

# 修士学位論文

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の  
応答関数構築に向けた性能評価

指導教員 大橋 隆哉 教授

首都大学東京大学院  
理工学研究科 物理学 専攻  
学修番号 13879318  
氏名 佐藤 寿紀

平成 27 年 2 月 20 日





## 概要

X線望遠鏡は宇宙からの微弱なX線の集光・結像することで、観測対象の空間分布の把握を可能とすると共に、検出器の小型化を可能にし、S/N比を飛躍的に向上させた。2015年度打ち上げ予定の次期X線天文衛星ASTRO-HにもX線望遠鏡が搭載される。その中でも軟X線望遠鏡(Soft X-ray Telescope : SXT)は、0.5–15 keV程度X線の結像・集光を担っている。望遠鏡としては、回転放物面鏡と回転双曲面鏡の二段の反射鏡の全反射をもちいて結像する「Wolter I型斜入射光学系」、ミラーを多数積層することで高い集光力を実現した「多重薄板型」を採用しており、同じ設計のものが2台搭載されることになる。これらはそれぞれ、世界初の衛星搭載となるX線カロリメータ(SXS)を焦点面検出器とするSXT-Sと、X線CCD(SXI)を焦点面検出器とするSXT-Iに分けられる。我々は2013年から2014年にかけて、宇宙科学研究所のX線ビームラインにて、これら二台のSXTの応答関数構築に向けた地上性能評価を行ってきた。

宇宙科学研究所のX線ビームラインは、これまでの日本のX線天文衛星に搭載された望遠鏡の地上較正試験に用いられてきた施設である(図A.5)。光源から約27 m離れた位置にあるスリットでビームを絞ることで、高い平行度のX線を望遠鏡に照射できる。この時、小さく絞ったビーム(2 mm × 2 mm や 8 mm × 8 mm など)で、望遠鏡全面にくまなくX線を照射してあげることで、望遠鏡全面の性能評価が可能となる。測定方法としては、望遠鏡ステージと検出器ステージを同期させながら、望遠鏡全面を走査する「ラスタースキャン」法と、望遠鏡全面を絞ったビームでモザイクマッピングすることで、局所的な領域の評価が可能な「スポットスキャン」法をもちいた。

X線望遠鏡の応答関数構築で最も重要な性能情報は、「結像性能」と「集光力(有効面積)」である。結像性能は、観測天体の空間分布の正確な理解に、有効面積は、観測天体の絶対光度の見積もりに必要となってくる。我々はまず、SXT-IとSXT-Sの、これらの性能の評価を行った。結果を図2にまとめる。結像性能は、要求値としてHalf Power Diameter : HPD換算で1.7'という値が与えられている。結果としては、どのエネルギーにおいても、HPDは1.2'–1.5'以内に収まっており、要求値を満たしていることがわかった。有効面積に関しては、要求値として1 keVで450 cm<sup>2</sup>、6 keVで390 cm<sup>2</sup>という値が設定されている。測定結果としては、図2右に示すように、SXT-I、SXT-S共に要求値を満たしている事が分かった。また、すざく衛星の望遠鏡とくらべHPDは2/3程度に、有効面積は3–5割増加しており、望遠鏡としての性能が向上している事がうかがえる。以上のことから、本測定によって、SXT-IとSXT-Sの応答関数で再現すべき主要な性能を把握することができたと言える。

実際に、以上の測定より得られた性能を、応答関数で再現するためには、Ray-tracingシステムというシミュレーションツールを使う。この計算機内で仮想的な望遠鏡を構築し、その望遠鏡に光子を降らせることによって、望遠鏡の性能を再現することになる。結像性能を再現する際に、Ray-tracingに組み込むパラメータとして、ミラーによって反射されたX線の強度分布(反射プロファイル)と多数積層された一枚一枚のミラーの設置位置のズレ(アライメントミス)の2つが必要となる。我々は、これらのパラメータを望遠鏡の局所的な領域で与えるため、一台の望遠鏡に対して、位相角方向に32分割、動径方向に7分割した計224領域で2つのパラメータを見積もることを試みた。まず、求めた反射プロファイルの例を図3左に示す。通常、反射プロファイルは、1枚の反射鏡に反射したときのX線輝度分布を指すが、望遠鏡の測定では二回反射したデータしか得られない。そこで、我々は二回反射で得られたプロファイルは一回反射プロファイルが二回畳み込まれていると仮定し、フーリエ変換をもちいて逆に畳み込むことで一回反射プロファイルを得た。ミスアライメントに関しては、各入射位置ごとの結像位置のズレを幾何学的にミスアライメントの値へと焼き直すことができる。本研究においては、反射鏡角度にズレがあると仮定し、それぞれの領域でのミスアライメント値を見積もった(図3右)。これらの見積もりによって、暫定的にはあるが、X線測定結果から2つのパラメータを引き出すことができたと言える。

以上のことから、本研究において、「応答関数構築において再現すべき性能」と「性能の再現に必要なとなるパラメータ」を明らかにできたと言える。今後は、実際に Ray-tracing システムに、本研究で求めたパラメータを組み込むことで、望遠鏡の性能の再現を試みる。

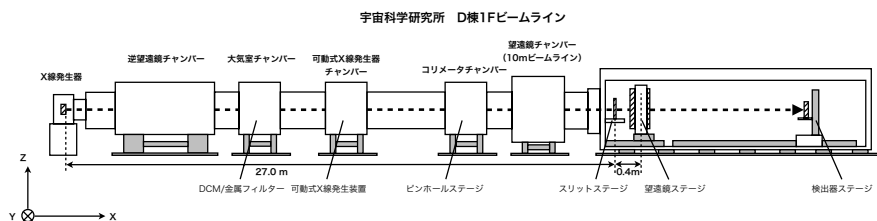


図 1: 宇宙科学研究所 X 線ビームラインの概略図。光源から約 27 m の位置にあるスリットでビームを絞り、高い平行度の X 線を照射できる。

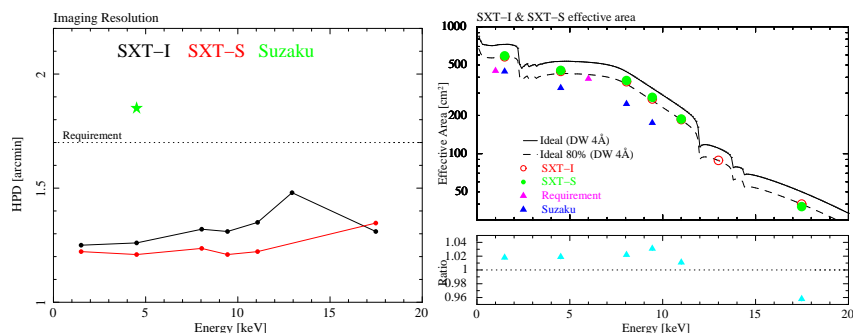


図 2: (左)結像性能の測定結果、(右)有効面積の測定結果。赤、緑の丸はそれぞれ、SXT-I、SXT-S の有効面積。マゼンタ、青の丸はそれぞれ、要求値、すざく衛星の望遠鏡の有効面積。実線、破線はそれぞれ、SXT の理想的な有効面積とその 80%を示す。

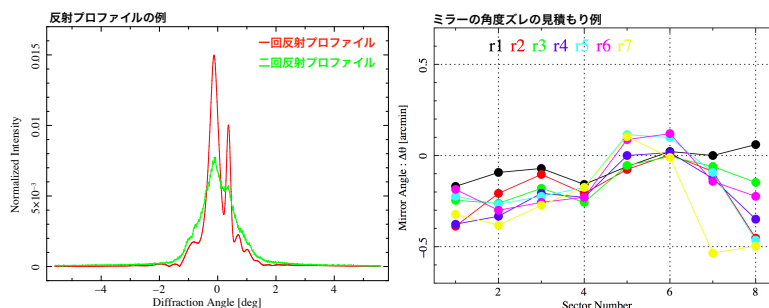


図 3: (左)反射プロファイルの見積もり、(右)ミラーのアライメントミスの見積もり。

# 目次

第 1 章	序論	24
1.1	X 線天文学	24
1.2	X 線天文衛星と X 線望遠鏡の登場	25
1.3	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	26
1.3.1	ASTRO-H の概要	26
第 2 章	X 線光学	33
2.1	反射の原理	33
2.1.1	トムソン散乱	33
2.1.2	X 線の全反射	36
2.2	表面粗さによる X 線の反射率と散乱	37
2.2.1	運動学的回折理論	37
2.2.2	表面粗さによる反射率の低下	39
2.2.3	散乱 X 線の強度	40
第 3 章	X 線望遠鏡	43
3.1	結像光学系	43
3.1.1	結像の基本条件	43
3.1.2	斜入射光学系	43
3.2	X 線望遠鏡の種類	45
3.2.1	多重薄板型	45
3.2.2	直接研磨型	45
3.3	迷光とプリコリメータ	47
3.4	ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 (SXT)	49
3.5	X 線望遠鏡の性能とその評価	51
3.5.1	集光力 (有効面積)	51
3.5.2	結像性能 (HPD、PSF、EEF)	51
3.6	結像性能と像の広がり要因	53
3.6.1	円錐近似	54
3.6.2	鏡面の形状誤差	55
3.6.3	鏡面の位置決め誤差	56
第 4 章	地上較正試験による SXT の総合特性	58
4.1	地上較正試験と測定項目	58
4.1.1	地上較正試験の目的と応答関数の構築	58
4.1.2	測定項目とその定義	58
4.2	可視光を用いた光軸・焦点距離の測定	60
4.2.1	測定セットアップ	60

---

4.2.2	光軸測定：目的と測定方法	63
4.2.3	光軸測定：測定結果	64
4.2.4	まとめと SXT-I との比較	70
4.2.5	焦点距離測定：目的と測定方法	71
4.2.6	焦点距離測定：測定結果	72
4.3	有効面積	74
4.3.1	測定項目と測定方法	74
4.3.2	測定結果：X 線による光軸測定	78
4.3.3	測定結果：光軸における有効面積のエネルギー依存性	83
4.3.4	測定結果：有効面積の入射角依存性	85
4.3.5	まとめと SXT-I との比較	89
4.4	結像性能	90
4.4.1	測定項目と測定方法	90
4.4.2	測定結果：光軸における結像性能	91
4.4.3	測定結果：SXT-S の off-axis におけるイメージ測定	97
4.4.4	測定結果：SXT-I の off-axis におけるイメージ測定	109
4.4.5	まとめと SXT-I との比較	117
4.5	迷光の評価	119
4.5.1	迷光と予測される迷光成分	119
4.5.2	測定方法と測定項目	122
4.5.3	測定結果：SXT-S	123
4.5.4	測定結果：SXT-I	159
4.5.5	迷光の評価のまとめ	161
<b>第 5 章</b>	<b>SXT の局所的性能と反射鏡パラメータの考察</b>	<b>162</b>
5.1	局所的性能評価	162
5.1.1	評価項目と測定方法	162
5.1.2	測定結果：全スポットイメージとラスタースキャンとの比較	166
5.1.3	測定結果：スポットイメージの結像位置	168
5.1.4	測定結果：スポットイメージの結像性能	170
5.1.5	測定結果：像の広がり要因の切り分け	172
5.2	反射鏡パラメータの考察	173
5.2.1	反射プロファイル	174
5.2.2	反射鏡アライメント	232
<b>第 6 章</b>	<b>Ray-tracing による結像性能の再現</b>	<b>235</b>
6.1	Ray-Tracing によるシミュレーション	235
6.1.1	性能の再現の必要項目	235
6.1.2	すざく衛星の時の結像性能の再現 (横山修論)	235
6.2	シミュレーションと結果	242
6.2.1	反射鏡パラメータの組み込みと正反射成分の再現	242
6.2.2	散乱成分の再現	246

---

第 7 章	まとめと今後	251
7.1	全体的な性能評価	251
7.2	局所的な性能評価	252
7.3	Ray-tracing による結像性能の再現	252
7.4	応答関数構築へ向けて	253
付録 A	測定システムとシミュレーション環境	255
付録	可視光光学装置	255
付録 .1	平行光源	257
付録 .2	検出器	258
付録	宇宙科学研究所 X 線ビームライン	260
付録 .1	X 線発生装置	262
付録 .2	真空系	262
付録 .3	透過型フィルター・二結晶分光器	265
付録 .4	四極スリット	268
付録 .5	測定チャンバー	269
付録 .6	検出器ステージ・望遠鏡ステージ	270
付録 .7	検出器	274
付録 B	光線追跡法 (Ray-Tracing)	277
付録	Xrtreftable(X-ray Ray Tracing Reflectivity Table generator)	277
付録	望遠鏡記述ファイル	278
付録	scatter file	279
付録	Xraytrace(X-ray Ray Tracing Ray-tracing program)	279
付録 C	X 線測定におけるアライメント	281
付録	キューブミラー法線と X 線軸の正対	281
付録 .1	正対の手順	281
付録 .2	セオドライトの移動量の計算	282
付録 .3	実際の正対結果	284
付録	首振り測定	285
付録 .1	測定手順	285
付録 .2	測定結果	285
付録	検出器中心とビーム中心・結像中心の位置合わせ	287
付録	DCM をもちいた場合のビーム・光軸のズレ補正	288

# 目 次

1	宇宙科学研究所 X 線ビームラインの概略図。光源から約 27 m の位置にあるスリットでビームを絞り、高い平行度の X 線を照射できる。 . . . . .	2
2	(左) 結像性能の測定結果、(右) 有効面積の測定結果。赤、緑の丸はそれぞれ、SXT-I、SXT-S の有効面積。マゼンタ、青の はそれぞれ、要求値、すざく衛星の望遠鏡の有効面積。実線、破線はそれぞれ、SXT の理想的な有効面積とその 80%を示す。 . . . . .	2
3	(左) 反射プロファイルの見積もり、(右) ミラーのアライメントミスの見積もり。 . . . .	2
1.1	光の波長とエネルギー . . . . .	24
1.2	X 線天文衛星の性能の変遷 (左上: 空間分解能、右上: エネルギー分解能、下: 検出感度) . . . . .	25
1.3	次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」 . . . . .	26
1.4	軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) . . . . .	27
1.5	硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT) . . . . .	28
1.6	軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS) . . . . .	29
1.7	軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) . . . . .	30
1.8	硬 X 線分光検出器 (Hard X-ray Imager : HXI) . . . . .	31
1.9	軟 $\gamma$ 線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD) . . . . .	32
2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。 . . . . .	34
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数。(図左は金の複素原子散乱因子 $f_1, f_2$ 、図右は金の密度を $19.32 \text{ [g/cm}^3]$ としたときの光学定数 $\delta, \beta$ である。両図とも横軸にエネルギーをとる。) . . . . .	35
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数。(図左はプラチナの複素原子散乱因子 $f_1, f_2$ 、図右は金の密度を $21.45 \text{ [g/cm}^3]$ としたときの光学定数 $\delta, \beta$ である。両図とも横軸にエネルギーをとる。) . . . . .	35
2.4	単層膜の理論反射率。 . . . . .	38
2.5	大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱。 . . . . .	39
2.6	物質表面による X 線の散乱。 . . . . .	39
2.7	粗さのある物質面上での散乱と反射。 . . . . .	39
2.8	回折格子による X 線の散乱。 . . . . .	42
3.1	アッペの正弦条件 . . . . .	43
3.2	Wolter 型光学系の種類 . . . . .	44
3.3	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。 . . . . .	45
3.4	「多重薄板型」X 線望遠鏡。-写真は ASTRO-E の XRT である。 $\sim 180 \mu\text{m}$ という薄さの反射鏡 (基板: アルミニウム) が $0.5 \sim 1.2\text{mm}$ 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。 . . . . .	46
3.5	「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。 . . . . .	46

3.6	視野外に明るい点源がある場合に検出器上に洩れ込む迷光の概念図。 . . . . .	47
3.7	ASCA 衛星に搭載された GIS で観測されたカニ星雲からの迷光のイメージ。 – カニ星雲は GIS 中心から左下に 60' 離れた位置にある。左下の明るい部分は 2 段目のフォイルで 1 回だけ反射される成分、右上の暗い部分は背面反射成分。 . . . . .	47
3.8	プリコリメータを搭載した望遠鏡の断面図。 – 一段目のフォイルの真上に望遠鏡と同じ同心円上の円筒を立てることで、反射鏡すれすれを通過する迷光を取り除くことができる。 . . . . .	48
3.9	プリコリメータを搭載してない場合 (左) と、搭載した場合 (右) の 30' off の迷光の違い (Ray-tracing によるシミュレーション)。プリコリメータの搭載により、Secondary Only 成分を減少させることができる。 . . . . .	48
3.10	SXT FM の外観。 . . . . .	49
3.11	SXT の構造。左: SXT の Quadrant の領域。右: 上から順番にプリコリメータ、Primary、Secondary。 . . . . .	49
3.12	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。 . . . . .	51
3.13	焦点面のイメージ。左: 等高線で表したものと、右: 3 次元的に表したもの。 . . . . .	52
3.14	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)。 . . . . .	52
3.15	PSF、EEF、HPD の関係 . . . . .	53
3.16	反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。 . . . . .	54
3.17	(左) 反射鏡の形状による像の広がり (右) 反射鏡の各点での法線ベクトルの揺らぎ . . . . .	55
3.18	反射鏡の位置決めによる像の広がり . . . . .	56
3.19	位置決めのずれによる反射光のずれ . . . . .	57
4.1	軟 X 線望遠鏡: SXT-I(左)、SXT-S(右) . . . . .	58
4.2	ビームライン座標系での side と軸の定義 . . . . .	60
4.3	平置き時の side と軸の定義 . . . . .	60
4.4	折り返し光学系 . . . . .	61
4.5	検出器の設置 . . . . .	61
4.6	やぐらは $\theta_y, \theta_z$ 軸の調整が可能。 . . . . .	61
4.7	焦点距離 5600 mm への設置の仕方。 . . . . .	62
4.8	(左)–1 つのクアドラント全面に照射する場合のマスク。(中)–1 つのクアドラントの半径 150 mm 以内に照射する場合。(右)–半径 150 mm 以内の円形領域に 1 度に照射する場合。 . . . . .	62
4.9	SXT の上面に設置してあるキューブミラー。写真上方向がキューブ法線となり、衛星 $z$ 軸を定義している。このキューブミラーの反射を利用することで、衛星 $z$ 軸と光軸の関係性を把握する。 . . . . .	63
4.10	キューブ法線と平行光源の正対 . . . . .	63
4.11	Q1S $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting。 . . . . .	65
4.12	Q2S $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting。 . . . . .	65
4.13	Q3S $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting。 . . . . .	65
4.14	Q4S $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting。 . . . . .	66
4.15	クアドラント全面照射における各クアドラントとの光軸分布 (全面平置き) – (左) それぞれ S-side に回して測定した光軸のセオドライトの読み値、(右) ビームライン座標系 Q1234/UCDW にあわせて回転補正したもの。 . . . . .	66
4.16	Q1S $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。 . . . . .	68

4.17	Q2W $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。	68
4.18	Q3N $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。	68
4.19	Q4E $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。	69
4.20	望遠鏡全面 $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。	69
4.21	内側のみ照射におけるクアドラントごとの光軸分布 (R150mm) – 全面平置きと R150mm 平置きのクアドラント光軸と望遠鏡光軸を比較したもの。ビームライン座標系 Q1234/UCDW にあわせたもの。黒抜が全面、白抜が R150mm を表す。	69
4.22	クアドラント光軸平均からの各クアドラント光軸の離れ。黒星が光軸平均、赤星が SXT-S、青星が SXT-I を示す。	70
4.23	焦点距離と像の形 (LR 法)	71
4.24	LR 法とレーザー測距による焦点距離測定の結果	72
4.25	Quadrant 毎の焦点距離 (5600 mm) からのずれ。縦軸は上下の像の光量、横軸は焦点距離からのずれ (pulse 値)。イメージの半分の領域の光量の比を赤線と黒線で表している。データは Linear + Constant でフィット。左上: Q1U、右上: Q2U、左下: Q3U、右下: Q4U。	73
4.26	SXT の理想的な有効面積と測定にもちいた X 線エネルギー。実線: 望遠鏡 1 台分の理想的な有効面積、破線: クアドラントの理想的な有効面積。	74
4.27	各エネルギーでの Vignetting map	75
4.28	左: ペンシルビームを用いた望遠鏡測定の模式図。望遠鏡の光軸と検出器を同期して動かし、望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する。右: Q1U をラスタースキャンするステージの経路の例。	76
4.29	X 線光軸のまとめ	79
4.30	クアドラントごとの X 線光軸 (Q1234/UCDW)	80
4.31	クアドラントごとの X 線光軸 (Q1234/DWUC)	81
4.32	SXT-S の有効面積のエネルギー依存性。赤: 望遠鏡全面の有効面積、水色: SXT 要求値、緑: <i>Suzaku</i> XRT、緑十字: Q1U、マゼンタ米印: Q2C、オレンジ: Q3D、青: Q4W。実線は Debye-Waller モデルで粗さ 4 Å を仮定した理想的な有効面積。破線はそれの 80 %。下段には、理想的な有効面積との比を示している。	84
4.33	多色の X 線による有効面積の入射角依存性。(左)–各 Vignetting 測定の結果を、光軸の有効面積で割ったもの。(右)–Vignetting の測定点。	85
4.34	測定条件	87
4.35	45 度斜め Vignetting の軸の定義	87
4.36	Ti-K $\alpha$ をもちいた、Vignetting 方向による有効面積の比較。(左)–Vignetting 点における有効面積。下段は光軸における有効面積との比を示す。(右)–Vignetting の測定点と Vignetting 方向の ID。	87
4.37	SXT-I と SXT-S の光軸での有効面積のエネルギー依存性の比較。下段には、SXT-S の有効面積と SXT-I の有効面積の比を示してある。	89
4.38	1 回反射の際の、Ti-K $\alpha$ と Mo-K $\alpha$ の反射率の角度依存性。Au の厚みは 200 nm、粗さは 4 Å で計算したもの。	90
4.39	SXT-S の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性。黒: Q1U、赤: Q2C、緑: Q3D、青: Q4W、水色: 望遠鏡全面の HPD。実線は要求値 1.7' を示す。	91
4.40	Q1U の各エネルギーにおけるイメージと HPD。	92



4.41	Q1U の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。 . . . . .	92
4.42	Q2C の各エネルギーにおけるイメージと HPD。 . . . . .	93
4.43	Q2C の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。 . . . . .	93
4.44	Q3D の各エネルギーにおけるイメージと HPD。 . . . . .	94
4.45	Q3D の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。 . . . . .	94
4.46	Q4W の各エネルギーにおけるイメージと HPD。 . . . . .	95
4.47	Q4W の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。 . . . . .	95
4.48	望遠鏡全体の各エネルギーにおけるイメージと HPD。 . . . . .	96
4.49	望遠鏡全体の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。 . . . . .	96
4.50	(左)–off-axis イメージ測定の configuration。 (右)–off-axis イメージの測定点。 . . . . .	97
4.51	各エネルギーでの on-axis イメージと、SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。緑のマスが SXS の視野に対応。有効面積イメージのカラースケールは 0~50 cm <sup>2</sup> の範囲で統一している。 . . . . .	98
4.52	off-axis イメージ測定の結果。 . . . . .	99
4.53	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(+4.5', 0')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	100
4.54	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(+4.5', 0') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	100
4.55	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(−4.5', 0')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	101
4.56	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(−4.5', 0') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	101
4.57	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(0', +4.5')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	102
4.58	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(0', +4.5') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	102
4.59	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(0', −4.5')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	103
4.60	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(0', −4.5') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	103
4.61	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(+3/ $\sqrt{2}$ ', +3/ $\sqrt{2}$ ')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	104
4.62	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(+3/ $\sqrt{2}$ ', +3/ $\sqrt{2}$ ') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	104
4.63	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(−3/ $\sqrt{2}$ ', +3/ $\sqrt{2}$ ')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	105
4.64	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(−3/ $\sqrt{2}$ ', +3/ $\sqrt{2}$ ') の結像中心での PSF、 (右)–EEF。 . . . . .	105
4.65	(左)–( $\theta_y, \theta_z$ )=(−3/ $\sqrt{2}$ ', −3/ $\sqrt{2}$ ')off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。 (右)–SXS を考慮した際のの各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	106

4.66	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	106
4.67	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$ off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右)–SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	107
4.68	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	107
4.69	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-8.6', 0')$ off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右)–SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。 . . . . .	108
4.70	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-8.6', 0')$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	108
4.71	(左)–off-axis イメージ測定の configuration。(右)–off-axis イメージの測定点。 . . . . .	109
4.72	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	110
4.73	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	110
4.74	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-4.5', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	111
4.75	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-4.5', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	111
4.76	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-9.0', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	112
4.77	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-9.0', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	112
4.78	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-13.5', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	113
4.79	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-13.5', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	113
4.80	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-18.0', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	114
4.81	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-18.0', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	114
4.82	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-22.5', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	115
4.83	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-22.5', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	115
4.84	(左)–SXT-I の $(\theta_y, \theta_z)=(-27.0', 0)$ off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。 . . . . .	116
4.85	(左)– $(\theta_y, \theta_z)=(-27.0', 0)$ の結像中心での PSF、(右)–EEF。 . . . . .	116
4.86	SXT-I と SXT-S の Ti-K $\alpha$ でのイメージの比較。 . . . . .	117
4.87	(左)–SXT-S、SXS-I、 <i>Suzaku</i> XRT の PSF、EEF の比較。 . . . . .	117
4.88	SXT-I と SXT-S の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性。黒 : Q1U、赤 : Q2C、緑 : Q3D、青 : Q4W、水色 : 望遠鏡全面の HPD。実線は要求値 1.7' を示す。 . . . . .	118
4.89	(左)–迷光の経路の例。(右)–SXI と SXS の視野。 . . . . .	120
4.90	SXT-I の off-axis 角 +60' におけるセクターの迷光のイメージ@Al-K $\alpha$ 。すり抜け成分が見える。 . . . . .	120
4.91	すり抜け成分の経路。 . . . . .	120
4.92	Ray-tracing による迷光のシミュレーション . . . . .	121
4.93	迷光の測定と off angle の定義。 . . . . .	122
4.94	測定条件 . . . . .	123
4.95	1 line rotation scan . . . . .	123
4.96	1 line rotation scan による各 sector の各 angle での有効面積 (SXS FOV) のまとめプロット。+60' で有効面積が $10^{-3} \text{ cm}^2$ 以上の sector は赤でプロットしてある。 . . . . .	124
4.97	(左)–+30' における Ray-racing の結果。宇宙研 CCD の +Y 方向に Backside 成分が –Y 方向に Secondary 成分があらわれる。(右)–実際に +30' で得られるイメージ。SXS の視野と Backside 側、Secondary 側、全領域のそれぞれの迷光の寄与を調べる。 . . . . .	124
4.98	–40' off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	125
4.99	–40' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	125
4.100	–30' off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	126

---

4.101-30' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	126
4.102-25' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	127
4.103-25' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	127
4.104-20' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	128
4.105-20' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	128
4.106-15' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	129
4.107-15' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	129
4.108-10' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	130
4.109-10' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	130
4.1100' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	131
4.1110' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	131
4.112+10' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	132
4.113+10' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	132
4.114+15' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	133
4.115+15' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	133
4.116+25' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	134
4.117+25' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	134
4.118+30' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	135
4.119+30' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	135
4.120+35' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	136
4.121+35' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	136
4.122+40' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	137
4.123+40' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	137
4.124+45' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	138
4.125+45' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	138
4.126+50' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	139
4.127+50' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	139
4.128+55' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	140
4.129+55' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	140

4.130+60' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	141
4.131+60' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	141
4.132+65' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	142
4.133+65' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	142
4.134+70' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。 . . . . .	143
4.135+70' off-axis : 各ラインでの有効面積。 . . . . .	143
4.136測定条件 . . . . .	144
4.1371 line tilt scan . . . . .	144
4.1381 line tilt scan による各 off angle での有効面積。(左上)-Q2C の Al-K $\alpha$ による測定。 (右上)-Q3C の Ti-K $\alpha$ による測定。(左下)-Q3C の Ti-K $\alpha$ による測定。(右下)-Q3C の Al-K $\alpha$ と Ti-K $\alpha$ の各 off angle の有効面積 (PC FOV) の比較。 . . . . .	145
4.139Al-K $\alpha$ による Q2C sector 5 の各 angle でイメージ。左上が -120'、右下が +120' に対応。	146
4.140Al-K $\alpha$ による Q3C sector 5 の各 angle でイメージ。左上が -120'、右下が +120' に対応。	147
4.141Ti-K $\alpha$ による Q3C sector 5 の各 angle でイメージ。左上が -120'、右下が +120' に対応。	148
4.142測定条件 . . . . .	149
4.143QT 全面照射による迷光測定 . . . . .	149
4.144Q1 & Q3 -20' off-angle : Q1 には Primary Only 成分が見える。 . . . . .	150
4.145Q2 & Q3 +30' off-angle : Q2 には素通り成分が見える。 . . . . .	151
4.146Q2 & Q3 +60' off-angle : Q3 にはすり抜け成分が見える。 . . . . .	152
4.147測定条件 . . . . .	153
4.148望遠鏡全面照射による迷光測定 . . . . .	153
4.149Al-K $\alpha$ 、Ti-K $\alpha$ による各 off angle の望遠鏡の有効面積。(左)-PC による測定結果との比 較。(右)-SXS の視野における有効面積。 . . . . .	153
4.150Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +15' off-angle 方向 . . . . .	154
4.151Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +20' off-angle 方向 . . . . .	154
4.152Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +30' off-angle 方向 . . . . .	155
4.153Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +45' off-angle 方向 . . . . .	155
4.154Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +60' off-angle 方向 . . . . .	156
4.155Al-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +75' off-angle 方向 . . . . .	156
4.156Ti-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +15' off-angle 方向 . . . . .	157
4.157Ti-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +30' off-angle 方向 . . . . .	157
4.158Ti-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +45' off-angle 方向 . . . . .	158
4.159Ti-K $\alpha$ による各クアドラントの迷光測定結果 : sector 5 +60' off-angle 方向 . . . . .	158
4.160測定条件 . . . . .	159
4.161大視野による望遠鏡全面の迷光測定 . . . . .	159
4.162(左)-大視野における SXT-I の on-axis イメージ。CCD で 4 点測定し、XY 方向で 34' $\times$ 32' の視野。(右)- SXT-I と SXT-S の Ti-K $\alpha$ で測定時の PSF と本測定の PSF との比較。 . . . . .	160
4.163(左)-大視野における SXT-I の全面 30' off イメージ。CCD で 4 点測定し、XY 方向で 34' $\times$ 32' の視野。(右)- Ray-tracing による+30' off イメージ。 . . . . .	160
4.164(左)-rotation scan の測定結果。+60' の素通り成分は特有の sector にあられる。(右)- SXS の視野における望遠鏡全面の迷光測定結果。 . . . . .	161

5.1	(左)–スポットスキャンにおける軸の定義。X 線は C-side に置いたクアドラントに照射する。(右)–スポットスキャンによる $8 \times 8$ mm beam モザイクマッピング。各スポットのイメージを足しあわせることでクアドラントのイメージが得られる。 . . . . .	163
5.2	レンズの公式。 . . . . .	164
5.3	各スポットイメージの結像中心の求め方。 . . . . .	165
5.4	形状誤差を求める際のイメージ解析方法。 . . . . .	165
5.5	各クアドラントの全スポット積分イメージと HPD。各イメージは最大値を示すピクセルの値で規格化してある。 . . . . .	166
5.6	図 5.5 の EEF。縦軸が半値となる直径が HPD となる。 . . . . .	167
5.7	各クアドラントの結像位置プロットと HPD。中心は各クアドラント全体の結像中心。コントラストは、図 5.5 に示したイメージの 0.25、0.05、0.01 レベルに対応する。 . . . . .	168
5.8	各クアドラントの結像中心から、ある直径内に含まれる結像中心の数を全スポット数で規格化したもの。イメージ解析でもちいた関数 EEF と等価となる。縦軸が 0.5 を示す直径がイメージ解析でもちいた指標 HPD(これが位置決め誤差となる) と等価。 . . . . .	169
5.9	SXT-I と SXT-S の結像位置の入射位置による違い。各クアドラントの結像位置を中心に Y 軸方向にどれだけずれているかをカラーバーで表示している。各クアドラントは上から時計周りに、Q1、Q2、Q3、Q4 を示す。 . . . . .	169
5.10	各クアドラントの形状誤差イメージと HPD。各イメージは最大値を示すピクセルの値で規格化してある。各スポットイメージをそれぞれの結像中心から、クアドラント全体の結像中心に集めたもの。この操作によって、結像中心のばらつきによる結像性能の悪化を消すことができる。 . . . . .	170
5.11	図 5.10 の EEF。縦軸が半値となる直径が HPD : 形状誤差となる。 . . . . .	171
5.12	SXT-I と SXT-S の結像性能の入射位置による違い。各スポットイメージの結像中心で HPD を算出している。各クアドラントは上から時計周りに、Q1、Q2、Q3、Q4 を示す。 . . . . .	171
5.13	形状誤差と位置決め誤差の二乗和と HPD の比較。 . . . . .	172
5.14	スポットスキャンのデータを用いて、動径方向に 7 分割、位相方向に 8 分割した SXT の領域による解析を行う。ここでは、sector を図に表記したように、sector1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 のように定義する。また動径方向は、r1 : 55–80 mm、r2 : 80–105 mm、r3 : 105–130 mm、r4 : 130–155 mm、r5 : 155–180 mm、r6 : 180–205 mm、r7 : 205–230 mm と定義する。 . . . . .	173
5.15	反射鏡面上での X 線の反射と角度の定義。入射 X 線は入射角 $\alpha$ で入射し、 $\alpha$ で反射されるが、反射鏡面の形状によって散乱される。大角度側への反射を $+\theta$ 、小角度側への反射を $-\theta$ とする。 . . . . .	174
5.16	二回反射プロファイルから一回反射プロファイルを算出するプロセス。二回反射プロファイルには、一回反射プロファイルが二回畳み込まれていると仮定すれば、フーリエ変換を用いて一回反射プロファイルを計算することができる。 . . . . .	174
5.17	SXT-I Q1 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	176
5.18	SXT-I Q1 の sector8–5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑 : 2 回反射プロファイル、灰色 : 元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤 : フィットモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	177

5.19	SXT-I Q1 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	178
5.20	SXT-I Q1 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	179
5.21	SXT-I Q1 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	180
5.22	SXT-I Q1 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したと きの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元 データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを 逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元デー タとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	181
5.23	SXT-I Q1 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したと きの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元 データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを 逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元デー タとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	182
5.24	SXT-I Q2 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下 から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	183
5.25	SXT-I Q2 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	184
5.26	SXT-I Q2 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	185
5.27	SXT-I Q2 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	186
5.28	SXT-I Q2 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	187

5.29	SXT-I Q2 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	188
5.30	SXT-I Q2 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	189
5.31	SXT-I Q3 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	190
5.32	SXT-I Q3 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィッティングモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	191
5.33	SXT-I Q3 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィッティングモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	192
5.34	SXT-I Q3 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィッティングモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	193
5.35	SXT-I Q3 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィッティングモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	194
5.36	SXT-I Q3 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	195
5.37	SXT-I Q3 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	196
5.38	SXT-I Q4 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	197
5.39	SXT-I Q4 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィッティングモデルを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	198

5.40	SXT-I Q4 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	199
5.41	SXT-I Q4 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	200
5.42	SXT-I Q4 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	201
5.43	SXT-I Q4 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	202
5.44	SXT-I Q4 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	203
5.45	SXT-S Q1 の領域に分けた際のイメージ。左右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	204
5.46	SXT-S Q1 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	205
5.47	SXT-S Q1 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	206
5.48	SXT-S Q1 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	207
5.49	SXT-S Q1 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	208



5.50	SXT-S Q1 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	209
5.51	SXT-S Q1 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	210
5.52	SXT-S Q2 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	211
5.53	SXT-S Q2 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	212
5.54	SXT-S Q2 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	213
5.55	SXT-S Q2 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	214
5.56	SXT-S Q2 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	215
5.57	SXT-S Q2 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	216
5.58	SXT-S Q2 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	217
5.59	SXT-S Q3 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	218
5.60	SXT-S Q3 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	219

5.61	SXT-S Q3 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	220
5.62	SXT-S Q3 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	221
5.63	SXT-S Q3 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	222
5.64	SXT-S Q3 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したと きの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元 データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを 逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元デー タとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	223
5.65	SXT-S Q3 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したと きの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元 データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを 逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元デー タとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	224
5.66	SXT-S Q4 の領域に分けた際のイメージ。左 右が sector8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 に対応。下 から上が r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。 . . . . .	225
5.67	SXT-S Q4 の sector8-5 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	226
5.68	SXT-S Q4 の sector4-1 の反射プロファイル (linear 表示)。縦軸は全光量で規格化。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対応。緑：2 回反射プロファイ ル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したもの、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	227
5.69	SXT-S Q4 の sector8-5 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	228
5.70	SXT-S Q4 の sector4-1 の反射プロファイル (log 表示)。縦軸は全光量で規格化。横軸は Diffraction Angle( $^{\circ}$ )。左 右は sector4, 3, 2, 1 に、下から上は r1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 に対 応。緑：2 回反射プロファイル、灰色：元データを 1 回反射プロファイルに変換したも の、赤：フィットモデルをを 1 回反射プロファイルに変換したもの。 . . . . .	229

5.71	SXT-S Q4 の sector8-5 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	230
5.72	SXT-S Q4 の sector4-1 の反射プロファイルを求める際のフィッティングと逆演算したときの再現性。黒：元データ (2 回反射プロファイル)、赤：フィッティングモデル、青：元データを逆戻し演算したもの、緑：モデルを逆戻し演算したもの、マゼンタ：モデルを逆戻し演算したものと元データとの比、水色：元データを逆戻し演算したものと元データとの比。横軸は、結像中心からの pixel 値の離れを示す。 . . . . .	231
5.73	結像中心のズレからミラーの角度のズレを評価する。ここでは、下のミラーだけが傾きにズレがあると過程する。 . . . . .	232
5.74	SXT-I の各クアドラントごとのミラー角度ずれの見積もり。左上から右下の流れで Q1, Q2, Q3, Q4 を示す。縦軸は予測される角度のズレ (')、横軸は各 sector の番号を示す。色は、黒が r1 : 55-80 mm、赤が r2 : 80-105 mm、緑が r3 : 105-130 mm、青が r4 : 130-155 mm、水色が r5 : 155-180 mm、マゼンタが r6 : 180-205 mm、黄色が r7 : 205-230 mm を示す。 . . . . .	233
5.75	SXT-S の各クアドラントごとのミラー角度ずれの見積もり。左上から右下の流れで Q1, Q2, Q3, Q4 を示す。縦軸は予測される角度のズレ (')、横軸は各 sector の番号を示す。色は、黒が r1 : 55-80 mm、赤が r2 : 80-105 mm、緑が r3 : 105-130 mm、青が r4 : 130-155 mm、水色が r5 : 155-180 mm、マゼンタが r6 : 180-205 mm、黄色が r7 : 205-230 mm を示す。 . . . . .	234
6.1	Astro-E2 反射鏡の反射 X 線強度角度分布の応答関数 . . . . .	236
6.2	散乱 X 線強度の角度分布測定に対するモデル関数のフィッティング結果 . . . . .	238
6.3	作成した応答関数から計算した Astro-E2 反射鏡に対する反射 X 線強度の角度分布 . . .	240
6.4	X 線による反射プロファイルの散乱成分測定から算出した PSD—マークの種類で入射 X 線のエネルギーを区別した。円が 1.49 keV (Al-K $\alpha$ )、四角形が 4.51 keV (Ti-K $\alpha$ )、三角形が 8.04 keV (Cu-K $\alpha$ ) をそれぞれ示している。また、Astro-E2 を黒塗りのマークで示した。Astro-E2 の PSD は非常にバラツキが大きい、これは測定サンプル数が ASCA や Astro-E よりも少ないためであると考えられる。今後サンプルを増やす事でこのバラツキはなくなると考えられる。 . . . . .	241
6.5	scatter file への反射プロファイルの書き込み。各クアドラントで複数のエネルギー、入射角依存性を持つプロファイルを組み込む事が出来る。 . . . . .	242
6.6	望遠鏡記述ファイルへの書き込み。scatter file のどの反射プロファイルを参照するか、反射鏡の傾きのズレ、segment のズレを記述する。 . . . . .	243
6.7	(上)-xraytrace による SXT-I のシミュレーション結果 (左) と実験結果の比較 (右)。(下)-PSF のシミュレーション結果と実験結果の比較。 . . . . .	244
6.8	(上)-xraytrace による SXT-S のシミュレーション結果 (左) と実験結果の比較 (右)。(下)-PSF のシミュレーション結果と実験結果の比較。 . . . . .	245
6.9	横山修論の散乱モデルと本研究で得られた正反射成分を合わせた反射プロファイルのエネルギー依存性。縦軸は、正反射成分の全光量が 1 となるように規格化してある。散乱成分に関しては、正反射成分 (4.51 keV) と 4 keV 散乱成分がつながるように normalization を調整している。 . . . . .	246

6.10	(左)–横山修論の散乱モデルをもちいてシミュレーションした、PSF tail の再現。(右)–実測による PSF tail のエネルギー依存性 (富川修論より抜粋)。	247
6.11	PSF tail を良く再現できる散乱モデル (9 keV でのモデル) と本研究で得られた正反射成分を合わせた反射プロファイルの入射角依存性。縦軸は、正反射成分の全光量が 1 となるように規格化してある。すべてのエネルギーにおいて、この散乱モデルを使用することとする。	248
6.12	(上)–SXT-I の散乱成分ありのシミュレーション結果 (左) と散乱無しの比較 (右)。1000 万 photon 降らせた時の 10 photon がイメージスケールの最大値を示す。(下)–散乱 PSF のシミュレーション結果と実験結果 (SXT-I) の比較。	249
6.13	(上)–SXT-S の散乱成分ありのシミュレーション結果 (左) と散乱無しの比較 (右)。1000 万 photon 降らせた時の 10 photon がイメージスケールの最大値を示す。(下)–散乱 PSF のシミュレーション結果と実験結果 (SXT-I) の比較。	250
7.1	KEK、SPring-8 による金の吸収端測定。KEK では M 吸収端を、SPring-8 では L 吸収端を測定。	253
A.1	衛星アライメントの概要。	256
A.2	愛媛大の平行光源。平行度は約 5 秒角。	257
A.3	CMOS カメラ。	258
A.4	左：右から順番に BITRAN BS-42N CCD カメラ、NIKON Ai AF Micro-Nikkor レンズ、レンズと望遠鏡に固定するための治具。右：くみ上げた様子。各接続部はアラルダイトで固着している。	259
A.5	宇宙科学研究所 X 線ビームラインのチャンバー配置図。	261
A.6	X 線発生装置の構成図。	262
A.7	宇宙科学研究所ビームラインにおける真空・排気装置の全体図。	264
A.8	フィルターの透過率。	265
A.9	大気室チャンバー中のフィルターの配置図。	266
A.10	30m ビームライン搭載 DCM の結晶配置図。– $A_\theta$ 軸ステージの中心に第 1 結晶面が置かれており、X 線は常に第 1 結晶の同じ位置に入射する。	267
A.11	Cu-K $\alpha$ (8.04 keV) 付近のロッキングカーブ。– DCM を回転させ、入射角度を変えていったときの光量変化を表している。30m ビームライン搭載 DCM は Cu-K $\alpha_1, \alpha_2$ を区別することができる。	267
A.12	四極スリットの構成図。	268
A.13	測定チャンバーの 3D イメージ。	269
A.14	左：ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観。右：チャンバー上流側のドアから下流側に見たチャンバー内部。	270
A.15	上：望遠鏡ステージ、下左：検出器ステージ、下右：検出器微調整ステージの概要図。	272
A.16	左：ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観。右：チャンバー上流側のドアから下流側に見たチャンバー内部。	273
A.17	左：ステージドライバ付近。右：ステージコントローラ付近。信号線にフェライトが装着されている。	273
A.18	背面照射型 CCD カメラの原理 – 上：前面照射型と背面照射型の断面図、下：電荷転送の概念図。	275
C.1	D1F ビームラインの概略図。矢印があるところのピンホールやスリットを用いてセオドライトを X 線軸に正対させる。今回は上流ピンホールと下流スリットを用いて X 線軸を決定する。	281

---

C.2	セオドライトから見た角度の関係。 . . . . .	283
C.3	セオドライトによる首振り測定結果。(左) $\theta_x$ を 45 度ずつまわしたときキューブが正対する位置の $\theta_y$ , $\theta_z$ の pulse 値を秒角に直したもの。(右) $\theta_x=0$ のところにすべての点を回し、プロットしたもの。測定誤差のようなもの。 . . . . .	285
C.4	首振り測定による望遠鏡光軸の予測(左) どの $\theta_x$ でも望遠鏡光軸が分かる様に、キューブが正対する $\theta_y$ , $\theta_z$ をそれぞれ sin 関数でフィットしたもの。(右) それをもとに望遠鏡光軸を予測したもの。 . . . . .	286
C.5	口の字ラスタースキャン。 . . . . .	287
C.6	口の字ラスタースキャンで得られたイメージ。 . . . . .	287
C.7	DCM での 2 回反射。 - DCM に入射した X 線は DCM 前後でビームに垂直な方向に $\Delta x$ ずれる。 . . . . .	288
C.8	DCM による X 線軸のずれに伴う光軸補正の概念図。紫の直線が本来の X 線軸で、紫の点線が DCM 挿入時の X 線軸である。X 線軸と光軸を正対させるため、軸が傾いた分だけ望遠鏡も傾ける必要がある。 . . . . .	289

# 表 目 次

1.1	SXT の設計パラメータ	27
1.2	HXT の設計パラメータ	28
1.3	SXS への性能要求	29
1.4	SXI 諸元	30
1.5	HXI への性能要求	31
1.6	SGD への性能要求	32
2.1	金とプラチナの臨界角。	37
3.1	SXT の設計パラメータ。	50
4.1	ビームライン座標系と平置き時の side の相関。	60
4.2	測定条件	64
4.3	クアドラント全面照射における各クアドラントごとの Vignetting 測定 (全面平置き) のまとめ。1' = 25813 pulse に対応。 $\theta_y, \theta_z$ は光量最大となる点 (pulse 値)。AZ、EL は光量最大の点にもっていった時の光源とキューブ法線の離角 (セオドライト測定)。	64
4.4	測定条件	67
4.5	内側照射における各クアドラントごとの Vignetting 測定 (全面平置き) のまとめ。1' = 25813 pulse に対応。 $\theta_y, \theta_z$ は光量最大となる点 (pulse 値)。AZ、EL は光量最大の点にもっていった時の光源とキューブ法線の離角 (セオドライト測定)。	67
4.6	可視光測定による SXT-S、SXT-I の光軸とキューブ法線離角のまとめ	70
4.7	測定条件	72
4.8	焦点距離の測定結果	72
4.9	各エネルギーでの Vignetting 測定項目	75
4.10	測定条件	78
4.11	Q1U positon : Ti-K $\alpha$ 、 $\theta_y$ 軸	79
4.12	Q1U positon : Ti-K $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸	79
4.13	Q3U positon : Ti-K $\alpha$ 、 $\theta_y$ 軸	79
4.14	Q3U positon : Ti-K $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸	79
4.15	Q1234/UCDW の光軸 : 1 pulse = 1.8''( $\theta_y$ )、3.6''( $\theta_z$ ) に対応。	82
4.16	Q1234/DWUC の光軸 : 1 pulse = 1.8''( $\theta_y$ )、3.6''( $\theta_z$ ) に対応。	82
4.17	クアドラント・望遠鏡光軸における各クアドラントの有効面積の比較	82
4.18	測定条件	83
4.19	望遠鏡光軸における各 Quadrant の有効面積	84
4.20	測定条件	85
4.21	Al-K $\alpha$ による Vignetting 測定 : $\theta_y$ 軸	86
4.22	Al-K $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸	86
4.23	Ti-K $\alpha$ による Vignetting 測定 : $\theta_y$ 軸	86

4.24	Ti-K $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸 . . . . .	86
4.25	Cu-K $\alpha$ による Vignneting 測定 : $\theta_y$ 軸 . . . . .	86
4.26	Cu-K $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸 . . . . .	86
4.27	Pt-L $\alpha$ による Vignneting 測定 : $\theta_y$ 軸 . . . . .	86
4.28	Pt-L $\alpha$ 、 $\theta_z$ 軸 . . . . .	86
4.29	Pt-L $\beta$ による Vignneting 測定 : $\theta_y$ 軸 . . . . .	86
4.30	Pt-L $\beta$ 、 $\theta_z$ 軸 . . . . .	86
4.31	Ti-K $\alpha$ による Vignneting 測定 : $\theta_y$ 軸 . . . . .	88
4.32	Ti-K $\alpha$ による Vignneting 測定 : $\theta_z$ 軸 . . . . .	88
4.33	Ti-K $\alpha$ による Vignneting 測定 : even . . . . .	88
4.34	Ti-K $\alpha$ による Vignneting 測定 : odd . . . . .	88
4.35	SXT-S と SXT-I の有効面積の比較 . . . . .	89
4.36	測定条件 . . . . .	91
4.37	測定条件 . . . . .	97
4.38	SXS の視野での有効面積と P.C. の視野 (7.4' $\Phi$ ) での有効面積の比較 . . . . .	98
4.39	SXT-S : off-axis イメージ測定結果まとめ . . . . .	99
4.40	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0')=(-379, -94 : \text{pulse})$ . . . . .	100
4.41	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-4.5', 0')=(-79, -94 : \text{pulse})$ . . . . .	101
4.42	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(0', +4.5')=(-229, -19 : \text{pulse})$ . . . . .	102
4.43	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(0', -4.5')=(-229, -169 : \text{pulse})$ . . . . .	103
4.44	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(+3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')=(-304, -56 : \text{pulse})$ . . . . .	104
4.45	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')=(-154, -56 : \text{pulse})$ . . . . .	105
4.46	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')=(-154, -132 : \text{pulse})$ . . . . .	106
4.47	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')=(-304, -56 : \text{pulse})$ . . . . .	107
4.48	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-8.6', 0)=(+59, -94 : \text{pulse})$ . . . . .	108
4.49	SXT-I : off-axis イメージ測定結果まとめ . . . . .	109
4.50	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)=(+251, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	110
4.51	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-4.5', 0)=(-49, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	111
4.52	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-9.0', 0)=(-199, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	112
4.53	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-13.5', 0)=(-349, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	113
4.54	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-18.0', 0)=(-499, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	114
4.55	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-22.5', 0)=(-649, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	115
4.56	測定結果 : $(\theta_y, \theta_z)=(-27.0', 0)=(-799, +40 : \text{pulse})$ . . . . .	116
4.57	SXT-S と SXT-I の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性のまとめ . . . . .	118
4.58	測定結果 : Q1 & Q3 : -20' off angle 有効面積 . . . . .	150
4.59	測定結果 : Q1 & Q3 : +30' off angle 有効面積 . . . . .	151
4.60	測定結果 : Q1 & Q3 : +60' off angle 有効面積 . . . . .	152
5.1	測定条件 . . . . .	163
5.2	Ti-K $\alpha$ をもちいたスポットスキャンとラスタースキャンでの結像性能の比較 . . . . .	167
5.3	結像性能の要因切り分けのまとめ . . . . .	172
6.1	Astro-E2 反射鏡の反射 X 線強度角度分布の応答関数のベストフィットパラメータ . . . . .	237
6.2	Astro-E2 反射鏡の反射 X 線強度角度分布の応答関数のベストフィットパラメータ . . . . .	239

---

A.1	愛媛大平行光源の仕様。 . . . . .	257
A.2	CMOS カメラの仕様。 . . . . .	258
A.3	CCD カメラの仕様。BITRAN 製。 . . . . .	259
A.4	レンズの仕様。Nikon 製。 . . . . .	260
A.5	X 線発生装置の仕様。 . . . . .	263
A.6	特性 X 線と対応するフィルターの種類。 . . . . .	265
A.7	望遠鏡ステージ、検出器ステージの基本情報。 . . . . .	271
A.8	ガスフロー型比例計数管の仕様。 . . . . .	274
A.9	マルチチャンネルアナライザー MCA8000A の仕様。 . . . . .	274
A.10	背面照射型 CCD カメラの仕様。 . . . . .	276
C.1	(1)–大気中での X 線軸とセオドライトの正対 . . . . .	284
C.2	(2)–望遠鏡導入後、大気中で X 線軸とキューブ法線の正対 . . . . .	284
C.3	(3)–真空引き後、X 線軸を再度確認 . . . . .	284
C.4	(4)–真空中で、X 線軸とキューブ法線を正対 . . . . .	284
C.5	各 $\theta_x$ における望遠鏡光軸の予測– $\theta_y, \theta_z$ はそれぞれ $\theta_x$ に対応したキューブが正対するところをパルス値で表示。光軸 $\theta_y, \theta_z$ はそれぞれ $\theta_x$ をまわしたところの望遠鏡光軸を表す。 . . . . .	286





# 第1章 序論

## 1.1 X線天文学

宇宙の神秘は、いつの時代でも人々の好奇心を引きつけ、古代から続く学問「天文学」として、現在も盛んに研究されている。天文学の起源は紀元前 2000 年頃までさかのぼる。古代の人々は、太陽、月、星の動きを観測して、その動きの規則性から暦を作り出した。その後 1600 年代には、望遠鏡が発明されることで、本格的な宇宙の可視光観測が可能となった。そして、現代における天文学では、電波から  $\gamma$  線までという様々な波長の光 (電磁波) による宇宙観測が可能となり、宇宙の様々な姿が明らかになってきている。

その中でも X 線天文学では、1nm から 0.01nm 程度という、可視光と比べ 1000 分の 1 から 10 万分の 1 の非常に波長の短い光 (X 線) で宇宙の観測を行う。光において波長の短さは、そのエネルギーの高さの指標となるため (図 1.1)、この場合 X 線は、可視光の 3 から 4 桁もエネルギーの高い、高エネルギー現象をとらえている事になる。そして、宇宙の物質の 8 割以上は X 線でなければ観測できないと言われるほど、宇宙環境は劇的であり、宇宙からの X 線放射は一般的なものである。

しかしながら、宇宙から初めて X 線が発見されたのは、約 50 年前と比較的最近のことである。宇宙からの X 線のほとんどが大気吸収を受けてしまう。そのため、地上観測が主だった 1900 年代初頭までは、観測自体が不可能であると共に、宇宙からの X 線放射の存在も知られていなかった。そして 1962 年、ブルーノ・ロッシ、リカルド・ジャッコニらによるロケット実験によって初めて、宇宙からの太陽以外の X 線源が発見された。この発見を皮切りに X 線天文学が誕生し、現在までに数々のロケット実験、気球実験、観測衛星の打ち上げが行われている。また、2002 年にはジャッコニがこの業績をたたえられノーベル物理学賞を取得する事となった。

また、X 線望遠鏡の登場は、X 線天文学に大いなる飛躍をもたらした。X 線望遠鏡は宇宙からの微弱な X 線の集光・結像することで、観測対象の空間分布の把握を可能とすると共に、検出器の小型化を可能にし、S/N 比を飛躍的に向上させた。

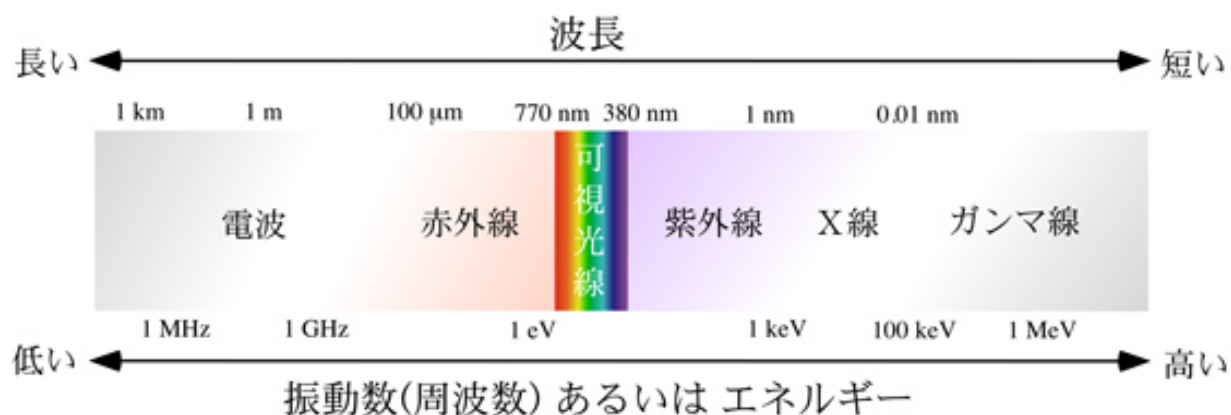


図 1.1: 光の波長とエネルギー

## 1.2 X 線天文衛星と X 線望遠鏡の登場

X 線領域の観測は、一般的に光子のカウントレートが低く、典型的には 1 count/sec ほどである。よってその観測は、1 つ 1 つの光子について、入射時間、進行方向、エネルギー（波長）を測定することになる。このため、一部例外はあるが、X 線天文衛星は、（X 線望遠鏡 or コリメーター）+（エネルギーや時間分解能を持つ検出器）という組み合わせで観測機器が搭載されている。

X 線天文衛星が打ち上げ始められたのは、1970 年代以降で、これまでさまざまな衛星が打ち上げられている。1970 年代前半の主な衛星は（コリメーター）+（ガス比例計数管）という組み合わせで、Uhuru、Ariel-5、OSO-8、HEAO-1 などがある。この世代の典型的な感度は 1 mCrab<sup>1</sup> 程度であった。

しかし、1978 年の Einstein 衛星で劇的な進化を遂げる。X 線望遠鏡の登場である。これまでの（コリメーター）+（ガス比例計数管）という組み合わせは、検出器の開口面積を大きくすれば、それに比例して多くの光子を集めることができる。但しそれと同時に検出器のバックグラウンドとなる宇宙 X 線背景放射（CXB）が増えてしまう。さらにもう一つのバックグラウンドである荷電粒子などの宇宙線は検出器の体積に比例して大きくなるため、検出器を大きくしてもその感度には限界がある。しかし X 線望遠鏡を用いることで目的の天体の X 線のみを見ることができ、小さな開口面積の検出器で多くの光子を集めることが出来る。これにより検出感度（シグナルノイズ比：S/N 比）は劇的に改善され、Einstein の検出感度は 0.1  $\mu$ Crab を達成した。さらに 1999 年に打ち上げられた XMM や Chandra などといった X 線天文衛星では、焦点距離を伸ばすことで、さらに高エネルギーの X 線の集光を可能とした。Einstein 衛星では、3 keV 程度が集光の限界であったが、これらの衛星では 10 keV 近くまで集光することが可能となっている。しかしながら、衛星自体の大型化、重量化も伴い、衛星計画にかかるコストも急激に増加してしまった。

日本の衛星は「はくちょう」をはじめ、これまでの比例計数管の 2 倍のエネルギー分解能をもつ蛍光比例計数管を搭載した「てんま」、4000 cm<sup>2</sup> という大面積でありながら低いノイズをもつ比例計数管が搭載された「ぎんが」などがある。日本の衛星で初めて望遠鏡を搭載したのは、1993 年に打ち上げられた、あすか衛星である。あすか衛星では、軽量ながら大有効面積を獲得できる「多重薄板型」X 線望遠鏡（後の章で説明）と、当時最先端の X 線 CCD カメラと組み合わせることで、日本の X 線天文学を世界トップレベルへと押し上げた。現在では 2005 年に打ち上げられた「すざく」が運用中で、あすか同様、多重薄板型望遠鏡が採用されている。これまでに宇宙の構造形成やブラックホール直近領域の探査等で順調に成果をあげている。

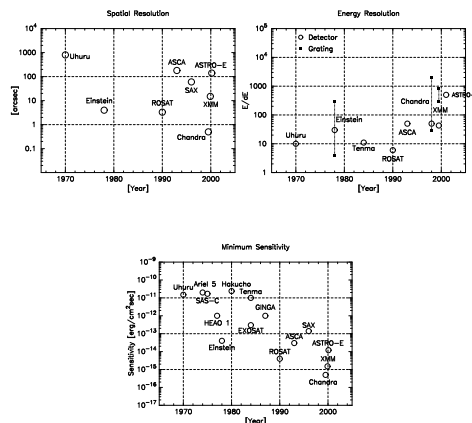


図 1.2: X 線天文衛星の性能の変遷（左上：空間分解能、右上：エネルギー分解能、下：検出感度）

<sup>1</sup>mCrab はカニ星雲の X 線強度の 1000 分の 1 を表す。

## 1.3 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H



図 1.3: 次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」

ASTRO-H は、2015 年度打ち上げ予定の日本の主導の次期 X 線天文衛星である (図 1.3)。日本の X 線天文衛星の中では 6 番目に位置し、世界初となる X 線カロリメータの搭載により、これまでと比べ桁違いのエネルギー分解能によって観測が可能である。また、0.3–600 keV という過去最高の高感度帯域観測が可能となっており、ブラックホールや超新星残骸、銀河団など、その観測対象は幅広い。この節においては、この ASTRO-H について説明する。

### 1.3.1 ASTRO-H の概要

ASTRO-H には、2 種類の計 4 台の望遠鏡と、4 種類の検出器が搭載され、これらの機器を組み合わせることで、高エネルギー分解能かつ広帯域での観測が可能となる。以下に、観測システムに関してまとめる。

- 軟 X 線精密分光測定システム  
軟 X 線望遠鏡 (SXT) と軟 X 線分光器 (SXS) を組み合わせたシステムである。0.3~10 keV のエネルギー領域に置いて、エネルギー分解能 10 eV 以下の分光測定が可能である。
- 軟 X 線撮像分光システム  
軟 X 線望遠鏡 (SXT) と軟 X 線分光検出器 (SXI) を組み合わせたシステムである。観測帯域は 0.5 ~ 14 keV であり、38 分角四方という広い視野をもつ。
- 硬 X 線撮像分光システム  
硬 X 線望遠鏡 (HXT) と硬 X 線撮像検出器 (HXI) を組み合わせたシステムである。1 ~ 60 keV のエネルギー領域において、従来より 1 桁以上優れた感度で X 線の空間分布とスペクトルを得ることができる。
- 軟  $\gamma$  線検出器 (SGD)  
10 ~ 300 keV において、現在の検出器を 1 桁以上上回る感度を有し、1 度を切る狭い視野角と、新しいバックグラウンド除去を組み合わせた観測システムである。

