

# はやぶさ探査機が拓く サンプルリターンと小惑星の科学

藤原 顕

総合研究大学院大学教授宇宙科学専攻 / 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部教授

2005年夏、小惑星探査機「はやぶさ」がいよいよ小惑星イトカワの近傍に到着する。  
注目のサンプルリターンは、どのように行われるのか。今後の惑星探査を切り拓くはやぶさミッションについて紹介する。

## はじめに

2003年5月9日、小惑星探査機「はやぶさ」が鹿児島県内之浦町からM5型ロケットにより打ち上げられた。「はやぶさ」は、本年2005年8月末に近地球型小惑星イトカワの近傍に到着し、種々の科学観測を行ったのち、表面から試料を採取し、2007年夏期に地球に帰還する予定である。これが成功すれば、小惑星からのサンプルは世界ではじめてのことである。そもそも、これまでにサンプルが持ち帰られた天体は、アポロによる月だけである。

惑星探査の方法として、サンプルリターンは最も困難なもので、多くの技術的課題を解決する必要がある。しかし、そ

の重要性から考えて、今後、惑星探査の大きな流れになっていくものと考えられ、ぜひともこの技術的課題をクリアしておくことが必要である。「はやぶさ」は、その技術を実証する工学実験探査機であるが、今後の小惑星探査、惑星探査を切り拓くための重要なものである。

## 小惑星サンプルリターンの科学的目的

### 1. 隕石研究の問題点

現在の惑星系形成の筋書きは、いろいろな力学的証拠と物質的証拠にもとづいて作り上げられている。そのうち、物質的証拠を提供している重要な試料は、隕石と月の試料である。とりわけ隕石試料は非常に始原的なものから、加熱分化したもので、進化の度合いの異なるいく

つのタイプのものが知られており、これらは太陽系進化の諸様相を反映していると考えられている。たとえば、炭素質隕石はその構成鉱物粒子が集まった状態をほぼそのまま保持しているようであるが、一方、鉄隕石などのように母天体内部で物質が溶融分離したのち、核の部分が隕石としてもたらされたと考えられるものまである。

隕石は、わが国でも南極での大量採集をはじめとして、これまで大きな蓄積があり、これからは岩石、鉱物的情報や元素、同位体組成などの詳細なデータが得られてきた。太陽系近傍での平均宇宙元素組成を決めるための重要なデータともなっている。大事なことは、隕石のように宇宙試料が手に入れば、それが経てきたいろいろなイベントの年代がわかるということである。太陽系の歴史における重要なイベントは、46～45億年前ごろのきわめて短い期間に集中している。このあたりの各イベントを時間分解して測定するためには、高精度の年代測定が必要であるが、これはごく最近になって行えるようになったものである。いずれにせよ、隕石で得られたデータは、われわれの太陽系の形成モデルを組み立てる上で、大きなよりどころとなっているわけである。

