修士論文

X線望遠鏡性能評価システムの高性能化と すざく型望遠鏡を用いた性能実証試験

指導教官 大橋 隆哉

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 修士課程 宇宙物理実験研究室

市原 昂

2013年1月20日

X線望遠鏡は宇宙からの微弱なX線を結像する事で、観測天体の位置や空間構造を把握する事を可能にし、また検出器の小型化を可能にすることで S/N 比の飛躍的な向上を実現した。

X線はほとんどの物質に対し屈折率が1よりもわずかに小さいため、X線望遠鏡には、回転放物面鏡と回転双 曲面鏡を組み合わせた Wolter I 型斜入射光学が採用されている。しかし、X線を反射鏡に斜入射角1度程度以下で 入射させる必要があるため、反射鏡を見込む面積が小さくなり、集光できるX線は非常に少ない。そこで、集光力 をできるだけ大きくする為に、厚さの薄い反射鏡を同心円状に、多重に積層した「多重薄板型」X線望遠鏡が考案 された。日本のX線天文衛星ではこのタイプの望遠鏡を採用しており、今までにあすか衛星及びすざく衛星に搭 載され目覚ましい成果を上げている。2014 年度に打ち上げが予定されている ASTRO-H 衛星にも、軟X線望遠鏡 (SXT) が2台、硬X線望遠鏡(HXT) が2台、合計4台の多重薄板型X線望遠鏡が搭載される。X線望遠鏡は衛 星に搭載される前に、その性能の評価、および応答関数の構築のために地上較正試験に供される。この試験には 軌道上での較正と異なり、単色、かつ強度の強いX線による評価を行うことができるという利点がある。しかし、 地上では天体からの光と同様の平行光を作り出すことが困難である。そこで、宇宙科学研究所X線ビームライン では、X線発生装置から 30 m の距離にある四極スリットでX線ビームを絞り、最大でも~23 秒角(スリットサ イズが 2 mm×2 mm の場合)という高い平行度を持つペンシルビームを成形している。このペンシルビームで、 望遠鏡と検出器を同時に移動させつつ、望遠鏡の入射面全面をくまなく走査するラスタースキャンと呼ばれる方 法により、擬似的に宇宙空間におけると同様の、平行光が望遠鏡入射面全面に当たった状態での性能評価を行うこ とができる。

宇宙科学研究所X線ビームラインでは、今までにあすか衛星及びすざく衛星に搭載されたX線望遠鏡の地上較正 試験を行ってきた。しかし、すざく衛星のX線望遠鏡が口径 400 mm、焦点距離 4.5 m であるのに対し、ASTRO-H 衛星に搭載される SXT は口径 450 mm、 焦点距離 5.6 m と大型化しており、既存のビームラインでの測定は不可 能であった。そこで、2013 年に予定されるフライトモデルの地上較正試験に向けて、2012 年にビームラインに大 規模な改修を施した。四極スリットステージ、望遠鏡ステージ、検出器ステージを搭載した全長 11.3 m、直径 1.8 mの円筒型の測定チャンバーを新たに導入し、最大で口径 450 mm、焦点距離 0.7 ~ 9.0 m の望遠鏡の測定が可能 になった。しかし、測定チャンバーの巨大化に伴いX線発生器から四極スリットまでの距離は 30 m から 27 m に短 くなり、それに伴いペンシルビームの平行度も ~3 秒角程度悪くなっている。撮像に用いるX線 CCD カメラの更 新も行い、従来のカメラに比べて撮像が高速になったことにより、CCD カメラを用いた分光測定も現実的となっ た。また、温度、真空度の記録システムの導入に加え、水晶振動子センサーの導入によりコンタミネーションの 監視も可能となり、環境管理の面でフライトモデルを受け入れる体制が整っている。

私は、ビームラインの改修に伴い、新しい測定システムの構築を行った。ラスタースキャンによる測定を行う ためには、望遠鏡ステージと検出器ステージの動作を高い精度で同期させる必要があり、更に検出器の露光等の 操作も同時に行わなければならない。そのためにステージコントローラ、検出器コントローラの同期制御が可能な ソフトウェアの開発を行った。また、二結晶分光器や可動式X線発生器ステージの制御もソフトウェアに組み込 むことにより、ビームラインに装備されているあらゆる移動ステージを単一のワークステーションから同期制御 することを可能にした。完成したシステムにおけるステージ同期性の評価のため、CMOS カメラを用いたステー ジ同期性確認試験を行った。その結果、検出器ステージと望遠鏡ステージを同期制御した時に、ステージ可動範 囲内で両ステージ間のずれは±20 μm(~1.5 秒角)以内、再帰性は±3 μm(~0.3 秒角)以内であり、十分な精度を 持っていることがわかった。更に、システムの実証のために、すざく型X線望遠鏡の性能評価試験を行った。こ の望遠鏡はすざく衛星のものと同じく口径 400 mm、焦点距離 4.5 mのX線望遠鏡鏡であるが、すざく衛星に搭載 された望遠鏡に比べ結像性能が向上しており、HPD で 1.08 分角である (2009 年林修論)。今回の私の測定結果で は HPD が 1.10 分角となり、両者の結果は誤差の範囲内で一致している。

本研究により、宇宙科学研究所ビームラインにおいて従来よりも大口径、多様な焦点距離の望遠鏡の測定が可 能である測定システムの性能が実証され、ASTRO-H 衛星に搭載するX線望遠鏡のフライトモデルに向けた測定体 制が整ったと言える。本論文では、ビームラインの改修と制御システムの詳細について述べ、システム実証試験 の結果について議論する。

目次

第1章	序論	1
1.1	X線天文学	1
1.2	ASTRO-H 衛星の概要	1
第2章	X線望遠鏡	3
2.1	X 線の反射	3
	2.1.1 トムソン散乱	3
	2.1.2 X 線の全反射	5
2.2	結像光学系	9
	2.2.1 結像の基本条件	9
	2.2.2 斜入射光学系	10
2.3	X線望遠鏡の種類1	1
	2.3.1 多重薄板型	11
	2.3.2 直接研磨型	11
2.4	X線望遠鏡の性能	13
	2.4.1 集光力 (有効面積)	13
	2.4.2 結像性能(HPD、PSF、EEF)1	13
2.5	軟X線望遠鏡 (SXT) 1	15
	2.5.1 SXTの概要	15
	2.5.2 地上較正試験	17
第3章	宇宙科学研究所 X 線ビームライン 1	19
3.1	測定システム	19
	3.1.1 X線発生器 1	19
	3.1.2 真空系	22
	3.1.3 金属フィルター、二結晶分光器 2	24
	3.1.4 四極スリット	27
	3.1.5 測定チャンバー及びステージ 2	28
	3.1.6 焦点面検出器	28
3.2	宇宙科学研究所X線ビームラインにおける性能測定方法	29
第4章	ビームラインの改修	33
4.1	ビームライン改修の概要 ニー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 音	33
4.2	新測定チャンバー	33
4.3	検出器ステージ及び望遠鏡ステージ	35
4.4	X線ビーム平行度の悪化による測定結果への影響	39

ii

第5章	新測定システムの構築	41
5.1	システムに要求される性能...................................	41
	5.1.1 ステージ同期性能	41
	5.1.2 望遠鏡全面を自動スキャンできる機能	43
5.2	システム構成	44
	5.2.1 ステージ制御	44
	5.2.2 検出器制御	46
	5.2.3 ワークステーション	46
5.3	制御ソフトウェアの開発	47
	5.3.1 ソフトウェア構成	47
	5.3.2 マクロ制御	49
5.4	ステージ同期性試験	52
	5.4.1 測定方法	52
	5.4.2 測定結果	52
笋 6 音	測定システムの実証試験	55
カリ早 61		55
6.2	9 C Y 至重逐號	55
0.2	(A)	58
	6.2.1 Vignetting 少國定	50
	0.2.2 点点距離の固定	59
63	0.2.5 柏豚住肥、有劝曲慎切侧足	61
0.5	侧足和术	01
第7章	まとめと今後の展望	67
7.1	総括	67
	7.1.1 制御ソフトウェアの開発	67
	7.1.2 スニー 心同期供の誕年	67
	/.1.2 入了 ーン 回朔性の 評価	07
	7.1.2 スケーン同期性の評価 7.1.3 システム実証試験	67

図目次

2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。	4
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数.................................	5
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数	5
2.4	単層膜の理論反射率。	7
2.5	原子散乱因子 f1,f2 の原子量と入射 X 線エネルギーに対しての値。	8
2.6	アッベの正弦条件。	9
2.7	Wolter 型光学系	10
2.8	X 線望遠鏡の断面図	11
2.9	「多重薄板型」X 線望遠鏡	12
2.10	「直接研磨型」X 線望遠鏡	12
2.11	焦点面のイメージ....................................	14
2.12	Point Spread Function	14
2.13	PSF、EEF、HPDの関係	15
2.14	SXT-EM クアドラントの外観(左)、SXT-FM の外観(右)。	16
3.1	宇宙科学研究所X線ビームラインのチャンバー配置図	20
3.2	X 線発生装置の構成図	21
3.3	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	23
3.4	大気室チェンバー中のフィルタの配置図	25
3.5	フィルターの透過率	26
3.6	四極スリットの構成図	27
3.7	背面照射型 CCD カメラの原理	30
3.8	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	
	(左)、望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する(右)。	31
3.9	ショートカットラスタースキャンの模式図。	31
4.1	新測定チャンバーの 3D イメージ。灰色で描かれている部分が新規に導入された部分を示	
	す。	34
4.2	ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観(左)。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(右)。	34
4.3	望遠鏡ステージ(上)、検出器ステージ(下左)、検出器微調整ステージ(下右)の概要図。	37
4.4	望遠鏡ステージ(左)、検出器ステージ(右)の外観。	38
4.5	ステージドライバ付近 (左)、ステージコントローラ付近 (右) で信号線にフェライトを	
	装着した。	38
5.1	反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。	42
5.2	クアドラントスキャンパスの例。赤線が望遠鏡ステージ、検出器ステージが同期移動す	
	るパスを示す。	43

