

The challenges of Hayabusa 2 and the results up to now

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-08-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 吉川, 真, はやぶさ 2 プロジェクトチーム メールアドレス: 所属:
URL	https://mu.repo.nii.ac.jp/records/1336

「はやぶさ2」の挑戦とこれまでの成果

吉川 真 ・ はやぶさ2プロジェクトチーム

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS)

The challenges of Hayabusa 2 and the results up to now

Makoto YOSHIKAWA and Hayabusa2 Project Team

Abstract

Hayabusa 2 is the second asteroid sample return mission in the world, following Hayabusa. Hayabusa2 was launched on 3 December 2014, arrived at Asteroid Ryugu on 27 June 2018, and executed a lot of operations such as remote sensing observations, separations of rovers and a lander, 1st touchdown, an impact experiment, 2nd touchdown, and injection of small objects around Ryugu. Most of these operations were the world's first and all of them were done successfully. In this paper, we summarize the challenges and the results of Hayabusa 2 mission.

Key Words: 小惑星探査, はやぶさ2, リュウグウ

1 「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ

小惑星からその表面物質を持ち帰るとい世界初の挑戦をしようとして行われたミッションが「はやぶさ」である。「はやぶさ」は2003年に打ち上げられ、当初の予定では4年後に地球に戻ってくるはずであった。しかし、いくつかの大きなトラブルが発生し、3年遅れて2010年に地球に帰還した。“世界初”というハードルは、やはりかなり高いということ思い知らされたわけである。それでも「はやぶさ」はその最大の使命である小惑星から物質を持ち帰ることに成功し、惑星科学の進展に大きく寄与した。「はやぶさ」が探査した小惑星イトカワは、その大きさが500m程度であり、このように小さな天体に探査機が到着したのも世界初であり、微小な小惑星についての概念をがらりと変えたミッションでもあった。「はやぶさ」がイトカワに到着する前までは、小惑星というクレーターで覆われた天体というイメージであったが、このイメージを打ち砕いたのが「はやぶさ」ミッションだったのである。

この「はやぶさ」の後継機として計画されたミッションが、「はやぶさ2」である。元々は、「はやぶ

さ」が大きなトラブルを起こして地球に戻って来ること自体が危ぶまれたため、2006年に「はやぶさ2」は提案された。しかし、プロジェクトを開始するための予算がなかなか付かず、そうこうしているうちに「はやぶさ」が地球に帰還して大きな話題となると、2011年に「はやぶさ2」がプロジェクトとしてスタートすることになったのである。5年間ほど、足踏み状態が続いた。

しかし、実はこの5年という時間が非常に有効であった。その間、ミッションの提案をしては却下されるということが続いていたわけであるが、新しいアイデアも生まれてきたのである。最も顕著なものが後にSCIと呼ばれることになる衝突装置である。

最初の「はやぶさ2」の提案は、「はやぶさ」とほぼ同じであり、違うところは「はやぶさ」でトラブルがあったところを修正することと、ターゲット小惑星をC型である1999 JU3（後にリュウグウと名付けられる）にしたことであった。「はやぶさ」の場合、ターゲットとなった小惑星は1998 SF36（後にイトカワという名前となる）であったが、これはS

型に分類されるものであった。「はやぶさ2」では、より始原的でありまた生命の起源の探求にも繋がるC型の小惑星からサンプルを持ち帰り、理学的にも大きな挑戦をしようというものであった。

しかし、この提案だとあまり新規性がないと言われた。それならば、ということで、一機のロケットで2台の探査機を同時に打ち上げて、片方は「はやぶさ2」としてサンプルリターンを行い、もう片方は、ターゲットの小惑星に衝突する衝突機にしたかどうか、という案を提案した。すると、今度はコストが高すぎてダメだという。そこで、衝突機をかなり縮小して、探査機に搭載して持っていくものとしたのが、最終的にSCIと呼ばれることになる衝突装置なのである。SCIとは、Small Carry-on Impactorの略で、小さな搭載型の衝突装置のことである。後で述べるように、このSCIが小惑星に人工クレーターを生成するという世界初のことをやってのけることになる。

また、「はやぶさ2」の提案と平行して、「はやぶさ Mk2 (マークツー)」というミッションの検討も行っていた。これは、「はやぶさ」や「はやぶさ2」の次の世代となるようなミッションである。この検討にヨーロッパの科学者・技術者が関心を寄せてくれて、共同でミッションを提案することになり、ミッション名を「マルコ・ポーロ」として検討を進めた。こちらは、「はやぶさ2」より大型の探査機でより強力なイオンエンジンをもち、ウィルソン・ハリントンという以前は彗星の特徴も示した小惑星からサンプルを持ち帰ろうという計画であった。日本が探査

機を供し、ヨーロッパがロケットと大型のランダを提供するという進めていた。しかし、いろいろ紆余曲折があり、ミッションとしては当初のものからかなり変更されて、最終的にはヨーロッパ単独でESA（欧州宇宙機関）にミッション提案が行なわれたのであるが、残念ながら採択されなかった。しかし、ここで検討されたランダが、「はやぶさ2」に搭載されたMASCOTに繋がっているのである。規模はかなり縮小されたが、ドイツが中心となってフランスも協力して作成されたMASCOTは、「はやぶさ2」では大成功を取めることになる。

このように「はやぶさ」からいろいろなことを経て「はやぶさ2」にたどり着いたわけである^{1),2)}。多くの議論や検討は日の目を見ずに消え去ってしまったわけではあるが、検討そのものは決して無駄ではなかった。「はやぶさ2」は、単に「はやぶさ」のミッションをより確実に行う探査機であるだけでなく、更なる世界初をいくつも行えるような探査機になったのである。そうなったのも、表面には見えてこないようないろいろな検討がその背後にあるからなのである。

2 「はやぶさ2」探査機

「はやぶさ2」探査機は、「はやぶさ」をベースにして設計されているので、基本的には「はやぶさ」と似ている。全体的な形状や大きさなどは、ほとんど「はやぶさ」と同じである。探査機と搭載機器を図1に示す。「はやぶさ」との見た目の大きな違いは、ハイゲインアンテナ（最も大きなアンテナ）である。