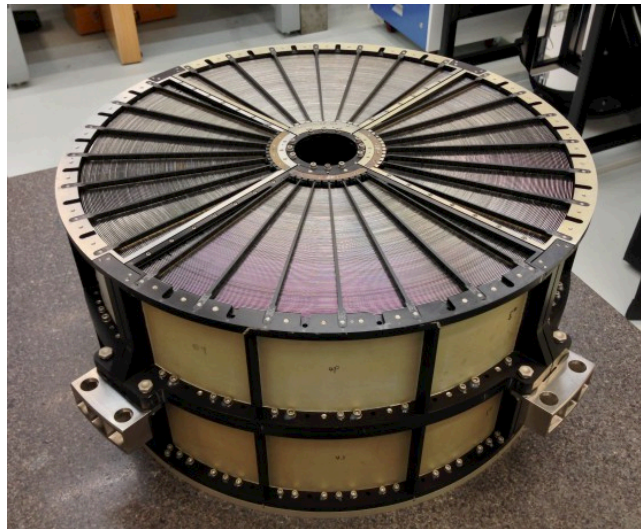


図 1.4: 軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT)

#### 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

表 1.1: SXT の設計パラメータ

口径	450 mm
焦点距離	5,600 mm
反射鏡積層数	203 枚
反射膜	Au
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 165 $\mu$ m
	~ 153 枚目 241 $\mu$ m
	~ 203 枚目 318 $\mu$ m
入射角	0.15 ~ 0.59 °

軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) は (図 1.4)、約 0.3–15 keV 程度の結像・集光を担っている。軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS) を焦点面検出器とする SXT-S と、軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) を焦点面検出器とする SXT-I の二台搭載される。望遠鏡としては、これまでのあすか衛星やすざく衛星に搭載された望遠鏡をアップグレードしたものである。SXT の設計パラメータを表 1.1 にまとめる。

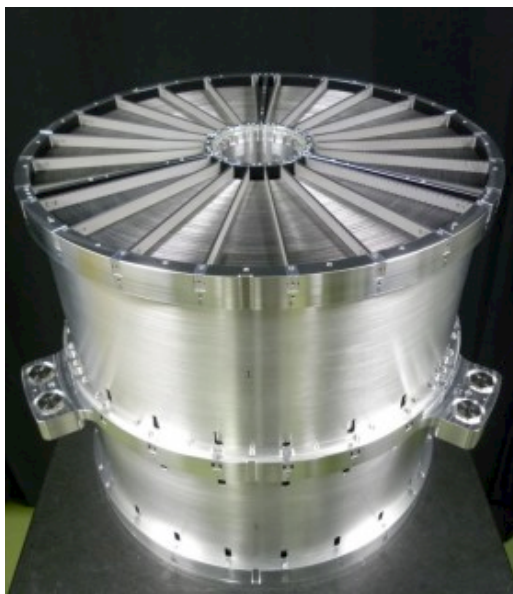


図 1.5: 硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT)

## 硬 X 線望遠鏡 (HXT)

表 1.2: HXT の設計パラメータ

口径	450 mm
焦点距離	12,000 mm
反射鏡積層数	213 枚
反射膜	Pt/C 多層膜スーパーミラー
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 165 $\mu$ m
	~ 153 枚目 241 $\mu$ m
	~ 203 枚目 318 $\mu$ m
入射角	0.15 ~ 0.59 °

硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT) は (図 1.5)、約 5–80 keV の集光・結像を担っている。HXT の反射鏡には Pt/C 多層膜スーパーミラーが用いられている。深さ方向に周期長を変化させた多層膜を積み重ねており、それぞれの層でブラッグ条件を満たす X 線が強め合い、結果として広いエネルギー領域で反射率を持つ。これにより硬 X 線領域での結像が可能である。硬 X 線分光検出器 (Hard X-ray Imager : HXI) を焦点面検出器とし、ASTRO-H には 2 台搭載される。スーパーミラーを搭載した衛星として ASTRO-H は、NuSTAR に次ぐ 2 番目の衛星となる。結像性能は、NuSTAR に劣るものの、有効面積は NuSTAR より高く、一度に多くの光子を集めることができる。HXT の設計パラメータを表 1.2 にまとめる。



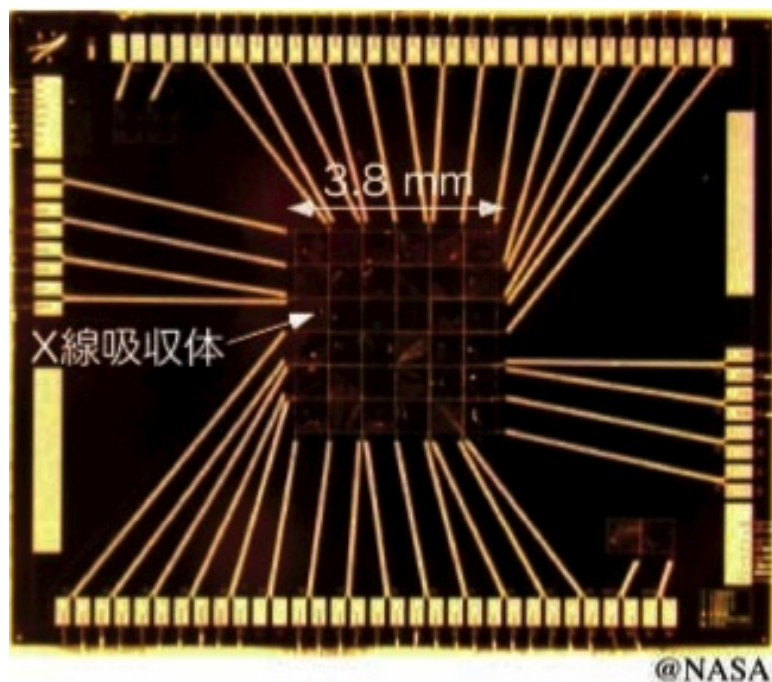


図 1.6: 軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS)

## 軟 X 線分光器 (SXS)

表 1.3: SXS への性能要求

エネルギー帯域	0.3 - 10 keV
検出効率 @0.6 keV	0.15 以上
検出効率 @7 keV	0.7 以上
エネルギー分解能	10 eV 以上 (FWHM、6 eV)
アレイ全面積	5 mm × 5 mm 以上
アレイフォーマット	6 × 6
最大計数率	30 c/s
軌道寿命	2 年以上

軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS) は (図 1.6)、X 線マイクロカロリメータであり、SXT と組み合わせることにより、約 0.3-10 keV 程度の X 線の分光を担う。マイクロカロリメータは、約 50 mK の極低温まで冷却し、X 線が素子に当たった時にごくわずかに温度が上がることを利用して、エネルギーの強さを測る装置である。これまでの検出器とは桁違いのエネルギー分解能が得られ (数 eV)、ASTRO-H で世界で初めて衛星に搭載されることになる。約  $0.5' \times 0.5'$  の検出器が  $6 \times 6$  個設置してある。そのため、粗くなってしまうが、イメージングも可能である。SXS への性能要求を表 1.3 にまとめる。

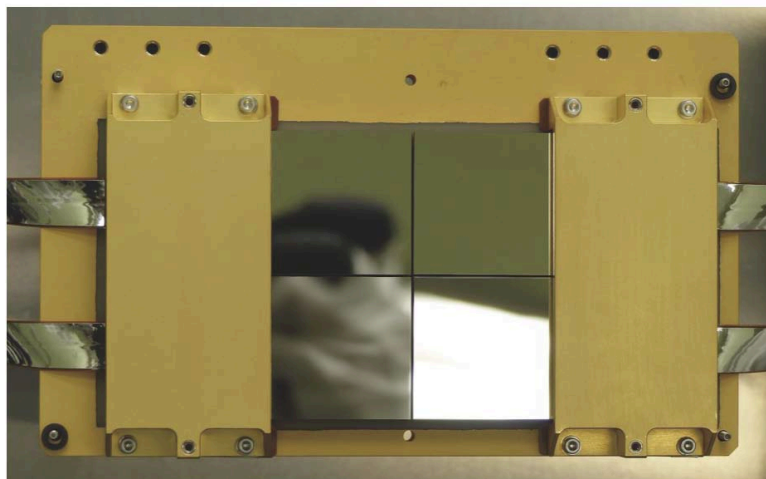


図 1.7: 軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Imager : SXI)

## 軟 X 線分光検出器 (SXI)

表 1.4: SXI 諸元

エネルギー帯域	0.5 - 12 keV (ベースライン案) 0.5 - 12 keV (ゴールライン案)
CCD サイズ	50 mm × 50 mm
CCD 形式	フレーム転送型
視野	19 分角 × 19 分角
フォーマット	2048 × 2048 × 2 pixel
ピクセルサイズ	24 $\mu\text{m}$ × 24 $\mu\text{m}$
読み出しサイクル	4 秒
重量	4 kg (センサー部) 1.8 kg (エレクトロニクス部)

軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) は (図 1.7)、X 線 CCD であり、SXT と組み合わせることによって約 0.5-12 keV の撮像・分光を可能とする。SXI 全体のシステムは具体的に、X 線 CCD 素子とそれを納めるハウジングを含むセンサー、X 線 CCD 素子を直接冷却するベルチェ素子、ベルチェの廃熱を宇宙空間に捨てるラジエーターとそこまで熱を運ぶヒートパイプを含む冷却系、CCD の駆動読み出し系、読み出したデータの機上処理回路、温度制御回路等を含む電子回路系のコンポーネントから構成される。これはすざく衛星の X 線 CCD カメラに準じた構成であるが、技術開発が進んだことを反映し随所に改良が施されている。19' × 19' の CCD を 4 つ組み合わせることによって、約 38' × 38' の広視野のイメージング・分光が可能である。そのため、銀河団・超新星残骸など、視直径が非常に大きいものを、一度に大領域撮像分光が可能となる。表 1.4 に SXI 諸元をまとめる。



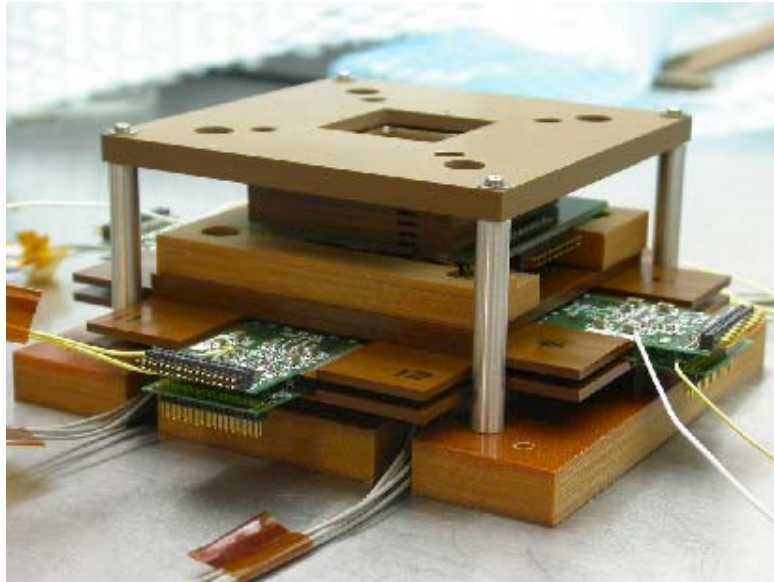


図 1.8: 硬 X 線分光検出器 (Hard X-ray Imager : HXI)

### 硬 X 線分光検出器 ( HXI )

表 1.5: HXI への性能要求

エネルギー帯域	5 - 80 keV
エネルギー分解能	<1.5 keV ( FWHM、 60 keV )
検出器視野	5 × 5 度以上
検出器 BGD	$1\text{-}3 \times 10^{-4} \text{ cnt s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1}$ 以下

硬 X 線分光検出器 (Hard X-ray Imager : HXI) は (図 1.8)、HXT と組み合わせることで、約 5-80 keV のエネルギー帯の撮像・分光を可能とする。HXI は 10 keV から 80 keV までを担当する CdTe ピクセル検出器の上部に、5 keV 前後から 30 keV までの領域を担当する多層化両面シリコンストリップ検出器 (SGGD) を持つ。3.2 cm 四方で 0.5 mm 厚の DSSD を 2 枚から 4 枚と、2 cm 四方以上のサイズを持ち、0.5 - 0.75 mm 厚の CdTe ピクセルを 1 枚用いる。高エネルギーの X 線やガンマ線の撮像を可能にするものとして開発した、日本独自の新型検出器である。HXI への性能要求を表 1.5 にまとめる。

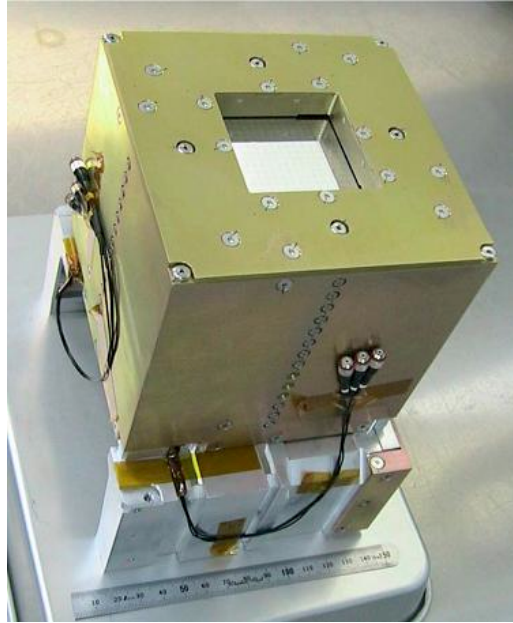
図 1.9: 軟  $\gamma$  線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD)軟  $\gamma$  線検出器 (SGD)

表 1.6: SGD への性能要求

エネルギー帯域	10 - 300 keV
エネルギー分解能	2-3 keV (FWHM、40 keV)
有効面積	100 cm <sup>2</sup> 以上
検出器視野	0.6 × 0.6 度以上
検出器 BGD	$1 \times 10^{-6}$ cnt s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> keV <sup>-1</sup> 以下

軟  $\gamma$  線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD) は (図 1.9)、コンプトン散乱の運動学を適用した、狭い視野を持つ半導体多層コンプトンカメラである。半導体多層コンプトンカメラは、高いエネルギー分解能をもつ両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と、ガンマ線に高い感度をもつテルル化カドニウム (CdTe) 半導体ピクセル検出器から構成される。観測対象からのガンマ線は、パッシブあるいはアクティブなコリメータによってしぼられた視野から、この半導体コンプトンカメラにより検出される。軟ガンマ線領域での世界最高感度観測を実現するとともに、コンプトン散乱を用いた偏光観測が可能となる。これは HXT と HXI でも届かない、80 keV より高いエネルギー帯域での分光と粗い撮像を目指す装置で、X 線光学系を用いず、宇宙からの 10-600 keV の光子を直接に観測する。SGD への性能要求を表 1.6にまとめる。

## 第2章 X線光学

X線は1895年ドイツの物理学者レントゲンによって発見された。X線は我々がいつも見ている可視光と同じ光の一種だが、可視光に比べ約1000倍もの高いエネルギーをもっている。X線は原子と直接相互作用（衝突）するために、電子密度の高い（電子が多い）金やプラチナが反射鏡に用いられる。全反射とは、屈折率の大きい物質から屈折率の小さい物質へ光が入射する時に起きる現象で、入射してきた光を90%以上反射する。X線領域では物質の屈折率は1より小さくなるため、真空中（屈折率＝1）からくるX線に対しては全反射をおこす。例えば反射面にプラチナを用いた鏡に対しては、X線の入射角度が約 $0.5^\circ$ 以下の場合に全反射をおこす。本章では、このような高エネルギーのX線の反射の原理と、表面粗さによって生じるX線の散乱について取り扱う。

### 2.1 反射の原理

#### 2.1.1 トムソン散乱

物質中を $z$ の距離だけ通過した電磁波の電場に対する波動方程式の一般解は、真空中の波長を $\lambda$ として、複素屈折率 $\tilde{n}$

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - i\beta(\lambda) \quad (2.1)$$

を用いることで、

$$E(z, t) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda}(\tilde{n}z - ct)\right) \quad (2.2)$$

$$= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z\right) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}(nz - ct)\right] \quad (2.3)$$

と書ける。ここで、 $E_0$ は $z=0$ での電場の振幅である。この式は、第1項が屈折率の虚数部分 $\beta$ を消衰係数とした減衰関数で、第2項が物質中での振動を表している。つまり、 $\mu = 2\pi\beta/\lambda$ とすると、距離 $z$ を通過した波の強度 $I(z) = |E(z)|^2$ はもとの強度 $I_0$ に対して、

$$I(z) = I_0 \exp(-\mu z) \quad (2.4)$$

と減衰する事を意味している。実際は $\mu$ の代わりに、これを物質の密度 $\rho$ で割った質量吸収係数 $\mu_m$ が使われる事が多い。

X線が物質中に入射すると、ある断面積で原子がX線と弾性散乱を起こす。これをトムソン散乱と言う。簡便のため、まず自由電子によるトムソン散乱を考える。振幅が $E_0$ である入射X線の電磁波によって、原子中の束縛電子に双極子的な強制振動を引き起こし、この電子を源として入射X線と同じ振動数を持つ二次的なX線が放射される。再放射された散乱波は方向依存性をもっており、散乱波の振幅 $E_s$ は双極子軸と散乱波の進行方向の角度 $\chi$ との間に、

## 2.1 反射の原理

$$E_s = \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \quad (2.5)$$

の関係がある (図 2.1)。ここで、 $r_e$  は次で定義する電子古典半径である。

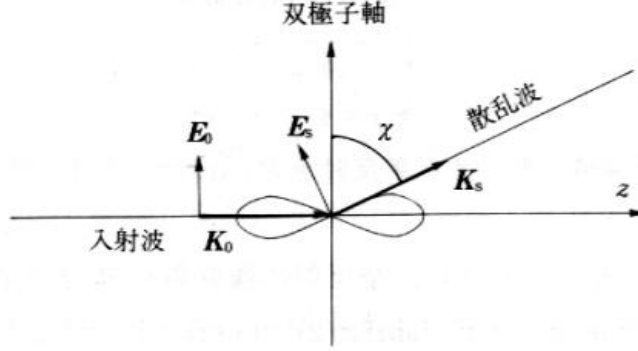


図 2.1: 電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.82 \times 10^{-13} [\text{cm}] \quad (2.6)$$

一方、原子核も電荷を持っており、入射 X 線によって振動させられる。しかし、振動とそれによって引き起こされる二次的な放射は、荷電粒子が非相対論的運動の場合、加速度に比例するため、電子に比べ非常に大きな質量を持つ原子核からの再放射は無視することができる。

以上より原子全体での散乱は、自由電子による散乱波の重ね合わせだけで考えれば良いように思えるが、実際の電子は原子核に束縛されている。さらに周囲の原子との相互作用があるため補正が必要となる。この補正のために原子散乱因子  $f$  を以下のように定義する。

$$f \equiv \frac{\text{1 個の原子によって散乱された波の振幅}}{\text{1 個の電子によって散乱された波の振幅}} \quad (2.7)$$

$$= f_1(E, \phi) + i f_2(E, \phi) \quad (2.8)$$

この補正を加えると、原子による散乱振幅  $E_s$  は

$$E_s = f(E, \phi) \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi = [f_1(E, \phi) + i f_2(E, \phi)] \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \quad (2.9)$$

となる。注意しなければならないのは、この  $f_1, f_2$  は入射 X 線のエネルギーだけではなく、散乱角  $\phi$  にも依存することである。これは散乱角が増えると原子内の各電子による散乱波の位相がずれるためである。しかし後で扱う内容は散乱角  $\simeq 0$  の場合のみでなので、 $f_1(E, \phi), f_2(E, \phi)$  を、それぞれ  $f_1(E, 0), f_2(E, 0)$  の値で近似できる。これにより、 $f_1, f_2$  は相対論的量子分散理論で求めることができ、次式のように表すことができる。

$$f_1(E, 0) = Z + \frac{1}{\pi r_e h c} \int_0^\infty \sigma(W) \frac{W^2}{E^2 - W^2} dW - \Delta_{rel} \quad (2.10)$$

$$f_2(E, 0) = \frac{1}{2\pi r_e h c} E \sigma(E) \quad (2.11)$$

## 2.1 反射の原理

$f_1$  の第 1 項は原子中の電子数を表し、第 2 項は異常分散の効果を表している。第 3 項は相対論的補正項で X 線領域では無視できる。よって、吸収端から離れたところでは  $f_1 = Z$  と近似できる。また  $f_2$  は原子による光電吸収を表す因子である。原子散乱因子  $f_1, f_2$  は物質の屈折率  $n$  や吸収係数  $\beta$  と

$$\delta = 1 - n = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_1 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_1 \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_2 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \mu = \frac{\rho \lambda}{4\pi} \mu_m \quad (2.13)$$

の関係がある。ただし  $N_a = (N_0/A)\rho^1$  とする。

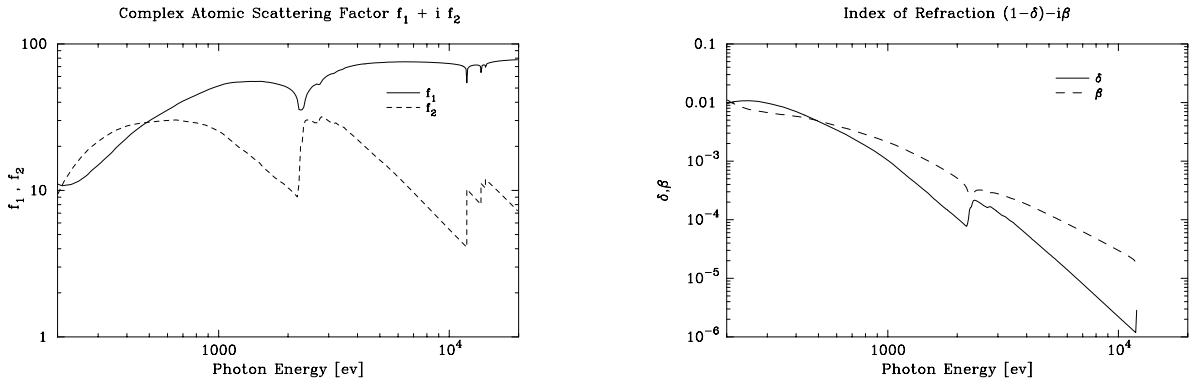


図 2.2: 金の複素原子散乱因子と光学定数。(図左は金の複素原子散乱因子  $f_1, f_2$ 、図右は金の密度を  $19.32 \text{ [g/cm}^3]$  としたときの光学定数  $\delta, \beta$  である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

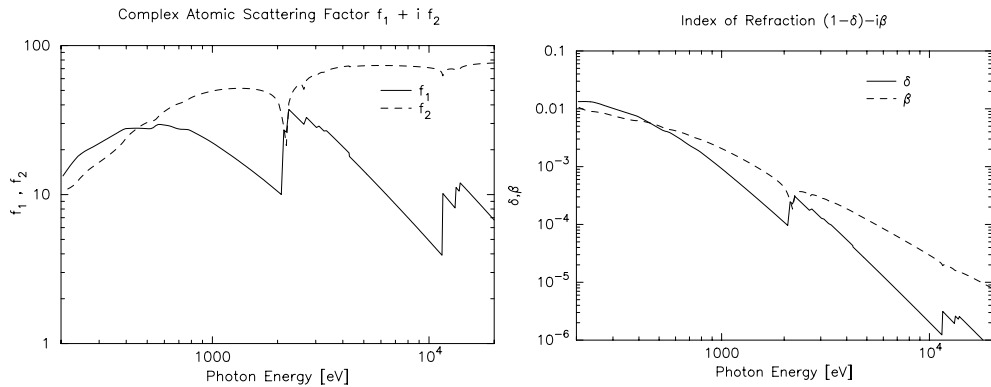


図 2.3: プラチナの複素原子散乱因子と光学定数。(図左はプラチナの複素原子散乱因子  $f_1, f_2$ 、図右は金の密度を  $21.45 \text{ [g/cm}^3]$  としたときの光学定数  $\delta, \beta$  である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

<sup>1</sup>  $N_0$  はアボガドロ数、 $A$  は原子質量数、 $\rho$  は原子密度である。

## 2.1 反射の原理

### 2.1.2 X線の全反射

図 2.2, 2.3より、物質の屈折率が1よりわずかに小さいことが分かる。これにより、X線が物質表面に臨界角  $\theta_c$  よりも小さい角度で入射すれば全反射を得る事ができる。ここで真空中から物質（屈折率  $\tilde{n}$ ）にX線が入射した場合を考える。それぞれ表面から測った入射角、屈折角を  $\theta_i, \theta_r$  とすると、スネルの法則により

$$\cos \theta_i = \tilde{n} \cos \theta_r \quad (2.14)$$

の関係がある。 $\theta_r = 0$  の時の  $\theta_i$  が  $\theta_c$  であるから、吸収を無視 ( $\beta = 0$ ) すると、

$$\cos \theta_c = \tilde{n} \simeq 1 - \delta \quad (2.15)$$

となる。さらに図 2.2, 2.32.3で示したように、 $\delta \ll 1$  であるから、 $\theta_c \ll 1$  rad である。そこで  $\cos \theta_c \simeq 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$  の近似を用いると

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (2.16)$$

となる。よって (2.12) 式より、 $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>],  $E$  [keV],  $\lambda$  [nm] を用いて  $\theta_c$  は

$$\theta_c = 1.332 \times 10^{-2} \left( \frac{\rho f_1}{A} \right)^{1/2} \lambda \text{ [deg]} \quad (2.17)$$

$$= 1.651 \times 10^{-2} \left( \frac{\rho f_1}{A} \right)^{1/2} \frac{1}{E} \text{ [deg]} \quad (2.18)$$

と書ける。(2.10) 式は吸収端から十分離れたところでは  $f_1 \sim Z$  である事を示し、重元素の場合  $Z/A \sim 0.5$  であるから、(2.16) 式は結局

$$\theta_c \propto \sqrt{\rho} \lambda \quad (2.19)$$

と求まる。したがって反射面にはしばしば密度の大きな物質である金や白金が用いられる。

真空から複素屈折率  $\tilde{n}$  を持つ物質にX線が入射した場合、界面に平行な電場ベクトルを持つP偏光と、垂直な電場ベクトルを持つS偏光に対する反射振幅  $r_p, r_s$  は、 $E$  と  $H$  の境界条件より、フレネルの式から

$$r_p = \frac{\sin \theta_r - \tilde{n} \sin \theta_i}{\sin \theta_r + \tilde{n} \sin \theta_i}, \quad r_s = \frac{\sin \theta_i - \tilde{n} \sin \theta_r}{\sin \theta_i + \tilde{n} \sin \theta_r} \quad (2.20)$$

である。反射強度はそれぞれの偏光につき複素共役との積をとり

$$R_p = r_p r_p^*, \quad R_s = r_s r_s^* \quad (2.21)$$

と書ける。全反射の様な極端な斜入射では反射率はほとんど偏光に依らない。よって反射率は

## 2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

$$R = \frac{R_p + R_s}{2} \quad (2.22)$$

と考えて良い。したがって反射率は臨界角  $\theta_c$  で規格化すると、

$$R = \frac{h - \frac{\theta}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)}}{h + \frac{\theta}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)}} \quad (2.23)$$

$$h = \left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 + \sqrt{\left(\left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^2}$$

となる。

図 2.4 に (2.23) 式を用いて計算した、真空と物質の界面での X 線の反射率計算結果を示す。横軸は臨界角で規格化した入射角である。このように、反射率は  $\theta/\theta_c = 1$  以下の全反射領域でのみ高く、臨界角を超えると急速に減衰する。また X 線の吸収が少ないとき ( $\beta/\delta = 0$ )、全反射領域 ( $\theta/\theta_c = 1$  以下) での反射率は 100% であるが、吸収が大きくなる (すなわち  $\beta/\delta$  の値が大きくなる) にしたがって全反射領域の反射率が低下することが分かる。したがって反射物質には、密度が大きく、 $\beta/\delta$  が小さい、さらには物理的、化学的に安定な物質である金や白金が有用である。

表 2.1: 金とプラチナの臨界角。

物質	原子番号	原子量	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	Al-K $\alpha$	Cu-K $\alpha$
Pt	78	195.08	21.45	2.64 °	0.58 °
Au	79	196.97	19.32	2.52 °	0.56 °

## 2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

### 2.2.1 運動学的回折理論

有限の大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱を考える。物質表面による散乱はボルンの第一近似<sup>2</sup>が適用できるので、物質からの散乱波の振幅は各原子による散乱波の振幅を、電子の位置による位相のずれを考慮して重ね合わせたものとなる。

入射波と散乱波の波数ベクトルをそれぞれ  $k$ 、 $k_0$  として、散乱ベクトル  $q$  を

$$q = k - k_0 \quad (2.24)$$

と定義する。この大きさは、

$$|q| = q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda} \quad (2.25)$$

である。但し、 $2\theta$  は  $k$  と  $k_0$  のなす角である。

<sup>2</sup>物質中で X 線が 1 回しか散乱されないときに使用できる近似で、物質と X 線との相互作用が十分小さい時に適用できる。

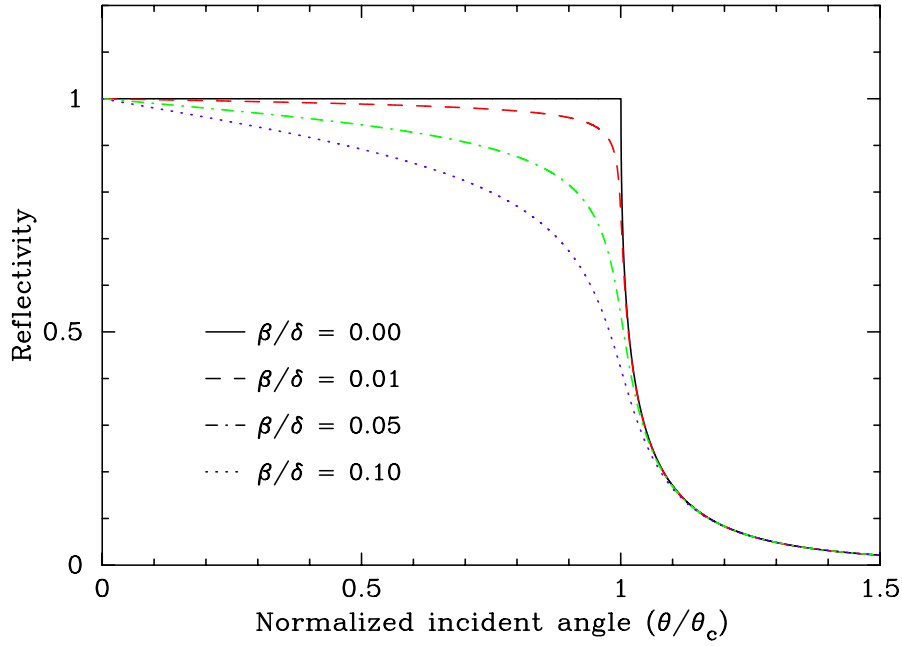


図 2.4: 単層膜の理論反射率。

すると点 P からの散乱波は、原点からの散乱波との間に位相差  $(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r} (= \mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$  を生ずる。ここで位置  $\mathbf{r}$  での原子の数密度を  $\rho(\mathbf{r})$  とすると、微小体積要素  $d\mathbf{r}$  で散乱される波の振幅は、 $\rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}$  に比例する。したがって、強度  $I_0$  の X 線が入射した場合の散乱体全体からの散乱波の強度は、

$$S(\mathbf{q}) \equiv N \int \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (2.26)$$

として、

$$I = I_0 f^2 |S(\mathbf{q})|^2 \quad (f : \text{原子散乱因子}) \quad (2.27)$$

となる。これは、散乱体が固体、液体、気体でも適用できる一般的な式で、運動学的回折理論の基礎を与える式である。

次に図 2.6 のような物質表面での X 線の散乱を考える。粗さのある平面を考えた時に、図 2.7 のように、平均の表面に  $x, y$  軸を、それに垂直に  $z$  軸を定義する。これから  $\mathbf{q}$  のそれぞれの方向に対する成分は、 $xz$  面内から X 線が入射したとし、図 2.6 で定義する角度を用いると、 $\mathbf{q}(q_x, q_y, q_z)$  の成分はそれぞれ、

$$q_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i - \cos \theta_s \cos \phi) \quad (2.28)$$

$$q_y = \frac{2\pi}{\lambda} (-\cos \theta_s \sin \phi) \quad (2.29)$$

$$q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta) \quad (2.30)$$

となる。ここで、物質表面上での反射に運動学的回折理論を適用し、(2.23) 式の  $R_0$  を用いることで、反射 X 線の強度は、



## 2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A dx dy \exp[-iq_z Z(x, y)] \exp[-i(q_x x + q_y y)] \right|^2 \quad (2.31)$$

と導ける ( $A$  は X 線があたっている領域)。

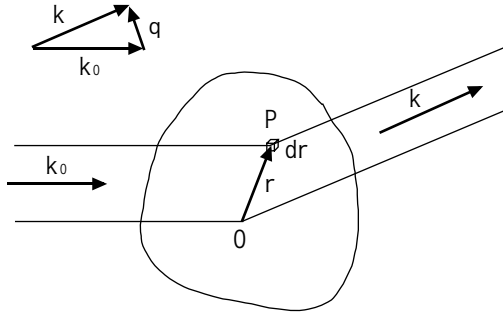


図 2.5: 大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱。

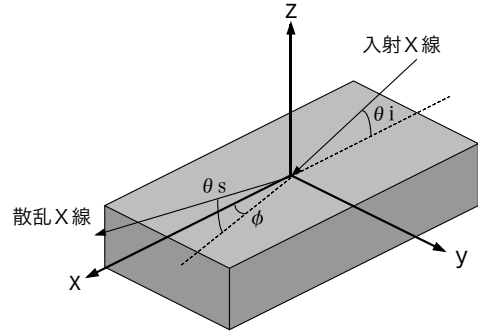


図 2.6: 物質表面による X 線の散乱。

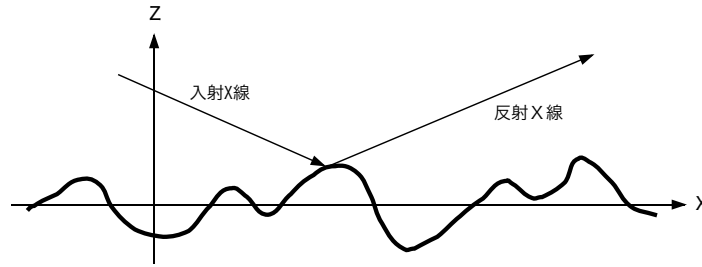


図 2.7: 粗さのある物質面上での散乱と反射。

### 2.2.2 表面粗さによる反射率の低下

ここでは、 $q_z Z(x, y) \ll 1$  となるような滑らかな平面上での正反射<sup>3</sup>(以後、「反射」とは正反射 X 線で、「散乱」とは正反射以外の方向へ進む X 線とする。)の反射強度について考える。

まず、 $q_z Z(x, y) \ll 1$  により  $q_z Z(x, y)$  を含むエクスポネンシャルを 2 次の項まで展開し、

$$\exp(-iq_z Z(x, y)) \simeq 1 - iq_z Z(x, y) - \frac{1}{2!} (q_z Z(x, y))^2 \quad (2.32)$$

ここで第 2 項は大角度への散乱を表す項であるため、今のように非常に滑らかな平面では無視できる。そこで、さらに

<sup>3</sup>平均の法線方向に垂直な面に対する入射角  $\theta_i$  と散乱角  $\theta_s$  が等しい場合にその X 線を正反射光、その散乱角を正反射な方向という。

$$\simeq \exp\left(-\frac{1}{2}(q_z Z(x, y))^2\right) \quad (2.33)$$

と近似できる。正反射では、 $\theta_i = \theta_s, \phi = 0$  であるので、 $q_x = q_y = 0, q_z = 2 \sin \theta_i$  となり、(2.31) 式にあてはめると、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A \exp[-iq_z Z(x, y)] dx dy \right|^2 \quad (2.34)$$

$$\simeq I_0 R_0 \left( \exp\left(\frac{1}{2}(q_z Z(x, y))^2\right) \frac{1}{A} \int_A Z^2(x, y) dx dy \right)^2 \quad (2.35)$$

ここで表面粗さ  $\sigma$  を考えると、 $\frac{1}{A} \int_A Z^2(x, y) dx dy = \sigma^2$  であるので、

$$I = I_0 R_0 \left( \exp\left(-\frac{1}{2}(q_z \sigma)^2\right) \right)^2 \quad (2.36)$$

$$= I_0 R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi \sigma \sin \theta_i}{\lambda}\right)^2\right) \quad (2.37)$$

と書き直せる。(2.37) 式の  $R_0$  にかかる項は Debye-Waller 因子<sup>4</sup> と呼ばれる。このフレネルの反射率  $R_0$  に Debye-Waller 因子をかけたものは、特に  $q_z Z(x, y) \ll 1$  となる条件では実験結果を非常によく再現している。

Debye-Waller 因子を見ると、波長の<sup>-2</sup>乗に比例して減衰効果が大きくなることが分かる。X 線領域（波長が  $0.1 \sim 100 \text{ \AA}$ ）の様に非常に短かな波長域では、可視光光学系のような直入射光学系を用いると<sup>5</sup>、数  $\text{\AA}$  程度の粗さで反射率が大きく低下してしまう。しかし、ASTRO-E XRT 等では極端な斜入射光学系を用いているため、 $\sin \theta_i$  の効果の分  $\sigma$  の値が数  $\text{\AA}$  まで観測に十分な反射率を得ることができる。

### 2.2.3 散乱 X 線の強度

次に、X 線の散乱（正反射でない散乱成分）について議論する。散乱についてはいくつかの理論があるが、 $q_z \cdot z$  の小さい場合のみに適用できるものがほとんどである。ここではそれらのうち、代表的な 2 つの理論について述べる。

#### Plain-Wave Born Approximation : PWBA

まず (2.34) 式を、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dx dy \frac{1}{A} \int_A dx' dy' \exp(-iq(Z(x, y) - Z(x', y'))) \times \exp(-i(q_x(x - x') + q_y(y - y'))) \quad (2.38)$$

と変形する。ここで相対座標  $(X, Y) \equiv (x' - x, y' - y)$  を導入し、 $g(X, Y)$  を

$$g(X, Y) \equiv \langle (z(x', y') - z(x, y))^2 \rangle \quad (2.39)$$

<sup>4</sup>Debye-Waller 因子は、本来は結晶中の原子位置の熱運動による揺らぎを考慮に入れるために導入された。

<sup>5</sup>2.1 と矛盾しているように思われるかも知れないが、X 線領域でも Bragg 反射を用いた多層膜ミラーによる直入射鏡が可能である。

と定義する。ここで、 $(X, Y)$  は  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$  の距離だけ離れた 2 点間の粗さを表している。しかし  $R \rightarrow \infty$  のときには  $g(X, Y)$  は無限大にはならないはずである。(なぜなら、 $R \rightarrow \infty$  のときは反射率が 0 になってしまうから。) よって、適当なカットオフ  $\xi$  をつけ、例えば、

$$g(R) = 2\sigma^2 \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{R}{\xi} \right)^{2h} \right) \right) \quad (2.40)$$

とし、 $g(X, Y)$  を適当な値  $2\sigma^2$  に収束させるようにする。

ここでさらに、 $z(x', y') - z(x, y)$  がガウス分布であると仮定すると、(2.38) 式は、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dX dY \exp \left( - \frac{q_z^2 g(X, Y)}{2} \right) \exp(-i(q_x X + q_y Y)) \quad (2.41)$$

と書き直せる。

さらに、correlation function  $C(X, Y)$

$$C(X, Y) \equiv \langle z(x', y') z(x, y) \rangle = \sigma^2 - \frac{1}{2} g(X, Y) \quad (2.42)$$

を定義することにより、(2.41) 式を

$$I = I_0 R_0 \exp(-g_z^2 \sigma^2) \frac{1}{A} \int_A dX dY \exp(q_z^2 C(X, Y)) \exp(-i(q_x X + q_y Y)) \quad (2.43)$$

と書き直す。ここで  $F(q_z, R) \equiv \exp(q_z^2 C(X, Y)) - 1$  とすると、 $R \rightarrow \infty$  では  $F \rightarrow 0$  となるため、(2.43) 式を正反射成分と散乱成分に分けることができる<sup>6</sup>。よって、 $I = I_{spec} + I_{diff}$  を分けて表記すると、

$$I_{spec} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \delta(q_x) \delta(q_y) \quad (2.44)$$

$$I_{diff} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \frac{1}{2} \int_0^\infty dR R F(q_z, R) J_0(q_z, R) \quad (2.45)$$

となり、(2.44) 式は、(2.36) 式と一致していることが分かる。これは正反射成分と散乱成分の反射強度を同時に得ることができ、 $q_z \sigma$  が小さい場合には、比較的实验結果を再現している。ただし、(2.40) 式が物質の表面状態をあたえるわけであるが、これが形状測定の結果と一致しないことも多く、問題点も多い。最近では粗さが比較的大きい表面に対しても適用できる、Distorted-Wave Born Approximation(ひずみ波 Born 近似) : DWBA がよく使われている。

### Bidirectional Reflectivity Distribution Function : BRDF

この理論は正反射でない散乱成分のみを取り扱うため、(2.31) 式とは考え方を異にする。まず物質表面を表面波長  $l$  が連続的に変化する正弦波の重ね合わせと考え、入射 X 線は表面のその多数の回折格子(図 2.8) によって散乱させると考える。

但し、回折格子による回折光は 0 次及び 1 次が支配的であるため、回折条件の式

$$m\lambda = l(\cos \theta_i - \cos \theta_s) \quad (2.46)$$

<sup>6</sup>無限大の平面上に光があたっている場合には散乱は 0 になるはずであるため

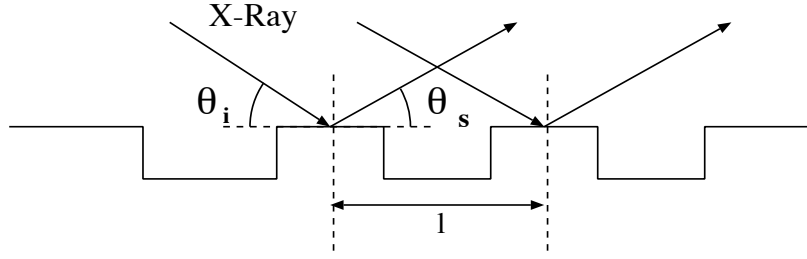


図 2.8: 回折格子による X 線の散乱。

での  $m = 1$  の回折光のみについて考える。ここで、表面上の凹凸を表す関数として、Power Spectral Density(PSD) 数を導入する。表面上の点  $(x, y)$  における凹凸の高さを  $Z(x, y)$  とすると、その PSD 関数はフーリエ成分の 2 乗として表せ、

$$PSD_2(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \left| \int_0^A \exp(2\pi i(f_x x + f_y y)) Z(x, y) dx dy \right|^2 \quad (2.47)$$

の式で与えることで、回折格子による  $\theta_s$  への 1 次の散乱強度は、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_2(f_x, f_y) \quad (2.48)$$

と与えられる。ここで、 $\lambda^4$  はレイリーの blue-sky 因子、 $\sin$  の項は幾何学的効果、 $R(\theta)$  は (2.23) 式の  $R_0(\theta)$  である。この項は臨界角付近の散乱強度の急激な変化 (Yoneda 効果) を補正するために導入してある。

注意すべき点は、BDRF は (2.31) 式での、 $z$  方向の変位による位相の変化  $\exp(-iq_z Z(x, y))$  をこの式では考慮していない。よって、当然ながら  $q_z Z(x, y) \ll 1$  となる非常に滑らかな面内にも適用できる。実際の X 線散乱測定では 1 次元のみの測定が普通であるので 1 次元の式を与えると、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{\pi}{\lambda} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_1(f_x) \quad (2.49)$$

$$\text{但し、} PSD_1(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(2\pi i f_x x) Z(x) dx \right|^2 \quad (2.50)$$

となる。

## 第3章 X線望遠鏡

### 3.1 結像光学系

#### 3.1.1 結像の基本条件

望遠鏡に対する結像の条件は以下のものがある。

1. 光軸に平行な光が1点に集光すること。
2. 物体から焦点までに至る全ての光路の距離の差が観測する波長の4分の1以下であること (レイリーの1/4波長条件)。これは言い替えば、直入射光学系における1回反射であれば、鏡面の形状精度が波長の8分の1以下に収まっているということである。ただし、X線領域では電磁波が互いに干渉する空間的範囲 (空間的コヒーレンスが保たれる範囲) が非常に狭いため、およそ1 [mm] 以内の鏡面上の範囲でこれが成り立っていれば良い。
3. 光軸上の物点 O から光学素子の任意の点を見込む角を  $u$ 、同様に光軸上の焦点 I から見込む角を  $u'$  とした時 (図 3.1)、アッペの正弦条件

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \text{const.} \quad (3.1)$$

が成り立つこと。これは光軸周辺に広がった観測対象がある場合に、像に歪みがなく結像するための条件である。

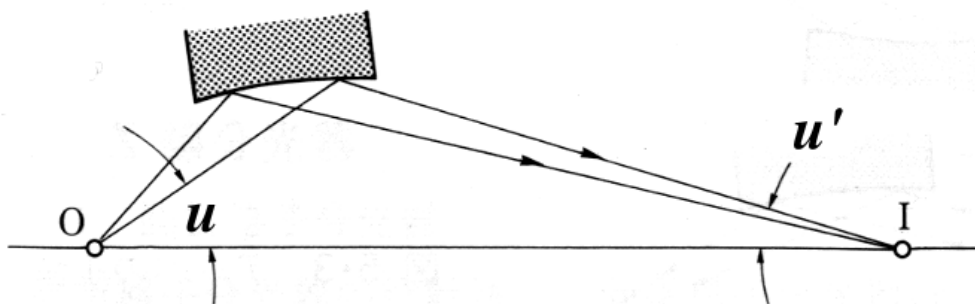


図 3.1: アッペの正弦条件

#### 3.1.2 斜入射光学系

直入射鏡で良く用いられる凹面の球面鏡は、斜入射で用いられれば収差、特に非点収差が大きくなり、高い結像性能は得られない。一方、平行光を完全に点に集光させる回転放物面鏡 (図??) も、斜入射光学

系で用いると、広がった光源からの光に対してはコマ収差が急激に増大し、良好な結像性能を得ることはできない。

それを解決する方法として、2枚の反射面を組み合わせる方法が用いられている。代表的なものとして、2種類の回転2次曲面を組み合わせた Wolter 型反射鏡があり、凹面と凹面を組み合わせた I 型、凹面と凸面を組み合わせた II 型、凸面と凹面を組み合わせた III 型がある。

このうち、望遠鏡の光学系としてよく用いられる I 型と II 型は、回転放物面と回転双曲面を組み合わせたもので (図 3.2 参照)、焦点距離の短い I 型が主に使われているが、II 型も多層膜反射鏡での視野を広げるために極端紫外用の望遠鏡等で用いられる。

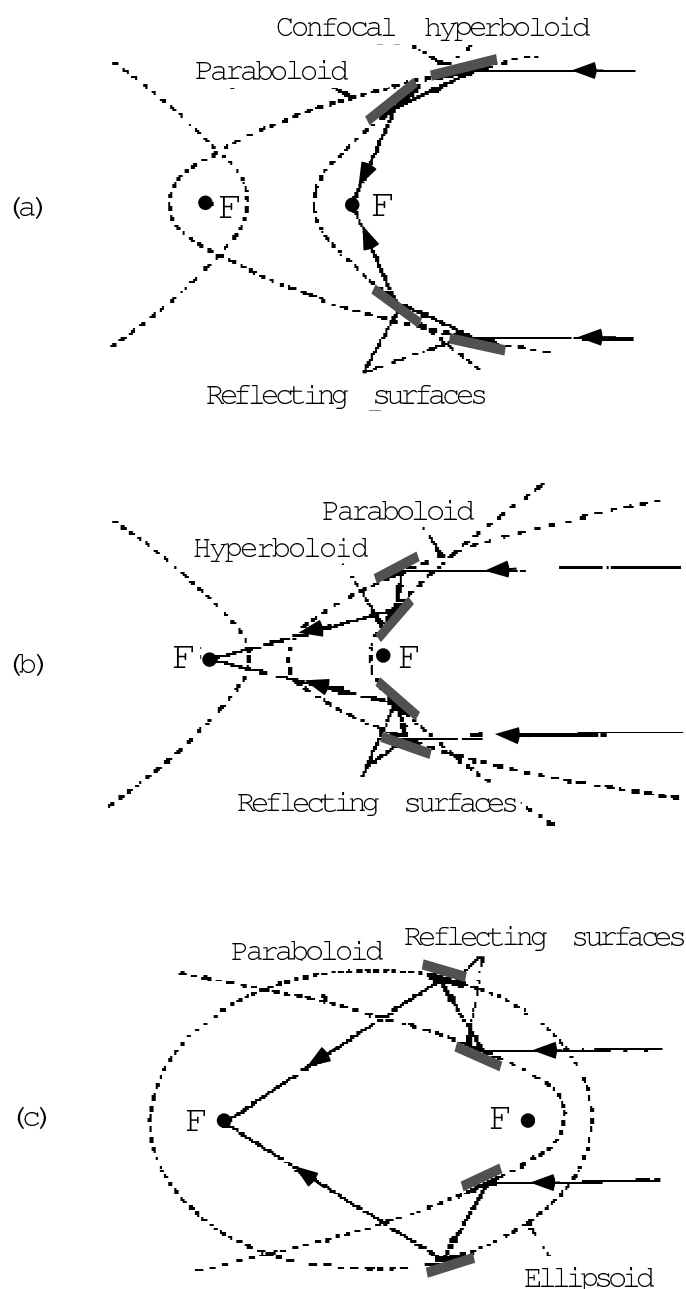


図 3.2: Wolter 型光学系の種類—上から順に I 型、II 型、III 型

## 3.2 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 3.3 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。

### 3.2.1 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  $\sim 0.2$  mm と極力薄くし、非常に多数 ( $\sim 200$  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。

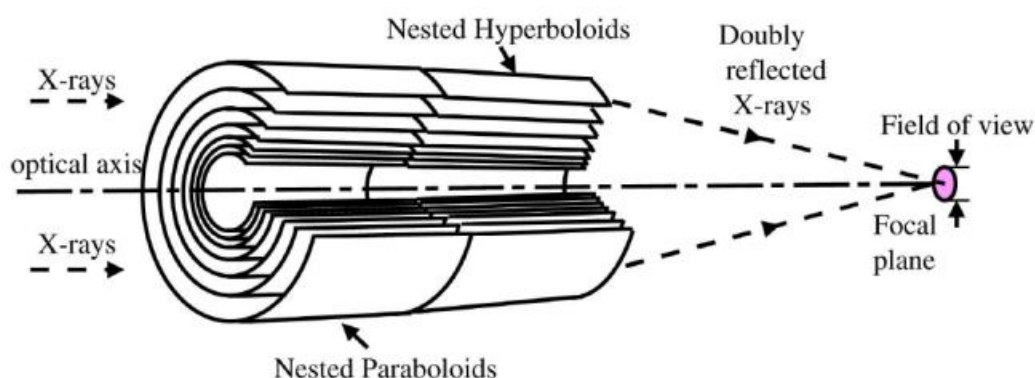


図 3.3: X 線望遠鏡の断面図。-複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I) X 線望遠鏡の断面図。

### 3.2.2 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<sup>1</sup>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。

<sup>1</sup>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。

### 3.2 X 線望遠鏡の種類

---

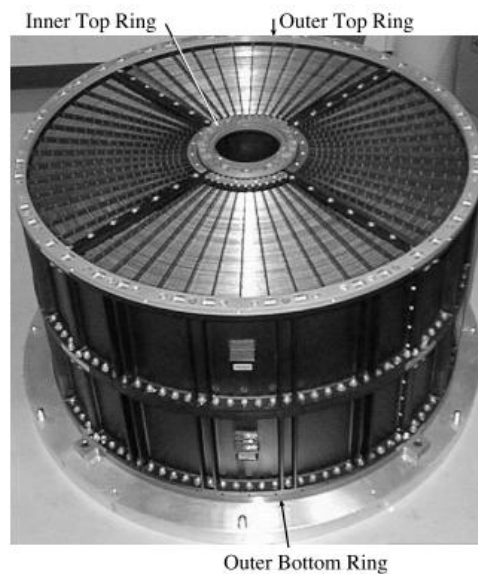


図 3.4: 「多重薄板型」X 線望遠鏡。-写真は ASTRO-E の XRT である。～180  $\mu\text{m}$  という薄さの反射鏡 (基板: アルミニウム) が 0.5 ～ 1.2mm 間隔で 175 枚も並べられている。1 台 20 kg という軽さで大有効面積を実現する。

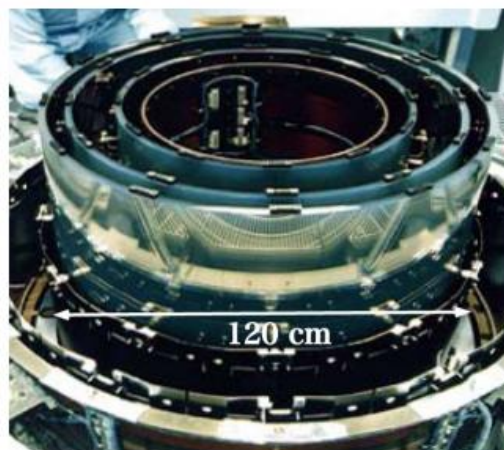


図 3.5: 「直接研磨型」X 線望遠鏡。-写真は Chandra の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡 (基板: ガラス) が 4 枚並べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし重さは 1 台で 1 トンもある。



### 3.3 迷光とプリコリメータ

観測対象となる X 線天体の周りにいる別の X 線天体がある場合や、銀河団のような広がった X 線天体の一部を観測する場合には、対象となる天体からの他に、望遠鏡の視野外にある X 線源からの X 線も、望遠鏡内部で複雑な経路をたどって焦点面検出器上に到達する。このような X 線を迷光 (Stray Light) と呼ぶ。迷光が検出器上に洩れ込むと、対象となる天体からの X 線と区別ができないため、衛星の観測精度が老化してしまう。

図 3.6 に視野外に明るい点源がある場合に検出器に洩れ込む迷光の概念図を示す。図 3.6 に描かれているように、視野外の点源の本来の結像位置は検出器の外側にあるが、像の一部が迷光として検出器内に洩れ込むのが分かる。迷光は上記のような場合、特に銀河団の観測、宇宙 X 線背景放射 (CXB) の観測、銀河面サーベイなどの空間的に広がった天体の観測に影響する。実際に ASCA 衛星では、このような観測において検出器に洩れ込む迷光が確認されている。図 3.6 に ASCA 衛星で観測されたカニ星雲による迷光の GIS によるイメージを示す。この図ではカニ星雲は望遠鏡の光軸から 60' 離れた左下の位置にある。図 3.6 から分かるように、検出器面全体に迷光が広がっている。

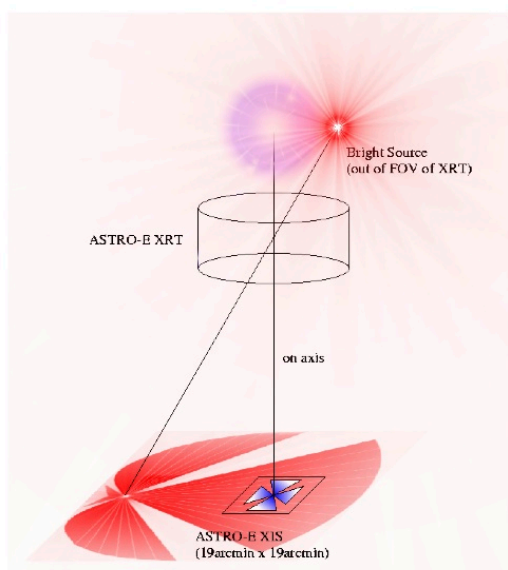


図 3.6: 視野外に明るい点源がある場合に検出器上に洩れ込む迷光の概念図。

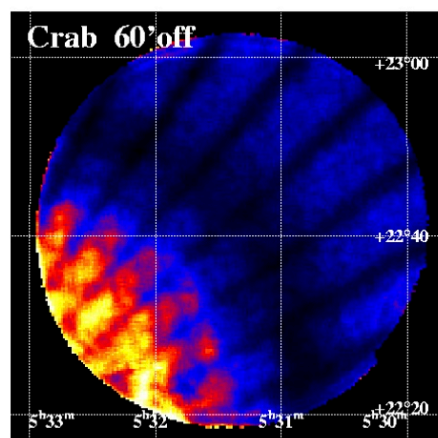


図 3.7: ASCA 衛星に搭載された GIS で観測されたカニ星雲からの迷光のイメージ。－カニ星雲は GIS 中心から左下に 60' 離れた位置にある。左下の明るい部分は 2 段目のフォイルで 1 回だけ反射される成分、右上の暗い部分は背面反射成分。

### 3.3 迷光とプリコリメータ

すざく衛星においては、この迷光の量を軽減させるため、「プリコリメータ」を搭載している。プリコリメータは、一段目の反射鏡の X 線入射側に設置することにより、迷光を遮断することができる (図 3.8)。主にこれは、二段目の反射鏡のみに反射して、検出器に達する「Secondary Only」成分を遮断するために設計されている。図 3.9には、プリコリメータの有無で迷光量がどのように変わるかを、Ray-tracing によってシミュレーションした結果を示す。プリコリメータをつけることで、明らかに Secondary Only 成分を軽減できていることがわかる。しかしながら、プリコリメータですべての迷光を防ぐことは不可能であり、また、プリコリメータの反射による、新たな迷光成分も出現してしまうという事実もある。

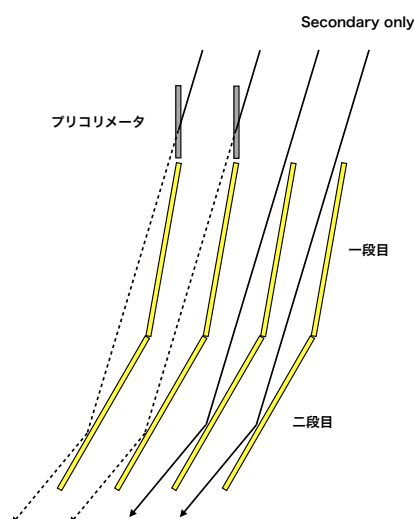


図 3.8: プリコリメータを搭載した望遠鏡の断面図。一段目のフォイルの真上に望遠鏡と同じ同心円上の円筒を立てることで、反射鏡すれすれを通過する迷光を取り除くことができる。

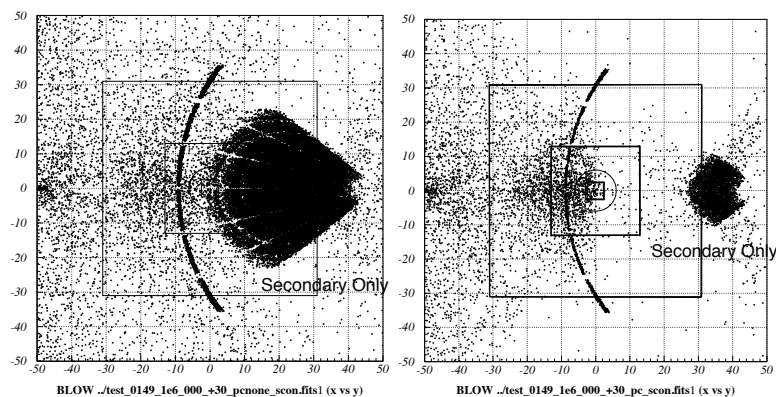


図 3.9: プリコリメータを搭載していない場合 (左) と、搭載した場合 (右) の 30' off の迷光の違い (Ray-tracing によるシミュレーション)。プリコリメータの搭載により、Secondary Only 成分を減少させることができる。

### 3.4 ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

2015 年度打ち上げ予定の ASTRO-H には、0.3 -12 keV の範囲の X 線を捉える軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) が搭載され、カロリメータと組み合わせることによって、今までにない高エネルギー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おり、図 3.11 に示すように Quadrant と呼ばれる 1/4 円筒を 4 つ組み合わせた構造になっている。さらに反射鏡を二段に並べた Wolter-I 型の構造を取っているため、Quadrant は上下二段に分割されており、上段を Primary、下段を Secondary と呼んでいる。また、Quadrant には反射鏡が 203 枚積層されており、反射率を稼ぐために金が表面に蒸着されている。望遠鏡の上段には迷光の漏れ込みを遮断するプリコリメータが載せられている。

図 3.10 と表 3.1 に、本論文で測定した SXT Flight Model (SXT FM) の外観と設計パラメータを載せる。

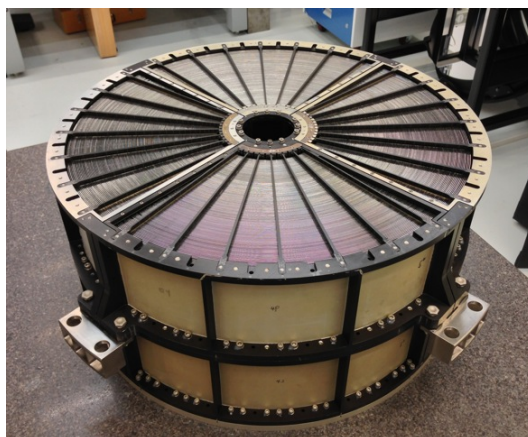


図 3.10: SXT FM の外観。

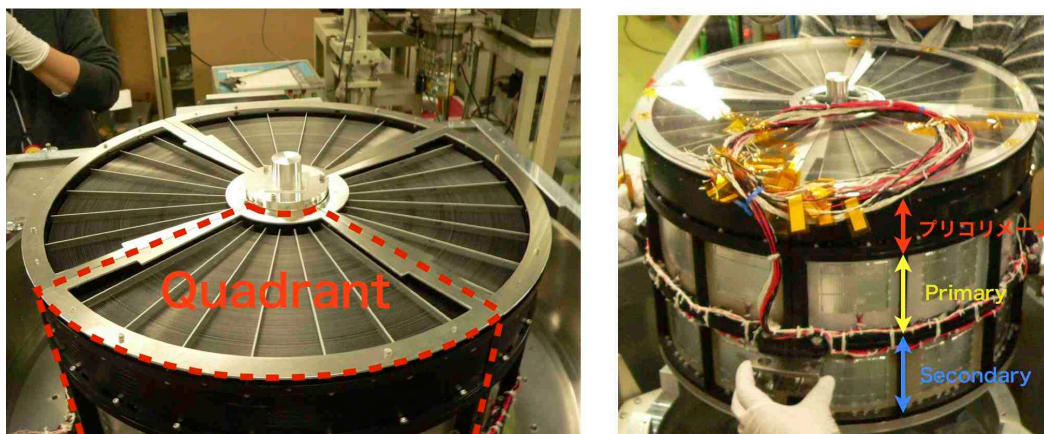


図 3.11: SXT の構造。左 : SXT の Quadrant の領域。右 : 上から順番にプリコリメータ、Primary、Secondary。

### 3.4 ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

---

表 3.1: SXT の設計パラメータ。

口径	450 mm
焦点距離	5600 mm
反射鏡積層数	203 枚
反射膜	Au
反射鏡の高さ	101.6 mm
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 165 $\mu$ m ~ 153 枚目 241 $\mu$ m ~ 203 枚目 318 $\mu$ m
入射角	0.15 ~ 0.59 °
要求される有効面積	450 cm <sup>2</sup> @ 1 keV 390 cm <sup>2</sup> @ 6 keV
要求される空間分解能 (HPD)	1.7 分角

