

特集：我が国における学術研究の動向について I

は じ め に

戸 塚 洋 二

平成 18 年 3 月 22 日開催の文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会 学術研究推進部会において、日本学術振興会学術システム研究センター(以下、「本センター」という.)の協力を求めて「近年の学術研究の動向把握及び分析」を行うことが決定された。本センターはこの求めを受け調査に可能な範囲で協力することとした。

本センターは、最先端の研究現場で活躍中の研究員 110 名を擁し、1) 学術振興方策の調査・研究、2) 学術動向に関する調査・研究、3) 日本学術振興会事業全般に対する提案・助言、4) 本会事業全般にわたる審査・評価業務(審査委員候補者案の作成、審査会の議事運営等を行っており、審査・採択そのものには関わっていない)等の業務を行う組織であり、学術動向に関する調査・研究はセンター本来の業務のひとつでもある。

本調査・研究は、本センターの内部組織である 9 専門調査班の分類に従い、人文学、社会科学、数物系科学、化学、工学系科学、生物系科学、農学、医歯薬学、総合・複合新領域の 9 分野・領域ごとに、それぞれ本センターの研究員の学知を結集して行われた。具体的には、科学研究費補助金採択課題の経年変化の分析を中心に、国際学会発表テーマの調査、さらに各研究員独自の調査および専門的知見等を基にまとめられた個別報告を、専門調査班での討議を通じて彫琢する形で進められた。

本調査報告は、各分野・領域ともそれぞれ

れ、1) 当該分野・領域の特徴・特性等、2) 過去 10 年間の研究動向と現在の研究状況、3) 今後 10 年間で特に進展が見込まれる研究対象、アプローチ等及び推進すべき研究、4) 諸課題と推進手法等、の 4 節から成り立っている。

本調査報告は、上述のように我が国の学術研究の牽引者的研究者である本センター研究員の努力と苦心の結晶であり、現時点において、学術の諸分野を広くカバーする信頼度の高い動向調査になっていると自負している。ただ、調査の行われた学術分野・領域は極めて多様であり、それぞれの研究文化も異なることから、動向調査のまとめ方にも分野・領域で若干の相違がある。文言等の調整は極力行わなかったため、報告の文章表現にもそれらが反映されているをご承知いただきたい。

本調査報告は、平成 19 年 1 月に「中間まとめ」としてとりまとめられ、同年 1 月 25 日に開催された文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会において報告され、同省における学術研究支援方策の検討等に利用されることとなった。その後、若干の加筆・修正を行い最終版としてとりまとめたので、ここに本誌を借りて公表するものである。

本報告が、関係各位の学術動向に関する理解の向上に役立つこととなれば幸いである。

戸 塚 洋 二 (とつか・ようじ)  
学術システム研究センター 所長

## 学術動向に関する調査研究の経緯について

### 〈前 提〉

- ・ 文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会は、平成18年1月20日開催の第18回会議において、「学術研究分野・領域の特性に応じた振興方策の在り方について」審議することとし、具体的には、近年の学術研究の動向把握及び分析を踏まえた支援方策の検討を行うものとした。
- ・ これを受け、同年3月22日開催の学術分科会学術研究推進部会（第14回）において、独立行政法人日本学術振興会学術システム研究センターの協力を求めて我が国の学術動向について調査することとされた。

### 〈日本学術振興会学術システム研究センターにおける経緯〉

- 1) 日本学術振興会では、この調査は学術システム研究センターが行う業務の一つである学術動向等に関する調査研究と一致する性質のものであると認め、この求めに応ずることとした。
- 2) 調査にあたっては、学術分科会学術研究推進部会が示した調査項目について、学術システム研究センターが本来業務として行っている学術動向等に関する調査研究の方法と成果に即して実施した。  
調査報告は、以下の4つの項目を各分野・領域共通とし、詳細については、分野・領域の特性に委ねることとした。
  - ・ 当該分野の特徴・特性等
  - ・ 過去10年間の研究動向と現在の研究状況
  - ・ 今後10年間で特に進展が見込まれる研究対象、アプローチ等及び推進すべき研究（分野・手法等）
  - ・ 諸課題と推進手法等
- 3) 調査報告書は、それぞれの分野・領域（「人文学」、「社会科学」、「数物系科学」、「化学」、「工学系科学」、「生物系科学」、「農学」、「医歯薬学」、「総合・複合新領域」）においてまとめた。
- 4) 調査報告書は、各専門調査班会議において、センター各研究員が専門分野についてまとめた調査結果に基づき、以下に示す手順と日程によりとりまとめたものである。

平成18年

- ・ 4月～6月 「調査研究項目」等について主任研究員会議、各専門調査班会議等での意見等を踏まえて、共通理解を図る。
- ・ 6月～ 各研究員が、当該専門分野において学術動向調査を行う。  
(必要に応じて、各専門調査班会議において意見交換を行う。)
- ・ 10月～ 各専門調査班会議において、経過報告を行う。

- ・ 11月～ 各専門調査班会議において、当該分野・領域についてとりまとめを行う。
- ・ 12月～ 主任研究員会議に各班でまとめている調査報告について、経過報告する。さらに、専門調査班会議において、議論を行う。

平成 19 年

- ・ 1月 主任研究員会議において中間まとめについて確認を行った上で、文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会に報告する。
- ・ 2月～ 中間まとめに加筆・修正を行うことにより最終報告書を取りまとめる。

#### 〈文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会への報告〉

平成 19 年 1 月 25 日に開催された文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会第 21 回会議において、戸塚センター所長から中間まとめが報告された。

#### 〈最終報告書の学術月報への掲載〉

学術システム研究センターの研究成果として発信することを目的として、最終報告書を学術月報において以下の 3 回に分けて連載することが決定された。

- 平成 19 年 7 月号 我が国における学術研究の動向について I  
(数物系科学, 化学, 工学系科学分野)
- 平成 19 年 8 月号 我が国における学術研究の動向について II  
(生物系科学, 農学, 医・歯・薬学分野)
- 平成 19 年 9 月号 我が国における学術研究の動向について III  
(人文学, 社会科学, 総合・複合新領域)

#### 〈調査に当たって利用した主な参考資料〉

本報告書の作成にあたっては、以下の資料を参考とした。また、個別の分野・領域の動向調査において利用した資料については、当該分野・領域において記載した。

- (参考 1) 国立情報学研究所科学研究費補助金採択課題・成果概要データベース  
(<http://seika.nii.ac.jp>)
- (参考 2) 平成 9 年度 我が国の文教施策「未来を拓く学術研究」(抜粋)  
学術研究をめぐる内外の動向「各研究分野の動向」
- (参考 3) 学問分野別の特性・特色 (本資料は文部科学省が各分野の研究者へのアンケート調査から、学問分野別に特性・特色を整理したもの。)
- (参考 4) 総合科学技術会議「分野別推進戦略」(平成 18 年 3 月 28 日) 答申・意見具申抜粋

## 数物系科学分野の研究動向

日本学術振興会学術システム研究センター

ここで扱う数物系科学分野は、数学、物理学、天文学・宇宙物理学、地球惑星科学、プラズマ科学を含む。研究の対象は、広大な宇宙から極微の素粒子にまでわたり、個々の物質の具体的諸性質から完全に抽象化された数学的概念にまで及び、その研究対象と研究方法は極めて多様である。しかし、この分野の研究の共通した目的は、我々を取り巻く自然界の諸事象を科学的な観察・実験と理論的考察を通じて解明し、知識の領域を拡大し、諸事象の内に潜む根源的な法則性を暴き出すことにある。この知的活動によって、人類の学術的知見を豊かにして文化の発展に資すると共に、現在および将来の応用への強固な基礎を提供している。

数物系科学分野における研究の特徴は、幅広い裾野を持つ大学・研究機関の一研究室レベルでの継続的な基盤的研究と、国家的規模での大型計画研究が密接不可分に結びついている点である。基盤的研究は、それぞれの領域において、新たなパラダイム創生や新現象の発見などに貴重な貢献をしてきた。科学の歴史が示しているように、革新的成果や発見は事前の成果予想の付かない斬新な試みの中でこそ生まれてくる。この歴史から学び、幅広い基盤的研究への支援がますます重要となっている。また、これらの基盤的研究は、大学院生や若き研究者の教育と養成に不可欠であり、「人づくり」の観点からも、極めて

重要である。

一方、素粒子・原子核研究、天文・地球惑星科学研究、プラズマ科学研究などにおいては、このような基盤的研究に加えて、その諸成果を集大成し、新たな学術的展開を切り開く大型プロジェクト研究や研究施設を必要とする。その研究組織や規模も国際化しており、世界に対する我が国の科学的責務からも、学術の革新的展開を実現する大型研究を旺盛に展開することが強く望まれている。

我が国の基礎科学界の実力は極めて高く、各分野で過去10年間に着実に伸びてきたことは相次ぐノーベル賞受賞などによっても明らかである。しかし、科学技術基本法により重点的な振興策が取られている分野は別として、基礎科学全般においては、バブル経済崩壊から最近の法人化に伴う運営費交付金の伸び止まりと、大学運営や予算措置の変化は、基礎科学にとって極めて危機的な状況を生み出しつつある。

第一に、科学技術基本法の制定に伴う予算増とポストク増は大きな効果をもたらしているが、重点投資がなされている応用科学技術の分野に比して、基礎科学分野では国立大学法人化に伴う運営費交付金の圧縮により、基盤的研究の継続と展開に大きな困難を与えている。基本的な研究や実験が継続的に遂行可能となるように広く基盤的研究経費を措置することによってこそ、新しい展開を生む研究

を育み、自然科学の意義と成果を次世代にしっかりつなぐことが可能となる。基盤的研究経費と研究支援体制の充実、更には有能な若手が展望を持って研究に専心できる環境の整備無くしては、我が国が築いてきた学術基盤は、遠からず衰退の道を辿ることは必至である。抜本的な改革が早急に必要である。

第二に、科学技術基本計画の重点分野に入らない基礎科学分野の共同プロジェクト的研究を支援する枠組みの硬直化と予算削減は、国際レベルの研究に必要な予算規模の増大化に対応できているとは言い難い。国立共同利用研究機関等を軸とした国家的プロジェクトの実現、またいくつかの研究グループが共同で展開できる中型規模での研究計画の推進など、共同プロジェクト的研究を旺盛に展開できる枠組みを整備することが強く望まれている。多段階的な予算支援策の確立と大幅な財政支援が不可欠である。

本稿は、日本学術振興会学術システム研究センター数物系科学専門調査班が、科学研究費補助金の申請・採択課題の調査分析を参考にしつつ、過去10年の研究動向を探り、数物系科学各領域における今後の研究展開の方向性を議論・検討し、作成したものである。最初に述べたように、数物系科学分野は、五つの分科を含み、研究対象の多様さに対応して、研究手法・研究形態・必要予算規模・産業界・社会生活との関わり方などのさまざまな側面は、分科ごとあるいはその中の専門分野ごとに大きく異なっており、以下では全体に共通な事項と分野特有の事項があることに注意されたい。

## 1 当該分野の特徴・特性等

### 1. 数学

数学は、科学の多くの分野の言葉や普遍的

方法論を提供している。数学の重要性は、隣接分野で（たとえば物理学・化学・工学・経済学・哲学）ばかりでなく、近年の発展により100年前までは、つながりが薄かった生物学などにまで広がっている。数学はまた、最古の学問の一つであり、数や図形を扱うことが出発点であったが、発展に従ってその対象は関数、抽象的な代数系、アルゴリズムなど、大きく広がっている。そして現在では、論理的に明確に定式化できるすべての概念が、数学の対象である。

論理が数学の方法の特徴であり、数学においては、一度確立された事実は揺らぐことが無い普遍性がある。また、論理に基づいて導かれた数学的事実は、その論理的仮定さえ満たされれば、どの分野にも適用できる汎用性がある。これが、前述の広範囲の応用を生んでいる根拠の一つであり、隣接分野における数学的思考の重要性である。

数学の研究では、計算機による実証や実験を行うこともあるが、その意義は他の分野に比べて限定的であり、理論研究が中心的な役割を占める。また、数学研究は、多くの場合個人や少人数のグループによってなされ、大規模な共同研究を必要としない。そのため、小さな大学の研究者でも世界的な研究を行うことが可能である。

数学研究においては、研究成果が直接、実生活において目に見える形で現れることは多くなく、また現れる場合でも長い時間がかかる。しかし科学の諸分野で空気のように当たり前に使われている言葉・考え方・概念のなかで数学に由来するものは多い。それはいわば科学という一つの織物において、縦糸をなす各分野に対し、数学は横糸の役割を果たしているからとも言える。数学は横糸だからこそ目に見えにくく、評価しにくいだが、必要不可欠なものである。

数学の研究領域は広く、解決すべき問題は

多様である。理論的研究の特徴として、将来どのような領域分野が重要になるか、予想することは困難である。また、社会での応用においても、どのような研究がどのように応用されるかを、あらかじめ予測することは不可能である。数学における独創的な研究成果、画期的な応用は、ほとんどが、予想されない分野同士の結びつきや、全く新しい問題意識の開拓、全く予期されていなかった応用によってなされる。分野同士の結びつきとしては、数理論理学の発展がコンピュータ誕生に果たした役割、代数・微分幾何学と超弦理論の関係などがあり、応用例としてはラドン変換のCTへの応用、ウェーブレットと信号解析・画像処理、伊藤解析のファイナンスへの応用、楕円曲線の暗号理論への応用、結び目理論のDNA結び目分類への応用等がある。また、生物学などにおける分子、細胞レベルでの研究の急速な進展に伴い、数学の応用が非常に大きく広がることが予想される分野である。

従って既存の応用や現在脚光を浴びている領域にこだわらない、幅広く多様な研究が行われることが、豊かな数学の発展と次世代における応用には不可欠である。

## 2. 物理学

### 2-1. 素粒子・原子核分野

素粒子物理学は、物質の究極的構成要素である素粒子と、それらの間の相互作用を対象とする分野である。言い換えると、自然界の最も基本的な物理法則を明らかにすることが素粒子物理学の目標である。これは同時に、宇宙の起源にせまるための不可欠な手段ともなっている。

微小の対象を調べるには、不確定性関係により大きなエネルギーを要する。これを実験室で直接実現するには、粒子を高エネルギーまで加速する加速器が必要であり、素粒子物

理学はしばしば高エネルギー物理学とも呼ばれる。過去50年の素粒子物理学は、より高いエネルギー、あるいはビーム強度の大きな加速器の建設とあいまって発展してきた。一方量子力学によれば、重すぎて直接生成できないような素粒子も、ごく一瞬の間存在することが可能であり、このことから非常にまれな現象の探索や非常に精密な物理量の測定によって、間接的に高エネルギーの相互作用に関する情報を得ることも可能である。

人為的手段によらず自然界に存在する高エネルギーの粒子は、宇宙線として地球に降り注いでおり、これを利用して高エネルギーの現象を研究することができる。宇宙線は加速器と異なり制御することができないため不利であるが、現存の加速器では実現できない高いエネルギーの粒子もわずかに含まれている。また、宇宙のビッグバン直後には、非常に高い温度の時期があり、重くて寿命の短い素粒子も多数存在していたため、宇宙物理学は素粒子物理学と密接な関連を持ち、初期宇宙の観測から素粒子の相互作用に関する情報を得ることができる。

さて、20世紀後半において、物質を構成する素粒子として3世代のクォークおよびレプトンが発見され、その間に働く強、弱、電磁相互作用がすべてゲージボソンを媒介として起こるゲージ相互作用であることが確認された。これらの事実はいわゆる素粒子の標準理論として具体化されている。しかし、標準理論には、素粒子の質量の起源となるヒッグス粒子と、それが引き起こす新しい種類の相互作用が含まれており、実験的には未だに証拠に欠ける状態である。これを検証することが素粒子物理学の一つの目標であり、エネルギーフロンティアの加速器のエネルギー設定に反映されている。

標準理論は、現存の加速器を用いた実験で測定できる過程に対しては、三つの相互作用

を統一的に記述できる理論として著しい成功を収めている。しかし、標準理論には重力相互作用は含まれていない。また、非加速器実験や宇宙物理に関係した現象で、より高いエネルギーの物理が関与しているとおぼしき事実が蓄積されてきている。例えば、ニュートリノの質量、宇宙の暗黒物質、暗黒エネルギーの存在、宇宙の物質・反物質の非対称性、初期宇宙におけるインフレーションの証拠などからは、標準理論の枠外の物理が要請される。

重力まで含んだ最終理論の有力な候補としてストリング理論が精力的に研究されている。この理論では時空の次元が10次元であり、未知の余剰次元の存在を必要としている。また、標準理論自身の持つ理論的な不備を解決するものとして以前より超対称性が注目されてきたが、ストリング理論では余剰次元の効果で超対称性が実現することが知られている。

超対称理論では数多くの超対称粒子の存在が導かれ、余剰次元の自由度は素粒子の励起状態の存在を意味する。これらの新しい粒子・現象は、今後のエネルギーフロンティア加速器の到達エネルギーである TeV 程度のスケールで現れることが期待される。

一方で、以前より知られているクォークの世代混合に加えて、レプトン-ニュートリノにも世代の混合が発見された。これらはそれぞれ Cabibbo・小林・益川行列および牧・中川・坂田行列によって記述できているが、その起源はいまだに理解されていない。これらのフレーバー混合現象を精査することは、標準理論を超える物理を探究する一つの有力な方向である。

クォークから構成される陽子・中性子・パイオンなどのハドロンは、強い相互作用をする粒子である。また、陽子・中性子からなる原子核は、少数多体系という独特の系であ

り、これらの性質や反応過程にはきわめて多彩なものがある。これらハドロン・原子核の物理はつきない話題を提供し続けている。また、高温ないし高密度における核物質の性質は重イオン衝突実験等より次第に明らかにされている。これは強い相互作用の重要な一側面であるとともに、中性子星など天体物理学とも密接に関連している。

素粒子・原子核分野の実験は、大型の加速器や大規模な測定器を必要とするものが多く、国際共同実験が基本的である。各種類の加速器は世界に1, 2しか存在せず、研究を遂行するためには場合により外国において実験を行うことになる。また、国内の加速器には外国からも実験に参加するのが通常である。測定器の建設には、参加各国の各研究機関が責任を持って各部分を担当して行う。また、データ取得後は、共同研究グループ内の各研究者が興味に応じて国際的に協力・競争により解析を進めるのが一般的である。

## 2-2. 物性物理学関連分野

素粒子・原子核関連以外の物理全般を網羅するこの分野は、「原子・分子・凝縮系物理学」と総称できる。この分野の目的は、自然界に存在する多様な物質の存在形態とその諸性質を物理学的に理解し、多彩な現象の奥深くに潜む普遍的な法則を見出して、より統一的な概念で自然物質界を記述する方法を創出することである。その成果は、今日の高度に発達した文明の根幹をなし、次世代における展開への強固な基礎を構築するとともに、物質界の豊かさに関する人類の知識を拡大し、文化・学術の発展に大きく貢献している。

この学問分野の特徴の一つは、多様性であり、それは、対象とする物質系、着目する物性と研究手法、更にはその研究視点、等のさまざまな側面に根ざしている。研究対象としては、原子・分子から有機・無機のナノ構

造、固体、更には生体物質まで含み、着目する物性としては、構造、電子的・磁氣的・誘電的・光学的諸性質とそれらの外部場との相互作用・応答性までを包含する。更には、研究視点としては、個々の物質の特定の現象の超精密測定と理解の深化、個別的現象の統一的理解・把握への挑戦、応用への展開研究など、極めて幅広いスペクトルを持つ。従って、この分野の研究者にとっては、価値の多様性・多元性が一つの最重要な前提であり、この下でこそ、豊かな発想とオリジナリティの高い発見が保障され、より広くかつ深い統一的概念の創出を惹起する。従って、その振興方策もそれを完全に保障し得るものであることが必要不可欠であり、幅広い基礎研究への継続的支援こそが重要である。

全ての自然科学研究がそうであるように、この分野における研究の展開は、基本的には学問の内在的発展方向に沿いながらも、新物質・新現象の発見、研究手法の開発、パラダイムの展開、の三つの要因によって規定されてきた。さらに、ここ近年の特徴として、学際性が新たな要因として加わっている。物性物理学関連分野が持つ性格からして、その内容は、工学領域における応用物理学、材料科学、ナノテクノロジー等と密接に関係している。実際、多くの研究者が、関連する主題を通じて、基礎的学理を追求すると共にその応用性にも着目して幅広い研究活動を展開しており、研究（発表）活動が、物理学会や応用物理学会などの複数にまたがる場合が少なくない。

本来ならば、「原子・分子・凝縮系物理学」が関係する横断的諸分野をも視点に入れた動向を総合的に調査すべきであるが、今年度は、主に数物系科学という基礎的学理研究の動向に限定し、まず、「原子・分子・凝縮系物理学」を、便宜上、伝統的な細目区分に従って分類して過去10年程度における動向

を、科研費の申請・採択課題に基づいて調査・総括した。その結果に立脚し、必要な場合は、工学系の応用物理学、新領域のナノ・マイクロ科学などの関連細目の動向についても参考にしつつ、今後の研究動向に関する試案を作成した。

### 3. 天文学・宇宙物理学

天文学は古代文明の発祥時にまでその歴史を遡り、人類の科学的世界観の形成史のなかでも最も歴史のある、かつ自然発生的な学問と位置づけられよう。宇宙観とその中での人類の位置づけについては、現代社会においてもその根源的な意義はますます強まり、一般社会からの関心が極めて高いことは、マスコミなどでの天文学の話題の取り上げられ方からも明らかだが、その陰には若い世代の科学への関心を呼び起こす広報普及活動やアマチュアの参加にも配慮した学界側からのさまざまな努力・工夫がある。特に、近年の科学技術の急速な発展に伴い、学術的な宇宙観は大きな変貌をとげつつあり、全地球的規模での文明の将来を考えねばならない時代に突入した人類にとっては、天文学・宇宙物理学は、社会的なメッセージ発信についても大きな影響と責任を負う時代に入ってきていると考えられる。

1) **学際性**：初期宇宙では、高エネルギー物理学の実験では到達できないエネルギー規模の現象が起こっていたと考えられ、観測天文学と素粒子物理学に接点があることが指摘されてきたが、近年宇宙観測が多面的かつ高精度で行われるようになり、ダークエネルギーの存在など物理学の根源に関わる新しい概念が、天文学の観測から生まれつつあり、宇宙の進化史や宇宙モデルの精密化の研究が急速に進展している。また、太陽系探査などを通じて惑星物理学が発展し、太陽系外惑星の探査研究にも成果が出始めており、大きな学問

分野として成長しつつある。星間ガス・塵の研究では化学・生物学との接点が着目される。

**2) 国際性：**天文学・宇宙物理学はそもそもその研究対象からして国際性の高い研究分野であるが、近年プロジェクトの大型化に伴い、国際協力の必要性が一層大きくなっている。全人類の知的資産を生み出す学問として、国際協力・国際分担を如何に組織化できるか、研究者グループ間、研究機関間、政府間、国際組織間など、さまざまなレベルでの検討が活発化している。

**3) プロジェクトの大型化：**大型望遠鏡やスペース望遠鏡など最先端の観測装置は、ますます大型化高額化しており、様々な計画を国際協調のもとに実現していくための、新たな施策の必要性が顕在化している。

電磁波の異なる波長域では、見える天体や現象が異なるため、それぞれの領域で地上望遠鏡やスペース望遠鏡計画が提案されているが、これらの構想を実現に向けて具体化する総合的な判断を下し領域間の合意を形成する体制が不十分である。国内では、JAXA 宇宙科学研究本部における月惑星探査、赤外線天文衛星、X線天文衛星などのプロジェクトの実現、国立天文台によるALMA望遠鏡や次世代光赤外望遠鏡計画の実現に向けた国際協力事業の予算化と実行体制の整備が望まれる。これらに次ぐ規模だが大型科学研究費補助金の規模を越えるプロジェクトを土俵に上げる枠組みについても整備が必要であろう。

#### 4. 地球惑星科学

**1) 総論：**地球惑星科学は、今日において地球中心部から太陽系全体の宇宙空間まで、広範な領域を対象とする研究分野に発展した。地球惑星の形成・進化および現在の状態・構造とそこで発生している諸現象を包括的に解明し自然観を創り鍛えるとともに、地球の将

来を予測できる学問として人類の持続的発展への貢献を行うことが期待されている。

**2) 対象・手法の多様性：**地質学として出発した地球科学は、その後、気圏・水圏、地球内部、電離圏・磁気圏や生物圏、さらには、隕石などの地球外物質や月・惑星などをも研究対象に加え、地球惑星科学へと発展した。地球惑星科学では、対象が多様でありかつ複雑であることから、さまざまな手法・個別的对象が存在し、多岐に渡る分野に細分化されていた。これらの対象それぞれに、力学面・エネルギー収支面、物質科学面などのさまざまな切り口と研究手法がある。

**3) 総合化の努力：**専門分野間を横断する総合化に向けた努力がなされてきた。1960年代に確立されたプレートテクトニクス理論は、地殻現象を包括的に説明するだけでなく、現在も固体地球を扱う研究のパラダイムの一つとなっている。1960年代以降の月・惑星・宇宙空間の探査の展開は、惑星としての地球の特殊性と普遍性や宇宙における太陽圏の理解を推し進めた。1990年代に発展した全地球史の解明を目指した研究により、生物圏を含む多圏システムとしての地球の進化・挙動の解明が進み、マントル全体の動きによってプレート運動を含めた地球の歴史を理解しようとするプレートテクトニクス説が提唱された。その一方で、地球温暖化問題や異常気象、地震火山災害への対応など社会工学面への展開も求められている。

研究の総合化や新展開に対しては専門分化した個別学会組織では対応できず、様々な地球惑星規模の複雑系現象を、総合的・一体的に取り扱う視点、研究手法や組織の構築が必要となっていた。わが国では2005年に地球惑星科学関連のほとんどの学会が加盟する「日本地球惑星科学連合」が設立され、地球惑星科学をほぼすべてカバーする大規模な会議が毎年開催されている。

## 5. プラズマ科学

プラズマ科学は、プラズマ物理学を基礎とした学問であり、磁場閉じ込め方式による核融合やレーザーを用いた慣性核融合、半導体などのプロセスプラズマ、そして自然界における宇宙・惑星プラズマなど、広範囲の学問分野にわたる学際的色彩の強い研究領域となっている。

まず核融合エネルギー研究は、これまでビッグサイエンスとして着実に発展してきたといえよう。磁場閉じ込め方式では、5億度まで達する高温プラズマの発生に成功し、現在、日本・欧州連合・ロシア・米国・中国・韓国・インドの国際協力で熱核融合実験炉ITERの建設がフランスで進んでおり、実用規模の核融合エネルギーが生じる条件下でのプラズマ物理の解明を目指している。またレーザーを用いた慣性核融合では、固体密度の千倍で温度が1億度を超えることが必要であるが、既に固体密度の600倍圧縮に成功している。また極短パルス大出力レーザーの開発により、燃料小球の中心部分を点火させる高速点火の可能性も実証され、慣性核融合炉で要求される高効率・高繰り返しの研究が着実に深化してきている。またこのような超強度レーザーは、超高密度・超高温・超高压など極限の物質状態を作ることが出来るので、核融合研究だけでなく宇宙物理などの研究も視野に置いた学術融合型の高エネルギー密度科学の開拓も行われている。

一方、低温プラズマの分野では、プラズマプロセスなどの応用面で、この20数年で急速な進展をとげており、プラズマプロセス技術は、薄膜生成・エッチング・マイクロエレクトロニクス・マイクロマシン分野における最も重要で不可欠な基盤技術となってきた。最近では大気圧やそれ以上の高い圧力での非平衡プラズマ技術や放電制御技術が進化し、

ナノテクノロジー・バイオテクノロジー・バイオメディカルテクノロジーの分野での研究展開も行われている。

宇宙・惑星プラズマの研究は、20世紀後半の人工衛星を用いた宇宙からの観測技術の進歩により飛躍的な進歩があった。地球の上層大気から宇宙空間へとつながる電離圏・磁気圏のプラズマの性質や構造が次々に明らかになった。また太陽大気については、数百万度に達する激しく時間変動する高温コロナの解明が進み、その太陽活動と地球のオーロラ磁気嵐との関連を理解する研究も進められている。更にX線や電波天文衛星などによりコンパクト天体や銀河・銀河団などにおける高エネルギー天体現象の発見やその解明も急速に進められてきた。

このようにプラズマ科学は、宇宙・核融合・プロセスプラズマの各分野で、その理解を深め学問的に深化してきてはいるが、依然未解決の課題が多く、今後一層の持続的発展が必要とされる学術分野である。これまでは核融合研究が、エネルギー政策の重要な役割を担う基礎科学としての当該分野を先導してきたが、プラズマ科学は、プロセスプラズマなどの低温プラズマの応用研究や宇宙プラズマなどの自然科学の基礎学問としても今後発展が見込まれる分野として成長してきている。今後は、実験室プラズマから宇宙プラズマまで全体を総合する学問的体系化の試みも必要であり、そのような視点での学術交流や学際領域研究の発展が将来の重要な課題である。

## 2 過去10年間の研究動向等

### 1. 数学における過去10年間の動向と今後の展開

以下において、数学を専門とするセンター

研究員が関係諸分野の合計 30 名程度の専門家の意見を聞いてまとめた最近の研究動向について述べる。数学においては、論文数や研究者数の多い分野が重要というわけではないので、研究の中心がどこかを判断するには、個人の判断を総合すること以外の方法はない。数学の研究は多様であり、ここで触れることができなかつた研究が重要でないわけではない。

幾何学における最近の最大のブレークスルーは Perelman による 100 年間未解決であった 3 次元多様体のポアンカレ予想の解決であり、幾何解析と計量リーマン幾何学（項目 3）という微分幾何学の大きな二つの潮流の交叉する点でなされた。この 2 分野は今後も発展を続けると思われる。理論物理学と深く関わる形で、代数幾何学、代数的組み合わせ論、表現論、微分幾何学、位相幾何学らを巻き込んだ大きな流れが、10 年以上発展を続けており今後も発展を続けると思われる（項目の 1, 5）。高木の類体論の非可換化に向けた流れと、ゼータ関数などの数論的関数の研究は、数論研究の動向の中心であり、数論幾何・ $p$  進的手法なども進歩した（項目の 4）。高次元代数多様体・複素多様体の一般論と各論も着実な進展を続けている（項目の 3）。

解析学、数学一般では、各分野がそれ自身の問題を追求して着実に進展していると同時に、今後の新しい研究を模索して、理論的興味あるいは実用的観点から隣接分野に研究を展開している。このような状況の中で特質される動きは、非線形性理解の一つの指標としての力学系理論の広がり、数学の諸分野と数理物理学を巻き込んで進展するパンルヴェ方程式の研究（項目の 11）、偏微分方程式における実解析的手法の非線形発展方程式への応用と線形偏微分方程式論の制御理論・逆問題への応用（項目の 12）、実解析・確率論にお

ける抽象的な距離空間上の確率解析とポテンシャル論（項目の 8, 13）、確率論における統計力学の確率解析、確率論と統計学のファイナンスへの応用（項目の 13）、実解析の一分野として発展したウェーブレットの画像解析への応用（項目の 8）、数値解析における新しい解析手法として注目されている精度保証付き数値計算と計算ホモロジー（項目の 15）、そして離散数学における離散凸解析の発展である（項目の 16）。

**1) 数理物理と代数学・幾何学：**サイバーク・ウィッテン方程式の 4 次元位相幾何学への応用の中心は、組み合わせ的な再構成、有理ホモトピー的理論、物理の双対性の数学的実現に関わる研究の三つである。代数幾何学の数え上げの問題が多くの分野を巻き込んで進展している。シンプレクティック幾何学では、ハミルトン力学系などへの応用とともに、ホモロジー代数学にもとづく基本的な研究手段が完成しつつある。位相幾何学では、量子不変量や写像類群の森田-Mumford 類の理解が進んだ。特殊ホロノミー多様体（ツイスター構成、超対称性、キャリブレーションなど）の研究が深まった。

今後はより多様な数学や、素粒子物理学、統計物理学や物性物理学などが関わり、大きな発展が予想される。空間概念の一般化の進展が期待されており、非可換幾何学などという言葉が使われている。

**2) 実微分幾何学：**無限離散群の幾何学的研究が進展している。クライン群の研究は最近 20 年程度の発展が完成段階にある。計量リーマン幾何学の研究は特異空間の解析・幾何学を含む形に発展した。離散ラプラシアンの研究も進展している。距離空間上の解析学、無限離散群の研究など、より幅広い範疇の空間の研究が、今後とも重要性を増すと思われる。離散数学とのつながりが現れてお

り、今後も深まる。

**3) 代数・複素幾何**：森重文らの3次元の極小モデルプログラムの4, 5次元への一般化が日本を中心になされ、高次元代数幾何の一般論は今後もこの方向で発展する。導来圏の研究、フーリエ-向井変換、キャラビヤウ多様体など代数多様体の各論が進展中である。超越的な複素幾何学では、キャラビ予想の一般化が進展中で、一般型代数多様体の多重標準系の研究に大きな発展があった。正標数の代数幾何については、整数論との関係、特異点解消などが進展する。

**4) 整数論**：谷山・志村予想の解決、楕円曲線のゼータ関数に関する佐藤幹夫・Tate予想の解決、Langlands予想の局所体、関数体の場合の解決などがあった。保型関数の研究では日本の数学者が世界の研究をリードしている。モジュラー形式の岩澤理論やゼータ関数の特殊値に関する玉河数予想の解決などが注目されている。数論幾何の研究は、日本の貢献が大きく今後とも発展する。代数多様体のホモトピー理論やミルナー予想などの進展があり、今後モチーフ理論やホッジ予想などが進展すると思われる。p進的手法、数論的基本群などが発達し今後の発展も見込まれる。

**5) 表現論**：量子群研究からの発展では次の重要な進展があった：結晶基底の存在、モジュラー表現論への応用、箆多様体を用いた量子アフィン群の有限次元表現の幾何学的指標公式。一方、表現の制限についての離散分規則の研究が進展した。

リー群やその表現の研究、可積分系の研究、代数的組み合わせ論などは、一体化した研究領域として、今後も研究が進展することが予想される。

**6) 群論**：有限単純群分類の完成のあとの模索期にある。モンスターと共形場の結びつきの研究などがある。

**7) 数学基礎論**：モデルの理論や理論計算幾何学との融合領域で大きな発展があり、今後ともそれを中心として発展する。我が国の研究は証明論が中心となっている。

**8) 関数論と実解析**：関数論では複素力学系の研究(項目11)が活発に研究され、今後も進展する。実解析では、ウェーブレットや信号・画像解析の研究が注目されている。

**9) 関数解析**：作用素環論が活発に研究され、 $C^*$ -環では単純、従順 $C^*$ -環上の自己同型あるいは群作用の分類に関する研究が進展し、フォンノイマン環では部分因子環理論と量子場理論との関係の研究が盛んに行われ、日本の研究者が活躍している。今後は、実数群等の分類可能 $C^*$ -環への作用の分類と作用素空間論からの作用素環の研究が重要である。

