

「ひとみ」衛星の X線光学システム

粟木 久光¹

石田 學²

岡島 崇³



粟木



石田



岡島

〈¹愛媛大学大学院理工学研究科数理物質科学専攻 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5〉

〈²宇宙科学研究所 (JAXA) 宇宙物理学研究系 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

〈³NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA〉

e-mail: ¹awaki@astro.phys.sci.ehime-u.ac.jp, ²ishida@astro.isas.jaxa.jp, ³Takashi.Okajima@nasa.gov

「ひとみ」衛星には0.2 keVから80 keVまでをカバーする3種類の位置検出型のX線検出器が搭載されている。本稿では、これらの検出器での集光，撮像を可能にするX線望遠鏡，それを搭載する光学ベンチ，光学ベンチの軌道上での変形をモニタするアラインメントシステム，およびそれらの軌道上での性能を含む，「ひとみ」衛星のX線光学システム全般について解説する。

1. X線光学システムの概要

「ひとみ」衛星には10 keV以下のエネルギー帯域をカバーする軟X線精密分光システム，軟X線撮像分光システムと，10 keV以上のエネルギー帯域をカバーする硬X線撮像分光システムの3種類の撮像分光機器が搭載されており，軟X線系と硬X線系では5.6 mと12 mという異なる焦点距離のX線望遠鏡が採用されている。これらの異なる光学系を搭載し，所定の指向性能を保証するのが光学ベンチである。本稿では硬軟2種類のX線望遠鏡，およびこれらを搭載する光学ベンチからなる「ひとみ」衛星のX線光学システムについて解説する。

図1に「ひとみ」衛星のX線光学システムの全景を示す。軟X線望遠鏡 (SXT: Soft X-ray Telescope)^{1,2,3} 2台と硬X線望遠鏡 (HXT: Hard X-ray Telescope)^{4,5} 2台は固定式光学ベンチ (FOB: Fixed Optical Bench)⁶ の先端にあるトッププレート上に搭載されている。このうち軟X線分光検出

器 (SXS: Soft X-ray Spectrometer) に使用されるSXT-SはSXS デュワー内部での検出器の位置が高いため，軟X線撮像検出器 (SXI: Soft X-ray Imager) に使用されるSXT-I，および2台の硬X線望遠鏡よりも1 mほど高い位置に取り付けられている。HXTは焦点距離が12 mと長いため，衛星の全長は14 mにも達する。このサイズの衛星はH-2Aのフェアリングに収納できないため，「ひとみ」衛星では硬X線撮像検出器 (HXI: Hard X-ray Imager) を搭載して軌道上で伸展する伸展式光学ベンチ (EOB: Extensible Optical Bench)⁶ を採用することとした。FOBとEOBは独立に製作し，完成後に衛星下部構造に組みつけた。

本稿は3名による共著であるが，§3のSXTは主に岡島が，§4のHXTは主に粟木が，残りの部分は主に石田が担当した。

2. 光学ベンチ

「ひとみ」衛星の光学ベンチはFOB, EOBを併

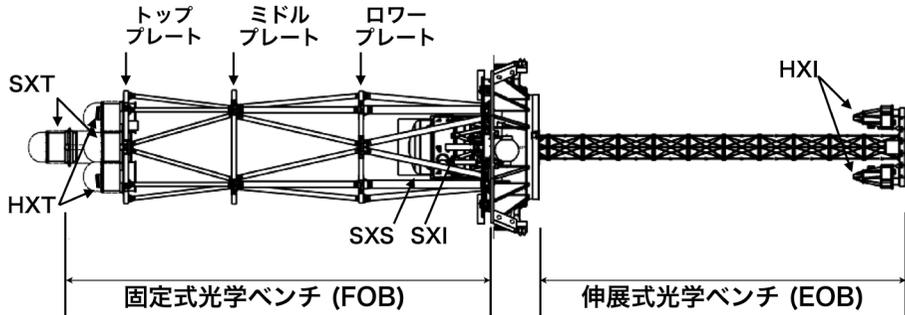


図1 「ひとみ」衛星のX線光学システムの全景。

せて全長14 mにも及ぶ。この大きさは日本の科学衛星としては群を抜いて過去最大である。これら光学ベンチは日本飛行機株式会社（以下、日飛）が中心となって開発された。ただし、設計の随所に過去のX線天文衛星での経験による改善や宇宙科学研究所（以下、宇宙研）の工学研究者の叡智が盛り込まれている。また、製品の試験の多くは宇宙研主導のもとに宇宙研の機械環境試験施設や熱真空槽、日飛の工場で行われた。最も困難を極めたend-to-endのアライメント試験と調整のシステムは衛星開発主体でありエンド・ユーザでもある宇宙研のX線天文グループが案出し、工学研究者の多大な支援を受けて宇宙研、日飛、システムメーカーであるNECの三者共同で実施した。その成果は高く評価され、ASTRO-H「ひとみ」アライメントチームに対して2017年3月に日本機械学会宇宙工学部門から部門一般表彰である「スペースフロンティア」賞が授与された。

2.1 FOB

図1に示すとおり、FOBはトップ、ミドル、ローの3枚のプレートを炭素繊維強化プラスチック（CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic）製のチューブで組み合わせたトラス構造体である。3枚のプレートはそれぞれ厚さ70 mmであり、軽量化のためアルミニウム製のハニカムコアを持つCFRPのサンドイッチ板となっている。3枚のプレートとチューブはアルミニウム製のチューブ・フィッティングと呼ばれる部材で結合されてい

