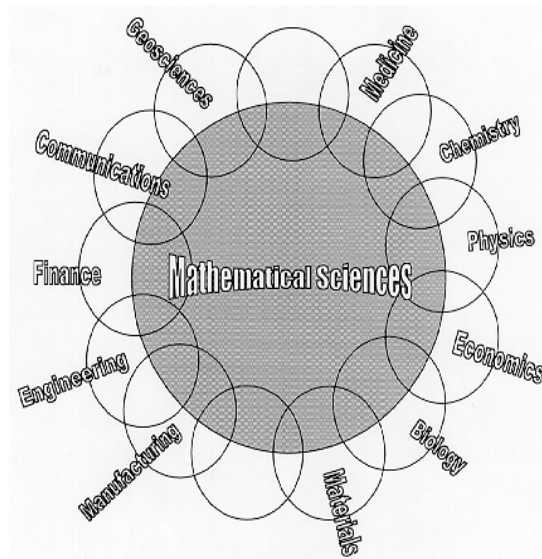
斜交系の幾何学、鏡映対称性、量子群の発展があり、ソリトン（孤立波）の発見、約 350 年前に述べられたフェルマーの定理の証明、単純有限群の分類（群論一般における、単純かつ正確な論理を正しく積み上げて大きなものを作るというビルディング・ブロック）が含まれている。分野領域（サブフィールド）はかつて無関係と思われていたが、今日では全体の一部とみなされている。目覚ましい応用例も生まれた。例えばボーイング 777 の設計では数学理論、コンピュータモデル、シミュレーション技術により物理的な試験をなくし設計プロセスを早期化した。またウェーブレット解析は指紋分析に欠かせないツールとして利用され、計算電磁気学における多極アルゴリズム、パターン認識の応用でのニューラルネットワークのアルゴリズムもある。米国の数学者はこれまで数学のこれらの分野及びその他の分野で世界の発展の最先端にあった。

数理科学及びその他の全ての科学は急速に変わりつつある世界で実施されている。社会のあらゆる部門で情報が爆発的に重要性を増し、国の安全と繁栄を維持するのに技術が欠かせなくなっていることから、数理科学は最も重要な位置を占めるようになっていく。数学はその他の専門分野での伝達と発見の支えになっている。ビジネス及び政府部門を通しての競争圧力は、コンピュータによる分析とデータ管理が広く使われるようになったことと相まって、数学をどのような人間活動にも応用可能なものにした。

科学技術の様々な領域、特に生物学、通信、コンピュータで起きている根本的な変化には、新しい数学なしには解決できない重要な問題が伴っている。意思決定を改善し（例えば株式市場やリスクヘッジの意思決定を瞬時にする）、非常に複雑な問題を理解する（例えば人間の活動が環境に及ぼす影響をモデル化する）という現代の要望から、独創的な数学技術が必要になってくる。国家にとって決定的に重要なこれらの大きな課題は、数学研究に新しい機会をもたらす。数学者は他の学問の問題に心を広くして受け入れない限り、数学はこれらの発展に寄与しそこから利益を得る機会を失うことになるだろう。

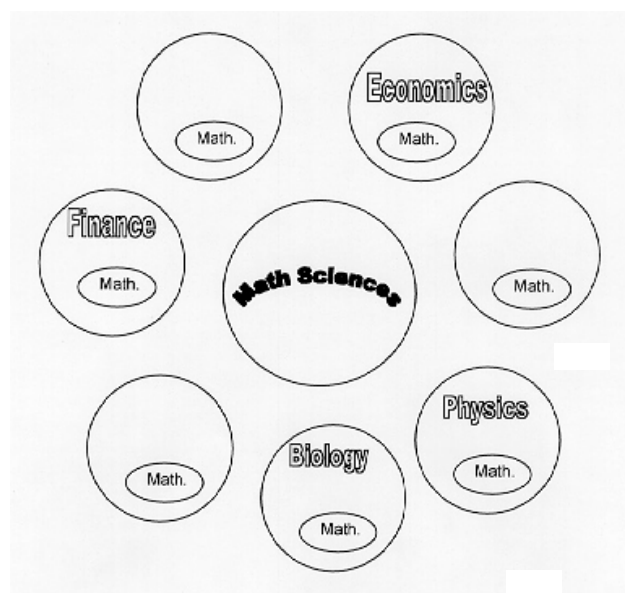
機会が失われることは数学だけに留まらない。生物学で開発された素晴らしい数学的考え方が、例えば金融モデルには恐らく役立たないだろう。というのは、両分野で用いられる専門語が非常に異なっているからである。数学はある分野での発展を標準化して他の分野にも応用できるのを助けることができる。例として、構造技術者が発展させた有限要素法と、動力システム技術者と経済学者が発展させた疎行列法の 2 つが挙げられる。どちらの例でも数学者が結果を標準化し一般化したことで、その他の多くの分野で応用ができるようになったのである。次の図がこの点をさらによく示している。

理想的な世界では、数学は中心から外側の応用へ、また応用から中心へという明瞭な流れを有している。この流れによって、ある分野、例えば物理学での数学的概念を経済学に応用したりその逆を行なうことができるようになる。



数理科学でそのような学際的な関与が少なくなれば、数学は他の分野からの考え方や挑戦により豊かになることがなくなり苦しむことになる。その他の分野も次の2つの理由から苦しむことになる。

- それらの分野が、数理科学で開発された巨大な知識の蓄えの経験を失い、簡単に利用することもできなくなること
- それらの分野が、専門化しすぎた数学言語やツールを開発して、学際的な交流ができなくなること



1993 年、米国では数理科学の博士号取得者 22,820 人が雇用された。これら数理科学の専門家のうち、14,670 人 (64.3%) は大学と 4 年制のカレッジで (6,427 人は博士号を授与できる大学)、5,160 人 (22.6%) は産業分野で、960 人 (4.2%) は連邦政府で採用されたと推計されている (巻末注記 1 参照)。研究活動に従事している者のうち 35%は連邦の奨学金を受

領していると報告されている（巻末注記 2 参照）。他の科学と比較してみる価値があるだろう。

1993 年全日制博士課程設置学部				
	合計	研究従事者	奨学金受領者	連邦奨学金受領比率
生物学	68, 194	51, 767	36, 143	69%
物理学	28, 644	20, 029	13, 463	67%
数理科学	15, 475	9, 517	3, 250	35%

数理科学は大きく 2 つの独立したグループに分けられる。1) 学術的な数学者、及び 2) 大学コミュニティの内外の数学利用者である。両グループのつながりの弱いことが、世界的に数学の中心的な問題である（これは科学技術の外の領域にも見られる通りである）。両グループの活力を高めるためには、数学の作り手と使い手がより緊密に結びつくことが必須である。優れた数学は、たとえ抽象的であっても、実用につながる。逆に難しい問題が新しい数学を生み出す刺激となる。

伝統的に抽象数学者は、探求をしているうちに自ずと新概念、新理論を打ち立てる道を辿っている。彼らはしばしば数学の外で起きている問題に影響されているが、それよりもさらに多くの場合、内在的な美しさとその結果の内部一貫性に突き動かされているのである。そのような概念が実用化されるには、もしそうなればであるが、何年あるいは何十年かを要することがある。物理学者ユージン・ウィグナーは「(抽象) 数学が自然科学に対して合理的範囲を超えるほどに効果的である」ことに驚いたが、今日では金融や経営にも、と付け加えるだろう。アーサー・ジャフェはこれを次のように説明している（デビッド I（巻末注記 3 参照）120 ページ）「数学的な考え方は、研究者の心から完全な形で飛び出してくるのではない。数学はしばしば自然のパターンからインスピレーションを得ている。自然との出会いの一つから得られた教訓が、そのほかの自然現象を探求するときにも同様に役立つのである」。数学を応用からのみ評価するとしても、このような基本的な抽象探求を評価する必要がある。それを基礎にして応用数学及びコンピュータ数学、並びに統計学やコンピュータ科学が成り立っているからである。

米国は抽象数学の研究の点で卓越している。この強みを最大限に活用するには、数学の作り手と使い手の間で知識を速やかに流す必要がある。数学者や数学の利用者が「必要に迫られて」新知識を開発しなければならない場合には、科学の進歩は阻害される。コミュニケーションのためのドアが広く開いているときにのみ、数学の試みの持つ可能性を最大限に機能させることができる。利用者は既に知られた数学を速やかに利用して便益を得るし、数学者は利用者からの新しい定式化や問題によって挑戦されることになるのである。

純粋数学の歴史に通暁しつつ、数学の作り手と使い手の連携を強化することは、この分野への支援として国立科学財団に与えられた最も重要な機会である。学術的な数理科学者と彼らの研究結果を使用する者との間で、また異なる数理科学分野間で、数学的発見を速

やかに流す方法を見つけることは至上命令である。

数学の事業を支える第 3 のコミュニティは学生である。変化の早いこの時代にあって、学生の教育法は移り変わる職業及び雇用の現実に応じたものであり続けなければならない。将来の数理科学者ばかりではなく、その科学の利用者のためにもカリキュラムを拡充する必要がある。研究者と利用者を柔軟にして、学問と社会のために 2 つのグループが効果的に交流できるようにするためである。数理科学者には独創性が要求され、その外の分野でも深さを失うことなくそうすることが求められる。

数理科学は社会にとって重要であるから、新しい現実に直面するため我々は次世代の数理科学者を準備する方策を用意しておかなければならない。新しい現実とは、仕事が増えます学際的になり、数理科学が他の分野にも拡大していることである。**明日の数理科学者は、数学の事業と、多岐にわたる雇用機会及び挑戦の多い専門職を含む社会に貢献するのであれば、新しい方法で教育されなければならない**（巻末注記 4 参照）。

本報告書の目的

本報告書は国立科学財団が、**政府業績評価法**（Government Performance and Results Act、GPRA）に従ってそれに応答するものの一部である。同法は以下の戦略目標についての当財団の達成度を評価するよう求めている。

- ・ 米国が科学・数学・技術のあらゆる面で世界の主導的地位を維持できるようにすること
- ・ 社会に奉仕する新知識の発見・統合・普及・採用を促進すること
- ・ 米国の科学・数学・工学・技術教育をあらゆる水準で最高のものとする

1997 年 3 月国立科学財団（NSF）の数理科学部門（Division of Mathematical Sciences、DMS）は上級評価委員会を招集し、米国の数理科学の調査の実施を委嘱した。委員会は以下の課題を行なうよう求められた。米国数理科学の優位性の程度とその将来性の評価、数学とその他の科学・技術・教育・商業・産業との関係の評価、専門数理科学者の教育訓練における数学の成績評価、及び対応策の作成である。本報告書は委員会の検討結果である。

NSF がその目的を達成するために用いる基本戦略は、大学の研究と教育を助成することである。従って本報告書では、学術的な数理科学が業績をあげ教育を施すのを支援し、学術的な数学研究者と数学の利用者との交流を奨励するのに、NSF がどれだけの業績を挙げたかに焦点を絞っている。

委員会が用いた手続

委員会は、その多くが米国外から招聘された有数の数学者たちと、数学に大きく依存している米国の主要なコミュニティ（科学、技術、教育、政府及び金融）の個人からなっている。数学について最近 NSF の助成を受けた者はいない。数学者の委員は委員会に対して、様々な専門領域での経験、国際研究の進展、他国の数学研究支援手段に関する知見を提供した。主要なコミュニティからの委員は、出身コミュニティにおける数学の必要性、そこ

で数学者に与えられている機会、社会に奉仕する際の数学的知識の有効性についての見解が提供された。

委員会は、数理科学部門の事務局スタッフから、データ、データ分析、様々な報告書について支援を受けた。委員会委員は、データと各種報告書を調べ、調査実施に適した基準を検討し、数量的な裏付けのある勧告をまとめるために、ヴァージニア州アーリントンの国立科学財団本部で4回会合を開いた（1997年3月20-22日、6月6-7日、9月5日、9月22日）。

委員会は、米国において幼稚園から高校にかけての数学教育が非常に重要であることについても、相当の時間をかけて議論をした。ためらいがないわけではないが、委員会は委員の構成と経歴を考えて、この領域については調査や勧告を行わないこととした。しかし委員会は、米国の幸福のためには幼稚園から高校までの数学がきわめて重要であると感じていることを力説し、以前の各種報告書でなされた調査と勧告を強調し、この領域で多くのことが行なわれる必要を確認することを望んでいる。幼稚園から高校までの数学を向上させる鍵となるのは、現在の、そしてもっと大切なのは将来の、教師を教育することだろう。教師の養成は現在及び将来の大学・専門学校の数学者の仕事であるから、数学専攻の学部学生の質と学生が受ける教育が幼稚園から高校にかけての数学を改善するのに決定的な役割を果たすだろう。

報告書の構成

本報告書には、米国の数学を、西欧と環太平洋地域の数学とベンチマーク比較したものを含んでいる。本報告書は、数理科学の個別領域での詳細なベンチマークと、数学部門と数学応用部門のあらゆる領域で米国の強みを形成し維持する上で果たす数学の役割の戦略的分析とを統合するものである。この領域は、数学の基礎的発見から数学を他の科学技術に応用することにまで及び、政府、金融、製造業のような「利用者」の領域にまで及んでいる。

報告書の方法論の部分では、委員会がそれに従った手続（第III章）と、ベンチマーク比較をするのに用いた方法とデータ（第IV章と付録2）を記述している。

委員会の作業結果の本質部分を示すと以下の通りとなる。

- ・数理科学、その国家への貢献、他の学問及び数学を用いる専門職との関係（第II章）
- ・委員会の調査結果（第V章）
- ・NSFの目的、目的を達成するための勧告、進捗度合いを測る目安の提案（VII第章）

本報告書には、調査結果を裏付けるデータと、報告書の論点について詳細に論じた材料も含まれている（付録）。

II. 数理科学：構造と貢献

数理科学

数理科学は、表 1 からわかる通り科学の中でも最も抽象度が高い。

表 1：科学の知的焦点

分野	研究内容
数理科学	型、構造、現実モデル
物理学	エネルギー、物質、時間
化学	分子
生物学	生命
材料科学	材料、構造
地球科学	地球：大陸、海洋、大気
天文学	惑星、恒星、宇宙の起源と進化

数理科学には 2 つの主要な側面がある。第 1 の点はより抽象度が高いが、構造、図形、図形の構造的調和と記述することができるかと推測される。純粋数学の核心となるのは、抽象的な型の構造の中にある対象性と規則性である。このような探求は通常は抽象概念の理解を目的としているが、しばしば実用的かつ理論的に他の分野に大きな影響を及ぼすこともある。例えば X 線断層撮影（CAT スキャン）の発展の基礎には積分幾何学があり、素数の計算はデータをインターネットで安全に伝送するための完全コードを生成することにつながり、無限次元群の表現論は通信分野でネットワークを大規模で安く効率的にかつ高い接続性を持たせて設計することを可能にしている。

数理科学の第 2 の側面は、世界、つまり普通は物理学・生物学及びビジネスの世界であるが、その世界で生じているできごとやシステムのモデルを作りたいという願望が動機になっているものである。この側面には 3 つの段階がある：

- ・明確に定義されていないことの多い現実の状況について、明確に定義されたモデルを作る。そのようなモデル化では、現実の状況に忠実である必要と、数学的にあとづけできる必要との間で妥協が必要になる。適切な妥協点を見出すためには通常、その主題の領域の専門家と数学の専門家との協力が必要になる。
- ・分析または計算的手段あるいは両者を併用してモデルを解決する。
- ・特定のモデルを解決するのに繰り返して使用できる可能性が高い一般的ツールの開発をする。

数学モデルの例としてはクォンタム・コンピュータ・プロジェクト、DNA を基礎とする分

子デザイン、生物学におけるパターン形成、数値計算に技術者が日々用いている高速フーリエ変換と多重アルゴリズムなどがある。

数理科学はそれ自身が独立した専門領域で、その中に独自の活力があり助成する必要がある。しかしそれは科学、技術、産業、経営、金融のための基礎的ツールインスピレーションを得ることがしばしばある。数理科学は精密で注意深い分析と系統立てた計算を可能にする抽象に基礎を置く思考法を代表するものである。従って数学には二重の性質がある。数学は精密で本来的な美しさを備えた独立の学問であるが、応用の世界に様々な手段を提供する豊かな源泉でもある。数学は内面には抽象性を、外面には効果性を有していると表現することもできるだろう。

この両面性のそれぞれが密接につながっている。秩序、対象性、型の規則性の探求が純粹数学研究の核心である。研究結果は非常に長い間使われる。時には発見から何十年もしてから思いがけずに重要な応用を見出すこともある。このようなことが起きる主な理由は、数学では一度証明されればそれが否定されることはないからである。もちろん、より影響力のある結果によってその座を奪われることはあるが。それに対して外の科学は、連続的に近似していく過程により真理に向かっていくのである。

米国では数学研究は大学で行なわれており、恣意的かもしれないが表2のように細かく9つに区分できるだろう。:

表2：数学の専門分野

分野領域	研究内容
基礎理論	数学の論理的基礎
代数学及び組合せ論	構造論、離散数学
数論及び代数幾何学	数の特性と多項式
位相数学及び幾何学	空間構造、型、形状
解析	微積分の延長及び一般化
確率	無作為及び不確定現象
応用数学	自然界の問題
コンピュータ数学	解決にコンピュータを用いる問題
統計学	データ分析

これらの専門分野同士の境界は固定して硬いものではない。興味深く実りのある数学の進歩がこれらの専門分野の重なり合いから生じることがあるのである。研究分野の中にはいくつかの専門分野にまたがるものがある。例えば理論物理／数理解物理学は位相数学／幾

何学、解析、応用数学に登場する。

数理科学の研究コミュニティ

数理科学の研究コミュニティは他の研究コミュニティといくつかの点で異なっている。数学研究は「小さな」科学の典型である。研究の多くは個人が一人で行ない、必要器具としてはせいぜいワークステーションである。（しかし次第に、スーパーコンピュータや可視化研究室を必要とする数学者も出てきている。）また数学研究は持続的なもので、古い文献をしばしば参照するために、数学者は他の科学よりも充実した図書館に依存することが多くなる。最後に数学者は、他の科学者に比べて、教育及び教育機関と密接に関連することが多い。大半の数学者は学術を根拠としていて、その文化は学究的な色彩を帯びている。

1995年に、米国の博士号を取得した数理科学者のうち約16,000人（65%以上）が高等教育機関に所属している（巻末注記5参照）。そのうち6,427人が博士課程を設置する機関で仕事をしており、米国の学術研究コミュニティの核をなしている。博士号を持つ数学者のうち私企業に雇用されているのは25%未満で、4.2%は政府に雇用されている。1994-95年の米国博士号取得者のうちで、50%を超える者が教育機関の学部でのポストを望み、それに加えて25%はおそらく学者としての道を歩む前段階として米国で博士課程終了後のポストに就くことを考えている。

産業界の数理科学者が「数学者」という肩書きを称することはまずない。通常は「エンジニア」「システムアナリスト」その他の肩書きで知られている（SIAM レポート参照）（巻末注記6参照）。彼らには研究機関にいる同僚と比較すると数学者としてのアイデンティティと意識を欠いており、科学者やエンジニアとは対照的に学術的なコミュニティとの接触に乏しい。

世界的にみた学問としての数理科学

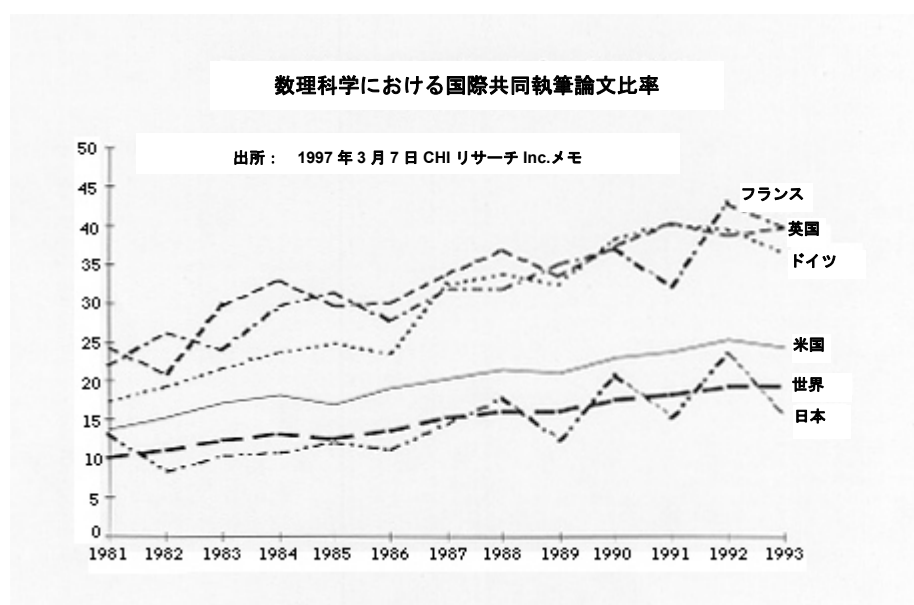
その抽象的な性質と伝統から、数学には言葉や政治的な境界は存在しない。数学の言語は通常は方程式と関係性のみから解読可能である。言葉が必要であれば世界の数学者は一致して英語を用いる。かつて学者がラテン語を用いたのと同じように。同じ精神から数学者は、冷戦期にあっても政治的相違や国境を超越してきた。数学者は研究を進めるのに特別な研究室が必要ないことから、大学と大学、国と国との間を自由に旅してきた。このような慣習と了解の結果として、数学は例外的に開放的で国際的な活動になっている。

活発に研究活動をしている数理科学者の数は世界中でも少ない。おそらく1万弱である。従って特定の分野では非常に特化した個人がごくわずかにいるだけであると思われる。彼らは国や居住地の違いを越えてお互いによく知り合っていて、共通の専門用語を共有し、長い距離があってもそれを越えて密接に協力している。数理科学の会議は多数の国から参加者を迎えるのが一般で、同僚と会うことは出版されていない考え方を交換するために不可

欠である。

このような国際的な文化から数学者は、しばしば異なる国に順番に移り住んだり国々を行き来したりする。米国は自由を堅持し生活水準が高く優秀な大学を擁していることから、外国生まれの数学者を受け入れ非常な利益を享受してきた。同様の精神によってアメリカ人は、ほとんど全てのヨーロッパの国で数理科学の学部で仕事をしている。このような理由から、ある国の数理科学への助成に変化があれば、数学者が急速に移住してしまう結果となる可能性がある。それは第 2 次大戦前のヨーロッパや冷戦終了時の旧ソビエト連邦からの大移住のようなものである。

また数学者は研究について国際的に協力して、その傾向は 20 年近くずっと拡大している。数学主要 5 カ国（巻末注記 7 参照）の数学者が他国の研究者と共同執筆した論文数は 1981 年から 1993 年の間に約 50%増加し、この傾向はなお続いている。



