

# 「銀河を吹き渡る風をみる」X線天文衛星XRISM（くりずむ）観測開始

渡辺 伸

Watanabe Shin

## 1. XRISMの登場

2023年9月7日午前8時42分（日本標準時）、X線分光撮像衛星XRISM（くりずむ）<sup>1)</sup>は、小型月着陸実証機SLIMと共にH-IIA47号機によって、種子島宇宙センターから打ち上げられた（図1）。XRISMとは、X-Ray Imaging Spectroscopy Missionの頭文字を取り、分光に特長を持つことからプリズムになぞらえてプロジェクト発足時に決めた名前となる。「銀河を吹き渡る風」すなわち星周、星間、銀河間等、宇宙空間にあまねく存在する高温プラズマをX線で観測する天文観測衛星であり、2016年に失われ

たASTRO-H「ひとみ」のリカバリーミッションでもある。

ASTRO-Hが軌道上で運用されたのは、ひと月あまりだった。X線マイクロカロリメータSXSをはじめとする最先端の観測装置がすべて立ち上がり、出始めたばかりの試験観測のデータは、その後本格化する科学観測で切り開かれる新世界を垣間見せていた。しかし、姿勢系の異常に端を発した通信途絶により、その扉は閉じられてしまった。XRISM計画は、この異常事態から始まった。事故の原因は何か、その背後要因に何があったか、どうやれば防げるのか。開発体制、開発方式の見直しは、所管したJAXA宇宙科学研究所のみならず、JAXA全社的な取り組みとなった。また、協力海外機関との教訓の共有が行われた。JAXA、NASA双方のプロジェクトでまとめられた教訓は数百に及び、これらは、XRISMのプロジェクト活動をとおして、一つひとつに対処できたか確認しながら進むことになる。

もう一度やる価値があるのか、厳しく問われるなかで、筆者らを支え、NASAやESAを含む内外の支援を後押ししてくれたのは、ASTRO-Hの残した、かつて見たことのない観測データだった。人的、資金的リソースを早急かつ確実なリカバリーに集中するため、観測装置は、軟X線分光装置、軟X線撮像装置に絞り込んだ。2台のX線反射望遠鏡の焦点面にX線マイクロカロリメータとX線CCDを配し、それぞれ、Resolve、Xtendと命名された2式である。ASTRO-Hに搭載されていた硬X線撮像分光計（HXI）と軟ガンマ線検出器（SGD）は別の機会でもリカバリーを図ることとして搭載せず、衛星の基本



図1 H-IIA47号機の打上げ

JAXA 種子島宇宙センターからX線分光撮像衛星XRISMと小型月着陸実証機SLIMのデュアルローンチとなった。©JAXA

的な動作に必要なバス系は ASTRO-H のものをほぼ踏襲することとして、XRISM はスタートを切った。

## 2. 開発期の活動

2018 年、XRISM プロジェクトは、JAXA のプロジェクトとして、正式に始動した。また、NASA との国際協力も、XRISM では、JAXA と NASA とのジョイントプロジェクトという形をとった。NASA も XRISM を重要なミッションと捉え、深く寄与することとなった。

衛星、観測装置の設計は、ASTRO-H を踏襲し、大部分は再製作となる。しかしながら、開発の道は平坦ではなかった。マイクロカロリメータの Resolve の組付けでは、NASA の技術者の現場での関与が不可欠だが、2020 年、2021 年は、世界を襲った新型コロナウイルスによるパンデミックのため、海外からの入国が困難になる等、様々な障害を乗り越える必要が生じた。開発にまつわる話は別稿<sup>2)</sup>を参照してもらうこととして、本稿では、運用準備活動、運用訓練・リハーサルについて述べたい。

### 2.1. 運用準備活動

XRISM プロジェクトでは、ASTRO-H の運用中の事故からの教訓として、「運用準備」活動にプロジェクトの初期の段階から力を入れてきた。これまでの宇宙研の科学衛星では、設計者、開発者がそのまま運用者になるので、運用のことは念頭において、設計・開発を行っていたように思う。ただし、設計者・開発者はどうしても設計、開発を優先し、運用については後回しになって、衛星を上げてから、後で運用のことを考えるということもあったかと思う。システムの規模が小さければ、それも効率的だが、昨今、開発するシステムが大きくなり、複雑になり、設計・開発・運用を分業せざるを得ない状況である。これは、衛星に限った話ではないと思う。そういう状況では、下手をすると、設計・開発したシステムは、(打ち上げた後)運用できないシステムだったということが起こりかねない。そうならないために、設計段階で、運用のことを考慮した設計になっているか、設計ではどういう運用を想定しそれは無理なく運用できるかを確認する必要がある。また、開発試験段階では、ミッション達成に対して、制約が発生して

