

News

2025

12

No.537

金星探査機「あかつき」の 停波運用を実施

2025年9月18日に、金星探査機「あかつき」(PLANET-C)の停波運用を実施しました。最後の運用を見守ったときの集合写真です。全てのメンバーが集まることは叶いませんでしたが、数多くの方々に見守られたミッションでした。可能な限りの笑顔で写りました。やり切った感の顔になっているでしょうか？ (p.4 参照)



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

XRISMの科学成果

宇宙科学研究所 X線分光撮像衛星 (XRISM) プロジェクトチーム 宇宙航空プロジェクト研究員

福島 光太郎(ふくしま こうたろう)・金丸 善朗(かねまる よしあき)・小川 翔司(おがわ しょうじ)

はじめに

X線分光撮像衛星 (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission; XRISM) は日本主導で開発した7番目のX線天文衛星で、X線帯域の宇宙望遠鏡として2023年9月7日に種子島宇宙センターから打ち上げられ、運用を開始した[1]。宇宙科学研究所XRISMプロジェクトチームでプロジェクト研究員を務める筆者らが、この記事を通じてXRISMがもたらした科学成果の一部をお伝えしたい。さて、XRISMの科学成果の紹介にあたり、これだけは述べておかなばならない。『「ひとみ」とその成果を生み出したみなさんの足跡は永遠に残される』。ISASニュース2019年9月号[2]に掲載された『「ひとみ」の科学成果』で、当時のプロジェクトサイエンティストであった大橋 隆哉氏が述べた言葉である。ポジティブな文脈だけから紡がれたものではないが、この言葉こそXRISMへの付託に他ならない。我々プロジェクトチームが日々運用しているXRISMは、自身に課せられた目標だけでなく、「ひとみ」に注がれた情熱と寄せられた期待をも背負って観測を続けているからだ。

X線は可視光に比べ100-1万倍も短い波長の光で、高温・高エネルギー(100万-1億K)の天体から放射される。実は、宇

宙に遍く存在するバリオン^{*1}の大部分が、太陽表層の100倍以上も高温となったプラズマとして存在し、X線を放射している。XRISMが相手とするのはこの高温プラズマである。

XRISMは軟X線分光装置「Resolve」と軟X線撮像装置「Xtend」という2台の装置でX線を観測する。XRISMがX線観測にもたらした革新のひとつが、「高温プラズマの運動」の高精度測定だ。とくにResolveは、6 keVでのエネルギー分解能が4.5 eV、エネルギー決定精度は0.4 eVと史上最高の軌道上性能を誇る^{*2}。図1は、ヘリウム状イオンや水素状イオンまで高階電離した鉄^{*3}からの特性X線輝線が、遷移前後の量子数の違いによる微細構造まで分光されている様子を示す。このようなデータにより、輝線幅から高温プラズマの速度分散、輝線のエネルギーシフトからガスの全体的な運動を高い精度で決定できる。

また、従来のCCDでは検出が困難だった微量な元素からの弱い輝線を見つけ出す能力が飛躍的に向上したことも特筆したい。私たちの世界を彩る元素の大部分は恒星内核融合や超新星による爆発的要素合成で生成されている。バリオンであるこれらの元素の多くはX線を放射するプラズマとして存在するので、XRISMの観測データから微量な元素の存在量を詳細に測定できる。いわば「宇宙のレシピ」を調べることができるのだ。

*1 「暗黒物質ではない普通の物質」くらいの意味である。 *2 検出器部分はX線マイクロカロリメータで、回折格子などを用いない非分散型の分光装置であるため、広がった天体からの放射にも高い分光性能を発揮する。分散された光子の位置情報を利用する回折格子分光では、放射源自体の空間的な広がりが精密分光を難しくする。
*3 未電離の鉄原子は26個の電子を持つが、ヘリウム状イオンでは2個、水素状イオンでは1個しか残っていない。

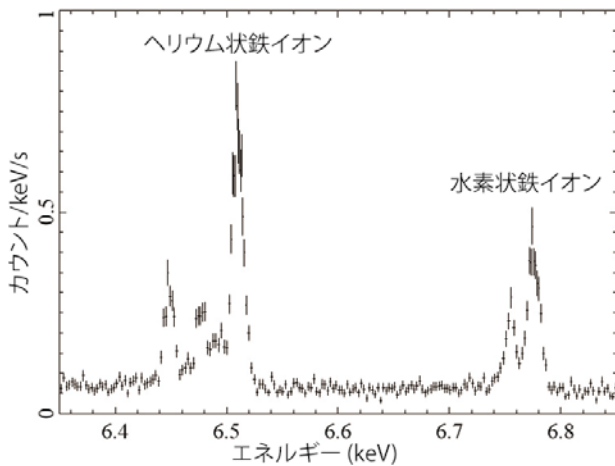


図1：XRISMにより観測されたへびつかい座銀河団中心領域のエネルギースペクトル[3、一部改変]。

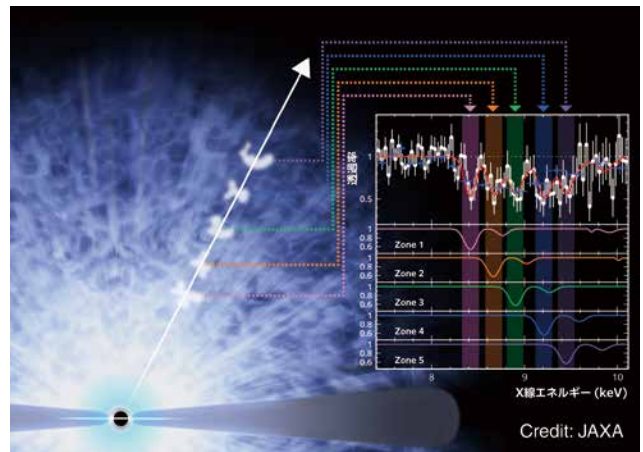


図2：PDS 456というAGNから噴き出すアウトフローの想像図とResolveによるエネルギースペクトルに現れたその痕跡。ガス塊の持つ速度の違いに応じて、スペクトルの異なる位置に「凹み」が現れている。

