修士論文

多重薄板型X線望遠鏡の 高角度分解能化の研究

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

鈴木 真樹

2008年1月10日

要旨

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とともにS/N比の向上を可能にした。X線はほとんどの物質に対し屈折率が1よりもわずかに小さいため、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WolterI型斜入射光学採用されている。しかし、反射鏡を見込む面積が非常に小さいために、集光されるX線は大幅に減少してしまう。そこで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線望遠鏡を用いることで集光力を高める事ができる。

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の反射鏡が175枚積層されている。すざくの望遠鏡は焦点面においてHPD(Harf Power Diameter)で1.8分角の像の広がりをもつ。この像の広がりは、製作を容易に行うための反射鏡形状の円錐面近似、反射鏡鏡面のうねりによる形状誤差、反射鏡が設計の位置からずれることによる位置決め誤差の3つに起因している。すざく望遠鏡の像の広がりをこれらに分解すると円錐近似による誤差0.3分角、形状誤差0.85分角、位置決め誤差1.5分角に分解となっている。これにより結像性能の最も大きな要因となっているのは、位置決め誤差であることが分かる。望遠鏡内の反射鏡は、「アライメントバー」という4本の櫛の歯状のバーで支持されている。X線が結像する位置は、反射鏡上下段のなす角で決定されるがアライメントバーは独立に動く事ができるため結像位置を一点にそろえることが非常に困難になっている。また、組み上げの工程で反射鏡をアライメントバーの櫛の歯部分に挿入するため、反射鏡と溝との間に50µmの「遊び」が設けられている。この遊びにより各々のアラインメントバーの満内で反射鏡がばたついてしまい、反射鏡上下段のなす角が変化し結像位置を悪化させる。これら各々のアラインメントバーの位置精度と、溝内での反射鏡のばたつきが位置決め誤差の要因である。

そこで位置決め誤差を改善するためこれまでに、アライメントバーを4段一体型にし、反射鏡のなす角が加工 精度でのみ決まるような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、望遠鏡中心に 基準面を配置する事で、望遠鏡内での各プレートの相対位置の調整を容易にする工夫を行った。これにより各ア ラインメントプレートの位置を精度よく揃える事が可能になった。またプレート内での反射鏡を精度よく配置す るため、プレートを2枚1組で構成し1枚をスライドさせる事で反射鏡を支持する溝幅を10µmの精度で調整す る機構を開発した。しかし、反射鏡に厚さムラがあるために、最も厚い反射鏡によりスライド量が制限されてし まい反射鏡の溝内でのばたつきを十分に押さえ込む事ができなかった。(2007年窪田修論)仮に焦点面での結像位 置のズレを0.5分角以下に抑えたい場合、各反射鏡の厚さムラを7µm程度に抑える必要がある。

そこで、今回私は反射鏡基板の厚さムラが~4µmと微小であることに着目し、反射鏡基板の端を予めテープで マスクをすることで、反射鏡の支持部分が基板のみになるような新たな反射鏡の開発を行った。また従来の反射 鏡基板は、アルミ板の切り出し時に生じる放電白層の除去を手作業でおこなっており、反射鏡基板の端の部分が最 大で10µm 程度歪んでしまっていた。そこで今回この工程を機械化することで品質の改善を行ったところ、反射 鏡基板の表面形状で2µm 程度の平滑度を達成した。この反射鏡基板を用いて反射鏡を製作した結果、母線方向の 表面形状が2回反射相当で0.5分角相当の反射鏡を製作する事ができた。

改良した反射鏡と可動式アラインメントプレートによる望遠鏡の溝の遊び (55µm) を調整により詰めた前後で、 位置決めによる結像性能がどのように変化するかを調べた。その結果、望遠鏡全体の結像性能は、調整前で 1.75 分角、調整後で 1.47 分角となることがわかった。また、結像性能の決定要因を調べたところ、位置決め誤差につ いては調整前が 1.08 分角、調整後は 0.55 分角となり、すざくの 1.5 分角に比べ約 66%向上した。

本論文では、新しいレプリカ反射鏡の説明とその反射鏡を用いた光学測定結果について述べる。さらに結像性 能を向上させる手法についても検討する。

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 線望遠鏡	5
2.1	X 線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系	5
2.2	X 線望遠鏡の種類	5
	2.2.1 多重薄板型	5
	2.2.2 直接研磨型	6
2.3	X 線望遠鏡の性能	8
	2.3.1 集光力 (有効面積)	8
	2.3.2 结像性能(HPD、PSE、EEF)	9
		-
第3章	多重薄板型 X 線望遠鏡の結像性能の決定要因	1
3.1		1
	3.1.1 反射鏡の円錐近似	1
	3.1.2 反射鏡鏡面の形状誤差	3
	3.1.3 位置決め誤差	4
3.2		6
0.2	3.2.1 構造	6
	3.2.1 協連 3.2.2 反射鏡の製作方法 1	8
	3.2.2 反初號の表F/J/A	.0 10
	5.2.5 反別現の又行機構	.0 10
	3.2.4 絔像性能	.9
第4音	新しい反射鏡支持機構の開発	21
4.1		21
4.2	ローズの () () () () () () () () () ())
-1.2 1 3		.~ いつ
4.5		.2 12
4.4		:5 \1
4.3		24
第5章	マスク処理による反射鏡製作 2	25
51		>5
5.1	511 アルミ其板の切り出し.	.5 >5
	5.1.1 7,72~至100000日0 ·······························	.) 90
	5.1.2 区初時の1000000000000000000000000000000000000	.0 00
	J.I.J 区划底U埜WNU型)	.9) 1
		51
5.2		53

ii

5.3	熱成形後の反射鏡基板の形状の改善34
5.4	マスク処理による反射鏡の製作 36
	5.4.1 マスキングテープの種類 37
	5.4.2 マスクレプリカ反射鏡の製作 38
	5.4.3 形状評価
5.5	ハウジングに挿入した反射鏡の表面形状
第6章	アラインメントプレートスライド量の均一化 45
6.1	アラインメントプレートの評価 45
	6.1.1 溝位置測定
	6.1.2 なす角のずれ 50
6.2	アライメントプレートの調整54
6.3	アラインメントプレートのスライド量60
	6.3.1 アラインメントプレートの 位置 63
6.4	可視光測定による焦点距離測定 66
第7章	X線による望遠鏡の光学測定 69
7.1	Quadrantの結像性能
	7.1.1 測定方法
	7.1.2 測定結果
7.2	セクター毎の結像性能
	7.2.1 測定方法
	7.2.2 測定結果
7.3	反射鏡の1組毎の結像性能80
	7.3.1 反射鏡の位置測定
	7.3.2 反射鏡の1組イメージ
	7.3.3 反射鏡1組イメージの結像中心のばらつき
7.4	結像性能の決定要因の切り分け
	7.4.1 円錐近似と形状誤差の切り分け 101
	7.4.2 位置決め誤差の分離
	7.4.3 X線測定結果のまとめ 102
第8章	まとめと今後の展望 105
8.1	総括
	8.1.1 反射鏡製作の改良 105
	8.1.2 プレートの位置調整精度の向上 105
	8.1.3 望遠鏡のX線による結像性能の評価 105
8.2	今後の展望
	8.2.1 反射鏡の表面形状の評価方法 105
	8.2.2 反射鏡基板の真円度の改善
付録A	実験装置 109
A.1	非接触 3 次元形状測定装置 (NH-5N、NH3-NS) 109
	A.1.1 エッジ検出測定 111
A.2	X 線測定システム

A.2.1	X 線発生装置	113
A.2.2	四極スリット	114
A.2.3	大気室チェンバー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	114
A.2.4	試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ...........	117
A.2.5	真空装置....................................	118
A.2.6	焦点面検出器	120

図目次

1.1	X 線天文衛星の性能の変遷	3
2.1	X線で用いられる結像光学系・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
2.2	X 線望遠鏡の断面図	6
2.3	「多重薄板型」X 線望遠鏡	7
2.4	「直接研磨型」X 線望遠鏡	7
2.5	様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積	8
2.6	焦点面のイメージ	9
2.7	Point Spread Function	10
2.8	PSF、EEF、HPDの関係	10
3.1	反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり......................	12
3.2	(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	13
3.3	反射鏡の位置決めによる像の広がり..................................	14
3.4	位置決めのずれによる反射光のずれ....................................	15
3.5	X 線望遠鏡の構造	16
3.6	Quadrant の構造	16
3.7	レプリカ法で製作された反射鏡	18
3.8	すざく搭載 X 線望遠鏡の反射鏡支持機構	18
3.9	すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の結像性能決定要因	19
4.1	アラインメントバーの問題点....................................	21
4.2	反射鏡のなす角と焦点距離の関係................................	21
4.3	上下2段を一枚のプレートで構成する事で反射鏡のなす角を加工精度で決める.....	22
4.4	プレートの溝部分の拡大図 — ボトルネック形状のため反射鏡端の部分の折れ曲がりを回避できる .	22
4.5	内壁基準面の導入— 内壁基準面により 13 枚のプレートの動径方向と回転方向の調整が容易になる	23
4.6	2 枚のアラインメントプレートの導入 ― 1 枚のプレートをスライドさせることで溝幅を詰める	23
4.7	窪田修論時での望遠鏡の結像性能....................................	24
5.1	反射鏡基板の端に存在する放電白層(左図)とルーターを用いた従来の除去作業の様子(右	
	図)	26
5.2	3点ローラーで反射鏡基板に曲率をつけている様子	26
5.3	超音波洗浄	27
5.4	熱成形の模式図 — 金型へ押し付けるため積層した反射鏡基板の厚さをシリコンゴムシートの厚さより	
	150µm 厚くする	27
5.5	実際の熱成形前の状態	28
5.6	反射膜の成膜の様子	29

vi

5.7	エポキシ噴霧用治具の様子 — エポキシを噴霧する治具を上下に動かしながら反射鏡基板を円周角方
	向へ動かし噴霧を行う
5.8	圧着の様子 — チャンバー内部の真空度が 30Pa 以下になったところでマンドレルを下げて圧着を行う . 31
5.9	剥離の様子 — 反射鏡基板とマンドレルの間に水を流すと自然にマンドレルから反射鏡基板が金を転写し
	た状態で剥離される
5.10	反射鏡の母線形状の測定一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。軸は反
	射鏡の top 側を正となるように取る。
5.11	反射鏡形状の評価方法 ― 大きく分けて 4 項目に分かれる。
5.12	新しいルーターのヘッド部分35
5.13	ばり取り後の反射鏡の端の様子の拡大図 ―従来の方法によるばり取り後の基板の端の様子 (左図)、
	新しいヘッドに夜ばり取り後の基板の端の様子(右図)
5.14	ロール後の反射鏡基板の表面形状 — 従来の方法でバリ取りされた反射鏡基板 (左図) と新しい方法に
	よりバリ取りされた反射鏡基板 (右図) 36
5.15	熱成形後の反射鏡基板の表面形状 — 従来の方法でバリ取りされた反射鏡基板 (左図) と新しい方法に
	よりバリ取りされた反射鏡基板 (右図) 36
5.16	マスクテープ厚とエポキシ厚の関係 — エポキシ厚が薄いと反射膜を写し取る事ができない 38
5.17	エポキシがガラスマンドレル上を垂れている様子 — エポキシの量が多いとガラスマンドレルが
	極率を持っているため硬化するまでの間に垂れ易い
5.18	エポキシをマスクテープ厚よりも薄くスプレーした反射鏡の表面 — ェポキシがガラスマンド
	レル上の反射膜に触れる事ができないため部分的に反射膜が欠損している
5.19	反射鏡基板と同じ極率をつけた厚さ 3mm のアルミ板の治具を用意する 39
5.20	治具の上にマスク用テープを粘着面を上にして乗せる
5.21	テープの上に反射鏡基板を重ねる 39
5.22	片側にテープを貼りつけた状態 — テープに凹凸 (ホコリ等) が出来た場合は貼り直す 39
5.23	両側にテープを貼付けた状態
5.24	テープを貼付けた基板でレプリカを行った反射鏡
5.25	テープを剥離していく様子 — 粘着力が弱いため基板から剥離することが容易である 40
5.26	エポキシとポリエステルテープの相性 ― ガラスマンドレルから反射鏡基板を剥離した段階ですで
	に、テープ上の金が剥離しかけている
5.27	基板表面にテープの接着剤が残存する — アセトンを染み込ませた綿棒を使うと容易に除去するこ
	とが可能
5.28	ポリエステルテープとテープ上の金の様子 — エポキシとポリエステルテープの相性が悪いためか
	テープ上の金は容易にテープから剥がれてしまう
5.29	マスクテープの剥離前後での反射鏡の鏡面形状の様子 — 剥離前 (黒線) と剥離後 (赤線) 41
5.30	71 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.31	72 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.32	73 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状 42
5.33	90 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.34	91 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状 43
5.35	92 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.36	93 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状 43
5.37	94 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.38	95 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状
5.39	96 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状 44

