

「ひとみ」搭載軟X線分光検出器SXS

藤本 龍一

〈金沢大学理工研究域数物科学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町〉

e-mail: fujimoto@se.kanazawa-u.ac.jp



ひとみ衛星搭載SXSはX線マイクロカロリメータを用いた軟X線精密分光器で、日米欧国際協力によって開発された。断熱消磁冷凍機と液体ヘリウムによりセンサを温度0.05 Kの極低温に冷却し、ジュールトムソン冷凍機と2段式スターリング冷凍機でヘリウムタンクの周囲を冷却することで30リットルの液体ヘリウムを軌道上で3年以上保持する。軌道上でエネルギー $E \sim 6$ keVのX線に対してエネルギー分解能 $E/\Delta E \sim 1,200$ を実現し、ペルセウス座銀河団の観測ではその性能を発揮して、精密X線分光観測による新たな世界を垣間見せた。

1. はじめに

1990年代、X線CCDカメラがあすか衛星等に搭載されて宇宙観測に使用されるようになり、エネルギー $E \sim 6$ keVのX線に対して $E/\Delta E \sim 50$ のエネルギー分解能を実現できるようになった。これによって水素状・ヘリウム状の $K\alpha$ 輝線 ($Ly\alpha$, $He\alpha$ 輝線) を分解できるようになり、鉄の $K\alpha$ 輝線を使って数千 km s^{-1} の運動を調べられるようになった。しかしながら、輝線の微細構造を分解し、さらに銀河団ガス等の運動を調べるには、もう1桁優れた分光性能が必要である。チャンドラ衛星やニュートン衛星には回折格子が搭載され多くの成果を上げているが、回折格子は検出効率が低く、また広がった天体の観測は苦手である。

X線マイクロカロリメータはX線光子1個のエネルギーを素子の微小な温度上昇として測定するX線検出器であり、0.1 K以下の極低温で動作させることで $E/\Delta E \geq 500$ の高いエネルギー分解能を実現する^{1), 2)}。回折格子と違って広がった天体を観測しても性能が劣化しないことから、宇宙観測用の精密X線分光検出器として期待されている。X線マイクロカロリメータの開発は1980年代に

米国で始まり、日本のASTRO-E/ASTRO-E2計画にX線分光検出器XRS (X-Ray Spectrometer) として、NASAとの国際協力で搭載されることになった。X線マイクロカロリメータではセンサを極低温に冷却するために大掛かりな冷却装置が必要となる。XRSでは、液体ヘリウムで温度 ~ 1 Kの熱浴を作り、断熱消磁冷凍機と組合せてセンサを0.06 Kに冷却する。センサの寿命は液体ヘリウムの量で決まってしまうので、液体ヘリウムをなるべく長持ちさせることが重要となる。ASTRO-E XRSではヘリウムタンクの周りを固体ネオンで囲い³⁾、ASTRO-E2 XRSではさらに固体ネオンの周りのシールドを1段式スターリング冷凍機で冷却することで、30リットルの液体ヘリウムを軌道上で2-3年以上保持する計画であった。しかしながら、ASTRO-E衛星は打ち上げに失敗し、ASTRO-E2(すざく)衛星では軌道上で較正用の6 keVのX線に対してエネルギー分解能 $E/\Delta E = 850$ (半値全幅7 eV) を達成したものの⁴⁾、液体ヘリウムの排気に設計上の問題があって打ち上げ1か月で液体ヘリウムが失われ、観測を行なうことができなかった⁵⁾。

