

シリーズ： はやぶさ2 #トリフネ・フライバイに寄せて  
「超近接フライバイの先に見えたもの」

はやぶさ2 拡張ミッションプロジェクトチーム システム担当  
藤原 正寛  
楠本 哲也

## ■探査機に託した最後の一步

2026年7月5日18時36分（日本時間、以後同じ。）、探査機の無事を知らせるテレメトリで湧き上がる管制室の中、オンボード航法誘導アルゴリズムを担当した藤原、楠本両名は、手放しに喜ぶことができなかった。

探査機制約から来る必要性に地球防衛というエッセンスも加わり、スレスレの超近接フライバイを実現することが今回の大目標であった。新規開発したオンボード航法誘導アルゴリズムは、地上からの指令で小惑星に接近させた後に残る誤差を修正する役割を担っていた。つまり、最終的にどこまで接近できるか、はオンボード航法誘導の成否にかかっていた。

## ■最後の一步が生まれるまで

オンボード航法誘導アルゴリズムでは何をやっていたのか、ということを紹介しておきたい。例えるなら宇宙版自動運転のようなものである。まずオンボード航法では、探査機に搭載された望遠光学カメラ（ONC-T）に写る小惑星の輝点位置から、小惑星相対の探査機位置、速度を推定する。オンボード誘導では、算出した相対位置、速度から、小惑星相対で設定した目標点を通るために必要な増速量（ $\Delta V$ ）を算出する。これらは制約の大きい探査機搭載の計算機で動くため、地上のように高度な処理はできない。小惑星相対の探査機の軌道は高校物理でも習う等速直線運動で近似でき、一見簡単そうに感じる。しかし、ワンチャンスの超近接フライバイミッションを成功させるためのシステムとして信頼できるオンボード航法誘導アルゴリズムの開発、運用においては、解決すべき課題が山ほどあった。

2023年、藤原がJAXAに入構し、はやぶさ2 #プロジェクトに加わって最初に渡されたのは、津田さんがNASAのDARTミッションに感化されて作成した航法誘導アルゴリズムの設計図であった。そこから探査機搭載の計算機で動作させるため、極限まで行列計算を削減した定式化に変更した。さらに、運用中に変更可能なパラメータも設計段階で確定させる必要があった。自作のシミュレータで何度も計算を行い、アルゴリズムの妥当性を確認しながら設計書を作り上げた。設計書を基にメーカー側でフライトソフトウェアの実装が進められ、代表ケースでの動作確認が実施されるまでに、およそ2年が経過していた。2026年1月、開発を完了したオンボード航法誘導アルゴリズムのアップロードが無事成功するのだ

が、そこから当日に至るまで、創意工夫をこらしながら、さらなる検証を重ねることとなる。

### ■一度きりの本番に備えて

現在のはやぶさ2 # は、若いチームとよく言われる。実際、三舩さんの下で技術検討を行うコアメンバー4人は、JAXA入構3～5年目（岩城、藤原、楠本、木村）である。運用面、地上誘導やサイエンスなどでは多くの方々から支援をいただいたものの、今回のフライバイ全体を成立させるコアメンバーとしては、心もとなかった。そのうえ、フライバイは一度きりであり、その成否を新規ソフトウェアに委ねる必要があった。新規開発したソフトが、検証と訓練を経て本番に至るまでを振り返りたい。その過程に、フライバイを成立させられた理由の一端があるように思う。

新たに作成したコードにはバグが含まれるものであり、単体では正常でも、探査機上では想定通りに動かない場合がある。しかも、フライバイは一回限りのため、本番で動かしながらデバッグすることはできない。そこで開発段階から、画像に細工をし、恒星を使うことで、フライバイと同様の試験ができるように仕込んでいた。この検証を26年2月から複数回行い、いくつもの問題点が洗い出された。事前検証なしに当日この不具合に出くわしていたらと思うと、今考えても背筋がヒヤッとするものもある。

地上でリアルタイムの運用を模擬できるシミュレーター（HIL）でも試験を行った。リュウグウ時のHILはランデブー用であったため、フライバイ用に改修したが、完了は2026年4月半ば、フライバイの3か月前を切っていた。当然ながら、あまりにも遅い。それでも遅れを取り戻すように、毎週HIL検証を行い、探査機や新規ソフトの特性を学んでいった。光学カメラ担当の理学チームの協力により実画像相当のノイズも模擬でき、結果への自信も深まった。安定した精度が出るようになったことから、接近距離を当初目標の1kmよりも近づけようという話にもなった。（その後、サイエンスチームとの接近距離と安全性のトレードオフに関する大激論になり、最終的に800mを目標とすることとなった。）

こうして、探査機ベースの検証により、フライバイ用の設定、コマンドやテレメトリが体に染み付き、時間感覚も磨かれていった。

### ■揺らぐ自信

探査機がトリフネに最接近するおよそ10日前から当日までの期間、地上で決定した小惑星相対の軌道に基づき、トリフネに対する通過点を修正するための $\Delta V$ を算出していた。このとき、日本国内で結成された軌道決定チームに加え、NASA/JPLでも独自に軌道決定が実施され、それぞれの軌道決定解を比較検討した上で $\Delta V$ を決定していた。

