

日本の展望—学術からの提言 2010

報告

材料工学分野の展望



平成22年（2010年）4月5日

日本学術会議

材料工学委員会

この報告は、日本学術会議材料工学委員会および下記分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議材料工学委員会

委員長	馬越 佑吉	(第三部会員)	独立行政法人物質・材料研究機構理事
副委員長	前田 正史	(第三部会員)	東京大学理事・副学長
幹事	岡野 光夫	(第三部会員)	東京女子医科大学先端生命医科学研究所所長教授
幹事	早稲田嘉夫	(第三部会員)	東北大学名誉教授
	北澤 宏一	(第三部会員)	独立行政法人科学技術振興機構理事長
	佐久間健人	(第三部会員)	高知工科大学副理事長学長
	井上 明久	(連携会員)	東北大学総長
	岡田 益男	(連携会員)	東北大学副学長
	葛西 栄耀	(連携会員)	東北大学多元物質科学研究所教授
	片岡 一則	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	岸 輝雄	(連携会員)	東京大学名誉教授
	北田 正弘	(連携会員)	東京芸術大学名誉教授
	田中 一宜	(連携会員)	独立行政法人科学技術振興機構研究開発センターシニアフェロー
	戸崎 泰之	(連携会員)	住友金属工業株式会社副社長
	友田 陽	(連携会員)	茨城大学工学研究科教授
	豊田 政男	(連携会員)	独立行政法人科学技術振興機構 JST イノベーションプラザ大阪館長
	長井 寿	(連携会員)	独立行政法人物質・材料研究機構領域コーディネータ
	中村 崇	(連携会員)	東北大学多元物質科学研究所教授
	新家 光雄	(連携会員)	東北大学金属材料研究所教授
	板東 義雄	(連携会員)	独立行政法人物質・材料研究機構フェロー
	細野 秀雄	(連携会員)	東京工業大学フロンティア創造共同研究センター教授
	松宮 徹	(連携会員)	新日本製鐵株式会社顧問
	牧島 亮男	(連携会員)	北陸先端科学技術大学院特別学長顧問
	村上 正紀	(連携会員)	立命館大学副総長
	山本 雅彦	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	吉田 豊信	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授

材料工学委員会材料工学将来展開分科会

※ 名簿の役職等は平成 22 年 3 月現在

要 旨

1 作成の背景

人口の爆発的増加とエネルギーの大量消費により、資源の枯渇、人類経済活動の結果としての気体、固体、液体の放散により、人類社会の成長の限界があらわになった。このような状況の下で、わが国の学術、とりわけ材料工学が寄与できることは何か、どのような変革が求められているかを注視し、その将来展望を踏まえて「日本の展望」を材料工学の立場から取りまとめた。

2 材料工学の学術と教育の整備

わが国の基幹産業を支え、新しい産業を生み出すのは材料であり、材料工学の重要性を社会に示すとともに、膨大な蓄積知識の自重でつぶれる材料工学を見通しの良い新たな学問として若者の魅力ある分野へと整備する必要がある。そのため、伝統的な知識体系に加え、現代基礎科学といった新しい知識体系の導入、医学等の異分野との連携を図り再整備しなければならない。

3 地球環境保全、循環社会実現と材料工学の果すべき役割

地球温暖化は、材料分野で解決に資すべき喫緊の課題であり、素材・製造工程のみならず、他の工程とも関連するため、材料工学の広い枠組みの中で、ものづくりの在り方について、再構築する必要がある。自然を克服して世界中で同じ生活スタイルを確立するのではなく、自然条件に適合することで環境負荷の低減を図り良好な環境を創出するとの立場から材料研究もなされるべきである。

4 健康社会（難病克服）実現のための材料工学

対症療法から根本治療に向かう時代の要請の中で、20世紀に発展した低分子医薬品やバイオ医薬品から、遺伝子、幹細胞、再生組織で治療される時代に移行しつつある。先端治療にブレークスルーをもたらすバイオマテリアル開発、材料工学の果すべき役割は大きい。

5 豊かな社会実現、貧困問題解決に向けて材料工学の果すべき役割

科学・技術は、快適さや豊かさを追求した時代から、環境との調和を重視した環境調和型の価値観へと移行する必要がある。地球規模で拡大する砂漠化の進行を阻止し、農地拡大を図るためには、脱塩処理技術、逆浸透膜開発等に果す材料工学への期待は大きい。エネルギー問題について見れば、地域ならびに国力に依存してその対応策は大きく異なる。貧困な地域においては、大規模設備の原子力、火力、水力等の大規模発電設備の建設は容易でなく、太陽光発電等の分散型エネルギー源開発のための材料工学の果す役割は大きい。

6 国際競争力の基幹をなす材料工学と材料構造化技術の展望

わが国の材料工学の国際的な学術水準は世界のトップであるに比して、構造化を基盤と

するものづくり産業の将来には、不安要因がある。ものづくり科学と実際の製造業分野を支えるものづくり技術との間には乖離がある。基盤科学・技術の重要性の再認識を広めるとともに、材料構造化コンバージング・テクノロジーの導入が必要である。また、人材育成を含めたものづくり科学基盤分野の強化策を早急に実施する必要がある。

7 国際レベルでの人材育成とわが国の果すべき役割

科学・技術で世界をリードし、先端技術に裏打ちされた工業製品を生産、輸出する日本において、その中枢にある材料工学に携わる人材の確保のためには、初等、中等教育段階から材料に触れさせ、五感で体験させる必要がある。また、国際化のためのカリキュラム、外国人教員の増員等の大学院教育体制整備が望まれる。材料工学は、社会と産業との結びつきが強く、総合的な面もある。そのため、基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解し、応用領域としての環境科学、極限材料等にも精通した人材が望まれる。国際化が急速に進む社会にあつて、学界、産業界を問わず、世界的視野に立って材料工学研究を推進できる人材の育成策が必要とされる。

8 現代社会・科学的動向の中での材料工学の将来展望

わが国は、かつて鉱山技術とその製錬技術、磁器製品を作り上げる工業技術により価値を手にした。鉱物資源は多種多様であったものの、いずれもその規模が小さく次第に国際競争力を失い、全面的に輸入に依存するようになった。一方、原材料を加工し、付加価値を与え製品化し、これら工業製品を輸出することにより、エネルギー、食料を確保してきた。そのため、材料開発、生産技術の果してきた役割は大きい。顕在化している中国、インドにおける環境劣化に対する対応技術指導、リサイクルを前提とした材料・プロセス開発を広めるとともに、世界の貧困と紛争の撲滅、食料の十分な確保のための教育と研究により一層貢献することが求められている。

世界の材料研究を俯瞰した上で、今後の材料研究体制としては、材料工学委員会などが窓口となり、総合的な材料工学戦略を構築し、過去に行われた研究成果を十分に生かせる体制を確認し、乏しい財政支援を有効に活用することが重要である。

目 次

1	作成の背景	1
2	材料の学術と教育の整備	2
(1)	材料工学の役割と社会での位置づけ	2
(2)	材料工学の知識体系の整理と再構築のための方策	2
(3)	材料研究の方向性と新たに取り組むべき課題	4
(4)	教育・研究組織とファンディング	4
3	地球環境保全、循環社会実現と材料工学の果すべき役割	6
4	健康社会（難病克服）実現のための材料工学	9
(1)	先端治療と材料工学	9
(2)	構造材料から機能材料への発展	9
(3)	薬物治療戦略と材料	9
5	豊かな社会実現、貧困問題解決に向けて材料工学の果すべき役割	11
(1)	先進国の科学・技術と今後のわが国の材料工学	11
(2)	砂漠の緑地化と材料工学	12
(3)	発展途上国における分散電源の確保と材料工学	12
(4)	情報通信インフラと教育環境の整備	13
6	国際競争力の基幹をなす材料工学と材料構造化技術の展望	15
(1)	我が国の材料工学研究と材料構造化技術を取り巻く現状	15
(2)	ものづくりにおける科学－技術サイクルと課題	15
(3)	材料構造化のための異種科学・技術収斂技術（コンバージング・テクノロジー）	17
(4)	我が国の国力を支えるものづくり科学の強化の展望	17
7	国際レベルでの人材育成とわが国の果すべき役割	19
(1)	初等、中等教育における材料工学の認知	19
(2)	わが国の材料工学における国際化と人材育成の在り方	19
(3)	研究拠点形成と人材育成プログラム	20
(4)	材料工学を支える人材像	21
(5)	学界、産業界にとっての人材育成策	21
8	現代社会・科学的動向の中での材料工学の将来展望	23
(1)	現代社会と材料工学	23
(2)	わが国の材料工学研究と教育の現実	24

