

## はやぶさ 2 拡張ミッションへと至る道

2021 年 12 月 1 日

はやぶさ 2 プロジェクト 三樹 裕也 津田 雄一

はやぶさ 2 は 2020 年 12 月に地球帰還後、カプセルを分離して、また深宇宙へ飛び立つ軌道に乗りました。この時、イオンエンジンの燃料（キセノン）は約半分程度が残り、なかなか立派な量の軌道修正（約 1.7km/s）が可能であるため、残されたリソースをフル活用して、どのようなミッションが可能であるか事前に検討を行いました。

実はこの新たな計画の検討、はやぶさ 2 打ち上げ直後の 2015 年から少人数で細々と検討を開始し、地球帰還が見えてきた 2019 年にチーム総出の本格的な活動になりました。最悪ケースも最良ケースも「全部考える！」のが、はやぶさ 2 チームの流儀。リュウグウに一度も着陸できないかも・・・と一時は“最悪の状況”を覚悟しましたが、ふたを開けてみれば完全成功。チームメンバーでさえ半信半疑だった（！？）拡張ミッションを実行に移す機会がやってきたのです。決して余裕があったわけではありませんが、はやぶさ 2 に第二の人生を送らせてあげるという“最良の状況”を作れたことには、チーム一同大満足です。

さて、その拡張ミッションの作戦立案の全容を紹介しましょう。

まず初期条件として、はやぶさ 2 の地球帰還の際には、カプセルを確実に地球に落とせるように、地球からの高度 300km という非常に近い距離まで近づくため、この時の地球重力エネルギーによって軌道が大きく変化します（地球スイングバイと同様の原理）。地球スイングバイの場合には、目的の軌道に投入するために地球に対してどこを通すか、その相対位置を厳密に選びますが、今回はカプセルがウーメラ砂漠のある範囲にきちんと落下するように、探査機の地球への最接近ポイントが決まっていたため、地球からの離脱後の軌道に選択の自由度はほとんどありません。結果的に、この地球重力による軌道変換により、はやぶさ 2 の軌道は、地球の公転軌道と金星の公転軌道の間を行ったり来たりする楕円軌道に入ることが分かっていました。そこからまず探したのは、地球からの離脱後、その方向にたまたま到達できる小惑星があるか？ということでしたが、太陽系に 100 万個の小惑星があると言えど、広い宇宙の中では、それほど都合の良い天体はありませんでした。ただ、幸いなことにカプセル分離後、地球を再出発した探査機が持つ地球との相対速度は 4km/s 以上あり、これであれば軌道エネルギー的には金星や火星に届かせることができます。また長く待つことで地球へ再び舞い戻り、地球スイングバイさせることも可能です。金星や火星を探索するシナリオが描けるばかりでなく、それら大きな天体を使ったスイングバイを行うことで、その後の行き先の可能性を格段に広げることができるのです。惑星スイングバイに持ち込むためには、正確にその惑星に向かうために絶妙な軌道修正が必要です。そのためにイオンエンジンを使おうという発想になりました。イオンエンジンは化学推進に比べ燃費が良いと言っても、広い宇宙の中での軌道変更量としては、惑星スイングバイには遠く及びませ

ん。そのため、惑星スイングバイによる劇的な軌道変更に対して、惑星スイングバイや目的地へ精密に誘導していく軌道修正がイオンエンジンの主な役割となります。はやぶさ2の場合、地球帰還後の自然な軌道から金星や地球などの惑星に戻すためにも数百 m/s の軌道修正量が必要となるので、1.7km/s の残燃料は絶望的になるほど少ない量ではなく、拡張ミッションの計画段階において、“まだ何かできるはずだ”と思えるという意味でちょうど良い量だったとも言えます。以上のような検討の結果、大雑把に分けて以下の6つのようなシナリオが出てきました。

