

システム熱真空試験後のMMXの探査機 (探査モジュールと復路モジュール)

2025年3月から4月にかけて、MMXの探査機のシステム熱真空試験が行われました。写真は、熱真空試験を終えて真空チャンバから搬出された探査機の機体です。MMXの探査機は、往路モジュール、復路モジュール、探査モジュールの3つのモジュールから構成されていますが、今回の試験は、復路モジュール、探査モジュールが結合した状態で行われました。熱真空試験は、宇宙空間（真空、温度）を模擬した環境である、真空チャンバという試験設備内に探査機を格納して、想定される軌道上の温度環境（高温側／低温側）において、探査機に搭載された各機器が正常に動作するか、十分な性能を発揮するか、そして、システム熱設計の妥当性を確認します。写真では、機体の上部に探査モジュールが結合されています。画像中央に位置するのが復路モジュールで、ハイゲインアンテナとミドルゲインアンテナの2種類のアンテナが設置されています。右上には、着陸用の脚が見えます。今回は、4本ある着陸脚のうち1本だけを取り付けて、試験を行いました。今後は、往路モジュールも結合して、3モジュール全機結合状態で、機械環境試験へと向かいます。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

ブラックホールの多様な活動性の解明を目指して

愛媛大学大学院理工学研究科 准教授 志達 めぐみ(しだつ めぐみ)

ブラックホールが引き起こす活動

アインシュタインの一般相対性理論によりブラックホールの存在が予言されてから、約100年が経ちました。近年、観測技術は飛躍的に進歩し、重力波の検出やEvent Horizon Telescopeによる銀河中心の超巨大ブラックホールの直接撮像といった成果により、ブラックホールが理論上の仮想天体ではなく、実在することが明確に示されました。しかし、その実態はいまだ謎に包まれています。特に興味深いのは、ブラックホールが引き起こす極めて激しい活動現象です。ブラックホールは単独で存在する場合は沈黙を保ちますが、周囲に物質があると、それを強大な重力で引き寄せて輝き始めます。さらに、落下するガスの一部を外向きに加速し、高速で宇宙空間へ噴き出すことも知られています。こうした活動は、周囲の星形成や銀河構造に影響を与え、宇宙進化に寄与している可能性があります。また近年、活動的なブラックホール周辺からは、高エネルギー宇宙ニュートリノや超高エネルギーガンマ線も検出されており、宇宙線の起源や粒子加

速機構を探る上でも、その活動が注目されています。

ブラックホールX線連星

宇宙には大小さまざまなブラックホールがあるとされますが、中でも最も劇的な活動を示すのが「ブラックホールX線連星」です。これは太陽の数倍から数十倍の質量を持つ「恒星質量ブラックホール」と、通常の恒星が連星を成す系で、恒星からブラックホールに落ちるガスが高温の降着円盤を形成します(図1左)。ブラックホール近傍では、ガスの摩擦で円盤が約1,000万度以上に加熱され、X線を放射します。このX線を観測することで、ブラックホール周囲のガスの状態や運動を調べることができます。銀河系内に発見されているブラックホールX線連星のほとんどは観測上「突発天体」と分類されるもので、普段は非常に暗いものの、ある日突然X線で急増光し、1週間で1万倍以上明るくなることもあります。その際、降着円盤と垂直方向に光速に近いジェットが噴き出し、X線に限らず電波や可視光でも劇的な変化が観測されます。こうした突発現象の背景にある物理機構は、長年研究が続けられて



図1：(左) ブラックホールX線連星の想像図。(右) 国際宇宙ステーション搭載のMAXI。

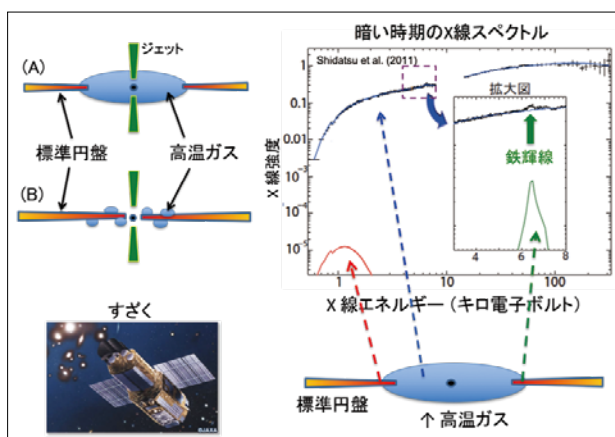


図2：(左) X線で暗い時期のブラックホールX線連星の降着円盤の構造に対する2つの仮説。(右)「すざく」で得られたX線スペクトルと、降着円盤の各領域からの放射の寄与。

いるにもかかわらず、未だ理解しきれておらず、増光中の活動の全体像は依然として明らかになっていません。

私は大学院時代から一貫してこの謎に取り組んできました。本稿では、第17回宇宙科学奨励賞の対象となった研究と、それを実現するために取り組んできたX線天文ミッションでの技術的な貢献について紹介します。

全天X線監視装置MAXIと多波長観測体制

ブラックホールX線連星の多くは、数年から数十年に一度、突如として明るく輝きます。一方、現在活躍する大型X線天文衛星や地上望遠鏡の多くは視野が狭く、一度に観測できる範囲はごくわずかです。こうした、いつ・どこで活動を始めるか分からない天体を見逃さず、増光中に詳細観測を行うには、常に全天を監視する必要があります。この目的のために開発されたのが、全天X線監視装置MAXI(図1右)[1]です。2009年に国際宇宙ステーション(ISS)に設置されて以来、MAXIは400件を超えるX線突発現象を検出し、全世界に速報してきました[2]。私は2010年、運用初期の段階からミッションに参加し、こうした活動に携わってきました。