iv

5.3	測定チャンバー制御システム構成のブロックダイアグラム。	44
5.4	ビームラインに搭載されている全移動ステージ。	45
5.5	制御ソフトウェアコントロールパネルの外観。...............	47
5.6	ソフトウェア処理の模式図。.................................	48
5.7	通信 VI のアルゴリズム。	49
5.8	並進同期試験のセットアップ(左)、反射板を撮像した CMOS イメージ(右)。	52
5.9	Y 方向にステージを動かした際の重心の変位 Y(左)、変位 Z(右)。赤が Z = -237 mm、	
	黒が Z = 0 mm、緑が Z = 237 mm の位置で取得したデータ。	53
5.10	Z 方向にステージを動かした際の重心の変位 Y(左)、変位 Z(右)。赤が Y = -260 mm、	
	黒が Y = 0 mm、緑が Y = 260 mm の位置で取得したデータ。	53
5.11	Y 方向(左)、Z 方向(右)にステージを動かした際の再帰性。赤が重心位置 Y の差分、	
	緑が重心位置 Z。	53
6.1	すさく型試作望遠鏡の外観。半径の異なる4つのフォイルクループが組み込まれている	56
6.2	アフインメントフレート (左)、マスク反射鏡 (石) $\dots \dots \dots \dots \dots$	56
6.3	測定 I 回日の θ_y (左)、 θ_z の Vinetting	58
6.4	測定 2 凹日の θ_y (丘)、 θ_z の Vinetting	58
6.5	馬品距離と塚の形(LR 法) ···································	59
6.6	馬豆距離測定の結果。1回日の測定では馬豆距離4506mm(左)、2回日の測定では馬豆	50
	距離 4508 mm (石) という結果になった	59
6.7	ノオイルクルーノ毎のスキャンハス (上)、クアトラントノルスキャンのハス (下)	60
6.8	4つのノオイルクルーノの定し合わせのイメージ(左)と PSF(中央)と EEF(右)の様子	61
6.9	40 金台のイメーン (左) と PSF(中央) と EEF(石) の様子	62
6.10	/0 金台のイメーン (左) と PSF(中央) と EEF(石) の様子	62
6.11	90 金台のイメーン (左) と PSF(中央) と EEF(石) の様子	62
6.12	150 街台のイメーン (左) と PSF(中央) と EEF(右) の様丁	63
0.13	4 \mathcal{O} の / オイル / ルー / の定し合わせの / メーン (圧) \mathcal{C} PSF(中央) \mathcal{C} EEF(石) の 塚丁	63
0.14	40 街台のイトーン (工) $\leq PSF(中央) \leq EEF(石) の 塚丁 $	03 64
0.13	70 街口のイクーン(工) $C PSF(中大) C EEF(石)の塚丁$	04 64
0.10	90 街口のイクーン(工) $C PSF(中天) C EEF(石)の塚丁$	64
0.17 6.19	150 街口のイクーン (圧) と $PSF(中大) \in EEF(行) の 隊 「$	65
0.10	4 \mathcal{O} O	65
6.20	40 田口 ツイ クーシ (工) C EEF(十天) C Γ SF(日) の塚丁	65
6.20	10 田口 ツイノーン (工) C LEF(T人) C F SF(石) ツ(k 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	66
6.22	$50 $ 田口 $\gamma (\land) \land)$ (上) C EEF(十大) C F SF(日) の 塚丁	66
0.22	1JU 田口ツィノーン (仁) C EEF(十六) C F3F(勹) ツ塚丁	00

表目次

2.1	金とプラチナの臨界角。	7
2.2	SXT の設計パラメータ	16
2.3	SXT-FM の有効面積の予想	16
2.4	SXT-EM の性能測定結果	17
3.1	X 線発生装置の仕様	21
3.2	特性X線と対応するフィルタの種類.............................	24
3.3	ガスフロー型比例計数管の仕様................................	28
3.4	マルチチャンネルアナライザー MCA8000A の仕様	29
3.5	背面照射型 CCD カメラの仕様	29
4.1	望遠鏡ステージ、検出器ステージの基本情報......................	35
5.1	ステージコントローラ PM16C-04XD の仕様。	46
5.2	ステージ同期性試験の詳細な結果。.................................	54
6.1	すざく型望遠鏡クアドラントの各フォイルグループの半径	55
6.2	2009 年に測定したすざく型望遠鏡クアドラントの性能............	57
6.3	結像性能測定の測定条件	60
6.4	試作望遠鏡の結像性能の測定結果	61
6.5	試作望遠鏡の有効面積の測定結果。	66

第1章 序論

1.1 X線天文学

自分達の住む宇宙の果てがどうなっているのか、また、その形成はどのように為されたのか。これら を追い求め、理解することが天文学の目的である。そのためには天体の物理状態を知ることが必要不可 欠である。

天体が放つ光即ち電磁波は天体からの多くの情報を持っており、これを観測することで我々は遠方の 天体の物理状態を知ることができる。この電磁波は波長によって電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 ガンマ線に分類することができ、X線領域を観測し、X線放射の起源やそのダイナミクスについて研究 するのがX線天文学である。では、X線の波長域(0.1~100 keV)の天体からの電磁波を観測すること はどのような物理を解明していくことに継るのであろうか。

X線の一つの特徴はエネルギーが高いことである。例えば、可視光と比べるとそのエネルギーは3桁 も高い。これ程の高エネルギーは、1千万度~1億度の高温プラズマ領域や中性子星やブラックホール 近傍の強い重力場、超新星爆発などの強い衝撃波による電子の加速など、物質の極限状態で生み出され る。また、X線はもう一つの特徴として透過率が大きく、これにより、可視光領域では観測できない暗 黒星雲や厚いガス雲の中に隠された天体を観測することが可能である。

しかし、X線は大気に吸収されてしまうため観測機器を飛翔体に搭載し大気圏外に出て観測する必要 がある。このことがX線天文学を阻み、1962年のジャッコーニとロッシによるサウンディングロケット を用いた観測が行なわれるまで、太陽起源以外のX線を観測することはできなかった。しかしそれ以後 の気球実験、さらには1970年の「Uhuru」衛星以降は数々のX線天文衛星が打ち上げられ、観測が行な われてきた。その結果現在の観測対象は恒星のコロナから、白色わい星、中性子星、ブラックホール候 補天体、活動銀河核などの高密度天体、また超新星残骸、銀河団などの高温プラズマ天体などの多岐に わたる。

さらに、近年では地上の加速器では再現できない高エネルギーを生み出す、X 線放射領域は、高エネ ルギー物理の検証の場として用いられるようになってきている。

1.2 ASTRO-H衛星の概要

ASTRO-Hは日本の第6番目のX線天文衛星であり、2014年度の打ち上げが予定されている。世界初と なるマイクロカロリメータの搭載により、軟X線(0.3-10.0 keV)での超高分解能分光観測を行うほか、 合計2種類のX線望遠鏡と4種類の検出器の搭載により、0.3-600 keV での広い波長域での観測が可能 である。その高分解能分光観測と広い波長域での観測により、銀河の誕生過程や進化過程の解明、ブラッ クホールや中性子星近傍の物理状態の探求、宇宙線加速メカニズムの解明等を目的とする。ASTRO-H は 現状唯一と言っても良い次世代大型X線天文衛星であり、これからの宇宙物理学の発展に欠かせない衛 星である。

以下に ASTRO-H に搭載される 2 種類の望遠鏡について述べる。

 ・軟X線望遠鏡(SXT)
 軟X線望遠鏡は軟X線領域(0.3 - 12 keV)のX線を集光、結像するX線望遠鏡である。ASTRO-H

に2台搭載され、焦点面検出器として軟X線分光検出器(SXS)、軟X線撮像検出器(SXI)が搭載される。SXTの設計パラメータを2.3 に示す。SXT はすざく衛星に搭載されたX線望遠鏡と同型で、Wolter-I型斜入射光学系を採用した多重薄板型X線望遠鏡である。制作方法は基本的にすざ く衛星と同様であり、アルミニウム基盤に金の反射膜を写し取るレプリカ法が用いられている。望 遠鏡本体は NASA の Goddard Space Flight Center で制作される。SXT の詳細については 2.5 で述べる。

• 硬X線望遠鏡(HXT)

硬X線望遠鏡は硬X線領域(5.0-80 keV)のX線を集光、結像するX線望遠鏡である。HXTの反 射鏡には Pt/C 多層膜スーパーミラーが用いらている。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となり、硬X線撮像検出器(HXI)と 組み合わせて撮像・分光を行う。

第2章 X線望遠鏡

2.1 X線の反射

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、真空での波長を λ として、複素屈折率 \hat{n}

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

を用いる事で、

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

$$= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z\right) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}(nz-ct)\right]$$
(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2項が物質中での振動を表しており、第1項が屈折率の虚数部分 β を消衰係数とした減衰関数となっている。 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、

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\mu z\right) \tag{2.4}$$

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

X線が物質中に入射すると、ある断面積でもって原子がX線と弾性散乱を起こす。これをトムソン散 乱と言うが、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χとの間に、

$$E_s = \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \tag{2.5}$$

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

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



図 2.1: 電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。

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、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。

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

$$= f_1(E,\phi) + if_2(E,\phi) \tag{2.8}$$

この補正を加えて原子による散乱振幅 Es は、

$$E_s = f(E,\phi) \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi = [f_1(E,\phi) + i f_2(E,\phi)] \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi$$
(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 ϕ 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 るが、後で扱う内容は散乱角 ~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、f₁、 f₂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。

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

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

 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 β と

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

$$\beta = \frac{e^2\hbar^2}{2\varepsilon_0 m_e E^2} f_2 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \mu = \frac{\rho\lambda}{4\pi} \mu_m$$
(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 [g/cm³] としたときの光学定数 δ 、 β 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 、図右はプラチナの密度を 21.45 [g/cm³] としたときの光学定数 δ 、 β である。両 図とも横軸にエネルギーをとる。)

