科学技術動向 No.89 2008.8

Science & Technology Trends

科学技術動向

8
2008
No.89

レポート

p2.8 言葉の壁を越える音声翻訳技術

p3.20 月・惑星探査における我が国の宇宙開発能力

トピックス

環境分野

p4 我が国の地域別の温暖化影響

ナノテク・材料分野

p5 電子デバイス中の歪み分布をナノメートルの空間分解能で計測

社会基盤分野

p6 山崩れ予測のための地下流水音探査技術

その他の分野

p7 身体性や感覚に根ざした漢字の成り立ちを活用する学習教材

2008
No.89
8
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名の産官学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16F
【電　話】03-3581-0605【FAX】03-3503-3996
【URL】http://www.nistep.go.jp
【E-mail】stfc@nistep.go.jp

科学技術動向
概　要

本文は p.8 へ

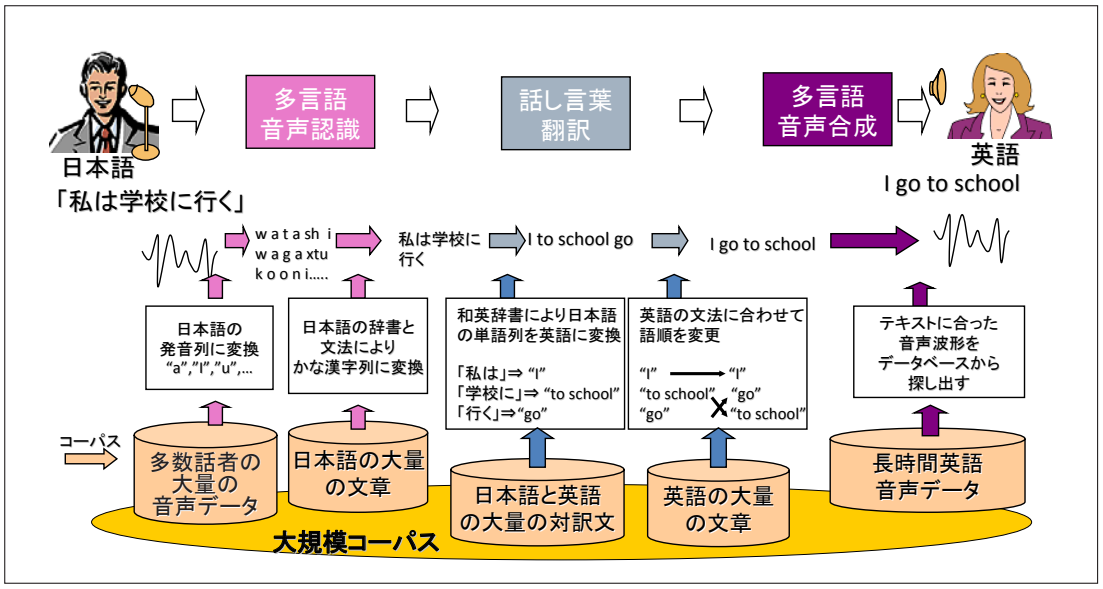
言葉の壁を越える音声翻訳技術

多国間の言語の壁はお互いの意志疎通にとって、今なお大きな問題であり、場合によっては、より深刻な問題となっている。話した言葉をその場で相手の言語に翻訳する自動音声翻訳技術を確立することは、経済活動・多言語観光ビジネス・外国人滞在者へのサービス向上を通じて、我が国のグローバル化にも大きく貢献する。

音声翻訳は、音声認識技術・テキスト翻訳技術・音声合成技術の統合技術であり、近年、それぞれの技術の発展とともにデータベースが拡充し、音声翻訳の精度は飛躍的に向上している。今世紀に入り、種々の言語的補助情報を付与した音声やテキストのデータベースである「コーパス」に基づく技術研究が急速に進み、現在では、日常の旅行会話に対し、一文ごとに日英中の双方向逐次音声翻訳を実現できる段階に達した。しかし、音声翻訳は発話者への依存性、表現の多様性が大きく、新しい語彙や概念が社会変化に応じ次々と創造されるため、特に多国間の音声翻訳には多くの研究課題が残されている。

音声翻訳技術は、基本技術の研究開発も大事だが、実世界でのコーパス収集と自動学習が不可欠であり、使われてこそ性能があがるという側面がある。今後、種々の場において、フィールド実験を重ねながら、可能なところから導入していくことが重要である。また、多くの国の言葉の壁を越えるべく、多言語多国間の連携スキームを進めていく必要がある。音声翻訳は日本が進んでおり、標準化などの場では他国をリードできる技術である。

音声翻訳のメカニズム



科学技術動向研究センターにて作成

本文は p.20 へ

月・惑星探査における我が国の宇宙開発能力

米国航空宇宙局（NASA）は現在、アポロ計画以来となる有人月・火星探査計画に着手するとともに、全米研究評議会（NRC）が 2002 年 7 月に公表した太陽系科学探査に関する報告書の提言を受け、無人科学ミッションを推進している。欧州宇宙機関（ESA）も、無人探査車による火星ミッションを計画しているほか、中国およびインドも新たな宇宙開発能力の獲得のため、無人月探査計画に着手した。

我が国においては、小惑星探査機「はやぶさ」が、小惑星イトカワの詳細な科学観測および表面試料採取に挑戦して多大な科学成果を挙げ、我が国独自の宇宙技術であるイオンエンジンなどによるサンプルリターンをほぼ確立した。また月周回衛星「かぐや」が、アポロ計画以来の本格的な月の科学探査を行い、月の誕生と進化の謎の解明に挑戦している。

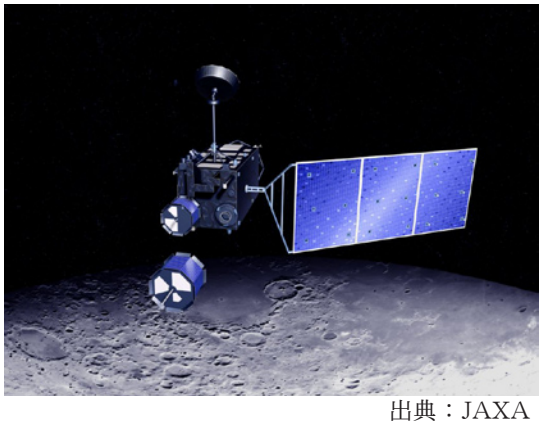
我が国の活躍の背景には、優秀な研究者・技術者の存在がある。（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部（ISAS）の研究者らの存在により、小惑星への「はやぶさ」のタッチダウン成功、さらにはその後の推進剤漏洩事故による満身創痍からの復活を果たすことができた。資源が乏しく食料自給率も低い輸出立国である我が国にとっては、人材が国力の源泉であり、この様な研究者・技術者による後継人材の育成も重要な機能である。

今後、イオンエンジンなどによるサンプルリターンのような、我が国独自の技術を継続的に開発して、友好国との国際協力を推進し、信頼関係の維持・強化を図ることが期待される。また将来の理工系人材の確保のためにも、今後とも月・惑星探査から得られる科学成果に基づく普及啓発活動を継続・強化したい。

「はやぶさ」（想像図）

出典：JAXA

「かぐや」（想像図）



出典：JAXA

2008年5月、温暖化影響総合予測プロジェクトチームは、我が国における地域別の水資源、森林、農業、沿岸域、および健康の5分野への温暖化影響に関する評価結果を発表した。2005年にスタートした、環境省による「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」の中間報告として、14機関の研究者45名によりまとめられた。今世紀半ばには、我が国の様々な地域において、洪水や土砂災害の増加、森林適域の北方への移動と衰退、米作への影響、高潮災害の拡大や沿岸部での液状化リスクの増大、熱中症患者の増加、感染症の潜在的リスクの増大など、多岐にわたる影響が現れるとしている。本プロジェクトは、2009年度までに、我が国およびアジア地域の温暖化による影響の全体像を定量的に把握し、温暖化影響の危険水準および適応策に関する科学的知見を提示することを目標としている。

トピックス 1 我が国の地域別の温暖化影響

2008年5月29日、温暖化影響総合予測プロジェクトチームは、「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」の中間報告として、我が国における地域別の水資源、森林、農業、沿岸域、および健康の5分野への温暖化影響に関する評価結果を発表した。

このプロジェクトは、環境省が運営する競争的研究資金である地球環境研究総合推進費S-4の戦略的研究「温暖化影響総合予測プロジェクト」として2005年にスタートした。2009年度までの5年間で、我が国およびアジア地域の温暖化による影響の全体像を定量的に把握し、それに基づく温暖化影響の危険水準と適応策に関する科学的な知見を提示することを目標としている。同様の温暖化影響がすでに報告されているIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次評価報告書との違いは、その温暖化影響レベルを我が国の地図上で詳細に示したことにある。プロジェクトチームは、茨城大学や（独）国立環境研究所など14機関からの研究者45名で構成されている。

中間報告書では、今世紀半ばには、我が国の様々な地域において、洪水や土砂災害の増加、森林適域の北方への移動と衰退、米作への影響、高潮災害の拡大や沿岸部での液状化リスクの増大、熱中症患者の増加、感染症の潜在的リスクの増大など、多岐にわたる影響が現れるとしている（図表）。さらに、気温上昇に対する影響感度の分析から、温暖化の危険水準を次のように示している。洪水や土砂災害による被害金額は、2℃を超えると豪雨の増加によって急速に大きくなる。高潮による浸水人口は、2℃を超えると現在の約1.7倍を超える。農業では，気温上昇が約2.6℃を超えると生産適地の北上が起こる。熱ストレスによる死亡リスクは、気温上昇に伴って指数関数的に増加する。

本プロジェクトの成果は、温暖化に対する適応策について、行政のみならず、企業や市民が地域毎に議論・策定していくための有効な前提条件になるものと期待される。

図表　我が国における各分野の温暖化影響（今世紀半ば～今世紀末）

水資源への影響
豪雨の頻度と強度が増加して、洪水の被害が拡大し、土砂災害、ダム堆砂が深刻化する、無降雨期間の濁質流出量増加によって水道の浄水費用が増加する。一方、積雪水資源の減少は、北陸から東北の日本海側で代掻き期の農業用水の不足を招き、降水量の変化によって九州南部と沖縄などでの渇水リスクが高まる。

森林への影響
温暖化に伴う気温上昇・降雨量変化によって我が国の森林は大きな打撃を受ける。ブナ林・チシマザサ・ハイマツ・シラベ（シラビソ）などの分布適域は激減し、今世紀の中頃以降、白神山地もブナの適地ではなくなる。また、マツ枯れの被害リスクが拡大し、1～2℃の気温上昇により、現在はまだ被害が及んでいない本州北端まで危険域が拡大する。

農業への影響
我が国のコメ収量は、北日本では増収、近畿以西の南西日本では現在とほぼ同じかやや減少する。さらに、コメの品質低下、他の穀物や果樹などの生産適地の北上や減収によって農業に大きな影響が及ぶ。

沿岸域への影響
海面上昇と高潮の増大で、現在の護岸を考慮しても、浸水面積・人口の被害が増加する。特に、瀬戸内海などの閉鎖性海域や三大湾奥部では、古くに開発された埋立地とその周辺で浸水の危険性が高い。また、海面上昇は汽水域拡大による河川堤防の強度低下、沿岸部の液状化危険度リスクを増大させる。

健康への影響
温暖化によって健康への脅威が増す。気温とくに日最高気温の上昇に伴い、熱ストレスによる死亡リスクや、熱中症患者発生数が急激に増加し、とりわけ高齢者へのリスクが大きくなる。気象変化による大気汚染（光化学オキシダント）の発生が増加する。感染症（デング熱・マラリア・日本脳炎）の媒介蚊の分布可能域も拡大する。

出典：参考文献[1)]

参　考
1) 環境省プレスリリース、2008年5月29日：
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=9770

今日のトランジスタには、シリコンに1%程度の引っ張りや圧縮の歪みを加える、歪みシリコン技術が用いられ性能向上が図られている。しかし、デバイス中の複雑な歪みの分布を走査せずに計測する技術が必要となるが、現状では未だ確立されていない。仏国立科学研究センターの研究グループは、モアレ干渉法と電子線ホログラフィー法を組み合わせることにより、走査をせずに、マイクロメートルスケールの視野とナノメートルスケールの空間分解能を両立させ、かつ必要な測定感度と精度を満たす計測が可能になったと報告した。歪み分布の新たな測定手法として期待される。

トピックス 2 電子デバイス中の歪み分布をナノメートルの空間分解能で計測

トランジスタの集積度に関しては、今日に至るまでほぼムーアの法則にしたがって微細化が進んできたものの、トランジスタの大きさが原子レベルになることで、この法則には物理的限界が訪れると言われている。一方、そこに至る前にも、すでに平面型MOSFETでは、微細化によるリーク電流の増加などの問題が出てきており、性能向上のための微細化はすでに限界に来ているとの見方もある。問題解決の一案として、歪みシリコンや立体構造を採用することで、性能向上を図る試みがなされている。なかでも、シリコンに1%程度の引っ張りや圧縮の歪みを加えることで、チャンネル中の電荷（電子または正孔）の移動度を増加させ、それにより性能の向上を図る歪みシリコンの技術は、少ないコストアップで得られる効果が大きく、多くのMOSトランジスタデバイスに適用されており、近年の不可欠な技術となっている。トランジスタのゲート幅は数十nmであり、さらにそこに加える歪みの方向や、引っ張りか圧縮か、あるいは一軸性か二軸性かの制御など、ナノスケールでの歪みのエンジニアリングが重要になっている。

従来から用いられている歪みの計測方法は、基本的には1点計測であり、μmオーダーの広い範囲の測定には長時間を掛けて測定位置を走査する必要がある。現状では半導体デバイス中の複雑な歪み分布を計測する実用的な技術は確立されていない（図表）。

2008年6月、フランスのトゥールーズにある仏国立科学研究センター（CNRS）の研究グループは、モアレ干渉法と電子線ホログラフィー法を組み合わせることにより、走査をせずにマイクロメートルスケールの視野とナノメートルスケールの空間分解能を両立させ、かつ必要な歪みの測定感度と精度を満たす計測が可能になったと報告した[1)]。この研究グループは、幅90nmのシリコンのチャンネル部に一軸性圧縮応力を加えたダミートランジスタをシリーズに並べたものを製作し、有限要素法によるシミュレーション結果と実測データとを比較することにより、この計測法の評価を行なっている。その結果、幅0.25μm長さ1μm以上の視野、5nmの空間分解能、0.1%未満の歪みに対する感度、また歪みが一様な領域の測定から変動係数0.2%の測定精度が得られた。

今回の報告では、200kVの透過電子顕微鏡を使用しており、試料作製や計測も容易ではなく、インライン計測は困難なものの、走査なしに歪み分布を計測する新たな手法として期待される。

歪み分布測定技術

測定法	感度	空間分解能	走査	視野/走査範囲
収束電子線回折	0.02%	10～20nm	要	～100nm
ナノ電子線回折	0.1%	～10nm	要	～100nm
チップ増強ラマン	0.05%	＜50nm	要	～100μm
共焦点ラマン	0.02%	～150nm	要	～300μm
X線回折	0.01%	100μm	－	－
本報告手法	＜0.1%	～5nm	不要	～1μm

参考文献[2)]を基に科学技術動向研究センターにて作成

参　考
1）Hytch, M. et al., “Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices” Nature Vol.453, 1086-1089(2008)
2）2007 ITRS page 27, Figure MET3

これまで、地下水の状況の把握は困難であり、山崩れ原因のひとつとして推測の域を出ていなかった。2008年5月28日、(独)森林総合研究所は京都大学防災研究所、鳥取大学および鳥取県林業試験場と共同で、地下水の流れる音を探知する「地下流水音測定装置」の開発を発表した。また、この装置を用いて実際に発生した山崩れ箇所を調査し、山崩れと地下水の集中に高い因果関係があることを明らかにした。測定装置は、一人で容易に持ち運びができ、地下約10mまで探知が可能である。

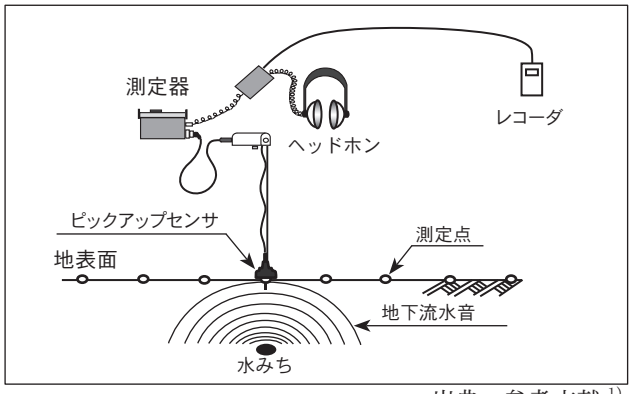
トピックス 3 山崩れ予測のための地下流水音探査技術

一般に、山崩れの原因は地形地質などの素因と降雨や地下水などの誘因に分けられ、両者の条件が揃った場合に山崩れが発生する。実際に山崩れが発生した箇所では湧水や流水の痕跡が確認されることから、崩壊現象には地下水が集中するいわゆる「水みち」が関連している場合が多いと考えられてきた[1)]。しかしながら、水みちと山崩れの因果関係は、推測の域を出ていなかった。これは、山崩れが突発的現象であり発生位置を事前に特定することが困難であり、また、簡便に水みちを探査する方法も無かったことに因る。

2008年5月28日、(独)森林総合研究所は、京都大学防災研究所、鳥取大学および島根県林業試験場と共同で、地下水が流れるときに発生する曝気音[注)]を簡便に測定する「地下流水音測定装置」の開発を発表した。また、この装置を用いて地下水の集中と山崩れの発生に高い因果関係があることを明らかにした[2)]。

地下流水音測定装置は、地中音を集音するφ0.8×10cmのステンレス棒を取り付けたピックアップセンサ、測定器、ヘッドホン、レコーダから構成されており、小型軽量で一人で容易に持ち運びができる。この装置は地下水専用装置であり、地下約10mまで探知可能である。従来水道管の漏水箇所の検知装置として開発されたセンサの感度を上げ、雑音を取り除くフィルター回路等の改良を行った（図表1）。

図表1　地下流水音の測定



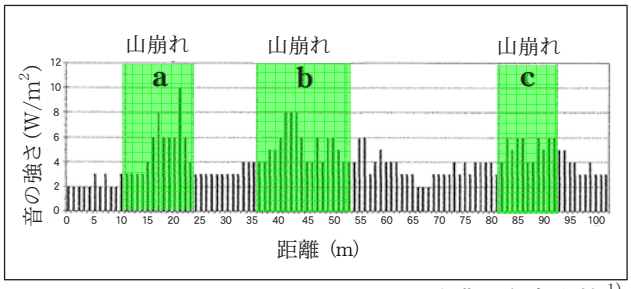
出典：参考文献[1)]

現地調査に先立ち、この測定装置を用いた室内実験で人工的に作成した地下流水音を測定し、地下流水音の大きさは水みちまでの距離と流量の大小によって定まり、水みちの直上で最も強くなる特徴を把握した。

