

招待講演

小惑星リュウグウに到着した「はやぶさ2」のミッションと広報

吉川 真 (JAXA)

Asteroid Explorer “Hayabusa2” Arrived at Ryugu and its Public Relations

Makoto Yoshikawa (JAXA)

Abstract

Hayabusa2 is the second asteroid sample return mission of Japan. It was launched on December 3, 2014, and it arrived at its target asteroid Ryugu on June 27, 2018. Ryugu has unexpected top shape, and is covered by numerous boulders. We are sure that the observations of Ryugu by Hayabusa2 will bring us a lot of new knowledge related to the planetary science. Hayabusa2 will contribute to both science and technology. In addition to this, we think that public relation, public outreach, and education are also very important related to this mission. Up to now, we have had various kinds of public relations. In this paper we show what we have done for our public relations.

1. はじめに

「はやぶさ2」は、「はやぶさ」に次ぐ世界で2番目の小惑星サンプルリターンミッションです。2014年12月3日に打ち上げられ、探査の目的地である小惑星リュウグウには2018年6月27日に到着しました。「はやぶさ2」は約1年半リュウグウに滞在して探査をし、2019年末にリュウグウから出発して、2020年末に地球に帰還する予定です(図1: 図は発表で使用したパワーポイントのコピー。以下同様)。

「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の経験を活かして、「はやぶさ」でトラブルを生じたところや問題があった点は考慮して改良した探査機になっています。姿勢制御のシステム、化学エンジン、イオンエンジンなど主要な機器を改良しただけでなく、細かいところまで「はやぶさ」の経験を活かしています。また、探査対象天体がS型小惑星ではなくてC型であるということも考慮しました。これは、主に小惑星表面の反射率の違いを考慮したことになります。さらに新しい機器として、Ka帯の通信機器、衝突装置・分離カメラ、小型のランダ・ローバであるMINERVA-IIを3機とドイツ・フランスが製作したMASCOTを搭載しています。科学観測機器は、光学航法カメラ、レーザ高度計、近赤外分光計、中間赤外カメラを搭載しています。このように単に「はやぶさ」を改良しただけでなくかなり欲張った構成になっています(図2)。



図1 「はやぶさ2」ミッション

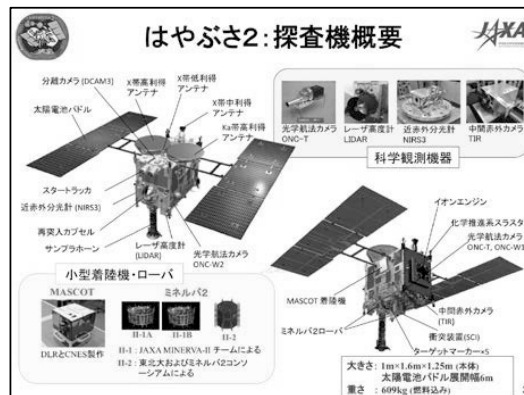


図2 はやぶさ2探査機

このような探査機で小惑星リュウグウを探査しその表面物質を地球に持ち帰るわけですが、その最大の目的は、リュウグウ表面物質に含まれていると思われる有機物です。リュウグウは誕生してからあまり変化していない天体だと考えられます。もし有機物が見つければ、それは地球生命が誕生する前にあったものかもしれません。そうしますと、地球生命の起源を調べる上での手がかりが得られるかもしれません。もちろん、小惑星そのものの起源や進化を調べることで、惑星の誕生や進化を理解する上での手がかりも得られる可能性があります。このように、太陽系や生命の起源を調べるのが「はやぶさ2」の科学目標になっています。工学的には「はやぶさ」の技術をより確実なものにすることや新たな探査技術を実証することが目標です。そして、このような宇宙への挑戦を若い世代に伝えていくことも重要な目標になっています。

2. リュウグウ到着

2014年12月に打ち上げられてからリュウグウに到着する2018年6月まで約3年半の時間がかかりましたが、この間もいろいろな技術を実証していました。主な項目だけを挙げてみると次のようになります。

