

## ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 1 号機 (HXT-1) 地上較正試験

立花 献 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

名古屋大学 U<sub>x</sub> 研究室では、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する硬 X 線望遠鏡 (HXT) の開発を行っている。HXT は Pt/C 多層膜スーパーミラーを用いて、10–80 keV の硬 X 線領域まで感度を向上させた望遠鏡で、焦点面検出器 (HXI) と共に硬 X 線分光撮像観測を行う。ASTRO-H には 2 台の HXT が搭載される。そのうちの 1 台目 (HXT-1) は反射鏡全 1278 枚の搭載を完了し、大型放射光施設 SPring-8 にて X 線による光学調整が行われた。光学調整とは反射鏡を上下端から支えるアライメントバーを調整することで結像位置のばらつきを抑えるものである。その後望遠鏡は宇宙科学研究所 (ISAS) にて迷光防止用のプリコリメータが搭載され、衛星打ち上げ時の環境を模した音響試験・機械振動試験が行われた。2012 年 11 月から 12 月にかけては、天体観測データの解析に用いる応答関数の構築に必要なデータを取得するために、SPring-8 で地上較正試験を行った。具体的な測定項目は、光軸での有効面積、有効面積の入射角依存性、結像性能などである。その結果、30 keV のエネルギーで有効面積が  $170.1 \pm 1.7 \text{ cm}^2$ 、結像性能が 1.92 分角、50 keV のエネルギーで有効面積が  $82.3 \pm 1.6 \text{ cm}^2$ 、結像性能が 1.80 分角という値を得た。本講演では、地上較正試験の測定方法とその結果をまとめ、地上における HXT-1 の光学特性について考察する。

## 1 Introduction

### 1.1 ASTRO-H 搭載の硬 X 線望遠鏡

ASTRO-H 搭載の硬 X 線望遠鏡 (HXT)(図 1) は多重薄板型の Wolter-I 型斜入射光学系 (円錐近似) を用いている。Wolter-I 型斜入射光学系は、回転放物面と回転双曲面をした反射鏡が共焦点を持つように配置されており、X 線を 2 回反射させることで集光、結像させる二段一体型の光学系である。HXT は図 2 のように Wolter-I 型斜入射光学系の回転曲面を円錐近似した薄い反射鏡を用いており、さらにその薄い反射鏡を何枚も重ねることで軽量かつ開口面積を広く取っている。反射鏡は厚み 0.22 mm、母線方向の長さ 200 mm のアルミ基板に Pt/C 多層膜スーパーミラーを反射鏡面として用いており、1 台につき計 1278 枚の反射鏡が HXT に搭載されている。

### 1.2 望遠鏡の性能

#### 1.2.1 結像性能 (角度分解能)

結像性能は平行な X 線が望遠鏡に入射し、集光・結像したときの像の広がり定量的に表せる。結像

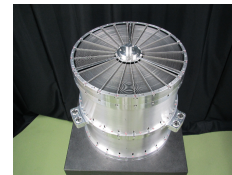


図 1: HXT-1

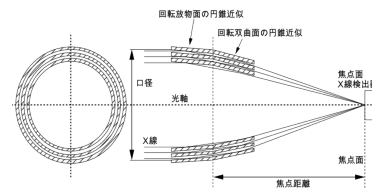


図 2: HXT 断面図

性能の評価は焦点面上の輝度分布から求められ、以下の物理量を用いて表す。

#### PSF (Point Spread Function)

2 次元の PSF とは無有限遠にある点源から放射された X 線が、HXT の焦点面に作る輝度分布である。これを円周方向に積分し、半径  $r + dr$  内に含まれる光子数をその円環の面積で割ること

で半径  $r$  の関数として得られるものを 1 次元の PSF として定義している。

### EEF(Encircled Energy Function)

EEF は半径  $r$  での光子数を  $r$  方向に積分したものである。つまり EEF は 1 次元の PSF を  $r$  方向に積分したものとなっている。