また、MAXIが検出した増光現象に対して、より高精度のX線観測を行うべく、各種X線天文衛星への観測提案を行ってきました。同時に、電波や可視光などで輝くジェットも捉えるため、X線以外の波長帯の観測提案も自ら行い、国内外

の研究者とも連携して多波長観測網を構築しました。こうして、MAXIによる増光検出後には、さまざまな衛星や望遠鏡を総動員し、貴重な増光中のブラックホールX線連星の観測体制を整えてきました。以下では、これまでの観測成果の一部を紹介します。

低光度の降着円盤の最内縁構造とジェットの磁場測定

以前の研究から、X線連星は増光の初期や減光期末の比較的X線で暗い時期には10 keVを超える硬X線を多く放射し、明るくなると10 keV以下の軟X線放射が支配的な状態に変化することが知られています。これらのX線は主にブラックホール近傍の降着円盤最内縁部から放射され、その構造を反映しています。明るい時期については、黒体放射により効率的に冷えた「標準円盤」が形成されており、軟X線放射はその内縁部の約数100万度から1000万度のガスが出す放射として非常によく説明されます。

一方、暗い時期の硬X線は、高温ガス(電子温度で約10億度)に由来するとされますが、その構造については、ブラックホール近傍を高温ガスが覆うとする説(図2左A)と、明るい時期と同様に標準円盤が伸びているとする説(図2左B)が長く対立していました。

そこで私は、複数のブラックホールX線連星を、X線天文衛星「すざく」等を用いてX線で暗い時期に観測しました。図2に示すX線スペクトルでは、6~7 keV付近に標準円盤由来の鉄輝線が確認されます。この輝線は、重力や回転の影響で広がり、変形するため、その形状解析により標準円盤の内縁位置を推定できます。相対論を考慮したモデルを使って輝線を解析した結果、標準円盤はブラックホールから離れた位置で途切れ、その内側は高温ガスに置き換わっている(図2左Aの描像が正しい)ことが明らかとなりました。さらに、連続スペクトルの解析からも複数天体で同様の結論が得られ、この時期のブラックホール周辺が高温ガスに覆われていることを示しました([3]他)。このように、X線スペクトルを解析することで、画像で分解できない構造を「見る」ことができました。また、この結果はブラックホールの自転測定にも影響を及ぼすもので、今回否定された構造を仮定した解析から「ブラックホールX線連星の多くが非常に高速回転しているブラックホールである」との主張もなされていましたが、見直しが必

要となりました。

また、暗い時期には定常的にジェットが噴出していることも知られています。理論研究ではジェットの噴出機構には磁場が関係していると考えられてきましたが、ブラックホールX線連星のジェットの根元の実際の磁場強度は未解明でした。私はMAXIにより検出された増光初期のブラックホールX線連星を多波長で同時観測し、磁場の実態に迫りました。図3に示す2018年にMAXIで発見されたブラックホールX線連星 MAXIJ 1820+070 のデータでは、X線と紫外領域は降着円盤の放射で説明可能である一方、電波から可視光付近では折れ曲がった冪型の分布が見られます。これは、ジェットからのシンクロトロン放射に由来し、その分布は電子のエネルギーや磁場強度、放射領域のサイズに依存するため、観測からそれらのパラメータを推算できます。解析の結果、ジェットの根元には1テスラ超の強い磁場が存在し、磁場がジェット噴出に深く関与していることが確認されました。

X線天文ミッションへの貢献：MAXIからXRISMへ

MAXIでは突発天体の監視に加え、軌道上で検出されるノイズの見積もりにも取り組んできました。天体からの微弱なX線信号を捉えるには、宇宙線などによる非X線バックグラウンド (NXB) を精密に評価する必要があります。MAXIでは多くの場合NXBが信号を凌駕するため、その影響を除去することは、ミッションの根幹とも言える課題です。しかし、NXBはISSの軌道や姿勢に強く依存し、時々刻々と複雑に変化するため、その見積もりは困難でした。私は、MAXIの全観測データを解析し、機上で計測している宇宙線強度の指標となるパラメータを用いた独自手法により、高精度のNXBモデルの構築に成功しました(図4上)。その解析の中で、約半年ごとにNXBが数十パーセント変動する現象も見つかりました(図4下)。これは、ロシアの宇宙船ソユーズがMAXI近傍のポートにドッキングする時期と一致しており、ソユーズの高度計に使用されているガンマ線源がその原因である可能性が高いことが後に明らかになりました。これらを踏まえ、構築したモデルに基づいてNXBの擬似データを生成するシミュレータも開発しました。これを用いることでMAXIの感度を最大限に引き出す解析が可能となり、その後のMAXIデータを利用した研究の推進に貢献することができました。

