

第1章 はじめに

人間社会は材料とともに進化してきたといっても過言ではない。身近な例を挙げてみよう。初期の飛行機はエンジンなどを除くと木と布でできていた。もし、ジュラルミンをはじめとする軽くて強い材料が開発されなかったら、私たちが飛行機で世界を飛び回るといのは夢のまた夢であったに違いない。もちろん、巨大な航空機メーカーも航空会社も存在しなかつたろう。もし、シリコン半導体という材料がなければ、現在のようにコンピュータが普及することはなかつたし、現在の経済を牽引する IT 産業も興らなかつた。そうであれば、私たちも昔ながら世界の出来事とは切り離されて生活しているに違いない。

どうやったら空を飛べるかという基本原理が分かって、それに適した材料がなければ空を飛ぶ技術は社会の中で定着普及することはできない。どうしたら計算機が作れるかは真空管式のコンピュータ「ENIAC」で実証できるが、その技術が力を持つには最適な材料が不可欠である。技術や仕組みを考案することは、人の頭脳の中でできるが、それを社会的な存在として具現化するのには材料であり、材料を駆使する産業である。

模型的に過ぎるという批判があるかも知れないが、例えば、高温超伝導体を使った送電（まだ実現されていない）の開発について、その知の構造を考えてみたい。超伝導送電を実現するには、臨界温度や臨界電流などの物性から、開発の対象となる超伝導物質の選択が行われる。選択した物質について生産・加工の技術を開発しなければならない。さらに、冷却システムや安全性の研究開発が必要だし、他の送電システムとの整合性なども検討される。

超伝導送電開発の最も大切な要件は、様々な高温超伝導物質について選択肢が用意されていることである。Zurich にある IBM の研究所の研究者が、ペロブスカイト系のセラミックスが高温超伝導を示すことを発見した。これに刺激されて、世界中の様々な研究者が、様々な酸化物などについて極低温まで冷却し、電気抵抗をはかってみた。それによって多数の高温超伝導物質が発見された。ある時期に、多くの研究者が超伝導物質の探索研究をしたことによって、超伝導物質の選択肢が用意された。言い換えれば、超伝導という学術的な視点に立った物質研究のおかげである。

では何故、IBM の研究者が高温超伝導体の発見に至るのか。動機は様々なながら、多様なセラ

ミックスについて物性研究が行われていたからとしか言いようがない。エレクトロニクス材料という視点からの研究もあったし、耐熱材料という動機もあっただろう。鉱物結晶の性質を体系的にまとめようという研究も考えられる。動機によって、測定した物性もまた様々だったに違いない。地味な研究で、社会から注目される例は少なかった。たまたま、IBM の研究者は、研究対象となった物質を冷やして電気抵抗をはかってみた。彼らが超伝導の研究をしていたわけではない。その証拠に、彼らの論文は「超伝導の可能性がある」ことを指摘しただけにとどまっている。超伝導体であることを確認したのは日本の研究者であった。

この例を整理すると、社会的な目的を持った材料の研究開発を支えるのは、超伝導物質の探索という学術的な目的を持った物質・材料の研究である。その学術研究のきっかけになったのは、様々な動機による多様な物質研究の存在と、たまたま冷やしてみるという好運であった。もし、超伝導送電という社会的な目的から出発して物質研究を行うとすれば、当時の常識から考えて金属材料しか研究されず、高温超伝導体は発見されない。上記の例で、どこまでが材料研究で、どこまでが物質研究かは判然としない。しかし、特定の材料の研究開発の前提条件として多様な物質研究があることは確実である。

夢のエネルギー源といわれる核融合も、ITER 計画でエネルギーが取り出せることが実証されようとしている。核融合炉の成否は材料にかかっていると言っても過言ではない。1,000 以上で働く熱機関が実現すれば、エネルギー効率を大幅に改善することが出来る。世の中には原理や仕組みは分かっているが、それに適した材料が存在しないという例は多い。そういう場合、材料のブレークスルーがあれば、極めて大きな経済効果があるし、新産業も生まれる。社会の仕組み全体を変える可能性すらある。新しい材料の開発こそ、経済活性化の道である。

現在の世界は、人類の持続可能性を模索する段階に入った。大量生産・大量廃棄という文明の質的な転換が求められている。捨てることを前提とした材料選択から、捨てないことを前提とした材料の出現が必要なのかも知れない。文明の質的な転換のためには、材料の質的な転換が必要だろう。もちろん、既存の選択肢を別の視点で見直すことで、新たな材料が見つかる可能性も強い。それには、戦略的な材料研究が必要になる。しかし、戦略的な材料研究にも限界がある。超伝導送電の例で見たとおり、既存の選択肢から脱却することはできず、大きなブレ

ークスルーにはつながらない。

大きなブレークスルーを実現し、不可能を可能に変え、新たな文明を築くには多様な物質研究の支えがなければならない。急がば回れのたとえ通り、多様な物質研究こそブレークスルー、ひいては経済活性化や文明転換の早道と考えることができる。物質・材料研究開発の国家戦略を立案することが急務である。戦略立案に当たって、社会的目的を意識した戦略的材料研究と、それを支える多様な物質研究の二つの視点が重要である。

本報告書は6章からなっている。第2章では、材料のもつ社会的意味、産業との関わり合いを中心に述べ、第3章で物質・材料研究体制の国内外の状況に言及し、第4章では代表的な材料分野における研究の現状と将来展望を述べている。第5章で物質・材料研究に関する国家戦略構築の必要性を提言している。

第2章 材料とは何か

我々の生活は数多くの物質や材料、さらにはそれらを加工した様々な製品によって支えられ我々の社会は物質文明の上に成立している。そしてその水準はそれを支える科学技術の発展によって向上してきた。

人類は古くから、天然の素材（物質）を手工業的な手法で加工するなどして、材料・道具として利用し、生活を豊かにしてきた。科学的知識や産業としての形態が未熟な時代においては、材料の利用は量、質ともに限定されていたが、近代に入り、科学の進歩と産業革命に端を発する急速な経済の発展が相互に影響しあうに及んで、社会に大きな変革をもたらすことになった。

18世紀に酸・アルカリ工業の基礎が築かれ、化学産業という形態が社会に誕生するきっかけになった。同時期に石炭コークスによる高炉製鉄法が確立し、産業革命の原動力となる材料としての鉄鋼産業、原動力としての蒸気機関によるエネルギー産業が開花した。19世紀には、石炭と鉄を主軸とする産業革命は一層の高度化を遂げ、コンクリートも発明された。石炭ガスの製造に伴うコールタール処理の研究から合成染料が開発され、現在の有機化学産業の端緒となった。合成医薬の時代が始まったのも19世紀後半である。また、ゴムの加硫法の発見(1839年)によるゴム工業の新しい展開など、それまで天然物に依存していた生活から人類独自の新しい物質文明への道筋が拓かれた。

20世紀に入って電気化学工業、空中窒素固定による合成アンモニア工業、食塩電解によるソーダ・塩素工業、合成ゴム、合成樹脂、合成繊維などの新しい化学工業が生まれた。特に後半では、より性能の高い材料の研究開発が国家の存立基盤に直接関わることから、大規模な研究開発のための組織が生まれるようになった。化学の分野においては石油を原料とする石油化学工業が急速に進歩し、金属産業においては新しい大規模プロセス技術の発展により我が国を中心とした臨海型の大型製鉄業が出現した。この時期に特記すべき事項は、固体物理を中心にした半導体技術の誕生と急速な発展である。これにより従来の真空管をベースにした電子工業が半導体に軸を移して、情報・電子産業というまったく新しい産業の創出を導いた。

また、物質の探求と生物学との融合から20世紀半ばにはDNAが発見され、生化学、バイオテクノロジーの急速な発展を促し、21世紀に人類は人工の命を作り出す能力まで獲得しようと

している。新しい科学技術、新しい材料の誕生により我々の物質文明がまさに最盛期を迎えつつある一方で、環境問題、資源問題、エネルギー問題が地球的規模で進行しつつあり、単純な開発思考だけでは今後の発展が難しい時代となってきた。

2 - 1 材料の定義

材料とは加工されて製品になるものであり、最終消費財の機能対費用効果の最大化を意図して設計され最終消費財を構成する部品・成型品・加工品などの原料として利用される物質群である。ここで、機能とは消費財の価値・利便性のみならず、消費財のライフサイクルにわたる環境影響をも含むものである（図2-1：物質・材料と社会・産業の関係）。科学技術基本計画においても「役に立って始めて材料」という表現があるように、材料には有用という目的指向性が付きまとっている。しかし有用性とはその時々を経済社会的条件や技術水準によって変わるのであまり有用性ばかりに目を奪われていると本質を見失う恐れがある。これに対して、物質とは物体を作り上げている実質と示され、精神に対置する意味でも用いられる。このように日本語の響きとしては材料と物質との間には大きなニュアンスの違いがあるが、いずれも英語では Material である。

それらを総合的に研究しようとする立場から Materials Science という概念が50年ほど前から提唱され、定着している。これは物質、材料を構成する分子、原子の構造やそれらの集合体、その結合状態等を総合的に研究し新たな機能を有する物質、材料の開発やその製造プロセスを研究しようとするものである。日本では材料科学と訳されることが多いが、正しくは物質・材料科学と解すべきであろう。