	٠	٠	
x 7	1	1	
v	I	т	

6.1	溝位置測定の概念図	45
6.2	アラインメントプレートの溝幅の設計値からのずれ	48
6.3	アラインメントプレートの溝位置の設計値からのずれ	49
6.4	溝位置からなす角の導出	50
6.5	反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ1.0mm	51
6.6	反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ0.5mm	52
6.7	なす角の変化による焦点距離の変化.................................	53
6.8	アライメントプレートの並進と回転..................................	54
6.9	調整システム	55
6.10	内壁と切りかき — 望遠鏡の中心部分にある内壁上の旋盤傷とアライメントプレート上に作られた切りか	
	きを上下の CCD カメラで見て、距離を測定する....................................	55
6.11	内壁上の旋盤傷の位置の測定....................................	57
6.12	内壁 — (左): 内壁の測定の様子、内壁中心部にある旋盤傷を確認する。(右):実際に出力された内壁中心の様子	58
6.13	切りかき — (左):切りかき位置の測定、アライメントプレート上に放電加工により作られた切りかきの位	
	置を確認する。(右):実際に出力された top 側の切りかきの様子、上方にあるのが厚さ 1.0mm のプレートの切	
	りかき、下方が厚さ 0.5mm のプレートの切りかき	58
6.14	アライメントプレートの調整....................................	62
6.15	設計値にアラインメントプレートを配置した時の状態 (プレート上部 (左図)、プレート下	
	部 (右図)) ― プレート設計値位置 (図中下部点線)、スライド目標位置 (図中上部点線)	63
6.16	反射鏡に当たるまで一枚のプレートをスライドさせた時の状態	64
6.17	溝の遊びが 10μm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態	64
6.18	溝の遊びが 0μm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態	64
6.19	設計値にアラインメントプレートを配置した時の状態 — (左図) プレート上部、(右図) プレート下部	65
6.20	反射鏡に当たるまで一枚のプレートをスライドさせた時の状態	65
6.21	溝の遊びが 10μm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態	66
6.22	溝の遊びが 0μm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態	66
6.23	焦点距離と像の形 (LR 法)	67
6.24	左右の光量比から算出された焦点距離................................	68
- 1		-
7.1	・ 望遠鏡の性能評価システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
7.2		70
7.3	XRI-1 の Quadrant イメーシ (左) と EEF(中央) と PSF(石) の様子	71
7.4	XRI-2の Quadrant イメーシ (左) と EEF(中央) と PSF(石) の様子	71
7.5	XRI-3 の Quadrant イメーシ (左) と EEF(中央) と PSF(石) の様子	72
7.6	XRI-4 の Quadrant イメーシ (左) と EEF(甲央) と PSF(石) の様子	72
7.7		73
7.8	セクター3、4、5 の焦点面1メーシ(左)、EEF(甲央) と Detector Y 万回への射影1メーシ	- 4
7.0		74
7.9		
- 10		15
7.10	セクター 9、10、11 の焦点面イメーン (左)、EEF(甲央) と Detector Y 万回への射影イメー	-
		/6
7.11	セクター 12 の焦点面イメーシ (左)、EEF(甲央)と Detector Y 万回への射影イメージ (石)	17
7.12	各セクターにおけるイメーシの広がり(HPD[分角])	77

viii

7.13	Quadrant 中心に対する 10 セクターの結像中心のばらつき — XRT-1(左)、XRT-2(右)	78
7.14	Quadrant 中心に対する 10 セクターの結像中心のばらつき — XRT-3(左)、XRT-4(右)	79
7.15	反射鏡位置測定の様子 — 1 組の反射鏡のみに照射するため動径方向が細いビームを当てる	80
7.16	71 番台と 90 番台の反射鏡の位置測定の結果 — 71 番台は 3 組、90 番台は 7 組	81
7.17	反射鏡1組ごとのポインティングスキャン	81
7.18	セクター 8 内の 71、72 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射	
	影イメージ (右)	82
7.19	セクター 8 内の 73、90、91 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向へ	
	の射影イメージ (右)	83
7.20	セクター 8 内の 92、93、94 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向へ	
	の射影イメージ (右)	84
7.21	セクター 8 内の 95、96 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射	
	影イメージ (右)	85
7.22	各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 71、72、73 番台反射鏡の1 組イ	
	メージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ	86
7.23	各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 90、91、92 番台反射鏡の1組イ	
	メージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ.......	87
7.24	各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 93、94、95 番台反射鏡の1組イ	
	メージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ	88
7.25	各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた96番台反射鏡の1組イメージ – 左	
	から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ	89
7.26	スライド量による1組イメージの結像中心のばらつき — 平均値からのズレ量(横軸)、度数(縦軸)	90
7.27	セクター 3,4,5 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき ― 上から XRT-1、XRT-2、	
	XRT-3, XRT-4	91
7.28	セクター 6.7.8 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、	
	XRT-3, XRT-4	92
7.29	セクター 9.10.11 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、	
	XRT-3, XRT-4	93
7.30	セクター 12 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、XRT-3、	
	XRT-4	94
7.31	結像性能決定要因の切り分け、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	100
7.32	位置決め誤差とプレートの満幅の相関図	102
7.33		102
7.34	XRT-1(左)とXRT-2(右)の結像性能の内分け	103
7.35	XRT-3(左)とXRT-4(右)の結像性能の内分け	103
1100		100
8.1	3点ローラーに粗成形時の問題の模式図	106
8.2	新しく導入した 2 点ローラー — 鉄のシリンダー (上部) とウレタンローラー (下部) で構成される	107
8.3	71 番台の反射鏡の曲率半径 — Top 側の設計値の曲率 (黒い点線) と Top 側の設計値の曲率 (赤い点線)	107
8.4	90 番台の反射鏡の曲率半径 — Top 側の設計値の曲率 (黒い点線) と Top 側の設計値の曲率 (赤い点線)	108
A 1		100
A.1	NR ンリー人の測定原理Cン人テム図	109
A.2	ムツン快山筬楀の慨略	111
A.3	于田 妍 悰华 A	112
A.4	X 緑発王装直の構成図	113

A.5	四極スリットの構成図	114
A.6	大気室チェンバー中のフィルタの配置図	115
A.7	フィルタの透過率....................................	116
A.8	試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997)	117
A.9	ビームラインにおける真空・排気装置の全体図...........................	119
A.10	検出器チェンバー内に設置されている検出器	120
A.11	背面照射型 CCD カメラの原理	121

表目次

すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の設計パラメータ...........................	17
マスク用テープの性質	37
アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ(厚さ1.0mm)-測定値の誤差は±1µm程度	46
アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ(厚さ0.5mm)―測定値の誤差は±1µm程度	47
1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ―厚さ 1.0mm	51
1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ―厚さ0.5mm	52
Quadrant による像の左右光量の比	67
Quadrant 全面スキャン時の測定条件..................................	71
Quadrant の HPD と焦点距離	72
Sector スキャン時の測定条件	73
Sector Image の広がり (HPD [分角])	78
各 Sector の Quadrant 結像中心に対する結像位置のばらつき — (0,0) は Quadrant image center	79
1pair スキャン時の測定条件	82
反射鏡1組ごとのイメージの広がり	85
反射鏡1組ごとの結像位置	95
反射鏡1組ごとの結像位置	96
反射鏡1組ごとの結像位置	97
反射鏡1組ごとの結像位置	98
形状誤差....................................	101
位置決め誤差	101
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	110
X 線発生装置の仕様	113
特性 X 線と対応するフィルタの種類...............................	116
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)	117
ガスフロー型比例計数管の仕様	121
背面照射型 CCD カメラの仕様	122
	すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の設計パラメータ マスク用テーブの性質 アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 1.0mm) – 測定値の誤差は ±1µm 程度 フラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 0.5mm) – 測定値の誤差は ±1µm 程度 1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ – 厚さ 0.5mm Quadrant による像の左右光量の比 Quadrant 全面スキャン時の測定条件 Quadrant の HPD と焦点距離 Sector スキャン時の測定条件 Sector スキャン時の測定条件 反射鏡 1 組ごとのがり (HPD [分角]) 各 Sector の Quadrant 結像中心に対する結像位置のばらつき – (0.0) は Quadrant image center Ipair スキャン時の測定条件 反射鏡 1 組ごとの結像位置 同業 マン 新会 マン 新会 文市測定装置 NH シリーズのスペック X線発生装置の仕様 特性 X 線と対応するフィルタの種類 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) ガスフロー型比例計数管の仕様

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、0.1~10 keV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。3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)

第2章 X線望遠鏡

2.1 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°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(Wolter I型)を、図2.1 に示す。図2.1 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 2.1: (左):回転放物面反射鏡、(右):Wolter I 型反射鏡

2.2 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 2.2 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。

2.2.1 「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 2.2: 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)

2.2.2 「直接研磨型」

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

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

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



Outer Bottom Ring

図 2.3: 「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 2.4: 「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。

2.3 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。

2.3.1 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。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E)$$
(2.1)

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

ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に、焦点距離を一定にして口径を大きくし ただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めな い。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大 きくしても有効面積が増えることはない。そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが、口径内に占 める反射面の割合(開口効率)である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄く し積層枚数を上げればよい。最後に、様々な衛星の有効面積の比較を図 2.5 に示す。

Effective areas of various missions



図 2.5: 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。

2.3.2 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 2.6 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 2.6 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 2.6: 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2.7)。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 2.7: 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。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi r PSF(r) dr$$
(2.2)

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 2.8 にまとめる。図 2.8 は、入射した X 線の全光量を1 と規格 化した時の EEF、r=0 の時1 になるようにした PSF のr 依存性を表している。PSF のピークが鋭いもの、 EEF の立ち上がりが鋭いもの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 2.8 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 2.8: PSF、EEF、HPDの関係

第3章 多重薄板型X線望遠鏡の結像性能の決定要因

2 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」 かつ「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、2005 年 7 月 10 日に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。

3.1 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 §1.1.1~§1.1.3 の 3 種類の独立要因から決定 される。

3.1.1 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 3.1) この広がり HPD_{円錐近似}を見積もってみると、

$$HPD_{
円錐近似} = \tan^{-1}\left(\frac{L\tan\theta/\cos4\theta}{F}\right) = 0.3$$
[分角]

θ:入射 X 線と反射鏡のなす角度 ~ 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。つまり、すざく搭載の 望遠鏡の設計ではこの0.3分角が結像性能の原理的な限界となっている。円錐近似による像の広がりは、 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く、結像性能劣化の大きな原因とはなっていない。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 3.1: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり

3.1.2 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。HPD_{形状誤差}は、図 3.2 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求めることができる。まず、 法線ベクトルは反射鏡の法線ベクトルの平均の向きのまわりに、ある分布を持ってばらつくとする。今、 この分布が幅 $\sigma_{\rm 法線}$ のガウス分布であると仮定すると、平均的な反射鏡の傾きに対して入射角 θ で入射 した X 線は、反射鏡各点に対し、入射角に幅 $\sigma_{\rm 法線}$ のばらつきを生じる。つまり、入射した X 線は鏡面 で入射方向に対して 2 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 $\sigma_{\rm Jaga}$ 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 68%が含まれるため、これを全積分量の 50%が入る幅の HPD_{形状程差} は、

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

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



図 3.2: (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。

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。

3.1.3 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 3.3)

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。仮にその 4 点のうち 1 点が設計値から距離 d だけずれ、そのために X 線の入射角が $\Delta\theta$ 変化したとすると、X 線の出射方向は 2 回反射のために $2\Delta\theta$ 変化する。そのときの X 線の出射方向を反射鏡の母線方向の長さ l と移動距離 d を用いて表すと、

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

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 3.4) 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 3.3: 反射鏡の位置決めによる像の広がり一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 3.4: 位置決めのずれによる反射光のずれ

3.2 すざく衛星搭載のX線望遠鏡

3.2.1 構造

すざく衛星には全部で5台の多重薄板型X線望遠鏡が搭載されており、その構造は、図3.5 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、形状を円錐で近似した厚さ180µmの反射鏡を同心円状に175枚積層することで製作される。また図3.8 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 3.5: 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 3.6: 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。

図 3.6 は X 線望遠鏡の Quadrant を X 線の入射方向から見た図である。図に示す通り 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できている。しかし、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。 詳細な望遠鏡の仕様については表 3.1 にまとめる。

表 3.1: 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	$566 [\mathrm{cm}^2]$	569 [cm ²]	583 [cm ²]	
4.51 keV	$420 \ [cm^2]$	$439 [\mathrm{cm}^2]$	$411 [\rm cm^2]$	
8.04 keV	340 [cm ²]	344 [cm ²]	300 [cm ²]	
9.44 keV	$244 [\mathrm{cm}^2]$	$246 [\mathrm{cm}^2]$	$214 [\mathrm{cm}^2]$	
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。

3.2.2 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。このレプリカ法とは、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噴霧したもの 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 3.7: 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。

3.2.3 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 3.8: 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。

3.2.4 結像性能

すざく衛星搭載のX線望遠鏡の結像性能を決める §1.1.1~1.1.3 の3つ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図3.9 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 3.9: 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。

第4章 新しい反射鏡支持機構の開発

4.1 位置決め誤差の要因

位置決め誤差は、§3.1 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 4.1)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 4.1: アラインメントバーの問題点-4 段が別々に動 さ、反射鏡と溝との間に 50µm の隙間があるため。 大きいほど望遠鏡から遠い位置で結像する。

4.2 アラインメントプレートの導入

上述したように、4本のアラインメントバーの相対位置を精度よく調整するのは非常に困難である。そ こで、4本独立に存在するアラインメントバーから、1枚のプレートに反射鏡保持用の溝を彫った「アラ インメントプレート」へと改良した(図 4.3)。これにより上下段の反射鏡のなす角は加工精度にのみ依存 するようになる。

また、反射鏡の母線方向の端の形状によって反射鏡の位置がばらつかないようにするため、プレートの溝の形を「ボトルネック」状に改良した (図 4.4)。(2005 井上修論)

プレートの導入により反射鏡の位置決め誤差を suzaku 望遠鏡に比べ 40%も向上する事が出来た。しかし各々のプレートの位置の基準となるハウジングが 2 段構造のため、プレートの並進方向を Peak to Valley 値 (PV 値) で 24μm、回転方向で 0.37 分角で調整するのが限界であった。また、プレートの導入によりなす角は一意に決定されるはずであったが、実際は反射鏡とプレートの溝の隙間により数分角程度のばらつきを持ってしまった。プレートの溝幅と反射鏡の厚さを考慮すると、反射鏡を歪めないためには各プレートを並進方向に 15μm、回転方向には 0.3 分角の精度で調整する必要があることが分かった。





図 4.3: 上下 2 段を一枚のプレートで構成する事で 図 4.4: プレートの溝部分の拡大図 — ボトルネック形 反射鏡のなす角を加工精度で決める 状のため反射鏡端の部分の折れ曲がりを回避できる

4.3 内壁基準面の導入

井上修論 (2004) 時は上下 2 段構造のハウジングを使用していたため、13 枚のプレートの回転方向や 並進方向における相対位置の調整が困難であり、反射鏡の形状を歪める要因の一つとなっていた。そこ で、上下段を一体にした上で望遠鏡の中心部に内壁と呼ばれる PV 値で ±2µm の精度で加工された基準 面を取り付ける工夫を行った。(2006 大熊修論)。

基準面に各アラインメントプレートを突き当てることにより、並進方向と回転方向を一度に調整する 事が可能になった。また、各プレートの反射鏡と溝の隙間を 15µm に、溝の深さを 15mm から 5mm に 狭めることで反射鏡のばたつきを軽減することに成功した。

しかし、基準面へプレートを手で突き当てながらネジ締めするため、各プレートにおける位置精度が 20μmの精度しか達成する事が出来なかった。また、反射鏡とプレートの溝の遊びを減らしたため、反 射鏡の挿入が困難になり反射鏡の鏡面を傷つけてしまった。



図 4.5: 内壁基準面の導入 一内壁基準面により 13 枚のプレートの動径方向と回転方向の調整が容易になる

4.4 プレート調整機構の導入

内壁基準面によりプレートの位置を精度よくアラインメントする事ができたが、プレートの溝の中で 反射鏡がばたつく事により結像性能が劣化してしまった。反射鏡と溝との隙間を狭くする事が望ましい が、隙間を 12µm 程度にまで狭めると反射鏡鏡面を挿入時にいためてしまうことが分かった。

そこで、アラインメントプレートの溝幅は反射鏡の厚さよりも十分に広い205µmで加工し、そのプレートを2枚一組にして、1枚をスライドさせることで溝の中で反射鏡が動くのを抑える工夫を行った。 これにより、反射鏡の挿入は容易になるだけでなく、各アラインメントプレートの相対位置を内壁へ突き当てた後にも調整する事が可能になった。

しかし実際プレートの調整を行ってみた結果、挿入した反射鏡の厚みムラにより最も厚い反射鏡基板 によりプレートのスライド量が制限されてしまう事が分かった (2007 窪田修論)。このため相対的に薄い 反射鏡はプレートの溝の中で動いてしまい,望遠鏡の結像性能の劣化の要因となった。



