

日本の展望—学術からの提言 2010

報告

機械工学分野の展望



平成22年（2010年）4月5日

日本学術会議

機械工学委員会

この報告は、日本学術会議 機械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 機械工学委員会

| | | | |
|------|--------|---------|---------------------------------------|
| 委員長 | 笠木 伸英 | (第三部会員) | 東京大学大学院工学系研究科 教授 |
| 副委員長 | 古川 勇二 | (第三部会員) | 職業能力開発総合大学校 校長 |
| 幹事 | 岸本 喜久雄 | (第三部会員) | 東京工業大学大学院理工学研究科 教授 |
| 幹事 | 北村 隆行 | (第三部会員) | 京都大学大学院工学研究科 教授 |
| | 金出 武雄 | (第三部会員) | Carnegie Mellon University, Professor |
| | 岸浪 建史 | (第三部会員) | 国立高等専門学校機構 釧路工業高等専門学校 校長 |
| | 木村 文彦 | (第三部会員) | 法政大学理工学部 教授 |
| | 柘植 綾夫 | (第三部会員) | 芝浦工業大学 学長 |
| | 林 勇二郎 | (第三部会員) | 国立高等専門学校機構 理事長 |
| | 福田 敏男 | (第三部会員) | 名古屋大学大学院工学研究科 教授 |
| | 矢川 元基 | (第三部会員) | 東洋大学計算力学研究センター センター長・教授 |
| | 青山 藤詞郎 | (連携会員) | 慶應義塾大学理工学部 教授 |
| | 阿部 博之 | (連携会員) | 科学技術振興機構 顧問 |
| | 荒木 信幸 | (連携会員) | 静岡理工科大学 学長 |
| | 有信 睦弘 | (連携会員) | 株式会社東芝 顧問 |
| | 生田 幸士 | (連携会員) | 名古屋大学大学院工学研究科 教授 |
| | 井口 雅一 | (連携会員) | 前宇宙開発委員会委員長 |
| | 石川 憲一 | (連携会員) | 金沢工業大学 学長・教授 |
| | 稲崎 一郎 | (連携会員) | 中部大学総合工学研究所 所長 |
| | 井上 孝太郎 | (連携会員) | 科学技術振興機構 上席フェロー |
| | 井上 博允 | (連携会員) | 東京大学 名誉教授 |
| | 大園 成夫 | (連携会員) | 東京電機大学未来科学部 学部長・教授 |
| | 大橋 秀雄 | (連携会員) | 工学院大学 理事長 |
| | 岡崎 健 | (連携会員) | 東京工業大学大学院理工学研究科 科長・教授 |
| | 小口 幸成 | (連携会員) | 神奈川工科大学 学長 |
| | 帯川 利之 | (連携会員) | 東京大学生産技術研究所 教授 |
| | 川田 裕 | (連携会員) | 大阪工業大学 工学部長・教授 |
| | 木内 学 | (連携会員) | 木内研究室代表、帝京平成大学教授 |
| | 久保 司郎 | (連携会員) | 大阪大学大学院工学研究科 教授 |
| | 河野 通方 | (連携会員) | 大学評価・学位授与機構 教授 |
| | 小林 敏雄 | (連携会員) | 日本自動車研究所 副理事長・研究所長 |
| | 佐藤 順一 | (連携会員) | 株式会社 I H I 検査計測 代表取締役社長 |
| | 佐藤 知正 | (連携会員) | 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授 |

| | | |
|--------|--------|--|
| 佐藤 正明 | (連携会員) | 東北大学大学院医工学研究科 科長・教授 |
| 清水 伸二 | (連携会員) | 上智大学理工学部 教授 |
| 庄子 哲雄 | (連携会員) | 東北大学 エネルギー安全科学国際研究センター 教授 |
| 庄司 正弘 | (連携会員) | 神奈川大学工学部 教授 |
| 白鳥 正樹 | (連携会員) | 横浜国立大学大学院工学研究院 教授 |
| 鈴木 浩平 | (連携会員) | 首都大学東京 名誉教授・副オープンユニバーシティ長 |
| 鈴木 宏正 | (連携会員) | 東京大学先端科学技術研究センター 教授 |
| 高田 祥三 | (連携会員) | 早稲田大学理工学術院 教授 |
| 田中 正人 | (連携会員) | 富山県立大学 学長 |
| 谷下 一夫 | (連携会員) | 慶應義塾大学理工学部 教授 |
| 筒井 康賢 | (連携会員) | 高知工科大学 副学長 |
| 富塚 誠義 | (連携会員) | University of California, Berkeley Professor |
| 永井 正夫 | (連携会員) | 東京農工大学大学院共生科学技術研究 教授 |
| 長坂 雄次 | (連携会員) | 慶應義塾大学理工学部 教授 |
| 中島 尚正 | (連携会員) | 学校法人海陽学園海陽中等教育学校 校長 |
| 長野 靖尚 | (連携会員) | 名古屋工業大学 名誉教授 |
| 西尾 茂文 | (連携会員) | 東京大学生産技術研究所 教授 |
| 西脇 信彦 | (連携会員) | 東京農工大学 名誉教授 |
| 菱田 公一 | (連携会員) | 慶應義塾大学理工学部 教授 |
| 広瀬 茂男 | (連携会員) | 東京工業大学理工学研究科 教授 |
| 福田 収一 | (連携会員) | Stanford University, Consulting Professor |
| 藤本 元 | (連携会員) | 同志社大学工学部 教授 |
| 古田 勝久 | (連携会員) | 東京電機大学 学長 |
| 松尾 亜紀子 | (連携会員) | 慶應義塾大学理工学部 教授 |
| 松本 洋一郎 | (連携会員) | 東京大学 副学長・教授 |
| 三浦 宏文 | (連携会員) | 工学院大学 顧問 |
| 水野 毅 | (連携会員) | 埼玉大学工学部 教授 |
| 宮内 敏雄 | (連携会員) | 東京工業大学大学院理工学研究科 教授 |
| 宮崎 則幸 | (連携会員) | 京都大学大学院工学研究科 教授 |
| 森 和男 | (連携会員) | 産業技術総合研究所 関東産官学連携センター長 |
| 森脇 俊道 | (連携会員) | 摂南大学 特任教授 |
| 門出 政則 | (連携会員) | 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター長 |
| 矢部 彰 | (連携会員) | 産業技術総合研究所 理事 |
| 山口 隆美 | (連携会員) | 東北大学大学院医工学研究科 教授 |

機械工学企画分科会

※ 名簿の役職等は平成22年3月現在

要 旨

1 機械工学の展望

近代の文明を「機械文明」と称するように、産業革命以降の人類社会の近代化は様々な機械の普及に多分に依拠してきたといっても過言ではない。しかし、人口、資源・エネルギー、環境などの地球規模の問題の顕在化とともに、人類の文明文化の均衡ある発展に、機械工学のそれ自身の拡充と、他分野との学融合による総合的手法が不可欠となっている。学術としての機械工学は、材料力学、熱力学、流体力学、機械力学の4力学を中心とした分析（アナリシス）と、設計と生産を中心にした統合（シンセシス）の学術コアから成るディシプリンに、多彩な応用技術（人工物の科学）に関わる工学知を組み上げた立体構造を有する。今後は、それぞれの深化と拡張とともに、先端・融合領域の開拓や、機械の創造・利用と人間・自然環境の持続性を可能とするハーモナイゼーションの学術の構築が目標となる。したがって、機械工学は、極めて多面的かつ総合的な発展の可能性を有している。

2 機械工学に期待される貢献と役割

21世紀の機械工学のミッションは、科学の共通課題「社会のための科学・技術」への貢献であり、特に、「人と社会を支える機械工学」として、環境制約、資源制約の下で、安心安全で豊かさの感じられる持続的な社会を構築するための具体的な方策を呈示することである。すなわち、あらゆる生産・消費活動において、低炭素化に向かう流れを誘導せねばならず、機械工学には他の学術分野と広く協働して、目に見える具体的成果を生み出していく役割がある。独自の科学・技術研究開発の優れた成果によってイノベーションを達成し、新たな産業を発展させ、国際社会へ我が国の優れた製品や知識を提供できるようにすることが、活力ある知識基盤社会を我が国に実現するための唯一の方法である。こうした科学・技術駆動型イノベーションの創出において、機械工学の学術的、技術的な貢献が、そして機械工学の人材の活躍が極めて重要である。

