

解説

## X線望遠鏡の特性

津坂 佳幸\*, 山下 廣順\*\*, 国枝 秀世\*\*

\*分子科学研究所極端紫外光科学研究系 \*\*名古屋大学理学部

## Characterization of X-Ray Telescopes on board ASCA

Yoshiyuki TSUSAKA\*, Koujun YAMASHITA\*\* and Hideyo KUNIEDA\*\*

\*Department of Vacuum UV Photoscience, Institute for Molecular Science,

\*\*School of Science, Nagoya University

The X-ray properties of multi-nested thin foil mirror X-ray Telescopes (XRT's) on board ASCA satellite were fully evaluated with an X-ray pencil beam. Scanning over the telescope aperture of 35 cm with an X-ray pencil beam, we found the effective area of XRT to be 20–30% less than the value derived from the ray tracing calculations under the ideal condition. The Point Spread Functions (PSFs) of XRT were derived by measuring the image profile at the focal plane with an X-ray CCD. The PSF is found to exhibit a sharp core concentrated within 30 arcsec and a broad wing extended with 3 arcmin in Half Power Diameter (HPD). We also evaluated the contribution of the stray light, which is caused by the single reflection of X-rays by primary or secondary mirrors and by the back side reflection of the mirrors. To obtain the characteristics of XRT in the energy range of 0.5–10 keV, incorporated with the measurement at discrete energies, a ray tracing method is developed with the telescope design parameter, PSF, and optical constants. Especially optical constants around gold M absorption edges are obtained by measuring the reflectivity of our mirror sample, using monochromatized X-rays in the energy range of 2.0–3.5 keV from a synchrotron radiation. Taking into account of the PSFs and optical constants, our ray tracing program can reproduce all these XRT performances.

## 1. はじめに

X線光学の応用分野として、軌道放射光と共に重要な柱は天文学である。X線天文学は、大気吸収に阻まれ、ロケットや人工衛星の利用が可能になった1960年代に始まったばかりの学問分野である。対象は宇宙の中でも最も活動的で高温な領域である太陽や星のコロナ、超新星、ブラックホール、銀河及び銀河団など多岐にわたる。しかしその強度はもっとも明るいX線天体の1つである蟹

星雲からさえ、1photon/cm<sup>2</sup>/sしかなく、地上の実験室でのX線強度の数桁から十数桁微弱なものである。このため、大きな有効面積で長時間露光しなければ精密な観測は行なえない。また、飛翔体に搭載して大気の外に出て観測するため、装置は小型軽量でかつ、打ち上げ時の激しい振動衝撃に堪えなければならない。こうした実際上の違いはあるものの、X線光学系として、地上実験特に軌道放射光における光学系と基礎的なテクノロ

\*分子科学研究所 極端紫外光科学研究系 〒444 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38  
TEL 0564-55-7443 FAX 0564-53-7327  
e-mail tsusaka@ims.ac.jp

ジーは共通している。

ここで取り上げた、あすか衛星は1993年2月に打ち上げられた日本で4番目のX線天文衛星であり、我々としては初めて本格的なX線望遠鏡を搭載した。特に10keVまでの集光結像を目指し、結像性能としては3分角と中程度ではあるものの、超軽量ながら大面積を実現している。望遠鏡の開発製作はNASAゴダード宇宙飛行センターのSerlemitsos博士らと、名古屋大学理学部X線天文グループが中心となって行なった。その特性試験は日本側が主に担当し、望遠鏡のX線集光特性の正確な理解と、観測データの正しい解釈のための基礎データを取得することができた。本稿は特にここに焦点をあてており、そこで得られた知識とそれを取り入れた光線追跡法等の技法が、放射光に於ける光学素子の設計評価の参考になれば幸いである。

あすか衛星は打ち上げ後2年余り経った現在も、この波長域(0.5-10keV)で世界唯一の衛星として稼働しており、その間に観測した1000個近くの天体について、世界中の研究者とともにその結果の解析を進めているところである。

## 2. X線天文学

中性子星やブラックホール近傍の強重力場中の物質や、超新星残骸或いは銀河団を満ちす1千万度~1億度の高温プラズマなど、物質の極限状態ではX線が放射される。このため、さまざまな天体現象の中でも特に、活動的な領域の研究にはX線観測は不可欠であり、また、宇宙の構造と進化の研究においても、今やX線天文学は重要な柱の一つとなっている。X線観測において、より遠方の即ちより暗い天体まで精度良く観測するためにはX線望遠鏡の開発が不可欠である。しかしながらその開発は、可視光域とは異なった多くの問題を抱えている。すなわち、X線領域では物質の屈折率が1に比べて僅かに小さい値であるため、極端な斜入射の光子に対してしか、有効な反射率が得

られないことに起因している。

人工衛星に初めてX線望遠鏡を搭載したのは、1978年にアメリカによって打ち上げられたEINSTEIN衛星である<sup>1)</sup>。このX線望遠鏡は、Wolter I型と呼ばれる光学系をガラスの基板を研磨して忠実に再現したもので、空間分解能6秒角、エネルギー帯域は4keV以下であった。それまでの衛星が、検出器の前に視野を絞るコリメーターを置くことでX線天体の位置を調べたのに対し、撮像能力を持ったこの衛星は、近傍天体からのX線の漏れ込みを防ぐことができ、また集光によってS/Nが格段に向上したことで、その検出感度は過去の衛星に比べ2桁以上向上した。

我が国においては、「はくちょう」、「てんま」、「ぎんが」とコリメーター衛星ではあるが、大有効面積、広いエネルギー帯域の検出器と低雑音化によって、世界の第一線のレベルに達した。1993年2月に打ち上げられた「あすか」衛星<sup>2)</sup>は日本初のX線望遠鏡<sup>3)</sup>を搭載した衛星で、検出器にX線CCDカメラ<sup>4)</sup>と撮像型蛍光比例計数管<sup>5)</sup>を搭載し、0.5-10keVのX線領域で世界初の撮像分光観測を可能にした。「あすか」に搭載されたX線望遠鏡は多重薄板型<sup>6)</sup>と呼ばれ、空間分解能はやや劣るが、小型・軽量でありながら、大有効面積、高エネルギー帯域(<10keV)までの感度が特徴である。大きな有効面積は、非常に微弱なX線( $10^{-6}$  counts/s/cm<sup>2</sup>)の集光に役立ち、高エネルギー帯域までの感度は、天体の広帯域X線スペクトル測定、特に鉄のK輝線(~7keV)まで感度を有することで宇宙物理学上重要な情報を引き出すことができる。

## 3. X線望遠鏡

### 3.1 X線の反射と散乱

X線領域の物質の屈折率は1に比べて僅かに小さく、複素屈折率nを用いて次のように表せる。

$$n = 1 - \delta - i\beta, \quad \delta = \frac{N_a r_e \lambda^2 f_1}{2\pi}, \quad \beta = \frac{N_a r_e \lambda^2 f_2}{2\pi}$$

ここで、 $\delta$ 、 $\beta$ はそれぞれ位相のずれ、吸収を表す因子であり、 $N_a$ 、 $r_e$ 、 $\lambda$ はそれぞれ原子密度、古典電子半径、X線の波長である。 $f_1$ 、 $f_2$ は原子による散乱、吸収を表す因子で、これは元素の種類とX線の波長によって決まる。 $\delta$ 、 $\beta$ は1に比べて非常に小さな値で、例えば金の7keVに於ける $\delta$ 、 $\beta$ はそれぞれ $6 \times 10^{-5}$ 、 $8 \times 10^{-6}$ 程度である。屈折率が1に極めて近いことから、X線をレンズで集光することはほとんど不可能である。しかしながら屈折率が1より小さいことで、可視光領域とは対照的に、真空から物質に適当な入射角で入射するときにX線の全反射が起こる。スネルの法則より、吸収を無視すると、 $\cos\theta_c = 1 - \delta$ であり、 $\delta \ll 1$ より、 $\cos\theta_c \sim 1 - \theta_c^2/2$ だから、 $\theta_c = \sqrt{2\delta}$ である。ここで $\theta_c$ は表面から測った臨界角で、例えば金の7keVに於ける臨界角は0.6度である。

屈折率 $n_1$ 、 $n_2$ を持つ2つの物質の界面でのP偏光、S偏光に対する反射振幅 $r_s$ 、 $r_p$ は、フレネルの式により、

$$r_s = \frac{n_1 \sin\theta_1 - n_2 \sin\theta_2}{n_1 \sin\theta_1 + n_2 \sin\theta_2}, \quad r_p = \frac{n_1 \sin\theta_2 - n_2 \sin\theta_1}{n_1 \sin\theta_2 + n_2 \sin\theta_1} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ はそれぞれ表面から測った入射角、屈折角であり、スネルの法則によって $n_1 \cos\theta_1 = n_2 \cos\theta_2$ で与えられる。反射強度はそれぞれ複素共役をとり、 $R_s = r_s r_s^*$ 、 $R_p = r_p r_p^*$ である。全反射を用いる場合、その入射角は極端な斜入射であるから、その反射率はほとんど偏光には依らない<sup>7)</sup>。全く偏光がない場合反射率は、 $R = (R_s + R_p)/2$ であり、これは臨界角 $\theta_c$ で規格化すると次式のように表せる。

$$R = \frac{h - x \sqrt{2(h-1)}}{h + x \sqrt{2(h-1)}}, \quad (3)$$

$$h = x^2 + \{(x^2 - 1)^2 + a^2\}^{1/2}, \quad x = \frac{\theta}{\theta_c}, \quad a = \frac{\beta}{\delta}$$