しかし、これらの隕石がどのような小惑星から来たものなのか、太陽系の中で普遍性のあるサンプルかどうか、本当のところよくわかっていないことは大きな



小惑星に近づく「はやぶさ」探査機（想像図）。

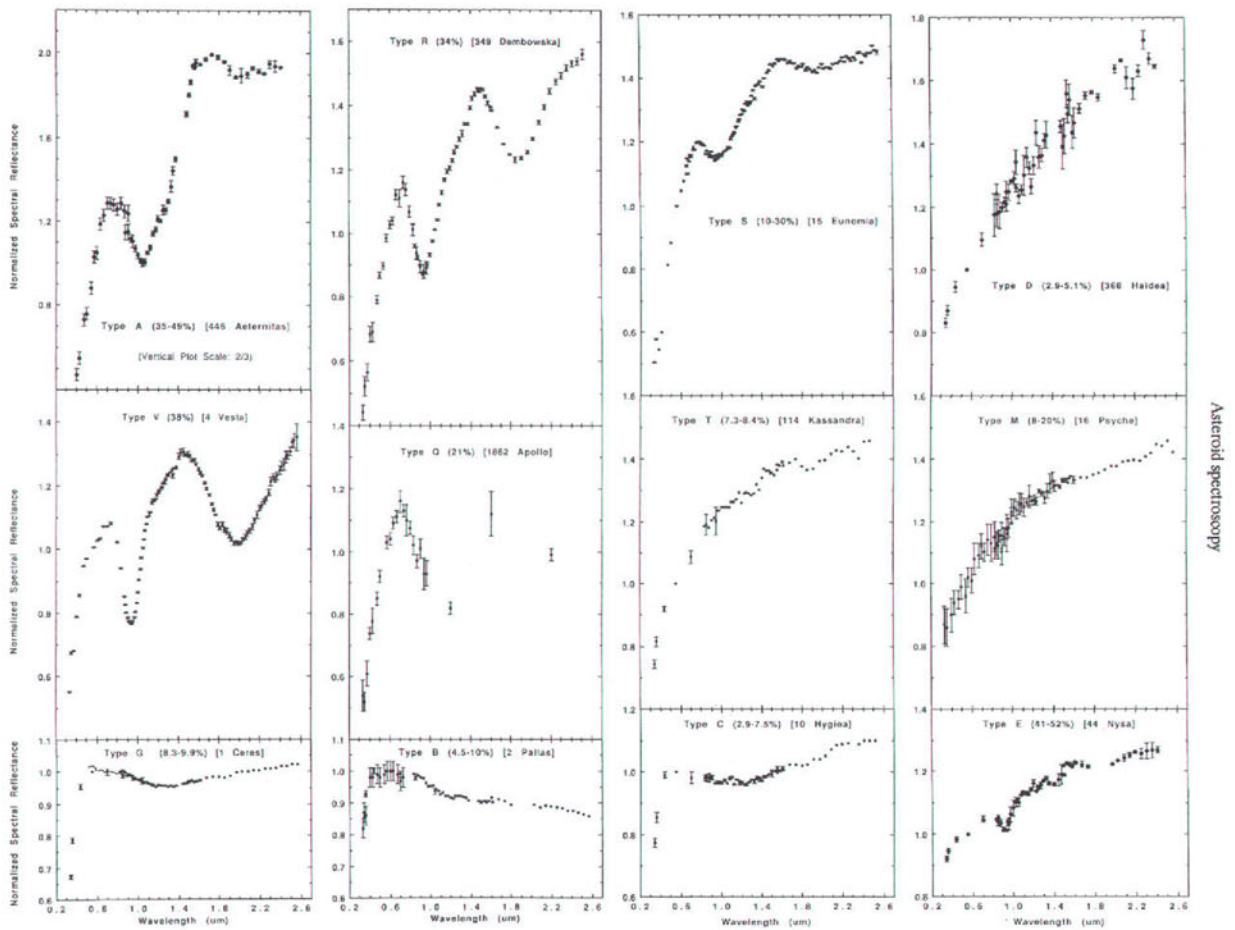


図1 小惑星のスペクトル型。それぞれの型（アルファベット）に属する代表的な小惑星の名前とスペクトルをあげた。  
Gaffey M. J., Burbine T. H., and Binzel R. P. (1993a) Asteroid spectroscopy Progress and perspectives. *Meteoritics*, 28, 161-187.

問題である。

## 2. 小惑星研究の問題点

一方、小惑星は発見以来200年以上になるが、とくに最近の観測技術の著しい進歩にともなって、サイズの小さな天体への探索が進み、その数は飛躍的に増加している。現在までに、27万個以上の小惑星の軌道が算出されている。観測で得られるデータは、個々の小惑星の軌道要素、大きさ、光反射率、自転周期、反射スペクトル、自転の向きなどである。これらの中で、小惑星の反射スペクトルのデータは、小惑星の物質に関する重要な情報を担っているものと考えられ、多くの小惑星について観測がされつつある。小惑星にはかなりのバラエティが見られるが、それらは反射スペクトルの形と反射率によって系統的に分類がなされてい