この経験を活かし、私はX線分光撮像衛星XRISM[6]にもプロジェクトの立ち上げ時から参加し、開発・試験や運用に携わってきました。XRISM搭載のX線マイクロカロリメータ Resolveは、従来より1桁優れたエネルギー分解能を持ち、ブラックホール近傍のガスの運動をかつてない精度で捉えることを可能にします。これにより、噴出流の性質や駆動機構の理解が大きく進むと期待されています。私は、ブラックホールX線連星の観測立案など科学的側面に加え、科学運用チームの一員として、観測データを科学解析用に整形する地上データ処理システムの開発・試験や、衛星時刻システムの精度評価に中心メンバーとして携わってきました([7]他)。現在、XRISMの第1期国際公募に基づく観測が順調に進んでおり、私が提案したX線連星の観測も最近実施されました。得られたデータは現在解析中ですが、すでに多くの興味深い結果が得られつつあります。今後は、XRISMの精密X線分光観測と多

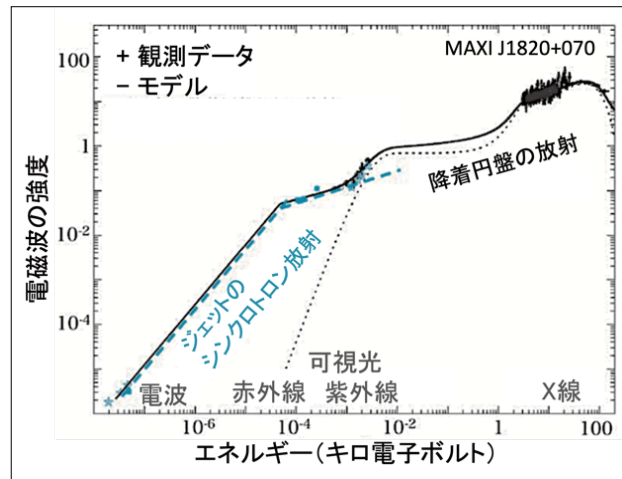


図3：多波長観測により得られたブラックホールX線連星MAXIJ 1820+070のスペクトルエネルギー分布[4]。

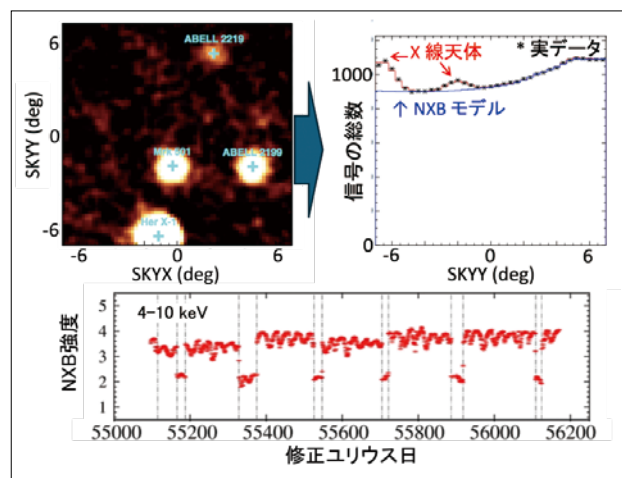


図4：(左上) 2009年から約3年分のMAXIの観測データを積分して得られた画像。(右上) 左の画像をSKYY方向に足し合わせて得られたSKYY方向の信号強度の分布。モデルが観測データとよく一致していることがわかる。(下) 一日平均のNXB強度の変化。およそ半年に1度の頻度で急激な減少が見られる。これらは、ソユーズがMAXIに近いドッキングポートを離れ地上に戻っている時期と同期している([5]改)。

波長観測を組み合わせ、ブラックホールX線連星の未解明の課題に挑んでゆく予定です。

おわりに

上に述べた研究活動は、MAXIやXRISMなど日本のX線天文ミッションがなければ成り立ちませんでした。これらのプロジェクトでは、観測に用いる装置や衛星本体の開発・運用を現場で学び、天体の研究にとどまらない、幅広い知識と経験を得ることができました。このような貴重な機会を提供してくれたプロジェクトと、関係者の皆様に感謝いたします。今後は、これまでに培った知見を活かして、将来の天文ミッションの推進や次世代の育成に貢献していきたいです。

引用文献

- [1] M. Matsuoka et al. Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 999 (2009)
- [2] H. Negoro et al. Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 1 (2016)
- [3] M. Shidatsu et al. Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 785 (2011)
- [4] M. Shidatsu et al. The Astrophysical Journal, 868, 54 (2018)
- [5] K. Hiroi et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 207, 36 (2013)
- [6] M. Tashiro et al. Publications of the Astronomical Society of Japan, in press
- [7] M. Shidatsu et al. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 11, 042012 (2025)

再使用ロケット実験機RV-X・飛行試験に向けた準備状況

本誌での前回の報告(2021年5月号*)からかなり時間が経ってしまいましたが、再使用ロケット実験機RV-Xの飛行試験に向けた現在の状況についてご紹介します。RV-Xは研開部門主体の活動ですが、RVTや再使用観測ロケットなど、ISASでの再使用ロケットの研究成果を最大限活用しつつ、ISASも活動の立ち上げから一緒に取り組む実践的な研究として進めています。1段再使用飛行実験CALLISTOのフロントローディングとして位置付けられるとともに、より将来に向けたロケットの再使用技術を獲得するための実験です。