また、材料を物質から生命、心へと展開する研究の流れの中に位置づけた場合、材料の定義や意味も発展するナノテクノロジー、バイオ、医学等の影響を受けて変化することが考えられる。例えばナノテクノロジーの進展により、材料としての最小機能単位は原子や分子のレベル、さらには量子（効果）のレベルに接近しつつあり、エネルギーや波動との相関性も視野に入ってくる。一方、化学組成とは異なる形状因子によって特異な材料機能が発現される可能性もある。また、ES 細胞由来の生体材料の供給が現実のものになれば、生命と材料の境界は曖昧な

ものになる可能性がある。

2 - 2 「材料」の社会生活における役割

人類の歴史を記述する方法として、石器時代、青銅器時代、鉄器時代といった表現が知られている。この表現では、新しい「材料」の発見・発明を契機としてその活用法が普及し一般化されたことを表して命名されたものである。「器」という表現から明らかなように、「農耕器具」や「狩猟器具」、「武器」、「生活器具」などの財への応用の一般化によって、生活様式の革命的な変化をもたらされたことを、「材料」名を借りて表現したものと理解される。「材料」は人が活用すること或いはその社会的価値(実用価値)が強く意識され、設計された「物質」である。人の意図とは無関係に存在しうる「物質」と異なり、強い目的指向性を有する。

材料とエネルギーは社会の発展に欠くことのできないものである。ストック資源の枯渇が深刻化する将来においては、これまでの資源多消費型・エネルギー多消費型材料技術体系の根本的な変革が必須であり、これまで以上に新「材料」の開発への期待が高まることは明白である。科学技術基本計画が目指す「社会の持続可能な発展と産業の国際競争力強化」を実現するためには、「材料」開発を支える基礎的かつ広範な「物質」に関わる科学的知識の蓄積と社会への普及、その上に「材料設計のための科学」、「新しい生活価値の創造」及び「最適な新材料の設計と製造技術の確立」を具体化しなければならない。

2 - 3 「材料」の産業における役割

現代社会において、財やサービスの消費者の大多数は、一方でそれらを生産・供給する産業界の構成員でもある。そこで本論では、産業が社会を構成する集団の一つとして財やサービスを供給する機能を担うことから、受け手としての消費機能を「社会」と考えた。ここでは「社会」は、狭義に「社会生活」の意味と解釈して考察する。

「産業」においては、財やサービスの高度化・複雑化及び徹底的な効率化の追求により、単一の事業者が一次原料から最終消費財までを一貫して取り扱うことができなくなっている。すなわち、高度な分業や複雑なプロダクションチェーンとサプライチェーンによって財が供給されて

いる。このチェーンの中で「材料」は多くの製造産業に供給され、そこで生産された「部材、部品・成型品・加工品」等の製品が様々な形で消費財生産者に供給され、流通業や商業を通じて消費者に提供されていることが理解できる。「材料」は消費財の機能やサービス価値を決定する重要な役割を担っており、「材料」の供給無しで社会生活を維持することは困難である。消費財やサービスを提供する産業も存続しえないことは自明である。

金属、無機（セラミックス）、有機高分子の3分野にわたる材料産業の製品出荷額は93兆円（1997年）、従業員数282万人（1997年）、付加価値額40兆円（1997年）で、いずれも我が国製造業の約3割を占める基幹産業であり、雇用吸収力も大きく、産業基盤として重要な地位を占めている。特に我が国では製造業に占める材料産業のシェアが約21%で、ドイツ（約19%）や米国（約16%）に比して高く、国民経済にも大きな貢献をしている。

一方研究開発費は、2.7兆円（製造業の27%）で、売上高研究費比率は3.4%と製造業平均（3.7%）より低く、今後は更に低下する傾向にある。また材料分野における大学の研究者数及びその全体に占める割合は若干増加しているものの、企業における研究者数及びその割合は減少している（割合は1980年：47%、1998年：28%）。材料分野における技術論文の数および引用件数の世界的シェアは他の分野に比較して最も高く、これまでのところ先進国中で遜色のない水準にあるが、一方で上記産業界の研究開発費の低下傾向には一抹の不安を禁じ得ない。

材料産業は前述のように、加工組立産業、建設産業等に材料を提供する産業であり、材料産業の産業連関係数は2.03で、精密機械の2.01、建設の1.94と比較して高く、材料産業の国際競争力の水準が電子機械、自動車、精密機械等の加工組立産業の競争力に大きな影響を与えることが分かる。

材料産業は一般的に言って装置型産業であり、商品の差別化が難しく、過当競争に陥りやすく、低収益体質であるといわれている。確かに売上高利益率等の指標で比較すると、加工組立型産業に比べて低いのが現状であるが、特定の材料分野において独自技術による製品の差別化や圧倒的シェアの確保、さらには特許等による事業戦略で高い収益率を図っている企業もある。材料産業分野においても、企業の経営戦略によって大きな差異が生じる時代になってきたと言う事ができる。また、技術が進歩するに従って、材料の生産のみならず、材料の加工等川下工

程分野へ材料産業が進出したり、逆に組み立て産業側から材料創製をも取り込もうとするケースも見受けられ、材料と加工組み立てとの融合化が進展しているケースも多い。特に半導体等の機能材料においてこうした傾向が顕著である。

材料の革新はユーザー産業に大きなインパクトを与える。最近の事例だけ見ても、GaN 青色発光ダイオード、Bi 系超伝導材料、超高張力鋼線、巨大磁気抵抗効果酸化物、自動車用ベークハード鋼板、GI 型プラスチック光ファイバー等枚挙に暇がない。これらは材料技術の発展が無ければ実用化できなかった事例である。材料技術の発展は、応用分野が広いだけに経済的なインパクトの点で極めて大きい。特に今後、環境エネルギー問題が深刻化すると材料の効果は飛躍的に高まる。自動車の軽量化、発電・送電・電力消費の各段階における効率向上、燃料電池用材料、IT 用各種機器の省電力化、石油掘削用耐食材料、太陽電池用材料等材料の解決なくして対応することはできない。一方で、「材料」は基本的に天然資源の利用技術の一つであり、超高性能化や長寿命化、再資源化などによって、資源消費を最少化することが強く望まれるようになってきた。

2 - 4 材料の経済効果

2 - 4 - 1 経済効果

材料の経済効果として最も直接的な側面は前述の産業連関表で触れたように広範な産業や日常生活に材料が用いられて、経済的活動を下支えしている点であって、いわば基盤的経済効果と言えるであろう。

また、材料の技術進歩（生産性の向上）がその材料が用いられている川下部門（最終財部門）の投入コスト削減という形で波及して経済成長を促す。例えば鉄鋼部門の 1%の技術進歩が 1960～1965 年当時の高度成長の時期には自動車や機械部門の生産コストを 0.4～0.5%引き下げ、産業全体の生産コストを 0.2～0.25%も引き下げる効果のあったことが分析されている。加えて、川下部門で生産される財が投資財の場合、それが資本コストの低下に繋がるので、各種産業は投資を拡大し延いては国全体の需要規模を拡大し、設備投資した産業部門の生産性のさらなる向上に繋がることも明らかになっている。これらによって素材としての鉄鋼が高度成

長時に産業全体に対して重要な供給サイドとしての役割を担っていたことが判る(「わが国経済成長と技術特性」、経済分析 第149号、経済企画庁経済研究所編集、平成9年3月)。これらはいわば量的経済加速効果と言えるであろう。

これらに対して材料の質的進化や新規材料の創出は、新たな産業出現の契機あるいは必要要件となり、上記の量的側面とは異なる質的経済発展の要因となることが考えられる。例えば前述のシリコン半導体の出現は人類の生活・社会を劇的に高度化し、高純度のシリカや特殊な高分子材料は高速・大容量の情報通信を通してコミュニケーションの質を変え、カーボンファイバーや軽量高強度金属は交通手段やわれわれの日常生活の利便性と快適性を向上させ、新しい医薬や医療材料は多くの生命を救い、光触媒やカーボンナノチューブは新たな産業を生み出す可能性をもつとして期待され、さらに将来の長期的なエネルギー問題の解決に向けた核融合エネルギーの利用実現等にはそれを可能とする材料の誕生が鍵を握っている。このようないわば質的経済変革効果は、とりわけ材料の研究開発という観点から重要な側面であって、国家的ないし社会的見地から戦略的に研究開発投資が行われるのもこのような質的経済変革効果への期待に基づいている。この種の研究開発の成果予測や必要性の認識には、産業連関表のようなマクロ経済統計は役に立たず、科学技術・産業・社会にわたる動向を踏まえたミクロな調査と大局的な時代認識が重要な拠り所となるであろう。

2 - 4 - 2 経済価値

経済的価値という観点からは、顧客・ユーザーにとっての利用価値、材料が生産されるまでに付与される付加価値及び事業主体にとっての収益価値の三つの側面がある。また、材料総体としての価値と特定の個体の価値があり、それぞれ生産される前(誕生前)から生産、使用を経て使われなくなるまでの経時的価値(Vintage Value)の変化があり、どの時点を捉えて価値を評価するかという問題もある。材料総体としての経時的価値の変化はいわば系統発生的な価値変化であり、個体の経時的価値の変化は個体発生的な価値変化と見なせる。系統発生的な価値の変化は開発、事業投資という観点から重要なストック的側面であり、個体発生的な価値の変化は供給サイドと需要サイドの各企業の事業運営にかかわるフロー的側面や社会コストの観