る。Sタイプ、Cタイプを主要タイプとして、現在では約1ダースほどのタイプに分類されている（図1）。

これらの分布は、太陽からの距離と相関をもっていること、その原因が太陽系の形成の歴史と深く関りがあるらしいということがわかっている。それぞれのスペクトルタイプに対応する物質がどのようなものであるかを推定するために、実験室で隕石や鉱物の粉末の光反射スペクトルを調べ、小惑星のスペクトルとの比較が行われている。

しかし、このような研究からだけでは、各スペクトルに対応する隕石の種類を特定するのに問題が多いことが指摘されている。たとえば、次のような重要な矛盾がある。小惑星に最も多いのはS型とよばれているタイプである。しかし、不思議なことに、地球上で最も多く見つかる

普通コンドライトとよばれる隕石グループとは、スペクトルの型が一致していない。このことは、地球に降ってくる隕石の集団が非常に偏った集団であることを意味しているのだろうか？

ここで注意しておかねばならないのは、望遠鏡で観測する小惑星の光というのは、小惑星のごく表層のミクロン程度の部分を見ているにすぎないことである。したがって、表面のごく薄い層でなんらかの変質があれば、本来の小惑星物質の色合いを隠してしまうということが起こる。実際にそのようなことが起こっているかもしれないということが、最近提唱されている。小惑星の表面は宇宙空間で長く露出されているうちに、宇宙塵の衝突や放射線の照射などによって表面状態が変質する。これを宇宙風化とよんでいる。この現象を考えると、普通コン

ドライト隕石のスペクトルは、S型小惑星のものに近くなるという証拠や実験がなされているが、まだ本当のところはよくわかっていない。

以上述べた隕石研究の問題点と小惑星研究の問題点を解決し、両研究分野を融合させるためには、小惑星からの試料を持ち帰り、小惑星のスペクトルタイプと隕石の対応づけが必要である。小惑星の数は非常にたくさんあるが、主要なスペクトルタイプの小惑星からサンプルを持ち帰り、スペクトルタイプに隕石グループを対応づけることができれば、小惑星帯全域にわたる第一近似的な物質分布マップが描けることになる。もちろん試料を持ち帰れば、隕石で行っているような詳細な分析や年代の決定ができることはいままでもない。

われわれは、このような考えで小惑星のサンプルリターンを進めつつある。とほいうものの、サンプルリターンミッションは惑星探査の他のいろいろな手法（フライバイランデブーなど）に比べて各段に高度な技術を必要とする困難なものである。ということで、「はやぶさ」は、まずは工学技術を実証するための工学実験探査機なのである。

## はやぶさミッション

### 1. ミッションのあらすじ

図2には、探査機のたどる道筋が小惑星、地球の軌道とともに描かれている。探査機は打ち上げ後、約1年間、イオン

エンジンを使って地球の軌道にほぼ沿った軌道を航行し、2004年5月19日に再び地球に接近した。ここで地球に引かれて増速されるとともに軌道を曲げられた（スイングバイ）のち、目標とする天体に向かう軌道上を航行し、2005年夏には小惑星付近に近づく予定である。

その後、探査機は小惑星を周回するのではなく、小惑星の太陽側約6km程度のところに停留する（小惑星と並走する）。ここで観測をしたのち、降下点を決め、表面に向けて降下し、表面の試料を採取する。採取した試料は探査機側面に取り付けられているカプセル内に収納される。その後、再びイオンエンジンの助けを借りて、2007年6月に地球付近に戻ってくる予定である。地球帰還ではカプセルのみが探査機から外され、大気中に突入し、減速されて地上に回収される。回収地点はオーストラリアのウーメラという砂漠地帯である。

### 2. 技術

このミッションにおいて、主要な技術的課題となるものは次の4項目である。まず、この探査機は目標の小惑星への往復に電気推進器（イオンエンジン）を使用する。これはキセノンガスをマイクロ波でイオン化し、電界で加速放出するものである。この推進器の推力は弱いが、燃費がよいので、長期間作動することによって効率よくじわじわと軌道を変えていくことができる。とにかく長時間にわたっ

