

## 連載

## 小惑星探査機「はやぶさ」の感動から天文教育へ【1】

## 「はやぶさ」7年間の軌跡

大西浩次（長野工業高等専門学校）

## 1. はじめに

2010年6月13日22時51分（日本時）、オーストラリア、ウーメラの砂漠の街、クーパーペディヤ郊外で空を見つめていた。日本の小惑星探査機「はやぶさ」が、7年の旅を終え、小惑星「イトカワ」のかけらを載せたリエントリーカプセルが大気圏に突入する様子を見届げるためだ。

このちょうど3時間前の19時51分（日本時）にリエントリーカプセルは、「はやぶさ」本体から分離、そして本体はカプセルの後を追うように大気圏に突入する。22時51分50秒、1つの小さな光が見え始めた。この時の高度は110km。その青緑の光が次第に明るくなり、10秒後にフラッシュのように明るく周りの砂漠を照らした。次々と分裂しながら、20秒後にはオレンジ色に輝き、本体が大きく4分裂し地球の大気に吸い込まれていた。その満月より明るくなった火球の手前に小さく輝く1つの光がウーメラ目指して飛んでゆく[1]。

日本の小惑星探査機「はやぶさ」リエントリーカプセルの帰還と本体の大気圏突入による消滅の様子だ。無事、地球に届けられたカプセルは、地上着地の直後に発見され日本へ輸送された。現在、カプセルの中の小さな小惑星「イトカワ」の「小さなかけら」は、太陽系形成の謎を探る多くの人々によって分析されている。

『天文教育』ではこの小惑星探査機「はやぶさ」と、ここで生まれた社会的現象や教育的効果、そして、将来についての特集を行うことにした。今回はその第1回目。今後の

情報の整理のために、小惑星探査機「はやぶさ」の簡単なレビューを行うことにしよう。現在、「はやぶさ」に関する一般向けの書籍やWebが多数あふれているので、あまり紹介されていない「はやぶさ」の観測対象である小惑星の観測意義や「イトカワ」観測の成果を中心に簡単に紹介することにしよう。

## 2. 小惑星探査機「はやぶさ」の目的

「はやぶさ」は、MUSEC-Cと呼ばれた小惑星サンプルリターン計画の探査機の名称である。このMUSEC-Cとは、Mu Space Engineering Satelliteという工学実験衛星シリーズの3番目の衛星で、工学的な技術の試験および実証のための衛星だ。「はやぶさ」の目的は、科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、太陽系の起源にせまることだ。一方、工学的には、太陽系の惑星探査、本格的惑星サンプルリターンに必要な高度な技術の試験と実証することだ。

## 3. 太陽系の形成と小惑星

小惑星は、太陽系形成の記憶を残している天体の一つだと考えられている。現在の太陽系形成の標準的シナリオと小惑星の関係は次の様なものだ[2]。

宇宙空間には、ガスや塵が集まった分子雲がある。このガスは主に水素やヘリウムからなり、塵は、恒星の内部で作られた微小な金属や岩石などが星の死とともに宇宙空間に放出されたものである。この様な分子雲コア(密

度の高いところ)のひとつが、今から 47 億年前、自己重力で収縮しはじめ、その中心部に原始太陽が誕生した。この原始太陽の周りには数十から数百 AU もの円盤ができる。この構造を原始惑星系円盤と呼ぶ。

この原始惑星系円盤の中で、塵が次第に赤道面に向かって沈積し薄いディスクを作る。その厚さが数百 km になると、塵の層の内部で重力不安定性が発生し、塵の層が分裂し、直径が数 km 程度の微惑星が一気に数百億個も出来る。この微惑星はお互いの重力で衝突を繰り返し、大きい微惑星は、その重力により、より多くの微惑星と衝突を繰り返して暴走的に成長してゆく。この暴走的成長で生まれた大きな原始天体が原始惑星となる。

太陽系の内側では、揮発性物質が少ないダストが集積した比較的岩石質の多い地球型惑星ができる。一方、太陽から 2-3AU より遠いところでは、水が氷として存在するため、固体成分(ダストや氷)が内側より多く、より大きな原始惑星へと成長できる。この大きな原始惑星に、周囲のガスなどを取り込んで木星型惑星へと成長する。