1 作成の背景

産業革命以降、人類は無限のエネルギーと、発見・採掘さえすれば資源は豊富に存在すると信じていた。しかし、地球は有限である。人口の爆発的増加とエネルギーの大量消費により、資源の枯渇、人類経済活動の結果として気体、固体、液体の放散によって人類社会の成長の限界があらわになった。この制約された条件のもとで、わが国は1億2000万人の人口を抱え、その食料の多くとエネルギーをものづくり産業の対価によって得ていると言って過言でない。この困難な状況のもと、わが国の持続的存在、あるいは資源循環を前提とする模範的国家、循環資源立国を達成するために、わが国の学術、とりわけ材料工学が寄与できることは何か、どのような変革が求められているのかに注視し、その将来展望について学術としての材料工学(2章)、社会的課題解決のための材料工学(3、4、5章)、科学技術創造立国や人材立国に向けた材料工学(6、7章)の果すべき役割について材料工学委員会からの日本の展望としてまとめた。

2 材料の学術と教育の整備

(1) 材料工学の役割と社会での位置づけ

古くは青銅器、鉄器時代から現代に至るまで、人類社会の発達において新たな物質・材料の出現が社会の変革をもたらしてきた。鉄鋼を中心とする構造材料が 18 世紀の産業革命を支え、高分子材料、ジュラルミンを中心とする軽量合金が航空機の開発、高速輸送時代をもたらした。ナイロンの発明は衣料・服飾界に革命をもたらし、また半導体材料は情報通信の飛躍的発達と高度経済成長をもたらした。21 世紀に突入し、資源枯渇、環境汚染等の地球規模で人類社会の持続的発展を危うくする問題に対し、その抜本的解決策が求められ、それを解決するための新たな材料の出現に期待するのは歴史の必然である。20 世紀後半の材料研究の変遷を顧みれば、金属、セラミック、半導体などの分野において特定の物質、機能探索を目指す好奇心駆動型の研究から、電子材料、構造材料、磁気材料の開発といった技術駆動型の研究、さらには航空機、自動車といった材料の協調設計を念頭に入れたシステム駆動型の研究へと発展してきた。

21 世紀の問題解決のため、また閉塞感のある材料研究の救世主としてナノテクノロジーが期待され、ナノからメソ、ミクロへの巨大化と要素機能の協調・複合化を睨んだハイブリッド材料時代へと移行している。明治維新以降の急速な経済の発展と国際競争力の向上は、優れた材料、製造プロセスの開発によって支えられ、いわば新たな材料の出現が新たな産業を生み出してきたと言っても過言ではない。産業の基盤としての材料工学は、その重要性は認めつつも日常的に我々が眼にする材料を対象とするため、必ずしも脚光を浴びる学問分野でもなく、政策的にも集中投資される状況にはなかった。

さて、大量消費・廃棄を想定しての循環型製品開発、資源の枯渇に対処する代替元素戦略、貧困と飢餓の克服、難病の治療と予防といった問題に対し、課題解決型の新たな発想による材料工学の在り方が問われている。例えば、希土類元素を初めとする、埋蔵量が少なく産出国が限定される元素を含む材料については、その元素の使用量の削減、代替金属によって同等の機能発現を目指し元素戦略プロジェクトが開始されている。また、貧困と飢餓に苦しむ地域においては、大規模発電とその輸送よりは、太陽光発電といった局地的なエネルギー対策が必要とされ、先進富裕国とはその対応策が異なる。このように材料開発主導の社会発展から、問題解決型・新分野開拓型の材料工学への脱皮が必要とされている。また、健康社会実現においても、対症療法から幹細胞、再生組織を利用した根本治療に向けて材料工学に対する要請が高まっている。そのためには、従来の基盤技術・知識の集積から、医学、情報科学、化学、環境学といった異分野との連携、交錯により問題解決にあたる必要があり、新たな概念にもとづく材料工学の再構築が必須である。

(2) 材料工学の知識体系の整理と再構築のための方策

わが国の基幹産業を支え、新しい産業を生み出して来た材料工学が、近年の地球規模での課題を解決に資するためには、基盤技術である材料工学の重要性を社会に示すと

もに、膨大な蓄積知識の自重でつぶれる材料工学を、見通しの良い新たな学問として整備する必要がある。従来の材料工学は、結晶学、熱力学、反応速度論、結晶塑性学、材料組織学といった伝統的な学問体系により構築され、その研究者に閉塞感がある。現代基礎科学の進歩は著しいものがあるので、計算科学や生命科学などとも連携し、新しい知識体系を活用して材料工学の基礎的事項を整理し直すことが、材料工学の発展と新しい世代への知識の伝承に必須である。現代の若者の理科離れの原因の一端は、高すぎる知識の山と、それを整理可能とする見通しのいい学術体系の不在が、若者が夢のある材料工学の未来を実感をもって描きにくくしている点にある。

材料工学が目指す研究の方向性、研究体制の再構築は、研究資金・投資を政策的に誘導することにより新たな分野開拓、融合的な分野における研究者の養成も可能にする。しかし、初等、中等教育から高等教育に至る教育課程においては、このような外的誘導策は整備しておらず、ともすれば従来の蓄積された知識伝承を中心とした教育となっている。材料工学においてもその増大した経験的知識をベースに教育を行っている。特に材料工学は、金属分野における非常に巨大な知識群として蓄積が大きい。しかし、半導体、ガラス、セラミックス、高分子、有機化合物など科学としては同一の分野として取り扱うべき素材について個別に取り扱い共通の基礎科学での整理が十分なされているとは言い難い。

教育における外的誘導策として、各種評価機関による学部評価がある。工学分野ではJABEEが当該分野における最低要求基準について定め、その基準と照らした水準評価を行っている。しかし、先端分野において、基準を定める適切な機関がなく、ボランティアベースで産業界の意見を部分的に聞くに留まっていると推察される。また、高等教育全般においては、評価機構などが教育機関が定めた教育について教育の水準評価を行っているのが現状である。

今後の方針として、知識の集約と構造化を行い、基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を取り入れた新たな教育体系を単純化して示し、材料工学のベースとしての体系化を行う必要がある。一方、応用領域としての環境科学、極限材料、生命健康分野などにおける材料の重要性とその課題が解決された場合の社会的衝撃、例えばエネルギー発生、蓄積、宇宙・航空、移動体、通信などについて十分示し、若者に夢を与えるとともに、地球の未来、人類の持続的発展に材料研究の進展が不可欠であることを認識させ、重点的支援策がなされるよう、政策を誘導する必要がある。本来の材料工学は、個人または少数のグループの自由な発想に原点を求めるスモールサイエンスであった。この自由で独創性に富む発想が、次々に新たな物質・材料を生み出し、機能を発現してきた。しかし、現代社会における課題解決型の材料研究においては、個人の天才的な発想のみならず、多岐にわたる分野からの参加が必要とされる。また、ナノ、原子レベルでの計測と機能発現のための原子レベルの操作が必要とされ、そのための先端機器群の整備と共用化が必須である。スモールサイエンスとしての材料工学の原点を否定するものではないが、このような現実に対処するためには、プロジェクト研究、大型共用設備の整備等を図るよう政府に要望する必要がある。

基礎知識の集約化と応用領域をも包含した材料分野の教育において、個々の大学、学科における特色ある人材養成は必要であるが、共通的な演習などのスキルの獲得と原理の理解に適した教材を連携して共同開発し、高度に発達した IT を利用して効率的な教育体制を構築する必要がある。材料は数多ある物質の中で社会に直接役にたつものである。よって、材料の研究者には、社会の困難の解決や夢のある社会を実現したいという高い志が要求され、そのような志を有する人材の育成が必須である。

(3) 材料研究の方向性と新たに取り組むべき課題

第2期、第3期科学技術基本計画において、ナノテクノロジー・材料が重点4分野の一つに指定され、選択と集中のもとに予算が集中投資されている。ナノテクノロジーを駆使しての材料研究は、従来の金属、無機材料、有機、高分子材料といった研究領域の境界を取り除き、その研究領域も拡大している。

