

# 地球を巣立ったはやぶさ

## －世界初の小惑星サンプルリターンへ向けて－

安部 正真<sup>1</sup>

### 1. 打ち上げ成功

探査機はやぶさは2003年5月9日13時29分25秒(日本時間)に宇宙科学研究所のM-Vロケット5号機に載せられて地球を飛び立ちました(図1)。その14分後、つばさとなる太陽電池パドルを展開し、20分後にはくちばしとなるサンブラホーンを伸展しました。現在はやぶさは探査対象となる小惑星1998 SF36<sup>2</sup>に向けて飛び続けています。

はやぶさはこれまでMUSES-Cと呼ばれていた小惑星サンプルリターン計画の探査機の新しい名前です。この名前は探査機が小惑星に行って表面の物質(サンプル)をすばやく捕獲する様を喩えて名づけられたものです。はやぶさの行う小惑星からのサンプルリターンは世界中ではじめて試みられる非常に野心的なミッションです。

### 2. はやぶさの目的

この計画は、1994年に工学ミッションとしてワーキンググループが設置され、宇宙開発委員会の承認を得て、1996年から正式に開発がスタートしましたが、その基となる計画の検討は、ハレー彗星を探査した、探査機すいせい・さきがけが打ち上げられた1985年ころから始まっています[1]。

はやぶさの目的は理学的には小惑星近傍での観測と、表面からの標本採取および地球への持ち帰り(サンプルリターン)による分析を通して、小惑星と

隕石の関係を調べ、太陽系の起源に迫ることでありますが、工学的には、それらの目標を達成させるために必要な技術の試験および実証を行うことが目的です。MUSES-CといのはMu Space Engineering Satelliteという工学試験衛星シリーズの3番目という意味で、工学的な技術の試験および実証がはやぶさの本来の目的なのです。

はやぶさが試験する主な新技術は、(a)電気推進(イオンエンジン)を主推進機関とした惑星間航行、(b)

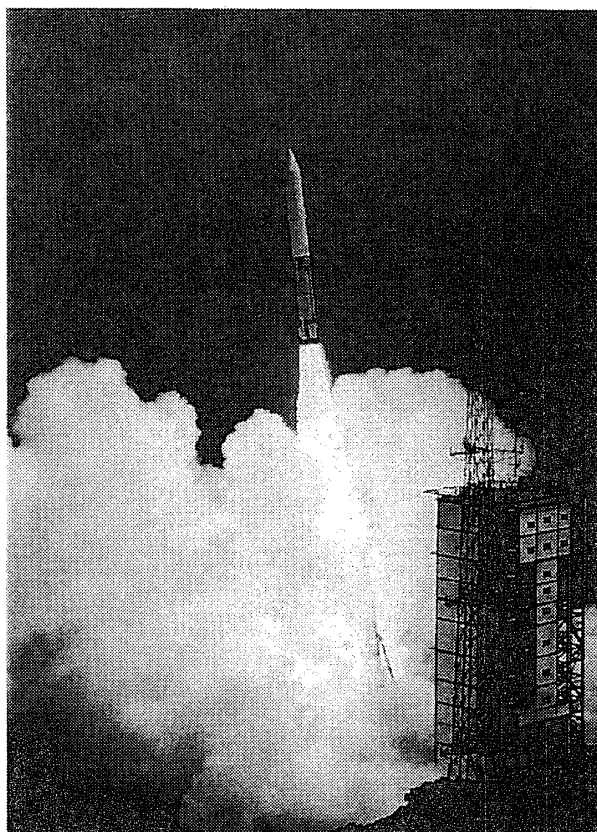


図1 探査機はやぶさが搭載されたM-V-5号機の打ち上げ(宇宙科学研究所提供)

