修士論文

高角度分解能化を目指した 多重薄板型X線望遠鏡の設計とその性能評価

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻 修士課程 宇宙物理実験研究室

指導教官 石田 學

大熊 哲

平成18年1月6日

X線望遠鏡の持つ高い角度分解能と集光力は、X線天文学に飛躍的な発展をもたらした。高い角度分 解能は、観測天体の位置・空間構造を把握することを可能にし、集光力は、検出器の小型化とともに S/N 比の向上を可能にした。つまり、X線望遠鏡は、X線天文学の発展には必要不可欠なものである。

2005 年 7 月に打ち上げられた X 線天文衛星「すざく (Suzaku)」には、厚さ 180µm の反射鏡を同心円 状に 175 枚積層した多重薄板型 X 線望遠鏡が搭載されている。多重薄板型 X 線望遠鏡は、薄い反射鏡を 開口面積いっぱいに並べているため、軽量でかつ高い有効面積を得ることができる。しかし、結像性能 (角度分解能)が十分でないという問題点が存在する。

このX線望遠鏡の結像性能を決定する主な要因は、反射鏡鏡面のうねりによる「反射鏡鏡面の形状誤 差」と反射鏡が設計の位置からずれることによる「反射鏡の位置決め誤差」の2つが挙げられる。すざ く衛星搭載のX線望遠鏡では、全体の結像性能1.8分角は、形状誤差0.85分角、位置決め誤差1.5分角 と分解でき、結像性能の最も大きな要因となっている要素は、位置決め誤差であることが分かった。

そこで、我々は、位置決め誤差を改善するため、従来の反射鏡支持機構であるアラインメントバーでの問題点を解決するべく、新たな反射鏡支持機構「アラインメントプレート」を導入した。さらにその 調整を簡易にかつ正確に行なうために、新しい望遠鏡の設計を行なった。まず、精度良く加工された円 柱を用意し、その円柱にプレートの基準面を突き当てプレートの回転・並進を抑える工夫をおこなった。 その結果、突き当ての調整のみでプレートの位置は、15µm 程度。回転は 0.5 分角以内に抑えることに成 功した。

X線を当てて性能評価を行ったところ、結像性能は望遠鏡全体で1分角を達成した。また結像性能決 定要因を分離し、位置決め誤差を求めた。すると、位置決め誤差は、0.4分角と向上した。反射鏡の枚数 はすざく搭載のX線望遠鏡に比べると少数であるが、もくろみが正しかったことを示してる。

次の結像性能の決定要因となっている形状誤差の改善に向け、反射鏡製作にも取り組み、水による反 射鏡の剥離などを用いて反射鏡の形状を悪化させる要因を取り除いた。その成果により、反射鏡の形状 誤差が 0.5 分角程度の反射鏡を製作することができた。

本論文では、これらの実験結果および今後の結像性能向上の可能性について述べる。

目 次

第1章	序論	1
1.1	X 線天文学	1
1.2	結像性能とX線天文学	1
第2章	X線光学	4
2.1	反射の原理	4
	2.1.1 トムソン散乱	4
	2.1.2 X 線の全反射	7
2.2	表面粗さに対する X 線の反射率と散乱	9
	2.2.1 運動学的回折理論	9
	2.2.2 表面上の粗さによる反射率の低下	11
	2.2.3 散乱 X 線の強度	12
2.3	結像光学系	15
	2.3.1 結像の基本条件	15
	2.3.2 斜入射光学系	17
第3章	X線望遠鏡	18
3.1	X 線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系	18
3.2	X 線望遠鏡の種類	18
	3.2.1 多重薄板型	18
	3.2.2 直接研磨型	19
3.3	X 線望遠鏡の性能	21
	3.3.1 集光力 (有効面積)	21
	3.3.2 結像性能(HPD、PSF、EEF)	22
第4章	多重薄板型 X 線望遠鏡の結像性能の決定要因	25
4.1	結像性能の決定要因・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
	4.1.1 反射鏡の円錐近似	25
	4.1.2 反射鏡鏡面の形状誤差	26
	4.1.3 位置決め誤差	27
4.2	すざく衛星搭載の X 線望遠鏡	29
	4.2.1 構造	29
	4.2.2 反射鏡の製作方法	31
	4.2.3 反射鏡の支持機構	31
	4.2.4 結像性能	32
	4.2.5 位置決め誤差の要因	33

ii

第5章	新しい反射鏡支持機構とX線望遠鏡の設計	36
5.1	新しい反射鏡支持機構	36
	5.1.1 導入の目的	36
	5.1.2 アラインメントプレートの製作	37
	513	38
	5.1.5 構造量の点定 ····································	13
5.0		43
5.2		44
	5.2.1 設計の思想	44
	5.2.2 望遠鏡の組み上げ	47
	5.2.3 プレートの取り付け精度	49
	5.2.4 可視光を用いた焦点距離の測定	53
第6章	すざく衛星搭載X線望遠鏡の反射鏡を用いた望遠鏡の光学測定	55
61	X 線測定システム	55
0.1	611 X 線発生装置	57
	6.1.1 A線元王役直	50
	0.1.2 四極スリット	50
		58
	6.1.4 試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ	61
	6.1.5 真空装置	63
	6.1.6 焦点面検出器	65
6.2	反射鏡の形状	67
6.3	結像性能決定要因の切り分け、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	68
6.4	Ouadrant の結像性能	70
011		70
		70
<i></i>	0.4.2 /別に細木・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
6.5		/4
	6.5.1 測定方法	74
	6.5.2 測定結果	75
6.6	反射鏡1組ごとの結像性能	80
	6.6.1 測定方法	80
	6.6.2 測定結果	81
	6.6.3 イメージの 広がり	83
	661 は像位置のげらつき	85
67	0.0.4 和你世世のほう JC	05
0./		80
		86
	6.7.2 位置決め誤差の分離	87
	6.7.3 結果のまとめ	87
第7章	レプリカ法による反射鏡の製作	89
7.1	レプリカ法	89
7.2	反射鏡作成の手順....................................	89
	7.2.1 基板の製作	89
	7.2.2. 反射膜の成膜	92
	7.2.2 (スカ) (スク) (スク) (スク) (スク) (スク) (スク) (スク) (スク	02
		75
	/.2.4 奉忉の刻離	94

7.3	7.3 反射鏡の形状評価					
	7.3.1 測定システム	96				
	7.3.2 作成した反射鏡の形状	97				
	7.3.3 X 線での像の広がり	98				
7.4	反射鏡の製作についての問題点	103				
	7.4.1 アルミ基板の形状	103				
	7.4.2 エポキシの厚さムラ	103				
第8章	まとめと今後の展望 105					
8.1	まとめ	105				
8.2	8.2 今後の展望					
付録A A.1	実験装置 非接触 3 次元形状測定装置 (NH-5SP、NH3-SP)	107 107 109				
付録B	望遠鏡ハウジング、アラインメントプレートの製作図面	110				

図目次

1.1	X 線天文衛星の性能の変遷
2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性5
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数6
2.4	単層膜の理論反射率
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
2.6	大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱
2.7	物質表面による X 線の散乱 11
2.8	粗さのある物質面上での散乱と反射12
2.9	回折格子による X 線の散乱 14
2.10	アッベの正弦条件
2.11	Wolter 型光学系—上から I 型,II 型,III 型17
2.1	V.伯不田いこわえは偽火尚石 10
3.1 2.2	A線C用いられる結像元子☆18 X値は清確の転面図
3.2 2.2	A 緑宝医規の別面図
5.5 2.4	「 」 夕里海 似 空 」 A 詠 主 逸 説
5.4 2.5	且按听招望」へ級主送現・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.5	
3.0	Point Spread Function
3.8	PSE FFE HPDの関係 24
5.0	
4.1	反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり
4.2	(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 27
4.3	反射鏡の位置決めによる像の広がり
4.4	位置決めのずれによる反射光のずれ28
4.5	X 線望遠鏡の構造
4.6	Quadrant の構造
4.7	レプリカ法で製作された反射鏡 31
4.8	すざく搭載 X 線望遠鏡の反射鏡支持機構 32
4.9	すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の結像性能決定要因
4.10	反射鏡のなす角と焦点距離の関係 34
4.11	アラインメントバーの問題点35
51	アラインメントバーからアラインメントプレートへの恋国 36
5.1 5.2	ティーンシーン $n = 0$ $n $
53	m_{Γ} T T T T T T T T
5.5	ノ ノ I ノ ハノ I ノ ノ I V/冉叩刀 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30

v	_	-
v	٦	1
	1	

5.4	溝位置測定の概念図	39
5.5	アラインメントプレートの溝位置の設計値からのずれ	40
5.6	溝位置からなす角の導出	41
5.7	反射鏡のなす角の設計値からのずれ..................................	42
5.8	なす角の変化による焦点距離の変化..................................	42
5.9	Ray-tracing シミュレーションにより求めた (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread	
	Function(下)Encercled Energy Function	43
5.10	アラインメントプレートの自由度	44
5.11	ハウジング設計の思想	45
5.12	作成した望遠鏡ハウジングの部品..................................	45
5.13	アラインメントプレート調整の基準面となる内壁	46
5.14	内壁の母線方向の形状....................................	46
5.15	望遠鏡組み上げの手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	48
5.16	組み上げた望遠鏡の写真	49
5.17	内壁に対するアラインメントプレートの相対位置	50
5.18	アラインメントプレートの (上) 並進位置と (下) 回転	51
5.19	実効的な溝幅を0にする工夫.................................	52
5.20	実際の溝部分の写真....................................	52
5.21	アルミナイズドマイラーを挟んだ前後の#90の反射鏡の位置	53
5.22	焦点距離の測定	54
5.23	焦点距離が長い例....................................	54
5.24	焦点距離の測定 (スペーサーなし)	54
5.25	焦点距離の測定 (スペーサーあり)	54
6.1	宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図	56
6.2	X 線発生装置の構成図	57
6.3		58
6.4	大気室チェンバー中のフィルタの配置図	59
6.5	フィルタの透過率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	60
6.6	試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図(柴田 1997)	61
6.7	ビームラインにおける真空・排気装置の全体図	64
6.8	検出器チェンバー内に設置されている検出器..............................	65
6.9	背面照射型 CCD カメラの原理	66
6.10	望遠鏡に使用したすざく衛星搭載用反射鏡の鏡面形状――上から 90、93、96番の溝に挿入した反	
	射鏡。左が Primary 右が Secondary。	68
6.11	結像性能決定要因の切り分け	69
6.12	Quadrant 全面のスキャン	71
6.13	ラスタースキャン	71
6.14	Quadrant イメージの測定結果 (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread Function(下)Encert	cled
	Energy Function	72
6.15	Quadrant イメージの測定結果 (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread Function(下)Encert	cled
	Energy Function	73
6.16	セクタースキャンの方法	74

6.17	HRXRT-1のセクターイメージ (セクター 3 ~ 6)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encer-
	cled Energy Function
6.18	HRXRT-1のセクターイメージ (セクター7~10)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encer-
	cled Energy Function
6.19	HRXRT-1のセクターイメージ (セクター 11 ~ 12)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encer-
	cled Energy Function
6.20	セクターイメージの詳細 —(左) セクターごとの HPD(右) 原点を Quadrant イメージの結像位置としたと
	きのセクターごとの結像位置
6.21	セクターイメージの詳細 —(左) セクター毎の HPD(右) 原点を Quadrant イメージの結像位置としたとき
	のセクター毎の結像位置
6.22	反射鏡1組ごとのポインティングスキャン81
6.23	反射鏡1組のイメージ―─図はセクター7のもの。 左から焦点面でのイメージ、Detector Y 方向への射影
	イメージ、Encercled Energy Function \ldots 82
6.24	HRXRT-2 での反射鏡 1 組ごとのイメージの広がりのセクター依存性 83
6.25	HRXRT-2 での反射鏡 1 組ごとのイメージの広がりのセクター依存性 84
6.26	反射鏡1組ごとの結像位置ばらつき86
6.27	HRXRT-1、2の結像性能決定要因の内訳—(左)HRXRT-1、(右)HRXRT-2。 88
7.1	アルミ基板の図面
7.2	(左)放電加工時にできる放電白層(右)バリ取りの様子
7.3	ローラーによる粗成形の様子91
7.4	熱成形の模式図
7.5	
7.6	エポキシ噴霧の様子
7.7	圧着の様子
7.8	剥離の様子
7.9	反射鏡形状の評価方法
7.10	反射鏡の母線形状測定
7.11	
7.12	アラインメントバーを用いたハウジング
7.13	70 番台の反射鏡形状
7.14	150 番台の反射鏡形状
7.15	70 番台の反射鏡に X 線をあてた結果
7.16	150 番台の反射鏡に X 線をあてた結果
7.17	エポキシに厚さムラがある場合の反射鏡鏡面形状
A.1	NHシリーズの測定原理とシステム図 107
A.2	エッジ検出機構の概略 109

vi

表目次

2.1	金とプラチナの臨界角	8
4.1	すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の設計パラメータ	30
5.1	アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ	39
5.2	1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ	41
5.3	2 種類の状態での焦点距離	54
6.1	X 線発生装置の仕様	57
6.2	特性 X 線と対応するフィルタの種類	60
6.3	試料室・検出器両チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998)	61
6.4	ガスフロー型比例計数管の仕様	66
6.5	背面照射型 CCD カメラの仕様	67
6.6	Quadrant での結像性能	73
6.7	HRXRT-1,2のセクターイメージの広がり (HPD)	79
6.8	HRXRT-1,2 の結像位置のばらつき—(0,0)は Quadrant イメージの結像位置	80
6.9	HRXRT-1の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり	83
6.10	HRXRT-2の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり	84
6.11	HRXRT-1の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置	85
6.12	HRXRT-2の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置	85
6.13	HRXRT-1、2の形状誤差	87
6.14	HRXRT-1、2の位置決め誤差	87
7.1	実際に製作した反射鏡の形状....................................	97
7.2	製作した反射鏡の像の広がり1	03
A.1	三鷹光器製非接触3次元測定装置 NH シリーズのスペック	08