地球温暖化の主因とされる CO₂ 削減等の環境問題解決への社会的要請、原油価格高騰に端を発したエネルギー問題、希少元素などの鉱物資源に対する国家戦略等の問題が顕在化し、この抜本的解決のための元素戦略に立脚した材料研究に対する期待が急速に高まっている。一方、産業界に目を向ければ、エレクトロニクス関連企業の国際競争力が急速に衰退するとともに、電気・電子分野に携わる若手研究者の減少がこれに拍車をかけている。その解決のために More than Moor（トランジスタの構造や配線などで技術革新を取り込むことで、指数関数的に向上する CPU の性能を維持しようという研究）、Beyond CMOS（従来のトランジスタの概念を超えた新しいデバイスを生み出そうという考え方）をターゲットに究極の Si テクノロジーの限界探索を行う、Si 半導体ナノ材料、省エネ・極限半導体として光デバイス応用も含めたワイドバンドギャップ材料のエレクトロニクス応用や電源用高出力半導体素子や光デバイスへの展開やその周辺材料開発が重要である。フォトニクスは情報の処理・記録・伝達に重要な役割を果たしてきたが、光材料を半導体・金属・酸化膜などの複合材料に拡張し、ナノ構造を制御することによるエレクトロニクスの限界にチャレンジするナノフォトニクス材料、プラズモン材料研究も今後重要度を増す。また、わが国が世界をリードしてきた磁性材料に加え、従来の技術の延長線にない全く新しい分野であるスピントロニクス研究に拡大すべきであろう。

また、低炭素社会実現を材料面から支えるとすれば、エネルギーの変換効率向上のための耐熱材料、磁性材料研究はもとより、CO₂ 分離・回収により積極的に問題解決にあたる、膜、吸収材料研究も重要である。環境保全、浄化再生材料としての光触媒材料に対する期待は大きい。このように従来の材料工学の枠組みに捉われないことなく、課題解決のための分野横断・融合型の研究により、人類社会の未来に貢献する姿勢が必要とされる。

(4) 教育・研究組織とファンディング

科学技術基本法の制定とそのアクションプランとしての科学技術基本計画の策定、と

りわけ、第2期、第3期科学技術基本計画における重点4分野の設定は、材料工学のみならず自然科学分野の研究・教育の方向性に大きく影響を与えた。ナノテクノロジー・材料分野への戦略的投資は、閉塞感があった材料研究に新たな流れを注いだ。大学における教育の組織単位として学科、専攻が設けられ、その教育の体系化はかなり長期的視野に立って設計されている。一方、研究の方向は生き物であり、連携・融合が容易に図られ、ファンディング等によって戦略的に誘導可能である。科学技術基本法制定以前と今日の専攻・講座名称を比較すると大きく変化している。研究の方向性と教育・人材の養成が一体化して動き、極めて不安定な状況にある。伝統的な知識体系に加え、急速に進展した基礎科学分野をも包含、再構築した学問体系に根ざした、長期的視野に立った人材養成が必要とされ、それを可能とする組織を絶えず念頭におく必要がある。

国際産業競争力について見れば、ものづくり製品がわが国の輸出を支え、重点4分野の中でも特に、ナノテクノロジー・材料は多大な寄与をしてきた。その意味では、産業界の要望に応えるものづくりを支える基盤技術は依然として重要であり、研究としての潮流は、ナノテクノロジー手法と概念を考慮した材料工学が重要度を増す。ものづくり産業を支える人材の養成は必須であり、その人材養成を担う大学においては、基盤技術を支え、先端科学をも切り拓く人材養成を可能にする教育組織と、新たな流れを生み出す研究体制との併合を視野に入れた再構築が必要である。

3 地球環境保全、循環社会実現と材料工学の果すべき役割

素材・材料の製造には、非常に大きなエネルギーが消費される。とりわけ CO₂ 発生に直接的にかかわり、今世紀最大の課題の一つである地球温暖化に対する影響といった観点から材料の在り方を示す。

わが国でも製造業における CO₂ 発生の最大の分野は鉄鋼業であり、二番目は化学工業である。したがって、素材・材料製造における省エネルギー・CO₂ 発生抑制のための技術開発は、材料分野で欠かすことができない課題であり、この分野にかかわるすべての人間が常に検討しておくべき事項である。ただ、わが国の素材製造の省エネルギー技術は、鉄鋼生産における単位重量当たりの CO₂ 発生量が最も少ないことを見てもわかるように世界のトップにあり、これをさらに促進するには、単に一製造工程における省エネルギーを進めるような手法では、十分でなく、他の工程との連関や場合によっては産業の枠を超えた連携の上で進めなくてはならない。その意味で、材料工学の広い枠組みの中でそれぞれのものづくりの在り方を再構築する議論が重要である。

上記の連携の検討は、単に省エネルギーに留まらず、省資源にも繋がり、最終的にはいわゆる「循環資源立国を目指した循環社会システムの構築」に繋がる。この場合、“物質”がかかわるための連携がさらに重要な意味を持つ。それは、多くの“物質”は潜在的にエネルギーを保有していることが多いためである。これまでも省資源、省エネルギーの観点から各分野内での取組み、あるいは産業界、さらには民生を含めた社会全体としての取組みが積極的に行われてきた。産業分野の場合は、省資源や省エネルギー対策それ自体は縦割り組織単位の努力の集計によっても、最終的には生産コスト削減に結びつき、企業や業界の利潤の増大に貢献することも多く、これまではその対策自体が抱える矛盾や縦割り組織ごとの努力の矛盾はそれほど目立つものではなかった。しかし、省エネルギー・省資源にあらゆる角度から取り組む循環型社会においては、個別対策間の矛盾や組織間の努力の無駄や矛盾が顕在化してこなくなっている。そのため同一レベル間の矛盾や対立に対してはレベルを代えて調整、総合的調和的観点からの調整が求められるようになってきている。各分野単位で最適化を考えるのが適切なもの、気候風土的にひとまとまりの単位で循環負荷低減の最適化を考えるのが適切なもの、もう少し広域の地域的なまとまりを単位と考えるのが相応しいもの、地球レベルでなければ最適化を考えにくいものまで整理して区別していく必要である。見方を換えれば、個々人あるいは個々の組織が責任を持って取り組むべき課題もあれば、地方の自治体単位でなすべき課題、さらに広域の行政単位、あるいは国家単位で取り組むべき課題などの区別があり、表 1 もそういう観点からの区別を問題にするものである。最近の国際的な資源循環の調査・制御の試みは、まさにこのことを念頭に置いている。

同じ地球に暮らすといっても、住んでいる、あるいは立地している地域の気候風土の違いは当然のことながら生活文化の違いともなっており、生活スタイルを規定している。したがって、その地域に応じた素材・材料製造のシステム、ならびに技術があることを認識しなくてはならない。そうしたことから総合的に考えれば、自然を克服して世界中で同じ

ような生活スタイルを確立しようとするこれまでの発想や動きには無駄も矛盾も多く、循環社会にとっては、むしろ自然条件にうまく適合することで循環負荷の低減を図りながら人間としてふさわしい良好環境の創出が求められるともいえよう。材料そのものの開発志向もまたその製造プロセスも社会的文化的な配慮も含んだ環境負荷の観点からの評価尺度も加えた総合的評価が求められ、材料の供給循環連鎖もその観点から見直さなければならぬ。つまり、従来の素材産業とシステムならびに循環を考慮した素材産業とそのシステムの構築に際してもそうした総合的評価は欠かせず、その対象の特性によって、最適化すべき適切なレベルの選択も重要になってきている。したがって、素材・材料製造に関する技術開発も上記のレベルのどこに対応しているかを十分に理解しながら進めなくてはならない。

表 1 環境調和型社会確立の 3 レベル

環境 調 和 レ ベ ル	組織内連携	ゼロ・エミッション型の組織内連携（自己完結型） ・自己完結型を目指してマイナス価値の減量&高付加価値製品化 …プロセスやプロダクト(特に副生成物)の見直しや再評価
	立地地域社会内 連携	環境負荷を考える基礎単位としての地域社会内連携 (地域社会財のプラス・マイナス調和型) ・地域全体としての環境負荷の低減への貢献 ・地域社会全体での新たな価値の創出(地域社会財の形成・蓄積)
	地域間連携(国際 も含む)	処理効率と高付加価値化を目指す広域連携 (広域社会財のプラス・マイナス調和型) ・連携による新たな価値の創出、 ・広域内完結型体系の創出(地域外連携)

人工物環境で生活している人間にとって材料は大変有用であるが、場合によっては逆に直接・間接的に生態系に悪影響を与えることがある。その結果、製造時の廃棄物ならびに使用後の廃棄物処理において不適正となり大きな社会問題を引き起こした事例がある。現在は、すべての材料、それに含まれる化学物質の環境リスクを評価して使用する方向で検討がなされており、材料工学の中でも新規材料の開発には、環境リスクの評価も忘れるべきでない。そのため先進国ではある種の有害物質使用規制が導入されている。(例えば EU における ROHS 規制、REACH 規制、日本における化学物質審査規制法) その対応を行ったよく知られている例として鉛フリーはんだの開発がある。しかし、この対応も十分に検討が必要である。鉛フリーはんだの代替として使用されているのは、Ag-Sn、Bi-Sn を中心とした多元系はんだであるが、これらのはんだは若干ながら融点が鉛はんだより高く、トータルエネルギーとして負荷が高くなっている。また、素材として Ag は、鉛より資源量は少なく、Bi も同様に鉛の副産物である。トータルとして環境問題をとらえる場合、その評価をどのように置くかが大きく問われる。

