

X線天文衛星 ASTRO-H (「ひとみ」) プロジェクト

大橋 隆哉¹・高橋 忠幸²

¹ 首都大学東京理学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1,

² 東京大学カブリ IPMU 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

e-mail: ¹ohashi@tmu.ac.jp, ²tadayuki.takahashi@ipmu.jp

1. はじめに

X線天文衛星「ひとみ」は2016年2月17日17:45 (JST) に種子島宇宙センターから打ち上げられたが、約1ヶ月を経た3月26日に衛星の機能喪失という結果を迎えてしまった。天文学会のみならず、多大なご支援をいただいた計画であるにもかかわらず、その結果を十分に果たせなかった。プロジェクトマネージャー (高橋) およびプロジェクトサイエンティスト (大橋) として、この大きな損失に至らしめたことへの責任は重く感じており、お詫びさせていただく。運用断念までの経緯や原因究明、対策・改善事項についてはJAXAウェブサイトで詳しい報告資料を公開している。本特集では「ひとみ」の科学成果を本号から、技術的な観点からの成果を次号から述べる。

「ひとみ」はASTRO-Hという名前で2007年に正式なプロジェクトとして開発が始まった。2005年に打ち上げられた「すざく」で果たせなかったマイクロカロリメータによる宇宙観測を実現するとともに、硬X線の多層膜スーパーミラーや狭視野のコンプトンカメラを組み合わせて、これまでにない広いエネルギー範囲で宇宙を見ることをめざす計画である。このために、日米協力を軸にしつつヨーロッパやカナダからの協力も得て、広範囲な国際協力に基づく計画となった。関わった人数だけでなく、観測装置技術を中心とする先端性とその多彩さという面でASTRO-Hは科学衛星として未経験の大規模計画であった。各機器の状況については以降の記事を参照していただきたいが、

サイエンス全体の進め方を要約しておく。ハードウェアとソフトウェアに関わった研究者に加えて、衛星や運用系の製作は行わず試験観測 (Performance Verification) 計画の立案などのサイエンス面で主たる貢献を行なう人々も、50名ほどの規模で加わった。サイエンス検討も衛星計画にとって重要な要素であり、こうしたチームの全体が協力することで、ASTRO-Hがどれほど新しい宇宙物理学を開拓できるのかが明確にされ、それらが16編のWhite paperとしてまとめられている¹⁾。

2. 「ひとみ」の目指したサイエンス

「ひとみ」の目指したサイエンスの特徴を一言で言う、これまでのCCD検出器より20倍以上優れたエネルギー分解能をもつマイクロカロリメータと、最高感度の硬X線・軟ガンマ線検出器が共に働くことで、ガスの運動とそれが引き起こす粒子加速など、動的に進化しつつある天体と宇宙の姿を世界ではじめて直接明らかにすることで、活動銀河核が放出する宇宙ジェットや、銀河団同士の衝突など、宇宙ではきわめて激しい現象が至る所で展開している。特にX線で観測される高エネルギー天体についてチャンドラ衛星やニュートン衛星の画像や「すざく」のX線スペクトルがもたらした最大の結果も、宇宙が激しく変化していることを実証したと集約できるだろう。「ひとみ」はこうした宇宙のすがたを、運動学の情報をもたらすなど、全く新しい切り口で明らかにするために計画された。新しい検出器がもたらす第一の特徴が、これまでのCCDを20倍以上凌

ぐエネルギー分解能で、高温プラズマの運動（ドップラー分光）やプラズマの物理状態（輝線構造）を明らかにすることである。第二が軟ガンマ線に至るまでの高エネルギー光子を高感度で捉え、宇宙で起きる粒子加速を探ることである。高精度分光が見せるガスの運動、その帰結としての粒子加速という、これまで未知であった非熱的な宇宙の姿に迫るという点が「ひとみ」の大きな特徴である。