現地での測定は、スギ・ヒノキを植栽した幼齢林地斜面で発生した表層崩壊10箇所と、林道を設置するため山を切り取った法面で発生した法面崩壊63箇所で地下流水音を測定し、崩壊箇所は崩壊していない箇所に比べ地下流水音が大きいことがすべての箇所で確認された。林道部法面2箇所において、強い地下流水音が存在するも崩壊の発生していない法面があったが、この箇所もその後の台風による豪雨で崩壊が発生した。これらのことから、山崩れ発生原因のひとつとして、地下水の集中が関係していることが明らかとなった。

なお、この研究は京都大学防災研究所COEプログラム、および(独)森林総合研究所への文部科学省科学研究費補助金の成果である。

図表2　地下流水音測定結果



出典：参考文献[1)]

上図は地下流水音測定結果の一例であり、a・b・cの区間で崩壊が発生した後に測定したものである。この様に地下流水音が周囲より大きい箇所において山崩れが発生、あるいは、発生する危険性が高い。なお、降雨直後はあらゆる箇所で地下流水音が大きいことから、測定は降雨後2～3日以上経過した後に行う。

注　曝気音：地下水が、岩盤の亀裂や土粒子の間隙に入り込むと間隙中の空気を押し出す。このときに発生する気泡の破裂音。

参　考

1) 地中水みちと崩壊発生位置の関連性、砂防学会誌、Vol.60、No.4、p.25-33（2007）

2) (独)森林総合研究所プレスリリース：http://ss.ffpri.affrc.go.jp/labs/kouho/Press-release/2008/yamakuzure20080529.html

白川静博士（1910 ～ 2006 年）は、中国古代の甲骨文や金文まで遡って、漢字の原義を字形学的に体系化した白川文字学を確立した。漢字は象形文字の時代から今日まで実用されている唯一の文字であり、文字誕生以前から誕生以降をつらね、人間の意識、身体や自然の捉え方、文化の変遷を解明するために、認知考古学的に多大な意味があると示唆されている。身体の形・動きや感覚に根ざした漢字の成り立ちを理解することによって、文字を機械的に暗記するのではなく、個々の文字を堅固に学ぶ事が可能になると期待される。白川氏の故郷である福井県の教育委員会は、児童が興味・関心をもって漢字学習に取り組めるようにすることを狙いとし、白川文字学を活用して独自の教材を作り、2008 年 4 月から県内の公立小学校と特別支援学校で使い始めた。教材では漢字の成り立ちについて分かりやすい説明を掲載してあり、形・意味の面から体系的に学べるように工夫している。

トピックス 4 身体性や感覚に根ざした漢字の成り立ちを活用する学習教材

福井出身の文字・漢字学者、白川静博士（1910 ～ 2006 年）は、中国古代の甲骨文や金文まで遡って、漢字の原義を字形学的に体系化した白川文字学を打ち立てた。氏の研究方法は、字形のみならず、古代人の意識、生活、文化、自然観も考慮に入れて解析するものであった。又、実際に甲骨文字を彫った古代人の身体感を実感するために、数万片の古代文字資料を、自らなぞって記録した。

3 千～ 5 千年前に誕生した古代文字の多くは、象形文字とそれに基づいて音節化した文字から成るが、実用文字として現存するのは漢字のみである。漢字は、文字誕生以前から誕生以降をつらね、人間の意識、身体や自然の捉え方、文化の変遷を解明するために、認知考古学的に多大な意味があると示唆されている。

個人の成長過程をみると、小学校の学年が上がるにつれて、漢字の形の複雑さ、読みの多様性、意味の多義性、抽象性が高まり、高学年では機械的に漢字を暗記することが容易ではなくなる。特に、読み書きの学習困難のある児童にとっては、低学年から急速に難易度が上がる。

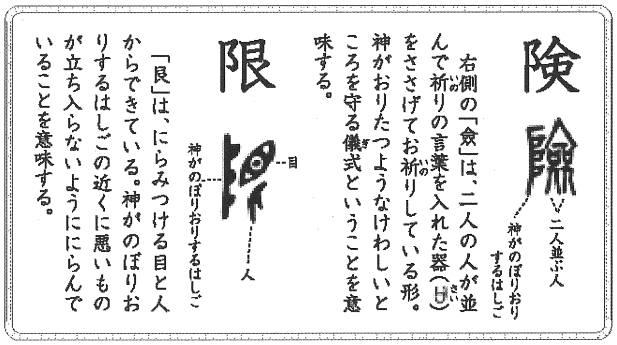
これに対し、複数の感覚を動員した多感覚学習法が有用であるが、これまで、音節文字であるアルファベットやひらがなでは、単語の意味に依存して、その中で使われる文字を習得する方法がとられてきた。一方、漢字は、字形や成り立ちからみて、様々な感覚や身体などの具体的な手がかりを含むため、これを活用して現実に接地した堅固な学習が、個々の文字単位で可能になることが期待される。

福井県教育委員会は、児童が興味・関心をもって漢字学習に取り組めるようにすることを狙いとし、白川文字学を活用して、独自の教材を作り、2008 年 4 月から県内の公立小学校と特別支援学校で使い始めた。

教材は①なぞり書きもできる書き込み式の練習帳、ワークシート「楽しい漢字」、②活用の手引き、③壁などに掲示できる漢字一覧表からなる。目や耳、手足、身体、動作、動植物、地形、道具、等、漢字の成り立ちについて分かりやすい説明を掲載している（図表参照）。

学習指導要領の学年別漢字配当表（1006 字）を基準にしたうえで、異なった学年で学ぶ事になっている漢字も、形や意味の類似している仲間の漢字を集めて、体系的に学ぶよう工夫している。又、福井県での日常生活で接する事の多い漢字（16 字）も配当表外から加えている。

漢字の成り立ちの説明



漢字学習ワークシート「楽しい漢字」5年生用から引用。象形的字形の組み合わせから、「限る」・「険しい」など抽象的意味を表す文字をつくっている。又、宗教的・呪術的背景のあることがわかる。白川氏は、「口」を持つ漢字の多くは、「口」を「くち」ではなく、神に祝詞をささげる器（図中の「さい」）と解釈することによって意味が明らかになる事を見出し、これを発端に多くの漢字の成り立ちを解明した。

参　考

1) 福井県教育委員会、『漢字学習ワークシート「楽しい漢字」、活用の手引き、白川静博士の漢字の世界へ』
2) 白川静、「漢字－生い立ちとその背景－」、岩波新書（1970）
3) 立命館大学白川静記念東洋文字文化研究所：http://www.ritsumei.ac.jp/acd/re/k-rsc/sio/eprof.html

科学技術動向研究

言葉の壁を越える音声翻訳技術

中村　哲
客員研究官

1 はじめに

異なる言語を話す人々のコミュニケーションを可能にすることは、経済活動のグローバル化やボーダーレス化に伴い極めて重要になっている。話した言葉をそのまま相手の言語に自動で翻訳する音声翻訳技術は、人類にとって長年の夢であり、世界を変える10の技術の中のひとつとしても選ばれている。特に日本では、地理的条件や日本語の孤立性などに起因する外国語習得の困難さがあり、日常の話し言葉を自動翻訳する音声翻訳システムに対する期待が大きい。この音声翻訳技術は、ますます国際化する日本人と日本という国にとって恩恵の大きい技術である。

自動音声翻訳技術は、音声を認識する技術、認識した話し言葉を翻訳する技術、相手の言語で音声を合成する技術の3つで構成される。最近の技術の発達により、日本語、英語、中国語の旅行会話の自動音声翻訳が実用可能なレベルまで到達しており、文が短く単純な会話の一文ずつを逐次翻訳できるまでとなった（日英翻訳では、TOEICで600点以上）。

しかし、より多くの言語への対応や、実用上必要となる場所名や人名などの種々の固有名詞の自動獲得など課題も多く、今なお実用化への挑戦が続く。さらには、「五月雨式」に音声翻訳する同時通訳のような技術の確立も望まれる。また、音声翻訳に使われる個々の技術は、音声情報検索・対話型ナビゲーション・口述筆記と要約・アーカイビングなどにも幅広く適用が可能な技術であり、その新しい使い方にも期待される。

本レポートでは、まず音声翻訳技術の意義を確認し、これまでの研究開発状況や自動翻訳技術の歴史について概観する。さらに、音声翻訳システムの構成や現状のシステム性能について述べる。また、世界の研究開発動向について触れ、音声翻訳技術の実用化についても述べ、アジア言語への展開および接続標準化活動についても紹介する。最後に、音声翻訳技術の課題と展望をまとめ、音声翻訳技術を推進するにあたっての課題を解決すべき方策について提言する。

2 音声翻訳技術の歴史

2-1 音声翻訳研究の意義とこれまでの歴史

音声翻訳はある言語で発話された音声を別の言語の音声に翻訳して出力する技術である。音声翻訳技術の意義は、異なる言語を話す世界の人々とのコミュニケーションを可能とし、グローバルビジネスや異文化交流、ランゲージデバイドの解消などを実現することである。音声翻訳術の実現が、人類にもたらす科学的価値、文化的価値、経済的価値は、非常に大きいといえる。An MIT Enterprise Technology Review誌の2004年2月号の特集「10 Emerging Technologies That Will Change Your World」においては、世界を変える10の技術のひとつとしてUniversal Translationが取り上げられており、種々の翻訳技術の中でも特に音声翻訳技術に焦点をあてて紹介されている。

音声翻訳が初めて注目されたのは1983年の世界電気通信展示会（テレコム‘83）であり、日本電気株式会社（以下NECと表記）がコンセプト展示として音声翻訳のデ

モを行い注目を集めた。この後、音声翻訳実現のためには長期的な基礎研究を行う必要があるという認識のもとに、1986年に(株)国際電気通信基礎技術研究所(以下ATRと表記)が設立、音声翻訳の研究プロジェクトが開始され、国内外から様々な研究機関の音声言語研究者が参画することになった[1)]。1993年には、ATR、カーネギーメロン大学(以下CMUと表記)、シーメンス社による世界3地点を結んだ音声翻訳実験が行われた。ATRのプロジェクト開始の後、世界でも音声翻訳のプロジェクトが開始された。ドイツでは「Verbmobil」プロジェクト、欧州共同体で「Nespole!」、「TC-Star」、米国では「TransTac」、「GALE」プロジェクトが開始された。この中でも「GALE」プロジェクトは、2006年からアラビア語と中国語から英語へと自動翻訳するためのプロジェクトであり、これまで人間が行っていた多言語重要情報の抽出作業の自動化を目的にしており、バッチ型テキスト出力のシステムとして構成されている。これに対し、ATRやNECは、これまで対面・非対面のリアルタイム異言語コミュニケーションを達成する音声翻訳を目標にしており、音声から音声へのオンライン翻訳が前提となっており、処理の即時性が重要なファクターとなっている。

音声翻訳は、音声認識・自動翻訳・音声合成の3つのコンポーネントとそれらを統合する技術から構成され、それぞれの技術の困難さが存在する。特に、話し言葉の音声を認識し、翻訳する必要があるが、話し言葉の文には非文法的な口語表現が含まれること、疑問符や感嘆符、引用符などの記号は含まれないことから、テキスト翻訳よりも翻訳が困難である。また、音声の誤認識も重大な翻訳誤りを起こす。したがって、最初からあらゆる会話を対象とするのではなく、特定の比較的容易な会話に対象を絞り込むことにより、精度を利用可能なレベルまで向上させるという開発手法がとられた。図表1に音声翻訳技術の変遷を示す。比較的容易な翻訳からだんだんと高度な翻訳へと研究開発が進められ、対象とする会話は、会議予約、ホテル予約、旅行会話へと順を追って進められてきたが、今後はさらに多様な日常会話や高度なビジネス会話へと対象分野を拡げていく必要がある。

2-2 自動翻訳の歴史

3つのコンポーネントのうち、テキスト翻訳技術の最近の進歩が、自動音声翻訳技術の実現に大きな貢献を果たしている。このテキスト翻訳技術の研究に関しては、半世紀を越える長い歴史がある。

最初のコンピュータが誕生して間もない1946年に、米国の科学技術政策に大きな影響力を持っていたロックフェラー財団のW.ウィーバーがテキストの自動翻訳技術の研究を提唱している。そして、1953年に、初めてIBM社が開発した商用コンピュータ701を利用して、ジョージタウン大学とIBM社が自動翻訳の共同研究を開始した。1954年には、このコンピュータで世界初の自動翻訳システムを構築し、露英翻訳が可能なことを実証した。このシステムは250語の辞書と6個の規則からなる極めて限定的な翻訳能力しかなかったものの、社会に与えた衝撃は大きく、当時の人々はすぐにでも言葉の壁は解消すると感じた。また、この後、米国政府はスプートニク・ショックへの対応の一環として、自動翻訳の研究にも2千万ドルもの資金を投入している。

ところが、1965年に、自動言語処理諮問委員会(ALPAC)は重大な報告書を米国科学アカデミーに提出した。自動翻訳は当面実用化できないので、むしろ基盤となる言語理論や言語理解の研究を進めるべきだと

図表1　音声翻訳に関わる研究開発の推移

研究フェーズ	実現性の確認 80年代	技術の拡張 90年代	実利用への挑戦 2000年代
対象分野	単純予約 (ATR-phase1)	予約とスケジューリング (ATR-phase2, Verbmobil)	・日常旅行会話(ATR-phase3) ・基調講演翻訳(TC-Star) ・軍事用会話(TranTac) ・情報収集(Gale)
言語的特徴	文法的に正しい表現	状況依存したり、非文等を含む日常的な表現	広範囲な話題や固有名詞を含む表現
音響的特徴	明瞭な発声	不明瞭な発声	雑音を含む発声
翻訳方式	規則に基づく翻訳 人工的中間言語翻訳	用例に基づく翻訳 英語中間言語翻訳	統計に基づく翻訳 多対多言語直接翻訳

(注:ATR-phase1:1986〜1992年、ATR-phase2:1993〜1999年、ATR-phase3:2000〜2005年、その他のプロジェクト略名は本文参照。)

科学技術動向研究センターにて作成

いう趣旨の報告書であった。以後、米国においては、自動翻訳に予算はつかなくなり、研究は基礎に向き、意味や理解というキーワードが重視された。その中では、1970年のヴィノグラードの世界知識を使った言語理解が有名な成果である。しかし、このような研究は、基礎となる知識ベースの不足から、汎用で実用的な意味での自動翻訳の性能向上には直接には結びつかなかった。

日本では1980年代に、ルールベース翻訳、用例ベース翻訳、統計ベース翻訳という3つの大きな技術革新の波が訪れた。日本では、1982年に科学技術庁の科学技術文献の要約を自動翻訳するプロジェクト（Muと呼ばれる）が成功した。この結果によって、辞書とルール（解析文法規則、変換規則、生成文法規則）に基づくルールベースの自動翻訳の研究開発が普及し始めた。ベンチャーのブラビス社による商用翻訳ソフトが発売された。これを機に、富士通(株)、(株)東芝、NEC、沖電気工業(株)など大手IT各社の自動翻訳システムも商用化された。現在までに世界で商用化されたパッケージソフトの全て、およびWEBで公開されているソフトのほとんどは、このルールベース技術を基本としたものとなっている。翻訳品質の改善に専門用語辞書の充実が有効であったために、地道な努力が積み重ねられ、辞書の規模は数万から数百万まで拡大した。

一方、1981年に長尾真京都大学教授（当時）が人間の行う翻訳過程にヒントを得て、入力文に類似した文とその翻訳（併せて対訳用例と呼ぶ）を活用する用例ベース翻訳方式を提唱した。この用例ベース翻訳が、1990年前後に京都大学とATRで行われた研究をきっかけに、二つ目の波として、日本から世界へ広がって行った。この方式は、ルールベースの商用システムに一部取り入れられ、さらに、(独)情報通信研究機構（以下NICTと表記）が中心になり実施している科学技術文献の日中翻訳プロジェクトの基本方式として現在も採用されている。

また、1988年にIBM社が、文法などの知識を排除した純粋に統計的処理と対訳データとを組み合わせた統計ベース翻訳という手法を提唱した。しかし、その論文は難解であり、計算機の能力不足、対訳データの不足、実行方法が特許明細書でしか開示されなかったこと、英語とフランス語のような類縁言語間以外には有効でなかった、などの理由のために、長らく重要視されなかった。しかし、2000年前後に「句に着目した統計ベース翻訳方式」が提案され、対訳データの充実や計算機能力の向上を追い風に、第3の大波となり、現在では、統計ベース翻訳の研究に関する論文が9割を占めるに至っている。この研究領域がまだ伸びるのかは現在は判断しにくい状況である。

今はちょうど、上記の3つの大波が重なっている。ルールベース、用例ベース、統計ベースの自動翻訳の長所と短所とが次第に分かってきた。どれか単一の方式ではなく、3方式をうまく融合できたときに最高の性能が実現できるというのが現時点での見解である。しかし、3つの方式には共通の課題もあり、3方式とも文単位の翻訳である。文脈情報が利用できていない。すなわち、前後の文章の関係を使っておらず、結束性を担保できていない。特に、統計翻訳は入力文の意味の解釈を行わずに自動翻訳しているため、ナンセンスな訳文が生じることもある。

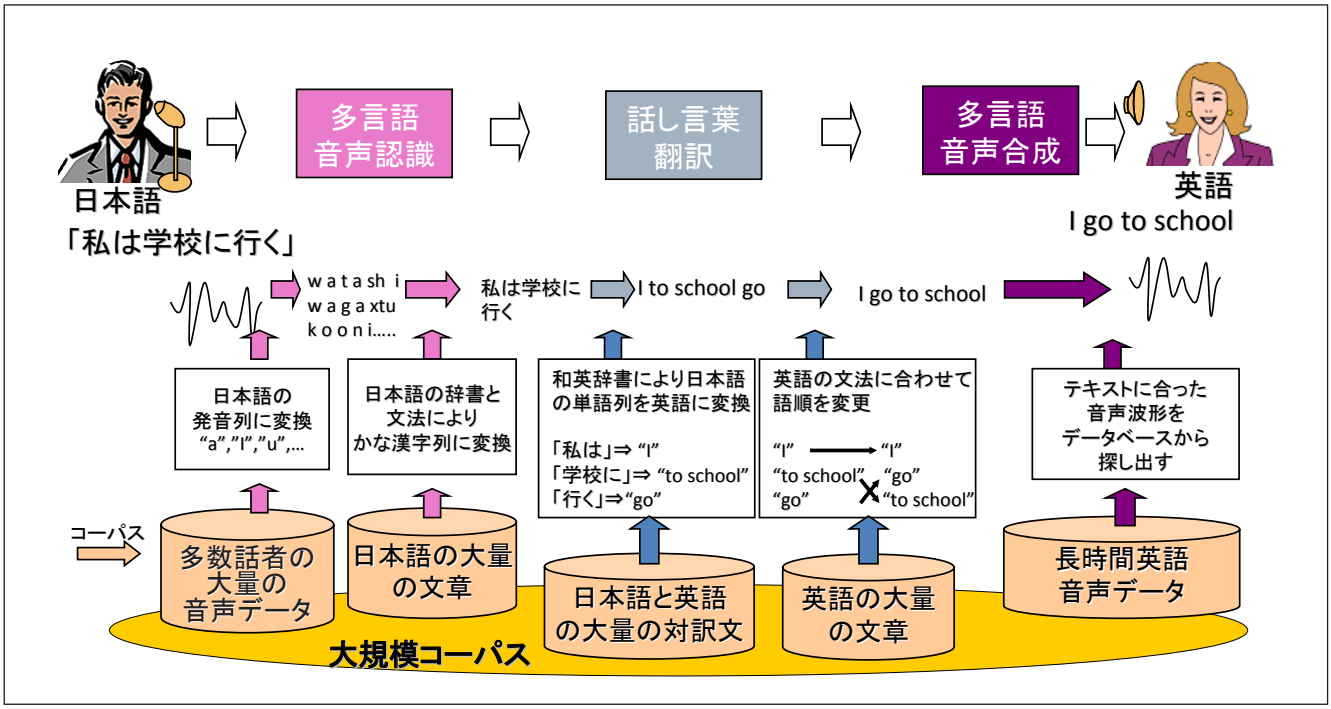
用例ベースおよび統計ベースを用いた手法を「コーパスベース翻訳手法」と呼ぶが、本稿では、主として統計ベースを用いた手法を紹介する。コーパスとは、読み、すなわち品詞情報や係り受け情報などの言語的な補助情報を付与したテキストのデータベースのことである。次章以降の記述は、主にコーパスベース翻訳手法についての記述である。