点から重要である。最近は特に個々の材料の使用後の価値（負の価値を含む）を含めたいわゆる LCA が重要視されるようになってはいるが、これは材料だけの問題ではなく、材料を使用する社会の問題でもある。

2 - 5 材料開発の多様性と今後

物質から材料の誕生の仕方や契機は多様であり、最近の遺伝子工学やナノテクノロジー等の科学技術の進展はその傾向に拍車をかけている。あえて共通項を求めるならば、以下のような類型に分けられよう。

- (a) 物質に関する地道な科学的研究からの実用的価値に結びつく特性の発見。これは偶然の発見（セレンディピティ）によることも多い。（例えば、Ziegler・Natta 触媒、カーボンナノチューブ、等）
- (b) 普遍的な原理や新しい概念の提唱による新材料の発見・創出。これは一連の材料群の誕生に繋がることもある。（例えば、半導体、高分子、光触媒、徐放性医薬、遺伝子工学 医薬・生体材料、等）
- (c) 社会的な動向・要求に応じての新材料の開発。（例えば、食塩電解イオン交換膜、軍需・原子力・宇宙開発関連の材料、等）

いずれの場合にも、個人の自由な発想、柔軟な思考や深い洞察は基本的に重要な要素となっている。これからも新しい材料が産業や社会の高度化に貢献することに変わりはないものと思われるが、同時に望ましい社会のあり方を想定した材料の研究・開発の方向付けも重要な課題である。今後材料開発を効率化するためには、材料と社会との間の緊密な連関を定量的に把握できる経済モデルの開発が望まれる。

第3章 物質・材料研究体制の現状

平成13年3月30日に閣議決定された「科学技術基本計画」には、重点4分野として、ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料が挙げられている。これらの分野に、国策として重点的に支援をしようというのである。前3者については、それらが代表する分野を題名から直感的に理解できるような気がするが、第4項目の「ナノテクノロジー・材料」はやや分りにくい。「ナノテクノロジー」はナノメートルレベルで物質を解析、加工できる時代を象徴する外来用語であり、「材料」は「加工されて製品になることを前提とした物質」とでもいった伝統ある日本語である。したがって、「ナノテクノロジー」は、ライフサイエンス、情報通信、環境、材料、いずれの分野の研究にも内在する概念といってもよい。事実、物質・材料分野では、ナノテクノロジー時代を迎えて、構造制御の対象がより微細化され、急速に研究・技術対象や評価・分析領域が拡大しつつある。

材料研究の内容を少し詳細に見てみると、それらは多くの場合に物質の研究であったり、自然科学（自然の原理の解明）の研究であったりする。欧米では、Materials Science という概念が違和感なく定着している。これを日本語（漢字圏）で材料科学と訳することが多いが、「Materials」と「材料」が内包する概念が必ずしも同一ではないために誤解を生じ易い。「材料」には「有用」という目的指向性が強く付きまとう。かといって「物質」だけではあまりに漠としていて、焦点がはっきりしない。実際には、物質科学は、技術を通して産業・生活を支え、一方正しい科学的知識を提供することによって環境、保健（医療）の保持に役立つなど、社会と密接に関わっている（図3-1: 物質・材料研究と社会との関わり合い）。Materials Science に正確に対応させるには、物質・材料科学とでもしなくてはならない。Materials Science の内容を4つの要素に分けて、相互の関係を四面体で表示した Flemings の図式（Flemings, M. .C., *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **1999**, 29, 1）はよく知られているが、中でも合成、構造・物性解析などの力は、物質に関する基礎研究の水準を高める不断の努力がなければ一朝一夕には育たない。このように物質と材料を中点で結んだだけではどうしても研究分野としての一体感に欠けるので、やむなく片仮名の「マテリアルズ」を用いることもある。要するに研究者の多くは、実体として、材料研究／物質研究／自然科学という一連の流れに、同時に携っている。

3 - 1 我が国の物質・材料研究体制

日本材料学会の呼び掛けで毎年開催されている日本学会議材料研究連合講演会は、今年で45回目を迎える。共催に加わっている学協会数は48にのぼり、物質の基礎研究から材料として物質を利用する側まで、幅広く網羅されている。しかしながらこの集まりは、目的意識を共有しても、なおまだ自らを統合的にはっきり定義できるところまでは到達していないように思われる。

物質・材料研究の実態を具体的に描き出すには基礎となるデータが十分とはいえない。現時点で可能なことは、やや断片的ではあるが、日本学会議第4部（理学）と第5部（工学）にまたがる関連学協会の広がり、総合科学技術会議で統括される国家予算の規模、文部科学省の科学研究費配分の実績などによって、研究者や研究費の状況を類推することであろう。金額的には、材料研究の過半は民間企業で実施されているものと思われるが、これを考察するデータは見当たらない。

3 - 1 - 1 日本学会議第5部（工学）の構成

日本学会議第5部（工学）は17の研究連絡委員会に分かれて登録学術研究団体（関連学協会）に対応することになっている。関連学協会の登録には重複が許されており、第17期（平成9 - 12年）の延数は259であった。その分類を表（表3-1：第17期日本学会議第5部（工学）研究連絡委員会の構成）に示す。物質・材料研究に強い関わり合いをもっているのは、金属工学、材料工学、化学工学研究連絡委員会であろう。ここで材料工学という名称は、旧帝国大学由来の応用化学系研究を総括するものとして採用された経緯がある。上記3研究連絡委員会の関連学協会数の合計（延数）は73、構成員の総数（延数）は約17万人で、第5部の総数101万人に対する比は17.8%である。材料工学研究連絡委員会の一つの特徴は関連学協会数（43）が多いことである。

材料工学研究連絡委員会の基盤は工学系応用化学とされている。無機・セラミックスと有機・高分子の関連学協会はここに所属している。近年においては、工学系応用化学と理学系化学の

差はあまり大きくない。従って、第5部の材料工学研究連絡委員会と第4部の化学研究連絡委員会の関連学協会にはかなりの重複が見られる。金属工学研究連絡委員会、化学工学研究連絡委員会、材料工学研究連絡委員会、及び化学研究連絡委員会の関連学協会の会員数分布図（図3-2：日本学術会議関連学協会構成員分布図）を添付する。

3 - 1 - 2 平成14年度国家予算における科学技術関係経費

文部科学省のホームページに分野別科学技術関係経費が掲載されている（表3-2：平成14年度予算案における科学技術関係経費（分野別分類））。総合科学技術会議の指定の重点項目順に、ライフサイエンス4,366億円、情報通信2,456億円、環境7,643億円、ナノテクノロジー・材料1,232億円、エネルギー7,033億円、製造技術594億円、社会基盤2,848億円、フロンティア3,184億円となっている。ナノテクノロジー・材料分野への配分額は総合計29,356億円の4.2%に当たる。内訳は、主目的115億円、関連施策384億円、独立行政法人運営交付金286億円、競争的資金447億円となっている。内閣府の月例科学技術報告には、「ナノテクノロジー分野」と「ナノテクノロジーを活用しない材料分野」に分けた数値として、それぞれ825億円および407億円と記載されている。

3 - 1 - 3 文部科学省科学研究費補助金

国、公、私立大学の研究の大きな後楯である文部科学省科学研究費補助金は平成14年度から研究分野の分類が改訂され、生物系、理工系、人文・社会系、その他となった。文科省のホームページに掲載されている研究分野別配分状況の円グラフ（図3-3：平成14年度科学研究費補助金配分状況：金額ベース）で系別の配分額分布を知ることができる。本報告書で対象としている研究は「理工系」の中の「物質・材料科学系」に属する。これまでの理学、工学の区別がなくなった結果、化学と応用化学の境もなくなり、上述の図では理学の「化学」も「物質・材料科学系」に収容されているものと考えられる。科学研究費の総額は平成14年度1,700億円といわれているので、「物質・材料科学系」はその10分の1の170億円程度を使っていることになる。これは、理工系（全体の38.0%）の29%に当たる。

平成14年度における基盤研究の細目毎の応募件数をホームページから抜粋したものを表(表3-3:平成14年度科学研究費補助金 物質・材料系細目別新規課題応募件数)に示す。必ずしも上記円グラフのデータと対応するものではないが、「物質・材料科学系」の内容が異なるものかを類推する手掛かりにはなる。平成15年度から科学研究費補助金に複合新領域分野にナノ構造科学、ナノ材料・ナノバイオサイエンスなどという細目が設けられたが、物質・材料系ではナノであるものとなないものとの区別は必ずしも定かではない。細目の性格がはっきりするまでには今少し時間がかかりそうである。

3 - 1 - 4 まとめ

科学・技術研究は一般に国際的な競争と協調の関係を維持しながら進められている。官民を問わず、投入した研究資金に対する成果をもって研究効率を判断する。当然ながら研究者人口も成果の大小に関係する。日本の研究者数は、ほとんどの分野においてアメリカや全ヨーロッパのそれらに較べて少数であろう。国際的な協調の下でいかに研究を重点化し、手掛けたテーマについては、どのようにして効率化を図るかが我が国の課題である。基礎研究と言えども例外ではない。