能代ロケット実験場にて2シリーズの地上燃焼試験(RV-X-1/2)を実施して以来、飛行試験に必要な各種の検証試験、地上系の準備などに取り組んできました。姿勢の制御性を検証するモーションテーブル試験や、着陸脚の機能を検証する落下試験など、実際に実験機を使った地上検証を進めてきました。また、この実験で最も重要な検討項目の1つである「安全」について、有識者の皆さんとじっくりと議論を進めてきました。水素を使う再使用型のロケットを、如何に安全に飛ばし、運用するか。繰り返し飛ばすロケットだからこそ確立しなければならない、新たな安全の考え方について、各系を担当するチームメンバーが実験機と向き合いながら検討を進めてきました。例えば、水素が入った状態の着陸後の機体にどのようにアクセスするのか、手順や人員、機体状態のモニタなどの詳細について、将来の再使

用ロケットの運用にも指針となる考え方として整理しています。

いま、この6月から飛行試験前最終の3シリーズ目の地上燃焼試験(RV-X-3)を実施するための準備を能代ロケット実験場で進めています。RV-Xの機体は飛行形態です

に実験場に搬入されており、射点にセットして、推進剤や電力を地上から機体へ供給するためのアンビリカルラインの着脱試験など、事前確認の最終段階にきています。この燃焼試験で、飛行実験を想定したエンジン推力プロファイルの試験を行い、必要な機能がすべて問題ないことを確認できれば、いよいよ飛行試験に移ります。

計画当初はもっと早く飛行試験を行う予定でしたが、新しいロケットだからこそ考えなければならないことも多く、時間がかかりました。このRV-Xで得た技術や経験は、ISAS輸送系が計画する次の新しい小型実験機に必ず役に立ちます。そちらの計画についてはまた改めて。まずは、RV-Xを研開部門の皆さんと一緒に飛ばします。(野中 聡)



RV-Xの射点での運用確認(2025年3月能代ロケット実験場)

* https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISA5news482.pdf

次世代旗艦宇宙望遠鏡 Habitable Worlds Observatory(HWO)への参画

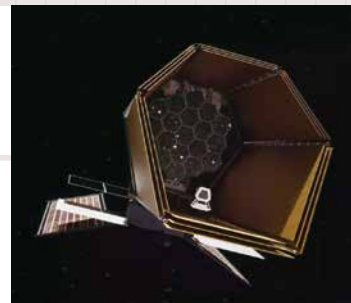
Habitable Worlds Observatory (HWO) は、米国のディケーダールサーベイ(Astro2020)の提言にもとづき、NASAがジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡、ローマン宇宙望遠鏡に続く旗艦ミッションとして、紫外線から近赤外線にわたる波長域で観測を行う口径6m級の大型宇宙望遠鏡を2040年代に実現しようとする超大型計画です。

HWOの主要な科学目標の1つとして、太陽型星を周回する地球型系外惑星の直接観測を行い、その大気や表面の特徴を調べるとともに、そこに生命の兆候を探索することが挙げられています。いわば、「第2の地球の探索」という究極目標です。そのためHWOでは、主星の光を選択的にかつ大幅に抑制して系外惑星の直接観測を可能にする「コロナグラフ」という特殊な光学装置を開発して搭載します。望遠鏡と組み合わせて使用する科学観測装置としては、コロナグラフ装置の他にも、高解像度カメラと多天体分光器の搭載が予定されており、さらに追加の装置の搭載も検討されています。これらの装置では太陽系天体から遠方銀河にわたる幅広い科学研究が推進される予定です。HWOに要求される光学的・機械的・熱的な精度は極めて高く、その開発は挑戦的ですが、実現すれば多くの画期的な科学成果が期待できます。

HWOに対して日本からの寄与としては、コロナグラフ装置および紫外線観測装置の開発、そして科学研究への参画が検討されています。宇宙機器開発の本格的な国際協力は、基本的に実績あればこそ、需要があり成立します。宇宙望遠鏡用コロナグラフ

の開発では、日本には(実現には至りませんでした)赤外線天文衛星SPICA搭載に向けたコロナグラフ装置の開発を進めた経験があり、またローマン宇宙望遠鏡に対してはコロナグラフマスク(系外惑星観測のため高コントラスト像を生成する素子)の材料基板や偏光素子の提供等で参画した実績があります。また地上望遠鏡では、すばる望遠鏡におけるコロナグラフの実績があります。現在、亀田 真吾氏(立教大・宇宙研)らが検討を進めている紫外線観測装置関連では、日本の「ひさき」の実績やLAPYUTAの検討活動が大いに活きと考えられます。

HWOへの日本の参画に向けて、2024年12月、宇宙研にタスクフォースが設立されました。HWOタスクフォースはNASAに対する日本側の窓口となること、技術フロントローディングの推進、コミュニティとの連携等の役割を担っています。その前段階では、2023～2024に住 貴宏氏(大阪大)、宮崎 聡氏(国立天文台)らがJAXA representativeとして活動してきました。さらに遡れば、NASAによるHWOの認定に至る前になされたLUVOIR^{*1}、HabEx^{*2}、OST^{*3}の検討がHWOの背景となっています。HWOは特に実現まで時間がかかるミッションですが、未永く応援していただけましたら幸いです。(HWOタスクフォース/塩谷 圭吾)



HWO外観の予想図(©NASA Goddard Space Flight Center)

*1 Large Ultraviolet/Optical/Infrared Surveyor、*2 Habitable Exoplanet Observatory、*3 Origins Space Telescope