3 音声翻訳技術の概要と性能

3-1 多言語音声翻訳処理の構成

音声翻訳システムの全体構成を図表2に示す。図表2は、発話者が話した日本語音声が認識されて日本語文章となり、さらに英語文章に翻訳され、英語音声に合成される例を表している。多言語音声認識のモジュールで、多くの話者の多量の音声データから構成された音のモデル（モデルは音声を構成する音素ごとに構成される）と、入力音声との照合が行われて、カタカナ表記の音素列に変換される。次に、この音素の列は、日本語のかな漢字で表記される単語列確率を最大化するように変換される。この変換では、日本語の大量のテキストから学習された、3つ組の単語列の生起確率をもとに、日本語として適切な単語列を確率付きで求める。これをさらに話し言葉翻訳のモジュールで、日本語の単語列が対応する英語の適切な単語との入れ替え、および語順の入れ替えが行われる。日本語の単語列を対応する英語の単語列に入れ替えるために、

図表２　音声翻訳システムのメカニズム



科学技術動向研究センターにて作成

同じ意味を持つ日本語と英語の対訳文から学習された翻訳モデルを用いて単語の入れ替えを行う。次に、語順を英語に合わせるため、大量の英語のテキストから学習された、3つ組の単語列の生起確率から英語として適切な単語列を求める。それを音声合成部に送る。音声合成部では、英語の単語列にあわせて発音、イントネーションパターンを推定し、それにあう波形を長時間音声データベースから選択、接続し、高品質な音声合成を行う。大量の音声コーパスを基に、統計モデルと機械学習を用いる音声認識、音声合成手法を「コーパスベース音声認識・音声合成手法」と呼ぶ。

ATRが開発した音声翻訳システム[1,2]では、旅行会話の音声翻訳を実現するため、一般の口語旅行会話コーパスが収集された。これまでに、旅行会話基本表現集BTEC (Basic Travel Expression Corpus)として、日英100万文対、日中・日韓それぞれ50万文対が構築されている。この対訳文データは、多言語の旅行会話コーパスとしては、世界最大規模のものである。このコーパスに格納されている文章は英語の単語数の意味で平均7単語の長さであり、挨拶・トラブル・買い物・移動・宿泊・観光・レストラン・コミュニケーション・空港・ビジネスなどの日常旅行会話を網羅している。日本語1文に対して、話し言葉の英語対訳文の例を示す。

日本語：「窓をあけてもいいですか」
英語：

1. may i open the window
2. ok if i open the window
3. can i open the window
4. could we crack the window
5. is it okay if i open the window
6. would you mind if i opened the window
7. is it okay to open the window
8. do you mind if i open the window
9. would it be all right to open the window
10. i'd like to open the window

この例のように、音声翻訳で取り扱う文では、主語、固有名詞の一文字目が大文字にならず、疑問文でも疑問詞がつかない。また、非常に口語的な表現も取り扱う必要がある。

BTECのほかに、MAD(Machine Aided Data)と呼ばれる音声翻訳システムを介した、実環境下での対話を記録した約10000発話のコーパスの収集データ、および、FED(Field Experiment Data)と呼ばれる、2004年12月から2005年1月にかけての計5日間に渡り、大阪府の協力を得て、関西国際空港において公開実験を行い、外国人(英語話者39人、中国語話者36人)と観光案内所のガイドが、音声翻訳システムを介して行った会話を合計約2000発話収集したデータを用いて評価を行った。

3 - 2 人間の音声翻訳能力との比較調査

音声翻訳の正確さの評価は、原理的には非常に困難である。音声合成部を評価に入れない場合には、音声翻訳の評価法は、いくつかの評価文をシステムに与え、この出力が

どの程度の品質かを評価する点で、テキスト自動翻訳の評価法と基本的には同じとなる。ただし、音声翻訳の場合は、評価文が文字列ではなく音声で与えられる。

翻訳品質の評価法には人手で5段階評価などを行う主観評価法やあらかじめ参照訳を用意してこの参照訳とシステム出力との類似度で評価する自動評価法が用いられる。後者はBLEU、NIST、WER(Word Error Rate)などの評価尺度が提案され、最近はこれらが広く用いられるようになってきた[4]。これらの結果は単なる数値で、2つのシステムを比較することはできるが、スコアを達成したシステムが現実世界でどの程度の実力を持つのかという問いには答えられない。

この問題に対して、翻訳システムの能力が人間でいうとTOEICスコア何点に対応するかを推定する方法も提案されている[5]。まず、TOEICスコアが既知の複数の日本語母語話者（ここではTOEIC被験者と呼ぶ）に、評価用の日本語文を聞かせて、英文に音声翻訳させ、次に各TOEIC被験者の翻訳文と自動翻訳システムの出力とを対にして、両者を日英バイリンガルの評価者が比較する。試験文全体の中で被験者の翻訳の方が優れている文の割合を示す被験者勝率を計算する。全ての被験者に対する被験者勝率の計算が完了した段階で、回帰分析により自動音声翻訳システムのTOEICスコアを計算する。性能をTOEICスコアに換算すると、図表3のようになる。基本旅行会話のような比較的短く表現も簡単なもの（BTEC）であれば、ほぼ正解に近い性能が出ているが、音声翻訳システムを介して行った会話に現れるような文（MAD、FED）では、TOEIC 600点の日本人と同等の性能となっている。

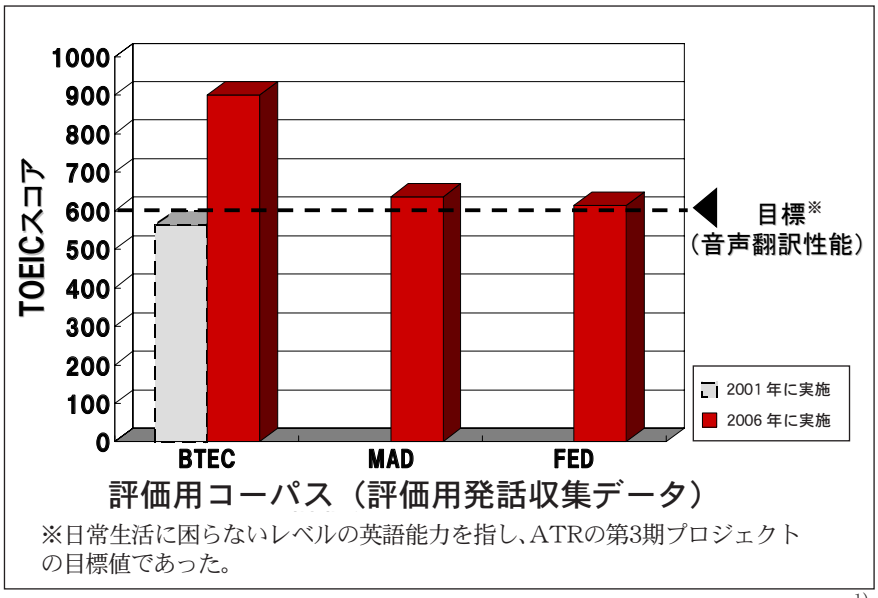
さらに、長文やめったに現れない表現を含む複雑な文に対しては、著しく性能が劣化する。未だ性能向上のための余地が残されている。

3-3 音声翻訳機を用いたフィールド実験

システム手帳大のスタンドアロン型音声翻訳機により、音声翻訳機を介した情報伝達の特徴や音声翻訳機の使用性の評価を目的としたフィールド実験が、2007年7月30日から8月24日にかけて、京都市内の繁華街で実施された[6]。フィールド実験では次のように、被験者への制約をできるだけ排除した設定とする。①移動・買物・飲食などの現実の旅行場面における音声翻訳機利用時の表現の多様性を収集するため、対話相手は事前に準備しない。②対話の目的はあらかじめ与えるものの、具体的な移動先や購入品の固有名詞に制限を加えない。③対話の流れによって被験者が課題を自由に変えることを許容する。④課題に応じて場所を適宜移動できる。⑤一対話あたりの制限時間を設けない。

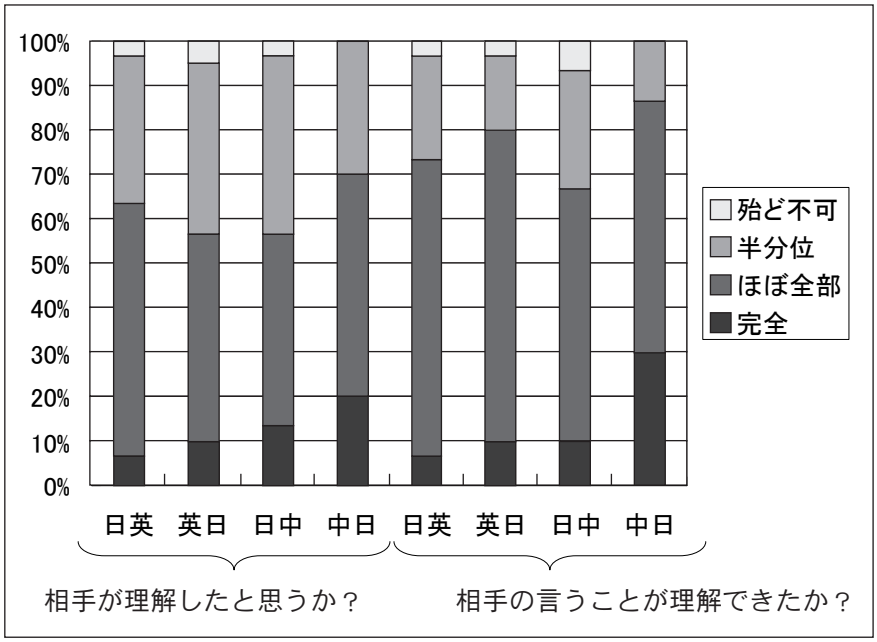
移動であれば移動先に関する情報が得られた場合、あるいは実際に移動できた場合、買物や飲食で

図表3　音声翻訳の正確さをTOEICスコアで評価した例



出典：参考文献[1]

図表4　アンケートに基づく理解度評価



出典：参考文献[6]

あれば商品の購入や飲食が完了し領収証を受領した場合に、目的達成とした。

実験では、音声認識率・対話の応答率・翻訳率を定量的に評価したほか、アンケートに基づく理解度評価も行った。図表4に示されるように、英語ネイティブ話者50人の理解度評価では、相手がほぼ全部理解したと回答した割合は約80%に達し、相手の言うことが半分以上理解できた割合は80%を超えた。この結果は、音声翻訳機を介したコミュニケーションが十分成立しうることを示唆している。

4 世界の研究開発動向

音声翻訳の技術進展を強力に後押ししたものに「評価型国際ワークショップ」がある。評価型国際ワークショップとは一種のコンテストであり、主催者が共通のデータを提供し、ワークショップに参加する研究機関に競争的にシステムを作成させ、各システムを定量的に評価するものである。評価結果から、提案された様々なアルゴリズムの優劣が定まり、優秀なアルゴリズムが以降の研究開発で広く採用されるようになる。これにより、世界の研究機関が競争的かつ協調的に研究することができ、効率的な研究が推進されてきた。ここでは、評価型国際ワークショップの代表例として、IWSLTとGALEを取り上げ、さらに、評価型ワークショップによる競争的研究スタイルを支える自動評価技術について述べる。

(a) IWSLTワークショップ[7] (IWSLT：International Workshop on Spoken Language Translation)は、日本のATR、米国のCMU、イタリアの科学技術研究所（以下IRSTと表記）、中国の中国科学院（以下CASと表記）、韓国の電気通信研究所（以下ETRIと表記）などが組織した音声翻訳研究の国際的なコンソーシアムであるC-STARが主催するもので、2004年から開催されている。毎年、参加機関数も増え、現在では世界の音声翻訳研究の中核的イベントとなっている。日本語、中国語、スペイン語、イタリア語等の言語から英語への旅行会話の音声翻訳を対象としている。対象が旅行会話という平和利用であること、コンパクトなタスクのためかなり精度の高い翻訳が可能であることなどがIWSLTの特徴である。

(b) GALEプロジェクト[8] (GALE：Global Autonomous Language Exploitation)は、米国防総省の高等研究計画局（DARPA）のプロジェクトであり、公開されずクローズドで行われる。年間50MUSドルの資金が投入されている。アラビア語と中国語のテキストおよび音声を英語に翻訳し、情報を抽出することを目的としている。多数の機関が3チームに分かれ性能を競い合う。目標値が与えられた単年度で運営され、毎年、性能が外部機関により評価される。現在の米国では、自動翻訳研究はこのDARPAの予算に強く依存しており、米国防総省の意向が強く反映される。

これらのワークショップにおいては、翻訳の品質評価法が大きな議論のポイントとなっている。翻訳品質は、流暢さ(fluency)や適切さ(adequancy)などの様々な観点があり、高度に知的な作業と考えられてきた。近年提案されたBLEUと呼ばれる評価手法は、人間による主観評価との相関が高く自動で計算できるため、時間も費用もかからず、システムの開発と評価を短いサイクルで繰り返すことを可能にし、翻訳の研究開発に大幅な効率向上をもたらした[4]。

5 音声翻訳技術の実用化

計算機の処理能力の向上とメモリの大規模化、および、ネットワークの普及により、携帯できる音声翻訳機器の実装が可能になり始めている。小型のハードウェアへ実装する単体方式と、携帯電話などの端末とネットワークを介して高性能サーバと接続して実装する分散方式の開発が進んでいる。

単体としては、重量・大きさ・バッテリ寿命などからパソコンを携帯して利用するのは現実には困難であること、一方で無線などインフラのない状況での利用も需要が見込めることを考慮して、音声翻訳機能を内蔵した専用の携帯機器での実用化に向けた努力がなされている。2006年に、NECは世界で初めて携帯端末（400MHzのMPUと64MBのRAMというハードウエア）上に日英音声翻訳を搭載した製品を開発した。

一方、携帯電話・ネットワーク・サーバを利用した分散型実装については、2007年11月にドコモ905iシリーズの携帯電話向け音声翻訳システムがATRにより開発

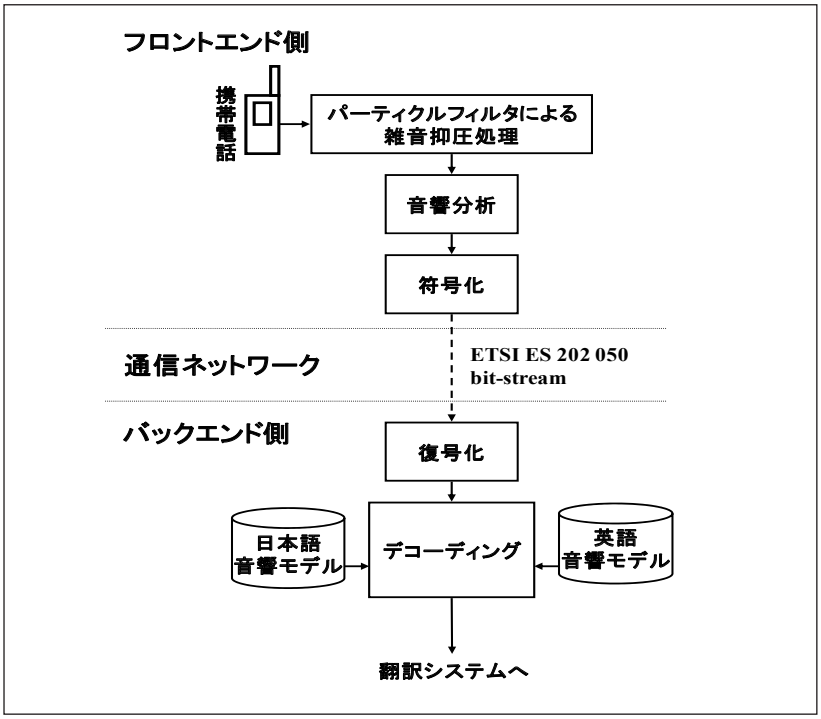
された。これは、(株) ATR-Trek よりリリースされた世界初の携帯電話による音声翻訳サービス「しゃべって翻訳」である（図表5参照）。さらに、2008年5月には、ドコモ906iシリーズから日中音声翻訳のサービスも開始されている。図表6に分散型音声翻訳の音声認識部の構造を示す。携帯電話側（フロントエンド）において、雑音抑圧および音響分析、ETSI ES 202 050 に準拠した符号化が行われ[9]、bit-stream データのみが音声認識サーバに送信される。音声認識サーバ側（バックエンド）では、受信した bit-stream を展開し、音声認識および単語信頼度の計算処理が行われる。このようなシステム構造を採用することの利点は、携帯電話の情報処理能力の限界に縛られず、大規模かつ精密な音響モデルや言語モデルが利用可能な点が挙げられる。これらの各々のモデルは携帯電話ではなくサーバ側に存在するため、更新作業が容易であり、つねに最新の状態が維持可能である。2008年6月の時点で累積アクセス数は500万を超えており、すでに多くの利用実績がある。

図表5　世界初の携帯電話による音声翻訳サービス「しゃべって翻訳」の利用シーン

トップの画面　音声入力画面　翻訳結果出力画面

提供：(株)ATR-Trek

図表6　分散型音声翻訳の音声認識部の構造



参考文献[9,12]等を基に科学技術動向研究センターにて作成

6 音声翻訳の多言語化に関わる標準化の状況

音声翻訳技術は、言語の壁を越える技術であり、多くの国の研究者および研究機関が共同研究を進めていくのが望ましい。国際間の共同研究としては、これまでATRとCMUが中心となって組織した国際音声翻訳共同研究コンソーシアムC-STARが活発な活動をしてきた。