機械工学の学術的な役割は、それ自身の深化と同時に、基礎科学および学際分野と連携して、社会から求められる技術や価値を創造するための基盤的な知の体系を築き、科学・技術駆動型イノベーション創出の原動力としての工学を実現することである。社会との関係で見れば、機械工学は、これまで高度な機能代替型の機械システムを普及させ、さらに近年、多様な知能代替型の機械システムを生み出している。今後は、これらの多様なものづくりの技術と産業を21世紀の地球社会に相応しい持続性ある姿に転換し、人間の感情や感性、夢や希望にも応えられるような技術パラダイムを切り拓いてしていくことが機械工学の社会的役割といえる。

こうした機械工学の役割を達成するには、大学などの高等教育機関と産業界の各々の改革とともに、オープンイノベーションを指向したダイナミックな連携に基づく、戦略的研究開発体制の構築が必要である。学協会の積極的な関与も得て、そのようなビジョン牽引型、目的指向型の基盤研究を推進する必要がある、国の研究資金制度の改善も望まれる。

さらに、研究開発を担う次世代の機械工学の人材を育てる体制を改めて整える必要がある。初等中等教育から継続教育まで課題は多いが、特に大学・大学院の教育に関して早急な対応を必要とする課題が存在する。

3 今後の課題と提言

機械工学の責任を果たすために、以下の諸課題に対し、機械工学コミュニティが確固たる意思を持って取り組んでいくことが望まれる。

(1) 機械工学のミッションの共有と協働

機械工学関係者が、「人と社会を支える機械工学」としてのミッションを自覚し、認識科学と設計科学の両輪の協働により、還元論的および全体論的方法論としての機械工学の強化に取り組んでいくことが肝要である。これによって、機械工学の学術的な飛躍と発展を可能とし、科学・技術駆動型イノベーションを先導し、機械工学を次世代人材にとって有力な行動原理として位置づけることができる。このためには、教育・研究機関、産業界の関係者の意識改革と、教育機関と産業界の対話を通じた長期的なビジョンとミッションの共有と協働、そして社会への発信と具体的な実践が必要である。

(2) 学術としての機械工学の課題

機械工学は、多様なスケールに及ぶ力学を基盤とした認識科学と、ものづくりや価値創造を先導する設計科学としての二つの機能を堅持しつつ、先進的研究開発を持続することが課題である。加えて、ものづくりのプロセスには、社会の持続性との調和、それらを利用する人々との意思疎通が必要であり、ハーモナイゼーションとしての学術を取り込むことが必要である。さらに、先端・融合領域における機械工学フロンティアの開拓も重要課題である。これらの課題の達成には、大学・国研での研究戦略の構築を進め、多彩な学術交流活動を推進し、社会への知の還元を具現化する必要がある。

(3) 研究開発と研究資金制度

研究開発におけるオープンイノベーション時代の流れであり、機械工学分野においても、大学や研究機関と産業界とが息の長い戦略的共同研究体制を構築し、ダイナミックに連携し得る関係を築く努力が求められる。関連学協会においても、積極的に研究開発や産学連携を企画実施する必要がある。科学研究費などにおいて新分野・統合分野や目的指向型の基盤研究への資金供給を可能とする制度改善が望まれ、多様な評価基準を導入する必要がある。また、新技術開発の産学連携研究に対する各省庁の研究資金制度においては、基盤技術に長期的に取り組めるような改善が必要である。さらに、研究費配分においては、より多くの研究プロジェクトを小さな規模で始め、適正な評価を経て増強し、結果として研究プロジェクトも研究者も大きく育てる制度の導入が強く望まれる。

(4) イノベーション人材の育成

学部・大学院の機械工学教育プログラムを、さらに充実、強化させていくことが喫緊の課題である。すなわち、大学関係者は、ビジョン設定・目標設定・教育プログラム改革・出口管理、といった一連の具体的な行動を始める必要がある。教育課程には、新分野・横断分野のコンテンツを導入するとともに、論理的な考察力を強化するために数学の素養を高める工夫を図る必要がある。現行の大学院博士前期課程を、例えば、技術分野を中心とした高度な職業に就く者を主対象とする修士課程（職業大学院ないしは専門職大学院、Professional School）として明確に位置づける一方で、博士後期課程を、工学分野を中心とした研究職・教育職、および研究職に近い高度な技術職に就く者を主対象とする博士一貫課程（研究大学院、Graduate School）とするなど、各々独自の目的を持つプログラムとして構築すべく、抜本的な検討が必要である。近年の機械工学分野の博士課程進学者数の危機的減少に対しては、在籍者への経済的支援、博士人材の就業条件やステータスの改善に向けて、産官学が連携しつつ具体的対策を早急に施すべきである。

(5) 知の統合へ向けた工学の再編

理学・工学分野における学術の各々を深化発展させると同時に、社会が直面する複雑な問題を解決し、さらには巨大複雑化する社会経済システムを創成するためには、「社会のための科学に向けた知の統合」が必要である。このような知の統合を先導するディシプリンを構築するためには、各分野のミッションの見直しだけでなく、工学全体の再編のような抜本的な吟味も必要であろう。機械工学だけに留まらない、この大きな課題に対しては、日本学術会議が関連学協会とともに、継続的取組みを始める必要がある。

(6) 国民の工学的素養の涵養

技術と社会の関係、技術者の社会における役割に対する国民の理解を涵養するために、産官学は相互に連携しつつ、具体的な対策を実施する必要がある。特に、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ともに、社会の実問題に対して設計科学的なものを見方を涵養することが、生きる力と創造力を育成する観点から極めて重要である。特に機械工学に関わる教育研究者や技術者は、このような“ものづくり”教育に貢献することにも積極的に参画していく必要がある。行政における教育振興政策においては、現状の投資規模と教育者人材育成の両面で早急な強化策が必要である。

目 次

| | | |
|---|--------------------------------------|----|
| 1 | はじめに..... | 1 |
| 2 | 機械工学の学術の展望..... | 2 |
| | (1) 機械工学ディシプリン..... | 2 |
| | (2) アナリシスの学術コア（認識科学としての機械工学）の進展..... | 3 |
| | (3) シンセシスの学術コア（設計科学としての機械工学）の進展..... | 4 |
| | (4) ハーモナイゼーションの学術としての進展..... | 5 |
| | (5) 先端・融合領域における機械工学フロンティアの開拓..... | 5 |
| 3 | 機械工学に期待される貢献と役割..... | 7 |
| | (1) 人と社会を支える機械工学として..... | 7 |
| | (2) 機械工学の固有の特性を活かして..... | 8 |
| 4 | 機械工学分野に求められる人材育成..... | 11 |
| | (1) 求められる人材像..... | 11 |
| | (2) 初等中等教育における工学的素養の涵養..... | 11 |
| | (3) 学士課程教育における人材育成..... | 12 |
| | (4) 大学院教育における人材育成..... | 13 |
| | ① 修士課程教育..... | 13 |
| | ② 博士課程教育..... | 14 |
| | ③ グローバル化時代の大学院教育..... | 15 |
| 5 | 我が国の機械工学における今後の課題..... | 17 |
| 6 | まとめ..... | 19 |
| | (1) 機械工学のミッションの共有と協働..... | 19 |
| | (2) 学術としての機械工学の課題..... | 19 |
| | (3) 研究開発と研究資金制度..... | 19 |
| | (4) イノベーション人材の育成..... | 20 |
| | (5) 知の統合へ向けた工学の再編..... | 20 |
| | (6) 国民の工学的素養の涵養..... | 21 |
| | <参考文献>..... | 22 |
| | <参考資料>..... | 24 |

1 はじめに

第 21 期日本学術会議は、2008 年 4 月、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』をとりまとめることとしたが、並行して、主要な学術分野ごとの長期展望を各分野別委員会において審議の上まとめることとした。これを受けて、機械工学委員会では、近年の機械工学委員会関連分科会等での審議の結果も踏まえて、機械工学に期待される役割と目指すべき発展の方向性、それを担う人材の育成について、主として機械工学企画分科会において審議を重ねた。

