

「はやぶさ2」の進捗状況

吉川 真

JAXA

Current Status of Hayabusa2

Makoto YOSHIKAWA

Abstract

As the follow-on of Hayabusa, the world's first asteroid sample return mission, Hayabusa2 was launched in December 3, 2014. The target of Hayabusa2 is Asteroid (162173) Ryugu (=1999 JU3), which is a C-type asteroid. The scientific purpose is to study not only the formation and evolution of the solar system but also the organic matter and water, which existed in the early stage of the solar system. After the launch, Hayabusa2 revolved around the sun near the orbit of the earth for first one year. Just one year later, on December 3, 2015, it came back to the earth to perform the Earth swing-by. The Earth swing-by was successful, and the orbit has changed to go to Ryugu. In this paper, we summarize the status of Hayabusa2 up to the Earth swing-by.

Key Words: Hayabusa2, Exploration, Small Solar System Bodies

1 太陽系小天体探査の現状

2014年から2015年にかけて、太陽系小天体の探査が大きく進展した。まず、ESAが打ち上げた彗星探査機 Rosettaが、2014年8月、目的のChuryumov-Gerasimenko彗星に到着した。その彗星の異様な姿に、まず我々は驚かされた。そして11月、世界で初めて彗星に着陸機を降ろしたのである。その次は、準惑星に分類されている小惑星Ceresの探査である。NASAの小惑星探査機 DAWNが、2015年3月にCeresに到着し、そのきれいな球の形と、表面を覆う無数のクレーター、そして不思議な白い点などを映し出してくれた。そして、3つ目はNASAの冥王星探査機New Horizonsである。2015年7月に冥王星フライバイを行い、ついに我々はかつての“第9惑星”で現在は準惑星に分類されている冥王星の素顔を見ることができたのである。ちなみに、冥王星にも134340番という小惑星の確定番号が付与されているので、冥王星も小惑星リストの中にある。

このように、太陽系小天体についての我々の知識は一気に増えた。このような中で、「はやぶさ2」が2014年12月3日に打ち上げられたわけである。

2 小惑星サンプルリターンミッション「はやぶさ2」

小惑星探査機「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の後継ミッションである。2003年5月に打ち上げられた「はやぶさ」は、数々の世界初の挑戦をしつつ、多くの深刻なトラブルにも見舞われて、2010年6月に地球帰還を

果たした。特に、2005年に小惑星Itokawaに到着して2度目のタッチダウンをした後、燃料漏れや通信途絶が起り、地球帰還が不可能とも考えられた。さらに、予定されていたやり方では、小惑星表面のサンプル採取ができていないことも分かった。そこで、まだ「はやぶさ」の運用に四苦八苦していた2006年に、「はやぶさ2」を提案したのである。これは、「はやぶさ」で起こった不具合を解消するような改良された探査機で再挑戦をしようというミッションである。探査する小惑星のタイプはItokawaのS型に対してC型という別の種類を選んではいないが、探査機そのものの機能としては「はやぶさ」のコピーと言ってよいものであった。

しかし、提案はしたもののなかなか予算が付かず、当初に想定していた打ち上げの年である2011年には間に合わないことになった。そして、次のウインドウである2014年に打ち上げ予定を変更した。それに伴って、探査機について新たにいくつかの機能を追加し、「はやぶさ」のコピーではないミッションとして再提案したのである。2010年、「はやぶさ」が地球帰還を果たすと、「はやぶさ」が非常に大きな注目を浴びたために、「はやぶさ2」はプロジェクトとして2011年からスタートすることになった。

「はやぶさ2」の経緯や探査機のしくみ、また探査のシナリオや科学的目的などは、すでにいくつか報告がなされているのでそちらを参照していただくことにして^{1), 2), 3)}、ここでは詳細は割愛する。以下では、打ち



図1 H-IIA ロケット 26 号機による「はやぶさ2」の打ち上げ

上げから地球スイングバイまでの探査機の運用状況について整理してみることにする。

3 打ち上げから地球スイングバイ準備までの運用

3.1 打ち上げとクリティカル運用

「はやぶさ2」は、2014年12月3日の13:22:04 (JST) に、種子島宇宙センターからH-IIAロケット26号機によって打ち上げられた(図1)。打ち上げ予定期間は、11月30日から12月9日であり、最初は11月30日に打ち上げが予定されたが、天候の条件が合わずに延期された。

