# 高角度分解能多重薄板型X線望遠鏡の開発

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 学

# 早川 彰

2003年1月10日

初めて結像光学系 (X 線望遠鏡)を搭載した X 線天文衛星は、1978 年にアメリカが打ち上げた「*Einstein*」 衛星である。この結像光学系を搭載した X 線天文衛星の登場は、望遠鏡の能力である高い角分解能と集 光力によって X 線天文学に飛躍的な発展をもたらした。角分解能を有することにより観測対象の天体の 位置や空間構造を把握することが可能となり、また集光力の増加と検出器の小型化によって S/N 比が格 段に向上したことで、その検出感度は過去の衛星に比べて 2 桁以上向上した。それ以来、望遠鏡の性能 は X 線天文衛星の性能を決める重要な要素となっている。

X線望遠鏡の性能を表す指標として、角分解能、有効面積、視野の広さの3項目が上げられる。X線 は物質表面にすれすれの角度で入射しないと全反射されないので、X線望遠鏡には極端な斜入射光学系 が必要となる。このため、高い角分解能と広い有効面積を同時に実現するのは困難とされてきた。

1999年にアメリカによって打ち上げられた「*Chandra*」衛星は、反射鏡の基板を直接研磨することで 0.5秒角という高い角分解能を得ることが出来た。しかし、基板として用いているガラスの厚さを数 cm 程度必要とするため、開口効率が悪く有効面積を大きくすることができない。

一方、2000年に打ち上げられた X 線天文衛星「ASTRO-E」では、反射鏡の製法に十分滑らかなガ ラス表面の形状を基板に写し取るレプリカ法により基板の薄い反射鏡を製作することができ、反射鏡を 多数枚積層することができる。このため、高い開口効率を得ることができるので、口径の小さな望遠鏡 でも効率的に広い有効面積を確保することができる。しかし、薄い基板を使用していることによる鏡面 光軸方向の法線揺らぎの増加や、168 枚積層していることによる反射鏡の位置決定精度が低下により、 角分解能は光学系の設計値である19 秒角から2.1 分角へ低下してしまっている。

本研究では、高い角分解能と開口効率を同時に実現するために、レプリカ法を用いた多重薄板型望遠 鏡の角分解能劣化原因となる反射鏡鏡面形状誤差と位置決め誤差を同時に補正することが出来る新しい 支持方式の研究開発を行なった。具体的には、ASTRO-E型の望遠鏡で採用されている反射鏡の上下端 を動径方向に伸びた櫛の歯状のアライメントバーで固定する方式から、プレートに切ったスリットに反 射鏡を挿入して固定するアライメントプレートによる支持方式へ変更する。この方式を採用すると、反 射鏡背面とプレートの間に弾性物質を挟み反射鏡鏡面を精度をだしたスリットの側面に押し付けること で鏡面形状を補正しつつ、位置決定精度を上げることが出来る。このように角分解能劣化の原因を補正 することで、光学系の設計値である 19 秒角に迫る角分解能を実現することができる。

そこで、実際にスリットを切ったアライメントプレートと、反射鏡を押し付けるための弾性物質とし てシリコンゴムフィラーを製作し、形状補正効果の検討を行なった。その結果、補正の効果は望遠鏡の 角分解能に換算して、ASTRO-Eの2.1分角からから40秒角に相当することがわかった。更に、この 支持方式を採用した望遠鏡ハウジングを設計し、製作を行なった。

# 目次

1	序論		9
	1.1	X 線天文学	9
	1.2	結像性能とX線天文学1	0
<b>2</b>	X 線	光学 1	2
	2.1	反射の原理	12
		2.1.1 トムソン散乱	12
		2.1.2 X 線の全反射 1	4
	2.2	表面粗さに対する X 線の反射率と散乱 1	7
		2.2.1 運動学的回折理論 1	17
		2.2.2 表面上の粗さによる反射率の低下 2	20
		2.2.3 散乱 X 線の強度	21
	2.3	結像光学系	23
		2.3.1 結像の基本条件	23
		2.3.2 斜入射光学系	25
3	X 線	望遠鏡 2	6
	3.1	X線望遠鏡の種類とその性能 2	26
		3.1.1 X線望遠鏡の性能	26
		3.1.2 製作方法と性能	28
	3.2	多重薄板型 X 線望遠鏡	30
	3.3	結像性能劣化の諸要因	30
		3.3.1 光学系による結像性能	32
		3.3.2 反射鏡の形状誤差	34
		3.3.3 反射鏡の位置決定誤差	37
		3.3.4 結像性能劣化要因の分離3	39
4	反射	寛の形状補正 4	<b>0</b>
	4.1	設計の指針	40
	4.2	表面形状の評価	42

	4.3	形状測定システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
		4.3.1 測定システムの構成	43
		4.3.2 正反射型レーザー変位計	45
		4.3.3 共焦点型レーザー変位計	46
	4.4	望遠鏡への導入を目指した反射鏡形状補正支持システムの検討・・・・・・・・・・・・	50
		4.4.1 ASTRO-E スペアミラーを用いた補正効果の検討	50
		4.4.2 テストプレートの製作	56
		4.4.3 ゴムフィラーの製作	33
5	レプ	リカ法による反射鏡製作システムの構築 6	<b>39</b>
	5.1	レプリカ法の流れ	70
	5.2	反射鏡基板の製作	72
		5.2.1 バリ取り	72
		5.2.2 ローラーによる粗成形	72
		5.2.3 熱成形	73
		5.2.4 熱成形金型の表面形状	74
		5.2.5 基板の表面形状	76
	5.3	反射膜の成膜	77
		5.3.1 マンドレルの洗浄	77
		5.3.2 金の成膜	78
		5.3.3 マンドレルの形状測定 8	30
	5.4	基板と反射膜の接着	33
		5.4.1 エポキシの噴霧	33
		5.4.2 圧着	34
	5.5	基板の剥離	35
		5.5.1 剥離による表面のダメージ 8	35
		5.5.2 反射鏡鏡面形状	36
6	形状	補正効果の検討 8	39
	6.1	アルミ基板の特性	39
	6.2	ゴムフィラーによる加圧量の検討	92
	6.3	テストプレートを用いた形状補正	92
		6.3.1 アルミ基板の形状補正	93
		6.3.2 熱成形を行なった基板の形状補正	96
		6.3.3 反射鏡の形状補正	98

7	103						
	7.1	設計の指針	103				
	7.2 望遠鏡の設計						
		7.2.1 スリット形状の検討	103				
		7.2.2 ハウジングとアライメントプレートの位置決め方法	104				
		7.2.3 望遠鏡強度と支持方法	105				
	7.3	望遠鏡の製作	105				
8	まと	めと今後の課題	109				
	8.1	まとめ	109				
	8.2	今後の課題....................................	110				
A	ゴム	フィラー型枠の製作図面	112				
в	プレ	ート治具の製作図面	114				
С	新望	遠鏡の製作図面	118				

# 図一覧

1.1	X 線天文衛星の性能の変遷	11
2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性	13
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数	14
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数	15
2.4	単層膜の理論反射率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
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...........	18
2.6	大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱	19
2.7	物質表面による X 線の散乱	19
2.8	粗さのある物質面上での散乱と反射.................................	19
2.9	回折格子による X 線の散乱	23
2.10	アッベの正弦条件	24
2.11	X 線で用いられる結像光学系	25
21	V 迫切清楚の断面図	26
3.1 3.9		$\frac{20}{27}$
0.2 2.2		21 20
3.J		29 31
3.4 3.5	ASTRO-E XRT Ouedrant の概題	31
3.5 3.6	Abiiito-B Aiii Quadrant の機能 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	91
0.0		33
37	ASTRO-E XRT L quadrant の設計図	21 21
3.8	(左): 可于洗距離上り小さいスケールの凸凹による散乱(右): 可干洗距離上り大きいス	JI
0.0	(1) の に $(1)$	36
39		37
3.10	第一日 $(f)$ (f)	38
3.11		39
0.11		00
4.1	支持方法の検討	41
4.2	測定システムの構成	44
4.3	ステージの揺らぎ	44

4.4	レーザー変位計の測定原理	45
4.5	測定精度	47
4.6	再現性	47
4.7	共焦点型レーザー変位計を用いた時の測定精度	48
4.8	共焦点型レーザー変位計を用いた時の再現性	48
4.9	速度の違いによる表面形状の見え方................................	49
4.10	速度の違いによる測定誤差	49
4.11	定点測定	50
4.12	支持方法	51
4.13	円柱棒による形状補正例	53
4.14	10 [mm	54
4.15	3 [mm	55
4.16	梁の厚さと最大たわみ量の関係	57
4.17	テストプレート	58
4.18	テストプレート用治具	59
4.19	放電加工面の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
4.20	ピーニング処理を行った面の様子	59
4.21	スリットの表面形状	60
4.22	スリット断面の模式図	61
4.23	突起の間隔とたわみ量の間隔・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	61
4.24	表面形状の頻度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62
4.25	RTV ゴムの型さと RTV シンナー添加量の関係	64
4.26	ヤング率測定のセットアップ	65
4.27	ゴムフィラーの形状	65
4.28	ゴムフィラー製作手順	67
4.29	主剤に硬化剤を添加した様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
4.30	脱泡時の様子....................................	68
4.31	完成	68
E 1	后针绘制作毛唇	71
5.1		71
0.2 5.2		72
0.0 F 4		79
0.4 5 E		13
5.0 5.6		19
0.0	飛艇形 並 至 切 我 国 形 (4 八 16) □ 凶 3.300 専録 万 回 0 長 さ と 万 世 用 万 回 0 長 さ の 離 尺 を て 5 え 2 次 元 的	75
57	に小した。中心11近のくはみは具至517月の八。	10 76
0.1	※10次ル立王公則の広談沽りて ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10

5.8	熱成形による基板形状の変化	76
5.9	金の成膜....................................	79
5.10	${ m ID.2}$ マンドレルの表面形状 $(3$ 次元) -熱成形金型の母線方向の形状を $10$ 度ごとに測定し、方位角方	
	向に展開し3次元的に展開した。	81
5.11	${ m ID.2}$ マンドレルの表面形状 $(2$ 次元 $)$ 一図 $5.10$ の母線方向の長さと方位角方向の長さの縮尺をそろえ	
	2次元的に示した。	81
5.12	${ m ID.3}$ マンドレルの表面形状 $(3$ 次元) - 熱成形金型の母線方向の形状を $10$ 度ごとに測定し、方位角方	
	向に展開し3次元的に展開した。	82
5.13	${ m ID.3}$ マンドレルの表面形状 $(2$ 次元 $)$ 一図 $5.12$ の母線方向の長さと方位角方向の長さの縮尺をそろえ	
	2次元的に示した。	82
5.14	マンドレル表面の母線方向の法線揺らぎ母線方向の形状から $5 \; [ m mm]$ 毎に法線法線揺らぎ $( m HPW)$	
	を求めた。右図:ID=2 マンドレルの法線揺らぎ、左図:ID=3 マンドレルの法線揺らぎ.........	83
5.15	エポキシの噴霧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
5.16	圧着	85
5.17	基板の剥離	85
5.18	表面のダ メージ −左図: 脱泡が不十分な場合に起こる形状劣化。、右図: 硬化温度の上げすぎにより起こる	
	形状劣化原因。 ....................................	86
5.19	反射鏡の表面形状と対応する位置のマンドレル形状......................	87
5.20	反射鏡背面の形状	87
6.1	120 [µm] B=100 [mm] のアルミ基板の応答	90
6.2	100 [µm] B=100 [mm] のアルミ基板の応答	90
6.3	$5 [\mu m]$ の形状補正を行うために必要な荷重と基板の厚さの関係	91
6.4	ゴムフィラー加圧面の模式図	92
6.5		93
6.6		94
6.7	厚さと硬さの異なるゴムフィラーを用いた形状補正	95
6.8	ピーニング処理を行っていないスリットを用いた形状補正	96
6.9	ピーニング処理を行っていないスリットを用いた形状補正	97
6.10	プレート断面の縁の形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	97
6.11	ID=1の反射鏡の形状補正結果	100
6.12	ID=2の反射鏡の形状補正結果	101
6.13	ID=3の反射鏡の形状補正結果	102
71	マニノットプレートのまで形式	104
(.1 7.0		104 104
1.Z	衣山の体丁 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	104 104
1.3		104
1.4	アノ1 アノトノレートの世自次の力法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100

