

「はやぶさ2」打ち上げ成功

吉川 真

JAXA はやぶさ2 ミッションマネージャ

1 打ち上げドキュメント

2014年12月3日。ついに、「はやぶさ2」（図1）が旅立ちました（図2）。ロケットの打ち上げは何度経験しても心配ですが、H-IIA ロケットが上昇していくのをネット越しに見てまずはほっとしました。もちろん、打ち上げ成功と言うためには、探査機が

ロケットから分離されて予定通りの軌道に投入され、さらに、きちんと動作していることを確認する必要があります。結果的にはすべて問題なく進行して、「はやぶさ2」の打ち上げは成功しました。いよいよ、6年に渡る宇宙の旅の始まりです。

最初に設定された打ち上げ

日は2014年11月30日でした。しかし、その2日前の11月28日、打ち上げ時間帯に射場付近に規定以上の氷結層を含む雲の発生が予想されるということで、打ち上げは延期になってしまいました。氷結層がある中をロケットが飛行すると静電気による悪影響が心配されるためです。翌日、打ち上



図1 「はやぶさ2」探査機
(種子島宇宙センターにて)



図2 H-IIA ロケットによる「はやぶさ2」の打ち上げ
(2014年12月3日)

げは12月1日に行うと発表されました。しかし、11月30日の天候判断で強風が予想されるということになり、再度延期されて12月3日に打ち上げが設定されたのです。

11月30日は日曜日でしたから、現地の種子島には非常に多くの人が打ち上げを見に訪れたようですし、全国各地で打ち上げの様子を見るパブリックビューイングが企画されていました。予定通りに打ち上がらなくて、多くの人たちをがっかりさせてしまい申し訳ありませんでしたが、天気ばかりは制御できませんので仕方ありません。

打ち上げ当日の12月3日。JAXA宇宙科学研究所がある相模原は、快晴で青い空が広がっていました。当日朝の情報によると種子島の方もまずまずの天気ようです。今日こそは打ち上がる（＝打ち上がって欲しい）と思いながら、朝、自宅を出ました。私が担当している軌道決定は、打ち上げ直前にはあまり作業はありません。使う計算機がきちんと動いていることやデータ通信が問題ないことを確認する程度で済みます。ただし、NASA/JPLが持っている追跡局DSN（ディープ・スペース・ネットワーク）も使って探査機の追跡を行いますから、海外との通信やDSNの準備状況の確認は進められていました。こちら問題なしです。

13時22分04秒（日本標準

時）。予定通りにH-IIA ロケットは打ち上げられました。軌道決定グループは、打ち上げのときにはいつもJAXA相模原キャンパスの軌道決定部屋に集まって作業をしています。射場でもなく、また相模原キャンパスの衛星管制室でもありません。管制室の音声は届くようにしてありますが、射場の様子は分かりません。それで、一般の人も見ているネット中継で打ち上げの様子を見守っていました。ネット中継では、配信される画像が実際よりも数秒から数十秒遅れます。管制室からの音声で打ち上げとなった時刻から少し遅れて、パソコン画面上のロケットが上昇していきました。中継を見ている限り打ち上げは順調そうで、まずはほっとしました。

普通ならば打ち上げ後まもなく探査機がロケットから分離されることになりますが、今回はロケットがほぼ地球を一周してから分離されます。これは、すぐに探査機を分離してしまうと分離直後に地上局と通信ができないためです。軌道決定グループは、探査機が分離されるまでは出番はありません。それで、軌道決定部屋から抜け出して相模原キャンパスで行われていたパブリックビューイングの様子を見に行きました。平日であったためだと思いますが、思っていたよりもこじんまりと行われていました。ただ、皆さんの

熱気は伝わってきました。途中、何人かのマスコミの記者さんに捕まって質問に答えたりして、再び、軌道決定部屋に戻りました。

打ち上げ後1時間47分21秒後。「はやぶさ2」はロケットから無事に分離しました。いよいよ軌道決定グループの出番です。ロケット側から送られてきたデータを変換して、プロジェクト側やJPLに送ったり、追跡のためのアンテナ予報値を作成して送ったりと、作業が続きます。事前に十分な練習やりハーサルを行っていたので、問題なく作業は進みました。すると、DSNのアンテナで探査機からの電波を受けたという連絡が入ってきました。これで更に安心です。まず、DSNのゴールドストーンとキャンベラ局での追跡が始まったのです。その後はJPLとやり取りをしながら「はやぶさ2」の軌道を正確に推定していき、日本側の内之浦での追跡にバトンタッチ。これで完全に安心です。