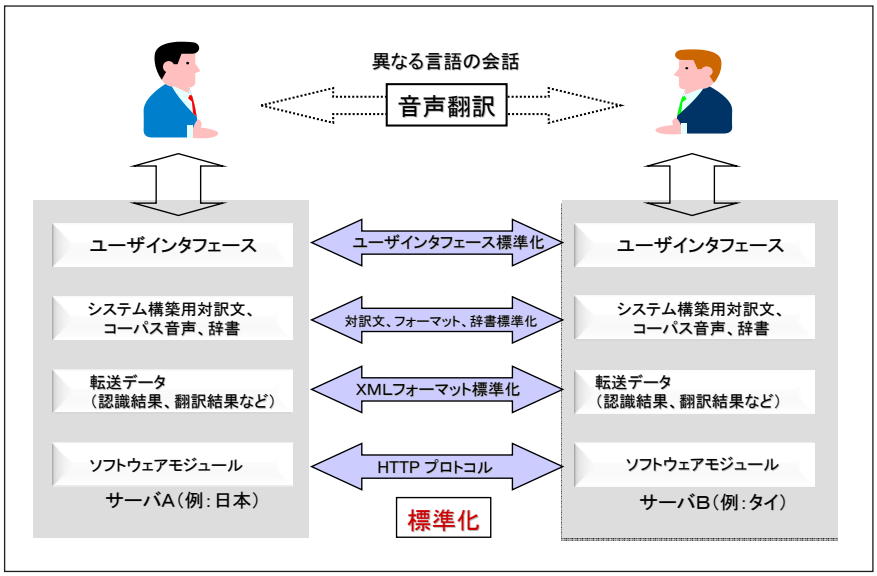
一方で、邦人の海外旅行や移住・留学先の多様化、様々な国々からの日本への旅行者・留学者・就労者の拡大などの変化は、英語圏以外の国々の人々との交流支援手段に対するニーズを高めている。

とりわけ、我が国は、社会経済面でロシアを含めてアジア諸国との幅広い地域的関係強化が進んでおり、草の根レベルの相互理解の増進や経済関係の強化も重要な課題となってきている。アジア諸国との関係は日本にとって今までにないほど重要となっている。したがって、英語だけでなく、中国語・韓国語・インドネシア語・タイ語・ベトナム語・ロシア語といった、これまで日本で馴染みの薄かった近隣諸国の言語にまで対応できる必要性が生じている。

そのような背景で、アジア圏内で言語の壁を越えた音声言語コミュニケーションを実現するための基本インフラを整備する音声翻訳コンソーシアムとして、A-STARが発足した。本コンソーシアムでは、アジア圏における当

該分野の研究機関と共同で、技術の研究開発そのものではなく、研究開発を進めるために不可欠となる対訳文コーパスのフォーマットの設計、アジア圏の言語間での基本対訳文コーパスの設計・収集、音声翻訳のモジュールを国際的に接続するインタフェース、データフォーマット標準化の設計のための国際共同研究体制を確立することを目指している。このコンソーシアムの活動は、科学技術振興調整費事業「アジア科学技術協力の戦略的推進」の委託研究として進められている。この活動はさらにAPEC TEL (Telecommunications and Information) のプロジェクトとしても提案、採択されている[10]。さらに、音声翻訳のモジュールを接続するインタフェース・データフォーマット標準化については、標準化ドラフトの作成にむけて、アジア圏での通信に関する標準化フォーラムである APT ASTAP(Asia-Pacific Telecommunity Standardization Program) に Expert Group を設置して活動が行われている[11]。図表7に、これらの活動で検討されている接続標準化のイメージを示す。音声翻訳を構成するモジュールが、インターネット上で接続可能になるようにインタフェース、データフォーマットの標準化を行う。さらに、音声認識、翻訳の辞書の共通化、標準化された対訳コーパスの収集も必要となる。通信インタフェースとしては WEB ベースの HTTP1.1 による通信を基本とし、アプリケーションの接続におけるデータフォーマットとして音声翻訳用のマークアップ言語 STML(Speech Translation Markup Language) が現在開発中である[12]。

図表7　音声翻訳標準化のイメージ



出典：参考文献[12]

7　音声翻訳技術の課題と展望

7-1　音声翻訳を進展させる上での課題

このように音声翻訳技術は異なる言語を話す人々のコミュニケーションを実現する技術である。しかし、発話者への依存性、特に表現の多様性が大きく、また、新しい語彙、概念が次々と社会の変化に応じて創造されるといった要因など、多くの研究課題が残されている。現在の音声翻訳技術は、旅行会話という一文あたり7単語程度の長さのシンプルな文章を対象にしているレベルである。したがって、新聞や講演などの長く複雑な文の発話の音声翻訳は、未解決の課題が多く残されている。当面の技術的な課題をまとめると、以下のようになる。

1) 実応用におけるユーザビリティの評価と性能向上

人間の発話に内在する個人差、すなわち、発話様式の差・アクセント・表現様式の差は多様である。この差による音声翻訳性能のばらつきを押さえ、万人に同様の高い性能を目指す必要がある。また、実利用時には、音響的な雑音・残響・他の話者の音声も大きな影響を与える。これらの外的要因への対処も非常に重要である。一方、コミュニケーションツールとしてのユーザビリティという観点からは、音声認識から翻訳を経て音声合成が出るまでの時間をさらに短縮することが不可欠である。音声翻訳が用いられる場では、利用者は翻訳先の言語を知らない。そのため、翻訳結果が正解であるかどうかを確認する術がない。これについては、利用者の言語に再度翻訳し直す、あるいは逆翻訳をするなどして、翻訳結果が正しいかどうかを確認する方法を提供する必要がある。さらに、旅行中における情報獲得ツールとして考える際には、人に聞くだけでなく、多言語でインターネット上の情報を獲得するなどの手段の同時提供も不可欠となる。

このような種々の課題については、フィールド実験と技術開発を同時に進めて、データ収集・性能向上・ユーザビリティ向上・トライアルサービス提供の成長的ループを確立する必要がある。

2)多言語化

実質的な世界共通語になりつつある英語への翻訳だけでなく、今後は世界中に6000あると言われている言語への直接の翻訳が必要になる。多言語の音声翻訳を実現するためには、これら言語のそれぞれの音声認識・翻訳・音声合成を構築する必要がある。すなわち、それぞれの言語で、大量の音声コーパス・対訳コーパス・テキストコーパスが必要となる。特に、音声コーパスの収集には大きな費用がかかる。また、このような技術は、利用者が減少し消えゆく言語の保存という観点からの価値も大きいと言える。

3)ネットワークにより世界の音声翻訳を接続するための標準化

現在、アジア圏でのモジュール接続の標準化が進められている。今後、さらに広く国際的に接続するための標準化と同研究体制の構築を進めていく必要がある。

4)翻訳例としてWEB上のデータを利用するための著作権緩和

音声翻訳技術の構築には、翻訳元言語のテキストコーパス、翻訳先言語のテキストコーパス、それらの間の対訳文コーパス、そして、音声コーパスが必要となる。これらのコーパスは従来の方法では作成・収集に大きなコストがかかる。現在、これらを、爆発的に規模が拡大しているインターネットのWEB上のデータから収集する方法が注目されている。たとえば、音声翻訳の性能向上に、多言語で発信されているニュースなどの媒体の2次利用が有効である。しかし、現在のところ、著作権の問題が解決されていない。

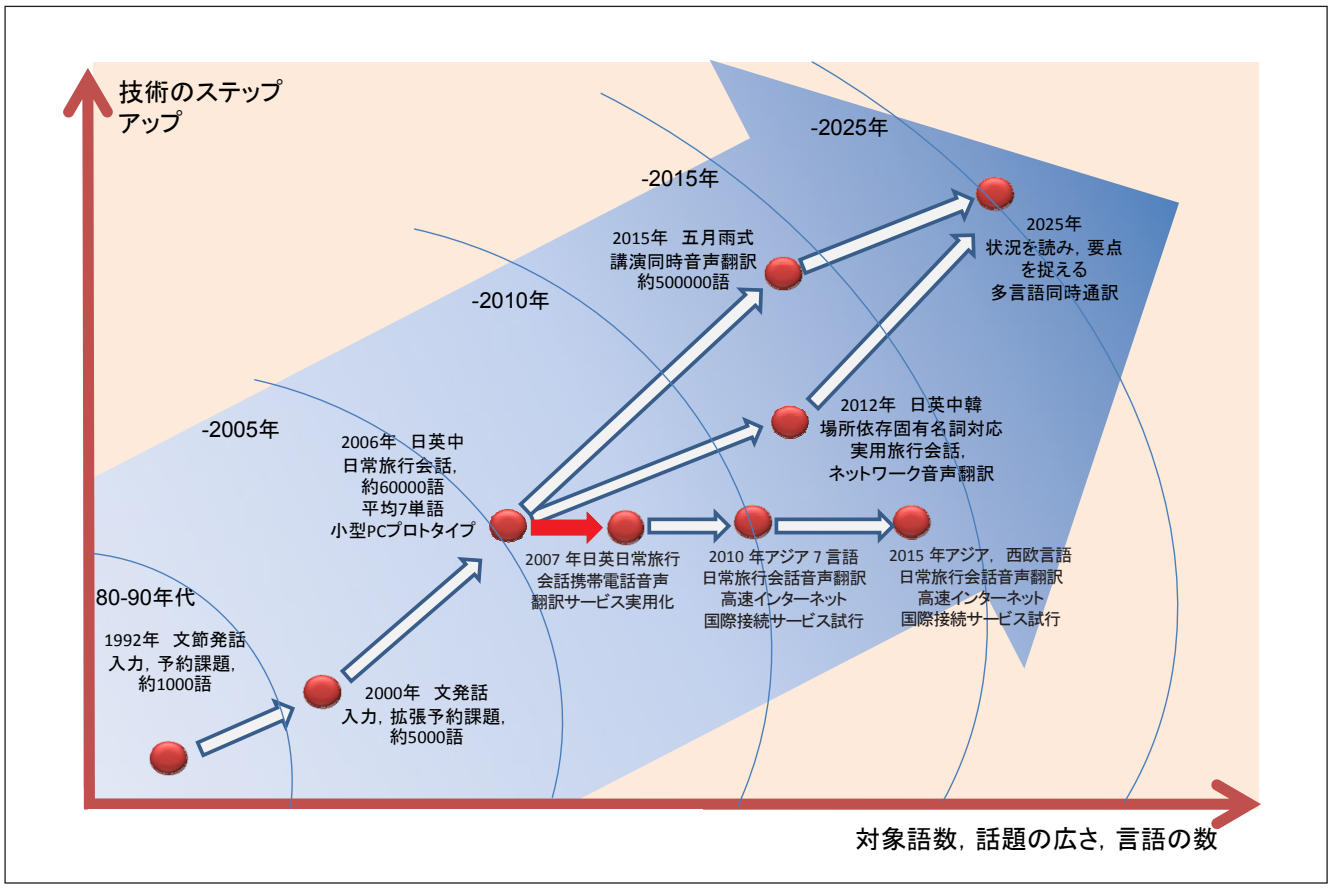
5)自分の現在の居場所に応じた、最新の固有名詞の利用

場所や物の名前の数は膨大であり、これら固有名詞をすべて同時に音声翻訳することは、性能の点でも速度の点でも不可能に近い。このため、GPSなどを用いて自分の現在の居場所に応じた固有名詞を自動的にネットワークから獲得し、その場に応じた音声認識・その場に応じた翻訳・その場に応じた音声合成を行うことが効率的である。

7-2 今後の研究開発（ロードマップ）

図表8に、これまでの音声翻訳の開発経緯と、今後の研究開発動向を示す。2010年に、アジア言語に関する国際研究コンソーシア

図表8　音声翻訳技術研究開発動向予測



科学技術動向研究センターにて作成

ムが、インターネットを経由した音声翻訳を試行する予定である。これを拡張し、西欧言語を含む、接続標準化が進み、国際研究コンソーシアムによる接続試行が行われるのは2015年頃と推測される。また、日本の社会還元加速プロジェクト（次節で紹介する）では種々の実証実験を経て2012年に、ネットワーク音声翻訳としての技術を確立する予定になっている。中長期的には、2015年頃にはビジネスや講演での五月雨式同時音声翻訳、2025年頃には状況を読み、要点を捉える多言語同時通訳が実現し、次第に夢の同時通訳へ近づいていくと予測される。

8 音声翻訳に関わる日本の施策

8-1 内閣府社会還元加速プロジェクト「言語の壁を乗り越える音声コミュニケーション技術の実現」

総務省の音声翻訳プロジェクトを内閣府社会還元加速プロジェクトと認定して、2008年度から進めているプロジェクトである。国際化の進展の中で、国民レベルでの直接的な国際コミュニケーションにより、多国間の相互理解を深めることが目的である。アジア圏など海外の人々と言語の壁を乗り越えた直接会話による交流を可能にすることができる「自動音声翻訳システム」を目指している。当面の利用ニーズと今後5年程度で期待できる技術向上等を考慮して、観光やショッピング、国際交流イベントなどにおける実証試験を企画･推進する。また、プロジェクト終了後には、短期間で産業界における事業化ベースでのサービスにつなげ、その成果の社会還元を加速する。

このプロジェクトでは、技術開発としては、場所の地名・物の名前などの名詞だけでなく、幅広い話題に対応するためにネットワーク上に分散する翻訳知識を活用し、翻訳端末と組み合わせるネットワークベース音声翻訳技術の確立に取り組む。それとともに、このシステムの円滑な実用化・事業化を図り、普及を促進するために、音声翻訳コミュニケーション技術というイノベーションの「見える化」にも取り組んでいる。ここで「見える化」とは、開発サイドと利用者サイドのミスマッチが実用化・事業化を妨げているとの認識のもとで、開発サイドが技術開発状況を適宜開示し、利用者サイドは利用場面などの利用環境条件を想定できるようにすることである。そして、その利用環境条件に適した機能とユーザーインターフェースを持ったシステムを構成して、具体的に実証を繰り返す。このような開発サイドと利用者サイドとの密接な連携による実証を積み重ねることにより、このプロジェクトは「日本、英語・中国語圏で、普通の旅行者がほとんど支障なく海外旅行を楽しむ」など草の根レベルの国際交流における重要な役割を果たすことができるようになる。さらに、新たなビジネスを創造し、地域における地場産業等の振興にも資することができると期待される。

8-2 ユビキタス特区

ユビキタス特区事業は総務省の「ICT改革促進プログラム」および「ICT国際競争力強化プログラム」に基づいて創設されたものである。革新的なサービスの開発・実証実験を支援する事業として、2008年度より3年間の計画で実施される。(財)京都産業21を代表とした8法人（(株)インテージ、(株)東映京都スタジオ、NICT、ATR、(株)JTB法人東京、(株)ウィルコム、NEC）からなるコンソーシアムによる共同提案が、「ユビキタス特区」事業に採択された。この事業は、京都府と連携し、京都を来訪する外国人旅行者を対象とした市場調査・多言語翻訳・観光情報提供を行うための携帯端末サービスの開発と、これを広く観光地に普及させるために高速モバイル通信を実現する次世代PHSに対応したユビキタス多機能サーバの実証試験を行う。また、外国人旅行者の満足度向上と観光産業の増進に貢献することを目指し、多言語翻訳とともに、次世代PHSに対応したウェアラブル動画配信サーバ等の先進的な技術を活用し、ユーザとなる観光施設の売店や飲食店で導入・利用しやすいサービスの開発が推進される。また、特区であることを活用すると、コーパス構築における著作権問題などの課題をクリアできる。

9 おわりに

音声翻訳は、音声・言語の研究も進展したため、利用価値が比較的明確で容易な課題については実用に近いレベルまでに至った。しかし、現在のレベルはまだ技術の核の部分ができた段階にすぎない。より高度な音声翻訳を実現するために、さらに研究開発を加速させることが望まれる。以下が、今後の注目すべき点である。

まず、第一に、コーパスベース技術は使われてこそ磨かれていくという特質を有する。したがって、実証実験や社会実験の場を確保し、開発した技術を積極的に利用することが重要である。オリンピックや万博などの多言語の参加者が期待できるイベントは、多言語音声翻訳技術にとって絶好の実証実験の場である。このような場を利用して技術を進化させていくことが重要である。NICTは、北京オリンピックにおいて日本からの旅行者を主な対象としたモニター実験を行った。北京市内の固有名詞に対応した音声翻訳システムを開発し、モニターの人々に北京市内での移動・観光・ショッピング等におけるコミュニケーション手段として音声翻訳機能を利用してもらった。アンケートによるサービス利用満足度調査により、より実用に近い状況に対応可能な音声翻訳技術の実験となった。

日本が観光立国をめざす上で、言語音声翻訳による外国人観光客のための継続的な観光情報サービスは有効な施策となろう。一方、昨今の外国人滞在者や労働者の増加により、自治体・医療・警察・教育の現場における多言語音声翻訳は、意志疎通の手段としてもはや不可欠と言える。通訳者がいる場合にも、通訳者の負担軽減に役立つはずである。しかし、それぞれが個々に使用していたのでは、断片的な知識しか蓄積されず、研究開発へのフィードバックという点では効率が悪い。効率改善のためには、国・自治体・民間の協力体制が必要となろう。たとえば、小型翻訳機については、使用が想定される公的機関への配布、外国人労働者や観光客への無償貸与などが有効であろう。

第二に、音声翻訳は異なる言語の間の話し言葉の翻訳を行う技術である。英語への翻訳はもちろん重要だが、他の種々の国の母語と日本語の直接の音声翻訳にも大きな意味がある。このため、対象の言語を増やしていくことが重要となる。この研究開発では、特にコーパスの収集については、日本だけで進めるには限界がある。多言語多国間の連携スキーム、つまり、種々の国が連携しながら音声翻訳、音声・言語の研究開発を進めるしくみが必要である。連携研究開発のスキームとして、国際音声言語技術研究センターなどを設置することで、音声や方言の収集や言語構造の研究などの幅広い研究からのフィードバックが期待できる。

第三に、実際に音声翻訳を多くの国で研究開発するようになると、それぞれの言語の処理モジュールを接続するための種々の標準化を行う必要が出てくる。接続方式・データフォーマット・辞書などの標準化を意識しながら開発を進める必要がある。各国がばらばらに開発し、相互接続できなくなる事態は避けなければならない。日本は、音声翻訳技術が進んでいる国であり、標準化に関しても他国をリードすることができる。

最後に、著作権も注目すべき点である。音声処理や翻訳処理には、音声コーパスとテキストコーパスが必要であり、音声翻訳の性能はこれらコーパスの量と質に大きく依存している。したがって、放送ニュース・新聞・インターネットのコーパスの利用は非常に有効である。現在の著作権法では二次利用としてのこれらのコーパスの利用は考慮されていない。新しい技術の研究開発のためには、柔軟な法改正や運用がなされてしかるべきであろう。このことに関しては、現在、文化審議会著作権分科会で議論されており、近々、結論がまとめられることになっている。この検討結果を待って、将来の音声翻訳の本格的なサービスに向けた制度的な課題を整理し、サービスモデルも含めて、改めて対応を検討していく必要があろう。

参考文献

1) S.Nakamura, et al, “ATR Multilingual Speech-To-Speech Translation System”,IEEE Trans. ASLP, vol.14, no.2 (2006)
2) A.Finch, et al, “The NICT/ATR Speech Translation System for IWSLT 2007”, IWSLT (2007)
3) T.Takezawa,et al,” Toward a Broad-coverage Bilingual Corpus for Speech Translation of Travel Converstaions in the Real World” Proc. LREC (2002)
4) 安田、他、「自動翻訳の研究・開発における翻訳時道評価技術とその応用」、人工知能学会誌、23巻1号（2008）
5) 菅谷、他、「音声翻訳システムと人間との音声翻訳能力評価手法の提案と比較実験」、信学論 J84-D-II、11（2001）
6) 伊藤、他、「日英中音声翻訳機のフィールド実験とその評価」、1-Q-33、日本音響学会講演論文集（春）(2008)