上に引用した数値に示されるように、生物、情報、環境関連など、比較的大口の研究費を投入されている出口に近い分野と比較して、基盤技術とされる物質・材料研究にもかなり大きな研究費が配分されている。これに関わる科学・技術者もまた相当な数にのぼる。加えて、上記生物、情報、環境などの分野でも多くの研究者が物質・材料研究に携わっていることを考えると、今後、物質・材料研究の実体の正確な把握が極めて重要であることが理解されるであろう。

3 - 2 物質・材料研究体制の国際情勢

物質・材料の研究は国際的な競争と協調の中で進行している。広範囲にわたる物質・材料のすべてを専門とする研究者はほとんどいない。それぞれ最も興味のある物質・材料を中心に専門学会に加入して活動を行っている。物質・材料に関する研究が多様化すればするほど、一方では逆に、分野間の相互理解を深めることの重要性を指摘する声も高い。

海外各国にも対応する専門学会が存在し、絶えず交流が行われている。代表的な材料分野とされる金属、セラミックス、高分子、それぞれにおける国際的な研究活動状況について述べる。

3 - 2 - 1 金属

我が国には 21 の金属関係の学協会があり、これらの学協会は独自にあるいはときには協力しながら金属学の分野の発展に貢献している。しかし近年、学協会連携などの動きが活発となり、これに呼応して平成 9 年度に金属連合協議会（以下協議会と略す）が設置され、上記 21 学協会のうちの 18 学協会が加入している。この協議会は日本学会議の金属工学研究連絡委員会（以下金研連と略す）のもとに組織されており、協議会の会長は金研連の委員長が兼務している。また世話学協会は日本金属学会が務めており、金属学およびそれに関連する学問領域における研究のあり方や学協会連携などについて議論するとともに将来の研究体制の在り方について検討している。また、それとともに各種の材料関連情報を共有するための努力を行っている。同協議会における中心的学協会は日本金属学会と日本鉄鋼協会である。

米国では TMS (The Minerals, Metals and Materials Society) が学問主体で講演大会およびシンポジウム主体の活動を推進し、ASM International が技術主体でデータベースを含む出版事業および教育事業を主体にした活動を展開している。TMS と ASM は春期講演大会は別々に開催するものの秋期講演大会を共同開催していた。しかし 2003 年 1 月 28 日から TMS は ASM との協力関係は残しながらも TMS と同じ場所に事務局を持つ鉄鋼の ISS (Iron and Steel Society) と共同講演大会を実施予定である。同様の共同講演会開催をセラミックス学会および溶接学会にも勧誘している。TMS と ASM は共同で欧文誌 Metallurgy and Materials Transactions A (物理・機械特性関係) および B (精錬、プロセス関係) を刊行しており、2001 年のインパクトファクターは各々 1.273、0.754 である。ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) の材料分野の教育プログラム認証活動は TMS が実施しており、金属分野以外にセラミックス分野の認証も実施している。ASM が主導する国際連携活動の事例として合金状態図のデータベース構築がある。

欧州ではドイツ DGM (Deutsche Gesellschaft für Materialkunde) と英国 IOM3 (The

Institute of Materials, Mineral and Mining) が中心に学協会活動が展開されている。1987年から DGM, IOM (The Institute of Metals) 及びフランスの SFMM (Société Française de Metallurgie et de Matériaux) が中心で FEMS (Fédération des Associations Européennes de Matériaux) を設立し、現在までに 24 学協会が参加して、共同講演会・技術展示会を 2 年毎に実施している。FEMS は若手研究者を対象とした研修会 (Junior EUROMAT) を開催したり、共通の会報を刊行している。

英国の IOM3 の分野拡大は特筆に値する。The Institute of Metals が 1992 年にセラミック学会およびゴム学会と統合して会員 19,000 名の The Institute of Materials となり、さらに 2002 年に The Institution of Mining and Metallurgy と統合して会員 24,000 名の IOM3 を発足させた。シナジー効果を生かして高校選択科目への「材料」科目採択を推進するなど新しい動きがでてきている。

国際学術交流促進のため TMS、IOM および AusIMM (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy) が提案して金属関係の専務理事・事務局長の組織 IOMMMS (International Organization of Materials, Metals and Minerals Societies) を 1998 年に設立し、現在 17 学協会・団体が参加して情報交換の会合を年 1 回実施している。現在の会長は IOM、事務局は TMS が務めている。最近の話題として材料のプレゼンス向上に貢献した学生を World Materials Day を新設して世界同一日に顕彰することが検討されている。なお日本鉄鋼協会と交流協定を締結している海外の学会には、大韓金属・材料学会、中国金属学会、タイ鉄鋼協会、アメリカ鉄鋼協会、フランス鉄鋼協会がある。

その他の主たる海外での学会には大韓金属・材料学会 (KIM)、中国金属学会 (CSM)、タイ鉄鋼協会 (ISIT)、ドイツ鉄鋼協会 (VDEh)、フランス鉄鋼協会 (ATS)、スウェーデン鉄鋼技術協会 (Jernkontoret)、オーストリア金属協会 (The Austrian Society for Metallurgy) がある。

3 - 2 - 2 セラミックス

セラミックスに関連する研究者は、多くの学術団体に所属しているが、(社)日本セラミックス協会はこの分野の日本における最大の学術団体である。(社)日本セラミックス協会の個人正

会員数は、平成13年度、約5,400人となっている。会員の構成については大学980人、国立研究機関290人、公設試験研究所260人、その他主に企業関係3,925人である。

世界的にみると、米国セラミックス協会は会員が約1万名で、質量とも世界最大級の協会である。会員の25%が米国以外の外国人会員であり、先端の科学技術、教育関連情報を書籍の出版、会議開催等などにより、世界中に発信している。ヨーロッパでは、各国セラミックス協会が統合して、ヨーロッパセラミックス協会となり会誌の発行や年会を開催している。また、日本セラミック協会に本部がある国際セラミックス連盟には Argentine Ceramic Society、American Ceramic Society、Australasian Ceramic Society、Bangladesh Ceramic Society、Canadian Ceramic Society、Chinese Ceramic Society、Egyptian Ceramic Society、European Ceramic Society、Ceramic Society of Japan、Korean Ceramic Society、Mexican Ceramic Society、Russian Ceramic Society、South African Ceramic Society、Academy of Ceramics 等が加盟しており、それぞれ独自の活動をしている。なかでも中国セラミックス協会（Chinese Ceramic Society）は33,000人の会員で最大の会員が所属している。

3 - 2 - 3 高分子

高分子に「材料」が付けば高分子材料（Polymer Materials）となり、「化学」が付けば、高分子化学（Polymer Chemistry）になる。当然のことながら材料研究の産物である体系化された知識は、化学と言う学問の重要な一部分である。材料と化学は縦系と横系の関係にあり、高分子研究者の多くは時に材料の研究者であり、時に化学の研究者でもある。

化学の中の高分子を語るには、まず化学をその構成要素に正確に分類し、総合しなければならない。世界の化学会の連合体である IUPAC（国際純正応用化学連合）の分科会構成が一つの参考になるのではないかと考えられる。現在は、物理化学、有機・生物有機化学、無機化学、高分子化学、分析化学、化学と環境、化学と保健の7分科会に分けられている。日本学術会議化学研究連絡委員会の専門委員会構成はもともと IUPAC の分類を手本に決められた経緯があるが、ここ数年間の IUPAC の分科会再編に伴い現在は多少対応が崩れている。IUPAC で高分子分野に単独の分科会が与えられているのは、高分子材料に関わる諸課題に加えて、化学の

中において生物、物理の一部とも強い関わりをもつ「高分子性」を中心とする学問の体系化を支援するためである。すなわち、化学と材料の両面における重要性を認識して、高分子分科会が成立している。

IUPAC 高分子分科会では、日本の高分子学会が事務局となって、World Polymer Organizations と題する冊子で IUPAC 未加盟国も含めた高分子関連学協会組織の国別データを集録している。高分子の分野で目に付くのは、現時点ですでにアジア地域の研究者・技術者数が世界の過半を占めていることである（図3-4：世界の高分子学協会の地域別分布）。今後汎用高分子材料の供給拠点がアジア発展途上国に移転されて行くであろうことを考える時、この傾向はさらに強まるものと思われる。日本の高分子研究者への国際的期待は、アジアにおける高分子材料研究の発展を側面から支援する役割と、アジアの先頭に立って、高分子科学の研究に新しい領域を開いて行く努力であろう。

