

次期X線天文衛星ASTRO-HのSXT EMの地上性能 評価

首都大学東京 都市教養学科 理工学系 物理学コース 修士1年
富川和紀

概要

X線望遠鏡の持つ高い角分解能と集光力はX線天文学に飛躍的な発展をもたらした。高い角分解能は観測天体の位置・空間構造の把握に貢献し、集光力は検出器の小型化とともにS/N比の向上を可能にした。

X線はほとんどの物質に対し屈折率が1よりもわずかに小さいため、反射させるためには非常に小さい角度で反射鏡に入射させる必要がある。そのため、X線望遠鏡には回転放物面鏡と回転双曲面鏡を組み合わせた Wolter I 型斜入射光学系が使われている。しかしX線が反射鏡に当たる面積は非常に小さいため、集光されるX線は極めて少ない。そのため、反射鏡を同心円状に多重に積層した「多重薄板型」X線望遠鏡が考案され、より多くのX線を集光できるようになった。

2007年7月に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」には、厚さ $180\mu\text{m}$ の反射鏡を同心円状に175枚積層した「多重薄板型」X線望遠鏡が搭載されている。すざくの望遠鏡は焦点面において、HPD(Half Power Diameter)が1.8分角の像の広がりをもつ。

2014年度打ち上げ予定の次期X線天文衛星「Astro-H」に搭載されるSXT(Soft-X-ray-Telescope)は、すざく衛星と同じ「多重薄板型」X線望遠鏡が採用されている。Astro-Hでは反射鏡の枚数は203枚積層され重量は40kgと重くなったが、1kgあたりの有効面積は従来のSXTよりも大きくなった。

我々は2011年秋に宇宙科学研究所の30mビームラインを用いてSXT EM(Engineering Model)の性能評価を行った。その結果、HPDは1.27分角を達成し、要求である1.7分角を大きく上回る結果となった。また、焦点距離の正確な割り出しや、Quadrantのlocalな部分のHPDも測定し、そのばらつきを調べた。

第1章 X線望遠鏡

1.1 X線望遠鏡に用いられる光学系～斜入射光学系～

可視光で像をつくるには、レンズを利用した屈折光学系を用いるのがふつうである。しかしX線領域ではほとんどの物質に対して屈折率が1よりもわずかに小さいため、ほとんど屈折を起こさない。そのためX線を集める技術は反射光学系を用いるのが一般的である。しかしX線の直入射の反射率は非常に小さいので、臨界角以下(～1°以下)の小さい角度で全反射をさせて集光させる、斜入射光学系を用いる。斜入射光学系の例を図2.1に示す。Wolter I型斜入射光学系では、回転放物面と回転双曲面の内面で入射されるX線を2回反射させ、焦点に集光させる。これにより焦点距離を短くすることができる。

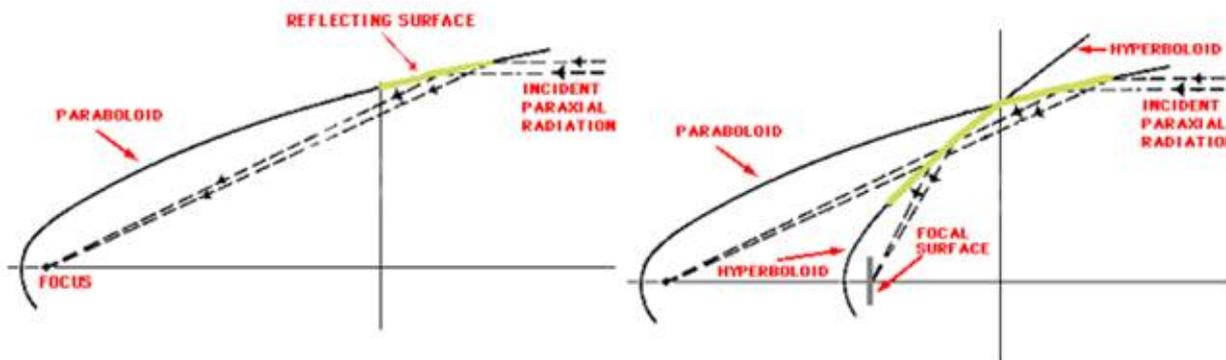


図 1.1: (左) : 回転放物面反射鏡、(右) : Wolter I 型反射鏡

1.2 X線望遠鏡の種類

斜入射光学系では、X線入射方向から見た鏡の見込む面積は小さくなり、鏡の実面積の1/100以下になる。そのため集光力を増すには鏡は1枚ではなく、図1.2に示すように多数の鏡を同心円上に配置することが必要になる。

1.2. X線望遠鏡の種類

1.2.1 多重薄板型

集光力をできるだけ大きくするため考案された望遠鏡として、「多重薄板型」X線望遠鏡がある。これは、基板の厚さを ~ 0.2 mmと極力薄くし、非常に多数(~ 200 枚)の反射鏡を同心円状に並べたもので、軽量でありながら高い開口効率を実現する。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板に金のレプリカをとる方法によって平滑な鏡面を実現している。ただし反射鏡は2次曲面ではなく、円錐面に近似して製作している。我が国では、あすか衛星をはじめ、Astro-E、すざく衛星と、このタイプの望遠鏡の開発を進めてきた。

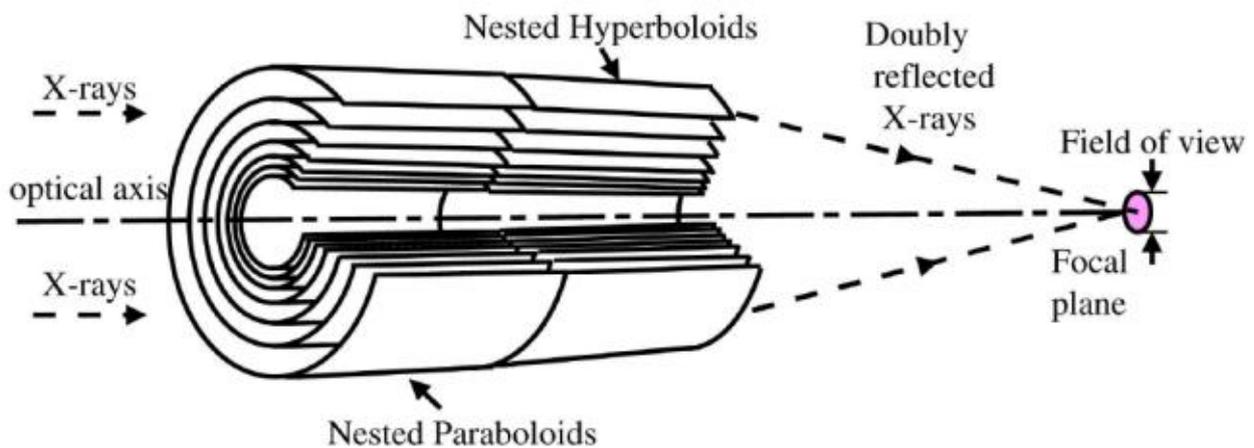


図 1.2: X線望遠鏡の断面図-複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I)X線望遠鏡の断面図

1.2.2 直接研磨型

一方、望遠鏡の結像性能を重視した「直接研磨型」X線望遠鏡がある。これは鏡面を直接切削、研磨し、正確な非球面(放物面又は双曲面)加工を行う。具体的には、ゼロデュアーガラス¹を、小型工具を走査させ部分的に工具の滞留時間をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその表面に金などを蒸着し反射率を稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確な理想2次曲面に加工することができるため、非常に高い結像性能を実現することができる。実際に「直接研磨型」X線望遠鏡を搭載したChandraでは結像性能0.5秒角を達成している。しかし、加工のため基板として用いるガラスの厚さを数cm程度必要とするため開口効率は非常に悪く、またその重量は非常に大きくなる。ChandraではX線望遠鏡だけで1.5トンもの重さになる。

¹熱膨張率が非常に小さく、宇宙空間のような苛酷な状況下でも安定して高分解能の結像性能を保つことができる。

1.2. X線望遠鏡の種類

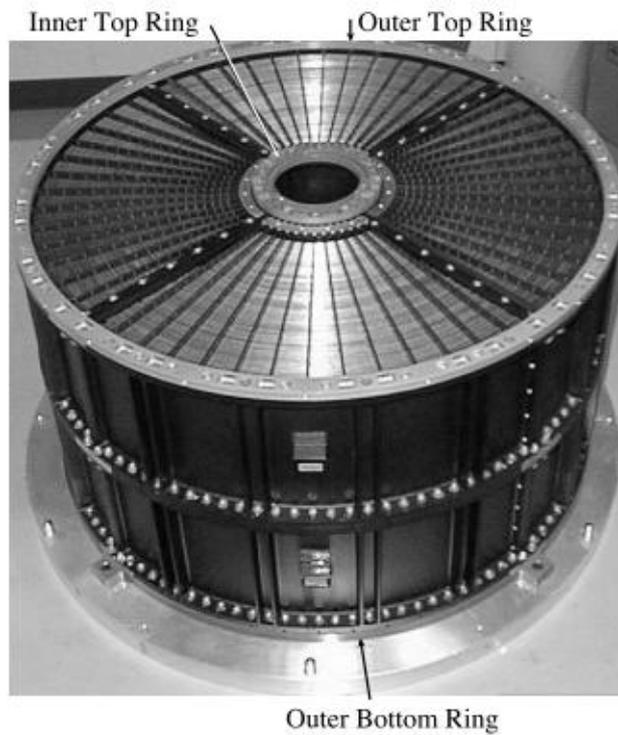


図 1.3: 「多重薄板型」X線望遠鏡-写真は Astro-E の XRT である。~180 μm という薄さの反射鏡(基板: アルミニウム)が 0.5 ~ 1.2mm 間隔で 175 枚も並べられている。1 台 20 kg という軽さで大有効面積を実現する。