打ち上げ後、ロケットの第2段エンジン燃焼開始までは短時間(約7分)のうちに動作が進んだが、第2段エンジンは、いったん燃焼を停止して地球をほぼ1周してから再び燃焼を開始するというやり方を取った。そして、打ち上げから約1時間47分後に「はやぶさ2」が切り離されたのである。これは、「ロングコースト」と呼ばれる打ち上げになるが、H-IIAでは初めての打ち上げ法であった。このような打ち上げ方法をとったのは、「はやぶさ2」がロケットから分離された後に、なるべく早めに地上局と通信ができるようにするためである。

打ち上げは成功し、探査機がロケットから分離されてからは、初期運用であるクリティカル運用が始まった。クリティカル運用では、太陽電池パネルの展開、太陽捕捉制御、サンプラーホーンの伸展、イオンエンジンの方向を制御するジンバルの打ち上げ時保持機構(ロンチロック)の解除、3軸姿勢制御や軌道決定など重要な運用を行った。図2には、伸展が終わったサンプラーホーンの写真を示す。これは、探査機本体に取り付けられた小型のカメラ(CAM-H)で撮影されたものである。運用はすべて正常に行われ、12月5日にはクリティカル運用が終了した。

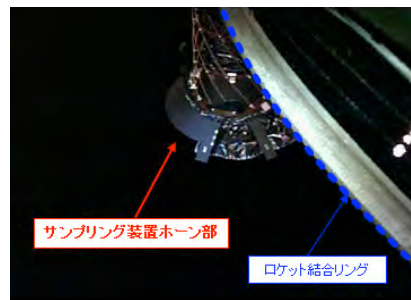


図2 伸展したサンプラーホーン

3.2 初期機能確認運用と巡航フェーズ

その後は、初期機能確認の運用が続いた。この運用では、搭載されているバス機器やミッション機器が正常に機能するかどうかの確認を行うのである。重要なイオンエンジンについては、まず、2014年12月下旬に4台あるエンジンを1台ずつ稼働させ推力が予定通りになることを確認した。さらに、2015年1月にはイオンエンジンの2台同時運転、3台同時運転も確認された。新しい装置機器であるKa帯通信装置については2015年1月上旬に通信試験を行い、きちんと通信できることが確認された。この他、DDOR (Delta Differential One-way Range) による精密軌道決定も行われた。

初期機能確認は2015年3月初めまで続き、3月3日からは巡航フェーズに移行した。巡航フェーズでの重要な運用は、イオンエンジンによる軌道制御である。これは、EDVEGA (Electric Delta-V Earth Gravity Assist) と

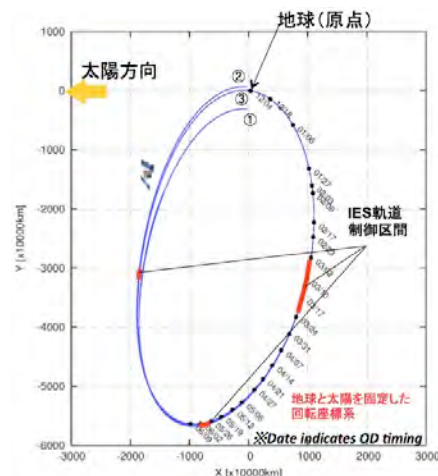


図3 イオンエンジンによる軌道制御の結果。打ち上げ後の最初の1年間の探査機の軌道を、太陽・地球を固定した回転座標系で示した。①の軌道は、打ち上げ直後の状態でそのまま飛行した場合であり、これでは、1年後に地球に戻れない。②は1回目のイオンエンジン運用後の軌道で飛行した場合であり、③は2回目のイオンエンジン運用後の軌道で飛行した場合である。この図のスケールでは、③で地球に戻ってくるように見える。

呼ばれる「はやぶさ」で初めて行った運用であり、電気推進（イオンエンジン）と地球スイングバイを併用した運用である。1回目のイオンエンジンの連続運転は2015年3月3日から21日まで行われ、409時間の運転を行った。また、2回目は6月2日から6日にかけて行われ、102時間の運転となった。この2回の運転によって、探査機は地球に戻ってくる軌道に修正され（図3）、地球スイングバイの日にちが2015年12月3日と決まった。