その後、探査機の操作としてはサンプリング装置のホーンの伸展をしてその様子を小型モニタカメラで撮影したり、イオンエンジンの方向を制御するジンバルを保持していたロンチロックを解除したりしました。また、姿勢制御や精密軌道決定も問題なく行うことができることが確認されました。それで、12月5日、クリティカル運用が無事に終わっ

たことが宣言されたのです。

長かった最初の3日間も無事に終わって、その後の「はやぶさ2」の運用も順調に進んでいます。そして1年後の2015年12月の地球スイングバイを目指すことになります。

2006年に最初の提案をしてから8年が経ちました。ついに、新しい挑戦がスタートしたわけです。非常に感慨深のですが、でも、感慨にふけている時間はありません。まだ、最初の関門をクリアしただけです。これからの6年間、気を引き締めて運用にあたらなければなりません。

2 ミッションシナリオ

2014年12月3日に打ち上げられた「はやぶさ2」は、「はやぶさ」と同様に、最初の1年間は地球の軌道とほぼ同じ軌道で太陽の周りを一周します。この間に、イオンエンジンをはじめとしていろいろな機器のチェックを行います。そして、1年後の2015年12月に地球に戻ってきて地球スイングバイをします。ここから小惑星に向かうことになるのです。その後さらに太陽の周りを2周し、2018年の夏前に、小惑星1999 JU3に到着します(図3)。

「はやぶさ2」は、1999 JU3に約1年半滞在する予定です。「はやぶさ」のときには滞在時間が3ヶ月しかなく短すぎました。そのため、今回は1年半という滞在期間と

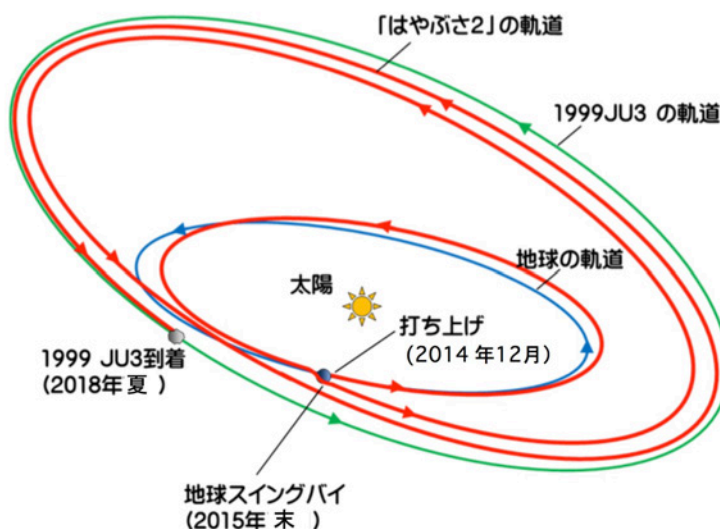


図3 打ち上げから小惑星到着までの軌道の模式図



図4 人工的に作ったクレーターにタッチダウンする「はやぶさ2」の想像図 (イラスト: 池下章裕氏)

したのです。小惑星に到着して、最後に衝突装置を使った「はやぶさ2」は、まずは小惑星を詳しく調べます。そのときには、光学カメラ、近赤外線分光計、中間赤外カメラ、レーザ高度計を使います。その後、小型の着陸機のMASCOTやローバのMINERVA-IIを降ろしたり、表面にタッチダウンして物質の採取を行ったりします。そして、最後に衝突装置を使って人工的なクレーターを作り、可能ならばそのクレーター付近に着陸して物質を採取します。このことで、地下にあった物質も採取することができるとのことです(図4)。

