

連携記事

小惑星探査：「はやぶさ2」の成果と今後の展開

Asteroid Exploration : The Results of Hayabusa2 Mission and the Future

吉川 真

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
准教授

Makoto Yoshikawa

はやぶさ2プロジェクト ミッションマネージャ

小惑星という小さい天体がいろいろな観点から注目されている。ここでは、最近の「はやぶさ2」ミッションの紹介を中心に、小惑星という天体を取り巻く状況について解説する。小惑星という「鉄」には無関係な話のように思えるかもしれないが、本稿の最後に今後の展開として鉄との関係も述べる。

1 小惑星とは

太陽系というと“太陽とその周りを回る惑星”というものを思い浮かべる人が多いであろう。少し前ならば惑星は9つと覚えたが、現在では惑星は8つである。2006年8月に、冥王星が準惑星に分類替えになり、惑星の数が一つ減ったのである。準惑星とは、惑星ほどは大きくないが自己重力で球状になっている天体であり、現在、準惑星は5個ある。惑星と準惑星の違いは、自分の軌道周辺から他の天体を排除したものが惑星で、排除していないものが準惑星である¹⁾。太陽系は、太陽の周りを8個の惑星と5個の準惑星が公転しているシステムということになるが、実際には非常に多くの小さな天体も太陽系に存在している。この小さい天体を総称して、太陽系小天体と呼ぶ。

太陽系小天体は、大きく小惑星と彗星に分けることができる。彗星の場合、太陽に接近するとその表面からガスやチリが放出されて、彗星本体(核)の周りにコマと呼ばれる領域が形成され、さらには尾が長くのびることもある。一方、小惑星ではそのようなことは起こらない。彗星ならば肉眼でも見えるくらいに明るくなることもあるが、小惑星は肉眼で確認されることはほとんど無いであろう。小惑星はこのように目立たない天体なのであるが、その発見個数は非常に多く、現時点(2021年5月)で発見されて軌道も算出されている小惑星の数は108万個にものぼっている(国際天文学連合のMinor Planet Center²⁾による)。数の上では、太陽系の主流である。ちなみに、彗星の方は現在までに4600個ほど発見さ

れている。

最初の小惑星は、1801年1月1日に発見されたCeres(ケレス)である。発見当時は新惑星と考えられたが、似たような軌道に多数の小さい天体が発見されるようになり、小惑星と呼ばれるようになった。ケレスの軌道は火星と木星の軌道の間にあるが、この領域には多数の小惑星が存在しており、小惑星帯(アステロイド・ベルト)と呼ばれている。ケレスは、小惑星帯では最も大きい天体であり、冥王星が準惑星となったときにケレスも準惑星とされた。ただし、小惑星番号1番というものはそのまま付与されており、小惑星でもあるとしてよい。

発見されている大部分の小惑星はこの小惑星帯にあるが、火星軌道の内側にあるものもあれば、木星軌道付近、さらには海王星軌道の外側にも存在している。特に、海王星軌道以遠を公転している天体を太陽系外縁天体と呼ぶ。この太陽系外縁天体は現時点で4000個ほど発見されており、実は冥王星も太陽系外縁天体の1つであると考えた方がよいということになった。そのために、冥王星は惑星ではない、ということになったのである。図1に木星軌道付近までの小惑星の分布の様子を示す。100万個も小惑星があると、小惑星で太陽系が埋もれてしまっているように見える。

このように、ケレスの発見から220年経過した今、小惑星は太陽系の至る所に発見されており、我々の小惑星に対する認識も大きく転換しつつある。

2 小惑星の重要性

このように、数では太陽系の主流である小惑星であるが、いろいろな意味で人類にとっても重要な天体である。ここでは、小惑星がなぜ重要なのかをまとめてみることにする。

■惑星科学における重要性

小惑星は、惑星まで大きく成長することがなかった天体で

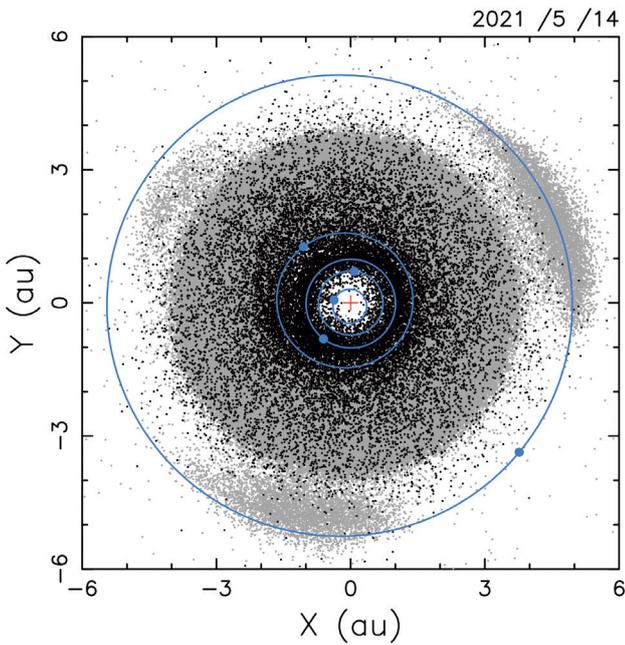


図1 小惑星の分布。2021年5月の時点で国際天文学連合のMinor Planet Center²⁾が公開しているデータに基づいて作図した。中心が太陽で軌道は内側から水星・金星・地球・火星・木星である。また、小さな点でプロットしたものが小惑星であるが、黒色で示した小惑星は地球接近小惑星であり、それ以外の小惑星が灰色の点で示されている。2021年5月14日時点での天体の位置が示されている

