



宇宙の謎に迫る 日本の月・小惑星探査技術

ガリレオが天体望遠鏡で初めて宇宙を観測してから400年がたち、これを記念し2009年は国際天文年とされている。これまで日本の宇宙開発はさまざまな成果を生み出してきたが、最近では月周回衛星「かぐや」の月面観測や、工学試験探査機「はやぶさ」の小惑星からのサンプル採取という、人類初の試みに注目が集まった。さまざまな条件が地球上とは異なる宇宙空間で、高度な要求性能に応える材料が利用されている。

かぐやのハイビジョンカメラがとらえた、月面からの「満地球の出」(2008年4月6日撮影)。このようにかぐやから満地球を撮影できるタイミングは、月、地球、太陽とかぐやの軌道が一直線という位置関係に並ぶ時だけ、1年に2回しかない貴重なものである。

©JAXA/NHK

世界各国で高まる宇宙開発への期待

1609年、ガリレオは口径わずか4cmの天体望遠鏡で初めて宇宙を眺めた。月のクレーターや木星の衛星に彼はたいへん驚き、著書「星界の報告」を残したという。

時は流れ、最近の宇宙開発のビッグニュースは、現在進行中の国際宇宙ステーション計画であろう。世界各国の宇宙飛行士とともに日本人宇宙飛行士も重要な役割を担っている。いまや宇宙開発は、日本を始め世界の主要国において、重要な政策の1つとなっている。アメリカは月や火星への有人探査を新たな計画に盛り込んでおり、ヨーロッパ諸国も安全保障政策を実現する重要なツールとして位置づけている。中国も有人宇宙飛行に成功し、将来の有人月探査も計画している。

日本の宇宙に関する研究は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が中心となって進められている。JAXAは、2003年宇宙・航空に関する3つの研究機関*が統合して誕生した機関で、これにより基礎研究から開発・利用に至るまで、一貫して行う体制がスタートした。現在は、長期ビジョン「JAXA2025」に基づき、さまざまな取り組みを行っている。この中から、今回は月・小惑星探査に注目し、最近の観測の成果や、ミッションを支えた工学技術について紹介する。

*宇宙科学研究所(ISAS)、航空宇宙技術研究所(NAL)、宇宙開発事業団(NASDA)

月はどうやって誕生したのか

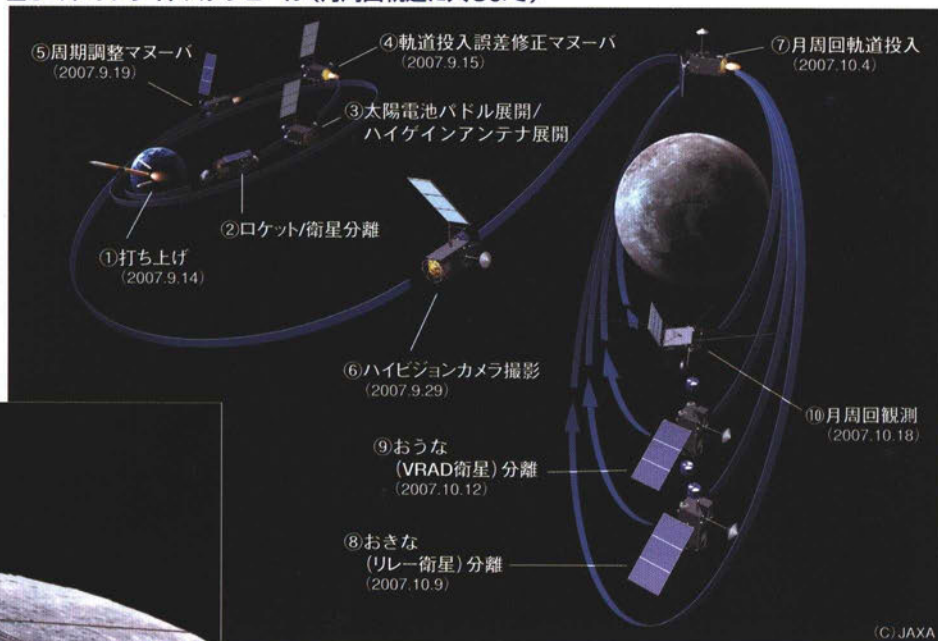
日ごと満ち欠けを続ける月は古くから暦の元であり、地球に住む私たちにとって、太陽とともに最も身近な天体である。しかし、実はまだ多くの科学的な謎が解明されていない。

