

Science & Technology Trends 科学技術動向

4
2009
No.97



レポート

p2.8 我が国の国際産業競争力を支える人材の育成
—基幹産業としての鉄鋼業を例とする人材育成モデル—

p3.19 航空科学技術に係る日米欧の研究開発動向

トピックス

情報通信分野

p4 高速無線技術WiMAXの
国内サービス開始

ナノテク・材料分野

p6 超高速充放電のためのリチウム
イオン電池正極材料

環境分野

p5 世界の原子力事故に対応した
環境線量情報予測システムの開発

社会基盤分野

p7 レーザーを用いたコンクリート
内部欠陥探傷装置

2009
No.97

4

Science&Technology Trends

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

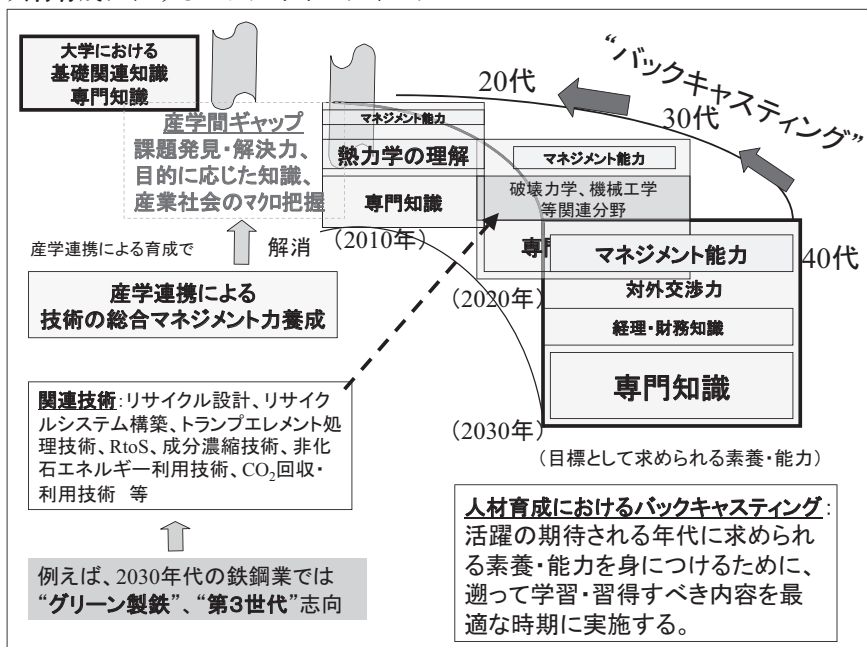
我が国の国際産業競争力を支える人材の育成 —基幹産業としての鉄鋼業を例とする人材育成モデル—

品質の高度化を進めることで世界をリードしてきた我が国の鉄鋼業においては、引き続き粗鋼生産規模の拡大やユーザー業界の海外への生産拠点のシフトへの対応といった課題があるが、2030年に向けては、世界的な産業構造の変化への対応も重要となる。中でも最も大きな課題は環境問題への対応である。すなわち、“グリーン製鉄”（CO₂排出ミニマム）で“第3世代”（大量生産の問題点を解決した柔軟な生産システム）が志向され、さらなるイノベーションが必要である。

これに対応するには、段階的にレベルアップを図る既成の人材育成プログラムではなく、職業人としての要件を具体的に示し、そこから逆戻りする“バックキャストिंग”の視点による人材育成プログラムの構築が求められる。それにより、例えば企業内もしくは社会人教育として行われている内容を、産学連携により学生時代に修得することが可能となれば、“産学間のギャップ”が埋まり、即戦力としてのドクター育成にもつながることが期待される。

鉄鋼業界では、(社)日本鉄鋼協会による30年余りにわたる人材育成事業が行われており、現在では各世代のプログラムとして定着している。しかし、さらにバックキャストिंगの視点で見直すことにより、業界において求める人材の検討を深め、我が国の産業競争力維持向上のための具体的アクションが実行されることを期待する。

人材育成におけるバックキャストिंग



科学技術動向研究センターにて作成

航空科学技術に係る日米欧の研究開発動向

航空機は、道路・鉄道と言ったインフラストラクチャを必要とする陸上輸送機器とは異なり、空を自由に飛行しながら国境をも越え、より速く、より高く、より遠くへとと言う人類共通の夢を実現して来た。人・物の移動量と経済活動（GDP）との間には正の相関関係があるとも言われており、航空輸送もグローバル経済の発展に寄与して来たと考えられる。

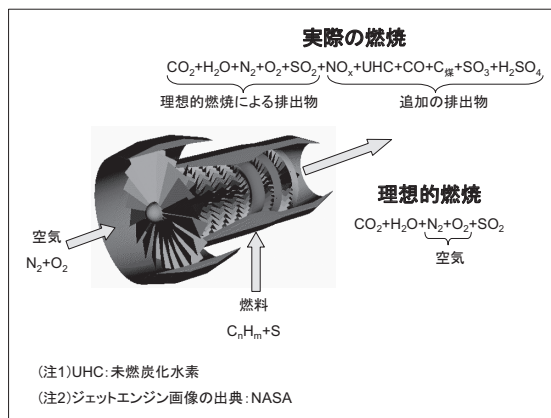
一方、人為起源の温室効果ガスによる地球温暖化問題を検討している「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は1999年、主要な温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）、対流圏オゾンの生成およびメタンの減少を引き起こす窒素酸化物（NO_x）、飛行機雲および巻雲の形成に繋がる水蒸気、煤およびエアロゾルなど、航空機からの排出物による気候変動への影響に関する特別報告書を発表した。2007年発表の第4次報告書においても、現状科学的理解が不十分な巻雲を除き、航空輸送による気候変動への影響が評価されている。

エコ、グリーンと言った環境適合性は、今や航空活動にとっても喫緊の課題となりつつあり、米国および欧州連合では産学官連携の下、2020年頃およびその先を見据え、CO₂などの排出物および騒音の大幅な低減を目指した環境適合型航空機の研究開発が行われている。また、航空交通量が、2025年頃には2000年頃と比べ約2倍に増加するとの予測もあり、空港での離着陸待ち、ノロノロ運転と言った空の交通渋滞を解消するため、GPSなどの測位衛星も活用した航空交通管理（ATM）システムの研究開発が進められている。

我が国においても産学官連携の下、欧米と同様の取り組みが進められている。我が国の環境技術は世界に冠たるものであるものの、民間航空分野については、YS-11以降約40年振りに小型ジェット旅客機の全機開発に着手した状況である。大学・研究機関による基礎研究、(独)宇宙航空研究開発機構（JAXA）などの研究開発機関による技術開発・実証ならびに航空産業界による製品開発および製作・運用実績に基づくフィードバックと言う研究開発の全サイクルを回しながら航空科学技術力をさらに向上し、地球温暖化対策に対する我が国の貢献を強化したい。

現状12時間以上要する太平洋間の移動時間を半分程度に短縮できる超音速旅客機が実現すれば、経済活動などに変革がもたらされるとされており、JAXAでは、将来予想される国際共同開発への対等な参加の実現を視野に入れ、ソニックブームおよび離着陸時騒音の低減と言う環境適合性と軽量化および低抵抗化による燃料効率向上と言う経済性との両立を目指した「静粛超音速機技術の研究開発」が行われている。将来的には、空気吸込み式極超音速機を第1段とする宇宙輸送系など新たな宇宙活動の展開に繋がると期待される。

ジェットエンジン燃焼過程



出典：本文参考文献⁵⁾

高速無線通信技術のモバイル WiMAX と固定系 WiMAX による無線ブロードバンドの国内サービスが開始された。2009年2月26日より首都圏でモバイル WiMAX の試験サービスが開始され、エリア内全域でのロケーションフリーなサービスが可能となり、7月1日には首都圏全域・京阪神・中部圏での運用が始まる。また、南城市では固定系 WiMAX のブロードバンドサービスが、敦賀市・新居浜市・西条市では地域 WiMAX のサービスが開始されている。地域 WiMAX は、地域の公共福祉サービスの向上や、山間部・離島・過疎地などでのデジタルデバイド解消を目的に利用される。モバイル WiMAX も地域 WiMAX も、さらなるユビキタス環境の向上に寄与することが期待される。

トピックス / 高速無線技術 WiMAX の国内サービス開始

高速無線通信技術の WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) は、無線 LAN (IEEE 802.11) を発展させた中距離エリアをカバーする高速無線通信技術であり、電車や車での高速移動中も通信可能な技術である。国際規格 IEEE802.16-2004 をベースとする固定系の規格と、基地局自動切り替え(ハンドオーバー)に関する仕様を追加した IEEE802.16e をベースとする移動系の規格がある。国内では、2.5GHz 帯のうち移動系のモバイル WiMAX に帯域 30MHz が、固定系の地域 WiMAX に帯域 10MHz が割り当てられている(図表参照)。これとは別に、無線局登録で利用できる 4.9GHz 帯の一部も固定系 WiMAX 用に使用される。

モバイル WiMAX による無線ブロードバンド通信に関しては、UQ コミュニケーションズ(株)が、2009年2月26日より首都圏(東京23区・横浜・川崎)で「UQ WiMAX (サービスブランド名)」の無料試験サービスを開始した¹⁾。最大の通信速度は下り 40Mbps/上り 10Mbps で、1つの基地局で最大半径約 3km をカバーする。山手線など JR の 44 駅に設置された 160 の基地局を含め、合計 500 の基地局でのスタートとなった。無線 LAN は一部のスポットエリアでしか使えなかったが、モバイル WiMAX では、エリア内全域でのロケーションフリーなブロードバンドサービスが可能となる。7月1日には首都圏全域・京阪神・中部圏に拡大して有料の本サービスに移行し、2010年度末には全国主要都市にエリアを拡大し、人口カバー率 93% を達成する予定である。また、UQ コミュニケーションズ社は、複数のネットワークサービス・プロバイダーに対して、無線ネットワーク基盤を提供する。

一方、固定系 WiMAX に関しては、(株)沖縄テレメッセー

ジが、2008年12月25日より沖縄県南城市で 4.9GHz 帯無線ブロードバンド・サービスを開始した²⁾。また、2009年4月1日より福井県敦賀市で(株)嶺南ケーブルネットワーク³⁾ が、愛媛県新居浜市・西条市で(株)ハートネットワーク⁴⁾ が、ともに 2.5GHz 帯地域 WiMAX サービスを開始した。

これらの地域 WiMAX は市町村程度の地域で運用され、地域の公共福祉サービスの向上や、山間部・離島・過疎地などでのデジタルデバイド解消を目的に利用される⁵⁾。2.5GHz 帯地域 WiMAX の免許(または予備免許)は 42 事業者(うち、2 事業者は免許返上)が取得しており、今回、2 事業者が本サービスを開始した。また、北海道の帯広市第三セクター法人も、「地域情報通信基盤整備推進交付金」を利用して地域 WiMAX 環境を整備中である。光ケーブルなどのブロードバンド環境が充実している東京都心部からも免許申請があり、無線の特徴を活かして河川管理などの防災システムに利用される予定である。

モバイル WiMAX と地域 WiMAX がともにサービスを開始し、それぞれ日本全域のユビキタス環境の向上と地域サービスの向上に期待が寄せられている。

図表 国内の WiMAX の周波数割り当て

規格	名称	周波数帯	制度
移動系	モバイル WiMAX	2.5GHz 帯 (2595MHz ～ 2625MHz)	免許
		2.5GHz 帯 (2580MHz ～ 2590MHz)	免許
固定系	固定 WiMAX	4.9GHz 帯	登録

参考

- 1) UQ コミュニケーションズ(株)、ニュースリリース : http://www.uqwimax.jp/news_release/200902261.html
- 2) (株)沖縄テレメッセージ、ニュースリリース : <http://www.otc.ne.jp/wimax.htm>
- 3) (株)嶺南ケーブルネットワーク・ホームページ : <http://www.rcn.ne.jp/index.html>
- 4) (株)ハートネットワーク・WiMAX 案内 : <http://www.heartnetwork.jp/wimax/>
- 5) 総務省電波利用ホームページ : <http://www.tele.soumu.go.jp/j/system/trunk/wimax.htm>

(独)日本原子力研究開発機構は、万一の世界の原子力施設事故の際、放出される放射性物質の大気拡散状況や放出地点を迅速に推定できる緊急時環境線量予測システム世界版第2版(WSPPEEDI-II)を開発した。この予測計算シミュレーションシステムは、世界の任意の原子力施設において、その周辺数10km程度から数1000km規模の広域に及ぶ放射性物質の移動・拡散・沈着・被ばく線量を予測できる。また、事故情報が不十分でも、環境モニタリングから発生源、放射性物質放出量が推定でき、越境型原子力事故への迅速対応が可能となる。今後、一般市民の安全確保のため、本システムの早期実用化が望まれる。また、近年問題となっている越境大気汚染への適用も期待される。

トピックス 2 世界の原子力事故に対応した環境線量情報予測システムの開発

近年、エネルギー需要の増大と地球温暖化問題などから原子力発電所の増設や原子力利用の再評価が進み、世界的な原子力施設の増加が見込まれている。各国が原子力設備の安全性に万全を期すのは当然であるが、万一の事故に備えた対策も構築する必要がある。

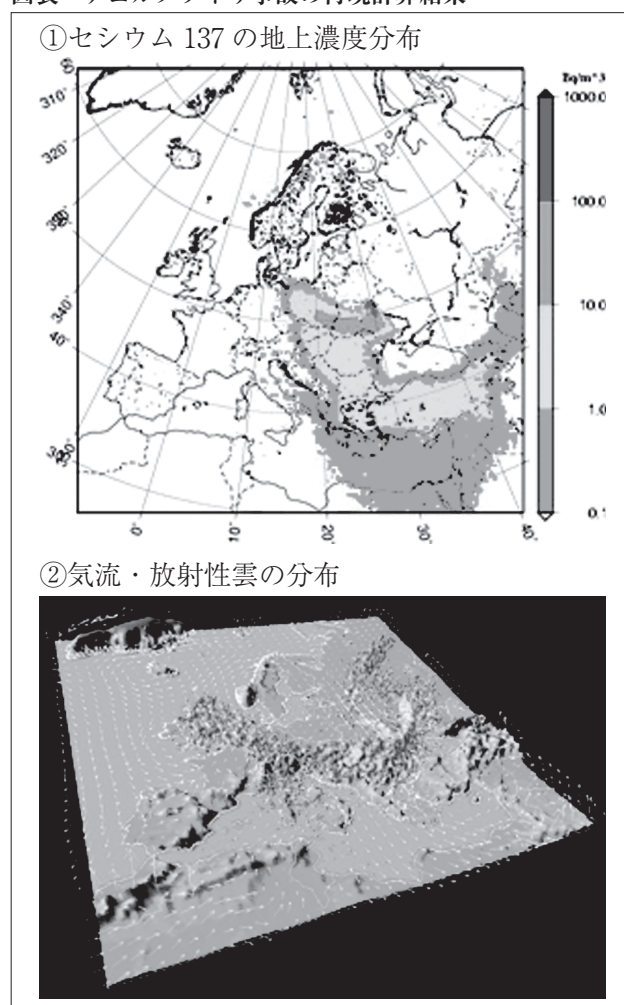
(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)は、世界の原子力施設で万一の事故が発生した場合、計算シミュレーションにより、放出される放射性物質の大気拡散状況や放出地点を迅速に推定可能な緊急時環境線量予測システム世界版(Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose information)の第2版(WSPPEEDI-II)を開発した¹⁾。JAEAでは、1979年の米国スリーマイル島原子力発電所事故以降、日本国内原子力施設緊急時の大気拡散予測システム(SPEEDI)を開発し、すでに実用化している。さらに1986年のチェルノブイリ事故を契機に世界の原子力事故に対応するシステム(WSPPEEDI-I)の開発を進めてきた。1997年に開発を終了したWSPPEEDI-Iの改良を重ね、今回、飛躍的に機能を向上させたWSPPEEDI-IIを完成した。

WSPPEEDI-IIは、気象要素を予測する大気力学モデルの導入により、原子力施設からの距離が数10km程度の狭域から数1000km規模の広域におよぶ風速場、乱流場、降水・雲量分布が予測可能となり、放射性物質の移動・拡散地表面沈着および被ばく線量がより高精度で予測できる。予測性能は、チェルノブイリ事故などの再現計算で評価され、世界トップレベルの性能が確認されている(図表②)²⁾。

また、WSPPEEDI-IIは、事故情報が不十分でも、環境モニタリングポストの線量上昇から発生源、放射性物質放出開始時間・放出量が推定できるため、越境型原子力事故への迅速対応が可能となる。さらに、欧米の同様な予測システムとも情報の交換ができるため、予測結果の確度評価が可能となる。

今後、ハード面・運用体制面を充実し、早期に本システムを実用化することが、一般市民の安全確保のために望まれる。また、本システムは、原子力分野以外にも、近年問題となっている硫酸化物や光化学オキシダントなど大気汚染物質の越境汚染への適用も期待される。

図表 チェルノブイリ事故の再現計算結果



出典：参考文献²⁾

参 考

1) (独)日本原子力研究開発機構プレスリリース：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p09020501/index.html>

2) 寺田ほか、原子力誌、No.7, pp.257 (2008)

携帯電話やノート型パソコンなどに広く使用されているリチウムイオン電池だが、高出力が要求される用途にはコストや性能の面で満足できるレベルが達成されていない。2009年3月、米国マサチューセッツ工科大学の研究グループは、安価で化学的にも安定なリン酸鉄リチウムを使用し、超高速充放電を可能にする正極材料の開発を報告した。リン酸鉄リチウムの微細化と、その表面を改質することでLiイオンの拡散速度と電子の伝導度を速くすることに成功した。この正極材料を用いた電池の容量は通常のリチウムイオン電池と同程度であり、出力パワー密度はこれまで得られていた値より2桁大きい。このような高出力電池はハイブリッド自動車などに用いることができると考えられる。

トピックス 3 超高速充放電のためのリチウムイオン電池正極材料

リチウムイオン電池 (LIB) は、蓄えられるエネルギー密度が高いことやメモリ効果がないことなどから、携帯電話やノート型パソコンなどに広く使われている。しかし、現在の LIB で正極材料に使用されているコバルト酸リチウム (LiCoO_2) は高価で、さらに 200°C 程度で酸素を放出するため発火の危険性があるなどの問題が残っている。また、Li イオンの移動速度の低さなどから、大出力かつ大容量を必要とするハイブリッド自動車などの用途には利用されていない。つまり、LIB の研究開発では、同じ重量あるいは容積の中にどれだけエネルギーを蓄えられるかというエネルギー密度だけではなく、どれだけ速くエネルギーを出力できるかという出力パワー密度や高速充電に耐える入力特性の向上も必要である。このような中、米国の研究者により、安価で安全性の高い材料を用いて、なおかつ二次電池で最高の出力パワー密度が実現されたとの報告があった。