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所

<sup>2</sup> 小惑星1998SF36は、2003年8月に(25143) Itokawaと命名されました。

光学観測による自律的な航法と誘導方法, (c)惑星表面の標本採取(サンプリング)技術, (d)惑星間軌道からの直接再突入(リエントリ)および回収の4つです。

(a)の電気推進はこれまでのミッションに多く使われてきた化学推進に比べて比推力で約10倍もある効率の良い推進エンジンで, これを利用することで, これまで同じロケットでは到達できなかった天体に到達し, さらに地球まで戻ってこられるようになりました。(b)の自律的な航法誘導は, これからの深宇宙探査では必ず必要となるものです。地球周回の人工衛星と違って, はやぶさのような深宇宙への探査機は地球から離れるにしたがってその交信にかかる時間は非常に長くなります。はやぶさが小惑星に到達するころの地球と探査機の距離は約2AU(1AU=約150,000,000km)もあり, その交信にかかる時間は往復30分近くになります。小惑星表面への接近やその際の危険回避などは, 地上からの指令では間に合わなくなるため, 探査機自身が判断して行動することが必要です。(c)のサンプリング技術も将来のサンプルリターンミッションの実施には必須の技術です。今回探査する小惑星の表面状態についてはまだ良くわかっていない点も多く, どのような表面であってもサンプリングが行えるような方法を新たに開発しています。その具体的な方法については後ほど紹介します。(d)のリエントリはサンプルを地球表面に届ける方法として採用されたものです。地球への突入前の相対速度は約12 km/sで, これはアポロの帰還カプセルをはじめとするどの帰還カプセルよりも速いものです。この方法の採用によって, 地球帰還時に探査機と地球の相対速度を減少させるため必要な燃料の消費節減につながっています。

上記の4つ以外にもはやぶさでは, 2液小推力化学推進機関, X-band Up/Down 通信, CCSDS 完全準拠のケットデータ処理, 総電力固定のデューティ制御型熱制御, イオンエンジンを閉ループに組み込むホイールアンローディング, PN-code 超遠距離測距, リチウムイオン2次電池, マルチジャンクション太

陽電池などさまざまな新技術を採用してその実証を試みています。

### 3. 探査機概要

はやぶさの概観図を図2, 機器配置図を図3, 4に示します。はやぶさはおよそ1.5 x 1.5 x 1.0mの直方体を本体とし, 3軸に姿勢制御される探査機です。探査機上面に固定された直径1.5mの高利得アンテナ, 探査機の側面のひとつに電気推進スラスタ, それと対向する面にリエントリカプセルが配置されています。科学観測機器およびサンプリングホーンは, すべて探査機下面に向くように取り付けられ, 小惑星近傍での観測中はこの探査機下面を小惑星に向けるような姿勢をとります。

はやぶさの電力は, 2翼太陽電池パネルにより得ます。太陽電池はGaAs系のマルチジャンクションセルを採用していて, およそ1.4m x 1.4mのパネル3枚を片翼として, 全体でおよそ2600W@1AU, 1000W@1.7AUの発生電力があります。

はやぶさの打ち上げ時の全重量は510kgです。そのうちの約4分の1に相当する130kgは電気推進や化学推進用の燃料になっています。

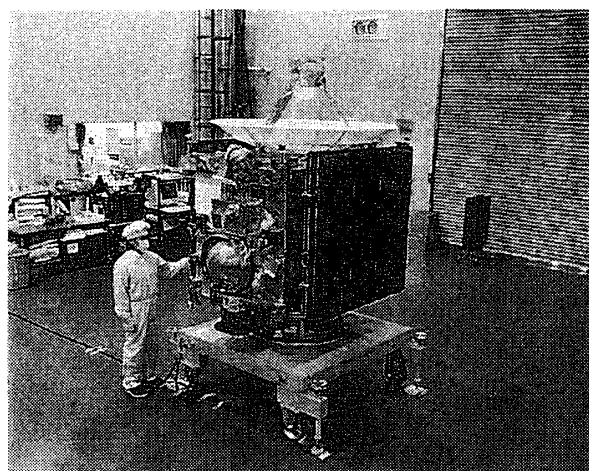


図2 探査機はやぶさの概観(宇宙科学研究所提供)

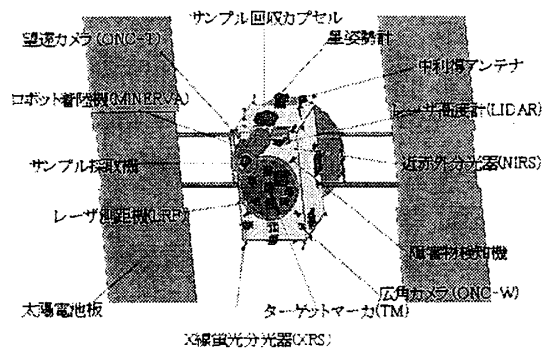


図3 探査機はやぶさの機器配置(探査機下面から)