資源や環境の制約の下で、地球上のあらゆる人々の、健康で快適な生活と安全で安心な社会を実現し、人間社会の持続性を可能にしていくため、今改めて科学・技術の理念と方法論が問われており、機械工学も例外ではない。そのため、個別学術分野の深化を進めるとともに、複数の自然科学分野、さらには人文・社会科学分野をも横断する科学と技術の融合や協働を進めること、つまり「知の統合」の実践が重要な切り札として認識され[1]、さらに、このような知の統合を実践する俯瞰的視野を有する人材への社会的ニーズが強まっている。

機械工学委員会では上記の認識に基づき、知の統合の前提としての「機械工学ディシプリン」を再確認し、機械工学のアイデンティティと目的を改めて明らかにし、機械工学の教育・研究・社会貢献活動の改革を進めるための方向性を吟味するため、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審議を行い、2009 年 6 月に報告『人と社会を支える機械工学に向けて』[2]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 月に報告『21 世紀ものづくり科学のあり方について』[3]をまとめた。

以上の複数の報告や機械工学委員会傘下の各分科会でのこれまでの検討結果を踏まえた機械工学企画分科会の審議の結果は、2009 年 11 月に機械工学委員会で報告、審議されると共に、日本学術会議・(社)日本機械学会主催シンポジウム「機械工学の展望：21 世紀の役割と貢献」で公表、議論され、また関連学協会から提出された意見も勘案して、本報告『機械工学の展望 2010』としてまとめられた。

2 機械工学の学術の展望

(1) 機械工学ディシプリン

近代の文明を「機械文明」と称するように、産業革命以降の人類社会の近代化は様々な機械の普及に多分に依拠してきたといっても過言ではない。すなわち、産業の振興、物資の供給、健康の促進、災害や事故の防止、そして様々な機械の普及による生活の質の向上などは、機械文明によってもたらされてきた。しかし、時として過剰とまで映る機械による利便性の追究や、人口、資源・エネルギー、環境などの地球規模の問題の顕在化によって、これ以上の機械化は不要とする声も一部には聞かれるようになった。そして、未来に向けて、人類の文明と文化の均衡ある発展に、そして機械と人間・自然環境との調和的關係の構築に貢献するには、機械工学のそれ自身の深化と、関連の理工学、生命科学、さらには人文社会科学との学融合による総合的手法が不可欠であることが指摘されている[1]。

『人と社会を支える機械工学に向けて』[2]によれば、機械工学は、材料力学、熱力学、流体力学、機械力学の4力学を中心とした分析（アナリシス）に重点が置かれた縦糸としての学術コアと、設計工学、生産工学、制御工学など設計・生産を中心にした統合（シンセシス）に重点が置かれた横糸としての学術コアとが織りなすディシプリンに、エネルギー、輸送、資源、環境、医療福祉などの多彩な応用技術（人工物の科学）に関わる工学知を組み上げた、特異な立体構造を有する知の体系である。そのような知の構造に由来して、機械工学は対象を選ばず、広範な技術の基盤を創造する役割を果たし、さらには社会のための科学・技術の方向性を常に牽引し得る特性を有している。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も成り得るものである。

アナリシスの学術コアに関しては、古典力学や統計力学だけではなく、量子力学を含み、最近では、電気・電子工学や化学なども取り込みながら拡充されてきた。扱われる時空間スケールも原子・分子スケールへと拡張され、極微スケールの素過程や分子挙動を解明・予測する方法論も組み込まれつつある。こうしたミクロな世界の科学が機械工学の学術を改めて肉づけし、一方ミクロな世界の技術に機械工学的手法が有効に組み込まれていく。また、ミクロな現象の粗視化によって、マクロな解析・設計手法などの構築も進められている。さらに、各力学分野の深化とともに、より多彩な物理・化学現象の相互作用を含むマルチフィジックスを扱う科学としての機械工学が発展している。

シンセシスの学術コアに関しては、設計、生産、利用の実プロセスを、科学に根付かせる努力が継続しており、例えば、マルチスケール、マルチフィジックスの統合・連結シミュレーションが開発されている。これらは計算機ハードウェアや超並列計算の進展によって実用化が加速しており、それらを真に設計、生産と融合するためのデジタルエンジニアリングが進展している。

これらのアナリシスとシンセシスの学術コアは、情報学、物理学、化学、生物学などの最新の成果を取り込み、多彩なものづくり（人工物）とそれらを通じたサービスの実現に寄与している。そして、総体としての機械工学が、さらに、知能機械、ロボティク

ス、NEMS/MEMS、新エネルギー、バイオ・医療など、ものづくりのフロントエンドにその学術と技術の領域を広げる一方、アナリシスやシンセシスの学術コアの進展を誘導し、さらに広大な機械工学の知の体系が築かれていくダイナミズムが存在することが、現代の機械工学の特徴でもある。

以上のように、特有の構造を有するディシプリンとものづくり科学のダイナミズムを包含する機械工学には、今後さらに、機械の創造・利用と人間・自然環境の持続性を可能とする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。産業革命以降、機械は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）の規範が必ずしも一致して来なかった場合が多見される。しかし、機械は、本来それを利用する人びとに利便性と喜びを与えるべきものであるから、供給者と使用者の一体化した開発規範への転換が始まり、人間の感覚、知覚、環境と人間との仲立ちを支援するインターフェースとしての生活機械が求められるものと予想できる。例えば、機械工学を基に創出された機械や機械システムが人間社会の利便性付与と安全性確保にいかに関与すべきかという問いかけに応えるサービス科学や安全科学、さらには自然環境との調和の視点からの製品ライフサイクル科学などが、社会に相応しい機械やシステムの創造と利用をもたらすはずである。

(2) アナリシスの学術コア（認識科学としての機械工学）の進展

機械工学におけるアナリシスの学術基盤は、分析の対象の本質に迫る力学体系により構成されているのが特徴である。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、交通機器やエネルギー機器をはじめとして全ての機械の設計・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 や電子/光デバイスに関連した微小材料（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・医学などの知識との融合が必要である。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。

一方、流体力学は流れの本質を理解し、その挙動を予測し、制御するための学問として発達してきた。最近の流体力学の進展は、対象の時間・空間スケールの広がり、新たな応用分野への展開の二点に集約される。例えば、数値解析手法の進歩と計算機性能の向上により、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ともに、分子動力学を応用して、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、様々な現象の解析と制御が進展することが期待される。一方、シンセシスを意図した研究の進展も期待される。例えば、高レイノルズ数乱流の直接数値シミュレーションから生み出される膨大な数値データから流れの本質的な機構を理解し、設計に有用な情報を抽出するための方法論の確立が重要となる。また、乱流渦を直接的な対象とした制御技術などの開発によって、例えば、航空機の騒音低減や高速車両

の抵抗低減などが実現されることが期待される。このためには、微小なセンサ、アクチュエータなどの要素研究開発や、非線形現象を対象とした制御手法の開発などがその成否の鍵を握っており、設計・制御工学との融合が重要な課題としてクローズアップされるものと考えられる。

伝導、輻射などの熱輸送現象や化学反応、流体の熱物性、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分野においては、相変化現象、界面現象、反応流や燃焼流など未解明な現象も多く、これらの解明、予測、制御を主要課題として、一層の発展が期待される。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。これらの知見をマクロスケールの実際の機械の設計に組み入れる手法も重要である。例えば、乱れスケールによりはるかに小さい空間・時間スケールを有する燃焼流の予測や制御の手法の開発が望まれる。また、熱工学は、人間や機械に関わる事象の非線形散逸系としての状態変化にマクロ的な方向性を与える普遍的学理を提供するので、バイオエンジニアリングやナノテクノロジーなどの新分野においても強力な学術基盤として機能することが期待される。

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きた。また、剛体運動やリンク機構を扱う機構学から発展したロボット工学、運動解析から発展した車両工学など、新たな工学分野の開拓に貢献してきた。この分野でもコンピュータ・シミュレーションの応用が進んでいるが、特に、多体系の動力学解析（マルチボディ・ダイナミクス）の発展は著しく、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、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し、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。さらに、機械力学は姿勢制御、振動制御の基礎となっていることから、制御工学との結びつきも強く、電子工学や電気工学と融合したメカトロニクスの発展にも寄与してきた学術といえる。このように、機械力学は、今後とも他の基礎力学とともに発展を続けながら、シンセシスの学術コアとの有機的結合を先導する力学として貢献することが期待される。