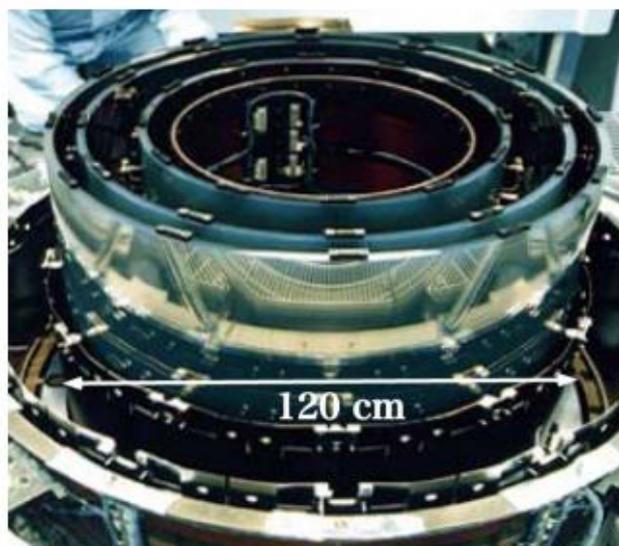


図 1.4: 「直接研磨型」X線望遠鏡-写真は Chandra の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡(基板: ガラス)が 4 枚並べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし重さは 1 台で 1 トンもある。

1.3 X線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能は大別すると集光力と結像性能によって表される。ここではこの2つの性能を評価するために必要な物理量を定義する。

1.3.1 集光力（有効面積）

X線望遠鏡の集光力は、光軸方向から見た反射面の面積（開口面積）に、反射率を掛けた有効面積と呼ばれる量で表す。有効面積 S_{eff} は次の式で定義される。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta)R^2(\theta, E) \quad (1.1)$$

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ 、エネルギー E の時の鏡面の反射率である。反射は一段目と二段目でそれぞれ入射角 θ の2回反射となるため、 $R^2(\theta, E)$ となっている。ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に焦点距離を一定にして口径を大きくしただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めない。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大きくしても有効面積が増えることはない。そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが口径内に占める反射面の割合（開口効率）である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄くし、積層枚数を上げればよい。様々な衛星の有効面積の比較を図 1.5 に示す。

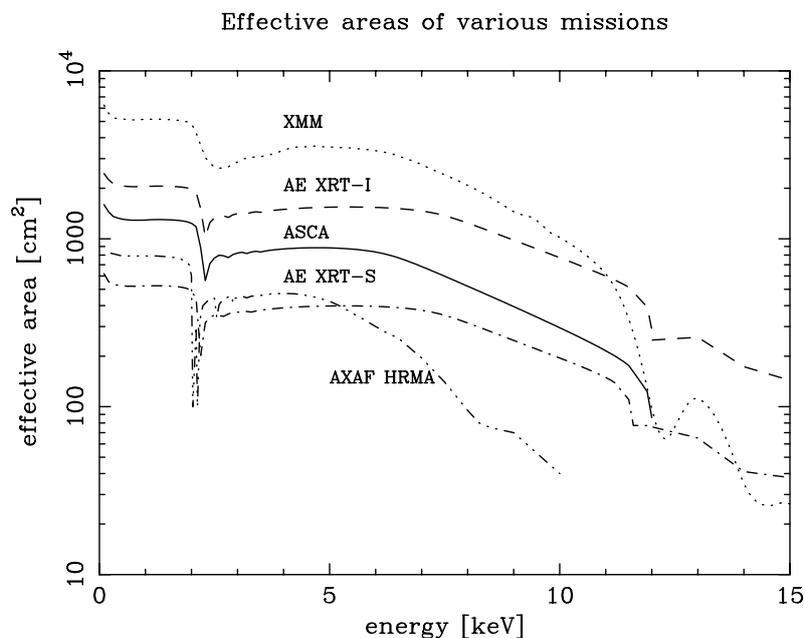


図 1.5: 様々な衛星に搭載される X線望遠鏡の有効面積（XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積 である。） - AE は Astro-E の略である。

1.3. X線望遠鏡の性能

1.3.2 結像性能 (HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下のような 3 つの物理量が用いられる。

1. HPD (Half Power Diameter) - 全光量の 50% が含まれる円の直径

平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 1.6 に示す。理想的には、イメージは 1 点に結像するが、実際には、図 1.6 のように、広がりを持ったイメージとなり、この広がり的大小で結像性能 (角分解能) が決まる。この広がり的大小を表すのに、HPD (Half Power Diameter) が用いられる。これは、全光量の 50% が含まれる円の直径である²。HPD の値が小さいほど結像性能が良いといえる。

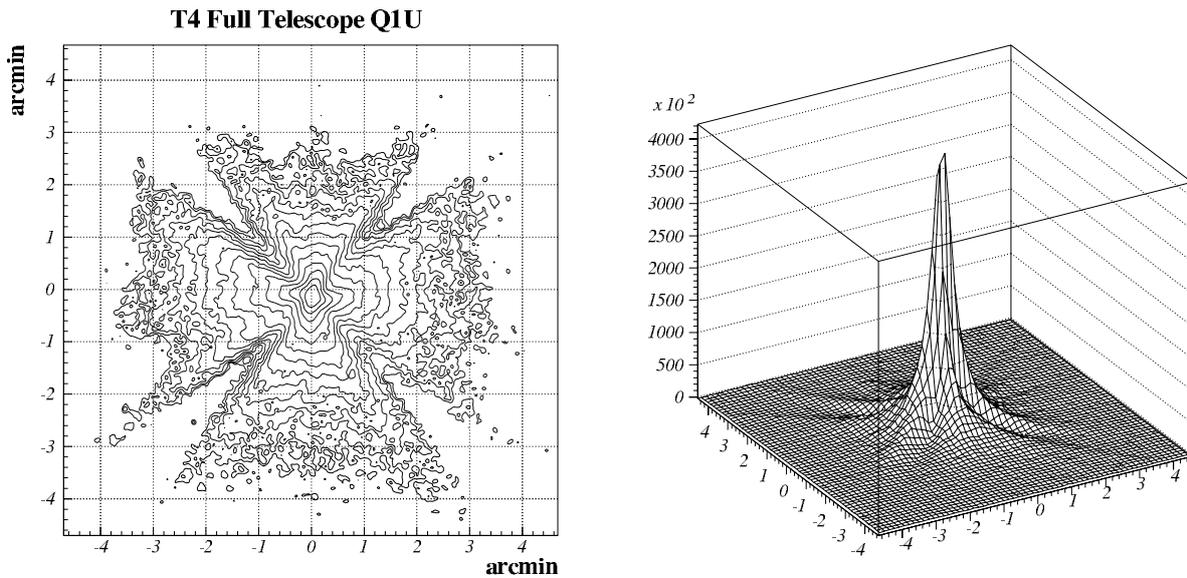
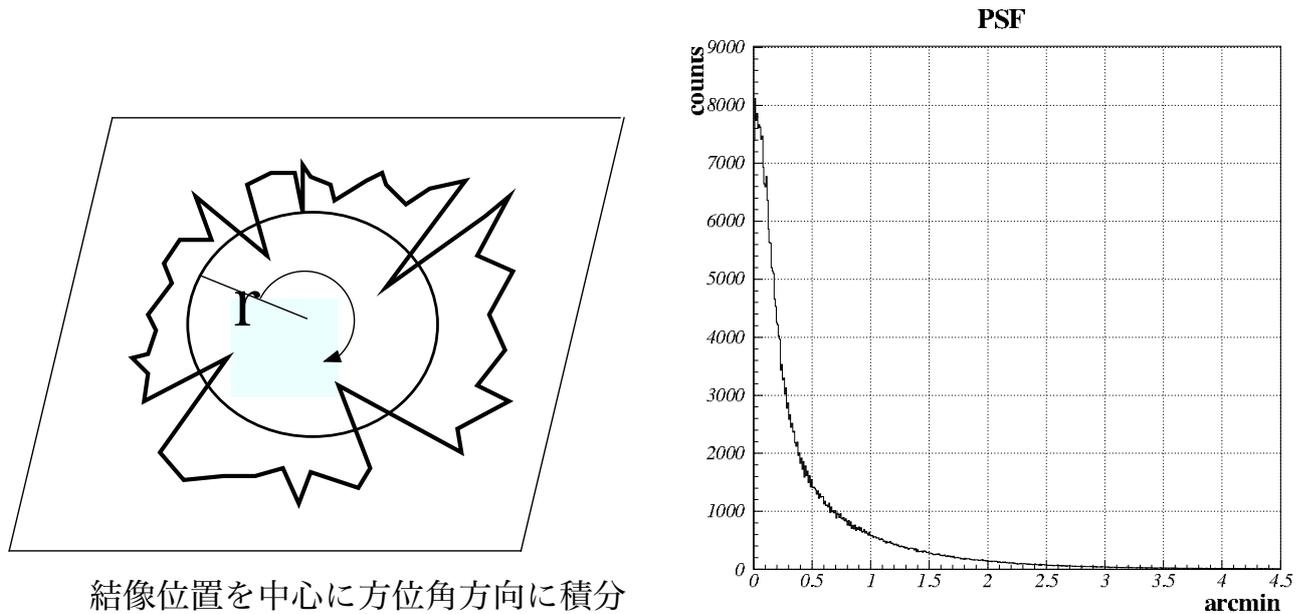