あると考えられている。今から46億年前、星間ガスが収縮して太陽が誕生し、その周りには惑星が誕生したと言われている。最初に生まれた天体は、微惑星と呼ばれる大きさが10km程度の天体と考えられている。この微惑星が衝突合体して成長したものが惑星である(図2)。しかし、微惑星がそのまま残ってしまったものや、ある程度大きく成長したが互いに衝突破壊しあって大きな天体にならなかったものがある。そのようなものが小惑星ではないかと考えられている。つまり、小惑星は惑星誕生の頃の情報をそのまま持っているか、変化したとしても惑星ほどは変化していないので、小惑星を調べれば太陽系の起源や進化を知ることができるのである。小惑星は、この意味で惑星科学的に重要である。

さらに、最近では生命との関係で小惑星が注目されている。地球最古の生命は38億年前とも40億年前とも言われているが、まだ生命の起源は解明されていない。生命の起源そのものに迫るのはなかなか難しそうであるが、生命を作っている材料の起源には迫れるかもしれない。その目的で行われたミッションが次の節で説明する「はやぶさ2」である。上記のように、小惑星には46億年前に惑星が誕生したときに存在していた物質があまり変化せずに残っている可能性がある。その物質としては、岩石や鉄以外に有機物や水もあるはずである。地球生命が誕生する前の有機物が分かれば、それ

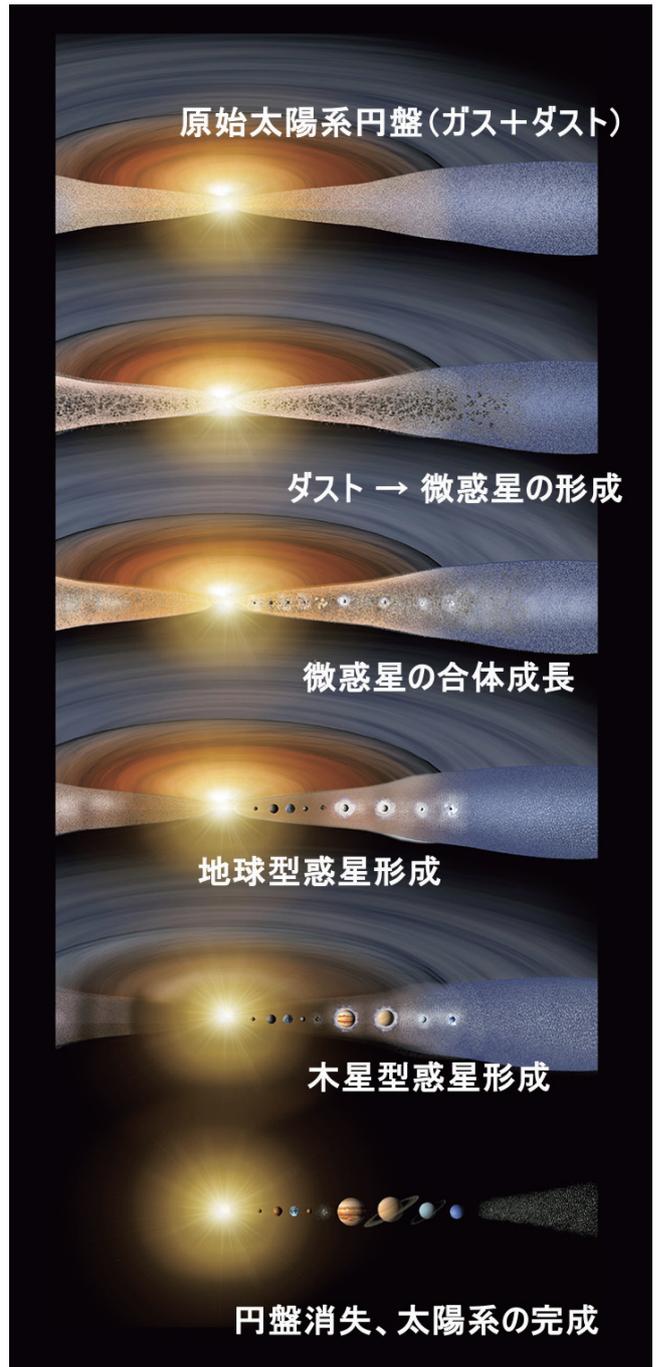


図2 太陽系の惑星の誕生シナリオ。星間ガスが収縮して原始太陽とその周りの原始太陽系円盤が形成され、原始太陽系円盤内で微惑星から惑星へと成長した(©JAXA)

が生命の材料になったかどうか解明できるかもしれないのである。

■自然災害としての重要性

このような科学目的に加えて、最近注目されている活動がプラネタリーディフェンスである。スペースガードとも呼ばれるが、これは天体の地球衝突問題を検討する活動である³⁾。天体の地球衝突というと、それこそ杞憂だと思う人が多いかもしれないが、実はそうではない。1908年にシベリアで起き

たツングースカ大爆発と呼ばれる現象では、2000平方kmに渡る森林が破壊されてしまったが、この原因は直径が60m程度の小天体の衝突だと言われている。最近では、2013年のチェリャビンスク隕石による被害がある。これは、ロシア・チェリャビンスク州の中心都市チェリャビンスク付近に落ちた隕石により、100km以上にわたる地域で窓ガラスや壁が壊れたり、1500人ものが怪我をしたりしたものである⁴⁾。このときの隕石の大きさは、NASAの推定によると17m程度であるという。つまり、数十年あるいは100年という単位で見れば、起こりうる自然災害なのである。

