

ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡の地上較正試験

菊地 直道 (首都大学東京 理工学研究科)

Abstract

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には広いエネルギー帯の X 線の結像を可能にする 4 つの X 線望遠鏡が搭載される。そのうち 0.3-12 keV の軟 X 線の結像を担うのが、軟 X 線望遠鏡 (SXT) である。天体からの X 線の情報をより正確に理解するためには、望遠鏡の応答を把握しなければならない。そのため SXT の光学特性を把握するために、現在、JAXA/ISAS の X 線ビームラインを使用し地上較正試験を行っている。この望遠鏡の特性には集光力を示す有効面積、空間分解能を示す結像性能などがある。今まで行われてきた地上較正試験の結果から、SXT-1、2 はともに望遠鏡単体での有効面積がそれぞれ、 445 cm^2 、 454 cm^2 (4.51 keV) とすざくの X 線望遠鏡 (XRT) の 330 cm^2 より 1.3 倍ほどに性能が上がっていることが確認された。また、結像性能もやはり、すざく XRT (~2.0 分角) よりも向上し、4.51 keV において SXT-1、2、それぞれ 1.3 分角、1.2 分角となった。本講演ではこの 2 台の SXT の地上較正試験の測定結果をまとめ、その報告を行う。

1 Introduction

1.1 X 線望遠鏡

普通、望遠鏡などの光学系ではレンズのような屈折を用いるが、X 線は物質の吸収があるためこのような方法で集光することが困難である。しかし、X 線は物質に対し屈折率が 1 よりわずかに小さい特性があるため、臨界角以下 (~1°) の小さい角度で全反射させることができる。この現象利用し、多くの X 線望遠鏡に用いられている光学系が Wolter-I 型である。図 1 のように 1 段目の反射鏡に回転放物面と 2 段目の反射鏡に回転双曲面を組み合わせ、入射してきた X 線を一点に集光する事ができる。

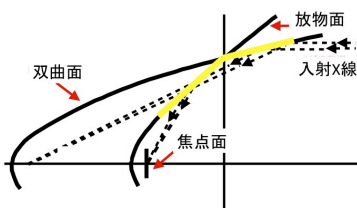


図 1: Wolter-I 型斜入射光学系

1.2 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

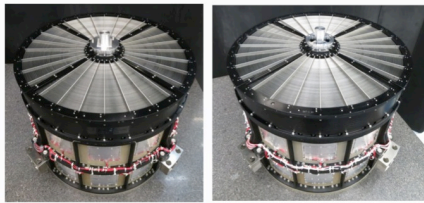
ASTRO-H において 0.3-12 keV のエネルギー帯の撮像を担うのが軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) である。SXI (X 線 CCD カメラ) と組み合わせられる SXT-I、SXS (カロリメータ) と組み合わせられる SXT-S の 2 台が搭載される (図 2)。

SXT は歴代のあすか、すざくに搭載された X 線望遠鏡同様、多重薄板型、Wolter-I 型斜入射光学系を採用している。これは 2 次曲面を円錐近似し、薄い反射鏡を多層に渡って積層することで X 線に対する開口面積を上げ、比較的軽量で大有効面積を実現できる型式である。この反射鏡はアルミニウムの基板に反射率の高い重金属である金を成膜させて製作されている。また、SXT は望遠鏡を 4 分割した Quadrant で構成されており、望遠鏡に入射部に迷光防止用のプリコリメータ装着されている。

SXT はすざく XRT よりも大型化し、焦点距離を延ばした。これによって、高エネルギー側での反射率が上がり有効面積の向上につながる。SXT とすざく XRT の諸元を表 1 にまとめる。なお、すざく XRT のデータは XIS に組み合わせられた XRT-I を参照している。

表 1: SXT とすざく XRT の諸元

	SXT	すざく XRT
口径	450 mm	400 mm
焦点距離	5600 mm	4750 mm
反射鏡	203 層	175 層
入射角度	0.15 °~0.59 °	0.18 °~0.6 °



SXT-I

SXT-S

図 2: 軟 X 線望遠鏡 (SXT)。

1.3 望遠鏡の性能

1.3.1 有効面積

X 線の集光力を性能が有効面積である。光軸から見た X 線の当たる幾何学的な開口面積 $S(\theta)$ に、反射率 $R(\theta, E)$ を掛けたもので表される。有効面積 S_{eff} は

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta)R^2(\theta, E)$$

と表される。反射率が 2 乗になっているのは、2 回反射になっているからである。

1.3.2 結像性能

望遠鏡の角分解能を評価する望遠鏡の集光したイメージは、反射鏡の形状誤差、アライメントの位置決め誤差などによりぼやけた像になってしまう。このぼやけ具合を定量的に示すため、以下の方法を用いて評価を行っている。