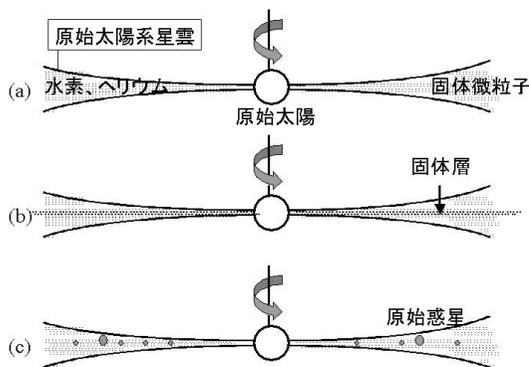


図1 標準モデル(林モデル)による惑星形成のシナリオ[2]

- (a) 原始太陽系星雲の形成直後、  
 (b) 固体層の形成期、この後、自己重力で微惑星誕生、  
 (c) 原始惑星の形成期を示す。

やがて 5AU 付近で成長した木星の摂動によって、成長途上にある多数の微惑星=小惑星の軌道が乱されるようになる。その結果、小惑星相互の相対速度が大きくなり、衝突によって合体成長するよりも破壊する方が卓越するようになり、惑星にまで成長出来なかったと考えられている。これらが小惑星帯を作っていると考えられている。

地球を含め、現在の惑星たちは、過去の激しい衝突合体などにより、太陽系形成時期の成分や温度などの情報がわからなくなっている。一方、惑星になりそこねた小惑星や彗星(太陽系外縁天体やオールの雲の天体)などは、太陽系形成時期のある瞬間でのタイムカプセルの様な天体だといえる。小惑星でもエロスなどの大きなものは、原始惑星程度に成長する途上の進化の進んだ天体であるのに対し、「イトカワ」のような小型の小惑星は、微惑星に近い比較的原始的な小惑星か、あるいは、破壊された比較的大きな小惑星の破片のような天体だと考えられる。このような「小さな」小惑星の探査は、惑星形成の原材料となった物質とか、原始太陽系の温度・圧力分布、あるいは、小天体上で有機物質の進化などを考える上で大変重要となる。

#### 4. 小惑星「イトカワ」

小惑星は太陽光の反射スペクトルによって大きく3種類に分類されている。炭素質の暗いC型小惑星(75%)、灰色がかったケイ素質(石質:17%)のS型小惑星、金属質のM型小惑星である。S型は岩石質の天体と推定されており、小惑星帯の内側の縁付近に多く存在している。これらに対して、C型は、有機物を多く含んでいると思われ、小惑星帯の中央付近で多い。「はやぶさ」が探査した小惑星イトカワは、S型に分類される小惑星だ。

「はやぶさ」の最初のターゲットはネウレスであったが、ロケットの性能を考慮して小惑

星 1989ML に変更された。しかし、2000 年 2 月の M-V ロケット 4 号機打ち上げ失敗のため、打ち上げ計画が延期され、第 3 候補の小惑星 1998SF36 に変更された。「はやぶさ」が打ち上がった後に、この小惑星 1998SF36 が「イトカワ」と命名された。この「イトカワ」とは、日本のロケット工学の祖、糸川英夫博士の名前に由来する。ちなみに、次の「はやぶさ 2」のターゲットは、より始原的小惑星と考えられる C 型の小惑星 1999 JU3 である。

## 5 「はやぶさ」の 5 つのミッション

小惑星「イトカワ」からのサンプルリターンを行うために、技術試験衛星としての「はやぶさ」には 5 つのミッションが与えられた。

その 1 番目はイオンエンジンを使った惑星間航行の実証試験である。「はやぶさ」は、従来の化学推進エンジンと比べて、燃料の効率が良い新開発の電気推進エンジン＝イオンエンジンで惑星間を航行することに挑戦した。イオンエンジンは、まず、マイクロ波によって推進剤のキセノンをイオンに電離、次に生成したイオンを強力な電場で加速、高速で噴射させ、その反動を利用して推進力を得るものだ。イオンエンジンを 3 台同時に運用させたのも、4 万時間もの長時間にわたり稼働させたのも、「はやぶさ」が世界初である。

