

## 人と社会を支える機械工学の実現に向けて

東京大学大学院工学系研究科教授  
日本学術会議会員，元日本機械学会会長  
笠木 伸英

### 1 はじめに

21世紀もすでに10年を経過したが、環境制約・資源制約の下で、途上国の発展と新しい国際秩序の形成、経済危機と技術革新によるイノベーション追求、そして各国での社会福祉と公的負担の均衡など、人類社会は次々に新たな課題の解決に迫られている。こうした中、科学技術と社会の関係にも大きな変化が生じている。それは、科学技術が我々の豊かな生活にとって欠かすことのできないものになる一方、科学技術の扱い方が人類社会の行く末に決定的な影響を及ぼすようになったことによる。その結果、社会が求め許容する技術を生み出すには、理工学のみならず、より広い視野からの検討も要するようになった。そうした中で、工学の一分野としての機械工学の位置づけも改めて問われ、その課題や役割などについて再確認をする必要がある。

工学は、明治以来、土木、機械、電気、化学などを主要なディシプリン（個別の科学技術分野の基盤となる原理的な知識の体系と方法論を指す）として、近代日本の隆盛を支える新技術の開発や産業の振興に長く貢献してきた。機械工学研究者は力学を基盤とする工学体系の構築を進める一方、産業界の機械技術者は「ものづくり」の基幹技術を営々と創りあげてきた。この間、機械工学は、輸送機械、エネルギー機械、生産機械や、それらを含む高度な機械システムを科学に基づいて設計し創造する基盤的学術として発展してきた。さらに、近年、機械工学は、情報、生命、材料の科学、あるいはナノテクノロジーなどを取り込んで大きく拡張し、電子機械、情報知能機械、生体機械、福祉医療機械など、多様な機械システムを生み出し、深化と延伸を進めている。しかし、このような知の著しい膨張は、「機械工学」という言葉に意図される学術体系や構造を不鮮明にし、機械工学の意義や重要性を分かりにくくしている。一方、専門家の間では、機械工学の学術としての発展性、関連産業の方向性、そして若手人材の育成などが、様々な機会に議論の俎上に載っている。従って、今改めて、21世紀に相応しい機械工学像、機械技術者像を描き、それらを実現していく具体的な方策を見出すことが重要である。

ディシプリンの成立は、それ自体の科学的な発展の可能性を包含すること、未来社会が直面する諸課題のソリューションを呈示できる可能性を有すること、そして、未来を担う次世代人材にとっての行動原理と成り得ることにかかっていると看做される。機械工学が工学のコアディシプリンとして機能してきたことは、これまでの歴史や機械工学人材の顕著な貢献から明らかと言える。しかし、今後の機械工学が、それらの条件を満たし得るのかどうか、それはどのような形で可能となるのか、そして21世紀に相応しい「人と社会を支える機械工学」に発展させるために、産官学の関係各方面に何が求められるのかを明らかにする必要がある。

第20、21期日本学術会議機械工学委員会では、上記の課題認識に基づいて、機械工学ディシプリン分科会を設置し、機械工学の固有の特性、21世紀社会において果たすべき役割や貢献、機械工学の学術の発展の可能性、そして次世代を支える人材育成のあり方などについて、継続的な審議

を続け、2009年6月に日本学術会議報告「人と社会を支える機械工学に向けて」<sup>1)</sup>をとりまとめた。また、量産化時代の「もの」の生産・使用のあり方を見直し、機械工学が深く関与する「生産」の新時代におけるあり方を長期的・総合的視点から再検討するため、生産科学分科会を設置し、2008年9月同会議報告「21世紀ものづくり科学のあり方について」<sup>2)</sup>をまとめている。本稿では、これらの報告の内容を踏まえながら、機械工学の展望を試みる。

## 2 21世紀の科学技術の潮流

我が国は科学技術創造立国を標榜しており、科学技術の発展によって、少子高齢化と人口減少社会においても豊かな精神生活（文化）と豊かな物質生活（文明）を享受し得る国家の構築を、また、世界の国から尊敬される文化を持ち、環境問題や安心安全に関する国際的な課題解決に積極的に寄与する活動などを通して、世界の文化と文明の進展に貢献する名誉ある国家の構築を目指している。鍵となる科学技術は、産業革命以降、人類の夢を次々に実現し、社会の利便性や安全性を高めてきたが、今後そのような役割を担うと同時に、地球規模の問題の解決にも貢献していくことが期待されている。一方、科学技術に内在する重大な課題が近年強く認識されるようになってきている。それは、科学技術の発展に伴うディシプリンの細分化と深化の方向性と、科学技術が対象とするシステムの複雑化・巨大化の方向性に、乖離が生じていることである。言い換えれば、これまで科学技術の幾多の成功を導いてきた、様々な対象を要素に分解して理解する還元論（Reductionism）と共に、「知の統合」を目指す全体論（Holism）の追究が要請されている。

