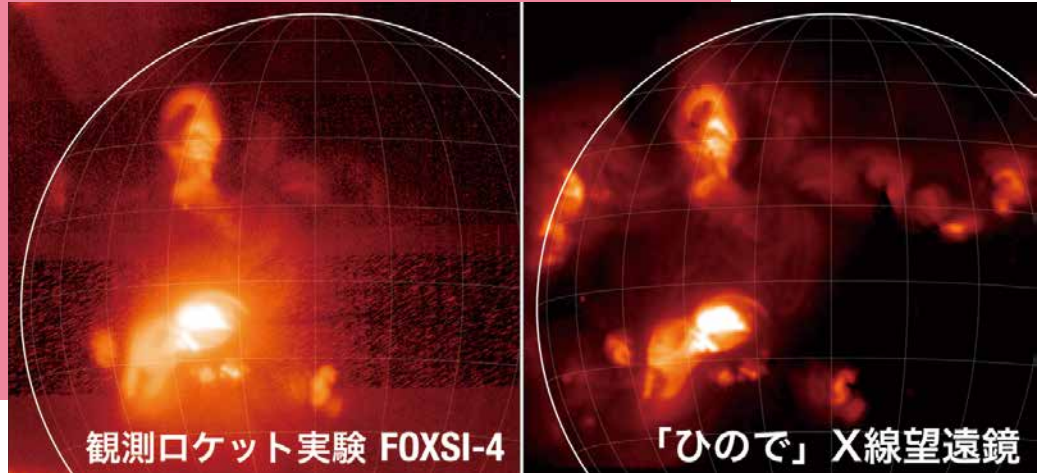


## 日米共同観測ロケット実験 FOXSI-4が観測した 太陽フレアと活動領域

左図は、FOXSI-4が計測した1,000万個を超えるX線光子を使って点描画のように描いた画像。右図は、同時観測を行った太陽観測衛星「ひので」のX線望遠鏡による通常の撮像画像。同じX線画像でも、FOXSI-4のデータにはX線光子1個1個の情報が含まれている。白の円弧は太陽の縁を示している。



観測ロケット実験 FOXSI-4

「ひので」X線望遠鏡

The Forefront of Space Science

宇宙  
科学  
最前線

## 世界初、太陽フレアのX線集光撮像分光観測に成功

国立天文台 太陽観測科学プロジェクト 成影 典之(なるかげのりゆき)

### 観測ロケット実験FOXSI-4が切り拓いた 新しい太陽フレア観測

2024年4月17日、息も凍るようなアラスカの曇天に、2本の煙炎が伸びていきました。そのとき太陽では、中規模のフレア（太陽表面で起きる爆発的な現象）が発生していました。その煙炎を描いたのは、太陽フレアを観測するために打ち上げられた2機の観測ロケットです（図1）。

そのうちの1機が、日米共同で開発した太陽フレアX線集光撮像分光観測ロケット実験FOXSI-4です。FOXSI-4はFocusing Optics X-ray Solar Imagerの4回目の飛行実験にあたります。FOXSI-4は約15分間の弾道飛行を行い、そのうち高度150km以上に到達した約6分間に、太陽フレアから飛来した1,000万個以上のX線光子を1個ずつ捉え、各光子の発生場所、到来時刻、エネルギーを記録しました。これは、太陽フレアのX線集光撮像分光観測に世界で初めて成功した出来事でした。

FOXSIは、NASAの観測ロケットを用いて続けてきたシリーズ実験です。その集大成ともいえるFOXSI-4では、満を持して太陽フレアを観測対象としました。科学目標は、次の3つです。第一に、太陽フレアのX線集光撮像分光観測という新しい観測技術を実証すること。第二に、その観測からフレア領域の詳細な温度構造や、そこで加速された電子のふるまいを捉えるという新しい科学成果を生み出すこと。第三に、得られた観測データや解析ソフトウェアを公開し、この新しい研究手法を広く普及

させることです。

FOXSIがシリーズを通して切り拓いてきたのは、太陽に対するX線帯域での集光撮像分光観測という新しい観測手法です。これは、X線がどこから来たかを知る空間分解能、いつ来たかを知る時間分解能、どのようなエネルギーを持つかを知るエネルギー分解能、さらに非常に明るい場所と暗い場所を同時に観測できる高いダイナミックレンジを同時に実現するものです。これにより、太陽の高エネルギープラズマ、すなわち高温の熱的成分<sup>\*1</sup>と加速された非熱的成分<sup>\*2</sup>の両方について、これまでにない質と量の情報が得られます。私たちの日米共同グループは、この観測を世界に先駆けて実現し、太陽コロナの観測を通じて世界第一級の科学成果を挙げてきました。そしてFOXSI-4は、ついに太陽フレアの本格観測に挑みました。



図1: アラスカの射場から打ち上げられた2本の観測ロケット（動画を合成して作成）。左がFOXSI-4、右がその1分後に打ち上げられた高解像度極端紫外線観測ロケット実験Hi-C Flareの軌跡。この2本の打上げは、観測ロケットで太陽フレアを観測するNASA初の試みとして、「フレアキャンペーン」と銘打って実施された。