### 3.5 X 線望遠鏡の性能とその評価

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。

#### 3.5.1 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。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E) \quad (3.2)$$

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  $\theta$ 、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  $\theta$  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。最後に様々な衛星の有効面積の比較を図 3.12 に示す。

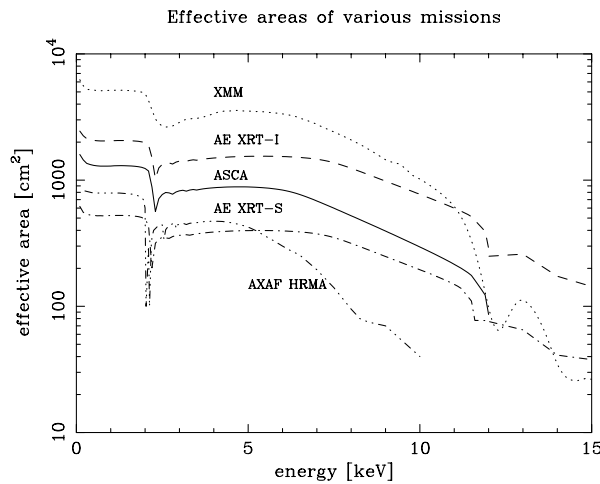


図 3.12: 様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積。(XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積である。) – AE は ASTRO-E の略である。

#### 3.5.2 結像性能（HPD、PSF、EEF）

結像性能の評価には、以下の 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 3.13 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 3.13 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<sup>2</sup>。HPD の値が小さいほど結像性能が良いといえる。

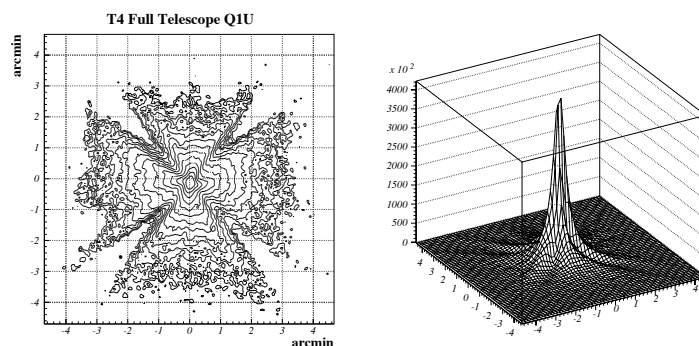


図 3.13: 焦点面のイメージ。左：等高線で表したものと、右：3 次元的に表したものの。

## 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 3.14）。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 のコアの部分に鋭いピークを持つほど結像性能が良いといえる。

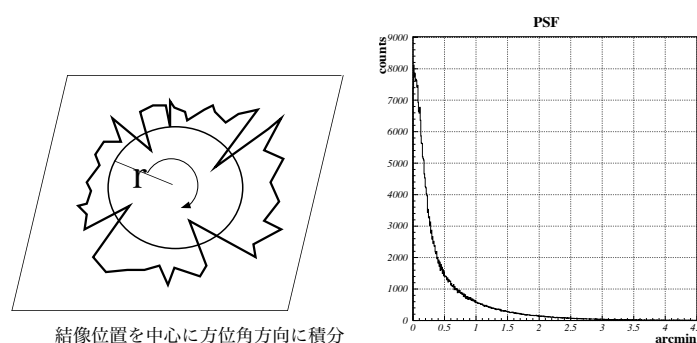


図 3.14: Point Spread Function (1 次元)。焦点面のイメージを動径方向に積分し (左)、1 次元の PSF を作る (右)。

<sup>2</sup>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。

### 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。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi PSF(r) dr \quad (3.3)$$

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 3.15 にまとめる。図 3.15 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 3.15 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。

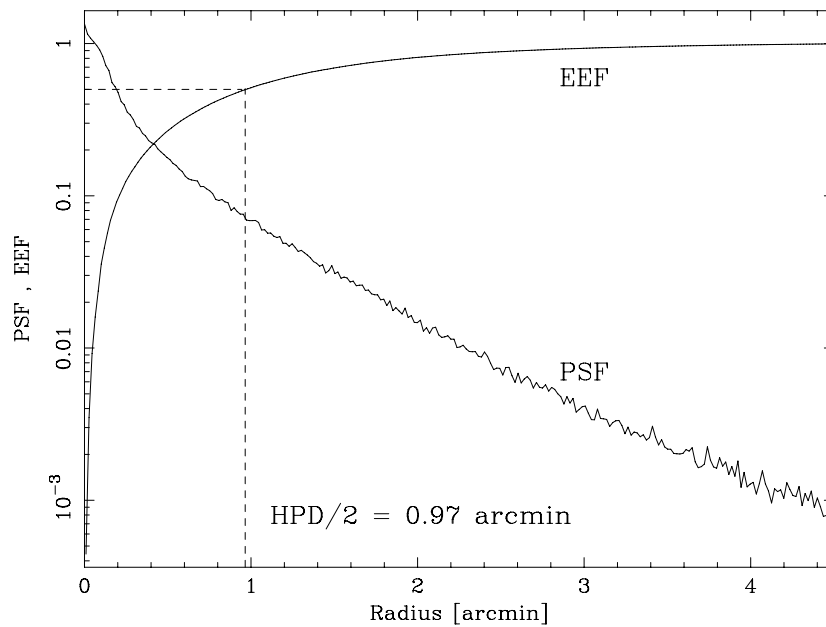


図 3.15: PSF、EEF、HPD の関係

## 3.6 結像性能と像の広がり要因

多重薄板型 X 線望遠鏡は、非常に薄い反射鏡を同心円状に何重にも積層させ、小型で軽量かつ大きな有効面積を実現できるように工夫された X 線望遠鏡である。しかし、反射鏡が「多重」で「薄板」であるために、結像性能は直接研磨型の X 線望遠鏡には遥かに及ばない。ここでは、その原因となっている「多重薄板型」X 線望遠鏡の結像性能を決定する 3 つの要因について説明する。

### 3.6.1 円錐近似

ASTRO-H に搭載される SXT は、回転双曲面鏡と回転放物面鏡を用いた 2 回反射により集光する Wolter I 型光学系を採用しているが、回転双曲面鏡と回転放物面鏡は非常に製作が困難であるため、二次曲面を円錐で近似した反射鏡を用いている。そのため、円錐近似によるイメージは 1 点に集光せず、必ず広がりを持ってしまう（図 3.16）。この広がり  $\text{HPD}_{\text{円錐近似}}$  を見積もってみると、

$$\text{HPD}_{\text{円錐近似}} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{L \tan \theta / \cos 4\theta}{F} \right) = 20 \text{ 秒角}$$

$\theta$  : 入射 X 線と反射鏡のなす角  $\sim 0.59^\circ$

$L$  : 光軸方向への反射鏡の長さ = 100 mm

$F$  : 焦点距離 = 5600 mm

となる。SXT の設計上、この 20 秒角が原理的な結像性能の限界となる。

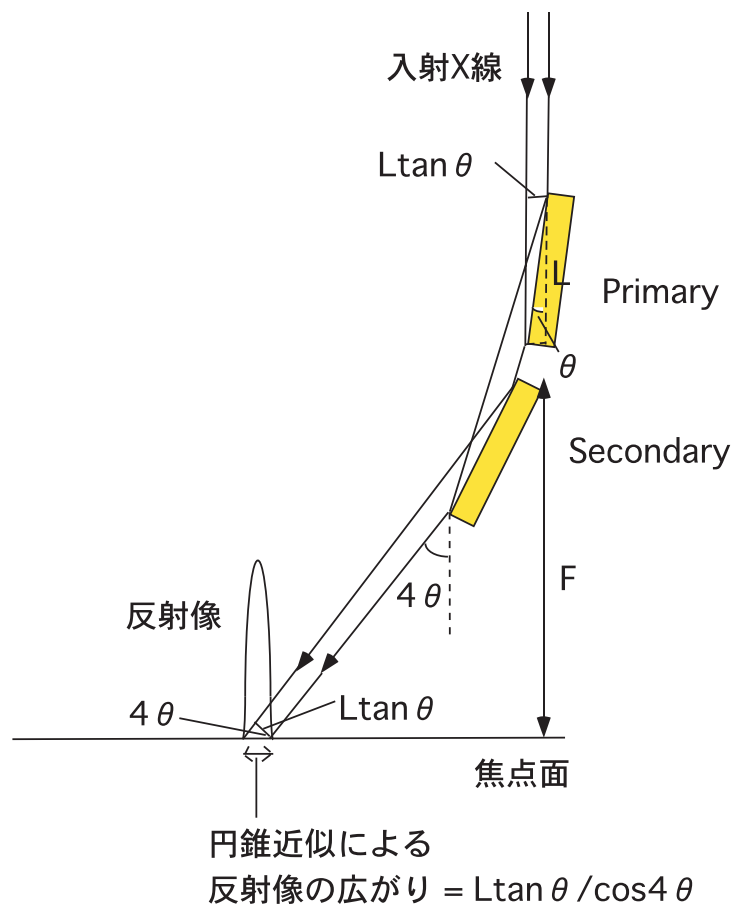


図 3.16: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。



## 3.6.2 鏡面の形状誤差

多重薄板型 X 線望遠鏡は、非常に反射鏡が薄い。そのため、反射鏡鏡面に数 mm のスケールの大きなうねりを生じてしまい、入射 X 線が様々な方向に反射され、焦点面での像が広がってしまう<sup>3</sup>。この像の広がり要因を、反射鏡鏡面の「形状誤差」と呼ぶ。

ここで、この要因による焦点面での像の広がり HPD<sub>形状誤差</sub> を見積もってみる。HPD<sub>形状誤差</sub> は、図 3.17 に示すように鏡面のうねりを反射鏡各点の法線ベクトルの揺らぎを用いて求めることができる。まず、法線ベクトルは反射鏡の法線ベクトルの平均の向きのまわりに、ある分布を持ってばらつくとする。今、この分布が幅  $\sigma_{\text{法線}}$  のガウス分布であると仮定すると、平均的な反射鏡の傾きに対して入射角  $\theta$  で入射した X 線は、反射鏡各点に対し、入射角に幅  $\sigma_{\text{法線}}$  のばらつきを生じる。つまり、入射した X 線は鏡面で入射方向に対して  $2\theta$  の方向に反射されるため、反射鏡に入射した X 線が反射されるとき、射出角度にばらつき  $2\sigma_{\text{法線}}$  を持つことになる。

X 線望遠鏡では、2 回反射し焦点面に結像するため、2 段目の反射を行なった後の射出方向のばらつきは  $\sqrt{(2\sigma_{\text{法線}})^2 \times 2} = 2\sqrt{2}\sigma_{\text{法線}}$  と書くことができる。このことは、2 回反射後の像のプロファイルが  $\sigma = 2\sqrt{2}\sigma_{\text{法線}}$  のガウス分布に従うことを意味している。ガウス分布では、 $-\sigma \sim \sigma$  の間には全積分量の 68% が含まれるため、これを全積分量の 50% が入る幅の HPD<sub>形状誤差</sub> は、

$$\text{HPD}_{\text{形状誤差}} = 2 \times 0.68 \times 2\sqrt{2}\sigma_{\text{法線}}$$

となる。ここで factor の 2 は、 $-\sigma \sim \sigma$  の範囲の幅を求めるため、0.68 は 68% を 50% にするために掛けている。この HPD<sub>形状誤差</sub> が、鏡面形状による反射光の広がりを表している。

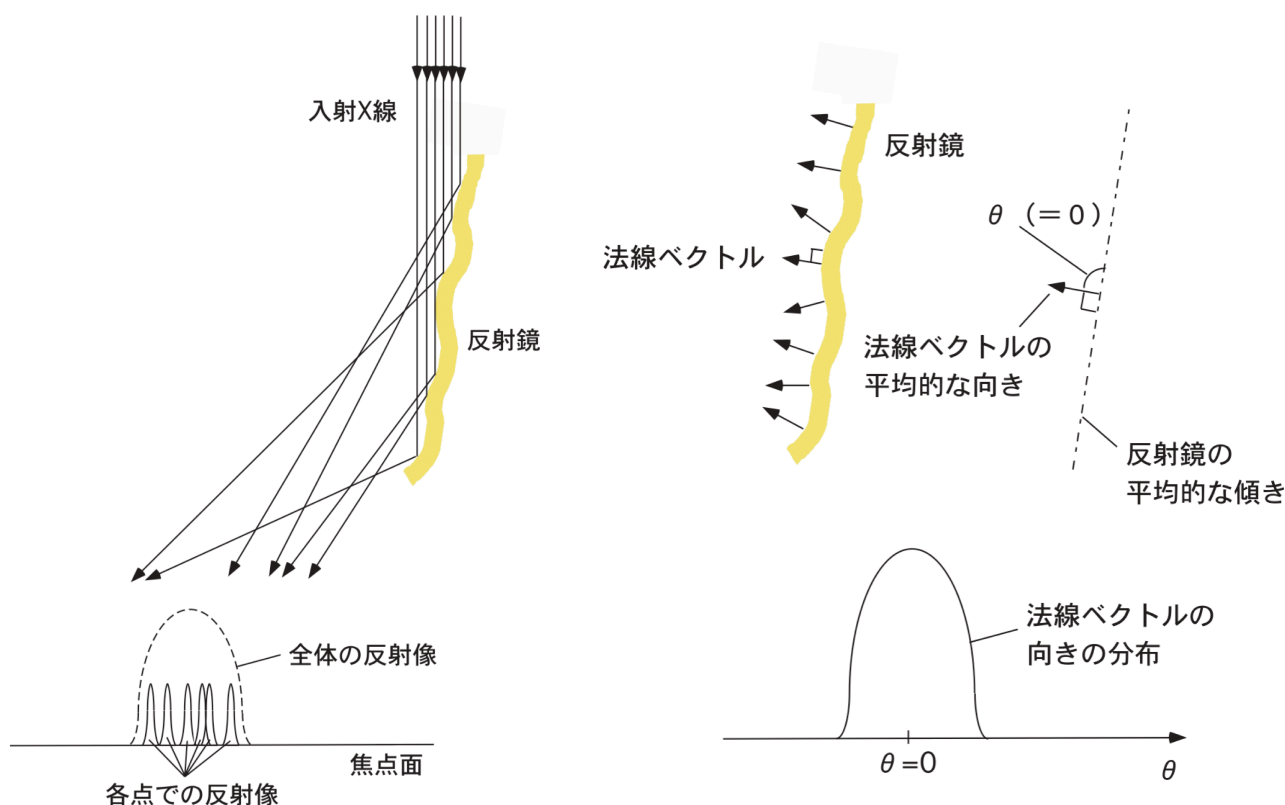


図 3.17: (左) 反射鏡の形状による像の広がり (右) 反射鏡の各点での法線ベクトルの揺らぎ—反射鏡の反射光の広がり、反射鏡各点での法線ベクトルのばらつき具合で表すことができる。

<sup>3</sup>実際には 0.1~1 mm 以下のスケールにも数十 Å のうねりが生じると、X 線は反射鏡鏡面で散乱され像が広がってしまうが、現在その程度のうねりは反射鏡鏡面の成膜技術の向上のため、生じていないので議論しない。

## 3.6.3 鏡面の位置決め誤差

多重薄板型 X 線望遠鏡は非常に多くの反射鏡を同心円状に積層しているため、全ての反射鏡を設計値通りの位置に配置することが非常に困難である。反射鏡が設計値通りの位置に配置されていないと、反射鏡個々に反射される X 線の結像位置が焦点面でばらつき、結果として全体の像が広がってしまう。(図 3.18)

反射鏡の位置決めはの上下段の各 2 点、計 4 点で行なっている。仮にその 4 点のうち 1 点が設計値から距離  $d$  だけずれ、そのために X 線の入射角が  $\Delta\theta$  変化したとすると、X 線の出射方向は 2 回反射のために  $2\Delta\theta$  変化する。そのときの X 線の出射方向を反射鏡の母線方向の長さ  $l$  と移動距離  $d$  を用いて表すと、

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left( \frac{d}{l \cos \theta} \right)$$

$d$  : 反射鏡の設計値からのずれ量

$l$  : 反射鏡の母線方向の長さ

$\theta$  : 設計値での X 線の入射角度

と表すことができる。(図 3.19) 仮に 1 点が設計値から  $100\mu\text{m}$  ずれていたとすると、焦点面でのずれ量は約 6.8 分角となり大きくずれてしまう。

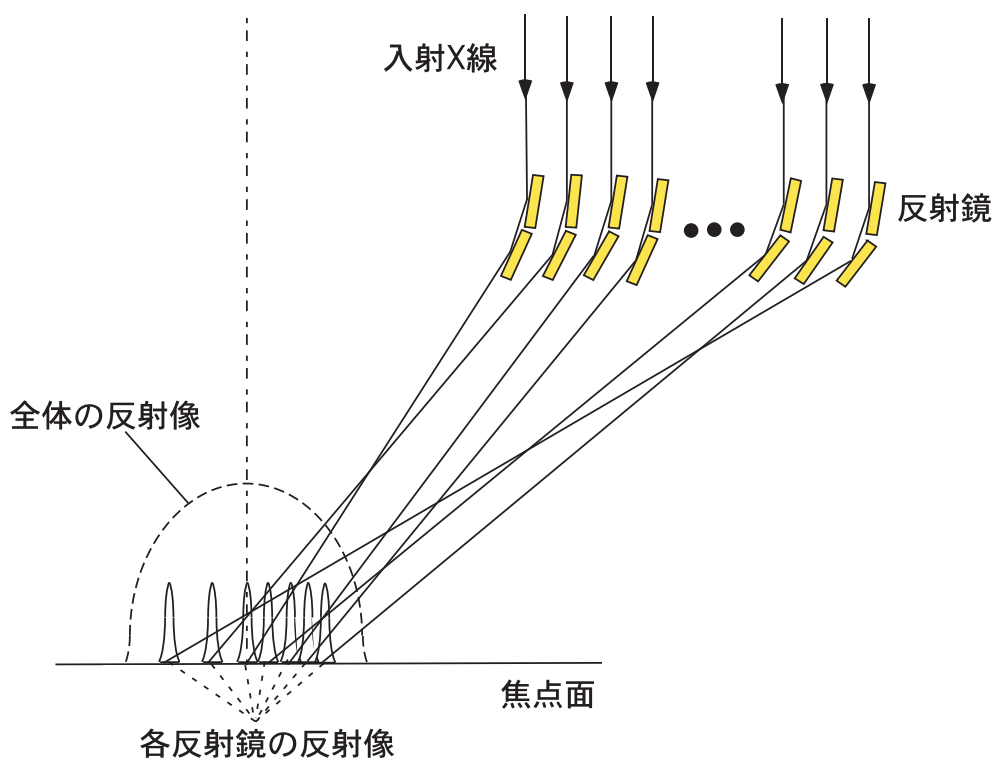
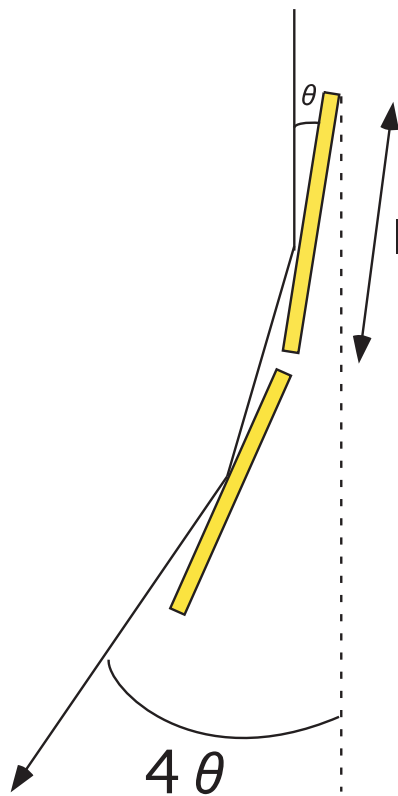


図 3.18: 反射鏡の位置決めによる像の広がり—焦点面どの位置に結像するかは、反射鏡のなす角でのみ決定する。

反射鏡が設計値通りの位置に  
いるとき



1点のみ距離dだけ設計値から  
ずれているとき

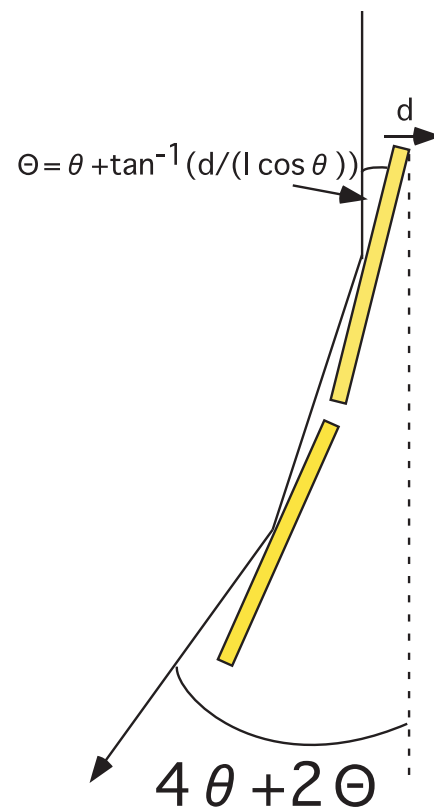


図 3.19: 位置決めのずれによる反射光のずれ

## 第4章 地上較正試験によるSXTの総合特性

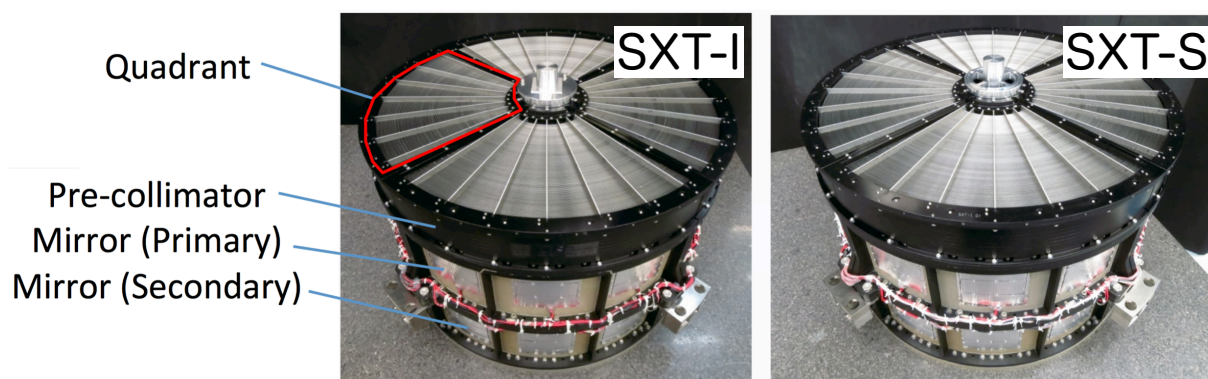


図 4.1: 軟 X 線望遠鏡 : SXT-I(左)、SXT-S(右)

### 4.1 地上較正試験と測定項目

#### 4.1.1 地上較正試験の目的と応答関数の構築

地上較正試験の第一の目的は、応答関数の構築へ向けて望遠鏡の性能を理解することである。我々は宇宙からの X 線を観測することで、天体の情報を得ることが出来るが、それは各観測機器の応答を介した情報である。そのため、もともとの天体の正確な情報を得るためには、観測以前に較正試験において観測機器の性能を理解し、応答関数を構築しておく必要がある。

X 線望遠鏡の較正試験は、地上較正試験 (Ground based calibration) と軌上較正試験 (On board calibration) の二つの段階に分類できる。前者は、単色化された X 線を用いて、望遠鏡の局所的な性能まで正確におさえることが出来る。しかし、重力下の測定であったり、さまざまな X 線エネルギーやその入射角に依存する連続的な情報のすべては得られないなど、実際の衛星軌道上での観測条件を満たす評価は不可能である。また打ち上げ後衛星軌道上で行われる後者は、較正を行う X 線源として実際の X 線天体を用いる。この場合、すでに素性の知れた天体を用いることになるが、当然のことながら全てを正しく理解できている天体は存在しない。また、観測機器の性能や天体の状態は日々変化する。そのため、測定条件は実際の観測と同等であるものの、望遠鏡の特性を正確に把握できる測定は限られてくる。

これらの試験の性質もふくめ、より精度の高い観測 (精度の高い応答関数の構築) を行うためには、地上での較正試験の段階であらかじめ、基本的な特性や軌道上では不可能な局所的な性能を把握し、軌上較正にすぐ反映できる応答関数を構築しておくことが重要になってくる。

#### 4.1.2 測定項目とその定義

X 線望遠鏡の応答関数とは、ある強度を持つ点源から放射される X 線が、焦点面上にどのような強度分布のイメージを作るのかを関数として表したもので、X 線のエネルギーと入射角  $\theta$  に依存する。天空

#### 4.1 地上較正試験と測定項目

座標  $(\alpha, \delta)$  に分布する強度分布  $F$  の天体を X 線望遠鏡を通して見ると、検出器の焦点面座標  $(r, \theta)$  とエネルギー  $E$  の関数として観測データ  $G$  を得る。応答関数を  $H_{Res}$  として式に表すと次のようになる。

$$F(E, \alpha, \delta) \times H_{Res} = G(E, r, \theta) \quad (4.1)$$

そして X 線望遠鏡に強度 1 の平行 X 線を入射させたすると、そのときの観測データ  $G$  が応答関数と等しくなる。この  $G$  は強度を表す関数と焦点面のイメージの広がりを表す関数に分離することができ、

$$1 \times H_{Res} = G(E, r, \theta) \quad (4.2)$$

$$= S_{eff}(E, \theta) \cdot PSF(E, r, \theta) \quad (4.3)$$

となる。 $S_{eff}$  が強度（有効面積）、 $PSF$  がイメージの広がり（結像性能）に対応している。

この応答関数の作成のために必要な測定は主に以下の通りである。

##### 1. 光軸

光軸とは光子の入射角に対して望遠鏡の集光力が最大となる軸である。X 線望遠鏡を通した観測から絶対的な天体の X 線強度を正確に求めるためには、X 線望遠鏡の光軸がどこを向いているのかを把握しておく必要がある。

##### 2. 有効面積

X 線を集光する実効的な面積のことである。X 線望遠鏡を通した観測から絶対的な光源のフラックスを求めるために必要不可欠な量である。式 (5.3) では有効面積は  $S_{eff}$  と表され、 $E$  と  $\theta$  の関数となっている。地上較正試験においては、6 種類の既知の単色化 X 線を用いて有効面積のエネルギー依存性を調べる。

##### 3. 結像性能

X 線望遠鏡が平行光を集光したときに焦点面上にできる輝度分布のことで、理想的には焦点面のイメージは点となるが、Wolter I 型光学系の円錐近似、アライメントバーのずれ、鏡面形状の粗さなどの様々な要因のため、焦点位置を中心に広がりをもった分布になる。結像性能は、天体の空間構造の把握に必要な不可欠な情報である。結像性能は  $PSF$  で表され、 $E, r, \theta$  の関数となっている。

##### 4. 迷光

迷光は、off-axis から入射した光子が通常 2 回反射で結像せずに、異なったパスを通った光子が視野内に漏れ込むものである。迷光は、観測のコンタミとして測定精度を下げてしまうため、あらかじめどのような迷光がどれだけの量あるかを把握しておく必要がある。

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には、異なる焦点面検出器を持つ 2 台の軟 X 線望遠鏡 (SXT) が搭載される (図 4.1)。これらは、X 線 CCD (SXI) を焦点面検出器とする SXT-I、X 線マイクロカロリメータ (SXS) を焦点面検出器とする SXT-S に分けられる。それぞれの SXT は、設計上同じ望遠鏡であるが、使用する検出器の違いや望遠鏡自身の個性が存在するため、個別に、またその用途に見合った性能評価をする必要がある。

SXT の地上較正試験は、2013 年春から宇宙科学研究所 X 線ビームライン (付録参照) を用いて、約 1 年間にわたり行われた。SXT-I の測定は、2013 年の間にほぼ完遂し、富川修論にまとめられている。そのため、本章では主に SXT-S の測定結果と SXT-I の追測定結果をまとめる。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

この節では、可視光を用いた望遠鏡の光軸、焦点距離測定の結果をまとめる。

### 4.2.1 測定セットアップ

#### クアドラントの位置関係と座標の定義

可視光測定には折り返し光学系を用いて、重力方向に平行に平行光が入射させるような測定を行う。この設置を”平置き”と呼ぶこととする。この平置きの場合、X線ビームラインをもちいた測定の configuration とは異なったものとなる。通常、宇宙研 X 線ビームライン測定では、望遠鏡はビームライン座標系における  $x$  軸 (X 線ビームに平行な軸) に平行に設置されているが、平置きの場合は  $x$  軸に対して垂直に設置される。ビームライン座標系では、クアドラントが上側、廊下側、下側、窓側のどちらを向いているかで U、C、D、W-side という位置関係を定義していた。平置きの場合は、この side を東西南北で S、W、N、E で定義する。この場合の side の対応表を表 4.1 に示す。また、座標系の定義の詳細は図 4.2、4.3 にまとめる。この時、折り返し光学系では、鏡の反射を用いているため、座標の符号反転があることを注意しなければならない。

表 4.1: ビームライン座標系と平置き時の side の相関。

U-side $\longleftrightarrow$ S-side
C-side $\longleftrightarrow$ W-side
D-side $\longleftrightarrow$ N-side
W-side $\longleftrightarrow$ E-side

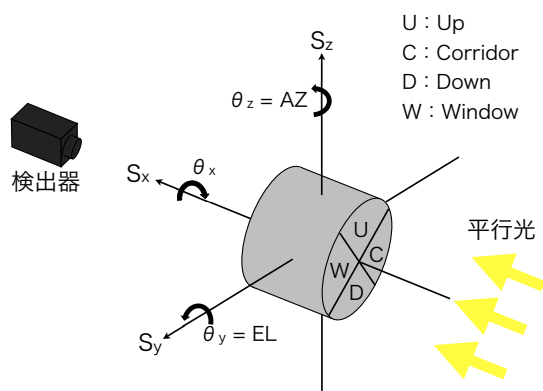


図 4.2: ビームライン座標系での side と軸の定義

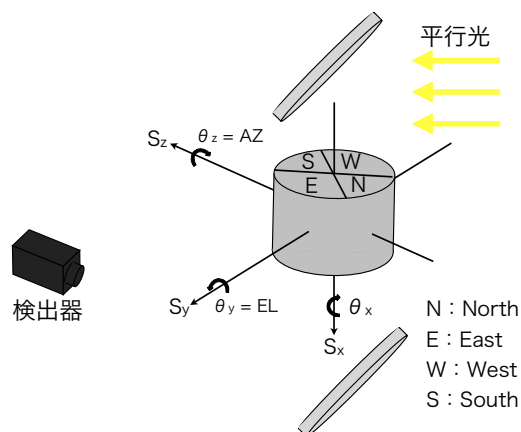


図 4.3: 平置き時の side と軸の定義



## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

### 望遠鏡と検出器の設置

実際に SXT を折り返し光学系に設置している様子を図 4.4 に示す。折り返し光学系には  $\theta_y, \theta_z$  軸方向に傾けることができるやぐらが設置してある (図 4.6)。この上に望遠鏡を設置することで、光軸測定の際行う Vignetting 測定が可能となっている。今回もちいた折り返し光学系では、望遠鏡の反射光は床すれすれをとおり検出器にたどりつく。そのため、検出器は床に設置した (図 4.5)。検出器の高さは実際の集光像をみながら、検出面に結像するように調整する。検出器までの距離は、SXT の焦点距離を考慮し設置する。SXT の焦点距離は、primary bottom と secondary top の中点から 5600 mm になるように設計されており、実際の衛星搭乗の際もこの距離になるように設置される。本可視光測定では、SXT の Bottom 側の表面から検出器の表面までの距離をレーザー測距計を用いて測定し、焦点距離を合わせた (図 4.7)。

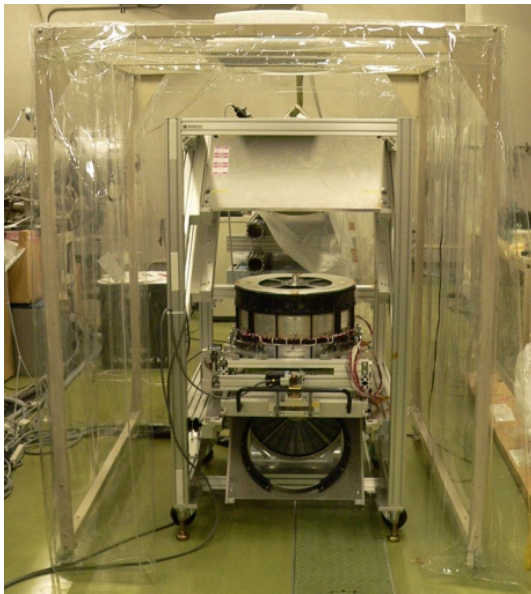


図 4.4: 折り返し光学系

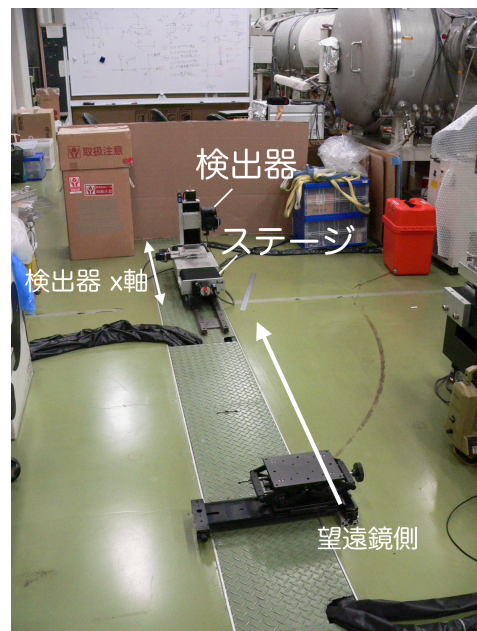


図 4.5: 検出器の設置

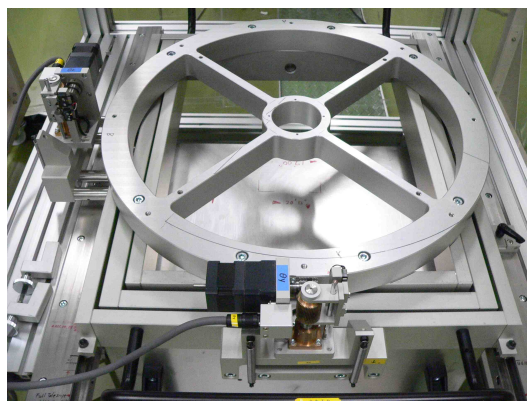


図 4.6: やぐらは  $\theta_y, \theta_z$  軸の調整が可能。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

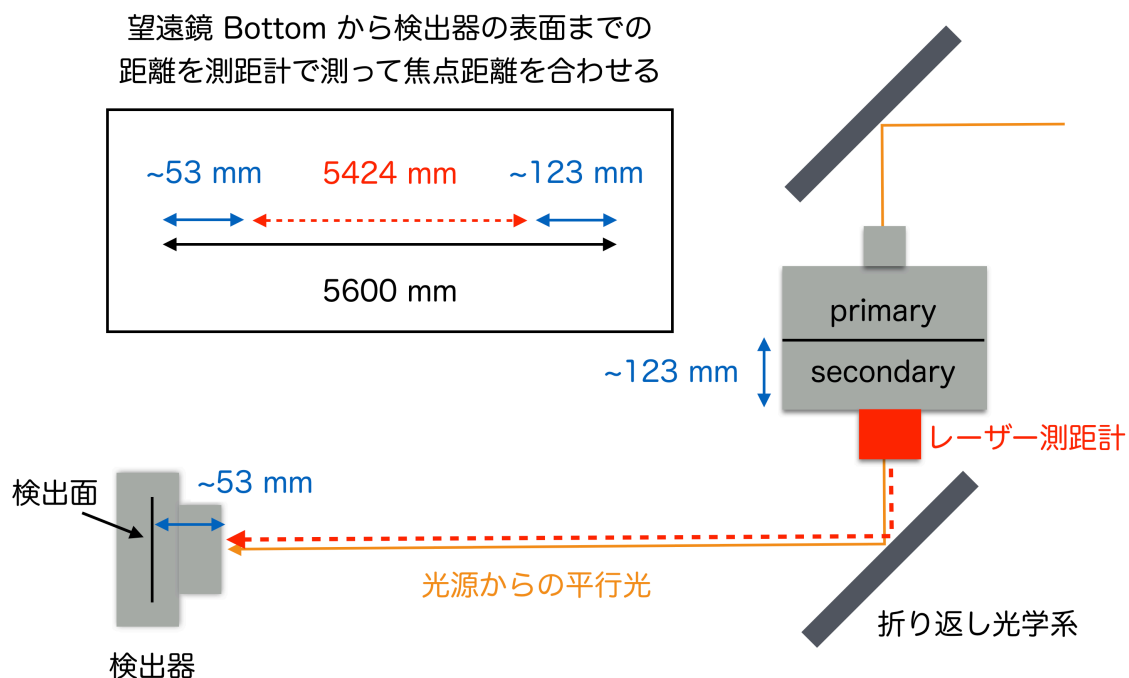


図 4.7: 焦点距離 5600 mm への設置の仕方。

### 平行光照射領域の調整：マスクの装着

折り返し光学系をもちいた平行光は、望遠鏡上では縦方向に 30cm、横方向に 40 cm の範囲にしか照射されない。そのため、1 度の測定で望遠鏡全面に平行光を入射することは不可能である。また、クアドラント個別の測定をする際にも、そのままでは他のクアドラントに光が漏れ込んでしまう。そのため、測定に応じてマスクを装着し、照射領域を調整している（図 4.8）。半径 150 mm 以内の円形領域であれば、1 度に照射可能である。

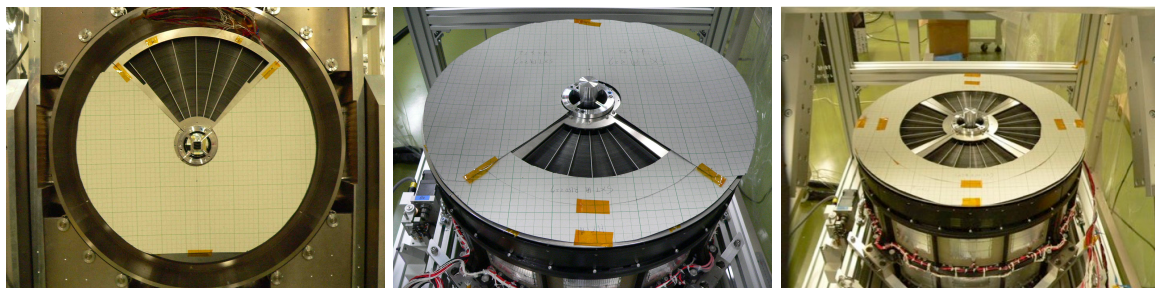


図 4.8: (左)–1 つのクアドラント全面に照射する場合のマスク。(中)–1 つのクアドラントの半径 150 mm 以内に照射する場合。(右)–半径 150 mm 以内の円形領域に 1 度に照射する場合。



## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

### 4.2.2 光軸測定：目的と測定方法

可視光をもちいた光軸測定では、平行光をさまざまな入射角から照射することで集光力が最大となる軸（光軸）を決定する。この際得られた光軸と衛星  $z$  軸の関係性を把握しておくことで、衛星アライメントの際に焦点面検出器との位置関係を決定することができる。衛星  $z$  軸の情報は、SXT の入射面側に設置してあるキューブミラー（図 4.9）の法線方向にある。そのため本測定では、このキューブミラーをリファレンスにし、光軸がどのような向きを向いているかを測定した。以下に、その測定方法を記す。

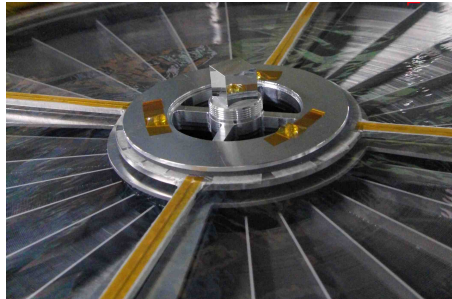


図 4.9: SXT の上面に設置してあるキューブミラー。写真上方向がキューブ法線となり、衛星  $z$  軸を定義している。このキューブミラーの反射を利用することで、衛星  $z$  軸と光軸の関係性を把握する。

1. セオドライトを用いて、入射光源の軸とキューブミラー法線を正対させる（図 4.10）。これによって、キューブミラー法線に平行な光が入射していることになる。

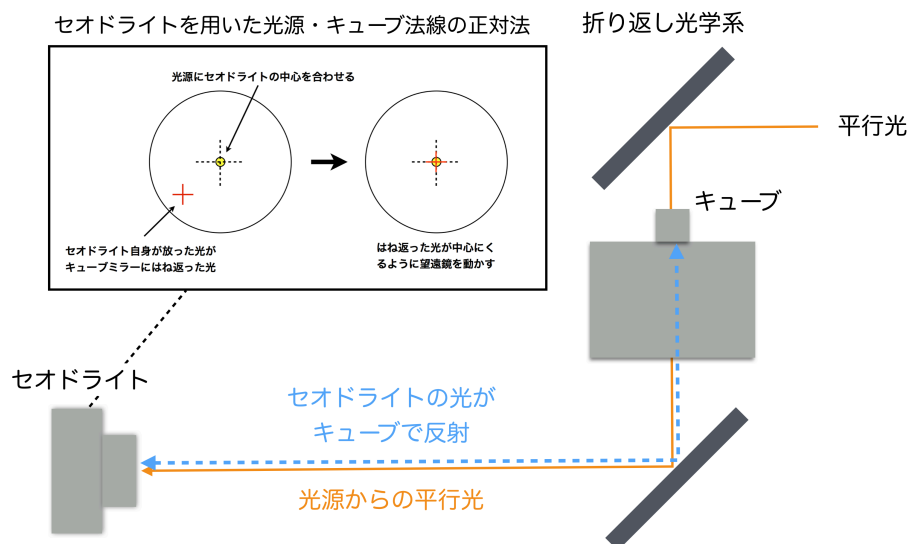


図 4.10: キューブ法線と平行光源の正対

2. 正対位置を中心に、サンプル  $\theta_y$ 、 $\theta_z$  をふりながら、各点での光量を測定（Vignetting 測定）。
3. 2. で得られた Vignetting カーブから、光量最大となる  $\theta_y$ 、 $\theta_z$ （光軸）を決定。
4. 3. で得られた光軸にサンプルステージを移動させる。その位置でセオドライトを用いて、光源とキューブ法線の開きを測定する。この値が、光軸とキューブ法線との離角になる。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

### 4.2.3 光軸測定：測定結果

可視光測定では、先述したように平行光を当てられる面積に制限があるため、全面照射の測定は難しい。そのため今回は、各クアドラントの全面照射測定、半径 150 mm の方眼紙マスクをつけた状態での各クアドラント測定、同じく半径 150 mm の方眼紙マスクをつけた状態での望遠鏡全体での測定の 3 種類行った。以下にその結果を示す。

#### クアドラント全面照射における Vignetting 測定

表 4.2: 測定条件

Config.	Q1S, Q2S, Q3S, Q4S
スキャン範囲	$-20' \sim +20'$
スキャンピッチ	1' ピッチ (1' = 25813 pulse)
Detector	CMOS カメラ
ISO	100
Exposure	1/100 sec
マスクの有無	クアドラント全面用 (図 4.8左)

各クアドラントそれぞれに全面照射するためには図 4.8左のマスクを使用する。また、クアドラント全面に照射する場合、S-side でなければ全面をカバーできないため、全てのクアドラントは S-side に回して測定する。この測定では、まず各クアドラントを S-side に移動し、その後光源とキューブ法線を正対させる。そして、その正対位置を中心に  $-20' \sim +20'$  の範囲で Vignetting 測定を行った。測定条件の詳細は表 4.2 を参照。

測定で得られた Vignetting カーブを、図 4.11~4.14に示す。それぞれ Gaussian (+constant) でフィットし、光量最大となる点を求めた。その最大点となる pulse 値にやぐらを傾けたあと、セオドライトを用いて光軸とキューブ法線の離角を Azimuth(AZ) 方向、Elevation(EL) 方向それぞれで測定。この際、すべてのクアドラントを S-side で測定したため、離角情報はもとの side から回転した値となっている。また、折り返し光学系では鏡の反射を用いるため、EL 方向の符号反転がある。そのため、この情報を元のビームライン座標系の情報に戻すため回転・反転補正した。これらの測定結果を表 4.3にまとめる。

図 4.15には、この結果の分布図を添付した。クアドラント毎の分布は  $30''$  以内でそろっている。SXT-I の測定の際は、これ以上に分布は広がっていたため、前回よりも望遠鏡アライメントがうまくいっていることがうかがえる。また、平均法線を望遠鏡光軸と考えると、GSFC の結果ともよくあう。

表 4.3: クアドラント全面照射における各クアドラントごとの Vignetting 測定 (全面平置き) のまとめ。  
1' = 25813 pulse に対応。  $\theta_y$ ,  $\theta_z$  は光量最大となる点 (pulse 値)。AZ、EL は光量最大の点にもっていった時の光源とキューブ法線の離角 (セオドライト測定)。

	$\theta_y$ [pulse]	$\theta_z$ [pulse]	AZ	EL	回転・反転補正 AZ, EL(Q1U)
Q1S	172469	-139757	323''	-405''	323'', 405''
Q2S	-145826	-174402	406''	337''	337'', 406''
Q3S	-179029	139819	-324''	420''	324'', 420''
Q4S	156134	177786	415''	-361''	361'', 415''
平均					337'', 413''
GSFC					342'', 413''

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

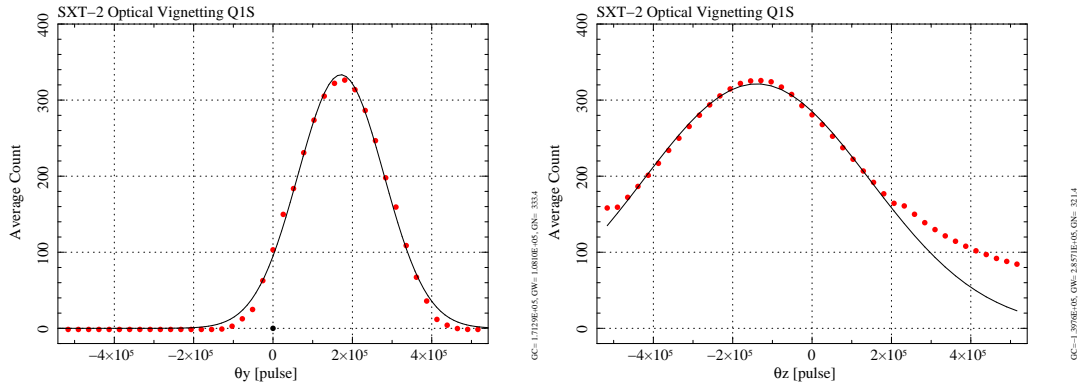


図 4.11: Q1S  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (右図) 方向の vignetting。

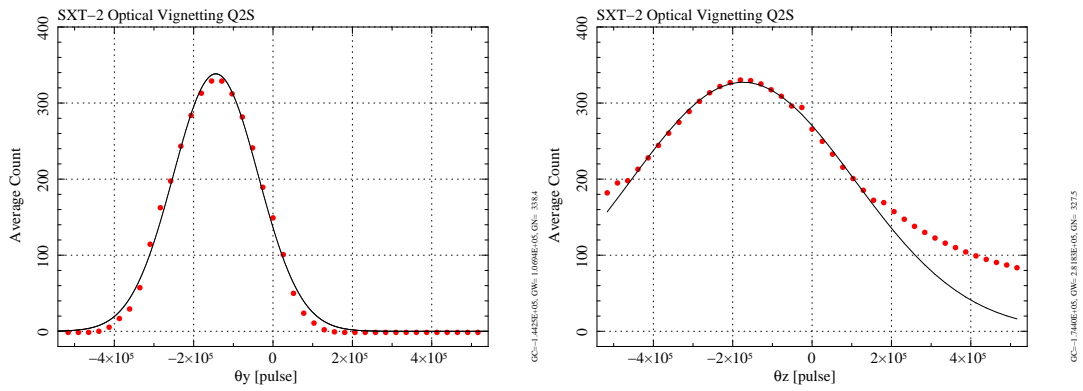


図 4.12: Q2S  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (右図) 方向の vignetting。

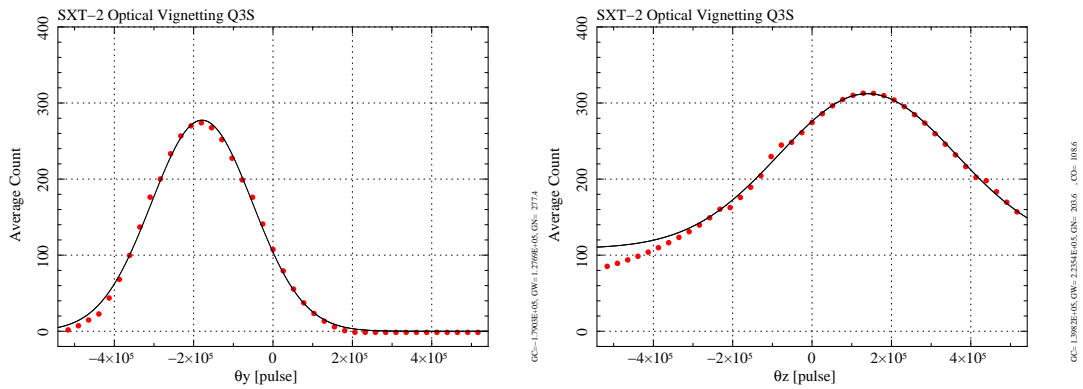


図 4.13: Q3S  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (右図) 方向の vignetting。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

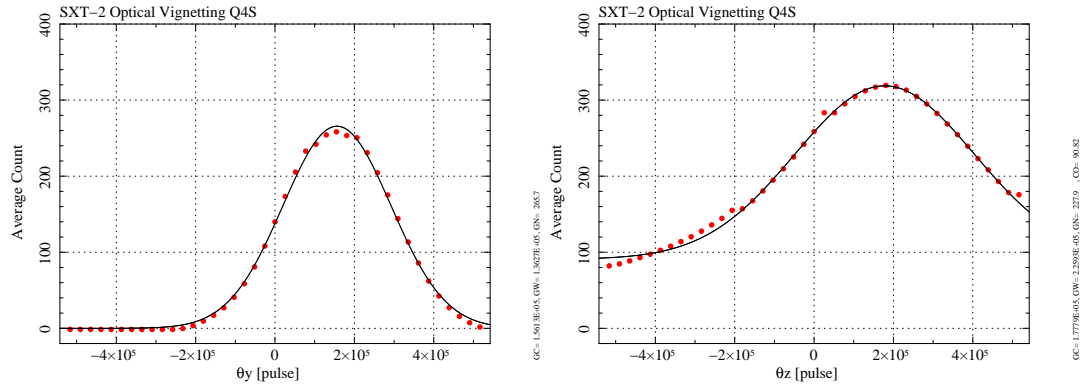


図 4.14: Q4S  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (右図) 方向の vignetting。

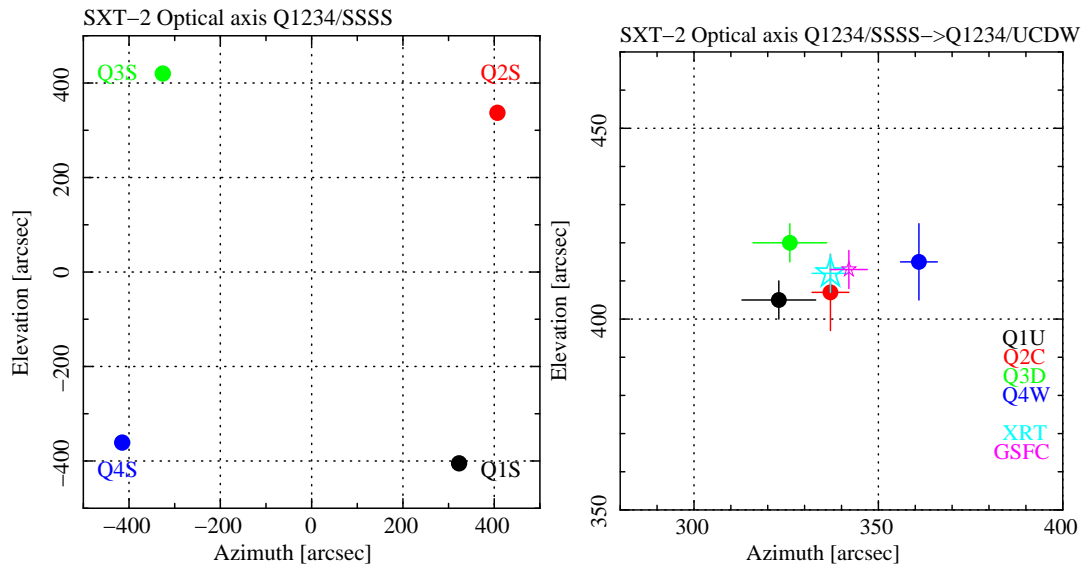


図 4.15: クアドラント全面照射における各クアドラントとの光軸分布 (全面平置き) – (左) それぞれ S-side に回して測定した光軸のセオドライトの読み値、(右) ビームライン座標系 Q1234/UCDW にあわせて回転補正したもの。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

### 望遠鏡内側 (R150mm) 照射における Vignetting 測定：各クアドラント & 望遠鏡全面

表 4.4: 測定条件

Config.	Q1S, Q2W, Q3N, Q4E
スキャン範囲 (クアドラント)	$-10' \sim +10'$ (各光軸を中心に)
スキャン範囲 (望遠鏡全面)	$-20' \sim +20'$ (光源・キューブ正対位置を中心に)
スキャンピッチ	1' ピッチ ( $1' = 25813$ pulse)
Detector	CMOS カメラ
ISO	100
Exposure	1/15 sec(クアドラント測定)、1/60 sec(望遠鏡全面)
マスクの有無	R150mm マスク (図 4.8真ん中と右)

半径 150 mm までの望遠鏡の内側に照射して測定した光軸の結果をまとめる。各クアドラントに照射するためには図 4.8真ん中のマスクを、望遠鏡全面に照射する場合は図 4.8右のマスクを使用。また、クアドラント全面に照射する時と違い半径 150 mm 以内に照射する場合は、回さずに全クアドラントをカバーできるため、Q1S、Q2W、Q3N、Q4E の side でそれぞれの測定を行う。各クアドラントの測定では、クアドラント全面照射測定の際に求めた光軸位置にやぐらを傾け、その位置を中心に  $-10' \sim +10'$  の範囲で Vignetting 測定を行った。また、望遠鏡全面での測定では、Q1 が S-side の位置で測定する。そして、光源とキューブ法線を正対させた位置を中心に  $-20' \sim +20'$  の範囲で Vignetting 測定を行った。測定条件の詳細は表 4.4を参照。

測定で得られた Vignetting カーブを、図 4.16~4.19(各クアドラント)、図 4.20(望遠鏡全面) に示す。それぞれ各クアドラントは Gaussian (+constant) でフィット、望遠鏡全面測定は、Lorentz (+constant) でフィットし光量最大となる点を求めた。その最大点となる pulse 値にやぐらを傾けたあと、セオドライトを用いて光軸とキューブ法線の離角を Azimuth(AZ) 方向、Elevation(EL) 方向それぞれで測定。この際、クアドラント全面照射測定の時と違い、回転の効果はないが、折り返し光学系の鏡の反射により AZ 方向と EL 方向のどちらにも符号反転が起きる。そのため、この情報を元のビームライン座標系に戻すため符号反転補正した。これらの測定結果を表 4.5にまとめる。

図 4.21には、この測定で得られた光軸とクアドラント全面に照射した場合の結果をまとめてある。XRT 軸は、全面照射と内側のみ照射で、光軸が  $15''$  程度、特に EL 方向にずれている。またクアドラント光軸も特に、Q1、Q3 がずれが大きく、20-30'' 程度ある。この結果は、内側と全体で光軸が違う可能性を示している。X 線をもちいても光軸測定は行ったため、その結果との比較を後の節で行う。

表 4.5: 内側照射における各クアドラントごとの Vignetting 測定 (全面平置き) のまとめ。1' = 25813 pulse に対応。 $\theta_y, \theta_z$  は光量最大となる点 (pulse 値)。AZ、EL は光量最大の点にもっていった時の光源とキューブ法線の離角 (セオドライト測定)。

	$\theta_y$ [pulse]	$\theta_z$ [pulse]	AZ	EL	反転補正 AZ, EL(Q1U)
Q1S	2014	619	333''	-404''	333'', 404''
Q2W	-2714	619	319''	-393''	319'', 393''
Q3N	-2749	1105	331''	-393''	331'', 393''
Q4E	5771	-9766	357''	-412''	357'', 412''
望遠鏡全面	0(172079)	0(-144784)	334''	-399''	334'', 399''
クアドラント平均	566	-351	335''	-400''	335'', 400''
GSFC					342'', 413''

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

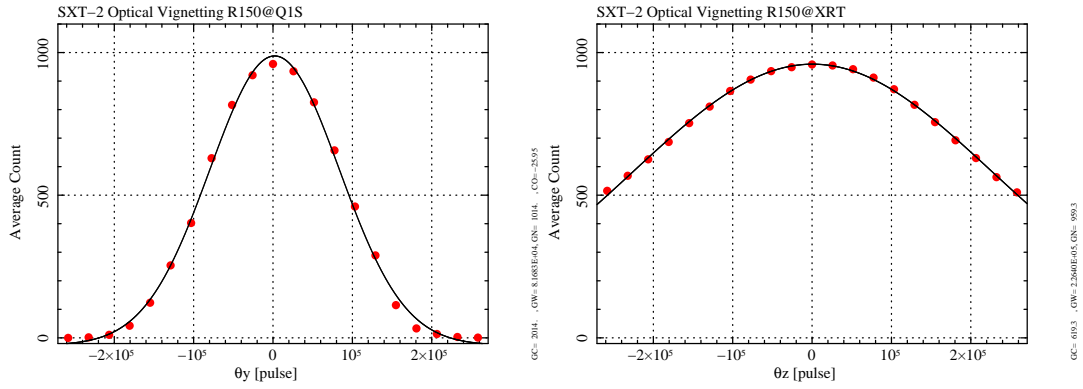


図 4.16: Q1S  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。

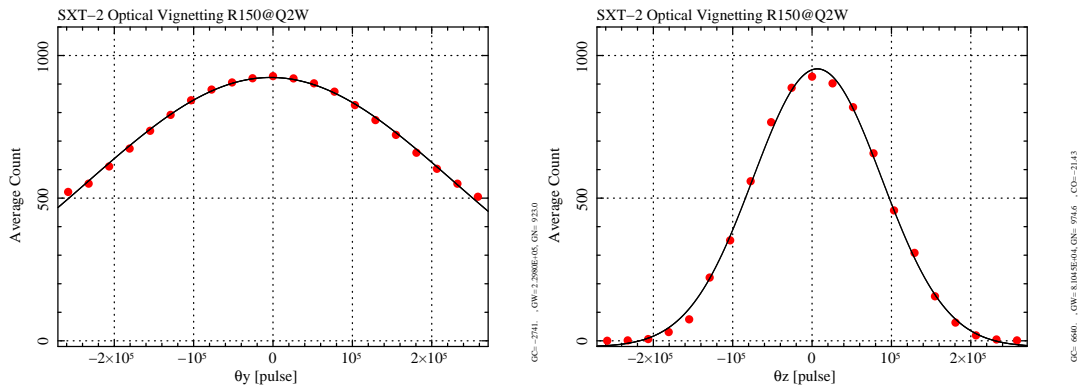


図 4.17: Q2W  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。

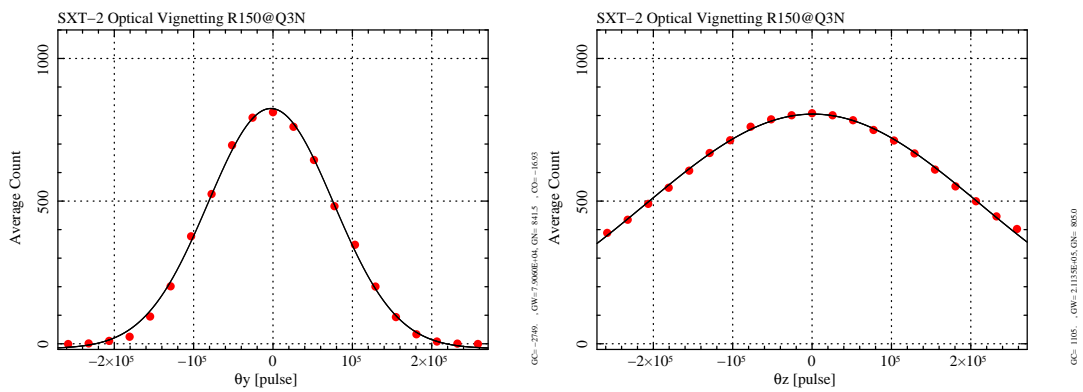


図 4.18: Q3N  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

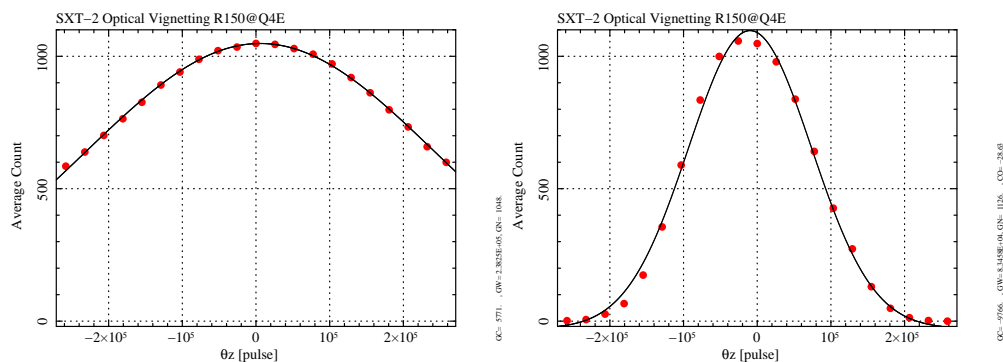


図 4.19: Q4E  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。

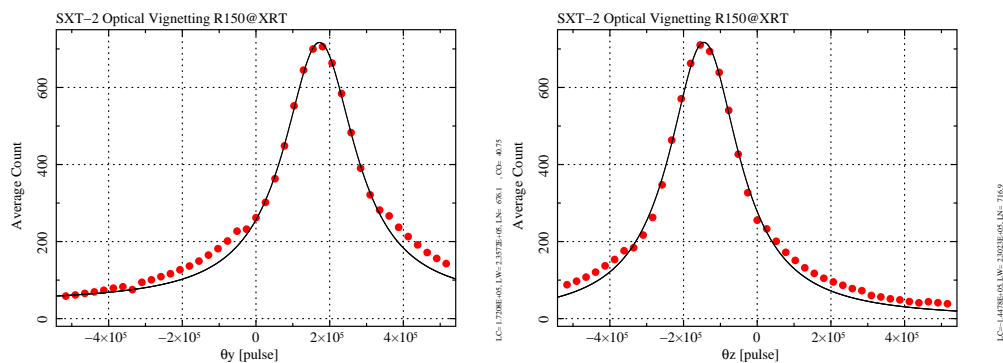


図 4.20: 望遠鏡全面  $\theta_y$ (左図)、 $\theta_z$ (左図) 方向の vignetting(with 150mm mask)。

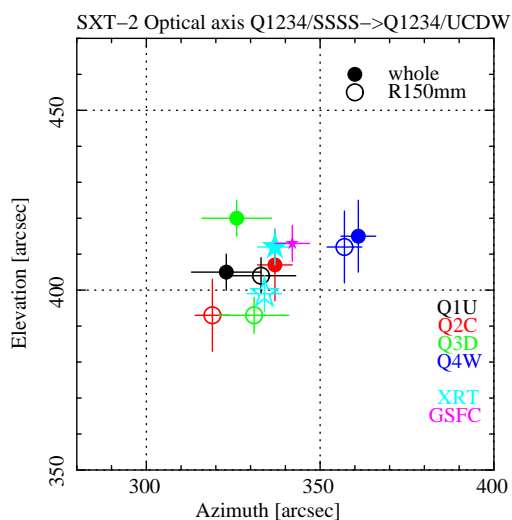


図 4.21: 内側のみ照射におけるクアドラントごとの光軸分布 (R150mm) – 全面平置きと R150mm 平置き  
のクアドラント光軸と望遠鏡光軸を比較したもの。ビーмлиン座標系 Q1234/UCDW にあわせたもの。  
黒抜が全面、白抜が R150mm を表す。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