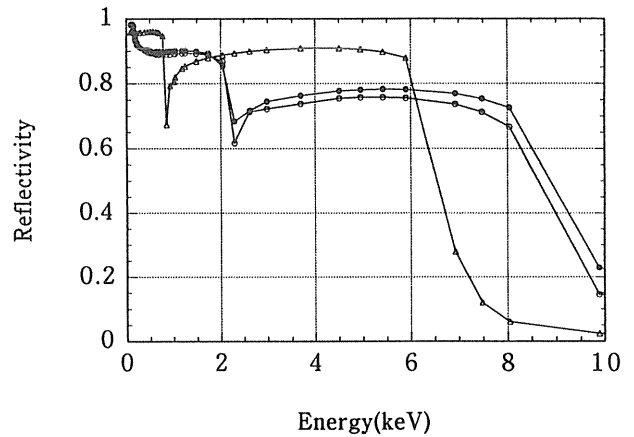


Figure.1 Reflectivity versus X-ray energy at 0.5 degree incidence. Open circles, filled circles are represent Au, Pt, and Ni surfaces, respectively.

X線の反射率は、(3)式から求められる。吸収の効果は $\beta/\delta$ で効き、 $\beta$ が0の極限では、臨界角以下の斜入射角で入射したX線の反射率は1になる。よって反射物質には、密度が大きく、 $\beta/\delta$ が小さい、物理、化学的に安定な物質が選ばれる。通常、金、プラチナ、ニッケル等がよく用いられる。図1に斜入射角 $0.5^\circ$ のときの金、プラチナ、ニッケルの反射率をX線エネルギーの関数で示す。

実際の反射鏡では表面の酸化、或いは不純物の吸着といった化学的原因や、形状形成時の誤差である物理的原因で完全に滑らかな表面は実現できない。このような鏡面の凹凸が光の波長と同程度である場合、入射した光は散乱されてしまう。X線の場合その波長はオングストロームレベルであるため、反射鏡の小さな凹凸でも散乱が起こり、結像性能の劣化や反射率の低下を引き起こす<sup>8-10)</sup>。

X線の散乱は、表面の凹凸の間隔 $l$ が連続的に変化する回折格子として考えることができる。即ち、

$$n\lambda = l(\cos\theta_i - \cos\theta_s) \quad (4)$$

で、 $n$ は回折の次数、 $\lambda$ はX線の波長、 $\theta_i$ 、 $\theta_s$ は表面から測った入射角、散乱角である。散乱光の強度は、凹凸の振幅の2乗に比例する。反射鏡表

面の凹凸は様々な波長の正弦波で記述する事ができ、その表面の凹凸を表す関数として Power Spectral Density (PSD) 関数:  $W(p)$  が用いられる。ここで、 $p$ は表面波長 $l$ の波の波数 ( $p = 2\pi/l$ ) であり、(4)式で  $n = 1$  とおくと、

$$p = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_s - \cos\theta_i) \quad (5)$$

である。表面上の点  $x$  における凹凸の高さが  $Z(x)$  のとき、その PSD 関数はフーリエ成分の2乗で表される。

$$W(p) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int \exp(ipx) Z(x) dx \right\}^2 \quad (6)$$

このとき散乱角  $\theta_s$  に散乱される X 線の強度は、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = \frac{2k^3}{\pi} I_r \sin\theta_i \sin^2\theta_s W(p) \quad (7)$$

である。ここで  $k = 2\pi/\lambda$ 、 $I_r$  は全反射強度である。(7)式より X 線の散乱強度の角度依存性を測定することによって、表面の PSD 関数を直接求めることができる。 $W(p)$  と表面の凹凸の rms (root mean square) 高さ  $\sigma$  は次式で結ばれる。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} Z(x)^2 dx = \frac{1}{2\pi} \int W(p) dp \\ &= \frac{1}{4k^3 I_r} \int \frac{1}{\sin\theta_i \sin^2\theta_s} \frac{dI}{d\theta_s} d\theta_s \end{aligned} \quad (8)$$

また、全反射強度と散乱 X 線 ( $I_s$ ) の強度 (1次光) の比は、

$$\frac{I_s}{I_r} = 1.2 \times 10^{-2} \left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\theta_i}{0.5}\right)^2 \quad (9)$$

となる。斜入射角  $0.5^\circ$  のとき、波長  $1.9 \text{ \AA}$  (鉄 K 輝線) の X 線の散乱強度を  $10\%$  以下に押さえるためには、 $\sigma = 5 \text{ \AA}$  以下が必要になる。 $\sigma$  が入射 X 線の波長より長くても良いのは  $0.5^\circ$  の浅い斜入射角で入射するため、実際の光路差は  $\sigma$  よりずっと

短いからである。

### 3.2 X線望遠鏡の製作

現在 X 線望遠鏡に最も良く用いられている光学系は、回転放物面と回転双曲面を組み合わせた Wolter I 型<sup>11)</sup> である (図 2)。X 線望遠鏡は微弱な X 線を集めるため大きな有効面積が必要であるが、斜入射の Wolter I 型の開口面積は反射鏡面の入射面への投影部であり、例えば斜入射角  $1^\circ$  の場合の開口面積は、実際の反射面の面積の  $0.017$  倍 ( $\sin 1^\circ$ ) である。そこで普通 X 線望遠鏡は有効面積を上げるために、同じ焦点距離で口径の違う Wolter ミラーを同心円状に積層する方法 (ネステイング) が用いられる。しかしながら地球大気によって吸収される天体 X 線の観測には、ロケット、人工衛星等が必要であり、そのため観測機器には大きさ、重量等の厳しい境界条件が課せられる。これら境界条件の中で解像力、集光力を高め、エネルギー帯域を広くする努力が行われる。このうちどの性能を重視するかで、X 線望遠鏡は研磨型、レプリカ型、多重薄板型の3つのタイプに分かれる。

#### 〈研磨型〉

望遠鏡の解像力を追求した製法で、鏡面基板である厚さ  $10 \sim 20 \text{ mm}$  のガラスを直接研磨して Wolter I 型の光学系を忠実に実現する。現在の技

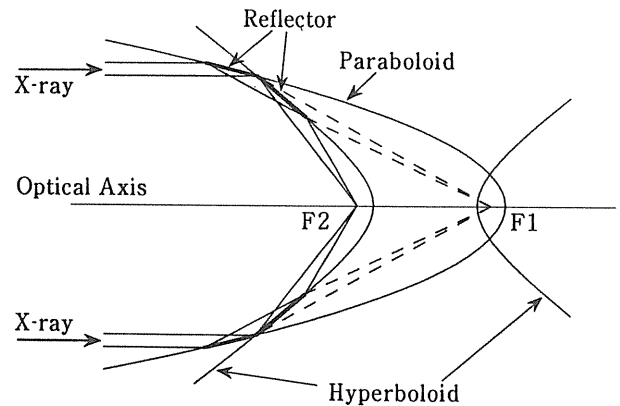


Figure.2 Wolter type I geometry. The focus point of paraboloid is F1, and those of hyperboloid are F1 and F2. X-rays are focused on F2.

術水準では空間分解能1秒角以下が可能であるが、厚い基板を用いるためネスティング数を増やすことができない。これまでの衛星では斜入射角を大きくして有効面積を上げているが、そのためエネルギー帯域も狭く4keV以下である。また厚いガラス基板を用いるため、その重量は500kg~1tと非常に重い。このタイプの望遠鏡を搭載した衛星は、1978年のEINSTEIN衛星<sup>12)</sup>、1990年のROSAT衛星<sup>13)</sup>があるが、いずれも数tクラスの衛星である。開口効率(ミラー最大口径に対する幾何学的集光面積の比)は、EINSTEINが17%、ROSATが20%である。

#### 〈レプリカ型〉

空間分解能、開口効率、重量とも研磨型と多重薄板型の間間的な性能が得られる。製法は、まずガラスの母型を研磨し、そこに金などの反射面となる元素を蒸着する。その外側にCFRP等の基板を被せ、間にエポキシ樹脂を流し込み固める。その後円筒を母型から離すと金と母型が剥がれ、CFRP基板に金と母型の形状を写し取ることができる。空間分解能は30秒角程度である。この方法で作られたのはEXOSAT衛星の望遠鏡<sup>14)</sup>である。また、ヨーロッパで現在計画中のXMM計画<sup>15, 16)</sup>、あすか衛星に次ぐ日本のX線天文衛星ASTRO-E(2000年打ち上げ予定)もこの方法で、X線望遠鏡の開発を行っている。