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 θ_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 \hat{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 θ_i 、 θ_r とすると、 θ_i 、 θ_r には、スネルの法則により、

$$\cos\theta_i = \tilde{n}\cos\theta_r \tag{2.14}$$

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

 $^{^{1}}N_{0}$ はアボガドロ数、Aは原子質量数、 ρ は原子密度である。

$$\cos \theta_c = \tilde{n} \simeq 1 - \delta \tag{2.15}$$

となる。さらに、図 2.2、2.3 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、 $\cos \theta_i \simeq 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$ の近似を用いると、

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \tag{2.16}$$

となる。

よって (2.12) 式より、 ρ [g/cm³]、E [keV]、 λ [nm] を用いて θ_c は、

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

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

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

と求まる。 このため後にも述べるが、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 \hat{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、

 $r_p = \frac{\sin \theta_r - \tilde{n} \sin \theta_i}{\sin \theta_r + \tilde{n} \sin \theta_i}, \qquad r_s = \frac{\sin \theta_i - \tilde{n} \sin \theta_r}{\sin \theta_i + \tilde{n} \sin \theta_r}$ (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、

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

$$R_0 = \frac{R_p + R_s}{2} \tag{2.22}$$

と考えて良い。したがって反射率は臨界角 θ_c で規格化すると、

$$R_{0} = \frac{h - \frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\sqrt{2(h-1)}}{h + \frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\sqrt{2(h-1)}}$$

$$h = \left(\frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\right)^{2} + \sqrt{\left(\left(\frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\right)^{2} - 1\right)^{2} + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^{2}}$$
(2.23)

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 $\theta_i/\theta_c = 1$ 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 ($\theta_i/\theta_c = 1$ 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 β/δ 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、 β/δ が小さい、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。

実際の反射率は、Henke テーブルなどの f_1, f_2 の値を用いて計算を行なう。Henke テーブルの原子番 号と入射 X 線エネルギーに対しての値を図 2.5 に図示した。

物質	原子番号	原子量	密度 [g/cm ³]	Al-Kα	Cu-Ka
Pt	78	195.08	21.45	2.64°	0.58°
Au	79	196.97	19.32	2.52°	0.56°

表 2.1: 金とプラチナの臨界角。



図 2.4: 単層膜の理論反射率。



図 2.5: 原子散乱因子 f1,f2 の原子量と入射 X 線エネルギーに対しての値。

第2.X線望遠鏡

2.2 結像光学系

2.2.1 結像の基本条件

望遠鏡に対する結像の条件に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。
- 物体から焦点までに至る全ての光路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)。これは言い替えれば、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 2.6)、アッベの正弦条件

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \text{const.} \tag{2.24}$$

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。

X線領域では、この様な条件を満たす結像光学系として、ゾーンプレートやX線レンズ、軟X線用直入 射式多層膜反射鏡の他、斜入射光学系が挙げられる。X線天文衛星では、このうち斜入射光学系が用い られることが一般的である。



図 2.6: アッベの正弦条件。

2.2.2 斜入射光学系

2.1 で述べたように、X 線領域では有効な反射を得るためには極端な斜入射を用いなければならない。 しかし、直入射鏡で良く用いられる凹面の球面鏡は、斜入射で用いれば非点収差が大きくなり、高い結 像性能は得られない。また、一方で平行光を完全に点に集光することができる回転放物面鏡も、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。

このコマ収差を解決するために、2枚の反射面を組み合わせて収差を抑える方法が一般に用いられている。この様な光学系を用いた代表的な例として、2種類の回転2次曲面を組み合わせた Wolter 型反射鏡が挙げられる。これはさらに反射鏡の組合せによって、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型に分けることができる。

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、焦点距離の短い I 型が主に採用されているが、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 2.7: Wolter 型光学系—上から I 型,II 型,III 型

2.3 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2.8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。



図 2.8: 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)。

2.3.1 「多重薄板型」

集光力をできるだけ大きくするため考案された望遠鏡として、「多重薄板型」X 線望遠鏡がある。こ れは、基板の厚さを ~0.2mm と極力薄くし、非常に多数 (~200 枚)の反射鏡を同心円状に並べたもので、 軽量でありながら高い開口効率を実現する。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板に金のレプリ カをとる方法 (レプリカ法)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。

2.3.2 「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²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。

²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。



Outer Bottom Ring

図 2.9: 「多重薄板型」X 線望遠鏡— 写真は Astro-Eの XRT である。~180µm という薄さの反射鏡 (基板:アルミニウム)が 0.5~1.2 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。



図 2.10: 「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。

第2.X線望遠鏡

2.4 X線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能は、大きく、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。

2.4.1 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。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E)$$
(2.25)

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ ,エネ ルギーEの時の鏡面の反射率である。反射は一段目と二段目で、それぞれ入射角 θ の2回反射となるた め、 $R^2(\theta, E)$ となっている。

ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に、焦点距離を一定にして口径を大きくし ただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めな い。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大 きくしても有効面積が増えることはない。そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが、口径内に占 める反射面の割合(開口効率)である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄く し積層枚数を上げればよい。

2.4.2 結像性能(HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下のような3つの物理量が用いられる。

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

平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 2.11 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 2.11 のように、広がりを持ったイメージとなり、この広がり の大きさで結像性能 (角分解能) が決まる。この広がりの大きさを表すのに、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³。HPD の値が小さいほど、結像性能 が良い。

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2.12)。これは、無限遠にある点源から放射されたX線が、XRTの焦点面に作る輝度分布であり、 PSFのコアの部分が鋭いピークを持つほど、結像性能が良いといえる。

³一般に、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。



図 2.11: 焦点面のイメージ。等高線で表したもの(左)と、3次元的に表したもの(右)。



図 2.12: 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)。

2. 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。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi r PSF(r) dr$$
(2.26)

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 2.13 にまとめる。図 2.13 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が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 2.13 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 2.13: PSF、EEF、HPDの関係

2.5 軟X線望遠鏡 (SXT)

2.5.1 SXT の概要

ASTRO-H衛星に搭載される軟X線望遠鏡(SXT)は、あすか衛星、すざく衛星に搭載されたX線望遠 鏡と同じくWolter-I型斜入射光学系を採用した、多重薄板型X線望遠鏡である。ASTRO-Hには焦点面 検出器にSXSを用いるSXT-Sと、焦点面検出器にSXIを用いるSXT-Iの2台が搭載される。尚、SXT-S とSXT-Iの設計は同じである。望遠鏡はクアドラントと呼ばれる1/4円筒4つ組み合わせてできている。 望遠鏡本体はNASAのGoddard Space Flight Center で制作され、視野外からのX線の入射を防ぐプリコ リメーター、望遠鏡の温度を保つサーマルシールドは日本で制作される。SXTの設計パラメータを表2.3 に示す。また、フライトモデルの有効面積の予想を??SXTはすざく衛星のX線望遠鏡に比べ大型化して おり、その口径は450 mm、焦点距離は5,600 mm である。また、従来半径の大きい外側の反射鏡は形状 が悪く、結像性能の劣化要因となっていたが、外側の基盤を厚くすることで結像性能の向上を果たして いる。

2011 年には宇宙科学研究所X線ビームラインにおいて、SXT のエンジニアリングモデル(EM)クア ドラントの性能評価を行った[1]。2011 年時の宇宙研X線ビームラインでは口径 450 mm の SXT の性能



図 2.14: SXT-EM クアドラントの外観(左)、SXT-FM の外観(右)。

表 2.2: 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	Al
反射鏡基盤の厚さ	~79 枚目 165 μm
	~ 153 枚目 241 µm
	~203 枚目 318 µm
入射角	$0.15\sim 0.63\ensuremath{^\circ}$
重量	41 kg

表 2.3: SXT-FM の有効面積の予想

	1 keV	6 keV
SXT only (1台)	630	449
SXT-S + SXS	241	277
SXT-I + SXI	542	422

測定は困難であり、焦点距離よりも短い位置に検出器を置く特殊な測定を行った。測定した EM の性能 を 2.4 にまとめる。結像性能は 1.27 分角であり、すざく衛星のX線望遠鏡の 1.5 分角からの向上が確認 出来た。

表 2.4: SXT-EM の性能測定結果

結像性能	1.27 分角
有効面積	$115.9 \pm 1.1 \text{ cm}^2$ at 4.51 keV
	$147.4 \pm 0.9 \text{ cm}^2$ at 1.49 keV

2.5.2 地上較正試験

X線望遠鏡は衛星に搭載される前に地上較正試験に供される。この試験において望遠鏡の詳細な性能 測定を行い、応答関数の構築する。望遠鏡を用いて取得したデータから正しい物理情報を読み取るため には正確な応答関数の構築が必要不可欠となる。較正試験は運用中も行うが、地上較正試験では単色光 を使った測定が出来るという大きな利点があり、さらに天体からのX線よりも1000倍以上の強度のX線 で測定を行うことができる。

2013年2月に宇宙研X線ビームラインにおいてSXTフライトモデル(FM)の地上較正試験を行う予定である。しかし2.5.1で述べた通り、宇宙研X線ビームラインでは口径450mmの望遠鏡の測定は難しく、特に望遠鏡全体での性能を測るのは非常に困難である。そこで、SXT-FMの地上較正試験に向け、2012年にビームラインに大きな改修を施した。詳しくは第4章以降で述べる。