**10) 代数解析**：柏原正樹らによりInd-Sheavesの理論が建設され、今後の大きな発展が期待される。

**11) 常微分方程式**：可積分系とパルヴェ方程式系の理論、複素力学系理論を中心に研究が盛んであった。可積分系とパルヴェ方程式系の理論は、数学の諸分野と数理論理学をまき込んで多方面へ発展しており、日本は研究が世界をリードしている。力学系理論では、1次元系の分岐理論の確立、位相的性質の理解、高次元系の現象の発見・応用の研究が進展した。今後は、2次元以上の非一様双曲系の研究と計算機による研究が進展する。

**12) 偏微分方程式**：Navier-Stokes方程式に関して、その初期値問題の弱解の部分正則性、小初期値に対する時間大域的可解性そして初期値境界値問題の研究が進展した。今後は、Euler方程式との比較と渦度の挙動等が問題になる。等高面法による曲面の発展方程式の研究が日本を中心に進展し、粘性解理論の重要性が認識された。今後は、等高面法とその数値計算の応用、粘性解理論の数値ファ

イナンスへの応用が注目される。非線型分散及び波動方程式に関しては、この分野から近年フィールズ賞受賞者二人を輩出しており、実解析的手法による研究が、世界中で活発に行われている。この分野における日本の研究者の活躍・影響は非常に大きい。反応拡散方程式に関しては、縮約理論、SLEP 理論、スパイラル解のスペクトル解析の研究等が進展し、今後パターン相互間の強い作用の解明が重要になる。線形偏微分方程式に関する重要な研究としては、幾何学的手法によるスペクトル・散乱理論等の研究、準古典解析、一意接続性定理、相空間解析、自己共役作用素の連続スペクトルの研究、そして制御理論と逆問題の研究があり、今後制御理論、逆問題、非線形方程式等との交流を通じて研究が発展する。

**13) 確率論**：Dirichlet 形式による無限次元解析とそのフラクタル等への応用、数理物理学に関連した確率論、確率最適制御理論とその数理ファイナンスへの応用が進展した。今後は、ラフパス解析と呼ばれる新しい確率解析、ランダム媒質に対する確率論的研究、ファイナンス数値解析の研究等の発展が期待できる。

**14) 数理統計学**：統計的推測の高次漸近有効性の研究が盛んに行われ、甘利俊一達は、それに基づいて情報幾何の分野を築いた。今後は、大量データ処理、逐次選択実験における最適な推測方式の構築等の研究が重要である。

**15) 数値解析**：計算機支援証明や計算ホモロジーと呼ばれる新しい数値解析が注目されており、計算機による楕円型偏微分方程式の解の精度保証解析では日本の研究者が活躍している。今後は、これらの現実の問題への応用が重要である。

**16) 離散数学**：代数的組み合わせ論では、距離正則グラフ、Robertson-Seymour のグラ

フ理論、P-Q 多項式のアソシエーションスキームの分類問題、コード・デザインの Delsarte 理論が大きなテーマであった。今後は、特にコード・デザインの研究が進展する。離散凸解析では、劣モジュラー関数最小化の組み合わせ的アルゴリズム設計問題の解決等日本の研究が世界をリードしており、今後も活発な研究が期待できる。

## 2. 物理学の過去 10 年間の研究動向

### 2-1. 素粒子・原子核分野

素粒子の理論的研究は、純理論的な立場から窮極の物理法則を見出そうとするトップダウン的方向と、実験と連携して素粒子の物理を明らかにしようとするボトムアップ的な方向に大きく分けられる。

前者では、重力も含めたあらゆる基本相互作用を記述する窮極的理論の有力候補として、スーパーストリング理論が精力的に研究されている。過去 10 年間にはいくつかの重要な理論的發展 (D ブレーン、 $N=2$  超対称理論の厳密解、AdS-CFT 対応など) があったが、素粒子の標準理論と直接結びつくには至っていない。後者の立場からは、標準理論の不満足な点を解決し、それを発展させた理論として、超対称理論や、余剰次元理論などが詳細に研究されており、種々の新しいアイデアが議論されている。また、宇宙背景放射の観測や、原初元素比の測定などが精密化したことにより、初期宇宙論と素粒子理論のかかわりが特に重要になっている。超対称理論は、宇宙暗黒物質の候補となる粒子 (LSP) を含み、その点でも興味深い。

標準理論の実験的検証の成功は、標準理論における高エネルギーの過程が摂動展開を用いて計算可能であることによっているが、一方で低エネルギーの物理量を計算するには、非摂動的方法によらざるを得ない。小林・益川理論の検証や、新しい物理の探索にはこの

非摂動的計算が必要であり、これは高速計算機を用いた格子ゲージ理論によって行うことができる。日本の研究グループは、高性能のスーパーコンピュータを用いて、90年代に世界でも群を抜く成果を挙げた。

原子核の研究においては、通常の原子核とは異なる性質をもつ核が興味を持たれている。中性子過剰核、ハイペロンを構成要素として含むハイパー核、球形から大きくずれた変形核などが代表的な対象である。また、核物質の新しい相として、クォーク・グルーオン・プラズマやカラー超伝導相が、重イオン衝突実験の進展とともに注目されている。これらは宇宙初期や中性子星の内部の物理と関連が深い。

素粒子実験のための加速器は、エネルギーフロンティアでは、陽子・反陽子コライダーであるテバトロン（米国フェルミ研究所、重心系エネルギー 1.8 TeV）、電子・陽電子コライダーの LEP（欧州 CERN 研究所、重心系エネルギー 200 GeV、2000 年 停止）、電子・陽子コライダー HERA（ドイツ DESY 研究所、重心系エネルギー 250 GeV）がある。また、大強度フロンティアとしては、高エネルギー加速器研究機構の KEK-B、米国スタンフォード線形加速器センターの PEP-II という二つの B ファクトリーなどがある。

テバトロンにおいては、トップクォークの発見が最もよく知られた成果である。LEP は、弱い中性ボソン  $Z^0$  の精密測定により、素粒子の世代の数が 3 であることを示し、さらに標準理論を検証するとともに、標準理論を超える物理に対する重要な制限を得た。また、W ボソンの対生成反応から、W がゲージボソンであることを示した。HERA においては、今後の素粒子実験の基礎となる陽子の構造関数を広いエネルギー領域で測定した。これらの加速器実験では、新粒子・新現象の探索も精力的になされた。

B ファクトリーの実験においては、ボトムクォークを含む B メソンを大量に生成し、その崩壊過程において、CP 対称性が大きく破れていることが明らかにされた。これにより、CP 対称性の破れの起源として、小林・益川理論が正しいことが証明された。テバトロンにおいてもボトムの研究が推進され、ボトムとストレンジクォークからなる  $B_s$  メソンの粒子・反粒子間の振動を最近初めて観測した。

また、中性 K メソンの崩壊過程の研究がフェルミ研究所および CERN において行われ、小林・益川理論で予測される新しい種類の CP 対称性の破れを見出した。

次世代の加速器としては、直線型電子・陽電子衝突型加速器（ILC: International Linear Collider）の基本設計が国際的に統一され、開発研究が進んでいる。

ニュートリノ物理では、スーパーカミオカンデ実験によって、宇宙線により上空大気中で生成されたニュートリノ（大気ニュートリノ）の観測から、ニュートリノが質量を持つことがはじめて実証された。引き続き、高エネルギー加速器研究機構で生成したニュートリノビームをスーパーカミオカンデ測定器に入射する実験（K2K）により、これを確認した。また、これとは異なる種類のニュートリノがやはり質量を持っていることが、太陽からのニュートリノの観測によって示され、神岡のカムランド実験によってその質量の測定が行われた。これらは、ニュートリノ振動と呼ばれる現象を見出したものであり、質量と同時に、ニュートリノの世代間の混合の存在を確立し、その混合角がそれぞれ測定された。

宇宙線では、気球を用いた BESS 実験により、従来よりはるかに信頼度の高い宇宙線スペクトルの決定がなされ、大気ニュートリノの解析にも利用された。これは、素粒子実験

の高度な技術を隣接分野に応用したのと言えらる。また、明野における最高エネルギー宇宙線のスペクトルの測定では、理論的予測とくいちがう興味深い結果が得られている。

原子核実験分野では、米国BNL研究所のRHIC加速器において、高エネルギーの重イオンを衝突させ、クォーク・グルーオン・プラズマが生成されたと思われる現象を確認した。また、高エネルギー加速器研究機構では、散乱やガンマ線分光などを用いてストレンジネスを含む原子核（ハイパー核）の研究を推進した。理化学研究所では、不安定核ビームを用いた原子核研究が行われるとともに、新しい超重元素の発見もなされた。

上に述べたいずれの実験においても、日本の実験グループは活躍しており、あらゆる方面で大きな貢献をしている。実験施設の面では、日本はBelle実験、ニュートリノ振動実験のように、大強度フロンティアに主力を注いでおり、Bメソンやニュートリノの研究は日本が世界をリードしている。その反面、エネルギーフロンティアの実験施設は米国やヨーロッパが拠点を持っており、日本は実験装置の一部を建設して参加する形になっている。しかし、日本は次世代のエネルギーフロンティアであるILCについては加速空洞の開発など、重要な技術の開発を精力的に行っている。

## 2-2. 物性物理学関連分野

この領域は、過去の歴史的経緯を引きずりつつも、現状では①物性Ⅰ、②物性Ⅱ、③原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ、④生物物理・化学物理、⑤数理物理・物性基礎の五つの細目に区分されている。③、④、および⑤の細目が、研究内容を中心とした比較的単純な区分であるのに対して、物性Ⅰ、物性Ⅱは、物質名や物性の切り口、研究

内容などで区分された多くの相対的に主題を異にする領域を含んでいる。従って、研究者数も多く、この5細目を合わせた科研費申請件数は、現在では1年当たり1,300件を上回り、年々増加傾向にある。申請件数の細目ごとの割合は、ほぼ、それぞれの研究者人口に比例している。現在では、平均約20%の課題が、厳密な審査を経て採択されている。

細目の区分に基づき、過去10年の科研費の申請および採択課題に基づく詳細な分析を行った(添付資料参照)。データに基づくkey word検索から、今までの10年間で、どのような研究が多くの研究者の注目を集めてきたかがほぼ推察される。但し、多様性を前提とするこの研究分野で、申請・採択件数の量的分布は、その研究の重要性を必ずしも反映しない。key wordおよび細目区分は、種々の歴史的制約を受けた、物質名や物性の切り口、研究手法などを並列的に含んでおり、各細目ごとの議論は、「原子・分子・凝縮系物理学」の全体的動向を概観するうえで有用ではない。従って、ここではその区分を無視し、過去10年間における採択された科研費の研究テーマから読み取れる研究状況を踏まえ、今後の展開の動向(今後多くの研究者が着目すると想定される研究主題)を列記する。

### 1) 超伝導発見機構を中心とする量子多体系の強相関物理の研究

量子多体系の電子系が有する特徴の一つである強相関物理の研究は、1986年に発見された酸化物高温超伝導機構解明に向けての継続的な研究と共に、2001年の古くて新しい超伝導体MgB<sub>2</sub>や三重項超伝導体の発見に更に刺激され、多くの研究が展開されている。更に、無機物質のみならず化学分野とも融合し、分子性固体・有機導体を対象にした磁性・超伝導の研究も盛んである。

## 2) 低次元・ナノ構造における量子物性・磁性・誘電性研究

ナノテクノロジーの展開により、物質の原子レベルでの制御と微細加工の高精度化によって、量子効果が顕著に発現する諸現象の研究が進展している。量子ホール効果を始め、量子ドット、量子コヒーレンスを伴うトンネル現象の研究、更には、巨大磁気抵抗効果の発見などを契機としたスピントロニクスと総称される研究やナノ誘電体に関する研究が、新たなパラダイム形成にむけて大きく進展している。ナノ構造が提示する新規な諸現象の開拓とともに、その統一的理解を核とした総合体系としてのナノ物理学の確立に向けた研究も誕生している。この課題は、量子ドットやジョセフソン結合を用いた量子ビットへの応用をはじめとする工学的応用とも密接に関連しており、研究の展開が目覚ましい。

## 3) 相転移と臨界現象に関する研究

相転移現象は、量子多体系の物理学における典型的物理現象の一つであり、物質の存在様式とその相互関係に関する重要な研究課題である。大きな注目を集めているボーズインシュタイン凝縮をはじめ、典型的固体における構造的・誘電的・磁氣的・電子的相転移現象が系統的に研究されてきている。最近では、より複雑な物質系における転移現象や非平衡・臨界現象、更には、光誘起による相転移の動力学的研究も新たな対象として活発に研究されており、非平衡統計物理学的立場からの理論的研究も展開されている。

## 4) 超短光パルスを駆使した超高速現象の研究・量子光学の研究

この間の急速なレーザー技術の展開によって、コヒーレント原子制御によるボーズ凝縮研究を始め、フェムト秒・アト秒時間領域の超高速現象の研究が大きく進展している。対象も、原子・分子から固体・表面・ナノ構造にまで広がり、大きな研究分野を形成してい

る。さらに、テラヘルツ領域の光源開発と分光学の展開は、従来の分光概念を一新するまでのレベルに至っており、今後の応用面への更なる展開が期待される。これと関連して、量子コンピューティング・量子暗号・量子テレポーテーションなどの量子情報・通信に関連する基礎研究の新たな展開も目覚ましい。

## 5) 走査型プローブ顕微鏡を基礎とする表面物理研究と表面ナノ科学の研究

走査型プローブ顕微鏡技術の大きな発展に伴い、固体表面を研究対象とした研究が新たな展開を見せている。原子レベルでの構造的 characterization を基礎としつつ、今まで我が国の研究者が大きく貢献してきた構造論的研究分野のみならず、ナノテクノロジーという新たなパラダイムの誕生と相まって、表面上での原子・分子操作、原子スケールでの局所分光、ナノ構造創製への展開や半導体、磁性体、誘電体、有機材料分野内での独自の展開等など、今までには無い新しい研究領域が開拓され、展開されつつある。典型的低次元系の物性研究としての基礎的学理の研究の意義と共に、単に物理学の範囲にとどまらず、化学、生物学などが融合し、新領域としての表面ナノ科学が誕生しつつあることも一つの特徴である。

## 6) 軌道放射光施設を利用した固体分光学研究

スプリング8やフォトンファクトリーなどを中心とした軌道放射光施設の高精度化に伴い、幅広い領域の電磁波を用いた物質科学としての固体分光学研究が大きく展開している。超高分解能電子分光や高輝度X線回折による複雑系物質の構造決定など、光源開発の展開に牽引されつつ、従来では得られなかった高精度の物性的知見が得られつつある。

## 7) 数理物理学の研究

多様性を一つの特徴とする「原子・分子・

凝縮系物理学」研究において、その多様性の内に潜む統一的法則性の確立を目指す数理物理学・物性基礎論の研究は、最重要課題の一つである。個々の実験事実の詳細な説明という立場から離れ、その一般化を目指した研究と、他分野との境界領域も含めてより広範な適用範囲を持つ理論の展開が、活発に行われている。新たな概念形成を含む凝縮系物理の諸様相に関する統一理論の展開や、統計力学、量子力学、情報科学の3分野がかかわる量子情報統計力学の展開などが、今後の展開方向となると想定される。

### 3. 天文学・宇宙物理学

観測天文学・宇宙物理学は、観測波長域の拡大や電磁波以外の観測手段の開発、観測感度・精度の大幅な向上により、この10年間でさまざまな成果を挙げており、理論に新しい課題を突きつけて来た。

具体的には、1) マイクロ波背景放射観測衛星 (COBE, WMAP) の解析による膨張宇宙モデルの精密化と暗黒物質、暗黒エネルギー量の定量化、2) 高赤方偏移天体の研究による宇宙再電離期の探査、3) 連星パルサー観測による一般相対論の検証、4) ガンマ線バースト天体を遠方宇宙での大質量星の終末爆発と同定、5) 補償光学による銀河系中心の巨大ブラックホールの運動学的確認、および水メーザー源の運動や X 線輝線の観測による銀河中心ブラックホールの発見、6) 惑星を持つ多数の近傍星の運動学的、測光学的発見、7) 超新星残骸における高エネルギー粒子加速の発見、8) 星形成・惑星形成の観測的研究と大規模数値シミュレーション、9) 太陽と惑星間プラズマの研究などの分野で明確な進展があった。

これらの成果を可能としたのは、スローンデジタルスカイサーベイによる銀河探査、ハッブル宇宙望遠鏡に加えてすばる望遠鏡や

ケック望遠鏡など地上 8 m–10 m 級望遠鏡が、相補的に連携して観測が組織的に遂行されたこと、COBE とその後継機 WMAP に代表されるマイクロ波背景放射観測が進んだこと、あすか、すざく、XMM-Newton, Chandra などの X 線観測衛星、IRAS とその後継機 Spitzer など赤外線衛星など観測の多様化によるところが大きい。

・我が国の強い点、弱い点

国立天文台では、「すばる」望遠鏡の主焦点カメラによる遠方宇宙の探査はその感度と視野において諸外国の追隨を許さないレベルで進めており、また野辺山 45 m ミリ波望遠鏡から国際協力で建設中の「ALMA」に至る電波天文学においても国際レベルでの研究成果が挙げられてきた。銀河系測地干渉計 VERA、電波ヘリオグラフ、「多摩 300」重力波検出装置などのユニークな観測装置の研究でも国際的な業績を挙げてきた。JAXA 宇宙科学研究本部では、「あすか」、「すざく」など一連の X 線天文観測衛星による X 線天文学、「ようこう」から「ひので」に至る太陽物理学と宇宙天気の研究、「あかり」による赤外線天文学などにおいて得られた成果が、世界的な観測的研究を先導した。これに加えて、「はるか」による高解像スペース電波干渉観測や、地球・惑星探査衛星の開発、「のぞみ」「はやぶさ」による衛星操作技術の進歩や月探査衛星計画によって、太陽系天体の探査やスペースからの観測計画に我が国がより本格的に、参加する素地ができつつある。名古屋大学の「なんてん」、IRSF 望遠鏡、東京大学の「マグナム」望遠鏡など大学が独自に海外に望遠鏡を設置したり、観測装置を開発してユニークな観測を進めてきたことも特筆に値する。重力多体問題専用計算機「Grape」の開発や観測データベースの構築公開などの分野でも世界をリードするユニークな研究成果が挙げられてきた。これらの開

発研究では、研究者の独創的なアイデアを自主開発や民間企業の高い技術力の結集により実用化し、国際的にも抜きん出た成果につなげたものが多く、この点は我が国の強みとも言えよう。

我が国の天文学・宇宙物理学研究がほぼ全分野をカバーして多面的に展開されている現状は、強い点でもあるが、同時に最先端の観測装置規模が大きくなってきている現状では、弱みとなるおそれがある。大型科学への取り組みにおいて、研究者の独創性を活かしつつ、大同団結して国際的な存在感の強いグループとしてとりまとめ、研究計画を強力に進めていく研究集団を構築していく観点が当事者として重要である。また大型計画の相互・外部評価を経て、長期的見通しを立て適切な予算措置により現実的な実施計画にとりまとめてゆく決定を、学術サイドからの視点をより強化しつつ行う枠組みの整備が重要となっている。

#### 4. 地球惑星科学

##### 1) 固体地球の解明研究に関する動向

観測網の高密度化、構造推定の高解像度化とリアルタイム化、実験可能な地球内部物理条件の拡大、数値実験の精密化により、固体地球の微細構造や現象の解明が進んだ。「ゆっくり地震」による地殻の運動、断層系の破壊伝播、火山体イメージング、全マン托ルの対流様式、外核対流による地球磁場発生過程などについて重要な発見や成果が得られてきた。

放射光など新たな光源の実用化と超高压実験技術の発展のリンクは、地球内部物性の実験条件を下部マン托ル条件にまで拡大した。天然物質の極微量精密同位体分析技術の発展により、岩石・鉱物の微細スケールでの年代測定とそれによる地球史の精密化が進んだ。また極限変成作用の研究が進み、地球

深部の物質循環ならびに島弧-海溝系の進化の解明に強い束縛条件を与えるようになった。

##### 2) 大気・海洋・表層システムの解明研究に関する動向

地球温暖化問題と水循環問題の研究を通じて水文、雪氷、気象、海洋、生態などの分野間交流が活発化した。情報技術と衛星観測技術の発達は、シミュレーション研究、特に、大気と海洋の高解像モデルの研究と、地球表層の諸現象の観測研究を大きく進展させた。また、探査機がもたらした潤沢なデータにより惑星気象学が進展した。

氷床や湖沼・海洋堆積物などのコア試料の分析・解析技術向上により古環境の復元が進み、過去の長期的気候変動の理解が進んだ。また、超高速計算機の導入は近未来の地球環境変動予測の道を開いた。

##### 3) 惑星・宇宙空間の解明研究に関する動向

地上および人工衛星観測による磁気圏探査や惑星間探査により、宇宙空間を支配するプラズマのエネルギー・物質輸送の解明が進んだ。またこのような理解を踏まえて太陽地球系の電磁気環境の変動を予想する宇宙天気の研究も進められている。

「はやぶさ」によって小惑星イトカワの探査に成功し、日本の独自性を活かした太陽系科学の理解が深化してきている。

##### 4) 横断的・境界領域的研究に関する動向

地球の起源、全歴史、複合システムとしての仕組みと挙動を理解する試みが展開され、プルームテクトニクス理論と地球と生命の共進化の概念が提唱された。また、地熱地帯や深海、大深度地下などの極限環境域での生物圏の発見と、古生物学への分子生物学的手法の導入は、生命進化と地球環境の変遷の理解に重要な情報をもたらした。

一連の惑星探査は、太陽系天体に関する地

質学・測地学・気象学・電磁気学・物質科学等のデータを飛躍的に豊富にし、比較惑星学を大きく発展させた。さらに、惑星形成過程にある星間雲と星周円盤の観測が進展した。隕石中のプレソーラー粒子の発見により、元素合成理論および恒星進化理論の精密化が進んだ。隕石の精密分析および物質進化の室内実験は、分子雲から原始惑星系円盤に至る物質進化過程の実証的研究を発展させた。これら一連の研究により、星間物質から惑星系に至る進化過程の理解が格段に進展しつつある。また太陽系外の惑星が相次いで発見され、惑星形成論が太陽系外の惑星系にまで一般化されつつある。

地球周辺空間での直接観測から得られるプラズマ物性の理解を、太陽や宇宙のダイナミクスの理解に応用する天文学との融合研究が展開されている。

#### 5) 近年のわが国の大型プロジェクトの動向

超高速計算機「地球シミュレータ」と地球深部探査船「ちきゅう」の建造、地球内部観測ネットワーク構築等により地球表層と内部の変動と構造の総合的解明が展開されつつある。科学衛星による宇宙空間・惑星科学探査計画が推進されている。

#### 5. プラズマ科学分野の過去10年間の研究動向

プラズマ科学は学際的色彩が強い学問であり、実際科学研究費においてもプラズマをキーワードに含む分科(細目)は、数物系の物理学(原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ)や地球惑星科学(超高層物理学)、工学系の応用物理学・工学基礎(薄膜・表面界面物性)、総合工学(核融合学)に及ぶ。このようにプラズマ科学は、基礎プラズマ物理としての側面と同時に、核融合やプロセスプラズマなどにおける応用工学的側面も

あり、両者のバランスの取れた持続研究発展が必要不可欠である。

これまでの数物系のプラズマ科学の動向を、科学研究費の採択状況から簡単に概観してみる。まず、「応用」もしくは「基礎」というキーワードで分類された件数を比べてみると、応用と位置づけられた課題と基礎とはそれぞれ同程度あり、理想的な研究が展開されていることがわかる。また同様にキーワードとして「実験・観測・計測」と「理論・シミュレーション・計算機」とで検索してみると、実験関係の採択が理論系より多く、過去10年間では実験関連が理論関連より約8割程度多くなっている。研究者人口比のデータが手元にはないが、概ね実験系の研究者数が理論系より多い状況を考えると、研究費は理論系にも実験系にもほぼ均等に配分されていると言えよう。

次に、学問分野について調べてみると、従来の「核融合科学」だけでなく、「宇宙・惑星プラズマ」や半導体の「プロセスプラズマ」研究でも着実な発展が見られており、3本柱の研究展開が行われている。三つの学問領域を代表するキーワードとして、「核融合・レーザー」「天体・宇宙・太陽・磁気圏・星・地球・惑星」「プロセス・化学・物性・反応性」を用いて、それぞれの過去の動向を見てみると、どれも着実に研究課題数が多くなってきている。プラズマ科学の分科だけでみると、核融合関連の研究採択数が一番多いが、理工学全体で見るとプラズマプロセス関連の採択数多く、プロセスプラズマに関連した分野は研究分野が拡大している。宇宙・惑星プラズマに関連する採択数は他と比べると少ないが、増加率をみると最も大きく、この分野の著しい発展がわかる。総括すると、分野ごとに数値の違いはあるが、核融合・プロセス・宇宙の3分野とも、今後更なる持続的発展が見込まれる学術領域といえよ

う。

最後に研究内容を詳しく見るために、上記の三つの分野を縦糸と見たとき、それに対する横糸のキーワードで調査してみる。横糸のキーワードとしては、「加熱・加速」「放電」「輸送・混合・拡散」「不安定」「非線形・ソリトン・乱流」「相対論・高エネルギー」「自己組織化・複雑」「衝撃波・リコネクション・ダイナモ」「炉・燃焼」などがあげられる。実際、過去10年間の採択数からこれらのキーワードの占める割合は全体の8割近くを占めている。キーワードの重複があるが、研究展開の現状を知る上での基礎データを与える。そしてその半数以上が、プラズマ加熱・加速、放電、輸送・混合・拡散といったプラズマ研究で重要な物理要素の研究で占められている。また不安定や非線形性といったプラズマを特徴付ける物理課題でも多くの研究が展開されている。自己組織化や複雑性は、最近の研究の流れを表すキーワードであるが、採択数の上では必ずしも多くない。また超強度レーザーや宇宙・天体におけるフロンティア領域としての相対論的プラズマの研究が活発化してきている。

### 3 今後10年間で特に進展が見込まれる研究対象、アプローチ等及び推進すべき研究

#### 1. 数学

現在の研究の状況から直接予想される今後の発展については前節で触れた。理論研究が中心となる分野の性格により、今後10年間に大きく発展する分野を特定することは、難しく、ほとんど意味がないと思われる。大きなブレークスルーは、今までの研究の延長としてはとらえられない、前節でふれた分野とは異なる場所でおこる可能性が高いことを強

調しておきたい。特定の分野だけを重点的に推進するのではなく、全体をバランスよく発展させることが、日本の数学の健全な発展をもたらす。

## 2. 物理学

### 2-1. 素粒子・原子核分野

素粒子実験のエネルギーフロンティアでは、CERNにおいて7 TeVの陽子同士を衝突させるLHC実験が2007年から開始される。これにより、ヒッグス粒子の発見が予想され、超対称粒子など標準理論を超える新しい物理の探索も精力的に行われる。日本から参加している研究者が、これらの物理解析に重要な寄与をすることが期待される。

これに続く計画として、重心系エネルギー0.5ないし1 TeVの電子・陽電子リニアコライダーは国際共同で具体的な検討が進行している。この最終設計を確立し、建設地の決定、各国の予算計画の決定などを経て、建設が開始されることが強く望まれる。これに先立ち、日本ではこの加速器建設に必要な、量産を含めた技術開発、および測定器の開発を進め、建設にあたって日本として十分な貢献ができる体制を整える必要がある。

大強度フロンティアでは、東海村で建設中のJ-PARC加速器が稼働を開始し、2009年頃から大強度のニュートリノを生成して、これをスーパーカミオカンデで検出する。これにより、従来の測定の高精密化を行うとともに、まだ観測されていない最後の混合角 $\theta_{13}$ を測定する。Fermi研究所において同等の研究であるNova実験が採択されており、両者の実験は競争関係となる。

ニュートリノについては、これらニュートリノ振動実験からは決定できない質量の絶対値の測定をめざしたダブルベータ崩壊の高感度探索が計画されているとともに、宇宙物理からの情報も期待される。

J-PARCにおいてはさらに、大強度の中性Kメソンを生成して稀な崩壊の分岐比を測定し、CPの破れのパラメータを求める。CERNではこれと相補的な荷電Kメソンの稀な崩壊分岐比を測定する。これらの結果と、Bメソンの結果と比較することにより、超対称性などの新しい物理を探ることができ

る。KEK-B加速器においては、Bメソンの強度を増大し、CPの破れのパラメータの測定精度を10%から1%に向上させ、標準理論の精密な検証を行って、ボトム→ストレンジの遷移などで兆候が見えかけている新しい物理の探索を行う。また、Bメソンの崩壊における荷電ヒッグス粒子の効果の発見、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ などレプトンフレーバーの破れの発見があれば、さらに未知の物理の世界を開くことができる。

スイスのGSI研究所では、日本も参加してミュオン崩壊のレプトンフレーバー非保存探索実験が開始されるが、将来的には、高品位のミュオンを大量に生成する加速器の開発が進めば、これを用いたレプトン数非保存の実験、ミュオンのパラメータの精密測定などから新しい物理を探る分野を開くことができる。大強度高品位ミュオンは、レプトンセクターのCP非保存の発見を視野に入れたニュートリノファクトリーや、リニアコライダーより高エネルギーのミュオンコライダーなど、次世代以後の素粒子物理学の発展のための一つの鍵となる技術である。これに限らず、従来の加速原理に頼る加速器の高エネルギー化には経済的にも限界があり、現在萌芽状態にある新しい加速原理の開発・実用化の努力を続けていくことは必須である。

レプトンフレーバーの破れや、スーパーカミオカンデなどの地下観測において探索できる陽子の崩壊が観測されれば、既知の相互作用では守られている保存則が破れていること

になり、直ちに新しい物理の存在が帰結されるため、感度を上げていく努力が望まれる。

原子核の分野では、理化学研究所において、放射性同位核ビームファクトリー(RIBF)が開始され、重い不安定核による実験ができるようになる。また、J-PARCの大強度陽子加速器を用いて、ストレンジネス核物理を大幅に進展させることが可能になる。これらの施設により、従来手の届かなかった核種に研究対象が拡がり、既知の核とは質的に異なった現象が観測されることが期待される。LHCでは、陽子だけでなく重イオンを加速するプログラムが予定されており、これによってクォーク・グルーオン・プラズマの研究が新たな段階に進む。また、反陽子を大量に生成することにより、新たな科学の発展が期待される。

素粒子・原子核実験の高度な最新技術は、宇宙物理にも応用され、粒子天体物理という分野を形成しつつある。過去20年間にわたり進展してきた宇宙暗黒物質の直接探索は、ようやく観測可能な領域に迫ってきている。暗黒エネルギーの性質を明らかにする目的で、遠方の超新星や重力レンズの観測も計画されている。大規模宇宙線観測により、天体起源の高エネルギーニュートリノ観測や、超高エネルギー宇宙線の観測も進むであろう。重力波の探索も重要なテーマである。

加速器実験に戻り、世界の情勢を俯瞰すると、米国はエネルギー省の主導によりリニアコライダーに集約しようとしており、ヨーロッパは現在、LHC実験の建設と遂行で手一杯である。ニュートリノ、Bメソン、Kメソン、ハイパー核など、大強度フロンティアの実験を行える施設を持つ日本は、世界の中でもユニークな存在となりつつある。

過去の科学の発展を振り返ると、過度の集中は同時に危険性を伴っている。革命的な進展はしばしば事前の予測を超えたところから

起こっており、経済性をあまりに優先することは、科学の健全な発展に対する弊害が大きい。対象を絞りすぎず、機動的かつ広範に研究を行っていくことは大きな成果に結びつくであろう。エネルギーフロンティアの実験と、ILCの建設が最も重要なことは論を待たないが、それと同時に日本は、得意としかつり得る分野として、J-PARCやBファクトリーという日本独自の大強度フロンティアの拠点を世界に開放し、研究をさらに推進することによって、世界におけるリーダーシップを維持していくことが望まれる。さらに、ILCのための加速空洞の技術や、KEK-B加速器でつちかった大輝度電子加速器の技術はKEKが誇りとする分野であり、こうした技術をさらに高めて次世代の加速器に生かしていくべきである。

理論面では、ストリング理論は引き続き発展していくであろうが、いつどのような形で次の大きな進展があるかは予測が難しい。現象論では、LHCやフレーバー実験のもたらすと期待される新しい実験結果によって、方向性が決定されると考えられる。フロンティアの実験結果を正しく解釈するためには、理論家と実験家の協力が今まで以上に重要になるであろう。

スーパーコンピュータを用いた計算物理では、理論的アイデアと計算機の能力は車の両輪である。世界的に計算機の能力は年々向上しており、日本が世界的な成果を出し続けるためには、高性能の計算機への投資が不可欠である。

## 2-2. 物性物理学関連分野

現在までの研究動向から見た各分野での今後の展開方向の概略を記す。但し、多様性を一つの特徴とする物性物理学関連分野は、これ以外の全く予想できなかった分野からの新現象の発見やブレイクスルーが誕生し得る領域

であることを、再度強調しておく。

### 1) 超伝導発現機構を中心とする量子多体系の強相関物理の研究

超伝導発現機構を含めた量子多体系の電子系が有する特徴の一つである強相関物理の研究は、凝縮系物理学における最大の研究課題の一つとして、今後も、精力的な研究が展開されていくと想定される。

### 2) 低次元・ナノ構造における量子物性・磁性・誘電性研究

現在までの研究の質的展開として、我が国で伝統的に行われている磁性・誘電性研究とシリコンLSI技術で培われた超微細加工技術との融合による、ナノ融合物性の飛躍的な展開が期待される。ナノ構造が提示する新規な諸現象の開拓とともに、その統一的理解を核とした総合体系としてのナノ物理学の発展が真のナノテクノロジーの展開を保障する学理となる。その確立と応用への展開は、さらに多くの研究者の興味と参画を引き起こすと期待される。

### 3) 相転移と臨界現象に関する研究

相転移現象は、量子多体系の物理学における典型的物理現象の一つであり、物質の存在様式とその相互関係に関する重要な研究課題である。新たな実験的・理論的手法の開拓によって、自然物質界が提示する豊かな相の発現や、非平衡過程の記述も含めた統一的理論の構築など、今後とも、大きな進展が期待される分野である。

### 4) 超短光パルスを駆使した超高速現象の研究・量子光学の研究

レーザー技術の更なる質的展開による、超高速現象の物理、テラヘルツ領域の光源開発と分光学の展開、量子情報・通信に関連する基礎研究も、今後の展開が大いに期待される課題である。

### 5) 走査型プローブ顕微鏡を基礎とする表面物理研究と表面ナノ科学の研究

走査型プローブ顕微鏡技術の大きな発展を核とした、物理学・化学・生物学などを融合させた、新領域としての表面ナノ科学の展開を目指した研究は、今後とも、大きく飛躍する研究分野である。

### 6) 軌道放射光施設を利用した固体分光学研究

幅広い領域の電磁波を用いた物質科学としての固体分光学研究は、X線レーザー分光の適用も含め、今後大きな展開が期待される。

### 7) 数理物理学の研究

「原子・分子・凝縮系物理学」研究内容の多様性の内に潜む統一的法則性の確立を目指す数理物理学・物性基礎論の研究は、新たな概念形成を含む凝縮系物理の諸様相に関する統一理論の展開や、学際的な量子情報統計力学の展開など、今後ますます展開されていくと想定される。