「宇宙の怪物」の心臓部に迫る— XRISMが解き明かす活動銀河中心核の謎

私たちが住む天の川銀河をはじめ、宇宙に存在する数多の銀河の中心には、太陽の数百万倍から数十億倍もの質量を持つ超巨大ブラックホールが潜んでいる。この超巨大ブラックホールが周囲のガスを吸い込む際に、銀河全体の輝きを凌駕するほどの莫大なエネルギーを放ち、「活動銀河中心核 (AGN)」として観測される。なぜ天文学者は、この「宇宙の怪物」に注目するのだろうか？それは、AGNの活動が銀河全体の進化に大きな影響を及ぼすからだ。AGNから吹き出す高速のガスの流れ (アウトフロー) が、銀河内の星形成活動を抑制、または促進し、銀河の姿かたちを決める重要な役割を担うと考えられている。しかし、AGNは濃いガスや塵に覆われており、その中心部で何が起きているのか詳しく観測することは困難である。

この厚いベールの向こうに潜む「宇宙の怪物」の心臓部を観測する上で絶大な力を発揮するのがX線だ。X線は可視光よりもエネルギーが高く、ガスや塵を透過して内部の様子を直接に捉えることができる。しかし、これまでのX線観測では、そこに「何か」があることは分かっても、それが「どのように動いているか」を精密に調べることはできなかった。この長年の課題に答えを出したのがXRISMである。その世界最高のエネルギー分解能により、AGNの周辺に広がる様々な物質と、そのダイナミックな速度構造を、鮮明に描き出すことが可能となった。

XRISMがもたらしたAGN研究における衝撃的な成果のひとつが、まさにアウトフローの詳細な姿である[4, 5]。これまでの観測でも、アウトフローする高階電離した鉄により特定のエネルギーのX線が吸収されてできるスペクトルの「凹み」から、アウトフローの存在自体は知られていた。しかし、ガスの正確な速度や物理状態を知ることはできなかった。XRISMの観測は図2のように、このスペクトルに残された足跡を驚くほどシャープに描き出し、その正体を突き止めた。それは、単一のガスの流れではなく、異なる速度を持つ複数のガス塊による極めてダイナミックな構造だったのである。数万km/sという猛スピードで宇宙空間を駆け抜けるガスの流れを、私たちは目の当たりにすることができるようになった。

XRISMのX線精密分光はAGNの理解に革命をもたらした。アウトフローの正確な速度と質量を推定し、ブラックホールのごく近傍から銀河にどれほどのエネルギーが供給され、星形成にどのような影響を与えるのか定量的に評価する道が拓かれた。これは、超巨大ブラックホールと銀河が互いに影響を及ぼし合いながら成長する「共進化」の謎を解き明かす決定的な一歩となる。銀河の中心からその外に至るまで、XRISMの観測により宇宙の壮大な進化のシナリオが、今まさに書き換えられようとしている。

静謐の語りと熱狂する観測者— XRISMが暴く意外と穏やかな銀河団ガス

銀河団は、多数の銀河とその間を満たす高温プラズマ (銀河団ガス) からなる宇宙最大の天体だ。銀河団ガスは暗黒物質の強大な重力ポテンシャルの底で加熱され電離平衡に達する。そのX線スペクトルは温度に依存して形を変えるため、XRISMのデータからガス温度が分かる。この温度はイオンの熱運動による圧力を生み、銀河団ガスが静水圧平衡になっていれば重力ポテンシャルの大きさまで正確に分かってしまう。だが、重力に抗するガスの圧力には非熱的な成分も存在する。そのうちガス乱流による寄与の推定は、XRISMが得意とする仕事のひとつである。すなわち輝線幅による速度分散の測定だ。

「ひとみ」により観測されたペルセウス座銀河団の乱流速度は200 km/sであり、1,000 km/s程度との予測よりも小さく、全圧力に占める乱流の寄与はわずか4%だった[6]。この結果はペルセウス座銀河団固有のものか、あるいは一般的な傾向なのか？その答えが図3にある。ガス温度が上がっても乱流の割合はほとんど増えていない。さらに驚くべきことに、XRISMが観測した銀河団サンプルの全てにおいて、ガス圧力への乱流の寄与は5%程度しかない。中心の巨大銀河の影響やガスの粘性によるエネルギー散逸などを考慮すると、乱流の寄与は典型的に10-20%以下と予想されるが、今回の観測値はその下限値に近い[7]。ほとんどの場合で上限値しか求めることができなかった先行研究に対して、XRISMは20 km/s以下の誤差で速度分散を決定し、乱流が銀河団ガスの非熱的圧力に大きく寄与していないという「ひとみ」の描像をより強固なものとした。

図3に挙げたサンプルは銀河団の中でも近傍かつX線で明るいという特徴で選出された一部の銀河団に過ぎない。しかし、

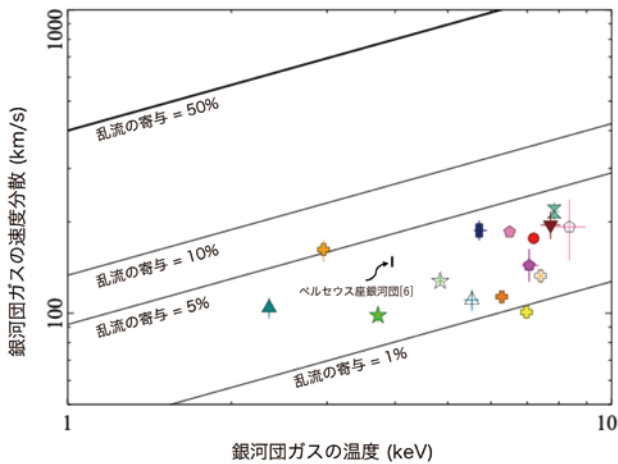


図3：鉄輝線の幅で測定した銀河団ガスの速度分散と温度の関係。同一の銀河団は同じマークでプロットし、複数箇所からデータを取得した場合には、塗りつぶしの色を変えてプロットした。

