



小惑星探査機「はやぶさ2」の地球帰還とその後の展開



宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
吉川 真

1. 「はやぶさ2」ミッション

小惑星探査機「はやぶさ2」は、「はやぶさ」に続く世界で2番目の小惑星サンプルリターンミッションです。サンプルリターンとは、天体から物質を地球に持ち帰ることでありますが、月からのサンプルリターンを除くと現時点（2023年7月）で世界で4例しかありません。そのうちの2つが「はやぶさ」と「はやぶさ2」です。「はやぶさ」では小惑星イトカワから、そして「はやぶさ2」では小惑星リュウグウから表面物質を持ち帰りました。小惑星からその物質を持ち帰って調べると、太陽系が誕生した当時の物質についての情報が得られます。つまり、地球のような惑星がどのような物質から生まれたのかを調べることができるわけです。さらに、リュウグウの場合には、その物質に水や有機物が含まれていますので、地球にある水の起源や、地球生命の元になった材料についての情報も得られる可能性があります。水や有機物を調べることが「はやぶさ2」の最も重要な目的です。

「はやぶさ2」は、2014年12月に種子島宇宙センターからH-IIAロケットで打ち上げられ、2018年6月にリュウグウに到着、そしてリュウグウでいろいろな探査を行い、2019年11月にリュウグウから出発して、2020年12月に地球にサンプルが入ったカプセルを帰還させました。その後、サンプルの分析が進み、一方で探査機の方はミッションを延長して新たな目的地に向かっていきます。「はやぶさ2」のミッションやリュウグウで行ったことにつきましては、「じっきょう理科資料86号（2019年9月25日発行）」で報告していますので、ここではその報告以降の出来事である再突入カプセルの地球帰還とその後のサンプル分析、そして探査機についてはミッションが延長されましたのでその新しいミッションについてご紹介します。

2. 「はやぶさ2」の地球帰還

「はやぶさ2」は、約1年5か月にわたって小惑星リュウグウ近傍に滞在して探査を行った後、2019年11月13日にリュウグウから出発しました。太陽の周りをほぼ1周して地球にカプセルを届けます。地球到着は2020年12月6日ですので、約1年間で地球に戻ってくることになります。単に地球に戻るだけなので簡単かという点、全くそうではありません。リュウグウのサンプルが入ったカプセルは、探査機から切り離された後、オーストラリアのウーメラという砂漠の中にきちんと着地する必要があります。そのためには、探査機の非常に正確な軌道誘導が必要になります。さらに、地球帰還は一発勝負。やり直しがきかないのです。

2020年9月までは、イオンエンジンを使って探査機を地球に向かうように徐々に軌道を修正していきます。そして、10月からは4回に分けて、化学エンジンによる軌道の微修正を行いました。その結果、探査機は完璧にウーメラ砂漠に衝突する軌道に乗ったのです。地球に帰還するちょうど半日前の12月5日、14:30（日本時間、以下時刻は日本時間）にカプセルは探査機から分離されました。地球からの距離は約22万kmです。カプセルは自分自身では軌道を制御する能力はありませんので、あとは惰性で飛んでいくだけです。一方で、探査機も何もしないとウーメラ砂漠に衝突してしまいますから、カプセル分離後に急いで化学エンジンを噴射して軌道を変更しました。そして、地球のすぐ近くを通過して、再び、地球から離れていったのです。探査機のそれからについては、後でお話しします。

ウーメラ砂漠には、はやぶさ2のプロジェクトメンバーが待機していました。12月6日午前2時29分、カプセルが流れ星となって発光したことが確認されま



図1 流れ星となった再突入カプセル
2020年12月6日、オーストラリア・クーバーペディで
撮影 (©JAXA)

した(図1)。まずは、一安心です。地球にカプセルが戻ってきました。そして、2時32分には、カプセルからのビーコン電波が受信されました。これは、非常に嬉しい情報です。流れ星となったカプセルは、大気中で減速しますが、高度約10 kmでパラシュートを開いて降りていくことになります。パラシュートが開くと同時にビーコン電波が発信される仕組みになっており、ビーコン電波を地上の数カ所で受信することでカプセルがどこに着地したかをすばやく推定する手筈になっています。そして、その推定された場所にヘリコプターで飛んでいって、カプセルを回収するのです。ビーコンが出なかったときのために、光学撮影、マリンレーダー、ドローンを準備していましたが、これらに頼る必要はなくなりました。

カプセル回収の作業は非常に順調に進みました。4時47分にはヘリコプターでカプセルが発見され、6時32分にはカプセル回収作業を開始、そして8時3分には現地本部にカプセルが搬入されました。ここでは、カプセル中にあるサンプルが入った容器(サンプルコンテナ)を開けることは行いません。ただし、サンプルコンテナには特殊な穴があり、内部の気体を取り出すことができますので、気体を取り出す作業を行いました。小惑星リュウグウには大気は無いですから、サンプルコンテナ気体が入っているはずはないと思われるかもしれませんが、採取されたサンプルから気体が遊離する可能性があるのです。この可能性を考慮して、



図2 リュウグウのサンプル
2020年12月15日撮影 (©JAXA)