2019年末、「はやぶさ2」は小惑星を離れ、1年後の2020年末に地球に戻ってきます。東京オリンピックが終わっ

た後に、戻ってくるわけです。地球に到着する直前にカプセルを切り離し、カプセルはオーストラリアの砂漠に着地する予定です。

カプセルを切り離した後、探査機本体は大気圏に突入することは避けて、「はやぶさ2」は地球から遠ざかっていくことになります。「はやぶさ」は、地球に戻ってきたとき、探査機本体もカプセルの後をついていって地球大気中で燃えてしまいましたが、これは「はやぶさ」の化学エンジンが故障していたため地球衝突を避けることができなかったからです。カプセルを切り離した後の「はやぶさ2」をどうするかはまだ決まっていますが、可能ならば別の目的地に向かわせてみたいですね。目的地としては、別の小天体にフライバイさせるとか、太陽-地球系のラグランジュ点に向かうなど、いくつか候補があります。もちろん、「はやぶさ2」ミッションはここで終わりではなく、着地したカプセルを回収しその中から1999 JU3の物質を取り出し、そして分析が始まることになります。

3 探査機

「はやぶさ2」は、「はやぶさ」で経験したことを踏まえて、より確実なミッションができるような技術を目指しました。いろいろな不具合や失敗があり、それを乗り越え

たのが「はやぶさ」でしたが、「はやぶさ2」は、「はやぶさ」のようなドラマティックなミッションにはならないはずです。探査技術としては、確実性やロバスト性を追求することが「はやぶさ2」の目的であるからです。ただし、科学としては、C型の微小惑星についての世界初のサンプルリターンミッションで、有機物や水についての情報が得られることが期待されています。つまり、科学としてはドラマティックなミッションになることを期待しています。

「はやぶさ2」の探査機は、「はやぶさ」とほぼ同じ規模です。もともと「はやぶさ」のリベンジとしてスタートしたものであるので、大きな変更は想定していませんでした。ただし、「はやぶさ」を打ち上げたM-Vロケットが2006年の打ち上げを最後に廃止されてしまったので、打ち上げにはH-IIAロケットを使うことになりました。H-IIAロケットを使うのなら格段に大きくて重い探査機を打ち上げることができそうに思えるかもしれませんが、実際はそうではありません。H-IIAロケットは地球周回の人衛星を打ち上げ用として設計されたため惑星探査機を打ち上げるには効率があまりよくないということに加えて、探査機にいろいろな機器を搭載して重くしてしまうと、イオンエンジンによる軌道制御の能力を超え

てしまうのです。つまり、探査機を格段に大きくするためにはイオンエンジンの推力増強も含めた探査機の大幅な設計変更が必要となってしまう、より多くの費用や時間が必要となり打ち上げに間に合わないのです。最終的には、「はやぶさ2」は燃料込みの重さが約600kgとなり、510kgであった「はやぶさ」より少し重くなりました。これは、新たな装置やより確実にミッションを行うためのバックアップの装置を追加したためです。なお、探査機本体の大きさや形は、「はやぶさ」とほとんど同じです。では、「はやぶさ2」探査機について、その特徴をまとめてみましょう(図5、図6)。

「はやぶさ」と見た目で大きく異なる点は、探査機上面の高利得(ハイゲイン)アンテナです。「はやぶさ」では1つのパラボラアンテナでしたが、「はやぶさ2」では2つの平面アンテナとなっています。2つのアンテナがある理由は、「はやぶさ2」ではXバンドとKaバンドという2種類の電波を使って通信をするためです。探査機との通信は、普通はXバンドと呼ばれる8ギガヘルツ帯の周波数の電波を用います。Kaバンドは、32ギガヘルツ帯であり、周波数が高いとより高速な通信を行うことができるので、小惑星に到着して多くのデータを地球に送るときに使われるこ

とになります。なお、平面アンテナは、金星探査機「あかつき」にも使われていましたが、パラボラ型より軽くできるというメリットがあります。

探査機の下面も、「はやぶさ」とはかなり異なっています。下面中央にある円筒形の箱のようなものが「衝突装置」と呼ばれるもので、すでに述べたように小惑星の表面に小さなクレーターをつくるための装置です。もう一つ、探査機下面ですぐにわかる「はやぶさ」との違いは、ターゲットマーカです。探査機がサンプル採取するために小惑星表面に降下していくときの目印がターゲットマーカですが、「はやぶさ2」では5個搭載されています。「はやぶさ」のときが3個であったので2個増やしたわけですが、これは衝突装置によって作成したクレーターに正確にタッチダウンするためです。