2009年3月、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) の研究グループは、安価で化学的にも安定なリン酸鉄リチウム (LiFePO_4) を使用し、スーパーキャパシタ^{注)}に匹敵する超高速充放電を可能にする正極材料を開発したと報告した^{1, 2)}。この材料を用いて作られた電池の容量は 166mAh/g と通常の LIB と同程度の値を示した。また、18秒で全放電する高出力 (大電流) 条件でも 100mAh/g (60%)、さらに9秒で全放電する出力条件でも 60mAh/g (36%) と高い容量をそれぞれ示した。これらは、出力パワー密度としては 90kW/kg と 170kW/kg に相当し、これまで得られている値より2桁大きい。参考までに、市販のハイブリッド自動車であるトヨタ自動車 (株) のプリウスに搭載されているモーターの最高出力は 50kW である (2009年3月現在)。

リン酸鉄リチウムは、コバルトを含有しない材料であるため、低コストである。また、材料としての安定性ととも資源の供給や環境負荷の面からも、注目を集めている。これまでも一部では実用化されていたが、Li イオンの拡散速度や電子伝導度の面で十分ではなく、高出力化が課題であった。これまでの研究開発では、材料の微細化により Li イオンの拡散距離を短くするなどの方法で改良がなされてきた。

しかし、近年同じ MIT の研究者らのコンピュータ計算により、Li イオンがリン酸鉄リチウムの表面から [010] 方向にのみ非常に速く内部に入ることができることがわかってきた。そこで、MIT の研究グループは、Li イオンがリン酸鉄リチウム表面で内部へ通じるトンネルの入口と言える (010) 面への拡散速度を上げることで、充放電の速度を改善できると考えた。そのために、リン酸鉄リチウムを粒径 50nm まで微細化し、さらにその表面を Li イオンの安定した良導体として知られているガラス質のリン酸リチウム (厚さ約 5nm) で被覆した。そのリン酸リチウムの非化学量論組成を制御することにより、Li イオンと電子の伝導性をともに改善でき、画期的な充放電特性が得られた。

今回の報告は、ハイブリッド自動車や太陽光発電の蓄電システムなど高出力用途への LIB の利用に期待を持たせるものである。

注：電気二重層と呼ばれる固体と液体との界面に正負の電荷が蓄えられることを利用した蓄電装置。構造が簡単で、寿命が長い。また、内部抵抗が小さく大電力の充放電が可能であるが、二次電池と比べて蓄えることのできるエネルギー密度が小さい。

参 考

- 1) Kang, B. and Ceder, G. "Battery materials for ultrafast charging and discharging" Nature Vol. 458, 190–193 (2009)
- 2) MIT News March 11, 2009 "Re-engineered battery material could lead to rapid recharging of many devices"

2009年1月7日、(財)レーザー技術総合研究所などの産学研究グループは、レーザーを用いたコンクリート内部欠陥探傷装置を開発したと発表した。コンクリートの健全部分と内部欠陥を有する箇所では、振動周波数が異なる。この装置では、コンクリートに高出力のパルスレーザーを照射し、急激な熱膨張やアブレーションなどにより発生した超音波で振動させ、健全部分と内部欠陥を有する箇所の振動周波数の違いを検出用レーザーで計測し画像化する。現行の打音検査と比べると、遠方からでも迅速で正確かつ客観的な内部欠陥検査ができる。

トピックス 4 レーザーを用いたコンクリート内部欠陥探傷装置

コンクリート構造物の維持管理は重要であるが、特に1999年に山陽新幹線の小倉一博多間にある福岡トンネルの内壁から約200kgのコンクリート塊が剥落し、走行中の列車の屋根を直撃する事故が発生して以来、適切な検査の必要性が高まっている。この事故は、建設時の段階施工によって生じたコールドジョイントと呼ばれるコンクリートの不連続面において、長期間にわたる漏水・温度変化・列車振動などにより、ひび割れが進展したことが原因とされている。

現在、コンクリートの内部欠陥検査方法としては打音検査が主流であるが、コンクリート表面をハンマーで打撃したときの音の高低によって検査員が状態を判断する打音検査は、検査員の経験や主観に左右されるため、必ずしも客観的な評価とは言えない。

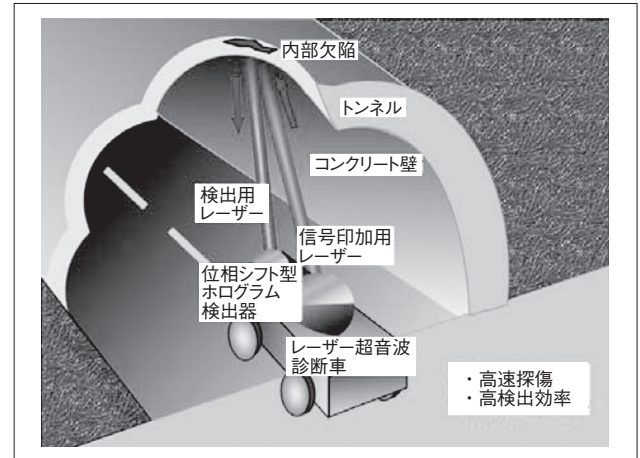
2009年1月7日、(財)レーザー技術総合研究所、東京工業大学、(財)鉄道総合技術研究所、西日本旅客鉄道(株)の産学研究グループと(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構は、レーザーを用いたコンクリート内部欠陥探傷装置を開発したと発表した¹⁾。健全部分と内部欠陥を有する箇所ではコンクリートの振動周波数が異なる。高出力のパルスレーザーをコンクリートに照射することで、コンクリート表面の急激な熱膨張やアブレーションにより超音波を発生させ振動させ、振動周波数の違いを狭帯域の連続発振レーザーを用いた検出器で計測することで、内部欠陥を検出できる。

本装置の研究開発は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」により2006～2008年度に実施され、レーザー超音波システムの検出感度向上・欠陥検出手法の確立・試作機開発・実構造物等での実証実験等の研究が行われた。この結果、レーザーを縦横に走査させ、コンクリート面を約1秒/点で計測することにより、内部欠陥を2次元で画像化できた。レーザーを用いた探傷検査については、金属などではすでに行われていたが、コンクリート構造物への遠方

からの適用は、今回が初めてである。実証実験では、5m離れたコンクリートにおいて、深度10cmまでの内部欠陥を探知することができた。遠方のコンクリートに斜めに照射しても内部欠陥を探傷可能である。

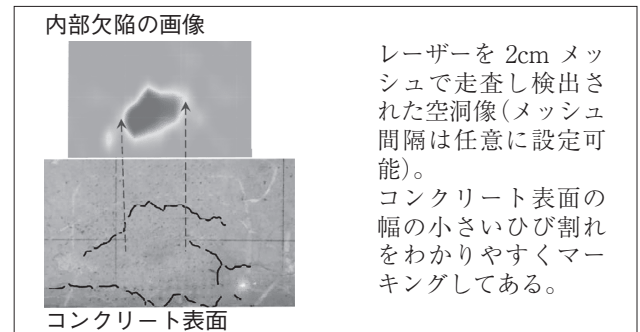
コンクリート構造物の非破壊検査としては、打音検査の他に赤外線や電磁波を用いた検査などがあるが、どれも検査員がコンクリート面に近づく必要があり、高所作業車等を必要とし、作業効率も悪かった。本装置の導入により、遠方からでも迅速・正確かつ客観的な内部欠陥検査ができるようになる。

図表1 レーザーリモートセンシング装置概念図



出典：参考文献¹⁾

図表2 探傷結果画像



出典：参考文献¹⁾

参 考

- 1) (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構プレスリリース「レーザーリモートセンシングによるコンクリート内部欠陥探傷装置を開発」：http://www.jrnt.go.jp/news/news_pressrelease.htm

我が国の国際産業競争力を支える 人材の育成

—基幹産業としての鉄鋼業を例とする人材育成モデル—

千田 晋
客員研究官

1 はじめに

各国の人口動態のうち、15歳から64歳の労働力人口の2030年に向けた推移を見ると(図表1)、中国およびインドは10億人程度へ増加することが予想されている。この間、米国は2億人程度、日本およびロシアは8千万人程度、ドイツは5千万人程度、英国は4千万人程度で、大きな変化はない(構成の変化・平均年齢の高齢化は考慮していない)。工業化の指標として国民一人当たりの鋼材消費量を見てみると、現在のインド(全人口約12億人、粗鋼生産量4,400万トン)の一人当たりの鋼材消費が2030年に現在の世界平均140kgの半分になると仮定すると、インドだけでも人口が増加しなくても4,000万

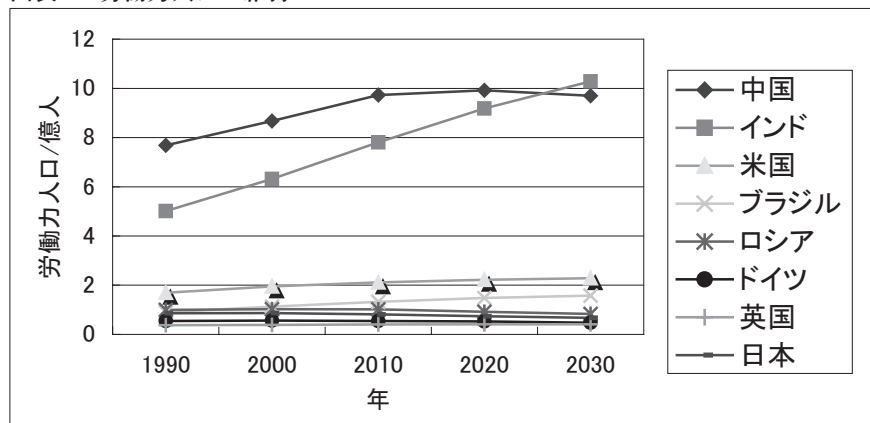
トンの需要増となる。4,000万トンという量は、現時点で世界2位クラスの日本の鉄鋼企業(新日本製鐵(株)あるいはJFEスチール(株))の粗鋼生産量を上回る。

これからの20年の鉄鋼を取巻く環境の変化については、このような人口動態と鋼材の相関を見ただけでも、産業競争力を維持向上しようとするれば、技術開発による品質の向上策のみでなく、世界的な産業構造の変化についても十分な配慮をしなければならないことは明らかである。2030年に向けた鉄鋼業の最も大きな課題は、このような大きな環境の変化への対応である。そこでは総合的な技術力が求められ、長期の漠然とした人材

教育ではなく、20年程度の中期的で具体的な産業人材育成を検討する必要がある。

これまで日本の鉄鋼業は品質優先策をとり、新興国の量的伸びに支えられて成長し、ユーザーであるメーカーの生産拠点の海外移転にも対応してきた。2030年に向けて大幅な鋼材需要増が見込まれるが、今後も鉄鋼業で日本が世界の優位に立つための戦略として、リサイクルを含めたグローバルな鋼材サイクルの構築が必要である。世界の動向としては、欧州では材質マーケティングに基づくリサイクルシステムに関心がある一方で、混合されたスクラップからの素材回収には関心が低く、リサイクル技術の進展も見られていない。また、米国においては、リサイクルシステムとしての原材料スクラップ供給体制が整備されておらず、製錬技術が活かされていない²⁾。グローバルな鋼材サイクルのなかで、優れた製錬技術を背景に持つ日本の鉄鋼業は要の役割を果たさなければならない。そのためには、国内で培った製錬技術を積極的に海外で活かし、グローバルなリサイクルシステムを構築できる総合技術力を持つような、中核技術人材の

図表1 労働力人口の維持



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

育成が課題である。

2 人材育成におけるバックキャストिंग

IMD^{注1)}のランキングによれば、我が国の国際競争力は、1990年代にはトップクラスであったが、2002年には27位に低下し、その後2006年に一時的に16位まで上がったが、2007年には再び24位に低下した。また、日本経済研究センターによれば、経済の潜在競争力においても、2006年12位、2007年13位と低迷している。このような背景から、ここでは国際産業競争力の向上を目的とする産業人育成に焦点を絞り、生涯学習プログラムの検討という意味ではなく、技術経営の核となる考え方である“バックキャストिंग”の視点で人材育成を見直してみたい。バックキャストिंगとは、スウェーデンの環境NGO ナチュラール・ステップの創始者であるカール・ヘンリック・ロベールが、過去

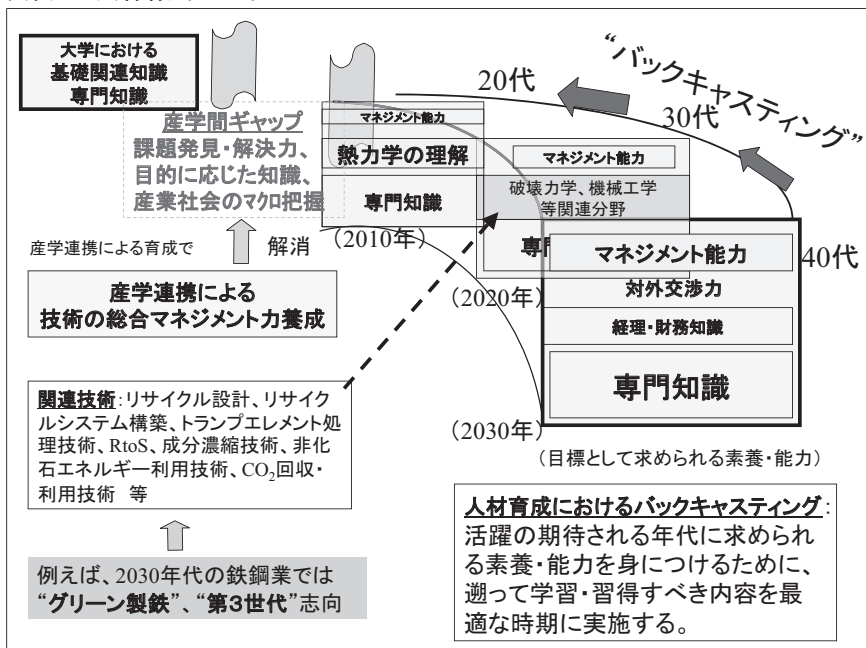
からの延長で現在以降の展開を検討する“フォアキャストिंग”手法では環境改善が望ましい方向に向かわないとして、それとは反対に、理想とする出口から振り返って現在のポジショニングをする、という概念を提示したものである。

すなわち、本稿で述べる“人材育成におけるバックキャストिंग”とは、産業の競争力を支える核であることが期待される30歳代後半から40代の職業人の“理想”を描き、そこに到る人材育成プログラムを逆戻りして構築することを指す。産業人として必要な素養や知識を、どの段階で身につけるべきかを考えることにより、各産業・各業種に応じた人材育成策が構築できるものと考えられる(図表2)。つまり、30歳代後半から40代の職業人がこの年代に高い労働生産

性を成すことを目的として、その数年前の段階ではどこまでの内容を身につけるべきか、さらにその数年から10年前である20代後半から30歳程度までにはどのような専門性や一般知識が前提とされるべきか、などを分析することで、いわゆる“出口を想定した”育成プログラムを構築できる。さらに、大学を卒業し社会に出てから数年後の段階で前提となる資質・素養が身につけているためには、学部卒業・修士修了・博士修了の各時点で期待されるレベルがおのずと定まってくると考えられる。

2030年に鉄鋼業界で中核となるべき技術者像として、十分な専門知識を備えていることに加えて、総合力の発揮と異分野とのコラボレーションによるイノベーション開拓能力が期待される。そのためには、30代では、それまでの職歴に応じた専門性に加えて、周辺技術の知識やマネジメントに関する素養も身につけておく必要がある。また、遡って20代においては、“大学で学んだ専門”分野の知識に加えて、鉄鋼に関する広範な知識と考え方を整理して理解しておかねばならない。現在の20代の育成を2030年の産業競争力につなげるためには、若手の人材育成の議論の場において“出口”を定めて具体的に要件を挙げていくことが必要であり、各社の社内もしくは業界としての育成プログラム構築へつなげる議論が必要である。大学までの教育カリキュラムの成果と上記の要件との“ギャップ”が明らかとなることで、産学が連携して取組

図表2 人材育成におけるバックキャストिंग



科学技術動向研究センターにて作成

注1: IMD: International Institute for Management Development (国際経営開発研究所)

むべき職業人材育成内容が初めて明確になると考えられる。

図表2には、2030年に40代となる鉄鋼業の中核エンジニアを想定した場合に見出される、鉄鋼業界の求める人材像と現状の大学教育による人材とのギャップも示している。一方、2030年の中核エンジニアには、第4章に後述する“グリーン製鉄”や“第3世代製鉄”に対応できる要素技術(リサイクルシステム構築、トランプエレメント処理技術、成分濃縮技術、CO₂回収・

利用技術等)を総合的にマネジメントできる能力が必要であり、専門技術分野に加えてMOT (Management of Technology: 技術経営)の考え方を早期に理解・修得すべきである。MOTは本来、社会人教育というよりむしろ大学での工学教育で充実すべき分野であると考えられる。MOTの基礎として特に産学連携によるプログラムとして取り組む課題は、課題発見・解決力、産業社会のマクロ把握である。このようにして産学間ギャップが埋

められることにより、即戦力として博士課程修了者を位置づけることが可能となる期待もある。

以下では、産官学連携の人材育成パートナーシップ事業の鉄鋼材料分野での議論ポイントと、これまでの鉄鋼業界における取組みならびに新たな取組みを概観する。また、産業競争力向上を目的とした場合、産学間のギャップをどのように埋めることが期待されているのか、さらなる課題はどこにあるのかなどについて考察する。

