

# 「銀河を吹き渡る風をみる」 X線天文衛星 XRISM (くりずむ)

田代 信 (埼玉大学大学院理工学研究科/JAXA 宇宙科学研究所 tashrio@mail.saitama-u.ac.jp)

## 1. XRISM 登場

2023年9月7日午前8時42分、X線分光撮像衛星XRISM<sup>1)</sup>(くりずむ)は、小型月着陸実証機SLIMとともにH-IIA 47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 and Spectroscopy Missionの頭文字をとり、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だ。「銀河を吹き渡る風」すなわち星周、星間、銀河間の高温プラズマを観測する日本で7番目のX線天文衛星であり、8年前に失われたASTRO-H「ひとみ」<sup>2)</sup>のリカバリーミッションである。ASTRO-Hの最初の提案から数えると、20年になる。

ASTRO-Hが運用されたのは、ひと月あまりだった。世界で初めて天体を観測したX線マイクロカロリメータSXSをはじめとする各観測装置から得られたデータは、X線観測の新時代の到来を高らかに告げるものだった。<sup>3)</sup>しかし、姿勢系の異常に端を発した通信途絶によって、新世界への

扉は突如閉じられた。<sup>4)</sup>XRISM計画は、この忘れることのできない異常事態から始まった。事故の原因は何か。その背後に何があったのか。どうやれば防げるのか。推進したコミュニティである高エネルギー宇宙物理連絡会の衛星計画への取り組みの振り返り、JAXA宇宙科学研究所での開発体制の見直し、協力海外機関との教訓の共有がおこなわれた。JAXA、NASA双方のプロジェクトでまとめられた教訓は数百におよび、XRISMはミッション期間をとおして、その一つ一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。その能力と資源があるのか。厳しく問われるなかで、我々の背中を支え、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、いままで見たことのない観測データだった。限られた人的、資金的資源を早急かつ確実にリカバリーに集中するため、観測装置は軟X線分光装置と撮像装置に絞り込んだ(表1)。すなわち、2台のX線反射鏡の焦点面に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には搭載されていた硬X線撮像分光計(HXI)と軟ガンマ線検出器(SGD)は搭載しないものの、衛星バスはASTRO-Hのものをほぼそのまま使うかたちで、XRISMはスタートをきった。

## 2. 3つの難所

2018年、XRISMプロジェクトは、JAXAとNASAのジョイントプロジェクトとして正式に始動した。ASTRO-Hのリカバリーミッションとはいえ、かつて通った開発の道も平坦ではなかった。この5年あまりの開発で突き当たった、観測装置、衛星の基盤システム、地上支援系、データ処理系、あらゆる開発項目にわたるいくつもの難所の中から、設計と製造、そして打ち上げオペレーションからそれぞれ一つずつとりあげて紹介する。

### 2.1 姿勢制御系の設計

ASTRO-H喪失の直接的な原因となったのは、軌道上で衛星すなわち望遠鏡の向きを決める姿勢(制御)系だった。姿勢系は、その目としての計測系——星センサ(スタートラッカ)、角速度センサ、太陽センサ、地磁気センサと、手足としての駆動系——モメンタムホイール、スラスタ、磁気トルカを持っている。唯一のエネルギー源である太陽電池パネルを安定して太陽に向けつつ、天体ごとの観測姿



図1 H-IIA 47号機の打ち上げ。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

表1 XRISM搭載観測装置の性能要求。\*:実際は $38 \times 38$  arcmin<sup>2</sup>。†:半値全幅@6 keV。‡:観測開始時。

観測装置	Resolve	Xtend
視野(arcmin <sup>2</sup> )	>2.9×2.9	>22×22*
角度分解能(arcmin)		<1.7
エネルギー分解能†(eV)	<7	<200†
感度帯域(keV)	0.3-12	0.4-13

勢を精度よく保つためにきわめて重要な機能である。特に太陽方向を見失いバッテリーが枯渇すると衛星の死に直結する。システムとしての強靱さが求められる一方で、多様なセンサと複数の駆動系を駆使しなければならない複雑な制御系である。XRISMでは、星センサを実績のある「枯れた」機種に変更するとともに、台数も2台から3台に増やした。また太陽センサの視野も拡大し、姿勢異常を検知する役割も担わせるなど、冗長性を高めた。ハード面のみならず、姿勢異常を検知し、異常をきたした部分を切り離し、自律的にシステムを再構成するロジックも全面的に見直し、周到的な改良をおこなった。考えられるあらゆる弱点をあぶりだし、それを潰すだけでなく、仮にどこか一か所で故障や異常が起こっても自律的に対処し、破綻しない設計がなされた。