7) IWSLT：http://www.slt.atr.jp/IWSLT2004/
8) SLTC e-Newsletter, “DARPA′s GALE Program to Get More Challenging in 2007”（GALE プロジェクトの一例）：http://ewh.ieee.org/soc/sps/stc/News/NL0701/NL0701-GALE.htm
9) ETSIES 202 050 ETSI ES 202 050 v1.1.1 Speech Processing, Transmission and Quality aspects (STQ); Distributed Speech Recognition; Advanced Front-end Feature Extraction Algorithm; Compression Algorithms, ETSI, April 2002.
10) APEC TEL WORKING GROUP：http://www.apectelwg.org/
11) ASTAP:http://www.aptsec.org/Program/ASTAP/
12) 木村、他、「多言語音声翻訳基盤のための通信インタフェースの検討」、3-Q-17、日本音響学会講演論文集（秋）（2007）

執　筆　者

中村　哲
客員研究官
(独) 情報通信研究機構 上席研究員
MASTAR プロジェクトリーダ、
ATR 音声言語コミュニケーション研究所 所長
ATR フェロー
http://www2.nict.go.jp/x/x162/mastar
◉
工学博士。音声翻訳、音声認識を始めとした音声・言語処理に従事。ドイツ・カールスルーエ大学客員教授、けいはんな連携大学院教授。

科学技術動向研究

月・惑星探査における我が国の宇宙開発能力

清水　貴史
推進分野ユニット

1 はじめに

米国航空宇宙局(NASA)は、ブッシュ米大統領が2004年1月14日に発表した宇宙探査に関するビジョンを受け、アポロ計画以来となる有人月・火星探査計画に着手した。2010年に退役するシャトルに代わる新たな宇宙輸送系・有人探査機を開発するとともに、有人月探査の実施に先立ち、着陸地点の選定のための地形、有人活動の持続的展開に必要な水氷と言った資源、人体に影響を及ぼす放射線環境などに関する情報収集のため、無人探査機を打ち上げる計画である。また、全米研究評議会(NRC)が2002年7月に公表した太陽系探査に関する報告書[1)]の提言を受け、無人科学ミッションを推進している。

欧州宇宙機関(ESA)も、独自にまたはNASAなどとの協力の下、無人科学ミッションを推進するとともに、将来的には有人活動も視野に入れ、オーロラ計画の下、無人探査車による火星ミッションを計画している。さらに、中国およびインドも新たな宇宙開発能力の獲得のため各々、嫦娥(じょうが)およびチャンドラヤーンと言う無人月探査計画に着手した。

我が国においても、小惑星探査機「はやぶさ」がイトカワの詳細な科学観測および表面試料採取に挑戦して多大な科学成果を挙げ、米科学専門誌サイエンスでは2006年6月2日、「はやぶさ」特集号が組まれた。月周回衛星「かぐや」は、月の誕生と進化の謎の解明に向け、アポロ計画以来の本格的な月の科学探査を行っており、次々に発表され始めている科学成果は、内外の関心を集めている。「はやぶさ」および「かぐや」は、X線天文衛星「すざく」、赤外線天文衛星「あかり」および太陽観測衛星「ひので」と共に、先駆的な科学的発見を行い、人類の知的フロンティアを拡大したなどとして、2008年2月12日、米国以外の機関では初めて(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)に対しジャック・スワイガート賞が授与されることになった[2)]。この賞は、奇跡の生還を果たしたアポロ13号の宇宙飛行士で後に米国下院議員に当選したジャック・スワイガート氏を記念するため2004年に創設されたものであり、過去の受賞者は、NASA火星探査チーム、ブッシュ米大統領、ジェット推進研究所(JPL)およびカリフォルニア工科大学の天体観測部門である。

本稿では、「はやぶさ」および「かぐや」ミッションと海外の同様なミッションとを比較することにより、我が国の宇宙開発能力について分析する。

2 変貌しつつある太陽系像

2-1 惑星の定義

冥王星の直径は約2,390kmであり、月の約3,476kmより小さいこと、冥王星の軌道離心率および軌道傾斜角が他の惑星に比べて大きいこと、冥王星の近傍に直径約2,400kmのエリスが発見されたことなど、冥王星は惑星であるのかとの疑問が天文学者の間にあった。

国際天文学連合(IAU)は2006年8月、太陽系の惑星の定義(図表1)を決定し[3)]、冥王星は惑星から除外された。惑星の数は水金地火木土天海冥と言われた9つから8つに減少したものの、地上の天体望遠鏡の技術進歩に加え、吸収・

散乱・揺らぎと言った大気による影響を受けない宇宙空間から天体を様々な波長で観測するハッブル宇宙望遠鏡などの活躍により、我々の太陽系像はより豊かなものへと変貌しつつある。

日本学術会議物理学委員会のIAU分科会および天文・宇宙物理学分科会は、上記国際天文学連合の決定を踏まえ、図表2の通り、これら惑星以外の太陽系天体を「太陽系外縁天体」、「準惑星」、「太陽系小天体」および「冥王星型天体」と分類することを推奨している[3)]。

冥王星は、太陽系外縁天体の一員となったものの、その大きさのため準惑星とも分類され、さらに冥王星型天体が定義されたことにより、その存在意義を留めることになった。一方、神戸大学のパトリック・S・リカフィ研究員および向井正教授は2008年2月28日、太陽系外縁天体の外側に未知の惑星の存在が示唆される数値シミュレーション結果を発表した[4)]。なお、太陽系外縁天体が存在する領域は短周期彗星の故郷でもある。

太陽系小天体に属する小惑星は、主に火星と木星との間の小惑星帯に存在し、「はやぶさ」が探査したイトカワもその一員である。オランダのヤン・オールトが1950年、長周期彗星の軌道を基に、その存在を予言したことからオールト雲と呼ばれる領域は、1万～10万AUまで広がり、無数の氷・岩の塊が存在すると考えられている。

図表1　国際天文学連合による惑星の定義

1) 次の3つの条件を満たす天体を「惑星」と呼ぶ
　(a) 太陽の周りを回っている
　(b) 質量が大きいため自己の万有引力で強くまとまり、ほぼ球形（流体力学的平衡の形状）になっている
　(c) その軌道の領域で他の天体を力学的に一掃している
2) 上記(a)、(b)は満たすものの(c)を満たさない、かつ、衛星でない天体を「準惑星」と呼ぶ
3) 太陽の周りを回っている他の天体を「太陽系小天体」と呼ぶ

出典：参考文献[3)]

2-2 太陽系形成理論

現代物理学に基礎を置く太陽系形成理論は、1970年代に入り我が国京都大学の林忠四郎博士を中心とするグループおよび米国ハーバード大学のアル・キャメロン博士を中心とするグループが提案した。共に原始太陽を取り巻くガスおよびダストとも呼ばれる塵から成る原始太陽系円盤から太陽系が形成されること（円盤仮説）および塵から微惑星と呼ばれる小天体が形成されること（微惑星仮説）を基本概念とするも、原始太陽系円盤の質量について、京都大学グループが太陽の100分の1程度としたのに対し、ハーバード大学グループは太陽程度と仮定した。現在の太陽系形成標準モデルは、

図表2　惑星以外の太陽系天体の分類

分類名称	概　要
太陽系外縁天体	・太陽を中心として、約30天文単位(AU)[注1)]にある海王星付近から約50AU以遠まで分布する氷で覆われた天体で、冥王星もその一員。1992年以降1,000個以上が発見(2007年4月現在) ・英文名は「trans-Neptunian object (TNO)」、従来は「エッジワース・カイパーベルト天体(EKBO)」とも呼称
準惑星	・太陽系外縁天体である冥王星(直径約2,390km)・エリス(直径約2,400km)および小惑星帯で最大のケレス(直径約950km)の合計3つが該当(2007年4月現在) ・英文名は「dwarf planet」 ・天体が準惑星か否かの判定が困難なため、定義には検討の余地
太陽系小天体	・惑星、準惑星および衛星以外の太陽系の全ての天体(ケレスを除く小惑星、冥王星・エリスを除く太陽系外縁天体、彗星など) ・英文名は「small solar system body」
冥王星型天体	・太陽系外縁天体かつ準惑星である天体 ・2006年のIAU総会で決議されるも、英文名は未定[注2)] ・冥王星およびエリスが該当(2007年4月現在)。他にもこの定義を満たす可能性のある太陽系外縁天体が存在、今後その数が増加する可能性

(注1)　1天文単位(AU)は太陽と地球との間の平均距離で、約1.5億km
(注2)　2008年6月11日付IAU発表文によると英文名は「plutoid」に決定
(http://www.iau.org/public_press/news/release/iau0804/)

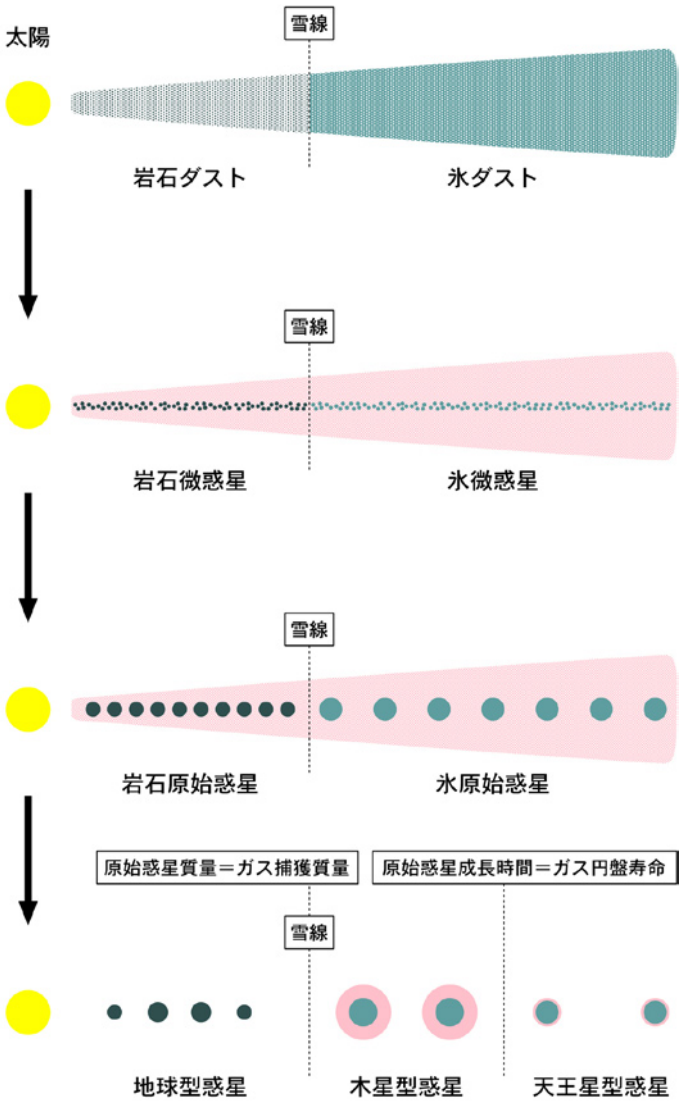
出典：参考文献[3)]

図表３　太陽系形成標準モデル

1. 原始太陽系円盤の形成
- 約 46 億年前、宇宙を漂う水素・ヘリウムなどのガスおよび金属･鉱物などの微細な塵の塊（分子雲）が、近くで起きた超新星爆発などをきっかけに、自らの重力で収縮を開始、中心に太陽が誕生
- ガスおよび塵から成り、太陽の周りを回転する原始太陽系円盤が形成。円盤の総質量は、太陽質量の約 1% で、その内の約 1% がμm 程度の大きさの塵。塵の主成分は太陽からの距離約 3AU を境界（雪線）として、内側では岩石・金属、外側では氷

2. 微惑星の形成（10^6 年）
- 原始太陽系円盤中の塵は、太陽重力の鉛直成分により黄道面に沈降、ダスト層を形成。ダスト層は、臨界密度を超えると、重力的に不安定になり分裂
- 分裂片が一気に収縮して微惑星と呼ばれる小天体（質量約 10^{15} ～ 10^{18}kg）が形成

3. 原始惑星の形成（10^6 ～ 10^7 年）
- 微惑星は、太陽の周りを公転しながら互いに衝突合体して成長。大きな微惑星ほど強い重力で周囲の微惑星を集めて速く成長（「暴走的成長」と言う）
- 微惑星の暴走的成長により、原始惑星と呼ばれる天体（質量約 10^{23} ～ 10^{26}kg）が形成。原始惑星は、ある程度大きくなると重力で周囲の微惑星を振り回すため成長が鈍化、また重力による相互作用によって隣同士一定の間隔を保って成長



（図は理科年表オフィシャルサイトから転載）

4. 惑星の形成（10^7 ～ 10^9 年）
- 地球型惑星領域では、原始惑星同士の衝突によって岩石型の地球型惑星が形成
- 木星・天王星型惑星領域では、大きな原始惑星が形成、重力によって原始太陽系円盤からガスをまとって木星型惑星および天王星型惑星が形成

出典：参考文献[5)]

図表３の通りである[5)]。

太陽系の惑星は(1)岩石および鉄でできている「地球型惑星」（水星、金星、地球、火星）、(2)水素・ヘリウムなどの原子および分子のガスでできている「木星型惑星」（木星、土星）および(3)水・メタン・アンモニアなどの氷でできている「天王星型惑星」（天王星、海王星）に分類される[5)]。太陽系形成標準モデルは、未だ多くの問題を抱えているものの、大枠で現在の太陽系の基本的特徴を説明することができている。このモデルをより完全なものとし、我々の太陽系に関する理解を深めるためには、地上望遠鏡による観測に加え、探査機によるリモートセンシング観測、着陸機・探査車などによるその場観測、探査機により採取された試料の地上での詳細な解析などにより、さらに研究を進める必要がある。

3 太陽系小天体探査における内外の動向

3 - 1 太陽系小天体探査の意義

太陽系小天体には、小惑星、彗星などがある（図表 2）。太陽系形成標準モデルでは、衝突合体によって微惑星から原始惑星、さらに原始惑星から現在の惑星が形成されたと考えられている（図表 3）。一方、火星と木星との間には、微惑星の様な小惑星が帯状に存在している（図表 4）。この小惑星帯にある天体は、質量が地球の約 318 倍もある巨大な木星の重力の影響により軌道離心率および軌道傾斜角が大きくなった結果、お互いの相対速度が大きくなり、激しく衝突して粉砕され惑星まで成長できなかったとの説のほか、現在小惑星帯にある全ての天体を合計しても、地球の衛星である月にも満たないため、小惑星帯には元々、塵が少なかったとの説もある。有機物を含んだ彗星の核が地球に降り注ぎ、地球での生命誕生の起源になったとの説もある。始原天体とも呼ばれる小惑星・彗星は、太陽系の形成およびその後の初期進化の情報を保持していると考えられており、この様な天体の探査も重要である [6]。

3 - 2 内外の動向

1980 年代から行われてきた主な太陽系小天体探査ミッションを図表 5 に示す [7]。なお、本項では太陽系小天体以外に準惑星ケレス、冥王星およびその衛星などを探査するミッションも含め、太陽系小天体探査ミッションとして議論する。

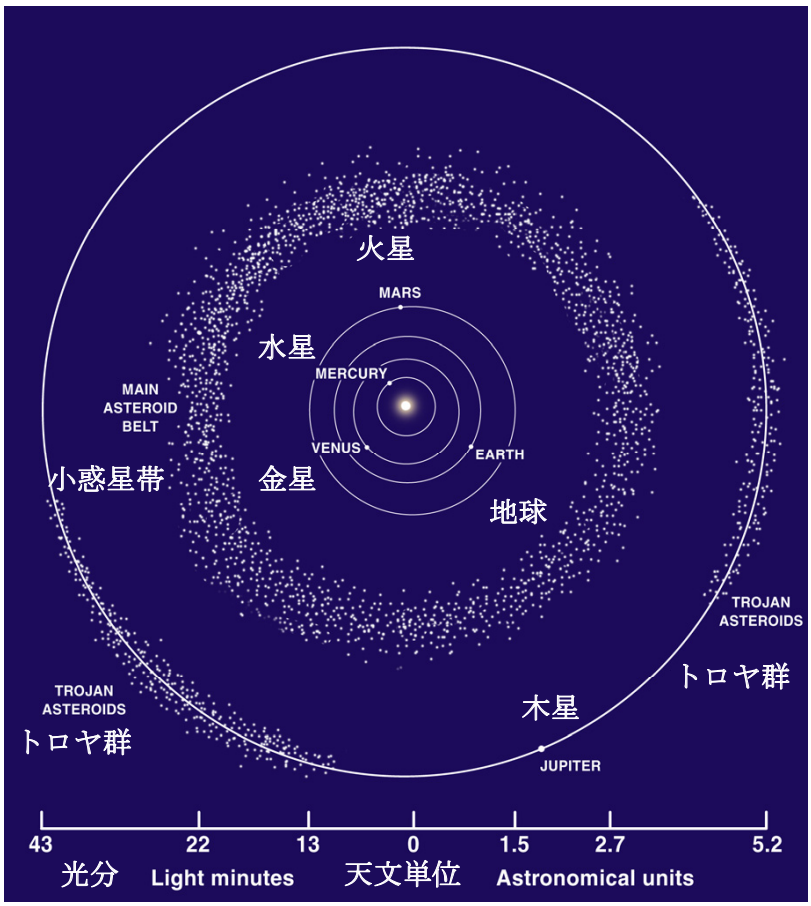
1980 年代のハレー彗星探査では、旧ソ連のベガ 1 号および 2 号、我が国の「さきがけ」および「すいせい」、欧州のジオットならびにジャコビニ・ツィナー彗星探査後の米国の ICE が共同で観測を行った。1990 年代に入って、ガリレオ探査機が木星に向かう途中、小惑星ガスプラおよびイダとの近傍通過（以下、「フライバイ」と言う）を行ったほか、ハレー彗星を観測したジオットがグリグ・シェレルプ彗星とのフライバイを行った。

ガリレオ後の探査機の主要諸元を図表 6 に示す。ニア・シューメイカーは、計画費に上限を設け、研究者からの提案を公募・選定して小規模太陽系探査ミッションを推進するディスカバリ計画 [8] の初号機であり、世界で初めて小惑星との遭遇（以下、「ランデブー」と言う）を行って詳細なリモートセンシング観測を行うことを主要目的としていた [9]。小惑星への軟着陸を行いつつ詳細な画像を取得し、ミッションを終了した。

ディープスペース 1 は、新規技術の宇宙実証を主要目的とするニューミレニアム計画の初号機であり [10]、世界初の惑星間航行用イオンエンジンなどを宇宙実証した。

スターダストは、ディスカバリ計画の第 4 号機であり、世界初の試みである彗星の核から放出される塵および星間空間に漂う塵の採取・持帰り（以下、「サンプルリターン」と言う）を主要目的とし