英仏独の研究者による共同執筆論文の伸びは、欧州連合内の国々が次第に統合していることを反映している。

数学の学生が最強の研究センターに集まる傾向があり、これは 1 世紀も前に始まる伝統である。1940 年以前は最優秀の米国学生が欧州で勉学するのは普通のことであった。第 2 次大戦後、数学における米国の名声は急速に高まり、過去 15 年では米国の研究機関で博士号を取得した大半は米国人以外となった。1996 年には、数学及びコンピュータ科学の全博士号取得者のうち米国市民以外が 55%となっている（巻末注記 8 参照）。その他の有力な国際的研究センターも外国人学生を集めている。フランスでは現在は外国人学生が科学分野全ての博士号取得者の 3 分の 1 を占めている。日本ではその比率は 40%である。英国は 27%で、旧植民地のコモンウェルスと米国から多くの学生を受け入れている（巻末注記 9 参照）。ドイツは外国人大学院学生の助成をしており、博士課程修了者にはフンボルト奨学金がある。

数学の社会的役割

数学研究のコミュニティの多くが大学を基礎としたものであっても、社会に対する数学の影響力は広範にわたる。数学は現在の大半の科学技術活動の基礎となっている。数学の新領域はすべてが、実験科学（生物学、化学、地球物理学、医学）、政府（国防、安全保障）及び実務（産業、技術、製造業、サービス、金融）の問題への対応として発展してきた。現在ではこれらの分野においてはすべて、膨大な量の大まかな構造のデータを分析し管理することが求められており、どれも現象をシミュレーションし予想をするのに数学モデルが必要なのである。観察できるデータが少ない分野、または天文学、気候学、公共政策の分析など不確実要素が非常に多い分野では、モデルやシミュレーションが不可欠となる。そのような複雑な問題を処理するためには、あらゆる数学に扉を開き新たに出現する数学を受け入れねばならない。進歩には革新的な理論的思考と、純粋数学、統計学、コンピュータ科学、実験科学の大同団結が求められる。

将来数学を応用するのには、数理科学者と広い範囲の科学者及び技術者との密接な協力関係が必要となるだろう。複雑な明日の課題に対処するには、数学に関連する全ての分野への洞察が要求されるだろう。このような発展の持つ理論的影響力と産業への影響力は測り知れないだろう。表 3 では数学が今日及び将来の社会にどのような貢献をするかを示している。

表 3 : 社会における数学の役割

問題／応用	数学の寄与
核磁気共鳴映像法及びコンピュータ断層撮影	積分幾何学
航空管制	制御理論
オプション評価	ブラック - ショールズのオプションモデル及びモンテカルロ法シミュレーション
地球調査	信号処理、画像処理、データマイニング
貯蔵業	オペレーションズリサーチ、最適化理論
複雑なネットワークの安定性	論理学、コンピュータ科学、組合せ論
機密性及び統合性	数論、暗号学／組合せ論
大気及び海洋のモデル化	ウェーブレット、統計学、数値解析
機動的で自動化した生産	幾何学、映像化、ロボティクス、制御理論、工程品質管理
設計及びトレーニング	シミュレーション
ヒトゲノムの解析	データマイニング、パターン認識、アルゴリズム
合理的薬剤設計	データマイニング、組合せ論、統計学

サイバーク・ウィッテン理論（ひも理論）	幾何学
宇宙に関するデータの読取	データマイニング、モデル化、特異点理論
複合素材設計システム	制御理論、計算論、偏微分方程式
地震の分析及び予測	統計学、動的システム／乱流、モデル化、工程管理

科学は常に、理論及び補強となるシミュレーションをするのには数学を使い、実りある実験を行なうためには統計学を使ってきた。数字や記号を操作するときには、その操作は数学的な関係に依存している。高速コンピュータと測定器が登場して、実験科学のなかには膨大な分量のデータを作り出すことができるものが出てきた。ヒトゲノムプロジェクトが一例である。このデータを整理し意味のある情報を引き出すのに必要な新しい道具は、数理科学に依存するのである。それゆえ数理科学は、現在では科学の3つの側面、観察、理論、シミュレーションのすべてで欠かすことのできないものになっているのである。

以下の例では、広くわが国の関心となる領域で数学が貢献できる方法を示している。

安全保障 複雑な通信システム（音声、データ、電子機器）の安全性は、数学的に洗練されたツールに依存している。核兵器保全管理計画（核兵器を実験せずに保全するもの）は数学モデルと高度の計算に基づくことになるだろう。国の探査システムを運営するには、データの収集と分析に数学を多用しなければならない。軍事システムは数学を基礎とした情報、兵站、戦闘システムの採用で変容しつつある。

技術 数学は設計、製造、技術の使用において遍く使われている。マイクロプロセッサから、航空機のエンジン、衛星通信網、在宅マーケティングシステム、航空管制システム、ラップトップコンピュータまで、数学を応用しなければどのようなシステムも成り立たない。

教育 数学が労働力の教育の役割を果たすことは、国の安寧のために決定的に大切である。科学者や技術者は数理科学に依存し、成功するには健全な数理科学の知識が必要になる。平均的市民にとって、最低でも中等教育レベルの数学基礎知識が現代の市民生活には不可欠である。数学ができないのは読み書きができないのと同様に致命的である。

医学 コンピュータ断層撮影や核磁気共鳴映像法（MRI）など、現代の医学用画像システムの運用では、信号の数学的处理に依存している。ヒトゲノムプロジェクトを成功させるためには、遺伝子連鎖と人間の疾病の関係の情報を得るために数学を利用することが必要となる。折り込まれたタンパク質の複雑な幾何学を解明することが、タンパク質の機能を理解する鍵である。病院で患者記録を管理するのに、効率的なデータベースを構築しなければならず、そのために数学を応用する必要が多くなっている。

金融 リスクを測定し、金融商品、金融機関、金融システム（個別の国、貿易圏、国際決済などのグローバルシステム）の動きをモデル化するのに、数学は欠かせない。確率と、大量のデータ、向上した能力、効率的アルゴリズム及び計算速度を持つ先進的

な金融モデルの組合せによって、金利、通貨、商品、株式その他の金融商品についての洗練されたモデル化が可能になる。VAR (value at risk)、債権エクスポージャーのポートフォリオ理論、非線形商品などの分野をよく理解するには、数学を応用しなければならないのである。

環境モニター 人間活動が環境に与える影響を予測するために海洋と大気について有用なモデルを作ることは、健全な公共政策や規制を行なうのに不可欠である。気候モデルでは、膨大なデータを扱う必要があり、複雑で同時発生的な相互作用（例えば大気中に拡散した化学物質同士の）を研究することも必要になる。そのようなモデルではすべて不確実性の理論に基づいており、それが有効かを判断するには数学を多用しなければならないだろう。

広く見れば、科学技術と社会の要請の両方ともが、過去に較べて劇的に複雑になっているのである。新しい要請とシステムを理解し、その行動を予測し制御する能力には、2つの要素が必要になるだろう。i) 新しい数学的な考え方や手法と、ii) 専門科学者、エンジニア、コンピュータ科学者、医学から公共政策にいたるまでの関係専門家など、それに活動的に関与する全てのグループの効果的な協力である。

III. 調査の基準

国立科学財団は、米国の学術的な数理科学研究を支援する、大学とは切り離された援助組織である。従って、この分野での NSF の業績を評価することは、米国の学術的な数学研究の業績と健全性を評価し、学術的な数学研究が大学、産業、政府で数学を利用する者に対して与える影響を評価することと同一となる。

同時に、数学の価値を公共投資の見返りの測定によって行なうことは、単に数学への支出額とそれにより生み出された富の額を比較することでは達成できない。数学の「効果」は即効的、直接的ではなく、ある単一の助成プログラムに帰すこともできないのだろう。この分野でもっと正確に調査をするのには、あらゆる科学技術の分野での一致した見解（数学助成は必須である）を受け入れる調査が必要になる。同時にその助成が数学の内部を健全化し外部に有益な影響を及ぼしているかを問う調査が必要になるのである。

委員会は、学術的な数学研究の影響を最も正確に測定する方法は、数学者の3つの主要な活動を調査することであるという結論を得た。

1. 基礎数学における概念の創出
2. 科学、エンジニアリング、技術、財政、安全保障など数学を利用する分野との交流
3. 次世代の数学者の誘引と掘り起こし

IV. 国際比較

委員会では、米国の数理科学の活動と健全性を他国のそれらと比較評価しようとして数多くの分野のデータを検証した。委員会では以下に述べる通り、数多くの指標（付録参

照)と重要な定性的観察結果を得た。

計量文献学

委員会では、米国を欧州と比較して米国の数学がより多くの数学論文を発表していることを確認した。環太平洋諸国は米欧のそれに追随しているのであるが、1980年代初頭（確認できず）から業績を大幅に伸ばしている（巻末注記 11 参照）。

数理科学の出版

	1989	1991	1992
米国	39.9%	42.1%	38.9%
英国	5.7%	6.3%	5.9%
ドイツ	6.6%	7.0%	6.5%
フランス	7.5%	4.6%	8.5%
その他西ヨーロッパ	12.7%	12.6%	13.1%
日本	4.3%	4.6%	3.6%
その他環太平洋	3.9%	3.7%	4.4%

CHI リサーチ Inc. による純粋数学分野の研究出版に焦点を当てた別の調査（ISI（Institute for Scientific Information）のデータベースの学術誌の調査）では、諸国の出版論文比率は安定していて、米国の数学者が執筆したものが 40-50%になっている。同調査では国際共同執筆の増加を指摘している。

数理科学の博士号取得者数のデータを地域別に決定することは困難である。もっと一般化すれば、自然科学部門で 1992 年には、アジアの博士号取得者は 6,593 人、ヨーロッパが 18,951 人、北米が 13,344 人である（米国は 12,555 人の博士を送り出している）。しかし同報告書は、「ヨーロッパでは 18 歳人口の減少が、米国で生じているような自然科学及びエンジニアリングでの学位取得数の減少をもたらすまでにはなっていない」と注している（巻末注記 12 参照）。

国際会議への参加

国際会議での招聘講演者のデータはやや異なっている。1994 年、4 年ごとに開催される国際数学者会議に招聘された 1 時間の講演者の 50%は米国からであった。次の 1998 年の会議では、1 時間の講演者の 38%は米国から、48%が欧州からであった。これに対して 45 分の講演では 48%が米国からで（その 3 分の 1 は米国以外の出身）、36%が欧州からであった。1995 年の産業応用数学国際会議での総会講演者の 35%は米国の講演者で占められていた。

受賞

数学の主要な賞の記録からは別の有益な比較調査ができる。1970 年から 1990 年までの

間にフィールズ賞を受賞した 16 人の数学者のうち、8 人が受賞時に米国に在住、11 人が現在在住している。1990 年代受賞した 8 人のうち 4 人が米国在住であったが、米国生まれは 1 人のみであった（ノーベル賞は数学分野には与えられない。米国の数学者が 1 人経済学でノーベル賞を受賞している）卓越した科学者に与えられるウルフ賞を受賞した数学者では、27 人中 14 人が米国の数学者で他の 2 人はかなり長い間米国で過ごしている。

専門分野での比較

委員会は、その専門性を基にして、専門分野での定性的比較調査を行ない、その詳細は付録 2 に示されている。委員会は、米国は全ての小部門で優位にあるが、主たる寄与をしていない部門もある、という結論を得た。根本的な細分化された分野の中には、基礎理論、記号計算、常微分方程式など、外国の貢献の方が米国の貢献より大きいものもある。しかし全体としては米国の数学研究は世界のどこかで生じている進展に反応する力があると判断される。その能力は世界中の数学者の相互交流が活発に行なわれることで高められている。

予算比較

委員会では、研究助成金について意味のあるだけの各国比較を提供することができなかった。それは一つには、政府と大学との間の予算面及び制度面での関係が大きく異なっているからである。例えばカナダ、ヨーロッパ、日本では、学部は 12 ヶ月を基礎として教育と研究についての支払がなされる。これは、これらの国では夏の研究にも、米国では 35% しか研究活動をしていないときであるが、助成がされているということである。このような助成があるところとないところがあるという事実は、米国の数理科学コミュニティの構造にとり非常に破壊的であり、明らかに若い米国研究者の意欲を削いでいる。ヨーロッパと日本の助成機関は NSF や国防総省の諸機関とは違った役割を果たしている。これらの国では健康に関する科学の助成と数学の助成とではしばしば異なる手段を採っているのである。例えば日本学術振興会はその予算の大半を、大学の科学文献支援と海外の著名科学者の招聘支援とに用いているのである。

しかしいくつか一般化することができるだろう。ヨーロッパでは大学院進学を認められた学生への奨学金は生活費のすべてを賄うもので、教師をして資金を稼いで補う必要はない。ドイツと東ヨーロッパの講師プログラムは、博士課程を終え大学の研究ポストを求めようとしている学生の助成となり、それは英国の大学フェローシップ（特別研究員制度）でも同様である。最近フランスは EU 同様に博士課程修了者へのフェローシップを導入した。これとは対照的に、米国では数理科学で研究補助制度がほとんどないことを、委員会は見つけた。米国では数理科学の大学院学生の助成をするのに、教育基金に依存しすぎている。これは学位を取得する時間を長くし米国の学生にとって数学分野の魅力を薄めることになる。また、NSF が助成するわずかの博士課程修了後の研究者フェローシップと大学の資金に

よるわずかの研究者インストラクターシップを除くと、米国では博士課程終了後の数理科学者のための研究機会はきわめて限られている。

アジアでは全体として数学への投資が増えている。シンガポール、台湾、韓国、香港といったアジアの虎といわれる国々では、数学に相当の重点を置いた強力な研究系大学及び研究機関を作っている。日本では基礎科学への助成を 5 年で倍増する計画を開始した。中国の国家自然科学基金委員会は、数理科学の開発を最優先にしている。

研究機関

研究機関と会議センターは数理科学を支援するインフラストラクチャーとして重要な要素である。これらは実験施設や天文台が物理学や天文学にとって重要であることと同一である。ニュージャージー州プリンストンにある高等研究所 (Institute for Advanced Study、IAS) は数理科学の研究者グループを短期間 (4-12 ヶ月) 集める最初の施設となった。このような研究機関は数理科学で好評を博し、研究の進展に多大の貢献するものと受け取られている。これはそのような施設が新開発の展開を可能にし、数理科学者間の協力を支援し、数理科学者とその他の専門家との間での考え方の共有を助けるからである。NSF は主として若い研究者の支援のために IAS に部分的資金援助をし、その他の 3 つの研究機関 (MSRI (Mathematical Sciences Research Institute、数学科学研究所)、IMA (Institute for Mathematics and its Applications、数学応用数学研究所)、NISS (National Institute of Statistical Sciences、国立統計科学研究所) に中核となる資金援助をしている。また他の研究機関同様に運営されるが、特に離散数学、アルゴリズム、理論コンピュータ科学に特化した科学技術センターである DIMACS (Center for Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science) にも援助をしている。西欧には 6 つの研究機関と 2 つの会議施設があり、カナダには 3 つある。環太平洋にもいくつかあり、さらに計画中である。ドイツは米国の 3 分の 1 の大きさであるが、2 つのマックスプランク研究所、オーバーヴォルフアッハ会議センター及び 7 つの特別研究報告 (Sonderforschungsbereich、大学に付属し研究所と米国科学技術センターの要素を持つ) がある。研究機関の中には常設の学部のあるものもあるが、NSF から中核となる資金援助を受けているものには設置されていない。フランス国立科学研究所 (Centre Nationale des Recherches Scientifiques、CNRS)、ロシア国立科学アカデミー、及び東欧では、数理科学に相当数の常勤研究者がいる。

他の専門分野との協力

世界全体では学術的な数理科学者とその他の科学者との連絡は貧弱である。数学者の多くは、他の科学者と交流する自己の能力は限定されていると見ている。大学院教育はきわめて専門化したものになることがしばしばである。大学では昇進、報奨、給与は専門ごとに行なわれるのであるが、大学の構造は自己の専門外との協力については消極的である。第 2 の専門について理解するのは困難で時間のかかる仕事であることも消極的にする理由

となる。イリノイ大学のベックマン研究所のように、学際的な研究を進めるためにいくつかのプログラムが米国で設けられているが、このような努力の中で数理科学者が関与するものはほとんどない。

多くの国で、数理科学者の学際的研究協力を促進する試みが始まっている。英国は、特にアイザック・ニュートン研究所の後援で、これを非常に積極的に推進しているように見える。フランスでは数理科学者とエンジニアの間で相当の交流があるが、これは中等教育及び大学教育を共にしているが一部与っている。協力の試みは経済進展のために研究を強調している国々で目立つようになっている（例えば EU 諸国と環太平洋諸国である）。多くの米国数理科学者が学際的研究により関与するようになっており、おそらく他国よりその度合いは高いと考えられるが、科学とエンジニアリングでは米国数理科学者のさらなる関与を必要としている。とはいえ進歩はある。NSF の DMS (Directorate for Mathematical Sciences) 予算の 10%以上が、他部及び他のダイレクター管轄部門と共同してプロジェクトに投下されているのである。DMS グループのインフラストラクチャー・プログラムは各種の協力プログラムを助成して、米国数理科学者の提案は学際活動部の MPS (Mathematical and Physical Sciences、数学及び物理学) と IGERT (Integrative Graduate Education and Research Traineeship Program) によって広く受け入れられるところとなった。その他の NSF の施策も、しばしば数学が大きく関与する学際研究を援助している。例えば今年度に始まった知識及び分散知 (Knowledge and Distributed Intelligence、KDI) イニシアティブである。

学会と産業の交流

もう一つの流れは、英国とオランダで最も顕著であるが、学術的な研究と私企業分野という全く異なる文化の間での交流を促進するものである。英国は、オックスフォードのスミス研究所と OCIAM (Oxford Centre for Industrial and Applied Mathematics、オックスフォード産業応用数学センター) が先立ちとなり、この面で特に熱心である。アイザック・ニュートン研究所の活動により相当額の私企業投資が学術的な数学になされている。その他の欧州諸国もそのようなプログラムを始めたが進展は遅々としている。学会と産業の文化を混合することは容易なことではなく、加えて知的財産権と産業機密に係わってくるのである。日本では交流はほとんどない。米国では産業及び金融の企業と交流している数学の学部及び組織（特に数学応用数学研究所）がいくつかあるが、これはごく少数派である。NSF の GOALI (Grant Opportunities for Academic Liaison with Industry、産学交流助成金) に米国の数理科学が係わることは、他の科学に比較して少ないが、増加し始めている。数理科学部門 (The Division of Mathematical Sciences、DMS) は最近 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency、国防総省国防高等研究事業局) と、数理科学者が他の学術的な科学者や産業界の科学者と協力することが求められるイニシアティブに助成をするために協力している。

米国では、学術的なキャリアに対する期待は、産業界でのそれよりも特に強い。新規に米国で数理科学の博士号を取得した者の約 75%は学術的なポストを期待している。欧州大陸では対照的に、多くの大学に学位コースがあり、そこから学生は非学術的な地位を求めることになる。英国の大学では、新しくバカロレアと博士号の中間的学位を導入し、この目的に対応している。米国の数理科学の学部の多くでは、ディプロマ学位プログラムに匹敵する「専門修士」学位を検討しているが、これを試しまたは設置した学部はいまだほとんどない。

学部教育

米国の数理科学の博士課程はきわめて強力であるが、米国の学部課程でヨーロッパ及びアジアに比較して数学科を設置しているところは少なく内容も深いものではない。これには大きな理由が 2 つある。(i) 米国の学部学生は、大学入学時において数学知識をそれほど有していないこと。50%以上は微積分を始める用意ができていない。(ii) 他の国では数学科の学部学生は数学とその関連分野に集中するのであるが、米国の学生は少なくとも 50%の時間を数学と無関係の科目に費やしている。これによって、米国で学部課程を終えた大学院生は、ヨーロッパの大学院生に追いつくために博士課程の期間を延長しなければならないことになるのである。これに対して米国の教育体系では、学生が専門外の科目を学び専攻を変更する機会が多くなる。例えば 1984 年に高校時代に A 及び A+を得て米国大学の数学科に入学した学生のうちで、75%は転科をしており、1989 年の数学学位取得者の 61%は他分野からの転科であった（巻末注記 13 参照）。

大学院教育

優れた大学の博士号取得者は、どこの国であれ、到達水準は同等であり研究への用意ができて点でも同等である。米国の大学院は一般的に、欧州やアジアの場合に較べてより多くの専門分野を提供しているが、最近の欧州連合の進展で欧州の学生は他大学、場合によっては他国の大学に容易に移ることができるようになった。これによって彼らにとっては専門科目選択の余地が大きくなるのである。欧州の大学院学生は生活費を賄うに十分な奨学金も受けている。米国では数理科学の学生の多くは、生活費を賄うために教師をしなければならない。

不確かな情報であるが、米国で数理科学の博士課程を始めた学生で学位を取得できていない割合は、西ヨーロッパの場合よりも多いという。これは特に米国の学生について当てはまる。米国の多くの大学で、第 3 年目までに博士課程に米国市民がだれも残っていない事実を報告している。

若者に魅力ある分野

過去 10 年に数理科学の学位を取得しようとする米国市民の数は、明らかに減少している。

1985 年から 1995 年の間に米国で数理科学に興味を有する大学 1 年生は 32%減少し、優秀な学生の場合は 23%減少している（巻末注記 14 参照）。この状況は他の国にも見られる。オランダ、ドイツ、フランス、ロシア、ポーランド、すべて過去 5 年の間に数学の登録数が著しく減少したことを報告している。過去 3 年に、中国人学生で米国大学院へ数学で応募する者の数が着実に減少している。これはおそらく中国での関心が弱くなっている兆候である。

欧州の応用及び集中化への動向

欧州連合では、欧州委員会が富の創出あるいは生活の質を高めることになる数学の応用の方向に重点を移してきている。現在の第 4 期の枠組プログラムでは、純粋科学へのほとんど唯一の支援は、人的資本と移動に対する予算化である。このプログラムは、EU 諸国の中で大学院生及び博士課程修了者の移動を支援し、会議とネットワーキングに補助金を出し、数学者の要求を実験科学者の要求より多く認めてその要求をカバーする議題を採り上げることによって、全体として数学の利益になるものになっている。しかし資金を地方管理から中央管理に移し、基礎研究から応用分野に移すことについては数学コミュニティの広い支持は得られていない。

結論

プラス面では、米国の数学コミュニティは、多くの細分化された分野で他国をリードしており、全体として数学の他の分野のどこかで生じた飛躍的前進に反応できると判断される。個人で見ると、米国の数学者は各分野の著名な賞を相応以上に獲得している。

同時に米国の数学コミュニティは専門分野の大きな課題を他国と共有している。それは外の科学とエンジニアリングの部門からの孤立であり、数学を目指す若者の数の減少であり、非学術的な分野、特に私企業との交流水準の低さである。

委員会は、米国の数学者が他国の数学者と比較したときに劣等感があるという印象を受けている。それは特に国の支援の点である。西ヨーロッパや環太平洋ではモラルの低さは明らかになっていない。欧州連合では大学院生及び博士課程修了者への機会と奨学金を拡大している。米国の学生は教師収入への依存が極めて大きく、それにより学位を得るまでの時間が長くなり、若い学生に対する数学の魅力を失わせ、米国の数学研究をきわめて脆弱なものにしている。