一方、材料を考える場合、その資源はもはや無尽蔵に供給されるとの神話は成立しないことが明確になりつつある。人類の活動の持続可能性を担保する観点から、廃棄された材料の循環使用は必然である。本来、廃棄物は、動脈型材料・素材産業で製造された“物質”が使用価値を失った“物質”である。したがって、そこに使用されている“物質”は本質的に同じものである。つまり製品中に含まれる素材・材料は、製品と廃棄物に大きな違いはなく、本来的には、循環可能なはずである。しかし、一般的にはそれを実現するのは容易ではない。そのことは、わが国において個別リサイクル法が制定され、リサイクルが単純な市場経済に適さないことを見ても容易に判断できる。特に廃棄物処理と同時に行われるリサイクルは、場合によっては現在最大の環境問題である。温暖化防止と矛盾することが生じる。一般に有害廃棄物を処理するには、新たなエネルギーを必要とし、その関係は、残念ながらトレードオフの関係になりがちである。具体的な例でいえば、2000年当初問題となったダイオキシン規制では、廃棄物処理炉を初め、種々の金属リサイクルプロセスで発生する高温排ガスを急冷しなくてはならず、エネルギー回収を図ることができなくなり、結果としては、リサイクルの促進に本来必要でないエネルギーの消費を余儀なくされた。

極論すれば、いくらでもエネルギーを投入してよければ有機・無機・金属素材、材料がリサイクル可能となる。しかしながら、当然リサイクルを含む3R(リユース、リデュース、リサイクル)は目的ではなく手段であり、持続可能な循環型社会構築を支えるものでなくてはならない。したがって、材料の在り方もこの点を考慮して、製造され、利用、廃棄されなくてはならない。特に、最近、鉱物資源の供給制限が懸念される状況では、真の循環型社会を構築し、循環負荷物質も自然環境に拡散しないような管理を強化した使用を行い、循環負荷をエネルギーと組み合わせた形で最小化する社会システムを構築すべきである。

一方ユビキタス元素による材料開発もある種のレアメタルの供給制限を緩和する意味で重要である。その場合、できるだけ循環規制元素を使用しないことが望まれるが、前述したように場合によっては社会システムで管理すれば、使用も可能であると考えられる。例としてわが国では普及しないCd-Te太陽電池が欧米では普及が始まっている。これも使用時、使用後の管理をすることで社会に受け入れられる。

材料工学としては、エネルギー問題(地球温暖化問題)を解決する直接的な貢献として、高効率のエネルギー変換を支える材料開発がある。前述の高効率太陽電池をはじめとするエネルギー変換材料、Nd-Fe-B系より強力な磁石材料、また輸送機器の軽量化に資する材料技術開発は、これからも積極的に進めていくべきである。

4 健康社会（難病克服）実現のための材料工学

(1) 先端治療と材料工学

生体あるいは生体要素（DNA、タンパク質、細胞、組織、臓器など）と接触して利用される人工材料（バイオマテリアル）への要求は、ライフサイエンス、先端医療の発展と共に益々大きなものとなってきている。この生体系と人工材料の接触する界面での相互作用を分子レベル、細胞レベル、遺伝子レベルで経時的に把握することができれば合目的に人工材料を設計することが可能となることが期待される。特にガンや難病のための新しい診断や治療が具現化され、21世紀の新しい治療を大きく革新させることができよう。

従来のタテ型の枠組みを越えた、生命医科学と材料工学の融合の新領域の教育・研究の整備は緊急なる課題となっている。

(2) 構造材料から機能材料への発展

20世紀は人工腎臓の発展など、医療の安全と効果を高めるためのバイオマテリアルが大きく進展した。特に人工材料の構造制御は、固い、柔い弾力性がある、引っ張り力、ねじれに強い成形加工性などの物性を向上させ、それぞれに適合したバイオマテリアル応用を大きく進展させ、その結果ディスプレイ製品、カテーテル、人工関節、人工骨、骨固定用プレート、ステント、人工弁など医療の安全性と効果を大きく革新させた。さらに、金属、セラミックス、高分子のバイオマテリアルの多大の貢献により、透過機能制御、吸着機能、抗血栓性などの面で未だ理想的な機能の実現には至っていないものの、人工腎臓、人工肝臓、人工肺、人工心臓、人工血管、ペースメーカーなどの埋め込み型デバイスなど多くの患者の治療を可能とした。最近では高度な機能追及がさらに進められ、金属のステント上に高分子コートして薬物の徐放を実現した、薬物放出ステントなど新しいタイプの複合材料が着実に進展している。このような中で、完全な抗血栓性表面の作成は21世紀の材料工学における大きな宿題である。現在は血液自体を固まりにくくする抗凝固治療により体外循環型人工臓器を可能にしている。抗血栓性表面は、完全埋め込み型人工腎臓、人工心臓、細小人工血管などを可能にする基盤テクノロジーとされ、人工腎臓や人工心臓の完全埋め込み型の実現にはこれが必須である。しかし、現在は血液自体を固まりにくくする抗凝固治療により体外循環型人工臓器を可能にしている治療にとどまっている。わが国が先導的役割を果たしてきている材料表面のナノ微細構造と動的構造などとを対応させた生体要素（タンパク質、細胞、組織、臓器など）との相互作用の全体像をバイオロジーと工学の両面から総合的に明確にする基礎学問体系である、バイオマテリアルサイエンスの確立が21世紀における緊急かつ重要な課題とすることができる。

(3) 薬物治療戦略と材料

投与された薬物が、体内の他の部位で接着、吸収されることなく、任意の標的部位で

選択的に接着し吸収されることを可能とするテクノロジーは理想的な治療である。生体や生体要素を賦活する材料や薬物の放出を制御し、標的となる体内の部位に送達（デリバリー）する薬物送達システム（DDS）が、薬物治療の革新的テクノロジーとして注目を集めている。特に低分子の抗がん剤に加え、ペプチドや DNA、RNA を標的にデリバリーすることができ、バイオ医薬が大きく発展して来た今日、DDS は薬物治療戦略として極めて重要である。また、生体要素との相互作用を ON/OFF できる外部信号に応答するインテリジェント材料との併用は効果的であるが、生物学と技術の高度な統合が必須である。このレベルへの進展が次世代 DDS を大きく発展させてガンや難病の治療を実現していくことが期待される。ホルモンを作り、必要に応じて放出制御する細胞の利用、その組織化、臓器化は、人工材料なしに考えることができない。これには、高度に分解速度が制御された組織工学用の生分解性材料を利用した組織再生の発展が期待できる。また、細胞シート作製を実現するインテリジェント表面（熱などの外部信号により、細胞を培養・増殖する表面から細胞や細胞シートを脱着する表面に変化させる）のように日本が世界に先駆けて先導している新領域のさらなる発展により、多種細胞によるパターン制御された細胞シートの作製とその積層化、人工組織内に毛細血管網を作る技術などの大きな進展が考えられよう。従来の生物学や材料工学技術のみでの試行錯誤的開発から高度に発展し、集学的アプローチを可能とするバイオマテリアルサイエンス研究は、診断・治療の医療の革新のみならず生命科学の新しい発展を可能にしていく新学問領域として、その確立に大きな期待が寄せられる。日本の優れたこの領域の拡大と 21 世紀の先導的な役割を果たすために、大学院の医工薬連携、融合教育環境整備、産学官連携研究の戦略的な促進は国家レベルで推進されることが強く望まれる。

5 豊かな社会実現、貧困問題解決に向けて材料工学の果すべき役割

(1) 先進国の科学・技術と今後のわが国の材料工学

20世紀は生産活動を生活拠点とする「経済の世紀」であったが、これから我々の目指す21世紀は「環境重視の世紀」である。これは、自動車、電気製品、住宅などに快適さや豊かさを追及した価値観より、環境との両立性を重視した環境調和型の価値観へ移行することを意味する。科学・技術はこれまで、豊かな生活や安全・安心な生活の実現等に貢献してきたが、一方、先進国の高度な経済活動に伴う化石燃料の使用による地球環境の問題として、都市の大気汚染、酸性雨およびCO₂による地球の温暖化などももたらしている。今後の科学・技術は、環境調和型の先端科学・技術の開発を視点として、豊かで、安全・安心な生活の発展に貢献することを目的とすることが考えられる。

