

XRISM ニュース (6): X-ray Mirror Assembly (XMA) の開発

林 多 佳 由

〈Department of Physics, University of Maryland, Baltimore County, 1000 Hilltop Circle, Baltimore, MD 21250, USA〉

〈Center for Research and Exploration in Space Science and Technology (CRESST II), Greenbelt, MD 20771, USA〉

〈NASA's Goddard Space Flight Center, X-ray Astrophysics Division, Greenbelt, MD 20771, USA〉

〈京都大学 大学院理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: thayashi@umbc.edu

1. 日本の宇宙科学X線望遠鏡

XRISM衛星には2台のX-ray Mirror Assembly (XMA) と呼ばれるX線望遠鏡が搭載されている(図1)。X線望遠鏡は他の波長の望遠鏡と同様に、天体からの光(X線)を集光することで検出器の小型化を可能にし、ノイズに対する天体シグナルの強度比を向上させるとともに、結像することで天体の空間構造を明らかにする。ただしX線では可視光などと違い、反射面に対して1度以下の角度で入射させないと高い反射率が得られない。つまり、一回の反射で変えられるX線の進行方向は2度程度となり、可視光などの望遠鏡と比較して、X線望遠鏡は口径の割に焦点距離が長く、視野が狭い。実際のX線望遠鏡では、視野中心から外れた天体に対する結像性能^{*1}を向上させるため、回転放物面と回転双曲面の反射鏡で一回ずつX線を反射することで集光・結像させる、Wolter-I型光学系が広く利用されている(Wolter-I型光学系の構造図は[1]の図4参照)。日本では「あすか」、ASTRO-E、「すざく」、「ひとみ」、XRISMの天文衛星にX線望遠鏡が搭載されてきた。

上記の日本のX線望遠鏡はすべて「多重アルミ

薄板型」で、これらの大部分^{*2}はNASAのGoddard Space Flight Center (GSFC) で開発された。多重アルミ薄板型X線望遠では製作を簡単にするため、Wolter-I型光学系の回転放物面と回転双曲面の反射鏡はいずれも円錐面で近似される。有効面積^{*3}の向上のため、このような反射鏡を数百枚、同心円上に入れ子に配置する。このタイプのX線望遠鏡はGSFCのPeter Serlemitsosが発明し、スペースシャトルコロンビアに搭載されたBroad Band X-Ray Telescopeで初めて宇宙で使用された。その後は歴代の日本のX線天文衛星に搭載されながら性能向上を果たした。

多重アルミ薄板型の売りは軽量かつ大有効面積と低開発コストにある。X線天文観測では大気吸収を避けるために飛翔体による観測が必須であり、搭載機器には重量制限が課される。そのうえで、高精度観測にはより多くのX線を集める必要がある。この性能の指標が単位質量当たりの有効面積(有効面積/質量)になり、特に日本の衛星では一般的に重量制限が厳しく、重要度が高い。多重アルミ薄板型と好対照なのがチャンドラ衛星の望遠鏡で、直接研磨した数cm厚のガラスをベースにした反射鏡を4つ入れ子にしている。

^{*1} どれくらい細かい構造を分解できるかという、いわゆる目の良さ。

^{*2} 「ひとみ」の4台のうち2台の望遠鏡と、「すざく」、「ひとみ」の迷光(意図しない経路から焦点面に届く不要な光(X線))を除去する装置(Precollimator)は日本が開発。XMAではアライメントパーと呼ばれる反射鏡調整ジグやアライメントキューブは日本から提供。

