

シリーズ： はやぶさ2 #トリフネ・フライバイに寄せて
「2020年12月からの6年間（その2）」

宇宙科学研究所
イオンエンジン担当 月崎 竜童
はやぶさ2 #チーム長 三桝 裕也
プロジェクトサイエンティスト 田中 智

■ 拡張ミッションにおけるイオンエンジン視点での比較

電気推進技術のめざましい進化と実績を振り返るべく、世界各国で実施されてきた代表的な拡張ミッションの成果を紹介する。

【米国】

NASA/JPL が1998年に打ち上げた質量486kgのDeep Space 1は、2kWのNSTAR イオンエンジンを利用して1年間のノミナルミッション中に燃料（キセノン） 約22 kgを消費して、 ΔV : 1.3 km/sを達成した。その後、2年間の拡張ミッションで燃料73.4 kg達成し、 ΔV : 4.3 km/s達成し、ボレリー彗星フライバイに成功している。

後継機「DAWN」は「はやぶさ2」の2倍にあたる1.2トンの大型機体となり、3機のNSTAR イオンエンジンを搭載して2007年に打ち上げられた。425kgのキセノンを消費し、イオンエンジンだけで ΔV : 10km/sを達成し、メインベルト最大の小惑星ケレスに到達した。2016年にはノミナルミッションを終え、拡張ミッションでは、ケレスにとどまり続け、2018年にはヒドラジンの枯渇により2年間で終了している。

2023年に打ち上げられた後継のPsycheは、NSTAR イオンエンジンが達成した425kgのキセノンで ΔV : 10km/sという金字塔であるにもかかわらず、ロシア製ホールスラスタSPT140を採用し、2.6トンの探査機にXeを922kg搭載して ΔV : 6.5km/sを実現する。

【欧州】

2003年に打ち上げられた1.5kWのホールスラスタPPS1350を搭載した、ESAの月周回衛星SMART-1は、質量367kgの機体に82kgのキセノンを搭載し、 ΔV : 3.9km/sを達成した。月周回軌道に到達のち2005年にはノミナルミッションを終えた。その後1年間の拡張ミッションを終了している。

ベピコロノボは4.1トン、Xeを1400kg搭載し「はやぶさ2」の10倍の出力をもつ4.5kWのイオンエンジン4機で ΔV : 4km/s実現する。拡張ミッションは未定だが、今年の水星到着とともにイオンエンジンのモジュールは切り離される。

【日本】

質量 610kg のはやぶさ 2 は、2014 年に打ち上げ、約 25kg のキセノンを消費し、 ΔV : 1km/s を達成し、2020 年に地球帰還を果たし、ノミナルミッションを完遂した。さらに 5 年 7 ヶ月におよぶ拡張ミッションに取り組み、45kg のキセノンを累積で消費して、 ΔV : 2km/s を達成し小惑星トリフネフライバイを実現した。今後さらに 5 年間の拡張ミッションが予定されている。

他国の拡張ミッションが、1~2 年程度であるのに対し、はやぶさ 2 は拡張ミッションだけでも 10 年を超え、中間目標であったトリフネフライバイまででも 5 年以上ととても長かった。2021 年以後はコロナ禍のなか、リモート運用を実装し乗り切ったこともあり、現場にいても、最低限の人しか出勤しておらず、ほとんどがリモート対応、プロジェクト部屋も閑散としているのが現状だった。そういった意味で、2026 年 7 月 5 日に久しぶりに管制室でフルメンバーが勢揃いしたのが、とても嬉しかった。リモート対応、テレワークは、ソフトウェア開発や運用ではある程度有効であることが示されたが、ハードウェア開発において、机上の空論がたびたび発散する審査会をみるにつけ、働き方改革以後に開発されたハードウェア(探査機・宇宙機)がどれほど、成功、失敗するのか、疑問に感じる。

また、成功すれば必ず報われるとは限らない。宇宙研は、常に新規事業を起こしミッションを立ち上げない限り、定常的に十分な予算はつかずギリ貧のまま死んでいくのみだというのは恩師の弁である。一方で、使えるものは最後の一滴まで使い倒し成果をあげるのが、エンジニアとしての正論である。これが両立する世界を実現せねばならない。「拡張ミッションを 5 年 10 年続けたから、新規開発が滞り、予算も停滞し宇宙研は死んだ」とはならないようにするのが、拡張ミッションの真の成功ではなかろうか。世界に胸を張れる成果を上げたのだから、報われる世界を実現しよう！