7.5	ハウジング部品とアライメントプレート	 .07
7.6	新望遠鏡の外観・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 .08

# 表一覧

2.1	金とプラチナの臨界角	17
3.1	X 線望遠鏡の性能一覧 (NIT:Normal Incidence Telescope)	29
3.2	ASTRO-E XRT の設計パラメータ	32
4.1	レーザー変位計の仕様....................................	46
4.2	並進ステージ移動速度と実効的なスポット径の関係...............	48
4.3	各支持方式での HPD の補正効果	52
4.4	ヤング率と比重・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
4.5	それぞれの RMS と Peak to Valleyの値	61
4.6	RTVゴム	63
5.1	マンドレルの平均法線揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	83
5.2	反射鏡構成物質の線膨張率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	86
6.1	ゴムフィラーの種類	95
6.2	RMSを用いた形状補正効果の検討	96
6.3	反射鏡の特徴....................................	98
6.4	法線揺らぎを用いた形状補正効果の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
7.1	アライメントプレートのスリット位置....................................	105

# 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。

9

#### 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/cm<sup>2</sup>/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、スダレコリメータを搭載 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4000cm<sup>2</sup>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、我々が打ち上げ予定のASTRO-E2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  $0.1 \text{ }^{A} \sim 100 \text{ }^{A}$ 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  $\lambda$  として、複素屈折率  $\tilde{n}$ 

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

を用いる事で、

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

$$= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z\right) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}\left(nz - ct\right)\right]$$
(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  $\beta$  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  $\mu$  の代わりに、これを物質の密度  $\rho$  で割った質量吸収係数  $\mu_m$  が 使われる事が多い。

X線が物質中に入射すると、ある断面積でもって原子が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*<sub>0</sub> である入射 X線の電

磁波によって、原子中の束縛電子に双極子的な強制振動を引き起こし、この電子を源として入射 X 線と同じ振動数を持つ二次的な X 線が放射される。再放射された散乱波は方向依存性をもっており、散乱波の振幅  $E_s$  は、双極子軸と散乱波の進行方向の角度  $\chi$  との間に、

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

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



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。

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

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

この補正を加えて原子による散乱振幅 E<sub>s</sub>は、

$$E_{s} = f(E,\phi) \times \frac{r_{e}E_{0}}{r} \sin \chi = [f_{1}(E,\phi) + if_{2}(E,\phi)] \times \frac{r_{e}E_{0}}{r} \sin \chi$$
(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  $\phi$  に も依存することである。これは散乱角が増えると原子内の各電子による散乱波の位相がずれるためであ るが、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  $\beta$  と

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

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

の関係がある。ただし $N_a = (N_0/A) 
ho^1$ 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  $[g/cm^3]$ としたときの光学定数  $\delta$ 、 $\beta$  である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

2.1.2 X 線の全反射

図 2.2、 2.3より物質の屈折率が 1 よりわずかに小さいことが分かる。これにより、 X 線が物質表面に 臨界角  $\theta_c$  よりも小さい角度で入射すれば全反射を得る事ができる。

ここで、真空中から物質(屈折率  $\tilde{n}$ )に X 線が入射した場合を考える。それぞれ表面から測った入射角、 屈折角を  $\theta_i$ 、  $\theta_r$  とすると、  $\theta_i$ 、  $\theta_r$  には、スネルの法則により、

 $^1N_0$ はアボガドロ数、Aは原子質量数、hoは原子密度である。



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  $[g/cm^3]$ としたときの光学定数  $\delta$ 、 $\beta$ である。 両図とも横軸にエネルギーをとる。)

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

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

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

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、  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]、 E [keV]、  $\lambda$  [nm] を用いて  $\theta_c$  は、

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

$$\theta_c \propto \sqrt{\rho} \,\lambda \tag{2.19}$$

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、

$$R_p = r_p r_p^*, \qquad R_s = r_s r_s^* \tag{2.21}$$

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、

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

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

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

$$h = \left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 + \sqrt{\left(\left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^2}$$
(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 $\theta/\theta_c = 1$ 以下の全反射領域でのみ高く、臨界角 を超えると急速に減衰する。 また X 線の吸収が少ないとき ( $\beta/\delta = 0$ )、全反射領域 ( $\theta/\theta_c = 1$ 以下)で の反射率は 100 % であるが、吸収が大きくなる (すなわち  $\beta/\delta$  の値が大きくなる) にしたがって全反射 領域の反射率が低下することが分かる。したがって、反射物質には、密度が大きく、 $\beta/\delta$ が小さい、物 理的、化学的に安定な物質である金や白金が有用である。

実際の反射率は、 Henke テーブルなどの f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub> 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-K $\alpha$	$\mathrm{Cu}\text{-}\mathrm{K}\alpha$
Pt	78	195.08	21.45	$2.64^{\circ}$	$0.58^{\circ}$
Au	79	196.97	19.32	$2.52^{\circ}$	$0.56^{\circ}$

表 2.1: 金とプラチナの臨界角



図 2.4: 単層膜の理論反射率

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 似<sup>2</sup>が適用できるので、物質からの散乱波の振幅は各原子による散乱波の振幅を、電子の位置による位相 のずれを考慮して重ね合わせたものとなる。

入射波と散乱波の波数ベクトルをそれぞれ k、 k<sub>0</sub> 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、 $2 \theta$ は $\mathbf{k} \ge \mathbf{k}_0$ のなす角である。

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



図 2.5: 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

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、

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

$$I = I_0 f^2 |S(\mathbf{q})|^2 \quad (f : \mathbb{R} - \mathbb{R} - \mathbb{R})$$
(2.27)

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

次に図 2.7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、



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

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

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

$$q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta)$$
(2.28)



図 2.8: 粗さのある物質面上での散乱と反射

第 2 章 X 線光学

となる。ここで、物質表面上での反射に運動学的回折理論を適用し、(2.23)式の *R*<sub>0</sub>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)

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<sup>3</sup> (以後、「反射」とは正反射 X 線 で、「散乱」とは正反射以外の方向へ進む X 線とする。)の反射強度について考える。

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

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

$$\simeq \exp(-\frac{1}{2}(q_z Z(x,y))^2)$$
 (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 $\sigma$ 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<sup>4</sup>と呼ばれる。この、フレネルの反射率  $R_0$  に Debye-Waller 因子をかけたものは、特に  $q_z Z(x,y) \ll 1$  となる条件では実験結果を非常によく再 現している。

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

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

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<sup>5</sup>、 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、  $\sin \theta_i$  の効果の分  $\sigma$  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<sub>z</sub> · z の小さい場合のみに適用できるものがほとんどである。

ここではそれらのうち、代表的な2つの理論について述べる。

Plain-Wave Born Approximation : PWBA [?]

まず (2.29) 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

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

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

$$C(X,Y) \equiv \langle z(x',y')z(x,y) \rangle = \sigma^2 - \frac{1}{2}g(X,Y)$$
(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<sup>6</sup>。

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

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

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

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。

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  $\land$  (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*<sub>s</sub>への 1 次の散乱強度は、

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



図 2.9: 回折格子による X 線の散乱

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

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

注意すべき点は、 BDRF は (2.29) 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)

$$\square \cup, PSD_1(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(2\pi i f_x x) Z(x) \right|^2$$
(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[1]。 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[2]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: (左):回転放物面反射鏡、(右): Wolter I 型反射鏡

# 第3章

# X 線望遠鏡

ここでは、2.3で述べた斜入射光学系を用いた X 線望遠鏡に焦点を絞り、その性能等について ASTRO-EII 搭載用の望遠鏡を中心に議論する。

3.1 X線望遠鏡の種類とその性能

X 線望遠鏡は斜入射光学系を用い、さらに主鏡が1枚ではなく同心円上に多数の反射鏡を配置した形状をとる(図3.1)。この様な形状を持つものの内、特に反射鏡が薄く、非常に多数配置したものを多重薄板型X線望遠鏡と呼び、ASTRO-Eなどはこのタイプの望遠鏡を搭載している。望遠鏡の性能は反射鏡の製作方法や用いる光学系によって大きく異なってくる。

ここでは、X線望遠鏡の種類とその性能について述べる。



図 3.1: 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)

## 3.1.1 X 線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能を定量的に示す指標として、集光力、解像力と視野がある。ここでは、これら3つの指 標について以下に簡単にまとめる。 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。すなわち、有効面積 *S<sub>eff</sub>* は次の式で表すことができる。

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

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

ここで、集光力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、図 3.1を見ても分かるように、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、図 3.1を見れば明らかなように、鏡面基盤の厚さをできるだけ薄くし積層枚 数を上げればよい。

様々な衛星の有効面積の比較を図 3.2に示す。





図 3.2: 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。

解像力(角分解能) 平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、集光・結像したときの焦点面像の広がりで 解像力が決まる。 理想的な Wolter-I 型光学系による焦点面像は点になるが、実際は 3.3.2で述べるよう に、回転放物面と回転双曲面を円錐で近似したことや、鏡面の形状誤差などにより、焦点面像は広がり を持つ。この広がりは、斜入射光学系では直入射光学系と異なり、円形開口の場合には焦点面に  $1/\theta$  ( $\theta = 反射光の拡散角$ )の関数形となる非常に鋭いピークを持つ。 これを簡単に説明する。反射鏡の法線ベクトルの揺らぎを d $\theta$ とすると、 X 線望遠鏡の半径 R の位置に入射した X 線は、その反射鏡の法線揺らぎ にしたがって焦点からずれた点 ( $dF_x$ , $dF_y$ )に到達する。 ここで、焦点距離を FL、 X 方向を R 方向に 平行にとると、  $dF_x=2d\theta \times$  FL、  $dF_y=2d\theta \times$  R である。つまり、  $dF_x/dF_y=$ FL/R となる。例えば、 ASTRO-E XRT を考えると、 FL=4500[mm]、 R=60~200[mm] であるから、ある微小領域で反射し た X 線がつくる像はその動径方向に 20~70 倍引き延ばされることとなる。 結局 X 線望遠鏡による像 は、この引き延ばされた像を光軸周りに重ね合わせたものであるから、中心部に鋭いピークを構成する ことになる。