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 結像性能とX線天文学

天体が放つ X 線の強度は最も明るい X 線天体の 1 つである蟹星雲からでさえ、1 [photon/cm²/s] しか なく、地上の実験室での X 線強度から数桁から十数桁微弱なものである。観測される典型的なフォトン のカウントレートは 1 [counts/s] 程度であり、このため 1 つ1 つのフォトンについて、その入射時刻、進 行方向、エネルギー等の詳細な情報を測定する。このため 1 部例外はあるが、X 線天文衛星には(X 線 望遠鏡またはコリメーター) + (エネルギー、時間分解能を持つ検出器)という組み合わせで観測機器 が搭載されてきた。

1962年以降、数々のX線天文衛星が打ち上げられ、X線天文学は衛星の技術的進化と共に発展してきた。 1970年代前半はコリメータ+ガス比例計数管といった組合せで、主な衛星として、「*Uhuru*」「*Ariel*-5」 「*OSO*-8」「*HEAO*-1」がある。この世代の天文衛星は広い有効面積の観測器による検出限界の向上を 図り、典型的な感度は1 mClab 程度であった。その中でも、すだれコリメータを搭載した「*SAS3*」は、 その位置分解能により、銀河系内にあるX線源の位置を正確に決め、光学天体との同定を行なった。

しかし、1978年に打ち上げられた「Einstein」衛星によって X 線天文学は劇的な進化を遂げることに なる。これまでのコリメーター + 検出器という組合せでは、検出器の開口面積を大きくすれば目的の天 体からのフォトンを開口面積に比例して多く集めることができるが、それと同時にバックグラウンドと なる、宇宙 X 線背景放射(CXB)も同じように増える。さらには、もう1つのバックグラウンドである 荷電粒子等の宇宙線は、検出器の体積に比例して増えるため、検出器を大きくしても検出感度には限界 があった。これに対して、「Einstein」衛星は、X 線望遠鏡 + マイクロチャンネルプレートという組合せ を初めて搭載し、この限界を打ち破ることに成功した。X 線望遠鏡による角分解能を得ることで目的の 天体以外の方向からの X 線を除去でき、さらには小さな開口面積を持った検出器で多くのフォトンを集 めることができるため検出感度(シグナルノイズ比:S/N比)が激的に改善され、検出感度 0.1 μClab を 達成したのである。

さらにその後、X線望遠鏡は持たないが特徴的な検出器を持つ衛星として、日本の打ち上げた、9.5%@6keV というこれまでの比例計数管の倍のエネルギー分解能を持つ、蛍光比例計数管を搭載した「てんま」、低 いノイズを持つ 4000*cm*² という大面積の比例計数管を搭載した「ぎんが」などがある。

X線望遠鏡を搭載した衛星として登場したのが、3秒角という高い角分解能を持った「ROSAT」である。この衛星は望遠鏡を搭載した衛星で初めて全天観測を行ない「Uhuru」衛星で観測した X線天体の200倍以上の10万個もの天体を発見することに成功した。さらに、90時間という長い周期の軌道を持つため、長時間の観測が可能だった「EXOSAT」がある。

また、撮像型蛍光比例計数管と共に、2%@6keVという半導体検出器としては限界に近いエネルギー 分解能を持つX線CCDを初めて焦点面に搭載し、0.1~10keVのX線領域で世界初の撮像分光観測を可 能にした「あすか」がある。この衛星の登場によって、銀河系中心付近からの蛍光鉄輝線の発見や超新 星残骸や銀河団の重元素組成の測定に基づく、宇宙の化学進化の研究などの天文学上の成果が得られた。

さらに「XMM」「Chandra」などといった最新のX線天文衛星では、(秒角単位の角分解能を持つX線 望遠鏡)+(X線CCDとGrating等の分散型高分解能分光素子)という組合せになってきている。これ により、離角が秒角程度の重力レンズによるクローバーリーフの発見、Jetの加速機構の解明などX線天 文学上重要な発見が為されている。

一方、先日打ち上げられた「すざく」衛星はこれらとは異なり、高い集光力と優れたエネルギー分解 能を持たせるという方向性をとっている。

以上のように、X線天文学はX線天文衛星の技術的進化、特にX線望遠鏡の進化によって大きく発展 してきた。第??章で述べるように、X線望遠鏡は製作方法によって性能に大きく制限がつき、広いエネ ルギー帯域で高い集光力を持ち、それと同時に高い分解能を持つことは現段階では不可能である。しか し、これを打破することができれば、X線天文学にさらなる発展が望める。そこで、本研究では高い集 光力を保ちつつも、結像性能を秒角単位まで向上させるための基礎開発を行なう。

図 1.1 に検出感度、角分解能、エネルギー分解能の進化を示す。



図 1.1: 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)

[Year]

1990

2000

1980

1970

第2章 X線光学

X線のエネルギー帯域では、ほとんどの物質の屈折率が1に非常に近く、全反射を得るのが困難である。 また、波長にすると $0.1 \overset{A}{\sim} 100 \overset{A}{\sim} と極めて短いので、反射鏡表面の粗さを非常に滑らかにする必要があ$ る。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線の散乱を取り扱う。

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、真空での波長を λ として、複素屈折率 ñ

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

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、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

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

$$f \equiv \frac{1 @ 0 原 F に よって 散乱 された 波 0 振幅}{1 @ 0 電 F に よって 散乱 された 波 0 振幅}$$
 (2.7)

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

この補正を加えて原子による散乱振幅 E_sは、

$$E_s = f(E,\phi) \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi = [f_1(E,\phi) + i f_2(E,\phi)] \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi$$
(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 $\simeq 0$ 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。

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

$$\delta = 1 - n = \frac{e^2 \hbar^2}{2\varepsilon_0 m_e E^2} f_1 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_1$$
(2.12)

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

 $^{{}^1}N_0$ はアボガドロ数、Aは原子質量数、hoは原子密度である。

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 \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 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、

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

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 \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、

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

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

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

$$(2.23)$$

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 f₁, f₂ 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





2.2 表面粗さに対するX線の反射率と散乱

2.2.1 運動学的回折理論

ここでは運動学的回折理論を基に議論を進めていく。

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 (以²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、k₀ として、散乱ベクトル q を

$$\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k}_0 \tag{2.24}$$

と定義する。この大きさは、

$$|\mathbf{q}| = q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda} \tag{2.25}$$

である。但し、 2θ は k と k₀のなす角である。

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 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、 $\rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) d\mathbf{r}$ 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、

$$S(\mathbf{q}) \equiv N \int \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad \boldsymbol{\varepsilon} \cup \boldsymbol{\tau}, \qquad (2.26)$$

$$I = I_0 f^2 |S(\mathbf{q})|^2 \quad (f : \mathbb{R} - \mathbb{R} + \mathbb{R}$$

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。

²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 2.5: 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

次に図 2.7 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 2.8 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 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 2.7 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、

$$q_{x} = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_{i} - \cos \theta_{s} \cos \phi)$$

$$q_{y} = \frac{2\pi}{\lambda} (-\cos \theta_{s} \sin \phi)$$

$$q_{z} = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_{i} + \sin \theta)$$
(2.28)

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 R₀を用いることで反射 X 線の強度は、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A dx dy \exp[-iq_z Z(x, y)] \exp[-i(q_x x + q_y y)] \right|^2$$
(2.29)



図 2.6: 大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱



図 2.7:物質表面による X 線の散乱

と導ける (A は X 線があたっている領域)。

2.2.2 表面上の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³(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、

$$\exp(-iq_z Z(x,y)) \simeq 1 - iq_z Z(x,y) - \frac{1}{2!}(q_z Z(x,y))^2$$
 (2.30)

ここで第2項は大角度への散乱を表す項であるので、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

³平均の法線方向に垂直な面に対しての入射角 θ_i と散乱角 θ_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。



図 2.8: 粗さのある物質面上での散乱と反射

$$\simeq \exp(-\frac{1}{2}(q_z Z(x,y))^2)$$
 (2.31)

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、(2.29)式にあてはめると、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A \exp(-iq_z Z(x,y)) dx dy \right|^2$$
(2.32)

$$\simeq I_0 R_0 \left(\exp(\frac{1}{2} (q_z Z(x, y))^2) \frac{1}{A} \int_A Z(x, y)^2 dx dy \right)^2$$
(2.33)

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

$$I = I_0 R_0 \left(\exp\left(-\frac{1}{2}(q_z \sigma)^2\right) \right)^2$$
(2.34)

$$= I_0 R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta_i}{\lambda}\right)^2\right)$$
(2.35)

と書き直せる。(2.34) 式の R_0 にかかる項は Debye-Waller 因子⁴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-2 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 $0.1 \sim 100^{\text{Å}}$)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⁵、 数 $^{\text{Å}}$ 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 θ_i の効果の分 σ の値が数 $^{\text{Å}}$ 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·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。

⁴Debye-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。

⁵2.1 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。

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 (2.29) 式を、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dx dy \frac{1}{A} \int_A dx' dy' \exp\left(\left(-iq(Z(x,y) - Z(x',y'))\right) \times \exp\left(-i(q_x(x-x') + q_y(y-y'))\right)\right)$$
(2.36)

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

$$g(X,Y) \equiv \left\langle (z(x',y') - z(x,y))^2 \right\rangle \tag{2.37}$$

と定義する。 ここで、g(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が、 $R \to \infty$ のときには g(X,Y) は無限大にはならないはずである。(さもなければ、 $R \to \infty$ のときは反射率が 0 となってしまう。) よって、適当なカットオフ ξ をつけ、例えば、

$$g(R) = 2\sigma^2 \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{R}{\xi}\right)^{2h}\right) \right)$$
(2.38)

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))がガウス分布をすると仮定すると、(2.36)式は、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dX dY \exp\left(-\frac{q_z^2 g(X, Y)}{2}\right) \exp\left(-i(q_x X + q_y Y)\right)$$
(2.39)

と書き直せる。

さらに、correlation function C(X,Y)

$$C(X,Y) \equiv \left\langle z(x',y')z(x,y) \right\rangle = \sigma^2 - \frac{1}{2}g(X,Y)$$
(2.40)

を定義することにより、(2.39)式を

$$I = I_0 R_0 \exp(-g_z^2 \sigma^2) \frac{1}{A} \int dX dY \exp(q_z^2 C(X, Y)) \exp(-i(q_x X + q_y Y))$$
(2.41)

と書き直す。 ここで $F(q_z, R) \equiv \exp(q_z C(X, Y)) - 1$ とすると、 $R \to \infty$ では $F \to 0$ となるため、(2.41) 式を 正反射成分と散乱成分に分けることができる⁶。

よって、 $I = I_{spec} + I_{diff}$ を分けて表記すると、

$$I_{spec} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \delta(q_x) \delta(q_y)$$
(2.42)

$$I_{diff} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \frac{1}{2} \int_0^\infty dR R F(q_z, R) J_0(q_z, R)$$
(2.43)

⁶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

となり、(2.42) 式は、(2.34) 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、比較的実験結果を再現している。ただし、(2.38) 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 : BDRF [?] [?]