近い過去に衝突合体を経験したものや、中心銀河のAGNから強い影響を受けるものなどを含む多様なサンプルである。これらの全てで乱流が小さいという事実は、非熱的圧力を生ずる他のエネルギー源の存在を窺わせる。いま私たちは、銀河団ガスがどのようにエネルギーが供給されて高温を保ち、重力を支えているのかという根本的な問いに答える一歩を踏み出したのだ^{*4}。

爆発で生まれた「風」を読む— XRISMで迫る超新星爆発と元素の広がり

超新星爆発は、星がその進化の最期を大爆発で締めくくる現象である。放出される膨大なエネルギーと衝撃波が高温プラズマの「風」である超新星残骸を形成し、数万年にわたり爆発の痕跡を残す。その起源は、大質量星が重力崩壊して中性子星やブラックホールを残しつつ外層を吹き飛ばす重力崩壊型と、白色矮星の熱核反応で炭素・酸素からマンガンやニッケルなどの鉄族に至る重元素を合成して宇宙へ放出するIa型の2種類に大別される。どのような星がいかなる機構で爆発に至り、どのように元素を運び銀河の化学進化を進めるのか？これは現在も未解決の重要課題であり、超新星残骸の研究はこの課題解決の一端^{*5}を担ってきた。

超新星爆発が起こると、外向きの順行衝撃波が星の周りの物質を、内向きの逆行衝撃波が爆発した星からの噴出物（イジェクタ）を加熱し、温度・電離度・速度・元素組成の異なる重層的で複雑なプラズマが生じる。残骸の形状は多種多様でひとつとして同じものはなく、これらを観測することで、超新星爆発とそれを起こした星の謎に迫ることができる。私たちは高いエネルギー分解能とエネルギー決定精度を誇るResolveを利用して、豊富な輝線から視線方向のドップラー速度と元素分布を同時に測定し、「風」の向きと組成を地図化しているのだ。

図4は、XRISMのファーストライトとなったN132Dの観測スペクトルとX線画像である。超新星残骸では運動学的速度分散に加えて、高温イオンの激しい熱運動によるドップラー幅が輝線幅に有意に寄与し、それをResolveで測定できる。N132Dの場合、超新星爆発という極限環境で合成された鉄のイオンが、約100億度もの超高温に達していることが明らかになった[8]。また、X線画像はResolveと対になる軟X線撮像装置Xtend^{*6}によって捉えられた。ResolveとXtendのデータを組み

*4あるいは一歩下がったのかも知れない。 *5元素合成の起点という意味でもまさしく「端」というわけだ。もう片方の「端」が銀河・銀河団である。
*6 Xtendの焦点面にあるX線CCD検出器は、広視野を一度に空間分解する能力に優れ、狭視野で高分光性能を発揮するResolveとは互いに相補的な役割を担っている。

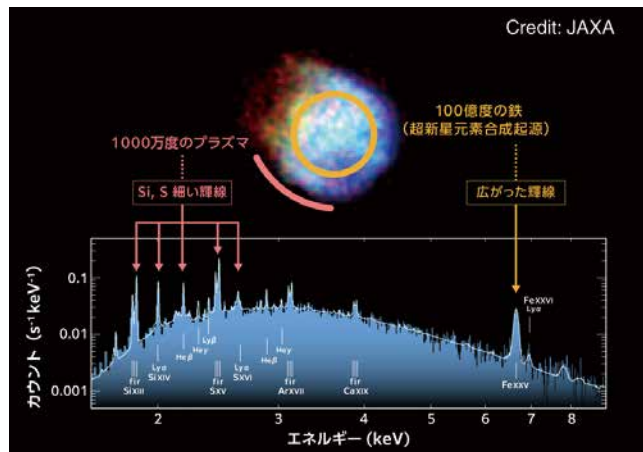


図4：XRISMが捉えた超新星残骸N132DのエネルギースペクトルとX線画像。エネルギースペクトルは軟X線分光装置 Resolve で、X線画像は軟X線撮像装置 Xtend で観測された。

合わせることで、電離状態の異なる鉄イオンが残骸の中で非均一に分布する様子が浮かび上がった。超新星爆発から約40年後の観測となったSN1987Aでは、加熱された高温プラズマの元素組成比が母銀河である大マゼラン雲の典型的な値と整合しており、2024年時点で逆行衝撃波がまだ内側の金属豊富なイジェクタに到達していないことが示されている[9]。

また、Resolveは、地上の実験室では再現の難しい状態のプラズマを観測し、高品質のスペクトルを提供することで、理論モデルの検証と改良にも貢献しており、測定した元素量の信頼性を高めている。一般に超新星残骸のプラズマは電離が非平衡で複数の温度状態が混在することから、スペクトルの解釈は単純ではないが、その読み解きこそが研究の醍醐味のひとつであり、より大スケールの銀河や銀河団の化学進化理解にもつながっていく。残念ながら現在、ゲートバルブが未開放であるため、2 keV以下にも存在する輝線が豊富な帯域へのアクセスが制限されている。それでもXRISMは、ケイ素や鉄、ニッケルなどの輝線から、運動学と元素地図の双方が織りなす爆発の「風」の新しい姿を私たちに見せはじめている。

終わりに

このような記事を寄稿する光栄に与りながら、筆者らの趣味と興味に基づくサイエンスの紹介を「XRISMの科学成果」と題して世に送り出すことをご容赦いただきたい。ここには書ききれない科学成果の数々が、世界中のXRISMユーザ各位により日夜積み重ねられている。この9月には日本天文学会欧文報告PASJから、「Special Issue: Initial Results from XRISM」と題して特集号[10]が発刊された。ぜひご一読の上、「ひとみ」の喪失から再び立ち上がった我々と、XRISMの今後に期待を寄せていただければ幸いです。

