

もうひとつの小惑星サンプルリターン OSIRIS-REx の地球帰還に想う

ウーメラでのはやぶさ2・カプセル回収オペレーション前の数日間。現地にいた自分が、天気予報を一時間ごとにチェックする神経症的な状況になっていたことを思い出す（ちなみに、海外出張の機内で「君の名は」を、チョイスの中にあれば必ず、見ます。「来ることがわかっている、どうにかしなければならない、準備万端かどうか誰にもわからない、でも絶対に成功させなければならない」というウーメラでの気持ちを思い出すし、それは忘れてはいけないと思うから。）。JAXA の数名が米国ユタ州の OSIRIS-REx カプセル着陸地点へと NASA に招待され、彼らのカプセル回収活動を見守ることができた。サンプルリターンは究極の太陽系探査の手法、地質学者が地球を知るために行ってきたことを太陽系へと展開するものであるが、究極のベストなやり方があるわけではなく、実際、はやぶさ2と OSIRIS-REx では大きく異なる。同じような天体から二回もサンプルを持ち帰るのは無駄？いやいや、比較研究こそが科学を大きく進めるのだ。それに、ここで扱う問題は「太陽系が出来つつある中で地球が生命惑星となる前提がどのように整ったのか」という、われわれの世界の起源に関する、誰もが考えたいような問題であることを強調したい。以下に挙げられた論点から、これらのことを深く理解していただければ幸いである。

そして、JAXA と NASA は3つの小天体サンプルリターン計画（はやぶさ2、OSIRIS-REx、MMX）において持続発展的な形で協力していること、おそらく、国際協力の理想的な形のひとつを実現していることも指摘しておきたい。

2023.9.24 （OSIRIS-REx 地球帰還の日、帰還地ユタ州ソルトレイクシティにて）

JAXA 宇宙科学研究所・副所長 藤本正樹

2023 年 9 月 24 日の朝、米国の小惑星サンプルリターンミッション OSIRIS-REx（オサリス・レックス）が地球帰還を果たしました。小惑星 Bennu（ベヌー）を探査し、着陸により採取したサンプルを今、地球へ持ち帰ったのです。

惑星間を往復し、天体の物質を持ち帰る「サンプルリターン」は究極の宇宙探査。この探査形態のミッションを完遂したのは日本のはやぶさ1・2と米国の OSIRIS-REx しかありません。究極のミッションはそれだけ難しい技術ということです。それを大成功させた OSIRIS-REx チームに心からの賛辞を贈りたいと思います。

さて、一口にサンプルリターンは究極の探査と言っても、その技術ははやぶさ2と OSIRIS-REx ではかなり違ったものでした。ここでは代表的な5つの相違点を挙げてみます。

（1）推進方式：OSIRIS-REx はいわゆる従来型の化学推進系のエンジンを採用したため、総重量2トンのうち1トンは推進剤が占めていました。はやぶさ2は燃費が良い電気推進（イオンエンジン）を採用した結果、総重量約600kgのうち推進剤はたった60kgで済んでいます。化学推進は枯れた技術であるのに対し、電気推進は比較的新しく、非常に繊細な運用が必要という特徴があります。

(2) 滞在方式：小惑星滞在中、OSIRIS-REx は小惑星まわりの周回軌道を回っていたのに対し、はやぶさ2はヘリコプタのように定点にホバリングしていました。前者は周回軌道を維持するための燃料が極小なのに対し、後者は毎日エンジンを噴射し沈降と浮揚を繰り返します。周回させるには太陽電池が常に太陽を向くための回転機構などが必要になります。ホバリングはそういったお高い装置は不要ですが、毎日エンジン噴射の運用が必要になります。

(3) 地表観測の作戦：OSIRIS-REx は安全な遠距離から超望遠カメラでサクサク地表を撮影していましたが、はやぶさ2は同じ解像度の写真を得るために低高度に降下する難しい運用を繰り返していました。望遠カメラは解像度が高い分視野が狭くなるので、少ない数のカメラで視野と解像度を折衷した設計としたのがはやぶさ2の作戦でした。OSIRIS-REx のカメラが羨ましい！と思いながらも、はやぶさ2は繰り返し降下をすることを逆手にとって運用練度向上の機会として活用し、リュウグウへの2度もの高精度着陸成功に繋がりました。

(4) 着陸方式：両ミッションとも、想定以上に険しい小惑星の地形に翻弄され、当初予定していた着陸方式からの変更を余儀なくさせられました。はやぶさ2では、ターゲットマーカーという人工の目印を事前に着陸目標地点付近に設置しておき、それを起点にした自動制御で高精度着陸を実現しました。OSIRIS-REx は、そのような人工の目印を持ち合わせていなかったため、地形の特徴をカメラが直接認識する方式を採用しました。地形の特徴と言っても似たような石ころだけの風景なので、この作戦は非常に繊細なチューニングが必要でした。最終的に着陸を完全成功させた OSIRIS-REx チームは本当に凄いと思いましたが、彼らと雑談した際に「ターゲットマーカーがあればなあ」というぼやきを聞いたことも・・・