\*1 プラズマ中の粒子が全体的にエネルギーを獲得して加熱され、高温になった成分。

\*2 プラズマ中の一部の粒子が特別にエネルギーを獲得して加速され、高エネルギーになった成分。

## 7本すべてが異なる望遠鏡

FOXSI-4の観測装置は、高精度X線ミラーと高速度X線カメラから成る7本の望遠鏡で構成されています。X線をミラーで集光し、画素化またはストリップ化した検出器を持つ高速度カメラで、X線光子を1個ずつ計測します(図2)。これらの望遠鏡には、さまざまな高度な技術が用いられています。例えばX線用ミラーでは、Wolter I型<sup>\*3</sup>という特殊な形状を実現しなければなりません。さらに、その鏡面はX線の波長に対応するナノメートルレベルの精度で仕上げる必要があります。一方、検出器とエレクトロニクスからなるカメラにも厳しい性能が求められます。太陽フレアの時間変化を追跡するために高速でデータを取得できることに加え、検出器でX線のエネルギーを正確に測るため、ノイズや信号欠損を低く抑えなければなりません。さらに、太陽フレアの構造を空間的に分解するため、検出器は微細に画素化またはストリップ化されている必要があります。このようなX線集光撮像分光観測を支えるキー技術が成熟し、整ったことで、FOXSI-4の実現に至りました。

さらに、観測性能を十分に引き出すため、迷光を除去するプレ・コリメータ、可視光を遮断するフィルター、光量を調整する減光フィルターなども搭載されています。FOXSI-4は最新技術の実証実験の場でもあり、7本の望遠鏡はすべて構成が異なります。このうち2本が軟X線帯域(約0.8～10keV)、5本が硬X線帯域(約5～20keV)を観測します。

日本からは、名古屋大学が電気鋳造型の高精度X線ミラー2本と各種フィルターを、国立天文台がCMOS検出器を用いた軟X線用高速度カメラ2台と金属3Dプリンター製の迷光除去用プレ・コリメータ2台を、さらに東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構とJAXA宇宙科学研究所がCdTe検出器を用いた硬X線用高速度カメラ4台を提供しました。さらに、データ収集系には日本の提案によりSpaceWireアーキテクチャが全面的に採用されました。つまり日本は、太陽フレアのX線集光撮像分光観測に必要な技術とシステムを、国内で一通り担える段階に達しました。

またFOXSI-4では、太陽フレアを観測するために観測性能を大きく引き上げました。電気鋳造型X線ミラーはFOXSIシリーズ最高の空間分解能を達成しました。軟X線用高速度カメラはシリーズ最高の感度と分光精度を、硬X線用高速度カメラはシリーズ最高の読み出し速度と位置決定精度を達成しました。こうして、FOXSI-4は世界最高レベルの性能を備えたX線観測装置として仕上がりました。

FOXSIの観測装置の全長は2mあり、目指す空間分解能は3

～5秒角です。そのため観測ロケットには、このサイズの装置を搭載できることに加え、秒角レベルの姿勢安定度が求められます。FOXSIでは、これらの条件を満たすNASAの観測ロケットを用いてきました。また、米国で打ち上げれば観測装置の回収が可能で、再飛行も行えます。こうしてFOXSIはシリーズとして継続されてきました。FOXSI-1では、日本からの提供は硬X線検出器のみでしたが、シリーズの展開とともに、日本が担う観測装置の種類は増え、性能も向上しました。日米の協力関係も深まり、共同で太陽フレア観測に挑めるまでになりました。その到達点がFOXSI-4です。

## 太陽フレアが起きたら、すぐ打ち上げる

観測ロケットの有効観測時間は、弾道飛行中の数分間に限られます。一方で、太陽フレアの発生を分単位で正確に予測することは、現時点では不可能です。そのため、あらかじめ決めた時刻に打ち上げる従来の方式では、フレアを観測できません。

そこで今回は、ロケットを打上げ可能な状態で待機させ、米国の気象衛星GOESが計測する太陽X線フラックスをほぼリアルタイムで監視し、中規模以上のフレアの発生を検知した直後に打ち上げるという方式を採用しました。この挑戦的な打上げ手順は、米国チームがNASAと協力して構築しました。

ただし、それだけでは十分ではありません。観測成果を最大化するには、できるだけ規模の大きなフレアを狙うこと、さらに太陽面上に複数の活動領域(黒点群)がある場合には、どの領域でフレアが起きそうかを事前に予測しておくことが重要です。前者は、大きなフレアほどエネルギー解放や粒子加速が長く続き、それらを観測できる可能性が高くなるためです。後者は、観測装置が最高性能を発揮できる視野に限りがあるため、打上げ後にフレアの発生場所を探すことなく、直ちにフレアの観測を始めるためです。

そこで、打上げオペレーションに対する日本からの貢献として、草野 完也 特任教授(名古屋大学・宇宙地球環境研究所)が開発し、伴場 由美 博士(情報通信研究機構)が宇宙天気予報への実用化を進めている、磁場観測データと物理モデルを用いた予測手法を活用し、各活動領域について、フレアの起こりやすさと想定されるフレアの規模を事前に予測しました。

こうした入念な準備のうえで行われた打上げにより、FOXSI-4は太陽フレアのX線集光撮像分光観測に世界で初めて成功しました。観測したフレアは中規模(Mクラス)のフレアで、発生場所も含めて事前予測と一致しており、観測開始とともにフレアを捉えることができました。フレアのピークは過ぎていたものの、なおMクラス相当のX線フラックスを保つ時間帯から観測を開始できました(図3(d))。