#### 〈多重薄板型〉

1981年Serlemitsosが提案したもので、空間分解能を犠牲にする代わりに大有効面積、広エネルギーバンド、軽量という特徴を持っている<sup>6)</sup>。Wolter光学系を忠実に再現する限り、その鏡面基板は研磨に耐え得るよう厚いものとなってしまう、開口効率が悪く重量も大きくなる。この多重薄板型では、Wolter型の2次曲面を円錐で近似することで研磨処理を行わず、基板を0.1mm程度まで薄くして50%以上の開口効率を達成できる。軽量の基板を用いることで、望遠鏡重量は他の製法に比べ極端に軽くできる。有効面積は100層以上のネステ

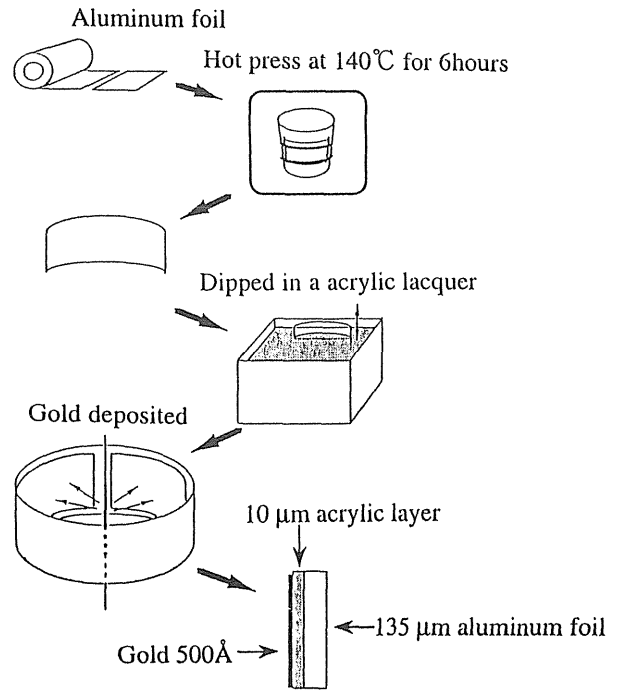


Figure.3 Reflector preparation. An aluminum foil is bent in a conical shape by using a hot press method with a conical mandrel. The shaped foil is coated with acrylic lacquer and gold layer for X-ray reflection.

ィングによって稼ぐことができるため、入射角を小さくして高エネルギー領域まで感度を持たせることが可能である。この手法を用いた望遠鏡は、スペースシャトルミッションのBBXRT<sup>17)</sup>とあすか衛星である。図3にあすかX線望遠鏡の反射鏡製法を示す。あすかX線望遠鏡では厚さ0.13mmのアルミフォイル基板を母型に押しつけて熱成形する。X線反射面に必要な滑らかな表面は、アクリルを10-20μmコーティングして作り<sup>10)</sup>、反射面には金を500Å蒸着する。こうしてできた反射鏡120枚を、扇型の鏡筒に同心円状に並べ、120本の溝が切られたスポークによって位置決めが行われる(図4)。この鏡筒4台を円筒型に結合して望遠鏡1台が完成する。あすか衛星はこの望遠鏡を4台搭載した。

異なる3つの手法で作られた(作られる)代表的なX線望遠鏡の性能を表1に示す。

#### 4. X線望遠鏡の性能評価実験

天体の観測データを正しく理解するためには、それぞれの装置の応答関数を精度よく知る必要がある。我々はあすかX線望遠鏡の応答関数を決定

Aligned and supported by  
slotted radial bars

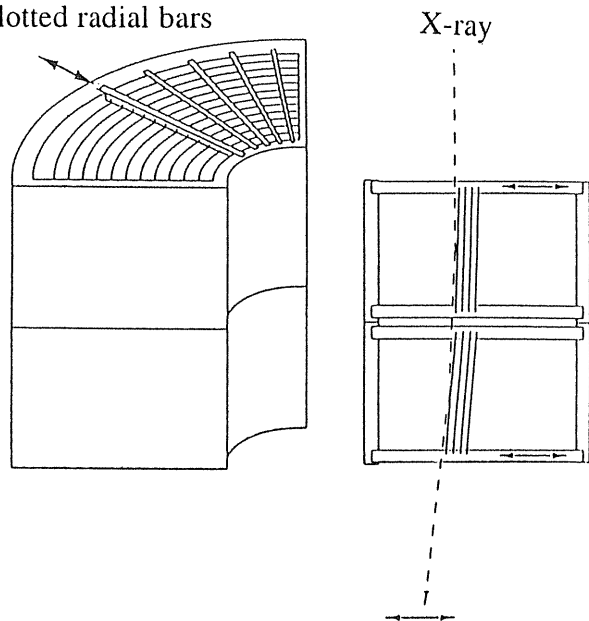


Figure.4 X-ray telescope quadrant housing. 120 foil reflectors are installed in each of two layers. Slotted radial bars supported the reflectors in the each housing.

するため地上較正、軌道上較正、レイトレーシング法の確立を行った<sup>18, 19)</sup>。

X線望遠鏡の地上較正には、図5示す宇宙科学研究所の30m X線ビームライン<sup>20)</sup>を用いた。このビームラインの最上流には回転対陰極型のX線発生装置があり、ターゲットにはAl, Ti, Cu等が準備されている。ターゲットで発生した特性X線と制動放射による連続X線は、長さ30mのダクトに導かれ、4極スリットによって細く絞られる。4極スリットでビームを1mmに絞るときその平行度は $\arctan(1\text{mm}/30\text{m}) \sim 7$ 秒角である。発生装置と4極スリットの間には、ダクト内反射成分の漏れ込みを防ぐための直径20mmのピンホールが3箇所を設置される。X線の単色化は金属フィルターを用いる。サンプルチャンバーにはX線の進む向きをX軸、鉛直上向きをZ軸としたときのY, Z方向の平行移動とX, Z軸回りの回転が可能なステージが設置され、サンプルの任意の位置に任意の入射角でX線を照射することができる。サンプルによって反射或いは回折したX線は、測定チャンバーのXYZステージにセットされたX線

Table 1 Main characteristics of typical X-ray telescopes

	EINSTEIN	XMM	ASCA
Fabrication method	Polishing	Replication	Multi-nested thin foil
launch	1978	1999	1993
Focal Length (mm)	3400	7500	3500
Diameter (mm)	330 - 560	306 - 700	120 - 344
Incident angle (deg.)	0.7 - 1.2	0.29 - 0.67	0.24 - 0.70
Reflecting surface	Ni	Au	Au
Mirror substrate	Glass (Zero Dewar)	CFRP	Al foil (acrylic lacquer)
Reflector thickness (mm)	20	0.6 - 1.4	0.135
Mirror Length (mm)	510	300	100
Number of reflector	4	58	120
effective area (cm <sup>2</sup> )			
(1keV)	400	5000 (3 set)	1300 (4 set)
(7keV)	-	2500 (3 set)	600 (4 set)
weight (kg)	500	510 (3 set)	40 (4 set)
Angular resolution (arcsec.)	6	30	180

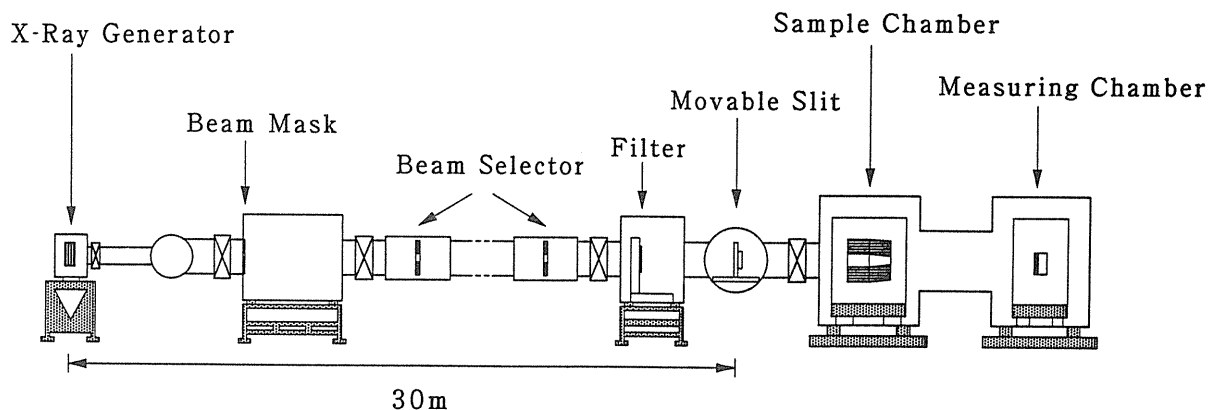


Figure.5 The 30 meter long X-ray beam line at Institute of Space and Astronautical Science. The distance between X-ray source to a slit is 30 meter. The 3.5 meter X-ray telescope can be accommodated in two large chambers. Total volume is separated into 6 sections by 5 gate valves indicated by cross marks.