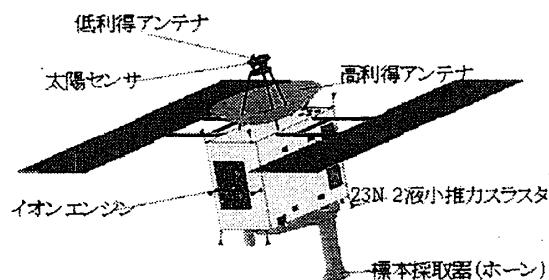


図4 探査機はやぶさの機器配置(探査機側面から)

## 4. 軌道計画

はやぶさの打ち上げから地球帰還までの軌道図を図5に示します。図を見るとわかるように、太陽からの距離は0.86~1.70AUまで変化するので、これに対応した電源系設計、熱設計、太陽センサの仕様などの考慮がなされています。また、地球との距離は2.33AUまで到達するので、これを考慮した通信系の設計がされています。はやぶさでは推進燃料の消費をできるだけ少なくするために、ダイレクトアセントや地球スイングバイという技術を採用しています。また電気推進という推進エンジンを採用したため、軌道計画はマルチインパルスでの設計となり、これまでの惑星探査機よりかなり複雑になっています。

## 5. 搭載科学観測機器

科学観測機器としては、蛍光X線分光器(XRS)と近赤外線分光器(NIRS)、バス機器の望遠カメラ

(ONC-T)に多色フィルタを搭載した可視多色カメラ(AMICA)、同じくバス機器と兼用の高度計(LIDAR)が搭載されています。

XRSは観測エネルギー範囲が0.7KeV~10KeV、エネルギー分解能が150eV@5.9KeVのSi-CCDを5枚用いたタイプの蛍光X線分光器で、視野サイズは3.5度あります。主要元素組成の定量分析、全球的元素分析、表面微小凹凸などを観測します。

NIRSは850nm~2100nmの観測波長域で23.5nmの波長分解能のInGaAsフォトダイオードアレイ(64素子)を用いた近赤外線分光器で、近赤外連続分光での全球マッピングを行い表面主要鉱物分布を調べます。

AMICAは中心波長が360nmから1025nmまでの7色のフィルタと、1つの広波長域(350~950nmをカバー)フィルタを備えたSi-CCDを用いたカメラで視野サイズは5.7度あります。小惑星の形状、表面地形の観察、多色分光撮像での全球マッピングを行っての表面地質区分の調査、多色偏光特性、小惑星自転周期、自転軸の向き、ガス・ダスト雲、衛星の有無などを調べます。

LIDARは1064nmのNdYAGレーザーを用いた送信器とSi-APDを用いた受信器で、小惑星表面までの測距を±1m@50m、±10m@50kmの精度で行い、表面凹凸の測定と、小惑星の重力場、平均密度の測定を行います。

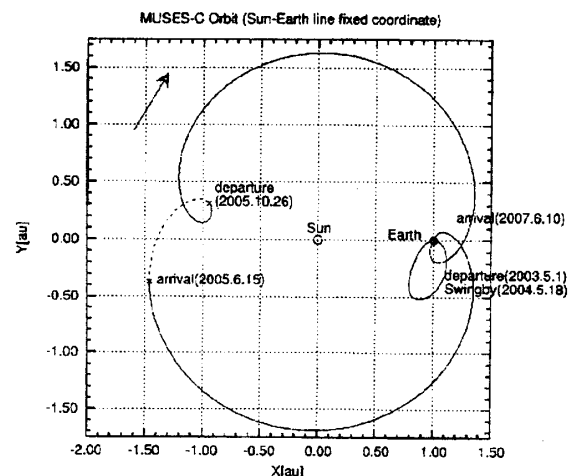


図5 太陽・地球固定座標系での探査機はやぶさの軌道図

またこれら4つの科学観測機器以外に、小惑星表面に投下するロボット着陸機(MINERVA)があり、MINERVAには表面温度を測定する温度計と3つのカラーカメラ(うち2つはステレオカメラとして使用)が搭載されていて、カメラでは小惑星表面での近接地形観察と小惑星表面の微細構造の観察を行います。