る。軌道上での熱入力によるFOBの長手方向の伸縮や横方向への倒れを防止するため、チューブのCFRPは熱膨張係数が負になる（温度が上がると縮む）ように繊維の配向が工夫されており、チューブ・フィッティングの正の熱膨張係数と相殺してFOBの長手方向が全体として0.1 ppm程度以下の線膨張係数に収まるようになっている。この線膨張係数はアルミニウムの1/100以下である。

FOBの上にはX線遠望鏡の他にも以下のような機器が搭載されている。

- スタートラッカ（STT）：天球座標を基準として衛星の姿勢や観測系の指向方向を計測するために、トッププレート上に2台の異なる方向を向いたSTTが搭載されている。STTは「あすか」や「すざく」ではそれぞれ衛星下部構造や側面パネルに搭載されていたが、軌道上での衛星構体の熱歪みの変動のために指向方向の制御やオフラインの姿勢決定に30秒角以上の誤差が乗ってしまっていた。「ひとみ」衛星ではHXTのvignetting制約から来る指向方向制御の要求が厳しいこともあり、過去の経験を活かしてSTTをトッププレート上に搭載することとした。
- アライメントモニタ発光・計測部（CAMS-LD）：光学ベンチは全長で14 mにも達するため、end-to-endでのアライメントを定常的にモニタするためにCAMS（Canadian Astro-H Metrology System）⁷⁾を導入した。CAMSは、

発光・計測部の CAMS-LD とターゲット部の CAMS-T で構成される。このうちの CAMS-LD がトッププレートの望遠鏡群と反対側の面に搭載されている。

FOB 上にはこの他にも、SXS への入射 X 線強度を調整するためのフィルタホイール (FW)、サンシェードや断熱材、X 線迷光を防ぐための X 線シールドや電気計装など、さまざまな付属品が搭載されているが、紙面の都合上ここでは割愛する。

2.2 EOB

EOB は硬 X 線撮像分光システムの検出器である HXI を搭載する HXI プレートを HXT の焦点距離 12 m の位置に保持するための伸展式構造物であり、伸展マスト、キャニスタ (マスト繰出し機構)、保持構造、熱制御材により構成される。伸展マストは多関節型の伸展/収納可能なマストで、軽量・高収納効率でありながら伸展後には高い強度/剛性を有することを特長とする。伸展マストは打ち上げ時には HXI プレートごと衛星下部構造に収納され、打ち上げ後に 5.7 m ほど伸展して、HXT の焦点距離 12 m の位置に HXI を保持する。

図2に伸展中のマストの様子を示す。マストは横材 (バテン)、縦材 (ロンジロン)、及び斜材 (ダイアゴナルロッド) で構成される折り畳み式トラス構造体である。横材は縦材および斜材とヒンジで結合される。縦材は中央部にヒンジがあり、収納時はヒンジ部で折りたたまれる。伸展時はロック機構によりヒンジ部が折りたたまれないように固定される。斜材は相互にスライドする2本のチタン合金製ロッドから構成され、伸展時には張力がかかり、マストに剛性を与える役割を持つ。伸展マストは23ステージからなり、上段から順番にキャニスタから繰り出される。その際に斜材の張力で形状が最終状態に固定される。縦材の熱変形はHXT-HXI間の距離の変動やHXI上の結像位置の変動に直結するため、線膨張係数の小さいCFRPで製作されている。さらに、3本の縦材が直射日光に曝されないようにするため、

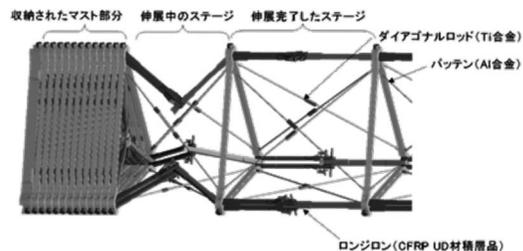


図2 伸展中のEOBマストの様子。

マスト全体をアルミ蒸着ユーレックスフィルムでできたマストブーツで覆っている。

EOBの先端に搭載されているHXIプレートには、HXIの他に、前節で紹介したCAMSのターゲット部 (CAMS-T) が搭載されている。CAMSの機能は次節で紹介する。

2.3 CAMS

「ひとみ」衛星は近地球軌道を周回し、一日に15回、日陰と日照を繰り返す。また、観測方向は全天球方向に亘るため、衛星の様々な方向から太陽光を浴びることになる。このような状況では光学ベンチに設計・製造段階では想定していなかった熱歪みが発生し、軌道上での指向精度が保障できない可能性が考えられた。そこでプロジェクトチームでは、カナダ宇宙庁 (CSA: Canadian Space Agency) と協力して光学ベンチの軌道上での歪みをモニタするためのシステムとしてCAMSを開発し、「ひとみ」衛星に搭載することとした。

CAMSはFOBトッププレートとHXIプレートの間でレーザー光を飛ばし、FOBトッププレートに対するHXIプレートの光学ベンチ機軸垂直方向の位置をリアルタイムで計測するためのシステムであり、観測終了後にオフラインで光学ベンチの揺れによるHXIでの天体像の歪みを補正することを目的としている。その原理を図3に示す。トッププレートの下面 (検出期側) に搭載されているCAMS-LDからHXIプレートに向けてレーザー光を打ち出す。ミドル、ロープレートや衛星下部構造には、光路を中心として直径70 mmの穴が開けてある。この光はHXIプレート上に設けられた

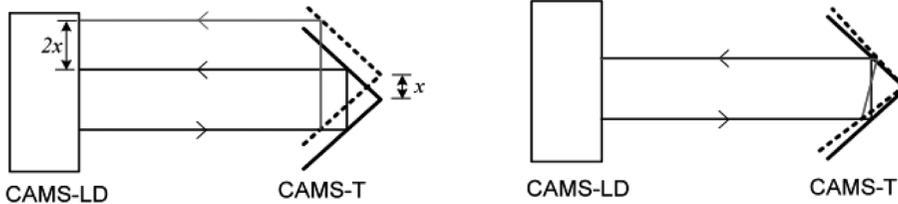


図3 CAMSのアラインメント計測の原理.