このことを実現することは必ずしも容易でない。研究者は細分化された各専門学術を執拗に追求することに傾き、また研究成果の評価は専門家集団の中での相互評価（ピアレビュー）によって成されるため、部分のみに関心を持ち全体を俯瞰的に見通すことができない、著しく専門化された研究者集団の再生産に陥りやすいためである。このことは、科学的発見や技術的発明を社会的・経済的価値に具現化する、いわゆるイノベーションを志向する科学者や技術者を育てにくくし、アカデミアと産業界の間に齟齬を来す結果ともなっている。

システムの複雑化・巨大化の方向性に伴い、産業界の中に生まれつつある懸念もある。多様な社会や経済の要請に応じて開発される機械システムは、近年その構造と機能をさらに複雑巨大化する傾向があるが、それらを実現するために、益々広範な分野の、より高度な専門知識が必要となっている。しかし、このような開発に取り組む科学者や技術者は、システムのごく一部にしか関与できなくなり、システム全体を見通せる視野の広い人材が育ち難くなっている。このことは、革新的な機械システムの開発に対する市民の理解と支持を得る上での障壁になりかねない。また、ロマンと親近感を感じる対象としての科学技術者像が薄れ、科学技術を職業として志望する若者の減少を引き起こしている。

一方、科学技術研究と社会の関係を見直す試みが成されてきた。例えば、M. Gibbonsら<sup>3)</sup>は研究を知識生産活動と捉え、それらを二つのモードに分類した。すなわち、ディシプリン固有の判断により研究課題が設定され、その評価もピアによるモード1（ディシプリン駆動型）、社会や経済からの要請やアプリケーションの文脈によって問題設定が成され、多様な学問分野の知識や研究者が動員されるモード2（社会関心駆動型）である。そして、モード2研究の高い価値を認め、従来型のモード1研究と同様にその活動を強化すべきことを主張した。D. E. Stokes<sup>4)</sup>は、研究を、そ

の成果の社会還元と基礎的科学知識の創造の二つの観点から分類し、ボーア型、パストゥール型、エジソン型と称し、出口を意識したパストゥール型基礎研究の重要性を指摘した。さらに、1999年、国際科学会議（ICSU：International Council for Science）はブダペスト宣言<sup>5)</sup>を公表し、「知識のための科学；進歩のための知識」、「平和のための科学」、「開発のための科学」と共に、「社会における科学と社会のための科学」の重要性を指摘した。そして、科学の最終目標は人類の福祉であり、科学者は貧困の撲滅、人間の尊厳と権利の尊重、地球環境の保全など、次世代への責任に関与すべきこと、そして、持続型循環社会の実現のために、広く人文社会科学などとも連携した実践的総合科学技術を構築していく責務を有することを明確にした。

我が国においても同様な提言が成されている。例えば、第18期日本学術会議新しい学術体系委員会では、従来「基礎」と「応用」に分けられていた学術研究を、「認識科学」と「設計科学」とに再分類し<sup>6)</sup>、第19期学術の在り方常置委員会では、前者を「あるものの探求」、後者を「あるべきものの探求」と表現している<sup>7)</sup>。そして、第20期の提言「知の統合—社会のための科学に向けて—」<sup>8)</sup>では、「社会のための科学」の追求こそが科学者コミュニティーに与えられた最大の課題であり、認識科学の重要さを認めながら設計科学の追及の重要性を強調し、これら二つの対峙する知の統合こそが、「社会のための科学」の実現に不可欠であるとした。すなわち、これらの知の統合が、認識科学によって導出された知を設計科学による人工物や制度・方策などの案出によって社会化することを可能にする一方、新たな認識科学の生産を促す可能性があると論じている。

このように、いずれの議論においても、ディシプリンの中でその専門性の追求を進めるだけでなく、ディシプリンの枠を越えた「知の統合」や、さらには「テクノロジーコンバージェンス」の重要性が指摘されている。そして、知の統合を含めて、「社会のための科学」を具現化する方法を追究し、着実に実践していくことが求められている。

### 3 機械工学の知の構造と社会のための科学技術としての役割

機械工学の本質は「力学を基礎とした設計方法論」であり、『社会の中にいる人間が、ある動作を人間に代わって実現させたいという願望に基づいて、その願望を達成させるメカニズム（具体的な物であって、これを機械と呼ぶ）を「考え」、「作り」、「動かす」または「使う」という人間の行動に必要な学問である』といえる<sup>9)</sup>。これを機能代替の機械パラダイムと位置づけることができる。現代の機械は、さらに、ネットワークを始めとする新しい通信メディアと繋がり、人工知能を活用して、人間の知識、判断、表現などの知的能力をも代替可能な知能機械へ、さらには仮想空間での機械などに拡張しており、これを知能代替の機械パラダイムとみなすことができる。このように現代の機械工学は、古典的な「もの」を創り出すのみならず、人間の知識・知能をも代替し、人間のコミュニケーション、情緒と感性、倫理、そして社会全体にまで影響を及ぼしている。