図 1.6: 焦点面のイメージ。等高線で表したもの (左) と、3 次元的に表したもの (右)。

2. PSF (Point Spread Function) - 半径 r の円周上に含まれる単位面積当りの光量

焦点面に作られる 2 次元のイメージ上で、半径 r の円周上に含まれる単位面積当りの光量を PSF と呼ぶ (図 1.7)。これは、無限遠にある点源から放射された X 線が、XRT の焦点面に作る輝度分布であり、PSF のコアの部分が鋭いピークを持つほど結像性能が良いといえる。

²一般に、分解能を表すのに FWHM (Full Width at Half Maximum) が使われる。しかし、斜入射光学系の XRT の輝度分布は中心部に鋭いピークを持ち、中心付近の強度分布についてはガウス分布/半径の関数型で表すことができる。すると、半径が小さくなると、ピークの輝度は $1/r$ で高くなる。これは位置分解能がより良い焦点面検出器を使えば、検出器の 1 画素あたりの面積とともに r がさらに小さくなるので、ピークの高さはより高くなることになる。つまり使用する検出器の位置分解能によって、FWHM の値が異なってしまう。これでは斜入射光学系の結像性能を評価することはできない。一方、HPD は全光量の 50% を含む円の直径であり、全光量にのみ依存した値なので、検出器の位置分解能に依存しない。このため、斜入射光学系の望遠鏡を評価するには HPD が適している。



結像位置を中心に方位角方向に積分

図 1.7: Point Spread Function (1次元)。焦点面のイメージを動径方向に積分し (左), 1次元の PSF を作る (右)。

3. EEF(Encircled Energy Function) - 半径 r の円内に含まれる光量

結像中心から半径 r の円内に含まれる光量を EEF と呼ぶ。EEF は以下の関係式に示したように PSF の積分形となっている。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi PSF(r) dr \quad (1.2)$$

EEF のプロットにおいて、縦軸が 50% の時の横軸の値 (半径) を 2 倍した値が HPD に相当する。最後に PSF、EEF、HPD の関係について図 1.8 にまとめる。図 1.8 は、入射した X 線の全光量を 1 と規格化した時の EEF、 $r = 0$ の時 1 になるようにした PSF の r 依存性を表している。PSF のピークが鋭いもの、EEF の立ち上がりが鋭いものほど結像性能が良いといえるが、これを定量的に表すために HPD を用いている。図 1.8 の場合では、EEF が 0.97 分角の時に全光量の 50% になっているので、HPD はその 2 倍の 1.94 分角となる。

1.3. X線望遠鏡の性能

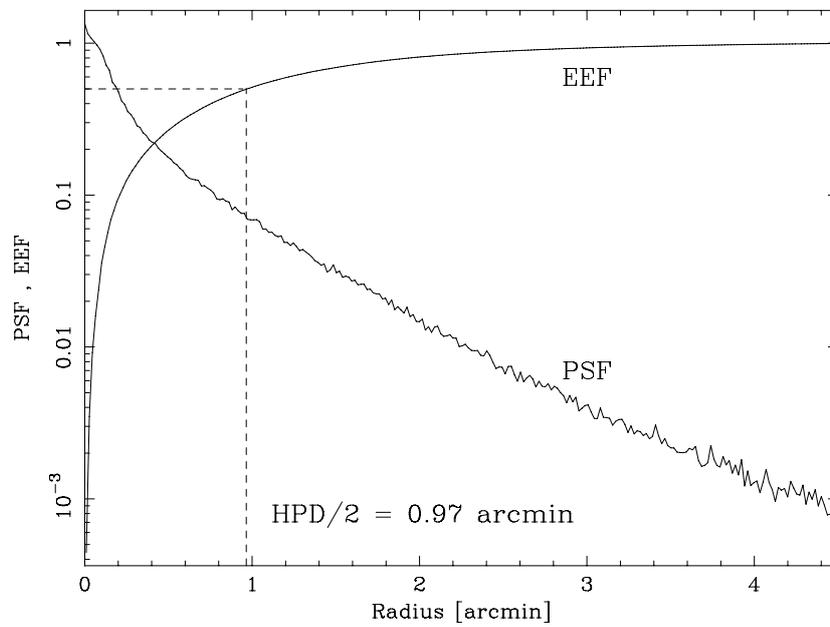


図 1.8: PSF、EEF、HPD の関係

第2章 次期 X 線天文衛星 Astro-H SXT EM の性能評価

2.1 次期 X 線天文衛星 Astro-H

2014年度打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星、通称「NeXT」(New exploration X-ray Telescope) は、日本で 6 番目の宇宙 X 線衛星であり、世界で初めて 1 桁をしのぐ 0.1% のエネルギー分解能を実現した。硬 X 線で集光撮像観測を行う能力を追加し、0.3 ~ 600keV の広帯域で「すざく」の 2 桁上となる世界最高の感度を目指すものである。

2.1.1 全体構成

ASTRO-H の概観を図 2.1 に示す。総重量は 2400 kg、全長は 14 m で、「すざく」の 1.5 倍の重量となる。羽のように広がった 6 枚の太陽電池により 3150 W の発電を行う。機上には、

- (1) 軟 X 線望遠鏡 (SXT-S) と軟 X 線分光撮像検出器 (SXS) を組み合わせた軟 X 線分光システム
- (2) 硬 X 線望遠鏡 (HXT) と硬 X 線撮像検出器 (HXI) を 2 個ずつ組み合わせた硬 X 線撮像システム
- (3) 軟 X 線望遠鏡 (SXT-I) と軟 X 線撮像検出器 (SXI) を組み合わせた軟 X 線撮像システム
- (4) 2 個の軟ガンマ線検出器 (SGD)

を搭載する。それぞれの観測機器の配置を図 2.2 に、基本仕様を表 2.1 に示す。

2.1.2 X 線光学系

ASTRO-H は、軟 X 線領域では SXT、硬 X 線領域では HXT という、2 種類の光学系をもつ。このうち SXT は、「すざく」の XRT と同じく金メッキされた多数のアルミ薄板を入れ子にしたものであり、10 keV 以下で大きな集光面積をもつ。HXT も基本は SXT と同じく薄板を多数の入れ子にしたものだが、その鏡面にはブラッグ反射を利用した「スーパーミラー」を形成することで、~ 80 keV までの反射と集光を可能にする画期的なものである。スーパーミラーとは、周期長と積層数の異なる Pt と C の多層膜を円錐状の薄板レプリカ基板上に積層したもので、光電吸収の効かなくなる硬 X 線領域で有効となり、有効面積は 20 keV で 500 cm² と「すざ

2.1. 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

く」の約 10 倍にまで向上されている。角分解能は点源に対する画像の広がりを表す HPD(Half Power Diameter) で比較し、「すざく」の $2'$ から $1'.7$ と改善され、焦点距離も 4.75 m から 12 m に長くすることで、高エネルギー側での集光率を上げている。2 つある HXT の重量はそれぞれ 70 – 80 kg、直径は 50 cm で、HXI と組み合わせて硬 X 線撮像システムとして働く。この技術は気球実験などにより実証済みである。

2.1.3 検出器

SXT と組み合わせられる検出器は、焦点距離 6 m の位置に置かれる。その 1 つである SXI は X 線 CCD カメラで、「すざく」の XIS の改良版である。SXI は撮像と分光を同時に行う能力があり、「すざく」の XIS の 1.7 倍となる $\sim 30'$ の広視野をもつ。エネルギー帯域は 0.3 ~ 12 keV で、冷凍機を用いて 150 K まで冷却することで、放射線劣化を抑制する。

もう 1 つの軟 X 線焦点面検出器である SXS は、X 線エネルギーを温度として検出する X 線ポロメータであり、「すざく」で液体ヘリウム予想外の蒸発というトラブルにより動作しなかった XRS を改良したものである。重量は 240 kg と「すざく」XRS の半分ちかくまで軽量化され、ほとんどは液体ヘリウムと 2 段スターリング冷凍機などの冷却構造が占める。スターリング冷凍機とは、ピストンによる冷媒の等温膨張などを利用した機械式冷凍機で、冷媒の気化による寿命の制約を受けない点の特徴である。これにより検出部は 47 mK まで冷やされ、4 ~ 7 eV という高い分解能をほこる。冷媒は 3 ~ 5 年ほど持続すると見積もられている。

HXT と組み合わせられる HXI は、CdTe 素子と Si 素子を重ねて 5 ~ 80 keV にわたる硬 X 線の撮像と分光を可能とする。より高いエネルギーを受けもつ SGD は他の検出器と異なり、X 線光学系を用いず天体からの光子を直接捉え、コンプトンカメラの原理を用いて 10 ~ 600 keV にわたり高感度でスペクトルと画像を取得する。