3. 「ひとみ」衛星

「ひとみ」衛星の打ち上げ前の写真を図1に、内部の模式図を図2に示す。衛星全体についてはJATIS誌の論文に詳しく記述されている²⁾。4台のX線望遠鏡のうち、2台は0.3-12 keVに感度をもつ軟X線望遠鏡（SXT）で、1台はマイクロカロリメータ検出器（SXS）に、もう1台はCCD検出器（SXI）に焦点を結ぶ。他の2台が硬X線望遠鏡（HXT）で、焦点距離は12 mで6 m長の伸展式光学ベンチ（EOB）の先につけられた硬X線イメージング検出器（HXI）2台と組み合わせられる。観測するエネルギー範囲は5-80 keVである。これに加えて、望遠鏡を持たない軟ガンマ線検出器（SGD）が搭載され40-600 keVという広いエネルギー範囲の光子を検出する。

大型衛星となった「ひとみ」の数多くの観測装置やバス機器全体を見通しよく設計できるように、また、これらの機器からのデータを効率よく収集するために、国際標準の衛星用ネットワーク、SpaceWireが全面的に採用された。共通系・観測系の電子回路は、X線の光路を妨げないよう側面パネルに実装された。また、GPS受信機を搭載する「ひとみ」の絶対時刻の精度は、寺澤敏夫（理化学研究所）らの協力を得て、パルサーからの信号を情報通信研究機構・鹿島宇宙技術センターと同時観測することで、300 μ sec以下であることが確認された。なお、観測装置の詳細は個別の記事で述べられるので、ここでは全装置の設計

