JSME 技術ロードマップ

Preface：“JSME Technology Roadmap”

渡邉　政嘉
Masayoshi WATANABE

◎ 1990 年通商産業省入省，2005 年東北大学大学院博士課程技術社会システム専攻修了，2013 年より現職
◎研究・専門テーマは，人間工学，機械加工等
◎正員，経済産業省　製造産業局紙業服飾品課長
（〒100-8901　東京都千代田区霞が関 1-3-1／
E-mail：watanabe-masayoshi@meti.go.jp）

日本機械学会における技術ロードマップの策定・公開の組織的な活動は，2007 年の本会創立 110 周年記念事業の一環として開始された．産官学連携センター（現イノベーションセンター）に「技術ロードマップ委員会」が設立され，部門活動の一環として現在に至るまでその活動は継続されている．技術ロードマップは企業における研究開発マネージメントツールとして活用されているが，学術活動を基本とする学会活動としては技術ロードマップの策定・公開を通じた社会への情報発信はあまり行われていない．経済産業省によって 2005 年に産業技術全般に関する技術ロードマップを策定・公開が行われ，もともと取り組んできた産業界，そして学会が技術ロードマップを共通言語として相互のコミュニケーションが進みやすい環境が整ったとも言える．

学会のつくる技術ロードマップの本質は，過去から現在に続き研究実績の上に立って，将来の研究領域がどのように拡がっていくかを可視化し，それらの方向性について研究者の間で一定のコンセンサスを形成することにあると考えている．一般的に学会では，学術的に検証できないことは発表しないのがルールである．新しい分野を切り開き，未知の領域を議論したり，公表したりという活動は一般的ではない．しかしながら，それらの議論が今求められているのではないか．科学技術の対象がより複雑化し，高度化する中で，研究者が答えを一人で出すことは極めて難しい．異なるディシプリンを背景に持つ研究者が議論をしながら，技術を融合・複合させイノベーションを創出するためのコミュニケーションをすることが必要である．その活動が学会における技術ロードマップ活動の大きな意義だと考えている．そのような観点からは，部門横断的な技術ロードマップ策定活動（自動運転）もスタートしている．今後もこのような横断テーマの活動が進むことが期待される．

本会技術ロードマップ策定活動から発展的に生まれたテーマの中には，研究協力事業委員会の審議を経て RD 分科会活動へとつながり，その成果が政府への技術開発プロジェクト（ヒートポンプや 3D プリンタ関連）の一翼を担う具体的な提案へと進んだものもある．一部のプロジェクトでは，本会が成果の普及の観点から直接，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託を受けるケースも出てきている．今後もこのような学会活動発の国家プロジェクトの案件形成が期待される．イノベーションセンターでは，技術ロードマップ委員会および研究協力事業委員会が連携しながら，年次大会等でシンポジウムを毎年企画し，これら取り組みを紹介するとともに今後の進め方について関係者のご意見を聞きながら運営に当たっている．本特集では，機械工学の最新の技術ロードマップを改めて紹介する．

これまでの技術ロードマップ委員会メンバー：委員長　矢部　彰〔新エネルギー・産業技術総合開発機構〕，渡邉政嘉〔経済産業省〕，平澤茂樹〔神戸大学〕，副委員長　吉田健一郎〔経済産業省〕，委員　松田哲也〔筑波大学〕，大山　聖〔宇宙航空研究開発機構〕，河合浩志〔諏訪東京理科大学〕，小石正隆〔横浜ゴム〕，澁谷忠弘〔横浜国立大学〕，高木　周〔東京大学〕，坂本二郎〔金沢大学〕，松本健郎〔名古屋工業大学〕，山口隆美〔東北大学〕，笠原直人〔東京大学〕，猪狩敏秀〔三菱重工業〕，川上　崇〔富山県立大学〕，岡部友三朗〔日産自動車〕，藤山一成〔名城大学〕，秦　誠一〔名古屋大学〕，加藤千幸〔東京大学〕，能見基彦〔荏原製作所〕，榊原　潤〔明治大学〕，長谷川豊〔名古屋工業大学〕，荒川忠一〔東京大学〕，荒木幹也〔群馬大学〕，高橋周平〔岐阜大学〕，前田太佳夫〔三重大学〕，青柳友三〔新エィシーイー〕，田辺光昭〔日本大学〕，野村浩司〔日本大学〕，三上真人〔山口大学〕，中田俊彦〔東北大学〕，佐藤幹夫〔電力中央研究所〕，松田憲兒〔日本冷凍空調工業会〕，佐々木正信〔東京電力〕，丹野賢二〔電力中央研究所〕，田川泰敬〔東京農工大学〕，野波健蔵〔千葉大学〕，成田有弘〔北海道大学〕，矢野智昭〔近畿大学〕，吉本成香〔東京理科大学〕，北條春夫〔東京工業大学〕，大富浩一〔東京大学〕，野間口大〔大阪大学〕，青山和浩〔東京大学〕，妻屋　彰〔神戸大学〕，舘野寿丈〔明治大学〕，柿崎隆夫〔日本大学〕，柳原好孝〔東急建設〕，辰野恭市〔名城大学〕，大築康生〔新産業創造研究機構〕，田中雅人〔安川電機〕，松元明弘〔東洋大学〕，岡田亮二〔日立製作所〕，有賀敬治〔フェローテック〕，三友信夫〔日本大学〕，戸枝　毅〔富士電機〕，久保内昌敏〔東京工業大学〕，中野公彦〔東京大学〕，高田　博〔東京理科大学〕，杉山博之〔アイオワ大学〕，ポンサトーン　ラクシンチャラーンサク〔東京農工大学〕，吉田敬介〔九州大学〕，高田　一〔横浜国立大学〕，渡辺辰郎〔東京大学〕，大久保英敏〔玉川大学〕，新井雅隆〔群馬大学〕，梶谷修一〔茨城大学〕，堀　雅彦〔日本自動車研究所〕，浦島邦子〔文部科学省〕

解　説

ロードマップ作成の趣旨と目的

JSME Technology Roadmap

執筆者プロフィール

◎1979 年東京工業大学大学院博士課程機械物理工学専攻修了，同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所，2008 年産業技術総合研究所理事，2015 年より現職
◎研究・専門テーマは，エネルギー工学，熱工学
◎正員（フェロー），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
（〒212-8554　川崎市幸区大宮町 1310／E-mail：yabeakr@nedo.go.jp）

矢部　彰
Akira YABE

1. JSME 技術ロードマップ作成の趣旨と目的

機械技術を始めとする工学に対する社会の期待と要請に応え，技術の将来を予測することにより，社会に情報発信するとともに社会を先導することを目指して，工学的な独自の視点に立った JSME 技術ロードマップの作成を試みている．技術ロードマップ作成作業を通じて得られたイノベーションプロセスと技術ロードマップの関係は以下のとおりである．

・イノベーションを生み出すには，技術開発の死の谷を乗り越える必要があり，社会実装するために経済性・信頼性・社会受容性などあらゆる角度からの総合的検討が必須である．
・革新的な技術は，異分野の人々が共通の指標（経済性など）で議論し，知恵を出し合う相互作用の結果として生み出されることが多い．また，技術戦略として，技術プラットフォームを提供し，その中で各ニーズに合わせたカスタマイズ化を推進することは有効である．また，多くの場合，キーパーソンの粘り強い頑張りが必須である．また，研究者は，曖昧さの残ることを表現することに積極的になれない面はあるが，各研究者の頭の中には，研究の将来展開に対するロードマップを皆が持っているわけで，それを論理的に可視化し，社会に対して発信することが大切であると考えている．

2. 技術ロードマップ作成による可能性と限界など

本会の技術ロードマップの可能性と限界は以下のとおりと考えている．

①技術ロードマップの作成は，社会のニーズ把握，世界における技術開発の動向，技術の原理・メカニズムとその限界の把握，経済性，産業規模，消費者の動向，社会受容性の変化などを総合的に判断する必要があり，定量的な議論になりにくい分野である．
② JSME ロードマップの考え方としては，ロードマップとして評価されている半導体分野のムーアの法則と同様，技術のキーとなる汎用的物理パラメーターを学問的見地で見出し，その年次展開として記述することを目指している．そのような中から，単なる物理パラメーターではなく，設計の分野では，付加価値を与える「デライト設計」などの指標が出てきている．
③産業技術は，多くの物理的なパラメーターの組合せで体系的に構成されると考えており，キーとなるパラメーターは，多くの分野の産業技術に共通する製品性能の指標となる．
④効果としては，工学分野に将来像を提示することにより，技術・研究開発の参考になるとともに，機械工学を始めとする工学分野のいっそうの進展に貢献できると考えている．
⑤一方，情報技術の急速な進展により，イノベーションに相当する急激な社会変化が生じており，技術ロードマップに記載されていない技術の展開によりロードマップの限界も議論されている．ホライズン・スキャニング活動という急激な社会変化を予測する活動により，急激な社会の変化を推定し，ロードマップを社会変化に合わせて高度化することも必要である．
⑥「社会と技術の関わり」は将来どのようになるのかという議論の中からは，高齢化の進展により，介護ロボットや自動運転が重要になり，それに伴う事故の問題，社会的な責任の問題に関係して，リスク評価が必須な課題となることが出てきている．このリスクコミュニケーションの重要性は，第 5 期科学技術基本計画の中でも取り上げられている Society5.0 に関連する内容であり，技術を「解析技術（アナリシス）」と「統合技術（シンセシス）」だけでなく，社会への影響や社会受容性を扱う「社会技術」の観点からも検討することの重要性が示されている．
⑦また，技術ロードマップの議論により，将来の燃焼による二酸化炭素の排出低減を実現するためのボイラー代替の高性能高温出力ヒートポンプの重要性が指摘され，国家プロジェクトに取り上げられていることも，ロードマップの議論の重要性を示している．

今後とも，JSME 技術ロードマップからより大きな社会ビジョンを描ける可能性を追求して，どうすれば 21 世紀に目指すべき循環型の持続可能な社会，環境に調和する社会を実現できるかを JSME 技術ロードマップを作成しながら議論することが，本会が社会に対して情報発信し，社会と議論していく活動として重要であると考えている．

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

1. 機械工学全体の技術ロードマップ

1・1　趣旨

日本機械学会における技術ロードマップは 2007 年の本会創立 110 周年記念事業の一環として，各部門に呼びかけて開始した．この十年余りで非常に中身の濃い技術ロードマップに仕上がっている．一方で，本会は機械工学に関する多くの分野を包含する唯一の総合学会でもある．ある技術領域に特化した技術ロードマップに加えて，機械工学全体としての技術ロードマップを世に問うことも本会のミッションの一つと考える．また，機械工学全体の技術ロードマップを作成することにより，各技術領域の目指すところが明確になるのではないだろうか．

しかしながら，機械工学全体の技術ロードマップといわれても簡単にはイメージできない．これは多くの場合，技術を計測可能な物理量に置き換えて理解しているのに対して，機械工学全体の技術というものは計測可能な物理量に一般には置き換えられないことに起因する．このように機械工学全体の技術ロードマップを作成することは非常に困難であることを重々承知したうえで，これがうまく描けた際のインパクトの大きさに鑑みてあえてチャレンジするものである．

1・2　技術ロードマップとは

そもそも技術ロードマップとは何であろうか．一つは今後を予測し，これに向けてどのような技術が必要かを考えることである．半導体の集積度向上は 18 ～ 24 箇月で集積度が倍になるというムーアの法則に従う形で実現してきた．こうなるための半導体の微細化の技術を極め，これが半導体の集積度向上のための技術ロードマップとなった．しかしながら，ムーアの法則にも限界がある．原子レベル以下の微細化は不可能だからである．そこで，ムーアの法則を超えた段階での半導体の集積度はどうなるかを考える必要がある．この場合，これはこうなるであろうではなく，こうしたいという思い（アイデア）が必要となる．

このように技術ロードマップの作成方法としては①技術のトレンドを読む，②技術のトレンドを創る，の二通りがあるように思う．多くの技術ロードマップは前者の“技術のトレンドを読む”に沿っており，本会部門発の技術ロードマップの多くもこれに準じている．たとえば，横軸を年代として縦軸にピーク性能（超大型計算機），燃焼ガス温度（エネルギー機器の効率），加工分解度（加工技術），比強度（材料），発電コスト（風力発電），熱流束（熱工学），熱伝導（断熱材），熱効率（エンジン），自由度数（動的現象の解析），燃費（自動車）がこれに相当する．一方，後者の“技術のトレンドを創る”に関しては知能レベル（ロボット技術）が対応する．

機械工学全体の技術ロードマップ作成に当たって，機械工学自体が多くの技術の集合体であることから，“技術のトレンドを読む”ことは難しい．そこで，“技術のトレンドを創る”方向で考えたい．ただ，技術そのもののトレンドを創ることは難しいので，機械工学のミッションから紐解き，機械工学の目指すところを明確にし，これを具体化するプロセスを“機械工学全体の技術ロードマップ”として示してみたい．機械工学のミッションも多様ではあるが突き詰めると“ものづくり”のための技術と考えることができる．

1・3　機械工学の現状と目指すところ

機械工学はものづくりのための重要な技術群を有している．

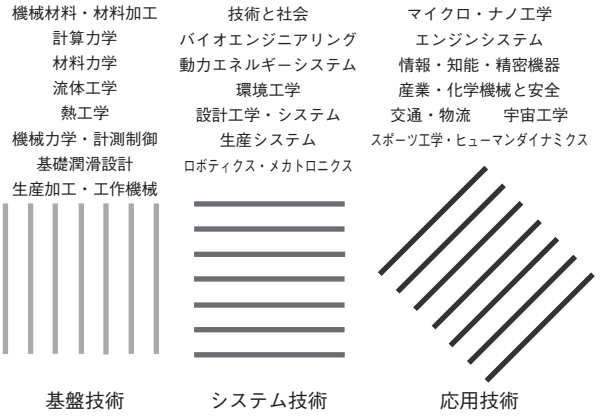


図 1　機械工学の技術分類例（部門と対応づけ）

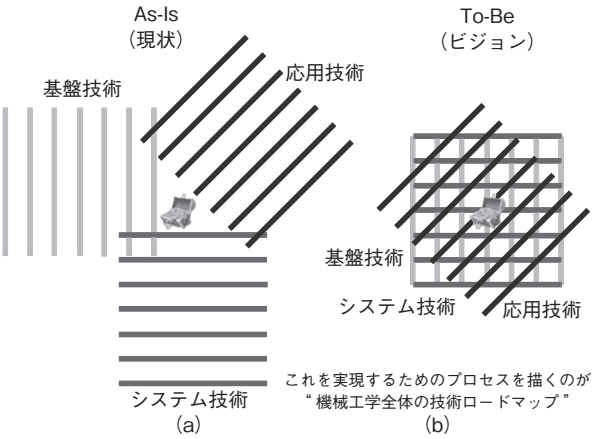


図 2　機械工学の現状とあるべき姿

ここでは機械工学の現状を分析，ものづくりの視点から目指すところを明らかにする．最初に機械工学の技術群をいくつかに分類してみたい．**図 1** に分類例を示す．本会の各部門が機械工学の各技術領域に該当していると考えられるので，技術分類に合わせて各部門も分類してみた（細かくは部門の分類に意見もあろうと思うがご容赦いただきたい）．ここでは技術の目利きを行う“基盤技術”，技術を応用した製品開発のための“応用技術”，技術と製品を束ねる“システム技術”の三つの領域に分類した．基盤技術はいわゆる 4 力学に代表されるものづくりのベースとなる技術である．システム技術は設計工学に代表される基盤技術をベースに製品化に至るプロセスを支援する技術である．応用技術は製品開発という具体的目標に向かって基盤技術とシステム技術をいかに適用していくかという技術である．一般に基盤技術を縦糸にシステム技術を横糸にして強固な布を構成，そのうえで製品開発（応用技術）を行うのが理想である．

それでは，機械工学の三つの技術領域の現状はどうなっているのだろうか．**図 2** の (a) に現状例を示す．すべてがこうなっているわけではないがこのような状況が多々見受けられる．えてして宝はこれらの境界領域に存在する．あるべき姿とは前述

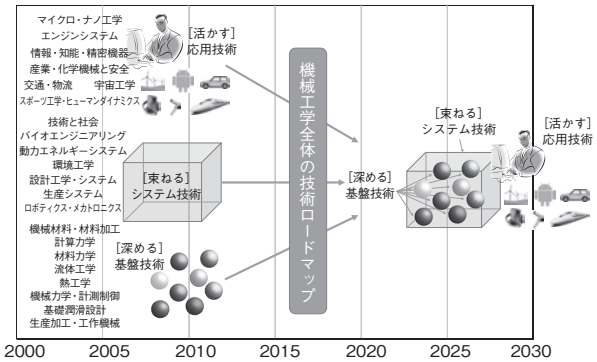


図 3　機械工学の目指すところ

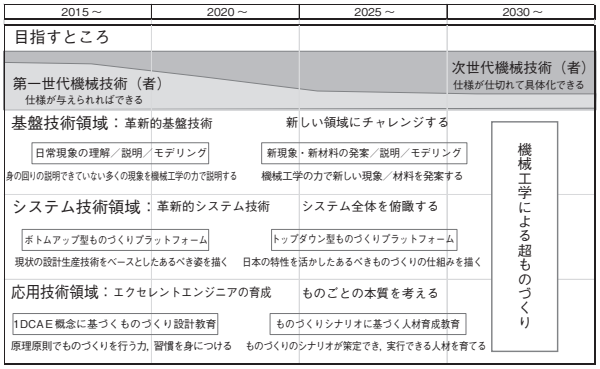


図 5　技術ロードマップの具体例

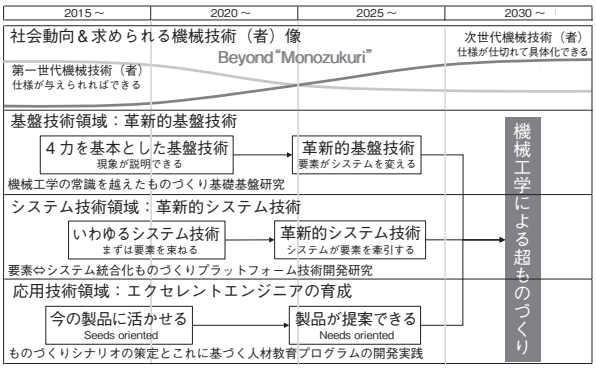


図 4　機械工学全体の技術ロードマップ

のように**図 2** の（b）のように基盤技術，システム技術，応用技術の三つの技術領域が相互に連携し，相乗効果を発揮する状態にあることである．

図 2 の機械工学の現状とあるべき姿を時間軸で表現すると目指すところが見えてくる．**図 3** にその状況を図示する．現状の（すべてとは言わないが）三つの技術領域が独立に存在する状態から，三つの技術領域が相互に連携し，相乗効果を発揮する状態に移行するプロセスを考え，これを機械工学全体の技術ロードマップとする．三つの技術領域の目標をものづくりという共通のものに設定することにより，自然と**図 3** に示す流れが見えてくると考える．

1・4　機械工学全体の技術ロードマップ

機械工学全体の技術ロードマップを考える際に社会が機械技術（者）に求める姿を描いてみたい．これもすべてがそうだとは言えないが多くの場合，仕様が与えられればきっちりこなすのが機械技術（者）との印象が強い．これは機械技術（者）にとっての必要条件ではあるが十分条件ではない．おそらく，仕様が与えられればきっちりこなすことに加えて，仕様が仕切れて具体化できる機械技術（者）が望まれていると考えるし，そうなりたいと考えている．こうなるためのプロセスが自ずと機械工学全体の技術ロードマップになるはずである．

図 4 に上述の手順で考えた各技術領域の今後必要となる技術を技術ロードマップとして示す．基盤技術領域では，現状の 4 力学を基本とした基盤技術から，機械工学の常識を超えた基礎研究により革新的な基盤技術が生まれることを期待する．システム技術領域に関しては，現状の要素技術を束ねたシステム技術から全体最適の視点に立った革新的システム技術が必要となる．応用技術領域では，現状の製品の延長から新たな製品の提案ができる仕組みをエンジニアの育成と連携して実現できることを期待する．そして，革新的基盤技術，革新的システム技術，新たな製品が提案できるエンジニアが一体となって，“機械工学による超ものづくり”が実現する．

次に技術ロードマップの中味について考えてみたい．**図 5** に技術ロードマップの具体例を示す．この中のいくつかについて説明を加える．

1・4・1　日常現象の理解／説明／モデリング

個人的なことであるが，筆者は企業で長年製品開発に携わってきた．重電機器に始まり，宇宙機器，医用機器，家電機器を対象とし，ものづくりの視点から対象製品の現象を理解／説明／モデリングしてきた．実はこのプロセスが設計であるということを経験的に理解している．そしてこのなかで家電機器の現象理解が最も難しく，かつ解明が遅れている．これは家電製品の場合，試作検証が容易で，現象理解／説明／モデリングの機会が少なかったこと，境界条件，環境条件が多様でモデリングが容易でないことに起因する．たとえば，“ものが乾く”という現象一つをとっても正確に現象を説明し，モデルに落とし込んだ例は見ない．このような日常現象を従来の機械工学の枠を越えて理解／説明／モデリングすることが重要と考える．これがひいては新現象／新材料の発案に繋がると信じる．“ものが乾く”のような事例を 10 個ほど選定して考えてみたらどうだろう．

1・4・2　1DCAE 概念に基づくものづくり設計教育

原理原則で考え，ものづくりを行う概念，考え方，手法を 1DCAE[(1)] と定義し，研究開発，普及啓蒙活動を行っている．この普及活動の一環として，2013 年から講習会を実施し，2016 年の 6 月で第 7 回目を迎える．1DCAE 活動は設計工学・システム部門からスタートしたが，現在では他部門の方々にも参加いただき，学会全体の活動に移行しつつある．ここで目指していることはものづくりの飛躍的向上とこれを実際に行うエンジニアの育成である．これは上記 4・1 とも深く関係し，“本質的に物事を理解する”ことの重要性とそのための方法を検討している．先人の知恵に学ぶところ大である[(2)～(4)]．

1・5　今後の展開

機械工学全体の技術ロードマップとして，ものづくりの革新を目的とした技術ロードマップを提案した．本会のミッション，ビジョンとも深く関わることであり，出過ぎた感もあるが，機械工学のさらなる発展のためにはこのような提言も重要と考える．今回の技術ロードマップはいまだ漠とした感はあるが，大きな方向は示したつもりである．部門の方々との議論を通して，より具体的なものにしていければと思う．

〔大富　浩一　東京大学〕

文　　献

（1）大富浩一・羽藤武宏，1DCAE によるものづくりの革新，東芝レビュー，**67**-7（2012）．
（2）Michael, F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition, (2011), Butterworth-Heinemann.
（3）Richard P. Feynman, Lecture on Physics, (2011), The New Millennium Edition, Basic Books.
（4）木村建一，建築設備基礎，pdf version0.8.1, April 22, 2011（2011）．

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

2. 自動運転技術で見た部門横断の技術ロードマップ

2・1　はじめに

P-SCC14「自動運転に関する分野横断型分科会」は，日本機械学会の部門横断活動を強化するために 2015 年 4 月に発足した．活動期間は, 2017 年 3 月までの 2 年間である．本会では，近年とくに企業会員の減少が問題視されており，企業と本会との価値観のかい離の原因として，たとえば自動車のような複雑なシステム製品の機能・性能への本会の対応に弱点があることが指摘された．そこで，30 年後の自動運転製品開発プロジェクトを想定することにより，企業の視点に基づいた部門横断活動の活性化を図ることにした，委員は全部門から募集し 7 部門 1 専門会議から 36 名の参加を得た．幹事部門は，交通・物流部門である．現時点の活動の重点は，二次元技術ロードマップ（以下 2D-ARM と記す）の作成である．自動運転の技術は，従来の枠組みでは収まらない大規模な技術的な広がりを持っているため，部門横断活動のテーマとして最適であると判断された．本稿では，2D-ARM により自動運転関連技術の全貌を俯瞰（ふかん）する事例について述べる．

2・2　自動運転に関する分野横断型分科会発足の背景

本会の会員数減少，とくに企業会員数の減少について危機感を持っていたところ，2014 年の年次大会において「自動車を基軸として見た機械工学全体の将来展望」[1]の講演を技術ロードマップ委員会より依頼された．筆者は，長年自動車の完成車メーカーにおいて製品開発フローの効率向上を研究していたが，完成車メーカーでは本会への興味がなくなる傾向にある．この現象を理解するため，本会と自動車技術会が 2006 年以降 10 年間に作成・発表してきた技術ロードマップ全部を調査し分類を行った．自動車工学はマトリクス構造になっていて，組織もそれに対応したマトリクス組織になっている．日本の自動車会社の強みは，機能・性能への強いこだわりがあることだと

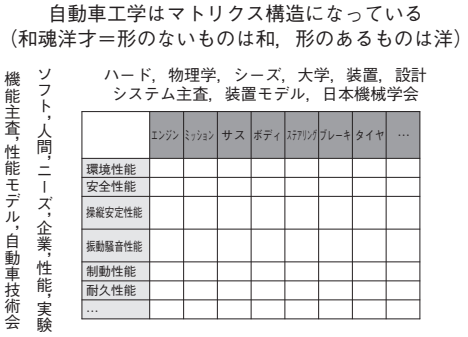


図 1　自動車工学のマトリクス構造―和魂洋才

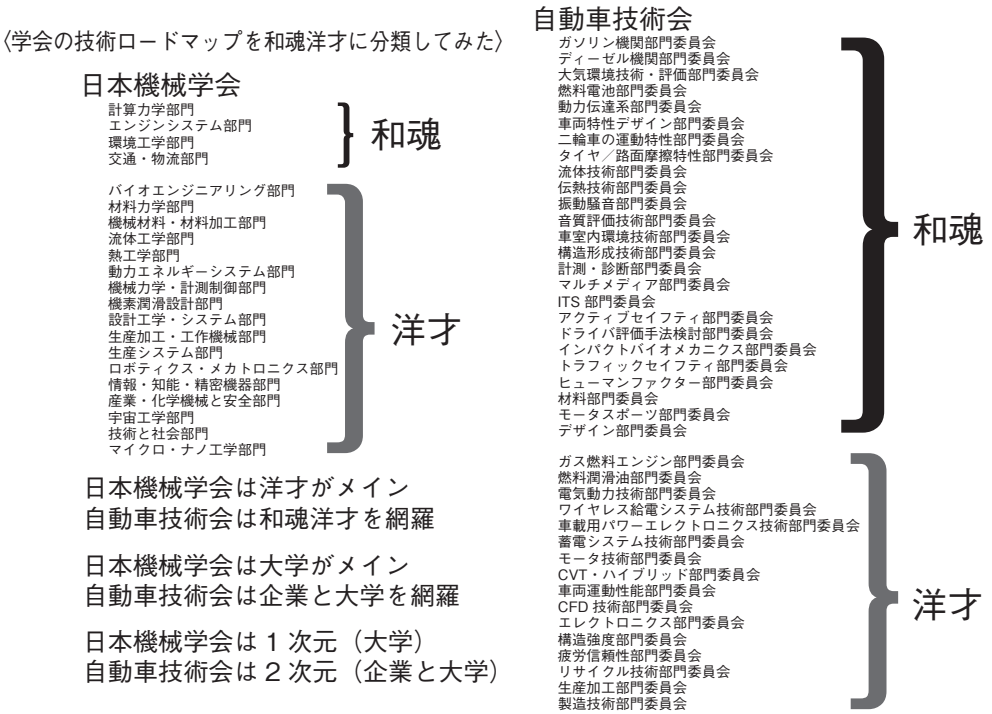


図 2　技術ロードマップの和魂洋才への分類

考えており，**図 1** のマトリクスの縦軸（機能・性能）を和魂技術と呼び，横軸（部品・装置）を洋才技術と呼んで分類した．

技術ロードマップを和魂と洋才に分類した結果を**図 2** に示す．本会の力点は，機械システム製品の性能・機能（システム）にはなく，部品・装置（システムの要素技術）の仕掛けに偏重している事実が明らかになった．一方，自動車技術会は和魂と洋才のバランスが取れていることがわかる．これが完成車メーカーの支持が高い所以であると考える．**図 3** に部品・装置のサプライチェーンを重ねて示すが，とくに完成車メーカーにおける本会への興味が失われつつある要因が明確になった．

機械工学便覧の機械工学総論には，機械の機は仕掛けのこと，械は何かをさせるものとの記述があり，機械には二つの独立した軸があると記述されている．これが和魂と洋才の二つの軸である．本会の現状は，和魂が弱く「日本機学会」としか呼べない学会になっている．この状態を改善するために部門横断活動を恒常的に実施できるような活動への取り組みを技術ロードマップ委員会において提案したところ，委員全員の賛同を得て部門横断活動の発足が決定された．