検出器によって、その位置、エネルギーが測定される。X線検出器には、ガスフロー型比例計数管、一次元位置検出型比例計数管、X線 CCDカメラが準備されている。このビームラインで得られるX線ビームでは、有意な強度の空間非一様性、時間変動とも観測されていない。測定中全系はターボ分子ポンプにより  $10^{-5}$  torrまで排気される。

#### 4.1 有効面積

宇宙研30m X線ビームラインでは口径350mmのX線望遠鏡を一度に照射できない。そこで地上較正実験では、4極スリットで細く絞ったペンシルビームでX線望遠鏡の開口部をくまなく走査する方法をとる。もちろんX線ビームは固定なので、X線望遠鏡と検出器を同期して走査する。有効面積の測定においてはX線ビームを5mmに絞った。これは約30秒角の発散光に対応し、この発散角による影響は十分無視できるほど小さい。X線検出器には直径12mmの入射窓を持つ比例計数管を用いた。直径12mmを越える領域の光量は、一次元位置検出型比例計数管を用いて測定した。その結果60mmと12mm内に含まれる光量の比として、1.08 (1.5keV), 1.15 (4.5keV), 1.17 (8.0keV) が得られた。これは反射鏡表面凹凸の空間周波数  $0.01-0.2\text{mm}^{-1}$  に対して、 $3\sim 5\text{Å}$ の表面粗さで説

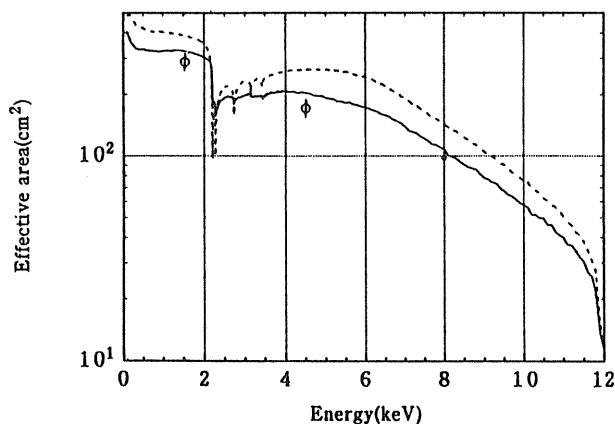


Figure.6 Effective area of an ASCA XRT versus photon energy. The circles represent the measured results, and the dashed and solid curves are derived from the calculation based on an ideal case and a modified case, respectively (see section 5 in text.)

明できる。これらの補正を加えた有効面積の測定結果を図6に示す。ここで得られた有効面積の絶対値は、理想的なレイトレーシングから求めた値に比べ20-30%程度小さい。

X線望遠鏡の光軸と入射X線のなす角 (off-set angle) が大きくなると、有効面積は減少する。これはX線の反射率の低下以上に、それぞれの反射鏡はそのすぐ内側の反射鏡の影になるからである (shadowing effect)。この効果は高エネルギーのX線ほど厳しい。すなわちX線のエネルギーが高くなるに従って、その反射率は望遠鏡のより内側の

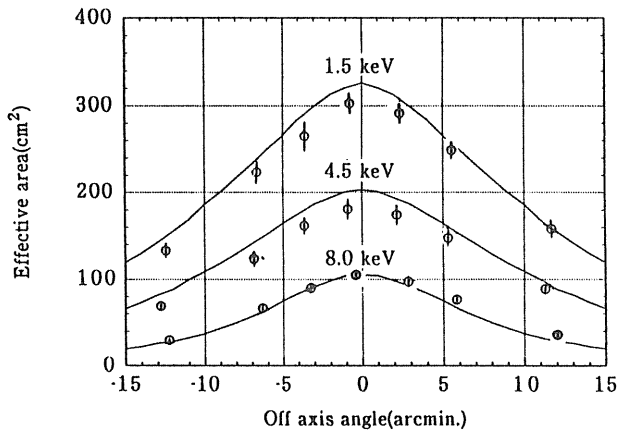


Figure.7 Measured and calculations (solid line) effective area versus off-axis angle at 1.5, 4.5, and 8.0 keV. The field of view is 24, 22, 18 arcmin in FWHM, respectively.

(より入射角の小さい) 反射鏡ほど相対的な効率が高くなる。そしてこの内側の反射鏡は、より密に詰められているため shadowing effect が大きくなるからである。有効面積の入射角依存性も上述と同様の方法で測定した。図7に有効面積の入射角依存性の測定結果を示す。あすかX線望遠鏡の視野は半値幅で、それぞれ 24arcmin (1.5keV), 22arcmin (4.5keV), 16arcmin (8.0keV) である。

#### 4.2 結像性能

結像性能の測定では、X線ビームの平行度を上げるため4極スリットを2mmに絞り(15秒角の発散光)、検出器にX線CCDを用いた。有効面積の測定と同様、開口部をくまなく走査する。図8に4.5keVのX線で得られた像を示す。90度おきの切れ込みは、鏡筒の影である。これらの図から分かるようにあすかX線望遠鏡の点源像は広い分布を示すが、中心部に非常に鋭いピークを持つ。これは、斜入射光学系の特徴であり<sup>21, 22)</sup>、以下のように理解することができる。いま反射鏡の法線ベクトルの揺らぎを  $d\theta$  とする。X線望遠鏡の半径  $R$  の位置に入射したX線は、その反射鏡の法線揺らぎに従って焦点からずれたある点 ( $dF_x$ ,  $dF_y$ ) に到達する。このとき、 $dF_x = 2d\theta \times FL$ ,  $dF_y = 2d\theta \times R$  である。ここで  $FL$  は焦点距離であり、X方向

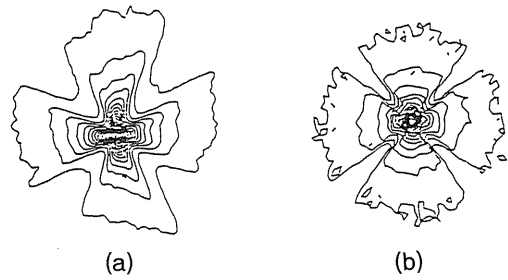


Figure.8 XRT images of a point source at 4.5 keV: (a) Measured on axis image. (b) Image derived from the modified ray-tracing calculations.

はR方向に平行にとった。あすかX線望遠鏡の場合その焦点距離は3500mmであり、半径は60mmから170mmであるから、 $dF_x$ と $dF_y$ の比は、 $dF_x/dF_y = 3500/(60\sim 170) = 20\sim 60$ である。結果、ある微小領域で反射したX線像はそのradial方向に20~60倍引き延ばされる。X線望遠鏡全体の点源像は、この引き延ばされた微小部分像をその光軸回りに重ね合わせたものであり、これによって中心部に鋭いピークを構成する。

X線望遠鏡の点源像を定量的に評価する方法に、PSF (Point Spread Function) とEEF (Encircled Energy Function) がある。PSFは像の中心から距離  $r$  の位置での平均輝度であり、EEFはPSFの積分表示つまり半径  $r$  の円で囲まれた領域に含まれる全エネルギーで、単色X線の場合は光子の個数に等しい。EEFは普通、適当な領域で規格化する。我々はこの規格化する領域として、焦点面上の直径12mm (~12分角) の円を選んだ。点源像のPSFとEEFを図9に示す。PSFが  $r=0$  近傍で平坦になっているのは、X線ビームの拡散光のためであり、X線ビームの発散角15秒角に一致している。このPSFは、平坦部を除く中心部分(半径1分角以内)が(ガウス分布/半径)で、その外側は指数関数でよく合う。このためX線望遠鏡の分解能の指標に、PSFの半値幅を使うのは適当ではない。つまり、(ガウス分布/半径)で表されるPSFの中心部は特異点であり、その半値幅は検出器の位置分解能を上げれば上げるだけ小さくなる。



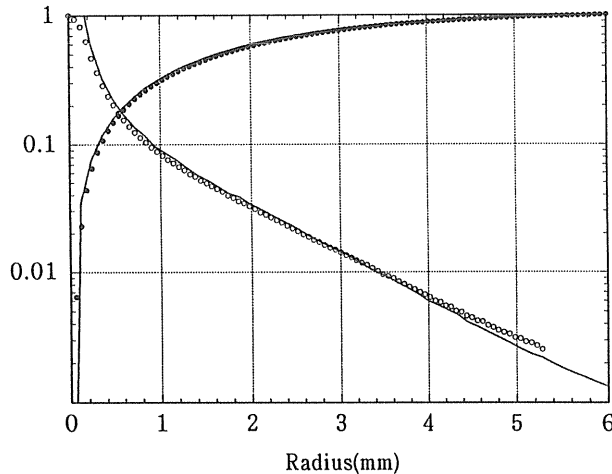


Figure.9 Measured PSF (open circles) and EEF (field circles) at 4.5 keV. The solid curves are calculated by the ray tracing.