て使用するの、なによりも耐久性が要求され、地上試験でも長時間耐久試験が行われた。

2番目は、小惑星にたどり着くための航法技術である。探査機が小惑星に到着するころには、太陽をはさんで地球とは反対側にいるため、地球から探査機への通信往復時間が30分以上もかかる。したがって、探査機が持っているカメラからの画像情報などを使って、状況を機上で独自に判断して小惑星に向かったり、降下したりする自律化機能を備えている。

3番目はサンプルの採取法である。探査機の底面には1mの長さの筒が付いていて、この筒の先端が小惑星表面に接地した瞬間に金属小球を打ち出し、小惑星表面に衝突させる（図3）。衝突によって跳ね飛ばされた表面試料は、この筒の中を通過してサンプルの容器に入れられ、最終的にはこの容器がカプセルの中に収納される。

一般に月など、ある程度以上の大きさをもつ天体の表面は砂や礫で覆われている（この層のことをレゴリスとよぶ）。ところが、探査の対象となっている小惑星は、大きさが300m×600m程度であり、表面の重力は地球の表面での重力の1万分の1程度である。こんな表面にレゴリスがあるのかどうかについては現在論争中であり、あるいは岩盤が露出しているという可能性もある。いろいろな可能性に対して最も適応性があり、軽量で電力の少ない簡単な方法として、この試料採取方法が選ばれた。探査機は表面との一瞬の接触の後、姿勢変化による衝突を避けるために、化学エンジンを噴いて上昇する。

4番目は地球への帰還の技術である。「はやぶさ」から切り離されたサンプルの入ったカプセルは、スペースシャトルの地球帰還よりはるかに速い12km/sという超高速で、惑星間軌道から地球大気突入してくる。このため、カプセルの前面の耐熱アブレターが開発された。大気突入後、充分減速した段階でパラシュートを開き、アブレターを脱ぎ捨てる。大気との摩擦で前面は高温になるが、サンプルの経験する温度は約

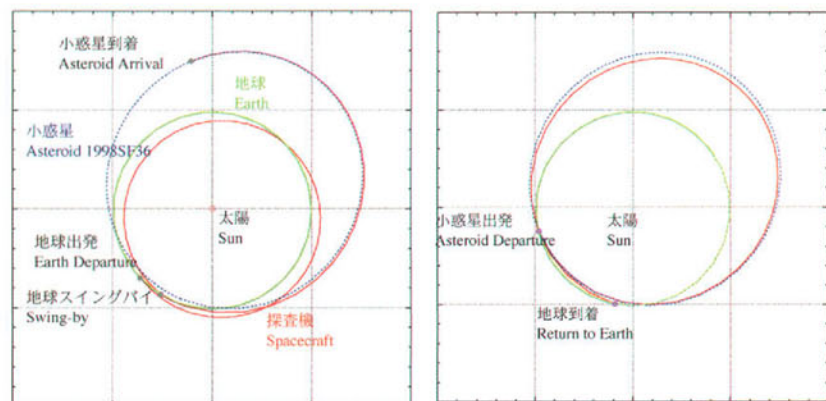


図2 「はやぶさ」の軌道。左は往路、右は復路。

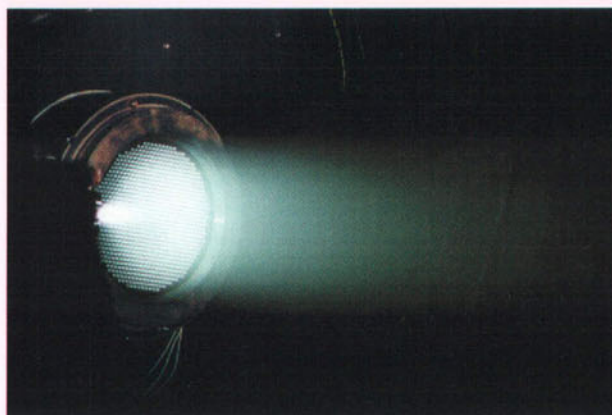
# 宇宙動力航行を可能にする電気推進

國中均 総合研究大学院大学助教授宇宙科学専攻/宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部助教授

