

科学技術動向



科学技術動向研究

国際標準を担う人材育成について

国際標準に携わる人材育成への取り組みが世界各国で始まっている。我が国でも標準を戦略的に担う人材を育成していかなければならない。

P.1

P.10

各国の宇宙輸送システム開発動向

スペースシャトル退役がもたらす変化

米国・ロシア・欧州・中国の宇宙輸送システム開発競争に伍して、我が国はスペースシャトル退役後の宇宙ステーションへの物資補給に注力すべきである。

P.2

P.20

トピックス

ライフサイエンス分野

1 関節疾患の軟骨破壊に重要な役割を果たす ADAMTS-5 酵素

P.3

情報通信分野

2 チップ冷却技術開発における米国の新しい動き

P.4

環境分野

3 船舶に対する大気汚染規制の開始
4 遺伝子組み換え植物による土壌浄化技術

P.5

ナノテク・材料分野

5 電子デバイスの新たな道を拓く n 型ダイヤモンド半導体の合成

P.7

エネルギー分野

6 血液で発電するバイオ燃料電池の電極作成技術を開発

P.8

フロンティア分野

7 広範な地球惑星関連分野を網羅する「日本地球惑星科学連合」発足

P.9

ワークショップ報告

「数学の将来シナリオを考える」開催報告

2005年5月10日に科学技術政策研究所は、社団法人日本数学会と共催で、ワークショップ「数学の将来シナリオを考える」を開催した

P.31

国際標準を担う人材育成について

国際市場において、日本独自の標準に基づいた携帯電話機が苦戦を強いられ、また、アジア諸国が日本の家電製品の輸入を禁止するなどという事態も発生している。世界市場で競争優位性を確保する際の「国際標準」の重要性がいっそう増している。その一方で、多くの企業においてOJT（On the Job Training）による人材育成の行き詰まり感が見られ、国際標準に携わる人材の育成が困難になっているのが現状である。このような状況の下、諸外国は国際標準を担う人材育成を開始している。

日本においても、「知的財産推進計画 2004」で標準化に関する人材育成の必要性が述べられているなど、人材育成の必要性が認識されつつある。しかしながら我が国では、このような認識が直ちに具体的な人材育成プログラムの実施にはつながっていないという問題がある。大学教育においても、7大学に標準に関する専門科目があり、21大学で講義中に標準が取り上げられているものの、国全体としては一貫した取り組みがなされておらず、ばらばらに教育が行われているのが実情である。

日本全体として、国際標準を担う人材育成のための一貫した取り組みを行うためには、まず育成そのものについて議論すべき問題がある。それらは、①経済のグローバル化によって、標準の重要性が高まったにもかかわらず、その認識が不足していること、②標準に関わる戦略には、企業の戦略や財務、渉外など人材に求められる技能が多岐に渡ること、③標準の担当者が重んじられておらず、標準を扱う人材のキャリアパスが確立していないこと、④自分の組織を超えた枠組みやルール作り、それも時間のかかる戦略的な活動を行うことに対する評価や支援が日本においては少ないこと、⑤過去の日本がそうしてきたように、決まってしまった標準を取り入れ、標準に従うだけであれば高度な人材がそもそも不要であったこと、である。

標準に関わる人材教育の対象には、標準の作成に直接関わる人々だけでなく、標準の使用者、標準の維持制定に関わる政策担当者あるいは学識経験者、さらには、経営に標準化活動を活用していく企業戦略担当者、といった様々な層の人々が含まれる。教育に際しては、それらの対象を、一般層、標準を実務とする層、標準を戦略的に考える層というように分けて考える必要がある。①一般層への教育とは、標準を利用する一般の人々や将来標準に関わる青少年に、標準が人類の知的財産であり、今後とも改訂や制定のための努力が必要という基本的な理解を与えることである。②標準を実務とする層へは、標準を策定し、標準を規定する文書を作成し、標準を実施するなどの実務を行うための教育が必要である。この教育は、従来は企業内でOJTとして行われてきたものだが、現在の企業はOJTを行う余裕がなくなってきている。③標準に関わる戦略を担う人材の育成には、標準に関する現状の把握及び将来動向の理解と、それらを踏まえたうえでより望ましい状況を作り出す材料や方法論を教育することが必要である。

日本における国際標準に関する人材育成を奨励していくためには、現状の延長ではなく、具体的に目に見える形をもった「標準人材育成センター」ないし「標準戦略センター」の設立も有効であろう。このようなセンターには、戦略人材育成の教育カリキュラム開発や情報の集約・発信などの役割を担わせることが望ましい。また、当然ながら、産業界も含めて関連部門との連携が必要となるほか、育成した人材を積極的な活用を推進する必要がある。

各国の宇宙輸送システム開発動向 —スペースシャトル退役がもたらす変化—

我が国の基幹的な宇宙輸送システムである宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の HIIA ロケットは、2005年2月26日の7号機の打上げに成功し、6号機の打上げ失敗以来1年余りの足踏み状態をようやく脱した。また、米国航空宇宙局 (NASA) の宇宙輸送システムであるスペースシャトルも空中分解事故から2年余りを経て、打上げ再開が迫ってきた。しかしその間に米国は宇宙政策を変更し、多額のコストを要するスペースシャトルを10年以内に退役させる方針を明らかにした。

本稿では、最初にスペースシャトル退役の動きを紹介し、ポストスペースシャトル時代の宇宙輸送システムを①有人宇宙輸送システム、②国際宇宙ステーションへの物資補給、③使い切り型打上げロケット、④月以遠の深宇宙探査、⑤再使用型宇宙輸送システム、の5つに大別して、現時点で進行中の世界各国の開発・運用プロジェクトをトピック的に紹介し、世界的な開発競争の中で、我が国は宇宙輸送システム関連の施策をどのように考えるべきかを検討する。

まず、有人宇宙輸送システムでは、NASA は現在建設中の国際宇宙ステーション (ISS) の完成後、月・火星などの有人探査を目指す計画であり、そのための新しい有人探査機「CEV」を開発しようとしている。ロシアも「クリーベル」という新型の6人乗り宇宙船の開発を計画している。欧州でも、フランスとドイツが有人宇宙船の開発を競い始めている。中国も独自の有人宇宙飛行計画を着々と拡大しようとしている。

次に、国際宇宙ステーションへの物資補給輸送では、我が国の国際宇宙ステーション物資補給機 (HTV) と欧州の自動輸送機 (ATV) の開発が行われており、スペースシャトル退役後の ISS への物資輸送を我が国が独自の技術で担う可能性が高まってきた。我が国は2008年に HTV の技術実証機を打ち上げる計画であるが、欧州はそれに先立って2006年に ATV 初号機打上げを予定している。

一方、使い切り型ロケットによる衛星打上げでは、商業通信衛星の長寿命化などで打上げ需要が毎年20～30機と予想より少なくなっており、その中で有力な商業打上げ会社が受注を競っている。米国は発展型使い切り型ロケットで2種類の重量級ロケットを開発してきた。アトラスVは性能を下げた成功したが、デルタIVはまだ完成の域に達していない。また、打上げ競争の新たな参加者として、陸地に射場を持たないシー・ロンチ社が後発でありながら静止衛星打上げで着々と実績をあげている。中国も長征5号系列という新しい打上げロケットの開発に着手していることが注目される。我が国では、H-IIAロケットの民間移管により定常的な運用を確実に行うとともに、より大型の衛星の打上げが可能な H-IIA 能力向上型ロケットを開発すべく検討が行われている。

深宇宙探査では各国が月や火星へ探査機を打ち上げており、我が国でも小惑星の物質を採集して持ち帰る「サンプルリターン」という計画が進行中である。

エネルギー危機に対応した、宇宙太陽光発電衛星 (SSPS) は超大型の宇宙構造物であり、その打上げを効率よく行うには、運用コストが安い再使用型宇宙輸送システムの実現が必須である。再使用型宇宙輸送システムはこれまで各国とも失敗の連続でありながら、引き続き研究開発が行われている。

こうした各国の開発動向を踏まえて、我が国の宇宙輸送システムの今後の進め方として、① HTV の実用化、② 使い切り型ロケット技術の保持と発展、③ 再使用型宇宙輸送システムの開発を通じた基盤技術の育成、の3点を提案する。我が国では H-II 打上げ型宇宙往還機 (HOPE) の開発を凍結しているが、今後は小規模な繰り返し実証を通じて地に足のついた基盤技術の育成を目指すべきである。

変形性関節症および関節リウマチは、軟骨が破壊されて関節機能に障害をきたす疾患である。軟骨の破壊には、蛋白質分解酵素 ADAMTS に属する数種の酵素が関与するが、主原因の酵素は不明であった。今回、米国 Wyeth research 社の Glasson らは、ADAMTS - 5 が関節障害の発症に重要な役割を果たすことを明らかにし、2005年3月31日発行の Nature 誌に発表した。Glasson らは、ADAMTS - 5 酵素の遺伝子を欠損しているマウスを作成し、このマウスの膝の靭帯を外科的に切除して8週間経過後の軟骨の状態を観察した。その結果、別の酵素遺伝子 (ADAMTS - 4) を欠損したマウスの関節には摩耗が生じたが、ADAMTS - 5 欠損マウスでは摩耗は生じなくなった。オーストラリアのメルボルン大学の Stanton らも、同じ号の Nature 誌に ADAMTS-5 が関節症の発症に重要な役割を果たす可能性を報告した。これらは、関節疾患の予防や治療に対する薬物開発に重要な情報になると考えられる。

トピックス 1 関節疾患の軟骨破壊に重要な役割を果たす ADAMTS - 5 酵素

変形性関節症および関節リウマチは、プロテオグリカン (糖タンパク) やコラーゲンなどの関節の構成要素が変性することにより軟骨が破壊されて、関節機能に障害をきたす疾患である。どちらも年齢とともに発症頻度が増加し、高齢者人口の多い我が国では、変形性関節症は数百万人、関節リウマチは60万人以上が罹患していると想定されている。

関節軟骨は主に2型コラーゲンと、軟骨に特有の巨大なプロテオグリカンであるアグリカンから構成される。炎症や荷重の増大により関節軟骨が破壊され磨耗する際には、アグリカン分子の373番目のグルタミン酸と374番目のグルタミン酸の間で分解が生じることが知られている。この部位を分解する酵素としては、ADAMTS 注に属するメタロプロテアーゼである ADAMTS - 1、- 4、- 5、- 8、- 9、- 15 などが知られている。この内、特に ADAMTS - 4 と - 5 の分解作用が強いが、どれが軟骨の破壊に主原因な分子であるか明らかではなかった。

今回、米国マサチューセッツ州にあるバイオテクノロジー製品および医薬品開発企業である Wyeth research 社の Glasson らは、ADAMTS - 5 が関節障害の発症に重要な役割を果たすことを明らかにし、2005年3月31日発行の Nature 誌に発表した。

Glasson らは、ADAMTS - 4 と - 5 の遺伝子を欠損しているマウスを作成して、それらの酵素の関節軟骨に対する機能を検討した。それによると、膝の靭帯を外科的に切除した外傷性関節症モデルでは、手術から8週間後の観察で、遺伝子の正常なマウスおよび ADAMTS - 4 欠損マウスの関節軟骨に磨耗が示されたが、ADAMTS - 5 欠損マウスでは摩耗は生じなくなった。また、関節軟骨を摘

出して培養し、炎症を誘導する生理活性物質であるインターロイキン - 1 α で刺激すると、遺伝子が正常のマウスでは関節の基質が破壊されてプロテオグリカンの溶出が示されたが、ADAMTS - 5 欠損マウスの内、遺伝子型がヘテロ型 (2対の遺伝子の半分が欠損している) のマウスでは部分的な破壊が観察され、ホモ型 (2対の遺伝子の両方が欠損している) のマウスでは破壊はほとんど示されなくなった。

ADAMTS - 5 が炎症による軟骨破壊の主原因であるという結果は、オーストラリアのメルボルン大学の Stanton らからも同じ号の Nature 誌に報告されている。Stanton らも、ADAMTS 遺伝子欠損マウスを作成し、ADAMTS - 5 の関節炎への関与を調べるために、牛血清アルブミンの膝関節内への注射による関節炎モデルマウスを用いて実験を行った。

これらの荷重の異常や炎症による関節軟骨の破壊において、ADAMTS - 5 が中心的な役割を果たしているという強い証拠は、変形性関節症などの関節疾患の予防や治療に対する薬物の開発に重要な情報になると考えられる。

① ADAMTS (a disintegrin and metalloproteinase with thrombospondin-like repeat) : ディスインテグリン領域、メタロプロテアーゼ領域、I型トロンボスポンジンモチーフをもつ蛋白分解酵素。

参考 : Nature, vol. 434, p.644 - 648 および p.648-654 (2005)
産業医科大学 医学部 教授 中村利孝氏のご投稿より

2005年3月、米国のパデュー大学で開催された「Workshop on Electrothermal Co-Design of Future Electronics」で、パデュー大学をはじめとした8大学の研究者が共同で、最先端LSIチップの冷却問題に対応した新技術開発に特化したセンターの構築を提案した。チップの性能向上が発熱量の増大を招くため、今後10～15年で発熱が高性能チップ実現の大きな障壁になりうるとしている。将来のLSIチップは、冷却素子も統合された多層構造の三次元チップになると予想されるため、開発当初から回路や素子の設計者と冷却システムの開発者が協調することの必要性が訴えられている。8大学からの専門家で構成される予定のセンターの役割としては、①省電力素子の開発と設計による発熱の抑制、②新冷却技術、③設計自動化ソフトウェアなどの研究開発などが挙げられている。本センター構想は現在NSFに申請中であり、2006年6月からの運営を目指している。

トピックス 2 チップ冷却技術開発における米国の新しい動き

LSI（大規模集積回路、以降チップという）は、トランジスタ（Tr）や配線の微細化によって集積度と性能の向上を続けてきた。国際半導体テクノロジー・ロードマップ（ITRS）によると、高性能MPU/ASIC（マイクロプロセッサ／特定用途向け集積回路）の集積度と動作周波数は、2010年の45nmノード（ノード：最小配線ピッチの1/2）では20億Trで15GHz、2016年の22nmノードでは88億Trで40GHzにもなると予想されている。こうしたTr数や動作周波数の増加は消費電力の増加をもたらし、チップの発熱問題も顕在化する。過度の発熱は、チップの性能低下をもたらすとともに、繊細な回路の破壊などの問題を引き起こす。現在のチップ冷却法は、ファンやヒートシンクを組み合わせたものとなっているが、ITRSでは、ヒートシンクの冷却能力で対応できるチップの最大許容発熱量は、高々約200W程度と予測されている。今後のLSI開発で、発熱問題は大きな障壁となっており、その対策が急務である。

2005年3月に米国のパデュー（Purdue）大学で「Workshop on Electrothermal Co-Design of Future Electronics」が開催された。将来のチップ冷却の課題と挑戦すべき項目の明確化をテーマにしたこのワークショップには、インテル社、IBM社、HP社、ソニー（株）等約25の会社、DARPA等の政府機関および大学からの専門家が参加した。ワークショップの中で、パデュー大学をはじめとした8大学（Purdue大、Albany大、Minnesota大、カルフォルニア大Santa Cruz、同Santa Barbara、テキサス大El Paso、Puerto Rico大、Alabama A&M大）の研究者は共同で、最先端のコンピュータチップが今後10～15年に直面すると想定される冷却問題に対応

するための新技術開発に特化したセンター構築を提案した。ここでは、回路や素子の設計者と冷却システムの開発者がチップ開発当初から協調して設計することの必要性が訴えられている。現状では回路や素子の開発後に冷却部分の開発が行われているが、今後は協調設計で革新的な冷却素子をチップ内に盛り込むことが可能になるとしている。

将来のコンピュータのマイクロプロセッサでは、二次元のチップ形状は少なくなり、回路、素子そして小さな冷却素子が統合された多層構造の三次元立方体（cube）形状が多数を占めると想定されている。そのcubeは、冷却液を循環するマイクロチャネルや、人間の毛髪の半分程の幅で可動部を持たずに動くsolid-state refrigerator等も構成要素としており、提案者らは、これをICE-cubed（3-D integrally cooled electronics）と呼んでいる。

本センターの活動は、①省電力素子の開発や設計への注力による発熱の抑制、②新冷却技術の開発、③複雑な多層構造のICE-cubedプロセッサ開発に向けた多様なコンポーネントの最適配置を支援する設計自動化ソフトウェアの開発などを目指すもので、具体的には、小型熱センサ、電力供給システム技術、多様な冷却素子、冷却液を循環するための微小ポンプ、チップの発熱を利用した発電などが検討項目として挙げられている。また、本センターは、8大学からの専門家で構成される予定であり、学生の教育、大学・企業間の人材交流も意識している。

本センター構想は、現在、NSF（National Science Foundation）に申請中であり、ファンドが通れば2006年6月からの運営を目指す。

2005年5月19日、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」の改正が施行され、我が国初の船舶に関する大気汚染防止規制が開始された。この規制は、全世界の船舶からの大気汚染防止を目的とした、MARPOL73/78条約の1997年議定書の発効に伴うものである。日本国内の窒素酸化物、硫黄酸化物の総排出量のうち、船舶からの排出量が占める割合はそれぞれ33%、21%と報告されており、今回の規制はこれらの削減に向けて大きな意義がある。規制内容は、船舶からの窒素酸化物、硫黄酸化物はもとより、揮発性有機化合物、オゾン層破壊物質（ハロン等）および船舶での焼却物質の制限を対象としている。また、総トン数400トン以上の全ての船舶には定期検査が義務付けられることになった。本規制の開始により、船舶による大気汚染に歯止めがかけられることになる。

トピックス 3 船舶に対する大気汚染規制の開始

2005年5月19日、我が国において船舶に対しては初めての大気汚染防止規制が施行された。世界を航行する船舶に関する規制は、自国籍船にのみ規制を行っても大きな効果は期待できない。そのため、1997年、全世界の窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO_x）の対策として、船舶による汚染防止のための国際条約に関する議定書（MARPOL73/78条約）に「大気汚染防止のための規則（附属書VI）」を追加する97年議定書が採択された。この議定書は、締約国が15カ国以上、締約国の商船船腹量が総トン数で世界全体の50%以上に達した場合に発効するという条件があり、議定書の採択から7年後の2004年5月18日、サモアが15番目の批准国となったことで発効条件を満たした。なお、日本は2005年2月16日に批准した。今回、日本で施行される規制は、この議定書の発効（2005年5月19日）に伴ったものである。

全世界の船舶から排出されるNO_xとSO_xの量は、世界の総排出量に対して、それぞれ13%、6%と見積もられている。また、日本国内における船舶からの排出量比率はNO_x：33%、SO_x：21%と報告^(注1)されており、船舶による大気汚染の影響は小さいとはいえない状態である。今回の船舶に対する大気汚染規制は、環境施策として大きな意義がある。

日本で施行された「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」の改正の規制内容は、船舶からのNO_x、SO_xはもとより、揮発性有機化合物（VOC）、オゾン層破壊物質（ハロン等）および船舶での焼却物質を対象としている。また、総トン数400トン以上の全ての船舶は定期検査が義務付けられる。初回検査は、新船については完工時に、現存

船は2005年5月19日以降に予定されている最初の定期的入渠検査の完了日までに受検する必要がある（ただし、2008年5月19日を超えてはならない）。国際航海に従事する船舶に対して、検査の適合性が確認できれば、有効期限5年の国際大気汚染防止証書（IAPP：International Air Pollution Prevention）が交付され、国際航行が可能となる。また、議定書に批准していない国の船舶が日本へ入港する際にも、規制値の適合性が確認できる検査証明書が要求され、検査証明書を所持していない船舶に対しては、次回入港までに準備することが勧告される。本規制が開始されることにより、船舶からの大気汚染に歯止めがかけられることになる。

規制概要

規制対象	発生源	規制内容
窒素酸化物 (NO _x)	エンジン	排出基準適合エンジンに発給される国際大気汚染防止原動機証書（EIAPP：Engine International Air Pollution Prevention）が交付されたエンジンを搭載しなければならない。（定格出力が130kWを超えるディーゼルエンジンが対象。ただし非常用専用ディーゼルエンジンを除く）
硫黄酸化物 (SO _x)	エンジン (燃料油)	使用燃料の硫黄分濃度は、硫黄酸化物排出規制海域においては1.5%以下、それ以外の海域においては4.5%以下のものを使用しなければならない。
揮発性有機化合物 (VOC)	液体貨物	規制実施港湾を利用するタンカーに対して蒸気収集装置搭載を義務付けている。
オゾン層破壊物質 (ハロン等)	消火器、冷凍機等	排出の禁止。新規搭載の禁止。
船内発生廃物の焼却ガス	焼却炉	焼却物質の制限。技術基準に適合する焼却炉の使用。