ヨーロッパでは、1947年フランスがいち早く国立の高分子研究所を Strasbourg に設立し、その後のこの分野の進展に寄与したことはよく知られている。ドイツでは、古くから大学における高分子基礎研究の伝統が根付いており、なかでも Freiburg、Mainz 両大学の高分子学科は研究者養成の拠点の役目も果たしてきた。1980年、この分野におけるそれまでの議論を受けて、ドイツの Max-Planck 財団は、高分子科学のための研究所の設立を決定した。この判断の正しさは、1983年に発足した研究所のその後の活況に如実に示されている。Max-Planck-Institut für Polymerforschung (Mainz) 設立の経過、ならびに20年を経た今日の研究所の運営状況は参考にすべき点が多い。イギリスにおける高分子研究の流れは、Manchester、Leeds 大学を中心に Cambridge、Bristol、Liverpool、Durham、Bradford 大学などに研究者が散在している。国立の研究所などのハードな組織を持たない代わりに、ソフトな集まりとして英国工学自然科学研究会議 (EPSRC) の下に Interdisciplinary Research Centre for Polymer Science and Technology という組織を設け、Leeds 大学を中心に研究の活性化を図っている。イタリアは、Politecnico di Milano に G. Natta 博士以来の高分子立体規則性に関する研究の伝統がある。旧東側の国では、チェコの高分子研究所 (Institute of Macromolecular Chemistry, 1959年) からの基礎、応用両面での貢献が広く知られている。ロシアには、Moscow、St. Petersburg

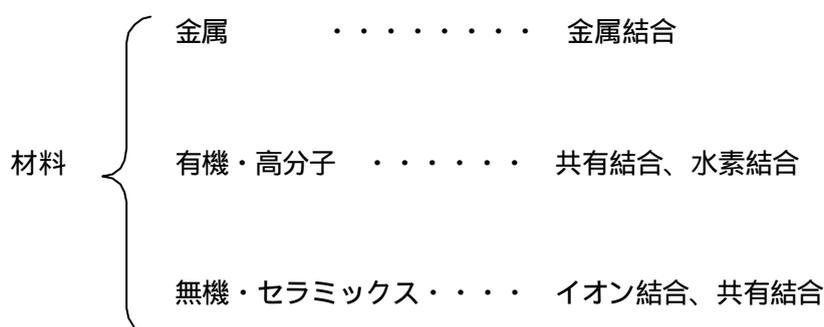
大学などに高分子研究の拠点があり、この他に科学アカデミーの下に高分子関連の研究所もある。このように見てくると、ヨーロッパ全体にはかなり多くの高分子研究拠点があることに気付く。これらが相互に有機的な結び付きを保ちながら活動している。

アメリカ化学会は世界最大、約 16 万人の会員を擁し、分科会制 (Divisions) を採用している。分科会の数は 30 以上にのぼり、必要に応じて互いに連携して活動を行っている。アメリカ化学会会員総数 (ACS Members) と分科会に属する会員の全数 (Division Members) の経年変化が、経済界の景気に左右されることなく着実に増加しているのは、学会が職能集団としての性格を強くもっていることによるものであろう。

高分子に直接関連のある分科会には、Polymer Chemistry (POLY: 分科会会員総数に占める比率 7.2%)、Polymeric Materials Science and Engineering (PMSE: 同上 5.9%)、Rubber (RB: 同上 4.2%) などがある。POLY 分科会が、アメリカ化学会の中でも独自の運営形態を取り、大きな自由度をもって活発に活動していることはよく知られている。これは、この分科会が化学と材料の両面の性格を強く有するという特殊性によるのであろう。アメリカ化学会における研究発表の分野別分類においても、高分子関連分野からの発表が全体の 1/5 程度を占めている。アメリカ化学会では複数分科会の共催によるシンポジウムも頻繁に企画されるので、分科会ごとの線引きはあまり明確なものではない。

第4章 物質・材料(マテリアルズ)の特徴と研究の様態

材料は、金属材料、無機・セラミックス材料、有機・高分子材料、ならびにそれらの複合材料に大別することができる。周期律表の元素約100種類は、単独もしくは元素同士の結合によってさまざまな物質を形成する。これらの物質の結合形式には金属結合、共有結合、イオン結合、時に弱い結合として水素結合が加わる。物質の特性は結合様式によって大きく異なる。



これまで、これら3つの材料に関する研究および教育はそれぞれ独自の発展を遂げてきており、研究者の集まりである学協会もそれぞれ独立に活動を行ってきている。上記それぞれの分野において、日本学術会議からの対外報告書がすでに発表されているので、ここでは研究の様態、将来展望、問題点などについて簡単に触れるに止める。

4 - 1 金属材料

4 - 1 - 1 金属の特徴

周期律表の中で金属元素と呼ばれるものは79元素(SiおよびGeを加えると81元素)と総数103元素のうちの大部分を占めている。金属結合と呼ばれる緩やかな結合形式と、比較的簡単な結晶構造をもつため、高分子やセラミックスに比べると加工し易いという特徴を有している。例えば伝統工芸に使用される金箔は、金属の優れた展延性の好例である。また、結晶中を比較的自由に運動する電子が存在するため、銅、銀やアルミニウムに代表されるように、優れた電気および熱伝導性を有する材料が多い。さらに金属に他の金属もしくは元素を添加して合金とすることにより、使用目的に適した機械的、電氣的、磁氣的特性などの改善ができる。

工業的にもっとも重要な鉄鋼材料は、鉄と炭素の合金であり、炭素の量を制御するとともに製造過程での熱処理によって、さまざまな機械的特性が得られる。19世紀に英国で始まった産業革命は近代工業の出発点であるが、変革は鉄鋼の製造技術の発展と軌を一にして進行した。その後も鉄鋼の製造技術および合金化技術の進歩は著しく、金属学（Metallurgy）と呼ばれる学問分野の構築につながった。現在でも、自動車等の輸送機器、橋や高層建築等の構造物など、鉄鋼の存在なくして我々の日常生活は語れない。鉄は経済性に優れた構造材料であるのみならず、大きい磁気モーメントを有し優れた電磁気特性を示すことから、モーター部品、トランス鉄芯用電磁材料や耐食性、抗菌性を活かしての食品製造容器などの機能材料としても広く用いられている。

アルミニウム、銅、マグネシウム、チタンなど、鉄鋼以外の金属ならびにその合金は非鉄金属材料に分類され、軽量、良好な熱・電気伝導性などの優れた材料的な特徴を生かして、機能材料として多様な開発が進んでいる。このような種々の金属をベースとする半導体材料、超伝導材料、軟磁性・硬磁性材料などの新たな材料の出現がなければ、今日の産業の発展もなかったといっても過言ではない。

金属の特徴の一つは、原子が周期的に配列して結晶を形成することである。しかし、適当な金属、非金属元素の組み合わせを液体状態から急冷すると、液体構造を凍結した固体、いわゆるアモルファス（非晶質）合金が得られる。アモルファス合金は、従来の金属の常識を打ち破る、高強度、高軟磁性、高耐食性等を示し、新たな金属材料の可能性として注目されている。

4 - 1 - 2 金属研究の将来と様態

(a) 鉄鋼材料

実用的観点からみれば鉄鋼材料は極めて重要であり、その製造量や使用量が極めて多いため、他の非鉄金属材料と較べて、より大型の設備と膨大な研究資金を必要とする。このため、単に科学技術的興味のみならず企業間の連携・協調、国家的施策などの外部要因が重要になっている。研究開発の方向については、日本鉄鋼協会の鉄鋼科学技術戦略策定特別委員会がまとめた「鉄鋼科学技術戦略」（1999年）に詳細に記載されている。重厚長大を支え、大量生産による

製造コストで勝負といった時代から、今は高性能化、より付加価値の高い製品開発への方向転換が求められている。新しい材料設計指針に立脚して、金属組織をナノオーダーで制御し、強度または寿命を2倍にしようという超鉄鋼材料研究プロジェクトはまさにこの延長線上にある。

石油、天然ガス等に比べて、鉄鉱石は埋蔵総量に対する不安は少ないが、化石エネルギーの枯渇、炭酸ガス排出増に伴う温暖化などへの懸念から、地球環境負荷低減への配慮が求められている。また、脈石、燐、硫黄等の不純物が少ない鉱床は少なくなっており、このような原料品質の変化に対応できる高温プロセスの技術開発が要請されている。一方、鉄スクラップ発生量は年々増加しており、我が国では2010年に年間5,800万トンにも達すると予想される。とりわけ自動車、家電製品などのスクラップには、精錬で除去が難しいCu、Snなどのトランブエレメントと呼ばれる不純物元素を含んでおり、これらの除去技術の確立、あるいはこれらを含んだままでの材料特性の改善と用途の開発など、新たな技術革新が求められている。

(b) 非鉄金属（アルミニウム、銅、ニッケル合金など）

鉄に次ぎ幅広く利用されているアルミニウムの我が国の消費量は、米国に次いで世界第二位である。しかし残念ながら、電力エネルギーのコスト差から、一次製錬プロセスからは1工場を残してすべて撤退している。そのため、開発は圧延プロセス以降の技術およびリサイクルが中心になっている。自動車・鉄道等の輸送部門、アルミサッシ等の建設部門、缶、箔等の包装部門が主要なものであるが、高い熱伝導度や電気伝導度などに注目した熱交換器材料、電子材料にも用いられている。その軽量性を生かして、チタン、ニオブなどとの金属間化合物として比強度、耐熱性、耐酸化性の改善を図ることにより航空機用材料への進出が期待される。また、深絞り性などの加工性の低さ、相変態の利用による結晶粒微細化の達成の困難さが、自動車用材料への広い展開を阻害しているが、今後集合組織制御プロセスの開発により、この分野にアルミニウムが応用されれば、軽量化、低燃費が達成され、その社会的意義は極めて大きい。