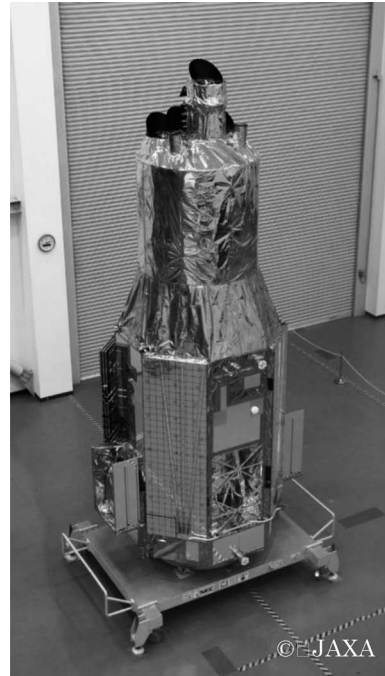


図1 打ち上げ前の「ひとみ」衛星。打ち上げ状態では全長約8.2 m。

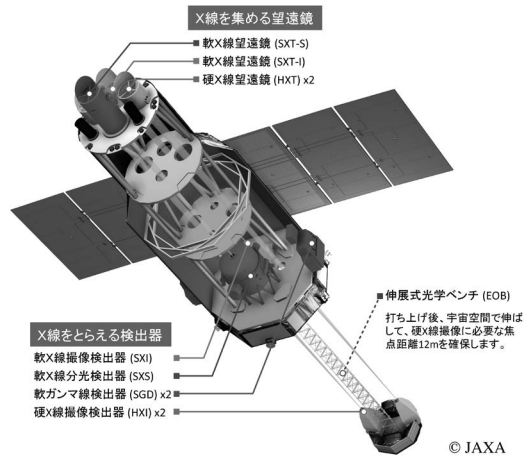


図2 「ひとみ」の観測機器配置。軌道上では全長約14 mである。

値の概要を表1にまとめて示す。

4. 軌道上のオペレーション

「ひとみ」（打ち上げ前はASTRO-H）は高度575 km、軌道傾斜角31度の円軌道に投入された。

表1 「ひとみ」の観測機器の諸元

	硬X線 撮像検出器 (HXI)	軟X線 分光検出器 (SXS)	軟X線 撮像検出器 (SXI)	軟ガンマ線 検出器 (SGD)
検出器 (台数)	Si/CdTe cross-strips (2)	Microcalorimeter (1)	X-ray CCD (1)	Si/CdTe Compton Camera (2)
焦点距離	12 m	5.6 m	5.6 m	—
有効面積	300 cm ² at 30 keV	300 cm ² at 6 keV 250 cm ² at 1 keV	350 cm ² at 6 keV 370 cm ² at 1 keV	>20 cm ² at 100 keV Compton mode
ピクセル数	128 strips 直交	6×6	(640 × 640) × 4 chips	—
エネルギー範囲	5–80 keV	0.3–12 keV	0.4–12 keV	40–600 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	<2 keV (at 60 keV)	<7 eV (at 6 keV)	<200 eV (at 6 keV)	<4 keV (at 60 keV)
角度分解能	<1.7 arcmin (at 30 keV)	~1.2 arcmin	~1.3 arcmin	—
実効視野	~9×9 arcmin ²	~3×3 arcmin ²	~38×38 arcmin ²	<0.6×0.6 deg ² (<150 keV)
時間分解能	25.6 μs	5 μs	4/2/0.5/0.1 s	25.6 μs
動作温度	-25°C	50 mK	-120°C	-20°C

表2 「ひとみ」の観測した天体

天体名	種類	観測期間	観測機器
ペルセウス座銀河団	銀河団	2月24–26日, 3月4–6日	SXS, SXI
N132D	超新星残骸	3月8–11日	SXS, SXI, HXI
IGR J16318–4848	大質量X線連星	3月11–15日	SXS, SXI, HXI
RX J1856.5–3754	孤立中性子星	3月17–19, 23–25日	SXS, SXI, HXI, SGD
G21.5–0.9	超新星残骸	3月19–23日	SXS, SXI, HXI, SGD
かに星雲	超新星残骸	3月25–26日	SXS, SXI, HXI, SGD

姿勢系のチューニングとSXS冷却系の稼働に続き、EOBの伸展オペレーションが2月27–28日にかけて行われた。EOBおよびレーザー測距システム (CAMS) については別の記事で紹介するが、結果としてHXIの画像のゆれは7秒角以下に抑えられた。SXSの視野が3分角と狭いこと、またHXIも光軸から1分角ずれたところでは有効面積が20%も減るため、検出器間の視野方向が揃っていることは重要である。結果としてSXS, SXI, HXI全ての視野方向は要求値より十分高い

精度で一致していることが確認された。

衛星高度が低いため衛星の環境が軌道1周の間に大きく変化する。日照と日陰の入れ替わり、地球からのアルベドといった熱入力の変化の他に、重力傾斜の変化も大きい。指向方向を1分角の精度で維持するために熱設計も精度が要求された。実際、機器立ち上げ後の温度データはほとんどの場所で予想値から5度以内のずれに収まっていた。

衛星の共通機器や姿勢系のチューニングと並行して天体にX線望遠鏡を向け、科学的にも意義の

あるデータを得ることができた。観測した天体は表2に示すように、ペルセウス座銀河団、超新星残骸N132D、大質量X線連星IGR J16318-4848、孤立中性子星RX J1856.5-3754、超新星残骸G21.5-0.9、そして“かに星雲”の6つである。SXSはこれら全てを観測し、SXIはペルセウス座銀河団の途中から、HXIはペルセウスの最後から、そしてSGDはRX J1856.5-3754から観測という順で立ち上げられた。これらの結果については学術論文としてまとめられており、本特集のそれぞれの記事で解説する。観測データはJAXA宇宙研のDARTSおよびNASAゴダード宇宙飛行センターのHEASARC、それぞれのアーカイブシステムで公開されている。

なお「ひとみ」の通信が途絶えた2016年3月26日時点では、観測系は立ち上げの途中であったが、その範囲において正常に動作していたことが確認できている。ただし、SXSについては真空断熱容器(デュワー)のX線入射窓(ゲートバルブ)が開いておらず、厚さ約300 μm のBe膜を通して2 keV以上のエネルギーでのみX線を検出している状態であった。また、エネルギースケールを較正するためのX線源(MXS)も動作していなかった。以上の点は、データを科学的に解釈する際に配慮が必要であった。

5. 「ひとみ」のサイエンスチームについて

「ひとみ」計画において、サイエンスの検討や試験観測へどう臨もうとしたかについても触れておく。先にも述べたが、ハードウェア製作とは別に、ソフトウェアや較正データベースの整備も衛星計画の重要な柱である。そのためにSCT (Software and Calibration Team) が組織され、ハードウェア開発の人々との協力のもと、ユーザーサポートに向けたデータ処理や解析ソフトウェアの開発、検出器の応答関数やバックグラウンド等の較正データベースの整備を行った。また、「ひと

