

[特別講演]

新世紀の機械工学ディシプリンの構築へ ービジョンを描き、人を育てるー

東京大学 笠木 伸英

1. はじめに

新しい時代を迎え、機械工学のビジョンと目標を改めて定めることは、これからの技術と社会の健全な関係を描くことでもあり、我々に課された重要な課題といえる。日本機械学会をはじめとする機械系学会で組織的に検討すべき課題といえるが、例えば、日本機械学会では特別企画行事を組んで、各部門の将来展望を語り合ったり、関連企業の事業戦略を紹介していただいたりしている。これと併行して、第20期の日本学術会議では、30の専門分野別常置委員会のひとつ、機械工学委員会の下に「機械工学ディシプリン分科会」が設置され、現在約40名の会員、連携会員の委員の参加を得て、同じ向きの検討が開始されている。当該分科会の設置趣意は、工学・技術の革新には専門学術分野の深化と他分野との協働が、未来社会への貢献には学際・横断型的手法と知識が必要とされる中、力学を基盤とした設計方法論として発展した機械工学も大きく変容しつつあり、新世紀に相応しい機械工学のディシプリンを改めて描くことが求められているとしている。筆者はこの分科会の委員長を務めているが、ここに機会を得たので、日本機械学会諸兄に私見を披露し、広くご意見を賜りたいと考えた。

2. 21世紀の時代軸

過ぎ去った20世紀とはどんな時代だったのだろうか。まず、“右肩上がりの時代”であったとすることができる。技術の発達、産業の発達が生活の向上をもたらすと信じられていたのである。そして、我が国においても社会が目標を共有できた時代であった。表1は、米国工学アカデミーが選んだ、20世紀の20大技術革新のリストである¹⁾。これらの技術は、この100年間に開発され、大半は先進国社会の人々が容易に手にすることが出来るほど広く普及している。挙げられた個別技術の選択には任意性があるが、地球上の生命誕生から38億年、そして400万年といわれる人類史上、20世紀が科学技術の開発・普及、その結果生じた社会変化の速度の面では極めて異例な世紀であったことがわかる。テレビ、携帯電話、東京-大阪3時間、月旅行など、我々が夢見たことの多くは、すでに現実になっている。この100年間に、人の寿命は飛躍的に長くなり、例えばアメリカの平均寿命は47歳から77歳へ、日本でも45歳から81歳へと倍近くに延びている。

表1 20世紀の20大技術革新 (米国工学アカデミーによる)

1. 電力・電化	11. 高速道路
2. 自動車	12. 宇宙船
3. 航空機	13. インターネット
4. 上下水道	14. 画像技術
5. 電子技術	15. 家庭用電化製品
6. ラジオ・テレビ	16. 医療健康技術
7. 農業機械化	17. 石油・石油化学
8. コンピュータ	18. レーザー・光ファイバー技術
9. 電話・通信	19. 原子力技術
10. 空調・冷凍	20. 高性能・高機能材料

このように、20世紀における技術の目覚ましい進展と普及は、災害や事故を防ぎ、産業を支え、人々の生活に豊かな物資を供給し、日々のストレスを軽減し、健康を促進し、病気を克服して長寿を可能にしてきた。技術は、間違いなく社会の要請に応じてきたといえる。この間、技術と工学は細分化と深化を通じて発展する一方、均質大量生産を目指す企業組織や集団においては、個の相対的な埋没が進んだ。また前世紀の特徴の一つは、自然を克服し利用することこそ、人間の主体性の発露と自由の拡大に他ならないとする、人間中心の自然観であった。

このような20世紀の単なる延長として新世紀を展望できないことは、多くの識者がすでに指摘

するところである。20世紀には、地球上の人口は約16.5億人から61億人（3.7倍）へ、年間消費エネルギーの総量は石油換算で5億トンから90億トン（19倍）へ膨張し、大気中二酸化炭素濃度は300ppmから370ppmへと増加した。人口については、1987年の50億人から1992年の60億人に増加するのに要した時間はわずか15年で、今後2050年には94億人、21世紀に100億人を越えると予測されている。現在、この内約11億人が先進諸国に住み、石油換算で53.5億トンのエネルギーを消費している。一方、途上国の50億人が49億トンを消費し、1人当たりで言えば先進国の約1/5である。現在、もし世界の人々が先進国並みのエネルギーを使えば、必要な全エネルギーは300億トンで、持続可能な技術的な解は存在しない。今後、先進諸国の人口はほぼ横ばいで、増加はもっぱら途上国であるから、2030年で同様に見積もれば390億トンが必要で、気候変動の可能性からも極めて深刻と言える。その他にも、人口増加に伴う、一人当たりの水供給、穀物生産の減少など、マクロな数字には切実な現実が浮かび上がる。