図 4.6: 2 枚のアラインメントプレートの導入 — 1 枚のプレートをスライドさせることで溝幅を詰める
4.5 これまでの成果と課題

アラインメントプレートの導入により上下段の反射鏡のなす角は、プレートの加工精度によってのみ 規定されることになった。上下2段に分かれていたハウジングを一体加工にした上で、内壁基準面を導 入する事で各アラインメントプレートの相対位置を突き当てる事で調整可能にした。さらにアラインメ ントプレートを2枚1組で構成し1枚をスライドさせる事で反射鏡を支持する溝幅を10µmの精度で狭 め、各々の反射鏡のばたつきを抑える事を可能にする。これらの改良により、望遠鏡の位置決め誤差を 大きく改善する事に成功した(図 4.7)。

しかし、挿入する反射鏡に厚さムラがある為に、最も厚い反射鏡によりスライド量が制限されてしまう。仮に焦点面での結像位置のズレを0.5分角以下に抑えたい場合、各反射鏡の厚さムラを7µm 程度に抑える必要がある。



図 4.7: 窪田修論時での望遠鏡の結像性能

第5章 マスク処理による反射鏡製作

反射鏡の厚さムラが位置決め誤差の大きな要因になっている事が分かったので、反射鏡の製作方法の 改善を行った。まず、反射鏡基板を反射鏡の形状に塑性変形させた場合、反射鏡基板の端で最大 10µm 程度の凹凸が生じてしまっていた。そこで反射鏡基板の製作工程を改善し、平滑な反射鏡基板の製作を 目指した。(§5.3)次に、反射鏡基板用のアルミ板の厚さムラが~4µm 程度と微小である事に着目し、反 射鏡のアラインメントプレート内での支持部分が基板になるような反射鏡製作方法を考案した。(§5.4)

5.1 レプリカ法

多重薄板型望遠鏡に搭載する反射鏡は、厚さが 150µm 程度と非常に薄いためガラス基板を用いた反 射鏡のように研磨等による直接的な鏡面加工が困難である。薄い反射鏡基板を用いた反射鏡の製作法と してレプリカ法が挙げられる。レプリカ法とは、平滑なガラス母型(ガラスマンドレル)に反射鏡面とな る金を成膜し、エポキシ樹脂などの接着剤を使用して反射鏡基板にその反射膜を転写する方法である。 レプリカ法による反射鏡の製作工程は、

- 1. 反射鏡基板の製作
 - アルミ基板の切り出し
 - ばり取り
 - 3 点ローラーによる粗成形
 - 基板の洗浄
 - 熱成形
- 2. 反射膜の成膜
 - ガラスマンドレルの洗浄
 - 成膜
- 3. 基板と反射膜の接着
 - 接着剤 (エポキシ樹脂)の噴霧
 - 基板の圧着と硬化
- 4. ガラスマンドレルからの基板の剥離

という工程に分類する事ができる。

5.1.1 アルミ基板の切り出し

反射鏡基板に用いられるアルミニウムは、5052材と呼ばれる Al-Mg 系の材質のものである。これは、 従来反射鏡基板に使用していた1052材と呼ばれる純アルミニウム系に比べ硬度が高いという特徴がある。

ばり取り

放電加工技術により切り出された反射鏡基板の端には、放電白層(ばり)と呼ばれる溶けたアルミニウムが付着している。このばりをルーターと呼ばれる回転砥石と粒度1500番の紙ヤスリを用いて手作業で除去していく(図 5.1)。しかしこの方法では、基板の端の広範囲を紙ヤスリで傷付けてしまう。また作業従事者によりバリ取りの程度違うという問題も生じていた。そこで今回、新たなバリ取り方法を考案した。詳細は §5.3 で述べる。



図 5.1: 反射鏡基板の端に存在する放電白層 (左図) とルーターを用いた従来の除去作業の様子 (右図)

3点ローラーによる粗成形

バリ取りが終わった反射鏡基板は、超音波洗浄により基板の端に付着したやすり粉を綺麗に取り除く。 洗浄後に3点ローラーを使用して反射鏡基板に粗く曲率をつける(図 5.2)。



図 5.2:3 点ローラーで反射鏡基板に曲率をつけている様子

基板の洗浄

曲率をつけた反射鏡基板は、基板表面に付着した不純物を除去する為に再び超音波洗浄にかける(図 5.3)。不純物が基板表面に残存していると、熱成形後の基板形状の劣化に繋がる。洗浄後の反射鏡基板 の表面は乾燥空気で乾燥させ、素早く互いの基板を重ね合わせホコリが付着するのを防ぐ。



図 5.3: 超音波洗浄

熱成形

熱成形とは、3点ローラーを用いて粗成形した反射鏡基板を、反射鏡の形状に加工された金型に大気 圧を用いて押しつけ、200度で10時間成形し、円錐面の一部の形状を作り出す工程である(図 5.4、5.5)。 粗成形を行った反射鏡基板を複数重ね合わせる事で、一度に大量の反射鏡基板を熱成形する事が可能で ある。積層して熱成形をおこなうため、基板間や基板と金型の間に不純物が存在すると、その形状が反 射鏡基板に伝搬してしまい形状劣化の要因となる。そのため、反射鏡基板を金型の上に積層する前に必 ず乾燥空気等で表面の不純物を再度飛ばしておく必要がある。



図 5.4: 熱成形の模式図 — 金型へ押し付けるため積層した反射鏡基板の厚さをシリコンゴムシートの厚さより 150µm 厚 くする



図 5.5: 実際の熱成形前の状態

5.1.2 反射膜の成膜

反射鏡のガラスマンドレルへの製膜は、スパッタリング法を用いて行われる。ガラスマンドレルへの 成膜をおこなう際の工程は、ガラスマンドレルの洗浄と成膜の二工程がある。

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表 面形状が重要になる。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り大きな形 状の悪化劣化の要因となる。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の恒温槽に入れ乾燥させる。

スパッタリングによる製膜

洗浄し終わったガラスマンドレルに反射鏡面となる金を成膜する。金の成膜には、スパッタリング現 象を利用した大阪真空社製のDCマグネトロンスパッタ装置を使用した。成膜はガラスマンドレルを一 定の速度で回転させることにより、ガラスマンドレルの円周方向に均一に金を成膜する。(図 5.6 参照)

ここでスパッタリング法について説明する。高真空 (1mTorr)の電極間にスパッタガスと呼ばれるガス を流し込むと、高エネルギーの宇宙線などにより電離されて一次電子が作られる。ここにターゲットを 陰極として数 100~1000V 程度の高電圧を印加すると、電子は電場と逆方向に加速され、エネルギーを 増しながら次々にガスを電離する。このようにして、電極間にグロー放電によるプラズマが形成される。 スパッタリング装置では、このプラズマ中の陽イオンを電場により加速させ、ターゲットに衝突させる ことにより、この陽イオンの運動エネルギーを得てターゲット物質が飛び出す。これをスパッタリング 現象と呼び、この現象により発生した粒子をスパッタ粒子と呼。また、スパッタガスには化学的に安定 で多くのスパッタ粒子を得られる Ar ガスを使用している。 スパッタリング法の最大の利点は生成した成膜物質の粒子が、keV 程度の陽イオンと運動量を交換し て生じるため、10eV オーダーの高いエネルギーを持つことである。このようにして形成された薄膜は、 表面での原子の移動が起こりやすいのでより緻密な膜になる。またスパッタ法は成膜速度が一定で膜厚 の制御性が優れていることも利点の1つである。

スパッタリング法の欠点としては、スパッタガスを導入するので真空度を高くすることができないこ とである。このスパッタガスが成膜中に混入するため、純粋な薄膜を得ることが困難であるといわれて いる。

今回用いた DC マグネトロンスパッタ装置は、放電空間に磁場をかけることにより成膜速度を大きくしたものである。電子は磁場によるローレンツ力を受けてサイクロトロン運動をするようになる、そのため電子をターゲット近傍に閉じ込めることができるため、陽イオンの生成率を上げ、成膜速度を大きくすることができる。また、低いガス圧で安定したプラズマを作り出すことが可能である。



図 5.6: 反射膜の成膜の様子

5.1.3 反射膜の基板への転写

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、重量比でA剤:B剤=10:3.5 に混合すると常温(23°C)で2~3日で完全に硬化す 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剤とB剤を混合した重 量の6%のトルエンを混合し、粘性を下げ噴霧を行なう。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で制御する必要がある。そのシステムについては図5.7 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。反射鏡は、反射鏡基板と同じ曲率を持った 支持板に空気圧により吸着させて固定する。反射鏡基板表面への噴霧量の制御は乾燥空気の流量と反射 鏡側の円周角方向の回転速度により行う。



図 5.7: エポキシ噴霧用治具の様子 — エポキシを噴霧する治具を上下に動かしながら反射鏡基板を円周角方向へ動かし 噴霧を行う

基板の圧着と接着剤の硬化

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。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下で脱泡した後に行われる。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い接着後は50 C°の恒温槽に入れ10時間以上硬化させる。



図 5.8: 圧着の様子 — チャンバー内部の真空度が 30Pa 以下になったところでマンドレルを下げて圧着を行う

5.1.4 反射鏡の剥離

エポキシが完全に硬化した後、ガラスマンドレルから反射鏡を剥離する。反射鏡基板の周囲の金をテー プにより除去した後、反射鏡基板の端にテープを貼付ける。貼付けたテープを引っ張り上げることで、 ガラスマンドレルと基板の間に隙間を設ける。その隙間、厚さ0.5mmのナフロンテープを差し込み、ガ ラスマンドレルと基板の隙間にイオン交換水を流し込んでいく(図5.9)。剥離した反射鏡は、乾燥空気で 水滴を飛ばし鏡面に水ムラが生じないようにする。



図 5.9: 剥離の様子 — 反射鏡基板とマンドレルの間に水を流すと自然にマンドレルから反射鏡基板が金を転写した状態で 剥離される

5.2 反射鏡の形状評価

反射鏡の鏡面形状の測定は三鷹光器製レーザー変位計 NH-3NS を用いて行なう。その詳しい原理につ いては、付録 A.1 に載せる。図 5.10 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 (1)。同様に逆方向の最下点の X、Y 座標を求る (2)。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測定軸を 作成する。そして、こ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。



図 5.10: 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。軸は反射鏡の top 側を正となるように取る。

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図 5.11 に載せる。まず、得られたデータ点を 3mm ごとに区切り、その区間で高さ平均を求める。ここで得られた 3mm ごとの平均の高さの点を直線で結ぶ。形状評価はこの折れ線の法線の平均の方向に対するばらつきを用いて行う。 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。

¹原点をスタートにまず正の方向 (図 5.10 の (3) の方向) 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 負の方向 (図 5.10 の (4) の方向) に測定範囲分の断面形状測定を行なう。



図 5.11: 反射鏡形状の評価方法 — 大きく分けて 4 項目に分かれる。

5.3 熱成形後の反射鏡基板の形状の改善

従来のばり取りでは、ルーターにより粗くばりを除去した後、紙ヤスリを用いて手作業でばり取りを 行っていた。しかし、大量の反射鏡基板を処理するため製作される反射鏡の品質にばらつきが生じ易かっ た。そこで今回円盤状のルーターのヘッドに、1500番台の紙ヤスリを取り付けてばり取りを行う方法を 考案した (図 5.12)。

この方法は、従来の工程を一工程に短縮するだけでなく、円盤状のヘッドに変えた事により反射鏡基板 の端の部分を均一かつ、浅い角度でバリ取りを行う事を可能にした。これにより、反射鏡の端から~10µm の領域のみヤスリがけでき、基板表面の傷を最小限にする事ができる(図 5.13)。さらに、ヤスリがけの 工程を機械を使用する事により作業従事者に依らず同じ品質の反射鏡を製作する事が可能になった。



図 5.12: 新しいルーターのヘッド部分



図 5.13: ばり取り後の反射鏡の端の様子の拡大図 — 従来の方法によるばり取り後の基板の端の様子 (左図)、新しい ヘッドに夜ばり取り後の基板の端の様子 (右図)

反射鏡基板の形状評価

新しいヘッドを使用したバリ取りの評価を行うため、熱成形をおこない熱成形後の反射鏡の基板の表面形状を NH3-SP で測定した。図 5.14 にあるように、新しい方法でバリ取りを行った反射鏡基板のロールがけ後の表面形状は、端の部分での折れ曲がりが最大で 2µm 程度である。一方で従来の方法による反射鏡基板では、既に 5µm 程度折れ曲がってしまっている。

これらの反射鏡基板を熱成形した結果を図 5.15 に載せる。従来の方法でバリ取りを行った反射鏡基板 は端の部分で最大 8µm 程度折れ曲がっているにも関わらず、新しい方法のものは端の折れ曲がりは 1µm 程度に押さえ込む事に成功した。また、新しい方法による基板では端の折れ曲がりは全て 1µm 程度であ り、折れ曲がりが各反射鏡で伝搬していない事がわかる。これにより、端の形状が均一で折れ曲がりの 小さい反射鏡を簡便かつ大量に制作する事が可能になった。



図 5.14: ロール後の反射鏡基板の表面形状 — 従来の方法でバリ取りされた反射鏡基板 (左図) と新しい方法によりバ リ取りされた反射鏡基板 (右図)



図 5.15: 熱成形後の反射鏡基板の表面形状 — 従来の方法でバリ取りされた反射鏡基板 (左図) と新しい方法によりバ リ取りされた反射鏡基板 (右図)

5.4 マスク処理による反射鏡の製作

レプリカ法で製作された反射鏡において、最も困難な点はエポキシの厚さを均一にスプレーする事で ある。反射鏡とマンドレルを圧着した後、エポキシが硬化するまでの間にエポキシが流動することで反 射鏡の厚さムラが生じてしまう。自作反射鏡の場合、厚さのばらつきは±7µm あった。これは、アライ ンメントプレート内での反射鏡のばたつき量が~14µm であることになり、焦点面でイメージが~1分 角程度広がってしまう事に相当する。

一方で、反射鏡基板の厚さムラは $\pm 2\mu m$ 程度である。反射鏡基板部分で支持した場合ばらつきは $\sim 4\mu m$ になり、イメージの広がりは ~ 0.3 分角にまで抑える事ができる。

そこで反射鏡の端の部分にはレプリカを行わず、反射鏡基板の厚さの均一性を利用した反射鏡の製作 を行った。

5.4.1 マスキングテープの種類

反射鏡には接着剤としてエポキシを 25µm 噴霧している。その為テープの厚さが 25µm 以上ある場合、 噴霧するエポキシの量を増やす必要がある。また反射鏡に直接テープを取り付けレプリカ後に取り除く ため、粘着力が強すぎるとテープの剥離の際に反射鏡の形状を歪めてしまう可能性がある。そのためマ スク用のテープには、従来のエポキシ厚よりも薄く粘着力の弱いことが求められる事になる。今回、表 5.1 にあるように 2 種類のテープを用意して実験を行った。

テープの種類	カプトン (R) テープ	ポリエステルフィルムテープ
メーカー	寺岡製作所	寺岡製作所
型番	NO650S (#12)	NO610K (#12)
粘着材	シリコーン系	ゴム系
支持体の厚さ [µm]	12	12
テープの厚さ [µm]	35	20
粘着力 [N(gf)/25mm 幅]	4.41 (450)	4.66 (475)
引張強さ [N(kgf)/25mm 幅]	78.5 (8.0)	39.2 (4.0)