その 2 番目として、自律誘導航法がある。「はやぶさ」が「イトカワ」に到着、観測や着陸・サンプル採取を試みる時期は、「イトカワ」が（地球から見て）合の頃であり、地球と「イトカワ」の距離がほぼ地球太陽間の 2 倍の距離、2AU ほどの時であった。このため、「はやぶさ」との交信は、片道 16 分、状況を見て指令を送っても 30 分以上の時間差が生じるので、地球からのリモートセンシングが出来ない。このため、実際の「イトカワ」

の観測や着陸時には、レーザー高度計や近距離センサなどの各種センサを用いて、自らが自分の位置を判断し、自分で目標に近づきながら、姿勢を変える自律航法に挑戦した。

第 3 番目が、小惑星のサンプル採取である。「イトカワ」は非常に重力が小さい小惑星なので、「はやぶさ」が地表に着陸することはできない。また、「イトカワ」の表面がレゴリス（砂礫）で覆われているのか、あるいは、大きな一枚岩のような状況なのかも事前にはわからない。このため、表面がどのような状態でも、確実に地表サンプルを採取するための工夫がされた。それが「はやぶさ」の底部に張り出した長さ約 1m、直径 20cm ほどのサンプラーホーンと呼ばれる装置で、金属球を撃ち込んで地表面を砕き、飛び散った岩や砂を採取する方法を採用した。

第 4 番目が、地球スイングバイだ。天体の引力を用いて宇宙船や探査機の手速や軌道などを変える事を「スイングバイ」という。「はやぶさ」はイトカワに向かうにあたって、イオンエンジンを運用して軌道を修正しながら、地球の重力を利用して加速する地球スイングバイを実施した。イオンエンジンを併用して地球スイングバイを実施したのは、世界初だ。

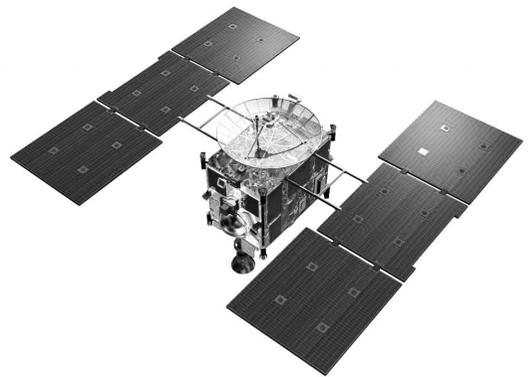


図 2 「はやぶさ」の全体像（JAXA フォトアーカイブスより）

第5番目に、大気圏再突入カプセルの開発である。「はやぶさ」は、「イトカワ」のサンプルを採取したカプセルを持って地球に帰還する。月より遠い小惑星表面のサンプルを地球に持ち帰るというこの挑戦は世界で初である。カプセルは、惑星間空間から秒速12.2kmで直接地球大気に飛び込むので、スペースシャトルなどに比べて30倍以上の空力加熱を受ける。このため、この高温に耐えられるカプセルの開発が進められた。

これらのミッションと共に、「イトカワ」の科学観測用に、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)が搭載され、貴重なデータを取得できた。

## 6. 「はやぶさ」の旅

1996年に小惑星サンプルリターン計画としてスタート、MUSES-Cは、2003年5月9日に鹿児島県内之浦からM-Vロケット5号機により打ち上げられた。2004年5月19日に地球スウィングバイを行い、2005年9月12日に「イトカワ」の太陽側約20kmに到達した。

2005年11月に「イトカワ」への降下着陸を行い、11月20日は「イトカワ」に着陸、11月26日には試料採取のための2度目の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後の解析でわかった。2度目のタッチダウンの際に、金属球を発射する予定であったが、安全装置の誤作動のため発射されなかった。しかし、この2度の着地の結果、「イトカワ」の岩石を採取することが出来たことが、サンプル容器から回収された岩石質微粒子の初期分析でわかっている[3]。

