



小惑星探査ミッション「はやぶさ2」の新たな挑戦



JAXA 宇宙科学研究所准教授
 「はやぶさ2」ミッションマネージャ
 吉川 真

1. 「はやぶさ2」ミッションの目標

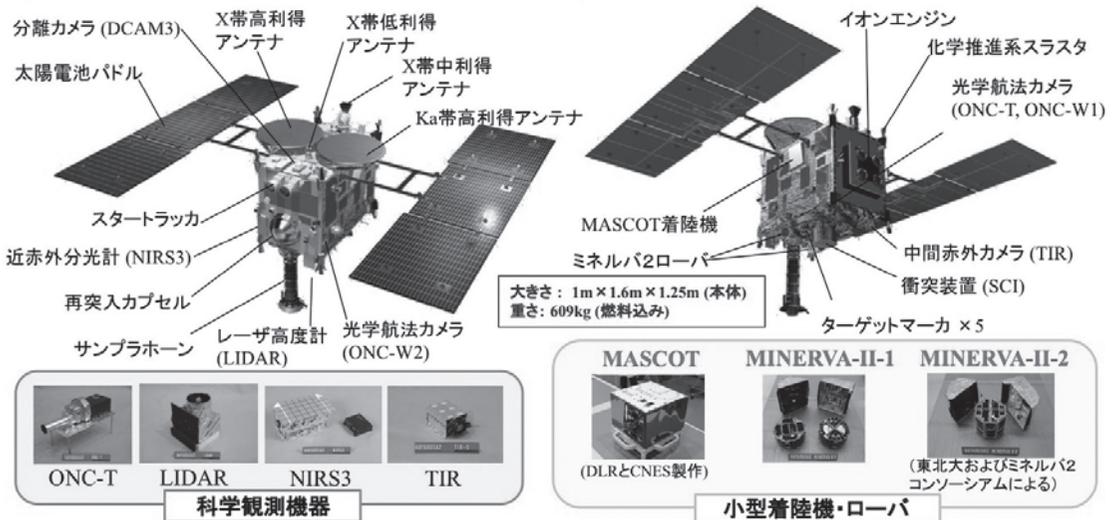
「はやぶさ2」ミッションは、「はやぶさ」の後継ミッションです。「はやぶさ」は、小惑星から物質を持ち帰る世界初の小惑星サンプルリターンミッションでした。実は、それだけでなく、月よりも遙かに遠い天体に着陸してから地球に戻ってくる世界初のミッションだったのです。ちなみに、現時点でもそのようなミッションを行ったのは「はやぶさ」だけで、2番目となるミッションが「はやぶさ2」なのです。「はやぶさ2」が成功すれば、世界初と世界で2番目を日本が独占することになります。

その「はやぶさ」ですが、いろいろなトラブルに見舞われました。「はやぶさ」の目的地はイトカワと呼ばれる小惑星でしたが、2回目にイトカワに着陸した後から、燃料が漏れたり、通信が途絶えたり、イオンエンジンが壊れたり、いくつかの致命的とも言え

るトラブルがありました。しかし、「はやぶさ」はそのトラブルを乗り越えて地球にイトカワの物質を届けるという使命を果たしたのです。

「はやぶさ2」の探査機を図1に示します。「はやぶさ2」では、「はやぶさ」の経験を精査して、よりトラブルの少ない確実な技術に仕上げることが大きな目標となっています。このこと自体、非常に重要なことではあるのですが、「はやぶさ2」では、科学がより重要な目標に位置づけられています。それは「生命の原材料を解明する」というもので、これは大きな挑戦です。そのために、「はやぶさ2」ではリュウグウという小惑星から物質を持ち帰ることにしました。

そもそも、イトカワやリュウグウというような小惑星から物質を地球に持ち帰る目的ですが、これは地球が生まれる前の物質を調べることになります。地球は、約46億年前に誕生したと言われていますが、誕