最接近距離の変更にも表れているように、毎週の HIL 検証を通じて、オンボード航法誘導に対する自信を深めていた。そうした中で衝撃を受けたのが、7 月 4 日時点での JPL 解の驚異的な精度であった。軌道決定解を比較するこの日の会議が終わりに差し掛かった頃、「この精度だとオンボード航法誘導しなくても接近できませんか？」と藤原は半分冗談、半分本気でつぶやいてしまった。「精度が高い≠正しい」という前提は理解していた。それでも、もし地上誘導だけで十分な精度が得られていたなら、オンボード航法誘導でかえって目標点から離れてしまうのではないか。その不安を抱えたまま当日を迎えることとなった。

## ■フライバイ当日

それぞれの視点で、当日感じていたことを振り返る。

（藤原視点）

7 月 5 日 15 時 30 分、地上から指令する最終の軌道修正マヌーバを実施した。ここから 1 時間半程度、航法計算の様子を見て問題なければオンボード誘導を開始する予定であった。しかし、航法解は想定外の方向に動き出した。「このままオンボード誘導を GO するのか？」藤原の脳裏には、そもそも地上での軌道決定結果が真に正しいとは限らないし、最終的には精度が上がるはずだ、という楽観的な考えと、もし地上での軌道決定が正しいとしたら、最初の  $\Delta V$  は小惑星に衝突する側に実施することになるのでは、という悲観的な考えがぐるぐる駆け巡り、判断に迷っていた。オンボード誘導開始時刻が残り 10 分に迫る中、楠本君が三桝さんと呼び止めた。この瞬間に考えが固まり、航法計算を一度リセットし、オンボード誘導を 30 分遅らせて 17 時 30 分から開始することとなった。

その後オンボード航法誘導は安定した動きを見せた。18 時 36 分、探査機からのテレメトリが確認され、管制室は拍手の渦に包まれたが、この時点で心の底から喜ぶことができなかった。管制室正面のモニターに表示された誤差楕円のどこを通ったのか、それとも予測から大きく外れた軌道を実際には飛行していたのか、その時点では知る術がなかったからである。

翌日までに、全ての観測機器のデータを取得できたことが報告された。写る小惑星が HIL で仮に使用していたリュウグウではなく「本物の」トリフネであったことを除き、およそ事前のシミュレーション通りの ONC-T 画像を目の当たりにして初めて、オンボード航法誘導が正しく動作していたことを確信でき安堵した。また、サイエンスメンバーの非常に嬉しそうな姿を見て、自分達に取り組んできたことが、とにかく近い距離を通したいという工学的な挑戦に留まらず、宇宙科学の観点でも貢献できたことを実感し、強い達成感を覚えた。

結果から振り返ると、航法系をリセットしたのは大正解の判断であったが、この判断は間違いなく一人ではできなかった。自分と同じレベルで技術的な判断ができる楠本君が隣にい

たからこそ、当日は的確な判断ができたと感じている。

（楠本視点）

7月5日、フライバイ3時間前が地上からの最終軌道修正であり、そこからオンボード航法が始まる。時間が近づくにつれ、隣の藤原さんがペットボトルを口に運ぶ回数が増え、緊張感が高まっているのが伝わった。つられて、楠本も何度も水を飲むようになったことをよく覚えている。

地上から最終軌道修正や航法系のリセットを経た後、フライバイ1時間前からオンボードの誘導航法を開始すると、推定値が突然飛ぶことも、異常な燃料を噴くこともなく、安定していた。これはかなり良い、このままいってくれと楠本は心の中で呟いていた。ところが残り10分を切った頃、航法系の更新が止まった。「更新されていない」と藤原さんが何度も言っていた。原因がわからないままフライバイ時刻を過ぎ、衝突していないことが確認された。一応は喜んだが、最後まで航法系を見届けられなかったことがひっかかり、安堵と残念が半々だった。

その後、管制室で余韻に浸っていた時、LIDARの測距ができていたという知らせがあった。結果的に、最後の10分よりも前のデータでも十分な精度で誘導できていたということだった。吉報を聞いて目が潤んだ。泣いている木村君を見て、さらにこみ上げるものがあった。

### ■超近接フライバイの先に見えたもの

ここまでを振り返ると、チームとして成長したと綺麗にまとめられるのかもしれない。しかし、そう言い切ってしまうことには抵抗がある。その言葉の下に、各人の地道な作業が埋もれてしまう気がするからだ。「このくらいで十分かな」と思う瞬間は何度もあったが、フライバイでスレスレを通過したらすごいことだ、人生に一度のチャンスかもしれないという思いが、妥協したい心に対抗する強さになった。

フライバイの翌日、トリフネが大きく写った画像が降りてきて、多くの人が喜んでいる姿を見た。こんなに喜ぶ人達がいるなら、頑張って良かったと、それぞれの地道な努力が報われた気がした。

完璧な運用だったか、と言われるとそうではない。航法系のリセット、最後の10分間の機能不全、地上誘導での小さなトラブルもあった。それでも、なんとか乗り越え、撮像された画像は完璧、といえることを誇りに思う。ぎりぎりの運用だったため、次をやっても同じ結果が得られるのか、と問われるだろう。技術的には、今回得られたデータを使って再現性を説明できる。しかし、それよりも、フライバイ直後、「できることなら、来月、もう一度フ

ライバイをしたい。次はもっとうまくやれる。」と藤原、楠本、木村で言い合った心意気こそが、将来の探査ミッションを支える力になる、と信じている。