月に関する最大の謎は、月の起源である。1960年代から70年代にかけてのアメリカのアポロ計画では、月面から約400kgの岩石が採集され、詳細な分析が行われた。これにより、月の多くの岩石は35億年より古い形成年代を示していること、高地の部分から得られた岩石はアルミニウムやカルシウムに富み、融点が高く、密度の小さい斜長岩が含まれること、海の部分から得られた岩石は鉄に富み、融点の低い玄武岩であること、月にも地震があり、マントルや核など地球と同様の層構造があること、などの科学成果が得られた。

この研究から生まれた起源と進化に関するモデルが、巨大衝突起源説とマグマオーシャンモデルである。マグマオーシャンモデルとは、月が形成されてしばらくの間、月の表面は岩石が溶けたマグマの海が覆っていた、という説である。また月の密度が地球よりかなり小さく、鉄の中心核が小さいことなどから、地球ができてからまもなく別の天体が地球に斜めにぶつかり、そこから飛び出した表面付近の物質が集まって月ができた、という巨大衝突起源説が有力と考えられてきた。

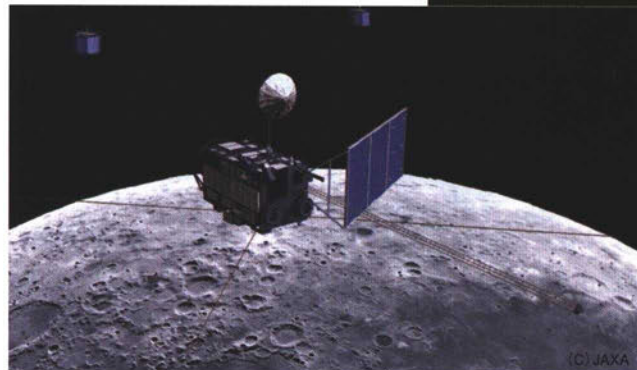
月は地球と同じく約45億年前に誕生したが、地球のような

■かぐやのフライトスケジュール(月周回軌道に入るまで)



■月周回衛星「かぐや」(予想図)

かぐや(主衛星)は質量約3t、2.1m×2.1m×4.8m。磁場の測定では、かぐや本体から発生するノイズを拾わないように、長いマスト(12m)の先に磁力計を設置。このようにかぐや自体がノイズ源にならないよう、炭素を練り込んだ断熱材を利用して、衛星表面に導電性を持たせている。



火山活動や地表のプレートテクトニクスなどの変化をほとんど受けていないため、初期進化の歴史が残っていると考えられる。そのため月を探索することは、月の起源だけでなく地球の起源につながる重要な手がかりとなることが期待されている。

アポロ計画の有人月面着陸では、月の表側の海の部分付近にしか着陸しておらず、月の上空からの観測にしてもその範囲は月面全体の10%程度にしか満たなかった。そこで、月を全球にわたって観測し、月面の元素組成、鉱物組成、地形、重力場や月の内部のようすがわかれば、さらに多くのことが明らかになると期待され、月周回衛星「かぐや」が計画された。

「かぐや」による宇宙のハイビジョン映像

2007年9月、日本初の大規模月探査機「かぐや」が打ち上げられた。かぐやは、アポロ計画以来最大規模の本格的な月の探査計画として、世界中から注目された。

かぐやのミッションは、2007年9月に地球を飛び立ってから約1カ月で高度約100kmの月周回軌道に到達し、その後月の周りを回りながら各種の観測を行なうことである。かぐやは、主衛星と2基の子衛星(リレー衛星とVRAD衛星)で構成されている。また多くの観測機器が搭載され、月表面の元素分布、鉱物組成、地形、表層構造、磁気異常、重力場など多岐に渡る観測が行われた。

2007年10月、かぐやは世界初のハイビジョンによる月面撮影に成功した。その後、地球が月から上のように見える「満地球の出」のようすなども公開され、かぐやの名は一般にも広く知られるようになった。

月周回軌道に入ったかぐやは引き続き各種の観測を行い、2008年10月末には予定していた定常観測を終了した。2009年2月からは、月面から50km程度の高さでさらに観測を行った。そして、2009年6月に姿勢制御用の燃料が尽きる前に、月面に制御落下し、その役割を終えた。