## 1,000万個を超えるX線光子がもたらす新しい科学

FOXSI-4は、フレア領域を約5分間、活動領域を約1分間、合わせて約6分間観測しました(表紙参照)。日本から提供した6台のカメラはすべて正常に動作し、軟X線帯域で1,000万個以上、硬X線帯域で2万個以上のX線光子を計測しました。

FOXSIの観測データの最大の特徴は、取得した光子をあとから自由に選んで解析できることです。たとえば、あるエネルギーのX線の空間分布を調べることも、X線スペクトルの時間変化を追うことも、特定の領域ごとのX線スペクトルを



図2: 観測ロケット実験FOXSI-4の観測装置。

\*3 X線を反射させるためには、全反射条件を満たす小さな角度でX線を鏡面に入射させる必要がある。加えて、光軸外で生じる像の収差を小さくするため、回転放物面鏡と回転双曲面鏡で2回反射させる光学系。

詳しく調べることもできます(図3)。

軟X線帯域では、1,000万度を超える超高温プラズマが放射する鉄の輝線も検出されました。硬X線帯域では、15keVを超えるX線も検出されています。このように、これまでの太陽観測では難しかった超高温プラズマの精密診断が可能になります。

観測時間中には、主たるフレアだけでなく、マイクロフレア(小規模なフレア)の発生や、磁場構造の再構成に伴うプラズモイド(プラズマの塊)の噴出も捉えました。これらのデータから、今後は、フレア領域における加速電子(非熱的成分)の調査、マイクロフレアにおけるエネルギー解放の調査、フレアループやプラズマ噴出領域周辺、非フレア活動領域におけるプラズマ加熱の精査、さらには恒星フレアとの比較研究など、さまざまな科学成果が期待されます。

現在、取得したデータの較正処理、観測装置の追加較正、解析ソフトウェアの整備、データ公開の準備を進めています。FOXSI-4は、先に述べた第一の目標である新しい観測技術の実証を達成し、続く新しい科学成果の創出、新しい研究手法の普及へと歩みを進めています。観測データの解析も進んでおり、初期科学成果が得られつつあります。

## さまざまな連携と、次世代への広がり

2020年冬にキックオフしたFOXSI-4計画は、ちょうどコロナ禍のさなかに進められました。太陽コロナを研究する私たちが、別の「コロナ」に悩まされることになったわけです。対面での議論や試験立ち会いは難しかったものの、その制約を乗り越える過程で、日米間の連携はむしろ強まりました(図4)。

FOXSIは太陽を観測対象としていますが、その科学テーマは高エネルギープラズマにあります。また、観測装置にはX線観測の最先端技術が求められます。このため計画は、太陽物理学にとどまらず、高エネルギー宇宙物理学や地球磁気圏プラズマ物理学の研究者も加わる学際的なプロジェクトとして進められました。さらに、最新技術を多数取り入れる必要があったことから、産学連携も大きく進展しました。加えて、フレア予測という観点から、宇宙天気研究との連携も始まっています。こうした連携は、科学と技術の両面で新たな展開を生み出しています。

また、FOXSI計画には多くの大学院生や若手研究者が、責任ある立場で参加しました。その成果は、博士論文2編、修士論文6編として結実しています。さらに、国際光工会学会SPIE主催のシンポジウムSPIE ASTRO 2024では、大学院生2名がFOXSIの成果により論文賞(Paper Prizes)を受賞しました。最先端の装置開発と科学研究の現場が、そのまま次世代研究者を育てる場にもなりました。

## 将来展開 — FOXSI-5、そしてその先へ

FOXSIシリーズは、FOXSI-4で終わりではありません。2026年5月には、FOXSI-4の再飛翔実験であるFOXSI-5の打上げが予定されており、2回目の太陽フレア観測に挑みます。FOXSI-5では、ミラーのひとつをより高性能なものに置き換えました。さらに、打上げ手順も改善し、FOXSI-4よりもフレア発生に近い段階から観測を始めることを目指します。

さらに、FOXSIで培われた技術は、キューブサット計画(科研費・基盤研究(S)「CubeSatによる定常的太陽X線集光撮像分光観測で拓く宇宙プラズマ・宇宙天気研究の深化」)やフルサイズの衛星計画(PhoENiX)への展開も視野に入っています。観測口

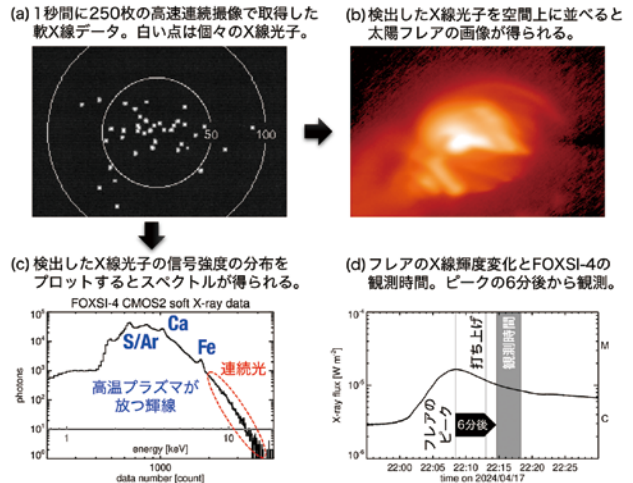


図3: FOXSI-4が検出した太陽フレアからのX線光子データ(a)と、その解析例(b)、(c)。FOXSI-4はフレア後半を観測した(d)。(a)の2つの円は、CMOS検出器上でそれぞれ半径50画素と100画素の円を示しており、太陽面上ではおおよそ4万kmと8万kmに相当する。(b)のフレア画像は、おおよそ450秒角×300秒角の領域を示しており、太陽面上ではおおよそ33万km×22万kmに相当する。