次に、観測装置について紹介します。「はやぶさ2」が探査する小惑星はすでに述べたようにC型小惑星です。そのために、観測装置にも「はやぶさ」から変更が加えられました。観測装置としては、光学航法カメラ、レーザ高度計、近赤外分光計、中間赤外カメラがあります。この中で、小惑星を撮影する光学航法カメラは「はやぶさ」で搭載されたものと一部を除いてほぼ同じですが、他はかなり異なります。

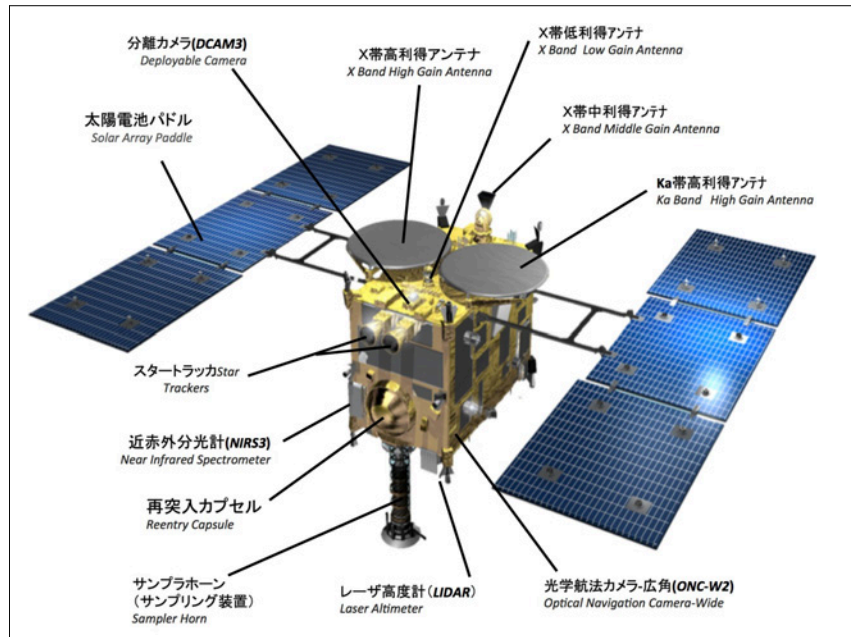


図5 探査機の外観（上方から見た図）

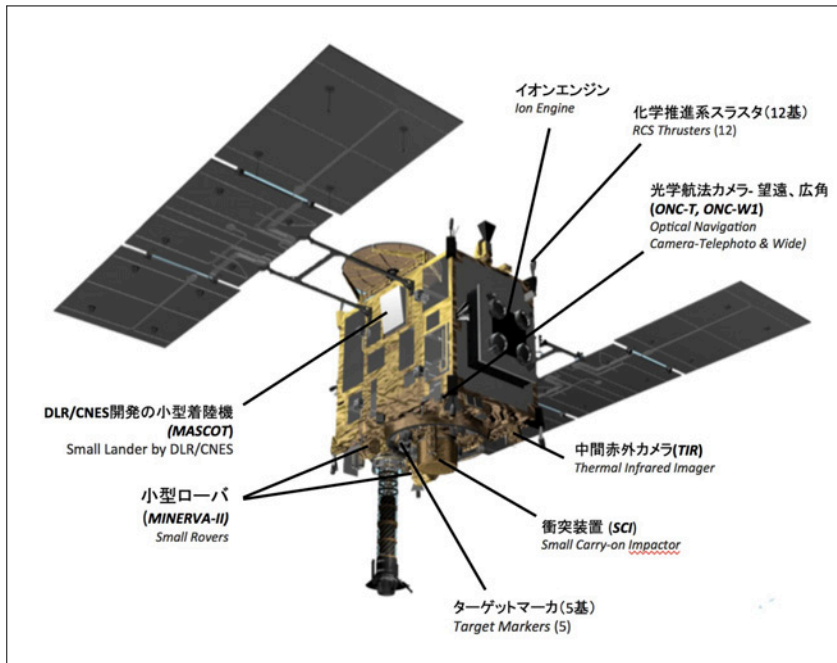


図6 探査機の外観（下方から見た図）

レーザ高度計は、探査機と小惑星表面との間の距離を正確に計る装置です。「はやぶさ」にも搭載されていましたが、「はやぶさ2」では「はやぶさ」と同じ装置は使えません。なぜならば、1999 JU3の光の反射率がイトカワとは異なるからです。レーザ高度