公募型小型ミッション候補ぞろい踏み

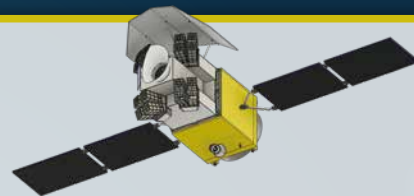
第1回

現在、公募型小型ミッション候補として、ダウンセクションを目指して検討を進める3つのチームに、それぞれのミッションをアピールしていただく機会を企画しました。3回シリーズの第1回は、ミッションの科学目標についてです。

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・ 極限時空探査計画 (HiZ-GUNDAM)

HiZ-GUNDAMは、宇宙に突如発生する突発天体現象を扱う「時間領域天文学」を強力に推進する衛星計画です。

主要課題の1つ目は、宇宙年齢が7.7億年よりも若い(赤方偏移が $z>7$)の初期宇宙における星形成率の測定や初代星の探査、宇宙再電離や重元素合成の歴史の解明を行うことです。そのために、宇宙で最も明るい光源であるガンマ線バースト (GRB) を利用します。宇宙を監視し、検出したGRBの赤方偏移を決定することで宇宙初期に発生したものを抽出し、その情報を世界に直ちに配信します。地上大型望遠鏡の協力を得て、宇宙再電離と重元素合成を明らかにすることで、初期宇宙の宇宙進化シナリオについて初めて観測的な検証を行います。



HiZ-GUNDAM衛星の外観図：広視野X線モニター「EAGLE」(16本の柱状の構造体)が、宇宙に突如発生したGRB候補天体を検出すると、衛星全体の姿勢変更を行い、口径30cmの可視光・近赤外線望遠鏡「MONSTER」(フード付きの構造体)にて5バンド測光を実施します。初期宇宙に発生した可能性を軌道上で判定し、直ちに地上へ通報します。

2つ目は、重力波やニュートリノと同期して発生する突発天体の観測により「マルチメッセンジャー天文学」を強力に推進し、ブラックホールの極限時空環境における物理現象を探索することです。

これらの観測を通じて、天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」を深く理解する計画です。

(土居 明広)

超精密フォーメーションフライト実証衛星SILVIA

SILVIA (Space Interferometer Laboratory Voyaging Towards Innovative Applications) は、編隊飛行技術を軌道上実証する工学実証衛星計画です。

本計画では3機の衛星を地球周回軌道へ投入し、100m程度で隔てられた衛星間距離をマイクロメートル以下という前人未到の精度で編隊制御することを目指します。これにより、将来構想されている様々な衛星干渉計構想の実現に向けた技術ギャップを埋めます。

SILVIAでは通常の衛星バス機器に加え、衛星間距離をモニタするレーザー干渉計や、

低推力・低雑音の精密推進系といった機器を開発・搭載します。これら複数機器をリアルタイムに協調動作させることが求められるため、SILVIAの真骨頂は理工連携にあると言えます。

以上の軌道上実証を達成することで、原始背景重力波輻射の直接観測を目指す重力波観測レーザー干渉計構想DECIGOや、近傍地球型惑星からの熱輻射の直接撮像を目指す赤外線ナノ干渉計構想LIFEといった構想群に対して、SILVIAは技術的見通しを提供します。

(和泉 究)



SILVIAのイメージ図。3機の衛星が高精度の編隊を維持しながら地球を周回する。衛星間のレーザー干渉計の光は緑の直線で表現している。 Credit: SILVIA / 佐藤 修一(法政大)

高精度紫外線宇宙望遠鏡 (LAPYUTA) 計画

LAPYUTAは、「宇宙の生命生存可能環境の探求」と「宇宙の構造と物質の起源の理解」に関する未解決問題の中から、2030年代に取り組む科学課題として、(1) 太陽系内天体の生命生存可能環境、(2) 系外惑星の大気、(3) 銀河の形成過程、(4) 重元素の起源、の4つを抽出し、紫外線宇宙望遠鏡によって実現を目指す計画です。鍵となるのは、水素、酸素、炭素といった元素の物理状態の観測です。これらの元素は宇宙にありふれた元素であるが故に、惑星や衛星の大気から、恒星、銀河を構成するガスまで、様々な空間スケールの構造とその進化に対して重要な役割を持ちます。

LAPYUTA計画では、性能要求を科学目標に最適化し、“電子式手ぶれ補正機能”と最新の高感度化技術を適用することで、真空

紫外の波長域でハッブル宇宙望遠鏡 (HST) に匹敵する解像度と感度を実現します。また、太陽系天体の追尾を可能とすることによって、観測から得られる物理量に時間軸をつけ、木星系の氷衛星の物質輸送や、金星・火星の大気散逸の問題に取り組めます。LAPYUTAで宇宙実証を目指す紫外用高効率検出器やミラー成膜の技術は、Habitable Worlds Observatory (HWO) への展開も期待されています。4つの科学目標に加えて、年間1~2ヶ月分の観測時間を一般観測枠に設定することを計画しており、HSTとHWOの間を繋ぐ2030年代の紫外線プラットフォームを担えるよう検討と開発を進めています。

(東北大学/土屋 史紀)

LAPYUTA計画に向けて (天文月報 2025 年 6 月号)
https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/118-6_347.pdf



MMXはフォボスを目指す!