図4: 観測ロケット実験FOXSI-4とHi-C Flareの打上げに携わった人々。アラスカの射場で、2本のロケットとともに。日本からは、国立天文台 成影研究室、名古屋大学 Uxg研究室 三石グループ、東京大学カブリIPMU 高橋研究室、JAXA宇宙科学研究所 渡辺研究室・坂尾研究室が参加した。米国からは、FOXSI-4の研究代表者(PI)であるDr. Glesener氏を中心に、ミネソタ大学、カリフォルニア大学パークレー校、NASAマーシャル宇宙飛行センター、NASAゴダード宇宙飛行センターなどが参加した。

ケット実験は短時間の観測に限られる一方で、新技術を素早く宇宙実証できる大きな強みがあります。そこで得られた知見を小型衛星や本格的な宇宙望遠鏡へとつなげていくことができれば、太陽フレアを舞台とした高エネルギープラズマ研究は新しい段階へ進むでしょう。

太陽フレアは、太陽が持つ磁気エネルギーが突発的に解放される現象であり、宇宙空間における粒子加速やプラズマ加熱の代表的な舞台のひとつです。そこでは何が起きているのかを、X線光子を1個ずつ捉えて測ることで解き明かす——。FOXSI-4は、そのための新しい扉を開きました。次の飛翔、そしてその先の宇宙科学へ向けて、挑戦は続いていきます。

## 謝辞

本計画は、日米の多くの研究者、技術者、学生、関係機関の協力によって実現しました。観測装置の開発、打上げ運用、データ解析に携わったすべての皆さまに深く感謝します。また、本研究は、JAXA宇宙科学研究所小規模計画とJSPS科研費JP22H00134, JP21KK0052, JP21H04486, JP18H03724, JP17H04832, JP15H03647, JP24244021の助成を受けたものです。

## 「れいめい」の運用終了

INDEX (INnovative-technology Demonstration EXperiment) 計画は、次世代衛星技術の軌道上での実証、若手の技術者・科学者の育成、小規模、高頻度の理工学ミッションの実現を目的に衛星開発が始まり、高い三軸姿勢制御性能を持つオーロラ観測衛星「れいめい」として結実しました。「れいめい」はオーロラ粒子観測と、地球磁場で衛星とつながった領域のオーロラ撮像を同時に高時間・高空間分解能で行った初の衛星です。慣性アルペン波と呼ばれる電波が電子を大気に降り込ませることで生じる微細オーロラ発光構造を明らかにしたほか、数秒間隔で明滅しつつ1秒間に数回瞬く脈動オーロラの発生機構解明に大きく貢献しました。

「れいめい」では開発の大部分がインハウスで、若手職員と学生が主体となってメーカー・OBの助言を得ながら進められたことも特色の1つです。衛星システム全体を俯瞰しながら、各々の専門分野であるサブシステムをハードウェアの細部にまで目を配りながら仕上げることで、参加した職員は多くの学びを得ることができました。とはいえ、知識と経験の不足から苦労や失敗も多いという現実もありました。衛星の残留磁気は衛星の輸送直前に苦勞した点の1つです。低軌道にある小型衛星では、衛星自体が帯びている微弱な残留磁気が、地磁気の影響を受けて姿勢擾乱の原因になります。衛星を組み立ててから飛翔体環境試験棟の磁気シールドチャンバーで測定したところ、規定値を上回る残留磁気が測定され、射場への輸送期日が迫る中その



INDEX衛星の磁気モーメント測定 (2005年4月)

対策に追われました。写真は衛星の+Z面から磁気プローブを入れて、磁気の発生源を捜している様子です。最後には逆向きの磁石(キャンセルマグネット：写真左下)をつけて、「毒を以て毒を制す」方法で解決しました。

昨夏には打上げから20年を経て電源系の劣化が顕著となり、運用を停止する判断となりました。電源を停止した後の衛星の姿勢は、残留磁気と地磁気・軌道の関係によって決まるため、運用を停止する処置を考える上でも残留磁気は重要な要素でした。統合化制御装置をはじめ多くの新規技術を取り入れてインハウス主体で開発された「れいめい」が、20年という長寿を全うしたことは「信頼性とは何か」を問いかけているように思えてなりません。(水野 貴秀)

## 2025年度プラネタリーディフェンス・シンポジウムを開催

2025年度のプラネタリーディフェンス・シンポジウムは、2026年2月26～27日にJAXA相模原キャンパスでの対面とオンラインで開催されました。今回が5回目ですが、口頭発表が24件、参加者延べ人数が2日間で246名と、今回も盛況なシンポジウムとなりました。

今回は、JAXAのプラネタリーディフェンスに関連したミッションである、はやぶさ2拡張ミッション、Hera、RAMSES、DESTINY<sup>+</sup>に注目してもらうプログラムとし、藤本 正樹宇宙科学研究所長にプラネタリーディフェンスに関連した総括的な講演を行っていただきました。シンポジウムの直後には、RAMSESミッションの日本側サイエンスチームのキックオフ会も行っ

