

記 録

文書番号	SCJ第24期 020820-24560700-077
委員会等名	日本学術会議機械工学委員会機械工学の将来展望分科会
標題	機械工学を切り拓く Inclusive Society
作成日	令和2年（2020年）8月20日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議第 24 期 機械工学委員会機械工学の将来展望分科会で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機械工学の将来展望分科会

委員長	大島 まり	(第三部会員)	東京大学大学院情報学環／生産技術研究所教授
副委員長	菱田 公一	(第三部会員)	明治大学研究・知財戦略機構 特任教授
幹 事	塩見淳一郎	(連携会員)	東京大学大学院工学研究科機械工学専攻教授
	岩城智香子	(連携会員)	エネルギーシステム技術開発センター原子炉システム・量子応用技術開発部主幹
	大竹 尚登	(連携会員)	東京工業大学工学院教授・副学長 (研究企画担当)
	岡崎 健	(連携会員)	東京工業大学科学技術創成研究院グローバル水素エネルギー研究ユニット特命教授
	岸本喜久雄	(連携会員)	東京工業大学名誉教授
	北村 隆行	(連携会員)	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻教授・工学研究科長
	佐々木直哉	(連携会員)	株式会社日立製作所研究開発グループ技師長
	松尾亜紀子	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部教授
	松本 健郎	(連携会員)	名古屋大学大学院工学研究科教授
	森下 信	(連携会員)	横浜国立大学理事(研究担当) 副学長・教授
	矢部 彰	(連携会員)	国立研究開発法人産業技術総合研究所特別顧問、 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センターユニット長

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	松室 寛治	参事官 (審第二担当)
	五十嵐 久留美	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
	柳原 情子	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職

要 旨

1 作成の背景

日本学術会議機械工学委員会では「日本の展望—学術からの提言 2010」の中で、2010年4月に「機械工学分野の展望」と題した提言を発表した[1]。それから10年がたち、その間、グローバル化が進み、我が国だけでなく全世界規模で社会が著しい速度で変化してきた。また、我が国は、2011年3月11日に起こった東日本大震災により、地震、津波、そして原発事故と三重の甚大な被害を経験した。その後、台風、水害と毎年、何らかの形で自然災害が起り、将来をなかなか見据えることの出来ない不確定の時代へととなっている。さらに、2020年初等から世界的に拡散しはじめた新型コロナウイルス感染症（COVID-19）によって、全世界にてより一層混沌さが増している。このような社会変化を背景に、機械工学の将来展望を考えるために、第24期に機械工学委員会のもと、機械工学の将来展望分科会が設置された。本記録は、機械工学の将来展望のまとめに向けて、機械工学の将来展望分科会の活動成果をとりまとめるものである。

2 現状および問題点

機械工学は、アナリシス（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）に重点を置いた縦糸としての学術コアと、シンセシス（設計工学、生産工学、制御工学など設計・生産を中心とした統合）に重点を置いた横糸としての学術コアとが織りなす学術体系を基盤に、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に関わる工学知を組み上げた。そして、今後も絶えず異分野の学問を吸収しながら、新しい研究領域や技術目標を創り出すことにより、科学技術基本計画における Society5.0 の推進および Sustainable development goals (SDGs) への貢献に向けての Inclusive Society の構築において、機械工学は大きな役割を果たすと考えられる。なお、Inclusive Society は、様々な側面を持っている。SDGs における「誰も排除しない社会」という文脈で用いられるが、本記録では、「誰も排除しない社会」との SDGs の観点だけではなく、グローバル規模であらゆるバックグラウンドを持った人々が参加することにより、新しいイノベーションを創出することのできる社会の実現を指す、広義かつ能動的な観点も含んでいる。このため、本記録ではインクルーシブ社会と日本語の標記を用いるのではなく、英文の Inclusive Society の標記を用いる。

産業構造だけでなく、学術分野においても四力学の枠組みを超え、様々な新しい分野との融合が進み、機械工学は新しい局面を迎えている。例えば、機械工学が基盤となっている産業と考えられている自動走行車やロボットに見られるように、AI を取り入れるなど、ものづくり技術において革新が求められている。近年の傾向として、情報技術に重点が置かれがちであるが、先端的なものづくりには、様々な物理・化学的が複合的に連成した現象の解明が不可欠である。そのため、力学の深い理解とともに複合的な現象の解明のための学術的な発展が必須である。しかし、我が国では、先端的な力学を基盤とした教育の重要性に対する認識不足、研究教育基盤の弱体化が起こっており、改善が必要と考えられる。

これらの課題について、将来を見据えて、機械工学の将来展望分科会にて、今期において議論および検討された。

3 記録の内容

本記録は、全四章から構成される。まず、第一章では、本記録をまとめた背景と現状について、まとめている。第二章においては、機械工学の「Society5.0」への貢献として、機械工学の将来展望委員会にて、学協会連携小委員会において機械工学関連の学会と連携しながら、今後の核となる研究テーマについて議論を重ねてきた。今後、注目されると考えられるテーマのなか、次の5つテーマを取り上げ、まとめる。

1. 理論応用力学研究拠点ネットワーク形成による研究推進と人材育成
2. 新ものづくり産業を創出する産学一体プラットフォームの形成
3. ピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくり
4. 脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システム創出
5. バイオハイブリッドが拓く新たな機械工学

第三章「では、Inclusive Societyに資する工学系学術基盤の必要性として、機械工学だけでなく、工学系全般の学術基盤について論じている。そして、それらを受けて、Inclusive Societyの実現に向けた課題についてまとめている。

そして、最後の第四章では、機械工学がリードする工学系学術基盤の課題解決として、検証および次期にて機械工学将来展望委員会として検討する事項をまとめている。

目 次

1	背景	1
2	機械工学の Society 5.0・Inclusive Society への貢献	2
(1)	理論応用力学研究拠点ネットワーク形成による研究推進と人材育成	4
(2)	新ものづくり産業を創出する産学一体プラットフォームの形成	5
(3)	ピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくり	7
(4)	脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システム創出	9
(5)	バイオハイブリッドが拓く新たな機械工学	11
3	インクルーシブな社会に資する工学系学術基盤の必要性	13
(1)	工学系学術基盤の弱体化の課題	13
(2)	Inclusive Society の実現に向けた課題	14
4	機械工学がリードする工学系学術基盤の課題解決	14
	<参考文献>	22
	<参考資料1> 審議経過	23
	<参考資料2> 公開シンポジウム	24
	機械工学の将来展望 —イノベーション創出にむけた次の一手	24

1 背景

日本学術会議機械工学委員会では「日本の展望—学術からの提言 2010」の中で、2010年4月に「機械工学分野の展望」と題した提言を公表している[1]。当該提言（以下、機械工学提言 2010）は、機械工学委員会および関連分科会の審議結果を取りまとめて公表したものである。

機械工学提言 2010 では、まず、機械工学とは、アナリシス（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）に重点を置いた縦糸としての学術コアと、シンセシス（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）に重点を置い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ことを説明している。

その上で、学術としての機械工学の課題として、上記のディシプリンを基盤としてあらゆる面で持続可能な環境と社会との調和を実現するべく、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ハーモナイゼーションの学術として機械工学を発展させる重要性について提言している。また、狭義の機械工学の範疇を超えた知識と獲得し、それを駆使して先端領域・融合領域の学術分野を発展させていく広義の機械工学の重要な役割についても強調している。すなわち、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とし、これによって、機械工学の基盤的学術がさらに発展していくとしている。

また、これらの学術的な課題に加えて、機械工学のミッションの共有と協働、研究資金制度の改革、イノベーション人材育成、知の統合へ向けた工学の再編、国民の工学的素養の涵養の必要性についても提言している。研究資金制度については、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を求めている。また、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を提案している。人材育成については、大学院博士前期課程を、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、抜本的な検討を促している。また、当時から問題であった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ことを促している。

以上を含む機械工学提言 2010 の内容の殆どは、10 年程経った現在でも妥当であり、引き続き継承するべきものである。本記録は、その後の日本の科学技術基本計画および、Sustainable Development Goals (SDGs) に代表される Inclusive Society への要求を踏まえている。なお、インクルーシブ社会とカタカナ表記ではなく、英語の Inclusive Society を用いているのは、グローバル規模であらゆるバックグラウンドを持った人々が参加するこ

とにより、新しいイノベーションを創出することのできる社会の実現、という広義かつ能動的な観点を含んでいるためである。そして、本記録は、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)によって起きている社会変革を見据え、機械工学がポストコロナ後のニューノーマルとしての Inclusive Society の実現にどのように貢献できるのか、その足がかりの一端としてまとめている。

本記録は、本章を含めて全四章から構成される。第一章での背景と現状をふまえ、第二章においては、機械工学の「Society5.0」への貢献として、学協会連携小委員会も含めて機械工学の将来展望委員会にて議論された今後の核となる研究テーマについてまとめている。第三章では、第二章にて取り上げた機械工学を基盤とした研究分野の達成、さらに長期的かつグローバルな視点たち機械工学だけでなく、Inclusive Society に資する工学系学術基盤の必要性として、工学系全般の学術基盤について論じている。そして、それらを受けて、Inclusive Society の実現に向けた課題についてまとめている。最後の第四章では、機械工学がリードする工学系学術基盤の課題解決として、機械工学の将来展望委員会にての議論をアクションプランとして、次期の委員会として実行性を含めて検証・検討する事項をまとめている。