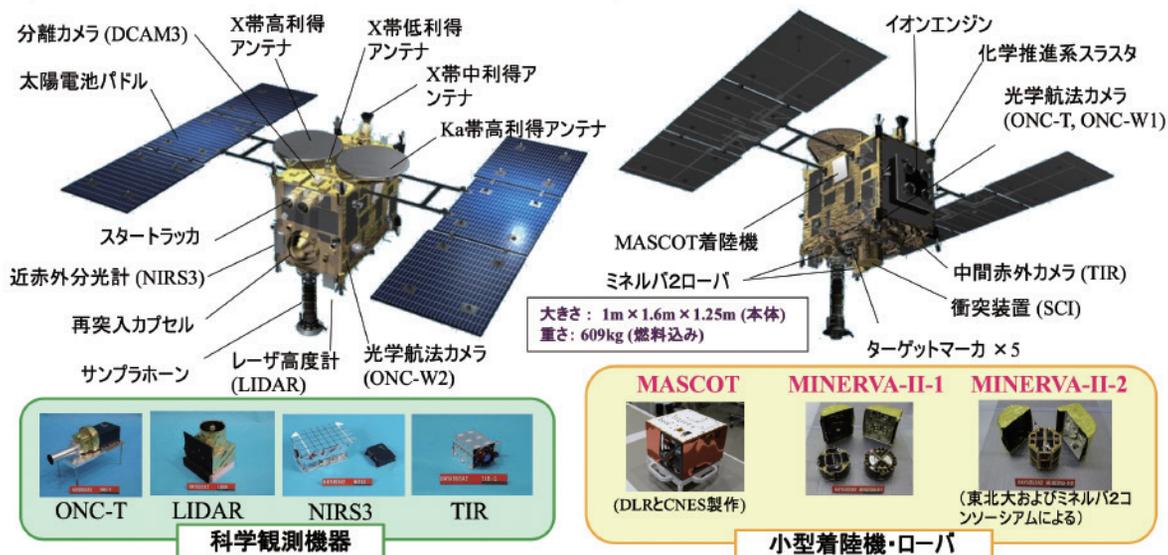


図1 はやぶさ2探査機と搭載機器 (©JAXA、探査機イラストは池下章裕氏による)

「はやぶさ」のときには一つのパラボラアンテナが付いていたが、「はやぶさ2」では二つの円形の平面アンテナになっている。パラボラから平面になった理由は技術の向上であるが、二つに増やしたのは実は技術的な挑戦なのである。片方は、「はやぶさ」と同様で多くの深宇宙探査機が使っているX帯という電波で通信を行うものであるが、もう片方はKa帯という周波数で約4倍高い電波で通信を行うものである。Ka帯を持っている深宇宙探査機は少ない。周波数が高ければ、同じ時間内に送ることができるデータ量を増やすことができる。そのようなKa帯での通信の実証のために「はやぶさ2」では二つのハイゲインアンテナを搭載したのである。

探査機の見目は「はやぶさ」に似ているが、中身的には「はやぶさ2」ではかなり改良している。「はやぶさ」では姿勢制御の装置が壊れたり、化学エンジンの燃料が漏れたり、イオンエンジンが劣化で故障したりした。これらは、すべて「はやぶさ2」では改良されたり搭載を工夫したりしている。たとえば、姿勢制御を行うリアクションホイールについては、「はやぶさ」では3台中2台が壊れてしまったわけであるが、「はやぶさ2」では異なる装置にした上で、4台搭載している。さらに「はやぶさ」の経験を踏まえて、リアクションホイールを使わずに温存するような運用上の工夫も行っている。

新しい装置としては、すでに述べた衝突装置(SCI)がある。衝突装置によって小惑星表面に人工クレーターを作る。その人工クレーターを調べることでリュウグウ表面の物理的性質を知ることができる。ただここで一つ問題が生じる。衝突装置は爆発することで2kgの銅の塊を秒速2 km/sで小惑星表面に当てるのであるが、衝突装置本体がバラバラになって破片が飛び散ってしまうのである。その破片が探査機に当たったら大変なので、探査機は衝突装置が爆発する前に小惑星の裏側に隠れることになる。探査機が隠れてしまうと、衝突装置から発射された銅の塊がリュウグウ表面に衝突する様子を見ることができない。そこで、探査機が隠れる前に小さなカメラである分離カメラ(DCAM 3)を切り離して、このカメラで衝突の様子を撮影することにした。この分離カメラは、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」で開発したものを改良したものである。

人工クレーターを作るもう一つの理由は、地下物質を露出させることである。可能ならばその地下物

質も採取したい。そのためには、ピンポイントタッチダウン(特定の場所にピタリと着陸すること)を行う必要がある可能性がある。そのために、タッチダウンの時の目印のターゲットマーカを5個搭載することにした。「はやぶさ」ではターゲットマーカは3個だったので、2個増やしたことになる。ターゲットマーカを降ろした地点がタッチダウン目的地からずれたら、別のターゲットマーカを降ろして、目的地に近づいていこうという作戦である。そのために、より多くのターゲットマーカを搭載したわけである。

また、「はやぶさ」では小型のローバであるミネルバを、イトカワ表面に降ろすことに失敗してしまった。今回は是非とも成功させたいので、ミネルバ2として3機搭載している(MINERVA-II-1が2機、MINERVA-II-2が1機)。さらに、すでに述べたランダのMASCOTも搭載しているので、合計4機のローバ・ランダを搭載している。これらによって、リュウグウ表面でデータを取得できる。

もちろん、探査機にもリュウグウを観測する装置が付いている。光学航法カメラ(ONC)、レーザ高度計(LIDAR)、近赤外分光計(NIRS3)、そして中間赤外カメラ(TIR)である。これらも「はやぶさ」のものを改良したり、新規のものとなったりしている。

以上の搭載機器の他に、サンプルを取得するためのサンプラーホーンやサンプルを格納するケース、サンプルを地球に戻すための再突入カプセルがある。これらも、「はやぶさ」に搭載したものを改良している。

「はやぶさ」では、いろいろな技術的なトラブルがあったが、そのトラブルをすべて検証して、「はやぶさ2」としてはより確実で、さらにより革新的な探査が行えるようにした。やはり、挑戦してみて失敗したことは決して無駄にはならない。