2・3　機械工学全体を俯瞰する技術ロードマップ 2D-ARM の開発

製品開発プロジェクトでは，**図 4** の製品開発プロセスに示すとおり，最初に製品企画を実施する．

品質機能展開（QFD）等を用いて，製品とその関連技術全体を俯瞰し，製品競争力において必須な技術のフィージビリティスタディを行うことが企画の成否を決定する最重要作業である．

QFD は，製品開発の肝となる重要な技術で，製品企画と密接に結びついているため社外秘の情報であり，会社の外にはまったく漏れてこない．QFD には種々の使われ方があるが，本活動では，**図 1** に示したマトリクス構造に対応した QFD とした．すなわち，QFD を使用して和魂を展開していく作業として，以下に示す 3 ステップを実施した．

(1) 市場の要求品質を収集
(2) 要求品質を抽出（KJ 法，親和図法）
(3) 要求品質展開表

市場の要求品質の収集については，エクセルファイルを用いてメールで収集作業を行った．次に KJ 法を用いて要求品質を抽出する．これは，要求品質をカード化して，似た言葉をくくりタイトルを付けていく作業である．KJ 法を用いた結果の一部を**図 5** に示す．

最後に**図 6** に示す要求品質展開表を完成する．和魂項目と洋才項目には技術ロードマップを関連づける．この表により，関連するすべての技術ロードマップにハイパーリンクによってアクセス可能である．この表は，新しい構造化された二次元技術ロードマップであり，関連技術全体を俯瞰するものになる．この表を 2D-ARM（Academic Road Map）と命名した．

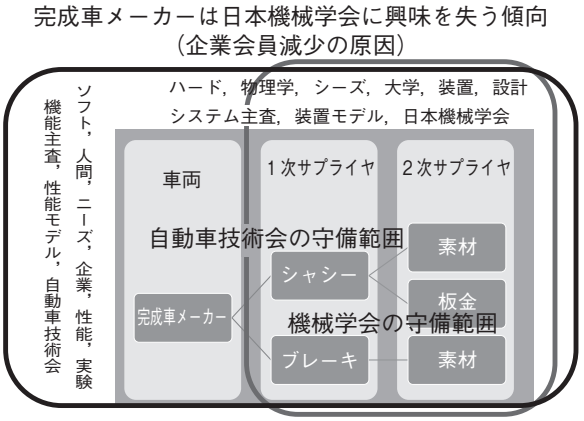


図 3　学会の扱う範囲

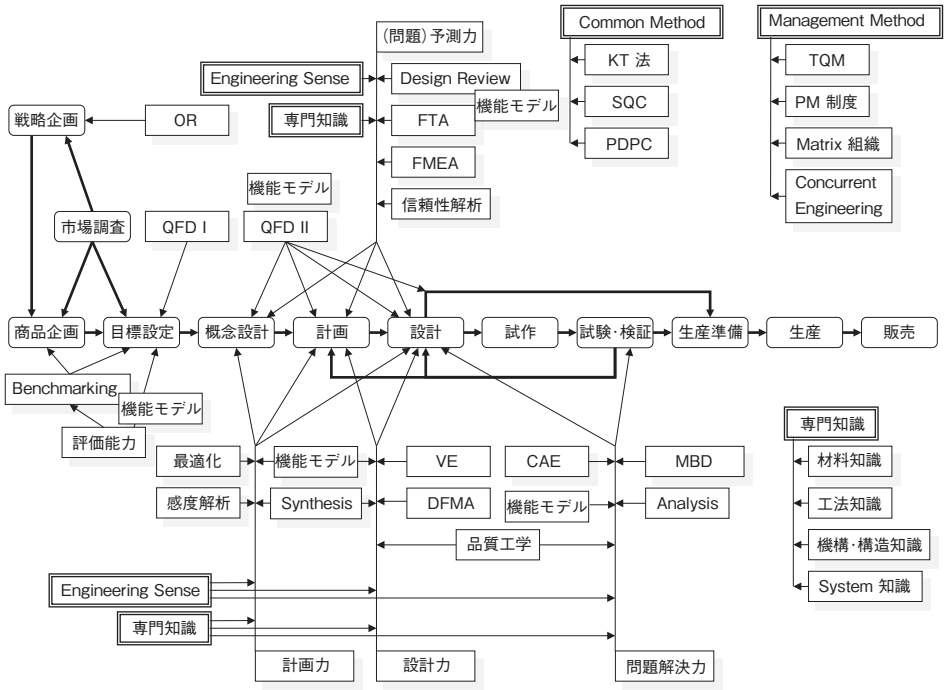


図 4　製品開発プロセス

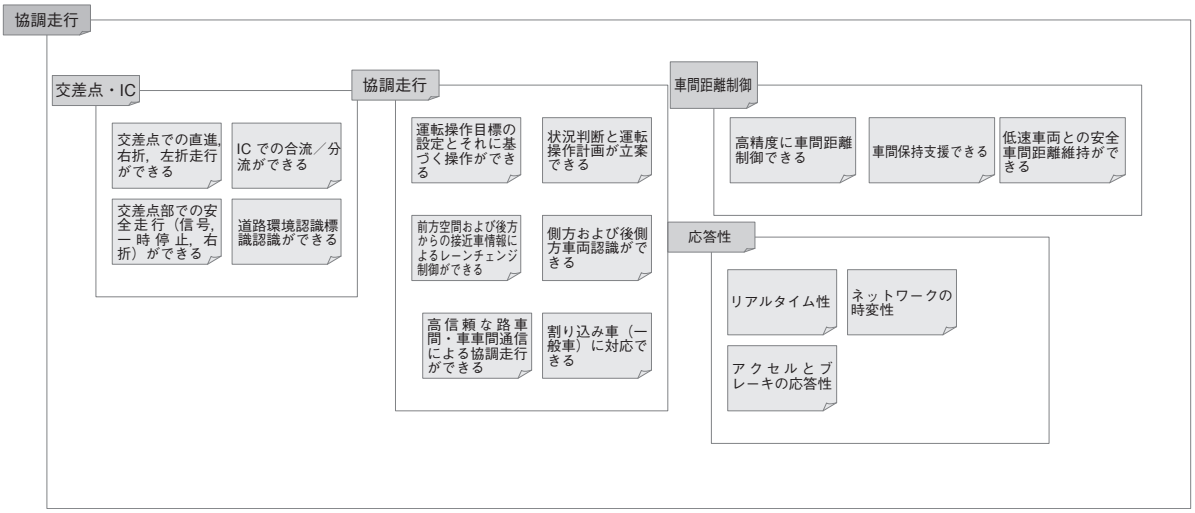


図5　KJ 法による要求品質の抽出

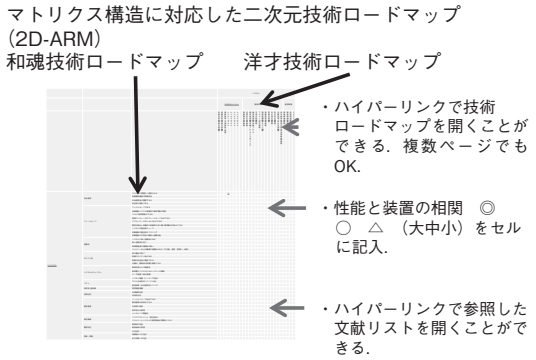


図6　要求品質展開表（2D-ARM）

2・4　自動運転を題材とした 2D-ARM

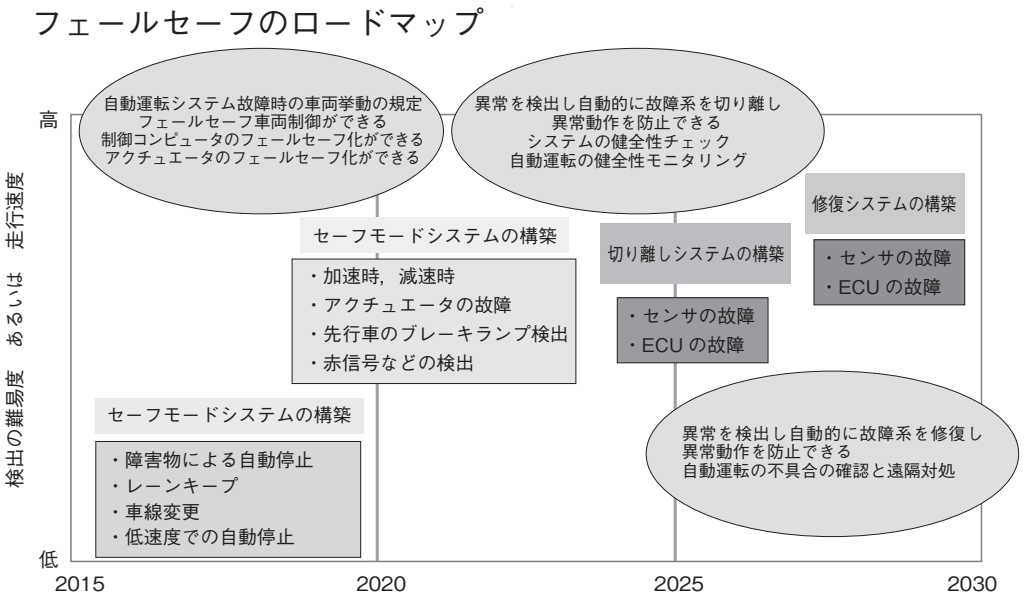
2D-ARM の具体例として自動運転に適用した事例について紹介する．技術ロードマップは，2D-ARM の縦軸および横軸の各項目について分担作成した．以下に作成した技術ロードマップおよび作成担当委員，所属，部門を示す．残された紙面を使って**図 7 ～ 14** に代表的な技術ロードマップを紹介する．なお，すべての 2D-ARM は本会のホームページにて公開している．

(1)　和魂技術ロードマップ（2D-ARM の縦軸の項目）

・社会受容性法規対応　責任範囲　事故対応［田村直義（インターリスク総研）法工学専門会議］
・社会受容性防御防衛　社会受容性［筒井壽博（弓削商船高等専門学校）技術と社会部門］
・社会受容性フェールセーフ　［高田　一（横浜国立大学）技術と社会部門］**図 7**
・社会受容性システムセキュリティ　［村田良美（明治大学）技術と社会部門］
・社会受容性ロバスト［村田良美（明治大学）技術と社会部門］
・混在交通　［河合俊岳〔(株) 本田技術研究所〕交通・物流部門］
・衝突防止　［関根康史（福山大学）交通・物流部門］**図 8**
・環境問題　［高田　博（東京理科大学）交通・物流部門］**図 9**
・救援活動　［高田　博（東京理科大学）交通・物流部門］
・自動手動切り替え　［ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク（東京農工大学）交通・物流部門］
・レーンキープ　［秋田時彦〔アイシン精機（株)〕交通・物流部門］
・システム統合　［西村秀和（慶應義塾大学）機械力学・計測制御部門］**図 10**
・情報関連技術　［福戸淳司（海上技術安全研究所）交通・物流部門］
・協調走行　［高田　博（東京理科大学）交通・物流部門］
・熟練者の運転実現　［稲垣瑞穂〔(株) 豊田中央研究所〕機械力学・計測制御部門］

(2)　洋才技術ロードマップ（2D-ARM の横軸の項目）

・判断技術　［林　隆三（東京理科大学）交通・物流部門］**図 11**
・HMI　［中野公彦（東京大学）交通・物流部門］**図 12**
・社会受容に必要なシステム　［堀越　整〔テュフズードジャパン（株)〕産業・化学機械と安全部門］
・操作技術　［中村弘毅（神奈川大学）機械力学・計測制御部門］
・自動運転システム　［ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク（東京農工大学）交通・物流部門］**図 13**
・運転支援システム　［高橋正樹（慶應義塾大学）機械力学・計測制御部門］
・通信装置　［高田　博（東京理科大学）交通・物流部門］
・ECU　［石塚真一〔サイバネットシステム (株)〕機械力学・計測制御部門］
・センサ　［古屋泰文（弘前大学）機械材料・材料加工部門］
・通信　［今城昭彦〔三菱電機（株)〕交通・物流部門］**図 14**



和魂技術（レベル１：社会受容，レベル２：フェールセーフ）

図７　和魂技術ロードマップ－社会受容性フェールセーフ

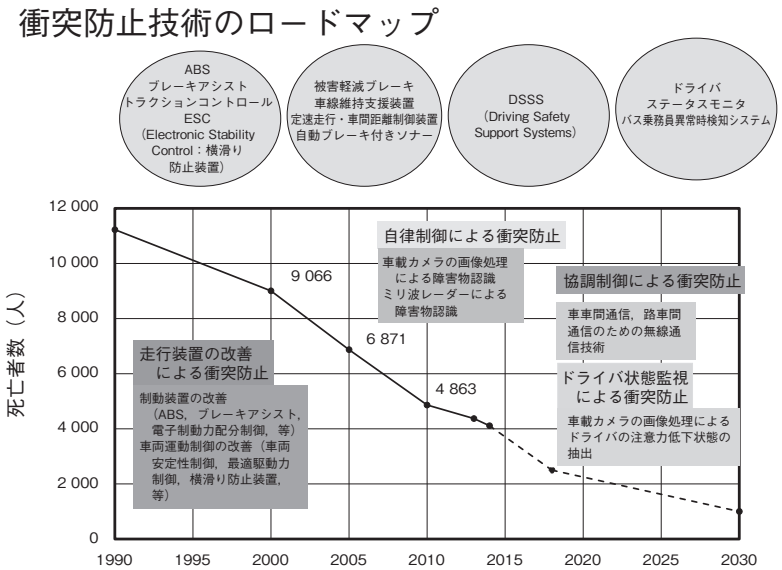


図８　和魂技術ロードマップ－衝突防止

2･5　おわりに

P-SCC14「自動運転に関する分野横断型分科会」（活動期間２年間　部門協議会直属）は発足後１年経過した．分科会の２年目の活動はイノベーションを促す技術ロードマップの開発および開発技術に関する技術ロードマップの開発を予定している．横断型活動としてできうる限り多くの部門から多くの委員を集めたいと考えており，委員を広く募集している．

〔高田　　博　東京理科大学〕

文　　献

（1）高田　博，自動車から見た機械工学全体の将来展望，日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集，(2014-9)，P00100.
（2）高田　博，自動運転 ARM 研究会ワーキンググループ活動，日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集，(2015-9)，P002003.

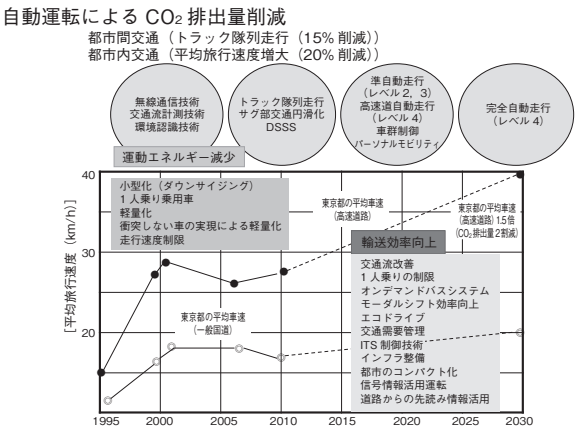


図９　和魂技術ロードマップ－環境問題

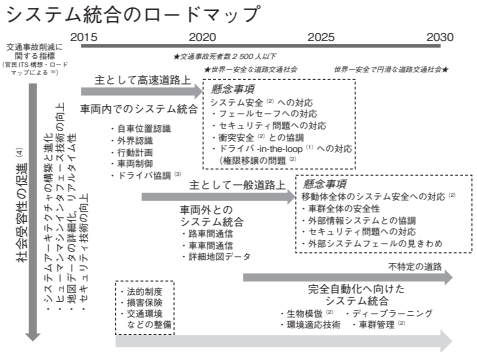


図 10　和魂技術ロードマップ－システム統合

図 11　洋才技術ロードマップ－判断技術

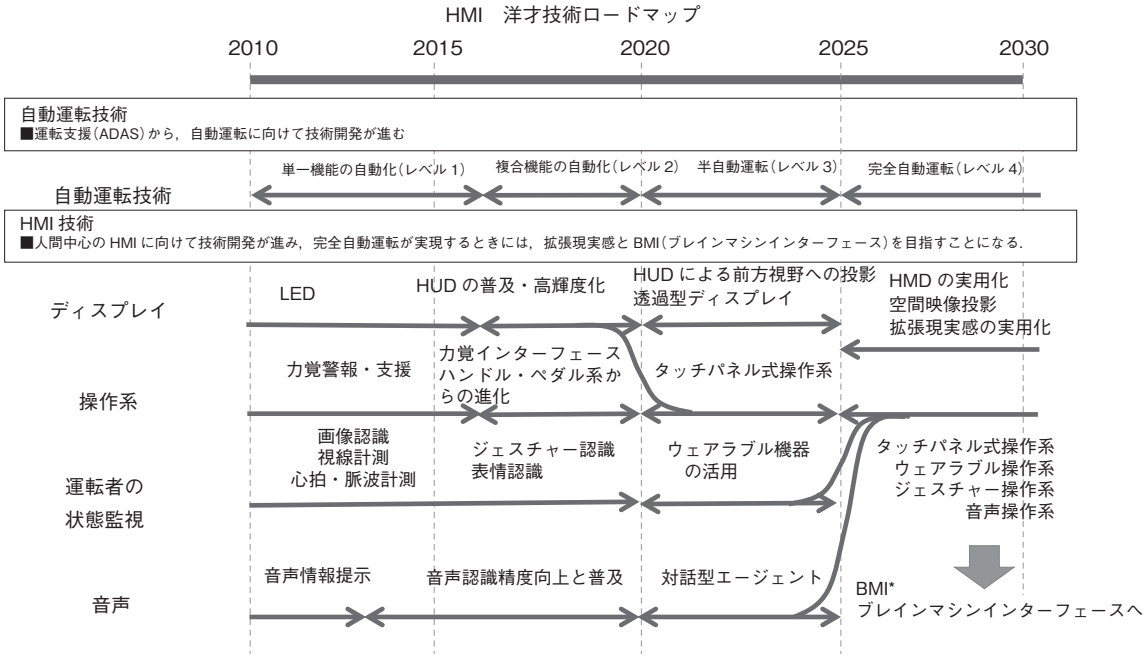
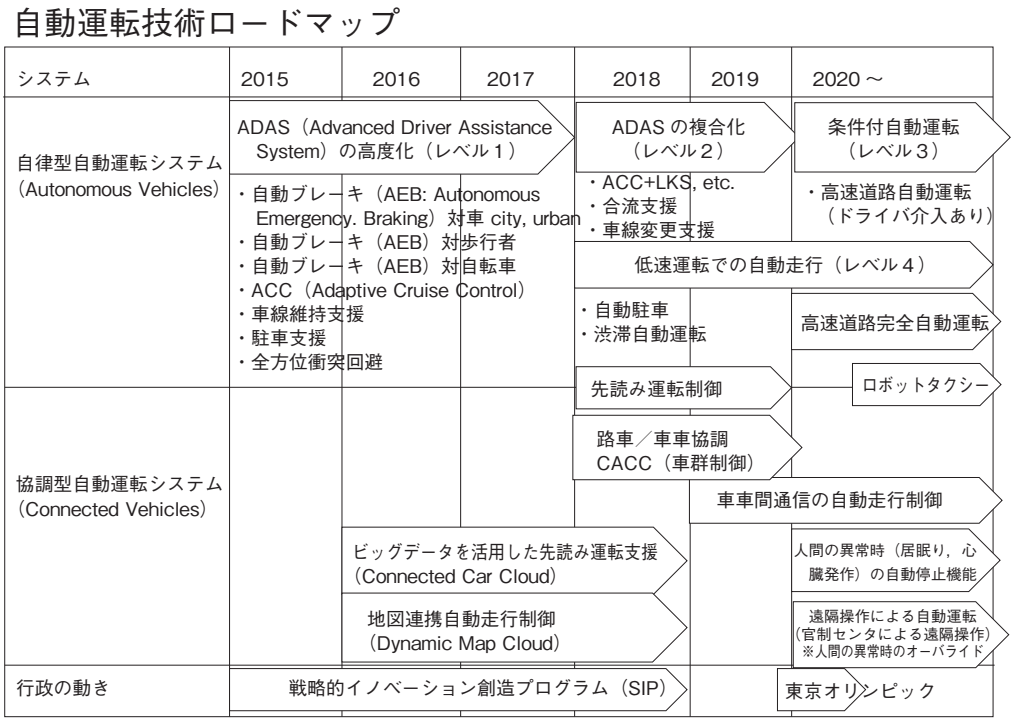


図 12　洋才技術ロードマップ－ HMI



LKS: Lane Keeping System,　CACC: Cooperative Adaptive Cruise Control

図 13　洋才技術ロードマップ－自動運転システム

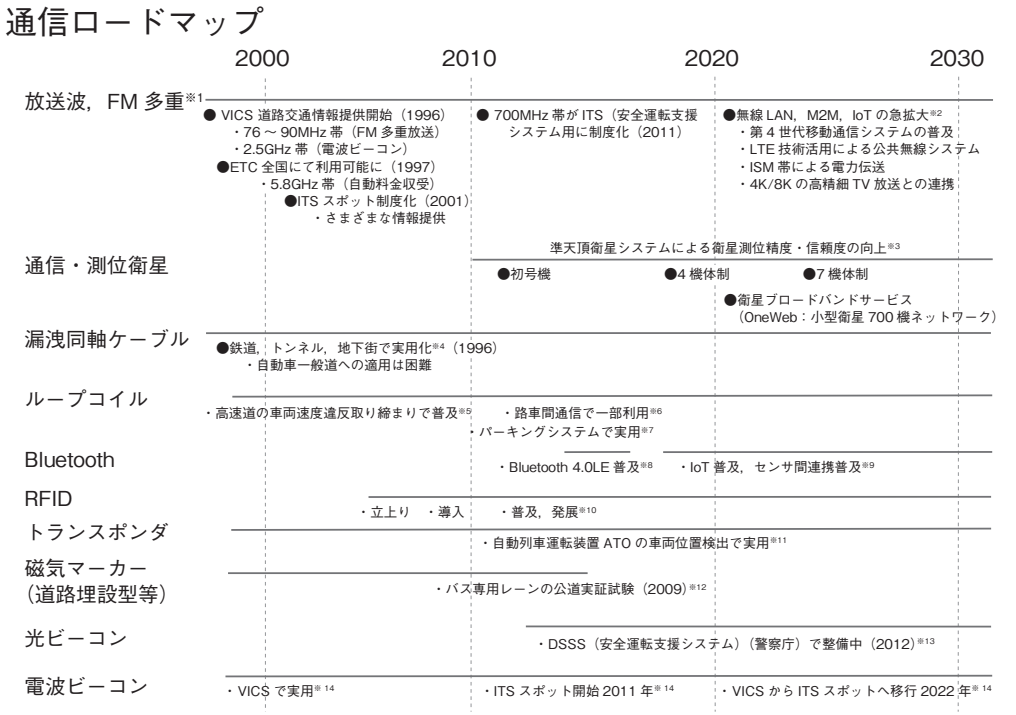


図 14　洋才技術ロードマップ－通信

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

3. 計　算　力　学

3・1　趣旨

日本の国際的技術競争力を維持・発展させていくためには，新しいアイディアの創出，設計開発プロセスの効率化，製品の品質向上が不可欠である．これらに直接的に貢献できる分野として，計算力学に対する産業界からの期待は非常に大きい．また，これからの日本や世界が直面するさまざまな問題，たとえば高齢化社会，医療，防災・減災，地球温暖化等の解決に向けても，計算力学は大きな期待を背負っている．本ロードマップでは，計算力学分野を先導するハイパフォーマンスコンピューティングおよび産業界における計算力学の利用についてのロードマップを示す．

3・2　ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）

3・2・1　ポスト「京」重点課題アプリケーション開発

2014 年度から「京」の後継機となるポスト「京」の開発（フラッグシップ 2020 プロジェクト）が始まっている（図 1）．このプロジェクトでは，2020 年頃にフラッグシップシステム：ポスト「京」を頂点とした計算技術インフラを構築し，社会的・科学的課題を解決すること，および国際競争力の強化を目指している．2014 年 12 月には，国家的に解決を目指す社会的・科学的課題に対して世界を先導する成果を創出するためとして，九つの重点課題が選定されている[1]．これらのうち，機械工学にとくに関連する重点課題としては，重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」および重点課題⑧「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」がある．これらの重点課題は，それぞれ以下のサブ課題で構成されている．

重点課題⑥：革新的クリーンエネルギーシステムの実用化

A)　高圧燃焼・ガス化を伴うエネルギー変換システム
B)　気液二相流および電極の超大規模解析による燃料電池設計プロセスの高度化
C)　高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析
D)　核融合炉の炉心設計
E)　膜・界面のナノレベルからの設計

重点課題⑧：近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発

A)　上流設計プラットフォームの開発整備と産業利用実証によるものづくり革新

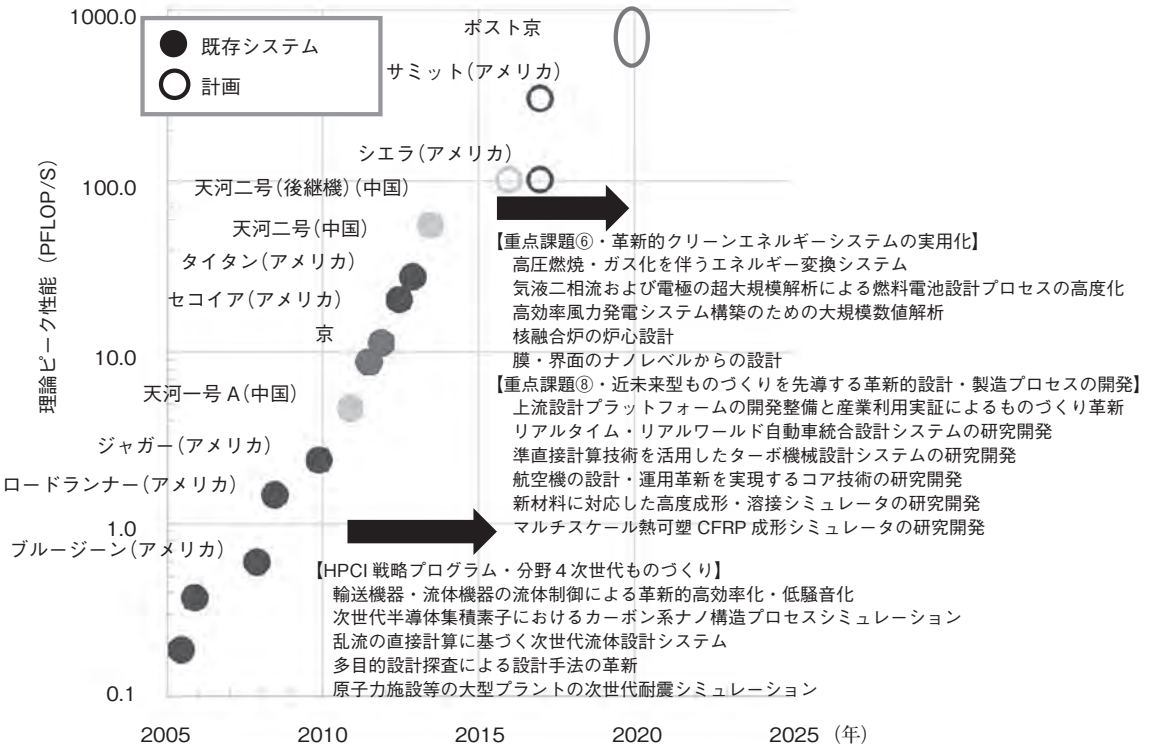


図 1　ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）のロードマップ

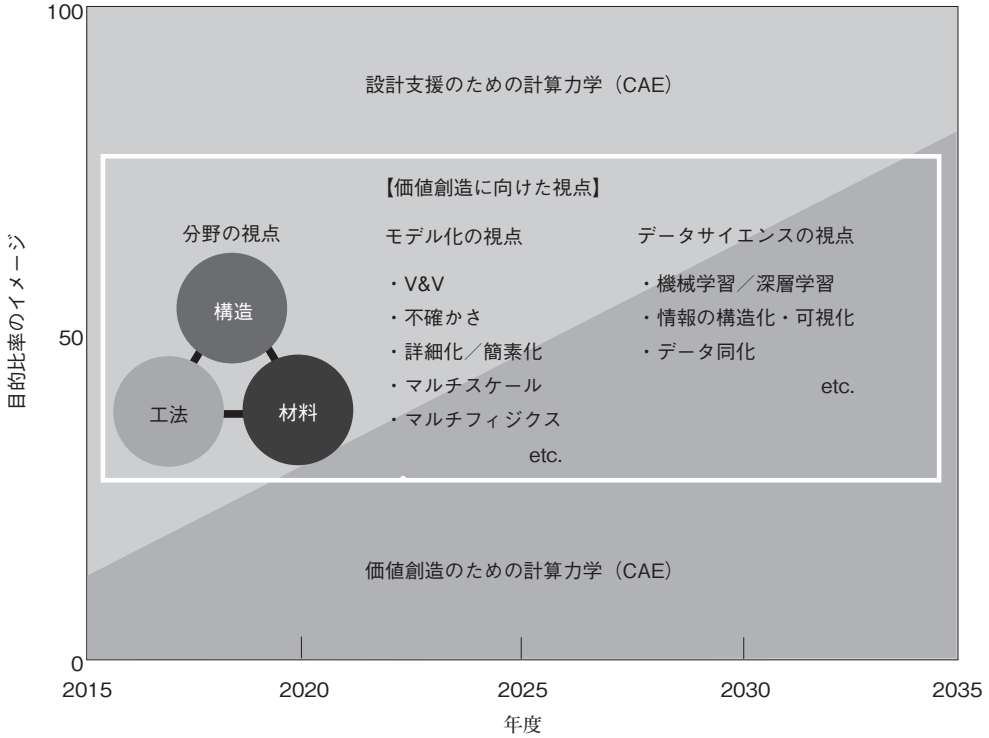


図2　産業界における計算力学（CAE）のロードマップ

B）　リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発
C）　準直接計算技術を活用したターボ機械設計システムの研究開発
D）　航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発
E）　新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発
F）　マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発