銅は、鉄について多種多様な元素を固溶し、加工性も良好で、熱・電気伝導性にも優れている。このため熱交換部品、工芸美術品、電子部品から超伝導細線の安定化材として用いられている。半導体配線材料、ケーシング材料としての特性改善のためには、微量添加元素の厳密な制御、組織制御のための加工プロセスの開発が必要とされる。また、極限まで溶存酸素量を低

減した超高純度銅線は、音響用材料として高い付加価値を生み出している。

ニッケル、コバルトは、耐熱性に優れた超合金の主成分としてタービン翼材等に広く用いられている。第一世代のニッケル基単結晶超合金、レニウムを含む第二および第三世代、微細な整合界面により強化を図った第四世代の単結晶超合金が開発され、その耐用温度は 1,100 に近づいている。今後は、耐用温度の更なる向上とともに、これまでに開発された超合金を高効率発電用ガスタービン翼材、次世代エンジンのタービン翼材などとして実用化を進めることが課題である。この解決には、遮熱コーティングと冷却構造を考慮した複合化設計の検討が必要である。また、タービンシステム開発との連携など、民間企業との協力体制を強化することがより効果的・効率的な実用化推進に繋がるであろう。

(c) 機能性金属材料

高 T_c 酸化物超伝導材料の出現にもかかわらず、現在なお超伝導材料の主流は、NiTi 合金、 Ni_3Sn 等の化合物型超伝導材料である。NMR に代表されるように、高磁場を得るためには超伝導特性による大電流を必要とするが、その多くは表面電流によるため超伝導細線とする必要がある。安定化材としての銅と共に、このような超伝導線の作製は加工・熱処理工程における開発の努力に帰着する。また半導体についても、単体としてのシリコンが長く主流を占めてきたが、電子の移動度、バンドギャップエネルギー等の特性から、将来は金属間化合物が注目されることになるであろう。

従来、鉄鋼、銅、ニッケルなどの金属材料においては、不純物元素の挙動と効果に注意を払ってきたが、一方金属間化合物に関しては、不純物元素、なかでも炭素、酸素等の振る舞いには無関心であった。今後金属間化合物の超伝導、半導体への展開を図るには、これら不純物元素の挙動の解明と高純度化プロセスの開発が重要であり、不純物元素の除去により飛躍的な特性の改善に繋がる可能性がある。また、磁気応答形状記憶等のセンサー材料、燃料電池等のエネルギー関連材料についても、これまでの金属学の基礎的知見を拡大し、広い意味での合金の材料設計に応用することが求められている。

(d) アモルファス金属

液体を一秒間に 10 万度以上の高速で冷却し、液体構造のまま凍結したアモルファスは、極

めて優れた機械的（高強度、高磨耗特性）、磁氣的（高軟磁性）、化学的特性（高耐食性、高触媒性、水素吸蔵性）などの特徴を有する。これらの合金は通常超急冷を必要とするため、薄板、細線、粉末の形状で使用され、主として軟磁性材料の分野で広く利用されている。また、最近になって1秒間に数度から数百度の比較的遅い冷却速度でアモルファスとなる安定性の高いアモルファス合金が見いだされ、金属ガラスと呼ばれている。この合金は徐冷でもアモルファス化するために、従来のもより大規模の成型ができることになり、また酸化物ガラスと同様に低温で過冷液体状態が現れるため、この温度領域での加工・成型も可能になる。さらに、アモルファスからの結晶化を利用したナノ組織制御により、高強度材料、軟磁性材料、スプリング磁石材料などの開発が進められており、アモルファス金属の応用範囲が一層広がることが期待されている。

4 - 2 無機・セラミックス材料

4 - 2 - 1 セラミックスの特徴

セラミックスは以前、「焼き物」を中心に使われてきたが、時代とともにその言葉の範囲は拡大して、無機材料を指し示すようになってきている。単なる「焼き物」ではなく、ガラス、セメント、単結晶、炭素製品など各種の無機材料を包含している。

セラミックスには優れた特性、すなわち、光学特性、誘電性、磁性、電気絶縁性、耐熱性、高耐食性、硬質性などがあり、今日我々が身近に接する耐火物、研削材、衛生陶器、碍子、板ガラス、各種ガラス製品、セメントのような現代の生活や各種の産業を支える材料として社会に役立っている。セメントの生産量は年約8,000万トンで鉄鋼に並んで大きく、ビル、道路、橋、港湾施設、内装材、外装材等に多く使用されている。また、ガラスも日常生活で多く使用されている。セラミックスは今後とも、それぞれに、材料としての特性や経済性を活かして使用され続けると思われる。

我が国のセラミックス産業はその全ての分野で世界のトップクラスの生産量を誇るに至っている。例えば、日本は世界のエレクトロセラミックスの50%以上を生産し、この分野では突出している。また、その研究水準においてもフロントランナーである。セラミックスの出荷額は

横這いであるが、高機能製品への移行が進んでいて、製品や事業内容の変化が著しい。セラミックスのうち、最近進展の著しいファインセラミックスについてみると、日本ファインセラミックス協会の産業動向調査によれば、セラミックス材料の中のファインセラミックスと言われるものの生産額は年々右肩上がりに増加している。また、情報社会となり、情報伝達量は、急速に増大している。インターネット、携帯電話等においては、ガラスの光ファイバー、多種の電子セラミックスが使用されており、情報化社会の進展に役立っている。

4 - 2 - 2 セラミックス研究の将来と様態

セラミックス研究において注力すべき分野は、セラミックスの基礎科学、新エネルギー対応材料、電子・情報分野の材料、生体関連材料、環境の保全や改善に関わる材料などが挙げられる。第17期の日本学術会議物質創製工学研究連絡委員会無機材料専門委員会ではこれらの分野の今後の研究開発に関する報告書を作成し、公表したが、その後、省庁の統廃合や、米国の科学技術政策の策定、さらに平成13年3月には総合科学技術会議より科学技術基本計画が提示されるなど、大きな動きがあった。上記基本計画に指定されている重点4分野、すなわち、バイオ、情報、環境、ナノテクノロジー・材料を考慮に入れて、セラミックス分野の重点研究について述べる。

(a) セメント分野

今後必要とされる課題として、資源リサイクル・環境にかかわる諸問題を取り扱う科学技術、高性能コンクリート用セメントの開発研究、およびコンクリートの補修・補強にかかわる技術開発を挙げることが出来る。例えば、セメントが使われている社会的環境や条件からみて、その研究開発においては従来にも増して資源リサイクルと環境問題に対する取り組みが必要である。そのためには、セメントの品質に悪影響を及ぼす有害物質（塩素等）を除去する研究、塩素等を含むセメント（エコセメント）の用途開発、各種セメントへの混合材添加量の増量の研究、解体コンクリートの骨材再利用の研究などが必要である。産業廃棄物をセメントキルンで処理することにより、化石燃料使用量の削減及びCO₂排出量の抑制、鉱物資源使用量の削減、有害物質の無害化、廃棄物のリサイクル化が可能になり、各種セメントへの混合材添加量の増

量により、CO₂排出量の抑制、鉱物資源使用量の削減ができる。また、解体コンクリートの再資源化は、骨材資源の削減、廃棄物埋立て処理量の削減に繋がる。

(b) ガラス

ナノガラスが発展しつつあり、今後の展開が期待される。応用研究では、IT関連で、光増幅、波長分離、スイッチ等の機能を有する光波制御ガラス、および光メモリ、ディスプレイ、超残光照明体等の高輝度発光ガラス、機械的特性に関連して、メモリディスク、ディスプレイ、容器、各種窓材、環境関連で調湿、環境ホルモンや有害ガス分離の環境浄化ガラス等の開発が期待されている。外部からのエネルギーや応力によって、ガラス中のSi-O-Si結合角やSiとSiの距離が変化することを利用して、SiO₂分子の結合体である珪酸塩物質の構造制御が可能である。例えば、フェムト秒レーザーの照射により、照射部の微構造が変化して部分的に屈折率が変わる。外部から印加できるのはレーザー光や応力だけではない。この他にも、熱、電場、磁場やこれらの組み合わせも考えられる。それぞれに微構造への影響があり、変化は多様で予測も出来ないほどである。

(c) 高温材料

高温高強度の酸化物セラミックスの研究開発では、ナノからメゾスコピックのスケールでの組織制御による力学的特性の向上を目指している。酸化物は酸素雰囲気下でも安定である。しかし、高温では拡散が顕著となり、強度が下がり、高温変形が問題となる。ムライト系などの複酸化物は耐クリープ性に富み、この周辺を重点的に研究することにより、高温高強度を達成できる可能性がある。その場合、ナノ・メゾスコピックのオーダーでの構造制御が必要となる。また、機能性材料の脆性改善が必要であり、強度のバラツキが大きいことから信頼性に乏しいといわれている。これはセラミックスの基本的問題であり、徹底的な検討が要請されている。金属や有機物とのハイブリッド材料の展開も材料の複合化による特性の役割分担の追求により可能であろう。エコ・カスケード的思考の展開ではエンジニアリングセラミックスで培われた高強度化の技術を電磁氣的機能を有する材料に対して適用し、構造機能と電磁気機能を兼ね備えたセラミックスの開発が必要である。脆性セラミックスの特性に合わせた機械部品形状の設計指針の開発も今後重要である。