3 人材育成に関わる議論

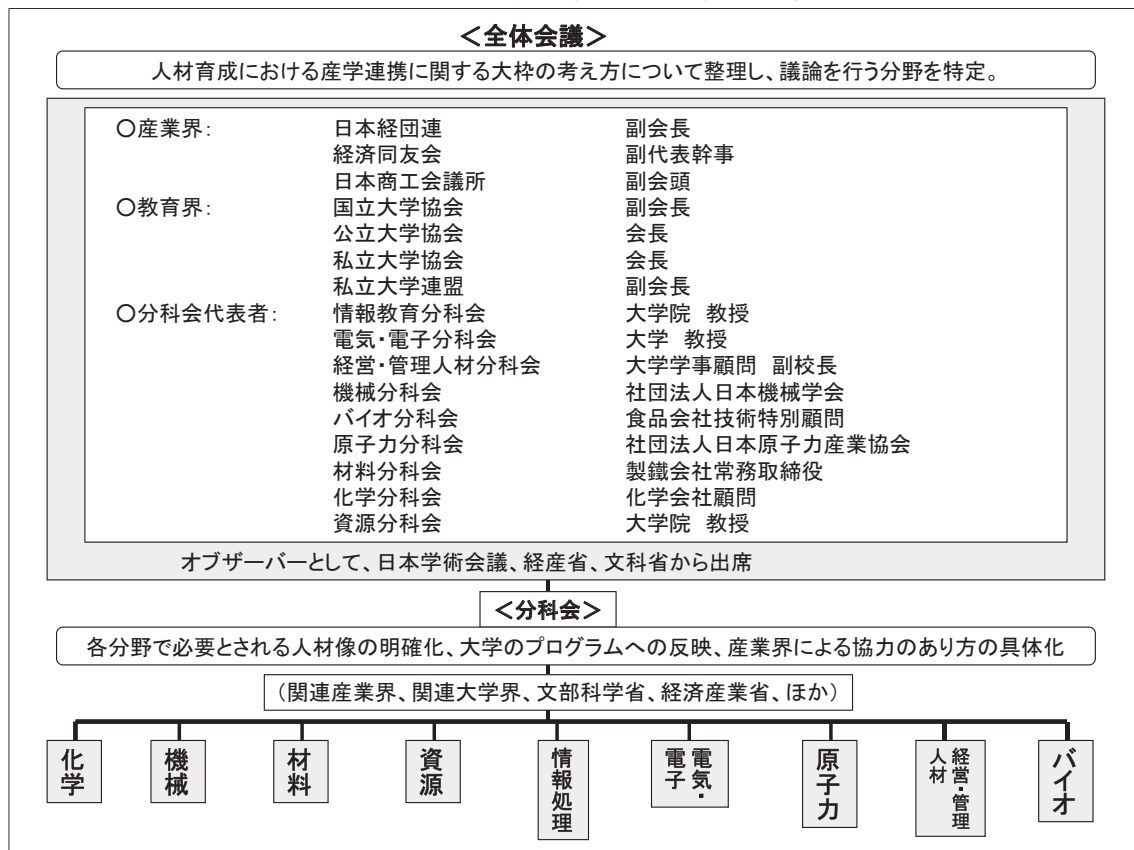
3-1

産学連携人材育成 パートナーシップ 事業等における議論

日本経済が持続的で力強い成長を実現するとともに、国民一人ひとりが豊かで充実した生活を享受できることを目的に、2007年度より、文部科学省と経済産業省との共同事業として、産学人材育成パートナーシップ事業が創設された³⁾。

本事業では、9つの産業分野を対象に具体的な産業人材育成方策が検討され、材料分野も重要な分野のひとつとして積極的な検討が進められている(図表3)。材料分科会(事務局:(社)日本鉄鋼協会)では、産業界および教育界それぞれにお

図表3 産学連携人材育成パートナーシップ事業 (全体会議・各分科会)



参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ける課題および解決に向けて積極的な対話が展開され、産学が連携して対応すべき具体的な取組みについて提案された。

その中間報告には、以下のような内容が記載されている。(以下は、筆者による参考文献³⁾の要約である)

我が国は、国際的に競争力のある製品を海外へ輸出することにより存立する貿易立国であり、最終製品の基礎となる素材・材料の品質レベルを高位に安定的に維持するとともに、将来に向けた革新的な素材・材料の技術開発が、我が国製造業の生命線である。

図表4に示すように、我が国の製造業の製造品出荷額に占める鉄鋼・非鉄産業の直接比率は8%に過ぎないが、機械製品や自動車等の輸送用機器の競争力も鉄鋼・非鉄材料に依存していることを鑑みると、鉄鋼・非鉄産業は我が国の製造業を支える基幹的な産業分野であると言える。特に近年、自動車産業や電機産業等のグローバル事業展開に伴い、材料産業においても国際競争が激化しており、世界最先端の研究開発能力の強化がますます重要になっている。また、資源対応技術あるいは環境対応技術のニーズも高まっている。特に、産業界の40%のCO₂を排出する鉄

鋼業等では、地球温暖化抑制等の環境問題への対応を図ることは重要である。より一層高度な技術開発が必要となるなか、材料分野の産業界は、高度な製造技術を維持し、かつ、より難度が高い課題をブレークスルーし得るような優秀な人材を求めている。

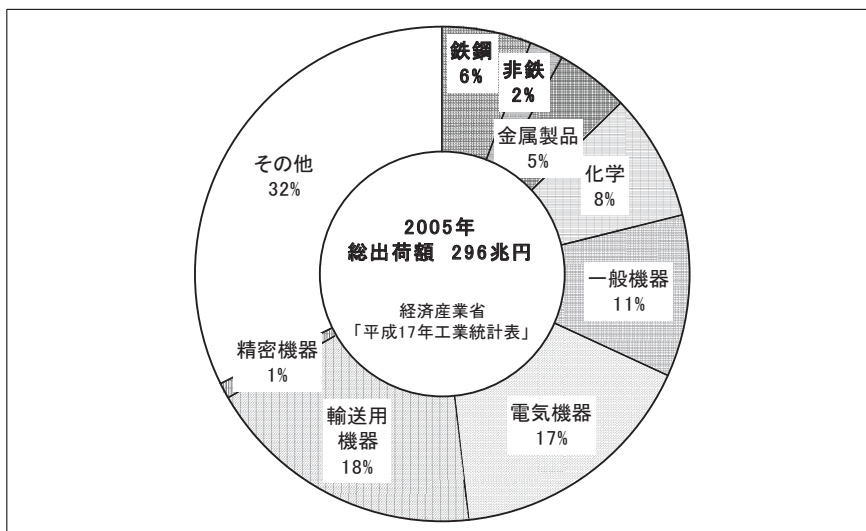
将来を担う学生の教育・人材育成を行う材料系学科を有する大学等においては、冶金学等のいわゆる金属系材料学科が減少し、材料産業の求める大学教育像との間に事実上のギャップが生じつつある。また、社会に対して材料分野の魅力発信が不足しているためか、他の技術分野に比しても学生の進学希望が低下し、学科・専攻等の維持さえ困難になっている教育機関もある。材料は非常に多くの要素技術の集大成により構築されている分野であるため、工業的な課題と科学技術的な課題の一对一对応を付け難い。このことが、学生や一般社会人にとってわかりにくい分野と思われる要因として挙げられる。現時点では我が国の材料分野の研究は国際的にも高いレベルを維持しているが、領域によっては科学研究費の獲得が困難になっており、今後の研究開発の進捗については懸念もある。現在、大学の教育や研究に対する評価は、国

立大学法人化等の大学改革により具体的に変化しつつあり、定数充足率・投稿論文数・国際会議発表数といった客観的な数値データに強く依存するようになってきている。

一方、材料分野における産業界の求人数は、変動する景気に大きく左右されている。ある鉄鋼企業の新卒採用数を見ると、1993年頃より大幅に減り、その後の10年は、1985年頃を1とすると0.5程度で推移している。大手の鉄鋼企業中心にアンケート調査を行った結果では、材料系講座出身の入社数は350名程度でその9割以上が修士である。したがって、すでに、抽象的に産学連携による学生の人材育成を議論するのではなく、個々の顔を描いて育成策を具体的に考える段階に来ている。

以上のような材料分科会での議論を基に提案された「鉄鋼分野における産学人材育成パートナーシッププロジェクト」が、経済産業省の平成20年度産学連携人材育成事業(産学人材育成パートナーシップ等プログラム開発・実証事業)として採択された⁴⁾。この提案は、(財)金属系材料研究開発センターを中心に鉄鋼会社と大学教官が連携して検討したものであり、3年間の試行を経て鉄鋼業界として継続できる産学連携体制の構築を目標としている。大学における材料系の講座の強みをさらに伸ばし、他の大学講座とも連携したコンソーシアムとして必要な教育分野をカバーできる体制を作り、また、材料分野の学生教育の場へ鉄鋼会社が先端的な技術を反映した教材を提供する計画である。また、鉄鋼業の特徴やケーススタディーを含めたMOTプログラムの試行、あるいは、企業からの提案を盛り込んだテーマ設定を行い、比較的長期にわたり大学と企業が連携して学生の研究・実習の場を提供するような新

図表4 我が国の主要製造業の出荷額割合



出典：参考文献³⁾

たなインターンシップの試行も計画している。

大学教官に産業界の現状の理解を深めてもらい、学生教育に活かしてもらうためには、産業界の協力と情報提供が必須である。これまでの鉄鋼業界における人材育成が企業エンジニアを対象としてきたのに対し、上記の提案では本格的な産学連携による大学教育のプログラム開発を目指しており、従来の産学個別の取組みでは成し得なかった効果を生み出すことが期待されている。また、今回の試行結果の定着のためには、教材作成・カリキュラム検討に加えて、人的流動化のために、契約関係を含めた新たな基盤の整備が必要とされる。例えば、企業人・大学の教官・学生の相互受け入れを考える場合、保険から知財にわたるような広範な体制の具体的な整備が必要である。これには文部科学省や経済産業省、厚生労働省などの支援も必要となるだろう。

3-2

鉄鋼業における産業競争力を支える人材育成の議論

経済産業省産業構造審議会の基本問題検討小委員会によれば、我が国の産業政策は、かつての「中核産業の振興をいち早く図る」ことから「キャッチアップ型の経済成長を終え先進国の仲間入りを果たした後には、何が中核産業であるかは市場の選択に委ねるべきで」とされ、政府の役割は「市場制度の整備や不要な規制の緩和撤廃にあり」、少子高齢化・二極化・資源環境規制の課題への直面が認識され

ている。そこでの議論では、「我が国の環境技術、ものづくりの現場力」等が競争力の基礎的要素であるが、「組み合わせて活かす力が不足しており、それらが十分に活かされていない」という現状を打破するには、「従来の枠を超えて技術、ノウハウを組み替える大胆なイノベーション(知識組替え)と地域総がかりの発想が必要」と結論している。鉄鋼業に関する議論としては、「環境技術をソリューションサービスとして提供し、普及させながら対価を得る仕掛けが必要」と指摘されている⁵⁾。

しかし、2000年4月から2008年4月の間に鉄鉱石や石炭価格は共にピークでは4.9倍となり⁶⁾、さらに、2008年後半の景気後退により対前年月次生産量が3割減となるなど、鉄鋼企業収益は悪化している。加えて、2050年までに温室効果ガス排出量を半減させる目標の実現のために、抜本的なエネルギー需給構造の改革が必要となっている。このような状況下では、従来の延長には囚われない発想が求められる。

鉄鋼業の開発投資は、2006年の我が国の民間研究開発投資上位100社に3社が入っている⁷⁾ことから分かるように活発であり、その研究開発は、自動車メーカーとのデザインイン^{注2)}のような製品開発から、CO₂削減に向けたプロセス開発まで多岐にわたっている。今後は、第二次世界大戦後のような産業競争力を付けるための国家プロジェクトとは異なり、温暖化対策のみならずオープンイノベーションのスタイルを採らなければ解決に至らない課題が増えてくるとの指摘もある。経済産業省による米国調査報告には、「米国では、

コンソーシアム型プロジェクトでは垂直連携は当たり前で、同業他社とどう研究協力して成果を生むかを重視するようになった」との有識者からの示唆が示されている⁸⁾。このような時代には、業界を取巻く環境の変化に応じたプロジェクト提案のできる人材の育成や確保が課題である。

鉄鋼業が“オールドエコノミー”の代表のように言われ、学生からは希望コースとして選択されなくなっているのも事実であるが、実は鉄鋼業界は以前からオープンイノベーションを実践してきた業界であり、企業間の“競争と協調”によって第二次世界大戦後の我が国の産業競争力を支えてきた業界である。ただ、これまでの鉄鋼業界における人材は「技術」に重点を置いており、国際的な競争の場で戦えるエンジニアや研究者育成は各個人または個別企業に委ねられてきた。しかし、産業界のOJT^{注3)}を行う余裕も乏しい昨今の厳しい経済状況を勘案すると、“国際的な交渉力”を身につけたエンジニアや研究者の育成は国是として位置付けられるべき重要事項であり、一業界に限られた課題ではないと考える。“出口”を明確にした人材育成プログラムを、大学教育を含めて具体的に検討すべきである。また、出口要件すなわち年代と素養等の関係を明確にすることで、企業で即戦力として活躍できる人材として博士課程修了者の就業機会が増えることも期待される。

“成熟産業”とされる日本の鉄鋼業界は、現在の世界的景気後退の中でも国際競争力維持のため、企業内教育に加えて業界共通課題として技術者育成を行っている。図表3の産学連携人材育成パート

注2：デザインイン：生産者側と利用者側の技術者が設計段階から打ち合わせて、特色のある機能を持つ製品を生産すること

注3：OJT：On the Job Training 企業内で、上司や先輩が部下や後輩に対して、具体的な仕事を通じて、仕事に必要な知識・技術・技能・態度などを指導し修得させること

ナーシップ事業の検討では専門分野による切り口で関係の近い業界が割り振られているが、実際の鉄

鋼企業活動は、材料分野の中だけではなく、他分野との総合技術として達成されてきたものであり、

業界としての人材育成の議論には今まで以上に分野横断的な検討の場が望ましい。

4 産業競争力の現状から見た人材育成の課題と事例

4-1

日本の鉄鋼業の課題

世界の粗鋼生産量は2007年に13億トンを超え、そのうち日本は1億3千万トンを生産している。日本全体の生産量は、首位のアセロール・ミタル社の生産量とほぼ等しい量である。国別では中国が毎年2割を超す増産で5億トン程度まで伸長している(図表5)が、同国内に数百社の鉄鋼会社が林立している状況であり、この状況は少なくとも2010年の上海万博までは変わらないのではないかとの見方がある⁹⁾。すなわち、国別粗鋼量では中国、企業別ではアセロール・ミタル社が圧倒的であるが、原材料供給側の寡占状態により、企業毎の対山元原料購入価格交渉力は限られている。我が国の鉄鋼業は、鉄鋼市場としては高級鋼には強みがあるが、今後は、ミドルユーザーである自動車メーカーや造船業界

と連携した“造り込み”による産業競争力の維持・向上が必要であり、絶えざる日々の技術開発・製品開発、さらにはイノベーションが求められる。

2008年は、我が国鉄鋼業にとって近代製鉄150周年の節目にあたった。安政4年12月1日(1858年1月)の南部藩士大島高任による“日本式高炉”を用いた初の連続出鉄成功を記念して、毎年12月1日を鉄の記念日としている。大島高任の日本式高炉の成功は単なる外国技術の導入に拠らず、固有のノウハウを基に工夫を重ねた結果であり、このことは、後年、明治政府の雇われ外人技術者が操業に失敗していることから明らかである。日本の鉄鋼業では、その後の発展史においても不断のイノベーションを見ることができる。

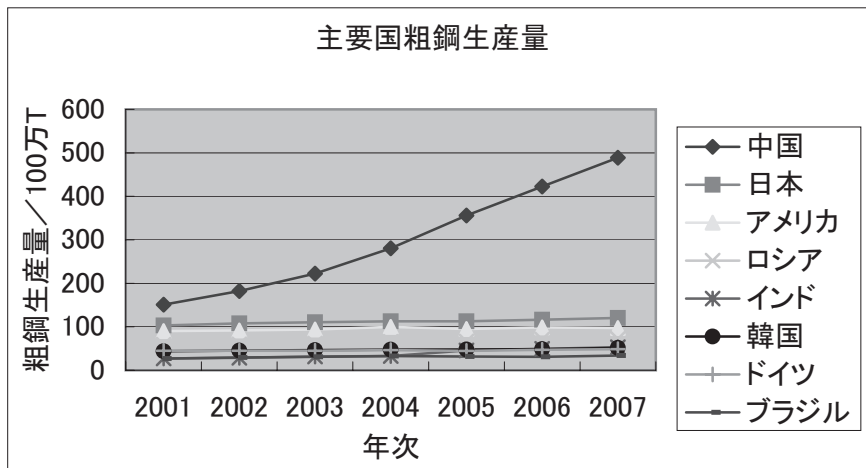
また、「東アジア鉄鋼企業の比較分析」¹¹⁾において、川端望は、鉄鋼一貫システムの第1世代を原料立地、第2世代を日本の1960～70年代における臨海立地で特徴付

けており、第3世代を「大量生産の問題点を解決してより柔軟な生産を確立し、資源・環境管理を大きく前進させる生産システム」と定義している。現在の日本および米国における鉄鋼業は、川端望の言うところの第2世代の大量生産の特質を基本的に継承しながら、柔軟な多仕様・小ロット生産を組み込んだ第2.5世代と位置づけられる。

現在の高炉出鉄量は2008年後半の急激な景気後退の影響を受け、中国以外是对前月出鉄変動が軒並みマイナス、すなわち減産となっている。2008年の8月と12月を比較すると、半減以下となっている国も見られる(図表6)。高炉関係者の“常識”では出鉄量変動は月次1割が限界、とされてきたことからすれば、まさに現在は「百年に一度」の操業状態である。世界的には潜在需要は底堅く、現下の減産に耐えつつ生産能力をいかに担保するかが、経営・技術両面で問われており、生産弾力性に関する技術開発が求められている。鉄鋼業界としては、この経験を、生産弾力性のためのツール構築の機会として若手エンジニアに引き継いでいき、“第3世代”の製鉄につなげていかなければならない。

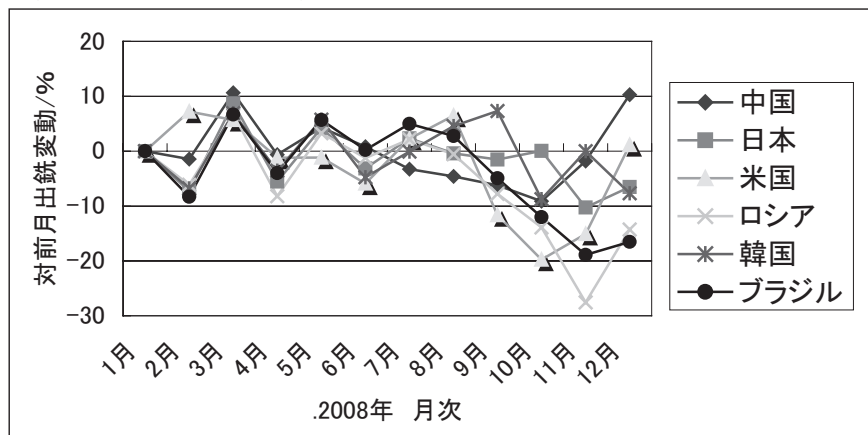
2030年における産業競争力を想定して鉄鋼業を取巻く環境の将来を考えると、少なくとも我が国の製造業が最終製品の“Value(価値)”で勝ち残っていくためには、他の追随を許さないレベルの圧倒的に高い品質か、あるいは価格競争力のどちらかを維持する必要がある。また、国民一人当たり鉄鋼需要は、2030年には世界平均で250kg(現

図表5 主要国の粗鋼生産量



参考文献¹⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表6 高炉出鉄量月次変動



参考文献¹⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

在の韓国のレベル)に近づくことが予想される。もし、これ以上の需要の伸びがあれば、機械向け需要の急増に伴って、鉄系材料フローへの銅の混入率が28%を超え、その結果、大量の利用不可能な鉄スクラップが廃棄されるであろうと試算されている¹²⁾。日本国内においては、すでにシュレッダーなどの素材分別システムがある程度は整備されているが、世界レベルでの銅混入に対しては、技術・システム共に不備と言わざるを得ない。2030年に向けては、当然ながら、海外からのリターン材の増加への技術的対応が必要である。例えば、銅などのリサイクル不純物(トランブエレメント)の無害化技術をはじめ、不純物を積極的に材質改善につなげる技術も検討され始めている。また、従来の廃棄物処理(解体・選別・再製錬)の発想から、RtoS(Reserve to Stock: 解体・分離・濃縮・再製錬)²⁾への転換が志向されている。2030年に競争力を保ちうる世界戦略技術として、スクラップベースの管理システムを基本としながら、カスタマイズされた多品種生産様式を確立することが課題である。