1. PSF (Point Spread Function)

結像中心からのイメージの輝度分布である。ある半径 r の円周上に含まれる単位面積あたりの

光量と定義される。この PSF の結像中心付近が鋭ければ結像性能が高いとされる。

2. EEF (Encircled Energy Function)

前述の PSF を半径で積分したものが EEF である。ある半径に含まれる光量を表している。

3. HPD (Half Power Diameter)

天体からの入射光は望遠鏡を通して、かならずしも点源にならず広がったイメージを結んでしまう。このイメージの広がり、つまり角分解能を評価するための指標が HPD である。HPD は結像中心からの全光量の 50%が入る直径と定義され、EEF が半値になる半径の 2 倍の値である。

2 SXT の地上較正試験

天体を観測して得たデータを解析するにおいて、望遠鏡の応答を正確に把握しなければならない。そのため、地上で実際に X 線を SXT に照射し、その光学的特性を把握し、天体データの解析において重要な応答関数の構築を目的としている。

2.1 宇宙科学研究所 X 線ビームライン

地上較正試験の X 線測定には宇宙科学研究所の X 線ビームラインを用いている。金属ターゲットからの 10 数 keV までの特性 X 線を発生することができ、地上較正試験では 1.49 keV-17.47 keV のエネルギーを利用している。また、X 線発生装置からスリットまで 27 m 離すことで 2×2 mm スリットの時、15 秒角という高い平行度を X 線ビームを作ることができ、天体から届くほぼ平行な X 線を再現することができる。測定用チャンバーには望遠鏡と検出器を焦点距離 5.6 m に離して移動ステージ上に設置する。検出器には比例計数管、X 線 CCD カメラを用いている。

2.2 測定方法：ラスタースキャン

宇宙研ビームラインでは望遠鏡全面に X 線を当てるために図 3 の左上の図のようなラインにビームが通るように、望遠鏡と検出器を移動させながら測定

を行う。これによって望遠鏡全面に X 線が入射したのと同じ結果を得ることができる。この方法をラスターキャンと呼ぶ。

この方法を用いると、集光した X 線のカウント数 C 、望遠鏡に入射してくる X 線の強度 I を測定することで、有効面積 S_{eff} はステージの速度 v 、ラインのピッチ幅 h から

$$S_{eff}(E) = \frac{C}{I/vh}$$

となり、望遠鏡の幾何学的な面積に依存しない形となる。

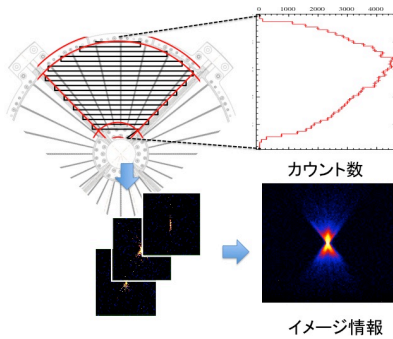


図 3: ラスターキャン概念図。

3 地上較正試験の結果

3.1 有効面積

比例計数管を用いて 1.49 keV から 17.47 keV でラスターキャンを行った結果、光軸における有効面積は表 2 のようになった。また測定結果と、設計値と反射率の理論モデル (Debye-Waller モデル、反射鏡表面粗さは 4 \AA を仮定) を計算した有効面積の理想値のプロットを図 4 にまとめている。

SXT はすざく (XRT) の 4.51 keV での有効面積 330 cm^2 に比べて 1.3 倍、9.44 keV の 180 cm^2 に対して 1.5 倍程度になることが分かった。これは、SXT の口径が XRT に比べ大きくなり、焦点距離を長くしたことで高エネルギーの X 線の反射する反射鏡が増えたためだと思われる。また、有効面積の実測値は理想値の $\sim 80\%$ となることが分かった。これは歴代

の X 線望遠鏡と同じ傾向にあり、応答関数を実測に合わせるための課題となっていく。

表 2: 有効面積

エネルギー [keV]	有効面積 [cm^2]	
	SXT-I	SXT-S
1.49	580.36 ± 1.06	590.55 ± 1.04
4.51	445.16 ± 0.88	453.59 ± 0.95
8.05	369.12 ± 0.68	377.22 ± 0.56
9.44	269.68 ± 0.52	278.09 ± 0.53
11.07	185.50 ± 0.41	187.47 ± 0.42
12.94	88.48 ± 0.45	-
17.47	40.03 ± 0.20	38.25 ± 0.21