いないかを確認し、「ヒト」が運用を行えるように準備を行うという活動が不可欠となる。JAXA 全体でもこの「運用準備」の重要性が認識され、「運用準備標準 (JERG-2-701：一般公開)」という文書が制定されている。

XRISM の運用準備活動の重要なマイルストーンは、「XRISM 運用計画書」の作成だった。ASTRO-H のリカバリーミッションでもある XRISM では、衛星システムの設計は基本的には ASTRO-H のそれを踏襲する。そのため、ASTRO-H の設計で前提となっていた運用シナリオを把握することが必要となる。また、X 線天文グループは、これまで衛星の経験があるが故に、運用に関して、暗黙の了解になっている部分も多くあった。しかしながら、XRISM メンバーは、宇宙研以外の衛星プロジェクトを経験してきたメンバーも多く、衛星システムメーカーのスタッフもいる。「暗黙の了解」は通じない。そこで、ASTRO-H の運用シナリオを改めて見直して、XRISM 衛星ではどういう運用を行う計画なのかを明文化することにした。併せて、初期段階の運用方針、異常発生時の対処方針、運用体制の方針をまとめ、「XRISM 運用計画書」を制定した。また、XRISM では、NASA がプロジェクトレベルでの国際協力となっていることを踏まえ、NASA の運用担当エンジニアにこの運用計画書をレビューいただき、NASA の経験も取り入れるようにした。

続いて、この運用計画書をもとに、運用の成立性を確認する運用設計解析を行い、衛星運用文書の作成に入った。衛星運用文書は、「衛星運用説明書」、「衛星運用手順書」、「衛星チェックアウト手順書」からなり、軌道上での衛星運用のすべてがここに記載され、すべてが検証されたもので、これに基づいた運用しか行わない。また、定常の運用に関して、衛星運用チームの実際の手順を、衛星運用マニュアルという文書にまとめ、これと衛星運用文書との網羅性を確認するという準備を実施した。

### 2.2. 運用訓練・リハーサル

XRISM プロジェクトでは、打上げ前の運用訓練、リハーサルにも力を入れてきた。衛星運用文書、運用マニュアルをもとに、運用者がすべての運用を確実に実施できるように、訓練計画、リハーサル計画を練った上で、2022 年 12 月より独習、座学、操作



訓練、リハーサルを打上げ前まで実施してきた。

この運用訓練、リハーサルを効果的に行うために、XRISMでは、衛星シミュレータを導入した。この衛星シミュレータは、代表的なオンボード計算機である、データ処理系と姿勢軌道制御系の計算機をエミュレートし、同じソフトウェアが動くようにして、実際の運用時に発行するコマンドに反応し、実機と同じ形式にテレメトリデータを出すことができる。シナリオを用意することで、衛星の異常事象を模擬することも可能だ。

XRISMの打上げ直後は複雑な運用を強いられる。通常の衛星では、打上げ直後の電力確保や姿勢系確立の運用がクリティカル運用として重要だが、それに加えて、ミッション観測装置 Resolve の冷凍機の立上げを組み込んでいく必要がある。Resolve のマイクロカロリメータの冷却のための液体ヘリウムをなるべく減らさないように、打上げ時には、OFFにしている冷凍機の運転を速やかに行う必要があるためだ。複雑になる運用を確実に実施するため、打上げ時の運用に対しては、実時間を模擬して行うリハーサル形式で実施した。そのために衛星シミュレータをフル活用した。また、異常事象が起こる衛星シミュレータのシナリオを作成し、運用者の対応力を試すというリハーサル、訓練も実施した。そうやって、かれこれ、6回ぐらいは、衛星を軌道に載せるリハーサル、操作訓練を実施し、本番に臨んだ。

### 3. 打上げからファーストライト、そしてPV観測へ

冒頭に述べたように、2023年9月7日、XRISMは打ち上げられた。当初の打上げ予定日は、8月26日だったが、天候条件により、度重なる延期となったが、とにもかくにも9月7日に打ち上げられ、順調に衛星分離となり、打上げ直後のクリティカル運用に進んでいった。