第3章 宇宙科学研究所X線ビームライン

3.1 測定システム

X線望遠鏡の性能評価には、平行度の高いX線ビームが必要となる。これは観測天体からのX線が、 ほぼ完全な平行光とみなせるためである。従来、宇宙科学研究本部ではX線望遠鏡の性能評価に同敷地 内に設置されているX線ビームラインを用いてきた。X線ビームラインには位置の可変機構を持たない 固定式X線発生装置が採用されている。固定式発生装置からのビームは、陰極ターゲット面の数 mm 角 の領域を焦点として発生する。従って、例えば数 m 先で口径の大きなX線ビームを得ようとすると、完 全な平行光にはならずに拡散光になってしまう。そこで、X線ビームラインでは高い平行度を得るため に四極スリットにより細く絞ったペンシルビームを用いる。固定式発生装置から出射されたビームは、 まず制動放射による連続 X 線を除去するためフィルターや二結晶分光器にかけられる。そして発生装置 から 27 m の距離にある四極スリットによって典型的には 2 mm×2 mm 角までX線ビームを絞ってコリ メートした後、X線望遠鏡に照射する。この場合、X線ビームの平行度は固定式発生装置の実効焦点を 点源と見なすと、~12 秒角の平行度が達成される。その反面、X線ビームをX線望遠鏡入射面全面に一 度に照射することは不可能となる。結像性能及び有効面積の測定では、望遠鏡全面にX線ビームを照射 する必要があり、また固定式発生装置は位置の可変機構を持たないことから、X線望遠鏡と焦点面検出 器を Sy、Sz 軸及び Dy、Dz 軸ステージを用いて同時に平行移動させる。

X線望遠鏡の性能測定は Quadrant または Full-Telescope 単位で行ない、これらを望遠鏡ステージのド ラムに取り付ける。そしてレーザー光を用いてビームラインの系と望遠鏡の系の光軸を合わせた後、四 極スリットによって細く絞ったペンシルビームを使って、望遠鏡を通過した X 線ビームの強度が最大に なるよう Sθ_y 軸、Sθ_z 軸、Sy 軸、Sz 軸を適当に調整し、さらに厳密に各軸の軸合わせを行なう。その後 の望遠鏡の性能測定を行う。

図 3.1 に宇宙科学研究所X線ビームラインの全体図を示す。また、このビームラインを構成するサブ システムの詳細について順に説明していく。

3.1.1 X線発生器

宇宙科学研究所標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機 製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 3.2)。まず陽極であ るフィラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲット との間にかけられた管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムに よって電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は [kV] のオーダーなので、発生す る電磁波は X 線領域が主となる。一方でターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしもするの で、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。

宇宙科学研究所標準 X 線光源室での測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282[keV])、Al-K α (1.49[keV])、Ti-K α (4.51[keV])、Cu-K α (8.04[keV])、Pt-L(9.44[keV])の5種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは10mm×1.0mmであるが、X 線の出射方向(X 軸)に対してターゲットの回転軸は6°傾けて取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは



図 3.1: 宇宙科学研究所X線ビームラインのチャンバー配置図

20

最大定格出力	60kV 200mA (12kW)
管電圧設定	$5\sim 60 {\rm kV}$
管電流設定	$10 \sim 200 \text{ mA}$
ターゲット回転数	6000 rpm
X 線源サイズ	$1.0(Z) \times 10(Y) \text{ mm}^2$
実効焦点サイズ	$1.0(Z) \times 1.0(Y) \text{ mm}^2$
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから1時間後)

表 3.1: X 線発生装置の仕様

1.0mm×1.0mmになる。また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整 することで制御している。X 線発生装置の仕様を表 3.1 に示す。



図 3.2: X 線発生装置の構成図

3.1. 測定システム

3.1.2 真空系

宇宙科学研究所X線ビームラインの長さは、高い平行度を実現するために36mにもおよぶ。しかし 地上較正試験時に使用されるX線領域(~10 keV)では、大気中の分子による吸収や散乱のためにX線 は大気中をこれほどの距離を進むことができない。そこでX線の進むダクトを真空に引いて、大気分子 による吸収を防いでいる。ビームライン全系に、ロータリーポンプとターボ分子ポンプの組が9組、メ カニカルブースターポンプを加えた組が1組、さらに測定チャンバーの粗引き用にスクロールポンプが 2台、ロータリーポンプが1台設置されており、ゲートバルブによって分けられた6つのエリアを真空 に引く。ロータリーポンプは大気圧から~10⁻¹ Torr 程度までの低真空を粗引きし、10⁻¹ Torr 以上の高 真空では、ターボ分子ポンプと背圧用補助ポンプとしてロータリーポンプを同時に使用して真空引きを 行なっている。

ビームライン全系の真空度は主に5つのワイドレンジゲージでモニターされている。ワイドレンジゲージはピラ二ゲージとマグネトロンゲージを組み合わせたものであり、真空度 1.0×10⁻³ Torr でピラニゲージからマグネトロンゲージに自動的に切り替わり、大気から 1.0×10⁻⁹ Torr の範囲で真空度を測定することができる。またこの5つのワイドレンジゲージの出力結果は House Keeping 用のパソコンで管理することができる。X線発生装置の真空度はピラニゲージ(測定範囲:7.6×10² ~ 1.0×10⁻³ Torr)、イオンゲージ(測定範囲:1.0×10⁻¹ ~ 1.0×10⁻⁷ Torr)、でモニターされており、通常大気圧 ~ 10⁻³ Torr まではピラニゲージ、10⁻³ ~ 10⁻⁷ Torr まではイオンゲージを使用している。

図 3.3 に宇宙科学研究所標準 X 線光源室に設置されている真空・排気装置の全体図を示す。

3.1. 測定システム



図 3.3: 宇宙科学研究所ビームライ23における真空・排気装置の全体図

3.1.3 金属フィルター、二結晶分光器

X線発生装置からのX線は、前述したように特性X線と制動放射による連続X線からなるが、X線の 正反射及び散乱成分は強いエネルギー依存性を持っているために、測定にはできる限り単色なX線を用 いる方が良い。このために大気室チェンバーには数種類のフィルタが入っており、目的とする特性X線 以外のエネルギーの連続X線をフィルターで取り除くことによって単色化を行なっている。フィルター の構成を図 3.4 に示す。

• 透過型フィルタ

透過型フィルタは物質の吸収端における吸収係数の急激な変化を利用した、最も簡単な分光素子 である。各フィルタの K 吸収端が、目的とする特性 K-X 線のエネルギーのすぐ上に来ていること を利用して、特性 X 線より高エネルギー側の連続 X 線を取り除くことができる。しかし低エネル ギー側の連続 X 線及び Kβ 線は除去することができない。

X線望遠鏡の測定に用いられる特性 X 線とその時に使うフィルタの種類を表 3.2 に示す。また各 フィルタの透過率を図 3.5 に示す。

特性X線	フィルター物質	フィルターの厚さ [µm]
Al-K α (1.49 keV)	Al	15
Ti-K α (4.51 keV)	Ti	50
Cu-Kα(8.04 keV)	Ni	40
Pt-L(9.44 keV)	Ni	40

表 3.2: 特性 X 線と対応するフィルタの種類



図 3.4: 大気室チェンバー中のフィルタの配置図— X 線発生装置側から検出器チェンバー側を見た時の様子(上)、上 (+Z 方向)から見た様子(下)。



Filter Transmissin

図 3.5: フィルターの透過率

3.1.4 四極スリット

X線望遠鏡の特性測定においてはできるだけ高い平行度のX線を当てる必要がある。そのために、X線発生装置から約27mの長い距離をとり、四極スリットでビームを細く絞って使うことで、12角(2mmスリット使用時)という高い平行度を実現している。四枚のスリットはそれぞれ独立の可動ステージに載っており、ワークステーションから直接制御可能することができる。またこれら4枚のスリットプレートはX座標が異なり、スリットを閉め切った状態であっても、ステージのワーク内でプレート同士が接触することは無い。4極スリットの構成図を図3.6に示す。



図 3.6: 四極スリットの構成図

3.1.5 測定チャンバー及びステージ

X線発生装置は固定されているために、X線望遠鏡と検出器を並進及び回転ステージに載せて移動す ることで、ペンシルビームによる全面スキャンを実現している。測定チャンバー内にはこのための望遠 鏡ステージ、検出器ステージが搭載されている。従来の宇宙科学研究所X線ビームラインでは、ステー ジワークの制限と、望遠鏡ステージ上に望遠鏡を固定する望遠鏡ドラムの制限から、測定可能な望遠鏡 は最大口径 400 mm、焦点距離 3,500 mm 4,750 mm であり、ASTRO-H SXT の性能測定は非常に困難で あった。そこで、SXT-FM の性能測定に向けて、2012 年の改修で従来よりもワークの広い望遠鏡ステー ジ、検出器ステージが搭載された新しい測定チャンバーが導入された。新測定チャンバー及びステージ については第4章で詳しく述べる。

3.1.6 焦点面検出器

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

ガスフロー型比例計数管 (P.C.)

宇宙科学研究所標準X線光源室で使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10ガス(Ar: 90%、CH₄:10%)を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 3.3 に 比例計数管の仕様をまとめる。

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

表 3.3: ガスフロー型比例計数管の仕様

P.C. の出力信号はマルチチャンネルアナライザー (MCA) でエネルギースペクトルに変換される。宇宙 科学研究所X線ビームラインでは PocketMCA MCA8000A を使用しており、ワークステーションが読み 取るのはこの MCA の出力データである。ここの PMCA8000A は 2012 年のビームライン改修に伴って 導入したものである。表 3.4 に MCA8000A の仕様をまとめる。

背面照射型 CCD カメラ

CCD とは Carge Coupled Device(電荷結合素子)の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバイス を意味する。現在宇宙科学研究所ビームラインには浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシス

ADC	逐次比較型 ADC
Channel	16k,8k,4k,2k,1k,0.5k,0.25k
Conversion time	5 µs
最大カウント	4.29×10^9 counts/ch
動作温度	0 - 70 °C
微分非直線性	$<\pm 0.6\%$
積分非直線性	$<\pm 0.02\%$
ゲインスタビリティ	$<\pm10$ ppm/ $^{\circ}\mathrm{C}$