学術基盤となる機械工学ディシプリンは、材料力学、流体力学、熱力学、機械力学などの力学体系から構成される縦糸としての「アナリシス（分析）」学術コアと、設計工学、計算工学、制御工学、加工・生産工学などの横糸としての「シンセシス（統合）」学術コアとが織りなすマトリクスとして捉えることができる。さらに、現代の機械工学の全体像は、そのようなディシプリンの上には、具体的な出口としての自動車工学、航空工学、エネルギー工学、環境工学、宇宙工学、医療工学などの多彩な応用技術（人工物の科学）が重層されるという、特有な知の構造を成していると考

えられる。

このような学術の構造に由来して、機械工学は三つの際だった特性を有する。第一に、その学術コアが、人間に関わるあらゆる現象の解明や機器・システムの開発を対象とし、マイクロな分子レベルからマクロな地球規模のスケールまでを扱い、また限られた物理化学的現象や特定の応用技術のみに留まらず、常に対象の本質的で根源的な原理原則に理解を求めながら設計を進めるといった、普遍的で広い視野を具備している。第二に、縦糸と横糸の学術の存在が、細分化と深化を続けるという内包的動機を有する学術群に、具体的な目的達成の方向性を持たせることで、それらの相対的位置付けと取捨選択を可能とすることである。このことが、特に分析系の学術コア群に「社会のための科学技術」という視点を付与すると言える。第三の特性は、学術コアの上に多くの応用工学の体系が構築され得る構造に起因するものである。機械工学は、これまでも船舶、航空、自動車、原子力などの機械システムを扱う学術体系の基盤ディシプリンのひとつとあったが、分野を問わず、設計・解析・製造、運転・保守・サービスなどの広範なプロセスや機能に関わる工学と言える。

今後の工学の発展は境界領域を含む未踏分野への果敢な知の挑戦によって駆動されると予想されるが、その際、異分野の学融合による新分野開拓、異種技術の統合による新技術開発など、境界を越えた協働が各領域間で、さらには工学と自然科学、人文社会科学との間で必要になる。そのような「知の統合」が求められる時代に、機械工学の固有の特性に大きな期待が寄せられる。そして、そのような役割を機械工学が果たすために、二つの方向性が明らかになる。

第一の方向は、「還元論」的方法論の堅持である。これは機械工学の基盤を成すディシプリンを更に深化、拡充していくことである。近年、機械工学が扱うスケールはナノスケールから地球スケールに及び、また化学あるいは生物学的な素過程も含まれるようになっていく。工学の諸問題に対峙するとき、常に基礎科学的なレベルに立ち戻り、力学的な観点から理論を組み上げていくという方法論は堅持、発展させるべきである。

第二の方向は、「全体論」的方法論の強化である。これからの科学技術には、様々な制約の下で豊かな持続的社會を実現するための具体的な方策を呈示することが求められる。この重要な目標は、広範な知識を動員して初めて達成することが可能となる。エネルギー、輸送、エレクトロニクス、コンピュータ、そして医療福祉システムなどはいずれも社会に必須の総合的科学技術分野であるが、これらの基盤を成し、関係する多様な知識の架け橋としても機能するように、「全体論」的方法論としての機械工学を発展させるべきである。

#### 4 機械工学の学術の発展

学術としての機械工学の、今後の発展性について触れたい。まず、力学を基盤としたアナリシスの学術基盤、機械科学としての発展である。例えば、固体の変形と破壊に関わる現象を扱う材料力学は、すべての機械の設計製造や運用保守などのための基盤学術であり、社会の安心・安全の向上に貢献する。今後も機器の設計に関する基盤である材料力学には、MEMS/NEMS (Micro/Nano Electromechanical Systems) や電子/光デバイスに関連したマイクロ/ナノ・マテリアルの強度や生体機能と関連した材料の微視的力学など、その学術的展開が期待される。そのためには、分子動力学、量子力学、あるいは生物学・医学などの知識が必要である。また、宇宙や海洋などの極限環境下で使用される種々の材料の問題は、最先端の力学を必要とし、材料力学をさらに発展させてい