鉄鋼業界は、これまでは自動車産業を中心ユーザーとして量的伸びを享受してきた。しかし、今後の多様なユーザーへの対応を想定すると、2030年に向けての“グリーン製鉄”あるいは“第3世代”のためのキーワードとしては、CO₂排出ミニマム(新製鉄プロセス・高効率製錬・適所適量生産・高圧下)、劣質原料(低含鉄分・劣質炭・山元立地・輸送形態)、低合金鋼(添加原料ミニマム・新加工プロセス・成分分離リサイクル)、寿命設計(橋梁・高層建築補強・リプレース・易解体設計)、マテリアルフロー設計(素材流通・成分流通・成分コスト)等が挙げられるであろう。2030年にも鉄が引き続き社会的な要となる材料であるためには、材料関連技術を基礎として、機械・電機・化学・プラント設計・財務等々広範な科学技術分野を総合できなければならない。現下の景気後退状況への対応を一過性の“減産対応”とせず、“生産体制の弾力化実現”ととらえる技術的・経営的発想が求められる。

4-2

日本鉄鋼業における人材

戦後の経済成長とその後の安定成長、その中で培われた産業競争力を支えたものとして、“ものづくり技術”の高さとともに最終製品の信頼性を確かなものとする“素材品質”の高さが挙げられるが、その象徴的な素材として鉄鋼製品を挙げることができる。一例を挙げれば、自動車外板が主用途である高張力鋼板(ハイテン材)では、40年ほど前には引張強度(試験片に引張り応力を掛けて破断する際の強度をkg/mm²で表したものが40程度であったが、最近では70を超える薄板も実用化されている。その結果、自動車の必要強度に見合った鋼材重量が2割ほど減量し^{13, 14)}、走行燃費向上に貢献している。また、造船用の厚板においてもハイテン化が進展し、その結果コンテナ船の大型化が可能となり輸送コストの激減につながっている。それらを支えているのは高い素材品質であり、その開発と造り込みを実現した鉄鋼業の人材の役割が大きい。単なる材料製造技術に留まらず、溶接技術・塑性加工技術・表面処理技術のような多方面の専門的人材に支えられた結果である。

日本の産業界の特徴として、素材メーカーと素材利用者例えば自動車メーカーとが、新車開発の初期段階から情報共有してデザインインの形で、素材から開発する体制が挙げられる。コンシューマー商品である自動車産業では、自動車メーカーにばかり目が行きがちであるが、材料から加工技術までをカバーしているのは素材提供企

注4: 近年、「ユーザー・イノベーション」に着目するマーケティング手法が注目されている。例えば、ネット購買者の志向データや要望をベースとした(市場開拓)あるいは品揃え、(情報)機器のユーザーが(端末機器の)開発に関わる、などの手法を指す。大橋らは、この概念を拡張して用いている。

業であり、鉄鋼会社の技術者の力量に負うところが非常に大きい。大橋ら¹⁵⁾は「ユーザー・イノベーション」^{注4)}を、導入技術の利用者(ユーザー)が自ら、使用法・性能向上にコミットするなど、ユーザーが製品(あるいは導入装置)に精通しているという意味で定義している。大橋らは、その事例として、日本の鉄鋼業に大きな発展をもたらした純酸素上吹き転炉(BOF)と呼ばれる生産技術を海外から輸入した際の、鉄鋼企業における対応を挙げている。当時、BOFはいくつかの重大な技術課題を抱えており、普及に当たってはそれらの課題の解決が必要であった。この課題を解決する改良技術を生み出したのが日本の鉄鋼企業であった。これを成し遂げたのは、とりもなおさず、製鉄現場の人材レベルの高さに他ならない。

しかし、「第3世代」に向けては、従来技術を超えた新たな視点が不可欠であり、日本の鉄鋼業はオープンイノベーションの場となり、環境の変化への対応が必要となる。これは足元の生産技術の延長とは異なる10年・20年先の、多方面のエンジニア・開発者を如何に育てるかにかかっている。

日本製造業の強みの根拠を、戦後の終身雇用制に求め、日本の企業内における人材育成を“継続訓練”を特徴とするマクレガーのX型理論の変形として理解しようとする生産管理からの見方がある¹⁶⁾。これは人材が比較的固定化されている社会環境を前提としている。現在、大手鉄鋼企業においては社内で専門職に特化した人材育成を行うことが可能だが、中小規模の企業においては技術伝承が困難になり、人材も流動化している状況である。そのような状況に対応すべく、日本の鉄鋼業においては第二次世界大戦後の復興期以来培った「協調と競争」の風土を活かし、業界共通な基盤技術育成を行って

きている。また、現在の変化の早い社会経済環境に対応する専門技術を有するゼネラリストも求められる。その育成は一企業では難いため、(社)日本鉄鋼協会を介して業界他社との共同人材育成も志向している。

4-3

学協会としての 人材育成の取組み

ここでは、鉄鋼業における学協会としての人材育成の取組みの具体例を紹介する。

(社)日本鉄鋼協会における人材育成事業は、企業人・大学人が半々で構成する育成委員会にて企画運営している。図表7で紹介しているような育成事業、すなわち「鉄鋼工学セミナー」「鉄鋼工学アドバンストセミナー」は有料で会員に提供しており、基本的に個々の事業が採算を取ることを原則としている。現在、全ての事業で若干の黒字計上となっている。このことは、それぞれが提供する育成内容が時代に即し、運営を含めて受け入れられていることを示している。

毎年継続開催している「鉄鋼工学セミナー」は、協会の個人正会員および個人外国会員を対象とし、鉄

鋼業界での実務3～5年程度の若手社員、すなわち主に20代を想定した内容である。製造現場のエンジニアおよび研究職が数多く参加し、例えば、大学での専門が機械工学や電気工学であった社員が、材料・冶金などについての基礎を学び直し、または知識の整理をするようなきっかけ作りを目的としている。さらに、現在の担当業務が近い他社の人材と知己の関係になることで、その後、個人ベースの情報交換が続くケースも多いようである。毎回150名ほどが蔵王のホテルで1週間合宿し、朝から夜までの座学・議論・自由討論が行われる。最終日には、課題テーマに沿ったグループディスカッション結果のプレゼンテーションが行われ、優れた発表は表彰される。講師陣は関連する大学教官と企業委員がおよそ半々であり、2年任期で代々引き継がれてきている。ここでの講師経験は、特に課長クラスすなわち主に40代の企業人にとっては、自身の修練として貴重な経験になっている。つまり、受講生のみならず講師の人材育成としても有効に機能している。受講申し込みは各社人事部門経由で成されることが多く、各社の人材育成策として定着していることの証左と言えよう。

「鉄鋼工学セミナー専科」は、「鉄鋼工学セミナー」の受講経験者で、

図表7 (社)日本鉄鋼協会における人材育成事業(2007年度)

1)鉄鋼工学セミナー(蔵王セミナー)

対象：入社数年程度のエンジニア、研究員
規模・内容：150名程度、1週間泊りがけ。製鉄、製鋼、材料・圧延の3コース

2)鉄鋼工学セミナー専科

対象：鉄鋼工学セミナー修了者
規模・内容：各専科10数名程度。特定分野に特化して専門家が教授
(H19実施テーマ：鑄造組織制御、高温変形・加工、溶鉄・スラグの融体物性、薄板プレス成形)

3)鉄鋼工学アドバンストセミナー

対象：中堅社員(掛長クラス)
規模・内容：製鉄、製鋼、材料・圧延の3コース、各数名から10名程度。
ディスカッション中心に将来の中核人材を育成
(H20実績：10月23～25日、かながわサイエンスパーク、製鉄8、製鋼11、材料15名。
基調講演：東北大経済学部 川端教授「東アジア鉄鋼業の新局面」)

科学技術動向研究センターにて作成

さらに特定の分野を深く学びたいエンジニアや研究者を対象としている。毎年、協会の育成委員会が大学の教官に依頼してテーマを提案していただき、企業からはそのテーマに関心のある社員が参加する形態を採っている。テーマ別コースは、受講希望10名以上で開催することとしており、実施に当たっては企業から幹事役を専任することで円滑な運営を図っている。一方、「鉄鋼工学アドバンスセミナー」は、「鉄鋼工学セミナー」の受講経験者を対象としており、中核的技術系人材となることを期待される中堅社員(係長クラスすなわち主に30代)が2泊3日でディスカッションを中心に行う。各社からの参加者は、製鉄・製鋼・材料(圧延)の各分野に分かれて、当該技術分野の将来について、事前に与えられた個別テーマに沿って、各自の担当分野での知識を基礎に技術的内容を含めて議論する。各社の知財・ノウハウは出さずに、将来の技術展望をグループ毎にまとめて発表する。議論のモデレータは企業の先輩社員と同年代の大学准教クラスである。

(社)日本鉄鋼協会が、現在の育成事業形態に辿り着くまでには、業界としてのニーズの共有と大学側の実学への思い、さらに連携の場の重要性を認識した歴代の関係者の努力があり、不断の変革が成されてきた。しかしそれでも30年余を要しており、人材育成事業の難しさがうかがえる。はじめから“バックキャストイング”の概念を意識して構成されているものでは

なかったが、現在は、40代・30代・20代のそれぞれを中心とするプログラムとして定着している。

4-4

鉄鋼業を通して見た人材育成の課題解決の方策と提言

ここでは、上記の(社)日本鉄鋼協会における人材育成事業を、図表2のバックキャストイングの視点で見直して、プログラムとしての更なる充実を考える。

まず、2030年における業界の競争力維持・向上に関する課題認識を、産学関係者間で共有することが必要である。その上で、我が国の産業競争力維持・向上にとって不可欠な、環境対応を出口とするイノベーションを促進できる人材像を描き出さなくてはならない。このために、現在20代である若手エンジニア・材料系学生・他分野の学生を対象とする産学の連携したプログラム検討が早急に必要である。例えば、技術的な問題としては、リサイクル合金鋼の利活用技術の確立やCO₂排出量ミニマム化を実現するシステム作りが必要であり、そのためには要素技術開発とともに総合化技術を涵養し、その中核となる人材の育成が必要である。一方、大学の工学教育では、専門分野に加えてMOT能力を早い時期に身に付ける必要があり、学生時代に業界の実情を理解することから始め、総合力充実のためのMOTプログラムを導入するべ

きである。課題発見から技術開発までを一貫して見ることができるといったような、目的を達成するためのプロジェクトマネジメントのセンスを社会に出る前から養うべきである。

文部科学省の中央教育審議会における「中長期的な大学教育のあり方について」では大学関係者による真摯な議論が行われており、「グローバル化による国際競争の中で、大学卒業生にも高い知的資質が要求され」¹⁷⁾、質的向上が図られようとしている。しかし、さらに社会が求める人材育成の目的を明確として、既成の育成策に囚われることなく、バックキャストイングの視点により最適な時期に最適なプログラムが実施できるよう、様々なセクターを包含した検討を期待したい。例えば、産学連携の試行成果を参考に、従来は企業内の社員教育で成されてきた項目を大学カリキュラムのなかにも取り入れるなど、今後は産学間のギャップを埋める方向での議論が望まれる。例えば、3章で紹介した文部科学省・経済産業省の共同による産学連携人材育成パートナーシップ事業が新たな産学連携のきっかけを提供していることを好機として、バックキャストイングの視点で、業界毎あるいは各社において求める人材についての検討を深め、連携することで初めて果たせる我が国の産業競争力維持向上のための、具体的アクションが実行されることを期待する。

5 まとめ

産業競争力の維持向上のため業界として取組んでいる人材育成事業について、ここでは鉄鋼業界を事例として紹介したが、他のいく

つかの産業のモデルとなると考えている。また、最近の公的取組みとして、文部科学省・経済産業省の産学連携における共同検討と具

体化について概観し、各業界・各企業のみでは対応できない課題解決を目的として、産学間のギャップを埋めることを期待した事業に

も言及した。現下は世界的景気後退局面にあるものの、金融システム改革の後には潜在的需要に応える更なるマーケット拡大が期待される。2030年に向けては、我が国の鉄鋼業は“第3世代”製鉄の実現、つまり環境問題への対応と生産弾力性の両立が求められている。ここでは、単なる金融の世界的流動化を示す“グローバル化”から、物心ともに境界を越え、境

をなくしていく“グローバル化”の時代の展開が想定され、各企業内・各業界内での人材育成では不十分となることが予想される。これまで手探りであった人材育成を、バックキャスト手法によって課題を明らかにし、産業競争力の維持向上に有効な産学連携プログラムが公的サポートをきっかけとして構築されることを期待している。大学における

MOT教育も導入だけでなく、それらが産業界の具体的期待に応えるプログラムとなるよう、不断の改革が求められる。なお加えて、本稿では触れていないが、中小企業における中核人材の育成においても、今後は単なる技術伝承に留まらず、国際的経営者育成の視点が必要と考えられるが、そこには公的な育成システムが求められると考えている。

参考文献

- 1) United Nations Population Division : World Population Prospects : The 2006 Revision : <http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=2>
- 2) 科学技術振興機構：環境技術分野 P.67-69 科学技術・研究開発の国際比較 2008年版
- 3) 日本鉄鋼協会事務局 ふえらむ Vol.13 (2008) No.8 549-555
- 4) 鉄鋼新聞記事 (H20.9.10)
- 5) 産業構造審議会 新成長政策部会：基本問題検討小委員会報告書 (H20年7月) 「知識組替えの衝撃—現代産業構造の変化の本質」
- 6) 産業構造審議会総会 (第8回 H20.9.27)資料：「日本経済が直面する課題と対応の方向性」
- 7) 産業構造審議会総会 (第8回 H20.9.27)資料：「平成21年度経済産業政策の重点」
- 8) 産業構造審議会 産業技術分科会 研究開発小委員会 (第24回)：「オープンイノベーション環境での研究開発戦略」
- 9) 日本鉄鋼協会事務局 ふえらむ Vol.13 (2008) No.5 283-303 「2007年鉄鋼生産技術の歩み」
- 10) World Steel Association World Steel in Figures 2008 2nd edition : <http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/WSIF%202008%202nd%20edition.pdf>
- 11) 川端望、アジア経営研究 No.14、61-74、2008年6月 「東アジア鉄鋼企業の比較分析」
- 12) 小杉隆信、政策科学 Vol.13-2(2006) 1-10「世界鉄鋼業におけるリサイクルとエネルギー消費に関する長期シミュレーション分析」
- 13) WorldAutoSteel of World Steel Association (WorldAutoSteel 日本委員会 訳) 「スーパー鉄鋼 先進ハイテン」文芸春秋 2009年1月
- 14) 細谷佳弘、船川義正 「自動車用ハイテン」(財)JFE21世紀財団 2008年12月
- 15) 大橋弘、中村豪 政策研ニュース 6-8、No.236、6号 2008年 「Effects of User Innovations on Industry Growth : Evidence from Steel Refining Technology」
- 16) P. ドラッカー マネジメントⅡ P.197-日経BP 「サクセスストーリー：日本企業、ツァイス、IBM」
- 17) 金子元久、日経新聞 H21.1.19 「大学教育 中教審の行方は」

執筆者プロフィール



千田 晋

客員研究官
新日本製鐵(株) 技術開発本部技術開発企画部 マネジャー
<http://www.nsc.co.jp>

博士(工学)。鉄冶金専攻。全日本地域研究交流協会、JST、岩手県地域結集型共同研究新技術エージェントを経て、知的生産のマネジメントをテーマとして MOT で学位取得。東北経済連合会事業化センター設立等地域での産学官連携に長年携わってきている。

航空科学技術に係る日米欧の研究開発動向

清水 貴史
推進分野ユニット

1 はじめに

双発ターボプロップエンジン方式の小型旅客機「YS-11」は、1950年代末から1960年代初頭、戦後初の我が国国産民間旅客機として開発されたものの、大幅な赤字および販売不振のため、1971年12月に生産中止が決定された^{1) 2)}。最終的には1974年までに182機が生産され、2006年9月30日、国内民間定期航空路線から引退した。YS-11以降1990年代末まで、国家プロジェクトとして民間航空機の全機開発は行われなかった。

我が国は、家電および電子機器のほか、輸送機器のうち、自動車、鉄道および船舶に関しては国際競争力を有するものの、民間航空機に関しては、欧米航空機メーカーと国際共同開発を行い、機体およびエンジンのサブシステム、コンポー

ネントなどを納入している状況であった¹⁾。21世紀初頭に入って、本田技研工業株式会社および三菱重工業株式会社が各々、小型ビジネスジェット「ホンダジェット」および小型ジェット旅客機「三菱リージョナルジェット(MRJ)」による民間航空機市場への参入を表明した。

客席数が100席以上で航続距離が5,000kmを超える大型・中型旅客機市場は現在、米ボーイング社および欧エアバス社が独占しており、座席数が100席前後で航続距離が数千km程度のリージョナルジェット市場は、加ボンバルディア社および伯エンブラエル社が二大巨頭であり、我が国の三菱重工のMRJに加え、露スホイ社の「SSJ」および中国商用飛機有限責任公司(CACC)の「ARJ21」が新規参入を

計画している³⁾。MRJの市場参入は決して容易であるとは言えない。日本は、全機インテグレーション技術が無いため、MRJは「皆のリージョナルジェット」として我が国関係者が一丸となり、協力して開発に当る必要があるとの意見もある⁴⁾。MRJおよびホンダジェットによって我が国航空産業がさらに国際競争力を有するようになることを期待したい。

本稿では航空科学技術に関し、最近話題になっている地球温暖化問題関連の動向を紹介した後、主に温室効果ガス排出量・騒音の低減を目指す環境適合型航空機と言った環境関連の研究開発プロジェクトについて、日米欧の動向を調査・分析し、今後の我が国の研究開発の進め方について考察する。

2 地球温暖化問題関連の動向

ジェットエンジンからは、図表1に示す通り、圧縮空気と燃料との高温高压燃焼により様々な種類のガスなどが排出される⁵⁾。航空機の排出物による地球温暖化への影響については、世界気象機関

(WMO) および国連環境計画(UNEP)により1988年に設立された「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」が国際民間航空機関(ICAO)からの要請に応え、1999年に特別報告書を発表した⁶⁾。気