MMXの目指すサイエンス

太陽系の地球型惑星の月は全部で3つしかありませんが、火星の2つの月は未踏天体として残されてきました。MMXは、Phobosを詳しく観測し、その地表から試料を採取します。MMXの多彩な観測装置は、外側を公転するDeimosや、火星大気の形成進化過程の解明にむけた火星大気と周火星空間の観測にも用います。これらの科学的背景とねらいを全て述べたいところですが、紙面に限りがあるため、この記事では、最大のターゲットであるPhobosの起源にまつわる科学について解説します。

Phobosは、Deimosとならんで、地球の月の1/100未満の大きさしかなく、重力が弱いため、多くの小惑星と同様にいびつな形をしています(図1)。惑星級のサイズを持つ地球の月と違い、内部に熱がこもらないため、地下深くには氷ですら冷温保存されているかもしれません。潮汐軌道進化を理論的に追うと、Phobosは、火星の形成直後からDeimosとともに火星を周回し続けていた、つまり、火星の月は歴史が古いと推定されます。

生命生存環境をもたらした小天体の化石?

火星の月はどちらも黒っぽい色をしており、可視-近赤外の反射スペクトルは、炭素質隕石や、木星軌道周辺に主に分布する水や有機物に富むとされる分類群の小惑星とよく似ています。ここから、火星の月は、太古の火星に水や大気成分をもたらした小天体の仲間の一部が、火星を周回するようになったとする捕獲説が提唱されてきました。飛来した小天体が月になるには、何らかの仕掛けが必要です。誕生直後の火星は、原始太陽系円盤ガスに包まれていたと考えられ、そのガス摩擦でブレーキがかかれ、飛来天体が火星を周回するようになる可能性があります。もしPhobosの物質が、MMXの近接観測や試料分析で炭素質小惑星と同様だと分かれば、捕獲説が正しいと判明します。そして、試料の詳細分析により、初期太陽系での巨大惑星領域から地球型惑星領域への水・有機物輸送過程を解明することができます。

「はやぶさ2」が持ち帰った試料は、水分や有機物を帯びる小惑星リュウグウが、巨大惑星領域でまず氷微惑星として生まれ、融水による化学的変質、衝突破壊や再集積を経つつ、長い時間をかけて地球のそばにやって来たことを語ってくれました。これは外来の小天体が地球に水や大気成分をもたらした過程の一端を示すものです。しかし、こうした水や有機物の輸送が、初期太陽系でも起きたのか、まだ定かではありません。ここに迫れるのが、太古から存在するであろう、火星の月を探索する大きな科学的利点です。

原始火星と衝突天体の欠片?

さて、火星の月の起源については、地球の月と同様に、太古の火星に起きた大型の天体衝突で飛び散った破片が月となったとする、巨大衝突説も提案されています。この説は、火星の月がいずれも、火星のほぼ赤道上を、火星の自転と同じ方向に、ほぼ円軌道で公転している(図2)ことをうまく説明します。火星にある直径2,000km超のヘラス盆地や、形成時の直径が約8,000kmと推定されるボレアリス盆地は、そうした巨大衝突の痕跡かもしれません。Phobosの物質の組成が火星の地殻・マントル物質に近く、大部分が衝撃加熱による融解や部分的な蒸発を経たものと分かれば、巨大衝突説が正しいと判定できます。試料の同位体組成を分析し、火星由来成分と衝突天体由来の成分をより分け、太古の火星に、いつ、どんな天体が衝突したのか、そして揮発性物質の供給についても迫ることができます。原始火星由来成分の分析からは、巨大衝突が起こる直前の火星に水や大気があったかという問いにも答えることができるかもしれません。

捕獲と巨大衝突という火星の月の起源の2大仮説に、現時点では優劣はありません。MMXはPhobosの近接観測と試料分析により、この論争に決着をつけます。そして初期太陽系における地球型惑星への揮発性物質の輸送、ひいては生命生存可能惑星の形成過程に迫ります。ひょっとすると、これまでの説はどれも間違いで、全く別の出生の秘密がわかる可能性もあります。MMXが地球型惑星の形成過程の理解をがらりと変えてしまう、そんな成果が得られることも、筆者は期待しています。

MMXプロジェクト統括科学者／倉本 圭(くらもと きよし)



図1: 火星に浮かぶPhobos。黒っぽい色といびつな形を持つ小さな月であることが分かる。ESAの火星探査機Mars Expressによって撮像された。
Image Processing: AndreaLuck CC BY; Raw data: ESA / DLR / FU Berlin

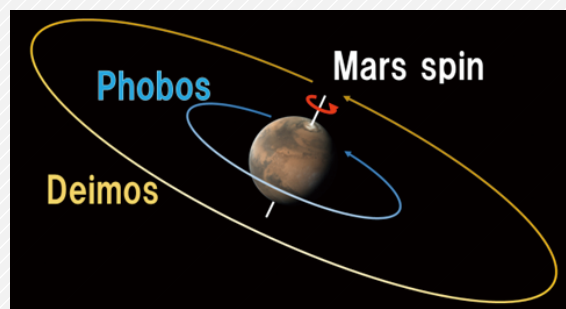


図2: PhobosとDeimosの軌道。いずれも火星のほぼ赤道上を、おおよそ円軌道を描いて、火星の自転と同じ方向に公転している。



宇宙科学探査交流棟 解説員

清水 幸夫 (しみず ゆきお)