それでも想定外の事故は起きるかもしれない。すでに設計が進んだ2019年になって、数々の事故を経験したNASAのエンジニア部門からの強い助言もあり、想定外でも最悪の事態だけは避ける“systemic”な設計を導入することにした。ASTRO-Hは、スラスタによる異常回転の末、太陽電池パドルの破断に至った。衛星の破壊に至るようなエネルギー源は、姿勢制御系ではスラスタしかない。ならば、異常回転を検知した場合は、スラスタを止めれば最悪の自体は防げる。すでに詳細設計をほぼ終えた段階の変更だったため、全体設計を損なうことなくこの対策をとりこむために苦心した。結果、角速度センサが通常の姿勢制御ではありえないような高い値を一定時間継続して検知した場合は、スラスタをふくむ姿勢制御の駆動系を止めるという大胆な設計とした。これは別のリスクを生む。姿勢制御をやめてしまうということは、太陽電池パドルを太陽に向けるという制御も中断することになるので、そのまま放置すれば、最悪、蓄電池の枯渇をまねき衛星の死に至る可能性すらある。これを防ぐためには、いち早く衛星の状態を知り、地上からのコマンドで太陽指向の安全姿勢に立て直す必要がある。このために、JAXAとNASAの海外地上局も使った追跡・運用体制を組み、約3時間以内に必ず一度はどこかの地上局で衛星の状態をチェックし、対処できる運用をおこなっている。

## 2.2 観測装置の製造

2019年6月まで、Resolveの検出部の開発は順調に進展していた。検出部のX線マイクロカロリメータは、50 mKまで冷却され、X線光子を吸収することによって生じるmK程度の温度上昇を $\mu$ K精度で測定する。衛星上でこれを実現するカギの一つが冷却システムである。断熱消磁冷凍機と液体ヘリウムをおさめた多層の真空容器「デュウ」の各層をジュールトムソン冷凍機と2段スターリング冷凍機で冷却する構造になっている(図2)。特に液体ヘリウムは超流動状態におかれ、ナイフエッジデバイスとポーラスプラグによって液相・気相分離されて排出されることで熱を奪う。もし気化したヘリウムが、冷却部に戻ってしまう

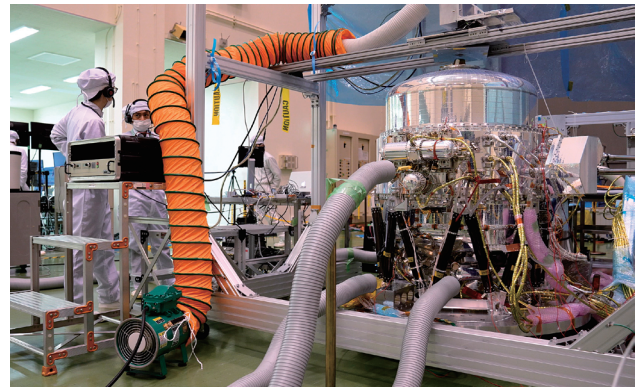


図2 Resolveの筑波宇宙センターでの較正試験の様子。高さ1メートルほどの銀色の筐体がResolveのデュウ。周りに搭載された機械式冷凍機を冷却するためのダクトがみえる。©JAXA

と、そこで潜熱を開放しこれがさらにヘリウムの蒸発を誘発する正のフィードバックがかかってしまう。ヘリウムを真空容器部分にリークさせず、確実に排出することが重要である。

厄介なのは、冷却するまで超流動状態の液体ヘリウムのふるまいが検証できない点だ。実際、デュウを組上げ冷却試験をして超流動状態を達成したあとに、わずかなリークがあることがわかった。極低温にしたことで起きる熱ストレスと超流動ヘリウムの組み合わせでのみ起きる症状だった。リーク源の特定には、デュウを分解し、内部に入れたセンサをとりだして調査する必要がある。原因を特定するまでの半年余り、一時は、液体ヘリウムなしで打ち上げ、機械式冷凍機のみで運用することも覚悟したが、チームメンバーの献身的かつ徹底的な調査によりリーク源がつきとめられ修正された。

