



リュウグウは想定と違い、ソロバンのコマのような形をしていた。 ©イラスト提供：池下章裕氏

「はやぶさ2」の衝突装置に採用された無酸素銅

銅の弾丸

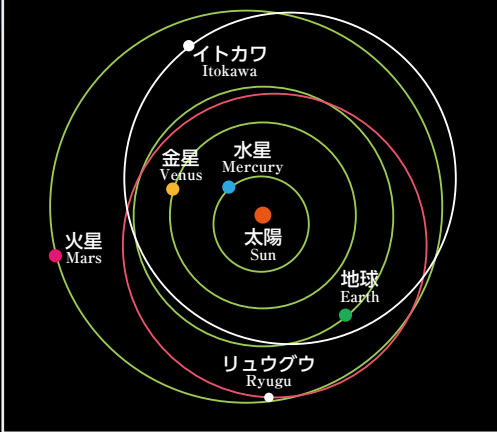
で人工クレーター
を作れ!

4月5日、地球から遙か遠く約3億kmも離れた小惑星リュウグウ(Ryugu)で、人類初の歴史的な一弾が発射された。それは、小惑星探査機「はやぶさ2」の衝突装置から飛び出した「銅の弾丸」だ。世界中の人々が固唾を飲んで見守る中、小惑星表面に着弾。砂礫を舞い上げると見事に人工クレーターを生成した。これにより表層下に隠れていた新鮮な地下物質を露出させることに成功。次に目指す最終ミッションは、人工クレーター付近に着陸してサンプルを採取し、無事に地球へと帰還することだ。

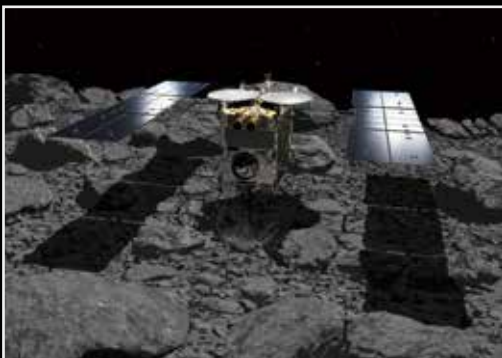
日本の宇宙開発・探査技術のレベルの高さに驚嘆しながら、世界中が熱いまなざしで「はやぶさ2」の動向を見守り続けているのはわけがある。

「はやぶさ2」が探査しているリュウグウは、C型小惑星と呼ばれる原始的な天体で、太陽系が誕生した頃、約46億年前の水や有機物が、今でも残されていると想定されている。地球の水はどこからきたのか。生命を構成する有機物はどこでできたのか。さらに、太陽系で最初に行われた微惑星の衝突・破壊・合体を通して、惑星はどのようにして生まれたのか。そんな疑問を説く鍵を、「はやぶさ2」が持ち帰ろうとしているのだ。

リュウグウの軌道



地球からリュウグウへ。それは片道3年半もかかる宇宙の旅だ(往路は未知のリュウグウの軌道に乗せるため時間を要すが、復路は約1年と短い)。リュウグウは、水を含んだ岩石が存在すると予想され、水を連想する「リュウグウ」の名が付けられた。また、浦島太郎が竜宮城から玉手箱を持ち帰ったように、「はやぶさ2」も無事にサンプルを持ち帰ることができるようにとの願いも込められている。



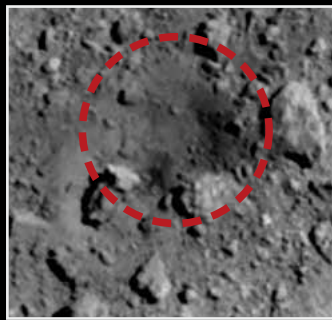
想定外の情報が次々と判明するリュウグウ。その厳しい条件をクリアし、2019年2月22日、第1回目のタッチダウン(着陸)は無事に成功した。