くことが期待される。

空気や水の流れに関わる流体力学は、流体现象を予測・制御する時間・空間スケールの広がり、新たな応用分野への展開が期待される。例えば、数値解析手法の進歩と計算機性能の向上とにより、微細な乱流の渦運動の数値シミュレーションが可能となると共に、分子動力学を応用した界面現象の解明や生体組織の理解が進んでいる。今後、相変化、化学反応、音の発生など、流れが関与する様々な現象の解析と制御が進展することが期待される。同時に、シンセシスを指向する方法論の確立が重要となる。例えば、乱流の渦を直接制御し、航空機の騒音低減や高速車両の摩擦抵抗低減に期待がかかる。このためには、微小なセンサ、アクチュエータなどの要素開発や、非線形系の制御手法の開発などが求められ、設計・制御工学との融合が重要な課題として浮かび上がる。

熱輸送現象や化学反応、そして熱と仕事との変換過程を体系化した学術である熱工学分野においては、相変化現象、界面現象、反応素過程など未解明な現象も多く、これらの現象の解明、予測、制御は依然として主要課題となる。分子動力学法や量子力学計算の応用により、マイクロ・ナノスケールでの現象の解明や理解を基に、マクロな現象の解明や予測が進展するものと期待される。そして、それらの新たな知識を、設計手法に組み入れていくことが重要である。例えば、燃焼や反応の素過程の設計は、高効率な熱機関や燃料電池の開発のために必須であるが、幅広い時空間スケールの物理化学現象を高精度に予測し、それを制御する手法の開発が望まれる。

剛体の運動や振動を対象とした機械力学分野においても、その応用分野の拡大に伴い、弾性振動、熱・流体関連振動、自励振動、あるいは非線形系の振動問題など、他の力学との連成解析が進展している。この分野でもコンピュータの応用が進んでいるが、特に、マルチボディ・ダイナミクス的发展には目覚ましいものがあり、最近では機械を構成する複雑な剛体の結びつきだけでなく、非弾性体要素、流体要素、トライボロジーまで含め、シミュレーションモデルを生成できるようになり、高度な設計・開発のニーズに応えられるようになってきた。

以上の学術基盤を活かして、人間が必要とするものを創り出すための、シンセシスの学術の発展にも期待が大きい。「ものづくり分野」では、素材から製品まで、企画、開発、設計、生産計画、製造、市場評価まで、ものを創り出し社会へ供するために必要なすべてのプロセスが包含されている。また、産業革命以来の機械が、主として産業側の視点から創造され提供されてきたため、その供給者と使用者（受益者）の分離・分業を招いてきた。しかし、機械は、それを利用する人びとに利便性のみでなく、喜びや満足を与えるべきものであり、その目的の達成のために供給者と使用者の一体化へのパラダイム転換が生じるものと予想できる。例えば、サービス科学、安全科学、さらには製品ライフサイクル科学など、今後の機械工学には、機械の創造・使用と人間・自然環境との調和（ハーモナイゼーション）のための学術の付与が求められる。また、世界の標準・規格、技術移転戦略などをカバーする学術が必要である。今後は、これらに関わるあらゆる学術を統合し、「ものづくり科学」、すなわち設計の科学として明確に位置付け、発展させることが重要である<sup>2)</sup>。

融合領域の科学技術を発展させていくことも重要である。新材料や熱流体分野の学融合による超高効率エネルギー変換、電力・燃料・情報ネットワーク融合による高度分散エネルギーシステムや新たな交通物流システム、電子・情報分野との融合による知能ロボット、生化学と MEMS/NEMS の融合によるマイクロ生化学分析チップ、高性能計算機システムによるシミュレーション生産科学など、いずれも未来社会において新たな価値を生み出す可能性を有するものである。医療や福祉に役立つ機械を作り出すことを目的とした生体医用機械工学の進展も著しい。先進の医用マイクロデ

バイスやロボティクスなど、新概念の機械が次々に開発されつつある。微細なロボットの実現には、レーザ光学や制御工学だけでなく、細胞生物学など、従来の機械工学の範疇を超えた知識とそれを駆使する能力が要求される。そのためには、従来の力学だけに留まらず、絶えず異分野の学問を吸収しながら新しい挑戦を繰り返す必要がある。大胆な知的冒険に乗り出すための仕組みづくりに向けて、産学あるいは学協会が協働すべきである。

## 5 機械工学分野に求められる人材育成

機械工学を取り巻く環境は大きく変化し、人材育成のあり方についても変革が求められている。すなわち、機械工学には、「社会のための科学」を実現するための牽引役としての役割が求められており、そうした役割を果たす人材の育成は喫緊の課題である。特に、揺るぎない専門知識とその応用力と共に、知の統合による価値の創造能力の開拓が強化されねばならない。