地球の歴史を見れば、6600万年ほど前に恐竜を含む多くの生物種が絶滅し地質時代が中生代から新生代に移ったが、この原因として最も有力なものが天体衝突である。この恐竜絶滅をもたらしたと考えられる天体は、直径が10kmほどと推定されている。また、その衝突場所は、メキシコのユカタン半島付近と言われている。ツングースカ大爆発やチェリャビンスク隕石の場合には、天体が衝突したことによって生じた衝撃波による直接的な被害であったが、恐竜絶滅の場合には天体衝突によって地球全体の環境が変化してしまったと考えられる。そのために、衝突場所以外でも大きな影響が生じたのである。もし今、同じようなことが起こってしまったら人類が減ってしまうかもしれない、ということでプラネタリーディフェンスの活動が最近活発になってきた。

実際問題としては、恐竜を滅ぼしたような天体衝突が起こるのは1億年に1度程度であるのであまり心配する必要はなく、むしろ地域的な被害を念頭においた活動を行っている。これまでの活動の結果、図1に示されているように地球に接近する小惑星が多数発見されており、現時点ではその数は2万5千個以上に上る。これらは近い将来に地球に衝突する可能性はないことは確認されているが、まだまだ未発見の小惑星が多くあると考えられており、現在、いくつかのプロジェクトが地球に接近してくる小惑星の発見活動に力を入れている。小惑星の発見個数が最近急激に増加しているのはこのプラネタリーディフェンスの活動のためなのである。

■宇宙資源や利用としての重要性

小惑星は将来の資源としても注目されている。小惑星というと岩石でできていると考える人が多いであろうが、中には金属でできた小惑星もあるはずである。なぜならば、地球には鉄隕石という金属でできた隕石(図3)が多数落ちてくるので、その母天体の小惑星は金属でできているはずであるからである。その成分は鉄やニッケルが主であるが、レアメタルも含まれている。小惑星全体が金属ならば、膨大な量の資源となる。さらに、宇宙では水も重要な資源である。もちろん、人間や生物は水が必要ということはあるが、水を電気分解すれば水素と酸素を作ることができ、これはまさにロケッ

トの燃料となるわけである。

資源といっても地球に持ち帰ってきて利用しようというのではなく、太陽系空間で資源を現地調達しようということが目的である。将来、有人でも無人でも太陽系空間を自由に行き来するような時代になったときに、地球から資源を持っていかなくても現地で調達できるというわけである。この小惑星の資源利用については、今すぐに具体的に何か行われるわけではないが、未来の人類にとっては重要なものになっているかもしれない。

同様に小惑星を有人ミッションのターゲットにしようという話もある。現在、再び月に人を送ろうという動き(アルテミス計画)があるが、さらに火星にも人を送ろうとする検討がなされている。しかし、火星は、有人のミッションとしてはなかなか大変である。それで、いきなり火星に人を送らずに、地球に接近しているような小惑星に人を送ったらどうか、というわけである。そのような小惑星の方が地球からの往復距離は短いし、離着陸も簡単である。火星に人が行く前の練習というわけである。さらには、人が行くのなら小惑星を何かに利用できないかというような議論もある。

以上のように、小惑星という天体は、地球や月の次に我々人類に身近な天体であり、単に科学の研究のためだけでなく、近い将来の人類にとって重要になりそうな天体なのである。

3 小惑星探査ミッション「はやぶさ2」

3.1 日本の太陽系天体探査と「はやぶさ2」

日本初の太陽系天体探査機は1985年に打ち上げられた「さきがけ」である。目標の天体は、当時回帰してきたHalley(ハレー、ハリー)彗星であった。日本がこれまで打ち上げた太陽系天体探査機は10機ほどしかない。日本は多数の人工



図3 鉄隕石。スケールはcm単位(著者所有)

衛星は打ち上げているのだが、地球の引力を振り切って太陽系空間に向かって行った探査機はまだこれだけなのである。しかし、ミッションとしてはいろいろ挑戦的なものを行っている。

特に「はやぶさ」は、小惑星サンプルリターンという世界初の試みに挑戦した⁵⁾。サンプルリターンとは、天体まで行ってそこにある物質を採取し、地球に持ち帰るというミッションである。実は、月よりも遠いところまで行って地球に戻ってきたという探査機は非常に少なく、これまで4機しかない。米国のGenesis（ジェネシス）とStardust（スターダスト）、そして日本の「はやぶさ」とこの後に述べる「はやぶさ2」である。

米国の2つの探査機は、着陸はせずに太陽系空間を飛行しながらサンプルを採取して戻ってきたのであるが、日本の「はやぶさ」と「はやぶさ2」は小惑星に着陸してから戻ってきた。このように、月よりも遠い天体まで行って着陸してから戻ってきた探査機というのは、これまで世界でも「はやぶさ」と「はやぶさ2」しかない。3機目になるのが、米国のOSIRIS-REx（オサイリス・レックス）で2023年に地球に帰還する予定である。

このように「はやぶさ」は世界に先駆けた挑戦を行ったわけである。ただし、「はやぶさ」は、お手本のない世界初のミッションだったこともあって、いろいろなトラブルに見舞われた。それでも最終的にはイトカワという小惑星から物質を地球に持ち帰るという使命は全うしたのであるが、技術的にはこれではよくない。ということで、「はやぶさ2」が計画されたのである。

「はやぶさ2」の最初の提案は2006年になされたが、プロジェクトとしてスタートしたのは紆余曲折を経た2011年になる^{6,8)}。技術的に確実性を高めるという目的も重要であるが、「はやぶさ2」の最も重要な目的は地球生命の原材料になった物質を探すということである。前の節で述べたように、小惑星の物質は46億年前に惑星が生まれたころにあったものがあまり変化しないで残っている可能性が高い。もし有機物があれば、地球生命の材料になった物質であるかもしれない。有機物を採取するには、有機物がありそうな小惑星を選ぶ必要がある。そこで選ばれた小惑星がC型に分類されるリュウグウ（小惑星の仮符号は1999 JU3）なのである。「はやぶさ」がサンプルリターンを行ったイトカワはS型小惑星であり、表面物質には有機物はほとんど含まれていなかった。C型小惑星は炭素が多く含まれていると考えられており、リュウグウに行けば有機物が採取できると考えられたのである。