^{*3} 実際にX線を集められる面積で、どれくらいのX線を集められるかに直結する量。

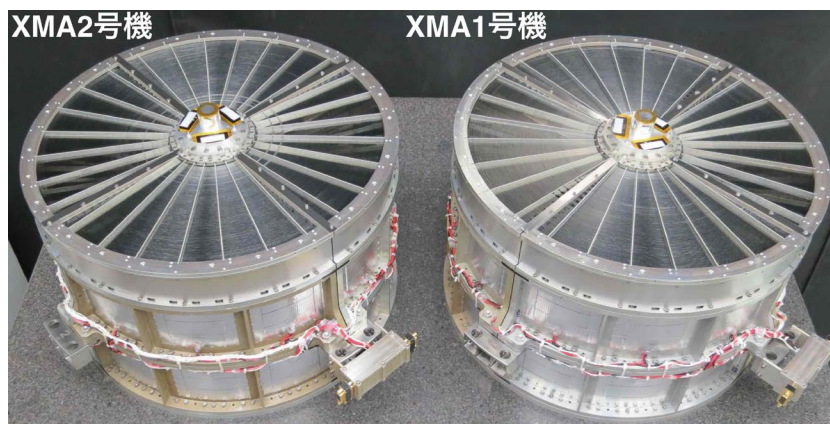


図1 XMA一号機（右）と二号機（左）。熱的保護膜（サーマルシールド）は未取り付け。

XMAの有効面積／質量@1.5 keVと開発コストが $16 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ と数億円であるのに対し、チャンドラでは $0.8 \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ と数百億円である。一方で多重アルミ薄板型の欠点は結像性能で、XMAのHalf-Power Diameter (HPD)^{*4}が約80秒角であるのに対し、チャンドラは0.5秒角と、大きな差がある。応答関数^{*5}開発や地上・軌上較正試験^{*6}は、「ひとみ」までは日本が担当したが、XMAではこれらもGSFCが担当した。また、「すざく」、「ひとみ」で日本の大きなハードウェア貢献だったprecollimatorと呼ばれる迷光除去装置の開発もGSFCに移り、X線望遠鏡開発体制はXMAで大きく変わった。筆者はGSFCでXMA開発の当初から現在まで中心的メンバーとして携わってきた。この記事では個人的に印象に残ったことを交えつつ、XMA開発を振り返ってみる。

2. XMAのハードウェア開発

2016年3月の「ひとみ」喪失後、同年にはXARM^{*7}として代替機の検討が始まった。翌年11月にはXMAのDesign Reviewが行われ、12月にXMA開発が本格化した。反射鏡製作は主に5人の技術者で行われ、2019年9月までに2台のXMAに十分な約5000枚が製作された。2018年10月にはハウジングが完成し始め、quadrant (QT)^{*8}開発が始まった^{*9}。1, 2段QTハウジングそれぞれに203層の反射鏡を挿入し位置調整する。調整後はX線で結像性能を確認し、必要があれば再調整する。時間の制約から心ゆくまで調整することは叶わなかったが、QT開発は概ね順調に進んだ。可視光で集光位置と光軸を揃えつつQTを組み上げ、有効面積を減らさないようにprecollimatorを取り付けてXMAが完成する。

^{*4} 結像性能を表す一つの量。結像中心を中心とし、望遠鏡で集められる全光量のうち半分が入る円の直径で定義される。HPDが小さいほど狭い範囲に光が集まること、つまり結像性能が高いことを示す。

^{*5} 観測機器を通して得られる情報に対して、その観測機器が与えた影響を表す関数。得られる情報は入力情報に応答関数をかけたものになる。X線望遠鏡の応答関数は注目する空の領域毎に定義される有効面積であり、X線エネルギー、視野中心に対する天体の位置をパラメータに持つ。

^{*6} 応答関数を測定する試験。打ち上げ前後にそれぞれ地上と軌道上で実施。

^{*7} X-ray Astronomy Recover Mission.

^{*8} 四分円 (QT: quadrant) 毎に望遠鏡を制作し、これらを組み上げて一台のXMAにする。

^{*9} <https://svs.gsfc.nasa.gov/13530/> や <https://svs.gsfc.nasa.gov/13280/> にQT開発の様子が公開されている。

2019年11月と2020年3月にそれぞれ一、二号機が完成した。完成後は熱真空試験と振動試験^{*10}を実施。熱真空試験中、XMA内の温度が一様な時間帯では集光像に変化はないが、温度勾配ができると途端に大きく歪んだのが印象に残っている。

二号機の熱真空試験が完了した時点の2020年4月からパンデミックのためGSFCは閉鎖された。XMAチームは特別な許可を取り、閉鎖の最中、7月に開発に戻った。二号機の振動試験から再開したが、試験前後でHPDが約10秒角ほど変化してしまった。ただこれは、測定システムに残っていた、加工時に発生する意図しない突起（バリ）をXMA取り付け時に挟んでしまったことが原因で、二号機には問題ないことが判明している。一方で、この問題を受けて再測定した一号機のHPDがGSFC閉鎖前から20秒角以上変化していることがわかった。測定データを遡って確認したところ、実際には振動試験直後にHPDが50秒角も変化している結果が出ていた。しかし、あまりにも像の変化が大きく、また、検出器までの距離を変えて取得した同日の結果が振動試験前とよく一致したため、測定の失敗とみなされていた。さらに、測定後に距離の確認を怠っていたことが痛恨であった^{*11}。

振動試験による破壊が判明した一号機はQTにまで分解して原因追求した。その結果、二号機や「ひとみ」望遠鏡と比べて、ハウジング間のスタイキャスト接着剤の量が少ないことがわかった。スタイキャストはQT結合時のネジ締めによってハウジングが歪まないよう、ハウジング間の隙間を埋める「詰め物」の役割を意図していた。しかし、実はスタイキャストは構造的な補強も担って