(注1) シップ・アンド・オーシャン財団「船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査研究報告書」（1999）

植物の代謝機能を利用して環境汚染物質を吸収または無害化させることをファイトレメディエーション (phytoremediation) と言い、土壌汚染処理技術のひとつとして注目されて多くの企業や大学で研究が進められ、土壌汚染対策ビジネスの市場も拡大している。

最近、カリフォルニア大学バークレー校の植物微生物学の研究グループが、カラシナの一種に遺伝子操作を施すことで、毒性を持つ重金属のセレンを吸収する能力が、野性のものに比べて430%向上した結果が得られたと発表した。

ファイトレメディエーションは環境負荷が小さく低コストであり、浄化が可能な物質は水銀、鉛、カドミウム、亜鉛などの重金属、ウランその他の放射性物質、環境ホルモンなど多岐にわたることから、多くの企業や大学で研究が進められている。

トピックス 4 遺伝子組み換え植物による土壌浄化技術

植物の代謝機能を利用して環境汚染物質を吸収または分解させることをファイトレメディエーション (phytoremediation) と言い、土壌汚染処理技術のひとつとして注目されている。この技術は物理・化学的環境修復に比べて、コスト及び環境負荷の面で効果的であると期待されている。現在、重金属を内部に吸収蓄積する植物として400種類が知られており、これらの植物の一部はすでに産業で実用化されているものもあるが課題も多い。これまで米国の大学を中心に研究が実施されているが、日本でも2003年2月に土壌汚染対策法が施行されたことから、大学を始め建設業界や電力業界などでも研究が行われている。重金属などに対する土壌汚染対策のビジネスは、市場規模はまだ小さいものの確実に成長し続けており、米国では1998年には2,000万ドル程度だったものが、2005年までには3億ドル前後、我が国でも8億円にまで拡大すると試算されている。

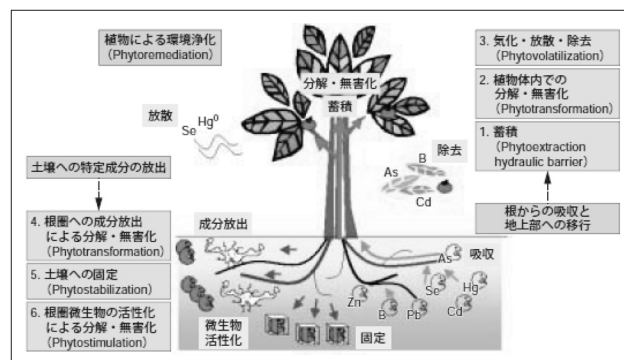
以前から、シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) の遺伝子を組み換え、土壌から砒素を吸収して葉に貯える能力を向上させる研究や、シダの1種が砒素を効率的に吸収するという研究成果がジョージア大学やフロリダ大学の研究グループから発表されている。最近、カリフォルニア大学バークレー校の植物微生物学の研究グループは、カラシナの一種に遺伝子操作を施すことで、毒性を持つ重金属のセレンを吸収する能力が、野性のものに比べて430%向上した結果が得られたと発表した。実験に用いたセイヨウカラシナは、成長が速く、汚染された土壌にもともと耐性を持つが、遺伝子操

作を施すことによって、通常より多くの汚染物質を体内に蓄積しても枯れないセイヨウカラシナを作り、セレンを無害な形に変える能力を向上させた。セレンは人間にとっても必須の元素とされているが、摂取過多になると中毒を引き起こすため、土壌からは除去しなければならない。

また、米 APGEN 社は、あるバクテリアの遺伝子をポプラの一種に注入し、汚染された土壌から水銀を吸収して害の少ない形に変えて大気中に放出する能力を持たせる研究を進めている。

ファイトレメディエーションは時間がかかるという欠点を有するが、浄化過程において環境負荷が小さく低コストである。浄化が可能な物質は水銀、鉛、カドミウム、亜鉛などの重金属、ウランその他の放射性物質、環境ホルモンなど多岐にわたることから、多くの企業や大学で研究が進められている。

ファイトレメディエーションに活用される植物の機能



出典：電中研報告 u00022「植物による環境修復(1)」吉原利一ら (2000) より引用

ダイヤモンドは、電子デバイスに応用された場合、電力制御、高周波特性、紫外線発光などで優れた性能が期待されている。電子デバイスを構成するには、電荷状態の異なるp (positive) 型とn (negative) 型の結晶を合成することが必須である。ダイヤモンド半導体に関しては、p型半導体は合成可能であったが、実用的なn型半導体の合成が得られていなかった。

2005年5月9日、(独)産業技術総合研究所は、マイクロ波プラズマ化学気相合成法によって世界で初めて実用的なn型のダイヤモンド半導体の合成に成功したと発表した。このダイヤモンド半導体を用いてp-n接合による紫外線発光素子を試作し、波長235nmの紫外線発光にも成功した。これまで原子レベルの平坦化が期待できる結晶面でのn型半導体膜の合成は極めて困難と考えられてきたことから、今回の成功はダイヤモンド半導体デバイス実用化への大きな前進と考えられる。この研究開発は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構委託事業と(独)科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業の支援を受けている。

トピックス 5 電子デバイスの新たな道を拓くn型ダイヤモンド半導体の合成

ダイヤモンドは弾性率や熱伝導率が大きいこと、広い光透過波長帯を持つこと、化学的に安定であること、絶縁耐圧が高いこと、またワイドギャップ半導体として電子デバイスに応用された場合、電力制御、高周波特性、紫外線発光などで優れた性能が期待できることなど数々の魅力的な性質を持っている。例えばパワー素子としてはその原理的な性能指数がシリコン半導体の15,000倍とも見積もられており、発光素子としては紫外線発光デバイスの実現も期待されている。

電子デバイスを構成するには、電荷状態の異なるp (positive) 型とn (negative) 型の結晶を合成することが必須である。p型ダイヤモンド半導体については、従来から結晶面の方位に制約されることなく合成が可能であった。一方、n型については、膜の平坦化が困難なため使いにくい(111)面の合成は可能であったが、より実用的な(001)面はリンなどの添加元素が入り込みにくいため、半導体化が不可能と考えられてきた。

このたび、(独)産業技術総合研究所ダイヤモンド研究センターの山崎聡総括研究員らは、マイクロ波プラズマ化学気相合成法により、実用的な(001)面のn型ダイヤモンド半導体を合成することに世界で初めて成功した(2005年5月9日発表)。合成した膜は、ホール効果の温度変化の測定により、n型ダイヤモンド半導体であることが確認され、また、この技術を使って良好なP-N接合を形成し、波長235nmの紫外線発光にも成功した。

ダイヤモンド膜の合成は、結晶品質がシリコン半導体と同程度であること、表面が原子レベルで平坦であること、リンなどのドーピング原子が均一に入り込んでいること、などの条件が同時に満たさなければならない。今回の(001)面のn型半導体合成は、①リン原子の取り込みは合成速度に強く依存し、合成速度を速めることで取り込み率を上げることができ、②リン原子の不活性化をもたらす合成時の表面欠陥は合成速度が速まると増加する傾向にあること、等を考慮し、かつ、③合成時の気相中のリン濃度を極めて高くすることにより成功した。

今回合成したダイヤモンド膜では、まだ、結晶欠陥やリン以外の不純物の混入などによるリン原子の不活性化が起こっていると考えられ、今後の課題としては、これらを改善し、さらにキャリア濃度、移動度を向上させ、性能を高めていくことが必要である。

この研究開発は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構委託事業ナノテクノロジープログラム/次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料技術「ダイヤモンド極限機能プロジェクト(平成15~17年度)」、(独)科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CRESTタイプ)「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製/高密度励起子状態を利用したダイヤモンド紫外線ナノデバイスの開発(平成13~18年度)」の支援を受けて行なわれたものである。

燃料電池の開発が世界的に進む中、水素ではなく、血液中の糖分（グルコース）を使って発電する新しい小型燃料電池の基礎技術を、東北大学大学院工学研究科と第一化学薬品(株)の研究グループが開発した。分子シミュレーション技術を用いて、分解酵素反応を効率よく電極反応に連携させるメディエータの分子設計を行うとともに、炭素電極への生体触媒塗布技術を開発して体内物質に近いビタミン K3 を電極表面に膜として固定した。牛の血清を血液に見立てた基礎実験を行った結果、1 円玉サイズの電極で約 0.2mW 相当の電力を発生させることができた。

今後は、電池の寿命や生体への適合性を向上させ、体内埋め込み型医療用具の電源などへの応用を目指していく。将来的には、糖尿病患者の体内に埋め込んで使う次世代血糖値センサーの電源や心臓ペースメーカーの電源としての利用が期待できる。燃料電池の医用デバイスへの新しい展開として注目される。

トピックス 6 血液で発電するバイオ燃料電池の電極作成技術を開発

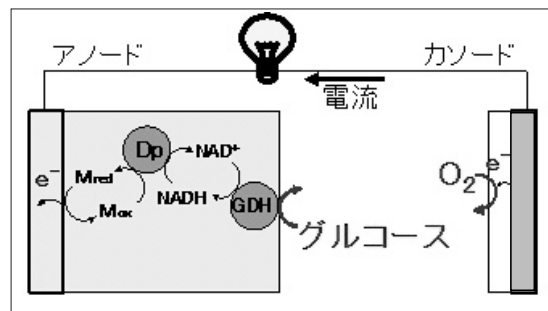
燃料電池の開発が世界的に進む中、東北大学工学系大学院と第一化学薬品(株)の研究グループは、血液中の糖分を使って発電する新しい小型燃料電池の基礎技術を開発した。一般に、燃料電池は水素から電子を取り出して発電する仕組みであるが、東北大学らのグループは、体内埋め込み型医療用具の電源などを想定して、水素の代わりに血液中の糖分を利用する燃料電池を検討してきた。

今回開発した電池は、血液中の糖分（グルコース）を水素の代わりに使って、酸素と反応させて発電する仕組みになっている。糖分から電子を取り出す分解酵素（生体触媒、図中の Dp、GDH）をうまく働かせるために、体内物質に近いビタミン K3 などを利用した。これらは、分解酵素から電極への電子の移動を仲介する役割を担うもので、メディエータ（図中の Mox、Mred）と呼ばれる。上記の研究グループは、まず、分子レベルのシミュレーション技術を用いて、分解酵素反応を効率よく電極反応に連携させるメディエータの分子設計を行った。それとともに、分解酵素とメディエータを炭素電極へ塗布する技術を開発した。分解酵素とメディエータは、電極表面のポリマー膜内に固定され、分解酵素が糖分から電子を取り出すときに電流が流れる。牛の血清を血液に見立てた基礎実験を行った結果、1 円玉サイズの電極で約 0.2mW

相当の電力を発生させることができた。

生体触媒を用いたバイオ燃料電池は、温和な生理的環境下でも駆動可能である。本研究開発は、体内埋め込み型医療用具の電源などへの応用を目指しており、そのためには今後、電池の寿命や生体への適合性を向上させる技術開発が必要である。関連技術が十分に進歩すれば、例えば、糖尿病患者の体内に埋め込んで使う次世代血糖値センサーの電源や心臓ペースメーカーの電源として適用できる可能性がある。燃料電池の医用デバイスへの新しい展開として注目される。

バイオ燃料電池の原理



Dp、GDH：分解酵素、Mox：メディエータの酸化体、Mred：メディエータの還元体（メディエータは分解酵素と電極をつなぐ物質で、ここではビタミン K3）
 東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻：西沢・阿部研究室ホームページ：http://www.biomems.mech.tohoku.ac.jp/research_enzyme_devices.html より

2005年5月22～26日、地球環境や惑星探査などに関する地球惑星関連学会2005年合同大会が開催され、特に地震関連の発表が大幅に増加し、口頭発表の1/3近くを占めた。

また、この合同大会の開催期間中に、地球物理学・地質学・鉱物学・地理学など広範な地球惑星科学分野に関連する24学会（延べ総会員数3万7,000名）から成る「日本地球惑星科学連合」の設立が発表された。この連合組織は同分野の対外的な窓口組織として位置づけられ、今後は国や一般社会に対して、科学者の意見を集約した形での提言や情報発信を行なっていくことが期待されている。日本学術会議との連携強化、初等・中等教育における理科教育への対応、一般市民を対象とした教育・啓蒙・アウトリーチ等の活動も行われる予定である。

連合設立は、2005年10月に予定されている日本学術会議の改革に対応するものであり、学協会に所属する科学者の意見を俯瞰的に集約して政策提言を行おうとする動きを先取りしたものである。地球惑星科学の研究者からの声が政策に反映されやすくなることが期待される。

トピックス 7 広範な地球惑星関連分野を網羅する「日本地球惑星科学連合」発足

2005年5月22日から26日まで千葉市・幕張メッセ国際会議場において地球惑星関連学会2005年合同大会が開催され、口頭発表1,300件以上、ポスターセッション900件以上の参加があった。地球環境や惑星探査など多数のセッションが同時進行する中で、地震関係の発表が昨年より大幅に増加し、口頭発表件数で約400件と3分の1近くを占めたことが注目される。これは、中越地震、スマトラ地震、福岡地震など、最近連続して巨大地震が発生したことも大きな要因であるが、地球惑星科学に関連する分野の中で、測位学・地質学・火山学・海洋学・水文学・地球電磁気学など地震学に隣接する領域の研究者が地震に関係する発表を多数行っていることにもよる。このように、地震のテーマだけを見ても幅広い議論が行われていることがこの大会の特徴である。

この期間中に同会場において、地球惑星科学関連学会のユニオンとなる「日本地球惑星科学連合」（代表＝浜野洋三・東京大学教授）の設立が発表された。これまで、地球惑星科学の研究者は専門的な学会に分かれて個別に活動を行っていたため、他の分野の大規模な学会と比較して、科学技術政策への提言、社会への情報発信、理科教育問題への対応などが効果的に行えないという傾向があった。地球惑星科学関連学会の学会長の間では、2005年10月に予定されている日本学術会議の改革

に合わせて、地球惑星科学分野の窓口組織を一本化する必要性が認識され、昨年からの検討を重ねた結果、今回、連合設立が合意されたものである。

発足時の加盟学会数は24で、延べ会員数は37,000人であるが、現在加盟を検討中の学会も複数あり、今後さらに増える見通しである。

連合は、これまで合同大会運営を通じて築いてきた連携の基盤に立ち、地球惑星科学コミュニティの運営と意見集約を行う。具体的には、地球惑星科学に関わる国際学協会との連携及び国際プロジェクトへの対応、地球惑星科学に関わる年次研究発表集会の開催及び国際会議等の企画・開催、ニューズレター誌の発行、などの活動を行う。また、対外的な情報発信の活動としては、日本学術会議や総合科学技術会議に対する政策提言、初等・中等教育における理科教育に関する提言、報道機関に対する広報活動、インターネットを用いた地球惑星科学の啓蒙普及活動、一般向けの公開講演会の開催、出前授業やマルチメディア授業の実施、などの活動も検討されている。

このような地球惑星科学関連学会の積極的な動きは、日本学術会議の改革に呼応しており、学協会に所属する科学者の意見を俯瞰的に集約して政策提言を行おうとする動きを先取りしたものである。地球惑星科学の研究者からの声が政策に反映されやすくなることが期待される。

国際標準を担う 人材育成について

黒川 利明
客員研究官

1 はじめに

「国際標準 (international standards)」^① という言葉は、誰もがどこかで聞く言葉だが、それが具体的に何を指すかと言うことについては、各人各様の解釈がある。例えば、ISO ネジに代表されるような機械部品の形状などを思い浮かべる人がいるかもしれない。あるいは、ISO9000 という品質管理プロセスに関するマネジメント標準を考える人もあるだろう。ISO9000 は、具体的な工業製品に関するものではなく、広くサービスまで含めて事業体 (役所など、公共的なものも含めて) における品質保証への取り組みのプロセス (手続き) を規定している。商取引に用いられている交換文書の形式、最近では、eXML のような電子的交換形式の標準もある。さらには、材料についての標準もある²⁶⁾。本稿では、これらすべてを取りまとめて、国

際標準あるいは単に標準と呼ぶ^②。

本稿では、JABEE などのようなカリキュラム標準は直接には扱わないことにする。理由の第1は、それらが産業標準の場での議論になっていないからである。第2の理由は、JABEE などの高等教育に関しては、カリキュラム標準それ自体を別途十分に論じるだけの必要性があると思うからである。ただし、もちろん国際標準を担う人材教育をカリキュラム標準へ組み入れることを考慮する必要はあり、本稿でもその例を紹介する。

さて、国際標準は、1906年のIEC (International Electrotechnical Commission) 創立から数えて、少なくとも百年弱の歴史があり、現在では、標準を支配すれば産業を支配できると言われるほど重要性が認識されている¹⁾。このような歴史があるにもかかわらず、現時

点で、国際標準を担う人材育成という主題を改めて取り上げるのには、3つの理由がある。

第1に、経済および産業のグローバル化が挙げられる。すなわち製品が全世界を対象にして、全世界で作られるようになっており、その中で国際標準の重要性が増している。すなわち、世界市場での競争優位性確保という点で、国際標準が非常に重要になっている^{2, 25)}。端的には、WTO (世界貿易機関) の「貿易の技術的障害に関する協定 (TBT 協定)」³⁾ に見られるように、国際標準が国内標準に優先するようになってきている。携帯電話機の市場で、日本企業は国内標準のPDC (国内のデジタル無線通信方式) に長期間対応してきたため、現在、苦戦を強いられている。これに反して、欧州から発したGSM (100ヶ国以

■ 用語説明 ■

① International Standard(s)

国際標準。国際規格という訳語もある。国際的な標準化団体 (Standard Development Organization) が定めた標準をいう。代表的な標準化団体には、ISO、IEC、ITUがある。ITUは国際連合の下部機関だが、ISOやIECは、非政府の非営利団体である。これらは、構成要員が世界中の国または地域を代表し、国際的な合意のための手続きを備えており、正当な (de jure) 標準を作成する。国際的に通用しているものであっても、de facto 標準、もしくは、団体標準 (コンソーシアム標準とかフォーラム標準と呼ばれることもある。) は、こういう国際的な正規の手続きを取っておらず、そのために、de jure 標準と区別される。ただし、団体標準が国際標準化団体の所定の手続きを経て、de jure 標準になることがある。

② standard

一般用語としての基準、規範、尺度という意味ではなく、国家ないしは団体が定めたものを特に「標準」と呼ぶ。“standard”の訳語には「規格」が宛てられることもある (例えば、平凡社の世界大百科)。一部の辞書では、「標準規格」という訳もある (例えば、プログレッシブ英和中辞典)。一般に、標準は、関係者の合意によって定められるもので、関係者の選定に始まり、その合意のための手続きが定められている。ただし、そういう手続きを経ないで、広く行き渡っているという意味での「事実上の標準 (de facto standard)」もある。

上で利用されているデジタル無線通信方式)は世界に普及し、欧米・アジア企業に有利な状況になってきている。アジア諸国におけるTBT協定遵守の動きは、極端な例としては、国際標準でない日本の二槽式電気洗濯機の輸入禁止というような事態まで招いた^{4, 26)}。

理由の第2には、日本国内の企業における人材育成の場の変化、すなわち、従来のOJT (On the Job Training) による人材育成の行き詰まり感がある。人材の専門化と短期的な利益指向のために、標準に携わる人材を長期的に育成することが多くの企業で困難となっている。人材育成に注目が集まるのは、標準の位置づけが変化しているためでもある。経済と産業のグローバル化は、企業の販売や調達だけでなく、技術開発においても新しい側面をもたらした。国際標準が確立することによって、製品やサービスの対象が全世界の顧客に広がり、大量生産による利点を享受できるようになる一方で、技術開発段階から国際標準への配慮が必要になっている。特許などの知的財産においても言われていることであるが、個別の製品あるいは部品開発の都度に標準

化をどうするか検討するのではなく、企業体の将来像や目標を含めた大きな戦略の中で、世界を視野に置いた標準化への取り組みを適切に位置づけておいて、その枠組みの中で個別の研究開発や販売調達で標準をどう扱うか決定する必要がある⁵⁾。

第3の理由は、社会的見地における変化である。例えば、アクセシビリティに関する標準のように、現行の法制度を補完するソフト・ロー³⁾として、さらには、諸外国との不必要な摩擦を避け、社会的な負担を引き下げるといったようなことも標準に期待できるようになってきた。日本だけでなく欧米においても、標準に関する人材育成の問題と対策が大きく取り上げられるようになったの