「はやぶさ2」ではサンプルコンテナは気密性の高いものにしました。ですが、一気圧の大気中では地球の空気がサンプルコンテナの中に漏れ込む可能性があります。それで、大急ぎで内部のガスを取り出したのです。

その後、サンプルコンテナは専用の箱に梱包されて、12月7日の夜にチャーターした飛行機がウーメラ空港から離陸、そして12月8日の午前10時半頃、JAXA相模原キャンパスに到着したのです。「はやぶさ2」探査機がJAXA相模原キャンパスから搬出されたのが2014年9月20日ですから、約6年3ヶ月ぶりに探査機の一部であるカプセルが元の場所に戻ってきたことになります。

サンプルコンテナの蓋を開ける作業は、JAXA相模原キャンパスにあるキュレーションという施設で慎重に進められました。12月15日に、ついに黒々としたサンプルがたくさん容器内に入っていることが確認され(図2)、これで、はやぶさ2ミッションは完全な成功となりました。

3. リュウグウサンプルの分析

「はやぶさ」初号機の時には、サンプルコンテナを開封しても、すぐにはサンプルがあるのかどうかわかりませんでした。見た目には空っぽに見えたからです。ですが、容器の内側の壁を詳しく調べてみると“ほこり”のような小さな粒がたくさん付いており、その中に小惑星イトカワの物質も確認されたのです。「はやぶさ2」では、見ただけでたくさんのサンプルが入っていることがわかりましたから、作業としてはまずはサンプルを容器から取りだして、整理する(カタログを作る)ことになります。この作業をキュレーションといいます。キュレーションの作業では、サン

ブルの一粒一粒について、大きさや質量、形状などを計測してカタログにしていきます。そのカタログを公開して、分析の研究者がサンプルを選んで分析を行うわけです。基本的なキュレーション作業は、JAXAで行われましたが、より進んだキュレーション作業は、フェーズ2のキュレーションとして、岡山大学の惑星物質研究所と海洋研究開発機構（JAMSTEC）の高知コア研究所の2つのチームで行われました。

次はサンプルの分析です。最初の分析は、プロジェクトの初期分析チームが行いました。初期分析チームのリーダーは、東京大学の橘省吾教授で、その手法や分析対象によって、6つのチームに分かれて分析作業が進められました。6つのチームの役割は、化学分析、石の物質科学分析、砂の物質科学分析、揮発性成分分析、固体有機物分析、可溶性有機物分析です。初期分析開始時には、109の大学と研究機関から総勢約270名（国籍は14カ国）のメンバーが参加しており、その後も初期分析に参加する研究者はさらに増えています。

サンプル分析は現時点でまだ進行中ですが、これまでにいろいろなことが分かってきました。まず、リュウグウの物質の元素存在度は、水素や希ガスを除くと太陽の元素存在度に非常によく合うことが分かりました。このことは、太陽系の材料となった元素がそのまま石となったものと考えてよく、非常に始原的な物質であるということになります。このような組成を持つイン石は、ほんの数個程度しか確認されていません。このような物質が地球の物質の汚染無しに採取されたということは非常に重要なこととなります。

また、リュウグウを作る鉱物には、水を含んだ含水鉱物や炭酸塩、硫化鉄、磁鉄鉱など、水と反応してできる鉱物が多くあることが分かりました。詳しく調べてみると、温度が40℃くらいの水（お湯？）の元で太陽系誕生から約500万年後くらいにできた物質であることが分かりました。リュウグウには温泉のような水があったというわけです。さらに、ごくわずかですが、液体の水も発見されました。炭酸が含まれていた水でした。炭酸水の起源としては、リュウグウの材料に二酸化炭素の水（ドライアイス）が含まれていたということが考えられます。さらに、磁鉄鉱の残留磁場の計測結果なども考慮すると、リュウグウの元になった天体（母天体）は太陽から離れたところで形成され、その後、太陽系の内側に移動してきたのではないかと推定されています。

有機物についての分析も進められ、これまで約2万種類もの有機物がリュウグウのサンプルから確認されています。アミノ酸も多く発見されましたが、注目されたその立体構造はL型（左型）とD型（右型）が半々というものでした。地球上の生命におけるアミノ酸はほとんどがL型であるので、リュウグウのアミノ酸と地球生命との関係はまだ何とも言えないということになりそうです。生命に関連しては、地球生命のRNAに含まれる核酸塩基の一つであるウラシルや生命の代謝に不可欠な補酵素の一つであるビタミンB3も検出されるなど非常に興味深い結果となっています。

リュウグウのサンプル分析は、現在では初期分析チームだけでなく全世界の研究者が研究提案を行って、採択されれば研究を行うことができるようになっていきます。今後、さらに多くのことが判明してくることになるでしょう。

4. はやぶさ2 拡張ミッション

以上のように、リュウグウでの探査に加えて、サンプル分析も非常に順調に進んでその成果もどんどん出ていますが、さらに探査機の運用も継続しています。はやぶさ2探査機がカプセルを地球に届けたとき、探査機の状態は問題なく、またイオンエンジンの燃料であるキセノンも全体の半分くらい残っていました。このようになることは、「はやぶさ2」がリュウグウから出発して地球帰還を始めたときに想定されていたから、地球帰還の運用をしているときに、ミッションの延長についても議論をしていました。その結果、地球帰還前に延長ミッションの一つのシナリオが決定されたのです。