2020年代には，ポスト「京」マシンを利用したこれらの研究課題での大きな技術進展が期待されている．

3・2・2　そのほかの研究課題

これから10年程度の間に，学術界・産業界に「京」クラスのコンピュータが普及していくことが予想される．HPCの活用の方向性としては，①大規模シミュレーションの実施と②多数シミュレーションの実施の二つが考えられる．①については，現在低レイノルズ数条件での利用に限定されてきたLarge Eddy Simulation（LES）／直接数値計算（Direct Numerical Simulation：DNS）を用いた流体解析が普及していくことが予想される．これにより，輸送機器・流体機器が高効率化・低騒音化されることが期待される．また，反応流シミュレーション，マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション等のさらなる発展が期待される．構造分野では，プラントや車両，機器などの複雑構造物をまるごと解析しようとするこれまでの流れをさらに一歩進め，とくに非線形解析（弾塑性，クリープ，超弾性，複合材料，接触など）およびマルチスケール解析，また流体や磁場との連成解析のためのカップリング機能などが，ワークステーションや小規模PCクラスタだけでなく，大規模HPC環境上においても整備されていくものと思われる．②に関しては，設計最適化と不確定性定量評価[2]が注目を集めている．設計最適化は，理想的な問題では最適な設計が得られるとともに，多目的設計最適化を行うことで設計空間を俯瞰（ふかん）することが可能となる．不確定性定量評価は，設計が不確定な上流段階での設計性能評価や製造工程での誤差等を考慮した設計評価が可能になる手法である．これらの技術が活用できることにより，より品質と信頼性が高い製品が効率的に設計開発できるようになると期待される．

〔大山　聖　宇宙航空研究開発機構，
河合　浩志　諏訪東京理科大学〕

3・3　産業界における計算力学

産業界の立場でまとめた計算力学（CAE：Computer Aided Engineering）の技術ロードマップを**図2**に示す．国際競争を勝ち抜くために，産業界では材料を含めたプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションが求められている．イノベーションの創出には新たな視点やスケールからの思考やその過程で生まれる気づきやひらめきが役に立つ．そのため，今後さらにさまざまな視点やスケールからのモデリングによる思考が求められる．それを後押しするのが，HPCや，データサイエンスと融合した多角的なデータマイニングである．すでにシミュレーションと進化計算による多目的最適化やデータマイニングを利用した多目的設計探査が産業界でも活用されているものの，現在は設計支援を目的とする従来からのCAEが多くを占めている．しかしながら，今後は価値創造を目的とする新たなCAEの活用が増加していくと考えられる．

〔小石　正隆　横浜ゴム（株）〕

文　献

（1）http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/12/1354134.htm
（2）http://science.energy.gov/~/media/ascr/pdf/research/am/docs/EMWGreport.pdf

技術ロードマップから見る2030年の社会

4. バイオエンジニアリング

4・1　マイクロ・ナノバイオメカニクス：荷重支持組織の再生医療への応用

4・1・1　趣旨

近年，細胞を人工物と混和し，これに生化学的・物理的刺激を加えることで所望の組織に分化させ，治療に応用する再生医療への期待が高まっている．ところで，荷重支持組織（骨，腱・靭帯，軟骨，動脈など）あるいは力発生組織（筋肉，心筋，消化管など）の形態や機能の維持には適切な力学刺激が必須であることが明らかとなってきており，組織再生には力学刺激の考慮が不可欠である（図1）．

4・1・2　技術課題に対する社会的・技術的ニーズ

・機能の失われた生体組織を新たな組織で置き換えたい．

・荷重支持組織の再生を考えるうえで，力学刺激を考慮することが必要である．

・未分化細胞の分化誘導や生体組織の形態形成（全体の形成だけでなく，血管系の走行なども）に力学環境が密接に関与している．細胞分化と組織再生を支配する力学因子を明らかにする必要がある．

4・1・3　将来の社会に対する展望

・動物実験で再生された天然組織と遜色ない組織の出現．

・ヒトに移植できる天然組織と遜色ない再生組織の出現．

・本人細胞から再生された天然組織と遜色ない組織出現

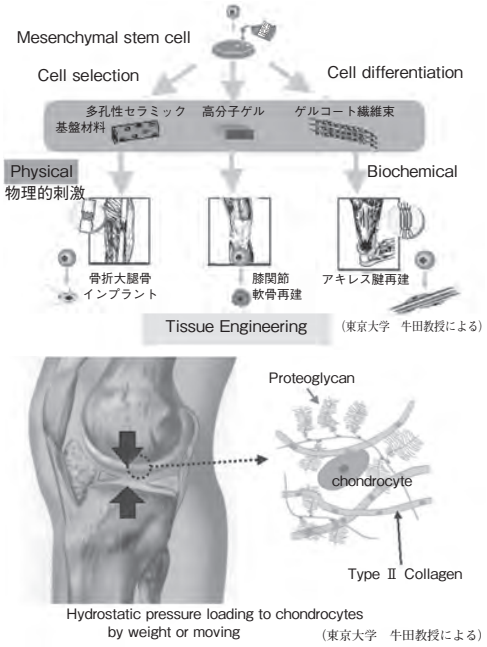


図1　荷重支持組織の再生医療

4・2　生体低摩擦接合

生体低摩擦接合による省エネルギー化についてのロードマップを図2に示す．

〔バイオエンジニアリング部門ロードマップ委員〕

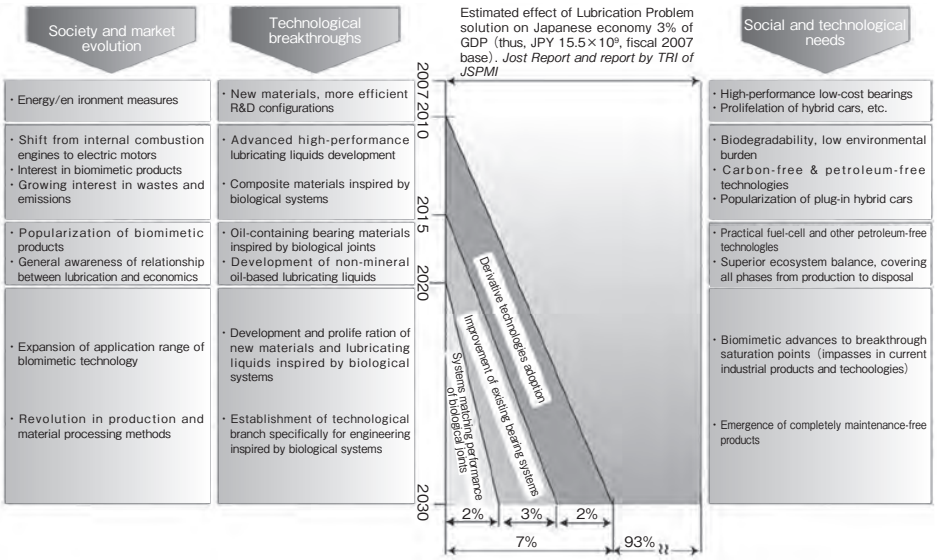


図2　生体低摩擦接合

技術ロードマップから見る2030年の社会

5. 材料力学

5・1 趣旨

材料力学は，基盤技術として機械工学のあらゆる領域に適用される．そして，機械製品の複雑化，大型化，超小型化と使用条件の過酷化に対応して，実際の構造を実現するための設計・製作・保守・運用に関わる評価技術を供給することが求められる．とくに社会インフラを支える機械の事故や，複雑な機器の構成要素のトラブルは社会的・経済的に大きな損失をもたらす．

したがって，材料力学に期待される現代的要請として次の項目を挙げることができる．

・機械設備・機器の安全を確保するための評価と対策を示すこと．
・既存の機械設備を評価して交換・補修などの指針を的確に示すこと．
・安全・安心（信頼性）と低コストを両立させる判断手法を示すこと．
・エネルギー問題解決のための革新を支える指針を示すこと．

以上を実現するための機能（手法）を分析し，対応する要素技術を抽出してロードマップを作成することとした．材料力学の対象は多岐にわたっていることから，2007年には産学で議論を行える典型例として，エネルギー機器の効率／出力向上を実現するために必要な材料力学分野のロードマップを示した．その後，制定から数年が経過し，見直しの時期となった．この間，社会では「効率」に加え「安全」や「安心」がより強く求められるようになった．また，2011年3月に発生した東日本大震災と福島第一原子力発電所事故により，その傾向がさらに強くなったと考えられる．これにより，「エネルギー機器」に対しても「安全と信頼性」の向上がより重要な課題となってきた．これを受けて，2014年度に材料力学部門内に技術ロードマップ委員会を設置し，表題を「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」と改め，内容の見直しを含む改訂を行った[1]．

5・2 エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上

5・2・1 社会的・技術的ニーズ

ロードマップの見直しに当たり，初めに産業界の視点から「ニーズ（エネルギー機器とその要求）」を，学術界の視点から「シーズ（研究のアプローチ）」をそれぞれ選定した．

「ニーズ（エネルギー機器とその要求）」としては，超高温・超高圧・環境劣化などの条件で使用される機器として，火力発電機器（汽力発電），火力発電機器（ガスタービンおよびコンバインドサイクル），原子力発電機器，燃料電池（SOFC），およびエンジン（ロケットエンジンなど）を選定した．これらの機器への要求として，近年の社会情勢を勘案して，安全，信頼性，効率向上を挙げた．また，再生可能エネルギーや水素エネルギーの大量導入時期には，組織やエネルギーの種類を越えた大規模なグリッドの管理，自然現象などさまざまな荷重への対応が必要とされる．上記のエネルギー機器に対しても，人・組織・人工物を含むトータルマネージメントシステム技術が必要になると想定される．

「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」技術ロードマップ

1. エネルギー機器の定義
   超高温・超高圧・環境劣化などの条件で使用される機器
2. ニーズ側（産業界）視点とシーズ側（大学）視点のスコープ全体像を見える化
3. 産業界のニーズ
   エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上（高温・高圧化）・低環境負荷
4. 材料力学研究のシーズ
   (1) サイズ・スケールの視点…材料科学（ミクロ），機器・構造（マクロ）
   (2) 手法の視点……実験，微視観察，計測，シミュレーション
   (3) アプローチの視点……ハード・ソフト（情報科学など）

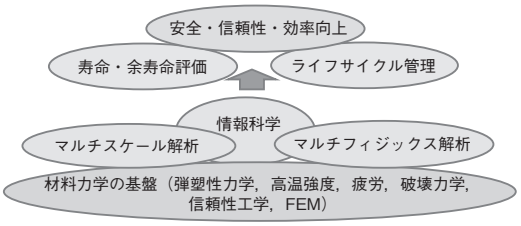


図1 ニーズ側（産業界）視点とシーズ側（大学）視点の全体像

一方，ブレークスルーをもたらす「シーズ（研究アプローチ）」の項目としては，マルチスケール解析，マルチフィジックス解析，情報科学，寿命・余寿命評価，ライフサイクル管理などを選定した．これらは，材料力学の基盤である，弾塑性力学，高温強度，疲労，破壊力学，信頼性工学あるいはFEMなどの要素技術の上に新しい切り口として定義したものである（**図1**）．現時点においては，既存のロードマップの延長上で項目を選定している．ここでは取り上げていないが，今後は再生可能エネルギーや水素エネルギーについても，同様の整理が必要と考えられる．

「ニーズ（エネルギー機器とその要求）」「シーズ（研究アプローチ）」として選定した項目について，その関連を表にまとめた．これは，「エネルギー機器とその要求」において，各機器特有の技術キーワードを摘出し，ブレークスルーをもたらす研究アプローチの各項目との対応を一覧表としてまとめたものである（**表1**）．次に，「ニーズ（エネルギー機器とその要求）」と「シーズ（研究アプローチ）」の対応を表にまとめた**表1**を詳細化し，ブレークスルー技術のキーワードを可能な限り材料力学分野の学術用語で表現してみた．材料力学研究者が研究テーマと具体的にニーズの関係を理解しやすいようにまとめ直したものである（**表2**）．

5・2・2 汽力発電および高効率コンバインドサイクル発電プラント（図2，3）

「汽力発電プラントのロードマップ」は，2007年度版をベースに総合資源エネルギー調査会エネルギー関係技術開発ロードマップ[2]などを参考に，700℃級先進的超々臨界圧発電（A-USC）の導入目標時期を追加するとともに，研究アプローチ

表1　エネルギー機器のニーズと研究アプローチの関係

機器＆ニーズ ＼ 研究アプローチ		マルチスケール（観察・シミュレーション）	マルチフィジックス（連成）	情報科学（データベス）	寿命・余寿命評価（損傷・モニタリング・非破壊検査）	ライフサイクル管理（リスク評価・損傷許容・確率）
火力（汽力）	安全	○材料劣化機構	◎地震	◎シミュレーションと保守DBの統合	○材料劣化予測・使用限界	○損傷予測・許容限界
	信頼性	◎材料劣化予測	◎材料劣化機構	◎監視・検査DBの活用	◎長時間予測 ◎状態監視技術	◎損傷予測・損傷許容 ◎確率論的評価 ◎リスク評価
	性能		◎連成解析（熱，流体，構造）	◎耐熱材料開発 ◎耐熱設計		
火力（ガスタービン）	安全	○材料劣化機構	◎地震	◎シミュレーションと保守DBの統合	○材料劣化予測・使用限界	○損傷予測・許容限界
	信頼性	◎材料劣化予測	◎材料劣化機構	◎監視・検査DBの活用	◎長時間予測 ◎状態監視技術	◎損傷予測・損傷許容 ◎確率論的評価 ◎リスク評価
	性能		◎連成解析（熱，流体，構造）	◎耐熱材料開発 ◎耐熱設計		
原子力（安全・限界荷重）	安全	◎材料劣化機構	◎地震・限界荷重 ◎連成解析（熱，流体，構造）	◎損傷事例DB ◎シミュレーション・モニタリング・大規模データ解析の組合せ		
	信頼性	◎材料劣化予測	◎破壊駆動力 ◎LRFD法・破損確率 ○荷重・強度一貫評価	◎損傷事例DB ◎トータルマネージメントシステム（人・組織を含むシステム）	◎モニタリング検査と解析評価の連携	◎リスクベース手法
	性能					
燃料電池（SOFC）	安全	◎材料劣化機構			○材料劣化予測・使用限界	
	信頼性	◎材料劣化予測	◎寿命予測			
	性能		◎連成解析（電気―熱―反応） ◎焼結解析			
エンジン（ロケットエンジンなど）	安全		◎極限荷重評価			
	信頼性	◎材料劣化機構	◎超高温極低温			
	性能		◎連成解析（熱，流体，材料）			

表2　研究アプローチとブレークスルー技術の具体例

研究アプローチ ＼ ニーズ	火力（蒸気）	火力（ガス）	原子力（安全・限界荷重）	燃料電池（SOFC）	エンジン（ロケットエンジンなど）
マルチスケール 観察技術 結晶塑性 転位動力学 分子動力学	・材料劣化メカニズム解明（クリープ） ・余寿命予測技術（クリープ損傷）	・材料劣化メカニズム解明（単結晶・一方向凝固合金，コーティング） ・余寿命予測技術（クリープ・疲労）	・中性子照射脆化メカニズム解明 ・熱脆化メカニズム解明 ・SCC発生メカニズム解明 ・環境疲労劣化メカニズム解明	・材料劣化メカニズム解明（組織変化） ・余寿命予測技術（発電能力）	
マルチフィジックス 連成（流体・伝熱・振動） 荷重（自然現象など） 製造プロセス	・熱－流体－構造の連成解析 ・限界状態評価 ・損傷許容限界評価	・熱－流体－構造の連成解析 ・限界状態評価 ・許容限界評価	・熱－流体－構造連成解析（熱疲労劣化予測，減肉予測） ・地盤－建屋－機器構造連成解析（地震限界荷重・耐震強度予測） ・事故時の強度評価技術 ・SCC，疲労劣化低減（製造・表面改質）	・焼結解析（製造） ・材料劣化（組織変化）解析 ・電気－構造－反応解析	・極限荷重評価技術（超高温，極低温等） ・熱－流体－構造連成解析
情報科学 データベース	・材料データベースと保守管理データベースの融合 ・統合最適設計	・材料データベースと保守管理データベースの融合 ・統合最適設計	・材料データベースの構築 ・損傷事例データベースの活用 ・保全データベースの活用 ・情報共有化		
寿命・余寿命評価 損傷予測 モニタリング 非破壊検査	・材料劣化メカニズム解明（クリープ） ・余寿命予測技術（クリープ損傷） ・状態監視技術 ・保守管理DB活用による損傷予測	・材料劣化メカニズム解明(クリープ・疲労) ・余寿命予測技術（クリープ・疲労） ・状態監視技術 ・保守管理ＤＢ活用による損傷予測	・中性子照射脆化予測，熱脆化予測 ・SCC・疲労き裂発生・進展予測 ・疲労モニタリング ・プラント状態監視技術（状態監視保全） ・非破壊検査技術の高度化	・材料劣化メカニズム解明・使用限界（組織変化，発電能力）	
ライフサイクル管理 リスクベース 損傷許容 確率（損傷・稼動率）	・限界状態評価 ・確率論的評価 ・リスク評価	・限界状態評価 ・確率論的評価 ・リスク評価	・廃炉関連技術 ・保全最適化技術 ・維持規格高度化 ・欠陥許容基準 ・リスク評価技術の活用		

の視点として追加されたマルチスケール解析，寿命評価，ライフサイクル（LC）管理などのキーワードを加筆して修正した．

また「高効率コンバインドサイクル発電プラント」についても，同様に総合資源エネルギー調査会エネルギー関係技術開発ロードマップなどを参考に1 600℃級，1 700℃級の実用化目標を追記するとともに，石炭ガス化複合発電（IGCC），石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）などを追加し，マルチスケール解析など新たに研究視点として追加されたキーワードを加筆して修正した．

5・2・3　マルチスケール解析およびマルチフィジックス解析（図4，図5）

マルチスケール解析は，ナノスケール（原子・電子）からマ

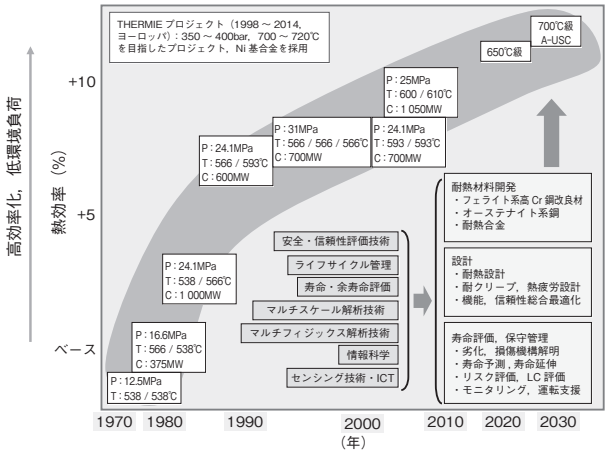


図 2　汽力発電プラントのロードマップ

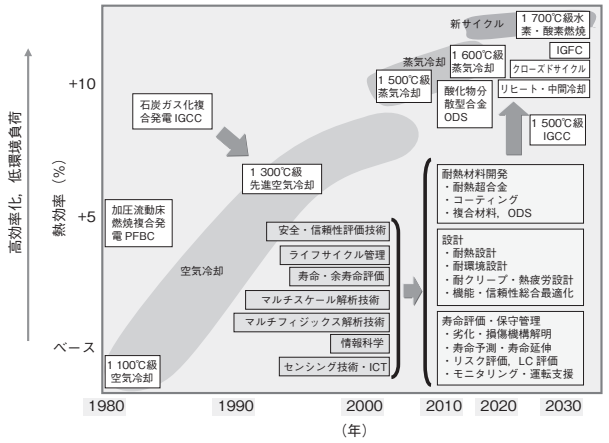


図 3　高効率コンバインドサイクル発電プラントのロードマップ

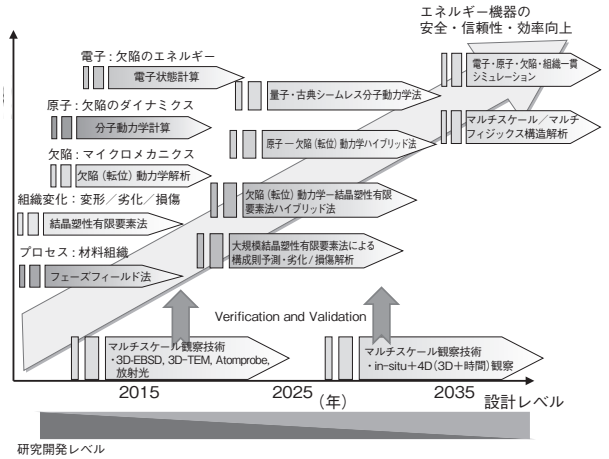


図 4　マルチスケール解析のロードマップ

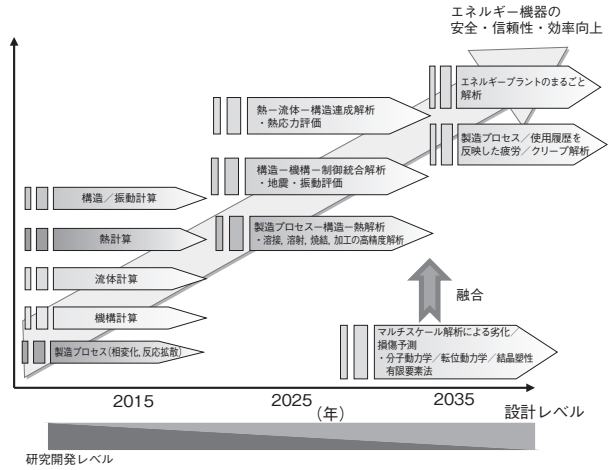


図 5　マルチフィジックス解析のロードマップ

クロスケール（欠陥，結晶組織，試験体）までを，カバーする解析技術である．電子状態計算，分子動力学，欠陥（転位）動力学，結晶塑性有限要素法，フェーズフィールド法などさまざまなスケールごとの解析手法と，EBSD や TEM，Atom-probe などの観察技術が組み合わされた技術が開発されており，材料強度のメカニズム解明を目指している．

それぞれの解析手法は，間接・直接的に統合され，階層を超えて知見が伝えられることにより，高度化していくと考えられる．将来的には，マルチフィジックス解析とも統合され，CAE の一端を担うと考えられる．

マルチフィジックス解析は，構造・熱・流体・機構のさまざまな力学を連成させる解析手法である．古くから，熱―構造解析，流体―構造解析などの連成解析が行われてきたが，最近では，これらすべてをシームレスにつなぐという意味で，マルチフィジックス解析と呼ばれ，エネルギープラントや自動車をまるごと解析してしまおうという試みが行われている．さらに，力学解析と制御を統合させ，物理モデルに基づいた制御技術も期待されている．また，機械工学分野では，これまで難しかった製造プロセス（溶接，溶射，焼結，加工）の解析も盛んに行われるようになり，製造プロセス／使用履歴を反映した強度解析が期待されている．将来的には，マルチスケール解析の知見を取り入れ，さらなる高度化をしていくと考えられる．

5・2・4　情報学応用材料強度技術（図 6）

エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上のための技術において，すでに国際的なリーディングカンパニーは世界的な機器モニタリングネットワークを駆使してビジネスの拡大を進めている．一方，わが国では，きめ細かい点検・保守が行われているが，必ずしもビジネスに生かす情報資源として有効活用されているとはいえない．そこで，本ロードマップでは，まず，既存データの掘り起こしと処理に関して，医療やマーケッティングの分野で威力を発揮している多変量解析技術の応用を最初のステップとして取り上げている．その次に，不完全データも生かせるようなデータ同化手法を活用し，事象のトレンドを推定するための定性データも含めた最適なパラメータを見出していく．さらに，事象間の因果関係を分析し，高度な予測モデルを組み立てていく．また，ヒューマンインタラクティブな操作環境の高度化や，最終的には人の手を介さない自律化した高度統合情報システム化により，暗黙知や経験知までを含めた的確な予測ときめ細かい判断を可能とするシステムが実用化されて，エネルギーネットワークの効率化とエネルギーミニマム化が実現されると考えられる．

5・2・5　寿命・余寿命評価およびライフサイクル管理（図 7，図 8）

「寿命・余寿命評価」はエネルギー機器を安全にかつ効率的に運用するために重要な技術である．ロードマップの作成に当たっては，現在も盛んに研究が行われ，今後実用化への展開が

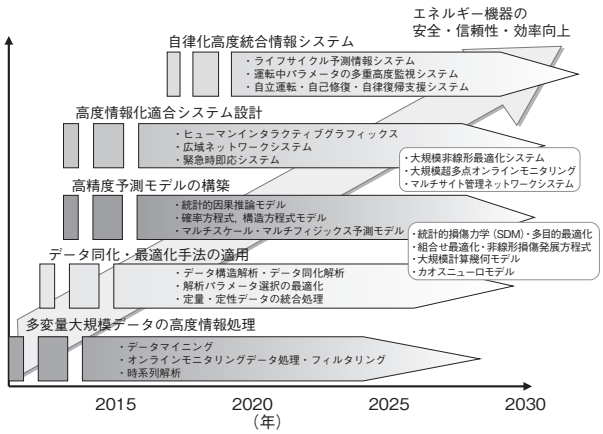


図6　情報学応用材料強度技術のロードマップ

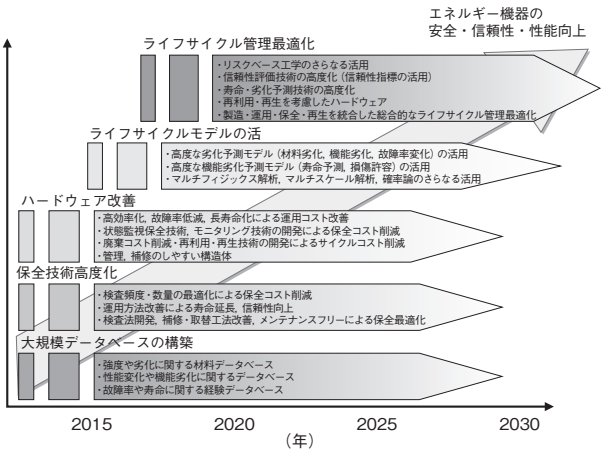


図8　ライフサイクル管理のロードマップ

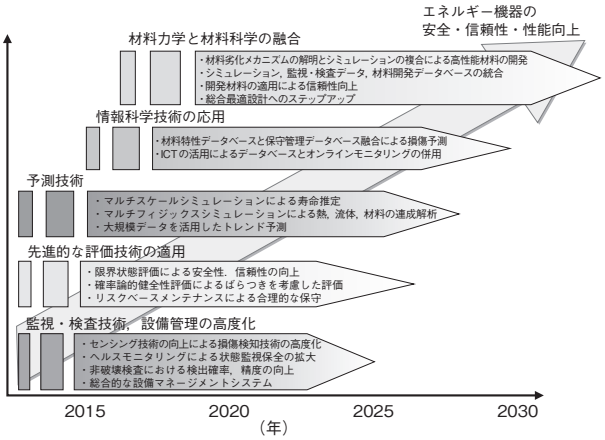


図7　寿命・余寿命評価のロードマップ

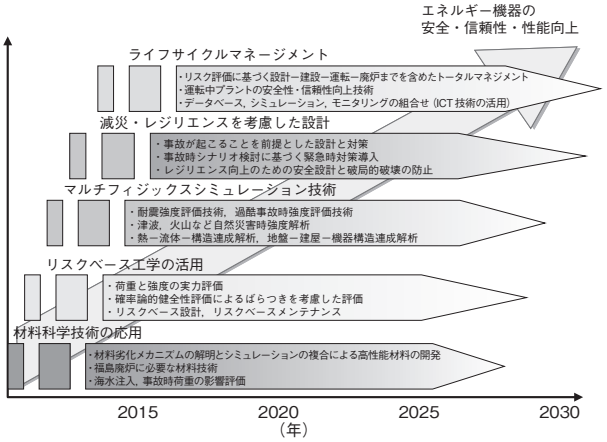


図9　原子力（安全・信頼性）のロードマップ

期待されているヘルスモニタリングや非破壊検査などの監視・検査技術，限界状態評価やリスクベースメンテナンスなどの先進的な評価技術，マルチスケールシミュレーション，マルチフィジックスシミュレーションなどの予測技術などのハードとソフトについて網羅した．さらにこれらの技術の進展に加えて，データベースあるいはICTなど情報科学技術の応用による予測・監視技術の高度化，材料力学の知見の材料開発への展開と開発材料の適用によるいっそうの信頼性，性能の向上につながる総合最適設計へのステップアップが期待されている．