3.2 ミッションの概要

「はやぶさ2」は、2014年12月3日に、種子島宇宙センターからH-IIAロケット26号機で打ち上げられた（探査機は、Techno Scopeのp.405の図を参照）。ちょうど1年後に地球に戻ってきてスイングバイというテクニックで地球に引力を利用して軌道を変更するというを行い、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。行きは合計3年半かかったことになる。

リュウグウに到着してみると、その形はそろばんの珠そっくりであった（Techno Scopeのp.404の写真を参照）。これは全くの想定外。まずは詳しい観測を行い、どこにタッチダウン（着陸）したらよいかなどを検討した。そして、小型のローバ（探査車）であるMINERVA-II-1（ミネルバ-II-1）の2機とドイツ・フランスによって製作された小型のランダ（着陸機）であるMASCOT（マスコット）をリュウグウ表面に降ろして、小惑星表面での探査を行った（Techno Scopeのp.404の写真を参照）。

最も重要な運用はタッチダウンして表面物質を採取することであるが、これは非常に難しいことが判明した。その理由は、リュウグウ表面に広くて平らな場所がなかったためである（図4）。リュウグウに到着するまでは、どこかには100mくらいの幅の平らな領域があるだろうと想定していたのであるが、見事に裏切られたわけである。この想定の本拠は、「はやぶさ」が訪れた小惑星イトカワも凸凹だらけであったのだが、平らな場所もあったことである。最終的には、直径が6mの領域にタッチダウンすることになった。これはピンポイント・タッチダウンと呼ばれる非常に高精度の制御が必要にな



図4 高度6kmから撮影した小惑星リュウグウの表面の様子。表面全体が大多數の岩塊で覆われている。2018年7月20日に望遠の光学航法カメラ（ONC-T）で撮影（© 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）

るものであるが、実は、そのようなタッチダウンも事前に想定はしていた。ただし、いきなりピンポイント・タッチダウンを行うことになったので、タッチダウンは予定より4ヶ月ほど延期することになった。

2019年2月22日、1回目のタッチダウンが行われた。1回目のタッチダウンでは、運用開始時にちょっとしたトラブルがあった。探査機が高度20kmから降下を開始しようとしたところ、探査機に設定されていた情報が実際の状況と食い違っていたのである。急遽、運用を中止して大急ぎで対応策を検討した結果、5時間遅れて降下を開始するという事になった。ただし、予定のスケジュールに追いつくために、降下速度を当初の予定の秒速40cmから90cmに速めることにした。その後の運用は順調に進み、タッチダウンを行った後、探査機は正常に離陸した。

「はやぶさ」のときには2回のタッチダウンを行ったが、2回ともトラブルがあったので今回初めて正常にタッチダウンが行えたことになる。この時点ではサンプルが採取できているのか分からないのであるが、後述するように結果的にはサンプルも多量に採取できた。

次に、2019年4月5日には衝突装置というものを使って人工的なクレーターをリュウグウ表面に作るという実験を行った。小惑星に人工クレーターを作ることは世界初の試みなのであるが、その目的は小惑星表面の物理的な性質を調べることに加えて、地下の物質を表面に出してそれを採取するということがある。小惑星表面は太陽からの光・熱・放射線や宇宙からの宇宙線、そして隕石の衝突などによって、変質している。これを宇宙風化と呼ぶ。宇宙風化した物質も重要なのであるが、宇宙風化をなるべく受けていないような物質も採取したい。ということで、この人工クレーターを作る実験を行ったのである。

衝突装置は、小惑星上空で爆発をして、2kgの銅の塊を秒速2kmで小惑星表面に打ち込むものである。爆発をしたときには破片が周囲に飛び散るし、銅塊が小惑星表面に衝突すれば砂礫が飛び出すので探査機は爆発の前に小惑星の陰に隠れるように運用する。その後は、小惑星近くで砂礫が周回する可能性もあるので、探査機はいったん小惑星から離れて、安全を確認してから人工クレーターを調べることになる。また、探査機が小惑星の陰に隠れてしまうと衝突実験の様子が撮影できないので、隠れる前に分離カメラというものを切り離しておき、このカメラによって人工クレーター形成の様子を撮影する。このように非常に複雑でアクロバティックな運用であったが、実験は成功し、クレーターが形成される様子の撮影も成功した(図5)。その後、探査機が接近して確認したところ、直径が15mほどのクレーターが形成されていた(図6)。これは、大きくても3m程度という事前の予想よりも遙かに大きなものであった。

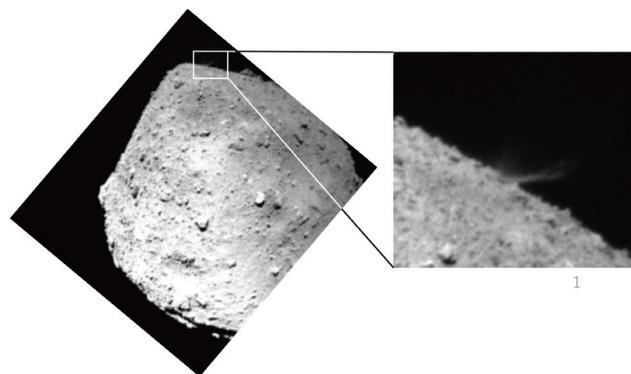


図5 衝突装置からの銅塊が小惑星リュウグウ表面に当たって砂礫(イジェクタ)が飛び出している様子。2019年4月5日の実験。(© JAXA、神戸大、千葉工大、高知大、産業医科大)

