「はやぶさ」による小惑星イトカワの 観測結果 速報

藤原 顕. はやぶさチーム

1. はじめに

小惑星探査機はやぶさのイトカワに関する科学観測成果の速報を以下に要約する。まずは日本語科学報告では初めての内容の記事を惑星学会誌に載せる機会を微妙なタイミング調整で与えていただいた編集部の方々に感謝する。この内容の元となっている最初の科学解析結果はSIENCE特集号に掲載されたので、厳密な内容を求める方はぜひそちらを参照いただきたい[1]. またはやぶさ探査機の最新情報やイトカワの画像などに関してはウェブを参照いただけると幸いである[2]. またそれぞれのパートを担当している研究者の詳細な解析結果や工学面での話などの、さらに興味ある記事は、今後、遊星人につぎつぎに掲載されることを期待して、本稿では速報的に概観をのべることを目的とする。

2. はやぶさの経緯

はやぶさ(MUSES-C)計画がスタートしたのは 1994年度である。はやぶさは将来の本格的惑星サンプルリターンに必要な高度な技術の習得を目的とする工学実験探査機という位置づけとなっている。重量その他の厳しい制限や,打ち上げ時期の延期にともない対象小惑星は当初のものから変更され,現在のイトカワ(25143 Itokawa) は3つ目に選ばれたものである。は やぶさは2003年5月3日鹿児島県内之浦より宇宙科学研究所(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の前身)の最後のミッションとしてM5-5号機によって打

ち上げられた. 探査機の概要等については、すでに本誌の安部正真氏の記事[3]に詳しいので詳細は省き、ここではごく簡単に概略を述べるにとどめる.

打ち上げ後、電気推進機を長時間ほぼ継続的に作動させ、2004年5月19日に地球スイングバイを行い、合(地球に対して)の位置を経て、2005年9月12日に小惑星イトカワの太陽側約20kmの空間に到達した.探査機および小惑星の位置は太陽をはさんで地球とは反対側に近く、すなわち、地球からの距離は約2AUである.9月20日には小惑星から約7kmの地点に進んだ(この場所をホームポジションとよび、滞在拠点とした).10月8日から28日にかけてはツアーと称して、ホームポジションから東西南北方向への移動や、さらに高度を下げた接近などに加えて、極地方の観測や高位相観測を行った.

この観測結果に基づき、着陸地点をMuses Seaと呼ばれる平坦な地域に設定し、11月20日と26日には表面に向けて降下し、それぞれタッチダウンを行った。1回目の着地では約30分間表面に滞在したことが確かめられている。2回目の接地の際には、小弾丸を発射して舞い上がる小惑星破片を捕獲する予定であったが、弾丸が発射されていない可能性が高いことが判明した。しかし、とくに1回目の着地において、サンプラーホーンが着地の際に表面を引っかいて、低重力環境で舞いあがった表面の試料を僅かでも採取した可能性が高いと考えられている。





図: はやぶさによって撮られたイトカワ(ISAS/JAXA) いずれも上方が南極,下方が北極

(上)西半面 右端に見える大きなボルダーが Yoshinodai, 北極近くに広がる滑らかな場所が Sagamihara

(下) 東半面 中央くびれ付近にある滑らかで広いところがMuses Sea. ここに探査機が降下,接地した.

2回目のタッチダウン終了後,化学エンジンの不調により姿勢制御が困難になり,通信が途絶えたが,1 月末に通信が回復し,現在,地球へ向かっての帰還に向けて調整中である。予定では,地球帰還は2010年6 月となり,当初の予定より3年遅れとなっている。

科学観測に使われた観測機器は7色のフィルター 付き撮像カメラ (AMICA), 近赤外分光器 (NIRS), 蛍光 X線分光器 (XRS), レーザー高度計 (LIDER)

である。すべての機器は正常に作動し、多くの貴重なデータを取得できた。マイクロローバーにはカメラが搭載されており、探査機からの放出に成功し、機器は正常に動作したことが確かめられているが、小惑星表面への着陸には至らなかった。

3. 小惑星イトカワの性質

イトカワはApollo型近地球型小惑星のひとつで、その軌道は、近日点がわずかに地球軌道の内側に、遠日点が火星軌道のわずかに外側に達する軌道を持っている(a=1.3AU, e=0.28). はやぶさ到達以前の地上観測によって、大きさが550mぐらい、自転周期は12.1時間、自転軸はほぼ黄道面に垂直、逆行スピンをもっていること、スペクトル型はS型であること、などは、わかっていた.