文献

- [1] Tashiro, Kelley, Watanabe et al. 2025, PASJ, 77, S1
- [2] 大橋 2019, ISASNews 宇宙科学最前線, No. 462, 1
https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews462.pdf
- [3] Fujita, Fukushima, Sato, Fukazawa, & Kondo 2025, PASJ, 77, S270
- [4] XRISM Collaboration et al. 2025, Nature, 641, 1132
- [5] Noda, Yamada, Ogawa et al. 2025, ApJL, 993, L53
- [6] Hitomi Collaboration et al. 2018, PASJ, 70, 9
- [7] XRISM Collaboration et al. 2025, ApJL, 993, L11
- [8] XRISM Collaboration et al. 2024, PASJ, 76, 1186
- [9] XRISM Collaboration et al. 2025, PASJ, 77, S193
- [10] https://academic.oup.com/pasj/issue/77/Supplement_1

金星探査機「あかつき」運用終了

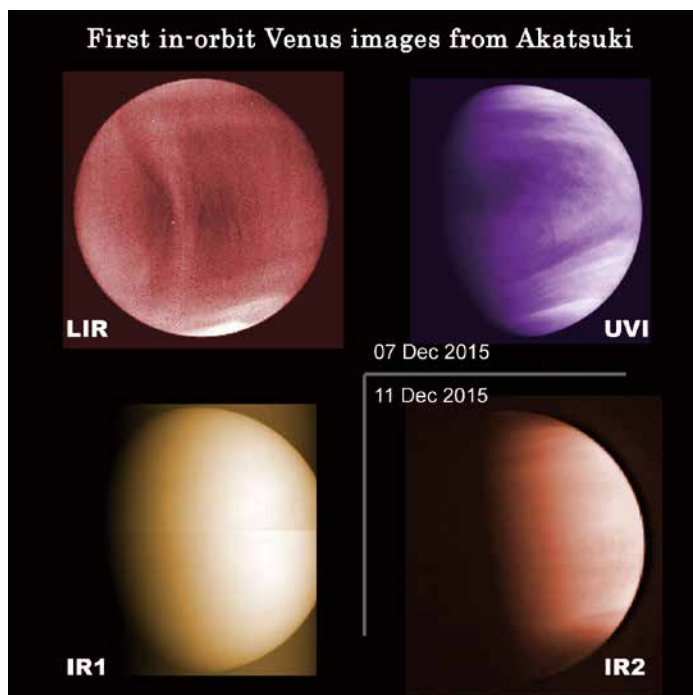
金星探査機「あかつき」(PLANET-C)は、2010年5月21日、種子島宇宙センターからH-IIAロケット17号機で打ち上げられました。12月7日に金星周回軌道投入に挑戦したものの失敗。太陽の周りを9周するクルージング期を経て、2015年12月7日に再び金星周回軌道への投入に挑戦。見事成功し、日本で初めて地球以外の惑星を周回する探査機が誕生しました。その後8年以上、金星の気象衛星として厚い雲の様子を観測してきました。しかし、2024年4月末、「あかつき」との通信が確立できなくなり、1金星年の探索運用期間を設け復旧を試みましたが果たせませんでした。設計寿命の4年半を大幅に超えていることからミッションの終了を判断し、2025年9月18日に停波運用を実施しました。

振り返ると、紆余曲折を経た探査機であり、挑戦の連続でした。最初は、打上げロケットの変更でした。当初想定していたM-VロケットからH-IIAロケットに変更されました。H-IIAにとっては、それまでに経験したことのない最軽量の探査機がペイロードとなり、「あかつき」にとっては、構造設計がほぼ完了した段階での打上げ振動条件の過酷化という課題がありました。元々の振動条件を維持するため、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」と4機の小型衛星、ロケットインターフェースアダプタを“おもり”として搭載する工夫を行い、H-IIAロケットによる初の地球重力圏脱出を実現しました。

最大の試練は、1回目の金星周回軌道投入の失敗です。軌道制御エンジンの噴射中にスラストノズルが破損し、十分な減速ができず、探査機は金星を通り過ぎてしまいました。当初から異常時に備えて配備されていた、米国航空宇宙局(NASA)深宇宙ネットワーク(DSN)のマドリッド局で「あかつき」の微弱な電波が捉えられました。続くゴールドストーン局で軌道が確認され、白田局での確実な受信につながりました。経験が豊かなNASA DSNの支援がなければ、探査機は本当に失われていたことでしょう。

そのときの「あかつき」のテレメトリデータは、軌道制御エンジン以外は健全そのもので、ミッションは失われたわけではありませんでした。「あかつき」チームは、前代未聞の金星周回軌道再投入に挑戦する決意を固めます。燃料消費を抑えるため、金星の公転軌道より内側を通り金星に追いつく方法を取りました。そのため、太陽に近づき想定1.5倍の熱環境に5年間で9回晒されました。想定外の熱負荷に耐えられたのは、丁寧な製造工程の賜物です。軌道設計には科学チームからの要望も反映されました。金星の自転方向と同じ向きに周回することで、大気の動きが相対的にゆっくりとなり観測しやすくなります。しかし、金星は自転と公転の向きが逆のため、「あかつき」は太陽周回軌道の逆向きに金星を周回する必要がありました。金星に落下しないよう太陽重力による摂動まで考慮して、周回軌道投入タイミングを決定することになりました。

そして運命の日。本来は短時間しか使用しない姿勢制御用の小さなエンジン4台を約20分間噴射するという、設計目的外の方法での周回軌道再投入に挑戦。結果は成功、「あかつき」は、遠金点38万km、軌道傾斜角が変化する楕円軌道に投入されました。軌道計画チームの努力が結実した瞬間です。観測運用では、太陽電池への太陽光入射、高利得アンテナでの地球との通信、搭載カメラでの金星観測を、最低限の燃料消費で成立させ