まず、わが国が強みとする環境・エネルギー分野の科学・技術を一層推進することで、国際競争力を強化することが考えられる。特に、化石燃料を太陽、地熱、風力、海洋、水素などのクリーンな再生可能なエネルギーで代替する先端科学・技術が注目される。米国を初めとする諸外国において、環境・エネルギー対策の強化により雇用の創出や需要の拡大を目指し、長期的な成長を目指す「グリーン・ニューディール政策」が提案されている。わが国は長年、太陽電池や燃料電池、原子力発電、LEDに代表される研究開発において優れた成果を挙げており、強い国際競争力を有している。米国では、太陽光発電や風力発電の技術開発に重点投資をすることが発表されており、他の諸外国も追従する傾向にある。このような状況を踏まえると、わが国においても、わが国が強みとする環境・エネルギー分野の先端科学・技術を一層重点的に推進することで、国際競争力を確保するとともに、諸外国に展開していくことが可能となると考えられる。

世界におけるわが国の強みは、ものづくりである。しかし、関連特許の約9割をわが国の企業が有しているDVDプレイヤー、液晶パネル、太陽光発電セル、カーナビゲーションなど、日本製品について、その世界的シェアの低下が起こっている。それは、パソコンや携帯電話といったエレクトロニクス製品を中心に、標準化された汎用部品の組合せで製造を行う「モジュール化」が浸透しているためである。エレクトロニクス製品の製造は、標準化された汎用部品を用い、組立工程の人件費等のコストが安い国へ移転されている。この結果、わが国では、シェアの低下する最終製品と高いシェアを誇る素材等というものづくりの競争力について二極化が進んでいる。

わが国のものづくりは、素材等に関しては極めて高いシェアを誇っている。特に、大企業がターゲットとしないような小さな市場や、潜在的にはニーズがあるが、まだビジネスの対象として考えられていないような「隙間」(ニッチ)分野において、製品の販売額の世界シェアが50%を超える中小・中堅企業(ニッチトップ企業と称する)が多数存在している。わが国のものづくりを維持・強化するためには、素材等の優位を有する分野における競争力を維持し、自動車産業、エレクトロニクス産業のさらなる充実が望まれる。しかし、韓国など東アジア諸国では、素材等の製造を推進する施策を策定し、今後は素材等の分野においても、世界シェアの獲得競争が激化することが予想される。

今後、わが国の素材等の分野において高い世界シェアを維持するためには、世界的に優れたわが国の材料工学などの分野において、大学等の研究機関の基礎研究を奨励し、また研究成果をどのように企業に展開していくかが競争力維持の鍵となるといっても過言ではない。また、大学等の研究機関との連携による技術開発を加速的に進められるよう、地域における産学官連携を推進する拠点施設を整備し、地域の産業集積を一層発展させていくことも考えられる。

(2) 砂漠の緑地化と材料工学

砂漠の緑地化がもたらす効果として、砂漠化の進行の阻止、農地の拡大による食糧・エネルギー生産量の増加、CO₂の固定による地球温暖化防止などが考えられる。緑地化のための課題や技術として、水の確保、水の有効利用のための保水性の確保、排水路の確保、乾燥ストレス耐性・塩ストレス耐性植物の開発、緑地化することによる生態系への影響調査などを考慮する必要がある。ここでは、特に、水の確保に関する技術課題について、材料工学関連の視点から概観する。

淡水源（河川、湖沼）等がなく、降水量も少なく雨水に頼れない場合、もし海辺の近くであれば、海水を淡水化することが考えられる。海水は約 3.5%の塩分が含まれており、飲用水とするためには塩分度を少なくとも 0.05%以下に低減する必要がある。この脱塩処理技術には、海水を熱して蒸発させて、冷却し淡水を作る多段フラッシュ法と、海水に圧力をかけて逆浸透膜と称される濾過膜を通して、海水の塩分を濃縮させ、淡水を濾し出す方法がある。前者の多段フラッシュ法は、水を蒸発させるために多量のエネルギーを投入する必要がある、熱効率は悪いものの、生成清水の塩分濃度は 5ppm 未満程度の淡水を大量に作り出すことが可能であり、精油所や火力発電所に併設される場合が多い、一方、濾過膜を利用する逆浸透膜法は、生成清水の塩分濃度は 100ppm 未満程度の淡水しか得られないが、エネルギー効率的には優れており、最近の大型プラントは、世界的にこの方式によるものが多い。この濾過膜として、 Pasta 程度の太さで、中が空洞の糸状に成形し、外側から内側へ濾過する中空糸型逆浸透膜が注目されている。正確なデータではないが、現在、世界で逆浸透膜を最も多く製造しているのは日本であり、材料工学的には、この逆浸透膜のさらなる高能率化が求められている。

(3) 発展途上国における分散電源の確保と材料工学

発展途上国の多くの地域には電気やガスが設置されておらず、例えば、インドにおいて、人口の約半数の 5 億人は、電気のない地域に住んでおり、また、電気が配備されているものの、停電が日常的に発生しているとされている。また、発展途上国では、屋内の照明用として灯油などの化石燃料を直接使用し、室内空気汚染による 5 歳未満の子どもの死亡や生涯にわたる障害を引き起こす原因となっているともされている。したがって、これらの人々に太陽光、風力、バイオマス・廃棄物等の再生可能エネルギーを活用するなど、地域に適合した分散型エネルギー源によって貧困克服への援助、協力が求められている。

地域に適合した再生可能エネルギーを利用した発電として、太陽光発電、小型水力発電、風力発電、バイオエネルギーなどがある。また、アフリカ大陸、南米大陸などの巨大水力発電、インドネシアの地熱発電など地域によっては他の発電方式も可能であろう。

発展途上国における太陽光発電導入の最大の障害は、貧しい地域の資金不足であろう。実際に、国連環境計画（UNEP）の主導により、インドにおける太陽光発電のパイロットプロジェクトに150万ドルが投じられ、貧困農村地帯に暮らす10万人の生活を一変させた。UNEPの家庭用ソーラーシステム・プロジェクトにより、電灯だけでなく、小さな家電製品を動かすことも可能となった。将来は通信インフラをその電力でまかない、インターネット環境を整備することで、安定した知性を持つ社会が構成されることも期待される。この成功を受け、アルジェリア、中国、エジプト、ガーナ、インドネシア、メキシコでは付随する同様なプログラムが実施されている。

このような状況の中、例えば太陽光発電について、発電効率の向上や発電コストの低減、原材料供給の安定化、発電システムの適用拡大等が現在の課題となっている。今後は、太陽電池については、これらの課題の克服を含め、第2世代の有機薄膜型・色素増感型太陽電池や第3世代の太陽電池の開発、また風力発電については、出力安定化技術等の開発や高効率モータを利用した低価格の風力発電デバイス、エネルギー効率の向上に資する超伝導材料、耐熱材料等の開発の推進が考えられる。わが国において、再生利用可能エネルギーを利用した発電装置等を積極的に開発することにより、発展途上国の無電化地域問題の解決に大きく貢献することが期待される。

(4) 情報通信インフラと教育環境の整備

情報通信インフラストラクチャーは、情報の流通を担う通信インフラストラクチャーと、情報の蓄積を担ういわゆるデータベースの情報インフラストラクチャーに分類される。高度情報通信システム（INS）は、通信網の全国的なデジタル技術 ISDN（デジタル総合サービス網：Integrated Service Digital Network）化により急速に整備が進んでいる。その背景には、光ファイバ伝送技術、デジタル技術、衛生通信技術などの飛躍的な発展がある。一方、情報インフラストラクチャーとしてのデータベースには、新聞、雑誌、書籍などの情報を蓄積した文献データベースと、経済統計や企業の財務データを蓄積した非文献データベースに分類され、急速に整備されている。このように情報通信インフラストラクチャーの整備発展は、利用者にとって、時間的距離を克服し、情報量の増大、最新データへの更新、データの質の向上をもたらしている。

したがって、このような情報社会に対応するためにも、中等、高等教育において、情報を生み出したり、それをうまく利用する情報リテラシーを教育することが必要である。現在の情報化社会におけるリベラルアーツとして位置づけられる情報リテラシーとは、コンピューターを単に使用するだけでなく、情報に効果的にアクセスし、精査し、そして使用できることであり、その結果、社会的、文化的、そして哲学的な状況・影響を知ることができる能力とされている。