そこでX線望遠鏡の角分解能には、HPD (Half Power Diameter) がよく用いられる。これは望遠鏡が集光した光量の内、半分の光量が含まれる半径を言う。あすかX線望遠鏡の場合、反射したX線は広く分布するため、そのHPDは約3分角である。しかし、その点源像は中心に鋭いピークを持つため、約30秒角離れた点源でも分解が可能である。

#### 4.3 迷光

望遠鏡の視野を大きく越えた off-set angle 0.5-1.5度で入射したX線は、通常の2回反射をせずに焦点面に達する場合がある。これを迷光と呼ぶ。この迷光は目的の観測に対してはバックグラウンドであり、X線望遠鏡の検出能力を下げる。このため迷光が通過するパスやその特性を把握することは重要である。通常のX線望遠鏡には迷光のパスとして、1) 一段目のみで反射したX線 2) 二段目のみで反射したX線 3) 一段目、二段目の両方ともに当たらない直接X線が考えられる。あすかX線望遠鏡の場合は更に、4) 反射鏡の背面で反射したX線も迷光のパスとして存在する。これはあすかX線望遠鏡の反射鏡の両面に、表面粗さを押さえるためのアクリルコーティングがディップ

法により施してあるため、これは低エネルギーのX線に対しては効率の良い反射面となる。この迷光を防ぐ方法として他のX線望遠鏡では迷光ストッパーを置く方法も採られているが、多重薄板型の場合、反射鏡と反射鏡の間隔が $\sim 1\text{mm}$ と狭く、このようなストッパーを置くことは事実上不可能である。

あすか衛星の検出器の一つである撮像型蛍光比例計数管を用いて得られたあすかX線望遠鏡の迷光のパターンをレイトレーシングの結果とともに図10に示す。迷光の分布はレイトレーシングの結果と良く一致し、その絶対強度も10%程度の範囲内で一致している。

#### 5. 光線追跡法 (レイトレーシング法)

地上で行われる較正は、飛び飛びのエネルギー或いは入射角での有効面積、PSFの決定であり、また軌道上においてもその入射角は飛び飛びである。これらの結果から、任意のエネルギー、入射角を持つ光子が望遠鏡を通してどのように振る舞うかを知るためにはレイトレーシング法の開発は不可欠である。較正によって得られた性能を反映させたレイトレーシング法を確立することによって、任意の観測における有効面積とPSFのエネルギーおよび入射角依存性を供給することができる。またこれによって有効面積や結像性能の劣化の原因を定量的に明らかにでき、将来のX線望遠鏡の開発方針を示すことができる。

あすかX線望遠鏡のレイトレーシングでは、まずあるエネルギー、ある方向ベクトルを持ったX線を望遠鏡の全面から打ち込む。このときX線望遠鏡の入射面での光子の位置はランダムに決められる。その後光子はその方向ベクトルに従って進み、1段目の反射鏡に当たるかどうか判断される。反射鏡に当たった光子はその反射率に従って、反射(散乱を含む)或いは吸収される。反射したX線の方法は、ある確率分布に従って選ばれる。これは、反射ビームの広がりや散乱を考慮したもので

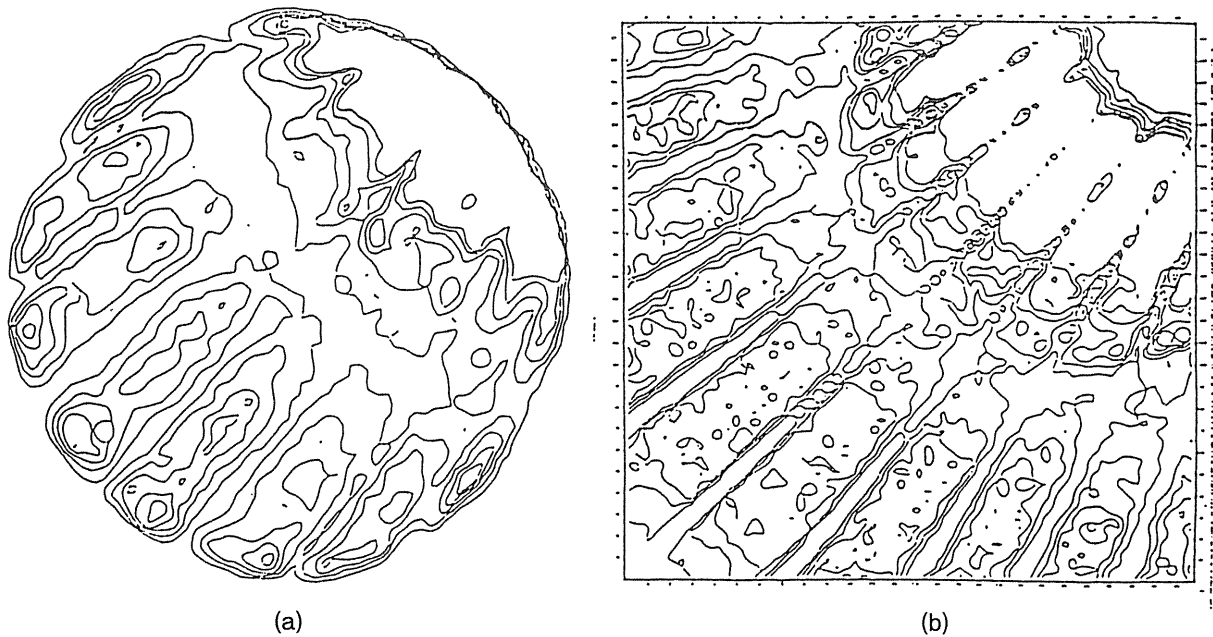


Figure.10 Distribution of stray photons from a source at an off-axis angle of 1 degree in the direction of the top right corner: (a) observed GIS image, in which the aperture is 50 mm diameter and the distribution is compressed near the detector edge due to the response. (b) from the ray tracing. The lower left region is contaminated by photons reflected by backside surface and the upper right region is contaminated by the photons reflected only on secondary mirrors.

ある。光子の反射或いは吸収，反射光子の方向の決定はモンテカルロ法で行う。その後光子はその方向ベクトルに従って，次の反射鏡へと進んでいく。このレイトレーシングでは，有効面積の計算に40,000個の光子について，結像性能を求めるときは，1,000,000個の光子についてシミュレーションを行った。

### 5.1 反射率

3.1で述べたように，X線の反射率はその光学定数によって(3)式から計算される。しかしながら現在まで，信頼性の高い光学定数のデータセットは存在しない。この原因はX線領域の物質の屈折率は，表面の粗さ，酸化，吸着等の影響を受けやすく，従って製作方法の違いによるところが大きいからである。特に屈折率が不連続に変化する吸収端ではこの傾向が大きい。このため，我々はあすかX線望遠鏡の金の反射鏡に対してその光学定数を，その反射率測定と軌道上較正のデータか

ら求めた。以下この光学定数の決定について述べる。

あすかX線望遠鏡の反射鏡サンプルを，Al-K (1.5keV)，Ti-K (4.5keV)，Cu-K $\alpha$  (8.0keV)の特性X線を用いて反射率を測定した。また金のM吸収端付近の反射率測定は，分子科学研究所UVSOR施設のBL-7Aの単色X線を用いて行った。その結果を図11，及び図12に示す。光学定数は，反射率測定の結果を(3)式を用いて，光学定数をフリーパラメータとしたフィッティングにより決定する。この手法を特性X線の結果とUVSOR BL-7Aの結果の両方に適用するのであるが，UVSORのデータでは，各々のエネルギーに対して，角度の関数で見た反射率の結果は，0.3，0.5，0.7，1.0，1.2度の5点しか存在しない。この5点に対して，光学定数 $\delta$ ， $\beta$ の2つのフリーパラメータでフィッティングを行うと，それぞれが大きな決定誤差を持ってしまう。そこで，フィッティングは $\beta$ を固定のもとで行った。この