は、ごく最近の話である⁶⁾。標準の新しい位置づけに伴う人材不足は、日本だけでなく世界的な規模で生じている。

標準のレベルには様々なものがあり、例えば、社内標準から始まって、業界標準、国内標準、EUなどの地域標準、さらに、ISOやIECなどの国際標準までいろいろとある。本稿で扱うのは、グローバル化の必要性と言う背景から、あるいは、日本がどちらかと言うと苦手としているという側面からも、国際標準である。しかし、人材教育の内容は、社内標準等に携わる人材にも関わってくる。なぜならば、内部標準をより広い外部の標準とどう関連させるかは、常に問われる課題の1つだからである。

■用語説明■

③ soft law

訳語は未だ無く、そのまま「ソフト・ロー」と使われている。これは、国家による強制力がなく、自主的に遵守されることによって実現されるルール(規範)をさす。ただし、企業や個人の恣意に委ねられたものではなく、遵守することによる利益享受、遵守しないことによる経済的不利益、社会的批判がある。標準、行動規範(コード)、自主規制などがその例としてあげられる。遵守しないと罰則や行政処分を科される法律であるhard law(ハード・ロー)と対比してこう呼ばれる²²⁾。“Voluntary Codes”という呼び名もある²⁴⁾。また、道路運送車両法、建築基準法、電気用品安全法、食品衛生法などは、標準をハード・ローの中で用いているため、単純に標準=ソフト・ローとは言えない。

2 諸外国における標準を担う人材育成

2 - 1

北米での動き

(1)米国での動き

米国における産業標準は民間主導であり、それが他の諸国との大きな違いであると言われてきた。これは、米国における諸政策が民間からの提案及び議会の主導によって決定されてきたということを考えれば、米国における他の政策上の活動とむしろ合致している。標準の活動のみが特に民間主

導であるというわけではない。米国商務省及び国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: 略称NIST)の活動、ならびに、軍部における軍用標準(MIL)への関与などを考えれば、米国内でも、産業の標準化は国の関与が大きい活動と言える。歴史的にも、米国における標準は、政府の働きかけ及び戦時体制に対する軍部の要請によって普及してきたという歴史がある⁷⁾。

2004年5月に発行された米国商務省の「結果を出すための標

準及び競争⁸⁾」という報告では、2003年3月から商務長官Donald Evansが主導した標準の推進活動(Standards Initiative)をさらに押し進めるために、新たに4つの政策と2つの長期的戦略が述べられている。その長期的戦略の1つが、科学技術及び経営の両学部において、標準に関するカリキュラムを拡充することとなっている。もう1つは、新技術の研究開発において大学とパートナー関係を樹立し、新技術開発の初期段階から標準に対する影響力を行使すること

である。そのような米国の大学における産業標準に対する活動の代表例としては、首都ワシントンにあるカソリック大学 (The Catholic University of America) の世界標準研究センター (The Center for Global Standard Analysis) があり、これは 1999 年から活動している。ここでの受講者は法学もしくは工学の履修者となっており、文理融合の事例ともなっている。卒業者は、企業、標準化団体、米国特許庁を含む政府機関、及び法律事務所に採用されている⁹⁾。

しかしながら、同センターから出されている 2004 年 3 月付けの調査報告¹⁰⁾ によれば、米国の工学系大学において、標準に関する講義

を行っているのは、上記カソリック大学、コロラド大学ボルダー校 (2004 年 9 月からはコース廃止)、メリーランド大学の 3 大学に過ぎない。ビジネススクールにおいては、過去に標準に関する講義が提案されたことはあるが、実際には採用されていないと言う¹¹⁾。

(2)カナダでの動き

カナダにおいては、カナダ規格協会 (Canadian Standards Association : CSA) 及びカナダ標準局 (Standard Council of Canada : SCC) が中心となり、カナダ標準戦略 (Canadian Standards Strategy : CSS) の中の重要戦略の一環として、人材教育を取り上げている。2004 年

1 月に CSA と SCC は、カナダ技術者教育認定機構 (Canadian Engineering Accreditation Board : CEAB) の政策委員会 (Policies and Procedures Committee) に、学部カリキュラムの検討を行うことを提案し、受け入れられた。その内容は、①標準を技術系のカリキュラムに取り込むための要件、②標準に関する情報へのアクセス、③大学教官の標準への関与、の 3 項目からなる。さらに、SCC の 2005 年から 2008 年にかけてのカナダ標準戦略の更新版では、標準研究センター (Canadian Center for Standardization Research) の設置が検討されている¹²⁾。重点大学としては、University of

図表 1 標準に関連したコースのある欧州の大学

国	大学	主目的(教育/研究)	コース分類 (文系/理工系)
ドイツ	Technical University of Aachen, Computer Science Dept., Informatik IV	研究	理工系
	Dresden University of Technology, Department of Economics	部分教育・研究	文系
	University Erlangen-Nürnberg Faculty of Law and Technics	研究	文理融合
	J.W. Goethe University Chair of Economics, esp. Information Systems	専攻教育・研究	文系
	Universität der Bundeswehr Hamburg Department of Standardization and Technical Drawing	専攻教育・研究	理工系
	University of Hamburg, Institute of SocioEconomics (IAW)	専攻教育・研究	文系
	Fraunhofer Institute, Systems and Innovation Research	研究	文系
ギリシャ	Aristotel University of Thessaloniki, Union of Hellenic Scientists for Prototyping and Standardization	部分教育・研究	理工系
リトアニア	Kaunas University of Technology, Economics and Management Faculty	部分教育・研究	文系
	Klaipeda University, Marine Technology Faculty	部分教育	理工系
マルタ	University of Malta, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering	部分教育・研究	理工系
スウェーデン	Stockholm School of Economics, Center for Organisational Research (SCORE)	研究	文系
オランダ	Delft University of Technology, Faculty of Technology, Policy and Management	専攻教育・研究	MoT
	TNO Institute for Strategy, Technology and Policy Studies, Information and Communication Technology Policy	研究	文系
	Eindhoven University of Technology, Faculty of Technology Management	専攻教育・研究	MoT
	Erasmus University of Rotterdam Management of Technology and Innovation	専攻教育・研究	MoT
英国	University of Sussex, Science and Technology Policy Research	研究	MoT
	University of Edinburgh Research Centre for Social Sciences/Technology Studies Unit	研究	文系
	Queen Mary Intellectual Property Research Institute, Centre for Commercial Law Studies, Queen Mary, University of London	部分教育	文系
	University of Manchester, Manchester Business School	部分教育・研究	文系

「部分教育」とは専門教育の中で部分的に標準についても教えるもの。「専攻教育」とは標準に関する教育の専用コースがあるもの。このほか、EURAS (The European Academy for Standardization) という学会が、ハンブルグを本部に 1993 年に設立されている¹⁴⁾。さらに、次項で述べるように、アジアの大学と協働してカリキュラムを作ろうとする Asia Link Project もある。

ウェブ上の情報¹³⁾をもとに科学技術動向研究センターで翻訳作成

Western Ontario、University of Ontario、Queens University、University of Waterloo が挙げられている。また、CSA においては、メンバーの教育プログラムを 1998 年から独自に実施しており、2004 年 8 月現在で伸べ 1,300 人を超えるメンバーが受講している。

2 - 2

欧州での動き

欧州委員会 (The European Commission) の企業総局 (Enterprise and Industry DG) では、標準化活動を重要な政策の 1 つとして捉えている。歴史的に見ても、商行為を含めて、複数の国にまたがった標準化のための活動は、まず欧州において始まった。複数の言語や制度の中で、共通の標準をどうするかという問題は、欧州で最初に取り上げられ、それが南北アメリカ、アジア、アフリカを含めた世界に拡大されてきた。

欧州委員会企業総局の標準化活動支援の一環として、大学とのネットワーク作りがある。大学とのネットワークに関する専用のウェブサイトが作られており¹³⁾、このウェブサイトには、標準に関連したコースのある欧州の 20 大学が挙げられている。それらを図表 1 に示す。このようなネットワーク構築の目的としては、①大学での意識向上、②大学及びその他機関との協働促進、③情報交換、及び④知識及びアイデアの交換普及が挙げられている。

2 - 3

アジアでの動き

経済発展途上にあるアジア諸国においては、工業標準が産業政策の重要な柱の 1 つとして認められている。2003 年に北京で開かれた「中日韓第 2 回東北亜標準協力セミナー」においては、三国間の協

図表 2 韓国の標準に関する教育の実施大学

大学	取り組み (理工系 / 全学)
KOREA University	理工系
Catholic university of DAEGU	理工系
DAEBUL University	全学
PAICHAI University	全学
SILLA University	全学
YONSEI University	理工系
WONKWANG University	理工系
CHUNG-ANG University	理工系
HANSHIN University	理工系
HANYANG University	理工系
Catholic Sangji College	理工系
KANGWON National University	理工系
KUNKUK University	理工系
Gyeongju University	全学
Kyung Hee University	全学
KWANGWOON University	理工系
FAR EAST University	理工系
Kumoh National Institute of Technology	理工系
NAMSEOUL University	理工系
Dongduk Women's University	全学
DONG-EUI University	全学
Seokyeong University	全学
SEOUL National University of Technology	理工系
SEOUL Women's University	理工系
Sungkyunkwan University	全学
SoonChunHyang University	理工系
Ajou University	理工系
Yongsan university	理工系
Chonbuk National University	全学
JEONJU University	全学
Chungju National University	理工系
Korea Maritime University	理工系
HONGIK University	理工系

資料¹⁷⁾に基づいて科学技術動向研究センターで一部翻訳

力覚書の第 6 番目の項目に、標準化人材育成計画が含まれ¹⁵⁾、欧米の大学との共同研究の動きも始まった。さらに、2004 年 12 月に東京で開かれた日中韓第 3 回東北亜標準協力セミナーでは、韓国から「2004 年度には、理工系大学で標準化ゼミを 11 大学で実施した。2005 年度については 30 大学が応募している。対象は、大学 2 年生

から 4 年生。標準を専門とする教授が居ないので、企業や研究所の標準に関する担当者からなるチーム編成での講義を行っている。さらに、高校生を対象とした標準教育を検討中。これには、高校教師に対する標準のための教育も学校が休暇中に行う予定である」という口頭発表があった。このセミナーの終了後に取り交わされた協

図表3 日本における大学での標準に関する教育の実施状況

大学	実施状況	対象学部あるいは学科科目
麻布大学		獣医学部、環境保健学部
大阪大学		共通科目、「新しい物質の化学」
御茶の水女子大学	実施予定	
金沢工業大学		技術倫理
関西学院大学		大学院総合政策研究科「技術移転論」
吉備国際大学		政策マネジメント学部 知的財産マネジメント学科
近畿大学	実施中	システム工学科、国際標準政策論
九州大学		農学部、土壌関係、食品関係の分析方法、大学院医学研究院「知的財産の保護」
神戸大学		海事科学部では、国際条約に基づく海洋汚染防止、海技資格制度等に関連する授業科目
静岡県立大学大学院		経営
静岡大学		情報学部、コンピュータネットワーク
静岡理工科大学		「電子部品工学」
実践女子大学	実施中	生活科学部食生活科学科、食品に係る国内及び国際標準
千葉大学	実施中	国際交流科目、国際標準
東海大学		工学部、特許戦略
東京大学		工学部（安全評価）、農学部食品科学「JAS」
東京海洋大学		海洋工学部流通情報工学科、「インターモーダル輸送論」「在庫管理論」「流通情報システム設計論」；海洋科学部海洋食品科学科、JAS；「食品流通の安全管理専門技術者養成コース」で検討中
東京工業大学		電子機能システム 科学技術特論
東京農工大学	実施中	専門職大学院、「工業技術標準」「標準化戦略論」
東京理科大学		総合科学技術経営研究科 知的財産戦略専攻
東洋大学	実施中	経営学研究科
長岡技術科学大学		機械安全工学
名古屋工業大学		ながれ領域
名古屋大学		大学院環境学
奈良先端科学技術大学院大学	実施中	学際領域特論
日本大学		生物化学資源部
一橋大学		大学院商学研究科、商学部、大学院法学研究科
広島大学	過去に実施	
北陸先端科学技術大学院大学	実施中	技術標準化論
早稲田大学	過去に実施	経営、競争戦略論
山形大学	実施予定	
横浜国立大学		工学部電子情報工学科、「電気法規・施設管理」

実施状況の空欄のものは、対象学部あるいは学科科目の講義内で標準についても教えられている、という状況を示す。
 科学技術動向研究センターで作成

4 標準を担う人材育成における問題点

標準を担う人材育成の議論では、次のような問題点を議論する必要がある。

まず、本稿の「1.はじめに」で述べたように、近年、標準を担う人材育成が注目されている理由

は標準化の位置づけが変化してきているためであるにもかかわらず、そのような変化が認識されていないことが問題点の第1となる。①経済のグローバル化によって製品やサービスの対象が全世界

の顧客に広がり技術開発段階で、標準への配慮が必要になったこと、②将来像や目標を含めた大きな戦略の中で、世界を視野に置いた標準化への取り組みを適切に位置づける必要が生じたこと、③社

会的には、現行の法制度を補完するソフト・ローとして標準が使われることなどというふうには、標準の位置づけそのものが変化してきたこと²²⁾を、多くの人々に正しく認識してもらう必要があるこの点は、知財やCSR（企業の社会的責任）などに関する人材育成などとおそらくは同様の議論になる。

第2の議論の焦点は、標準を担う人材とは、そもそもどのような技能を持つ人材を指すのかという点にある。従来、例えばプログラミング言語の標準に関わる人材とは、コンパイラ技術の専門家のことであり、言語標準の仕様を検討し、自社のコンパイラをどう作ればよいか考えるのがその役割だった。しかし、現在必要とされるプログラミング言語の標準を担う人材とは、プログラミング言語の設計段階で、その用途や動作環境、開発環境等を考え、標準化による市場の拡大確保による利益と標準化のために必要なコストを見積もり、標準化作業に協力してくれる団体や企業のめぼしをつけ、さらには関連する知財についての処理を考慮することができる人材でなくてはならない。標準に関する人材に要求される能力は、CSRのようなマネジメント標準の場合なら、企業の経営戦略から財務、渉外と非常に広範囲なものになる。しかし、技術標準の場合でも、プログラミング言語の例で述べたように広範囲の問題を扱えなければならない。すなわち、これらの人材には、技術分野だけでなく法律や管理の業務、さらには、外国語による交渉力まで要求される。そのような多方面の技能を備えたスーパーマンのような人材は標準に関わらずあらゆる分野でニーズがあると思われるが、その中でも標準に関わる人材として本質的な技能は何なのかを明確化していく必要がある。

第3は人材育成に常に付きまと

う問題だが、キャリアパスの問題である。少なくとも日本国内の組織では、標準が重要とみなされている業界においてすら、標準の担当者は重んじられていないという傾向が見られる。現在及び過去の人材に対する処遇の仕方、さらには現在及び過去の人材が自分たちをどう位置づけてきたかという結果によるものであるため、急激に変化することは望めない。しかし、基本的には、組織体、すなわち企業や国家等において、標準をどう位置づけるか、そして、そのための人材をどう処遇するか、という問題をどの程度重要と考えるかという第1の議論に帰着する。このことは、第4に、そもそも、国際標準のような自分の所属する組織の範囲を超えた大きな枠組みやそこでのルール作り、それも時間のかかる戦略的な活動をするこゝに対する評価や支援が、日本においては少なかったことが挙げられる²³⁾。そのため、そういう人材のキャリアパスがないのではないかという上記の第3の懸念にもつながる。極端な意見は、これらすべての原因を日本人の国民性に帰着させるものだが、それでは何も生み出せない。時間のかかる戦略的な視点の導入とその活用は、標準に限らず他の分野でも必要である。

第5に、組織が標準に対してどのような立場をとるかという選択の問題がある。これは、第1の問題点とも重なる部分があるが、標準においては、過去の日本がそうしてきたように、決まってしまう標準を取り入れ、従うだけでよいという選択肢がありうる。国際標準を必要とする国際企業は、標準に関する人材を必ずしも日本で調達する必要はない。また、未だ直接は国際標準を必要としない国内企業は、標準に関する人材を必要としていない。そのときには、以下に論じるような人材育成など不要となる。この問題点につい

ては、さらに若干の補足が必要であろう。例えば、独創的な技術の開発では、他人がその技術を受け入れるかどうかを気にする必要はない（もちろん、その技術の普及のためには、標準を含めて広く受け入れられるようにしなければならない）。一方、標準においては、大多数がその標準を受け入れて従わない限りは、標準を作成した効果が発揮されない。したがって、標準の策定は、独創的な技術開発とは異なる意味での困難を伴い、これはまた、標準における「偉人」が見つかりにくいということにもつながるだろう。すなわち、標準の策定は、個人ではなく、チームで作業することが基本となる。ここで、標準を担う人材育成は、その役割がリーダーであるのか、それとも従うだけであるのか、によって育成コストが大きく変動する。これはとりもなおさず、組織が標準に対してどのような立場をとるかという選択の問題になる。

残念ながら、上に示した5つの問題に対して、世界共通の解答を見出すことはできない。例えば、第3のキャリアパスの問題は、日本の組織運営や人事の問題に関わるため、簡単に解決できる性格のものではない。一方、欧米では専門職が様々な場で存在しているから、標準の専門家やコンサルタントが素直に受け入れられる素地があり、日本とは逆にOJTで現場から標準の専門家を育てるという発想も必要ない。また、人材育成は、畢竟「国家百年の大業」であるから、即効を求めることもできない。あらゆる事柄が大きく変動する現代において、100年後の「国家の柱石」を育てるにはどうすればよいかについて、意見の一致など求めるだけ無駄だろう。このような状況で取りうる1つの方策は、様々な人がそれぞれの考えで、次代を担う人材の開発に努めていくことしかないだろう。本稿

では、このような問題点を前提として、そのうえでなお、標準に関する人材開発を具体的に支援するために出来ることを提案してい

きたい。次項では、教育カリキュラムについての検討を行うが、このような教育カリキュラムの整備は、これから標準に関する人材育

成を積極的に進めていこうとする国々、例えば中国などでも検討されていることである。

5 人材の層に応じた教育内容の検討

5 - 1

人材の層に応じた教育の必要性

標準に関わる人材教育の対象には、標準の作成に直接関わる人々だけでなく、一般大衆を含めた標準の使用者、標準の維持制定に関わる政策担当者あるいは学識経験者、さらには、経営に標準化活動を活用していく企業戦略担当者、といった様々な層の人々が含まれる。これらのあらゆる層の人々を対象にしようとするならば、教育の内容は、標準を規定する文書の作成・配布に関わる技術、会議運営を含めた標準の作成過程に関わる技術、各技術分野の研究開発、知的資産の取り扱い、法律や制度、さらには、企業などの経営における標準の取り組み方、といった多岐に渡る内容が必要となってしまう。実際には、人材の層や種類に応じた教育内容を検討していかねばならない。その種類分けには、大学での文系、理系という分類に応じた、経営層と技術層という分け方もあるが、ここでは、一般層、標準を実務とする層、標準を戦略的に考える層という分け方を用いることにする。このように分けて検討する理由には次の3つが挙げられる。まず第1に、欧米やアジア諸外国と比して特に日本に欠けているのは標準に関する戦略を担う人材だから、そういう戦略を担う人材の教育を他の層と分けして考えるべきである。第2に、特に戦略的な部分では、従来の文

系・理系という区分けは有効ではない。また、第3に、前述したように日本で従来行われていたOJTによる標準の実務者の養成が行き詰っているためである。

5 - 2

一般教育

どのような分野においても、裾野としての一般教育は重要である。標準に関する一般教育の対象は、標準を利用する普通の人々だが、将来、標準に関わる青少年も含まれる。

諸外国で現在、標準に関する一般教育に積極的に取り組もうとしているのは、高校段階でのコースを2006年度から取り入れようとしている韓国だけである。しかし、今後は、他の多くの国でも組み込まれていくものと思われる。この一般教育においては、標準の常識的な知識だけでなく、標準が人類の知的資産であり、今後とも改訂や制定のための努力が必要なものだという基本的な理解が望ましい。

5 - 3

標準に関する実務教育

標準に関する実務教育とは、具体的に標準を策定し、標準を規定する文書を作成し、標準を実施するなどの実務を行うための教育である。すでに述べたように、従来の標準に関する実務教育は、企業などでOJTとして行われてきた。しかし、現在、多くの企業内では

OJTを行うだけの余裕がなくなってきた。一方で、世界的な競争激化という環境変化を考えれば、効果的に標準実務を行うには、専門教育を受けた人材が必要になる。

標準に関する実務教育を受けた人の活躍する分野は、主として、研究開発や商品開発などであろう。実務の中には、標準に関する戦略との関わりもあり、実務と戦略との両方を兼ねる人もいるだろう。