表 5.1: マスク用テープの性質

エポキシ厚とマスクテープの厚さの関係

§5.1.3 にあるようにマスクテープを貼付けた反射鏡基板の表面にエポキシを噴霧する。そのため、ガラ スマンドレルに圧着する際に、反射鏡基板中央部分にはテープ厚よりも厚くエポキシが付着していない とガラスマンドレルの鏡面を基板に転写する事ができない (図 5.16)。しかし今回用意したカプトンテー プは 35μ mの厚さがあるため、テープの厚さ以上にエポキシをスプレーしようとすると従来のエポキシ 厚に比べ 10μ m 以上厚くなる。これによりガラスマンドレルと反射鏡基板を圧着、硬化中にエポキシの厚 さムラが生じ易くなる (図 5.17)。従来のエポキシ厚が 25μ m 程度である事を考えると、マスク用のテー プの厚さは 20μ m 程度のものが好ましいと思われる。今回厚さが 20μ m 程度のカプトンテープを用意す る事ができなかったので、厚さ 20μ m のポリエステルフィルムを代わりに使用した。それぞれの性能は 表 5.1 に載せてある。



図 5.16: マスクテープ厚とエポキシ厚の関係 — エポキシ厚が薄いと反射膜を写し取る事ができない



図 5.17: エポキシがガラスマンドレル上を垂れている様子 — エポキシの量が多いとガラスマンドレルが極率を 持っているため硬化するまでの間に垂れ易い

図 5.18: エポキシをマスクテープ厚よりも薄くスプ レーした反射鏡の表面 — エポキシがガラスマンドレル 上の反射膜に触れる事ができないため部分的に反射膜が欠損 している

5.4.2 マスクレプリカ反射鏡の製作

反射鏡の製作工程は従来のレプリカ反射鏡に、マスクテープの貼付けと反射膜をレプリカした後のテー プの剥離という工程が加わる事となる。熱成形された反射鏡基板は2µm 程度のスケールで表面は平滑で ある。そのため、マスクテープの貼付け作業時には、基板表面とテープの接着面にホコリ等が付着しな いよう注意する。テープに皺がよる等して凹凸ができると、レプリカする際にエポキシと反射膜の間に 隙間が生じてしまい、反射鏡鏡面での反射膜の欠損に繋がる。 改良した反射鏡は、

- 反射鏡基板表面を軽く α-wipe などでホコリを除去しておく
- マスクを施す反射鏡の円周角方向の長さ程度にテープを切り取る
- 反射鏡と同じ曲率をつけた治具の背面に、マスクテープの接着面が上になるように置く(図 5.19~5.22)
 ニ この際マスクテープに皺が寄らない様に心掛ける
- 反射鏡の両端にマスクテープを貼付ける (図 5.23)
- テープの端の部分には耳をつけ、レプリカ後に剥がしやすくする
- 従来のレプリカの方法で鏡面を転写する
- ガラスマンドレルから反射鏡を剥離する
- 反射鏡上のマスクテープを剥離する

といった工程で製作される。





図 5.19: 反射鏡基板と同じ極率をつけた厚さ 3mm 図 5.20: 治具の上にマスク用テープを粘着面を上に のアルミ板の治具を用意する して乗せる



図 5.21: テープの上に反射鏡基板を重ねる



図 5.22: 片側にテープを貼りつけた状態 — テープに 凹凸 (ホコリ等) が出来た場合は貼り直す



図 5.23: 両側にテープを貼付けた状態



図 5.24: テープを貼付けた基板でレプリカを行った 反射鏡





図 5.25: テープを剥離していく様子 — 粘着力が弱い 図 5.26: エポキシとポリエステルテープの相性 — ガ ため基板から剥離することが容易である フトロング フトの金が剥離しかけている





図 5.27: 基板表面にテープの接着剤が残存する — 図 5.28: ポリエステルテープとテープ上の金の様子 アセトンを染み込ませた綿棒を使うと容易に除去することが — エポキシとポリエステルテープの相性が悪いためかテープ 可能 上の金は容易にテープから剥がれてしまう

5.4.3 形状評価

レプリカ後にマスクテープを剥離する必要があるが、剥離前後で反射鏡の表面形状が劣化していない か確認を行った。確認方法は、反射鏡の鏡面形状を測定する時と同様に反射鏡の母線形状を NH3-SP を 用いて行った。図 5.29 から、マスクテープの剥離前後で反射鏡の表面形状は一致しており反射鏡の形状 を歪めていない事が分かった。



図 5.29: マスクテープの剥離前後での反射鏡の鏡面形状の様子 — 剥離前 (黒線) と剥離後 (赤線)

5.5 ハウジングに挿入した反射鏡の表面形状

マスク処理によって製作された反射鏡の内、表面形状が2回反射相当で1分角以下のものを選別しハ ウジングに入れる。今回ハウジングに挿入した反射鏡の表面形状を以下に載せる。



図 5.30: 71 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.31: 72 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.32: 73 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.33: 90 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.34: 91 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.35: 92 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.36: 93 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.37: 94 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.38: 95 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状



図 5.39: 96 番の Primary Mirror と Secondary Mirror の表面形状

第6章 アラインメントプレートスライド量の均一化

6.1 アラインメントプレートの評価

6.1.1 溝位置測定

アライメントプレートにより支持される反射鏡の2枚のなす角は、溝の位置の加工精度によって決められる。今回加工したアライメントプレートの溝の位置を三鷹光器株式会社所有のNH-5Nを用いて測定した。その詳しい原理については付録のA.1.1 に載せる。

溝の位置の測定はエッジ検出を応用した「溝幅測定」機能を用いて行う。図 6.1 のように 2 辺のエッジ をエッジ検出機能を用いて求め、そのエッジにそれぞれ直線を引く。その 2 直線の交点から 2 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」として出力する。この機能を用いた溝位置の測 定結果は表 6.1、表 6.2 と、図 6.3 の通りである。ずれの値が正であれば設計に比べ望遠鏡の外側に、負 であれば設計に比べ内側にずれていることになる。



図 6.1: 溝位置測定の概念図 -- 溝の両側でエッジ検出を行い、溝のパラメーターを計算する。

設計値からのすれ量 [µm]						
溝番号	Primary top	Primary bottom	Secondary top	Secondary bottom		
40	-5	-7	-9	-4		
41	-8	-10	-12	-6		
42	-7	-10	-11	-7		
43	-7	-11	-12	-6		
44	-8	-10	-11	-6		
45	-8	-10	-11	-6		
46	-7	-10	-11	-6		
47	-7	-10	-11	-6		
48	-7	-10	-11	-5		
49	-7	-7	-9	-4		
71	-6	-6	-6	-1		
72	-6	-7	-9	-2		
73	-7	-7	-9	-3		
74	-6	-7	-8	-3		
75	-6	-7	-8	-2		
76	-6	-6	-7	-2		
77	-6	-7	-6	-2		
78	-6	-8	-7	-3		
79	-6	-8	-6	-1		
80	-5	-6	-6	-1		
90	-1	-5	-2	-0		
91	-3	-6	-4	-1		
92	-3	-6	-6	-2		
93	-3	-5	-5	-3		
94	-4	-6	-4	-2		
95	-4	-6	-5	-1		
96	-3	-6	-4	-1		
97	-3	-5	-4	-2		
98	-3	-4	-4	-2		
99	-3	-4	-4	0		
150	-3	-3	-1	1		
151	-2	-5	-3	0		
152	0	-4	-3	0		
153	-2	-4	-3	-0		
154	-2	-2	-3	-1		
155	-1	-4	-2	-1		
156	-3	-4	-6	-1		
157	-2	-4	-2	-1		
158	-2	-3	-4	-1		
159	-2	-3	-3	0		

表 6.1: アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 1.0mm)—測定値の誤差は $\pm 1 \mu m$ 程度

		設計値から	5のすれ量 [µm]	
溝番号	Primary top	Primary bottom	Secondary top	Secondary bottom
40	-3	-4	-4	-4
41	-5	-6	-8	-6
42	-5	-6	-9	-6
43	-6	-6	-8	-7
44	-5	-7	-9	-7
45	-5	-7	-8	-6
46	-6	-7	-7	-6
47	-7	-5	-8	-6
48	-6	-5	-8	-6
49	-4	-5	-3	-4
71	-3	-4	-3	-2
72	-4	-6	-5	-3
73	-3	-6	-4	-4
74	-4	-5	-4	-4
75	-4	-5	-5	-3
76	-4	-5	-5	-5
77	-5	-5	-4	-3
78	-4	-6	-4	-3
79	-5	-6	-4	-3
80	-4	-4	-2	-3
90	-3	-5	-4	-1
91	-5	-5	-5	-3
92	-5	-5	-5	-2
93	-5	-5	-4	-2
94	-5	-5	-4	-3
95	-5	-6	-4	-3
96	-2	-5	-3	-2
97	-2	-5	-4	-3
98	-4	-5	-4	-2
99	-3	-4	-2	-2
150	-2	-3	-4	-1
151	-3	-3	-4	-1
152	-2	-3	-4	-2
153	-3	-3	-4	-3
154	-4	-3	-4	-1
155	-2	-2	-3	-1
156	-2	-2	-4	-2
157	-3	-2	-3	-2
158	-2	-2	-3	-3
159	-3	-3	-3	-2

表 6.2: アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 0.5mm) – 測定値の誤差は ±1µm 程度



Groove width t1.0mm

図 6.2: アラインメントプレートの溝幅の設計値からのずれ一横軸は溝の ID、縦軸は溝幅、設計値は 205µm



図 6.3: アラインメントプレートの溝位置の設計値からのずれ – 横軸は溝の ID、縦軸は溝の設計値からのずれ

溝の位置測定の結果を見ると、どの溝も設計値に対して 10μm 以内にずれは押さえられているのがわ かる。また、図 6.3 を見ると、どちらのプレートとも若い番号の溝(望遠鏡の中心に近い溝)ほど内側 にずれている。また、2枚のアライメントプレートを比較すると、厚さが 1.0mm のプレートの方が厚さ 0.5mm のものに比べて溝の位置によるずれ量の差が大きい。

6.1.2 なす角のずれ

望遠鏡に反射鏡を組み込む際に、最も問題となるのはなす角のずれである。なす角がずれると焦点距離が変化し結像性能に影響する(図 4.1)。ここでは測定された溝の位置からなす角のずれを見積もる。



図 6.4: 溝位置からなす角の導出

図 6.4 のように、Primary top、Primary bottom、Secondary top、Secondary bottom の座標を (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) 、 (X_4, Y_4) と定義する。反射鏡の望遠鏡光軸からの傾きを Primary、Secondary について、 それぞれ θ_p 、 θ_s とすると、

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}\right) \tag{6.1}$$

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{X_3 - X_4}{Y_3 - Y_4}\right) \tag{6.2}$$

となる。

よって2枚の反射鏡のなす角は180°-($\theta_s - \theta_p$)となり、設計値は $\theta_p = \theta$ 、 $\theta_s = 3\theta$ で、なす角が180°-2 θ なので、そのずれ $\Delta \theta$ は

$$\Delta\theta = 180^{\circ} - (\theta_s - \theta_p) - (180^{\circ} - 2\theta) \tag{6.3}$$

$$= 2\theta - (\theta_s - \theta_p) \tag{6.4}$$

となる。計算した結果を厚さ 1.0mm については表 6.3、図 6.5 に、厚さ 0.5mm ついては表 6.4、図 6.6 ま とめる。

溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]
40	0.273	71	0.208	90	0.190	150	0.052
41	0.268	72	0.292	91	0.233	151	0.220
42	0.286	73	0.245	92	0.256	152	0.287
43	0.362	74	0.233	93	0.164	153	0.173
44	0.338	75	0.189	94	0.102	154	0.052
45	0.252	76	0.203	95	0.234	155	0.167
46	0.368	77	0.150	96	0.260	156	0.212
47	0.281	78	0.240	97	0.090	157	0.159
48	0.314	79	0.248	98	0.111	158	0.194
49	0.228	80	0.244	99	0.196	159	0.182
平均	0.297		0.225		0.184		0.170

表 6.3:1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 1.0mm



図 6.5: 反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 1.0mm-横軸は溝の ID、縦軸はなす角の設計値からのずれ

溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]
40	0.048	71	0.062	90	0.201	150	0.177
41	0.086	72	0.133	91	0.114	151	0.122
42	0.171	73	0.115	92	0.126	152	0.108
43	0.059	74	0.024	93	0.088	153	0.059
44	0.183	75	0.062	94	0.006	154	0.084
45	0.111	76	0.028	95	0.074	155	0.111
46	0.099	77	0.029	96	0.141	156	0.072
47	0.066	78	0.107	97	0.138	157	0.065
48	0.031	79	0.113	98	0.135	158	0.028
49	0.060	80	-0.028	99	0.060	159	0.065
平均	0.091		0.065		0.108		0.089

表 6.4:1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 0.5mm



図 6.6: 反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 0.5mm-横軸は溝の ID、縦軸はなす角の設計値からのずれ



※Secondaryの反射鏡がずれて、

図 6.7: なす角の変化による焦点距離の変化

結果を見ると、アライメントプレートの溝の位置の設計値からのずれによるなす角のずれは、平均で 厚さ 1.0mm のプレートは 0.218 分角、厚さ 0.5mm のプレートは 0.088 分角となっている。これは 4 章 でも述べた通り、焦点距離が伸る要因となる(図 6.7 参照)。例として 90 番台の反射鏡で焦点距離を見積 もると、基準となる厚さ 1.0mm のアライメントプレートの 90 番台のなす角のずれの平均は 0.184 分角、 primary の設計値の傾き角 θ は~0.345°なので、

$$FL = 4750 \times \frac{\tan 4\theta}{\tan(4\theta - 2\Delta\theta)}$$
(6.5)

$$=4750 \times \frac{\tan(4 \times 0.345)}{\tan(4 \times 0.345 - 2 \times 0.184/60)}$$
(6.6)

$$=4771$$
mm (6.7)

以上より焦点距離が、設計値である4750mmに比べて、21mm長くなっていることがわかった。また、 このなす角のずれ Δθ は望遠鏡からの距離 4750mm においては、像に半径 2Δθ=0.368 分角の広がりをも たらす。

6.2 アライメントプレートの調整

反射鏡を精度よく望遠鏡内に配置するためには、精度よくアライメントプレートを加工するとともに、 設計通りの位置に望遠鏡ハウジング内にプレート自身を配置する必要がある。アライメントプレートに は望遠鏡ハウジング内で動径方向への「並進」とプレート面上での「回転」の自由度を持つ(図 6.8 参 照)、これまで、これまでアライメントプレートは望遠鏡ハウジング内の精度よく加工された内壁(表面 の加工精度が Peak to Valley で ±2µm)につき当ることにより、設計通りの位置に配置してきた。しかし、 この方法では、アライメントプレートの配置を容易にできる反面、後からの位置の微調整を行うことが できない。