「はやぶさ2」では、探査機の姿勢制御にも工夫をしている。それは、ソーラーセイルモードというものである。「はやぶさ2」では、合計4台のリアクションホイールが搭載されている。X軸とY軸のまわりの姿勢制御として各1台、そしてZ軸には2台のリアクションホイールが付いている。このうち、Z軸の1台のみを使って姿勢制御を行うのが、このソーラーセイルモードと呼ばれるものである。この制御モードのことをOWC（One Wheel Control）とも呼んでいる。「はやぶさ」のときには、搭載されていた3台のリアクションホイールのうち2台が、小惑星着陸前に壊れてしまった。この経験を受けて、「はやぶさ2」ではリアクションホイールの数を1台増やして4台としたが、さらにこのソーラーセイルモードを使うことで、小惑星到着まではリアクションホイールを温存しておこうということである。この姿勢制御は、2015年の3月から5月と、6月から8月に行われた。

3.3 地球スイングバイに向けた準備

地球スイングバイに向けて、正確な軌道誘導を行う必要がある。2015年9月からは、精密な軌道決定と軌道誘導が行われた。ここでの軌道誘導のことを、TCM（Trajectory Correction Maneuver）と呼ぶ。

まず、9月1日から2日にかけて、イオンエンジンによってTCMが行われた。約130cm/sの速度修正が行われ、スイングバイ位置までのずれを約10000kmから400kmまで縮小させた。これをIES-TCMと呼んでいる。（IES

とは、Ion Engine Systemのことである）

次に、11月3日に、RCS（Reaction Control System：化学エンジン）による軌道修正が行われた（TCM1）。このときには、23cm/sほどの速度修正が行われ、スイングバイ位置からのずれが11kmまで縮小した。さらに、11月26日にはTCM2として約4.6cm/sの速度修正を行い、スイングバイ位置まで3kmまで接近させた。そして、12月1日にTCM3を予定していたのであるが、TCM2までで十分に軌道誘導ができたと判断されたため、TCM3は実施しなかった。ここまでの、スイングバイに向けた軌道修正は終了したことになる。

4 地球スイングバイ

4.1 スイングバイ運用

「はやぶさ2」は2015年12月3日、19:08:07（JST）に地球に最接近した。最接近時の地表からの距離は約3090kmで、ハワイ諸島上空を通過した。探査機のスイングバイの軌道は図4のようになる。探査機は、地球の北極方向から接近して、南極方向に抜けていく軌道となっている。この接近によって、太陽に対する速度は、30.3km/sから31.9km/sと約1.6km/sの増速となる。なお、「はやぶさ2」の直下点は、図5のように少し複雑な軌跡となる。これは、地球の自転も関係してくるためである。

最接近の直前の18:58（JST）に、探査機は地球の影（日陰）に入った。そして、19:18までの約20分間、日陰が続いた。日陰に入ると太陽電池による発電ができなくなるため、探査機に対応するための設定をした。また、19:00（JST）には内之浦からの通信が終了し、臼田での電波受信も19:04（JST）には終了した。

上記のように探査機が南半球の方に移動していくため、これ以降は日本から「はやぶさ2」を追跡することはできない。19:25（JST）に、オーストラリアのキャンベラにある地上局と接続がなされた。運用は19:30からの予定であるが、5分前から探査機との接続が開始