■ ノミナルミッション以上の厳しさ

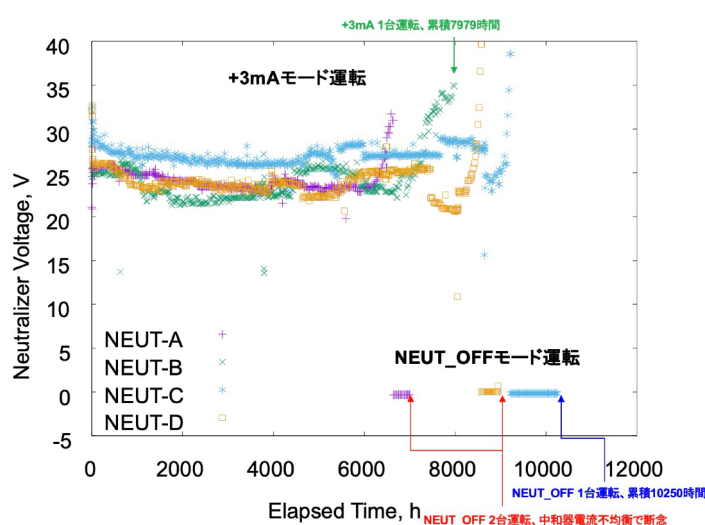
定常（ノミナル）ミッションでのランデブーに対し、秒速 5 km/s という高速でアプローチするフライバイの軌道決定が極めて高度な運用を求められたのと同様、イオンエンジンにとっても拡張ミッションは未踏の挑戦の連続であった。初期状態のフレッシュな機体で挑んだ定常ミッションとは異なり、長年の運用を経て経年変化したエンジンを限界まで精密に調整し、運用し続けることこそが拡張ミッションの本質と言える。

特に 2021 年、通常の運用モード維持が難しくなった際、打開策として選択した「Neut-OFF モード」による 2 台同時運転において、数百時間後に双方の稼働を失うという大きな試練に直面した。しかし、この貴重な宇宙データから「Neut-OFF モードにおける安全な運用は 1 台稼働に限る」という重要な技術的知見・知恵を得ることができた。

下記のグラフは、2026 年 5 月末時点における寿命の重要な指標（中和機電圧と運転時間）を示したものであり、現在も稼働を続けるイオンエンジン B の軌跡を緑線で描いている。

これまでの地上での研究成果をもとに講じたキセノン流量増加に対策の効果により、電圧上昇の傾きは緩やかさを保っている。流量を増加することで、宇宙機表面の損耗が抑えられている知見は、2016-17年の米国の長期海外派遣研修中で学んだことだ。前述の Psyche でも遠日点付近で実装されている。グラフ横軸 12,000 時間を超えたその先には、重要なマイルストーンである地球スイングバイが待っている。この緑のラインがどのような未来を描き出していくのか。

宇宙に存在するすべての事物と同様に、探査機の運用にもいつか終わりが訪れる。だからこそ「はやぶさ2」の輝かしい足跡に相応しい最高のエンディングを結実できるよう、エンジニアとして持てるすべての知見と創意工夫を注ぎ込み、一日一日を愚直かつ確実な試行錯誤とともに歩んでいきたい。



(ここまで、月崎竜童)

■ 運用視点での地球帰還からの6年間

はやぶさ2が地球に帰還した頃には、10年に及ぶ拡張ミッションの計画は全貌が明らかになっていた。最初のハイライトのトリフネフライバイまで5年半(≒約6年間)。その当時、途方も無く先のように思っていたが、2026年7月5日にフライバイミッションが終了し、はや1ヶ月が経とうとしている。ちょうど良い機会なので、これまでの6年を振り返ってみよう。

【イオンエンジン運用】

地球帰還後、やはりメインとなったのはイオンエンジンによる軌道制御運用だ。もちろんリュウグウへのアプローチ、地球への帰還の中でもやってきた運用であったが、イオンエンジンの劣化も見え始め、劣化と付き合いながら運転を継続するために試行錯誤した。この頃の知見は現状のBによる1台運転にも活かしている。この辺りは月崎によって前述されている内容を参照していただきたい。西山、月崎をはじめとするイオンエンジンチームのメンバ