はやぶさが見たイトカワは 2つの塊があたかもくっ付いたような形をしていた。われわれは、その形を「ラッコ」型と呼んでいる。ラッコ(動物)が腹を上にして水に浮かんでいる様子を思わせるところからこう呼ばれるようになった。この表現は、小惑星上の場所を特定するのに非常に便利であることが、このあとの文を読んでいただくうちにご理解いただけるであろう。大きい塊の方をラッコの胴体、小さい方をラッコの頭と呼んでいる。はやぶさの観測にもとづいて作成された 3 D形状モデルよってサイズが550×298×224m(取り囲む直方体サイズ)であることや、自転軸の方向が明かにされたが、地上観測の結果はほぼ正しかったことが分かっている。自転軸には明らかなふらつきは確認されていない。

小惑星イトカワの表面はボルダー(巨岩)の多い地域(rough terrain)とスムースに見える地域(smooth terrain)とに分かれている。スムースな地域はラッコの首のあたりから胴上の胸にあたる付近(Muses Sea)に、また北極付近(背中)のSagamiharaと呼ばれる地域に分布している。経度ゼロの線はラッコの頭のてっぺんにある黒い色のボルダーのある地点を通るように定め、経度は東経で数える(黒い色のボルダー自体は科学的に興味ある存在で、その性質と起源については議論がされつつある)。

小惑星の質量は、探査機の小惑星付近の運動から求められた。各時刻の位置の測定は地球上での電波計測あるいは探査機に搭載されたライダーなどによって計測された。10月初めに2台目のリアクションホイールの故障に伴う化学エンジン使用による姿勢制御となり、このことの探査機の運動への影響の評価が必要である。複数のグループがそれぞれの方法で異なるフェーズで解析を行い。質量値として(3.510 ± 0.105)× 10^{10} kgを得た。小惑星の形状モデルとして3グループが独立にモデルを提出した。それぞれは、若干の違いがあり、さらに改良がつづけられている。これらに基づいて、質量密度として、 1.90 ± 0.13 g/cm³という値が得られている。これは、Erosや地球上の通常の石の持つ密度 $2.6\sim3.0$ g/cm³付近の値よりかなり小さなものとなっているのが注目される。

形状はGaspraなどのように、いかにも破片といった形状ではなく、ラッコの頭、胴ともに第一近似的には丸みを帯びている。これまで探査された小惑星の表面はレゴリスに覆われたのっぺりとした表面にクレーターが多く見られるものであった。それと比べると、様相が異なって岩の多いことが一見して分かる。このことは、今回のイトカワと同じくらいのスケールで撮られたErosの表面写真と比べてみてもこの傾向は見られ、細かい粒子から成るレゴリスの量が少ないようである。イトカワには全般に典型的なリムを持つクレーターの数がこれまでのものに比べて少ないことも特徴的である。

rough terrainには非常に大きなボルダーが転がっているのが目に付く.なかでもYoshinodaiとよばれる,ラッコの胴部の先端付近にあるものは50m程度のサイズがある.全般に大きなボルダーの数は西側(ラッコの右腹)に多い傾向がある.クレーターとボルダーのサイズ分布も計測されており、これらは近々発表されるであろう.サンプル採取のための降下時に撮られたMuses Seaの近接画像では、遠目にスムースに見えていた地域はcm~mmサイズの比較的大きさのそろっ