図表 4　小惑星帯



出典：NASA

図表5　主な太陽系小天体探査ミッション

	1980年代	1990年代	2000年代
フライバイ・衝突	・1985注1)〈ジャコビニ・ツィナー彗星〉ICE ・1986〈ハレー彗星〉ベガ1号・2号、さきがけ、すいせい、ジオット、ICE	・1991〈ガスプラ〉ガリレオ ・1992〈グリグ・シェレルプ彗星〉ジオット ・1993〈イダ〉ガリレオ ・1997〈マチルダ〉ニア・シューメイカー ・1999〈ブレイユ〉ディープスペース1	・2001〈ボレリー彗星〉ディープスペース1 ・2002〈アンネフランク〉スターダスト ・2004〈ビルト第2彗星〉スターダスト ・2005〈テンペル第1彗星〉ディープインパクト
ランデブー・着陸	（注1）探査機が太陽系小天体に到着した年。以下同じ （注2）太陽系惑星の衛星を除く。目的天体に向け飛翔中のものは、2014〈チュリュモフ・グラシメンコ彗星〉ロゼッタ、2015〈冥王星・カロン〉ニューホライゾン、2011/2015〈ベスタ/ケレス〉ドーン		・2000〈エロス〉ニア・シューメイカー ・2005〈イトカワ〉はやぶさ
サンプルリターン			・2004〈ビルト第2彗星〉スターダスト（2006年帰還） ・2005〈イトカワ〉はやぶさ（2010年帰還予定）

出典：参考文献[7)]

図表6　各国の太陽系小天体探査機の主要諸元

	ニア・シューメイカー	ディープスペース1	スターダスト	はやぶさ
開発国（機関）	米国（NASA）	米国（NASA）	米国（NASA）	日本（JAXA）
打上げ年月日	1996.2.17	1998.10.24	1999.2.7	2003.5.9
打上げロケット	デルタII	デルタII	デルタII	M-V
本体寸法（m）	注1)	（不明）	1.7×0.66×0.66注3)	1.0×1.6×1.1
打上げ時重量（kg）	805	486.3	385注4)	510注7)
発生電力（W）	1,800@1AU 400@2.2AU	2,500 @ 1AU	170～800注5)	2,600@1AU
姿勢制御方式	3軸	3軸	3軸	3軸/スピン
ミッション期間	～2001.2.28	～2001.12.18	～2006.1.15注6)	～2010.6（予定）
計画費（百万ドル）	224.1	149.7注2)	168.4	（約235億円）

（注1）面積約1.7㎡のアルミ板8枚から成る八面体
（注2）1995～1999米会計年度
（注3）回収カプセル寸法はφ 0.8m×0.5m
（注4）試料回収カプセル～46kgを含む
（注5）発生電力は太陽との距離に応じて変化
（注6）試料回収カプセルの地球帰還日
（注7）再突入カプセル～16kg、ターゲットマーカー～280g×3、表面探査機ミネルバ～591gを含む

	ロゼッタ	ディープインパクト	ニューホライゾン	ドーン
開発国（機関）	欧州（ESA）	米国（NASA）	米国（NASA）	米国（NASA）
打上げ年月日	2004.3.2	2005.1.12	2006.1.19	2007.9.27
打上げロケット	アリアンV	デルタII	アトラスV	デルタII
本体寸法（m）	2.8×2.1×2.0	3.3×1.7×2.3注10)	0.7×2.1×2.7注13)	1.64×1.27×1.77
打上げ時重量（kg）	3,000注8)	973注11)	478	1,217.7
発生電力（W）	850@3.4AU 400@5.2AU	750（最大）注12)	234 @木星 200 @冥王星	10,300@1AU 1,300@3AU
姿勢制御方式	3軸	3軸	3軸/スピン	3軸
ミッション期間	～2015.12（予定）	～2005.8	～2015.7（予定）注14)	～2015.7（予定）
計画費（百万ドル）	（約10億ユーロ）注9)	333	700	357.5

（注8）彗星表面着陸機フィラエ～100kgを含む
（注9）アリアンV不具合に伴う打上げ延期の追加経費約70百万ユーロを含む
（注10）衝突体の寸法は、φ 1m×1m
（注11）探査機～601kg+衝突体～372kg
（注12）彗星遭遇時～620W
（注13）形状は略三角柱
（注14）冥王星到着予定時期

出典：参考文献[9～16)]

ていた[11]。推進剤搭載量の最適化による打上げ費低減のため、太陽をほぼ3周回する飛行経路を採用し、公転周期は第1周回が約2年、第2および第3周回が約2.5年であり、ミッション期間は約7年となった。

「はやぶさ」は、太陽系小天体探査に必須かつ鍵となる技術の宇宙実証を主要目的としている[12]。宇宙実証する技術は、(1)イオンエンジンを主推進機関とする惑星間航行、(2)光学情報を用いた自律的な誘導・航法による天体への接近・着陸、(3)微小重力下の天体表面からの試料の採取、(4)カプセルを惑星間航行軌道から大気圏に再突入する試料回収および(5)地球重力による軌道変換(以下、「スイングバイ」と言う)とイオンエンジンとの併用である。なお、地球帰還は化学推進剤漏洩事故のため2007年6月から2010年6月に延期された。

欧州宇宙機関(ESA)の大規模科学プロジェクトであるロゼッタは、周回機および着陸機フィラエで構成され、彗星の観測を行うことを主要目的としている[13]。着陸機は彗星の核に降下して詳細な観測を行うとともに、周回機は彗星と共に近日点を通過して、約1年間に亘り観測を継続し、汚れた雪だるまとも形容される彗星を調査する。

ディープインパクトは、ディスカバリ計画の第8号機であり、衝突体を彗星に衝突させることにより噴出する物質を観測し、彗星内部の元素組成を調査することを主要目的としていた[14]。全備重量約372kgの衝突体は2005年7月3日、彗星との距離約88万kmで探査機から放出され、約1日後、相対速度約10.3km/sで彗星に衝突しており、衝突により放出された力学エネルギーは約19GJ、TNT換算で約4.5tと見積もられている。

ニューホライゾンは、計画費に上限を設け、研究者からの提案を公募・選定して中規模太陽系探査ミッションを推進するニューフロンティア計画の初号機であり、冥王星およびその衛星カロンなどの観測を主要目的としている[15]。大型ロケットでの打上げにより、これまでの探査機では最速の約16km/sで地球の重力圏を脱出し、打上げ後約9時間で月の地球公転軌道(半径約384,000km)に到達した。放射性同位元素による熱電発電機(RTG)が搭載されており、発電のため太陽指向する必要が無いので、運用費の低減および搭載電子機器の損耗回避のために木星とのスイングバイ後は冬眠モードに入り、約1年毎の軌道制御・定期点検期間を除き、冗長系の片系などの電源を切り、アンテナを地球指向した約5rpmのスピン安定状態で飛行する。冥王星到着後、推進系による姿勢制御で観測対象に指向する。

ドーンは、ディスカバリ計画の第9号機であり、ディープスペース1と同型のイオンエンジンを主推進系とし、小惑星ベスタおよび準惑星ケレスとのランデブーを行うことを主要目的としている[16]。イオンエンジンは、毎週数時間アンテナが地球指向する交信時を除き、惑星間航行中、常時稼動するとともに、周回軌道投入にも使用される。

3-3 太陽系小天体探査に必要な技術

小惑星探査では、元素組成、鉱物組成、地形、形状・大きさなどの調査にリモートセンシング観測機器が使用されるほか、質量・密度の調査のため、探査機追跡データの解析による重力場の計測が行われている。彗星探査では、小惑星探査と同様なリモートセンシング観測機器などに加え、核の調査のためのサウンダー、彗星のコマの観測のための塵の流束・組成の分析器、太陽風との相互作用の調査のためのプラズマ計測器などが搭載されている。

一方、スターダストの塵捕獲装置、「はやぶさ」の表面試料採取技術、ロゼッタの着陸機によるその場観測およびディープインパクトの衝突体は、他の探査機と比べ独特なものであり、この様な新たな手法による研究が今後は、重要性を増すものと考える。本項では、太陽系天体の試料を地上で解析することを可能にするサンプルリターンに必要になると考えられるイオンエンジン技術、試料採取技術および再突入カプセル技術について述べる。

(1)イオンエンジン技術

ニューホライゾンの様に大型ロケットでの打上げにより大きな初速を得て地球重力圏を脱出し、スイングバイを併用した慣性飛行により目標天体に到達する方法がある。一方、計画費の低減の為には、より小型のロケットによる打上げが好ましく、スターダストの様に飛行経路を選んで推進剤搭載量を最適化する方法のほか、ディープスペース1、「はやぶさ」およびドーンの様にイオンエンジンを主推進系とする方法がある。

米国のデルタIIおよびアトラスV[17]、欧州のアリアンV[18]ならびに我が国のM-Vおよび、参考として、H-IIA[19]のおよその打上げ能力を図表7に示す。M-Vは他のロケットに比べ打上げ能力がかなり劣るものの、関係者の創意工夫により、他国に勝るとも劣らない「はやぶ

図表7　日米欧ロケットの打上げ能力

	デルタII	アトラスV	アリアンV	M-V	H-IIA
GTO(kg)	900～2,120	4,950～13,000	6,000～9,600	－	3,700～5,700
LEO(kg)	2,450～5,430	9,750～29,420	21,000	1,850	10,000

出典：参考文献[17～19]

さ」ミッションを実現している。

化学推進系は、化学推進剤の燃焼または触媒反応により発生する高温ガスを排出することにより、一方、イオンエンジンは、推進剤であるキセノンをイオン化して電場で加速し、その後電子と結合して中和した推進剤を排出することにより推力を得る。

宇宙空間で推進剤が無補給な場合のロケット方程式を図表8に示す[20]。イオンエンジンは、化学推進系と比べ推力（馬力）が小さいため地球重力圏からの脱出には適さないものの、比推力が化学推進系の約10倍と高く、約10分の1の推進剤消費量で化学推進系と同等の軌道変換量を得ることができる（低燃費）ため、推進剤搭載量の軽減化によって打上げ時重量を低減化し、より小型のロケットによる打上げを可能とするほか、地球重力圏離脱後は、「はやぶさ」が示す様に、打上げロケット以上の軌道変換量を実現して遠方の天体まで飛翔することを可能にする[21]。また、低推力での長時間飛行と言う短所は、逆に軌道制御計画の柔軟性にも繋がり、ロケット打上げ時間帯の設定期間を長くすることもできる。

米商用静止通信衛星では1980年代から、その高比推力（低燃費）という特性を利用して、ほぼ推進剤搭載量で決まる軌道上寿命を伸ばすため、軌道制御用にイオンエンジンを搭載するものもあり、毎日0.5～5時間程度のイオンエンジン稼動で軌道制御を行っている。なお、我が国の「きく8号」も、軌道制御用イオンエンジンを搭載している。

探査機搭載例は、米国ディープスペース1のNSTARが最初で、その後、我が国「はやぶさ」のμ10、後述する欧州月探査機SMART-1のPPS1350と続く。これらエンジンの主要諸元および飛行実績を図表9に示す[22]。米国ドーンにもNSTARが3基搭載されており、イオンエンジンシステム全体の空虚重量は約129kgである。延べ稼働時間では最長を記録した「はやぶさ」搭載のμ10は、4基のうち最大3基を稼働して消費電力約1.1kWで推力約24mNを発生し、電力状況に応じて稼働数および推力を変更する。なお、化学推進剤漏洩事故後の2007年10月18日の時点で、延べ稼働時間を約31,400時間（約1,308日）に更新して軌道変換量約1,700m/sを達成し、地球帰還に必要な残る軌道変換量を約400m/sとするとともに、エンジン単基の最長稼働時間約13,400時間（約558日）を記録している[23]。

SMART-1搭載のPPS1350は、仏SNECMA社がロシア製イオンエンジンをベースに開発したもので、消費電力約462～1,190Wで推力約9.1～65.7mNを発生した。ドーンでは3基のNSTARのうち1基が稼働し（冗長構成）、消費電力約500～2,300Wで推力約19～91mNを発生し、延べ稼働時間は約2,000日ならびにベスタおよびケレス到着に必要なキセノン消費量は各々、約288kgおよび約89kgと見積もられている。

惑星間航行用イオンエンジンは、非常に長時間稼働する必要がある。NSTARは、イオン生成電極に劣化を起こす可能性が有り、一方、マイクロ波放電式イオンエンジンであるμ10では、この様な電極ではなくマイクロ波発生器によりイオンを生成しているため、劣化要素が少ないと言われている[24]。

NASAは、惑星間航行用推進系の高性能化を目指して、NSTARに続く次世代イオンエンジンNEXTおよび先端材料を使用した軽量・高温燃焼型2液式化学推進系AMBRを開発しており[25]、ニューフロンティア計画の第3回ミッション提案での使用検討を奨

図表8　ロケット方程式

$$\Delta v = V_{ex}\ln(M_i/M_f),\ V_{ex} = gI_{sp}$$

- Δvは速度変化量または軌道変換量
- V_{ex}は排出速度、lnは自然対数
- M_iおよびM_fは各々、推進系噴射前後の探査機質量
- 比推力I_{sp}は、V_{ex}を地球の重力加速度g（約9.8m/s^2）で割った値

➢特定のΔvについて、初期質量M_iに対しより大きな最終質量M_fを目標天体に到達すること、すなわち同一の推進剤消費量でより大きな排出速度V_{ex}を達成すること（低燃費）が、より高性能な推進系の条件

出典：参考文献[20]

図表9　日米欧イオンエンジンの主要諸元および飛行実績

探査機	ディープスペース1	はやぶさ	SMART-1
イオンエンジン名称	NSTAR	μ10	PPS1350
エンジン基数	1	4	1
空虚重量(kg)	64.4	59	（不明）
消費電力(W)注1)	2,300	350	1,500
比推力（秒）	3,280	3,200	1,650
推力(mN)注2)	91	8注3)	88
軌道変換量(m/s)	4,300	1,400	3,700
延べ稼働時間(hr)	16,265（約678日）	25,800（約1,075日）	4,958（約207日）
推進剤消費量(kg)	73.4	22	81.7
地上寿命試験(hr)	30,352	20,000	10,530

(注1)比推力および推力は、表示された消費電力における値
(注2)1N～0.1kg重、1mN～0.1g重　(注3)1基当りの値。3基稼動時は24mN

出典：参考文献[22]

励している[26]。我が国でも、μ 10後継エンジンとして、始原天体探査機マルコ・ポーロおよび木星探査機ソーラー電力セイルの主推進系を目指して各々、推力向上型のμ 20（推力約30mN、比推力約2,500秒＠消費電力約1kW）および比推力向上型のμ10HIsp（推力約30mN、比推力約10,000秒＠消費電力約2.5kW）の研究開発が行われている[27、28]。

(2) 試料採取および再突入カプセル技術

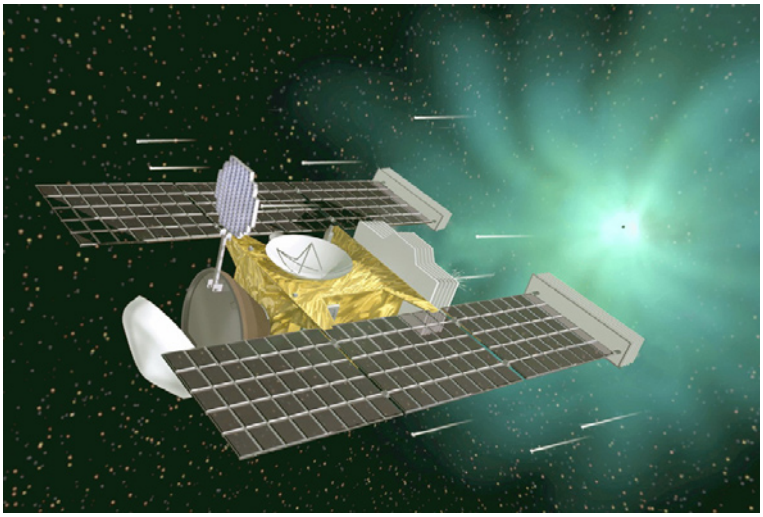
スターダスト（図表10）は、2004年1月2日の彗星最接近の前後に飛来する彗星の塵を採取したほか、第1周回の2000年2～5月および第2周回の2002年8～12月の間の計約195日かけて、飛来する星間空間の塵を採取した。テニスラケットの様な形状をした塵捕獲装置は、エアロジェルと呼ばれる極低密度・不活性・高空隙率のゼリー状の固形シリコンが使用されており、塵採取面積が各約1,000cm^{2}である表面および裏面が各々、彗星および星間空間の塵の受動的採取に使用された。塵捕獲装置を収納した試料回収カプセルは、2006年1月15日、大気圏に再突入し、落下傘による減速の後、米国ユタ州に落下、回収された。

回収された塵試料は、NASAジョンソン宇宙センターで処理が施された後、9カ国100機関以上の研究者約187名が参加する初期分析チームに分配され、約半年間に亘り化学組成分析、赤外分光分析、鉱物・岩石学分析、同位体分析、有機物分析および衝突クレータ解析が行われた[29]。地球以外の太陽系天体から試料が回収されたのは、母天体の識別が困難な隕石は除き、アポロおよびルナ計画以来である。アポロ計画で採取された月面試料により月の研究が進展したとされており、太陽系の原材料を保存すると考えられる彗星の構成物質を地球に持ち帰り、あらゆる分析機器を駆使して直接解析することの科学的意義は大きいと言われている。なお、我が国研究者が担当した分析では、高エネルギー加速器研究機構およびSpring-8の施設を使用した放射光による非破壊分析も行われた。

「はやぶさ」（図表11）は、能動的な手法を用いており、重さ数グラムの金属球を約300m/sで発射して小惑星の表面を破砕することにより、重力が非常に小さい小惑星の表面から飛散するかけらをサンプラーホーン経由で探査機内の容器に採取する[12]。長時間稼働可能なイオンエンジンと組み合わせる我が国のサンプルリターン技術は現在、様々なミッション要求に対応するため、表面試料採取技術の多様化[30]および回収カプセルの高加熱耐性化・軽量化[31]が検討されている。

「はやぶさ」が探査したS型小惑星以外にも、太陽光反射率の違いなどでC型、P型、D型などと分類されるものがあるほか、小惑星帯に捕獲された彗星の残滓（ざんし）と考えられる枯渇彗星が存在しており、研究者が地上での詳細な分析のためにサンプルリターンを望んでいる太陽系小天体は未だ多数存在する。

図表10　スターダスト（想像図）



出典：NASA

図表11　はやぶさ（想像図）

出典：JAXA

4 月探査における内外の動向

4-1 月探査の意義

月は、地球と同時期の約45億年前に誕生したものの、地球型惑星と異なりプレートテクトニクス、火山活動、風化などによる変化を受けていないため、初期進化の歴史を克明に記録しており、地球との距離的近さもあり、惑星科学の格好の研究対象である[32]。米アポロ有人月探査計画では、計6回の有人月面着陸を成功させるなどして、様々な科学観測を行い、合計約400kgの月面試料を採取した。月の研究は確実に進展したものの、例えば、月の誕生の謎については(1)地球の高速自転のため、その一部が放出されてできたとする分裂説、(2)地球周辺の岩石およびガスの円盤から形成されたとする双子集積説、(3)地球とは別の場所で形成された天体が地球により捕獲されたとする捕獲説および、(4)アポロ計画以降、火星またはそれ以上の大きさの原始惑星が原始地球に衝突して生成された材料物質から形成されたとする巨大衝突説が提唱されており、未だ決着していない。