2.1. 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

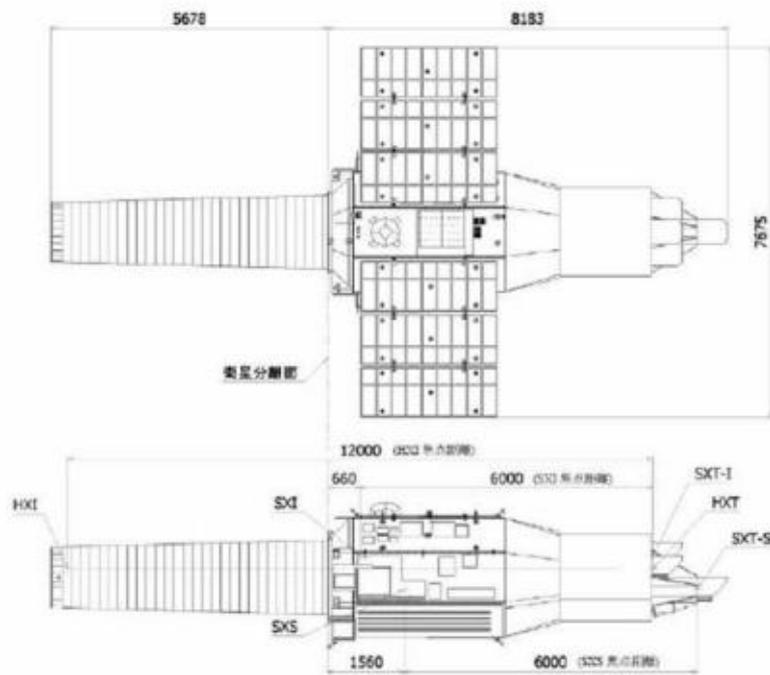


図 2.1: ASTRO-H 衛星の全体図

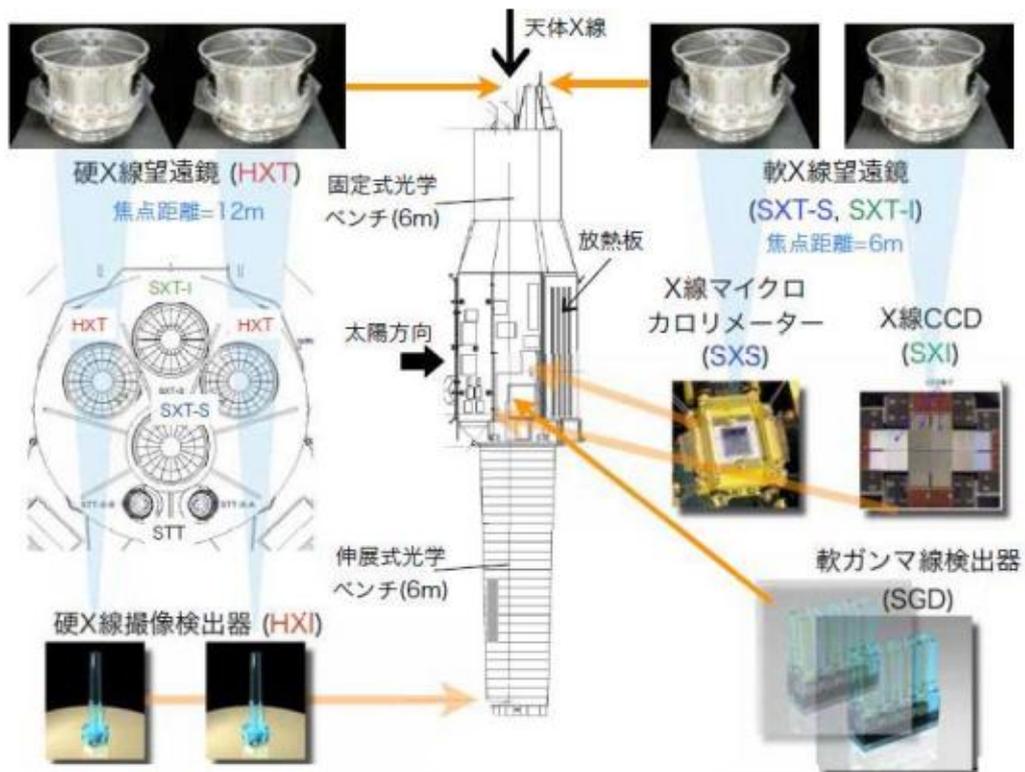


図 2.2: ASTRO-H に搭載される観測機器の配置。

2.1. 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

観測機器	基本仕様
軟 X 線分光システム (SXT-S+SXS)	有効面積 210 cm ² @6 keV エネルギー範囲 0.3 – 10 keV エネルギー分解能 7 eV 視野 3 分角 @6 keV 角度分解能 1.7 分角 (HPD)
硬 X 線撮像システム (HXT+HXI)	有効面積 300 cm ² @30 keV エネルギー範囲 5 – 80 keV エネルギー分解能 2 keV 視野 9 分角 @30 keV 角度分解能 1.7 分角 (HPD)
軟 X 線撮像システム (SXT-I+SXI)	有効面積 360 cm ² @6 keV エネルギー範囲 0.5 – 12 keV エネルギー分解能 150 eV 視野 35 分角 @6 keV 角度分解能 1.7 分角 (HPD)
軟ガンマ線 (SGD)	有効面積 100 cm ² @100 keV エネルギー範囲 10 – 600 keV エネルギー分解能 2 keV @40 keV 角度決定精度 < 0.6 度 ($E < 150$ keV)

表 2.1: ASTRO-H に搭載される観測機器とその基本仕様

2.1.4 SXT EM の構造

2014 年度打ち上げ予定の Astro-H には、0.3 – 12 keV の範囲の X 線を捉える SXT (Soft X-ray Telescope) が搭載されており、今までにない高分解能で宇宙の謎に挑む。その構造は「すざく」衛星などと同じ多重薄板型が採用されていて、図 2.3 に示すように Quadrant と呼ばれる 1/4 円筒を 4 つ組み合わせてできている。また、EM では Quadrant 1 つにのみ反射鏡が入っている。反射鏡の表面は金を蒸着することにより反射率を稼いでいる。さらに Quadrant の上下 2 段に分かれたハウジングの中に、形状を円錐に近似した反射鏡が同心円状に 203 枚積層されている。また図 2.4 に示すように反射鏡の上段を Primary、下段を Secondary と呼んでいる。SXT の設計パラメータを表 2.2 に示す。

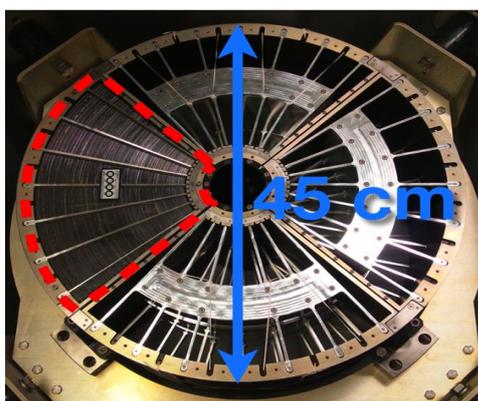


図 2.3: SXT の Quadrant (赤の点線部分)

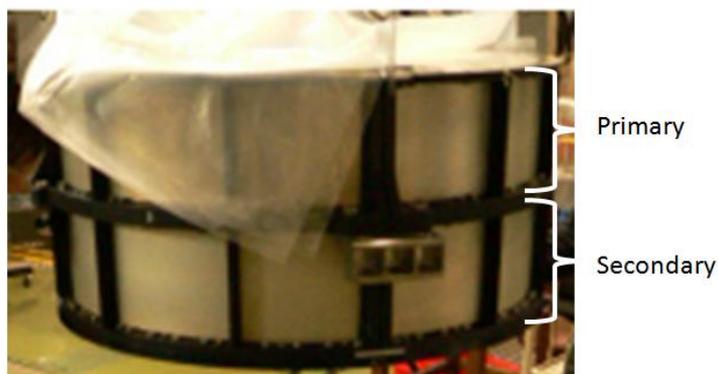


図 2.4: SXT を横から見た図。上段を primary、下段を secondary と呼ぶ。

焦点距離	5600 [mm]
積層数	203 枚
反射鏡の積層間隔	0.444 ~ 1.361 [mm]
有効面積	450 [cm ²] @1 [keV] 390 [cm ²] @6 [keV]
有効観測エネルギー領域	0.3 ~ 12 keV
空間分解能 (HPD)	1.7 [分角]
反射鏡の高さ	101.6 [mm]
反射鏡の厚さ	1 ~ 79 枚目 165 [μm] 80 ~ 153 枚目 241 [μm] 154 ~ 203 枚目 318 [μm]
反射膜	金
入射角	0.15 ~ 0.59 °

表 2.2: SXT 設計パラメータ

2.2 30m ビームライン

望遠鏡の性能評価は、宇宙科学研究所の 30m ビームラインを用いて行なった。その測定システムおよび検出器について説明する。宇宙研標準 X 線光源室における平行 X 線光源装置を図 2.5 に示す。