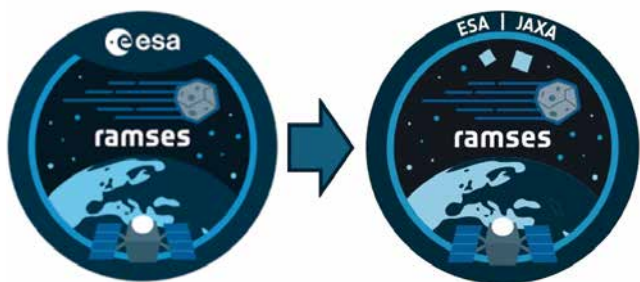
ています。このように今後の宇宙研のプラネタリーディフェンスの活動を広く知っていただくシンポジウムとなりました。

RAMSESミッションは、ESAとJAXAが協力して行う小惑星探査ミッションです。探査する小惑星アポフィスは、2029年4月13日に地球に約32,000kmまで接近します。その大きさは約340mと推定されており、この大きさの天体がこの距離まで地球に接近するのは観測史上初めてのことで、非常に注目されています。アポフィス地球接近時に探査機をランデブーさせ探査するミッションがRAMSESです。最初はESAで検討が始まりましたが、JAXAが加わったことで実現に向けて動き出しました(図)。

シンポジウムでは、他に観測、防災・国際法、アウトリーチ、惑星科学、衝突回避のような多岐にわたるセッションがありました。招待講演では、東北大学災害科学国際研究所の越村 俊一教授による「津波災害デジタルツインの開発と展望」というタイトルで講演がありました。プラネタリーディフェンスとしては防災のコミュニティとの連携を図っていくことが1つの課題になっていますので、防災の最新の取り組みについての研究成果を聞くことができたことは有意義でした。

2029年は、国連の国際年「小惑星認識と惑星防衛の国際年(International Year of Asteroid Awareness and Planetary Defense)」でもあります。2029年に向けてプラネタリーディフェンスの活動がより活発化していくこと期待しています。

(吉川 真)



RAMSESミッションのロゴマーク  
JAXAの参加によってロゴマークが変更になりました。

## おおふなトン

おおふなトンをはやぶさ2回収班特別隊隊員に任命したのは5年半前。先日久しぶりにおおふなトンに会ってきました。場所はおおふなトンの故郷である大船渡市。

今回大船渡市を訪れた目的は、大船渡市と宇宙研による「宇宙科学の普及活動等に係る連携協力に関する協定書」の締結式に出席するためです。

大船渡市と宇宙研の関係は古く、1971年に岩手県三陸町(2001年以降は大船渡市)に「三陸大気球観測所」を開設。以来、国内

唯一の大気球実験実施拠点として、毎年多くの研究者が大船渡市を訪れ、町の皆様に大変お世話になってきました。2007年に同観測所が閉鎖された後も、「宇宙学校」を開催する等、大船渡市と宇宙研との交流は続いています。また宇宙研の研究施設が縁で交流を始めた自治体が構成する銀河連邦に大船渡市もサンリクオオフナト共和国として加盟しており、同連邦による交流活動イベントや災害時における支援等を通じ、友好関係を深めてきました(この連邦の縁で、おおふなトンをはやぶさ2回収班特別隊隊員に任命しました)。

協定のきっかけは、昨年の大船渡市大規模林野火災でした。甚大な被害が発生したことを受け、大船渡市と宇宙研が今後も継続して協力関係を構築し、市民が宇宙について学ぶ機会をつくり、空を見上げ、前向きな気持ちを育み、心のケアや地域コミュニティの再構築につなげていくことを目指し、協定を締結する運びとなりました。

(科学推進部)



締結式には洲上大船渡市長、藤本宇宙研所長の他関係者が出席し、協定書へ署名しました。その後の懇談は終始和やかな雰囲気のうちに行進し、両者の友好関係がさらに深まりました。



締結式が行われた大船渡市役所で出会ったおおふなトン(ぬいぐるみ)。5年半ぶりでしたが、元気づけました。

## 第18回宇宙科学奨励賞 水本 岬希氏と尾崎 直哉氏に授与

公益財団法人宇宙科学振興会では、毎年、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者に宇宙科学奨励賞を授与しています。創設以来18回目となる今年度は、福岡教育大学教育学部 講師 水本 岬希氏(宇宙理学分野)と宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 准教授 尾崎 直哉氏(宇宙工学分野)に授与することになりました。

水本氏への授賞の対象となった研究業績は、「コンパクト天体からのアウトフローに関する研究および装置的貢献」です。水本氏は、必要な観測・実験の実施能力、それらのデータの適切な整約・解釈の能力、それらを理解する深い理論的考察の能力等を高いレベルで兼ね備え、X線分光撮像衛星XRISMの優れた観測性能を最大限に活用して、天文学の最前線を切り拓いておられます。また、関連する論文作成や、検出器の較正実験等における共同作業において、チーム員と協力しつつ結果をしっかりと出していく中心的役割を果たしておられ、今後の宇宙科学の進展への貢献が大いに期待されています。

尾崎氏への授賞の対象となった研究業績は、「高頻度な小惑星探査を実現する軌道設計・最適化手法の確立と実装」です。尾崎氏は、機械学習を導入した革新的な軌道設計技術によって、小惑星探査の新しい世界を開拓する数多くの優れた研究成果を挙げておられ、これらの研究は、アストロダイナミクスの学術分野全体に対して、新たな学術領域を切り拓く可能性を示していると評価されています。また、尾崎氏はアストロダイナミクスに留まらず、探査機のシステムにも精通しており、宇