V. 調査結果

調査結果 1：学術的な成功

米国の数学はいまだ特別な存在である。米国の学術的な数学者は、新規の根本的な概念を作り出すことにおいて成功してきている。この優秀性は、米国の数理科学者が専門の賞を数多く受賞していることで、明らかであり、繰り返し確認されてきたことである。さら

に米国の数理科学者は、外で創造された新しい考え方を、発展拡張させる点で素早い。米国の学術コミュニティが第 2 次世界大戦以降卓抜した存在であり今日でもそうであることは疑いない。

米国の数理科学の大学院課程で学んだ数学者の成功が、西欧を含め各国から学生を集めている。一般的に米国の大学院課程は米国以外の課程と比較して規模が大きく範囲も広く、それが魅力として加わっているのである。

米国は、一国の数理科学のコミュニティとしては最強であるが、この強さにはやや脆さが伴っている。自国のみで養成した専門家を考慮すると、米国は西欧よりも劣後するだろう。アメリカ生まれの者の数理科学への興味は着実に減退している。米国の最優秀数学者の多くが米国外で教育を受けており、米国生まれでない者の数はさらに多い。これらの数学者のうちの相当数が、旧ソビエト連邦からその崩壊後移住したのである（ロシアの数学における強みは、研究資金がなくなり指導的数学者の多くが移住したことによって非常に弱体化している）。西ヨーロッパは数学について米国と同じくらいに強力であり、重要な分野でリードしている。西ヨーロッパはソビエトから移住した数理科学者の存在でも利益を得ている。

第 2 次大戦前には米国が数学研究の点で欧州にかなり遅れをとっていたことは、注意しておく価値がある。戦後、ドイツからの亡命者を得たこと、連邦政府の科学への投資が増えたこと、及び大学システムが拡充したこと、これらのすべてが数理科学で米国が力強い成長をする原動力となったのである。しかし連邦政府の助成は数理科学のコミュニティの規模拡大に追いついておらず、大学制度の拡大は 2, 3 の州を除き止まっている。米国を数理科学でリーダーにした勢いはもはや失われている。

数理科学での米国のリードはいくつかの専門分野では失われつつあり、それは米国の指導者が間もなく引退する分野に若い世代が不足していることでさらに加速されている。一例は数学基礎論で、過去 20 年にわたり、他国での進展に寄与しあるいは反応するために十分な数の若い数学者を惹きつけることができなかった。その結果、米国の数理論理学の指導者の平均年齢は 50 歳を超え（証明論よりも高い）、数学の外の分野よりもきわめて高くなっている。記号計算はヨーロッパが強い専門分野であるが、米国は商業的には相当の存在であるものの学術的な深さが伴っていない。米国の大学で数理科学からコンピュータ科学が分離したことが、組合せ論、離散数学、記号計算その他の領域でマイナスの影響を与えている。それによって数学的基礎の少ないコンピュータ科学者が教育されるという結果ともなっている。

米国の数学の強みは米国の外から来た数学者に頼るところが大である。国際的な賞を受賞している著名な米国数学者の多くが、米国生まれではなく米国で教育を受けたのでもなかった。全米の学術的な数理科学者のうち初期の教育を米国外で受けた者の数が増えている。これから出版される COSEPUP（科学技術公共政策委員会）の報告書によると、数学の上位 10 学科で、終身在職権を有する教授の 21%、終身在職権を得ることになる教授の 58%は

学部教育を米国外で受けていたとのことである。この状況は有力学科だけに限られない。1991年から1992年にかけて米国の大学及び専門学校で採用された、博士号を保有する常勤数学教授の国籍は以下のとおりである。米国籍 37%、西ヨーロッパ 16%、東ヨーロッパ 13%、アジア太平洋地域 22%、その他 12%（巻末注記 15 参照）。これらの任命のうち 26%は直接海外からの就任である。米国産業は常に米国外から数理科学者を採用しようとし、数学能力を要する仕事を海外に送っている。数学はきわめて国際的な分野であるが、この傾向は、高い水準の学術的な認識を得ていることが示すほどには米国の学術的な数学研究が確固としたものではないことを示唆している。米国は数学を職業経歴として米国民にとってより魅力的なものにしない限り、以下のような事態の進展で、訓練された数学者の供給が産業界はもとより大学で必要とする水準以下となる恐れがあるのである。（i）よく訓練された数学者を生み出してきたソビエト連邦の崩壊、（ii）中国籍の米国大学院生に対する課程終了後の帰国圧力、（iii）世界的な学生の数学に対する興味の減退、（iv）ヨーロッパで教育された第一級数学者を保持しようとする西ヨーロッパの競争。

資金援助の欠如が多く若い数理科学者のキャリアを挫折させている。数理科学の新規博士号取得者に十分な研究員ポストを与えられないばかりではなく、若い研究者で研究助成金を得るのに成功する者はあまりいない。学術的な数理科学者のわずか 35%しかそのような助成金を得ていないことから、若い研究者が研究職にあり続けることは非常に困難である。この支援の欠如によって、特に物理学、生物学、エンジニアリング科学の若い研究者への支援と比較したときに若い数学者を落胆させ、その多くが学究生活を離れウォール・ストリートその他の学術以外の分野へ向かうことになるのである。このような若い研究者の喪失は、数理科学における将来の米国の強さを蝕む可能性を秘めている。

調査結果 2：数学利用者との相互作用

学術的な数学は大学外の数学との接触が不十分である。学術的な数学にとり非常に重要で、しかも最も難しい機会、産業との緊密な連携を築くことである。大学と産業の間の連絡不足を、どちらか一方の責任として非難することはできない。学術的な数学は高密度かつ集中的で、ときに孤独な知的活動である。それと対照的に、産業界の数理科学者は集団で仕事をし、通常は新概念を開発するよりは分析的な課題に取り組むことが多い。さらに困難なことには、多くの企業では数学に特化した部門や、「数学者」「統計家」という職務区分が実のところないことである。この状況は数学が今日よりも産業に普及しておらず経済競争の中心的役割を果たしていない時期に展開したものであるが、それによって学術的な数学者が産業界の同僚と連絡を取ることを難しくしているのである。

産業界と学術的な数学が効果的に相互に交わるとすれば、両方がお互いに手を差し伸べねばならないことは明らかである。産業界は、数学者を容易に識別できるようにし、大学の同僚が連絡を取りやすくなるよう、彼らを組織することによって、コミュニケーションを多くすることができよう。産業と学術との間の連携が化学、製薬、エンジニアリングで

見られるように強まれば、学術的な数学者は自分の専門についてより大きな視野を得ることができるだろう。好例がボーイング、ルーセント、IBM、AT&T、製薬会社の応用数学グループ、金融業にある。それらの企業では数理科学者を容易に見出すことができ、彼らは十分定義され洗練された数学的問題に取り組み、大学教授の助言や学生インターンを歓迎しているのである。このような効果的な交流から、応用数学において金融工学やコンピュータ利用の薬品設計などの新しい専門が生まれている。

学術的な数学はその他の専門と交流して成果を挙げることが可能であるが、その交流のあり方は数学及びそれぞれの科学部門の内向きな態度によってしばしば見失われる。我々は数学とはほとんど無限の可能性を有する分野であると信じている。しかしそれは数学が外を向いて他の分野と交流すればの話である。例えばバイオインフォマティクス、通信ネットワーク、地球環境モデルに見られるような、専門同士が交流は実質的な意味で重要であるばかりではなく、知的にも挑戦する甲斐のあることである。しかし、伝統的に学術的な数学者は、他の科学やエンジニアリングの学問でと同じく、そのような相互交流を求めることに消極的である。このような消極性は多くの専門的な刺激を無視することになり、数学的に新しい考え方と技術が必要な問題を解決する可能性を排除するのである。統計の専門家の場合、常に他者と共同作業をしており、このような事例は少ない。

大学の学科における偏狭な数学観は、大学院学生に対する狭い教育となり、学生の多くは学術的な数学のみにキャリアを求めるようになるのである。いくつかの学科では「純粋」に学術的な姿勢を維持することも適切だろう。うが、全体としては数学にとって他の専門と高い水準で交流することは、外の専門にとってと同じく不可欠である。

大学の構造が学際的研究を弱めている。上記の調査結果では数理科学者があまり積極的に他の科学者やエンジニアと協力していないことを批判しているが、そのような過ちの一部は米国でも外国でも大学組織と雰囲気であり、それが科学の領域を超えた協力を制約しているのである。学術的な評価システムでは協力を奨励していない。実のところ分野を超える人物は終身雇用の機会を減ずるのである。学際研究の必要性が高まることを考えると、先進的な大学は協力を妨げている専門性の壁を打破する方法を考えねばならない。

将来の科学的問題はきわめて複雑で、モデル化、シミュレーション、視覚化に数学の協力が必要になるだろう。数学的モデル化と実験観察とは車の両輪である。モデル化は観察と理論の両方を基礎としてなされるのであるが、それは次の実験とより正確な計測につながるものである。良いモデルにはそれに最適の数学理論が必要になる。1人の研究者が、複雑な問題を単独でモデル化するために、数学／計算科学の専門知識と別の科学の専門知識の両方を十分に維持するのはほとんど不可能である。良く定義されたモデルを作るには、数学者と専門分野の科学者からなる学際的なチームが必要になる。そのようなチームの各メンバーは、他のメンバーの専門知識を、その得意とするところも限界もわかるほどによく理解する必要がある。このような幅広さを得るには時間がかかり、全メンバーの関与が必要である。**助成機関は、学際的活動を認識し奨励するような財政支援をする必要があり、**

それとともにそのような事業が確固としたものになるには長い時間を要することを認識する必要がある。

「応用数学」と「純粋数学」が物理的に別個の学科として存在しているために、数学が何に應用でき何に應用すべきかという問題について、しばしば狭い見方が永らえることになっていたのである。歴史的には「応用数学」は、細分化された領域の「分析」を物理学とエンジニアリングの問題に應用することを意味してきた。このような応用数学の見方が、数学すべてを現実世界の問題に應用することを非常に制限していたのである。現在は多くの機会が得られるのであるから、見方は「数学のあらゆる領域は他の専門領域並びに産業及び商業との相互交流に貢献でき、その相互交流から利益を得ることができる」というものでなければならない。「純粋」と「応用」の区分は学問にとってきわめて破壊的であり、修復されなければならない。

調査結果 3：次世代の教育

米国の数理学の大学院課程は、特に上位 25 大学では、世界でも最優秀の部類にあると考えられ、他の国から多くの学生を惹きつけている。過去 10 年に米国の大学院の数理学の博士号取得者の 50%以上が米国外で学部の学位を受けている。米国の大学院課程をおえた者は、その教育内容で秀でている。その出版物は前の世代の者よりも内容が深く数も増加している。

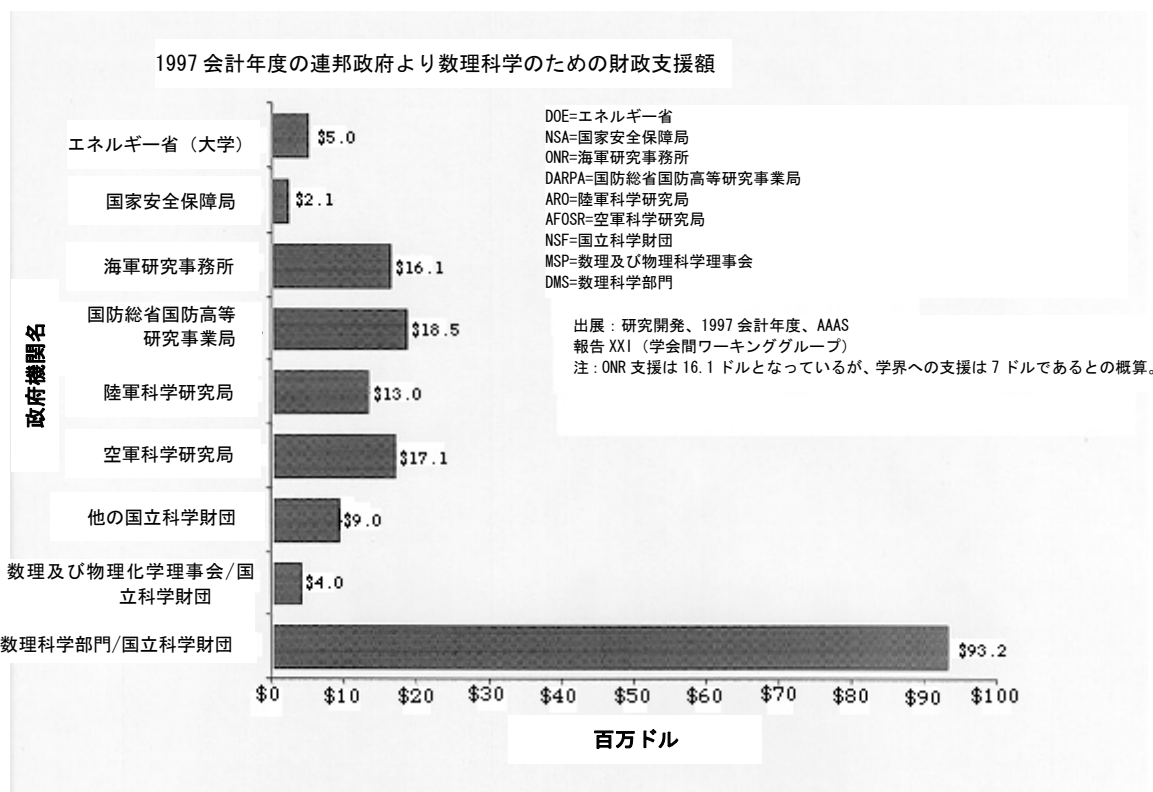
米国の数理学の大学院課程の優秀性にも係わらず、これらの課程に在籍する学生は他の科学の学生に比較して大幅に少ない連邦政府の奨学金しか受けていない。彼らはほとんど教育補助の固定給と自活のみに依存している。このような取扱いは、米国は数理学に高い価値を与えていないという明瞭なメッセージを送っている。これは西ヨーロッパでは確実に起きないケースである。

全日制大学院学生数と補助の内訳（巻末注記 16 参照）

VI. 学究的な数理学における研究に対する連邦政府及び非連邦政府による支援

連邦政府による支援

米国の数理学は非常に少ない支援に頼っている。NSF は米国の大学及び研究機関における数理学に対する支援の大勢を占めている。



Ⅶ. NSF に対する目標、提言、及びマイルストーン

数学に対する NSF 支援の目標

NSF の数理科学分野における特定の目標は、知的に卓越していて社会に関連した数学の学術的なコミュニティを構築し、それを維持していくべきであるということである。この目標は重点及び NFS の戦略的計画を保つことの重要な移行を含む。これは実績の判定基準及び学術的な数理科学における目標としての社会的妥当性を明確に含む。

伝統的に、米国数理科学省はそれ自身にとって知的に取り組み甲斐のある数学における問題点に焦点をあててきた。しかしながら、過去 3 年から 5 年のあいだに重点の移行が表立ってきた。これらの基本的な移行では、国家、科学、及び技術の他の分野、及び産業、商業、及び政府に対して数学が多大な利益をおよぼすと信じられている。これらの分野はつづいて、数理科学が取り組み甲斐のある数学的問題、数学を専攻とする学生に対する職業、各種専門分野の専門家とともに仕事ができる数学の可能性を提供することになる。それゆえ、NSF の数学における広範な目標は米国において最先端の数理科学を構築し、それを維持していくと同時に他の専門分野及び産業界との協業を活動的及び効率的に行うことを強く奨励するべきであるということである。

NSF はまた、十分な人数、質、及び幅広さをもった数学専攻の学生を育て上げるべきである。このことは教育、数理科学及び他の専門分野における研究、及び産業、商業、及び政府におけるニーズにあったものである。

NSF は以下の戦略をとってこれらの目標を達成していくべきである：

- ・当専門分野で活動する研究者の数を物理学、生物科学、及び工学と同等のレベルまで増やせるように数理科学に対する財政支援額が増加していることを示す
- ・他の分野の科学、技術、ビジネス、財政、及び政府が数学と関連しているような活動を奨励する；
- ・「純粋」及び「応用」数学の間のつながりを強化する；
- ・他の分野における各種問題点に対して数学の専門家及び学生を幅広く配置できるようにする；
- ・米国の学生に対して、数理科学は輝ける若い学生にとってより良い結果をだせる分野であるというような数理科学の魅力を広く知らしめるようにする；そして、
- ・数理科学の健全さにとっての基礎であるところの抽象数学をさらに維持し、強化していくことである。

NSF に対する提言

数理科学専攻の大学院生及び学部生に対して、より幅広い教育を奨励する。 NSF は博士課程教育プログラムの支援に焦点をあてて、幅広い教育を受けるとともに大学院生助手の指導労力を低減させながら、博士号取得のための時間を短くさせる必要がある。NSF は可能な限り大学院生及び学部生の両方に対して、数学とは異なる分野における数学的問題に対して幅広く数学専攻の学生を配置するようなプログラムに資金提供することを奨励すべきである。

博士課程及び博士号取得後の学生及び若い研究者に対して、物理学及び生物科学を専攻する者に対するのと同レベルでの資金提供を行う。 数理科学を専攻する大学院生の研究に対して、他と比べて低い金額の資金提供は、その意欲を低くさせるとともに、輝ける若者に対する当専門分野の魅力を低減させるものである。博士研究員の不足は学術の専門職育成能力を低減させるものである。NSF は博士号取得後の学生が博士課程修了レベルでの他の専門分野に没頭できるように奨励すべきである。

大学レベルでの数理科学者と産業、政府、及び大学における数学の利用者との間の相互関係を促進する。 NSF は学術的な数理科学者が複数専門分野において大学及び産業で参画できるようなプログラムの支援を増加するべきである。特に重要であることは、新しい科学的及び技術的開発から数学的チャレンジを引き出す努力を支援すること、及びそれらのチャレンジに立ち向かうような研究を奨励するということである。

抽象数学に関する研究を強化する。 抽象数学の強いコアは、米国における数理科学の健全さ、ひいては全ての科学に対して欠くことのできない部分である。なぜならば、卓越した抽象研究はしばしば、数理科学の利用者が問題につきあたる場合及び研究者がその利用者と良いつながりをつづけることが必要であるということにより刺激を与えられるからである。

そのリーダーとしての位置を維持していくために、米国数理科学の連邦政府としての主たる出資者として、その特殊な責務を理解する。

NSF の活動に対するマイルストーン

今後 3 年の間に NSF は以下の内容を目指すべきである：

数学を専攻する大学院生及び博士研究員に対する資金提供が十分に大きく増加していることを示す。これらの増加は、学生が教育指導に使う時間の短縮、幅広くより柔軟な教育、及び米国の学生に対してより魅力的な分野を構成することにより、大学院の学位取得のための時間を短縮することになる。

数学を含む専門分野間の活動の増加を示す。この増加は数学的概念の利用者のコミュニティへの普及、数学者の各種問題点及び従来型数学以外の機会への配置、及び数理科学者その他の専門分野の研究者間のパートナーシップの構築を奨励するものである。

大学院生及び学部生のカリキュラムを目的とした活動を奨励する。カリキュラム選択の幅を広げることを目的とすることによって、学生に対する数学関連の職業の魅力を増やし、将来の数学者としての職業的柔軟性を増大することになる。

数理科学に対して資金提供が増大していることを示す。多くの数理科学者が物理学及び生物科学と同じレベルでの資金提供を受けていることを示す。これは若い学術研究者を引き止めておくために特に重要である。

付録 1

上級評価委員会メンバー

評価委員会座長：

ウィリアム・E・オドム (William E. Odom) 退役中將

ハドソン研究所国家安全保障研究センター理事 (ワシントン DC)

マイケル・グロモフ (Mikhael Gromov) 教授

フランス高等科学研究所数学学部 (Bures-Sur-Yvette)

評価委員会委員長：

E・F・(ジム)・インファント (E. F. (Jim) Infante) 教授

ヴァンダービルト大学学芸大学学部長 (テネシー州ナッシュビル)

ダリル・D・ホルム (Darryl D. Holm) 博士

ロスアラモス国立研究所非線形科学理論部門センター (ニューメキシコ州ロスアラモス)

委員会メンバー：

荒木 不二洋 (Huzihiro Araki) 教授

東京理科大学理工学部数学科 (千葉県野田市)

シャーリー・ストラム・ケニー (Shirley Strum Kenny) 博士

ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校総長 (ニューヨーク州ストーニーブルック)

タニヤ・S・ビーダー (Tanya S. Beder) 女士

株式市場リスクアドバイザー (ニューヨーク州ニューヨーク)

マリア・クローウェ (Maria Klawe) 博士

ブリティッシュコロンビア大学学生学術サービス副長 (カナダビクトリア州バンクーバー)

マーシャ・J・バーガー (Marsha J. Berger) 教授

ニューヨーク大学クーラント研究所 (ニューヨーク州ニューヨーク)

ハンスピーター・クラフト (Hanspeter Kraft) 教授

バーゼル大学数学研究所 (スイスバーゼル)

レナート・A・E・カールソン (Lennart A. E. Carleson) 教授

スウェーデン王立工科大学数学研究所 (ストックホルム)

ドナルド・W・マーカード (Donald W. Marquardt) 氏 (故人)

ドナルド・W・マーカードアンドアソシエイツ会長 (デラウェア州ウィルミントン)

アルバート・M・エリスマン (Albert M. Erisman) 博士

ボーイング社テクノロジー担当役員 (ワシントン州シアトル)

H・ピーター・F・スウィナートン - ダイアー (H. Peter F. Swinnerton-Dyer) 卿, FRS

アイザック・ニュートン数理科学研究所 (イングランド州ケンブリッジ)

ジョージ・ホワイトサイド (George Whitesides) 教授

ハーバード大学化学学部 (マサチューセッツ州ケンブリッジ)

付録 2

各分野の評価

数理科学の部分領域を評価するにあたって、私たちは数理科学部門のスタッフの大きいな後援に支えられている。そこでは主導研究員からの情報及び同僚による調査システムからの結果をもとに内部評価を行う。パネルの個々のメンバーは自身の専門分野の評価に対して責任をもつものと考えられている。彼らは米国及び海外の専門家から助言を得て、また書類調査及び部門のスタッフによる同僚調査を行うのである。評価の結果は基本的に主観的で定性的によるものであるが、その基本とするところと結果からくるデータには強い自信をもっている。

しかしながら、当報告の本体より、補遺のほうがより技術的に詳しく記述されている。これは、短期的にはパネルメンバーでの使用に、中期的には数理科学部門で使用されることを基本に作成された。

評価目的のために数理科学は 9 つの分野領域に分かれており、それは NSF の数理科学部門のプログラム構成にあわせている。それぞれの分野の評価はどちらかという一般的なものにあわせて作られており、分野領域に対してのさらに詳しい評価は同僚による調査システムにて行われている。このシステムはこの目的に対しては非常に有効な方法であるとされている。