CAMS-T内部のコーナーキューブで反射されてCAMS-LDに戻り、CMOS検出器で検出される。図3左に示すとおり、HXIプレートが機軸垂直方向に x だけ動いた場合、CAMS-LD上では移動量 $2x$ として検出される。コーナーキューブは入射方向に依らず入ってきた光を真逆の方向へ反射する(180°折り返す)という性質を持つ。従って図3右のように、CAMSはHXIプレートの傾きには感度を持たない。HXIプレートが非現実的に大きく傾かない限り、HXIで得られた像を再構成する際にはHXIプレートの傾きが問題になることはない。CAMSのシステムはHXIプレートの横方向の移動量だけに感度を持つという点で、目的にかなったシステムと言える。

CAMSは、HXIプレートの並進と光学ベンチ機軸回りの回転を検出するために、2台が搭載されている。CAMsは軌道上で正常に動作し、1日程度の同一ターゲットの観測期間中を通じてのHXIプレートの揺れが 0.4 mm 程度以下であることを見いだした。これは 12 m の焦点距離では7秒角に相当する。このことから、「ひとみ」衛星のEOBが極めて高い指向方向制御精度を有していることが証明された。

3. SXT

SXTは「ひとみ」衛星の軟X線望遠鏡で、SXSとSXI用にそれぞれ1台ずつ搭載されている。SXTはアルミ基板を用いた多重薄板型X線望遠鏡で、NASAのGoddard Space Flight Center(GSFC)で開発された。この多重薄板型X線望遠

鏡は1980年代にGSFCのPeter Serlemitsos博士によって考案、開発されたもので、スペースシャトルのミッションAstro-1で初めて宇宙で使用された(BBXRT: Broad Band X-Ray Telescope)。その後、Serlemitsos博士と故・田中靖郎教授の出会いがきっかけで日本の衛星「あすか」に搭載されたあとは日本のX線天文衛星で活躍することになり、「あすか」、ASTRO-E、「すざく」、「ひとみ」と5つの衛星計画で採用され、これまでに合計18台が宇宙を飛んだ。「ひとみ」衛星の望遠鏡は17台目と18台目である。そのすべてがNASA GSFCにおいてほぼインハウスで製作された。

X線は可視光などの光とは異なり、鏡面に垂直に入射したX線は反射せず、表面内部に侵入してしまう。これは、X線の振動数が非常に高いため、鏡面物質(原子、分子)がその振動に 응답できないからである。また、物質のX線に対する屈折率を定義すると、その値は1より小さくなる。そのため、X線が反射鏡面にすれすれに入射(斜入射、典型的に鏡面から測った入射角度が数度以下)すると全反射を起こす。この性質を利用してX線を反射、集光することが可能である。X線望遠鏡の光学系は斜入射光学系となり、一般的にはウォルター1型が採用されている。図4に示すように、ウォルター1型光学系は回転放物面と回転双曲面を共焦点状に組み合わせ配置し、筒のような構造をしている。X線は筒の内面であるそれぞれの鏡面で一度ずつ反射、2回反射して焦点面に集光、結像される。2回反射は結像するために必要である(アッペの正弦条件)。図4からもわか

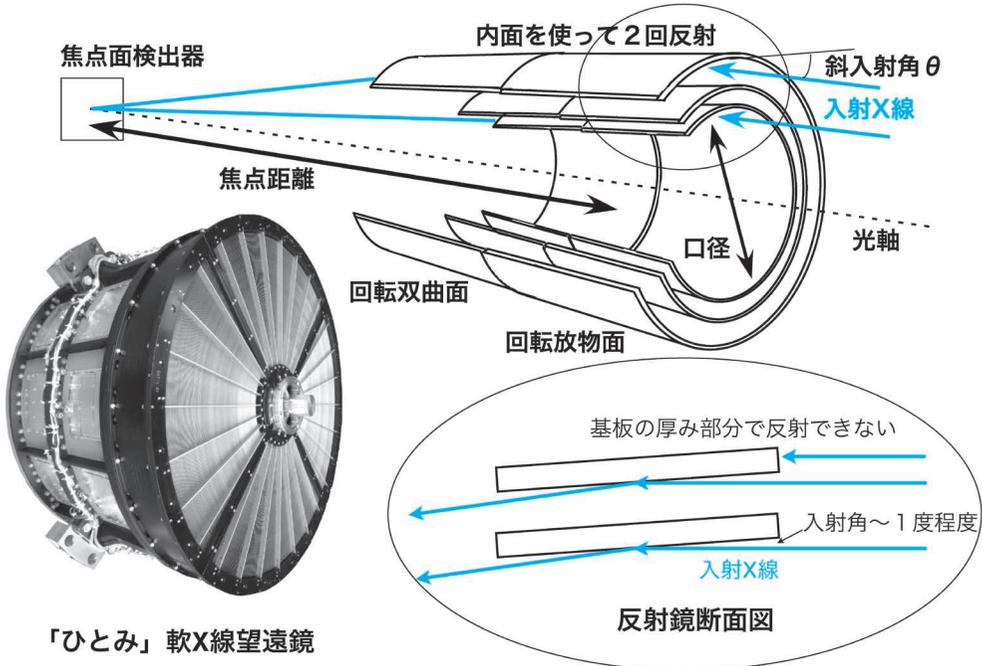


図4 ウォルター1型斜入射光学系と「ひとみ」軟X線望遠鏡.