2. ひとみSXSの設計

ASTRO-E2衛星で実現できなかったX線マイクロカロリメータによるX線観測は、ASTRO-H衛星の観測装置の一つ軟X線分光検出器SXS(Soft X-ray Spectrometer)に託されることになった⁶⁾。SXSに要求される主な性能は、エネルギー帯域0.3–12 keV、6 keVでのエネルギー分解能 $E/\Delta E \geq 850$ 、視野2.9分角以上、寿命3年以上である。XRSと同様、開発はJAXA宇宙科学研究所とNASAを中心とする日米国際協力が進められ、日米の多くの大学・研究機関が関わった。米国がセンサ、X線入射部(薄いフィルタを含む)、断熱消磁冷凍機とその制御装置、アナログ信号処理装置を、日本が室温からヘリウムタンクまでの冷却装置(機械式冷凍機を含む)とその駆動装置、デジタル信号処理装置、アナログ信号処理装置用の低ノイズ電源等を担当した。機械式冷凍機を含む冷却装置とその駆動装置は住友重機械工業、デジタル信号処理装置は三菱重工業、アナログ信号処理装置用の低ノイズ電源等はNECが、それぞれ設計・製作を行なった。また、新たに欧州宇宙機関(ESA)とオランダ宇宙研究所(SRON)他の欧州の研究機関が参画し、フィルタホイール、小型X線発生装置、冷却装置の一部を担当した。筆者はJAXA宇宙科学研究所から金沢大学に移り、SXSのサブリーダーの1人として、主に冷却装置の開発に取り組んだ。

SXSでは、XRSの設計を踏襲しつつ、XRSの不具合と経験を踏まえていくつか大きな変更・改良を加えている。センサはASTRO-E2 XRSと同じ6×6アレイであるが、焦点距離が長くなったことに合わせて画素サイズをXRSより大型化している(図1)。受光部分の大きさはアレイ全体でおおよそ5 mm角で、約3分角の視野をカバーする。XRSでは0.06 Kであった動作温度を0.05 Kに下げたことと、センサの製作プロセスの改良により、分光性能はXRSより向上している。また、小型X

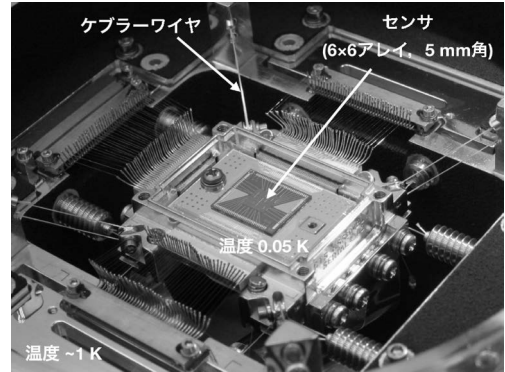


図1 SXSセンサ部。センサを含む温度0.05 Kの領域を温度 ~ 1 Kの領域から細いワイヤで吊り下げる構造になっている。NASA提供。

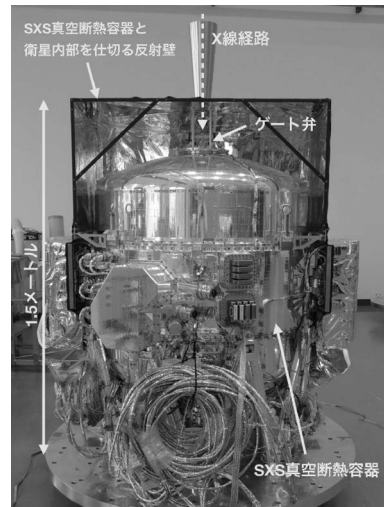


図2 SXS冷却装置外観(真空断熱容器)。JAXA提供。

線発生装置を搭載して、軌道上でのセンサのゲイン変動をより正確に追跡できるようにした。最も大きな変更箇所は冷却装置である(図2, 3)。XRSの不具合を踏まえて、SXSでは日米のインタフェースを変更し、室温からヘリウムタンクまでを日本側が担当して一括して責任を持つこととした。また固体ネオンの使用をやめて、日本が優れた技術と実績を持っている機械式冷凍機(ジュールトムソン冷凍機、2段式スターリング冷凍機)を採用し、軌道上で3年以上液体ヘリウムを維持できるようにした⁷⁾。さらに、万が一XRSのように