表 4.6: 可視光測定による SXT-S、SXT-I の光軸とキューブ法線離角のまとめ

	補正 AZ, EL(Q1U) : SXT-S	補正 AZ, EL(Q1U) : SXT-I
Q1S : クアドラント全面	323'', 405''	-200'', -151''
Q2S : クアドラント全面	337'', 406''	-142'', -197''
Q3S : クアドラント全面	324'', 420''	-151'', -174''
Q4S : クアドラント全面	361'', 415''	-128'', -187''
平均	337'', 413''	-155'', -177''
望遠鏡全面 (R150mm)	334'', 399''	-157'', -175''
各クアドラントの平均光軸からの平均距離	~ 15''	~ 27''
各クアドラントの平均光軸からの距離のばらつき (標準偏差)	~ 6''	~ 16''

### 4.2.4 まとめと SXT-I との比較

この節では、可視光を用いて SXT-S の光軸測定を行った。結果として、クアドラント光軸は 30'' 以内に収まっており、SXT-I と比べよくそろっていることがわかった。また、その平均法線は GSFC での測定結果と非常に良く一致している。しかし、半径 150 mm 以内の測定結果では、クアドラント全面照射の結果と開きがあることがわかった。これは、望遠鏡内側と全面で光軸が違うことを示唆している。そのため、われわれは望遠鏡光軸としては、クアドラント全面照射した時の平均法線である (AZ, EL)=(337'', 413'') を採用する。

表 4.6 に SXT-S と SXT-I の光軸測定の結果をまとめた。また、図 4.22 には、クアドラント光軸の平均値からの各クアドラント光軸の離れ分布を示した。各クアドラントの平均光軸からの平均距離は SXT-S で ~ 15'', SXT-I で ~ 27'' 程度と SXT-S の方がばらつきが約半分ほど小さいことがわかる。

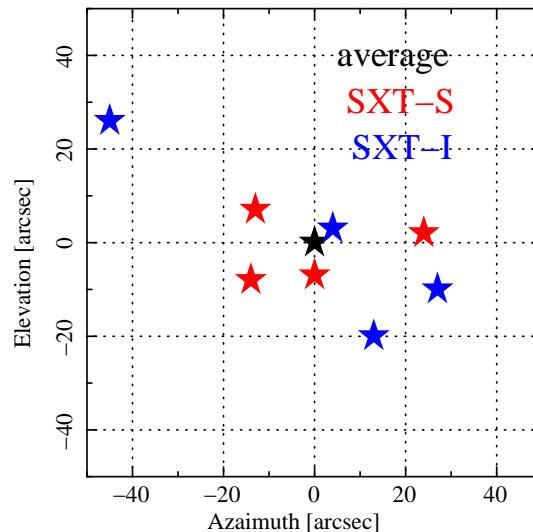


図 4.22: クアドラント光軸平均からの各クアドラント光軸の離れ。黒星が光軸平均、赤星が SXT-S、青星が SXT-I を示す。



### 4.2.5 焦点距離測定：目的と測定方法

SXT の焦点距離は 5600 mm に設計されている。しかしながら、製作過程の内にどうしても設計値からのずれは生じてしまう。本測定では、そのずれを各クアドラントごとに調べることを目標とする。

望遠鏡の像は焦点距離からずれた時に左右（または上下）に偏る。この性質を利用し、検出器の距離を変えながら得られた像を見て、各像の結像位置に対して、左側と右側（または上側と下側）の光量を調べる。例えば、W-side にある Quadrant の焦点距離について考える。もし検出器が望遠鏡の設計値よりも近いところにあると、結像する前に検出器に当たってしまうため、W-side の方向に像が偏る。反対に検出器が望遠鏡の設計値よりも遠いところにあると、結像位置を乗り越えて検出器に当たるので、C-side 方向に偏る。従って、左右の光量が等しくなる距離がその望遠鏡の実際の焦点距離であると言える。この焦点距離の測定方法を LR 法と呼ぶ。概念図を図 4.23 に示す。以下、詳しい測定方法について説明する。

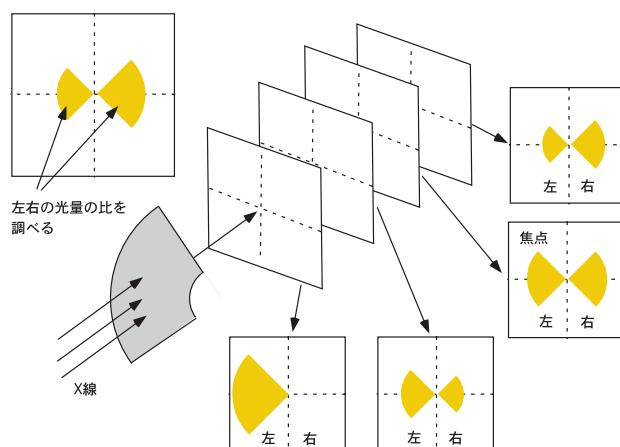


図 4.23: 焦点距離と像の形 (LR 法)

1. SXT の焦点距離の設計値の位置である 5600 mm に検出器を置き、この位置を原点とする。詳細は測定セットアップの節を参照 (図 4.7)。
2. Q1S、Q2S、Q3S、Q4S の configuration で、各 Quadrant 毎に光軸の位置に移動する。
3. 検出器の距離を原点から  $\pm 100$  mm の範囲で動かし、10 mm ピッチで計 21 点を測定する。
4. 各測定毎に像の上下<sup>1</sup>の光量を求める。
5. 上下で変化する光量をそれぞれ直線でフィットし、交わる点を焦点距離のずれとする。
6. 最後に距離計を使って実際の焦点距離を測定する。距離計のエラーは 1 mm 程度。

<sup>1</sup>S-side にあるため、像の広がり方は上下になる。

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

### 4.2.6 焦点距離測定：測定結果

表 4.7: 測定条件

Config.	Q1S, Q2S, Q3S, Q4S
スキャン範囲	-100 mm ~ +100 mm (5600 mm を中心に)
スキャンピッチ	10 mm ピッチ ( 1 mm = 100 pulse)
Detector	CMOS カメラ
ISO	100
マスクの有無	クアドラント全面用 (図 4.8左)

本測定では各クアドラントの全面に照射するために図 4.8左のマスクを装着して行った。測定条件の詳細は表 4.7に示す。また、本測定で実際に得られた測定値からのズレ分をまとめたものを表 4.8に示す。図 4.24は、この結果をプロットしたものである。結果としては、LR 法とレーザー測距で求めた結果はほぼ一致して、どのクアドラントでも焦点距離は長い方向にあることがわかった。また、SXT-I の測定では、可視光で測定した焦点距離は X 線の焦点距離よりも 10 mm ほど長い位置にある傾向があった。このことを踏まえると、SXT-S の焦点距離のズレ分は  $\pm 10$  mm 程度で、設計値とよく合っていると言える。

この結果を得るため、実際に各距離で得られた像を結像位置を境に上下に分割し、光量を求めプロットしたものを図 4.25に示す。この図では、上下のデータの光量の変化を Linear (+constant) でフィットしている。これらの交点 (上下の光量が等しくなる点) が、設計値と実際の焦点距離とのズレ分となる。

表 4.8: 焦点距離の測定結果

	LR 法	レーザー測距
Q1S	916 (+9.16 mm)	+10 mm
Q2S	59 (+0.59 mm)	+1 mm
Q3S	880 (+8.80 mm)	+9 mm
Q4S	1736 (+17.36 mm)	+18 mm

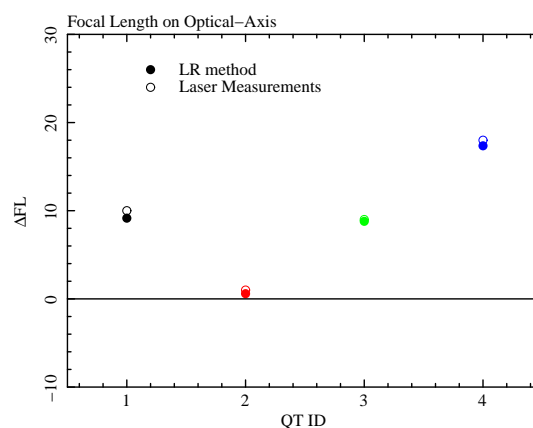


図 4.24: LR 法とレーザー測距による焦点距離測定の結果

## 4.2 可視光を用いた光軸・焦点距離の測定

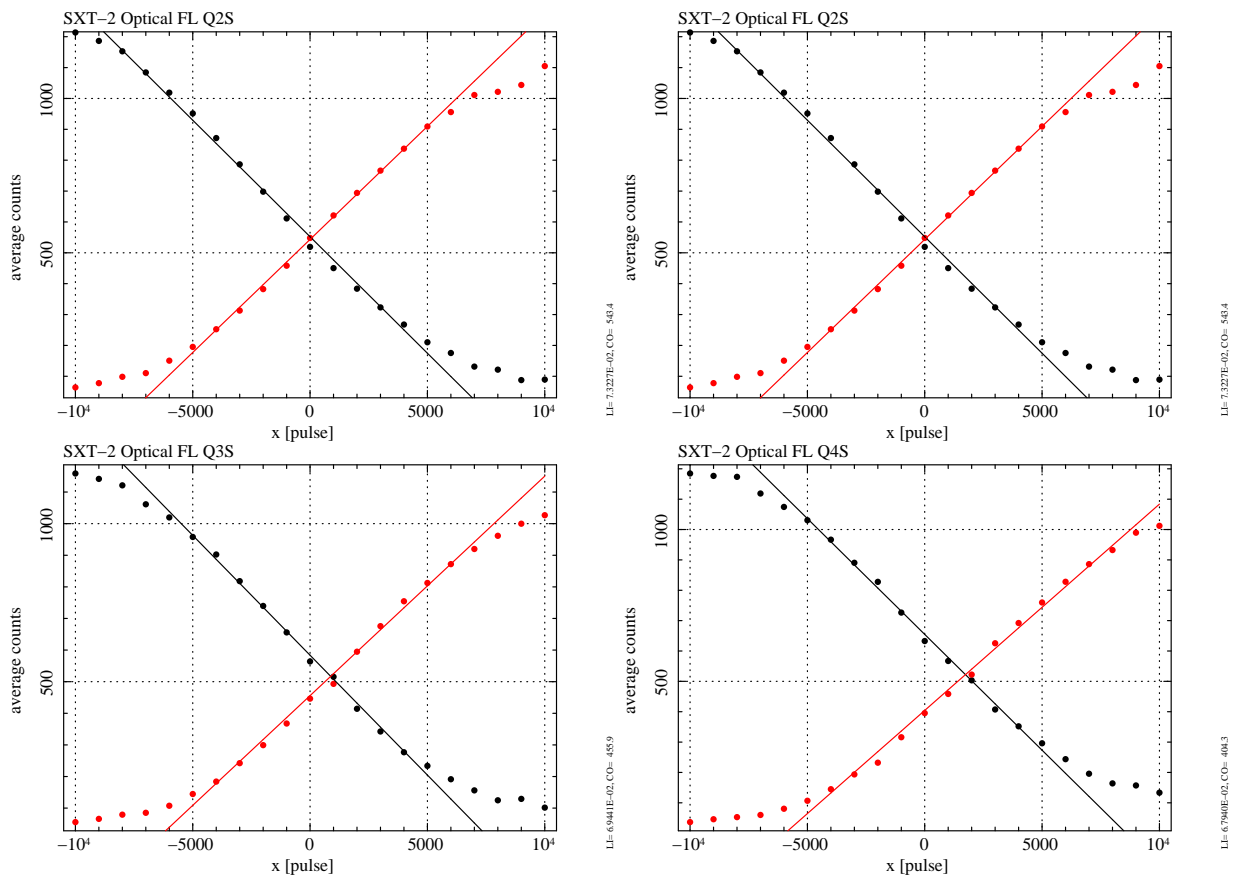


図 4.25: Quadrant 毎の焦点距離 (5600 mm) からのずれ。縦軸は上下の像の光量、横軸は焦点距離からのずれ (pulse 値)。イメージの半分の領域の光量の比を赤線と黒線で表している。データは Linear + Constant でフィット。左上: Q1U、右上: Q2U、左下: Q3U、右下: Q4U。

## 4.3 有効面積

### 4.3.1 測定項目と測定方法

#### 測定目的と測定項目

SXT は、数百 eV から 十数 keV のエネルギー帯の集光・結像を担っている。物質に対する X 線の臨界角  $\theta$  とエネルギーには、以下の関係がある。

$$\theta \propto \frac{\sqrt{\rho}}{E} \quad (4.4)$$

SXT の反射鏡の一段目の入射角は 0.152 ～ 0.573 と設計されており、外側に行く程大きくなる。つまり X 線のエネルギーが大きくなるほど臨界角は小さくなるため、外側の反射鏡では反射されなくなる。そのため有効面積は、X 線のエネルギーが大きくなるほど小さくなる傾向にある。このエネルギー依存性を把握しておくことは、応答関数構築に必要不可欠である。また、X 線の入射角度によっても集光力は変化する。そのため、本測定においては、多色の X 線を用いて、さまざまな入射角度をもって、その性能を把握することを目的とする。具体的には、以下の項目の測定を行う。

1. X 線による光軸測定
2. 光軸における有効面積のエネルギー依存性の測定
3. 有効面積の入射角依存性

X 線のエネルギーは、Al-K $\alpha$ (1.49 keV)、Ti-K $\alpha$ (4.51 keV)、Cu-K $\alpha$ (8.04 keV)、Pt-L $\alpha$ (9.44 keV)、Pt-L $\beta$ (11.07 keV)、Mo-K $\alpha$ (17.48 keV) の 6 色で行った。図 4.26 に SXT の理想的な有効面積と今回測定にもちいた X 線のエネルギーをまとめる。また、各エネルギーにおける入射角依存性の測定は、表 4.9 と図 4.27 に示した入射角度で行った。

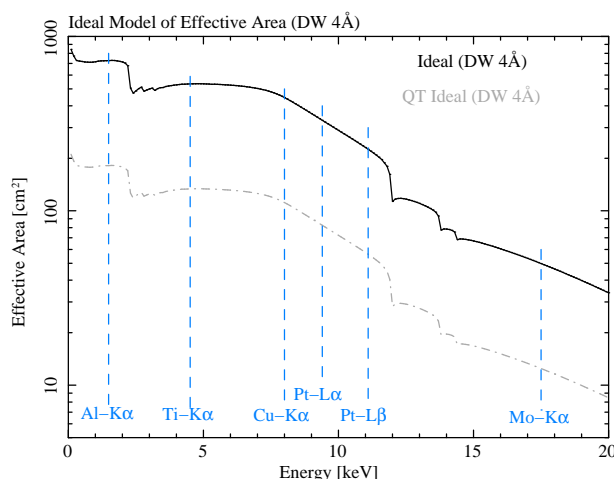


図 4.26: SXT の理想的な有効面積と測定にもちいた X 線エネルギー。実線：望遠鏡 1 台分の理想的な有効面積、破線：クアドラントの理想的な有効面積。

表 4.9: 各エネルギーでの Vignetting 測定項目

$\theta_y, \theta_z$ Vignetting	$-4'$	$-2'$	$-1'$	$0'$	$+1'$	$+2'$	$+4'$
Al-K $\alpha$	×	×	○	○	○	×	×
Ti-K $\alpha$	○	○	○	○	○	○	○
Cu-K $\alpha$	×	×	○	○	○	×	×
Pt-L $\alpha$	×	×	○	○	○	×	×
Pt-L $\beta$	×	×	○	○	○	×	×
Mo-K $\alpha$	×	×	×	○	×	×	×
45 度 Vignetting	$-4'$	$-2'$	$-1'$	$0'$	$+1'$	$+2'$	$+4'$
Ti-K $\alpha$	×	○	○	○	○	○	×

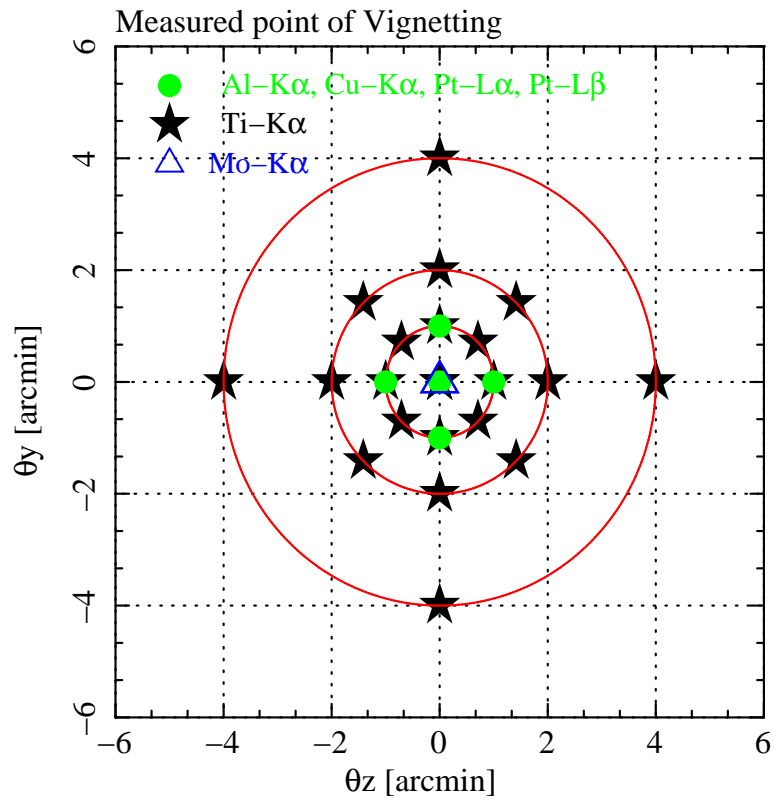


図 4.27: 各エネルギーでの Vignetting map

### 4.3 有効面積

#### 測定方法と評価方法

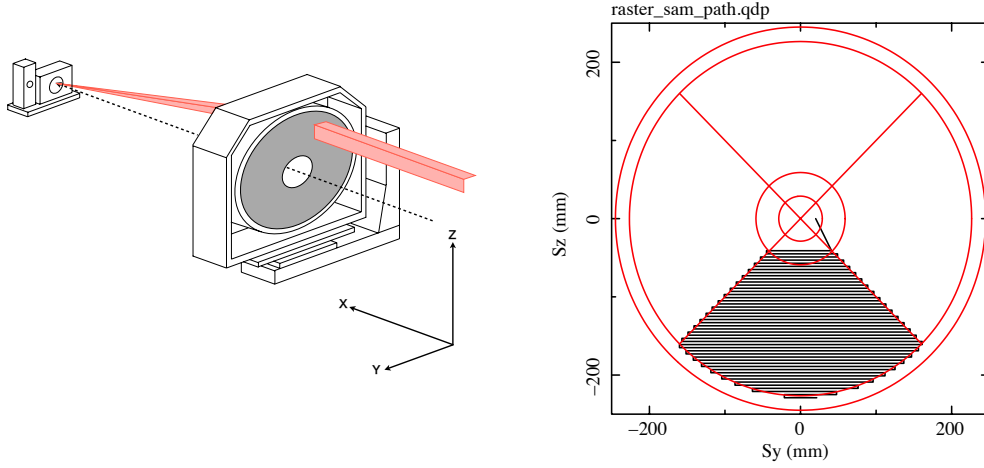


図 4.28: 左：ペンシルビームを用いた望遠鏡測定の模式図。望遠鏡の光軸と検出器を同期して動かし、望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する。右：Q1U をラスタースキャンするステージの経路の例。

有効面積の X 線測定はラスタースキャン法を用いて行う。X 線 30m ビームラインは X 線発生装置が固定されているため、望遠鏡ステージと検出器ステージを同期させて動かすことにより、望遠鏡入射面上の任意の位置にペンシルビームを照射する（図 4.28）。望遠鏡入射面をペンシルビームでくまなく走査することにより、擬似的に望遠鏡全体に平行 X 線が入射している状況を作り出すことができる。通常は検出器を露光させながら、 $y$  方向に検出器ステージと望遠鏡ステージを同期移動させ 1 ラインをスキャンし、 $z$  方向に 1 ラインの幅分移動させ、次のラインをスキャンする。この方法をラスタースキャンと呼ぶ。ペンシルビームの高い平行度を確保するために、スリットの  $z$  方向の大きさは最大で結像性能測定時には 2 mm、有効面積測定時には 4 mm 程度にする必要があり、Quadrant 単位の測定でも最大 ~100 ライン以上スキャンする必要がある。この測定方法から、望遠鏡の有効面積は次のように求められる。

有効面積  $S_{eff}$  は望遠鏡の幾何学的面積 (X 線が反射される実効的な面積)  $S_{geo}$  を用いて以下のように書ける。

$$S_{eff} = S_{geo} \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (4.5)$$

ここで  $C_{in}$  は望遠鏡に入射されたトータルの X 線光子の数、 $C_{out}$  は焦点面に集光した X 線光子の数である。 $C_{in}$  はダイレクト X 線ビームの強度  $I$  counts/s、露光時間を  $t$  として、

$$C_{in} = It \quad (4.6)$$

と書ける。さらに X 線ビームの縦幅を  $h$  mm、X 線ビームの移動速度 (ステージ Y 方向の移動速度) を  $v_y$  mm/s とすると、

$$t = \frac{S_{geo}}{v_y h} \quad (4.7)$$

と表せる。よって有効面積は、

### 4.3 有効面積

---

$$\begin{aligned} S_{eff} &= S_{geo} \frac{C_{out}}{C_{in}} \\ &= S_{geo} \frac{C_{out}}{I t} \\ &= S_{geo} \frac{C_{out}}{I \frac{S_{geo}}{v_y h}} \\ &= \frac{C_{out} v_y h}{I} \end{aligned} \tag{4.8}$$

と求まり、有効面積は幾何学的面積に依存しない。結局、上の式において  $v_y$  と  $h$  は定数なので、ダイレクト X 線ビームの強度  $I$  と焦点面に集光した光子の数  $C_{out}$  のみを測定することにより、有効面積を測定することができる。

## 4.3 有効面積

### 4.3.2 測定結果：X 線による光軸測定

表 4.10: 測定条件

Config.	Q1U & Q3U
Target	Ti-K $\alpha$
Slit size	2 $\times$ 2 mm
Pitch	4 mm(Q1U) & 8 mm(Q3U) pitch
FL	5600 mm
Detector	P.C.
angle	0', $\pm 4'$

X 線をもちいた光軸測定では、可視光測定の際に求めた各クアドラントの光軸を中心に  $\pm 4'$  だけ、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  軸を振り、各点で有効面積を求める。その時得られた Vignetting カーブから、X 線光軸を求めた。X 線のエネルギーは 4.51 keV で行い、configuration は Q1234/UCDW と Q1234/DWUC の 2 種類で測定する。これは重力の効果が side の違いで出るかを確認するためである。この場合、望遠鏡を回すため、基準となる可視光光軸の位置は変わることになる。Q1234/UCDW の時、可視光光軸の位置の pulse 値は  $(\theta_y, \theta_z) = (-229, -94)$ 、1234/DWUC の時、 $(\theta_y, \theta_z) = (-220, -138)$  である。詳しくは付録のアライメントの章を参照。測定条件の詳細は表 4.10 を参照。

この測定で得られた、光軸位置をまとめたものを図 4.29 に示す。可視光測定の時と同様に、各クアドラントの光軸分布は非常に良くそろっており、 $\sim 30''$  程度で一致している。SXT-I の場合  $\sim 1'$  程度だったため、非常に良い。Q1U と Q3U で測定した結果も数秒以内で一致しているため、重力の効果はほぼないと言える。最終的に望遠鏡の X 線光軸は、Q1 が U-side の時、 $(EL, AZ) = (407'', 342'')$ 、Q3 が U-side の時、 $(EL, AZ) = (410'', 345'')$  となった。これは、可視光測定による光軸  $(EL, AZ) = (413'', 337'')$  と数秒程度で一致している。そのため、可視光光軸と X 線光軸はほぼ変わらないものとして、今後の測定では望遠鏡光軸は可視光測定の際に求めた、 $(\theta_y, \theta_z) = (-229, -94)$  を採用することにする。

今回の測定で実際に得られた有効面積の結果は表 4.11~4.14 にまとめた。光軸を求める際に使用した Vignetting カーブは図 4.30、4.31 に示す。これらは、それぞれ Gaussian でフィットすることで有効面積最大となる点を求めている。また、この Vignetting カーブから求めた光軸は、表 4.15、4.16 にまとめる。 $\theta_y$  (EL 方向) と  $\theta_z$  (AZ 方向) の pulse 値はそれぞれ 1 pulse =  $1.8''$ 、 $3.6''$  に対応しているため、これらを掛けたものが、実際の光軸位置となる。また、Q3 を U-side において測定したものに関しては、望遠鏡を回して測定しているため、Q1 が U-side にある時と同じになるように回転補正をしている。

図 4.17 には、今回の光軸測定で得られた各クアドラント光軸位置での有効面積と望遠鏡光軸での有効面積の比較をしている。通常、それぞれのクアドラント光軸で測定した方が有効面積は大きくでるはずであるが、望遠鏡光軸の方が大きい傾向にある。しかし、どれも誤差の範囲内で一致しており、数十秒程度のずれでは、ほとんど有効面積に効いてこないことがわかる。



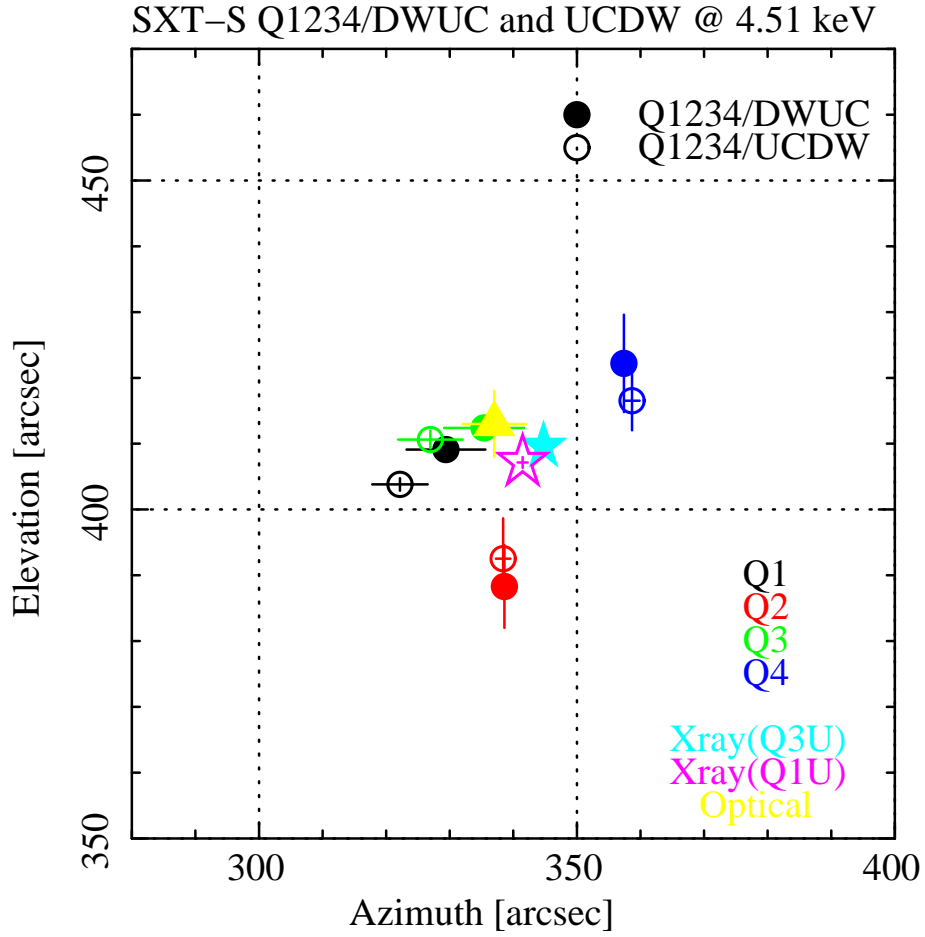


図 4.29: X 線光軸のまとめ

表 4.11: Q1U positon : Ti-K $\alpha$ ,  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-4'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+4'$ [cm $^2$ ]
Q1U	77.42 $\pm$ 0.36	114.33 $\pm$ 0.48	73.00 $\pm$ 0.35
Q2C	109.70 $\pm$ 0.46	116.60 $\pm$ 0.48	107.39 $\pm$ 0.46
Q3D	75.22 $\pm$ 0.35	109.97 $\pm$ 0.46	74.47 $\pm$ 0.35
Q4W	103.40 $\pm$ 0.44	112.69 $\pm$ 0.47	104.00 $\pm$ 0.44
Average	91.44 $\pm$ 0.20	113.40 $\pm$ 0.24	89.72 $\pm$ 0.20
Total	365.74 $\pm$ 0.81	453.59 $\pm$ 0.95	358.86 $\pm$ 0.81

表 4.12: Q1U positon : Ti-K $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-4'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+4'$ [cm $^2$ ]
Q1U	103.92 $\pm$ 0.44	114.33 $\pm$ 0.48	106.30 $\pm$ 0.45
Q2C	76.57 $\pm$ 0.35	116.60 $\pm$ 0.48	76.57 $\pm$ 0.36
Q3D	101.51 $\pm$ 0.44	109.97 $\pm$ 0.46	102.93 $\pm$ 0.44
Q4W	78.18 $\pm$ 0.37	112.69 $\pm$ 0.47	69.58 $\pm$ 0.34
Average	90.05 $\pm$ 0.20	113.40 $\pm$ 0.24	88.84 $\pm$ 0.20
Total	360.18 $\pm$ 0.80	453.59 $\pm$ 0.95	355.38 $\pm$ 0.80

表 4.13: Q3U positon : Ti-K $\alpha$ ,  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-4'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+4'$ [cm $^2$ ]
Q1D	105.47 $\pm$ 0.54	112.81 $\pm$ 0.57	104.81 $\pm$ 0.54
Q2W	74.29 $\pm$ 0.43	113.68 $\pm$ 0.57	76.26 $\pm$ 0.44
Q3U	100.12 $\pm$ 0.52	107.41 $\pm$ 0.55	100.19 $\pm$ 0.52
Q4C	66.89 $\pm$ 0.40	109.10 $\pm$ 0.55	78.67 $\pm$ 0.45
Average	86.69 $\pm$ 0.24	110.75 $\pm$ 0.28	89.98 $\pm$ 0.24
Total	346.77 $\pm$ 0.95	443.00 $\pm$ 1.12	359.93 $\pm$ 0.98

表 4.14: Q3U positon : Ti-K $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-4'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+4'$ [cm $^2$ ]
Q1D	73.45 $\pm$ 0.43	112.81 $\pm$ 0.57	74.69 $\pm$ 0.43
Q2W	104.14 $\pm$ 0.54	113.68 $\pm$ 0.57	107.22 $\pm$ 0.55
Q3U	73.97 $\pm$ 0.43	107.41 $\pm$ 0.55	73.87 $\pm$ 0.43
Q4C	103.29 $\pm$ 0.53	109.10 $\pm$ 0.55	102.27 $\pm$ 0.53
Average	88.71 $\pm$ 0.24	110.75 $\pm$ 0.28	89.51 $\pm$ 0.24
Total	354.85 $\pm$ 0.97	443.00 $\pm$ 1.12	358.05 $\pm$ 0.98

## 4.3 有効面積

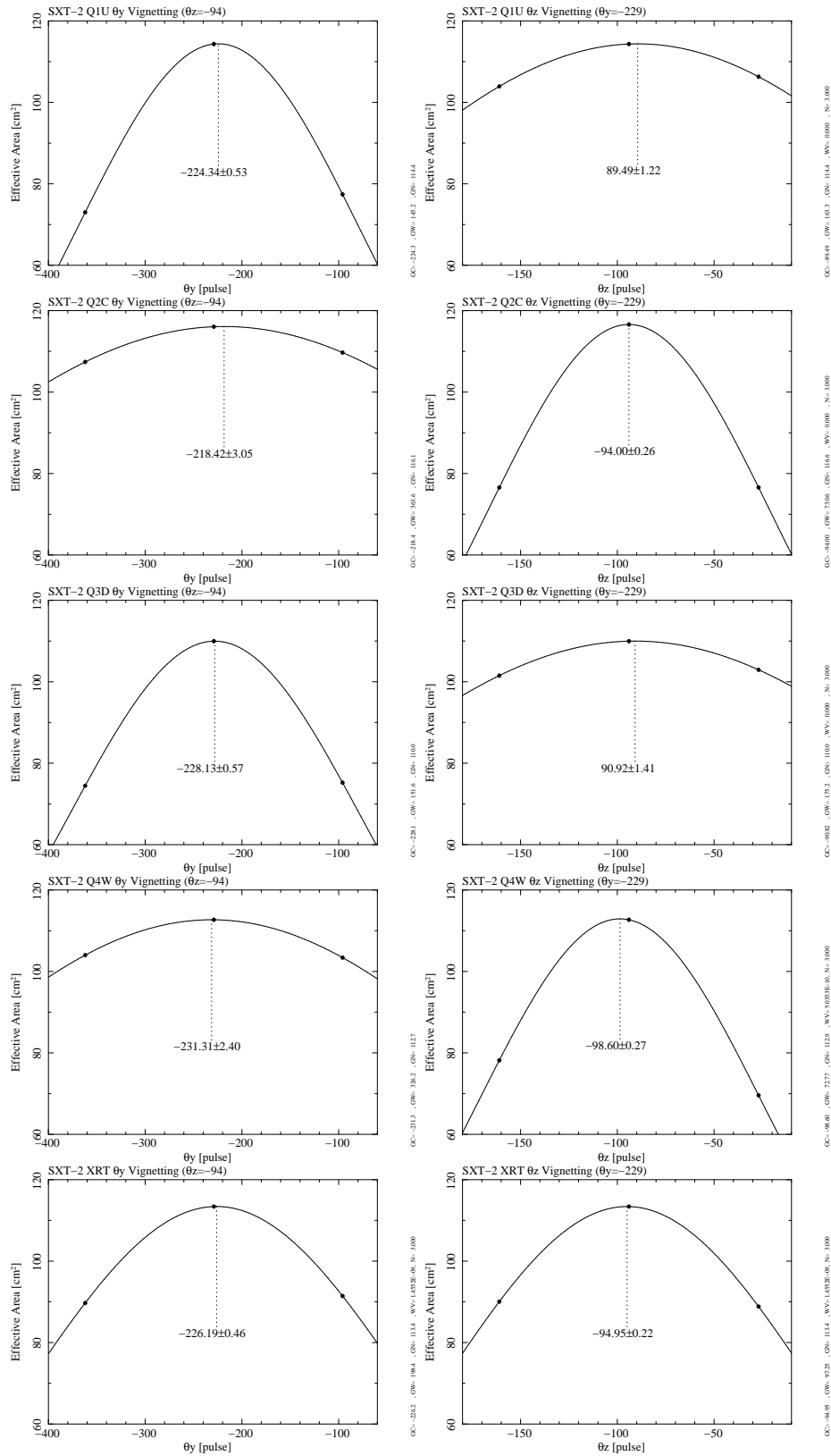


図 4.30: クアドラントごとの X 線光軸 (Q1234/UCDW)

### 4.3 有効面積

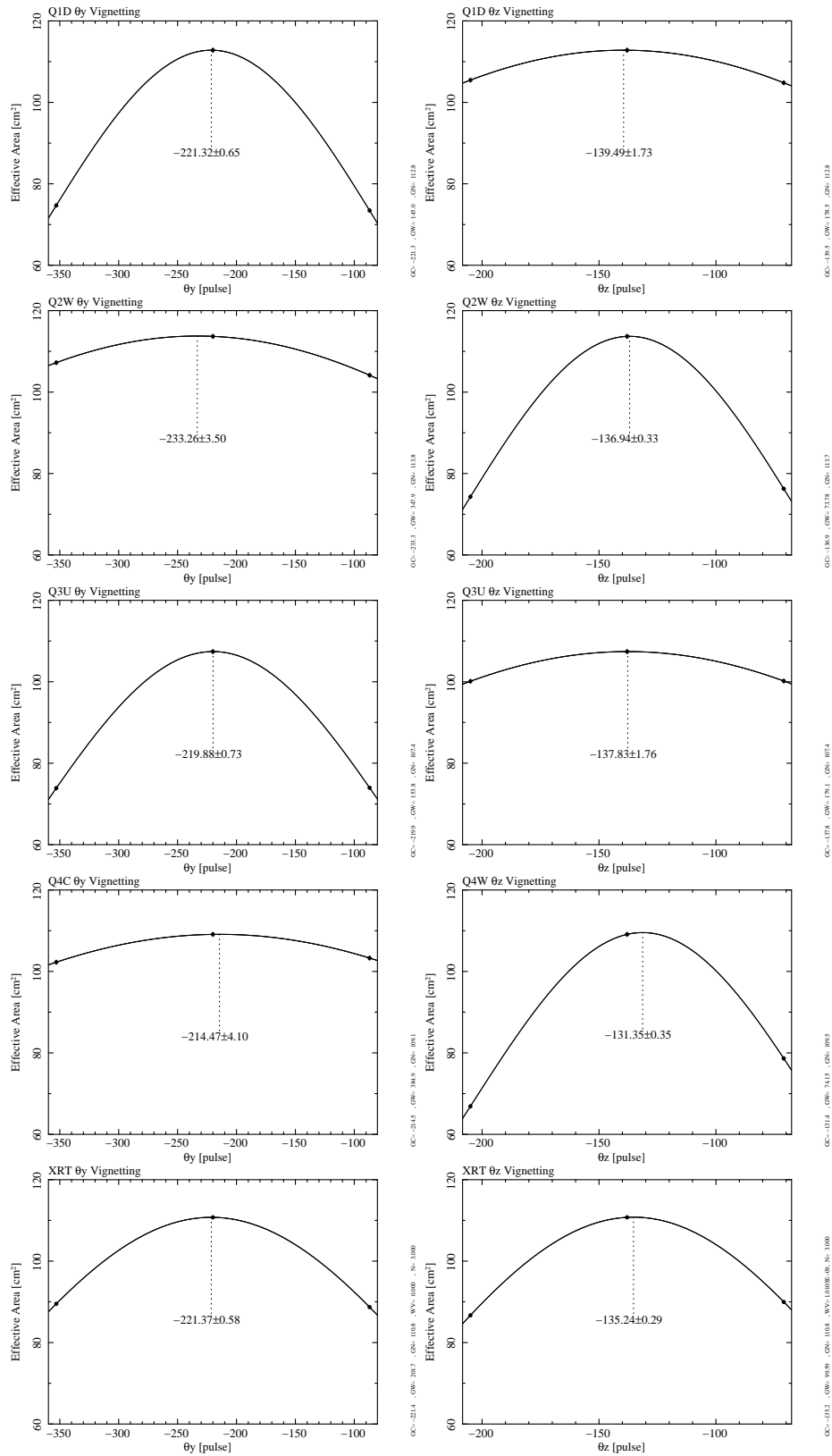


図 4.31: クアドラントごとの X 線光軸 (Q1234/DWUC)

### 4.3 有効面積

表 4.15: Q1234/UCDW の光軸 : 1 pulse =  $1.8''(\theta_y)$ 、 $3.6''(\theta_z)$  に対応。

	$\theta_y$ (pulse)	$\theta_y$ (EL)	$\theta_z$ (pulse)	$\theta_z$ (AZ)	
Q1U	$-224.34 \pm 0.53$	$403.74 \pm 0.95''$	$-89.49 \pm 1.22$	$322.16 \pm 4.39''$	
Q2C	$-218.42 \pm 3.05$	$393.16 \pm 5.49''$	$-94.00 \pm 0.26$	$338.40 \pm 0.94''$	
Q3D	$-228.13 \pm 0.57$	$410.64 \pm 1.03''$	$-90.92 \pm 1.41$	$327.31 \pm 5.08''$	
Q4W	$-231.31 \pm 2.40$	$416.36 \pm 4.32''$	$-98.60 \pm 0.27$	$354.96 \pm 0.97''$	
平均	$-225.57 \pm 0.99$	$406.03 \pm 1.78''$	$-93.25 \pm 0.48$	$335.70 \pm 1.73''$	
合計	$-226.19 \pm 0.46$	$407.14 \pm 0.83''$	$-94.95 \pm 0.22$	$341.82 \pm 0.79''$	望遠鏡光軸
可視光光軸	-229	$413''$	-94	$337''$	全面 QT の平均法線

表 4.16: Q1234/DWUC の光軸 : 1 pulse =  $1.8''(\theta_y)$ 、 $3.6''(\theta_z)$  に対応。

	$\theta_y$ (pulse)	$\theta_y$ (EL)	$\theta_z$ (pulse)	$\theta_z$ (AZ)	
Q1D	$-221.32 \pm 0.65$	$398.38 \pm 1.17''$	$-139.49 \pm 1.73$	$502.16 \pm 6.23''$	
Q2W	$-233.26 \pm 3.05$	$419.87 \pm 5.49''$	$-136.94 \pm 0.33$	$492.98 \pm 1.19''$	
Q3U	$-219.88 \pm 0.73$	$395.78 \pm 1.31''$	$-137.83 \pm 1.76$	$496.19 \pm 6.34''$	
Q4C	$-214.47 \pm 4.10$	$386.05 \pm 7.38''$	$-131.35 \pm 0.35$	$472.86 \pm 1.26''$	
平均	$-222.23 \pm 1.37$	$400.01 \pm 2.47''$	$-136.40 \pm 0.63$	$491.04 \pm 2.27''$	
合計	$-221.37 \pm 0.58$	$398.45 \pm 1.04''$	$-135.24 \pm 0.29$	$486.86 \pm 1.04''$	望遠鏡光軸
可視光光軸	-219.56	$395.2''$	-138.39	$498.2''$	全面 QT の平均法線
Q1(D U)		$409.1 \pm 1.2''$		$329.4 \pm 6.2''$	
Q2(W C)		$388.3 \pm 6.3''$		$338.6 \pm 1.2''$	
Q3(U D)		$412.4 \pm 1.3''$		$335.4 \pm 6.3''$	
Q4(C W)		$422.2 \pm 7.4''$		$357.4 \pm 1.3''$	
合計		$409.5 \pm 1.0''$		$344.7 \pm 1.0''$	望遠鏡光軸
可視光光軸		$413''$		$337''$	全面 QT の平均法線

表 4.17: クアドラント・望遠鏡光軸における各クアドラントの有効面積の比較

	Q1U [ $\text{cm}^2$ ]	Q2C [ $\text{cm}^2$ ]	Q3D [ $\text{cm}^2$ ]	Q4W [ $\text{cm}^2$ ]	Average [ $\text{cm}^2$ ]	Total [ $\text{cm}^2$ ]
QT 光軸	$113.76 \pm 0.47$	$116.23 \pm 0.43$	$109.72 \pm 0.46$	$113.42 \pm 0.43$	$113.28 \pm 0.22$	$453.13 \pm 0.90$
XRT 光軸	$114.33 \pm 0.48$	$116.60 \pm 0.48$	$109.97 \pm 0.46$	$112.69 \pm 0.47$	$113.40 \pm 0.24$	$453.59 \pm 0.95$

## 4.3 有効面積

### 4.3.3 測定結果：光軸における有効面積のエネルギー依存性

表 4.18: 測定条件

Config.	Q1U
Target	Al-K $\alpha$ , Ti-K $\alpha$ , Cu-K $\alpha$ , Pt-L $\alpha$ , Pt-L $\beta$ , Mo-K $\alpha$
Slit size	2 $\times$ 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	P.C.
angle	0'

ここでは、有効面積のエネルギー依存性の結果をまとめる。この測定では、望遠鏡光軸である  $(\theta_y, \theta_z) = (-229, -94)$  の位置で、Al-K $\alpha$ (1.49 keV)、Ti-K $\alpha$ (4.51 keV)、Cu-K $\alpha$ (8.04 keV)、Pt-L $\alpha$ (9.44 keV)、Pt-L $\beta$ (11.07 keV)、Mo-K $\alpha$ (17.48 keV) の 6 色で測定を行う。測定条件の詳細は表 4.18 に示す。

図 4.37 に、本測定で得られた結果のまとめプロットを示す。また表 4.19 には実際に得られた各エネルギーでの有効面積を示している。比較対象として、図には SXT の理想的な有効面積もプロットしてある。実線が Debye-Waller モデルで粗さ 4 Å を仮定したもので、破線がそのモデルの 80 % の有効面積を示している。実際の測定結果は、モデルの 80 % とよく似た値を示していることがわかる。各クアドラントの比較としては、Q3 が各エネルギーで多少他のクアドラントよりも有効面積が低くでている。クアドラントの平均有効面積と比べると、数%程度小さいという結果になっている。SXT1 台の有効面積は 1 keV で 450 cm<sup>2</sup>、6 keV で 390 cm<sup>2</sup> の要求値が与えられている (図 4.37 の水色の点)。今回の測定では、輝線エネルギーを用いているため、直接そのエネルギーでの有効面積は測れていないが、その前後のエネルギーでの測定結果から、SXT-S は要求値を十分満たしているといえる。また、図 4.37 の緑のデータは、*Suzaku* 衛星の XRT の有効面積を示している。これと比べると、SXT-S は 1.3-1.5 倍程度有効面積が大きく、望遠鏡としての性能は向上していることがわかる。

### 4.3 有効面積

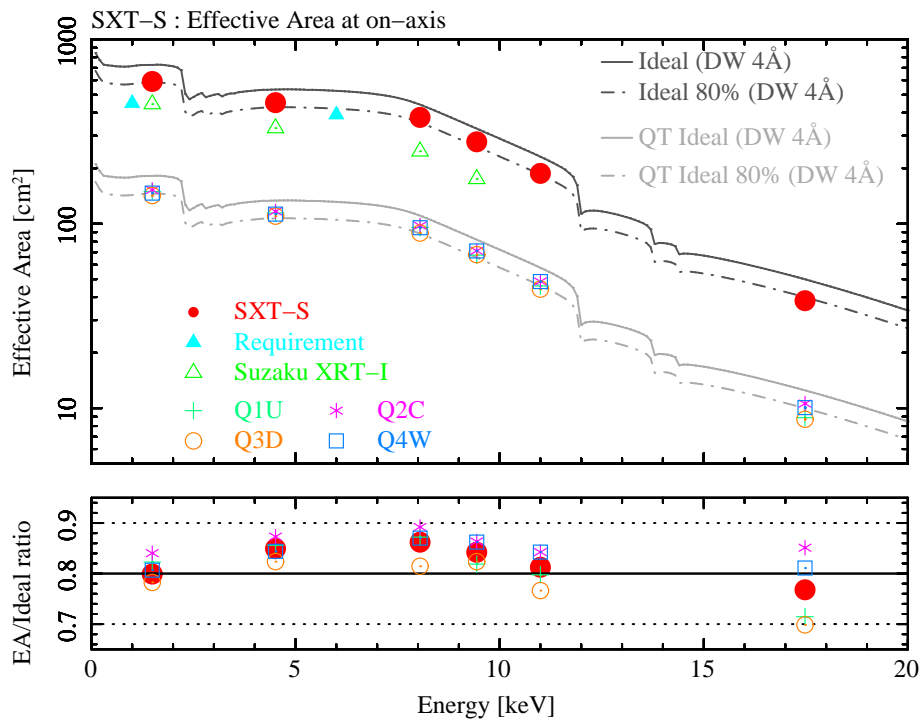


図 4.32: SXT-S の有効面積のエネルギー依存性。赤 : 望遠鏡全面の有効面積、水色 : SXT 要求値、緑 : *Suzaku* XRT、緑十字 : Q1U、マゼンタ米印 : Q2C、オレンジ : Q3D、青 : Q4W。実線は Debye-Waller モデルで粗さ 4 Å を仮定した理想的な有効面積。破線はその 80 %。下段には、理想的な有効面積との比を示している。

表 4.19: 望遠鏡光軸における各 Quadrant の有効面積

	Q1U [cm <sup>2</sup> ]	Q2C [cm <sup>2</sup> ]	Q3D [cm <sup>2</sup> ]	Q4W [cm <sup>2</sup> ]	Average [cm <sup>2</sup> ]	Total [cm <sup>2</sup> ]
Al-K $\alpha$	149.39 $\pm$ 0.55	152.55 $\pm$ 0.50	142.11 $\pm$ 0.53	146.50 $\pm$ 0.49	147.64 $\pm$ 0.26	590.55 $\pm$ 1.04
Ti-K $\alpha$	114.33 $\pm$ 0.48	116.60 $\pm$ 0.48	109.97 $\pm$ 0.46	112.69 $\pm$ 0.47	113.40 $\pm$ 0.24	453.59 $\pm$ 0.95
Cu-K $\alpha$	95.42 $\pm$ 0.25	97.56 $\pm$ 0.31	89.05 $\pm$ 0.24	95.19 $\pm$ 0.31	94.31 $\pm$ 0.14	377.22 $\pm$ 0.56
Pt-L $\alpha$	67.58 $\pm$ 0.27	71.28 $\pm$ 0.26	67.99 $\pm$ 0.27	71.24 $\pm$ 0.26	69.52 $\pm$ 0.13	278.09 $\pm$ 0.53
Pt-L $\beta$	46.03 $\pm$ 0.21	48.64 $\pm$ 0.21	44.19 $\pm$ 0.21	48.61 $\pm$ 0.21	46.87 $\pm$ 0.11	187.47 $\pm$ 0.42
Mo-K $\alpha$	8.88 $\pm$ 0.10	10.59 $\pm$ 0.11	8.71 $\pm$ 0.10	10.07 $\pm$ 0.11	9.56 $\pm$ 0.05	38.25 $\pm$ 0.21

### 4.3 有効面積

#### 4.3.4 測定結果：有効面積の入射角依存性

多色の X 線による有効面積の入射角依存性と Ti-K $\alpha$  をもちいた斜め Vignetting の結果をまとめる。

多色の X 線による有効面積の入射角依存性

表 4.20: 測定条件

Config.	Q1U
Target	Al-K $\alpha$ , Ti-K $\alpha$ , Cu-K $\alpha$ , Pt-L $\alpha$ , Pt-L $\beta$
Slit size	2 $\times$ 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	P.C.
angle	0', $\pm 1'$

多色の X 線による有効面積の入射角依存性は、Al-K $\alpha$ (1.49 keV)、Ti-K $\alpha$ (4.51 keV)、Cu-K $\alpha$ (8.04 keV)、Pt-L $\alpha$ (9.44 keV)、Pt-L $\beta$ (11.07 keV) の 5 色を用いて測定を行い、入射角度は、 $\pm 1'$  で振っている。測定条件の詳細は表 4.20 にまとめる。

図 4.33 に、測定結果をまとめる。このプロットは、各エネルギーの Vignetting 測定による結果を光軸での有効面積で割ったものを示している。結果としては、 $\pm 1'$  の Vignetting では、エネルギーによって 1~4 % 程度の有効面積の減少があること、そのエネルギー依存性は、非常に良く似ていることが分かる。表 4.21~4.30 には、各エネルギーでの測定結果をまとめてある。

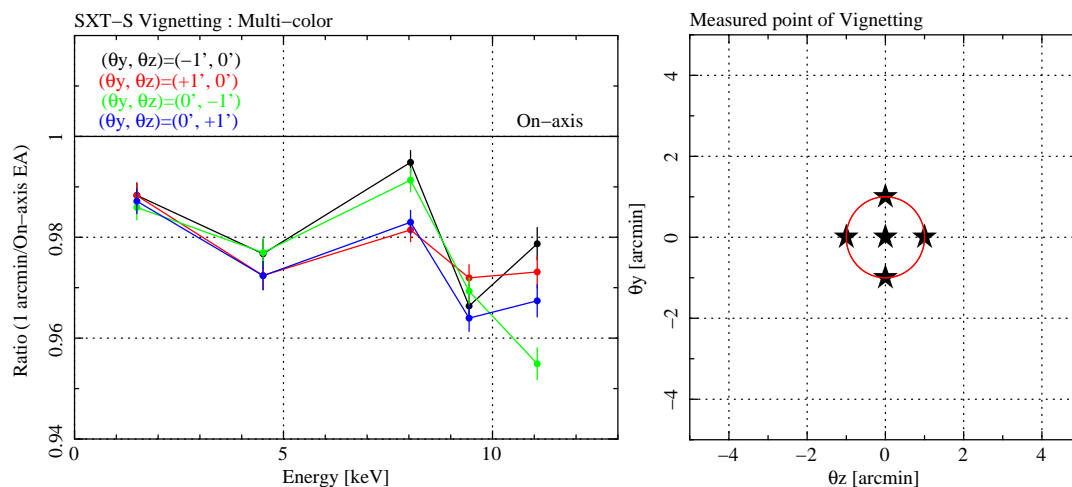


図 4.33: 多色の X 線による有効面積の入射角依存性。(左)–各 Vignetting 測定の結果を、光軸の有効面積で割ったもの。(右)–Vignetting の測定点。

### 4.3 有効面積

表 4.21: Al-K $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	149.39 $\pm$ 0.54	149.39 $\pm$ 0.55	143.76 $\pm$ 0.53
Q2C	149.57 $\pm$ 0.50	152.55 $\pm$ 0.50	150.97 $\pm$ 0.50
Q3D	141.06 $\pm$ 0.54	142.11 $\pm$ 0.53	141.42 $\pm$ 0.54
Q4W	147.63 $\pm$ 0.50	146.50 $\pm$ 0.49	147.47 $\pm$ 0.50
Average	145.91 $\pm$ 0.26	147.64 $\pm$ 0.26	145.91 $\pm$ 0.26
Total	583.65 $\pm$ 1.04	590.55 $\pm$ 1.04	583.62 $\pm$ 1.04

表 4.22: Al-K $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	148.92 $\pm$ 0.55	149.39 $\pm$ 0.55	150.08 $\pm$ 0.55
Q2C	143.72 $\pm$ 0.48	152.55 $\pm$ 0.50	148.59 $\pm$ 0.50
Q3D	142.58 $\pm$ 0.54	142.11 $\pm$ 0.53	143.50 $\pm$ 0.54
Q4W	147.01 $\pm$ 0.50	146.50 $\pm$ 0.49	140.79 $\pm$ 0.48
Average	145.56 $\pm$ 0.26	147.64 $\pm$ 0.26	145.74 $\pm$ 0.26
Total	582.23 $\pm$ 1.04	590.55 $\pm$ 1.04	582.96 $\pm$ 1.04

表 4.23: Ti-K $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	109.87 $\pm$ 0.46	114.33 $\pm$ 0.48	109.66 $\pm$ 0.46
Q2C	116.49 $\pm$ 0.44	116.60 $\pm$ 0.48	115.20 $\pm$ 0.43
Q3D	105.49 $\pm$ 0.45	109.97 $\pm$ 0.46	104.81 $\pm$ 0.44
Q4W	111.18 $\pm$ 0.42	112.69 $\pm$ 0.47	111.41 $\pm$ 0.42
Average	110.76 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	110.27 $\pm$ 0.22
Total	443.03 $\pm$ 0.89	453.59 $\pm$ 0.95	441.08 $\pm$ 0.88

表 4.24: Ti-K $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	113.00 $\pm$ 0.47	114.33 $\pm$ 0.48	112.73 $\pm$ 0.47
Q2C	109.97 $\pm$ 0.42	116.60 $\pm$ 0.48	113.88 $\pm$ 0.43
Q3D	108.24 $\pm$ 0.46	109.97 $\pm$ 0.46	108.81 $\pm$ 0.46
Q4W	111.93 $\pm$ 0.43	112.69 $\pm$ 0.47	105.64 $\pm$ 0.41
Average	110.79 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	110.27 $\pm$ 0.22
Total	443.14 $\pm$ 0.89	453.59 $\pm$ 0.95	441.06 $\pm$ 0.87

表 4.25: Cu-K $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	92.52 $\pm$ 0.36	95.42 $\pm$ 0.25	92.92 $\pm$ 0.35
Q2C	98.36 $\pm$ 0.35	97.56 $\pm$ 0.31	98.04 $\pm$ 0.36
Q3D	87.33 $\pm$ 0.34	89.05 $\pm$ 0.24	85.96 $\pm$ 0.34
Q4W	97.07 $\pm$ 0.33	95.19 $\pm$ 0.31	93.31 $\pm$ 0.33
Average	93.82 $\pm$ 0.17	94.31 $\pm$ 0.14	92.56 $\pm$ 0.17
Total	375.28 $\pm$ 0.69	377.22 $\pm$ 0.56	370.23 $\pm$ 0.69

表 4.26: Cu-K $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	94.21 $\pm$ 0.35	95.42 $\pm$ 0.25	96.36 $\pm$ 0.36
Q2C	92.56 $\pm$ 0.33	97.56 $\pm$ 0.31	96.31 $\pm$ 0.36
Q3D	91.63 $\pm$ 0.35	89.05 $\pm$ 0.24	90.15 $\pm$ 0.35
Q4W	95.55 $\pm$ 0.34	95.19 $\pm$ 0.31	87.98 $\pm$ 0.32
Average	93.49 $\pm$ 0.17	94.31 $\pm$ 0.14	92.70 $\pm$ 0.17
Total	373.95 $\pm$ 0.69	377.22 $\pm$ 0.56	370.80 $\pm$ 0.70

表 4.27: Pt-L $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	65.28 $\pm$ 0.27	67.58 $\pm$ 0.27	66.58 $\pm$ 0.27
Q2C	71.87 $\pm$ 0.25	71.28 $\pm$ 0.26	70.54 $\pm$ 0.25
Q3D	61.73 $\pm$ 0.25	67.99 $\pm$ 0.27	62.08 $\pm$ 0.25
Q4W	69.86 $\pm$ 0.25	71.24 $\pm$ 0.26	71.09 $\pm$ 0.25
Average	67.19 $\pm$ 0.13	69.52 $\pm$ 0.13	67.57 $\pm$ 0.13
Total	268.74 $\pm$ 0.51	278.09 $\pm$ 0.53	270.29 $\pm$ 0.51

表 4.28: Pt-L $\alpha$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	68.40 $\pm$ 0.28	67.58 $\pm$ 0.27	67.99 $\pm$ 0.28
Q2C	67.17 $\pm$ 0.25	71.28 $\pm$ 0.26	68.68 $\pm$ 0.25
Q3D	64.98 $\pm$ 0.26	67.99 $\pm$ 0.27	66.38 $\pm$ 0.27
Q4W	69.01 $\pm$ 0.25	71.24 $\pm$ 0.26	65.02 $\pm$ 0.24
Average	67.39 $\pm$ 0.13	69.52 $\pm$ 0.13	67.02 $\pm$ 0.13
Total	269.56 $\pm$ 0.52	278.09 $\pm$ 0.53	268.07 $\pm$ 0.52

表 4.29: Pt-L $\beta$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	42.41 $\pm$ 0.21	46.03 $\pm$ 0.21	43.94 $\pm$ 0.21
Q2C	48.79 $\pm$ 0.22	48.64 $\pm$ 0.21	49.14 $\pm$ 0.22
Q3D	43.94 $\pm$ 0.22	44.19 $\pm$ 0.21	40.68 $\pm$ 0.21
Q4W	48.34 $\pm$ 0.23	48.61 $\pm$ 0.21	48.67 $\pm$ 0.23
Average	45.87 $\pm$ 0.11	46.87 $\pm$ 0.11	45.61 $\pm$ 0.11
Total	183.48 $\pm$ 0.44	187.47 $\pm$ 0.42	182.43 $\pm$ 0.44