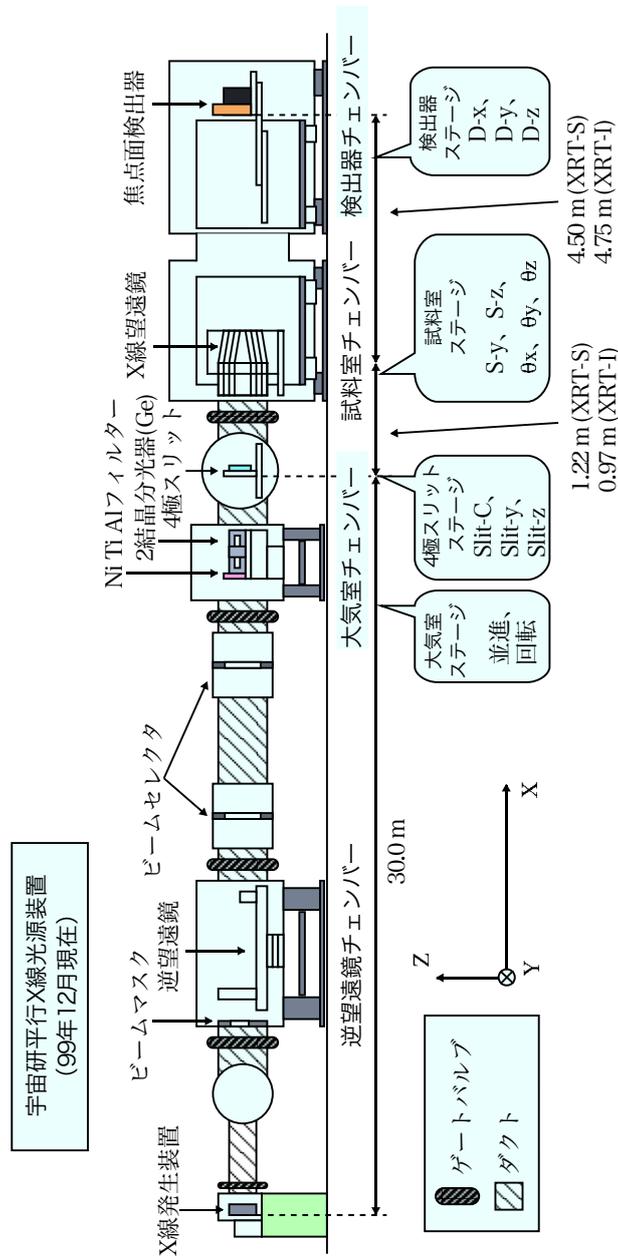


図 2.5: 宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図

2.2. 30M ビームライン

2.2.1 X線発生装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生原理は次のようになっている (図 2.6)。まず陽極であるフィラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲットとの間にかけて管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムによって電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は [kV] のオーダーなので、発生する電磁波は X 線領域が主となる。一方でターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしめるので、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。宇宙研標準 X 線光源室での測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282 [keV])、Al-K α (1.49 [keV])、Ti-K α (4.51 [keV])、Cu-K α (8.04 [keV])、Pt-L (9.44 [keV]) の 5 種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは 10 mm \times 1.0 mm であるが、X 線の出射方向 (X 軸) に対してターゲットの回転軸は 6° 傾けて取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは 1.0 mm \times 1.0 mm になる。また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整することで制御している。X 線発生装置の仕様を表 2.3 に示す。

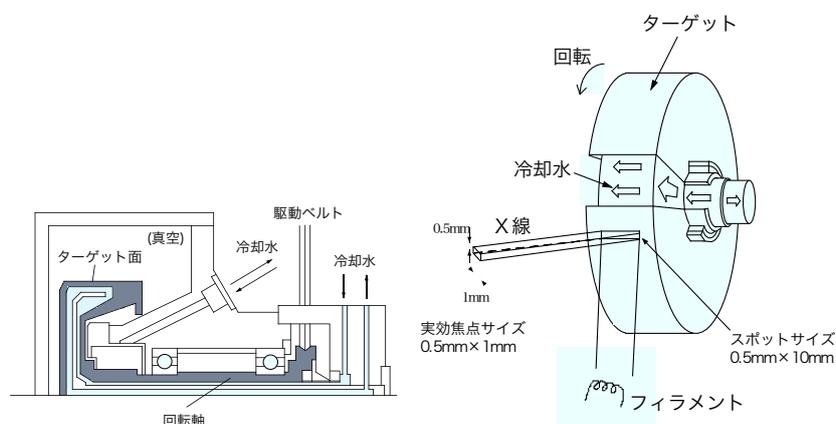


図 2.6: X 線発生装置の構成図

最大定格出力	60 kV 200 mA (12 kW)
管電圧設定	5 ~ 60 kV
管電流設定	10 ~ 200 mA
ターゲット回転数	6000 rpm
X 線源サイズ	0.5(Z) \times 10(Y) mm ²
実効焦点サイズ	0.5(Z) \times 10(Y) mm ²
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから 1 時間後)

表 2.3: X 線発生装置の仕様

2.2.2 四極スリット

X線望遠鏡の特性測定においてはできるだけ高い平行度のX線を当てる必要がある。そのために、X線発生装置から30mの長い距離をとり、四極スリットでビームを細く絞って使うことで、15秒角(2mスリット使用時)という高い平行度を実現している。スリットの中心位置、Y及びZ方向の間隔は、ワークステーションから直接制御可能で、それぞれを独立に動かすことができる。

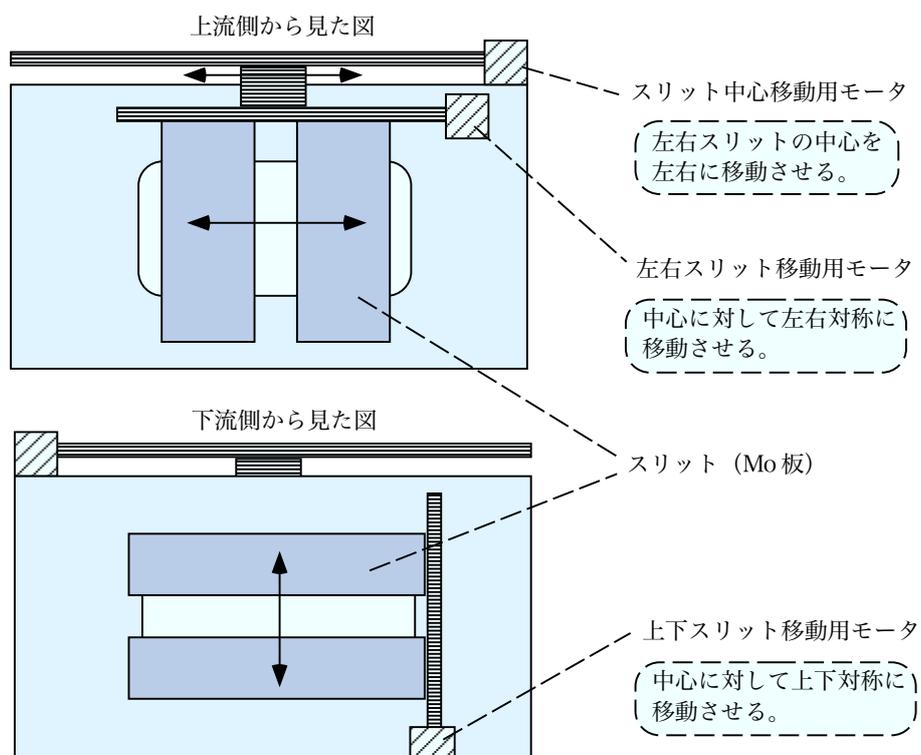


図 2.7: 四極スリットの構成図

2.2.3 試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ

地上較正試験においては、平行度の高い X 線ペンシルビームを望遠鏡全体に照射する必要がある。しかし前述の X 線発生装置は固定されている。そのため、XRT と検出器を並進及び回転ステージに載せて移動することでペンシルビームによる全面スキャンを実現している。試料室チェンバーと検出器チェンバーに設置されている、計 9 軸の駆動ステージ群の全体図及び可動範囲について図 2.8 と表 2.4, 2.5 に示す。

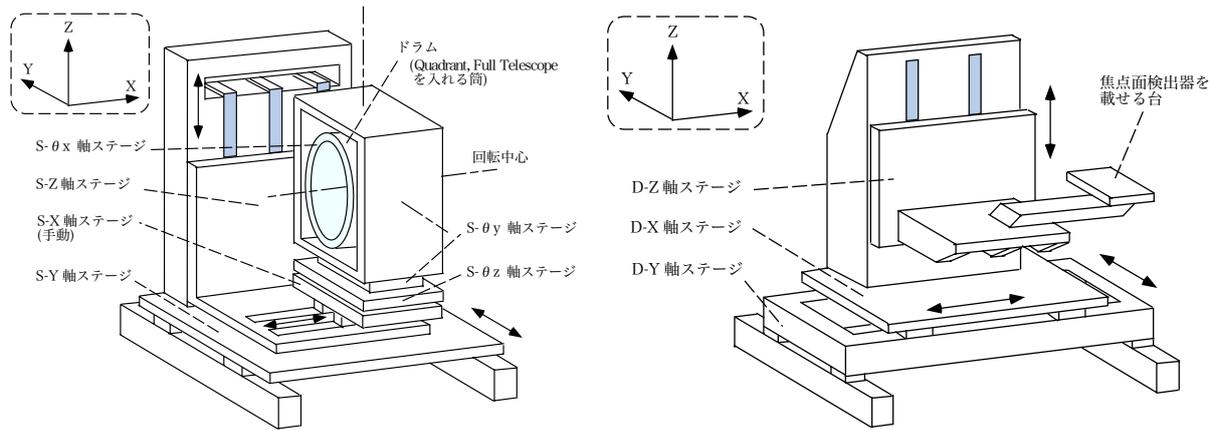


図 2.8: 試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997) - 左が試料室チェンバー内ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。

ペンシルビームを XRT に照射する位置を変えるために、試料室チェンバーのステージは Y、Z 軸方向に移動可能である。また、焦点距離の異なる望遠鏡の測定のために、X 軸方向についても移動が可能である。さらに XRT の結像性能及び有効面積の入射角依存性を調べるために、X 線の入射角度を変える必要があるため、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 方向に回転可能なステージが、並進ステージの上に載っている。これら 2 つのステージの組み合わせによって、任意の位置と角度に XRT を移動、回転させることができる。また XRT の全面スキャンや 1 ラインスキャンにおいては、検出器を XRT の焦点位置に固定する必要があるため、検出器も X、Y、Z 軸方向に移動可能な並進ステージの上に載せてある。測定の際には S_y と D_y を同期して動かさなくてはならないが、 ± 0.1 mm 程度の精度で両者を一致させて動かすことが可能になっている (柴田 1997)。これら 9 軸の駆動ステージ群は、試料室チェンバーの X 軸を除いて全てワークステーションによって制御することが可能になっている。座標軸は以下のように定義されている。X 線の上流 (X 線発生装置側) から下流 (検出器チェンバー側) 方向に X 軸、地面から鉛直方向上向きに Z 軸を定義する。右手系を採用するために、Y 軸方向は上流から下流側を見て、水平方向に右から左に向かう向きになる。回転系については右ねじが進む向きに回転させる方向を正の向きと定義する。

2.2. 30M ビームライン

軸	移動量 [pulse/deg or min]	移動可動範囲 [mm, arcmin](total)	移動速度 [mm, arcmin/sec]
S-X	—	0 or +25(手動)	—
S-Y	100 pulse/1mm	-206.5 ~ +426.6(633.1)	4
S-Z	800 pulse/1mm	-192.6 ~ +228.8(421.4)	0.25
S- θ_x	1000 pulse/1deg	($\pm 360^\circ$ 回転が可能)	20
S- θ_y	2000 pulse/1deg	-331.8 ~ +292.9(624.7)	20
S- θ_z	2000 pulse/1deg	-250.0 ~ +284.4(534.4)	20

表 2.4: 試料室チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998)

軸	移動量 pulse/1mm	移動可動範囲 [mm](total)	移動速度 [mm/sec]
D-X	2000 pulse/1mm	-111.5 ~ +97.3(208.8)	1.5
D-Y	2000 pulse/1mm	-231.0 ~ +429.7(660.7)	4
D-Z	2000 pulse/1mm	-207.5 ~ +213.0(420.5)	0.25

表 2.5: 検出器チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998)

2.2. 30M ビームライン

2.2.4 焦点面検出器

検出器チェンバーのステージには、焦点面検出器として以下のものが搭載されている。

- ガスフロー型比例計数管 (P.C.)