ロケットや人工衛星に積み込む燃料重量には自ずと限界があるので、少ない量を効率的に使用することが至上命題である。宇宙用推進機関の高性能化の「極意」とは、高速噴射を意味している。これまでの人工衛星に使用されている化学推進は、燃料に内在する化学エネルギーを用いて、燃料そのものを加速噴射するものである。重量当たりの化学エネルギーは物質に固有なので、噴射速度は秒速5 kmが上限となる。

一方、「はやぶさ」が用いる電気推進は、噴射質量と加速エネルギーを別々に調達して、任意の割合で調合できるので、速度の上限は一気に取り払われる。加速エネルギーは、もっぱら太陽電池からの電力を利用する。「はやぶさ」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジンでは、噴射速度毎秒30km、作動時間2万時間を達成した。3台同時運転で約1 kWの電力を消費し、(たった!?) 24mNの推力を発生する。これは、地球表面で1円玉2個を持ち上げる力にすぎず、瞬時の推力は非常に小さいが、長時間動作させれば最終達成速度はこのほか大きくなる。

しかし、この長時間作動というのが曲者で、その機能性能を証明するために、われわれは2年半の連続耐久試験を2回、つまり5年間も試験に費やした。昼夜、日曜祭日、盆暮れ正月の区別なく連続動作させるため、その試験が軌道に乗るまでの当初数カ月、実験室での寝泊まりを強いられた。時を同じくして、急速に進歩したIT技術のおかげで実験室に幽閉されることはなくなったが、いったん事あれば実験室のコンピュータから携帯電話越しに呼び出される始末。開発フェーズでは大変に



作動中のマイクロ波放電式イオンエンジン

てこすらされたものの、いちど宇宙空間に投入されたイオンエンジンは、地球からの指令電波に応じて「はやぶさ」を加速させ、目的の小惑星に接近中である。

これまでの人工衛星は、ロケットによって加速されて以降は慣性(惰性)飛行をしていたが、「はやぶさ」はマイクロ波放電式イオンエンジンによって宇宙を動力航行する宇宙船といえるだろう。今まさに、地球~小惑星間往復航行を実証し、「宇宙大航海時代」を切り拓こうとしている。現在傾けられている電気推進のさらに高性能化への研究開発努力は、もっと遠方のメインベルト帯小惑星群、さらには木星へと向かう深宇宙探査を現実のものへと導くことだろう。

100℃に抑えられると予想されている。

以上の四つの技術は、どれをとっても新技術であり、これらを一度に盛りこんだ非常に難度の高い先鋭的なミッションとなっている。このすべての難関を越えてはじめて、サンプルが地球に帰ってくるわけである。

### 3. (25143) ITOKAWAと科学観測

「(25143) ITOKAWA (イトカワ)\*」というのが探査する小惑星の名前である。小惑星は、一般には小惑星帯とよばれる火星軌道と木星軌道の間の空間に分布している。しかし、今回探査するイトカワは、

近日点が地球軌道のわずかに内側、遠日点は火星軌道より少し外側にある軌道上を運行している。このように地球の近傍にまでくる小惑星は、現在では2000個以上発見されていて、一般に近地球型小惑星とよばれている。もともとは小惑星帯にあったものが、軌道を乱されて現在の軌道に入ったものと考えられている。このような天体には、比較的低いエネルギーで探査機の到達が可能である。

ところで、この探査対象天体は、1998年と比較的最近に発見された。計画開始の当初、探査目標天体は別のものであったのだが、探査機開発にともなう種々の

困難のため、スケジュールが延び、目標天体が2回も変更されてこの天体になったという経緯がある。2001年はイトカワの地上観測によい時期で、世界中の観測者に観測をよびかけ、観測が進んだ。残念ながら観測好機とはいっても小さな天体なので、ある程度大きな望遠鏡でないと観測できない。このときの観測から、対象とする天体は、約12時間で自転していること、自転軸がほぼ黄道面に垂直に近いらしいこと、大きさが差し渡し600m(長軸)×300m(短軸)くらいという非常に小さな天体であることなどがわかった。また、小惑星からの反射光のス