表 4.30: Pt-L $\beta$ ,  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	$-1'$ [cm $^2$ ]	$0'$ [cm $^2$ ]	$+1'$ [cm $^2$ ]
Q1U	46.00 $\pm$ 0.22	46.03 $\pm$ 0.21	45.84 $\pm$ 0.22
Q2C	44.67 $\pm$ 0.21	48.64 $\pm$ 0.21	46.95 $\pm$ 0.22
Q3D	43.02 $\pm$ 0.22	44.19 $\pm$ 0.21	44.04 $\pm$ 0.22
Q4W	45.33 $\pm$ 0.22	48.61 $\pm$ 0.21	44.53 $\pm$ 0.22
Average	44.76 $\pm$ 0.11	46.87 $\pm$ 0.11	45.34 $\pm$ 0.11
Total	179.02 $\pm$ 0.44	187.47 $\pm$ 0.42	181.36 $\pm$ 0.44

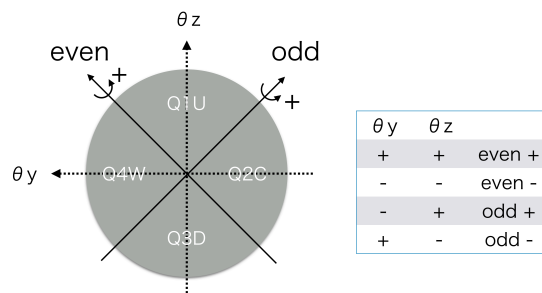


### 4.3 有効面積

図 4.34: 測定条件

Config.	Q1U
Target	Ti-K $\alpha$
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	P.C.
angle	斜め 45 度に 0', ±1', ±2'

図 4.35: 45 度斜め Vignetting の軸の定義



#### Ti-K $\alpha$ をもちいた 45 度斜め Vignetting

45 度斜め Vignetting は Ti-K $\alpha$  を用いて、入射角度は 0', ±1', ±2' で行う。斜めに傾けるためには、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  を同時に傾ける。斜め方向に 1' 傾けるには  $\theta_y$ 、 $\theta_z=0.71'$ 、斜め方向に 2' 傾けるには  $\theta_y$ 、 $\theta_z=1.41'$  傾けることになる。斜め Vignetting の傾ける軸の定義は、even 方向と odd 方向とし、図 4.35 に示すように定義した。測定条件の詳細は表 4.34 に示す。

図 4.36 に、測定結果をまとめる。図には  $\theta_y$ 、 $\theta_z$ 、even、odd 方向それぞれで 1' と 2' 傾けた際の、有効面積と光軸の有効面積との比をプロットしている。各 Vignetting 方向は図 4.36 右に定義している。結果としては、傾ける方向によって有効面積の減少分は同程度であり、1' の傾きでは 3 % 程度、2' の時は 7-8 % の減少になることが分かった。実際にこの測定によって得られた有効面積は、表 4.31~4.34 に示す。

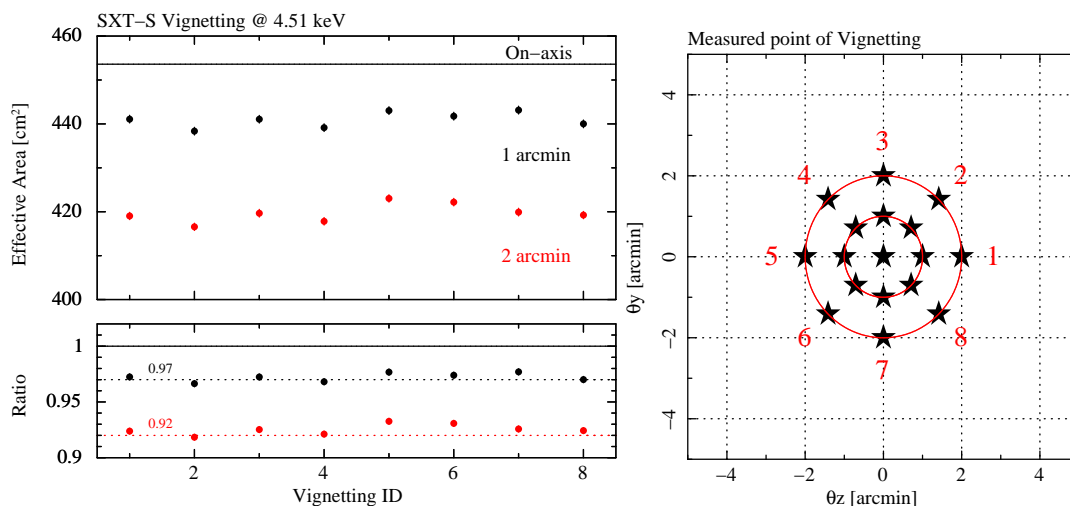


図 4.36: Ti-K $\alpha$  をもちいた、Vignetting 方向による有効面積の比較。(左)–Vignetting 点における有効面積。下段は光軸における有効面積との比を示す。(右)–Vignetting の測定点と Vignetting 方向の ID。

#### 4.3 有効面積

表 4.31: Ti-K $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_y$  軸

Offset Position ( $\theta_y$ )	-2' [cm <sup>2</sup> ]	-1' [cm <sup>2</sup> ]	0' [cm <sup>2</sup> ]	+1' [cm <sup>2</sup> ]	+2' [cm <sup>2</sup> ]
Q1U	101.06 $\pm$ 0.43	109.87 $\pm$ 0.46	114.33 $\pm$ 0.48	109.66 $\pm$ 0.46	98.19 $\pm$ 0.42
Q2C	114.39 $\pm$ 0.43	116.49 $\pm$ 0.44	116.60 $\pm$ 0.48	115.20 $\pm$ 0.43	113.12 $\pm$ 0.43
Q3D	97.49 $\pm$ 0.39	105.49 $\pm$ 0.45	109.97 $\pm$ 0.46	104.81 $\pm$ 0.44	97.88 $\pm$ 0.39
Q4W	110.09 $\pm$ 0.42	111.18 $\pm$ 0.42	112.69 $\pm$ 0.47	111.41 $\pm$ 0.42	109.84 $\pm$ 0.42
Average	105.76 $\pm$ 0.21	110.76 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	110.27 $\pm$ 0.22	104.76 $\pm$ 0.21
Total	423.03 $\pm$ 0.84	443.03 $\pm$ 0.89	453.59 $\pm$ 0.95	441.08 $\pm$ 0.88	419.03 $\pm$ 0.83

表 4.32: Ti-K $\alpha$  による Vignneting 測定 :  $\theta_z$  軸

Offset Position ( $\theta_z$ )	-2' [cm <sup>2</sup> ]	-1' [cm <sup>2</sup> ]	0' [cm <sup>2</sup> ]	+1' [cm <sup>2</sup> ]	+2' [cm <sup>2</sup> ]
Q1U	109.45 $\pm$ 0.46	113.00 $\pm$ 0.47	114.33 $\pm$ 0.48	112.73 $\pm$ 0.47	111.02 $\pm$ 0.46
Q2C	100.87 $\pm$ 0.40	109.97 $\pm$ 0.42	116.60 $\pm$ 0.48	113.88 $\pm$ 0.43	104.04 $\pm$ 0.41
Q3D	106.97 $\pm$ 0.45	108.24 $\pm$ 0.46	109.97 $\pm$ 0.46	108.81 $\pm$ 0.46	108.62 $\pm$ 0.46
Q4W	102.62 $\pm$ 0.44	111.93 $\pm$ 0.43	112.69 $\pm$ 0.47	105.64 $\pm$ 0.41	95.98 $\pm$ 0.42
Average	104.98 $\pm$ 0.22	110.79 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	110.27 $\pm$ 0.22	104.92 $\pm$ 0.22
Total	419.91 $\pm$ 0.88	443.14 $\pm$ 0.89	453.59 $\pm$ 0.95	441.06 $\pm$ 0.87	419.66 $\pm$ 0.88

表 4.33: Ti-K $\alpha$  による Vignneting 測定 : even

Offset Position (even)	-2' [cm <sup>2</sup> ]	-1' [cm <sup>2</sup> ]	0' [cm <sup>2</sup> ]	+1' [cm <sup>2</sup> ]	+2' [cm <sup>2</sup> ]
Q1U	105.80 $\pm$ 0.45	110.97 $\pm$ 0.47	114.33 $\pm$ 0.48	110.79 $\pm$ 0.47	104.59 $\pm$ 0.41
Q2C	106.08 $\pm$ 0.41	111.92 $\pm$ 0.42	116.60 $\pm$ 0.48	114.78 $\pm$ 0.43	107.86 $\pm$ 0.41
Q3D	103.83 $\pm$ 0.44	107.48 $\pm$ 0.46	109.97 $\pm$ 0.46	106.51 $\pm$ 0.45	103.72 $\pm$ 0.44
Q4W	106.47 $\pm$ 0.41	111.39 $\pm$ 0.43	112.69 $\pm$ 0.47	106.27 $\pm$ 0.41	100.39 $\pm$ 0.39
Average	105.55 $\pm$ 0.21	110.44 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	109.59 $\pm$ 0.22	104.14 $\pm$ 0.21
Total	422.18 $\pm$ 0.86	441.76 $\pm$ 0.89	453.59 $\pm$ 0.95	438.35 $\pm$ 0.88	416.56 $\pm$ 0.83

表 4.34: Ti-K $\alpha$  による Vignneting 測定 : odd

Offset Position (odd)	-2' [cm <sup>2</sup> ]	-1' [cm <sup>2</sup> ]	0' [cm <sup>2</sup> ]	+1' [cm <sup>2</sup> ]	+2' [cm <sup>2</sup> ]
Q1U	103.30 $\pm$ 0.40	110.05 $\pm$ 0.46	114.33 $\pm$ 0.48	111.26 $\pm$ 0.47	105.92 $\pm$ 0.45
Q2C	106.19 $\pm$ 0.41	111.79 $\pm$ 0.42	116.60 $\pm$ 0.48	115.53 $\pm$ 0.43	108.91 $\pm$ 0.42
Q3D	102.25 $\pm$ 0.44	105.97 $\pm$ 0.45	109.97 $\pm$ 0.46	106.18 $\pm$ 0.45	102.10 $\pm$ 0.44
Q4W	107.50 $\pm$ 0.41	112.20 $\pm$ 0.43	112.69 $\pm$ 0.47	106.17 $\pm$ 0.41	100.89 $\pm$ 0.40
Average	104.81 $\pm$ 0.21	110.00 $\pm$ 0.22	113.40 $\pm$ 0.24	109.79 $\pm$ 0.22	104.46 $\pm$ 0.21
Total	419.24 $\pm$ 0.83	440.01 $\pm$ 0.88	453.59 $\pm$ 0.95	439.14 $\pm$ 0.88	417.82 $\pm$ 0.86

## 4.3 有効面積

### 4.3.5 まとめと SXT-I との比較

以下に、SXT-S の光軸での有効面積と SXT-I との比較を示す。結果としては、SXT-S の光軸における有効面積は要求値を満たしていることがわかり、*Suzaku* XRT と比べても、性能が向上していることが分かった。また、SXT-S と SXT-I では、SXT-S の方が Pt-L $\beta$  までのエネルギーで有効面積は  $\sim 1\text{--}3\%$  大きいことがわかった。

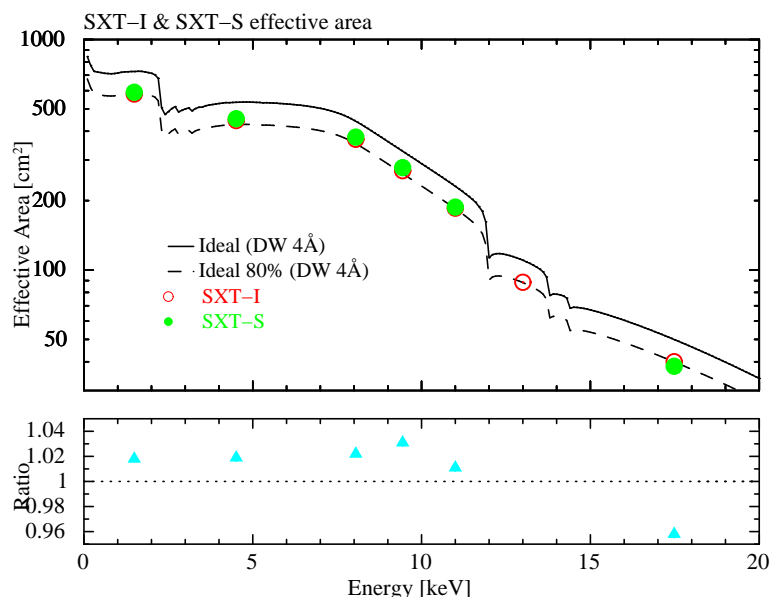


図 4.37: SXT-I と SXT-S の光軸での有効面積のエネルギー依存性の比較。下段には、SXT-S の有効面積と SXT-I の有効面積の比を示してある。

表 4.35: SXT-S と SXT-I の有効面積の比較

Quadrant (Config)	Al-K $\alpha$	Ti-K $\alpha$	Cu-K $\alpha$	Pt-L $\alpha$	Pt-L $\beta$	Pt-L $\gamma$	Mo-K $\alpha$
SXT-I Q1U	147.7 $\pm$ 0.5	113.1 $\pm$ 0.5	92.0 $\pm$ 0.3	67.6 $\pm$ 0.3	46.2 $\pm$ 0.2	22.7 $\pm$ 0.2	10.75 $\pm$ 0.1
SXT-I Q2C	146.8 $\pm$ 0.5	112.0 $\pm$ 0.5	94.0 $\pm$ 0.3	68.8 $\pm$ 0.3	47.8 $\pm$ 0.2	22.9 $\pm$ 0.2	10.13 $\pm$ 0.1
SXT-I Q3D	150.3 $\pm$ 0.5	112.2 $\pm$ 0.5	94.9 $\pm$ 0.3	69.3 $\pm$ 0.3	48.1 $\pm$ 0.2	22.9 $\pm$ 0.2	10.21 $\pm$ 0.1
SXT-I Q4W	140.6 $\pm$ 0.5	107.9 $\pm$ 0.4	88.3 $\pm$ 0.3	64.0 $\pm$ 0.2	43.5 $\pm$ 0.2	20.0 $\pm$ 0.2	8.94 $\pm$ 0.1
SXT-I 合計	580.4 $\pm$ 1.1	445.2 $\pm$ 0.9	369.1 $\pm$ 0.7	269.7 $\pm$ 0.5	185.5 $\pm$ 0.4	88.5 $\pm$ 0.5	40.0 $\pm$ 0.2
SXT-S Q1U	149.4 $\pm$ 0.6	114.3 $\pm$ 0.5	95.4 $\pm$ 0.3	67.6 $\pm$ 0.3	46.0 $\pm$ 0.2	—	8.9 $\pm$ 0.1
SXT-S Q2C	152.6 $\pm$ 0.5	116.6 $\pm$ 0.5	97.6 $\pm$ 0.3	71.3 $\pm$ 0.3	48.6 $\pm$ 0.2	—	10.6 $\pm$ 0.1
SXT-S Q3D	142.1 $\pm$ 0.5	110.0 $\pm$ 0.5	89.1 $\pm$ 0.2	68.0 $\pm$ 0.3	44.2 $\pm$ 0.2	—	8.7 $\pm$ 0.1
SXT-S Q4W	146.5 $\pm$ 0.5	112.7 $\pm$ 0.5	95.2 $\pm$ 0.3	71.2 $\pm$ 0.3	48.6 $\pm$ 0.2	—	10.1 $\pm$ 0.1
SXT-S 合計	590.6 $\pm$ 1.0	453.6 $\pm$ 1.0	377.2 $\pm$ 0.6	278.1 $\pm$ 0.5	187.5 $\pm$ 0.4	—	38.3 $\pm$ 0.2
SXT-S/I 比	1.018 $\pm$ 0.002	1.019 $\pm$ 0.003	1.022 $\pm$ 0.002	1.031 $\pm$ 0.003	1.011 $\pm$ 0.003	—	0.958 $\pm$ 0.003
Suzaku XRT-I	$\sim$ 445	$\sim$ 330	$\sim$ 247	$\sim$ 175	—	—	—

## 4.4 結像性能

### 4.4.1 測定項目と測定方法

#### 測定目的と測定項目

SXT は、有効面積の時に説明したように、入射 X 線のエネルギーが上がるほど、外側のミラーで反射できなくなってくる。そのため、入射 X 線が高エネルギーになればなるほど、望遠鏡内側のミラーしか反射しなくなり、外側のミラーの性能は効かなくなってくる。図 4.38 には、一回反射の際の、Ti-K $\alpha$  と Mo-K $\alpha$  の反射率の角度依存性の比較をのせた。実際の望遠鏡の場合は二回反射のため、反射率は二乗で効いてくる。このような結像性能のエネルギー依存性を調べることは、やはり応答関数構築に必要不可欠となる。また、SXT-S の焦点面検出器となる SXS は、視野がおおよそ  $3' \times 3'$  と非常に狭いとともに pixel 数も  $6 \times 6$  と非常にあらいため、軌道上で結像性能を評価するのは、非常に困難となってくる。そのため、地上較正試験の間に SXS によってどのようなイメージが得られるかを把握しておくことが必要となる。特に、off-axis イメージに関しては、地上で測定しておかなければ、理解が難しいものになってしまう。また、SXT-I の off-axis イメージに関しても、これまで取得されていなかった。SXT-I の場合は、焦点面検出器の視野の広さ (おおよそ  $38' \times 38'$ ) ゆえ、on-axis から外れた天体も検出することができる。この時、どの程度の性能が期待されるかを把握しておくことが、観測精度の向上につながる。これらの理由から、結像性能の測定として、以下の項目を行うこととした。

1. 光軸における結像性能のエネルギー依存性
2. off-axis におけるイメージ測定 (SXT-S & SXT-I)

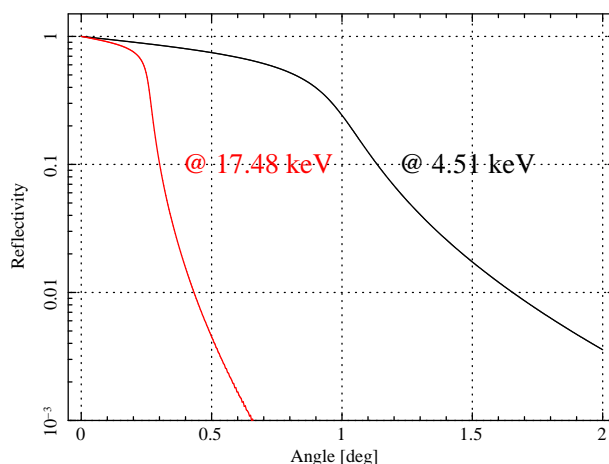


図 4.38: 1 回反射の際の、Ti-K $\alpha$  と Mo-K $\alpha$  の反射率の角度依存性。Au の厚みは 200 nm、粗さは 4 Å で計算したもの。

#### 測定方法と評価方法

測定には、有効面積の測定と同じラスタースキャンを用いる。ラスタースキャンで得られた各ラインのイメージをすべて足しあわせて、その輝度分布から結像性能を求める。結像性能の指標としては、Point Spread Function (PSF) と Half Power Diameter (HPD) をもちいる。

## 4.4 結像性能

### 4.4.2 測定結果：光軸における結像性能

表 4.36: 測定条件

Config.	Q1U
Target	Al-K $\alpha$ , Ti-K $\alpha$ , Cu-K $\alpha$ , Pt-L $\alpha$ , Pt-L $\beta$ , Mo-K $\alpha$
Slit size	2 $\times$ 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	CCD
angle	0'

光軸における結像性能は Al-K $\alpha$ , Ti-K $\alpha$ , Cu-K $\alpha$ , Pt-L $\alpha$ , Pt-L $\beta$ , Mo-K $\alpha$  の 6 色で測定を行った。測定条件の詳細は表 4.36 に示す。

図 4.39 に、各クアドラントの結像性能 (HPD) のエネルギー依存性を示す。結果として、Ti-K $\alpha$  では、結像性能は  $\sim 1.2'$  程度、全エネルギーでみても  $\sim 1.5'$  以下という結果となった。SXT の結像性能の要求値は、 $1.7'$  となっている。そのため、SXT-S の結像性能は要求値を十分に満たしていると言える。また、SXT-I では、Ti-K $\alpha$  で  $\sim 1.3'$  程度だったため、SXT-S の方が結像性能が良いということがわかった。

各クアドラントのイメージ、HPD、PSF、EEF は次以降のページに示す。

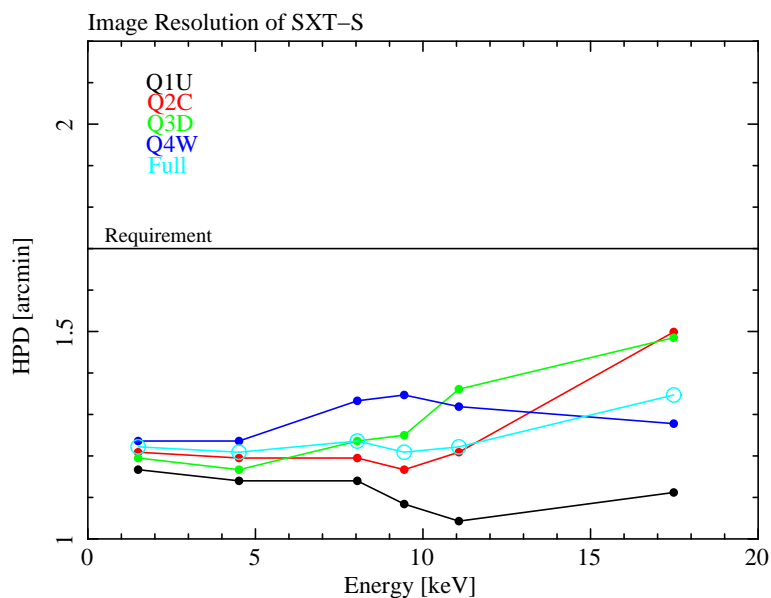


図 4.39: SXT-S の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性。黒：Q1U、赤：Q2C、緑：Q3D、青：Q4W、水色：望遠鏡全面の HPD。実線は要求値  $1.7'$  を示す。

# Q1U の各エネルギーによるイメージ測定結果

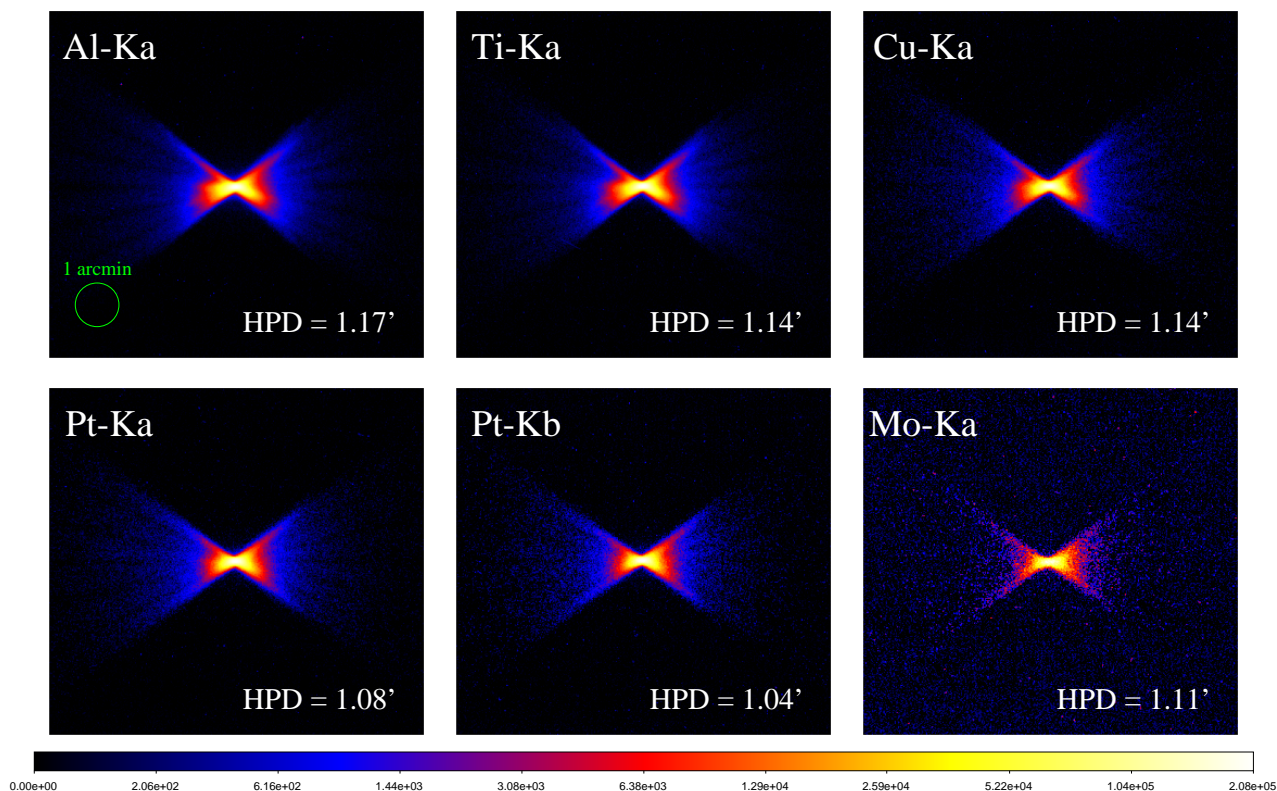


図 4.40: Q1U の各エネルギーにおけるイメージと HPD。

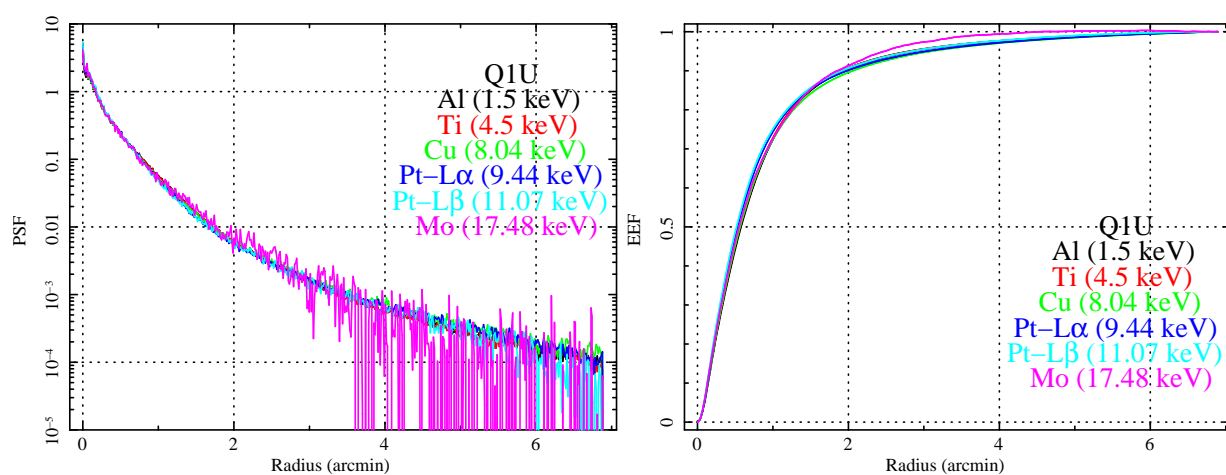


図 4.41: Q1U の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。



Q2C の各エネルギーによるイメージ測定結果

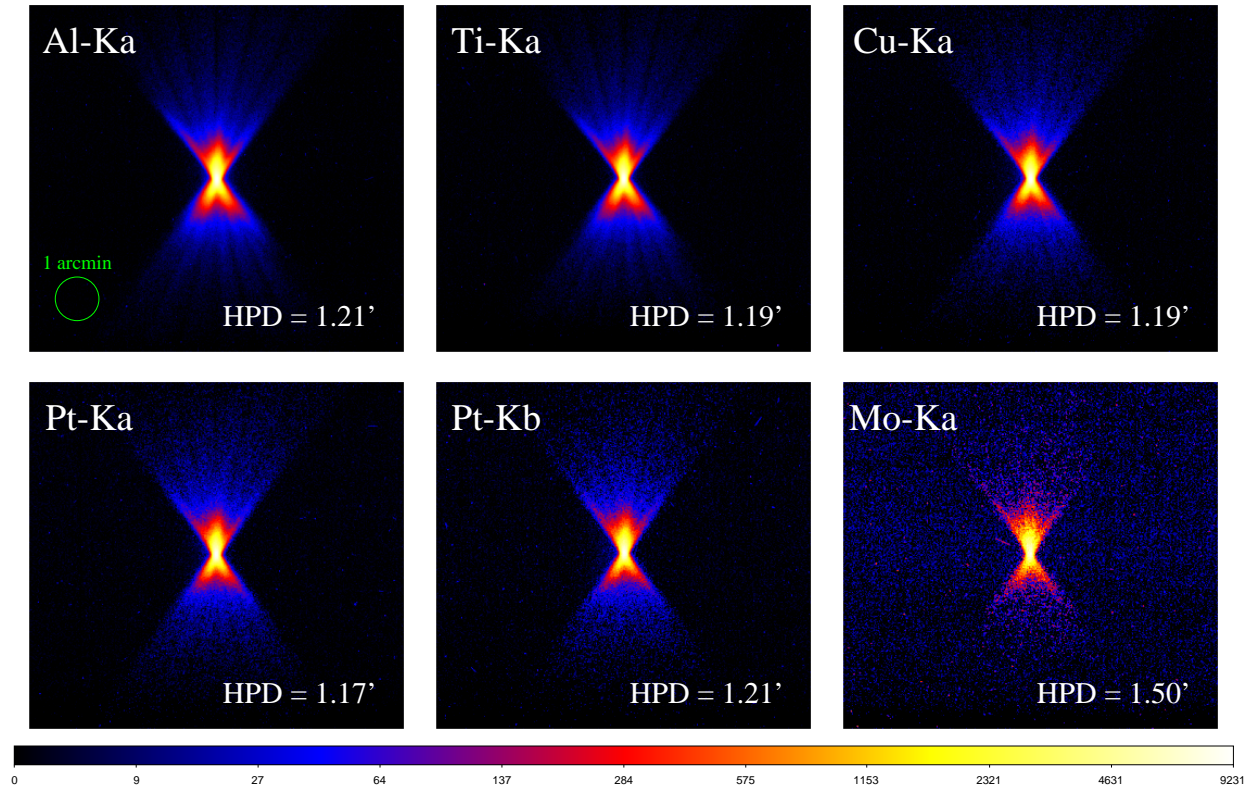
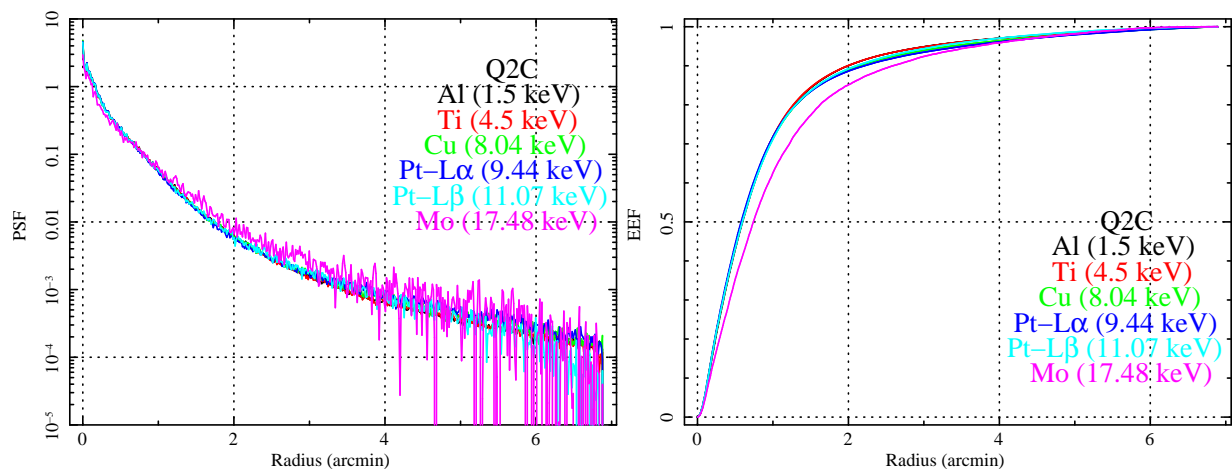


図 4.42: Q2C の各エネルギーにおけるイメージと HPD。


図 4.43: Q2C の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。

### Q3D の各エネルギーによるイメージ測定結果

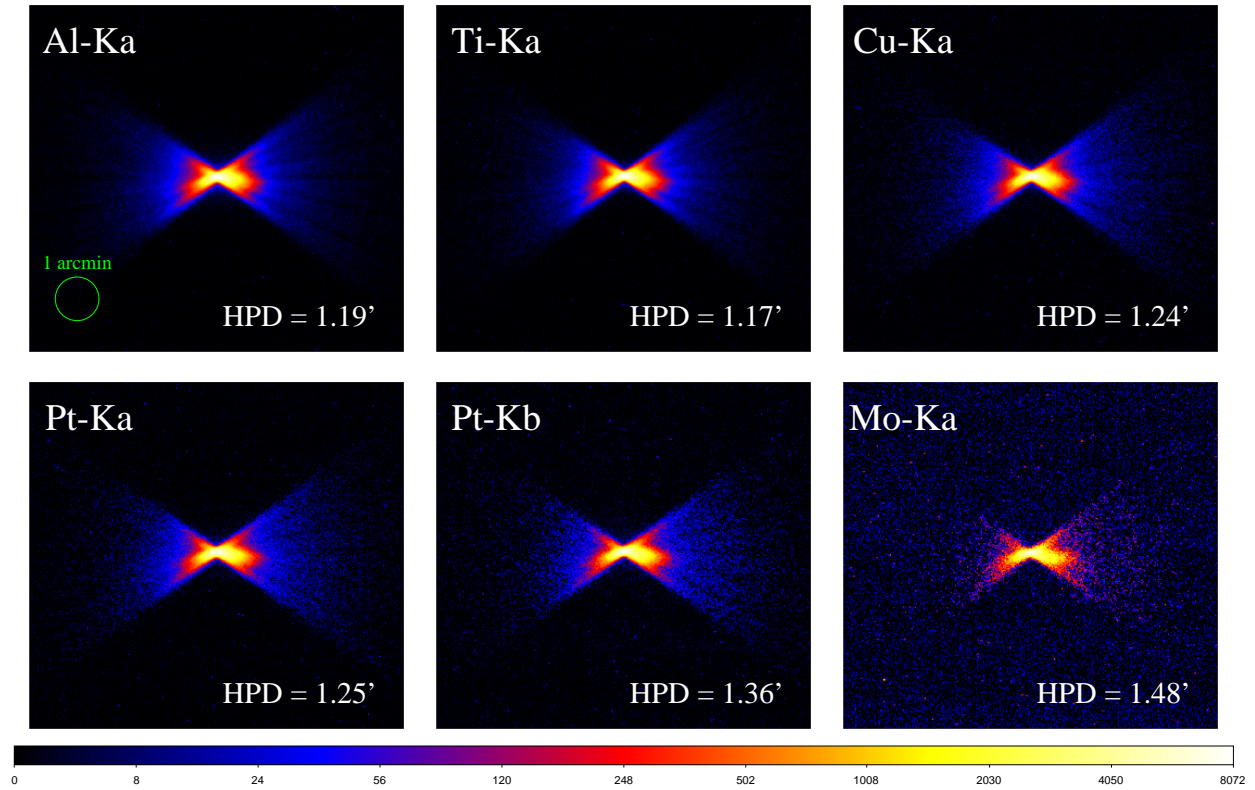


図 4.44: Q3D の各エネルギーにおけるイメージと HPD。

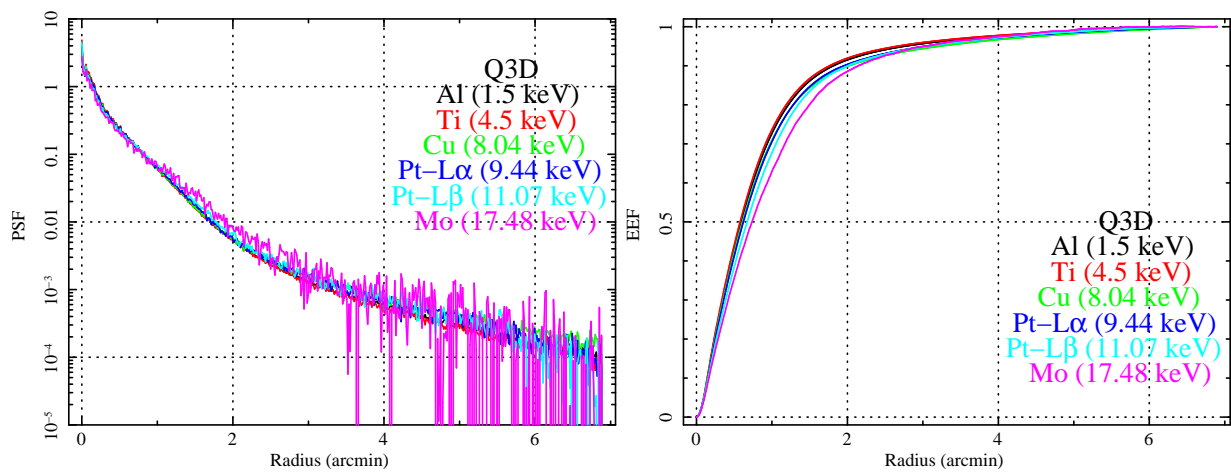


図 4.45: Q3D の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。



Q4W の各エネルギーによるイメージ測定結果

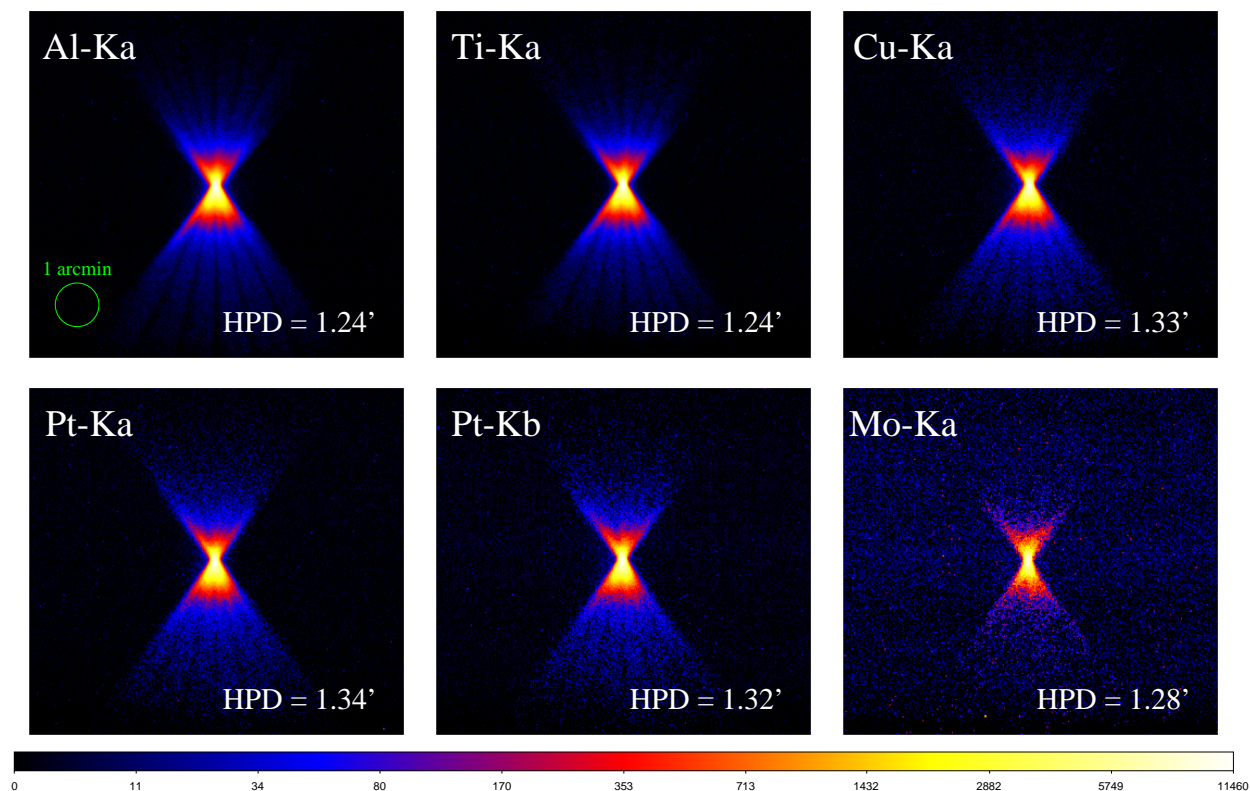
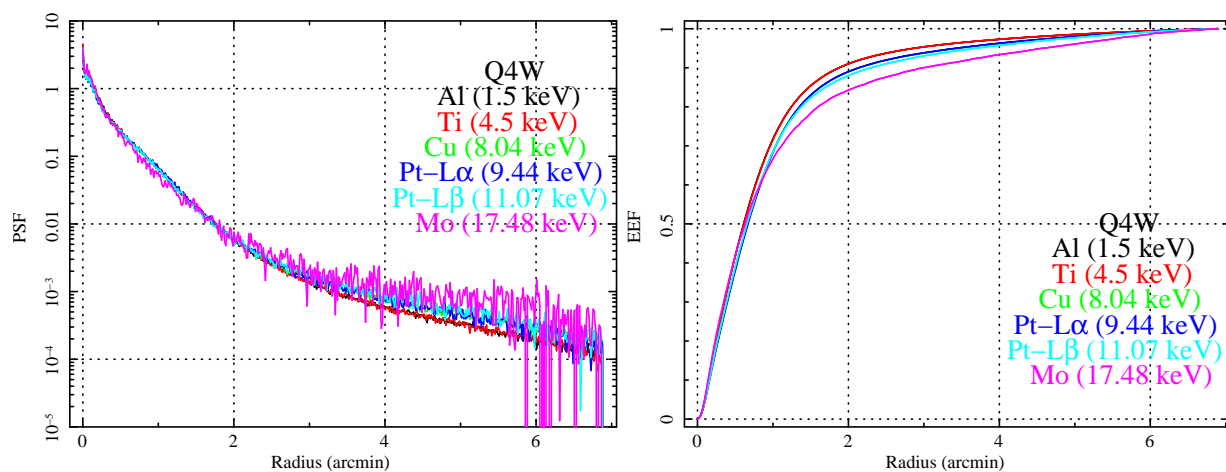


図 4.46: Q4W の各エネルギーにおけるイメージと HPD。


図 4.47: Q4W の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。

#### 4.4 結像性能

望遠鏡全面 の各エネルギーによるイメージ測定結果

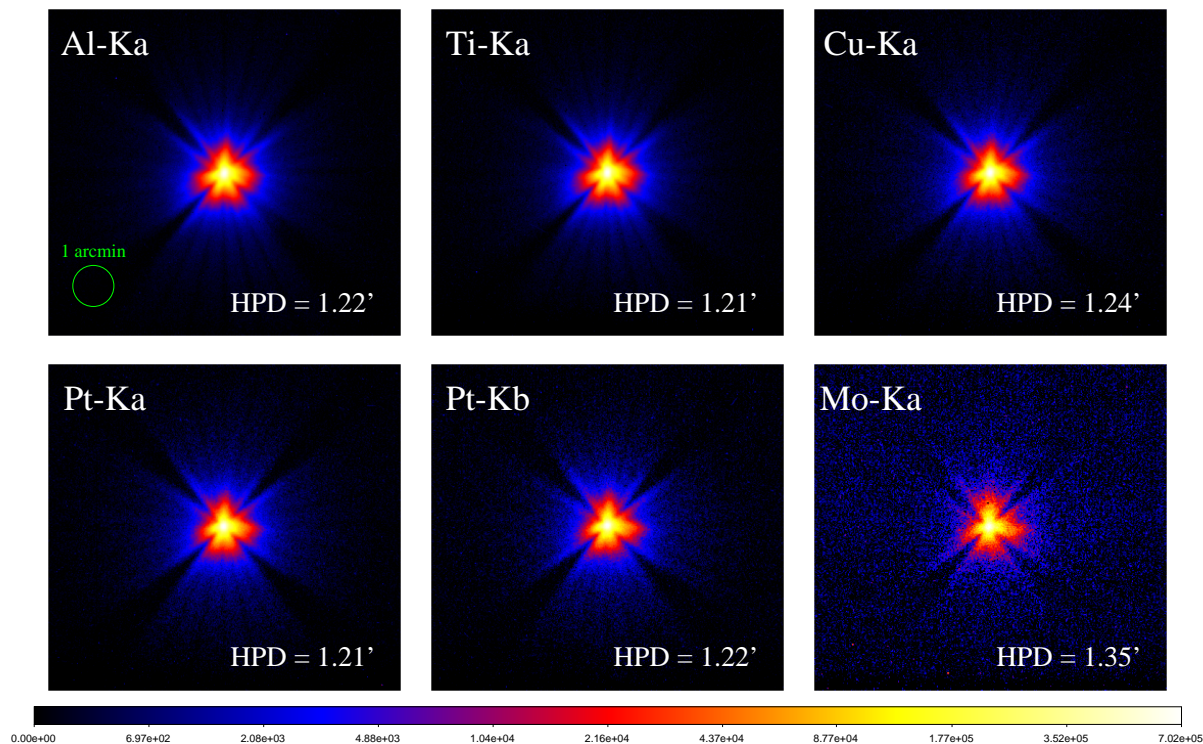


図 4.48: 望遠鏡全体の各エネルギーにおけるイメージと HPD。

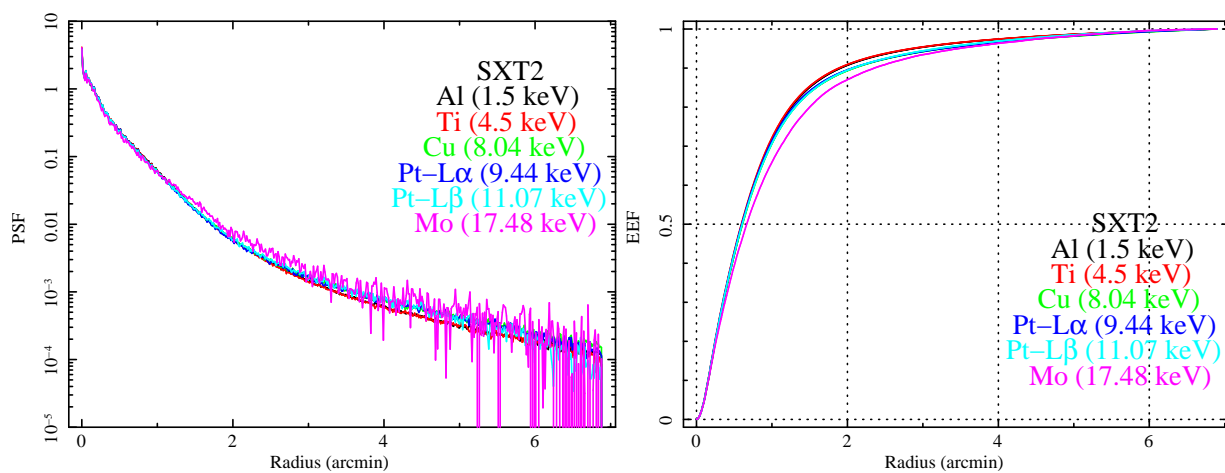


図 4.49: 望遠鏡全体の各エネルギーにおける (左)Point Spread Function(PSF) と (右)Encircled Energy Function(EEF)。EEF が 0.5 となる直径が HPD となる。黒 : Al-K $\alpha$ 、赤 : Ti-K $\alpha$ 、緑 : Cu-K $\alpha$ 、青 : Pt-L $\alpha$ 、水色 : Pt-L $\beta$ 、マゼンタ : Mo-K $\alpha$ 。

## 4.4.3 測定結果：SXT-S の off-axis におけるイメージ測定

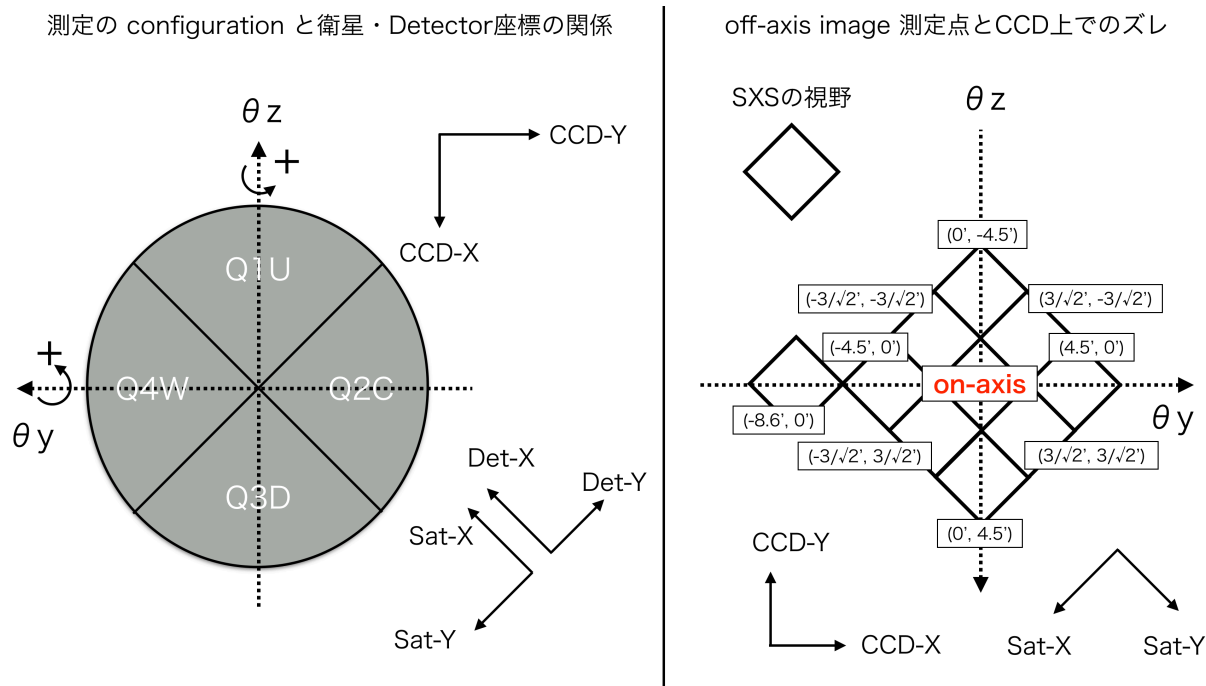


図 4.50: (左)–off-axis イメージ測定の configuration。(右)–off-axis イメージの測定点。

表 4.37: 測定条件

Config.	Q1U
Target	Ti-K $\alpha$
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	CCD
angle	図 4.85右参照

この節では、SXS の視野を考慮した際に、on-axis、off-axis イメージはどのようなものになるかを、イメージ解析から求める。また、SXS の視野ではどの程度の有効面積になるかを求める。off-axis イメージは、図 4.50 に示すように、on-axis の位置から四方を囲むようにオフセットさせて、測定する。この際、ある点源をマッピングしたときにどのようなイメージ、また、どの程度の光量がオフセット領域に漏れ込むかを調べることができる。測定条件の詳細は表 4.56 と図 4.50 にまとめる。以下に測定・解析の結果を述べていく。

## 4.4 結像性能

### SXS の視野を考慮した on-axis イメージの解析

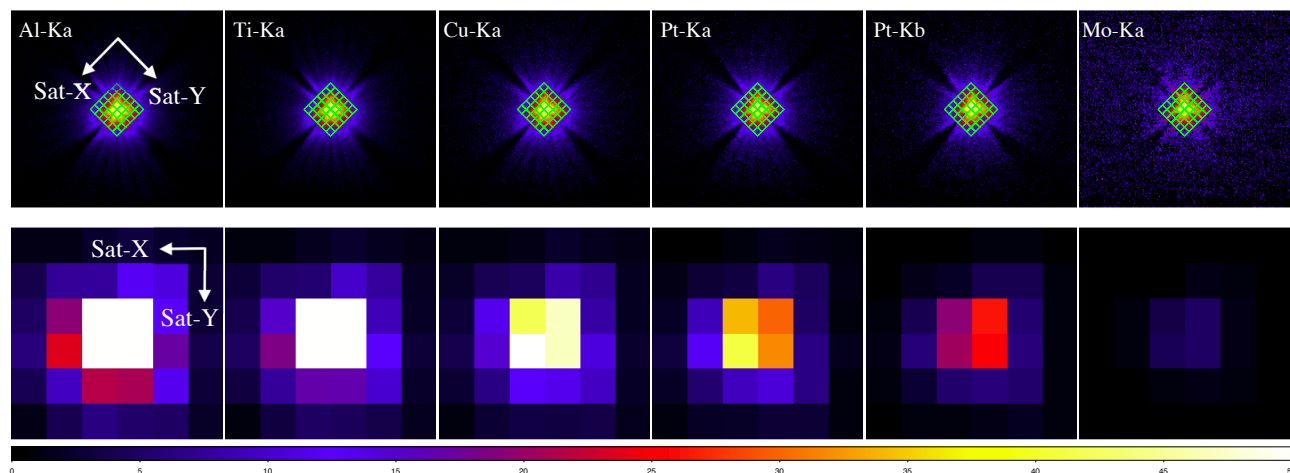


図 4.51: 各エネルギーでの on-axis イメージと、SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。緑のマスキが SXS の視野に対応。有効面積イメージのカラースケールは  $0 \sim 50 \text{ cm}^2$  の範囲で統一している。

表 4.38: SXS の視野での有効面積と P.C. の視野 ( $7.4'\Phi$ ) での有効面積の比較

	Al-K $\alpha$	Ti-K $\alpha$	Cu-K $\alpha$	Pt-L $\alpha$	Pt-L $\beta$	Mo-K $\alpha$
SXT-S Full [ $\text{cm}^2$ ]	591	454	377	278	188	38
SXT-S SXS FOV [ $\text{cm}^2$ ]	535	412	340	251	169	34
SXS/Full ratio	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.88

図 4.51に各エネルギーのイメージと SXS 視野を考慮した際の各ピクセルの有効面積マップを示す。また、表 4.38には P.C. で測定した有効面積と CCD のイメージ解析から求めた SXS 視野内の有効面積を示す。どのエネルギーでも、P.C. の測定結果から一割程度少ない有効面積を示すことがわかった。

### SXS の視野を考慮した off-axis イメージ測定

各オフセット位置での HPD、有効面積をまとめたものを図 4.52、表 4.49にまとめる。この測定では、測定時間の都合上 ( $+4.5', 0'$ )、( $-8.6', 0'$ ) の測定では Q1、Q3 のみ、( $0', +4.5'$ )、( $0', -4.5'$ ) の測定では、Q2、Q4 のみの測定を行っている。これは SXS の視野に漏れ込むのは、傾ける方向に位置するクアドラントによる集光がほとんどを占めるためである。測定結果としては、 $-4.5'$  オフセットの場合、視野には  $\sim 0.6 \%$ 、 $3/\sqrt{2}'$  オフセットの場合は  $\sim 2 \%$ 、 $8.6'$  オフセットの場合は  $\sim 0.01 \%$  程度以下の漏れ込みがあることがわかった。各オフセットでの測定・解析結果は、以降のページに示す。

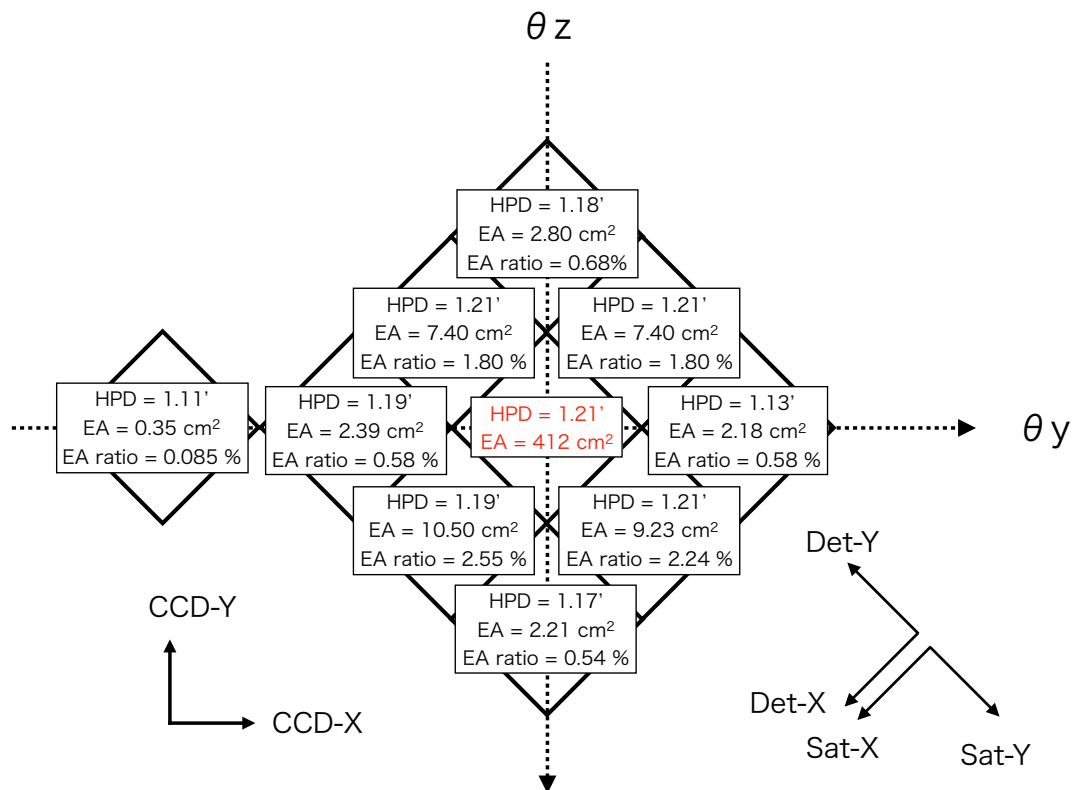


図 4.52: off-axis イメージ測定の結果。

表 4.39: SXT-S : off-axis イメージ測定結果まとめ

$(\theta_y, \theta_z)$	HPD [ $'$ ]	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸における有効面積との比 (%)
$(0', 0')$	1.21	412	—
$(+4.5', 0')$	1.13	2.18	0.57
$(-4.5', 0')$	1.19	2.39	0.58
$(0', +4.5')$	1.17	2.21	0.54
$(0', -4.5')$	1.18	2.80	0.68
$-4.5'$ 平均		2.40	0.58
$(+3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$	1.21	9.23	2.24
$(-3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$	1.19	10.50	2.55
$(-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$	1.21	7.40	1.80
$(+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$	1.21	7.40	1.80
$3/\sqrt{2}'$ 平均		8.52	2.07
$(-8.6', 0')$	1.11	0.35	0.085



#### 4.4 結像性能

表 4.40: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (+4.5', 0') = (-379, -94 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.13'	2.18	0.57

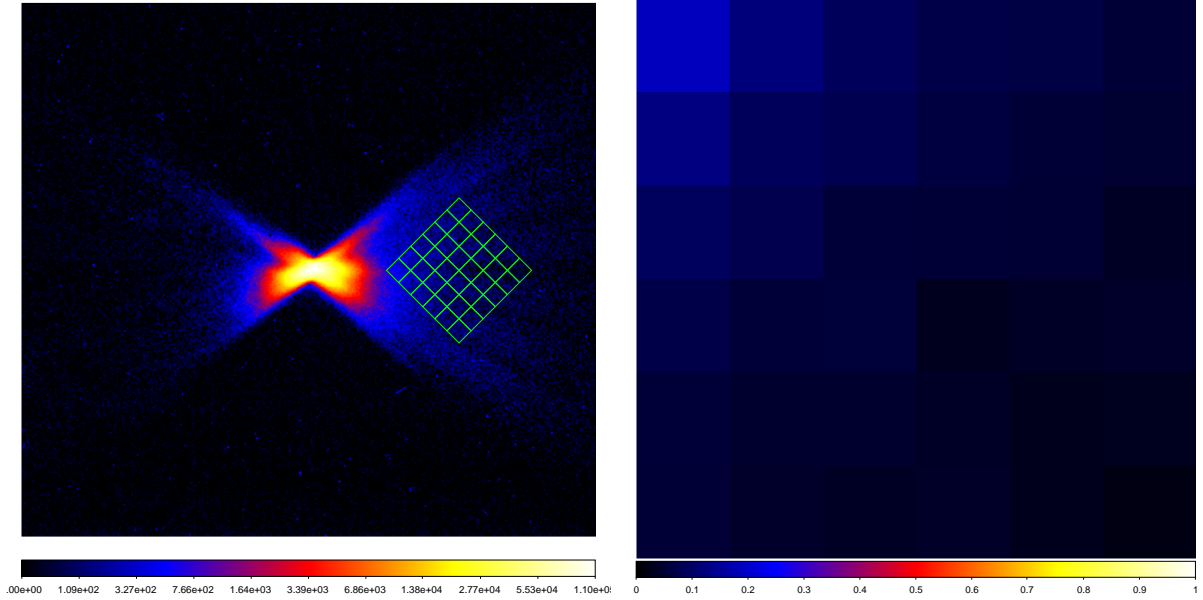


図 4.53: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+4.5', 0')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

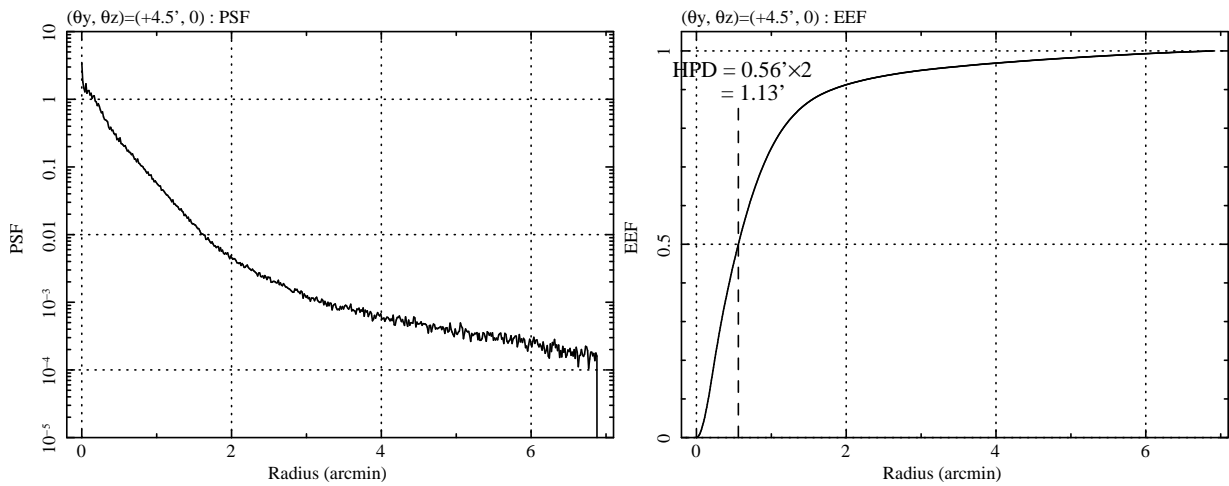


図 4.54: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+4.5', 0')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.41: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0') = (-79, -94 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.19'	2.39	0.58