この理論は正反射でない散乱成分のみを取り扱うため、(2.29)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 2.9) 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

$$m\lambda = l(\cos\theta_i - \cos\theta_s) \tag{2.44}$$

での m = 1 の回折光のみについて考える。



図 2.9: 回折格子による X 線の散乱

ここで、表面上の凸凹を表す関数として、Power Spectral Density(PSD) 関数を導入する。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、

$$PSD_2(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \left| \int_0^A \exp(2\pi i (f_x x + f_y y)) Z(x, y) dx dy \right|^2$$
(2.45)

の式で与えることで、回折格子による θ_sへの1次の散乱強度は、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_2(f_x, f_y)$$
(2.46)

と与えられる。 ここで、 λ^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 (2.29) 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のみ適用できる。 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、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{\pi}{\lambda} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_1(f_x)$$
(2.47)

但し、
$$PSD_1(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(2\pi i f_x x) Z(x) \right|^2$$
 (2.48)

となる。

2.3 結像光学系

2.3.1 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 2.10)、アッベの正弦条件

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \text{const.} \tag{2.49}$$

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 2.10: アッベの正弦条件

2.3.2 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 2.11: Wolter 型光学系—上から I 型,II 型,III 型

第3章 X線望遠鏡

3.1 X線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系

可視光で像をつくるには、レンズを利用した屈折光学系を用いるのが普通である。しかし、2.3 で述べ たように X 線領域では、ほとんどの物質の屈折率が1 に極めて近く、X 線をほとんど屈折しないため、 鏡を用いた反射光学系を用いる。しかし、X 線の直入射の反射率は非常に小さいので、X 線を臨界角以 下 (~1 [degree] 以下)の小さい角度で全反射させて集光する、斜入射光学系を用いる。

斜入射光学系の例 (Wollter I 型)を、図 3.1 に示す。図 3.1 に示すように、Wolter I 型斜入射光学系では、 回転放物面と回転双曲面の内面で入射 X 線を 2 回反射させ、焦点に集光させる。これにより、焦点距離 (二つの曲面の接合部から焦点までの距離)を短くすることができる。



図 3.1: (左):回転放物面反射鏡、(右): Wolter I 型反射鏡

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 3.2 に示すように、多数の鏡を同心円上に配 置することが必要になる。

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~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:??章参照)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 3.2: X 線望遠鏡の断面図— (複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I)X 線望遠鏡の断面図)

3.2.2 「直接研磨型」

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

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

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



Outer Bottom Ring

図 3.3: 「多重薄板型」X 線望遠鏡— 写真は Astro-E の XRT である。~180 µm という薄さの反射鏡 (基板:アルミニウム)が 0.5~1.2 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 3.4: 「 直接研磨型 」 X 線望遠鏡— 写真は *Chandra* の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡 (基板:ガラス)が 4 枚並 べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし、重さは1台で1トンもある。

3.3 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。

3.3.1 集光力(有効面積)

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

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E)$$
(3.1)

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ ,エネルギーEの時の鏡面の反射率である。

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 3.5 に示す。

Effective areas of various missions



図 3.5: 様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積 (XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積 である。) – AE は Astro-E の略である。

3.3.2 結像性能(HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下のような3つの物理量が用いられる。

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

平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 3.6 に示す。理想的には、イメージは 1 点に結像するが、実際には、図 3.6 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²。HPD の値が小さいほど、結像性能が良い。



図 3.6: 焦点面のイメージ。等高線で表したもの(左)と、3次元的に表したもの(右)。

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

焦点面に作られる2次元のイメージ上で、半径rの円周上に含まれる単位面積当りの光量を PSF と呼ぶ(図 3.7)。これは、無限遠にある点源から放射されたX線が、XRTの焦点面に作る輝度分布であり、 PSFのコアの部分が鋭いピークを持つほど、結像性能が良いといえる。

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



図 3.7: Point Spread Function (1 次元)。 焦点面のイメージを動径方向に積分し (左),1 次元の PSF を作る (右)。

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。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi r PSF(r) dr$$
(3.2)

EEF のプロットにおいて、縦軸が 50% の時の横軸の値 (半径)を2倍した値が HPD に相当する。最後 に、PSF、EEF、HPD の関係について図 3.8 にまとめる。図 3.8 は、入射した X 線の全光量を1と規格 化した時の、PSF、EEF 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 3.8 の場合では、 EEF が 0.97 分角の時に全光量の 50% になっているので、HPD はその 2 倍の 1.94 分角となる。



図 3.8: PSF、EEF、HPDの関係

第4章 多重薄板型X線望遠鏡の結像性能の決定要因

3 で述べたように多重薄板型 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要因について説明し、先日打ち上げら れたすざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡の結像性能と結像性能向上の可能性について示す。

4.1 結像性能の決定要因

多重薄板型 X 線望遠鏡の結像性能は大きく分類して次の3種類の独立要因から決定される。

4.1.1 反射鏡の円錐近似

X線望遠鏡に採用される Wolter I型光学系は回転双曲面鏡と回転放物面鏡を用いた2回反射で焦点面 にX線が集光される。しかし、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。そのため、製 作の容易さの点から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4.1)この広がり HPD_{円錐近似}を見積もってみると、

> $HPD_{
> PH_{3}} = \tan^{-1}\left(\frac{L\tan\theta/\cos 4\theta}{F}\right) = 0.3$ [分角] θ : 入射 X 線と反射鏡のなす角度 sim 0.25°

L: 光軸方向への反射鏡の長さ = 100mm

F: 焦点距離 = 4750mm

となることが分かる。ここで、代入した値は、すざく衛星搭載のものである。これは、円錐型に近似し た反射鏡を用いる限りは残ってしまう要因ではあるが、現在の結像性能決定要因に占める割合は最も小 さいので、大きな問題とはなっていない。しかし、今後結像性能を秒角のレベルまで向上させようと思 うと、改善する必要がでてくるのは必至である。、



図 4.1: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり

4.1.2 反射鏡鏡面の形状誤差

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¹。この像の 広がりの要因を、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_{形状誤差}を見積もってみる。図 4.2 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評価を行う。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 $\sigma_{3,2,4}$ のガウス分布であると仮定する。すると、平均的な反射鏡の傾きに対して入射角 θ で入射した X 線は、反射鏡各点に対しては、入射角に幅 $\sigma_{3,2,4,4}$ のばらつきを生じる。入射した X 線は鏡面で入射方向に対して 2 θ 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 $2\sigma_{3,2,4,4}$ 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 $\sqrt{(2\sigma_{kk})^2 \times 2} = 2\sqrt{2}\sigma_{kk}$ と書くとこができる。このことは、2回反射後の像のプロファイルが $\sigma = 2\sqrt{2}\sigma_{kk}$ 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

¹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。

68%が含まれるため、これを全積分量の 50%が入る幅の HPD_{形状誤差} は、

HPD_{形状誤差} =
$$2 \times 0.68 \times 2\sqrt{2\sigma_{法線}}$$

となる。factor の 2 は、 $-\sigma \sim \sigma$ の範囲の幅を求めるため、0.67 は 68%を 50%にするために掛けている。この HPD_{形状記差} が、鏡面形状による反射光の広がりを表している。



図 4.2: (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は、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。

4.1.3 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 4.3)

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。そのうちの 1 点が設計値から距離 dだけずれており、そのため 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 θ:設計値での X 線の入射角度
と表すことができる。(図 4.4) 仮に 1 点が設計値から 100µm 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 4.3: 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。



図 4.4: 位置決めのずれによる反射光のずれ

4.2 すざく衛星搭載のX線望遠鏡

4.2.1 構造

すざく衛星には全部で5台のX線望遠鏡が搭載されており、多重薄板型が採用されており、その構造 は、4.5に示すようにQuadrantと呼ばれる1/4円筒を4つ組み合わせてできている。さらにQuadrantは の上下2段に分かれたハウジングの中に形状を円錐に近似した厚さ180µmの反射鏡は175枚積層され ている。また4.8に示すように反射鏡の上段をPrimary、下段をSecondaryと呼んでいる。



図 4.5: X 線望遠鏡の構造—4 つの Quadrant と呼ばれる扇形のハウジングを組み合わせてできている。



図 4.6: Quadrantの構造—Quadrantはアラインメントバーに挟まれた14のセクターで構成されている。

4.6 は X 線望遠鏡の Quadrant を X 線の入射方向から見た図である。Quadrant は 14 のセクターのよば れるアラインメントバーに挟まれる領域からなる。この 14 セクターのうち両端 1 セクター分は解放端 となっており、結像性能が極端に悪いため、カバーをして観測には使用しない。詳細な仕様については 4.1 にまとめる。

表 4.1: すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の設計パラメータ

	XRT-I	XRT-S	XRT-S(spare)
焦点距離	4750 [mm]	4500 [mm]	4500 [mm]
焦点面検出器	XIS ^a	XRS ^b	XRS
望遠鏡台数	4	1	
plate scale	0.725 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm
反射鏡積層数	175	168	168
X 線入射角度	0.178~0.599 度	0.188~0.639 度	0.188~0.639度
反射鏡の間隔	$0.488 \sim 1.239 \ [mm]$	$0.506 \sim 1.302 \; [mm]$	$0.506\sim 1.302 \; [mm]$
開口面積(1台あたり)	702 [cm ²]	713 [cm ²]	713 [cm ²]
有効面積 ^c 1.49 keV	566 [cm ²]	569 [cm ²]	583 [cm ²]
4.51 keV	420 [cm ²]	439 [cm ²]	$411 [\rm cm^2]$
8.04 keV	340 [cm ²]	$344 [\mathrm{cm}^2]$	$300 [cm^2]$
9.44 keV	$244 \ [cm^2]$	246 [cm ²]	214 [cm ²]
有効観測エネルギー領域	≤ 10 [keV]		
角度分解能 (HPD)	~ 2.1 [分角]		
口径	直径 400 [mm]		
反射鏡のサイズ	長さ 100× 厚さ約 170 [µm]		
反射鏡の構造	アルミ基板 (厚さ 157.48 [μm])		
	+型取り用エポキシ (厚さ 12.7[µm])		
	+金 (厚さ 0.1 [µm])		
全重量 (1 台あたり)	~ 18 [kg]		

^a X線 CCD カメラ。位置情報とスペクトルが同時に得られる汎用性の高い検出器で、半導体検出器としては限 界に近いエネルギー分解能 130eV@6keV を実現。

^b X 線マイクロカロリメータ。入射する X 線光子のエネルギーを温度上昇として検出する検出器で、非常に優れたエネルギー分解能 (~12eV@6keV) を実現。

[°]表面が理想的な反射鏡が設計値にあると仮定したときの計算値。

4.2.2 反射鏡の製作方法

反射鏡はレプリカ法という方法を用いて製作された。表面形状の非常に良いガラス母型に反射鏡の鏡 面物質である金を蒸着し、薄い基板にエポキシ樹脂などの接着剤を塗布したものを母型に接着して、そ の基板を母型から剥がしとることで、ガラス母型を反射鏡の鏡面形状として写し取る方法である。詳し いその作業工程は??章に示す。



図 4.7: レプリカ法で製作された反射鏡—厚さは 180µm、母線方向の長さは 101.6mm。

4.2.3 反射鏡の支持機構

Primary、Secondaryの反射鏡を設計値の場所で支持するには、少なくとも4点で支持する必要がある。 すざく搭載X線望遠鏡ではアラインメントバーという櫛の歯状のバー4本を用いて175枚の反射鏡の上 下端の支持を行なっている。また、アラインメントバーの溝の幅は220µmとなっており、反射鏡を望遠 鏡に挿入した後には、反射鏡を溝との間に50µmの隙間が生じる。



図 4.8: すざく搭載 X 線望遠鏡の反射鏡支持機構—4 段に分かれており、それぞれが反射鏡の Primary top、Primary bottom、Secondary top、Secondary bottom の 4 点の位置を決定している。

4.2.4 結像性能

すざく衛星搭載のX線望遠鏡の結像性能を4.1の3つの要因で分離する。それぞれの誤差要因は独立 事象なので、全体としての結像性能は3つの2乗和で表すことができる。その結果を模式的に図で表し たものが4.9である。この結果を見ると、すざく搭載の望遠鏡では、反射鏡の位置決め誤差が最も結像 性能の決定に寄与していることが分かる。



図 4.9: すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の結像性能決定要因—それぞれが独立要因なため、全体での結像性能は 2 乗和 で表すことができる。

4.2.5 位置決め誤差の要因

位置決め誤差は、4.1 で述べたように反射鏡個々の組の結像位置がばらついてしまうため、つまり、反 射鏡1組ごとの反射鏡のなす角が変化しているために生じている。反射鏡のなす角が変化すると個々の 組での焦点距離が変化してしまう。(図4.10)特にアラインメントバーは4段に分かれているため、反射 鏡の位置を決めるためには4本のアラインメントバーを正確に設置しなければいけない。さらに、望遠 鏡が上下2段に分かれているため、仮にアラインメントバーを正確に望遠鏡ハウジングに取り付けたと しても、上下段の組付けの際にさらに自由度が生まれてしまう。また、アラインメントバーを上下2段 組み合った望遠鏡に対して、完璧な位置に調整が行なえたとしても、反射鏡と溝との間に50µmの遊び が存在するため、反射鏡は溝の中で角度を変化させ、やはり反射鏡のなす角が変化してしまう。

このような理由から、アラインメントバーを用いて、反射鏡を設計値の通りの位置、なす角に設置す ることは非常に困難であり、位置決め誤差を押さえ込むためには、アラインメントバーによる反射鏡支 持の改善が必要不可欠である。





図 4.11: アラインメントバーの問題点—4 段が別々に動き、反射鏡と溝との間に 50µm の隙間があるため。

第5章 新しい反射鏡支持機構とX線望遠鏡の設計

前章で述べた通り、すざく衛星搭載の X 線望遠鏡には、反射鏡の支持機構に結像性能を悪化させている 問題点があった。そこで、その問題点を解決する新しい反射鏡支持機構を導入し、それを用いた X 線望 遠鏡の設計を行なう。