この作業は、日米欧の共同作業だった。特に、センサの取り扱いには、製作したNASAゴダード宇宙飛行センターの技術者の協力が、搭載較正線源となるX線発生装置の取り扱いには、製作したオランダとスイスの技術者の協力が不可欠だ。分解調査が山場をむかえた2020年、折悪しくも、世界をおそった新型コロナウイルスによるパンデミック対策のため、海外からの入国は困難を極めた。関係各機関の助言と協力を得てようやく入国を果たしたあとも、大変だった。東京オリンピックと同様、来日者とそのエスコート専用のエリアをつくり、関係者以外とは接触しない動線管理をおこなったうえで、作業はクリーンルームで、クリーンスーツとマスク、防護メガネ、手袋を着用してとするバブル方式による徹底的な感染対策のもとでの作業となった。外食もできないので、食事はすべてお弁当か、テイクアウト品を給食当番が届けることになる。パンデミック対応は、国境管理が厳しくなったり少しゆるんだりしながら、結局、2021年まで続くことになる。これを乗り越えられたのは、開発チームの明るく不屈の精神と、それを支えるプロジェクト、日米欧宇宙機関ほか各所からのサポートがあったからこそである。

## 2.3 打ち上げオペレーション

2023年3月、筑波宇宙センターで2021年から続いたすべての試験を終え、我々は衛星を種子島宇宙センターに送り出した。続いて、5月の打ち上げにむけて種子島での射場作業に入るはずだった。そこに、同時期に起きたH3ロケットの事故の影響がふりかかってきた。H3の故障した第2段エンジンには、XRISMが使用するH-IIAの2段エンジンとその補器の設計を踏襲した部分があったのだ。H3チームは、非常に精力的に原因究明を進め、短時間で故障部分を絞り込み、結果、H-IIAにも対処が必要であるとの結論に至った。非常に迅速な対応をいただいたものの、その処置をロケットに対しておこなうため、打ち上げは8月以降に延期となった。

7月になり、ようやく種子島に乗り込んだXRISMチームは、衛星を立ち上げ、すべての機器に異常がないことを確認して、ロケットに搭載する。たいていの衛星は、これで一段落だが、XRISMはここからが大変である。打ち上げの1週間前になると、デュワに液体ヘリウムを注入し、これを打ち上げ直前まで冷却し続ける必要がある。ロケットの上段、衛星フェアリングの2階部分に搭載されたXRISMは、地上11階相当の高さにある。その場所で、24時間体制で冷凍機を使ってヘリウムを冷やす作業が続く。

当初の打ち上げ予定日は、天候不良が予想され、早々に2日間延期の8月28日が打ち上げ予定日となった。その前日、射場への出勤前によったコンビニで、親子連れから声をかけられた。「XRISMの方ですか？ 記者会見に出られていた方ですよ。昨日動画で見ました。応援しています！」打ち上げを見に来た小学生とその両親のようだった。思いもかけない応援までいただいて迎えた当日。夜明けとともに射場入り。管制棟の横では、上空の気象を観測するための気球の打ち上げ準備をしていた。打ち上げ1時間前に管制室の席についた。すべて順調。打ち上げ前に管制室が施錠されるのを前に、いちど部屋をでて、身だしなみを整えて戻ってくると、プロジェクトマネージャーが両手でバツのサイン。なんと、打ち上げ30分前に中止の判断がでたとのこと。衛星とロケットはもちろん、天候、視界、地上風、波いづれも問題ないが、東からの高層風が規制値を超えているとのこと。普段と異なって、高層では強い東風が吹き渡っており、万一、打ち上げ後、機体が東の海上に出る前に事故があったときに、地上に落下物が落ちる可能性があるとのこと。打ち上げ責任者の方も、はじめての経験という珍しい理由での中止となった。誰のせいでもないが、延期で打ち上げが見られないかもしれないコンビニでお会いした親子連れにもうしわけない気持ちになった。なお、その高層風を最終的に観測したのは、朝に見た気球だったらしい。