2度目のタッチダウン終了後、化学エンジンの燃料漏れが発生し、「はやぶさ」は姿勢制御が困難になり、約7週間行方不明となる。

通信回復後は、姿勢制御のための化学エンジンが使用できない状態であったため、イオンエンジンの燃料であるキセノンガスを直接噴射するという目的外の使い方を駆使することで姿勢を制御し、2006年3月までに復旧した。

しかし、このトラブルで地球帰還軌道への投入が遅れ、当初予定の3年遅れので、2010年6月の地球帰還を目指す。

地球帰還が目前となった2009年11月にイオンエンジンが異常停止した。これはイオンエンジンの寿命が尽きてしまったためである。しかし、4つあるエンジンのうち壊れていない機能を組み合わせて1台のエンジンとして動かすクロス運用で地球帰還へ向けてイオンエンジン再開。日本時間2010年6月13日19時51分に無事カプセルを分離し、同日22時51分すぎに大気圏に突入した。リエントリーカプセルは、無事回収され、現在、国内の研究機関でサンプル容器内の微粒子の分析が進められている。

## 7. 「はやぶさ」の成果（「イトカワ」の観測より）

「はやぶさ」が撮影した「イトカワ」の様子を図3、図4、図5に示す。

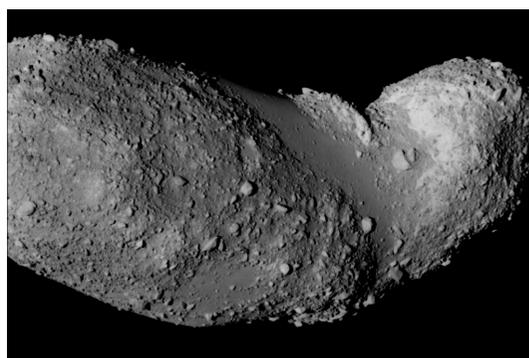


図3 「はやぶさ」の捉えた「イトカワ」ラッコの姿

2005年10月31日 14h27m18s (AMICA)  
(ファイル名: ST\_2506733028\_v) [4,5]

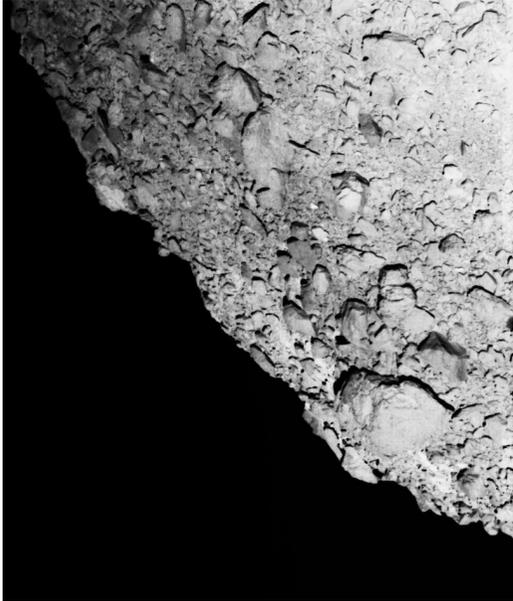


図4 「イトカワ」の岩塊

2005年11月12日 06h40m43s (AMICA)

(ファイル名: ST\_2539467169\_v) [4,5]

これらの画像は、「はやぶさ」プロジェクト科学データアーカイブ情報システム[4]より、「はやぶさ」の撮影した「イトカワ」の画像をダウンロードし、画像強調して表示している[5]。

これらを見てわかる最大の特徴は「イトカワ」の奇妙な形状である。図3の様に「イトカワ」は2つの塊があたかもくっ付けた様な形をしている。研究者たちは、その形を「ラッコ」型と呼んでいる。はやぶさの観測にもとづいて作成された3D形状モデルによってサイズが550m×298m×224mであることが判った[6]。

「イトカワ」はそれまで一般的に考えられていた小惑星の姿とは異なり、表面の大部分はレゴリス（砂礫）に覆われておらず数メートルの岩石が露出した部分であった。また、図4の様に特異な岩塊が存在し、最大のもは長さ50mに達する。