一にはこの約6年という長いイオンエンジンの運転期間にご協力いただき、感謝しかない。そして何卒引き続きよろしくお願いします。

【RW 故障時の対策】

劣化が見られていたのは、イオンエンジンだけではない。運用の可否を決めるほど重要な姿勢制御装置であるリアクションホイール (RW) もまた、少なからず劣化が見え始めていた。RW の故障に備え、元々、Z 軸周りの RW のみを使用する One Wheel Control (OWC) という制御モードは確立されていたが、設計寿命を超えた探査機においては、2 台搭載されている Z の RW が両方とも壊れないとも限らない。我々は、Z の RW に頼らない X/Y のみを使用する X-OWC、Y-OWC 向けのソフトウェアの開発と共に、ある軸の RW が故障した場合に備えた、Double Reaction Wheel (DRW) の制御モードについても開発に着手した。一年半ほどかけてオンボードの SW も新規開発し、2023 年度末には、これらを書き込むための SW 書換え運用もはやぶさ 2 史上初めて実施した。この頃、チームメンバーとして参画し始めた、岩城も若手ながら新たなロジック検討に貢献している。

【ソフトウェア書換え運用】

初めての SW 書換えを終え、ようやくフライバイ SW の開発に着手し始めたのが 2023 年ごろ。当時、本当に間に合うのかと思うほど新規のアルゴリズムの搭載を検討していたが、ほぼ最初に立案したスケジュール通りに NEC の SW 開発部隊は開発作業を進めてくれた。関係各位には心からの感謝と賛辞を送りたい。また、JAXA 運用チーム側では、藤原、楠本といった若手チームメンバーが台頭してきたのもこの頃で、NEC メンバーと協力して SW の完成に貢献していた。その結果は、別コラム「[超近接フライバイの先に見えたもの](#)」の通りであり、ぜひこちらもご覧いただければと思う。

【合運用】

2024 年度にやってきたのが、はやぶさ 2 史上において最も通信ができなかった合の時期だ。はやぶさ 2 が地球に対して、太陽の反対側に位置する時期（外合）であり、事前の予想では 3 ヶ月ほどの通信途絶期間になるであろうと予想されていたが、実態としては、探査機のアンテナ側の性能もあって、5 月中旬から 7 月初旬の 1.5 ヶ月程度に留まった。それでも、リュウグウの近傍フェーズで経験したのがせいぜい 3 週間であったため、1.5 ヶ月も探査機との通信が途絶するという状況は運用チームにとって恐怖でしかない。この期間は、はやぶさ初号機時代から受け継がれてきた、1bit 通信の活躍により、最低限の情報を受け取りつつ、恐怖の 1.5 ヶ月を無事に乗り切ることができた。また、この時期（に限らずだが）、NESIC からの出向者であった下村の活躍も見逃せないものであり、チーム一同、心からの感謝の念が絶えない。

【セーフホールド】

フライバイ運用に向けて、準備を着実に進めている中で突如として 2025 年 3 月末に RW が異常状態になり、探査機はセーフホールドモードへと移行した。新しい体制になってからは初めての状況で、チームメンバーには緊張が走ったが、過去のセーフホールドの知見を足掛

かりに、なんと Z 周りの RW 1 台だけを利用した OWC モードとスピンモードの組み合わせによる、新たな復帰運用に取り組んだ。はやぶさ 2 は、セーフホールドモードに入ると、安全確保のため、自動でスピン状態に入る。ここから三軸姿勢制御状態に戻すためには、色々大変なのだが、OWC モードを経由することで、非常に効率的に三軸姿勢に戻すことが可能となった。ここでも、若手メンバーの楠本、木村が積極的に運用に取り組み、新しい運用技術の確立に一役買っている。今後、研究成果が世に出ていくのが楽しみだ。

【理学観測運用】

この 5 年半を通して、忘れてはならないのが、黄道光観測や系外惑星のトランジット観測の実績だ。イオンエンジン運転中は実施が難しいため、その合間を縫って多くの観測を実施し、研究成果として発表されている。詳しくは、後段のコラムをご参照いただきたい。