(3) シンセシスの学術コア（設計科学としての機械工学）の進展

上述の解明・分析に力点が置かれた学術コアの知見を活かして人間が必要とするものを創り出すための、シンセシスの学術コアの重要性が今後一層増していく。一方、設計・生産・加工・計測・使用・廃棄・回収などの「ものづくり分野」は、機械工学だけではなく、あらゆる学術分野の成果を統合し、新しいものを創造していくための学術の構築を目指しており、日本学術会議における多角的な議論の成果が、報告『21世紀ものづくり科学のあり方』[3]として集約されている。しかし、その多様性と知識の急速な拡大の結果、学術としての体系化は遅れている現況にある。ものづくり分野の学術の体系化にあたっては、自然に存在するものを活用して、人間が必要とするものを人為的に創

り出すための普遍的な法則を導き出し、説明・記述する学術基盤としての設計の科学を改めて問い直す努力が必要となろう。そのためには、古典的な作図、製図、CAD、CAM、CAT という積み上げ的な方法論を脱却し、環境→顧客→製品→部材→加工→設計→材料という従来とは逆のプロセスからものづくりを分析し、全プロセスを一体的にデジタルエンジニアリング化する手法を学術的に探求しなければならない。

機械工学とものづくりとは、これまで相互に強い影響を及ぼしあって発展してきたことは間違いないが、今後はより密接な協働によって、社会の期待に答えていく必要がある。すなわち、機械工学の原理原則から構想される新しい機械やシステムがその生産プロセスやサービス形態まで含めて設計される一方、精緻で巧みな製造技術によってそれらが忠実に造り出され、その結果が直ちにフィードバックされるような、コンカレントな関係が生み出されるようになれば、シンセシスの学術コアが実現化技術（Enabling Technologies）としての役割を一層高めることができるはずである。

(4) ハーモナイゼーションの学術としての進展

「ものづくり」という言葉には、製品の企画・構想から、開発、設計、生産計画、製造、使用、評価（市場における評価も含む）、廃棄、回収、再利用に至るまでに必要な全てのプロセスが包含されている。こうしたものづくり分野には、あらゆる面で持続可能な環境と社会との調和が求められており、これを推進するために、前述のように、まずは改めて学術的基盤を確立することが急務となっている。今後は、コスト、技術に加え、持続可能性、そしてものづくりを通じて提供するサービスを重視し、また、グローバル化・技術移転を視野に入れたものづくりを実現するための新たな学術が必要とされる。そのためには、従来からの設計、製造関連の学術の進展に加えて、サービス、世界標準・規格、技術移転戦略、安全・安心、省エネルギー、環境調和などを視野に入れた学術が必要であり、これらを「ものづくり科学」、すなわち設計の科学の一分野として明確に位置づけ、機械工学をハーモナイゼーションの学術としても発展させることが重要である。

(5) 先端・融合領域における機械工学フロンティアの開拓

機械工学の基盤的な学術コアやものづくり科学の発展性について展望したが、加えて、先端領域、融合領域の学術分野を発展させていくことも機械工学の重要な役割である。これらの領域を開拓し、発展させていくためには、従来の機械工学の学術コアを単に応用するだけでは不十分であり、大胆な知的冒険に乗り出すことが必要で、そのための仕組みを産学、あるいは学協会が積極的に構築すべきである。

そのような分野の開拓の可能性は、あらゆる方向に潜んでいる。例えば、新材料分野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 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豊かな生活環境や新たな価値を生み出す可能性を有するものである。

例えば、生命組織体の構造と機能を力学的な視点から捉えるバイオメカニクス分野では、これまで科学的に扱えなかった生物体を扱う固有の工学的的方法論を生み出す可能性がある。それによって、生体システムの原理を工学的に理解し、生体機能をバイオ・医療以外の技術にも応用し、社会の多様な要請にも応えることが可能となる。また、コンピュータ上に作られる生命システムを工学的に応用して、高度な自律分散性と柔軟な適応性を発揮するシステムを構築し、ロボット技術やマイクロマシンの発展に繋げることも期待される。生体医用機械工学では、医療機器や車椅子などの福祉機械だけではなく、先進の医用マイクロデバイスや先進ロボティクスなど、「新しい概念の機械」が次々に開発されつつある。微小な遠隔操作ロボットハンドの駆動には、レーザトラッピングによる光エネルギーが使われるが、レーザ光学や制御工学だけでなく、表面修飾による親水化や細胞生物学など、従来の機械工学の範疇を超えた知識とそれを駆使していくことが要請される。

以上のように、先端・融合領域分野の進展には、これまで構築されてきた力学を基盤としながらも、前述したアナリシスとシンセシスの学術に加え、ものづくり科学に軸足をおいた研究開発が必要である。すなわち、従来の力学だけに拘ることなく、絶えず異分野の学問を吸収しながら新しい技術目標や研究領域を作り出す弛まない挑戦が、これからの機械工学のさらなる発展の鍵を握っている。これによって、機械工学の基盤的学術もさらに発展していくことになる。

3 機械工学に期待される貢献と役割

(1) 人と社会を支える機械工学として

21世紀の機械工学のミッションは、科学の共通課題「社会のための科学・技術」への貢献であり、特に、「人と社会を支える機械工学」[2]として、環境制約、資源制約の下で、安心安全で豊かさの感じられる持続的な社会を構築するための具体的な方策を提示することである。現代の地球社会は、産業革命以降急速に増加した化石燃料の消費によって手に入れた快適さと共に、気候変動や温暖化の強い懸念を抱えている。この極めて困難な課題を解決するための科学的、技術的な対策を提供するために、産業の基盤とも言える機械工学に期待される貢献と課せられた役割は大きい。あらゆる生産・消費活動において、低炭素化に向かう大きな流れを誘導せねばならない。特に、脱化石燃料、高効率エネルギー利用、省エネルギー、再生エネルギー利用などの技術開発においては、機械工学には他の学術分野と広く協働して、目に見える具体的成果を生み出していく重要な役割がある。

我が国に目を移せば、資源・エネルギー制約の下で、長寿高齢化社会への移行、少子化による労働人口の減少などが急速に進むにつれて、様々な社会負担の増加と、国際的な産業競争力の低下も危惧されている。国家的な政策対応が必要であることは言うまでもないが、独自の科学・技術研究開発の優れた成果によってイノベーションを達成し、新たな産業を発展させ、国際社会へ我が国の優れた製品や知識を提供できるようにすることが、活力ある知識基盤社会を我が国に実現するための唯一の方法である。こうした科学・技術駆動型イノベーションの創出に向けて、機械工学の学術的、技術的な貢献が、そして機械工学の人材の活躍が強く望まれる。

機械工学の学術的な役割は、それ自身の深化と同時に、基礎科学および学際分野と連携して新領域を開拓し、社会に求められる技術や価値を創造するための基盤的な知の体系を築いていくことである。例えば、エネルギー高度利用や豊かな福祉医療を実現するための方法としての新しい「工学」を創生するために、他の工学分野との連携や融合を積極的に進めるべきである。そのような新しい工学の誕生は、機械工学自身の深化と発展を可能とし、新たな知の循環を生み出すとともに、社会的・経済的価値の創造、すなわちイノベーション創出の原動力としての工学を実現することになる。

技術創造を通じた社会への貢献の観点から見れば、機械工学は、これまで輸送機械、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生み出し、社会へ供給してきた。さらに、近年、機械工学はその伝統的な中核領域から大きく拡張し、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み、電子機械、情報機械、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新たに生み出し、社会の期待に答えていこうとしている。今後は、これらの多様なものづくりの技術と産業の構築を、21世紀の地球社会に相応しい、持続性ある姿に先導していくことが機械工学の社会的役割といえる。機械工学は理学・工学の全体的な視座に立ち、地球の有限性に強い関心を保ち続けるとともに、人間の感情や感性、生き甲斐、夢や希望にも応えられるような技術の新しい在り方を希求し、先導すべきである。