3 ミッションの経緯

ここでは、打ち上げからリュウグウ出発までに行ったことについて、時間を追って説明する。軌道の概念図を図2に示す。

3.1 打ち上げからリュウグウ到着まで

「はやぶさ2」は、2011年5月にプロジェクトチームが発足した後、本格的に探査機の制作が始まり、2014年12月3日に打ち上げられた。この規模の探査機を3年半ほどで完成させ打ち上げてしまう

というのは驚異的に早い。これだけのことができたのは、プロジェクトになる前の準備でかなり進めていたことによる。

「はやぶさ2」は、打ち上げられてからちょうど1年後の2015年12月3日に地球に戻ってきて、地球スイングバイを行った。そして、さらに約2年半に渡って宇宙空間を飛行し、2018年6月27日に目的地である小惑星リュウグウに到着した。合計すると約3年半かかってリュウグウに到着したわけである。

この3年半の間も、いろいろな技術的挑戦を行っていた。地球スイングバイやイオンエンジンの長期運転は「はやぶさ」でも行ったことであるが、「ソーラーセイルモード」、「アップリンク・トランスファー」、「DDOR」、「Ka帯通信」など、「はやぶさ」では部分的にしか行わなかったか全く行っていなかったことに挑戦したのである。ここでは詳細は省略して簡単に説明することにする。まず、「ソーラーセイルモード」とは、太陽輻射圧を使って探査機の姿勢を制御することで、これは、「はやぶさ」が地球に帰還するときの最後の運用で行ったことを積極的に取り入れた運用である。前の章でリアクションホイールの温存と書いたことに対応する。「アップリンク・トランスファー」は、一つの地上局から別の地上局に運用を切り替えるときに、電波が途切れることなく切り替えるテクニックで、日本の探査機としては初めての試みである。「DDOR」とは、Delta Differential One-way Range というもので、二つの

地上局で同時に探査機からの電波を受けることで、探査機の軌道を正確に推定する手法である。また、「Ka帯通信」はすでに述べたように、より大量のデータを送る試みで、深宇宙探査機としては日本では初めてである。

そしてリュウグウ到着の3週間ほど前からは、光学電波複合航法（オプティカルナビゲーション）によってリュウグウへと接近した。これは「はやぶさ」でも行った方法であるが、「はやぶさ」の経験を踏まえてより洗練されたやり方で行われ、地球から約3億km離れたところで直径1kmのリュウグウに予定通り到着することができた。

3.2 リモートセンシング観測

リュウグウに到着するすこし前、その形が予想外であることに驚かされた。小さい小惑星の場合、形は不規則であるのが当たり前であった。これまで探査機が見た小惑星は、ケレスやベスタのように大きなものは球形であるが他はすべて不規則な形をしていた。ところが、見えてきたリュウグウは、そろばんの珠のような幾何学的な形をしていたのである（図3）。英語では、このそろばんの珠のような形のことを spinning top と呼ぶ。回転するコマである。そこで、このような形を“コマ型”と呼んでいる。

2018年6月27日にリュウグウに到着してからは、リモートセンシング機器による観測が続いた。リモートセンシング機器とは、すでに述べた ONC、LIDAR、NIRS3、TIR である。最初は、ホームポジ

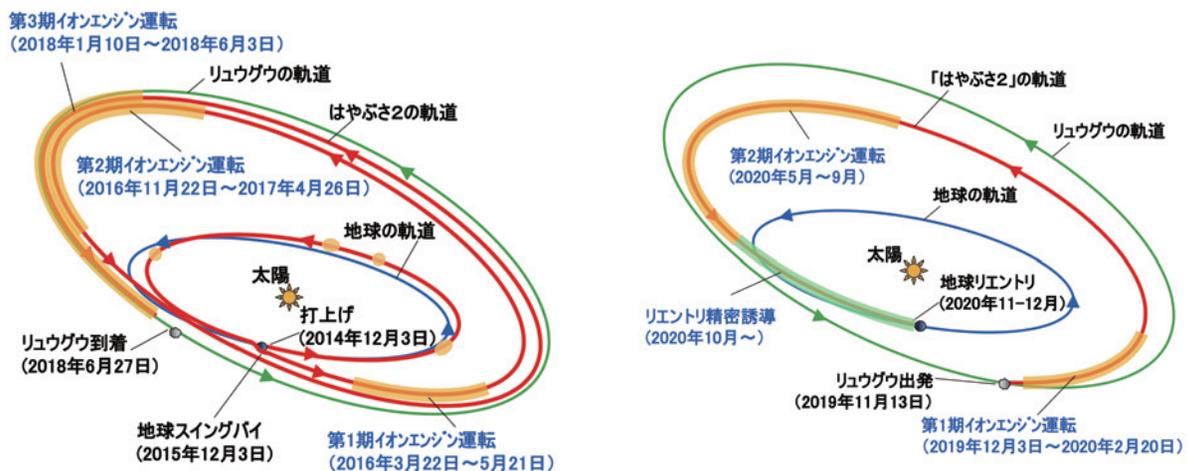


図2 はやぶさ2探査機の軌道の概念図

左が打ち上げからリュウグウ到着まで、右がリュウグウ出発から地球帰還までを示す。オレンジ色で太く描いた部分は、イオンエンジン運転のおおよその期間を示す。(©JAXA)



図3 「はやぶさ2」が観測した小惑星リュウグウ

左)2018年6月30日に高度20kmから撮影したもの。中)2018年7月20日に高度6kmから撮影したもの。右)2018年10月15日に高度42mから撮影したもの。(©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

ションと呼ばれるリュウグウの赤道上空の高度20kmからの観測を行っていたが、徐々に高度を下げた観測を行ったり、南北・東西方向に少し移動した観測も行い、リュウグウ全面を詳しく観測した。これは、もちろんリュウグウの物理的な性質を知るためである。実際、多くのデータが取得され、現在(2020年春)、多くの論文が発表されている。(注:探査機は、通常はリュウグウから20km離れたところに滞在しているのので、この場所をホームポジションと呼んでいる。)