るように、斜入射光学系では反射鏡面の見込みの面積が非常に小さい。これに対して天体からの光は非常に微弱である。そこで、天体観測用途のX線望遠鏡ではこの筒状の反射鏡を同じ点に焦点を結ぶように何層にも入れ子（ネスト）にして合計の面積を大きくする工夫をしている。現代のX線望遠鏡の開発は与えられた制約条件の中で（重さ、サイズ、予算など）このウォルター1型の反射鏡形状をいかに忠実に再現するか、ということに集約される。また、図4にも示すように、基板の厚みはそのままデッドスペースとなってしまう。光の集光効率を落とすことになるため、基板は薄い方が効率よくX線を集めることができる。

世界の代表的なX線望遠鏡を表1にまとめた。この3つの望遠鏡は違う方法で作られており、それぞれ長所、短所があり、プロジェクトの制約や目指すサイエンスによって選ぶことになる。アメリカのチャンドラ衛星のX線望遠鏡は基板を直接研磨することによってウォルター1型の形状を出

来るだけ正確に再現した。そのために結像性能にすぐれている。ヨーロッパのXMMニュートン衛星の望遠鏡は基板ではなく反射鏡母型の方を研磨し、その母型の上に基板を成長させる方法をとった。これにより基板を比較的薄くすることができ、結像性能と有効面積のバランスの取れた望遠鏡である。「ひとみ」衛星に搭載された望遠鏡はコストを下げるために研磨をしていない。また、基板の厚みを極端に薄くし、光の集光効率を最大限に高めている。そのためコスト、サイズ、重さのわりに有効面積が大きい。「ひとみ」衛星の精密分光装置など空間分解能よりも高集光効率を必要とする装置、またコストや重量制限が厳しい場合、アルミ基板を用いた多重薄板型X線望遠鏡がベストである。

「ひとみ」の軟X線望遠鏡（図4）は「すぎく」衛星の望遠鏡とほぼ同じ設計だが、口径が少し大きく（45 cm）焦点距離も少し長い（5.6 m）。反射鏡は半径約6 cmから22.5 cmまでの間に203枚

表1 軟X線望遠鏡諸元比較(費用は目安).

衛星名	ひとみ	チャンドラ	XMMニュートン
口径	45 cm	120 cm	70 cm
焦点距離	5.6 m	10 m	7.5 m
基板の厚み	数cm	数mm	数百 μm
ネスト数	203	4	58
1.5 keV有効面積	590 cm ²	770 cm ²	1,475 cm ²
6 keV有効面積	400 cm ²	300 cm ²	940 cm ²
結像性能	72"	0.5"	15"
重量	36 kg	950 kg	440 kg
単位重さあたり有効面積(1.5 keV)	16 cm ² /kg	0.8 cm ² /kg	3.4 cm ² /kg
費用	数億円	数百億円	数百億円

ネストされている。また、反射鏡は円周方向に4つに分けて作られ、放物面と双曲面も別々に作られる。そのため、1台の望遠鏡には $203 \times 4 \times 2 = 1,624$ 枚の反射鏡が含まれることになる。結像性能向上のために、「ひとみ」では製作工程でいくつかの変更を行った。アルミ基板は $1 \mu\text{m}$ 以下の形状精度で作成されたアルミ母型にロールしたアルミシートを11枚積層し押し当てられて、約 200°C で熱成形される。アルミ母型は円錐形状で、基板はウォルター1型の放物面と双曲面を円錐近似した形になる。この母型は203種類の半径をカバーするために71サイズ用意し、「すぎく」よりも約3倍多く用意した。これにより円錐の母線角度と半径がより一致する。また、基板の厚みも「すぎく」の 0.15 mm の1種類だけではなく、基板の半径によって $0.15, 0.22, 0.30 \text{ mm}$ の3種類を使用した。半径の大きいものほど基板が歪まないように厚くしてある。X線の反射鏡面はパイレックスガラスチューブの表面(粗さがオングストローム程度)に金を蒸着(厚み $0.2 \mu\text{m}$)し、さらにエポキシ接着剤をスプレーした後、アルミ基板をその上に置く。接着剤硬化後、アルミ基板を剥がすと金とガラスの間で剥がれ、金がアルミ基板上に転写される(エポキシレプリカ法)。この方法により研磨をすることなく薄いアルミ基板上にオングストローム程度のスムーズなX線反射面を作ることができる。この時、ガラスチューブの

形状は必ずしも正確な円錐形状をしておらず($P-V < 4 \mu\text{m}$)、エポキシの厚みが厚いとその形状まで反射鏡に転写されてしまう。「ひとみ」ではエポキシの厚みを $15 \mu\text{m}$ 程度まで薄くすることによって(「すぎく」は約 $25 \mu\text{m}$)反射鏡面の形状がなるべく基板自身の形状と一致するようにした。作られたこれらの反射鏡はくしの構造を持ったアライメントバー(もしくはサポートバー)と呼ばれる支持構造で望遠鏡ハウジング内部で保持される(図5)。反射鏡はくしの歯に挿入され、くしの歯の位置精度によって反射鏡の位置精度も決まる。「すぎく」ではこのアライメントバーの製造に問題があり、悪いもので $40 \mu\text{m}$ も位置がずれてしまっていた。「ひとみ」のくしの歯の位置精度は $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度に抑えられている。さらに、「ひとみ」では反射鏡をサポートバーに固着することによって反射鏡の位置決め精度を高めた(固着しないと $25 \mu\text{m}$ 程度の遊びを持つことになる)。また、望遠鏡ハウジングも構造上の強度をあげた。これらの他、SXTには迷光を抑えるためのプレコリメータと衛星搭載時のアライメントのためのリファレンスキューブミラー、さらに温度コントロールのための薄膜フィルム(サーマルシールド)が搭載されている。以上のSXTの開発において、心臓部となるウォルターI型ミラーの部分の設計とほぼすべての製造がNASA GSFCのインハウスで行われた。プレコリメータ