実務の基本は、世界に通用する交渉力であり、それは、論理と手続きをどれだけ自分たちが守り、周りの人に守らせるかである。基礎的な部分としては、次のような項目が必要だろう。

- 論理的な思考と発表力
- 交渉における手続き的な処理
- 技術英語及び会議・交渉での英語力
- 自分の主張を関係者に納得させる技術

さらに、具体的な標準の策定に当たっては、次のような内容が必要となる。

- 標準団体に特有のマネジメントの理解
- 特定分野に関わる標準団体についての理解
- 競合企業、関連企業との標準作成における競合及び協力を進める力
- 日本では、JIS作成のための用語や手続きの理解、及びJIS作成作業のためのツール類の学習

標準を戦略的に考える層への教育

ここでいう教育の対象となる層は、標準の実務経験者と他の分野の戦略担当経験者との2種類に大別できる(標準も戦略もまったく扱った経験のない層への教育は、難しいだろう)。標準を戦略的に考えるように教育された人々の活躍する場は、広くは、国家あるいは地域レベルでの標準のための戦略とその施策、業界や産業団体での標準のための戦略、企業経営での標準に関する戦略が必要な場から、もう少し実務に近い、知的財産戦略の枠内での標準に関する戦略、商品開発での標準に関する戦

略が必要な場まで様々である。

目標吟味、実施施策、施策評価などと言った一般的な教育部分を除けば、標準のための戦略的な教育とは、標準に関する現状の把握及び将来動向の理解と、現状と動向を踏まえた上で、望ましい状況を作り出すという解決策を作り出すための材料や方法論、さらにはそれらの実技の習得ということになるだろう。ここで言うような教育においては、技術面の習得や適合性確認など一部を除いて、ほとんどの場合、対象の社会的側面が強いため、実験というものを行なうことができない。その代わりに、実際には、戦略の事例研究が学習上の大きな役割を果たすだろう。

また、理解すべき現状及び動向の対象としては、標準の作成団体、

標準に関する国家戦略、ソフト・ロー、ハード・ローを含め法規範としての標準、世界市場での標準、知的財産戦略との関連、研究開発戦略との関連、商品開発戦略との関連、標準を策定するコストと効果、独自標準(内部標準)のリスクと効果などが挙げられる。

しかし、どのような対象を想定する場合においても、標準に関する戦略を日本の教育で行ううえで最も重要なことは、標準が他から与えられるものではなく、自分たちで作る、あるいは、変えていくものだという基本認識を教育することである。この認識が無ければ、どの標準を選ぶか、あるいは、いつ受容するかという判断だけで終わってしまう。

6 終わりに

標準に対する戦略は、科学技術の出口での知的資産管理という側面から、特許戦略などと同じように、科学技術振興に必須の課題である。標準については、グローバル化に伴う市場の変化だけでなく、法制度に関わる面でも、以前より格段に重要な位置を占めるようになってきている。この問題意識を持って本稿では、国際標準を担う人材教育について、世界及び日本の現状を紹介し、標準に対する人材教育における問題点を指摘した。さらに、人材教育の内容を、一般層、標準の実務層、標準を戦略的に考える層という3つの層に分けて論じた。

標準そのものももちろんであるが、標準に関する人材育成も、戦略的に取り組む必要がある。歴史的に見たときに、日本のこれまでの取り組みは、個別の標準問題への対処に追われて、戦略的な取り組みという面ではアジア諸国にも遅れをとっていたのではなからう

か。アジアにおいては、韓国に代表されるような新興工業国が標準の戦略的価値に着目して、国家主導で人材育成に注力している。欧米諸国のなかで米国は、大学での標準に関する人材育成が遅れており、日本同様に企業内でのOJTによる人材育成にも陰りが見えている。しかし、米国ではその間隙をコンソーシアムの活発な活動やフォーラムなどNPOによる標準化活動と各種コンサルタントが埋めている。

日本においても、標準に関する人材育成は「知的財産推進計画2004」などで奨励され、図表3に示したように、大学での標準に関する授業が行われている。しかしながら、国として人材教育を推進する担当者が不明確であり、実態の把握も行われておらず、各大学での講義内容もまちまちである。つまり、日本では、標準に関する問題意識が具体的な人材育成プログラムの実施にはつながっていない。

い。結果として、標準の戦略的活動に携わる専門家は相変わらず不足しており、実務担当者についても後継者が育たないという問題を抱えている。

このような問題を解決するには、現状の延長ではなく、具体的に目に見える形をもった「標準人材育成センター」のようなものの設立も有効だろう。特に、日本がこれから必要とする標準に関する戦略の人材育成に焦点を当てるには、「標準戦略センター」のような名称の方がふさわしいかもしれない。その役割は、例えば次のようなものである。

- 戦略人材育成の教育内容の開発
- どのような層の人に対してどのような教育が提供されているかという情報の集約
- 標準に関する各種事例のデータベース
- 標準を担う人材のキャリアパス開発

●これらの情報の積極的発信

上記の問題を解決して人材の積極的な活用を進めていくには、当然ながら、産業界を含めて関連する多くの部門との連携も必須であり、また、育成した人材を積極的な活用を推進する必要がある。

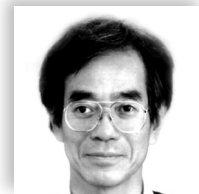
謝 辞

本稿をまとめるに当たり、以下の方々に、貴重な資料のご提供、ご示唆、ご意見をいただいた。深く感謝申し上げたい（以下、敬称略）。Donald Purcell（The Catholic University of America）、John Hill（Sun Microsystems, Inc.）、Jan van den Beld（ECMA International）、Alan Wilson（Standards Council of Canada）、Stephen Brown（Canadian Standards Association）、Tineke Egyedi（Delft University of Technology）、Willfried Hesser（Helmut-Schmidt-University, University of the Federal Armed Forces, Hamburg）、Henk de Vries（Erasmus University）、Danbee Kim（Korean Standards Association）、高柳誠一（前 IEC 会長、(株)東芝）、山田英夫（早稲田大学）、栗原史郎（一橋大学）、松本恒雄（一橋大学）、藤代尚武（経済産業省）。また、日本の大学における標準の教育に関わるアンケートでは、科学技術専門家ネットワークの多数の方の協力を得た。

参考文献

- Deming, W. Edwards, Out of Crisis, MIT Press, 1986.
- 土井教之編著、技術標準と競争—企業戦略と公共政策、日本経済評論社、2001年
- TBT 協定については、日本工業標準調査会の次のホームページ：<http://www.jisc.go.jp/cooperation/wto-tbt-guide.html> に詳しい解説が載っている。
- 藤田昌宏・河原雄三、国際標準が日本を包囲する なぜ自らルールを作らないのか、日本経済新聞社、1998年
- 山田肇、技術経営、NTT 出版、2005年
- De Vries, Henk J., Standardization education, in Manfred J. Holler (Ed.) (2005) EURAS Yearbook of Standardization, Vol. 5, pp. 71 - 91, 2005.
- 橋本毅彦、〈標準〉の哲学 スタンダード・テクノロジーの300年、講談社選書メチエ 235、2002
- Standards & Competitiveness : Coordinating for Results - Removing Standards-Related Trade Barriers Through Effective Collaboration, U. S. Department of Commerce, May 2004. pre-print は http://www.technology.gov/reports/NIST/2004/trade_barriers.pdf から入手できる。
- 電子メール、Donald Purcell, 2005/5/14.
- Report on A Survey of Schools of Engineering In the United States concerning Standards Education, The Center for Global Standard Analysis, The Catholic University of America, March 2004.
- 電子メール、Donald Purcell, 2004/12/07.
- Alan Wilson, personal communication via email, 2005/4/14
- http://europa.eu.int/comm/enterprise/standards_policy/academic_network/index.htm
- <http://www.euras.org>
- 中日韓第2回東北亜標準協力セミナー（北京2003）協力覚書、日本規格協会、2003
- 第3回東北亜標準協力セミナー（東京2004）協力覚書、日本規格協会、2004
- 電子メール、Korean Standard Association 4/7/2005
- http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/SNEWS/MARCH_2005/kang_mar05.html?L+my
- <http://www.asia-link-standardisation.de/>
- ISO Focus, April 2005 : <http://www.iso.org/iso/en/commcentre/isofocus/index.html>
- <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/titeki2/kettei/040527f.html>
- 松本恒雄、企業の経営システムと標準化 CSR（企業の社会的責任）が目指すもの、標準化と品質管理、56、11、11 - 15, Nov. 2003
- 谷島宣之、なぜ日本は「標準」でリーダーシップを発揮できないのか、IT Pro 記者の眼、2005/03/04 : <http://itpro.nikkeibp.co.jp/free/ITPro/OPINION/20050303/156983/>
- Kernaghan Webb, Voluntary Codes : Private Governance, the Public Interest and Innovation, Carleton Research Unit for Innovation, Science and Environment, October, 2004
- 栗原史郎 + 竹内修、21世紀標準学、日本規格協会、2001年
- 緒形俊夫・玉生良孝、材料の国際標準化からみた国際戦略の現況と課題、科学技術動向 No.28、特集2、2003年7月

執 筆 者



客員研究官

黒川 利明

株式会社 CSK CSK フェロー

<http://www.csk.co.jp/index.html>

東芝、IBM を経て現職。プログラミング言語、オブジェクト指向、メタデータなどの標準化に従事。システム開発の上流工程、サービス科学にも関心がある。

各国の宇宙輸送システム開発動向

—スペースシャトル退役がもたらす変化—

辻野 照久
総括ユニット

1 はじめに

2005年2月26日、国土交通省は運輸多目的衛星新1号(MTSAT-1R)をH-IIAロケット7号機により打ち上げた。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発したH-IIAロケットは、2003年11月の6号機打上げ失敗以降、1年3ヶ月に亘り足踏みを余儀なくされていたが、MTSAT-1Rの静止トランスファ軌道(GTO)への投入成功を足掛かりにして再出発することになる。

一方、米国の宇宙輸送システム

もスペースシャトル・コロンビア号の空中分解事故により運用中断が続いていたが、2005年7月に打上げ再開を予定しており、ようやく復活の途についたところである。しかし、その間の米国の宇宙政策の変化により、今後10年以内にスペースシャトル退役という事態を迎える見通しである。

本稿では、最初にスペースシャトル退役への動きを紹介し、これを受けたポストスペースシャトル時代の宇宙輸送システムを、①有

人宇宙輸送システム、②国際宇宙ステーションへの物資補給、③使い切り型打上げロケット、④月以遠の深宇宙探査、⑤再使用型宇宙輸送システム、の5つに大別し、現時点で進行中の世界各国の開発・運用プロジェクトをトピック的に紹介する。

最後に、このような世界的な開発競争の中で、我が国は宇宙輸送システム関連の施策をどのように考えるべきかを検討したい。

2 スペースシャトル退役の動き

スペースシャトルは1980年にコロンビア号の打上げで華々しく運用が開始された。スペースシャトルは正式名称を「宇宙輸送システム」(STS)といい、帰還してくる機体を「オービタ」という。オービタは合計5機製造された。これまでの飛行回数は100回以上に及んでいる。

米国航空宇宙局(NASA)は、文字通りあらゆる宇宙輸送を行うためのシステムとしてスペースシャトルを開発した。そのコンセプトは、人と貨物を同時に宇宙へ輸送し、何回でも再使用ができ、着陸後1ヶ月程度でまた飛行できるというものであった。当初は4機のスペースシャトルで年間数十回の打上げを目指していた。

しかし、実際に運用が始まってみると、たちまちこの計画は挫折した。再突入の際に耐熱タイルが甚だしく損傷し、その修復に時間がかかるため、1ヶ月程度での再打上げは到底できなかった。また、繰り返し運用の考慮が十分でなかったことから、コストは当初予想したより2ケタ近く高くなってしまった。最近では年間40億ドルで8機の打上げがせいぜいであった。1機100億円から200億円程度で打上げができる使い切り型ロケットに全く及ばないコストであったため、衛星打上げ専用のミッションは1992年以降行われていない。

スペースシャトルはこれまでに2回の重大事故を起こし、オ

ービタ2機が失われた。1986年1月28日、チャレンジャー号は打上げ直後に固体ロケットブースタ(SRB)のOリングの隙間から燃焼ガスが噴き出し、これが発端になって液体推進薬が隙間から爆発して、7名の搭乗員の生命を失ったことは米国の宇宙開発にとって大きな打撃であった。打上げ再開は1988年9月で、再開準備に2年8ヶ月を要した。チャレンジャー号の代替オービタとして製造されたエンデバー号は、1992年5月に初飛行を行った。2003年2月1日、今度は米国テキサス州の上空で着陸を目前にしたコロンビア号が空中分解し、搭乗員7名が死亡した。原因は左翼前縁の強化炭素複合材(RCC)パネルが打上げ

時に外部タンクから落下した断熱材で一部破損し、その部分から再突入時に機体内部に高温の空気が侵入したことによるとされる。事故の調査及び今後の対策がまとまり、2005年7月から打上げが再開されることになった。

米国・欧州・日本・ロシア・カナダが国際的に協力して建設を

進めている国際宇宙ステーション (ISS) 計画では、構成要素 (モジュールやトラスなど) はスペースシャトルとロシアのプロトンロケットで打ち上げられることになっている。このうち、日本や欧州の実験モジュールはスペースシャトルでなければ打上げができない。このため、米国は、ISS が完成す

るまでは国際約束を果たすためにどうしてもスペースシャトルを運航させておく必要がある。しかし、ISS 完成後はなるべく早期にスペースシャトルを退役させ、搭乗員輸送と物資輸送を分離して、より効率的な新しい宇宙輸送システムに移行しようとしている。

■用語説明■

繰り返し使用されるスペースシャトルの固体ロケットブースタ (SRB)

SRB は燃焼を終えて分離投下された後、海上から回収され、鉄製の構造であるため推進剤を再度充填して再使用することができる。一方、我が国のH-IIAロケットのSRB-Aはフィラメント・ワインディング (FW) で形成された構造体の中に推進剤を充填しており、燃焼後は構造体の強度が大幅に低下するため、再度使用することはできない。

オゾン層に影響を与えるSRBの酸化剤

SRBの推進剤は、燃料と酸化剤の原料をミキサで混合して成形・凝固させて製造する。この酸化剤は成分に過塩素酸塩 (perchlorate) を含むため、SRBの排出物がオゾン層を破壊するという報告もある。2005年2月、米国環境保護庁 (EPA) は、過塩素酸塩の公式な参照用量を0.0007mg/体重kg/日に設定した。

3 有人宇宙輸送システムの開発動向

3 - 1

米国の有人探査機 (CEV)

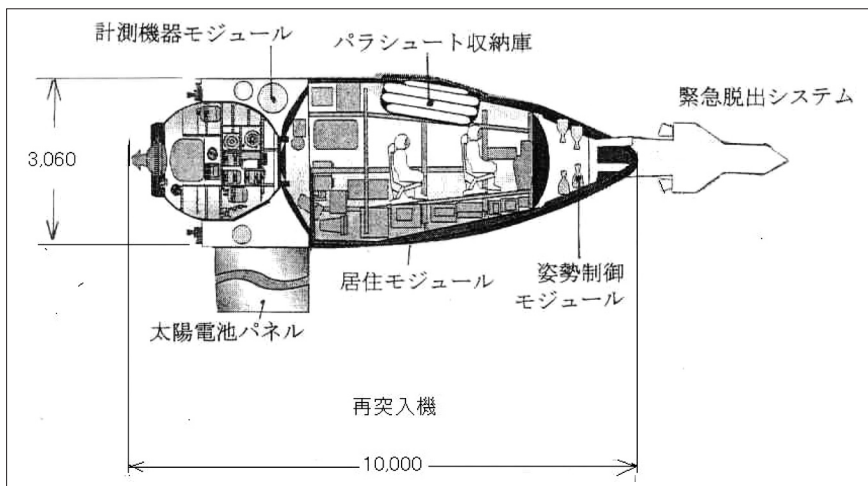
NASA は、スペースシャトル退役に先立ち、地球低軌道飛行から火星の有人探査まで可能にする有人宇宙輸送システムとして、有人探査機 (CEV) を新たに開発することを計画している。当初は、2014年までにCEVによる有

人実証飛行を達成し、2015年から2020年までの間に有人月探査を実施するという目標を設定していたが、その後、NASAのグリフィン長官は飛行実証を2010年に前倒ししたい意向を示している。

2005年3月、NASAはCEVの開発を2005年9月から2008年12月までの期間に実施すべく、提案要請書 (RFP) を発出した。これに対し、5月2日の締切日ま

で2つのグループから応募があった。ロッキード・マーチン社が主導するコンソーシアムは6人乗り・有翼型の構想を提案した。一方、ボーイング社はノースロップ・グラマン社や欧州のアレニア・スパツィオ社などと連合して、3つのモジュールが宇宙でドッキングする方式を提案した。NASAは今後これらの提案を審査し、2005年9月には契約相手方が決まる予定である。

図表1 リフティングボディ型クリーペルの断面図¹⁾



原図 © Anotly Zak

3 - 2

ロシアの新型有人宇宙船開発動向

2004年11月、ソユーズ有人宇宙船などを製造・運用しているロシアのRKK エネルギア社は、KIS 試験基地において次世代の有人宇宙船「クリーペル」(КЛИПЕР) の原寸大模型を公開した。この模型は、2005年6月にパリで開催される航空ショーでも展示される予定である。現用のソユーズ宇宙船 (3人乗り) の基本

的な構造・仕様は40年前の1号機とほとんど変わりがなく、宇宙飛行士にとって船内は狭く乗り心地の悪いものであったが、これに代わるクリーベルはスペースシャトル退役後の搭乗員輸送の主役となる可能性がある。

クリーベルのコンフィギュレーションはこれまでに2通りが発表されており、図表1はそのうちリフティングボディ型の機体の断面図である。搭乗員は6名(3名×2列)で、ISSの搭乗員を6名輸送できるだけでなく、2名の搭乗員で4名の宇宙旅行客を乗せる場合もありうる。もう1つのコンフィギュレーションはスペースシャトルと同じ有翼型の形態であるが、搭乗員が乗り込むコンパートメント部分はリフティングボディ型と同じである。このことから、当初はリフティングボディ型で開発し、その後、有翼型を開発するというような段階的な開発を行う可能性があると思われる。

クリーベルは全長10m、直径約3m、重量13トンで、搭乗員6名の他に貨物500kg程度を積

載可能としている。緊急脱出口ロケットは公開された図面ではソユーズ宇宙船と同様に先端部に設けられているが、別の設計案としては、重量軽減のため、宇宙船の後方に取り付けて加速用の推進エンジンと兼用することも考えられている。また打上げロケットは開発コストを節減するため、ウクライナのゼニットロケットを使用することになると見込まれる。

3 - 3

欧州宇宙機関加盟国間の 有人宇宙船開発競争

欧州では、各国独自の国家宇宙開発プログラムとは別に、欧州宇宙機関(ESA)が加盟各国の出資と開発分担による大型宇宙プロジェクトを実施しているが、有人宇宙飛行については、これまでに例のない加盟国間の競争が生じている。これは、ESA自身の有人宇宙飛行計画が予算計上のみであり、内容がまだ定まっていないことに起因していると思われる。

ESAの最大の出資国であるフランスとドイツは、自国の宇宙開発プログラムとして、それぞれ有人宇宙飛行の技術開発を行っている。フランスはエンジェル/プレXという2種類の有人宇宙船を、ドイツもフェニックス/ホッパーという2種類の有人宇宙船を開発中である。両国とも、うまくいけば、自国の有人宇宙船をESAのプログラムに昇格させたいという思惑があるものと思われる。

3 - 4

中国の有人宇宙飛行

中国は2003年10月に、神舟5号の打上げ成功によって、世界で3番目の有人宇宙船打上げ国となった。2005年9月頃には、搭乗員2名で数日間にわたる宇宙飛行を行い、単独宇宙飛行から2年以内に複数人の宇宙飛行を実現して最短記録を樹立しようとしている。かつて、旧ソ連は3年半、米国は3年を要した。さらに2006年以降は、3名の宇宙飛行士を搭乗させ、しかも3名のうち1名は一般人を搭乗させることを視野に入れている(2004年7月号特集3参照)。

さらに、有人飛行船を中国独自の宇宙ステーションとドッキングする計画もある。2010年頃には、独自の宇宙ステーションのモジュールを打ち上げるためのロケットとして、現在開発中の長征5号系列が使われる可能性がある。