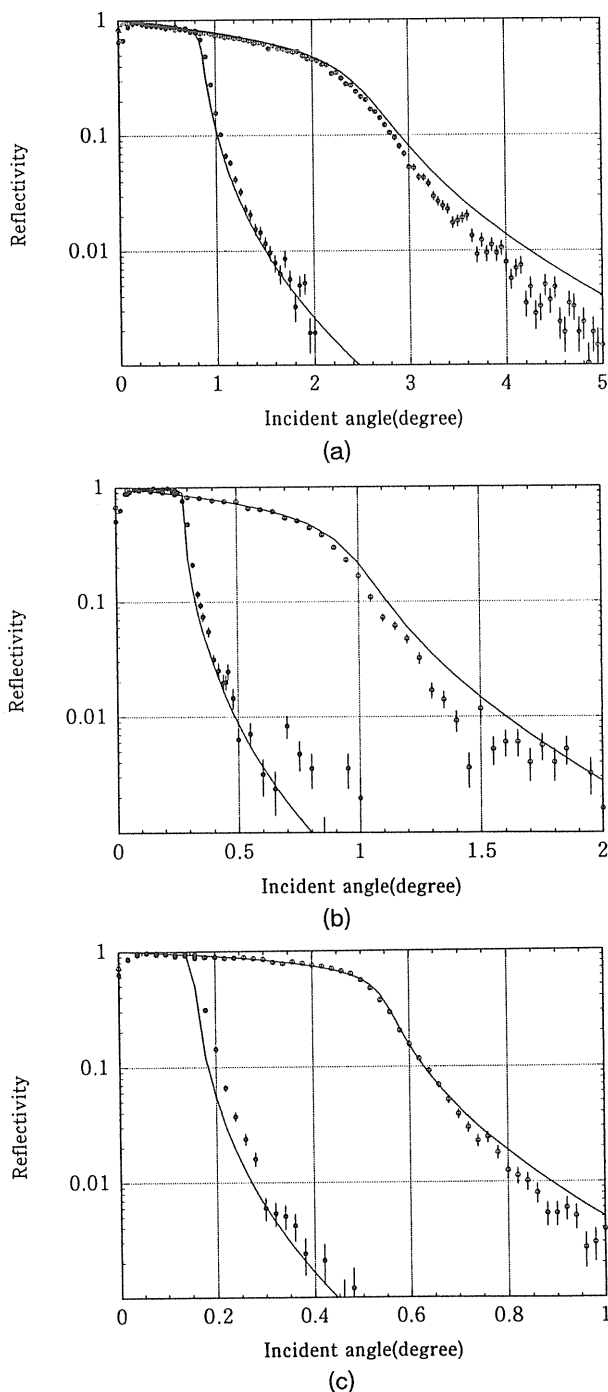


Figure.11 Results of the reflectivity measurements. (a), (b), (c), the reflectivity of the ASCA reflector at 1.5, 4.5, and 8.0 keV, respectively. The open and filled circles represent the reflectivity of the front (gold) and back (acrylic lacquer) surfaces. The solid curves are from the calculations with the surface micro roughness of 5Å.

理由は、 $\beta$ はX線の吸収に関連づけられる因子であり、その測定方法は単純でかつ過去権威あるデータセットが何例かそろっているからである。フィッティングに用いた $\beta$ の値は、Henke et. al.<sup>23)</sup>

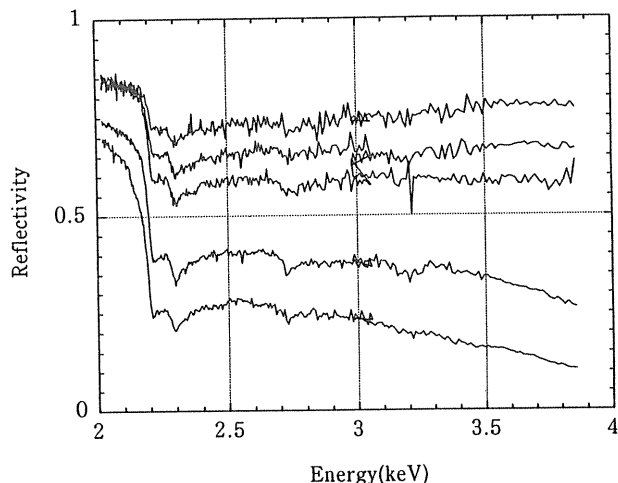


Figure.12 Results of the reflectivity measurements at UVSOR BL7A. Gold M absorption edge structures are clearly seen at 2.21, 2.29, and 2.74 keV.

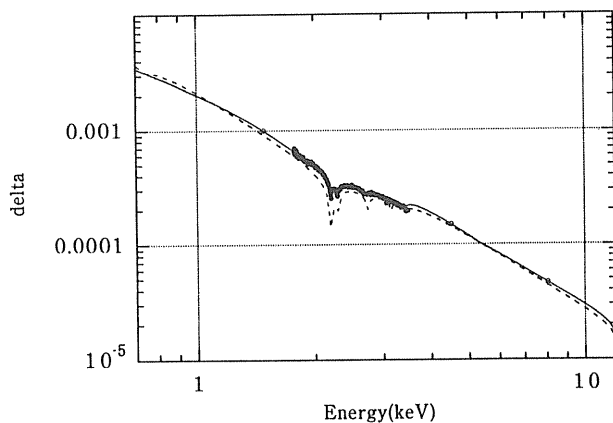


Figure.13 Optical constants,  $\delta$ . The open and filled circles are derived by the fitting of the reflectivity measurements in Fig.11 and Fig.12, respectively. The solid curve represents the  $\delta$  installed in the modified ray tracing program, and dotted curve is calculated by the use of the empirical formula.

を参照した。

最終的な光学定数の決定は、軌道上較正のデータを用いた。標準X線天体である蟹星雲の観測では、光学定数の経験関数<sup>24)</sup>から求めた有効面積は2~5keVと7keV以上に本来のものとの食い違いが存在する。この食い違いをなくす様に、光学定数を決め直した。この調整過程でも、 $\beta$ については、Henke et. al.のテーブルで固定したままである。図13に最終的に決められた $\delta$ の値を示す。比較のため、フィッティングによって決められた $\delta$

と、経験関数によって決められた $\delta$ も合わせて示す。

## 5.2 Broadening Effect

多重薄板型のあすかX線望遠鏡は、その設計値から計算される理想的な結像性能はHPDで0.5分角である。しかしながら、実際のHPDは約3分角にとどまっており、その主な原因は、a) 表面粗さによるX線散乱、b) 反射鏡の形状誤差、c) 個々の反射鏡のミスアラインメントによる反射ビームの広がりである。そしてこの反射ビームの広がりには単にX線像の質を下げるだけでなく、有効面積の減少を生み出す。反射鏡の不完全性のため設計の軌道から外れた光子の中には、すぐ内側の反射鏡の背面に当たるものや、2段目の反射鏡に当たらないものがある。こういった光子が焦点面に達する場合は即ち迷光であり、反射ビームの広がり、光軸方向からきた光子に対してもこのような迷光を生み出す。特に多重薄板型の場合、反射鏡は密に詰め込まれているため、内側の反射鏡の背面に当たる光子が多い。ここではこれら反射ビームの広がりを、個々の要因に着目しながら、レイトレーシングシミュレーションへの組み込みについて述べる。

a) 表面粗さによるX線散乱とb) 反射鏡の形状誤差は、反射鏡表面の円錐からのずれであり、その表面波長に従って、数 $\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ の表面粗さ、mmスケールのwaviness、10mm以上の形状誤差の3つに分けられる。これら3つの境界の波長ははっきりと決まるわけではないが、表面粗さはX線回折を引き起こし(主に1次光)、散乱X線の原因となる。mmスケールのwavinessや形状誤差は、反射鏡の法線ベクトルのゆらぎを作り、0次光ではあるが、反射ビームを本来の軌道からはずす。これらを定量的に理解するために、反射鏡サンプルの反射像を詳しく調べた。

反射像の測定は、宇宙研30mX線ビームラインで、X線ビームを0.2mmに絞って行った。測定に

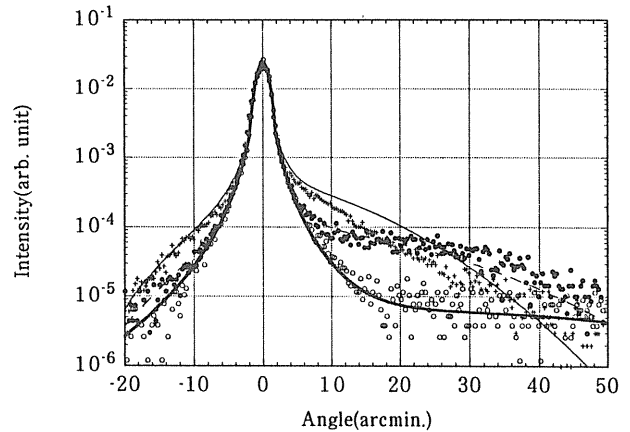


Figure.14 The reflected beam profiles. The open circles, filled circles, and crosses show the measured results at 1.5, 4.5, and 8.0 keV, respectively. The thin, dotted, and thick curves represent the model calculations installed in the present ray tracing program. The incident beam of the width of 0.2 mm is negligible small in this plot.