今回、新たにマイクロメーターを用いてアライメントプレートの位置を調整することを試みた。その 思想は、まず精度のよい内壁にプレートをつき当ることにより大まかな配置を行う。そして、その位置 を確認しながら、目標の位置にプレートをスライドさせていくというものである。また、アライメント プレートを2枚に分離したため、反射鏡を挿入後に1枚(厚さ0.5mm)の位置をマイクロメーターを用い て調整することにより、溝の遊びを減らし反射鏡の位置のばらつきをなくすように試みた。



図 6.8: アライメントプレートの並進と回転— プレートはその面内において「並進」と「回転」の自由度を持つ

測定システム

アライメントプレートの調整には宇宙科学研究本部にある UKH1 を用いる。その様子は図 6.9 に示す。 UKH1 には X ステージと X ステージの下に CCD を取り付け上下に動くことができる Z ステージが存 在する。今回調整のため、新たに下部にある Z ステージと同等のものを上部にも取りつけた。上下のス テージに取りつけられた CCD カメラには 10 倍のレンズがついており、X ステージが動くことで上下か ら望遠鏡上の同じ位置を見ることができるようになっている。また、上下についた CCD カメラを高さ 方向 (Z 方向) に動かすことで測定したい望遠鏡上の地点に焦点を合わせる。

アライメントプレートの望遠鏡内での位置の測定

実際にアライメントプレートの望遠鏡ハウジング内での位置は図 6.10 に示した内壁上の旋盤傷とアラ イメントプレート上の放電加工によって作られた切りかきの相対的な距離を UKH1 のステージエンコー ダーから読み取ることにより調べる。

ここで望遠鏡中心からの位置を知るためには、まず望遠鏡の中心に対する内壁上の旋盤傷の位置を知る必要がある。旋盤傷の中心に対する位置の測定は以下の手順で行う。



図 6.9: 調整システム—(左):実際の位置測定機構の様子、望遠鏡上にある 10 倍のレンズ付の CCD カメラと同様のものが 望遠鏡の下部にもある。(右):調整機構の概念図、X ステージととも望遠鏡が X 方向に動き、上下の CCD で望遠鏡上の同じ位 置を見ることができる。



図 6.10: 内壁と切りかき — 望遠鏡の中心部分にある内壁上の旋盤傷とアライメントプレート上に作られた切りかきを上下の CCD カメラで見て、距離を測定する

- 1. X ステージを動かし CCD で内壁中心を測定する。
- 2. 内壁の中心付近の見やすい旋盤傷を2本選び、それを旋盤傷1、旋盤傷2として、その2本の間の 距離dをXステージのエンコーダーから読み取る。
- 3. この画像を保存し印刷して、旋盤傷1と旋盤傷2の印刷した画像上の半径*R*₁ と *R*₂ を円スケール を用いて測る。
- 4. ここで、内壁上での旋盤傷1、2の実際の半径を*r*₁、*r*₂とすると、

$$\begin{cases} r_1 : r_2 = R_1 : R_2 \\ r_2 - r_1 = d \end{cases}$$

となり、これらより

$$r_1 = \frac{R_1}{R_2 - R_1} d$$
, $r_2 = \frac{R_2}{R_2 - R_1} d$

となる。よってこの関係から、実際の旋盤傷の半径 r₁、r₂ を求める。

図 6.11 には内壁上の旋盤傷の位置を測定する手順と実際に求めた値を記してある。それぞれ調整の基準に使用したのは旋盤傷 1 で、その実際の半径はそれぞれ 0.561µm と 0.363µm である。



下側の内壁旋盤傷の位置測定結果



図 6.11: 内壁上の旋盤傷の位置の測定



図 6.12: 内壁—(左): 内壁の測定の様子、内壁中心部にある旋盤傷を確認する。(右):実際に出力された内壁中心の様子



図 6.13: 切りかき — (左): 切りかき位置の測定、アライメントプレート上に放電加工により作られた切りかきの位置を確認 する。(右):実際に出力された top 側の切りかきの様子、上方にあるのが厚さ 1.0mm のプレートの切りかき、下方が厚さ 0.5mm のプレートの切りかき アライメントプレートの位置測定は、図 6.12 のようにまず内壁を CCD に合わせる。さらに先ほど測定 した内壁上の旋盤傷に CCD の中心を合わせた上でステージエンコーダーをリセットする。その後図 6.13 のように、アライメントプレートの切りかき側に CCD の中心が来るようにステージを移動させる。こ こでのエンコーダーの値に先ほど測定により導いた旋盤傷の位置を足したものが、望遠鏡中心からのア ライメントプレートの切りかきの距離になる。今回測定には、設計で望遠鏡の中心に対して 136.870mm 外側にあるべき切りかきをアライメントプレートの位置を測定する基準として用いた。

UKH1のXステージの最小作動ピッチは 0.2μ m であり、ステージエンコーダーの最小分解能は 0.1μ m である。よって、理想的には位置の測定は 0.2μ m 程度のの精度で可能なはずである。しかし、実際には 内壁の旋盤傷の動径方向の幅、およびアライメントプレートの切りかきの加工精度から測定できる精度 は 1μ m 程度である。また同じ内壁と切りかきの間の距離を測定した際の再現性は PV(Peak to Valley) で 2μ m 程度であった。
6.3. アラインメントプレートのスライド量 第6. アラインメントプレートスライド量の均一化

アライメントプレート調整の手順

アライメントプレートの位置調整は以下のようにして行う。

- 1. 内壁にプレートをつき当てて、ある程度の目標の位置にプレート同士をそろえる。
- 2. マイクロメーターで厚さ 1.0mm のプレートを目標の位置に動かす。
- 3. マイクロメーターで厚さ 0.5mm のプレートを厚さ 1.0mm のプレートと同じ位置に移動させる。
- 4. 反射鏡を挿入する。
- 5. 再び、マイクロメーターで厚さ 1.0mm のプレートを目標の位置に動かす。
- 6. 再び、マイクロメーターで厚さ 0.5mm のプレートを厚さ 1.0mm のプレートと同じ位置に移動させる。

ここで、アライメントプレートの目標の位置とは、図 6.13 の切りかきが望遠鏡中心に対して 136.870mm の位置である。また、全ての工程において、調整の都度 L 字にアライメントプレートをネジで固定する。 試作した反射鏡を 71 番台と 90 番台の溝 (71,72,73,90,91,92,93,94,95,96) に合計 10 組挿入した。

6.3 アラインメントプレートのスライド量

理想的には反射鏡基板 (厚さ150µm) とアラインメントプレートの溝 (205µm) との間には、55µm の遊 びが存在する。従って、遊びをなくす為には55µm アラインメントプレートをスライドさせる必要があ る。しかし、実際はアラインメントプレートの溝の加工精度、反射鏡基板の厚さムラやプレート調整時 の位置の読み取り誤差などが生じる。従って,各々の誤差を見積もる事で反射鏡を歪めないスライド量 を算出する。

アラインメントプレートの溝の加工精度

今回反射鏡を挿入している ID71、ID90 番台の溝幅を測定すると、設計値 (205µm) に対して、厚さ 1.0mm のプレートは 200~207µm、厚さ 0.5mm のプレートで 210~214µm のばらつきがある。厚さ 1.0mm のプ レートの方が溝幅が狭く加工されているため、2 枚のプレートを揃えた状態では、反射鏡は厚さ 1.0mm のプレートの溝に当たっている事になる。この状態から厚さ 0.5mm のプレートをスライドさせて溝幅を 狭める事になる。

反射鏡基板の厚さむら

理想的に反射鏡基板の厚さは150µmであるが、過去にマイクロメーターで厚さを測定した結果厚さむらがある事が分かった。

厚さは、149~153µm 程度の範囲でばらついている事が分かった。

基準位置の読み取り精度

プレートをスライドさせた値はUKH-1に取り付けたCCDを用いて行う。旋盤傷とプレートの切りか き位置を測定する事でプレートの位置を得る事ができるが、それぞれの位置を測定する時の精度が問題 になる。

旋盤傷の幅と切りかきのエッジが~幅を持っているため、それぞれ読み取り誤差として±1µmが生 じてしまう。そのため最大で±2µmの読み取り誤差が生じることになる。

よって、スライド量を X とすると

$$X = \left(\frac{厚さ 0.5mm & 1.0mm \\ 0 \\ 2 \\ = \left(\frac{210 + 200}{2}\right) - 149 \\ = 51 \pm 2 \quad [\mu m]$$

となる。

従ってプレートを 51µm スライドさせた場合、いずれのプレートも反射鏡の形状を歪める事なく溝幅 の遊びを減らす事ができると考えられる。プレートの最大スライド量は~60µmになるが、この場合反 射鏡を歪める可能性がある。



図 6.14: アライメントプレートの調整

6.3.1 アラインメントプレートの位置

図 6.14 の手順に従ってアラインメントプレートを調整した結果を図 6.15~6.18 に載せる。上で求めた ように 51±2µm だけアラインメントプレートをスライドさせてみたところ、51µm 以上プレートが抵抗 もなくスライドさせる事ができるプレートが存在した。そこで、実際にアラインメントプレートをスラ イドさせ反射鏡に当たりストレスがかかり始める手前まで移動させる事にした。これにより、図 6.16 に あるように、各アラインメントプレートでスライド量が異なる結果となった。60µm 程度スライドでき たプレートは 2 枚であった。

次に、アラインメントプレートを設計段階の思想のように内壁方向へスライドさせる工夫を行った。 反射基板の端をレプリカしない事により、設計の段階よりも長い距離をスライドさせる事になり、内壁 方向へスライドさせるとプレートが内壁に当たってしまい ~50µm スライドさせる事が出来なかった。

そこで、予め2枚のプレートを設計値の場所から50µm外側に配置し、厚さ0.5mmのプレートのみ内壁方向へスライドさせる事にした。これにより、内壁方向へは50µmスライドする事が保証される。 プレートを設計値から50µm外側へ平行移動することで、焦点面で像が0.04分角広がるが、後述するX線測定におけるCCDの角度分解能限界が0.04分角程度なため、今回の性能評価には影響がないと思われる。

並進方向

並進方向の調整精度は反射鏡とプレートの溝との隙間が 50µm 程度ある場合、隙間と同じ 50µm 程度 の精度が要求される。1枚のプレートをスライドさせてこの隙間を減らした場合は、溝幅の加工精度、基 板の厚さムラ、測定値の読み取り誤差を考慮して 17µm 程度の精度が要求される。この精度以上に隣り 合うプレートがずれている場合、反射鏡に負荷を与えてしまい像の劣化の要因となる。





図 6.15: 設計値にアラインメントプレートを配置した時の状態 (プレート上部 (左図)、プレート下部 (右図)) - プレート設計値位置 (図中下部点線)、スライド目標位置 (図中上部点線)



第6. アラインメントプレートスライド量の均一化



図 6.16: 反射鏡に当たるまで一枚のプレートをスライドさせた時の状態 — 厚さ 0.5mm のプレートを外壁方向 へスライドさせている



図 6.17: 溝の遊びが 10µm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態



図 6.18: 溝の遊びが 0µm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態

回転方向

回転方向の調整精度について考える。ただし、回転中心はプレートの左上の角で、回転方向は時計回 りとする。この時ある角度以上回ったところで Secondary の反射鏡の下端に溝が当たり始める。その角 度 θ は、回転中心から Secondary Bottom の溝までの距離を約 200mm、基板の厚さムラを 5µm、プレー トの溝幅の加工精度 10µm とすると、

$$\theta = \arctan\frac{0.015}{200}$$

$$= 0.3 \ [\Im \hbar]$$
(6.8)

程度の調整精度が求められる。図 6.19~6.22 から分かるように、回転方向には 0.2 分角の精度で調整 する事ができた。



図 6.19: 設計値にアラインメントプレートを配置した時の状態 — (左図) プレート上部、(右図) プレート下部



図 6.20: 反射鏡に当たるまで一枚のプレートをスライドさせた時の状態 — 厚さ 0.5mm のプレートを外壁方向 ヘスライドさせている

6.4. 可視光測定による焦点距離測定



図 6.21: 溝の遊びが 10µm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態



図 6.22: 溝の遊びが 0µm になるようにプレートを内壁方向へスライドさせた時の状態

アラインメントプレートのスライド量ごとの望遠鏡のX線による結像性能の評価を行う。そこで、ス ライド量ごとに、

- 2 枚のプレートを揃え、反射鏡と溝の遊びが 55µm ある状態の望遠鏡を XRT-1
- 厚さ 0.5mm のプレートを内壁方向へスライドさせて遊びを詰めた状態の望遠鏡を XRT-2
- 厚さ 0.5mm のプレートを外壁方向へスライドさせ溝の遊びを 10μm にした望遠鏡を XRT-3

● 厚さ 0.5mm のプレートを外壁方向へスライドさせ溝の遊びを 0µm にした望遠鏡を XRT-4

と以後、本論文では呼称する。

6.4 可視光測定による焦点距離測定

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 6.23 に示す。



図 6.23: 焦点距離と像の形 (LR法)

一例として XRT-4 の結果を以下に載せる。横軸に検出器から望遠鏡までの距離、縦軸に左右の光量の 比をプロットし図 6.24 を得る。左右の光量の変化を直線でモデルフィッティングし、それぞれの直線が 交わる地点が望遠鏡の焦点距離となる。このようにして各々の望遠鏡の焦点距離を算出した。

焦点距離 [mm]	左[%]	右[%]
4717	71.0	29.0
4737	66.0	34.0
4757	60.5	39.5
4777	55.5	44.5
4797	49.2	50.8
4817	45.1	54.9
4837	40.2	59.8

表 6.5: Quadrant による像の左右光量の比



図 6.24: 左右の光量比から算出された焦点距離

X線望遠鏡にレプリカ法により製作した反射鏡を挿入し、結像性能の評価を行なった結果について示 す。X線による評価はセクター3から12について行った。¹

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。

7.1 Quadrant の結像性能

7.1.1 測定方法

X線による結像性能の評価は、Quadrant全面にX線をあて、1つの望遠鏡としての性能を調べる。今回、アライメントプレートの調整による異なる溝幅での結像性能の変化を調べるためX線測定を行った。 X線測定は宇宙科学研究本部にある30mビームラインを用いて行う。そのシステムの詳しい説明は付録 に載せる。

宇宙科学研究本部の 30m ビームラインは、高い平行度を実現するため X 線発生装置から測定を行う サンプルまでは、およそ 31m もの距離を取っている。さらにサンプルから X 線発生装置側に約 1m の位 置にはスリットを設置し、その幅を絞ることにより非常に高い平行度 (スリットサイズ 2mm×2mm で約 13 秒角)の X 線ビームを作ることができる。また、検出器をサンプルが乗っているステージを同期して 動かし、サンプル全面に X 線を走査させることで、この高い平行度の X 線をサンプル全面に照射する のと同様の状況を作り出すことができる (図 7.1)。望遠鏡ステージ (Sample stage)の並進方向をそれぞれ S_x 、 S_y 、 S_z と定義する。同様に検出器ステージ (Detector stage)の並進方向をそれぞれ D_x 、 D_y 、 D_z と定 義する。ステージの詳細は付録 A 参照のこと。

実際の測定は以下の手順で行った。(図 7.2 参照)