5.1 新しい反射鏡支持機構

5.1.1 導入の目的

既に述べているように、従来の支持機構であるアラインメントバーには、(1)反射鏡個々の傾きが変化 する。(2)1 組の反射鏡のなす角が変化する。という問題点があり、位置決め誤差の要因となってしまっ ていた。この2点を改善するために新たな支持機構として、以下の点を改善した「アライメントプレー ト」を導入する。

1. 反射鏡のなす角の変化を抑えるためにアラインメントバーを4段一体型に変更した。

2. 反射鏡個々の傾きの変化を抑えるために、溝と反射鏡の間の遊びを 50µm から 15µm に変更した。

4本のアラインメントバーを一体型にしたことによって、反射鏡のなす角は、そのアラインメントプレートの加工精度でのみ決定されるようになる。そのため、加工には数 μm の精度が必要となる。



図 5.1: アラインメントバーからアラインメントプレートへの変更-4段-反射鏡のなす角は加工精度で決まる。

5.1.2 アラインメントプレートの製作

実際に製作したアライメントプレートの写真を図 5.2 に載せる。今回のアラインメントプレートの製作は、(株)オオイシに精密な加工が可能な放電加工で製作していただいた。アラインメントプレートの材質はアルミニウムで、厚さを 1.5mm、溝の深さを 2mm としている。実際の溝の写真を図 5.3 に載せる。溝は反射鏡の母線方向と平行になるように傾きを持たせてある。



図 5.2: 試作したアラインメントプレートの全体図



図 5.3: アラインメントプレートの溝部分

5.1.3 溝位置の測定

反射鏡2段のなす角は、溝の位置、つまりアラインメントプレートの加工精度のみによって決まって いる。加工していただいたプレートの実際の溝の位置を三鷹光器株式会社所有のNH5-SPをお借りして 測定を行なった。その詳しい原理については??に示す。

溝位置の測定はエッジ検出を応用した、「溝幅測定」機能を用いて行なう。図 5.4 のように 2 辺のエッジを検出し、直線を引く。その 2 直線の交点から直線のなす角を 2 等分するように線を引き、その 2 等分線に垂線を下ろし、その交点の座標を溝位置とする。そのとき、同時にエッジから溝位置までの距離を「溝幅」として出力してくれる。この機能を用いた溝位置の測定結果は図 5.1、図 5.1.3 の通りである。ちなみにずれの値が正であれば、設計に比べ、望遠鏡の外側にずれていることになる。



図 5.4: 溝位置測定の概念図—基本的には egde 検出と同様である。

		設計値からのずれ量 [µm]			
溝番号	Primary top	Primary bottom	Secondary top	Secondary bottom	
10	6	2	6	0	
14	5	6	4	2	
18	5	4	5	6	
21	10	2	3	-1	
22	7	2	0	-3	
90	10	8	8	5	
93	9	10	6	2	
96	6	9	7	2	
99	10	6	5	1	
101	10	8	6	2	
102	7	5	7	2	
151	11	11	7	5	
154	13	7	9	4	
157	11	10	12	5	
160	11	10	8	3	

表 5.1: アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ



図 5.5: アラインメントプレートの溝位置の設計値からのずれ—横軸が設計値からのずれ量、縦軸は Y 方向の位置

この結果を見ると、Secondary bottom 側から Primary top 側に行くにつれて、さらに外側の溝ほど大き くずれていることが分かる。最もずれている部分で約 12 μ m 程度である。前に述べた通り、実際の望遠鏡 に組み込む際に最も問題になるのは、焦点距離を決める Primary と Secondary の反射鏡のなす角である。 そこで、溝の X,Y 座標から反射鏡のなす角を求める。Primary top,Primary bottom,Secondary top,Secondary bottom の座標をそれぞれ (X₁,Y₁),(X₂,Y₂),(X₃,Y₃),(X₄,Y₄) とすると 5.6 のようになす角を求めることがで きる。実際の計算結果は、表 5.2、図 5.7 に載せる。



図 5.6: 溝位置からなす角の導出

表 5.2:1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ―値が負は、なす角が小さくなる方向

溝	設計値からのずれ [分角]
10	0.06
14	0.12
18	0.12
21	0.12
22	0.06
90	0.12
93	0.30
96	0.36
99	0.18
101	0.18
102	0.18
151	0.12
154	0.00
157	0.36
160	0.30
平均	0.14
分散	0.11



図 5.7: 反射鏡のなす角の設計値からのずれ

平均で、およそ 0.1 分角ほどなす角が大きくなっており、焦点距離が設計値の 4750mm よりも長くなっていることが分かる。この結果がどの程度焦点距離に効いているかを求める。90 番台の反射鏡のパラ メータを用いて、焦点距離を求めてみる。90 番台の反射鏡は、平均で 0.26 分角なす角が大きい。その 結果から焦点距離を求める (図 5.8) と 4780mm となり、設計値から 30mm ほど長くなっていることが分 かった。。



図 5.8: なす角の変化による焦点距離の変化

5.1.4 Ray-Tracingシミュレータを用いた結像性能の見積り

アラインメントプレートの加工精度のため、焦点距離は実際より若干長くなっていることが分かった。 このことが望遠鏡を組み上げたとき、どの程度を影響を与えるかを調べるために、シミュレーションを 用いて結像性能の見積りを行なった。今回はプレート 90 番台の溝の設計値からのずれ量である Primary topを 8 μ m、Primary bottom,Secondary topを 6 μ m、Secondary bottom を 4 μ m それぞれ望遠鏡の動径方向 の外側にシフトさせ、さらに溝の中で反射鏡はばたついていないことを仮定し、焦点距離 4750mm でシ ミュレーションを行なった。反射鏡の形状はすざく搭載反射鏡と同様なので、形状誤差は 0.85 分角であ る。図 5.9 にその結果を示す。



図 5.9: Ray-tracing シミュレーションにより求めた (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread Function(下)Encercled Energy Function

シミュレーションの結果 HPD は 1.32 分角となった。すざく搭載の X 線望遠鏡に比べると改善が見ら

れるが、プレートの加工精度のため焦点距離が長くなってしまっているので、位置決め誤差は十分に抑 えきれていないことが分かる。。

5.2 プレートを用いた望遠鏡の設計

すざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡は、4本のアラインメントバーを用いて作られており、望遠 鏡の Primary と Secondary が上下別々のハウジングを組み合わせてできている。今回設計を行なったア ラインメントプレートは、ハウジングが上下別々に作られていると、プレートに回転や動径方向への並 進の自由度を生んでしまい、理想的なプレートのアラインメントが非常に困難になる。(図 5.10) そのた め、アラインメントプレートに適した、新しい望遠鏡ハウジングの設計を行なった。



図 5.10: アラインメントプレートの自由度—ハウジングが上下段別々だと、回転、並進の自由度が生じる。

5.2.1 設計の思想

アラインメントプレートは、反射鏡を精度良くアラインメントできる工夫がされているが、望遠鏡に 対し反射鏡を精度良く配置するためには、プレート自身も、ハウジング内に精度良くアラインメントす る必要がある。そこで、図 5.11 の様に精度良く加工 (数 µm 程度) された円柱を基準面として、その基準 面にアラインメントプレートの基準面をつき当てることで、プレートのアラインメントを数 µm 程度、 プレートの溝幅から考えると最低でも 15µ の精度で行なうことを目標に置き、その基準面を軸に望遠鏡 ハウジングの設計を行なう。実際に製作した望遠鏡ハウジングの図面は、付録に載せる。ハウジングの 製作は三鷹光器株式会社に依頼した。



図 5.11: ハウジング設計の思想—精度良く加工された基準面にアラインメントプレートを突き当てるのみで、調整を行なう



図 5.12: 作成した望遠鏡ハウジングの部品―部品は大きく分けて内壁、外壁、側板、上板、下板、歯車、L 字ブロック、止め板の 8 種類

基準面の加工精度

設計の思想では、プレートのアラインメント精度は、基準面の加工精度で決定される。溝幅と反射鏡 との遊びが 15µm であることを考えると、内壁の加工精度は Peak to Valley で少なくとも、15µm 以下で ないといけない。さらに、位置決め誤差の改善を目指すのであれば、それ以上の加工精度は必要である。 図?? に実際の内壁の写真、図??にその母線方向の形状を宇宙科学研究所所有の NH3-SP¹を用いて 20cm を 0.1mm ピッチで測定を行なった結果を示す。



図 5.13: アラインメントプレート調整の基準面となる内壁—この 1/4 円柱は円柱を旋盤で加工した後に 4 分割した。



図 5.14: 内壁の母線方向の形状—母線方向に 20mm、0.1mm ピッチで測定した。

¹測定の原理は NH5-SP と全く同様。

加工された円柱は母線方向におよそ PV で ±2µm 程度の精度で加工されていることが分かる。この 1/4 円柱の真円度の測定は、1/4 であるために測定方法がなく、行なうことができなかった²。しかし、母線 方向の精度が非常に良く出されており、その程度の精度で円周方向にも加工されていると考えられる。 これらの結果から基準面は、プレートのアラインメントに十分使用できる精度で加工されていることが 分かった。

5.2.2 望遠鏡の組み上げ

組み上げ手順

望遠鏡は、次のようにして組み上げていく。

- 1. 内壁に歯車を取り付ける
- 2. 内壁に側板を取り付ける
- 3. もう1つ側板を取り付ける
- 4. 外壁を取り付け、そのとき L 字ブロックを軽く外壁に取り付けておく
- 5. 上板、下板を取り付け、いったん「箱」を作り上げる
- 6. 側板を片方外し、プレートを内壁に押し付けながら取り付け、同時にL字ブロックをプレートに そわせるように外壁に取り付ける

7. 反射鏡を挿入する

組み上げの際、全ての組み上げ行程は、図??にあるように、丈盤の上で行ない、全ての面を直角に組み 上げられるように注意を払った。実際に組み上げ、完成した望遠鏡の写真を図 5.16 に載せる。

²曲率半径のずれと円柱を 1/4 に割っている点が円柱の中心であるかの切り分けができないため。





図 5.15: 望遠鏡組み上げの手順



図 5.16: 組み上げた望遠鏡の写真

今回試作した望遠鏡のアラインメントプレートには反射鏡の設計値 180µ に 15µm の余裕を持たせた 15本の溝が切られている。しかし、今回の試作では、反射鏡は 3 組 (90,93,96番の溝) にしか挿入するこ とができなかった。マイクロメーターを用いて反射鏡の厚さを測定したところ、厚さがその理由として 考えられるのは、実際の反射鏡には、厚さにばらつきがあり、195µm よりも厚い反射鏡があったためと 考えられる。実際にマイクロメータを用いて測定した反射鏡の厚さを??に示す。

5.2.3 プレートの取り付け精度

前にも述べたように、プレートは内壁である 1/4 円柱に突き当てるのみで、調整する。このときの取 り付け精度を調べた。プレートには基準面である内壁に対して、「並進」と「回転」の 2 つの自由度が存 在する。CCD カメラを用いて、基準となっている内壁から、プレートの「切りかき」と呼ぶ位置までの 距離を測定した。さらに、内壁に対する回転角 θ は、Primary 側の内壁-切りかき間の距離と Secondary 側の内壁-切りかき間の距離から求めるとこができる。プレートの Primary と Secondary の切りかきの距 離は、223mm であるので、Primary top の内壁-切りかき間の距離を Pt、Secondary bottom の内壁-切りか き間の距離を Sb とすると、 θ =tan⁻¹(Pt-Sb)/223 で求めることができる。(図??) 内壁に対するプレート の回転、並進位置の測定結果は図??に示す。



図 5.17: 内壁に対するアラインメントプレートの相対位置



図 5.18: アラインメントプレートの(上)並進位置と(下)回転

??より、プレートを基準面に突き当てるという調整のみで、並進方向のばらつきは、P.V.(Peak to Valley) で 20µm 程度、回転に関しては、0.5 分角程度となっていることが分かる。隣り合うプレート同士が 15µm ずれていなければ反射鏡の挿入には問題がないと思われるので、調整としては、十分な精度だといえる。

溝の中での反射鏡の遊び減らす工夫

今回製作したアラインメントプレートには、反射鏡と溝に 15µm の遊びが存在する。小さいとはいえ 反射鏡はこの遊びの中で、傾きを変化させる。そこで、反射鏡と溝との間にアルミナイズドマイラー (厚 さ 15µm)を挟み、反射鏡をアラインメントプレートの内側に押し付け、実効的な溝幅を0にする工夫を 行なった。



図 5.19: 実効的な溝幅を0にする工夫—アラインメントプレートの溝部分に曲率がついているので、そこにアルミナ イズドマイラーを差し込んだ。



図 5.20: 実際の溝部分の写真

反射鏡にスペーサーを挟んだ前後で反射鏡の位置を測定したところ、??のようになり、確かに内側に 反射鏡が動き固定されていることが分かる。



図 5.21: アルミナイズドマイラーを挟んだ前後の#90の反射鏡の位置—どの場所も数 µm 程度内側に移動して いる

5.2.4 可視光を用いた焦点距離の測定

アラインメントプレートを用いた望遠鏡は、1組の反射鏡のなす角が一意的に決定されるために基本 的には溝の加工精度で焦点距離が決定する。しかし、アラインメントプレートには溝と反射鏡の間に遊 びがあり、反射鏡のなす角が変化し得る。そのため、前もって可視光で焦点距離を確認しておく必要が ある。