宇宙研標準 X 線光源室で使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar : 90%、CH₄ : 10%) を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 2.6 に比例計数管の仕様をまとめる。

使用ガス	P10 ガス (Ar : 90%、CH ₄ : 10%) 大気圧で使用
ガス深さ	20 mm
X 線入射窓	厚さ 1 μ m ポリプロピレン + カーボンダゲ 直径 12.0mm
陽極芯線	直径 50 μ m タングステン
印化電圧	2100 V (C-K α の場合のみ 2200 V)
エネルギー範囲	~ 12.3 keV (検出効率 10%以上)
エネルギー分解能	~ 45% (Al : 1.49 keV) ~ 30% (Ti : 4.51 keV) ~ 20% (Cu : 8.04 keV)
線形増幅器の増幅率設定	Al : 100 \times 0.5, Ti : 50 \times 0.5, Cu : 50 \times 0.5

表 2.6: ガスフロー型比例計数管の仕様

- 背面照射型 CCD カメラ

CCD とは Charge Coupled Device (電荷結合素子) の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバイスを意味する。現在、宇宙研標準 X 線光源室には浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシステムが設置されている。この CCD カメラは受光領域と電荷転送部が同じフルフレーム転送方式である。一辺 24 [μ m] の正方形ピクセル 1024 \times 1024 個からなっていて、XRT に対して 19 \times 19 [arcmin²] の立体角をカバーしている。CCD は 1.1 [arcsec] の位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプルのアラインメントやサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われる。また暗電流を減らすために、ペルチェ素子を使って -70C °まで冷却して使用する。表 2.7 に X 線 CCD カメラの仕様をまとめる。

2.3. X線によるSXT EM地上性能評価システム

撮像素子	フルフレーム転送方式 MOS 型 CCD 固体撮像素子
有効画素数	1024(H) × 1024(V)
画素サイズ	24 [μm] × 24 [μm]
有効面積	24.6 [mm] × 24.6 [mm](1 inchsize)
フレームレイト	2 秒/フレーム (高性能読み出しモード)
飽和電荷量	20000 electrons (高性能読み出しモード)
エネルギー範囲	1.1 ~ 9.2 [keV]
読み出しノイズ	
平均暗電流	
冷却方式	電子冷却 + 水冷

表 2.7: 背面照射型 CCD カメラの仕様

2.3 X線によるSXT EM地上性能評価システム

ここでは、SXT-EMの性能評価を行って得られた結果を示す。結像性能の指標となるHPDは1.27分角を達成し、要求である1.7分角を大きく上回る結果となった。また、焦点距離の正確な割り出しや、Quadrantのlocalな部分のHPDも測定し、そのばらつきを調べた。

2.3.1 測定方法

X線による結像性能の評価は、Quadrant全面にX線をあて、1つの望遠鏡としての性能を調べる。本測定は宇宙科学研究所にある30mビームラインを用いて行った。宇宙科学研究本部の30mビームラインは、高い平行度を実現するためX線発生装置から測定を行うサンプルまでは、およそ31mもの距離を取っている。さらにサンプルからX線発生装置側に約1mの位置にはスリットを設置し、その幅を絞ることにより非常に高い平行度(スリットサイズ2mm × 2mmで約15秒角)のX線ビームを作ることができる。また、検出器とサンプルが乗っているステージをそれぞれ同期して動かし、サンプル全面にX線を走査させることで、この高い平行度のX線をサンプル全面に照射するのと同様の状況を作り出すことができる。

- ステージのセットアップ

望遠鏡をSample stageに置き、検出器(CCDカメラとP.C)をDetector stageに置いて測定を行う。

本来、望遠鏡の焦点距離の位置に検出器を置いて測定をする。今回の測定に用いる望遠鏡の焦点距離は5.6[m]となっているが、その距離が長すぎるため30mビームラインではその位置にDetectorステージを置けない。そのためDetectorステージを望遠鏡から4.2[m]の位置に置き、4.2[m] : 5.6[m] = 3 : 4とした。よってスキャンするときにはDetectorステージのHSPD : SampleステージのHSPD = 3 : 4となるようにステージの速度を調整をしなければならない。その時に用いたステージのパラメータを表2.8に、各パラメー

2.3. X線による SXT EM 地上性能評価システム

タの意味を表 2.9 に示す。

	Detector	Sample
HSPD[mm/s]	4.0	5.333
LSPD[mm/s]	0.37	0.4
URATE	12	4

表 2.8: 各ステージのパラメータ

HSPD	ステージの移動速度
LSPD	ステージが立ち上がるまでの速度
URATE ¹	LSPD から HSPD に立ち上がるまでの率

表 2.9: 各パラメータの意味

以上のセットアップを踏まえ、測定は以下の手順で行った。

- P.C による測定手順 (有効面積)

- (1) 4 極スリットを用いてサンプルに当たる X 線ビームサイズを絞り、 1×4 mm にする。
- (2) Sample stage Y 方向 (以下 S_y)、Detector stage Z 方向 (以下 D_z) を移動させ、X 線ビームが Quadrant 開口部の外側へ当たるようにする。
- (3) サンプルステージの θ_y, θ_z を $(y, z) = (0, 0), (6, 0), (-6, 0), (12, 0), (0, 6), (0, -6), (0, 12), (0, 18)$ の 8 パターンに対して光軸²から傾け、それぞれ X 線を当て、8 mm pitch で全面スキャンする。

P.C の測定ではターゲットに Ti-K α と Al-K α を用いて測定した。

ターゲット	Ti K- α
z 方向ピッチ	8 [mm]
ビームサイズ ($y \times z$)	1×4 [mm]
スキャン	全面

表 2.10: Quadrant 全面スキャン時の測定条件 (PC)

¹URATE は整数のみのパラメータで 1~19 の値をとる。この値が大きいくほど LSPD から HSPD に達するまでの時間は長くなる。

²宇宙研 D 棟 4F にある平行光源を使って求めたおおよその光軸。この位置が今の (0, 0) に対応している。Vignetting でより正確な光軸を求める。

2.3. X線による SXT EM 地上性能評価システム

- CCD による測定手順 (焦点距離、HPD)

- (1) 4 極スリットを用いてサンプルに当たる X 線ビームサイズを絞り、 2×2 mm にする。
- (2) Sample stage Y 方向 (以下 S_y)、Detector stage Z 方向 (以下 D_y) を移動させ、X 線ビームが Quadrant 開口部の外側へ当たるようにする。その後、X 線 CCD カメラで露光を開始し、 S_y 、 D_y を 4 : 3 の割合の速度でそれぞれ動かし、サンプルを横切り、先ほどとは逆側の Quadrant 開口部の外側に X 線ビームが当たる位置まで移動し、CCD のシャッターを閉じる。
- (3) S_z 、 D_z をビームの幅の分だけ移動させる。
- (4) (2)、(3) を反射鏡の入っている部分全てを走査するまで繰り返し替える。

今回は X 線発生装置のターゲットには Ti を使用し、これに Ti フィルターを通し単色化した。また測定は D-side(X 線発生装置側からみて下側) と C-side(X 線発生装置側からみて右側) にサンプルを配置して行なった。

ターゲット	Ti K- α
z 方向ピッチ	8 [mm]
ビームサイズ ($y \times z$)	2×2 [mm]
CCD ゲイン	Super High
CCD 温度	-65[deg]
スキャン	全面

表 2.11: Quadrant 全面スキャン時の測定条件 (CCD)