- ・イオンエンジンによる長期間の軌道制御（のべ1万8千時間余りの運転）
- ・地球スイングバイによる正確な軌道変更
- ・太陽光圧を積極的に利用した姿勢制御（ソーラーセイルモード）
- ・地上局が変わっても途絶えない通信手法（アップリンクトランスファー）
- ・DDORによる高精度軌道決定（Delta Differential One-way Range）
- ・Ka帯による深宇宙通信
- ・光学電波複合航法による探査機・小惑星同時軌道推定

以上の技術は、「はやぶさ2」のための技術というだけでなく、今後の太陽系天体探査ミッションに役立つものです。あまり目立ちませんが、リュウグウ到着までに技術的に大きな成果を挙げることができました。

そして、2018年6月27日にリュウグウから20kmのところまでリュウグウに対して静止することになりますが、ここをもってリュウグウ到着としました。その到着の2週間くらい前から徐々にその形が見えてきましたが、リュウグウは“コマ（独楽）型”の小惑星でした（図3）。これは、誰も想定していませんでした。このようなコマ型の小惑星がいくつかあるということは、これまでのレーダー観測で知られていましたが、いずれも自転周期が2時間から4時間と、かなり高速で自転しているものでした。リュウグウの自転周期は7.6時間ですから、コマ型であるとは誰も思わなかったわけです。

また、リュウグウ全体が多数の岩塊で覆われていることも驚きでした（図4）。またはっきりとしたクレーターもいくつか見ることができます。これらの特徴は、「はやぶさ」が探査したイ

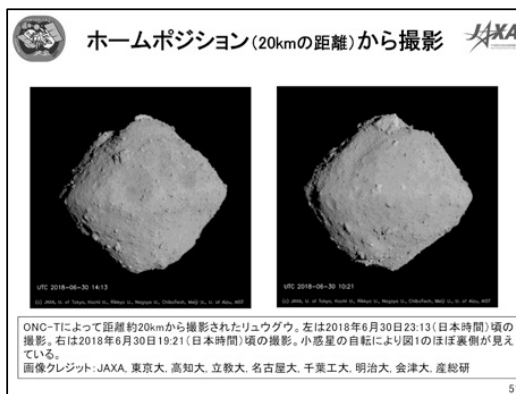


図3 小惑星リュウグウ



図4 リュウグウ表面のようす

トカワとは異なります。科学的には非常に興味深いですが、表面物質を採取するためのタッチダウンは、かなり難しいことが分かりました。

3. 広報活動

「はやぶさ2」プロジェクトでは、プロジェクト発足当初から、広報・アウトリーチ活動に力を入れてきました。これは、高額なミッションを認めていただいたので、単に目的達成に向けてミッションを遂行するだけでなく、広く一般の人や若い世代に科学の面白さを知って欲しいと考えたためです。行った主要なアウトリーチ活動を表1に示します。また、個々の内容について説明した図を図5に示します。

このようなアウトリーチ・広報活動によって、かなりの人にミッションの面白さを伝えることができたのではないかと考えています。ただし、より広い層の人たちに感心をもってもらうような工夫が必要であると感じています。

表1 主要なアウトリーチ活動

No.	実施期間	名称	内容・結果
1	2013. 4.10～8.8	星の王子さまミリオンキャンペーン2	ターゲットマーカには 183,174 名の名前が、カプセルには 226,800 名の名前・メッセージが搭載。(合計、409,974 名。うち外国からは 116,034 名)
2	2015. 7.22～8.31	小惑星名称公募	探査対象小惑星 1999 JU3 の名称を募集し、約 7,300 名から提案が寄せられた。2015 年 9 月末に、「リュウグウ」という名前が正式に命名された。
3	2015.12.3	スイングバイ観測キャンペーン	39 カ所(一部国外を含む)から地球に接近した「はやぶさ2」の観測に成功し、多くの人が見送った。
4	2016. 7.1～8.15	リュウグウ観測キャンペーン	明るさは 18.5 等という暗いものであったにもかかわらず、約 14 カ所で観測に成功。
5	2017. 2.12～20	自転軸予想キャンペーン	「はやぶさ2」の運用訓練で用いる自転軸のパラメータをツイッターで募集し、約 100 名が数値を応募。
6	2017.12～ 2018.4	リュウグウ想像コンテスト	リュウグウを想像するコンテストを外部の機関に主体となってもらって実施。(国内 18 機関、海外 7 カ国が参加)
7	2016.2～ 2018.4	はやぶさ2 トークライブ(全 14 回)	「はやぶさ2」のミッションについて少し高度な内容まで含めた講演会を 2 ヶ月に 1 回、相模原市立博物館で開催。毎回、150 名前後の参加者あり。