この様な鋭いピークを持つ関数系に対して、ピークの中心点はいわば特異点であるため、指標に FWHM を用いるのは適切ではない。そこで、解像力を定量的に表すものとしては焦点面上の全強度の 50% が含 まれる焦点を中心とした円の直径 (Half Power Diameter : HPD) で表す方法がとられる。

視野 斜入射光学系の視野は、収差による結像性能の悪化よりも図 3.3に示したような、反射鏡面の遮 へい効果 (Vignetting) が大きい。これによる Off-Axis 角  $\phi$  での有効面積  $S_{eff}$ を非常に簡単に見積もる と、典型的な入射角を  $\theta_i$  として、

$$S_{eff}(\phi) = S_0(\theta_i - \phi) \qquad (\phi < \theta_i) \tag{3.2}$$

#### *S*<sub>0</sub>:光軸での有効面積

となり、 Off-Axis  $\hat{\mathbf{h}} \phi$  に線形に依存する。

#### 3.1.2 製作方法と性能

2.3で述べた Wolter-I 型とその近似を実現するための鏡面の製作方法として、現在は直接研磨法とレ プリカ法という2つの方法がとられている。 3.1.1で述べたような X 線望遠鏡の性能は、この製作方法 に大きく依存する。

直接研磨法 この方法は一般の光学望遠鏡と同様に、反射面を直接研削、研磨して正確な非球面加工を 行なうものである。 具体的には、ゼロドュアーガラス<sup>1</sup>を、小型工具を走査させ部分的に工具の滞留時間 をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその表面に金などを蒸着し、反射率を 稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確に理想二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。実際にこの方法で製作した X 線望遠鏡を搭載した「*Chandra*」では 角分解能 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り「*Chandra*」では X 線望遠鏡だ けで 1.5 [ton] もの重さになる。

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



図 3.3: Vignetting による光軸外の光に対する集光力 (有効面積)の低下

衛星名	国名	打ち上げ	口径	ミラー長	焦点距離	ネスト数	角分解能	波長域
		(年月)	(cm)	(cm)	(m)	(枚)	(秒角)	(nm)
EINSTEIN	アメリカ	1978.11	60	56	3.4	4	4	6 - 0.3
EXOSAT	ヨーロッパ	1983.5	28	20	1.1	2	10	10 - 0.6
ROSAT	ドイツ	1990.6	83	50	2.4	4	3.3	10 - 0.6
ようこう	日本	1991.8	23	2	1.5	1	2.5	10 - 0.4
EUVE	アメリカ	1992.6	40	14	0.5	1	4	76 - 5.8
あすか	日本	1993.2	35	10	3.5	120	180	3 - 0.1
ALEXIS	アメリカ	1993.4	12.8(NIT)		0.07	1	15	18.6 - 13
SOHO	ヨーロッパ	1995.11	(NIT)			1	1	30.4 - 17
SAX	イタリア	1996.4	15	30	1.8	30	60	10 - 0.1
Spektr-X	ロシア	—	60	20	8	154	<120	10 - 0.1
ABRIXAS	ドイツ	—			1.6	27	<60	3 - 0.1
Chandra	アメリカ	1999.7	120	84	10	6	0.5	10 - 0.1
XMM	ヨーロッパ	1999.12	70	30	8	58	15	10 - 0.1
ASTRO-E	日本	2000.2	40	10	4.75	175	120	10 - 0.1

表 3.1: X 線望遠鏡の性能一覧 (NIT:Normal Incidence Telescope)

レプリカ法 この方法は表面形状の滑らかなガラス母型に蒸着した金など反射物質を、薄い基盤にその 形状を移し取るという方法である。本論文では実際にレプリカ法による反射鏡製作システムを構築し反 射鏡を製作しており、具体的な製作方法については5で述べる。

この方法で製作した反射鏡は、直接研魔法では難しかった非常に薄い基板を用いることができるため、 高い開口効率を非常に軽量で実現することができる。しかし、積層数を増やし開口効率を上げるために は反射鏡を大量に製作しなければならず、1枚1枚の加工精度を上げることや反射鏡を正確に配置する ことが困難になる(3.3.1参照)。そのため、高い結像性能を得ることが難しい。2000に打ち上げられた 「ASTRO-E」衛星に搭載されたX線望遠鏡(XRT)は反射鏡の製作にレプリカ法を採用しており、こ の望遠鏡を例にとると「*Chandra*」衛星の望遠鏡の1/3の口径で同程度の有効面積を非常に軽量(1台 20 [kg] 程度)で実現することができた。しかし、角分解能は2.1分角と大幅に悪くなってしまっている。

### 3.2 多重薄板型 X 線望遠鏡

今まで述べてきたように、日本では X 線望遠鏡として多重薄板型 X 線望遠鏡を用いている。実際に ASTRO-E に搭載された X 線望遠鏡は、図 3.4のような概観をしており、入射角 0.2~0.7 度の薄い鏡面 基板を持つ反射鏡を同心円状に約 170 枚配置している。このため、 10 keV 付近まで大きな有効面積を 有するが、一方で、直接研磨法を用いて製作された望遠鏡に比べ、結像性能は劣り、視野も狭いという 欠点を合わせ持つ。

ASTRO-E では、この様な望遠鏡を5台搭載し、そのうち4台(XRT-I)は鏡面が金でコーティング されており、焦点面にX線CCDカメラが置かれている。残り1台(XRT-S)はプラチナをコーティン グしており、焦点面にはX線マイクロカロリメータが置かれた。それぞれの詳しい設計パラメータを表 3.2にまとめたが、このパラメータからも反射鏡の構造が非常に密であることが分かる。

ASTRO-E XRT は、その円周方向に対しての4分の1である Quadrant と呼ばれる扇型の構造物 (図 3.5)を4つ組み合わせる形で構成される。 Quadrant の中には4分の1周分の鏡面約 170 枚が、2 段に 同心円上に配置され、アライメントバーによって鏡面の上下端は位置決めされている (図 3.6)。

また、アライメントバーを境界線として Quadrant は 14 のセクターと呼ばれる部分に分けられる (図 3.7)。ただし、セクター1とセクター 14 で鏡面は解放端となっており、この部分はカバーされており使用しない。

### 3.3 結像性能劣化の諸要因

入射光の波長に比べ、表面の粗さが無視できる程度に滑らかな鏡面を持つ結像光学系の角分解能は、 入射光の波長を  $\lambda$ 、開口部の直径を D として、 $\lambda/D$  に比例する回折限界で決定される。つまり、波長 が短くなるほど小型の望遠鏡で同じ角分解能が得られる訳であるから、可視光より 3 ~ 4 桁波長の短い X 線では、可視光の直径 10 [m] 規模の望遠鏡と同程度の角分解能を、 X 線では直径 1 [cm] の望遠鏡で 得られる事になる。

しかし、X線領域では波長は数十 A と非常に短いため、鏡面の加工精度が回折限界よりも先に角分解 能を規定してしまう。さらに、X線領域では極端な斜入射光学系を用いているため、斜入射光学系特有



Outer Bottom Ring





図 3.5: ASTRO-E XRT Quadrantの概観

	XRT-I	XRT-S	XRT-S(spare)			
焦点距離	4750 [mm]	4500 [mm]	4500 [mm]			
焦点面検出器	XIS(X 線 CCD カメラ)	XRS(カロリメータ)	XRS			
望遠鏡台数	4 <b>台</b>	1 <b>台</b>				
plate scale	0.725 <b>分角</b> /1 mm	0.763 <b>分角</b> /1 mm	0.763 <b>分角</b> /1 mm			
積層数	175 <b>枚</b>	168 <b>枚</b>	168 <b>枚</b>			
入射角度	$0.178 \sim 0.599$ 度	$0.188 \sim 0.639$ 度	$0.188 \sim 0.639$ 度			
反射鏡の積層間隔	$0.488 \sim 1.239 \text{ [mm]}$	$0.506 \sim 1.302 \text{ [mm]}$	$0.506 \sim 1.302 \text{ [mm]}$			
開口面積(1台あたり)	$702 \ [\rm{cm}^2]$	$713 \ [\rm{cm}^2]$	$713 \ [\rm{cm}^2]$			
有効面積 <sup>a)</sup> (1.49 keV)	$566 \ [\rm{cm}^2]$	$569 \ [cm^2]$	$583 \ [cm^2]$			
( 4.51 keV )	$420 \ [\rm{cm}^2]$	$439 \ [cm^2]$	$411 \ [\rm{cm}^2]$			
( 8.04 keV )	$340 \ [\rm{cm}^2]$	$344 \ [\rm{cm}^2]$	$300 \ [\rm{cm}^2]$			
( 9.44 keV )	$244 \ [cm^2]$	$246 \ [cm^2]$	$214 \ [\rm{cm}^2]$			
有効観測エネルギー領域	$\leq 10 \; [\mathrm{keV}]$					
空間分解能( $\mathrm{HPD}^{b)}$ )	$\sim 2.1$ [分角]					
口径	直径 400 [mm]					
反射鏡サイズ	長さ 100[mm]× 厚さ 約 170 [µm]					
反射鏡の構造	アルミ基板(157.48 [µm] 厚)					
	+ 型取用エポキシ(12.7 [µm] 厚)					
	+金( $0.1 \ [\mu m]$ 厚XRT-	-I, XRT-S(spare) )				
	+ プラチナ(0.1 [µm] 厚					
全重量(1台あたり)	$\sim 18 \; [\mathrm{kg}]$					

表 3.2: ASTRO-E XRT の設計パラメータ

(ASTRO-E XRTの設計パラメータをまとめた。 a) 表面が理想的な反射鏡が設計位置にあると仮定したときの計算値。 b) 焦 点面検出器に来た光子の半数が入る直径。)

## の非常に大きな収差によって、その角分解能は制限を受ける。

ここでは、上に挙げた望遠鏡の結像性能を低下させる諸要因について詳しく議論する。

### **3.3.1** 光学系による結像性能

Wolter-I型光学系の収差 理想的な Wolter-I型光学系においても、非光軸光に対しては収差が存在し、 1点に集光しない。焦点面での像の広がりを HPD で表し、その HPD を *HPD*<sub>wo</sub> とする。

焦点面における像の形状はガウス分布で近似できるので、 HPD<sub>wo</sub>は、

$$HPD_{\rm wo} = 1.35\,\sigma \,[\rm rad] \tag{3.3}$$

$$\sigma \text{ [rad]} = \frac{(\xi+1)}{10} \frac{\tan^2 \theta_i}{\tan \alpha} \left(\frac{L}{F}\right) + 4 \tan \theta_i \tan^2 \alpha \tag{3.4}$$



図 3.6: Quadrant の段面図 — (2段の鏡面の上下端がアライメントバーにより位置決めされている。 なお、1段目をプ ライマリー、2段めをセカンダリーと呼ぶ。)