人材面では、これまで、機械工学を学んだ技術者が産業界の様々な分野に柔軟に適応し、多大な貢献をなして来た歴史がある。鉄鋼、繊維などの製造プラント、ガス・蒸気タービン、原子炉などのエネルギー関連機器、自動車、航空機、鉄道などの輸送用機器、空調冷凍などの設備機器、ロボットを含む生産機械、種々の家電製品などの開発において、機械工学の人材の貢献は顕著であったといえよう。今後、21世紀に日本が世界のフロントランナーの一員としての役割を果たすためには、俯瞰的な視野の下、広範な知識を統合し、具体的な解決策や新技術を創出していくことが必要である。ものづくり、エネルギー、輸送、通信、コンピュータ、そして医療福祉システムなどの統合科学・技術分野において、深い専門知識と広範な知識を連携させる工学知としての機械工学を創出し、そして科学・技術駆動型イノベーションを牽引する能力を有する工学者・技術者を育てることが、社会への責任を果たす途といえる。

他方、産業革命以降の機械の開発と創造が、専ら産業的立場から成されてきたため、その製造者・供給者と使用者・受給者の間には双方向的な意思や情報のやりとりは持たれなかった。しかし、これからの時代に生み出される機械や機械システムには、それらを利用する人々に楽しみや満足、さらには感動や共感をもたらすことが期待されることから、製造者と使用者との意思疎通が機械工学の極めて重要な要件のひとつとなる。生み出される人工物やそれらを通じたサービスに対する社会的受容性と、ユーザ個人にとっての満足度を担保するために、人間の知覚、情緒、感性を重視し、環境と人間との仲立ちを支援する生活機械の探求と創造も、「人と社会を支える機械工学」にとって重要であると考えられる。

(2) 機械工学の固有の特性を活かして

機械工学は、歴史的にはハードウェアとしての機械装置を対象として発展し、その間、船舶、航空、自動車、原子力のような個別の機械システムを扱う工学の学術的基盤としても拡充してきた。機械工学が基盤とする「力学」の概念は広く、一般に「物体間に作用する力と運動の関係を論ずる科学」であり[4]、古典力学や統計力学だけではなく、量子力学も含む。さらに、ここでいう力学とは、自然や人工物など、広く物質や物質から成る系の時間的な挙動や変遷を記述する知の体系であり、その因果関係が数学的に記述できる場合にだけ限定されるものではなく、電磁気学や化学なども必要に応じて取り込みながら、機械工学の「力学」は拡充されてきている。そのため機械工学が対象とする内容は基礎的・基盤的で、極めて広範な事象を対象としており、ここに機械工学のひとつの特徴がある。

機械工学の本質はまた、『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、これを機械とよぶ）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』とみなされ[5]、これを機能代替の機械パラダイムと位置づけることが可能である。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の出現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位置づけることができる。

現代の機械工学がもたらす工業製品としての機械や機械システムは、イノベーションに影響する重要な要因となり得る。さら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・知能をも代替し始めて、人間のコミュニケーションと感性、人間社会や時として倫理にまで影響を及ぼし、その結果が人間関係はもとより経済、国家、国際関係などをも巻き込んだ社会現象に波及することが多い。

これらを勘案すると、機械工学は、極めて広い学術分野と技術のパラダイム変化に関係していることが大きな特徴と言える。2章で述べたように、現代の機械工学は、力学を中心としたアナリシス（分析）の学術コアと、設計・生産、さらに人間社会との関連も取り扱うシンセシス（統合）の学術コアとが織りなすディシプリンの上に、具体的な出口として多彩な応用技術（人工物の科学）が重層されているが、そのような現代の機械工学には、三つの際立った特性がある[2]。

その第一の特性は、機械工学の基盤となる学術コアが、人間に関わるあらゆるスケールの現象の解明や機器・システムの開発を対象とし、常に対象の本質的で根源的な原則に理解を求めながら設計を進めることであり、限られた物理化学的現象や特定の応用技術のみに留まるものではないことである。つまり、機械工学は、認識科学[6、7]としても、人間の感性・情緒などをも含む設計科学[6、7]としても、普遍的で広い視野を有するという特性を内包している。

第二の特性は、アナリシスとシンセシスの学術コアで構成されるディシプリンの構造に由来する。これは、発展とともに常に先鋭的に細分化と深化へと向かうアナリシスの学術に、具体的な目的達成の方向性を持たせることで、目的達成の寄与度に応じた相対的位置づけと取捨選択を可能とする構造特性である。このような知の構造を有することが、往々にして現実社会との接点を見失いがちなアナリシス系の学術コア群の還元論的進化の方向性に、常に「社会のための科学・技術」という全体論的視点を付与してきたと言える。

第三の特性は、上記のディシプリンの上に築かれる応用工学の体系を有することに起因するものである。すなわち、機械工学のディシプリンは、これまでも航空、船舶、自動車、原子力などの機械システムごとに構築された科学・技術の基盤ディシプリンとなっていた。またその中には、設計・解析・製造などだけでなく、それらの運転・保守・サービスなどの広範な分野や俯瞰工学、インダストリアル・エンジニアリングまでも含む科学・技術が包含されて来た。このように、機械工学のディシプリンは、科学・技術が発展し社会の要請に応じた新しい応用分野に関する工学体系を構築しようとするとき、その基盤ディシプリンとなり得る。

このような機械工学の特性を考えると、機械工学がこれからの社会のために果たすべき役割を果たすために有力な、二つの手段が明らかになる。第一の手段は、様々な自然現象を要素に分解して理解する「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。機械工学の諸問題に

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すべきである。

第二の手段は、「知の統合」を目指す、いわば俯瞰的方法論の強化である。これからの社会が直面する課題に具体的な方策を呈示することは、広範な分野に及ぶ科学・技術の知識を集めて初めて可能となる。つまり、最先端の多様な科学・技術を統合して具体的な解決策を導出できうるものが、未来社会における多くの問題解決の鍵となる。多彩な知識を連携させ、「知の統合」を達成させる、いわば扇の要のようなディシプリンが必要となる。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重要な総合的科学・技術分野であるが、これらの科学・技術の基盤となり、関係する多様な知識を総合統括する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。

以上に述べたように、機械工学は、本質的に持つ基盤性と総合性により、その守備範囲を拡大しながら、ものづくりを契機としたイノベーションをリードすることができるものと期待される。そうした役割を担うためには、分析と統合の両輪にバランス良く軸足を置きながら、中庸を尊び妥協を厭わない精神性を保ち、俯瞰的な視野から、専門性に拘らず全体を統率できる人材を社会に供給し続ける必要がある。

4 機械工学分野に求められる人材育成

(1) 求められる人材像

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、21 世紀において、機械工学は、「科学・技術駆動型イノベーション」創出に向けた「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いる。したがって、イノベーションの創出、具現化、普遍化のプロセスを横断的に担う能力を持った人材の育成、特に機械工学においては、揺るぎない専門知識とその応用力とともに、価値の創造能力に焦点を当てた人材育成を強化する必要がある。

このような目標の達成には、高等教育の役割が重要である。大学は、学士、修士課程の教育プログラムを、国際的な教育改革の動向を踏まえつつ競争力のある内容に強化し、博士課程においては、世界をリードする研究開発を担う創造性豊かな能力を涵養することを目標に改革を進めるべきである。一方、こうした大学教育の前提となる初等中等教育に対しても課題が山積している。国民の科学・技術科学・技術の理解力や活用力を涵養する上でも教育内容や方法が改善される必要がある。また、大学卒業・大学院修了後の、産業界における継続的な人材育成についても充実が期待される。以下では、日本学術会議からの報告『人と社会を支える機械工学に向けて』[2]の指摘を踏まえて、人材育成の課題について展望する。

(2) 初等中等教育における工学的素養の涵養

国民の科学・技術の理解力と活用力を涵養し、科学・技術を基盤的に担う専門人材を広く育成するためには、初等中等教育の重要性は論を待たず、その内容は元より、教育者自身の育成も含めて充実させていくことが必要である。科学や技術の成果が身の回りを取り囲み、豊かな社会を実現してきたが、一方では、技術に関わる事故や環境問題などが生起していることも事実である。このような社会においては、全ての国民が科学や技術の基礎を理解し、適切に評価し活用する能力が求められる。前述したように、機械工学は極めて広い学術分野に関係していることをその最大の特徴としていることから、機械工学関係者は、諸外国における技術教育の動向も注視しつつ、我が国にとって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より一層の貢献をすべきである。