21世紀社会においては、全ての国民に科学知識を基に技術を適切に評価し活用する能力が求められる。そのような力を育むためには、まずは初等中等教育の重要性は論を待たず、その内容の充実と教育者の育成が必要である。必ずしも解が一つに定まらない問題に対して、あらゆる知識を動員して、実行可能な解を見出す設計的な考え方を涵養することが、国民の生きる力を育む点からも望まれ、これを技術教育の重要目標として位置付ける必要がある。高等学校における理科教育に関しては、スーパーサイエンスハイスクールにおける数々の取り組みなど、新しい試みが行われている。しかし、普通高校にも技術や工学に関する教科を導入して理解を育むと同時に、進路選択にも役立たせる必要がある。例えば、技術や工学的素養を育む視点に立った「スーパーテクノロジーハイスクール」を全国に普及させると共に、予算措置と教員養成の見直しを進めるべきである。機械工学関係者は、こうした観点から、諸外国における技術教育の動向<sup>10)</sup>も踏まえつつ、我が国に相応しい初等中等教育における技術教育の構築に向けて、一層の貢献を成すべきである。

大学の学士課程教育においては、専門的知識の獲得に加えて、自立的な思考能力及び判断能力の涵養が必要なことは言うまでも無い。持てる力を、社会が直面する問題の創造的解決に活用する人材を育成する必要がある。そのためには、論理的、科学的思考力、創造力、課題設定力、コミュニケーション力、そして人としての総合的な力を涵養する教養教育と専門教育をバランス良く行う必要がある。我が国の工学教育の礎は、工学寮の開設に寄与したヘンリー・ダイアー(Henry Dyer、1848-1918)によって築かれたが、彼は理論の習得と実習・演習(官営工場実習)のバランスを重視し、当時の英(実習重視)や独・仏(理論重視)に例を見ない6年制のカリキュラムを導入した<sup>11)</sup>。このような良き伝統を継承し、スクーリングと実習・演習のバランスを重視しつつ、教育課程を設計する必要がある。

機械工学に関する学部教育のあり方を考える場合、4年間という時間的な制約のなかで、教養教育も含め相応しいバランスが必要である。いわゆる4力学に加え、設計工学、生産工学などの教育が必須であり、さらに機械工学の対象がナノ、バイオ、環境、エネルギーの領域で広がりつつある現状からも見直しを行う必要がある。既存の基礎科目の教育の質を落とさずに、量子力学や生物学などの新規分野の基礎教育を行う工夫が必要である。このためには、流体力学と固体力学を、材料と材料力学を、あるいは機械力学とメカトロニクスを統合して教育するなど、教育分野での知の統合も検討される価値がある。また、卒業論文については、その意義の明確化と教員・学生の共有

が必要であり、複数教員による指導、産学連携などの取り組みも望まれる。4年次に卒業設計が組み込まれる例もあるが、望ましいオプションであり、適正な効果が得られるよう、その内容が吟味される必要がある。

工学系の大学院修士課程では、企業への就職者に占める修士課程修了者の割合が急速に増加するのに伴い、技術者としての幅広い知識や実行力を涵養する教育への変革が求められている。折しも、中央教育審議会からは、「我が国の高等教育の将来像」<sup>12)</sup>ならびに「新時代の大学院教育」<sup>13)</sup>と題した答申が出され、産官学が連携した大学院教育改革の重要性が謳われている。日本機械学会においても、平成17年度には、コースワークの強化と体系的な履修、産学連携教育の強化、機械系高度専門技術者・研究者の確保、から成る大学院教育に関する提言が<sup>14)</sup>、平成18年度には、産学が共有する人材像の明確化、教育という視点からの論文研究の位置付けの明確化、産学間の人材交流の仕組みの具体化、から成る提言<sup>15)</sup>が成されている。今後は、各大学において、これらの提言を踏まえた自主的な取組が要望される。中でも、教育プログラムの半分以上の時間を費やしている修士論文の位置付けを明確にしておく必要がある。論文研究は修了者からも企業からも高く評価されているが、基本的な指導内容や方針が教員個人に任されているため、達成度に大きなばらつきがあり、改善が必要である。研究活動では、論文の成果だけでなく、その過程で涵養される、創造力、課題設定・解決力、コミュニケーション力、チームワーキング・リーダーシップ力などの獲得も目標として設定し、達成度評価を含めて、教育の実質化を早急に図る必要がある<sup>16)</sup>。