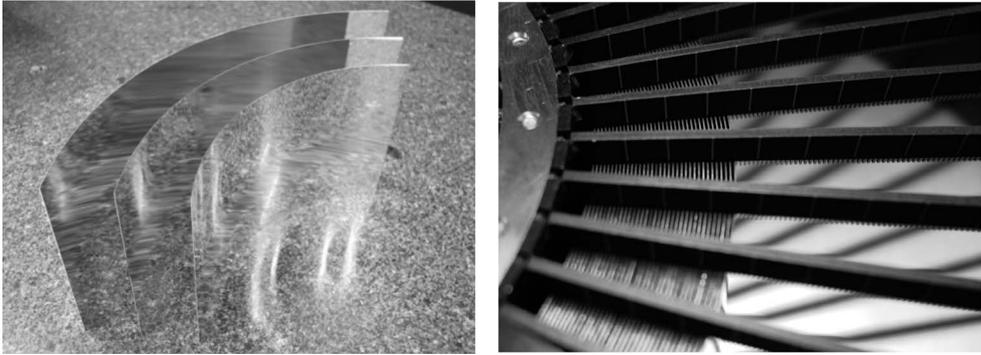


図5 金の反射鏡と望遠鏡ハウジングに挿入された反射鏡。

やサーマルシールドはそれぞれ宇宙研，名古屋大学が担当し，設計および実際の製造作業も行った。

完成したSXTの性能評価は宇宙研の30 m X線ビームラインで行われた。望遠鏡の有効面積，結像性能，視野など一通りの性能をいくつかのエネルギーごとに測定した。上に述べた変更によって，「ひとみ」の結像性能は「すざく」の約2分角から1.2分角と2倍近く向上した（10 keV以下で）。これは「ひとみ」ミッションの要求値1.7分角を大幅に上回った性能である。

図6にSXTのX線エネルギーごとの有効面積の状況をまとめる⁸⁾。SXTの有効面積はAl-K α (1.49 keV)，Ti-K α (4.51 keV)，Cu-K α (8.05 keV) でそれぞれ590 cm²，450 cm²，370 cm²程度で，「すざく」のX線望遠鏡のおよそ1.4倍になっている。結像性能が向上したため，スループットが「すざく」の75%程度から80%強に改善している。

世界の人々がチャンドラ衛星のX線写真を目にした今，約1分角という多重薄板型望遠鏡の結像性能はあまりに乏しいと感じるだろう。しかし，X線天文学を変えるかもしれない精密分光装置カロリメータの衛星ミッションを限られたリソースの中で可能にするのは，今の時点ではこの多重薄板型望遠鏡だけである。「ひとみ」代替機にも搭載されるこのX線望遠鏡の結像性能を少しでも改善したい。

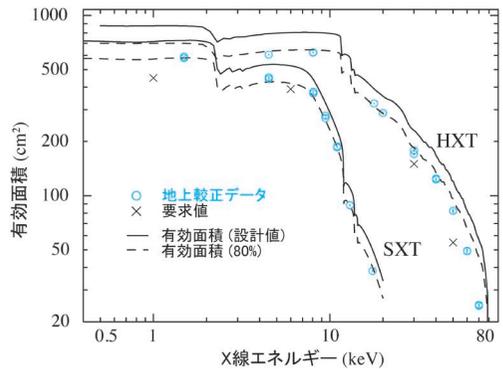


図6 SXTとHXTのエネルギーごとの有効面積。○が実測値，×が要求値，実線が完全な鏡面反射をする反射鏡が設計値通りの場所に配置されている場合に期待される有効面積の曲線，破線はその80%を示す。

4. HXT

HXTは「ひとみ」衛星の硬X線撮像分光システムの中で宇宙から飛来する硬X線をHXI検出器上に結像させる望遠鏡部にあたる。焦点距離は12 m，口径45 cmであり，2台搭載される。HXTの反射鏡基板には多層膜が成膜されており，全反射に加えて後述のプラグ反射を利用して，10キロ電子ボルト以上のX線に対して高い反射率を保つことが可能となった。この点が反射鏡基板に1種類の元素のみを成膜していた「すざく」衛星搭載X線望遠鏡等とは大きく異なる。多層膜成膜した望遠鏡を搭載した衛星は米国のNuSTAR衛

星に続いて2機目であり、HXTの結像性能はNuSTARに劣るものの30キロ電子ボルトのX線に対する有効面積は2倍近くになっている。最初にHXTの特長である多層膜について説明する。