2 機械工学の Society 5.0・Inclusive Society への貢献

ニュートン力学を原点におき、機械工学の学術としての発展予測を表した一例を図1に示す。

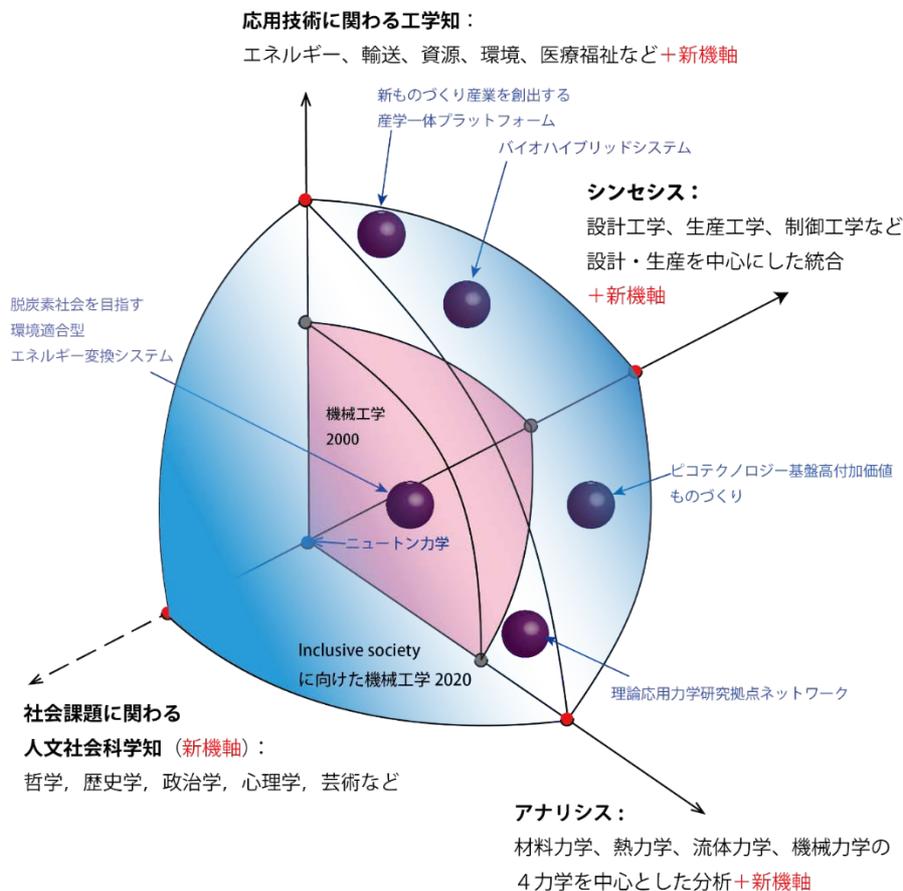


図1 ニュートン力学を基盤とした機械工学の学術にける発展予測

前述したように、機械工学提言 2010 では、まず、機械工学とは。アナリシス（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）に重点を置いた縦糸としての学術コアと、シンセシス（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）に重点を置い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ことを説明している。

本分科会では、機械工学を基盤とした学術分野および産業分野の現状について、学協会連携小委員会を立ち上げ、さらに機械工学に関わる約 23 の学協会にアンケート調査を行った。そのうち、11 学協会からアンケート調査に協力をいただき、その結果をもとに 5 研究領域を重点分野として本記録にて以下に具体的に示している。取り上げている 5 研究領域は、1/8 球をなす 2000 年以前の機械工学体系のやや外側に位置し、機械工学の学術体系を部分的に拡大している。

1. 理論応用力学研究拠点ネットワーク形成による研究推進と人材育成
2. 新ものづくり産業を創出する産学一体プラットフォームの形成
3. ピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくり
4. 脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システム創出
5. バイオハイブリッドが拓く新たな機械工学

これらを参照することで、今後の機械工学の潮流を整理すれば、図 1 の外枠のとおり、アナリシスに量子力学や相対論を、シンセシスに AI やビッグデータ分析を、工学知にゲノミクスや IoT をより積極的に用いることで、機械工学の体系は大きく拡大し、社会と産業への貢献も拡大していくと思われる。アナリシスとシンセシスの発展は、機械工学の進化の要諦である。一方、Inclusive society の実現を考慮すれば、工学知に加えて社会的課題に関わる人文社会科学の知を取り入れた機械工学の体系化を目指すこともまた、将来求められる方向となろう。実際に、日本機械学会では法工学部門が活動しており、その重要性は年々高まっている。今、より技術の寄り添った形で人文社会科学の叡智を活用するための組織作り、研究推進を活性化していくのが望ましいと思われる。

アナリシス、シンセシス、工学知と人文社会科学知を融合した機械工学の体系は、変化のペースの早い中で未来と向き合うためにも有効である。ここ数年、CRDS を始めとする政府機関[2]だけでなく、民間企業においても未来社会の分析と提示に努力が払われている[3, 4]なかで、SDGs を考慮しつつ未来社会像を描き、その到達目標から駆動する形で、未来社会の中に機械工学の役割を位置づけていく思考が求められるであろう。人々のありたいと思う未来社会に機械工学がどう貢献するのか、そして「アナリシス、シンセシス、工学知のなかで何が足りないのか」を詳らかにしていくアクションは、機械工学を豊かにし、研究そのものを魅力的にするに違いない。それは、研究の向かう先が、人々の求める未来社会だからである。

研究および技術の進歩を支えるためのグローバルな博士人材の育成、教育も大事な観点である。特に、多様な分野にて基盤技術として浸透している機械工学の教育は英国をはじめ

めとして、教育体系の見直しの議論がなされている。一方、多様かつ複雑化している社会を反映して研究および技術倫理を再考し、実践していくことも Inclusive Society の実現に向けて必要不可欠である。

様々な分野のコア技術を組み合わせた社会還元型のモノづくりの方法論は、新しい価値やサービスが次々と創出される「超スマート社会」を世界に先駆けて実現する「Society 5.0」そして Inclusive Society の推進に貢献することが見込まれる。第 24 期機械工学委員会では「機械工学の将来展望分科会」を設置し、機械工学関連の学会と協同して、その核となり得る研究テーマについて議論を重ねてきた。研究例を以下に挙げる。

(1) 理論応用力学研究拠点ネットワーク形成による研究推進と人材育成

理論応用力学は、材料力学、流体力学、熱力学、機械力学など広範な学術分野の基盤であり、社会生活に必要な多くの人工物や製品・機器の開発において、現象理解の基礎として、またシミュレーション等によりどころである物理・数学モデルの構築の基盤として必須な学術大系である。一方で、Society5.0 の構築や SDGs に代表される社会的課題の解決を目指すなか、ものづくり技術においても革新が求められている。中核技術としてデジタルツイン技術やバーチャルリアリティ技術の高度化が求められている。そのため情報技術に視点が置かれがちであるが、先端的なものづくりにおいて、様々な物理・化学的要素が連成した複合的な現象の解明が不可欠となっている。そのため、メカトロニクス分野に見られるような電気電子工学との融合など、異分野との連携・融合をさらに促進していくとともに、力学の深い理解とともに複合的な現象の解明のための学術の発展が求められている。しかしながら、我が国においては、力学的知識の利用面が強調されて学術の深化に向けた創造的研究が停滞し、また、先端的力学に関する教育の重要性に対する認識不足により、理論応用力学の研究教育基盤、ひいては工業の発展の基盤が喪失しつつあると危惧される状況にある。

また、理論応用力学は、ものづくり技術において必要なばかりでなく、自然現象や生命現象のより深い理解のためにも有用な学術であり、化学、生物学、医学などとの融合学術分野の開拓も必要となっている。このような学際・横断型の手法と知識の創出を可能とし、未来社会の発展に貢献するためには、機械工学分野に留まらず、その枠を超えて、力学を基盤とする各分野間の継続的な学術交流と将来を担う人材育成が求められる。

以上の背景と我が国における理論応用力学分野の状況を考えると、理論応用力学分野の研究教育を持続的に発展させるためのプラットフォームとなる全国的組織の構築が急がれる。具体的には、理論応用力学に関する優れた研究を実施している 5 大学程度を選定し、各拠点は国内外の関連機関と連携した理論応用力学研究を推進するための環境整備を行い、著名な研究者や若手研究者等を招聘して特色のある研究を推進することで新知識の開拓・体系化を目指すとともに、高水準の理論応用力学教育を行い、高度科学技術人材の育成に貢献する。理論応用力学は広範囲の研究領域を横断する学術分野であるため、その中核拠点を担う大学や研究機関には理工学分野を幅広くカバーする大学で、かつ高い研究能力を有する研究者を擁していることが必要である。また、設置される拠点を孤立させ

ることなく、学協会の連携によってコミュニティ全体のサポートを得た上で、大学等の研究機関が共同して運営に協力することが不可欠である。そのために、併せて、関連学協会の連携を強化し、理論応用力学に関するコンソーシアムを立ち上げて、学協会を越えた全国規模の研究者ネットワークを形成し、拠点大学と連携したネットワーク型の理論応用力学研究プラットフォームを構築することが必要である。理論応用力学研究拠点ネットワークとして図2にまとめている。

海外の状況としては、欧州では欧州力学会が中心となって加盟国が連携して理論応用力学振興を図っており、また、中国は、中国力学が2万人以上の会員を有する組織として海外に対しても大きな存在感を示している。本計画は、恒常的な研究拠点ネットワークを創設することにより、我が国における理論応用力学分野の発展を促すものであり、海外の状況を踏まえると、早急な実現が望まれる。