クリティカル運用は、リハーサルの甲斐もあり、太陽捕捉、太陽電池パドル展開、Resolveの冷凍機起動、姿勢制御モードのホイール太陽捕捉モード移行と順調に進めることができた(図2)。

その後、1か月かけて、バス系の通信系、電源系、データ処理系、姿勢系コンポーネント、観測に向け



図2 打上げ直後の運用、太陽電池パドル展開時のXRISMの管制室の様子

衛星状態を確認するため、皆緊張した面持ちでモニターを見ている。写真中央が衛星運用の司令塔となるSpacecraft Conductor (SC)という役割の人になる(筆者が務めた)。©JAXA

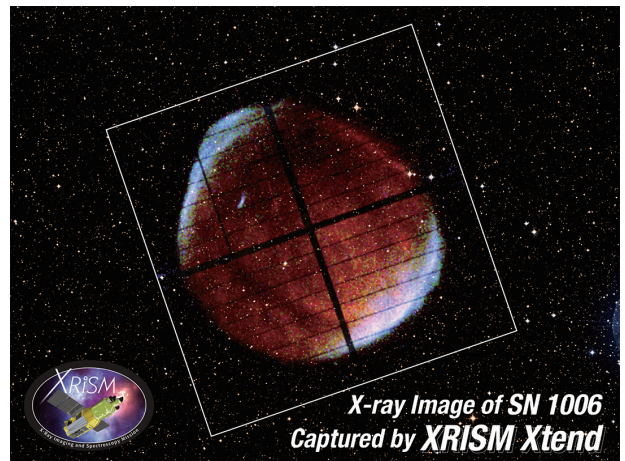


図3 Xtendが捉えた超新星残骸SN1006のX線画像

背景に可視光の画像を重ねている。この天体は西暦1006年、すなわち、紫式部や藤原道長が活躍した時代に爆発した超新星の残骸である。SN 1006は爆発から1000年あまりの時をかけて、直径65光年もの大きな球状の天体へと成長し、見かけ上の大きさが満月とほぼ同じで約30分角の視直径を持つ。©JAXA (X線)・DSS (可視光)

た姿勢制御系の機能性能確認を進めた。

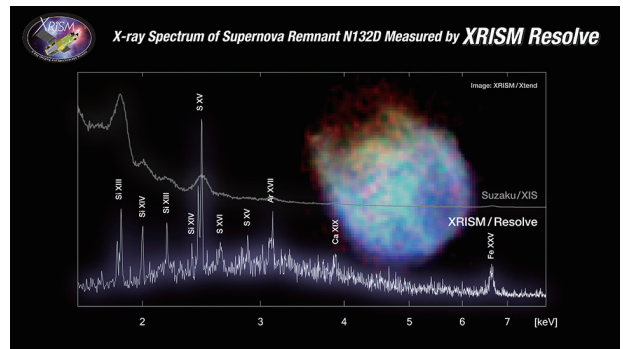
10月に入り、観測系の立上げ、観測系機上パラメータ調整、姿勢系とのアライメント調整といったチェックアウト運用を実施し、観測運用が実施できるように準備を行った。

Xtendは、X線望遠鏡の焦点面に国産のX線CCDカメラを搭載した観測装置で、分光性能はシリコン半導体検出器の性能に制限されるものの広い視野という特長を持つ。このXtendは、軌道上で、順調に立上げ運用を行い、機能性能に問題がないことを確認した。姿勢系観測軸とのアライメント調整のなかで捉えた銀河団Abell 2319をファーストライト

トとした。Xtendの特長を示すものとして、**図3**にXtendで取得した超新星残骸SN1006のX線イメージを示す。このSN1006、ちょうど満月と同じくらいの見かけ上のサイズを持つが、Xtendの広い視野ですっぽり収めることができている。Xtendのイメージの分解能は、およそ1分角で、人間の視力と言うと1.0に相当する。肉眼で月を見た時、「月のうさぎ」を識別できるというのを想像すると感覚がつかみやすいかもしれない。超新星残骸の衝撃波の構造等をあらわにするXtendのX線イメージは新たな観測情報をもたらすものとしても期待される。