ライフサイクル管理では，製造，供用開始から，運用，保全，さらには廃棄や再生などの広範囲の取り組みをカバーしながら，安全・信頼性・性能向上を実現していく必要がある．そこで，ライフサイクル管理の最適化に向けて，信頼性評価技術，寿命・劣化予測技術などのソフトウェアの対応と，保全，検査，再生技術などに代表されるハードウェアの開発課題を網羅した．また，コストパフォーマンスと信頼性確保を両立するためには，バランスがとれ，かつ戦略的な取り組みが要求されている．それを実現するためのリスクベース工学の活用と，その基礎となるデータベースの構築も課題として含めた．

5・2・6　原子力の安全・信頼性（図9）

従来は事故を起こさないための設計が機械技術者の活動の主目的であったと考えられるが，福島第一原子力発電所事故を経験したことから，事故が起こることを前提とし，減災やレジリエンスを考慮した設計と対策が世の中と規制側から求められるようになった．このため，設計・メンテナンス・緊急時対応などの役割分担を合理的に決めるためのリスクベース工学や，リアリスティックな強度をメカニズムに基づき予測するための材料科学技術の活用がこれまで以上に必要とされている．また，実験が難しい事故時のシナリオ検討等にはマルチフィジックスシミュレーション技術の応用が期待されている．将来的には，上記の技術が組み合わさることによって，プラントの設計から廃炉までのトータルのライフサイクルマネージメントを合理的に行うための技術を確立することが望まれている．

〔笠原　直人　東京大学，猪狩　敏秀　三菱重工業（株），
泉　　聡志　東京大学，高木　愛夫　東京電力（株），
釜谷　昌幸　（株）原子力安全システム研究所，藤山　一成　名城大学〕

文　　献

（1）日本機械学会材料力学部門ホームページ技術ロードマップ情報
http://www.jsme.or.jp/mmd/Roadmap/Roadmap.html
（2015年11月参照）．
（2）エネルギー関係技術開発ロードマップ（案），経済産業省
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/015/pdf/015009.pdf
（2015年11月参照）．

技術ロードマップから見る2030年の社会

6. 機械材料・材料加工

6・1　趣旨

機械材料・材料加工部門では，材料と加工の観点から2007年度より技術ロードマップの作成に取り組んできた．2007年度に「マイクロ・ナノ加工技術ロードマップ」，2008年度には「材料比強度技術ロードマップ」を作成した．2013年度には「3Dプリンタロードマップ」を発表し，2015年度には「自己治癒セラミックスの社会実装ロードマップ」を作成している．

6・2　マイクロ・ナノ加工技術

6・2・1　社会的・技術的ニーズ

機械材料・材料加工分野での重要な技術であるマイクロ・ナノ加工技術に関する汎用的なパラメータとして，最小加工寸法を表す加工分解能を取り上げる．加工分解能は，加工技術の進展を表す重要なパラメータである．

精密加工の分野では，谷口による有名な技術ロードマップが存在している[1]．谷口は，汎用パラメータとして総合加工精度を採用している．総合加工精度とは，**図1**に示すようにかたより誤差（正確度）とばらつき誤差（精密度）の和，すなわち許容公差である．自明として，本技術ロードマップの加工分解能は，このばらつき誤差の幅σを超えることはできない．

本ロードマップでは，とくに二次元的なマイクロ・ナノ加工と三次元的なマイクロ・ナノ加工に分類し，それぞれの加工分解能の年代変遷と進展予測を明らかにすることを目標とする．これにより，加工技術の限界である原子オーダの加工分解能の実現可能性と，その時期，必要とされるブレークスルーや新しい加工技術による産業・社会へのインパクトを議論することで，技術者に定量的な目標と，その社会的・学問的意義を与えることができ，機械工学のいっそうの進展に貢献できる．マイクロ・ナノ加工技術における社会的・技術的ニーズを以下に示す．

- 従来製品の小型化，軽量化，高性能化
- 電子回路の高集積化に伴う，製造技術，周辺技術の微細化，高集積化
- 小型化による新製品・新産業の創出（μ-TAS，マイクロサテライト，マイクロファクトリー等）
- 機能性材料の微細加工，低損傷加工

6・2・2　技術的ブレークスルー

主な加工分解能を有する方向により二次元のマイクロ・ナノ加工，および三次元のマイクロ・ナノ加工における加工分解能の年代変遷図であるマイクロ・ナノ加工技術ロードマップを**図2**に示す．二次元的なマイクロ・ナノ加工の加工分解能は，三次元的な加工より高分解能である．これは，制御すべき加工軸の多元化に伴う困難さなどから，直観的にも理解できる傾向である．現在の傾向を単純に外挿すると，二次元マイクロ・ナノ加工の加工分解能が原子オーダに達するのは，2025年以降，三次元マイクロ・ナノ加工では，早いものでも2035年以降と考えられる．これまでのマイクロ・ナノ加工は，除去加工もしくはトップダウン的な加工が主流であった．

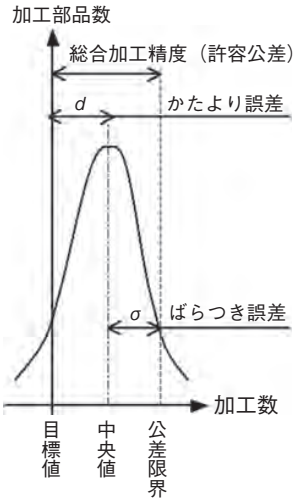


図1　総合加工精度

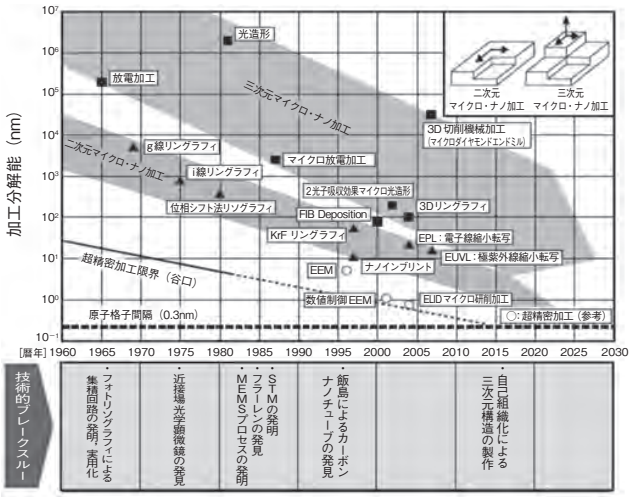


図2　マイクロ・ナノ加工技術ロードマップ

原子オーダの加工を実現するためには，別のアプローチ，すなわちボトムアップ的な加工の実現も必要と思われる．さらに，実用的な速度で原子オーダのボトムアップ的加工を実現する方法として，原子，分子の自己組織化を利用する方法などが考えられる．

6・2・3　将来の社会に関する展望

マイクロ・ナノ加工技術は，金型から半導体まで，高付加価値で機能性を要求される製品に密接に関係している．原子オーダの二次元，三次元のマイクロ・ナノ加工が実用化されれば，たとえばフルカラー・高精細な電子ペーパー，薄さ数mmのモニター，テラバイトクラスのストレージメモリ，超高燃費自動車や燃料電池の小型化など，情報機器から環境対策まで，広い技術分野での革新が期待できる．

〔秦　　誠一　名古屋大学〕

6・3　材料比強度技術

6・3・1　社会的・技術的ニーズ

人類は常により強い材料にあこがれ新材料を創り出してきた．またそれが材料の歴史でもある．一方，現代においては，ただ材料の強さだけを要求しているのではなく，軽くて強い材料という付加価値のついた材料が強く求められている．これは輸送体構造を例に考えると，輸送コストや安全性の観点に立てば高比強度材料を用いた移動体の軽量化が最も有効な手段であると同時に，省エネルギーに伴う CO_2 削減という国レベルでの要求にも合致していることからもうなずける．

そこで機械材料・材料加工部門では材料の複合化技術を考慮した金属系素材，非金属系素材の比強度に着目し，これまでの実績と今後の可能性を展望した．なお材料開発という他分野より時間のかかる研究分野であることを考慮し 20 世紀前半以降の高比強度材料の需要変化について表記した．

高比強度を有する材料の用途としては輸送機器，建築，医療福祉等のあらゆる分野にわたっており，その社会的・技術的ニーズを以下に示す．

- 競争が熾烈な航空業界から要求される航空機の大型化と燃料消費対策および低騒音性
- 環境保護や燃料コストを意識した自動車の低燃費化
- 鉄道網の高速化ならびに省エネルギー化のための車輌の軽量化
- 国からの耐震性建築構造の指導と建築物の高層化
- 高齢化社会に入り福祉介護機器の介護労働の負担軽減
- より有利なスポーツ競技器具への要求

6・3・2　技術的ブレークスルー

材料比強度の技術ロードマップを**図 3** に示す．これまでの高比強度材料の普及の過程としては，経済的な面が二次的な分野である国家プロジェクトでの航空・宇宙開発ならびに医療，スポーツ競技への使用が最初であり，それを経て一般社会への用途が浸透した．したがって材料普及を図るには製造コストの低減が決定的であり，製造コストが低減されれば，高比強度材の消費量は増大し，さらに製造コストが削減するという相乗効果が生まれる．

今後，さらなる素材の自身の比強度向上は当然必要であるが，さらにそれら素材を組み合わせた複合化技術の向上あるいは，高比強度の特性を有しつつ耐熱性，耐環境性といった他の機能も併せ持った材料開発も重要である．また，製造過程における高い作業性や対人有害性の排除も重要なポイントとなる．

6・3・3　将来の社会に関する展望

今後の高比強度材料の開発研究に当たっては新材料が広く一般に普及されることを想定し，これら材料が社会に与える影響を予想する必要がある．すなわち，新材料の地球環境や生態系に及ぼす影響，使用済み新材料の処理技術やそのリサイクル化を念頭に置きながら材料開発をする必要があるだろう．

〔大塚　年久　東京都市大学〕

6・4　3D プリンタ

6・4・1　社会的・技術的ニーズ

近年，IoT（Internet of Things），Industry 4.0 などデジタルものづくり革命が進められている．3D プリンタは，従来の加工・組立・調整を経る従来のものづくり工程を短縮・省略し，3D デジタルデータと原材料から一気に製品を加工することのできるデジタルものつくりの寵児として注目されている．3D プリンタの技術的萌芽は 30 年以上前から存在していたが，オープンイノベーションの進展に伴い，急速に普及・発展を遂げている．とくに近年，従来の試作段階での活用に留まらず，主に金型や鋳型への 3D プリンタの活用により，量産品の製造に活用される例や，航空機，医療機器など少量多品種製品の製造，ゲルなど従来の加工法では加工自体が困難な材料を用いた製品の製造など，製造現場での活用が進められている．

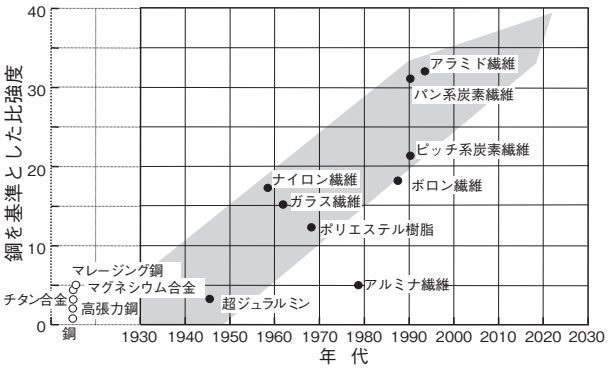


図 3　材料比強度技術ロードマップ

3D プリンタへの社会的・技術的ニーズは，数多く存在している．その例を以下に示す．

- 少量多品種生産から多種多品種生産への 3D プリンタの適用
- 同一の材料系だけなく，異種の材料が混在した製品を造形できる 3D プリンタ
- 3D データを忠実に再現する 3D プリンタ
- 造形精度の向上，とくに表面粗さやエッジ部精度の向上
- 成分・組成が同一の材料でも，従来の素材を加工した部材と，3D プリンタ
- 原材料の低価格化と，造形物の機械的，物理的特性の把握と制御

6・4・2　技術的ブレークスルー

3D プリンタ技術ロードマップを**図 4** に示す．ロードマップから読み取れることは，3D プリンタ技術の進展には，マルチ材料対応，マイクロからナノメートル，究極的には分子・原子のオーダへの微細化と，それに対応した超高速化などの技術的ブレークスルーが必要である．

6・4・3　将来の社会に関する展望

金属，セラミック，ファイバー，プラスチック，ゲルなどのあらゆる材料の 3D 印刷をシームレスにする統合的な 3D プリンタ技術基盤が確立すれば，環境低負荷・ゼロエミッションものづくりとしてのグリーン・イノベーションと，オーダーメード医療補助・食品関連機器ものづくりとしてのライフ・イノベーションの実現が期待される．

〔古川　英光　山形大学〕

6・5　自己治癒材料

自己治癒（修復）材料は，次世代の構造材料として近年大いに注目を集めている．自己治癒性により使用寿命を延長することが可能であることも大きな利点であるが，それ以上に部材としての信頼性を根本的に改善することができることの利点は極めて大きい．既存材料は，使用中少しずつ強度が低下していき，その残存強度と設計応力の差で部材の健全性が受動的に決定する．これに対して自己治癒材料は，損傷を受けても強度が自動的に健全体へ復帰するため，自己治癒性の寿命を迎えるまで部材の健全性が能動的に担保される．このアクティブな健全性発

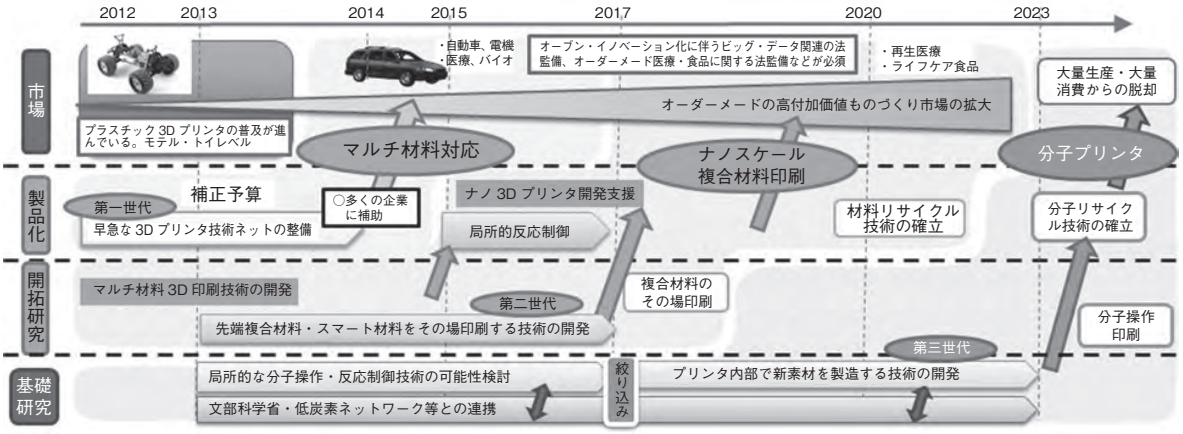


図 4　3D プリンタ技術ロードマップ

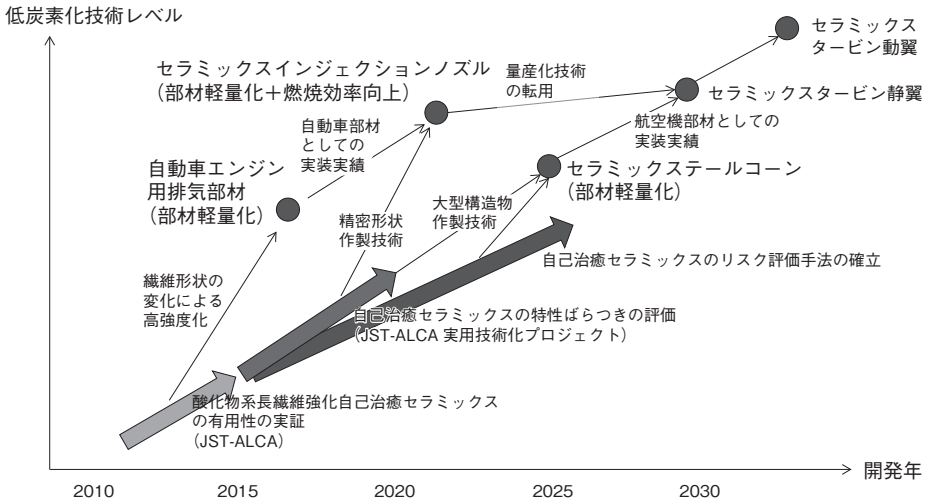


図 5　自己治癒セラミックスの社会実装ロードマップ

現によって，これまで実現しなかったイノベーションを達成することが可能となる．

自己治癒材料の最大の特徴は，化学反応を稼動中に積極的に活用することで機能を発現することである．このため，使用環境に適した化学反応を選択し，自己治癒発現に活用することが重要である．しかしながら，多くの自己治癒材料研究は，自己治癒性を発現する材料の開発に重きを置き，その後にその自己治癒性に適した応用を探していた．いわゆる“フォーキャスト型”の材料設計を実施していたために，自己治癒材料の実用化が大きく遅れた原因である．著者らは，化学反応速度に最も影響を与える温度の条件が広い高温構造用セラミックスを対象に自己治癒材料研究を実施していたために，世界的にもいち早く“バックキャスト型”材料設計の確立に成功した．

また，この材料設計指針の確立によって，自己治癒セラミックスの適用範囲を大幅に広げることに成功している．確立した材料設計指針を活用することで，現状では，300 ℃～1 200 ℃までの広い温度範囲で適用可能な，自己治癒セラミックスのバリエーションを用意することに成功している．同時に，それらに対応する温度範囲に対して，**図 5** のような自己治癒セラミックスの社会実装ロードマップを作成した．

図 5 からもわかるように，われわれの研究グループでは，自己治癒セラミックの最終応用先を，ジェットエンジンのタービン動翼としている．ジェットエンジン部材の国産化は，政府目標でもある航空産業のわが国のシェア拡大にも大きく貢献する．

また，自己治癒セラミックスの各熱機関への応用は，燃焼技術や内燃機関の設計を大きく変化させることが予想される．このため，周辺技術の革新なくして，自己治癒材料の実用化は不可能である．現状，想定されている応用事例でのロードマップ作成にとどまっているが，周辺技術の技術課題を含めた技術ロードマップを作成することが，自己治癒材料研究をさらに発展させるために急務となっている．

〔中尾　　航　横浜国立大学〕

文　　献

（1）谷口紀男，ナノテクノロジの基礎と応用，(1988)，2-3，工業調査会．

技術ロードマップから見る2030年の社会

7. 流体工学

7・1　趣旨

流体工学部門では，本分野の技術者・研究者から高い関心が寄せられているテーマを選定し，数年ごとに技術ロードマップの策定・公開に当たっている．これまでに当部門で策定した「風力発電（2008年度策定）」，ならびに，「流体計測（2014年度策定）」の二つのロードマップの概要を記載する．

7・2　風力発電

7・2・1　社会的・技術的ニーズ

風力エネルギーは世界的にもわが国においても最も大きな期待が寄せられている再生可能エネルギーである．わが国の風力発電設備の導入量は3GW*1に過ぎないが，全世界では432GW*2に達している（2015年末現在）．風力発電に限らず，再生可能エネルギーの導入を促進するうえでの最大の課題は発電コストの低減と需要者への安定な電力供給の実現である．

7・2・2　技術的ブレークスルー

風力発電の発電コストは陸上では15.6kWhである[1]．現在実証段階の洋上風力の発電コストは陸上風力の2倍～3倍と試算されているが，2030年には20.2～23.2円/kWhとすることが目標にされている（**図1**）．現在，銚子沖で2.4MW（風車直径92m）の着床式，福島沖で7MW（風車直径167m）の浮体式大型洋上風車の実証研究が実施されており，将来的には5MW以上（風車直径130m）の大型風車を数十台配置した，数十万kWの設備容量を有するウインドファームの建設も計画されている．技術的には20 MW（風車直径250 m）の大型風車まで実現可能と予測されている．

風車の大型化のための最大の技術課題は，軽量化，超長翼の開発，および洋上における設置である[2]．5MWを超える大型風車を洋上に設置するのは，台風・落雷が多く，また，沿岸における遠浅の海底地形が少ないなど，わが国固有の厳しい環境条件のため，技術的困難を伴う．このため，風力エネルギーの賦存量が大きく，かつ，安定した発電が可能である領域の選定が重要となり，大規模な数値シミュレーションと観測データの同化による詳細な風況予測が行われている．超長翼はGFRPやCFRPなどの繊維強化プラスチック材料を素材として開発されているが，大気乱流や風上側風車の後流による動翼の荷重変動，気象予測と連動した疲労評価，ならびに大規模なウインドファームの発電量予測なども重要な技術課題である．

7・3　流体計測

7・3・1　社会的・技術的ニーズ

高性能・高付加価値の流体関連製品を早期に市場投入するためには，数値シミュレーションや最適化手法を駆使した設計の高度化とラピッドプロトタイピングなどを利用した試作期間の大幅な短縮，詳細な流動計測による流れ場の正確な把握と設計へのフィードバックが重要である．粒子画像流速測定法（PIV）は流れに追従するトレーサー粒子の2時刻の画像から断面内の流速分布を計測する方法であり，流速3成分の計測，三次元計測など大きく発展してきたが，熱線流速計など流れ場の他の計測法と比較すると計測精度が低く，また，空間解像度も数値計算よりも低く，これらの向上が重要な技術課題である．

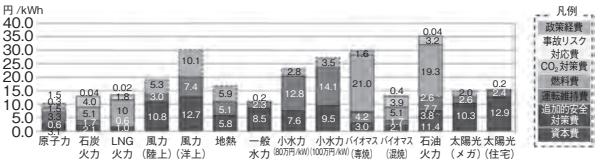


図1　2030年の電源別発電コストの試算（経済産業省，2015）

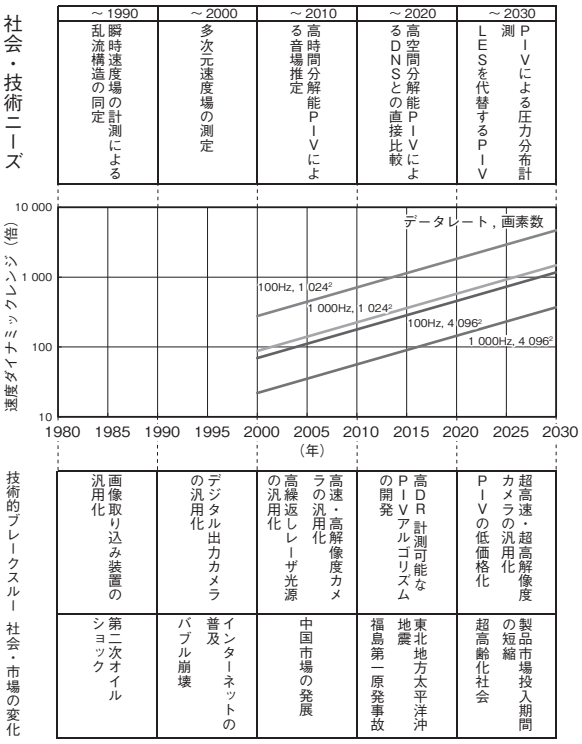


図2　粒子画像流速測定法（PIV）の開発経緯と今後の発展

7・3・2　技術的ブレークスルー

流速計測精度の向上には多数の計測結果の平均と粒子像の多時刻追跡による粒子移動距離の延伸が有効であり，カメラのフレームレートの向上がその鍵を握っている．カメラの画素数とフレームレートは反比例の関係にあるが，この積は過去10年間で約6.6倍に向上しており，2025年には現在の10倍の計測精度である，フルスケールの0.1%の計測が可能になるものと予想される（**図2**）．また，半導体レーザやLEDの利用などによる大幅なコスト低減も普及のための重要な課題である．

〔加藤　千幸　東京大学〕

＊1　日本風力発電協会，http://jwpa.jp/

＊2　Grobal Wind Energy Council，http://www.gwec.net/，1GW=100万kWであり，火力発電所1カ所の設備容量に等しいが，風力発電の設備利用率（kWh評価）は2～3割程度である．

文　献

（1）経済産業省，長期エネルギー需給見通し小委員会，関連資料（2015）．
（2）NEDO再生可能エネルギー技術白書第2版，（2014），新エネルギー・産業技術総合開発機構．

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

8. 熱　工　学

8・1　趣旨

熱工学分野でのキー技術である温度制御，伝熱促進，熱交換，省エネルギー技術の最先端と限界を示すパラメーターとして，除熱限界熱流束と断熱材特性とを取り上げる．

8・2　高熱流束除熱

8・2・1　社会的・技術的ニーズ

高熱流束除熱に関して，熱工学分野における学問的な研究動向を**図 1** に示す．すなわち，小型化・低コスト化のための熱交換器のコンパクト化＝伝熱促進の研究開発＝限界熱流束の促進である．社会的・技術的ニーズを以下に示す．

- 宇宙船の大気圏再突入時の冷却（宇宙船の熱的な耐久性確保）
- エレクトロニクス冷却，電子デバイスの冷却における小型化，高発熱密度化（コンピューターの小型化のため）
- 半導体レーザー冷却で，安定な発信を実現するため，数百 W/cm^2 が必要になっている（加工用固体小型半導体レーザー）
- レーザー照射冷却，X 線照射時の冷却

8・2・2　技術的ブレークスルー

高熱流束除熱の技術ロードマップを**図 2** に示す．除熱熱流束の増大を実現する可能性としては以下の事項が挙げられる[(1)(2)]．

- 大気圧のプール沸騰限界熱流束は，100 ～ 200 W/cm^2 の程度まで．臨界圧力の 1 / 3 程度の 80 気圧で最大約 400 W/cm^2 がプール沸騰の限界熱流束になる．
- 強制対流サブクール沸騰の限界熱流束は，2 × 10^{4}W/cm^2 のオーダーまで可能．蒸発の限界熱流束も 2 × 10^{4}W/cm^2 のオーダーで，蒸発の極限利用は大きな可能性を有している．
- 通常の対流熱伝達では，温度差 150K，流速 35m/s，ノズル直径 1 mm，液体に水の物性値を使った熱流束は，5 000 W/cm^2 になる．
- MEMS による伝熱面積拡大で対応しているが，面積拡大には限界があるのではないか．

8・2・3　将来の社会に関する展望

- コンピューター製品の小型化のいっそうの推進により，身近なコンピューターの機能が飛躍的に増大する（モバイルでデスクトップと同等の性能を発揮する．また，電気・電子機器や車のマイコン制御の機能が増大する）．
- 持ち運びのできる強力レーザー加工機械の実現．これにより，加工される材料のそばに小さな加工機械を持っていき，設置して使用することができる（マイクロ・ファクトリーの概念で，コンビニでめがねレンズの加工ができる．また，強力な小型レーザーは凶器としても使用される心配がある）．

〔矢部　　彰　新エネルギー・産業技術総合開発機構〕

8・3　断熱材特性

冷蔵庫の断熱材と住宅用断熱材の断熱特性の技術ロードマップを**図 3** に示す[(2)(3)]．社会的・技術的ニーズはオイルショックに始まり地球環境問題でさらに重要となった省エネルギー技術である．冷蔵庫用の断熱材の技術開発が先行し，住宅用断熱材に展開されていることがわかる．断熱特性の向上の技術的動向は，まず材料の熱伝導率を小さくし，次に材料内のふく射成分による伝熱量を低減している．

〔平澤　茂樹　神戸大学〕

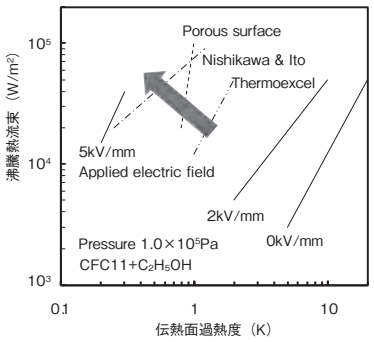


図 1　学問的な研究動向

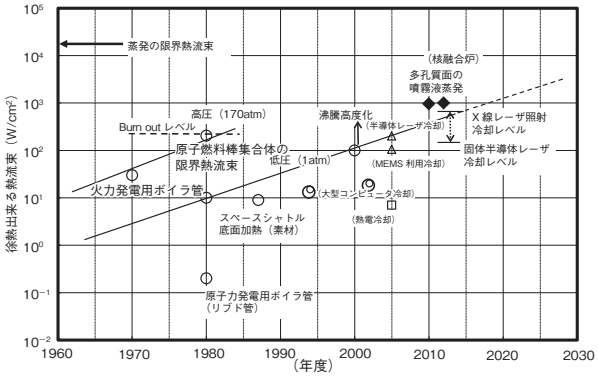


図 2　高熱流束除熱のロードマップ

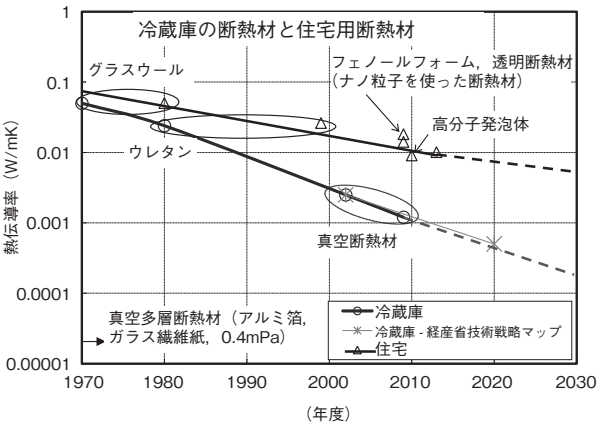


図 3　断熱特性のロードマップ

文　　献

（1）甲藤好郎，伝熱概論，(1964), 66, 養賢堂.
（2）日本機械学会ホームページ，熱工学部門技術ロードマップ http://www.jsme.or.jp/InnovationCenter/activity_a.html
（3）Song, T.H., Vacuum Insulation-Achievements and Anticipations, *Proc. of 1st Pacific Rim Thermal Eng. Conf.*, (2016-3), PRTEC-1PL01.