従って、新世紀を迎え、人類社会の目標は、肥大化した人間圏を地球と共生し得る持続的なシステムとして再構築すること、一方で多様な価値観を有する人々に、健康で快適な生活と安全で安心な社会を保障することといえる。そして、技術と工学は、新たな知の創造と活用を通じて、この困難な課題を克服し、人々の生活の真の豊かさに貢献することであり、機械工学も例外ではない。

新世紀のキーワードは、例えば、技術革新、グローバリゼーション、規制緩和などであろう。科学技術の開発は、バイオ、ナノテク、情報技術を始めとして急速に進展すると予想され、人々の生活や意識、そして産業構造や社会制度の変革も進むに違いない。情報化、ネットワーク化、高速輸送網整備が進んで、人、もの、情報の移動に対する国家、国境の障壁は一層低下し、経済や文化など人類の活動は一層のグローバリゼーションに向かう。いわゆるフラット化した世界が訪れる。また、民族ナショナリズムの台頭も各地域で顕著となり、地域間や文化間の齟齬も予想される。一方で、人類は、地球規模で解決すべき環境や資源エネルギーなどの深刻化な問題を共有しつつ、文化的生活、福祉、倫理、個人の尊厳などをいかに担保するかについても解決を迫られている。

3. 新世紀の我が国の国家像

我が国は、戦後の困窮の時代から回復して既に先進国の仲間入りを果たし、その国土の狭さとは裏腹に、世界の政治経済の中で主要なプレゼンスを示す位置にある。日本のGDPは約500兆円で、世界の1割強といわれる。少なくともその規模と影響力ではトップランナーの仲間入りを果たしたのである。しかし、日本が世界の文化文明、そして平和に貢献するためには、長期的な国家ビジョンをもって新世紀の国造りを進める必要がある。2000年の第2期科学技術基本計画では、「知の創造と活用により世界に貢献できる国」、「国際競争力があり持続的発展ができる国」、「安心・安全で質の高い生活のできる国」の3つの基本理念を掲げている。ビジョンに基づく国造りがようやく始まった。

技術における我が国の活躍は、すでに優れた工業製品を世界に供給してきたものづくり実績に裏付けられており、日本製品の品質、安全性、省物資、省エネルギー、製造コストなどでの優位性は世界に比類無い。ここにおいて機械技術分野の先達らの貢献は目覚ましいものであった。今後は、さらに節約技術、回復技術、文化融合技術など、日本独特の文化と感性に根ざした技術²⁾による貢献に期待がかかる。日本独特の細やかな省エネルギー技術がよい例で、技術移転によって、どれだけ世界の環境にも経済にも貢献できるか計り知れない。今後先進各国でも予想される人口減少、高齢化、環境・エネルギーの課題を我が国が率先して克服し、豊かな国家社会を造る模範を示す良い機会と捉えるべきであろう。最近では、日本の伝統文化や環境との調和を重視する思潮が、世界の多くの人々の共感を得ていると聞くことも多い。

日本は、乏しい資源しか持たず、狭い国土に高い人口密度を抱え、世界の中では特殊な言語を話す国とあって良い。我が国の人口は昨年末で1億2,800万人弱、人口統計史上初めて減少に向かい始めたが、この傾向は今後も続き2050年には1億人程度（世界の1%）となると予想されている。産業を支える生産年齢人口（15～64歳）は戦後一貫して増加を続けたが、1995年の8,700万