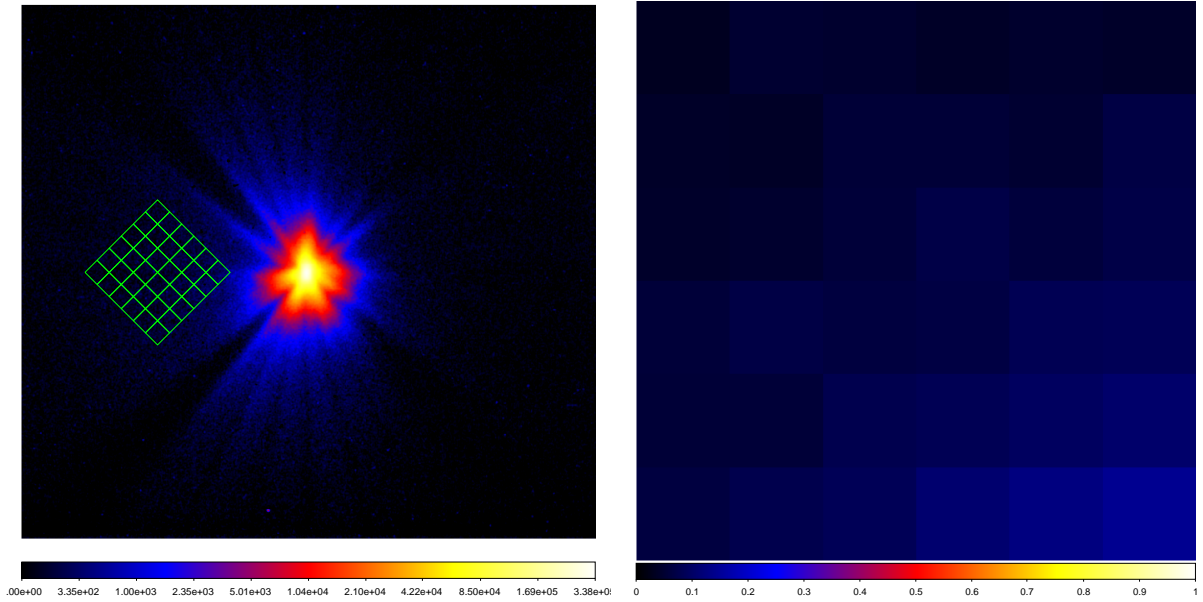


図 4.55: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

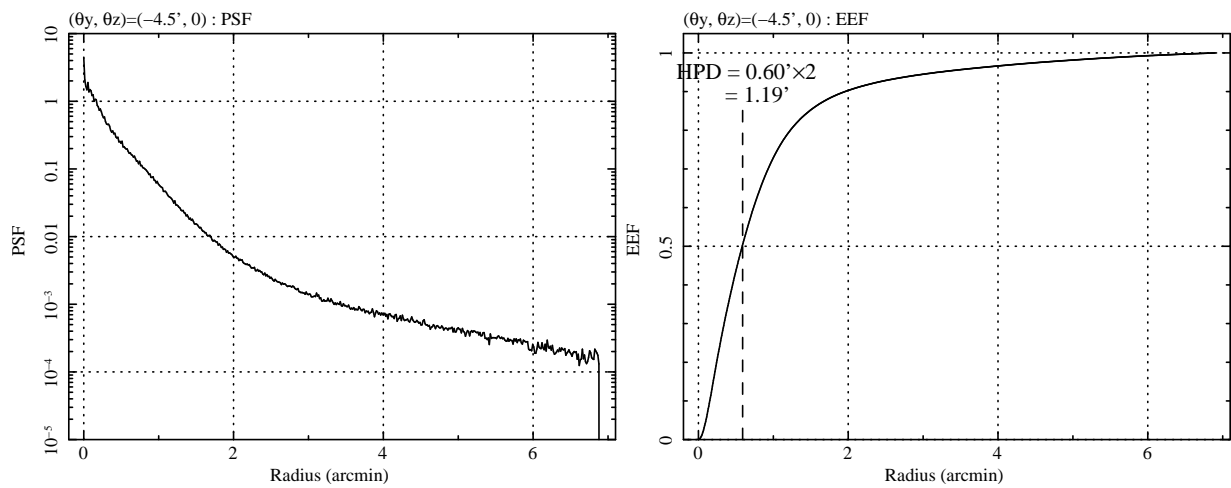


図 4.56: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.42: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z)=(0', +4.5')=(-229, -19 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.17'	2.21	0.54

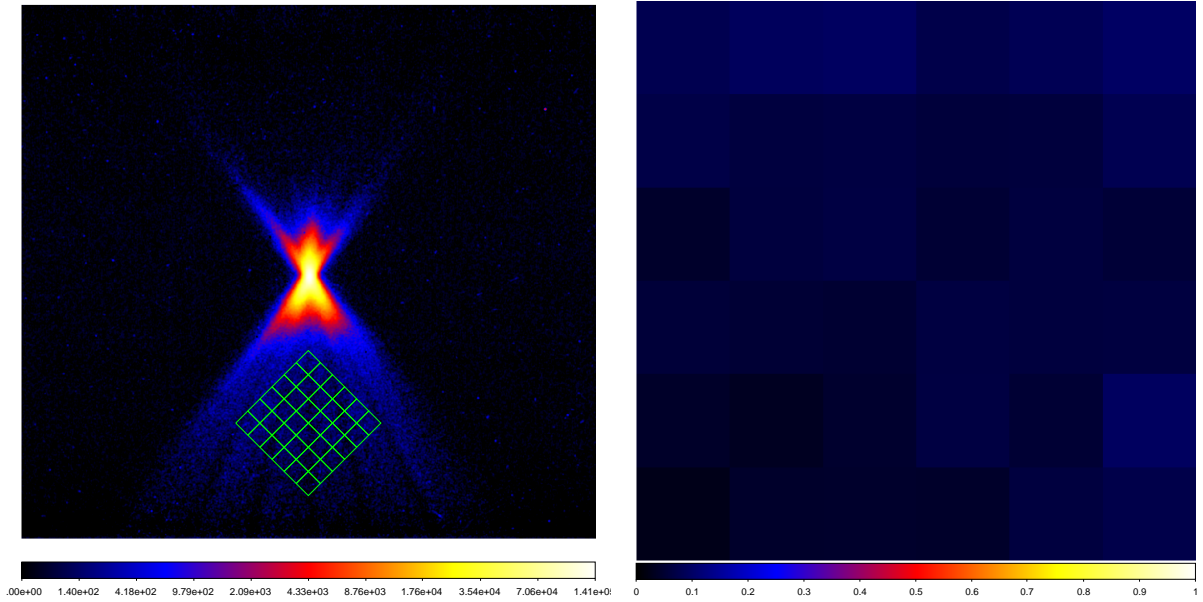


図 4.57: (左)  $(\theta_y, \theta_z)=(0', +4.5')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

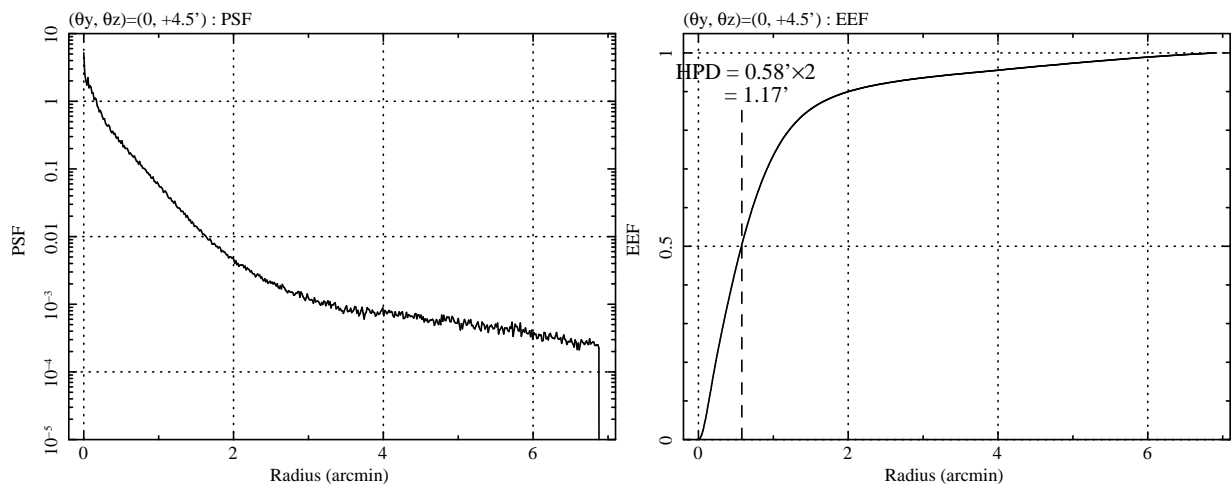


図 4.58: (左)  $(\theta_y, \theta_z)=(0', +4.5')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。



#### 4.4 結像性能

表 4.43: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z)=(0', -4.5')=(-229, -169 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.18'	2.80	0.68

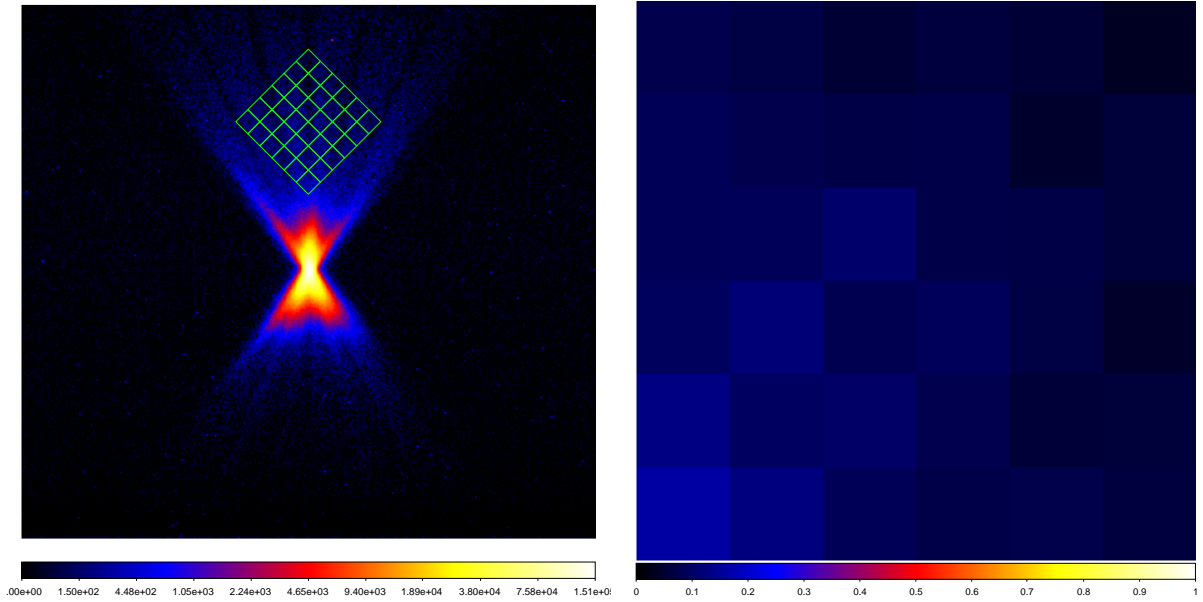


図 4.59: (左)  $(\theta_y, \theta_z)=(0', -4.5')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

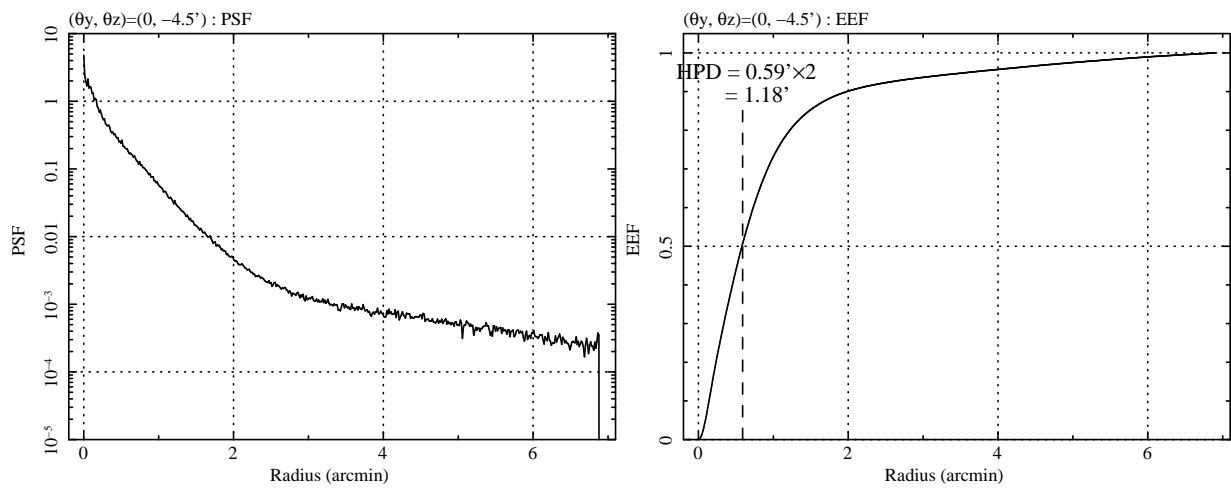


図 4.60: (左)  $(\theta_y, \theta_z)=(0', -4.5')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.44: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}') = (-304, -56 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
$1.21'$	9.23	2.24

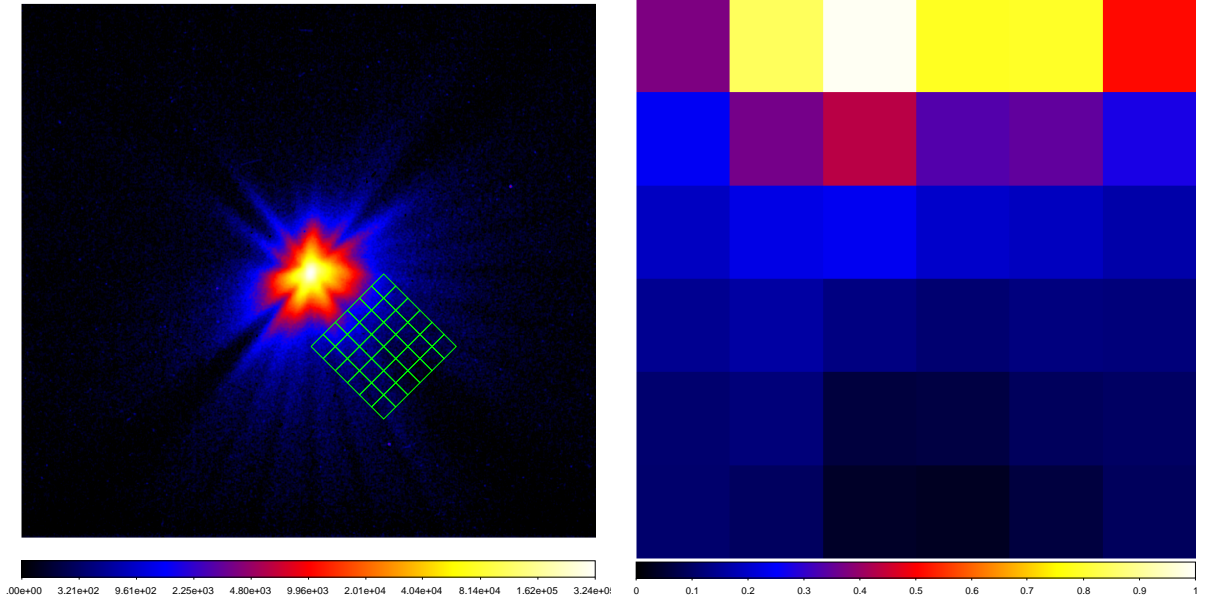


図 4.61: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

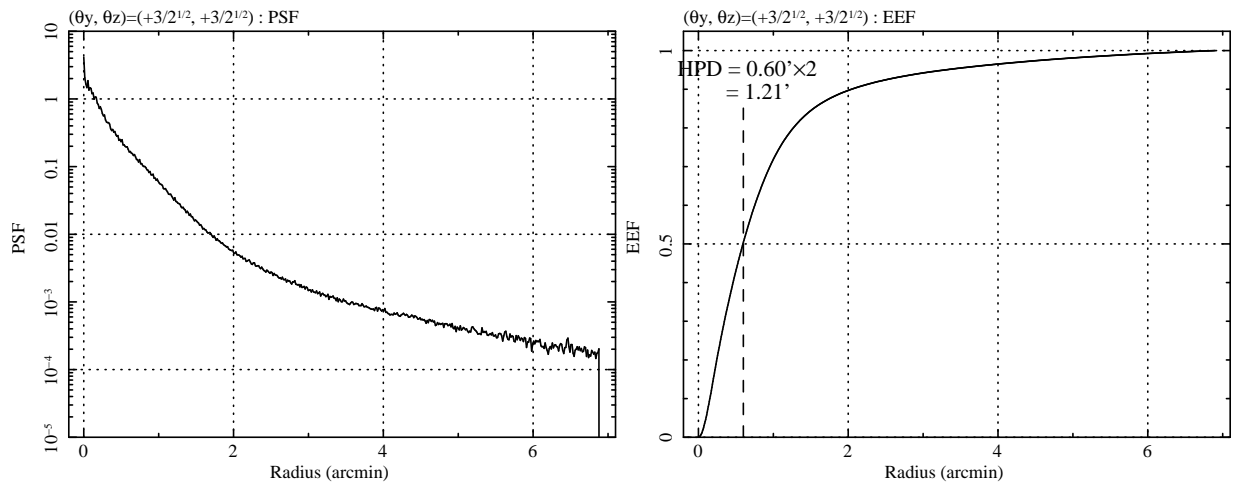


図 4.62: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.45: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}') = (-154, -56 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.19'	10.50	2.55

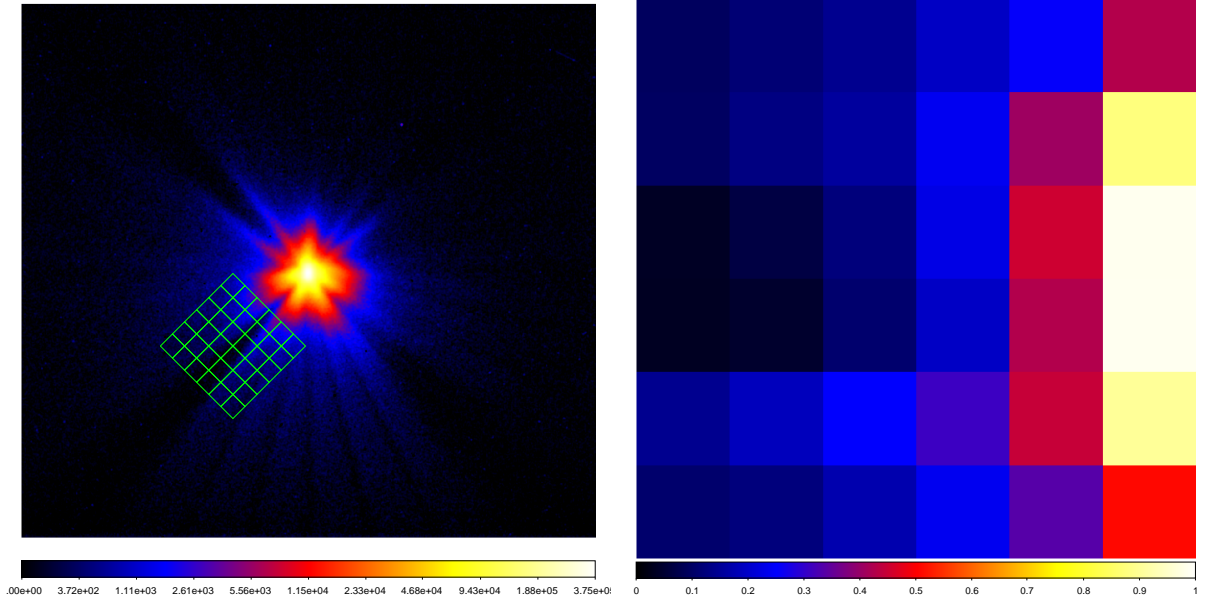


図 4.63: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

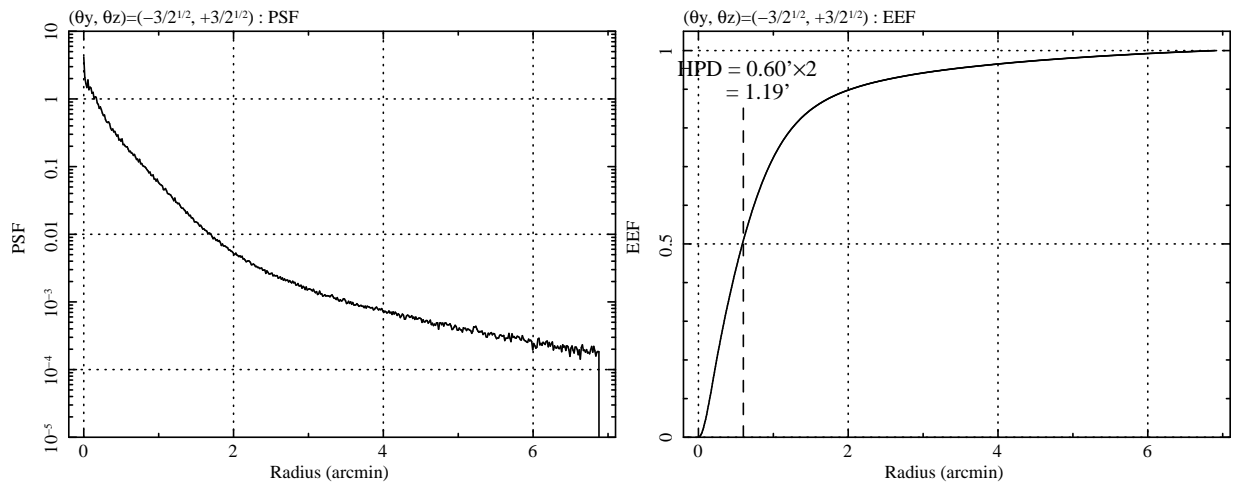


図 4.64: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', +3/\sqrt{2}')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.46: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}') = (-154, -132 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
$1.21'$	7.40	1.80

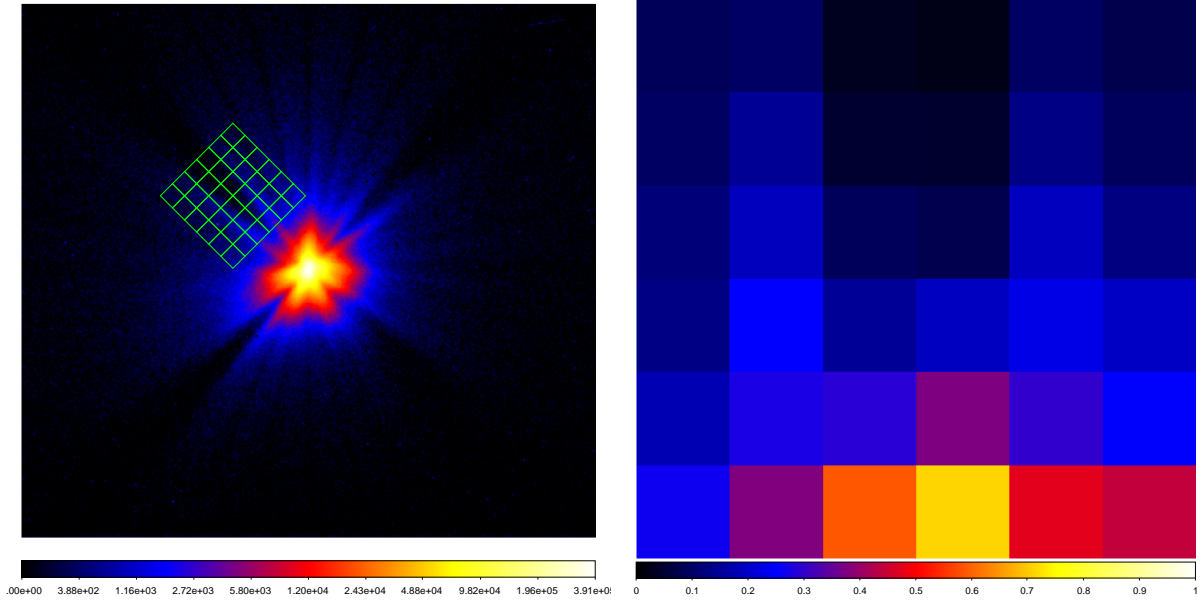


図 4.65: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$  off-axis イメージ測定。緑のマスキがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

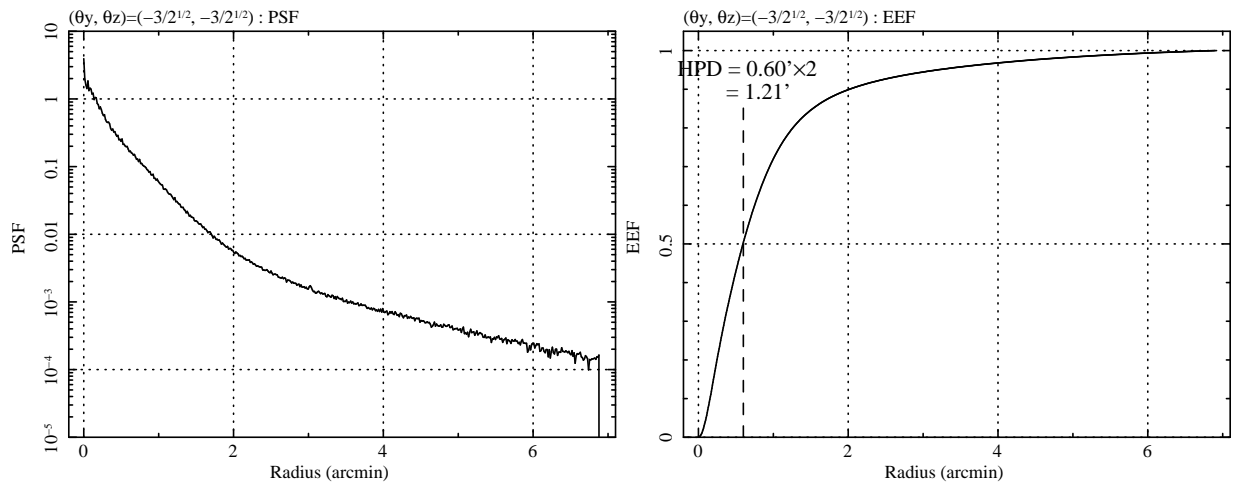


図 4.66: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.47: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}') = (-304, -56 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
$1.21'$	7.40	1.80

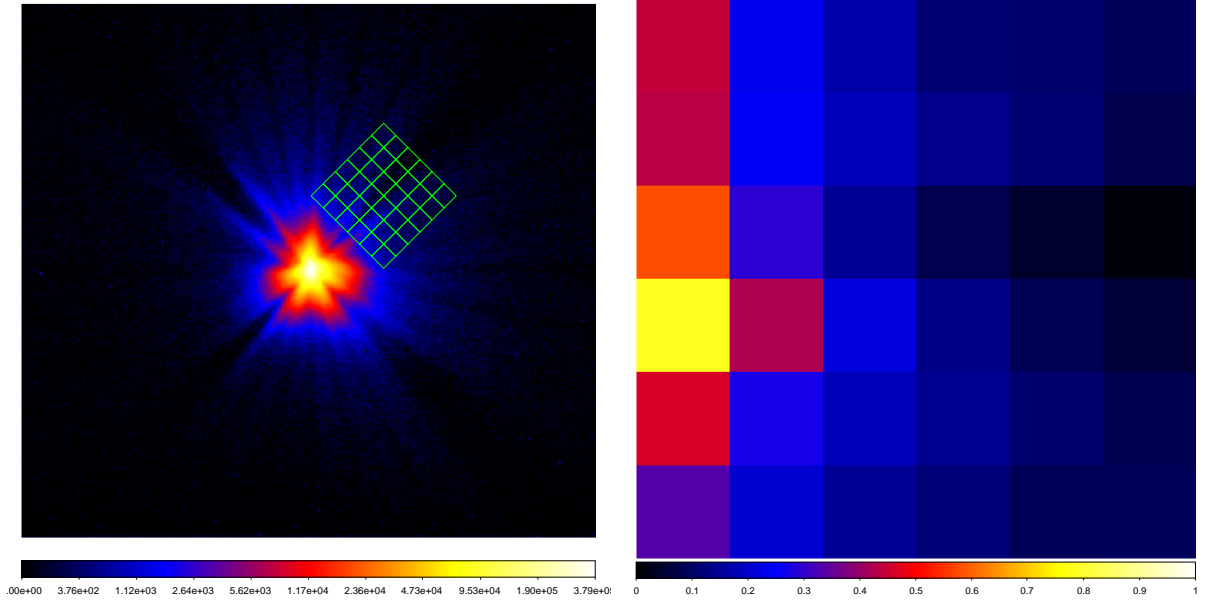


図 4.67: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

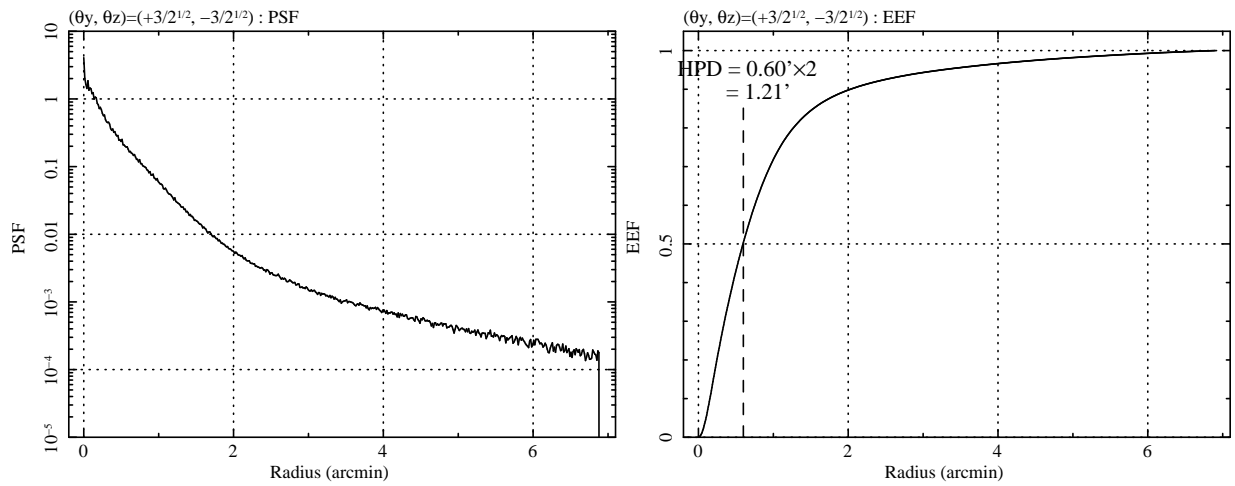


図 4.68: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (+3/\sqrt{2}', -3/\sqrt{2}')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.48: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-8.6', 0) = (+59, -94 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積との比 [%]
1.11'	0.35	0.085

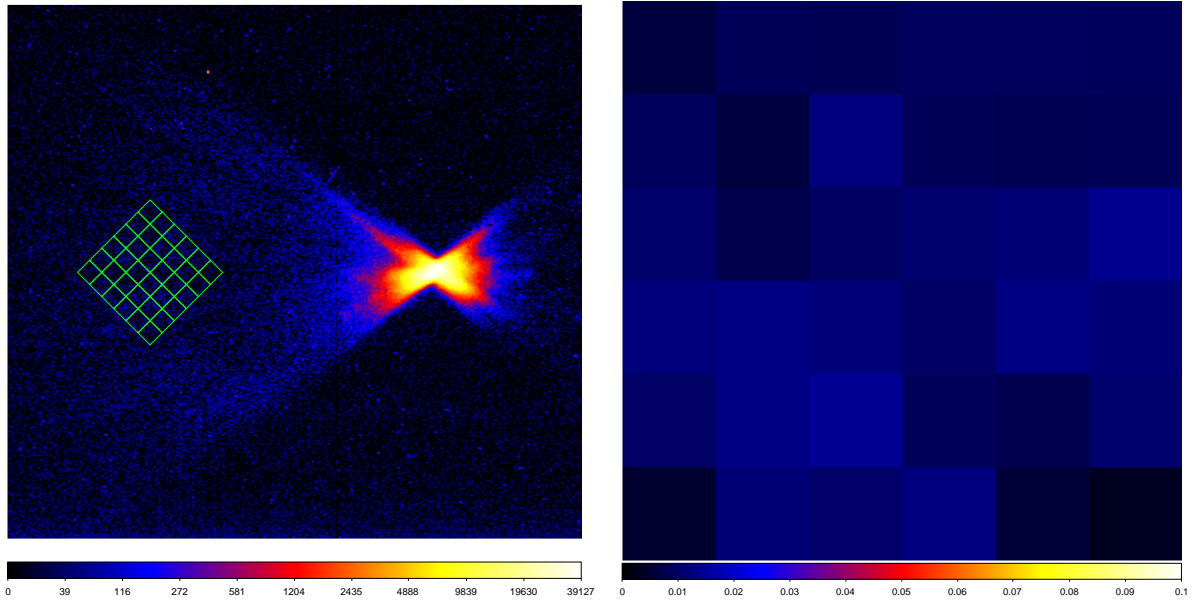


図 4.69: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-8.6', 0')$  off-axis イメージ測定。緑のマスがオフセット観測の際の SXS の視野に対応。(右) SXS を考慮した際の各ピクセルの有効面積 map。

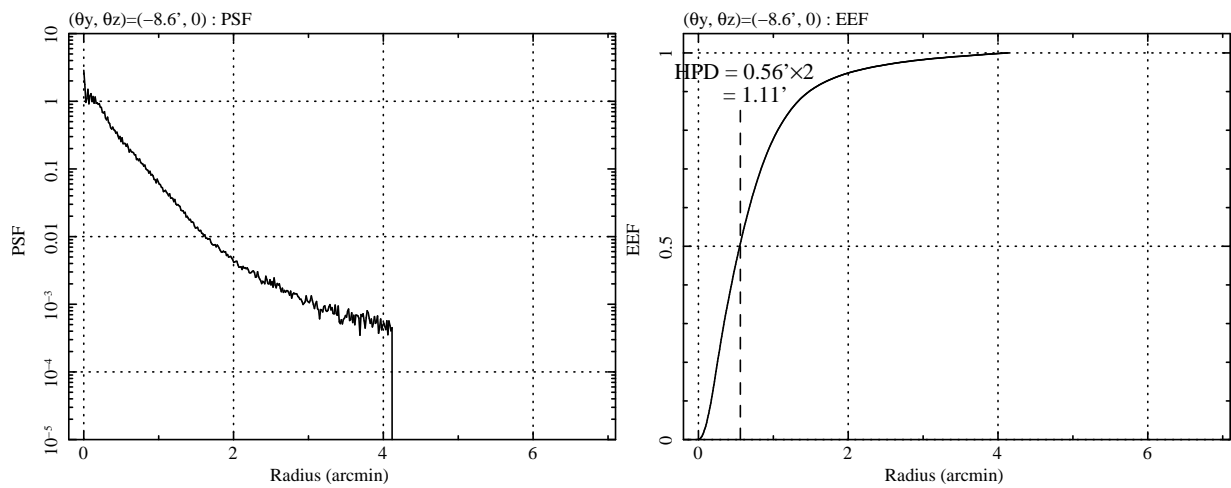


図 4.70: (左)  $(\theta_y, \theta_z) = (-8.6', 0')$  の結像中心での PSF、(右) EEF。

## 4.4 結像性能

### 4.4.4 測定結果：SXT-I の off-axis におけるイメージ測定

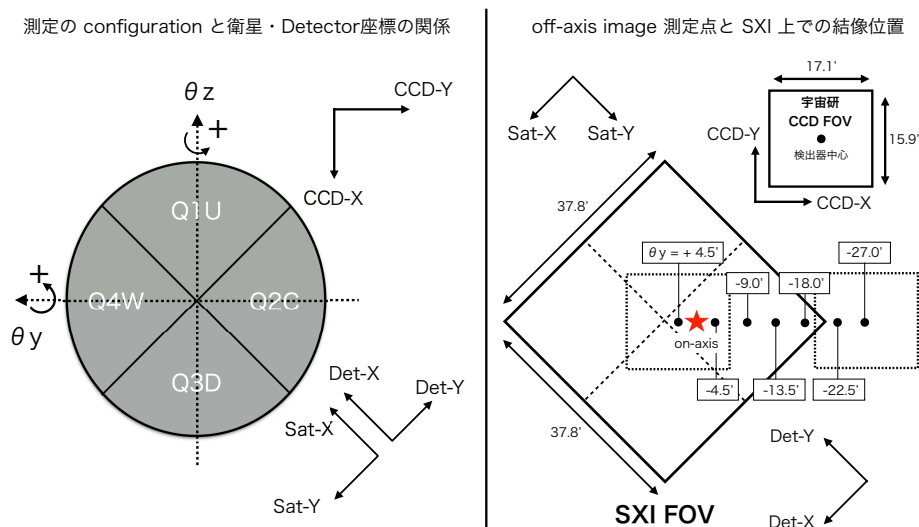


図 4.71: (左)–off-axis イメージ測定の configuration。(右)–off-axis イメージの測定点。

SXT-I の焦点面検出器 SXI は、広い視野 ( $38' \times 38'$ ) を持つため、観測対象から離れた天体でも視野内で結像可能となる。そのため、SXT-I の off-axis イメージ測定では、各 off-axis でどのようなイメージになり、どれだけの有効面積となるかを測定することにする。具体的な測定条件と測定した off-axis に関しては表 4.71 と図 4.71 に示す。

測定結果を表 4.49 にまとめる。結果としては、SXI の視野の端では (18' 以降の結果)、有効面積は光軸の 20% 程度以下になり、結像性能は 1.6–1.9' 程度に悪化することがわかった。ここで、結像性能の評価は検出器中心から PSF、EEF を求めて算出している。以降のページに、各 angle でのイメージと解析結果をしめしている。この図から分かるように、イメージは angle が大きくなるにつれ、結像中心がシフトしている。この影響で結像性能が悪く出ているが、これはシフトしている訳でなく、angle が大きくなるにつれてミラーの反射領域が減っている効果が見えていると考えれる。

表 4.49: SXT-I : off-axis イメージ測定結果まとめ

$(\theta_y, \theta_z)$	HPD [']	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸における有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 (%)
(+4.5', 0')	1.18	328	74
(−4.5', 0')	1.24	343	77
(−9.0', 0')	1.29	213	48
(−13.5', 0')	1.43	134	30
(−18.0', 0')	1.58	99	22
(−22.5', 0')	1.72	77	17
(−27.0', 0')	1.87	63	14



#### 4.4 結像性能

表 4.50: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)=(+251, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.18'	328	74

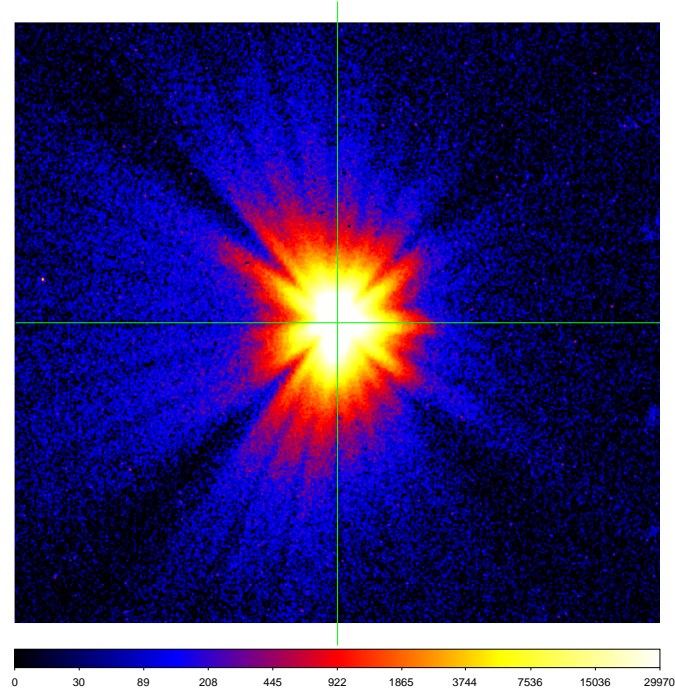


図 4.72: (左)-SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

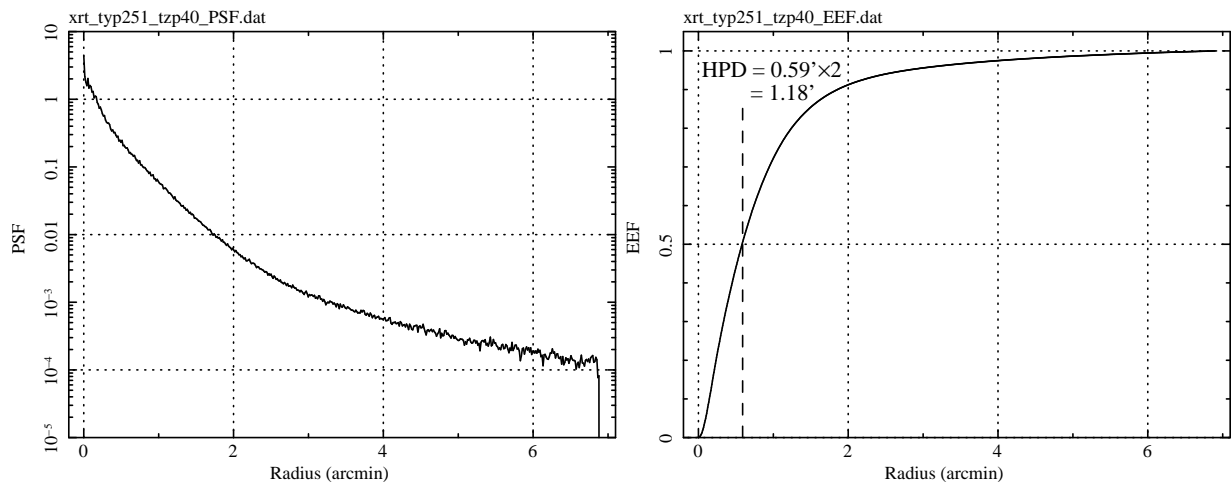


図 4.73: (左)- $(\theta_y, \theta_z)=(+4.5', 0)$  の結像中心での PSF、(右)-EEF。



#### 4.4 結像性能

表 4.51: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0) = (-49, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.24'	343	77

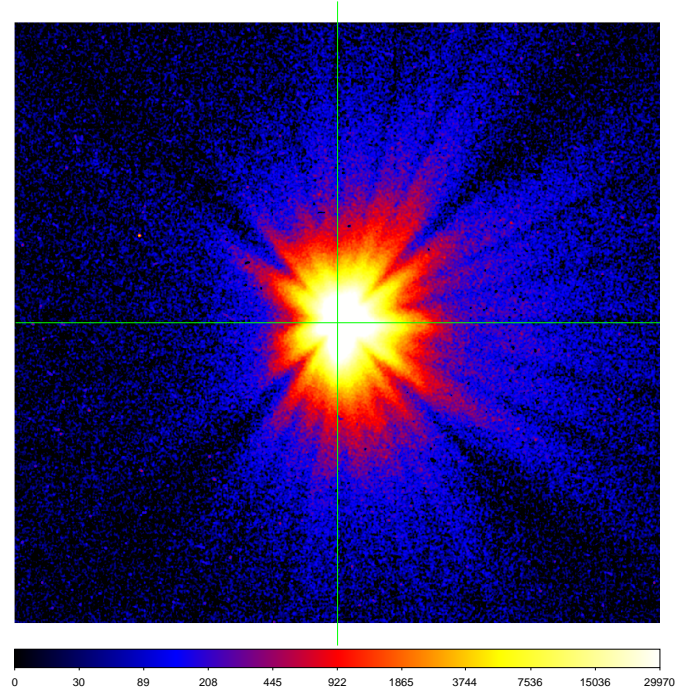


図 4.74: (左)-SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

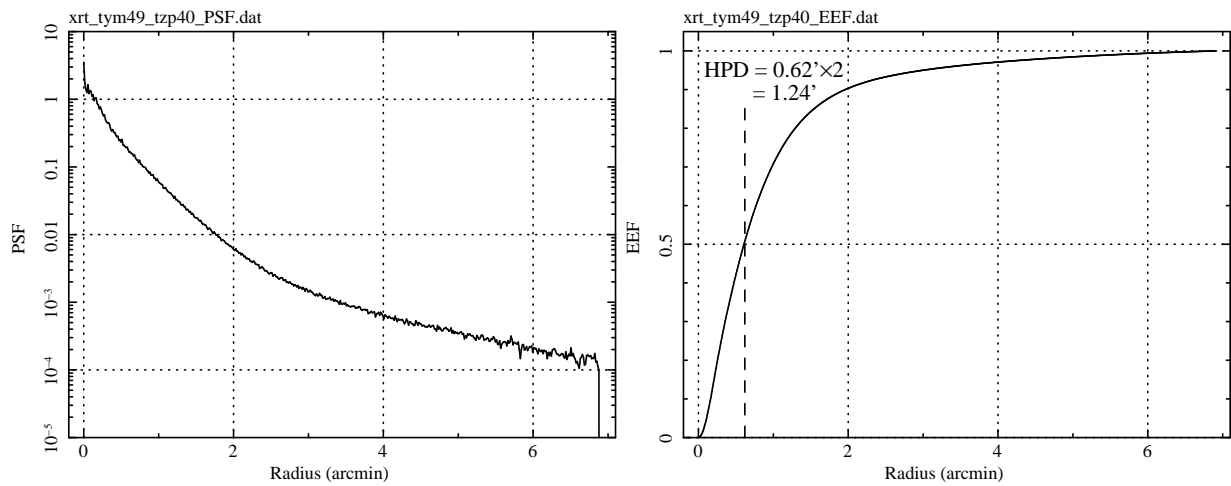


図 4.75: (左)- $(\theta_y, \theta_z) = (-4.5', 0)$  の結像中心での PSF、(右)-EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.52: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-9.0', 0) = (-199, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.29'	213	48

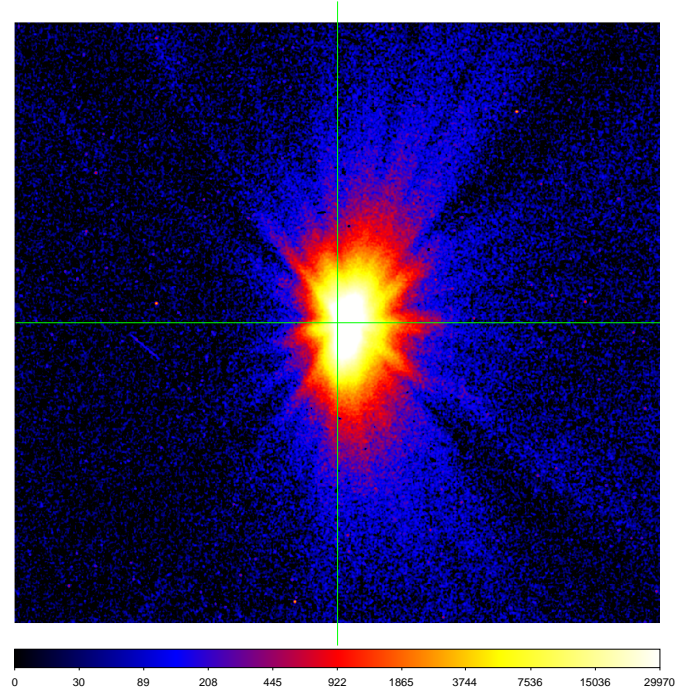


図 4.76: (左)-SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-9.0', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

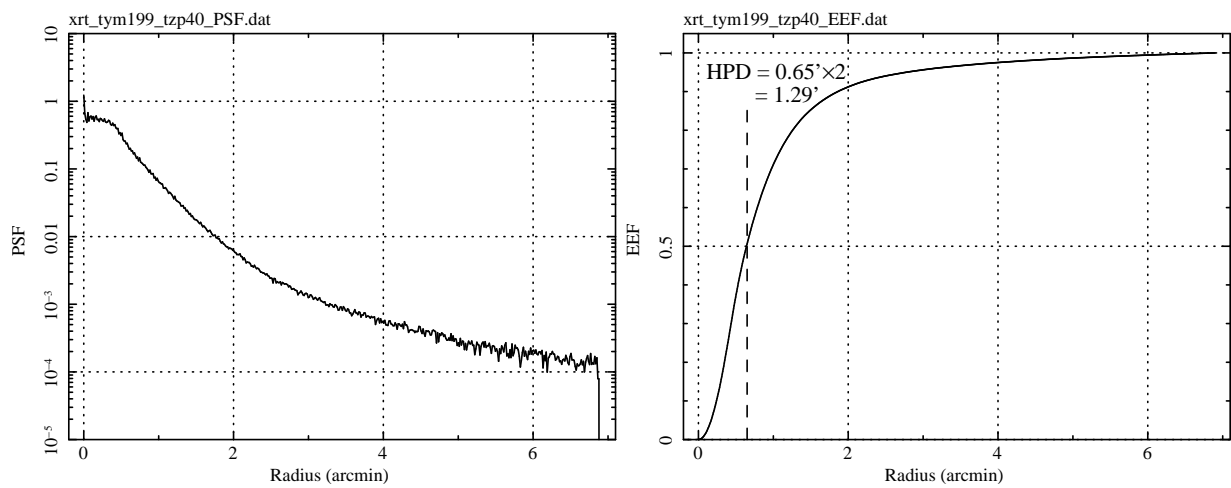


図 4.77: (左)- $(\theta_y, \theta_z) = (-9.0', 0)$  の結像中心での PSF、(右)-EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.53: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-13.5', 0) = (-349, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.43'	134	30

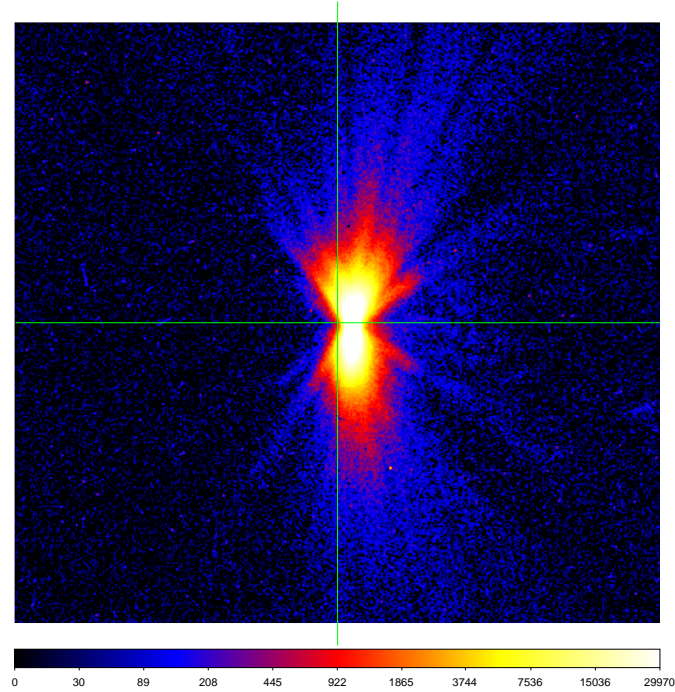


図 4.78: (左)–SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-13.5', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

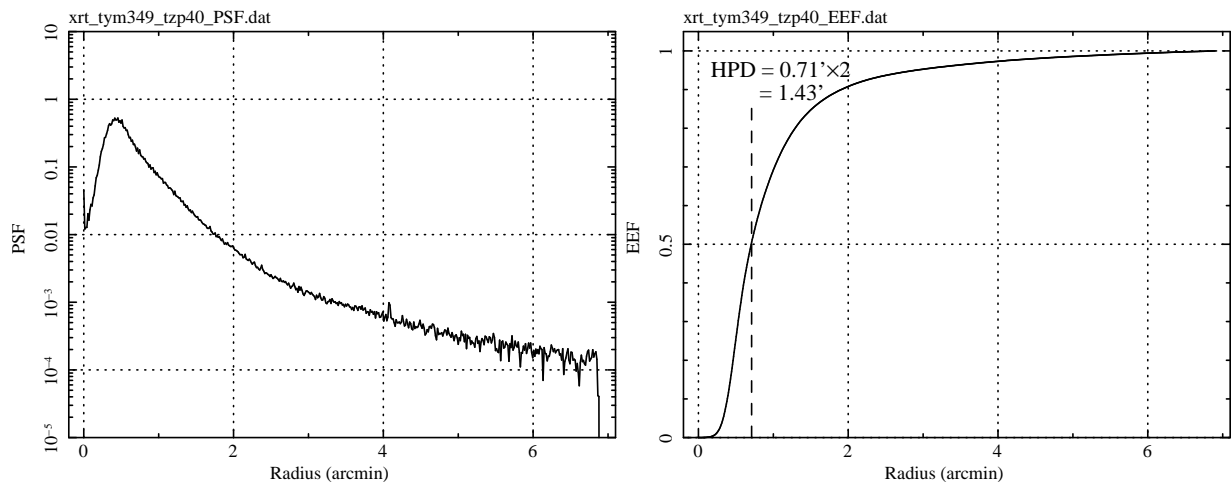


図 4.79: (左)– $(\theta_y, \theta_z) = (-13.5', 0)$  の結像中心での PSF、(右)–EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.54: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-18.0', 0) = (-499, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.58'	99	22

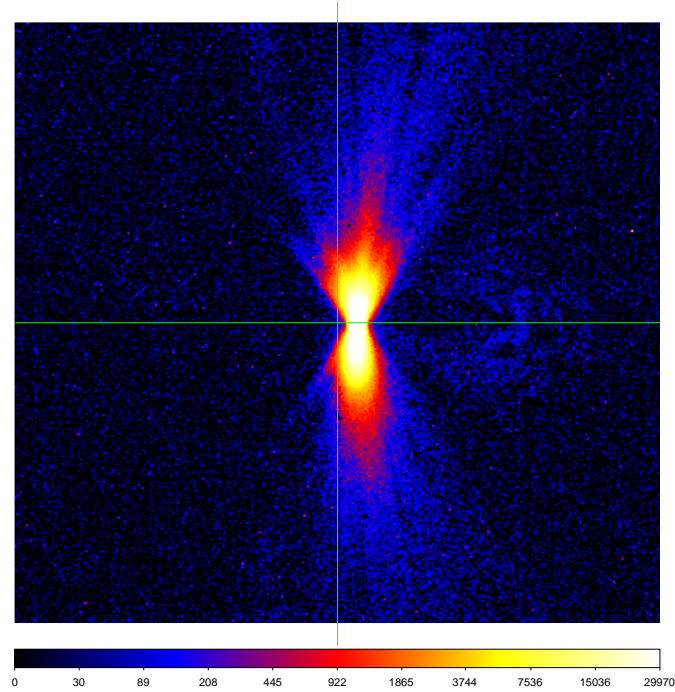


図 4.80: (左)–SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-18.0', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

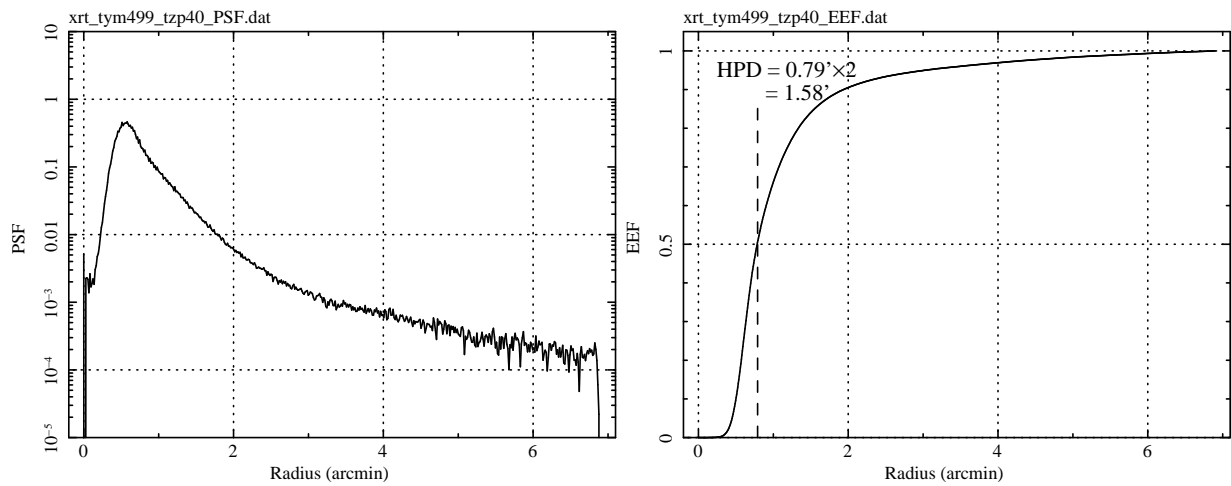


図 4.81: (左)– $(\theta_y, \theta_z) = (-18.0', 0)$  の結像中心での PSF、(右)–EEF。

#### 4.4 結像性能

表 4.55: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-22.5', 0) = (-649, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.72'	77	17

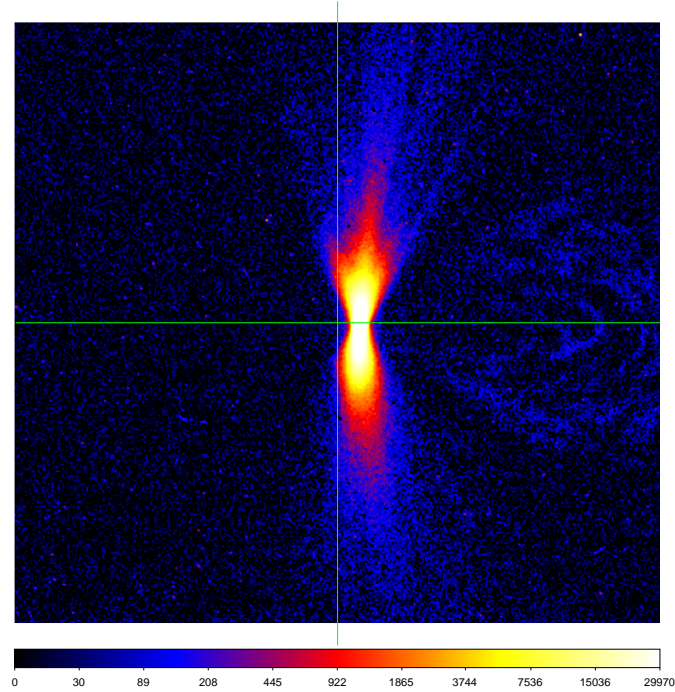


図 4.82: (左)–SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-22.5', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

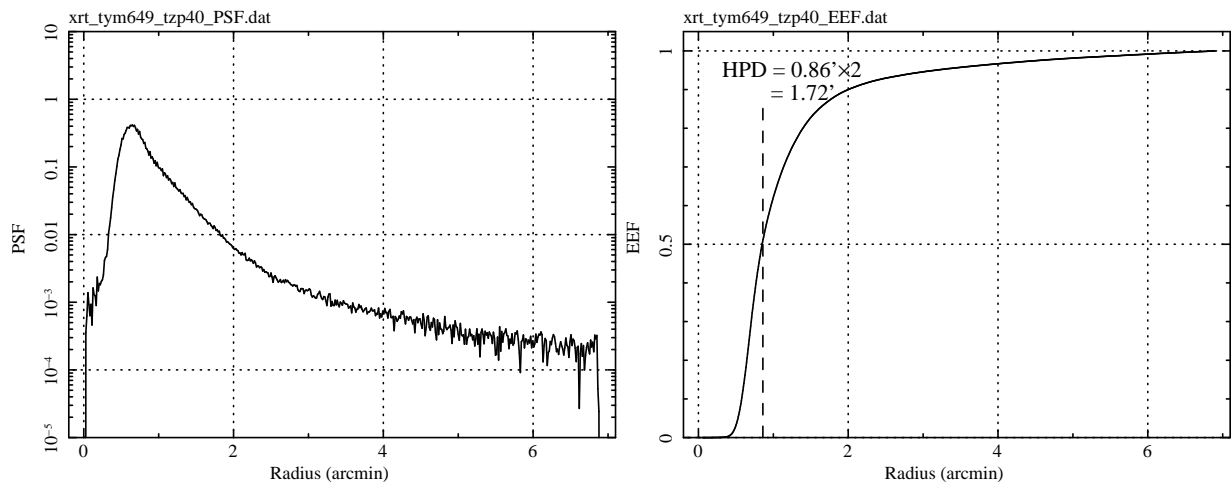


図 4.83: (左)– $(\theta_y, \theta_z) = (-22.5', 0)$  の結像中心での PSF、(右)–EEF。



#### 4.4 結像性能

表 4.56: 測定結果 :  $(\theta_y, \theta_z) = (-27.0', 0) = (-799, +40 : \text{pulse})$

結像性能 (HPD)	有効面積 [ $\text{cm}^2$ ]	光軸の有効面積 ( $445 \text{ cm}^2$ ) との比 [%]
1.87'	63	14