\*この名前は、打ち上げ後、日本のロケット研究の創始者である糸川英夫博士の名前を取ってつけられた。



図3 小惑星にタッチダウンする「はやぶさ」(想像図)。探査機下面にサンプル採取用の筒が取り付けられている。小惑星表面にある球状物体はマーカー(着地目標点を示す人工目標)、手前は小型ロボットランダーMINERVA。

ペクトルが取られ、Sタイプであることがわかった。

「はやぶさ」には、観測機器として多色フィルターを装着した可視撮像カメラ、レーザー測距器(ライダー)、近赤外分光器、X線分光器(XRS)を搭載している。これらのうち、最初の二つは探査機の誘導・航法用であるが、科学観測にとっても重要な機器である。また小惑星表面にはカメラを搭載したミネルヴァ(MINERVA)というニックネームの超小型ローバー(移動ロボット)が投下される。

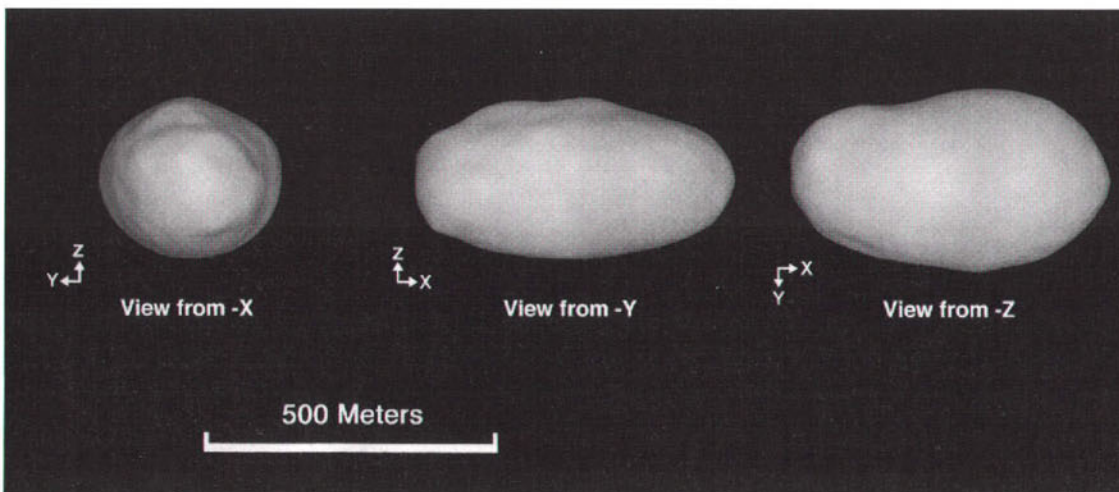
これは内部にモーターを内蔵していて、その反作用で小惑星表面を飛び跳ねながら撮像観測などを行う。これらの複数のカメラによって小惑星の形、地形、表面の情報が、可視カメラと近赤外分光からの表面反射スペクトルによって岩石、鉱物の分布情報が得られる。XRSからは、主要元素分布を求めることができる。ライダーによって小惑星の重力、すなわち質量が得られ、小惑星形状データと合わせて小惑星の密度が推定される。密度は小惑星内部の物質や構造を知る手がかり

となる。

## 現状と今後

先にも述べたように、今夏の小惑星到達に向けて、「はやぶさ」は順調な飛行を続けている。イオンエンジン、航法誘導、軌道決定などのグループをはじめとして、研究者、メーカー、大学院生(もちろん総研大生も加わって)が一丸となって日夜、相模原の管制室から交信し、探査機の運用が行われている。イオンエンジンも、のべ2万時間以上の運転時間を達成した。探査機は、いよいよ今夏から秋にかけて目標の小惑星に到達し、近傍での探査機の運用と観測を始める。これに向けてのさまざまな準備を進めつつあり、期待と緊張感が高まっている。

オーストラリアで回収されるサンプルの入ったカプセルは、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部内に建設が予定されている「試料受け入れ、保管、分配施設」に運びこまれ、厳重に汚染管理されたクリーンチェンバー内で試料が取り出される。分析は初期分析期間(約1年)とその後の詳細分析期間に分かれる。初期分析期間では、あらかじめ選抜されたチームによって基本的な特徴を抽出するための分析(キャラクターゼーション)が行われる。この結果は公表され、その後、公募による分析期間ではテーマが国内外から募集され、選抜の後、詳細分析が実施