リモートセンシング観測のもう一つ重要な目的は着地(タッチダウン)する場所を決めることである。しかし、到着したときにすぐに分かったことであるが、リュウグウには平らで広い場所が全くない(図3)。安全に着地できる場所がないのである。これは、想定外であった。イトカワは表面がデコボコだらけで最初に見たときには非常に驚いたわけであるが、それでも幅50mで長さは200m以上にわたる平らな領域があった。大きさがたった500m程度の天体にこのような平らな領域があったわけであるから、リュウグウにもどこかには平らな領域があるだろう、そう思っていたわけであるが、見事に予想は外れたのである。高度を下げて表面に近づいた観測でも、ある程度広い平らな場所というのは全く見つからなかった(図3)。このことで、タッチダウンが非常に難しいものになったのである。

最初に述べたように、「はやぶさ」では小惑星がクレーターで覆われているという既成概念を打ち砕いたが、「はやぶさ2」では、小惑星は大きいものを除いて形が不規則であるということや、広い平らな場

所があるはずだという既成概念を打ち砕いたことになる。やはり、「初めて」の天体に行くとなんが起るかかわからない。このような天体に行くミッションは、何が起っても対応できるように柔軟なものしておく必要があるのである。

3.3 ローバ・ランダによる観測

3ヶ月弱の観測で、とりあえずリュウグウについていろいろなデータが取得できたので、小惑星での最初の大きな技術的挑戦として小型のローバであるMINERVA-II-1をリュウグウ表面に降ろすことにした。2018年9月21日、探査機は高度約55mまで降下し、2機のMINERVA-II-1を分離した。「はやぶさ」では搭載していたミネルバをイトカワ表面に降ろすことに失敗してしまったので、そのリベンジである。(注:正式な表記は、MINERVA-II1のように二つ目のハイフンは入れないのであるが、ここでは分かりやすいようにMINERVA-II-1と表記することにする。)

2機のMINERVA-II-1は無事にリュウグウ表面に達し、写真を送ってきた。また、表面をジャンプしながら移動したことも確認できた。小型のローバを小惑星上でジャンプしながら移動させるという13年前の夢が叶ったのである。2機のMINERVA-II-1から送られてきた画像を見ると、リュウグウ表面はザラザラした表面の岩で覆われていた。砂のようなものは見えない(図4)。やはり、リュウグウ表面はデコボコだらけなのである。

2018年10月3日には、小型の着陸機であるMASCOTをリュウグウ表面に降ろす運用を行った。すでに述べたように、MASCOTはドイツ・フランス

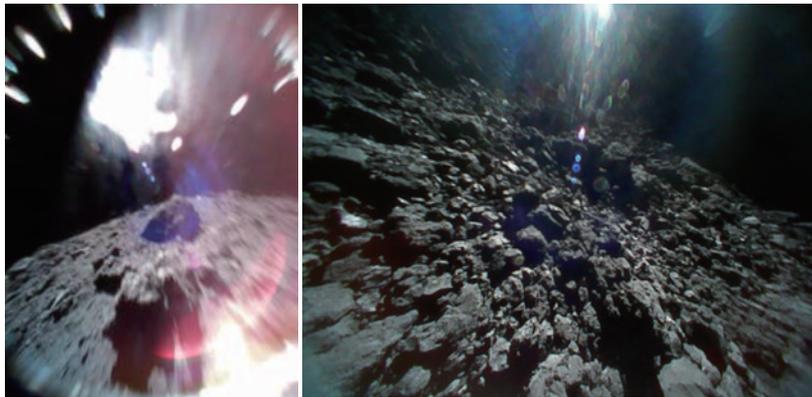


図4 MINERVA-II-1 が撮影した小惑星リュウグウの表面
左は表面付近を移動中に、また右は表面に着陸して撮影したもの。2018年9月22日(左)、23日(右)に撮影。左の画像で白く見えるものは太陽がぶれて写っているものである。
(©JAXA)



図5 MASCOT が撮影した小惑星リュウグウの表面
2018年10月3日撮影。
(©MASCOT/DLR/JAXA)

が製作したものであり、国際協力のミッションである。失敗すると国際的な問題にもなるので、MINERVA-II-1 が成功したからと言って、全く気は抜けない。探査機は、MINERVA-II-1 分離のときとほぼ同じ高度 50m 付近まで降下し、MASCOT を分離した。MINERVA-II-1 は太陽電池で電力を得るが、MASCOT はバッテリーである。そのバッテリーは設計では 16 時間しかもたない。この 16 時間に確実にミッションを行って、データを探査機に送らないといけない。MASCOT から確実にデータを受信するために、分離後探査機は高度 3 km 付近にしばらく滞在した。MASCOT の方は順調に観測が進み、実際には 17 時間ほど動作し続け、リュウグウ表面でのデータ取得に成功した (図 5)³⁾。

3.4 第 1 回タッチダウン

MINERVA-II-1、MASCOT と運用が成功したので、いよいよタッチダウンである。予定では、MASCOT 運用に続いて 2018 年 10 月に 1 回目のタッチダウンを行う予定であったが、リュウグウの表面がデコボコすぎて広い平らな場所が無かったため、タッチダウンは延期し、2018 年 10 月にはターゲットマーカを降ろすことのみ行った。ターゲットマーカは、探査機がタッチダウンするときの人工的な目印にするもので、したがって着地点付近に降ろす必要がある。

2018 年 10 月 25 日、高度 12m まで探査機を降ろして、ターゲットマーカを分離した。岩が少ない直径 20m の領域にターゲットマーカを降ろすつもりであったが、実際にはその領域から 5 m ほどずれた

ところにターゲットマーカは着地した。その後、この状況を踏まえてどのようにタッチダウンを行ったらよいか、しばらく検討することにしたのである。

そして、2019 年 2 月 22 日にタッチダウンを行うことになった。タッチダウンの場所は、上記の直径 20m の領域ではなく、ターゲットマーカのすぐ近くの直径 6m の平らな場所とした。ターゲットマーカに近い方が、正確な着地ができるという解析ができたからである。これは、ピンポイントタッチダウンである。当初の計画では、幅が 100m くらいの平らな場所があると想定しており、最初のタッチダウンは、ターゲットマーカを切り離してそのまま追尾して着地するというものであった。しかし、この手法は着地点の誤差が大きくなるので使えない。前の章で述べたように、事前にピンポイントタッチダウンという別のやり方も検討していた。これは人工クレーターを作ったときに、そこにタッチダウンするためであったのであるが、このやり方にさらに検討を加えたピンポイントタッチダウンを最初から行うことになったのである。タッチダウン地点の選定の経緯を図 6 に示す。

