

## 粉体物理で興味をもたれる「はやぶさ」が見た小惑星イトカワ

藤原 顕 (元 JAXA/宇宙科学研究本部)

### 1. はじめに

小惑星は最大のものでも直径が約 1000km 以下の天体で、これまでに 30 万個ほど発見されている。多くのものは火星と木星の軌道の間の、いわゆるメインベルト帯を運行するが、それからはずれて地球軌道付近にまで入ってくる「近地球型小惑星」のグループも数多く発見されている。小惑星は太陽系形成の比較的初期段階の情報をとどめた天体として太陽系の起源・進化の研究において重要な位置を占めている。1801 年の最初の発見以来、長らく地上からの観測のみであったが、1990 年代から、探査機によるリモート撮像観測がはじまり、現在までに 5 つの小惑星の表面画像が得られている。表面からの試料はまだ持ち帰られていない。

2003 年 5 月に JAXA によって打ち上げられた工学実験探査機「はやぶさ」は近地球型小惑星イトカワに接近し、一瞬間その表面に接触して表面試料を採取し、地球に持ち帰るというものであった。探査機は 2005 年 9 月に小惑星イトカワ (25143itokawa) に到達し、イトカワの近接観測を行った。表面へのタッチダウンの後、推進系にトラブルが出て、地球帰還予定は 2010 年となった。イトカワの近接観測によって多くの興味ある成果が出されたが、粉体物理の観点からも興味をもたれる部分が多いと思われる。以下では得られた観測結果の概要をひととおり述べ、粉体研究の観点から興味深いと思われる点について述べる。

### 2. ミッションの概要と観測結果

探査対象となったイトカワは上に述べた近地球型小惑星のひとつで、軌道の近日点が地球軌道のわずかに内側に、遠日点が火星軌道のわずかに外側にある、表面の反射スペクトルタイプは S-型と呼ばれるものであり、小惑星としてはありふれたものである。また直径が 550m と、これまで探査された 10 km オーダーの小惑星よりはるかに小さいものである。

はやぶさに搭載されたリモートセンシング観測機器は 7 バンドのフィルターを備えた撮像カメラ、近赤外分光器、レーザー測距器、X 線分光器であり、これらによって小惑星の形状、質量、体積、表面地形、表面の反射スペクトル、主要元素組成などのデータが得られた。これらの詳細は文献[1]にまとめられている。また地上観測および探査機によるその場観測によって決められた小惑星の基本パラメータを表 1 に、またカメラによって得られたイトカワのイメージを図 1 に示してある。

イトカワの特徴を要約すると以下のようなものである。

(1) 動物のラッコを思わせる形状が特徴的である。小さな天体であるにしてはラッコ

- の「頭」の部分,「胴」の部分とも丸みを帯びた形で,破片のような形ではない.
- (2) バルク密度が  $1.9\text{g/cc}$  で,これまで探査された他の S 型小惑星がいずれも  $2.6\text{g/cc}$  以上の密度であったのにくらべて密度が低く, 空隙の多い内部構造を持っていると思われる.
- (3) 表面が多く岩で覆われており, とくに巨大な岩(boulder) の存在が見られる. 最大のものは  $50\text{m}$  程度である.

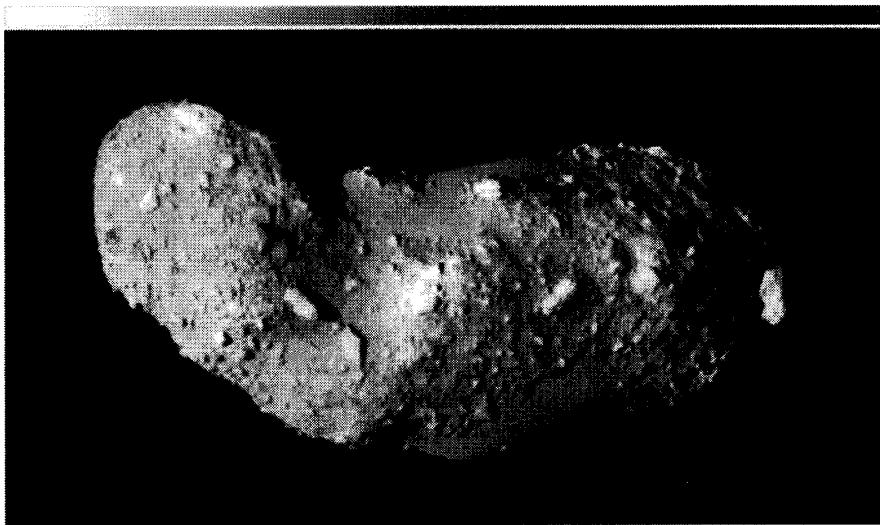


図 1. イトカワ (西半球) ラッコのような形状をしている.「首」にあたる部分と「背中」にあたる部分は  $\text{cm}\sim\text{mm}$  のサイズの小石で構成される smooth な地域. 右端に見える岩は大きさ約  $50\text{m}$ . (JAXA 提供)

表 1. イトカワの基本パラメーター

|              |                                                                                          |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 軌道要素         | $a=1.3238\text{AU}$ $e=0.2801$ $i=1.6223$<br>近日点= $0.953\text{AU}$ 遠日点= $1.694\text{AU}$ |
| 主軸サイズ(m)     | $X=535$ $Y=294$ $Z=209$ ( $\pm 1\text{m}$ )                                              |
| とり囲む箱のサイズ(m) | $550 \times 298 \times 244$ ( $\pm 1\text{m}$ )                                          |
| 自転周期         | $12.1324$ 時間                                                                             |
| 自転軸の向き       | 慣性空間 $[128.5, -89.66]$ (黄道面にほぼ垂直)<br>小惑星 $[90.53, -66.30]$ (逆スピン)<br>自転軸のふらつきは誤差範囲内      |
| 質量           | $(3.610 \pm 0.105) \times 10^{10} \text{ kg}$                                            |
| 密度           | $1.90 \pm 0.13\text{g/cm}^3$                                                             |