### HPD(Half Power Diameter)

光学系の空間分解能を表す指標としては種々あるが、ここでは点光源を見たときの焦点面全強度の 50% が入る円の直径を結像性能として評価する。

図 3 に PSF,EEF,HPD の概念図を、図 4 に実際に得られた反射像から求めた PSF と EEF を示す。

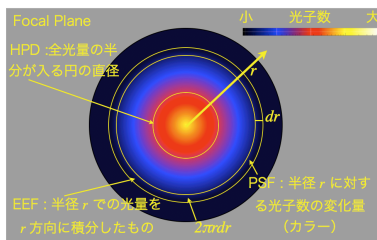


図 3: PSF,EEF,HPD 概念図

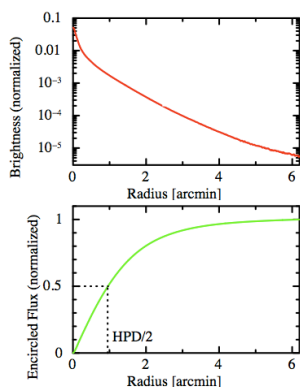


図 4: PSF(上段)、EEF(下段)

### 1.2.2 有効面積 (集光力)

X 線望遠鏡の集光力を表す指標として有効面積がある。これは光軸方向から見た反射鏡の面積 (開口面

積) に、反射鏡の反射率をかけたものとして定義され、X 線を集光する実効的な面積を表す。  $S(r)$  を半径が  $r$  での開口面積、  $R(E, r, \theta)$  をエネルギー  $E$ 、半径  $r$ 、入射角  $\theta$  での反射率とすると、有効面積  $S_{\text{eff}}(E)$  は、次のようにかける。

$$S_{\text{eff}}(E) = \sum_r S(r) R^2(E, r, \theta) \quad (1)$$

## 2 ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 1 号機 (HXT-1) 地上較正試験

観測天体からの X 線は望遠鏡で集光された後、焦点面検出器で検出される。そのため観測データから観測天体の真の情報を得るには、入射 X 線のエネルギーと入射角度に対する望遠鏡の特性を関数形で表した応答関数が必要である。そこで我々は応答関数の構築に必要なデータを取得するために、2012 年 11 月-12 月に大型放射光施設 SPring-8 で HXT-1 の地上較正試験を行った。地上較正試験では有効面積が最大となる光軸を求め、その光軸での有効面積と結像性能をそれぞれ各エネルギー (30 keV、40 keV、50 keV、60 keV、70 keV) ごとに測定した。

### 2.1 大型放射光施設 SPring-8

実験は大型放射光施設 SPring-8(Super Photon Ring-8 GeV) の BL20B2 とよばれるビームラインを用いている。このビームラインは高輝度・高平行度・単色光を実現し、光源からビームライン端までの全長が 215 m ある。使用ビームサイズが望遠鏡上で 10 mm×10 mm のときの平行度は水平方向・鉛直方向ともに 10 arcsec 程度である。ビームを目的のサイズに絞る目的で望遠鏡の前に 4 極スリットを配置し、望遠鏡から焦点距離 12m 先に検出器を配置して測定を行った。検出器には I.I.(Image Intensifier) を用いて X 線を可視光に変換し CCD カメラで撮像した。

### 2.2 測定方法 : Raster Scan 法

望遠鏡全面に一度に X 線を照射して測定したいが、X 線の平行度を保つ目的と望遠鏡全面にあたるビー

ムを作れないという制約から、Raster scan 法という測定方法を用いて測定している。これは X 線ビームを 10 mm×10 mm に細く絞り、望遠鏡全面を掃くように望遠鏡を載せたステージを移動させる。そのとき、検出器を載せたステージも望遠鏡との位置関係を保つように同期させてを動かす。最後に、各測定点のデータを足し合わせて評価を行っている。図 5 に Raster Scan 法の概念図を示す。また、望遠鏡は 3 つの segment からなる構造をしており、測定は各 segment ごとに行っている。Raster Scan 法により絞ったビームが望遠鏡を掃いた位置を図 6 に示す。