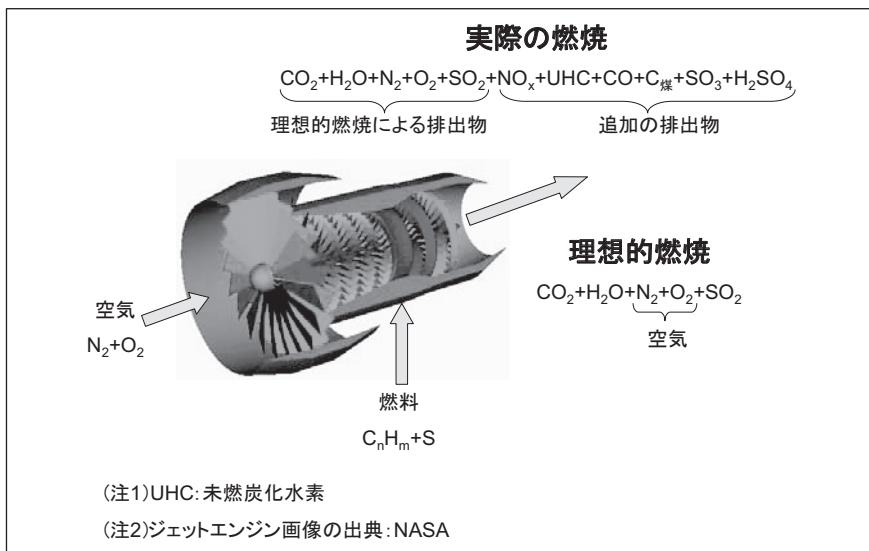
候への影響因子としては、図表2に示す通り、主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)に加え、対流圏オゾンの生成およびメタンの減少を引き起こす窒素酸化物(NO_x)、飛行機雲および巻雲の形

成の原因となる水蒸気(H₂O)、ならびに煤およびエアロゾルが挙げられている⁷⁾。なお、1kgの燃料からの排出量は、CO₂ ~ 3,160g、H₂O ~ 1,290g、NO_x ~ 15g 未満、その他 ~ 1g 未満である⁸⁾。

航空機からの排出物による温暖化効果のうち、航空機に特有なものである飛行機雲および巻雲の1992年における放射強制力(Radiative Forcing)は各々、0.02W/m² および、不確実性が大きいいため正確に推定できないとして、0 ~ 0.04W/m²の範囲であるとしていた。放射強制力とは、大気と地表との間のエネルギー平衡状態が、温室効果ガスの濃度変化など様々な要因により変化した際、その変化量を対流圏と成層圏との境界面である圏界面における単位面積当たりの放射量(W/m²)の変化で表す指標であり、地表を加熱する効果がある場合には正の値、また地表を冷却する効果がある場合には負の値で示される⁹⁾。

IPCCが2007年に発表した第4次報告書でも、航空活動に起因する地球温暖化への影響が評価されている¹⁰⁾。2000年におけるCO₂

図表1 ジェットエンジンの理想のおよび実際の燃焼過程



出典：参考文献⁵⁾

排出量見積もりについては、1990年の年当り約330Mt CO₂から年当り約480Mt CO₂と約1.5倍に増加しており、人為起源のCO₂総排出量に占める割合は約2%であるとしつつ、現状を放置した場合、航空交通量は年率約5%で増加すると予測されるため、年率1~2%程度の燃料効率の改善では、航空機によるCO₂排出量は年率3~4%で増加することになってしまうと指摘している。

飛行機雲について、2005年にお

ける放射強制力は約0.01W/m²であるとした。この値は、1999年発表の特別報告書にある値(但し、1992年に於ける値)の約2分の1であり、衛星による雲の観測能力の向上および雲の放射特性に関する研究の進展が起因している。一方、巻雲については現状、科学的理解が十分ではないとして、放射強制力の評価は行われていない。なお、巻雲による地球温暖化への影響については様々な評価結果が発表されている¹¹⁾。

図表2 航空機排出物による地球温暖化への影響

気候への影響因子	影響の特徴	科学的理解度
CO ₂ の生成	・数十~数百年、最大数千年程度大気中に滞留 ・排出場所に依存せず同様の影響 ・温暖化効果の影響は地球規模	○ (航空関連CO ₂ の規模、気候への影響は十分理解が得られたとの一般的認識)
対流圏オゾンの生成	・巡航時に排出されるNO _x により対流圏にオゾンが生成、温暖化の原因。 影響度は、緯度・経度・高度および大気の状態に依存 ・大気中滞留期間は数週間 ・温暖化効果は、地球規模ではなく、地域的	△ (影響の程度については不明確。IPCCによれば、対流圏オゾンの濃度変化は北半球で顕著、一方、メタンの濃度変化は地球規模。そのため、両者の地域への影響は相殺しない)
メタンの減少	・巡航時に排出されるNO _x により周辺大気中のメタン (NO _x ではなく他の生成源によるもの)が減少、寒冷化の原因 ・影響の持続期間は約8~12年 ・寒冷化の影響は地球規模	
飛行機雲および巻雲の形成	・飛行機雲は大気の状態が寒冷、高湿度な場合にのみ形成。飛行機雲の持続期間は、周辺大気の状態および氷の過飽和の程度に依存し、数秒~数時間程度。飛行機雲による巻雲形成の可能性 ・温暖化効果は緯度・経度・高度および大気の状態に大きく依存。巻雲と航空輸送との間の相関を示すデータもあるものの、航空機による飛行機雲の形成および塵の排出に起因する巻雲の規模に関する定量的理解は不十分	飛行機雲については△、巻雲については× (一般的に巻雲を含め、気候変動において雲の果たす役割は理解が不十分)
煤およびエアロゾル	・影響は地上よりも高々度に於いてより顕著 ・煤は宇宙空間に向かう赤外線放射を捕捉、小規模の温暖化効果 ・硫酸塩のエアロゾルは太陽光を反射、冷却効果 ・共に短い滞留期間。影響は地域的	△

出典：参考文献⁷⁾

京都議定書では、国際航空便は、国内航空便とは異なり、附属書 A に掲げる部門および発生源に含まれていないため、国際航空便により排出される温室効果ガスは、附属書 I に掲げる締約国による抑制または削減の対象となっておらず、京都議定書第 17 条が規定する排出量取引制度の対象には自動的にはない¹²⁾。但し、京都議定書第 2.2 項では「附属書 I に掲げる締約国は、国際民間航空機関(中略)を通じて活動することにより、航空機用(中略)の燃料からの温室効果ガス(中略)の排出の抑制又は削減を追求する」旨規定されており、国際民間航空機関(ICAO)は、政府または民間による排出量取引制度を検討している。なお、ICAO の航空環境委員会(CAEP)は、航空機の離着陸(LTO)時については、騒音レベルに加え、人体に有害な一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)および窒素酸化物(NO_x)の排出量に関する基準を制定しており、この基準は時間の経過とともに強化される傾向にある。

欧州連合(EU)は 2005 年 1 月 1

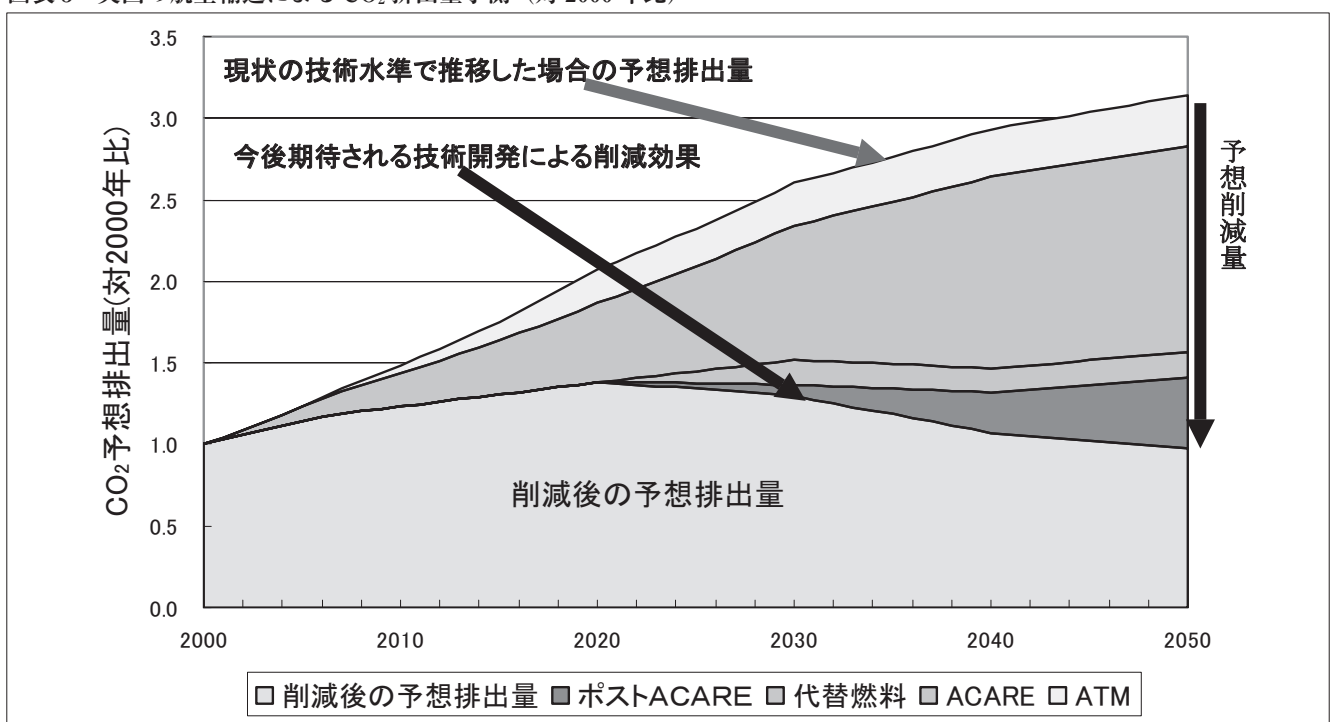
日から京都議定書に含まれる温室効果ガスのうち、CO₂を対象とする EU 域内排出量取引制度(EU-ETS)を発足しており、EU-ETS は、学習期間である第 1 期を 2007 年末に終了し、現在、京都議定書の約束期間と同じく 2008 年 1 月から 2012 年末を対象とする第 2 期に入っている。

欧州委員会は、京都議定書以降を睨み、EU-ETS 第 3 期である 2013 年 1 月から 2020 年末における地球温暖化問題への欧州としての取組みを強化し、2020 年までに (1) 1990 年比で温室効果ガス排出量 20%削減 (国際取決めが成立した場合は 30%削減) および (2) 再生可能エネルギーの総エネルギー消費に占める割合 20%を達成するため、加盟国別の排出量割当ではなく EU 全体として上限を設けること、CO₂以外の温室効果ガスの排出枠を EU-ETS の対象とすることなどを柱とした提案を行い、EU 首脳会議および欧州議会は 2008 年 12 月、修正を施した後、この提案を承認した¹³⁾。

提案が承認されたことにより、

2012 年から EU 域内便および国際便を問わず、EU 域内において発着する航空便が EU-ETS の対象となる見込みである^{14, 15)}。EU 加盟国政府機関を除く民間の航空運航業者が原則、規制の対象となり、一つの航空運航業者に対して一つの EU 加盟国政府の担当機関が監督を行う。但し、EU と同様な取組みが行われている国の航空運航業者は、対象とならない場合がある。CO₂のみが排出規制の対象となり、2004 年～2006 年の間に EU 域内の空港において発着した航空機からの総排出量の年平均に基づき、航空運航業者には 2010 年の運航実績(乗客・貨物などの重量と運航距離との積)に応じて排出量実績が算出される。2012 年には排出量実績の 97% および 2013 年～2020 年には排出量実績の 95% が上限枠(cap)として設定され、各航空運航業者には、上限枠の 85% が無料で割り当てられるとともに、これを超える排出枠は EU-ETS で取引されることになる。手続きの簡素化のため、小型航空機の運航業者などは、EU-ETS の対象から除外される。

図表 3 英国の航空輸送による CO₂ 排出量予測 (対 2000 年比)



出展：参考文献¹⁶⁾

英国航空環境団体であるサステナブルアビエーション(Sustainable Aviation=持続可能な航空)によると図表3に示す通り、英国の航空輸送によるCO₂排出量は、現状の技術水準で推移した場合、2050年には2000年に比べて約3倍に増加する見込みである¹⁶⁾。航空交通管理(ATM)システムの改善、後述す

る欧州航空研究諮問委員会(ACARE)の戦略研究計画(SRA)に基づく航空輸送システム(ATS)の先端的技術開発、低炭素の代替燃料、ACARE後のさらなるATS技術開発などが実現する場合、2020年頃にCO₂排出量がピークを迎えた後、2050年頃、2000年と同程度のCO₂排出量まで抑制できる

としている。

EU域内で発着する民間航空機に対し原則、2012年からEU域内排出量取引制度が適用される見込みであることもあり、CO₂などの温室効果ガスの排出量を現状に比べ大幅に削減する環境適合型航空機に対する需要は今後高まるものと考えられる。

3 内外の研究開発動向

3-1

日本

総合科学技術会議が2006年3月28日、第3期科学技術基本計画に基づき取りまとめた「分野別推進戦略」¹⁷⁾では、社会基盤分野の交通・輸送システムにおいて、新たな社会に適應する交通・輸送システム新技術として「新需要対応航空機国産技術」および「交通・輸送予防安全新技術」が集中投資を行う戦略重点技術として位置付けられている。

新需要対応航空機国産技術は、「新たな需要に対応した航空機・エンジン実現を可能とする全機インテグレーション技術のうち試作機開発およびこれに寄与する技術開発、静粛超音速研究機の研究開発、比較優位を維持・向上する複合材創成・加工技術」を技術の範囲とし、選定理由については、「これまでの我が国の国際共同開発の実績をベースに日本特有の国産技術の確保が不可欠」であるため、「小型航空機の全機インテグレーション技術ならびにそれを支える要素技術の向上(中略)将来の高速化ニーズに対応する(中略)技術を戦略重点化する」としている。交通・輸送予防安全新技術は、「航空機の安全高密度運航を可能とする4次元(位置+時間)の交通管理等を含むIT技

術の活用による航空交通管理技術、小型機運航支援技術、全天候・高密度運航技術」を技術の範囲とし、選定理由については、「今後の航空交通の需要増加(中略)に配慮して、予防安全を徹底するための新たな技術の活用を重点化して推進する必要がある」としている。

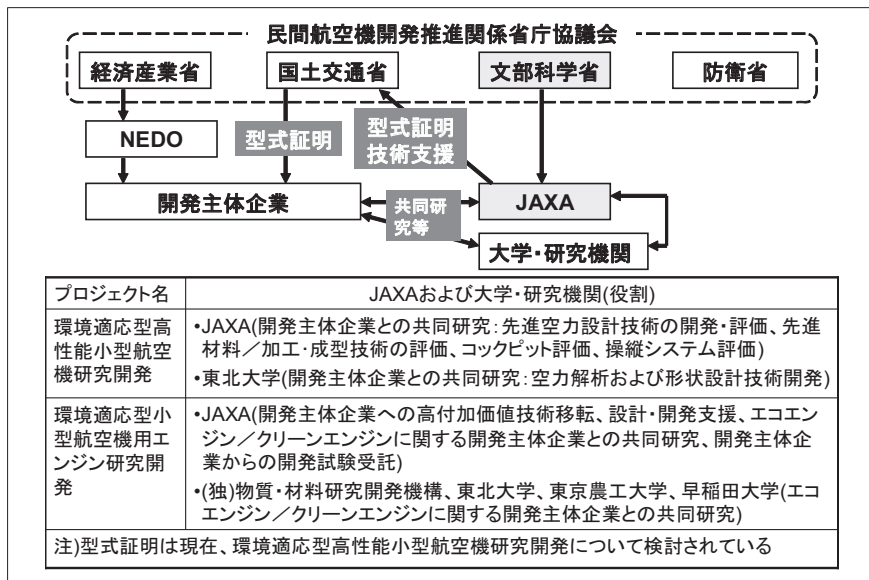
(1) 全機インテグレーション技術

新需要対応航空機国産技術に含まれる航空機・エンジンの全機インテグレーションについては、経済産業省を主務省とする(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクトとして「環境適合型高性能小型航空機研究開

発」¹⁸⁾および「環境適合型小型航空機用エンジン研究開発(通称、エコエンジン)」¹⁹⁾が2003年度から実施されており、これらプロジェクトの推進体制の概要を図表4に示す^{20、21)}。

文部科学省を主務省の一つとする(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、第1期中期計画(2003年10月1日～2008年3月31日)において、環境適合型高性能小型航空機研究開発および環境適合型小型航空機用エンジン研究開発に「共同研究で参加するとともに、積極的に技術協力、大型設備供用等を進める」²²⁾こと、さらに第2期中期計画(2008年4月1日～2013年3月31日)においても、「『第3

図表4 NEDOプロジェクト推進体制の概要



出典：参考文献¹⁸⁻²¹⁾

期科学技術基本計画』における戦略重点科学技術を中心とした先端的・基盤的な航空科学技術の研究開発を進める。具体的には、航空機／航空エンジンの高度化に資する研究開発として、国産旅客機高性能化／クリーンエンジンに係る高付加価値・差別化技術の研究開発(中略)を重点的に推進する」²³⁾ことを目標として掲げ、2010年頃に完成するエコエンジンよりもさらに環境適合性の向上を目指し、2012年頃完成予定の「クリーンエンジン」、さらなる騒音低減および燃費・安全性・快適性の向上を目指す「国産旅客機高性能化」など、より先端的な研究開発を推進するとともに、これらNEDOプロジェクトを技術的に支援してきた。また、我が国有数の大規模な風洞試験設備、計算流体力学(CFD)設備などの供用も行っており、さらに実際の運用環境での機器の評価が可能となる飛行試験設備(ジェットFTB)の整備も計画している²⁴⁾。

環境適応型高性能小型航空機研究開発で開発されている小型ジェット機技術については、三菱重工業株式会社(MHI)が2008年3月28日、YS-11以来約40年ぶりの国産民間旅客機となる「三菱リージョナルジェット(MRJ)」としての事業化を決定するとともに、MRJの事業化を担う「三菱航空機株式会社」を同年4月1日、設立した²⁵⁾。なお、MRJが民間航空機として運航するためには、我が国の場合、国土交通省から型式証明を取得する必要があり、その際、JAXAは国土交通省を技術支援することになっている。

(2) 静粛超音速研究機

世界唯一の超音速旅客機であった英仏共同開発のコンコルドは、数分間程度の超音速飛行が要求される軍用機と異なり、数時間程度の超音速飛行を実現する必要があったため、機体重量、空力設計、

燃料効率などが開発課題であったのに加え、亜音速機を超える騒音のため離着陸できる空港が限定され、ソニックブームのため陸地上空での超音速飛行が許可されなかった^{26, 27)}。

JAXAでは、図表5に示す通り、関係機関との連携の下、将来予想される超音速輸送機(SST)の国際共同開発への対等な参加の実現も視野に入れ、離着陸時騒音低減に加え、SST実現の鍵となるソニックブーム低減と言う環境適合性と軽量化・低抵抗化による燃料効率向上と言う経済性との両立を目指した「静粛超音速機技術の研究開発」が行われている。

