

シリーズ： はやぶさ2 #トリフネ・フライバイに寄せて
「超近接フライバイを実現させたナビゲーションの進化」
～地上軌道決定とオンボード自律航法のシームレスな融合～

宇宙科学研究所 深宇宙追跡技術グループ
研究開発員 杉本 理英
グループ長 竹内 央

■ 究極のミッションを支えるナビゲーションのバトンリレー

深宇宙探査において、探査機を目的地へと導く「ナビゲーション」は、まさにミッションの成否を握る生命線である。近年の探査ミッションでは、ターゲットへの接近精度に対する要求がかつてないほど高まっている。その一方、ナビゲーション技術は「あって当たり前」であり特別フォーカスが向けられることは少ない。

トリフネ・フライバイにおいて求められる精度要求に応えるため、ナビゲーション技術は大きな進化を遂げた。その核心にあるのは、地上局での電波・光学データを用いた高精度な「地上軌道決定 (Orbit Determination: OD)」と、探査機自身がカメラで目標を捉えて誘導を行う「オンボード自律航法」とのシームレスな融合である。

本稿では、この超近接フライバイを成功に導いた、地上での軌道決定運用の裏側にある技術的ブレークスルーと、極限のタイムプレッシャーの中でチームがいかにして最適解を導き出したのか、その運用現場の軌跡を振り返る。

■ 観測データの包囲網：限界まで高められた軌道決定精度

フライバイへ向けた最終盤のナビゲーションは、イオンエンジンによる軌道制御が完了し、目標通過の約 10 日前から複数回設定された軌道修正 (TCM) とともに本格化した。トリフネ・フライバイにおける相対速度はおよそ 5 km/s で高速に通過することが分かっていた。ここで地上チームに課せられたのは、探査機と小惑星の相対位置および速度を、いかに早く、そして正確に割り出すかというミッションである。

地上からの電波航法 (レンジおよびドップラー観測) をベースとしながら、フライバイ前の勝負の 1 週間においては、複数の深宇宙地上局を利用した DDOR (Delta-DOR: 相対 VLBI) による高精度航法を毎日実施した。これにより、探査機の天球面上の位置精度を劇的に向上させた。

そして、決定的な転換点となったのがフライバイ 4 日前である。このタイミングから、探査機に搭載された光学機器 (カメラ) による目標天体の撮像データ (OpNav データ) が、軌道決定において確かな感度を持ち始めた。地球からの絶対的な位置を示す電波ナビゲーションデータと、探査機から見た目標天体との相対的な位置関係を示す光学データ。これらを地上システムで精緻に融合 (データフュージョン) させることで、探査機と小惑星の相対軌

道の決定精度は桁違いの大幅な向上を実現した。

■ 自律航法への条件

地上での軌道決定精度を極限まで高めることは、ナビゲーション技術者の本能とも言える。しかし、今回のフライバイにおいて最も興味深く、かつ技術的に難易度が高かったのは、地上航法からオンボードの自律航法へと制御を引き継ぐ最後の局面における精度要求のパラドックスであった。

明確な誤差バウンダリの数値化はされていなかったものの、オンボードのアルゴリズムを正常に機能させるためには、「予測精度がオプティミスティック（楽観的）すぎても、逆に低すぎてもいけない。実誤差を数キロメートルの範囲に確実に収めること」という暗黙の条件が存在した。

地上からの誘導精度をオプティミスティックに見積もりすぎた（誤差がほぼ無いという前提を与えてしまった）場合、探査機上のアルゴリズムは軌道修正の必要なしと判断し、本来必要な制御が棄却され「動かない」という事態に陥るリスクがある。逆に精度が「低すぎる」と、探査機は自身の想定を超えた大きな誤差を修正しようと過剰な制御を実施してしまい、結果として安全な軌道を逸脱する危険性があるのだ。

我々地上チームのミッションは、探査機上のアルゴリズムの挙動を深く理解し、オンボードのシステムが最も安定して、かつ確実に所定のパフォーマンスを発揮できる数 km 程度の条件に、探査機の誤差楕円（不定性）を予測すること。これこそが、地上チームのシステムエンジニアリングが求められた瞬間であった。ここでの数 km 程度とは探査機の小惑星に対する相対位置の誤差楕円であり、もちろん中心位置は真に航行する軌道を目指すことになる。

■ 極限のタイムプレッシャーと情報処理の戦い

フライバイ当日は、まさに時間との戦いであった。最後の軌道修正操縦である「TCM-D」が設定されたのは、フライバイのわずか 3 時間前である。探査機の制御計画を立案するチームへ軌道決定値を提供しなければならないタイムリミットは、そこから逆算してフライバイ約 5 時間前。この短時間までに、地球から遠く離れた探査機のデータを取得し、処理し、評価を下さなければならない。

要求精度に見合ったテレメトリデータの高精度な分析と、極めて短時間の OD（軌道決定）および OD 評価会のサイクルを回し続けることは、運用チームにとって最大のチャレンジであった。24 時間体制の運用により、高密度かつ連続的なデータが地上局に降り注ぐ。それは、貴重な入力であると同時に、いつの時点のデータで区切りをつけて（データのカットオフタイミング）最終計算を回すかという、運用者としての非常に重要な判断を常に迫られることを意味した。

このプレッシャーの中で正確さを担保するため、チームは知恵を絞った。例えば、通常のテレメトリデータだけでは時刻の分解能や確定に限界がある場合、探査機へ送信したコマンド

の履歴情報を補足的に用いることで、事象の発生タイミングを極めて正確に取得する手法を取り入れた。

さらに特筆すべきは、NASA/JPL (ジェット推進研究所) によるシャドウナビゲーション (独立検証) が並行して実施されていたことだ。世界最高峰のナビゲーションチームと同じデータを見つめ、結果を突き合わせる環境は、我々にとって心地よい緊張感と絶対的な信頼性を生み出す強力なバックアップとなった。

(杉本視点)

息を呑むようなタイムクリティカルな運用を根底で支えたのは、華やかなアルゴリズムではなく、チーム自身の手で練り上げられた「周辺技術」と「運用の自動化」であった。

最も大きなアドバンテージは、複数の観測データを取り込む高精度軌道決定システムを、外部に依存せず「インハウス (内製)」で開発・維持していたことだ。これにより、実運用に向けた準備やテストの過程で判明した必要な機能改修、あるいは新たな要件に対する機能追加を極めて迅速に実行することができた。自分たちの手で隅々まで把握し、チューニングを施したソフトウェアであるからこそ、提供する軌道プロダクトに対して絶対の自信を持つことができたのである。このソフトウェアは竹内さんの日々の研鑽の積み重ねであり、得られる結果にはいつも驚かされるものがあった。

また、個人的には地上チームや JPL へのデータ提供を担当していたこともあり、短時間の OD サイクルを回す上で障壁となる「データの提供やフォーマットの整形」といった、細かく時間がかかるが極めて重要度の高い作業を徹底的に自動化した。軌道決定解の提供は、事前に準備されていたクラウドストレージベースのファイルアップロードを確実に実施した。これにより、プロジェクト側は評価会で選択された解を「即座に」自動で取得できるようになった。

日常の業務の延長線上にある技術を応用し、運用パイプラインを自動化したことで、ナビゲーション技術者は「データの処理」から解放され、最も重要な「データの解析と判断」に 100% の集中力を注ぐことができる環境を手に入れたのである。

(竹内視点)

深宇宙探査機の軌道決定システムは、理学と工学にまたがる多様な技術を統合した、複雑かつ高度なシステムです。軌道決定の一次データを生成する地上アンテナ局には、低雑音受信機で捉えた微弱な電波を、精密に管理された原子時計に同期した低位相雑音の基準信号を用いて復調し、10 ps 級の遅延精度と 0.01 mm/s 級の速度分解能を持つ追跡データを生成する高度なハードウェアが求められます。さらに、アンテナ参照点の位置も数 cm の精度で維持しなければなりません。

また、電波が地球および惑星の電離圏・中性大気を伝播する際の遅延や、太陽系内の天体の重力が信号伝播と探査機の運動に及ぼす影響を正確に補正するため、基礎物理学および地球物理学に基づく高精度モデルの適用が不可欠です。裏を返せば、軌道決定システムは大気・電離圏・重力場を計測する理学センサーとしての機能も併せ持っているといえます。

このように多岐にわたる技術分野へ横串を通すことが求められる巨大システムであるため、JPL や ESA のような大規模組織では、これらの技術を一気通貫で管理することが難しく、縦割りの複数グループ間で詳細なインターフェースを定義することによってシステムを成立させています。これに対し JAXA/ISAS の強みは、理学と工学が共存するコンパクトな組織であるがゆえに、観測・計測・物理モデル・推定までを一貫性を保ちながら横断的に管理できる点にあります。その結果、システム全体として世界最高水準の精度を確保することが可能になります。

今回、JPL がシャドー・ナビゲーションに参加したことにより、トリフネ接近後に確定した軌道を基準として、両者の軌道決定結果を客観的に比較する機会が得られました。その結果、軌道解そのものの正確性と、推定誤差（共分散）の妥当性の双方において、JAXA が JPL を上回る解を得ていたことが明確に示されました。多様な技術を横断的かつ一貫して統合できるといふ、ISAS の組織的な強みを実証した成果であると考えています。

さらに、時間制約の極めて厳しいミッションを遂行するなかで、杉本さんを中心に各種処理の自動化を推進できたことも大きな成果です。これは、軌道決定を AI によって自律化・自動化するための礎となりました。

AI ドローンが戦場のゲームチェンジャーとなりつつあるように、深宇宙ミッションにおいても今後 AI の活用が重要になると予見されます。地上軌道決定に蓄積された職人芸的な技量を学習した生成 AI が、深宇宙においてオンボードかつ自律的に判断して GNC を行う——そうした将来の探査ミッション形態を実現するための第一歩として、まずは地上軌道決定の AI による自動化を実現したいと考えています。

■ 次世代へのバトン：ナビゲーションは終わらない

本ミッションの成功は、優秀なアルゴリズムや単一の優れたハードウェアだけで達成されたものではない。本番で想定される主要な TCM のすべてについて、実際に利用するソフトウェアを用い、チーム全体で幾度となく訓練を積み重ねた泥臭い努力の結晶である。この訓練があったからこそ、実運用で生じた予想外のデータの振る舞いや困難さに対して、即座に対応し最適解を導き出す「運用力」を発揮することができた。

地上の職人技とも言える極限の軌道決定と、探査機の自律的な思考であるオンボード航法。この二つが、インハウスで鍛え上げられたソフトウェアと徹底した自動化システムの上で、見事なリレーを見せたこと。これが今回の「ナビゲーションの進化」の真髄である。

宇宙探査の歴史は、不可能と思われた要求精度を、技術と運用の融合によって塗り替えてきた歴史でもある。これから深宇宙を目指し、未知の領域に挑もうとしている若い学生やエンジニアたちには、このエキサイティングな「進化の最前線」にぜひ飛び込んでほしい。