(5) サンプル採取方式：はやぶさ2も OSIRIS-REx も、小惑星へ数秒間というごく短時間接地しその間にサンプル採取を行う作戦でしたが、サンプル採取方式そのものは大きく異なっていました。はやぶさ2は弾丸を高速で地面に発射し、破砕片を捕獲する方式の一方、OSIRIS-REx は、ガスを吹き付けて舞い上がった砂を捕獲する方式を採用していました。前者は採取量は数グラムに限定されるものの地表の硬さなどの性状によらず捕獲できるのに対し、後者は一枚岩なら何も採れないが砂ならば数百グラム採れることが期待できる方式でした。量より確実性を追求した日本と、最新の科学知見を惜しみなく注ぎ込みベヌーに特化し量を追求した米国の違いが見て取れます。

以上のように、総じて米国は十分なリソースと手堅い技術で横綱相撲、日本は繊細な工夫を詰め合わせる方式と言ったところでしょうか。工夫詰め合わせ方式はいかにも日本人好みのやり方ですが、技術者としては桶狭間合戦を毎回するのは本道ではないと思いますし、世界のスタンダードをとるなら横綱相撲を心掛けるべきとも思います。探査も宇宙先進国だけのステージではなくよりつつある昨今、器用に走りすぎず手堅い技術もしっかり押し進めることが重要だと思います。

さりとて、はやぶさ2は、私たちならではの工夫と苦労を通じて、類例ない技術とチーム

力を蓄積した結果、「2回目の着陸」「地下物質の採取」という OSIRIS-REx とは全く違った大成果を獲得できたのです。OSIRIS-REx という好敵手の存在により、日本ならではの技術文化の強みと注意点がより浮き彫りになったのではないのでしょうか。

はやぶさ2は本当に実り多きミッションだったと再認識しつつ、同時代にサンプルリターンを志し、完遂し、この究極の探査方式の価値を高めた米国の友人たちへ心からの祝辞と感謝を表したいと思います。おめでとう OSIRIS-REx！ありがとう OSIRIS-REx！

2023.9.24 （OSIRIS-REx 地球帰還の日、帰還地ユタ州ソルトレイクシティにて）

はやぶさ2（元）プロジェクトマネージャ 津田雄一



イトカワ、リュウグウに続き、OSIRS-RExによりベヌーから新たな小惑星試料を人類は手にすることができました。米国ユタ州の着陸地点において回収されたベヌー試料が入った帰還カプセルは、現地での処置がなされた後、すぐにテキサス州ヒューストンにあるNASA ジョンソン宇宙センター (JSC/NASA) のキュレーション施設へと搬送されることになっています。

現在、私は、受け入れ準備の整った JSC/NASA において、搬送されてくるベヌー試料を待ち受けています。今回も待つ・・・3年前の2020年12月6日、日本から遠く離れたウーメラからの進捗を聞きながら、「いよいよ我々の出番だ」という緊張感・高揚感とともに、相模原の JAXA キュレーション施設で試料を待ち受けていた、はやぶさ2帰還の記憶が蘇ります。そう、帰還成功の歓喜のフィナーレが、キュレーションチーム・サンプル分析チームの活動開始の号砲となるのです。

これから、約半年間、JSC/NASA のキュレーションチームそして OSIRS-REx のサンプル分析チームは、ベヌー試料に記録された太陽系最初期の謎に挑むことになります。そして回収したベヌー試料の一部は、JAXA にも引き継がれます。リュウグウとベヌー、2つの小惑星の違いは何か？両者の比較研究に向け、JAXA 側でも受け入れ準備を着々と進めています。以下、ベヌーとリュウグウを比較しながら、ベヌー試料の分析で期待されることを概説します。

(1) リモートセンシング観測からの予想と、サンプル分析による予想の裏切り：探査機

に搭載された可視・近赤外の反射分光観測からは、リュウグウ・ベヌーの両天体から、粘土鉱物に代表される含水鉱物 (=水) の存在を示唆する吸収スペクトルが得られていました。リュウグウでは、その吸収の程度が小さいため、リュウグウには含水鉱物があまり含まれず、リュウグウ母天体で生じた加熱により脱水が進行したと考えられていました。一方、ベヌーは顕著な含水鉱物の吸収スペクトルに加え、水と岩石の反応で生じる炭酸塩鉱物の存在も示唆されています。つまり、リモートセンシング観測の段階では、「リュウグウ (乾燥：加熱脱水済み) vs ベヌー (水あり)」という予想でした。しかし、その後のサンプル分析により、リュウグウ試料には多量の含水鉱物や炭酸塩鉱物が含まれ、リモートセンシング観測の予想を大きく (そして、嬉しく) 裏切ることになりました。果たして、今後の試料分析が明らかにするであろう真のベヌーの姿とは？