次第に明らかになった月の姿

2009年2月、米科学誌「サイエンス」の表紙にかぐやが撮影した月面の写真が掲載され、同時にかぐやの観測に基づく研究に関する論文が掲載されて大きな注目を集めた。これまでに得られた代表的な成果例を紹介する。

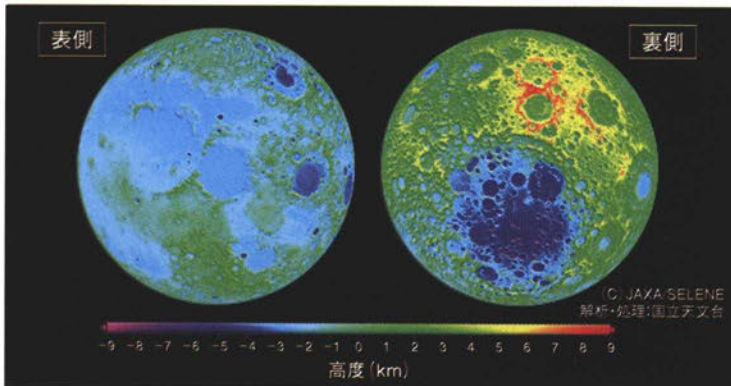
重力場測定では、月の裏側を飛行しているかぐや(主衛星)を、リレー衛星を経由して地球上から追跡するという方法で、裏側の観測を行った。平均重力からの重力のずれの大きさや分布は、地下の重い物質(マグマが固化した玄武岩やマントル物質)と軽い物質の分布を表しているが、かぐやの観測結果は、月の表側と裏側で分布パターンが大きく異なることを明らかにした。

かぐやでは、レーザ高度計を用いて、月の全球にわたる表面2000万点の高度が測定された。これにより、月の最高点は裏側の真ん中あたり(高度約10km)、最低点は裏側の南極近く(高度-9.7km)であること、裏側の高低差レベルは地球のそれに近いこと、表側は裏側に比べ高低差が少ないこと、などがわかった。また極地方に、1年のうち80%日照がある場所があり、月面基地での電力を得るために太陽電池によりエネルギーを確保できる可能性が広がった。

地形観測では、地形カメラにより月の裏側の調査を行い、「クレーター年代学」という手法でクレーターの数と大きさの関係からその表面ができた年代を推測した。その結果、月の裏側の海の活動

■レーザ高度計による月の表側・裏側の地形図（正射投影図法による）。

データを元に作成された正射投影図法による地形図。表側が比較的平らであるのに対し、裏側は高低差が大きい。



■かぐやの観測ミッション

観測項目	観測機器	観測内容
元素分布	蛍光X線分光計	太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面の元素（Al、Si、Mg、Feなど）の分布を調べる。
	ガンマ線分光計	月面から放射されるγ線を観測し、月表面の元素（U、Th、K、Hなど）の分布を調べる。
鉱物分布	マルチバンドイメージャ	月面からの可視近赤外光を9つの波長バンドで観測し、鉱物分布を調べる。
	スペクトルプロファイラ	月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、月表面の鉱物組成を精度良く調べる。
地形・表層構造	地形カメラ	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。
	月レーダサウンダー	月面に電波を放射し、その反射により月の表層構造（地下数km程度まで）を調べる。
	レーザ高度計	月面にレーザ光を放射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。
環境	月磁場観測装置	月面および月周辺の磁気分布を観測する。
	粒子線計測器	月周辺における、宇宙線や宇宙放射線粒子、および月面のラドンから放射されるα線を観測する。
	プラズマ観測装置	月周辺における、太陽風等に起因する電子およびイオンの分布を測定する。
	電波科学	「おうな」（VRAD衛星）から送信される電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を観測する。
	プラズマイメージャ	月軌道から、地球の磁気圏およびプラズマ圏を画像として観測する。
月の重力分布	おきな（リレー衛星）中継器	月裏側に飛行中の主衛星の電波を「おきな」（リレー衛星）で中継し、これを地球局でドップラ計測することによって、主衛星の軌道の擾乱を観測する。これにより月裏側の重力場データを取得する。
	衛星電波源	「おきな」（リレー衛星）および「おうな」（VRAD衛星）に搭載するS、X帯電波源を対象に、地球局による相対VLBI観測を行い、各衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。（VLBI：超長基線電波干渉計）
精細画像	高精細映像取得システム	地球および月のハイビジョン撮影を行う。