■用語説明■

有人打上げ

ロケット打上げにおいて、ペイロード(積載物)に人間が含まれる場合を特に「有人打上げ」という。この場合、貨物だけの積載とは異なる要素として、人間を安全に地上に帰還させる上での信頼性の確保、非常事態における緊急脱出システムの装備、ロケットの振動や音響などの環境条件を考慮する必要がある。中国では有人宇宙船「神舟」を打ち上げるため、打上げロケットとして「長征2E」を設計変更して「長征2F」という新しい型式のロケットを開発した。主な変更点は、制御系の冗長化、故障の自己診断機能、緊急脱出装置の追加などである。また、4回行われた無人試験機の段階で宇宙飛行士を模した人形を搭載し、医学的計測の試行や支援作業者の訓練などを行ったものと思われる。

4 国際宇宙ステーションへの物資補給船の開発動向

4 - 1

ロシアの物質補給船 プロGRESS

ロシア連邦宇宙局(FSA)は、

2005年2月28日、ソユーズUロケットにより、物資補給船プログレスM-52の打上げに成功した。ISSへの補給ミッションとしては17回目の飛行になる。1回の打上げで輸送できる物資の重量は

約2.8トンで、このうち約1トンは燃料や酸素ガスなどタンクに充填したもの、その他は搭乗員が取り扱う実験機材や食糧などの物資である。米国のスペースシャトルの打上げ再開時まで、ISSへの補

給ミッションはプロGRESSが一手に引き受けてきたという経緯がある。物資補給の遅れのため、ISS搭乗員が節食を余儀なくされた期間もあったほどである。プロGRESSは1978年の初飛行以来、若干の改良が施されたが、ソユーズ宇宙船と同様に原型と比べて大きな変化はなく、旧ソ連のサリュートやミールなどの宇宙ステーションへも補給を行ってきた。今後、プロGRESSに匹敵する物資補給船が他の国で開発されて運用に供されたとしても、実績のあるプロGRESSの役割が終わることは当分ないと思われる。

4 - 2

日本の補給機 HTV

2005年1月26日、カナダで開催された宇宙機関長会議において、スペースシャトル退役後の宇宙輸送システムについて話し合いが行われ、JAXAが開発中の宇宙ステーション補給機(HTV)を国際宇宙ステーションへの物資輸送に使用するという形でISS計画を支援することが、共同声明²⁾に盛り込まれた。これにより、ロシアのプロGRESS物資補給船や後述の欧州の自動輸送機(ATV)と並んで、我が国の宇宙輸送システムが実力を発揮する舞台が用意されたといえることができる。

図表2 HTVの外観³⁾

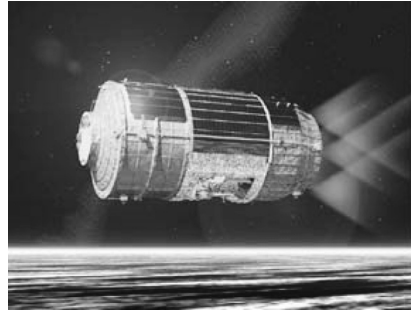


Photo by JAXA

HTVは、図表2に示すように円筒状で、後端(図の右端)が推進装置や誘導制御機器等、また中胴部から先がペイロード用の容器であり、与圧部と非与圧部に分かれている。積載できる物資は最大で約6トンである。ISSヘドッキングするうえでは、技術試験衛星VII型(ETS-VII、きく7号)で培われた無人での自動ランデブ技術が反映される。日本は負担すべきISSの運用経費の代替としてHTVによる物資補給を行うことになっており、ISSの運用期間にわたって、一定割合の物資補給需要があるものと期待できる。

4 - 3

欧州の自動輸送機 ATV

欧州のATVは1990年代から構想が練られてきた。1995年10月のESA閣僚級理事会においてATV開発が決定され、ドイツを

図表3 ATV(ジュール・ベルヌ)の外観⁴⁾



Photo by ESA

中心に開発が行われてきた。現時点では、図表3に示すような外観の「ジュール・ベルヌ」と呼ばれる技術実証機の打上げを2006年に予定している。これまでの開発経過は必ずしも順調とは言えず、コスト超過や技術的な課題などの問題もあったが、現在は欧州として他の宇宙関連プロジェクト予算を圧縮してでも遂行すべき重要な位置に置かれている。このATVは、アリアン5型ロケットで打ち上げられ、ISSに自動的にランデブ・ドッキングして、最大6ヶ月間滞留することを想定している。ISSの最前部右舷側にある欧州実験モジュール「コロンバス」の実験機器や食料などの生活物資を、年に1回程度の頻度で輸送する。打上げ時に積載可能な物資は約7.5トン、廃棄時に搭載するISSの排出物は約6.5トンとして設計されている。

5 使い切り型打上げロケット(ELV)の開発動向

5 - 1

米国の発展型使い切り型ロケット(EELV)

米国は1994年に国家宇宙輸送政策を発表し、使い切り型ロケットの発展型であるEELVの開発を国防総省(DoD)が担当することになった。開発のベースとなった

機種はアトラスII ASロケットとデルタIIロケットである。

ロッキード・マーチン社は2003年にアトラスV(ファイブ)型ロケットの初打上げを行い、これまでに計5回の打上げに成功している。静止トランスファ軌道(GTO)投入可能重量は、3.8トンから8.7トンに向上した。重量級バージョンはGTO13トン級以上を目指し

ていたが、現在は開発を中断している。一方、ボーイング社もデルタIIIでGTO投入可能重量をデルタIIの1.8トンから3.8トンへ向上させようとした。しかし、デルタIIIは3回打ち上げて1回しか成功せず、同社はGTO13トン級を目指して並行開発していたデルタIVを市場に投入した。中量級のデルタIVは、2004年までにGTO 3

トン前後の静止衛星で3回の打上げに成功し、デルタIIからの性能向上という意味では成功した。しかし、2004年12月に初めて重量級デルタIV(図表4)でGTO6トン級の実証衛星を打ち上げた際には、エンジンの早期燃焼停止で不十分な結果となった。これまでに発表された資料によれば、液体酸素供給配管で発生したキャビテーション(気泡)が早期燃焼停止の原因と見られている。ボーイング社は既に重量級デルタIVでDoDの静止早期警戒衛星(DSP)を打ち上げる準備を始めている。

5 - 2

欧州のアリアン5増強型

欧州では、アリアンスペース社がアリアンロケットの運用を行い、世界各国の静止通信衛星の半数程度を受注している。一方で、ESAの開発プログラムにおいては、アリアン5E/ESC-AによりGTO投入可能重量10トン級を目指している。2002年12月の初打上げで、衛星を所定の軌道に投入することに失敗したが、2005年2月12日、通信衛星等を積載した同型式のロケットの打上げに

成功し、GTO7.5トン級の打上げ能力を実証した。アリアン5E/ESC-Aは、大型の静止衛星2機を同時に打ち上げて打上げコストを削減することを目指しており、コストが下がればますます競争力を高めることになる。

5 - 3

国際合弁企業の洋上打上げシステム

最近の新しい打上げ方式として、海洋上に射点を設けて打ち上げる方式が注目される。この方式は、静止衛星打上げにおいて最も有利な赤道直下の公海上に射点を選ぶことができ、ロケットの能力を最大限利用できるというメリットがある。また、ロケットの整備は航海中の船内でも行うことができるため、作業時間の短縮効果もある。米国・ロシア・ウクライナ・ノルウェーの4カ国の企業の合弁で設立された「シー・ロンチ社」⁵⁾の船舶とロケットを図表5に示す。打上げを行う海上構造物は、海底石油掘削に使用されていた長さ130mのサブマーシブル型浮遊構造物で、「オディッセイ」と名づけられている。

図表4 重量級デルタIVの外観



Photo by Boeing

シー・ロンチ社は1999年3月に性能実証衛星をGTOに打ち上げて以来、2005年3月までに計15回の打上げを行い、2000年3月に中高度円軌道のICO衛星の軌道投入に失敗した以外は、計13個の衛星の打上げに成功している。軌道投入精度は回を追うごとに向上しており、当初は20kmほどずれていたが、最近ではほとんど誤差がなくなっている。シー・

用語説明

多段式ロケット

打上げロケットは2段、3段と段数を多くすることで、燃焼を終えた段を切り離しながら目標とする速度や高度に到達させる。この方式を「多段式ロケット」といい、ロシアのツィオルコフスキーが1929年にその理論を発表した。

静止衛星を打ち上げるロケットは通常3段式で、静止トランスファ軌道(GTO)投入までの推進を担当する。1段目は大気圏を抜けて宇宙高度まで持ち上げ、第2段は衛星速度に達するまで加速する。第3段は軌道面を変えてGTOに投入するために用いられる。その後は衛星搭載のアポジエンジンにより静止ドリフト軌道に投入する。

なお、我が国のH-IIAロケットは2段式にもかかわらずGTOへの投入ができる。これは、第2段のエンジン(LE-5B)が再着火可能であり、第3段の役割も兼ねることができるからである。これは世界に誇りうる高度な技術である。一方、ロシアのプロトンロケットは4段式である。これは、第4段が衛星のアポジエンジンに相当し、静止ドリフト軌道投入もロケット側の役目に行っているためである。

「静止トランスファ軌道」と「静止ドリフト軌道」

静止軌道(GEO)は、地球表面からの距離が約35,786km、軌道傾斜角0°の円軌道である。衛星の周期が23時間56分で地球の自転と同期して赤道面上を周回することで衛星が静止して見える。実際には衛星は時速10,000km以上で飛行している。静止トランスファ軌道(GTO)は近地点約200km、遠地点約36,000kmの楕円軌道で、周期は12時間程度である。種子島(北緯30度)から東方向に打ち上げた場合、ロケットによりGTOに投入された後、衛星側のアポジエンジンで燃料を大量に消費して静止ドリフト軌道に移行するため、静止化後の衛星重量はGTO投入時の重量の約半分になる。なお、赤道近辺から東方向に打ち上げた場合は衛星の燃料消費は少なくて済むため、この比率はもっと大きくなる。静止ドリフト軌道はほとんど静止軌道と同じであるが、わずかな周期の差や微小な軌道傾斜角などにより静止化していない軌道である。逆に、衛星の静止位置を変更する目的で、ドリフト(漂流)させるように制御することもできる。MTSAT-1R運用開始までGMS-5(ひまわり5号)の代役を務めた米国の気象衛星GOES9号は静止位置が西経105度から東経155度へと変更された。

ロンチ社の打上げ作業スケジュールによれば、衛星を組立・指令船に積み込んでから打上げまでの期間は約3～4週間であり、このうち母港から射場までの航海に1週間を要する。これまでの打上げ間隔実績は最短で53日である。最近の打上げは2005年4月26日に西経154度の赤道直下で行われ、その際のペイロードは米国のディレクTV社の放送衛星スペースウェイ(GTO重量6.1トン)であった。その直前の打ち上げは3月1日に行われており、この間の56日という打上げ間隔は前記の最短記録に近い。

図表5 作業中のシー・ロンチ社のロケット
(ゼニット3SL)



手前：洋上発射台「オディッセイ」、奥：組立・指令船
Photo by Sea Launch

■用語説明■

「射場」と「射点」

打上げロケットを用いて衛星を打ち上げるには、ロケットを発射する場所が必要である。これを「射場」という。射場では、打上げロケットを発射地点である「射点」に据えるために、ロケット各段の組立て・点検や衛星及びフェアリングの組立てなどを行い、またそれらを結合する作業を行う。発射時の打上げ管制を行う施設や監視台などの設備もある。

5 - 4

中国の次世代ロケット

近年、米欧に次いで世界最大級の重量級ロケットの開発を目指している中国の動向が注目される。

2003年10月、ドイツのブレーメンで開催された第54回国際宇宙会議(IAC)において、中国の研究者から新しい長征ロケットに関する発表⁶⁾が行われた。中国の長征ロケットは、1号から4号までは軍事用ミサイルを人工衛星打上げ用に発展させた設計であり、燃料に非対称ジメチルヒドラジン(UDMH)を用いていたため、燃料の毒性が問題になってきた。併せて打上げ作業を簡便にすることや、信頼性を高めることなど、これまでに長征ロケット全体として

80機以上を打ち上げた経験を踏まえて、現在は長征5号系列の研究開発を行っている。

長征5号は、直径が5m(1段、2段)、3.35m(1段、2段、3段)及び2.25m(1段、2段)の計7種類の機体モジュールを組み合わせてシリーズを構成している。直径5mの1段・2段モジュール、3.35mの第3段モジュール及び2.25mの第2段モジュールのエンジンは、液体酸素・液体水素を推進剤とする推力50トンのエンジンを2個装備している。その他の3種類のモジュール(3.35m 1段・2段及び2.25m 1段)の推進剤は液体酸素・ケロシンで、推力120トンのエンジンを2個装備する。燃料充填時の第1段モジュールの重量は173.5トン(5m)、144トン(3.35m)及び64トン(2.25m)である。2段式の5mモジュールだけでは低軌道にしか投入できないが、既存の液酸・液水エンジンを追加することでGTO投入が可能になる。長征5号系列のうち、最も強力な「504/HO」モデルは、5mモジュールの周囲に4個の3.35mモジュールを取り付けて静止トランスファ軌道投入能力

の目標を15トンとしており、打上げ能力としては世界最強となる可能性がある。

長征5号はその設計思想からみて、小型衛星から重量級衛星までペイロードに応じて自在に輸送能力を調節できる柔軟性を持ち、かつ、すべてのエンジンが無公害または低公害の液体である点が、従来の長征4号までと異なる特徴である。液体エンジンは燃焼試験を行ってから使用でき、また、打上げ時には点火を確認してからリフトオフできるので、信頼性の観点からも望ましい。

なお、中国は北緯20度の海南島に4番目の射場を建設することを計画しており、長征5号は海南島射場から打ち上げられることになる可能性がある。

大韓民国が^{チョルラナムド}全羅南道・^{ウエナロ}外羅老島に初の射場を建設する動きと併せて、中国の新射場建設の動向も注目される。

5 - 5

インドの使い切り型ロケット
PSLVとGSLV

インドの宇宙開発を主導するインド宇宙機関(ISRO)は、1980

年に独自の使い切り型ロケット SLV によりインド初の人工衛星の打上げに成功し、続いて能力増強型 (ASLV)、極軌道用 (PSLV)、静止軌道用 (GSLV) などの打上げロケットの開発を進めてきた。1997年までの打上げにおいては、SLV で4機中2機、ASLV で4機中3機、PSLV で4機中2機が失敗し、成功率は41.7%と非常に低い状況であったが、1999年以降、8回連続で静止衛星3機を含む中量級衛星の打上げに成功しており、現在は日本のH-IIAロケットの約半分の打上げ能力を有している。

インドは2001年に初めてGSLVにより静止衛星GSATの打上げに成功した。インドの実用静止衛星であるインサットは通信と気象観測のミッション機器を搭載している。これまでに13機のインサットが欧米のロケットにより打ち上げられてきたが、今後は自

国のGSLVによる打上げが行われるようになる可能性がある。

5 - 6
我が国のH-IIA能力向上型ロケット

我が国の基幹ロケットと位置づけられているH-IIAロケットはこれまでに7回打ち上げられ、SRB-A分離に失敗した6号機を除いて6回成功している。今後さらに数回の打上げ成功が続けば、H-IIAの設計技術は確立できたものと見なされて、運用主体がJAXAから三菱重工株式会社(MHI)に移管されることになっている。現在はJAXA又は顧客から委託を受けたロケットシステム社(RSC)が打上げ関連作業を各宇宙関連企業に委託する形態になっているが、民間移管後はMHIが主体となって関連企業の製品や作業者をとりまとめて打上

げの準備を行い、最終段階の打上げ管制だけをJAXAに委託するという形になる。時期的には平成18年度契約分からと見込まれるが、このことによって、我が国では打上げロケットの定常運用と新規開発が明確に区分されることになる。

新規ロケットの開発を担当するJAXAは、H-IIA能力向上型のコンフィギュレーションを種々検討してきたが、今後は、直径を4mから5mに拡大し、1段の主エンジンを2個束ねた形にして、GTO投入可能重量6トン級を目指そうとしている。この性能目標が実現すれば、HTVを低軌道に打ち上げることができ、また、インテルサット10型衛星(GTO5.6トン)のような世界最大級の通信衛星を商業的に受注して打ち上げることにも可能になる。

6 **月以遠の深宇宙への輸送**

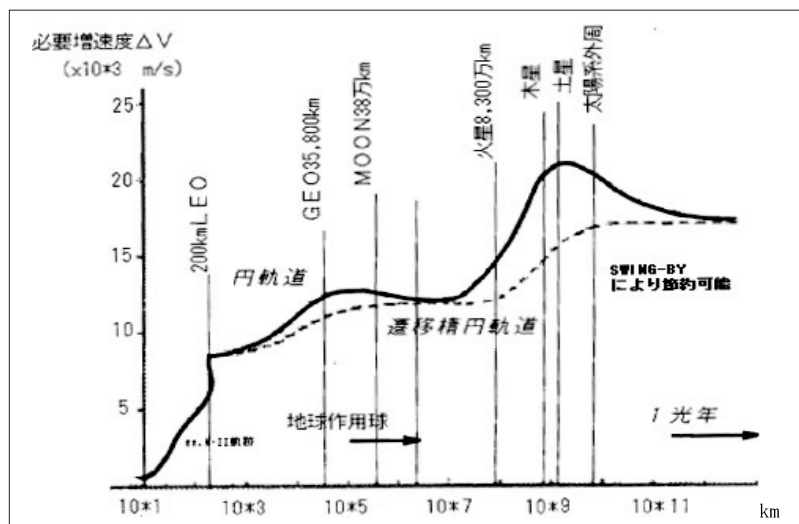
宇宙のある高度へ到達するために必要となるエネルギーは ΔV (デルタブイ)、すなわち「増速度」という数値で表される。図表6は、高度10kmから1光年に近い距離まで飛行するのに要する ΔV をグラフで示したものである⁷⁾。

図表6から、200kmの高度に到達するのに必要な増速度は約8km/sであり、静止軌道(GEO)と月に到達するための増速度はほとんど変わりがなく約12km/sであることがわかる。また、火星までの距離は月までの距離と比べて約200倍、木星・土星までの距離は数千倍あるが、それらの惑星に到達するための増速度は意外に小さいことが分かる。このような深宇宙への飛行においては、打上げロケットだけでなく探査機に搭載した推進系も ΔV の一部を担うこ

とになり重要な役割を果たしている。また、惑星探査機の飛行計画では、 ΔV を節約するために地球または他の天体の重力を利用して加速するスイングバイという手法が用いられる。

NASAはこれまでに太陽系探査機として「ユリシーズ」(太陽)、「メッセンジャー」(水星)、「マゼラン」(金星)、「ルナ・プロスペクタ」(月)、「マーズオブザーバ」(火星)、「ガリレオ」(木星)、「カッシーニ」

図表6 地球から到達するために必要なエネルギー ΔV ⁷⁾



ア」ロケットにより無人宇宙往還機「ブラン」の打上げ及び回収に成功したが、その後財政難のため計画は中止された。

(3)欧州

ESA はアリアン 5 型ロケットで小型の宇宙往還機エルメスを打ち上げようとしたが、財政面での制約のため、開発を断念した。

(4)日本

1990 年代に宇宙開発事業団 (NASDA = 当時) と航空宇宙技術研究所 (NAL = 当時) が共同して、H-II ロケットで打ち上げて水平着陸で回収する宇宙往還機 (HOPE) の研究開発を行い、関連して極超音速飛行実験 (HYFLEX) や小型自動着陸実験 (ALFLEX)

の飛行試験も行った。HYFLEX は飛行には成功したが、機体が海中に没してしまい、回収ができなかった。このため、再突入後の機体材料の変化に対する詳細な分析を行うことができなかった。2003 年には、キリバス共和国・クリスマス島やスウェーデン・エスレンジにおける高速飛行実証 (HSFD) 試験で機体を投下して自律飛行で着陸させる実験を行った。しかし、HOPE の実機製作も行えないまま、このプロジェクトは凍結されている。2005 年 3 月に JAXA が長期ビジョンを発表し、その中で、宇宙輸送システムについては基幹ロケットである H-IIA の運用維持・発展にとどまらず、再使用型宇宙輸送システムを開発していく必要性と方向性について言及して

いる。その基本的な考え方は、小規模な繰返し運用を行うことにより、有人打上げが可能な程度まで信頼度向上を図るために新たな取り組みを行うことである⁸⁾。

米国では、アンサリ X プライズ財団の懸賞を契機に、民間ベースでの有人宇宙飛行競争が活発化してきた (2005 年 2 月号トピックス参照)。米国のスペース X 社は衛星打上げのみならず、民間の宇宙ステーション打上げやそこにランデブ・ドッキングする有人宇宙船の開発も行おうとしている。このグループには、過去に他の宇宙関連企業でロケット開発に従事した技術者が含まれている模様である。停滞気味の政府計画に先んじて、民間の自由な発想から本格的な再使用型宇宙輸送システムが実現する可能性もあり、斬新なアイデアに基づく宇宙機の創出が期待される。