レーザー観測によって求められたイトカワのモデル(Ostro他による)

# サンプル採取装置の開発

安部正真 総合研究大学院大学助手宇宙科学専攻/宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部助手

1994年に本格的に小惑星探査に関わるようになって以来、私は探査候補天体の地上観測と同時に、サンプル採取装置（サンプラー）の開発と近赤外線分光器の開発に取り組んできた。

サンプラーは、小惑星の表面から物質を採取する装置であるが、この装置の問題点は、探査する小惑星の表面重力が非常に小さい（地球重力の数万分の1）ことと、さまざまな表面状態に対応できる必要があることであった。サンプルの採取方法の検討は、多くの研究者とのアイデアの出し合いからのスタートだった。アイデアが出されると、そのアイデアを実際に試作して実験してみるという形で開発は進められた。最終的には、無重力環境下での実験も行った。無重力実験では、飛行機のパラボリックフライト（放物弾道飛行によって無重力環境を作り出すこと）による試験もあり、私自身も無重力を体験できたのは貴重な機会であった。

近赤外線分光器は、小惑星表面での太陽光の反射を近赤外線の波長で分光してスペクトルを調べる装置である。そのデータからは、小惑星表面の鉱物組成を知ることができる。「はやぶさ」は比較的小さな探査機で、機器も小型軽量化しないと搭載できない。小型軽量化しながら科学的な成果をできる限り多く出せるように、さまざまな工夫を行った。検出器の性能データの取得や、搭載ソフトの開発も自前で行った。回路のノイズレベルを下げるために、製作メーカーと一緒に何日も徹夜したこともあった。

そして、2003年の5月9日、「はやぶさ」は鹿児島県の内之浦から打ち上げられた。打ち上げ前の機器の最終確認のとき、これまで10年近く関わってきた探査機を見るのもこれで最後かと考えると、こみ上げてくるものがあった。打ち上げの瞬間、われわれは打ち上げ後の第一可視での機器の状態確認のため



宇宙科学研究本部で各種の試験を受ける「はやぶさ」実機。

に、テレメータセンタの建物の中において、打ち上げそのもののシーンを見ることはできなかった。しかし、打ち上げ時の振動は肌で感じる事ができた。打ち上げが成功して探査機が無事切り離されたとのアナウンスがあっても、われわれの緊張はまだ続いていた。第一可視を迎えて、探査機の状態を信号で確認することができたときが一番の興奮であった。

その後、「はやぶさ」は順調に小惑星に向けて航行中である。われわれの開発したサンプラーは、採取部分のホーンの伸展が完了していることを確認済みである。近赤外線分光器の方も、電源を投入して、天体の試験的なスペクトルの取得に成功している。「はやぶさ」との交信（運用）は、日曜日を除いて毎日行われている。われわれも運用に参加しており、緊張は日々続いている。次の最大の興奮は、探査機に搭載しているカメラが小惑星の姿をとらえたときであろう。それは、2005年の夏に訪れる予定だ。

される予定である。分析に興味のある多くの研究者の参加を期待している。現在、初期分析チーム編成のための分析者選抜コンペティションの開催、ハード、ソフト両面での分析準備などの態勢をつくりつつある。

2004年10月には、総研大国際シンポジウムとして「はやぶさシンポジウム」が開催された。サイエンスについてホットな議論が戦わされ、このミッションへ

の各国の研究者からの熱い期待が寄せられた。このミッションを機に、日本の惑星探査技術とその広範な分野にわたる関連科学のレベルが一気に高められることを狙っている。

藤原 顕(ふじわら・あきら)

物体を宇宙速度で衝突させる実験を行っていたのがきっかけで、小天体研究に入った。多数の小天体が互いに衝突しあいながら、力学的、物質的にどのように時間発展してきたかの歴史を、実験と観測によって組み上げようと思っている。