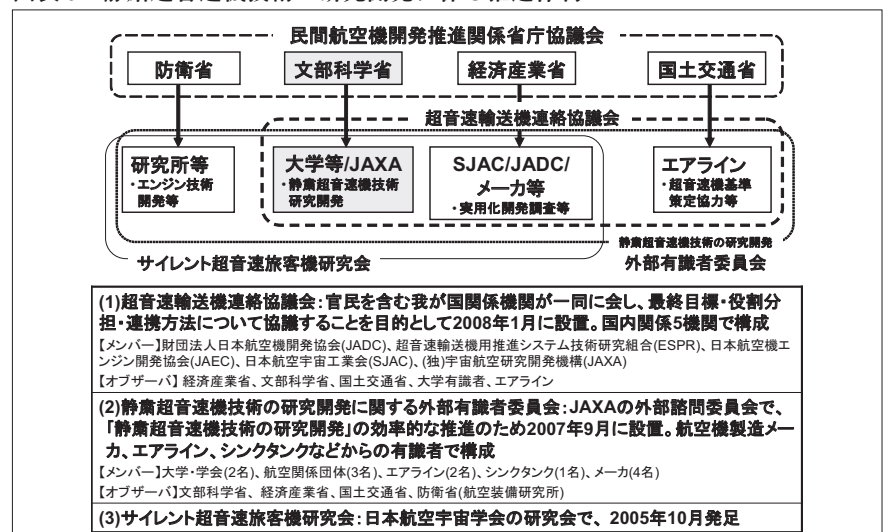
1997年から超音速機技術の研究開発を行っており、設計結果の風洞試験・計算流体力学(CFD)による評価および評価結果と目標との相違に基づく設計変更を繰り返す行方従来の手法(「順問題設計」と言う)とは異なり、自然層流が実現する圧力分布を目標として設定して主翼形状を逆に求める「計算流体力学(CFD)逆問題設計法」など、空力抵抗低減のための設計技術の獲得を目的とした第1段階では、2005年10月、無推力・ロケット打上げの小型超音速実験機の飛行実証実験に成功し、逆問題設計法の妥当性などを確認した²⁸⁾。

2006年からは、推力飛行・完全自律航行の無人研究機による飛行実験を行い、空力抵抗の低減と同時にソニックブームの半減と言う騒音問題の解消に取り組む第2段階に入った。図表6に示す通り、研究機本体および飛行実験計画に関する研究開発活動を行っており、2009年度の間中評価によるフェーズアップ判断を仰いだ後、2010年度から開発に着手、2010年代中頃の飛行実証の実現を目指している²⁶⁾。

静粛超音速研究機の設計検討では、CFD逆問題設計法をさらに進め、空気力学、構造力学、空力音響と言った多分野に跨る制約条件を統一的に処理して機体設計を実現する「多分野統合多目的最適設計手法」も開発されており、超音速機のみならず亜音速機の設計にも貢献することが期待されている²⁷⁾。

マッハ5程度で巡航し、約2時間で太平洋を横断することができる極超音速機概念も検討されている。極超音速エンジンでは、ロケットエンジンとは異なり、大気中から取り込んだ空気と燃料との燃焼により推力を発生し、推進材搭載量を低減できるため、宇宙輸送系の第1段とする概念検討も行われている²⁸⁾。

図表5 静粛超音速機技術の研究開発に係る推進体制



出典: 参考文献²⁶⁾

図表6 静粛超音速機技術の研究開発の概略スケジュール

年度	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2010年代中頃
主要マイルストーン		▼事前評価		▼中間評価	ソニックブーム半減小型SST概念		環境適合型小型SST概念	小型SSTの性能目標達成評価
I技術目標								
(1)ソニックブーム強度の半減:0.5psf以下					▼解析による評価			▼飛行実験・解析による達成評価
(2)離着陸時騒音:ICAO Chap.4Iに適合							▼要素試験・解析による評価	▼地上試験・解析による達成評価
(3)巡航揚抗比:8.0以上							▼解析による評価	▼地上試験・解析による達成評価
(4)構造重量:全金属機体に比べ15%減							▼部分構造試作による評価	▼解析による達成評価
III静粛超音速研究機の飛行実験システム開発および飛行実験								
(1)静粛超音速研究機飛行実験システムの開発				▼基本設計完了	▼詳細設計完了		▼開発完了	
		概念検討	設計検討		開発			
(2)静粛超音速研究機の飛行実験					飛行実験計画検討等	飛行実験計画詳細化等		▼飛行実験着手 飛行実験

出典：参考文献²⁶⁾

3-2

欧州

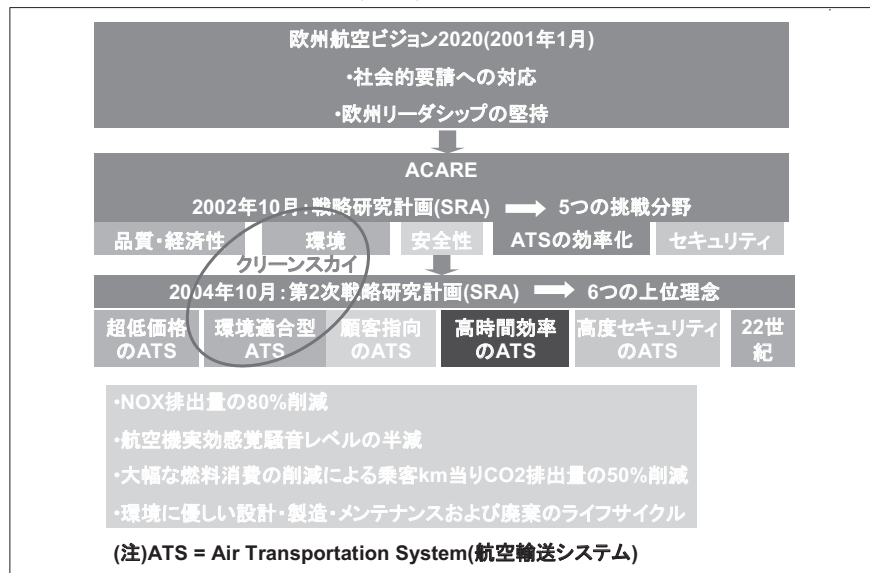
(1) 欧州航空ビジョン2020と欧州航空研究諮問委員会(ACARE)

2020年に向けた欧州航空輸送のビジョンをまとめた報告書「European Aeronautics: A Vision for 2020」(以下、「欧州航空ビジョン2020」と言う)が2001年1月に発表され²⁹⁾、(1)品質・経済性、安全性、環境および航空交通管理(ATM)の発展・強化に関する「社会的要請へ

の対応」とともに、(2)欧州航空産業界の世界第一位と言う国際競争力の維持・強化に関する「グローバルリーダーシップの堅持」ならびに(3)市場変化に対応した柔軟な航空政策、公的研究開発体制の強化、官民研究交流の促進、航空人材育成のための教育政策、欧州域内の人材流動化、電子ネットワーク・電子商取引・電子ビジネスの促進および国際民間航空機関(ICAO)その他欧州航空輸送活動に影響する国際機関との関係強化に関する「欧州各国政府および欧州議会の政策・規則」において、産学官連携の下、達成すべき目標が提言された。

航空分野における利害関係者間の調整のため、欧州技術プラットフォーム(ETF)として欧州航空研究諮問委員会(ACARE)を立ち上げることも提言された^{29)、30)}。ACAREは、欧州航空ビジョン2020に規定する社会的要請への対応に基づき、2020年までに実現すべき民間航空輸送研究開発に関する優先付けなどの検討を行い、戦略研究計画(SRA)を取りまとめている。図表7に示す通り、2002年10月に発表された報告書では、民間航空機ハイジャックによる米国同時多発テロが2001年9月11日に発生したこともあり、SRAとしてセキュリティも加え5つの挑戦分野(品質・経済性、環境、安全性、ATSの効率化およびセキュリティ)が識別され、2004年10月に発表された報告書では、2020年以降も視野に入れ、SRAとして6つの上位理念(超低価格、環境適合型、顧客指向、高時間効率、高度セキュリティ、22世紀)が識別された³¹⁾。

図表7 欧州航空戦略研究計画(SRA)



出典：参考文献³¹⁾

(2) 第7次EU研究開発枠組み計画

EUの第7次研究開発枠組み計画(FP7)では、ACAREの提言を踏まえ、図表8に示す通り、航空分野において取り組むべき課題と

して、(1)航空輸送の環境適合理化、(2)時間的効率性の向上、(3)顧客満足度および安全性の確保、(4)経済性の向上、(5)航空機および乗客の保護ならびに(6)未来型航空輸送の研究が取り上げられている^{32, 33)}。

研究開発活動は技術成熟度の達成目標レベルに分類して行われており、(1)レベル1では、基礎研究からコンポーネントおよびサブシステム・レベルまでの上流過程の研究開発活動で、解析および/または適切な環境での実験によるもの、(2)レベル2では、より高度な技術成熟に向け、多分野に跨るシステムレベルの技術および運用手法の統合および妥当性確認を中心とした下流過程の研究開発活動で、大規模飛行・地上試験設備、模擬装置などの適切な環境で行うもの、さらに(3)レベル3では、最高レベルの技術成熟に向け、統合されたシステムにより行う研究開発活動で、適切な運用環境などで行うものが対象となる。

レベル3に該当する研究開発プロジェクトとしては、航空輸送の環境適合理化に対応する「クリーンスカイ共同技術開発計画(JTI)」および「単一欧州航空交通管理研究計画(SESAR)共同事業(JU)」が立ち上げられており、FP7の通常の研究開発活動とは異なる枠組みで行われる。

(3) クリーンスカイ JTI

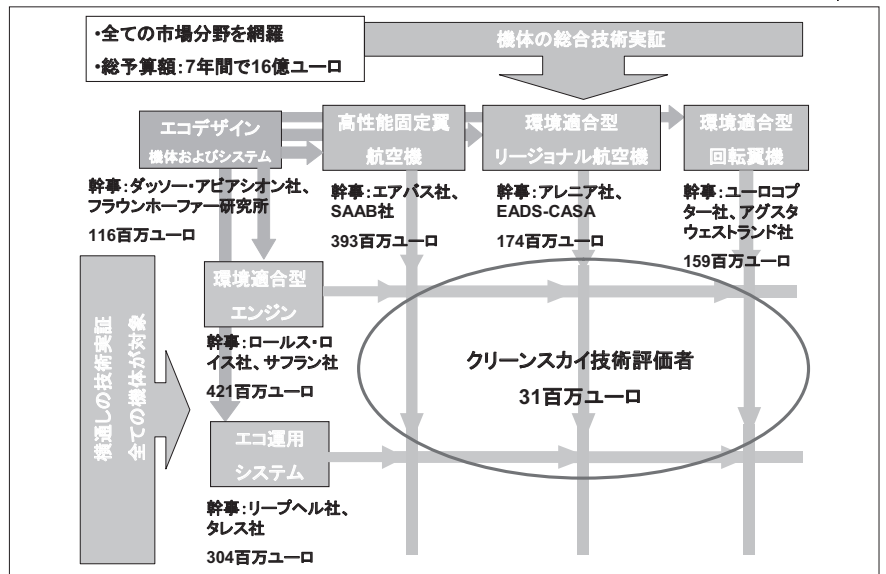
クリーンスカイは、欧州航空ビジョン 2020 および ACARE の提言に基づき、CO₂、NO_x、騒音と言った航空活動による環境負荷を大幅に低減するため、産学官連携の下、実際の製品開発に繋げるための先行的な技術開発・実証を行う。図表9に示す通り、機体関連では、(1)燃料効率に画期的な向上をもたらすオープンロータを搭載するとともに、飛行機の速度に応じて理想的な自然層流を実現する高性能固定翼航空機、(2)CO₂などの温室効

図表 8 FP7における航空関連研究開発

<p>1. 航空輸送の環境適合理化</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：環境適合型航空機、エコ製造・メンテナンス、環境適合型航空輸送活動 2020年には2001年比で乗客 km 当り CO₂ を 50%、NO_x を 80%、実効感覚騒音レベルを 50%削減して、航空輸送による環境負荷を低減 代替燃料技術を含む環境適合型エンジン技術の向上、固定翼機および回転翼機の機体性能向上、構造の軽量化・高機能化、空力特性の向上などを研究 空港における航空機の運用、航空交通管理、エコ製造・メンテナンス・リサイクルも課題
<p>2. 時間的効率性の向上</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：航空機の利便性の向上、航空輸送活動の時間的効率性の向上 安全性を確保しつつ、全気象条件下でフライトスケジュールを遵守(フライトの99%がスケジュールの15分以内に発着)し、かつ、乗客の空港待合せ時間を大幅に短縮(短距離飛行で15分、長距離飛行で30分)することにより、3倍とも予想される航空交通量の増加に対応 航空機の自律的運航とともに、航空機、地上設備および測位衛星を統合することにより、SESARの枠組みで画期的な航空交通管理(ATM)システムを開発・実現するために研究 乗客・貨物の処理能力の向上、空港の効率的利用、他の交通手段との接続も課題
<p>3. 顧客満足度および安全性の確保</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：客室快適性の向上(機上サービスおよび快適性の選択拡大)、乗客に優しい航空輸送活動、航空機の安全性、ATMなどの運用の安全性 乗客の選択肢およびスケジュールの融通性を大幅に向上するとともに、事故率を1/5に低減。ヒューマンエラーの大幅な低減と回復能力の向上、事故死亡率の低減
<p>4. 経済性の向上</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：航空機開発費、航空機運用費、ATM運用費 初期設計から製品開発・製造までの全ての過程を改善するとともに、サプライチェーンを強化し、2020年には2001年比で航空機開発費を50%削減、市場投入時間を50%短縮、航空機運用費を50%削減、ATM運用費を20%削減。より安価な航空運賃を実現
<p>5. 航空機および乗客の保護</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：航空機セキュリティ、運用セキュリティ 如何なるテロからも乗客または一般市民を防護し、傷害・損失・損害などの発生を抑止 航空機または航空輸送システムに対する機上または外部からの敵対的攻撃の抑止
<p>6. 未来型航空輸送の研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象範囲：ブレイクスルーおよび新技術、航空輸送活動の画期的変革 2050年以降に向け、関係者、特に大学および研究機関による斬新なアイデアおよび未来志向技術の創出。航空輸送における画期的変革のための技術基盤の創成

出典：参考文献^{32, 33)}

図表 9 クリーンスカイの統合技術実証プロジェクト



出典：参考文献³⁴⁾

果ガス、空港周辺大気汚染物質および騒音の大幅な削減を実現する環境適合型リージョナル航空機ならびに(3)環境適合型リージョナル

航空機と同様に環境対応を目指す環境適合型回転翼機、分野横断型では、(4)高性能固定翼航空機、環境適合型リージョナル航空機およ

び環境適合型回転翼機の実現に不可欠な環境適合型エンジンならびに(5)補助動力装置、油圧系などの電化および飛行経路の最適化を含め燃料消費量を低減し、空港周辺および飛行時における環境対応を目指すエコ運用システム、さらに機体およびシステムでは、(6)設計・製造・廃棄の全ライフサイクルにおいて環境負荷の低減を目指すエコデザインについて、要素技術開発およびプロトタイプによる総合技術実証(ITD)が行われる³⁴⁾。

クリーンスカイでは、2008年～2014年の7年間の活動期間における予算総額は約16億ユーロと見込まれており、欧州委員会および参加企業がこの予算を折半して負担する。各々のITDでは、欧州の代表的企業が幹事を務め、欧州の航空関連中小企業は提案要請または入札公募を介して参加する。クリーンスカイでは、図表10に示す通り、実際の製品開発が可能となるTRL6またはそれを超えるレベルまでの技術成熟度の向上を目標としている³⁵⁾。

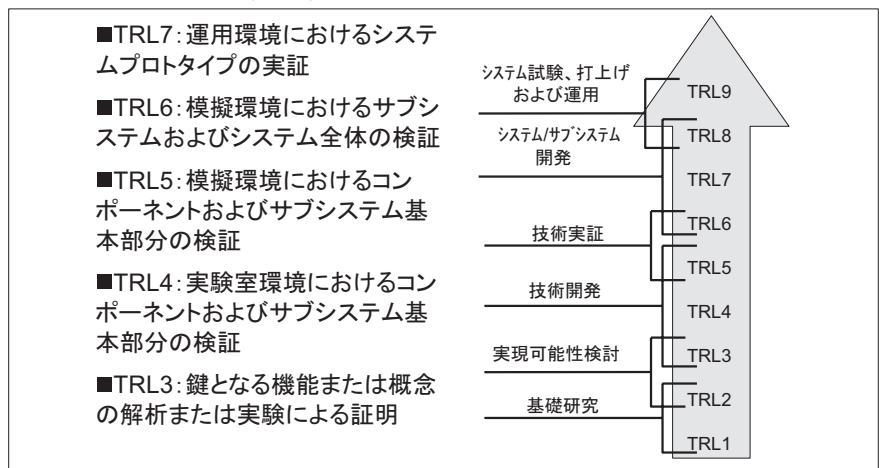
3-3

米 国

(1) 米連邦政府の政策

1993年11月23日に設立された米国家科学技術評議会(NSTC)は、米連邦政府研究開発政策の調整を行う米国大統領府の機関であり、米大統領が議長ならびに副大統領、大統領府科学技術政策局(OSTP)局長、科学技術所掌の省・局の長およびその他の大統領府担当官が委員を務める³⁶⁾。米大統領が2006年12月に承認した「米国航空研究開発政策」は、2020年までの米連邦政府の航空科学技術研究開発に係る初の政策であり、NSTCの技術委員会(COT)航空科学技術小委員会(AS&T)は、この政策の規定

図表10 技術成熟度(TRL)と研究開発フェーズ



出典：参考文献³⁵⁾

図表11 航空研究開発および関連施設に関する米国家計画の目標

<p>I. 移動性 (目標1) 航空機の飛行間隔の短縮および機体性能に基づく運用 (目標2) リソースおよび事故発生時の航空交通量の管理による米国航空システムの能力の強化 (目標3) 気象が航空交通管理に係る意思決定に及ぼす悪影響の低減 (目標4) 空港および大都市部における発着数の大幅な増加 (目標5) 航空交通管理システムの性能向上による航空輸送能力の向上</p>
<p>II. 米国家安全保障および国土安全保障 (目標1) 高効率の高々度飛行および移動性に優れた航空機実現のための巡航時揚抗比(L/D)の向上および画期的な機体概念の実証 (目標2) 回転翼機の輸送能力、航続距離および任務遂行能力の向上 (目標3) ガスタービンの燃料消費量の低減 (目標4) 航空機の推力および熱制御能力の向上 (目標5) 持続的かつ制御された極超音速飛行の実証</p>
<p>III. 安全性 (目標1) 機体設計、構造およびサブシステムの向上による事故発生件数低減技術の実証 (目標2) 地上および空域における航空機運用の改善による事故発生件数低減技術の実証 (目標3) 大規模事故の際の乗客および乗員の生存率向上の実証</p>
<p>IV. エネルギーおよび環境 (目標1) 燃料供給安全保障および価格安定性の向上のため、米国産資源から得られる多様な新航空燃料の実現 (目標2) 航空システムの燃料効率を大幅に改善する技術および運用方法の先端的開発 (目標3) 航空システムの環境に対する甚大な影響を低減する技術および運用手法の先端的開発</p>