衝突実験前 2019/03/22



衝突実験後 2019/04/25



図6 衝突実験の前と後の比較。衝突実験後は表面が窪んでいる様子が分かるが、これが人工的に作られたクレーターである。(© 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)

すると、2回目のタッチダウンを行って地下物質を採取するかどうか大きな問題となった。ここまでの運用は非常に順調に行われていて、すべて成功しているわけである。ここで2回目のタッチダウンをやって失敗して探査機が壊れてしまったら、すべて失うことになる。「やるべきか、やらざるべきか」という議論があったが、実際に探査機を運用しているメンバーは是非行いたいという意見で一致していた。むしろ、プロジェクト外あるいは海外のプロジェクトメンバーからは2回目のタッチダウンは行わないで地球帰還した方がよいのでは、という声が強かった。そこで、2回目のタッチダウンのリスクをいろいろな観点から精査し検討してみたのであるが、1回目のタッチダウンよりもリスクは小さいという結論に至った。それで、十分な準備をした上で、2回目のタッチダウンを2019年7月11日に実行し、成功したのである。

タッチダウンを行った場所であるが、地下物質を採取するためには人工クレーター内にタッチダウンするのがよいが、それはリスクが高い。人工クレーター周辺を調べてみると、20mほど離れたところにもクレーターからの物質が降り積もっていることが分かったので、そこにタッチダウンを行ってサンプルを採取した。地下物質も採取されていることを期待しているのだが、これは取得されたサンプルを分析してみないと分からない。ちなみに、タッチダウン地点の誤差は60cmであった。3億km彼方で行っている運用であるが、これだけの高精度を達成できたことも世界初である。

以上で予定していた運用はすべて終了したのであるが、さらに追加の実験を行うことになった。タッチダウンのときには、その前にターゲットマーカという人工の目印を小惑星表面に降ろしておく。そして、そのターゲットマーカを探査機が見ながら予定された位置に正確に着地するわけである。ターゲットマーカは5個搭載されていたが、そのうちの2個しか使っていないので、まだ3個余っていた。そのうちの2個をリュウグウの周りを回る人工衛星にするという実験を行ったのである。さらに、もう1つ残っていた小型ローバのMINERVA-II-2もリュウグウのまわりの人工衛星とした。これら3つがリュウグウの周りを回る様子を探査機から観測し、その軌道データよりリュウグウの重力場が高精度で推定することができた。このことで、リュウグウ内部の質量分布(密度の違い)も推定できることになる。

探査機は、リュウグウに約1年5ヶ月滞在した後、2019年11月13日にリュウグウから出発し、地球への帰途についた。そして、約1年後の2020年12月6日未明に、オーストラリアのウーメラにカプセルが着地したのである。以上の探査機の運用シナリオを図7に示す。

地球に戻ってきたカプセルの中には、サンプルコンテナという箱があり、その中にリュウグウのサンプルが入っている。まずオーストラリアでサンプルコンテナからガスだけ抜き取る作業を行った。リュウグウには大気は無いのであるが、サンプルからガスが遊離する可能性がある。そこで、

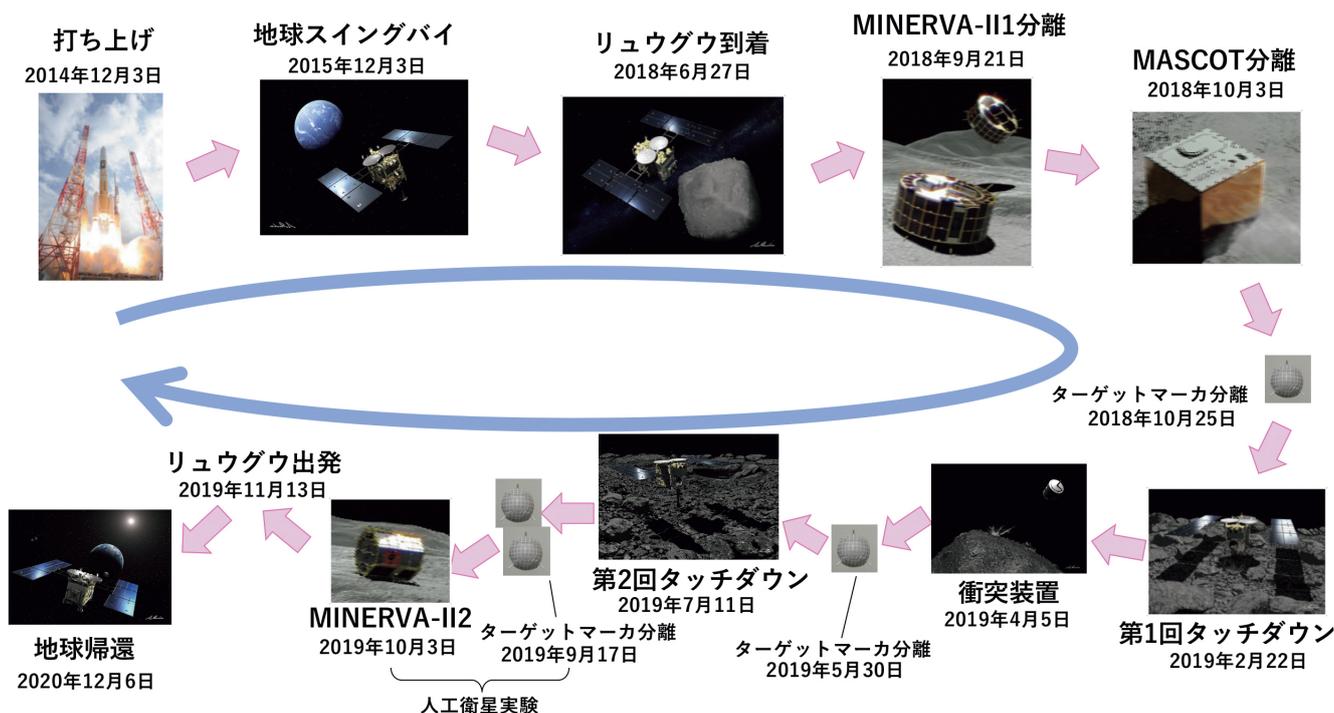


図7 はやぶさ2 ミッションのシナリオ。ここに描かれている全てのミッションが成功した(画像クレジット：探査機および衝突装置のイラストは池下章裕氏、他はJAXA)