## 3. 天文学・宇宙物理学

今後10年間で進展が見込まれる研究分野として、

1) **観測的宇宙論**：ダークマターの分布や性質については、銀河の分布の大規模な観測から実体の解明が進むことが期待される。より確実な進展が期待できるのは、ビッグバン後38万年で一旦中性化した宇宙の中でダークマターの揺らぎが成長し、約3億年後に初代の星や銀河が生まれ、その紫外線により宇宙が再び暖められ再電離を完了した約10億年までの時代の観測的解明であろう。現在赤方偏移7までの最遠銀河の観測については、すばる望遠鏡の独断場である。今後は、8m級望遠鏡、ALMA、JWST、さらには次世代地上大型望遠鏡による観測での大きな進展が見込めよう。また、近傍銀河内の恒星の大型望遠鏡による分光観測により元素合成史の解

明についても、大きな進展が期待される。バリオンの大部分を担う銀河団プラズマの実態についても、その軟X線放射の観測でその解明が進むと期待される。これらの研究により膨張宇宙モデルの精密化による宇宙の過去と未来の理解、その中での銀河・大質量ブラックホール進化史の理解が進むものと期待される。COBE、WMAPの観測からその存在が明らかとなってきたダークエネルギーの正体については、アインシュタインが導入した「宇宙項」に相当する宇宙膨張の加速を観測的に検証して、その性質を明らかにすることなどが検討されているが、その進展については予断を許さない。

2) **惑星形成論**：現在、惑星による母星の運動の変化や惑星が母星の前面を通過する現象などの観測から、多数の太陽系外惑星の存在が確認されているが、補償光学技術と光干渉計技術の発展と専用スペース望遠鏡の登場、およびサブミリ波干渉計により、この分野の観測的研究についても大きな進展が見込めよう。これまで発見されたものは大型惑星に留まっているが、地球型惑星の存在の確認についても進展が期待される。

3) **新しいジャンル**：超新星1987Aからのニュートリノ検出の成功を受け、新たな超新星などからのさらなる測定が期待される。また、重力波の測定については過去10年間で必要な検出感度にまで、何桁もの改善が行われており、最初の検出に期待が持てる状況になってきている。宇宙論的観測の精密化に伴い様々な物理定数の変動の有無の確認観測の提案がなされており、何か新しい発見があるかもしれない。最初の星が輝き出すまでの宇宙の暗黒時代を赤方偏移した中性水素線を用いて探る提案もなされている。また、系外惑星の観測が現実化するなか、宇宙での生命発生について検証する宇宙生命学が新しい学際分野として成立する可能性が考えられる。

これらの分野は日米欧でさまざまなレベルで近年とりまとめられた10年規模あるいは20年規模の天文学・宇宙物理学を展望する報告書でも、その重要性和根拠が述べられている。

2008年にはサブミリ波・遠赤外線天文台 Herschel, 宇宙背景放射観測機 Planck の打ち上げが予定されている。次いで、ハッブル宇宙望遠鏡の後継機として2013年以降の打ち上げが期待されている口径6mの JWST, チリのアタカマ高原に建設中であり2012年には稼働予定のミリ波サブミリ波干渉計 ALMA, 日米欧間の国際協力での建設開始が期待される TMT, E-ELT などの口径30m級の次世代超大型光赤外線望遠鏡, 米欧の科学衛星計画に加え日本の相補的なスペース電波干渉計衛星 VSOP-2, 硬 X 線撮像衛星 NeXT, 赤外線天文台衛星 SPICA などの科学衛星などが実現することが期待される。2010年代には宇宙観測の感度・分解能・精度が現在より格段に向上すると期待できる。1) や 2) の分野では確実に大きな進展が期待できる。例えば30m級望遠鏡で次世代補償光学装置が機能できるようになると、現在の8-10m望遠鏡の観測限界である28等級が、約32等級にまで改善されると見積もられている。これはとなりのアンドロメダ銀河にある太陽相当の星を十分に捉えられる感度となる。

クォーサーの構造と放射機構およびその進化の解明, 宇宙における生命の起源とその普遍性の研究などで大きな進展が見込まれる。これらの研究の多くは次世代の望遠鏡による電波から X 線に至る電磁波を用いた観測的研究の進展に伴ってもたらされると期待される。

今後10年間に於いては、これらに加えて、重力波天文学, ニュートリノ天文学, 高エネルギー・宇宙線天文学など電磁波以外の手段

を用いた宇宙研究においても、過去10年の発展に鑑み大きな進展があるものと期待される。

#### 4. 地球惑星科学

1) **生命の起源・惑星地球と生命の共進化**：初期地球環境の復元, 前生物的化学合成論の展開, 初期生命化石の探索, 極限環境微生物・生態系の調査と分子系統樹の作成, 比較惑星学の太陽系外惑星への展開。

2) **地球惑星内部構造論の深化**：能動的地球内部常時モニタリング法・ニュートリノ法など地球内部観測新技術の開発, 中性子パルス法など新技術を用いた物性実験, 高密度観測網データと京速コンピュータによる変動シミュレーションと深部トモグラフィー。

3) **地球表層変動の解明**：炭素循環と陸水を含めた水および関連物質の全球的動態の解明の方法論の開発, 生物圏モニタリングと地球と生態系の相互作用の探求, シミュレーションと結合したリアルタイム・双方向観測システムによる天気予報精度の向上, 地球表層理解のテストベッドとしての惑星表層探査とそのシミュレーション。

4) **月惑星・惑星系・宇宙空間探査**：ペネトレーターを用いた固体惑星内部構造探査, 「Planet-C」による金星大気圏探査, 「はやぶさ-2」による始原的小惑星からのサンプルリターン, 系外惑星探査手法の開発。日欧協力の国際水星共同計画。小型衛星を用いた地球周辺電磁環境観測。新しい外惑星探査の検討。局所精密分析技術の開発とそれを用いた惑星サンプルリターン試料・彗星塵・プレソーラー粒子・隕石の分析的研究ならびに物質進化の室内実験。

5) **地球惑星情報学の確立**：多種多様で膨大なデータのアーカイブとそれらの迅速な検索・処理法の開発。階層連結シミュレータの開発。リアルタイム観測解析システムの開発。

## 5. プラズマ科学の今後の展開

プラズマ科学は、前章でも記述したように、「核融合」「プロセスプラズマ」「宇宙・惑星プラズマ」など、多岐の分野にわたる応用科学的色彩が強い学問領域であるが、各分野の発展には、それらに共通の基礎科学を更に強化発展させることが必要であり、数物系における「プラズマ科学」という枠組みは、今後とも基盤的研究を支えていく上で必要不可欠の領域である。そして三つの分野「核融合」「宇宙・惑星プラズマ」「プロセスプラズマ」を縦糸と見たとき、それを支える横糸のキーワードとしては、「加熱・加速」「放電」「非平衡原子過程、輻射」「輸送・混合・拡散」「不安定」「非線形・ソリトン・乱流」「非中性・ダスト」「相対論・高エネルギー」「自己組織化・複雑系」「渦・カオス」「衝撃波・リコネクション・ダイナモ」「核融合燃焼・炉」「反応性」などがあげられる。このような横糸の研究内容の発展により、学際的研究領域であるプラズマ科学が支えられている。核融合炉に代表されるエネルギー科学という側面だけでなく、その背後にある基礎研究の位置づけを再確認する必要がある。

一般にプラズマ科学の研究には、非線形的に振舞う媒質の複雑多様な物性の理解が必要であり、プラズマ中で起きる波の伝播、乱流やカオスの発生、自己組織化などの非線形現象や非平衡輸送現象が重要となる。特にプラズマ過程の理解には、マクロ物理とミクロ物理が相互に作用する非線形過程を理解することが必要であり、電磁流体力学で記述されるマクロ構造と、ブラソフ方程式などによるプラズマ運動論による輸送係数の関連を自己無撞着に解明することが大切である。現代物理は多かれ少なかれ線形の重ね合わせの上に構築された議論であり、非線形現象を扱うのを苦手としており、このような非線形の問題

は、現代物理の最先端課題としても位置づけられている。また、非線形問題に関連して複雑性の科学という視点も大切である。プラズマ中に微粒子を含むコンプレックス・プラズマ科学は最近急速に研究が進展した分野であり、新たな学問発展の可能性を秘めているといえる。

従来のプラズマ実験は、古典的物理の取り扱いで理解される温度・密度・圧力領域に限られていたが、最近の科学技術の著しい発展に伴い、相対論や量子論効果の効く領域においても実験検証が可能となりつつあり、極限物理へと学問の広がりを見せている。80年代末に登場した超強度レーザーを用いた相対論プラズマでは、測定技術の精密化により、宇宙と実験室プラズマ共通の非線形に支配される現象を研究する学問として発展しようとしている。量子論効果が効いてくる強結合プラズマや高エネルギー密度プラズマにおける研究も将来の重点課題であろう。

## 4 諸課題と推進手法等

科学技術基本法制定以降のポストドク増員、総合科学技術会議等による重点分野への集中投資、科学・技術振興予算決定の流れの変化、国立大学法人化後における運営の自由化と運営交付金の漸減、常勤職の減少と任期職・非常勤職員の増加、教育研究評価の導入に伴う、いわゆる評価疲れ等の諸問題、研究費不正防止に関する反応など、近年日本の基礎科学研究をとりまく状況は大きく変化している。変化には良い面と悪い面が必ず伴うものであり、実際従前に比べて多くの改善もなされているが、同時に多くの憂慮すべき事態も発生している。

以下、数物科学分野の研究現場から、現状認識とその改善に必要な諸課題・推進手法について指摘されている事項について述べる。

数物科学分野の特色として、研究形態、予算規模などが分野により多様であるため、全体に共通する事項と個別分野の事情とが混在するが、それぞれについて記述する。

### 1) 研究環境の整備・強化

科学技術基本計画によって全体としては研究資金が理系を中心に相当増額され、対GDP比では欧米諸国との差を縮めつつある。しかし、現実には大学の運営費交付金の漸減が、手痛いボディブローとなっており、基礎科学分野の研究環境の改善は未だ極めて不十分な状況にある。

大学における狭隘な研究スペースや研究施設設備環境の劣悪さは基本的には相変わらずである。特に国立大学の法人化以後、大学の施設整備費や大型装置の維持・更新費は激減し、欧米の設備環境と比較して大きな隔たりが発生している。

実験系の基礎研究においては、研究の展開に最も重要な装置や試料を自ら作成しなければならない場合が多い。しかし近年、装置開発や研究手法自体の研究が極めて展開し難い状況に陥っている。その主要な原因は、短期間に量的な成果が要求される評価制度とともに、大学における専門技術職員等の研究支援スタッフの不足とスキルアップへの適切な処遇の欠如などにある。新たな装置を地道に開発するより、研究費資金の大半を高額装置の購入費にあてて、容易に結果を得ようとする傾向が見られる。このような傾向が続くと大学の基盤的・基礎的研究力を低下させる結果になることが危惧される。

数学や物理の理論研究に最低限必要とされるのは、専門雑誌を中心とした図書であり、これは実験系の諸科学における実験装置にあたる。現在必要な図書の購入の体制を維持できない大学が増えつつあり、大きな問題である。中小規模大学において、数学研究が継続

して行われることを確保するためには、電子媒体を中心とする雑誌図書を共同で購入するシステムの一層の充実とそこへの財政的援助などの施策が不可欠である。

多くの大学において研究環境の整備を行うマネージメント体制が不十分であり、担当責任者も移動が多く長期的な視点での施策が機能していない。法人化後の個々の大学が強く意識して克服に取り組むべき重要な課題であろう。

これらの諸問題を解決し、独創的な研究を支える支援体制の強化（高度技術職員の確保）、高額装置の共有化と共同維持・支援体制の整備など、個々の研究機関の基盤強化と、それを財政的に支援する強力な施策が、我が国における基礎研究を発展させるために必要な最重要課題のひとつである。

### 2) 研究支援体制の整備

大学の研究環境を整備するための基盤経費が圧迫されているため施設面のみならず、人員面での研究支援環境の劣化が進行している。大学や大学共同利用機関においては、研究支援の技術者や事務担当者の減員が進み、非常勤職員に振り替える傾向が進んでいるが、待遇面や継続的人材育成の観点から大きな問題を抱えている。研究職、技術職、事務職の評価・管理の在り方も大学等の法人化に伴い見直しが図られつつあるが、基本的に運営費交付金の圧縮が背景にあり、さまざまな新たな問題が浮き出てきつつある。学問の発展には、共同利用機関の強化と共に、それを支える諸大学における組織的、予算的強化が切に望まれる。

### 3) 研究の多様性の確保

特定の大学に資金を重点的に投与する施策だけでは、裾野の広い基盤的研究は支えられず、萌芽的・独創的な研究が育たない。資金

投入の基本方針を分野の特性に応じて柔軟に変更する必要がある。

基礎科学の研究では、ある時期あまり脚光を浴びなかった研究が、一躍重要になる場合があるので、多様性の確保が決定的に重要である。特に数学や物性関連の研究においては、多くの大学においてそれぞれ異なった様々な研究が行われることで、研究の多様性が確保されてきた。現在、多くの大学において研究環境の悪化が著しく、一部の大学では事実上研究をすることが困難となっている。これを改善し多様な研究が行われる状況を確保することが重要である。そのためには、できるだけ多くの研究グループに支援を行う必要がある。現在の科学研究費補助金の基盤研究の新規採択率を30%程度にまで向上させることが望ましい。

これらの採択課題の選定に当たる審査員の更なる質の向上が不可欠であり、独創性を的確に評価でき、かつ価値の多様性を保障できる広い視野を有する審査員の育成が必要となる。そのためには、審査員経験を研究者の一つの業績として正しく評価し、適正な報酬を措置する仕組みの導入が必要である。

#### 4) ポスドク制度の改善：優秀な若手研究者が研究に専念できる体制の構築

ポストドクター1万人計画が第一期科学技術基本計画で打ち出され、博士号取得者に対する財政的支援は充実し、現時点で約1万2,000人に達している。その一方、支援を得られていない若手研究者も数多く、法人化以後の運営費交付金の継続的減少等により、常勤的研究助手のポスト数がどの分野も明らかに減っている。このような状況下で、極めて優秀な若手研究者でも、分野によっては常勤研究職に就くことが困難な状態が生じている。その結果、ポストクの多くは、数年の単位で成果が得られる小振りの研究テーマを選

んで「成果」を出し、次の短期ポストをねらうような戦術をとらざるを得ず、将来を見据えた大きなテーマの継続的基礎研究に挑戦しにくい状況がある。若手研究者を対象にした、現在の特別研究員より年限の長いポスト（たとえば延長可能な5年程度のポスト）の導入を検討することが必要であろう。

ポストクの進路に学術研究職以外のさまざまな選択肢を用意し、その貴重な研究経験を社会に還元できるような枠組みを整えることが有益である。これは同時に優秀な学生が早々と非学術的方面へ就職してしまうことなく研究を続けることを後押しすることにもなるであろう。また、小規模な大学を教育機関と割り切ってしまうことなく、地方においても最先端の研究を続けていける環境を整えることが、多様で優秀な若手研究者を多く育成するためにも重要である。

2007年度からの大学の教員組織の変更に伴い、助教制度が新たに導入されたが、大部分の大学では、教育研究職のポスト数は増加どころか減少傾向にあり、若手研究者の育成に大きな障害を残したままの状況になることが懸念される。ポストクには教育経験を積む機会が無いことも、助教の位置づけを考える上で一考すべき問題であろう。

最も独創性を発揮できる時期に、優秀な若手研究者が腰を落ち着けて長期的ヴィジョンに基づく基礎研究を推進できる受け皿体制作りが、緊急の課題として提起されている。現状のままでは科学技術立国としての我が国の将来は、極めて不安定な基礎の上に置かれていると断ぜざるを得ない。第三期科学技術基本計画で提言されている「ものより人」の内容に、この若手研究者に対する制度的問題の抜本的解決を期待したい。

## 5) 大学院教育組織の見直し：質的改善と社会的要請への対応

大学院重点化による大学学生定員増は基礎科学振興に資する面も大きかったが、その一方で学生の平均的な質の低下や偏差値上位校への集中などの問題が生じている。また、学位取得者の多くが任期付きポストドクをわたり歩く状況を見て、研究職への就職の可能性を早々に諦めてしまう優秀な院生が増えていることも問題である。院生の進路として、学術研究職のみならず、大学院教育で培った能力を発揮できる社会的要請の高い職場の開拓についてもより一層の配慮を持ってカリキュラムを組む努力が必要である。分野によっては人口減少を見据えつつ、レベル維持に配慮して学生定員減の検討も必要と思われる。

教育面での具体的課題としては領域ごとの特殊事情があることに配慮しなければならない。

大型プロジェクトを軸とする分野では計画の策定、建設、データ収集、データ解析のサイクルが長くなり、大学院の5年間では全てをカバーできない場合が生じており、教育的には計画の最初から最後までを見わたせる比較的小規模の実験を展開できるようにすることが重要である。また国際協力が増えている中、国際感覚を身につけた若手を育成する必要がある。

日本の数学研究は応用との接点に弱点を持つ。一方、数学に密接に関わるべき諸分野において、日本の研究が基礎的理論的な側面に弱点を持つことがしばしばある。この両面の問題点の改善には、数学研究者や将来数学研究者になるべきものが、数学が応用される諸分野に自然な形で触れ、興味をもつ機会を与えるべきである。数学研究者と応用されるべき諸分野の研究者が共同で研究を行い相互に啓発し合う場所やシステムが有用である。また、大学院生を含む数学研究者が、数学的な

考え方を必要としている諸科学を、自然な形で学ぶ機会を与える施策や教育プロジェクトを実施することが望ましい。

物性関連科学では、工学系との連携強化により社会からの要請にも応えられる人材の育成を一層心がける必要があるが、同時に社会からの要請に流されることなく、その基礎学理の探求を幅広く展開できるよう配慮する必要がある。

地球惑星科学系では、領域分野の拡大とともに研究組織が多様化しているが、社会的要請の高い防災工学面や地球温暖化への対応などを主たる使命とする組織と理学的組織の再編を視野に入れた教育システムを検討すべきであろう。

## 6) 学際的共同研究の振興

異分野の交流が新たな分野の研究を創出し、関連分野でのブレイクスルーを達成することはこれまでの歴史が証明しているが、現在の科研費制度のもとでは、残念ながらそれが保障されていない。現在の特定領域研究ほど大規模でなく、かつプロジェクト的性格でもない、ボトムアップ的な、比較的少数の複数の研究機関にまたがる研究ユニットの共同研究を支援する制度の確立と財政基盤の保障が必要である。現在の科研費制度に、共同研究の 카테고리を導入し、基盤研究と同程度の予算措置を講じるなどの検討が望まれる。

## 7) 共同利用機関の充実と共同利用の促進

全国の大学の研究者が、必ずしも自前の施設・設備・環境に頼ることなく大学共同利用機関などを有効に利用して研究を推進できる体制を作ることは、研究者層の充実と育成のために重要である。

理論の中でも、高性能計算機の使用が必須な分野では、世界をリードする研究を続けていくために最新鋭の計算機を更新していくこ

とがきわめて重要である。数年前までは国内のシミュレーション研究は諸外国に比べて優位な立場にあったが、最近では米国に巻き返されている。スーパーコンピュータを活かす数物科学の創成をめざした、ソフトとハードの両側面での強化が必要である。

学術情報・データの集積と流通の仕組みの確立は、膨大かつ種々多様なデータを扱う地球惑星科学や天文学・宇宙物理学ではきわめて重要である。観測実験データ・計算プログラム等を無償公開する制度を確立し、解析研究用ソフトや各種数値シミュレータの開発を促進し、世界に向けて学術情報を発信できる体制を整備すべきである。

共同利用されている大型分析機器の多くが個別研究室のボランティアによって維持され、老朽化しているものも多い。これらを安定的に保守運営するために、全国共同利用分析機器センターを地域ごとに設立すべきである。

数学の研究所としては、現在京都大学数理解析研究所や共同利用機関統計数理研究所がある。この両者の機能を充実させると同時に、常任の研究者を持たない短期間滞在型の研究所の設立や、プロジェクト研究を中心とした研究所の設立が望ましい。このような研究所は、欧米諸国に既に幾つか存在し成功している。このような研究所を活用するには、研究業績を上げている研究者が、本務先を一定期間離れることを可能にする施策の実施、また、サバティカル制度の導入や、中小規模大学に若手研究者を共同研究者として派遣する制度の実現などが望ましい。

プラズマ科学を核とした学問創成や、生命科学と宇宙科学との境界領域の発展を展望した動きもあり、今後が期待される。

## 8) 応用研究への展開支援研究経費の在り方

科学研究費補助金以外に様々な目的と枠組みで競争的な研究支援が行なわれている。数物科学系の中でも物性関連研究分野を中心に、科学研究費補助金以外の研究助成の採択例が増えており、応募可能性が多様化している。戦略的な研究助成の審査判断の過程については外からはやや見えにくく、透明性などの面で改善すべき点があると思われる。

## 9) 大型新規計画の実現

我が国の大型計画への予算措置は大学共同利用機関である高エネルギー加速器研究機構、自然科学研究機構（国立天文台、核融合研究所）、および宇宙航空研究開発機構（宇宙科学研究本部）を通じてなされている。その規模も決して小さくはなく、学術推進支援予算が多様化し機会も増えていること自体は歓迎すべきである。計画の大型化に伴い予算規模も大きくなり、計画採択については、各分野からの整合性のある長期計画の策定を受け、その審査・採択については、学術的ピアレビューの視点を一層重視するように更なる改善が望まれるが、学術研究成果や予算措置の国際的状況に照らすと、より一層適切な形で予算措置を講じる必要がある。

とくに宇宙科学分野の計画の策定については、宇宙開発のみならず学術事業としての位置づけをより明確化することが強く望まれる。

我が国の学術実績と国力を考えると、日本単独あるいは国際協力で推進すべき大型学術計画を、長期的見通しのもとに適切・迅速に決断する枠組みの構築が必要である。大型化してきた計画では、研究者、研究機関、国、といった様々なレベルで、それぞれの責任・権限・貢献度を明確化する必要がある。

また、国策として行うレベルの大型計画と

平行して、独創的かつ学術的価値の高い多様な中型計画をもサポートできることが望ましいが、このような計画の中には中型といえども大型科学研究費の枠を超える規模の計画が近年増えており、その受け皿がない現状を見直して、整備する必要がある。

#### 10) 国際協力・学術交流

学術の世界が急速に国際化しており、また大型プロジェクト計画が国際協力的なものには実現できないレベルのものが増えている中、国際協力の議論・交渉を行う場合に、予算についてもある程度の裁量を持って臨む必要がある場面があるが、日本の研究者には予算については責任をもった発言ができず、国際交渉に困難を来すケースがある。

日本の研究所や大学には、欧米に比べてエンジニアや技術者などが少ないが、その代わりに企業の技術者でそのギャップを埋めている面がある。事実、大規模計画では日本の企業の力に依るところは大きく、これは海外の実験にも大きく貢献している。大学と企業がうまく連携して、基礎的な技術から先進的な技術まで、過去のノウハウが途絶えることのないようにしっかりと継承してかつ発展させていく体制が必要である。

大型計画だけでなく、基礎研究における国際協力にも長期的な視点で取り組む必要がある。例えば、(若手)研究者の国際学術交流は、将来の持続的研究発展に欠かせない人材育成にとっても重要である。国際貢献の一環として捉えることができ、今後とも一層の推進を期待したい。また学術研究交流について

は、米国やヨーロッパとの交流だけでなく、アジア全体の学術的底上げを目指して、中国・韓国などとの連携を深める議論も必要であろう。我が国がこのような取り組みにおいてもリーダーシップを発揮していくことが望まれる。

#### 11) 科学研究費細目の適正化

地球惑星科学分科は固体地球惑星物理学、気象・海洋・陸水学、超高層物理学、地質学、層位古生物学、岩石・鉱物・鉱床学、地球宇宙化学の七つに細分化されている。これらの細目は科学研究費補助金の制度ができた当初から基本的な変更はない。地球科学の研究対象が惑星にまで広がり、分科名が「地球科学」から「地球惑星科学」に変更された際にも細目の見直しは行われなかった。学問の広がりや総合化により的確に対応するためには、細目の再編成・新設も必要であろう。物理学と天文学の両方に跨る宇宙物理学、なかでも宇宙線などの分野の動向を適切に反映するには両分野の再構成の可能性の検討も必要であろう。

プラズマ科学は、基礎および応用を含んだ理工学全体に関わる学際的研究となっているが、現状のように数学・天文学・物理学・地球惑星科学に加えてプラズマ科学という枠組みを設けておくことは重要である。しかし国内外の今後のプラズマ科学の研究動向を見極めて、プラズマ科学の体系的学問発展や適切な予算審査および配分が出来るような仕組みや位置づけの議論が常に必要である。

## 物性物理学関連分野における科学研究費補助金の申請・採択に係わる統計的資料

物性物理学関連分野における過去および今後の動向を探る一助として、過去における科学技術研究費補助金（以下科研費）の申請および採択課題に関するデータを調べた。その結果を以下に示す。

### 1) 申請件数の推移

平成 15 年度以降、細目設定に大きな変化があった。それ以後の 4 年間に於ける申請件数の変化を図 1 に示す。16 年度の一時的落ち込みを除き、申請件数は 1,200 件以上に及んでおり、物性 I、物性 II、およびその他の細目がほぼ 1/3 程度ずつの分布となっている。これらのうち、毎年度約 20~25% 程度の課題が、採択されている。

### 2) 採択課題の細目別分布

次に、採択課題の細目別分布を示す。図 2 が、1992 年から 2006 年までの採択課題件数の推移を示している。2003 年を境に細目設定の変化が発生していることに留意しても、物性関連科学の総採択件数が、横ばいであることがわかる。申請件数と同様、物性 I、物

性 II、およびその他の細目が、ほぼ同様な分布で推移している。

この細目間の分布を別の形で図示したものを、図 3 に示す。全体を 1 としたときのそれぞれの細目に属する課題の割合を、明確にするため、平成 15 年度以前とそれ以降に分けて図 3 に採択課題の相対的割合を示す。2003 年以降の分布は、物性 I が 25%、物性 II が 36%、その他の三つの細目が 39% となっている。

科研費は、申請金額に応じて、いくつかの種目に分類されているが、その中で物性関連科学の基礎研究に最も代表的な、基盤研究の (A) および (B) ごとの統計を探る。細目区分が明確な、2003 年以降に限った分布は、図 4 のようになる。基盤研究 (A) の約半数が物性 II 関連となっている。

### 3) キーワードごとに見た採択件数の推移

以下に、物性 I、物性 II、および 2003 年以前の細目である物性基礎、に関連する採択件数を、より詳細に、キーワードごとに分類

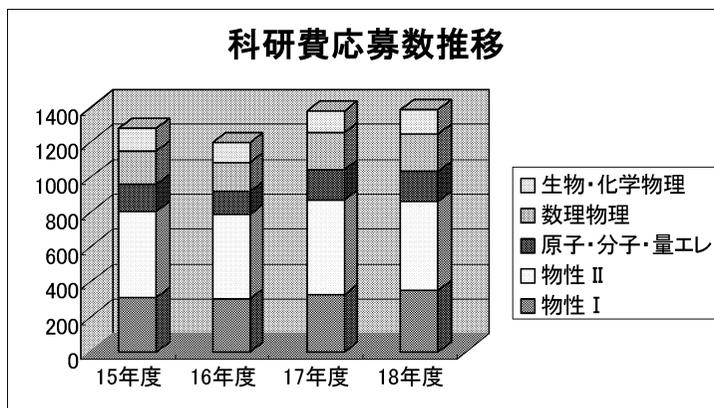


図 1 平成 15 年度以降の申請課題数の変化

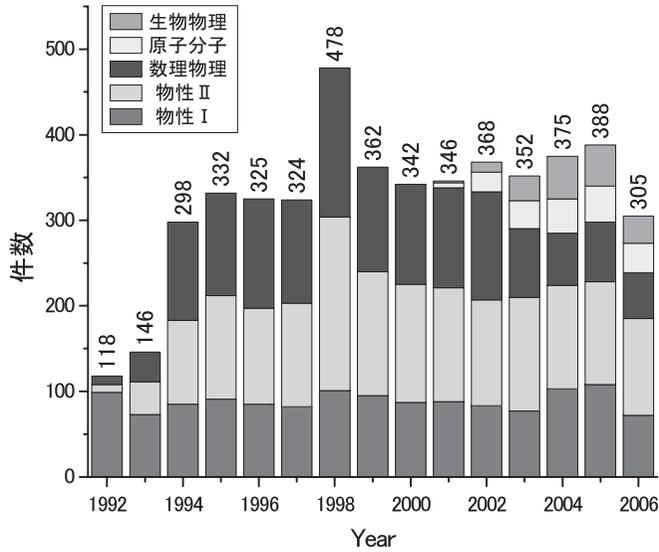


図2 細目別採択課題件数の年次推移

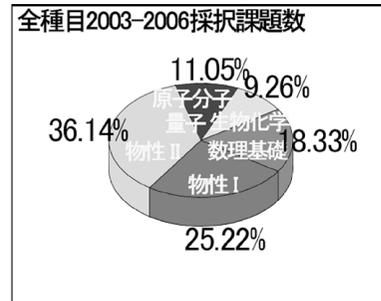
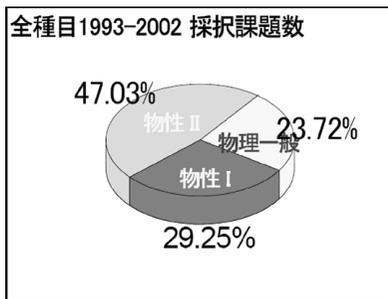


図3 採択課題の相対的細目別分布

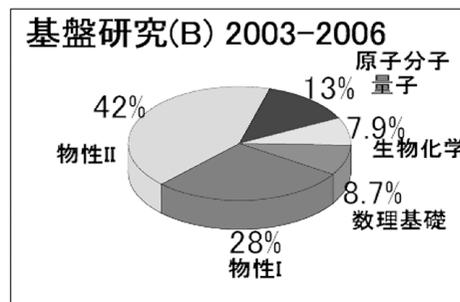
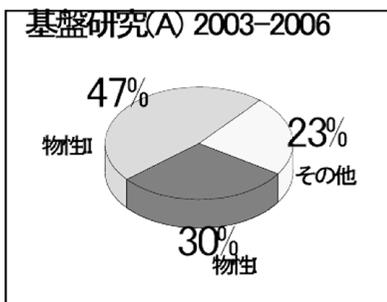


図4 基盤研究 (A) (B) の細目別分布

する。物性Iでは、課題名に、半導体、光、誘電（リラクサーソフトモードを含む）、相転移、表面、界面、薄膜、結晶、顕微鏡STM、ナノ微小、欠陥、を含む課題を抽出して分類した。図5が2003-2006年における

それぞれの課題の割合を、図6は、2002年以前とそれ以後のキーワード課題ごとの比を示す。

次に物性II関連の代表的キーワードで区分した採択課題の件数の推移を、図7に示す。

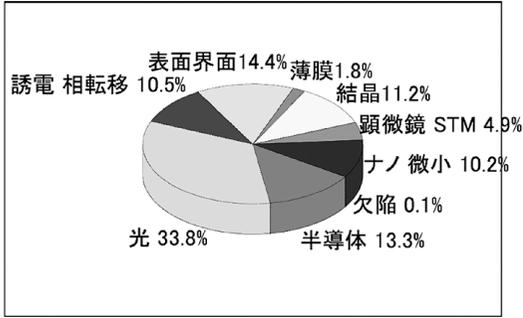


図5 物性I 関連課題のキーワードごとの割合

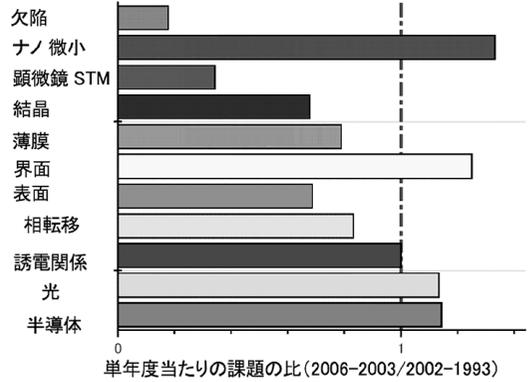


図6 2003 年前後での相対的变化

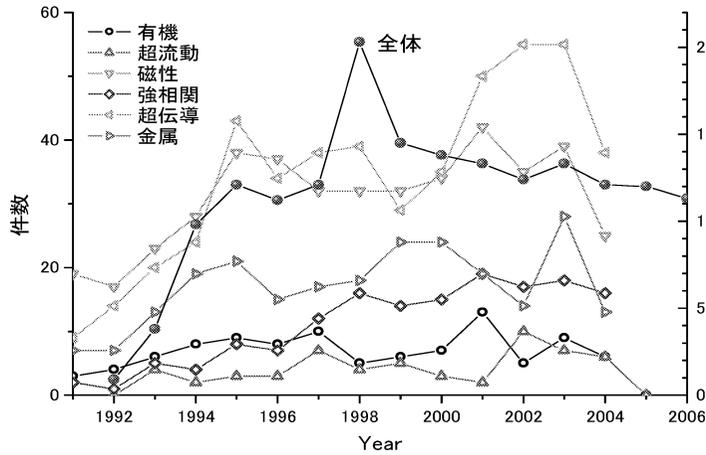


図7 物性II 関連課題のキーワードごとの採択件数変化

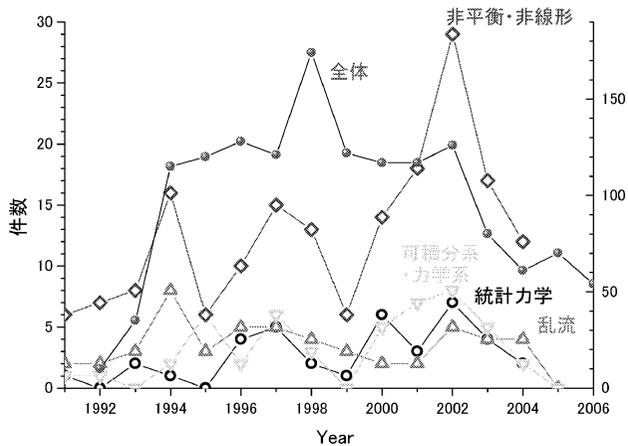


図8 物性基礎・統計力学関連のキーワードごとの採択件数変化

磁性および超伝導関連の課題が多く、これらが物性Ⅱにおける主要な研究課題の一つとなっていることがうかがえる。

図8は、数理物理・物性基礎におけるキーワードごとの動向を見た結果である。2002年を境に、全体の採択件数が減少している理由は、細目設定が大きく変化したことの原因としている。

以上、科研費の申請・採択課題に関して、入手可能なデータから、いくつかの分類と整理を行った。これらの統計は、物性関連科学の今後の動向を判断する上では、極限られた情報を提供しているのみであり、世界の、そして我が国の物性関連科学の動向調査には、更に体系的かつ詳細なデータの收拾と分析が必要なのは言うまでもない。

### 天文学分野における科学研究費補助金の採択動向調査

1985年度から2005年度の21年間にわたる天文学分野における科研費の採択課題のデータベース（学術情報センターがすでに公開している1995年度から2005年度までのデータベースを元に、1985年度から1994年度までのデータを加えたもの）を作成し、天文学における採択動向を調査した。このデータベースには天文学・宇宙物理学以外に、宇宙線・地球惑星科学関係から天文学に近いものを一部取り込んでいるが、その取舍選択は完璧ではない。21年間の総採択課題数は2,300件あまり、総額305億円におよぶ。以下は、このデータベースの分析報告である。