前列左側(宇宙理学分野)水本 岬希氏、前列右側(宇宙工学分野)尾崎 直哉氏

宙探査全体を牽引する人材としての素質を発揮しており、今後もリーダーシップを持って日本の宇宙工学の発展にさらなる貢献を果たしていくことが期待されています。

当振興会は今回受賞された水本氏と尾崎氏に心からお祝い申し上げますとともに、今後の宇宙科学の発展に大いに貢献されることを期待しております。表彰式とそれに引き続く祝賀会は、3月5日に多数のご来賓、関係者列席のもと、都内のホテルにて開催しました。式中に受賞者による記念講演も行われました。なお、本授賞の対象となった両氏の研究内容は、それぞれISASニュース6月号および7月号の「宇宙科学最前線」で紹介いただく予定です。

(公益財団法人 宇宙科学振興会/中島 節夫)



# MMXはフォボスを目指す!



## MMX打上げに向けて 運用準備進行中

### MMX運用準備の概要

MMXは世界初の火星圏サンプルリターンを目指し、2026年度に打ち上げられる計画です。現在、探査機システムはフライトモデル (FM) 総合試験の佳境に入っており、4月からは種子島宇宙センターで射場作業が始まります。

MMXは、日本の宇宙科学史上最も大型かつ複雑な探査機によるサンプルリターンミッションとなっており、運用においても過去の深宇宙探査ミッションとは比較にならないほど難しい運用を成立させなければいけないため、運用リスクを少しでも下げるよう、開発フェーズの早期から運用検討を開始し、運用準備に注力してきました。

運用準備活動の軸として、MMXでは複数の運用ワーキングチーム (WT) を立ち上げ、運用検討、詳細設計を実施し、訓練計画など実運用の準備を進め昨年度から運用訓練に着手しています。

また、運用設計結果や運用準備状況を外部の視点で審査してもらう運用設計CDR (詳細設計審査)、MOR (ミッション運用準備審査) などを実施している点も特徴です。

MMXでは探査機のダイナミクス、統合化計算機 (SMU) の動作を模擬できるフルソフトウェアシミュレータ (探査機総合シミュレータ) を開発し、地上系に組み込み運用手順の検証に用いると共に、シミュレータを使った運用訓練を実施しています。2025年からはシミュレータにフライトバージョンのソフトウェアが実装され、より実運用に近い状態で検証・訓練に使用されています。

運用訓練は、探査機システム担当、航法誘導制御系 (GNC) 担当と、運用する際に指揮をとるスーパーバイザとコマンドの最小限の体制で運用の一部を模擬した小規模訓練から、運用体制を実運用規模にした中規模訓練、更に実運用と時間軸を合わせ、リアルタイム性をもたせた大規模訓練までの3段階で実施する計画となっています。

訓練対象は重要と識別されたクリティカル運用 (打上げ初期クリティカル、火星圏投入、着陸、火星圏離脱、カプセル分離等) であり、今までに打上げ初期クリティカル運用と、着陸運用のノミナル・オフノミナルなどの小規模訓練を実施しました。



運用訓練の様子。MMX用に新たに整備した運用室で行われている。

現在は残りの小規模訓練を実施しつつ、2026年度に開始される中規模訓練に向けた課題の抽出と訓練方法のブラッシュアップを行っています。

澤田 弘崇 (さわだひろたか)

### ミッション機器運用準備について

MMXには、11種類の科学ミッション機器と、2種類の探査技術獲得のための装置が搭載されます。これらの機器は、カメラや高度計測、放射線計測など多様な観測手法を持ち、それぞれ適した観測タイミングも異なります。例えば、フォボス表面の昼面を対象とする撮像機器もあれば、昼夜を問わず火星圏環境を調べる機器もあります。さらに、一部の機器のデータは探査機上で圧縮などのデータ加工処理も行われますが、一部の機器の観測と加工は同時に行えないという制約があります。また、ダウンリンク量や加工可能な時間などの運用制約により、ある特定のデータのみを選択して加工やダウンリンクを行う必要もあります。そのため、それぞれの機器の運用条件に加えて、複数機器間の観測・加工・ダウンリンクの干渉も考慮する必要があり、MMXの運用は非常に複雑です。

加えて、MMX探査機には探査モジュール、復路モジュール、そしてリターンカプセルのそれぞれに一基ずつデータレコーダーが搭載されています。中でも、地球へ持ち帰る回収型データレコーダー (RDR) はMMXの特徴の1つです。火星圏では、地球に送れる通信量に限りがあるため、大容量のデータをこのレコーダーに保存し、採取サンプルとともにカプセルで地球に届けます。ただ、このデータレコーダーのデータ格納状況の情報は取得が困難であるため、大容量のデータレコーダーに対して、地上で厳密にその情報を管理する必要があります。