測定方法

測定には、宇宙科学研究所所有の折り返し光学系を用いた。

焦点距離はイメージの左右対称性を用いて調べる。まず、図 5.22 のように焦点面で得られるイメージ を結像中心を境目に左右に分割し、その左右のイメージの光量を調べ、全光量で割る。望遠鏡-検出器 (CCD カメラ)までの距離を変化させ、その関係式を導き全光量に対する左右の光量が比が 0.5 になると ころを焦点とする。例として焦点距離が短いものを図 5.23 に示す。



図 5.22: 焦点距離の測定—図のように結像位置で左右に分図 5.23: 焦点距離が長い例—このイメージを撮像した距割し、それぞれの光量の全体に占める割合を求める。 離は望遠鏡の焦点距離よりも短い。

2種類試作した望遠鏡について測定を行なった。その結果を図 5.24、図 5.25 に示す。



図 5.24: 焦点距離の測定 (スペーサーなし)—焦点距離 図 5.25: 焦点距離の測定 (スペーサ - あり)—焦点距離 は 4757mm は 4771mm

表 5.3:2 種類の状態での焦点距離			
反射鏡の状態	焦点距離 [mm]		
スペーサ - なし	4757		
スペーサ - あり	4771		

この結果を見ると、遊びをなくす工夫をした後の方が焦点距離が長くなることが分かった。溝位置の 測定結果から、90番台の反射鏡のなす角は設計値よりも約0.26分角大きいことが分かっている。まさ に、これは溝幅を実効的に0にすることで、反射鏡は溝に沿う位置に移動し、加工精度で規定される位 置に反射鏡が収まっているため、焦点距離が長くなっていると考えられる。

第6章 すざく衛星搭載X線望遠鏡の反射鏡を用いた 望遠鏡の光学測定

この章では、今回試作した X 線望遠鏡にすざく衛星搭載用の反射鏡を挿入し、結像性能の評価を行なった。その結像性能の決定要因を分離するため、望遠鏡の構成要素 (Quadrant、セクター、反射鏡 1 組) ごとに X 線をあて、得られるイメージの広がりとばらつきを調べた。

6.1 X線測定システム

望遠鏡の性能評価は、宇宙科学研究所の 30m ビームラインを用いて行なった。その測定システムおよび検出器について説明する。宇宙研標準X線光源室における平行X線光源装置を図 6.1 に示す。



図 6.1: 宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図

最大定格出力	60kV 200mA (12kW)
管電圧設定	$5\sim 60 { m kV}$
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	$0.5(Z) \times 10(Y) \text{ mm}^2$
実効焦点サイズ	$0.5(Z) \times 1.0(Y) \text{ mm}^2$
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから 1 時間後)

表 6.1: X 線発生装置の仕様

6.1.1 X 線発生装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200)である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 6.2)。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。宇宙研標準 X 線光源室での測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282[keV])、Al-K α (1.49[keV])、Ti-K α (4.51[keV])、Cu-K α (8.04[keV])、Pt-L(9.44[keV])の5種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは 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 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 6.1 に示す。



図 6.2: X 線発生装置の構成図

6.1.2 四極スリット

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



図 6.3: 四極スリットの構成図

6.1.3 大気室チェンバー

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。フィルタの構成を図6.4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。



図 6.4: 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)。

XRT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 6.2 に示す。また各フィルタの透過率を図 6.5 に示す。

表 6.2: 特性 X 線と対応するフィルタの種類

特性X線	フィルタ物質	フィルタの厚さ[mum]
Al-K α (1.49keV)	Al	15
Ti-K α (4.51keV)	Ti	50
Cu-K α (8.04keV)	Ni	40
Pt-L(9.44keV)	Ni	40



Filter Transmissin

図 6.5: フィルタの透過率

試料室チェンバー				
車	ŧ	移動量	移動可動範囲	移動速度
_	[t	oulse/deg or min]	[mm,arcmin](total)	[mm,arcmin/sec]
S-	Х		0 or +25(手動)	
S-	Y 1	00 pulse / 1mm	$-206.5 \sim +426.6 \ (633.1)$	4
S-	Z 8	800 pulse / 1mm	-192.6 ~ +228.8 (421.4)	0.25
S-	$\theta_x = 1$	000 pulse / 1deg	(±360°回転が可能)	20
S-	$\theta_y = 2$	000 pulse / 1deg	-331.8 ~ +292.9 (624.7)	20
S-	θ_z 2	000 pulse / 1deg	$-250.0 \sim +284.4 (534.4)$	20
検出器チェンバー				
:	軸	移動量	移動可動範囲	移動速度
		[pulse/mm]	[mm](total)	[mm/sec]
	D-X	2000 pulse / 1m	m $-111.5 \sim +97.3 (208.8)$	3) 1.5
	D-Y	2000 pulse / 1m	m $-231.0 \sim +429.7$ (660.)	7) 4
	D-Z	2000 pulse / 1m	m $-207.5 \sim +213.0 (420.5)$	5) 0.25

表 6.3: 試料室・検出器両チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998)

6.1.4 試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ

地上較正試験においては、平行度の高いX線ペンシルビームを望遠鏡全体に照射する必要がある。 しかし前述のX線発生装置は固定されているために、逆にXRTと検出器を並進及び回転ステージ に載せて移動することで、ペンシルビームによる全面スキャンを実現している。試料室チェンバー と検出器チェンバーに設置されている、計10軸の駆動ステージ群の全体図及び可動範囲について 図 6.6 と表 6.3 に示す。



図 6.6: 試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997) — 左が試料室チェンバー内ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。

ペンシルビームを XRT に照射する位置を変えるために、試料室チェンバーのステージは Y、Z 軸方向に移動可能である。また XRT-I(焦点距離 4750[mm]) と XRT-S(焦点距離 4500[mm]) という焦点 距離の異なる望遠鏡の測定のために、X 軸方向に関しても移動が可能である。さらに XRT の結像 性能及び有効面積の入射角依存性を調べるために、X線の入射角度を変える必要があるので、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 方向に回転可能なステージが、並進ステージの上に載っている。これら2つのステージの 組み合わせによって、任意の位置と角度にXRTを移動、回転させることができる。

また XRT の全面スキャンや1ラインスキャンにおいては、検出器を XRT の焦点位置に固定する必要があるため、検出器も X、Y、Z 軸方向に移動可能な並進ステージの上に載せてある。測定の際には S-y と D-y を同期して動かさなくてはいけないが、±0.1mm 程度の精度で両者を一致させて動かすことが可能になっている (柴田 1997)。これら 10 軸の駆動ステージ群は、試料室チェンバーの X 軸を除いて全てワークステーションによって制御することが可能になっている。

座標軸は以下のように定義されている。X線の上流(X線発生装置側)から下流(検出器チェンバー 側)方向にX軸、地面から鉛直方向上向きにZ軸を定義する。右手系を採用するために、Y軸方向 は上流から下流側を見て、水平方向に右から左に向かう向きになる。回転系については右ねじが 進む向きに回転させる方向を正の向きと定義する(図 6.6)。

6.1.5 真空装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されたビームラインの長さは、高い平行度を実現するために 36[m] 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。例えば 6[keV] の X 線の平均自由行 程は??[cm] でしかない。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。

これらの真空度はピラニゲージ (測定範囲:7.6×10² ~ 1.0×10⁻³ [Torr]) と、イオンゲージ (測定範囲:1.0×10⁻¹ ~ 1.0×10⁻⁷ [Torr]) でモニターしており、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 6.7 に宇宙研標準 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。


図 6.7: ビームラインにおける真空・排気装置の全体図



図 6.8: 検出器チェンバー内に設置されている検出器 — 左 (+Dy 側) から順に CaZdTe 検出器、背面照射型 CCD、 P.C.。

6.1.6 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。図 6.8 に焦点 面検出器の配置を示す。

• ガスフロー型比例計数管 (P.C.)

宇宙研標準 X 線光源室で使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar: 90%、 CH₄:10%)を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 6.4 に比例計数管の仕様をまとめる。

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。現在宇宙研標準 X 線光源室には浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシステムが 設置されている。この CCD カメラは受光領域と電荷転送部が同じフルフレーム転送方式である。一辺 24µmの正方形ピクセル 1024×1024 個からなっていて、XRT に対して 19×19[arcmin²]の立体角をカバー している。CCD は 1.1[arcsec]の位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプルのアラインメント やサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われる。また暗電流を減らすために、ペル チェ素子を使って-70C°まで冷却して使用する。

図 6.9 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 6.5 に X 線 CCD カメラの仕様をまとめる。

表 6.4: ガスフロー型比例計数管の仕様

 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% (Al:4.51keV)
	$\sim 20\%$ (Al: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



1pixel

0000

000000

80000



P3 P2 P1

 $t=t_1$

t=t₂

t=t₃

<u>'00 00</u>0

899



Time

図 6.9: 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)。

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

表 6.5: 背面照射型 CCD カメラの仕様

6.2 反射鏡の形状

今回試作した X 線望遠鏡に挿入する反射鏡は GSFC/NASA(NASA Goddard Space Flight Center) で製作 された、すざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡の反射鏡である。製作の方法は、??で示す方法と同じ レプリカ法を用いている。今回挿入した反射鏡 3 組の鏡面形状について、6.10 に示す。



図 6.10: 望遠鏡に使用したすざく衛星搭載用反射鏡の鏡面形状—上から 90、93、96番の溝に挿入した反射鏡。 左 が Primary 右が Secondary。

6.3 結像性能決定要因の切り分け

Quadrant での結像性能は、4章で述べた通り円錐近似、形状誤差、位置決め誤差により決定される。この3つのうち円錐近似と形状誤差に関しては、反射鏡1組にX線を当て、その像の広がりから求めることができる。¹位置決め誤差は、Quadrantの結像位置から反射鏡1組ごとの作る像がどの程度ばらついているかで求めることができる。しかし、測定の原理的な問題で、望遠鏡を回転させずに1組ごとにX線を当てていくことができない。そのため、望遠鏡を回転させずにイメージが撮像できるセクターの結像位置を用いる。セクターの結像位置がQuadrantの結像位置からがどれだけばらついているかを求め、その後望遠鏡を回転させセクターの中での1組ごとの結像位置のばらつき求める。

すると、位置決め誤差である Quadrant の結像位置からの 1 組ごとの結像位置のばらつきは、2 つの 2 乗和で表すことができる。

¹実際には像の広がりを表す HPD は、円錐近似と形状誤差の 2 乗和になっている。



= {(Quadrantの結像位置に対するセクターの結像位置のばらつき)²+ (セクターの結像位置に対する反射鏡1組のイメージのばらつき)²}^{1/2}

図 6.11: 結像性能決定要因の切り分け

6.4. QUADRANTの結像性能 第6. すざく衛星搭載 X線望遠鏡の反射鏡を用いた望遠鏡の光学測定

6.4 Quadrantの結像性能

X線による性能評価はまず、Quadrant 全面に X線をあて、その望遠鏡全体での結像性能を調べる。今回は前章で述べた次の2種類の望遠鏡の測定を行なった。

- 1. 望遠鏡を組み上げ、反射鏡 3 組 (90、93、96 番)を挿入したもの——-(HRXRT-1)
- 2.1の後に反射鏡と溝の隙間を実効的に0にする工夫を行なったもの——-(HRXRT-2)

ここから、この2つをそれぞれ HRXRT²-1、HRXRT-2と呼ぶことにする。

6.4.1 測定方法

宇宙科学研究所 30m ビームラインは、高い平行度を実現するため、X 線発生装置から測定を行なうサ ンプルまでの距離を 30m と大きな距離を取っている。さらに、サンプルから X 線発生装置側に約 1m の 部分にスリットを設け、検出器とサンプルの乗っているステージを同機させて動かし、高い平行度(約 13 秒角)の X 線をサンプルの全面に入射できるようになっている。(図??) 実際の測定は以下の手順(6.13)に従い行なった。

- 1.4 極スリットを用いてサンプルに当たる X 線ビームサイズを 2mm×2mm にする。
- S_y、D_yを移動させ、X 線ビームが Quadrant 開口部の約 5mm 外側へ当たるようにする。その後、 X 線 CCD カメラで露光を開始し、S_y、D_yを同時に動かし、サンプルを横切り、先ほどとは逆側 の Quadrant 開口部の約 5mm 外側に X 線ビームが当たる位置まで移動し、CCD のシャッターを閉 じる。
- 3. S_z 、 D_z をビームの幅の分だけ移動させる。
- 4.2、3を反射鏡の入っている部分全てを走査するまで繰り替えす。

今回の測定は全て W-side(X 線発生装置側からみて左側) にサンプルを配置して行なった。また、可視光 測定での結果を踏まえて、サンプルから焦点面検出器 (X 線 CCD) までの距離は HRXRT-1 は、4750mm、 HRXRT-2 は、4766mm としてある。