©イラスト提供：池下章裕氏

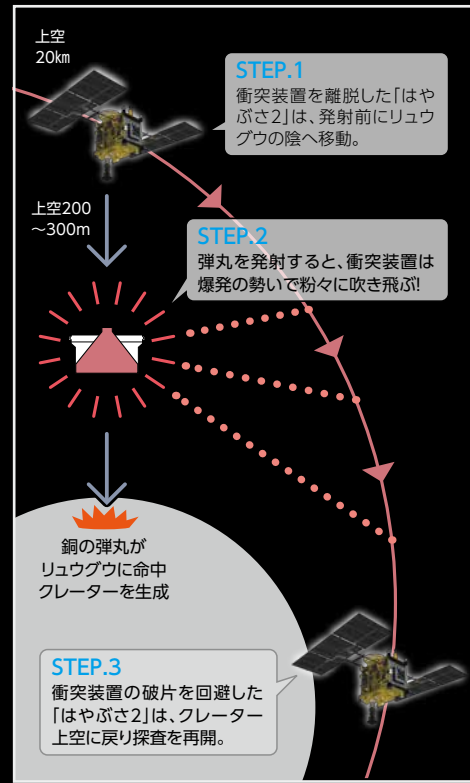
「はやぶさ2」の衝突装置に採用された銅の弾丸



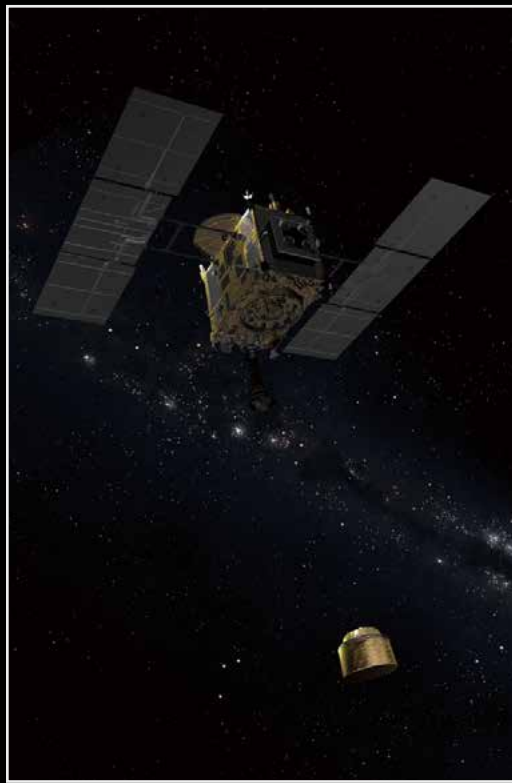
▲銅の弾丸が衝突する前
©写真提供：JAXA、東京大ほか



▲弾丸は事前に設定した目標地点からわずか20mの誤差で見事に着弾。生成したクレーターは深さ約2m、幅約10mと想像以上の成果に。その周辺には、掘り出された地質も確認できている。
©写真提供：JAXA、東京大ほか



▲衝突装置がクレーターを生成するまでの動き。「はやぶさ2」は、衝突装置を離脱後、弾丸を発射する前にリュウグウの陰へと避難した。これは爆発により破壊された衝突装置の破片で傷つけないように安全を確保するため。その後、着弾地点の上空へと戻り、探査を再開した。
資料提供：JAXA



▲衝突装置を離脱する「はやぶさ2」。「この装置をはじめ、大半が新しいスタッフによる新アイデアです。「はやぶさ」の良いところは継承しながらも、自ら悩み考え抜き、苦勞して生み出した技術でなければ、これだけのビッグプロジェクトに自信と責任を持って臨むことはできません」と佐伯氏。
©イラスト提供：池下章裕氏

衝突装置は、直径約30cmの円筒形であり、その中に円すい形の爆薬部をもつ。ここに約4.7kgの爆薬を詰め、厚さ約5mm・重さ約2kgの銅板をライナーとして使用した。

分離機構
発射部(爆薬部)

ケース
伝爆薬
爆薬
ライナー

小型ローバ(MINERVA-II)
イオンエンジン
推進系スラスタ(12基)
中間赤外カメラ(TIR)
衝突装置(SCI)

▲「はやぶさ2」の下部には、「はやぶさ」にはなかったクレーターをつくるための「衝突装置(SCI)」が搭載されている。
©写真提供：JAXA

▲図A：衝突装置の構造。銅板のカーブに注目。この角度が、命中精度を高める秘密。

▲図B：銅板の変化。爆薬の爆発衝撃波を受け、銅板は瞬時に変形と加速をし、秒速2km以上で目標に向かって直進していく。
資料提供：JAXA



▲実験では、爆薬の量から銅板に付けるカーブの角度まで、成功率を高める様々なポイントを計算し、一つひとつ検証していった。
©写真提供：JAXA

「地球とリュウグウでは、情報が届くまで約20分のタイムラグが発生し、往復だと計40分の遅れとなります。このタイムラグが発生する仕組みを作り、繰り返し訓練してきました。しかし、地球からの判断では間に合わないケースも出てきます。そこで最終的には探査機は自律的に行動するようになっていきます。」

「約3億km離れた「はやぶさ2」をピンポイントの場所に着陸」

「それにしても約3億kmも離れた「はやぶさ2」をどうやって操作しているのだろう？」

「地球とリュウグウでは、情報が届くまで約20分のタイムラグが発生し、往復だと計40分の遅れとなります。このタイムラグが発生する仕組みを作り、繰り返し訓練してきました。しかし、地球からの判断では間に合わないケースも出てきます。そこで最終的には探査機は自律的に行動するようになっていきます。」

「銅が選ばれた理由は優れた延性と天然に存在しないこと」

「以前、H-IIAロケットの第3エンジン燃焼室の冷却装置に銅合金が使用されたことをお伝えしたが、今回の壮大な宇宙プロジェクトの成否を握る重要な役割に、再び銅が選ばれたことは誇らしい限りだ。この「銅の弾丸を放つ衝突装置」を開発したキーマンが、宇宙科学研究所宇宙飛行工学研究系助教佐伯孝尚氏。現在も探査機の運用責任者として多忙な日々を送る佐伯氏を訪ね、神奈川県立の国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)相模原キャンパスへと足を運んだ。