また、以上に述べてきたような推進薬を燃焼するロケットとは全くコンセプトの異なる宇宙輸送システムとして、「宇宙エレベータ」の研究が急速に進んでいる (2005 年 4 月号トピックス参照)。

■用語説明■

再使用型宇宙輸送システムのコスト

再使用型宇宙輸送システムの開発には膨大な資金を必要とする。このような費用をノン・リカーリング・コスト (1 回限りの経費) という。これに対し、完成したシステムを用いて打上げを定期的に行うために必要な経費をリカーリング・コスト (繰返し経費) という。使い切り型宇宙輸送システムではノン・リカーリング・コストは再使用型より少なく済むが、リカーリング・コストは 10 倍以上もかかると考えられる。例えば 100 回の打上げで両者の総コストが等しくなるとすれば、巨大な宇宙構造物を建造することになる宇宙太陽光発電衛星 (SSPS) の部品を 200 回、300 回と繰返し打ち上げる再使用型宇宙輸送システムは非常に割安な輸送手段となりうる。

8 おわりに —我が国の宇宙輸送システム開発の進め方についての考察— ●●●●●●●●

我が国は、宇宙輸送システムという技術領域で、どのような戦略に基づいて研究開発を行うべきかを明確にすべき時期にきている。本レポートで紹介した各国の動向を勘案したうえで、次のような提案を行ないたい。

(1)国際宇宙ステーション補給機 (HTV) の実用化

HTV は、スペースシャトル退役後の国際宇宙ステーションへの物資輸送を、一定割合で担える可能性がある。HTV は打上げ時には積載物であるが、最終目的地

付近では自らの機能で目的地に到達し、宇宙輸送の重要な一部分を担っている。我が国が得意とするロボット技術等に基づく独自の自動ランデブ技術を活用して、まずは第一に HTV の実用化に注力し、国際宇宙ステーション計画におけるポジションを確保すべきである。

(2)中量級使い切り型ロケット技術の保持と発展

商業的な静止衛星の打上げ需要は年間 20 ~ 30 個しかなく、しかも米・欧・ロ・中が激しくシェアを競う中で、H-IIA ロケットが

受注を勝ち取ることはかなり難しい。しかしながら、部品点数が 28 万点にも及ぶロケットの製造技術や打上げ運用を維持することは、材料開発や製造技術など個々の産業技術における技術発展や継承を図るうえで、一定の役割を果たす。また、宇宙実験などを通じて、ライフサイエンスや環境観測など他の科学技術分野に対して、「知の創造」という面で直接的あるいは間接的に寄与しうる。H-IIA 能力向上型の開発を通じた世界最高水準の打上げ能力追求だけでなく、数多く存在する中量級のペイ

ロードを高い信頼性かつ自在性をもって打ち上げられるだけの基幹ロケット技術を保持することが必要である。

考える発展の方向性のひとつとしては、H-IIA能力向上型の開発において、米国の発展型ロケットや中国の長征5号系列と同様に、液体エンジンだけで推進系を構成することが挙げられ、この技術によって信頼度を向上させることができると考えられる。もう一つの方向性は、第2段エンジンの再々着火により衛星のアポジエンジンをいわずに静止ドリフト軌道に投入する技術の実現を目指すことである。これにより静止衛星の製造コストが下がるとともに衛星搭載機器の重量を増やすこともでき、あるいは複数衛星の同時打ち上げにより衛星1機当たりの打ち上げコストが低減できるなど、世界的に見ても競争力の高い宇宙輸送システムとなる可能性がある。

(3)再使用型宇宙輸送システムの開発を通じた基盤技術の育成

宇宙太陽光発電衛星の開発において、獲得できる電力以上のエネルギーを開発・運用のために投入するようでは開発計画の妥当性がない。輸送コストを下げると同時に、衛星の軌道上組立てを省資源・省エネルギーかつ円滑に行う

ためには、再使用型宇宙輸送システムの開発は避けて通れない。しかし、過去の各国の失敗の背景には、再使用型特有の課題である再突入時の高温に耐える軽量構造材料の開発や革新的な推進システムの開発などの技術面での未成熟さがある。これまで「基盤技術の蓄積」と「繰り返し運用による実証」とは全く別の課題のように考えられていた。しかし、再使用型宇宙輸送システムの開発においては従来の使い切り型打上げロケットの開発とは様相が異なり、繰り返し実証を行う中で信頼性向上や長寿命化などシステムのタフネスを高める基盤技術をはぐくんでいくことが可能である。繰り返し実証を通じて、地に足のついた基盤技術を育成する体制を整えることにも大きな意味があると考えられる。

謝 辞

本稿を執筆するに当たり、三菱重工株式会社の子崎勲特別顧問、技術士(航空・宇宙部門)の白子悟朗氏(SSC技術士事務所)、宇宙航空研究開発機構の長友正徳射場運用室長、青木宏再使用型推進系グループリーダー、岡田匡史宇宙輸送システム技術部技術領域リーダー並びに国際部の関係者から、資料提供や討議をいただいたことに対し、深く感謝します。

参考文献

- 1) Russian Space Web より；
Anatoly Zak：http://www.russian-spaceweb.com/kliper.html
- 2) JAXA プレスリリース「ISS計画に関する宇宙機関長会議(HOA)の結果について」添付3「共同声明」2005年2月2日；
http://www.jaxa.jp/press/2005/02/20050202_sac_hoa_j.html#at3
- 3) JAXAのHTVプロジェクトホームページ；
http://www.jaxa.jp/missions/projects/rockets/htv/index_j.html
- 4) ESAのATVプロジェクトホームページ；
http://www.esa.int/SPECIALS/ATV/index.html
- 5) シー・ロンチ社のホームページ；
http://www.sea-launch.com
- 6) The New Generation Launch Vehicle of Long-March Family；
Tangming Cheng 他；2003年10月(プレーメン大会)IAC-03-V.1.04
- 7) 青木宏、NASDA-TMR-95007「再使用ブースタ近未来試案」1996年10月
- 8) 岡田匡史他、「基幹ロケットの信頼度向上と繰り返し運用実証機」2005年1月

■ 略語のフルスペルと解説 ■

ALFLEX	Automatic Landing Flight Experimental 「自動着陸試験機(日本)」
ASLV	Augmented Satellite Launch Vehicle 「能力増強型衛星打上げロケット(インド)」
ATV	Automated Transfer Vehicle 「自動補給機(欧州)」
CEV	Crew Exploration Vehicle 「有人探査機(米国)」
DoD	Department of Defense 「米国防総省」
DSP	Defense Support Program 「国防支援計画(米国のミサイル早期警戒衛星)」
EELV	Evolved Expendable Launch Vehicle 「発展型使い切り型ロケット(米国)」
ELV	Expendable Launch Vehicle 「使い切り型打上げロケット」
EPA	Environmental Protection Agency 「米国環境保護省」
ESA	European Space Agency 「欧州宇宙機関」
ET	External Tank 「外部タンク(スペースシャトル)」
ETS	Engineering Test Satellite 「技術試験衛星(日本)」
FSA	Federal Space Agency of Russia 「ロシア宇宙局」
FW	Filament Winding 「フィラメント・ワインディング(複合材料の製作法の1つで、樹脂に含浸させた炭素繊維の束を型の周囲に巻き付け、硬化処理してさまざまな形状の構造体を形成する方法)」

GEO	Geostationary Earth Orbit 「静止軌道（地球表面からの距離が約 35,786km の円軌道）」
GSLV	Geostationary Satellite Launch Vehicle 「静止衛星打上げ用ロケット（インド）」
GTO	Geostationary Transfer Orbit 「静止トランスファ軌道（近地点約 200km、遠地点約 36,000km の楕円軌道）」
HOPE	H-2 Orbiting Plane 「宇宙往還機（日本）」
HSFD	High Speed Flight Demonstration 「高速飛行実証（日本）」
HTV	H-2 Transfer Vehicle 「宇宙ステーション補給機（日本）」
HYFLEX	Hypersonic Flight Experimental 「極超音速飛行実験（日本）」
IAC	International Astronautical Convention 「国際宇宙会議（国際宇宙連盟（IAF）が毎年開催する全世界の宇宙関係者の会議。2005 年は福岡で開催される）」
ICO	Intermediate Circular Orbit 「中高度円軌道」
ISAS	Institute of Space and Astronautical Science 「2003 年 9 月までは文部省宇宙科学研究所、それ以後は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部」
ISRO	Indian Space Research Organization 「インド宇宙研究機関」
ISS	International Space Station 「国際宇宙ステーション」
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency 「宇宙航空研究開発機構」
KIS	Контрольно-Испытательная Станция 「RKK エネルギア社の総合試験設備」 英字表記：Kontrolno-Isptatel'naya Stantsiya (Complex Integrated Stand)
MHI	Mitsubishi Heavy Industry 「三菱重工株式会社」
MTSAT	Multi functional Transport SATellite 「運輸多目的衛星」
NASA	National Aeronautic and Space Administration 「米国航空宇宙局」
PSLV	Polar Satellite Launch Vehicle 「極軌道衛星打上げ用ロケット（インド）」
RCC	Reinforced Carbon-Carbon 「強化炭素複合材」
RFP	Request For Proposal 「提案要請（契約相手方を公正に選定する手法の 1 つ）」
RKK	Ракетно-Космическая Корпорация 「宇宙ロケット会社（ロシア）」 英字表記 Raketno-Kosmicheskaya Korporatsiya (Rocket Space Corporation)
RLV	Reusable Launch Vehicle 「再使用型宇宙往還機（米国）」
RSC	Rocket System Corporation 「株式会社ロケットシステム」 (http://www.rocketssystem.co.jp)
SRB	Solid Rocket Booster 「固体ロケットブースタ」
SSC	Shirako Space Consulting (http://www2s.biglobe.ne.jp/~gshirako/)
SSPS	Space Solar Power System 「宇宙太陽光発電衛星」
SSTO	Single Stage To Orbit 「単段式再使用型宇宙輸送システム」
STS	Space Transportation System 「宇宙輸送システム（スペースシャトルの正式名称）」
TSTO	Two Stage To Orbit 「二段式再使用型宇宙輸送システム」
UDMH	Unsymmetrical DiMethyl Hydrazine 「非対称ジメチルヒドラジン」

執筆者



総括ユニット 特別研究員

辻野 照久

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/>

nistep/prof/tsujino.html



専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理等に従事した後、旧宇宙開発事業団において情報システム、世界の宇宙開発動向調査、知的財産権管理など宇宙技術全般と社会との接点に関わる業務に従事。現在はフロンティア分野を担当。

ワークショップ 「数学の将来シナリオを考える」 開催報告

伊藤 裕子
ライフサイエンス・医療ユニット

1 ワークショップの全体概要

文部科学省科学技術政策研究所は社団法人日本数学会との共催により、5月10日に虎ノ門パストラルで「数学の将来シナリオを考える—数学を基点とする分野横断型研究の展開に向けて—」のワークショップを開催した。

本ワークショップの目的は3つある。1つ目は、日本の数学研究が置かれている状況をきちんと認識することである。2つ目は、数学研究が新しい科学技術分野を発展させるために果たす重要性を考えることである。さらに3つ目は、日本の数学のポテンシャルを他分野に活用する方策を産学官関係者で討議し、認識を共有することである。

数学は、例えばひとつの定理が物理現象の解明に役立てば、経済現象にも適用できるという具合に、数学は様々な科学分野の基礎を支えている。翻って見れば、科学技術の構造変革をもたらした計算機の開発や、数理ファイナンス、複雑系等の学問分野の創造は、数学研究から端を発している。数学の成果は、社会を根底から変革する可能性を秘めている。

欧米各国は、このような数学

の特徴を踏まえて、国家として数学研究を推進している。特に、近年では数学に対する公的支援として、数学と他分野との研究の連携や融合を重視している。我が国の科学技術政策においても、分野間の連携・融合を推進していく必要性が増しており、多くの分野の基礎となる数学は一層重要になるだろう。そこで問題となるのは、数学研究の推進体制自体が十分なものであるのかどうかである。そのために産学官の関係者同士の対話が必要である。

ワークショップ当日は、数学関連の研究者や技術者および行政関係者など約80名が集まり、活発な意見交換が行われた。冒頭の開催挨拶において、有本科学技術・学術政策局長は、「科学技術の理論と実験に加えて新しい方法論として、モデリング予測、可視化といった数学に基づいた計算科学が大切になっている」、「行政や政策としても、数学が今後どうあるべきかを検討する必要がある」と問題意識を述べ、さらに「数学研究者も積極的に外に出て（他分野の人と）コミュニケーションを図って欲しい」と要望した。

次いで、桑原科学技術政策研究所総務研究官から科学技術政策研究所の調査による日本の数学研究の現状が報告された。また、同研究所で実施した「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」（平成15～16年度科学技術振興調整費）の中の注目科学技術領域の発展シナリオ調査「数学の研究発展と数学教育」の執筆者である、広中平祐氏およびピーター・フランク氏から、数学の将来展望および数学推進に関する提言が発表された。

さらに、大学からは東北大学教授で前日本数学会理事長の森田康夫氏、および北大教授の津田一郎氏、産業界からは中央青山監査法人の吉田英幸氏、および日立製作所の宝木和夫氏、生命科学分野からは東大教授の高木利久氏、の各氏から数学研究の重要性や他分野連携の必要性や問題点について発表が行われた。また、討論のセッションでは、永野博科学技術政策研究所長をコーディネーターとして、東大教授の儀我美一氏から分野横断型の数学研究所構想が提案され、活発な意見交換が行われた。以下に、発表内容の概要を示す。

2 数学研究の日本の現状

2 - 1

論文分析
(桑原総務研究官／
科学技術政策研究所)

(1)分野別の論文シェア

ISI 論文データベースを用いて、各国の分野別の論文産出における論文シェアのポートフォリオを比較すると、米国は化学・材料・物理の論文シェアは低いが、計算機科学&数学や生命科学は高い。日本は、米国で低かった化学・材料・物理のシェアは非常に高く、数学のシェアは他の分野に比べるとかなり低い(図表1)。

一方、ヨーロッパでは、英国は臨床医学のシェアが高く、数学は他の分野と同程度であり、ドイツは物理が突出し、計算機科学&数学も決して小さいシェアではない。フランスでは計算機科学&数学が突出し、他の分野よりシェアが大きい。中国の論文シェアのポートフォリオは日本に近いが、計算機科学&数学は日本のように小さくはない。

(2)数学と計算機科学の論文数の国際比較

図表2は、ISI 論文データベースに掲載されている数学と計算機科学だけの論文実数を並べたものである。2003年では、トップの米国が1年間で4,000報であり、フランスが1,700報、中国が1,300報、ドイツが1,200報、イギリスに次いで日本は800報である。数学と計算機科学との論文数のバランスを見ると、各国で特徴があり、米国の場合は数学4,000報に対して計算機科学は3,000報と、4対3。フランス・中国・ドイツでは、3対1で、計算機科学よりも数学の論

文数が遙かに多い。イギリス・日本・イタリアでは、数学の論文数は計算機科学の2倍程度である。韓国は、数学より計算機科学のウェイトが大きい唯一の国である。

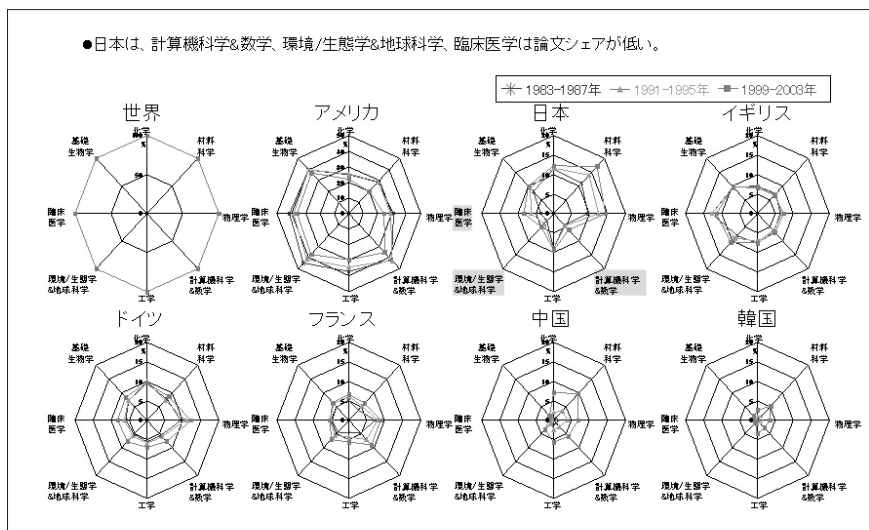
数学と計算機科学は、比較的近い領域と思われるが、国によってこの2つのバランスのポートフォリオも大分違っている。世界で産出される論文の絶対数では、数学

が1年間で1万4,000報に対して計算機科学は8,000報であり、数学のほうが論文数は多い。

(3)数学分野の日本論文の共著相手国

ISI 論文データベースの分析によると、日本人の国際共著率は高まっている。共著相手として、米国が1,700報の国際共著のうちの

図表1 各国の論文産出における論文シェアのバランス



(注) このグラフでは、17分野を8つに集約している。基礎生物学は、農学、生物学・生化学、免疫学、微生物学、分子生物学・遺伝学、神経科学・行動学、薬理学・毒性学、植物・動物科学の分野を含む。

図表2 数学と計算機科学の国別論文数

国名	数学			計算機科学		
	2001年	2002年	2003年	2001年	2002年	2003年
アメリカ	4087	4087	4260	2496	2428	3024
フランス	1566	1561	1755	369	388	503
中国	881	908	1309	342	358	469
ドイツ	1127	1119	1222	461	297	502
イギリス	897	892	958	466	428	563
日本	823	671	808	456	387	489
イタリア	718	698	958	466	428	563
カナダ	560	603	699	283	300	426
スペイン	599	580	678	166	167	195
ロシア	609	662	673	83	58	57
韓国	205	194	274	267	292	416
全世界	12978	12593	14082	6905	6608	8146

700 報で、全体の 4 割を占める。20 年前からアメリカは共著相手として多かったが、ドイツ・フランスは安定して 200 報ぐらいである。興味深いのは中国、イギリス、あるいは韓国であり、以前は日本の研究者との共著論文は非常に少なかったが、最近急増している。中国に関しては、最近継続的に 20 報ぐらいが、日本の論文の共著相手として出ている。韓国も最近増えているなど、共著相手国が変化している。

ある」と評価された分野がある一方で、多くの分野で「画期的なものがない」、「研究の深さが足りない」、「新しい概念が生まれてこない」という指摘があった。この事は、全ての学問の根底にあるはずの数学とのコラボレーションが必ずしもうまくいっていないということが、1つの理由として考えられるかもしれない。

しており、日本円にすると約 400 億円である。この 400 億円の予算の約半分は NSF（全米科学財団）に配分されており、ここから大学等にファンディングされている。もう半分の予算は、生物医学の最大の研究所であり、かつ生命科学分野の研究にファンディングをしている NIH や、エネルギー省、国防総省など、非常に多様性のある政府組織に配分されている（図表 4）。

2 - 2
米国の数学研究支援システム
 (伊藤主任研究官／
 科学技術政策研究所)