▲図1 「はやぶさ2」探査機的主要搭載機器

科学搭載機器は、望遠の光学航法カメラ (ONC-T)、レーザ高度計 (LIDAR)、近赤外分光計 (NIRS3)、中間赤外カメラ (TIR) である。

生したときにいったんどろどろに溶けてしまったと言われています。つまり、地球にある物質を調べても地球を作った元の物質は分からないわけです。ところが、イトカワやリュウグウのような小さな小惑星は、誕生してから物質的にはあまり変化していないと考えられています。そのような天体から物質も持ち帰って調べれば、地球を作った元の材料が分かることになります。

「はやぶさ」が探査したイトカワは、S型に分類される小惑星で、有機物をあまり含まない岩石でできています。S型の小惑星は地球軌道に近いところに多いもので、地球本体の元になった物質だと考えられます。「はやぶさ2」が探査するリュウグウはC型に分類される小惑星です。リュウグウも岩石でできていますが、リュウグウは有機物や水を含んでいると考えられています。もしこれが正しいとすると、地球にある水の起源や生命の元となる物質が解明できるかもしれません。つまり「はやぶさ2」の大きな科学目標は、生命の原材料を探す、ということになるわけです。

生命の起源という問題は、現代科学における非常に大きなテーマです。「はやぶさ2」では生命の起源そのものを解明するのは難しいかと思いますが、地球の生命を作る元の材料を調べることで、生命の起源を解明する手がかりを得られることが期待されているのです。

2. 小惑星リュウグウ

「はやぶさ2」は2014年12月3日に打ち上げられました。ちょうど1年後に地球に戻ってきて、地球の引力を利用して軌道を変更するというスイングバイというテクニックを使ってリュウグウに向かう軌道に乗りました。そして、さらに2年半後の2018年6月27日にリュウグウに到着しました。

到着の少し前からリュウグウの形がだんだん見えってきましたが、見えてきた形は驚くべきものでした。ケレスやベスタという直径が500 km以上にもなる大きな小惑星は形が球形をしています。それ以外の小惑星はいびつな形をしているのが普通です。リュウグウは直径が1 km程度ですから、形は当然不規則なものと考えられていましたが、実際の形はちょうどそばんの珠のような幾何学的な形をしていたのです(図2)。英語では「spinning top」と呼ばれていて、回転するコマの形です。

実は、このようなコマ型の小惑星があるということは以前から知られていました。探査はされていませんが、レーダーの観測でいくつかの小惑星がコマ型であることは分かっていたのです。ただし、観測されたコマ型小惑星のほとんどは、自転周期が2、3時間の短いもので、かなり速く自転しています。つまり、自転による遠心力がこのようなコマ型になる原因と考えられます。ところがリュウグウの自転周期は7時間半ほどで、コマ型になるほど速いわけではありません。そのため、到着前までは、誰もリュウグウがコマ型であるとは考えていませんでした。



▲図2 小惑星リュウグウ
約20 kmの距離から「はやぶさ2」の望遠の光学航法カメラで撮影。

もう1つの驚きは、リュウグウ表面が多数の岩塊(ボルダー)で覆われていて、広い平らな領域がなかったということです(図3)。このことは、リュウグウの形成過程を考えるうえで重要な手がかりとなるわけですが、問題はタッチダウン(着陸)する場所がない、ということです。「はやぶさ」が探査したイトカワも表面には多数の岩塊で覆われていました。しかし、イトカワの場合には幅50 mくらいの細長い平らな領域がありました。そこに「はやぶさ」はタッチダウンを試みたのです。リュウグウにもそのような平らな領域があると想定していたのですが、その想定は見事に裏切られてしまいました。

3. タッチダウン

「はやぶさ2」はリュウグウに到着してから、まずはその表面の詳しい観測を行いました。そして、ミネルバ2と呼ばれる2機の小さいローバ(探査車)