計はレーザ光を出してその反射を受信するので、小惑星表面の反射率の違いは重要です。1999 JU3はイトカワに比べて反射率が低い（＝黒っぽい）ので、低い反射率に対応できるレーザ高度計に改良されました。

近赤外線分光計は、「はや

ぶさ」にも搭載されていましたが、「はやぶさ2」では波長が3ミクロンの近赤外線が検知できるようにしました。波長3ミクロンの近赤外線を調べることで、水を含んだ鉱物の存在が分かります。水を含んだ鉱物には有機物も含まれる可能性が高いので、サンプルを採取するときに重要な情報となるわけです。

中間赤外カメラは「はやぶさ」には搭載されていなかったものです。こちらは、金星探査機「あかつき」に搭載されているカメラとほとんど同じもので、波長10ミクロン付近の赤外線の観測を行います。小惑星表面の温度分布を知るために使われます。（なお、「はやぶさ」に搭載されていた蛍光X線分光器は「はやぶさ2」では搭載されないことになりました。）

次に、小惑星の表面物質を採取するサンプル採取装置についてです。サンプルの採取方法は、基本的に「はやぶさ」のやり方を踏襲します。つまり、探査機にはサンプラホーンが表面に触った瞬間に弾丸が撃ち出され、砕かれた表面物質がサンプラホーンの中を上昇していき、サンプルの格納ケースに入るといったやり方です。格納ケースは3つの部屋に分かれているので、3回のタッチダウンによって採取されたサンプルを別々の部屋に格納することができます。

「はやぶさ」では2つの部屋

でしたので、ここも機能を強化したところです。

「はやぶさ」の場合、弾丸の撃ち出しができずに実際に採取されたサンプル量が少なくなっていました。「はやぶさ2」ではそのようなことがないように、慎重に運用を進めたいと思っています。なお、「はやぶさ2」のサンプラホーンでは、その先端部分が少し折り返されていて、そこに小惑星の表面物質が付着すれば、それを格納ケースに取り込むことができます。これは、サンプル採取のバックアップです。サンプルの格納ケースは、最後にはカプセルに収納され、カプセルが地球に戻ってくることになります。カプセルは基本的には「はやぶさ」のときと同じですが、いろいろ細かい工夫が追加されました。

これらの装置に加えて、「はやぶさ2」では、小型のローバや着陸機、さらには分

離カメラというものが搭載されています。「はやぶさ」にはミネルバという小さなローバが搭載されていましたが、残念ながら小惑星イトカワに着陸させることはできませんでした。「はやぶさ2」では、同様の小型ローバであるMINERVA-IIを搭載しています。MINERVA-IIには1と2があり、MINERVA-II-1はさらにAとBの2つに分かれるので、合計3台のMINERVA-IIが搭載されています。MINERVA-II-1はJAXAと会津大で製作され、MINERVA-II-2はMINERVA-IIコンソーシアム（東北大学が中心となり東京電機大学・大阪大学・山形大学・東京理科大学で構成）によって製作されました。

小型の着陸機はMASCOTと呼ばれるもので、ドイツ航空宇宙センター（DLR）が中心となってフランス国立宇宙研究センター（CNES）と共同で作成されました（図7）。質