基礎理論

基礎理論または数学的理論は 4 つの分野領域に分けられている：**集合論**、**モデル理論**、**帰納的理論**、及び**証明理論**である。米国はこの分野において顕著な活動を示しているが、イスラエルやヨーロッパが全体としては優勢となっている。

集合論においては、米国はイスラエルとともにリーダーの立場にある。そこでは確定性、大基数、組み合わせ論の分野において画期的な結果を出している。しかしながら、集合論の研究者コミュニティは高齢となっており、若い数学者や大学院生はほとんどおらず、いたとしても大勢が外国人である。**モデル理論**の分野は世界的に盛況である。米国も参画しているが、その活動は、英国、フランス、及びイスラエルの活動に隠れて影が薄くなっている。この分野と数学の他の分野及びコンピュータ科学との間には注目に値する相互関係がある。**帰納（または計算可能性）理論**は相当数の完成された成果があるが、現在静止しているような状態である。大きなブレイクスルーまたはコンピュータ数学及びコンピュータ科学を利用したさらなる開拓がなければ次の 10 年間は大きな活動は期待できない。英国がリーダーの立場にある。米国は貢献しているが、研究者層が高齢であるために今後の活躍にはあまり期待できない。米国では**証明理論**はほとんどのものがコンピュータ科学のほうに移行されてしまっている。米国の貢献はほとんどない。研究のリーダーはフランス、ドイツ、ロシア、及びイスラエルがとっている。コンピュータ複雑性に関する主な進展が今後期待できる。

米国及び海外での基礎理論の著名なリーダーたちが数学の他の分野またはコンピュータ科学においても活動していることは注目に値することである。モデル理論のいくつかの活動的分野は、その分野がそれ自信のコア内及び他の分野と関連して成長していることを実証している。集合論及び帰納理論は相互作用をおよぼす可能性がある。しかしながら、過去 20 年間にわたって一般的に基礎理論は米国の若い数学者にとって十分に魅力のあるものではなかったという懸念がある。これはこの分野における脆弱性及び米国のコミュニティは他国の先進性に追隨していくことができないのではないかという懸念である。さらには、基礎理論のいくつかの重要な分野において孤立してしまうという不安がある。そしてそれは、数学の分野内及び科学と技術、そしてコンピュータとコンピュータ科学において顕著に機会を失ってしまうという結果におちいつてしまうのである。

代数幾何学及び数論

ヨーロッパがこれらの分野においてずっと長い伝統があるにもかかわらず、米国及び西ヨーロッパがこれらの分野領域を占めている。これらの分野は、古代問題は既に解答されているにもかかわらず過去 10 年間でフェルマーの問題及びモーデルの推測を解いたことなどでその頂点をむかえるなど、過去 50 年間に於いてすばらしい実績をあげている。さらには、これらの分野領域は物理学、暗号法、及び他の数学の分野に対して大きな影響をおよぼすとともに相互に作用がなされている。

代数幾何学は盛況である。現在の重大な問題はこの数年で解答されると見られており、そしてまた同様の重要性をもった問題が出てくるだろう。うとされている。数学の他の分野及び理論物理学との間に注目に値する相互作用がある。米国、日本、及び西ヨーロッパがリードしており、米国が最も活動的な研究者をかかえている。**コンピュータ代数幾何学**に関して米国は深さに欠けており、ヨーロッパが主導をとっている。

数論は 3 つの「大挑戦」で占められている：それらはリーマン仮説 (Riemann Hypothesis : RH)、ラングランの問題、及びブロック - カトウ - バイリンソンの推測である。後者の 2 つに関しては近年顕著な進歩が見られるが、ラングランの問題に関してはブレークスルーに向けてのさらなる進歩が必要である。RH に関しては新たな活動が見られるが、おそらくそれほど深さは必要としないだろう。米国と西ヨーロッパが主体となっている。カナダは非常に強力であり、ソビエト連邦は一時はリーダーの中にいた。

算術幾何学は近年見事なブレークスルーを得られた。それはフェルマーの最終定理に関する顕著な研究成果である。米国はこの分野で非常に強力であるが、おそらくヨーロッパはさらに強力なのだろう。**解析的整数論**は現時点ではどちらかというとおとなしく、新たな別の方法での挑戦が必要である。米国が明らかにリーダーとなっており、米国では非常に深く掘り下げられているが、若い研究者が乏しい。**コンピュータ数論**は強力なコンピュータに増加的にアクセスできるようになり、また暗号法とも関連づけられるようになったことから、非常に高く活動されている分野である。ヨーロッパが文献公開で大きく貢献し

ている。また、機密及び著作権に関する顕著な研究において米国はリーダーであると見られている。

分野領域全体に関しては、内部開発及びこの分野の外部に対する影響の両方に関して非常に注目に値する可能性があると考えられている。それにもかかわらず、この分野に入ってくる若い米国人の数が顕著に減少してきている。現在米国で貢献している研究者の大多数は海外にて教育を受けている。これは 20 年前では考えられなかったことであり、現在では研究者は米国とヨーロッパの間を自由に行き来しているのである。

代数学及び組み合わせ論

代数学はこの 10 年の間に顕著な研究が進んだ。非常に活発な分野領域であり、位相数学、幾何学、及び理論物理学と有意義な相互関係をもっている。米国はリーダーとして見られており、西ヨーロッパが非常に近い 2 番手である。どちらもかつてのソビエト連邦からの数学者の移住により恩恵を受けている。ロシア、日本、イスラエル、及びオーストラリアもまた活動の中心となっている。

代数学的表現理論においては幾何学、組み合わせ理論、及び理論物理学との相互作用による研究が進められている。米国がリーダーであり、西ヨーロッパ及び日本も非常に強力である。米国は**有限及び組み合わせ群論**においてもリーダーとなっている。そこでは、幾何学的アイデアの導入により新規アプローチ及び結果をもたらしている。西ヨーロッパ、ロシア、及びイスラエルもまた強力な活動の中心となっている。**非可換幾何学及びリー代数**においては代数幾何学及び理論物理学（量子群）との関連により活発な研究が行われている。米国及び西ヨーロッパが研究のリーダーとなっている。米国は**環論**においてはあきらかにリーダーとなっている。そこではさらなる大きな進歩のためにはブレークスルーが必要である。**コンピュータ代数**はまだその幼年期であるが、非常に大きな可能性がある。ヨーロッパはあきらかに米国よりも深さと幅があり、オーストラリアも強力な参画者である。

グラフ理論は数学と応用の分野の間をつなぐ架け橋の役を担っている。米国には非常に強力な研究者たちがおり、数学部門ではなく、コンピュータ科学、電気工学、及び産業界で研究をおこなっている。ヨーロッパにおいては数学者、コンピュータ科学者、及びエンジニアの間で強いつながりがある。その結果、応用分野においてヨーロッパはより強力である。米国はグラフマイナー理論においての先駆者であり、依然としてこの小さな分野領域においてリーダーの立場にある。

米国は**代数組み合わせ論**において、あきらかにリーダー的存在で深さをもっている。大きな挑戦（マクドナルドの推測）及び注目に値する量子コホモロジーとの相互作用がすばらしい結果を導いている。**確率的組み合わせ論**においては米国には数多くの研究リーダーがいるが、深さに関してはそれほどではない。近年のブレークスルーは古典的極値問題の解答を導いた。西ヨーロッパ及びイスラエルがその他の主な活動中心地である。

代数学及び組み合わせ論の分野領域は数理科学の中核であり良質の学生及び若い研究者にとって魅力のあるものである。この 10 年の間、結晶学、ロボット工学、コンピュータ計算効率、DNA 塩基配列決定法、及びコンピュータネットワークといった幅広い分野における応用組み合わせ論に対する協調的な努力がなされてきた。米国においてこのことは理論コンピュータ科学によって最も頻繁におこなわれてきた。ヨーロッパでは離散数学が非常に強力である。米国の主流の代数学者と他の専門家との間の交流は乏しい。

位相数学及び幾何解析

位相数学及び幾何解析は過去 10 年間に於いて盛況である。この分野領域は特定数学研究の分野として、数学の他の分野における幾何学的及び位相数学的概念を使用するという考え方として、そしてコンピュータ科学及び自然科学の中から生まれてくる幾何学模様の分析において、数理科学の中核をなすものである。おそらく、近年最も素晴らしい研究は幾何学、位相数学、解析学、及び理論物理学は互いに密接に結びつき互いに補足しあうことにより成り立っているのだろう。米国はリーダーとして認められている。西ヨーロッパでは十分に強力であり、日本もそれなりの強さがある。

もともとは理論物理学であったサイバーグ・ウィッテン理論は**シンプレティック・トポロジー/幾何学**において効果的な手段であると証明された。それらは近年の活動に刺激を与え、また長年続いている問題の解決へと導くものである。全世界にわたって活動しているグループがあり、特に米国及び西ヨーロッパにおいて顕著である。代数学的不変式の理論、特に**低次元多様性**及び 3 次元多様性における**ノット**に対する不変式の研究は特別に動きの速いものであり、物理学との相互作用に刺激を受けてきた。米国はこの分野において近年の英国からの移住にささえられて特に優勢を保っている。ロシアも強力である。**3 次元多様性の分類**における研究はサーストンの幾何学的推測に導かれることにより継続している。これにより短期的な成功が期待できる。米国における集中が強さを導いている。**ホモトピー理論**は代数幾何学において重要な役割を増して担ってきている。しかしながら、概ね成熟してきている。米国はこの分野において強力である。**代数的 K 理論**においては、強力な計算をおこなうことにより大きな進歩がなされた。米国、フランス、及びノルウェーが主な貢献者である。

リーマン幾何学においては過去 10 年間でいくつかの大きな研究開発があった。この分野においては米国と西ヨーロッパの両方が非常に深い。幾何オブジェクトに関する微分方程式に対する**規則性理論**は研究の重要な分野であり、主に米国が活動してきている。**ハーモニックマップ**に関する米国及び西ヨーロッパにおける近年の研究は超剛性及び表現理論を示唆している。数学的構成要素における幾何学の合成、解析、代数学、及び位相数学を含む**非可換幾何学**は近い将来に非常に大きなブレークスルーを導くと思われる。米国及び西ヨーロッパの両方がこの分野のリーダーとなっている。**幾何学的測度論及び極小曲面**においては、華やかさはなかったとしても過去 10 年間に於いてしっかりした進歩があった。

これは物質研究における問題への応用として主に米国にて研究されてきた。

幾何学的アイデアをその予想される使用者に広く普及させると同時にこの分野領域における新しいアイデアを刺激させるためには、米国及び海外の両方において、位相数学者、幾何学研究者、及び他の科学技術分野の人たちの間で相互に刺激あうような活動が絶対的に必要であると考えられている。非常に限られた幾何学及び位相数学者のみが現在、DNA 及び高分子、機械システムの制御、ロボット工学、及び画像処理における専門家たちと共同研究をおこなっている。相当数の若い人たちがこの分野領域に入ってきているが、（他の分野領域と同様）多くの活動は海外で教育を受けて米国に移住してきた研究者たちの結果である。

解析

解析は理論と実施が交わる分野領域である。米国はこの分野においてリーダーであると見られている。西ヨーロッパ、ロシア、及び日本でも非常に力強い活動がなされている。過去、解析の幅広い分野において急速な進展がみられた。それは、この分野領域においての8回のフィールズ賞において、6回もメダルを受賞しているということにあらわれている（うち3回が米国在住者である）。非常に高いレベルで国際協力がなされているために、数学の国際的特徴が解析分野に反映されている。

微分方程式の分野は他の科学及び技術に対して非常に重要なものとなっている。通常の微分方程式においては、**数値解析**及び**動的システム**の活動に関連して、米国には長い伝統があり非常に活動的なグループを持つ。西ヨーロッパのグループはリーダーとしての座を追いかけているところである。**偏微分方程式**において、線形理論はすでに成熟しており、非線形理論は急速に成長している研究分野である。米国はその草創期においてリーダーの役割を果たしてきたが、現在では特にフランスを中心とした西ヨーロッパとともにその役割を担っている。米国の若い研究者がこの分野に魅力を感じない限りは米国の現在の立場は維持できなくなるだろう。

非線形偏微分方程式、演算子代数、力学系システム、表現理論、及び数理論理学の可解モデル、及び**調和解析**（及び応用）において多大な進歩があるとの確信がある。これらの進歩は全世界で起こり、米国がリードしている。他の分野と同様に、米国においてリードしている研究者、若手教職員、及び大学院生はほとんどが最近の移住者である。解析の分野領域は物理科学及び工学部門と応用分野において非常に良い相互関係を維持している。ほとんどの問題はそれらの分野からの現象の研究に影響を受けている。将来において、生物科学との連携をさらに増加させていく必要性が感じられる。それらの連携が欠乏することとは、重要な機会の損失を意味するからである。

確率

ギャンブルのような選択の研究から生じる確率は、厳格な内容としてどちらかということ

新しいものである。近代確率により統計的推測に対する基礎理論が導かれる。そして、それは測度論及び解析学の分派と密接に関連している。近年、乱数度及び不確定現象に力が注がれている。確率に関する新規の多くの研究は数学以外の問題に影響を受けている。

米国は理論、応用、及び計算論的アプローチを含めた確率の全ての点において中心となっている。文献計量学的データによると、確率論の文献のおよそ半分は米国を中心とする研究者によるものである。活動の他の中心は、フランス、英国、カナダ、及び日本である。米国での活動は幅も深さもあるが、それに比べて海外の活動ではより狭い部分に集中する傾向がある。かつてのソビエト連邦は一時非常に強力であったが、現在では弱くなっている。

一般的には、確率論は今日非常に活発である。それは基礎理論の開発、及び数学の他の分野や他の科学分野との相互作用の両方においてである（確率論的偏微分方程式、スーパープロセス、パーコレーション、ヤン - ミルズの方程式、乱流、統計物理学、及び臨界現象との相互作用分野である）。2 番目の強みは、米国の確率は幅広い応用分野との密接な関係を維持しつづけているということである。米国における応用確率は大いに拡大しつつ、生物科学（遺伝学、DNA 構造、競争過程）、医学（伝染病学）、及び環境科学（水文地質学、環境計量学）における問題から刺激を受けている。応用確率学者による貢献がオペレーションズリサーチ及び管理、コミュニケーションにおける確率ネットワーク、及びファイナンス工学における応用研究を支えている。これらの全ての分野において、米国の確率研究者は第一線にいる。英国、カナダ、及びフランスもまた活動的である。コンピュータ確率学において米国はまた活発である。英国は二番目に強力な中心である。

確率は科学及び技術において浸透している。工学、コンピュータ科学、物理学、経営学、及び財政学において注目に値する活動である。これらの分野における研究者たちは学術的な確率コミュニティとの密接な関係をもっている。それにより、理論及び応用の両方の分野においてすばらしい結果を導き出している。そして、そのほとんどは新しい技術的研究開発からの刺激をうけている。コンピュータ及びシミュレーションは重要な役割を増してきている。

応用数学

応用数学は数学の分野領域として大きく名をあげてきている。そしてそれは、その公式化及び研究が方法と内容において数学的であるところの実際上の問題により刺激をうけてきた。伝統的には、この用語は物理科学において解析の応用というような形で使われてきた。しかしながら、現在では全ての数学が応用というものに関連しており、それゆえに応用数学という用語は異なった専門分野としてみられるべきである。

米国は応用数学のいくつかの分野においてリーダーとなっている。特に注目を集めているのは**コンピュータビジョン**、**金融工学**、**材料工学**のほとんど、及び**数理生物学**の一部である。前回の工業数学及び応用数学国際会議への米国からの招待参加者は他のどの国より

も多いものであった。

科学と工学における応用数学者と実務者との間でも緊密な交流が非常に大切である。米国においては、応用数学の研究者は単独で研究をおこなっていることが多いが、他の分野領域の数学者よりも専門分野を越えた研究の方が多く、それがまた望まれている。ヨーロッパではこの分野に多くの投資がなされている。英国では産業と大学間の密接なつながりが多くなされている。そして、フランスにおいては工業と数学が緊密な関係をなしている。

米国では**流体力学**及び**材料科学**といった方面に急速に研究の矛先が向けられているが、これらの分野における数学はまだ幼年期にある。化学、生物学、工業、及びデザインから生じる問題に対して、研究者たちからの反応は非常に遅いものがある。連続体力学、構造的ゲージ理論、及び理論的/数理的物理学の他の観点は長いあいだ米国よりもヨーロッパにおいて活発な研究がなされている。**最適化**は米国が最も強力で多くの応用が出ており、非常に活発な分野である。米国においては、産業工学及びコンピュータ科学の部門において最も活発となっている。**制御理論**は工学の全ての分野で活発で、米国が非常に強力であるもう一つの分野である。

将来的には、応用数学はコンピュータモデリング及びシミュレーション及び解析的理論からの応用と密接なものになるだろう。科学の他の分野とのさらに強力な相互関係と産業界との強い連携がこれまで以上に必要である。

コンピュータ数学

コンピュータ数学は数学的問題に対してコンピュータを使用して信頼的及び効率的な解を求めるための数学の分野である。一般的には、**アルゴリズム及びデータ解析と同様に、応用数学に非常に関連している数値解析及び近似理論**が含まれるが、現象のコンピュータモデリング及びシミュレーションも含まれる。記号処理及び数学的証明において問題の精緻な描写をおこなうにあたりコンピュータを使用する場合があるが、それらも含まれる場合がある。既に記述しているように、数理科学の多くの分野領域はコンピュータを使用している部分がある。効率的な計算（特に各種の並列処理において）をおこなうにあたってコンピュータアーキテクチャが多大な影響をおよぼしていることからコンピュータ科学と強力な連携がある。

コンピュータ数学の成長に大きな影響をおよぼす要因は以下のようなものがある：

- ・ コンピュータの性能及びアーキテクチャの変化；
- ・ 数学的サブルーチンから構造解析コードまでにおいて、標準パッケージが出てきたことにより専門家でなくともコンピュータを使用できるようになったこと；
- ・ 特定の専門分野がコンピュータの性能を向上させる可能性から問題の幅広いクラスまでの根本的な構造の観測；そして、
- ・ 実際にテストを行って費用がかかるのに比べて詳細の物理現象を正確にシミュレーションしたいという数学の使用者の欲求。

コンピュータ数学は産業、財政、公共政策において重要な柱となってきた。最良の例はボーイング社のコンピュータによるデザインである。ここでは数学者がコンピュータ数学において十分に訓練されている必要がある。残念ながら、数学者によく研究された良いコンピュータ技術は標準パッケージに入っていることは少ない。逆にいえば、アプリケーションに入っている重要なアイデアはしばしば数学的に洗練されていないということである。

過去 10 年間にわたって、この分野における文献の質は非常に向上した。そして、その重要性和影響力は今後も増加していくだろう。しかしながら、全体としての分野は断片化しており、十分に合成されておらず、産業界及び別の科学者により開発された新しい技術は洗練されていない。

米国はコンピュータ数学（特にその商業分野において）におけるリーダーとして認められているが、全ての分野においてではない。米国は数値解析のある分野及び記号計算において西ヨーロッパの後を追うかたちになっている。しかし、商業製品の提供に関してはあきらかにリーダーとなっている。

コンピュータ数学における現在の強みは、数多くの分野において物理的なテストの代替としてのコンピュータモデリングが幅広く受け入れられているということである。最適化における顕著な研究は分析技術の中心に近づいているコンピュータモデリングに移ってきている。さらにはありがたいことは、最近では低価格で高性能のコンピュータが簡単に入手できるようになってきたということである。

コンピュータ数学においては弱点もある。各種の分野からの問題特性を利用したコンピュータモデリングからきた新しい数学の合成に対する顕著な一般エラーである。その結果として、その分野はより断片化される。そして、応用分野においては必要とする専門家を得ることができなくなる。この断片化は数学のある分野においては衰退していつてしまうことになるのである（例えば、「だれも占領しないということは、だれもそれに興味をもっていないということだ」というあるヨーロッパのレビューによるコメント）。

統計学

統計科学は米国の分野領域において非常に好調であり、米国があきらかに世界のリーダーである。統計学は伝統的には英国が強力であった。しかし、ヨーロッパ大陸において急速に拡大してきており、米国のリードもそれゆえに少しずついさくなってきている。オーストラリアと日本が顕著な中心となっている。

統計学は常に応用分野とつながってきている。その顕著な結果は、理論統計学においてさえ、結果に関連する応用分野のクラスに大きく依存している。この点において、統計学は、コンピュータ数学を除いて数学の全ての分野領域の専門性と大きく異なっている。

米国は**理論統計学**において高度な活動をおこなっていると同時にリーダーとなっている。他の中心ではヨーロッパ大陸とオーストラリアである。**応用統計学**においては米国はこちらもリーダーとなっている。英国も非常に強力な立場にいる。日本とオーストラリアは卓

越の中心となっている。西ヨーロッパでは研究開発が行われている。どちらの分野においても米国の専門誌はこれらの分野を占有している。米国はあきらかに**コンピュータ統計学**のリーダーとなっている。英国も強力な立場にある。この分野においての急速な進歩は応用への顕著な重要性を意味する。

学術的なコミュニティと産業及び政府における利用者との間の相互関係は高く開発されており、それゆえ、多専門性研究における伝統的な関与と同様に、理論的アイデア及び応用からの難問が急速に普及している。しかしながら、応用及び多専門性プロジェクトの両方において、統計モデルの間違った使用、及び科学者、エンジニア、社会学者、及び他の統計方法の利用者に対する教育の質という深刻な問題が存在する。観察はさらなるデータを生み出すことから、この問題を解決することは非常に重要である。これはおそらく定期的に統計学者研究チームを含むことになるだろう。

データ検索及び情報技術が現在必要としている非常に大きなデータセットの解析に関して多大な機会が存在する。データ解析は統計学の基本であるが、データ検索における困難は全ての確率が数学の主流からくる必要性となる新しい技術を求めている。例えば、量子力学からの概念が新しいツールを提供するかたちになると思われる。

統計学においては若者に対して学术界、産業界、及び政府において十分な職業機会がある。高い比率で大学院生は海外生まれであり、その多くは卒業後も米国に留まる。

付録 3

今後数十年のうちに考えられる傾向

著者：マイケル・グロモフ (Michael Gromov)

ここに数学において今後数十年のうちに考えられる傾向に関する簡単な意見をいくつか述べておく。

1. 古典数学とは構造的調和の追及であり、われわれの 3 次元の連続体は物理的世界の必須特性に浸透する驚くべき (回転及び並進) 対称性 (集団 $O(3)$ 及び $(R3)$) を有していると古代ギリシャの幾何学者が認識したことから始まった。(我々は歩行などの機械的な動きを生み出したり体験したりしているが、この対称性に対しては日常生活で何度使用しても何度遭遇しても常に知的な面で盲目である。これは $O(3)$ が理解しづらい非可換性を持ったためでもある)。その後、より深い (非可換性) 対称が発見された。相対性におけるローレンツとポアンカレ、素粒子のゲージ群、代数幾何学におけるガロアの対称性、数論などである。そしてよく似た数学が例えば結晶や準結晶、フラクタル、力学系、統計力学に対する自己相似性、また微分方程式の一価性などのより低い基本的レベルでも再び現れる。