(d) 電子セラミックス分野

セラミックスの持つ機能を最大限に活かすためには、薄膜の利用が不可欠である。薄膜を構成する結晶粒子の大きさは、ナノメートルのオーダーであり、界面の寄与が大きくなることや量子サイズ効果などにより、バルクセラミックスとは異なる特性が出現する。まず、ナノメートルのオーダーのセラミックス粒子を製造する技術を開発する必要がある。さらに粒子サイズと物性との相関を明らかにし、その特性を積極的に利用する材料設計手法を開発することになる。また、通信機器やIT用材料の高性能化、デバイスのチップ化にともなって必要になるインターフェース材料の研究、記憶材料、酸化物高温超伝導材料の探索とデバイス化技術、高周波領域に於ける電気的特性に優れた材料の研究開発等が重要である。現在、原子レベルのマニピュレーションが可能になりつつあるが（人工格子など）、いずれ原子（イオン）の配置を制御した薄膜が作製され、薄膜構造と性質の関係が解明されるであろう。この技術は究極のナノテクノロジーともいえるが、今後、薄膜の精密設計や素子化に適用が可能である。革新的な機能を発現させるために、分子集合体や結晶粒子をテンプレートに用いたり、バイオミメティック合成を利用したり、より小型で高機能の素子、あるいは複雑形状の素子を作製するために、セラミックス、有機ポリマー、金属などの異種材料の複合化を検討するなど多くの選択肢が残されている。最後に、エネルギー関連分野の重要テーマとして、リチウムイオン電池、色素増感型太陽電池、燃料電池などの研究、熱電変換素子の開発等を挙げることができる。

(e) バイオセラミックス分野

バイオセラミックスには、大別して生体用とバイオテクノロジー用がある。関連する課題としては次のようなものが挙げられる。力学的特性に優れた人工関節用バイオセラミックスの開発のために、例えばジルコニアやアルミナセラミックスの改質、生体関連物質との複合化が検討されている。また、電磁気的手法による高活性化と生体制御による人工骨、人工歯の高機能化が可能である。これを応用して骨と早期に結合し、恒久的に安定なバイオセラミックスを作ることにもできる。さらにバイオミメティックな手法による生体類似骨の開発なども重要になってきている。環境用セラミックスに関連する課題としては、従来のセラミック技術とバイオセラミック技術の併用による新規な環境セラミックスの開発が挙げられる。この場合に孔の形状を

精密に制御した多孔体や、ナノメートルサイズ粒子の利用による安全セラミックスの研究やセラミックスの親和性を利用した微生物制御が重要である。ナノテクノロジーのバイオセラミックスへの応用に関する課題としては有機材料との複合化による新規なバイオセラミックスの開発、金属材料との複合化による高強度、高活性バイオセラミックスの開発、バイオメテックな手法を利用したバイオナノテクノロジー用のナノコンポジット開発等が挙げられる。

4—3 有機・高分子材料

4—3—1 有機・高分子の特徴

今日では有機・高分子材料は、金属材料、無機・セラミックス材料と並んで主要 3 材料の一角を占めている。とくに 20 世紀後半は、石油化学工業の発展とあいまって、「プラスチック時代」とも呼ばれている。この一方で、有機・高分子物質は生物の働きを担っている主要な物質、核酸、タンパク質などと同じ仲間である。ハードな材料からソフトな材料へ、構造材料からより機能的な材料へという今日の材料科学の流れの中で、有機・高分子材料の研究はますますその重要性を増してきている。

高分子材料は汎用プラスチックからエンジニアリングプラスチック（エンブラ）さらにはスーパーエンブラへと、主として構造材料としての高性能化を中心に発展してきた。その一方で高分子材料は機能材料としても先端材料を含む広範な分野で高度利用されている。

構造材料を念頭においた伝統的な高分子材料はプラスチック、ゴム、繊維と大別され産業分野の分類に従ってきた。構造材料である樹脂（プラスチック）は熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に大別され、熱可塑性樹脂は汎用プラスチック、エンブラ、スーパーエンブラと樹脂の性能による分類が通常用いられる。しかし高分子材料を主体としていながら、この枠に入らない塗料、接着剤など数多くの産業分野が周辺にあり、主要材料のみで高分子材料全体を表すことは難しい。一方、機能性材料もその機能によって機械的機能、電気的機能、光学的機能、生体機能、分離機能、その他に分けられるが、「その他」には包装・被覆材料、フィルム、合成繊維、高吸水性樹脂、形状記憶樹脂をはじめ、化粧品・食品への添加剤、薬物伝達システムなどひとつの主要機能では表せない多くのものが含まれている。多様な物質の利用がその実態であ

る。

高分子材料の大半は、有機化学的に合成された（石油）化学製品であり、多様な化学物質の利用のひとつとして誕生し、成長してきた。したがって、材料としての位置づけと共に、化学肥料、合成染料、医薬品、化粧品、油脂・石けん・洗剤・界面活性剤などと並んで（石油）化学製品の主要製品としても位置づけられる。このことは有機・高分子材料の大きな特徴のひとつである。

材料を物質としてみると、物質は原子が多数結合して構成されている。その結合力には、金属結合、イオン結合、共有結合などの強い結合とそれらと比較して弱い結合である水素結合、分子間力（いわゆるファンデルワールス力）がある。それら原子間の結合力（より一般には相互作用）のありようが金属・セラミックス・高分子それぞれに対する物質としての特徴的個性を生み出している。このように捉えると有機・高分子物質は、強い結合である共有結合により分子を構成し、その分子が弱い結合である水素結合や分子間力で結合して物質を構成している。すなわち、有機・高分子物質においてはまず固定的な構造をもつ分子をつくり、その中に最後の巨視的な物質を見据えた設計（情報の埋め込み）がなされる。その上でそれらを柔軟性に富む弱い力で結合して物質を構築していく。この階層的物質構成が最も大きな特徴であり、これがソフトな機能物質を生みだしている。自然はこの階層的構造をより高次まで巧妙に積み上げて生き物を創っている。ここで重要なポイントとなる分子構造（一次構造）の構築は「分子設計」の概念をもたらし、この作業は化学的合成（有機合成）そのものである。

このような物質の特徴がまた、石油化学産業との関係以上に、有機・高分子材料の科学が本来的に化学、物質科学と不可分な関係にあることを生み出し、また材料研究と物質研究を不可分なものとしている。

4—3—2 高分子物質・材料研究の将来と様態

21 世紀に入り我が国はマルチメディアで代表される高度情報社会が現実のものとなりつつある一方、高齢者人口の増加による健康・医療の問題、エネルギー・地球環境問題など様々な課題を抱えている。このような社会経済の環境変化に応える技術革新を支える高分子の材料技

術の課題は、材料の高性能化、高機能化、そしてプロセス技術を含む環境対応技術の高度化が考えられるだろう。

高性能化が最も期待されるのは汎用材料・製品の性能である。汎用高分子材料は軽量、耐薬品性、耐腐食性、耐衝撃性、剛性、成形加工性、着色性などに優れた性能を示すが、有機材料であるため耐熱性には限界がある。高分子材料の特徴を保持し、かつ高強度・高耐熱性材料として金属・セラミックスなどの代替えを目指した各種のエンブラが開発されてきた。さらに高い耐熱性を有するスーパーエンブラも次々と開発されている。今後の高耐熱性材料の技術的展開としては、分子レベルでの立体規則性、分子量分布などの制御、高次構造の制御などによるさらなる耐熱性の向上、およびそれを加工する加工技術の開発などが期待されている。耐熱性以外の高性能化には特殊な環境・刺激に対する耐性、たとえば耐衝撃性、耐超低温、摺動特性などが挙げられる。各種の高性能プラスチックはそれぞれの持つ色々な特性により、単独ないしはアロイ・ブレンド・コンポジット技術、繊維強化技術、あるいは高次構造制御技術などにより、極限的使用環境で広範に使用されている（高分子学会誌「高分子」, **2002**, 51, 332）。

一方、高分子材料に対する最も大きな期待は「機能性」である。今後成長が期待される産業分野ないしは将来の基幹産業分野で必須となる機能性高分子材料としては、電子材料・光学材料・光反応材料、光半導体・電子半導体、分離膜、バイオミメティック材料・生体適合性材料・ポリマーゲルなどが期待されている（高分子学会誌「高分子」, **2002**, 51, 328,330）機能性高分子材料が 21 世紀の技術革新に先端材料として大きく貢献するキーテクノロジーの一つであることは明らかである。中でも生物・生命科学と物質科学の今後の発展を考えると、バイオ・メディカル分野において新しい材料のパラダイムが創出されていくことが予想される。

高機能化、高性能化のなかにあって、高分子材料の今日的な最重要課題は環境問題への取り組みである。生分解性高分子材料など高機能化、高性能化の課題としての研究がある一方で製造プロセス・循環型プロセスから取り組まれていることは言うまでもない。高分子学会での研究発表においても「環境」というキーワードで相当数の研究発表がなされこの分野が顕在化してきている。