用いたX線は、Al-K (1.5keV)、Ti-K (4.5keV)、Cu-K $\alpha$  (8.0keV) の特性X線で、検出器には位置検出型比例計数管を用いた。図14に測定結果を示す。X線の斜入射角は0.4度である。この図から反射像は、エネルギーに依存しないcoreと、エネルギーに依存したテールで構成されていることが分かる。あすかX線望遠鏡サンプルの場合、エネルギー依存しないcoreは、

$$f_{\text{core}}(\delta\theta) = \exp\left(-\frac{\delta\theta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\delta\theta \leq 2 \text{ arcmin})$$

$$= 10^{(a+b \log_{10} \delta\theta + c(\log_{10} \delta\theta)^2)} \quad (\delta\theta > 2 \text{ arcmin})$$
(10)

で表される。ここで $\delta\theta$ は期待される反射角(=入射角)からのずれであり、単位はarcminである。 $\sigma$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は広がりを示すパラメーターであり、図14からそれぞれ0.8840、-0.5456、-1.719、-0.7066となった。coreの分布は、反射鏡表面でのX線ビームのスポットサイズ( $\sim 20\text{mm} = 0.2\text{mm}/\sin 0.4^\circ$ )で見たときの法線ベクトルのゆらぎを表し、mmスケールのwavinessによる。

エネルギー依存する散乱テールは、表面粗さに

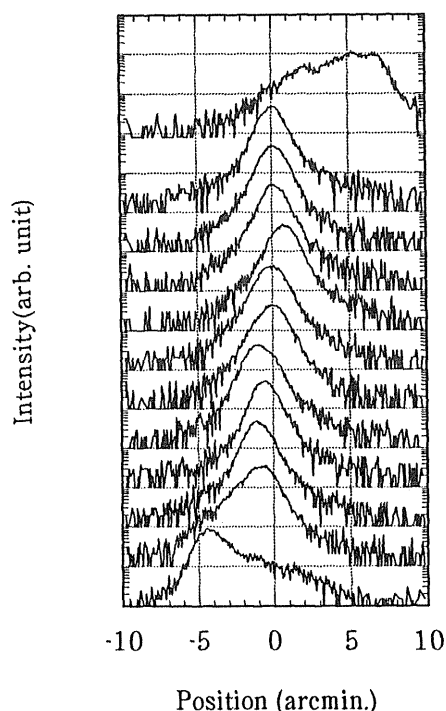


Figure.15 The X-ray beam profiles reflected by small part of a reflector that is 1mm×9mm. To avoid overlap, we offset each piece of data from the previous one in the plot. Each profile comes from a spot every 9mm from the top to the end of the foil along the X-ray beam axis.

よる散乱成分であり、散乱角  $\theta_s(\theta_i + \delta\theta)$  に散乱される強度は (7) 式で表されるが、この測定によって PSD 関数  $W(p)$  が決定できる。図 14 に示された 3 本の曲線は、(7) 式を変形した、

$$f_{\text{sca}}(\delta\theta; E, \theta_i) = sE^3 \sin\theta_i \sin^2(\theta_i + \delta\theta) W(p) \\ W(p) = \exp(tp) \quad (11)$$

である。ここで  $E$  は X 線のエネルギーで単位は keV,  $\theta_i$ ,  $\delta\theta$  は arcmin である。実験式  $W(p)$  における  $p$  は (5) 式から求まり、単位は  $1/\text{\AA}$  にとった。またパラメーター  $s$ ,  $t$  の値は、68.88, -9329 となった。(10), (11) 式の関数は、反射する X 線の方向を決める確率分布としてレイトレーシング法に取り込む。つまり反射する X 線の方向は、これらの関数の確率分布でモンテカルロ法で決定する。

10mm 以上の形状誤差は、0.2mm の X 線ビーム

を使って反射鏡を X 線ビームに対して走査して測定した。斜入射角は 1.26 度とした。この設定でのビームの反射面上でのスポットサイズは約 9mm ( $= 0.2\text{mm}/\sin 1.26^\circ$ ) である。これで一枚の反射鏡から 12 点の独立な位置でその反射像が得られる。但し、この設定で十分な反射率が得られるのは、エネルギーの低い Al-K (1.5keV) だけである。測定結果を、図 15 に示す。図中の曲線は、一枚の反射鏡上でビームのスポットサイズと同じ 9mm 離れた独立な点の反射プロファイルである。それぞれの反射プロファイルのピーク位置のゆらぎは、そのスポットサイズで見た平均の法線ベクトルのゆらぎを表す。この測定結果から、法線ベクトルのゆらぎの分布として、 $\Gamma = 1\text{arcmin}$  のローレンツ関数を得た。

個々の反射鏡のミスアラインメントは、あすか X 線望遠鏡のアラインメントバーの溝幅  $175\mu\text{m}$  と反射鏡の厚さ  $135\mu\text{m}$  との間の遊びが原因である。この遊びのため、反射鏡全体の法線ベクトルはその設計値のまわりで最大  $\pm \arctan((0.175-0.135)/100) \sim 1.4\text{arcmin}$  ゆらぐ。このゆらぎは、反射鏡 1 枚 1 枚に X 線を照射して、その焦点面でのピーク位置のゆらぎとして調べた。この結果を、その期待される分布とともに図 16 に示す。レイトレーシングシミュレーションには、反射鏡の上端と下端の位置が、その設計値に対して、 $\pm 20.0\mu\text{m}$  だけランダムにずれるとした。

より現実的な修正を加えたレイトレーシング法を用いて、それぞれの要因が結像性能、有効面積に与える影響を調べることができ、またこれは将来の X 線望遠鏡の開発方向を明らかにする。表面粗さによる散乱の影響はエネルギーに依存するため、この評価を 1.5keV と 8.0keV の X 線について行った。表 2 に 1.5keV と 8.0keV の X 線についてそれぞれの要因が HPD に与える影響をまとめる。この結果散乱成分は結像性能を HPD で表現するとき、現在の表面粗さのレベルで既にあすか X 線望遠鏡に影響を及ぼさないことが分かる。しかしな

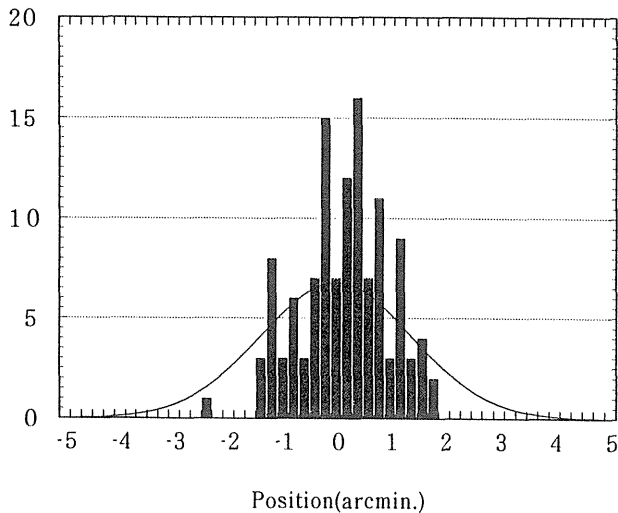


Figure.16 Histogram of X-ray peak positions of the reflected beam by each reflector on the focal plane. The expected distribution 120 foils is shown by a solid curve.

がら、特に高エネルギー X線に対しては、散乱された光子は大角度まで分布するため、実観測において、目的の観測対象の近傍に明るい点源が存在する場合や、中心部より2-3桁も表面輝度が低い銀河団等の外縁部を調べたいときには問題となる。よってその改善を無視して良いものではない。また多重薄板 X線望遠鏡の結像性能改善において、反射鏡の形状誤差, waviness, 表面粗さの改善だけでは決して1分角を切ることはできないことも分かる。この場合ミスアラインメントの効果がきいてくるため、将来の望遠鏡では反射鏡の改善と同時にアラインメント法の改善も要求される。

反射 X線が本来の軌道からはずれたことによる有効面積の減少もシミュレーションによって知ることができる。1.5keV の X線に対して、形状誤差, waviness, 表面粗さ, ミスアラインメントが有効面積の減少に与える影響はそれぞれ, 12%, 3%, 1%, 6%であり, また8keV の X線に対するそれは, それぞれ9%, 3%, 10%, 15%である。これらの数値は上で述べたように, それぞれの要因を完全に排除したときに得られる値で, 2度以上計数された光子もある。よってすべての要因を取り除いたときに期待される有効面積の改善

Table 2 Effect of each error to the image quality.

	1.5keV	8.0keV
Current HPD	3.3	3.3
micro-roughness	0	0
mm scale waviness	1.9	1.9
figure error	2.1	1.9
mis-alignment	1.9	1.9

は, これら数値の単純な和ではない。実際に1.5keV, 8keV の X線に対し, 現在の有効面積の減少分は, それぞれ20%, 30%程度である。

最後に, ここで述べたレイトレーシングの流れを図17にまとめておく。

## 6. まとめ

X線ペンシルビームを用いて多重薄板型のあすか X線望遠鏡の X線光学特性を求め, その有効面積は理想的な場合に比べ20-30%小さいこと, その点源像はHPD3分角の広い分布の中心部に鋭いピークを持つことを明らかにした。有効面積, 結像性能の劣化原因を探るため, 反射鏡サンプルの反射率測定から, その光学定数を導きだし, 像を乱す原因である反射鏡の表面粗さ, サブmmから数mmのwaviness, 数mm以上の形状誤差, 各々の反射鏡間のミスアラインメントを定量的に調べた。ここで得られた光学定数と, 反射ビームの広がり方を考慮したレイトレーシング法を開発し, X線望遠鏡の応答関数を決定した。またこれにより, 反射像の広がりが結像性能だけでなく有効面積に与える影響も定量的に評価した。

この研究は多重薄板 X線望遠鏡の取り扱い法を確立しただけでなく, 将来の X線望遠鏡に対してもその開発の指針を与える。日本の次期 X線天文衛星 ASTRO-E (2000年度打ち上げ予定) では, 角分解能1分角以下を目標にしており, これは現在の多重薄板型では不可能である。このため, アルミフォイルでレプリカをとる方法が検討され,