現行の博士前期・後期課程を有する大学院制度にも抜本的な検討が必要である。我が国の大学院は、戦後、年次構造的には米国の、教育研究内容としてはフンボルト型の制度を導入し、工学系では4年制の学部教育の上に置かれている。そして、修士課程は前期博士課程として、博士課程の途中修了の位置づけとなっている。この結果、博士前期課程は、研究大学院(graduate school)と職業大学院(professional school)の相異が意識されず、その位置づけは曖昧になっている。機械工学分野では、大学院進学者の内、修士課程修了後社会へ出る者が大半であるが、修士課程学生は教員の研究補助者として位置づけられ、広い俯瞰的知識を欠きやすい況を生み出している。本来、産業の構造や科学技術の役割をより広く理解する力を涵養する職業大学院としての修士課程は、それ自身完結したプログラムとして構成されねばならず、博士前期課程と位置づけることは適切とは言えない。一方、研究、教育、マネジメントなどを高度な研究活動の中で育成する研究大学院としての博士課程は、修士課程とは独立の目的を持つ一貫したプログラムとして構築されねばならない。従って、修士課程の位置づけや目的に関して、抜本的な検討を急ぐ必要がある。

今日、機械系の博士(後期)課程には、研究者に加え、産業界における技術者として、高度な研究開発能力と豊かな学識の涵養も強く求められている<sup>17)</sup>。このような状況を踏まえて、個々の博士課程では、そのアドミッションポリシー、教育プログラム体系、学位認定基準<sup>18)</sup>をより明確化していく必要がある。その際にも、博士人材の将来のキャリアパスを見据えた上での制度改革が優先されねばならない。

近年の機械工学分野の博士課程については、進学者数の減少という課題を抱えている。産業界での機械系人材の求人の高まり、採用活動の早期化と強化、博士課程での経済的支援や修了後の処遇の貧しさなどが原因となっている。また、若い世代に、早期に形のある結果を追い求め、じっくりと基礎知識を確かめながら成果を生み出す、粘り強い姿勢が弱まってきていることも懸念される。しかし、我が国が世界のトップランナーの一人として独自の技術開発を推進し、イノベーションを

達成していくには、優れた博士人材は必須である。大学関係者は人材育成機能の充実・強化を、教育行政は博士課程に在籍する若者への積極的かつ継続的な投資を、産業界は博士人材の就業条件やステータスの改善に向けて、各々が具体的対策を早急を実施すべきである。また、国際的に活躍できる技術者・研究者の育成も急務である。留学生や海外研究者を積極的に受け入れ、日頃から多様な人材の活動する研究環境を形成する、あるいは近年減少の一途にある海外での長期研究滞在へ学生やポスドクを派遣するなど、国際的な場でも動じない逞しい人材育成のために、真の国際化を進める必要がある。さらに、大学は社会人リカレント教育プログラムの開発を、産業界は技術者の大学への派遣をより柔軟に行える環境整備を進めるべきである。

## 6 我が国の機械工学の現状と課題

我が国の機械工学分野の研究は、国際的に見て高い総合評価を得ていると言えよう。研究論文や招待講演の質と量、国際交流活動における日本の研究者の活躍は、諸外国の研究機関が広く認めるところとなっており、毎年の国際賞の受賞も多い。機械工学の関係する幅広い分野で、挑戦的な研究や堅実な基礎研究の進展が見られる。ただし、大学の基礎研究においては、技術目標に照らした位置付けや社会導入への道筋が意識されない場合もある。一方、具体的な技術を志向するあまり、試行錯誤に終始し、原理原則が疎かになる状況も認められる。未来の社会を展望し、機械工学の立場から必要とされる技術や誘起されるイノベーションを構想し、その達成途上における本質的な科学的課題を抽出して研究目的を設定するという戦略をさらに強化する必要がある。

一方、機械技術に深く関係する産業活動、特に、ものづくり産業も、国際的な競争力において、トップランナーの一人であることは間違いない。重電機、エネルギープラント、自動車、輸送機器、工作・産業機械など、世界が認める技術力をもって優れた製品を送り出している例は多い。しかし、現在の競争力を堅持し続けるための研究開発力が十分備わっているかどうかは、慎重な吟味が必要であろう。産業界にもグローバル化が浸透して久しいが、そのような中、強みを発揮できる技術への選択と集中、そして将来の競争力となりうる技術のための研究開発を進めねばならない。しかし、必要な知識の広範化、技術革新の加速等により、各国の企業にとって基礎研究から開発研究まで全てを自前で進めることは困難な環境になり、オープンイノベーションが必要になっている。従って、大学や研究機関との息の長い戦略的共同研究体制の構築が必要である。産学の継続的対話が、各々の研究開発の役割を相対化し、相互のシームレスな連携の構築にも役立つ。近年、機械工学分野でも産学連携が進展しているが、日本の大学への外国企業からの研究費の投入は少なく、一方我が国の企業は外国の大学に多大の研究費投入を行っている。こうした状況を打破し、大型のビジョン牽引型の共同研究の実施に向け、産学の努力の結集が必要である。