- (1) できるだけたくさんの小惑星を通り過ぎ探査する「小惑星マルチフライバイミッション」
- (2) 複数の地球スイングバイを繰り返し、最終的に小惑星へ到着する「小惑星ランデブーミッション」
- (3) 複数の金星・地球スイングバイを繰り返し、最終的に小惑星へ到着する「小惑星ランデブーミッション」
- (4) 複数の金星・地球スイングバイを繰り返したのちに、火星を周期的に訪れる軌道に乗せる、「火星サイクリックフライバイミッション」
- (5) 複数の金星・地球スイングバイを繰り返し、木星方面へ飛んでいく「太陽系深淵分探査」
- (6) 他のミッションとのコラボレーションを考えた「小惑星衝突ミッション」

(4)の火星フライバイは、興味のある科学者は多いでしょうが、すでに送り込まれている、火星探査衛星やローバに比べ、フライバイ観測だけで優位な成果を挙げるのは難しそうです。(5)の最長不倒記録狙いのミッションも、どこまで行けるかという観点で面白いですが、訪れる天体が少ないのが玉に瑕です。(6)の小惑星衝突ミッションも、他の探査ミッションにとってみると、とても面白いアイデアです。例えば、火星衛星のフォボス・ダイモスなどにも衝突させることも原理的には可能で、火星衛星サンプルリターン計画のMMXがサンプル採取後に、はやぶさ2をフォボスないしはダイモスに衝突させ、その様子を観測できれば、はやぶさ2における衝突装置SCIと同様の科学成果を出し得る可能性があります。また、軌道設計次第でDidymosへの衝突も可能で、NASAとESAの協同ミッションである、DART、HERAミッションにとっても、このようなインパクトが得られると、大変興味深い成果となるでしょう。実際、HERAミッションに参画する研究者と、はやぶさ2をDidymosにぶつける拡張ミッションにしてはどうかという議論をしたりもしました。ですが、はやぶさ2は、ランデブーミッションのために開発した探査機です。搭載されている機器や機能はランデブーミッションを遂行するためのものであり、また、Ryugu近傍フェーズで蓄積された運用技術も、ランデブーミッションでこそ、その真価を発揮します。選択肢として残されているのであれば、やはり最終的にはランデブーミッションを行うという方向に舵を切りました。こうして、(1),(4),(5),(6)の候補は排除され、最終的に(2),(3)のどちらかのケースの検討に焦点が絞られるようになりました。

最初に、この残燃料を使って到達できる天体を探索した結果、354個という数の天体が候補としてあることが分かりました。この段階では、はやぶさ2の軌道を伝搬して、その軌道に、ある範囲で近づく小惑星がないかを絨毯爆撃的に探索し、ある程度近づくことが分かった天体について、イオンエンジンの残りの $\Delta V$ で到達可能かどうかを探ります。次に、354個の小惑星について調査を行い、上記の探索で調べた天体到達に必要な軌道制御量や、対象天体の軌道確定度、探査機運用の成立性など工学的な観点と、対象天体の大きさや自転速度、タイプなど、理学的興味の観点からランク付けを行って精査した結果、最終的に2001 AV43と1998 KY26という2天体まで絞り込みました(図1)。