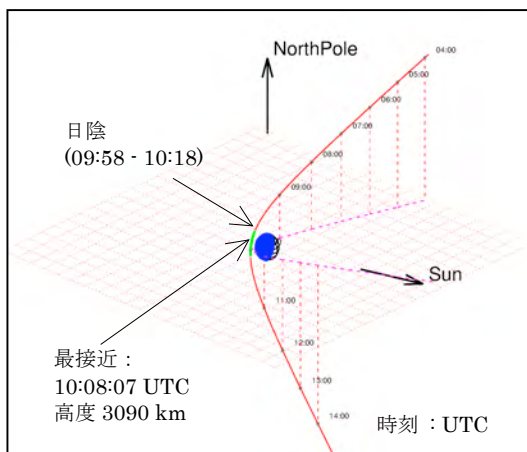


図4 地球スイングバイの軌道。

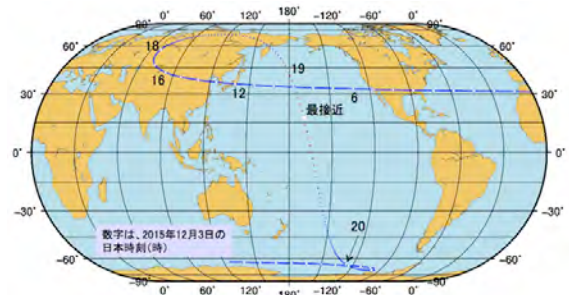


図5 「はやぶさ2」の直下点の軌跡。軌跡上の白丸は1時間ごとの位置である。数字は2015年12月3日のJST。

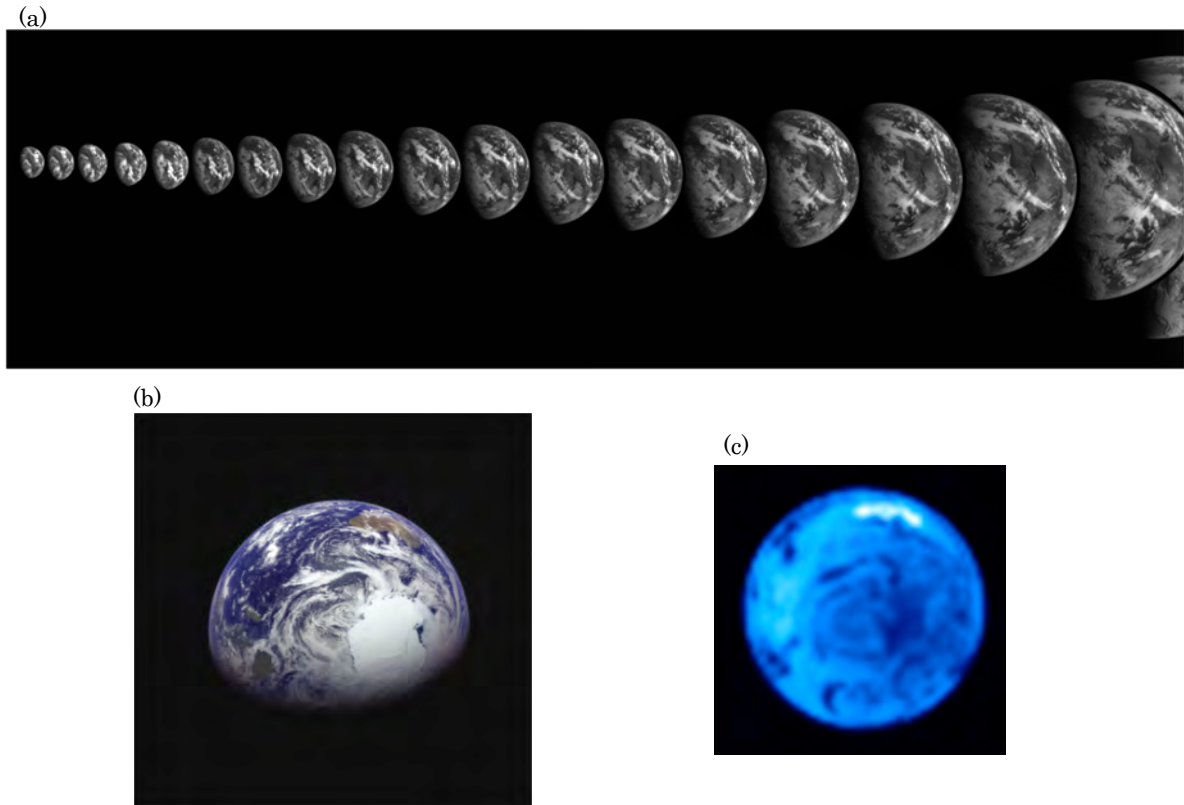


図6 スイングバイの前後で撮影した地球。(a) 地球最接近に直前に ONC-W2 で撮影された地球 (b) 地球最接近直後に ONC-T で撮影された地球 (c) 地球最接近直後に TIR で撮影された地球

されたのである。探査機からの情報が受信され始めると、すぐにいろいろなチェックが始まった。まずは、探査機の状況は正常であり、特に異常モード（セーフホールド）にもなっていないことが確認された。その後、姿勢や電圧、温度など、次々と確認がなされ、すべて問題なしと確認ができた。

スイングバイが成功したかどうかは、その後、1週間くらい時間をかけて追跡データを取得して軌道決定を行ったが、予定通りの軌道に入っていることが確認された。軌道修正を行う必要もなかった。最終的な軌道誘導精度は300mであった。

以上のように、「はやぶさ2」の地球スイングバイは成功した。

4.2 スイングバイ時の地球・月の観測と試験

地球スイングバイの機会を利用して、小惑星を観測するための機器である ONC-T（望遠の光学航法カメラ）、ONC-W2（広角の光学航法カメラ）、TIR（中間赤外カメラ）、NIRS3（近赤外分光計）によって、地球や月の観測を行った。また、小惑星と探査機との間の距離を計測する LIDAR（レーザ高度計）の試験も行った。