図：金星探査機「あかつき」の4つのカメラによる金星の疑似カラー画像。4枚とも金星の「雲」を写し出していますが、雲の温度の分布(LIR)、雲形成に関わる化学物質の分布(UVI)、雲の深部の構造(IR1)、雲頂の高低(IR2)と、それぞれ異なるものを観測ターゲットとしています。

る必要があります。投入された軌道では、条件が刻一刻と変化し、成立解がない期間もありましたが、運用チームの技術と工夫で金星観測が実現しました。

その後は、紫外線から赤外線まで5台のカメラと電波遮蔽で金星の雲・大気を観測し、多くの成果を挙げました*。金星周回軌道からのファーストライト(図)には、後にNature Geoscience誌に掲載される巨大弓状構造が捉えられ、未知の物理現象を捉えた心躍る一枚となりました。

このような挑戦は、多くの応援に支えられて成し遂げられました。打上げ前の「お届けします!あなたのメッセージ 暁の金星へ」キャンペーンには約26万人分もの思いが寄せられ、アルミプレートは探査機の重量バランス調整用「バランスウェイト」として活躍しました。打上げ直前に開設したTwitter(現X)には7万近くフォローを頂き、多くの「いいね」が励みになりました。1回目の周回軌道投入失敗後には、一般有志から約200人分もの寄せ書きタペストリーが、「千のあかつき」キャンペーンから“数”千のあかつきペーパークラフトが届けられ、隔月開催のトークライブなど多くの方々に活動を見守っていただきました。失敗できないという心地よいプレッシャーとともに、チームの前向きな気持ちを保つことができました。おかげで、「きんせいちゃん!来たよ!」の瞬間が実現したのです。

今も「あかつき」は、金星の周りを静かに回り続けています。宵の明星・明けの明星を見つけたとき、そのそばで旅を続ける小さな探査機のことには思いを馳せていただければ幸いです。地上では観測データの解析研究が続き、新たな発見はウェブサイトやXなどで情報発信します。長年のご支援・ご協力・ご声援に、チームを代表して心より感謝申し上げます。(山崎 敦)

*主な成果は「あかつき」サイト(<https://akatsuki.isas.jaxa.jp/>)をご参照ください。

第12回宇宙物質科学シンポジウム (HAYABUSA symposium 2025) 開催報告

2025年11月11日(火)～14日(金)の4日間、「第12回宇宙物質科学シンポジウム」(通称：はやぶさシンポジウム)を、ISASのオンサイト会場とZoomミーティングによるオンラインとのハイブリッド形式で開催しました。はやぶさシンポジウムはサンプルリターンに特化した世界最大規模の国際シンポジウムで、小惑星探査機「はやぶさ」によるイトカワ試料帰還後の2013年を第1回として始まり、今年で12回目を迎えました。口頭発表67件、ポスター発表15件、オンラインと合わせて全世界からのべ600人以上が参加し大盛況でした。今年は「はやぶさ2」による小惑星リュウグウとNASAの小惑星探査機「OSIRIS-REx」による小惑星ベヌーの試料比較研究に重点がおかれ、粒子の三次元形状に基づく特徴の比較をはじめ、多数の研究発表がなされました。



シンポジウム参加者の集合写真

今年には新たな試みとして、将来に向けたJAXAキュレーションの最新の取り組みについてディスカッションする時間を設

けました。帰還試料からもたらされる科学成果を最大化するためのリュウグウ試料の新たな活用方法や、新しい試料ハンドリング技術の開発、将来のサンプルリターンを見据えた低温キュレーション設備の検討といったトピックについて、JAXAキュレーションメンバーから話題提供する形式で始まり、試料を分析する研究者たちと双方向の活発な議論が交わされました。帰還試料のキュレーション活動が次のステップに進んでいることを実感しました。

新たな試料ハンドリング技術のひとつである、微粒子ピックアップのためのマニピュレーションシステムに関しては、実物があつたほうが伝わりやすいだろうということで、装置のデモンストレーションを実施しました。この装置はベヌー試料を扱うにあたって、数100マイクロメートルサイズの粒子をピックアップするためにNASAと共同で開発されたものです。模擬試料も用意され、ハンドリング部分のカメラモニターの周辺には常に人だかりができるほど大きな注目を集めていました。キュレーション施設のあるISASで開催するシンポジウムに参加する意義を感じていただけたものとなりました。

ご参加いただいた皆様、運営に尽力していただいた皆様に感謝いたします。来年度もより活発な科学的議論が生まれるシンポジウムとなるよう工夫を凝らしていきます。(中野 有紗)

ご参加いただいた皆様、運営に尽力していただいた皆様

JASMINE European Collaboration pre-kick off Meetingを開催

11月27、28日にオランダ・ライデン大学にてJASMINE European Collaboration pre-kick off Meetingを開催しました。これは、日本が進める世界初の赤外線位置天文衛星JASMINEについて、ヨーロッパの研究者コミュニティとの連携を強化し、将来的なESAとの協力体制を見据えて議論する、初めての国際会議です。会議には、ヨーロッパの12ヶ所の研究機関・大学から19名、日本のJASMINEチームから6名が参加しました。

初日には、JASMINEチームからミッションの概要やデータ解析手法、データダウンロード量の課題などを紹介しました。その上で、ヨーロッパで進行中・計画中のミッションや研究機関・大学における活動とのシナジーとして、Gaia^{*1}のLessons learned、ARI^{*2}でのデータ解析検討、ESAやバルセロナ大学がそれぞれ運用する地上局を利用する可能性など、多岐にわたる議論が行われました。

2日目には、銀河系中心領域のサイエンスに関する最新の研究成果が紹介され、これまでの地上望遠鏡による成果やJASMINEに期待される新たな成果について活発な意見交換が行われました。特に、銀河系の中心部で星々がどのように動いているかを理解するための理論モデルの作成や、その中心部に存在する構造の全体像を解明するために、JASMINEが提供する多数の星に対する高精度な固有運動データが重要な役割を果たすことが強調されました。また、JASMINEによる高精度位置測定および時系列測光観測のデータがもたらす思いがけない新発見(セレンディピ