「はやぶさ2」に搭載したサンプルコンテナは非常に機密性のよいものにし、地球に戻ってきても空気が漏れ込まないようにした。採取されたガスは、地球大気とは異なる成分であることも分かった。月より遠い天体からのガス採取も世界初である。

2日後の12月8日には、カプセルはJAXA相模原キャンパスに到着し、その後はキュレーションという施設の中で慎重に開封作業が行われ、最終的に5.4gほどの物質が採取されていることが分かったのである(図8)。「はやぶさ」のときにはごくわずかのサンプルしか取得できなかったことを思い出すと、これは大収穫と言ってよい。ちなみに、目標は0.1gで、0.1gあれば予定していた分析がすべて行えるということであった。5.4gは遙かに多い量であるので、より精度の高い分析が期待できる。サンプルの本格的な分析は、2021年の6月頃から開始される予定である。

以上のように、「はやぶさ2」ミッションはすべて成功したわけであるが^{9,10)}、これは「はやぶさ」と比べると非常に大き

な技術的進歩と言ってよい。「はやぶさ」やその他の探査機における多くのトラブルや失敗の経験を踏まえて製作・運用したわけで、その成果が実ったと言ってよい。探査機の方は地球にカプセルを戻した後、後述するように新たな天体に向けて出発していった。

3.3 探査の成果

「はやぶさ2」の探査の成果であるが、大きく工学と理学に分けて考えることができる。工学については、前の節で述べたように、大きなトラブルもなく小惑星往復ができ、また小惑星での運用もすべて成功したことが大きな成果である。特に世界初と言ってよい工学的な成果を表1に、また「はやぶさ2」の総飛行時間と総飛行距離を表2に掲載する。

理学(サイエンス)についての成果は、現在、続々と論文が発表されているところである。リュウグウのサンプル分析については、今後(2020年6月以降)に本格的な作業が始まるので現時点ではまだ結果は無いが、分析の前段階のキュレー

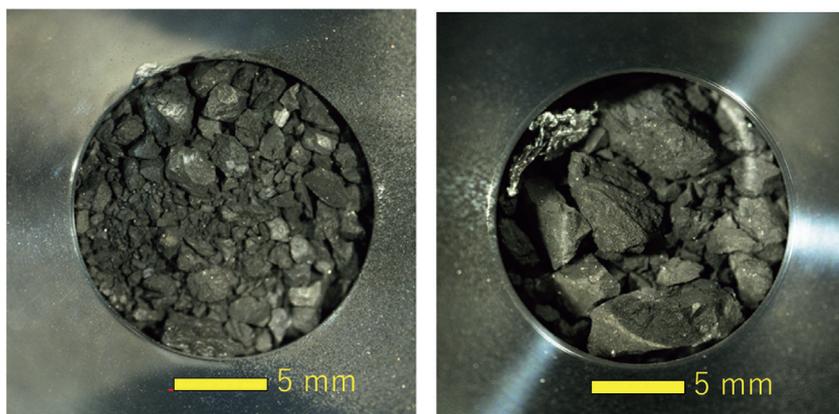


図8 小惑星リュウグウからのサンプル。左は1回目のタッチダウン、右は2回目のタッチダウンで採取したサンプル。2回目の方がより大きなサンプルが採取されており、最大で1cmほどの大きさである。2回目のサンプルに白っぽい物(右写真の左上)が見られるが、これは、サンプラーホーンからのアルミ泊である(©JAXA)

表1 「はやぶさ2」が成し遂げた工学における世界初

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) 小型探査ロボットによる小天体表面の移動探査 (2) 複数の探査ロボットの小天体上への投下・展開 (3) 小惑星での人工クレーターの作成とその過程・前後の詳細観測 (4) 天体着陸精度 60cm の実現 (5) 同一天体 2 地点への着陸 (6) 地球圏外の天体の地下物質へのアクセス (7) 最小・複数の小天体周回人工衛星の実現 (8) 地球圏外からの気体状態の物質のサンプルリターン (9) C型小惑星の物質のサンプルリターン |
|--|

表2 「はやぶさ2」の総飛行時間と総飛行距離

■総飛行時間	：2195日（2194日13時間32分ほど）
打上げ	：2014年12月3日（水）13時22分04秒
カプセル着地（＝消感）	：2020年12月6日2時54分
■総飛行距離	：52億4千万km
往路	：31億km
小惑星近傍	：13.2億km
復路	：8.2億km

ション作業においてサンプルには水や有機物が存在する兆候が見られるので非常に期待できる。一方で、リュウグウに滞在していたときに取得したデータに基づく研究はどんどん進んでいる。リュウグウについてこれまで分かった主要なことは次のようになる。