#### 1) 採択課題の天文学内研究領域別分布

採択課題をX線天文学、光赤外天文学、電波天文学、太陽物理学、理論天文学、重力波、宇宙線、地球惑星の八つの研究領域に分類して、過去21年間の採択課題件数のシェアを見たものが図1である。宇宙線、重力波、地球惑星の領域については、上記天文学データベースに採録されていないものもあり得るので、注意が必要である。

図2は、領域別採択件数の年次推移を見たものである。この20年間で天文学分野全体の研究者人口の増大に伴い、特に理論、光赤

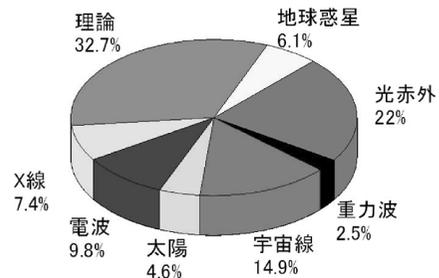


図1 過去20年間の領域別採択件数割合

外、宇宙線の領域などで、採択課題数が約2倍から3倍に増していることが、読み取れる。

図3は、同じ分類での研究領域ごとの採択総額の年次推移を見たものである。こちらは大型科研費の採択により総額が大きく変動する。また、予想されるように、理論系は比較的小額の多数の課題からなることが読み取れる。

図4は1987-1995年の9年間の各研究領域ごとのシェアに対して1996-2005年の10年間のシェアの増減を採択件数と交付額について示したものである。重力波、太陽は採択件数、交付額ともに減少傾向が見られる。電波も漸減している。宇宙線が伸びているように見えるが、これは1995年までのデータベースに宇宙線領域のもので欠落があるためである可能性がありうる。

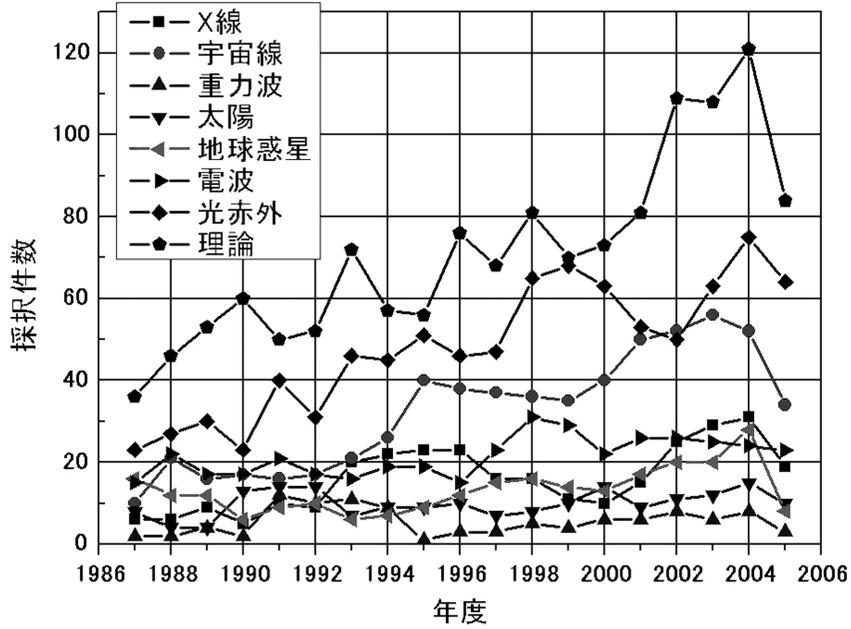


図2 天文学分野の八つの研究領域ごとの採択件数の1987-2005年度の年次推移

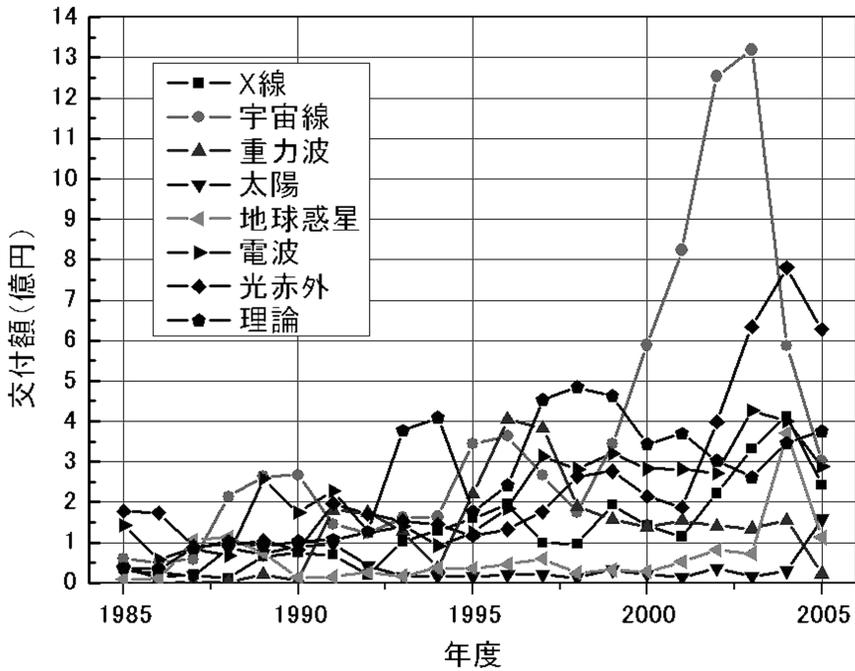


図3 天文学の研究領域ごとの交付総額の1985-2005年度の年次推移

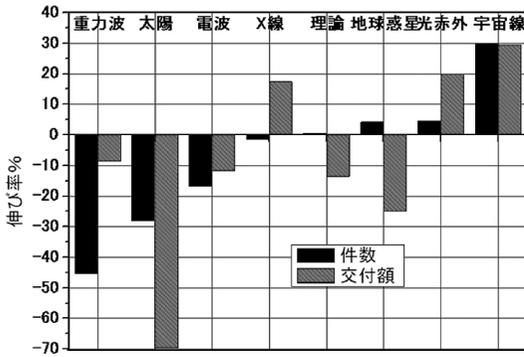


図4 最近10年間の採択件数シェアをその前の10年間のシェアに比べての伸び率を示す。

交付額の変動は大型科研費の採択の有無に大きく依存するので、研究分野の拡がりを単純に反映するとは限らない。また、大型プロジェクトが走る時期にはその研究領域の研究者が、かなりの割合でプロジェクト遂行に専心する場合もあるので、科研費の採択件数の減少は必ずしもその分野の衰退を意味しないことにも注意が必要である。

## 化学分野の研究動向

日本学術振興会学術システム研究センター

### 1 当該分野の特徴・特性等

#### 化学全般

化学は、物質の「結合・反応・構造・物性」の4課題を研究し、それらの制御を通して、人類社会の繁栄、人類の幸福や精神の向上、生命の豊饒、さらには自然との調和を目的とする中核的学問である。現代の化学は、新しいフロンティアを開拓しつつ、その周縁にある他分野との連携融合により膨大な領域に膨張し続けている。20世紀の科学・技術のすべての分野で、原子・分子さらにそれらの集合体レベルでの物質変換の重要性が認知され、「環境」、「エネルギー」、「情報」、「ナノサイエンス・ナノテクノロジー」、「ライフサイエンス」などの主要な課題を含む広範な分野に、化学は基盤的情報を提供している。

科学研究費の分科細目で化学は、基礎化学(物理化学、有機化学、無機化学)、複合化学(分析化学、合成化学、高分子化学、機能物質化学、環境関連化学、生体関連化学)、材料化学(機能材料・デバイス、有機工業材料、無機工業材料、高分子・繊維材料)に分けられている。数物系科学における分科(数学、天文学、物理学…), 工学における分科(応用物理学・工学基礎、機械工学、土木工学…)の分類に比べ、より単色化されている。単色

化された分科とはいえ、我が国におけるその基礎から応用に亘る研究者人口の多さ、研究実績、他分科や社会への貢献度・波及効果は非常に大きい。その発展は、歴史的背景と社会的要請の強い結びつきに負う所が大きく、江戸時代における本草学と蘭学、江戸末期のポンペによる化学のほか医学、生理学さらに採鉱学の教育や江戸開成所の化学教育、明治初期のハラタマによる分析を主体とした実験化学教育(大阪舎蜜局)は、化学を日本に根付かせたものである。その後の多くの日本人化学者による教育、研究を通して、教えを受ける状態を脱し、自立した研究、独創性のある新しい化学が発生したのは、明治後期以降となる。これらの歴史や社会要請の成果として、日本での化学は著しい進化を遂げ、多くの分科細目で世界の最先端に至り、昭和～平成において、福井(理論化学)、利根川(生理学)、白川(高分子化学)、野依(有機化学)、田中(分析化学)の5氏が、化学を基盤とした研究業績によりノーベル賞を得ている。

20世紀の終わりから21世紀初頭にかけて、物質変換の基礎における絶え間ない革新により、1個の分子を扱う超微細な系の化学(ナノ～オンゲストローム)、超短時間(ピコ～フェムト～アト秒)での化学反応(気相～固相)や結晶構造変化の観測、生命現象など高度に複雑な巨大系や非平衡・複雑系への化学からのアプローチ(例えば、化学生物学とい

う新しい学問領域)が急速に進展した。また、同時に、環境やエネルギーなど重要な社会的問題への化学的処方箋が飛躍的に量・質ともに増大した。今後も、化学は基礎学術的要請や、社会的要請を受け入れ融通無碍の展開を示すであろうが、その社会的波及が甚大であることから、科学倫理観のある発展が必須である。

今回の化学分野の動向調査では、科学研究費の分野細目とは異なり、物理化学に関しては**分光光学・界面化学・理論化学**、有機化学では主に**有機化学・合成化学**、無機化学では**錯体化学・生物無機化学**、複合化学中の機能物質化学と材料化学中の機能材料・デバイスおよび無機工業材料をまとめて**機能物質化学**、生物化学関係では**生体関連化学・生物分子科学**、複合化学の高分子化学と材料化学の高分子・繊維材料、高分子が関与する機能材料・デバイスをまとめて**高分子化学**、環境関連化学を**環境化学**とした7項目（これらは、各分科での骨格となる細目でもある）で調査を実施した。ただし、未調査事項の中にも緊急で重要な化学の課題があることを心に留めて読んでいただきたい。次に、各項目分野の特徴と発展過程などを、ノーベル賞などの対象となった大きな研究業績を踏まえ概説する。

## 1. 物理化学

**分光光学**：分光光学におけるここ10年間の技術の革新は、過去の分光光学における時空間およびエネルギー領域を全く塗りかえ、新しい発見、それに伴う新たな理論の誕生が相次いでいる。その源は、**超短パルスレーザー技術**（フェムト～アト秒）の確立、**超精密時間分解分光光学**や**強光子場化学**の発展であり、さらに、新しい光源（**自由電子レーザー**など）施設の建設計画の誕生と共に、更なる展開が期待される。特に、分子の動的変化（振動、反応、構造変化）の実験に目覚ましい質的变化をもたらし、新たな**動力学理論**の発展を促している。

**界面化学**：界面化学における諸発見と諸研究により、Langmuirにノーベル賞が与えられたのは1932年である。その後70年間の界面化学の研究は、界面での化学・物理現象が非常に多岐にわたり、界面構造や電子構造、粒子・エネルギー移動などの界面プロセスが複雑に絡み合っていることを明らかにすると同時に、結果として、数多くの重要な課題を未解明のまま残した。界面は、化学反応、触媒作用、デバイス接合、発光素子、光電素子など多くの化学における課題と密接に関連する

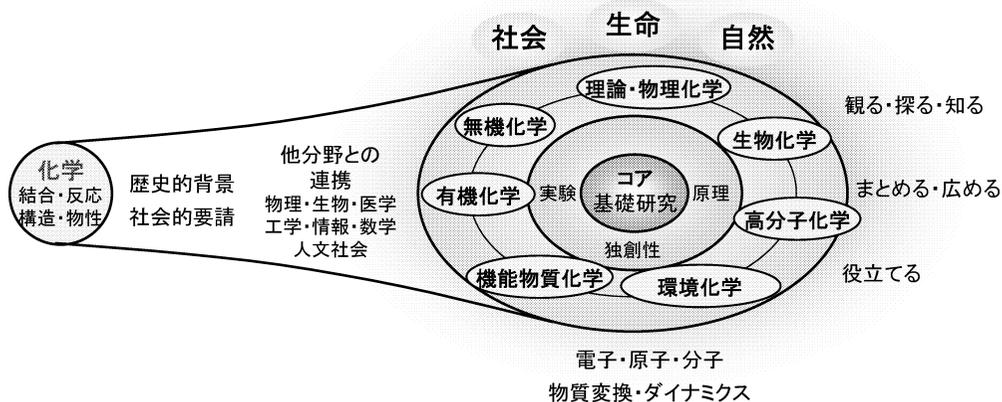


図1 化学の概念図。他の図は報告書の後ろにまとめる。

ため、界面化学は基礎科学から応用・産業に亘って非常に重要な学問分野に位置し、基礎と応用研究が有機的に連携して発展すべき典型的分野であり、波及効果の高い多くの課題がある。ここ、10年間の進展は、界面状態の新規な作成法(LB法、自己組織化膜(self-assembly films, SAMs)、電気化学堆積法、エピタキシャル成長法、摩擦転写法など)、半導体における微細加工の技術(実験室でのデバイスレベルで10 nm)、測定手法(AFM, STM、各種走査プローブ顕微鏡、低エネルギー電子顕微鏡や光電子顕微鏡、レーザーを使った非線形分光法や2光子光電子分光、近接場光学顕微鏡や表面プラズモン共鳴、軟X線分光法など)の開発が牽引車となり急激に進んだ。さらに、主流であった薄膜を対象とした表面化学研究から、固体-固体、固体-液体、分子系界面、メゾ-ナノスケールサイズや単分子サイズの物質界面などの界面へ学術的な対象が移りつつある。しかしながら、接合技術、接合点の構造の直接観察、精緻な電子状態の把握、観測データを解析するための基礎理論のほぼ全てが未開拓であり、実験・理論の両面での新規手法の開発によりこれらの基礎学理を確立すること、およびその実用研究への応用が重要課題となっている。

**理論化学および計算化学**は、化学現象や分子の性質を記述する**自律的理論**、**理論的方法論**、**アルゴリズム的方法論**、実験を説明する**計算**、**シミュレーション**、**情報処理の化学**であり、1950年までは、主に量子理論の物理学者や熱力学理論の化学者にノーベル賞が与えられた。1950年以降、量子化学・化学結合理論・構造研究でL. Pauling (1954年)、分子軌道法の開拓研究でR.S. Mulliken (1966年)、反応に限らず機能・物性に波及したフロンティア軌道や化学反応の選択則の提案で福井謙一とR. Hoffmann (1981年)、非経験的電子状態理論の発展でJ.A. PopleとW.

Kohn (1998年)が受賞している。現在は、コンピュータの普及、スーパーコンピュータの自由な使用などがあいまって、これまでの理論が扱えなかった対象・時空間(高精度、大規模システム、動的過程、励起状態、実在系)をキーワードとして、**電子核同時動力学**、**強い動的極限場の理論**、**超迅速アト秒理論化学**、**ナノ-メゾ理論**、**多体系量子効果理論**の研究が、国内外で急速に伸びている。

## 2. 有機化学

**有機化学**：化学分野の中でその歴史は最も古くまた研究者の数は最も多い。日本化学会の全会員の17.9%以上が属す。**構造有機化学**、**反応有機化学**、**合成有機化学**、**有機元素化学**、**有機光化学**、**物理有機化学**、**理論有機化学**と分類され、ノーベル化学賞の中で最も多くの受賞者をこれらの分野で輩出し、最近では野依良治の「触媒による不斉合成」に対して与えられている(2001年)。合成化学における方法論等を表すキーワードは(1)選択的合成、(2)選択的反応、(3)有機金属触媒、(4)不斉合成、(5)触媒設計、(6)環境調和型反応、(7)反応場、(8)生物学的合成手法、(9)コンビナトリアル手法などである。日本の有機・合成化学は世界的に非常にレベルが高く、日本人研究者の名の付いた反応や触媒も多く、合成化学分野における最も大きな分野の一つである不斉合成では世界を牽引している。また、不斉合成の論文の引用件数では、日本人研究者が世界の1位から3位を独占している。合成化学でのもう一つの重要なキーワードは「触媒」で、世界的に最も活発に研究されている分野の一つである。メタセシス触媒に対して2005年のノーベル化学賞が与えられ、産学連携も盛んである。従来の有機化学に加えてさらに、重心を生物学へとシフトすることも重要となる(**ケミカルバイオロジー=化学生物学**への展開)。特にアメリカでのこの分野

への研究資本の投入には目を見張るものがあり、我が国でも緊急に対処せねばならない。有機元素化学や、有機金属化学の分野はこの10年間大きく発展し、有機合成化学、特にクロスカップリング反応やケイ素化学、またフラーレンやカーボンナノチューブを新規素材とした有機反応、金属表面での分子反応制御、生物活性天然有機化合物の合成における研究者の層の厚さ、世界的に高い研究の質、論文業績の数、社会・産業に対する波及効果の大きさなどは、将来のノーベル賞に該当する人材や課題が豊富であることを示す。

### 3. 無機化学

**錯体化学：**この分野は、触媒化学、有機化学、有機金属化学、分析化学、光化学、理論化学などの化学分野は無論のこと、生命科学、表面科学、物性物理、材料科学、海洋科学等のさまざまな科学分野とも接点を持つ。多数の無機物およびウエルナー型錯体に加えて、フェロセンの合成(1951年)、G. Wilkinson, E.O. Fischerの構造決定(1952年、1973年ノーベル化学賞)に始まる有機金属錯体の出現、その他銅フタロシアニン(1927年)や遷移金属を含む生体関連分子など多種多様な錯体が発見、合成されている。C.J. Pedersenのクラウンエーテルの発見、J.-M. Lehnのクリプタンドによる3次元包摂化合物の化学(後に超分子化学を展開)、D.J. Cramの分子認識化学は、錯体化学を急速に進展させ(3氏は1987年にノーベル化学賞を受賞)、現在ではこれら金属錯体の構造から物性、機能に研究の重心が移行しており、光、磁気機能などの単分子素子の提案などが相次ぎ、電子機能材料(エレクトロニクス、スピントロニクスなど)はもとより、生体関連および医療材料へと膨張している。

**集積型金属錯体、超分子化学：**配位結合、水素結合・イオン結合などの弱い分子間相互作用

用は、かつては電荷移動錯体等の限られた分野で結晶中の分子集積の制御に利用されているにすぎなかった。近年になり、超分子化学の概念の発展とともに、これらの弱い相互作用を精密に分子設計にとり入れることにより、無限・有限(結晶・溶液)構造を問わず、非常に複雑な構造体の構築や高次機能の発現が可能となってきた。とりわけ、金属錯体の活用により、有機化合物と無機化合物の境界を超えた新概念の物質群の創出や、従来法では合成困難なメゾスケール物質群(2~50 nm程度)の精密構築も可能となりつつある。

**生物無機化学：**生物無機化学は、金属元素の生体内における機能の解明とその利用を開拓する研究分野である。したがって、その内容は生物・分子生物学から医学・薬学、ならびに無機化学、分析化学、錯体化学、電気化学、エネルギー・触媒化学に至るまで広範なテーマを内包する。生物無機化学は、金属蛋白質の機能の解析によって得られた知見をもとにして、環境負荷の低い触媒やエネルギー変換材料の開発といった、エネルギー・触媒化学への応用も模索している。

### 4. 機能物質化学

物質合成と材料化、材料の複合による有機的システムの構築、材料・デバイスの物性・構造の解析や評価手法の開拓、設計・評価における理論的バックアップなど本分野の領域は広大であり、他の多くの領域分野と密接に関連を持つ。無機材料、有機材料、バイオ材料、またそれらの複合材料を基盤とした、エレクトロニクス、イオニクス、フォトニクス、スピントロニクス、マルチフェロイック、他にもエネルギー、環境、医療などの分野で機能・構造材料の研究がその関連分野を巻き込んで急激に進んでおり、新産業創成に繋がる展開が始動しつつある。大学における研究は基礎に、また民間企業での研究は出口

に重心があり、産官学間の融合研究も多彩に行われている。新機能・新現象を示す物質材料の開発は非常に大きなインパクトを基礎学問から社会に与え、多くのノーベル賞が化学・物理・工学の研究者に与えられている(Shockley, Bardeen, Brattain (1956年), 江崎, Josephson (1973年), Bednorz, Müller (1987年), 白川, Heeger, MacDiarmid (2000年))。新機能・新現象を示す物質材料の開発には、理論(量子, 統計, 熱力学, 電磁気学)や固体科学などの基礎学問, 基礎実験, 概念(酸・塩基, 電荷移動, ホスト-ゲスト, 超分子, 錯体, 不斉など), 作成実装技術, 解析技術, 装置(高圧, 強磁場, 強電場, レーザー, 電子顕微鏡など)などの総合科学が必須である。

また、本分野は、その国における科学の総合力が如実に反映するところであると同時に、産業の芽の部分でもあり、欧米はもちろんのこと、中国, 韓国, 台湾, シンガポールなどの化学における発展途上国が国策として力を注ぎ始めた。課題は、物質・材料の開発から実用化までにかかる研究開発期間の長さである。一般に、耐久性の高い無機材料に比べ、有機材料では長い期間を要する傾向がある(液晶: 85年, 有機低分子半導体: 30-50年, 高分子半導体: 20-30年)。

**無機機能物質化学:** 新しい電子材料(光触媒, 高エネルギー密度電池, 燃料電池, 太陽電池・電極材料, 光通信・DVD, フォトニクス材料, 半導体レーザー), 生体親和性に優れた無機生体材料, 規則性ナノ空間の精密制御による多孔性材料(分子認識, 吸着分離, 触媒担体, 機能物質の貯蔵・放出)の研究開発が着実に進歩しつつある。

**有機機能物質化学:** 有機低分子や集合体からなる新規物質・材料の開発が進み, 機能物質材料, デバイスはこの10年間に大きな飛躍を遂げている。フラーレン・ナノチューブ等

の新規物質, EL, 液晶デバイス等への応用など, 基礎研究から応用・実用化にいたるまで, 我が国が先進的かつ重要な役割を担っており, 今後もその地位を確固たるものにする必要がある。無機・有機に限らず, 新しい学問領域の開拓を担う物質, 現象, 概念, 理論, 技術の構築が最先端課題である。

## 5. 生体関連化学・生物分子科学

**生体関連化学・構造生物化学:** 生物の活動を理解するには, 生物進化を念頭に置きながら全生物に共通する機能と個々の生物に個別的功能とを区分した上で, それぞれの機能の**分子科学的な原理解明**を行うことが必要となる。全生物に共通する機能は, 生命活動を維持したり細胞分裂を引き起こす上で不可欠な機能である。その分子科学的な原理解明は, 原始生命の発生過程を理解するための必須なステップである。一方, 個々の生物に個別的功能は, 関与するタンパク質分子の作用機構とその構造化学的解明, つまり, 構造と機能の相関を把握することによって初めて, その特異性とタンパク質進化との関連付けが可能となる。タンパク質進化による新たな機能の獲得過程(**生物の進化**)の原理を分子科学的に解明する研究が進展している。

構造生物化学は, 生命活動が関与する生化学的反応において, 機能分子として反応に関与するタンパク質やRNA分子の作用機構を, 構造化学的に解明する学問である。その基礎となるのは, タンパク質分子, RNA分子, RNA含有タンパク質の立体構造と, これら生体分子の関与する生化学的反応, 現象の反応化学的な詳細な研究である。従来から, 生化学および生理学的に興味深い生化学的反応や現象の反応化学的な研究が先行し, その反応化学的な研究成果に基づいて推定される反応機構を分子科学的に検証するため, 反応に関与する物質(タンパク質分子, RNA

分子、RNA 含有タンパク質)の立体構造を利用するという協力関係が成り立っている。特に、遺伝子工学の普及の結果、生化学的反応や現象の研究において、天然由来タンパク質に代わり組み換えタンパク質を利用する研究が急増するとともに、組み換えタンパク質を用いた立体構造の解析結果が一層重要視される状況となっている。

**生物分子科学**：理学，工学，薬学，農学，医学に亘り，主として有機および無機・分析化学を基礎とした研究手段で生物現象を理解する，および生物現象を化学的に理解し，これを自然科学として抽出することが研究課題である。日本の得意とする天然物化学における，構造・機能の多様性，特にここ20年の海洋に棲息する生物の2次代謝産物に対する評価は高い。医薬品リード化合物の宝庫として以前にもまして注目されるようになった。世界的潮流として**ケミカルバイオロジー**（化学生物学）に注目が集まっているが，これはポストゲノム時代の新しい学問である。しかしながら，新しい機構で働く天然有機分子の発見が先導する分野であることに変わりはなく，免疫抑制物質，抗線虫物質，制がん物質，抗菌性物質，抗ウイルス性物質などの発見については，今後の期待が大きい。加えて，有機合成化学的にこれらの分子自身，もしくは類縁体を創製する分野も活発で，世界的に多くの研究者が凌ぎをけずる分野となっている。多彩な構造，機能を持つ有機分子を活かして，生命現象の解明を目指す化学の分野として位置づけられる。

## 6. 高分子化学

Staudinger を中心に物理化学的な観点から20世紀初頭に勃興した高分子化学という比較的新しい学問領域が，合成化学ベースの「高分子合成」と物理化学の「高分子物性」，「高分子構造」領域に分かれて発展した。さ

らに1980年代に入り「機能性高分子」の概念で，研究領域が大きく発展してきた。また同じ時期に分子組織科学も国武豊喜などの高分子の研究者が積極的に展開し，非共有結合性高分子は重要な研究分野となりつつある。この分野は化学のみではなく物理，材料工学，生体材料，ナノ材料などの分野と密接に関連しているのが大きな特徴である。最も高分子分野の研究動向を反映する高分子学会の年次大会における研究発表動向をグラフにまとめた(図2)。なおこの領域では，高分子物理化学でStaudinger(1953), Flory(1974)，高分子合成分野でZiegler(1963), Natta(1963), Grubbs(2005)，高分子物理分野でde Gennes(1993)，機能性高分子で白川英樹(2000)，生体関連高分子でMerrifield(1984)らがノーベル賞を受賞し，それぞれの分野の発展に大きく貢献している。

**高分子合成**：ラジカル重合，メタセシス重合，および配位イオン重合領域でリビングの重合が進展し，様々な一次構造を有する高分子の合成法が可能になってきた。リビングラジカル重合は，日本の貢献の割合が高く，拡大しつつある研究領域の一つである。

**非共有結合性高分子**：2分子膜，超分子液晶，超分子ゲル，超分子ポリマーなどに代表される低分子を構成単位とする分子集合体。刺激応答性・リサイクル性・メモリー性・光電磁気物性などの機能発現が積極的に試みられている。

**高分子構造**：実空間・波数空間のナノスケール測定法の開発(AFMや3次元電子顕微鏡，量子ビームを用いた波数空間測定法)，特異な高次構造の発見，理論・シミュレーションを用いた構造形成の機構解明など大きな進展がある。

**高分子物性**：超撥水，超親水性など高分子と水の界面における物性，低摩擦・低摩耗，ナノ物性，ゲルの物性，高分子の光学特性の研

究などで進展がある。また、高分子電界発光、強誘電性は様々な有機デバイスの発展を支える研究である。

**機能性高分子（生体関連高分子・生体材料を含む）**：再生医療の足場材料、細胞や組織の培養・分離のための基材の開発、DDSの研究。ゼラチン、ポリ乳酸などの生分解性高分子の研究例が増加している。また、生体関連高分子、生体材料ともに異分野との境界領域の研究が急速に進展し、境界領域研究の域を超え融合研究のレベルにまで達しつつある。

**機能性高分子（電子・光学材料を中心に）**：IT産業の発展は様々な高分子材料が寄与するところが多い。特筆は導電性高分子をベースにした高分子バッテリー、シリコンと匹敵する特性の高分子FET、高分子EL材料などがある。燃料電池のセパレーター膜や光学材料でも高分子材料の寄与は著しく大きい。インターネットの普及に関して、高分子光ファイバーが重要な役割を果たしている。

**高分子工学・複合材料**：様々なレベルの相構造や界面構造を制御して、所期の性能を得るために、構造制御手法に関するものに研究者の関心が集中している。有機・無機ハイブリッドは日本発の材料である。

**繊維材料**：高強度繊維、繊維材料の高次構造解析、レオロジー・配向結晶化など動的な分子の振舞いに関わる解析が、紡糸条件との関連で理論・実験の両面から進んでいる。

**ゴム材料**：一次構造から異種ポリマーやフィラーを含む混合物の高次構造と物性の制御に関する研究。

## 7. 環境化学

1960年代に超音速航空機エンジン排気によるオゾン層破壊が提起され、1970年代にクロロフロロカーボンによる成層圏オゾン破壊問題が明らかにされた。「オゾンの形成と分解に関する大気化学的研究」に対して

1995年、地球環境分野で初めてのノーベル賞が与えられ、それ以降環境化学は化学の中の大きな分野となり、研究者人口は急増している。

人類活動の肥大化により地球環境を含む環境変化は急速かつ不可逆で、その問題解決は急務であり、解決に向けて英知を集めて行動すべきである。行動にあたっては、現象解明と影響対策の二つの車輪ができれば同時に適切に駆動されるよう、政策立案および決定がなされるべきである。多くの地球環境問題は物質の濃度の過剰な増大や減少が影響しているため、現象解明・影響対策・政策立案に化学が果たすべき役割は大変大きい。国土の狭さに対して人口の多さ、勤勉性からくる環境意識の高さ、エネルギー効率の高さから、環境問題に対する国民や研究者の関心は高く、環境の影響対策については諸外国、特にアジア地域では群を抜いている。一方、現象解明については、比較的地域的な問題では、しばしば野外調査の再現性に乏しい事象に直面するが、長寿命物質循環系でない事象については、比較的現象解明が進められている。また、地球規模での問題について、国力に応じた研究投資がなされていないため、時空間的に限られたデータからの予測にとどまっております。個々の高い研究レベルがまだ十分に活かされていない。当該分野は、キーワードとして「分離分析」、「環境分析」、「グリーンケミストリー」、「微量環境物質評価」、「環境計測」、「物質循環」、「環境変動」、「地球温暖化」などで示されるように、環境問題に幅広い側面を持ち、そのアプローチも多様であることを反映している。本報告では、担当分野を含む化学が大きな役割を果たす、環境変化の現象解明（地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、エアロゾル、大気質（対流圏オゾン、化石燃料から次世代燃料への変化））について研究動向を調査した。

## 2 過去 10 年間の研究動向と現在の研究状況

### 1. 物理化学

#### 分光学

**分子分光学：**分子分光学は、光あるいは電磁波を物質に照射することにより物質の物理および化学的性質を明らかにする学問である。古くから、マイクロ波分光、赤外分光、可視・紫外分光など、波長領域に応じて、分子の回転状態、振動状態、電子状態が調べられ、基本的な分光学の技術は他のあらゆる学術の分野で分析手法として使われてきた。以前における分光学の一つの目標は、分光測定を通じて、分子の幾何学的構造や、分子の持つ電氣的・磁氣的性質を明らかにすることにあったが、パルスレーザー光源の導入は新しい分光学、つまり、ポンププローブ法による分子の動的な挙動、ダイナミクスの研究を可能とした。1990年代初期に、ナノ秒領域のパルスレーザーを用いた実験が数多く行なわれ、蛍光検出やイオン化後のイオンの検出などを通じ、分子の電子励起状態における振電相互作用や、解離反応過程が研究された。特に、分子ビーム技術や超音速ジェット技術をレーザー分光技術と組み合わせ、分子ばかりでなく分子の集合体であるクラスターの動的な挙動に関する研究がさかんに行なわれた。また、短パルスレーザー光を用いた実験も行なわれ、1990年代の中ごろからピコ秒領域からフェムト秒領域のパルスレーザー光により、分子ダイナミクスの動的挙動の実時間の観測が行なわれた。周波数領域のレーザー分光学の手法と、時間領域でのレーザー分光学の手法は、分子の動的な過程について相補的な情報をわれわれに提供しており、物質および物質変化の理解が深められてきた。

**強光子場化学：**フェムト秒レーザー技術の発展はレーザーパルスの先頭値を極めて大きくすることを可能とした。特にチタンサファイアレーザーとチャープパルス増幅の手法がフェムト秒レーザーパルスの高輝度化に寄与した。その結果、1990年代の中ごろになり、強光子場とよばれる強い光電場と分子の相互作用に関する基礎的な研究が行なわれるようになった。強光子場において光と分子が結合する結果、分子はレーザーの偏光方向にアラインメントを起こし、また、超高速構造変形を起こすとともに、多重イオン化を経てクーロン爆発を起こす。光と分子が結合した光ドレスト状態は光パルスの形状や位相に鋭敏に応答する。従って、強光子場のデザインにより化学反応の選択的な切断が試みられるようになった。また、強いレーザー光を固体ターゲットに照射するとピコ秒領域のパルス硬 X 線が発生する。これを利用して固体内の超高速過程が時間分解 X 線回折法によって追跡されるようになった。

**分子制御・反応制御：**光パルスを用いて分子のダイナミクスを制御するところみが、実験および理論において盛んに行なわれるようになった。特に、パルスレーザー光のパルス形や位相を最適に制御すること、あるいは、ポンプ・ダンプ法によって化学反応の制御が可能となることが理論的に予測された。実験では、フェムト秒レーザーパルスの波形整形技術の進歩と最適化アルゴリズムの導入により、特定の生成物の生成比を増加させることが可能であることが示された。一連の研究は光の持つコヒーレンスを利用したものであることからコヒーレント分子制御と呼ばれることもある。パルス整形をすることは必然的にパルス内の電場強度を最適にすることであり、場合によっては、電場強度を極めて強くすることが最適化に必要である場合もある。その意味で、パルス整形技術は強光子場化学

と密接に連携しながら発展している。

## 界面化学

**種々の表面界面課題の研究：**界面を主題とした個別研究課題は多岐にわたって展開されてきた。固体-液体界面に関しては、環境/エネルギー問題に関連した燃料電池、バッテリー、光触媒や色素増感太陽電池などの電極関連現象の研究が進められ、また、バイオセンサーなどのバイオ応用のための生体分子との界面の研究なども増えつつある。固体-固体界面に関しては、有機分子を用いたデバイス研究と関連して電極界面、薄膜成長などが精力的に研究されている他、種々のナノ、メゾスコピック構造を作製するための研究も広範に進められている。

**界面基礎物性研究：**界面を対象とした基礎学理に関しては、有機デバイス研究の進展と連動して有機分子と電極との界面電子構造研究が展開されてきた。特に、界面における電子準位の接続機構は素子応用の基盤となる課題であり、我が国での光電子分光法による実験研究を出発点として、米国、ドイツをはじめ世界の多くの電子分光分野の研究グループが分子系界面の電子構造問題に参入し、現在も活発な研究が進められている。また、既存の微細加工技術の限界を克服する分子素子を対象とした研究も盛んであり、一分子の電気伝導の研究が実験・理論の両面から進められてきた。