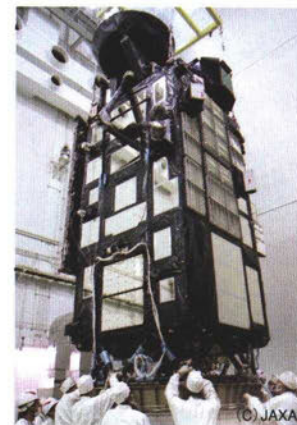
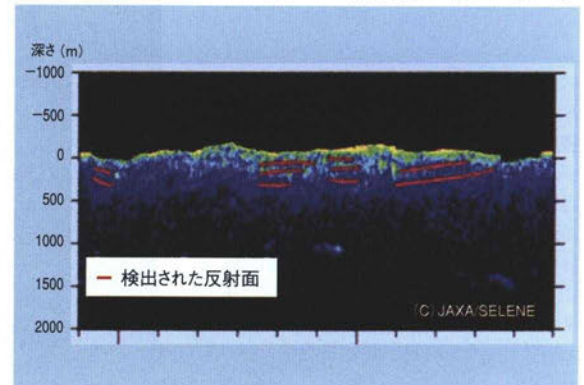
はこれまで35億年程度前に終了したと考えられていたが、それより10億年ほど若い、25億年前くらいに形成された場所があることがわかった。

また表面に近い地下の構造について、レーダサウンダーで観測を行った。かぐやから電波を送り、地下で電波が反射する様子を観測する。その結果、海の地下500mに不連続な面がある箇所や、マグマが湧き出した跡などが見られた。

鉱物分布では、直径100km程度のクレーターで、クレーター内部の鉱物を調べた。クレーターの中央にある丘は、クレーターができた時に地殻内部の岩石が飛び出したものと想像できる。そこでこの部分の鉱物をスペクトル

■月レーダサウンダーによる地下構造の観測データ

上空から月表面に向けて電波を放ち、地下で反射しもどってくる電波を観測する。検出された反射面（赤い線）により、層状構造が明らかになった。



かぐやの実物大モデル。高さは約5mで、マイクロバスぐらいの大きさである。

ルによって調べることににより、地下10km程度以深の岩石が同定できると考えられている。観測したクレーターでは斜長石や輝石と呼ばれる鉱物が多いことが明らかになった。

今後、これまでの観測結果を元にデータを統合し、新たな知見を得ることになるだろう。これにより、月の裏側も含めた詳細な地形図や鉱物分布図が作成され、今後の月探査活動の重要な手掛かりとして活用されることが期待されている。

小惑星の鉱物サンプルを採取する「はやぶさ」

「かぐや」に先駆けること4年、2003年5月に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」も、世界中が注目するプロジェクトを遂行中である。

小惑星とは、彗星や太陽系外縁天体と並んで、惑星や準惑星にまで成長しなかった太陽系内の小天体の一種であり、現在までに30万個以上が発見されている。これらは地球や月のように内部が溶融した大型の固体天体とは異なり、約46億年前に太陽系が誕生した当時の物質や構造の情報を今も保持しており、いわば「原始太陽系の化石」のような存在である。

■小惑星探査機「はやぶさ」(予想図)

はやぶさは質量510kg、本体約1.0m×1.6m×2.0mとコンパクトな外形である。下部にはサンプラーホーンが付いている。



探査機によって特定の小惑星から表面試料を持ち帰る技術が確立できれば、これまで蓄積された望遠鏡観測による小惑星の分類データベースと顕微鏡分析による隕石・宇宙塵の分類データベースの間を「橋渡し」することができるようになり、太陽系や地球、そして私たち地球生命そのものがどのような材料から誕生し、その後どのような物質進化を遂げてきたかという長年の謎について、ブレイクスルーをもたらすことができる。

こうした天体試料を採取して地球上の研究室に持ち帰る探査方法を「サンプリターン」と呼ぶ。地球の重力圏を超え、深宇宙の天体表面に離着陸してサンプリターンに挑むのは、はやぶさが世界初である。