上記の問題の解決において、学協会の役割も大きい。例えば、主要学会である日本機械学会は、我が国の機械工学・機械技術分野を代表する国際的な顔になっている。しかし、多数の産業界会員を有するものの、学会活動は大学や研究機関所属の会員に主として担われ、また産学連携共同研究の企画や実施も、例えば米国機械学会と比較すると低調と言わざるを得ない。これは、ひとつには、国内に自動車、ロボット、ガスタービンなどの個別技術分野の学会が独立に存在して、特に応用技術関連の研究発表の場がそちらに移っている状況に因る。また、日本機械学会の論文集は権威ある研究論文公表の場になっているものの、科学的価値や完結性を重んじるために、技術的価値を主張

する論文が受理されにくい状況がある。一方、個別技術分野の学会においては、他分野の研究開発との接点が薄くなる、あるいは、より基礎的な観点から問題を掘り下げる機会が得られない問題も生じる。こうしたことから、関連学協会の連携に向けて抜本的な改革が必要な時期に至っている。

機械工学の発展を担う人材の育成については、前章に述べたように多岐に渡る具体的な課題が存在する。総じて言えば、幅広い教養、自然科学の基礎知識、そして機械工学の専門知識を確実に修得するとともに、広い視野から問題を設定し、解決を図る力を有する人材の教育を実現することが重要である。多くの分野や技術に関わる機械工学の特性の故に、教育課程で具体的な技術や職業との連結性を学生にリアルに意識させることが難しく、学ぶインセンティブをどのように与えるか、さらにはアナリシスとシンセシスの両面から基礎力をいかにして涵養するか、さらには社会と技術の関係など俯瞰的なものの見方をいかにして育むかなど、大きな課題が存在する。教育プログラムの改革は喫緊の課題であるが、特に、広い専門領域の技術をインテグレートして製品やシステムを構築することに貢献することができる設計者がある割合で確実に育成することも視野に入れておく必要がある。

## 7 結言

21 世紀に生まれた科学技術と社会の新たな関係の中で、機械工学の今後の方向性について展望した。その結果、機械工学は工学のコアディシプリンのひとつとして、今後とも社会に尽くすべきことを述べた。また、機械工学ディシプリンは、今なお科学としての学術的な飛躍と発展の可能性を有し、次世代人材にとって有力な行動原理と成り得るものであることを指摘した。以上から、「人と社会を支える機械工学」の実現に向けて、機械工学、さらには広く工学関係者に、以下の理解と具体的な行動を要請したい。なお、第 21 期日本学術会議では、日本の学術とその推進政策に関する長期展望を呈示することを目的として「日本の展望—学術からの提言 2010」を 2010 年 4 月に公表する予定であり、その中で改めて「機械工学の展望 2010」が報告されることを記しておきたい。

### (1) 機械工学の知の構造とその役割

「社会のための科学」の時代を迎え、未踏分野の開拓、異種技術の統合、ディシプリンを越えた協働による、新しい知や技術の創造が要請されている。この重大な目標を実現していくには、学術ディシプリンを各々深化発展させると同時に、「知の統合」を可能とする新しい工学の確立が必要である。機械工学は、4 力学を中心としたアナリシス（縦糸）の学術コアと、設計・生産のシンセシス（横糸）で構成される学術コアが織りなして構成するディシプリンの上に、多彩な応用技術（人工物の科学）が重層されるという特有な知の構造を有している。この事実由来して、機械工学は、還元論と全体論の両者の特性を内包し、対象を選ばず、広範な技術の基盤を創造する役割を果たし、次世代人材にとって有力な行動原理と成り得るものである。

### (2) 機械工学の発展の方向性

機械工学の学術の発展には、極微な世界の新しい科学による肉付けに加え、ものづくり分野の設計生産技術を飛躍的に高度化させていく必要がある。これらに向けた基礎研究の推進によって、分析と統合を両輪とする新時代の機械工学を改めて確立することができる。また、未来のエネルギー、輸送機器、コンピュータ、ロボティクス、NEMS/MEMS、バイオ医療など、持続型社

会構築のフロントエンドにその学術と技術の領域を一層広げ、人と社会のための機械工学の知の体系を築く必要がある。

我が国の大学を中心とする機械工学分野の基礎研究は、国際的に見て高いレベルにあると認められる。未来社会を展望し、機械工学の立場から必要とされる技術や誘起されるイノベーションを展望し、その達成の途上における本質的課題を抽出して研究目的を設定するという戦略をさらに強化していく必要がある。

技術ブレークスルーを達成し、オープンイノベーションを誘導するには、産業界と大学との継続的な対話に基づいて、それぞれにおけるビジョン牽引型の基礎・応用開発研究の推進、あるいは息の長い戦略的共同研究も必要である。そうした産学の動機を結集するために、機械工学を総合的に扱う学会をはじめ、「知の統合」を成すべく組織を越えて協働し、真に望まれる研究開発や産学連携を生み出すための連携を開始する必要がある。