タスなサイエンス)への期待についても意見が交わされました。

さらに、今後のヨーロッパとの協力を具体化するための次のステップとして、データアクセス権の取り扱い、共同ワークショップの開催、ESAへの提案準備など、具体的なアクションアイテムを多数設定し、会議は締めくくられました。

私自身、学生の頃に名前を聞いていた銀河系中心研究の第一人者の方々と、懇親会でパンネックク(オランダ名物の薄焼きパンケーキ。訪れたお店のものは直径40cmもある驚きのサイズでした!)をいただきながらサイエンスの話を伺えたのは、非常に貴重な経験でした。改めて、JASMINEの科学目標に対して、世界中の研究者から大きな期待が寄せられていることを実感しました。

この会議は、JASMINEとヨーロッパとの国際的な協力体制を築くための第一歩となり、当初の想定をはるかに超えた非常に意義深いものとなりました。ここで得られたつながり議論を進展させ、JASMINEが目指す科学的成果を最大限に引き出す取り組みを進めていきます。(近藤 依央)



現地参加者の集合写真@ライデン大学

*1 ESA が主導する可視光での位置天文観測衛星。2025年1月に観測終了した。GaiaとJASMINEのサイエンスの詳細は、https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews464.pdf をご参照ください。

*2 ハイデルベルク大学天文学センター天文計算研究所。



MMXはフォボスを目指す!



フォボスを探査する ロボット

MMXの大きな見どころの1つは何かと聞かれたら、「人類未踏の天体でめちゃカッコいいロボットが最高に大活躍するところ」と私は答えます。惑星探査機は学会などでRobotic Explorerとも訳されることがあります。これは、ミッションを実現するために技術的に複雑になったり自律性が高くなったりすることが多く、それ自身がロボットであるという側面を持っていることによるものです。MMXではサンプリング装置とローバという特にロボティクスを駆使した装置が2つも搭載されています。今回はこれらの行うミッションとそれを実現する技術に関して紹介しようと思います。

サンプリング装置 (C-SMP) : フォボスから サンプルを採取するロボット

サンプリング装置は文字通りフォボスからサンプルを採取する装置です。取得したサンプルを帰還カプセル (SRC) に収納するところまでを目的としています。マニピュレータを搭載したことで既存手法より確実にかつサイエンスに最適な場所からサンプルを採取することを狙っています。

構成としては、エンドエフェクタ (手先) にサンプルを採取するコアラー機構を3つ、小型光学カメラ、計測機器等を搭載した5軸関節構成マニピュレータ (ロボットアーム) によるサンプル移送部 (CRMS)、探査機本体に搭載される地形計測センサユニット (TMSU)、これらを制御するコントローラ部 (SMP-E)、サンプルをSRCに収納するサンプル収納/カプセル搬送部 (SSTM) から構成されます。また、アメリカが提供するニューマティック式のサンプル採取機構 (P-SMP) のサンプル格納キャニスタをSSTMに搬送する役目も担っています (図1)。

フォボス表面に着陸後、TMSUでの撮像画像を地球に送信して、半径1mサイズの地形に対して地表状態確認と3次元地形復元を行います。それに基づき安全にサンプル採取できる地点を2点 (メイン及びバックアップ地点) 選択し、サンプル採取実行のコマンドを探査機に送信します。C-SMPはそのコマンドを

受け取った後は完全自律でサンプル採取を実行します。サンプル採取地点近傍までアプローチ後、地表の障害物有無や硬さを確認後にフォボス表面にコアラーを発射し筒を地面に打ち込むことで中に入り込むサンプルを採取します。コアラーは二重構造になっており外筒を地表貫入状態で分離させます。CRMSで地表から引き抜く時に内筒と外筒の間に仕込まれている板バネ仕掛けのクロージャが動作することでサンプルをコアラー内に閉じ込めることができます。その後、離陸衝撃に耐えられる姿勢にCRMSを移行させフォボスを離脱します。この運用を異なるフォボス上の地点で2回行う予定です。

フォボス離脱後の擬周回軌道 (QSO) 上にて、ターゲットマーカを用いた画像解析により、誤差1mmの精度でSSTM上に搭載された格納部にコアラーをアプローチさせ、エンドエフェクタから取り外します。すべてのコアラー及びP-SMPキャニスタを収納後、SRCにバネを用いた直動機構で搬送し蓋をします。以上でC-SMPのミッションは完了です。

MMXローバ (IDEFIX) : 探査機に先立ち フォボス表面を移動探査するロボット

探査機本体の着陸に先立ち、フランス (CNES) ドイツ (DLR) との国際共同開発のMMXローバ (IDEFIX) をフォボス上に着陸させ、100地球日の独立した探査を実施します。探査機本体に先立ちフォボス表面を探査することで、より確実な探査機着陸を実現するのが目的です。

IDEFIXはローバ本体が重さ約23kg、1辺約50cmの立方体形状で探査機の大きさと比較すると小型です (図2)。フォボス表面移動や姿勢制御のために、4つの独立に動作可能なホイールが先端についたアームを制御します。アームは本体との連結箇所が回転する仕掛けになっています。ホイールを動かすことで前進したり、アームを動かすことで高さや姿勢を変えたりすることができます。科学観測機器として光学カメラ、ラマン分光計、熱放射計が搭載されており、フォボス表面科学に資するデータも取得予定です。探査機本体には、加えて分離機構 (MECSS)、ローバ通信アンテナ (RolAnt)、データ処理装置 (RolBox) も搭載されます。

基本的な運用としては、日中は太陽方向を指向する姿勢制御により発電量を確保します。また、探査機からの通信電波を受信すると取得データを探査機に返し、新たな運用計画コマンドを取得することになります。これはフォボスの昼夜問わず1地球日に2回実施します。その他の時間はシステム制約の許す範囲で表面移動や先に示した機器での科学観測を実施し、ミッションを行います。