- (4) 典型的なクレーター地形が少ない。
  - (5) 表面が岩の多い rough な地形と smooth な地形に分かれる。
  - (6) Smooth な地形はラッコの首のあたりと背中付近に見られる。
  - (7) Smooth な地域は、その近接写真から cm~mm サイズの比較的揃った小石から成っていることがわかった。
  - (8) 表面は、パッチ状に反射率の高い部分がところどころにある。
  - (9) 反射スペクトルの場所による違いは少ないので、全体の組成はほぼ均一なものと考えられる。
  - (10) 主要元素組成の場所による違いは少ない。これも上記のことがらを支持する。
  - (11) 表面物質に対する近赤外、X 線からのスペクトルは、は L タイプ普通コンドライトのそれに近い。
- (2) (2) (3) などからイトカワは次に述べるように瓦礫の積み重なった (rubble pile) 構造であると考えられている。イトカワの形成の可能性あるひとつのシナリオとしてつぎのようなものが提唱されている。かつてある程度大きな(サイズは不明)小惑星が存在していて、あるとき衝突によって破壊された。飛び散った破片の中には互いに相対速度の遅いもの同士で集積し合ったものがいくつもあったと考えられる。こうしてできあがったもののうちの二つ(現在の「頭」と「胴」になったもの)がその後互いに集積したというものである。

### 3. 粉体物理との関わり

#### (1) Rubble pile 小惑星

惑星は、さまざまなサイズの天体が衝突しあい、破壊と集積を繰り返しながら成長してきたと考えられている。しかし小惑星では、高速度衝突によるクレーター形成や破壊による質量減少が、集積過程による質量増大を上回るようになり、大きな惑星にまで成長できなかったと考えられている。この衝突過程は現在にいたるまで続いている。クレーター形成では放出された破片群のうち、脱出速度以下のものは天体表面に再集積して、レゴリスと呼ばれる粉体層を形成する。小惑星では脱出速度が小さいので、レゴリス層は作りにくいとされているが、過去に探査された小惑星では遅い放出破片部分を集積して大量のレゴリスが観察されていた。

一方、上で述べたような天体全体が破壊するような事件も起こり、多数の大小の破片がばら撒かれる。これらの間で、相対速度の低いもの同士はたがいに集積しあうこともあったと考えられている。

実験室での高速度衝突実験データや天体衝突数値シミュレーションにもとづいてこのような離合集積の様子が考察されつつある。従来の予想では、小惑星でも比較的大きなものは瓦礫の集積構造 (Rubble pile と呼ばれる) をとっているのであろう、と考えられてきた。一方、小さな小惑星の構造は rubble pile ではなく単一構造と考えられていた。それにもかかわらず、これまで探査された大きな小惑星にはバルク密度などの点からも rubble pile 構造のものがみつかっていないのがなぜかという疑問が出されていた。今回のイトカワでは大きさが非常に小さいにもかかわらず、rubble pile

であるという結果は大きな驚きをもって受け止められている。従来の小惑星進化の考え方になんらかの改訂が必要となっている。

#### (2) Smooth terrain の成因

図 1 に見られるようにイトカワの首に相当するあたり、および背中にあたるところはスムーズな地域である。上に述べたように実際は cm~mm 程度のサイズがかなり揃った粒子が存在していることが近接画像からわかっている。これらの地帯はイトカワの形状から求められるポテンシャル地図（内部の物質は均一とし、自転も考慮して作製されたもの）でポテンシャル的に低地であることがわかっている。したがって、これらの物質はしだいにこの部分に集積してきたのではないかと考えられている。これらの移動のためのエネルギーとして、外部からの隕石などの小物体の衝突による表面の振動が考えられる。水のない天体の振動の減衰は小さいので、きわめて長い間振動が継続し、低重力環境とあいまって、有効に物質移動が行われるものと考えている。先に述べた表面のパッチ状に反射率の高いところは、その上を覆っていた岩が振動で移動させられて現れた新しい表面であると考えられている。

#### (3) イトカワの形状

小惑星の安定形状がどのようなものであるかという議論が最近なされつつある。流体天体が自己重力と遠心力のもとで取る安定形状としては古くから理論があるが、岩石の堆積物、あるいは粒状物質の天体のとる安定な形状についてはまだ十分議論が進んでいない。イトカワの現在の形は内部構造をさぐる一つの鍵となる。

#### (4) Rubbke のサイズ（分布）

イトカワが rubble pile 構造をもっているらしいことを述べたが、内部を構成する岩あるいは粒子の大きさ（分布）がどのようなものであろうか。内部の充填状態や空隙度などについて今後考察を進めてみる必要がある。

以上、述べてきたように、イトカワの表面や構造を理解し、さらにはその形成シナリオを作り上げていく上で、粉体の関わる部分がたいへん多いように見受けられる。粉体の研究にかかわっておられるかたがたに興味をもっていただき、コメントをいただければ幸いである。

( [hfujiw@gf6.so-net.ne.jp](mailto:hfujiw@gf6.so-net.ne.jp) )

#### 文献

(1) Science, 312, (2006) は、はやぶさ特集号となっている。この中に 7 編の論文あり。

小惑星研究の最近の動向を知るにはつぎの文献をお勧めする。

(2) Asteroids III (2002) Bottke, W. F. et al. (eds.) Univ. Arizona Press, Tucson.

また はやぶさミッションの最新情報はつぎをご参照いただきたい。

<http://www.isas.jaxa.jp/j/index.shtml>