したがって、これからの情報教育は、単に情報機器をうまく操作したり、プログラム

を開発したり、情報システムを設計するという能力の涵養だけでなく、情報を利用して、それぞれの目標を達成するために自己鍛錬することを促進するような教育プログラムの開発が望まれる。そのための教育環境として、情報教育にかかわる教員による、情報化の進展に対応した最新の情報技術の修得、情報機器などの整備が継続的に行われることが求められる。

また、情報教育は、中高等教育に留まらず、生涯教育の一環としての位置づけによる一層の充実が望まれる。情報機器が教育機関や家庭に設置されれば、在宅学習という教育ネットワークとして新しい形態が可能となり、教育対象は、教育、学習の生涯化が進展する中で、中高年齢者や主婦など幅広い国民を対象として、発展すると考えられる。

6 国際競争力の基幹をなす材料工学と材料構造化技術の展望

(1) 我が国の材料工学研究と材料構造化技術を取り巻く現状

我が国の材料工学に関する研究は、いろいろな学問分野の中にあっても高いレベルにあり、例えば、我が国の各分野別論文占有率の統計を見ても全体が 9.9%程度であるのに対して、材料科学は 14.3%とトップを占めている（科学技術白書（平成 19 年））。ところが、戦後の我が国の産業の国際競争力を支えてきたのは、いわゆる基盤技術分野（材料技術、溶接、塑性加工技術、エレクトロニクス実装技術など）であるといえるが、今後の材料工学を基盤とするものづくり科学分野とその技術水準、更には産業としても国際競争力の維持には懸念があることが指摘されている。我が国の科学技術や産業の国際競争力について、多くの研究者・技術者が、アジア諸国に対して、現状は優位にあることは認めつつも、数年後には同等に近くなるとの予測もなされている（塩谷：科学技術政策研究所調査資料-162, NISTEP Report No. 106、109）。この懸念は、近年の我が国のものづくりにおける、「もの」の品質や信頼性などへ幾つかの問題の顕在化にも現れており、1) 技術者倫理の問題、2) 製品設計の不十分さ、3) 製造工程の管理ミス、4) 製品が十分に保守できない、保守の仕方が分からない、など、目配せ・総合的判断・影響度評価などができる人材の不足が直接的に現れた結果ともいえる。このような状態をもたらした原因は、単一の理由だけとはいえず、戦後の産業界や科学技術施策の複合的な影響の結果ともいえる。

しかし、依然として我が国の産業の国際的な強さを支えているのは、成長の微分値は小さいものの、持続的に革新が続けられ世界で最も高い技術水準を誇っている「ものづくりの基盤技術」である。第三期科学技術基本計画においても、製造分野を新しく「ものづくり」分野と称し、この基盤技術に対する出口を強く意識した研究支援が行われてはいるが、その技術、知の源泉たる大学、公的研究機関における科学技術基盤分野への資源配分が必ずしも十分でなく、研究はもとより人材育成が困難な状況になっているともいえる。この状況を放置すれば、先端学術は世界トップレベルに達したとしても、それを応用展開、実用化する基盤技術と人材の供給が困難となり、産業の国際競争力が急速に衰えることも予想される。

(2) ものづくりにおける科学－技術サイクルと課題

材料工学分野では、我が国は科学技術大国といっても疑いない。しかし、それに基づいて国力を維持・発展させるに十分なものであるかについては疑問が残るとの意見もある。この最大の原因は、材料開発イノベーションは、多くの研究者によってなされているものの、その成果の実用化・企業化へ、十分なマネジメントがなされていないことに原因がある。

産業力は「日本力」の源泉である。国際競争力のある産業力の維持発展無くして我が国の国力の発展はない。我が国の製造業が富をもたらすことは疑う余地もない。その製造業はものづくりが基盤であるが、実践的ものづくりは、今や、科学的思考が重要とな

ってきている。

大学や独立行政法人の研究機関では、ものづくりに対する科学的なアプローチである「ものづくり科学」の研究は決して少なくはない。しかし、この「ものづくり科学」は、実際の製造業分野でのものづくりを支える「ものづくり技術」とは分離している傾向、すなわち、ものづくり科学から技術への展開が明確化でないか、そのアクションが評価されていないので見える形となつてこないのである。国力として、富を生み出す製造業にあって、個々の分野での技術予測などはなされているものの、全体的な技術像が見えていないのも事実である。特に、将来のものづくりを担う研究分野では、勢い科学視点重視の評価が先行しがちで、いわゆる科学-技術-技能サイクルを回すような評価システムとはなっていない。

我が国の国力の源泉を支えるのは「ものづくり科学」が生み出す英知にあり、その英知を持った「人財」にある。科学と工学の根本は、「知る」と、その知ったことを「活かす」の二つである。「知る」の基本は観察による科学的真理の発見であり、「活かす」の基本は技術革新（イノベーション）によるものづくりである。知ったことを活かすことが工学であり、それを支えるのは知ることの科学なのである。工学や工業は、科学の成果を大規模な技術革新で開花させ、我々の生活の質の向上や社会福祉に貢献してきたことは事実であるが、技術革新によって庶民の苦難をもたらしたことも否めない。これは、あまりにも細分化した、あるいは固定化した分野（ディシプリン）が、科学者を部品化へ導いたためでもある。既存のディシプリンの破壊と新しいディシプリンの創生が求められている。その意味で、ものづくり科学の新しいディシプリンの創出が待たれる。

(3) 材料構造化のための異種科学・技術収斂技術（コンバージング・テクノロジー）

2005年に米国の国立科学財団（NSF）から、「Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations : Converging Technology Society」が発表され、コンバージング・テクノロジー（Converging Technologies、CTs）の言葉が最初に提言された（伊藤：イノベーションをもたらすと期待される Converging Technologies 推進の政策動向、NISTEP レポート）。CTs は、明確な定義はないが、「特定の目的を達成するために2つ以上の異種の科学や技術を収斂（convergence）する技術」であり、かつ「他の技術に影響を与えてシステム全体を劇的に変化させるという“メタ技術”の一種である」と考えられる。材料開発はいろいろな分野で積極的に進められ、その開発には多面的、あるいは、異縁連携的な試みが数多く見られているが、「使われてこそ材料」の観点から、その材料の加工と構造化技術（ここでは、「ものづくり」と称する）は不可欠である。この分野こそ、いまやコンバージング・テクノロジーが求められるところでもある。特に、材料構造化研究分野では、その技術分野を支えてきた基盤科学技術の重要性への認識が希薄となり、積み上げ方の技術開発の基盤を失いつつあるが、学術分野の収斂が新たな発展をもたらす可能性がある。ただ、CTs は、単に連携するとか、融合するだけで生まれる収斂技術でなく、明らかに目標・目的解決型であり、そこで生まれる革新性が重要なのである。ものづくりには、基盤となる学問分野があり、それなくしてはものづくり科学分野が生まれない。これらの科学分野を基盤として、これまでもいろいろな「革新加工技術」や「新機能材料」が生み出されてきたが、いま必要なのは、『コンバージング・プラットフォーム』が形成され、新しいコンバージング・プロセス・テクノロジー（CPT）が生み出されてこなければならない。

収斂された「ものづくり技術力」の発展に不可欠なものとしては、①新機能・性能の発現の科学（革新をもたらす材料科学）、②新機能を活かす革新加工技術（新材料が活きるプロセス革命）が挙げられる。①については、我が国の高い材料科学技術の維持発展に、第3期科学技術基本計画における「ナノ・材料」でも大きく支援されてきている。ただ、今後の発展を展望するとき、材料科学分野における若手研究者の質と数は必ずしも十分でない。ナノ・材料研究は、大きな流れを作ったともいえるが、構造材料や機能材料において、変わった部分と変わらなかった部分が、必ずしも明確になっていない。特に、価値を持つ「もの（人工物）」への材料構造化の流れが、未だ明確でないのは、この分野が十分なコンバージング・テクノロジーとなっていないためである。

②については、多面的な支援体制が取られてはいるが、目的指向型の名の下に成果物を強く求め、直裁的な開発指向が見られ、プロセス革命を担う開発研究意欲が乏しい。また、これまでの基盤的プロセス科学に関する支援などの希薄化で、研究基盤の弱体化が見られる。

(4) 我が国の国力を支えるものづくり科学の強化の展望

ものづくり技術は、基盤となる学問分野を踏まえ、着実に積み上げられてきた「積み上げ（integrated）型」として実用化を目指した開発研究が主流であり、それが大きな

力となってきたのである。一般産業界でも、ブレークスルーはなされてきたし、開発研究で、市場には出ずに消えていったものも数多くあるが、一般には、革新的なブレークスルー対応なものは、大学や研究機関が担う分野であったといえる。ところが、我が国では、必ずしも大学、産業界の研究分野についての役割分担が明確でない。いずれにしても、未踏産業分野の創出と新視点による技術革新が今後の技術開発にとっても重要な分野である。