4.1 多層膜スーパーミラー

多層膜とは電子密度の高い重元素の層とX線吸収率の低い軽元素の層を周期的に重ねたものである。ここで重ねた周期(以降、周期長) d の多層膜を考えてみる。この多層膜に斜入射角(反射面からの角度) θ でX線を入射させると、多層膜中の重元素の各層で反射が起こる。そして、各層からの反射光の位相が一致した時、大きな反射率が得られることになる。この時のX線の波長 λ は、結晶でのブラッグ反射と同様、 m を次数として次のブラッグの条件式を満足する。

$$m\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{ブラッグの条件式}) \quad (1)$$

X線天体からはさまざまなエネルギーを持つX線が放射されているため、広いエネルギー帯域で高い反射率が必要となる。そこで、反射面に近い浅い層では周期長が長く、深くなるにつれて周期長を短くした多層膜(多層膜スーパーミラー、英語ではdepth graded multilayerと呼ばれる)が開発された(図7参照)。周期長に幅を持たせたことで、反射するX線帯域に幅をもたせることが可能となった。ここで、深い場所での周期長を短くしているのは、短い波長のX線は長いものに比べて透過力が高いためである。この周期長を変えた多層膜技術は中性子反射光学系で始まり、1990年代半ばからX線光学への応用研究が始まった。日本では名古屋大学の故・山下広順教授が中心となり開発が進められ⁹⁾、気球実験を通して世界で初めてX線天体の撮像観測に成功している(InFOCUS気球実験¹⁰⁾)。実際のX線望遠鏡では斜入射角のより小さい内側の反射鏡でより高エネルギーのX線を反射する。これに対応してスーパーミラーのデザイン(周期長、積層数など)も反射鏡の半径ごとに変えて、望遠鏡がカバーするエネ

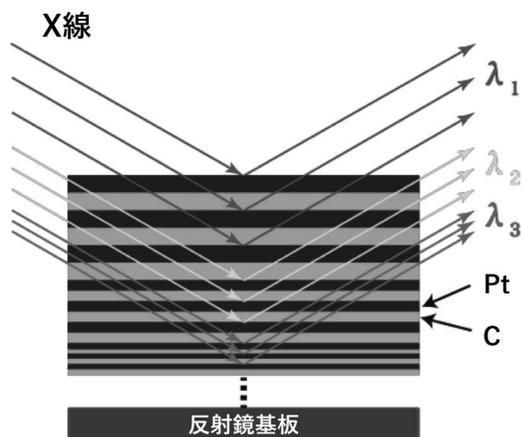


図7 多層膜スーパーミラーの概念図。表面から深くなるにつれ、Pt/Cの周期長が短くなる。HXTでの周期長は13~2 nmの範囲である。図中の λ はX線の波長を表し、 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ の関係にある。

ルギー範囲で最大の有効面積を持つように最適化する。実際、「ひとみ」衛星のHXTでは213層の反射鏡を半径ごとに14組に分けて、それぞれ別のデザインのスーパーミラーを成膜している¹¹⁾。

4.2 望遠鏡の構造

HXTの外観図を図8に示す。HXTは反射鏡を収めたミラー部の他に、視野外からの光(迷光)を除去するために配置されたアルミニウム薄板(プリコリメータ)、望遠鏡を保温する役割を持つ薄膜フィルム(サーマルシールド)、望遠鏡光軸の指標となるリファレンスキューブなどから構成される。ここではHXTの主要部分であるミラー部について説明する。

ミラー部は0.22 mm厚の薄い反射鏡を焦点距離12 mで結像するように213層同心円状に並べたものである。SXTと同様、多重薄板型望遠鏡である。反射鏡の総数は1,278枚あり、その表面積は「すばる」望遠鏡の主鏡の面積に匹敵する。この反射鏡の配置は図8の断面図に示すようにハウジングミラー部の上段、中段、下段に設置した櫛の歯状に溝の切られたバー(アライメントバー)の溝に反射鏡を差し込むことで行われる。

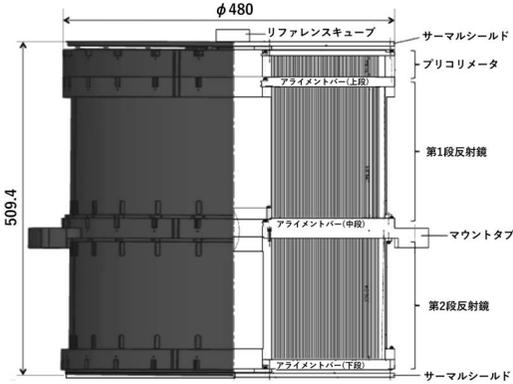


図8 HXTの外観図。右半分は断面図を表す。第1段と第2段反射鏡でミラー部を構成する。

すなわち、1段目の反射鏡（放物面に相当）は上段と中段のアライメントバーを使って、2段目の反射鏡（双曲面に相当）は中段と下段のアライメントバーを使って支持される。この2段の反射鏡で円錐近似したウォルター光学系が構成される。ハウジングの設計と製作は愛媛大学が担当した。アライメントバーは名古屋大学が設計し、実際の製造は株式会社オオイシに依頼した。放電加工を専門とするこの会社はアライメントバーの差し渡し160 mmの範囲に213個の溝を位置精度1 μm以下 (1σ) で刻むという驚異的な精度を達成した。

4.3 望遠鏡の製作

望遠鏡の製作は主に名古屋大学理学部U研で行われた。特に、合計4,000枚以上の反射鏡を2年半の期間で製作し、その中から2台分の衛星搭載用とスペア用の反射鏡を抜き出した。

望遠鏡の製造工程は主に反射鏡基板の成型、レプリカ法を用いた反射面の成膜、そして望遠鏡としての組み上げに分けられる。最初の反射鏡基板の工程では、0.2 mm厚のアルミニウム平板を扇型に切り出し、ロール成型と熱成形の2つの工程で円錐形状に成型する。次に、レプリカ法を使ってこの円錐形状の基板に表面粗さ0.5 nm以下の滑らかな面を持つ多層膜を成膜する。その工程を図9に示す。レプリカ法では表面が滑らかなうね