### (3) 人材育成への要請

イノベーション創出、産業競争力の強化を目指す我が国においては、近年の機械工学分野の博士課程進学者数の減少は重大であり、早急な対応が望まれる。大学関係者は、まずはイノベーション創出と産業競争力の強化に貢献する人材育成機能の充実・強化を進めるべきである。また、機械工学コミュニティーは、教育行政には博士課程への積極的かつ継続的な投資を行うよう、産業界には優れた博士人材の就業条件やステータスの改善を進めるよう、継続して理解を促す努力をすべきである。

機械工学の学士、修士課程の教育プログラムを、海外の教育改革や標準化の動向を踏まえつつ、競争力のある内容に充実、強化させていく必要があり、教育関係者は早急に具体的方策を採るべきである。我が国の工学教育の良き伝統としての、スクーリングと実習・演習のバランスを重視しつつ、カリキュラムを設計する必要がある。また、優れた特長である学士論文、修士論文について、その教育目標の明確化と達成度評価の標準化が急務である。なお、現行の大学院修士課程は博士前期課程として、その位置付けが曖昧になっている。職業大学院としての修士課程、研究大学院としての博士課程など、それぞれ独自の目的を持つ一貫したプログラムとして構築されねばならず、特に修士課程の位置付けや目的に関して抜本的な検討が必要である。

初等中等教育においては、「ものづくり」の楽しさを体感させると共に、社会の実問題に対して科学技術知識を動員して創意工夫し、実行可能な解を見出す、設計的なものの見方を涵養することが、国民の生きる力と創造性を育成する観点から重要である。機械工学に関わる教育者や技術者は、このような初等中等教育における「ものづくり」教育に貢献する使命を有しており、教育プログラムの開発と実施に積極的に参加していく必要がある。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、第 20、21 期日本学術会議機械工学委員会および機械工学ディシプリン分科会の審議や報告を参考にした。古川勇二、広瀬茂男、岸本喜久雄、加藤千幸の各氏をはじめ、委員会・分科会委員各位に慎んで謝意を表す。

### <文献>

- 1) 日本学術会議機械工学委員会機械工学ディシプリン分科会：報告「人と社会を支える機械工学に向けて」、2009年6月。

- 2) 日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会：報告「21世紀ものづくり科学のあり方について」、2008年9月。
- 3) M. Gibbons, C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott and M. Trow: “The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies,” SAGE Publication, 1994年7月（小林信一（監訳）、「現代社会と知の創造—モード論とは何か」、丸善ライブラリー、1997年8月）。
- 4) D. E. Stokes, Pasteur’s Quadrant: “Basic Science and Technological Innovation,” Brookings Inst. (1997)。
- 5) R. W. Schmidt, Final Report: ICSU Assessment Panel, 1996年10月。
- 6) 日本学術会議運営審議会附置新しい学術体系委員会：「新しい学術の体系—社会のための学術と文理の融合」、2003年6月。
- 7) 日本学術会議学術の在り方常置委員会：「新しい学術の在り方—真の Science for Society を求めて—」、2005年8月。
- 8) 日本学術会議科学者コミュニティーと知の統合委員会：対外報告「提言：知の統合—社会のための科学に向けて—」、2007年3月。
- 9) 日本機械学会：「新形式機械工学便覧に関する答申」、新版機械工学便覧改訂出版準備会、1977年1月。
- 10) 国際技術教育学会：「国際競争力を高めるアメリカの教育戦略—技術教育からの改革」、宮川秀俊、桜井宏、都筑千絵編訳、教育開発研究所、2002年7月。
- 11) Nature: “Engineering Education in Japan,” Vol. 16, No. 394, 1877年5月17日。
- 12) 中央教育審議：答申「我が国の高等教育の将来像」、2005年1月。
- 13) 中央教育審議会：答申「新時代の大学院教育—国際的に魅力ある大学院教育の構築に向けて—」、2005年9月。
- 14) 日本機械学会：「大学院教育に関する提言—平成17年度年次大会パネルから」、2006年3月。
- 15) 日本機械学会：「大学院教育に関する提言（その2）—平成18年度年次大会パネルから」、2007年3月。
- 16) 笠木伸英：「工学教育における“産官学学”協働のすすめ」、工学教育、57—4（2009年）、4—10。
- 17) (社)日本経済団体連合会：「イノベーション創出を担う理工系博士の育成と活用を目指して—悪循環を好循環に変える9の方策—」、2007年2月。
- 18) 田中正人：「工学系博士の質保証に関する日英比較」、大学評価・学位研究、4（2006）、93—100。