た小石からなる地帯であることがわかった。

イトカワ表面には上に述べた以外にもいろいろな特徴的な地形が発見されている。頭と胴の間にある首のところには、地滑りのように崩れたように見える部分がある。またこれらの中にはいくつもの大きなボルダーが塔のようにつき立っているのが見られる。頭の部分はよく観察すると実は全体が多面体のようにファセットで構成されている。胴の部分にもいくつかのファセット構造が見られる。首の後ろの部分には深い溝地形が見られる。胸のあたりに広がるMuses Seaの中には山脈を思わせるようなリッジが見られる。

NIRSで得られたデータからは、地上観測では得られなかった地域ごとの大量の反射スペクトルが得られている。地域によって10%以上のアルベドの変化と吸収バンドの深さの変化が現れている。対応隕石種としてLLが示唆されている。同一地域を異なる位相角で撮ったスペクトルを使って、太陽位相角依存性から表面物質の物理的状態を調べるなどの解析が現在進められている。さらにAMICAの多色カラー画像と合わせて、宇宙風化の程度の解析がなされている。XRSからはMg/Si、Al/Si比が求められ、LLあるいはLコンドライトに近いという結果が得られており、NIRSの結果とつじつまが合う。

4. イトカワの表面, 構造, 過去 についての考察

3D形状モデルや重力データに基づいて表面のポテンシャル図(自転による遠心力も考慮に入れた)が描かれている。これによると、ポテンシャルの低いところは首のあたりと、背中の部分にあり、これらはMuses SeaおよびSagamihara といったsmooth terrainとよく対応している。このことからsmooth terrainの物質は小惑星の振動によって移動し、この部分に集まったと考えるのが自然である。振動を与え

たのはおそらく外部からの衝突が大きな要因として考えられる.

また全域にわたって各場所の傾斜度マップが描かれている。ここで「傾斜」とは水平面(重力方向と直交する面)となす角度のことを指す。これによると,多くの場所で傾斜角は粒状物質に特有な臨界角以下であるが,首のあたりに傾斜の大きなところがあり,頭の部分に崩れにくい固まりがあることを示唆している。Yoshinodaiのような非常に大きなボルダーは,現在のイトカワ上に見られるどのクレーターからも放出できないと考えられている。もっと大きな衝突イベントによってできた破片の名残であろうと考えられている。具体的にはイトカワが形作られるときの,あるいはそれ以前の衝突事件を指している。

密度が1.9g/cm³と普通コンドライトの密度に比べて小さめであることから、イトカワは内部にかなりの空隙をもっていると考えられている。これをマクロポロシテイに換算すると約40%と見積もられる。密度が低いこと、頭と胴の形状が丸っこいこと、ボルダーの多い表面、等々から、イトカワはラブルパイル構造ではないかと考えられている。表面が多くのファセットから成り立っていることもこれを示唆するのかもしれないが、衝突によるクレーター様のものとの区別が必要である。

これまで述べてきたような結果と矛盾のないイトカワの成因について、可能な筋道としては例えばつぎのようなものが考えられている。イトカワの前にまず母天体が存在していて、あるときに衝突を受けて破壊した。その時作られた多数の破片が散乱して行く中で互いに重力で引き合ってくっ付き合い、いくつかのラブルパイル天体ができあがる。これらはそれぞれの自己重力と自転による遠心力できまる3軸不等楕円体に近い形を取った後、互いにさらにくっついて現在のイトカワの形をつくった、というものである。あくまでも

これはありえそうな仮説のひとつであり、本当にこのような筋書きで矛盾なく説明できるかどうかを判断するには、今後詳細なモデル計算が必要である.

5. おわりに

はやぶさによって得られたデータは1年間はチームによる占有期間として、チームメンバー内でさらに解析が進められた後は、公開される予定である。これらのデータはISAS/JAXAでのアーカイヴシステムに保管されるとともに、さらにNASA PDS(Planetary Data System)にも入れられ、全世界の研究者の研究に供されることになっている。

最後になったが、日本惑星科学会からは、はやぶさのイトカワ到着に際し、お祝いと励ましのメッセージをいただいた。ここにチーム一同厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- [1] Science Hayabusa Special Issue 6月2日号 (2006)
- [2] http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missios/ hayabusa/relate.shtml
- [3] 安部正真, 2003, 遊星人 12, 173.