## 6. サンプリング方法

はやぶさのサンプリング方法は非常にユニークです。重さ5gのタンタル製の弾丸を表面に向けて速度300m/sで打ち込むことにより生じる小惑星表面の破片(サンプル)を円筒および円錐状のホーンで探査機内部へ導き捕獲する方法です。この方法の大きな特徴は、(a)採取が短時間ですみ、探査機を小惑星表面に固定する必要がない。(b)小惑星表面が固い岩盤で覆われていようと、砂で覆われた表面でもサンプルを収集することが可能である、という点です。

探査機は小惑星到着後しばらくの間は高度6km程度の地点をホームポジションとして、そこからリモートセンシング観測によって、小惑星の地図を作成します。その後科学的に興味のある場所を選び、探査機を小惑星表面近くまで降下させます。高度100m付近で高度計をLIDARから近距離の測距と平面傾斜計測が可能なレーザ測距機(LRF)に切り替え、高度30m付近でターゲットマーカ(TM)を投下します。その際探査機はいったん降下を停止し、TMを広角カメラ(ONC-W)で捕捉します。高度17m付近まで降下し、小惑星表面の局所水平の直上でホバリングを行います。MINERVAを投下した後、接地速度が10cm/s以下になるように降下します。この最終降下フェーズでは、加速度計、ジャイロ、LRFなどを用いて探査機の接地を検出します。接地の検出と同時に弾丸を発射しサンプルを採取した後、タイミングよく2液スラスタを噴射して小惑星表面から離脱し、ホームポジションに戻ります。ホバリングから接地・離脱までは約10分、接地時間そのものは1秒程度のタッ

チアンドゴーで、探査機の名前であるはやぶさが獲物を獲る様に似ています。

## 7. 探査対象小惑星

はやぶさの探査対象は計画の途中で何度か変更がありました。1994年に計画がスタートした時期はネレウスという小惑星でした。しかし、その後2度の打ち上げ延期のたびに1989MLや1998SF36という小惑星が登場しました。そのたびに地上観測のキャンペーンが張られ、これらの小惑星については、いろいろなことが調べられました。

最後にターゲットとなった1998SF36は2001年に地球に非常に近づき、これまでの小惑星以上の観測データが集まりました。詳しくは参考文献[2][3]を参照してもらいますが、軌道要素( $a=1.3$  AU,  $e=0.28$ ,  $i=1.7$  deg), 大きさ(600m × 300mのいびつな形), 自転周期( $12.12 \pm 0.03$  時間), 自転軸の向き(黄道面にほぼ垂直で逆向き), スペクトルタイプ(S(IV)型)などがわかっています。この小惑星は2004年の6月にも地球に0.01AUまで近づき、約12等級まで明るくなります。その際にもさまざまな観測が実施されることになるでしょう。

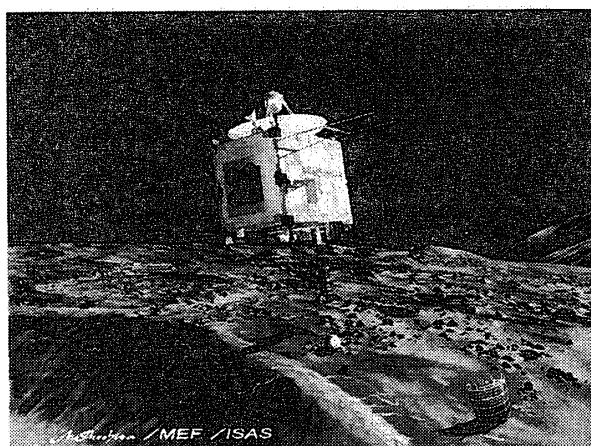


図6 小惑星表面でサンプリングを行う探査機はやぶさ(下章裕, MEF, 宇宙科学研究所提供)

## 8. 数多くの夢をのせて

探査機が小惑星表面接近時に投下するターゲットマーカーの中には全世界から集めた約88万人の名前が刻まれています。これは「あなたの名前を星の王子さまに届けませんか」というキャッチフレーズでインターネットなどを中心に集められたものです。1998年