まず、2015年11月10日～13日に TIR によって地球-月の撮像がなされた。約900万kmの距離から、地球の周

りを回る月の様子が確認できた。

11月26日には、TIRとONC-Tによって地球-月の撮像がなされた。地球からの距離は約300万kmである。ONC-Tによる撮像では、3つのフィルターを使って撮像が行われ、疑似カラー画像が作成された。また、NIRS3でも観測が行われ、地球と月のデータを比較すると、明らかに地球のデータには水による吸収があることが確認された。

スイングバイ当日の12月3日には、地球に接近していく過程で ONC-W2 によって地球が撮影された(図6(a))。撮像がなされたのは09:00から18:15 (JST) で、地球中心からの距離は約20万kmから約2万kmである。

最接近後の12月4日の13時 (JST) 頃には、ONC-TとTIRによって南極を含む地球の半球が撮影された(図6(b),(c))。地球からの距離は約34万kmである。ONC-Tでは、このときもいくつかのフィルターを用いて撮像がなされた。またTIRでも、地球表面のようすがはっきりと撮像された。

LIDARについては、光リンク実験というものが行われた。これは、地上の衛星レーザー測距局とLIDARとの間でレーザー光の送受信を行おうという試験で、スイングバイの前後で行われた。これまでの解析では、スイングバイ後の12月19日に、670万km離れた「はやぶさ2」で、オーストラリアの豪州宇宙環境センター



図7 美星スペースガードセンターで撮影された「はやぶさ2」。中央の点像が「はやぶさ2」であり、恒星は流れて撮影されている。撮影は、2015年12月3日17:57 (JST)で、露出時間は20.0秒。画角は、横(東西)が20分角、縦(南北)が15分角。(日本スペースガード協会提供)



図8 「はやぶさ2」の撮影の成否(日本公開天文台協会 安田岳志氏作成)

のMt. Stromlo局から送信したレーザー光がLIDARで受信されたことが確認された。このような長遠距離でのレーザー光によるリンク試験は米国のいくつかの探査機の実験例とならんで希少な成功例となった。

4.3 スイングバイ時の地上観測キャンペーン

図5から分かるように、「はやぶさ2」が地球に最接近するのはちょうど日本の夕方から夜にかけての時間帯であり、また、日本から観測できる。そこで、日本公開天文台協会(JAPOS)と日本惑星協会(TPSJ)に協力のもと、「はやぶさ2」の地上観測キャンペーンを行った。80カ所以上で観測が試みられたが、そのうちの36カ所ではスイングバイをしていく「はやぶさ2」が撮影された。その1例として美星スペースガードセンターで撮影された画像を図7に示す。また、撮影ができた場所とできなかった場所を図8に示す。なお、撮影された天体が「はやぶさ2」であるかどうかの確認が必要な場合には、日本スペースガード協会での確認がなされた。

このキャンペーンは、アウトリーチの活動としては成功であるが、さらに撮影されたデータから、探査機の光度や位置情報などを解析していく予定である。

5 今後の運用

以上が現時点(2016年1月初め)での状況である。今後は、2016年の3月ないし4月からイオンエンジンの本格運転が開始される。小惑星リュウグウ到着は2018年の6月から7月の予定であるが、それまで、イオンエンジンを約7000時間稼働させることになる。また、2016年5月くらいからは、日本から再び「はやぶさ2」との通信が可能になるので、南半球運用を終了することに

なる。また、2016年の夏は、探査機のリュウグウ到着前最後のリュウグウ観測好機となるので、地上望遠鏡による観測キャンペーンを行う予定である。以上のようなことを行いながら、次の大きな目標である小惑星到着を目指すことになる。

参考文献

- 1) 吉川真, 「はやぶさ2」-小惑星探査への新たなる挑戦, 日本航空宇宙学会誌, 第60巻 第12号, pp. 27-32, 2012.
- 2) Tsuda, Y., Yoshikawa, M., Abe, M., Minamino, H., Nakazawa, S., System design of the Hayabusa 2 - Asteroid sample return mission to 1999 JU3, Acta Astronautica, 91, pp.356-362, 2013.
- 3) Yoshikawa, M., Watanabe, S., Tsuda, Y., Kuninaka, H., Hayabusa2 Project Team, Hayabusa2 - The Next Asteroid Sample Return Mission of Japan, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan Vol. 12, No. ists29, pp. Tk_29-Tk_33, 2014.

※スペースガード研究会(2015年11月17日)では、その時点までの状況を報告したが、ここではその後のスイングバイの結果も含めて記載した。

(2016年1月20日受付, 2016年1月30日受理)