まず、リュウグウの密度はリュウグウの質量（探査機にかかるリュウグウの引力から推定）とリュウグウの体積（リュウグウの形状モデルより計算）から推定できるが、その値が 1.19g/cm^3 と小さいものであった。リュウグウ表面は写真を見ても分かるように岩石であり、最もありそうな岩石を想定するとリュウグウの内部にはかなり隙間があるとしないとこの密度が説明できない。つまりリュウグウは瓦礫の寄せ集めのような天体（ラブルパイル天体と呼ぶ）であると考えられ、内部の空隙率は50%以上と推定された¹¹⁾。

また、リュウグウのそろばんの珠のような形（コマ型）を説明するには、自転による遠心力を考える必要があるが、周期が3.5時間くらいで自転をしていないとこの形を説明できない¹¹⁾。現在のリュウグウの自転周期は7.6時間であるので、過去は現在よりもかなり速く自転していたということになる。自転の速度はいくつかの要因で変化しうるが、今後の研究で自転の変化した理由が分かるかもしれない。

リュウグウ表面からの可視光や赤外線のスpekトルを調べることで、リュウグウには含水鉱物がありそうだということ¹²⁾や、炭素を多く含んでいる可能性が高いということ¹³⁾が推定された。これについては、今後の分析でより確定的なことが分かると思われる。一方で、衝突実験や表面の温度変化からは、リュウグウ表面の強度が小さいということ¹⁴⁾や多孔質の岩でできていそうだというような結果^{15,16)}になっている。ただし、取得されたサンプルには固そうな小石が含まれており、リュウグウでの観測と合わない。今後のサンプル分析による解明が待たれる。

さらに、リュウグウ表面のspekトルの詳細な解析により、リュウグウの起源が小惑星帯の中の太陽に近い方ではないかということが推定された¹⁷⁾。また、リュウグウ表面はかなり宇宙風化を受けていることも分かり、このことを説明す

るにはリュウグウが過去のある時点では、太陽に非常に接近するような軌道（水星の軌道くらいまで）になっていたという推定もなされている¹⁸⁾。

以上のように、リュウグウについても、いろいろなことが分かってきた。サンプルの分析結果も出てくると、リュウグウという小惑星についてより総合的に理解できるようになり、太陽系の生い立ちについて新たなことが分かるかもしれない。そして、地球生命との関係も解明できるかもしれない。

4 今後の小惑星探査

まずこれまでの小惑星ミッションをざっとおさらいしておく。最初に鮮明な小惑星の表面を撮影した探査機は、1989年に打ち上げられた米国の木星探査機Galileo（ガリレオ）である。「ガリレオ」は1991年に小惑星Gaspra（ガスプラ）をフライバイ（近くを通り過ぎる運用）し、初めて小惑星というものの姿を我々に届けてくれた。小惑星フライバイミッションはこの他にも多数ある。小惑星に到着（ランデブー）した最初の探査機は、米国のNEAR Shoemaker（ニア・シューメイカー）である。「ニア・シューメイカー」は2000年に小惑星Eros（エロス）に到着し、約1年間、エロスを周回してデータを取得した。この他の小惑星ランデブーミッションとしては、小惑星Vesta（ベスタ）とCeres（ケレス）の2つを周回した米国のDawn（ドーン）ミッションがある。そして、世界初の小惑星サンプルリターンミッションが日本の「はやぶさ」である。サンプルリターンについては、すでに述べたように他には「はやぶさ2」と「オサイリス・レックス」がある。

今後もしろいろな小惑星ミッションが計画されている。まずは、「はやぶさ2」の延長ミッションがある。これは「拡張ミッション」と呼ばれているが、「はやぶさ2」は地球に戻ってきた後、1998 KY26というまだ名前が付けられていない小惑星へと飛行を続けている。この小惑星は大きさが30m程度で、10分ほどで自転をしている天体である（図9）。このような天体にはまだ探査機が近づいたことはないので科学的に興味深いのだが、まさにこのような天体が地球に衝突すること

を心配する必要があるので、プラネタリーディフェンスの立場からも注目されている。ただし、この天体に到着するのは2031年の7月の予定であり、今から10年後になる。あと10年、探査機が壊れずに運用が続けられるかという問題があるが、実はこのことも拡張ミッションの1つの目的になっている。探査機のハードウェアの耐久性を実際の宇宙ミッションで調べるという検証実験も拡張ミッションのテーマである。なお、2026年には2001 CC21という小惑星のフライバイ観測も予定されている。

日本では、この他にMMX (エム・エム・エックス) と DESTINY+ (デスティニー・プラス) というミッションが検討されている。MMXは火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration) というもので火星の衛星Phobos (フォボス) からのサンプルリターンを目指す。フォボスは小惑星ではないが、小惑星が火星の引力によって捕獲されたものかもしれないので、小惑星にも関連していると言える。技術的には、MMXは火星の引力圏に入ってから地球に戻ってくるという世界初に挑戦するミッションである。「デスティニー・プラス」は深宇宙探査技術実証機というもので、小惑星Phaethon (フェートン) をフライバイするミッションである。フェートンは12月に見られるふたご座流星群の母天体であり、活動的な小惑星として興味深い天体である。

欧米でも今後いくつかの小惑星ミッションが予定されている。まず、米国と欧州が協力して行うAIDA (アイダ: Asteroid Impact & Deflection Assessment) ミッションがある。最初に、米国のDART (ダート) という探査機がDydimos (ディディモス) という小惑星の衛星Dimorphos (ディモルフォス) に衝突する実験を行う。この衝突実験は2022年に行