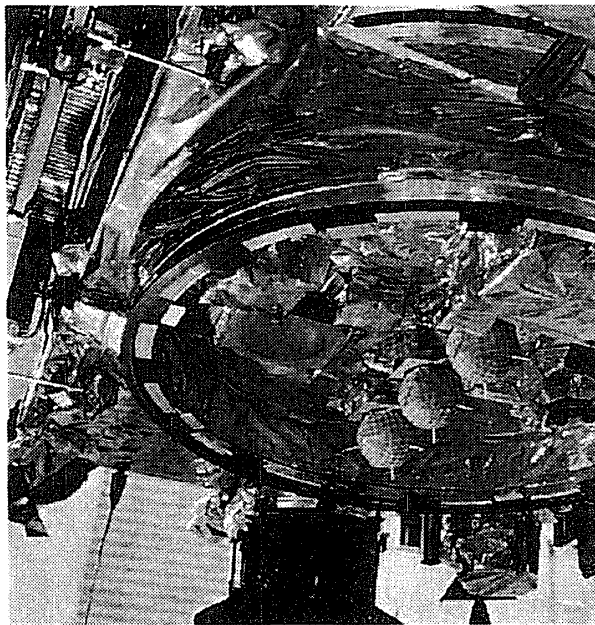


図7 探査機下面に取り付けられたターゲットマーカー(宇宙科学研究所提供)

に打ち上げられた火星探査機ののぞみにも約27万人の名前が取り付けられていますが、それを超える多くの人々の期待と夢を運ぶ使命もはやぶさは担っています。

## 9. 次処理施設および初期分析体制

地球に持ち帰られるサンプルは、地球大気にまったく汚染されていない、初めての小惑星表面物質です。それらを汚染することなく分析・記載・分配・保管するための施設(キュレーション施設)が必要です。現在このような施設はアポロの月サンプルを処理したNASAのジョンソン宇宙センターが世界的にも唯一の機関ですが、日本にもそのような施設作るべく検討中

です。またキュレーション施設で一次記載されたサンプルは日本国内の研究者を中心とした初期分析チームによって、一次分析された後、世界中の研究者への公募分析へと研究がつながっていく予定です。そうした分析の結果、S型小惑星と普通コンドライトの関係を明らかにすると同時に、小惑星の物質化学的な解明を通して、小惑星の起源および太陽系の歴史を紐解く鍵を我々に与えてくれることになるでしょう。

## 10. ポストはやぶさミッション

はやぶさミッションではS型小惑星と隕石の関係が解明されると考えられています。しかし、小惑星にはまだ別のタイプのものが複数あり、隕石にもさまざまなタイプのもが発見されています。小惑星の全様を理解するためには、S型以外の小惑星からのサンプルリターンも実施する必要があります。

幸い、小惑星の発見は急増しており、探査しやすい天体も増えてきました。またはやぶさミッションを通して、サンプルリターンに必要な技術は習得できるため、次の計画では、効率よく複数の小惑星を一度に訪れて、この小惑星と隕石の関係を一気に明らかにするような計画が望ましいと考えています。海外と協力して複数の探査機を打ち上げて探査する方法も考えられますし、日本独自で複数箇所の小惑星に訪問できる探査機を打ち上げる方法も考えられます。

## 11. はやぶさは今

はやぶさは打ち上げ後、1ヶ月以上の初期運用フェーズで、各バス機器および観測機器の初期動作チェックを無事終了しました。はやぶさの1つ目の目的であった電気推進も正常に立ち上がり所定の推進力を発揮しています。2004年の5月に地球スイングバイという大きなイベントがありますが、それ以外は、ひたすらエンジンを噴き続け、2005年6月の小惑星到着を目指して一人(一羽?)旅をつづけます。

## 参考文献

- [1] 小惑星サンプルリターン小研究会,  
宇宙科学研究所(1985年)
- [2] MUSES-C 探査対象天体 1998SF36 はどんな  
天体か?, 宇宙科学研究所(2002年)
- [3] 安部正真, 2003, 第24回太陽系科学シンポ  
ジウム, 89.