余談ですが、IDEFIXという名前は欧州で有名な白い犬のキャラクターからつけられています。その意味は「ピン!とくる」というニュアンスだとのこと。日本名は「閃き」と日本ローバチームで名付けさせていただきました。フォボスで何か「ピン!」とくる成果を出してくれることを期待しています。 吉川 健人 (よしかわ けん)

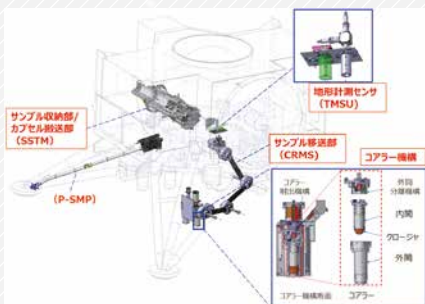


図1: サンプリング装置 (C-SMP) の構成



図2: MMXローバ (IDEFIX) の外観



北海道大学教授

塚本 尚義 (ゆりもと ひさよし)

EXPO 2025と隕石

EXPO 2025大阪・関西万博が先月閉幕しました。私にとって大阪・関西万博は隕石万博でした。まず、公式キャラクターのミャクミャクがアメンバー状かんらん石集合体(AOAs 太陽系最古の物質といわれている隕石中の難揮発性包有物の一種)にそっくりなのでびっくりでした。次に、日本館の目玉は、世界最大級の火星由来の南極隕石でした。私も行列に並んでこの展示を見てきました。イトカワとリュウグウの石も展示されていました。アメリカ館にも並んでアポロ17号が持ち帰った月の石をチラ見してきました。中国館にも並んで嫦娥5、6号が持ち帰った月のソイルを見ました。そして、われらのJAXAの展示はフューチャーライフヴィレッジの一角にありました。その隣の建物のブースで隕石展示があったのを憶えていますか？(株)アモーチェという会社の展示です。私はこの会社の会長と英国グラスゴーで開催した国際隕石学会のレセプションで偶然お会いしたことがご縁となり、会長がコレクションした大量の隕石の展示をお手伝いさせていただきました。この展示は、万国博覧会にふさわしく、質・量ともに世界の一流博物館のそれに勝るとも劣らぬものだったのです。それに加え、何よりも「隕石を触る・叩く・音を聞く」という、観るだけではない万博ならではの楽しむ試みが多くの方の共感を呼びました。開催当初は、待ち時間なく入場できたのですが、「鉄隕石を叩いた音はこんなだよ」とか「月の石と火星の石に触ったよ」とかの口コミがSNS等を通じて広がり、1ヶ月もたたないうちに連日行列ができるようになりました。この評判がテレビや新聞のニュースに取り上げられると、さらに混雑し、入場するのに1時間を超えることもあるようになりました。宇宙関係の研究分野としては弱小隕石が、沢山の皆さまに知っていただける機会になったことを嬉しく思います。この展示終了日の二日前に、「隕石、小惑星、火星、月のお話」というトークをフューチャーライフヴィレッジステージでやらせていただき、場外モニター前を含み満員御礼の来場をいただきました(写真)。2時間弱に及ぶ長丁場の講演でしたが、皆さま辛抱強く聞いてくださり、質問も沢山してくださり、隕石を囲むとても心地好い特別な時間を、市民の皆さんと万博会場の一角で共有できたことを嬉しく思います。

質問の中には、「隕石に加え小惑星サンプルを研究すると新しいことがわかるのですね。ワクワクします。」という嬉しいものがあります。確かに、私たちの知識は小惑星サンプルにより飛躍的に豊かになりました。ただ、個人的



2025年7月5日のEXPO 2025 フューチャーライフヴィレッジステージでの講演の様子。

には、まあそんなものかというのが正直な感想です。人類がサンプルリターンできているのは地球近傍小惑星だからというのが原因かもしれませんが、隕石には地球の岩石とは全く違う物が普通にあるように、隕石とは全く異なる不思議な岩石でできた小惑星が太陽系外縁部に普通にあるのだと思っています。いずれオールトの雲までの小惑星の破片を一堂に並べて研究し、その成因と関係性を思い巡らせたいと思います。小惑星研究の本当のお楽しみはこれからなのです。

オールトの雲まで小惑星探査ができる時代を夢見て、どこかの雑誌に太陽系のお散歩時代の幕開けという言葉を含むエッセイを書いたことがあります。散歩というのは私には大切に、いろいろなアイデアはその時に浮かびます。散歩のように小惑星に行かれるようになる頃には、太陽系の果てまで人類が進出している時代でしょう。気軽に冥王星旅行ツアーというのも可能になっていることでしょうか。そんなことは夢だと思われるかもしれませんが、今からほんの百年前にどれだけの方が南極大陸を散歩できる時代が来ると考えていたでしょう。

さて、人類の深宇宙進出には何を準備しましょうか。ちょっと歴史に学んでみましょう。大航海時代の発展には、技術の準備と人間の欲望の両輪が必要でしたとAIに聞くと答えてくれます。人類の深宇宙進出に向けて、この両輪を満たしそうな材料の1つは、地球にはほとんど無い宇宙の資源 ${}^3\text{He}$ でしょう。 ${}^3\text{He}$ は核融合の資源です。深宇宙進出に必要となるであろう核融合ロケットエンジンの燃料としても期待されています。 ${}^3\text{He}$ は太陽風により運ばれ、大気のない天体表面のわずか100nmの層に長い長い時間をかけて静かに蓄積されます。これだけでも鉱床ですが、さらに、この超薄い層を3次的に濃集する鉱床作用はないのでしょうか。もしあれば、もっと効率よくこの資源を採掘できます。地球上ではこのような鉱床作用のメカニズムは発見されていませんので、その存否を予想することも含めて、宇宙資源科学の格好な挑戦課題の1つでしょう。それはそうとして、上述しましたように、惑星科学の発展には散歩が必要と強く思うので、人類の深宇宙進出は、小難しく理系が主導する有人宇宙探査だけでなく、楽しく宇宙生活ができる文系主導路線もやって欲しいものです。手始めに月面生活を実現しましょう。そのため、人類が宇宙で楽しく生活したくなる明るいビジョンを積み上げ、深めましょう。文明発展のでも、文化活動のでも、できるだけ多種多様な切り口で。真面目なJAXAの面々からは叱られそうですが...