このような基礎学問領域がますます重要となるときに、基礎となるべき分野の脆弱化が起こることがないように科学技術施策が求められる。

いま必要なものは、ものづくり科学を統合的に提言・運営するような政策団体（本来の開発機構）的なものと、ものづくり科学を支える今後の人材の二つである。まず必要なのは、ものづくり分野の科学・技術研究を我が国の基盤分野としてしっかりと格付けすべきである。それで生まれる効果は、①ものづくりの科学的英知が富を生むという目標がしっかりした研究体制となる（ミッション指向）、②工学教育の中でものづくりの位置づけが明確となる（ものづくり教育体系）、③目指そうとする研究者が増加する（研究人口）、④若者の意識改革につながる（担い手の拡大）、⑤産業界への大きな波及効果が期待される（科学の社会化）。

今後、大学などで基盤学問分野の強化と材料工学全体を見渡せる分野融合型の教育システムの確立と、コーディネイト機能が充実したシーズ指向研究組織の充実と、適切なプログラムオフィサーを機関の戦略を踏まえて選考・選任し、その提言・管理能力を活かした研究組織とすることの、教育力と研究遂行力の強化が重要で、それによって我が国の材料工学を基盤としたものづくり技術の国際競争力の展望が拓ける。

7 国際レベルでの人材育成とわが国の果すべき役割

科学技術で世界をリードし、先端技術に裏打ちされた工業製品を生産、輸出することで日本は生きていかなければならない。その中枢にある材料工学に携わる人材の確保のためには、初等、中等教育段階から材料に触れさせ、五感で体験させる必要がある。また、国際化のためのカリキュラム、外国人教員の増員等の大学院教育体制の整備が望まれる。材料工学は、社会や産業との結びつきが強い総合科学であるため、基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解し、応用領域としての環境科学、極限材料等にも精通した人材が望まれる。国際化が急速に進む社会にあつて、学界、産業界を問わず、世界的視野に立って材料工学研究を推進できる人材の育成策が必要である。

(1) 初等、中等教育における材料工学の認知

科学・技術で世界をリードし、先端技術に裏打ちされた工業製品を生産、輸出する科学技術創造立国を目指す日本において、これを担う人材の育成は長い目で見て継続的に重要であるが、残念ながら小学生、中学生、高校生の間での理科離れを聞く。中学校学習指導要領技術分野に「材料と加工に関する技術」が新設されるなど対応が進められているが、益々「人が人を育てる」原則を再確認し、理科好きで授業の上手な先生による、実験を伴った理科の授業の実施が重要である。そのために、初等中等教育における教職員のFD（ファカルティ・ディベロップメント：教員の授業内容や教育方法などの改善・向上を目的とした組織的な取組み）活動を重視し、PDCA（Plan - Do - Check - Act すなわち、計画し、試行運用し、運用状況を監視、改善し、是正する）サイクルによる理科教師の授業力の向上が望まれる。材料についての教育では、半導体、ガラス、セラミックス、高分子、有機化合物などでそれぞれ興味深い特性を持つ材料の実物を教材として示すことにより、五感で体験させるのに最適である利点を生かすべきである。また、評判のよかった退職した理科教師による理科教育補助も有効活用したい。これら裾野の充実とともに、優秀な学生の更なる教育も合わせて重要であり、スーパーサイエンスハイスクールの数の増大、研修、実験に伴う教員、学生宿舎の確保など教育環境の充実が急務である。サイエンスカフェ活動に加えて、材料工学の多くの関連学協会の教育部会は、これらの活動に深く関与して、これからの時代を担う人材育成に貢献すべきである。

(2) わが国の材料工学における国際化と人材育成の在り方

わが国の材料工学の将来的な在り方としての第1は、国際的ネットワークを持ち、国際的に活躍し、材料工学分野を先導する人材を育成することである。残念なことであるが、最近の科学技術白書によると、大学院博士後期課程を修了して、欧米でポスドク等として残るのは僅か2パーセントにすぎず、長期留学経験者が減少している。これでは、日本の学界、産業界の国際化は心許無い。2 - 3年間の留学を体験して、英語を自由にこなし、大学、学会、社会での振る舞いの国際スタンダードを理解し、また真に国際的ネットワークを持ち、国際的に活躍する、材料工学分野を先導する人材を意識的に

育成することは重要である。国策として、留学中、留学後の処遇も含めて対応を考慮、支援が肝要である。

第2に、世界レベルでの人材育成（留学生、研修技術者を含む）にわが国が貢献することは重要である。特に、省エネルギー・省資源については、材料工学関連プロセスの省エネ化をシステム化し、世界へ移転可能な技術として体系づけることが求められる。材料工学は知識と経験の双方の集積が重要な要素であり、これに配慮した地道な研修も含めて、技術移転ができる現地適合型の人材を教育することが必要である。そのためには、大学、高等専門学校、公設研究機関、産業界間での連携により、総合的、統一的かつ効率も考慮した材料工学関連プロセス研修を実施することが望まれる。一方、諸外国への研究者、技術者の積極的派遣により、その国の実情に沿った人材を育成する必要がある。外国生活経験のある定年退職者による材料工学の伝承を諸外国で行うことも下支えとなる。

第3に、大学院教育の充実が求められる。同時に基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解させ、応用領域としての環境科学、極限材料等も記述した新材料工学の教科書の作成も必要である。国際化とわが国の人材育成の基盤的な面では、材料工学の英語での講義を国際スタンダードの質的内容で実施する必要がある。これに伴い、学部での実用英語教育の実施と受講義務化、また、外国籍の教員や留学生の増大と、それに伴う受け入れ環境の充実も合わせて必要であり、これらが実現されて初めて真の国際標準化、国際化であり、欧米との競争に伍することができる。

欧米の大学院では、学生は猛烈に幅広く勉強し、研究もする。広く、また深い素養を持った学生として教育、訓練される。日本では、特に大学院のカリキュラムが精査されておらず、レベル、質、評価、において欧米のものと比較して劣っている部分も多い。日本の大学院生は、研究は良くやっているが、成績評価の厳格化との兼ね合いもあり大学院のコースワークは猛烈な勉強を欧米ほどしない傾向である。これが、博士後期課程修了者の産業界での受け入れにおいて、日本と欧米の大学院の大きな差となっている。日本の材料工学の大学院の系統的なコースワークの充実が望まれる。

(3) 研究拠点形成と人材育成プログラム

文科省のグローバル COE による研究拠点形成事業は、教育面を相当程度に重視した施策であり、有効であると思われるが、特定の大学に集中させていることにより総花的になりがちな感がある。材料工学の分野では、日本はそのレベルが国際的に認知され、先導している数少ない分野の一つである。世界的に強い材料工学における、特定分野での全国的な研究の連携を可能とする、グローバルな COE 研究拠点形成事業の実施が望まれる。優れた、日本独自の研究実施過程でこそ、次の時代を担う若き研究者が育成される。

過去においては、研究者は学位取得後、徒弟制度的に講座内上司に鍛えられ、育成されてきた。現在、多くの大学では、講座は少なくなり、教授、準教授は独立し、ゆるい縛りの講座に移行して運営されているのが実態であろう。このような変化に即した人材育成プログラムを作り、助教、ポスドクを育成する必要がある。英語力を始めとする

より広く深い教養を身につけた、将来産業界でも受け入れられる人材を育成するためのプログラムの義務化や、メンター制度、教育経験・研究室運営体験機会の設定などの工夫が肝要である。

(4) 材料工学を支える人材像

材料工学を支える人材像とは、まずは、急速に変化している世界を理解し、国際化の重要性を認識して日常的に対応している人である。そして材料工学は、社会や産業との結びつきが強く、総合工学的な面もあることから、材料工学を支える人材像としては、基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解し、また、応用領域としての環境科学、極限材料、生命健康分野などにおける材料の重要性とその課題が解決された場合の社会的衝撃（例えばエネルギー発生、蓄積、航空・宇宙、移動体、通信）を社会に、学生に提示できる人であり、そのための努力と素養が常に求められる。無論経済、社会情勢へ関心を持つことは重要である。

材料は数多ある物質の中で社会に直接役にたつものである。よって、材料の研究者には、社会の困難の解決や夢のある社会を実現したいという高い志が要求され、そのような志を持った人材の育成が必須である。

(5) 学界、産業界にとっての人材育成策

国際化への対応は、今後の人材育成では避けて通れない。大学においても、文部科学省の留学生 30 万人計画、世界的研究拠点の大学グローバル COE 形成の推進などに象徴されるように国際化が必須となり、また、国内学会での研究発表も英語で行われる場合も多くなった。