はやぶさは打上げ後1年間、地球の公転軌道近くにとどまって後述のイオンエンジンによる動力航行を行ったのち、2004年5月に地球の重力を生かしたスウィングバイ*による加速と軌道変更を行った。その後もイオンエンジンによる動力航行を続け、2005年9月に地球から約3億km(地球と月の距離の約850倍)離れた空間で地球接近小惑星イトカワ*に到着した。その後1.5ヵ月間、太陽系探査史上最小となる大きさ500mほどのイトカワの全球形状、特徴的な地形、重力加速度、鉱物組成、主要元素組成などを詳細に観測した。2005年11月にはイトカワ表面からの試料採取に挑戦し、はやぶさは月以外の天体から離着陸した史上初の探査機となった。このときの運用室の様子はインターネットによって世界同時生中継され、第一回のタッチダウン運用のときには一日で約240万のアクセスを記録した。

これらの結果、岩石質小惑星が普通コンドライト隕石のふるさどであること、微小小惑星が一見採石場や土砂崩れにも似た「瓦礫の寄せ集め」構造で作られていること、微小重力環境でも表面物質が移動して特長的地形を形成することなど、数々の科学的発見を成し遂げた。その初期成果は2006年6月に、日本の宇宙科学ミッションとして初めて組まれた「サイエンス」誌特集号で報告された。

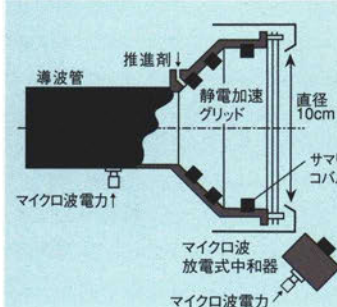
*イトカワ:太陽系にある地球近傍小惑星(地球に近接する軌道を持つ天体)。「日本のロケット開発の父」と言われる糸川英夫氏に因み、この名前が付けられた。

*スウィングバイ:惑星の重力を利用して、探査機の軌道を変更したり、加速・減速したりすること。



はやぶさが撮影したイトカワ

■イオンエンジン



はやぶさのイオンエンジン(マイクロ波放電型)の構造。キセノン(推進剤)の電子を閉じ込めるため、内部にはサマリウム-コバルト磁石が使用されている。磁石を支持する部分には軟鉄が使われている。

■サンプラーホーン(プロトタイプモデル)



ホーンの先端(写真下部)がイトカワの表面に接触しサンプルを採取する。

上部から金属弾丸を撃ち出しイトカワの表面を破砕すると、かけらが飛び散る。これが探査機内部のキャッチャーに収容される。



その後、燃料の漏えいによる一時的なトラブルに見舞われて当初の軌道計画を変更せざるを得なくなったものの、2007年4月にはイオンエンジンの再点火に成功し、地球に向けて帰還を開始した。この間、はやぶさを操るのは、神奈川県相模原市にあるJAXAの運用室から、長野県の山岳部にある臼田宇宙空間観測所の直径64mのパラボラアンテナを経由で送受信される電波による超長距離通信である。臼田からははやぶさがとらえられる時間は、通常1日のうち最長約8時間。しかも電波が光速で地球と探査機間を往復する遅延時間差を考慮しながら、地上からの遠隔操作が行われている。

高効率イオンエンジンの開発とサンプリターン

はやぶさの開発の大きな目的の1つは、深宇宙往復探査と小天体サンプリターンに必要な工学技術の実証を行うことであった。それらは、高効率なイオンエンジンによる航行、小惑星に探査機が自ら判断して近づく自律航法、微小重力下の小惑星表面で表面試料を採集する技術、採集した試料を惑星間軌道から直接地球に送り届ける大気再突入カプセル、などである。

月面の鉄資源を利用する

月面で黒く見える場所は、海と呼ばれる。ここは25億年から35億年前に噴出したマグマが流れ広がったものと考えられている。月の海は玄武岩（溶岩）からなっており、鉄分が豊富に含まれている。また高地の部分（白く見えるところ）は斜長岩という鉱物で、アルミニウムやカルシウムなどが多く分布している。

月面にある鉄、チタン、アルミニウム、酸素などを資源として利用する、という構想は以前から考えられていた。すでに日本を始め世界各国で、月面基地・有人長期滞在を主目的とした月探査計画が検討されているが、そのような計画で、必要な物資を地球から送るのではなく、月面で資源を採掘して利用するのである。

月面で鉄を取り出すために利用できる鉱物として考えられているのが、チタン、酸素、鉄からなるチタン鉄鉱（ FeTiO_3 ）である。チタン鉄鉱から酸素とチタンを取り出すとき、副産物として鉄が得られるはずである。酸化鉄を月面で還元して、より純度の高い鉄鋼材料