いることが調査から明らかになり、一号機では補強材としてのスタイキャストの量が不足していた。そのため振動試験でハウジングが動き、歪んでしまっていた。これを受けて十分量のスタイキャストを使用しつつ一号機を再組み上げた。結果、2021年6月に晴れて振動試験を通過することができた。再組み上げでは部品のネジを締めるたびに焦点距離を確認したが、その都度cm単位（約6秒角相当）で変化しており、X線望遠鏡の繊細さをありありと示していた。

3. 地上較正試験と測定システム開発

XMAでは地上較正試験もGSFCで実施したが、当初、有効面積を測れるシステムはGSFCにはなかった。XMAのようにタイトに反射鏡が詰まったX線望遠鏡では、点光源からの等方拡散光を照射しても、隣の反射鏡の影のため反射鏡面全面にX線が当たらず、原理的に有効面積を測ることはできない。そのため、有効面積測定にはビーム幅を細く（mm-cm）絞ったペンシルビームを用いる。ペンシルビーム内ではX線平行度が10秒角程度に抑えられるため、隣の反射鏡の影は問題にならない。一方でペンシルビームでは口径を覆えないので、望遠鏡と検出器を同期移動させることで望遠鏡入射面上にビームを走査させる^{*12}この手法ではpoint spread function^{*13}の測定精度は望遠鏡・検出器ステージの同期精度で制限されるが、有効面積は非常に正確に測定できる。ペンシルビームによる高精度なX線望遠鏡測定は、「ひとみ」までは日本独自の技術・システムであり、XMAではこれをGSFCに導入する必要があった。XMA開発の裏で、X線望遠鏡測定システム（X

^{*10} 衛星搭載機器は打ち上げ時の振動に耐え、宇宙の熱環境でも適切に動作することが必須であるため、これを確認する試験。

^{*11} X線測定は真空中で行うため、測定の最中に望遠鏡と検出器間の距離を測ることはできない。

^{*12} 光源を移動させる手もあるが、X線発生器を移動させることが困難なこと、ステージの首振りによるビームのぶれ、ビームライン全長に亘ってビーム移動範囲以上の真空チャンバーが必要になるデメリットがある。

^{*13} 望遠鏡による点源集光像がどのようにぼやけるかを表す関数。



図2 GSFCのX線ビームライン。

線ビームライン)の大規模な改修を実施した(図2^{*14})。2018年7月に高輝度X線発生装置、翌年4月に望遠鏡・検出器真空チャンパー(直径約2 m, 全長9 m)が納入されたのに続き、望遠鏡・検出器の両ステージや単色器の導入など、ほぼすべての装置を入れ替え、または新規導入した。印象に残った問題に真空パイプの熱膨張がある。X線を検出器で受けられるようになり二結晶分光器^{*15}を通したX線強度を確認すると、何十%も変動していた。調査の結果、炎天下で真空パイプが膨張し、これに伴い結晶が回転していることがわかった。アンカー増強、パイプの遮光、こまめなX線強度モニターでこの影響は無視できるまでに抑えた。気づけば当然に思えるが、事前に俯瞰して気づくのは難しい。また、最後まで残った問題に、これも熱膨張で、ステージのリードスクリュウの膨張があった。リードスクリュウとはモーターの回転を直線運動に変換する部品で、ステージ動作時は常に摩擦を生じる。地上較正試験では朝から晩までステージを行き来させる。ステージは朝には調子良いが、真空中で対流が効かないためリードスクリュウは次第に加熱、膨張する。そのうち摩擦によるノイズが聞こえ始め、最後には動作不能になってしまう。この問題は地上

較正試験のボトルネックになった。

何とかXMAと測定システムが完成し、2021年8月から翌年5月まで地上較正試験を実施した。試験開始以降は予想以上にスムーズに進んだ。リードスクリュウの問題はあったものの、GSFCのビームラインが100 mと長く、15×15 mmのペンシルビームでも十分な平行度が得られたため(「ひとみ」までは2×2 mm)、大幅に測定時間を短縮できた。しかしやはり、トラブルなしで長丁場の試験が終わることはなく、X線発生器の故障などにより数ヶ月の中断を余儀なくされた。こればかりは我々では対処できず、気をもみながら修理を待つ以外なかった。それでも予定していた項目を全て消化し、2022年5月にXMAは日本に発送された。