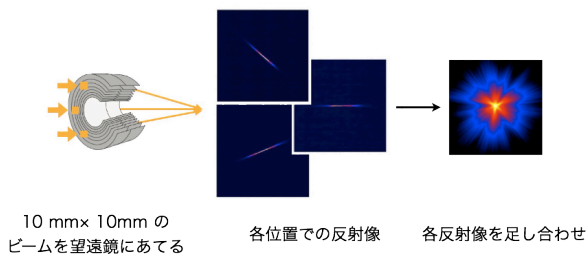


図 5: Raster Scan 法の概念図

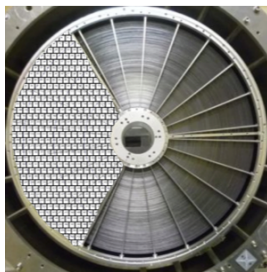


図 6: ビームが望遠鏡を掃いた位置を □ で示す。1 回の scan で 1segment 全面を掃いている。

### 2.3 結果

30 keV での測定結果の反射像の足し合わせ (PSF(Point Spread Function)) を図 7 に EEF(Encircled Energy Function) を図 8 に示す。

30 keV での有効面積は  $170.1 \pm 1.7 \text{ cm}^2$ 、結像性能は  $1.92 \text{ [arcmin]}$  であった。

同様にしてそれぞれのエネルギーで求めた望遠鏡光軸での有効面積と結像性能を表 1 に示す。

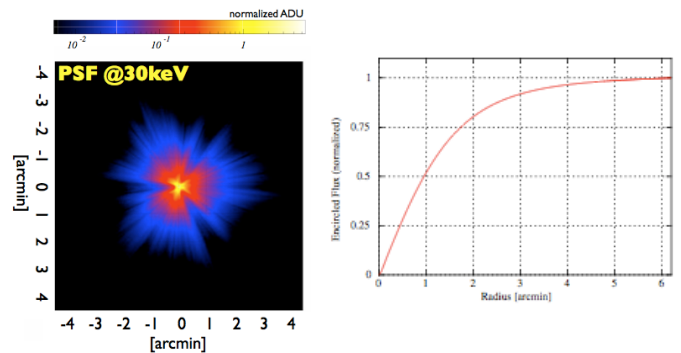


図 7: 30 keV における反 EEF  
射像の足し合わせ (PSF)

	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	結像性能 [arcmin]
30keV	$170.1 \pm 1.7$	1.92
40keV	$123.0 \pm 1.0$	1.94
50keV	$82.3 \pm 1.6$	1.80
60keV	$49.5 \pm 0.9$	1.67
70keV	$24.5 \pm 0.4$	1.49

表 1: 望遠鏡光軸での有効面積と結像性能

### 2.4 要求値に対する有効面積

ASTORO-H 搭載 HXT の有効面積の要求値は 30 keV で  $150 \text{ cm}^2$ 、50 keV で  $55 \text{ cm}^2$  である。図 9 に測定した各エネルギーに対する有効面積と要求値をプロットする。これを見ると、HXT-1 では有効面積の要求値を満たせたことがわかる。

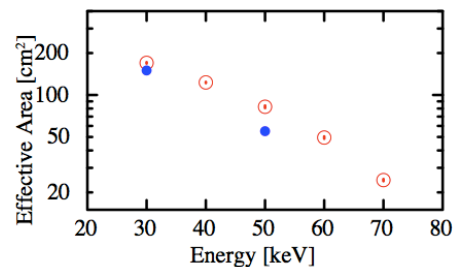


図 9: 各エネルギーごとの有効面積の測定値と要求値

要求値は反射鏡単体の界面粗さを  $5 \text{ \AA}$  と仮定して計算された理論値である。一方、HXT-1 に搭載された反射鏡のうち約 10 %が名大 Ux 研ビームラインにて測定されており、反射鏡単体の界面粗さの平均値