平成 20 年 3 月に公示された小・中学校の新学習指導要領では、「総合的な学習の時間」や小学校における「図画工作」、中学校における「技術・家庭」の技術分野において、ものづくりなどの体験的な学習を積極的に各教科に取り入れていくこととしている。このような体験に加えて、「必ずしも解が一つに定まらない問題に対して、あらゆる科学・技術知識を動員して、実行可能な解を見出す」という設計的なものの見方を涵養することが、全ての国民の生きる力を育む点からも望まれる。これらの能力は、ものを造るためだけでなく、広く問題を解決するためにも必須であり、技術教育の重要な目標のひとつとして位置づけることが望まれる。その際、力学を基盤として具体的事例を身近に示しつつ、工学的なものの捉え方を習得させることは効果的な方法のひとつであると言える。

高等学校における理科教育に関しては、自然探求コースや自然探求科の設置、あるいはスーパーサイエンスハイスクールにおける数々の取組みなど、様々な新しい試みが行われていることは望ましいことであるが、その多くが生物系・化学系に限られているのは適切でない。普通高校に技術や工学に関する教科がない事実は、科学技術創造立国として我が国が国造りを進める上で大きな問題である。したがって、さらなる予算措置に加えて、学習指導要領の内容や教員養成のあり方にも見直しが必要である。また、科学・技術教育をスーパーサイエンスハイスクールのみにも留めることなく、「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、全国に普及させるなどの施策が必要である。機械工学関係者は、これらの施策を支持し、高等学校における教育支援により積極的に関与すべきである。

(3) 学士課程教育における人材育成

学士課程教育における人材育成においては、専門的知識の獲得に加えて、自立的な思考能力および判断能力の涵養が必要なことは言うまでもない。持てる力を、社会が直面する高度な問題の解決に創造的に役立たせることが出来る人材を育成する必要がある。専門基礎知識の修得に加えて、論理的に考え、明瞭かつ効果的に書く力、正確に説得力をもって意思伝達する力、批判的に考える力、倫理について理解し考察する力、情報に裏打ちされた判断力、などの基本的な能力を身につけることが大切である。そのためには、論理的、科学的思考力や課題探求力、対話力、英語力、創造性や感性、哲学、文学、歴史学といった人間的素養などを涵養する教養教育を、専門教育とともにバランス良く行う必要がある。

このような観点から、機械工学に関する専門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、どのような教育に重点を置くのかについて、検討が必要である。基礎教育としては、材料力学、機械力学、熱力学、流体力学の4力学に加え、設計工学、生産工学などの教育は必須である。しかし、機械工学の対象とする範囲が従来の機械からナノ、バイオ、環境、エネルギーにまで広がりつつある現状を考えると、この点からも機械工学専門基礎教育の見直しを行う必要がある。量子力学、生物学、あるいは環境学などのより俯瞰的知識などを導入する必要がある。既存の基礎科目の教育の質を落とすことなく、新規分野の基礎教育を行う点に課題がある。このためには、流体力学と固体力学、材料学と材料力学、機械力学と機構学とメカトロニクスなどを統合して教育するなど、教育分野での知の統合が必要となろう。なお、論理的な考察力を育むことは、科学・技術イノベーションの先導役としての研究者・技術者には益々重要であり、その表現力としての数学の素養の必要性は国際的に高まっている。国際的に遅れを取ることなく数学の重要性を再認識し、大学学部での基礎数学、大学院での応用数学の教育を強化する必要がある。

我が国の工学教育の礎は、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、当時のイギリス(実習重視)やドイツ・フランス(理論重視)に例を見ないカリキュラムを導入

し、高く評価された。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、カリキュラムを設計する必要がある。また、学士論文研究については、卒業者や企業から高く評価されているが、指導教員によって研究指導方法や内容にばらつきがあることが指摘されている。この点を改善するために、複数教員による指導、産学連携などの取組み、そして学士論文研究の教育目標の明確化が必要となろう。4年次教育で、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、妥当な効果が得られるよう、その内容が吟味される必要があろう。

高等教育のグローバル化が進む中で、我が国の学士課程教育を、国際的に通用する技術者教育プログラムとして認定する日本技術者教育認定機構（JABEE：Japan Accreditation Board for Engineering Education）が行う認定審査が定着してきた。JABEEは、「種々の科学、技術および情報を利用して社会の要求を解決するためのデザイン能力」を技術者にとって重要な能力として位置づけているが、JABEEがワシントン・アコードに加盟する際に、日本はデザイン教育が弱いとの懸念が示されている[8]。ここでいうデザイン能力は、前述の「必ずしも解が一つに定まらない問題に対して、あらゆる科学・技術知識を動員して、実行可能な解を見出す」という設計的なものの見方に対応しており、指摘された懸念を重く受け止める必要がある。PBL（Project Based Learning）教育やものづくり教育等の実践的教育と専門知識の修得を目標とする基礎教育とのバランスや連携に関しても検討が行われる必要がある。

(4) 大学院教育における人材育成

① 修士課程教育

修士課程における教育の目標は、高度職業人の育成と次世代の学術としての機械工学を担う人材の育成にあるが、特に工学系では、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、大学院教育に、技術者としての幅広い知識や実行力を涵養する教育を付与するための変革が求められており、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[9]。

日本機械学会においては、平成16年度より大学院教育懇談会を設置して、大学院教育のあり方について検討を行っている。その結果、平成17年度には、(1)コースワークの強化と体系的な履修、(2)産学連携教育の強化、(3)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成されている[10]。さらに、平成18年度には、(1)産学が共有する人材像の明確化、(2)教育という視点からの論文研究の位置づけの明確化、(3)産学間の人材交流の仕組みの具体化、から成る提言が成されている[11]。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具体的取組みが要望される。

修士課程においては、教育プログラムの半分以上の時間を修士論文研究に費やしていることから、論文研究の位置づ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、改革が必要である。論文研究では、

論文の成果だけではなく、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、修士論文研究を通じた教育の実質化を早急に図る必要がある。日本機械学会は、そうした目的を達成するための標準的な論文評価法を提案して各大学の参考に供している[12]。

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、年次進行的には米国の制度を、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位置づけられ、博士全課程の途中で修了する仕組みとなっている。この結果、修士（博士前期）課程で育成目標とする人材が不明確で、課程の位置づけが曖昧になっている。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、現状では、修士課程学生は指導教員の下で研究に多くの時間を費やし、より広い俯瞰的知識や考え方を習得しにくい状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てきたことが上記のような矛盾を生じせしめているとも言えよう。一方、研究者・教育者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。例えば、技術分野を中心にした高度な職業に就く者を主対象とする修士課程（職業大学院ないしは専門職大学院、Professional School）、工学分野を中心とした研究職・教育職あるいは研究職に近い高度な技術職に就く者を主対象とする博士課程（研究大学院、Graduate School）とするなど、教育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。

② 博士課程教育

従来の博士後期課程では、自立するに十分な研究能力を備え、機械工学という専門分野において独創的な研究を行い得る研究者の養成を行ってきた。しかし、今日、機械系の博士後期課程には、これら研究者の養成のみならず、産業界などにおける高度研究者・技術者など高度な研究能力と豊かな学識に裏打ちされた知的な人材の育成が強く求められている[13]。このような状況を踏まえて、研究者・教育者の養成とともに、高度な研究能力を持って社会に貢献できる人材養成を目的とする機械系の博士課程を、ある割合で設置すべきである。博士課程を修了した人材の将来のキャリアパスを見据え、志望する進路によって、「研究・教育人材コース」、「産業界における開発・研究および技術マネジメント人材コース」のように、明確な選択肢を提示できるコースの設計も検討に値する。

後者の場合、従来の指導教員の研究室で行われている輪講や研究発表を中心とした学術探究型のコースワークに加え、課題解決型の教育が必要になる。すなわち、機械工学のより深い知識や自然科学の広範な知識の教授に加えて、知識を実際に活用し展