▲図3 クレーターと多数の岩塊
高度約6 km から撮影。
中央にリュウグウで最大のクレーターが見られる（直径約290 m）。

とマスコットと呼ばれるランダ（着陸機）をリュウグウ表面に降ろすことに成功しました。これらによって、リュウグウ表面でデータを取得することができました。リュウグウ表面で見ても石ころだらけで、砂の表面は見られませんでした。ちなみに、「はやぶさ」でも小型のローバであるミネルバをイトカワに降ろそうとしたのですが、失敗してしまいました。小型のローバ・ランダの小惑星への投下は、「はやぶさ2」が世界で初めて成功したのです。

そして、いよいよタッチダウンです。最初の予定は、2018年の10月にはタッチダウンを行うことになっていました。しかし、リュウグウ表面には平らで広い場所がありません。そこで、タッチダウンのやり方を変更することにし、そのためにタッチダウンは延期することになりました。

当初想定していたタッチダウンの方法は、「はやぶさ」で行ったものと同じです。これは、ターゲットマーカという人工的な目印を小惑星表面近くで分離し、探査機はそのターゲットマーカを追尾することで表面に着陸するというものです。この場合、小惑星表面には100 m くらいの幅の平らな場所が必要になります。しかし、リュウグウにはそのような場所はありません。そこで、ピンポイントタッチダウンという手法を用いることにしたのです。

後で紹介しますが、「はやぶさ2」では、衝突装置というものを使って人工的なクレーターを作るとい

うことも予定していました。その人工的に作るクレーターはせいぜい大きさが3 m 程度であろうと予測していたので、そのような場所に着陸する手法としてピンポイントタッチダウンという方法を事前に検討していたのです。ただ、これは、可能ならば試みるというものでした。ピンポイントタッチダウンでは、事前にターゲットマーカを探査機が着地する付近に降ろしておきます。そして、探査機はそのターゲットマーカを目印にしながら表面に降りていくわけです。

タッチダウンを行う場所ですが、なるべく平らな広い場所がよいのですが、リュウグウにはそのような場所は見当たりません。サンプルを採取するサンブラホンという装置は、長さが1 m ほどの筒状のものです。これが探査機の底面に付いており、探査機がリュウグウ表面に接近してこのサンブラホンの先端を小惑星表面に接触させて表面物質を採取します。つまり、探査機本体は、リュウグウ表面から1 m のところまで接近することになるわけです。ということは、高さが1 m の岩があるとぶつかる可能性があるわけです。実際には、探査機が少し傾く可能性もありますから、高さが60 cm 程度以上の岩があると危険ということになります。

そこで、高さが60 cm までの岩しかない領域を探しました。その結果、直径が20 m くらいの領域を見つけることができました。そこにターゲットマーカを投下したのですが、実際にターゲットマーカが着地した場所は、この直径20 m の円から5 m ほど外になってしまいました。そこで、ターゲットマーカが着地した付近をさらに詳しく調べたところ、すぐそばの直径6 m の領域にタッチダウンできそうなことが分かったのです。直径6 m というと探査機の太陽電池の端から端までの長さと同じです。まさにピンポイントタッチダウンを行う必要があります。

タッチダウンは、2019年2月22日に実行されました。タッチダウンの時刻には、探査機の管制室はかなり緊張に包まれましたが、結果的にはタッチダウン成功。後で、探査機のカメラが撮影した画像を見ると、タッチダウン直後に探査機が上昇するときに、非常にたくさんの砂礫が舞い上がっていることも分かりました。おそらく、リュウグウの表面物質がたくさん採取されているものと思います。ちなみに、位置誤差が1 m という非常に高精度でのタッチダウンが実