宇宙・夢・人

Space Human Dream

》挑戦する心を取り戻そう

小さくてもいいから挑戦的なことを

——2025年4月から宇宙研の副所長に就任されました。

今年度から副所長は2人体制となり、津田 雄一さんが科学戦略、私は技術戦略を担当しています。宇宙研がこれから技術面でどこに向かうべきかを考えることが、私の役割だと受け止めています。

——宇宙研の技術戦略はどのような方向性を考えていますか？

日本の宇宙科学ミッションの予算は欧米より1桁小さく、同じことをしても到底かきません。かといって、予算を1桁増やすのも現実的ではないでしょう。こうした状況で世界と渡り合うには、小さくてもいいから挑戦的なことをやっていくべきだと考えています。

その1つが、新しい分野の開拓です。まだ価値があるかどうか分からない分野に、私たちが先陣を切って踏み込む。そして、その分野に脈があると分かれば、世界の国々と協力して本格的に深めていく。日本発のアイデアで、リスクの高い部分を引き受けて、結果として人類にとってプラスになるのならば、その本格的なミッションが日本主導でなくても構わないでしょう。日本は、新しい分野を切り開くことで存在を示していけばいいのです。言うは易く行うは難しですが。

——新しい分野を開拓するために必要なことは何ですか？

素早く動くことです。新しい分野を開拓しようとするとき、その分野に取り組む価値が本当にあるのかを議論することは、不可欠です。ただ、議論に時間をかけすぎると、結論が出たころにはほかの国が動き始めていて、もう最先端ではなくなっていることもあります。だからこそ、脈がありそうだと判断できたら、すぐに動き始められるようにしておくことが大切です。

そのために必要なのは、1つはやることを絞り込んでプロジェクトをコンパクトにすること。もう1つが、失敗が許される環境をつくることです。挑戦に失敗はつきものです。失敗がないものは、そもそも挑戦とは言えません。もちろん、ネジの締め忘れのような、いい加減さから生じる失敗は論外です。しかし、100%の力を尽くした上での失敗や、次につながる失敗、実りのある失敗といった「いい失敗」は、許されてよいと思うのです。

プロジェクトの挑戦に伴走し支える

——宇宙科学プログラムディレクターも兼任されています。どのような役割ですか？

宇宙研では、多くの宇宙科学プロジェクトが走っています。宇宙科学プログラムディレクターは、皆さんの挑戦を、技術面に限ら

宇宙科学研究所 副所長
宇宙科学プログラムディレクター
宇宙飛行工学研究系 教授

澤井 秀次郎 (さわい しゅうじろう)

1966年、東京都生まれ。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。1994年より文部省宇宙科学研究所助手。2003年のJAXA発足などを経て、2018年より宇宙飛行工学研究系教授。その間、小型科学衛星プロジェクト・プロジェクトマネージャ、SLIMプロジェクト・プロジェクトサイエンティストなどを併任。2025年4月より現職。



ずさまざまな面でお手伝いする立場であると、私は捉えています。宇宙科学プログラムディレクターの役割として「調整」という言葉が使われることもありますが、私自身は「手伝い」あるいは「支援」という感覚が強いです。つい最近まで長いこと現場にいたので、現場の人たちが何を考え、どこで悩んでいるのかは、想像できます。どうすれば皆さんが力を発揮しやすくなるかを、伴走しながら一緒に考えていきたいと思っています。現場に寄り添い過ぎてしまうところもありますが、複数のプロジェクトを俯瞰する視点も忘れないうようにしています。

宇宙に行きやすい乗り物をつくりたい

——今の宇宙研に必要なものは何だと思われますか？

挑戦する心ではないでしょうか。昔の宇宙研は実績がなかったので、挑戦するしかありませんでした。その後、先輩たちが大きな成功を収め、成功の方程式のようなものができました。すると、こうすれば成功すると分かっているの、その道をたどるプロジェクトが多くなってきたのです。もちろん、先輩たちが積み上げてきた実績を、さらに発展させていくことも大切です。ただし、それだけではなく、先輩たちのように挑戦しながら新しい地平を切り開いていく、その精神も忘れてはいけないと思うのです。宇宙に行く新しい乗り物、高精度編隊飛行による宇宙望遠鏡、もっと簡単に火星へ行く方法……。挑戦すべきテーマは、まだ多くあります。

副所長でなければ、私も宇宙に行くための新しい手段の開発に挑戦したいですね。海外ではロケットが毎週のように打ち上げられ、価格競争が激しくなっています。一方、日本のロケットは価格競争力で海外には到底かきません。ならば、まったく異なる価値観に基づく乗り物を提案し、宇宙に行き易くしたいのです。

——宇宙に行くための新しい手段とは？

ロケットの打上げは、激しい振動と大きな衝撃を伴います。衛星は開発過程で、それに耐えられるか試験を行っています。宇宙飛行士も厳しい訓練を受けなくてはなりません。でも、私たちが飛行機に乗るときに特別な訓練は受けませんよね。空輸する荷物も振動試験を行ったりはしません。飛行機に乗るくらい気安さで宇宙に行けるようになれば、世の中は大きく変わるでしょう。宇宙研には私のほかにも、こうした新しい価値観の乗り物について考えている人がたくさんいます。自分で手を動かすことは難しくても、その挑戦を応援していきたいと思っています。

編集後記

15年の軌道上運用、「あかつき」さんお疲れ様でした。XRISMの科学成果に至るまでの道のりも困難なものだったと想像しますが、新世界を見せてくれていますね。検討が進む将来プロジェクトから「まあそんなものか」という感想がでないくらいの驚きが生まれてくるのを楽しみにしています。(三谷 烈史)



ISASニュース No.537 2025年12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/>