(4) 欧米の研究者による
 日本の研究の評価

欧米研究者から見た日本の研究活動の調査（全分野）では、「世界的リーダーである」や「優れており、手堅く、信頼できるもので

(1) 米国の数学研究予算の
 配分先の多様性

米国の政府による数学研究予算は、ここ 30 年間で約 2 倍に増加

(2) 数学研究を支援する
 米国政府組織

米国では、エネルギー省・国防総省・商務省・NIH・NSF など、様々な政府機関の中に数学研究にファンディングするための担当部局が複数ある。部局がないところ、例

図表 3 数学分野の日本論文の共著相手国

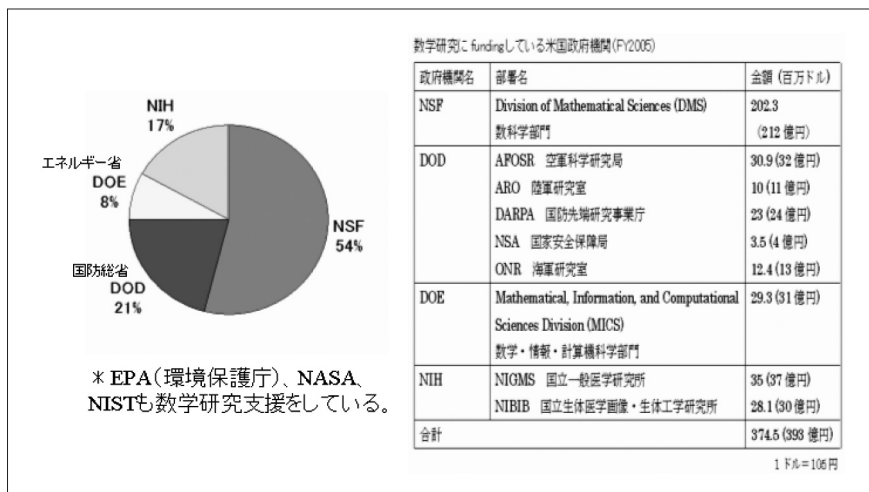
年	日本論文数	国際共著数	国際共著率	共著相手国							
				アメリカ	ドイツ	フランス	カナダ	中国	イギリス	イタリア	韓国
1982	505	43	8.5	22	3	5	2	0	1	1	0
1983	502	50	9.6	16	5	11	4	0	5	4	0
1984	473	62	13.1	22	5	10	5	2	5	2	2
1985	568	72	12.7	35	6	7	6	1	5	0	1
1986	350	46	13.1	20	9	1	6	2	2	1	1
1987	329	48	14.6	21	5	3	10	0	2	3	1
1988	513	64	12.5	24	9	11	6	1	3	4	3
1989	329	51	15.5	25	6	5	9	0	1	2	3
1990	328	61	18.6	23	11	8	7	1	5	5	1
1991	412	65	15.8	27	12	4	9	2	8	1	0
1992	367	72	19.6	31	12	9	8	4	5	2	3
1993	360	50	13.9	23	6	3	5	3	3	2	3
1994	379	54	14.2	28	4	11	2	4	3	1	1
1995	329	57	17.3	25	10	12	1	1	3	1	1
1996	419	61	14.6	19	7	9	5	1	4	2	2
1997	405	64	15.8	22	10	6	5	7	2	4	4
1998	562	104	18.5	47	13	8	6	7	7	5	4
1999	567	98	17.3	36	18	8	4	6	9	7	4
2000	700	146	20.9	44	17	19	7	20	14	7	6
2001	823	157	19.1	62	12	21	13	14	6	13	8
2002	671	163	24.3	63	18	15	11	21	11	10	5
2003	808	179	22.2	72	13	14	17	24	11	12	14
合計	10717	1767	16.5	707	211	200	148	121	115	89	67

例えばDARPAにも、継続的な数学研究プログラムが存在する(図表5)。

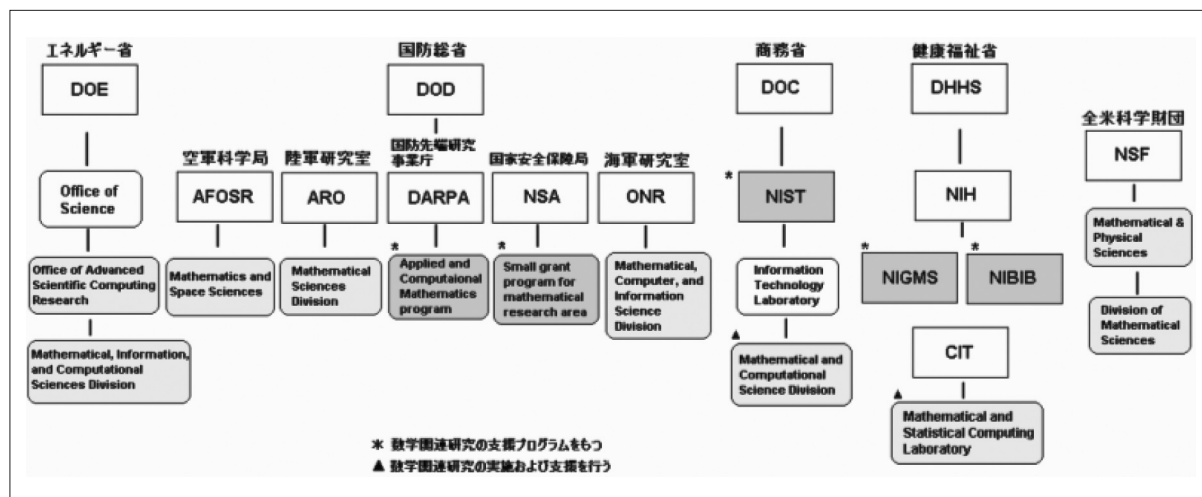
このように、米国の数学の公的な研究支援は、多額の予算を投資するだけではなく、多様な数学に関連した研究の支援を可能にするためのシステムが存在し、これが米国の研究の活性を保持するキーになっているのではないかと考えられる。

これに対し、日本の省庁には数学研究を支援する担当部署がないので、省庁主導での数学研究の支援に関する政策は立案することは難しい。

図表4 米国省庁別の数学研究予算(2005年度)



図表5 数学研究を支援する代表的な米国政府組織



3 数学研究の将来展望

—注目科学技術領域の発展シナリオ調査結果から—

3-1

発展シナリオ調査とは (奥和田上席研究官/科学技術政策研究所)

発展シナリオ調査は、第3期の科学技術基本計画策定のために様々なデータを収集している一環で行われた予測調査のひとつである。調査全体の目的が予測調査ということで、将来像を見ることに主眼を置いている。ある特定の領域の今後10年から30年の科学技術の発展を、ある個人の卓越した見通しのもとに描いて貰うという

ものである。

発展シナリオ調査では、調査テーマを48テーマ選び、その中のひとつのテーマが「数学の研究発展と数学教育」である。シナリオ原稿執筆者はコ・ノミネーション方式で選択した。まず、関連する団体、数学の場合は数学に関係する日本数学会を初め、約10の関連学協会あるいは業界団体等から、候補者の推薦を頂いた。次に、それらの候補者に対して、500ぐらいの団体による投票を行って頂き、その結果から原稿執筆者を選出した。

テーマ「数学の研究発展と数学

教育」では、広中平祐氏とピーター・フランクル氏が原稿執筆者として選出された。

3-2

数学の研究発展と数学教育 (広中平祐氏)

(1) 数学の特徴と今後の展開

数学の特徴のひとつは、「無限大の有限化」である。例えば、有限群を分類してこれとこれだとはっきりわかったとか、わからないときはどこまでわからないか、あるいは無限だと思っていたのがリストアップできるような形になっ

たとか。フェルマーの問題みたいに、「実は答えがない」ということをはっきり証明するとか。こういうことは、無限の問題なので、現在のコンピューターでやろうとしても、できない。コンピューターの発展は、数学にプラスになっている。将来的には、無限の問題をコンピューターで処理できるようにすることが数学者の本命だと考える。

数学には「非常に難しい側面」と「非常にやさしい側面」がある。難しいというのは、答えが見つかるまで、解答がはっきりするまでは、全く手がつかない。ところが一端わかるか、説明されればすぐわかる。初等段階のユークリッド幾何学をするとき、補助線さえ見つければ答えは明らかだが、補助線がないと一生懸命考えても、幾ら考えてもわからない。こういう2つの側面が一緒になっているというのが、数学の特徴である。この数学の特徴は、暗号理論や将来的に情報化が進んだときに、非常に役に立つと考えられる。暗号や暗証番は、使うべきでない人、使ってはいけない人にとっては非常に難しく、使すべき人にとっては実に簡単で決して忘れない、というものを理想とするからである。

論理学は、厳密性というものを非常に重視した学問であり、数学では「数学基礎論」に含まれる。この論理学がもっとマニュアル的になって実用化するべきだと考える。いわば、テーラーメイドの論理学である。世の中には突発的に起きる事件（出来事）が多い。もっとひどいになると革命とか、恐慌とか、バブルの崩壊とか、そういう突発的なものをどういうふうに見つけていくかが課題である。そのために、それぞれに対応した論理学をつくるべきだと考える。

抽象化と具体化あるいは具象化

も数学の特徴である。典型的な抽象化の例は代数学である。それを表現する典型的な例は、群である。群の理論というのは非常に抽象的な概念であるが、一方ではそれを「物の回転」とか、具体的なものに表現していく。そうすることによって、群の性質がよりわかってくる。数学はそういうことを両方やっている。

(2)「数学」というもの

色々な科学の分野があり、一般的に縦割りになっている。普通の科学というのを縦糸とすれば、数学というの横糸であるべきである。横糸だからこそ、あまり評価されない。すぐに何かの役に立つのか、と言われるかもしれないが、数学者は一生懸命横糸をつくっている。横糸のない布というのがどんなものかというのは、想像できると思う。

数学は歴史的に見れば最初は簡単に、「数」と「形」という2つの柱で進んできたが、17世紀ごろからニュートンとかライプニッツとかが出てきて、動きに対する、「変化・変動」に対する数学という3つ目の柱ができた。これが非常に数学の応用範囲を広げた。つまり、数学には「数」と「形」と「動き」の3つの柱がある。この点は、小学生の教育から始めて、数学の教育をしている人の全てが、はっきり頭の中に入れておいたほうが良いと考える。

(3)数学の将来展望としての

「進化のシミュレーション」

進化は、卵から生物が生まれて、成長して死んで、また新しく生まれてという、サイクルを非常に長い間何遍も繰り返している。この進化の過程というのは、1つの発展方程式を解くとか、ゲーム理論で答えを出すとか、そういう簡単な問題ではない。無限の繰り返しが出てくるような非常に長い年

月、何万年という年月をかけて繰り返してきたことが、答えになって生じてくるということである。このように背後では何遍も繰り返すというものがあって、表面には非常にきれいなもの（生物）が出てくる。コンピューターが非常に発展して、やがて量子コンピューターも出てくるだろう。すごいスピードのコンピューターを利用して、コンピューター科学の人と数学者が協力すれば、進化のシミュレーションができるかもしれない。

3 - 3

数学の研究発展と数学教育 (ピーター・フランクル氏)

(1)数学の他分野応用の将来

世界最大の数学者の一人であるカール・フリードリヒ・ガウス氏は、「ある学問の科学度は、その中に含まれている数学に比例している」と述べている。20世紀に見られた現象は、いろいろな学問の中にどんどん数学が入ってきて、そして数学を通して、学問が発展していった。

数学の最大の応用分野は、ニュートン以来は物理学であり、今も数学と非常に近い関係を持っている。これから50年間における、数学の他分野への応用では、生物への数学の応用が一番目覚ましいのではないだろうか。

(2)数学の発展予想は難しい

将来どのように数学が発展していくのかは、非常に予想し難い。数学の大きな発見は、時によっては、その発見により、皆がその研究に参入し、その方向の研究をする。別の発見によっては、逆にこの問題はもう完全に解決されたとなつて、その研究への参入は起らない。従って、数学の発展の将来を予測するのは結構難しい。

(3)数学の発展に必要なこと

●数学の発展は行政しだい

数学の発展もある程度、行政しだいである。つまり、行政がどの程度、数学のために体制を整えるのかである。人材を育成するためには、あるいは他のことに対してなど、幾らのお金を使うのか、ということである。

●国レベルで数学のコンテストを実施して欲しい

算数オリンピックや数学オリンピックは、多少ながら文部科学省の応援も得ているが、ほとんど個人レベルでやっているの、まだ規模が小さい。一方、ハンガリーは、世界で最も数学のコンテストの歴史が長く、100年以上毎年続いているコンテストがある。現在、どれだけコンテストがあるのか数え切れない。市のレベル、区のレベル、県のレベルのコンテストなど、いろいろなタイプの全国のコンテストなどがあり、学年別の子供たちが参加している。

コンテストで良い成績を修めると、自分は数学に向いているとか、数学はおもしろいとか、子供は思

う。賞金はお金ではなく、本や、数学の問題集などで、それをばらばら読むことで、子供たちの数学への愛情がさらに深まっていく。

従って、文部科学省でも、数学のコンテストを子供たちのためにやって欲しいと、強く希望する。

●若手数学者の研究環境を整備する

数学者はかなり早い(若い)段階で大きな成果を得ることができる。このことに関しては日本の研究機関、大学等は、何も特別にはやっていないように見える。大学の助手は、大体は教授よりも論文を書き、研究に一生懸命であって、頭の回転も早い。その助手があまり研究に没頭できなくて、教授はいろいろな手伝いをやらせるとか、そういうような状況があるように思う。

●数学専攻の学生の就職口を増やす

日本ではそういうのはあまりないが、ハンガリーなど幾つかの国では、大学在学中にも全国の学生が参加するような論文コンテストがあり、それに評価されることは将来の就職などでも有利に働いている。

また、中国の数学のレベルが上がって来ている大きな理由は、北京や上海などに大きな純粋数学の研究所をつくり、数学の活気を呼び戻していることにある。大学では、数学のための新しい教授のポストを増やしている。

日本では東京大学を優秀な成績で卒業したドクターを取った人でも、就職口が非常に少ないのが現状である。一生懸命やっても結局就職につながらないということで、日本では数学の活気が続にくい状況がある。

●数学の発展のために海外人材を活用する

日本は数学の発展のために、外国の優秀な先生や優秀な学生をたくさん呼ぶべきだと思う。日本で勉強した外国人には、日本の大学などに就職させるなど、外国人研究者のための就職先を設けることが、海外から研究者を呼び込むためには必要である。

●数理解析研究所

京都の数理解析研究所(のような研究所)を東京にも欲しい。

4 大学における数学研究の現状と将来像

4 - 1

大学の現状

(森田康夫氏/東北大学教授)

(1)数学を発展させるために必要なこと

数学者には、じっくりと考える時間が必要である。現在は、会議への出席とか、いろいろな申請書を書くための時間で数学者の考える時間が失われている。数学の場合には、平均的なプレイヤーを増やした方が、スタープレイヤーに集中投資するよりも良いのではな

いかと思う。

(2)数学の研究評価

数学者として、数学にこの研究が大事かどうかは確実に評価できるが、社会に役に立つかどうかは数学者にはわからない。

数学者の書く論文は長い。論文数は少ないが、論文の生命は長い。数学の雑誌は、大学等が出している紀要が主である。

(3)最近の大学事情

数学者は教養教育や入学試験も担当している。最近、若手の研

究者の義務を減らして、研究に専念できるように優遇しているところも多い。

大学間の競争が激しくなったため、学生のサポートが大事になり、大学内の費用がかさんでいる。そのために、残りのお金が減ってきており、どう役に立つか見え難い基礎科学は、大学内のお金の獲得に苦勞している。また、雑誌の値段が高騰し、そのために小さな大学では旅費に割く費用なども不足している状況である。

例えば、東北大学の数学研究予算は、約8,000万円であり、1996

年には雑誌購入に1,679万円使用していたが、2002年には3,176万円と2倍弱になった。この間に買っている雑誌の数にはほとんど変わらない(図表6)。

国立大学の小さなところの状況はさらに厳しい。例えば、新潟大学には教員が17人の数学教室があり、研究費は約1,300万円である。その中で雑誌購入費用は約333万円である。愛媛大学では、研究費が512万円で、それ以外に雑誌が全学レベルで943万円分購入されている。研究費と雑誌購入費らをグラフにすると、図表7のように、顕著な右肩下がり状態が示され、研究費に苦勞しているということがわかる。

4 - 2

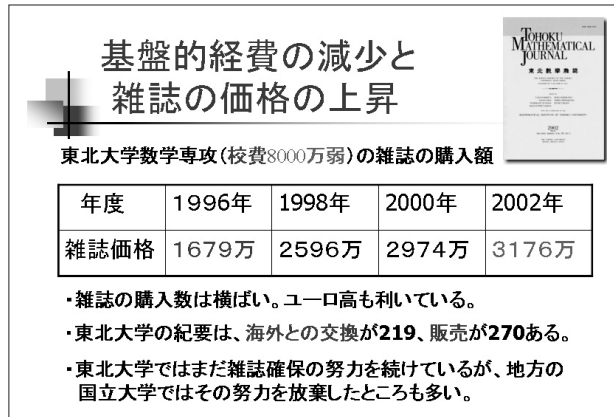
他分野との関わり (北大の試み)

(津田一郎氏/北海道大学教授)

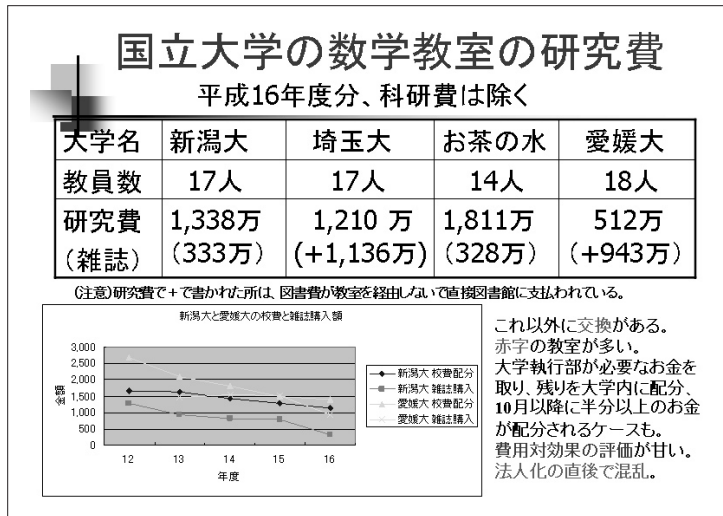
(1) 先端研究のための数学センター (他分野の問題を知る)

北大は数年前から「先端研究のための数学センター」を数学教室内につくっている。これはパーティクルセンターであり、ホームページに案内を出して、現在のところは北大内に限っているが、いろいろな諸分野の先端で研究している人の数学上の質問を受けつけている。レベルに差があると非常にやりにくいので、事前に公開セミナーによりチェックしている。事前に質問者に公開していいかどうかを尋ね、公開していい場合には公開し、数学教室内だけで閉じて欲しい場合には数学教室内だけで行っている。質問者にセミナーをやって貰う、あるいは質問に関連した諸分野の研究の現状を話して貰う。その発表を数学教室のメンバーが聞くことにより、数学者の方も現在他の分野でどういうことが問題になっているのかを知ることができる。

図表 6



図表 7



● 人材育成としても機能する

この活動に若手の数学研究者(大学院生以上)を参加させて、他分野の重要未解決問題を知って貰い、諸科学の重要問題に対して数学的な寄与を行って貰う。あるいは、そういうことを行えるような数学者として育つということを期待している。問題発掘型の数学者というのも、ここから育つてくると思う。

● 質問者における問題点

質問者の数学知識にかなりばらつきがあり、中には大学1、2年生の簡単な微分方程式の知識があればそれで済むのに質問に来るといった場合もある。ある程度、質問者の方にも研究者としてのレベルを要求したい。

● 他分野の人に数学者が望むこと
数学者が他分野とかかわろうとしたときに、数学者の方の負担がかなり大きい。相当、数学者から近寄っていかないと、協力関係を結ぶのが難しい。他分野の方も、思考基盤としての数学力というのをもう少しつけて欲しい。日本の場合はこの点で、欧米諸外国に比べて非常に劣っている。これは教育の問題かもしれない。

● 純粋数学の他分野への活用

高いレベルにある純粋数学をどれだけ他の分野に活用できるかは、これからの大きな課題である。従って、応用(数学)分野だけへの投資というのは、それほど意味がない、あるいは効果がないと考えている。また、純粋数学者全員が他分野と関わるということは、

期待してはいけない。やりたい人が、やればいいと思う。

(2)国際総合理論研究所の構想

北大では、数学を基点とした国

際総合理論研究所構想を持っている。数学自体を深めて豊かにすると共に、数学研究を他分野に生かすということを目指している。つまり、数学研究者と他分野研究

者とで共同研究ができるようなシステムづくりをしていきたい。あるいはそういう受け皿をつくりたい。さらに、他分野と交わる若手研究者を育成していきたい。

5 産業界および他分野からの数学研究への期待

5 - 1

産業界における数学の重要性について

(吉田英幸氏/中央青山監査法人)

保険会社は確率論をベースに事業が行われている。17世紀のパスカルやフェルマーが確率の扉を開き、不確実性というリスクにどう対処するのかという取り組みが始まった。この頃、ヤコブ・ベルヌーイが「大数の法則」を考えつき、これが人間の社会を不安から解消するという、生活を守るための保険制度の社会システムを生み出した。このシステムは非常にうまく機能して、大数の法則が最もよく機能した社会システムである。

1762年には、世界最古の保険会社、エクイタブルソサエティーがイギリスで設立されたが、240年もの歴史を持つ、この世界最古の保険会社は、2000年の12月に破綻した。これは年金の支払い保証リスクという、当時認識されていなかったリスクが顕在化した結果である。