表 3.4: マルチチャンネルアナライザー MCA8000A の仕様

表 3.5: 背面照射型 CCD カメラの仕様

撮像素子	背面照射型フルフレームトランスファ CCD
有効画素数	$1242(H) \times 1152(V)$
画素サイズ	$22.5\mu m \times 22.5\mu m$
有効面積	$27.9 \text{ mm} \times 25.9 \text{mm}$
フレームレート	約 0.1 フレーム/秒 (高精度読み出しモード)
飽和電荷量	360,000 electrons (高精度読み出しモード)
読み出しノイズ	8 electron r.m.s.
平均暗電流	0.3 electron/pixel/s
冷却方式	ペルチェ冷却 + 水冷

テムが設置されている。この CCD カメラは 2012 年のビームライン改修に伴い新たに導入したものであ る。一辺 22.5µm の正方形ピクセル 1242×1152 個からなっており、位置分解能をもった撮像能力がある ために、サンプルのアラインメントやサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われ る。また暗電流を減らすために、ペルチェ素子を使って-60C°まで冷却して使用する。またペルチェ素 子は、チラーで 20°に保った冷却水を循環させることにより冷却されている。

図 3.7 に前面照射型と背面照射型 CCD の断面図及び電荷転送方式の概念図を示す。また表 3.5 に X 線 CCD カメラの仕様をまとめる。

3.2 宇宙科学研究所X線ビームラインにおける性能測定方法

ラスタースキャン

宇宙科学研究所ビームラインにおいてはX線発生装置は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 3.8 左)。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、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 (図 3.8 右)。この方法は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


図 3.7: 背面照射型 CCD カメラの原理— 前面照射型と背面照射型の断面図 (上)、電荷転送の概念図 (下)。

第3. 宇宙科学研究所X線ビームライン 3.2. 宇宙科学研究所X線ビームラインにおける性能測定方法

時には4mm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。この操作を手動で行うのは現実的ではなく、これらの測定は予め指定したスキャンパスを自動 で測定するシステムを用いる。



図 3.8: 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(左)、 望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する(右)。

ショートカットラスタースキャン

SXT-EM は口径 450 mm、焦点距離 5,600 mm であるため、従来の宇宙研X線ビームラインでは入射面 全面をスキャンするのは不可能であった。そこで、検出器を焦点距離よりも手前に置き、検出器ステー ジ、望遠鏡ステージの移動スピード、移動範囲を調整し、検出器が常に反射X線ビームを検出面の中心 で受けるようにして同期移動させ性能測定をおこなった。測定の模式図を図 3.9 に示す。望遠鏡ステー ジ、検出器ステージのステージワークは正方形ではなく、+Y 方向に 100 mm 以上の余裕があるため、こ の方法を用いれば+Y 方向に位置するクアドラントのみ測定を行うことができる。この測定法を用いた 場合、反射X線ビームは焦点距離で受けた場合よりも広がりを持っており、PSF のコアがなまってしま うという欠点がある。



図 3.9: ショートカットラスタースキャンの模式図。

第4章 ビームラインの改修

4.1 ビームライン改修の概要

従来の宇宙科学研究所X線ビームラインにおいて測定可能な望遠鏡は最大口径 400 mm、焦点距離 3500 mm ~ 4750 mm であった。X線望遠鏡開発の発展に伴い、ASTRO-H に搭載される SXT は口径 450 mm、 焦点距離 5600 mm まで大型化し、従来のビームラインでの性能測定は非常に困難であった。そのため、 2013 年に予定される ASTRO-H 搭載 SXT のフライトモデルの地上較正試験に向け、2012 年にビームラ インに大きな改修を施した。最大の改修点として、検出器ステージ、望遠鏡ステージ、スリットステー ジを装備し、口径 450 mm、焦点距離 0.7 - 9.0 m の望遠鏡の測定が可能となる巨大な円筒形測定チャン バーを導入した。しかし、巨大な測定チャンバーの導入により、X線発生装置から4極スリットまでの 距離は 30 m から 27 m へと短くなっている。新しい CCD カメラ、マルチチャンネルアナライザー、ス テージコントローラを導入し、それらの制御システムも一新した。改修に伴い新たに変わった箇所を以 下に説明する。

- 新規測定チャンバーの導入従来の検出器チャンバー、望遠鏡チャンバーの代わりに、検出器ステージ、望遠鏡ステージ、スリットステージを装備した巨大な円筒型チャンバーを導入した。検出器ステージには新規に検出器微調整の3軸が追加された。
- X線 CCD カメラの更新X線 CCD カメラの更新を行った。ピクセルサイズが 24 μm から 22.5 μm に小さくなったことにより、位置分解能が向上した。また、データ読み出し速度が大幅に向上した ため、高速度読み出しモードによる分光測定が現実的となった。
- 新規マルチチャンネルアナライザーの導入老朽化がすすんでいた NetwarkMCA の代わりに、PocketMCA を導入した。
- •新しい真空計の導入5つのワイドレンジゲージを導入し、それらの出力を?????
- 新規ステージコントローラの導入新たにツジ電子製のステージコントローラ PM16C-04XDL、PM4C-06 の 2 台を導入した。
- 制御システムの更新新たにワークステーションとして Window 7 搭載 PC、Mac mini server、ネットワークストレージを導入し、ビームライン全移動ステージ、検出器の制御システムを1から構築し直した。詳しくは第5章で述べる。

4.2 新測定チャンバー

新しい測定チャンバーは全長 11.3 m、直径 1.8 m の円筒型である。測定チャンバーは2台のスクロー ルポンプ、1台のロータリーポンプ、2台のロータリーポンプ及び1台のメカニカルブースターポンプに より真空粗挽きを行い、その後は3台のターボ分子ポンプにより10¹⁵ Pa 程度の真空度に達する。チャ ンバーには内部へのアクセスがしやすいように、上流側と下流側にドアが設けられている。内部は十分 に人が入れる空間があり、チャンバー内部での作業も容易である。



図 4.1: 新測定チャンバーの 3D イメージ。灰色で描かれている部分が新規に導入された部分を示す。



図 4.2: ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観(左)。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(右)。

4.3 検出器ステージ及び望遠鏡ステージ

検出器ステージ、望遠鏡ステージの基本情報を報表4.1 に示す。また、移動ステージ軸を示したステー ジの外観を4.3、4.4 に示す。望遠鏡ステージには従来のステージと同じくSy、Sz、Sθ_x、Sθ_y、Sθ_zの 5 軸が搭載されている。検出器ステージは従来のDx、Dy、Dzの3 軸からDy、Dzの2 軸になったが、 新たに検出器微調整ステージ dx、dy、dzの3 軸が搭載された。焦点距離の調整という従来の検出器ス テージ Dx 軸の役割はこの dx 軸が担っている。検出器微調整ステージ3 軸は主に比例計数管とX線 CCD カメラの切り替えに用いる。従来は検出器ステージを動かして検出器の切り替えを行っていたが、この 微調整ステージの導入により検出器ステージと望遠鏡ステージの相対位置を変えること無く検出器の切 り替えが行えるようになった。また、検出器ステージ自体が図 4.2 に示したレールに載っており、X 方 向に大きく移動させることが可能である。これにより、焦点距離 0.7 m ~ 9.0 m の望遠鏡の測定が可能と なるまた望遠鏡ステージ、検出器ステージ共にZ 方向の移動スピードが4 倍となり、望遠鏡の性能測定 に要する時間の短縮化に繋がっている。

望遠鏡ステージ			
軸	移動量	移動可能範囲	移動速度
	[mm,deg/pulse]	[mm,deg] (total)	[mm,deg/sec]
Sy	0.01	$-270 \sim 370$	4.0
Sz	0.00025	$-250 \sim 250$	1.0
$S-\theta_x$	0.001	$0\sim 360$	1
$S-\theta_y$	0.00025	$-5\sim 5$	0.25
$S-\theta_z$	0.001	$-5\sim 5$	1

表 4.1: 望遠鏡ステージ、検出器ステージの基本情報

検出器ステ	ージ
-------	----

軸	移動量	移動可能範囲	移動速度
	[mm/pulse]	[mm/pulse] (total)	[mm/sec]
Dy	0.001	$-250 \sim 650$	4.0
Dz	0.00025	$-250\sim250$	1.0
dx	0.002	$-50\sim50$	2.0
dy	0.00025	$-2.5\sim2.5$	4.0
dz	0.004	$-60\sim 60$	0.25

ステージ移動スピード

ステージの移動スピードは4.1 で示した通りである。これはステージ仕様上の推奨スピードである。 しかしこのスピードでステージを移動させた時に検出器、望遠鏡ステージの両方のZ軸においてパルス モーターの空転が発生し、ステージが稼働しないという自体が発生した。ステージ移動スピードを四分 の一にすることで稼働することを確認したが、ステージ加速レートへの依存性は見られなかった。これ はステージドライバへ送られるステージ駆動パルス信号に混入したノイズの影響と考えられる。対処と して、ステージドライバのコネクタ付近と、ステージコントローラのコネクタ付近で信号線にフェライ トを着けることによりパルスモーターの空転は解消され、ステージは推奨スピードで稼働させられるようになった。フェライトを着けた箇所を図 4.5 に示す。



図 4.3: 望遠鏡ステージ(左)、検出器ステージ(右)の外観。





図 4.4: ステージドライバ付近(左)、ステージコントローラ付近(右)で信号線にフェライトを装着した。



図 4.5: 望遠鏡ステージ(上)、検出器ステージ(下左)、検出器微調整ステージ(下右)の概要図。

4.4 X線ビーム平行度の悪化による測定結果への影響

ビームラインの改修に伴い、X線発生装置から4極スリットまでの距離は、従来の30mから27mへ と短くなっており、それに伴いX線ビームの平行度も悪くなっている。宇宙科学研究所ビームラインで の望遠鏡性能測定において、原理的に発生する系統誤差は主に2つ存在する。1つはX線ペンシルビー ムの拡散である。長い距離と4極スリットでビームの平行度を高めてはいるが、それでもビームは12秒 角程度の広がりを持る。X線望遠鏡はレンズ系であるので、ビーム自体はレンズの公式に従い、焦点距 離よりも長い距離で像を結ぶことになる。焦点距離5,600 mmのSXTであれば、ビームは望遠鏡の焦点 面から1,565 mm後方で像を結ぶ。そのため、焦点面上ではビームは集光しきらずに広がりを持つこと になり、この広がりが測定結果に系統誤差を及ぼす。もう1つは光源の大きさである。宇宙科学研究所 X線ビームラインではX線光源の実効サイズは1.0 mm×1,0 mmであり、完全な点源では無いため、焦 点面上で広がりを持つことになる。