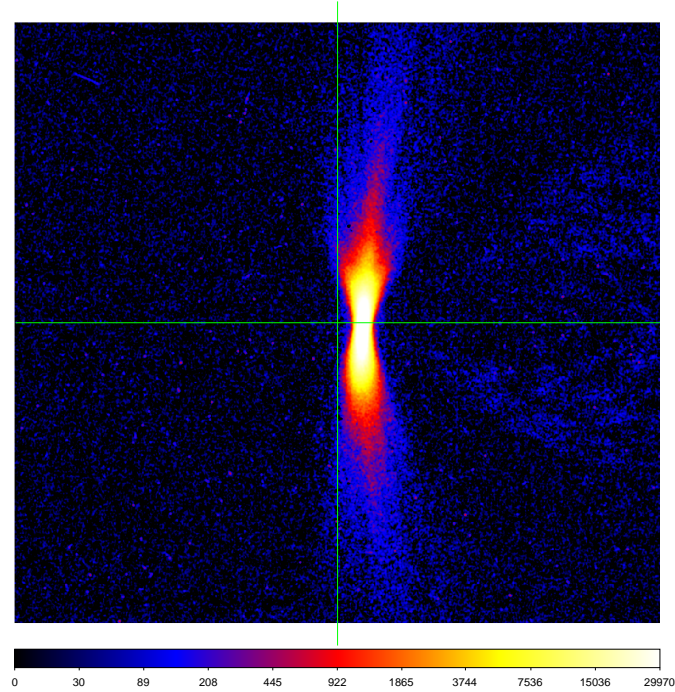


図 4.84: (左)–SXT-I の  $(\theta_y, \theta_z) = (-27.0', 0)$  off-axis イメージ測定。緑の十字が検出器中心を示す。

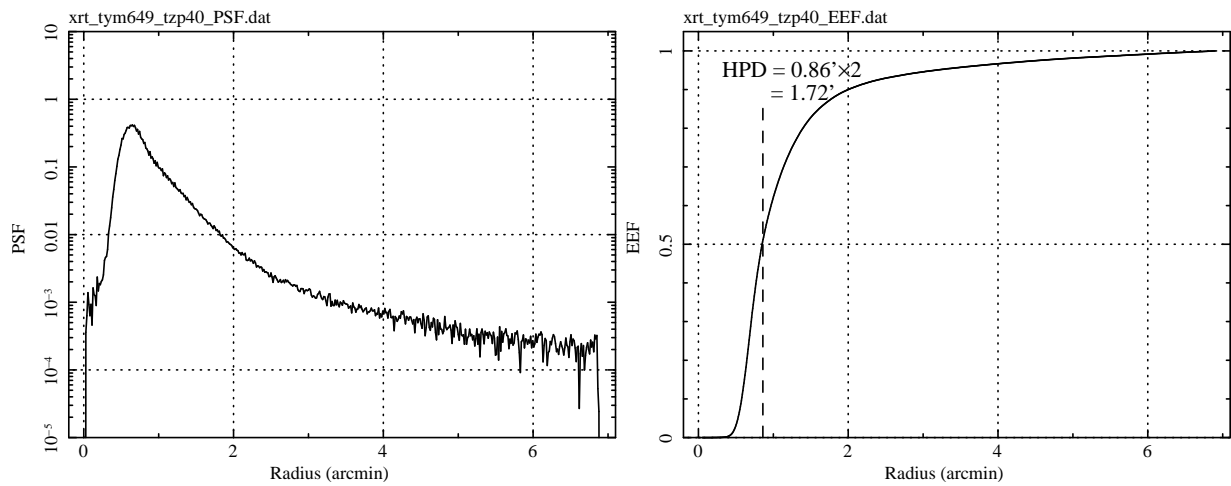


図 4.85: (左)– $(\theta_y, \theta_z) = (-27.0', 0)$  の結像中心での PSF、(右)–EEF。

## 4.4 結像性能

### 4.4.5 まとめと SXT-I との比較

#### Ti-K $\alpha$ での結像性能の比較

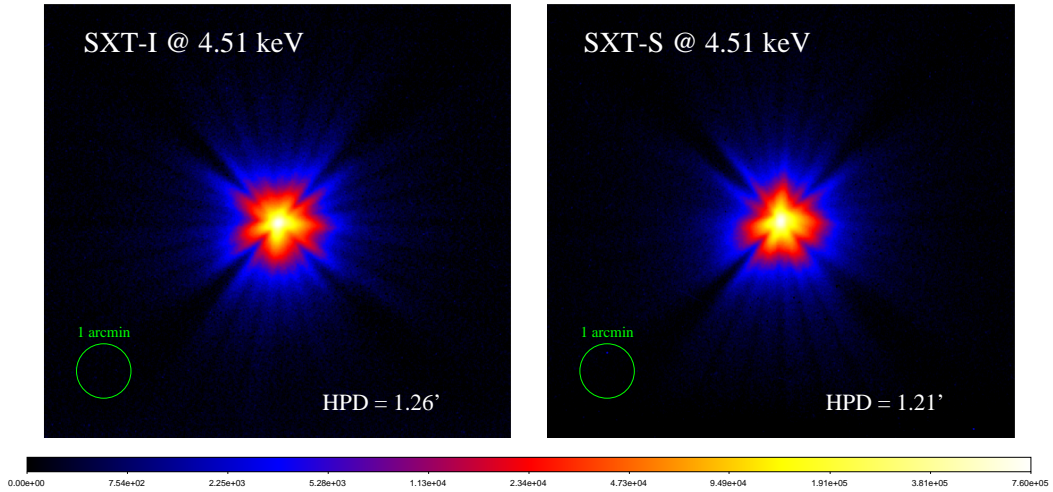


図 4.86: SXT-I と SXT-S の Ti-K $\alpha$  でのイメージの比較。

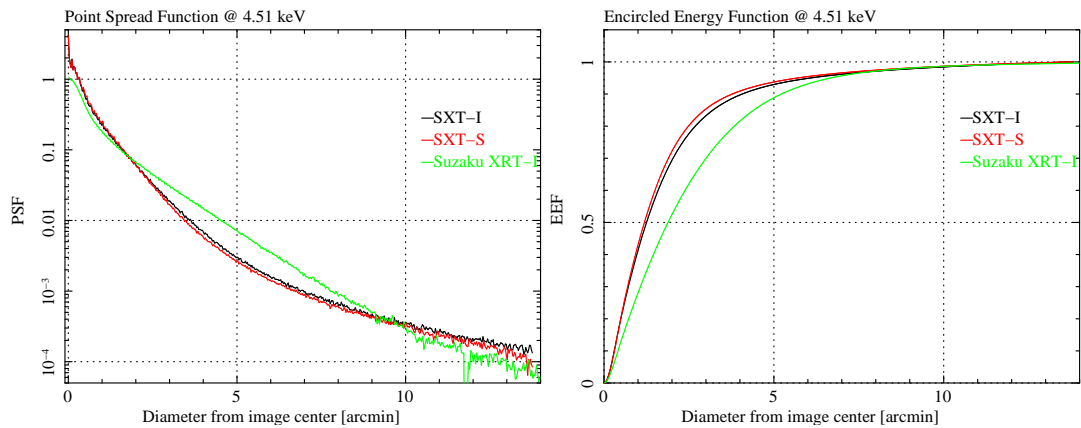


図 4.87: (左)SXT-S、SXT-I、*Suzaku* XRT の PSF、EEF の比較。

図 4.86、図 4.87に SXT-I と SXT-S の望遠鏡全面イメージと PSF、EEF の比較を示す。HPD としては、SXT-S の方が良い。SXT-I の場合は、クアドラント間に HPD の違いが  $\sim 1.1$ - $1.4'$  程度の開きがあったものの、SXT-S の場合は  $\sim 1.2'$  前後でそろっていたためと思われる (表 4.57 参照)。また、SXT-I、SXT-S とともに PSF は *Suzaku* XRT と比べ非常に鋭いピークを持っており、HPD も  $\sim 0.7'$  程度良くなっているため、望遠鏡としての性能が上がっていると言える。

## 4.4 結像性能

### 結像性能のエネルギー依存性の比較

表 4.57: SXT-S と SXT-I の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性のまとめ

Quadrant (Config)	Al-K $\alpha$	Ti-K $\alpha$	Cu-K $\alpha$	Pt-L $\alpha$	Pt-L $\beta$	Pt-L $\gamma$	Mo-K $\alpha$
SXT-I Q1U	1.29	1.26	1.25	1.22	1.19	1.35	1.07
SXT-I Q2C	1.25	1.26	1.32	1.31	1.31	1.29	1.33
SXT-I Q3D	1.39	1.42	1.53	1.64	1.77	2.01	1.69
SXT-I Q4W	1.13	1.13	1.15	1.14	1.24	1.50	1.21
SXT-I 全体	1.25	1.26	1.32	1.31	1.35	1.48	1.31
SXT-S Q1U	1.17	1.14	1.14	1.08	1.04	—	1.11
SXT-S Q2C	1.21	1.19	1.19	1.17	1.21	—	1.50
SXT-S Q3D	1.19	1.17	1.24	1.25	1.36	—	1.48
SXT-S Q4W	1.24	1.24	1.33	1.34	1.32	—	1.28
SXT-S 全体	1.22	1.21	1.24	1.21	1.22	—	1.35

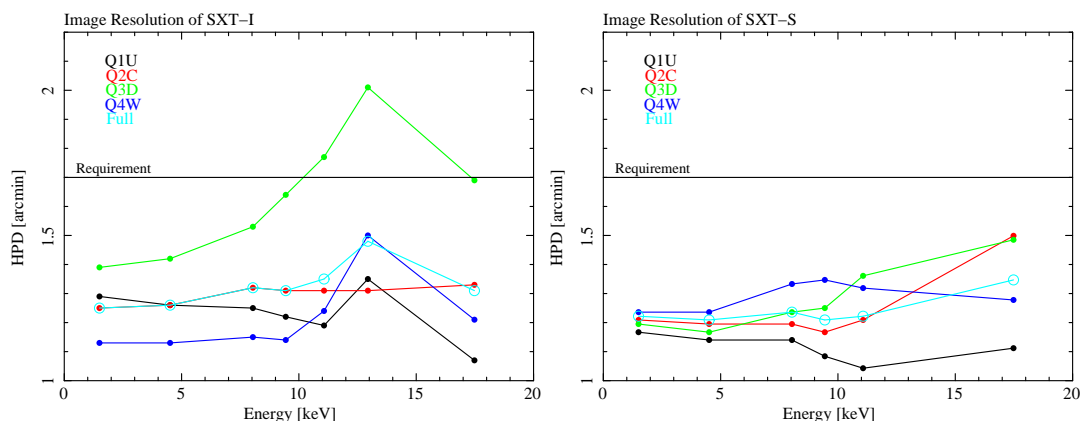


図 4.88: SXT-I と SXT-S の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性。黒 : Q1U、赤 : Q2C、緑 : Q3D、青 : Q4W、水色 : 望遠鏡全面の HPD。実線は要求値  $1.7'$  を示す。

表 4.57 と図 4.88 に SXT-I と SXT-S の結像性能 (HPD) のエネルギー依存性を示す。全エネルギーを通して、SXT-S の結像性能は SXT-I よりもよいことがわかる。また、SXT-I の場合は、エネルギーが上がるほど性能が悪化するクアドラントが存在したものの、SXT-S の場合はそのようなエネルギー依存性はみられず、全エネルギーを通して  $\sim 1.5'$  程度以下に収まっているのが分かる。これは、望遠鏡への X 線の入射位置によらず、一定の性能を持つためと考えられる。第 6 章にて、局所的な望遠鏡の性能を調べたので、詳しくはそこで述べる。



## 4.5 迷光の評価

### 4.5.1 迷光と予測される迷光成分

X線望遠鏡では、二段のミラーによって二回反射することで結像することが可能となっている。しかしながら、off-axis からくる光を集光する際、通常の二回反射以外の経路が存在してきてしまう(図 4.89 左)。これが X 線望遠鏡の「迷光」である。迷光がある場合、観測対象の天体以外からの光も視野内に入ってくる可能性があり、その際には正確な観測天体の情報を得るのは難しくなってしまう。SXT では、この迷光の寄与を軽減させるためプリコリメータ(第 3 章：迷光とプリコリメータ参照)を搭載しているが、それでも防ぎきれない迷光経路が多数存在する。そこで、本節では望遠鏡に対していろいろな off-axis から X 線を入射することで、どのような迷光がどの程度存在するかを定量的に評価することを目的とする。

SXT-S と SXT-I の迷光を考える際、二つの検出器で最も異なってくるのは、視野の違いである。SXI の視野がおおよそ  $38' \times 38'$  であるのに対して、SXS は  $3' \times 3'$  と非常に狭い視野となっている(図 4.89 右)。この時、二つの望遠鏡に同じような迷光があったとしても、その迷光がそれぞれの視野に漏れ込む量は全く違うものになってくる。SXI の場合は視野の広いだけでなく pixel サイズも SXS と比べ非常に小さいため( $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ )、迷光の種類によっては、領域を区切った解析をすることで迷光の寄与を無視することが可能となる。しかし一方で、SXS では視野の狭さと pixel サイズが大きいという理由から、領域解析による迷光の除去はほとんど不可能である。そのため、SXT-S の場合はより詳細の迷光情報を把握しておかなければならない。

迷光想定の前に、予めどのような迷光成分が存在するかを考えておく。図 4.92 には、Ray-tracing システムによってシミュレーションした、ある off angle での迷光の分布を示す。ここでは  $\pm 20'$ 、 $\pm 30'$ 、 $+60'$  の迷光を例として挙げる。各図内の青、緑、赤の四角はそれぞれ、SXI、宇宙研 CCD、SXS の視野を示している。また黒の円は宇宙研 PC の視野である。これからも、さまざまな迷光があるものの、視野によって寄与が違っていることがわかる。on-axis では、SXS の視野にはほとんど通常二回反射成分しか入ってこないのに対して、SXI の視野では Secondary Only 成分が無視できなくなってくる。 $-20'$ 、 $-30'$  では、Primary Only 成分が SXI の視野に入ってきており、角度によっては SXS にも漏れ込んでしまうことがわかる。 $+20'$ 、 $+30'$  では、ミラーに反射することなく検出器面に達する「素通り成分」が存在し、これも angle によって分布は変化してくる。このような、off angle による迷光の寄与を本測定では具体的に行っていくことになる。

一方で、 $+60'$  の Ray-tracing 結果では、迷光としては 612 成分しかみられていないが、この他に「すり抜け成分」と呼ばれる迷光が存在することが SXT-I の測定の際に分かっている(図 4.90)。この成分は、プリコリメータと Primary ミラーとの間の隙間をすり抜けた X 線が Secondary で反射し、検出器に達する成分である。これはプリコリメータと Primary ミラーのアライメントミスが主な発生原因であるため(図 4.91)、望遠鏡、クアドラントの個性が出てくる。また、この成分はほとんど検出器の視野中心に分布するため、SXS の狭い視野でも漏れ込んでしまう。そのため、SXT-S の迷光評価では、このすり抜け成分にどのような個性があるかを把握しておく必要がある。

## 4.5 迷光の評価

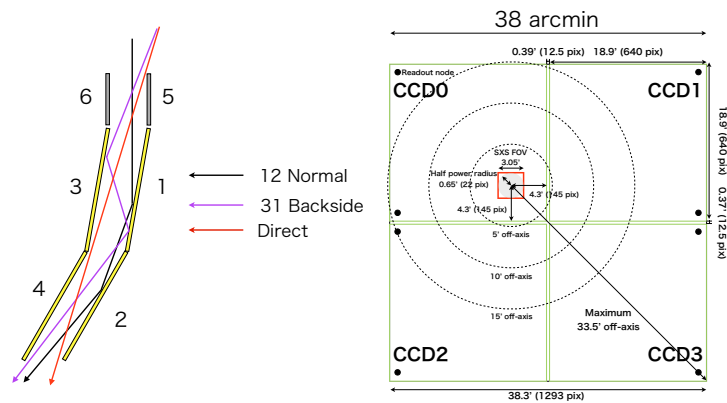


図 4.89: (左)-迷光の経路の例。(右)-SXI と SXS の視野。

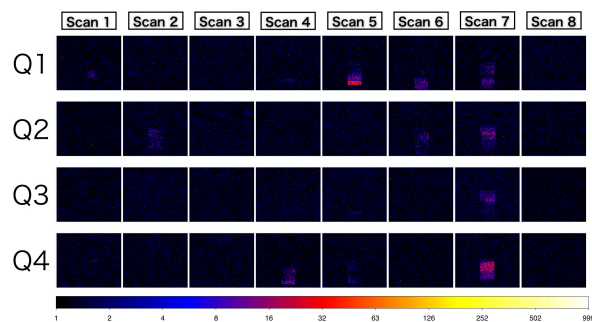


図 4.90: SXT-I の off-axis 角 +60' におけるセクターの迷光のイメージ@Al-K $\alpha$ 。すり抜け成分が見える。

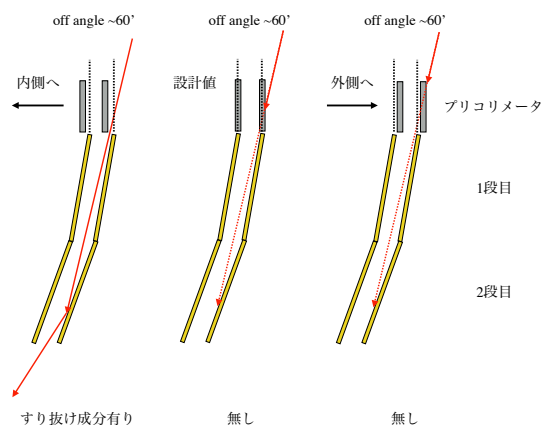


図 4.91: すり抜け成分の経路。

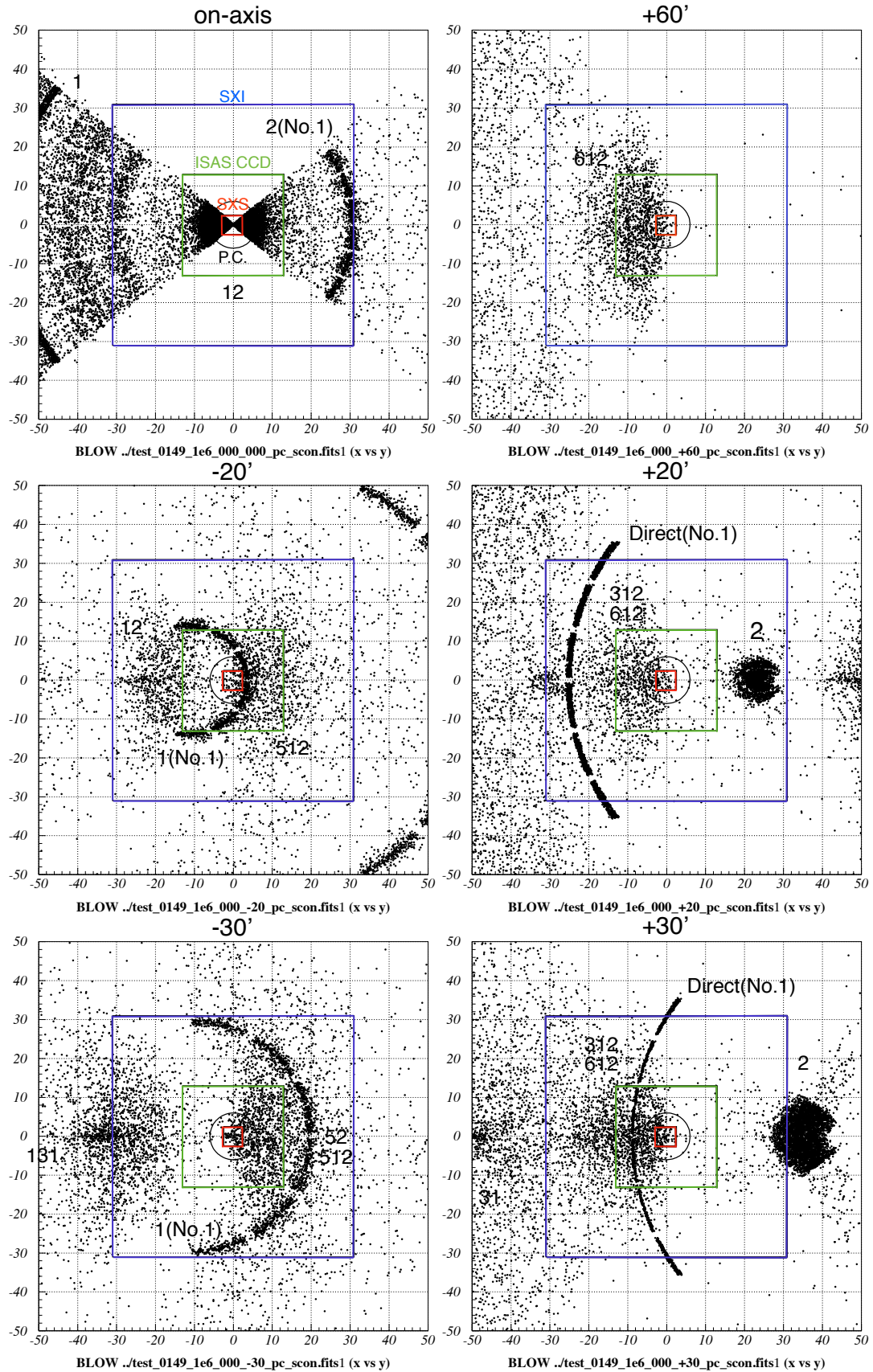


図 4.92: Ray-tracing による迷光のシミュレーション

### 4.5.2 測定方法と測定項目

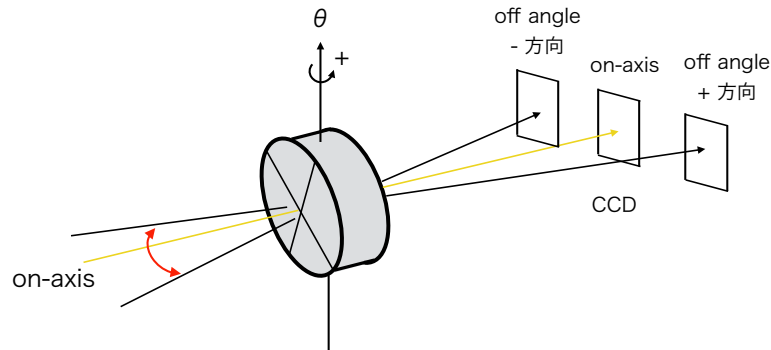


図 4.93: 迷光の測定と off angle の定義。

迷光測定では、先述したようにさまざまな off-axis angle での迷光成分を定量的に評価する。測定方法としては、図 4.93に示すように、望遠鏡を  $\theta_y$  もしくは  $\theta_z$  方向に傾けることで、off-axis から X 線を入射させる。この時、off-axis angle としては、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  方向とは  $\pm$  を逆に定義している。検出器は場合に応じて、CCD と PC を用いて行う。また、これまでの測定と同様のラスタースキャンと 1 ラインだけラスタースキャンを行う 1 ラインラスタースキャンによって測定を行う。

測定は、各 sector の個性の測定、各クアドラントの個性の測定、望遠鏡全面の迷光測定という流れで行う。 $+60'$  にみられるすり抜け成分は、各クアドラントの sector によって、存在するものとししないものが存在する。そのためまず、この個性を調べるために、各 sector 毎に迷光の入射角度による依存性を調査する。どの sector で迷光が出るか調査できた後は、クアドラント全面で入射角によってどれだけの迷光があるかを調査する。この時は、迷光の sector 依存性を考慮し、寄与が大きいと思われるクアドラントと小さいと思われるクアドラントに分け、迷光量の違いを評価する。そして、最後に全体ではどの程度の迷光量になるかを評価する。SXT-I に関しては、すでに迷光測定はされているが、SXI の全視野を考慮した測定はできていない。そのため、全視野をカバーする測定を今回行うことにする。以下に具体的な測定項目を記す。

1. 1 line rotation scan による迷光の sector 依存性の測定
2. 1 line tilt scan による迷光の入射角依存性の測定
3. クアドラント全面照射による迷光の評価
4. 望遠鏡全面の迷光評価
5. SXI 全視野をカバーする迷光測定

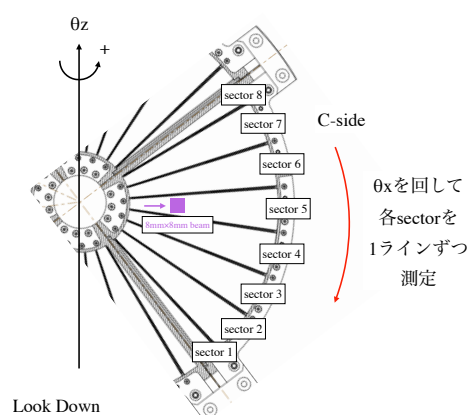
## 4.5.3 測定結果：SXT-S

## 1 line rotation scan

図 4.94: 測定条件

Config.	C-side
Target	Al-K $\alpha$
Slit size	8 × 8 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	CCD
angle	0, $\pm 10$ , $\pm 15$ , $\pm 20$ , $\pm 25$ , $\pm 35$ , $\pm 40$ , $\pm 45$ , $\pm 50$ , $\pm 55$ , $\pm 65$ , $\pm 70'$

図 4.95: 1 line rotation scan



1 line rotation scan では、各クアドラントの各 sector を 1 ラインだけラスタースキャンし、各 sector の迷光量の入射角度依存性を測定する。具体的には図 4.95 に示すように C-side に測定対象となる sector を設置し、8mm×8mm に絞ったビームで走査して測定する。1 ライン測定した後は、 $\theta_x$  を回し、次の sector に移りすることで、全クアドラントの全 sector を測定する。特に  $+60'$  にみられる可能性のあるすり抜け成分の sector 依存性を調べるため、off angle は  $+$  方向では  $70'$  まで測定することとする。測定条件の詳細は、表 4.94 にまとめた。

実際の測定結果のまとめプロット (SXS FOV) を図 4.96 にまとめる。off angle が  $+60'$  付近以外では、どの sector にも個性はほとんどみられないのが分かる。また  $+60'$  付近では、すり抜け成分がみられる sector とみられない sector で有効面積の違いがあることがわかる。すり抜け成分がみられない sector では  $+60'$  で有効面積は  $10^{-4} \text{ cm}^2$  程度以下を示すが、すり抜け成分がみられる sector では約一桁大きい  $10^{-3} \text{ cm}^2$  以上の有効面積を示すことがわかった。図 4.96 では、 $10^{-3} \text{ cm}^2$  以上の sector は赤で (図 4.96 右上に具体的な sector を示す)、それ以下の sector は黒で示している。on-axis の有効面積と比較すれば、そのレベルは 2~3 桁低い値を示している。かなり低いレベルとも考えられるが、これらの sector 側の off angle  $+60'$  の位置に観測対象より 100 倍明るい天体がいる場合は、その天体のコンタミが SXS の視野内に漏れ込み、観測は致命的になる。このことを踏まえ、そのような観測をする際には roll-angle を調整する必要がある。

各 sector 毎のイメージと有効面積プロットは、以降のページに示してある。ここでは、全領域、SXS FOV の有効面積をプロットすると共に、Secondary 側、Backside 側に領域を分け、それぞれの有効面積を示した。 $+30'$  では、経路の違う特徴的な迷光成分である 2 反射 (Secondary 成分) と 31 反射 (Backside) が両者視野の反対側にあらわれる。これを基準に CCD の  $+Y$  方向を Backside 側、CCD  $-Y$  方向を Secondary 側と定義して、それぞれの有効面積も求めている (図 4.97)。

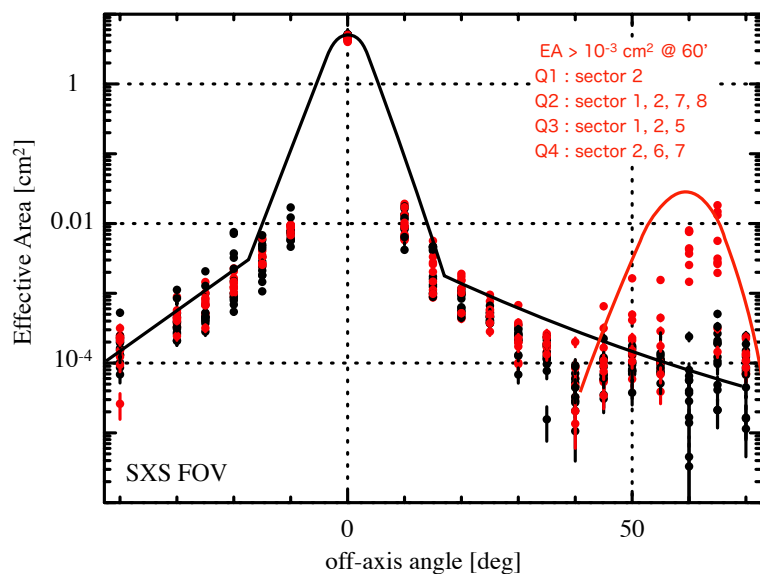


図 4.96: 1 line rotation scan による各 sector の各 angle での有効面積 (SXS FOV) のまとめプロット。  
+60' で有効面積が  $10^{-3} \text{ cm}^2$  以上の sector は赤でプロットしてある。

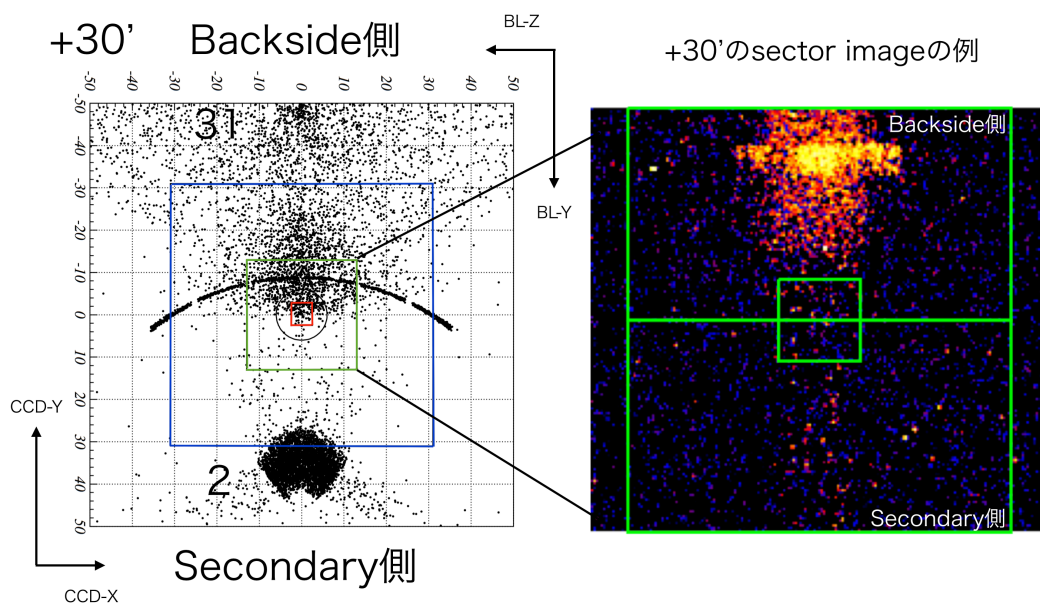


図 4.97: (左)+30' における Ray-racing の結果。宇宙研 CCD の +Y 方向に Backside 成分が -Y 方向に Secondary 成分があらわれる。(右)-実際に +30' で得られるイメージ。SXS の視野と Backside 側、Secondary 側、全領域のそれぞれの迷光の寄与を調べる。