出典：参考文献³⁷⁾

に従い、2007年12月に「航空研究開発および関連施設に関する米国家計画」を策定した³⁷⁾。

米国家計画は、図表11に示す通り、米航空研究開発政策の基本的枠組みに従い、(1)移動性、(2)国家安全保障および国土安全保障、(3)安全性ならびに(4)エネルギーおよび環境の航空科学技術研究開発分野について、目標および短期・中期・長期の目的を定めるとともに、研究・開発・試験および評価(RDT&E)施設に関する計画を取りまとめた。

図表11の「I. 移動性」では、第

4-1項の(1)で後述する通り、次世代航空輸送システム(NextGen)の導入により、航空交通管理システムの機能・性能を大幅に改善して、将来大幅に増加すると予測される航空交通量に対応するとの目標が示されている。「IV. エネルギーおよび環境」では、米国産資源による代替燃料開発の推進とともに、燃料効率の大幅な改善などによる環境負荷低減が目標として示されている。

米航空研究開発政策では、連邦政府機関の役割分担も定めており、米国防総省(DOD)、米連邦航

空局 (FAA)、全米科学財団 (NSF)、米国土安全保障省 (DHS) および米商務省 (DOC) がその所掌業務の範囲内で研究開発を行うのに対し、米国航空宇宙局 (NASA) は、世界トップクラスの米国航空科学技術能力の堅持のため、有人および無人宇宙活動にとって重要なものも含め、航空科学技術基盤の維持・強化を目的とした広範な先端的・基盤的研究開発活動を推進する旨規定されている³⁶⁾。

(2) NASA の航空科学技術研究開発活動

NASA の長期計画では、科学、有人探査および航空のバランスを図りつつ事業を推進し、さらに航空に関しては、基礎分野における知識を発展させるとともに、航空機の安全性の向上および航空交通量増大への対応のために技術開発を行うとしている³⁸⁾。航空分野において達成すべき目標としては、(1) 2016 年までに、航空交通管理 (ATM) のため 2025 年頃運用開始予定の次世代航空輸送システム (NextGen) において、新規および既存を問わず、航空機の安全性を向上するためのツール・手法および技術の開発、(2) 2016 年までに、安全性を維持しつつ、NextGen の交通量および移動性に対する要求を満足する先端的技術の開発、(3) 2016 年までに、亜音速から超音速、

極超音速までの全速度領域において、様々な形態の機体性能の定量的評価が可能となる多分野統合多目的最適設計手法 (MDAO) の開発ならびに (4) 米国航空宇宙計画にとって戦略的に重要である NASA 風洞試験設備その他の地上試験設備の継続的供用の確保が挙げられている。

NASA 航空研究本部 (ARMD) は航空基礎研究、航空安全性、航空交通および航空試験施設と言う 4 本柱で航空科学技術に関する長期計画の目標達成を目指している³⁹⁾。

(1) 航空交通では、NextGen に必要な研究、(2) 航空安全性では、航空機が既存または新規かを問わず、既存の ATM および NextGen における予防的な安全性の研究、(3) 航空試験施設では、新たな試験装置および手法の開発を含め、米国にとって必要な試験施設・設備の維持・向上、さらに (4) 航空基礎研究では、地球その他の太陽系惑星の大気において、全速度領域に適用可能な知見を創出する先端的研究が対象となる。

航空基礎研究では、亜音速固定翼、亜音速回転翼、超音速および極超音速に関する研究開発が行われている⁴⁰⁾。亜音速固定翼および超音速では、将来型航空機の市場参入時期などで、2015 年頃の第 1 世代 (N+1)、2020 年頃の第 2 世代 (N+2) および 2030 ~ 2035 年頃の

第 3 世代 (N+3) に分類して、研究開発目標を設定しているのに加え、極超音速では空気吸込み式極超音速エンジンを第 1 段に搭載する 2 段式宇宙輸送機 (TSTO)、将来の有人探査のため重量約 30t の大型構造物の火星への突入・降下・着陸 (EDL) に関する概念検討が行われているのが特徴として挙げられる。これら研究活動では、設計トレードオフの効率化などのため多分野統合多目的最適設計 (MDAO) のためのツールの開発も行われている。

ARMD では、燃料効率に優れ、MRJ にも搭載予定のエンジン「ギアードターボファン」の地上試験におけるプラット & ホイツニー社との協力、主翼の一部を機体と統合した主翼混合型機体 (BWB) の実験機「X-48B」の飛行実験におけるボーイング社との協力などを行っているほか、基礎研究などの分野における米国航空産業力の維持・強化のため 2006 米会計年度から NASA 研究公募 (NRA: NASA Research Announcement) を行っている。2008 米会計年度の NRA では、2030 ~ 2035 年頃に市場参入予定の亜音速固定翼機および超音速機概念検討のため米国企業など 6 者が選定された。主要検討課題には環境適合性が含まれており、総契約額は約 12.4 百万ドル、契約期間は約 18 カ月となっている⁴¹⁾。

4 研究開発動向の比較分析

4-1

環境適合化に向けた動き

航空輸送による環境負荷の軽減策としては、図表 12 に示す通り⁴²⁾、技術面では、短中期的には主翼先端の乱流による空気抵抗を

低減するウイングレットなどによる改装⁴³⁾、石油由来のケロシンに替わる植物由来その他の代替燃料の開発⁴⁴⁾などに加え、長期的には新規の環境適合型航空機の導入が不可欠になり、運用面では、短中期的には滑空飛行と推力飛行とを繰り返す従来の着陸方法に替え、滑空飛行で連続的に降下する着陸

方法 (CDA) などに加え、中長期的には次世代の航空交通管理 (ATM) システムの導入が重要である。

第 2 章で述べた通り、IPCC において航空輸送活動による環境負荷の増大が懸念されていること、2012 年から欧州連合 (EU) 域内で発着する航空便が原則、EU 域内排出量取引制度 (EU-ETS) の対象と

図表 12 航空輸送による環境負荷の軽減策

	負荷軽減策	環境への影響			経済的費用または効果	時期	対象
		騒音	大気汚染	地球温暖化			
技 術	騒音源遮蔽	○	N/A	×	× (費用)	短期	既存航空機
	改装 (ウイングレットなど)	N/A	N/A	○○	× (改装費) ○○ (低燃費化)	短期	既存航空機
	代替燃料	N/A	○	○○	×× (費用)	中期	既存航空機?
	新規設計	○○	○○	○○	××× (調達費) ○○ (燃料費削減)	長期	新規航空機
運 用	CDA	○	○	N/A	○ (燃料費削減)	短期	空港
	離陸時推力低下	○	○/×	N/A	○ (効果)	短期	空港
	着陸進入角増加	○	○	N/A	× (費用)	中期	空港
	ATM 機能・性能向上	○	○	○	×× (設置費) ○ (燃料費削減)	中期	航空輸送全般

出展：参考文献⁴²⁾

なる見込みであることなどから、エコ、グリーンと言った環境適合性は、今や航空輸送活動にとっても喫緊の課題となりつつあり、第3章でも述べた通り、日米欧において航空輸送活動の環境適合化に向けた研究開発が産学官連携の下、推進されている。以下では、これら日米欧の航空研究開発活動のうち、特に注目すべき点を述べる。

(1) 次世代航空交通管理 (ATM) システム

2025年頃には2000年頃に比べ、航空交通量が約2倍に増加するとの予測があり⁴⁵⁾、地上レーダを使用した地上管制官との音声通信による従来の航空管制では、このような増加に対応が困難となり、空港での離着陸待ち、ノロノロ運転と言った空の交通渋滞の解消のためには、カーナビと同様にGPSなど測位衛星を活用し、インターネットのように航空機、地上局などを接続して、気象予報、近傍を飛行する航空機の位置・速度などの情報交換を実現する航空交通管理(ATM)システムの導入が不可欠とされており、米国では2025年頃の運用開始を目指し、次世代航空輸送システム(NextGen)の整備が行われている⁴⁶⁾。

欧州連合(EU)でも、加盟国毎の細切れの航空管制空域ではなく

EU全空域を対象とする単一欧州空域政策(SES)の下、2020年頃の運用開始を目指し、単一欧州航空交通管理研究計画(SESAR)が推進されている⁴⁷⁾。我が国でも国土交通省において運輸多目的衛星を活用する同様の取組みが行われるとともに、我が国独特の事情も踏まえ、小型航空機の自律的運航を可能とする分散型高効率安全運航システム(DREAMS)の研究開発が行われている⁴⁸⁾。

これら次世代ATMシステムにより、CO₂排出量は、乗客km当たり約10%程度削減できるとされている⁴⁷⁾。空港周辺の騒音および窒素酸化物・未燃炭化水素などによる大気汚染のさらなる抑制に加え、CO₂排出量のさらなる削減のためには、従来の航空機とは異なり、大幅に排出物・騒音を低減する環境適合型航空機の導入が不可欠になると考えられる。

(2) 環境適合型航空機に必要な技術

単位燃料消費量(-dW)当りの航続距離(dR)は、以下の式で与えられる⁴⁹⁾。但し、V_{a/c}は航空機の速度、(L/D)は航空機の揚抗比、TSFCは定格推力当り燃料消費率、Wは航空機の重量で、空虚重量(W₀)、ペイロード重量(W_{PL})および搭載燃料(W_{Fuel})の和である。

$$-dR/dW = V_{a/c} \times (L/D) / TSFC / W$$

単位燃料消費量当り航続距離の向上により燃料効率を改善して、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量を削減するためには、上記の式が示す通り、a)機体の軽量化、b)エンジン効率の向上、c)揚抗比(L/D)の向上およびd)燃料の単位質量当りの高エネルギー化が鍵となる⁴⁹⁾。

a) 機体の軽量化

B787の例が示す通り⁵⁰⁾、機体の軽量化には軽量かつ高強度の炭素繊維複合材(CFRP)が有力であるものの、通常、複合材はプレプリグと言う半硬化のシート状複合材を積み重ねるため、製造工程が多くなり、またオートクレーブと言う製造時に高温・高圧をかける高価な製造容器が必要なため製造コストが高かった^{51, 52)}。

(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、真空樹脂含浸製造法(VaRTM)の航空機構造材製造への適用を研究している。VaRTMでは、プレプリグおよびオートクレーブを必要とせず、繊維のみを所定の形状に積み重ねた後、真空引きにより樹脂を流し込むため、大幅なコスト削減が可能となる。6mの主翼構造の試作など長年にわたる研究から試験技術、安全性審

査基準に関する知見などが得られ、MRJでは、従来の製造方法の炭素繊維複合材が主翼に使用されるとともに、VaRTMで製造された炭素繊維複合材が尾翼に採用されることになっている。なお、第3-1項の(2)で述べた静粛超音速研究機にもVaRTMで製造された炭素繊維複合材の使用が検討されている。

b) エンジン効率の向上

ジェットエンジンが発生する推力(F)は、以下の式で与えられる。但し、 Δm はジェットエンジンが単位時間当りに排出する流体の質量、 V_{jet} はジェット流の速度、 $V_{a/c}$ は航空機速度である。また、燃料消費量は V_{jet} の2乗に比例する(燃料消費量 $\propto V_{jet}^2$)。

$$F = \Delta m \times (V_{jet} - V_{a/c})$$

ジェットエンジンが排出するCO₂の量は、燃料の消費量に比例する。燃料消費量は V_{jet} の2乗に比例し、一方、推力Fは Δm または $(V_{jet} - V_{a/c})$ に比例するため、燃料消費量が増える V_{jet} よりも Δm を増加することにより、推力Fを増加する方が燃料面で得策であり、CO₂排出量の削減に繋がる。このため、燃焼室内部に流入する空気量に対し燃焼室外部を流れる空気量を多くするターボファンエンジンが製作されてきた⁵³⁾。燃焼室外部を流れる空気量と燃焼室内部に流入する空気量との比率であるバイパス比は大型化が図られてきたものの、エンジン断面積の増加による空力抵抗の増加、ナセルの大型化による重量増加により、その利点が失われる状況になりつつあり、新たな方式が模索されている。米プラット&ホイットニー社が開発しているギアードターボファン(GTF)では、低速タービンとファンとの間に減速ギアを噛ませ、それぞれが最適速度で回転するようになっており、さらに

はバイパス比の大幅な増加のため、ナセルを取り払ってタービンの動翼を剥き出しにしたようなオープンロータの研究開発が行われている。オープンロータでは、動翼が剥き出しとなるため、このエンジンの設置場所、剥き出しの動翼が破損した際、機体に及ぼす危害と言った安全性の問題、組立および整備の際の作業性、剥き出しの動翼が発生する騒音など様々な課題を解決する必要がある、クリーンスカイでは、これら課題の解決のための取り組みがなされている。

c) 揚抗比(L/D)の向上

揚抗比(L/D)の向上のためには、乱流の発生を抑制して、機体周りに自然層流を実現する必要がある、クリーンスカイの高性能固定翼航空機ITDでは、飛行速度に応じて主翼周りに自然層流を実現するための研究開発が推進されている。現状の機体および主翼の形状(円柱状機体+翼)では、大幅な揚抗比の向上は望めないため、画期的な機体形状の導入が必要との考えもあり、飛躍的な機体周り自然層流を実現する「空飛ぶ翼(FW)」、「主翼混合型機体(BWB)」などが検討されている。NASAは2007米会計年度から、図表13に示す通り、米空軍およびボーイング社と協力して縮尺モデルのX-48B実験機の飛行実験を行っている⁵⁴⁾。乗客収容容積の増加が見込めるほか、エンジンを機体上部に配置することが可能であり、騒音低減効果も見込めるとされている⁵⁵⁾。

d) 代替燃料

燃料の単位質量当り高エネルギー化に関しては現状、ケロシンに勝るものは存在せず、可能性としては水素が考えられるものの、これに適合するためには航空機のみなら

ず地上設備の再構築が必要となるため、費用面で問題となる⁵⁵⁾。第3-3項の(1)の米国の例が示す通り、燃料の安定的確保のためには、代替燃料の導入が不可欠と考えられ、既存の航空機および地上設備との互換性がある「ドロップイン燃料」の開発が行われている⁵⁶⁾。ガス液化(GTL)に加え、バイオマス液化(BTL)がCO₂排出量の面から有望であるものの⁵⁷⁾、食物用植物を原料とするのは批判もあるため、食物用以外の植物、栽培面積の大幅な削減が見込める藻類を原料とするバイオ燃料とケロシンとを混合した燃料が開発されている^{44, 58)}。

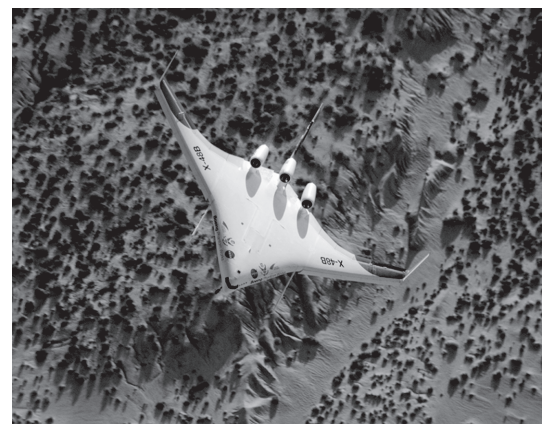
4-2

日米欧研究開発目標の比較

(1) 亜音速旅客機

日米欧の亜音速機研究開発プロジェクトにおける環境負荷軽減目標の比較を図表14に示す。なお、我が国の事例はエンジン単体の目標であるため注意が必要である。NO_xは、発生源がエンジンに限られるため、欧米の事例と単純に比較可能であるものの、騒音は、例えば、着陸装置が離着陸時の主要な騒音源であるため単純な比較はできない。また、欧州航空諮問委員会(ACARE)は、CO₂排出量削

図表13 X-48Bの飛行実験



出典：NASA

図表 14 日米欧の亜音速旅客機環境負荷軽減目標の比較

国・地域名	日本		欧州	米国		
	エコエンジン	クリーンエンジン	ACARE	N+1	N+2	N+3
名称						
実現時期 (年)	2010	2012	2020	2015	2020	2030-35
騒音マージン ^{注1)}	-20dB	-23dB	-30dB	-32dB	-42dB	^{注4)}
LTO NO _x 排出量 ^{注2)}	-50%	-80%	-80%	-65%	-78%	-78% 超
CO ₂ 排出量	-10%	-15%	-50% ^{注3)}	-33%	-40%	-70% 超

注1) ICAO Chapter4 基準値からのマージン, 注2) ICAO CAEP4 基準値からのマージン, 注3) SESAR による削減見込み量を含む, 注4) 55LDN (昼夜平均騒音レベル)

出典：参考文献 21、30、32、40)

減目標の配分値を機体で約 20～25%、エンジンで約 15～20%および ATM で約 5～10%としている⁵⁹⁾。

高温高圧燃焼による燃料効率の向上は、CO₂ 排出量の削減をもたらすものの、NO_x 排出量の増加に繋がるため、ある意味トレードオフの関係にある⁵⁵⁾。(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、NO_x 排出量の大幅な削減のため、燃料と完全燃焼に必要な量よりさらに多くの空気とを予め混ぜて燃焼させる「希薄予混合燃焼方式」を採用した「クリーンエンジン」の研究開発が進められており⁶⁰⁾、図表 14 に示す通り、NO_x 排出量削減では欧米に劣らぬ性能が達成できる見込みである。さらに研究開発を進め、国際競争力のある我が国の環境適合型エンジンが市場投入されることを期待したい。

(2) 超音速旅客機

日米の超音速機研究開発目標の比較を図表 15 に示す。超音速旅客機の実現のためには、第 3-1 項の(2)で述べた通り、巡航時の超音速飛行で発生するソニックブームの大幅な低減が重要な鍵となる。JAXA は、コンコルドと比べ大幅なソニックブームの低減を目指して、2010 年代中頃の飛行実験を計画しており、このような技術は、NASA の注目するところとなり、両機関は、ソニックブーム低減に関する共同研究を行っている⁶¹⁾。超音速機技術において、我が国が独自の技術を開発し、将来的には国際共同開発に対等な参加ができるようになることを期待したい。なお、ICAO は現在、超音速旅客機の環境基準を検討している⁶²⁾。

4-3

基礎研究・技術開発と製品開発

欧州連合(EU)の第7次研究開発枠組み計画(FP7)では、概ね基礎研究・実現可能性検討(TRL1～3)、技術開発(TRL3～5)および技術実証(TRL5～6)と技術成熟度の達成目標レベルに分けて、研究開発活動を実施しており、特にクリーンスカイ JTI では産学官連携の下、実際の製品開発が可能となるTRL6 またはそれ以上の技術成熟度を目指して、通常のFP7の研究開発活動とは異なる JTI の枠組みで技術開発・実証活動が実施されている。欧州航空産業界はクリーンスカイの技術開発・実証成果を受け継いで、実際の製品開発を行うことになる。