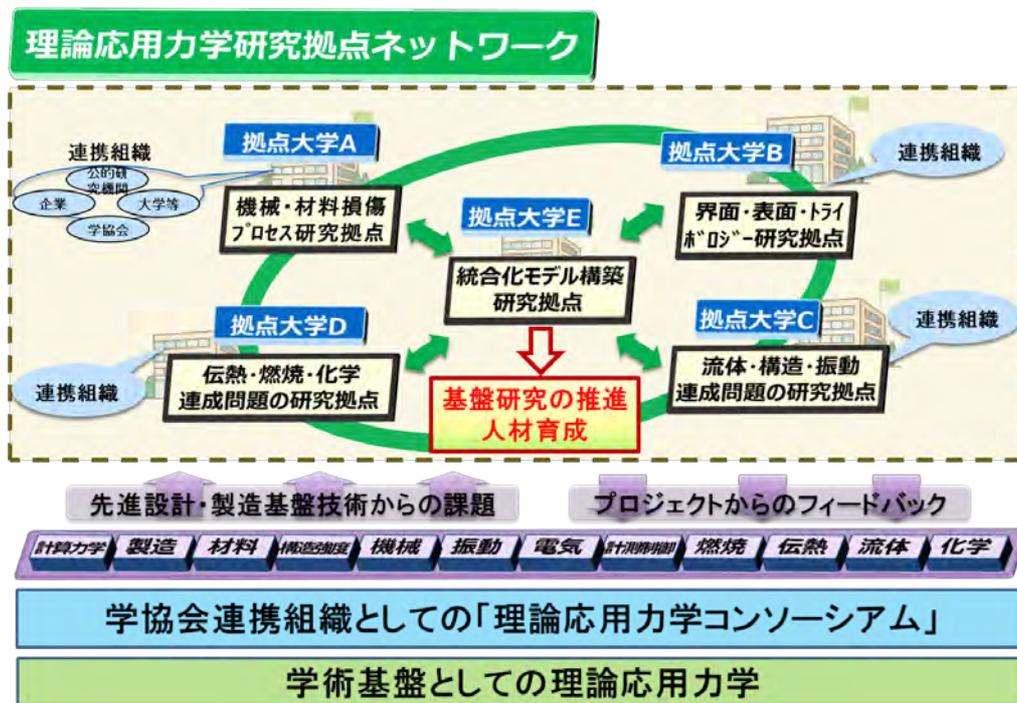


図2 理論応用力学研究拠点ネットワーク

(2) 新ものづくり産業を創出する産学一体プラットフォームの形成

機械工学が社会ニーズに対応した新しいものづくりの創出を可能とする母体であり続けるには、計測・予測・制御の3つの方法論を一体化した強力なオペレーションシステム(OS)が必要である。大学で実施される基礎研究と、産業界で推進される実装型のR&Dは、相互に不足を補完し合い、我が国の産業競争力を保持してきた。21世紀に入りその相補性の弱体化が嘆かれている。この要因の1つとして、機械工学が高度で複雑な対象に深化したゆえ、計測、予測、制御の全体を跨がって活躍する総合力をもった研究者・技術者が少なくなることが挙げられる。細分化された小領域での僅かな世界一に注力し、それによる短期的な評価を得ることに傾斜していないか、考える必要がある。工学研究の超分業化

は、学問と産業を次第に乖離させ、技術立国・日本の伝統的な強みと言われてきたチームワーク型の総合力を地位低下させている。

本計画は、機械工学分野の強みであるべき産学連携を、新しい世代で必要となるアイデアに乗せて企画・主導する実行部隊の設置を目指すものである。高度情報通信技術を導入した計測・予測・制御の3体同化システムをコア構想として、半世紀にわたり続いた機械工学のOS（基本知）をバージョンアップする。素案は日本機械学会イノベーションセンター附属研究分科会の企画に端を発している。国内20大学と20企業の専門家から構成される分科会（委員総数は55名）からの合同提案であり、機械工学のOSバージョンアップは、その上に乗る主幹4力学（流体力学、熱力学、材料力学、機械力学）の大規模刷新を伴わせるものとなる。長年にわたり未解決であった難題の解消と、今日まで認知されていない挑戦的な学術領域の開拓に着手する。

本計画の産学一体プラットフォームの行動計画は、今世紀後半までを視野に入れた3つの基軸で構成される。まず1つめは、計測・予測・制御の3者の「データ同化」の開発である。熱・流体工学分野における計算機予測と高度計測技術の相互が出力する3次元非定常の4Dデータを大容量通信技術で融合し、時空間分布量のリアルタイム制御を実現する。工場のデジタルツイン構想への貢献のみならず、エネルギー管理、個別別生産管理、ならびに防災分野で切望される技術手段である。2つめは計測技術の高度化に物理法則を結合した「理論融合計測」の開発である。各種センサーの出力に、対象とする現象の支配方程式を結合することで、センサーの本来仕様から飛躍した次元の物理情報を取得することを可能とする概念で、理工学における理論研究の再強化と再開拓が巻き起る。機械工学の発展を側部から支える電子・化学・量子の理論体系と接続から、新しい学術基盤の敷設が始まる。3つめは大容量高速通信が可能とする機械工学基盤4力学に特化した「機械学習」の体系化である。最適解の探査と新現象の発見は、データ容量の指数的爆発により専門家の解釈では追いつかない時代に入り、その有効活用が必須の段階に入ったためである。しかし機械工学を修得していない情報系の技術者が運用しても、機械学習からの発見やデータ不在領域での憶測には至らない。とくにエネルギー管理や人命を扱う医療技術の新領域の開拓では、計算機内に自動生成されたブラックボックスに設計責任を託すことはできず、既に多くの失敗例が山積する。国内の全事例を集約し、工学設計の機能強化を実現するような機械学習の再編に着手する。

上記の3つを基軸とすることで、R&Dの現場に新しい道具が提供され、10年先に新ものづくり産業が連鎖的に派生するしかけが敷設される。そのために図3に示されているように、本プラットフォームでは「データ同化」、「理論融合計測」、「機械学習」について最初の5年間で、それぞれの標準事例の生産とその集約を実施する。

これにより次世代の持続発展可能な機械工学の新しい共通基盤を形成する。試験実施機関は先に記した20大学と20企業であり、特に今日の未解決・未達成課題への適用によって成功事例の蓄積を目指す。対象とする未解決課題は既に日本機械学会イノベーション分科会で英知の集約が実施され、次の7つのテーマが定義されている。①乱流のデータ駆動型の解釈と制御、②混相流の計測と予測の相補型ツールの開発、③反応流のクロススケー

ル型の解析、④非ニュートン流の化学と流体工学の接続、⑤分子流の計算・実験設備の産学共有化、⑥高速流の制御を実現するデータ同化、⑦生体流の複雑な固体差への対応を可能とする物理融合計測。以上を要するに、本計画では、社会的重点課題の解決スキームを創出する従来になかった3つの「道具づくり」を推進する。

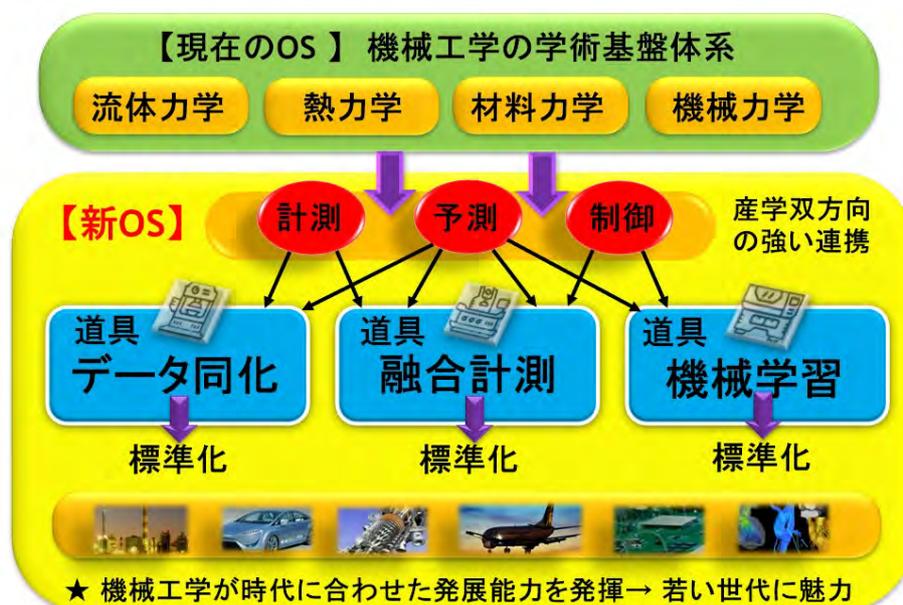


図3 新ものづくり産業を創出する産学一体プラットフォーム

(3) ピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくり

20世紀後半の我が国の繁栄を支えてきた大量生産・大量消費対応型の“ものづくり”は終焉を向かえ、今後は様々な価値観に対応する“ものづくり”に変革していかなければならない。そのためには、海外の技術では到達できない、より高い精度と付加価値を持った製品開発を強力に推進していかなければならない。従来から、加工結果の評価基準は形状精度と表面粗さの二つであったが、このような加工精度の追求は、今や原子オーダーに達しており、限界に達しているのが現状である。元来「ナノテクノロジー」という概念と言葉は、1974年に開催された生産技術国際会議において谷口が世界に先駆けて提唱した日本発の用語である。そして加工精度は今後急速に向上し、2000年には超精密加工限界が1ナノメートルを切るだろうと予想した。事実、これは実用化され、さらに現在では1ナノメートル以下の加工精度も要求され始めている。我々はこの領域を達成するための技術を特に「ピコテクノロジー」と呼ぶことにし、その技術を基盤にした加工技術を「ピコ精度加工」と呼ぶ。

一方、このような究極の加工精度を得るための研究開発と並行して、加工した表面上に微細構造体を創成したり、その表面近傍の結晶構造を制御したりすることにより、撥水・親水、無反射、極低摩擦等の新たな機能を発現させるための工夫を加味した“ものづくり”も要求されるようになってきた。すなわち単なる形状創成から、機能創成を加味した新しいものづくり技術への融合、発展である。そこでこのような“形状創成+機能創成”

を目指した新しいものづくりを「機能創成加工」と呼ぶことにした。以上、これら二つの新しい加工技術、すなわちピコ精度加工技術と機能創成加工技術を駆使し、製品の付加価値を高度に高めることが、将来にわたる日本のものづくりの優位性を維持するために最重要であると考えられる。

機械工学委員会生産科学分科会では、このような高付加価値製造技術の創出に関して、学術的知見をグローバルな視点で深く総合するとともに、産業界からの要望も考慮して議論してきた。そのためには分子原子レベルでの加工現象の科学的解明と、ピコ精度加工を実現するための新規加工プロセスの構築が必要不可欠である。すなわちピコ精度加工を支援し、デバイスやシステムにまで完成させるためのピコ・ナノ・マイクロ・マクロにわたる、いわゆるマルチスケールの機械システム設計論、さらには工具設計技術、ピコレベルでのその場計測・評価技術、加工シミュレータと加工システムの連動技術、微小構造体を精緻に組み立てるための実装技術、安全安心を保証するための強度信頼性評価技術等を駆使した統合技術として確立する必要がある。さらにはバイオミメティック等の知見を取り入れた機能表面設計論も必要不可欠である。このように、これまで培ってきた技術を総合したピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくりのための新しい学術領域の創出が始まっている。

このようにピコレベルでの加工技術、設計手法、材料制御技術、計測評価技術を統合的に捕らえるところに新規性と大きな学術的広がりが見込まれるが、これを社会実装して製品化にまで持って行くためには大きなハードルがある。これまで機械工学委員会生産科学分科会では、高付加価値製造技術の創出など、学術的知見をグローバルな視点で深く総合するとともに、産業界からの要望も考慮して議論してきた。その結果、欧米に先駆けてピコテクノロジー基盤の基礎研究、並びに社会実装を推進させ将来にわたる日本のものづくりの優位性を確立し、普及させるためには、“ピコテクノロジー基盤高付加価値ものづくりエコシステム拠点”の構築が必要不可欠であるという結論に達した（図4）。

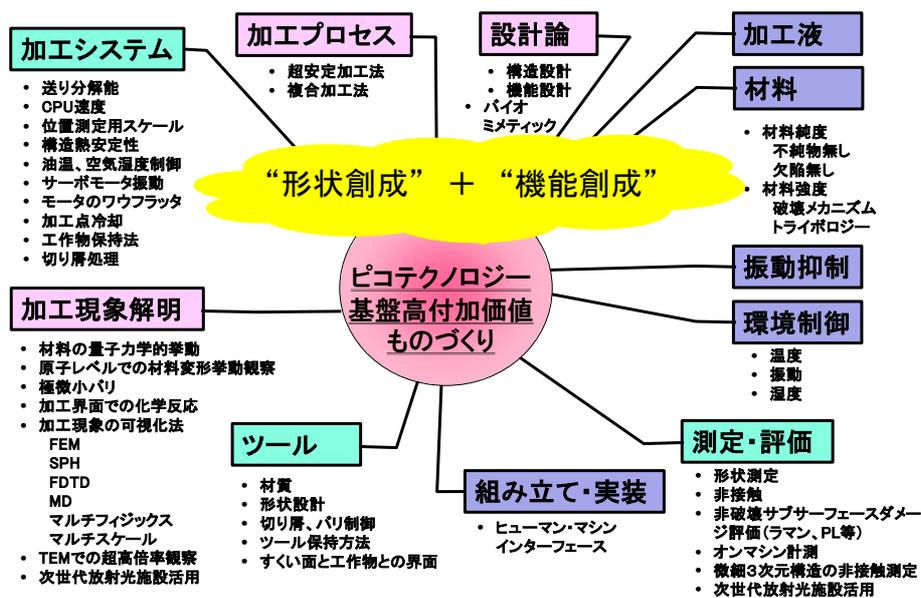


図4 機械工学と機械科学の融合による新しいものづくり

すなわち地域の企業、大学、公設試、行政だけではなく、金融機関も交えた共創により、次世代をリードする新しいピコ精度加工技術を創出する研究ネットワーク構築と、高精度・高機能部品のピコ精度試作加工が可能なピコファウンドリを設置し、それらを持続的に一体運営管理するためのエコシステム拠点を作ることが必要不可欠である。これはピコ精度加工に必要な作業環境を備えた施設で、ピコ精度加工装置やピコ精度分析評価装置等を設備する。さらには地域の大学、公設試、企業がこれまで設備してきた装置とも連携するとともに、蓄積してきたナノ精度加工関連の技術シーズやノウハウを集積させる。これらは新しいピコ精度加工技術を研究開発する場であるとともに、その技術の実践道場でもある。このエコシステム拠点は、研究成果の社会実装における種々の困難、いわゆる「魔の川」、「死の谷」、「ダーウィンの海」を効率的に飛び越えるための大きな役割を担うであろう。

これまでの日本の“ものづくり”は、技術と技能の融合のもとで高い水準を維持してきた。しかし近年、超精密加工製品といえども国際競争力は大幅に低下してきている。このような状況の中、まだまだ日本には最終製品の開発、生産を行っている企業が多く存在する。このような企業がピコファウンドリを活用することで、試作した部品をキーパーツとする製品を速やかに市場に出すことが可能となる。特に、グローバルな視点から、今後ピコテクノロジーに基づく製品やサービスの大きな担い手となるアジアやアフリカ諸国などのニーズを反映しながら、研究や技術開発を展開していくことも考慮して行く必要がある。これまでの強みを活かしながら、付加価値の高い商品開発が可能となり、部品レベル、システムレベルの両方での市場シェア拡大が期待できる。そして光、電子、新素材、自動車、バイオ・医用、金型・工具・機械分野などの、様々な生産分野で多くの新しい成果を上げることが予想され、国際競争力の維持と、国民生活の質向上が期待される。

(4) 脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システム創出

2015年11月から12月に開催されたCOP21において、産業化以前より地球平均気温上昇を2℃に押さえる長期目標が全ての国々が参加する世界共通の目標として採択された。これにより、人類社会の持続的発展を維持しながら地球温暖化問題に対処する施策が緊急性を持つに至った。総人口が減少し高齢化が進む我が国において、国際的地位と生活の質を維持増進するため、産業経済に及ぼす打撃を最小化し低炭素社会を目指す新しい概念と科学技術が求められる。

地球環境問題、エネルギー問題への国民の関心は極めて高い。特に東日本大震災以降の原発停止による電力供給のリバランス、経済・産業への影響が、エネルギー問題への関心を一層高めている。再生可能エネルギーの拡大や新エネルギー技術研究は今後も積極的に進められるべきであるが、その一方で、現代社会は未だ全エネルギーの80%が燃焼に支えられているという現実を注視する必要がある。燃焼は動力と熱を同時に取り出せる安定なエネルギー変換技術であり、エネルギー変換効率向上が温室効果ガス削減に大きくかつ敏感に影響する。すなわち燃焼のエネルギー利用効率を格段に高め温暖化ガス排出を最小化することが第一であるが、さらに脱炭素社会を目指すには排出される温室効果ガスの回

収と利用が求められる。これらの一連のプロセスは燃焼現象に代表されるような反応を伴う流動現象のもとに進展するものであることを踏まえ、以下の二つの目標を掲げることとする。すなわち 1) 革新的反応性流体科学技術創成、2) 燃焼エネルギー利用効率の格段の向上、を掲げる。

革新的反応性流体科学技術の創成には、化学反応と熱流体が連成する極めて複雑なマルチスケール・マルチフィジックス現象である燃焼の詳細な現象解明やモデル化が課題として挙げられる。特に、実用燃焼器の作動状況を考慮すると、時間的に負荷が変動する非定常燃焼挙動について基礎的な機構解明およびモデル化が求められ、AI 技術を活用した燃焼現象の予測や制御も重要な研究課題である。また、温室効果ガスの効率的回収を実現するための酸素燃焼技術や、高純度で回収された温室効果ガスの再生可能エネルギーによる燃料化も重要な課題である。例えば、欧州で実施されている e-fuel 研究は、再生可能エネルギー由来の電気を用いて、大気中や工場の排出ガスから CO₂ を濃縮/分離し、逆水性シフト反応で CO に、水の電気分解によって H₂ を生成し、両者から FT 法で hidrocarbon 燃料を合成するというものであり、これらの合成燃料を自動車用燃料とすることで WtW(Well to Wheel)の CO₂ をゼロにすることを目標としている。また、燃焼エネルギー利用技術の革新は、実際の燃焼機器における熱、流体、反応化学の融合現象を取り扱うもので、高度な学術的要素を有しているため、産学官の強い連携が求められる。2015 年から 5 年間にわたり内閣府主導で実施された戦略的イノベーション創造プロジェクトでは、「革新的燃焼技術」と「エネルギーキャリア」という燃焼分野の関連する二つのプロジェクトが遂行された。前者では、自動車用エンジンの熱効率 50%という目標が達成され、後者では、水素およびアンモニアを燃料とする燃焼技術を基盤とした研究により、世界に先駆けてアンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉の開発に成功している。「革新的燃焼技術」プロジェクトの終了後には、産の連合体である AICE と学の連合体で構成される内燃機関産学官連携コンソーシアムが結成され、引き続き内燃機関の性能向上を目指した研究開発が進められている。図 5 に脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システムに示す。

エネルギー変換技術の基盤となる燃焼は、社会エネルギーシステムの重要な研究領域のひとつであるので、持続的な産学官連携が強く望まれる。ゼロ CO₂ とエネルギーセキュリティの観点から、燃焼に関わる再生可能エネルギーへの研究開発など革新的なエネルギー変換システム技術構築を国家レベルで加速させる必要があると思われる。

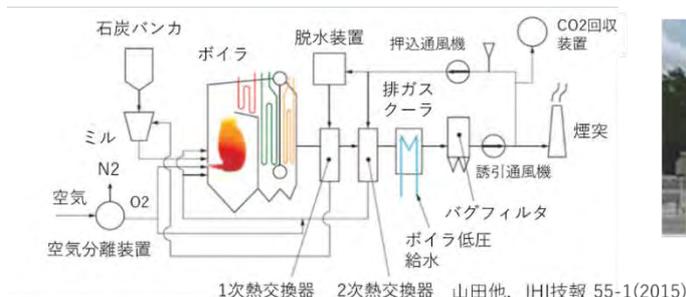
革新的反応性流体科学技術創成

数値解析の高度化および計算負荷削減
燃料多様化と詳細化学反応機構の構築
非定常燃焼ダイナミクスの解明とモデル化

燃焼エネルギー利用効率向上

燃焼機器のさらなる高効率化
エネルギー変換技術の進化
AI技術を活用した燃焼現象の予測・制御

燃焼機器の有する高い出力密度と負荷変動追従性を活用した
環境適応型エネルギー変換システムの創出



CO₂回収酸素燃焼プロジェクト



<https://www.jst.go.jp/seika/bt111-112.html>

アンモニア専焼発電プロジェクト

図5 脱炭素社会を目指す環境適合型エネルギー変換システム

(5) バイオハイブリッドが拓く新たな機械工学

生体もつユニークな機能が組み込まれた工業製品である「バイオハイブリッドシステム」を生み出す新たな研究分野や市場を創出することが、本研究拠点のミッションである。

人類は、社会のニーズに合わせてさまざまなシステムや技術を開発してきた。ヒューマノイドやスマートフォン、自動運転などは良い例である。その一方で、生物に見られるような特異的な機能を工業的に利用する段階には至っていない。たとえば、分子レベルで認識可能な超高感度、高選択性を持つイヌの鼻のようなセンサー、自己増殖や自己修復を繰り返す細胞のようなリアクタ、エネルギー効率の高い動きや情報処理を行なう筋肉や脳などの機能の実現には至っていない。それらの実現が現状の技術で難しいのであれば、自然界に存在している生物のパーツそのものを、人工物と融合し、実社会に応用することを目指すアプローチを展開すべきである。これは、本拠点が実現を目指すバイオハイブリッドシステムである。

バイオハイブリッド (BH) システムの要素技術は以下の四つに分かれる。(1) BH センサー、(2) BH リアクタ (3) BH アクチュエータ、(4) BH プロセッサ。センサーは、タンパク質や細胞を使い、一分子レベルで高感度に物質を検出することができるため、呼吸などからの体調診断や爆発物からの匂いによる高感度検出を行うことができる。リアクタは生体反応を模倣することができるため、創薬や医療に応用可能なデバイスを提供する。アクチュエータは、高効率なロボットアクチュエータの他、家畜に頼らず環境負荷の少ない培養肉の生産研究へ貢献する。プロセッサは、脳型処理を実現する超高効率・低消費電力な論理演算素子として機能する。本拠点では、これらのデバイス要素技術を組み合

わせて、統合したシステム（BH ロボットやBH システム）を創出するための学問体系を構築する（図6）。

Society5.0 が目指すサイバー空間とフィジカル空間を連携するバイオ技術としてハード、ソフトに加えてウェアブルウェアを使いこなす技術の開発が急務である。そのためにも上記学問分野の確立は重要であり、実現のためには異分野融合のための教育や研究体制の構築が必須である。教育においては、単に生物学を学ぶのではなく、「工学者がとらえる生物」を教える教育体系が必須である。たとえば、DNA は単に生体情報をつなぐ設計図というとらえ方でなく、DNA 折り紙やDNA ストレージのようにナノ構造の骨組みや記憶媒体として機能するナノ材料として働くこと、タンパク質は化学エネルギーを機械エネルギーに高効率に変換して動くアクチュエータやリアクタの素材であること、細胞は環境に応じて自在に自己組織化と分化を繰り返す超機能性メタマテリアルであることなど、モノ作りの要素としての生体素材を学ぶ体系の構築が必須である。また、研究体制においては、工学に加えて、理学や医学、農学、情報科学、人文社会学などの異分野の知見を融合する研究拠点が必須となる。これらの有能な人材が一つの拠点に集結したバイオハイブリッド研究拠点を設置し、教育から基礎研究、社会連携・実装までを一挙に行うシステムを構築する。

バイオハイブリッドという新たな機軸によって、異分野が集結し、世界に先駆けた成果を生むことによって、課題先進国である我が国の抱える少子高齢化や健康寿命の増進にむけた解決策を世界に提示することができる。また、SDGs など遅れをとっている我が国の環境対策においても、環境負荷を低減する自然や生物に学ぶ、高効率で廃棄物の少ない革新的なモノ作りを推進する基盤を構築することができる。

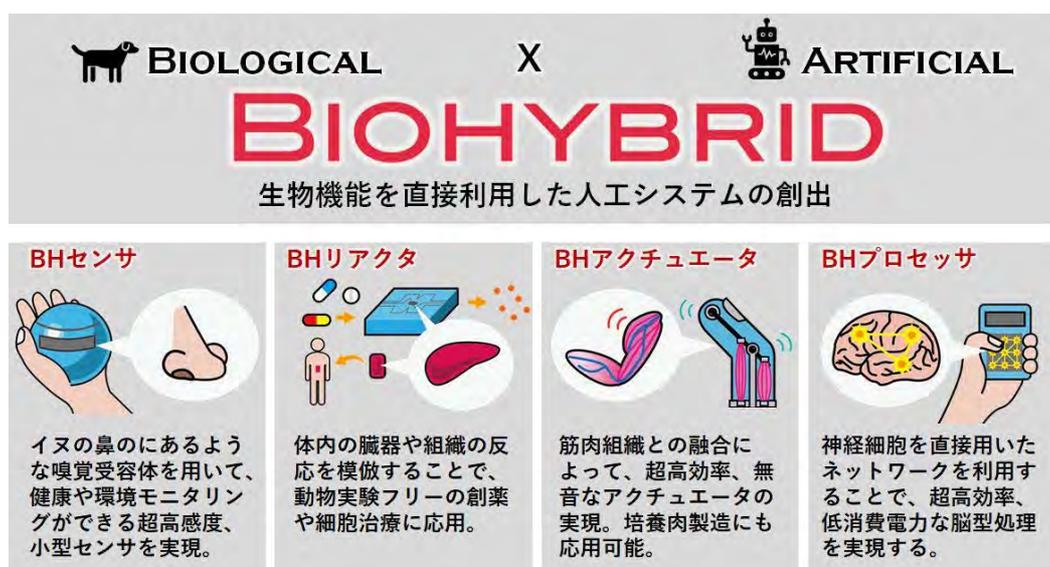


図6 バイオハイブリッドシステム

以上の5つの研究テーマ以外に貢献できる課題として、幾つか挙げる事ができる。例えば、制御やAI等のデジタル予測の枠組みでは難しい特性を持つ問題に対しては、新し

いハードウェアおよびソフトウェアシステムの考え方を導入する必要があると考えられる。例えば、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）を受けて、人との接触にかかわる現象の適正化を考慮する必要性が生じている。また、寿命や劣化の問題を解消することで、人や環境に優しく、永久に使用できる製品概念の設計にむすびつくことができ、少子高齢化、食品ロス等の問題解決に貢献でき、医療、福祉、ヘルスケア等の繊細で人に寄り添う、高信頼な製品、システム、サービスの向上につながると考えられる。

一方、超複雑、超過酷、極限環境、および非線形、不確定性な現象を利用するインフラ製品や大規模システムやサービスの開発も重要である。また、今後、5G や 6G 等の高速通信や量子コンピュータが進化すると考えられることから、従来の複雑現象理解と予測のシミュレーション技術がそのままリアルに製品やシステム全体制御に活用される、シミュレーションベース制御（CPS）という考え方も、今後、必要である。

そして、SDGs 対応の多様な曖昧合意を伴う課題の解決とともに、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）後のニューノーマルな模索する上で、人文社会科学と機械工学の連携にデジタル技術が融合していくことも、必要不可欠な要素である。

3 インクルーシブな社会に資する工学系学術基盤の必要性

(1) 工学系学術基盤の弱体化の課題

「Society 5.0」に学術が発展する一方で、第5期科学技術基本計画当初から課題として挙げられてきた科学技術における基盤的な力の弱体化に関しては、「第6期科学技術基本計画に向けた重要課題」において、研究基盤の共用、整備・更新や、技術職員の育成・確保が進んでいないことが指摘されている。また、日本の学術界全体の問題である、学術論文数が伸び悩み、博士人材が減少し、研究競争力が低下していることについては、その深刻さが増すばかりである。それらの要因としては、産業界における博士号の価値の低さ、キャリアパスの不透明性、学生の安定志向（将来不安）、経済発展の鈍化、「選択と集中」の政策の反動など様々挙げられている。例えば、選択と集中の政策については、それによって研究リソースが特定の分野や大学に集中したことで、全体としての論文数が伸び悩む要因となったことに加えて、近視的でトピカルな研究や過度に利用志向な研究に偏る傾向を生み、さらには若手研究者が流動しながら成長していく人材育成を鈍化させるなど、研究基盤の弱体化につながっているという見方がある。そもそも、日本の学術界の強みは「研究の裾野の広さ」であったはずで、学術界全体のレベルの高さが他国の追従型でない独自の科学技術を生み出し、日本全国に分布した研究者が地方産業の発展に関わってきた。これが失われつつあることは大きな損失であり、日本のアカデミックバリューを下げているとも言える。機械工学における力学基盤の弱体化はその最たる例であり、力学的知識の利用面が強調されて学術の深化に向けた創造的研究が停滞し、また、先端的力学に関する教育の重要性に対する認識不足により、力学の研究教育基盤、ひいては工業の発展の基盤が喪失しつつあると危惧される状況にある。健全な競争原理は必要であるが、多様

化を利用する裾野の広い学术界を取り戻す努力が必要であり、そのためには、研究資金の多様化の模索も欠かせない。

(2) Inclusive Society の実現に向けた課題

2015年に国連総会で採択された持続可能な開発目標 Sustainable Development Goals (SDGs) に代表されるように、インクルーシブな社会や成長の実現への要請が大きくなっている。各国において格差を生む要因の一つとなっているのが、所得の中間層を構成していた製造業雇用者数が下落傾向となっていることであり、生産性を高める政策や人材育成を強化する政策が広く議論されている。日本では、都市と地方の二極の問題としてもよく議論され、ものづくりの拠点を地方に移して地方の産業を活性化するようなアイデアは昔からあるが、情報社会が発達していく中でも逆に二極は進んでいる。生産性については、産学共同で新規産業の創出が欠かせない一方で、持続可能な発展のためには「最先端の技術開発」と「従来技術の継承」の両立が欠かせない。特に後者については機械工学が基盤となる製造業では特に一朝一夕では成らず、地道な継続が必要となり、長期的な視点にたち安定して技術の継承を実現できる研究基盤が必要である。人材育成においては、高度な専門性と複雑なニーズを両立できる「十種競技的なオールラウンダー工学人材」の育成が必要となる。これらは機械工学が長年折り合いを付けながらも向き合ってきた課題ではあるが、近年の Inclusive Society へのニーズの高まりを追い風として、より革新的なものづくり基盤および高度人材育成を実践する機運となっている。

4 機械工学がリードする工学系学術基盤の課題解決

本記録では、以上のインクルーシブな社会に資する工学系学術基盤に関する課題に対して、機械工学がモデルケースとなって解決するシナリオを提案するものである(図7)。その根幹は、機械工学の特徴である産学連携、国際連携、学際連携における強みを活かして「選択と集中」のもとに進めてきたローカルな最適化からグローバルな最適化へ移行したインクルーシブな工学系学術基盤を構築することにある。

課題解決シナリオ
 ～工学全体の問題を機械工学がモデルケースとなって解決する～

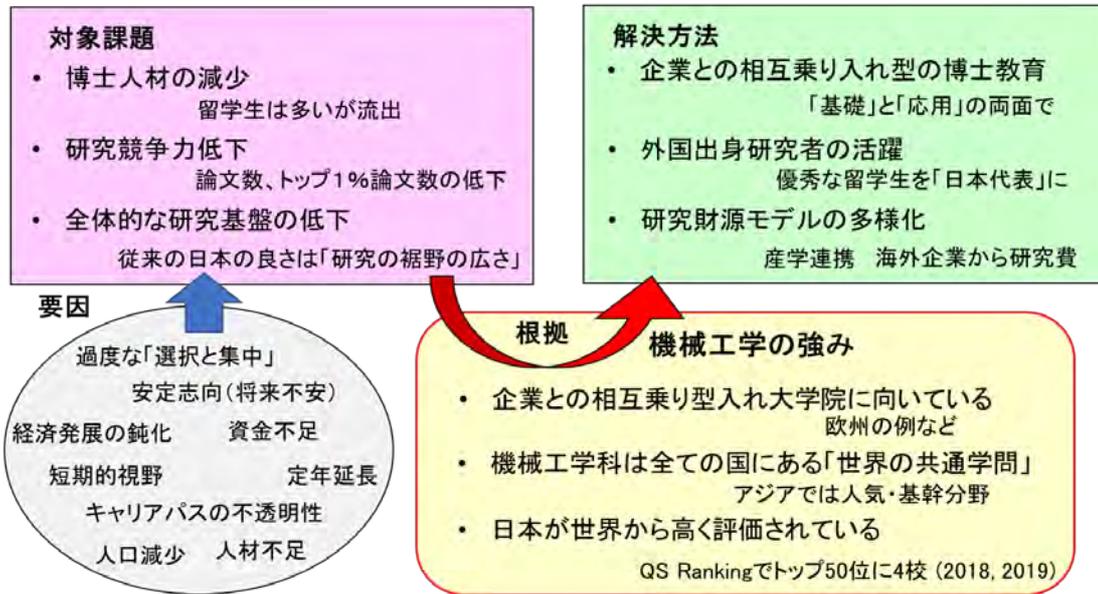


図7 「機械工学の強み」を活かして工学系全体の課題を解決するシナリオ

その舞台としては、産学が相互に乗り入れながら博士人材を教育する組織が考えられる。例えば2節に記した新しいものづくりのプラットフォームやファウンドリなどを土台として産学相互乗り入れ型のプログラムや制度を構築し、工学技術基盤と博士人材を育てる。産学連携型のプログラムとしては、文部科学省が平成25年度に開始した「革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM)」をもとに科学技術振興機構が運用しているセンターオブイノベーション (COI) プログラムなどがあり、そのようなビジョン主導型のチャレンジング・ハイリスクな研究開発も重要であるが、よりインクルーシブな観点から裾野を下支えする基盤的の仕組みが最重要である。また、日本企業におけるは博士号に対する意識改革とともに日本企業における積極的な博士人材の登用の促進も産官学、および地域も含めて取り組む必要がある。

機械工学には、産学相互乗り入れ型の教育・研究活動を行うのに適した学問であるメリットがある。まず、アナリシスとシンセシスの学術コアが織りなすディシプリンに、多彩な応用技術が関わる工学知を組み上げた機械工学特有の立体的な知の体系は、産業での様々なニーズに応えるのに適している。また、近年、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してきたことで、異なる学術分野の間や基礎科学と応用の橋渡しができるハーモナイゼーション学術として成長しており、トピックはもとより、ベクトル (バックキャスト、フロントキャストなど)、スピード、規模の異なる産業界での様々な課題に取り組むことができる。無論、ここでは、企業のための近視野的な製品開発や狭義のプロフェッショナル育成ではなく、産学における学術の発展を通じた研究開発や社会還元を念頭においている。なお、インクルーシブな体制の利点は、Pier to Pier になりがちな産学連携を、各連携で得られた知見や技術を知の体系にフィードし、それによ

って進化するハーモナイゼーション学術をまた個々にフィードバックすることで、相乗効果により全体での成長を実現していくことにある。これらの一部は、これまで日本機械学会をはじめとする関連学協会が担ってきたが、産学がさらに距離を縮めてオーバーラップし、有機的に活動を共にしながら工学知を高めていくには、プラットフォームやファウンダリなどの実態的な基盤が欠かせない。無論、実際の組織運営においては様々な調整が必要となるが、これまでの学協会活動で培った信頼関係や共有している我が国の工学基盤の弱体化に対する危機感を基に、協調していくことが期待される。

機械工学には、産学相互乗り入れ型の教育・研究活動を行うのに適した学問であるメリットがある。まず、アナリシスとシンセシスの学術コアが織りなすディシプリンに、多彩な応用技術に関わる工学知を組み上げた機械工学特有の立体的な知の体系は、産業での様々なニーズに応えるのに適している。また、近年、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してきたことで、異なる学術分野の間や基礎科学と応用の橋渡しができるハーモナイゼーション学術として成長しており、トピックはもとより、ベクトル（バックキャスト、フロントキャストなど）、スピード、規模の異なる産業界での様々な課題に取り組むことができる。なお、インクルーシブな体制の利点は、Pier to Pier になりがちな産学連携を、各連携で得られた知見や技術を知の体系にフィードし、それによって進化するハーモナイゼーション学術をまた個々にフィードバックすることで、相乗効果により全体での成長を実現していくことにある。これらの一部は、これまで日本機械学会をはじめとする関連学協会が担ってきたが、産学がさらに距離を縮めてオーバーラップし、有機的に活動を共にしながら工学知を高めていくには、プラットフォームやファウンダリなどの実態的な基盤が欠かせない。無論、実際の組織運営においては様々な調整が必要となるが、これまでの学協会活動で培った信頼関係や共有している我が国の工学基盤の弱体化に対する危機感を基に、協調していくことが期待される。

このような産学の相互乗り入れ型の博士人材教育は欧州では珍しくない。例えば、機械工学で世界トップレベルのミュンヘン工科大学の機械工学科[5]では、2018年実績で、150人/年程の博士（修士は895人/年、学士は414人/年）を輩出している。年間の研究費は60億円程度であり、ドイツの製造業を下支えする学問分野として重要な位置づけにあることが見て取れる。そのうちのおよそ6割が公的資金、4割が企業も含めた私的資金で、企業からの研究費は15億円程度である。企業との共同研究にもとづく博士課程の研究プロジェクトについては学位の認定はもちろん大学が行うが、最大で8割の時間は企業で研究することが許されているように、企業が大学に投資して共同研究を依頼するというよりは、大学、企業を問わずに研究する環境を広げる相互乗り入れ型の教育が実施されている。これは所謂 On-the-Job Training によって学生と企業の双方の視点から工学における博士教育の意義付けを強くしているだけでなく、科学的な論文として発行できるように教員と企業が話し合うことが前提となっていることからわかるように、企業単独ではできないような学術的な研究活動が目的となっている。

欧米で進んでいるような産学連携による学術界の研究財源モデルの多様化は我が国でも進める必要がある。国公立大学においては、独立行政法人化されて以来、運営費交付金が

減少していく中で研究財源の多様化を図ってきたが、未だに公的資金への依存度が高い。産業界からの財源比重が大きいモデルとしてはMIT メディアラボ[6]のモデルが有名であるが、そこでは研究プロジェクトごとではなく、より広域で一般的な研究テーマごとに企業スポンサーを募る点が特徴的である。このモデルはMIT メディアラボではアントレプレナーシップの育成にも役立っているが、工学系技術基盤の育成にも役立つと考えられる。一方で産業界でのニーズに応えるにはプロジェクトベースの共同も不可欠であり、学術基盤やイノベーション創出型と課題解決型をバランスさせながら、日本に合った財源モデルを構築していく必要がある。また、国際的な視点で海外の企業や大学との連携を活用することも考えられる。国内の企業が外国の大学に出資するのは一般的であるが、逆に海外の企業が日本の大学に出資する例は少なく、そのアンバランスを解消することは、日本の研究予算規模全体の「パイ」を大きくすることに繋がる。

以上のように機械工学の学術活動の規模を拡大していくためには、人材を確保する必要があり、学生全体の数に限りがある中で機械工学の学生数を増やす意義付けについて考える必要がある。我が国では、機械工学を学ぶのは、一般に高等教育での大学および大学院である。図8に機械系学生数の推移を示す[7]。

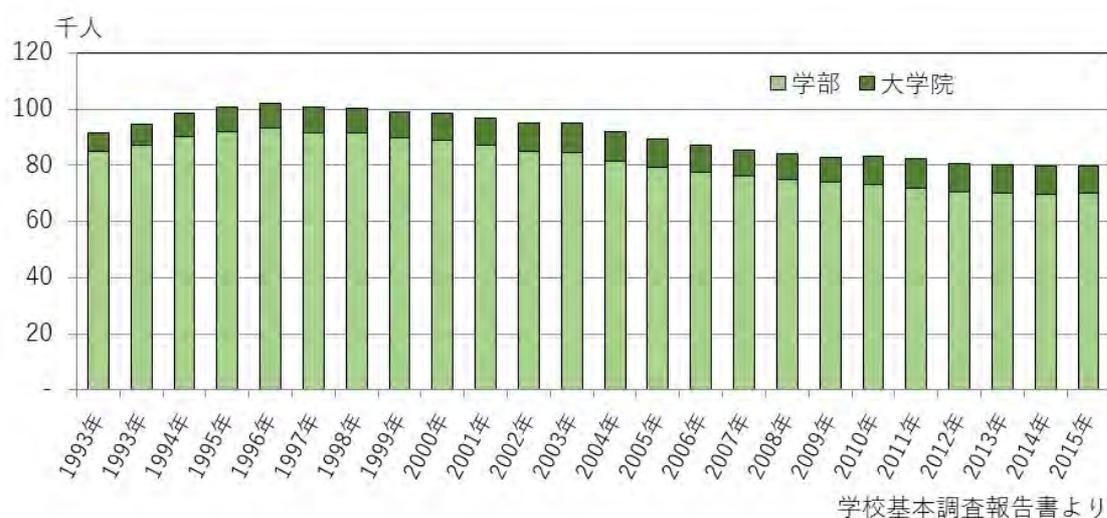


図8 機械系学生数の推移[7]

なお、高等専門学校においては、初等中等教育での高等学校に相当する課程から機械工学を専門教育として行っているが、大学および大学院と比較すると人数の割合は低く、大多数は大学以降、さらに専門課程において学ぶ。図7に示されているように、機械系の学生数は、右肩あがりの高度成長時代からバブル経済崩壊前の90年代後半まで、増加の傾向を示していた。しかし、10万人をピークに、バブル経済の崩壊以降からは減少に転じ、現在では8万人までに減少している。我が国は少子化に直面していることから、若年人口の減少が要因と考えられる。しかし、その一方、図9に示す国勢調査によれば、機械系技術者は現在、約30万人であり、ここ20年で多少の変動はあるものの、機械系学生の

推移と比較して大きな減少は見られない。このことより、機械系学部・大学院の卒業生だけでなく、他分野の学部・大学院を卒業した人が機械系の職種に就業している傾向が見られる。機械工学は、機械工学だけでなく様々な分野のバックグラウンドを持った人材が集まり、研究および技術が開発、推進されている。また、このような傾向は、本記録をまとめるにあたり、機械工学を基盤とした主要な機械系関連学協会 27 に対して行ったアンケート調査からもみてとれる。学協会で推進されている研究テーマとして、環境、エネルギー、バイオ、そしてものづくり基盤、など学際的であるとともに、従来の機械工学から医学・薬学などの他分野にも広く展開されたテーマに対して若手が中心となって推進していることがわかる。今後、このようなデータを分析し、将来の人材育成として教育および人材育成に反映していく必要がある。

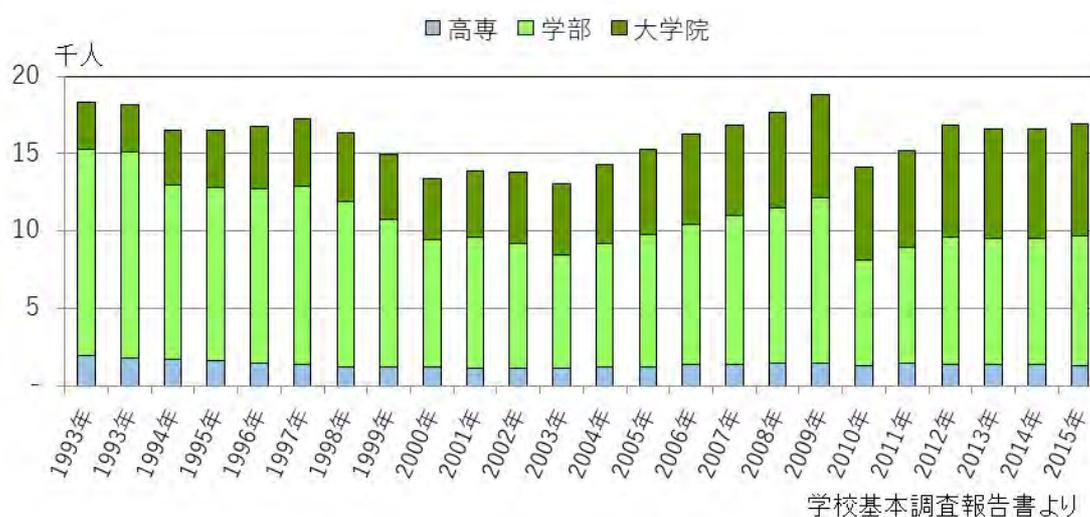


図9 卒業後の機械技術者就業者数の推移[7]

このように機械工学の技術者へのニーズは高く、より多くの学生が高度かつ広義な機械工学の技術知を得る機会が必要とされている。一方で、若者人口の減少は今後もさらに進むことが予測され、持続的可能な学術や産業の発展には、外国出身の研究者の活躍が欠かせない。このためには、まず、優秀な留学生のリクルーティングすること必要があるが、この点においても機械工学は利点である。その理由の1つとして、機械工学は、ものづくりの根幹を担うことから、全ての国にある「世界の共通学問」であり、機械工学科はほぼ全ての総合大学や工科大学に存在する点が挙げられる。特に、アジアでは機械工学は製造業に密接する基幹学問として人気があり、世界的な学生の母数は膨大である。もう1つの理由としては、機械工学分野における日本のレピュテーションの高さが挙げられる。例えば、機械工学関連の分野におけるQS ランキング (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing) では、世界のトップ50大学の中に日本から4大学がランクインしており、日本の科学・工学分野において世界的なプレゼンスが最も高い分野の1つとなっている。これらと、日本での文化や生活環境の魅力が相まって、日本で機械工学を学びたい学生は非常に多い。次に、リクルーティングと同様に重要なのは、優秀な留学生が卒業後に

日本の学术界や産業界で引き続き活躍し続けることである。留学生の数は学部と大学院の両方で年々増えているが[8]、大学院を卒業した後に日本を離れる学生も多く、世界で人材が循環することは健全ではあるものの、高等教育の社会還元という面ではバランスに欠けている点は否めない。これには、外国出身研究者と意識を共有し、当事者として日本の工学基盤を一緒に高めていく雰囲気になるような環境作りが必要である。その成功例が、2019年に日本で開催されたラグビーの日本代表（Brave Blossoms）であり、代表選手31人のうちのおよそ半分の15人半分を占める外国出身選手が日本代表としての誇りを胸に戦った。また、その内のおよそ半分の8人が日本国籍を取得している一方で、他の7名は国籍を有しておらず、日本語能力にも差があるように、日本との関わりも多様な選手達が One Team として戦ったことから学ぶべきものは多い。