人のピーク後、2030年には7,000万人弱、2050年には5,400万人弱（現在より15ポイント低い、対人口比53%程度）と予想される。少子高齢化は、産業労働力の減少、経済の低調、そして世代間負担のバランスの急速な崩れにつながることで、憂慮すべき事態といえる。国や経済界がその対策を検討中である。労働人口が毎年0.5%で減少する中、生産性の1%の向上が達成できれば人口減を補うことが十分可能で、2%を達成できれば経済成長も可能といわれる。そのためには、何と言っても、技術革新、そして女性や外国人を含めて優れた人材の確保が鍵となる。知育、徳育、体育によって人材国家を目指し、個人を基軸とする活力ある社会を創ることが目標となる。

4. 機械工学の役割

以上の認識から、今改めて、機械工学が新世紀にどのような役割を果たすのか、果たすべきなのか、歴史を振り返りつつ、ビジョンと目標を構築する必要がある。機械技術は、構造物、エネルギー・資源、交通物流、情報通信など、人間生活のライフラインを支え安心安全を担保すると共に、新技術を開拓し新しい価値を社会へ送り出す重要な役割を担っているといえる。そのような技術を創造する知の体系としての機械工学自体にも深化と拡がりが見られる。いわゆる4力学を基盤としながらも、取り扱う時空間スケールが拡大し、フェムト、ピコからギガ、テラといった言葉が頻繁に語られるようになった。また情報、物理、化学、生物学などを改めて取り込み、マルチスケール、マルチフィジックスへの挑戦や、コンピュータ、ネットワーク、ロボティクス、NEMS/MEMS、新エネルギー、バイオ医療など、機械技術分野の延伸が進んでいる。その中で、力学を基礎とする機械工学の手法やアプローチが新分野・融合分野でも有効であることも改めて分かってきた。

素粒子論、高エネルギー物理、宇宙科学、生命科学、材料科学など、先端科学の進展が今後とも予想されると同時に、工学で対象とする技術は一層複雑巨大化しつつある。様々な機械システムも例外ではない。この広範な学術・技術のスペクトルの狭間で、機械工学はどのようなポジショニングを取るべきであろうか。描かれる機械工学のディシプリンは、特に、研究や教育における若者の道案内役としても重大な役割を負っている。研究資金が豊富に投入される先端科学分野により多くの若者が導かれることは自然な成り行きであるが、それが彼らのプロフェッショナルライフを貫く基軸となり得るかどうかは別の問題であろう。現在の技術者や研究者が、未来からの訪問者である若者をどの方向に導くかは、世代の責任として高度の倫理にも関係することでもある。

今求められているものは、21世紀に相応しい機械工学像であり、機械技術者像である。学融合、学際領域の開拓が叫ばれる中、機械工学が主要な工学ディシプリンとして生き残れるかどうかとも言える。これらの作業は決して容易ではないが、多様な分野にわたる機械技術者、研究者のコミュニティが、各々の経験や専門知識を基盤としながらも、領域を越えた継続的な対話の中から共有すべきものを生み出し、後進へ示すことが必要であろう。

5. 国を支える技術者の育成³⁾

知を基盤とする成熟した市民社会、すなわち知識基盤社会では、政治、経済、産業、国土、交通、医療、教育など、高度複雑化した社会システムを創造し、健全に運営、経営する人材としての専門職業人が必要である。なかでも技術者は、建築構造物、エネルギーシステム、交通輸送機器、情報通信システムなどを支える、高度な科学技術専門知識と豊富な経験を有する専門職業人として位置付けられるといえる。そのような技術系人材育成は欧米でも主要目標となっているが、我が国の第3期科学技術基本計画でも、インフラ整備などの「モノ」から、競争力の根源である「人」に着目して投資する方向性が強調されている。関係省庁、技術系学会において、熱心な議論が継続している。少子高齢化と理工系離れによる技術者の“数の問題”と、新時代のイノベーションを可能とする人材の育成の“質の問題”が存在する。

日本の高等工学教育を経た技術者人口は、約240万人といわれる。その中には、約60万人の研究者、5万人の技術士が含まれる。毎年11万人の理工系の卒業生が輩出されるが、そのうち7割は大学学部、3割は大学院という。そして今後は大学院進学率が上昇する傾向にある。技術者人