SFU打上げ30周年 -SEPAC計画と国立科学 博物館への実物展示-

30年前の1995年3月18日に1つの人工衛星が打ち上げられた。人工衛星の名前を「宇宙実験・観測フリーフライヤー(SFU)」(以下SFU)と言う。打上げロケットは当時の宇宙開発事業団が開発したH-IIロケット試験3号機で、気象衛星ひまわり5号とのダブルロッチであった。SFUは当時の文部省・宇宙科学研究所、科学技術庁・宇宙開発事業団、通商産業省・新エネルギー産業技術総合開発機構・無人宇宙実験システム研究開発機構の3省庁・4実施機関の共同プロジェクトとして昭和62年度(1987年度)に発足し、平成8年度(1996年度)に終了した。

SFUの設計思想は、①宇宙開発事業団のH-IIロケットで打ち上げられること、②米国スペースシャトルにより回収できること、③再利用ができること、であった。実際には2回目の打上げ機会が与えられなかったものの、回収して再利用すればバスシステム整備と新ペイロード機器の搭載を行うだけで次の飛行に臨むことができ、研究者の実験機会が増やせることが確認できた。また5回の繰り返し打上げ・回収に対応できるようにコアシステムが設計された。日本のロケットと米国のシャトルによる宇宙空間を経由した輸出とケネディ宇宙センターに帰還後に米国東海岸から船舶による再輸入のための手続きや日米間の損害賠償請求放棄の問題など初めての事柄も多く、中央官庁への相談も必要となった。

SEPACからSFUへ

SFUは東京大学附属宇宙航空研究所(文部省宇宙科学研究所に1981年改組)の大林 辰蔵先生がNASAの国際公募スペース・ラボ1実験に採択されたSEPAC(Space Experiment with Particle Accelerators)計画に遡る。SEPACについての詳細はまた別の機会にするが、簡単にSFUとの関係について述べたい。SEPACはスペースシャトルに搭載した電子銃から高速電子を地球大気にぶつけて人工オーロラを出現させ、地球周りのプラズマ物理を観測する計画であった。電子銃の他にシャトルの帯電を防ぐプラズマ雲を作る装置としてMPDアークジェットやプラズマ観測装置、人工オーロラを観測するカメラや高圧電源などがスペースシャトルコロンビア号の貨物室に搭載され1983年11月28日に打ち上げられた。このSEPAC装置をグレードアップして日本独自の小型宇宙プラットフォームに搭載し、スペースシャトルで打上げ・回収する構想が宇宙研で議論されていた頃、科学技術庁や他省庁でも同じような計画が立案され、宇宙開



国立科学博物館に展示されているSFUのフライトモデル

発委員会が1つにまとめてSFU計画が始動した。SEPACで使われたフライトモデルのいくつかが相模原キャンパスの交流棟に展示されている。

SFUから生まれたもの

SFUは衛星を形作る基本機器(コアシステム)と実験機器(ペイロード)から構成されている。主な基本機器は、電源系、太陽電池パドル、通信系、データ処理系、航法誘導制御系、推進系、構造・熱制御系である。主構体はアルミ合金製の変形八角形のトラスで、着脱可能な台形実験箱(PLU: Payload Unit)と基本機器収納箱(BSU: Bus Unit)が合計8個取付けられるように設計された。太陽センサと地球センサおよびGPS、そして、RCSとリアクションホイールおよび磁気トルカによって三軸姿勢制御が確保された。SFUの電力は2翼のフレキシブル太陽電池パドルにより供給された。展開収納性に優れたフレキシブルアレイは、世界初の実用化であった。シャトルによるSFU回収時にSAPの逆折れによる収納異常が発生した。結果的にSAPを切り離す判断を行い、STS-72エンデバー号機に搭乗した若田 光一宇宙飛行士がシャトルに回収した。実験機器は次の12種類の装置が搭載された。それらは宇宙赤外線望遠鏡(IRT)、二次元展開/高電圧ソーラーアレイ実験(2D/HV)、プラズマ計測(SPDP)、SFU搭載実験機器部(EFFU)、気体力学実験(GDEF)、電気推進実験(EPEX)、凝固・結晶成長実験(MEX)、宇宙生物学実験(BIO)、複合加熱炉(GHF)、焦点加熱炉(MHF)、単熱炉(IHF)であった。これらの実験機器は後の2006年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」やJEM曝露部の礎になり、SFUのシャトル会合軌道設計T-Burn技術は、後のISSへのシャトルや補給船のドッキング軌道設計に繋がった。

国立科学博物館への実物展示

シャトルで回収されたSFUは2度目の打上げはできなかったが、国立科学博物館のリニューアル事業と時期的にうまく合致していた事もあり、宇宙空間に打ち上げられた実物として常設展示されている。バスシステムは再打上げのための健全性を確認するため一旦部品レベルにまで分解されたものを当時の東京大学の学生・院生の皆さんのお陰で再組み立てを行うことができた。作業は2003年12月に始まり、博物館新館のグランドオープン2005年11月まで、足掛け3年間に亘って合計36日間を費やし、学生諸君を中心に39人がこの組立に参加した。延べ人数は230人になる。当時学部学生・大学院生であった皆さんは、現在宇宙研の教授となった船瀬 龍さんをはじめ様々な分野で活躍されている。上は国立科学博物館に組み立てを終えたSFUの写真である。

》新しいサイエンスを可能にする 新しい観測装置をつくる

組み立て・試験検証は準備が重要

——SOLAR-C(高感度太陽紫外線分光観測衛星)プロジェクトチームでは、どのようなことを担当されているのでしょうか？

SOLAR-Cは、日本が主導し、米国と欧州諸国が参加する国際プロジェクトです。私は、望遠鏡の組み立て・試験検証についてJAXA側の取りまとめを担当しています。今後は基本設計審査、詳細設計、製作へと進み、2028年度の打上げを目指しています。