- 1. 4 極スリットを用いてサンプルに当たる X 線ビームサイズを絞り、2mm×2mm(平行度約 13 秒角) にする
- S_y、D_yを移動させ、X 線ビームが Quadrant 開口部の外側へ当たるようにする。その後、X 線 CCD カメラで露光を開始し、S_y、D_yを同時に動かし、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
- S_z、D_zをビームの幅の分だけ移動させる
- 4.2、3を反射鏡が入っている全領域走査するまで繰り替えす

今回は X 線発生装置のターゲットには Ti を使用し、これに Ti フィルターを通し単色化した。また測定は全て 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、サンプルから焦点面検出器 X 線 CCD) までの距離は HRXRT-1~4 は全て 4750mm で行った。これは、CCD カメラを検出器チェンバーの構造上これ以上焦点距離が長くなる方へ移動させる事ができないためである。

¹ハウジング内において両端のセクターは解法端となっているため、結像性能が極端に悪い。また反射鏡作成の工程においても形状が悪くなることが多いので、両端から2セクターの計4セクターはカバーをして隠してある。



図 7.1: 望遠鏡の性能評価システム



図 7.2: 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。

表 7.1: Quadrant 全面スキャン時の測定条件

X 線発生装置:Target Energy	Ti (4.51keV)
X線発生装置:管電圧値/管電流値	10kV/50mA
フィルター	Ti 50µm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$2\text{mm}\times2\text{mm}$

7.1.2 測定結果

図 7.3~7.6 に、XRT-1~4のQuadrant イメージ、EEF、PSF を載せる。それぞれの望遠鏡の Quadrant の HPD を表 7.2 にまとめる。



図 7.3: XRT-1 の Quadrant イメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右) の様子



図 7.4: XRT-2 の Quadrant イメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右) の様子

7.1. QUADRANTの結像性能



図 7.5: XRT-3 の Quadrant イメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右) の様子



図 7.6: XRT-4の Quadrant イメージ (左) と EEF(中央) と PSF(右)の様子

表 7.2: Quadrant の HPD と焦点距離

	プレートスライド量 [µm]	QuadrantのHPD [分角]	焦点距離 [mm]
XRT-1	0	1.75	4754
XRT-2	50-57	1.40	4797
XRT-3	43	1.40	4776
XRT-4	50	1.47	4795

7.2 セクター毎の結像性能

7.2.1 測定方法

測定方法は図に示すようにポインティングで反射鏡にビームを照射して行う。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ピッチで検出器と望遠鏡を動かして10セクター(セ クター 3~12)を測定していく。全てのセクターのイメージは、quadrantのイメージを撮像した時と同様 に回転させずに撮像しているので、セクター毎のイメージの結像位置が、quadrantイメージの結像位置 からどの程度ばらついているかを調べる事が出来る。



図 7.7: セクターイメージの撮像方法 — 望遠鏡は回転させずポインティングでビームを照射する

表 7.3: Sector スキャン時の測定条件

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	10kV/50mA
フィルター	Ti 50µm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$4\text{mm} \times 4\text{mm}$
各場所での露光時間	10 秒,20 秒,60 秒

7.2.2 測定結果



図 7.8: セクター 3、4、5 の焦点面イメージ (左)、EEF(中央) と Detector Y 方向への射影イメージ (右)

7.2. セクター毎の結像性能



図 7.9: セクター 6、7、8 の焦点面イメージ(左)、EEF(中央)と Detector Y 方向への射影イメージ(右)

7.2. セクター毎の結像性能

第7. X線による望遠鏡の光学測定



図 7.10: セクター 9、10、11 の焦点面イメージ (左)、EEF(中央) と Detector Y 方向への射影イメージ (右)



図 7.11: セクター 12 の焦点面イメージ (左)、EEF(中央) と Detector Y 方向への射影イメージ (右)

セクターイメージの広がり

図 7.12 から、セクター 6~9 で XRT-1 以外の溝幅を狭めた望遠鏡はセクターイメージが 40%程度改善した事がわかる。一方で、セクター 3 や 12 といった端のセクターイメージは各望遠鏡で HPD が著しく劣 化している事が分かる。アラインメントプレートをスライドさせていない XRT-1 においても、セクター 3 と 12 で著しく HPD が劣化している。これについては §8.1 で考察する。

図 7.8~7.11 の射影イメージから、セクター 3 や 12 といった広がったイメージではピーク光量はセク ター 7 などのよく集光されたイメージの 30%程度しかない。従って, Quadrant イメージに置ける HPD への寄与は小さく、全セクターイメージの HPD 平均が Quadrant イメージの HPD にはならない。



図 7.12: 各セクターにおけるイメージの広がり (HPD[分角])

Sector	no slide	$50 \sim 55 \mu m$ pull	$43 \mu m$ pull	$50 \mu m$ pull
3	2.69	4.77	3.49	4.46
4	0.95	1.13	1.23	1.16
5	1.79	2.06	1.54	2.03
6	1.61	1.02	0.88	0.88
7	1.82	1.13	1.09	0.88
8	2.03	0.88	1.30	0.85
9	1.92	1.26	1.27	1.09
10	1.58	2.20	1.72	2.48
11	1.13	1.16	0.99	1.16
12	4.50	4.67	4.36	5.68

表 7.4: Sector Image の広がり (HPD [分角])

セクタ-イメージ中心のばらつき

Quadrant イメージ中心に対する各セクターイメージ中心 (セクター3~12) のばらつきを示した図を、 図 7.13、7.14 に各データを表 7.2.2 に載せる。図 7.13 から分かるように、反射鏡とプレートの溝との隙間 を $\sim 0 \mu m$ 程度に削減することで、セクターイメージの結像位置のばらつきを約 60%抑える事ができた。

溝の遊びを 10μm の状態から溝幅を狭める事で、位置決め誤差を約 50%軽減する事が出来た。図 7.14 から、結像位置のばらつきは XRT-3 の方が大きいが、各セクターにおけるばらつきの傾向は XRT-4 と酷 似している。

XRT-2 と XRT-3 の結像位置のばらつき量から、13 枚のプレートごとにスライド量を調整せず、一律 50µm スライドすることで反射鏡ばたつきを十分押さえ込む事ができたものと考えられる。



図 7.13: Quadrant 中心に対する 10 セクターの結像中心のばらつき — XRT-1(左)、XRT-2(右)



図 7.14: Quadrant 中心に対する 10 セクターの結像中心のばらつき — XRT-3(左)、XRT-4(右)

表 7.5: 各 Sector の Quadrant 結像中心に対する結像位置のばらつき — (0,0) は Quadrant image center

Sector	(ΔD _y [分角],ΔD _z [分角])			
3	(0.111,0.077)	(-0.325,-0.486)	(-0.237,-0.608)	(-0.086,-0.279)
4	(-0.071,-0.043)	(-0.055,-0.188)	(0.804,-0.068)	(0.211,-0.119)
5	(-0.150,-0.012)	(0.065,-0.075)	(0.414,-0.145)	(-0.064,-0.183)
6	(0.029,0.123)	(-0.061,-0.0289)	(-0.005,-0.158)	(-0.094,-0.140)
7	(0.052,0.152)	(-0.023,0.138)	(-0.166,-0.096)	(-0.093,-0.034)
8	(0.105,0.322)	(-0.169,0.100)	(-0.060,-0.103)	(-0.295,-0.006)
9	(0.462,0.266)	(-0.058,0.144)	(0.324,-0.108)	(0.0274,0.008)
10	(0.370,0.296)	(0.130,0.186)	(0.337,0.105)	(0.351,0.006)
11	(0.286,0.587)	(0.251,0.301)	(0.403,0.091)	(0.419,0.056)
12	(0.109,0.325)	(-0.485,0.606)	(-0.797,0.671)	(-0.027,0.210)
分散	0.35 [分角]	0.36 [分角]	0.53 [分角]	0.25 [分角]

7.3 反射鏡の1組毎の結像性能

7.3.1 反射鏡の位置測定

測定方法

測定は、セクターごとの測定と同じくポインティングにより行う。この時、1組の反射鏡による結像 性能を測定したいので、Primary側の反射鏡1枚のみにビームを当る必要がある。そこで反射鏡のハウ ジング内での正確な位置を把握するための測定を行う。

ビームサイズを反射鏡の円周角方向に2mm、動径方向に0.3mmまで絞り、0.1mmピッチでY軸方向 に動かしながら反射鏡を横切るようにビームを照射していく(図7.15)。反射鏡の鏡面に当たっている場 合は比例計数管でカウント数が計測される。一方、反射鏡の側面(見込み幅150µm程度)や隣り合う反 射鏡の隙間部分にビームが照射された場合、ビームが反射されず比例計数管ではカウント数が計測され ない。

したがって、反射鏡を10組を横切るようにビームを照射していくと周期的にカウントが来る場所とこ ない場所が交互に現れる。カウントが来た部分から反射鏡の位置を算出する。



図 7.15: 反射鏡位置測定の様子 — 1 組の反射鏡のみに照射するため動径方向が細いビームを当てる

測定結果

縦軸は比例計数管で計測されたカウント数、横軸を望遠鏡中心からの位置としてプロットした図を図 7.16 に載せる。各反射鏡でカウント数が最も多くなる場所をフィッティングから算出し、その場所をそ れぞれの反射鏡の位置と定義した。



図 7.16: 71 番台と 90 番台の反射鏡の位置測定の結果 - 71 番台は 3 組、90 番台は 7 組

7.3.2 反射鏡の1組イメージ

測定方法

各反射鏡の位置を算出した後、その場所に移動しつつビームを照射して反射鏡の1組イメージを撮像 する。端をマスクした反射鏡の場合、X線入射方向から見た鏡面の見込む面積はおよそ500μm 程度であ るのでビームサイズを動径方向は0.4mm に広げて測定は行う。X線発生装置が固定されているため、θ_x を回転させ測定するセクターをステージのY軸に平行にして、各セクター10組の合計100組の反射鏡 上の点を測定した。



図 7.17: 反射鏡 1 組ごとのポインティングスキャン

表 7.6: 1pair スキャン時の測定条件

X線発生装置: ターゲット(エネルギー)	Ti (4.51 keV)
X 線発生装置: 管電圧電値/管電流値	10 kV/50 mA
フィルター	Ti 50 μm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$2\text{mm}{ imes}0.6\text{mm}$
各点での露光時間	100 秒

測定結果

撮像して得られるイメージの例として図 7.18~7.21 に、セクター 8 内の反射鏡の 1 組イメージを載せ る。1 組の反射鏡のイメージは各セクターごとの 10 個のイメージの足し合わせにより作り出す事ができ る²(図 7.22~7.25)。これにより計算された反射鏡 1 組ごとのイメージのの HPD (分角)を表 7.7 に載せる。 アラインメントプレートをスライドさせた結果、スライドさせてない状態に比べ HPD が改善している 事が分かる。また、スライドさせた場合の反射鏡の HPD の平均値を見ると、誤差の範囲でほぼ同じ値を 示しスライドによる反射鏡形状の劣化が見られない事が分かる。



図 7.18: セクター 8 内の 71、72 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射影イ メージ (右)

²¹ 組イメージの撮像のために望遠鏡を回転させているため、検出器面でのZ方向の情報は失われている



図 7.19: セクター 8 内の 73、90、91 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射影 イメージ (右)

7.3. 反射鏡の1組毎の結像性能

第7. X線による望遠鏡の光学測定



図 7.20: セクター 8 内の 92、93、94 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射影 イメージ (右)



図 7.21: セクター 8 内の 95、96 番反射鏡の 1 組イメージ (左)、EEF(中央)、Detector Y 方向への射影イ メージ (右)

	no slide	50~55µm	43µm	50µm
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
071	1.23	1.47	1.40	1.37
072	1.20	1.16	1.44	1.27
073	1.06	1.40	0.95	1.20
090	1.23	1.54	1.20	1.20
091	1.20	1.23	0.99	0.95
092	2.55	0.95	1.20	1.09
093	1.02	1.13	1.40	1.09
094	1.72	1.34	1.13	1.20
095	1.37	1.30	1.23	1.30
096	1.72	1.16	1.16	1.02
平均(分散)	1.43 (0.14)	1.27 (0.05)	1.21 (0.05)	1.17 (0.04)

表 7.7: 反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり



図 7.22: 各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 71、72、73 番台反射鏡の1組イメージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ



図 7.23: 各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 90、91、92番台反射鏡の1組イメージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ



図 7.24: 各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 93、94、95 番台反射鏡の1組イメージ — 左から、足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ



図 7.25: 各セクターでの1組イメージを足し合わせて作られた 96番台反射鏡の1組イメージ — 左から、 足し合わされたイメージ、EEF、Detector Y 方向への射影イメージ

7.3.3 反射鏡1組イメージの結像中心のばらつき

次に、反射鏡1組ごとのイメージの結像位置のばらつきの評価を行う。測定は望遠鏡を回転させて対象となるセクターを水平(ステージのY軸に平行にして)にして行ったため、得られたイメージから反射鏡1組の各セクター内でのステージY方向の相対的な位置情報を得ることができる。今回製作した反射鏡は、71番台の3組と90番台の7組となっている。セクターイメージに寄与する比率は、反射鏡の集 光力に比例すると考えられる。それぞれの1組イメージの結像中心を集光力で加重平均した場所がその セクターイメージの結像位置と考えることができる。

図 7.26 に、XRT-1~XRT-4 での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつきをまとめる。この XRT-1 と XRT-2、XRT-4 のばらつきからアラインメントプレートをスライドさせる事でばらつきを 60%近く抑え る事ができることがわかる。XRT-3 と XRT-4 の分散から溝の遊びが 10µm 程度残っている場合、ばらつ きが 25%程度劣化する事が分かった。

図 7.27~7.30 に全 10 セクターにおける、反射鏡 1 組イメージ結像中心のばらつきを載せる。図中の点線はそれぞれのセクターでの結像中心の加重平均を表す。表 7.8 ~7.11 にはそれぞれのセクターでの反射鏡 10 組の結像位置の加重平均平均を基準とした相対的な結像位置を示す。セクター内での反射鏡個々の結像位置のばらつきは、分散を用いて行う。



図 7.26: スライド量による1組イメージの結像中心のばらつき ― 平均値からのズレ量(横軸)、度数(縦軸)

7.3. 反射鏡の1組毎の結像性能



図 7.27: セクター 3,4,5 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、XRT-3、 XRT-4



図 7.28: セクター 6,7,8 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、XRT-3、 XRT-4



図 7.29: セクター 9,10,11 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、XRT-3、 XRT-4