そこで光線追跡シュミレーションを用いて、宇宙科学研究所X線ビームラインでの測定の妥当性の再 確認、ビームラインの短縮による測定結果への影響を評価を行った。

第5章 新測定システムの構築

5.1 システムに要求される性能

測定システムに要求される性能は主に以下の二つである

- 検出器ステージ、望遠鏡ステージの同期性 ±120 μm
- 望遠鏡全面を自動スキャンできる機能

以上の二つについて詳細を述べる。

5.1.1 ステージ同期性能

ASTRO-H 搭載 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、2次曲面を円錐 で近似した反射鏡を用いている。この場合2回反射した像は1点に集光せず、必ず広がりを持ってしま う。(図 5.1) この広がり HPD_{円錐近似}を見積もってみると、

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

θ:入射X線と反射鏡のなす角度~0.59°
 L:光軸方向への反射鏡の長さ=100mm
 F:焦点距離=5600mm

であり、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。なお、ASTRO-Hに搭載されるX線望遠鏡においては、反射鏡の位置決め誤差、反射面鏡面の形状誤差が支配的であり、円錐近似により生じる要因が結像性能決定要因に占める割合は最も小さい。SXTのエンジニアリングモデルは結像性能1.27分角であり[1]、フライトモデルにおいても1分角程度の性能が予想される。

検出器ステージと望遠鏡ステージを同期させてラスタースキャンを行うに際して、検出器ステージと 望遠鏡ステージの相対位置のずれは結像位置のずれにそのまま相当し、測定結果に系統誤差としてのっ てしまう。SXTの地上較正試験を行うシステムとして、SXTにおける円錐近似による像の広がり20秒 角よりも十分に小さいことが求められる。円錐近似による像の広がりと、ステージ相対位置のずれによ る像の広がりは、独立事象であるので、両方を考慮した測定結果への影響は二乗和で表すことができる。 検出器ステージ、望遠鏡ステージ間のずれが9秒角(±120μm)以内に収まっていれば、測定結果への 影響は円錐近似による像の広がりにくらべ10%以下となり、十分な性能であると言える。



図 5.1: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。

5.1.2 望遠鏡全面を自動スキャンできる機能

ステージ同期性による系統誤差と同じく、X線ビームの拡散による系統誤差も、円錐近似による像の 広がり20秒角よりも十分に小さく抑える必要がある。X線ビームの拡散による系統誤差は、スリットサ イズ1mm×1mmで7秒角、2mm×2mmで13秒角であるため、スリットサイズは結像性能を厳密に 測定する際には1mm×1mm、円錐近似の20%まで許容するとしても2mm×2mm程度まで絞らなけ ればならない。望遠鏡入射面全面をスキャンする時には、スリットサイズがラスタースキャンのライン ピッチになる。SXTの口径は450mmであるため、クアドラント単位の測定であっても100ライン以上 のスキャンが必要である。スキャンパスの例を5.2に示す。この操作を手動で行うのは非現実的であり、 予め指定したスキャンパスの通りに自動操作できる機能が求められる。



図 5.2: クアドラントスキャンパスの例。赤線が望遠鏡ステージ、検出器ステージが同期移動するパスを 示す。

5.2 システム構成

測定システムの構成のブロックダイアグラムを 5.3 に示す。また、機器について順に説明していく。



図 5.3: 測定チャンバー制御システム構成のブロックダイアグラム。

5.2.1 ステージ制御

宇宙科学研究所X線ビームラインに搭載されている全移動ステージを図 5.4 に示す。また、各ステージの詳細を上流から順に以下に示す。

- DCM/Filter ステージ2軸 (Ay、 A θ)
 - DCMの角度、金属フィルターの切り替えを行う。
- 可動式X線発生装置ステージ3軸(Gy、Gz、Gθ₇)
 - 可動式X線発生装置のYZ平面上の移動、あおり角。
- ・ ピンホールステージ2軸 (Py、Pz)

- 可動式X線発生装置を用いる際にビームの平行度を確保するため、発生装置と同期移動する。

4極スリットステージ4軸(Yp、Ym、Zp、Zm)

- 4枚のスリットプレートの移動ステージで、スリットの開け閉めを行う。

・ 望遠鏡ステージ5 軸 (Sy、Sz、S θ_x 、S θ_y 、S θ_z)

- 望遠鏡の YZ 平面上の移動、回転。

検出器ステージ5軸(Dy、Dz、dx、dy、dz)

- 検出器の YZ 平面上の移動、また検出器切り替え等に使用する微調整 3 軸。



図 5.4: ビームラインに搭載されている全移動ステージ。

これらの計 23 軸のステージは、6つのステージコントローラに接続されている。各コントローラと接続されているステージの関係は以下のようになっている。

• PM16C-04XDL (ツジ電子)

- 検出器ステージ (Dy、Dz)、望遠鏡ステージ (Sy、Sz、S θ_x 、S θ_y 、S θ_z)を同期制御する。

• PM4C-06 (ツジ電子)

- スリットステージ(Zp、Zm、Yp、Ym)を制御する。

- PMC-3GR(神津精機)
 - 検出器微調整ステージ(dx、dy、dz)を制御する。
- PMC-5GR (神津精機)
 - 可動式X線発生装置ステージ (Gy、Gz、Gθ_z)、ピンホールステージ (Py、Pz) を制御する。 ステージドライバ内蔵。
- PMC-2GR (神津精機)
 - DCM/金属フィルターステージ(Ay、A0)を制御する。ステージドライバ内蔵。

このうち PM16C-04XDL、PM4C-06 はシステムに新規に導入したコントローラである。またこの2つ のコントローラはステージドライバを内蔵していないため、それぞれ検出器ステージドライバ、望遠鏡 ステージドライバを介してステージと接続されている。

PM16C-04XDLは16channel同時に最大4台までのモータを同期制御させることが可能であり、ラス タースキャンにおいて高い同期精度が求められるSy,Sz,Dy,Dz等のステージのコントロールに割り当 てられている。PM16C-04XDLの使用を??に示す。検出器ステージと望遠鏡ステージの同期制御は、こ のコントローラの機能を核としている。同期制御を行う時には、最初にコントローラに"PAUSE"コマン ドを送信する。その後移動させる軸、移動パルスを全て送信し、最後に"PAUSE"を解くコマンドを送信 することで、予め入力した動作が一斉にスタートする。この機能を用いた時の同期性の精度については 5.4 で議論する。

表 5.1: ステージコントローラ PM16C-04XD の仕様。

制御モータ数	最大 16 台	
同時制御モータ数	最大4台	
制御出力	CW、CCW、HOLD OFF 信号 5V 8mA	
出力周波数	$1\sim 5 \text{ MPPS}$	
加減速レート 1048.56 ~ 0.0125 ms/KHz		
加減速形式	S字、台形、一定速	

5.2.2 検出器制御

比例計数管

比例計数管の出力は PocketMCA(MCA8000A)に接続されており、PocketMCA でアナログーデジタ ル変換を行いメモリ内にエネルギースペクトルとして記録される。

CCD 制御

CCD カメラ本体の制御は CCD カメラコントローラとシリアルケーブルで接続された専用 PC(DCWVKDBX) が行っている。ワークステーションからリモート制御する際には、専用 PC(DCWVKDBX)で動作して いるソフトウェア(UniCap) ヘコマンドを送ることにより間接的に CCD カメラを制御する。

5.2.3 ワークステーション

全てのステージコントローラ、検出器コントローラはワークステーション用 Windows PC (jigen) に 接続されている。PM16C-04XDL、PM4C-06、CCD 専用 PC (DCWVKDBX) とは TCP/IP 接続で通信し ている。その他の機器はインターフェースが RS-232C であるが、ワークステーション PC 側のポートの 問題や、延長の利便性等から途中で USB に変換している。最下流に位置するワークステーション PC と ビームライン全体にある機器とを配線をしなければならないため、上流側の機器へは USB リピータブル ケーブルで延長を行っている。この際、USB リピータブルケーブルよりもワークステーション PC 側で USB ハブを用いて分岐をさせてはならず、USB ハブは USB-RS232C 変換の直前に位置しなければなら ない。ワークステーション PC で取得したデータはネットワークストレージに保存され、データ解析用の Mac mini Server (goemon) で解析を行う。

5.3 制御ソフトウェアの開発

各機器をワークステーションから操作するために、ワークステーション PC から各コントローラと通信を行うソフトウェアを開発した。ソフトウェアのコントロールパネルの外観を 5.5 に示す。ソフトウェ アは LabVIew2012 で作成した。



図 5.5: 制御ソフトウェアコントロールパネルの外観。

5.3.1 ソフトウェア構成

LanVIew で作成したソフトウェアは、VI(Virtual Instruments)という最小プログラム単位から成る。 本ソフトウェアでは大きく分けて3種類のサブVIがメインVI上で各種VIが必要に応じて走る。サブ VI は主にコントロールパネルVI、通信VI、ステータスホルダーVIの3種類があり、それぞれの機器に ついてこの3つが存在する。これらのVI間の処理の模式図を5.6に示す。また、各種類について詳細を 以下に述べる。

コントロールパネル VI

コントロールパネル VI は 5.5 で示したように、各機器毎に存在する。コントロールパネル VI はステー タスホルダー VI ヘコマンド、フラグの書き込み、ステータスの読み出し等を行っている。コントロール パネル VI が通信 VI と独立なのは、全ての機器のコントロールを統合した巨大なパネルになるのを防ぐ ためである。LabVIew の仕様上パネルの開閉は各 VI 内の処理開始、終了時にしか行えない。そのため、 バックグラウンドで全機器のステータスを監視しつつ、各機器毎のコントロールパネルの開閉を行うた めにはコントロールパネル VI と通信 VI を独立させる必要がある。