図表 15 日米の超音速旅客機研究開発目標の比較

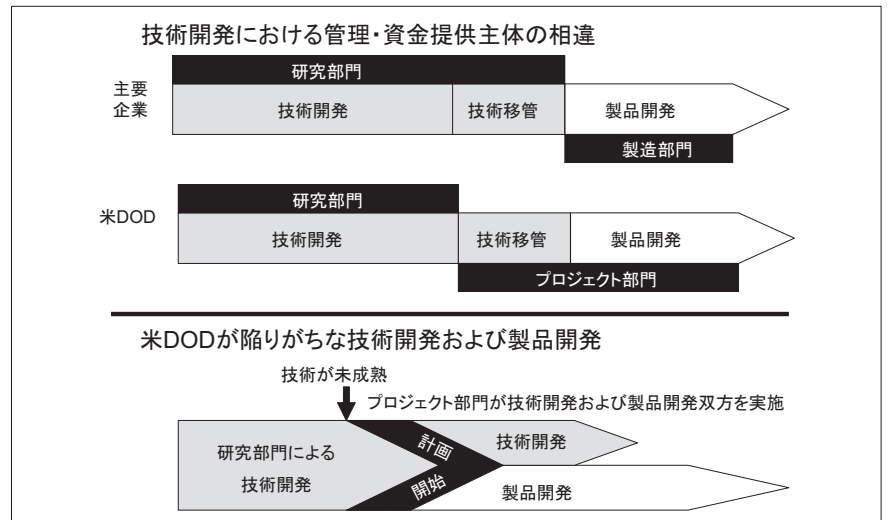
国名	英仏	日本	米国		
名称	コンコルド	静粛超音速研究機	N+1	N+2	N+3
実現時期 (年)	1976	2010 年代中頃	2015	2020	2030-35
巡航速度	M2.05	>M1.4	M1.6～1.8	M1.6～1.8	M1.6～1.8 ^{注5)}
航続距離 (哩) ^{注1)}	3,550	N/A	4,000	4,000	6,000
乗客数 (人)	100	N/A (無人)	6～20	35～70	100～200
ソニックブーム	2～3psf ^{注6)}	<0.5psf	^{注7)}	^{注7)}	^{注8)}
騒音マージン ^{注2)}	N/A	-α dB	0dB	0～-10dB	-10～-20dB
NO _x E _I ^{注3)}	約 20	N/A	(亜音速機並み)	<10	<5
燃料効率 ^{注4)}	約 2	N/A	1.0	3.0	3.5～4.5

注1) 哩=1.85km, 注2) ICAO Chapter4 基準値からのマージン, 注3) NO_x 排出指数：巡航時における単位燃料消費量当りの窒素酸化物排出量で、単位は gNO_x/kg 燃料, 注4) 乗客×マイル/lb 燃料, 注5) 低ブーム飛行時の値、飛行制限無しの場合は M2.0, 注6) 圧力の単位で、lb/ft²。1psf=47.88Pa, 注7) 65～70PLdB [“Perceived Loudness” と言う物理的な圧力ではなく、人間の聴覚で感じる騒音レベルで規定。ソニックブームの立ち上り時間、音響スペクトルに依存], 注8) 低ブーム飛行時、65～70PLdB。飛行制限無しの場合、75～80PLdB

出典：参考文献 40、63、64)

米連邦議会行政監査局(GAO)は、米民間企業における技術成熟度(TRL)などに基づいた研究開発手法と米国防総省(DOD)、米国航空宇宙局(NASA)などにおける研究開発手法との比較を行い、DODなどにおいてしばしば発生する開発費高騰、開発期間の遅延、仕様変更と言った問題を解決するための提言を行ってきており、最近では、図表 16 に示す通り、技術開発段階と製品開発段階との橋渡しである「技術移管」(Technology Transition)において、プロジェクト部門が明確な引渡し条件を設定することなく、製品開発段階への移行に適さないものまで含め、研究部門において技術開発が完了したとされる成果の移管を受けてしまっているため、開発費高騰、開発期間の遅延、仕様変更と言った問題が発生している事例もあると指摘している⁶⁵⁾。民間の主要企業と同様、明確な引渡し条件の下、製品開発に適用可能な技術成熟度となるまで、プロジェクト部門ではな

図表 16 GAO による技術開発・製品開発手法の比較

出典：参考文献⁶⁵⁾

く研究部門が技術開発を継続すべきとしている。

我が国航空産業の現状では、当然、産学官連携の下、環境適合型小型航空機研究開発の全段階において関係機関が一致協力する必要がある。しかしながら、将来的には、利害関係者間で合意されたロードマップに基づき、明確なインタフェース条件を定め、大学・研究

機関による基礎研究、(独)宇宙航空研究開発機構などの研究開発機関による技術開発・実証ならびに航空産業界による製品開発および製作・運用実績に基づくフィードバックという研究開発の全サイクルを回しながら我が国航空科学技術を発展・強化することが望まれる。

5 おわりに

我が国の環境技術は世界に冠たるものであるものの、民間航空分野については、YS-11以降約40年振りに小型ジェット旅客機の全機開発に着手した状況である。航空科学技術力をさらに向上し、航空輸送でも地球温暖化対策に対する我が国の貢献を強化したい。欧米では、超音速旅客機を含め、2020年頃およびそれ以降を視野に入れた中長期的な取組みが行われている。我が国においても、欧米と同様、中長期的視点での取組み

が重要であると考えられる。

航空科学技術の進歩は、地球大気中の活動に留まるものではない。NASAでは、超音速・極超音速研究開発の将来構想として、(1)シャトルのようなロケット推進系ではなく、空気吸込み式極超音速機を第1段とし、ロケット推進系の往還機を第2段とする2段式宇宙輸送系(TSTO)、(2)30トン程度の大規模構造物の希薄な火星大気圏突入・降下・着陸技術などの概念検討が行われている。航空科学技

術の発展は、地球の大気中からさらに地球周回軌道、火星などの惑星へと我々のフロンティア活動の拡大に繋がる。

謝辞

(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の鈴木和雄航空プログラムディレクターには、貴重なご意見・情報を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「飛翔 航空機産業公式ガイドブック」、財団法人 経済産業調査会 編、財団法人 経済産業調査会 発行、2008年7月10日 ISBN978-4-8065-2810-4 (127748)
- 2) 「希望をカタチにするためにJAXAが取り組んでいること：国産小型旅客機技術の研究」、石川隆司、航空プログラムニュース 2007年冬号 (No.03) : <http://www.apg.jaxa.jp/publication/magazine/2007/mag-2007.html>
- 3) 「近距離ジェット 世界で競争し烈」、日経産業新聞、2008年11月6日
- 4) 航空イノベーション研究会第1回シンポジウム「国産航空機開発への期待と課題～人材育成の視点から」(2008年10月30日、於東京大学安田講堂)における会場からの発言
- 5) “SBAC Aviation and Environment Briefing Papers 5: Emissions from Combustion and Their Effects,” the Society of British Aerospace Companies, May 1, 2008 : <http://www.sbac.co.uk/pages/92567080.asp>
- 6) “Summary for Policymakers: Aviation and the Global Atmosphere,” Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999 : <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf>
- 7) “Non-CO₂ climate change effects of aviation emissions,” Sustainable Aviation, November 2008 : <http://www.sustainableaviation.co.uk/images/stories/key%20documents/nonco2paper08.pdf>
- 8) “Rolls-Royce and the environment – Engine Technology,” Naresh Kumar, presented at the Omega Dissemination Conference, March 5, 2009 : <http://www.omega.mmu.ac.uk/omega-dissemination-conference-royal-society-london-4-5-march.htm>
- 9) EIC ネット環境用語集「放射強制力」: <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=2419>
- 10) “Technical Summary: Mitigation of Climate Change,” IPCC Working Group III, 2007 : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-ts.pdf>
- 11) “Climate Impact of Aviation,” Robert Sausen and Ulrich Schumann, in the ICAO Environmental Report 2007, International Civil Aviation Organization, 2007 : http://www.icao.int/icao/en/env/pubs/Env_Report_07.pdf
- 12) “Overview of ICAO Guidance on Emission Trading,” Andreas Hardeman and Kalle Keldusild, in the ICAO Environmental Report 2007, International Civil Aviation Organization, 2007 : http://www.icao.int/icao/en/env/pubs/Env_Report_07.pdf
- 13) “Climate change: Commission welcomes final adoption of Europe’s climate and energy package,” European Press Release (IP/08/1998), December 17, 2008 : <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/1998&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>
- 14) “Extending the EU Emissions Trading Scheme to Aviation,” David Batchelor, December 11, 2008, presented at the OMEGA Air Transport Emissions Trading Scheme Workshop : <http://www.omega.mmu.ac.uk/EU-ETS-presentations/2008-12-10%20Omega%20ETS%20Seminar%20David%20Batchelor.pdf>
- 15) “ETS and Aviation – Making it Work for Regulators and Operators,” Philip Andrews, presented at the OMEGA Air Transport Emissions Trading Scheme Workshop : <http://www.omega.mmu.ac.uk/EU-ETS-presentations/2008-12-11%20%20Omegas%20MRV%20and%20ETS%20PA%20Philip%20Andrews%20DECC.pdf>
- 16) “Sustainable Aviation CO₂ Roadmap,” Sustainable Aviation, December 2008 : <http://www.sustainableaviation.co.uk/images/stories/key%20documents/sa%20road%20map%20final%20dec%202008.pdf>
- 17) 「第3期科学技術基本計画：分野別推進戦略」、総合科学技術会議、2006年3月28日 : <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihon3/bunyabetu9.pdf>
- 18) NEDO HP「先進操縦システム等研究開発(2007年度までは環境適応型高性能小型航空機プロジェクト)」: <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p03029.html>
- 19) NEDO HP「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」: <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p03030.html>
- 20) 航空科学技術委員会(第28回)配布資料「国産旅客機高性能化技術の研究開発の進捗状況について」、(独)宇宙航空研究開発機構、2008年8月19日 : http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryu/013/08090310/001.pdf
- 21) 航空科学技術委員会(第28回)配布資料「クリーンエンジン技術の研究開発の進捗状況について」、(独)宇宙航空研究開発機構、2008年8月19日 : http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryu/013/08090310/002.pdf
- 22) 「独立行政法人宇宙航空研究開発機構の中期目標を達成するための計画(平成15年10月1日～平成20年3月31日)」

(独)宇宙航空研究開発機構、初版認可 2003年10月2日、最終変更認可 2007年3月30日：

http://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan_23.pdf

- 23) 「独立行政法人宇宙航空研究開発機構の中期目標を達成するための計画（平成20年4月1日～平成25年3月31日）」、(独)宇宙航空研究開発機構、2008年4月1日：http://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan_26.pdf
- 24) (独)宇宙航空研究開発機構の鈴木和雄航空プログラムディレクタとのインタビュー、2009年1月13日
- 25) 三菱重工ニュース「MRJ (Mitsubishi Regional Jet)の事業化を決定、事業会社『三菱航空機株式会社』を立ち上げ」、2008年3月28日発行第4691号：<http://www.mhi.co.jp/news/story/200803284691.html>
- 26) 航空科学技術委員会（第28回）配布資料「静粛超音速機技術の研究開発」、(独)宇宙航空研究開発機構、2008年8月19日：http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/013/08090310/004.pdf
- 27) JAXA HP「環境に優しい航空機技術の開発～クリーンエンジンと超音速機」：
http://www.jaxa.jp/article/special/aviation/index_j.html
- 28) JAXA 航空プログラムグループ HP：<http://www.apg.jaxa.jp/>
- 29) “European Aeronautics: A Vision for 2020,” the European Commission, January 2001：
<http://www.acare4europe.org/docs/Vision%202020.pdf>
- 30) ACARE HP：<http://www.acare4europe.org/>
- 31) “The Joint Technology Initiative for Aeronautics & Air Transport,” Bruno Stoufflet, presented at the Clean Sky Take-Off Forum, February 5, 2008：http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=111&set_language=en
- 32) “Work Programme 2008, Cooperation Theme 7, Transport (including Aeronautics),” European Commission C(2008)4598, August 28, 2008：ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/docs/wp/cooperation/transport/g_wp_200802_en.pdf
- 33) “Aeronautics 2nd Call – Level 1 and Coordination Actions,” Dietrich Knoerzer, February 6, 2008, presented at the FP7 Information Days for Transport：http://ec.europa.eu/research/transport/pdf/knoerzer_dietrich.pdf
- 34) “The Joint Technology Initiative for Aeronautics & Air Transport,” Bruno Stoufflet, presented at the Clean Sky Take-Off Forum, February 5, 2008：http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=111&set_language=en
- 35) “Smart Fixed Wing Aircraft – ITD,” Jens König, presented at the Clean Sky Take-Off Forum, February 5, 2008：
http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=111&set_language=en
- 36) “National Aeronautics Research and Development Policy,” National Science and Technology Council, Executive Office of the President of the United States of America, December 2006：
<http://ostp.gov/pdf/nationalaeronauticsrdpolicy06.pdf>
- 37) “National Plan for Aeronautics Research and Development and Related Infrastructure,” Aeronautics Science and Technology Subcommittee, Committee on Technology, National Science and Technology Council, December 2007：
http://www.aeronautics.nasa.gov/releases/aero_rd_plan_final_21_dec_2007.pdf
- 38) NASA HP：<http://www.nasa.gov>
- 39) NASA ARMD の HP：<http://www.aeronautics.nasa.gov/>
- 40) “Research Opportunities in Aeronautics – 2008 (ROA-2008),” National Aeronautics and Space Administration (NASA) Headquarters Aeronautics Research Mission Directorate, NASA Research Announcement (NRA) : NNH08ZEA001N, March 7, 2008：https://nspires.nasaprs.com/external/viewrepositorydocument/cmdocumentid=161741/ROA-2008_Amend%207_9Sept08.pdf
- 41) NASA ARMD の HP「ARMD NRA: Advanced Concept Studies Awardees」：
http://www.aeronautics.nasa.gov/nra_awardees_10_06_08.htm
- 42) “ATM’s Role in Implementing Environmental Performance,” Tom G. Reynolds, presented at the Omega Aviation Sustainability Short Course, June 17 – 19, 2008：
<http://www.omega.mmu.ac.uk/Short-Course-Presentations/06%20ATM%20Environmental%20Performance.pdf>
- 43) 「全日空、省エネ緊急対策」、日経産業新聞、2008年11月26日朝刊
- 44) 「気になる！航空業界 バイオ燃料が熱い」、読売新聞、2009年1月16日朝刊
- 45) “The Economic Impact of Civil Aviation on the U.S. Economy,” the Federal Aviation Administration, October 2008：
<http://www.faa.gov/about/initiatives/nextgen/defined/why/08%20economic%20impact%20report.pdf>
- 46) FAA の HP「NextGen Defined」：<http://www.faa.gov/about/initiatives/nextgen/defined/>
- 47) SESAR JU の HP：http://www.sesarju.eu/public/subsite_homepage/homepage.html
- 48) 「次世代運航システム DREAMS：空の交通安全を守る技術が変わり始めた」、航空プログラムニュース、2008年春号

- (No.08)、pp.2-5 : <http://www.apg.jaxa.jp/publication/magazine/2008/mag-2008.html>
- 49) “Fundamental Aeronautics Program Subsonic Fixed Wing Project Reference Document,” the National Aeronautics and Space Administration Aeronautics Research Mission Directorate :
http://www.aeronautics.nasa.gov/nra_pdf/sfw_proposal_c1.pdf
- 50) “Boeing 787 from Ground Up,” AERO, Fourth Quarter, 2006 :
http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article4.pdf
- 51) 「夢をかたちに～ JAXA 航空科学技術の成果」、(独)宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ、2008年8月31日
- 52) 「低コスト複合材を用いた航空機構造の研究」、JAXA 国産航空機プログラムチーム、航空プログラムニュース、2006年夏号 (No.01), pp.8-9 : <http://www.apg.jaxa.jp/publication/magazine/2006/mag-2006.html>
- 53) “SBAC Aviation and Environment Briefing Papers 3: Open Rotor Engines,” the Society of British Aerospace Companies, April 4, 2008 : <http://www.sbac.co.uk/pages/92567080.asp>
- 54) “X-48B Blended Wing Body Flight Tests Enter Second Phase (RELEASE: 08-21)”, NASA Aeronautics Research Mission Directorate, May 21, 2008 : http://www.aeronautics.nasa.gov/releases/05_21_08_release.htm
- 55) “Developments in Engine and Airframe Design,” Ian Poll, presented at the OMEGA Aviation Sustainability Short Course : <http://www.omega.mmu.ac.uk/Short-Course-Presentations/04%20Engine%20and%20Airframe%20Design.pdf>
- 56) “SBAC Aviation and Environment Briefing Papers 4: Alternative Aviation Fuels,” the Society of British Aerospace Companies, April 17, 2008 : <http://www.sbac.co.uk/pages/92567080.asp>
- 57) “Potential Effects of Alternative Fuels on Local and Global Aviation Emissions,” in the ICAO Environmental Report 2007, International Civil Aviation Organization, 2007 : http://www.icao.int/icao/en/env/pubs/Env_Report_07.pdf
- 58) “Alternative Fuels,” Chris Wilson, presented at the OMEGA Aviation Sustainability Short Course :
<http://www.omega.mmu.ac.uk/Short-Course-Presentations/07%20Alternative%20Fuels.pdf>
- 59) “2008 Addendum to the Strategic Research Agenda,” Advisory Council for Aeronautics Research in Europe, November 18, 2008 : http://www.acare4europe.org/docs/ACARE_2008_Addendum.pdf
- 60) 「クリーンエンジン技術の研究開発：環境への負担が少ない航空機エンジン技術を開発する」、林茂、航空プログラムニュース、2008年秋号 (No.10), pp.2-5 : <http://www.apg.jaxa.jp/publication/magazine/2008/mag-2008.html>
- 61) JAXA プレスリリース「NASA と JAXA におけるソニックブームモデリングに係る共同研究の実施について (日本語訳)」、米国航空宇宙局および (独)宇宙航空研究開発機構、2008年5月9日 :
http://www.jaxa.jp/press/2008/05/20080509_sonic_j.html
- 62) “Review of Supersonic Technology and Standards,” Kenneth Orth, in the ICAO Environmental Report 2007, International Civil Aviation Organization, 2007 : http://www.icao.int/icao/en/env/pubs/Env_Report_07.pdf
- 63) <http://www.concordesst.com/>
- 64) 「超音速機技術の研究開発の推進について」、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会、2007年7月 :
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/toushin/07071110.htm
- 65) “BEST PRACTICES: Stronger Practices Needed to Improve DOD Technology Transition Processes (GAO-06-883),” United States Government Accountability Office, September 14, 2006 : <http://www.gao.gov/new.items/d06883.pdf>

執筆者プロフィール



清水 貴史

推進分野ユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

宇宙開発関連業務に従事。科学技術動向研究センターでは宇宙開発を中心としたフロンティア分野を担当。

Science & Technology Trends

科学技術動向 4/2009



2009年4月号 第9巻第4号/毎月26日発行 通巻97号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター