JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2026 5

No.542

種子島で陸揚げされるMMXの探査機

今年3月31日、種子島の島間港でMMXの探査機の陸揚げが行われました。海路で輸送された探査機を載せたトレーラーが、専用船からゆっくりと降ろされようとしています。トレーラー上の大きなコンテナの側面カバーには、MMXのミッションマークが描かれています。コンテナの中には、復路モジュールと探査モジュールが結合された状態で格納されています。往路モジュールは別のトレーラーで、すでに先に陸揚げされています。コンテナがデッキに接触しないよう、輸送スタッフが車体下部を注意深く確認しながら慎重に作業を進めています。この後、トレーラーは港で待機し、夜を待って種子島宇宙センターへと出発します。（p.4記事参照）

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

ニューロモーフィック技術の宇宙機への適用を目指して

宇宙機応用工学研究系 教授　福田 盛介（ふくだ せいすけ）

はじめに

これまで20年以上の間切れ目なく衛星プロジェクトで忙しくしていたせいもあり、ISASニュースでは「ひさき」、「あらせ」、そして最近のSLIMについて関連の記事を担当しましたが、「宇宙科学最前線」に執筆させて頂くのはかなり久しぶりです。そこで今回は、この貴重な機会に、目前のプロジェクトからは少し離れて、将来に向けた技術研究のご紹介をしようと考えました。「ニューロモーフィック（神経模倣）」という、宇宙業界ではまだあまり馴染みのない分野の話題になりますが、どうぞお付き合いください。

プロジェクトからは少し離れてと言いながら、SLIMの話から始めてしまいます。SLIMのピンポイント着陸を実現するためには、光学カメラで撮像した月面画像を頼りに、探査機の位置を自律的に推定する技術が必要でした（ISASニュース2024年7月号*連載など参照）。このいわゆる画像航法技術の研究開発の過程では、探査機上の計算機の能力が常に悩みの種でした。宇宙機で使用できる電子部品は、放射線への耐性の確保や高い信頼性の要求から概して性能が低く、SLIMの開発当時で、地上用の部品に比べて1桁～2桁ほど処理能力が劣っていました。大学と協働で開発を進めたクレータを使用する画像航法アルゴリズムが、研究室のパソコンで1秒で動作するとしても、SLIMの搭載計算機では10秒かそれ以上かかってしまい、高精度着陸のために誘導制御系が必要とする時間要求に間に合わないのです。これに対し、SLIMでは処理精度を保ちつつ、アルゴリズムのぜい肉をそぎ落とした上で宇宙用のFPGAに実装して、画像航法技術を完成させました。

今後当面のプロジェクトでも、低リソースな演算環境に対しては、基本的にはアルゴリズムのシェイプアップで何とかしのぐという、SLIMと同様の作戦で対応することになると思います。これについてはもちろん、宇宙用部品の高性能化を目指したいところですが、演算チップの高周波動作は消費電力（と発熱）も課題になります。一方で、宇宙工学コミュニティ

＊ https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews520.pdf

の目標は「より遠くへ、より自在に」です。現状の我が国の探査機の電力は、太陽光発電をベースとしており、遠方探査では電力リソースが厳しくなります。一方で、通信遅延を考えると、自律性（及び必要な演算の高機能化）への要求は高くなります。この「逆センス」の関係の中で自在なミッションを実現するには、通常の技術の延長ではないパラダイムシフトやブレイクスルーが必須であると感じ、「そういえば人間や生物はそれほどエネルギーを使わずに、どうやって演算しているんだっけ？」という雑談を研究室内で始めました。雑談はほどなく研究につながり、手始めに当時大学院生だった狩谷 和季さん（現JAXA）が、後述するスパイキングニューラルネットワークやイベントベースカメラをクレータ抽出処理に適用した結果を学会で発表したところ、専門のコミュニティ（日本神経回路学会）から評価して頂き、優秀研究賞を受賞しました。以来、継続して、研究室の学生や将来技術に興味を持ってくださる民間企業の方と、関連の研究や議論を行っています。

ニューロモーフィック技術とは？

ニューロモーフィック技術とは、生物の神経機能を再現あるいは模倣したコンピューティングやセンシングを指します。生体のふるまいを正しく再現することを目指す生物学的な目的と、計算や計測の効率性の活用をモチベーションとするエンジニアリング的な関心（我々はこちら）が融合し、近年研究が盛んになっています。

ニューロモーフィックコンピューティングを概説するには、聞きかじりの知識で恐縮ですが、生体の神経細胞（ニューロン）のモデルが必要そうです。図1（a）のように、ニューロン間の信号伝達は、シナプスと呼ばれる接合部で行われます。ニューロン間で伝搬する信号は、短い電気パルス（スパイク）です。スパイク列の頻度やタイミングによって、情報が表現されています。スパイクがニューロンに到達すると、細胞体の膜電位が変化します。膜電位が特定のしきい値を超えると、新たなスパイクが発生（発火）して後段のニューロンに伝搬し、膜電位はリセットされます。また、膜電位は時間とともに低下します。このようなニューロンの動作は電気回路でうまく表現でき、電気系をバックグラウンドとする私には取っつきやすいです。膜電位を入力電流の積分（充電）と抵抗を介した電荷の漏れ（放電）で表現すると、図1（b）のようなRC並列回路が等価回路となります。

このようにニューロンとその結合をモデル化したスパイキングニューラルネットワーク（Spiking Neural Network: SNN）は、ニューロモーフィックコンピューティングの代表例です。これに対し、最近大流行している生成AIの基盤である深層学習などでもニューラルネットワークが使用されていますが、そこではニューロンの入出力はスパイクでなく数値情報です。すなわち、スパイクの代わりに発火率という時間情報を無くした数値を用いることで、クロック周期ごとに同期処理を行う通常のコンピュータで動作させやすくしています。一方、SNNはスパイクのタイミングをトリガとした非同期処理が特徴です。

また、昨今、イベントベースカメラ（イベントカメラ）と呼ばれる、各画素の瞬時瞬時の輝度変化の有無をタイムタグ付きで出力するセンサが注目されています。画像処理的に前後

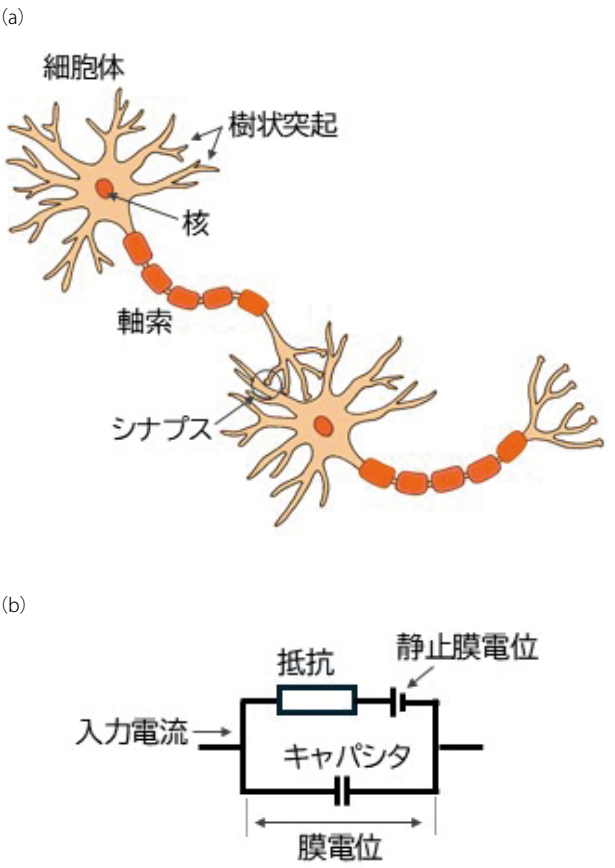


図1：(a) ニューロンの模式図と (b) 等価回路。入力電流によりキャパシタが充電され、膜電位が上昇する。またキャパシタの容量と抵抗値で決まる時定数で、膜電位は低下する

の画像を差分処理するのではなく、デバイスレベルでマイクロ秒オーダでの出力を実現しています。各画素内のアナログ回路で対数輝度の変化量を検出しているため、通常の光学カメラよりもダイナミックレンジが広く、地上用途では明暗の同時計測が必要な自動運転の分野などへの適用が検討されています。イベントカメラは生物の視神経の模倣ととらえることもでき、SNNに非同期パルスを入力するセンサとしても親和性が抜群です。我々の研究室でも、イベントカメラとSNNを使って、天体への着陸直前に障害物（ボルダー）を検知する研究などを行っています（図2）。

ニューロモーフィック技術が宇宙機にもたらすメリット

SNNやイベントカメラを採用する利点は様々な観点がありますが、およそ以下のように整理できます。いずれも、宇宙機への設計要求でよく挙げられる項目ばかりです。

【1】低消費電力
【2】高速応答性
【3】高ダイナミックレンジ
【4】ロバスト性

【1】の低消費電力は、SNNの非同期処理やスパイクのスパース性がもたらす特長です。通常の計算機が周期的なクロックごとに一斉に回路を駆動するのに対し、SNNはスパイクのタイミングにだけ処理が行われるため、非常に少ない電力での動作を実現できます。実際、図2のボルダー検知の処理

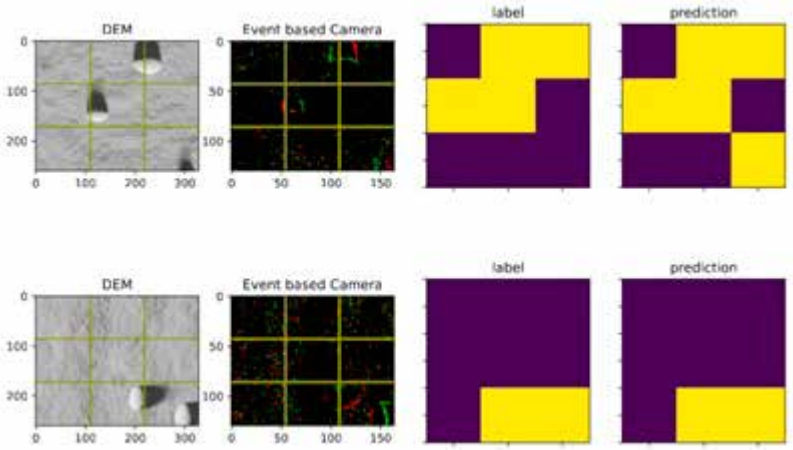


図2：スパイキングニューラルネットワークとイベントベースカメラによる障害物（ボルダー）検出のシミュレーション結果の例。着陸直前にボルダーの存在する方向を低レイテンシで検知し、回避行動に繋げられるかどうかを観点とした研究例。
1列目：ボルダーを配置した地形情報
2列目：イベントカメラの出力
3列目：ボルダー存在領域の教師データ
4列目：SNNによる検知結果

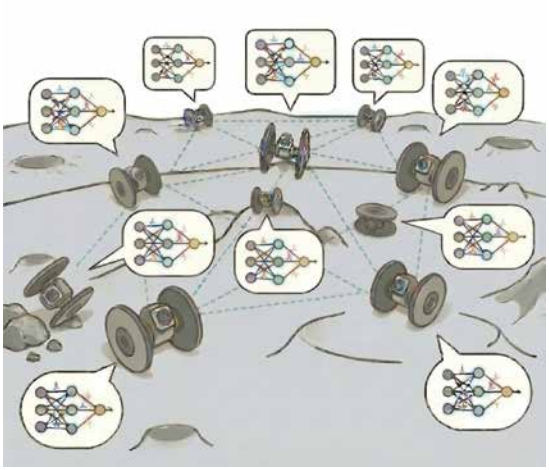


図3：ニューロモーフィックチップのみを搭載した複数ロボットが、群的に探査タスクを実行するイメージ図。

は、研究室にある民生ニューロモーフィックチップの実機環境で、およそ3ミリワットで動作しました。こういった低消費電力性は、電力リソースの厳しい遠方探査や、大きな太陽電池やバッテリを搭載できない天体探査ロボットなどで、とても有用と考えられます。

【2】の高速応答性（低レイテンシ）は、SNNやイベントカメラのイベント駆動型アーキテクチャがもたらすメリットで、瞬時に何かを検知し、対応するアクションのための信号を出力するような用途に適しています。この議論を研究室で行うと、必ず出てくるアイデアは「じゃんけん絶対勝つマシン」ですが、宇宙用途でもスペースデブリ関連や電波識別などのアプリケーションに適用する検討が行われています。

【3】の高ダイナミックレンジは、主にイベントカメラが有する特徴です。宇宙機で光学画像を航法などに使用する場合に、太陽の位置や方向に関わらず、様々な日照環境で安定的な性能を発揮することは重要ですが、この観点でイベントカメラの宇宙応用は非常に魅力的です。また、イベントカメラの高ダイナミックレンジと高速応答性は、観測用途での使用も検討されており、実際にイベントカメラが国際宇宙ステーションに搭載され、雷やスプライト発光の検出実験が行われた例があります。

【4】のロバスト性については、今後の研究テーマがたくさんあります。例えばSNNのようなニューロモーフィックなコンピューティングは、現在宇宙機で使われている計算機と比較して、放射線に対する耐性が本質的に強いのか弱いのかという問いに対しては、まだ答えが出ていません。SNNの実装方法（アナログ／デジタル／両方を混成したハイブリッド）にも大きく依存しますが、スパイクという疎な情報を多数のニューロンでネットワーク的に処理するSNNのアーキテクチャは、放射線による局所的で一過性の障害には耐性が高い可能性があります。また、SNNの学習時に放射線障害を想定した工夫を施すことで、推論時のロバスト性を向上させるような萌芽的な検討も研究室で始めているところです。

おわりに

本記事を通して、ニューロモーフィック技術が宇宙機設計に本質的に相性が良さそう、という印象を持って頂けたかと思います。今後、宇宙機への適用を考えるにあたっては、従来技術との適切な役割分担を模索するアプローチや、システムの考え方自体を大きく変えてしまうアプローチの両方があり得そうです。例えば、前者については、深宇宙探査機のクルージングフェーズで、メインの計算機を待機状態にして、システムの消費電力を節約しているような場合に、SNNで最低限の異常検知系をごくわずかな電力リソースで動作させておく、というような使い方がイメージできます。後者については、もっと大胆に、探査ロボットを低消費電力化するために、ロボットが実施するタスクに関わる全演算をエンドツーエンドでSNN化してしまうのはありでしょうか。この場合、SNNが必ずしも得意でない演算も担うことになりますので、場合によっては性能面ではやや劣化するかもしれませんが、そこは多数のロボットを群的に協調させて、システムとしての性能を確保する方向性もよいでしょう（図3）。複数ロボットを開発することは大変ですが、SNNが放射線に対してロバストであるなら、宇宙用の特別な仕立てを考えなくてよくなり、開発の敷居はぐっと下がるかもしれません。

このように目いっぱい夢は広がりますが、まだ宇宙分野でニューロモーフィック技術を導入する機運が急速に高まっているという状況ではありません。一方で、アメリカでは3Uサイズのキューブサットによる民生のニューロモーフィックプロセッサの軌道上実験が行われたとか、欧州ではニューロモーフィックプロセッサを組み込んだSoC（System on Chip）の開発が進行中であるとか、海外でも着々と研究開発が進んでいます。我々も将来の科学衛星や探査機への適用を目指して、技術コミュニティを拡充しつつ、腕を磨いておきたいところです。もし本稿でニューロモーフィック技術に興味を持たれた場合には、ぜひお気軽にお声がけください。

MMX：探査機を種子島宇宙センターに搬入

MMXの探査機システムは、これまで開発担当企業の三菱電機鎌倉製作所で、製造及び約1年にわたるシステムプロトフライト試験（PFT試験）を続けていましたが、2026年3月31日に、JAXA種子島宇宙センターに搬入を完了しました。

探査機は、2026年3月28日夜遅く、鎌倉を出発しました。探査機本体を含め、さまざまな必要機器を、22台のトラックやトレーラーに分かれて、まずは陸路で輸送開始。探査機本体が格納されているトレーラーのコンテナには、MMXのミッションマークがデザインされたカバーがかけられています。28日のうちに横浜港に到着、専用船に積み替えられ、種子島へと出発しました。

海路での輸送を経て、3月31日に種子島の島間港にて陸揚げを行いました（表紙写真参照）。朝から、船内に格納されたトラックが次々と降ろされました。探査機が格納されているメインのトレーラー2台は午後になってから、最後に陸揚げ。昼間は港で待機し、夜になってから、種子島宇宙センターに陸路で輸送を開始しました。港から種子島宇宙センターまでの所要時間は約1時間半。そして、宇宙センター内の第2衛星組立棟に無事搬入されました。「長旅お疲れさまでした」といった感じで、MMX関係者もほっとひと息。翌日の4月1日には、探査機が格納されたコンテナの開梱作業が行われました。

その後は、種子島射場にて、探査機のシステムプロトフライト試験を継続しています。2026年度中の打上げに向けて着実に作業を進めてまいります。

種子島宇宙センター・第2衛星組立棟（STA2）に搬入。
コンテナの側面のカバーにMMXのロゴとミッションマーク。

実は、鎌倉出発前には時折雨模様。また、30日から31日かけての夜にも強い雨が降り、輸送時大丈夫かなと心配も。幸いにも輸送時には天候も回復、予定通り無事に搬入を完了することができ、ひと安心しました。

以上、探査機の種子島搬入の様子は、4月1日にISASのウェブ上で、ウェブリリースとして速報で発信しました*。その後もSNS上で、探査機輸送の各場面を動画や画像で紹介しています。よろしければ、ぜひご覧下さい。探査機輸送に関わった、全ての方々に感謝いたします。（矢治 健太郎）

＊ https://www.isas.jaxa.jp/topics/004223.html

アルテミスⅡを支える深宇宙の絆：ISASによるトラッキング支援の意義

「アルテミス計画」の第2段階となるアルテミスⅡは、約半世紀ぶりに人類を月周回軌道へ運ぶ有人ミッションであり、将来の月面・火星探査を見据えた生命維持や航法技術の実証を行いました。この歴史的偉業に、日本の技術が深く関わっています。

ISASは初号機に続き、地上局によるトラッキング支援を担いました。NASA局から送信され、宇宙船「Orion」から折り返された信号を、臼田64m局や内之浦34m局で受信する「3-wayドップラ計測」を実施しました。これにより多角的な視線速度データを取得し、精密な軌道決定が可能になります。データは専用回線で準リアルタイムにNASAへ転送され、有人ミッションに不可欠な高精度ナビゲーションを支えています。

Artemis Ⅱ軌道図と支援パス（赤線）。

こうした枠組みを実効化するため、現場では緻密な準備が重ねられてきました。追跡ネットワークやC-SODA、深宇宙追跡技術グループは、限られたリソースの中で事前に受信試験を重ね、NASAやISASの他ミッションとトラッキングパスのスケジュールを調整してきました。NASAとISASの緊密な連携による運用遂行は、ミッションの精密な航法に直結しています。

本ミッションでもISASのデータはNASAから「Excellent data」と高く評価され、航法解の生成に貢献しました。これは「はやぶさ」シリーズ等で培ったISASの運用技術と精度が、最高難度の有人ミッションにおいても世界最高水準であることを証明しています。

この支援の背景には、地上局の運用時間を相互に融通し合う国際協力枠組み「Cross Support Agreement（CSA）」が存在します。支援実績は「CSAu」という仮想的な通貨単位で蓄積され、将来自国のミッションで海外局を利用する際の資産として還元できます。特に科学的成果の最大化が求められる一方で、独自の通信リソースの確保に制約がある小型探査機ミッション等において、この枠組みは極めて有効です。アルテミスⅡの支援で得られるCSAuは、今後の日本の深宇宙探査計画を柔軟に支える貴重な原資となります。アルテミスⅡへの貢献は、JAXAが国際探査において不可欠なパートナーであり、日本の技術が人類の活動圏拡大を支える「インフラ」であることを意味します。ISASが受信する信号は、月を目指す4名のクルーと地球を結ぶ一筋の確かな絆となりました。（杉本 理英）

水星到着迫る！BepiColomboサイエンスチーム会議を札幌で開催

水星へ向けて航行中のBepiColomboは、いよいよ2026年11月に水星周回軌道へ投入され、12月には水星磁気圏探査機「みお」が分離される予定です。その後、「みお」は、通信確立やワイヤアンテナ・マストの伸展運用を1か月以上にわたって実施し、さらに探査機及び科学観測装置の機能確認、テスト観測などを経て2027年4月から定常観測を開始する予定です。

いよいよ迎える山場に向けてサイエンスチームの活動も活発化しています。BepiColomboでは年2回のペースで国際サイエンスチーム会議を開催しており、2026年4月13～17日には札幌で同会議が開催されました。海外メンバーを中心に100名を超える関係者が集い、1週間にわたり科学成果や最新の運用状況、今後の計画の報告・議論を集中的に行いました。

BepiColomboサイエンスチーム会合での集合写真。

他にも広報普及・アウトリーチ計画に関する報告や議論が盛り上がったのが印象的でした。大学研究者からも本テーマへの高い関心や協力の姿勢が示されました。筆者からはJAXAで積極的に取り組んでいるYouTubeでのライブ配信や、音楽コンサートと講演会の融合、Vtuberやアニメとのコラボなどについて紹介しました。参加者の多くから「素晴らしい」「革新的」など高評価を得られ、国際的にももっとアピールしたい意欲が湧きました。

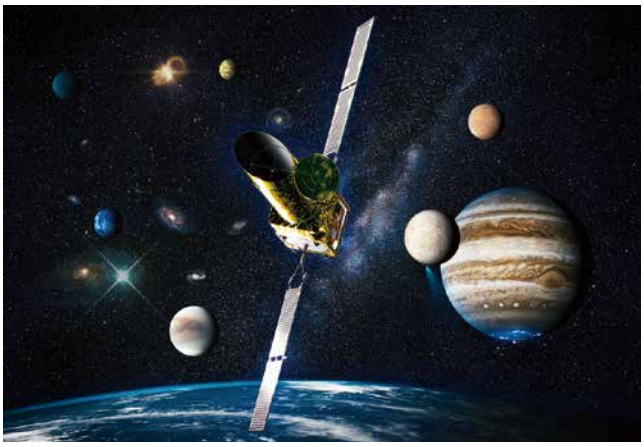
同会議を日本で開催する際は懇親会後にカラオケへ行き親交を深めるのが恒例となっています。BepiColomboチームの特徴ともいえる家族のような温かい雰囲気を醸成する上で必須の行事となっています。今年も50人を越える参加者が大きな一室に集い、各国の人気曲を合唱しながら文化交流に盛り上がりました。また今回はカラオケだけでなく、ソーシャルディナー中のサプライズとしてバンド演奏も行いました。筆者と若手研究者の即席バンドに加えESA側のプロジェクトサイエンティストらをゲストボーカルに迎え、マーキュリーに向かうBepiColomboのアンセムといえるQUEEN「ボヘミアン・ラプソディ」を披露。会場で感じた一体感こそが、水星探査という難関に挑むBepiColomboチームの強みの象徴かもしれません。（村上　豪）

LAPYUTAの科学戦略研究集会を開催

公募型小型計画のプリプロジェクト候補として検討が進められている、高精度紫外線宇宙望遠鏡計画LAPYUTA（惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画：Life-environmentology, Astronomy, and PlanetarY Ultraviolet Telescope Assembly）の研究集会が、2026年3月23日に東北大学で開催されました。

太陽のような恒星は、目に見える可視光だけでなく、X線や紫外線のようなエネルギーの高い電磁波や、「恒星風」と呼ばれるプラズマの流れを宇宙空間に放出しています。これらは、周囲の惑星環境に大きな影響を与え、大気を宇宙空間に逃がしたり、表層環境を大きく変化させたりします。そのため、生命が存在できる環境が成立する条件は、惑星そのものだけでなく、恒星との関係によって決まると考えることができます。

このテーマを深掘りするために、本研究集会では、太陽系の惑星と、遠くの恒星を回る系外惑星の研究を組み合わせて考える重要性が議論されました。直接探査で詳しく調べられる太陽系内の惑星と、多数の例を比較できる系外惑星の両方の研究を活用することで、天体どうしのエネルギーや物質のやりとりをより深く理解しようという試みです。特に、太陽系内外の地球型惑星の大気に対する中心星（太陽または恒星）の影響について議論しました。近年著しく進展している火星オーロラ研究が紹介され、金星での観測の展望や系外惑星での恒星放射・恒星風との関連について現状の理解と今後の観測戦略について意見が交わされました。さらに、惑星誕生の理解を深める上で重要な原始惑星系円盤について、現状の研究課題と紫外線を用いた将来研究の展望を論点にチームの科学的な視野を広げました。



LAPYUTA衛星のイメージ図。太陽系の内外の惑星大気に加え、近傍銀河や突発天体の初期放射を主要な観測対象としている。

太陽系内の惑星探査による地表・大気組成などの直接観測データと、系外惑星の統計的なリモート観測を統合することで、惑星環境の比較研究が可能となります。生命存在可能性を規定する環境条件を体系的にどう制約し、生命が誕生しうる惑星大気の特徴をどう抽出するか、この比較研究を駆使した科学戦略について議論が交わされました。なお、本研究集会は、名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）の共同利用・共同研究公募に採択された研究集会「宇宙プラズマ・恒星放射が惑星超高層大気・衛星表層環境に及ぼす影響」として実施されたものです。（山﨑　敦）

連載 第13回

世界初の火星衛星サンプルリターン計画

MMXはフォボスを目指す!

MMXの軌道計画・軌道決定

MMXはフォボス表面からのサンプルリターンを目指しています。このために探査機は地球から火星に遷移し火星周回軌道に投入、火星周回軌道でフォボスの近傍に接近、フォボス表面の観測を実施して着陸に適した地点を選択、降下・着陸・サンプル採取・上昇、地球ー火星間を遷移してSRC（サンプルリターンカプセル）を地球まで届けます。各フェーズにおいてこれまでJAXAで実施した探査ミッションで培った技術が活用されています。

軌道計画

ミッション期間中に利用する、地球ー火星間の往復軌道、火星圏での運用軌道（フォボス観測軌道、デイモスフライバイ軌道）には特徴があります。火星圏ではフォボス近傍の力学環境を考慮して、安定的にフォボス表面を観測するための観測軌道としてQSO（Quasi-Satellite Orbit）と呼ばれる軌道を利用します。火星に対してフォボスの重力は非常に小さく、SOI（Sphere of influence）（天体の重力が支配的な領域）を計算するとフォボスの内部に位置し、フォボス周回をケプラー軌道で周回することはできないため、擬似的にフォボスを周回するQSOを採用しました。この軌道は火星中心でみるとフォボスと同じような軌道を周回していますが、探査機側の軌道要素をフォボスに対して若干ずらすことで、フォボス中心座標系で見るとあたかも探査機が周回しているように見えます。図1にMMXで利用予定のQSOの軌道例を示します。右図はフォボス中心の慣性座標系、左図はフォボス中心・火星ーフォボス方向固定座標系でプロットしています。QSOの種類は高度別に、QSO-H（100x198km）、QSO-M（50x94km）、QSO-L-A（33x56km）、QSO-L-C（20x27km）と設定しました。探査機の火星周回軌道の周期は7.66時間ですが、QSOの周期（フォボスを1周回する時間）は高度が低くなるに従い短くなります。それぞれQSO-Hは7.59時間、QSO-Mは7.13時間、QSO-L-Aは6.15時間、QSO-L-Cは3.97時間です。

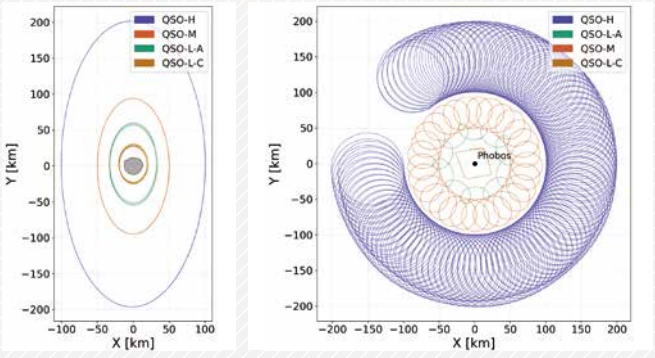


図1：QSOの例。左／フォボス中心、火星ーフォボス方向固定座標系。右／フォボス中心慣性座標系。

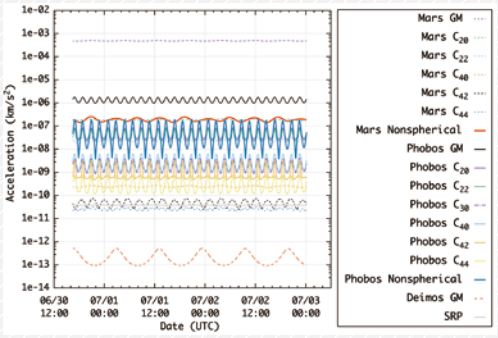


図2：低高度QSOで探査機に加わる加速度の例。

火星周回軌道投入後、フォボスへの最終接近軌道を経由してQSO-Hに投入予定です。その後、QSO-M、QSO-L-Aと徐々に高度を低下させて観測運用を行います。最も低高度のQSO-L-CではMEGANE（ガンマ線・中性子線分光計）の主要な観測を実施します。

惑星の衛星を探査するということで、フォボスによる掩蔽（地上局から見て探査機が天体で隠れる状態）・日陰に加えて火星による掩蔽・日陰の発生も運用条件に大きく影響します。これまでの小天体ミッションや月周回ミッションと比べて運用条件が異なるポイントです。探査機の制約を超える長時間日陰が発生する季節においては、運用高度を調整して回避します。

軌道決定

探査機の軌道決定は、これまでのJAXA探査ミッションで利用してきた手法をベースに実施します。地上局で取得する電波追跡情報（RARR:Range and Range-rate, DDOR:Delta Differential One-way Range）とオンボードで取得する相対観測量（光学航法データ、レーザー高度計データなど）を適宜組合せて探査機の軌道を推定します。

地球周回では、地球重力場、大気抵抗（低軌道の場合）、月・太陽の影響、太陽光圧加速度などが影響します。月近傍では、他天体重力に加えて月重力場が重要な項目です。小惑星近傍では、探査対象天体の重力場、太陽光圧加速度、他天体の重力、熱放射加速度、小天体アルベドの影響などがあります。MMXが運用される火星圏（特にフォボス近傍）での探査機に加わる加速度の例として、図2に低高度QSOを航行したと仮定した場合の加速度履歴を示します。それぞれ“GM”は火星・フォボスの重力を、“C20”などは火星・フォボスの重力場の係数毎の加速度を、“Nonspherical”は火星・フォボスの重力場の非球面成分を合計した加速度を示しています。項目別に見ていくと、火星の質点重力が主要項であることがわかります。フォボスの質点重力は10^{-6}（km/s^2）のオーダーです。フォボス重力の非球状成分は太陽光圧加速度(SRP)よりも大きいことがわかります。現時点でフォボスの重力場はそれほど精度良く求まっていませんので、MMXの観測データを利用した重力場モデルの精度向上が探査機運用の安全性向上に繋がります。図2に記載していませんが、火星重力場に関しては、南北方向の非対称性（J3項）の季節変化や、潮汐力による影響も精密な軌道推定では気にする項になります。

いよいよ打上げが迫ってきました。軌道力学系運用システムのデータベースを最新化し、運用に使う軌道情報を関連システムに提供、万全の準備を整えて出発の日を待ちたいと思います。MMXが地球に帰還したあかつきには、探査機の飛行した経路を線で結び、太陽系の地図に壮大な一筆書きを描こうと密かに楽しみにしています。

池田　人（いけだ ひとし）

東奔西走

いまも続く道の途中で
― LiteBIRDリフォーメーション

宇宙科学プログラム室
吉原 圭介（よしはら けいすけ）

多くの国際メンバーが集結したLiteBIRD全体会合@IPMU（2026年1月）。

LiteBIRDを実現するための奔走は、今も現在進行形で続いている。特にこの2年間、チームは日本と欧州、そして北米を行き来しながら活動を続けてきたが、それは過去の情景ではない。近く予定されている次の大きなゲートを通過したときにこそ、本格的な「東奔西走」が始まる。その感覚を、チーム（LiteBIRDを推進する科学者とプロジェクトメンバーで構成されるLiteBIRD国際チーム）は共有している。

2024年に実施したミッション定義審査（MDR）を通過した後、LiteBIRDはプロジェクト化に向けた最終準備を整えるための新たなフェーズに入る、はずであった。しかし、観測装置の中核である検出器を提供する予定であったKEKが計画から離脱するという予期せぬ事態に直面し、一転、ミッションは存続の危機を迎えることになった。この事態を受けて、チームはミッションをあらゆる側面から見直し、その実現性を高めるための検討に取り組むことになる。この一連の取り組みを、チームでは「リフォーメーション」と呼んだ*。最初の節目となったのが、カナダ・バンクーバーで開催された国際チーム全体会合であり、これを皮切りに、欧州および北米のチームメンバーや関係機関との議論が次々と始まり、日本メンバーは文字どおり東に西に奔走していくことになる。

この間、東西を行き来したのは人の移動だけではなかった。ミッションを立て直す上で必要不可欠なピースを埋めるためのアプローチ、すなわち検出器調達をめぐるチームの思考もまた、大きく東西に揺れ動いた。LiteBIRDが必要とする超高感度極低温検出器については、米国の技術的実績が突出しており、当初の計画でも米国技術に基づく検出器を前提としていた。そのため、リフォーメーション検討の初期段階においても、チームの思考の重心は米国に置かれていた。PI（研究主催者）を中心としたコミュニティのボトムアップの動きも、ISASが機関レベルで試みたNASAとの調整も、いずれも北米を主要な舞台として行われた。

しかし、2025年初頭以降、米国を取り巻く国際協力環境が大きく変化し将来が全く見通せないなかで、チームは欧州での検出器開発という別の可能性を追求する方向に舵を切ることを決断する。欧州検出器を現実的な選択肢として捉え、日本メンバーが欧州メンバーや関係者と共にこの可能性を具体化する作業を進める過程の中で、ミッションを存続させるためには、机上で可能性を並べる段階を越え、具体的な責任分担や技術開発計画、その実現に必要な時間軸を詰めていく必要があった。また、各国の協力機関がこの新しい取り組みにどこまで踏み込む用意があるのかを、姿勢として確認することも重要だった。そのため、互いの表情が分かる距離で向き合う対面での議論が不可欠となり、欧州各地への物理的な行き来が加速度的に増えていったのは必然であった。イタリア、フランス、オランダ、英国、そしてカナダを行き来する中で、各国のメンバーとの間で数多くの対話が重ねられた。オンライン会議では共有しきれない暗黙の前提や制約、言葉の間合いは、対面で初めて浮かび上がる。特に重要だったのは、同じ空間で議論を重ねることで、ミッションに向き合う責任と覚悟を共有できたことである。

この間、東西を奔走していたのは、日本メンバーだけではない。ISAS内でリフォーメーションの本格検討を決定した2024年9月のKey Decision Point（KDP）以降、約1年半の間に、海外の科学者やプロジェクトメンバーを迎えた国際会合が日本で三度開催された。さらに、多くの海外メンバーが個別に来日し、議論を重ねてきた。実態として世界各地を東西に行き来してきたのは、LiteBIRD国際チーム全体であった。国や所属を越えてミッションを立て直そうとするその行動力と情熱が、ミッションを決定的な危機から救い、二度目のミッション定義審査（MDR）への再挑戦まであと一歩という段階まで、チームを導いてきたと言える。

現在、チームにとっての最優先事項はMDRを通過することである。しかし、このゲートはミッション実現までに現れる複数の関門の1つに過ぎない。その先には地図の描かれていない世界が広がっている。そこを進む中で、今後も膝を突き合わせる距離での議論が不可欠な局面や、前提を見直す思考の転換が求められる場面が数多く訪れるだろう。

国際協力に基づく多くの科学ミッションと同様に、LiteBIRDにおいて「東奔西走」は特別な出来事ではなく、挑戦的なミッションを前に進めるためのノーマルワークなのかもしれない。形を変えながらも、この営みはミッションの実現まで続いていく。その覚悟のもと、チームは次の一歩に備えている。

＊リフォーメーションの詳細は、ISAS Webページの掲載記事「LiteBIRD KDP-2に必要だったこと、それをやり遂げて次へ」を参照のこと
https://www.isas.jaxa.jp/missions/documents/files/isas_202512_1.pdf

宇宙・夢・人
Space Human Dream

2つの「ソウゾウ」 ― 想像と創造 ― を大切に

宇宙航空研究開発機構 理事補佐
西田 亮三（にしだ りょうぞう）

1966年生まれ。九州大学工学部卒業。1993年、科学技術庁（現 文部科学省）に入庁。科学技術政策や、原子力分野で研究開発と安全規制の両面に携わる。経済産業省、防災科学技術研究所、理化学研究所など複数の省庁や研究機関などへの出向を経て、2024年8月から現職。

宇宙研は「気持ちの良い世界」

――2024年8月にJAXAの理事補佐に就任されました。宇宙研に来て、どのような印象を持っていますか？

宇宙研では、最先端の宇宙科学を推進するという使命のもと、一人ひとりが、自主性を持って自発的に研究開発に取り組んでいます。その姿を見て、私はとても気持ちの良い世界だと感じました。

子どものころから、決まった型にはめられるのが苦手でした。勉強も、自分でやる気になればとことんやるのですが、毎日何時間と決められるとやる気が失せてしまうのです。高校でラグビーを始めたのも、手も足も使え、接触プレーも認められている、その自由さに惹かれたからです。自由と自主性は、私がずっと大切にしてきたものです。

――理事補佐として、どのような仕事をされているのですか？

藤本 正樹所長を補佐し、宇宙研の活動がより円滑に進むよう業務の改善に取り組んでいます。特に意識しているのは、皆さんの邪魔をしないことです。自主性、自発性に加えて、私が大切にしたいのが「ソウゾウ」です。「ソウゾウ」には、「想像」と「創造」の2つの意味があります。社会を変える画期的な発明も、最初は一人の想像から始まります。誰も想像しないことは、創造につながりません。だから皆さんの「こんなことできたら凄いでしょ!」ということを声に出して欲しいと思います。皆さんの想像の芽を摘まず、創造につなげることができる環境を整えることが、私の役目だと考えています。

「目標の共有」と「見える化」を

――宇宙研には、どのようなことが必要だとお考えですか？

1つ目は、日本の宇宙科学が目指す方向を示していくことです。もちろん、新しい良いアイデアは逐次反映していく必要はありますが、宇宙科学分野で目指すべき方向性の認識を共有することで、一人ひとりの取り組みが繋がっていけば、宇宙科学の未踏の領域を切り拓いていく大きな動きとなっていくのではないでしょうか。

2つ目は、宇宙研の活動を積極的に外へ伝えていくことです。内部の人にとっては、「外へ発信するほどの取り組みや成果ではない」と思うかもしれません。しかし、外から見ると「これはすごい」と思えることが、数多くあります。今は小さな取り組みであっても、それが将来のミッションを実現するための重要な一歩であることも多いはずです。発信を強化し、取り組みの意義や、その先にある可能性をわかりやすく丁寧に伝えることで、宇宙研を応援してくれる人がさらに増えると考えています。

科学技術の理念が問われている

――大学卒業後、科学技術庁（現 文部科学省）に入庁されました。科技庁を志望した動機を教えてください。

横須賀出身で船が身近でしたし、ものづくりへの憧れがありました。また、子どものころから物事を探求したり想像したりすることも好きで、周りを見て「こうしたらもっと良くなるのではないか」といつも考えていました。

さらに、科学技術そのものだけでなく、科学技術をどのように使って社会に役立てるかにも強い関心がありました。科学技術によって人々の生活や社会をより良くできるはずだ、そういう使い方をするべきだ、という思いがあったのです。そうしたことから、科学技術政策に携わりたいと思うようになっていきました。

――今後、どのようなことに取り組みたいとお考えですか？

科学技術行政に30年以上携わってきました。最初は、進歩を積み重ねれば日本は必ず良くなると信じていました。しかし今、科学技術の足元が崩れ始めていると感じています。最近の科学技術政策では、基礎的、基盤的研究予算を抑制し、時世の重点的テーマを重視することを続けてきましたが、その結果、研究開発費や研究者数、論文数、特許件数など、さまざまな科学技術の指標が悪化してきています。現状を分析し、研究費の配分、研究者の待遇の考え方など、まず、これまでの科学技術政策の理念について、正しかったのかをあらためて検討する必要があると考えています。

――仕事をするうえで心掛けていることはありますか？

「一隅を照らす」という言葉が好きです。自分の持ち場でやるべきことをしっかり果たす。その集合によって、全体がうまく動くのが理想ですが、全体で上手くいかない部分があれば、自分の持ち場から踏み出していく積極性も大事にしたいです。

自転車で600kmを走破

――趣味は？

最近はブルベという、主催者が決めたコースを自転車で走り、制限時間内に完走することを目指すイベントに参加しています。最長600kmですが、制限時間は40時間。2～3時間の仮眠を取り、走り続けます。走っている時は辛くて、自分でも「意味が分からない。」と思いますが、終わると不思議な達成感があります。苦しい時は「終わらないブルベは無い。」と思いながら、今できるペダルを回すことに集中します。仕事も同じかもしれません（笑）。

編集後記

約1年ぶりの編集後記です。前回はMMX連載の第2回がありましたが、今号では第13回目。また、表紙・ISAS事情の通り、探査機も種子島宇宙センターに無事到着ということで、「いよいよだな」という思いです。やることは目白押しと思いますが、成功のニュースを心待ちにしています。（坂本 勇樹）

JAXA ISASニュース No.542 2026年5月号
ISSN 0285-2861

発　　行／国立研究開発法人　宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所
発行責任者／JAXA 宇宙科学研究所長　藤本 正樹
編集責任者／ISAS ニュース編集委員長　山村 一誠
デザイン制作協力／株式会社 トリッド
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1　isasnews@isas.jaxa.jp

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶https://www.isas.jaxa.jp/