近年材料ナノテクノロジーが注目を浴びている。高分子材料分野においても例外ではない。

高分子は分子の世界を扱ってきたので本来的にナノサイズの科学・技術である。分子設計、ナノレベルでの構造制御に基礎をおく階層的な高次構造制御はこれまでの高分子研究の在り方そのものである。ナノ科学・技術をこのように広く捉える一方で、巨大分子1個の物性や制御と言う視点からの革新的素材の探索も本来のナノ科学・技術として進められている。

すでに見てきたように高分子材料科学が物質科学・化学の研究と不可分な関係にあることはまた無論、研究様態においてもそれらの研究が表裏一体となってなされてきたことを意味する。この関係は、高分子材料研究と高分子科学・化学研究の双方にとって健全で効率的な発展を支えている。高分子学会の研究発表の分野分けを見ても、合成 / 機能 / 構造・物性と高分子科学の標準的分野分けの中に材料指向の研究が多く含まれると共に材料科学的分野がそれらと並列的に置かれ、物質研究と材料研究との融合は明らかである。

他の材料研究にもまして有機・高分子材料研究においては膨大な物質研究の中から材料のシーズが生まれる。そして物質研究と一体となった材料研究が新しい材料を創出する。物質研究と材料研究を一体と捉えるほうが自然であり、実態にも合っている。それがまた物質研究と材料研究の双方により実りのある結果を生んでいる。

第5章 物質・材料研究開発に対する正しい認識と国家戦略構築の必要性

材料のもつ社会的意義、産業全体の中で材料関連産業の果たしている役割、それらを支える物質・材料研究の現状と問題点などをなるべく定量的に明らかにするのが本報告書の目的である。「物質・材料」研究を取り巻く環境、研究分野の実態を明らかにすることによって、広範囲にわたる関係者のコンセンサスを醸成することが可能になると考えたからである。すでにこれまでの調査でも明らかのように、欧米に較べて少ない研究者数で広い領域にわたって一定の国際水準を保つことは容易ではない。国際的な競争と協調の下で、効率のよい研究開発体制を構築することが必要である。そのためには、物質・材料研究開発の実態を把握する努力（“生きた”人材データベースの構築）と、人的資源を最大限に活用するための仕組みを論じる開かれた場の設定が急務であろう。産・学・官（独）にわたる地道な努力の積み重ねは、いずれ、世界の早い変化にも対応できる我が国独自の国家戦略の確立に繋がるはずである。

このような分析によって、研究者個々が自らが受けている研究支援の意味をはっきり認識することができれば、研究効率向上のボトムアップの努力にもつながるはずである。しかし、現実作業を始めて見ると、定量的な分析に必要なデータがあまりにも少ないことに気づいた。報告書作成の過程で議論の対象となった問題点を以下に付記する。

5 - 1 材料経済学への期待

(a) 材料の経済性を測る手段の欠如

生産性向上の要因としての直接的な資本と労働力の投入量から、技術力の寄与が間接的に求められるが、材料は技術力の中に含まれ表面にはでてこない。また、産業連関表を通して、原素材に関わる生産性の向上が各産業分野の生産性の向上にどのように波及しているかを定量的に把握できるはずであるが、「原素材」という分類の内訳が戦後間もなく作られたままの大雑把な項目立てになっており、先端的材料の波及効果や経済効果を定量的に抽出・把握できる経済統計とは考えられない。従ってこのような把握を可能とする方法論と資料が整えられた報告書ができれば、その意義は大きい。

(b) 材料に対する認識の変化

環境問題の高まりとともに材料に関する捉え方に時間的（材料の誕生から墓場まで）及び価値的（負の財としても経済の対象に取り込まれる）な幅が出てきており、従来型の直線的な材料開発の枠組みには収まらなくなりつつある。このような要因が産業・社会に与える影響を明確にするためには、エントロピー的な考察も取り入れた経済モデルの開発が求められる。

5 - 2 学協会への期待

物質・材料研究は極めて普遍的であり、手法も多様であり、研究の方法について定まった規範を見いだすことはできない。しかし研究者の数が増え、研究の大型化が進むにつれて、研究の社会的認知が必要になり、研究者を取り巻く環境にはパラダイムシフトが起こりつつある。社会から支援を受ければ、当然それなりの責任が伴う。基礎研究といえども厳しく研究効率の向上を求められることになる。プロジェクト研究には「出口を見据えた」戦略性が求められる。

このように研究環境が国内外ともに大きく変化しつつある時、研究者の集団として社会に認知されている学協会の責任は極めて大きい。物質・材料研究が我が国の将来にとって真に必要なであると信ずるのであれば、いかに困難であっても、材料研究の実態、国家戦略としての展望を自らまとめて社会に提示して行く必要がある。公的資金が材料関連の研究にどのように使われて、どのような成果が得られたかを明確にする努力がなければ、「物質・材料」という括りで永続的な研究支援は期待できないであろう。今後、学協会の連携でより定量的な作業が進展することを期待している。

5 - 3 研究評価体制確立への努力

材料の研究は、物質に関する正しい知識体系を築く努力と不可分であることを述べた。物質・材料研究は多岐にわたり、全分野に通暁している人はいない。共同研究を活発に行うことによって、研究効率の向上を図るべきであろう。縦型社会と言われる我国では、研究者が長期にわたって同一職場に留まる傾向が強く、共同研究が極めて育ち難い環境にある。「経緯を詳らかにする」という表現があるが、縦と横の関係が明らかになって、はじめて真の理解に至るという

ことであろう。縦型社会において、どうやって横型の人を育てるかが今後の課題である。縦型の人ばかりが集まっても、正しい研究の評価すら覚束ない。しかし、これが現状である。研究体制のあり方、研究費配分のあり方、基礎研究の効率化、評価のあり方等々、いずれも重要な課題であるが、我が国の科学・技術者がこれまでに築き上げてきた社会（集団）の文化と密接不可分の要素もあり、小手先の変革では実効につながらない。国際化時代への対応を考えるに当たっても、まず研究の現状について根源的な考察から始める必要がある。

研究支援には、直接投資に加えて、研究を支える環境の整備もまた必要である。我が国では、物質研究に用いられる分析機器の多くが輸入品であるが、新しい機器の開発が研究の進歩と表裏をなすことが多いことを考えると、今後世界と競合して行くためには、どうしても自らの力で分析機器を開発して世界の市場に提供して行けるだけの企業を国内に持つことが必要である。同様なことは出版についても当てはまる。自らの研究の評価を海外に預けているような現状からなるべく早く脱却しなければいけない。研究評価の文化を育てる努力が、結果的に出版の力を付けることにもなる。急がば回れである。

第6章 おわりに

物質に関する幅広い基礎研究に支えられて材料への応用研究がある。このような物質・材料研究に継続的な支援がなされるべきであることは当然であるが、一方で研究分野としての一体的定義にはあいまいな点があり、社会的な認知を得ているとは認め難い。今後とも、研究者自らが物質・材料研究の実態について説明責任を果たし、当該分野における研究効率向上の方法を提案する必要があることを述べた。なお、用語についていえば、中点なしで物質材料研究とするほうが、より本質に近いのかも知れない。今後の議論に委ねたい。

一方で、上述の主張にも拘わらず、物質研究と材料研究とを分けて考えることができるのは、漢字の利点であるようにも思われる。我が国では、多くの物質研究が材料として日の目を見ることなく終わってしまっていると云われている。また、材料開発プロジェクトの成否が物質研究との連携にかかっている例も多い。物質研究と材料研究の連携効率が問題となる場合には、両者を分けて考察するのも一法であろう。

本報告書は、大きな目標に沿っての第一歩に過ぎない。今後の本格的調査検討への呼び水となることを願うものである。

謝辞

報告書作成の作業は、日本学術会議第5部の材料工学研究連絡委員会、金属工学研究連絡委員会、化学工学研究連絡委員会、ならびに物質創製工学研究連絡委員会とも密接に連携して進められた。ご協力を得た委員各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

日本学術会議より既報の物質・材料研究分野の報告書は下記の通りである。

- 1．物質創製工学研究連絡委員会金属材料専門委員会報告
「材料の21世紀へのストラテジー - 金属系材料の視点から見た提言」
(平成12年6月26日)

- 2．物質創製工学研究連絡委員会無機材料専門委員会報告
「21世紀に向けた無機材料の研究開発について - セラミックスの現状と研究開発の推進」
(平成11年5月31日)

- 3．化学研究連絡委員会・材料工学研究連絡委員会報告
「高分子科学研究の推進について」(平成9年6月20日)

- 4．化学研究連絡委員会・材料工学研究連絡委員会・物質創製工学研究連絡委員会有機材料専門委員会報告
「高分子科学研究体制の整備・構築について」(平成12年5月29日)

- 5．化学工学研究連絡委員会・物質創製工学研究連絡委員会化学プロセス工学専門委員会報告
「未来社会を支える「統合的化学工学」の構築と国際的ケミカルエンジニアの育成」
(平成12年2月28日)

- 6．化学工学研究連絡委員会・物質創製工学研究連絡委員会化学プロセス工学専門委員会報告
「エコトピア社会の構築をめざして」(平成15年1月21日)