−40′ off angle

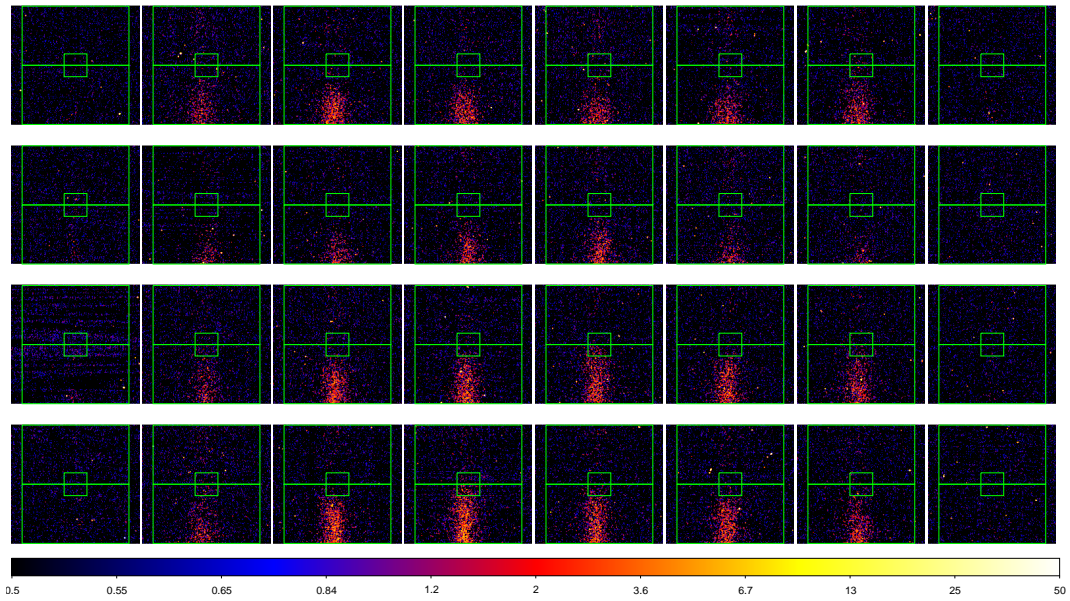


図 4.98: −40′ off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

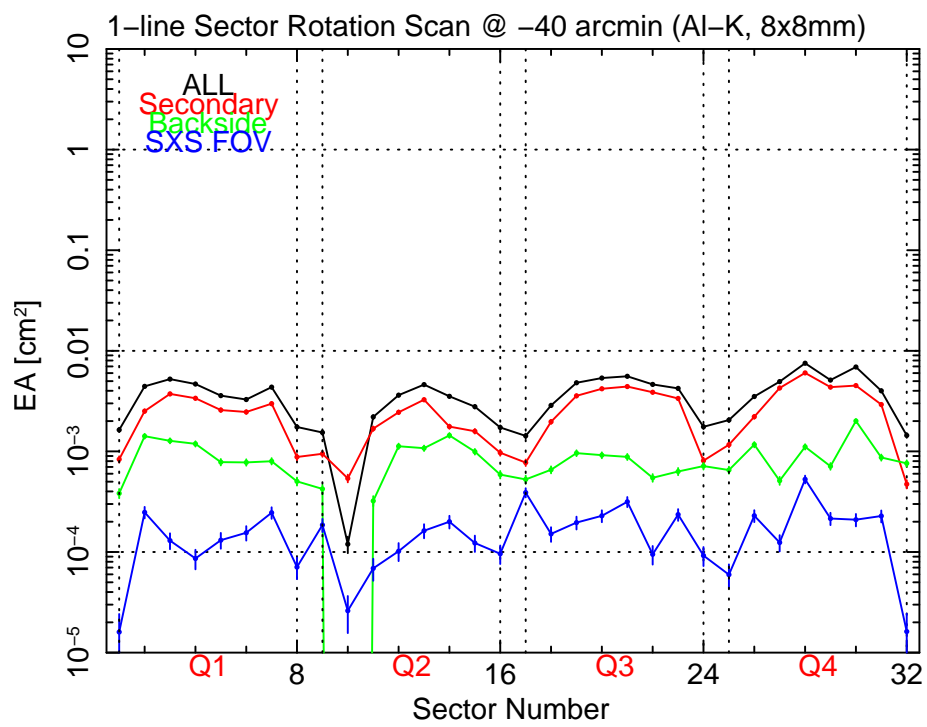


図 4.99: −40′ off-axis : 各ラインでの有効面積。

−30′ off angle

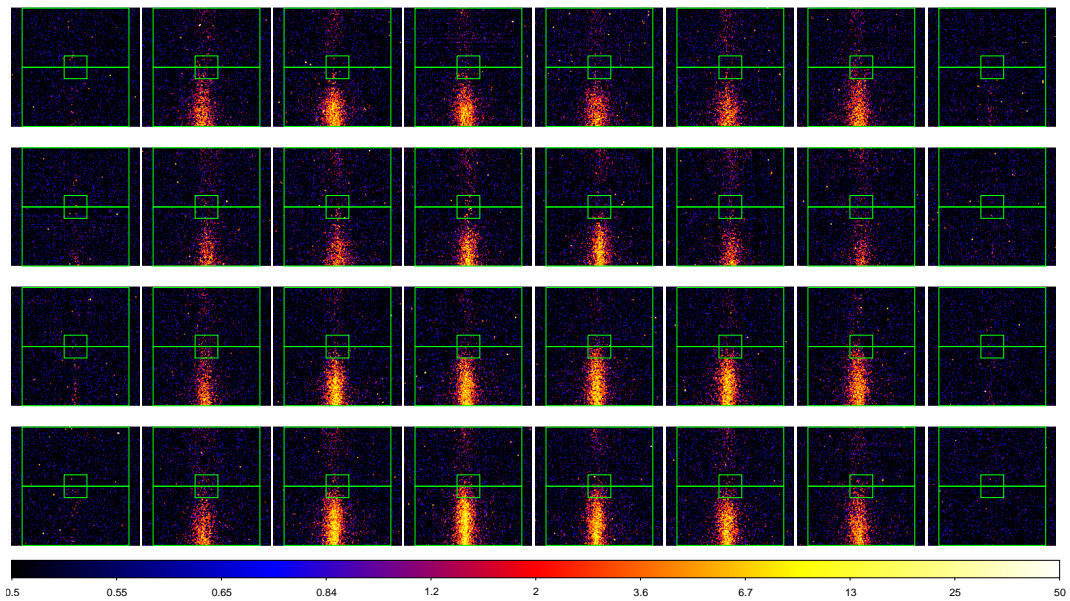


図 4.100: −30′ off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

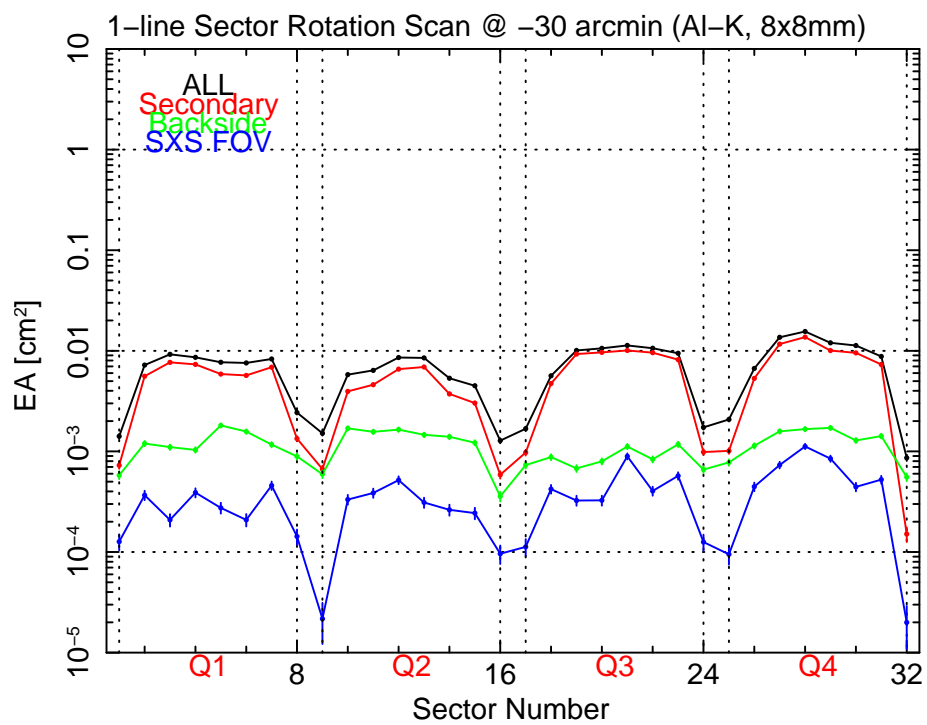


図 4.101: −30′ off-axis : 各ラインでの有効面積。



−25′ off angle

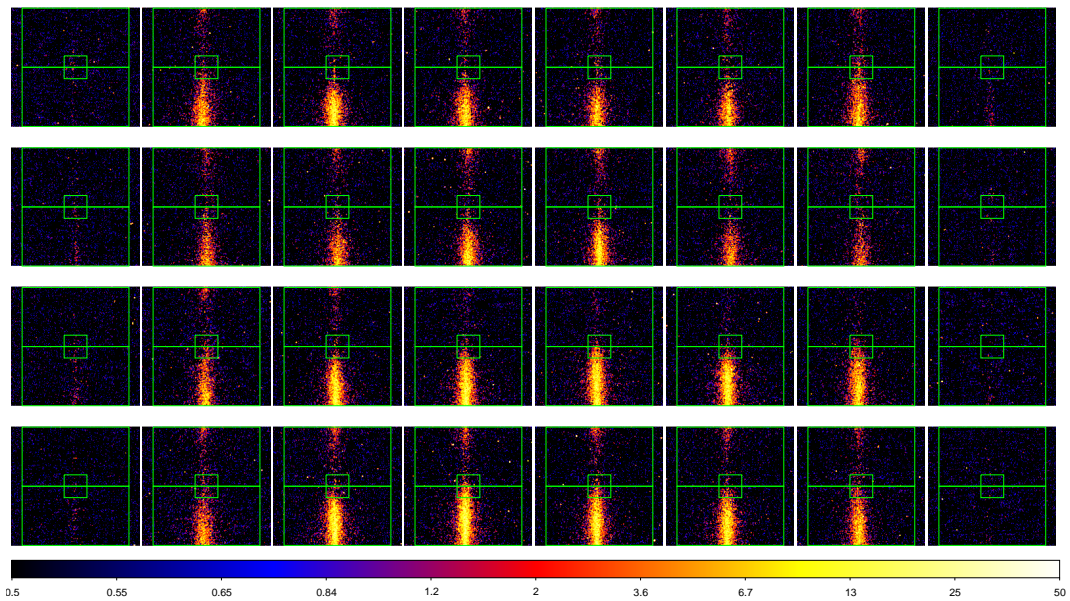


図 4.102: −25′ off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

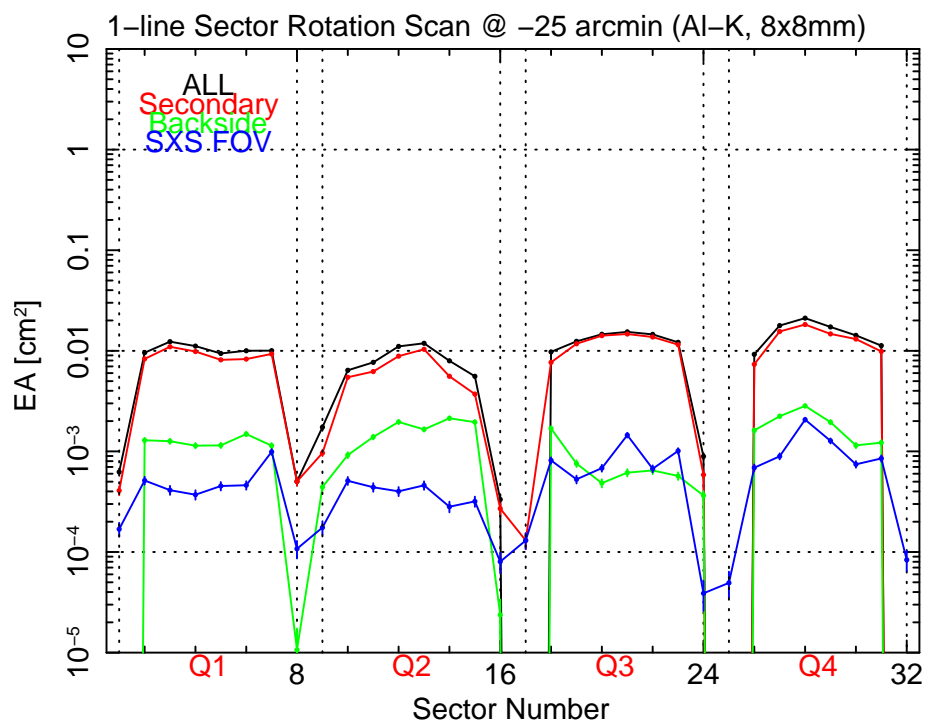


図 4.103: −25′ off-axis : 各ラインでの有効面積。

$-20'$  off angle

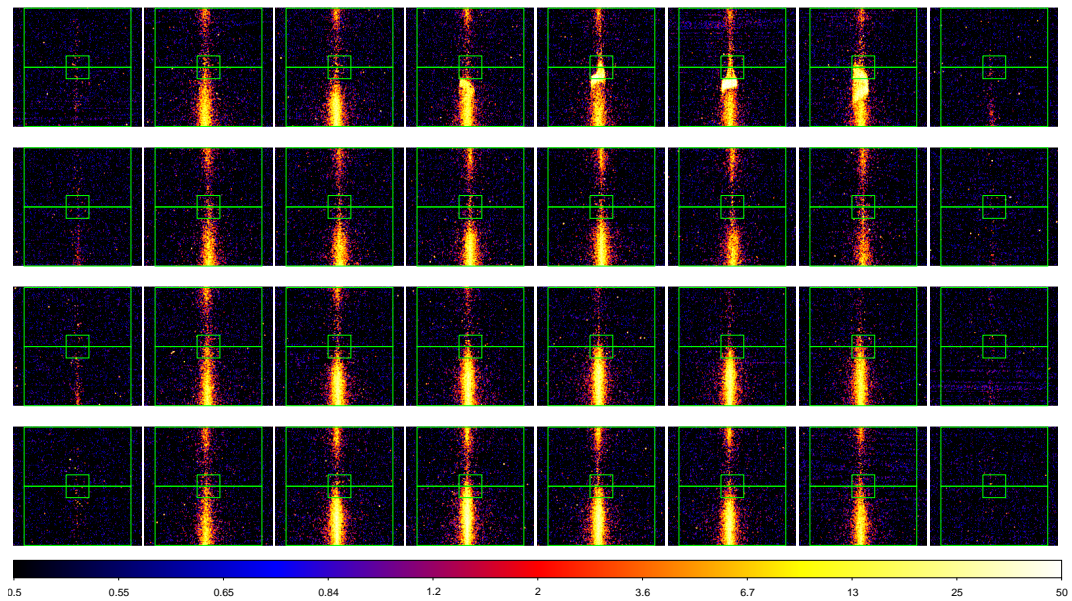


図 4.104:  $-20'$  off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

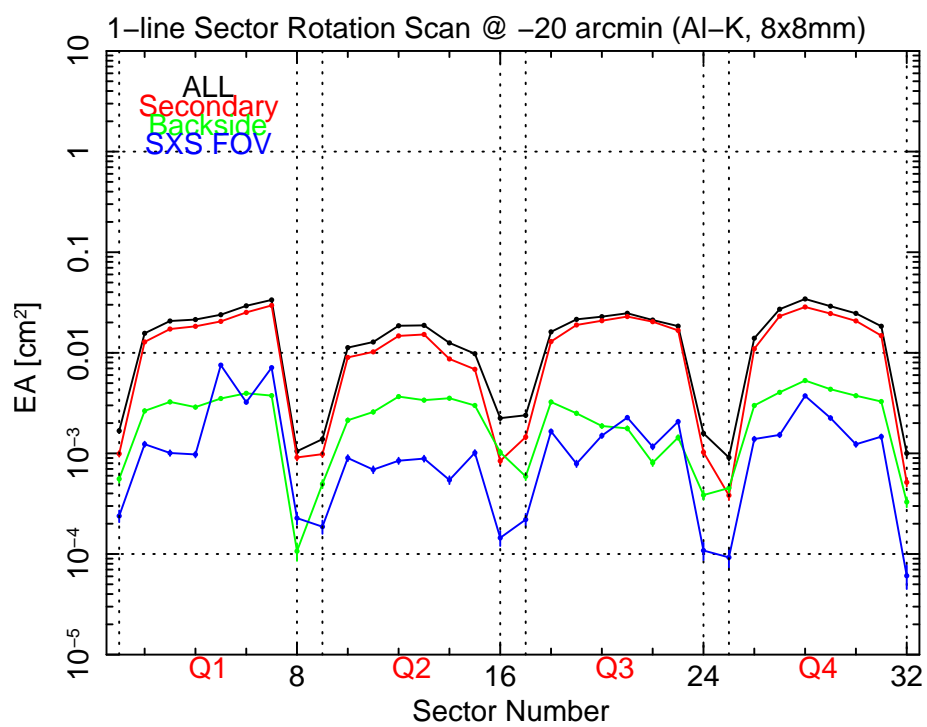


図 4.105:  $-20'$  off-axis : 各ラインでの有効面積。

−15′ off angle

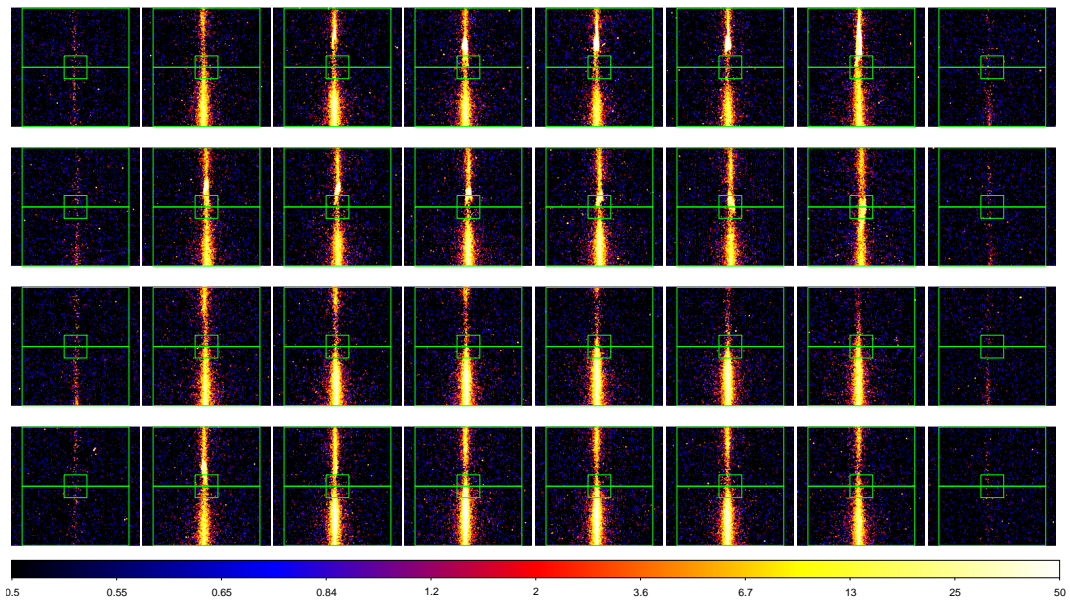


図 4.106: −15′ off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

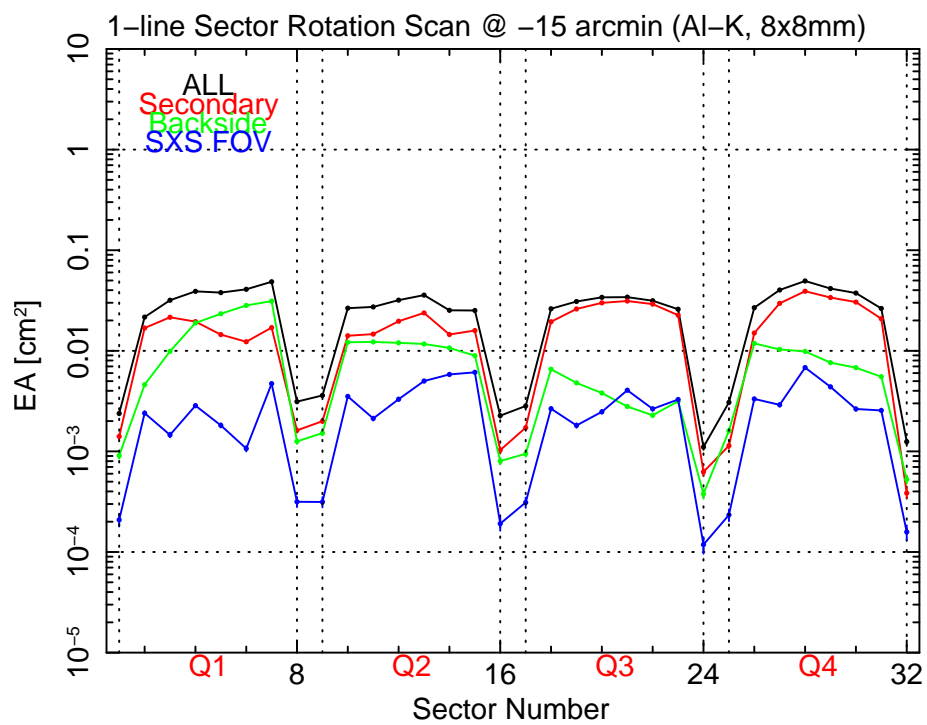


図 4.107: −15′ off-axis : 各ラインでの有効面積。

−10′ off angle

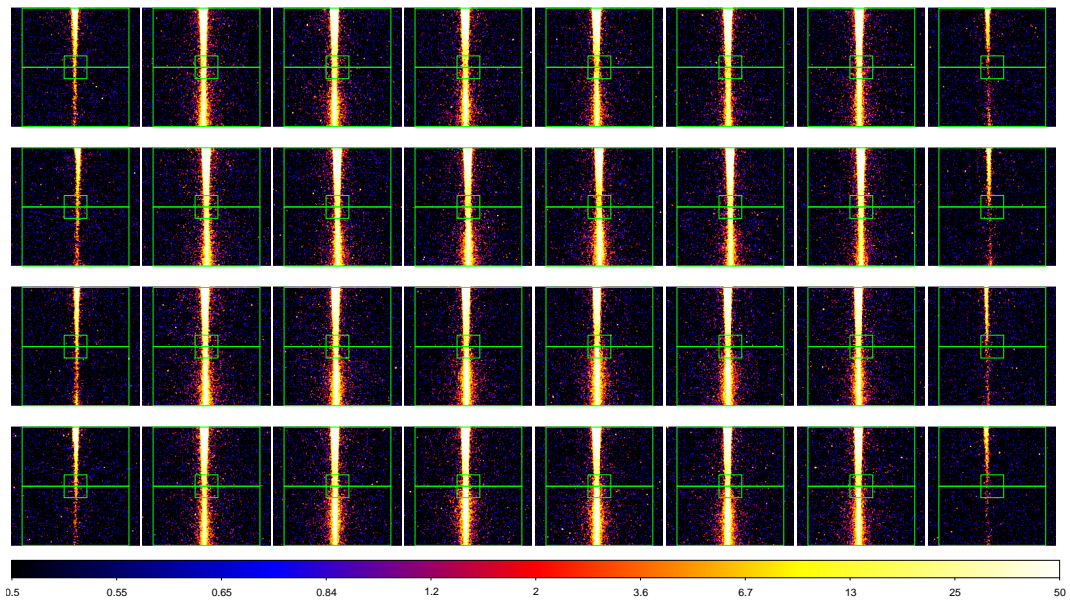


図 4.108: −10′ off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

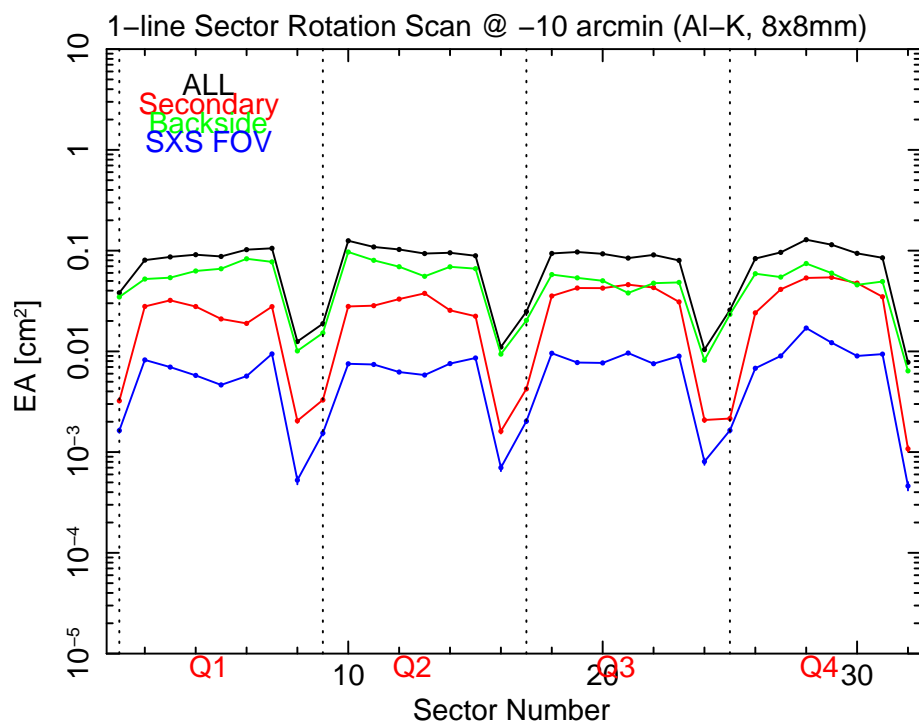


図 4.109: −10′ off-axis : 各ラインでの有効面積。



$0'$  off angle

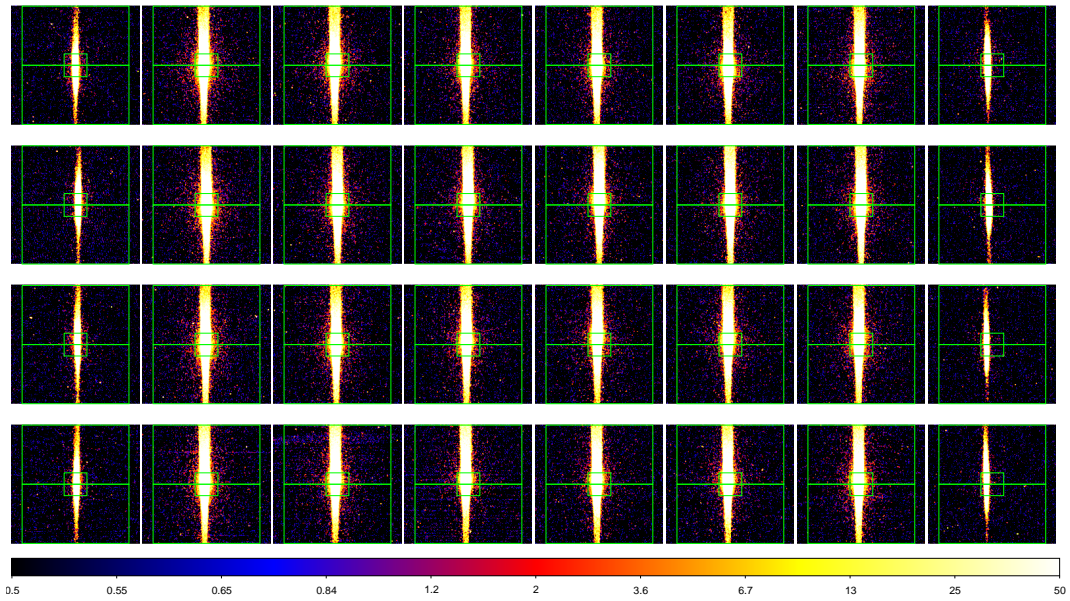


図 4.110:  $0'$  off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

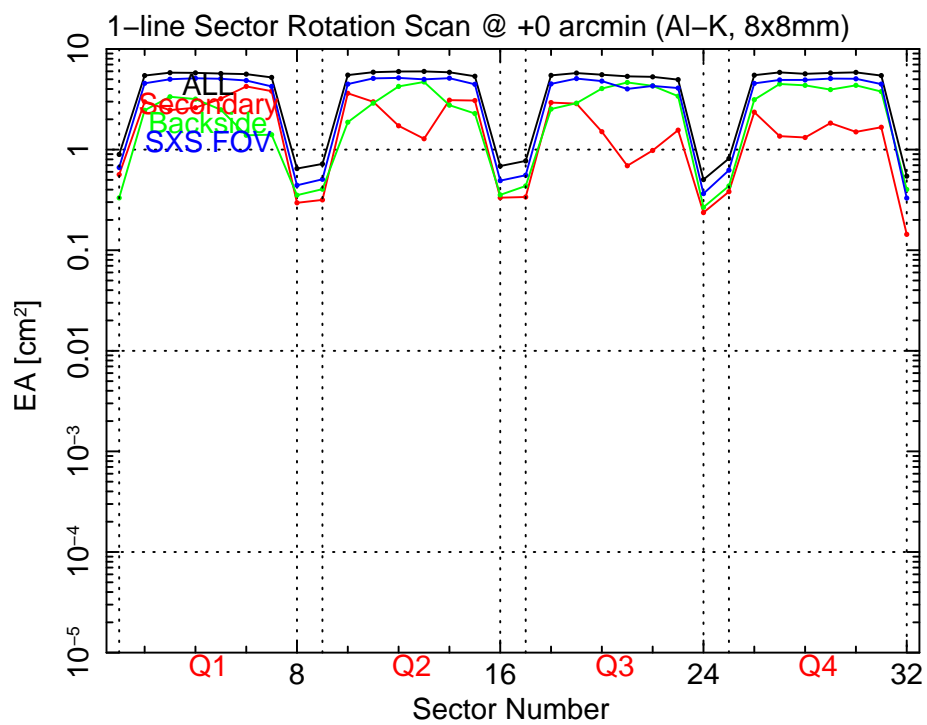


図 4.111:  $0'$  off-axis : 各ラインでの有効面積。

+10' off angle

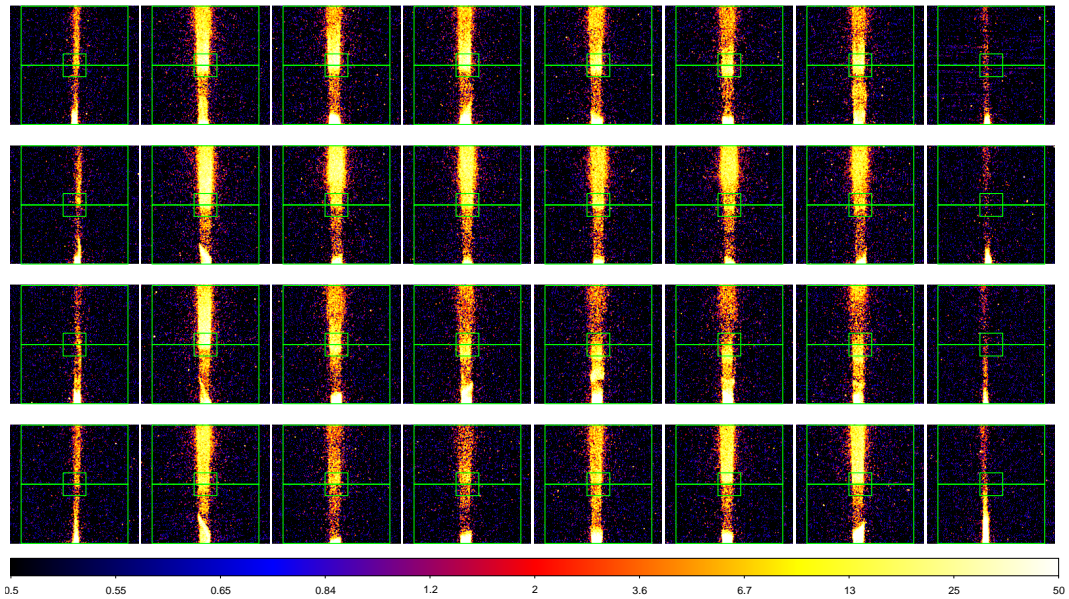


図 4.112: +10' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

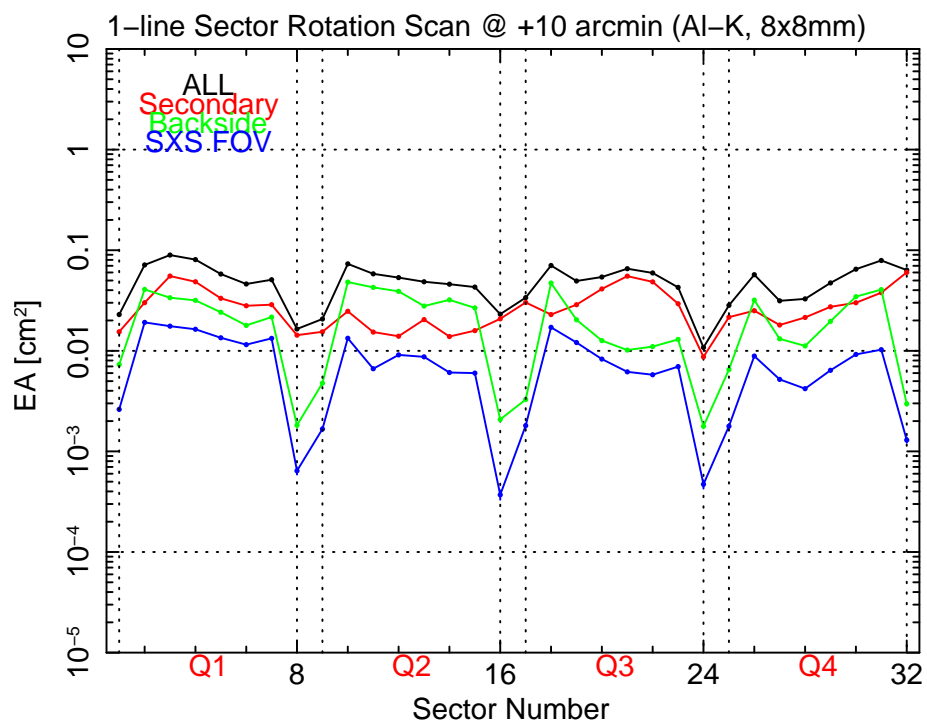


図 4.113: +10' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+15' off angle

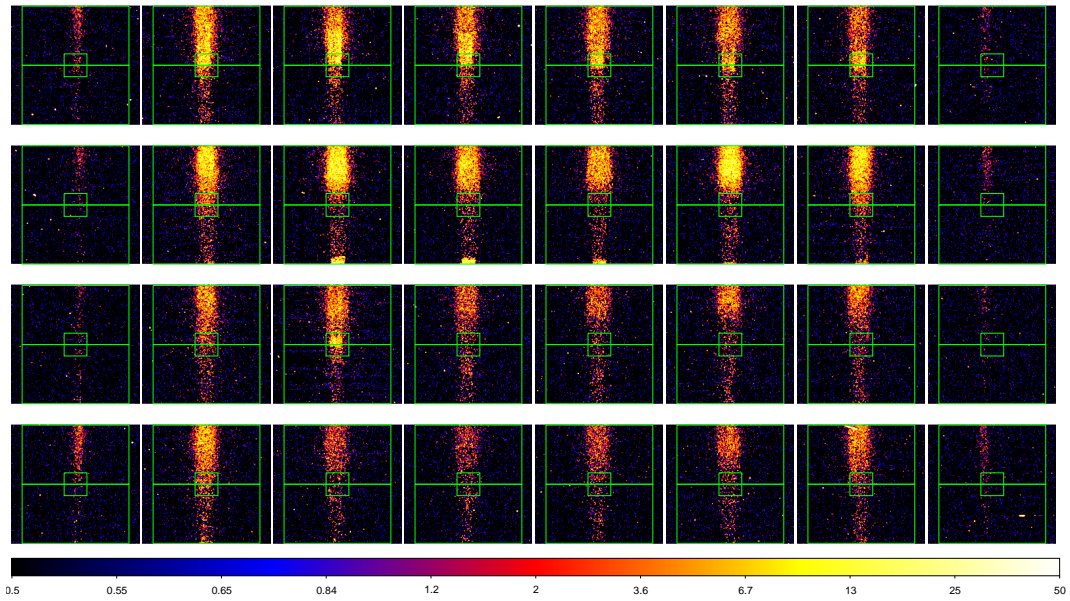


図 4.114: +15' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

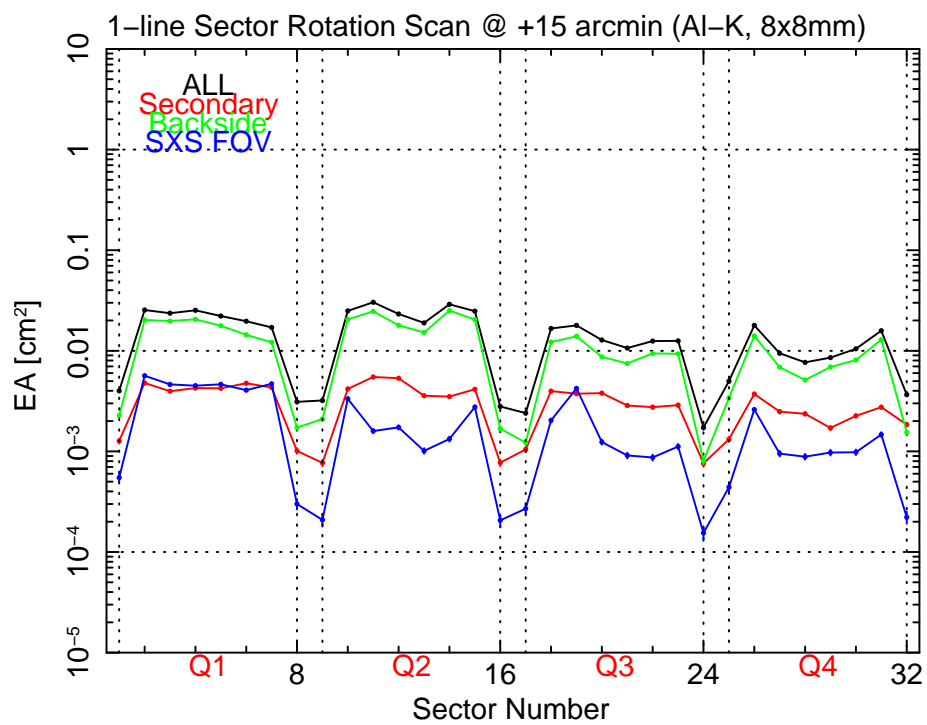


図 4.115: +15' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+25' off angle

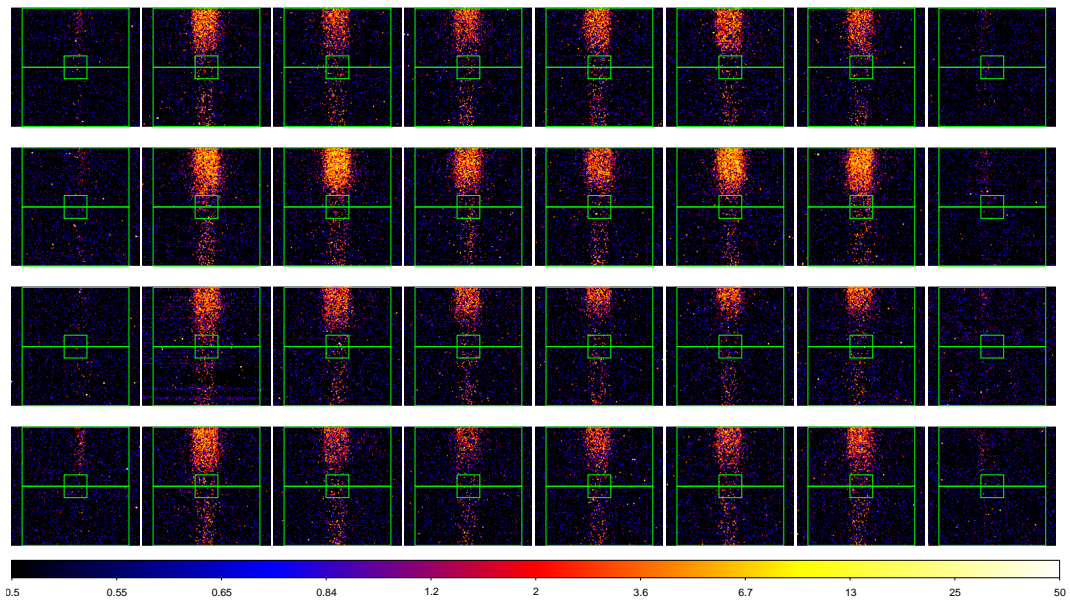


図 4.116: +25' off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

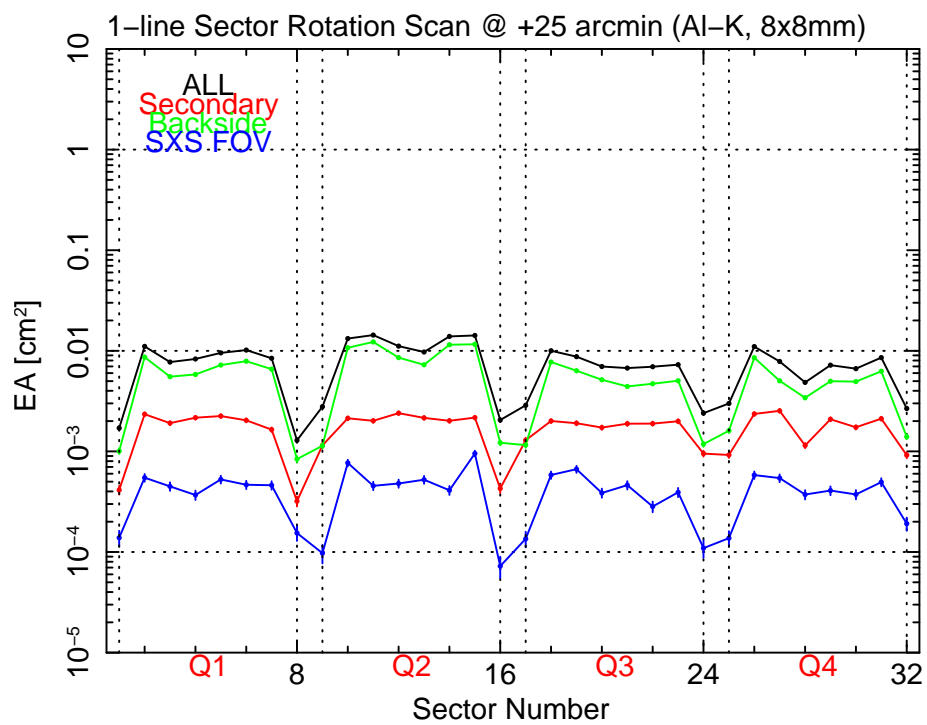


図 4.117: +25' off-axis : 各ラインでの有効面積。



+30' off angle

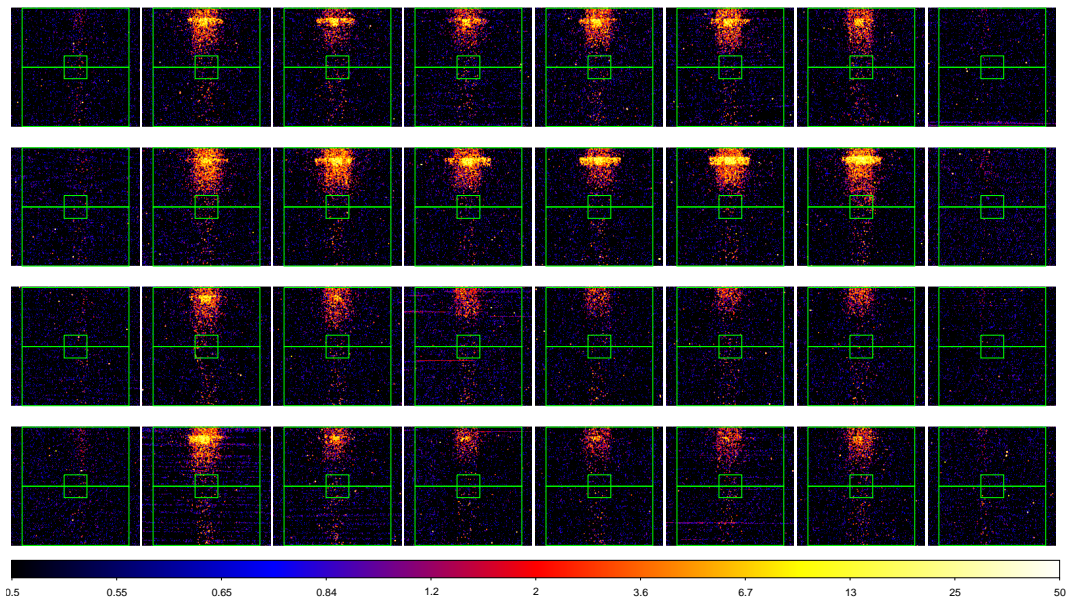


図 4.118: +30' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

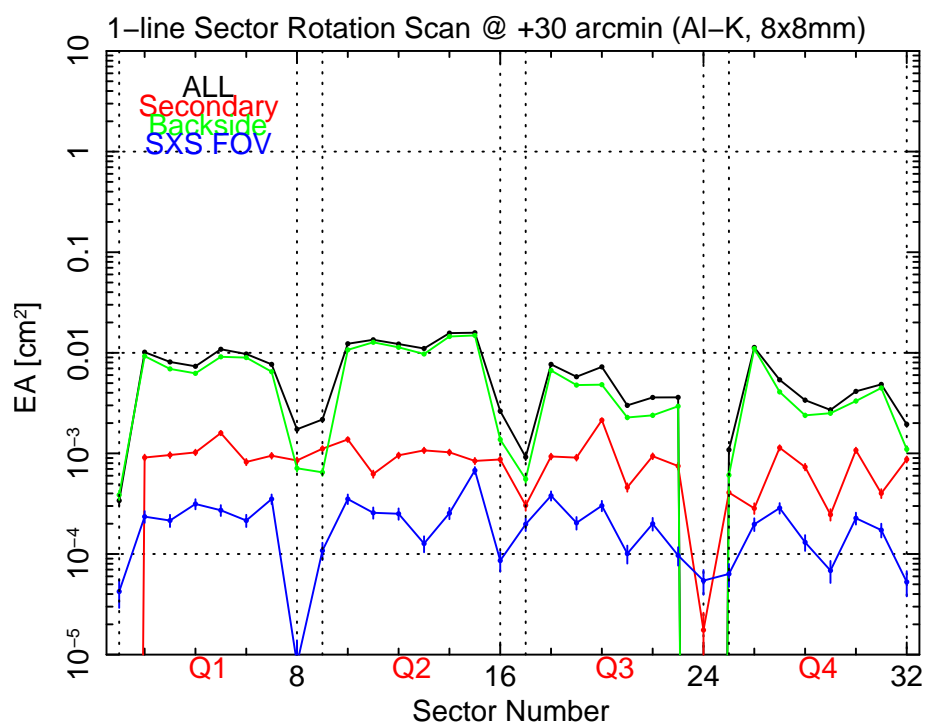


図 4.119: +30' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+35' off angle

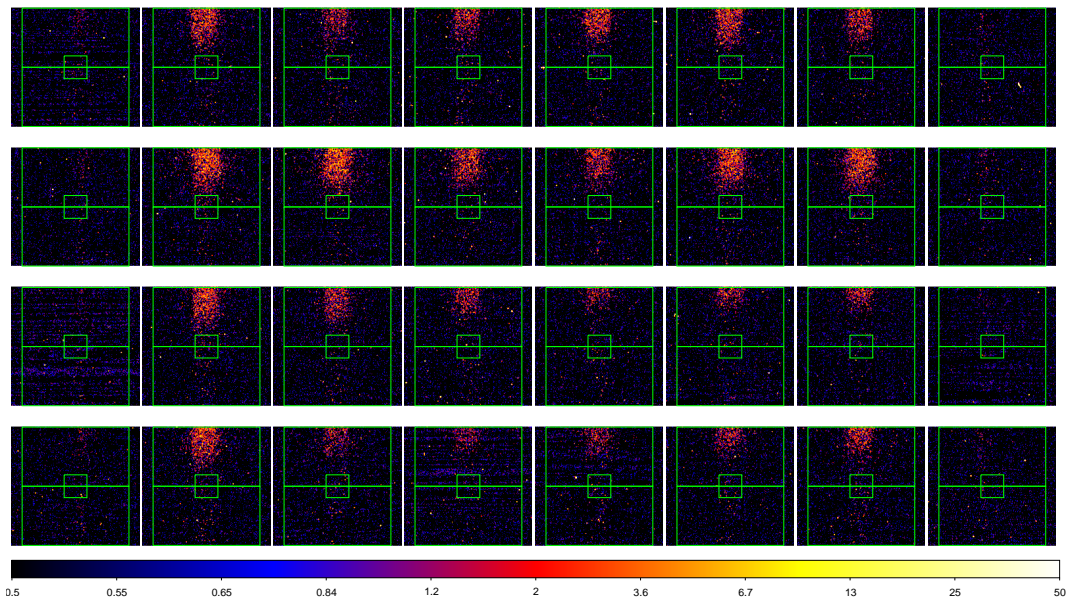


図 4.120: +35' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

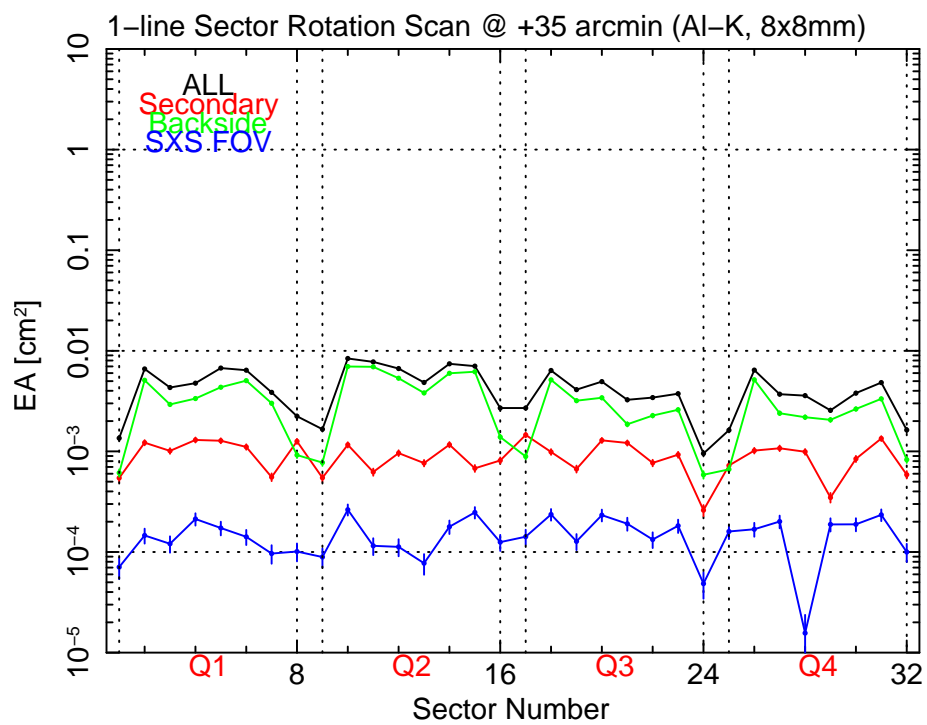


図 4.121: +35' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+40' off angle

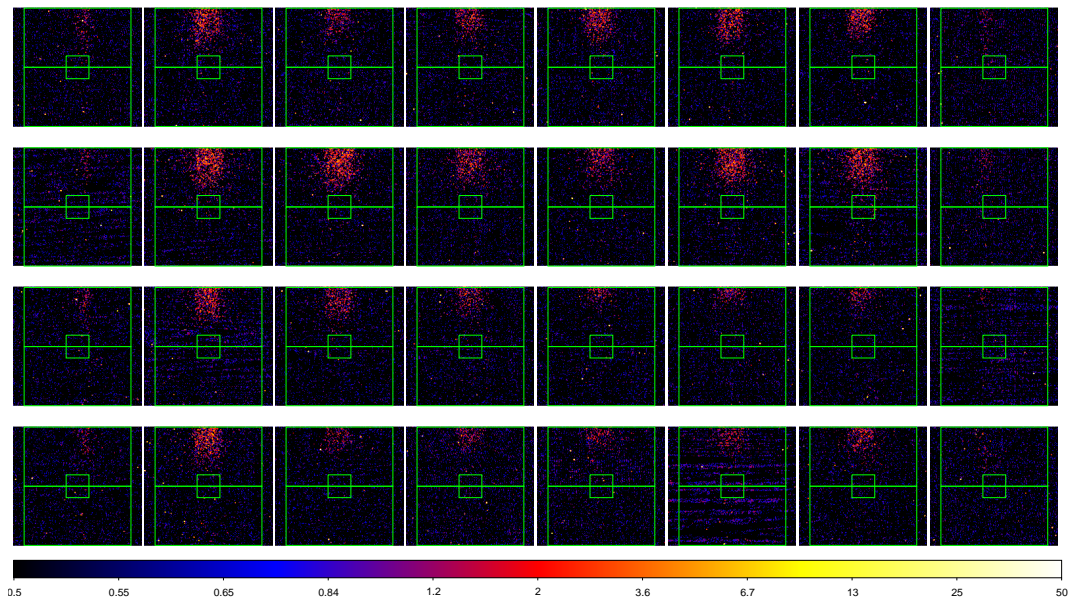


図 4.122: +40' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

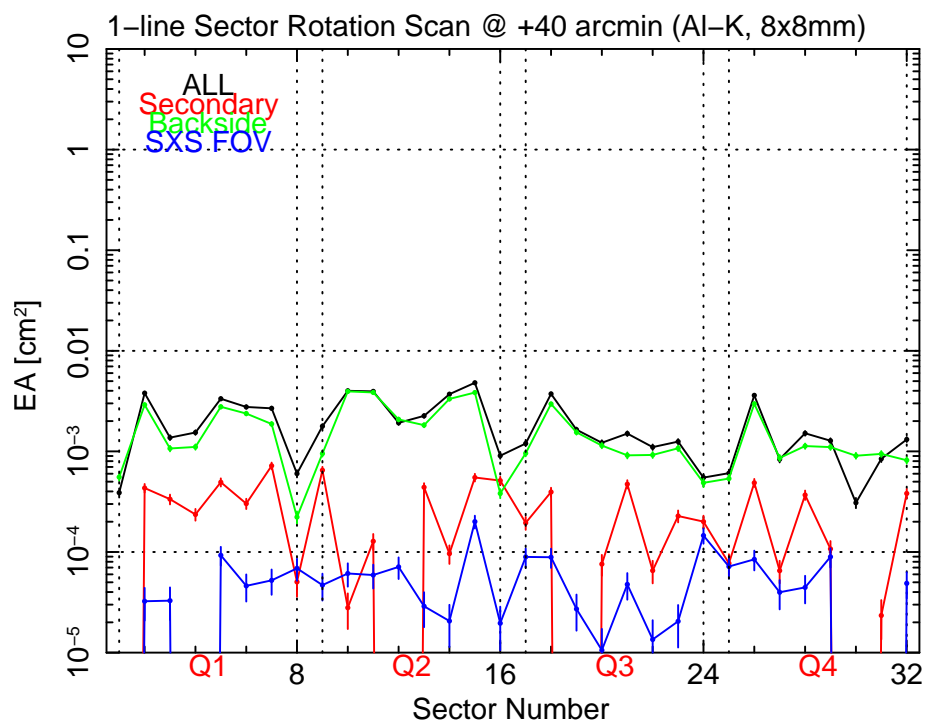


図 4.123: +40' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+45' off angle

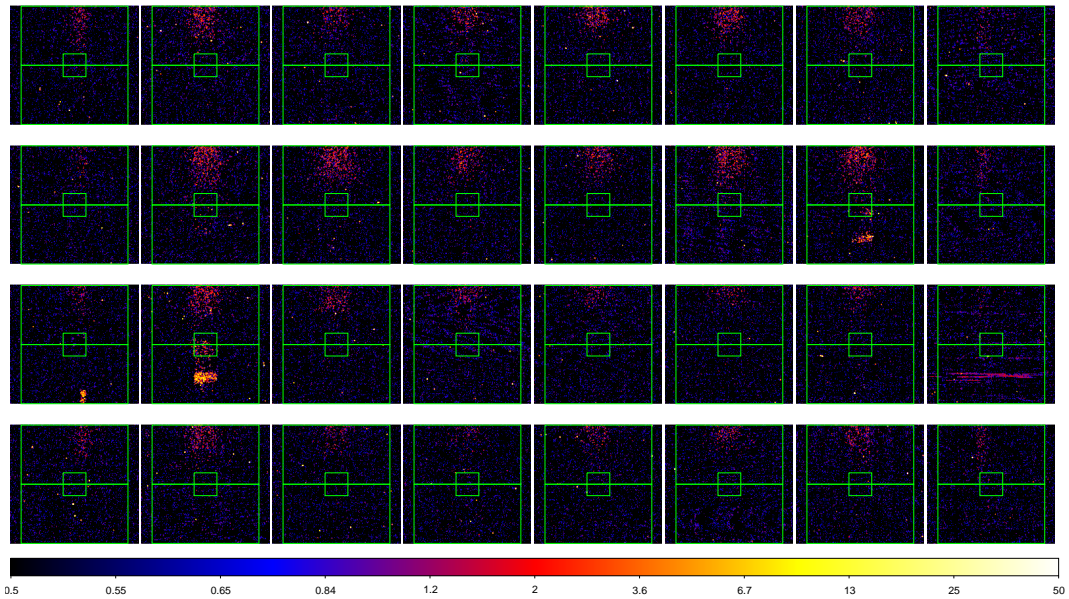


図 4.124: +45' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

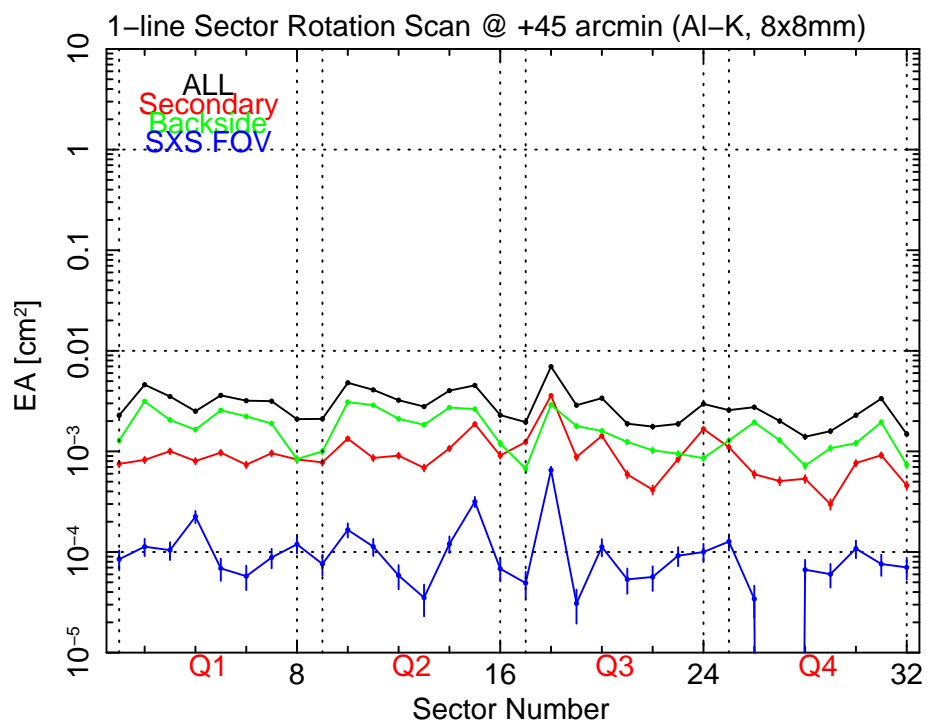


図 4.125: +45' off-axis : 各ラインでの有効面積。



+50' off angle

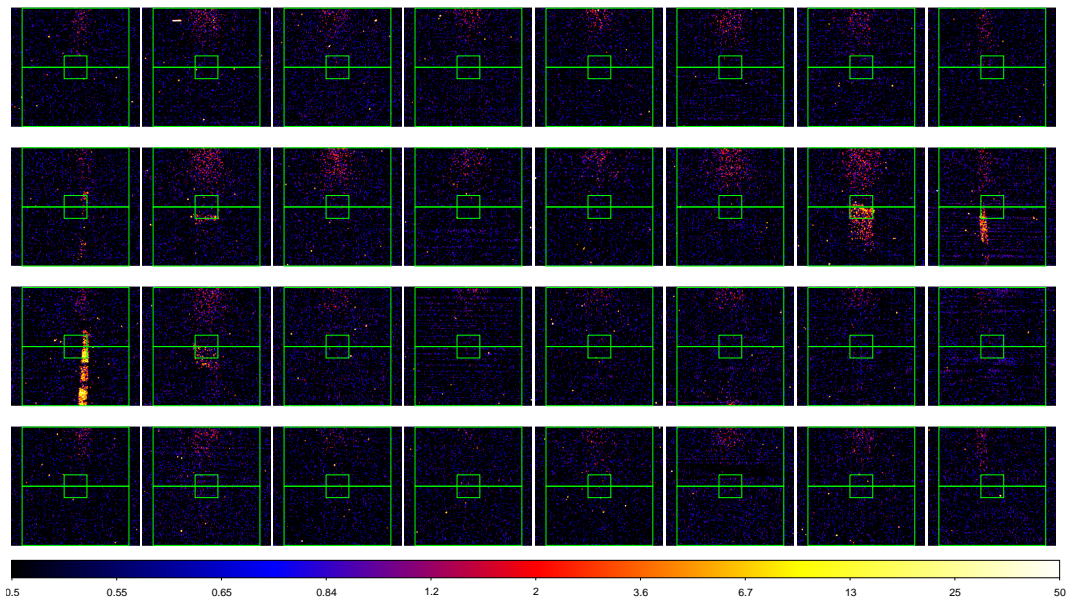


図 4.126: +50' off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

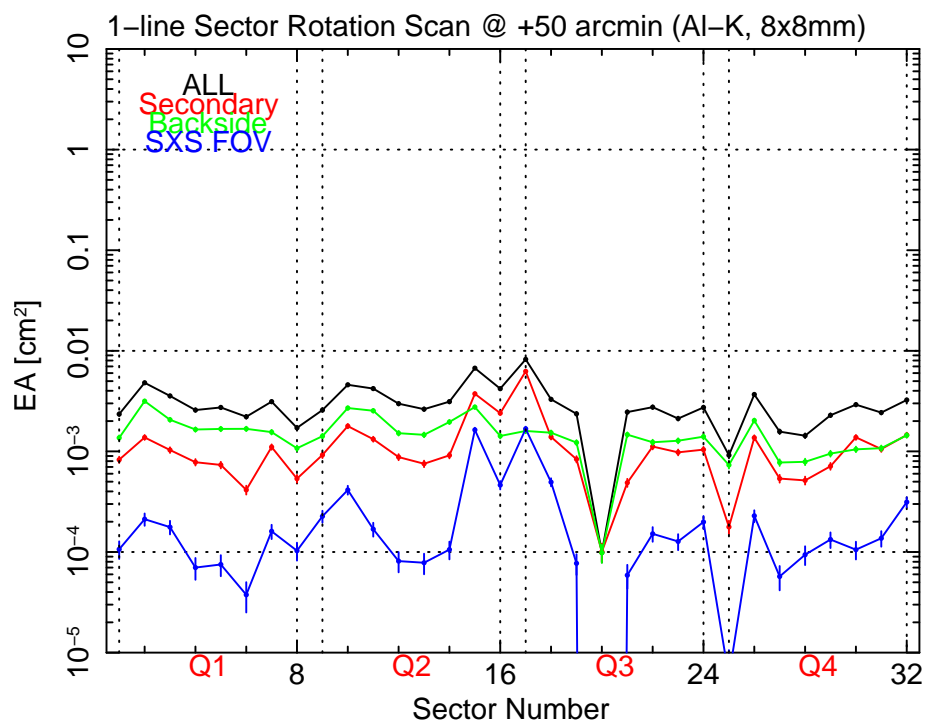


図 4.127: +50' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+55' off angle

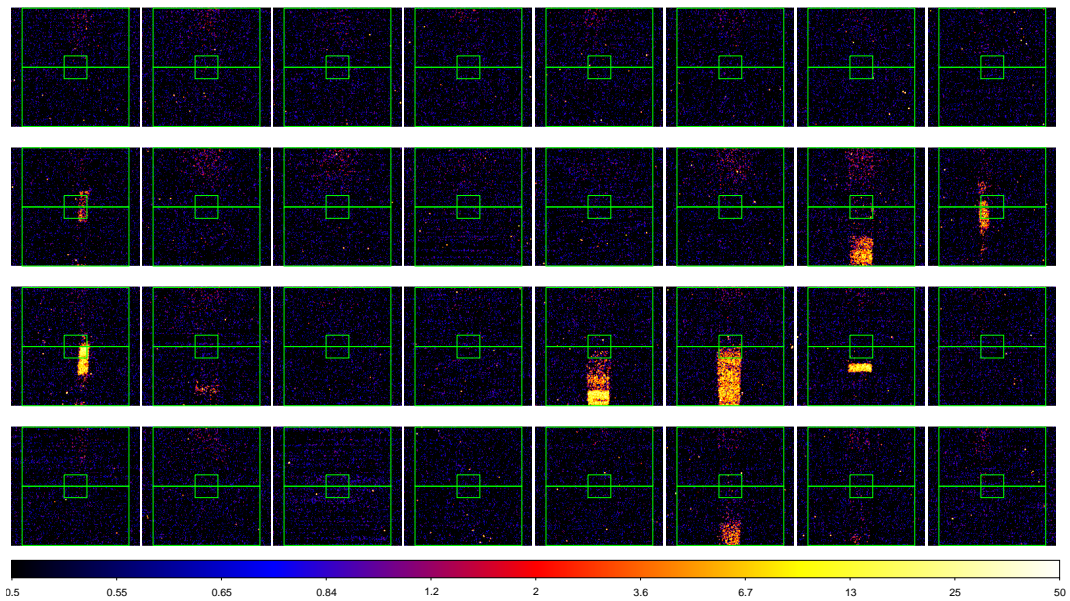


図 4.128: +55' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

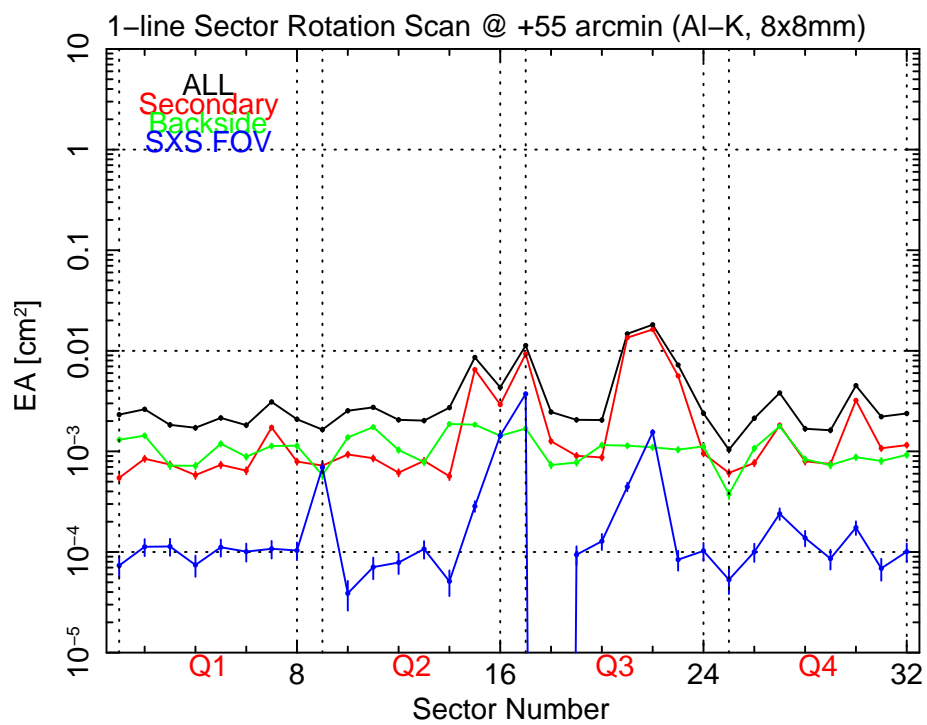


図 4.129: +55' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+60' off angle

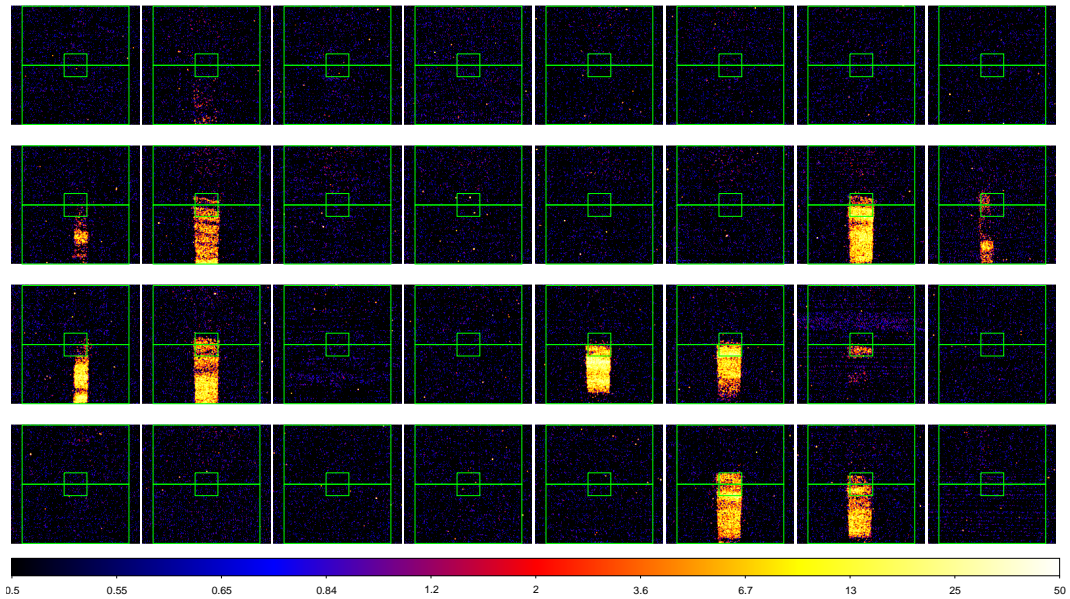


図 4.130: +60' off-axis : (列)–左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)–上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

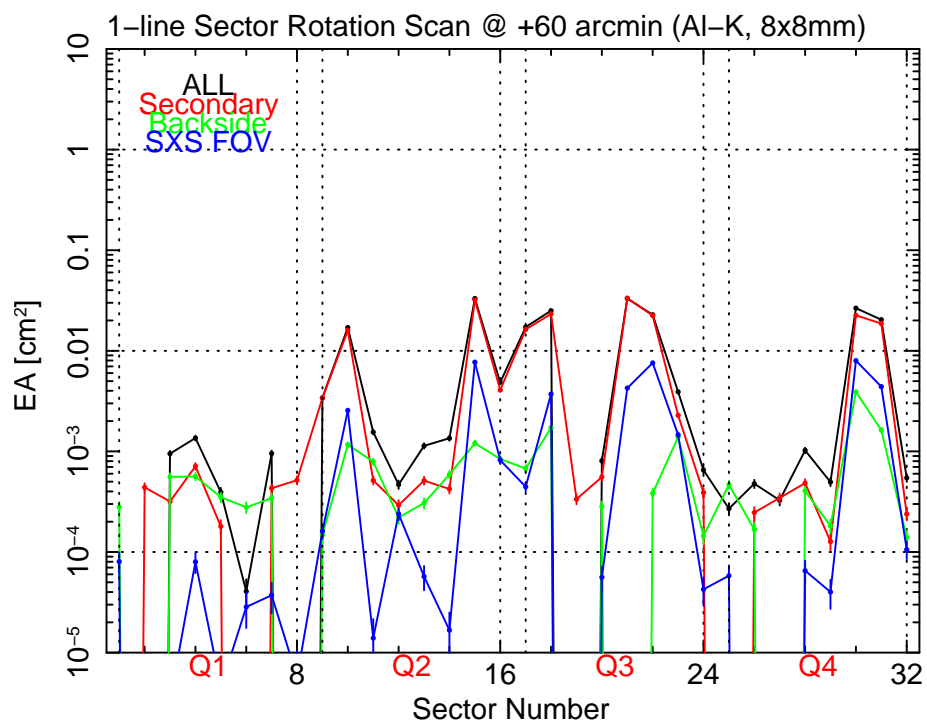


図 4.131: +60' off-axis : 各ラインでの有効面積。



+65' off angle

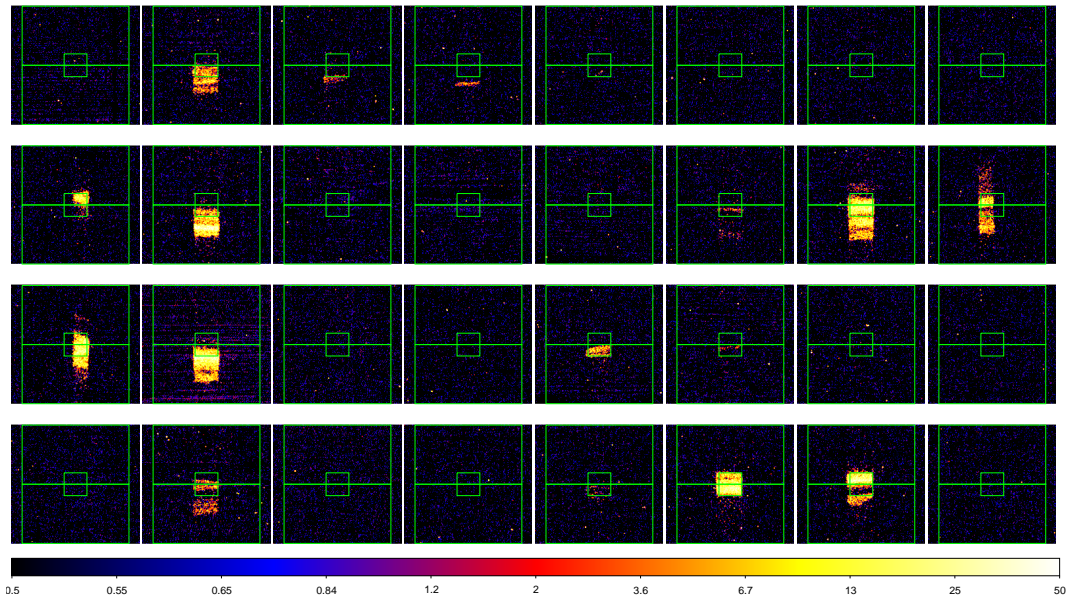


図 4.132: +65' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

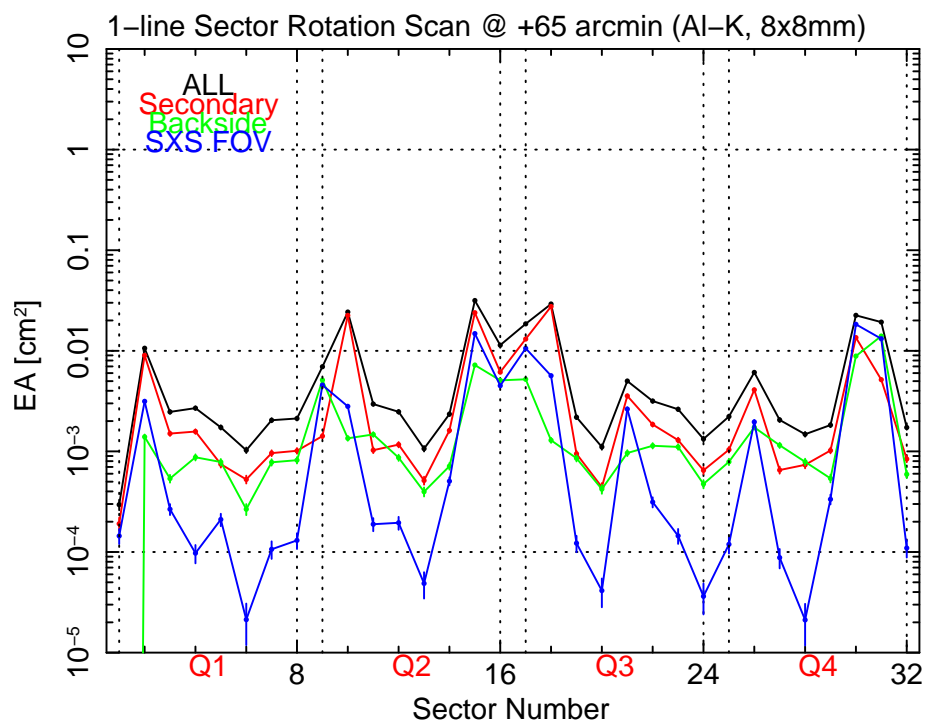


図 4.133: +65' off-axis : 各ラインでの有効面積。

+70' off angle

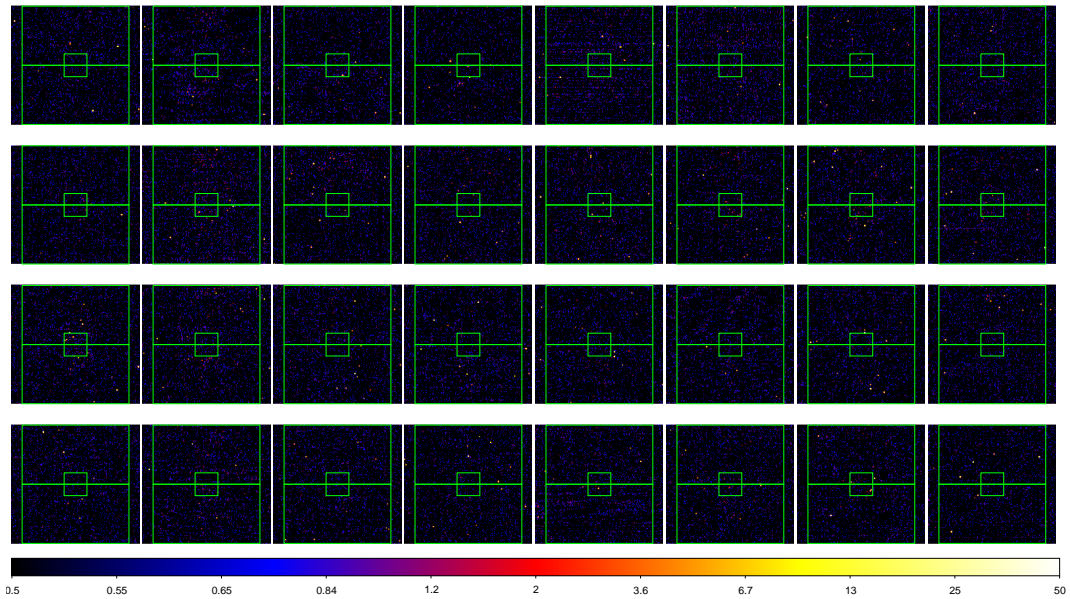


図 4.134: +70' off-axis : (列)-左 右は sector 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 の順に並ぶ。(行)-上 下は Q1, Q2, Q3, Q4 の順に並ぶ。

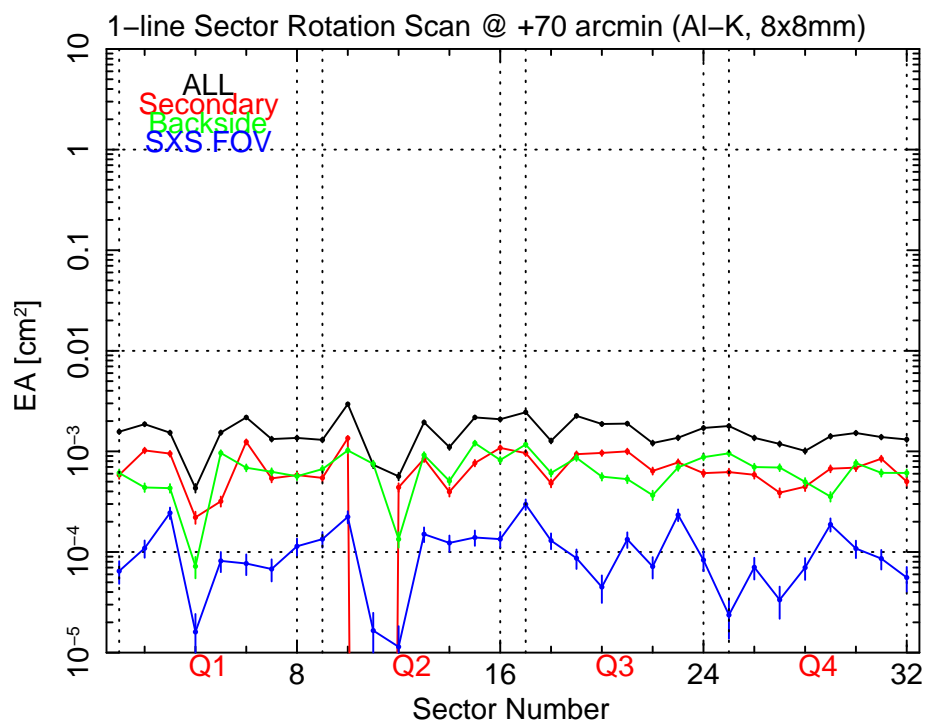


図 4.135: +70' off-axis : 各ラインでの有効面積。

## 1 line tilt scan

図 4.136: 測定条件

Config.	Q2, Q3 C-side(sector 5)
Target	Al-K $\alpha$ , Ti-K $\alpha$
Slit size	8 × 8 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	CCD, P.C.
angle	0~ $\pm 120'$ (1' pitch)

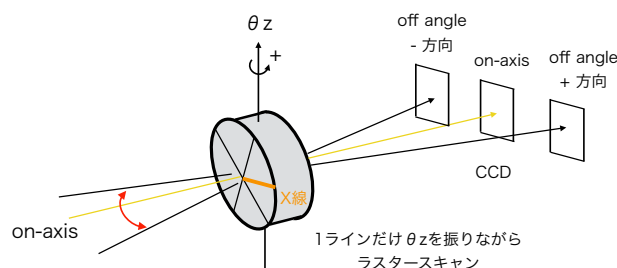


図 4.137: 1 line tilt scan

ここでは、1 line rotation scan によって得られた sector の個性をもとに、1 line tilt scan を用いてさらに細かい off angle で迷光測定を行う。1 line tilt scan では、rotation scan と同様に、ある sector を 1 ラインだけ走査して迷光を測定していく。しかしここでは rotation scan と異なり、ある sector に絞り、off angle を細かく振って測定する (図 4.137)。こうすることで、sector の迷光の細かい入射角依存性を測定することができる。またエネルギーは Al-K $\alpha$  と Ti-K $\alpha$  の二種類で行う。迷光成分の内、プリコリメータの反射を含む成分はエネルギー依存性を持つ。プリコリメータ表面は反射を少なくするためわざと粗い表面となっている。この粗い表面では、X 線が高エネルギーになるほど反射率が落ちていくため、寄与がエネルギーによって変化していく。実際、SXT-I の測定でも  $-20 \sim -40'$  程度の範囲にあらわれる 52 反射の成分がエネルギーの増加に伴って減少していることが分かっている。また、本測定では CCD との比較として P.C. による測定も行った。測定条件の詳細は、表 4.136 にまとめる。

調べる sector としては、Q2 と Q3 の sector 5 を選ぶ。Q2 sector 5 は、rotation scan の際、 $+60'$  付近にすり抜け成分が見えていないが  $+30'$  付近に素通り成分が見えていた。一方で Q3 sector 5 は Q2 の真逆であり、 $+60'$  付近にすり抜け成分が見えているが  $+30'$  付近に素通り成分は見えていない。これは、すり抜け成分が見える場合 (逆の場合もまた同様)、プリコリメータが設計より動径方向の内側よりずれているため、反射しない素通り成分の経路が狭まるため、二つの成分量には逆相関があることを示している。そのため、本測定では代表的にこの 2 つのクアドラントの sector 5 調査することにした。

図 4.138 には、Q2 と Q3 の sector 5 の tilt scan による各 off angle における有効面積のまとめを示す。Q2 では、rotation scan で測定した時と同様に、 $+60'$  付近にすり抜け成分は見えておらず、 $+30'$  付近の素通り成分が見えている。SXS の視野では考慮すれば素通り成分の寄与はほとんど効かず、 $\pm 50'$  以上大きい off angle では正常 2 回反射の 4 桁程度下の有効面積を示しており、迷光成分としては非常に小さいレベルといえる。また、Q3 の場合はやはり  $+60'$  付近にはすり抜け成分が目立ち、SXS の視野でも正常 2 回反射の 2~3 桁程度下のレベルである (図 4.138 上 2 つのプロット)。Q3 ではエネルギーの違いも調べている。図 4.138 右下に、Q3 の Al-K $\alpha$  と Ti-K $\alpha$  の測定結果の比較プロットを示す。この測定によって、すり抜け成分にはエネルギー依存性がほとんどみられないのに対して、 $-20'$  程度以降にみられる 52 反射成分が SXT-I の測定の際と同様に、エネルギーが高くなるにつれて減少していることがわかった。CCD と P.C. の測定の比較では、両者ほとんど同じ値を示しているが、Al-K $\alpha$  の  $-20'$  程度の領域に少し差がある。これは CCD による測定では、Al-K $\alpha$  のエネルギー以上の連続 X 線成分も有効面積の算出に入ってしまったため、低く出てしまうと考えられる。P.C. の測定ではスペクトルによって Al-K $\alpha$  だけのエネルギーを持ってこれるので、その違いが出てしまっていると思われる。

図 4.139~4.141 には、この測定で得られた実際のイメージを示す。

#### 4.5 迷光の評価

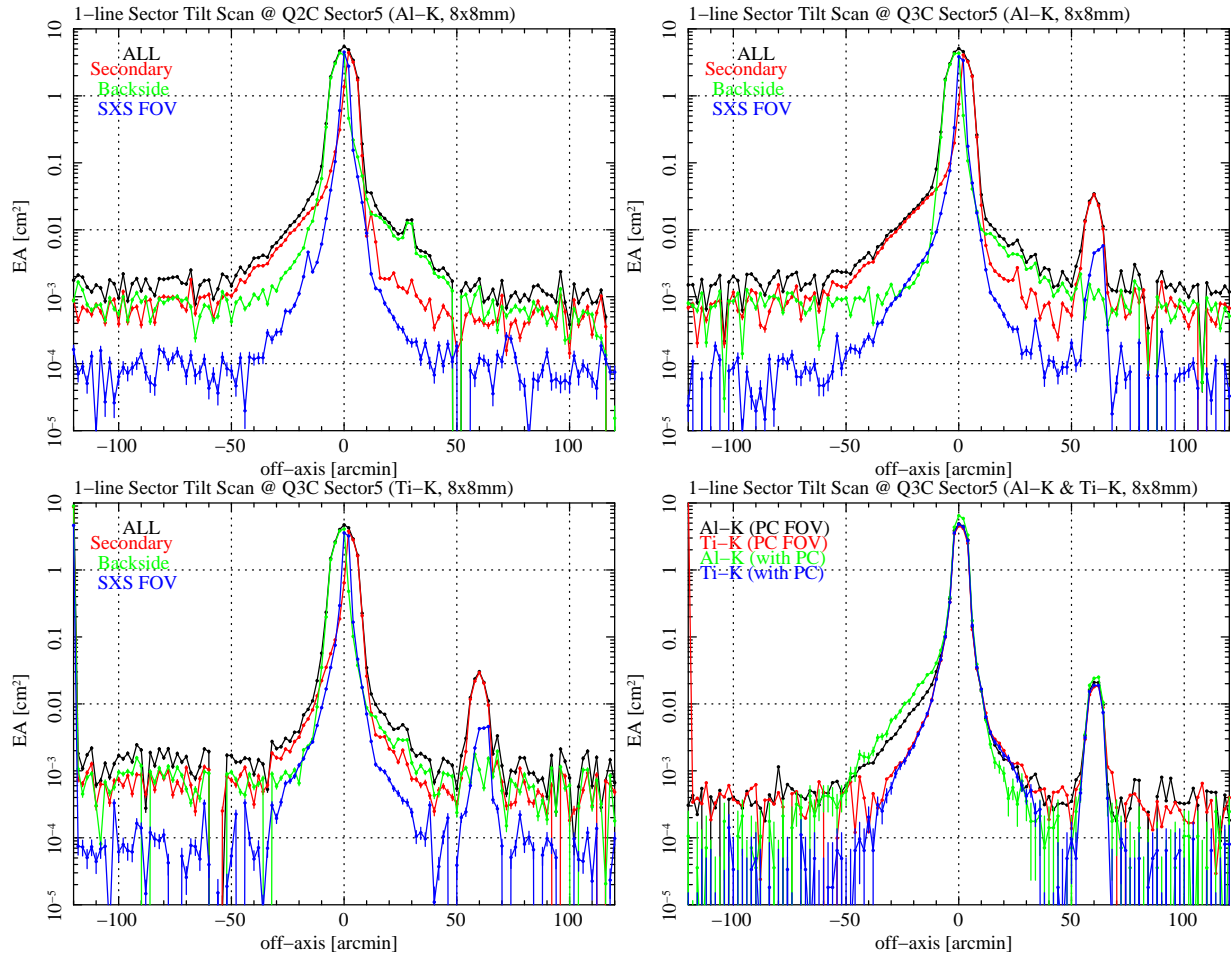


図 4.138: 1 line tilt scan による各 off angle での有効面積。(左上)–Q2C の Al-K $\alpha$  による測定。(右上)–Q3C の Ti-K $\alpha$  による測定。(左下)–Q3C の Ti-K $\alpha$  による測定。(右下)–Q3C の Al-K $\alpha$  と Ti-K $\alpha$  の各 off angle の有効面積 (PC FOV) の比較。

#### 4.5 迷光の評価

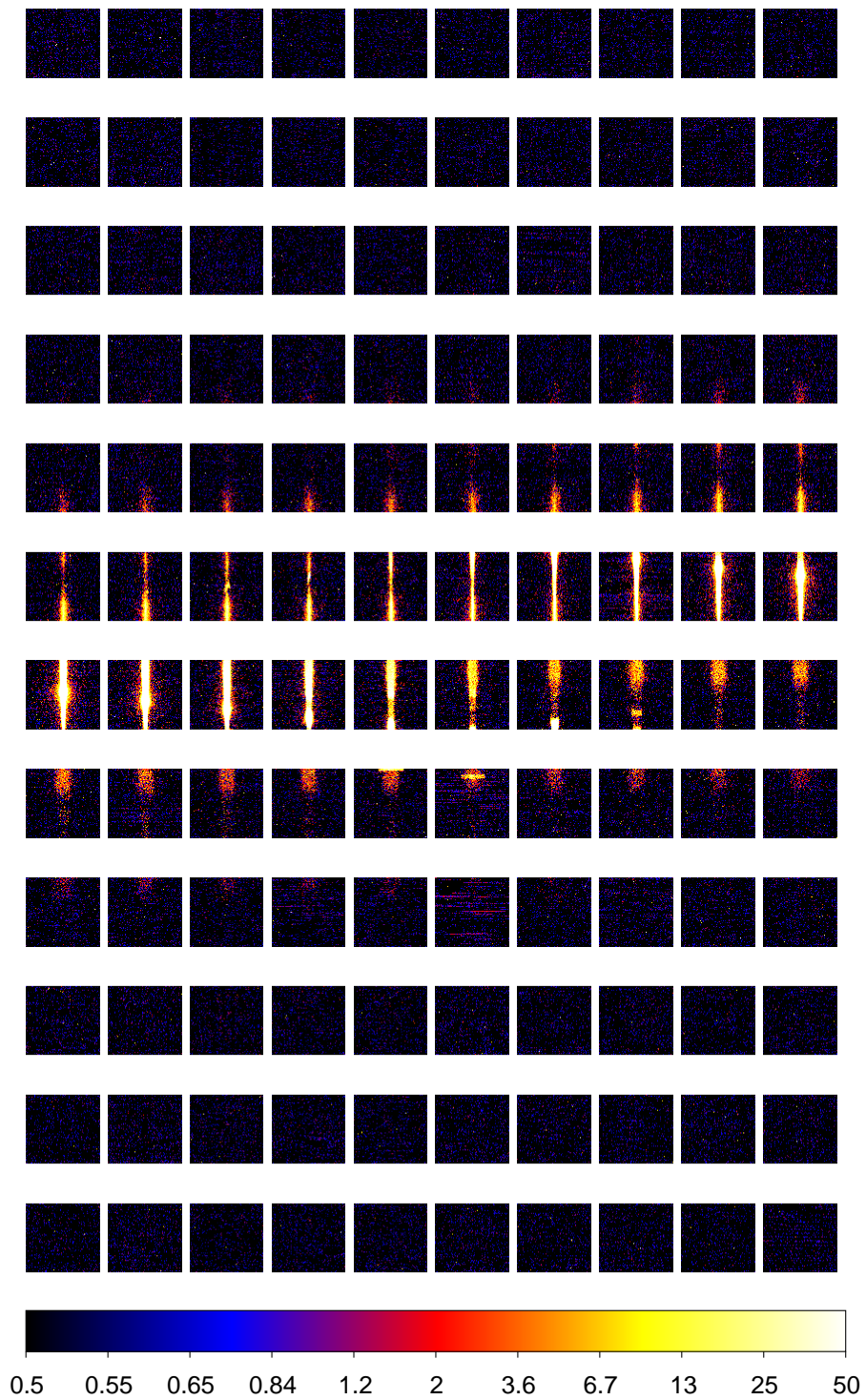


図 4.139: Al-K $\alpha$  による Q2C sector 5 の各 angle でイメージ。左上が  $-120'$ 、右下が  $+120'$  に対応。