技術ロードマップから見る2030年の社会

9. エンジンシステム

9・1　趣旨

地球温暖化対策が求められる中，輸送機器からのCO_2排出削減に有効な手段としてエンジンの熱効率向上があり，そのための研究開発が盛んに行われている．将来のCO_2排出量の見積もりや，輸送システム全体の持続可能性の評価のために熱効率のロードマップを作成している．初版は2007年，2012年度に改定を経て**図1**に示すように2050年までの推移を予測している．最近の傾向から，熱効率は年平均で約0.15ポイント上昇しているが，ハイブリッドシステム用に熱効率に特化したガソリンエンジンではここ数年で急速に上昇したものもある．このように高効率化の技術が着実に実用に投入されつつある中で，2014年度より，内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP)「革新的燃焼技術」[1]が開始され，ディーゼル・ガソリンエンジンともに熱効率50 %を目指した研究開発が開始されている．産官学共同で既存のロードマップを上方修正すべく努力がなされており，成果が期待されるところである．

本稿では，それらの状況に鑑み，エンジンを大きく三つのカテゴリーに分け，それぞれのカテゴリーにおいて将来の熱効率向上に寄与する要素技術を紹介し，その展望について概説する．

〔田辺　光昭　日本大学〕

9・2　舶用大型ディーゼルエンジンの熱効率

9・2・1　社会的・技術的ニーズ

将来の需要予測では，今後も海上輸送量は増加し続けるとされており，それを担う大型商船も増加していくと考えられる．大型商船の主機関として用いられている舶用2ストロークディーゼルエンジンは，静圧過給方式の排気タービン過給機を装備したユニフロー掃気・クロスヘッド型で，低速で大口径プロペラを駆動する超長行程（ストロークボア比が4以上）エンジンとなっており，熱効率が50 %を超えるまでになっている．

船舶からの排出ガス規制は，国際海事機構（IMO）で議論されており，NO_xに関しては，2005年に1次規制が，2011年から2次規制（1次規制の約20 %減），2016年から3次規制（1次規制から80 %減，指定海域のみ）が発効している．またSO_xに関しては，燃料中の硫黄分が規制されており，指定海域では2015年から0.1 %以下に，全海域において2020年あるいは2025年から0.5 %以下に規制される．さらに国際海運から排出されるCO_2削減についてもIMOで議論が進められており，これらへの対応が目下の課題となっている．

9・2・2　技術的ブレークスルー

すでに熱効率は50 %を超えており，機関単体での向上は，限界に近づいていると考えられ，排出ガス対策による熱効率の悪化を最小限にするとともに，排熱回収などによりプラント全体としての熱効率向上を図る必要がある．現状では，2003年頃から燃料噴射および排気弁駆動を電子制御（コモンレールあるいは油圧による増圧ピストンの駆動）したエンジンが投入され，これによりとくに部分負荷での熱効率が大きく改善された．小口径のエンジンまで電子制御が主流となってきている．また部分負荷の熱効率向上のため，可変ノズル過給機の採用や，複数台の過給機のうち1台の運転をカットすることが行われている．過給機の効率向上により，余剰となった排気タービンのエネルギーを有効利用するため，排出ガスの一部を分岐してパワータービンを駆動したり，過給機に発電機を組み込み電力を得たり，過給機に油圧ポンプを組み込み油圧モータで出力を加勢する技術が開発されている．これらにより最大で現状から4 %程度の熱効率向上が期待できる．ユニフロー掃気では，前半の排出ガスは高温の燃焼ガスで，後半は空気を多く含む低温のガスとなるため，これを分離して利用することにより，舶用SCR（Selective Catalytic Reduction）が適用しやすい，排熱回収率の向上，過給機所要動力の減少といった効果が期待され，実用化に向けて開発が進められている．今後目指す方向は，多様な技術による推進プラント全体としての高効率化であろう．

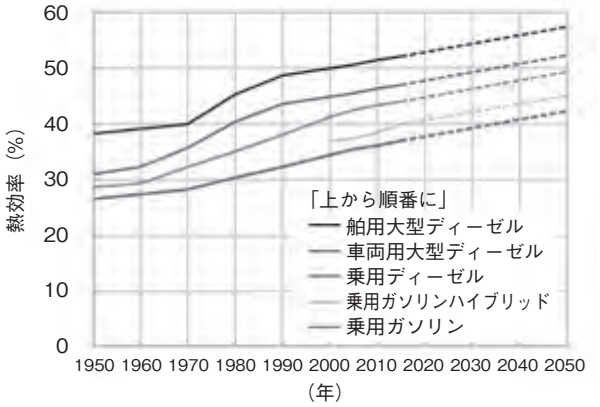


図1　エンジンの熱効率の推移

9・2・3　将来の社会に関する展望

CO_2排出削減に対しては，当然，エンジンを含めた船舶全体としての取り組みが，今後も進められていくことになる．また，SO_x規制により，将来の舶用燃料は，一つの分岐点に来ている．全海域での燃料硫黄分0.5 %以下の規制に対して，低硫黄の重油を使うのか，従来の重油を使用してスクラバなどの脱硫装置を装備するのか，天然ガスなど硫黄分を含まない燃料を使用するのか，確たる見通しは立っていない．低硫黄の重油は，供給体制や価格に難点があり，また天然ガスを燃料とするガスエンジン（天然ガスを主燃料とし，少量の重油を着火源として噴射する．重油のみによる運転も可能）が開発されて，すでにLNG船には搭載されており，今後は，航路や船種によって使用燃料が多様化していくものと考えられる．

〔塚本　達郎　東京海洋大学〕

9・3　車両・乗用ディーゼルエンジンの熱効率

9・3・1　社会的・技術的ニーズ

新興国を含む世界規模での需要予測では，ディーゼルエンジンはその高い経済性や耐久性から今後もさらに増加し続けると考えられる．とくに地球温暖化対策としてのCO_2排出量削減の観点からは，ディーゼルエンジンの特色である燃費の良さへの期待が高い．一方で大都市部の大気環境悪化を受けて，中国やフランスなどではディーゼル車を一部締め出す動きも出てい

る．先進国における排出ガス規制値はすでに未規制時に比べてNOx，PMとも1/100レベルの排出量に達しているが，オフサイクルエミッションや使用過程における劣化（とくに後処理触媒）を含めて，今後もさらに強化されると予想される．この排出ガス削減と燃費向上とのトレードオフの抜本的な解消こそが，ディーゼルエンジンに求められる普遍的な社会的・技術的ニーズである．

9・3・2　技術的ブレークスルー

システムとしてエンジンを捉えるならば，ディーゼルにおいて最も期待値の高い技術的ブレークスルーは高効率排出ガス後処理装置の実現であろう．大型商用車で普及した尿素SCR＋DPF（Diesel Particulate Filter）装置での浄化率が，大幅な燃費悪化がなく99％程度まで向上すれば，将来排出ガス要件にも適用が容易となることでエンジン熱効率改善技術の選択肢は飛躍的に拡がる．一方，エンジン単体での熱効率改善に対しては，各損失の改善のみならず燃焼自体の改善も併せて考える必要がある．

まず，エンジン単体の損失には大きく分けて仕事の損失と熱の損失とがある．従来は仕事の損失（すなわちフリクションや吸排気）低減に主眼が置かれてきた．近年の技術トレンドとしての低粘度オイル，ダウンサイジング＆スピーディング，多段過給化や補機駆動の可変化などもこれに当たる．一方で長期的観点からはそもそも寄与度の少ない損失であることから，いずれは熱の損失低減に移らざるを得ない．ただし熱の損失低減はその受け皿としてエンジン自体の高サイクル効率化，あるいは高効率の廃熱回生システムが実現しない限り直接熱効率の改善とはならないこと，また筒内温度・圧力の増加によって燃焼悪化も懸念されることに注意を要する．このため技術的ブレークスルーは，以下のような項目が単独ではなく複合的に実現する必要がある．

(1)　筒内最高圧レベル：20～30MPaの実現（理論効率を高めるための高圧縮比かつ高希釈燃焼に必要）
(2)　筒内冷却損失の画期的低減（目標：現状の1/3～1/4程度）
(3)　高効率廃熱回生システム（含ターボ過給機の効率向上）
(4)　噴射圧や筒内雰囲気に依存せずに混合気形成を（時間・空間的に）制御可能な新たな燃料噴射システム →さらにこれによるディーゼル燃焼の熱発生率能動制御

NOx，PMを大幅に低減しつつ損失を低減するという観点からは低温燃焼（HCCI，PCI，RCCI）もブレークスルーとしての期待は高いが，自動車用エンジンとしては燃焼制御の難しさとエネルギー密度の不足が懸念される．

9・3・3　将来の社会に関する展望

2015年に発覚したフォルクスワーゲンの排出ガス制御に関する不正問題は，ややもすればディーゼルエンジンの排出ガス低減対策が，メリットである力感や燃費と両立せず悪化させるものだ，と社会に印象づけてしまうことになりかねない．ただ幸いにも，ディーゼルエンジンの高熱効率化に関する産官学連携研究プロジェクトがすでに日米欧（SIP「革新的燃焼技術」[1]，21st Century Truck Partnership，FP7：CO_2RE・POWERFUL等）各国において着実に進んでおり，近い将来に従来の熱効率改善トレンド（0.15ポイント/年）をはるかに凌駕（りょうが）し，負のイメージを払拭する画期的なディーゼルエンジンの出現が期待される．

〔内田　登　（株）新エィシーイー〕

9・4　乗用ガソリンエンジンの熱効率

9・4・1　社会的・技術的ニーズ

乗用車は，世界の都市部にて集中的に普及した経緯から，過去50年間は，排出ガス対策，とくに対流圏オゾン（光化学オキシダント）対策が強く求められた．世界的に普及した今日では，地球温暖化対策としてのCO_2排出削減，燃費の改善が強く求められており，このような社会的ニーズの変遷から，熱効率の向上が車両・乗用ガソリンエンジンの強い技術的ニーズとなっている．

社会的ニーズに対応するために，乗用ガソリンエンジンは，熱効率向上を重要視したハイブリッドシステム向けのエンジン群と，従来車に適用した幅広い出力特性をもつエンジン群とに二極化する傾向にある．後者は，ヨーロッパを中心に過給エンジンとデュアルクラッチトランスミッションを組み合わせたパワートレーンシステム，国内を中心としたCVT（Continuously Variable Transmission）と組み合わせたパワートレーンシステムに大きく分類される．ヨーロッパで過給エンジンが普及しているのは，ガソリンのオクタン価が高いことや，ディーゼルエンジンのようなトルク特性が好まれるなどの嗜（し）好的な要素があることも重要なことである．

9・4・2　技術的ブレークスルー

ガソリンエンジンの最高熱効率は，近年ハイブリッド用エンジンを中心に急激な高まりを示しており，40％が実用化された．採用されている主要技術としては，内燃機関の有効仕事を高めるための高膨張比化技術，ミラーサイクル，アトキンソンサイクル，燃料のシリンダ内直接噴射技術，ノック改善と冷却損失低減を両立させるためのCooled EGR（Exhaust Gas Recirculation）技術，補機類駆動のベルトレス化・電動化を含めた徹底した低フリクション化技術が挙げられる．これら技術のさらなる改良で，ガソリンエンジンの熱効率はさらに進化することが期待される．

熱効率を飛躍的に高めるためには，前項に掲げた技術に加えて，動作ガスの比熱比を高めること，および熱損失の低減が求められている．そのブレークスルーとして，燃焼方式を従来の量論比燃焼（ストイキ燃焼）ではなく，超希薄燃焼（スーパーリーンバーン）により，徹底した低温燃焼を実現，熱損失を飛躍的に低減する技術革新が期待される．リーンバーンエンジンの技術開発は過去から行われているが，熱効率は45％にまで届いていないのが現状である．その理由としては，希薄燃焼で生じる燃焼時間の長期化，燃焼変動が生じ，ノッキングの抑制や冷却損失の低減ができないことが挙げられる．タンブル流の強化により強い乱れを生成し，超希薄予混合気を急速燃焼させる技術，スーパーリーンバーン技術の開発が期待される．エンジンの特性は全く異なるが，現在のハイブリッド用エンジンや過給エンジンに高タンブル化技術が採用されていることから，さらなる燃費向上実現を期待したい．

9・4・3　将来の社会に関する展望

乗用車のパワートレーンを考察するうえで，1次エネルギーの供給バランスは非常に重要となる．電気自動車，燃料電池自動車の技術開発と市場投入が進められているが，数十年先までの需給バランスを考えると液体燃料を使用する内燃機関が自動車用パワープラントのおおもとを担うことは間違いないと考えられる．自動車にとってエネルギー密度が高く，非常に利便性の高い液体燃料を有効に活用していくためにもスーパーリーンバーンなどの革新的新技術へのチャレンジは，われわれの責務であり，産官学一体となり推進していくことが期待される．

〔飯田　訓正　慶應義塾大学〕

文　献

(1) 科学技術振興機構，戦略的イノベーション創造プログラム http://www.jst.go.jp/sip/k01.html（参照日2016年2月1日）．

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

10. 動力エネルギーシステム

10・1　趣旨

エネルギーシステムの構成要素である機械装置の技術開発に加えて，システムの抜本的な再構築へのニーズが高まり，2050 年の低炭素社会実現に向けた大きな変革が期待できる．

10・2　エネルギーシステムの現状

日本のエネルギーフローの現況を**図 1** に示す．2013 年の 1 年間に供給されたエネルギー量は，19.0EJ（LHV ベース）．そのうち，産業，業務，家庭，運輸などで利用されたのは 6.34EJ のみで，全体の 60% に当たる 11.5EJ が熱として廃棄されている．発電効率の低さと，自動車のエネルギー効率の低さが，廃棄エネルギーが多い主な要因である．

一方の需要家側を見ると，産業部門に 3.43EJ，業務部門に 2.81EJ，家庭部門に 1.92EJ，運輸部門に 3.07EJ のエネルギーが消費されている．エネルギー消費量を利用形態（キャリア）別に見ると，熱が全体の 41.0% を占め，次いで電力が 32.7%，輸送用燃料が 26.2% となっている．エネルギーは熱利用が最も多いにもかかわらず，発電と運輸の分野で大量の熱を廃棄している現状にある．需要家での正味利用エネルギー量 6.34EJ をエネルギー供給量 19.0EJ で除すれば，総合エネルギー効率は 33.4% となる．

総合エネルギー効率を高めるには，要素機器の性能向上と並行して，社会システム全体の最適化を達成するためのアプローチが必要となる．

10・3　2050 年低炭素社会への展望

これまでは，電力を中心とした大規模集約型のエネルギー供給体制のなか，こうしたエネルギー損失は注目されてこなかった．今後は，実際にエネルギーを利用する需要側の視点に立ち，需要実態に合わせて，熱を有効利用する自律分散型のエネルギーシステム設計への期待が大きい．合理的なシステム設計に必要な要件を下記に挙げる．

- システム境界を，需要家へのエネルギーの安定供給に留まらずに，需要家でのエネルギー利用の実態まで拡げること．
- 熱と電力を需要変動に応じて生産・分配する CHP, Combined Heat & Power（熱電併給），この CHP を中核に据えた地域熱供給の導入．
- ほぼ全量を化石燃料に依存している自動車のフュエルシフトとして，原動機の機構変革と，バイオフュエル等マルチフュエル導入．

これらの推進のためには，

- 国際互換性のある LHV 基準のエネルギー統計データの整備．
- エネルギー需給の地域分散を反映した空間情報マップの作成．
- 研究開発投資の費用対効果を見据えた客観的な技術戦略の策定．

を通したエネルギー需給データに基づく意志決定と，エネルギーシステムを俯瞰（ふかん）しデザインするシステムエンジニアの育成が重要となる．

〔中田　俊彦　東北大学〕

文　　献

（1）瀧田祐樹・古林敬顕・中田俊彦，再生可能エネルギーのポテンシャルを考慮したエネルギーフローの作成と分析，日本機械学会論文集，81-827（2015），1-9.

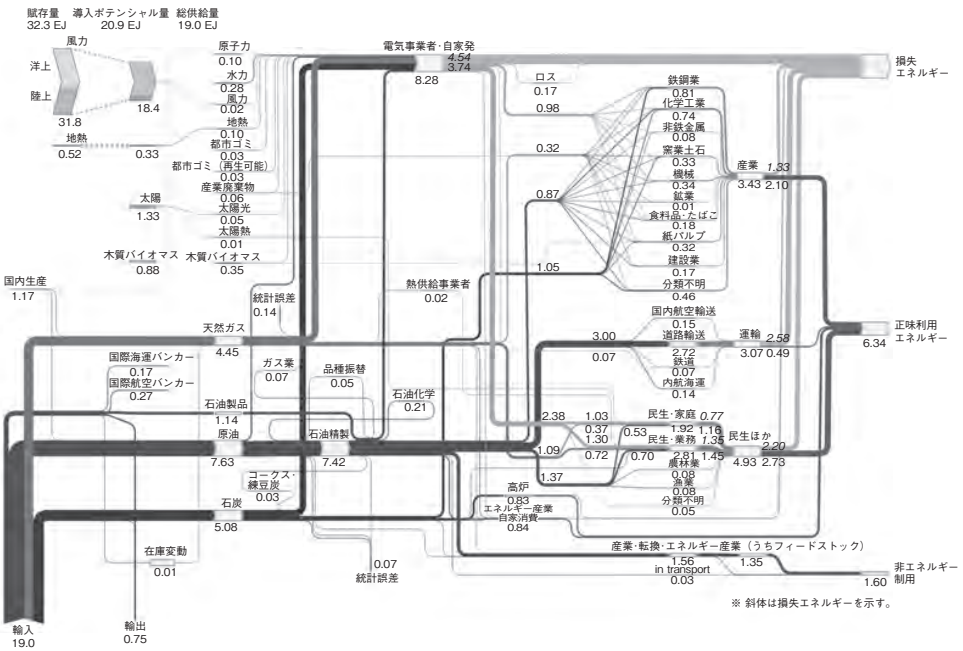


図 1　日本のエネルギーフロー（2013 年）[1]

技術ロードマップから見る2030年の社会

11. 環境工学

11・1　ヒートポンプ給湯機

11・1・1　趣旨

用途別エネルギー消費量の給湯の割合は大きく，2015年のデータでは，家庭部門で27.5%，業務用部門で12.9%と推計されている．近年，大幅なCO_2削減を可能とするヒートポンプ給湯機の普及が始まっており，温暖化対策として重要なヒートポンプ技術のいっそうの進展に貢献できる[(1)～(3)]．

11・1・2　社会的・技術的ニーズ

一般的な高効率化，低価格化に加えて，小型化，静音化，寒冷地対応などのニーズがある（**図1**）．

また，床暖房・セントラルヒーティングなども含めた多機能化，融雪用，直接給湯式，トイレなどの小型局所給湯用，廃熱利用（入浴後の残り湯など），熱回収式（冷温熱供給），ハイブリッド式，業務用，産業用などのニーズに対応した製品バリエーションが必要とされる．

11・1・3　キーパラメータ

冷媒，圧縮機，熱交換器，モータ系，冷媒膨張エネルギー回収，廃熱回収技術，ハイブリッド化などの，数多くの技術開発要素がある．以下にその一部技術について詳述する．

11・1・3・1　冷媒

冷媒には大きくフロン系冷媒と自然冷媒が使用されており，用途および特性に応じてさまざまな冷媒が開発・使用されている．冷媒特性による差としては，65℃給湯の高温度差加熱の理論COP12.9に対し，CO_2は11.5と最も高く，R410が9.1，その他のフロン系とハイドロカーボン系は8程度となる．各冷媒特性に最適な回路設計，冷媒制御の高度化により効率向上が期待される．

11・1・3・2　ハイブリッド化

ハイブリッド化には大きく2種類あり，産業用などの大規模需要に対応するボイラ利用と，ソーラーパネルなどの太陽熱，地中熱利用がある．また，システム構成としても，ソーラーパネルとヒートポンプの温熱を貯湯タンク内や出口で混合する並列型と，ソーラーパネル蒸発器や減圧沸騰ソーラーパネル一体型蒸発器をヒートポンプに組み込む一体型（屋根，ベランダ，壁面設置）がある．太陽熱とのハイブリッドでは大幅な効率向上が期待でき，減圧沸騰ソーラーパネル利用の試算ではブタン冷媒の給湯ヒートポンプ効率を約8割向上させる可能性がある．

11・1・3・3　静音技術

貯湯式ヒートポンプ給湯機は夜間に稼動するため，静音技術は重要である．振動減衰や固体音伝搬の抑制，騒音の音質改善などにより，当初の45dB程度から38dB程度へと大きく低減している．今後，高効率化および小型化の進展に伴い，圧縮機やファンの高速回転化なども想定されるため，音質改善設計やインバータ技術などの静音技術の向上が求められている．

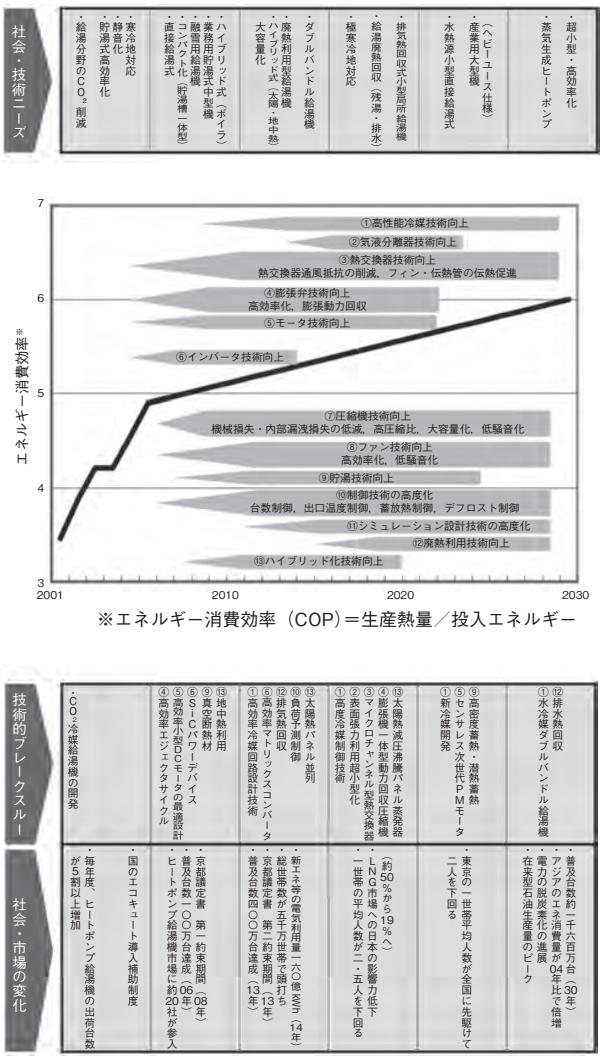


図1　ヒートポンプ給湯機のロードマップ

11・1・4　将来の展望

長期的視野で考えた場合，「高性能断熱材使用などによる給湯需要削減」，「ヒートポンプ給湯機の効率向上」，「再生可能エネルギー発電比率増やCCS（二酸化炭素回収貯留）等による電力の脱炭素化」の3要素が掛け算となり，給湯分野のCO_2削減効果を発揮する．家庭用ヒートポンプ給湯機の普及見通しとしては2030年に1 600万台程度の普及可能性があり，業務用・産業用を含めた2030年のCO_2削減効果は日本全体で4 800万トンが見込まれる．さらに，国内メーカーが有利な技術分野であることから，輸出による海外での普及拡大も想定される．

11・2　電動カーエアコン

11・2・1　趣旨

地球環境保全の観点から，排ガス規制や地球温暖化抑制への取り組みとして，自動車のエンジンの燃費の向上やハイブリッド車（HV），プラグインハイブリッド（PHV），電気自動車（EV）などエンジン駆動からバッテリー駆動などへと進化している．これに伴い，自動車用エアコン（カーエアコン）の圧縮機もエンジンによるベルト駆動からバッテリーによるモータ駆動へと進化している．今後，電動カーエアコンの割合が増加し，ヒートポンプ化も進むと考えられる[(4)～(7)]．

11・2・2　社会的・技術的ニーズ

電動カーエアコンは，エンジンの回転力によらずエアコンを駆動できるため，アイドルストップ時でもエアコンを稼働でき，パワーロスが小さいため，快適性と走行性能を向上できるなどの特徴を有する（図2）．

11・2・3　キーパラメータ

冷媒，圧縮機，インバータ，熱交換器，モータ，冷媒膨張エネルギー回収，廃熱回収技術，ハイブリッド化などの，数多くの技術開発要素がある．以下にその一部技術について詳述する．

11・2・3・1　冷媒

代替フロンは地球温暖化への寄与が高いことから，HFC（ハイドロフルオロカーボン）の段階的削減計画が世界レベルで協議されており，ヨーロッパはMAC指令による2017年からGWP150（GWP：地球温暖化係数）以下の冷媒搭載が義務づけられている．一方，日本でもフロン排出抑制法の施行により，2023年以降の自動車用冷媒は加重平均でGWP150未満とすることになっている．カーエアコン用冷媒は代替フロンR134aが使われているが，今後の代替冷媒としてR1234yfが有望となっている．

今後は低GWP化とともに，カーエアコンのヒートポンプ化も視野に入れ，冷媒の選定を行う必要がある．CO_2冷媒は暖房性能に優れていることで一つの候補として考えられているが，冷房性能の悪化や重量増加など多くの課題がある．

11・2・3・2　圧縮機

カーエアコン用圧縮機の種類は，ロータリ，スクロール，斜板がある．電動のコンプレッサとなり，インバータによる回転数制御が可能となったことで，空調の熱負荷に応じた容量制御では斜板が先行していたが，ロータリ，スクロールも容易にできるようになった．エンジン回転数に左右されないため，車両空調の要求に応じた省エネルギー運転ができ，より快適な空調制御を可能としている．