りの小さい円筒ガラス管をレプリカ用マンドレルとして用いた。このガラスマンドレルを洗浄した後、DCマグネトロンスパッタリング装置でプラチナ (Pt) / 炭素 (C) の多層膜を成膜する。一方、円錐形状に成型した反射鏡基板には、反射面側にエポキシ系接着剤を20 μm厚で均一に塗布する。それを成膜したガラスマンドレルに真空中で圧着し、50°Cで14時間おき硬化させる。硬化後、ガラスマンドレルから反射鏡基板を剥がす（離型）ことで、ガラスマンドレル上に成膜された多層膜が反射鏡基板に転写され、多層膜が成膜された反射鏡となる。この工程を望遠鏡の内側から外側のすべての反射鏡で行う。

反射鏡はいくつかの品質確認を経て、最終的に合格したものがアライメントバーを使って、ハウジング内に配置される。ここで、アライメントバーの位置は結像性能に影響を与えることから、X線反射像を確認しながらμmオーダーで位置を調整した。その後、アライメントバーをハウジングに固定し、ミラー部分が完成する。プリコリメータを取り付けた望遠鏡の写真を図10に掲載する。

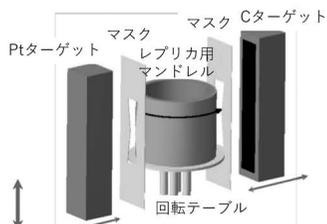
4.4 HXTの性能評価

HXTの性能評価は10キロ電子ボルト以上のエネルギーで平行度の高いX線が利用できる大型軌道放射光施設SPring-8の中尺ビームライン (BL20B2) で行なわれた¹²⁾。この評価試験で、望遠鏡が目標性能を満たしていることを確認すると同時に、望遠鏡の性能を表す有効面積、Half Power Diameter (HPD) などのデータを取得した。

これら地上試験の結果は望遠鏡シミュレータ内の望遠鏡を記述するパラメータの調整に使われる。望遠鏡シミュレータとは「ひとみ」ユーザーが指定した様々な観測条件において望遠鏡の性能を再現することを目的に作られたソフトウェアであり、計算機上で作った望遠鏡にX線を入射させ検出器までの経路を追跡することで望遠鏡の応答を作成する。

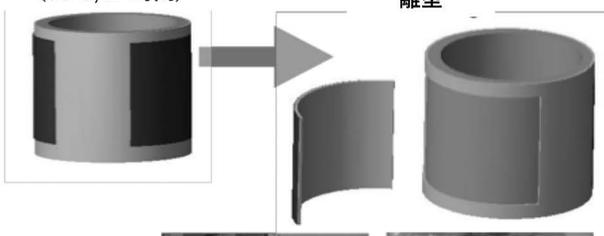
シミュレータの最終的な調整はX線強度やスペ

DC-マグネトロンスパッタリング装置

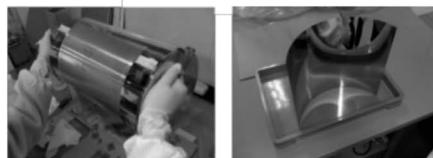


PtとCの2種類のターゲットを使って、交互に蒸着することで、ガラス型にPUC多層膜を成膜する。

接着剤の硬化
(50°C, 14時間)



離型



硬化後のガラスマンドレル
(離型前)

離型後の反射鏡

図9 多層膜成膜の工程概略図。左上は成膜装置の外観写真であり、その下に多層膜成膜の方法について記載している。中央上の図はガラスマンドレルに多層膜を蒸着したのち、一様な厚みの基板を接着剤を介して張り合わせた図である。接着剤硬化後、ガラスマンドレルから基板を離型する。このとき、反射鏡基板側に接着剤を介してガラスマンドレル上に成膜した多層膜が転写される。右下写真は離型後の反射鏡である。

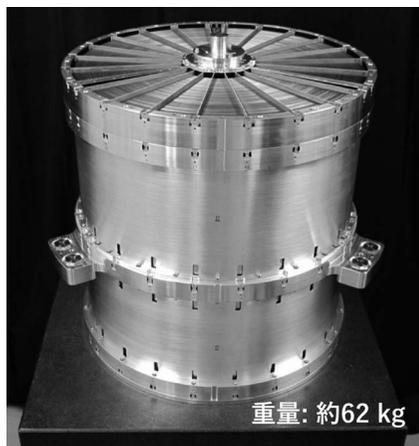


図10 プリコリメータを取り付けたHXTの写真。

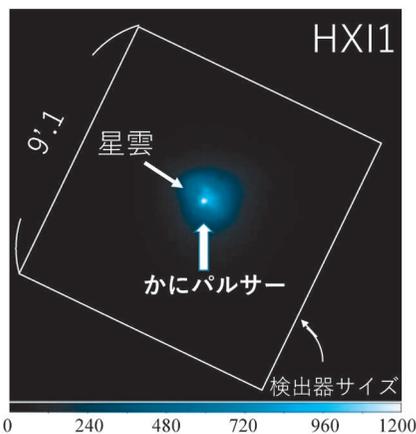


図11 硬X線撮像分光システムで観測したかに星雲。図中の四角はHXIのサイズを表している。

クトルがわかっている標準天体を観測することで行われる。図11はHXTの焦点面検出器であるHXIで捉えたかに星雲の画像である¹³⁾。中心に点のように見える天体がかにパルサー、その周りにぼやっと光っているのが星雲である。かに星雲全体からのX線スペクトルはベキ関数で再現できることが知られており、シミュレータで作成した応答関数を使ってかに星雲のスペクトル形状を求