【広報活動】

忘れてはならないのが、昔から継続的に実施している、はやぶさ 2 ならではの広報活動だ。SNS を中心として日々の活動を皆さんにお届けしてきたが、今回のフライバイミッションでは、YouTube による生配信にも取り組んだ。ここで活躍したのが、これまでもアウトリーチを一手に引き受けてきた吉川真と坂本である。最終的に全 9 回という生配信、かつチーム長からの無茶振りの日々に耐え抜き、無事にミッション後の後夜祭まで無事に終了することができた。配信にご協力いただいた、村上豪氏をはじめとする、SCCOT チームのメンバーにも心より感謝申し上げたい。

最後になるが、この中で登場していない関係者は山ほどいる。JAXA、メーカー、大学関係者、そして応援してくださっている皆様、本当にたくさんの方々のご協力で、この 5 年半の運用を継続してくることができた。この場をお借りして、関係者の皆さんに感謝を申し上げますと共に、引き続き、はやぶさ 2 のことを一緒に見守っていただけるよう、お願い申し上げます。

（ここまで、三舩裕也）

■ 6 年間の理学視点の目標達成度採点

「はやぶさ 2 拡張ミッション」の検討は、2020 年 12 月から遡ること約 1 年前、2019 年 9 月から開始した。2020 年 1 月には提案書の作成がおおよそまとまりつつあり、2 月 22 日には科学搭載機器 PI (Principal Investigator) を集めてキックオフ、そして 4 月 22 日には理工サイエンスチーム合同で新体制キックオフミーティングを開催し、本格的なスタートを切った。この新体制キックオフミーティングの冒頭、私は「本ミーティングの趣意」という題目で、科学チームの目標を 4 点掲げた。6 年を経た今、それぞれについて総括し、自己評価してみたい。

目標 1：この活動が「ミッション」として認定されるための審査資料を作成、ブラッシュアップすること（近未来）

評価： 言わずもがなではあるが、はやぶさ2拡張ミッション審査会は2021年10月1日に開催され、無事に審査を通過した。したがって、これは文句なしの満点！

目標2：巡航中のサイエンス観測についても成果を重ねること（中長期）

評価： 天体観測として成果が期待されるのはONC（可視カメラ）がメインとなるが、黄道光観測や系外惑星観測など、科学的に価値の高い、面白い成果が公表された。近年ではLIDARを用いた宇宙線検出の試みなど、新しい取り組みも行われている。そのほか、各機器の機能・性能チェックを定期的に遂行することで、長期間の宇宙空間飛行が機器に与える影響についても評価が続けられている。これも満点ということで！

目標3：いくつかの重要イベントに向け、サイエンス成果を最大限にする実行的な計画を検討すること

評価： 今回のトリフネフライバイについては、2023年6月に「CC21 フライバイ観測検討ワーキンググループ」を立ち上げた。フライバイまでに33回のミーティングを重ね、フライバイ後の現在も議論は続いている。立ち上げ当初、想定していた最接近距離は100km程度だった。それが半年ほどすると10kmとなり、そして最終的には1kmレベルにまで近づく計画となった。「そんなに近づけるのか」と、サイエンス界隈が大いに盛り上がったことをよく覚えている。そして実際に、その距離からトリフネを観測することができた。6年前に掲げた「サイエンス成果を最大限にする」という目標から考えれば、これは満点以上、としてもよいのではないだろうか。次なる重要イベント地球や月を利用した観測が期待される地球帰還時だと認識している。がんばって戻ってきて「はやぶさ君！」

目標4：観測機器チーム、システムとの情報交換、白熱した議論を通じてミッションを楽しむ、次の時代のミッション創生を担う若い研究者を育成すること

評価： 「はやぶさ2」時代から実施している「サイエンス系定例ミーティング」は、拡張ミッションに入ってから途切れることなく続いている。サイエンス運用計画や成果について議論し、情報交換を重ねてきた。また、国外のチームメンバーも参加するH#JST (Hayabusa2 Joint Science Team) Meetingもこれまでに計6回開催し、国際的なチームとしての位置付けも確立してきたと思う。搭載機器PIも、「はやぶさ2」時代から多くの機器で「世代交代」が進んだ。若い世代へのバトンタッチは、うまくいっていると感じている。誰もがミッションを「楽しめた」かどうかまでは分からないが、この目標についても、まあ合格点をいただいでよいだろう。

そして、私自身の立場についても、そろそろ世代交代の時期が来たと認識している。坂谷さん、よろしく。

（ここまで、田中智）