行きました。

4. さらなる挑戦

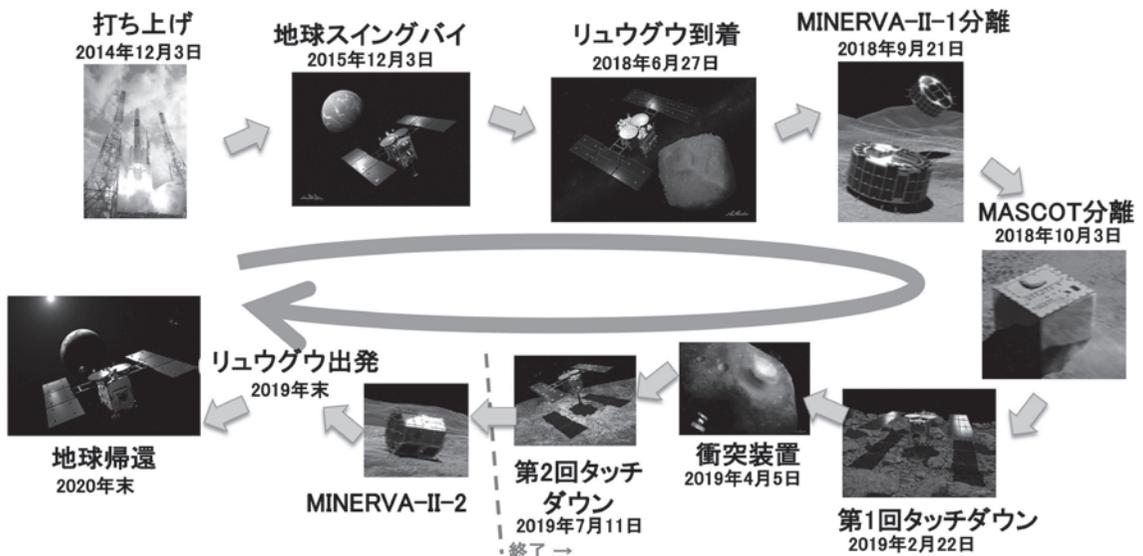
タッチダウンには成功しましたが、まだ大きな挑戦があります。それは、リュウグウ表面に人工的なクレーターを作るということです。そのために「はやぶさ2」は衝突装置（インパクト）というものを搭載しています。衝突装置は直径が30 cmほどの円筒形をした箱で、中には爆薬が入っています。小惑星上空で衝突装置が切り離されると、40分後に自動的に爆発します。爆発の勢いで、約2 kgの銅の塊が秒速2 kmに加速され、それが小惑星表面に衝突して、人工的なクレーターを作るのです。

原理は簡単ですが、これは非常に危険度の高い運用です。衝突装置が爆発すると、装置自体が粉々になって破片が四方八方に飛び散ります。また、小惑星表面からも砂礫が吹き出ます。これらが探査機に衝突したら大変ですから、探査機は、衝突装置を切り離れた後、急いで小惑星の背後に隠れます。ですが、探査機が隠れてしまうと、銅の塊が小惑星表面に衝突した後にどのようなことが起こるか観測できません。そこで、探査機が小惑星の背後に隠れる前に、分離カメラという小さいカメラを分離して浮かせておき、それが衝突の様子を撮影し、画像を電波で探査機に送る、ということをするのです。運用が複雑ですし、危険でもあるミッションですが、これが成功しますと、衝突によ

て小惑星表面から砂礫が噴出する様子や、人工クレーターを作ることで小惑星の地下を見ることができます。これは科学にとって非常に重要なデータになります。なぜならば、小惑星の表面は、太陽の光や放射線などで変質してしまっている可能性が高いからです。変質していない地下も是非調べてみたいのです。

2019年4月5日に、衝突装置によって人工クレーターを作る運用が行われました。この運用も非常に緊張しましたが、探査機は衝突装置が爆発したはずの時間を過ぎても、正常に電波を送ってきました。一安心です。運用の後、分離カメラが撮影した画像を見ると、小惑星表面から砂礫が噴出しているようすが写されていました。また、しばらくしてから衝突した場所を確認しに行ったところ直径が10 m以上にもなるクレーターが確認できました。人工クレーターを作ることに成功しました。

人工クレーターを作ることに成功したので、最後に残った大きな判断は、人工クレーター生成によって露出した地下物質を採取するために、2回目のタッチダウンを行うかどうかです。タッチダウンは大きなリスクを伴う運用です。失敗したら探査機を失う可能性があります。特に1回目のタッチダウンには成功しているわけですから、あえて危険を冒さなくてもよいのではないか、という議論がありました。一方で、小惑星の地下物質を採取する千載一遇のチャンスでもあります。“やるべきか、やらざるべきか”，それが問題