*L*:光軸方向への反射鏡の長さ(1段)

F : 焦点距離

 $\xi = \alpha_1/\alpha_2$ :  $\alpha_1$ 、  $\alpha_2$ は1段目、2段目の入射角。ただし殆んどの斜入射望遠鏡で  $\xi = 1$  $\alpha = 1/4 \tan^{-1}(R/F) = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ 

となる。

ここで、ASTRO-EII XRT の設計パラメータから代表的な値である、 F = 4750 [mm]、 L = 100 [mm]、  $\alpha = 0.5$  °を代入すると、視野の一番端 (Off-Axis 角:9 分角) で  $HPD_{wo}=2$  秒角程度である。

円錐近似 現段階で我々は、鏡面製作の容易さから、Wolter-I型の2次曲面を円錐で近似した反射鏡を 用いている。この近似による像の広がり(*HPD*<sub>co</sub>)は、光軸に平行な入射X線を考えると、

$$HPD_{\rm co} = \frac{L \times \tan(\alpha)}{2F} \tag{3.5}$$



図 3.7: ASTRO-E XRT-I quadrant の設計図 — (ASTRO-E XRT-I quadrant の設計図を簡略化して図示した。単位は mm。 quadrant を上流側(プライマリー)から見た図になっている。フォイルは 10 枚おきに図示した(最後のみ 5 枚)。入射方向から見て反時計回りにアラインメントバー 1 ~ 13、セクター 1 ~ 14 とする。)

と表せる。ここで、 *HPD*<sub>wo</sub> を計算した時と同じ ASTRO-EII XRT の設計パラメータを代入すると、 *HPD*<sub>co</sub>=19 秒角となる。

3.3.2 反射鏡の形状誤差

反射鏡を完全に設計値通りに製作することはできず、様々なスケールで鏡面形状に誤差が生じる。この誤差による角分解能の劣化は、そのスケールによって波動光学によるものと、幾何光学によるものに 分けられる。

波動光学は互いの電磁波が干渉する場合に成り立つが、電磁波が互いに可干渉な距離は有限である。 その距離を lとすれば、不確定性原理により入射光の波連の継続時間  $\Delta t$  と、その振動数  $\nu$ を用いたスペクトル幅  $\Delta \nu$  の間に、

$$\Delta t \approx \frac{1}{\Delta \nu} \tag{3.6}$$

が成り立つので、

$$l = c\Delta t \approx \frac{c}{\Delta \nu}$$
 (cは光速度) (3.7)
#### 第3章X線望遠鏡

となる。ここで得られた可干渉距離 *l* は波長と単色度によって変化するが、一般的にはミクロンオーダーである。

以下では、
しを指標とし、
波動光学、
幾何光学の
両面から
形状誤差を
議論する。

散乱成分  $(\leq 0.1 \sim 1 \text{ [mm]})$ 

実際の鏡面上には細かな凹凸があり、それによって反射光に位相差が生じる。先にも述べたように、 結像するためには反射した X 線の位相差  $d_{rough}$  が入射 X 線の波長  $\lambda$  の 4 分の 1 以下でなければならな い。一方、この位相差は、表面粗さの RMS ( $\sigma_{rough}$ )、反射面への斜入射角 ( $\theta_i$ )を用いて表すと、ミ ラーが 2 回反射である事を考慮して、 2 枚の鏡面の粗さが等しいとすると、

$$d_{\rm rough} = 2 \times 2^{\frac{1}{2}} \times \sigma_{\rm rough} \sin(\theta_i) \tag{3.8}$$

#### 2 : 反射因子

となる。よって先の条件と合わせて粗さは、

$$\sigma_{\text{rough}} < \frac{\lambda}{8} \times \frac{1}{2^{\frac{1}{2}} \sin(\theta_i)} \tag{3.9}$$

でなければならない。ここで ASTRO-EII XRT の設計パラメータの代表的な値である  $\theta_i=0.5$  °と  $\lambda=2.1$  [Å] (6[keV]) を代入すると、

$$\sigma_{rough} < 21 \ [\text{Å}] \tag{3.10}$$

となる。このように、斜入射光学系であるため、観測する X 線の波長と比べてかなり大きな粗さまで鏡面として許されることが分かる。また、実際の鏡面の反射率測定から、 Debye-Waller 因子によって粗さを見積もると、 ASTRO-E の鏡面の場合は  $\sigma_{rough} = 4 \sim 5$  [Å] 程度に収まっている。しかし、このような細かな凹凸が l より小さなスケールの範囲で存在すると、波動光学上??節で述べたような散乱を引き起こし、結像性能を劣化させる原因となる。

**Specular** 反射の光軸方向のスロープ分布(法線揺らぎ) (0.1~100 [mm])

*l*を越えるスケールの凹凸は幾何光学として考えて良く、*l*の範囲内での平均の法線方向が揺らぐ事に よって反射強度に角度分布が生じる。

鏡面の法線揺らぎの  $\mathrm{RMS}$ を  $\sigma_{\mathrm{slope}}$ とすると、この時の像の広がり ( $HPD_{\mathrm{slope}}$ )は、

$$HPD_{\text{slope}} = 1.34 \times 2 \times 2^{\frac{1}{2}} \times \sigma_{\text{slope}} \tag{3.11}$$

2:反射因子

となる。法線揺らぎは鏡面に存在する表面波長のスケールによって異なる。仮に反射鏡光軸方向に正 弦関数的な形状が存在しているとして、表面波長スケールが光軸方向の長さ (100 [mm]) と同程度なら ば、表面の凹凸は 2µm 程度で1分角程度の角分解能を実現することができる。しかし、波長スケールが 1 [mm] 程度まで細かくなると表面の凹凸は 0.03 [µm] 程度でなければならない。



図 3.8: (左): 可干渉距離より小さいスケールの凸凹による散乱(右): 可干渉距離より大きいスケールでの法線揺らぎによる反射 X 線の広がり

光軸周りの形状誤差 鏡面を光軸周りに見ていくと、各部分で結像位置が異なっている事がある。焦点 位置での像は各部分像の重ね合わせであるから、この結像位置のばらつきが結像性能をさらに劣化させ る。

この光軸周りの形状誤差までを考慮すると、鏡面全体の結像性能(HPD<sub>total</sub>)は、

 HPDaxis
 : 光軸方向のスロープ分布で広がる結像性能 (HPD)

 HPDrot
 : 光軸軸周りの結像のばらつきで広がる結像性能 (HPD)

とすると、

$$HPD_{\text{total}} = \left(HPD_{\text{axis}}^2 + HPD_{\text{rot}}^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(3.12)

となる。

以上のことから X 線望遠鏡の鏡面には、反射率を高めて散乱を抑えるためにミクロンオーダのスケール(可干渉距離)以内での形状を数 Å まで抑え、光軸方向には鏡面全長の 100 [mm] に渡るようなスケー



図 3.9: 光軸回りの (方位角方向の) 形状誤差による結像性能の劣化

ルでも数 [µm] 以下に揺らぎを抑えるという、厳しい形状精度が要求される。さらに、光軸周りの方向に 対しても数 [µm] 程度の精度が要求される。

3.3.3 反射鏡の位置決定誤差

斜入射光学系である Wolter-I 型は有効面積を高めるために、焦点位置が等しい多数の反射鏡を同心円 上に配置した形状をとる。そのため、個々の反射鏡の位置決め誤差が望遠鏡全体の結像性能に関わって くる (図 3.10)。

ASTRO-E 衛星では 2 段の反射鏡の上下端をアライメントバーにより計 4 点で位置決めしているが、 そのうちの 1 点が  $d_{pos}$  だけずれたとすると、反射光は  $\theta_{pos}$  だけずれた方向に出射されるとすると、  $\theta_{pos}$ は、

$$\theta_{pos} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{d_{pos}}{L} \right) \tag{3.13}$$

# 2 : 反射因子

*L*:光軸方向への反射鏡の長さ(1段)

で与えることができる。

これから ASTRO-E では、位置決めの 1 点が 10  $[\mu m]$  ずれたとすれば、出射角は約 40 秒角変化する ことになる。

37



図 3.10: 鏡面の位置決定誤差による結像性能の低下 — (分かりやすさのため、1回反射の場合を書いた。)

3.3.4 結像性能劣化要因の分離

結像性能を決める要因について 3.3で詳しく議論したが、実際に望遠鏡ではそれらの要因がどの程度結 像性能の劣化に寄与しているのか知ることは、光学特性の理解と、 X 線望遠鏡への改善点を探るという 両方の点で非常に重要である。

ASTRO-E のような多重薄板型の望遠鏡を考えると、基板の厚さは非常に薄いので 3.9で述べたよう な光軸回りの形状は反射鏡単体で決まるというよりも、アライメントバーの位置きめによっていると考 えられる。そこで、本論文では 3.3.3で説明する位置決定誤差と合わせて新たに「鏡面位置決め目誤差」、 反射鏡鏡面の光軸方向の形状揺らぎを「鏡面形状誤差」と定義する。

これらの誤差がどの程度望遠鏡の結像性能に影響を与えているか明らかにするために、168枚の反射 鏡のうち1枚のある1部分にX線ビームを当て、焦点面におかれたX線CCDで焦点面像を撮りX線 像の広がりからフォイルの形状誤差を、また他の反射鏡でも同じようにして測定を行い、それぞれの焦 点面像の重心位置の揺らぎから各反射鏡の位置決定誤差を測定した[8]。その結果、結像性能への寄与が 図 3.11の様に分離され、1分角を切る結像性能実現のためには、鏡面の位置決定精度はもちろん、鏡面 の形状精度をも高める必要があることが明らかになった。



図 3.11: 結像性能劣化の要因

本論文では、高い角分解能と開口効率を同時に実現するために、図3.11のようにして得られた結像性 能劣化原因のうち、鏡面位置決め誤差と鏡面形状誤差の補正を試みた。特に鏡面形状誤差の補正につい ては、反射鏡単体の強度を上げ表面形状を向上させるのではなく、ハウジングに組み込んだのちに塑性 変形を起こさない程度のわずかな圧力を加え、さらに、反射鏡の強度を望遠鏡全体持たせることで形状 補正を試みており、他に例のない独創的な研究であると言える。

# 第4章

# 反射鏡の形状補正

4.1 設計の指針

X線望遠鏡は Chandra 衛星のようにガラス基板を研磨したものと、ASTRO-E 衛星のようにレプリ カ法によって滑らかな母型の表面を写し取っアルミ基板を多数枚積層したものに大別することができる。 ガラス基板を用いた望遠鏡は、高い角分解能を得ることができいるが、基板が厚いために開口効率が悪 く十分な統計のデータを得ることができない。また、望遠鏡全体の重量も非常に大きくなってしまう。 それに対し、アルミ薄板を用いる多重薄板型の望遠鏡はガラス基板を用いた望遠鏡に比べ 1/100 程度の 重量で同程度の有効面積得ることができるが、薄板を用いているために反射鏡単体で強度を保つことが できず、前章でのべたような反射鏡の位置決定誤差と反射鏡鏡面の形状誤差が生じてしまい角分解能が 低下してしまっている。ガラス基板を用いた望遠鏡では、基板が厚いためにこれ以上開口効率をあげる ことは難しい。高い角分解能と開口効率を同時に実現するためには、多重薄板型の望遠鏡の角分解能劣 化原因である2つの誤差を改善しつつ基板の強度を上げるために、十分な精度と強度を持つ面に押し付 ける方法が最善であると考えられる。