世界の構造における対称性や不変性の探求は、今後も純粋数学 (及び物理学) の中心となるだろう。時には (そしてしばしば予想外に) 数学者によって発見される左右同形

が理論上だけでなく実践的に適用できるようになるだろう。すでに我々は過去にこのような事例を何度も見てきた。例えば、積分幾何学はX線断層撮影（CAT スキャン）の基本であるし、素数に関する計算は完全符号を生み出し、集団の無限次元表現は接続性の高い大規模な経済効率のいいネットワークを示唆する。

2. 数学の実質が大きくなるにつれ、数学自体が論理分析及び数理分析の対象となった。

これによって数学的論理学が生まれ、その後理論的なコンピュータサイエンスが生まれた。後者には今新しい時代が到来している。古典数学の概念を吸収し、理論的に考案されたアルゴリズムを実際に実行するコンピュータハードウェアの技術的進歩の恩恵を受けているのだ。（高速フーリエ変換と高速多極アルゴリズムは、日々エンジニアが使用する数値法における純粋数学の影響を強く示す例である）。また、論理的な計算概念は量子コンピュータプロジェクト、DNA ベースの分子設計、生物学におけるパターン形成、脳の力学など別の分野と相互作用する。数十年のうちには、コンピュータサイエンスがさらに深い数学的レベルにおける概念を展開させ、それに続いて例えば（長年望まれている）人工知能やロボット工学における現状突破など、コンピュータの工業への応用における急激な進歩が予想される。

3. 幅広いさまざまな問題があり、それらは一般的には膨大な量のゆるく構造化されたデータを扱わなければならないような実験科学（生物学、化学、地球物理学、医学など）に由来する。問題となる構造が本質的には存在しないような場合には、伝統的な数学、確率論、及び数理統計学は非常にうまくいく（皮肉なことに、局所的レベルにおける構造機構や相関関係の欠如によって全体的な対称性は高くなる。このようにして、確率変数の和にはガウスの法則が現れる）。だが、我々はしばしば古典的確率が当てはまらない構造化データに遭遇しなければならない。例えば、鉱物学的な形成や生体組織の顕微鏡画像は考慮しなければならない（未知の）相関関係を隠してしまう。（通常我々に「見える」ものは「真の画像」ではなく、光、X線、超音波、地震波などの複数の波が散乱した結果である）。浸透理論、自己回避のランダムウォーク（溶媒中の長分子鎖のモデリング）などにおいては、より理論的な例が見受けられる。制限のない対称性と純粋なカオス理論との間に広がるこのような問題は、新ブランドの数学の出現を待っている。これを進歩させるには、数学理論を現在利用可能な実験データと適合させるためにコンピュータを使ったり科学者とのより緊密な協力を得たりした新しい数学のやり方の他に、急進的な理論概念が必要である。（信号や画像のウェーブレット解析、文脈依存の逆散乱法、幾何的尺度分析、結晶化した形態中の大きな分子の X 線回折分析はいくらかの可能性を示している）。

この展開の理論的及び産業的影響はどちらも非常に大きくなるだろう。例えば、効率的な逆散乱アルゴリズムは医療診断に革命をもたらし、超音波装置が最低でも現在の X 線分析と同じくらい効率的になる。

4. コンピュータの力が理論上の限界に近づき、より現実的な（従ってより複雑な）問題

に取り組むとき、我々は科学や工学において数値をうまく実現させる上で障害となる「次元の呪い」に直面する。ここで、上記 2 及び 3 で示した概念と合わせ、コンピュータプログラミングだけでなくコンピュータアーキテクチャにおいてもずっと高レベルでの高度な数学的知識が必要になる。ここで成功すれば強力に増大し続けるデータの配列を使った計算を実施する理論的な手段が見つかるかもしれない。

5. 我々は教育や概念の伝達をもっとうまく行わなければならない。現在の数学の実質のボリューム、深さ、構造的複雑性ゆえに、数学的発見を 1 つの領域から別の領域へ伝達する新しいアプローチや非数学者に対する数学的概念のアクセス性を大きく向上させる新しいアプローチの発見が必須となる。現状では、我々数学者は科学や工学で何がおきているのかがほとんどわからないことが多く、また多くの場合、実験科学者やエンジニアは純粋数学における進歩が提供する機会に気づいていない。数学者の教育にもっと科学を取り入れ、またこれからの科学者やエンジニア達を中核となる数学に触れさせてこの危険な不均衡を元に戻さなければならない。これには新しいカリキュラムと、基本的な数学的手法及び概念（特にここ数十年で展開されたもの）をより幅広く聞いてもらうようにするという数学者の多大なる努力が必要である。我々には、純粋数学と応用科学を仲介する新しいタイプの数学専門家の養成が必要である。健全な科学と数学には、概念の融合が不可欠だ。
6. 我々は、数学的研究の資金調達を増加させなければならない。さらに多くのコンピュータの力を利用し、科学と産業との協調を引き締めていくと、数学の動態を支援するさらに多くの資源が必要になる。さらに多くの資源が必要とは言っても、我々は科学の他の分野よりもずっと少ない資源のみを必要とするため、利益／投資の比率は数学の場合最高となる。特に我々の概念を一般化させ、適用させるべく多大な努力をした場合にはこの比率はかなり高くなる。したがって、数学的研究の全ての可能性、そして近い将来や長期的な産業開発における数学の重要な役割について社会に認識させることが重要なのである。

付録 4

数学における基礎研究 学術界と産業の協調

1997 年 11 月 4 日にニュートン研究所 (Isaac Newton Institute) にて開催された座談会の研究報告書 (ジェレミー・ガンアワードナ (Jeremy Gunawardena)、BRIMS、英国ブリストル、1997 年 9 月 16 日)

数学とは、科学の中でも人類に対する貢献の深さ、幅広さにおいてユニークな科学であり、全ての精密科学、一部の社会科学、そして全ての伝統的工学に対して基礎構造を提供する。これは正確さ、汎用性、能力という純粋数学知識の集成によって支持される [1](#)。本題の起源は古代にさかのぼるが、その大きな開花は第一次産業革命や 18 世紀及び 19 世紀の

工業化社会の発展と並行して起こった。

社会はエネルギーを基本とする社会から情報を基本とする社会へと進化し、現在ではコンピューティング、通信、金融、生命科学における発展によって火がついた第二次産業革命が起こっている。政治と経済の同時変化は、基礎研究の環境を変化させている。政府は研究の公的資金投入基準を変更し、妥当性、技術移転、富の創造を重視するようになった。冷戦の終結に伴い防衛費が削減され、研究費の大きな資金源がまた少なくなった。大学は基礎研究への貢献を維持しようとしながら、学生を手腕が問われる求人市場へ送り出せるようにと奮闘している²。これによって出現するのは、数理科学への大きな挑戦と、産学官における基礎研究の新しい均衡である。

この大きな挑戦の例としては、(1) コンピュータ工学に対する数学的基礎構造の展開、(2) インターネット及びそのサービスへの自在なアクセスの提供、(3) 形状が原子の大きさにまで小さくなるため、電子装置の物理学と工学、が含まれる。これらは単なる技術的な課題ではない。数理化学の複数分野における基本的な進歩が必要なのだ。

工業・応用数学会 (SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics) 及び関連機関に代表される経営数学の有名な伝統がある³。これは必要不可欠であるが、新たな産業発展は今までは純粹と考えられていたもの (代数幾何学、数論、論理学など) など、新しい分野の数学を活用し始めており、まず第一に適切な数学的定式化が欠如しているような問題が目立ち始めた⁴。

エンジニア、数学者、及びその他産学両者による持続的な共同研究は、大きな挑戦課題に取り組む上で必要不可欠のようである。電気通信の初期には、このような研究の先例がある。つまり、電話への普遍的アクセスの提供という商業的かつ工学的な挑戦が確率論及び他の分野の数学における基礎的開発を促進したのだ⁵。まだそれに匹敵する偉大な解決策はないが、ワールドワイドウェブの発展は我々に同様の尺度と複雑性を持った挑戦を与えている。

このような挑戦がうまく対処されるような現代環境はいくつかある。上記にあげた電気通信事業の大半は、もう今は存在しない独占的な商業環境において AT & T ベル研究所 (AT & T Bell Laboratories) が実施してきた⁶。産業はごく最近になって産学の哲学と実施例を融合しようとする新しい環境での実験を始めたのだ⁷。

組織的構造の欠如は、人材の欠如と同等である。第二次産業革命の大きな挑戦の多くは学術的研究の議題や講座のカリキュラムにはなく、結果的にそれらを勉強しようとする人々は少ない。産業はこういった挑戦をなかなか明確にせず、また最も頭脳明晰な学術的才能のある人を引き付けるための前提条件である知的深さや難易度も明確にしてこなかった。最近では、基礎研究における協調を直接奨励する資金調達のみカニズムが台頭してきた⁸。こういった発展にも関わらず、共同研究という概念は産学分裂の両者の多くにとっていまだに不愉快なようだ。学術的な数学者にとって、産業に時間を割くことは常にキャリアを高めるわけではない。不幸なことに、博士課程の学生は特にこういった圧力に弱い。

こういった学生は新しい概念による刺激が最大の影響をもたらしえるような状態にあるのだ。産学分裂における流動性は停滞したままである。

以前は、数学が社会にとって必要不可欠であるということが当たり前のように考えられていた。これは、数学が第一次産業革命に計り知れない貢献をしたことに少なくともある程度起因すると考えられる。最近では、他の多くのこととの調和を保つ上で社会における本題の役割は綿密な調査に分類されるようになった⁹。これが今後もいつもの状態を維持するとすれば、第二次産業革命の最前線に行かないようにすることができるだろうか？

脚注

1. ニュートン研究所におけるプログラムの摘要。同研究所の情報パックにて入手可能であり、本題の適用範囲の概念が記述されている。米国における技術的な影響に関しては、ジェームス・グリム (James Glimm) (編集者) の「数理科学、技術と経済的な競争力 (Mathematical Sciences, Technology and Economic Competitiveness)」、数理科学理事会 (Board on Mathematical Sciences)、米国アカデミープレス (National Academy Press))、1991 を参照。
2. 国会議員ジョージ・E・ブラウン (George E. Brown)、「20 世紀に数学が直面する課題 (Challenges Facing Mathematics in the Twenty-first Century)」、AMS の通知、44:576-579、1997、A・ジャクソン (A. Jackson)、「ロチェスターにおける経営合理化 (Downsizing at Rochester)」、AMS の通知、43:300-306、1996、R・S・ローゼンブルーム (R. S. Rosenbloom) と W・J・スペンサー (W. J. Spencer)、「産業調査における変革 (The Transformation of Industrial Research)」、科学と技術の争点 (Issues in Science and Technology)、1996 年春号
3. 「工業における数学に関する SIAM 報告書 (SIAM Report on Mathematics in Industry)」工業・応用数学会にて入手可能。J・R・オッケンドン (J. R. Ockendon)、「数学と工業間の移動界面 (The Moving Interface between Mathematics and Industry)」、ICIAM-95 会報。
4. 我々は桁における応力の予測方法は知っているが、コンピュータシステム内の指定 MTBF を達成するのに必要な最低冗長性の予測方法は知らない。この問題はボン・ニューマン (von Neumann) によって最初に明確にされたが、いまだに適当な理論的構造を待っている状態である。以上 J・ボン・ニューマンによる。「確率的論理学と不確かな要素からの確かな生物の合成 (Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components)」、C・E・シャノン (C. E. Shannon) と J・マッカーシー (J. McCarthy) (編集者)、オートマトンの研究 (Automata Studies)、PUP、1956
5. 特に、ボード (Bode)、アーラン (Erlang)、ヘビサイド (Heaviside)、コルモゴロフ (Kolmogorov)、ナイキスト (Nyquist)、ライス (Rice)、シャノン (Shannon)、ウィーナー (Wiener) のもの。S・ミルマン (S. Millman) (編集者)、「ベルシステムにおける

工学と科学の歴史：通信科学 (A History of Engineering and Science in the Bell System: Communications Sciences (1925-80))、AT & T ベル研究所、1984。

6. S・ミルマン、op cit。

7. ヒューレット・パッカートの BRIMS、マイクロソフトの理論グループ、ケンブリッジ研究所、NEC のプリンストン研究所など。

8. 例えば、NSF の数理科学博士課程工学研究奨励制度、英国の可能性を現実的にするものに対する表彰計画 (ROPAs)、王立社会工業研究奨励制度など。

9. 数学は、「第五次フレームワークプログラムに向かって：科学と技術の目標 (Towards the Fifth Framework Programme: Scientific and Technological Objective)」(EC 研究報告書 COM (97) 47) 中では中心分野として記述されていない。

巻末注記

1. 米国における博士号を取得した科学者及びエンジニアの特徴 (Characteristics of Doctoral Scientists and Engineers in the United States) : 1995、(NSF 97-319)、表 20、34 ページ。その他の雇用グループには自営業、その他の教育機関、非営利民間団体、連邦及び地方政府が含まれていた。

2. 科学と工学の指標 (Science and Engineering Indicators)、1996、表 5-26、203 ページ。表 5-27、203 ページ。

3. 米国数学を更新する (Renewing U.S. Mathematics)、1984、米国アカデミープレス、ワシントン。

4. 技術の発達と経済の競争力において数理科学が担わなければならない重大な役割、そしてこの役割に関して学生を教育する必要性が米国学術研究会議の数理科学理事会 (National Research Council's Board of Mathematical Sciences) の報告書で丁寧に文書化されている：数理科学、技術と経済的な競争力 (Mathematical Sciences, Technology, and Economic Competitiveness)、1991 年、米国アカデミープレス、ワシントン。

5. 米国数学会 (American Mathematical Sciences) の通知、1997、vol. 44、917 ページ。

6. 工業における数学 (Mathematics in Industry)、1995、SIAM、フィラデルフィア。

7. CHI リサーチ社 (CHI Research, Inc.)、メモランダム、1997 年 3 月 7 日。

8. 米国数学会の通知、1997、vol. 4、915 ページ

9. 科学と工学の指標、1996、(NSB 96-21)、付録の表 2-33、69 ページ。

10. 工業における数学、1995、SIAM、フィラデルフィア。

11. 科学と工学の指標、1996、(NSB 96-21)、付録の表 5-31。

12. 科学と技術の人材：欧州地域 (Human Resources for Science & Technology: The European Region)、(NSF 96-316)。

13. 高学歴者たち：科学及び工学分野のトップ学生たちの教育とキャリアの道 (Best and

Brightest: Education and Career Paths of Top Science and Engineering Students)、1997、科学と技術の専門家委員会、ワシントン DC。

- 1 4. 高学歴者たち：科学及び工学分野のトップ学生たちの教育とキャリアの道、1997、科学と技術の専門家委員会、ワシントン DC。
- 1 5. 米国数学会の通知、1992、vol. 1939、314～315 ページ。
- 1 6. 科学と工学分野の大学院生及び博士課程学生 (Graduate Students and Postdoctorates in Science and Engineering)、1995 年秋号、(NSF 97-312)、表 25。
- 1 7. 科学と工学分野の表彰に関して選択したデータ (Selected Data on Science and Engineering Awards)、1995、(NSF 96-303)、80 ページ。
- 1 8. 米国数学会の通知、1997、v44、920 ページ。
- 1 9. 米国数学会の通知、1998、v44、920 ページ。
- 2 0. 米国数理科学 (American Mathematical Sciences) の通知、1997、vol. 44、926 ページ。
- 2 1. 研究開発 (Research and Development)、FY 1997、AAAS 報告書 XXI。注：ONR サポートが 16.1M でリストされているが、学術研究に対するものは 700 万ドルしかないと推測される。
- 2 2. 1990 年代の計画 (A plan for the 1990's)、1990、米国アカデミープレス。
- 2 3. 米国数学を更新する：科学と工学分野の大学院生及び博士課程学生、1995 年秋号、(NSF 97-312)。
- 2 4. 科学と工学分野の大学院生及び博士課程学生、1995 年秋号、(NSF 97-312) 88 ページ。
- 2 5. 生物学、生物物理学、植物学、細胞生物学、動物学、遺伝学、微生物学。
- 2 6. 科学と工学分野の大学院生及び博士課程学生、1995 年秋号、(NSF 97-312)。

(出典：<http://128.150.4.107/pubs/1998/nsf9895/start.htm>)

(参考資料 3-2)

米国のマルチスケール数学プログラムの概要

—” Multiscale Mathematics Initiative: A Roadmap” (Prepared for the U.S. DOE under Contract, Dec. 2004) の要約—

1 はじめに

最近まで、科学技術は自然の基本的な構成要素の解明に集中してきたが、その成果は基本的に1つ又は2つの空間的・時間的スケールで説明できる範囲の問題に限られていた。しかし、実際の我々の生活に及ぼす影響を更に深く理解するためには、その挙動が大幅に異なる空間的・時間的スケールにまたがる部分要素を含む物理過程をシミュレートする能力が必須となる。残念ながら、個々の要素がいかに完全に理解されたとしても、それが直ちにシステム全体をシミュレートする能力にはつながらないのが現実である。全体を総合的に理解するためには、システムがどのように接続され、どのようにコントロールされているのかをあらゆるレベルで知り、忠実にモデル化する能力が必要である。

例えば、図1は極端に違う時間スケール(14桁又はそれ以上)を含んでおり、これが磁気核融合における燃焼プラズマ実験では重要な役割を果たす(3.(6)参照)。時間や空間の異なる部分領域のそれぞれに適する解析技法や計算方法は大きく異なる。モデリング技術の統合が実現されるならば、それはプラズマ科学者がこの複雑極まるシステムの理解を深めるのを加速してくれることになる。環境及び経済の両面から持続可能なエネルギー源を実現するという長期目標実現のためには、この理解が必要である。

マルチスケール問題理解のための数学的手法のほとんどは極めて限定された応用分野で開発、使用されてきた。このため、マルチスケール研究は物理分野ごとに分断されており、各分野の研究者達も自分の専門以外で数種類以上の技術を知っている人はほとんどいない。

マルチスケール手法の各クラスを束ねる全体の枠組みを開発するためには、研究領域の境界を越えた情報交換を強力に促進する環境作りが重要である。DOEの極めて重要なマルチスケール科学問題が提示する困難な問題に真正面から対応するためには、この枠組みを更に発展させて、根本的に新奇性を持ち、かつ応用数学の古典的手法に立脚した、新しい数学的手法、計算方法、ソフトウェアを開発しなければならない。

2 マルチスケール数学の必要性

本プログラムの目的は、複数のスケールに亘る挙動を的確に説明できるシミュレーションを実施するために必要となるスケール接続とそれに伴う計算方法を開発することである。このシミュレーションとは統計やデータベースに基づくシステムの特性把握のみならず、計算による将来予測も含む。

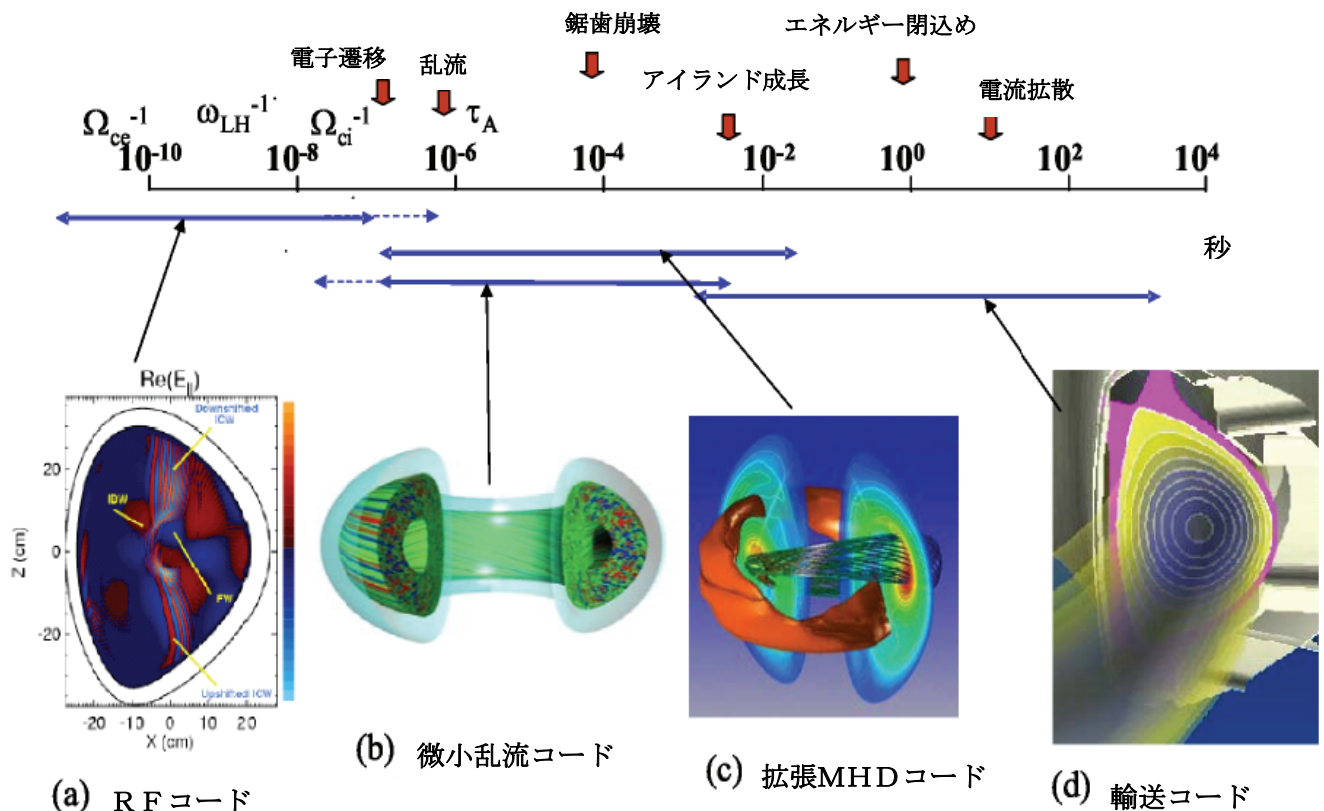


図1 磁気核融合のプラズマ燃焼実験をシミュレートするためには、複数モデルを接続して広範囲の時間スケールを記述できなければならない。図は4つの部分に分かれており、それぞれが時間又は周波数領域の一部をカバーするシミュレーション技術を表している。このようなシミュレーションが予測能力を持つためには、複数の正確で効率的なマルチスケール数学手法の組合せ（マルチ分解能離散化、ハイブリッド化、クロージャ、モデル縮小など）が必要である。（第一回マルチスケール数学ワークショップ報告書から抜粋）

(1) 数学的手法

マルチスケール問題に取り組む手法を大まかに8つに分類する。但し、分類の方法には多くの可能性が考えられ、本稿が示すのはその一例に過ぎない。典型的なマルチスケールシミュレーションには以下の手法のいくつかを組み込む必要があるだろう。