**界面測定法の開発研究：**電子構造測定に関しては、光電子分光法が界面へ適用され、あわせて、高分解能化も進められてきた。特に、分子系では高分解能化により振動構造を観測することで、有機分子系のキャリア輸送特性の鍵を握る分子-振動カップリングの研究が開始され、詳細で重要な情報が蓄積されている。また、光電子顕微鏡 (PEEM) やマイクロスポット光電子分光法などにより、界面の

微小領域の電子構造研究も開始された。光電子分光では観測できない空準位に関しては逆光電子分光法が活用されているが、解決すべき課題は分解能の向上および分子系材料での電子線損傷回避法の開発である。また、従来の電子構造測定は真空を要したが、実用界面を観測するために大気などの非真空雰囲気での電子構造測定研究も行われている。プローブ顕微鏡関連手法としては、STMによる単一分子の振動励起や操作、発光や光励起と組み合わせる表面にある単一分子の同定などの新しい展開が進められてきた。理論計算に関しては、密度汎関数法の普及により、格段に精度の高い計算が可能となり、様々な吸着系の構造や電子構造研究が進展した。また、分子-電極界面の電子構造計算も進められている。

## 理論化学

**高精度計算 (電子相関の取り込み)：**基底状態および低い励起状態の電子状態理論の発展には特に目覚しいものがある。大きくない分子については、すでに化学的精度 (誤差の絶対値が数 kcal/mol 以内) が実現されている。ある種の完成点に到達したと言ってもよい。

**相対論効果 (多電子相対論, スピン軌道相互作用)：**最近では、4成分のスピンールを直接取り扱う多電子相対論の発展が目覚しい。従来は内殻電子や項間交差でのみ相対論的效果は大きいと暗に仮定されてきたが、原子価領域の電子状態についても一般的に相対論的效果が小さくないことが平尾らにより報告され、研究者にショックを与えている。

**大規模化 (空間分割法, FMO 法, ONIOM 等)：**タンパクなどの分子空間を複数に分割し、それぞれで計算された電子状態を繋ぎ合わせる方法 (FMO 法) や、化学的に重要な部分は高精度で、それ以外は近似の粗い方法で計算し、全体を整合的に取り扱う方法

(ONIOM法)などが典型的な例で、生体関連分子の研究に覇を競っている。

**密度汎関数法 (DFT)** : Kohn らが示した存在定理は時を経て、汎用性が高く計算が簡単で大きな分子にも適用でき、かつ精度がかなり高い方法論として実装されるに至った。しかし、汎関数の作成原理は十分分かっておらず、対症療法的に改良が続けられている。

**Stochastic な方法 (Monte Carlo, Feynman-Kaz 等)** : 超流動液体ヘリウム中の化学反応の計算などで成功を収めている。

**高振動励起状態とカオス** : 分子の高振動励起状態は、化学反応の統計性の根源と考えられ、高振動励起状態を観測する努力が1990年代の初頭まで盛んに続けられた。比較的小さい多原子分子の分光学的研究から、分子のエネルギー準位の複雑さの根源が、非調和結合によるものであることが具体的に示され、古典力学におけるカオスとの対応が注目された。それは、非調和結合を持つ結合振動子が、古典力学においてカオスを発現するためである。古典力学がカオスを示すエネルギー領域において、対応する量子系が如何に振舞うかを調べる量子カオスと呼ばれる分野の研究は、化学反応の統計理論の基礎を与えるものとして注目された。このように分子分光學分子内エネルギー移動や分子の高振動励起状態は、分子の決定論的動力学と統計力学的振舞いのせめぎ合いの現場である。どのようにしてカオスが量子化されるのかというインシュタイン以来の根本的な問題に対して理論的な挑戦が続けられている。

**非断熱遷移の理論と BO 近似の再検討** : 古くは Landau-Zener の理論がその主役であったが、中村らによって重大な改良が加えられ、精度と適用限界が一新された。

**フェムト秒超高速動力学と波束動力学、およびその観測** : ピコ秒からフェムト秒領域のバルスレーザー光が分子の動的過程の追跡に使

われるようになり、ポンプ・プローブ法による分子内の核の位置の変化や、光電子の角度分布の時間変化から、電子状態を経由して進行する化学過程が実時間で観測できるようになった。この方向での仕事は、Zewail のノーベル賞の受賞によって象徴される。理論においても、フェムト秒領域の時間スケールで観測される現象を解き明かすための努力が続けられた。

**Coherent 反応制御** : レーザー化学への対応という点で、理論化学が果たした大きな役割の中に、化学反応の量子制御の指導原理(指針)を何種類も提案することができたことがある。

**液体構造と動力学、分光学的観測** : 溶液の研究は、多体効果と大振幅の揺らぎを如何に力学的に構成分子の個性を失わずに記述できるかという点にかかっている。特に水分子は、最も普遍的な液体でありながら、極めて例外的な性質を持つ重要な研究対象である。

**溶媒効果と溶液中の反応 (RISM, シミュレーション)** : 溶媒効果を分子の電子状態に繰り込み、化学反応の自由エネルギー面を構成するという一般的手法を加藤らが開発した。

**タンパク、生体関連分子の動力学、モデル、シミュレーション** : タンパクなどに適切なポテンシャルを仮定して、古典力学動力学によるシミュレーションを行う研究は、すでに相当古くから行なわれている。最近では、DNA やタンパクに対して、気相ダイナミクスやクラスター研究などで発展した分光学的手法が使われるようになってきており、格段の情報量が蓄積されつつある。

**極値探索問題 (タンパクの折れたたみ問題等)** : この10年近く、タンパク等の折れたたみや最安定構造の探索のアルゴリズムの開発に多大のエネルギーが注がれてきた。

## 2. 有機化学

### 有機化学と合成化学

過去 10 年間における有機化学に関する日本化学会春季年会での発表件数、ならびに基礎化学・有機化学における科研費採択研究内訳を図 3, 4 に示す。図 3 から、有機化学において過去 10 年間研究分野としては大きな変化は見られないことが分かり、図 4 は有機化学の活力にあふれる分野の研究動向を如実に表している。有機化学と不可分な合成化学においては 1995 年から 1997 年の 3 年間に科研費に採択された研究課題の題目に使われた言葉のトップ 3 は、(1)不斉、(2)触媒、(3)錯体である (図 5)。1998 年から 1999 年にかけては「不斉」が研究課題名のトップ 3 から脱落し、代わりに「金属」が上位に上がってきた。

**不斉触媒反応の進歩：**2001 年のノーベル化学賞は、触媒的不斉酸化反応の B. Sharpless, 不斉触媒水素化反応の野依および W.S. Knowles が受賞したことはあまりにも有名である。Sharpless 酸化 (不斉エポキシ化) の発展には香月の貢献が大きいことも世界的によく知られている。

**クロスカップリング反応：**もの作りのあり方を変えた遷移金属触媒反応であり、日本人研究者の貢献が顕著で、次期ノーベル賞の呼び声も高い。パラジウム触媒を用いたクロスカップリングは 70 年代に日本を中心に発展し、Corriu, 玉尾, 熊田らのマグネシウムを用いたクロスカップリングをスタートに、根岸ら (亜鉛, アルミニウム, ジルコニウム), 小杉, Stille ら (スズ), 鈴木, 宮浦ら (ホウ素), 檜山ら (ケイ素) などが貢献した。「金属」および「触媒」のキーワードから、この分野の日本人以外のノーベル賞候補として世界的に名前が挙がっている研究者はカナダの Heck である。パラジウム触媒を用いた

Heck 反応は有機合成のひとつの重要なツールとなっている。世界的に利用されているもうひとつの「金属触媒」反応は、銅触媒を用いて芳香族環にアルキニル基を結合させる菌頭カップリングであろう。また、四塩化チタンを用いる向山不斉アルドール反応も世界に誇る人名反応であり、エナミンを経由する不斉アルドール反応も含め今後が期待されている。

**ケイ素化学：**ケイ素-ケイ素三重結合やトリシラアレン、含ケイ素芳香族化合物など新しい結合様式を持つケイ素化合物群が相次いで日本で合成された。ケイ素化合物の機能性材料への応用を目指した研究として、光学活性ポリシラン、電子輸送性材料シロール、高発光性有機材料の創製が日本の誇るケイ素化学として挙げられる。

**オレフィンメタセシス：**不斉触媒反応を含め、さらにはジアミノカルベン配位子を有する第 2 世代の Grubbs 触媒が開発され、広く使用されるようになった。本反応は天然有機化合物の全合成にも活用されている。

**新しい反応場：**超臨界二酸化炭素、水、イオン液体といった、従来の有機溶媒とは異なる反応場での反応研究が始められている。2000 年以降、「環境」や「水」という言葉が研究課題の題目に登場し始め、全体のキーワードでは「環境」が 2003 年以降上位 12 位以内に入ってきている。

**構造有機化学：**外部刺激により分子の構造を変化させる化合物としてフォトクロミック分子が注目され、光スイッチングが実現している。分子認識関連では、大きなゲスト分子としてフラレン類の包接が多く報告されている。また、反応容器としての分子カプセルの研究でも成果が上がっている。特異な構造を有する分子の合成として、フラレン内部への水素分子の内包など、フラレンやカーボンナノチューブを新しい素材とした反応が進

展した。

**反応有機化学と天然物合成：**反応有機化学の分野で、C-H結合の活性化に顕著な進展が見られた。基本的には有機遷移金属化学の分野での貢献であるが、ルテニウム触媒の存在下、アシルベンゼンとビニルシランとの縮合反応は特記すべき成果である。天然物合成では生物活性の顕著な海洋天然物シガトキシン、ノルゾアンタミンや抗がん剤タキソールの完成に対する評価が高い。有機合成反応のなかでより有用性を検証することのできる分野として、また反応上必要となる保護基の発展を促す実験例として着実に機能している。

**有機工業材料：**有機工業材料の分野では、1995年から1996年頃に申請された研究題目の言葉として最も使われていたのが「光」である。最近では光に関する言葉の集合体と見なすことができ、実際の研究テーマとしては、「ナノ発光体」、「蛍光」、「光電変換」、「光環化」、「光触媒」、「非線形光学特性」、「光メモリ」、「光励起型電子移動」、「光駆動型」など多岐にわたる。2003年以後は、研究テーマとして「光応答」、「光記録材料」、「光捕集機能」などが新しく出てきた。

### 3. 無機化学

#### 錯体一般

近年、電子・プロトン移動あるいは溶液ダイナミクス等の研究が関連する他の新しい主題の方に引き寄せられ、研究者が固体を取り扱う錯体物性や配位空間の化学にシフトしている傾向がある(図6, 7)。この傾向は、当該分野における世界的な研究の流れを受けて、研究者がより応用的な視点(触媒、材料への応用)で錯体化学を展開し始めていることも後押ししていると考えられる。ここ数年、光や磁気物性に関する理論研究が活発に行われていることも見逃してはならない。特に、分光学による錯体の電子状態の解析は、

磁性開発に使われるなど現在の物性研究の基礎を支えている。錯体の構造研究を基盤とした物性研究や配位空間の化学など、凝縮系の化学が急速に進展しているのに対して、錯体化学分野での反応研究は欧米に比べて手薄になっている。つまり、錯体の反応に関する研究は、電子移動反応、光反応、小分子の活性化(生物無機化学)などの限られた分野で活発な研究が見られるが、配位子反応に関しては、錯体化学よりはむしろ有機金属化学、有機化学の分野で新しい展開がなされている。

#### 集積型金属錯体、超分子化学

(1) **規則的な無限構造を持つ金属錯体：**1次元から3次元までの規則的な無限構造を持つ金属錯体に関する研究はここ10年間非常に注目を集めている。このような金属錯体を合成する方法論が確立してきたのに伴い、金属錯体の構造をより精密に制御できるようになってきている。特に細孔を持つ錯体は興味深く、細孔内部にゲスト分子を取り込むことで、特異な反応の開発、特異な物性の観測、不安定中間体の捕捉など多くの成果が上がっている。これらの成果を基盤に、近年国内において、外部刺激などに応答する動的構造変化を示す金属錯体の研究が活発化しており、関連分野において世界的に見ても高いレベルで先駆的な貢献を果たしていると言える。

(2) **メソポーラス有機シリカの開発：**より大きなメソ孔(2-50 nm程度)の細孔径を持つメソポーラスシリカが開発されてきており、さらに有機分子を組成に持つメソポーラス有機シリカに注目が集まっている。

(3) **自己集合性金属錯体：**遷移金属イオンと複数の配位部位を持つ有機配位子との可逆的な結合を利用した自己集合によって、種々の金属錯体が合成されてきている。特筆すべき点は、これらの錯体は一義的な構造を持つこ

とであり、精密な設計、構造と物性の相関が達成されてきていることである。さらに近年では、中空構造を持つ金属錯体を利用することで、錯体内部での特異な反応や、バルクの溶媒中では進行しない反応が開発されてきている。

(4) **金属ナノ粒子**：ナノサイズの大きさを持つ金属原子のクラスターは、半導体や発光、触媒活性などの性質を示し、基礎科学から応用的利用まで多岐にわたり興味深い物質であり、国内外で広く研究が行われている。この研究において最も重要な項目の一つは粒子構造の制御である。金属ナノ粒子の物性は、その粒子の大きさに強く依存することがわかってきており、大きさを制御して調製しようとする試みとともに、通常は凝集しやすいナノ粒子の表面を修飾することで調製した粒子を安定化しようとする検討が行われてきている。金属ナノ粒子を表面に配列させて膜を作る研究や、表面を利用して水素を吸蔵する研究など、幅広い応用的研究も進められてきており、日本の研究は世界的にも高い水準にある。

#### 生物無機化学

(1) **金属蛋白質の構造と機能の解明、およびその応用**：金属蛋白質の機能解明ならびに金属蛋白質の機能変化がかなり進んでいる。電子移動や酸化ならびに加水分解酵素に加えて、水素やアンモニアを生成するヒドロゲナーゼやニトロゲナーゼ、ならびに酸素発生を行う光合成系Ⅱが注目されている。それらの知見は、金属活性中心の低分子モデル金属錯体の合成に注ぎ込まれており、そのレベルは世界的に見ても非常に高い。

(2) **金属イオンの動的ネットワーク解析および医学・薬学への応用**：金属イオンの作用機構に関して、細胞全体を対象に追究できるようになってきている。これらは生命維持と同

時に様々な疾患に関連する。例えば銅イオンは、狂牛病のプリオン蛋白質や、アルツハイマー症候群のアミロイド前駆体蛋白質との関係が注目され、また白金錯体は抗癌剤として、亜鉛やバナジウム錯体はⅡ型糖尿病治療薬として、国内外で活発に開発されている。

(3) **イメージングとバイオセンサー**：生体を直接観察する方法として、蛍光プローブによる亜鉛のイメージングの研究は非常に脚光を浴びている。常磁性ランタノイド錯体などを用いたMRIや、ラジカルや遷移金属イオンを検出するESRも生体内のイメージングに利用できる。これらの国内の研究水準は非常に高い。

#### 4. 機能物質化学

##### 無機機能物質化学

**合成法**：コンビナトリアル固体化学、有機物質を活用した無機固体合成（金属アルコキシドを利用したゾル-ゲル法に代表されるように、有機基あるいは有機分子、イオン、集合体を活用した無機固体の合成）が盛んに研究されている。

**物質**：**新超伝導体**：日本を中心として、層状やかご状の化合物を中心に新規超伝導体の開発研究が進められている。新しい対称性を持つ超伝導体の開発は基礎学問として重要であり、化学、物理の両面で精力的に研究されている。**酸化物スピネレクトロニクス**：巨大磁気抵抗、マルチフェロイック材料に関する研究が国内外で基礎・応用の両面で精力的に行われている。**ナノ磁性体**：1990年代に単分子磁石という現象が発見された。この現象は、非平衡状態の磁性化学という新たなフィールドを提供するだけでなく、その量子現象を利用した量子コンピューティングの可能性が指摘されるなど、現在でも非常に興味を集めている。**3次非線形光学材料**：古くから主にポリシランやポリアセチレンなどの有

機ポリマー，すなわちバンド絶縁体やパイエルス絶縁体を対象にした研究が行われてきたが，最近 Mott 絶縁体に属するハロゲン架橋ニッケル錯体において，優れた3次非線形光学効果が報告された。**光触媒**：1970年代初頭に酸化チタン光電極による水分解反応が報告されて以来，酸化チタンは多くの研究者の興味を引き続けてきた。研究を大別すると，光エネルギーの変換方法利用と，水中や大気中の有害物質の無毒方法の利用に分類できる。**無機イオン伝導体**：高エネルギー密度電池への応用の可能性から，リチウムイオン伝導性の高い材料が注目されている。**フォトニクスナノ材料**：光と透明材料との相互作用としてはフォトクロミックガラス，感光性結晶化ガラス，多色性ガラスなどがよく知られている。さらに光ファイバー中のブラッググレーティングの書き込みや，次世代の記録方法として期待されるフォトケミカルホールバーニングなども盛んに研究されている。**透明導電性酸化物**：液晶ディスプレイ，有機ELや太陽電池の透明電極として広く使われている。**バイオミメティック材料**：近年注目されている研究分野で，生物が生体の内外で無機鉱物に富む組織を作る作用をいう。**無機生体材料**：セラミックスの中で生体親和性に優れているハイドロキシアパタイトが，高齢化社会を担うバイオマテリアルとして注目され，精力的に研究が進められている。**機能的ダイヤモンド**：大型ダイヤモンドの合成，ボロンを含むp型半導体ダイヤモンドにおける超伝導，新規n型半導体ダイヤモンド作成のためのドーピング法の開発，ダイヤモンド表面の反応・物性，ダイヤモンドを用いたデバイス開発などに大きな進展がある。**金属蛋白質の構造と機能およびその応用**：近年，金属酵素の単結晶を基質の溶解した溶液に低温で浸すことにより，基質結合型の構造がX線回折法により解析されるようになった。

た。また，金属酵素の中心金属周りのアミノ酸変異体を合成することも頻繁に行われ，酵素反応の機構解明や機能改変に役立っている。最近では，水素発生に関わるヒドロゲナーゼやアンモニアを合成するニトロゲナーゼなどの鉄硫黄系の活性中心構造を有する酵素が以前に増して注目されている。

**金属イオンの動的ネットワーク解析**：例えば鉄イオンは，土中の菌体等により産生されたシデロフォアと呼ばれる天然のキレート剤によって捕捉され，菌体の膜蛋白質チャネルに認識されて，そこから取り込まれることが知られている。その後，蛋白質のネットワークにより，輸送，貯蔵，ならびに活性中心へ挿入されて機能発現する。このような金属の代謝過程が生命維持や様々な疾患に関わっていることが分かってきている。

**医薬品の開発**：抗癌剤としてシスプラチンのような白金錯体の研究も以前から行われている。最近，白金錯体の抗癌活性をチップで簡単に測定して作用機構を調べる手法が開発された。他には，糖尿病の治療薬のために，インスリン効果のある経口投与剤として亜鉛やバナジウム錯体などが注目されている。

**イメージングとバイオセンサー**：生物無機化学の項に記述。

### 有機機能物質化学

**物質**：基礎科学の分野において，過去10年間で最も活発に研究されたのは，フラーレンならびにその誘導体およびカーボンナノチューブであろう。科研費の申請書類に記載されるキーワードにおいても，これら二つは突出している。フラーレンは単体で用いられる他，多くの誘導体が合成されており，広大なサイエンスの領域を形成しつつある。フラーレンの高分子化による高温強磁性体や超硬物質（ダイヤモンドよりも硬い）などの真偽の定かでない報告がある。日本で1950年

代に開始され、世界の最高レベルでの研究が継続されているのが、**有機導体**関連の化学である。有機超伝導体の開発に伴い、基礎学問として重要な現象の発見があいついでいる。フェルミ面観測の新たな方法となる角度依存量子振動現象、スピン3角幾何構造に伴うスピン液体状態、d波超伝導、超迅速光誘起金属-絶縁体転移、サイリスタ現象、整流作用などである。また、超伝導体の開発途上にバルク及び薄膜として、金属、絶縁体、磁性体、スイッチ・メモリー材料、EL、FETの素材、有機強誘電体、透明金属薄膜、非線形光学材料、クロミック材料、蓄電材料、熱電材料などが開発された。20世紀初めに発見された**イオン液体**の研究が、1990年代における安定なイオン液体の発見に伴い、グリーン化学（有機溶媒代替）、電解液、イオン伝導体などの面で、急激に進展した。他に特筆すべき物質としては、**機能性色素**（EL材料として有望なりん光色素、太陽電池用増感色素）、電子材料として着目されている**DNA**（分子コンピュータとしての応用も考えられているが、DNA中の電子伝導は真偽が定かでない）、**有機磁性材料**（単分子磁石の他スピンクロスオーバー錯体などの無機・有機複合を含む）、**有機EL材料**、**有機FET材料**、**単分子素子材料**などがある。

**材料化**：現時点で応用に向けての材料化は主に薄膜化を意味する。蒸着法やMOCVD等のdry法だけでなく、スピコート法、LB法などwet法も重要である。特に、2000年に米クリントン政権が国家ナノテクノロジー戦略を発表して以降、**分子エレクトロニクスデバイス**の構築に向けた研究が盛んに行われている。基板との共有結合を有するSAMsも盛んに研究されている。LB膜よりも機械的強度が高いため、修飾電極等にも用いることができる。また、1分子伝導のモデル系として、STMを用いた基板-分子-STMチツ

ブ間の伝導機構の研究が進められている。最近、本来の意味での自己組織化（self-organization）も注目を浴びている。散逸構造形成を利用することで薄膜法では達成できない2次元面内のパターンニングに有効であり、今後の発展が期待される。これらの分野は旧通産省のプロジェクトなどを通じて、1980年代はLB膜研究を中心に我が国が比較的リードしていたが、バブル崩壊とともに企業での研究が縮小した。現在米国は国を挙げてのサポートにより当該分野で世界をリードしているが、それに伴って研究競争が熾烈になり、データ捏造事件なども起きている。中国や韓国においても、ナノテクノロジー研究が奨励され、韓国においてはナノバブルと呼ばれるほどの現象が起きている。2006年の釜山におけるAsiaNANO会議では550件を超える発表が行われ、それらの内訳は図8の通りであり、アジア地域のLB膜関係研究者におけるナノテクノロジー研究の活性化が見て取れる。

**システム化・機能開拓**：材料化においては、分子間相互作用に基づく機能発現が鍵となる。結晶化にともない周期構造が形成され、電子伝導や磁気秩序の発現が生じる。弱い分子間相互作用に伴う狭いバンドの形成が、微小刺激（温度、圧、光、磁場など）にたいして巨大で迅速な応答・相転移を示す起因の一つである。当該分野は我が国がリードする分野でもある。1分子伝導や単分子磁石等も近年注目されている。分子によるスイッチング現象も多く報告されている。光による2重結合のシストランス異性化反応や光2量化反応などを用いた系が主な研究対象である。また、カテナンやロタキサンにおける分子のコンフォメーション変化を利用したLB膜のスイッチング現象が報告されている。共有結合を形成することなく多種類の分子を集合化し、高度な構造と機能を発現させる超分子化

学も急速に発展しており、数十の分子からなる系が報告されるなど、さまざまな機能の開拓が進められている。また、分子集合体からなるナノチューブやナノワイヤ、メカニカルな機能を持つ分子（分子ピンセット、分子モーターなど）の研究も進められている。

## 5. 生体関連化学・生物分子科学

### 生体関連化学

#### 生体関連化学・構造生物化学

生体関連化学と構造生物化学は、生物の細胞内で起こる種々の現象やこの現象を誘起する細胞外との情報伝達などを研究する学問である。生物全体の多様性に由来して、個々の研究のスペクトルは幅ひろいが、原理的な共通性は「生命自体の本質」、「生命発生の過程」、「生物進化の過程」を分子科学的観点から解明する目的にある。過去10年間の研究動向における、代表的な関心事項(研究対象)は、以下のように纏めることが出来る。

(1)**DNA複製**：原核生物や真核生物中の染色体DNAの複製過程に参与するDNA replicaseは、DNA polymeraseとsliding-clampタンパク質との複合体で構成されるが、その複合体の構成にはclamp-loaderタンパク質が介在している。また、ミトコンドリアDNAの複製過程は染色体DNAの複製過程とは独立した過程であり、異なるDNA replicaseが参与することが判明してきている。

(2)**DNA損傷修復**：染色体DNA中に導入された各種DNA損傷の修復は、多くの場合染色体DNAの複製過程、あるいは、細胞周期中のDNA損傷のチェックポイント過程と共同的に進行する。DNA損傷には複数種の欠陥導入があり、それぞれ異なった機構で修復がなされる。修復過程自体に参与するタンパク質集合体の構造化学的な機能解析の研究も進められている。

(3)**DNAの分配**：DNA複製過程に引き続く

ゲノムDNAの分配過程は全生物種に共通する機構である。その分配過程ではゲノムDNAのみでなく、プラスミドDNAも分配がなされる。さらには、ミトコンドリアDNAの複製、分配、分配後のミトコンドリア全体の構築も、細胞分裂の周期に同期して進行する。さらに、ゲノムDNAの染色体形成の過程におけるヒストンタンパク質とDNAとの結合により誘起されるスーパーコイル構造の形成を含め、DNAの分配過程に参与するDNA結合タンパク質とDNA鎖間の相互作用の分子科学的なメカニズムの解明が進められている。

(4)**RNAの機能**：種々の生物において“small, noncoding RNA (ncRNA)”と称される転写・翻訳過程において、制御因子としての機能を有するRNA分子が存在している。“cis-Encoded Antisense RNA”ならびに“trans-Encoded Antisense RNA”は、転写過程のRNA鎖伸長機構、転写されたRNAのプロセシングあるいは塩基の修飾、RNAの安定性の維持機構に参与している。種々の“small, noncoding RNA (ncRNA)”中、その医学的治療への利用から最も高く着目されているのは真核生物中で機能する“cis-Encoded Antisense RNA”の一種“Small interfering RNA (siRNA)”である。

(5)**転写制御・スプライシング**：pre-messengerRNAのスプライシング機構、特に、pre-messengerRNAのアルタネイティブ・スプライシング機構は、高等真核生物中におけるタンパク質産生、特に、組織依存的なタンパク質のスプライシング異性体産生を可能としている。また、タンパク質のスプライシング異性体産生は種々の疾患の要因となることが判明している。その観点から代表的な系において、アルタネイティブ・スプライシング機構における選択に参与するタンパク質群の役割やその調節過程が研究されてき

た。

(6)翻訳・タンパク質折りたたみ：転写されたRNAの情報に従ってペプチド鎖へと翻訳する過程は全ての生物が共通して有する機能であり、この翻訳機構に関与するリボソームを構成するタンパク質群、ならびに、それらタンパク質が関与する素過程（開始コドンの特定とメチオニル-tRNAの割付、ペプチド鎖の伸長、終止コドンの検出と伸長反応の停止、RNA分子取り外しの各素過程）の概要は解明されてきている。翻訳されたペプチド鎖がタンパク質の3次構造を形成するタンパク質折りたたみ過程は古くから興味を持たれている分野である。タンパク質折りたたみ過程はタンパク質の機能発現に不可欠な過程であり、組み換え発現技術の利用拡大とともにその分子科学的なプロセスの解明が進められてきている。加えて、小胞体（ER）内における信号伝達系に関与する膜貫通型のタンパク質群、分泌型タンパク質群のfolding、また、そのfoldingに先立つ翻訳後修飾の役割も広範な興味を持たれている分野である。日本においても、これらの基礎的分野に貢献する多くの研究がなされている。

医学的な応用を目的として、次の六つのカテゴリーの研究が活発に進められている。

(7)信号伝達・細胞膜結合タンパク質、(8)内因性疾患関連タンパク質、(9)腫瘍発生に関連するタンパク質、(10)分化過程に関連するタンパク質、(11)物質輸送過程に関連するタンパク質、(12)翻訳後修飾によるタンパク質の機能・活性制御。

### 生物分子科学

**生物活性天然有機化合物の探索**：1984年にイギリス化学会のNatural Products Reportが出版され、海洋天然物に対する関心が大いに高まったことに注視したい。2003年までに引用された各地域の海洋天然物の数(図9)

を見ても、日本の貢献度がうかがえる。しかしながら、2004年では中国での研究が多くなっていることも興味がある。2003年、NSFではアメリカUCSDのFenicalグループの深海放線菌の代謝産物研究に力を入れている。

**生物活性天然物の化学合成**：研究意義は、(1)複雑な構造への挑戦としての合成（その時代における反応の利便度を示す評価基準）、(2)天然物の構造決定、(3)ファーマコアの解明と物質供給、(4)生物機能解明のためのプローブ合成、の4点に集約される。(3)に関して、1985年に日本で発見されたハリコンドリンBと名付けられた物質は、タキソールに耐性のある乳がんの患者に提供される日も近い。(4)における特記すべき進展は、アクチンの重合阻害物質の機能解明や、タキソールの誘導体合成である。

**生合成研究**：(1)遺伝子操作で各合成酵素を帰属することができ、中間に存在する物質群を明らかにできるようになったこと、(2)テルペン生合成に非メバロン酸経路の存在が出てきたこと、(3)質量分析など新しい分析手段の出現、により近年注目が集まっている。(1)について、日本では大村らのエバーメクチン合成や、海老塚らのトリテルペン研究が挙げられる。(2)については、フランスのRohmerらの研究(1999年、総説)を発端にして、Cane、瀬戸、葛山らの研究が特記できる。

**生体機能解明**：2003年、パリトキシンが $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATPaseに作用してイオンチャネルを形成し、神経細胞の外部から $\text{Na}^+$ イオンを内側へ流入させるために異常な毒性を示すことが明らかになった。このことが、一般にATPaseにはイオンチャネル構造があるという事実を定着させた。

**ケミカルバイオロジー**：アメリカでは多くの化学教室がDepartment of Chemistry and Chemical Biologyとなっている。日本からの多くの博士研究員も研鑽を積んでおり、そ

の流れが日本でも見受けられるようになってきている。下村, Ward, TsienらによるオワンクラゲのGFP研究はケミカルバイオロジーにおける分子標識, 検出手段の一つとして広範に使用されるようになった。日本の発光生物研究が広く認知された好例である。

## 6. 高分子化学

**高分子物性:** 表面, 界面, 薄膜と関連して, ぬれ, 超撥水, 超親水性など高分子と水の界面における物性や, あるいは低摩擦, 低摩擦, 高潤滑などの研究が近年盛んに展開されている。高分子のナノ物性 (高分子1本鎖の力学・電気物性測定, 高分子表面の微小領域の摩擦, 超薄膜のガラス転移温度など), ゲルの物性 (体積相転移, 超低摩擦, 高膨潤, 高伸長性など), 高分子の光学特性 (光学揺らぎの抑制などによる低損失光ファイバーなど), 高分子の電界発光 (フレキシブルなディスプレイへの応用など), 高分子の強誘電性は, 様々な有機デバイスの発展を支える研究である。

**機能性高分子 (生体関連高分子・生体材料を含む):** 機能性高分子を用いた再生医療の分野での足場材料, 細胞や組織の培養・分離のための基材の開発, または薬剤担体やDDSの研究が活発に進められており, 有用性を示す成果が多数報告されている。これまでバイオマテリアルの研究は, 合成系の高分子材料が主流であったが, この10年間ではゼラチン, ポリ乳酸などの生分解性高分子に関する研究例が増加している。またそれらへの機能付与といった観点から分子レベルで精密設計された材料は重要であり, 今後もこの領域の重要性は増すと考えられる。また, 生体関連高分子, 機能性高分子ともに異分野との境界領域の研究が急速に進展しており, 境界領域研究の域を超えて融合研究のレベルにまで到達しつつある。

**機能性高分子 (電子・光学材料を中心に):** 機能性を目的とした様々な高分子が合成され, 多くの機能性分野に応用展開されている。特にIT産業の発展は高分子材料が寄与するところが大きい。その中で特筆すべきものとして, 導電性高分子をベースにした高分子バッテリー, シリコンと匹敵する特性の高分子FET, 高分子EL材料などが挙げられる。いずれも材料の分子設計と高分子の分子鎖凝集構造制御が機能性の向上に大きな役割を果たしている。また, 燃料電池分野でも高分子はセパレーター膜をはじめとして重要性が認識され, 特に構造・物性と駆動特性の関係が基礎的なレベルから検討されている。一方, 光学材料でも高分子材料の寄与は著しく大きい。インターネットの普及に関しては, 高分子光ファイバーが重要な役割を果たしている。高分子の不純物の減少とGI型の光ファイバーの出現により光ファイバーの性能は著しく向上している。

**高分子工学・複合材料:** 当該分野の中心課題は, 様々なレベルの相構造や界面構造を如何に制御して所期の性能を得るかである。そのために, 構造制御手法に関するものに研究者の関心が集中している。有機-無機ハイブリッドは日本発の材料で, コアペーパーに占める日本の割合が高い, 継続的な発展が期待できる領域である。実用レベルに達している材料もあるが, さらに高性能化を目指した研究が進んでいる。

**繊維材料:** 高強度繊維の開発は, 新規材料, 汎用材料ともに継続的に進められている。石油燃料の高騰が起因となり航空機機体の軽量化が図られ, 日本における研究により開発された高強度で軽量の繊維に変えられつつある。また, 繊維材料の高次構造解析に関して, 高輝度放射光, NMRなどの解析技術に伴い著しい進展がみられた。繊維材料特有の1軸配向構造が構造解析に有利に作用してい

る。さらに、レオロジーや配向結晶化など分子の動的な振舞いに関わる解析が、一軸伸長流を主な対象として理論・実験の両面から進められた。

**ゴム材料：**ゴム材料の1次構造から異種ポリマーやフィラーを含む混合物の高次構造の制御、および生成物の精密キャラクタリゼーションが検討されてきた。最近の解析手法の発展により、架橋点の構造およびフィラー網目構造が精緻に解析されるようになり、アニオン重合や延伸結晶化の in-situ 解析も可能になった。我が国の研究による特筆すべき成果として、過去に欧米で行われた架橋点の構造の解析が誤りであることやゴム弾性論の基礎となるアフィン変形の破綻が挙げられる。さらに、我が国から提案された可動架橋構造や可逆的架橋構造は顕著な成果である。

## 7. 環境化学

**地球温暖化：**地球温暖化ガスによるポジティブフィードバックと対流圏オゾンやエアロゾルなどによるネガティブフィードバックがあるとされる。しかしながら、温暖化ガスの放射強制力の積算で、現在観測されている地球温暖化の速度と程度は全て説明できない。これについては、水蒸気、雲量などの効果、大気・海洋相互作用の物理的側面で、気候モデルによる解明が進められてきている。本報告では、この点について深く言及せず、化学的な側面について述べる。地球温暖化ガスとは、いわゆる京都議定書に記された  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  およびクロロフロロカーボン (CFCs)、 $\text{SF}_6$  を指している。前3化学種については自然界に生成源 (ソース) や消滅源 (シンク) を持つ物質で、人為活動との区別が難しいため、後の2グループ(次項で説明)のように人為起源の物質に比べて理解が進んでいない。 $\text{CO}_2$  については、国内外で研究者が最も多く、1950年代からのバイオニア研

究の歴史から、増加の主たる要因が化石燃料の燃焼と森林伐採などの土地利用変化であることが分かっている。一方で、シンクが海洋と陸域、さらにどの地域であるかについてはいまだに十分解明されていない。 $\text{CH}_4$  については、1980年代から開始されたが、過去10年間で研究者が増えてきている。しかしながら、 $\text{CO}_2$  に比べて多様なソース・シンクが存在することから、いまだに不明な点が数多く残されている。 $\text{N}_2\text{O}$  については次項で述べる。