位置決め誤差と鏡面形状誤差のうち、反射鏡の位置決め誤差を改善できれば結像性能は 80 秒角まで上 げることが出来る (図 3.11 参照)。ここで反射鏡の位置決め誤差といっても、大別して 2 種類の異なる要 因の誤差に分類することが出来る。一つはアライメントバーの位置決め誤差から来るもので、 Primary と Secondary あわせて独立した 4 本のバーを使って位置決めしているために生じる。仮に 4 本のアライ メントバーのうち、 1 本だけ 100 [µm] 程度ずれていたとすると、望遠鏡の結像位置で 9 [mm] 程度異な る位置に像を結ぶ事になる。そしてもう 1 つはアライメントバーのグループの誤差である。これはアラ イメントバーのグループは反射鏡を入れやすくするために 10-20 [µm] の遊びを持つように作られてい るために生じる。アライメントバーの位置決めの場合と同様に反射鏡の 1 端がグループの中で 10 [µm] 程度ずれているとすると、角分解能は 1 分角程度まで低下してしまう事になり、表面形状誤差まで考慮 すると望遠鏡全体の角分解能は 1.6 分角まで低下してしまうことになる。さらに、鏡面の形状による誤 差を補正できれば、円錐近似による誤差の 19 秒角まで決像性能を向上させることが出来る (図 3.11 参 照)。

このような3種類の誤差を補正する具体的な方法として、以下のような方法を考えた。

アライメントバーの誤差 従来の ASTRO-Eの XRT の反射鏡支持方式を図 4.1(a) に示す。アライメント

バーの誤差は、4本の独立したバーになっていることに起因している。そこで、4本のアライメン トバーを上下段一体で作ることが出来ればこの誤差は改善されると考えられる。(図 4.1(b))。

- グルーブ形状の誤差 反射鏡をいれるためには、グルーブの遊びをなくすことは出来ない。そこで、反射 鏡をグルーブに入れた後で上下のスリットに「おさえ」を挿めば遊びをなくすことが出来ると考え られる (図 4.1(c))。
- 鏡面形状誤差 図 4.1(d) のようにグループを反射鏡全体が通るように拡張してスリットとし、鏡面を精密に加工したスリット断面に押し付けることで反射鏡鏡面形状を補正することが出来ると考えられる。



(a)アライメントバー



(b)アライメントバーの誤差補正



(a) 溝形状の誤差補正



(d)鏡面形状誤差の補正

図 4.1: 支持方法の検討

ゴムフィラー

このような考察から、図 4.1(d) のようなアライメントプレートを製作する。しかし、図 4.1(d) のよう にして形状補正を行うためには、弾性物質による線支持の確立が不可欠である。

本章ではまず始めに、4.2で表面形状の評価方法について議論し、4.3で測定システムを構築する。4.4からは具体的な支持方式の検討を行い、4.4.1でASTRO-Eの予備の反射鏡を用いた測定を再検討し、支持方法と補正効果を検討し、4.4.2,??でプレートと加圧物質の検討と製作を行う。

4.2 表面形状の評価

形状補正の効果を検討するためには、表面形状の評価方法について考えなければならない。もっとも 直接的に表面形状を評価する方法は、平均値からの差分をとり表面形状の頻度分布を求め、平均二乗根 (RMS:Root Mean Square)をとる方法である。 RMS の定義を 4.5式に示す。

$$RMS = \frac{1}{l}\sqrt{\int_{0}^{l} [f(x) - \bar{f}]^2 dx}$$
(4.1)

ただし、lは測定距離、f(x)は反射鏡の母線に沿って取った座標xでの反射面の法線方向の位置、 $\bar{f}$ はf(x)の平均値である。このように RMS を用いた形状評価では、表面の凹凸の大きさを定量的に評価することができるが、望遠鏡の結像性能の評価に使われる角分解能に直結しない。そこで、法線揺らぎを用いた評価方法を用いる。法線nは、

$$\boldsymbol{n} = \arctan(\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}})$$
(4.2)

のように隣り合った 2 点を結ぶ直線に直行するベクトル (法線ベクトル) として求めることができる。 このとき基板の形状が理想的な直線だった場合の法線ベクトル n とのなす角を  $\theta_n$  とし、 $\theta_n$  の頻度分布 を法線揺らぎと定義する。しかし実際には、測定対象物の面が荒れていたり、 4.3で述べるように取得し た測定値はステージの移動による振動やステージ揺らぎ (図 4.3参照) のため、 4.2式では正確な法線揺ら ぎを求めることができない。そのため、取得した測定値を一定間隔ごとに区切り、その区間の測定値を 直線でフィットし得られた傾きから法線ベクトル N を求めた。このようにして得られた N と n のなす 角をとり法線揺らぎを得ることができる。本論文では、反射鏡など滑らかな面でステージの揺らぎが良 く引けているものは、 1 [mm] 毎 (約 15 点を直線で合わせ傾きを求める) に、基板などの粗い面でステー ジで揺らぎが良く引けているものは、 2-3 [mm] 毎 (約 40 点) に、測定対象面の状態によらずステージの 揺らぎがあまり引けていないものに対しては、 5-6 [mm] 毎 (約 80 点) に法線ベクトルをだし法線揺らぎ を求めた。

このようにして得られた法線揺らぎは、ダブルピークやそれ以上のピークを持ち、正規分布にはなら なかったので、鏡面形状の評価は法線揺らぎの頻度分布における HPW (Half Power Width:全デー タの平均を中心として全数の 50% が入る幅)をとることで行なった。この法線揺らぎの HPW は、近似 的にはガウス分布に従うとすると、 3.1.1 で定義した望遠鏡の結像性能を表す指標である HPD との間に は、

$$HPD \approx 2 \times \sqrt{2} \times HPW \tag{4.3}$$

第4章反射鏡の形状補正

の関係が成り立つ。ここで、係数 2 は入射 X 線と反射 X 線のなす角は、入射 X 線と反射面のなす角の 2 倍になる効果を表し、 $\sqrt{2}$  は上下 2 段で 2 回反射する効果を表している。

反射鏡面には非常に様々な表面波長スケールの凹凸が存在している。法線揺らぎによる形状評価方法 を用いた場合、その値は表面の凹凸の大きさではなく、表面に存在する傾斜角によって決まる。そのた め、同程度の凹凸の Peak to Valley(PV 値)の大きさをもつ表面でも、母線方向に渡って何波長分のう ねりが存在しているかによって法線揺らぎの値は大きく異なる。仮に、反射鏡鏡面に母線方向の長さと 同程度の表面波長スケールのうねりが存在しているとすると、凹凸の PV 値の大きさは3 [µm] 程度でも 角分解能は1分角以下になる。しかし、反射鏡母線方向に1 [mm] 程度の表面波長スケールのうねりが存 在していると、表面形状の PV 値を 0.03 [µm] 以下にしなければ1分角以下の角分解能を得ることはで きない。このように RMS は表面の凹凸の PV 値の大きさを反映するのに対し、法線揺らぎからもとめ た HPW の値は、反射鏡の表面波長スケールによって大きく異なる。

本論文では、表面形状を RMS や HPW、 HPD を必要に応じて使い分けて評価する。

#### 4.3 形状測定システムの構築

前章でのべたような反射鏡表面や基盤、マンドレル、熱成形金型の形状を測定するために、レーザー 変位計を用いた形状測定システムを構築した。本研究の目的は鏡面形状の補正であるので、鏡面形状の 変化を起こす可能性のある接触式の形状測定器を用いることはできない。しかし、サブミクロン以下の 精度で測定を行う必要があるため、非接触のレーザー変位計を採用した。本研究で使用しているレーザー 変位計は、鏡面のようななめらかな面の測定に適した正反射型と、切削面などの荒れた面の測定に適し た共焦点型がある。本章では、上記の2種類の変位計を用いた測定システムの性能と特性について議論 する。

#### 4.3.1 測定システムの構成

今回用いた測定システムは図 4.2に示したように、レーザー変位計、X 軸、 Z 軸並進ステージ、サン プル固定治具よりなりたっている。図 4.2に示したようにレーザー変位計を測定対象物を下から見上げる かたちで取り付け、治具によって固定された測定対象物との距離を Z 軸ステージで調節し、レーザー変 位計の許容範囲内に固定する。その後、X 軸並進ステージによって測定対象物を図 4.2にある X 軸方向 に動かしつつ、同時にレーザー変位計の値を読みこみ形状測定をおこなっている。

並進ステージには、一般的にピッチングとヨーイングという鉛直方向の揺れと、水平方向の揺れが存 在する。サブミクロンの測定に於いては、これらの揺れを鏡面の形状と分離する必要がある。そのため、 面精度  $\lambda/20^1$ である石英でできたオプティカルフラットを測定し、ステージ揺らぎの成分を分離した。 実際には、オプティカルフラットを支える治具の傾斜が含まれるが、その傾斜は測定データを一次関数 でフィットし差をとることで除き、ステージ揺らぎのみを取り出すことができる。オプティカルフラッ トを用いて得られた測定範囲内のステージ揺らぎは図 4.3の様になった。このようなステージのうねり

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>面精度  $\lambda/20$  とは、最大形状誤差 (PV 値) が (検査) 波長の 1/20 ということ。干渉計で測定している場合、多くの場合検査 波長  $\lambda$  は 0.633 [ $\mu$ m] なので  $\lambda/20$  は 0.032 [ $\mu$ m] となる。





図 4.2: 測定システムの構成 -(上: 実物、下: 模式図)

は、以下で述べるよう非常に再現性が良く、そのため、鏡面の形状測定データからオプティカルフラットの形状測定データを差し引くことで、ステージ揺らぎを取り除くことが可能である。



図 4.3: ステージの揺らぎ

4.3.2 正反射型レーザー変位計

原理

正反射型のレーザー変位計は、その基本原理に三角測量を用いており、発光素子と光位置検出素子(PSD) の組み合わせによって構成されている(図4.4左))。発光素子には半導体レーザーを用いており、投光レ ンズを通して集光したレーザー光を測定対象物に投影し、その反射光を受光レンズを用いて PSD 上に結 像させる。図4.4左図のように測定対象物との距離が変化すると、 PSD 上の像の重心位置が変移するの で、その変化量から三角測量によって測定対象物までの距離を割り出すことができる。しかし、重心を 用いているためゴーストや迷光によって、測定精度が低下してしまうため、対象物が鏡面やガラスなど の非常に表面精度のよいものでないと測定することができない。

正反射型のレーザー変位計は、PSD上の重心を求めるといる比較的簡易な方法を使って測定している ため、50kHzという高速でサンプリングを行うことができる。そのため、本測定システムのように対象 物を動かしつつ測定を行う場合でも精度良く測定することができる。また、測定対象物までの距離を比 較的長くすることができることも特徴の1つである。表4.1に正反射型レーザー変位計の仕様をまとめ る。