- ① マルチ解像度法：空間、時間及びデータの関数として解像度を調節することで、複数スケールを単一モデル内で分解する手法
- ② ハイブリッド法：複数モデルと数値表現を異なるスケール（及び物理現象）に亘って組み合わせることにより1つのシミュレーションとして実行する手法
- ③ クロージャ法：注目するスケールよりもはるかに小さなスケールに着目し、その挙動を記述する解析的又は数値的な表現を与える手法

- ④ 適応法：方法とモデル、パラメータ化を動的に制御して、シミュレーションやデータ表現における誤差及び不確定性を最小化する手法
- ⑤ 誤差評価法：基本モデルを解析的又は数値法（例：離散化法、求積法、基底系近似など）に解く場合に付随して現われる誤差の決定論的発生源の特徴を把握して定量化する手法
- ⑥ 不確実性の定量法：モデルに付随する不確実性の発生源（例：幾何学的理想化、不確実なパラメータ、微視的な揺らぎの統計的表現など）の特徴を把握して定量化を行う手法
- ⑦ 逆最適化法：シミュレーションにより得られた挙動を目的とする挙動に合致させるため、どのモデルパラメータが必要でそれをどのようにコントロールすれば良いかを探求する手法
- ⑧ 次元縮小法：高次元状態空間モデルを単純化して必須次元又は基本モードに絞り込み、自由度の数を減少させる手法

(2) 数学的枠組みの統一

特定の方法の開発や問題解決の範疇を超えた抽象的な数学的枠組みの構築に対して強いニーズがある。この枠組み内に設定された一連のベンチマーク問題を対象として、上で説明したそれぞれの数学領域で研究された新たなアプローチの試験や検証を行う。既に存在する、若しくは現在発展中のアプローチはいずれも問題が発生した領域の発想や解法を強く反映している。このため、マルチスケール問題の研究は広く分散した、相互に脈絡のない経路を辿ってきた経過があり、新たな領域の問題へ方法論を適用するにあたっては、重大な障害が存在する。

(3) 数学ソフトウェア

以上で説明した方法及び枠組みはソフトウェアとして実装されて、マルチスケールの研究者全員に広くユーティリティとして普及しなければならない。他の数学ソフトウェアと同様、検証、スケーラビリティ及び並列化には特に注意を払う必要がある。その定義から明らかなように、マルチスケール問題は単一スケール問題と比較してはるかに広い空間及び時間スケールを取り扱う。作成するアルゴリズムに数千ものプロセッサに対応できるスケーラビリティを保証することは最も困難な課題であるが、避けることはできない。多くのマルチスケール問題は今日のスーパーコンピュータでは解くことができず、次世代コンピュータのパワーとメモリ量を必要とするとともに、モデルやアルゴリズム、ソフトウェアの進化とも連携が必要となる。そのためには新しいアルゴリズムとモデル化の発想を簡単に試行可能な柔軟性と能力を兼ね備えた数学ソフトウェアツール群の開発が必要となる。実際、様々なマルチスケールモデルの実験と解法の探求はあまりに複雑かつ困難であるため、このようなツール群なしに科学に期待どおりの影響を与えることはできないだろう。

また、単一スケール問題でさえ、数値及び計算処理には条件不良や非線形性、硬直化、安定性、複数の最適点の出現、幾何学的複雑性、特異点、局在化、動的構造、非同時性、長距離結合などの問題が起こるが、これらの困難はマルチスケール化によって更に飛躍的に増大することが予想される。このような問題を取り扱える数値アルゴリズムやコンピュータ科学のツールを考え出すためには、科学計算コミュニティ内における長期的、継続的かつ協調的な努力が必要である（図2 参照）。



図2 高性能計算機上で使用する数学ソフトウェアの開発は、それぞれの応用領域に新しいアルゴリズムを実装する上で極めて重要な役割を担う。

3 各科学分野から見たマルチスケール数学の必要性

ここでは目標となる9種類の応用分野に着目して解説する。いずれもDOEにとって重要なばかりでなく、マルチスケール数学から極めて大きな利益を得る分野である。モデルから物理的に意味のある情報を取得し、物理世界の理解を深めることで今後の行動指針を提供するために、数学は科学技術が直面する現実から常に情報を得る努力が必要である。

(1) 環境科学と地球科学

この分野の一例として、地中でのCO2封じ込めの問題がある（次頁図3参照）。この課題の目的は、CO2が空気中に戻るのをできるだけ遅らせることにより、空気中のCO2濃度を下げて地球温暖化の速度を低下させることである。このシステムの完全な記述のためには表面化学（Åレベル）から細孔スケールの物理（ μm ）、更には地表下の不均一性（ $\text{m}\sim\text{km}$ ）までを包含しなければならない。この課題に関連して以下のニーズが存在する。

- ・微視的スケールでの理解に立脚する厳密な、物理を基礎とする新たなモデルの構築
- ・様々なスケールの異質なデータを取り込んで大規模なパラメータ推定を効率的に実施する方法、並びにこれらのモデルを正確にスケールアップする方法の開発
- ・バルクとしての表面特性をシミュレートできる、従来法とは異なる方法の開発

- ・現場スケールでの不確実性と変動性に最も寄与する物理特性を明らかにしてそれをパラメータ化すること
- ・力学的で堅牢かつスケラブルなマルチ物理結合（例えば、地下水、表面水及び大気の相互結合）を明らかにすること
- ・局所領域及び精度に基づく要求を満たしながらシステムを効率的にシミュレートする方式の開発

(2) 気候

大気と海洋システムそれぞれが単独でも困難なマルチスケールシミュレーション問題であり、両方のシステムを結合させる必要のある完全な気候モデルでは、問題に更にスケールが追加される。海洋システムにおけるマルチスケールの特徴を良く表す例が熱塩循環 (thermohaline circulation)である。熱塩循環とは、局所的な越流による 10 メートルから数百メートルという距離で特徴付けられる海流の影響を強く受ける地球規模の循環である（次頁図 4 参照）。この課題に関する現在の数学及び計算科学の戦略は以下の項目を含む。

- ・熱帯対流の未解決の問題を解く新たな確率モデルの作成
- ・流体静力学と局所的な非流体静力学を組み合わせたハイブリッドモデル開発の必要性
- ・地球規模気候モデルグリッド内への雲分解モデルの埋め込み。
- ・気候を低次元確率過程モードに縮約する体系的な数学手法。
- ・情報理論を利用してアンサンブル予測における不確実性を定量的に把握し、粗粒塊分割した確率モデルにおける情報損失の解明
- ・新たな適応方程式群を導出する適応マルチ周波数法の開発。マルチスケール、マルチ周波数分解の結果を連結させ、順次速くなる時間スケールに依存する、鎖状に繋がった一連のマップを作り出すことにより階層構造を持つ新たな方程式群の生成

(3) 物質材料科学

変形、亀裂と破壊、粒界の成長と移動、相変化などの基本プロセスの理解を深め、マルチスケール現象としての電子と輸送現象を理解するためには新たな数学ツールと技術が必要である。ナノスケール材料とミクロスケールシステムに応用する装置の設計と研究を行うには、ナノメートルから数百ミクロンまでの距離スケールをカバーできるモデルが必要である（図 5 参照）。このようなシステムは 10 億個を超える原子から構成されているため、分子動力学シミュレーションには大き過ぎるが、連続体としてモデル化するには小さ過ぎる。このため、ミクロシステムから将来のナノスケールシステムとプロセスの設計を支援するためにマルチスケール法を組み合わせた手法の開発が緊急に必要である。同時に、現在の設計者が巨視的なスケールを使用しているのと同じように使用できるシミュレーションツール群が必要とされる。

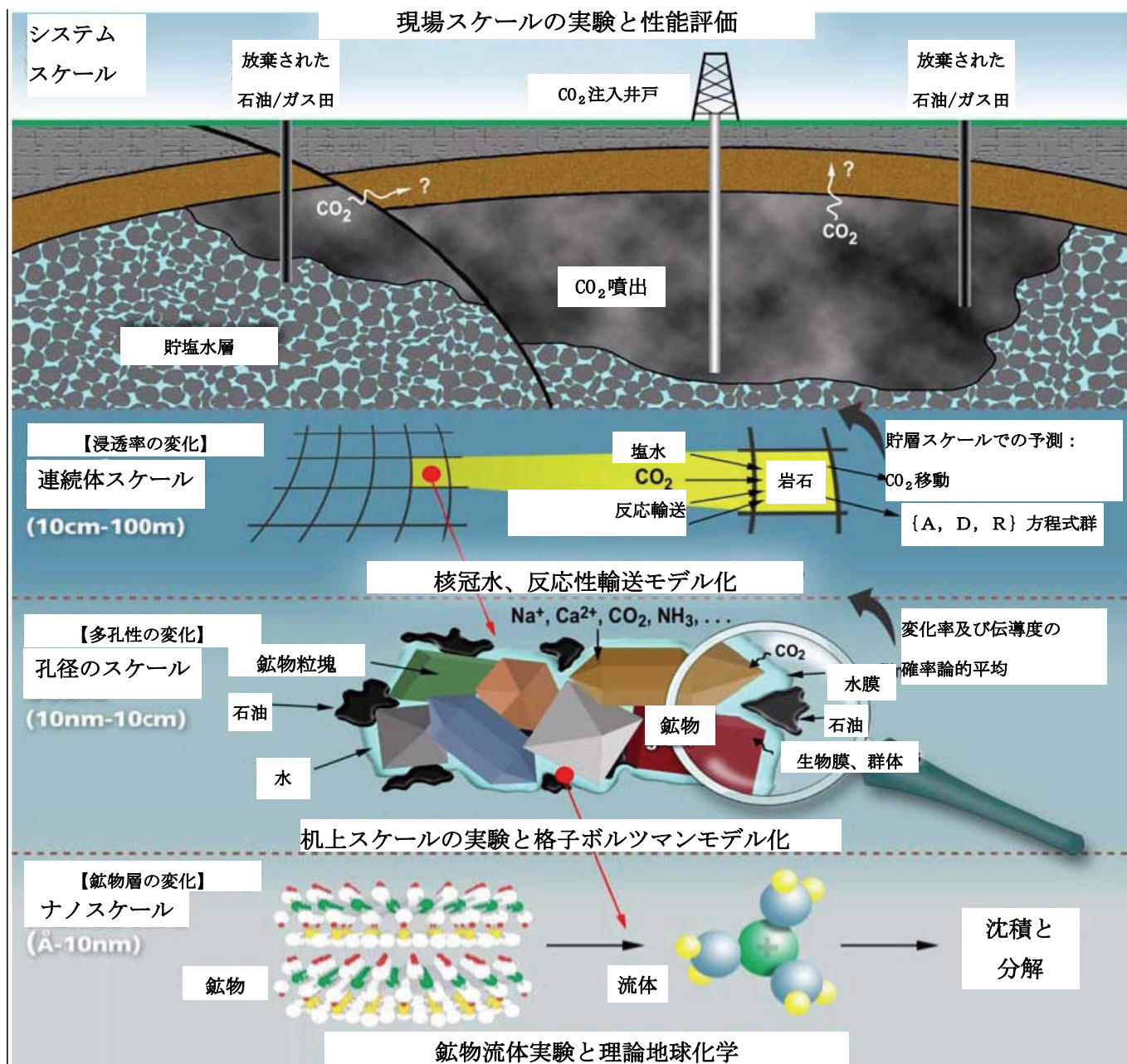


図3 炭素封じ込めを表す実験的地球科学モデルは原子スケールから現場スケールまでを含むマルチスケール特性を示す。異なるスケールにおける過程モデルはそれぞれ非常に異なる物理、数学モデルと計算方法に立脚している。異なるスケールにおけるデータの大部分は不確かなものではあるが、これらのデータから判断を下して政策決定に寄与しなければならない。(ロスアラモス国立研究所提供)

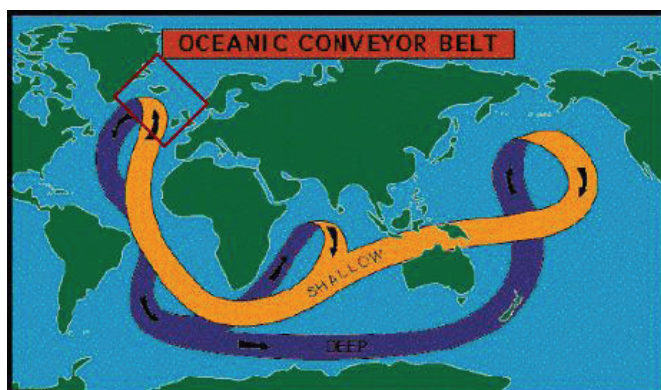


図4 この図に示される熱塩循環の重要性の1つは、比較的急激な気候変化が起こる過程で熱塩循環が途切れることである。左上の矩形で示した部分はデンマーク海峡の越流領域を表し、ここで起こる三次元の非流体静力学効果が1,000年間にわたるシミュレーションの最初の10%において観測値からの重大なずれを引き起こす。(ロスアラモス国立研究所提供)

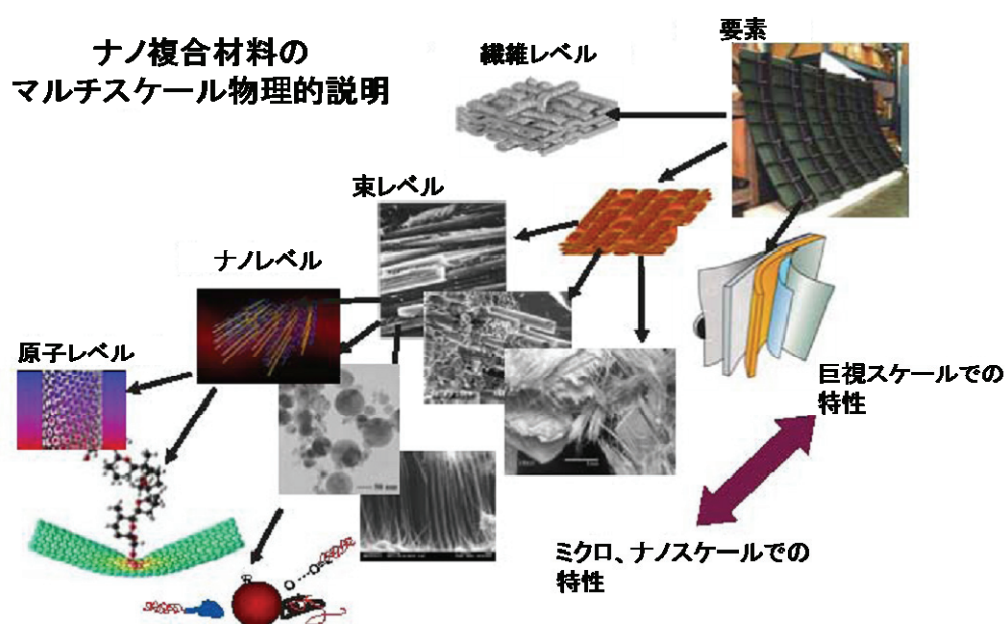


図5 ナノ複合材料のモデル化に関するスケール (Mark Shepard 氏提供)

(4) 燃焼

外国からのエネルギー供給への依存度を高めることなく米国の増大するエネルギー需要に応え、同時に公衆衛生問題が課す排出レベルを満たすためにも、次世代エネルギー技術の開発が必要である。この意味で、簡単な基本スケール例を示すのが希薄予混合燃焼技術 (lean, premixed combustion technology) (図6 参照) である。メタンを希薄燃焼限界近

くで燃やすと非常に効率の良い炎が得られ、余分な成分をほとんど排出しないことが知られている。残念ながら、希薄予混合炎は非常に制御が難しい。このような炎の安定性は音波（装置スケール）、乱流（mm スケール）及び火炎面（数百 μm スケール）の微妙な相互作用によって支配される。スケールの相互作用は 6 桁に及び、時間スケールの広がりよりも更に大きい。燃焼を研究してきた人々は既に長い間シミュレーションを使用しているが、現在のモデル化ツールではこの課題に対応することができない。計算力を大量に注ぎ込んで該当する距離スケールをすべて解く直接数値シミュレーションを行えば正確な予測が可能であるが、計算の時間と費用を考えると現実のシステムに適用することは不可能である。

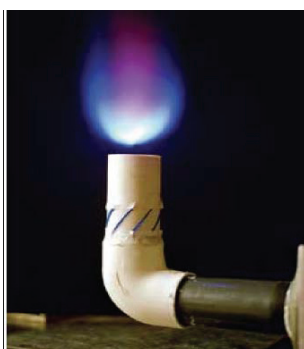


図 6 低渦流バーナーのプロトタイプ。新しい炎安定化機構を備えたこのバーナーは希薄条件で動作して、ほとんど排出物を発生しない。（R. K. Cheng 氏提供）

(5) 高エネルギー密度物理

DOE の国家核安全保障管理局の研究主題は高エネルギー密度物理である。その理由は熱核兵器からのエネルギー放出を支配するのが高エネルギー密度物理だからである。しかし、宇宙物理もこの分野に関心を示している。その一例として、超新星内の核燃焼の問題がある（次頁図 7 参照）。この分野に該当する物理現象は途方もなく広い空間的、時間的スケールの中で起こる。I a 型超新星は親である白色矮星のサイズ（ $\sim 10^8\text{cm}$ ）から星内部深くの核の「炎」の厚み（ $\sim 10^{-4}\text{cm}$ ）に及ぶ空間的スケールを持ち、同様に時間スケールについても千年単位（超新星発生前の白色矮星内における対流発生を特徴付ける時間スケール）から秒単位（白色矮星全体が燃え尽きる時間）に及ぶ。超新星をモデル化するには、光子とニュートリノの輸送、核燃焼速度、更に相対論的考察を取り込む必要がある。

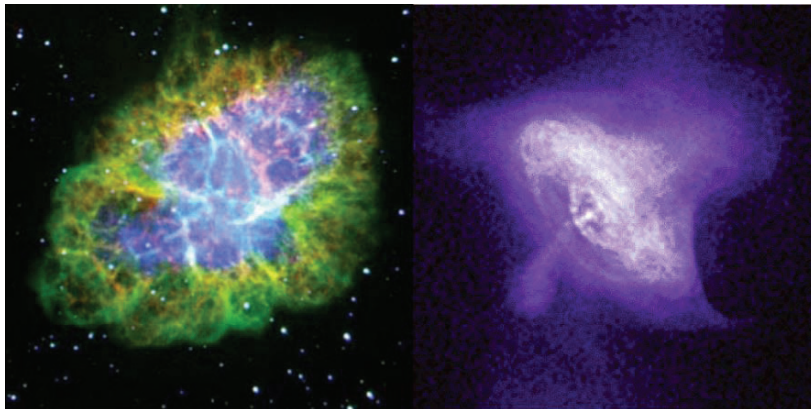


図7 カニ星雲の画像（左側：光学望遠鏡）と、パルサー位置に現われる同星雲の中心核（右側：チャンドラ X-線衛星から取得した X 線画像）。地球から約 6,000 光年の距離にあるこの超新星残渣には高度な相対的挙動を行う電子が磁場とともに存在する。X 線画像のスケールは光学画像の約 40%である。パルサーとその周囲の光学的に観測される星雲は空間スケールとして約 6 光年から m または cm まで含む範囲内での物理過程によって特徴付けられる。この物理過程の理解には輻射流体力学が重要な役割を果たす（NASA チャンドラ科学センター提供）

(6) 核融合

磁化された高温プラズマは既知の各種媒体の中で最も複雑な挙動を示す。この複雑さは、外部からの摂動に対するプラズマの応答及びプラズマが高エネルギー状態から低エネルギー状態へ遷移するときの不安定性を記述するために必要な数学的手法の多彩さからも明らかである。我々はプラズマの応答を 3 つの異なる周波数領域（時間スケール）に分割するのが適当と考えている（図 1 参照）。異なる領域のそれぞれに、非常に異なる解析法と計算法を適用しなければならない。

RF 解析コード（図 1 a）は周波数領域で機能し、その目的は外部のアンテナから強力な RF 場を与えたときに生ずる温度上昇を詳細に計算することである。ジャイロ力学コード（図 1 b）は乱流を形成して激しく揺動する電場と磁場の輸送を表す自己無撞着解を求める。拡張電磁流体力学（MHD）コード（図 1 c）は、ボルツマン方程式の速度運動量を取り出して三次元拡張 MHD 方程式を解くことにより大域的（装置スケール）安定性とその他の動力学を計算することに基礎をおいている。輸送時間スケールコード（図 1 d）はアルフベン波に関する項を除き簡略化した方程式群を使用する。輸送時間スケールコードはプラズマ放電の長時間シミュレーションに使用されるものであり、乱流計算による輸送流束を取り込む必要がある。輸送コードに関連する境界部の物理が、原子物理とプラズマ-壁面相互作用の問題ばかりでなく、それ自体で乱流と MHD 問題を引き起こすことに注意が必要である。

更に、核融合研究の重要な科学的問題に対応するためには、異なるプラズマプロセスと異なる時間/空間スケールの相互作用を統一的に取り扱う手法が必要である。従来は核融合

研究を複数の領域に分けて別々に研究してきた。したがって、目標は真に統合された核融合実験の計算モデルを構築し、プラズマ科学者がこの驚くほど複雑なシステムをより深く理解することができるようにすることである。

(7) 生物学

DOE の部門の多くが必要とする生物学は大規模な環境に及ぼすバクテリアの役割と、それによる環境の変化（炭素封じ込めや環境修復、バイオマスからのエネルギー生成など）に注目している。図 8 は、炭素封じ込めなどの問題が何故細胞群集スケールに至る多くの距離スケールに注目した研究を必要とするのかを例を用いて示している。

生きた細胞が形成する微視的システムでは、少数の反応分子が巨視的な動きを駆動することがあるため、その取扱いには離散的、確率論的なモデルが必要である。標準的な確率論的シミュレーションはあまりに非効率で現実的な問題には適用できない。このため新たな時間加速法が必要である。システムを離散的かつ確率的な部分システムと連続的かつ決定論的な部分システムに分割するための信頼できる効率的な手法も必要となる。その一方、これらの部分システムを結合させてマルチスケール計算の枠組みに乗せるハイブリッド法も必要である。更に、生物システムの逆問題から生ずるマルチスケール構造を考慮した効率的な緩和法も必要である。



図 8 炭素封じ込めを説明するには遺伝子から細胞群集の代謝ネットワークにいたるマルチスケールモデルが必要である。ボックス 1 に示すシアノバクテリアの遺伝情報（これが分子レベルでの機構を説明する）が重要な細胞プロセス（ボックス 2）を駆動し、この細胞プロセスが次に代謝ネットワーク生成（ボックス 3）を駆動する。個々の分子機械が空気中から二酸化炭素を取り込んで単純な糖へ変換する過程を説明するのが代謝ネットワークである。このネットワークが更に細胞内で起こる作用（ボックス 4）を説明する。これらの細胞と他の細胞の共同作業を考えることにより最終的にシアノバクテリアが全地球的な炭素サイクル（ボックス 5）に及ぼす影響を理解することが可能になる。（第一回マルチスケール数学ワークショップ報告書から抜粋）