**オゾン層破壊：**1960年代における超音速航空機エンジン排気によるオゾン層破壊、1970年代におけるCFCsによる成層圏オゾン破壊問題、さらに、1980年代には我が国の南極大陸におけるオゾンホールが発見がなされた。1990年代からの過去10年間については、観測が進み、衛星や地上からの遠隔観測とゾンデによる観測などから準実時間で高精度の計測が行われている。前述のCFCsなど自然界にソースやシンクを持たない人為起源のみの物質については、そのソースは製造であることが統計的に把握されている。対流圏にシンクを持たず成層圏に輸送され、オゾン層を破壊することから、成層圏におけるこれらの気体種はモントリオール議定書で規制されているにも関わらず、その寿命の長さから、一部についてはいまだ濃度上昇が続いていることが明らかにされている。 $\text{NO}_x$  については、もともとオゾン層の消長に寄与する $\text{N}_2\text{O}$ の成層圏における $\text{NO}$ の前駆物質としての役割が大きく、自然界での循環が明らかでない上、人為ソースが工業・農業の多種に及ぶため、いまだに不明な点が多い。

**酸性雨：**酸性雨の原因が塩化物イオン、硫酸イオン、硝酸イオンによることが明らかにされ、ローカルにはゴミ焼却施設の廃プラスチックなどの廃棄物燃焼によることが確認された。大陸スケールではやはり化石燃料の燃

焼などに伴う NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> の長距離輸送が原因であることが明らかにされてきている。過去 10 年では次項に示すエアロゾルの化学が、酸性雨との関連で重要と考えられるようになった。

**エアロゾル**：東アジアからの酸性物質輸送は、従来酸性雨に関連した観点から研究されてきていた。これらは近年、ガスとエアロゾルの長距離輸送という観点で研究されるようになった。酸性ガスの一部は大気中で酸化され、エアロゾルに組み込まれていくことが明らかにされた。また、エアロゾルは酸性雨に加えて、温暖化のネガティブフィードバックとしての重要性が近年明らかになり、研究者の関心が高まった。エアロゾル粒子は様々な起源を持ち、その組成が多様であることに加え、大気中の物理・化学的過程により変化することから、不明な点が多い。先行した無機エアロゾルに次いで、有機エアロゾルについても研究され、海塩粒子の変質、鉍物粒子の組成、有機エアロゾルを構成する 3,000 種ほどの多様な有機化合物が検出されてきた。最近では、後述するように、サブミクロンサイズの大気粒状物質の人体影響が関心を集めているが、その起源などはまだ不明である。

**大気質 (対流圏オゾン)**：大気汚染としては 70 年代の光化学大気汚染問題が大きな転機となって、光化学大気汚染発生メカニズムに関する研究が開始され、国立環境研究所の光化学チャンバーを用いた集中的光化学実験などにより、そのメカニズムが解明された。過去 10 年間は、大気質として、対流圏オゾン濃度が 100 年前に比べて 2 倍以上になったことが明らかにされた。この増加の主たる原因はオゾン前駆物質である窒素酸化物、炭化水素や一酸化炭素などの人為活動による排出増加とされている。欧米では窒素酸化物の排出規制が功を奏して、対流圏オゾンの増加が頭打ちとなってきたのに対して、我が国を含め

た東アジア地域では、著しい経済発展の結果として多くのオゾン前駆物質が排出されていることから、現在でも対流圏オゾン濃度が増加していることが明らかにされた。

### 3 今後 10 年間で特に進展が見込まれる研究対象、アプローチ等及び推進すべき研究

#### 一般論

21 世紀において、生命現象など極めて複雑な系への化学からのアプローチが図られる一方、環境・エネルギー・高齢化・安全保障など重要な社会問題についても基礎・応用を基にした解決策が求められている。地球規模の物質循環から、情報通信、ライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料など全ての科学・技術の分野において、**電子・原子・分子レベルの物質変換**およびそれらの**ダイナミクス**がその原理となり、また駆動力となっている。

ここ数年、重点化政策 4 分野 [環境、情報通信 (IT)、ナノテクノロジー (NT)・材料、ライフサイエンス (バイオテクノロジー、BT)；環境を地球環境 (Terrestrial environment) とし、重点化 4 T 領域と呼ぶ] にまたがる技術の基盤となる基礎研究において、電子状態の変化と原子・分子ダイナミカルプロセスの理解が急速に進み、4 T 分野横断的な化学研究が展開されている。

これらの多くの研究は、一つの化学細目内に限定することはできず、化学細目間、化学分科間、あるいは科学分野間に亘る学際融合領域研究であり、一つの化学細目内での研究の深化と、他分野(ときには人文・社会科学)を巻き込んだ展開を必要とする。例えば、環境問題、エネルギー問題、医療問題などに深く関係した燃料電池、太陽電池、排ガス処理、光合成、不斉合成などでは、低環境負

荷、高耐久性、高効率、高選択性の触媒の開発が要求され、異種物質の接触する界面や接触点におけるエネルギー状態の理解、触媒作用の電子・原子・分子ダイナミクスの理解が要求されている。また、エネルギー移動や触媒作用は生命現象に深く関係しており、その理解も電子・原子・分子のダイナミクスの基礎研究が突破口となっている。省エネルギー、省資源、超微細デバイス、超高速デバイスなどの可能性を秘める分子素子やRRAM（電気抵抗変化の履歴現象を利用する不揮発性ランダムアクセスメモリー）は、その原理のナノダイナミクスの理解を得ることができれば、IT、環境、ライフサイエンス、エネルギー問題に革命的变化をもたらすであろう。

今後、新しい展開を化学の基礎と応用に求めるためには、4T分野横断的な新しい概念を導入する必要がある。ナノダイナミクス、物質多様性がキーワードの例である。そこには、原子、分子の時空間や位相制御に基づく反応、材料作成や機能発現、微小外場摂動による迅速巨大応答、準安定相・非平衡系・柔軟階層構造の構築による機能制御、生命現象など高度に複雑な巨大系や非平衡・複雑系でのダイナミック構造の観測と分子科学的原理解明などといった化学の新しいパラダイムがある。その根本にあるドライビングフォースは、新学問領域を開拓するチャレンジ的課題や、curiosity-drivenの課題設定である。以上は、学理指向からの課題設定であり、目的指向または社会的ニーズに基づいた課題設定は、機能物質化学に焦点を合わせ次章で述べる。以下に各化学分野の調査結果を記す。

## 1. 物理化学

### 界面化学

手法の開発：0-1 eV程度の低運動エネルギー、または1000 eV以上の高運動エネル

ギーの電子を用いる手法（光電子分光、軟X線吸収分光、電子エネルギー損失分光など）や、軟X線発光分光などの手法をベースとして埋もれた界面を観測する手法を確立することが界面研究に本質的な変革をもたらす。つまり、埋もれた界面の理解こそが実用界面の解明に直接役立つのであり、従来の薄膜系疑似界面では限界がある。さらに、不均一界面における局所電子構造の解明のため、分光手法の顕微鏡化や局所分光化、プローブ顕微鏡による単分子物性計測法を集中的に進める必要がある。界面物性解明の鍵を握る界面準位や、欠陥準位、不純物準位などの観測のための光電子分光の高エネルギー分解能化・高感度化を進め、究極の課題として“動作状態にあるエレクトロニクス素子の直接動作観察”を確立することが重要である。水蒸気分圧下、大気下、液中などの様々な環境下での界面電子構造の測定法（非真空環境下測定法）の確立や空準位をプローブする汎用的に利用できる測定法（空準位測定法）の確立も緊急性がある。

計算法・理論の開発：ファンデルワールス相互作用まで含めて吸着系・界面系を再現できる、実験とは完全に独立して第一原理計算により電子構造を計算できる手法の確立（分子系界面電子状態計算）や界面での電荷移動のダイナミクスの研究（界面電荷移動ダイナミクス）、さらに化学を土台としてメゾ～ナノスコピック理論の開発が重要事項である。

系の開発：分子系-金属界面、分子系-半導体界面、分子系-絶縁体界面、バイオ関連界面における相互作用の解明と制御をさらに広範囲に進展させることが必要である。特に、単分子と電極の接合界面（分子素子問題、インターフェイス問題）の解明と制御は重要である。

## 理論化学

超高励起状態や強レーザー場中の実験など断熱近似が意味を持たない領域の開拓が急速に進展しており、それに対応したBO近似の枠を打ち破る理論（**電子核同時動力学**）は重要課題である。極限状況下の分子動力学、つまり強レーザー場、超強磁場、高電圧の電極表面等の環境下に置かれた分子の動力学を解明する理論（**強い動的極限場の理論**）の開発は緊急に必要である。アト秒化学において、この時間スケールでは電子波束の観測が可能になり、さらに電子波動関数を制御することができるようになれば、現在のフェムト秒レベルの反応量子制御とは全く質的に異なる状況が出現する（**アト秒化学への理論的挑戦**）。ナノサイエンスは、原理や概念に基づいた設計という段階に早く入らなければならない。ナノスケールの電子動力学により多くの研究エネルギーを注ぐ必要がある（**ナノ化学への理論的対応**）。凝縮系・多体系の統計とダイナミクスでは、量子効果の考慮、特に実時間領域における量子効果を考慮する理論（**多体系量子効果理論**）が必要である。特に水素結合が重要な役割を果たしている生体関連分子での多体系量子効果理論は重要である。

## 2. 有機化学

### 有機化学と合成化学

グリーンケミストリーとも関連して、より一層高い活性とエナンチオ選択性を兼ね備えた水素化触媒の開拓や、タングステン触媒を用いて過酸化水素を利用する酸化反応や水素や過酸化水素の安価な製造法の確立が重要な課題である。ケミカルバイオロジー（化学生物学）の台頭に伴い、有機合成力の重要性がより認識されることとなり、地球規模での化合物ライブラリーの構築を目指した研究が活発になる。

**クロスカップリング反応**：クロスカップリン

グ反応における「ユニバーサル触媒」の開発や、有機金属化合物を用いることなくC-H結合などのユビキタス結合を触媒的に直接変換する一般的手法の開発が重要である。また安価でより利用価値の高い金属触媒の探索が重要課題として進展する。

**ケイ素化学**：機能性含ケイ素 $\pi$ 共役系化合物の創製は継続的に進める必要がある。

**オレフィンメタセシス**：有機金属触媒の開発において、環境負荷、希少金属の確保の視点に沿った戦略は不可欠である。

**C-H結合およびC-C結合活性化**：有機化学における新たな挑戦課題として、**C-H結合活性化**および**C-C結合活性化**がある。反応しにくい代表である両結合も、ロジウム錯体、ルテニウム錯体、チタン錯体、ジルコニウム錯体などを用いて選択的に反応させる研究が進展しつつあり、最適な系の探索が課題である。副生成物をできるだけ抑えた反応系の構築という考え方（“atom economy”）に沿った研究の展開が重要である。

**金属を用いない触媒反応**：すなわち酸触媒や塩基触媒などの研究がより重要となる。また、環境負荷の観点から「水」を反応場とする合成化学も重要課題で、グリーンケミストリーの考えは必須である。

**構造有機化学**：分子集合体（表面膜、薄膜、固体、結晶など）の新規機能の開発、特にカーボンナノチューブの研究、有機EL、有機FET、太陽電池を含めた光電変換素子などの研究は重要である。

**反応有機化学と天然物合成**：新反応の発見や天然物合成（サイエンスとしての存在意義を明確化し、社会の要請に答えねばならない）は常に重要な研究課題として存在する。

## 3. 無機化学

### 無機錯体化学

重要課題は、キーワードとして「ナノ」、

「バイオ」, 「光」である. また, **錯体の構造および反応**に関しては, 錯体の励起状態など短寿命化学種および動的配位空間などの複雑系の構造を X 線構造解析により明らかにすることが重要課題である. この研究は基礎科学における極めて大きな研究テーマで, 実際, この研究を遂行できる国は日本と米国ぐらいしかない. **集積型金属錯体**や**超分子化学**における重要課題は, **規則的な無限構造を持つ金属錯体**の開発であり, 「適度に堅牢な構造」を有し, 外部刺激に対して制御された構造の変換やバルクまたは局所部分の電子状態の変化を起こす「柔軟で動的な」性質をもつ系の探索である. また, **マイクロ孔, メソ孔材料**の開発も緊急性を持ち, 2 nm 以下の細孔を持つマイクロ孔材料, 2-50 nm のメソサイズの細孔を持つメソ孔材料を精密に構造制御して合成することは, エネルギー, 環境, 生体に関わる気体 (酸素, 窒素, 二酸化炭素, 水素, メタン等) やその他の物質の大量貯蔵, 低エネルギー分離など極めて重要な機能を提供する. 20 世紀の有機化学がバルクの溶液中での新規反応開発を基軸に大きな展開を示したように, 今後は**中空の自己集合性金属錯体内部での新規反応**開発が合成化学に大きく寄与する. また, この反応場を生化学的に展開することにより新しい学際融合分野を築き上げることが可能となる. **金属ナノ粒子**の研究においては, 精密に大きさと形状を制御して (有機物やカーボンナノチューブとの複合体では, 異方的な電子状態の制御やトポロジーの制御をも含む) 金属ナノ粒子を調製する手法の開発が最重要課題である.

#### 生物無機化学

重要課題は, **生体イメージング法の開発** (ランタノイドを用いた MRI, 蛍光プローブを用いた蛍光イメージングなど), **薬剤の開発** (II 型糖尿病のための亜鉛やバナジウム錯

体, BSE (狂牛病)・アルツハイマー症候群の治療薬など) であり, 後者では分子レベルでの病理の解明が必須となる. 金属酵素の機能を人工的に再現した金属錯体触媒の開発は, 様々なタイプの燃料電池の電極 (**生物燃料電池**, 例えばグルコース-空気生物燃料電池) としての研究課題として重要である. 金属蛋白質の機能を利用または人工的に再現した, 環境負荷の低い触媒やエネルギー変換材料の開発 (**エネルギー利用・高効率触媒分子の開発**) はエネルギー・触媒化学の応用として重要な課題であり, 酸素分子の還元反応を行う分子触媒, 窒素分子の還元とアミノ化反応触媒, 炭化水素の高効率資源化, 水素発生, 光エネルギーで駆動する分子触媒システム, 固体担持材料やナノ・マイクロリアクターなどとの組み合わせが重要である.

#### 4. 機能物質化学

##### 無機機能物質化学

**無機工業化学**における重要課題は, 作成手法として, (1)コンビナトリアル固体化学, (2)有機物質を活用した無機固体合成, 材料として, (3)バイオミメティック材料, (4)無機イオン伝導体, (5)フォトニクスナノ材料, (6)透明導電性酸化物, (7)無機生体材料, (8)新超伝導体, (9)スピニエレクトロニクス, デバイス作成・実装技術として, (10)光触媒技術, (11)ナノインプリント技術, (12)非線形光学効果を利用した超高速光デバイスの構築, (13)分子磁性クラスターを用いた分子メモリの開発がある.

##### 有機機能物質化学

**物質設計理論と物質開発**: 多種の複合分子間相互作用に基づく機能発現を可能とする分子設計理論や, 多分子系や動的な分子システムを対象とした新奇な機能性物質の創出に繋がる分子や分子集合体の設計理論の開発は基礎的な重要事項である. コンビナトリアルケミ

ストーリーによる物質・材料の開発, 特に多重機能分子を成分とした, 新しい多形・相転移・現象を示す系でのコンビナトリアルケミストリーの確立が必須である。

**材料化:** サブナノメートルレベルで望む分子を望む位置に配置し, 超微細化が進む半導体技術とのインターフェースを確立する技術の開発は, 超高密度デバイスを作成する基盤である。

**システム化・機能開拓:** 高い温度での超伝導, 強磁性, 強誘電性, 巨大磁気抵抗, マルチフェロイックなどの複合機能の開拓や, 自己増殖や自己修復可能な材料の創出は, 新たな学問・産業の根幹にある。

**単一分子:** バリスティック伝導等の検証とデバイス応用への展開は, シリコン半導体産業を救済する重要な課題である。

**動的分子集合体の構築:** スイッチング分子, 分子ピンセット, 分子モーターなど, さらに複雑で高度な機能を持つ分子の創出や, 物質やエネルギーフローの中で機能発現をする集合体の構築, また複雑系理論などのバックアップによる分子システムの設計は, 将来の研究ならびに産業を生み出す課題である。

## 5. 生体関連化学・生物分子科学

### 生体関連化学・構造生物化学

生命自体の本質, 生命発生の過程, ならびに生物進化の過程を分子科学的な観点で解明する研究における課題は, (1)**DNA 複製**, (2)**DNA 損傷修復**, (3)**DNA の分配**, (4)**RNA の機能**, (5)**転写制御・スプライシング**, (6)**翻訳・タンパク質折りたたみ**である。

(1)と(2)は生命活動の根幹をなす過程であり, 損傷箇所を有する DNA において, その損傷部位をバイパスした DNA の伸長過程の分子科学的なメカニズムの解明が必要である。細胞分裂自体の過程, 例えば紡垂体構造の形成, 分裂に伴う細胞膜組織の分離過程を

含めて, (3)の過程の全体像を解明する必要がある。ゲノム DNA 中のセントロメア領域や種々の環状 DNA 中のセントロメア様領域と選択的に複合体を形成する DNA 結合タンパク質があり, タンパク質群の機能を構造化学的に解明する研究の継続が必要である。(4)に関しては, 転写・翻訳過程において制御因子としての機能を有する RNA 分子“small, non-coding RNA (ncRNA)”と, その機能に関与するタンパク質との相互作用を構造化学的に解明する研究の継続が必要である。なお, siRNA の機能発現に関与するタンパク質を含め, 構造化学的にその作用機構の詳細を確認する研究は重要である。(6)において, pre-messengerRNA のアルタネイティブ・スプライシング機構を介した, 高等真核生物中における組織依存的なタンパク質のスプライシング異性体産生の制御機構の解明には, 対象物質の拡大による知識の蓄積と, 機構的な共通性を見出すことが重要である。(6)では, 真核生物において, mRNA の ORF 中の開始コドンの上流に, フレームが一致した複数の AUG 配列が存在する際, 開始コドンを選定するメカニズムと, それに関与するタンパク質群の役割の解明が重要課題である。

### 生物分子科学

**ケミカルバイオロジー (化学生物学):** 創薬やロボット工学とリンクしており, 現在急増しつつあるチャネル・トランスポーター・酵素の構造のデータベースを基盤としたロボット工学を駆使し, ハイ・スループットによるリードの探索や組み合わせの合成化学による化合物のチューニングは重要課題である。特にポストゲノムの中心的分野として急成長が期待できる。しかしながら, タンパク質の構造を基礎とした機能性低分子化合物の完全設計には到達しておらず, 新しい基礎概念の発見によってはじめて大きく飛躍するのである

う。

**細胞表層の可視化学：**イオンチャネルの可視化，非溶解レセプター，トランスポーターの可視化（生物活性物質の存在下），それに伴う生薬学上重要な機能性分子の発見，細胞表層高分子の内在化や顕在化は重要である。

**活性分子の高精度合成：**純天然機能分子のファーマコアの多段階合成による薬剤の実現，それに伴うプロセス化学の発展，触媒化学を駆使したグリーン化学の実現を達成する必要がある。

**物質探索法の新機軸：**MRSA や SARS などの抗菌，抗ウイルス物質の創製や合成の基礎概念を確立することは重要課題である。

他に重要な課題として，生命現象関連物質（フェロモン，アロモン，ホルモンなど），ゲノム科学と連動した物質探索（GPCR オープン遺伝子のリガンド探索，環境ゲノムに基づく物質探索など），病原性新生物との抗争がある。

**機器分析法の開発：**生体高分子の質量分析法（田中耕一）に見られるように，新機軸の機器分析法の開発は研究に革新をもたらす。IR-CD 法，電子位相観測法に基づいた電子顕微鏡開発を進める必要がある。

## 6. 高分子化学

**高分子合成：**精密高分子合成技術に基づいた表面グラフト重合， dendroliマーなどの特殊構造ポリマーの精密合成，非共有結合高分子の精密合成が大きな課題である。

**高分子構造：**「構造と機能・物性の関係」の理解は今後も重要な課題であり，特に動的な構造変化の3次元観察は接着，生体適合性などとも関連して必須である。今後の飛躍的な発展は評価・解析技術の急速な発達が前提（大規模計算機シミュレーション技術や3次元電子顕微鏡のさらなる発展，放射光・中性子などの高輝度線源を用いたリアルタイム回

折・散乱，トモグラフィ装置の開発）である。

**高分子物性：**非平衡系での構造形成とその制御，これに関する理論およびシミュレーション，多成分系高分子におけるマイクロ相分離構造，クレイなどの無機材料，カーボンナノチューブ，液晶や球状分子などと組み合わせた場合の構造形成と様々な物性の関連，高分子表面/界面の物性と例えば低摩擦，超撥水，表面物性のスイッチング，高分子の運動や揺らぎをリアルタイムで可視化できるような測定法の開発，力学的な寿命評価，難燃性評価は，安全・安心社会の構築と関連して極めて重要である。これらの分野では測定技術を含めて未成熟であり，今後の研究の推進は必要不可欠である。

**機能性高分子材料（生体関連化学，バイオマテリアル，ゲル）：**生体環境下で利用する様々な器材（人工臓器，薬物キャリアや細胞培養床だけでなく，発光バイオマーカーや免疫診断粒子など）の生体との接触界面の最適化（特に人工心臓などの人工臓器表面の設計）は重要課題である。再生医療に最適化した高分子材料の設計は極めて重要な課題である。

**機能性高分子（電子・光学材料を中心に）：**フレキシブル化，デバイスの封止，インクジェットに代表される安価な製膜手法の開発，高分子特有の励起子生成過程の存在や，電荷移動機構の解明は基礎・デバイス両面において非常に重要である。

**高分子工学・複合材料：**植物由来高分子の積極的な利用（ポリマーアロイ技術の向上）やポリマーのリサイクルなども含めた環境低負荷材料へのアロイ技術の応用は重要である。

**高分子のナノ加工技術：**ナノ加工に適した高分子材料の精密高分子合成，ナノ加工後の材料の構造・物性評価，機能性評価は必須事項である。

**高分子材料の自己修復：**安全・安心社会の構築，資源循環型の社会の構築において極めて

重要で、合成、構造、物性、工学が密接に連携した基礎研究を始動する必要がある。

**繊維材料：**極限性能を有する繊維材料（極限環境適応繊維、防護繊維など）や従来性能・機能の延長線上にない革新的な特性繊維材料（例えば、スマートファイバーや神経系繊維など、外部環境に応答する動的機能を有する繊維材料）の開発は重要である。また、脱石油・省エネルギー指向繊維材料（低環境負荷、環境と性能のトレードオフの関係からの脱却）の開発は、継続的に行う必要がある。

**ゴム材料：**脱化石燃料化、天然資源の利用、多次元での精密構造制御、階層構造制御、可動架橋構造や可逆的架橋構造の形成により、リサイクル可能で地球に優しく、かつこれまでにない優れた物性を示すゴムの創製は重要である。

## 7. 環境化学

基礎学問として、濃度・同位体計測技術の革新、標準化、リアルタイム観測、観測プラットフォームや大気・海洋大循環モデルへの化学パラメータの導入（数物系科学との共同作業）、影響対策技術の評価は継続して行う重要な課題である。また、社会構造の変革に伴う新たな環境問題の継続的な探索が必須である。

**地球温暖化：**自然界に循環化学プロセスを持つCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの主要3種温暖化ガスの循環の解明は非常に重要な課題である。定量的評価を通じた現象解明のため、(1)大気濃度とソースフラックスの現場観測のための**衛星搭載の赤外分光計**による地球温暖化ガスやオゾンなどの**遠隔観測**、(2)航空機搭載や地上での赤外半導体レーザーなどの光源を用いた**分光高精度・高感度計測**などの技術革新、(3)過去10年適用され始めた**多種同位体**（アイソトポマー）**計測**による研究手法の高度化が必要である。これまでの物理パラメータに加

え、観測や模擬実験を通して得られた高精度の化学パラメータを取り入れた大気大循環モデルの確立は重要である。これらの観測を基に、今後、温暖化ガスの濃度上昇を最小限に抑えるために化学を駆使して取り組む。CO<sub>2</sub>については固定化と固定化されたCO<sub>2</sub>の海底・地中貯留の実用化を行う。

**オゾン層破壊：**衛星による濃度観測、宇宙ステーションで日本チームが参加する同位体の測定が予定されており、現象解明に向けて大きな成果が期待される。NO<sub>y</sub>、ClO<sub>y</sub>、HO<sub>x</sub>などの主要オゾン反応物質やCF<sub>3</sub>O<sub>x</sub>、FCO<sub>x</sub>などのサイクルの評価は重要な課題である。また、成層圏における大気の循環が明らかにされつつあり、対流圏の大気循環と同様に、物理パラメータだけでなく化学パラメータの精密化、高精度・高精度化が必要で、オゾン層の回復に向けた重要な課題である。

**エアロゾル：**大気粒状物質（サブミクロンサイズの未確認物質）の化学的計測技術の確立は重要課題である。このためには、微小部位の局所分析技術の進展が必要である。分析機器の発展による、より多種の成分同定と定量、分子レベルの解析や、有機エアロゾルの水溶性有機物前駆体・中間体などの研究、人間を含めた生態系や気候への影響の定量的評価が大きな課題である。

**対流圏オゾン：**日本で蓄積された低排出技術を環境技術途上国へ供与することは影響対策上最も重要であり、排出の増加と影響対策による低下に対する定量的な相関関係の解析には、観測や室内実験による現象解明の化学的高精度化が重要となる。

**化石燃料から次世代燃料への変化：**化石燃料から次世代燃料への転換は、一次排出物の削減に大きく貢献し、エネルギー需要と温暖化抑制の観点から大変重要な課題である。次世代燃料のリスクや移行過程での大気質の変化の研究が大きな課題となる。主要な次世代燃

料としての水素は、大量消費に伴い、未使用の水素のリークが増加し、対流圏や成層圏の化学に変化をもたらす。燃料電池へとシフトしていく過程でNO<sub>x</sub>やVOCの大幅な排出量の減少が予想されるものの、ジメチルエーテルやメタノールなどの代替燃料の大量放出が懸念される。これらの変化がOHラジカルとの反応性などから大気質をどのように変質させていくかについては必ずしも自明ではなく、大気質の変化を定量的に予測する必要がある。

## 4 諸課題と推進手法等

### 1. 物理化学

#### 界面化学

**異分野連携研究体制の構築：**急速な進展を示すこの分野においては、我が国が実験面においては高い研究レベルを維持しているが、欧米に比べ異なる研究背景を持つ研究グループ間の連携が弱く、この分野の骨太い発展に危機が感じられる。えてして、所属学会ごとに孤立しているかのような印象があり、異分野交流の場が限定されている。当該分野の発展には、基礎と応用研究のバランスのよい連携や、理論と実験、物理と化学、有機半導体と有機伝導体、基礎課題と実用課題といった研究者間の連携の促進施策が必要である。

**基盤設備整備：**シンクロトロン放射光施設の充実は、この分野の進展に必須である。電子構造研究には軟X線領域が望ましいが、最先端である第三世代の軟X線リングが国内にないため、国内の研究者は困窮しており、米国ALS、独国BESSY-II、瑞国MAX-IIをはじめとする海外の施設を利用する日本人研究者も多い。これに関する補強策は、基礎研究のみならず応用・実用面からも強く切望される。また、シンクロトロンではビームライ

ンの維持・管理が重要であるので、建設のための費用だけでなく、そのための人的リソースを確保することも不可欠である。常駐管理者のもと、一つの研究ベクトルに向けてユーザーが結集したビームラインでこそ、世界最先端の研究レベルは長期的に実現できる。

**研究評価法：**当該分野においては、例えば光電子分光やSTM・AFMのように、ひとつの新規測定手法の開発が多面でブレークスルーをもたらすことが少なくない。オリジナルな手法開発研究は一般に時間を要する。そのようなロングスパンの研究も行えるように、業績評価システムなどを工夫して対処することが必要であろう。

### 理 論

**教育・人材・後継者育成：**理論化学における人材養成は、「現在流行している」分野とは関係なく、学生や研究者の個々の興味を大切にしながら、持続的に行わなければならない。理論研究は、現状の実験事実の説明だけではなく、「何が出てくるか分からない」という状況を常に維持すべきである。

**実験研究を逸早く知る機会：**理論化学者が雄大な構想と成果を上げるためには、萌芽的なレベルにある実験研究などに積極的に触れることが必要である。これは、実験研究者にとっても、活力と新しいアイデアならびに実験指導原理などに繋がる。

**計算機環境：**一般的に言って、研究者が各自のアイデアを確認したり、小規模な計算を手早く試行するためには、身近に小規模ながら性能のよい計算環境が常備されている必要がある。10人以上の学生やポストドクを擁している研究室は、効率の良い計算システムが必要である。特に大規模な計算の実行を可能とするシステムをどのように担保するかについては、分子科学研究所などの施設を含めた多様な選択肢を用意すべきである。

## 2. 有機化学

**研究対象：有機金属化学，固体化学，結晶反応の化学，特に環境負荷が少なく元素効率の高い反応の開発が急務である。フラーレンの反応，カーボンナノチューブの有効利用なども，物性研究者や薬理研究者から大いに注目され，進展の期待がかかる。触媒反応の究極として2核ランタノイド錯体の有効利用も今後益々注目していく必要がある。**

**有機化学と合成化学の融合：**基礎化学である有機化学と複合化学である合成化学とは，区別の不要な分野間の関係にあり，一体化することも重要なように考えられる。特定領域的なグループ化によって，明確な戦略と評価システムの構築を達成し，成熟した有機化学の完成を目指さねばならない。有機化学の総合的な教育システムの構築に加えて，質的にも量的にも人材確保が一層重要となる分野であり，基盤となる化学の重要分野であるとの認識を一層広く社会に訴える必要がある。総じてノーベル賞の受賞等で高まっている化学に対する一般的理解をさらに進展させる必要がある。

**境界領域研究の拡大：**合成化学の今後の発展には，研究テーマの拡張が必要である。テーマを重点的に推進することに加え，「境界領域へ飛び込むテーマ」が考慮されるような仕組みが不可欠である。

## 3. 無機化学

今後，進展する課題と推進方法を記す。

### 錯体化学

(1)「光」に関連したテーマ（励起状態の構造解析を含む）。(2)錯体物性等に関連した「ナノ」。(3)錯体の反応に関連した「バイオ」。(4)新しい測定・解析手段の開発：規則的な無限構造を持つ金属錯体多重機能化（外場，外的刺激に応答する動的挙動を詳細に解析する

ためには，適切なタイムスケールを持つ時間分解を組み込んだ，結晶構造解析手法や分光分析手法などが必要）。(5)メソポーラス有機シリカの開発：研究室内で使用可能なハイスループットかつ信頼性の高い撮像装置の開発が，速い研究の展開には欠かせない。(6)自己集合性金属錯体：自己集合性金属錯体は，一義的な構造を持つ単一の分子である。今後ますますサイズが大きくなると考えられ，単純に大きさや分子量から見ればタンパク質と同等である。当該分野の研究を円滑に推進するためには，溶液状態の分析を精密に行う必要があり，高磁場NMRを用いた高分解能NMR装置の日常的な利用が必要である。ここ10年間にタンパク質の構造解析のために高磁場NMR装置が開発され，同時に新たな構造解析法が開発されてきたように，当該分野に特化した構造解析法の開発も必要である。また，配位結合に由来する不安定性を克服できる質量分析法のさらなる開発も重要である。(7)金属ナノ粒子の研究。

### 生物無機化学

(1)生体イメージング：有機色素型の蛍光プローブの場合は，現在は亜鉛イオンでしか成功していないが，残った他の遷移金属イオンをどのような方法でイメージングするかが問題である。(2)薬剤の開発：抗癌剤の開発においては，莫大な種類が存在する白金錯体に対するスクリーニングがカギになる。チップを用いた微量かつ迅速な抗癌活性の測定試験が誰でも簡便に測定依頼できるような体制の確立が重要である。インスリン作用のある経口投与剤として亜鉛やバナジウム錯体を開発する場合も，全国的な効率の良い網羅的なスクリーニング体制の確立が望まれる。(3)バイオインタフェースから生物燃料電池へ：グルコース-空気生物燃料電池に関しては，おそらく耐久性が重要なポイントとなる。(4)エネ

**ルギー利用・高効率触媒分子の開発**：金属酵素活性中心のエッセンスのみを抽出し、構造モデルを反応モデルにまで高めなければならない。ここでもやはり耐久性を確保するとともに、高活性も達成しなければならないので、ナノ・マイクロ細孔構造を有する固体担持材料との組み合わせに期待するところは大きい。

#### 4. 機能物質化学

目的指向または社会的ニーズに基づき物質開発を行うことも、学理からの指向と並行する研究推進法である。人類の未来により直接的に準拠した研究として**科学・技術と社会**がある。それは、我が国が今世紀に抱える大きな社会的諸問題の解決を目指す科学・技術であり、科学・技術と自然が調和した社会の形成を目的とするものである。21世紀型社会問題として、環境問題、エネルギー問題、高齢化・少子化問題、安全保障問題、次世代人材育成、新産業創成問題などがある。これらの問題を解決するとともに、新たな学問を開拓する基礎的な課題を物質科学の立場から分類すると、(1)環境・エネルギー問題では**低負荷・高効率環境・エネルギー材料**、(2)ナノサイエンス・ナノテクノロジーでは**超微細・高機能材料**、(3)高齢化福祉・生命倫理では**幸福・健康の調和材料**、(4)食料問題・テロ対策等の安全保障問題では**安心と平和の保障材料**である。これらの研究には、化学分科の全ての細目における学問を必要とし、関連分野も多岐にわたる（この記述中の材料と技術を化学に置き換えると、重要な基礎化学分野を規定できる）。

(1) **低負荷・高効率環境・エネルギー材料**  
**環境調和材料と技術の開発**：物質変換・循環・再生・ゼロエミッションの化学、省エネルギー物質変換技術、グリーン化学を用いた、リサイクル可能な材料、解毒促進材料、

抗菌材料、自己修復材料、高効率触媒材料、バイオマス変換技術、生分解性ポリマー、塩水（污水）を純水に変換する技術、砂漠化防止技術、高選択分離技術、高機能分離膜・繊維を開発する研究。これらの根底には、環境調和マテリアルデザインがある。

**高効率エネルギー変換材料と技術の開発**：高効率エネルギー変換マテリアルデザインの学問的發展と、高効率な太陽光発電材料・熱電材料・燃料電池材料・触媒・人工光合成材料・可視光をも利用できる光触媒・省エネルギー情報デバイス材料・メタンハイドレートの採掘技術などの開発が必要である。

#### (2) 超微細・高機能材料

**ナノサイエンス・ナノテクノロジー材料と技術の開発**：ナノテクノロジーと高機能材料物質設計を技術・学問の基盤として、超・多重機能材料(超伝導材料、強誘電体、強磁性体、超イオン伝導体(二次電池、太陽電池)、機能性ダイヤモンド・炭素材料、マルチフェロイック材料、高機能磁性材料・色素・繊維・複合ガラス・触媒・ポア材料(分子認識、吸着、貯蔵、新規反応場)・センサ(五感センサ、高選択性センサ)・人工駆動システム(ソフトアクチュエータ、分子機械など)、有機R-RAM、機能電極・表面)や次世代エレクトロニクス・フォトニクス(3次元光集積回路の構築)・スピントロニクス(単分子、スピン、ナノ、界面、バイオ、DNAコンピュータ、量子コンピュータ、分子コンピュータ、EL、FET、透明導電体(量子井戸構造などのビルトインナノ構造の作製、ITO代替材料の探索))、光応答材料(非線形、発光、光電変換、光制御磁性)の開発と、超高速で変換する双安定システム、デバイスの構築が課題である。