タッチダウンは、非常に緊張した運用であった。実際、高度 20km のホームポジションから降下を開始しようとしたところ、探査機が認識している位置情報が実際と異なっていることがわかり、急遽、降下を中止した。すぐに検討した結果、5 時間遅れで降下しても降下のスピードを上げることで当初の予定に間に合うということになり、タッチダウン運用は続行された。そして、タッチダウンは無事実行することができた。「はやぶさ」のときには、1 回目の

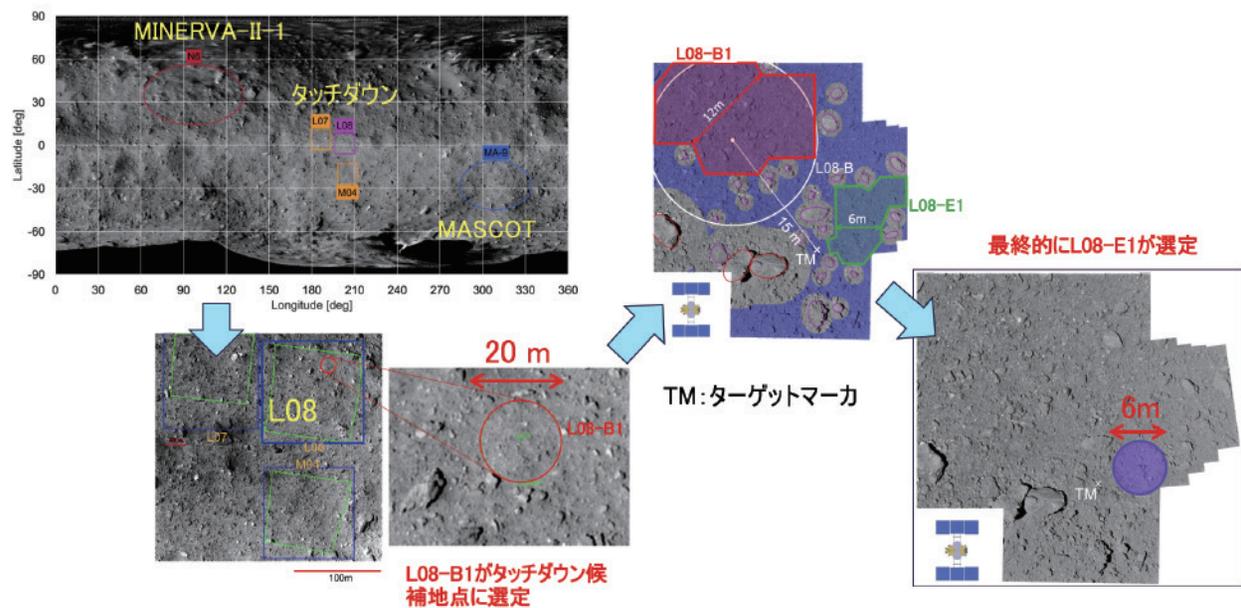


図6 着地点選定

2018年8月に、1回目のタッチダウン地点としてはL08(バックアップでL07、M04)、MINERVA-II-1についてはN6、MASCOTについてはMA-9を選んだ(左上の図)。L08地点を詳しく調べていくと、直径20mの円の領域が比較的平らであることがわかり、この地点にターゲットマーカ(TM)を降ろそうとしたが、ターゲットマーカはこの円から5mほど外に着地した。最終的には、ターゲットマーカの近くのL08-E1の領域の直径6mの円内に着地することに決まった(右下の図)。(背景の画像のクレジット: ©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

タッチダウンは不時着してしまっただけで失敗、2回目はタッチダウンは成功したのだが表面物質を採取するために発射する弾丸を打つことができなかった。今回は、弾丸も発射されたことが確認されたので、表面物質も十分な量が採取できているはずである。再び、「はやぶさ」でできなかったことをクリアした。

「はやぶさ2」では、サンプラーホーンがタッチダウンする様子を撮影するために、CAM-Hという小型モニターカメラも搭載していた。CAM-Hは、一般の方々からの寄付金によって搭載されたものである。このカメラが撮影したタッチダウンの瞬間の映像は、圧巻である。非常に多くの小石が探査機の上昇とともに舞い上がっていた。探査機が破損しないかと心配になるくらいの量であった。実際、探査機は破損こそしなかったが、底面に付いているカメラなどの機器に塵(ダスト)が付いて、少し曇ってしまった。このダストの影響については、2回目のタッチダウンに向けての検討事項となった。

3.5 人工クレーター生成

次は、「はやぶさ」では行っていなかったことである人工クレーターを作ることに挑戦した。小惑星に

人工クレーターを作るのは、世界初の挑戦である。

そのために、すでに述べた衝突装置(SCI)と分離カメラ(DCAM 3)を使う。探査機は、リュウグウ表面には500mくらいまでしか接近しないので、タッチダウンほど緊張はしないのであるが、運用自体は非常に複雑であり、衝突装置の爆発という危険は伴うものである。やはり運用は緊迫したものとなる。

衝突装置の運用は2019年4月5日に行われた。結果的には、予定通りに衝突装置が分離され、40分後に爆発し、2kgの銅の塊をリュウグウ表面に衝突させることに成功した。その衝突の様子を分離カメラで撮影することにも成功したのである(図7)。リュウグウ表面からイジェクタが舞い上がる様子をはっきりと捉えることができた。3週間ほど後に探査機が衝突地点に戻って観測したところ、15mほどの大きさのクレーターが確認できた。のちに正確に計測したところ、周辺の水平面より下に凹んだ領域の直径が約14.5m、リム(クレーターの縁で盛り上がった部分)の直径が約17.6m、水平面からピットと呼ばれる凹みの底までの深さが約2.3m、リム頂上からの深さでは約2.7mであった(図8)。事前の