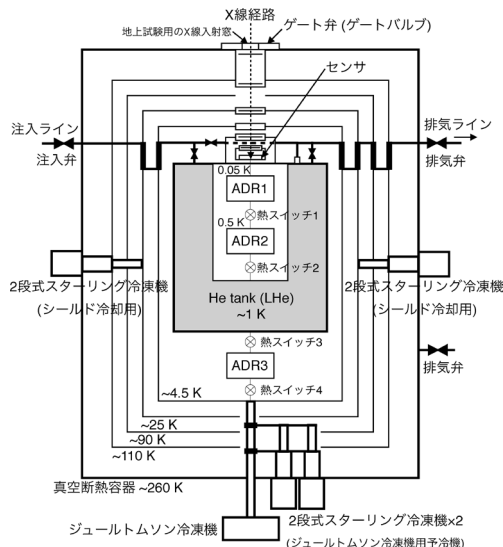


図3 SXS冷却装置の模式図。ジュールトムソン冷凍機と2段式スターリング冷凍機でヘリウムタンクの周りのシールドを冷却する。ADR 1-3は3段の断熱消磁冷凍機を示す。

液体ヘリウムが失われてしまった場合であってもセンサの冷却が行なえる設計とすることとした。このため、断熱消磁冷凍機を3段式とした。SXS冷却装置の総重量は約300 kgであり、機械式冷凍機の運転に約500 Wの電力を必要とする。いずれも小型衛星1基分に匹敵する規模である。

3. 製作・試験

SXSでは冷却装置をXRSから大きく変更したため、センサを含む完全な試作モデルを製作して設計検証を行なった。試作モデルの製作は2010年から開始し、2012年にセンサを含む冷却装置が完成して試験を開始した。その結果、冷却装置の外壁(真空断熱容器)に搭載した2段式スターリング冷凍機の微小振動がセンサの性能を劣化させるという重大な問題が判明した。SXSチームメンバーの一部を含む専門家チームを設置して対策を検討し、新たに微小振動アイソレータを導入することを決めた。既に衛星を含めて設計が固まっていたために種々の制約があり、その下でのアイソレータ開

発は困難を極めたが、最終的には解決することができた。詳しくは参考文献8)を参照頂きたい。

フライトモデルの冷却装置の製作は2014年9月に終了し、2014年10月から2015年3月にかけて冷却装置とそれ以外のフライト機器を順次噛み合わせてSXSとしての試験を実施した。2015年4月には衛星に搭載され、2015年11月まで衛星システムレベルでの試験を実施した。この間も様々なトラブルが発生したが、その都度日米のチームで議論を重ねて対応策を検討し、対処した。

SXSの冷却装置やセンサの試験では、機械式冷凍機を動作させて冷却を続けなければならない、週末も含めて24時間ずっと監視が必要である。XRSでも同様の苦労はあったが、機械式冷凍機を主とするSXSでは試験手順が複雑で監視項目や作業量が多かったため、試験期間中の人員確保等、チーム体制の維持が格段に大変であった。しかしながら多くの若手研究者と大学院生の協力のおかげで、大きな問題なく試験を遂行することができた。

4. 射場作業と打ち上げ後

液体ヘリウムを使用するミッションでは、打ち上げ直前にヘリウムタンクを超流動状態の液体ヘリウムで満液にするという作業が欠かせない。その作業は事前に調整した上で、ロケット側作業の合間を縫って行なうことになる。打ち上げの8日前から冷却開始、5日前に超流動液体ヘリウムの充填を行なった。実際には打ち上げが1度延期され、2週間以上、2チームで24時間態勢を維持することとなった。衛星、ロケット、射場の各チームの支援も受け、結果的に大きな問題もなく実施することができたものの、大変なオペレーションであった。

打ち上げ後のSXSのオペレーションは順調であった⁹⁾。初日から予定通り冷凍機の立ち上げを開始し、打ち上げ5日後にはセンサ温度が0.05 Kに到達した。宇宙線の影響により分光性能は若干劣化したものの、これは打ち上げ前から折り込み