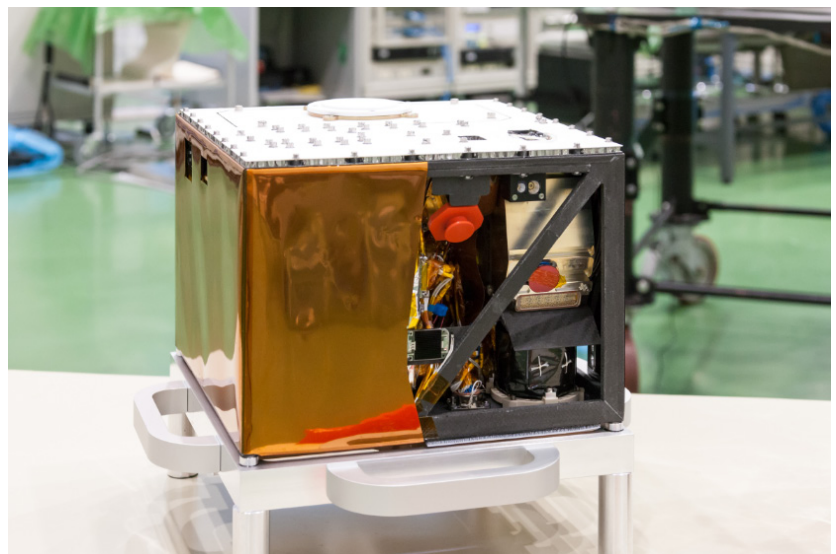


図7 MASCOT 開発試験用モデル

量は約 10kg で、約 30cm の大きさの箱形です。着陸機ですが、着陸した後で姿勢の向きを変えたり、1 回だけですがジャンプして別の場所に移動したりすることもできます。広角カメラ (CAM)、分光顕微鏡 (MicrOmega)、熱放射計 (MARA)、そして磁力計 (MAG) の 4 つの観測装置が搭載されており、小惑星表面での観測を行います。

そして分離カメラですが、衝突装置を使って小惑星の表面にクレーターを作るときには、安全のために探査機本体は小惑星の陰に隠れます。そうすると、衝突装置が爆発をしてクレーターができる様子を見ることができませんから、事前に小さなカメラを切り離しておきます。これが分離カメラなのです。分離カメラが撮影した映像はすぐに探査機に送られます。

以上のように「はやぶさ2」ではいろいろな工夫をしたり、新規の装置を搭載したりしています。これらに加えて、「はやぶさ」でトラブルがあった姿勢制御装置 (リアクションホイール)、化学推進系、イオンエンジンについては、それぞれ改良をしてあり、同じトラブルが起こらないようにしました。特に化学推進系については金星探査機「あかつき」のトラブルも考慮にいられた改良がなされています。この他、「はやぶさ」で生じた問題点についてはそれぞれ

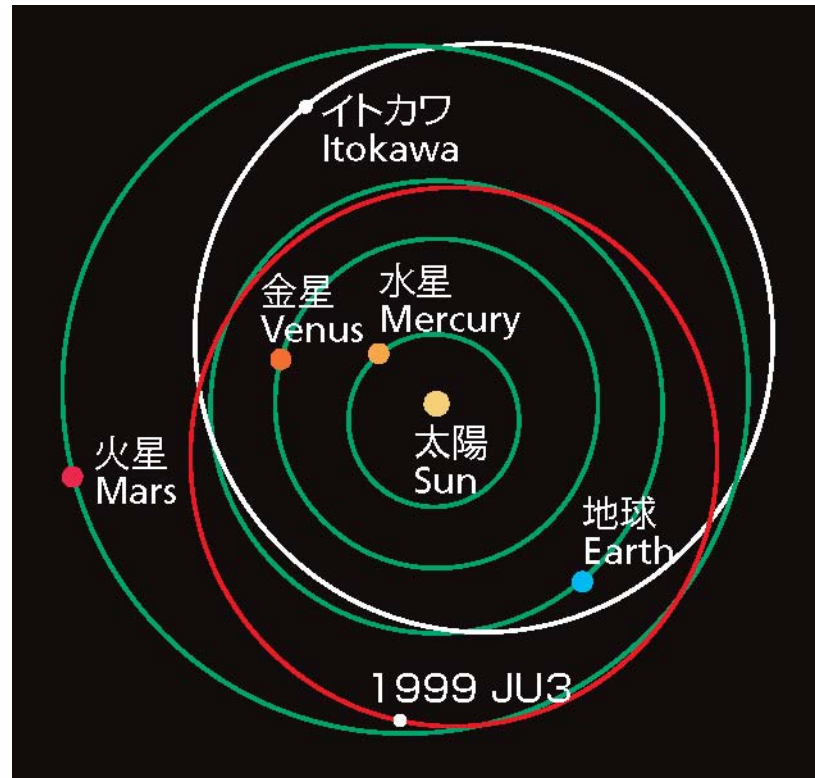


図8 小惑星 1999 JU3 の軌道

検討がなされ、必要な対策が施されています。

4 探査する小惑星 1999 JU3

「はやぶさ」の探査ターゲットとして選ばれた小惑星イトカワ (仮符号は 1998 SF36) は、「はやぶさ」の能力で往復できる軌道にある小惑星という条件で選ばれました。当時は小惑星の発見個数が現在ほど多くなかったため、探査候補となる小惑星はほんの数個であり、打ち上げのタイミングでイトカワになったのです。「はやぶさ2」では、科学が重要視されており、まず C 型の小惑星であることが条件となりました。C 型小惑星で往復探査が可能な天体として、1999 JU3 が選ばれたので