図7 リュウグウ表面から噴出するイジェクタ

衝突から192秒後のリュウグウ表面の様子。右画像は左画像の拡大図であり、スケールは25mを示す。(©Arakawa et al., Science 2020)⁴⁾

想定では、せいぜい直径が3m、深さは50cm程度、あるいはさらに小さくてクレーターがすぐに判別できないのではないかという心配もあったほどであったのだが、全く違った結果となった。

人工クレーターが想定よりもかなり大きなものであったということは、我々が小惑星について無知であったことの証拠である。やはり、やってみないと分からない。このクレーター生成実験により、リュウグウ表面の物理特性を解明できた。

3.6 第2回タッチダウン

さて、2回目のタッチダウンをどうするか。衝突装置で人工クレーターを作った最も重要な理由は、地下物質を露出させて、それを採取するということであるので、是非とも2回目のタッチダウンを行いたい。しかし、タッチダウンは大きなリスクを伴う。1回目のタッチダウンが成功しているだけに、2回目を行って探査機がクラッシュしてしまったら元も子もない…

これは非常に難しい判断ではあるが、プロジェクト内では、漠然とした不安を議論していたのではなく、技術的にどこまでリスクがあるのかを詳細に検討していた。そのためには、まずはタッチダウンできる場所があるかである。人工クレーター内に着地できればよいが、これはリスクが大きい。クレーターの底が平らではないのである。そこでクレーターの周りを調べてみると、衝突装置運用の前後で色の変化が見られた。これは、クレーターから放出された物質が降り積もったためと考えられる。そのような場所で着地できそうな場所を探してみると、数カ所の候補地が見つかった。降下運用を行って詳

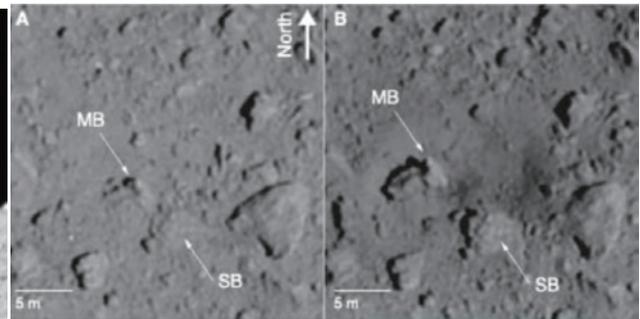


図8 生成された人工クレーター

左(A)が衝突前、右(B)が衝突後の写真である。衝突地点はMB(イイジマ岩 5m)とSB(オカモト岩)の間である。(©Arakawa et al., Science 2020)⁴⁾

しく調べた結果、人工クレーターの中心から20mほど離れた地点の、直径が7mほどの領域にタッチダウンできそうだということになった(図9)。

2019年5月30日に高度9m付近でターゲットマーカを分離したところ、この直径7mのタッチダウン目標地点内に降ろすことができた。これはより安全なタッチダウンにとってプラスとなる材料である。また、この領域周辺の岩の大きさ・高さなどを正確に推定し、誘導制御誤差をいろいろと考えて、タッチダウンにどのくらいリスクがあるのかを綿密に評価した。その結果、1回目のタッチダウンよりもリスクは少ないという結果になったのである。この判断には、1回目のタッチダウンによって探査機底面に接地されているカメラ等がダストで少し曇ってしまったというような探査機の機器の状況も考慮してある。また、数々の安全策も検討し、プロジェ

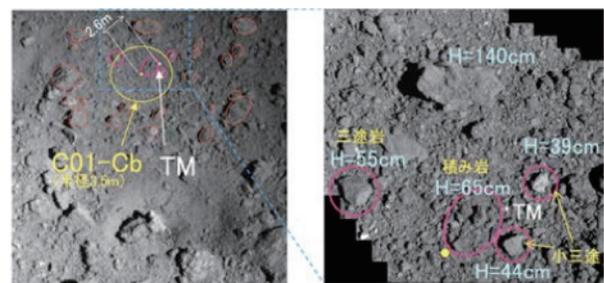


図9 第2回タッチダウン地点

人工クレーターから北の方に約20m離れたC01-Cbが第2回タッチダウンの地点である。ターゲットマーカ(TM)はこの範囲内に着地した。タッチダウン地点付近の岩を詳しく調べた(右図)。(©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

クトとしては2回目のタッチダウンをGO(実行)とした。

2回目のタッチダウンは、2019年7月11日に行われた。1回目ときのようなトラブルもなく、運用は非常に順調に進み、予定通りにタッチダウンが実行された。今回も、CAM-Hによる撮影が成功したが、やはり沢山の小石が舞い上がっていた。なお、タッチダウンの精度であるが、1回目ときは誤差が1mであったが、2回目は誤差60cmでのタッチダウンを実現できた(図10)。地球から3億kmも離れた場所で行っているミッションとしては、驚異的な精度と言えるであろう。

3.7 小惑星を周回する人工衛星

ここまでの運用で、やるべきことはすべて終了し、すべて成功した。「はやぶさ」ではいろいろなトラブルがあったので、このような成功は夢のようではあるが、まさに「はやぶさ」でのトラブルの経験が「はやぶさ2」ではいかされているのである。「はやぶさ」の経験の賜が「はやぶさ2」の成功であると言っても過言ではない。

さて、最後に一つ残っているものがある。それは三つ目の小型ローバ MINERVA-II-2 である。ただし、このローバには問題があることが発覚していた。このMINERVA-II-2は東北大学を中心とした大学コンソーシアムで製作されたものであるが、搭載されているデータ処理系の動作が不安定であることが分かったのである。ローバとの通信はできるのだが、仮に予定通りにリュウグウ表面に降ろしても、データが取得できない可能性が高まった。そこ