²High Resolution X-Ray Telescope



図 6.12: Quadrant 全面のスキャン



図 6.13: **ラスタースキャン**—サンプルステージと検出器ステージを同期させて動かし、2mm 角のビームを Quadrant 全面に走査させる。

6.4.2 測定結果

HRXRT-1、2 について Quadrant 全面に X 線を当てた測定結果を示す。焦点面に得られたイメージから PSF、EEF を作り、結像性能の評価を行った。結果は図 6.14、図 6.15、表 6.6 の通り。

HRXRT-1の結果



図 6.14: Quadrant イメージの測定結果 (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread Function(下)Encercled Energy Function

HRXRT-2の結果



図 6.15: Quadrant イメージの測定結果 (左上) 焦点面でのイメージ (右上)Point Spread Function(下)Encercled Energy Function

表 6.6: Quadrant での結像性能			
XRT	HPD [分角]		
HRXRT-1	0.99		
HRXRT-2	1.05		
すざく搭載 XRT	1.83		

すざく衛星搭載の望遠鏡と比較すると、反射鏡の枚数は異なるが、今回試作した HRXRT はよりシャー プな、HPD で比較すると、約 50% ほど改善された像が得られた。この段階では、単純に比較することは できないが、反射鏡はすざく搭載のものを用いているので、位置決め誤差の改善が見られているはずで ある。ちなみに、試作した 2 種類の HRXRT では、どちらも Quadrant での結像性能はほぼ同様の結像性 能であるという結果が得られた。

6.5 セクターごとの結像性能

Quadrant での結像性能を切り分けるため、Quadrant を円周方向に分割した、セクターごとのイメージを撮像し、そのイメージの広がりと結像位置を調べる。

6.5.1 測定方法

測定は図 6.16 に示したようにポインティングで反射鏡にビームを照射して行なう。θ_x 軸を回転させ ずに、4 極スリットでビームサイズを 4mm 角に絞り、4mm ピッチで検出器、望遠鏡を動かし、各セク ターをスキャンしていく。HRXRT-1、2ともに 10 セクター分³(セクター 3~12)の測定を行なった。全て のセクターのイメージは Quadrant のイメージを撮像したときと同様回転させずに撮像しているので、セ クターごとのイメージの結像位置が、全てのセクターイメージの足し合わせである Quadrant イメージの 結像位置から、どれだけばらついているかを調べることができる。



図 6.16: セクタースキャンの方法—4mm 角の X 線を 4mm ピッチで 4 点照射した。

³反射鏡の円周方向の端部分は、反射鏡作成の工程上形状が悪くなることが多いので、両端2セクター分はカバーをして隠してある。

6.5.2 測定結果

例として、HRXRT-1の焦点面でのイメージと EEF について以下の図に示す。また、HRXRT-1、2の 結像位置とイメージの広がり (HPD)を示す。図 6.20、??の結像位置のばらつきを示した図は、Quadrant の結像位置が原点になっている。



図 6.17: HRXRT-1 のセクターイメージ (セクター 3~6)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function



図 6.18: HRXRT-1のセクターイメージ (セクター 7~10)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function



図 6.19: HRXRT-1のセクターイメージ (セクター 11~12)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function

HRXRT-1のセクターイメージの広がりと結像位置のばらつき



図 6.20: **セクターイメージの詳細**—(左) セクターごとの HPD(右) 原点を Quadrant イメージの結像位置としたときのセ クターごとの結像位置



HRXRT-2のセクターイメージの広がりと結像位置のばらつき

図 6.21: セクターイメージの詳細—(左) セクター毎の HPD(右) 原点を Quadrant イメージの結像位置としたときのセク ター毎の結像位置

セクター	HRXRT-1	HRXRT-2
	HPD [分角]	HPD [分角]
3	1.55	1.75
4	0.78	0.89
5	0.89	1.44
6	0.89	0.82
7	0.85	0.75
8	0.64	0.85
9	1.06	0.99
10	1.40	0.92
11	0.96	1.37
12	1.51	0.82
平均	1.05	1.05

|--|

	HRXRT-1	HRXRT-2
セクター	(ΔD _y [分角], ΔD _z [分角])	(ΔD _y [分角], ΔD _z [分角])
3	(0.07, -0.03)	(0.00, -0.08)
4	(0.09, -0.04)	(0.23, 0.06)
5	(-0.04, 0.11)	(0.15, 0.00)
6	(-0.07, -0.11)	(0.02, -0.03)
7	(0.02, -0.08)	(0.02, -0.01)
8	(0.45, -0.12)	(0.29,0.02)
9	(0.50, -0.18)	(0.41,-0.00)
10	(0.21, -0.17)	(0.54,-0.08)
11	(-0.03, -0.12)	(0.26,-0.07)
12	(-0.14, -0.04)	(-0.38,0.289)
分散	0.27 [arcmin]	0.31 [arcmin]

表 6.8: HRXRT-1,2の結像位置のばらつき—(0,0)は Quadrant イメージの結像位置

この結果を見ると、HRXRT-1、2ともに、ほぼ同様に結果が得られた。セクターごとの結像位置はプレートの調整精度で決定するので、セクターの結像位置がほぼ同様のばらつきを示していることから、 プレートのアラインメント精度を反映した結果となっていると考えられる。。

6.6 反射鏡1組ごとの結像性能

さらに、結像性能決定要因を分割していくために、反射鏡1組ごとのイメージの広がりとその結像位 置のばらつきを調べ、セクターごとのイメージの広がりの原因を探る。

6.6.1 測定方法

先ほどのセクターごとの測定と同様にポインティングで測定を行なう。また、反射鏡1枚のみにビーム を当てるため反射鏡の位置を確認しておく必要がある。ビームをできるだけ絞り(0.2mmtimes2mm)手動 で検出器、望遠鏡を動かし、位置を確認する。その後、反射鏡1枚の全面にX線が当たるようにビーム サイズを広げ(2mm角)、θxを回転させて、各セクター3組の計30組の反射鏡について測定を行なった。

6.6. 反射鏡 1 組ごとの結像性能 第6. すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の反射鏡を用いた望遠鏡の光学測定



図 6.22: 反射鏡 1 組ごとのポインティングスキャン

6.6.2 測定結果

測定の例として、HRXRT-1のセクター7の反射鏡3組での測定結果(イメージ、検出器のY方向にイメージを投影したもの、EEF)を図??に載せる。



図 6.23: 反射鏡 1 組のイメージ — 図はセクター 7 のもの。左から焦点面でのイメージ、Detector Y 方向への射影イメージ、Encercled Energy Function

6.6.3 イメージの広がり

	セクター3	セクター4	セクター 5	セクター 6	セクター 7
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
90	1.47	0.78	0.54	0.43	0.40
93	0.89	0.36	0.64	0.47	0.50
96	0.99	0.99	0.85	1.06	0.81
	セクター8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
90	0.40	0.33	0.33	0.74	0.96
93	0.40	0.68	0.92	0.85	0.85
06					

表 6.9: HRXRT-1の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり

平均=0.74 [分角]



図 6.24: HRXRT-2 での反射鏡 1 組ごとのイメージの広がりのセクター依存性

	役 0.10. IIKAK1-2 の反射鏡 1 組ととの イメークの広かり					
	セクター 3	セクター4	セクター 5	セクター 6	セクター 7	
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	
90	1.51	0.85	1.23	0.68	0.54	
93	1.68	0.54	1.68	0.30	0.57	
96	2.24	0.71	2.17	0.78	0.85	
	セクター 8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12	
反射鏡	セクター 8 HPD [分角]	セクター 9 HPD [分角]	セクター 10 HPD [分角]	セクター 11 HPD [分角]	セクター 12 HPD [分角]	
反射鏡 90	セクター 8 HPD [分角] 0.61	セクター 9 HPD [分角] 0.75	セクター 10 HPD [分角] 0.61	セクター 11 HPD [分角] 0.78	セクター 12 HPD [分角] 0.40	
反射鏡 90 93	セクター 8 HPD [分角] 0.61 0.64	セクター 9 HPD [分角] 0.75 0.99	セクター 10 HPD [分角] 0.61 0.92	セクター 11 HPD [分角] 0.78 1.41	セクター 12 HPD [分角] 0.40 1.13	

表 6.10: HRXRT-2の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり

平均=0.96 [分角]



図 6.25: HRXRT-2 での反射鏡 1 組ごとのイメージの広がりのセクター依存性

この結果を見ると、明らかに HRXRT-1の方が HRXRT-2に比べ、反射鏡1組ごとのイメージの広がり は小さいことが分かる。この原因として考えられることは、は HRXRT-2は、溝にアルミナイズドマイ ラーを挟み、溝幅を0にしたため、反射鏡が溝に接触してしまい、反射鏡の形状が歪んでしまったため だと考えられる。一方 HRXRT-1は、反射鏡が溝の中で全くストレスを受けていないため、反射鏡本来 の結像性能を発揮して、良い結果が得られていると考えられる。

6.6.4 結像位置のばらつき

つぎに、反射鏡1組ごとのイメージのばらつきを評価する。ばらつきはセクターの結像位置からのば らつきである、セクターごとの反射鏡3組の結像位置の平均値からの分散を用いる。

表 6.11: HRXRT-1 の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置—Dy=0 は、そのセクターでの反射鏡 3 組の結像位置の平均値。

	セクター3	セクター 4	セクター 5	セクター 6	セクター 7
反射鏡	ΔD _Y [分角]	ΔD _Y [分角]	ΔD_Y [分角]	ΔD _Y [分角]	ΔD _Y [分角]
90	-0.61	-0.64	-0.60	-0.06	0.19
93	0.61	0.35	0.34	0.21	0.27
90	0.01	0.29	0.26	-0.15	-0.46
	セクター 8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	セクター 8 ΔD _Y [分角]	セクター 9 ΔD _Y [分角]	セクター 10 ΔD _Y [分角]	セクター 11 ΔD _Y [分角]	セクター 12 ΔD _Y [分角]
反射鏡 90	セクター 8 ΔD _Y [分角] -0.14	セクター 9 ΔD _Y [分角] -0.53	セクター 10 ΔD _Y [分角] -0.11	セクター 11 ΔD _Y [分角] -0.11	セクター 12
反射鏡 90 93	セクター 8 ΔD _Y [分角] -0.14 0.09	セクター9	セクター 10 ΔD _Y [分角] -0.11 0.10	セクター 11	セクター 12

分散=0.33 [分角]

表 6.12: HRXRT-1 の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置—D_y=0 は、そのセクターでの反射鏡 3 組の結像位置 の平均値。

	セクター 3	セクター4	セクター 5	セクター 6	セクター 7
反射鏡	∆D _Y [分角]	ΔD _Y [分角]	ΔD _Y [分角]	ΔD _Y [分角]	ΔD _Y [分角]
90	0.03	0.14	-0.08	0.04	0.03
93	-0.21	-0.08	0.09	0.10	0.10
90	0.17	-0.06	-0.01	-0.14	-0.13
	セクター8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	セクター 8 ΔD _Y [分角]	セクター 9 ΔD _Y [分角]	セクター 10 ΔD _Y [分角]	セクター 11 ΔD _Y [分角]	セクター 12 ΔD _Y [分角]
反射鏡 90	セクター 8 ΔD _Y [分角] -0.13	セクター 9 ΔD _Y [分角] 0.22	セクター 10 ΔD _Y [分角] 0.01	セクター 11 ΔD _Y [分角] 0.08	セクター 12 ΔD _Y [分角] 0.19
反射鏡 90 93	セクター 8	セクター 9 ΔD _Y [分角] 0.22 -0.02	セクター 10 ΔD _Y [分角] 0.01 0.10	セクター 11	セクター 12 ΔD _Y [分角] 0.19 -0.07

分散=0.12 [分角]



/tmp_mnt/izanami/d3/xrt/20051220/ti/ccd/1pair_image/hist.dat

図 6.26: 反射鏡1組ごとの結像位置ばらつき—上が HRXRT-1、下が HRXRT-2。1 に比べて2は非常にばらつきが小 さくなっていることが分かる。

この結果を見ると、HRXRT-2の方がHRXRT-1に比べ、結像位置が良くそろっていることが分かる。 これは、反射鏡がアルミナイズドマイラ - によって溝に押し付けられ、セクターの中での反射鏡の位置 が、溝の加工精度で完全に決まり、結像位置が1点に良く集まっていると考えられる。HRXRT-1は、反 射鏡が溝の中で15µmの遊びを持って収まっているために、セクターの中で反射鏡個々がばらついてし まい、結果として結像位置がばらついてしまっていると考えられる。

6.7 結像性能の内訳

以上の結果から結像性能の内訳を求める。

6.7.1 円錐近似と形状誤差の分離

先ほど述べたように反射鏡1組ごとのイメージの広がり(HPD)は、円錐近似と形状誤差の2乗和で表 される。このことを用いて形状誤差と円錐近似とを分離する。形状誤差をHPD_{形状}、円錐近似をHPD_{円錐}、 1組ごとのイメージの広がりをHPD_{1組}とすると、形状誤差は、

$$HPD_{$$
形状} = $\sqrt{HPD_1^2} = -HPD_{$ 円錐}^2

と表すとこができる。これを用いて求めた形状誤差を、表 6.13 に示す。

	衣 0.13: HKAR1-1、2 の形状訣差					
	1 組ごとのイメージの広がり (HPD) [分角]	形状誤差 [分角]				
HRXRT-1	0.74	0.68				
HRXRT-2	0.96	0.91				