このようにMMXでは機器毎の観測タイミングやダウンリンクの優先度を調整し、観測やデータ送信、RDRの読み書きの計画を事前に立てることが重要となります。MMXで取り組んでいるミッション運用準備の1つとして、「データレコーダーアドレス管理ツール」を紹介します。探査機上のデータ格納状況は、バス系テレメトリに含まれるポイント情報からある程度把握できますが、テレメトリを受信する前に、どのデータを優先して加工処理したり地上に送ったりするかを判断しなければならない場合もあります。また、送られてくる観測データがいつ・どのような条件で得られたものか、地上で管理されているコマンド履歴等の情報とも照らし合わせて確認しておく必要があります。そのため、テレメトリだけでなく地上系を含む全ての関連データを整理し、管理することが重要になります。本ツールは、テレメトリとコマンド履歴をもとに探査機上のデータ格納状況を地上で再現します。さらに運用計画段階では、観測時間や識別IDで指定したデータを加工・ダウンリンクするためのコマンドパラメータ作成支援や、想定したコマンドによってデータがどのように保存・移動するかを事前に調べることもできます。今後の運用訓練や地上試験、そして実運用を通じて、本ツールを含む運用準備がMMXの成果に貢献していくことを期待しています。

宮崎 理紗 (みやざきりさ)



JAXA 名誉教授

齋藤 宏文 (さいとう ひろぶみ)

## 「れいめい」から超低高度 SAR衛星へ

「れいめい」の最終運用で訪れた宇宙研の水野研究室の小部屋には、2005年ドニエプルロケットでの発射の写真、打上げ後に関係者で名前を書き集めた色紙、航空宇宙学会技術賞のメダルなど20年前の記憶が、古くなった衛星文書ファイルの紙の香りとともに残っていた。

「れいめい」は、1998年頃、中谷 一郎教授(当時)がINDEX (INnovative Technology Demonstration EXperiment) と命名して、衛星メーカーに頼らず職員の手で開発しようという提案でスタートした約70kgの小型3軸姿勢制御衛星である。当時宇宙研で進められていたSTRAIGHTという名の惑星探査機の軽量小型化をねらう技術開発プログラムの成果を軌道上で実証することも目的であった。また、宇宙研ならではの性格付けとして、オーロラの動画撮像装置と沿磁力線の粒子計測などによるオーロラ観測を理学ミッションに加え、観測ミッションを志向したシステム工学的なアプローチを実践体験する狙いもあった。

今でこそ、低価格の小型衛星バスを製造する中小企業が国内にいくつかある。しかし、2000年当時は、衛星と言えば衛星重量は数100kg以上でコストは100億円以上という状況であり、先進的な技術の導入、研究的指向を持った若手技術者の参加が難しい状況になっていた。

このため、所内の若手人材に声をかけたり、大学卒業生や大学院生に衛星作りやそれに関係する研究課題を与えたりもした。東大大学院の各研究室に「一緒に衛星をつくらないか」と声かけて優秀な人材を採用する努力も行った。25年を経てその人たちは月着陸機SLIMなどを実施する今の宇宙研を支えているメンバーになっている。また、オーロラのスペクトル動画観測を行うために、中精度の3軸姿勢制御機能を取り入れたため、姿勢制御を担当した若手助教(現在では大物教授)にはまたとないon-the-job-trainingになったと思う。衛星運用も自分たちでできるように、新A棟屋上に小型パラボラアンテナを設置して研究室内に衛星管制局を作って、20年間運用してきた。

若手のみならず、NECで長年にわたり科学衛星の経験を積んでおられた升本 喜就氏からは、小型衛星設計のノウハウを伝授していただき感謝している。升本氏から



2005年当時、射場搬出を前にした小型衛星「れいめい」と開発メンバー

は搭載機器製造の中小企業の匠たちを紹介していただき、若手研究者・学生+大手衛星メーカー技術+中小企業の匠、という面白い組合せのグループができた。

そのグループの中で文字通り“いろいろな苦労を楽しみ”ながら「れいめい」を完成させ、2005年春にはドニエプルロケットで打ち上げるためにバイコヌール宇宙基地へ搬出することとなった。写真は搬出前のプロジェクトメンバーの写真である。抱っこされている赤ちゃんも、もう20歳を超えているはずである。

発射場に輸送された「れいめい」には、スタッフが数週間ずつ交代で付き添った。日曜日に休日が取れて特別に市内に出ることが許された。広大な基地の近くには大きな川が流れていた。私たちがその川辺を散歩していたところ、地元の少年たちが川を泳いでいた。それを見たひとりの勇敢なメンバーが思いもよらぬ行動に出て、服を脱いで川を泳ぎはじめてしまった。プロマネである私は彼を厳しく注意をしたが、地元の少年達は彼を大変称賛していた。そして一人の少年が我々を自宅に招待すると身振り手振りで言い出した。恐る恐る彼の自宅に行ってみると、少年の母親は突然の日本人の客に少々びっくりされていたが、メロンやスイカを出してくれた。言葉も通じない国際親善だったが、まさに裸の付き合いであった。

この原稿を書き始めた頃、宇宙戦略基金の採択通知のメールが届いた。2年後には超低高度軌道からの合成開口レーダ観測を行う衛星を打ち上げるという私の提案が採択された。大型衛星が必要であると思われていた合成開口レーダ観測を、レーダアンテナを含めて衛星全体を薄型にして大気抵抗を減少させて、高度350km程度までに下げ、衛星の小型化、低価格化、観測性能を高める野心的な計画である。

いま振り返ってみると、あの時の「れいめい」こそが、自らで考えぬいた衛星ミッションのアイデアを実際に実現実証していく力を、私に与えてくれていたのだと感じている。

# 宇宙・夢・人

Space Human Dream

》宇宙科学のため、  
》だけではないミッションを

## チームに魔法がかかった！

——プロジェクトマネージャ(プロマネ)を務めた小惑星探査機「はやぶさ2」のカプセルが地球に帰還したのは、2020年12月のことでした。現在も多くの講演に招かれていますね。