済みであり、軌道上で較正用 6 keV の X 線に対して $E/\Delta E \sim 1200$ (半値全幅で 5 eV) の性能を実現した。打ち上げ後 2 週間程度で液体ヘリウムの温度も安定し、ゲート弁に取りつけられた X 線入射窓 (ベリリウム窓) 越しにペルセウス座銀河団をはじめ、いくつかの天体を観測することができた。それらの結果については、本特集の当該記事を参照されたい。半値全幅 5 eV の分光性能でケイ素から鉄・ニッケルまでの K 輝線を含むスペクトルデータを取得できたことは画期的な成果であり、X 線天文学は新たな時代に入ったと言ってよいであろう。

しかしながら、いよいよゲート弁を開いて SXS の真の性能を発揮するというその直前に、衛星の異常事象が発生し運用断念に至った。正式にプロジェクト化されてから数えても 8 年近い歳月をかけて取り組んできたものが失われてしまったことは痛恨の極みである。特に、SXS を使った観測の実現を目指して、貴重な研究時間を割いて一生懸命頑張ってくれた若手研究者にとっては、これから自分たちの本当の研究が始められるというタイミングでその機会を失ってしまったことになる。その後グループを離れざるを得なかった人も多い。SXS のサブリーダーの 1 人として申し訳ないという思いでいっぱいである。観測装置開発の観点からは、ゲート弁を開いて SXS の最終性能を確認することができなかったことが特に悔やまれる。

5. XRISM に向けて

我々にとって大変ありがたいことに、X 線分光撮像衛星 (XRISM) 計画が JAXA と NASA 主導のミッションとしてスタートし、SXS と同等の X 線マイクロカロリメータ分光検出器が搭載されることになった。ASTRO-E 計画からずっと NASA 側のリーダーを務めている Kelley 博士により、この観測装置は “Resolve” と名付けられた。スペクトルを高精度で分解するこの装置にふさわしい名前であり、同時に決意、不屈という意味が開発チー

ムメンバの気持ちを表している。

XRISM では、ひとみ衛星の技術的教訓、マネージメント上の教訓をしっかりとおさらいし、それを反映させるところから始めた。プロジェクトの体制や運営方法が見直され、各開発フェーズで達成すべき項目をひとみ衛星の時よりもより厳格に審査・確認して進めている。試験計画・態勢は SXS での大きな課題の 1 つであったが、これについても Resolve では段階的に立案を進めており、研究者以外の人材も積極的に活用して適材適所で試験を実施する態勢にする方針である。Resolve を確実に実現すべく取り組んでいるところであり、暖かく、厳しく、見守って頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) Moseley, S.H., et al., 1984, J. Appl. Phys., 56, 1257
- 2) Stahle, C.K., et al., 1999, Physics Today, 52, 32
- 3) 満田和久, & 藤本龍一, 2000, 日本物理学会誌, 55, 340
- 4) Kelley, R.L., et al., 2007, PASJ, 59, S77
- 5) <http://www.isas.jaxa.jp/j/snews/2006/0126.shtml> (2019.4.1)
- 6) Kelley, R.L., et al., 2016, Proc. SPIE, 9905, 99050V
- 7) Fujimoto, R., et al., 2017, J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., 4, 011208
- 8) Takei, Y., et al., 2017, J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., 4, 011216
- 9) Tsujimoto, M., et al., 2017, J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., 4, 011205

High-resolution Soft X-ray Spectrometer (SXS) onboard Hitomi

Ryuichi FUJIMOTO

Faculty of Mathematics and Physics, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan

Abstract: The Soft X-ray Spectrometer (SXS) is the high-resolution X-ray microcalorimeter spectrometer onboard Hitomi, and was developed by Japan, the US, and Europe collaboration. The sensor is cooled to 0.05 K by an adiabatic demagnetization refrigerator and liquid helium. The expected lifetime is ≥ 3 years, by using mechanical cryocoolers. It achieved $E/\Delta E \sim 1200$ in orbit. Perseus cluster was observed, which gave us a glimpse of a new world of high-resolution X-ray spectroscopy.