有人月面拠点のイメージ

(C) JAXA

が製造できるが、そのために、水素を加え加熱する、黒鉛を還元剤として使用する、などの方法が考えられている。

JAXA長期ビジョン（2005）では、2015年以降に月探査・利用技術の蓄積を図り、2025年以降に月面拠点構築を目指す、とされている。「月面の鉄を使い、月面で製鉄し、月面で利用する」という構想は、意外に早く実現するかもしれない。

はやぶさには、化学推進による姿勢制御用スラスター12基と主推進機関としてのイオンエンジン4基が付けられている。化学ロケットが燃料と酸化剤から作ったガスを後方に噴射してその反作用で前に進むのに対し、イオンを噴射するのがイオンエンジンである。ガスに比べてイオンはきわめて速く噴射することができ、推力を得る効率がきわめて高いため、わずかな燃料で遠くまで行ける可能性が広がる。しかしイオンでは得られる加速度は大変小さく、推進剤（燃料にあたる）には比較的大きい原子量を持つキセノンが使用された。はやぶさのイオンエンジンは、全行程30億kmにも及ぶ深宇宙航行の間、故障することは許されない。開発時には18,000時間という長期耐久試験が2回も行われた（1年は約9,000時間）。

また世界初の試みである、小惑星表面の試料採取に使われた機構も興味深い。イトカワの表面重力は、地球上の10万分の1程度しかない。そのため、探査機の端に円筒が張り出した形の採取装置がイトカワ表面に接地したらすぐに上昇しないと、探査機本体が重心から回り始めてしまう。またイトカワ表面の試料採取地点が一枚岩でできているのか、あるいは砂礫や粉体で覆われているのかは、探査機の設計・開発段階では未知なため、どのような表面状態でも一定量以上の試料が採取できるような装置が必要となった。そこで開発されたのが、弾丸を撃ち込むプロジェクト、試料を捕獲する円筒と円錐を組み合わせたホーン部、試料を保管するキャッチャ部、そしてキャッチャや回収カプセルに格納する搬送部からなる「サンプラー」と呼ばれる採取装置である。探査機がイトカワ表面に降下する際、探査機下面から突き出たホーン先端部が地表に接した瞬間にプロジェクトから金属弾丸を撃ち込むと、岩盤なら砕かれ破片が生じ、粉体ならば上向きに巻き上げられる。これらを円錐状のホーンでキャッチャ内部に導く。

弾丸は300m/sの速度でイトカワの表面に撃ち込まれるが、できるだけ外形が小さく、かつ重量が重いものが適していることから、材質はタンタルとなった。採取試料に鉄分が含まれている可能

性があるため、分析時の汚染を避けるべく、鉄球は使用されなかったという。

2005年11月に採取されたと思われる試料は、現在炭素系耐熱素材で覆われたカプセル内部に密閉され、はやぶさと共に地球に向かって航行中である。2010年夏に大気圏に突入、オーストラリアの砂漠地域で回収する予定となっている。

世界が目にする日本の月・小惑星探査技術

2008年2月、JAXAは、はやぶさ、かぐやなどの先進的な科学衛星・太陽系探査機を通じて科学的成果をあげた功績により、米国宇宙財団のジャック・スワイガート賞を受賞した。この賞は、宇宙探査の分野で最も優れた業績をあげた個人または機関に授与されるもので、今回は米国外で初の受賞者となった。

かぐややはやぶさの探査ミッションには、「世界初」と付くものが多い。人類が初めて行う月の裏側の重力分布探査や、小惑星への離着陸探査により、多くの観測結果が得られているが、これらを可能にしたのは探査機や観測機器の開発や、宇宙の航行技術、運用技術など、多岐にわたる工学技術の進歩である。いうならば、理学と工学相互のバランスが取れた進歩があってこそ、宇宙探査の可能性が広がるのだろう。

はやぶさが目的地のイトカワに近づくにつれ、それまでの観測では点光源でしかなかった微小小惑星の外形が、地球上の研究者たちの目にも徐々に明らかになっていった。まるで、海に浮かぶラッコの頭と胴体がゆるくつながったような形や、予想に反してクレーターの代わりに岩塊に覆われていることがわかり、研究者たちは興奮に包まれたという。

本年7月22日には日本各地で、月が太陽の前を横切る日食が見られる。宇宙は、人間の想像力をはるかに超えるダイナミックな営みの連続である。