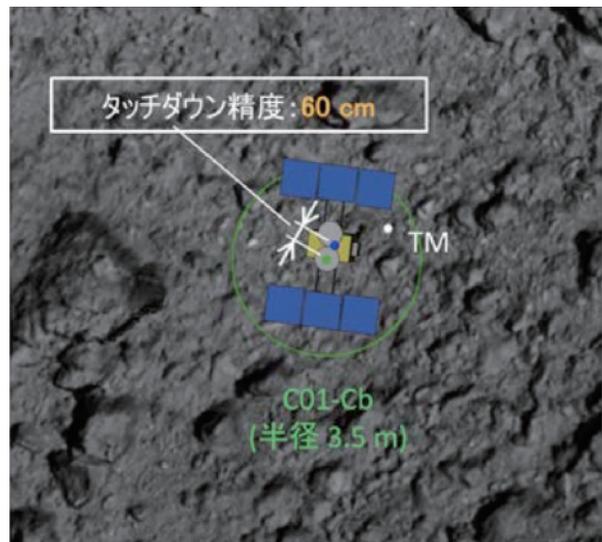


図10 第2回タッチダウンの精度
(©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

で、せっかくのローバを無駄にはしたくないので、予定を変更してより高い高度で分離し、リュウグウの周りを周回させる人工衛星にしてみたらどうか、という案が出された。人工衛星となったローバの動きを観測すれば、リュウグウの重力場を詳細に推定することができる可能性があるのである。これは、事前には考えられていなかった運用である。

ただ、いきなり人工衛星軌道にMINERVA-II-2を分離するのはリスクがある。そこで、まだ残っているターゲットマーカをリュウグウ周回軌道に乗せてみることを先に行うことにした。ターゲットマーカは5個搭載してあるが、2個しか使っていない。2019年9月17日、探査機は高度1km付近まで降

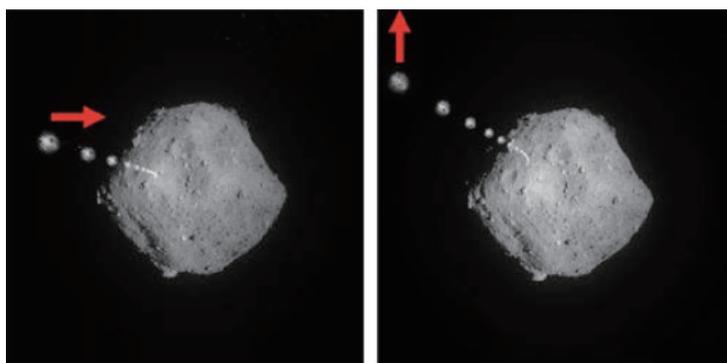


図11 ターゲットマーカの分離

2019年9月17日に高度1km付近から赤道周回(左)と極周回(右)にターゲットマーカを分離した。探査機が上昇しながら撮影されたものであるため、ターゲットマーカが小さくなっていくように見えている。(©JAXA, 千葉工大, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 明治大, 会津大, 産総研)



図12 MINERVA-II-2の分離

2019年10月3日に分離されたMINERVA-II-2が遠ざかっていく様子。(©JAXA, 東北大・山形大・大阪大・東京電機大・東京理科大・九工大・千葉工大, 産総研, 立教大, 東京大, 高知大, 名古屋大, 明治大, 会津大)

下し、2個のターゲットマーカをそれぞれ赤道周回と極周回の軌道に投入した(図11)。これら二つのターゲットマーカは何回かリュウグウの周りを回った後、表面に着地したことが確認された。

ターゲットマーカを衛星軌道に投入することに成功したので、2019年10月3日、探査機は再び高度1km付近まで降下をして、今度はMINERVA-II-2をリュウグウ周回軌道に投入した(図12)。MINERVA-II-2についても衛星軌道投入は成功し、周回するMINERVA-II-2が撮影できただけでなく、通信も確立し、測距信号も受信することができた。これは当初予定されていなかったことであるが、小惑星の回りに3個の人工物体を周回させたことも世界初のことである。

4 その後の展開

リュウグウでのすべての運用を追えた「はやぶさ2」は、2019年11月13日にリュウグウから出発し、地球に向かう軌道に乗った。その後、イオンエンジンの試験運転を経て、12月3日からは帰還フェーズにおける第1期イオンエンジン運転を開始し、2020年2月20日に運転が終了した。このイオンエンジンの運用で予定通りに軌道が変更された。

今後は、第2期イオンエンジン運転を2020年の5月から9月頃にかけて行い、その後10月からはリエントリー精密誘導にはいる。そして、2020年年末

には地球に帰還し、再突入カプセルをオーストラリアのウーメラ砂漠に着地させる予定である。帰還軌道の概念図は図2に示した。最後に残った作業が、この地球帰還である。地球帰還は「はやぶさ」では成功しているが、決して楽勝であるわけではない。最後の踏ん張りとなる。

打ち上げから地球帰還までのミッションの流れを図13に示す。多くの運用はリュウグウ滞在期間に行っているわけであるが、すべて成功したことは技術の確実な進展を実証したことになる。

一方で、リュウグウ滞在中に得たデータの解析もどんどん進んでいる。論文も、サイエンス誌^{3), 4), 5), 6), 7)}やネイチャー誌^{8), 9)}のような超一流の論文誌にもすでに何編か掲載されているし、その他の論文誌にも続々と投稿され掲載され始めている。リュウグウの科学については、もう少しデータ解析が進んでくると全貌が分かることになると思われるが、現時点で分かってきた主要なことを簡単に挙げてみると次のようになる。

まず、リュウグウの形がコマ型である理由であるが、これは過去においてリュウグウの自転周期が3.5時間ほどと短かったとすると遠心力によって形がコマ型になるということが説明できることが分かった⁵⁾。また、リュウグウの起源としては、小惑星帯の中で太陽に近い側にある小惑星の族(ファミリー)の中に可能性が高いものが特定された⁶⁾。