星の王子さまミリオンキャンペーン2

はやぶさ：星の王子さまに会いにいきませんか ミリオンキャンペーン (149カ国から877,490名の名前)

2013年4月10日-2013年8月9日

1. ターゲットマークに名前を記載したシートを入れ
2. リエントリカプセルに名前、メッセージ、イラスト、写真のファイルをセーブしたメモリチップを入れた

	登録数	地域	
		日本	海外
ターゲットマーク	183,174	123,661	59,513
リエントリカプセル	226,800	170,279	56,521
合計	409,974	293,940	116,034

リエントリカプセル

小惑星名称公募

「はやぶさ2」の探索対象小惑星

仮符号 1999 JU3

小惑星の名称募集は2015年7月22日から8月31日にかけて行われた

約7,300の提案

選ばれた名称 Ryugu (リュウグウ)

「うらしまろう」より

地球スイングバイ観測キャンペーン

「はやぶさ2」の地球スイングバイ 2015年12月3日

地球スイングバイ時に観測された「はやぶさ2」 衛星画像(スペースガードセンターにて撮影。(c) 日本スペースガード協会)

最小距離: 3090 km

39カ所において「はやぶさ2」を観測成功

成功 不成功

リュウグウ観測キャンペーン

2016年7月1日～8月15日

リュウグウのイメージ 四角の中にある天体がリュウグウ。白黒反転した写真。美星スペースガードセンターにて撮影。(c) 日本スペースガード協会)

2016年の夏は、小惑星リュウグウが地球に近づくため観測好機となる。光度が上がるが、ただし、最も明るくても18.5等くらいなので、小望遠鏡での観測は難しい。

約14の天文台・アマチュアが観測に成功

自転軸予想キャンペーン

リュウグウの自転軸の向きは不明

はやぶさ2がリュウグウに到着したとき、すぐに決める必要がある

運用訓練で、自転軸を推定することを行う

一般の人にスピン軸のパラメータを決めてもらう

ツイッターで短期間募集をして、100名ほどから応募があった

リュウグウのスピン軸パラメータ:
自転軸の向き: (λ, β)
基準経度のある時刻における角度: θ_0

キャンペーン期間: 2017年2月12 - 20日

「小惑星リュウグウ、想像コンテスト」

国内のノード: 16

1. はまぎん こども宇宙科学館
2. 大分市関崎海星館
3. 日本宇宙少年団
4. 稲塚市立博物館
5. 倉敷科学センター
6. SciNeth(サイネス)
7. 東芝未来科学館、東京国際科学フェスティバル
8. テアコステーション・ジャパン
9. 聖徳市生涯学習センター
10. 明石市立天文科学館
11. 岡山県生涯学習センター 人と科学の未来館サイバ
12. 多摩六都科学館
13. とよた科学体験館
14. 千葉市科学館
15. 佐賀県立 宇宙科学館<<ゆめぎんが>>
16. ローソン
17. ロボフェス2018
18. 会津もらの会

海外ノード: 2

1. フランス
2. スリランカ
3. イスラエル
4. スベイン
5. ウガンダ
6. インド
7. メキシコ

合計 約2000 作品が集まる

はやぶさ2 トークライブ

一般向け講演会

2016年2月～2018年4月: 14回

広報・アウトリーチ(その他)

ツイッター

ファクトシート

ペーパー・クラフト

シール

はやつー君

図5 主な広報・アウトリーチ活動

4. おわりに

この文章を書いている時点（2018年10月初め）で、「はやぶさ2」プロジェクトでは、リュウグウについて一通りのリモートセンシング観測を終え、小型ローバ MINERVA-II 1 の2機と小型着陸機 MASCOT をリュウグウ表面に届けるところまで無事終了しました。今後は、いよいよ表面物質を採取するためのタッチダウンになります。その後は、人工的なクレーターを作る衝突装置の実験が待っています。そして2020年末の地球帰還となります。まだまだ難度の高いハードルがいくつも残っていますが、目的完遂を目指してプロジェクトを進めています。