2.3. X線によるSXT EM地上性能評価システム

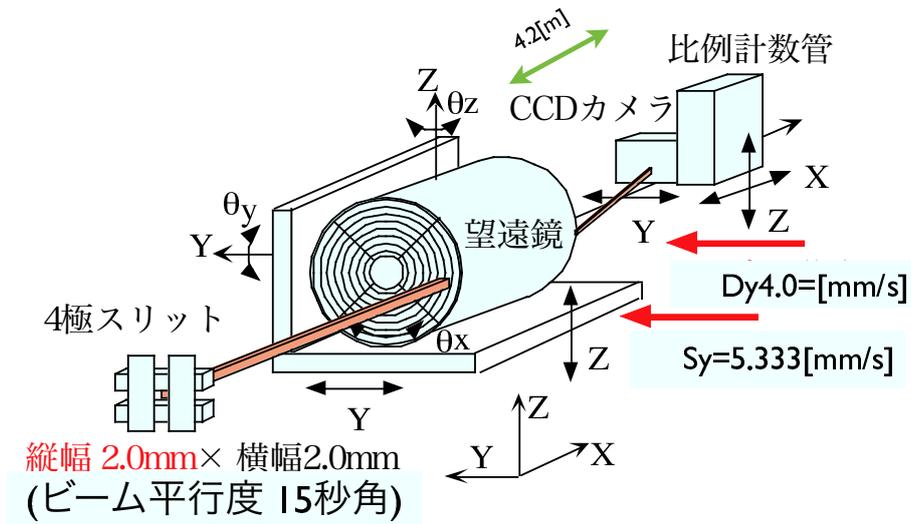


図 2.9: Quadrant 全面のスキャン

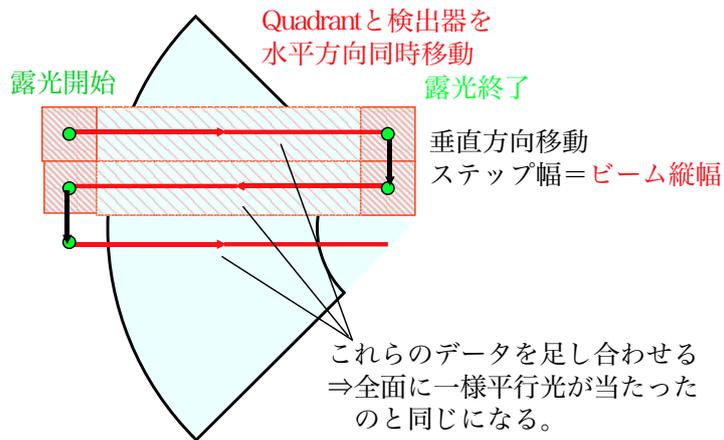


図 2.10: ラスタースキャン-サンプルステージと検出器ステージを同期させて動かし、2mm 角のビームを Quadrant 全面に走査させる。

2.3. X線によるSXT EM地上性能評価システム

2.3.2 有効面積

測定機器はP.Cを用いた。 y , z を横軸に取り、縦軸に有効面積を取ったものが図2.11である。フィッティングで求めた中央値から、光軸を(y , z) = (-31.920, 7.697) と決めた。その結果、4mm pitch スキャン、On-axis での Ti-K α での有効面積は 115.949 ± 1.098 [cm²] であった。また、同様の測定を行った Al-K α の有効面積は 147.425 ± 0.854 [cm²] であった。

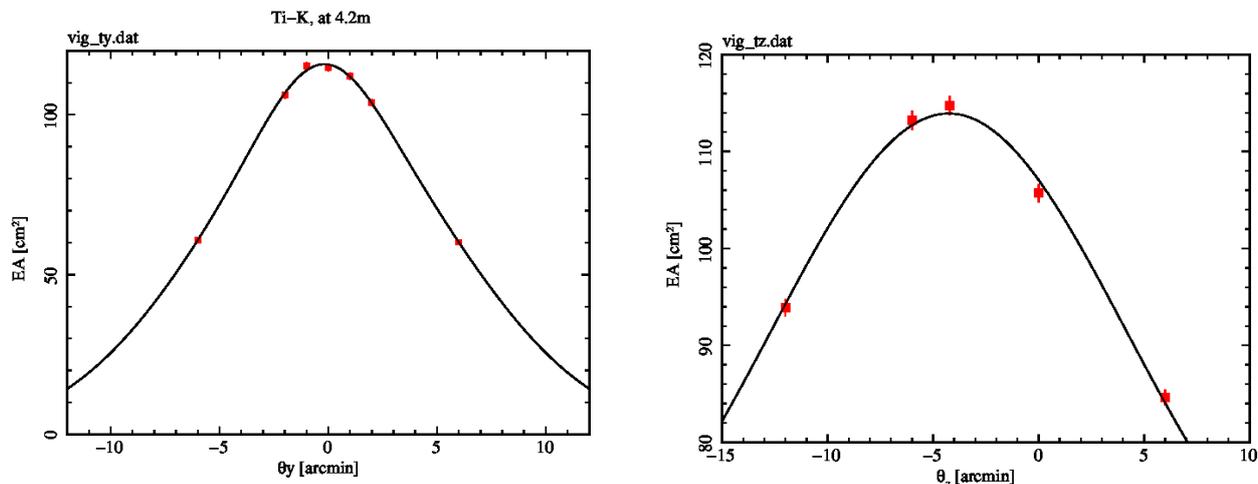


図 2.11: Ti-K α の θ_y (左)、 θ_z (右) の有効面積プロット

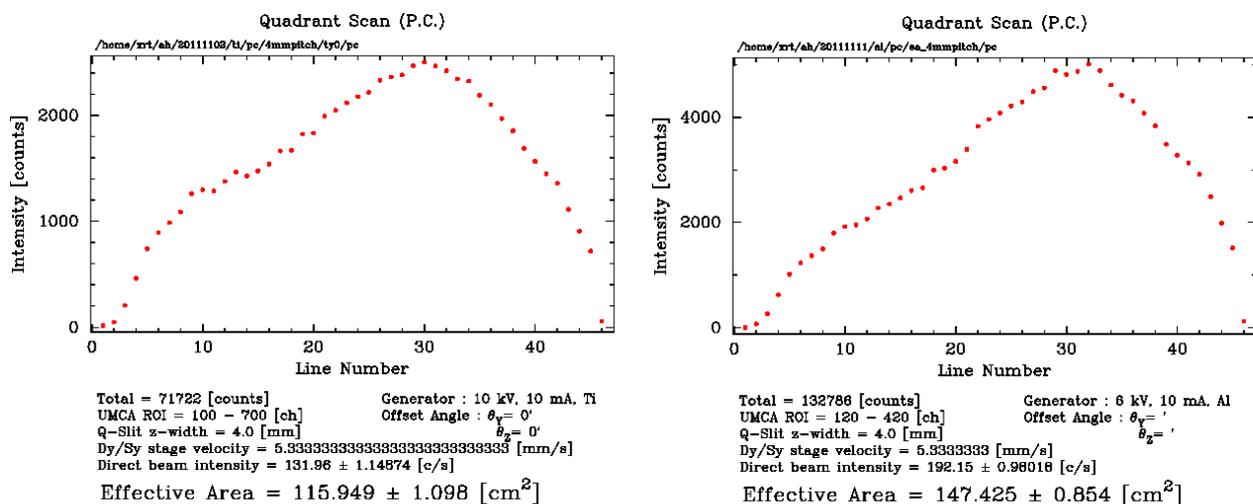


図 2.12: Ti-K α (左)、Al-K α (右) の有効面積プロット

2.3. X線によるSXT EM地上性能評価システム

2.3.3 HPD

ビーム平行度の影響を小さくするために測定 pitch をより細かくして HPD, EEF, PSF を求めた。結像性能を表す HPD は 1.27 [armin] だった。

ターゲット	Ti K- α
z 方向ピッチ	2 [mm]
ビームサイズ ($y \times z$)	2×2 [mm]
CCD ゲイン	Super High
CCD 温度	-65[deg]
スキャン	全面

表 2.12: 測定条件

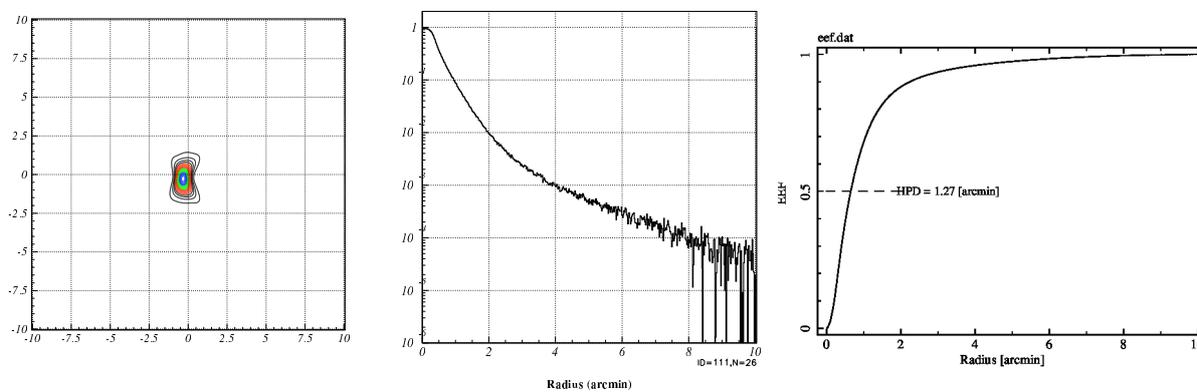


図 2.13: 像(左)、EEF(中央)、PSF(右)

2.3.4 位相角方向の HPD

測定方法

測定は図 2.14 に示したようにポインティングで反射鏡にビームを照射して行なった。 θ_x 軸を回転させずに、4 極スリットでビームサイズを 1 mm 角に絞り、1 mm pitch で検出器、望遠鏡を動かして、スキャンしていく。