(8) 化学

化学は常に広範囲の距離と時間スケールに亘る問題を発生する。その範囲は電子と原子（プラズマや蒸着）、分子（化学反応）からナノレベル（ナノ構造触媒とデバイス、タンパクの畳み込み）、更には巨視的レベル（化学的、生物学的及び物質特性、多相問題）まで極めて幅広い。しかし、我々の基本的な理解は最も微細なスケール、即ち物質の量子力学に

ある。この知識をもとに原子や分子の電子構造を予測し、更には化学反応の動力学を予測する。

化学におけるマルチスケール問題で必要なのは、長さと時間のスケールを広げることばかりでなく、量子の世界から古典の世界への橋を渡すことである。例えば、タンパク質は広い時間スケールによって特徴付けられる。現在のところ、精密なタンパク質シミュレーションは分子振動に相当する時間スケールで起こる動作を追跡するために、フェムト秒付近に時間ステップを設定する必要がある。しかし、生物学的な意味でのタンパク質の最も重要な現象（例えばタンパク質の畳み込み、リガンド結合、信号経路など）はそれよりも何桁も長い時間で起こるものが多い。このような2つの時間スケールの中間にも側鎖の揺動や鎖の曲がり、息継ぎモードなど多数の興味深い動きがあり、これらを含めた総体が全体としてのシステムの動力学を決定する。現時点では、これらの微視スケールの動作をどのように統合したら長期にわたる巨視的な挙動を正確に予測できるようになるのか、明確な理解はまだ得られていない。

同じような問題は、例えば材料表面（ナノ及び巨視的スケール）での触媒反応のような拡張されたシステムでの化学反応の理解についても起こる。定量的なレベルで理解するためには反応の熱化学と化学動力学特性の詳細な計算が必要であるが、大きな空間的、時間的スケールを考えた場合や別のシステムで別の化学反応を想定した場合で、明確に異なる結果が得られることが多い。異なる界面（例えば平面と段差のある面）で起こる反応の複雑な相互依存性が仮想世界と実際環境でどのように違うかについても理解が必要である。環境影響（例えば液体環境）の追加もマルチスケール問題を更に複雑にする。

(9) 電力網と情報ネットワーク

ネットワークのモデル化、解析、シミュレーションを行うと、いくつかの次元においてマルチスケール問題が発生する。具体的には時間、空間（トポロジと幾何）、状態（例えばキュー）及び大きさ（ノードやユーザー数）などにおいてである。多くの場合、これらのシステムは動的な性格を持ち、相互作用する複数ネットワークから構成されるネットワークである。局所的な、又は非常に小さな力を加えるだけで大規模な応答が発生してしまうことがある。注目すべき例は2003年8月に起こった大停電である（1本の送電線で起きた些細な障害が米国北部とカナダの大部分を停電に追い込んだ）。ネットワークの数学解析は比較的新しい分野であり、解析方法の研究や開発もまだ始まったばかりと言ってよい。これらのシステムの解析には全く新しい方法も必要であるが、先行分野のマルチスケール解析で得られた発想を展開することも有用である。この分野に適した数学として挙げられるのは、グラフを基礎とするアルゴリズム、組合せ最適化、離散事象シミュレーション、エージェントベースシミュレーション、スケーリング、更にマルチスケールシステムの連続体モデルを考案する過程で得られる様々なアイデアなどである。

インターネットのようなネットワーク上では様々な時間スケールで事象が起こる。パケ

ット伝送はほとんどがマイクロ秒の単位であり、ファイル転送は秒単位である。ルーティングテーブルは分単位の時間で更新され、ネットワークトポロジの重要な変更には数日を要する。この問題については既に様々なアプローチが試されている、その例を挙げれば自己類似性、長距離依存性、パワー法則とヘビーテイル、マルチフラクタル、カスケード、ウェーブレット、高度最適化トレランスなどである。時間スケールでは、スケーリング機能が遵守されている。それに加えて、インターネットのトポロジはスケーリング機能を備えている。上に説明したようなスケーリング機能への注目は結局のところ、この機能がネットワークの設計と性能に大きな影響を与えることに由来する。スケーリング法則の枠内では次のような問題に答えることは不可能である。即ち、ネットワーク内のノード数が増加するにつれて、ネットワークがサポートできる容量はどのようにして増えて行くのか、スケーリング法則では異なる性能測度をどのように相関付けられるのか、という問題も注目すべきである。例えば、スケーリング法則に即して遅延性能の容量トレードオフを実現できるのだろう。うか。これらの問題に対する検討はまだ始まったばかりである。

4 ロードマップ

【短期目標】

プログラムの最初の3～5年間の主たる目標は、既に存在する技術を新たなマルチスケール問題に適用すること、並びに確率論的モデルに適した新しいアルゴリズムを開発することである。

- ・ 広範囲のマルチスケールシステムに対して数学的理解を深める。誤差評価指標、安定性・頑健性解析、性能測度（上下限）の改良
- ・ マルチスケールの重要な挙動のいくつかを適正に表現できることが実証されている既存マルチスケール法を更に発展させ、新しいマルチスケール問題に適用して、シミュレーションの精度、効率、安定性の評価
- ・ マルチスケールに対応した確率論的数値法と不確実性の定量法を開発し、以後のプログラム全体に役立つ基礎とする。決定論的モデルのために開発された既存法を確率論的モデルに適用するには大規模な変更が必要
- ・ マルチスケール問題のスケール間を結合させる数学解析と数値解析。現在の最先端の解析ツールを使用した解析を頑健な数値実験機能と組み合わせて、新たなマルチスケールアルゴリズム開発並びに数学ツール拡張の基礎とする
- ・ 数学（物理よりも優先して）とマルチスケール問題に焦点を合わせて厳密に定義したベンチマーク問題の作成
- ・ 全く新しい、リスクの大きい概念の評価

【中期目標】

5～7年の時間枠を想定すると、マルチスケール問題の解析とシミュレーションに使用

できる全く新たな方法が出現するだろう。また、ソフトウェアについても主要構成要素が利用可能な状態に達すると期待される。

- ・新しいマルチスケール法（短期目標の成果）を DOE が目的とする問題（マルチスケール科学から発生した問題）に適用するプロトタイプシミュレーション
- ・マルチスケール科学のいくつかの特に「困難」な問題のマルチスケールモデル導出のために開発・使用された新しいマルチスケール数学法。困難な問題の例として、スケール間が明確に分離できない問題、稀な事象が生起する問題、高次状態空間を自由度の小さい部分に分割する問題、離散物理から連続体物理へ移行する問題（転移点の明確化）等が含まれる
- ・マルチスケール感度・不確実性解析のためのアルゴリズムとソフトウェア
- ・スケール間結合に重要又は必須なドライバを明らかにする新しい統計解析方法
- ・マルチスケールアルゴリズムの中核構成要素に使用できるソフトウェア
- ・改良された誤差評価指標、安定性評価、性能測度（上下限）を組み込んだアルゴリズム。マルチスケール計算速度の向上
- ・アルゴリズムの正当性検証

【長期目標】

7～10年の時間枠を想定すると、新世代のマルチスケールシミュレーション技術が DOE の科学アプリケーションに適用され、これらのプログラムがどのような衝撃を与えるのかを実際に見ることになるだろう。

- ・新しいマルチスケール法、モデル、ソフトウェアが広く使用され、包括的な科学シミュレーションの実施
- ・新しい方法がマルチスケール科学の特に困難な問題（例えば、乱流流体やタンパク質の量み込み）のいくつかを解くために応用
- ・新世代の堅牢・適応マルチスケール数学ソフトウェアであって、決定論的誤差と確率論的誤差（不確実性）を定量化する測度を備えたものの開発
- ・複雑な物理システムに対するアルゴリズムの正当性を検証

（出典：<http://www.sc.doe.gov/ascr/mics/amr/>）

(参考資料 3-3)

ドイツにおける数学研究に関する国家プログラムについて

1. 経緯

1993 年以降、ドイツ連邦教育研究省は「数学の特定領域」に対する国家プロジェクトを推進した。この背景には、公益に関する多様な問題は現代数学手法の開発なくでは解決され得ず、そういう意味で数学は将来の発展のキーテクノロジーの一つという認識に至ったことがある。

その基本的な推進基準は、プロジェクトに携わる研究者の仕事が数学的基礎の改善及び具体的な応用問題の解決の両方に役立たなければならないことである。

最初の 3 年間の国家プログラムでは、複雑系における非線型微分方程式の解法及びアルゴリズム開発、幾何学的イメージプロセスの数学的手法、並びに技術システムの数学的最適化及び制御の開発が実施された。

1996 年には更に 3 年間、このプログラムを最新化して、特殊逆問題、変分法、推計過程、暗号手段に拡張された。

1999 年から 2003 年の終わりまで、第三番目の推進期間「産業及びサービス業における新数学手法」が実施された。プログラムの重点は、生産過程、製品、特にハイテク材料及び電子回路、交通の流れ、エネルギー貿易及び市場供給、並びに金融サービスの改良のための新しい数学的方法に置かれた。

2004 年に第四番目の推進期間「産業及びサービス業におけるイノベーションのための数学」が開始した。このプロジェクトの中心に 2 つの主要課題がある。一つは技術のマルチスケールシステム、もう一つは自由化されグローバルな状態の下の材料開発、ライフサイエンス及び市場である。

2. 対象

ドイツの大学、非大学研究施設及び企業（※ ほぼ全ての課題で大学及び公的研究機関が中心となっている）

3. プログラム領域・課題

【第四推進期間（2004-2007）：„Mathematik für Innovationen in Industrie- und Dienstleistungen“（産業及びサービス業におけるイノベーションのための数学）】
（全 8 領域 27 課題のうち 04 年-：27 課題）

(1) マイクロ・光学電子工学【4 課題】

・熱伝導及び半導体モデルの電気ネットワークの数値カップリング（マインツ大学、04-07

年)

- ・電気回路シミュレーションにおける効率的な一時雑音解析 (フンボルト大学数学研究所、04-07 年)
- ・コミュニケーション技術の高周波電気回路の数値シミュレーション (フンボルト大学数学研究所、04-07 年)
- ・高周波回路の数値シミュレーションの部分特異代数的なマルチスケールシステム (ウッパタル大学、04-07 年)

(2) マイクロシステムとナノテクノロジー 【1 課題】

- ・化学マイクロ反応器のシミュレーションと最適化 (ハイデルベルク大学、04-07 年)

(3) 薬、化学とバイオテクノロジー 【3 課題】

- ・化学プロセス工学の絶え間ない運転過程の非線形規則 (ハイデルベルク大学応用数学研究所、04-07 年)
- ・グループプロジェクト：気体電池の三次元シミュレーション (フライブルク大学数学研究所、04-07 年)
- ・グループプロジェクト：気体電池の三次元シミュレーション (ハイデルベルク大学応用数学研究所、04-07 年)

(4) 計算機利用薬 【3 課題】

- ・グループプロジェクト：リウマチ診断における画像評価の非局所相分離イオンモデルの応用－実験臨床部分 (ベルリン薬科大学、04-07 年)
- ・グループプロジェクト：リウマチ診断における画像評価の非局所相分離イオンモデルの応用－数学的数値部分 (サーランド大学、04-07 年)
- ・人間の先端骨の是正措置のモデル化と最適化 (ミュンヘン工科大学数学センター、04-07 年)

(5) 金融保険サービスにおけるリスク管理 【7 課題】

- ・信用スコアリングに関する統計的研究法の進展 (ミュンヘン大学統計研究所、04-07 年)
- ・利益カーブ力学と利益デリバティブ評価のモデル化及びシミュレーション (ハイデルベルク大学、04-07 年)
- ・信用リスク管理の高次元モデル I (ライプチヒ大学数学研究所、04-07 年)
- ・信用リスク管理の高次元モデル II (フライブルク大学、04-07 年)
- ・信用リスク管理の高次元モデル III (ギーセン大学数学研究所、04-07 年)
- ・信用リスクのモデル化、定量化及びシミュレーション (ミュンヘン工科大学数学センター、04-07 年)
- ・保険における貯蓄負債管理の数値シミュレーション (ボン大学応用数学研究所、04-07 年)

(6) エネルギー及び原料市場管理 【2 課題】

- ・グループプロジェクト：分散エネルギー転換プラントのグループ最適化 (ドゥイスブルク大学数学研究所、04-07 年)

- ・グループプロジェクト：分散エネルギー転換プラントのグループ最適化（ドルトムント大学、04-07 年）

(7) 輸送、交通の計画及びコントロール【2 課題】

- ・操車場における時間クリティカルなこぶの最適化（カロロ・ウィルヘルミナ工科大学、04-07 年）
- ・交通、輸送網における動力学的ルート案内のための最適化手順（ベルリン工科大学数学研究所、04-07 年）

(8) 技術、物質材料開発及びライフサイエンスのマルチスケールシステム【5 課題】

- ・グループプロジェクト：SiGe 結晶成長連続モデル：強調アルゴリズム開発と数値シミュレーション（カエサル財団結晶成長作業グループ、04-07 年）
- ・グループプロジェクト：SiGe 結晶成長連続モデル：強調モデル化とアルゴリズム開発（ボン大学応用数学研究所、04-07 年）
- ・グループプロジェクト：薄膜ワニスのマイクロ構造に関するデザインのモデル化とシミュレーションー離散化とアルゴリズムの局面（ドゥイスブルク大学数学研究所、04-07 年）
- ・グループプロジェクト：薄膜ワニスのマイクロ構造に関するデザインのモデル化とシミュレーションーモデル化と分析（ボン大学応用数学研究所、04-07 年）
- ・気泡コンクリートの破壊強度の分析のための統計的方法（フライベルク工科大学統計研究所、04-07 年）

【第三推進期間（2000-2004）：„Neue mathematische Verfahren in Industrie und Dienstleistungen”（産業及びサービス業における新数学手法）】（全 12 領域 56 課題うち 00 年-：22 課題、01 年-：28 課題、02 年-：6 課題）

(1) エンジン、自動車【4 課題】

- ・繰返最適縁要素方法による自動車における電磁的特別部品からの音の放射の数値処理ーソースシミュレーションのテクニックによる適応型周波数特性計算（ハンブルク工科大学、サーランド大学など、02-04 年）
- ・繰返最適縁要素方法による自動車における電磁的特別部品からの音の放射の数値処理（サーランド大学、ハンブルク工科大学など、01-04 年）
- ・2 サイクルエンジンのガス交換の詳細シミュレーション（フライブルク大学応用数学研究所など、00-03 年）
- ・大きい変形下の自動車及び飛行機部品の寿命最適化（エアランゲン大学応用数学研究所など、00-03 年）

(2) 環境【2 課題】

- ・環境にやさしい給油方法（フラウンホーファー産業数学研究所など、01-03 年）
- ・負荷下地下水の自己洗浄能力の予後に関するシミュレーションモデル開発（ハイデルベルク大学など、00-03 年）

(3)技術的過程における流れ、輸送及び反応【9課題】

- ・外負荷を伴う濡ラッカー終端の静電補助問題に対する 3 次元適応マルチレベル FEM-BEM カップリング (ハノーバー大学、ミュンヘン工科大学など、02-04 年)
- ・産業気体液体反応器の最適化に対する効率的な FEM シミュレーション (ドルトムント大学応用数学計算研究所など、01-04 年)
- ・巨視集合体の流れ過程シミュレーション (ハイデルベルク大学、マイクロ技術研究所、01-03 年)
- ・時間依存二相水蒸気流シミュレーションに関する機械モデルから生じる線型方程式群に対する高効率長寿命正確なレーザー (ミュンヘン工科大学情報研究所など、01-03 年)
- ・化学及びバイオテクノロジーにおける非標準型最適制御問題 (ハイデルベルク大学など、00-04 年)
- ・全製造過程シミュレーションに対するラティス・ボルツマン手法の適応的格子値増加 (ブラウンホーファー産業数学研究所など、00-03 年)
- ・化学的気相成長反応器の効率的なシミュレーションへの動力学的次元減少 (コンラッド・ツーセ情報工学センターなど、00-03 年)
- ・試行的モデル判断(実験的制御モデル判断) (ベルリン自由大学など、00-03 年)
- ・結晶化プロセスの例による、拡散・局所分配されたシステムの人口動態モデル (シュツットガルト大学、マックス・プランク数学研究所など、00-03 年)

(4)機械システム【4課題】

- ・大問題に対するフォーム最適化の機械的指向手法 (ミュンヘン工科大学、02-04 年)
- ・電子光学研究法に基づくエラストマー特徴化のための空間的統計手順 (フライベルク工科大学統計研究所など、01-04 年)
- ・造船における簡便コンパクト法の例による改良建造単位組織の基礎として 3 次元粘流の新しいモデル化及び最適化の取組み (コットブス・ブランデンブルク工科大学など、01-03 年)
- ・ミクロ構造化工事単位連絡システム (アウスブルク大学など、00-03 年)

(5)センサー技術、光学【3課題】

- ・気体センサー技術における検出、分類及び定量分析 (リューベック薬科大学、ベルン大学など、01-03 年)
- ・光学－電子センサー (ワイヤーシュトラス応用解析統計研究所など、01-03 年)
- ・マイクロ光学面構造のモデル化と最適化 (ワイヤーシュトラス応用解析統計研究所など、01-03 年)

(6)物質材料、結晶成長、半導体【4課題】

- ・工場における物質材料生産への熱伝達の 3 次元モデル化 (カエサル財団結晶成長作業グループ、01-04 年)
- ・赤外線探知器生産による液相エピタキシのシミュレーションと最適化 (フライブルク大

学、ブレーメン大学技術数学センターなど、01-03 年)

- ・気相昇華による SiC 単一結晶成長の数値シミュレーションと最適化 (ワイヤーシュトラス応用解析統計研究所など、01-03 年)
- ・単結晶ガリウムヒ素におけるヒ素消去法の核生成、成長及び溶解の数学的モデル化とシミュレーション (ワイヤーシュトラス応用解析統計研究所など、00-03 年)

(7) 電気回路、ネットワーク 【4 課題】

- ・拡張半導体モデルを含む電気回路シミュレーション (フンボルト大学数学研究所、ミュンヘン工科大学数学センターなど、01-04 年)
- ・熱伝導効果に伴う電気ネットワークの数値シミュレーション (ウッパータル大学、フンボルト大学、ミュンヘン工科大学数学センターなど、00-04 年)
- ・熱伝導効果に伴う電気ネットワークの数値シミュレーション (フリーデリシアナ大学、フンボルト大学、ミュンヘン工科大学数学センターなど、00-02 年)
- ・統計的アルゲブロ微分方程式による毒性効果を伴う電気ネットワークのシミュレーション (フンボルト大学数学研究所など、00-03 年)

(8) 画像処理、断層撮影 【4 課題】

- ・微細グリッドによるパターン認識 (ボン大学など、01-04 年)
- ・ホログラフィー的エックス線断層撮影のための迅速再建アルゴリズム (サーランド大学など、01-03 年)
- ・航空機タービンの不均衡分布の逆規則 (ブレーメン大学技術数学センターなど、00-03 年)
- ・回転ピン機械による細波誤差検出 (ブレーメン大学技術数学センターなど、00-03 年)

(9) エネルギー：技術及び経済 【7 課題】

- ・電気エネルギー工学装置の電磁分析のための新技術 (シュツットガルト大学数学研究所など、01-04 年)
- ・電気エネルギー工学プラントの電流、温度分布及び冷却流の結合計算 (ハイデルベルク大学など、01-03 年)
- ・操作上の気体管理における混合全体の最適化 (ダルムシュタット工科大学、コンラッド・ツーセ情報工学センターなど、01-03 年)
- ・気体網における負荷分配の非線型最適化法 (コンラッド・ツーセ情報工学センター、ダルムシュタット工科大学など、01-03 年)
- ・現代自由化市場における発電所雇用及び商業計画の同時化のための統計的最適化法 (フンボルト大学数学研究所など、00-03 年)
- ・より小さい市場参加者の現調達ポートフォリオの中期リスク最適化 (フンボルト大学数学研究所など、02-03 年)
- ・不確実性下の最適化ガス経済計画 (ドゥイスブルク大学数学研究所、コンラッド・ツーセ情報工学センターなど、00-03 年)

(10) 物資の大量輸送システム、交通とコミュニケーションにおける最適化 【9 課題】

- ・連続依存準備時間及び代替資源を有する多段階、動力的ロットサイズ及び連続問題の解法の開発（ジーゲン総合大学、02-04 年）
- ・電子結合した自動車の動的挙動のモデル化、シミュレーション及び最適化（ダルムシュタット工科大学など、02-04 年）
- ・分配団体管理：統計的需要による輸送組織（コンラッド・ツーセ情報工学センターなど、01-04 年）
- ・OPNV の統合回転・サービス計画（コンラッド・ツーセ情報工学センターなど、01-03 年）
- ・大規模網輸送コースのモデル化、シミュレーション及び調整（ベルリン工科大学数学研究所など、01-03 年）
- ・連続依存準備時間及び代替資源を有する多段階、動力的ロットサイズ及び連続問題の解法の開発（アイヒシュテート・カソリック大学など、00-04 年）
- ・輸送網における動力的ルート案内のためのモデルとアルゴリズム（ベルリン工科大学など、00-03 年）
- ・仕事及び産業鉄道を伴う最適の自動車管理（ブラウンシュバイク工科大学など、00-03 年）
- ・電子結合した自動車の動的挙動のモデル化、シミュレーション及び最適化（ミュンヘン工科大学数学センター、00-01 年）

(11) 金融システム【4 課題】

- ・共済生命保険：保険会社における関税計算のための金融数学シミュレーションツール（統計利益検定）（ダルムシュタット工科大学実用数学センターなど、01-04 年）
- ・共済生命保険：保険会社における関税計算のための金融数学シミュレーションツール；サブプロジェクト B：統計的埋込値（カエサル財団金融工学作業グループなど、01-04 年）
- ・デリバティブ金融商品の評価のための解析方法と高効率数値アルゴリズム（ハイデルベルク大学など、00-03 年）
- ・リスク総量規制のための高効率方法（リスク測定評価への高効率方法）（ワイヤーシュトラス応用解析統計研究所など、01-03 年）

(12) (その他のプロジェクト)【2 課題】

- ・産業及びサービスにおける新数学手法：「インターネットサービス数学及び産業」の開発及び構造（コンラッド・ツーセ情報工学センター、オスナブリュック大学、フライブルク大学など、01-04 年）
- ・「産業及びサービスにおける新数学手法」の現状に関するワークショップ及びセミナー（ハイデルベルク大学、01-03 年）

【第二推進期間（1996-2000）：„Mathematische Verfahren zur Lösung von Problemstellungen in Industrie und Wirtschaft”（産業及び経済における問題定義の解決のための数学手法）】
（全 7 領域 6 7 課題　うち 97 年-：6 3 課題、98 年-：1 課題、99 年-：3 課題、課題名省略）