「この衝突装置は、どのような形状と仕組みとなっているのだろう？」

「衝突装置は直径30cmの円筒形であり、その中に、円すい形の爆薬部をもちます。本体の重量は14kgで、爆薬部はそのうちの10kg程度を占めています。爆薬部は、ステンレス製の円すいの容器に爆薬を詰め、ライナーと呼ぶ約2kgの薄い銅板でふさいでいます(図A参照)。爆発の衝撃波を受け銅板は瞬時に変形と加速をし、秒速2km以上で目標に向かって直進します。そして、リュウグウに衝突し人工クレーターをつくりました」

「弾丸を飛ばす大砲と言ったイメージだが、なぜこんなユニークな形状に？」

「まず、銅板が理想的な弾丸形状に変化して目標に飛び出していくのです(図B)。しかし、装置の製作は我々だけでは不可能でした。例えば、銅板と円すい容器は、しっかりとくっ付いていながらも、爆破の衝撃で上手に離れなければなりません。なにより実際に使用する爆薬約4.5kgはかなりの破壊力です。そこで火薬類の製造を専門とする日本工機株式会社と協力をお願いしました。実験は凄まじい迫力で、爆破の経験などない私は正直すごく怖かったです」

当初、円すい容器はアルミ製だったが、爆薬の耐真空性を考慮して爆薬部を密封容器にする必要が出てきた。そのため、ケース材を、銅と溶接可能なステンレス製に変更。発射実験は、爆薬の量を変えながら、小さなものから次第にサイズアップし、最終的に約100m先のターゲットに命中できる精度へと高めた。実際のミッションでは、リュウグウの上空200〜300mの高さから銅の弾丸を発射しているが、大気のないリュウグウではその程度の距離の違いはなにも問題ないそうだ。



佐伯 孝尚氏
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系助教

「銅板に付けたカーブが成功の秘訣」

「銅の弾丸は、目標地点からわずか20〜30mの誤差で見事に着弾した。どうやってこの命中精度を実現したのだろう？」

「まずは正確に衝突装置をターゲットに向けるのですが、これは制御でクリアできます。問題は、どうやって銅板をまっすぐに飛ばすか。そのためには、銅がきちんと弾丸状になつてくれる必要があります。よく見ると銅の円盤にはカーブが付けられています。爆発の衝撃波がこのカーブした銅板に当た

「大砲には長い砲身が必要で、そんな大きなものは搭載できませんでした。ペネトレータは？掘削して採取する方法は？」など、開発時に様々なアイデアが出ましたが、どれも重量、サイズ、予算、スケジュールなどの条件を満たせませんでした。最終的に、今回採用した衝突装置が、最もコンパクトで成功率が高いと判断したのです」

「では、弾丸に銅を採用された理由は？」

「開発当初から、ライナーは銅と決定していました。その理由は、銅の持つ素晴らしい延性です。銅板なら爆発の勢いで柔軟に伸び、理想的な弾丸形状へと変化してくれます。タンタルや鉄なども候補に挙がりましたが、このプロジェクトには銅がベストと判断しました。銅は天然には存在しませんが、もしも採取したサンプルに銅が混じってもリュウグウの内部物質と混同しなくて済むのです。ですから現在リュウグウには、あるはずのない銅が存在しています。なんだか不思議な気がしませんか(笑)」

「一方、地球で想定していた状況と、リュウグウの状況はかなり異なっていたらしい。」

「事前にわかっていたのは、リュウグウの自転周期くらいで、そもそも形状がコマのようだとわかったのは到着してからです。表面はゴツゴツとして、着陸に適した平坦な場所はごくわずかでした。1回目のタッチダウンは、やつと見つけた約6m四方の箇所、約6mの「はやぶさ2」を、まさにピンポイントで着陸させ、表面サンプルを採取したのです」

米国は年間に何十回もロケットを打ち上げているが、日本は1〜2回。それでこれだけのミッションを成し遂げる日本の技術の高さに世界中が拍手を贈った。次のクレーター内へのタッチダウンも容易なのでは？」

「クレーター内は無理なんです。クレーターは直径が10m以上ありますが、深さが約2〜3mあり、内に着陸すると左右の太陽電池パネルが斜面にぶつかってしまいます。いまはクレーター周辺の状況を細かく調べ、ちがった表面下サンプルをうまく回収できる着陸地点を特定している最中です。」

「はやぶさ2」は、1回目の着陸で採取した表面サンプルを体内に抱えていますから、それを失うわけにはいきません。リュウグウは、9月に太陽に最も近付くため、着陸できるタイムリットは6月末〜7月頭。それまでにタッチダウンを行うか否か、どこにいつ着陸するかを慎重に見定めています」

取材後、2回目のタッチダウンは7月11日に実施され、世界初の小惑星地下からのサンプル採取に成功した。「はやぶさ2」が帰還する予定は、2020年末である。