は約  $4.1\text{\AA}$  であった。したがって、HXT-1 が有効面積の要求値を満たせたのは、個々の反射鏡の界面粗さが仮定された  $5\text{\AA}$  を下回ったことが要因であると考えられる。

## 2.5 要求値に対する結像性能

ASTRO-H 搭載の HXT の結像性能の要求値は HPD で 1.7 分角である。図 10 に測定した各エネルギーに対する結像性能 (HPD) と要求値である 1.7 分角をプロットする。これを見ると、HXT-1 では 60 keV、70 keV の高エネルギー側では結像性能の要求値を満たせているが、30–50 keV の比較的低エネルギー側では満たすことができなかった。

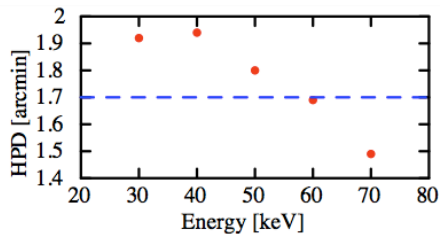


図 10: 各エネルギーごとの結像性能 (HPD) の測定値と要求値

図 11 に半径 60–220 mm まで 10 mm ごとの結像性能 (HPD) の測定値と要求値である 1.7 分角をプロットする。これを見ると、外側の径に行くほど結像性能が悪くなっていることがわかる。

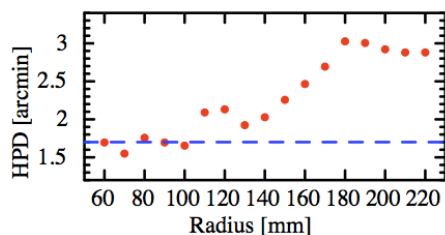


図 11: 径ごとの結像性能 (HPD) の測定値と要求値

また、30 keV と 50 keV での Raster Scan 法の各測定点の反射光量を図 12 に示す。図 12 からわかるように、X 線のエネルギーが高いほど径の小さい反射鏡の影響が大きくなり、X 線のエネルギーが低い

ほど大きい径の反射鏡の寄与を受けていることがわかる。

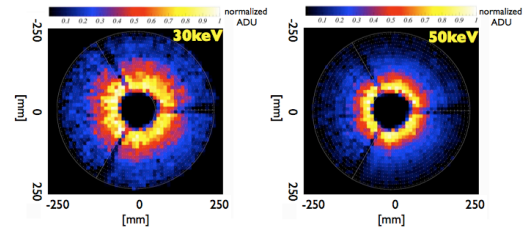


図 12: Raster Scan 法の各測定点の反射光量 左 : 30 keV、右 : 50 keV

以上より、30–50 keV の比較的低エネルギー側では満たせなかったが、60 keV、70 keV の高エネルギー側では結像性能の要求値 1.7 分角を満たせた原因は、高エネルギー側ほど結像性能の良い内側の反射鏡の寄与が大きくなることであると考えられる。

## 3 まとめ

- 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 1 号機 (HXT-1) の組み上げが完了し、大型放射光施設 SPring-8 にて地上較正試験を行った。
- 望遠鏡光軸での有効面積
  - 30 keV、50 keV 共に要求値を満たした。
- 望遠鏡光軸での結像性能
  - 60 keV、70 keV の高エネルギー側では要求値を満たした。
  - 結像性能には半径依存性があり、内側の径の反射鏡の寄与が大きいことが要因であると考えられる。

## Reference

出本忠嗣. 修士論文「ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 (HXT-1) 地上較正試験」2012. 名古屋大学大学院理学研究科