参考文献

「はやぶさ2」についての情報は、「はやぶさ2」プロジェクトの Web
<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/>
を参考にしてください。

質疑応答

Q. VLBI を使った手法によって精度が改善したそうですが、どの程度の位置測定精度が出たのでしょうか？ またリュウグウの位置誤差が元々100km 程度あったのが、色々な手法を組み合わせると10km まで改善したそうですが、その中でどの程度の誤差改善に貢献できているのでしょうか？（亀谷収さん）

A. 探査機の運用の場合には、DDOR (Delta Differential One-way Range) といいますが、原理は相対 VLBI と同じです。この手法を用いると、RARR (レンジ&レンジレート) という従来の電波航法による軌道決定に比べて、探査機の軌道決定精度が2桁くらい上がります。例えば3億キロ彼方の探査機の位置誤差ですが、RARR だと300km くらいになりますが、DDOR では数 km になります。探査機の軌道が正確に推定できると、リュウグウの方は探査機から見たリュウグウの方向という情報を使って、その軌道精度をよりよいものにしました。

Q. ホームポジションの位置を自転軸の上の方におくなどという事はできないのでしょうか？（大西浩次さん）

A. 残念ながらそれはできません。探査機は地球と小惑星を結ぶ線上にいて、かつ太陽電池の面を地球方向に向けておく必要があります。「はやぶさ2」の場合、探査機から見た地球方向と太陽方向がほとんど同じなので、太陽電池の面を地球に向けると、同時に太陽にも向くこととなります。地球との通信も同時にできます。このようになる位置で小惑星から20km のところがホームポジションになります。リュウグウの場合、自転軸が黄道面にほぼ垂直ですから、地球とリュウグウを結ぶ線は自転軸方向とほぼ垂直になってしまいます。ですから、自転軸上にホームポジションを置くことはできません。



図5 主な広報・アウトリーチ活動（続き）

Q. 「はやぶさ」、「はやぶさ2」を通して子どもたちに伝えたいことは何ですか？（松崎真香さん）

A. 未知というか知らないところに行くという挑戦です。イトカワのときも、事前はかなり情報がありましたが行ってみたらラッコのような形をしたデコボコの天体で非常にびっくりしたわけですが、今回のリュウグウも行ってみたらコマ型で非常に驚きました。やはり未知の天体、全く知らない天体については、現地に行かないとわからないわけで、そういった未知のことにぜひ挑戦してほしいというのが個人的には一番伝えたいことです。

Q. 今回とれるサンプルの量はどれくらいですか？（渡部隆夫さん）

A. サンプルを取る方法はほとんど「はやぶさ」のときと同じです。つまり、サンプラーホーンの筒が小惑星表面に触ると、その瞬間に内部に弾丸を撃ち出して小惑星表面を砕き、その破片が上がっていくというやり方です。ただし、サンプラーホーンの先端をちょっと折り曲げていて、それに曲がったところに砂や小さい砂利が乗るような仕組みも付けています。探査機が上昇して急にスピードを止めると、折り曲がった上に乗った砂がサンプラーホーンの中を上昇していくわけです。サンプルの目標の量は0.1グラムです。0.1グラムあれば、科学のチームが予定している分析が全部できることとなります。ちなみにアメリカのミッションのOSIRIS-RExでは、最低70g、最大2kgを採取すると言うことです。このアメリカのミッションでは、もし1回の着陸で十分取れなければ、もう1回着陸してサンプルを取ります。何回着陸しても取れた物質は同じ場所に入ります。「はやぶさ2」では、3回までタッチダウンをしてサンプルを取ることができますが、3回とも別の部屋にサンプルが入るようになっています