4-2 内外の動向

クレメンタイン探査機は、米国航空宇宙局(NASA)および米国防総省(DOD)の共同プロジェクトで、センサーおよびコンポーネントの長期間に亘る耐宇宙環境性能の評価を主要目的としていた[33]。1994年1月25日に打ち上げられ、同年2月21日の月周回軌道投入後、約2ヵ月に亘って月のリモートセンシング観測を行った。月の地形を研究するため、紫外・可視・赤外の波長域で月面の画像を取得したほか、レーザ高度計で月面の高度を計測した。月極域の永久影領域における水その他の揮発物の氷の存在を調査するため、レーダが搭載されていた。探査機から発射された電波の月面による反射波を地上で観測することにより、月の表層を調査するものである。特定の周回軌道において、月の南極域で水氷の存在を示唆する観測データが得られるも、他の軌道ではその様なデータが得られなかった。

我が国がアポロ以来の本格的月科学探査を目的として、月周回衛星「かぐや」を打ち上げたのに続き、月探査技術と言う新たな宇宙開発能力の獲得に向け、中国は嫦娥1号を打ち上げており、さらにインドはチャンドラヤーン1号を打ち上げる。21世紀初頭、月探査が再び活況を呈してきた。クレメンタインに続く主な月探査機の主要諸元を図表12に示す。

「かぐや」は、月の誕生と進化の謎の解明のため、月周回軌道上観測ミッションとして、月表面の元素分布、鉱物組成・分布、地形・表層構造、全球重力場、磁気異常、プラズマ環境などを観測する[34]。我が国初の月探査機でもあり、技術開発ミッションとして、月周回軌道への投入技術、月周回軌道上での三軸姿勢制御・軌道制御・熱制御技術の確立を目的としている。嫦娥1号は、中国が計画する月探査機シリーズの初号機であり、技術目的としては、月探査機開発・打上げ能力の獲得、月探査に必要な技術の実証・技術基盤の確立、後継ミッションのための経験蓄積などが挙げられている[35]。科学目的としては、月表面の立体画像の取得、表面元素の分布および表面土壌の厚さの測定に加え、核融合の燃料となるヘリウム3などの資源の調査が挙げられている。チャンドラヤーン1号は、インド宇宙研究機関(ISRO)が開発するインド初の月探査機であり、インドの宇宙開発技術の向上・実証および月表面に関する科学データの取得を目的としている[36]。

SMART-1は、イオンエンジンなど将来ミッションに必要な技術の宇宙実証を目的とした欧州宇宙機関(ESA)の探査機である[37]。地球周回軌道から月周回軌道へイオンエンジンにより遷移した。月周回軌道到着後は、地質、地形、鉱物・元素組成、月周辺環境などに関する科学データを取得し、最終的には月面に硬着陸した。イオンエンジンを搭載するため、探査機本体の大きさに比べ発生電力が大きい。

ルナプロスペクタは、NASAディスカバリ計画の第3号機であり、月の表面元素組成、極域の永久影領域における水氷の存在、磁気異常、重力場などに関するデータ取得を目的としていた[38]。中性子分光計により、水氷の存在を示唆する観測データが取得され、検証のため月面に衝突するも、地上望遠鏡による噴煙観測からは、その存在が確認できなかった。

NASAのLROは、有人月探査活動の再開に先立つ、無人月探査計画の初号機である[39]。将来の着陸地点、月面基地設置場所などを決定するため、月の表面の地形構造、水氷と言った利用可能資源、放射線環境などの詳細な情報を取得することが目的である。LROとの相乗りで打ち上げられるLCROSS

図表 12　各国の月探査機の主要諸元

		かぐや	嫦娥 1 号	チャンドラヤーン 1 号	SMART-1
開発国 (機関)		日本 (JAXA)	中国 (CNSA)	インド (ISRO)	欧州 (ESA)
打上げ年月日		2007.9.14	2007.10.24	2008.10（予定）	2003.9.27
打上げロケット		H-IIA	長征 IIIA	PSLV	アリアン V
本体寸法 (m)		2.1 × 2.1 × 4.8	2.0 × 1.7 × 2.2	1.5 × 1.5 × 1.5	1 × 1 × 1
打上げ時重量 (kg)		2,885 注 1)	2,350	1,304 注 3)	366.5
発生電力 (W)		3,486	(不明)	700	1,850
軌道	高度 (km)	100 注 2)	200	100	300 × 3000
	種類	極軌道	極軌道	極軌道	極軌道
姿勢制御方式		3 軸	3 軸	3 軸	3 軸
ミッション期間		1 年注 2)	1 年	2 年	1.5 年注 4)
計画費		約 550 億円	約 14 億人民元	約 38.6 億インドルピー	約 1.1 億ユーロ

(注 1) 主衛星～ 2,779kg、子衛星～ 53kg×2　(注 3) 590kg @月周回軌道
(注 2) 定常運用後、軌道高度 40 ～ 70km に変更　(注 4) 当初、半年間の予定。1 年間延長

		ルナプロスペクタ	LRO	LCROSS	GRAIL
開発国 (機関)		米国 (NASA)	米国 (NASA)	米国 (NASA)	米国 (NASA)
打上げ年月日		1998.1.7	2009.2.27（予定）		2011.9（予定）
打上げロケット		アテナ II	アトラス V		デルタ II
本体寸法 (m)		φ 1.37 × 1.28	(不明)	(不明)	(不明)
打上げ時重量 (kg)		296	1,846	834 注 5)	466.1 注 7)
発生電力 (W)		202	1,850	600	(不明)
軌道	高度 (km)	100	50	(月とのスイングバイを行う地球周回楕円軌道)	50
	種類	極軌道	極軌道		極軌道
姿勢制御方式		スピン	3 軸	3 軸	3 軸
ミッション期間		1.5 年	1 年	約 86 日注 6)	約 90 日注 8)
計画費 (百万ドル)		63	421		375

(注 5) 月面衝突時、探査機～ 700kg、ロケット上段部～ 2,000kg　(注 6) 月面衝突までの期間
(注 7) 2 機同時打上げ。1 機の打上げ時重量は、202.4kg　(注 8) ミッション終了後、月に落下

出典：参考文献 [34 ～ 41]

は、ロケット上段部および観測機を月面に衝突させることによる噴煙などを観測することにより、月極域の永久影領域における水氷などの存在を調査することが目的である [40]。相対速度約 2.5km/s で月面に衝突するロケット上段部が放出する力学エネルギーは約 6.25GJ、TNT 換算で約 1.5t と見積もられる。「かぐや」では、子衛星を介した 4 ウェイドップラ計測および相対 VLBI 観測により、月の裏側を含む全球の重力場観測を行うのに対し、GRAIL では、2 機の月周回衛星間の相対距離の変化率を測定することにより、月全球の重力場を計測する計画である [41]。

4 - 3 月探査に必要な技術

「かぐや」では、(1) 月の科学として元素分布、鉱物分布、地形・表層構造および全球重力場、(2) 月での科学として磁気異常、放射線環境、プラズマ環境および電離層ならびに (3) 月からの科学として地球プラズマ環境の観測などを行う。地上試験時の「かぐや」および「かぐや」搭載観測機器の概要を各々、図表 13 および図表 14 に示す。

各国の月探査機に搭載された観測機器の一覧を図表 15 に示す。LRO、LCROSS および GRAIL は、有人活動に先立つ情報収集が目的であるため、図表 16 に概要を示した。

図表 15 を見ると、「かぐや」は、正に月の本格的科学探査を目指していることが分かる。元素分布、鉱物分布および地形については、他国の探査機も同様な観測機器を搭載しているものの、発信電波の地表および地下数 km からの微弱な反射波を計測するレーダサウンダーおよび磁気異常を精度 0.1nT 以下で観測する月磁場観測装置を搭載するほか、世界で初めてとなる子衛星「おきな」(RSAT) を介した地上局との 4 ウェイドッ

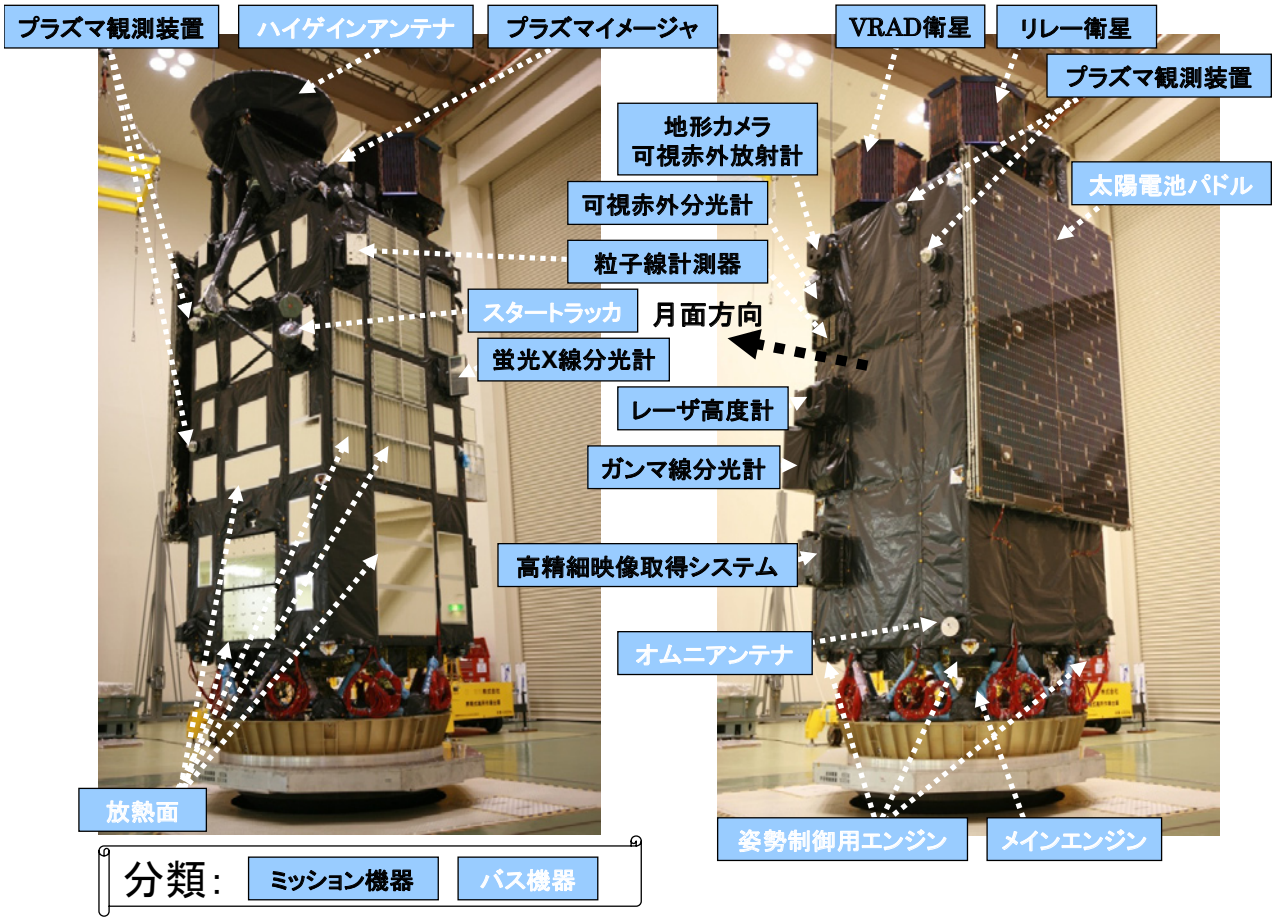
プラ計測による月裏側の重力場の計測、子衛星「おうな」(VRAD)および「おきな」(RSAT)の相対VLBI観測による月重力場の精密計測、ならびに「おうな」(VRAD)の発信電波の位相変化を検出することによる月の希薄な電離層の観測を行い、他国には見られない月の総合的な科学探査を行う。

レーザ高度計については、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)は2008年4月9日、国立天文台および国土地理院と共同で製作した月全球の地形図を発表した[42]。世界初となる極域も含め、従来の観測を大幅に上回る約600万点の高度データが取得されており(2008年4月9日現在)、2008年1月7～20日の2週間分の観測データを使用して作成された月の地形図が公開された。ハイビジョンカメラについては同年4月11日、月周回軌道から観測される現象で太陽、月、周回衛星の軌道および地球が一直線上に並ぶときに見られる満地球の出が撮影され、全面が青く輝いて見える地球の映像が公開された[43]。

チャンドラヤーン1号については、欧米との国際協力を推進していることが特徴として挙げられる。自国観測機器5基に加え、NASA提供の2基(M^3、MiniSAR)、ESA提供の3基(C1XS、SIR-2およびSARA)およびブルガリア提供の1基(RADOM)と計11基の観測機器を搭載しており、科学成果をより豊かなものにする国際協力の好例と言える。なお、ESA提供機器のうち2基(C1XSおよびSIR-2)はSMART-1搭載機器の改良版である。

NASAは、月の水氷の存在を継続的に調査している。有人活動には水が不可欠であるほか、太陽光発電を利用した電気分解により宇宙輸送機の推進剤となる水素および酸素を生成することができる。水を地球から輸送するには多額のコストを要するため、月に水氷が存在し、これを採掘・処理することができれば、計画費の大幅な削減につながる。

図表13　地上試験時の「かぐや」



出典：JAXA

図表 14 「かぐや」搭載観測機器の概要

月表面の元素分布	蛍光 X 線分光計 (XRS)	太陽 X 線を受けて月表面の元素から放射される蛍光 X 線を観測、Mg、Al、Si、S、Ca、Ti、Fe などの元素分布を調査
	ガンマ線分光計 (GRS)	月表面の元素から放射されるガンマ線を観測、U、Th、K、H、O、Mg、Al、Si、Ca、Ti、Fe などの元素分布を調査
月表面の鉱物分布	可視赤外放射計 (MI)	月面からの可視近赤外光を 9 つの波長帯で観測、鉱物分布を調査
	可視赤外分光計 (SP)	月面からの可視近赤外光の連続スペクトルを観測、鉱物分布を調査
月の地形・表層構造	地形カメラ (TC)	分解能約 10m のカメラ 2 台で撮像、地形の立体画像を作成
	レーザ高度計 (LALT)	月面にレーザ光を発射、反射光が戻るまでの往復時間を計測して衛星と月面との間の距離を求め、地形の起伏、高度を測定
	月レーダサウンダー (LRS)	月からの反射波により地下数 km 程度までの月の表層構造を調査
月の全球重力場	リレー衛星 (RSAT)	月裏側を飛行中の主衛星の電波を中継、これを地上局でドップラ計測して主衛星の軌道擾乱を観測、月裏側の重力場データを取得
	衛星電波源 (VRAD)	子衛星 (RSAT、VRAD) が発信する電波源を対象として、地上局で相対 VLBI* 観測を行うことにより、子衛星の高精度軌道決定を行い、月重力場を精密に観測 (＊：超長基線電波干渉計。電波の経路差から電波源の位置を正確に求めること)
月面環境	月磁場観測装置 (LMAG)	月面および月周辺の磁気分布を観測
	粒子線計測器 (CPS)	月周辺における宇宙線、太陽から放出される高エネルギー放射線および月面のラドンから放射されるアルファ線を観測
	プラズマ観測装置 (PACE)	太陽風などに起因する月周辺の電子およびイオンの分布を測定
	電波観測 (RS)	VRAD 衛星からの電波の位相変化を測定、希薄な月電離層を研究
地球プラズマ環境	プラズマイメージャ (UPI)	月周回軌道から地球の磁気圏およびプラズマ圏を撮像観測
映像撮影	高精細映像取得システム (HDTV)	「地球の出」などの地球および月のハイビジョン撮影

出典：参考文献 [34)]

図表 15 各国の月探査機の搭載観測機器

		かぐや	嫦娥 1 号	チャンドラヤーン 1 号	SMART-1	ルナプロスペクタ
月表面の元素分布	蛍光 X 線分光計	○ (XRS)	○	○ (C1XS)	○ (D-CIXS)	−
	ガンマ線分光計	○ (GRS)	○	○ (HEX) 注 3)	−	○ (GRS)
月表面の鉱物分布	可視赤外放射計	○ (MI)	○注 1)	○ (HySI、M³) 注 1)	−	−
	可視赤外分光計	○ (SP)	−	○ (SIR-2) 注 4)	○ (SIR) 注 4)	−
月の地形・表層構造	立体カメラ	○ (TC)	○	○ (TMC)	○ (AMIE) 注 6)	−
	レーザ高度計	○ (LALT)	○	○ (LLRI)	−	−
	レーダサウンダー	○ (LRS)	○注 2)	−	−	−
月の全球重力場	親子衛星システム	○ (RSAT、VRAD)	−	−	−	− (○ (DGE))
月面環境	磁場観測装置	○ (LMAG)	−	−	−	○ (MAG、ER)
	粒子線計測器	○ (CPS)	○	○ (RADOM)	−	○ (APS)
	プラズマ観測装置	○ (PACE)	○	○ (SARA) 注 5)	○ (SPEDE)	−
	電波観測	○ (VRAD)	−	−	−	−
その他	地球プラズマ環境	○ (UPI)				
	高精細映像取得	○ (HDTV)				
	月極域の水氷			○ (MiniSAR)		○ (NS)
	月面衝突体			○ (MIP)		
	月自転軸の運動				○ (RSIS)	

(注 1) 撮像分光計
(注 2) マイクロ波放射計で表面土壌の厚さを計測
(注 3) 硬 X 線領域まで観測
(注 4) 近赤外線分光計
(注 5) 太陽風が月面から弾き出す中性原子を計測
(注 6) 2次元多色画像

出典：参考文献 [34 ～ 38)]

図表16　NASA有人月探査計画における無人月探査機の概要

LRO
(目的)月の地形、着陸の障害物・傾斜、水氷その他の資源、放射線環境、月面拠点となる極域の温度・日照条件・地形などに関する情報収集 1. レーザ高度計(LOLA) • 正確・安全な着陸、探査活動の展開のための高精度全球地形モデルの作成。極域の日照条件、永久影領域の水氷の調査。高度分解能約0.1m 2. 高性能カメラ(LROC) • 着陸候補地の障害物・日照条件の観測 • 狭角（分解能約0.5m)、広角（分解能約100m) 3. 中性子検出器(LEND) • 水氷・水素の分布、放射線環境の観測。空間分解能約10km 4. 熱放射計(DLRE) • 月面温度分布の観測。温度測定精度約5度 5. 紫外線撮像分光計(LAMP) • 永久影領域の表層の水氷・霜の検出、地形の観測。波長分解能約3.5nm、空間分解能約260m 6. 放射線・プラズマ計測器(CRaTER) • 人体への影響の評価のため、銀河宇宙線などの観測。人体の皮膚と等価なプラスチック材料も使用。空間分解能約77㎞ 7. 合成開口レーダ(mini-RF) • 極域に堆積する水氷などの揮発物の観測

出典：参考文献[39]

LCROSS
(目的)月面の永久影領域における水氷の存在に関する調査 • 打上げ用ロケット上段部および観測機(S-S/C)で構成。LROとの相乗り打上げ • 上段部はS-S/Cの制御により、永久影領域衝突軌道に投入。S-S/Cおよび地上望遠鏡は、上段部の衝突により発生する噴煙などを観測。S-S/Cは上段部に続き、月面に衝突 • 過去にもルナプロスペクタが同様の目的で月面に衝突するも、水氷の存在は未確認