金融イノベーションにより日々刻々、新しい技術がつくられている。従って、金融機関の曝されるリスクはどんどん複雑になってくる。経営者は、こういう状況の中で、非常に高度な判断を求められる。リスクには、計量化ができないものもあるが、数理的な分析を行うことで、直感以上の指針を与える場合がある。そのため、数理的な分析が非常に重要になってくる。

どうしたら新しい金融イノベ

ションが生まれるのか。日本に欠けているのは、金融コンサルタントと言われる人が少ないことではないか。ここに、数学科の卒業生がどんどん参入するようになると、また状況が変わってくるのではないか。

5 - 2

産業界からの期待 (情報セキュリティへの応用)

(宝木和夫氏/日立製作所)

暗号に関しては、安全性解析について、数学に期待したい。量子コンピューターができ、コストパフォーマンスが数千兆倍の暗号解読装置ができるかもしれないので、NP完全/問題ベースの公開鍵暗号の構築というのは非常に大きな課題になる。量子暗号系、量子原子を使った安全な通信を実現するプロトコルの設計にも、高度な数学モデルのリスク、抽象モデルが必要である。暗号に関しては、国防も絡んでいるので、国産暗号への期待がある。

ソフトウェア自身のバグも将来的に大問題になる。人がつくっているソフトウェアはある確率でバグがある。しかし、バグがあると困るというシステムがこれからはいっぱい出てくる。なるべくバグを減らすためには、数学的な検証が必要である。

産業界は、数学を使ってつくる深めた研究、要素研究などには熱意が少ない。欧米の企業が投資している基礎研究にもう少し目を向けないと、これからの情報セキュ

リティの問題には対処し切れないのではと考えている。提言としては、大学と企業とのコミュニケーションを増やして欲しいということである。例えば、年に1回、風光明媚な地で、2、3泊、泊まって暗号の学会をやっている。そういう場で、大学の先生と企業が懇親するだけで、事態は改善されるのではないか。

情報セキュリティの一部、暗号などの問題は、将来にわたって常に高度な数学を必要とする。敵は人間であるので、数学的により高度化して攻撃を行うことが考えられる。それから身を守るために、数学的により高度化した防御をやる。これがスパイラルで続くだろう。非常に高度な数学を使わないと対処できない可能性もあり、5年、10年先を考えると背筋が寒い状況にある。従って、数学力を蓄える必要がある。

5 - 3

生命科学分野からの数学への期待

(高木利久氏/東京大学教授)

1953年のワトソン・クリックのDNAの二重らせんの発見以来、分子の言葉で生命を語るということが行われてきたが、最近では情報の科学、計算の科学という側面が非常に強くなってきた。従来はDNAやタンパク質などの物質を理解する、つまり、部品を理解するという側面が強かったが、今はその部品と部品の関係がどうなっているのか、その部品と部品を介

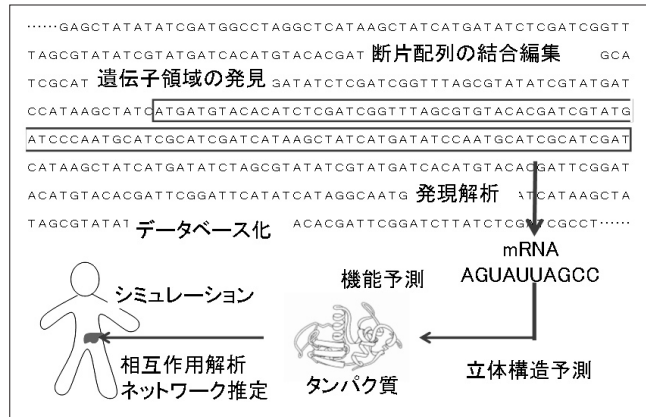
してどういう情報の流れがあり、
 どういう制御の流れがあり、ど
 ういう情報の変換があるのかとい
 うことを理解する方向に来ている
 (図表8)。

当然、生命科学と数学、あるいは
 情報科学の両方を理解した人材
 が必要であるが、残念ながら、こ
 こが最も欠けている。最近、情報
 科学の人間はこの分野に入ってく
 るようになったが、数学、物理、
 あるいは工学(制御工学や計測工
 学なども含めて)の人の参入、特
 に若い人の参入が必要であるが、
 それができている状況である。

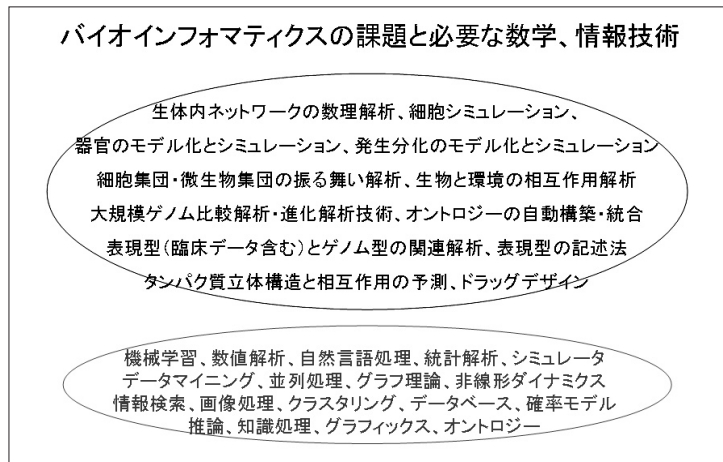
バイオインフォマティクスに
 関して欧米の状況を見ると、100
 を超える専攻、学科、教育プログ
 ラム、サマースクールなど多数あ
 る。情報科学、数学、物理学から
 も多数この分野に参入している。

ヒトゲノムの解析の結果につい
 ての『Nature』誌の論文だったと
 思うが、90人の著者の内、6人が
 数学出身である。また、『バイオ
 インフォマティクス』誌のエディ
 ター19人の内6人が数学出身
 である。さらに、バイオインフォ
 マティクス分野の一番大きな国
 際学会の25人のボードメンバー
 の内、3人が数学出身である。こ
 のように、欧米ではバイオインフ
 オマティクスに数学者がいる。
 しかし、日本では、数学からバ
 イオインフォマティクス分野に
 入っている人はほとんどいない。

図表8 情報科学(数学)を使って生命科学の問題を解く



図表9



大学におけるバイオインフォマテ
 イクスの専攻は、日本全体でも
 2つとか3つである。バイオイン
 フォマティクス人材養成プログ
 ラムがスタートしているが、欧米
 に比較すると非常に寂しい状況で
 ある。

生命科学に、新しい数学モデ
 ルや情報技術の必要性がある。今
 まで開発された情報の技術や数学

は、生命科学の問題にそのまま適
 用できるものはほとんどない。生
 命科学における複雑な現象を記述
 したり、そこから規則性を発見し
 たりするための技術はまだできて
 いないので、これからぜひ開発し
 て貰いたい(図表9)。そのため
 には、生命科学者と数学者の共同
 プロジェクトが必要である。

6 数学を基点とする分野横断型研究拠点へ向けて 私案 科学技術数学研究機構構想 (儀我美一氏/東大教授)

数学研究において、それを他分
 野に活用するにしても、人とコミ
 ュニケーションできるところ、人
 の集まる拠点というものが必要だ
 と考える。以下に、数学自体を深
 めるとともに、科学技術を根源か
 ら進展させるための国際研究拠点
 の構想を示す。

6 - 1 研究所の構想

研究所の大きな特徴は、常勤研
 究者を極力置かないということだ
 ある。これにより課題にタイムリ
 ーに対応できる。運営としては、

3センターの連携を考えている
 (図表10)。

(1) 数学交流センター

長期滞在者を主体とした「数学
 交流センター」を設置する。こ
 れは国際公募制によるスペシャ
 ルイヤー方式で運営する。毎年

課題を決めて、世界中から関連分野の研究者と数学研究者を集め、集中的に深い議論を通じて、新領域の展開を目指す。それだけではなく、数学自体を深化させ、発展させるようなトピックも選ぶ必要がある。

(2)先端研究のための数学センター

相談を受け付ける機関である「先端研究のための数学センター」を設置する。ここでは科学技術研究者が最先端の研究を進める上で生じる、数学上の質問（萌芽問題）を数学者集団が受け付け、調査し、可能ならば共同で研究する、あるいは適切な数学者を紹介する。質問者は、博士レベル以上を対象と

する。このセンターは、数学の他分野への寄与、数学の新領域の開拓を目的とする。

(3)数学情報文献センター

研究者を対象とした、現代数学の普及を目的とした「数学情報文献センター」を設置する。図書室の整備や電子化を通じて、他分野の研究者が必要とする数学の研究成果を使いやすい形で提供する。数学の成果はそのままでは使い難いので、それに対応する様々なシステムをつくる人材も育てる。例えば、国際学術誌クラスの紀要の出版を支援したり、日本語で書かれた数学書を英訳したり、滞在研究者に対して素数値計

算などを支援したり、いろいろなことが考えられる。このセンターは、数学に関してのサービスをする機関である。

6 - 2

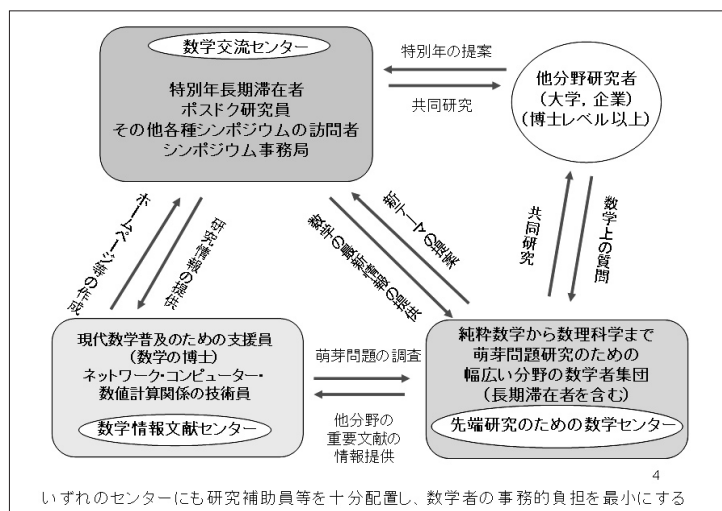
構想のねらい

本研究拠点により、数学を基点に、さまざまな科学技術分野を理論的にリードすることが可能になる。世界中から様々な研究者を集めるので、必然的に新しい研究者集団が形成される。その研究者集団を育成して、世界へ発信するとともに、数学自体を深化させ発展させることができる。

数学を媒介に様々な分野に研究交流が生じ、異なる研究バックグラウンドを持つ研究者同士で、お互いに言葉が通じるようになる。さらに、研究者の数理的思考力、数理的コミュニケーション力が向上する。

日本からの数学に関する情報発進力を強化するために、数学研究を補助し、普及する人材の育成を目指す。日本の場合、良い研究をする研究者が居るだけではだめで、その研究を普及していく人がいないとだめである。この点をサポートする必要がある。

図表 10 科学技術数学研究機構構想



7 質疑応答から

ワークショップの全体を通して、多くの質問およびコメントが発言された。これらの内から主なものを選び下記に示した。

(1)半導体産業における数学研究者の重要性

半導体は今、非常に厳しいところに来ている。欧米では、回路設計などについて数学者とエンジニアが日常的に一緒にやっている。しかし、日本の場合はそうではな

い。半導体という産業は、「ばらつきとの戦い」の産業であり、今までは経験と勘で、実験水準を決めて何とかしのいできたが、これからはパラメーターが多過ぎて実験一つできなくなる。従って、シミュレーションシステムやモデリング技術がないと、これからはものがつけれない。また、将来的に、半導体はベース産業として、バイオなど、他分野との融合をやらなければならない。単純な機能、プ

ロセッサとかメモリーというのは、どこでもつくれるので、これは全然産業の競争力がない。そういう意味で、よりグレードの高いものをやろうとすると、シミュレーション技術やモデリング技術というのが、どうしても必要になり、非常に困っているので、数学者に協力をお願いしたい。

(企業人からの意見)

(2)ドクターの学生に対する 企業のインターンシップ

ドクターに入った学生は、すべてがアカデミックポストにつけるわけではない。企業にいかなければならない学生もいる。彼らに社会で活躍してもらうために、ドクターの学生レベルにおいて、企業でインターンシップ等を受け入れて欲しい。そういう大学と企業の連携などが、研究連携も含めてあるのかというのが、非常に大きな問題になっている。そのための具体的なシステムは必要である。今までは、大きな大学も含めて、ドクターの学生に対する就職支援に関する具体的な対応はしてこなかったと思う。

(大学人からの意見)

今年度からインターンシップを開始し、受け入れてくれるところを探している。いくつかは見つかり、1つは保険関係のところで、あとは電機やソフトなどの企業で見つきたいと思っているが、こちらの希望しているものと企業側とで少し違っており、その辺のすり合わせをどうするかということが問題として残っている。

(大学人からの意見)

インターンとして、数カ月なり、我々の現場で暗号の解析などに従事して貰うことは大いに歓迎している。また、そういう制度もある。

(企業人からの意見)

インターンというか、学生の受け入れについては、保険会社はよく受け入れている。夏休みの間な

ど。マスター課程に在籍している学生を、時給幾らというような形で、アルバイトベースで雇って、それで現場の実務についてもらって経験を積んでもらう等、の形はとっている。

(企業人からの意見)

大学から学生を送って、企業で就業体験をしてもらう。米国では、学生は夏休みの間に（アメリカでは夏休みは約3カ月）、様々な企業である程度給料を貰いながら就業体験をする。彼らが大学を卒業するころには、好奇心が広がっていて、数学科を卒業した人がGMに勤めて塗装のことをやっていたり、ボーイングに勤めて、いろいろな流体のことで作業をしたりしている。このように、学生の好奇心を広げるように、企業が大学を助けるべきである。

(数学者からの意見)

(3)小規模なプラットフォーム型の 数学研究拠点

大規模な研究所をつくるのにエネルギーを割くよりも、大学が何校か連合して小さなプラットフォームをつくり、数学者だけでなく、応用数学の研究者、工学関連や化学などの他分野の研究者が集まれるような、小規模なプラットフォーム型の数学研究拠点をつくる方が、効果的ではないか。

(行政人からの意見)

数学の研究者、特に若手の研究者は、自分の頭の中の色々なアイデアを育むための期間、それを育むための場所、それを育むための給料など、が必要である。大規模

な研究所が必要なのではなく、(ポストドクから助手くらいまでの)若手研究者の支援のための費用(給料)が必要である。ある程度の期間、ある程度の時間は、色々な申請書類の作成、色々な会議への出席、教育などに関わらないで、自分の研究に没頭できることを可能にすることが重要である。研究場所は自分で選択でき、滞在費用などをサポートするアワード(賞)などが効果的ではないか。

(数学者からの意見)

雑用などを軽減し、研究に専念させるために、秘書的なサポートをする人や技官みたいな人を多く雇うべきである。それは任期制でもいいと思う。

(数学者からの意見)

(4)学生の興味を広げる 学部教育の必要性

高校までは数学が好きで、数学を一生懸命やっていて、大学進学時にいろいろな分野へ入って行く。ところが大学を卒業する頃には、いつの間にか縦割りがしみついでいて、そこで伸びなければ、もう落伍者だというような感覚ができていく。アメリカでは、学部では数学をやっている、大学院になると急に経済やバイオ、ビジネススクールなど、いろいろなところに行く。学部は基礎的な教育をするが、学生の興味は広げている。興味を広げ、技術を身につけるといことをアメリカの学部教育はやっている。日本の学部教育は興味を縮めていると思う。

(数学者からの意見)

8 今後の展開

本ワークショップを契機として、産学官の様々なレベルで、「日本の数学をどうするのか」についての真剣な議論が起こることが期待される。

今回の発表および討論では、産業界と大学において、お互いの連携の必要性や重要性を理解しながらも、双方の要望・希望（数学者がやりたい事と、数学者にやら

せたい事など）が必ずしも一致していないような様子が多々みられた。「官」としては、産学連携や他分野連携を踏まえた、多様な数学研究や数学研究人材育成の支援策が急務であると考えられる。分野横断型の数学研究拠点構想に関しては、多くの賛同者を得たが、ひとつの大規模な研究所よりも、複数の小規模な研究拠点を設置す

ることが効果的ではないかという意見にも賛同が集まった。

従って、今後も、「日本の数学をどうするのか」について、産学官で意見交換を実施し、問題意識を喚起することと共に、具体的な施策につなげて行くことが必要である。

執筆者



ライフサイエンス・医療ユニット

伊藤 裕子

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/>



薬学博士。ヒト染色体の構造・機能などの研究に従事。現在の専門は科学技術政策および科学史。ライフサイエンス分野の先端科学の動向、競争的研究資金制度、純粋科学 (pure science) の科学技術政策に関心がある。

日本の科学技術の 現状と今後の予測

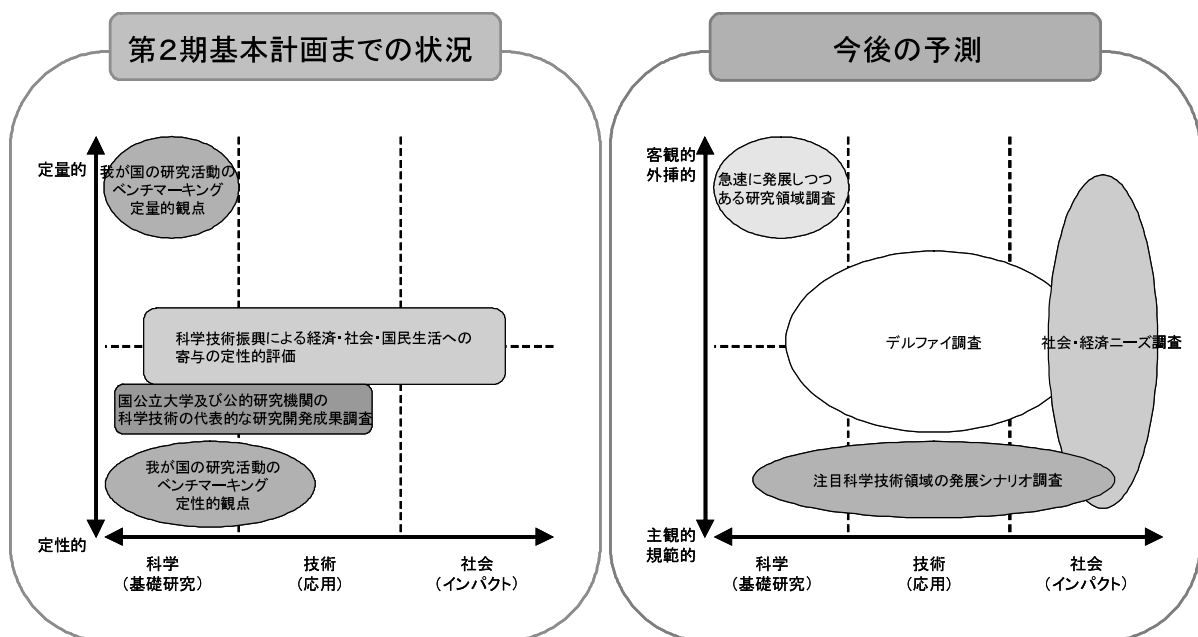
我が国の科学技術政策は、1996年度から科学技術基本計画に基づいて推進されています。現在は第2期科学技術基本計画（2000～2005年度）が進行中であり、2006年度からは第3期科学技術基本計画がスタートする予定です。科学技術政策研究所は、総合科学技術会議から第3期科学技術基本計画策定のための資料作成を要請され、第1期及び第2期基本計画を対象とした「基本計画の達成効果の評価のための調査」、今後の科学技術の方向性を対象とした「科学技術の中長期発展に係る俯瞰的予測調査」という2つの大きな調査を実施いたしました。

科学技術動向研究センターは、これら2つの調査に含まれる以下の各調査を担当しました。各報告書および概要版は、科学技術政策研究所のホームページに掲載されています。

NISTEP REPORT No. 89, 90, 93～99

<http://www.nistep.go.jp/achiev/abs/jpn/rep099j/rep099aj.html>

「科学技術動向」では、次号7月号から5回にわたり、以下の各調査の概要を紹介していきます。



第3期科学技術基本計画策定のための資料として科学技術動向研究センターが担当した調査

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

6 2005
No.51

Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

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
「報告書一覧科学技術動向・月報」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 - 0005 東京都千代田区丸の内 2 - 5 - 1
【電話】 03 - 3581 - 0605 【FAX】 03 - 3503 - 3996
【URL】 <http://www.nistep.go.jp>
【E-mail】 stfc@nistep.go.jp



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

科学技術動向2005年6月