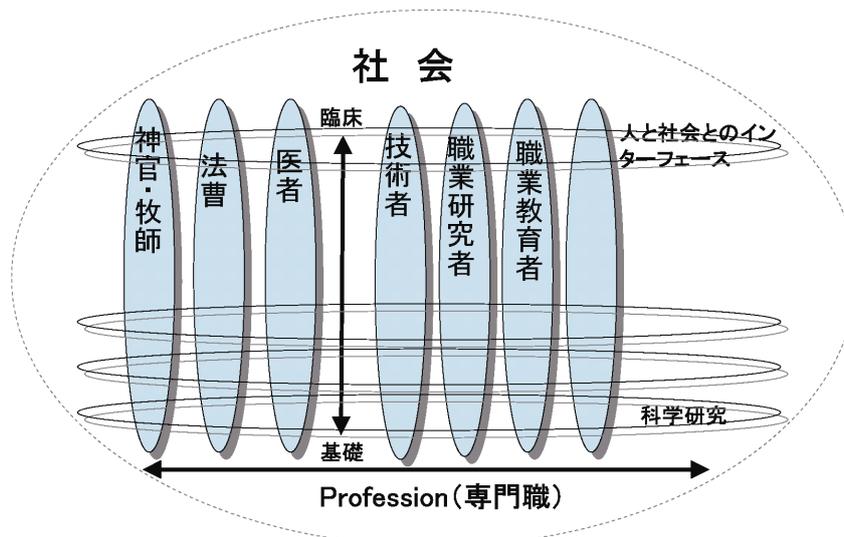


図1 専門職に支えられる知識基盤社会（専門職については脚注参照）

材の数の問題は、少子化と共に若者の理工系離れにより加速する。ものと情報に溢れた環境で不自由なく育つ現代の若者には、一見難しそうな数学や理科を要し、厳しい競争に曝されながら相応に報われない姿に映る技術者像が、自分の人生の有力な選択肢となりにくいことは容易に理解できる。欧米諸国でも、医者、弁護士、事業家などに比べて技術者の社会的地位は高いとは言えないが、技術によってのみ国を支えることが可能な我が国では、この事態を看過できない。特に幼少期の学校や家庭での教育の改善と共に、技術業が魅力ある職業となるような産業界や行政の努力が必要である。

工学教育の質の問題は、新世紀のグローバル社会における技術者に求められる資質の変化に起因している。すなわち、専門知識やスキルの教育に留まらず、社会・経済・環境に関わる文脈の中で形成される、21世紀型の工学教育体系の構築が望まれており、特にディシプリン境界型、横断型教育による俯瞰的な視野の付与の必要性、そして専門知識を使いこなしてプロジェクトを遂行するためのマネジメント力、チームワーキング力、リーダーシップなど、技術者としてのコンピテンシーの付与が必要である。大学教育改革はこれまでも継続的に行われてきたが、その効果が十分でなかった主たる原因は、改革の議論が教員だけで行われてきたことであろう。全てのステークホルダーが同じ目線の高さでオープンに議論を進め、ビジョンと目標に対する理解を共有する必要がある。すなわち、教員に加えて、産業界、そして学生・大学院生の参加による継続的な議論の存否が鍵と言える。

進学率の増加した大学院教育の改革は喫緊の課題といえる。大学院教育の本質は、講義演習の体系の中で養われる専門知識と応用力、そして未踏分野にチャレンジする様々な研究活動の中で養われる計画力、実践力、マネジメント力などを付与することである。知の創造の観点からは、ものづくりを追いかけた経験知・解明知から、ものづくりを創造する先導知を目指さねばならない。そのためには具体的な出口を意識したパスツール型研究⁴⁾の推進が必要であり、そのような場での若者の鍛錬が重要である。また、学部との関係では、学部は技術者としての基礎固め、つまり Pre-engineering、大学院は Professional School あるいは Research School と明確に位置付け、それぞれの教育目標を設定すべきであろう。さらに、相互の役割分担の理解を共有する、