Q. 「はやぶさ2」のターゲットとしてそのリュウグウが選ばれたというのは、リュウグウの軌道が非常にミッションにとって都合の良い軌道だったからですか。

A. はい、その通りです。「はやぶさ2」は惑星探査機としては小さいです。ですから軌道を変える能力は小さいわけで、小惑星を自由に選ぶことはできません。条件としては、地球の軌道面である黄道面になるべく近いところにあって軌道があまり傾いていないこと、そして、地球と火星の間くらいに軌道があることが挙げられます。「はやぶさ」では、今から20年ぐらい前、そのような条件に合う小惑星は3つか4つしかありませんでした。そのうちの 하나가イトカワでした。「はやぶさ2」を計画したときには、このような都合のいい小惑星がほしい20数個ありましたが、その中でC型だった小惑星はリュウグウだけでした。イトカワがS型小惑星でしたから、「はやぶさ2」ではC型小惑星にしようということで、リュウグウが選ばれたわけです。

Q. リュウグウのデータを市販の3Dプリンタで造形できるデータを公開するご予定はありますか？あるとすればいつですか？（臼田-佐藤功美子さん）

A. はい、これはよく要望されるので、リュウグウの形状を推定しているサイエンスチームの形状チームの人に話していますが、まだ不完全なので公開したくないとのこと。完全なものができたら公開したいということです。たとえば、イトカワについては、データはJAXAから公開していますので、リュウグウの方もJAXAから公開するということになります。

Q. MUSES-C（はやぶさ）から「はやぶさ2」に至るまで、エンジニア&サイエンティストが多く関係されていると思います。大体何名くらいの方々がこの成果を支え手きたのでしょうか？ぜひとも、インタビューをして、実物大模型とともに広く人々に伝えるコンテンツを制作したく存じます。（間瀬康文さん）

A. よく質問をいただくことですが、人数の数が難しいです。「はやぶさ2」のサイエンスのチームについては、名簿に載っている人数は300名ぐらいになります。これは日本国内と海

外の両方合わせた人数です。一方、工学の方ですが「はやぶさ2」専任の人はほとんどいなくてみんな何かと兼任して作業をしています。その兼任の度合いが人によって違うということになります。人数の数え方が難しいですが、いわゆるコアメンバーで基本的には「はやぶさ2」を中心として仕事をしている人が JAXA で 20 名ぐらいです。メーカーとして関わっている人や少しだけ「はやぶさ2」に携わっている人も含めると、ざっと 500 人ぐらいになります。

- Q. リュウグウに到着し、「はやぶさ2」の話を一般向けに話す機会も増えてきましたが、そこでよく出るのが、「天体に勝手に穴をあけてもいいのか？」というものです。どう答えたらよろしいでしょうか？（中串孝志さん）
- A. 時々ある質問ですね。「はやぶさ2」の場合には、実際にはせいぜい直径が 2、3 メートル穴があくくらいなので、ちっと削っている程度です。ですから、そのくらいは許して欲しいなという感じです。たとえば、アメリカのディープインパクトというミッションでは、探査機を彗星に衝突させていますが、それに比べればはるかに規模が小さいことになります。
- Q. 探査機がリュウグウに着陸するとき、エンジンを吹かして落下させるのでしょうか、それともエンジンを逆噴射して減速させるのでしょうか？（篠原秀雄さん）
- A. 探査機は軌道制御をしながら降りていきます。特にタッチダウンのときは、リュウグウが自転していることによる表面の速度が秒速 10cm くらいになると思います。これと同じ速度にします。なお、降下する速度も秒速 10cm くらいですが、リュウグウの引力によって加速しすぎないように減速しながら降りていきます。
- Q. 「はやぶさ2」で使われているイオンエンジンっていうのはどういうものでしょうか。
- A. 「はやぶさ2」に限らず探査機のエンジンというのはガスを噴射することによって探査機の速度を変えたり、探査機の向きを変えたりするわけです。「はやぶさ2」では、イオンエンジンと化学エンジンの2つを持っています。イオンエンジンは、「はやぶさ2」の場合にはキセノンという物質をイオンにして、そこに電圧をかけて加速して噴射するものです。化学エンジンの方は、花火と同じように燃料に火をつけて燃やせばガスが噴き出すというものです。この2つの違いですが、噴射されるガスのスピードが異なっており、イオンエンジンの方が10倍速いことになります。ですから、イオンエンジンの方がより効率がよいので、より少ない燃料で加速ができるということになります。
- C. イオンエンジンについて補足です。東京書籍の中学校の新しい科学3年生の発展の読み物ページのところに「はやぶさ」のイオンエンジンについて載っています。（佐久間理江さん）