——忙しくなるのは、衛星の製作が始まってからでしょうか？

いいえ、すでに忙しくなっています。フライトモデルの試験で問題が見つかったら、打上げスケジュールに影響が出る恐れがあります。フライトモデルを組み立てた後では試験が難しいもあります。そのため、打上げまでのロードマップを見据えて、どの段階で何の試験を行うべきかを綿密に計画しておく必要があります。その計画をプロジェクトメンバー全員で共有することも欠かせません。組み立て・試験検証は、本番の作業だけでなく、そのための準備が非常に重要なのです。

自分で開発した観測装置で新しいサイエンスに挑む

——宇宙科学分野に進もうと思ったきっかけを教えてください。

小学生のころ、すばる望遠鏡のファーストライトの画像をニュースで見て「いいな」と感じたのが、最初のきっかけです。それ以来、宇宙に興味を持ち続けてきました。高校生のときに系外惑星が発見されたというニュースに触れたことも、大きなきっかけです。「天文学は、今も未知のものが見つかる学問領域なんだ」と、ますます魅力を感じるようになりました。

——では、大学では迷わず天文学を選んだのでしょうか？

大学に入った当初は、まだ決めきれていませんでした。幅広いいろいろなことに興味があり、「あれもこれもやってみたい!」と思ってしまうのです。宇宙物理学や素粒子物理学にも興味があり、進む学科を決める2年生の夏の直前まで迷っていました。

——天文学を選んだ決め手は何だったのですか？

「新しいものを見つけたい」という思いが常にありました。それを実現できる場を探す中で、自分たちで装置をつくり、観測研究を行っている研究室が天文学科にあることを知ったのです。その研究スタイルが、自分に合っていると感じました。

大学院に進んだころ、チリのアタカマ砂漠に口径6.5mの赤外線望遠鏡を建設する東京大学アタカマ天文台(TAO)計画が始まりました。まず口径1mの望遠鏡を建設することになり、この望遠鏡に

SOLAR-Cプロジェクトチーム研究開発員

内山 瑞穂(うちやま みずほ)

千葉県生まれ。2010年、東京大学理学部天文学科卒業。2015年、同大学院理学系研究科博士課程天文学専攻修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員、国立天文台プロジェクト研究員を経て、2020年よりJAXA宇宙航空プロジェクト研究員。2021年9月JAXA研究開発員(PO室)。2022年11月よりSOLAR-Cプリプロジェクト研究開発員を経て2024年3月より現職。



搭載する観測装置の現地観測立ち上げに携わり、実際にアタカマ砂漠に行き観測も行いました。自分の関わった観測装置で新しいサイエンスに挑む。まさに、やりたかったことが実現できました。

大型国際プロジェクトを経験したい

——その後、国立天文台でプロジェクト研究員をされています。

口径30mの超大型望遠鏡TMT(Thirty Meter Telescope)プロジェクトで、観測装置の開発に取り組みました。最先端のサイエンスに挑戦しようとする、プロジェクトは大規模に、そして国際的になります。「新しいものを見つけたい」という思いは変わらず持ち続けていたので、大型の国際プロジェクトに関わってみたくったのです。

大学のプロジェクトとTMTのような大型国際プロジェクトでは、進め方も大きく異なります。また、私は装置開発と観測研究の両方をやってきましたが、TMTでは装置開発が中心になります。そうした変化に付いていけるのか不安もありましたが、「やってみなければ分からない」と思い切って飛び込みました。

——TMTプロジェクトに入って、いかがでしたか？

大変なことも多くありましたが、それ以上にやりがいを感じました。だからこそ、任期付きのポジションではプロジェクトの途中から入って途中で離れなければならないことを、残念に感じるようになっていきました。その後、SOLAR-Cの研究開発員を募集していることを知って応募したのです。

新しいものを見つけたい。それが最大のモチベーション

——仕事をする上で、内山さんの強みは何だと思いますか？

装置開発と観測研究、両方のバックグラウンドがあるので、サイエンス側の人と話していることや考えていることをくみ取り、それをほかの関係者に分かりやすく伝えることができることでしょうか。また、プロジェクトを進めていると、初めてのことや分からないことに、たくさん出会います。そのときには、周囲の人に積極的に話を聞いて学び、どんどん吸収していきたいと考えています。私は、大先輩に対しても気後れせずに話を聞きに行ってしまうタイプなので、それも1つの長所かもしれません。

——今後、どのようなことに取り組みたいとお考えですか？

新しいものを見つけたい。そのために新しい観測装置をつくる。これは、私の中では最も重要なことで、一番のモチベーションになっています。これからも宇宙科学プロジェクトに関わり、新しいサイエンスを可能にする新しい観測装置をつくっていききたいですね。

編集後記

西田元所長が逝去されました。たくさんの成果を上げられた先生がなくなったということで残念です。ISASニュースでは追悼号を計画しています。さて、話は変わりますが、いつのまにか夏目前という日和になりました。ISAS事情に寄稿いただいた再使用ロケット実験機RV-X試験など、屋外実験をするにあたっては暑さがつらくなり始める時期です。様々な場所で活躍される皆様、暑さに負けずに頑張りましょう! (坂本 勇樹)



ISASニュース No.531 2025年6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/>