11・2・3・3　インバータ制御

インバータ制御技術の電動モータによる圧縮機の回転数制御は，日本の冷凍空調機器の省エネ・高効率を支える重要な技術である．とくに，車両用エアコンは家庭用エアコンよりも冷房や暖房の立ち上がり性能（急速冷房や急速暖房）のニーズが高いため，エアコン内の冷媒の溜り込みの状況によらず，つまり圧縮機の回転立ち上げ時の吐出・吸入の圧力差に伴う回転負荷が毎回違っていても，圧縮機を始動できることや早く安定した高速の回転数まで運転できる制御技術が求められる．日本で培った制御技術〔V / f 制御やベクトル制御（センサレスも含む）技術〕がこの課題を克服している．

図2　電動カーエアコンのロードマップ

11・2・4　将来の展望

エンジン効率の向上によりエンジン廃熱が減り，補助ヒータの増強やカーエアコンの能力増加がさらに必要になる．この傾向はHV，PHV，EVになればさらに大きくなる．これにより走行時の燃費を悪化させ，走行距離を低下させる原因にもなる．このため，電動カーエアコンには，高効率・省エネが強く要求され，小型化・軽量化などのニーズへの対応と，地球温暖化抑制のために，GWPの小さい冷媒への転換をヒートポンプ化の可能性も視野に入れて同時に図っていく必要がある．

〔佐々木正信　東京電力エナジーパートナー（株），
松田　憲兒　（一社）日本冷凍空調工業会〕

文　献

（1）ヒートポンプ・蓄熱システム　データブック 2015，(2015)，(一財) ヒートポンプ・蓄熱センター．
（2）総合資源エネルギー調査会需給部会，2030年のエネルギー需給展望　中間とりまとめ，(2004)．
（3）(一財) ヒートポンプ・蓄熱センター，ヒートポンプ普及拡大による温室効果ガス削減効果について，(2015)．
（4）丸紅経済研究所，エコカー及び自動車先進技術の開発動向と需要予測，(2013)．
（5）髙井和彦，カーエアコン用圧縮機の変遷，2011年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，(2011-9)，D231.
（6）柴田晟司郎・中川二彦，空調システムを統合化した電気自動車，エネルギー・資源学会論文誌，36-2，(2015)．
（7）(一財) 機械システム振興協会，次世代に変革が予想される自動車産業に必要とされる新技術を提供する地域産業の可能性に関する調査研究，(2010)．

技術ロードマップから見る2030年の社会

12. 機械力学・計測制御

12・1　趣旨

機械力学・計測制御部門のカバーするエリアは非常に広範囲に及ぶが，本稿では，“ダイナミクスと制御”，“振動解析手法”，“流体関連振動”の3分野のロードマップについて紹介する．

12・2　ダイナミクスと制御（図1）

12・2・1　社会的・技術的ニーズ

“ダイナミクスと制御”に関する社会的・技術的なニーズは非常に多く，たとえば工作機械や産業機械の位置決め制御，自動車の運動制御や乗り心地制御，航空機・人工衛星の姿勢制御，建築・建設構造物の地震や風に対する振動制御，ロボットの運動制御など，枚挙に暇がない．今後も，これらの分野において，以下の最新テクノロジーを取り込みながらダイナミクスと制御の新たな展開が期待できる．

12・2・2　キーテクノロジー

ダイナミクスと制御分野の未来を考えたとき，重要なキーテクノロジーとなるのが，以下に述べるようなIT関連技術の応用である．

12・2・2・1　モデル化　　よりよい制御のためには，ダイナミクスのモデル化が鍵となるが，今後，モデル化技術は二つの方向性をもって展開していくものと考えられる．一つは，力学に基づくマルチボディ・ダイナミクスに代表される流れであり，従来の発展形と捉えることができる．もう一つが，IT技術を応用したモデル化である．今後，あらゆるものがIoT（Internet of Things）によりネットワークにつながり，膨大なビッグデータと統計的手法あるいはAI（Artificial Intelligence）などを利用した，超多入力多出力システムのダイナミクスのモデル化が可能になるであろう．これらのモデル化の対象は，われわれがこれまで扱ってきた，いわゆる機械系の枠を越えたものとなり，その可能性は大きい．

12・2・2・2　現実とシミュレーションの融合　　IT関連技術の発展にともない数値シミュレーションの精度および計算速度は飛躍的に向上しており，従来，研究開発や設計段階などで“オフライン”的に用いられてきたものが，ほぼリアルタイムでシミュレーション可能になっている．これにより，12・2・2・1で述べたモデル化技術の向上と併せて，これまで実際のハードウェアを用いていた実験の一部を数値モデルによるシミュレーションで補う，あるいは実際のハードウェア上で行っていた制御をシミュレーションに置き換え，その結果を現実に反映させるなど，現実とシミュレーションの融合が進んでいる[1]．今後，このような融合がよりいっそう進んでいくものと考えられる．

12・2・2・3　センサ，アクチュエータ　　あらゆるものが計測されインターネットにつながれる世界では，センサの果たす役割がさらに重要になる．半導体センサの登場により，センサがより小型かつ安価になっており，今後もより多くのセンサが開発され，これまで困難であった計測が可能になる．アクチュエータについても同様であり，新たに多くのアクチュエータの開発が期待できる．

12・2・2・4　ネットを介しての制御　　12・2・2・1～12・2・2・3の自然な流れとして，インターネットを介した，動的なシステムの制御が，広く一般に普及していくであろう．

12・2・3　将来の社会に対する展望

12・2・3・1　産業機械　　ドイツにおけるIndustry 4.0，

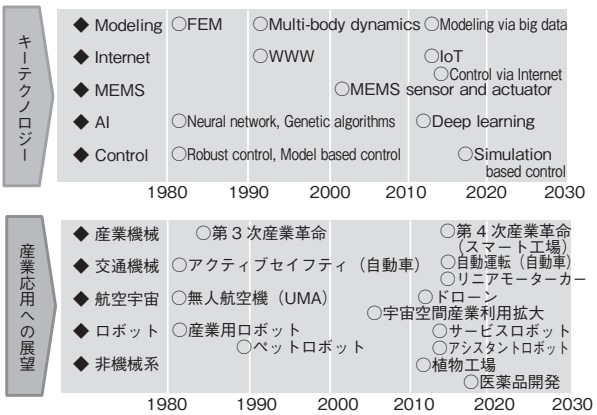


図1　“ダイナミクスと制御”におけるロードマップ

あるいはアメリカにおけるIndustrial Internetなど，センサネットにより得られる膨大なデータを活用し，工場のスマート化を図る動きは世界の大きなトレンドであり，産業機械のダイナミクスと制御においても同様である．また，建設現場や工場においてこれまで熟練者に頼っていた作業が，今後熟練者の減少あるいは海外での作業の増加に伴い，困難となる．これらの自動化の動きも加速されるであろう．

12・2・3・2　交通機械　　事故を未然に防ぐための予防安全技術は，近年，とくに自動車分野において，“ダイナミクスと制御”の知識を生かしつつ開発が進められてきたが，これらは主に自車のセンサからのデータに基づく制御であった．今後は，他車から送信されてきた情報，道路などのインフラからの情報，GPSからの情報など，外部からの情報を素早く，適切に判断し制御が行われるようになる．また，自動運転は，現在，各社がしのぎを削って開発を進めているが，上述の外部からの情報の活用が重要な鍵となる．鉄道分野では，国内初のリニアモーターカーの商用化により関連分野の制御技術に新たな展開が見られると考えられる．

12・2・3・3　航空宇宙　　航空分野では，アメリカNASAのドローンハイウェイ構想，日本政府による大型無人機の産業利用支援構想など，無人航空機（UAM）やドローンの産業利用への期待が急速に高まっている．これらの分野においても，前述の自動運転と同様に，高度な障害物回避制御技術が要求され，さまざまな外界からの情報に基づく“ダイナミクスと制御”が重要な課題である．

12・2・3・4　ロボティクス　　現在の産業用ロボットは，教えられたとおりの動作を忠実かつ高速に実行するタイプが主流であるが，今後は求められる作業の複雑化に伴い，自らの判断に基づいた動作を生成するものが増加していく．また，近未来ではロボットはよりわれわれの身近な生活環境で使用されるようになり，ロボットが人間に怪我をさせないための制御技術，およびHuman Robot Interface（HRI）に関する研究などが注目されている．

12・2・3・5　防災および非機械系分野への拡張　　機械システムのダイナミクスと制御の分野で培われてきた知識や技術を，今後，機械工学の枠にとらわれない新領域，たとえば，地球規模で重要性が増している農業，医薬，環境問題などへと展開していくことが期待できる．また，これまで以上に地震など

	1970～1980	1980～1990	1990～2000	2000～2010	2010～2020	2020～2030
キーテクノロジー	・FEM技術の普及	・動的現象の測定技術の発展	・パソコンの普及	・計算機の大規化と高速化	・新規解析技術に基づく効果的な振動抑制制御法や振動の積極利用法の構築	・減衰や摩擦などの統一的なモデル化の確立	・既存の各種解析技術の再構築と統一的取り扱い
産業応用への展望	・第一次石油ショック	・第二次石油ショック	・地球温暖化が問題に ・バブル崩壊 ・インターネットの普及	・新興国市場の発展 ・マイクロナノ技術の親展	・振動が開発のボトルネックとならないように動的設計を支援しる解析手法の確立 ・振動の積極的利用	・省エネ性能と高付加価値性が両立した製品開発

図2　振動解析手法のロードマップ

の災害に強い建設・建築構造物を目指した制御システムの開発が期待されている．

12・2・3・6　ITとは切り離された制御技術の展開　上述のとおり，すべてのものがネットにつながることによる恩恵は計りしれないが，反面，ネットにつながることによるセキュリティ上の危険性も増加の一途をたどっている．また，大規模災害時の電力消失時でも確実に動作する制御システムが求められている．このような観点から，たとえば，ネットさらには電気自体を用いず，100年単位のセキュリティや信頼性を確保した制御システムに関する研究も重要である．

12・3　振動解析手法（図2）

12・3・1　社会的・技術的ニーズ

ここ40年ほどの間に，有限要素法による動的応答解析や理論モード解析，時間増分法による非線形有限要素解析，実験モード解析や部分構造合成法などが，動的設計において実用的に用いられるようになり，大規模な振動系における動的設計においても成果を上げている．一方，近年の機械システム設計では，省エネの要求による軽量化や微細化，厳しい環境での使用だけでなく設計の短期化などが求められ，幾何学的な非線形性，複雑な減衰抵抗，摩擦，衝突などの諸現象をも正確にモデル化に取り込んだ実製品に近い詳細な解析が求められるようになっている．このような複雑な振動系についても，数理モデルに基づく理論的研究が実験研究と並行して進められており学術的な成果を収めているが，個々の研究での対象が複雑であるがゆえに，対象に特化した解析手法や設計対策になりがちであり，統一的な振動解析手法[2]の確立が今後必要になっていくものと考えられる．具体的には以下のとおりである．

(1)　振動解析に対する複雑化するニーズへの対応と汎用化
- 非線形振動解析モデルの統一的取り扱い
- 減衰や摩擦などの統一的なモデル化
- 入力の一般化：不規則振動解析手法の一般化

(2)　動的設計を支援しやすい振動解析手法の確立
- 大規模多自由度系振動解析の高速化
- 大規模多自由度系の低次元化解析手法の確立
- 振動系における各種パラメータ同定手法の高度化

(3)　上記解析手法を利用した，効果的な振動抑制・制御法や，振動の積極利用法の構築

12・3・2　キーテクノロジー

本分野のキーテクノロジーとしては，以下が挙げられる．

(a)　細分化され発展してきた振動解析手法の再分類とデータベース化
(b)　解析対象に応じた最適手法選択を容易とするツールの構築
(c)　解析手法の統一的取り扱い手法の構築
(d)　数学・物理学分野の最新動向の導入による解析技術の深化
(e)　解析手法を適切に使いこなすことのできる技術者の育成のための教育手法の構築

12・3・3　将来の社会に対する展望

省エネ性能と高付加価値性の両立が求められる将来の産業と社会において，振動が性能改善のボトルネックになる場合が大いにあり得る（振動が性能改善のボトルネックとなっている場合がすでに顕在化してきており，省エネ性能と高付加価値性の両立が求められる将来の産業と社会において，ますますその傾向は顕著となると思われる）．複雑化への対応が要求される振動解析において，対象に応じた適切な解析手法の選択や統一的な解析手法が確立されれば，産業界および社会に与えるインパクトは大きい．

12・4　流体関連振動

12・4・1　社会的・技術的ニーズ

多くの分野において流体関連振動[3]が問題となっているが，とくにエネルギー関連分野において問題が顕在化している．たとえば，原子力や火力発電施設における配管の破損問題，太陽光発電における耐風性の問題，バイオマス発電における燃焼振動，水力発電における流動不安定の問題などが指摘されている．また，ガス，LNGプラント，石油化学プラントなどにおいても，流体系と構造系が連成するさまざまな問題が発生しており，これらの問題の解決が強く望まれている．

12・4・2　キーテクノロジー

本分野のキーテクノロジーとしては，以下が挙げられる．

(a)　流体-構造連成問題の強連成解析の高精度化・高効率化
(b)　燃焼振動の発生予測手法と抑制法の確立
(c)　流れ場の能動的／受動的な制御
(d)　音響励振振動対策
(e)　管内渦・旋回流による自励脈動／振動対策
(f)　発電施設の大型化・流れの高速化に伴う流体関連振動対策

12・4・3　将来の社会に対する展望

再生エネルギーの利用促進は，わが国のエネルギーセキュリティの堅牢（ろう）化に寄与するだけでなく，急速な発展を遂げる新興国においても安定で安全な電源確保を可能にし，大きな役割を担う．そのため，再生可能エネルギー設備の低コスト化は不可欠である．とくに，初期投資のみならず，設備のライフサイクル全体を考慮して低コスト化を図ることは重要な課題である．また，世界的に観測されている気候変動をはじめ，再生可能エネルギーシステムに対する外乱が予想されるため，よりロバストな技術と設備は求められている．このような複雑な問題を解決するに当たって，機械工学者は，気象や森林工学，河川工学などを専門とする異分野の専門家との対話の重要性が増し，包括的に問題解決に当たっていくことが期待される．

また，第3＋世代の1 500～1 700MWeの炉については国内設置とともに輸出用が主体となってくる．国内では国家が成熟化し新たな設備ができにくいことから，設備を更新せずに出力だけ1～20%程度上昇させる出力向上がなされる可能性があり，また機器を一部高性能のものにリプレースして大出力化を図ることが考えられる．今後も依然として機器は大型化，流れは高速化し，流体関連振動の問題はいっそう厳しくなり，流れの三次元性がより顕在化する方向にある．

〔田川　泰敬　東京農工大学〕

文　献

(1) 田川泰敬，巻頭記事，DYNAMICS機械力学・計測制御部門ニュース 53，(2014)．
(2) 日本機械学会ホームページ，機械力学・計測制御部門技術ロードマップ［振動解析手法］，http://www.jsme.or.jp/InnovationCenter/activity_a.html
(3) 日本機械学会ホームページ，機械力学・計測制御部門技術ロードマップ［流体関連振動］，http://www.jsme.or.jp/InnovationCenter/activity_a.html

技術ロードマップから見る2030年の社会

13. 機素潤滑設計

13・1　趣旨

機素潤滑設計部門は，「機械設計」，「機械要素1」，「アクチュエータシステム」，「トライボロジー・機械要素2」の研究分野で構成される．本稿では，機素潤滑設計部門が手がける最初の技術ロードマップとしてアクチュエータを取り上げる．本稿で取り上げなかったアクチュエータおよび研究分野のロードマップも随時WEB上で公開していく予定である．

13・2　アクチュエータ

13・2・1　社会的・技術的ニーズ

「ものを動かし，操る」アクチュエータ技術は，現代のあらゆる科学・産業の基盤となる技術である．優れた性能を持つアクチュエータは，基礎科学，産業，医療福祉など幅広い分野から望まれており，その出現は，経済産業の発展を始め地球環境保護や生活文化水準向上に大きく寄与すると期待されている．

アクチュエータは，電車の駆動用から能動カテーテルの駆動までさまざまな大きさのものが実用化されている．また，アクチュエータはあらゆる機器に組み込まれているため，日本では電力の60%以上をアクチュエータが消費している．そのため，アクチュエータの性能が向上すると，機器の小型・軽量化と同時に電力消費量が削減され，地球温暖化ガス削減に貢献できる．

このように高性能なアクチュエータ開発は広範囲に影響を及ぼすため，国際戦略上も重要な課題となる．EUがリードしてモータの国際的な省エネルギー基準IE1～IE4の策定が行われた．

したがって，アクチュエータの性能のロードマップを作成して性能改善の歴史と将来を見通すことは技術的にも国際戦略上も非常に重要である．

13・2・2　技術的ブレークスルー

現在，「ものを動かし，操る」アクチュエータといえば電磁モータを指すぐらい電磁モータが普及している．しかし，電磁モータが普及したのはここ70年ほどである．歴史上は蒸気機関や油圧が全盛の時代があった．そのため，さまざまな駆動原理のアクチュエータについてもロードマップを作成することが重要である．

筆者らは，電気学会に「多自由度新世代アクチュエータの性能評価調査専門委員会」(2012.4～2015.3，上田靖人委員長)を設置し，①電磁，静電：電磁界による非接触駆動，②圧電，磁歪：電磁界による固体系接触駆動，③機能性流体，空気圧：流体系接触駆動，④光：遠距離から駆動可能，のアクチュエータについて現在の性能と理論的な性能限界の調査を行った[1]．

性能比較項目は，発生力質量密度，発生力体積密度，発生力面積密度，発生力，速度，変位，応答速度，体積，寸法，質量，効率，制御性，多自由度化の容易さなど，多岐にわたっている．

本稿では，上記駆動原理のうち電磁モータと機能性流体についてモータの性能を測る基本的な指標の一つである出力密度(出力/質量)を指標としてロードマップ作成を試みた．

13・3　電磁モータ

13・3・1　調査方法

モータの種類は誘導モータ，同期モータ，リラクタンスモータなどさまざまな種類がある．本稿では，このうち近年機器の制御に多く使用されるACサーボモータとDCモータに絞って調査を行った．

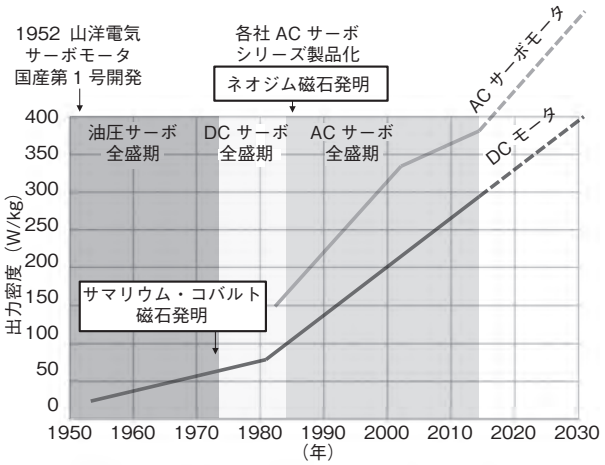


図1　商用電磁モータの年代別出力密度最大値のロードマップ

1970年以降に商品化されたACサーボモータ240種，およびDCモータ294種のカタログデータを収集した．電磁モータの定格出力は，主としてモータの温度上昇により制限されるため，瞬間最大出力は定格出力の10倍程度になる．したがって，カタログ値が定格出力か，瞬間最大出力か，に注意してデータ収集を行った．

収集したカタログデータから定格出力およびモータ質量を直接あるいは計算で求め，年代を横軸，出力密度を縦軸とするグラフ上にプロットした．

13・3・2　調査結果

詳細なデータに関しては別の機会に報告するが，本稿ではデータの傾向と将来予測を示しておく．

図1に商用電磁モータの年代別出力密度最大値のロードマップを示す．**図1**の折れ線は，商用電磁モータ（ACサーボモータおよびDCサーボモータ）の年代別出力密度最大値を示している．各年に発売された電磁モータの出力密度をプロットし，各年の最大値を結んだものである．年ごとに最大値のでこぼこはあるが，傾向がわかるように直線で結んでいる．2000年から2015年までは，出力密度最大値の増加率が低下しているが，これはこの時期に携帯電話や医療機器向けに超小型モータ開発の要請が強まり，モータメーカーが質量0.002kg（2g）程度の超小型モータの開発，商品化に注力したことによるものである．

一般的に，モータが小型になるほど出力密度最大値を大きくするのは困難になる．

13・3・3　将来予測

電磁モータの小型化はほぼ達成できたので，モータメーカーは出力密度最大値の向上を含めた高性能化，および高効率化を目指すと考えられる．1980年から2000年までの出力密度最大値向上直線の傾きを外挿すると2030年には出力密度600W/kg（定格値）に達する．

電磁モータの出力密度の向上は，永久磁石のエネルギー積の増加に負うところが大きい．科学技術動向センターが作成した永久磁石のエネルギー積の年次変化のグラフ[2]を**図2**に示す．永久磁石の最大エネルギー積は，ネオジム磁石に取って代わる

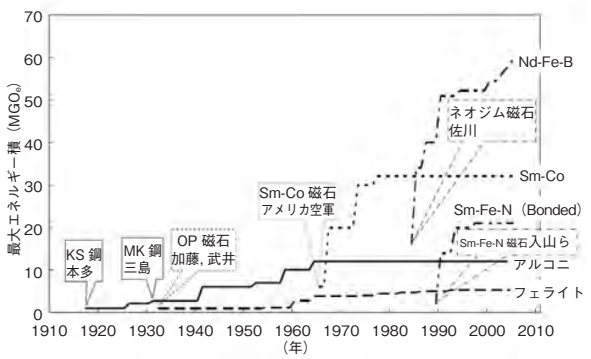


図 2　永久磁石のエネルギー積の年次変化[2]

永久磁石材料が開発されなければ今後頭打ちになる．また，希土類磁石材料の資源枯渇問題から，最大エネルギー積が希土類磁石より低い永久磁石の使用を迫られる可能性がある．

一方，電気自動車用モータを筆頭に，電磁モータの出力密度最大値向上の強い動機づけがある．今後，電磁モータの出力密度最大値の向上は，以下の課題の技術革新により行われるだろう．

①渦電流損ならびにヒステリシス損を低減させる電磁鋼板の磁気特性の改善，②巻線材料ならびに高密度巻線技術の開発，③機械損を減少させる軸受の改良，④放熱効率を向上させるモータ構造，⑤高温で駆動可能なモータと制御装置，⑥制御装置の高効率化

世界のモータ開発競争を先導するためにも，**図 1** に示したロードマップ以上の速度での電磁モータの出力密度最大値の向上が求められている．

〔坂間　清子　青山学院大学，矢野　智昭　宇宙航空研究開発機構〕

13・4　機能性流体アクチュエータ

13・4・1　原理と可能性

機能性流体とは，印加電界や印加磁界でジェット流発生や見かけの粘度変化など特有の機能性を発生する流体の総称であり，スマート流体とも呼ばれる．代表的なものとして，印加電界・印加磁界により見かけの粘度を制御できる電気粘性流体（ERF）・磁気粘性流体（MRF），印加磁界により吸引される磁性流体（Magnetic Fluids），直流電圧印加によりジェット流を生じる電界共役流体（ECF）などがある．従来の流体制御機器の可動部の機能を機能性流体からなる可動部なしの制御要素で代行させることができるため，①構造がシンプルである，②摺動部による漏れや摩擦などの影響を抑える，③電気信号によりフルードパワーを直接制御できる，④マイクロ化に適しているなどの特長を有し，機械システム全体の小型・コンパクト化，高効率化，高速化，安全・安心化が実現可能である．このような特長を活かして，動力伝達機構（クラッチ），エネルギー消散機構（ブレーキ，ダンパ），流体制御機構（バルブ），摩擦低減機構（シール），センサ機構（レートジャイロ），動力発生機構（モータ，ポンプ）などの多様な機械要素に適用できる．最近では，可変焦点液体レンズ，点字表示器，人工筋肉，ソフトロボットハンドなどの異分野融合研究へも応用され，多様な分野での実用化・製品化も期待されている．

13・4・2　調査方法と結果

機能性流体アクチュエータは，①機能性流体中の粒子のクラスター化や液晶の配向変化を起こす特性を用いた ERF，MRF アクチュエータと，②機能性流体に流動を起こす ECF アクチュエータの二つに大きく区分できる．前者での出力パワー密度は外部の流体パワー源に左右されるため，アクチュエータの出力パワー密度を求めることは困難である．一方，後者である ECF アクチュエータは，ECF 中に配置された電極対に直流電圧を印加すると電極間にジェット流が生じる ECF 現象の圧力・流量を利用したアクチュエータであるため，電磁モータのように電気エネルギーを入力とし，ECF アクチュエータの出力を求めることができる．したがって，機能性流体アクチュエータのロードマップの作成に当たり，ECF ポンプ（液圧源）のパワー密度（パワー/体積）を指標として調査を行うこととした．

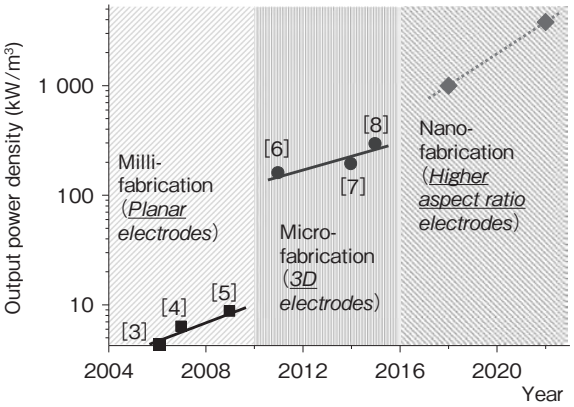


図 3　ECF ポンプの出力密度最大値のロードマップ

図 3 に ECF ポンプの年代別出力密度最大値のロードマップを示す．1996 年 IEEE Industry Applications Society で ECF モータが初めて発表されてから 2009 年までの ECF アクチュエータでは，平面電極対および機械加工によるミリメーターサイズの電極対を用いたために，出力パワー密度は徐々に増加したものの限界があった．2010 年から MEMS 技術を導入したことで，マイクロメーターサイズの三次元電極対を集積することができ，1 桁以上の画期的な増加を実現した．

13・4・3　将来予測

今までのマイクロ鋳型と電鋳の MEMS 技術による高出力パワー密度化では画期的なステップアップは困難である．これからは，シリコン MEMS 技術による高アスペクト比の電極対の製作，または，ナノ加工技術による電極対のさらなる高密度化により，1MW/m^3 以上の高出力パワー密度化が達成できると予測する．

〔金　　俊完　東京工業大学〕

文　　献

（1）多自由度新世代アクチュエータの性能評価調査専門委員会，新世代アクチュエータの性能評価とそれを活かす多自由度構成の提案，電気学会技術報告（2016），発刊予定．

（2）小澤純夫，資源問題に直面するモータ用永久磁石の研究動向と課題，科学技術動向，14（2010），10-21.

（3）横田眞一・ほか，電界共役流体（ECF）を応用した電子チップ液冷用平面薄形ポンプ，日本機械学会論文集 C, **71**-709（2005），2798-2804.

（4）Seo, W-S., ほか，A High Performance Planar Pump using Electro-conjugate Fluid with Improved Electrode Patterns, *Sensors and Actuators A*, **134**（2007），606-614.

（5）Kim, J-w., ほか，Tube-type Micropump by using Electro-conjugated Fluid（ECF），*13th ICMT2009*, CD-ROM,（2009-10）.

（6）Joon-wan Kim・ほか，MEMS-based tube-type micropump by using electro- conjugated fluid（ECF），*19th ICEM2010*, CD-ROM（2010）.

（7）Kim, J-w., ほか，High Performance ECF（Electro-Conjugate Fluid）Micropump by the In-plane Integration of MEMS-fabricated electrodes, *15th ICMT2011*, CD-ROM,（2011-11）.

（8）古木星哉・ほか，MEMS 技術を用いた集積化による ECF マイクロポンプの高圧化，山梨講演会，（2014-10），17-18.