Resolveは、X線マイクロカロリメータと呼ばれる検出原理を用いた観測装置である。検出部を50 mKと極低温に冷却し、X線光子が入射したときの微小な温度上昇を捉えることで、高いエネルギー分解能を発揮することが可能となっている。このResolveの立上げ運用も順調に進めてきたが、11月4日、「ゲートバルブ開放」のところで躓くことになってしまった。ゲートバルブとは、地上でも真空のデュワ内部の検出部とそのフィルタを大気から守る光路上の窓構造で、打上げ後、開放して、光路上をクリアにする。11月4日に所定の開放オペレーションを行ったが、窓が開放されたという信号が得られなかった。その後、原因推定を行い、条件を調整して、更に2度の開放運用を試みたが、窓を開けられてはいない。それでも窓には、X線を透過する250 μm厚のベリリウム材が用いられているので、閉じられた状態でもおよそ1.8 keV以上の帯域で観測ができる。そこで、まずはこの状態でファーストライト観測、そして軌道上校正観測と初期性能確認観測(PV観測)に進むことを決断した。

**図4**は、ファーストライト観測で取得した大マゼラン星雲の超新星残骸N132Dの観測データである。Resolveで得たスペクトルとXtendで撮像したX線イメージを示している。比較のため灰色で示しているスペクトルは「すざく」衛星のCCDカメラであるXISで得られたものである。これまで超新星残骸のように広がった天体では、このCCDのスペクトルしか得ることができなかったが、Resolveの桁違いの分光性能で格段の情報を得ることができるようになっている。このN132Dでは、シリコン、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄といった元素、及び、それらのイオンからの特有の輝線が観測され、それぞれ



**図4** Resolveで観測した超新星残骸N132DのX線スペクトル  
灰色の線は比較のためのX線CCDカメラ「すざく」衛星XISによるスペクトル。カラー画像は、Xtendで得たN132DのX線画像。X線帯域別に着色して合成したもの。©JAXA

れの輝線の幅から、イオンの熱運動に起因する熱的ドップラー広がりをイオンごとに得ることが初めてできるようになった<sup>3)</sup>。そして、観測時点で超新星残骸を構成する高温プラズマの温度構造、速度構造を調べるだけでなく、超新星爆発時の元素合成を調べるという新たな研究手法がXRISMによって開かれることが期待される。

XRISMでは、2024年2月8日に定常運用段階に移行し、その後、2024年8月まで、PV観測をXRISMの科学者チームがあらかじめ選定した約50天体に対して、実施してきた。PV観測では、観測機器の性能を確認し、データ解析方法の確立を進めてきた。これらの観測結果には多くの新しい科学的な知見が含まれており、XRISM科学者チームでは、今後、順次、成果を公表していく予定だ。そして、2024年9月からは、第一期の公募観測が開始され、世界の研究者によりXRISMの観測データを使った研究が実施されている。

## 4. アイントロップの利用

XRISMでは、Resolve、Xtend共にエネルギー校正用に、<sup>55</sup>Feの放射線源を搭載している。特に、Resolveでは、所定のエネルギー分解能を得るためには、エネルギー校正が欠かせない。断熱消磁冷却のサイクルの度に変化する検出部分(50 mKに冷却している)の温度や、常温回路部分の軌道周回に起因する温度変化に依存して、エネルギーとパルスハイトの関係が、5~6 eV変化する。これをモニタし、(地上のプロセス)で補正するためのデータを得るために<sup>55</sup>Feの放射線源を使用している。元々は、

---

MXS と呼んでいる X 線発生装置を使った補正を主として想定していたが、ゲートバルブを開放できていない状況下では、入射窓の保持枠がコリメータとなってしまう、MXS だと全面に照射できないため、フィルターホイール上の 5 つの  $^{55}\text{Fe}$  に依存することになっている。したがって、現在、Resolve の分光性能を担保しているのは、この  $^{55}\text{Fe}$  線源と言って過言ではない。

密封放射線源を表示付認証機器として、調達し、観測装置の組み込みの最終段階で、取り付け、使用し

ている。表示付認証機器の調達では、日本アイソトープ協会に尽力いただいた。この場を借りて、お礼申し上げます。

#### 参考文献

---

- 1) M. S. Tashiro, *et al.*, *SPIE Proc.*, **13093**, 130931G (2024)
- 2) 田代信, 日本物理学会誌, **79**, 248 (2024)
- 3) XRISM collaboration, *PASJ in press* (2024)

(JAXA 宇宙科学研究所)