す。1999 JU3 の軌道は小惑星イトカワに似ていて、地球の軌道の少し内側から火星の軌道に達するような軌道になっています。イトカワ同様に軌道の傾きも小さく、ほぼ黄道面に沿っています。このような軌道が、サンプルリターンに適しているのです (図8)。

1999 JU3 が「はやぶさ2」の探査候補に選ばれてから、多数の地上観測が行われました。その結果、大きさは 900m 弱、自転周期は 7.6 時間、反射率 (アルベド) は 0.05 程度というように小惑星の物理情報が分かってきました。直径が 900m というと、差し渡しが 530m ほどのイトカワよりちょっと大きいことになります。一方、自転周期は 7.6 時間であり、

イトカワの12時間に比べると短い。自転周期が短いとタッチダウンが難しいのですが、7時間程度であれば問題はありません。反射率（アルベド）が0.05ということは、表面がかなり黒っぽいことを意味していますが、これはC型小惑星の特徴です。

問題は、1999 JU3の形と自転軸の方向です。小惑星は望遠鏡で観測をしても、点状に見えるだけで、その形や自転の様子は分かりません。ただし、小惑星の明るさは周期的に変化します。球形ではないびつな形をした天体が自転すると、見かけの明るさが変化して見えるためです。これを小惑星のライトカーブ（変光曲線）と呼びますが、ライトカーブを解析することでまず自転周期を正確に求めることができます。さらにライトカーブから小惑星の形や自転軸の方向も推定できます。ただし、ライトカーブから形や自転軸の方向を推定することは難しく、なかなか正確に推定することはできません。これまでの観測では、1999 JU3は球形に近い形をしており、自転軸は黄道面に対してかなり傾いていると推定されています。

5 さいごに

そもそも、どうして小惑星のような天体を探査するのでしょうか。小惑星や彗星のような天体は、別名「始原天体」

と呼ばれます。地球のような惑星も、元は小さな天体が集まって生まれたと考えられています。溶けて固まったものであるため、初期の物質についての情報がかなり失われてしまっています。始原天体は、そのように溶けることなく存在してきたため、太陽系が誕生したときの情報を多く保存している天体なのです。太陽系という惑星系がどのように生まれたのか、そして、どのように進化してきたのかを調べるためには、このような始原天体が非常に重要なのです。また、生命の誕生や進化にとっても、これらの天体は何らかの手がかりを与えてくれるものと思われています。太陽系そして地球がどのように生まれ、進化してきたのか、生命はどのような物質から生まれたのかを知ることは、現代の科学のひとつのブレークスルーになる可能性があります。

始原天体のような太陽系小天体を研究するのは、科学目的のためだけではありません。小惑星や彗星といった天体は、地球に衝突しうる天体としても無視できないものです。小さなものでも仮に地球に衝突すれば、非常に大きな災害となります。天体の地球衝突を考えるスペースガードも重要なテーマです。また、未来に人類が太陽系空間に飛び出していくようになった場合、資源としての有用性もあります。

今すぐに小天体を資源として利用するのはコスト的に見合わないですが、資源としての利用の可能性を調べておくことは将来の人類にとって有用な情報となるでしょう。さらに、特に地球に接近するような軌道を持った小惑星については、月の次の有人ミッションのターゲットとして注目されるようになってきました。月の次は火星と言われていた有人ミッションですが、月から火星というのはやはり飛躍が大き過ぎます。火星の前に、地球に接近する小惑星に向かうというのが現実的な路線であるという考えが出てきています。このように単に科学にとどまらない多様な意義を持った天体が小惑星や彗星といった太陽系小天体なのです。

「はやぶさ2」がどのような成果をもたらしてくれるのか、非常に楽しみです。