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

14. 設計工学・システム

14・1　趣旨

今後のものづくりの競争力向上のためには，高品質・低価格に加え高付加価値が鍵となる．それに向けては，社会に存在する多様な価値への対応が求められる．一方で，価値を実現するための要素技術の高度化・複雑化も進んでおり，その対応も必要である．設計工学・システム部門では，このようなものづくりの課題に取り組むための設計工学のキー技術として，**図 1** に示すようにデジタルエンジニアリング技術，システムズエンジニアリング技術，魅力価値設計技術を取り上げ，個別の研究テーマを調和的に発展させて，価値創造を加速する新たな設計技術の確立を 2030 年の目標に据える．なお，本部門メンバーも主導する NEDO「戦略的イノベーション創造プログラム／革新的設計生産技術」の複数のプロジェクトにおいては，製品高付加価値化のための個別の「デライト設計手法」の開発が 2018 年度までに行われる予定である．本ロードマップはそれを中期的な目標として見据えつつ，その成果をさらに発展させることを目指すものである．

〔野間口　大　大阪大学〕

14・2　デジタルエンジニアリング技術

CAD，CAE，CAM，最適設計といった個別に発達していた技術は，3D モデリング手法を中心としてデジタルエンジニアリング技術として統合されつつあり，製品設計において高い性能と品質の確保が可能となってきている．さらに近年では，製品の機能といったような概念レベルにより近い情報のモデリング技術と評価技術の導入が進められ，設計プロセスの早い段階で製品性能の検証を行い，デライトなものづくりが推進されようとしている．今後は，設計者が求める機能を持つ具体的構造物・機構・システムの創成設計技術とそのモデリング技術，製品性能の抜本的な向上が可能なマルチスケール・マルチマテリアル材料設計技術，アディティブマニュファクチャリング等の新しい製造方法との融合など，構想設計から詳細設計，解析と最適化，製造までの情報を一気通貫に連結し，設計者のデライトな発想をより高いレベルで支えるための基礎技術の進展が期待される．

〔泉井　一浩　京都大学〕

14・3　システムズエンジニアリング技術

どのようなイノベーティブな設計であっても，最終的にはひとつひとつの個別具体的なアクションに分解され，それらの連鎖連携によって達成される．いかに個の英知を総合して最終設計品質を高めるかが，設計におけるシステムズエンジニアリング技術であると言える．近年 DfX[1] に代表されるように，設計において環境適合性やライフサイクル，サプライチェーンや製品系列展開を含むグローバル経営といった側面を考慮する必要性が高まったことにより，より広範な知識が必要となってきており，従来取り組まれてきた暗黙的で属人性が高い「すり合せ設計」だけでは，加速度的に増加・拡大する複雑性・知識範囲に対処できなくなりつつある．このため設計プロセスにおいて，モデルベース等で計算機を援用し設計者の英知の総合化を支援するといった手法のブレークスルーが起こることが待望されている．一方，すり合せ設計は日本独自の得意分野であり，世界では増大する複雑性への対処というニーズは，システムズ・オブ・システムズという学術エリアで論じられてきた経緯がある．長期展望では，日本の良さを生かしたすり合せ技術と，システムズエンジニアリング技術が高度な次元で調和することで，設計の質を高め価値創造を加速するような，世界に貢献する新たな設計技術として発展していくことが期待される．

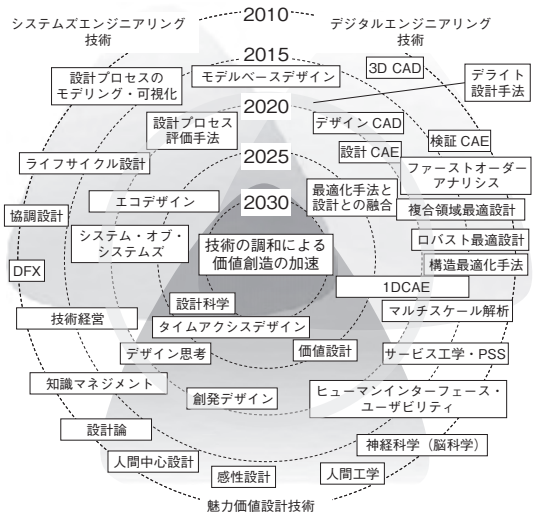


図 1　設計工学のロードマップ

〔古賀　　毅　山口大学〕

14・4　魅力価値設計技術

製品やサービスの品質分類は，しばしば狩野モデルで議論されてきた．狩野モデルでは，当たり前品質，一元的品質，魅力的品質で分類される．魅力品質設計は，この当たり前品質，一元的品質を確保したうえに，技術や顧客要求を先取りして，ユーザーに新たなエクスペリエンスを提供する設計技術である．この技術は，人間の感性や行動特性を深く理解することが必要なことから，人間中心設計，感性設計，人間工学などを基礎技術とし，設計論，発想支援，知識情報，ヒューマンインターフェースや創発デザインの研究がなされてきた．近年では，デザイン思考に対する注目の高まりに見られるように，ユーザーの立場・視座で現時点の魅力的品質をいかに設計するかに力点が置かれている．たとえば，前述のデライト設計手法の研究では，ユーザーの立場・視座で価値を設計する感性モデリングの開発などがある．狩野モデルは，世の中の技術進展，年月に伴って，現時点で魅力的品質であっても，次第に一元的品質へ，さらに当たり前品質へ遷移していくことも示している．それゆえ，今後は魅力的品質をいかに維持あるいは高めていくことができるのか，価値が成長するデザイン，価値寿命評価，持続可能社会シナリオ設計など，時間変化とそれへの対応を扱う方法論が期待される．すなわち，今後，エコデザイン，ライフサイクル設計，最適化手法などと調和しつつ，タイムアクシスデザインなど，将来にわたって価値を提供し続ける設計技術へと発展していくことが期待される．

〔細野　　繁　日本電気（株）〕

文　　献

（1）Ulrich, K. and Eppinger, S. D., Product Design and Development, (2011), McGraw Hill Higher Education.

技術ロードマップから見る2030年の社会

15. 生産システム

15・1　趣旨

生産システム部門では，2016年3月に部門初となる技術ロードマップを公表した．生産システム分野に関連する技術は多岐にわたるが，今回公表した技術ロードマップは部門で初めて作成したため，具体的な技術のロードマップではなく，生産システムの分野全体を俯瞰（ふかん）的に捉えて将来の工場像を描き，その実現のための主要技術をまとめたものとなっている．本稿ではその概要を述べる．

15・2　技術ロードマップの概要

15・2・1　社会的ニーズ

生産システムの歴史的な変遷を眺めると，技術的な要因もさることながら，社会的・経済的な要請による影響が多大であることが特徴となっている．近いところでは，FMS（Flexible Manufacturing System）の主たる目的が，1980年代では工場の自動化・無人化であったことに対し，2000年代以降では変種変量生産へ柔軟に対応できることを目指していることは，製品が量的には充足し，質的なものを求めるようになったがゆえの製品ニーズの多様化によるものであり，まさに社会的ニーズの変化によるものと言える．そこで，近年の生産システム（とくに日本の）を取り巻く状況を考えると，グローバル化がキーワードとなる．海外展開の動きは，現在は円安傾向もありやや鈍化しているものの，1990年代から海外投資比率は着実に増加している．ただし，その理由は当初の経済的・法規的なものから現地の顧客ニーズへの迅速な対応などに変化しつつある．このような傾向から，今後は現地のニーズを捉えたカスタマイズ設計を含む製品を現地で生産して供給する生産形態が増えていくことが予想される．

15・2・2　技術的ニーズ・ブレークスルー

上述のような生産形態の変化を「理想的な工場像」で捉えると，20世紀末の「自動化工場」から，現在進行中である世界に分散する工場を生産から販売までIoT（Internet of Things）技術でつなげ連携する「つながる工場」，そして2030年頃までには現地ニーズに対応した製品を世界に広がる工場のあらゆる設備を柔軟に選択して生産する「どこでも工場」へと進化することが予想される．工場がこのような変遷を遂げていくために必要となる技術を，海外生産，自動化⇔人，汎用機⇔専用機という三つの切り口から予測したものを**表1**に示す．これらの技術実現のための鍵となるのは，分散されたそれぞれの工場におけるローカルレベルの柔軟な対応と，工場のデータや知識・ノウハウのクラウドによる高度な共有・展開に裏打ちされた工場群のグローバルレベルの全体最適化であり，その前提としてネットワーク化，標準化技術の整備が必要となる．

15・2・3　将来の社会に関する展望

生産システムが**図1**に示すような「どこでも工場」へと進化していくことにより，地域ニーズに柔軟に対応したカスタマイズ製品設計および，要求品質に見合う製造技術を有し短納期・低コストを実現できる製造設備を，世界に分散する工場群から柔軟かつ適切に選択して製造する生産システムの実現が期待される．

15・3　技術ロードマップの展望

前述のとおり，生産システムの変遷は社会的ニーズによる影響が多大であるため，技術ロードマップは技術の進展だけでなく，社会動向も見つつ，随時更新していくことが必要である．また，生産システムの技術ロードマップを下敷きとして，具体的技術についても今後検討していくことが望まれる．

なお，生産システム部門技術ロードマップの全文は，日本機械学会ホームページのJSME技術ロードマップ内，および生産システム部門ホームページ内のコンテンツとして公表されている[1]．ロードマップの詳細はそちらを参照いただきたい．

〔妻屋　　彰　神戸大学〕

文　　献

（1）生産システム部門　技術ロードマップ
http://www.jsme.or.jp/msd/html/RoadMap/msd_roadmap201603.pdf

図1　将来（2030年）の「どこでも工場」

表1　工場の理想像と実現のための技術の変遷

	1990～2010 自動化工場	2010～2020 つながる工場	2020～2030 どこでも工場（地産地消・情報共有）
海外生産	工場移転の技術（工場管理） （作業者教育）	グローバルに広がる製販統合の技術	需要地での設計と製造とのすり合せ技術 効率的でレジリエントなグローバルサプライチェーンの技術 現地の文化・環境に適合した生産システム化技術
自動化⇔人	自動化の技術	機械と人をつなぐ技術 遠隔地の工場をつなぐ技術 需要変動に応じた工程計画・スケジューリング技術	製品のカスタマイズに対応し，設備のカスタマイズを含む適切なリソースを選択的に使用して最適化する技術 作業者の作業指示と教育を含む人間支援システム
汎用機⇔専用機	多機能化の技術	汎用機や専用機を選択的に使用できるネットワーク技術，標準化技術	需要や技術レベルに応じて，作業者やAM（Additive Manufacturing）を含む工場内の設備を含めたリソースを選択的に使用して最適化する技術

技術ロードマップから見る2030年の社会

16. ロボティクス・メカトロニクス

16・1　趣旨

2015年1月にロボット革命実現会議により公表された「ロボット新戦略[1]」では，ロボットの活用・普及を促進する分野として，①ものづくり分野，②サービス分野，③介護・医療分野，④インフラ・災害・建設分野，⑤農林水産業・食品産業分野と定められた．これは，今後到来する人口減少，労働者不足をロボット技術で実現したいという国の強い意識の表れであると思う．

ロボティクス・メカトロニクス部門では，2012年度から2013年度にかけて新たな「技術ロードマップ」の作成を実施し，2014年度にはこのロードマップのローリングを行った．ローリングでは，この「ロボット新戦略」と整合を取りつつ，「製造分野」「サービス分野」「特殊環境分野」についてロードマップを新たに書き加えた．

まず「製造分野」では，三品業界と呼ばれる食品・医薬品・化粧品業界を選んだ．最終製品の性質から無人化によるクリーン環境での製造が期待される一方で，ロボットによる自動化は充分に進んでいないと言われる業界であるためである．ここではこの業界に適した技術を予測し，将来の実用化につながるロボットの開発につなげたい．

次に「サービス分野」では，医療福祉・生活支援として範囲を拡大し，福祉については使用者を念頭に置いて自立支援，介護支援，リハビリ支援に細分化した．日本は本格的な高齢化社会になってきた．ロボット技術で介護支援・病院の効率化をすることにより，高齢者が豊かな生活ができる方法や，社会保障費の削減ができる道筋を模索してみたい．

最後に「特殊環境分野」では，インフラ維持管理を対象に，社会インフラの橋梁，トンネル，ダムや河川の水中を調査・点検・補修ができるロボットを選定した．とくに社会資本の老朽化が今後の社会問題として拡大することに対応し，人口減少や労働者不足対策としてロボット開発が進みつつある近接目視，打音検査，補修作業を代替できるロボットの実用化を実現し，社会の課題に寄与したい．

〔柳原　好孝　東急建設（株）〕

16・2　産業用ロボット分野

16・2・1　社会的・技術的ニーズ

製造業分野におけるロボットの適用作業として，ロボットの適用が増えつつある三品業界（食品・医薬品・化粧品）を対象に，ロードマップを作成した．本ロードマップは先端技術ではなく実用化・事業化を予測したものである．したがって，すでに試作・実証はされているが，実用化・事業化（普及）の域に達していないものも多く含んでいる．

16・2・2　技術的ブレークスルー

実用化・事業化のポイントを，システム開発のステップに沿って挙げている．

16・2・2・1　ニーズに沿った機能設計　一般に，自動化が進んでいない難しい作業ほどロボットシステムのコストが上がり費用対効果が低くなるため，ロボット導入の効果に懐疑的な生産技術者・経営者（ユーザー）は多い．費用対効果とユーザーの満足度の高いロボットシステムを構築するため，機能設計時の意思疎通を充分に行うことが重要である．CGを用いた機能設計支援ツールなどを利用することで，ロボット導入の効果・メリットを明示しつつ効率的に機能設計のすり合せを行い，結果としてシステムインテグレーションにかかる費用も低減できる．

現状では，普及のためにこのようなロボット導入・運用の支援を行うツールや仕組みが必要である．

16・2・2・2　ロボットに必要なコンポーネント（機能）の開発

⑴　要素技術

必要な要素技術として，アームのビジュアルフィードバック・力制御，作業を実行するための作業スキルの獲得（教示）がある．力制御の普及には安価な力・接触センサと動作の高速化が必須である．また，アームの出力不足により実施できない作業が多くある．さらなる小型・強力なアクチュエータの開発が期待される．一方，人の近傍で動作するロボットには安全性確保の一手段として柔軟アクチュエータの採用が考えられる．現状のハンドでは取り扱いが難しい柔軟物・不定形物の把持も重要な技術である．

⑵　プロジェクトチームによるロボット開発

ロボットを開発するには，システム設計者が中心となって，ユーザー，機構・コントローラ・通信などの要素技術者が協力し，プロジェクトチームとして一つのシステムに仕上げなければならない．組織の垣根を越えたフレキシブルなチーム編成と開発が必要である．

16・2・2・3　システムの完成度向上（作業を確実に実行する能力）

これまでにさまざまな技術が開発され論文などで発表されてきたが，実際には現場への導入に至らなかった技術も多い．たとえば，機械製品の製造で一般的に行われるボルトの締付作業は実験室レベルでは実現しているが，生産現場への適用に当たって求められる作業の失敗確率1/1000～1/10000以下は実現できていない．継続した繰返し検証実験と，失敗する場合の理論的な分析，ロバストな作業スキルの構築も開発しなければならない．それでも失敗・異常はゼロとはできない．異常処理の自動化により，異常が発生しても人を介在させずに動き続けるシステムの実現が期待される．また，予防保全の考え方を取り入れ，故障する前にメンテナンスを行いシステムの稼働率を向上させることも重要である．

実験室での研究開発だけではシステムの完成度は上がらない．ユーザーの理解を得て，ユーザーとともに現場で長期運用し完成度を上げていくことが必要である．

16・2・2・4　コストダウン

⑴　標準化されたモジュールの活用

安価なロボットシステム構築の一手段として，要素技術を標準化・コンポーネント化し，それらを組み合わせてロボットシステムを構築することが考えられる．アーム・移動台車・視覚センサなどのインターフェースの標準化（オープン化）や，コントローラ・ソフトウェアのライブラリ化が必要となる．ミドルウェアによる開発プラットフォームの標準化も効果的である．また，CGを利用した機能設計ツールやシミュレータなど

ロボットシステム開発環境の整備も必要である．コンポーネント化・ライブラリ化などは，これまでに開発された技術の整理と継承の方法としても有効である．

また，ロボットの機構として高精度な特殊品を製作・使用せず，汎用品・汎用モジュールを採用することもコストダウンに効果的である．この場合，機構としての動作精度が悪くなった分，ビジュアルフィードバックや力制御などの制御によって動作精度を補償しなければならない．

16・2・2・5　運用支援　現状，ロボットを使いこなせるユーザーは主に大手自動車メーカーや大手電機メーカーなどである．ロボットハードを売るだけではロボットの導入は進まない．ロボットハードの販売のみならず，導入コンサルタント・作業スキルの教示などの運用支援やメンテナンスまで視野に入れたエンジニアリング事業への転換も検討すべきである．高いスキルを持つエンジニアによる運用支援やメンテナンスを効率よく，かつ幅広いユーザーに提供するために，インターネットを利用した遠隔管理・運用支援技術も必要である．

16・2・3　将来の社会に関する展望

ここで，機械・電気製品から食品・医薬品・化粧品までの幅広い業界を俯瞰し，製造分野のロボットについての重要点をまとめておく．

16・2・3・1　製造現場で必要となる基本作業　①バラ積み部品の配膳・取り出し作業，②ボルト・ナットによる締め付け，③電子回路基板・コネクタ・電源類のネジ・ボルト・ナットによるシャーシへの組付け，④ケーブルの接続，⑤大型重量物の組付け，⑥ホース・ベルトなどの柔軟物の組付け，⑦柔軟物や不定形物の搬送，⑧検査などがある．また多品種少量生産が多く，多数の動作教示や段取り変更が多いことも留意すべきである．

16・2・3・2　作業セル　16・2・3・1に述べた作業を実行するための有効なロボットのひとつとして，移動台車付き人腕型の作業アームが挙げられる．

どのような作業ニーズがあるのか，現場の生産技術者と研究者のさらなるコミュニケーションが重要である．

16・2・3・3　要素技術　①移動して作業をするために，作業対象物に対してアームを位置合わせするためのビジュアルフィードバック，②さまざまな作業をさせるための作業スキル（教示），③作業スキルで人の持つ柔らかい動きを実行するための力制御，④力制御のための低雑音でドリフトのない安価な力センサ・触覚センサ，⑤さまざまな柔軟物・不定形物のハンドリング，⑥人の傍で作業できるアームとこれを実現する機構・アクチュエータ・安全性，⑦高度な画像センサ，⑧移動して作業をするための通信やエネルギー供給技術，⑨自動での異常処理や遠隔運転・リモートメンテナンス技術を開発する必要がある．

16・2・3・4　実用化・事業化へのポイント　①ユーザーである現場の生産技術者との意志の疎通を図り，ニーズに沿って機能設計をすること，②作業を確実に実行し異常があっても自ら復旧できるシステムに完成度を上げること，③ロボットシステムを安く実現できるように標準化・モジュール化を促進すること，④ロボットを売るビジネスから，ロボットの導入・運用・保守を支援するエンジニアリング事業に転換することである．

〔藤井　正和　㈱ IHI〕

16・3　サービスロボット分野

16・3・1　社会的・技術的ニーズ

サービスロボット分野では，個人の居宅を中心として日常生活の支援を行う「生活支援ロボット」を追加するとともに，「介護」をより広い概念を表す「福祉」という名称に変更し，使用する人と用途とに着目して，さらに自立支援，介護支援，リハビリ支援，の三つの分野に細分し直した．「介護」とは生活行為を成立させるための肉体的，精神的な援助であり，より具体的には，食事，排泄，睡眠，清潔化（掃除，洗濯，食器洗い）などの生活行為に対する援助を通して，命を守り，生きる意欲を引き出し，生活を維持することである．そして，この目的を実現する手段が生活支援ということになる．この意味において，介護ロボットと生活支援ロボットとは一部重複する概念であるが，ここでは「生活」，すなわち人間が人間らしく生きるために行う諸活動を，

I 群　：コミュニケーション（意志伝達と理解，視力，聴力）
II 群　：ADL（日常生活活動：寝返り，移乗，歩行，着衣，食事，排泄，入浴），
III 群：IADL（手段的生活動作：調理，掃除，洗濯，買い物，金銭管理，服薬，交通機関の利用）
IV 群：余暇活動（休息，楽しみ，教養）

の 4 群に大別した．

この中のI，II 群に示す基本的活動動作に関して，本人自身が使用するものを「自立支援」，介護者が使用するものを「介護支援」として分類し，これらの活動動作を行うための基本的動作をトレーニングするものを「リハビリ支援」ロボットとして区別する．また，III，IV 群に示すより複合的な家事レベルの活動に対する支援を「生活支援」と呼ぶこととする．

作成したロードマップを文献（2）に示した．ここで，病院内作業支援には医療行為の支援は含まない．本ロードマップは実用化・事業化を予想したものであり，すでに試作・実証はされているが，実用化・事業化（普及）の域に達していないものも多く含んでいる．

16・3・2　技術的ブレークスルー

16・3・2・1　ニーズに沿った機能設計　真に有用な医療福祉ロボットの実現に当たっては，高齢者・患者のみならず現場のユーザーである看護師・医師・介護士とロボット技術者との協力・意思疎通が重要である．ユーザーの意向を汲んだ機能仕様を決めるために，機能定義のビジュアライズや，ユーザーとの共同プロジェクトを組織することも有効である．近年，徐々にではあるが看護師・医師・介護士との連携は進みつつある．もう一歩進んで，必要としている介護機器としてたとえば杖・歩行器・車椅子などを対象に詳細なロードマップをユーザーと協力して作成し，製作プロジェクトを実行する，といった具体的な試みも役立つものと思われる．また，ユーザー側からの忌憚のない評価も重要である．

16・3・2・2　ロボットに必要なコンポーネント（機能）の開発

福祉機器の開発においては機構の開発が重要である．歩行を支える杖・歩行器・車椅子と，介助のキーポイントであるベッドからの移乗を支援するためのベッドと車椅子の機構開発はその代表的なものである．自律搬送車などを実用化し，効率的に運用するためには，どこでも接続できる無線ネットワークが必要となる．また安全のために，人・障害物を検出する高信頼性を持った接触センサ・近接センサ・ビジョンが必要となる．

16・3・2・3　システムの完成度向上　完成度を上げるためには実環境で長時間にわたって使用することが必要である．実験室だけでは普及するに必要な完成度まで高められない．使用しながら改善するために，ロボットの導入・運用を行うエンジニアリング・サービスの充実も重要である．

16・3・2・4　コストダウン　安価であれば普及するものは多い．そのため機構コンポーネントのモジュール化やソフトのライブラリ化は必須である．モジュールを用いてシステムを設計するための支援技術も必要となる．

16・3・2・5　運用支援　基本的に生活を支援したり，介護の支援・病院業務の支援をするエンジニアリング・サービスがビジネスの中核となる．地域・個人密着型の事業の充実が必要である．ビジネスのモデルケースを国・地方公共団体の事業として立ち上げることも望まれる．

16・3・2・6　社会環境整備　これら支援機器を取り巻く社会環境として，社会的認知度を向上させ，受容性を高めるためのさまざまな方策が立法，行政の両面からも必要となる．たとえば，機器の安全認証制度，免責，道路交通法などの規制緩和と改正，損害保険制度などはその代表的なものであると考えられる．医療機器の進歩に対応すべく，薬事法が「医薬品，医療機器等の品質，有効性及び安全性の確保等に関する法律」として2014年末に改正施行されているが，今後この分野へのロボット技術の導入に伴い，さらに柔軟な制度改革も必要となろう．また，個人情報を含むプライバシーの保護についても充分な配慮が必要であることは言うまでもない．

16・3・3　将来の社会に関する展望

ロードマップから重要な点を挙げてみる．

(1)　ロボットのニーズは,①自立できる人のための歩行支援,②介助者のための，ベッドから車椅子への移乗支援，③病院内で検体や食事を運ぶ自律移動車などが主なものであろう．

(2)　これらの作業のための機器として，杖・歩行器・車椅子・ベッドなどの基本的な機器を含めて継続して改良する必要がある．これらのうちの多くは最終的にはウエアラブルになろう．

(3)　要素技術として，①杖・歩行器・車椅子・ベッドの機構・機能に関する開発,②自律移動を実用化するための,どこでも接続できる無線ネットワーク，③安全のために人・障害物を高い信頼性で検出する接触センサ・近接センサが必要となる．

(4)　実用化・事業化には，①医療福祉の現場のユーザーである看護師・医師・介護士とロボット技術者との協力・意思疎通が重要であり，そのための機能設計のビジュアル化，②ロボットを運用するためのエンジニアリング・サービス，遠隔からの操作支援も重要となる．ロボットの導入・運用を包含したビジネスとすることにより，システムの普及に必要な完成度まで高めることができると考える．

〔三宅　徳久　千葉大学〕

16・4　特殊環境ロボット分野

16・4・1　社会的・技術的ニーズ

2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルの崩落事故を契機に，これまで社会インフラの維持管理に必要な点検体制の見直し，ロボット技術やセンサ技術を活用したトンネルや橋などの点検・補修といった維持管理技術の必要性が社会的課題として取り上げられるようになった．

2014年度に入り，経済産業省と国土交通省は,「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト(NEDO)」による研究開発と,「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進（国交省)」を同時に実施し，さらに内閣府主導のSIP(戦略的イノベーションプログラム)において「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」が開始された．

16・4・2　技術的ブレークスルー

16・4・2・1　ニーズに沿った機能設計　作業シナリオを作成し，関係者に周知．作業シナリオを具体化・ビジュアル化するために，点検対象のCGやロボットによる実環境での実証実験の繰返し実施と，作業シナリオ（手順）を確定していく．このために，作業の実施者と機器開発者が一緒になって何をすべきなのか，作業自体を明確にし，各作業の作業シナリオを作成することが最大のポイントである．作業実施者と機器開発者の協力こそ，実用化，普及の前提となる．

なお，前提条件として橋梁(りょう)点検においては,「橋梁定期点検要領（案）平成16年3月発出」「総点検実施要領（案）【橋梁編】平成25年2月国土交通省道路局」「橋梁における第三者被害予防措置要領（案）平成16年3月国土交通省道路局国道・防災課」,道路トンネルにおいては,「道路トンネル定期点検要領(案)平成14年4月国土交通省道路局国道課」に従うことが現状必須である．

16・4・2・2　ロボットに必要なコンポーネント（機能）を開発する

(1)　電源供給

屋外で実施されることがほとんどのインフラのメンテナンスでは，商用電力を前提に設計はできない．したがって，発電機(車載を含む）もしくは，バッテリー駆動である必要があり，ロボット側の省電力対策とともに，電源の安定化など一次側の対策は必須である．

(2)　通信機能

トンネルや水中におけるデータ通信については，現在さまざまな通信手段が日進月歩で変更または強化されており，今後の動向を見守り，最適な通信機器を選定できるように入出力をコンポーネント化しておく必要がある．

16・4・2・3　システムの完成度を上げる（作業を確実に実行する）

研究室レベルの構成要素でロボットを製作するのではなく，耐久性，耐環境性の高いシステムとすることが重要である．たとえば，コネクタ部の処理や点検，故障時に解体組立が手順どおりに簡単にできるなど．

16・4・2・4　コストダウン　機構をモジュール化し，検査装置，足場等の代替となる機構を人による点検時においても使用できるような構成とし，あらゆる検査の場面においてその要素技術が活用できるようにすることが，コストダウンに寄与すると考えられる．

16・4・2・5　運用支援

(1)　作業実施体制の確立

教習，資格制度などの教育面，問い合わせ等のサポート体制は，民間レベルでの恒常的使用には不可欠であり，ある一定量が市場に供給されるまでには体制の構築が必要である．

(2)　メンテナンス

自動車や家電製品など汎用機械は，メンテナンスサービスを行う専門の業者が存在し，開発者が自らメンテナンス等を行うことはない．上記と同様に一定量が市場に供給されるまでに体制を構築する必要がある．

16・4・3　将来の社会に関する展望

インフラ維持管理は，今後人口減少が予想される国内全域で実施されるため，専門家（検査，運用両面）が不在でも適切な補修計画や積算などを行える計画から作業までの一連の流れを一気通貫で実施できる発注形態の変更が望ましい．

また，国内の人口減少などを見据えて，閉鎖するインフラ，重点的に補修するインフラ等が仕分けられることを想定し，要求仕様を絞り込み，効率のよいロボット点検へと移行できるようラインナップを充実させる．

要素技術としては，橋梁では，ドローン，トンネルでは打診装置，水中では水中での近接目視がキーテクノロジーとなると考えられる．それぞれ，ブレークスルーが不可欠である．

なお部門ロードマップは，ウェブサイトに公開中である．是非一度熟読いただきたい[2]．

〔柳原　好孝　東急建設（株)〕

文　献

(1) ロボット新戦略
http://www.meti.go.jp/press/2014/01/20150123004/20150123004.html

(2) 2012－2014年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロードマップ委員会報告
http://www.jsme.or.jp/rmd/Roadmap/2014RMD_Roadmap.pdf

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

17. 情報・知能・精密機器

17・1　趣旨

情報・知能・精密機器部門では製品化に固有な技術を横串的に展開しており，多種多様な技術の集合体である．そのため，要素技術を紐解くと，多くが機械の極限を追求する技術があったり，一方では黎明期の技術があったりしている．それらを俯瞰しているのが，**図 1** である．

それぞれのフェーズで技術的なアプローチもマネジメントスタイルも変わってくる．すなわち黎明期の技術（医工融合，マイクロシステムなど）は多くの夢を創発するもので，発散のマネジメントが必要である．次に成長期に係る知能機械はロードマップを描き，多くの研究者の協賛を得る必要がある．すなわちここでは収束のマネジメントになる．