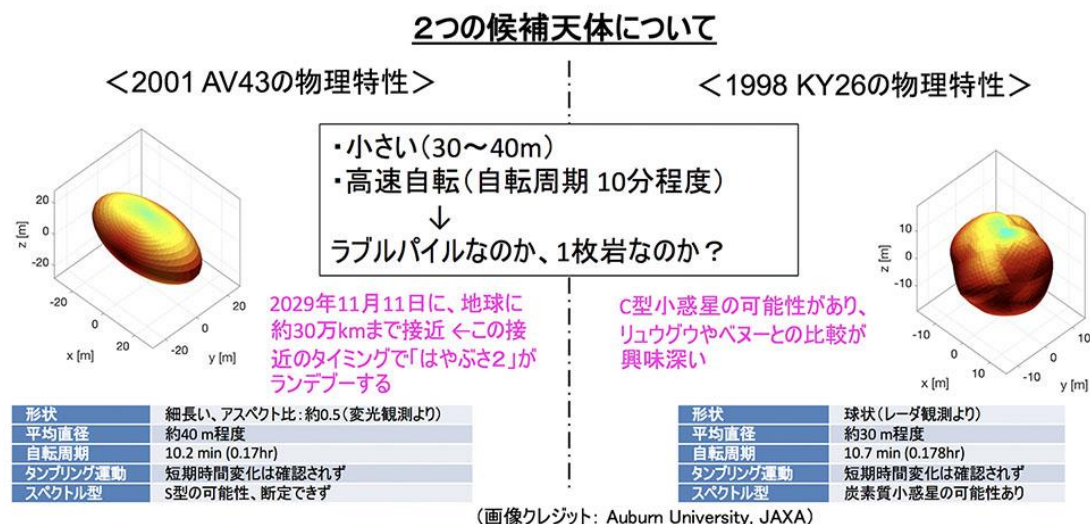


図1 探査候補天体の特徴 (画像クレジット: Auburn University, JAXA)

これらはどちらも直径数10mというとても小さな天体で、自転周期10分という非常に早い自転速度から、高速自転小惑星(Fast Rotator)と呼ばれます。未だかつて人類が到達したことのない特徴の天体であり、その特徴からリュウグウとの比較観測により、リュウグウで得られた科学的知見がより深められると期待されます(図2)。

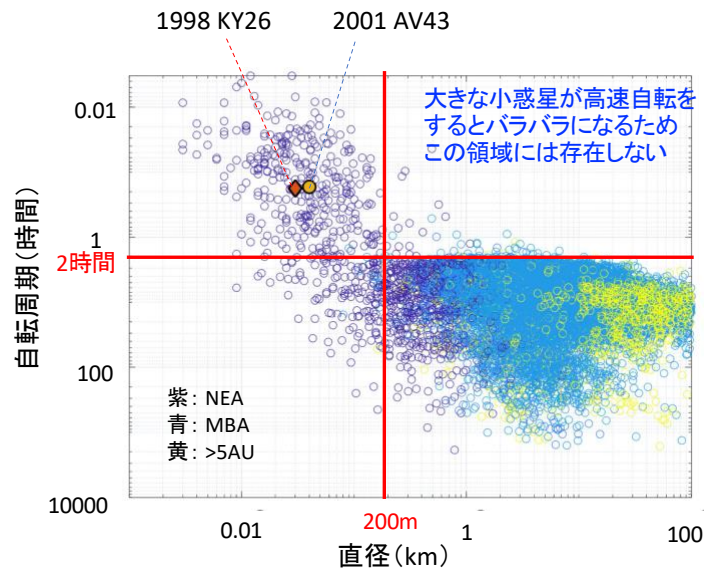


図2 各シナリオの軌道図 (画像クレジット : Auburn University, JAXA)

これらの2つの天体へ向かう軌道はそれぞれ異なっており、2001 AV43 へは金星経由、1998 KY26 へはまた別の小惑星を経由する形で到達する計画で、EVEEA(Earth->Venus->Earth->Earth->Asteroid)シナリオと EAEEA(Earth->Asteroid->Earth->Earth->Asteroid)シナリオと呼んでおり、EVEEA シナリオでは、2024 年に金星スイングバイ、EAEEA シナリオでは2026 年に小惑星フライバイを行うのが主な特徴の違いになります(図3)。またどちらのシナリオにおいても、その後に、2回の地球スイングバイを行って大きく軌道変更します。