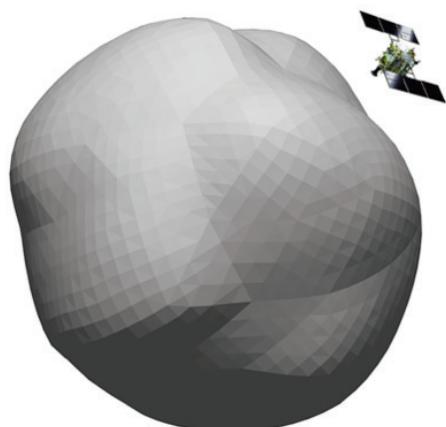


図9 「はやぶさ2」の拡張ミッションで目指している小惑星1998 KY26。小惑星の形状は1998年に行われたレーダー観測から推定されたデータに基づいている。小惑星の直径は30mほどなので、小惑星と探査機の大きさの比率はこの図のようになる (© Auburn University, JAXA)

われるが、その後、欧州のHera (ヘラ) という探査機が2026年に到着し、衝突の跡などを詳しく調べる。ダート探査機が小惑星の衛星に衝突することによりどのくらい軌道が変化するかなどプラネタリーディフェンスに関する情報を収集するミッションである。

2020年代後半には、米国ではさらにLucy (ルーシー) と Psyche (サイキ) という2つのミッションが計画されている。「ルーシー」は木星トロヤ群小惑星という木星軌道にある小惑星をフライバイするミッションで、2030年代初めにかけて合計5つのトロヤ群小惑星を観測することになっている。木星トロヤ群小惑星は、太陽からの距離が遠いこともあり、太陽系の初期により迫ることができると考えられている。「ルーシー」という名称は類人猿の化石であるルーシーに由来している。そして、「サイキ」であるが、実はこれが鉄にも関係しているものであり、次の節で紹介する。

5 おわりに

2節で宇宙資源として金属でできた小惑星について触れたが、現時点ではまだそのような天体は明確には確認されていない。しかし、小惑星の観測でM型小惑星というものが認められており、これが金属ではないかと言われているのである。M型のMはmetal (金属) から取られている。M型小惑星にランデブーする初めてのミッションが、前節の最後に述べた米国のPsycheである。

英語では、Psycheを「サイキ」と発音するので、これはサイキ・ミッションとなるが、探査する小惑星もPsycheである。Psycheはラテン語ではプシケなので小惑星を呼ぶときには小惑星プシケということになる。ちょっとややこしいが、日本語ではサイキ (Psyche) 探査機が小惑星プシケ (Psyche) を探査する、というわけである。

小惑星プシケは、小惑星帯の中にある小惑星で、300km弱の大きさのM型小惑星である。小惑星全体が金属だとするとどのような表面になっているのであろうか。全く未知である。図10は、サイキ・プロジェクトのWebに掲載されている小惑星プシケの想像図である。果たして、どのような姿をしているのであろうか。

金属でできている理由は、今から約46億年前に太陽系が誕生したときにある程度大きい天体まで成長しドロドロに溶けた状態でコアとマントルに分化した天体となり、その後、衝突によって破碎されてそのコアがむき出しになったというシナリオが考えられる。つまり、惑星のコアを見ることができるといことになり、これは惑星科学としては非常に画期的である。同時に、将来的には金属資源として利用できる可能性もあるのである。



図10 小惑星プシケの想像図。表面はおそらく金属と岩石が混ざっているのであろうが、左は金属が目立つ場合で、右はあまり目立たない場合である。イラストはPeter Rubin氏による（クレジット：左 Peter Rubin、右 NASA/JPL-Caltech/ASU）

最初に述べたように、現時点で小惑星は108万個も発見されており、まだまだ未知の天体が文字通り山ほどある。小惑星は近い未来の人類にとってかなり関係の深い天体になる可能性が高く、今後も小惑星を理解していくことが重要である。

参考文献

- 1) 吉川真：日本惑星科学会誌, 17 (2008) 1, 9.
- 2) <https://minorplanetcenter.net>
- 3) 吉川真：天文月報, 110 (2017) 2, 85.
- 4) 柳沢正久：天文月報, 110 (2017) 2, 111.
- 5) M.Yoshikawa, J.Kawaguchi, A.Fujiwara and A.Tsuchiyama：ASTEROIDS IV, Univ. of Arizona Press, (2015), 397.
- 6) 吉川真：日本航空宇宙学会誌, 60 (2012) 12, 455.
- 7) Y.Tsuda, M.Yoshikawa, M.Abe, H.Minamino and S.Nakazawa：Acta Astronautica, 91 (2013), 356.
- 8) M.Yoshikawa, S.Watanabe, Y.Tsuda, H.Kuninaka and Hayabusa2 Project Team：Transactions of JSASS Space Technology Japan, 12 (2014) ists29, Tk_29.
- 9) Y.Tsuda, T.Saiki, F.Terui, S.Nakazawa, M.Yoshikawa and S.Watanabe：Acta Astronautica, 171 (2020), 42.
- 10) Y.Tsuda, H.Takeuchi, N.Ogawa, G.Ono, S.Kikuchi, Y.Oki, M.Ishiguro, D.Kuroda, S.Urakawa, S.Okumura and Hayabusa2 Project Team：Astrodynamics, 4 (2020) 2, 137.
- 11) S.Watanabe et al.：Science, 364 (2019) Issue 6437, 268.
- 12) K.Kitazato et al.：Science, 364 (2019) Issue 6437, 272.
- 13) E.Tatsumi et al.：Astronomy & Astrophysics, 639 (2020), A83.
- 14) M.Arakawa et al.：Science, 368 (2020) Issue 6486, 67.
- 15) T.Okada et al.：Nature, 579 (2020), 518.
- 16) Y.Shimaki et al.：Icarus, 348 (2020) 113835.
- 17) S.Sugita et al.：Science, 364 (2019) Issue 6437, eaaw0422.
- 18) T.Morota et al.：Science, 368 (2020) Issue 6491, 654.

(2021年5月17日受付)