#### (3) 幸福・健康の調和材料

**高齢化福祉医療材料と技術の開発**：生体調和(人工筋肉・皮膚・骨・関節・五感センサな

ど)・生体調和自己修復・神経伝達調和・五感機能代替・脳型多値メモリーデバイスなどを目的とした材料化学。これらにとっては、巨大応答(超高感度)・超高速・超微細・生体活動温度をキーワードとした生体調和マテリアルデザインが必要である。

#### (4) 安心と平和の保障材料

**安全保障材料と技術の開発**：テロ対策，食の安全，安全通信保障，医療・炎症対策(バイオハザード，薬物，ハウスシック，微粉末など)，防災対策(交通事故，抗爆発，地震，津波，水害，火災，暴風，冷害，炎暑など)を目的とした，**セキュリティ化学材料**の開発であり，目的に応じた安全保障マテリアルデザインが必要である。また，超微弱信号センシング，量子通信材料，巨大物性応答センサー材料，高強度透明膜，化学結合膜，人工血液などが考えられる。毒性物質(鉛，水銀，砒素，ベリリウム，フロン，アスベストなど)を含む材料(はんだ，水銀蛍光灯など)の無毒代替材料の開発が必要である。また重要な課題として，超高速通信・超高速映像輸送など遠隔医療にも適用できる超高速光デバイスの構築のため非線形光学効果の大きい物質の開発がある。

以上の材料の研究・開発は，視点を社会的ニーズにおくものの，化学の基礎である「結合，反応，構造，物性」を研究視点としなければ学問的価値はなく，また論理的進展も期待できない。これらの研究には基盤となる技術・施設と基礎学問が不可欠であり，それらを一層充実させる必要がある。

#### (5) 技術・施設

**コンビナトリアルケミストリー**(マテリアルデータの高速ネットワークの構築)，**有機物質を活用した無機固体合成**(キラリティーを有する無機多孔体合成など)，**ナノサイエンス**(ナノインプリント技術，ナノメートル

オーダーの解像度を持つパターン形成，望む分子を望む位置に据え，望む機能を発現する手法)，**異種界面コンタクト**作製・解析技術(固体電解質-電極界面における固体電気化学による基礎的検討，単分子-電極)の躍進が必要である。他に，大型コンピュータによるデザイン(分子，多分子系，超分子系，結晶，液晶，構造，電子状態，機能，ダイナミクス)，超高感度非破壊分析技術，単分子分析技術，超迅速分子・構造ダイナミクス観測技術，極限・大型実験施設を用いた物質・機能の探索(軌道放射光施設，中性子施設，超高压施設，超強磁場施設)，大型装置とのインターフェース技術の開発が必要である。ボトムアップ，トップダウン双方の立場からの研究開発が課題である。

#### (6) 基礎学問

ナノメゾのサイエンス(特に，分子に根ざしたナノメゾ領域物性化学理論)，微少界面の電子状態，インターフェース接合，超迅速原子・分子ダイナミクスなどが必要である。研究対象によっては，生体系や脳研究の成果を活用し，数学等からの支援も得て研究を進める課題がある。これまで想像もできなかった分子が新たな機能材料分野を拓く可能性があり，**基礎研究の機会を担保**する必要がある。基盤となるサイエンスの確立こそが，長い目で見て分野の発展に資する。また，物質科学は人間社会に密接に関連しており，**社会倫理**や**科学倫理**の徹底した教育が必要であるが，日本の教育制度ではまだ不十分である。

### 5. 生体関連化学・生物分子科学

#### 生体関連化学

**研究対象と研究手法**：研究の対象は多岐にわたるが，生命活動の本質により深い理解を得るための基礎研究的な色合いの濃い分野と，医学的な応用を目的とする分野の，外見的には二極化が進む可能性が高い。しかしながら

全体的にみれば、実際に研究する対象は、ヒトにおける疾患と正常状態との相違を解明する上で、最終的には利用される成果を与える研究がその多くを占めると予測される。その際、上記の対象は全て、全世界的な研究者の広がりをもつものであり、それぞれが研究の一環を担うことで、国際的な役割分担と情報の共有化を介して進展速度の向上が図れる対象でもある。特に、個々の現象に関してその分子科学的なメカニズムを解明する際、それに関与するタンパク質は、タンパク質進化の過程を経て機能分化を達成している、という観点から、メカニズム的な共通性を探求することで、多くの現象に関して共通の理解を深めることができる。一方、実際には研究対象とする現象ごとに、専門化、細分化の傾向が増しており、相反する流れとなっている。

**研究体制と基盤支援組織：**我が国の研究ポテンシャルを向上させる上では、役割分担と情報の共有化という問題を、個々の研究者の努力に任せるのではなく、第三者機関がその役割を大幅に補うというシステムの構築（ディレクター体制）が今後必要性を増すと考えられる。

また現状でも、実際的に一定水準以上の研究技術やノウハウを蓄積している研究機関は、各地区のセンター的な役割を有している。今後はその傾向をさらに強め、研究のアイデアを提供する「研究者（提案者）」と、実際の実験操作を行う「実施担当者（担当機関）」の役割分担を行うことが、研究投資効率の向上に繋がると考える。若手研究者の育成には実習的な経験も重要であり、一定期間を研修期間として教育的な研究機関で実習的な研究活動を引き受ける制度（インターン制度）を設立することが望ましい。

### 生物分子科学

**ケミカルバイオロジー（化学生物学）：**この

新しい分野では、有機化学者が生物化学を理解し、これを化学の立場から実践することが要求される。そのためには教育的な見地として、学術としてのケミカルバイオロジーを成立させ得るかどうかを鍵握っている。単なるロボット工学やコンビナトリアル化学の習得では不完全で、化学を基盤とした生物学の理解実践を考慮したカリキュラムの設定を目指さなければならない。

**活性分子の高精度合成：**偉大な先人によって培われた有機金属化学は、物質科学の基礎に位置し、教育を通じた学術の継続が肝要である。

**有用天然物質探索法の新機軸：**化合物評価のための予算を計上することが重要になるであろう。この結果は特許の価値の高揚、さらには産業の発展や雇用体制の充実につながる。

## 6. 高分子化学

**研究対象（推進すべき分野）：**1) 特殊構造ポリマーの精密合成, 2) 非共有結合高分子の精密合成, 3) 動的な構造変化と関連した「構造と機能・物性の関係」の理解, 4) 非平衡系での構造形成とその制御およびこれに関する理論およびシミュレーション, 5) 高分子表面/界面の精密構造制御に基づく高機能化, 6) 力学的長寿命化, 難燃化技術, 7) DDS, 遺伝子治療や再生医療のための高分子の精密設計, 8) ソフトな電子デバイス用高分子の開発, 9) 環境低負荷材料, 10) ナノ加工に適した高分子材料の精密高分子合成, 11) 高分子材料の自己修復性の賦与, 12) 極限性能を有する繊維材料（極限環境適応繊維, 防護繊維など）や革新的な機能性繊維材料の開発, 13) 天然資源の利用やリサイクル可能で地球に優しく、優れた物性を示すゴムの創製。

**研究体制と資金：**応用分野中心ではなく、きちんとした精密合成の手法の開発、高分子に

**適した分析手法**の開発、様々な階層における**物性解析の手法**の理解などの基盤的高分子化学研究に対する研究資金の増加が、この分野の発展には必要不可欠である。

**高分子合成**：ナノ材料を目指した高分子合成においては、**目的を明確に設定し、シミュレーション予測**もうまく組み合わせ材料を設計し、効率的に開発を行うことが重要である。一方、さらなる精密高分子合成法の創出のためには、**天然高分子の生成過程**を参考にするなど、他方面からの新しい概念の導入が必要である。また、循環型社会の実現においては、研究を単に学術的な面から進めるのみならず、実用面からも他分野との交流および産学連携を効果的に行い進展させることが、より早い実現に結びつくと期待される。

**物性・構造研究・大型施設**：ソフトマターおよびナノ領域の物性研究に関する日本人研究者の環境は欧米と比較して劣っている。例えば、**放射光**などに代表される**大型研究施設**における本課題の遂行は研究者個人に強く依存しており、組織的な支援体制を必要としている。現状は、支援するスタッフの数は限られており、アジアや欧米諸国の大型研究施設と比較して見劣りしている。米国では、全米科学財団 (NSF) が 2005 年から 6 年間にわたって 1,400 万ドルの巨額を投じ、材料研究科学工学センター (MRSEC) を設立している。MRSEC の 2 大テーマの一つがナノ界面関連である。我が国においても、世界的な競争が激しい中、このテーマを牽引する研究者への包括的な支援が行われるべきである。さらに構造、物性関係も含めて民間の装置メーカーも含めたナノ計測分野との共同研究による機

器開発、物性予測のための理論/シミュレーション手法と高分子構造分野の着実な進展と密接な連携が不可欠である。

**高分子のナノサイエンス・ナノテクノロジー**：これは、分野・領域を融合・横断的にする革新的潮流であると期待されてきたが、我が国においては、必ずしも学際的な連携が効果的になされているとは言い難い状況である。とりわけ、高分子は素材に関わる科学・技術であり、その応用分野は化学にとどまらず数物系科学、工学、生物学、農学、さらに医歯薬学まで極めて多岐にわたっている。高分子学会（および繊維学会、日本化学会など高分子関係の諸学会）は、素材合成、機能化さらには加工、デバイス化までをカバーしており、学際的でありかつ産学連携が容易な組織として、我が国ナノテクノロジーにおける主導的立場になり得る。これらの関連学協会を中核とする複数の学際的産学連携プログラムを立案すべきであろう。また、ナノマテリアルの毒性、バイオマテリアルのレギュレーションについては、我が国の科学技術ならびに産業育成の観点から、行政の積極的な**基準作成**と迅速で適切な対応が要求される。

## 7. 環境化学

国際的には ICSU のもとに、IGBP, IGAC などの研究プログラムが提言されていて、日本もこれに呼応した研究活動がなされ、**地球温暖化、オゾン層破壊、エアロゾル、大気質**（対流圏オゾン、化石燃料から次世代燃料への変化）研究が研究推進事項として絞られている。人類を含む自然社会の保全にとって、これらの問題解決は急務である。

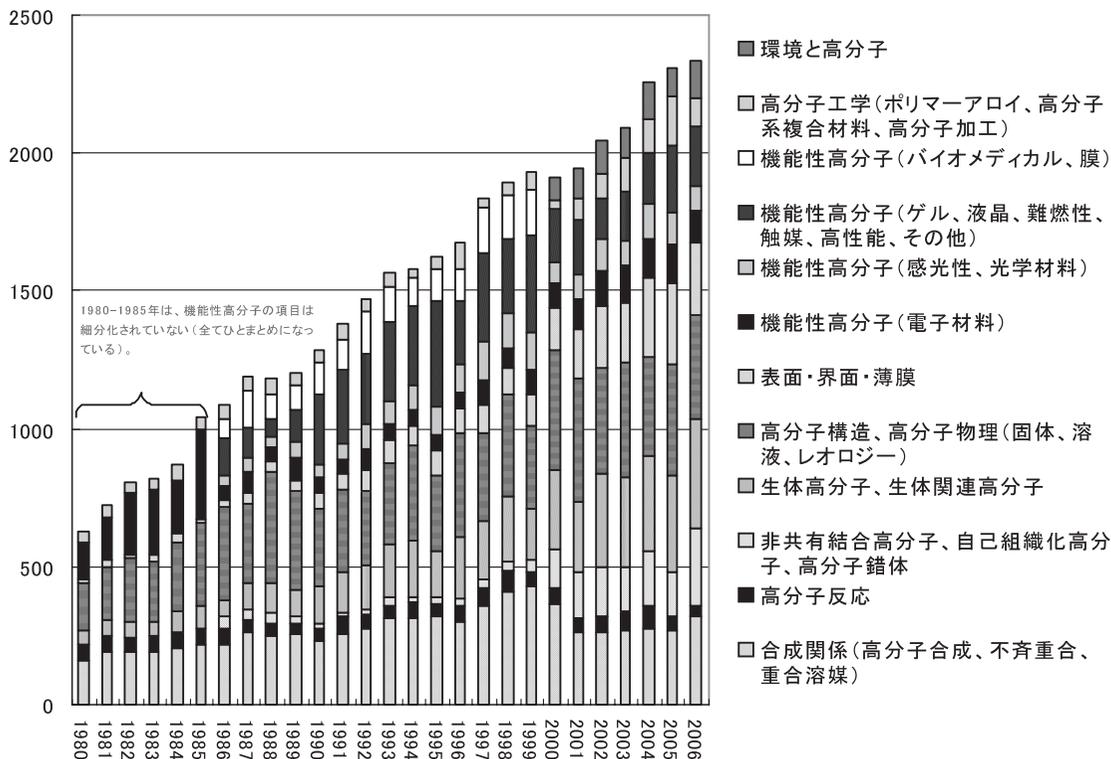


図2 高分子年次大会における発表件数，発表分野の変遷

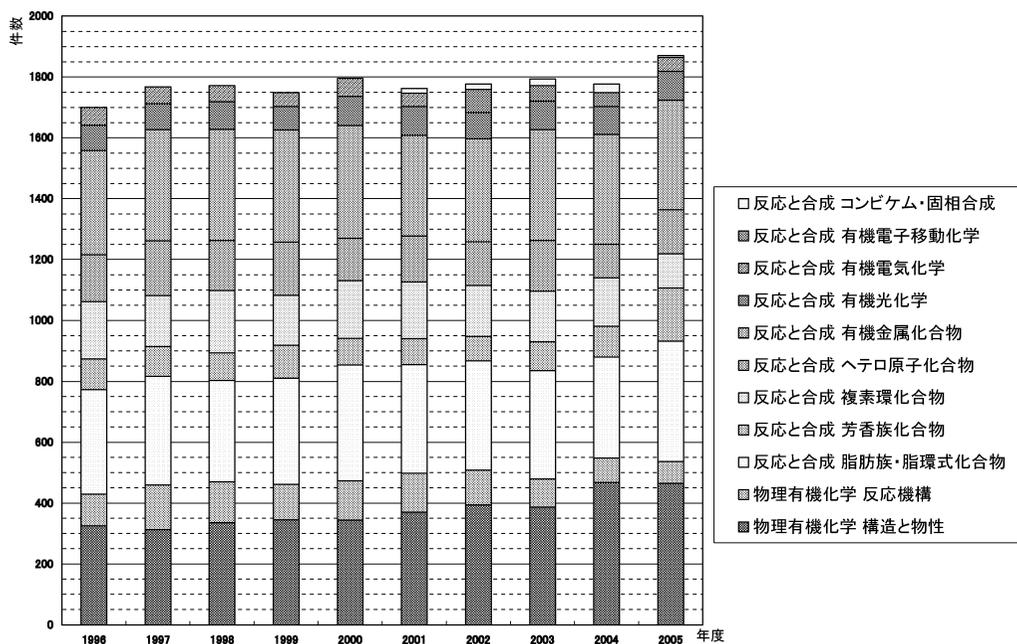


図3 有機化学における過去10年間の研究発表動向(日本化学会春季年会発表件数)

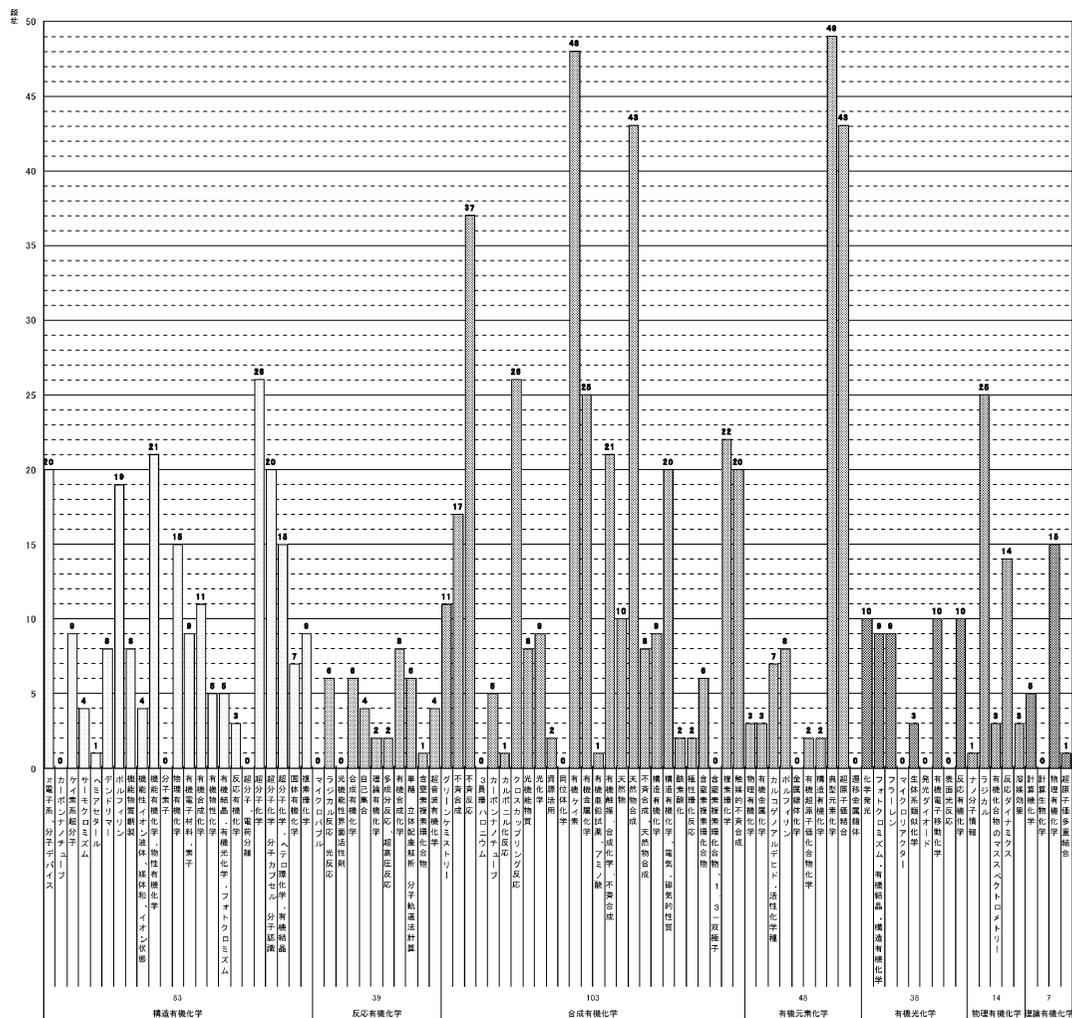


図4 基礎化学・有機化学における科研費採択研究内訳

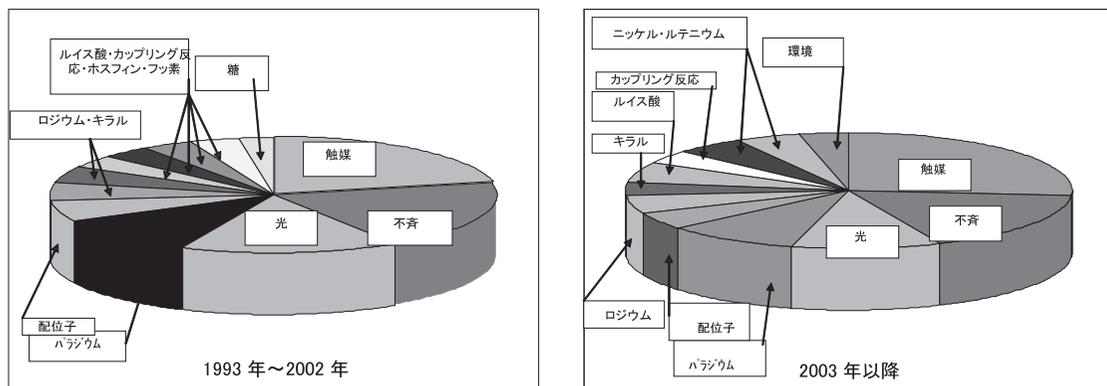


図5 合成化学分野における科研費採択課題にみるキーワード上位12位

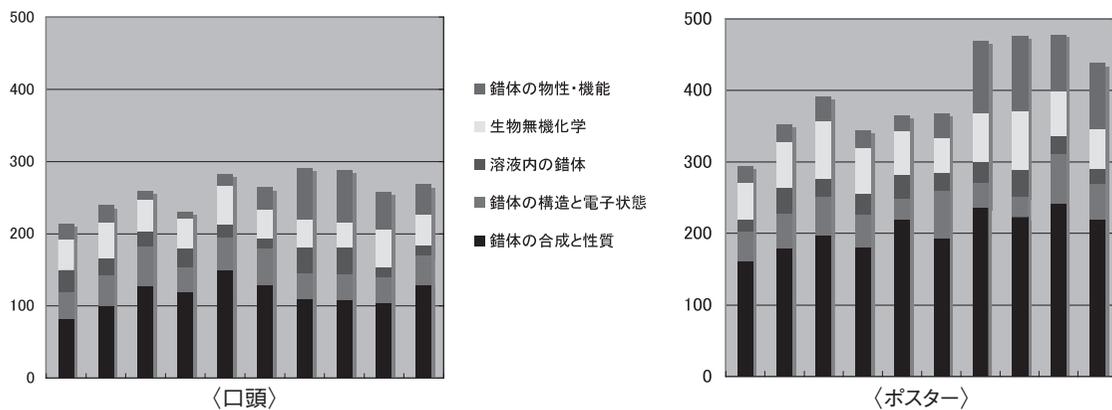


図 6 錯体化学会における研究分野の変遷 (横軸左から 1987-2006 年, 学会発表データベース)

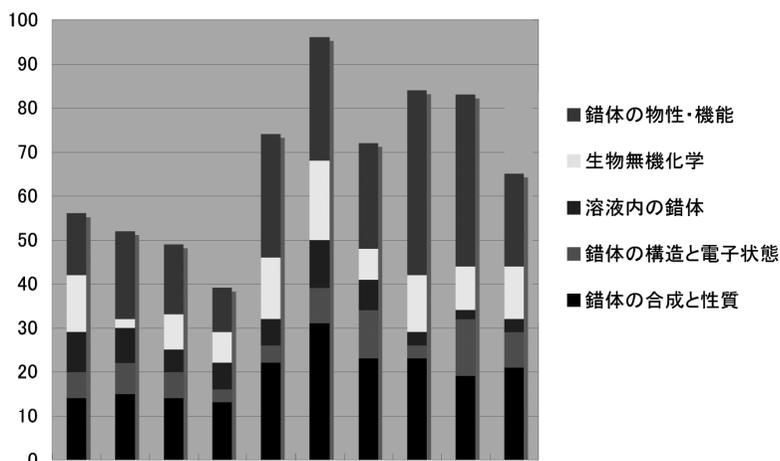


図 7 錯体化学分野における科研費採択数の推移 (横軸左から 1993-2002 年, 科研データベース)

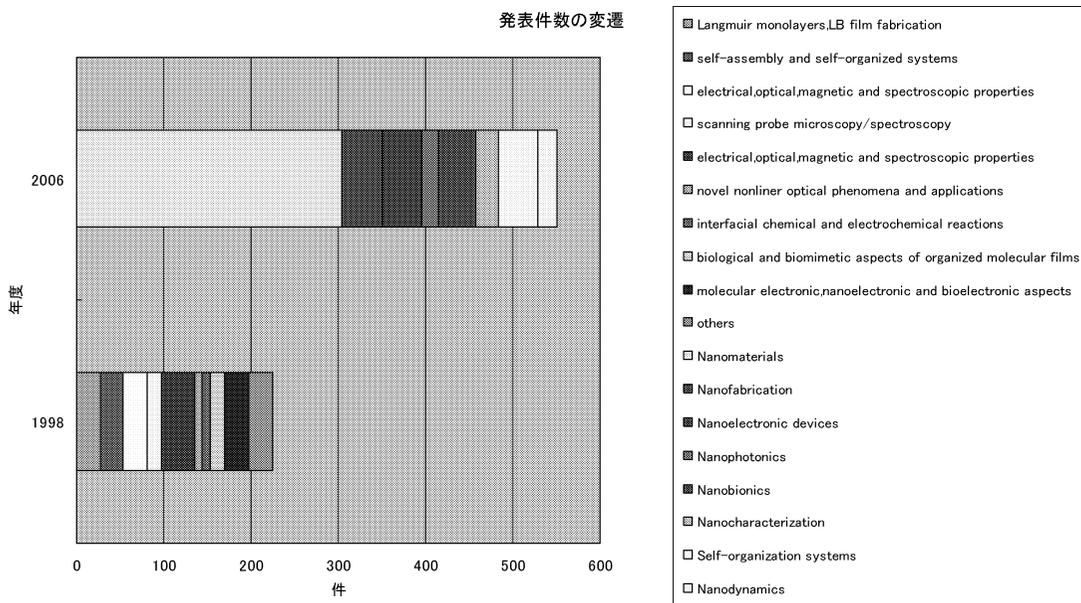


図 8 AsiaNano 2006 とその前身である ASMOF 1998 (The 2nd Asian Symposium on Organized Molecular Films for Electronics and Photonics) における発表件数

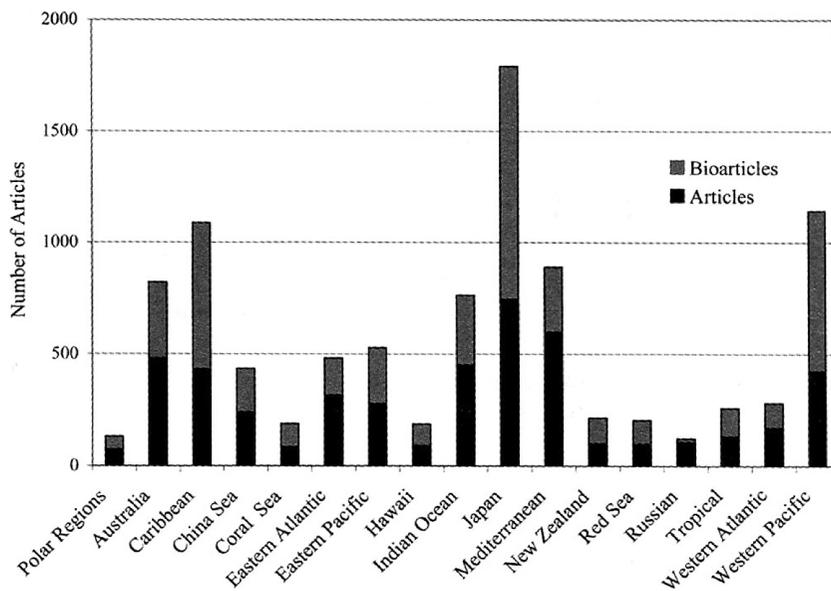


図 9 2003年までに引用された海洋天然物の論文数 (Natural Product Reports Vol. 23, 2006, 23, p. 68)

## 特集：我が国における学術研究の動向について I

## 工学系科学分野の研究動向

日本学術振興会学術システム研究センター

## 1 当該分野の特徴・特性等

「工学とは、数学と自然科学を基礎とし、ときには人文社会科学の知見を用いて、公共の安全、健康、福祉のために有用な事物や快適な環境を構築する学問である。」(工学における教育プログラムに関する検討委員会より)。そのため、基礎的な理論から実用的な応用事例まで、非常に多岐に渡る学問領域を含んでいることが特徴である。代表的なものとして、応用物理学・工学基礎、機械工学、電気電子工学、土木工学、建築学、材料工学、プロセス工学、総合工学がある。工学は、日本の製造業を支える重要な学問であり、製造業の国際的競争力を維持するためにも、今後は、これまで以上に注力すべき学問分野であると言える。以下、分科別に概観する。

## 1. 応用物理学・工学基礎

応用物理学・工学基礎においては、半導体、光・量子エレクトロニクス等の工学と物理を融合させた研究が多いが、その他に電気、機械、材料、化学、数学などとの広い範囲の学際的・基礎的な研究活動も行われている。これらの研究活動は、産業界との結びつきが強いことが特徴としてあげられる。応用物性・結晶工学では、半導体結晶の育成、評価、加工、そしてデバイス応用を研究対象と

している。扱う材料としては超 LSI 等に用いられるシリコン (Si)、青色発光素子用の窒化ガリウム (ガリウムナイトライド GaN) などのワイドギャップ半導体、そして非晶質 (アモルファス)、さらには有機分子も含まれる。これらの物質の電子物性、光物性、スピン磁性の探究が行われている。半導体以外では、超伝導の基礎物性とデバイス応用も研究されている。薄膜・表面界面物性では、いかにして所望の薄膜を表面に形成させ、界面をどのように制御するかを研究対象としている。最近の半導体デバイスの微細化に伴い、超精密な加工技術・表面平坦化技術が必要となっている。薄膜の形成技術としてのプラズマプロセスや評価手段としての走査プローブ顕微鏡等の研究が盛んである。応用光学・量子光工学では、レーザー技術が根幹をなしており、高出力半導体レーザー、超高出力レーザーそして青色半導体レーザーを利用した、光情報処理・通信、レーザー加工、計測等広範な研究が進められている。とくに最近では光微細加工技術に支えられたフォトニクスが大きく進展している。応用物理学一般および工学基礎は、物理学や数学の知識をベースにして工学的な問題を研究対象とする。工学の中では基礎的・普遍的な事項の研究を主に行っており、工学諸分野の多くの具体的な問題の解決に貢献している。具体的には、光、音、力、レーザーなどに関わる研究のほか、

非線形系、離散系、可積分系の振る舞いの数理解析や、連続体の力学等で現れる偏微分方程式の数理解析やシミュレーションの手法、最適化問題や計画問題等に対する解法アルゴリズム、などに関わる研究が多い。この細目で発展した解析方法は社会科学、経済学などにも応用される。

## 2. 機械工学

機械工学は、主に、機械を設計するための設計方法から、機械を制御するためのシステム、機械に必要な流体、熱、材料の制御方法までを取り扱っている。設計工学では、設計技法の研究ならびにそれらを統合的にシステム化する設計手法の研究開発を行う。近年では国際的に従来の性能・機能・コストに偏重した設計から環境・人・自然に優しいエコ設計や、リサイクルや省資源に配慮した設計への移行が進んでいる。機械要素では、伝動要素を中心とした機械要素ごとの地道な研究開発や種々の軸受技術に関する研究などが進められている。特に、位置決め技術の重要性が高まってきており、アクチュエータに関する研究が活発化している。

機械システムでは、ロボティクスに代表される、機械技術と電気・電子技術を融合することにより新たな機能・性能を実現するメカトロニクスが研究の中心となっている。これまでロボティクス技術の知能化が進められており、環境変化への対応や自立性、発展性の重要性が増している。それに加え、知能機械学は、ユビキタス社会を実現するための情報機器や車などの知能化機器技術を包含している。流体工学および熱工学では、流体(気体、液体など)や熱(エネルギーなども含む)の移動現象や輸送現象に関連した学問を取り扱い、基礎研究とともにそれらの応用研究へも積極的に参加し、それらの問題解決に大きく寄与している。すなわち、CO<sub>2</sub>の固定化・有

効利用、脱フロン技術、バイオマス・風力・太陽光発電、燃費改善、核燃料サイクル、水素エネルギー利用、燃料電池などの研究が活発に行われており、国際的にも非常に高いレベルにある。また、バイオテクノロジーや医用工学への適用も活発である。

## 3. 電気電子工学

電気電子工学の分科は、電気を使ったデバイスから、通信、システムまでの研究を取り扱い、我が国が強みを持つ電気産業を支える上で、大きな役割を果たしている。電力工学は、電気エネルギーの発生から送電、配電を主として取り扱う。CO<sub>2</sub>削減や地球温暖化問題などの観点から、日本における電化率が高まっていくことが想定されるため、電気エネルギーの利用に関する研究は今後ますます重要性を増すと考えられる。電気機器工学は、電気機器を介することで電気エネルギーを有効なエネルギーへ変化させる手法を扱い、電磁気エネルギーを介して機械エネルギーを得る機器を中心に研究されている。電気・電子材料工学では、電気電子工学のイノベーションを支える最も基礎となる材料研究を行う。電子デバイス・電子機器は、超LSI技術の開発など大きな技術パラダイムの変化を生み出すキラーデバイスの出現に大きな役割を果たしている。通信・ネットワーク工学は、情報通信システムの基礎研究を担い、さらなる社会の情報化を推し進める上で、その重要性は論を待たない。システム工学で研究されているシステム制御技術は、生産リードタイムの短縮や仕掛在庫の低減に体系的に取り組む近年の製造業にとって、生産の自動化・制御・管理などあらゆる面にわたり必要不可欠な基盤技術となっている。日本の自動化・制御・管理技術は高度成長期以降、常に世界のトップレベルにあるが、販売・流通までも含めた生産計画・スケジューリングシステムは欧米

に遅れをとっている。計測工学では、センシング技術の開発などが行われており、豊かで安心して暮らすことの出来る社会を実現する上での鍵となっている。制御工学は、メカトロ機器の高速高精度化や各種製品の省エネルギー化に大きな役割を果たし、さらにビルや橋梁、列車の振動抑制と安全性向上、航空機、船舶、人工衛星の姿勢制御等に効果を上げてきた。より高い制御性能を得るために高度なデジタル制御技術の開発が急務となっている。エンターテインメントロボットや、清掃用の家事支援ロボットなどが挙げられる家庭用ロボットも非常に幅広く研究されている。

#### 4. 土木工学

土木工学は、社会の基礎となる施設、都市基盤、社会基盤、経済基盤などのインフラストラクチャー（水・電気・ガス・鉄道などの文明社会の基本設備）を整備し、自然災害から社会を護り人々の安全・安心な生活を可能とするためのもので、極めて広い分科である。最近では自然環境の保全だけでなく積極的な再生まで研究・試行されるようになってきた。内には人間社会と、外には自然環境とダイレクトに接していることが土木工学の大きな特徴である。長いタイムスパンで将来の人間社会の行く末を見据えた研究の推進が必要となっている。

#### 5. 建築学

建築学は、建築物の材料から設計、都市計画までを扱い、現代の都市を支える重要な学問である。環境設計では、環境要因を総合的に考慮して建物とその周囲環境を計画設計し、建築環境・設備では、建物（群）を取り巻く地域、都市、地球環境との相互作用を考慮するなど、建物・都市を計画・実現・制御するために重要な役割を担っている。そのため、熱力学、流体力学、波動論、電磁気学な

どの物理学をベースに、人間の生理・心理を評価尺度の一つとし、建物や設備により望ましい空間を構築することを目的とする総合性が要求される。日本では建築学は工学部に属し、デザインなど芸術的な側面と同時に構造、設備のような技術的側面を併せ持っており、それらを総合して教育・研究することが日本の建築学の大きな特徴となっている。欧米の仕組みやISO、ASTMなどの欧米の基準、規格とどのように整合性をとっていくかが重要な課題である。