成熟期に向かっている HDD（磁気ディスク装置）やプリント技術は収束のマネジメントを推し進めると同時に新しい可能性を探る必要がある．最後は成熟期に至る ODD（光ディスク装置）や家電品は次の破壊技術の出現を想定しなくてはならない．

そこで，これらを意識しながらロードマップを描くのに適切な成長期と成熟期にかかる技術の将来展開[(1)(2)]を記すこととした．すなわち，柔軟媒体のハンドリング技術，磁気ディスク装置技術，知能化技術，に絞ってロードマップを提示する．

〔三枝　省三　就実大学〕

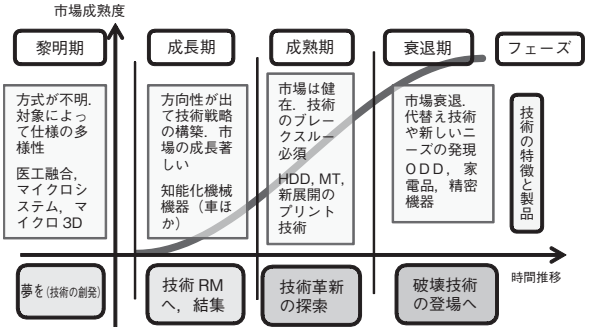


図 1　技術の成熟度と各技術の位置付け[(1)(2)]

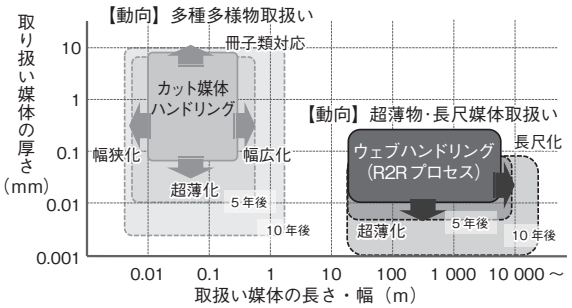


図 2　柔軟媒体ハンドリング技術のロードマップ

17・2　柔軟媒体ハンドリング

17・2・1　社会的・技術的ニーズ

柔軟媒体ハンドリング技術は，カット紙をハンドリングする技術とウェブと称される長尺の媒体をハンドリングする技術に大別される．いずれの技術も媒体を，送出（繰り出し・巻出し）→搬送→処理（記録・印刷・読取り・仕分け）→収納（集積・巻取り）という一連のプロセス処理技術という共通点があり，最近は媒体の高付加価値化や製品開発の低コスト化に伴い，取り扱う媒体の多様化，薄厚化，長尺化，幅広化が進んでいる[(1)]．代表的な社会的・技術的ニーズを以下に示す．

- 印刷技術を用いて電気回路やセンサなどを製造するプリンティッドエレクトロニクスへの適用
- 冊子類に記録された文字や画像の読取り，冊子類への文字や画像の印刷

17・2・2　技術的ブレークスルー

柔軟媒体ハンドリング技術ロードマップを**図 2** に示す．今後，柔軟媒体ハンドリング技術は，以下に示すような付加価値の高い媒体の製造や処理を実現するコア技術となると予想される．

- 媒体の高機能化のため，媒体上には文字や画像だけでなく電気回路やセンサなどの構造体が形成されるようになる．一方で IoT の普及に伴い媒体自体はより薄くなる．薄さの限界は数 μm と予想される．
- 電気回路やセンサ等の高機能化媒体の生産性向上のためウェブの長尺化がすすみ，最大数十 km 程度になると予想される．
- 媒体が薄いほど変形やしわなどが発生しやすくなる．また部分的に構造物が形成され剛性が異なる媒体の処理も必要となる．変形やしわの発生，構造物の破損防止のために低圧力・低張力で媒体をハンドリングする技術が必要になる．
- 帳票類だけでなくさまざまな厚さの冊子類のハンドリングも必要となり，さまざまな種類の媒体を正確にまくる技術もより重要となる．
- 従来の柔軟媒体ハンドリング技術は主に摩擦を利用した技術であったが，ハンドリングする媒体の多様化に伴い摩擦力以外の力の利用も必要となる．

17・2・3　将来の社会に関する展望

- よりソフトでフレキシビリティに富んだ柔軟媒体ハンドリング技術が実現され，世の中の極めて重要な技術となる．

〔吉田　和司　日立オムロンターミナルソリューションズ（株）〕

17・3　情報記憶装置

情報化社会のさらなる進展，とくに近年のクラウド環境の発展により，情報記憶装置のニーズは爆発的に増加している．今後の情報記憶に特徴的なのは，データセンターに保存されるものが多くなり，その多くがアクセス頻度の低いコールドデータとなる点である．こうした変化により情報記憶装置の中核であるハードディスクドライブ（HDD）についても，大容量・高

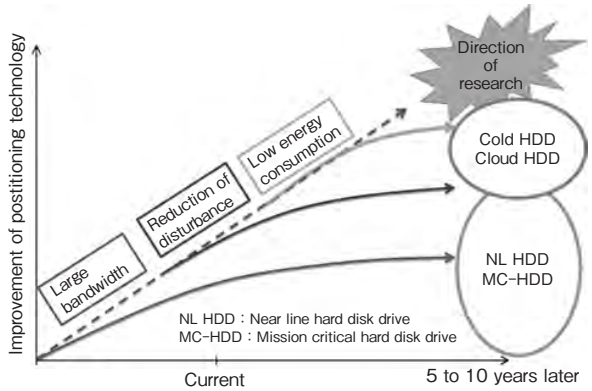


図3　HDD の位置決め技術ロードマップ

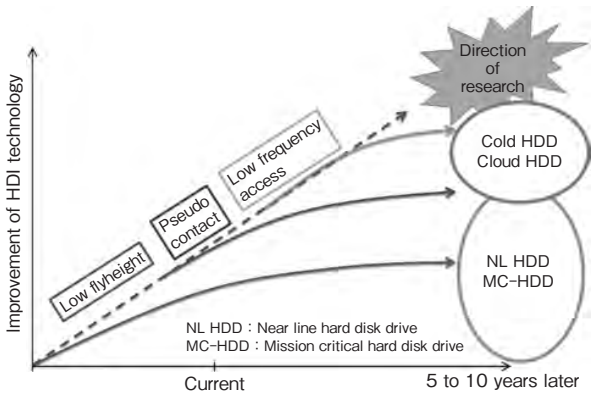


図4　HDD のナノトライボロジー技術ロードマップ

速アクセスから超大容量・低速アクセスまで応用が広がることが予想される[1]．今後の HDD に重要となるのはビットコスト低減であり，そのためには記録密度の向上が必須である．これを実現するためのキー技術は，ヘッド位置決め技術とナノトライボロジー技術である．ヘッド位置決め技術については，制御帯域の広帯域化，外乱の低減，さらに低消費電力化をねらった制御技術の高度化と新規な機構が求められる[3]（**図 3**）．また，ナノトライボロジー技術としては，さらなるヘッド・ディスク間のクリアランスの低減と摺動面の微小化により，極低浮上から疑似接触型ヘッド・ディスクインターフェイス（HDI）の実現，熱アシスト磁気記録や低頻度アクセスに対する信頼性を確保していくことが求められる（**図 4**）．

〔福澤　健二　名古屋大学〕

17・4　知能機械分野

知能機械周辺分野の科学技術動向[4]～[6]を調査・分析し，洗濯機，掃除機のようなメカトロ家電，自動車，生活支援ロボットなど身近な知能機械の進化を端的に象徴する四つのトレンドを提案する．**図 5** に示すように，多くの利用者の嗜好や操作特性をビッグデータなどから分析し，機械挙動に反映させる「みんなが使いやすい知能機械」から MEMS などで利用者の生理情報モニタリングすることで個人の嗜好・操作特性を機械挙動に反映させる「私（利用者）が使いやすい知能機械」に進化する．そして，利用者の機械挙動に対する感性的評価を考慮する「私が感動する知能機械」，さらに，あたかも究極の熟練者が機械を操作しているような「私の期待を超える知能機械」といった新しく感動する価値への道筋を示す．

さらに「人間の感性」に訴求する知能機械の挙動規範設計パラダイムの重要性に着目し，感性指標の定量化を中心にソフトウェア技術とハードウェア技術をシームレスに接続しながら進化するべき個別技術の進化シナリオを**図 6** のように分類する．

知能機械の評価関数に「人間の感性」を考慮させるために「感性の定量的モデル」や利用者の感情・感性をモニタリングする「五感センサデバイス」「生理情報センシング・フィードバック」などの技術が本部門として検討するべき留意課題の一つであることを提唱する．「感動・わび・さび」といった従来の機械工学で扱いにくい感性領域に一歩踏み出す必要性を示す．

〔高橋　　宏　湘南工科大学〕

	2010	2020	2030	2050	2080
マクロトレンド	みんなが使いやすい知能機械	私が使いやすい知能機械	私が感動する知能機械	私の期待を超える知能機械	
機械システム	人の対応によって動的に機械挙動が変化できる機械システム	個人の特性に対して機械挙動の変化幅が大きく，細かく調整できる機械システム	「そこまで考えているのか」と感動する機械挙動を実現する機械システム	「そういうこともできるんだ」と期待を超える機械挙動を実現する機械システム	
取り組むべき個別技術	外部ネットワークの知識ベースを安全に機械知能に取り込む技術	MEMS などで心拍・脳波・血流などの生体情報を入力	感性に訴える機械ダイナミックデザイン手法	非手続型記述アルゴリズムで動く機械の設計方法確立	

図5　四つのトレンド予測

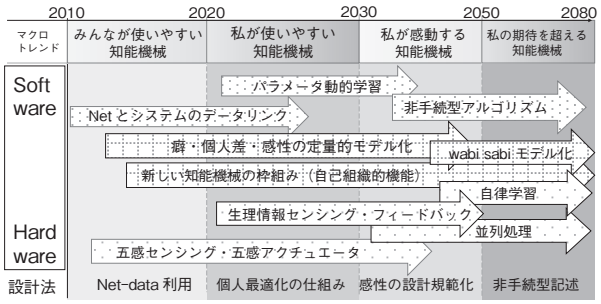


図6　個別技術の進化シナリオ

文　　献

（1）日本機械学会先端技術市民フォーラム，情報・知能・精密機器の将来技術（2015-3）．
（2）Extended abstract of the Future Technology session in 2015 JSME-IIP / ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE)（2015）．
（3）中村滋男・平田光男，日本機械学会 2015 年度年次大会，(2015-9)，S1620202.
（4）横断型基幹科学技術研究団体連合，分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ報告書，経済産業省平成 20 年度技術戦略マップローリング委託事業，(2009)．
（5）(株) KRI，横断型基幹科学技術研究団体連合，学会横断型アカデミック・ロードマップ報告書，経済産業省平成 19 年度技術戦略マップローリング委託事業，(2008)．
（6）日本能率協会総合研究所・日本機械学会，機械分野アカデミック・ロードマップ作成支援事業報告書，経済産業省平成 19 年度技術戦略マップローリング事業，(2008)．

技術ロードマップから見る 2030 年の社会

18. 産業・化学機械と安全

18・1　趣旨

安全はすべての分野における共通・基礎技術である．ここでは，広く扱われる安全技術の中で「産業・化学機械における安全技術」についてのロードマップを示す．

18・2　機械安全技術の動向

18・2・1　社会的・技術的ニーズ

機械安全の歴史を考えると，危険作業時の「機械を止める安全」から「機械が止まる安全」へと変化している．安全制御は，入力（Input：操作スイッチ，監視センサなど），制御〔Logic：シーケンスや情報処理を行う PLC（Programmable Logic Controller），DCS（Distributed Control System）など〕，出力（Output：駆動装置，開閉装置など），から成り立っている．本部門は，この安全制御系の安全度水準を証明するための工学的理論の体系化と技術の開発により，安全技術の発展に貢献している．**図 1** に安全とものづくり・環境等の関連図を示す．

18・2・2　技術的ブレークスルー

安全技術のロードマップを**表 1** に示す．1990 年代から 2000 年代初めは，機械的な構造安全，電気安全，制御安全の要求事項による機械安全技術が確立された．2000 年代の中ごろを過ぎると，電気・電子・プログラマブル電子制御を機械に適用するための，ソフトウェアも含めた機能安全技術が注目された．2010 年代は，機械安全の制御安全規格である ISO 13849 と機能安全規格である IEC 62061（IEC 61508）が，機械制御の高度化に適用され始めている．今後，機械間の通信・インターネット等の活用と合わせ，求められる安全技術としては以下の事項が挙げられる．

- 労働人口減少への対策として，ロボットによる人の代替と，人とロボットとの協働作業．
- IoT（Internet of Things）/ M2M（Machine to Machine）を活用し，生産設備のベースとなる通信制御の安全とセキュリティ．
- CPS（Cyber Physical System）に実装する，生産システムにおける現場の安全とセキュリティ．
- CPS に付加する，AI 型（Artificial Intelligence：人工知能）安全システム．
- CPS に付加する，自律型安全システム．

18・3　将来展望

18・3・1　中期（2020 年代）

コンピュータ技術の発展とともに，IoT/M2M が産業構造合理化・労働人口減少対策の手段として浸透し，産業・化学機械への適用が加速すると考えられる．そこでは，すべての機械・設備が安全技術をベースとし，現場作業における安全が確保された状態が求められる．

18・3・2　中長期（2030 年代）

安全を前提とした AI を組み込んだ CPS により，生産現場の自動化と海外連携が加速し，国内の産業が第 1 次産業＋第 3 次産業中心の新たな産業構造に変化していくと予想される．

18・3・3　将来（2040 年代以降）

この産業構造の変化をきっかけに，国内外製造業のスマートでしなやかな連携が生まれ，自律共生社会としての「スマートエコシステム」が実現する．安全とセキュリティの技術は，空気や水のように存在することが当たり前のものとして，システムに組み込まれることが予想される．

〔産業・化学機械と安全部門　ロードマップ委員〕

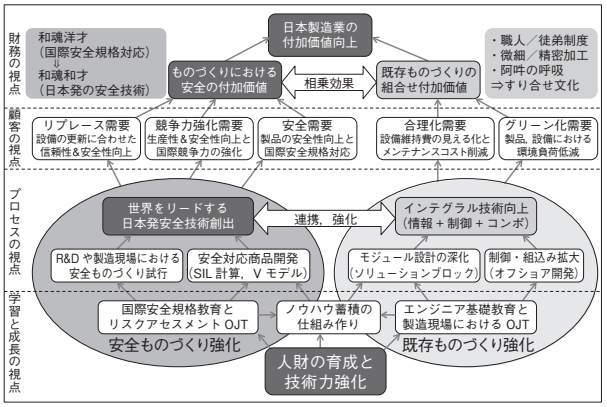


図 1　安全とものづくり・環境等の関連図

表 1　安全技術のロードマップ

分類	1990 年代	2000 年代	2010 年代	2020 年代	2030 年代	2040 年代
社会・技術ニーズ	ISO/IEC による安全規格制定	ISO/IEC による安全規格普及 機械の安全性と生産性との両立	機械と人との協調作業 安全技術者の育成	機械と人との協働作業	自律型安全システムの創製	安全を意識しない産業・化学機械システムの実現
技術的ブレークスルー	産業・化学機械自動化 ・マイコン制御 ・I/O ネットワーク ・高信頼性制御	機械安全基本技術 ・安全 PLC/DCS ・安全ネットワーク ・機械安全制御	機能安全制御技術 ・サイバーシステム ・情報セキュリティ ・センサーネット	IoT/M2M 型安全技術 ・CPS-St Cyber Physical System on the Safety technology	AI 型安全技術 ・CPS-Sai CPS on the Safety by Artificial Intelligence	自律型安全技術 ・CPS-Sat CPS on the Safety with Autonomic Technology
社会・市場の変化	・WTO/TBT 協定 ・ニューアプローチ指令 ・機械指令 ・低電圧指令 ・EMC 指令	・機械安全規格発行 ISO 13849 ・機能安全規格発行 IEC 61508 ・危険性有害性調査（RA）指針発効 ・労働安全衛生法改正（2006 年）	・第 4 次産業革命 IoT/M2M（アメリカ）Industrie4.0（ドイツ）つながる化（日本） ・ロボット安衛則改正 ・第 12 次労働災害防止計画 ・プラント事故増加	・国内労働人口減少労働人工（ロボット）による代替と，海外への生産移転が加速する	・産業構造 4.0 第 2 次産業の統廃合が進み，工業製品は海外生産が主になる	・スマートエコシステム産業構造の垣根を越え，自律型共生社会が実現される

技術ロードマップから見る2030年の社会

19. 交通・物流

19・1 趣旨

二酸化炭素排出量削減は世界的な課題であり，その排出の多くに寄与している交通物流システムにとっては，削減努力が最も求められていることでもある．交通・物流部門からは，同テーマにて，自動車および高速鉄道を中心にして，技術ロードマップを発表しているが，今回はその範囲を在来鉄道，船舶，昇降機に拡大して，技術ロードマップを作成した．

19・2 燃費・走行効率

19・2・1 在来鉄道

19・2・1・1 在来鉄道の現状と記載される新技術 日本鉄道車輌工業会のデータ[1]によれば，2015年4月1日時点での在籍車両数は，JRグループで34 754両（4 727両の新幹線車両を含む），公営・民鉄で27 691両である．この中で在来鉄道として旅客輸送の主な担い手となっている電車44 579両（JR 18 196両，公営・民鉄26 383両）と，気動車2 740両（JR 2 256両，公営・民鉄484両）について，新技術の導入を進めていった際に予測される走行効率の向上を議論する．

走行効率向上につながる新技術として，電車においては，モータとその制御法，主回路の損失低減などが，気動車においては，電気とのハイブリッド化が挙げられる．

電車の駆動は，抵抗制御式直流モータ，チョッパ制御式，VVVFインバータ／コンバータ使用の誘導交流モータ，さらには永久磁石同期モータ（PMSM）と進化してきている．今後は，シリコンカーバイド（SiC）による主回路の損失低減に期待がかかる．東京メトロからのデータによれば[2][3]，抵抗制御式直流モータの走行に必要な電力を100とすると，チョッパ制御方式は64，誘導交流モータは45，永久磁石同期モータにおいては39となり，主回路にSiCを用いたVVVFにより，さらに4.3%の省エネ効果[3]，すなわち37となることが期待されている．

気動車は，エンジンおよび変速機の効率向上も行われてきたが，近年になってJR東日本が中心となって新型電気式気動車と呼ばれるハイブリッド式が開発され，増備が進んでいる[4]．異なる方式を採用しているが，JR西日本によっても開発は進められている．エンジンのほかに電気モータを持ち，駆動と発電を行うとともに，蓄電池を搭載し，ブレーキ時にはエネルギー回生を行うものであり，10%程度の効率向上が目指されている[5]．また，試験走行により5%程度の燃費向上が確認され，数値計算によれば，12%程度の向上が見込まれている[6]．

19・2・1・2 在来鉄道の走行効率向上の技術ロードマップ

省エネ車両と呼ばれる，軽量化されたエネルギー回生ブレーキ機能を持つVVVF制御誘導交流モータを用いた車両はJR東日本管内において2015年度の時点で84.1%と考えられる[7]．2030年までに直流モータ車が主回路にSiCを用いたVVVFに置き換わり，その後2050年までにVVVF制御誘導交流モータを用いた車両が主回路にSiCを用いたVVVFによる永久磁石同期モータに置き換えられると仮定する．車両の現状と配置計画は各社で異なるが，JR東日本の例を適用すると，2030年までに13%，2050年までに26%の効率向上が予想される（**図1**）．

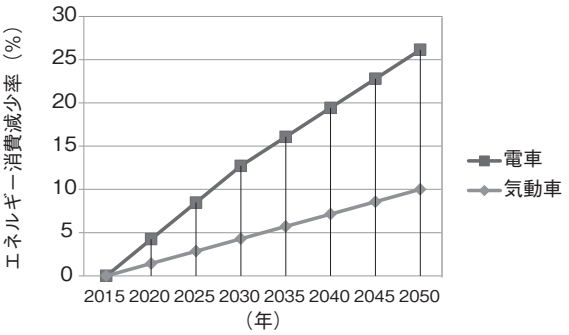


図1 在来鉄道車両の燃料消費量減少率の予測

気動車については，ハイブリッド車両の本格的な投入はこれからである．1車両10%の効率向上が達成され，2050年までにハイブリッド気動車もしくは同等のエネルギー効率を持つ車両への置き換えが終了すると仮定すると，気動車のエネルギー消費減少率（2015年を基準）の技術ロードマップは**図1**のようになる．電車については，次世代半導体の開発は発展途上でもあり，今後さらなる効率向上も十分に考えられる．ハイブリッド気動車の効率向上，エンジン自体の効率向上，電気式気動車，電池走行車両および燃料電池車両の開発も進められており，さらなる減少率向上は十分に期待できる．それ以外にも，車体軽量化，エネルギー回生ブレーキ，エコ走行の推進，駅構内での自然エネルギー利用など，鉄道システム全体での省エネルギー化の推進が期待される．

19・2・2 船舶

19・2・2・1 船舶の現状と期待される新技術 船舶技術は1970年代のオイルショック以降，船型の大型化，機関プラントの効率向上，船体抵抗の低減，プロペラ効率の向上，船尾フィンやダクトなど船尾回りの省エネ装置の開発・導入，帆走船による風エネルギーの利用が行われてきた．1970年代と1990年代で燃料消費量が大型タンカー，ばら積み貨物船で50から70%まで低減した．主機がタービンからディーゼルに移行したこと，省エネ船型の開発効果が大きい[8]．主機の低出力化が進む一方で，波風のある実海域中を航行すると速力が出ないことが報告され，わが国では実海域中の性能向上に取り組みを進め，波浪中性能に優れた船型，省エネ装置の開発が行われ，実用化されている．

近年の地球環境保全意識の高まりに伴い，国際海運からのCO_2排出を削減するため，国際海事機関（IMO）の場で国際ルールが策定され，2013年より実施されている．これは，エネルギー効率という指標で効率を向上させ，CO_2を削減するものであり，1トンの貨物を1海里運ぶ（船舶の活動量）際に排出されるCO_2量（輸送活動に伴う環境負荷）を指標とするというコンセ

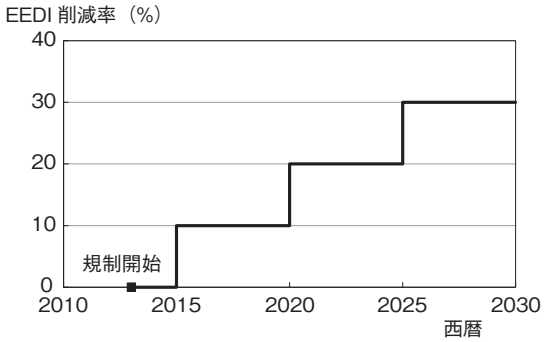


図 2　参照線値からの EEDI 削減率の規制値（ばら積み貨物船の例）

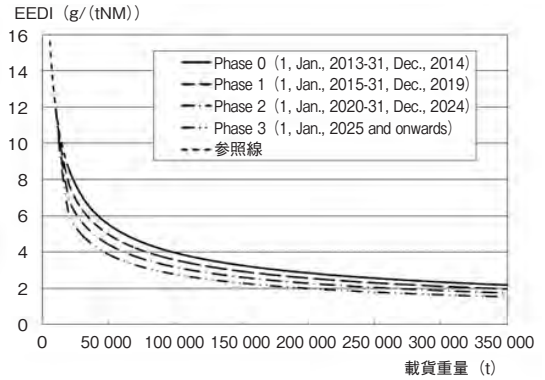


図 3　載貨重量別の EEDI 規制値（ばら積み貨物船の例）

プトである．

400 総トン以上の国際航行を行う船舶について，運航者にはエネルギー効率を向上させる運航を行う手順書を作成し，船上保持することが義務づけられ，建造者にはエネルギー効率設計指標(EEDI)を定められた削減値以下とした船舶を建造することが義務づけられ，削減値を満足できない船舶は竣工できない．

船舶のエネルギー効率向上のため，運航では減速航行が行われているが，同様に EEDI 削減達成のため，建造段階において出力の小さなエンジンを搭載することが有効である．その場合，荒天中で主機出力不足により操船不能となり，座礁，衝突等の発生を防ぐため，一定の主機出力を確保することとなっている．

このように，主機出力の削減には限界があることから，エネルギー向上に寄与する新技術の導入，たとえば，船底に空気を送り込み航行時の船体と水の抵抗を減らす空気潤滑法が開発され，実用化されている．

このほか，2016 年の新パナマ運河開通により，通行可能船舶の最大幅が 32.3m から 49m に拡大される．このため，載貨重量を大きくした船型が市場に投入され，2 乗 3 乗の法則に従い，エネルギー効率を向上させることが可能となる．

19・2・2・2　船舶のエネルギー効率向上の技術ロードマップ

EEDI 規制は，1999 年から 2009 年の 10 年間の船舶のデータから作成された参照線と呼ぶ EEDI の平均値を用い，これからの削減率を規定するものである．船種，サイズ別に参照線が設定され，2015 年には 10%，2020 年には 20%，2025 年には 30% などエネルギー効率の向上が必要である．一例として**図 2** にばら積み貨物船の参照線値からの EEDI 削減率の規制値を示し，**図 3** にその載貨重量別の EEDI 規制値を示す．Phase0 期間（2013 年 1 月～ 2014 年 12 月）の削減率は 0%（平均値以上）のため，ラインは参照線と同じである．たとえば 2016 年では**図 2** から EEDI 削減率は 10% であるので，本船の載貨重量が 100 000t の場合，**図 3** から，参照線に対して 10% 削減し（破線），本船の EEDI 値が 3.6〔g/(tNM)〕以下でなくてはいけないことを表している．

このように EEDI 規制により，エネルギー効率の削減率が定められており，2025 年には 1999 年から 2009 年の平均に対し 30% の削減が実行される．

また，実海域を航行する状態でのエネルギー効率を向上させるため，実海域でのエネルギー効率設計指標（EEDIweather）も導入されており，今後は実海域を航行する際のエネルギー効率を向上させる船型開発，省エネ装置等の技術開発がいっそう促進される．

19・2・3　昇降機

1970 年代の第一次オイルショック以降，省エネルギー化の要求が強まり，昇降機としてもさまざまな技術が登場した．駆動方式としては，ウォームギヤ減速機を使っていた巻上機が小型で高トルクを発生する永久磁石式モータの登場によりギヤレス化され機械効率が向上した．また，制御方式もリレー・交流制御がマイコン・インバータ制御化により電力変換効率が向上し，トータルとしてエネルギー消費量が約 50 ～ 70% 低減した．これらの技術により，オフィスビル内で昇降機の電力消費量が占める割合は 2.8% 程度となっている[9]．将来の技術展望としては，炭素繊維を用いた高強度ロープによる軽量化や，SiC 素子の適用による電力変換効率向上などが挙げられる．また，蓄電技術の向上により，昇降機の運行で発生する回生電力を蓄え，オフピーク電力や自然エネルギーとの併用により電力利用の平準化を図れるなど，社会全体での省エネルギー化がいっそう進むものと考えられる．

〔謝辞〕

本稿の執筆に当たり，ご協力をいただいた交通・物流部門鉄道技術委員会，船舶技術委員会，昇降機・遊戯施設技術委員会委員各位に感謝する．

〔中野　公彦　東京大学，
辻本　　勝　海上技術安全研究所，
安部　　貴　（株）日立製作所〕

文　　献

（1）日本鉄道車輌工業会ホームページ鉄道車両生産情報，http://www.tetsushako.or.jp/data.html（2015年12月19日参照）．
（2）エコライフ，2014 年 3 月 28 日記事，http://www.ecology-life.jp/news/tokyometro_02.html（2015 年 12 月 19 日参照）．
（3）大橋　聡，東京地下鉄銀座線 1000 系 3 次車概要及び同車両向け新開発 PMSM 及び SiC を利用した VVVF インバータの導入について，鉄道車両と技術，**225**（2015），2–9.
（4）山田孝夫，JR 東日本 HB-E210 系一般形ディーゼルハイブリッド車両の概要，鉄道車両と技術，**225**（2015），20–29.
（5）JR 東日本プレスリリース（2005 年 11 月 8 日）．
（6）児玉佳則・可児周博・川村淳也・小林　誠，JR 西日本　ハイブリッド気動車システムの開発，車両技術，**245**（2013），132–136.
（7）JR 電車編成表 2015 冬，交通新聞社，（2014）．
（8）松本光一郎，実海域性能を考慮した船型設計，日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム 2003（2003–12），20–42.
（9）経済産業省資源エネルギー庁，エネルギー白書，（2010），166–167.