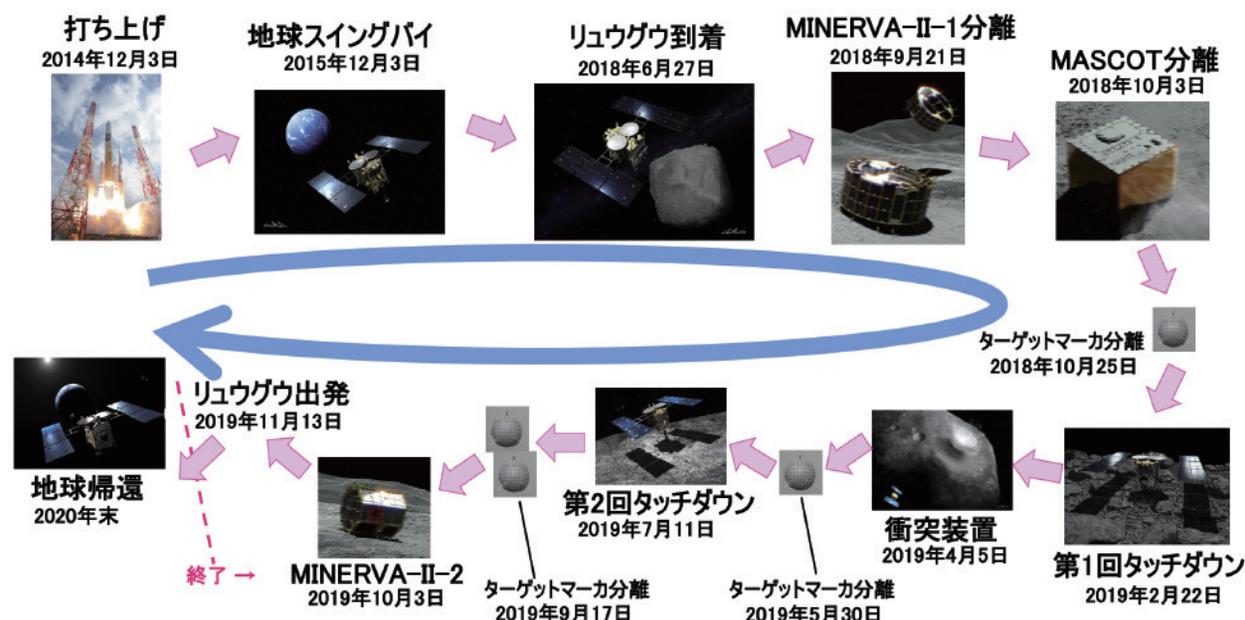


図13 「はやぶさ2」ミッションの流れ

2020年春の段階で、地球帰還を除いてすべてが終了した。
(©JAXA、探査機を含むイラストは池下章裕氏による)

リュウグウ表面の物質については、水を含んだ物質であること⁷⁾、かなりもろいものであることが、人工クレーターの実験⁴⁾や表面の熱的性質^{8), 9)}から分かってきた。今後も、さらにいろいろな事実が判明してくると思われる。

そして、もちろん、再突入カプセルが地球に戻ってきてその中にリュウグウ表面物質（サンプル）があれば、さらに新しい事実が判明することだろう。はたして、リュウグウの物質の中に有機物はあるのか、もしあったとしたらどのような有機物なのか、地球生命と関係しているのか、地球生命の起源が分かるのか・・・、サンプルから何が分かるか、期待は膨らんでくる。

もう1つ「はやぶさ」では行えなかったこととして、延長ミッションがある。「はやぶさ」の場合には、“満身創痍”の状態に戻ってきたので、再突入カプセルを予定通りの軌道に分離した後、自分自身もその後をついて行く形で大気圏に突入して燃え尽きてしまった。しかし、当初の予定では、カプセル分離後に地球に衝突しないように加速をすることになっていた。「はやぶさ2」は、リュウグウでの運用が終わって、特に探査機に今後の運用に差し障るような異常はない。地球に戻ってきたら、再突入カプセルだけを切り離して、本体は地球には衝突しないように制御する。

その後、どうするか。現時点ではまだ決まっていない。いろいろ検討中なのであるが、可能ならばどこか別の小惑星に行ってみたい。それも、脇を通過するだけのフライバイではなくて、到着するランデブーを行いたいところである。あるいは、金星などの惑星をフライバイするか、さらにはどこまで太陽から離れることができるのか、とにかく遠方まで行ってみるとか、いろいろ可能性は考えられる。今後、探査機の状況を見ながら検討がなされていくことになる。「はやぶさ2」の挑戦は、まだまだ続くことになるかもしれない。

5 さいごに

このように「はやぶさ」を引き継いだ「はやぶさ2」というミッションは、「はやぶさ」と同様に挑戦のミッションである。現時点（2020年春）までは、すべて成功してきているが、繰り返しになるがこれは「はやぶさ」の経験のお陰である。このような挑戦的なミッションに関わられたことは非常に幸せだと思っている。同時に、最近はなかなか挑戦的なミッ



図 14 小惑星の可能性

ションが行いにくい雰囲気になっているのではないかと危惧する。

小惑星に限ってもまだまだ広大な未知の世界が広がっている。現時点で発見されて軌道が推定された小惑星は95万個にもものぼる。小惑星は太陽系の起源や生命の起源を探る鍵を持っているかもしれないし、地球に衝突してきて大きな災害をもたらすかもしれない。逆に、未来に資源として役立つかもしれないし、人類が出かけて行っているかもしれない。いろいろな可能性を持つ小惑星について（図14）、今後も、次々と新しい挑戦が行われていることを期待したい。

謝辞

ここで紹介しました「はやぶさ2」ミッションは、多くのプロジェクトメンバーの努力と工夫と忍耐でここまで成功してきました。もちろん、「はやぶさ」を初めとして過去の多くの技術者・科学者による経験や成果の上に築き上げられたものでもあります。さらに、プロジェクト外の方々からも多大なご支援、応援をいただいています。すべての皆さまに感謝いたします。

参考文献

- 1) Tsuda, Y., et al., Acta Astronautica, 91, pp.356-362, 2013.
- 2) Yoshikawa, M., et al., Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan Vol. 12, No. ists29, pp. Tk_29-Tk_33, 2014.
- 3) Jaumann, R., et al., Science, 365, pp.817-820, 2019.
- 4) Arakawa, M., et al., Science, 368, pp.67-71, 2020.
- 5) Watanabe, S., et al., Science, 364, pp.268-272, 2019.
- 6) Sugita, S., et al., Science, 364, eaaw0422, 2019.
- 7) Kitazato, K., et al., Science, 364, pp.272-275, 2019.
- 8) Grott, M., et al., Nature Astronomy, 3, pp. 971-976, 2019.
- 9) Okada, T., et al., Nature, 579, pp.518-522, 2020.

(2020年4月29日受付、2020年5月5日受理)