▲図4 「はやぶさ2」のミッションシーケンス（終了とは、2019年8月末の時点での状況を示す。）

なのです。

ただ、悩んでいても何も始まりません。我々は、2回目のタッチダウンを安全に行う方策を検討し、さらには考えられ得るすべての誤差要因によるリスクを検討しました。それで、2回目にタッチダウンを行うリスクは、1回目にタッチダウンを行ったときのリスクを下回ることを証明したのです。それで、2回目のタッチダウンを行うことにしました。

2回目のタッチダウンは、2019年7月11日に行いました。結果は大成功。1回目のタッチダウンよりもスムーズに探査機の運用が行われ、タッチダウンした場所の誤差は、目標地点からたった60cmのずれでした。「はやぶさ2」はタッチダウンの技術を確立したと言ってよいことになります。

ここまでが、この文章を書いている時点(2019年8月初め)の状況です。「はやぶさ2」は、2019年の年末にリュウグウを出発し、2020年末には地球に戻ってきてカプセルを地球に投下することになっています。リュウグウの物質が手にできれば、いよいよ生命の原材料探しが始まります。ミッションシーケンスの全体を図4に示します。

5. 宇宙への夢

このように「はやぶさ2」ミッションは、非常にドラマチックです。ミッションをやっているメンバーですら、感動の連続です。実は、「はやぶさ」のときもそうでした。「はやぶさ」のときの方が、より劇的だったかもしれません。「はやぶさ」は何度も危機的な状況乗り越えたミッションだったので。このような感動があるのは、誰もやったことがない、誰も見たことがない、世界初のことに挑戦したためです。ネットで検索すれば情報が得られるというわけにはいかない世界なのです。

このような感動を体験できて、自分は本当に幸せだと思います。これは、ずっと小惑星というものにこだわってきたために得られたものなのかもしれません。振り返ってみると大学院生のときに小惑星観測の手伝いを始めてから、軌道計算、小惑星の地球衝突問題(スペースガード、プラネタリー・ディフェンス)、小惑星探査と、約35年にわたって小惑星に関わっていることになりました。

高校生の頃はというと、宇宙は好きで宇宙に関連

した本をたくさん読んでいました。宇宙に興味を持ったのは小学生のときからなのですが、中学・高校と天文のクラブには入らずに、ずっと運動のクラブに入っていました。特に高校生のときには、山岳部でかなり本格的な山登りをやっていました。このことは、今に思うと現在の仕事に非常に役に立っています。

まずは、体力。山岳部では体力は十二分に鍛えられました。それと、チームワークやリーダーシップというものも山岳部で学んだ重要なことだったように思います。一歩間違えば死と隣り合わせの山行ですから、いかに安全にチームがまとまって行動するのが重要なのです。リーダーには、無理をしない冷静な判断力も必要です。また、重い荷物を背負って山道を登ったり降りたりするわけで、それはまさに苦行なわけです。しかし、それが単なる苦行ではなくて、山登りというものにも楽しみや感動すらあるということを皆で共有することも重要なのです。そして、限られた物資しかない中で、何が起ころうとも工夫して切り抜けるという技も山登りで学びました。

このようなことは、宇宙ミッションを行うときも同じです。未知の世界に立ち向かうための知力や技術が必要なことは言うまでもないですが、予想外のことに直面しても冷静に判断し、限られたリソースの中で解決策を考える、そして決して諦めない。目的が達成されると感動もある・・・まさに登山と同じです。

高校生の時は、自分が好きなことをどんどんやると同時に、広い視野を持っていろいろなことを体験する、ということが将来役に立つように思います。今、「はやぶさ2」のミッションを行っていて、特にそう思います。夢を持ち続けて何事にも挑戦する気持ちを忘れないでいれば、いずれは何らかの形でその夢が叶うことになる、そう信じています。