- (1) 特に非線型微分方程式と動力的システム(マルチスケール法、適応法、並行法など)などの複雑方程式群の解法のための数値手法【28 課題】
- (2) 画像処理の数学的方法【5 課題】
- (3) 逆問題の解法【19 課題】
- (4) 変分法【7 課題】
- (5) 離散・連続最適化法【3 課題】
- (6) 統計プロセスと暗号方法【2 課題】
- (7) (その他のプロジェクト)【3 課題】

【第一推進期間 (1993-1996) : „Anwendungsorientierte Verbundprojekte auf dem Gebiet der Mathematik” (数学領域の応用指向グループプロジェクト)】

(全4領域57課題のうち93年- : 27課題、94年- : 23課題、95年- : 2課題、96年- : 4課題、不明 : 1課題、課題名省略)

- (1) 複雑系非線型微分方程式のためのアルゴリズムと解法の開発【28 課題】
- (2) 幾何学的データ処理における数学的方法【9 課題】
- (3) 技術システムの数学的最適化及び制御【18 課題】
- (4) その他のプロジェクト【2 課題】

(ドイツ連邦教育研究省HPから作成)

(出典 : <http://www.mathematik-21.de/projects/projects.shtml>)

(参考資料 3-4)

ドイツ「キーテクノロジーのための数学

(Mathematik für Schlüsseltechnologien) 研究センター」

(通称：MATHEON) について

ードイツ学術振興会による同研究センター設立計画書の要約ー

1 現状分析

国家規制緩和によって、学術分野は融合し世界経済の原動力となる未来技術となる。このシステムでは科学技術の言語である数学を必要とする。しかし、新技術は数学的言語だけを必要とするわけではない。数学的アルゴリズム（数学的モデル化、シミュレーション及び最適化）がなければ、高効率、低コスト、低資源な技術投入は不可能である。したがって、数学はそれ自体が資源及び市場シェアを巡る国際競争におけるキーテクノロジーである。しかし、数学は隠れて作用し、通常、問題解決への数学の寄与を最終製品から見ることはできない。多くの医学療法の制御、電子チップのレイアウト設計及びその機能保障、鉄道車両の最適運行、飛行機翼の形状などが数学によるものと誰が気付いているか？世界的な情報化社会時代においては、新製品及び現代社会構造の開発に数学の革新的ポテンシャルを有効利用する者のみが競争に持続的に勝つことができる。これは地域的企業等にもあてはまる。

近年 20 年間で応用問題から生じる数学的問題への取組みが重要な位置を占めてきており、今日、プロセス進行の数学的モデル化、シミュレーション及び最適化は数学研究の中心的役割を演じている。しかし、科学進歩の大加速時代では、数学研究は新技術と同様、更に発展させ強化しなければならない。

キーテクノロジーの高度に複雑な未解決問題は、数学の多数の部分分野が応用者と協力して初めて決定的進歩に繋がる。数学は今なお極めて部分分野指向的であるが、この状態は技術的応用の点からも、適切な助成措置により変えなければならない。このためにベルリンは理想的な試験場を提供する。ベルリン圏内にはベルリン工科大学、ベルリン自由大学、ベルリン・フンボルト大学、コンラート・ツーゼ・ベルリン情報技術センター、ワイヤシュトラス応用解析学・推計学研究所があり、傑出した数学専門家が集まっている。ベルリンの数学研究グループは、既に十分にネットワーク化されている。しかし、ドイツ学術振興会による研究センター設立により、更に緊密かつ適切な活動が達成される。

「キーテクノロジーのための数学」研究センターは、ベルリン応用数学界の研究者を核に構成される。彼らは現在既に、多数の共同研究協力活動を行っており、1999 年以降「数

学応用のためのベルリン・ネットワーク」を組織している。このネットワークが研究センターの基盤組織となる。センターはベルリン工科大学に設置され、ベルリン自由大学、ベルリン・フンボルト大学、コンラート・ツーゼ・ベルリン情報技術センター、及びワイヤシュトラス応用解析学・推計学研究所の専門研究グループを含む。

将来技術における高度に複雑な数学問題の解決は、応用数学専門家の緊密な共同及び応用者との緊密な協力によらなければ達成できない。その際、数学的専門分野の古典的な区分けは消滅し、具体的応用の観点から不可欠な分野が結合されるだろう。

「キーテクノロジーのための数学」研究センターでは、応用に動機付けられた基礎研究、応用研究及び具体的応用例のための問題解決が研究の中心的視点として重要な位置を占める。このセンターの目標は、ドイツで次代を担う科学者の教育に魅力的な環境を伴う、国際的に影響力を有する優秀なセンターとなることである。更に、研究センターはキーテクノロジーに対する応用に不可欠な新数学研究の基礎を大学カリキュラムに直接組み込むことを目標として、数学教育の新しい方向付けの強化にも尽くすことになる。

2 応用数学：隠れたキーテクノロジー

現代の応用数学手法は世界的な重要資源であると同時に、経済的、技術的、社会的進歩の原動力である。数学は、例えば情報、通信、バイオテクノロジー、医療技術など、将来指向のキーテクノロジー及び全先端産業研究分野において中心的な役割を演じている。数学的モデル化はプロセスを記述するための重要な基礎であり、これらの分野の急速な発展を導く。しかし、数学はモデルの基礎となるだけでなく、応用者との協力によって、プロセスの数学的シミュレーション、モデル最適化、未知パラメーターの識別並びに大量データの視覚化及び分類など問題解決のための重要な手段を提供する。ここでコンピュータ技術及び数学的・数値的手法の急速発展により、ますます複雑化する応用問題に関する数学的モデル化及び数値シミュレーションが行いやすくなる。こうして不必要なコストやリスクは回避される。

特に応用数学の手法によって、

- ・工業的及び自然科学的基礎研究においてコスト及び資源を消費する実験が削減される。
- ・技術及び製品開発サイクルが短縮され、その結果製品がより迅速かつ安価で市場に投入される。
- ・製品の品質が改善される。
- ・技術の結果が予め可能な限り評価され、新技術が環境及び社会に対して与え得るリスクが分析される。

これまでのところ、航空・宇宙、自動車、半導体、通信や情報産業など、技術的かつ経済的な重要分野の全てが応用数学手法の進歩から決定的な影響を受けており、その対象分野は絶えず拡大している。更に、非常に様々な応用分野のプロセスのモデル化は類似の数学的構造を導く。したがって、1つの数学的問題の解決によって同時に全く異なる応用分野

において類似構造の複数種類の問題解決に寄与することができる。

応用数学はほとんど隠れて作用する。しばしばそれがなければ問題解決は不可能である一方、通常、その寄与は外部からはっきりとは見えない。即ち、応用数学は開発初期に閉じられた革新への扉を開くことを助ける正に「キー」テクノロジーの役割を有する。

数学のこの重要な機能は近年、連邦研究教育省の意思決定委員会及び大企業においても認識されるようになったため、ドイツ学術振興会による数学基礎研究助成と並んで、応用数学研究も多様な方法で連邦教育研究省及び企業により助成されている。このような発展の結果、今日、多くの数学者が学際的な研究共同体に参加している。

3 ベルリンにおける応用数学

ベルリン地域は、応用数学研究及び複雑応用問題の解決において国内外で指導的地位にあり、数学的専門知識の集中は連邦全土中比類ない。この評価は学術審議会が1998年に行った数学的専門分野及び研究機関評価によっても明らかとなった。

ベルリンにおける応用数学は既に、様々な数学研究集団間でも他分野間でも高水準のネットワーク化が際立っている。例えば、ワイヤシュトラス応用解析学・推計学研究所とコンラート・ツーゼ・ベルリン情報技術センターは協力協定によって互いに結び付いている。また、両機関は研究者の併任によってベルリンの各大学と結び付いている。更に、共同研究プロジェクト、セミナー、講義、特別研究分野、ドイツ学術振興会の重点プログラム並びに連邦教育研究省及び欧州連合の助成プログラムにおいて、効果的に協力が行われている。現在の活動・研究ネットワークの例として、連邦教育研究省助成プログラム「産業及びサービスにおける新数学手法」の中の、ベルリン自由大学、ベルリン・フンボルト大学、ベルリン工科大学、ワイヤシュトラス応用解析学・推計学研究所、コンラート・ツーゼ・ベルリン情報技術センターの協力による14の応用数学プロジェクトが挙げられる。また、フラウンホーファー研究機構、ヘルムホルツ・ドイツ研究センター、マックス・プランク協会やゴットフリート・ヴィルヘルム・ライプニッツ学術協会など他の大学外研究機関及び多数の学際的な研究共同体との協力が数多く行われている。更に、BVG、e プラス、インフイネオン、VEAG、ルールガスなどの中規模企業とともにシーメンス、バイエル、ドイツ・テレコム、ドイツ鉄道、ダイムラー・クライスラーなどの多数の大企業及び多数の中小企業との協力も行われている。

ベルリンの数学研究が評価されていることは、産業への成果移転業績や応用分野の基礎的研究の業績などに対する各界からの多数の表彰及び学術論文賞によって裏付けられる。

関係研究者の多くは、地域的、全国的及び国際的な専門組織の指導的ポストで活動している。これは、ベルリン数学会からドイツ数学会を経て国際数学連合に、また、連邦及び州省庁の諮問委員会からドイツ学術振興会の専門委員会委員長にまで及ぶ。

1999年、ベルリン応用数学界の更なるネットワーク化を目指し、数学的専門知識を必要とする問題領域及び数学間の連絡・仲介機能等を有する「数学応用のためのベルリン・ネ

ットワーク」が設立された。

ベルリン応用数学界がこのように 1 つのネットワークへと結合したことにより、研究センターの本質的な組織基盤は既に固まっている。しかし、現代的な事務所はない。この点で、同研究センターは応用数学界の国内的及び国際的な存在感を更に高める役割も果たす。

4 「キーテクノロジーのための数学」研究センターの目標

「キーテクノロジーのための数学」研究センターは、応用数学界の研究者仲間を中核として構成される。既に彼らは多数の研究協力活動において共同作業を行っており、「数学応用のためのベルリン・ネットワーク」を組織している。

将来のキーテクノロジーに関する高度に複雑な数学問題の解決は、応用数学専門家と応用者間の緊密な協力がなければ達成できない。その際、数学的専門分野の古典的区分は消滅し、具体的な応用のために不可欠な分野を結合しなければならない。

研究センターは、最適化と不連続数学、数値数学／科学技術計算並びに応用・推計学的解析などの各重点分野に分けられ、数学的モデル化、シミュレーション及び最適化、並びに生命科学、交通・通信ネットワーク、製造、電気回路及び光学技術、金融、視覚化、教育などの数学的問題の研究に取り組むことになる。

ここで、本質的な挑戦は、これらの将来技術の数学的問題提起に立ち向かい、これらの分野の研究発展を促進することにある。その際、応用に動機づけられた基礎研究、応用研究及び応用のための問題解決の組み合わせが中心的な研究視点である。目標は、次代を担う科学者教育及び国際的トップクラスの研究者に対して魅力的な環境を提供し、国際的に優秀なセンターとなることである。これに関連して、隠れたキーテクノロジーである応用数学を更に目に見える存在にすること、その革新的なポテンシャル及び構造的かつ横断的な科学の利点を示すこと、応用数学と経済等の間に関係を構築すること、そして特に、極めて有能な若手科学者を助成することに中心的な役割がある。これにより、研究センターは、ドイツを再び数学・自然科学研究及び教育においてトップの座に就かせることに重要な寄与を果たすことになる。

次に数学研究を応用と結びつける予定シナリオとして、3つの具体例を示す。

・ バイオテクノロジーの例：計算機に支援された薬品設計

今日、新薬の設計から来るべき市場投入までには約 10 年の期間が経過する。薬品設計の第一段階は計算機で行われるが、ここで仮に作用物質の半分をふるい落とすことに成功すると、商品化段階に達した薬品当たりのコストは半分になる。現在のところ、この作業分野はほとんど、バイオ情報科学としての情報科学領域にあり、基本的にはこれによって、分子形状（幾何学）を計算及び比較するためのアルゴリズム開発及び解析が行われた。しかし、ベルリンの作業グループは近年、分子の作用に直接照準をあてた新式の数学的モデル化を提案した。ここでは、最新の非線型力学手法が応用される。すなわち、現在の一般的な分子力学の代わりに、マルコフ連鎖手法からいわゆるメタ安定状態

の化学的立体配座の力学を計算する（ここに数学的推計学の概念が入り込む）。立体配座力学の数値アルゴリズムは、コンラート・ツーズ・ベルリン情報技術センター及びベルリン自由大学において既に膨大な天然素材データベースを許容できる計算時間で体系的に調べることができるまでに開発された（バーチャルスクリーニング技術）。

- ・ **医療技術の例：コンピュータに支援された治療・手術計画**

近年、既に確立した医療用画像処理をはるかに超えて、バーチャル医療の未来像が具体化した。診断及び治療をコンピュータの助けを借りて量的、患者固有的に行う取り組みである。このテーマに関する最もよく知られたプロジェクトは、高体温計画、骨接合計画及び手術計画である。この種のプロジェクトの前提は、迅速かつ管理された正確さで個々の仮想患者のモデルを計算機上に作り出す能力である。これは、第一段階において、医療用画像資料（CT、MR あるいは超音波による）のセグメント化を必要とする（最高の頭脳を持った数学者が取り組んでいる困難な問題提起）。第二段階では、このモデルは3次元グリッドモデルによって置き換えられることになり、これが人体のシミュレーション及び医療機器の最適化のための基礎として役立つ（不連続・数値数学の問題）。

- ・ **情報技術の例：回路シミュレーション**

情報技術の急速な発展は、数学研究に対して無限の挑戦を突きつけている。

数学は特に、材料設計及びチップ設計の最適化、光学技術の開発及び通信網の計画と制御においてますます必要とされる。ここでは、回路シミュレーションの分野における状況を略述する。

新しい集積回路の開発は、逆方向の2つのトレンドによって特徴付けられる。一つは回路の複雑さが増していることに関連して、高抽象化水準の機能モデル化アプローチが要求されることである。もう一つは、小型化の推進及びそれに伴う性能密度は、回路ノイズ、トランジスタなどの短チャネル長による熱的、電氣的並びに共振の相互作用など、これまではおろそかにされていた影響の考慮を必要とすることである。これによって要求される回路の一層複雑なモデル化は、推計学的方程式（ノイズ解析のため）、熱伝導方程式（熱的影響の考慮のため）あるいはボルツマン方程式と関連するドリフト・拡散方程式（より精密な半導体モデルを取り入れるため）の結合システムを導く。そのような結合システムの解析、特に解決策の存在及び安定性という問題、シミュレーションに適合した数値プロセス及び最適化手段開発は重要な研究テーマであり、そこには応用・推計学的解析手法やネットワーク解析における数値数学と並んで、不連続数学の決定的手法も入る。なお、この分野における協力パートナーは、例えばインフィネオン社である。

（出典：ベルリン工科大学のホームページから。現在は削除された模様。）

(参考資料 4-1)

アンケートご協力のお願い(文部科学省 科学技術政策研究所)

＊＊大学大学院 ＊＊研究科

教授

＊＊ ＊＊ 様

「研究分野における数学のニーズ」に関するアンケート ご協力のお願い

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

専門調査員の皆様方には、日頃より科学技術動向研究センターの活動に対しまして一方ならぬご協力を賜り誠にありがとうございます。

文部科学省科学技術政策研究所では、本年５月に社団法人日本数学会との共催により、「数学の将来シナリオを考える－数学を基点とする分野横断型研究の展開に向けて－」のワークショップを開催しました。本ワークショップの目的は、日本の数学研究が置かれている状況をきちんと認識すること、数学研究が新しい科学技術分野を発展させるために果たす重要性を考えること、日本の数学のポテンシャルを他分野に活用する方策を産学官関係者で討議し、認識を共有することでした。その結果、ワークショップでの討論において、産学官の様々な分野において数学の重要性と必要性が示唆されました。

数学は、例えばひとつの定理が物理現象の解明に役立てば、経済現象にも適用できるという具合に、様々な科学分野の基礎を支えています。翻って見れば、科学技術の構造変革をもたらした計算機の開発や、数理ファイナンス、複雑系等の学問分野の創造は、数学研究から端を発しており、数学の成果は、社会を根底から変革する可能性を秘めています。

欧米各国は、このような数学の特徴を踏まえて、国家として数学研究や他分野における数学の活用を推進しています。

現在、日本には欧米のような数学推進の科学技術政策はありませんが、もし日本の多くの研究分野においても数学の重要性や必要性が示されるのであれば、政策上で取り上げていく必要があると考えられます。

本アンケート調査では、日本の様々な研究技術分野における数学や数学をバ

ックグラウンドに持つ人の必要性（ニーズ）を調査いたします。

ご回答頂きました結果は、日本における数学研究支援策を検討する際の基礎資料とさせて頂く予定です。

本アンケートの回答にかかる時間は10分程度でございます。

皆様におかれましては、ご多忙中とは重々承知いたしておりますが、何卒、上記の趣旨をお酌みいただき、ご協力賜りますようお願い申し上げます。

◇ アンケートの実施方法について

科学技術専門家ネットワークに設置しました「アンケート機能」によりアンケートを実施致します。

（手順）

1. 科学技術専門家ネットワークにログインします。
アドレス <http://stfc.nistep.go.jp/>
2. 画面左側の「メニュー」に表示されているリンク「アンケート」をクリックします。
3. アンケート入力画面が表示されますので、必要項目を入力後、送信ボタンをクリックします。
4. 「ご回答ありがとうございました」と表示されたら、送信完了です。
ブラウザを閉じてください。

◇ 注意事項

- 時間経過するとセッションが切断され、送信することができません。
入力に時間を要する場合は、予め Word 等で文書を作成しておき、コピー＆ペーストで入力してください。
- 誠に勝手ながら、ご回答は「平成17年10月13日木曜日」までにお寄せください。

＜アンケートについてのお問い合わせ先＞

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
担当 伊藤、細坪

Tel: 03-3581-0605 Fax: 03-3503-3996 E-mail: stfc@nistep.go.jp

(参考資料 4-2)

「研究分野における数学のニーズ」に関するアンケート

専門調査員の皆様方には、日頃より科学技術動向研究センターの活動に対しまして一方ならぬご協力を賜り誠にありがとうございます。

文部科学省科学技術政策研究所では、本年5月に社団法人日本数学会との共催により、「数学の将来シナリオを考えるー数学を基点とする分野横断型研究の展開に向けてー」のワークショップを開催しました。本ワークショップの目的は、日本の数学研究が置かれている状況をきちんと認識すること、数学研究が新しい科学技術分野を発展させるために果たす重要性を考えること、日本の数学のポテンシャルを他分野に活用する方策を産学官関係者で討議し、認識を共有することでした。その結果、ワークショップでの討論において、産学官の様々な分野において数学の重要性と必要性が示唆されました。

数学は、例えばひとつの定理が物理現象の解明に役立てば、経済現象にも適用できるという具合に、様々な科学分野の基礎を支えています。翻って見れば、科学技術の構造変革をもたらした計算機の開発や、数理ファイナンス、複雑系等の学問分野の創造は、数学研究から端を発しており、数学の成果は、社会を根底から変革する可能性を秘めています。

欧米各国は、このような数学の特徴を踏まえて、国家として数学研究や他分野における数学の活用を推進しています。

現在、日本には欧米のような数学推進の科学技術政策はありませんが、もし日本の多くの研究分野においても数学の重要性や必要性が示されるのであれば、政策上で取り上げていく必要があると考えられます。

本アンケート調査では、日本の様々な研究分野における数学や数学をバックグラウンドに持つ人の必要性（ニーズ）を調査いたします。

ご回答頂きました結果は、日本における数学研究支援策を検討する際の基礎資料とさせて頂く予定です。

本アンケートの回答にかかる時間は10分程度でございます。

皆様におかれましては、ご多忙中とは重々承知いたしておりますが、何卒、上記の趣旨をお酌みいただき、ご協力賜りますようお願い申し上げます。

Q0. 匿名の希望

匿名を希望する場合は「希望する」を、そうでない場合には「希望しない」を選んで下さい。

「希望する」 「希望しない」

Q1. あなたの専門分野等について

1-1. あなたの専門分野を以下の8つより1つ選んで下さい

1 ライフサイエンス、2 情報通信、3 環境、4 ナノテクノロジー・材料、5 エネルギー、6 製造技術、7 社会基盤、8 フロンティア(宇宙、海洋、地球)

1-2. あなたの所属を以下の4つより1つ選んで下さい

1大学、2公的研究機関、3民間企業、4その他

1-3. あなたの研究内容について記入して下さい

(回答例) RNA 研究、光通信、半導体などの領域の大きさでお答え下さい
()

Q2. あなたの研究内容と数学との関わりについて

以下の質問中の「数学をバックグラウンドに持つ人」とは、大学学部以上で数学専攻及びそれに類する高度な数学知識を有する者を指す。

2-1. あなたの研究と数学との関わりの程度は？

1. 非常にある、2. ある、3. ややある、4. あまりない、5. ほとんどない、6. 全然ない

2-2. あなたの研究チームに数学をバックグラウンドに持つ人は含まれていますか？

「はい」 「いいえ」

2-3. あなたのライバルとなる欧米の研究チームに数学をバックグラウンドに持つ人は含まれていますか？

「はい」 「いいえ」

2-4. 将来的にあなたの研究チームに数学をバックグラウンドに持つ人は必要ですか？

「はい」 「いいえ」

2-5. あなたの研究において数学の貢献を期待したい課題がありますか？

「はい」 「いいえ」

もしあれば、具体的な課題の内容など ()

Q3. 研究分野と数学との関わりについて

1-1. でお選びになった研究分野に関して以下の問いにお答え下さい。

3-1. 当該研究分野と数学との関わりの程度は？

1. 非常にある、2. ある、3. ややある、4. あまりない、5. ほとんどない、6. 全然ない

3-2. 当該研究分野に数学をバックグラウンドに持つ人は必要な数だけ含まれていますか？

1. あまっている、2. ややあまっている、3. 足りている、4. やや足りない、5. 足りない

3-3. 欧米において、当該研究分野では、日本と比較して数学をバックグラウンドに持つ人の数はどうですか？

1. 非常に多い、2. 多い、3. やや多い、4. やや少ない、5. 少ない、6. 非常に少ない

3-4. 将来的に当該研究分野において数学をバックグラウンドに持つ人の必要性はどうですか？

1. 非常にある、2. ある、3. ややある、4. あまりない、5. ほとんどない、6. 全然ない

3-5. 当該研究分野において数学の貢献を期待したい課題がどの程度ありますか？

1. 非常にある、2. ある、3. ややある、4. あまりない、5. ほとんどない、6. 全然ない

もしあれば、具体的な課題の内容など ()

Q4. その他

Q2及びQ3以外でわが国として数学の貢献が必要であると考えられる研究テーマなどがあればご記入下さい。その他数学に関連するご意見があれば、ご自由にご記入下さい。

()

—ご協力ありがとうございました—