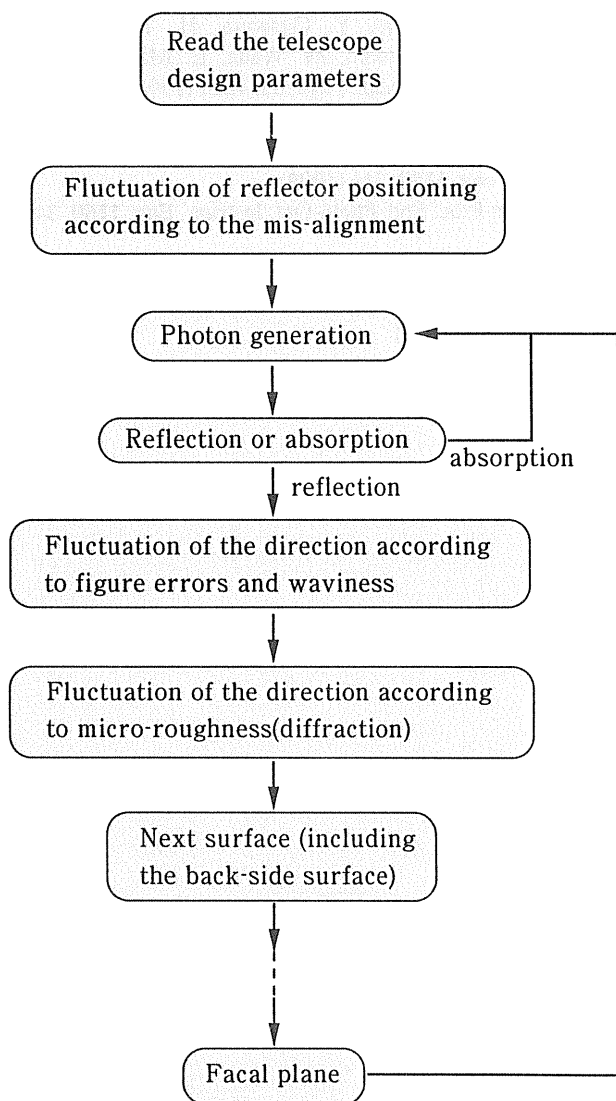


Figure.17 Flow chart of our ray tracing calculation.

現在までに1分角程度の分解能を持つ薄板反射鏡の見通しが得られている。今後の課題として、各反射鏡のアラインメント法の改善が必要であろう。

### 謝辞

ここで紹介した研究は、NASA/GSFCのP. J. Serlemitsos 博士、L. Jalota 博士、Y. Soong 博士、宇宙科学研究所の伊藤真之博士、小賀坂康志氏、本多博彦氏、京都大学の粟木久光博士、現浜松フォトニクス(株)の鈴木久則氏、現東芝(株)の内堀康弘氏との共同研究により行われたものである。また、宇宙科学研究所における較正実験では、大阪大学理学部の常深博教授、林田清博士を

はじめ宮本研究室の大学院生の方々に、迷光の測定では東京大学理学部牧島研究室の大学院生の方々に協力頂いた。UVSORにおける測定では、施設のスタッフの方々に協力を頂いた。ここに深い感謝の意を表す。

### 文献

- 1) R. Giacconi, G. Branduardi, U. Briel, A. Epstein, D. Fabricant, E. Feigelson, W. Forman, P. Gorenstein, J. Grindlay, H. Gursky, F. R. Harnden, Jr, J. P. Henry, C. Jones, E. Kellogg, D. Koch, S. Murray, E. Schreier, F. Seward, H. Tananbaum, K. Topka, L. Van Speybroeck, S. S. Holt, R. H. Becker, E. A. Boldt, P. J. Serlemitsos, G. Clark, C. Canizares, T. Markert, R. Novick, D. Helfand, and K. Long: *Astrophys. J.* **230**, 540 (1979)
- 2) Y. Tanaka, H. Inoue and S. S. Holt: *Publ. Astron. Soc. Japan* **46**, L37 (1994)
- 3) P. J. Serlemitsos, L. Jalota and Y. Soong, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Tsusaka, H. Suzuki, Y. Sakima, T. Yamazaki, H. Yoshioka, A. Furuzawa, K. Yamashita, M. Itoh, Y. Ogasaka, H. Honda, Y. Uchibori and H. Awaki: *Publ. Astron. Soc. Japan* **47**, 105 (1995)
- 4) B. E. Burke, R. W. Mountain, P. J. Daniels, M. J. Cooper and V. S. Dolat: *IEEE Trans, Nucl. Sci.* **41**, 375 (1994)
- 5) Y. Kohmura, Y. Fukazawa, Y. Ikebe, Y. Ishisaki, S. Kamijo, H. Kaneda, K. Makishima, K. Matsushita, K. Nakagawa, M. Tashiro, T. Ohashi, H. Inoue, M. Ishida, F. Makino, T. Murakami, Y. Ogawara, Y. Tanaka, Y. Ueda, K. Ebisawa, T. Mihara, T. Takeshima, T. Tsuru, K. Hiyoshi, M. Horii, R. Shoumura and K. Taguchi: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. eng.* **2006**, 78 (1993)
- 6) R. Petre and P. J. Serlemitsos: *Appl. Opt.* **24**, 1833 (1985)
- 7) L. G. Parratt: *Phys. rev.* **95**, 359 (1954)
- 8) E. L. Church, H. A. Jenkinson, and J. M. Zavada: *Opt. Eng.* **16**, 360 (1977)
- 9) P. A. J. de Korte and R. Laine: *Appl. Opt.* **18**, 236 (1979)
- 10) H. Kunieda, S. Hayakawa, T. Hirano, T. Kii, F. Nagase, N. Sato, Y. Tawara, F. Makino, and K. Yamashita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, 1292 (1986)
- 11) H. Wolter: *Annalen der Physik* **10**, 94 (1952)
- 12) L. P. Van speybroeck: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **106**, 136 (1977)
- 13) B. Aschenbach: *Appl. Opt.* **27**, 1404 (1988)
- 14) P. A. J. de Korte, R. Giralt, J. N. Coste, C. Ernu, S. Frindel, J. Flamand, and J. J. Contet: *Appl. Opt.* **20**, 1080 (1981)
- 15) W. Egle, H. Bulla, D. Scheulen, B. Aschenbach, and H. Brauning: *Opt. Eng., Bellingham* **29**, 1260 (1990)
- 16) W. Egle, H. Bulla, P. Kaufmann, B. Aschenbach, and H. Brauning: *Opt. Eng. Bellingham.* **29**, 1267 (1990)
- 17) P. J. Serlemitsos, F. E. Marshall, R. Petre, K. Jahoda, E. A. Boldt, S. S. holt, R. Mushotzky, J. Swank, A. Szymkowiak, R. Kelley and M. Loewenstein: *Frontiers*

- of X-Ray Astronomy (Universal Academy Press Tokyo 1991), p. 221.
- 18) Y. Tsusaka, H. Suzuki, H. Awaki, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Ogasaka, Y. Uchibori, H. Honda, M. Itoh, H. Tsunemi, K. Hayashida, S. Nomoto, M. Wada, E. Miyata, P. J. Serlemitsos, L. Jalota, and Y. Soong: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **2011**, 517 (1993)
- 19) Y. Tsusaka, H. Suzuki, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Ogasaka, Y. Uchibori, H. Honda, M. Itoh, H. Awaki, H. Tsunemi, K. Hayashida, S. Nomoto, M. Wada, E. Miyata, P. J. Serlemitsos, L. Jalota, and Y. Soong: to be appeared in Appl. Opt. **34** (1995)
- 20) H. Kunieda, Y. Tsusaka, H. Suzuki, Y. Ogasaka, H. Awaki, Y. Tawara, K. Yamashita, T. Yamazaki, M. Itoh, T. Kii, F. Makino, Y. Ogawara, H. Tsunemi, K. Hayashida, S. Nomoto, M. Wada, E. Miyata and I. hatsukabe: Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 4805 (1993)
- 21) J. R. Lemen, E. S. Claflin, W. A. Brown, M. E. Bruner, R. C. Catura and M. D. Morrison: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. eng. **1160**, 316 (1989)
- 22) P. Glenn: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1160**, 349 (1989)
- 23) B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka, R. L. Shimabukuro, and B. K. Fujikawa: Atomic Data and Nuclear Data Tables **27**, 1 (1982)
- 24) R. Giacconi, W. P. Reidy, G. S. Vaiana, L. P. Van Speybroeck, and T. F. Zehnpfenning: Space Sci. Rev., **93** (1969)

## きいワード

### Wolter I型光学系

光軸方向から入射した光に対し焦点を結ぶ回転放物面と、曲面上の任意の点における接線がその点と2つの焦点を結んだときにできる角を二分する回転双曲面を組み合わせた光学系で、放物面の焦点と双曲面の1焦点とを共焦点になるように配置す

ることで光軸からの光は一点に集光する。1回反射の斜入射の放物面鏡を用いる場合、光軸に対しある角度を持つ光に対しては像を結ぶことはないが(コマ収差)、偶数回の反射を用いるとこのコマ収差は十分無視できる。この光学系は完全な無収差光学系ではないが、近似的に無収差光学系の条件(Abbeの正弦条件)を満たす。