み」のサイエンスを検討し観測計画を立案するために、ハードウェア・ソフトウェアを作る人々と、それ以外のさまざまな形でこの計画へ貢献して下さる人たちを合わせることで「ひとみ」コラボレーションが組織された。その人数は大学院生を別として約220名である。半年に1回サイエンス会議を開催し、ハードウェアとソフトウェアを含めた進捗状況を報告するとともに、期待されるサイエンスや試験観測のターゲット選定などを議論した。サイエンス会議は打ち上げ後も含めると全16回、うち5回は海外で開催した。そこでの議論を基にして、「ひとみ」から期待されるサイエンスをシミュレーションなどに基づいて議論するWhite paper 16編を執筆(2014年にarXivへ公開)したほか、試験観測を行う天体をチーム内で提案・評価し、ターゲットごとのチームを編成した。なおハードウェア・ソフトウェアの開発状況は、SPIE Conferenceの集録³⁾およびJATIS誌の論文として公開した。また、大学院生や若手研究者を対象とし、チーム内の専門家を講師として招くサマースクールを開催した。サマースクールは全6回、うち1回が外国開催である。サイエンス面から「ひとみ」計画をリードしてもらうために、NASA、JAXA、ESAはそれぞれ7、2、3名のサイエンスアドバイザーを選出し、上記のサイエンス活動では大きな力を発揮していただいた。なお、JAXAから選出されたのは、嶺重慎、北山哲のお二人である。

試験観測の計画立案といったサイエンスの議論を、衛星製作に忙しい人たちを巻き込んでチーム全員の参加のもとに進められるよう、かなり気を配った。結果として、ハードウェアの性能だけでなくキャリブレーションやバックグラウンド評価などにチーム全員が厳しい意見を出し、それは「ひとみ」が信頼できる科学成果を出すうえで大きな力になったと考えている。一方で、「ひとみ」コラボレーションのメンバーは一定のルールのもとに認定したものの、200名を超えるメンバーの

寄与の度合いには濃淡があったことも事実である。衛星の異常事象の後、限られた数の科学論文をまとめる段階では、かなり厳しい議論をしなければならなかった。

6. さいごに

「ひとみ」は打ち上げ後わずか1ヶ月ほどで通信が途絶し、その1ヶ月後には運用を断念するという決断に至った。異常回転により太陽電池パドル機能を失った可能性が高く、衛星の機能回復は望めないという判断であった。打ち上げに至るまで日本天文学会の皆様にも多大なご支援をいただいたことにお礼を申し上げるとともに、本来の使命を全うさせることができなかったことについては心からお詫びをさせていただく。その後、JAXAとNASAを中心とする人々の努力により、マイクロカロリメータ検出器とCCD検出器を搭載するX線天文衛星XRISM計画が立ち上がり、2021年度の打ち上げをJAXAが提案し製作が進められている。その科学目的は、宇宙の構造形成と銀河団の進化の研究、宇宙の物質循環の歴史の

探求、宇宙のエネルギー輸送と循環の解明、超高分解能X線分光による新しいサイエンスの開拓である。高精度のX線分光がどれほど強力であるかは「ひとみ」の結果が示してくれた。XRISMによって世界のX線天文学は疑いなく新たな段階に入ることになるだろう。一方で、硬X線望遠鏡や軟ガンマ線での偏光観測などはXRISMでは実現されないため、将来に向けてさらなる努力を続け、日本が硬X線・ガンマ線観測の分野でも世界に貢献し続けることを願っている。XRISMで再挑戦を始める日本のX線天文学へのご支援をお願いするとともに、今度こそ日本の主導で、ダイナミカルに進化する宇宙の姿の全体像が解明されることを期待し、本特集の巻頭言とさせていただきます。

参考文献

- 1) <https://arxiv.org/html/1412.2351> (2019.2.7)
- 2) Takahashi, T., et al., 2018, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 021402
- 3) Takahashi, T., et al., 2016, SPIE, 9905, 99050Uおよび同じ巻の多数論文。