#### 6. 材料工学

材料工学は、自然界に存在する鉱石から必要な元素を取り出して、精錬し、所望の形に成形し、必要な機能を持たせることを扱う。材料は機械や土木・建築などに使用される構造材料と電気・電子材料などに使用される機能材料に大別される。物性や反応を探索する点では物理学や化学に近く、素材生産を対象とする点では技術開発に近い側面を持つ。扱う材料の種類は金属、無機材料、ポリマー、半導体、化合物などとそれらの複合体である。我が国において、学術面では最も世界に通用する分野である。

#### 7. プロセス工学

プロセス工学は、化学物質や生物の変化を研究することにより、特定の物を効率的に生成する手法を開発している。化学工業における化学装置及びそのプロセスでは、省資源かつ省エネルギーの装置形式および操作方法の開発が恒久的な課題である。近年では、高効率で経済的な装置とプロセスの開発が求められている。物理化学的变化を伴う各種現象の解析に必要な化工物性のうち、温度・圧力の条件が過酷な亜臨界および超臨界状態における相平衡データや塩を含む高压溶解度データの測定法に関しては、我が国の技術が

世界をリードしている。我が国では、多品種を一つのプラントで生産することが多いバイオ関連産業における流動（運動量移動）と伝熱（熱移動）についての単位操作に関する開発研究が活発に行われている。また、我が国では世界に先駆けグリーン化学プロセスの構築を目指し、「反応工学」と「触媒化学」の融合を意図した「触媒分子反応工学」に関する研究が活発に展開されている。また、化学反応に有効な触媒の研究では、エネルギー・環境への関心が高く、戦略的創造研究推進事業 CREST タイプの継続研究課題にはナノスケール触媒に関する取り組みが多く含まれている。資源化学プロセスに関しては、無機資源、新金属資源、有機資源、生物資源などにおいて、各種化合物の開発とその学術的基礎の確立を目指した研究が展開されており、バイオマスや水素への着目度が高い。国内においても「バイオマス・ニッポン総合戦略」が提唱されており、バイオマス転換や、水素、燃料電池等に関する動きが多い。

## 8. 総合工学

総合工学は、工学の技術を全て統合して、さまざまなものを構築する学問である。代表的なものとして、航空宇宙工学や船舶海洋工学などがある。広範な要素技術とそれらを統合するためのシステム工学的な側面がこの分科の特徴である。航空宇宙工学は、総合工学の典型であり、高性能で信頼性の高い航空機やロケットの開発・運用、人工衛星の正確な打ち上げと宇宙利用などを実現するために必要な研究を行う。要求される性能や安全性、信頼性に対する水準が高いことから、種々の先進技術を牽引して多くのスピノフを生み出してきた。船舶海洋工学は、高性能・多機能で美しく使い勝手の良い船を作り、それを安全に運用するための技術、さらには海中・海底探査、海洋エネルギー・海中空間利用を

行うために必要な技術の開発を行う。流体力学・運動力学・構造力学的研究が多いのが船舶海洋工学の特徴である。地球・資源エネルギー工学は、鉱物資源・エネルギー資源の探査から、その開発・生産・有効利用、さらには地震・火山活動の予測、災害の防止などを研究する。研究開発は国際的に展開されており、政府、民間企業、大学・研究所などが参画するプロジェクトとして行うことが多くなっている。核融合学、原子力学、エネルギー学は、国のエネルギーセキュリティとの関連性が高く、独立行政法人研究所等で行われる研究開発は国家的大型プロジェクトが中心となっており、また大学等の研究機関において行われている基礎研究も国家プロジェクトを支援する性質のものが多く特徴となっている。しかし、将来技術のシーズとなり得る基礎研究も行われており、これらの基礎研究はとかく保守的になりがちな大型プロジェクトを補完する重要な役割を担っている。

## 2 過去 10 年間の研究動向と現在の研究状況

過去 10 年間において、インターネットの普及をはじめとした急速な情報化社会を迎えて、工学研究においても、さまざまな変化が起きている。ここでは、工学の研究動向について、八つの分科に分けて、主に国立情報学研究所の科学研究費研究課題・成果情報データベース (KAKEN) を使って動向の調査を行った。その結果の概要を述べる。

### 1. 応用物理学・工学基礎

応用物理学・工学基礎は、応用物性・結晶工学、薄膜・表面界面物性、応用光学・量子光工学、応用物理学一般、工学基礎に分けられる。応用物性・結晶工学においては、半導

体関連の研究テーマが非常に活発であり、中でも電子産業の中心素材であるシリコンに関する研究が多く、近年は窒化ガリウム (GaN)、炭化ケイ素 (SiC) 等のワイドギャップ半導体に関連する研究の伸びが著しい。また、液晶、磁性体、ヘテロ構造なども増加傾向にある。磁性体関連のスピンエレクトロニクスにおいては、我が国が世界のトップを走っている。薄膜・表面界面物性においては、近年、走査プローブ顕微鏡関連の伸びが著しい。素材としては、最近になって国際的にもポストシリコン技術はシリコン自身が担うしかないと認識され始めたため、シリコンの研究が多い。また、従来のプラズマプロセス関連については研究が激減し、ナノマテリアル創製やバイオ関連のプラズマプロセスが増加傾向にあり、液晶や太陽電池製造用の大面積プラズマ源の研究が盛んである。応用光学・量子光工学では、レーザー、非線形素子、フォトニック結晶などの研究が盛んである。特にフォトニック結晶の研究は近年の伸びが大きい。応用物理学一般においては、研究テーマは広い範囲にまたがるが、光に関する研究が多く、近年特に、発光に関する研究が伸びてきている。また、機械工学的なマイクロスケールでの装置・現象に関する研究も多いが、複合新領域にナノ・マイクロ科学の分科が作られたため、応用物理学・工学基礎の分科ではこのような研究は横ばい傾向にある。工学基礎でも研究テーマは広い範囲にまたがるが、非線形性をどのように扱うかに関する研究が多い。この傾向は、10年前からほとんど変わっておらず、常に重要なテーマになっている。最近では、行列・固有値と逆問題に関する研究が伸びている。

## 2. 機械工学

機械工学は、機械材料・材料力学、生産工学・加工学、設計工学・機械機能要素・トラ

イボロジー、流体工学、熱工学、機械力学・制御、知能機械学・機械システムの各細目に分けられる。流体工学および熱工学では、乱流などの複雑流動とそのアクティブ制御、マイクロバブルや生化学分析システムなどに代表される流体・熱工学の医工学やバイオテクノロジーへの応用、分子やレーザーを用いたマイクロ・ナノレベルでの現象理解と計測、流動・燃焼・伝熱の能動制御、高空間分解・高時間分解・多成分・実時間計測、マルチスケール解析・計測などが最近の重点課題である。それに関連して、レーザー誘起蛍光法、共鳴多光子イオン化法、ラマン散乱法などの分光学的計測手法が開発、高精度化された。また、粒子画像計測法 (PIV) や感圧塗料 (PSP) に関する研究は国際的にも高く評価されており、今後さらに発展するものと思われる。設計工学では、これまで人工物の信頼性と最適化に関して研究が進められてきたが、近年では、設計支援を行うためのモデリング技術の研究も活発で、いわゆる熟練技術者の暗黙知をいかに形式知化し、組織としての知識として残すかというテーマで研究開発が活発化している。機械機能要素では、従来からの機械要素に関する研究に加えて、環境問題に対する意識の向上からシール技術に関する研究も活発である。トライボロジーでは、個々のケースにおける摩擦摩擦のメカニズムおよびその低減方法に関する研究の他に、低環境負荷を目指すトライボロジーとして、水系潤滑剤や植物油の潤滑特性に関する研究などが注目される。知能機械学・機械システムでは、人間機械協調システムの研究開発が活発である。新しい流れとして、マイクロ・ナノメカトロニクスでは、AFMなどを応用したナノマニピレーションやナノハンドリングに関する研究も伸びている。

### 3. 電気電子工学

電気電子工学は、電力工学・電気機器工学、電子・電気材料工学、電子デバイス・電子機器、通信・ネットワーク工学、システム工学、計測工学、制御工学に分けられる。電力工学・電気機器では、主に送配電の高信頼化の研究や、ハイブリッド電気自動車駆動用モータや超高速回転用モータ、超伝導線を利用した大出力機器など、新しい原理に基づく機器の研究が行われている。その他では、IGBTなどのスイッチングデバイス、共振スイッチ、マトリックスコンバータなど、また、応用分野では、風力発電機などの再生可能なエネルギーの利用技術、自律分散、ロバスト制御、自動同定アルゴリズムなどの研究が伸びており、過去10年を見ると、世界的に見ても進んだ水準にある。電子・電気材料工学と電子デバイスでは、青色半導体発光素子や縦型半導体レーザ技術などが開発されている。また、新規材料、新たな物理現象や相互作用などを研究に取り込む動きもあった。通信・ネットワーク工学では、ファイバ光増幅器の出現と波長多重方式の実用化によって幹線網の大容量化が進み、アクセス系におけるシステム構築が可能となった。一方、移動体技術では、デバイスの微細化技術や高密度実装技術の開発が鍵となった。リモートセンシング技術も、ドップラーレーダーやライダーによって、マイクロバーストが観測可能となるなど、飛躍的に発展し、安心・安全な生活の実現にとって大きな役割を果たした。システム工学では、近年、ロギング機能やWEBインターフェイス機能を備えた計測・制御装置が多く開発されている。また、柔軟性の高い計測制御システム構築技術が社会的に必要となり、ハードウェアの面では、コントローラとネットワークを中心としたシステム構築技術の進展、ソフトウェアの面では、

仮想的な製造システム上での制御プログラムの検証技術などが見られる。制御工学では、1990年代になり、ロバスト制御理論が完成し、その応用が進んだ。その後、線形行列不等式(LMI)とよばれる数値解析に基づいたものや、デジタル制御においてサンプル点間応答を考慮に入れた制御理論が発展し、その応用研究も進んでおり、その発展に我が国も大きく貢献している。最近では、ハイブリッドシステム制御理論や非線形制御にも関心が集まっており、研究が盛んである。応用面では、ロボット関連の研究が多く、特に2足歩行ロボット及びヒューマノイドロボットの研究が盛んであり、実用化に向けて研究が進んでいる。

### 4. 土木工学

土木工学は、土木材料・施工・建設マネジメント、構造工学・地震工学・維持管理工学、地盤工学、水工水理学、交通工学・国土計画、土木環境システムに分けられる。過去10年間の全体的な研究動向としては学際性があげられ、防災、環境、社会政策研究の伸びが最近顕著である。防災に関する研究、とりわけ地震災害、洪水災害、土砂災害などに対する研究では、力学だけでは到底解決できない問題のため、社会学・心理学・気象学・森林学など多方面との連携が不可欠となっている。環境に関する研究では、人類も自然の一部であり、健全な自然環境なくして人類の存続もあり得ないことから、自然環境の保全・再生に関する研究も大きな流れとなっている。こうした研究も化学・生物・気象・材料・地質などにまたがる学際性を有している。社会政策に関しては、総合的に社会資本の質や量、配置を見直すための研究が行われており、やはり学際性が高い。

## 5. 建築学

建築学は、建築構造・材料、建築環境・設備、都市計画・建築計画、建築史・意匠に分けられる。建築環境・設備では、空調、都市気象、温熱感、空気質、水分・湿気、換気・通風、室内気流・温湿度、伝熱、火災、自然エネルギーに関する研究が主に行われており、この10年間で変化はほとんど見られない。建築構造・材料、都市計画・建築計画などその他の細目では、阪神・淡路大震災の影響で、一般的に地震、災害に関連する研究が増加した。現在では、地震など災害に関連する非日常的な課題より、シックハウス関係などの健康や快適性、省エネルギー、ヒートアイランドなど都市・地球環境をテーマとする日常生活に密着した研究テーマが大部分を占める。今後増加が予想されるものとして、防犯、セキュリティ関連テーマ、諸外国と関連するテーマ、環境教育などの教育関連テーマ、規格、基準、管理システムに関するテーマなどがあげられる。海外との比較の観点では、ライフスタイルなどの曖昧なテーマについては、日本独自の研究領域が形成できる可能性が考えられる。これらのテーマの特長を改善して、積極的に生かすことにより、一層の飛躍が図れると思われる。

## 6. 材料工学

材料工学は、金属物性、無機材料・物性、複合材料・物性、構造・機能材料、材料加工・処理、金属生産工学の各細目に分かれる。科学研究費の採択課題数が多い材料工学の細目は、順に、材料加工・処理(24%)、構造・機能材料(21%)、無機材料・物性(20%)、金属物性(14%)、金属生産工学(13%)、複合材料・物性(8%)となっている。金属物性では、化合物、金属ガラス・アモルファス・非晶質、磁性、薄膜、粒子、電子顕微

鏡、X線に関する研究が多い。従来から拡散、変態などの研究テーマも多いが、水素関連の研究が注目される。日本は、アモルファスや磁性材料では世界のトップであるが、基礎研究全般で欧米に対して優位であるとは言えない。無機材料・物性では、セラミックス、ガラス、酸化物、薄膜、チタン酸バリウム、誘電体などの研究が盛んである。近年、生体用材料関係の研究が盛んになってきている。複合材料・物性では、高分子、粒子、繊維、破壊に関する研究が盛んである。また、C/Cコンポジットや超伝導材料の研究が注目される。構造・機能材料では、伝統的に金属材料の研究が多い。主なものとして、銅、チタン、磁性合金、水素吸蔵合金、形状記憶合金に関する研究が挙げられ、水素関連が多いことも注目される。鉄鋼材料では日本のレベルが世界的に見て十分に高いが、アルミニウム合金やチタン合金などはアメリカなどに差をつけられている。材料加工・処理では、材料として金属、特に銅やアルミ、チタンなどが主に研究され、対象として組織、接合、レーザーなどが主に研究されている。この細目で新しい研究として注目すべきは、コールドスプレー、摩擦攪拌接合、収束イオンビーム装置(FIB)による微細加工、エアロゾルデポジション(AD)、形状不変加工などであり、外国で考案されたプロセスが日本で発展した形となっている。金属生産工学では、銅、アルミニウム、凝固などに関する研究が主に行われている。海外から素材を輸入しているケースでは、国内での技術の蓄積が難しい状況にある。

## 7. プロセス工学

プロセス工学は、化工物性・移動操作・単位操作、反応工学・プロセスシステム、触媒・資源化学プロセス、生物機能・バイオプロセスの各細目に分かれる。化工物性・移動

操作・単位操作では、伝熱、吸収、吸着、抽出に関する物性や移動現象に関連したデータの集積が望まれている。しかし、この細目における過去10年間の研究動向に大幅な変化は見られない。化工物性に関しては、気-液、液-液、固-液間の相平衡推算法の開発、化工物性データベースの構築、相平衡の測定に関する研究が展開されており、最近では取り扱う物質も超臨界流体やポリマー溶液に拡張されている。移動操作に関しては、新規化学プロセスにおける直管内、層流および乱流状態下での流動、充填層内の流れの解析、攪拌による効果、非ニュートン流体の流動特性、熱交換器の伝熱特性などが検討されている。反応工学では、構造体反応器による反応場の創出と特殊反応場による反応活性の制御が最近行われている。プロセスシステムでは、マイクロ化学プロセスの最適設計と操作法、分散型サプライチェーン管理システム、プロセス制御・プロセス運転監視システムの設計、化学プロセスの動的最適操作、環境調和型プロセスの合成法の開発などに関する研究が展開されている。触媒・資源化学プロセスでは、グリーン・プロセス実現に向けた触媒設計に関する研究が活発に行われている。無機・有機資源化学では、種々の金属、有機及び高分子化合物の合成、構造、物性ならびに反応について広範な研究が展開されている。生物資源化学では、生体内で特に重要な役割を担うタンパク質の研究を中心に、タンパク質の作用機構を分子レベルで明らかにする研究も行われている。

## 8. 総合工学

総合工学は、航空宇宙工学、船舶海洋工学、地球・資源システム工学、リサイクル工学、核融合学、原子力学、エネルギー学各細目に分かれる。航空宇宙工学では、構造、気体・流体力学関係、制御などに関する研究

が多く、航空宇宙工学の基幹技術となる複合材、超軽量、強度、制御、設計に関する研究課題の数は、ほぼ変わっていない。衝撃波、空力特性、空力弾性、電気推進、デブリをキーワードとして含む研究課題は減少傾向にあるが、宇宙関連のキーワードが増加傾向にあり、プラズマ推進、デトネーションエンジン、イオンエンジンなどが例として挙げられる。また、数値流体力学(CFD)や環境適合技術に関連した騒音に関する研究も近年増加している。船舶海洋工学では、1996年からスタートしたメガフロートプロジェクトに関連して、1998年前後には超大型浮体、流力弾性、弾性応答などに関する研究課題が急増した。近年では、数値流体力学(CFD)の手法の進歩によって、強非線形の波浪・浮体相互作用の研究が急増している。また、メタンハイドレートに関する技術開発の研究、海洋環境の保全・再生に関する研究、波浪災害とその防止法の研究も最近話題を集めている。国際的には、双胴船や他胴船(トリマラン、ペンタマラン)を含む新形式高速船の研究成果が多く発表される傾向にあるが、日本では研究が少ない。地球・資源システム工学では、探査、制御、システム、き裂、破壊に関する研究がコンスタントに行われている。また近年減少傾向が見られるのは、岩盤、地熱(貯留層)、分離、鉱物、トモグラフィ、合成開口レーダ、鉄酸化細菌、焼却灰、機械などの研究である。逆に増加傾向が見られるのは、廃棄物(処理)、汚染物質、土壌浄化、X線CT、低環境負荷、温暖化、二酸化炭素、エネルギー、ハイドレートなどの研究である。環境問題、再生可能資源エネルギーの利用、新エネルギー開発などに研究の興味が移りつつあると言える。核融合学では、国際熱核融合実験炉(ITER)計画への参加を前提にトカマク方式による自己点火条件の達成と長時間燃焼の実現を目指した開発や、ヘリ

カル系やレーザー方式等のトカマク以外の閉じ込め方式の研究, 実験炉の建設に必要な炉工学技術の確立, 原型炉に必要な炉工学技術の基礎研究, 核融合炉システムの安全性, 経済性に関する研究が実施されてきた。原子力学では, 次世代原子炉概念に関する研究, プルトニウム高次リサイクルを見越した先進再処理技術やバックエンド技術の研究が主に行われた。また, 放射線と物質との相互作用やこれを利用した材料開発, 放射線計測技術に関する研究も盛んに行われた。エネルギー学では, 要素技術として太陽電池, 水素エネルギー, 燃料電池に関する研究が盛んに行われた。また変換技術では, 廃熱利用を目的とした熱電変換, 太陽光からの直接水素製造, 利用技術では, 廃熱利用に関するテーマが多かった。

### 3 今後 10 年間で特に進展が見込まれる研究対象, アプローチ等及び推進すべき研究

#### 1. 応用物理学・工学基礎

応用物理学・工学基礎の研究は, 重点推進 4 分野であるライフサイエンス, 情報通信, 環境, ナノテクノロジー・材料に密接に関係しており推進すべきテーマは多い。推進すべき研究の一つとして, 高度情報化を支える Si 集積回路があり, 多面的な Si 系の研究開発が必要である。高速化のための超薄膜 SOI (silicon-on-insulator) 構造, 歪 Si 技術などの作製プロセス技術とともにナノスケールの精密な評価が非常に重要な課題であるほか, 強誘電体, 磁性体, カーボンナノチューブなどの新探求材料の研究も必須である。シリコン太陽電池も我が国が先導して研究すべきテーマである。今後 10 年では, 多結晶 Si 太陽電池が本命であることは疑いがない。現在

の我が国の Si 太陽電池の生産は世界一であるが, 最近頻繁に開催される関連の国際会議では欧米が基礎的研究面で一步リードしており, 生産量でも日本を追い付き追いつき越そうとしている勢いである点が看過できない。Si 以外では, ワイドギャップ半導体を用いたデバイスの研究も推進すべきである。特に炭化ケイ素 (SiC) は超低損失パワーデバイス用として有望な材料である。ウエハーの高品質化・大口径化が進んでいるが, 低欠陥化とそれを支える欠陥評価等多くの研究課題が残されている。また, 窒化物系半導体 (GaN, In-GaN 等) 素子は飛躍的な発展を遂げたが, 照明用・光エレクトロニクス用として更なる用途の拡大が見込まれる。同時に耐環境素子・高周波デバイスの研究開発も推進すべきである。スピントロニクス関連では, 磁性金属と半導体の融合が重要と考えられる。有機分子エレクトロニクス関連では, 新しい有機材料機能を追及する必要がある。応用光学・量子光工学では, 超短光パルス発生技術に直接関係する量子光学, 非線形光学と, バイオフォトンクスや超高速光通信などの応用分野に進展が見込まれており, 光と半導体の融合を推進すべきである。応用物理学一般では, 光に関する研究が盛んに行われており, それは今後も引き続き発展していくと思われる。また, センサや中性子, 超伝導, 加速器, 放射線, 超音波などに関する研究の進展が見込まれる。工学基礎については, 非線形系の振る舞いの理解を進展させると同時に, 適切な解析・シミュレーション手法を進歩させることが必要である。また, カオス, フラクタルなどの非線形系で見られる現象に関する研究, 多粒子系の振る舞いのシミュレーションも含む離散系の解析も引き続き推進すべきである。最適化問題・数値計画問題, 逆問題の数理解法についての研究も進展が見込まれる。

## 2. 機械工学

設計工学においては人工物相互の、あるいは人工物と人間・社会・環境などとの関係性の設計についての理論を探求しなければならない。また人工物設計についての設計倫理などに関しても研究が必要である。トライボロジーでは、ナノトライボロジーやバイオトライボロジー（あるいは Human-related Tribology）が大きく進展すると思われる。知能機械学・機械システムでは、人間機械協調技術に関連して、人間の行動や運動、意図などを認識する研究やそれを人と機械のコミュニケーションやそれらの協調問題に多面的に活用していくことが重要になる。そのために、生活環境下で実用に耐えるシステムを開発するための統合技術の研究が必要になる。また歩行訓練、歩行支援のようなりハビリテーションや上肢のパワーアシストなどを目的としたロボットメカトロニクス機器の研究が進展すると考えられる。流体工学および熱工学では、CO<sub>2</sub>の固定化・有効利用、脱フロン技術、自然冷媒、バイオマス・風力・太陽光発電、燃費改善、燃料改質、核燃料サイクル、水素エネルギー利用、燃料電池、超臨界流体などの研究はさらに推進すべきであり、日本の環境に適合した風車の開発や洋上に適合した超大型風車システムの研究も進展するであろう。

## 3. 電気電子工学

電力工学・電気機器工学では、少ない電気エネルギーをいかに安定に供給するかという点は非常に重要であり、炭化ケイ素 (SiC) などの新しい電力変換機用のスイッチング素子の開発を急ぐべきである。さらに、電力変換を基礎とするパワーエレクトロニクス技術の研究を推し進め、例えば、ハイブリッド電気自動車、新幹線の動力性能や家電としてのイ

ンバータ利用の民生品において、省エネの面だけでなく、高性能な電気エネルギーの有効利用の面から研究を促進する必要がある。電子・電気材料工学、電子デバイス・電子機器、通信・ネットワーク工学でも、これまでの研究を継続してさらに発展させ、これまでにない新技術の開発によって新たなブレークスルーを生み出すシーズ技術を創出する努力が続けられなければならない。システム工学では、システム制御系の信頼性・安全性に関する問題は近年大きな関心を集めており、関連する研究を推進するべきである。制御工学では、自動車産業関連やロボティクス、各種メカトロ機器の高速高精度制御などにおいて、我が国が世界をリードしており、それらをより推進し、世界を先導し続けることが特に重要である。また、人間並みまたはそれ以上の運動能力および操作能力の実現や家庭用ロボットの安全基準の制定などが重要な課題となる。

## 4. 土木工学

今後推進しなければならないテーマ、我が国が先導して行うべきテーマは、他の国に先駆けて進む人口減少・少子高齢化の社会状況のもとで社会資本整備はどうあるべきか、地球温暖化に伴う災害外力の増大下で人々の生命・財産・社会生活を護るための社会基盤整備はどうあるべきか、また今後環境と防災をどう融合させていくかである。人口減少・少子高齢化の社会状況下での社会資本整備のあり方に関しては、コンパクトシティなどのコンセプトに基づいた学術的・技術的課題、解決などを横断的かつ総合的な観点から検討する必要がある。地球温暖化に伴う災害外力増大下で人々の生命・財産・社会生活を護るための社会基盤整備はどうあるべきかに関しては、低コストでかつ効率的な防災技術の開発・確立が急務となっている。今後環境と防

災をどう融合させていくかに関しては、人間の側に自然の声なき声を聞き取り、対応していくための豊かな感性、イメージ力、また自然環境の訴えに迅速に対応するための修正・後戻りできる要素技術ならびに技術システムの開発が必要となっている。

## 5. 建築学

我が国が第一に推進しなければならない課題は、建築環境・設備においても地球環境問題への対応、具体的には京都プロトコルを遵守するためのCO<sub>2</sub>排出量削減と言える。また、日本社会の高齢化の進行とともに、バリアフリー（ユニバーサルデザイン）に代表される建築設計のコンセプト、室内環境や住宅設備をどのようにすべきかについては、一層その重要性が増しており、関連する研究を今後推進していくべきである。

## 6. 材料工学

我が国が先導して行すべきテーマ、又は推進しなければならない材料工学のテーマとして、材料のライフサイクルに関する効率的で包括的なシステム技術開発、稀少資源を含む材料の代替材料の開発、エネルギー関連材料の開発が挙げられる。材料のライフサイクルに関する効率的で包括的なシステム技術開発では、資源選択、材料設計、生産、加工、評価、製品機能設計、利用（使用）システム、解体、廃棄（再資源化）という材料のライフサイクル全体について、地球環境負荷を尺度として、それを最小にする材料設計、リサイクルシステムの確立など包括的なシステムの開発が望まれる。稀少資源を含む材料の代替材料の開発では、資源が豊富で無害な元素を中心に、構造や組織を制御することで、稀少金属の担う機能を発揮させる代替材料の開発が望まれる。エネルギー関連材料の開発では、未普及なエネルギー利用を具現化する材

料技術や高効率なエネルギー利用のための革新的材料技術の開発が望まれる。

## 7. プロセス工学

化工物性では、測定法、推算法、データベースの構築について進展が望まれる。反応工学では、反応場のポテンシャル勾配を熱・エネルギー勾配（熱、電圧）、分子移動（濃度、圧力勾配）、変動操作（非平衡化）、雰囲気制御（雰囲気ガス、プラズマ）により形成させる研究の進展が望まれる。触媒・資源化学プロセスでは、電極触媒とイオン導電体を組み合わせた電気化学的反応システムについて進展が望まれる。また、モノリス触媒は、新たな反応形式として注目される。メンブレンリアクターにおける触媒機能の付与方式に関しても、新たな手法の開発により理想のメンブレンリアクターとなることが期待される。規則性ナノ空間物質は、未知の触媒能や機能をもたらすものとして期待できる。また、アミノ酸のポリマーであるタンパク質は、電子の伝達、光の受容、機械的な運動、情報の伝達、特異的な反応の触媒など様々な機能の発現が期待できる。

## 8. 総合工学

航空宇宙工学では、信頼性向上、高性能化、環境問題が当面の重要課題であり、数値流体力学（CFD）と実験技術の進展によって研究の速度と幅が広がっていくことは確実である。個別技術として、3次元複雑形状に対するCFD技術、多目的最適化技術、構造・空力・伝熱等連成計算技術、音響CFD技術、耐熱性・力学特性・成形性に優れた耐熱複合材の開発および成形技術の高度化を推進すべきである。また、安全運航に関して、構造の健全性モニタリング技術の開発、人間工学に基づいたヒューマンエラーの発生メカニズムの解明とその防止に関する研究、

航空機をより高精度・高密度に飛行させるための航空電子機器の開発と利用方法に関する研究などが進められるべきである。長期レンジで考えれば、有人宇宙飛行、深宇宙探査、完全再利用宇宙往還機、無人航空機、成層圏プラットフォームなど、新たなフロンティアを自らに課し、リスクの多い挑戦的な研究を行うことも必要である。船舶海洋工学では、波浪中での全抵抗を最小にするための船型最適化の研究、水波と浮体の強非線形相互作用の研究、波浪荷重・構造一貫解析に基づく異常波に対する安全評価技術の研究、逐次崩壊挙動ならびに最終強度の研究、洋上風力エネルギー・海洋エネルギーの利用方法の研究で発展が見込まれる。地球・資源システム工学では、効率的に地下資源が存在する地域を宇宙から特定する技術、高精度の電磁探査技術、メタンハイドレートを掘削・回収・輸送する技術に発展が期待される。また、信頼性・安全性の向上、環境問題が重要な課題であるので、それに資するための要素技術を高度化し、各種のシステムとして統合化する研究も継続して行われるべきである。核融合研究では、ITER計画への参加を通じたトカマク方式に関する研究、原型炉開発に向けた研究開発、ヘリカル方式、レーザー方式に関する研究が進むと予想されるが、これに加えて、核融合エネルギーの実用化検討に資するために経済性、安全性、運転信頼性の実証に向けた研究が行われることが期待される。原子力学では、さまざまな原子炉概念の確立、先進湿式や乾式による再処理技術の開発、プルトニウム多重リサイクルに必要な再処理・再加工技術に関する基礎研究・技術開発、地層処分安全性評価における不確かさを減らすための研究に成果が期待される。さらに、要素技術的研究に加えて、システム工学的研究や社会技術研究の進展も望まれる。エネルギー学では、引続き新エネルギーの開発と利用技術

の高度化の双方における研究開発努力が必要であり、太陽電池、水素エネルギー、燃料電池に関する研究が中心になってゆくと予想されるが、複数の選択肢に並列的に投資して行く姿勢が重要である。

#### 4 諸課題と推進手法等

工学においては、激しい社会状況・自然環境のもとでの10年後や100年後までも見越した長期的展望に立って研究を進めなくてはならないため、直感力・洞察力や眼識、見識などが研究者に要求される。大所高所から「今何をなすべきか」を深く洞察した研究者の意識・自覚が極めて重要となっている。そのためには、さまざまな要素が必要となる。現状では、要素技術的な研究が優勢であるが、今後は人間の意志を理解する人工知能技術のようなシステム的な研究や、工学と理学、社会科学などを融合した統合的工学の研究、経済・社会状況との整合性を持った技術構築に関する研究、安全・安心性に関する研究、資源リサイクルを目的にしたアーバンマイニング研究など従来の工学を超えた分野の研究も推進して行く必要がある。工学では、多分野間の先端技術の融合を図ることが効果的である。分野間・産学官の情報連携システムの構築を通して、質の高い情報を融合させることによってシナジー効果が生まれ、ブレークスルーが起こる。そのための推進手法として、人材育成、産学官連携、適切な研究支援戦略が重要となる。

##### 1. 人材育成

現在普及している工学技術のほとんどがブラックボックス化し、特に若年研究者層に原理を理解しないまま技術を使用する傾向が見受けられる。基礎に立ち返ったデータの採取と解析ができるような人材が不足しており、

基礎的理解の欠如により大切な次世代技術への芽がすみとられてしまう危惧が生まれている。専門的な領域ばかりでなく、基礎的な原理から分野を超えた学問まで幅広く習得するような若手の人材教育が肝要である。

これまでの工学の研究者育成では、要素技術の充実では誇れるものの、ものづくり体験に乏しく、俯瞰的立場からプロジェクトを計画策定し、推進・管理する能力の育成、国際的な連携・協力を柔軟に行える能力の育成が足りなかった。全体を見渡しながらの技術が有望で、研究を推進する価値があるのかを俯瞰的な視点から評価できる組織や人材を確保して行くことも重要になる。

人材の育成には、国際的な協力関係も大いに進めるべきである。単に海外で博士号を取得するにとどまらず、ポストドクターや企業での就職を含めて10年以上海外の経験を積んだ研究者を増やすことが必要である。そのためには、海外経験組が日本に戻って活躍できる仕組みを設けることも重要である。日本は将来少なくともアジアで学術や技術分野のリーダーとしての役割を果たすべきであると考える。そのためには、国際感覚を身につけ、世界の情勢や文化に関心を持つ研究者を育てていく必要がある。

## 2. 産学官連携

工学は、産業界との関わりが非常に大きい分野であり、民間企業の研究機関等との協調・協力関係の構築が大切である。現在の問題点の一つとして、産業界から企業内の操業データがオープンな形で提供されることがほとんどないため、学界の研究者が利用可能なフィールドデータが少ないことがあげられる。その一方で、国内の企業が世界のトップレベルであるような分野であっても、企業研究所は次世代の研究開発に手一杯で、将来を見据えた基礎研究を行う余裕は全くない。日

本が世界をリードし続けるためには、大学や各種研究機関の基礎研究の芽を育てるべく政府主導で産学官連携を推進すべきであると考えられる。

効果的な産学官連携を進めるためには、企業同士が協同して資金を出し合い、企業間連合の研究推進機構を形成するとともにそれを産学官連携研究コンソーシアムとして機能させることも考えられる。大学研究者と企業側技術者との役割分担を明確にすることで、相補的な研究開発体制を構築するなどの仕組みが重要である。その結果、大学研究者に研究資金を提供・支援するとともに、大学院生にも奨学金を提供するなどして、大学の基礎研究への支援ができるとともに次世代の若手研究者の育成も同時に可能となる。また、産学官民が集まってプロジェクトチームを構成し、大きな問題解決にあたる研究開発型NPO法人は新しい研究推進のスタイルとしてその可能性を秘めていると思われ、工学分野の大規模なプロジェクト研究に対して有効な方策の一つと考えられる。さらに、産業界と大学の協調による質の高いインターンシップ体系の構築も産学官連携に非常に効果的であると考えられる。

## 3. 適切な研究支援戦略

工学の一部の分野においては、大型国家プロジェクトを中心に研究が行われている。経費が膨大になる大型国家プロジェクトでは、国際的競争と協調の中で将来までを見通した国家的方針を明確にし、長期的かつ俯瞰的な観点から日本独自のビジョンを持った研究開発計画の立案・実施を行うべきである。

その際には、大学、学協会、国公立研究機関等とのネットワークを構築し、関連した科学・技術を省庁を超えて総合的に推進することが重要であると同時に、スーパーコンピュータなどの最先端の研究機器は、一部の

研究者だけが使えるのではなく、多くの研究者が容易に使えるような体制とすることが重要である。

一方、大学等では、国家プロジェクトとは別の次元で、学術的観点から基礎研究を中心に研究が行われている。国家プロジェクトでは最も有望と思われる少数の技術に集中的な投資を行うので効率的で失敗が少ない反面、保守的な選択とならざるを得ず、新時代を切り開く斬新な研究が生まれにくい。このような部分を担うのが大学等で行われる研究である。

バックアップ技術の準備や革新的技術シーズの創出という点で科学研究費補助金が担う

役割は大きい。したがって、これまで以上に広い範囲にわたる研究をしっかりと推進し、幅広い基礎的な研究の力を蓄えていくことが可能にするのが、日本の科学技術の発展のために重要である。特に、先端技術を支える基礎的な分野に関しては、さらなる研究費の拡充を行うとともに、採択率を今よりも高くすることが望ましい。

また、市場経済に依存した短期的判断に任せず、現状で応用分野が限られている場合でも、十分な配慮が必要である。

編集協力：市瀬龍太郎（国立情報学研究所）