(2) 宇宙風化の影響：リュウグウのリモートセンシング観測で、多量に存在した含水鉱物の特徴を検出できなかった原因が宇宙風化によるマスキングであることが、回収試料の分析により明らかになりました。宇宙風化とは、宇宙空間を漂う微細な高速粒子の衝突や、太陽風や銀河宇宙線などの高エネルギー粒子による、大気のない天体表面の変質のことで、いわゆる”日焼け“にたとえられます。リュウグウでは、この宇宙風化によりリュウグウの最表面が焼けただけのために、脱水しているように見えてい

たのです。ベヌーも当然、宇宙風化を受けています。ただし、同じように海水浴をしても日焼けの程度が人によって違うように、宇宙風化の影響も物質ごとに異なります。ベヌーが被った宇宙風化とはどんなものなのか、そしてリュウグウとは何が違うのか？比較研究が楽しみです。

(3) リュウグウ試料の分析で得られた科学成果：リュウグウ試料の分析ではたくさんの科学成果が得られました（そして、今でも世界中で分析が続けられています）。ここでは、そのなかでもハイライトを3つ、ご紹介します。

- a) リュウグウ試料は、太陽の組成を最もよく反映した始原的な隕石タイプ（CI コンドライト）と同じだったことが明らかになりました。CI コンドライト（シーアイコンドライトと読みます）は始原的ではあるのですが、隕石であるため地球上での汚染は免れません。一方、リュウグウ試料は地球汚染の影響は最小にとどめられており（キュレーションチームとしてはゼロといたい）、今後は太陽組成のレファレンスとなることが期待されています。
- b) 地球の汚染を受けていないリュウグウから、世界で初めて、水や揮発性物質の量が正しく決定されました。水や揮発性成分は、地球汚染を最も受けやすい成分であり、実際に隕石はリュウグウの3倍程度の地球由来の水を吸収していることが明らかになりました。これまで惑星科学の対象であった小惑星は、宇宙資源探査の対象としても注目されています。小惑星の水の量を正しく推定できたことで、今後、加速する宇宙資源探査分野においてもリュウグウがレファレンスとして用いられることが期待されます。
- c) リュウグウから2万種を超える有機物が確認されました。これまでの隕石研究でも同様に多くの有機物が検出されてきたのですが、どうしても地球汚染の影響を完全に排除できていませんでした。リュウグウからは、まさに宇宙由来の有機物が検出され、その中には地球生命の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酵素であるビタミンも検出されました。ただ、アミノ酸の分析によると、リュウグウ試料に含まれる有機物は非生物的に作られたことがわかっており、地球生命・宇宙生命との関連に関しては、今後のさらなる研究成果が待たれます。

(4) ベヌー試料への期待：リュウグウ試料の分析では惑星科学や隕石学を書き換える多くの科学成果が得られました。そして、これから始まるベヌー試料の分析は、それらをどのように追記し、上書きするのでしょうか？リモートセンシング観測により、ベヌーはCI コンドライトよりは一般的な隕石種であるCM コンドライト（シーエムコンドライトと読みます）に似ているようです。CM コンドライト隕石は様々な熱変成を受けているものがあります。ベヌーはどのような熱変成を受けているのでしょうか？そして、熱変成は、含水量だけでなく、有機物の種類や量を変化させます。リュウグウとベヌーの比較研究により、小惑星の元となる微惑星がたどった環境の変遷と、その環境を生じ

させた初期太陽系の描像がより正しく描かれることを期待しています。

今後のベヌー試料の分析では、JSC/NASA のキュレーション作業に、日本（JAXA）やカナダ（CSA：カナダ宇宙庁）からの研究者が参加します。また、OSIRIS-REx サンプル分析チームには、日本からも、はやぶさ2を経験した多くの科学者が参加することになっています。サンプルリターンという国際プロジェクトに参加できる喜びとともに、試料を無事に地球まで届けてくださった OSIRIS-REx 探査機チーム、そして万全な体制で受け入れ準備を整えた JSC/NASA のキュレーションチーム、OSIRIS-REx サンプル分析チームへの皆さんへの感謝でこの文章を結びたいと思います。

2023.9.24 （OSIRIS-REx 地球帰還の日、テキサス州ヒューストン JSC/NASA にて）
地球外物質研究グループ グループ長 白井寛裕