開していくための能力を身につけさせるための実践的なコースワークの導入などの教育上の取組みが求められる。また、高度な研究能力を持って社会に貢献できる人材養成を行うためには、経営工学、技術経営などの講義や長期インターンシップを教育プログラムに組み込むことも効果的であろう。

博士論文研究は、学術研究に内在する独創性を育む機能を有効に生かして、学生の創造性・独創性を開発する最適な機会である。既往の研究の調査、研究成果の提示、独創性の主張などがピアレビューを通して厳しくチェックされる機能は学生に独創性について考えさせる最適な機会である。一方、研究活動において所属研究室を越えて多様な研究者と相互研鑽することが求められる。複数教員による博士論文研究の指導は有効であり、また博士論文研究を通じた教育の達成度評価を適切に行うための教育目標の設定が必要となろう。博士課程について、そのアドミッションポリシー、教育プログラム体系、博士学位授与要件をより明確化していく必要がある。

近年の機械工学分野の博士課程においては、その進学者数の減少という課題を抱えており、他の理工系分野でポストク問題などが顕在化している状況と傾向を異にしている。これは、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と考えられる。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指摘できよう。今後、我が国が世界のトップランナー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発展して行くには、学界のみならず産業界においても、優れた博士人材は必須であり、価値創出の中核となる機械工学分野の博士人材の減少は特に重大な問題である。大学関係者は人材育成機能の充実・強化を実施し、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行い、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、相互に連携しつつ、若い世代にとっても魅力的な具体的対策を早急に実施すべきである。

③ グローバル化時代の大学院教育

大学院教育について考える場合、技術者の活動の場が国際的になっていることを認識する必要がある。したがって、大学院教育では特に国際的に活躍できる技術者・研究者の育成が急務であり、積極的に学生に海外で学習する機会を与え、留学生を受入れ共同体験を持たせるなどの教育の国際化の推進が不可欠である。そのためには、海外の大学との単位取得の同等性、教育の同等性の確保はもとより、我が国の大学院の国際的競争力を一段と強化するよう、大学関係者の努力が必要である。そして、前述した大学院教育の改革を進める際には、このような大学院教育のグローバル化の視点が重要である。

欧米で検討が進んでいる高等教育プログラムの質の保証の取組み、技術者資格の取組み、ボローニア・プロセス [14] の動向などを注視し、それらとの整合性を常に考慮した取組みが必要である。また、我が国の産業界はものづくり技術を中心に高い国

際的競争力を有している。大学院における人材育成において、そのような産業界との有機的な連携は、国際化の視点からもさらなる充実が望まれる。さらに、大学は社会人リカレント教育プログラムを開発導入し、産業界は研究開発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。

今、グローバル化が急速に進展する中で、人類社会の持続性に寄与し、よりよく生きるための技術が求められている。そのような社会の期待に応えるためには、機械工学を担う研究者・技術者自らが襟を正し、社会と技術の関係を見直し、我々のビジョンと目標の中に崇高な技術者倫理を組み込んでいくことも必要である。大学院教育における人材育成においては、上述した課題に加えて、教育技術者倫理教育を適正に位置づけることが極めて重要な課題である。

5 我が国の機械工学における今後の課題

前章までの考察において機械工学の具体的課題についても触れてきたが、改めて我が国における機械工学の現状を概観し、総括的課題に触れる。

我が国の大学を中心とする機械工学分野の研究のレベルは、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、たとえその目的が明確であっても、分析的なアプローチに終始し、当初の技術的な目標から離れて研究のための研究に陥る場合も散見される。一方、具体的な技術や技術改善を志向するあまり、実際のものを作ったり、むやみに試行錯誤したりする作業に終始し、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展望し、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姿勢をさらに醸成していく必要がある。

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品質の優れた工業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体制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集中と選択、そして将来の競争力となり得る技術のための基盤的研究開発を継続せねばならない。また、各企業にとって、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っており、あらゆるセクタとの協働、すなわちオープンイノベーションが必要になっている。

大学・研究機関における基礎・基盤研究の推進において「人と社会を支える機械工学」の実現を目的意識として醸成し、産業界の研究開発を補完することによって、科学・技術駆動型イノベーションを先導するために、大学や研究機関と産業界との多彩な連携の実施、特に息の長い戦略的共同研究体制の構築が必要である。産学の継続的な対話が、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はずである。我が国においても産学連携の機運は高まり、活動は着実に増しているが、知財管理や人事交流などのハードルは依然として高く、産学間のみならず、企業間、大学間にも課題は多い。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依然として少なく、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、目的指向型の共同研究の実施に向け、産学の結集した努力が必要である。各々の役割を着実に果たしつつ、相互に、かつダイナミックに連携・融合しうる関係を産官学で築く努力が求められる。

産学各々の、あるいは産学間の課題解決において、技術ロードマップの作成をはじめとして学協会の役割も大きい。例えば、主要学会である(社)日本機械学会は、我が国の機械

工学・機械技術分野を代表し、国際的な顔にもなっている。しかし、多数の産業界の会員を有するものの、学会活動においては大学・研究機関所属の会員が大半を占め、また産学連携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、流体機械、冷凍空調機、精密機械などの個別技術分野の学会が独立に存在して、産業界の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が、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。他方、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状況や、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状況が生じる。したがって、関連学協会の連携により、研究開発や産学連携を生み出すための強力な仕組みを作り出す必要があり、ここに日本学術会議の役割も期待される。

以上の諸課題の解決において、国の研究開発施策は極めて重要である。機械工学に限らないが、新分野や目的指向型の基盤研究へのファンディングが可能となる研究資金制度、特に日本学術振興会科学研究費をはじめとして審査制度などの改善が望まれる[15]。すなわち、論文査読、研究費配分、業績評価など様々なピアレビューのプロセスで、従来分野に縛られず、より多様な分野に対応した評価基準を導入することが必要である。また、新技術開発を指向する産学連携研究に対する各省庁の研究資金制度においては、具体的な技術や事業化を重視するあまり、長期的に基盤技術にじっくりと取り組むことが困難となっており、改善が必要である。さらに、研究費規模を大きくする一方、研究費申請の入口を厳しく細くするきらいがあるが、むしろ、より多くの研究プロジェクトを小さな規模で始めさせ、適正な評価を経て増強し、結果として研究プロジェクトも研究者も大きく育てる制度の導入が強く望まれる。

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亘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。大学関係者は、学部、大学院の教育課程の編成・改編において、①育成する人材像を描き（ビジョン）、②学生が獲得すべき力を定義し（目標）、③目標を達成する具体的な教育の手段と方法を構築し（教育プログラム）、そして、④教育達成度の十分なチェックを行う（出口管理）といったサイクルを繰り返す具体的な行動をとるべきである。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個別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、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、重要な課題も克服する必要がある。なお、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ことも必要であり、機械工学が社会の期待に応えるひとつの方途である。

6 まとめ

近年の科学・技術の動向と社会からの期待を念頭に、環境制約、資源制約の下で、安心安全で豊かさの感じられる持続的な社会を構築するための「人と社会を支える機械工学」の実現へ向けて、機械工学の学術の特性と発展性、機械工学が果たすべき貢献と役割、新時代の機械工学の実践者である人材の育成について検討し、短期的あるいは中長期的諸課題を抽出した。これらは以下のようにまとめられるが、機械工学コミュニティが確固たる意思を持って取り組んでいくことが望まれる。

(1) 機械工学のミッションの共有と協働

新世紀に相応しい「人と社会を支える機械工学」を発展させ、その貢献と役割を達成するためには、機械工学関係者がこれらのミッションを十分認識・自覚し、認識科学と設計科学の両輪の協働により、還元論的および全体論的方法論としての機械工学の強化に確固たる意思を持って取り組んでいくことが肝要である。そのことによってこそ、機械工学の学術的な飛躍と発展の可能性を生みだし、科学・技術駆動型イノベーションを先導し、機械工学を次世代人材にとって有力な行動原理と位置づけることができるといえる。このような思潮とインセンティブを、世代を越えて伝承するための仕組みを機械工学コミュニティに築く必要もある。このためには、教育・研究機関、産業界の関係者の意識改革と、教育機関と産業界の対話を通じた長期的なビジョンとミッションの共有と協働、そして社会への発信と具体的な実践が必要である。