4. 日本での受け入れと衛星搭載

日本に到着したXMAはまず、アライメント情報の取得と性能確認のため宇宙科学研究所(ISAS)に搬入された。XMAの入射面中心にはアライメントキューブミラーが搭載されている一方で十分な隙間も確保されており、これを通して検出器面を見通せる(図3)。ここにカメラシステムを取り付け、可視平行光をXMAに当てて得

^{*14} <https://svs.gsfc.nasa.gov/13531/> にビームラインの内部などの写真が公開されている。

^{*15} 向き合った2つの結晶面で1回ずつブラッグ反射させることで入射X線と平行な特定のエネルギー(色)のX線を取り出す装置。結晶を回転させることで取り出すエネルギーを変えられる。

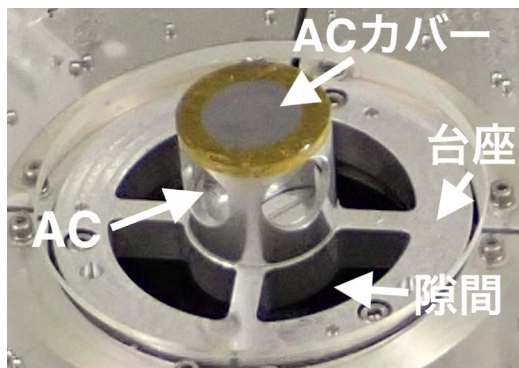


図3 アライメントキューブ (AC) とその台座。XMAの入射面中心に設置。台座のAC周囲部分には隙間が設けてあり、これを通して焦点面を見通せる。この写真では水平を向くAC面に窓を持つカバーが取り付けられているが、図1で取り付けられている台座の隙間を埋める台座カバーは未取り付け。

られる集光像の位置を記録する。同様に可視光で得られた光軸はアライメントキューブの法線からの離角と方位角として記録する。これらの情報は衛星搭載時のXMAアライメントに使用する非常に重要なパラメータで、間違えると場合によっては検出器上に集光像を作れなくなる。

日本輸送後の性能確認もISASで行った。ISASには日本で唯一のX線望遠鏡専用のビームラインがあり、「ひとみ」以前の日本のX線望遠鏡地上較正試験が実施されている。日本メンバーの入念な準備と完成されたシステムにより、大きなトラブルもなく約2ヶ月の測定を終えた。測定結果によれば、輸送前後でXMAの性能に優位な変化はなく、特にGSFCとISASの有効面積測定の結果は統計誤差の範囲(0.3%)で一致した。測定完了したXMAは2022年8月、ついに筑波宇宙センターへ搬送された。

筑波でのXMA搭載作業は1ヶ月後の2022年9月に始まった。まず軌道上でXMAを室温程度に保つための熱的保護膜(サーマルシールド)をXMAに取り付けた。サーマルシールドはアルミを被覆した0.2 μm 厚のポリミド膜で、ネジを落

とすと破けてしまう代物である。その後はXMAを衛星筐体へと吊り上げ、ISASで測定した光軸と集光像位置を頼りに筐体上でアライメントする。光軸は取り付けタブの下に入れるシムの厚さで調整する。集光位置は、仮のインターフェースでXMAを衛星筐体に取り付け、像が検出器上のどこに来るのかをカメラシステムで調べる。この結果から、望む位置に像を置くにはどれだけXMAをずらせば良いかを算出し、これを取り込んだ衛星搭載インターフェースを加工する。この加工完了を待ち、翌月10月に最終取り付け作業を行った。搭載作業ではQT間の隙間を覆うステンレスシートの破損やインターフェースのヘリサート不良、XMA吊り上げに使用したバネばかりが内部で引っかかり、これが戻った時にXMAの吊り具を跳ね上げて保護用アクリルカバーに落下するなど、トラブル続きであったが最終的には十分な精度でアライメントでき、XMAは無事にXRISMに搭載された。

5. さ い ご に

応答関数開発や軌道上での観測軸調整や較正試験など、まだまだ書ききれない項目は多々あるが、衛星搭載までのXMA開発を振り返ってみた。トラブルを強調するような書き方になっており実際に苦労は多々あったが、その中にもこそ新しい発見があり、今になってみれば面白く感じられる。XMAは軌上で期待通りの性能を発揮しており、有効面積の較正では打上げ当初から他衛星と遜色ない精度に達している。XMA開発の当初から今まで携われたことはとても嬉しく、この場をお借りして、「ひとみ」以前も含め、全ての関係者の方々に感謝申し上げる。また、本記事の執筆機会を与え、丁寧な校閲をしてくださった、志達めぐみ氏と守屋亮氏にも深く感謝する。

参考文献

- [1] 栗木久光, 他, 2019, 天文月報, 112, 460