元来、専門職(Profession)とは、「社会が必要とする特定の業務に関して、高度な知的訓練と技能に基づいて独占的なサービスを提供するとともに、独自の倫理規程に基づいた自律機能を備えている職業」とされ、単なる職業(Occupation)とは区別される^{6,7)}。専門職が満たすべき条件について厳密な共通理解はないが、知的訓練、社会サービス、サービスの独占権、独自の倫理規程、集団としての自律機能などの要件を備えているものが多く、医師、弁護士、公認会計士、建築家、技術士などは世界的に見ても専門職として認知されている。さらに、法律や国家試験などで職業資格が規定されていなくても、一般に技術者を当該分野の専門家さらには権威者として理解され、その判断や見解を社会は批判なく受け入れる傾向にあることなど、技術者の社会に与え得る影響の大きさを考えれば、その自律性を専門職と同等に考えるべきとも言える。

息の長い産学連携は、社会知識の付与によって大学を強化し、また、そのような環境で育つ人材が産業界でも教育研究機関でも未来の牽引力として期待される。

6. 技術者・研究者として

科学技術の発達と共に、科学的知識に基づいて仕事をする専門家が犯す不正行為が、続出してきた。技術に関わる人間やシステムの欠陥が露呈して起きた昨今のトラブルは重大である。市場の自由化に伴う産業界の競争の激化、研究開発サイクルの短期化、技術と経済・社会の関係の変化も影響していると考えられるが、これらを繰り返さない技術者の職業人としての決意と弛まない研鑽が望まれる。研究活動の不正は、高等教育研究機関の独立法人化などと共に、研究者を取り巻く研究環境が大きく変化してきたことにも帰因しているといわれている。すなわち、研究活動のリソースが傾斜配分される競争的研究環境が形成されてきた。また、研究者のポストには任期制が増え、ポスト獲得にも業績評価に基づく競争が導入され、研究者には短期間で成果を挙げることが求められる傾向が強まってきた。

図2は、責任ある研究行動を保証する二つの要素⁵⁾を示したものである。研究の公正誠実性は、技術者・研究者の規範・規則、そしてその精神に照らして相応しい行動かどうかに関わり、研究倫理は、道徳的な原理から考えて何をすべきかが問われる。前者は、現代の科学技術研究の多くにおいて、その活動は専門職のそれとして位置づけられるので、専門職コミュニティ、所属する機関、あるいは国が定めるように、研究上の専門職倫理に基づく責任を果たすことが要請される。このことは、社会が技術者や研究者を信頼し、その研究開発活動を安心して受け入れるための最小限の約束事と言える。

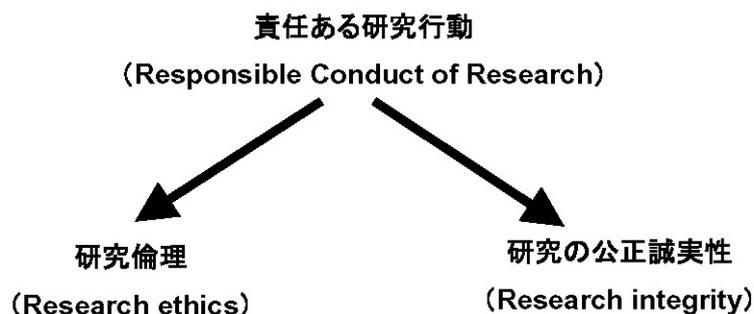


図2 責任ある行動

後者の研究倫理とは、より高い倫理的な、かつ俯瞰的な観点から、どのような研究課題に取り組むか、研究目標とする技術は何を優先して考えるべきかなどに関係する。臓器移植、クローン技術、軍事防衛技術、環境開発、そしてエネルギー・資源の消費など、研究課題の設定自体にも異なる倫理的な判断があり得る。先端技術に基づく高度な医療は、それが裕福な者だけが手にできる便益だとすれば、それを経済的な弱者にもアクセス可能なものとするのが、技術者・研究者としての高い倫理と言える。現代社会では、地球上の地域や国によって、生活レベルに大きな格差があり、その格差の存在によって環境汚染や気候変動が現在程度に留まっているという現実がある。エネルギー・環境問題はそうした地域間格差、そして現代と後世の人間社会の時間的な格差の解消という困難な倫理的課題を包含していることも見逃せない。そういった技術者・研究者の倫理、高い意識が新世紀に求められる。それに応えてこそ、社会の多くの人々は技術の恩恵に安心して浴し、さらには社会が技術者・研究者を尊敬し、若者が憧れることになるのではないだろうか。