主 < 12. UDVDT 1 2 の形状担关

この結果を見ると、HRXRT-1は2に比べ形状誤差が約30%良いことが分かる。

6.7.2 位置決め誤差の分離

位置決め誤差は、セクターイメージの結像位置のばらつきと1組ごとのイメージの結像位置のばらつ きの2乗和で表される。それぞれのばらつきがガウス分布に従うとすると、全点の50%が入る円の直径 HPD_{ばらつき}は、分散 σ を用いて、1.34σ と書くことができる。これの 2 乗和を用いて位置決め誤差を求 める。その計算結果については表 6.14 に示す。

	表 6.14: HRXR1-1、2 の位直決の誤差						
	セクターイメージの	反射鏡1組ごとのイメージの	位置決め誤差				
	ばらつき (HPD) [分角]	ばらつき (HPD) [分角]	[分角]				
HRXRT-1	0.36	0.47	0.59				
HRXRT-2	0.41	0.16	0.44				

HRXRT-1と2とを比較すると、セクターイメージのばらつきは、ほぼ同様であるが、反射鏡1組ごと のばらつきは約70%向上しているとこが分かる。

6.7.3 結果のまとめ

HRXRT-1と2の全体の結像性能としては、ほぼ同様の結果であった。しかし、その内訳については、 異なる結果となっていた。HRXRT-1は、形状誤差がよく、位置決め誤差が悪い。これは、プレートの位 置決めは非常に良くされており、反射鏡を溝に挿入したときに溝の遊び 15μm のために反射鏡個々がば らついてしまい、反射鏡1組ごとの結像位置がばらついてしまっていると考えられる。このとき、反射 鏡は溝の中でフリーな状態になっているために、形状がゆがめられるようなことはなく、形状誤差は比 較的よい結果となっている。

一方 HRXRT-2 は、位置決め誤差が良く、形状誤差は悪いという結果が得られた。これは、溝の遊び をなくすようにアルミナイズドマイラーを反射鏡と溝との間に挟んだため、反射鏡個々のばらつきは非 常によく抑えられていると考えられる。しかし、反射鏡を溝に押さえつけているために、形状が歪み、 形状誤差に悪影響を与えてしまっていると思われる。HRXRT-1、2それぞれの内訳を示した図を??に載 せる。



図 6.27: HRXRT-1、2 の結像性能決定要因の内訳—(左)HRXRT-1、(右)HRXRT-2。

今回、反射鏡と溝との間にアルミナイズドマイラーを挟み、反射鏡個々のばらつきを抑える工夫を行 なった。結果としては、確かにばらつきを押さえ込むことに成功したが、それと同時に反射鏡形状には 悪影響を与えてしまっていた。逆に何も抑えないと、反射鏡の形状には悪影響を与えず、本来の形状を 反映したイメージの広がりを示すが、反射鏡個々のばらつきが抑えきれない。このことから分かること は、現在のすざく搭載X線望遠鏡用の反射鏡を用いている限りは、すざく衛星の望遠鏡と同設計値の望 遠鏡の結像性能としては、限界に近いところであると思われる。アラインメントプレートの調整や溝の 遊びなどもこれ以上追い込むことは、現実的ではなく、反射鏡の形状の改善を目指すべきである。反射 鏡もさらに良い形状を目指すのであれば、反射鏡の材質や厚さを変更し、多少のストレスでは形状に影 響を受けないものを作成するとこを考え、溝の遊びを減らす工夫を行なえば形状誤差、位置決め誤差を 十分に抑え込んだ望遠鏡を製作することも可能であると思われる。

第7章 レプリカ法による反射鏡の製作

ここでは、その反射鏡の制作方法とその現状について示す。

7.1 レプリカ法

すざく搭載 X 線望遠鏡の反射鏡はレプリカ法という、平滑のガラス母型 (ガラスマンドレル) に反射膜 である金を成膜し、エポキシ樹脂などの接着剤を用いて薄い基板に離形・転写する技術を用いて製作さ れている。その行程は大きく4つの行程に分けることができる。

- 1. 基板の製作
- 2. ガラス母型への反射膜の成膜
- 3. 基板と反射膜の接着
- 4. 基板の剥離

以下ではそれぞれの行程について詳しく説明していく。

7.2 反射鏡作成の手順

7.2.1 基板の製作

すざく搭載 X 線望遠鏡は製作の容易さから、2 次曲面を円錐で近似した形状をしており、加工のしや すさの点から材質は厚さ 150µm のアルミニウム板を使用している。基板の製作の行程は、(1) 基板の切 り出し (2) バリ取り (3)3 点ローラーを用いた粗成形 (4) 熱成形の 4 工程に分けられる。

基板の切り出し

基板の切り出しとは、基板の外形である円錐形を切り出す作業である。100枚のアルミ板を重ね、ア ラインメントプレートと同様に数μmでの加工が可能な放電加工で切り出す。このアルミ基板も(株)オ オイシに切り出して頂いた。その図面を図 7.1



図 7.1: アルミ基板の図面—この図面は 40 番台、70 番台のアルミ基板の図面。

バリ取り

アルミ基板を放電加工を用いて切り出すと、その加工の端面に図 7.4 の様に放電白層と呼ばれる酸化 アルミニウムの固まり (10µm 角程度)が付着する。この放電白層が存在すると、後の熱成形の行程の際、 基板形状の深刻な悪化を招いてしまう。そのため、ここでは電動やすり (ルーター)を用いて荒く放電白 層を削り、最後に 2000 番台の紙やすりを用いて仕上げる。



図 7.2: (左) 放電加工時にできる放電白層(右) バリ取りの様子---放電白層は 10µm 角程度の大きさ。

3点ローラーを用いた粗成形

バリを除去したアルミ基板を、3点ローラーを用いて円錐面の一部になるように粗成形をする。この 行程は次の熱成形の行程をより容易にするために行なう。



図 7.3: ローラーによる粗成形の様子

熱成形

ローラーを用いて粗成形したアルミ基板を、反射鏡の形状に加工された金型に大気圧を用いて押し付け、加熱することで円錐面の一部の形状を作り出す。数枚の粗成形を行なったアルミ基板を重ね、一度に熱成形を行なうことで、多量の反射鏡の基板を製作することができる。また、200°Cという温度を10

時間かけるために、組成形で生まれた基板の形状も金型の形状に成形される。しかし、多数の基板を積 層しているので、金型にゴミなどが付着すると、積層した全ての基板にその影響が伝搬してしまい、形 状に大きな影響を与えてしまう。そのため、作業には慎重を要する。



図 7.4: 熱成形の模式図



図 7.5: 熱成形の様子—この状態で 10 時間 200°の熱を加える。

7.2.2 反射膜の成膜

反射膜のガラスマンドレルへの成膜はスパッタリング法を用いて行なわれる。詳しい原理については 後に記す。ガラスマンドレルへの成膜を行なう際の行程としては、(1)ガラスマンドレルの洗浄(2)成膜 の2工程がある。

ガラスマンドレルの洗浄

レプリカ法の要となるガラスマンドレルは、その形状を反射鏡鏡面に写し取るために使用するので、 汚れや傷などがその表面にある場合、反射鏡鏡面にその形状を写し取ってしまい大きな形状の悪化を招 く原因となる。そのため、洗浄は非常に慎重にかつ丁寧に行なう必要がある。洗浄の工程はイオン交換 水をマンドレルに掛けながら、ガラスマンドレルについている金やゴミなどを除去していく。その後に、 エアーで完全にマンドレル表面の水滴を飛ばす。これは、イオン交換水の中に含まれている不純物をガ ラス表面に残さないようにするためである。最後に、50°Cの恒温槽にいれ、乾燥させる。

成膜

洗浄の終了したガラスマンドレルに鏡面物質の金を成膜する。成膜には大阪真空社製の DC マグネト ロンスパッタ装置を使用した。スパッタリング法とは、固体ターゲットの表面に高エネルギー粒子を衝 突させ、高エネルギー粒子の運動エネルギーを固体ターゲット原子に与えて、ターゲット表面からター ゲット物質が飛び出し、物質は薄膜を形成させる方法である。特に、DC マグネトロンスパッタ装置を 用いると、ターゲット近傍に高エネルギー粒子である電子を閉じ込めることができ、成膜の速度を大き くすることができる。

7.2.3 基板と反射膜の接着

アルミ基板に接着剤を噴霧し、成膜を行なったガラスマンドレルとの接着を行なう。

エポキシの噴霧

アルミ基板とマンドレルとを接着するために、接着剤であるエポキシを噴霧する。接着に用いるエポ キシは、Epoxy Technology Inc 社製の EPO-TEK 301-2 を使用した。EPO-TEK 301-2 は A 剤、B 剤の 2 種 類の溶液からなっており、A 剤:B 剤=10.3.5 に混合すると常温 (23°C) で 48 時間で完全に硬化する。実際 に噴霧する際、エポキシは粘性が高く、噴霧には向かない。そのため、A 剤の1割程度トルエンを混合 し、粘性を下げ噴霧を行なう。EPO-TEK 302-1 の B 剤は非常に吸水性が高く、水分が混入すると全く硬 化しなくなる。そのため、保管や混合の際には十分に注意が必要となる。

エポキシの噴霧は、アルミ基板全体に均一に 20µm 程度に、かつ厚さを数µm でコントロールする必要がある。そのシステムについては 7.6 に載せる。エポキシを圧搾空気との差圧を用いて吸い上げ、噴霧を行なう。





図 7.6: エポキシ噴霧の様子—スプレーノズルが上下に1往復し、反射鏡が10°回転する。その行程を反射鏡全面にエポキシが付着するまで繰り替えす。

圧着

エポキシをつけたアルミ基板をマンドレルに接着する。しかし、エポキシにはトルエンや空気などが 混入しているために、そのまま接着すると、厚さムラ等の原因となるため、これらを脱泡した後に接着 を行なう必要がある。そのため、エポキシをつけたアルミ基板とマンドレルとの接着は真空中で行なう。 トルエンや空気は、約 30Pa で完全に脱泡が完了するので、その後に接着を行なう。接着後は、50°の恒 温槽に入れ、10時間以上硬化させる。





図 7.7: 圧着の様子—中の真空度が 30Pa を切ったらマンドレルを下げて接着する。

7.2.4 基板の剥離

アルミ基板のマンドレルからの剥離は、レンズクリーナーを用いて、直接マンドレルとアルミ基板と の間に力を加えて行なっていた。しかし、これは、剥離時に形状の悪化を招いてしまっていた。そこで、 新たな剥離の方法として、水を用いた方法に変更した。まず、テープなどでアルミ基板の端部分をほん の数 mm 程度浮かせる。その隙間にナフロンシートを差し込み、静電気で再びマンドレルとアルミ基板 がつかないようにする。そして、ナフロンシートとマンドレルとの間にイオン交換水を少しづつ流して いく。すると、アルミ基板とマンドレルが徐々にはがれていく。剥がした後は、反射鏡の鏡面について いる水分をエアーで完全に飛ばし、反射鏡の完成となる。



図 7.8: 剥離の様子――アルミ基板とマンドレルとの間に水を流すと自然に金とマンドレルの境界が剥がれていく。

7.3 反射鏡の形状評価

反射鏡の鏡面形状は、NH3-SPを用いて行なう。その鏡面形状の評価は、反射鏡鏡面の法線分布を用いる。評価方法については 7.9 に載せる。得られたデータ点を 3mm ピッチごとに区切り、その区間を最小2 乗法を用いて直線で fit する。その得られた 3mm ごとに直線の法線の向きを求め、その平均の方向に対するばらつきを用いて、形状の評価を行う。形状誤差の項目と同様に、平均の方向を中心とする全点の半分の点が入る円の直径 HPD を用いて表す。



図 7.9: 反射鏡形状の評価方法—大きく分けて4項目に分かれる。

7.3.1 測定システム

形状の測定は反射鏡の母線1ラインを宇宙科学研究所のNH3-SPを用いて行なった。詳しい原理については、??に載せる。図7.10に示すようにまず、反射鏡の母線方向の端から5mm中心方向に入った点を円周方向に測定し、最下点のX、Y座標を求める。同様に逆方向の最下点のX、Y座標を求め、その2点を結ぶ直線を、その2点の中点が原点となるようにアラインメント機能を用いて軸を作成する。そして、その軸にそって形状を100μmピッチで測定する。測定の方向は、内側振分け¹を用いた。