国際化を長期間継続的に進めるのは、結局、個々の構成員の努力が必要である。各国の文化活動への興味を持つことも重要である。英語や各国の言葉に興味を持ち、コミュニケーション力を普段から養うことは無論重要である。また、日本の教育、経済、歴史、習慣、食事などを的確に英語で説明できることも必要になってくる。国際化は各個人の国際化でもある。各大学で、サバティカル制度を導入して、種々の年代の教員が、1 年間欧米の大学等に滞在して研究等で研鑽を積み、人のネットワークを再構築、強固なものにするのも良い人材育成であろう。

なお、材料工学が基盤となっている「ものづくり」では、第 3 期科学技術基本計画においても、この基盤技術に対する出口を強く意識した研究支援が行われてはいるが、その技術、知の源泉たる大学、公的研究機関における科学・技術基盤分野への資源配分がおろそかにされたため、研究はもとより人材育成が困難な状況になっている。この状況を放置すれば、先端学術は世界トップレベルに達したとしても、それを応用展開、実用化する基盤技術と人材の供給が困難となり、産業の国際競争力が急速に衰えてしまうのは明白である。主たる研究セクターである国立大学は法人化の後、政府による計画的な整備はなされず、各法人のそれぞれの戦略に従って分野と組織の設定を行っている。未だ法人としての運営が過渡期であること、人件費、運営費が毎年自動的に 1%減額され

ることなどで積極的な分野構成の検討には至っていないところが多い。私立大学においても課題は共有している。

材料研究は計測器、測定器などの設備に依存する部分も多くあるが、精密高額機器を整備運転する研究補助者の不足とともに、研究者自身が機器オペレーター化していく懸念はぬぐえない。第一級の研究者を十分生かし切れていない研究支援と管理的制度にも大きな弱点があると考えられる。

企業の中には、その経済活動として、国外に支社、工場、子会社、連携会社などができているところも多く、そのような企業では多くの社員が派遣され、現地での日常

生活を体験して、国際化を学び、日本との違いを実感し、また日本そのものを再確認している。国外への技術移転などが進む中、このような人々はますます増加している。企業の派遣において人材育成面で望みたいのは、現地での国際人としての育成時間を十分にとることである。これらの活動を通じて、材料工学や産業において、国際標準を体験熟知し、され、国際的な人のネットワークを持つグローバルリーダーの養成・活躍が望まれる。

8 現代社会・科学的動向の中での材料工学の将来展望

(1) 現代社会と材料工学

江戸時代、わが国は世界に冠たる鉱物資源輸出国だった。17世紀初頭の日本の銀産高は世界のほぼ3分の1を占めていたのではないかとされている。銅は対外支払いに使われたこともあり、世界最大の産銅国として世界に存在を確かなものとしていた。銅、銀と並ぶ産品として陶磁器も日本の工業製品であった。伊万里の磁器は、世界的な価値を持つ工芸品、美術品としてヨーロッパ等に輸出されていた。わが国は、鉱山技術とその製錬技術、磁器製品を作り上げる工業技術により価値を手にしたのである。日立製作所やコマツも銅鉱山の動力機器の製造部門としてスタートしている。

わが国は明治時代中期には世界最大級の産銅国であり、第二次世界大戦前においても世界第2の産銅国のみならず、石炭も輸出していた。しかし、わが国の鉱物資源は多種多様であったものの、いずれも規模が小さく、次第に国際競争力を失い、戦後復興に基幹産業として大きく貢献した石炭産業も、さらに銅鉱山、鉛・亜鉛鉱山も閉山し、全面的に輸入に依存するようになった。一方、原材料（資源、鉱物）を加工し、付加価値を与えて製品化し、そのハードとしての製品に価値を与えていく技術は大きく進展し、この国の基盤を構築するようになった。今日のわが国はGDPの20%近くを製造業で生み出し、これらの工業製品を輸出することで外貨を獲得し、エネルギー、食料などを確保している。

工業立国の道は決して平坦ではなかった。わが国が農業社会から工業社会、情報社会へ移り今日のような国際的に高い評価を得るまでには大きな変化があった。第1期は戦前に起こった田中正造の足尾事件に代表される鉱害問題の発生したときである。つづいて1960年代を中心に2桁の経済成長をした時期には4大公害（熊本水俣病、イタイイタイ病、四日市公害、新潟水俣病）をはじめ数々の環境問題が起こり、環境問題は次第にローカルな問題からグローバルな問題に拡大され、生態系や人体に大きな影響を与え、近代工業生産を大きく変革させるきっかけとなった。現在のわが国の環境技術はこの時期の極めて大きな犠牲のもとに発達してきた。

次に大きな変化があったのは、2回にわたるオイルショックである。当時のわが国はエネルギーの8割近くを石油に依存しており、わが国の工業生産技術の国際競争力は危機に瀕した。しかしこのときも、わが国の工業生産技術は、生産規模の縮小ではなく極限まで省エネルギーを図ることで対応し、結果的に国際競争力の強化に繋がった。そして今、また大きな変化が起ころうとしている。中国はこの20年間でGDPを5倍近く伸ばし、日本がこれまで担ってきた世界の製造業を肩代わりしている。インドもやがてこの段階に達すると考えられる。中国、アセアン、インドなどの国々に見られる共通した動きは発展途上国から近代工業国への移行で、これには膨大な量の鉱物資源、エネルギー資源が必要になると見られる。日本、韓国とは異なり、これらの国々は大人口を抱えており、本格的な経済成長に伴う鉱物資源、エネルギー資源の需要増大は世界的な規模で考えない限り解決できない状況にある。

このような背景のもとに、わが国の製造業は大きな変革を求められている。課題先進国としてのわが国は、製造業が極めて複雑な課題をこれまで解決してきた。これから数十年の最大の課題の一つが、世界的には大人口国の経済爆発であれば、このインパクトを最小限に緩和することで世界に貢献するべきであると考える。

すなわち、顕在化している中国、インドにおける環境劣化に対する対応技術指導、リサイクルを前提とした材料開発、またそのプロセス開発、あるいは極めて入手容易な素材による最低性能製品の製造技術開発とコンセプト提供などで、我が国の材料工学を役立てる。その一方で、重要な技術開発を国内で積み上げていき、エネルギー・鉱物資源の開発と延命をはじめ、世界の貧困と紛争の撲滅、食料の十分な確保のために、教育と研究で貢献することである。そのためには、わが国内外の人材の育成を行い、世界におけるわが国の存在の強さを高めていくことが必要である。

(2) わが国の材料工学研究と教育の現実

大学の研究において、材料工学の人的な配置については名目的にはそれほど減少していると言えない。しかし、分野が従来の古典的構造材料の力学的性質やそれらの生産技術、製錬などから大きく拡張されていることに留意する必要がある。

わが国の材料研究は、応用分野としてはバイオマテリアル（DDSを含む）、電子デバイス、ナノマテリアル、エネルギーデバイスにまで広がり、プロセスとしては難処理鉱石の処理や大量発生副産物、微量難処理副産物の処理、さらにはリサイクルプロセスの開発まで、わが国独特の課題も持ちながら、人材と研究力の戦線は伸びきっていると言える。世界の材料工学で最も網羅的な研究体制をとりつつ、必ずしも国家的財政支援は多くなく、また明確な方針が打ち出されているとは言えないのが現状である。

その原因は、材料工学的なアプローチを応用分野の側から、いわばボトムアップのアプローチで五月雨的に行われていることにある。従来の古典的材料工学の場合は応用範囲もある程度限定され、それぞれの分野研究者が基盤的知識を共有しつつ、お互いの研究を俯瞰しながら、大きな無駄をすることなく過去の蓄積を生かした研究体制をとっていた。残念ながら爆発的に広がる応用範囲に知識の構造化が追いついていないことは、小宮山宏氏の言葉の通りである。

以上をまとめると、世界の材料研究と材料生産技術を俯瞰した上で、今後の材料研究体制としては日本学術会議材料工学委員会などが窓口となり、総合的な材料工学戦略を構築し、過去に行われた研究成果を十分生かせる体制を確認し、乏しい財政支援を有効に活用することが重要である。全国レベルの拠点形成は極めて重要である。もはや個別機関がすべての分野を網羅する事が不可能である。材料分野においても例外ではなく、資源循環、材料製造、材料開発、など分野研究の確保が必要である。そして、長期的に学術の活性化と産業界との技術と人物交流により真のイノベーションが達成でき、日本の存在を世界に確かなものにしていくことが必要であると考える。