最初のころは、科学的な成果について聞きたいという依頼が中心でした。次第にチームづくりやマネジメントについて話してほしいという依頼が増え、今では半々くらいです。

マネジメントについては、失敗しないことが成功ではない、という話をしています。失敗しないためのルールはたくさんくれます。しかし、そのルールを守るだけで成功できるわけではありません。大切なのは、チームのみんなが楽しむことです。

私たちは科学者や技術者なので、みんな新しいことに挑戦したいと思っています。その挑戦が楽しいのです。そして真の成功は楽しむ先にある。一方で、挑戦には失敗のリスクが付きものです。宇宙研で実施しているプロジェクトは国の事業でもあるので、失敗は避けなければなりません。そこで「はやぶさ2」では、あえてプロジェクトの中に失敗してもよい部分や機会をつくり、みんなが挑戦できるようにしていました。

## ——「はやぶさ2」で最も印象に残っている出来事は何ですか？

小惑星リュウグウへの1回目の着陸です。ソフトウェアにバグがあり着陸の直前に探査機が誤作動を始めたのです。このとき、私が細かい指示を出さなくても、一人ひとりが自分の役割を理解して動き出しました。以心伝心でチーム全体の動きが噛み合い、問題を解決し、着陸そしてサンプル採取に成功しました。あの瞬間は、チームが魔法にかかったかのようでした。またいつか、あの特別な瞬間を感じてみたいと思っています。

## 宇宙研を技術の“踊り場”に

### ——2025年4月、宇宙科学研究所の副所長に就任されました。

副所長は2025年度から2名体制となり、澤井 秀次郎さんは技術戦略を、私は科学戦略を担当しています。宇宙研ではミッションを中型と小型に分けていて、世界最先端の成果を目指す中型ミッションの方向性を描くのが、私の役割です。

2026年度に火星衛星探査計画MMXの打上げが予定されています。その次に決まっているのは、2036年度打上げ予定のマイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡LiteBIRDのみで、目標とする10年に3機というペースが崩れています。2030年代に打ち上げる中型ミッションの道筋をつけることが急務です。

## 編集後記

新緑の美しい季節となりました。宇宙研の桜は今年も見事な咲きっぷりでした。振り返れば、酷暑の後、早々に葉を落としていた姿も思い出されます。今は、そのごつごつとした幹とやわらかな若芽の対比を楽しんでいます。忙しさの中でもちょっとほっとするひとときです。  
(齋藤 芳隆)

宇宙科学研究所 副所長  
宇宙飛行工学研究系 教授

## 津田 雄一 (つだ ゆういち)

1975年、広島生まれ、相模原育ち。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2003年、JAXA宇宙科学研究所助教。准教授を経て、2020年、宇宙飛行工学研究系教授。2025年より副所長。IKAROSサブチームリーダー、「はやぶさ2」プロジェクトマネージャを歴任。



## ——将来ミッションを考える際、何が必要だと思われますか？

以前は、宇宙科学や宇宙開発といえば、宇宙研など国の研究機関が中心を担っていました。現在では、宇宙に関わる民間企業も増え、独自に宇宙を目指すベンチャーも出てきました。この状況を考えると、ミッションのつくり方も変えていく必要があります。

宇宙研は宇宙科学の研究所ですが、「宇宙科学のため」だけを目的としたミッションでは、外部からの支持は得にくいでしょう。宇宙業界だけでなく、さまざまな産業の技術発展にも貢献し、多くの人が関心を持つようなミッションをつくるのが重要だと考えています。そのためには、民間企業や大学など、さまざまな立場の人たちと対話し連携することが不可欠です。

## ——具体的な取り組みとしては、どのようなものがありますか？

新たに準小型ミッションという枠組みをつくりました。小規模の予算で短期間に実現することで、ミッションの頻度を上げることを目指しています。

準小型のもう一つの狙いは、自分たちで手を動かしてものづくりをする環境を取り戻すことです。中型ミッションでは、製作をメーカーに委ねることが多くなります。その結果、ネジの締め方も分からないような、現場を知らない集団になってしまう恐れがあります。準小型の規模であれば、自分たちで手を動かしてつくれ、挑戦もしやすいでしょう。

宇宙研だけでなく、民間企業や大学などから多様な人たちが集まり、企画し、挑戦し、技術を生み出し、ミッションを実現する。さらに、その技術がほかの産業へも応用される。宇宙研を、そうした技術の“踊り場”にしたいのです。そして、そこで得た技術や知見を中型ミッションにつなげていきたいと考えています。

## ——普段から心掛けていることはありますか？

与えられた環境の中でいかに楽しむかを意識しています。周りの人にも、「もし私が楽しそうにしていなかったら教えてほしい」と伝えています。しかめっ面は、宇宙科学には似合いません。

## おいしい肉を求めて、温度プロファイルを取得する

### ——休日はどう過ごされていますか？

私はお肉が好きです。安い肉を高級肉に変えるために、今も温度計を刺して色々な焼き方を試し続けています。5時間かけて焼き上げ家族に呆れられたこともあります。編み出した秘技で研究室のバーベキューで振舞うと、皆おいしいと言ってくれました。ただ、ひとつはつきり分かったことがあります。高い肉のほうが圧倒的においしい…



ISASニュース No.541 2026年4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/>