SXT-I/2 Effective area

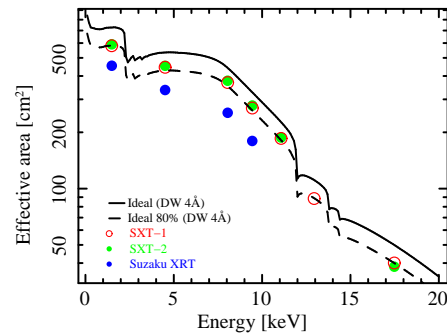


図 4: 各エネルギーでの有効面積 (赤丸: SXT-I、緑丸: SXT-S、青丸: すざく XRT) と、有効面積の理想値 (実線: 理想値、破線: 理想値の 80%)。

3.2 結像性能

CCD カメラを用いて、1.49 keV から 17.47 keV のエネルギーでラスターキャンを行った。光軸において SXT が結像した 4.51 keV の時のそれぞれのイメージは図 5 のようになり、結像中心から PSF、EEF を描くと図 6 のようになった。各エネルギーでの HPD は表 3 のようになり Quadrant ごとの HPD を含めて図 7 にプロットしてある。

どちらの SXT もすざく XRT の HPD ~ 2.0 分角と比べ向上したことが分かった。しかし、SXT-I はエネルギー依存性が出てしまっており、高エネル

ギー側で悪い傾向があることが分かる。これは、図 7 から、SXT-I の Q3 という Quadrant の高エネルギーになるにつれ結像性能が悪くなっているためだと見て取れる。高エネルギーでは望遠鏡内側の反射鏡が支配的になるので、Q3 はこの領域で性能が悪いと考えられる。対して SXT-S は HPD にほとんどエネルギー依存性がない。

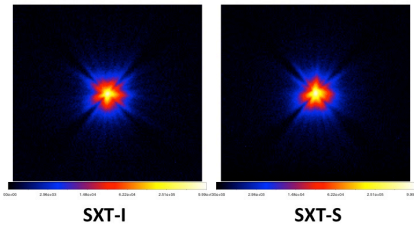


図 5: 4.51 keV におけるイメージ。スケールは log で表示。

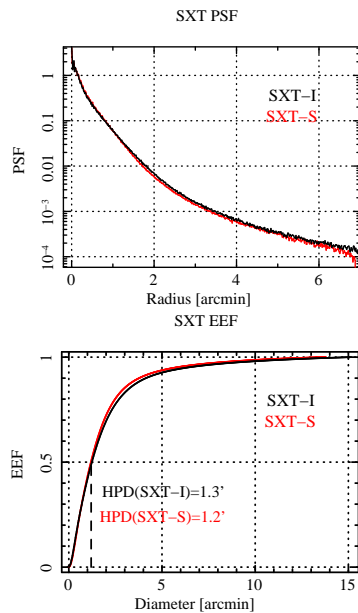


図 6: 4.51 keV における PSF, EEF。

4 まとめと今後の課題

ここまでの測定で SXT それぞれの有効面積と結像性能が得られた。有効面積はほぼ同性能で、すざ

表 3: 結像性能、測定結果。

エネルギー [keV]	HPD [arcmin]	
	SXT-I	SXT-S
1.49	1.25	1.22
4.51	1.26	1.21
8.05	1.32	1.24
9.44	1.31	1.21
11.07	1.35	1.22
12.94	1.48	-
17.47	-	1.35

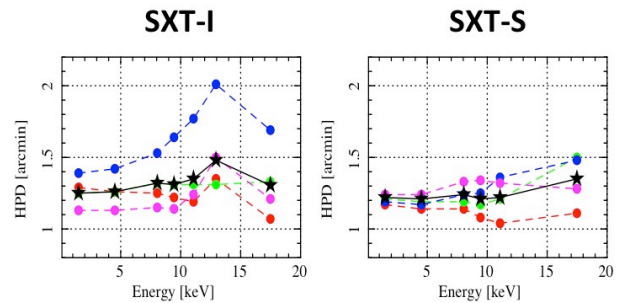


図 7: 各エネルギーでの HPD。

く XRT からの向上も確認された。結像性能はさすが XRT よりも向上したが、SXT-I にエネルギー依存性があることが確認された。対して SXT-S には SXT-I に見られるエネルギー依存性はほとんどない。

今後は迷光という視野外などから望遠鏡に入射し、正常な 2 回反射以外で検出器に侵入する成分の測定を行い、そのパターン、量を把握し、これらの実験結果を反映させて応答関数構築を目指していく。

Reference

富川和紀 修士論文「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の地上性能評価」2014. 首都大学東京大学院理工学研究科

横山裕士 修士論文「Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡の背面反射による迷光のモデル化とその検証」2004. 中央大学大学院理工学研究科