正反射型

共焦点型

図 4.4: レーザー変位計の測定原理

#### 測定精度

4.2でのべたように、同じ角分解能を得るために必要な表面の PV 値は表面波長スケールによって大き く異なる。言い換えれば、どの程度の形状まで測定できるかによって補正効果を確認できる表面波長ス ケールが決まってしまうので、より高い測定精度が必要となり測定精度や再現性は正しく見積もってお く必要がある。

	LC-2430	LT-8010
測定範囲	$\pm 0.5 \; [\mathrm{mm}]$	$\pm 0.3 \; [\mathrm{mm}]$
作動距離	$30 \ [mm]$	$5 \; [mm]$
スポット径	$30{ imes}20~[\mu{ m m}]$	$\sim 2 \ [\mu m]$
分解能	$0.02~[\mu { m m}]$	$0.1~[\mu { m m}]$
サンプリング周波数	$50 \mathrm{kHz}$	$1.4 \mathrm{kHz}$
測定平均回数	1~131072 回 (18 段階切換)	2/16/128 回 (18 段階切換)

表 4.1: レーザー変位計の仕様

本測定システムは測定対象物を動かしながら測定しているため、レーザー変位計単体の測定精度だけ では不十分であり、前章で述べたようなステージの揺らぎや、移動する際に振動を含めた測定システム 全体としての精度を求めなければならない。そのため、以下に示すような方法で測定精度と再現性を調 べた。

- 測定精度オプティカルフラットの測定を続けて数回行い、その平均値からの差分をとり測定誤差の頻度 分布を調べることでシステム全体の精度を見積もる。
- 再現性 オプティカルフラットの測定を、一度セットアップを崩し日を新ためて測定することで再現性を 調べる。

このようにして測定した結果を、図 4.5-4.6に示す。このように、測定精度は  $\sigma$ =0.09 [ $\mu$ m]、再現性は  $\sigma$ =0.32 [ $\mu$ m] であることがわかった。このことから、正反射型のレーザー変位計を用いた測定システム では、 10 [mm] 程度の表面波長スケールまで鏡面精度が 1 分角以下に達していると判断することができ る。

4.3.3 共焦点型レーザー変位計

原理

共焦点型レーザー変位計とは、測定対象物の表面で反射したレーザー光の焦点を合わせることで対象 物までの距離を測定する方式を使っている。

共焦点型レーザー変位計は図 4.4右図に示したような内部構造を持っており、光源から発射されたレー ザー光はハーフミラー、対物レンズを通り対象物表面で小さな像を結ぶ。レーザー光は、反射して再び ハーフミラーまで戻り、直角に反射されピンホールの位置で一点に集光されるため、ピンホールを通過 し受光素子に到達する。対象物までの距離が変動すると、反射した光はピンホールの位置で集光されず、 ぼやけるため、ほとんどの光はピンホールを通過できず、受光素子にはわずかな光しか到達できない。 このような原理を用い、対物レンズを音叉をによって機械的に動かすことで、レンズがどの位置にある とき、光がピンホールを透過するかを検出することで測定対象物までの距離を測定している。このよう に、測定対象物と焦点の合うレンズ位置を検出しているので、三角測量方式の変位計では測定が難しかっ た表面の荒れや、色、傾きのある対象物でも高精度で測定することができる。



図 4.5: 測定精度

図 4.6: 再現性

正反射型のレーザー変位計と異なり、共焦点型レーザー変位計は焦点を合わせるという複雑な過程を ふむため、サンプリング間隔を小さくすることができない。また、作動距離も 5 [mm] と非常に短く、正 反射型に比べて最小分解能も悪くなっている。共焦点型レーザー変位計の仕様を表 4.1にまとめる。

測定精度

正反射型のレーザー変位計と同様に、ステージも含めたシステム全体の測定精度と再現性を調べる。 測定の結果、測定精度は σ=0.07 [µm]、再現性は σ=0.1 [µm] となり (図 4.7,4.8)、正反射型のレーザー 変位計と比べると測定精度、再現性ともに若干良いことがわかった。これは、正反射型のレーザー変位 計が測定原理に三角測量を用いているため、共焦点型の変位計に比べて測定対象物に傾きがあると対象 物までの距離を見誤りやすいことを示している。本測定では、治具自体の傾斜を補正してしまっている ためにこのような効果が現れてしまう。

本システムは測定対象物を移動させながら測定を行っているため、ステージの移動速度と測定平均回数によって実効的なスポット径の大きさは、実際のスポット径の2 [µm] とは異なる。表 4.2にステージ 速度を 1-5 と変えたときの移動速度と実効的なスポット径を示す。ただし、取得したデータは 128 回平 均したものである。

このように、速度を上げるほど実効的なスポット径の大きさは大きくなるので、表面形状をなまして見ていることになり、実効スポット径よりも細かな形状は測定できない。実際に、アルミ基板の表面をステージ速度 1-5 と変化させて測定した結果を図 4.9に示す。

このように、速度を上げるほど表面の形状はなまされて測定されていることがわかる。この結果をより定量的な比較を行うために、速度 2-5 で測定した結果と、速度 1 で測定した結果を測定点数が同程度

# 第4章反射鏡の形状補正



図 4.7: 共焦点型レーザー変位計を用いた時の測定 図 4.8: 共焦点型レーザー変位計を用いた時の再現 精度 性

速度	移動速度 ( [mm]/s)	実効的なスポット $径\left(\left[\mu\mathrm{m} ight] ight)$
1	0.04	4
2	0.08	7
3	0.16	15
4	0.32	30
5	0.64	60

表 4.2: 並進ステージ移動速度と実効的なスポット径の関係

になるように bin まとめしたもを比較した。図 4.10に速度 1 で測定した結果を bin まとめしたものと、 速度 2-5 で測定したものそれぞれの平均値からの差分をとり RMS を求めた結果を示す。

その結果、実効スポット径が変わることによって測定される形状がなまされるだけでは説明できない ような実際よりも表面の凹凸をを小さく見積もっているという結果が得られた。図4.10で示したような 形状を小さく見誤る効果は、共焦点型のレーザー変位計が焦点を合わせることで測定対象物までの距離 を測定しているために、正反射型に比べて1点の測定にかかる時間が長いためにおこると考えられる。 本システムのように対象物を動かしつつ測定する方法では、焦点を完全に合わせきれていないために、 速度をあげるほど対象物までの距離を小さく見誤っていることを示している。このように、細かな表面 形状を測定するためには、ステージ速度はできるだけ遅い1で測定するか、1点1点ステージを止めて 測定する必要がある。しかし、当然ながらステージ速度を遅くするほど測定にかかる時間は長くなり、 作業性が悪くなる。本測定で測定したい形状のうち大部分は切削面のような表面の荒らさではなく、母 線全体にわたるような大局的なので、局所的な形状を厳密に測定できなくても大局的な形状を正しく測 定できれば、ステージ速度を早くしても問題ない。そこで、ステージ速度を5に設定し表面の細かな形



図 4.9: 速度の違いによる表面形状の見え方 -上段が速度1で放電加工面を測定した場合にえられる形状、下の段へ行 くほど速度は2,3,4,5 と早くなっており同じように放電加工面を測定した。



図 4.10: 速度の違いによる測定誤差 -- 白丸:速度1で測定した結果を各速度で測定点数が同じになるように bin まとめ したものから求めた RMS、黒四角: それぞれの速度で測定して得られた結果から求めた RMS

状に影響されないようにするために表面の滑らかな反射鏡面を測定し、同じ位置を10 [mm] 毎にステージをとめて測定(定点測定)することで大局的な測定精度を検討した(図4.11)。

図 4.11からもわかるように、ステージ速度 5 で測定した結果と定点観測した結果は非常に良く一致している。この結果は、速度を早くすると焦点をあわせることができなくなるという上述の結果と一致し



図 4.11: 定点測定 -実線は反射鏡鏡面を speed=5 で測定した結果。白丸は 10 [mm] 毎に定点観測により得られた結果。ど ちらもステージの揺らぎは引いていない。

ており、鏡面のような滑らかな面は測定距離の変化が緩やかなため速度を上げても形状を正確に測定で きることを示している。しかし、鏡焦点型のレーザー変位計は、アルミ基板や放電加工面の測定に用い ることを目的としており、荒れた面に対しても早い速度で測定できることが望ましい。そこで、図 4.9の 速度5で測定した値を 0.2 [mm] 毎に平均し、同じように 0.2 [mm] 毎に平均した速度1の値との差をと り RMS を求めた。この値は速度5 で測定した測定点を、 0.2 [mm] 毎に平均した値の信頼度を示してお り、速度による違いがない理想的な場合には0になる。この値を求めると、 0.56 [µm] となり速度5 で 測定し得られた値 (0.2 [mm] 毎に平均した値) は、 0.56 [µm] 程度の誤差を持つことになる。本測定で は、1分角を切る角分解能を目指しており、典型的には表面形状を1 [µm] 以下に補正することを目指し ている。 0.56 [µm] という値は必ずしも充分な値ではないが目標とする測定を行うことはできる。

以上の結果をふまえ本論文では、局所的な表面形状を厳密に測定する場合はステージ速度1を、大局 的な形状を測定する場合はステージ速度5を使う。

# 4.4 望遠鏡への導入を目指した反射鏡形状補正支持システムの検討

#### 4.4.1 ASTRO-E スペアミラーを用いた補正効果の検討

図 4.12のように反射鏡の鏡面よりも充分に平らなガラスのリファレンス面を用意し、様々な形状のお もりをのせ、反射鏡をガラス棒に押しつけることで形状補正効果を検討した [9]。測定は、レーザー変位 計を用いて行ない、反射鏡をリファレンス面に押しつける加圧物質として以下の3種類を用いた。本

 ・ 円柱棒 (φ10 [mm], 長さ 120 [mm]) → 図 4.13

- ブロック (10 [mm] 角) → 図 4.14
- 小球 ( $\phi=3 \text{ [mm]}$ )  $\rightarrow \boxtimes 4.15$

それぞれ重さは異なるので、 ASTRO-E の反射鏡表面の 5  $[\mu m]$  の凹凸を補正するために必要な 8 [gw/cm]の荷重となるように、円柱棒と小球はさらに上から加圧した。



図 4.12: 支持方法 - 「剛体」支持と「多点」支持は8 [gw/cm]の荷重となるように加圧した。

円柱棒を用いた支持具は、反射鏡母線方向に沿って抑えることが可能である。それに対し、10 [mm] 角のブロックや  $\phi$ 3 [mm] の小球を用いた支持具は、多点で抑えることができ、反射鏡の形状によらず各 点に独立に均等な荷重を加えることが出来るといった利点がある。各々の加圧物質による形状変化の様 子 (右図) と法線揺らぎの変化 (左図) を図 4.13、4.14、4.15に示す。上段、中段、下段はそれぞれ異な る反射鏡に対し補正を行った結果で、黒線が加圧前、赤線が加圧後の形状を示す。