図 5.6: ソフトウェア処理の模式図。

通信 VI

通信 VI は各機器と通信を行っている VI であり、入力されたコマンドを各機器固有のコマンドに変換 し送信/受信を行っている。通信 VI のアルゴリズムを 5.7 に示す。LabView ではデータの共有を行わな い VI 同士はマルチスレッドで動作させることが可能であり、通信 VI とステータスホルダー VI を独立 にすることで各機器毎の通信 VI を並列処理することができる。これにより、いずれかの機器の通信や処 理に時間がかかったとしても他の機器の通信に影響が出ないようになっている。ソフトウェアを起動す ると 2 種類の検出器を除く全ての通信 VI は機器との通信を始める。コマンド送信フラグが立っていれば ステータスホルダー VI から読み取ったコマンドを機器に送信し、そうでない場合はステータスリード コマンドを送り続け、ステータスを受け取り、ステータスホルダー VI を更新し続ける。

ステータスホルダー VI

この VI は一般的なプログラミング言語におけるグローバル変数を保持している VI であり、処理を行 わない。コマンド送信フラグ、コマンド内容、機器のステータス、取得したデータ等を保持している。保 持しているステータスはソフトウェアの終了と共に捨てられ、起動時には初期値に戻る。



図 5.7: 通信 VI のアルゴリズム。

5.3.2 マクロ制御

望遠鏡全体のスキャンを行うために、通常のコントロールパネル VI とは別系統の入力系統としてマクロ制御 VI がある。マクロ制御にはコントロールパネル VI と内部処理 VI が存在する。コントロールパネル VI は文法に沿って記述されたマクロファイルを読み取り、内部処理 VI にコマンドパッケージを読み取らせる。内部処理 Vi はコマンドパッケージを各機器が読み取れるコマンドに変換し、ステータスホルダー VI を更新する。内部処理 VI は初めにステージコントローラ PM16C-04XDL へ"PAUSE ON"コマンドを送信する。これにより処理順にステージ移動コマンドを送信しても、ステージが移動を始めるのは処理が終了してからとなる。その後パッケージ内の最大3コマンドを送信する。検出器はこの時に露光を開始する。コマンドを全て送り終えると、待機時間 0.5 s の後に"PAUSE OFF"コマンドを送信し、ステージが移動を開始する。この待機時間は、通信 VI の処理よりマクロ内部処理 VI の処理の方が高速であるために必要となる。この待機時間により、通信 VI が全てのコマンドをステータスホルダー VI か

ら読み取り機器に送信する前に、マクロ内部処理 VI が"PAUSE OFF"コマンドを送信してしまうのを防いでいる。

マクロファイルはヘッダとコマンドパッケージ群で構成される。ファイルの先頭から"@@@@"までが ヘッダであり、スキャンスピード、スキャンの種類等の任意の情報を書き込む。コマンドパッケージは4 行で構成され、最後の1行はパッケージを送信してから次のパッケージを送信するまでの待機時間を記 述する。よって、コマンドパッケージには3つのコマンドが含まれる。次のパッケージまでの待機時間 は、ステージの移動時間、検出器の露光時間に加え、検出器のデータ読み出し時間も考慮しなければな らない。読み出し時間はCCDカメラで約14秒、PocketMCAで約4秒である。コマンドは最初の3文字 により、ステージコントローラへのコマンド、CCDコントロールPCへのコマンド、比例計数管制御の PocketMCAへのコマンドに分類される。通常は検出器コントローラへのコマンドを1行目に、ステージ コントローラへのコマンドをその後に記述する。

検出器コントローラへのコマンド

検出器コントローラへのコマンドは以下のように構成される。

CCD,[露光時間]

最初の3文字は"CCD"、または"P.C"のどちらかを記述し、それぞれ CCD コントロール PC、PocektMCA へのコマンドに相当する。その後に検出器の露光時間を記述する。

ステージコントローラへのコマンド

ステージコントローラへのコマンドは以下のように構成される。

|STG,[コントローラ番号],[チャンネル番号],[移動パルス]|

コントローラ番号は、チャンネル番号はソフトウェアの定義ファイルより読み取る。チャンネル番号には PM16C-04XDLに対するコマンドの場合のみ、現在のコントローラ上の0点を基準とした絶対パルス移 動"ABS"か、現在パルスからの相対パルス移動"REL"を記述する。その後に移動パルスを記述する。移 動パルスは、マクロファイルを作成する際の便利のために小数点以下まで記述出来るが、パルスモータ の特性上整数値しか受け付けないために小数点以下を切り捨てして読み込む。

空行

ソフトウェアの仕様上、1つのパッケージにコマンドが3つ必要なくても必ず3行記述しなければな らない。コマンドを入力する必要の無い行は最初の3行を"—"にすることにより、空読み行となる。

マクロファイルの例を次ページに示す。

第5. 新測定システムの構築

```
raster scan macro
Detector = ccd
Z pitch = 2.0
inner radius = 73.5
outer radius = 85.3
Y speed [pps] = 100.0
Z \text{ speed [pps]} = 4000.0
000
_____
STG, 1, ABS6, -6031.62084366
STG, 1, ABS9, -6031.62084366
---,
wait,63.3162084366
_____
STG, 1, ABS7, 241264.833735
STG, 1, ABSA, 241264.833735
---,
wait,63.3162084339
   _____
CCD,21.3137680293
STG, 1, ABS6, -4200.24404072
STG, 1, ABS9, -4200.24404072
wait, 51.3137680293
_____
STG, 1, REL7, -8000.0
STG, 1, RELA, -8000.0
---,
wait,5.0
_____
CCD,23.2495461787
STG, 1, ABS6, -6225.1986586
STG, 1, ABS9, -6225.1986586
wait, 53.2495461787
_____
_____
CCD,19.020560615
STG,1,ABS6,-5891.68894123
STG, 1, ABS9, -5891.68894123
wait,49.020560615
_____
STG, 1, REL7, -8000.0
STG, 1, RELA, -8000.0
---,
wait,5.0
END------
```

```
マクロファイルの例
```

5.4 ステージ同期性試験

5.1.1 で述べた通り、ラスタースキャンによる測定の際に、検出器ステージと望遠鏡ステージの相対位 置がずれると、望遠鏡から見て検出器がずれていることになり、測定結果の系統誤差となる。SXT-FM を測定するシステムとして、ステージ同期性は ±240 µm 以内収まっていることが求められる。ステージ 同期性を評価するため、高速 CMOS カメラを使った並進同期性試験を行った。

5.4.1 測定方法

望遠鏡ステージに高速 CMOS カメラ及び光源を乗せ、検出器ステージに直径 9 cm の反射板を設置す る。CMOS カメラを露光させつつ望遠鏡ステージ、検出器ステージをステージワーク内で移動させデー タを取得する。ステージはそれぞれ基本速度である Sy、Dy = 4.0 mm/s、Sz、Dz = 1.0 mm/s で移動させ る。高速 CMOS カメラは 100 ms/Frame でイメージを取得することができるので、ステージワーク内で 数千フレームのイメージが取得できる。そのイメージ群において、イメージ上の反射板の重心の変位を 求めることで、ステージワーク内を並進同期移動させた時の検出器ステージ、望遠鏡ステージの相対位 置のずれを求めることができる。実験セットアップの概要の模式図と、反射板のイメージの例を図 5.8 に示す。並進同期性はステージを Y 方向に動かす時は Z = -237 mm、0 mm、237 mm の位置で、Z 方向 に動かす時には Y = -260 mm、0 mm、260 mm の位置でそれぞれデータを取得した。また Y 方向、Z 方 向それぞれについて同じパスを同期移動させた時の再帰性を評価するため、往きと帰りの重心の変位の 差分を取った。



図 5.8: 並進同期試験のセットアップ(左)、反射板を撮像した CMOS イメージ(右)。

5.4.2 測定結果

並進同期性の測定結果を図 5.9、図 5.10 に示す。また、再帰性の測定結果を図 5.11 に示す。結果はス テージワーク内で同期性 ±20 µm、再帰性 ±3 µm となっており、SXT-FM の測定システムとして要求 される性能 ±240 µm を十分に満たしていることが確認できた。結果の詳細を表 5.2 に示す。



図 5.9: Y 方向にステージを動かした際の重心の変位 Y (左)、変位 Z (右)。赤が Z = -237 mm、黒が Z = 0 mm、緑が Z = 237 mm の位置で取得したデータ。



図 5.10: Z 方向にステージを動かした際の重心の変位 Y (左)、変位 Z (右)。赤が Y = -260 mm、黒が Y = 0 mm、緑が Y = 260 mm の位置で取得したデータ。



図 5.11: Y 方向(左)、Z 方向(右)にステージを動かした際の再帰性。赤が重心位置 Y の差分、緑が重 心位置 Z。

	並進同期性				
7	スキャン方向	重心位置 Y の変位 [µm]	変位 重心位置 Ζ の変位 [μm]		
	Y	±15	± 20		
Ζ		± 10	± 10		
再帰性					
	スキャン方向] 重心位置 Y の差分 [µm] 重心位置 Z の差分 [µm]		
	Y	±3	±3		
	Z	± 3	± 3		

表 5.2: ステージ同期性試験の詳細な結果。

第6章 測定システムの実証試験

測定システムが構築出来たことの実証試験として、性能が既知であるすざく型望遠鏡の性能評価を行っ た。ステージ同期性は ASTRO-H 衛星搭載 SXT-FM の地上更正試験を行うにあたっての要求を満たして いることを 5.4 で確認した。実際に望遠鏡の性能測定を行い、過去の結果と矛盾の無い結果が得られれ ば、5.4 で行った試験とは別の方法でのステージ同期性の確認となるとともに、決められたスキャンパス に沿って自動でラスタースキャンを行える機能の実証にもなる。これらが実証されれば、測定システム が構築が完了したと言える。