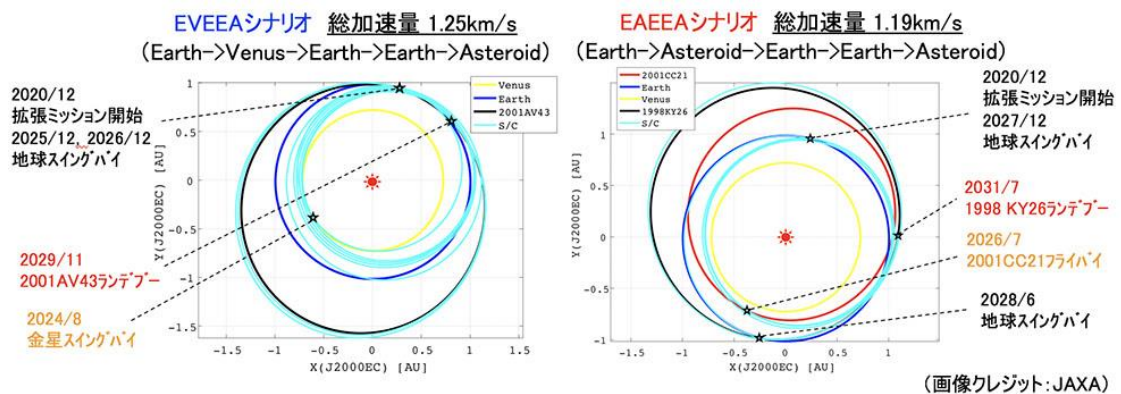


図3 各シナリオの軌道図 (画像クレジット : JAXA)

2001 AV43 への到着は2029 年11 月、1998 KY26 への到着は2031 年7 月の予定で、さらに10 年程度かかる長期のミッションとなります。これらの最終候補2 案について、チーム内ではさらなる議論を尽くしました。結論として、理学的・工学的なミッション価値として

は、どちらにもそれぞれの面白さがあり甲乙付け難く、最終的にミッション達成の可能性が高いものを選択することとなりました。ただ、そもそも、どちらのシナリオにおいても、探査機の太陽距離は設計前提の範囲を大きく超えた領域を航行するため、従来のはやぶさ2の熱設計からすると、リスクしかありません。これは前述の通り、地球帰還時のスイングバイの影響で探査機の軌道がより太陽側に曲げられてしまい、どの選択肢を取っていても経験してしまう環境となるため、致し方ないことではあります。そのため、それは百も承知で、さらに突き詰めて、探査機の通る軌道、及び取り得る姿勢に基づき各搭載機器の温度プロファイルを詳細に解析してみると、この2シナリオの最小太陽距離のほんの数%の違いが、探査機搭載機器の許容温度範囲を超えるか超えないかの大きな違いを生み出していることが判明しました。EVEEAのシナリオでは、EAEEAに比べると、金星軌道まで近付くため太陽距離がより小さくなるため、この違いによりEAEEAシナリオに軍配が上がったのです。整理すると、

- (a) まず残された軌道修正量で惑星に到達可能かを検討
- (b) 到達可能な惑星重力を利用したスイングバイにより、到達可能な天体を探索
- (c) 出てきたもののうち、最終的にランデブー可能な天体を探索
- (d) 理学・工学の観点で興味深い、かつ到達の実現性の高いものを選択
- (e) 探査機システム（主に熱設計）の観点でシナリオの運用実現性を評価

というように、残された軌道修正可能量から到達可能天体を網羅的に探索し、探査機の性能から得られる成果を最大化できるシナリオを選択、より詳細な調査・解析から天体の絞り込みを行って最終候補を選定するという段階的に詳細化していくプロセスを辿りました。

最終的に選択されたシナリオのミッションシーケンスは以下の通りです。

- ・2020年12月：地球出発
- ・2026年7月：小惑星 2001 CC21 フライバイ
- ・2027年12月：地球スイングバイ
- ・2028年6月：地球スイングバイ
- ・2031年7月：小惑星 1998 KY26 ランデブー

上述の通り、目標の天体へ到達するのは、地球帰還後からさらに10年後となりますが、はやぶさ2の機体は地球帰還までのミッションを想定して設計されており、その後の搭載機器の寿命は保証の限りではなく、いつ故障や不具合が起こってもおかしくない状態です。しかしその一方で、手塩にかけて作った探査機の限界を知ることは、宇宙技術に携わる者にとってまたとないチャンスでもあります。どこまで到達出来るかは分かりませんが、最後の最後まで、はやぶさ2と共に限界に挑戦し続けます！

関連リンク：

[はやぶさ2プロジェクト](#)

[小惑星探査機「はやぶさ2」](#)