それが「はやぶさ2 拡張ミッション」です。その愛称は「はやぶさ2#」となりました。#はシャープと発音します。ミッションのシナリオを図3に示します。はやぶさ2#では、探査機は2026年7月に2001 CC21という小惑星（まだ名前は付いていません）をフライバイ探査します。フライバイ探査とは、天体の近くを通過しながらその天体を調べるやり方です。この場合は、相対速度5 km/sほどですれ違うこととなります。そして、2031年7月に、1998 KY26という小惑星に到着（ランデブー）します。この小惑星は、大きさが30 mくらいと推定され、自転周期はたった11分ほどです。この天体の表面では、両極付近を除いて遠心力

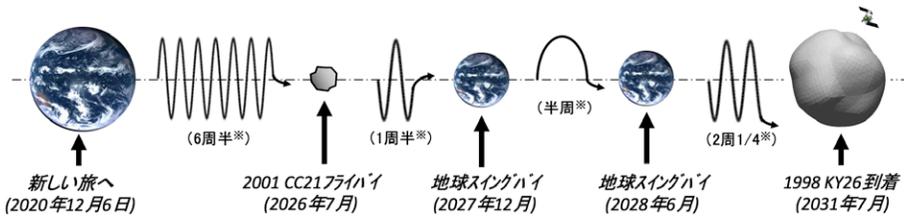


図3 はやぶさ2拡張ミッションのシナリオ
 ※印は太陽の周りの周回数を示す。(©JAXA)

の方が引力よりも強いので、表面に何か物を置いておくことができないことになります。このような天体を探査するのはもちろん世界初となります。

さらに、1998 KY26のように大きさが30 mくらいの天体は、地球に100年か200年に1度くらい衝突すると言われていています。そして実際に衝突すると、地域的には結構大きな被害を受けることになります。1908年にシベリアで起こったツングースカ大爆発が約60 mの天体の衝突によると考えられていますし、2013年のロシアのチェリャビンスクいん石が17 mくらいの天体の衝突だったと言われていています。天体の地球衝突問題を考える活動をプラネタリーディフェンス（あるいはスペースガード）と呼びますが、まさにプラネタリーディフェンスとしては、1998 KY26のような天体が気になることとなります。このように、はやぶさ2#の重要な目的の1つはプラネタリーディフェンスなのです。実はそのために、愛称が「はやぶさ2#」となっています。シャープとは、Small Hazardous Asteroid Reconnaissance Probeの頭文字を取ったもので、小さくて危険な小惑星を調べる探査機の意図が込められています。さらにシャープは、音楽記号では“半音上げる”ですから、ミッションがレベルアップしたものであるという意図もあります。

もちろん、はやぶさ2#の目的はプラネタリーディフェンスだけではなくて、2001 CC21や1998 KY26を惑星科学として調べることや、元々6年間のミッションとして設計・製作されたはやぶさ2探査機をさらに11年以上延長して運用したときに、探査機のハードウェアがどのように変化するか（経年劣化など）を調べることも重要な目的なのです。

ちなみに、2001 CC21のフライバイ探査も、プラネタリーディフェンスの目的があります。それは、高速フライバイを精度よく行うことができれば、探査機を

高速で小惑星に衝突させることも可能になるわけです。2022年9月にNASAがDART（ダート）というミッションで実証したように、探査機を小惑星に衝突させることで小惑星の軌道を変更することができれば、これはプラネタリーディフェンスにとって大きな進展になります。仮に地球に衝突する小惑星が発見された場合に、探査機を衝突させることによって、その軌道をそらして地球衝突を回避できるかもしれないからです。

以上のように、「はやぶさ2」はそのメインミッションは成功裏に終了していますが、さらなる挑戦を目指しているのです。

5. 最後に

現在、はやぶさ2#が進行中ですが、さらに将来について考えておく必要があります。プラネタリーディフェンスの活動が国際的に非常に活発になってきたこともあって、小惑星の発見個数は急速に増大しており、現時点で128万個にもなりました。今後、この数はさらに増大するでしょう。小惑星は地球に衝突すると大きな災害の脅威となりますが、資源としての利用や、人類が月以遠に出かけるようになったときに利用できる天体である可能性があります。日本は、「はやぶさ」そして「はやぶさ2」で小惑星探査については世界の最先端に躍り出たわけですが、世界はすぐに追いついてきます。日本は、予算や人員では米国や欧州など宇宙に力を入れている国・地域に対抗することは難しい状況ですが、「はやぶさ」が世界初を成し遂げたようにアイデアで勝負ができます。そのようなアイデアが次々と生まれてくるような環境を作っていくことが重要です。現在、JAXA宇宙科学研究所では、若い人が中心になって、次の小惑星探査ミッションについて検討が始まっています。また、新たな挑戦ができることを期待しています。