図 7.30: セクター 12 内での反射鏡 1 組イメージの結像中心のばらつき — 上から XRT-1、XRT-2、XRT-3、XRT-4

		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]	∆D _y [分角]	ΔD_y [分角]	ΔD _y [分角]
_	071	0.205	-0.190	0.833	0.813	0.500
	072	0.432	-0.278	-0.050	-0.225	0.479
	073	0.562	-0.004	-0.420	-0.226	0.118
	090	-0.147	0.100	0.948	1.050	0.829
	091	1.063	0.338	0.217	0.530	0.818
	092	-2.085	-0.045	-0.610	-1.737	-1.897
	093	-0.184	-0.555	-0.093	-0.105	-0.086
	094	1.140	0.387	-1.085	-0.203	0.673
	095	-1.079	0.257	0.757	0.838	0.141
_	096	0.358	-0.115	-0.416	-0.653	-1.331
_						
_		+ D D = 0	+ 0	セクター 10	セクター 11	セクター 12
		679-0	ビノリーッ			
	反射鏡	ビクター。 ΔD _y [分角]	セクター 9 ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]
_	反射鏡 071	ΔD _y [分角] 0.429	ΔD _y [分角] 0.800	ΔD _y [分角] 0.509	ΔD _y [分角] -0.083	ΔD _y [分角] 0.022
-	反射鏡 071 072	<u>ΔD</u> _y [分角] 0.429 0.186	<u>ΔD_y[分角]</u> 0.800 -0.140	ΔD _y [分角] 0.509 -0.188	ΔD _y [分角] -0.083 0.097	ΔD _y [分角] 0.022 0.774
_	反射鏡 071 072 073	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u>ΔDy</u> [分角] -0.083 0.097 -0.211	<u>ΔD_y [分角]</u> 0.022 0.774 1.178
-	反射鏡 071 072 073 090	<u> </u>	<u> ΔD_y[分角]</u> 0.800 -0.140 -0.260 0.457	<u> </u>	ΔD _y [分角] -0.083 0.097 -0.211 -0.127	<u>ΔD_y [分角]</u> 0.022 0.774 1.178 -1.215
_	反射鏡 071 072 073 090 091	<u> </u>	<u> </u>	<u>ΔDy</u> [分角] 0.509 -0.188 -0.477 0.411 -0.013	<u>ΔD_y [分角]</u> -0.083 0.097 -0.211 -0.127 0.095	<u> </u>
_	反射鏡 071 072 073 090 091 092	ΔD _y [分角] 0.429 0.186 0.078 1.228 1.130 -2.012	<u> </u>	<u> </u>	<u>ΔD_y [分角]</u> -0.083 0.097 -0.211 -0.127 0.095 0.175	<u>ΔDy</u> [分角] 0.022 0.774 1.178 -1.215 0.597 -0.988
_	反射鏡 071 072 073 090 091 092 093	<u> </u>	<u> </u>	<u>ΔDy</u> [分角] 0.509 -0.188 -0.477 0.411 -0.013 -0.319 -0.345	<u>ΔD_y [分角]</u> -0.083 0.097 -0.211 -0.127 0.095 0.175 -0.279	<u>ΔD_y [分角]</u> 0.022 0.774 1.178 -1.215 0.597 -0.988 -0.312
_	反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094	ΔD _y [分角] 0.429 0.186 0.078 1.228 1.130 -2.012 -0.334 0.964	ΔD_y [分角] 0.800 -0.140 -0.260 0.457 0.524 -1.582 0.332 0.789	<u> </u>	ΔD_y [分角] -0.083 0.097 -0.211 -0.127 0.095 0.175 -0.279 0.476	<u>ΔD_y [分角]</u> 0.022 0.774 1.178 -1.215 0.597 -0.988 -0.312 1.582
_	反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094 095	<u> </u>	<u> </u>	<u>ΔDy</u> [分角] 0.509 -0.188 -0.477 0.411 -0.013 -0.319 -0.345 0.323 0.521	ΔD_y [分角] -0.083 0.097 -0.211 -0.127 0.095 0.175 -0.279 0.476 0.120	<u> </u>

表 7.8: 反射鏡1組ごとの結像位置

分散 0.72 [分角]
	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]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	∆D _y [分角]
071	-0.308	0.628	0.671	0.250	-0.008
072	0.192	0.159	-0.207	-0.124	-0.149
073	-0.151	-0.265	-0.279	-0.308	-0.053
090	0.458	-0.046	0.524	-0.266	-0.542
091	-0.152	-0.237	-0.126	-0.306	-0.086
092	0.045	-0.445	-0.453	0.040	0.159
093	-0.046	0.197	0.256	0.392	0.415
094	0.019	0.160	0.113	0.188	0.349
095	-0.144	-0.105	-0.330	0.310	0.172
096	0.027	0.070	-0.128	-0.216	-0.304
	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	∆D _y [分角]	ΔD_y [分角]	∆D _y [分角]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]
071	0.214	0.539	0.175	0.016	0.373
072	0.140	0.039	0.294	0.065	0.446
073	-0.299	-0.207	-0.233	-0.082	0.422
090	-0.481	-0.386	0.399	0.292	-0.158
091	0.230	-0.146	0.025	0.246	0.390
092	0.234	-0.236	-0.366	-0.206	-0.261
093	-0.337	-0.217	-0.569	0.062	-0.502
094	0.039	0.245	0.300	0.333	0.082
095	0.237	0.190	0.173	-0.461	0.130
096	0.033	0.260	-0.146	-0.266	-0.647

表 7.9: 反射鏡1組ごとの結像位置

分散 0.29 [分角]

	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]	∆D _y [分角]	∆D _y [分角]	∆D _y [分角]
071	0.097	1.053	0.938	0.889	0.311
072	0.860	0.658	-0.584	-0.050	0.024
073	-0.347	-0.350	-0.178	-0.380	-0.316
090	0.547	0.076	0.820	-0.291	0.031
091	-0.531	-0.455	-0.296	-0.269	-0.139
092	0.335	-0.792	-0.470	-0.640	-0.352
093	-0.434	-0.189	-0.015	-0.078	-0.391
094	0.096	0.567	0.209	0.558	0.953
095	0.141	-0.399	-0.001	0.454	0.162
096	-0.629	0.134	-0.384	-0.091	-0.279
	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 071	セクター 8	セクター 9 ΔD _y [分角] 0.236	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134	セクター 12
反射鏡 071 072	セクター 8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023	セクター 9 ΔD _y [分角] 0.236 0.270	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178	セクター 12
反射鏡 071 072 073	セクター8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372	セクター 9	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092	セクター 12
反射鏡 071 072 073 090	セクター8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047	セクター9 ΔD _y [分角] 0.236 0.270 -0.254 -0.357	セクター10	セクター 11	セクター 12
反射鏡 071 072 073 090 091	セクター8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047 0.282	セクター 9	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092 0.005 0.254	セクター 12
反射鏡 071 072 073 090 091 092	セクター8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047 0.282 -0.045	セクター9 ΔD _y [分角] 0.236 0.270 -0.254 -0.357 -0.406 -0.310	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092 0.005 0.254 -0.340	セクター12
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093	セクター 8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047 0.282 -0.045 -1.520	セクター 9	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092 0.005 0.254 -0.340 -0.023	セクター 12
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094	セクター8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047 0.282 -0.045 -1.520 0.446	セクター9 ΔD _y [分角] 0.236 0.270 -0.254 -0.357 -0.406 -0.310 -0.769 0.339	セクター 10 ΔD _y [分角] 0.466 0.281 -0.098 0.627 -0.065 -0.483 -0.218 -0.244	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092 0.005 0.254 -0.340 -0.023 0.348	セクター12 ΔD _y [分角] -0.149 -0.971 -0.199 -0.072 0.338 0.013 0.148 -0.096
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094 095	セクター 8 ΔD _y [分角] 0.283 0.023 -0.372 -0.047 0.282 -0.045 -1.520 0.446 0.447	セクター 9 ΔD _y [分角] 0.236 0.270 -0.254 -0.357 -0.406 -0.310 -0.769 0.339 0.387	セクター 10	セクター 11 ΔD _y [分角] -0.134 -0.178 0.092 0.005 0.254 -0.340 -0.023 0.348 -0.240	セクター 12 ΔD _y [分角] -0.149 -0.971 -0.199 -0.072 0.338 0.013 0.148 -0.096 0.240

表 7.10: 反射鏡 1 組ごとの結像位置

分散 0.44 [分角]

	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]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	∆D _y [分角]
071	-0.070	0.705	0.337	-0.042	-0.137
072	0.072	0.421	0.045	-0.130	0.383
073	-0.301	-0.084	-0.072	-0.044	0.077
090	-0.083	-0.246	0.034	-0.202	-0.072
091	0.205	-0.130	-0.094	0.020	-0.114
092	0.032	-0.594	-0.616	-0.234	-0.263
093	0.037	0.029	-0.035	0.317	-0.211
094	0.006	0.219	-0.055	0.072	0.301
095	-0.150	-0.177	-0.154	0.293	-0.168
096	0.164	0.087	-0.016	-0.098	-0.329
	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	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]
<u>反射鏡</u> 071	ΔD _y [分角] 0.134	ΔD _y [分角] 0.179	ΔD _y [分角] 0.109	ΔD _y [分角] -0.216	ΔD _y [分角] 0.548
反射鏡 071 072	ΔD _y [分角] 0.134 0.359	ΔD _y [分角] 0.179 0.323	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334	ΔD _y [分角] 0.548 0.317
反射鏡 071 072 073	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393	ΔD _y [分角] 0.548 0.317 0.897
反射鏡 071 072 073 090	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693	ΔD _y [分角] 0.548 0.317 0.897 -0.051
反射鏡 071 072 073 090 091	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294 0.495	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496 0.011	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355 -0.509	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693 0.144	ΔD _y [分角] 0.548 0.317 0.897 -0.051 0.835
反射鏡 071 072 073 090 091 092	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294 0.495 -0.019	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496 0.011 -0.150	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355 -0.509 -0.336	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693 0.144 -0.209	ΔD _y [分角] 0.548 0.317 0.897 -0.051 0.835 -0.049
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294 0.495 -0.019 -0.374	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496 0.011 -0.150 -0.012	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355 -0.509 -0.336 -0.758	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693 0.144 -0.209 -0.707	ΔD _y [分角] 0.548 0.317 0.897 -0.051 0.835 -0.049 -0.589
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294 0.495 -0.019 -0.374 -0.069	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496 0.011 -0.150 -0.012 0.151	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355 -0.509 -0.336 -0.758 0.702	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693 0.144 -0.209 -0.707 0.797	<u>ADy</u> [分角] 0.548 0.317 0.897 -0.051 0.835 -0.049 -0.589 -0.193
反射鏡 071 072 073 090 091 092 093 094 095	ΔD _y [分角] 0.134 0.359 -0.090 -0.294 0.495 -0.019 -0.374 -0.069 -0.174	ΔD _y [分角] 0.179 0.323 -0.018 -0.496 0.011 -0.150 -0.012 0.151 -0.262	ΔD _y [分角] 0.109 -0.114 -0.079 0.355 -0.509 -0.336 -0.758 0.702 0.251	ΔD _y [分角] -0.216 -0.334 -0.393 0.693 0.144 -0.209 -0.707 0.797 0.149	<u> </u>

表 7.11: 反射鏡 1 組ごとの結像位置

分散 0.33 [分角]

7.4 結像性能の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つの中で形状誤差は、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。詳しい 求め方は後に述べる。³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、Quadrantの結像位置 に対する各セクターの結像位置のだらつきとセクターの結像位置に対する反射鏡1組ごとの結像位置の ばらつきの2乗和で表すことができる。さらに、ある1つのセクターを構成する2枚のプレートの調整 精度によってセクターの結像位置が決定され、反射鏡個々のばたつきによってセクターの中での反射鏡 個々の結像位置が決まる。そのため、結像位置のばらつきをセクターと1組ごとに分離することで、位 置決め誤差の要因がアラインメントプレートの調整精度によるものであるか、溝の中での反射鏡の遊び によるものであるかを区別することも可能になる。

³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 7.31: 結像性能決定要因の切り分け

7.4.1 円錐近似と形状誤差の切り分け

上記にあるように反射鏡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。この性質を用いて、形状誤差と円錐近似の分離を行う。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、

$$HPD_{形状} = \sqrt{HPD_{1}^2 - HPD_{円錐}^2}$$

と表すことができる。また、HPD_{円錐}は 0.3 分角である。この計算式を用いて求めた形状誤差を、表 7.12 に示す。

	R / 12: 形 / R / 2		
XRT	反射鏡1組ごとのイメージの広がり(HPD)[分角]	形状誤差 [分角]	
XRT-1	1.43	1.39	
XRT-2	1.27	1.23	
XRT-3	1.21	1.17	
XRT-4	1.17	1.13	

表 7.12: 形状誤差

7.4.2 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1組後とのイメージの結像位置のばらつきの二乗和で表される。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 として表すことができる。二乗和を計算する事で位置決め誤差を計算した結果を表 7.13 に載せる。

XRT	セクターイメージの	反射鏡1組ごとの	位置決め誤差
	のばらつき (HPD) [分角]	のばらつき (HPD)[分角]	[分角]
XRT-1	0.47	0.97	1.08
XRT-2	0.48	0.37	0.61
XRT-2	0.71	0.59	0.92
XRT-4	0.34	0.44	0.55

表 7.13: 位置決め誤差

7.4.3 X線測定結果のまとめ

位置決め誤差の改善

2007年の窪田修論時には、10µm 近い反射鏡の厚さムラによりアラインメントプレートを十分にスラ イドする事ができず、その結果位置決め誤差が0.9分角止まりであった。そこで今回反射鏡基板の端の 部分にマスクを施し基板の厚さ均一性を利用した反射鏡製作し、合計10組挿入した望遠鏡のX線測定 を4回行った。

その結果、図 7.32 にあるように位置決め誤差を 0.55 分角まで押さえ込む事に成功した。また溝内で の遊びが 10µm 残っている場合の位置決め誤差は 2007 年の窪田修論時の結果と同じ結果を返した。形 状誤差に関しては図 7.33 にあるように、アラインメントプレートをスライドさせた XRT-3、4、5 の 3 回 で誤差の範囲で同じ一致した。これは、反射鏡形状を歪める事なく位置決め誤差を軽減する事に成功し たことを意味する。



形状誤差の劣化要因

図 7.34 と 7.35 から明らかに望遠鏡の結像性能に一番寄与している要因は形状誤差になった。形状誤差 を劣化させている要因として、セクター 3 と 12 のイメージの HPD が挙げられる。セクターイメージ解 析からアラインメントプレートをスライドさせる前の状態(XRT-1)で、既にイメージの劣化が生じてい ることが分かった。これはスライドさせる事により反射鏡にストレスがかかり鏡面を歪めている可能性 は低いことを意味する。図 7.12 を見るとセクターイメージの HPD の傾向はセクター 7、8 を中心として 対称な傾向を持っている事が分かる。この事から、基準として考えている旋盤傷が完全な同心円になっ ていない可能性がある。

アラインメントプレートの調整時に使用している CCD カメラの視野の問題で、基準としている旋盤 傷は内壁中央から 500µm 程度の所にある。この付近の旋盤傷は、端の方へ行くに従い比較的うねりが生 じているものが多い。そのため旋盤傷を基準にプレートの位置を合わせる場合、端のセクターは中央の セクターにくらべて位置の決定精度落ちる事となる。基準位置の精度によるプレートの位置のずれが形 状の劣化に寄与していると思われる。そのため今後は、旋盤傷にかわる新たな基準を設ける必要がある と考えられる。