ともあれ、仕切り直し。ロケット機体から燃料を抜き、整備棟に戻したら、すぐに液体ヘリウムの再冷却をしなければならない。Resolveの観測を支えるヘリウムをなるべ

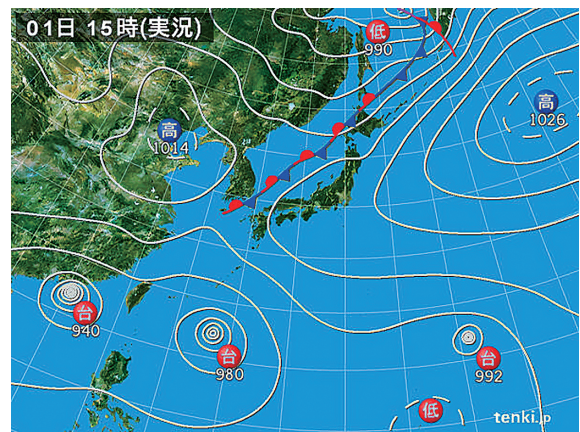


図3 2023年9月1日15時の実況天気図。偏西風が弱く3つの台風がしばらく停滞して、種子島を窺っている。©日本気象協会。tenki.jpより転載。

く維持して宇宙に送り出したいので、すぐに取りかかる。ここからは、冷凍機を動かしつつ天気図をにらみながら次のチャンスを待つことになる。この8月下旬から9月上旬は、複数の台風が太平洋上を西に東に遊弋するなど、件の高層風以外にも、やきもきさせる天候が続いた(図3)。ついに、9月7日の打ち上げが決まったときには、もう3週間連続の冷凍機の24時間管理が続いており、担当メーカー、大学関係者ともども疲労の極みに達していた。

粘り抜いた甲斐あって、この日の打ち上げは順調におこなわれ、内之浦、ハワイ、サンチアゴ、そして内之浦と衛星との交信を続けながら、衛星分離、太陽捕捉、太陽電池パドル展開、そして軌道上での冷凍機起動シーケンスと、順調にクリティカル運用が進んでいった。

## 3. ファーストライト、そして観測開始

通信系、電源系、姿勢系、データ処理系といった衛星の基盤となるシステムの機能確認をすませ、10月から観測系の立ち上げやパラメータ調整、姿勢系とのアラインメント確認をはじめた。観測系の機能と基本的な性能が確認できたところで、「ファーストライト」と称するお披露目のための天体観測データを取得する。<sup>5)</sup>

Xtendは、軌道上で、順調に立ち上げ運用をおこない、基本的な性能に問題がないことを確認した。姿勢系と観測軸のアラインメントチェックのなかでとらえた、銀河団Abell 2319をファーストライトとした。図4上に、可視光(Digital Sky Survey)の画像にXtendで得たX線画像を重ねたものを示す。比較として、X線天文衛星「あすか」やChandra、「すざく」のCCD検出器の視野も示している。これら諸先輩の4倍を超える広い視野で、差し渡し300万年を超える銀河団を外縁までカバーし、さらに周辺の天体まで収めている。衝突銀河団の構造もあらわにするX線反射鏡の空間分解能も印象的だ。

Resolveのファーストライトは、すこし遅れた。順調に立ち上げ運用を進めてきたが、11月4日、「ゲートバルブ開放」のところで躓いたからだ。ゲートバルブとは、地上

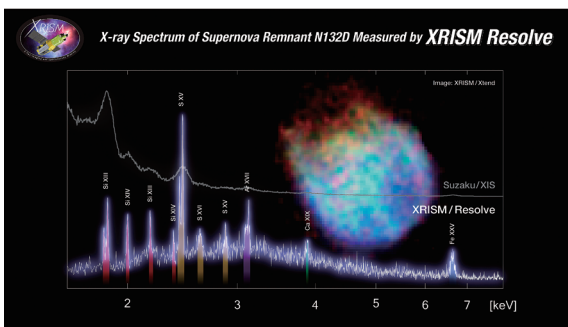
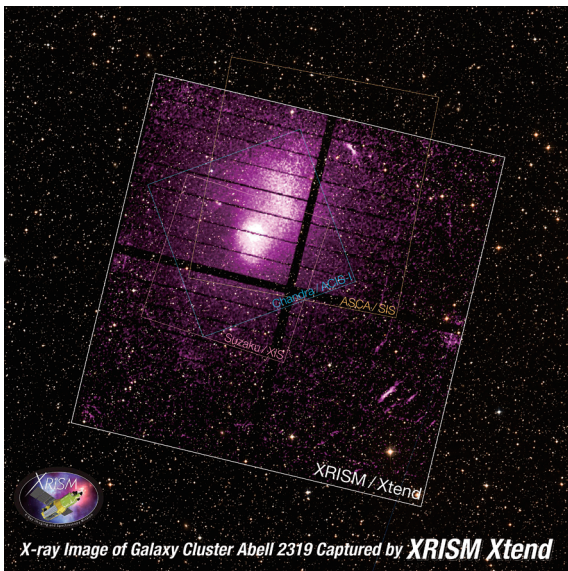