6.1 すざく型望遠鏡

システム性能実証試験に使用するすざく型望遠鏡は、結像性能の向上を目指して作られた試作型望遠 鏡クアドラントである。望遠鏡の外観を図 6.1 に示す。この望遠鏡はすざく衛星に搭載された XRT-S と同 型で、口径 400 mm、焦点距離 4500 mm である。この望遠鏡には反射鏡の位置決め誤差の改善をするた めのアラインメントプレート機構が採用されている。従来の望遠鏡では、Primary Top、Primary Bottom、 Secondary Top、Secondary Bottom にあるアラインメントバー4本で Primary、Secondary の反射鏡を保持 している。4本のアラインメントバーの代わりに一体化したアラインメントプレートにより反射鏡を保 持することで、反射鏡の位置決め誤差がアラインメントプレートの加工精度のみで決まる。また、反射 鏡は基盤に金の反射膜を成形することで作られるが、基盤に比べ反射鏡の厚みむらは3倍以上大きい。 そこで、反射鏡の両端にマスク処理をし、金が蒸着されずに反射鏡基盤がむき出しになった部分をつく る処理を行っている。この部分をアラインメントプレートで保持することで、反射鏡の厚さむらによら ずに精度よく反射鏡を保持することが出来ている。結果としてこの試作望遠鏡クアドラントの結像性能 は HPD で 1.08 分角となり、すざく衛星搭載の望遠鏡の 1.5 分角からの大幅な向上を実現している。

この望遠鏡クアドラントには各10枚、4グループの反射鏡フォイルが組み込まれている。それぞれの グループをすざく型望遠鏡のフォイル番号から、40番台、70番台、90番台、150番台と呼ぶ。各フォイ ルグループの半径を表 6.1 に示す。また、2009年に行ったこの試作望遠鏡の測定結果の概要を表 6.2 に 示す。

表 6.1: すざく型望遠鏡クアドラントの各フォイルグループの半径

ID	内半径 [mm]	外半径 [mm]
40	76.9	82.4
70	96.0	102.3
90	109.1	116.2
150	162.6	172.4



図 6.1: すざく型試作望遠鏡の外観。半径の異なる4つのフォイルグループが組み込まれている



図 6.2: アラインメントプレート (左)、マスク反射鏡(右)

表 6.2: 2009 年に測定したすざく型望遠鏡クアドラントの性能

焦点距離	4509 mm
結像性能	1.08 分角 (4 フォイルグループ合計)
有効面積	$14.025 \pm 0.096 \text{ [cm}^2\text{]}$ at 4.51 keV

6.2 測定方法

測定は可能な限り 2009 年と同様の条件で行った。使用するX線のエネルギーは 4.51 keV (Ti-K_{α})、 スリットサイズは、結像性能の測定においては 2 mm × 2 mm、有効面積の測定においては 1 mm × 1 mm とした。測定は、2009 年に使用した旧 CCD カメラ(1 回目)と、ビームライン改修に伴い導入した新 CCD カメラ(2 回目)両方を用いた場合について、合計 2 回行った。この 2 回の測定の間に一旦望遠鏡 ステージドラムの取り外しを行っているので、2 回の測定結果は完全に独立なものとなる。

6.2.1 Vignettingの測定

まず、望遠鏡の光軸を出すために Vignetting の測定を行った。望遠鏡を θ_y 、 θ_z を振りながら比例係数管 で反射光を測定し、強度が最大になる角度を出す。Vignetting の測定結果を図 6.3、6.4 に示す。Vignetting の測定により誤差 1.5 秒角以内で光軸を求めることができた。



図 6.4: 測定 2 回目の θ_y (左)、 θ_z の Vinetting

6.2.2 焦点距離の測定

光軸を出した後に、CCD カメラを用いて焦点距離の測定を行う。望遠鏡の像は焦点距離からずれた時 に左右に偏る、この性質を利用して検出器の距離を変えて得られた像について、結像位置に対して、左 側と右側の光量の比を調べる。左右の光量が等しくなる部分が、その望遠鏡の焦点距離である (LR 法)。 その概念図は図 6.5 に示す。焦点距離は 1 回目の測定で 4506 mm、2 回目の測定で 4508 mm となってい る。焦点距離測定の結果を図 6.6 に示す。



図 6.5: 焦点距離と像の形(LR法)



図 6.6: 焦点距離測定の結果。1回目の測定では焦点距離 4506 mm(左)、2回目の測定では焦点距離 4508 mm(右)という結果になった

6.2.3 結像性能、有効面積の測定

焦点距離を出したあとは Best Focus の位置に検出器を動かし、フォイルグループ毎に結像性能の測定 を行った。また、1回目の測定時のみクアドラントフルスキャンで有効面積の測定を行った。スキャン パスを図 6.7 に示す。また、結像性能測定時の測定条件を表 6.3 に示す。

表 6.3: 結像性能測定の測定条件

X 線発生装置:Target Energy	Ti (4.51keV)
X 線発生装置:管電圧值/管電流值	20kV/100mA
フィルター	Ti 50µm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$2\text{mm}\times2\text{mm}$



図 6.7: フォイルグループ毎のスキャンパス(上)、クアドラントフルスキャンのパス(下)

6.3 測定結果

結像性能

本研究の2回の測定結果と、2009年の測定の結果を表6.4 に示す。ピクセルサイズ0.018分角を系統 誤差すると、クアドラント全体の結果は2009年の結果と比べて誤差の範囲内に収まっている。70番台と 90番台は2009年の結果に比べ最大で0.07分角の差があるが、2009年の結果はバックグラウンドに比べ 反射X線の統計が足りていないため真の結像性能よりもよく見えていると考えられる。図6.20、図6.21 のPSFを見ると、半径3分角以上で負に落ち込んでいる。EEFについても、本来は単調増加しテールが 消える半径以上で1に張り付くはずであるが、2009年の70番台、90番台では途中で減少している。こ れはバックグラウンドを引きすぎていることを意味し、結果 HPD は真の結果よりも良くなってしまう。 旧 CCD カメラはバックグラウンドに不定性のある位置構造構造を持つため、反射X線の強度がバック グラウンドレベルに比べて十分に高くないと位置によりバックグラウンドを引き過ぎる、または引きき れない結果となる。そのため、反射X線の強度が十分に得にくい単一のフォイルグループの結果で HPD の差が生じ、4フォイルグループ合計の結果では誤差の範囲内に収まっているものと考えられる。以上 より、本研究の2回の測定共に過去の結果と矛盾の無い結果が得られたと言える。

	測定1回目(旧CCD)	測定2回目(新CCD)	2009年
ID	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
Quadrant	1.10	1.07	1.08
40	1.17	1.17	1.15
70	0.92	0.96	0.89
90	0.95	0.96	0.89
150	1.28	1.24	1.26

表 6.4: 試作望遠鏡の結像性能の測定結果

取得したイメージ、PSF、EEFを以下に示す。図 6.8 ~ 6.12 が 1 回目の測定(旧 CCD カメラ使用)の 結果、図 6.13 ~ 6.17 が 2 回目の測定(新 CCD カメラ)の結果である。また、2009 年に測定した結果を 図 6.18 ~ 6.22 に示す。



図 6.8: 4つのフォイルグループの足し合わせのイメージ(左)と PSF(中央)と EEF(右)の様子



図 6.9: 40 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.10: 70 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.11: 90 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.12: 150 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.13: 4 つのフォイルグループの足し合わせのイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.14:40 番台のイメージ(左)と PSF(中央)と EEF(右)の様子



図 6.15: 70 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.16: 90 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子



図 6.17: 150 番台のイメージ (左) と PSF(中央) と EEF(右)の様子

第6. 測定システムの実証試験



図 6.18: 4つのフォイルグループの足し合わせのイメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右)の様子



図 6.19:40 番台のイメージ(左)と EEF(中央)と PSF(右)の様子



図 6.20: 70 番台のイメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右)の様子



図 6.21:90 番台のイメージ(左)と EEF(中央)と PSF(右)の様子



図 6.22: 150 番台のイメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右)の様子

有効面積

有効面積の測定結果を表??に示す。測定結果は光子統計による統計誤差の範囲内に収まっており、過 去の結果と矛盾の無い結果が得られたと言える。

ŧ.	65.	封加損害癌の	古动品種の	加口如田田
衣	0.5:	試作室逸蜆の	1別囬惧の	側止樎禾。

	有効面積 [cm ²]
本研究	13.873 ± 0.091
2009年	14.025 ± 0.096

第7章 まとめと今後の展望

7.1 総括

7.1.1 制御ソフトウェアの開発

改修を施したビームラインにおいて、測定システムを構築した。システムの制御ソフトウェアを開発 し、単一のワークステーションからビームライン全移動ステージ及び検出器へのアクセス、望遠鏡入射 面全面の自動スキャンが可能となった。

7.1.2 ステージ同期性の評価

構築したシステムにおいて、ステージワーク内でステージの同期性は $\pm 20 \,\mu m$ 以内、再帰性は $\pm 3 \,\mu m$ 以内に抑え、要求値の $\pm 240 \,\mu m$ を十分に満たすことが出来た。

7.1.3 システム実証試験

測定システムの実証試験として、性能が既知であるすざく型望遠鏡の性能評価を行い、過去の結果と 矛盾の無い結果を得ることができた。その結果から、十分な精度のステージ同期性、自動ラスタースキャ ン機能のが実証出来た。

以上の結果より、ASTRO-H 衛星搭載 SXT-FM の地上較正試験を行う測定システムの構築が完了したと 言える。

7.2 今後の展望

構築が完了したシステムにおいて、2013年2月より SXT-FM の地上較正試験を行い、応答関数の構築 を行う。

また、HXT についても測定が可能となるように、可動式X線装置を使用するセットアップでの同期性試験を行う必要があるだろう。


- [1] K.Ichihara *et al.* A ground calibration of the engineering model of the SXT onboard ASTRO-H using the ISAS 30m pencil beam facility. *Proc SPIE* 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 2012.
- [2] 林修論 2009