このように円柱棒を用いた剛体による支持では、多少の加圧による補正効果は見られるものの形状補 正がなされたとはいいがたい。10 [mm] 角ブロックを使った場合、大きな振幅のうねりは補正されるが、 かわりに間隔、振幅の小さな凹凸があらわれる。この凹凸は10 [mm] ブロックによって加圧されている 位置に対応しており、反射鏡に均一に力がかかっていないことを表している。小球を用いた形状補正で は、3種類の加圧物質のなかではもっとも顕著な補正効果がみられ、さらに10 [mm] 角ブロックによる 加圧時に見られたような小さな凹凸もみられなくなっている。各支持方式の補正前と補正後の法線揺ら ぎから望遠鏡の HPD を見積もった結果を、表 4.3に示す。

これらの3つの支持方法すべてに共通した特徴として、補正前の反射鏡鏡面に表面波長スケールの小 さな局所的な凹凸が存在している場合、その様な形状の補正は非常に困難であると言える。

しかし大局的な構造のみに着目すると、加圧物質を変える事で形状補正効果に違いがあらわれる。具体的には、剛体による支持よりも多点支持を用いた場合の方が高い補正効果を得ることができ、多点支持でも加圧間隔を小さくするほどより大きな補正効果が得られるという結論がえられた。

このような、剛体による支持よりも独立な多点による支持の方が高い補正効果を得られたことは、反 射鏡に厚さむらが存在していることを示唆している。反射鏡は、アルミ基板、エポキシ、金の鏡面の3

支持方法	質量	HPD( <b>秒角</b> )		
	[g]	補正前	補正後	
円柱棒	10	100	90	
10 [mm] <b>角ブロック</b>	$8.2 \times 9$	91	73	
$\phi 3 \; [mm]$ 小球	$0.03 \times 30$	101	56	

表 4.3: 各支持方式での HPD の補正効果 -円柱棒と  $\phi$ 3 [mm] 小球は 8 [gw/cm] の荷重になるようさらに上から加圧 した。

層から構成されている。金の鏡面は厚さ 0.1-0.2 [ $\mu$ m] 程度なので問題にならないが、厚さ ~150 [ $\mu$ m] の アルミ基板や、金の鏡面とアルミ基板を接着している厚さ 10-20 [ $\mu$ m] のエポキシ層は、今補正しようと している 5 [ $\mu$ m] 程度の厚さむらをもっていると思われる。反射鏡に厚さむらが存在していると、剛体に よる支持を用いた場合母線方向に沿って均一に加圧することが出来ず、厚い部分により大きな圧力が加 わり薄い場所は最悪の場合何も力が加わっていない状態になる。このため、線支持よりも 10 [mm] 間隔 の多点支持、さらに 3 [mm] 間隔の多点支持の方が高い補正効果を得ることが出来たと考えられる。



図 4.13: 円柱棒による形状補正例 -上段、中段、下段はそれぞれ異なる反射鏡に対し補正を行った結果で、黒線が加圧 前、赤線が加圧後の形状を示す。





ブロックによる形状補正例]10 [mm] 角ブロックによる形状補正例 -上段、中段、下段はそれぞれ異なる反射鏡に 対し補正を行った結果で、黒線が加圧前、赤線が加圧後の形状を示す。





隔の多点支持による形状補正例]3 [mm] 間隔の多点支持による形状補正例 -上段、中段、下段はそれぞれ異なる 反射鏡に対し補正を行った結果で、黒線が加圧前、赤線が加圧後の形状を示す。

4.4.2 テストプレートの製作

図 4.1(d) のような支持を実現するためには、4.4.1で述べたような弾性体を用いた連続体支持を確立 しなければならず、この支持方式の確立は本論文で検討している新支持方式を用いた望遠鏡開発のため の鍵となる検討課題である。このような検討をはじめから上下2段の図 4.1(d) のような上下2段型のア ライメントプレートで行うことは、測定の面からも非常に困難である。また、スリットの形状などの検 討も行わなければならない。このようなことからまず手始めに、テストプレートの製作を行った。テス トプレートは、強度、スリット形状の精度、スリット幅の3点に注意をはらい製作した。

スリット 形状の検討

望遠鏡の反射鏡の半径方向の間隔は典型的には、1 [mm] 程度であるが図 4.1(d) のような支持を実現 するためには、この間隔のなかに基準面となる面と反射鏡を背面から支える支持機構を組み込まなけれ ばならない。ことを考慮すると、反射鏡を押し付けるスリットとスリットの間の梁の厚さは1 [mm] 以 下でなければならない。また、ASTRO-E の厚さ 170 [ $\mu$ m] の反射鏡の典型的には 5 [ $\mu$ m] 程度の振幅を もつ鏡面のうねりを補正するためには、反射鏡の母線方向に沿って 8 [gw/cm] の荷重を加えればよいこ とがわかっている [9]。本測定で目指している結像性能は <60 秒角であり、反射鏡のリファレンス面と なるプレートの梁部分が 4 [ $\mu$ m] 程度たわんでしまうとそれだけで 60 秒角を越えてしまうため、最低で も梁のたわみ量はこれ以下にしなければならない。このようなことを検討するために、荷重と梁のたわ み量の検討を行う。プレートの梁の断面が長方形だとして、幅を b、厚さ h とすると、部材の断面 2 次 モーメント  $I_{square}$  は、

$$I_{square} = \frac{1}{12}bh^3 \tag{4.4}$$

となる。これより、両端が固定された梁の均等荷重によるたわみ最大たわみ量 *z<sub>max</sub>* は、*w*を単位線 分あたりの荷重、*l*を部材の長さ、*E*をヤング率とすると、

$$z_{max} = \frac{12wl^4}{384Ebh^3}$$
(4.5)

となる。この式から、幅1 [mm]、厚さ1 [mm]、長さ100 [mm]の大きさの部材に8 [gw/cm]の荷重 を加えた時の最大たわみ量  $z_{max}$ を求めると、材質にアルミニウム  $(E = 7.03 \times 10^{10} Pa)$ を選んだ場合、 350 [ $\mu$ m] もたわんでしまうことになる。工作機械の刃に使われるような非常に硬度の高いタングステン カーバイト  $(E = 53.44 \times 10^{10} Pa)$ を用いたとしても、梁は50 [ $\mu$ m] 近くたわんでしまう。梁の強度を持 たせるために反射鏡の間隔を広げたと、するとたわみ量は厚さの3乗に比例して大きくなるので5倍程 度に広げなければなず、集光力は1/5倍に低下してしまうことになる。梁のたわみ量を目標とする<60 秒角の角分解能や、円錐近似使っていることにより生じる19秒角と同程度の角分解能を実現するために は、梁のたわみ量は1 [ $\mu$ m] 以下おさえなければならず、反射鏡の光軸方向の長さを短くしたり、反射 鏡の間隔を広くすると言ったような、抜本的な変更を加えなければならない。しかし、現状はこのよう な検討を行なう段階に至っておらず、まずは梁のたわみの効果を無視出来るようにし、反射鏡の形状を 補正できるか否かを検討すべきである。そこで本論文では、テストプレートの製作にあたり梁のたわみ の効果を出来るだけ取り除き、押さえつけによる形状変化の効果だけを測定するためにプレートの梁は 十分に厚くする。図 4.16に ASTRO-E の反射鏡の測定から求めた典型的な表面形状誤差の大きさである 5 [µm] の形状を補正するために必要な 8.0 [gw/cm] の荷重を加えた場合の梁の厚さと最大たわみ量との 関係を示す。



図 4.16: 梁の厚さと最大たわみ量の関係 一青破線がプレートの材質にアルミを選択した場合、赤実線がステンレスを選択した場合の梁の最大たわみ量と厚さの関係を 4.5式の関係を使い求めた。

ただし、図 4.16の赤い実線は材質にステンレスを選択した場合、青い破線はアルミを選択した場合の 関係を示している。このように、たわみ量を 1 [µm] 以下にするために必要な梁の厚さは、ステンレスを 用いた場合は 5 [mm]、アルミニウムを用いた場合は 7 [mm] にしなければならない。本論文では重量は 増加してしまうが、強度、加工性、入手しやすさの点からテストプレートの材質はステンレスを選択し た。表 4.4に本論文中に出てくる主な材質の典型的なヤング率と比重をまとめる。

	<b>ヤング</b> 率 (×10 <sup>10</sup> Pa)	比重 $(kg/m^3)$
アルミニウム	7.03	2.7-2.9
ステンレス	19.7	8.0
タングステンカーバイト	53.4	19.2
金	7.8	19.8
弾性ゴム	$(1.5-5.0) \times 10^{-5}$	1.1-1.3
エポキシ (EPO-TEK 301-2)	$>1.4 \times 10^{-3}$	1.0 - 1.5

表 4.4: ヤング率と比重

テストプレートは1 [µm] 以下のたわみ量を目指していることからもわかるように、高い加工精度を必

要とするため、加工方法にも注意を払わなければならない。このような高い精度で加工できる方法とし て放電加工がある。放電加工は一般的な切削や型抜きを使った加工よりも材料のゆがみが少なく、今回 製作したスリット幅 200 [µm] のような複雑で微細な構造をもつものでも、精度よく加工することができ る。スリット断面に反射鏡を押し付けて形状を補正することを考慮すると、スリット幅はできる限り狭 くしなければならない。しかし、スリット幅が狭くなるほどスリットに反射鏡鏡面を傷つけることなく 挿入することが困難になる。

このような検討を行うためにテストプレートには、幅が 0.2 [mm] から 1 [mm] まで 0.1 [mm] 間隔の スリットと 5 [mm] の幅のスリットを空けた (図 4.17)。



図 4.17: テストプレート

また、テストプレートとともに反射鏡を通した状態で鏡面の形状測定が行えるように図 4.18のような 治具の製作も合わせて行った (B参照)。この治具はテストプレートを同時に 4枚保持することができ、 テストプレートの最下のスリットが R100 [mm] と 150 [mm] の円柱になるように設計した。反射鏡の形 状測定は、鏡面が地面に対し水平になるように置いた状態で下からレーザー変位計を使って測定してい るので、このような形状の治具が必要となる。

## スリット 断面の面荒さの検討

今までの議論は、スリットの全長にわたる形状といったような大局的な形状について行っていた。しかし、反射鏡の形状を精度よく補正するためには、より細かな形状である面荒さについても検討しなければならない。このようなことを考慮し、放電加工はカット数や加工時の電圧によって面精度を上げることができるので、今回のプレート加工には面精度の高い加工を選んだ。図 4.19に倍率 500 倍の顕微鏡で撮影した放電加工の加工面を載せる。

このように、放電加工で加工した面には、 1-10 [µm] 程度のくぼみが無数に存在している。この面を レーザー変位計で測定すると図 4.21上段のようになり、表面形状の平均値からの差分をり求めた頻度分 布を図 5.2左上に示す。また、このときの RMS をとると 1.7 [µm] となる。



図 4.18: テストプレート用治具



しかし、図 4.19や図 4.21上段からもわかるように、加工表面には突起よりもくぼみの方が大きくなっており、反射鏡を押し付けてたときに形状を悪化させるのは表面に対し上に凸な成分のみなので、今求めた RMS ほど影響はないと考えられる。