(2) 学術としての機械工学の課題

機械工学は、アナリシスとシンセシスの学術コアから成るディシプリンという特有の知の構造に由来する、認識科学と設計科学の両輪に駆動される学術体系として飛躍と発展の可能性を有している。多様なスケールに及ぶ力学を基盤とした認識科学、ものづくりや価値創造を先導する設計科学としての二つの機能を堅持しつつ、先鋭的研究開発を継続することが変わらぬ機械工学の課題である。加えて、ものづくりのプロセスには、社会の持続性との調和、それらを利用する人々との相互の意思疎通が必要であり、ハーモナイゼーションとしての学術を取り込むことが必要である。さらに、先端・融合における機械工学フロンティアの開拓も重要課題である。これらの課題の達成には、大学・国研での研究戦略の構築を進め、関連学協会内部に留まらない組織を越えた多彩な学術交流活動を推進し、さらに長期ビジョンに基づくダイナミックな産学連携を通じて、社会への知の還元を具現化する必要がある。

(3) 研究開発と研究資金制度

研究開発におけるオープンイノベーションの達成が重要になっているが、知財管理や人事交流などのハードルを越えて、大学や研究機関と産業界との多彩な連携の実施、息の長い戦略的共同研究体制の構築、ビジョン牽引型、目的指向型の共同研究の実施に向

け、産学の結集した努力が必要である。各々の役割を着実に果たしつつ、相互に、かつダイナミックに連携し得る関係を産官学で築く努力が求められる。関連学協会においても、積極的に研究開発や産学連携を企画実施する必要がある、組織を越えた連携協力が必要になっている。

機械工学を含め、今後の工学の発展にとって、科学研究費などにおいて新分野・統合分野や目的指向型の基盤研究への資金供給を可能とする制度改善が望まれる。そのためには、様々な評価やピアレビューのプロセスで、従来分野に縛られず、より多様な分野に対応した評価基準を導入する必要がある。また、新技術開発を指向する産学連携研究に対する各府省の研究資金制度においては、技術の具体化や事業化を重視するあまり、長期的に基盤技術にじっくりと取り組むことが困難となっており、改善が必要である。さらに、研究費規模が大きくなる一方、研究費申請の入口が狭まっているが、むしろ、より多くの研究プロジェクトを小さな規模で始め、適正な評価を経て増強し、結果として研究プロジェクトも研究者も大きく育てる制度の導入が強く望まれる。

(4) イノベーション人材の育成

グローバル化に立ち向かう知的競争力の向上には、イノベーション創出と産業競争力の強化に貢献する独創的な人材が必須である。機械工学教育においては、学部・大学院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、国際的に競争力のある内容に充実、強化させていくことが喫緊の課題である。大学関係者は、育成する人材像を描き（ビジョン）、学生が獲得すべき力を定義し（目標）、目標を達成する具体的な教育の手段と方法を構築し（教育プログラム）、そして教育達成度の十分なチェックを行う（出口管理）といった具体的行動を始めるべきである。教育課程には、新分野・横断分野のコンテンツを導入するとともに、論理的な考察力を強化するために数学の素養を高めるための工夫を図る必要がある。

現行の大学院博士前期課程を修士課程として、その位置づけを明確にする必要がある。例えば、修了後、技術分野を中心にした高度な職業に就く者を主対象とする職業大学院（あるいは専門職大学院）としての修士課程（Professional School）、工学分野を中心とした研究職および研究職に近い高度な技術職に就く者を主対象とする研究大学院としての博士課程（Graduate School）など、修士・博士課程を各々独自の目的を持つ一貫したプログラムとして構築すべく、抜本的な検討が必要である。近年の機械工学分野の博士課程進学者数の危機的減少に対しては、博士課程在籍者への経済的支援、博士人材の就業条件やステータスの改善に向けて、産官学が相互に連携しつつ具体的対策を早急に施すべきである。

(5) 知の統合へ向けた工学の再編

理学・工学分野における学術の各々を深化発展させると同時に、社会が直面する複雑な問題を解決し、さらには巨大複雑化する社会経済システムを創成するためには、「社会のための科学に向けた知の統合」[1]が必要である。このような知の統合を先導するディ

シブリンを構築するためには、各分野のミッションの見直しだけではなく、工学全体の再編のような抜本的な吟味も必要であろう。また、知の統合を推進するために、研究資金制度の改革も進める必要がある。機械工学だけに留まらない、この大きな課題に対しては、日本学術会議が関連学協会とともに、継続的取組みを始める必要がある。

(6) 国民の工学的素養の涵養

技術と社会の関係、そして技術者の社会における役割に対する国民の理解を涵養するために、産官学は相互に連携しつつ、具体的な対策を実施することが必要である。特に、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ともに、社会の実問題に対して科学・技術知識を集めて実行可能な解を見出す、設計科学的なものの見方を涵養することが、生きる力と創造力を育成する観点から極めて重要である。工学、特に機械工学に関わる教育研究者や技術者は、このような「ものづくり」教育にも積極的に参画していく必要がある。同時に、行政における教育振興政策においては、これらの観点から見れば、現状は投資規模と教育者人材育成の両面において弱体であり、早急な強化策が必要である。

<参考文献>

- [1] 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22日。
(<http://www8.cao.go.jp/cstp/output/toushin5.pdf>)
- [2] 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25日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h79.pdf>)
- [3] 日本学術会議、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18日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-h64-2.pdf>)
- [4] 久保亮五、長倉三郎、井口洋夫、江沢洋（編）、理化学辞典、第4版、岩波書店、1987年10月。
- [5] 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。
- [6] 日本学術会議、運営審議会附置新しい学術体系委員会、対外報告『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24日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1829.pdf>)
- [7] 日本学術会議、学術の在り方常置委員会、対外報告『新しい学術の在り方－真の Science for Society を求めて－』、2005年8月29日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1032-11.pdf>)
- [8] 大中逸雄、「日本技術者教育認定制度の現状と展望」、日本技術者教育認定機構、2005年2月。(<http://www.jabee.org/OpenHomePage/jabee3.htm>)
- [9] 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、Vol. 57、No. 4、2009年7月、pp. 4-10.
- [10] 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」、平成18年3月。
(<http://www.jsme.or.jp/educenter/daigakuinkyokuteigen.htm>)
- [11] 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」、平成19年3月。
(<http://www.jsme.or.jp/opd/daigakuinkyokuteigen2006.htm/index.htm>)
- [12] 日本機械学会、『大学院教育に関する提言－修士論文の位置づけと達成度評価－』、平成20年6月。
(<http://www.jsme.or.jp/educenter/daigakuinkyokuteigen2008.htm>)
- [13] (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旨指して－悪循環を好循環に変える9の方策－』、平成19年3月20日。
(<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2007/020.html>)
- [14] 木戸裕、「ヨーロッパ項と追う教育の課題－ボローニャ・プロセスの進展状況を中心として－」、レファレンス、国立国会図書館、平成20年8月号、pp. 5-27.

- [15] 日本学術会議、総合工学委員会工学基盤における知の統合分科会、記録『知の統合の具体的方策－工学基盤からの視点－』、2008年8月.

<参考資料>

「機械工学の展望 2010」(案) について意見を求めた学協会

- (社) 化学工学会
- (社) 可視化情報学会
- (社) 空気調和・衛生工学会
- (社) 計測自動制御学会
- (社) 自動車技術会
- (社) 精密工学会
 - ターボ機械協会
- (社) 日本音響学会
- (社) 日本ガスタービン学会
- (社) 日本機械学会
 - 日本計算工学会
- (社) 日本原子力学会
- (社) 日本航空宇宙学会
- (社) 日本材料学会
- (社) 日本船舶海洋工学会
- (社) 日本塑性加工学会
- (社) 日本鑄造工学会
- (社) 日本伝熱学会
- (社) 日本トライボロジー学会
 - 日本燃焼学会
- (社) 日本マリンエンジニアリング学会
- (社) 日本流体力学会
- (社) 日本冷凍空調学会
 - 日本ロボット学会
- (社) 溶接学会