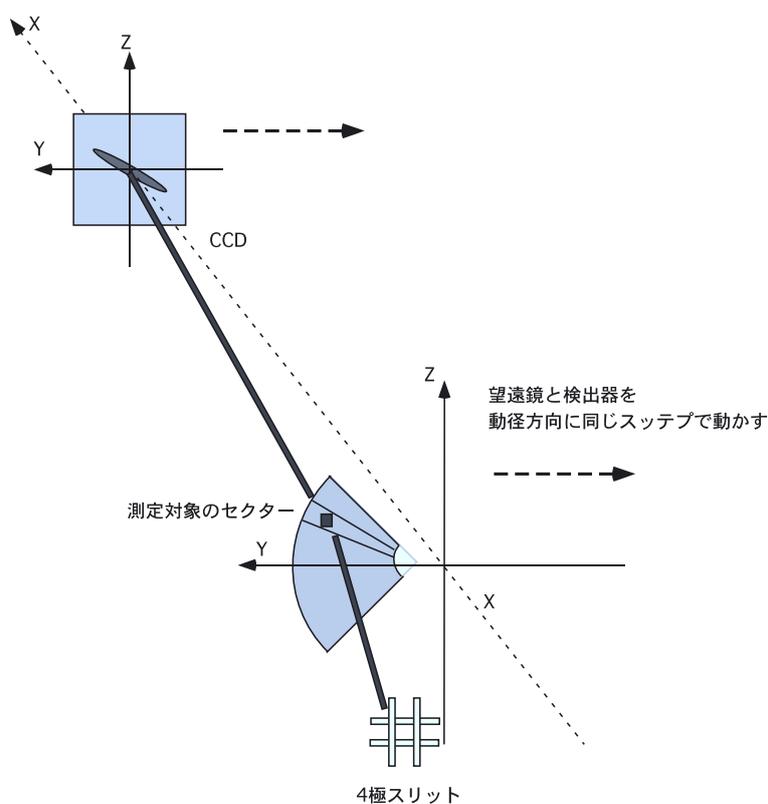


図 2.14: スキャンの方法-1 mm 角の X 線を 1 mm pitch で照射した。

測定結果

位相角方向の step scan を行った。図 3.28 のように、Quadrant の半径の、 $R = 100$ mm, 200 mm の位置でそれぞれ step scan をした。測定して得られた像を図 2.16 に、各 step での HPD と像のピーク位置を図 2.17 に示す。

図 2.17 を見てみると、Quadrant の側壁に近い端のセクターには HPD が大きなもので 2 ~ 4 arcmin 程度になる場合があるが、それ以外の領域ではほぼ ~ 1 arcmin 程度で一様であった。

2.3. X線による SXT EM 地上性能評価システム

ターゲット	Ti K- α
z 方向ピッチ	1 [mm]
ビームサイズ ($y \times z$)	1 \times 1 [mm]
CCD ゲイン	High
CCD 温度	-65 [deg]
SS スキャン	全面

表 2.13: 測定条件

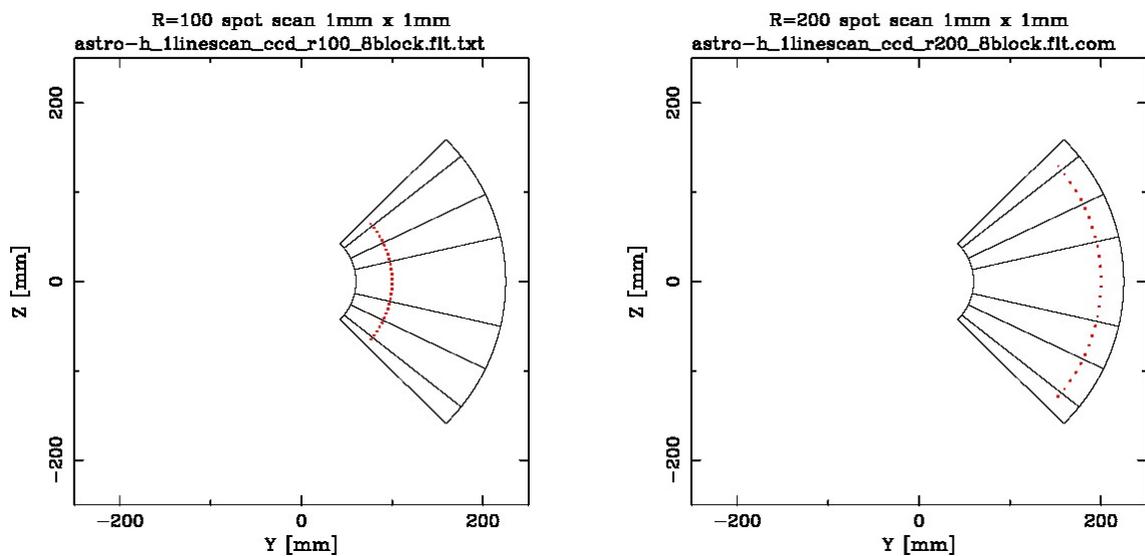


図 2.15: 位相角方向の step scan。左は半径 100 [mm] の位置、右は半径 200 [mm] の位置。

2.3. X線による SXT EM 地上性能評価システム

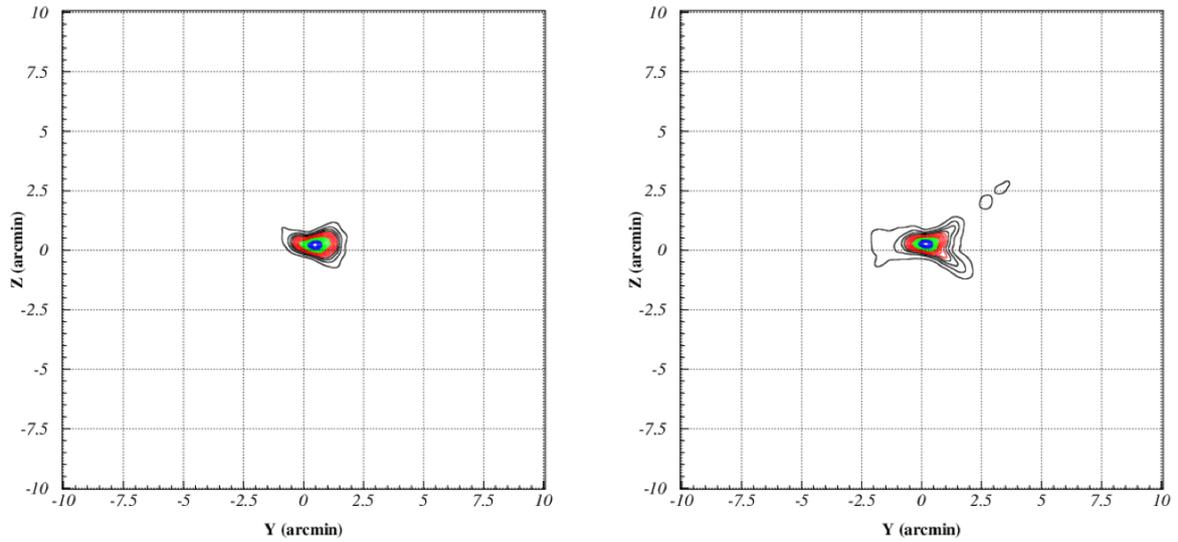


図 2.16: 各 step の image を足し合わせ。左は 100 [mm]、右は 200[mm]。

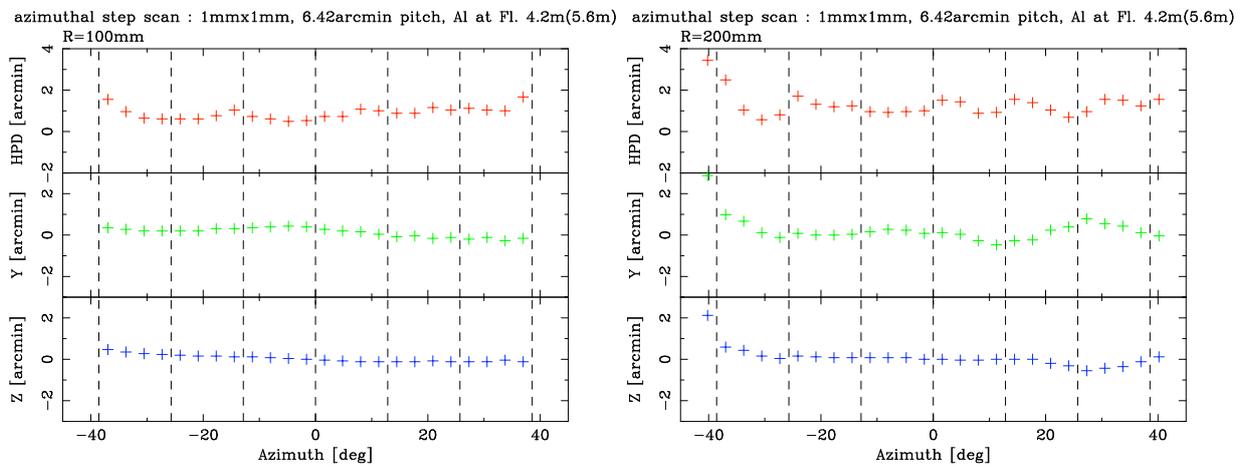


図 2.17: 赤は HPD、緑はピークの Y 座標、青はピークの Z 座標。

第3章 まとめと今後の展望

今回我々が行った SXT-EM の性能評価について、研究で得られた結果と今後の課題について示す。

3.1 まとめ

1. On-axis における有効面積

Ti-K α における有効面積は約 116 [cm²] となった。Quadrant 全体の有効面積の理論値は 531 [cm²] なので、1/4 では 132.75 [cm²]。したがって今回得られた有効面積は理論値の約 88%となる結果となった。

2. Quadrant の結像性能

焦点距離に検出器を置き、ビーム平行度の影響を小さくするために測定 pitch をより細かくして HPD、EEF、PSF を求めた。HPD は 1.27 [arcmin] だった。

3. 局所部分の結像性能

Quadrant の局所的な部分の結像性能を測定した。Quadrant の半径の、R = 100 [mm], 200 [mm] の位置での HPD は、Quadrant の側壁に近いセクターでは 2 ~ 4 [arcmin] と大きく、それ以外では ~ 1 [arcmin] 程度で一様であった。

3.2 今後の展望

今回用いられた EM では反射鏡の一部で金が剥がれている部分があった。しかし SXT EM の有効面積は理論値の 87% となり、すざく衛星の時の 80% よりも若干の改善が見られた。FM (Flight Model) ではこのような反射鏡は使わず、精度のよい反射鏡を用いるため、さらに有効面積の効率が上がると見られる。