7. 機械工学ディシプリンの構築へ

新世紀の人類社会、そして国造りに向けた機械工学ビジョンと目標の必要性、人材育成、技術者・研究者の倫理について私見を述べた。最近、団塊の世代が定年を迎える2007年問題が取りざたされる。筆者もその主役の一人である。我々、戦後生まれが見てきた半世紀は、今日よりは明日、明日よりは明後日への継続的な成長と拡大の道程であり、幸い我が国は国際紛争に巻き込まれることなく、恵まれた時代を生きてきたといえる。機械技術者は産業の隆盛に確かな役割を果

たし、同時に機械工学の知の体系も著しい発展を遂げてきた。そして、新世紀に入り技術の底流には大きな変化が生じている。大量の生産と消費を可能にした技術から、人類社会の持続性に寄与し、人を支える技術へのパラダイムシフトといえる。よりよく生きるための技術といえる。そのような21世紀の社会の期待に応えるためには、単一ディシプリンだけでは不可能であろうことは多くの認めるところである。

そこで、工学を束ねる総合の工学としての機械工学の役割も、さらに重要になってくるともいえる。実際、これまでも産業界での新技術開発には、多くの理工学分野を専門とする技術者・研究者の協働が必要であったし、その多くの場合に取り纏め役を果たしたのは、つぶしのきく、いわゆる機械屋であると言われている。どうして機械屋がそのような役割を果たし得たのか、改めて吟味が必要である。もしそれが本物だとすれば、明らかに機械工学のディシプリンとしての強みのひとつである。しかし、これからの機械工学が、それ自体の学術的な深化と発展と共に、どのようにしたら同様の機能を持ち得るのだろうか。あるいは、改めて機械工学の持つべき機能と果たすべき役割を定義する必要がないであろうか。こうした視点から、機械工学の動勢を改めて眺めるとき、分野の拡大と学際化が指摘できるものの、そのコアとなるべき知の体系や機械技術者像はおぼろげで、ややもの足りなく感じるのは筆者だけであろうか。あるいは、もはやあらゆる自由度とダイナミズムこそが時代の要請なのであるか。

大学に身を置く筆者には、寡聞にして、上記のような議論が教育、研究、技術開発におけるビジョンと具体的目標に結実するには至っていないように見受けられる。そして、これらは教育機関においても、産業界においても、人の育成における最も根源的かつ重要な要素でもある。従って、分野を越えて、機械工学の内外を見渡しつつ、その位置づけを再考してみる必要がある。そして、共有すべきビジョンと目標を構築し、継続的に見直しつつ、真に競争力ある機械工学のディシプリンを築き上げる必要がある。それは、進展する科学、技術とも整合したものでなければならぬ。また、その際、伝統と歴史を有する美しい国土に育った日本人として、脈々と受け継がれてきた高い道徳観、倫理観に由来する日本の方法論、特に人間と環境の調和を最高の善とする共生の思想を機軸にしたいものである。そして、世界を俯瞰して、南北などの地域間格差、あるいは未来との世代間不平等を克服する技術の創成に向けた、真の技術者倫理をも目標としたいと考える。

新世紀の機械工学ディシプリンを構築するために、多くの皆様のお知恵とご意見を賜れば幸甚である。

<参考文献>

1. National Academy of Engineering, "Greatest Engineering Achievements of the 20th Century," <http://www.nae.edu/>.
2. 月尾嘉男, 「縮小文明の展望 千年の彼方を目指して」, 東京大学出版会, 2003.
3. 笠木伸英, 「イノベーションを創出する工学系人材育成に向けて」, 学術の動向, 2006年12月, PP. 29-35.
4. D. E. Stokes, "Pasteur's Quadrant - Basic Science and Technological Innovation," Brookings Institution Press, Washington DC, 1997.
5. N. H. Steneck, "Fostering Integrity in Research: Definitions, Current Knowledge, and Future Directions," *Sci. Eng. Ethics*, 12 (2006), 53-74.
6. C. E. Harris, M. S. Pritchard and M. J. Rabins, 日本技術士会 (訳編), 「科学技術者の倫理 その考え方と事例」, 丸善, 1998年9月.
7. 大橋秀雄, 「これからの技術者」, オーム社, 2005年10月.