グローバル化および IT 技術の普及により、社会は多様かつ複雑化している。そのため、現存の倫理規定の範疇を超えて様々な問題も起こっている。めまぐるしく、かつ早いスピードで変化している社会に対応した研究および技術倫理を再考し、実践していくことも Inclusive Society の実現に向けて必要不可欠である。現在、機械学会では技術倫理委員会が設立され、法工学分野の専門家を交えて議論が重ねられている。このように学会にて研究者・技術倫理委員会などを通して倫理および倫理規定の整備が進められている。大学においても倫理教育はカリキュラムの組み込まれていることから、産業界などの現状を踏まえた倫理を教育へ迅速に反映できるようにしていくことも普及の上で重要である。

以上を通じてインクルーシブな工学系学術基盤の構築が実現されれば、最先端の技術開発と従来技術の継承を両立しながらイノベーションが創出され、オールラウンダー工学人材の育成が進むことが期待される。特に、SDGs で挙げられている課題は、機械工学を基盤としたものづくりと密接な関係がある。その際に、修士課程から直接、進学する博士人材の推進とともに、欧米に見られるようにリカレント教育の充実化とサポート体制の整備も必要である。現場での課題を大学での専門教育を通して解決していくことにより、最先端の研究をリカレント教育により習得するとともに、産官学民の他機関での人材交流を通して企業とともに大学の活性化にもつながる。一方、様々な分野や業種にて活躍している機械系人材が集まる機関として。学協会も重要な役割を果たす。大学、企業、および官公庁の壁を超えて、多様なバックグラウンドを持ち多数の人が集うことのできる機能を学協会が待っており、インクルーシブな社会を実現していく上で学協会の意義は大きい。

今後、Inclusive Society の実現に向けて、機械工学を取り巻く環境および仕組みに対するアクションプランとしては、以下が考えられる。

- ・最初にモデル化ありではなく、現場の難しく複雑でリアルな課題をそのまま考えるアプローチの検討
 - 順問題から逆問題的アプローチ、アブダクション的アプローチの機械工学への組み込み
 - 現象解明から仮説と検証の仕組みを体系化した機械工学アーキテクチャーの再構築

- ・解けていない問題への挑戦
 - 人文社会科学と連携し、機械工学と先端デジタル（AI 等）の組み合わせるよる問題解決

- ・方程式と離散化データの融合による新しい学問分野、新学会、コミュニティの創生
 - 従来の学術の枠組みよる研究・技術の枠組み以外での、社会での実装化を含めた総合的な学術および組織体制の検討

- ・ICT 技術に基づくオンラインと実空間における実験などのオフラインの組み合わせによる最適なものづくり

- ・基礎研究の実用化を牽引する、プロトタイピング文化の推進、醸成、評価システムの構築
 - 研究途中の公開、およびオープンな試行の場の構築による多様なバックグラウンドの人々（研究者、技術者、ベンチャー企業や facilitator）が入り、進化できるようなシステムや場の構築の検討

- ・学会や大学が主体とする、産学連携の新たなリカレント教育の仕組み構築と充実化
 - 経済産業省によるアンケート調査によれば、大卒新卒者の採用状況や今後技術者が不足する専門分野として、機械工学へのニーズは高い[9]。しかし、我が国におけるリカレント教育の機会は乏しい。そこで、教育の仕組みの構築と充実化に対する検討

- ・ローカル SDGs 的、および地方発の社会実装によるイノベーションの創出に向けた機械工学によるオンリーワン技術の醸成の仕組みの検討
 - 地域・地方活性化として、中小中堅企業、大学および公設試の共創による産官学民連携コンソーシアムの形成、人材育成・啓発、クラウドファンディング的促進の仕組み

- ・中小企業と大学、ベンチャーとの関わり、学会、国研等の新しいエコシステムの構築
 - 高リスクでチャレンジなプロトタイピングに対する新しいシステムの検討中
 - 長期的視点での研究・技術開発エコシステム

今後は、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）後のニューノーマルを見据えた Inclusive Society の実現が必要である。その観点からも、共通事項として我が国内にとどまるだけでなく、世界に開かれたオープンかつ持続可能なシステムを創っていくことが必要であり、そのためにはグローバル規模で工学系学会、異種学会間の役割や構成を考慮し、連携、再構築、また、業界団体と学術団体との新しい場の形成や活性化が必要と考え

られる。実現に向けた課題の整理および検討を含めて、引き続き、次期の機械工学の将来展望分科会で議論を進めて行く予定である。

<参考文献>

- [1] www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h-3-8.pdf
- [2] JST 研究開発戦略センター (CRDS) : 研究開発の俯瞰報告書,
<https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/index.html>
- [3] 博報堂の例, <https://seikatsusoken.jp/futuretimeline/>
- [4] トヨタ自動車の例, https://openroad-project.com/innovationreview/post_1109/
- [5] <https://www.mw.tum.de/en/the-department/facts-and-figures/>
- [6] <https://www.media.mit.edu/>.
- [7] 一般財団法人 日本機械学会、「日本機械学会の現状と中長期的課題～2018 年度（第 96 期）の取り組み～」
- [8][https://www.jasso.go.jp/sp/about/statistics/intl_student_e/2018/__icsFiles/afieldfile/2018/12/18/d
atah30z_2suii.pdf](https://www.jasso.go.jp/sp/about/statistics/intl_student_e/2018/__icsFiles/afieldfile/2018/12/18/datah30z_2suii.pdf)
- [9]<https://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180420005/20180420005.html>

<参考資料1> 審議経過

平成30年

4月17日 機械工学委員会（第2回）

7月5日 機械工学の将来展望分科会（第1回）
役員の選出、今後の進め方について

11月16日 機械工学の将来展望分科会・学協会連携小委員会（準備委員会）
今後の進め方について

12月3日 機械工学の将来展望分科会・学協会連携小委員会（準備委員会）
アンケート調査について

平成31年（令和元年）

4月16日 機械工学委員会（第3回）及び
公開シンポジウム「機械工学の将来展望 ―イノベーション創出にむけた次の一手」

12月24日 機械工学の将来展望分科会（第2回）
記録案について

令和2年

6月24日～29日 機械工学の将来展望分科会メール審議
記録（案）「機械工学を切り拓く Inclusive Society」の承認

<参考資料2> 公開シンポジウム

機械工学の将来展望 —イノベーション創出にむけた次の一手

平成31年4月16日 (火)

13:00～17:00

日本学術会議講堂

東京メトロ千代田線「乃木坂駅」
5番出口 徒歩1分

東京都港区六本木7丁目22-34

主催：日本学術会議機械工学委員会機械工学の将来展望分科会
共催：一般社団法人 日本機械学会、公益社団法人 空気調和衛生工学会、一般社団法人 日本燃焼学会、一般社団法人 可視化情報学会、公益社団法人 日本マリンエンジニアリング学会、公益社団法人 日本伝熱学会、一般社団法人 原子力学会、一般社団法人 日本航空宇宙学会、公益社団法人 精密工学会、公益社団法人 日本ガスタービン学会、日本船舶海洋工学会、一般社団法人 トライボロジー学会

機械工学は、従来の「材料力学」、「流体力学」、「熱力学」、「機械力学」を基盤とした四力学の枠組みを超え、様々な新しい分野との融合が進み、新しい局面を迎えています。そこで、イノベーションの創出、および社会や国民へのさらなる貢献していくために、機械工学のあり方について再考し、機械工学の将来展望についての議論を深めるためのシンポジウムを開催します。機械工学関連の学協会やグループの代表に、多角的なテーマに関するご講演を頂きますので、皆様の参加を期待します。

司会：塩見 淳一郎（東京大学大学院工学系研究科・教授）

13:00 開会の挨拶

大島 まり（東京大学生産技術研究所・教授）

13:10 「脱炭素社会を目指す革新的反応性流体科学」

藤田 修（北海道大学工学研究院・教授）

13:25 「分子・原子およびナノスケール組織構造化による新奇熱マネジメントの創成」

花村 克悟（東京工業大学工学院・教授）

13:40 「ナノ加工の時代「5ミクロン精度の壁を越えるには」」

青山 英樹（慶応義塾大学理工学部・教授）

13:55 「バイオハイブリッドが拓く新たな機械工学」

竹内 昌治（東京大学生産技術研究所・教授）

14:10～ (休憩)

14:30 「計測・予測・制御の同化技術が創出する新しい道具」

村井 祐一（北海道大学工学研究院・教授）

14:45 「力学基盤研究ネットワークの形成」

岸本 喜久雄（東京工業大学・名誉教授）

15:00 「リスク半減を目指す海運インフラと海護システムの構築」

田島 博士（九州大学総合理工学研究院・准教授）

15:15～ (休憩)

15:30 パネルディスカッション

16:50 開会の挨拶

荻田 公一（慶応義塾大学理工学部・教授）

17:00 閉会

連絡先：塩見淳一郎（東京大学工学系研究科・教授） e-mail: shiemi★photo@t.u-tokyo.ac.jp (★を@に書き換えてください)

公開シンポジウム

イノベーション創出にむけた次の一手
機械工学の将来展望

参加費無料

事前申し込み不要
直接会場にお越し下さい