出典：参考文献[40]

GRAIL
(目的)地殻から核までの内部構造および月の熱史に関する研究のため、月の全球重力場を計測。ディスカバリ計画第10号機 • 相対距離約175～225km、高度約50kmの極軌道を周回する2機の探査機の距離変化率を測定、月全球重力場を計測。 • 空間分解能約30km×30km、重力場計測精度≦約10mGal • 搭載カメラの遠隔操作による画像取得を教育目的に利用 • 約90日間の科学観測の後、軌道制御を行って月面に衝突。約12ヵ月かけてデータ解析

出典：参考文献[41]

5 「はやぶさ」および「かぐや」ミッションが示す我が国の宇宙開発能力

(1) 他国の追随を許さない我が国独自の宇宙技術の確立

米国は、ディープスペース1およびスターダストで各々、イオンエンジンによる惑星間片道航行ならびに彗星・星間空間の塵の受動的捕獲およびカプセル回収によるサンプルリターンに成功するも、我が国の「はやぶさ」は、トータルパッケージとして、今後の太陽系小天体探査の一つの技術体系とも言えるイオンエンジンを使用する惑星間往復航行、能動型表面試料採取およびカプセル回収(2010年6月実証予定)によるサンプルリターン技術の実証にほぼ成功した。他国の追随を許さない我が国独自の宇宙技術を確立したと言える。

(2) 大学共同利用システムによる我が国の英知の結集

㈱宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究本部(ISAS)は、大学共同利用システムとして機能し、我が国大学・研究所などの研究者の参画を広く求め、これら研究者の総意の下、宇宙科学プロジェクトを進めるとともに、各大学からの要請に応じ、連携大学院制度により宇宙航空分野における大学院教育に協力している。

小惑星イトカワなどの太陽系小天体からのサンプルリターンは、重力の影響が大きい天体からのものより容易とも考えられるものの、小惑星などの始原天体は、太陽系形成初期の情報を保持していると考えられるため、地上での試料分析を含む、始原天体の調査・研究は大きな理学的価値を有するとともに、光学情報による探査機の自律的な降下・着陸および離陸(タッチ＆ゴー)は工学的に高度な技術である。ISASは我が国研究者・技術者の英知を結集して、「はやぶさ」の様に理学的にも工学的にも意義のあるミッションを企画立案・推進している。

また、人類初めての試みである小惑星への「はやぶさ」のタッチダウン成功、さらにはその後の推進剤漏洩事故による満身創痍からの復活は、想定外の困難な事態に対し、諦めることなく臨む不屈の精神および適時・適切に対応し得る能力を有する優秀な研究者・技術者がISASに存在したことの証左であろう。資源が乏しく食料自給率も低い輸出立国である我が国にとっては、人材が国力の源泉であり、この様な研究者・技術者による後継人材の育成も重要な機能である。なお、「はやぶさ」および「か

ぐや」の運用ならびにこれらの後継ミッションの企画立案・推進は現在、新たに設置された月・惑星探査プログラムグループが担当している。

(3) 月の総合的科学研究の推進

「かぐや」は元素・鉱物分布および地形・表層構造の観測のために高性能機器を搭載するほか、レーザ高度計により、世界初となる極域を含む月全球の詳細な地形図の作成、我が国独特の親子衛星システムの採用により、世界初となる月の裏側を含む全球重力場の測定を行うなど、正にアポロ計画以来の世界最先端の本格的な月科学探査ミッションである。他国のミッションと比較すると、月を純粋な科学研究の対象とし、その誕生と進化の謎を総合的に解明したいとの我が国研究者の真摯な姿がうかがえる。月表層構造を観測するため微弱な反射波を検知するレーダサウンダーおよび微弱な月の磁気異常を計測する磁場観測装置を実現するためには、設計・製作・試験の各段階において高い技術力を必要とするとされ[44]、我が国の宇宙開発技術の高さを示すものと言える。なお、満地球の出などのハイビジョン画像に対する一般の関心も高い。

6 提言と今後の方向性

(1) 他国の追随を許さない我が国独自の宇宙技術の継続的開発と国際協力の推進

欧州および我が国の研究者らは、ESA のコズミック・ビジョン計画に対し、枯渇彗星などの始原天体からのサンプルリターンミッションであるマルコ・ポーロを共同提案し、第 1 次審査に合格した[45]。我が国は「はやぶさ」の開発経験を生かして我が国独自の技術であるサンプルリターンを行う探査機を開発するとともに、欧州側はロゼッタの開発経験を生かした着陸機の開発および打上げを担当する構想である。

太陽観測衛星「ひので」は、他国には例の無い高性能・最先端観測装置 3 基 (SOT、XIT、EIS) を搭載しており、海外の研究者もこれら観測機器に対する関心が高いためか、JAXA 相模原キャンパスで開催される観測計画立案会合には、我が国に加え米英の研究者なども参加するほか、海外研究者が同キャンパスに長期滞在して、衛星運用・研究活動を実施している[46]。

これら事例は、我が国独自の高度な技術により、対等にまたは我が国のリーダシップの下で国際協力を推進できることを示している。太陽系小天体を含む太陽系探査において、イオンエンジンなどによるサンプルリターンの様な他国の追随を許さない我が国独自の技術を継続的に開発して友好国との国際協力を推進し、信頼関係の維持・強化を図りたい。

米国航空宇宙局 (NASA) は 2008 年 3 月 12 日、国際月ネットワーク (ILN) 構想を提唱し、我が国などに参加を呼びかけた。「かぐや」後継ミッションとして無人月面軟着陸機・表面探査車・越夜技術などが検討されており[47]、我が国独自の技術が開発され、様々な国際協力が展開されるものと期待する。我が国では、リモートセンシング観測ではなく、槍のような形状で月表面を貫通する 2 本のペネトレータにより、月震計・熱流量計の観測ネットワークを月面に構築し、月の内部構造を探る LUNAR-A が開発されていたものの、ペネトレータの開発が難航したため中止された[48]。英ムーンライト構想[49]、米ニューフロンティア計画[50]でもペネトレータによる太陽系探査が検討対象となっており、この技術の可能性は高い。

月・惑星探査は、ミッションの企画立案から運用終了までに約 10 ～ 20 年を要すると言われており、ミッション終了後の成果を踏まえて次期ミッションを計画するのでは、引退などのため研究者および技術者の基盤が失われてしまう。計画的にミッションを企画立案し、推進する必要がある。

(2) 青少年に対する理数系教育活動の推進

「かぐや」が取得した月面、地球の出などの画像・映像の公開以降、国内の科学館・高等学校・大学などの教育関係機関、さらには海外の教育関係機関および研究機関から画像・映像などの提供依頼があり、JAXA は、これら要求に応えるとともに、内外の関心が高いことから、映像などを収録し、音声による解説を加えた教育用 DVD を製作し、2008 年 5 月末から国内外教育関係機関への無償配布を開始した[44]。月・惑星探査の成果が、青少年の科学技術に対する関心を喚起する好例と言える。将来の理工系人材の確保のためにも、今後とも月・惑星探査から得られる科学成果に基づく普及啓発活動を継続・強化したい。

なお、NASA では、ディスカバリ計画、ニューフロンティア計画などのミッション毎に優れた教材を作成するなどして、青少年向け理数系教育活動を積極的に展開している。我が国の「かぐや」が取得したハイビジョン映像に対する世界的反響が高かったためか、

GRAIL ミッションでは、搭載カメラによる画像取得を利用した教育活動が計画されている[41]。

「はやぶさ」、「かぐや」などの活躍にも触発されたためか、東京工業大学、日本大学などでは学生が超小型衛星の企画・設計・製作・打上げ・運用を2年程度のサイクルで実施しており、ものづくりの全工程を経験した卒業生は宇宙分野のみならず自動車製造業などに就職している[51]。宇宙開発では、様々なサブシステム、コンポーネントなどを組み合わせて、ミッション要求を達成するシステムを構築する。学生の手造り衛星とは言え、苛酷な高真空・放射線・熱環境である宇宙空間で機能しなければならない。システムエンジニアリング手法も習得した卒業生が今後とも我が国の製造業の現場で活躍することを期待したい。

JAXA は、この様な活動も支援するため、H-IIA ロケットの余剰打上げ能力による小型衛星相乗り機会を提供しており、金星探査機 PLANET-C での相乗り機会を提供する候補として、早稲田大学、鹿児島大学などの4機の小型衛星を選定した[52]。今後とも、この様な支援活動を継続・強化したい。なお、NASA は、教育活動の一環として次世代の米航空宇宙技術者の育成のため、米国大学生月周回衛星(ASMO)構想を検討しており、米大学生が行う小型月周回衛星の設計・製作・打上げ・運用に対し、NASA エンジニアによる技術支援、施設利用提供などを行う計画である[53]。欧州宇宙機関(ESA)も教育活動の一環として、欧州大学生月周回衛星(ESMO)および欧州大学生地球周回衛星(ESEO)を立ち上げ、次世代の欧州航空宇宙技術者の育成に努めている[54]。

7 おわりに―様々な地球型惑星の姿

「かぐや」が捉えた満地球の出の画像は、漆黒の闇の宇宙の中、荒涼たる月面の上に青く浮かび上がる水の惑星地球を映し出している(図表17)。人為起源の環境汚染による地球温暖化の危機が叫ばれる中、我々が住むかけがえのない地球の重要性を再認識させられる。

本稿では太陽系の誕生と進化の謎の解明に挑戦する探査ミッションに焦点を当てた。一方、太陽系惑星の特異性と普遍性を研究することも、これらミッションに劣らず重要であることを指摘したい。我々人類を育む地球は青い水の惑星であるのに対し、他の地球型惑星である水星、金星および火星の環境は、我々人類の生存を許さない過酷なものである。水星は地球と同様、固有磁場を有するものの、大気は非常に希薄であり、太陽に照らされる昼側は地表温度が約430℃に達する灼熱の世界、夜側は氷点下約180℃の極寒の世界である。大きさおよび太陽との距離が地球とほぼ同じであり、双子星とも呼ばれる金星では、厚い大気の約96%は二酸化炭素であり、その温室効果のため地表温度は460℃に達し、地表面での大気圧は約90気圧になると考えられている。赤い惑星とも呼ばれる火星は現在、地球の約100分の1と希薄で、主に二酸化炭素から成る大気に覆われた冷たい惑星であるものの、かつては水が豊富に存在したことを示唆する観測データがある。

図表17 「かぐや」が捉えた満地球の出

出典：JAXA

地球型惑星は、岩石・鉄などの同じ元素でできた天体であるにもかかわらず、各々全く異なる進化過程を経てきた。これら惑星の個々の特異性と共通する普遍性を研究することは、地球の現在を理解し、未来を予測するうえでも大いに意義があると考える。なお、NASA のフェニックス火星着陸機が地表下の水氷の存在などを調査するほか、我が国も現在、日欧共同水星探査計画ベピ・コロンボおよび金星探査機 PLANET-C を開発している。

謝辞

本稿を執筆するに当り、㈱宇宙航空研究開発機構の樋口清司技術参与、國中均宇宙科学研究本部教授、

滝澤悦貞 SELENE プロジェクトマネージャおよび株式会社ニュートンプレスの水谷仁編集長から貴重なご意見・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

太陽系全般の動向については、Newton別冊「さらに知りたい太陽系惑星の科学 最新成果が次々に」(2007年7月20日発行、株式会社ニュートンプレス)を参考にした。

1) “New Frontiers in the Solar System: An Integrated Exploration Strategy,” Solar System Exploration Survey, National Research Council：http://www.nap.edu/catalog/10432.html
2) 米国宇宙財団HPの「Japan Aerospace Exploration Agency Wins 2008 Jack Swigert Award for Space Exploration, Colorado Springs, Colo.（February 12, 2008)」：http://www.spacefoundation.org/news/story.php?id=459Bbsp
3) 対外報告「第二報告：新しい太陽系像について－明らかになってきた太陽系の姿－」、日本学術会議物理学委員会IAU分科会及び天文・宇宙物理学分科会、2007年6月21日：http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t39-3.pdf
4) 神戸大学HPの「お知らせ　太陽系外縁部に未知の惑星？」：http://www.kobe-u.ac.jp/info/topics/t2008_02_28_01.htm
5) 理科年表オフィシャルサイト「冥王星特集～2006 年夏、太陽系に何があったのか？：すいきん…かいめいの完成といま」：http://www.rikanenpyo.jp/top/tokusyuu/index.html
6) 「プログラム探査としての小天体探査」、吉川真、(独)宇宙航空研究開発機構、平成19年度第29回太陽系科学シンポジウム、pp.58-61、2007年12月19、20日
7) 「JAXAブリーフィング：JAXAの太陽系始原天体探査計画」、吉川真、(独)宇宙航空研究開発機構、日本惑星科学会誌、第17巻第1号、pp.50-53、2008年
8) NASAディスカバリ計画HP：http://discovery.nasa.gov/index.html
9) ニア・シューメイカーHP：http://near.jhuapl.edu/
10) ディープスペース1 HP：http://nmp.jpl.nasa.gov/ds1/
11) スターダストHP：http://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html
12) JAXA宇宙科学研究本部HPの「小惑星探査機　はやぶさ」：http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/index.shtml
13) ESA HPの「Rosetta」：http://www.esa.int/SPECIALS/Rosetta/index.html
14) ディープインパクトHP：http://solarsystem.nasa.gov/deepimpact/index.cfm
15) ニューホライゾンHP：http://pluto.jhuapl.edu/science/scienceOver.php
16) ドーンHP：http://dawn.jpl.nasa.gov/
17) ULA社HPの「PRODUCTS & SERVICES」：http://www.ulalaunch.com/index_products_services.html
18) ESA HPの「Launchers」：http://www.esa.int/SPECIALS/Launchers_Home/index.html
19) JAXA HPの「ロケット・輸送システム」：http://www.jaxa.jp/projects/rockets/index_j.html
20) 「講座　宇宙探査機『はやぶさ』とプラズマ工学：2.『はやぶさ』小惑星探査機に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジン」、國中均、(独)宇宙航空研究開発機構、プラズマ・核融合学会誌第82巻第5号、pp.300-305、2006年5月
21) 宇宙科学の最前線「宇宙大航海時代への予感～小惑星探査機『はやぶさ』とイオンエンジン技術」、國中均：http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2004/kuninaka/02.shtml
22) JAXA宇宙科学研究本部の國中均教授より2008年5月16日付け情報
23) 「はやぶさ探査機のイオンエンジンによる深宇宙動力航行」、國中均、宇宙航空研究開発機構特別資料「低推力・連続加速を用いた宇宙ミッションに関する研究会論文集」(JAXA-SP-07-020)、(独)宇宙航空研究開発機構、ISS1349-113X、pp.1-6、2008年2月
24) JAXAプレスリリース「第20号科学衛星(MUSES-C)『はやぶさ』の現状について」：http://www.jaxa.jp/press/2005/03/20050316_sac_hayabusa_j.html
25) NASAのIn-Space Propulsion HP：http://www.grc.nasa.gov/WWW/InSpace/（2008年8月19日アクセス）
26) ”Discovery & New Frontiers News-NewFrontiers ProgramAnnouncement,” NASA,May14,2008.：http://discoverynewfrontiers.nasa.gov/news/news _ archive/2008/news _ 051408.html
27) JAXA宇宙科学研究本部の國中均教授より2008年5月19日付け情報
28) 「ソーラー電力セイル実証計画について」、ISASニュース第288号、2005年3月：http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.288/mission-05.html
29) 「スターダスト探査が解き明かす原始太陽系の姿」、三河内岳、日本惑星科学会誌、第16巻第4号、pp.270-273、2007年
30) 「はやぶさ後継に向けた試料採取技術の改良および新規開発」、松永三郎他、平成19年度第29回太陽系科学シンポジウム、pp.64-67、2007年12月19、20日
31) 「Marco PoloカプセルとDASH-II計画」、山田哲哉他、平成19年度第29回太陽系科学シンポジウム、

pp.72-74、2007年12月19、20日
32) “The Scientific Context for Exploration of the Moon: Final Report,” Committee on the Scientific Context for Exploration of the Moon, National Research Council, 2007.：http://www.nap.edu/catalog/11954.html
33) NASA宇宙科学データセンターHPの「Clementine Project Information」：http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/clementine.html
34) JAXA宇宙科学研究本部HPの「月周回衛星　かぐや」：http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/kaguya/index.shtml
35) NASA宇宙科学データセンターHPの「Chang´e 1」：http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2007-051A
36) ISRO HPの「Chandrayaan」：http://www.isro.org/chandrayaan/htmls/home.htm#
37) ESA HPの「SMART-1」：http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1/index.html
38) ルナプロスペクタHP：http://lunar.arc.nasa.gov/
39) LRO HP：http://lro.gsfc.nasa.gov/
40) LCROSS HP：http://lcross.arc.nasa.gov/
41) GRAIL HP：http://moon.mit.edu/
42) JAXAプレスリリース「月周回衛星『かぐや(SELENE)』のレーザ高度計による月全球観測データを用いた地形図の公開について－従来データの10倍、約600万点の月の高さを計測－」、2008年4月9日：http://www.jaxa.jp/press/2008/04/20080409_kaguya_j.html
43) JAXAプレスリリース「月周回衛星『かぐや(SELENE)』のハイビジョンカメラ(HDTV)による『満地球の出』撮影の成功について」、2008年4月11日：http://www.jaxa.jp/press/2008/04/20080411_kaguya_j.html
44) JAXAの滝澤悦貞SELENEプロジェクトマネージャとの2008年5月9日付け取材
45) ”First Selection of Candidate Missions for CV2015 Assessment Studies,” ESA, October 18, 2007.：http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=41438
46) ISASニュース「太陽観測衛星『ひので』特集号」、JAXA宇宙科学研究本部、第323号、2008年2月：http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.323/ISASnews323.pdf
47) JAXA月・惑星探査プログラムグループHP：http://www.jspec.jaxa.jp
48) JAXA宇宙科学研究本部HPの「月探査機 LUNAR-A」：http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/lunar-a/index.shtml
49) “Lunar exploration - Potential UK and US collaboration,” British National Space Centre, February 15, 2008.：http://www.bnsc.gov.uk/content.aspx?nid=7208&hl=MoonLite
50) “Opening New Frontiers in Space: Choices for the Next New Frontiers Announcement of Opportunity,” Committee on New Opportunities in Solar system Exploration: An Evaluation of the New Frontiers Announcement of Opportunity, pp.28-32, National Research Council.：http://www.nap.edu/catalog/12175.html
51) 第18回宇宙開発委員会資料「委18-1大学による超小型衛星の開発動向とSEEDS2およびCute-1.7＋APDIIの開発・打上・運用報告」、松永三郎、宮崎康行、2008年5月21日
52) JAXAプレスリリース「PLANET-Cに相乗りする小型副衛星の選定結果について」：http://www.jaxa.jp/press/2008/07/20080709_sac_sat_j.html
53) ASMO HP：http://asmo.arc.nasa.gov/
54) ESA Education HP：http://www.esa.int/esaED/index.html

執　筆　者

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 8/2008

2008年8月号 第8巻第8号/毎月26日発行 通巻89号　ISSN 1349-3663

NISTEP
NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY

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