¹原点をスタートにまず+X 方向に測定する。測定範囲分の断面形状測定が終了すると、原点に戻り-X 方向に測定範囲分の 断面形状測定を行なう。



図 7.10: 反射鏡の母線形状の測定—反射鏡両端の最下点を求め、その点を結ぶ軸を断面形状測定する。

7.3.2 作成した反射鏡の形状

実際に上の行程を用いて製作した反射鏡の形状を示す。今回は 70 番台の反射鏡 32 枚、150 番台 43 枚、計 75 枚の反射鏡を製作した。

HPD [分角]	70 番台 [枚]	150 番台 [枚]
0.0~0.5	0	0
$0.5 {\sim} 1.0$	7	1
$1.0 \sim 1.5$	8	2
$1.5 \sim 2.0$	8	7
$2.0 \sim 2.5$	2	8
2.5~3.0	3	11
3.0~3.5	2	4
3.5~4.0	1	5
$4.0\sim$	1	5

表 7.1: 実際に製作した反射鏡の形状



図 7.11: 製作した反射鏡の鏡面形状---上が 70 番台の反射鏡、下が 150 番台。

表 7.1、図??を見ると、明らかに 150 番台に比べ 70 番台の反射鏡は、形状の良いものができている。 第6章で示したがが、すざく衛星搭載の反射鏡の鏡面形状は HPD で1分角から2分角程度であるので、 現在の技術でも衛星に搭載されているレベルの反射鏡を製作することが可能であることが分かった。150 番台と 70 番台の形状の明らかな違いについては、後に議論する。

7.3.3 X線での像の広がり

製作した反射鏡のうち形状の比較的良いものについて、X線をあてて、その反射像の広がりを調べた。 測定にはすざく衛星用のテスト Quadrant にアラインメントバーを3本入れ、反射鏡にストレスがかから ず、ほぼフリーな状態で支持できるようにした。もちろん結像位置はばらついてしまうが、今回は、反 射鏡1組ごとの像の広がりのみを議論するので、特に問題はない。また、いつも測定を行なっている母 線の位置は、通常ではセクター7、8の間で、アラインメントバーがいるため、X線をあてることができ ない。そのため、バーを意図的にずらし、測定が行なえるようにした。



アラインメントバー

図 7.12: アラインメントバーを用いたハウジング—反射鏡 にストレスがかからないように 3 本のアラインメント バーで反射鏡を支持する。

今回挿入した反射鏡は 70 番台 2 組 (72、75 番)、150 番台 2 組 (150、155 番)の計 4 組である。その鏡 面形状について図 7.13、図 7.14 に示す。


図 7.13: 70 番台の反射鏡形状—左が Primary、右が Secondary。上が#72、下が#75 の反射鏡。



図 7.14: 150 番台の反射鏡形状—左が Primary、右が Secondary。上が#150、下が#155 の反射鏡。

X線を用いた性能評価の方法については、??と同様である。今回はセクター7と8の間部分(反射鏡の 形状測定を行なっている部分)のX線をあてた。そのX線測定の結果について図7.15、図7.16に載せる。

7.3. 反射鏡の形状評価



図 7.15: 70 番台の反射鏡に X 線をあてた結果 — 左から焦点面でのイメージ、検出器 Y 方向に射影したイメージ、 Encercled Energy Function



図 7.16: 150 番台の反射鏡に X 線をあてた結果— 左から焦点面でのイメージ、検出器 Y 方向に射影したイメージ、 Encercled Energy Function

表 7.2: 製作した反射鏡の像の広がり		
反射鏡	像の広がり (HPD) [分角]	
72	0.43	
75	0.61	
150	2.38	
155	2.55	

この結果を見ると、70番台の反射鏡の性能は全くすざく搭載の反射鏡に劣っていないことが分かる。 このレベルの反射鏡をアラインメントプレートの全ての溝に挿入することができれば、望遠鏡全体で1 分角を切ることは十分に可能である。しかし、150番台についてはあまり良い結像性能は得られていない。確かに、NH-3SPを用いた表面形状の測定結果を反映したものとなっていることが分かる。

7.4 反射鏡の製作についての問題点

反射鏡の 70 番台と 150 番台とを比較すると、明らかに 70 番台の方が良い反射鏡ができていることが 分かる。また、反射鏡の鏡面形状はガラスマンドレルの表面形状にのみ依るが、実際にはそうなってい ない。そこで、その原因として考えられることを挙げる。

反射鏡の鏡面の形状を決める要因として考えられるものは、(1) アルミ基板の形状(2) ガラスマンドレ ルの形状(3) エポキシの厚さムラの3つである。このうち、(2) に関しては、マンドレルの中で、特に形 状の良い(HPD=分角程度)の部分を使っているので、特に問題がないと考えられる。つまり、形状の改 善には(1)(3) を主に考えていく必要がある。

7.4.1 アルミ基板の形状

形状のよいアルミ基板ができているかどうかを確認するために、熱成形の前後のアルミ基板形状と反 射鏡形状を測定した。その測定結果を図??に示す。

この結果を見ると、150番台の反射鏡は、熱成形によってアルミ基板形状が改善されていないことが 分かる。また、反射鏡の端点の反りは、ロールがけの際についていることも分かった。反射鏡の曲率半 径が大きいものには、この傾向が見られている。

7.4.2 エポキシの厚さムラ

次に、反射鏡厚さをマイクロメータを用いて測定し、その鏡面形状との関係を調べた。その結果を 7.17 に示す。



図 7.17: エポキシに厚さムラがある場合の反射鏡鏡面形状—実線は、反射鏡形状、丸印は、エポキシの厚さムラ。 上段の図には厚さムラがあり、下段の図には厚さムラがない。

この図を見ると、表面形状とエポキシの厚さ分布が良く一致していることが分かる。つまり、エポキ シの厚さも数 µm の精度で均一にする必要があると考えられる。

第8章 まとめと今後の展望

今回我々が行なった多重薄板型X線望遠鏡の製作とその性能評価について本研究の中で得られた成果についてまとめる。

8.1 まとめ

高精度のアラインメントに適したX線望遠鏡の設計と製作

反射鏡の位置決めをより容易でかつ正確に行なうために、従来の反射鏡支持機構支持機構であるアラ インメントバーを4段一体型にした、アラインメントプレートを導入し、そのプレートの位置決めを精 度の良い基準面に突き当てるという非常に単純な方法で行なうことができる望遠鏡を試作した。その結 果、アラインメントプレートは、基準面に対し、動径方向に15µm 程度、相対的なプレートの回転は、 約0.5分角以内に押さえ込むことに成功した。

X線望遠鏡の性能評価

実際に作成した望遠鏡にすざく衛星搭載の反射鏡を挿入し、X線を当てた性能評価を行なった。その 結果、望遠鏡全体で HPD は、約1分角となり、多重薄板型 X線望遠鏡では、これまでで最高の結像性 能を示した。その結像性能の決定要因の内訳は、形状誤差0.68分角、位置決め誤差0.59分角で、形状誤 差は過去の結果の中で最高であった。その原因としては、アラインメントプレートの調整が非常によく 行なわれており、反射鏡にストレスがかかることなく、本来の反射鏡形状を反映した結像性能を示した ためだと考えられる。

反射鏡個々のばらつきを抑える工夫

反射鏡と溝との間の 15µm の隙間をアルミナイズドマイラ - を用いて埋め、反射鏡個々のばらつきを 抑える試みを行なった。その結果望遠鏡全体で HPD は約1分角となった。結像性能の決定要因を分離す ると、形状誤差が 1.01分角、位置決め誤差が 0.44分角であった。特に位置決め誤差のうち、セクターの 中での反射鏡個々のばらつきは、、0.15分角と過去最高の結果を示し、もくろみ通り反射鏡のばたつき を押さえ込むことに成功した。しかし、反射鏡がアルミナイズドマイラ - に押され、歪んでしまい、形 状誤差が悪化してしまっていた。

反射鏡製作技術の向上

従来反射鏡制作の方法に加え、水による反射鏡の剥離、ガラスマンドレルの厳しい選別などを行ない 反射鏡の形状を悪化させる要因をできるだけ除き、反射鏡の製作を行なった。その結果、すざく衛星搭 載の反射鏡のレベルを上回る、2回反射でイメージの広がり(HPD)が30秒角程度の反射鏡を製作するこ とができるようになった。しかし、反射鏡の曲率半径によってよい形状のできるものとできないものが 存在し、その原因は、ロールによる粗成形時の形状やエポキシの厚さムラのためであることが分かった。

8.2 今後の展望

反射鏡の材質、厚さの変更

すざく衛星搭載の反射鏡の形状誤差が 0.68 分角であることを考えると、この反射鏡を用いて更なる結 像性能の向上を目指すことは、現実的ではない。また、反射鏡個々のばたつきを 0 にする工夫を行なう 際にも、アルミ基板の柔らかさや厚さのため形状が歪んでしまうと考えられる。そこで、反射鏡の材質 や厚さの変更を行い、物理的に変更しにくい反射鏡の製作を行なう必要があると思われる。

アラインメントプレートの変更

実際に製作された反射鏡は、厚さにばらつきがある。そのため、溝の幅を反射鏡の設計値に近づけて しまうと、望遠鏡に搭載できない反射鏡がでてきてしまう可能性がある。それをさけるため、溝幅は、 大きめにとり、反射鏡を挿入した後で実効的に溝幅を0にする工夫を行なうことが現実的であると思わ れる。

さらにアラインメントプレートは、放電加工を用いて加工されたとはいえ、切られていた溝の位置が 最大で設計値から 10µm 程度ずれていた。これによって、反射鏡ごとになす角が変化し、結像性能に影 響を与えてしまう。そのため、加工法、プレートの材質、形状なども改良の余地がある。

付 録 A 実験装置

本論文作成に当たり、使用した実験装置について、説明する。

非接触3次元形状測定装置(NH-5SP、NH3-SP) A.1

三鷹光器株式会社にある非接触3次元形状測定装置NH-5SPと宇宙科学研究所所有のNH3-PSの測定 原理とシステム図を図 A.1 に示す。



図 A.1: NH シリーズの測定原理とシステム図

顕微鏡鏡筒に送り込まれたレーザ光は、対物レンズを通って光軸中心の焦点面に向かって進む。サン プル表面で反射されたあと再び対物レンズを通過して AF センサー部に結像する。フォーカスが外れてい る時は、レーザーの結像位置が変化するので、この変化をセンサーが捉えて AF 駆動機構を用いて対物 レンズをフォーカスポイントへ移動させる。このオートフォーカスの仕組みによって高さ測定をしなが ら、自動 XY ステージで試料面をスキャニングして、表面の3次元形状を定量的に調べることができる。 NH-3SPとNH-5SPの違いはステージ部のストロークにあり、顕微鏡部、オートフォーカス部に関し ては NHシリーズを通して共通である。表 A.1 に NH-3SP 及び NH-5SP のスペックを示す。

表 A.1: 三鷹光器製非接触 3 次元測定装置 NH シリーズのスペック

仕様	NH-3SP	NH-5SP	
顕微鏡部 (各モデル共通)			
観察光学系	無限遠鏡筒 (f = 100 mm)		
対物レンズ	$10 \times (NA = 0.25, WD = 7.0mm) 50 \times (NA = 0.55, WD = 8.1mm)$		
CCD カメラ	40 万画素カラー CCD		
オートフォーカス部 (各モデル共通)			
可動範囲	10 mm		
分解能	0.001 µm		
測定精度	$\pm 0.1 + 0.3L/10\mu$ m		
測定再現性	再現性 σ=0.01μm		
使用レーザー	半導体レーザー (波長 635nm)		
フォーカスエリア	100 倍:~1µm 50 倍:~2µm 20 倍:~4µm		
ステージ部			
可動範囲			
Х	150 mm	300 mm	
Y	150 mm	400 mm	
Ζ	120 mm	170 mm	
分解能			
Χ, Υ	0.01 µm	0.1 μm	
Ζ	0.1 μm	0.1 μm	
専用防振台	エアーゴム式防振台		

A.1.1 エッジ検出測定

エッジ検出測定の概略を説明する (図 A.2 参照)。まずエッジを跨るように 2 点を指定する。次にそこ から離れたもう 1 点を指定する。ここでステージの移動ピッチとエッジと認識するためのしきい値 ΔZ を入力する。まず (1)-(2) 方向ヘスキャンを行ない、しきい値を越えた点の座標値 (*x*,*y*) を返す。次に (3) に移り、(1)-(2) 方向と平行になるようにスキャンを行なう。ここでも先ほどと同様にしきい値を元にし てエッジを検出し、その座標値を返す。ただしサンプリング回数を設定しておけば、(1)-(3) の間をその 回数分だけ分割してエッジ検出を行なう。

ただし、エッジ検出では、しきい値の設定がエッジ検出位置に影響する。今回、同じ点を色々なしき い値でエッジ検出してみたところ、しきい値 ≥~ 5µm では、検出位置が一定となった。これより、しき い値として 5µm という値を用いることにした。



図 A.2: エッジ検出機構の概略

付 録 B 望遠鏡ハウジング、アラインメントプレートの製作図面

三鷹光器株式会社、(株)オオイシにそれぞれ製作していただいた、望遠鏡ハウジング、アラインメント プレートの製作図面を以下に載せる。







付録 B. 望遠鏡ハウジング、アラインメントプレートの製作図面