めたところ、光子指数は 2.122 ± 0.003 となり、過去の観測結果 2.10 ± 0.03 ¹⁴⁾と一致していた。エネルギーフラックスもNuSTARの測定結果と約5%以内で一致していた¹⁵⁾。結像性能はかにパルサーのX線放射を抽出した画像を使って評価した。HXT1, HXT2それぞれ1.59分角, 1.65分角であり、目標の1.7分角と同程度かそれ以下であった。また有効面積(図6)も、2台のHXT合

わせると 60 keV でも 100 cm² であり, 30 keV と 50 keV に設定されている有効面積の要求値を超える性能を達成している. 全反射領域の Cu-K α 線 (8.05 keV) では 2 台あわせて 1,200 cm² という非常に大きな有効面積を持っていることがわかる. このように性能評価を行うことができた結像性能と有効面積では軌道上において計画時の性能を発揮していることを確認できた.

5. ま と め

「ひとみ」衛星には 0.2 keV から 12 keV までの軟 X 線帯をカバーする軟 X 線分光検出器 (SXS) と軟 X 線撮像検出器 (SXI), および 5 keV から 80 keV までの硬 X 線帯をカバーする硬 X 線撮像検出器 (2 台) の 3 種類の位置検出型の X 線検出器が搭載されている. このうち軟 X 線の 2 台の検出器への集光・結像には焦点距離 5.6 m の軟 X 線望遠鏡 (SXT) が用いられている. SXT は「すぎく」に搭載されたものをややスケールアップしたものであるが, 結像性能は「すぎく」の 2 分角から 1.2 分角程度と大きく改善されている. 一方, 硬 X 線撮像検出器 (HXI) には焦点距離 12 m の硬 X 線望遠鏡 (HXT) が用いられている. HXT は純国産技術で作られたものである. 角度分解能は 1.6 分角程度と, 軟 X 線望遠鏡には劣るものの, 要求性能の 1.7 分角を満たすものとなっている. 望遠鏡はいずれも固定式の光学ベンチ (FOB) の先端に搭載される. SXS と SXI は衛星のベースプレートに搭載されるが, HXT は焦点距離が長いので, その焦点面検出器 HXI は伸展式光学ベンチ (EOB) 上に搭載されている. 全長 14 m にも及ぶ光学ベンチの軌道上でのアラインメントを保証するため, 両ベンチをレーザー光で結ぶアラインメントシステム (CAMS) も搭載されている. CAMS による軌道上でのアラインメント測定の結果, EOB の軌道上での熱変形による結像位置のゆらぎは 7 秒角程度と非常に小さいことがわかった.

参考文献

- 1) Soong, Y., et al., 2014, SPIE, 9144, 914428
- 2) Okajima, T., et al. 2012, SPIE, 8443, 844320
- 3) Serlemitsos, P. J., et al., 2010, SPIE, 7732, 77320A
- 4) Awaki, H., et al., 2014, ApOpt., 53, 7664
- 5) Ogasaka, Y., et al., 2005, SPIE, 5900, 59000R
- 6) Takahashi, T., et al., 2018, JATIS, 4(2), 021402
- 7) Gallo, L., et al., 2018, JATIS, 4(2), 021405
- 8) Iizuka, R., et al., 2018, JATIS, 4(1), 011213
- 9) Yamashita, K., et al., 1998, ApOpt., 37(34), 8067
- 10) Okajima, T., et al., 2004, AdSpR., 34, 2682
- 11) Tamura, K., et al., 2018, JATIS, 4(1), 011209
- 12) Mori, H., et al., 2018, JATIS, 4(1), 011210
- 13) Matsumoto, H., et al., 2018, JATIS, 4(1), 011212
- 14) Toor, A., & Seward, F. D., 1974, AJ, 79, 995
- 15) Madsen, K. K., et al., 2017, ApJ, 841, 56

X-ray optics system onboard *Hitomi* Hisamitsui AWAKI¹, Manabu ISHIDA², and Takashi OKAJIMA³

¹ Ehime University, ² ISAS/JAXA, ³ NASA's GSFC

Abstract: Three kinds of position-sensitive detectors are onboard the *Hitomi* observatory which cover the band 0.2–80 keV. In this article we describe the X-ray optics system of *Hitomi* which enables us to carry out focusing and imaging observations with these detectors. Two out of the three detectors are the X-ray micro-calorimeter and the X-ray CCD camera which cover the band up to ~ 10 keV, are equipped with the Soft X-ray Telescope (SXT) whose focal length is 5.6 m. The SXT is somewhat scaled up from that onboard the *Suzaku* observatory, yet its imaging capability (1.2 arcmin in the half power diameter (HPD)) is improved from that of *Suzaku* (~ 2 arcmin in HPD). For the Hard X-ray Imager which is sensitive in the band 5–80 keV, on the other hand, the Hard X-ray Telescope (HXT) is used whose focal length is as long as 12 m. The imaging capability of the HXT is 1.6 arcmin in HPD, which is slightly worse than that of the SXT whereas it still meets the requirement 1.7 arcmin. These telescopes are all mounted on the top of the Fixed Optical Bench (FOB). The soft band detectors are assembled on the base plate while the hard X-ray detectors are fabricated at the end of the Extensible Optical Bench (EOB) due to the long focal length of the HXT. In order to monitor the alignment of the entire optical bench (14 m in the total length), the LASER alignment system called CAMS is adopted.