図4 上：Xtendがとらえた衝突銀河団 Abell 2319 のX線画像（マゼンタ～白）。背景に可視光（オレンジ）の画像を重ねている。差し渡し300万光年を超える銀河団の高温プラズマの分布の全貌を余裕をもって視野に収めている。また衝突によるとみられる構造も見て取れる。比較のため「あすか」SIS、「すざく」XIS、およびChandra ASIC-Iそれぞれの視野を、オレンジ、シアン、マゼンタで示している。（©X線：JAXA、可視光：DSS）下：Resolveが観測した超新星残骸N132DのX線スペクトル。シリコンから鉄に至るさまざまな電離輝線が鮮明に分解されている。灰色の線は比較のためのX線CCDカメラ「すざく」XISによるスペクトル。見やすいように上にオフセットして表示している。またカラー画像は、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

で、デュワ内部の検出部と保護フィルタを大気から守る光路上の窓構造である。打ち上げから十分な時間をおき、衛星内の清浄度が確保されたところで、最初の所定の開放オペレーションをおこなったが、窓は開かなかった。条件を調整しながら、さらに2度試みたが、開くことができていない。それでも、窓にはX線を透過する250 $\mu$ m厚のベリリウム材がもちいられているので、開放前でもおよそ1.7keV以上の帯域で観測できる。ChandraやXMM-Newtonといった米欧の大型X線天文台に搭載されている分散分光計がカバーできない帯域の観測はできるので、この状態で、ファーストライト、および軌道上較正と試験観測を開始す

ることを決断し、12月に大マゼラン雲の超新星残骸N132Dの観測をおこなった。図4下にResolveのスペクトルと、Xtendで撮像したX線画像を示す。Resolveの独壇場と期待されるシリコンから鉄、ニッケル輝線の帯域での分光性能が印象的だ。比較のため灰色で示しているスペクトルは、「すざく」のCCDカメラであるXISで得たものである。ただし見やすいように、上にオフセットして示している。この帯域での標準であったCCDのスペクトルと比較して、桁違いの情報量をもたらすことが見て取れる。ファーストライトは、今年1月5日に、JAXAとNASA、ESAから同日リリースされ、マスメディア各社からSNSまで、大きな反響をいただいた。なお、ゲートバルブ開放のオペレーションは、今後も条件を変えながら再挑戦する予定である。

XRISMは2月から、較正観測と初期性能確認観測を本格的に開始する。観測対象として、XRISMのサイエンスチームが議論を重ねて選んだ、XRISMの特長を生かす50ほどの天体がリストされている。それぞれの観測チームが、いまや遅しと手ぐすね引いて待っている。本年8月ごろからは公募観測を始める。4月の公募締め切りのあと、JAXA、NASA、ESA各地域での審査の結果、選ばれた天体に重複がある場合は、地域を越えた共同観測とされる場合もある。<sup>6)</sup> 国境を越えた競争と協働を通じて、XRISMで「銀河を吹き渡る風をみる」ことで、宇宙の物質とエネルギーの輪廻が解き明かされていくだろう。

#### 4. XRISM時代のはじまりに

ASTRO-Hで、我々が精魂込めて開発した観測装置すべてを復活させることはかなわなかった。それでも、20年を超える協働を通じて培われた研究者と技術者の国際的なチームは、ついに、世界のX線観測を前に進める天文台を軌道に送り出した。新しい宇宙像を見せてくれる観測装置は、技術開発を継続し、実装する力量と熱量を持ったチームがあって、はじめて生まれる。XRISMが、その営みを過去からさらに未来につなぐ、次の礎になってくれることを心から願っている。

#### 参考文献

- 1) M. S. Tashiro et al., SPIE Proc. **11444**, 1144422 (2020).
- 2) T. Takahashi et al., J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. **4**, 01402 (2018).
- 3) 大橋隆哉, 高橋忠幸, 満田和久, 日本物理学会誌 **72**, 503 (2017).
- 4) 宇宙航空研究開発機構, プレスリリース「X線天文衛星ASTRO-Hの今後の運用について」(2016年4月28日).
- 5) XRISM一般向けweb, <https://www.xrism.jaxa.jp/>
- 6) XRISM研究者向けweb, <https://xrism.isas.jaxa.jp/research/>

(2024年1月19日原稿受付)