図 7.35: XRT-3(左) と XRT-4(右) の結像性能の内分け

第8章 まとめと今後の展望

8.1 総括

8.1.1 反射鏡製作の改良

アラインメントプレートの溝と触れる反射鏡の端の部分にマスクを施す新しい反射鏡製作方法を考案 した。これにより、厚さムラは反射鏡基板のアルミ板の厚さムラにのみ依存する事となり、エポキシの 厚さというパラメータをなくす事に成功した。

さらに、反射鏡基板の切り出し時に生じる放電白層の除去方法を紙ヤスリを取り付けたルーターによ り除去することで、従来の作業工程を簡略化し熱成形後に得られる反射鏡基板を Peak to Valley(PV 値) で 2µm の平滑度を達成する事が出来た。

8.1.2 プレートの位置調整精度の向上

改良した反射鏡基板を 10 組挿入し、13 枚のアラインメントプレートにより位置決め誤差の改善を図った。各々の反射鏡の厚さムラが軽減された事により、アラインメントプレートへのストレスを一律に設計 値通りの位置に移動させる事が容易になった。これにより、アラインメントプレートの並進方向は 5µm の精度で、回転方向は 0.2 分角の精度で調整する事ができた。設計値からのプレートの位置のズレが軽 減された事により、同時に反射鏡への負荷を軽減し像の劣化を抑える事ができた。

8.1.3 望遠鏡のX線による結像性能の評価

アラインメントプレートをスライドさせ溝の遊びを減らす前後での、望遠鏡の結像性能の変化につい て評価を行った。アラインメントプレートを50µm スライドさせ遊びをなくした場合、位置決め誤差を 0.55 分角まで軽減する事に成功した。溝の遊びが10µm 残っている状態の位置決め誤差は0.92 分角とな り、2007 年の窪田修論時の結果と誤差の範囲で一致する結果となった。位置決め誤差が十分小さくなっ たことから、望遠鏡の結像性能の劣化の主要因は形状誤差となった。

8.2 今後の展望

8.2.1 反射鏡の表面形状の評価方法

今回反射鏡基板の製作工程を見直す事で、平滑度が 2µm 程度の基板を用意する事ができた。我々が現 在レプリカに使用しているガラスマンドレルの形状は、0.5 分角を切る非常に滑らかなものもある。これ らを使用する事で、0.3 分角相当の鏡面をもつ反射鏡を制作する事ができたが、反射鏡の母線方向のある 一部分での評価であった。そこで、反射鏡全体の表面形状を評価するために、平行光源と CCD を利用し たシステムを構築する必要がある。このシステムにより全体の形状を定量的に評価する事が可能になる だけではなく、X 線測定結果との相関を取る事で X 線測定を行わずに HPD の値の概算が可能になると 思われる。 8.2. 今後の展望

8.2.2 反射鏡基板の真円度の改善

3点ローラーの問題点

従来の反射鏡製作において、反射鏡基板の粗成形に3点ローラーを使用していた。3点ローラーはその原理上、ローラー進入方向の端の部分に曲率をつける事ができない。そのため、反射鏡基板の真円度 は悪くなり、結像性能の劣化につながる(図 8.1)。また、3点ローラーで複数枚の反射鏡基板に曲率をつけた場合、曲率のばらつきが大きくなり、熱成形金型へ重ね合わせるのが非常に困難なる。特に150番 台等の曲率の緩い反射鏡基板の場合その傾向が顕著である。



図 8.1: 3 点ローラーに粗成形時の問題の模式図 — 反射鏡基板の進入方向の端 ~7mm 程度は曲率をつけることができない

2点ローラーの導入

3点ローラーと異なり、2点ローラーは柔らかいウレタンロールと固い鉄のシリンダーで構成される。 鉄のシリンダーによりウレタンロールを凹ませて試料に曲率をつける装置であり、異なる曲率をつける 場合は鉄のシリンダーの径を交換するだけで良いという特徴を持つ。2点ローラーの場合、基板の端の 部分にも曲率をつける事が可能であるため真円度のよい反射鏡基板を製作する事が可能になると予想さ れている。また、曲率が鉄のシリンダーによって決まっているため、一定の曲率で大量の反射鏡を製作 するのに非常に適している。今後は曲率と鉄のシリンダーの径の相関関係を導き、曲率の再現性、ロー ル後の基板の表面形状の評価などを行い実用化を目指す。



図 8.2: 新しく導入した2点ローラー — 鉄のシリンダー(上部)とウレタンローラー(下部)で構成される

金型の曲率半径と反射鏡の曲率半径

71 番台と90 番台の反射鏡の曲率半径はそれぞれ、~100mm、~114mm である。熱成形後の反射鏡基板は、金型の形状をよく反映し曲率は金型曲率と1.5mm 程度のズレ量である。しかし、レプリカ後の殆どの反射鏡の曲率は設計値に比べ小さい傾向がある事がわかる(図 8.3、8.4)。

我々が現在使用している熱成形金型は10番台、40番台、71番台、90番台、150番台の5種類でそれ ぞれ Primary と Secondary 用がある。それぞれの番台の金型はそれ一つで10組分の反射鏡の曲率をまか なっている¹。したがって、番台が大きいものほど設計値に対して小さく曲率がつけられる事になる。

このためレプリカ後に曲率が小さくなる場合、設計値からのズレが大きくなりプレートの溝内で反射 鏡にストレスがかかる可能性が高くなってしまう。この問題を解決する為には、熱成形金型を細かい曲 率ごとに容易しなるべく設計値からのズレ量が大きくならないようにする必要があると考えられる。



図 8.3: 71 番台の反射鏡の曲率半径 — Top 側の設計値の曲率 (黒い点線) と Top 側の設計値の曲率 (赤い点線)

¹例えば 90 番台 (91~99 番) の反射鏡の金型は、90 番の反射鏡の曲率で製作されている。そのため 99 番の反射鏡も実際は 90 番の曲率がつけられている事になる



図 8.4: 90 番台の反射鏡の曲率半径 — Top 側の設計値の曲率 (黒い点線) と Top 側の設計値の曲率 (赤い点線)

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-5N、NH3-NS) 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-5Nと宇宙科学研究所所有のNH3-NS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ー光は、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-3NS と NH-5N 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-3NS 及び NH-5N 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-3NS	NH-5N
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	$10 \times (NA = 0.25, WD = 7.0mm)$	h) $50 \times (NA = 0.55, WD = 8.1 mm)$
CCD カメラ	40 万画素カラー CCD	
オートフォーカス部	⑧(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 =0.01 μ m	
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 2	20 倍 : ~4µm
ステージ部		
可動範囲		
Х	200 mm	300 mm
Y	150 mm	400 mm
Z	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

A.2 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A.3に示す。



図 A.3: 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	$5\sim 60 {\rm kV}$
管電流設定	$10\sim 200~{ m mA}$
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 A.2: X 線発生装置の仕様

A.2.1 X 線発生装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 A.4)。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 A.2 に示す。



図 A.4: X 線発生装置の構成図

A.2.2 四極スリット

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



図 A.5: 四極スリットの構成図

A.2.3 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A.6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 A.6: 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 A.3 に示す。また各フィル タの透過率を図 A.7 に示す。

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

表 A.3: 特性 X 線と対応するフィルタの種類



Filter Transmissin

図 A.7: 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
		[pulse/deg or min]	[mm,arcmin](total)	[mm,arcmin/sec]
S-	Х	—	0 or +25(手動)	—
S-	Y	100 pulse / 1mm	$-206.5 \sim +426.6\ (633.1)$	4
S-	Ζ	800 pulse / 1mm	$-192.6 \sim +228.8 \ (421.4)$	0.25
S-	θ_x	1000 pulse / 1deg	(±360°回転が可能)	20
S-	θ_y	2000 pulse / 1deg	-331.8 ~ +292.9 (624.7)	20
S-	θ_z	2000 pulse / 1deg	$-250.0 \sim +284.4 (534.4)$	20
		t	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-2	X 2000 pulse / 1m	m $-111.5 \sim +97.3 (208.8)$) 1.5
	D-	Y 2000 pulse / 1m	m $-231.0 \sim +429.7$ (660.7)	7) 4
	D-2	Z 2000 pulse / 1m	m $-207.5 \sim +213.0 (420.5)$	5) 0.25

表 A.4: 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)

A.2.4 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A.8と表A.4に示す。



図 A.8: 試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997) — 左が試料室チェンバー内ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。

ペンシルビームを XRT に照射する位置を変えるために、試料室チェンバーのステージは Y、Z 軸方向 に移動可能である。また 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A.8)。

A.2.5 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。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 A.9 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 A.9: ビームラインにおける真空・排気装置の全体図



図 A.10: 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.。

A.2.6 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 A.10 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 A.5 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 A.11 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 A.6 に X線 CCD カメラの仕様をまとめる。

表 A.5: 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)
	$\sim 30\%$ (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







Back-Illuminated CCD





図 A.11: 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)。

表 A.6: 背面照射型 CCD カメラの仕様

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	$24 \mu \mathrm{m} imes 24 \mu \mathrm{m}$
有効面積	24.6 mm \times 24.6 mm (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	$1.1 \sim 9.2$ [keV]
読み出しノイズ	
平均暗電流	
冷却方式	電子冷却 + 水冷

謝辞

本論文を完成させるにあたり、非常に多くの人にお世話になりました。

石田學先生には、宇宙科学研究本部において研究をする機会を与えて頂きました。また修論の執筆に おいて多くのご指導ご鞭撻を頂きました。柔軟な発想力と論理的な思考力から導かれたアイデアは、常 に数歩先を読んだものであり驚かされてばかりでした。大橋隆哉先生には卒研生の時から、指導教官と してご指導頂きました。ミーティングでの論文紹介時には、幅広い天文学の知識を分かり易く説明して 頂きました。自由闊達な雰囲気の研究室であったため、自分の考えた手法を存分に実験で試す事が出来 ました。この研究室で3年間研究する事ができ、自分は本当に幸せでした。石崎欣尚さんにはパソコン の設定やトラブルなどの際、お世話になりました。また研究に関しても簡潔かつ的確な助言を頂きまし た。前田良知さんには、実験の方法について多くの助言を頂きました。従来とは違った角度から問題を 見る事の重要性と、興味がある事には積極的に挑戦することの大切を教えて頂きました。育児に忙しい にも関わらず、快く相談に乗って頂き有り難うございました。井上裕彦さんには、望遠鏡の測定並びに 実験に対する心構えを教えて頂きました。全てを教えるのではなく、得られた結果を自分の頭でしっか りと考察する事が出来るようなアドバイスを頂けた事が非常にありがたかったです。また、きちんと予 想を立て計画的に実験をおこなう癖を身につける事ができたのも、ひとえに井上さんの親身のアドバイ スのおかげです。岡田俊策さんには、実験の手法やその解析について多くの助言を頂きました。特に、 実験機器関連で問題に直面したときには、大変お世話になりました。また、逆境を敢えて自分で作り出 し、それを楽しみながら乗り越えていくその精神力と実行力は、自分も学ばせて頂きたいと思います。 中村良子さんには、実験には決断力も必要という事を学ばせて頂きました。完璧計画を立てようと悩む のではなく、実験をおこない適宜計画を修正していかなければ、限られた時間内に結果を出す事はでき ないということを実感しました。関口晶子さんとは実験をする事は有りませんでしたが,これから3年 間中村さんと一緒にXRTチームを引っ張っていってください。同期の大澤武幸君とは、同じ修士論文を 抱える同期として励まし合いながら実験を行いました。実験方法や結果について話し合った事で、自分 では気づかなかった問題点や手法に気づかされました。また深夜にまで実験が及んだ時には、良き話し 相手になってもらいました。実験が期待通りにならずストレス感じる事も有りましたがそんな時、大澤 君の『訳の分からない寝言』には大分癒されました。後輩の林多佳由君、白田渉雪君、染谷謙太郎君た ちには実験を手伝って頂きました。電車を使わないため終電を気にせずに、夜遅くまで実験を手伝わせ てしまい済みませんでした。XRT チームの人数が減ってしまい実験が大変になると思いますが、お互い に助け合いながら自身の修士論文を頑張ってください。鈴木健介君は一緒に実験することはありません でしたが、少しずつ着実に成果を出していく根気には驚かされました。

首都大の星野晶夫さんには、首都大の飲み会での生き様を見せて頂きました。これからも親しみ易い 先輩として研究室を引っ張っていってください。同期の床井和世さんとは首都大のミーティングの時以 外はあまり合う機会が有りませんでしたが,授業や連絡事項など宇宙研では忘れがちなことを親切に教 えて頂きました。また、空腹時には引き出しの中にしまってある様々なお菓子や食材を提供してもらい ました。ごちそうさまでした。首都大の後輩の赤松君は、その独特な個性と林君との掛け合いで笑わせ てもらいました。博士課程では林君とともに首都大宇宙物理実験研究室を盛り上げていってください。 三鷹光器株式会社の長谷部さん、三浦さん、株式会社オオイシの大石さんには望遠鏡の部品や治具の製 作、アライメントプレートの製作、そしてその形状評価などでお世話になりました。おかげさまで素晴 しい研究成果をあげることができました。本当にありがとうございます。 最後に経済面で、そして精神面で支えてくれた両親と兄に感謝します。本当にありがとうございました。

関連図書

- [1] Korsch, D. Reflective Optics. Academic Press, 1991.
- [2] von H.Wolter. Spieelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optikenfür Röntgenstrahlen. *Annalen der Physik*, Vol. 10, pp. 94-114, 1952.
- [3] Church, E. L. & Takacs, P. Z. Statistical and signal processing concepts in surface metrology. SPIE,Vol.645,p.107,1986.
- [4] Kunieda, H., Hayakawa et al. Roughness mesurement of x-ray mirror surfaces. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 (ISSN 0021-4922), vol. 25, Sept. 1986, p. 1292-1299., 25, 1292.
- [5] Sinha, S. K. et al. X-ray and neutron scattering from rough surfaces, 1988, prb, 38, 2297.
- [6] 波岡武,山下広順.「X線結像光学」. 培風館, 1999.
- [7] S.P.Timoshenko. 「板とシェルの理論(上・下)」. 丸善, 1973.
- [8] 日高康弘.「X線望遠鏡の結像性能の評価とその高性能化への展望」.修士論文,名古屋大学,2000.
- [9] 今村晃介.「ASTRO-E 衛星搭載用 X 線望遠鏡の地上較性試験と応答関数の構築」. 修士論文, 神戸 大学, 2000.
- [10] 伊藤啓.「X線望遠鏡結像性能向上の研究」.修士論文,東京工業大学,2002.
- [11] 早川彰.「高角度分解能多重薄板型 X 線望遠鏡の開発」.修士論文,東京都立大学,2003.
- [12] 井上智暁. 「高角分解能をめざした多重薄板型 X 線望遠鏡の開発と性能評価」. 修士論文,東京都立 大学, 2004.
- [13] 井上裕彦. 「高精度アラインメントによる X 線望遠鏡の高解像度化の研究」. 修士論文,東京工業大 学, 2005.
- [14] 大熊哲. 「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」. 修士論文,東 京都立大学, 2006.
- [15] 窪田廉.「高角度分解能化を目指した多重薄板型 X 線望遠鏡の開発とその性能評価」. 修士論文,首 都大学東京, 2007.