図5 「はやぶさ」着陸地点付近の表面

2005年11月19日 20h23m36s (AMICA)

(ファイル名: ST\_256511720\_v) [4,5]

レゴリスで覆われていたのは、「はやぶさ」が着陸したミューゼスの海と呼ばれるラッコの腹の一部であった。しかも図5の様にそのレゴリスは砂利のように敷き詰められていた。

この「イトカワ」の質量は、はやぶさの軌道追跡などいくつかの方法求められ  $3.51 \pm 0.105 \times 10^{10} \text{kg}$  という値を得た。このことより、「イトカワ」からの脱出速度は毎秒15cmくらいになる。この重力の小ささが「はやぶさ」の着陸を困難にしたのであるが、同時に「イトカワ」の進化にも影響した。と言うのも、隕石が衝突した破片であるレゴリスが簡単に宇宙に飛び去ってしまうからだ。これで「イトカワ」表面にレゴリスがすくなくないのだ。これら体積と質量より、「イトカワ」の密度が  $1.90 \pm 0.13 \text{g/cm}^3$  という値を得た[7,8]。これは、エロスや地球上の岩石の密度  $2.6 \sim 3.0 \text{g/cm}^3$  の値より遙かに小さい。すなわち、「イトカワ」は、衝突により破壊された破片が自己重力で再集積した“すかさか”の天体＝ラブルパイル天体であることがわかった。

近赤外線による観測では、「イトカワ」は輝

石やカンラン石に特徴的なスペクトルが得られており、普通コンドライドよりなると考えられている[9,10]。「はやぶさ」によって回収された微粒子の組成もこのデータと符合している[3]。

## 8. 「はやぶさ」現象

マスコミ等の「はやぶさ」の報道は、「はやぶさ」の「イトカワ」タッチダウン直後のトラブル以降、急激に減少した。この間に「はやぶさ」チームの努力により次々とトラブルを解決し、2010年6月13日、地球帰還を成功させた。この間、マスコミには、ほとんど報道されなかったが、通常のアストロファンファンには入らない一般市民がブログやユーチューブを使って熱狂的に応援し、擬人化された「はやぶさ」が一人歩きした。それらが、カプセル帰還後、国民を巻き込むような「はやぶさ」ブームの基盤を作った。この「はやぶさ」現象については、今後の天文教育を考えていく上で、重要なテーマの1つになるであろう。

## 文 献

- [1] 「天文教育」2011年1月号表紙参考
- [2] シリーズ現代の天文学 I 「人類の住む宇宙」岡村ほか編、日本評論社（2007）
- [3] JAXA プレスリリース 平成 22 年 11 月 16 日「はやぶさカプセル内の微粒子の起源の判明について」  
[http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116\\_hayabusa\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116_hayabusa_j.html)
- [4] 「はやぶさ」プロジェクト科学データアーカイブ情報システム  
<http://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/index.html.ja>
- [5] 「はやぶさ」プロジェクト科学データアーカイブ情報システムで公開されている研究用の画像（FITS 画像）を、すば

る望遠鏡画像解析ソフト：マカリなどで解析する事が出来る。マカリは教育利用では誰でも使える。

<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>

図 3、図 4、図 5 は、著者がアーカイブデータからダウンロードした FITS 画像（オリジナルファイル名）をマカリで画像調整して JPEG で保存した画像である。

- [6] Saito, J. *et al.* “Detailed Images of Asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa” *Science*, **312**, pp.1341-1344 (2006) ほか
- [7] Fujiwara, A, *et al.* “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa.” *Science*, **312**, pp.1330-1334 (2006) ほか
- [8] Abe, S. “Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa.” *Science*, **312**, pp.1344-1349 (2006) ほか
- [9] Abe, M *et al.* “Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft.” *Science*, **312**, pp.1334-1338 (2006)
- [10] Okada, T. *et al.* “X-ray Fluorescence Spectrometry of Asteroid Itokawa by Hayabusa.” *Science*, **312**, pp.1338-1341 (2006)

大西浩次（長野工業高等専門学校）