本測定で目指す角分解能は <60 秒角であり、大雑把に言えば表面形状誤差を 1  $[\mu m]$  以下に補正しな ければならない。そのためには、スリット断面の凹凸を 1  $[\mu m]$  以下になるように加工するか、もしくは スリット断面の凹凸の間隔を十分狭くしなければならないことになる。一辺の長さが Am、厚さ hm の 平板の中心部に集中荷重 Wkgf の荷重を加えたときの平板の最大たわみ量 z は、

$$z = 0.0116 \times \frac{WA^2}{D} \tag{4.6}$$



図 4.21: スリットの表面形状 -上段:放電加工面、中段:ピーニング処理を行った面、下段:研磨面。y軸プラス側がプレートから突き出しているということを示している。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{4.7}$$

となる [7]。ただし、 E はヤング率、  $\nu$  はポアソン比である。ここで、スリット断面に存在する突起 と反射鏡の表面形状に与える影響を検討するために、以下のような仮定を用いた。スリット断面の凹凸 のうち反射鏡の形状に影響を与えるものは比較的大きい突起のみとし、このような突起は図 4.22のよう に一定の間隔 A で存在しいるとする。突起部を中心とする一辺が A の微小正方形の平板を考えると局所 的に正方形の中心に集中荷重が加わっていると仮定することができ、式 4.6を用いて考えることが出来る このとき、母線方向に沿って 5 [ $\mu$ m] の形状変化を起こすために必要な 8 [gw/cm] の荷重を加えたとす ると、突起の間隔が 10 [mm] を超えなければ 1 辺の長さが A の平板に加わる集中荷重は 8gw 以下にな る。そこで、 8gw お集中荷重を加えた場合の突起の間隔 A とたわみ量 z の間には、図 4.23のような関 係が成り立つ。

このように、形状に影響を及ぼすような突起の間隔が 200 [µm] 以下ならば、反射鏡の間隔が 1 [µm] となる。図 4.21から比較的大きな突起の間隔を見積もると、 100-200 [µm] 程度になっていることから、 スリット断面全体にわたって図 4.21上図程度の凹凸が存在していたつすれば放電加工の加工面のままで 問題ないといってよい。

しかし、局所的に大きな突起が存在すると、その部分を支点として反射鏡の形状を大きくゆがめてし まう可能性がある。そこで、スリット断面の面精度を上げるためにピーニング法による表面形状の改善 を試みた。ピーニング法とは、微小な粒子を高速で対象物に衝突させることで、表面を叩き、圧縮し、 研磨することで表面をならす方法である。放電加工面にピーニング処理を施した面の様子を図 4.20に示



図 4.23: 突起の間隔とたわみ量の間隔

す。ただし、倍率は図 4.19と同じ 500 倍で撮影した。また、ピーニング処理を施した表面をレーザー変 位計を用いて測定結果を図 4.21中段に、表面形状の頻度分布を図 5.2右上図に示す。表面形状の RMS を とると 0.8 となり半分以下になっており、目標とする 1 [µm] 以下の表面精度に達していることが分か る。

プレートの加工面ではないが、研磨法で加工した面を測定した結果を図 4.21下段にしめす。このとき の表面形状の平均値からの頻度分布を図 5.2下図に示したようになり、 RMS は 0.3 [µm] となる。この ように、放電加工面やピーニング処理を行っても研磨した面の面粗さと比べると十分な精度とは言えな い。しかし、 200 [µm] のような小さなスリットの内部に大局的な形状を維持したまま研磨を行うことは 非常に困難であることから、本論文ではみぞ内部の面精度は「放電加工のみ」か「放電加工 + ピーニン グ」のどちらか方法で加工し、押さえつけたときの補正効果の違いを測定する。

最後に、	放電加工のみ、	放電加工+ピー	-ニング処理、	研磨のそれぞれの	RMS と凹凸の最ス	大と最小値
<b>の差を表</b> 4	.5にまとめた。					

	RMS	Peak to Valley		
放電加工	$1.7~[\mu {\rm m}]$	$20 \; [\mu m]$		
放電加工 + ピーニング	$0.8~[\mu { m m}]$	$8 \; [\mu m]$		
研磨	$0.3~[\mu m]$	$1 \; [\mu m]$		

表 4.5: それぞれの RMS と Peak to Valley の値



図 4.24: 表面形状の頻度分布 - 図 4.21から求めた頻度分布。左上図: 放電加工のみ、右上図: ピーニング処理を行った面、 下図: 研磨面

#### 4.4.3 ゴムフィラーの製作

ゴムの選択

フィラー用のゴムは、1 [mm] 以下のスリットに入れることができ、かつ反射鏡に均一に圧力を加え なければならならず、そのためにもゴムは精度よく自在に加工できなければならない。このような条件 を満たすゴムとして、表 4.6に示したような 4 種類のゴムを選択した。これらのゴムは、シリコン系の RTV ゴムの主剤と硬化剤からなる 2 液性タイプのゴムで、硬化時に反応副生物がなく、硬化時の線収縮 率が 0.1% 以下という非常に優れた特性を備えおり、複雑緻密で厳しい寸法精度が要求される作業に適し ている。これらの RTV ゴムは、希釈剤となる RTV シンナーを添加することで硬さを変えることができ る。

この4種類のゴム以外にもさらに2種類のゴムをテストした。1つ目はKE-101で、上記の4種類の ゴムと同様に2液性タイプで硬化時に反応副生成物を発生せず、硬化反応が均一に進行し深部硬化する。 そしてもう1つがKE-4908SC-Wで、1液性のタイプで大気中の水分を吸収することで硬化する。この 2つのゴムは他の4つに比べてアウトガスが非常に少なく、実際の衛星搭載を考慮している。以下に、6 種類それぞれのRTVゴムの特徴をまとめる。

	硬化前								
	外観	粘度	potlife	混合比	硬化時間	外観	比重	硬さ	outgas(TML)
		Pa·s	分		(時間 /°C)			D type A	%
KE-1300	白色	90	90	10:1	24/23	白色	1.10	40	-
KE-1300T	半透明	90	90	10:1	24/23	半透明	1.09	40	-
KE-1600	灰白色	170	150	10:1	24/23	淡青色	1.27	45	-
KE-1603(A,B)	透明	A80, B50	90	1:1	24/23	透明	1.03	28	-
KE-101(A,B)	透明	7	60	1:1	4/23	透明	1.02	40	0.357
KE-4908SC-W	白色	-	-	-	-	白色	1.08	46	0.396

表 4.6: RTVゴム -(TML(Total Mass Loss): 重量減少値)

#### ヤング率測定

表 4.6で示した RTV ゴムのうち、 KE-1300、 KE-1300T、 KE-1600、 KE-1603(A,B) の 4 種類のヤ ング率を測定した。ヤング率は、製作したゴムフィラーを用い実際に形状補正を行なう際に、どの程度 スリットに押し込めば希望とする圧力を加えることができるか知るために求めておかなければならない。

ヤング率を直接測定する前に、デュロメータ タイプ A を用い硬さ測定を行なった。デュロメータは硬 さ測定に広く使われている押しバネ式の硬さ試験機でありなかでもタイプ A は、一般ゴムや軟質物質の 測定に適している。デュロメータによって測定した硬さは、ヤング率と線形の関係を持つため1種類の み測定しておけば全てのゴムに対しヤング率を求めることが出来る。 4 種類それぞれの RTV ゴムに対し RTV シンナーを 0%、 10%、 30%、 50% 添加し、硬さを変えた 4 通りのゴムを同じ大きさの型<sup>2</sup>に流し込み製作した。製作したゴムをデュロメータ タイプ A を用いて 測定した結果を図 4.25に示す。



図 4.25: RTV ゴムの型さと RTV シンナー添加量の関係 -デュロメータ タイプ A を用い、4 種類の RTV ゴムに RTV シンナーを添加し硬さを測定した。白抜き丸:KE-1300T、赤三角:KE-1600、緑丸:KE-1603、青星:KE-1300

このように、 KE-1600 が最も硬く<sup>3</sup>30-65 の範囲で変化しているのに対し、それ以外のゴムの硬さほ ぼ等しく、 20-40 の範囲におさまった。

次に、ヤング率の測定を行なった。ヤング率の測定は、 KE-1603 を用い全く希釈していないものと、 50% 希釈した 2 種類の試験片を製作し行なった。試験片は高さ 26 [mm]、底面が 33 [mm]×33 [mm] と なるように製作した。製作した試験片を図 4.26のように、荷重を加えたときの変化量をハイトゲージを 使い測定した。

このようにして求まった変化量 z は加えた荷重 W と、

$$z = \frac{Wh}{ES} \tag{4.8}$$

のような関係を持つことから、ヤング率を求めることが出来る。ただし、 h は試験片の厚さ、 S は試験片の断面積、 E はヤング率である。その結果、全く希釈していない KE-1603 のヤング率は  $2.5 \times 10^6$  [N/m<sup>2</sup>]、 50% 希釈した物は  $3.7 \times 10^6$  [N/m<sup>2</sup>] と求めることができ、デュロメータ タイプ A から求めた硬さ H と ヤング率の間には、

$$E = 1.2 \times 10^5 H - 2.29 \times 10^6 \tag{4.9}$$

の関係が成り立つことがわかった。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ゴムフィラー用の型とは異なる。表面の大きさは 7cm×3cm で厚さは流し込むゴムの重量で制御した。

 $<sup>^{3}</sup>$ KE-1600 は硬化温度によって固まった後の温度が異なる。本測定で使用した 4 種類の RTV ゴムは、すべて  $70^{circ}$ C で硬化した。



図 4.26: ヤング率測定のセットアップ

## 金型の製作

ゴムの型を作るためには、まずゴムフィラーの形状を決定しなければならない。ゴムフィラーを用いる理由を整理すると、反射鏡の形状補正を行うために幅 0.2-1.0 [mm] 程度のスリットに反射鏡を挿入しその状態でゴムフィラーで背面から反射鏡をスリット断面に押し付けるということである。そこで図4.27のようなくさび型の形状を選択し、上辺は 8 [mm] を固定し傾き角  $\theta$  を変えることでゴムフィラーの厚さを変えた。このような方法で厚さが h が 0.4 [mm]、 0.6 [mm]、 0.8 [mm]、 1.0 [mm]、 1.2 [mm]、 1.4 [mm]、 1.6 [mm] の 7 種類のゴムフィラーを製作できる金型を製作した (A参照)。



図 4.27: ゴムフィラーの形状 -上辺の 8 [mm] を固定し  $\theta$  を帰ることで厚さ h を変えた。

ゴムフィラー製作手順

次のような手順でゴムフィラーの製作を行なった。

- 1. 主剤と硬化剤を混合する。このとき硬化後の硬さを下げる必要があれば希釈剤となる RTV シンナー を添加する (図 4.28)。
- 2. 混合したゴムを撹拌する。

第4章反射鏡の形状補正

- 3. 真空槽に入れ脱泡を行なう。チャンバー内の気圧が 2×10 Torr に達すると液面に変化が現れ脱泡し はじめる (図 4.28)。このとき、液体の体積は倍以上に増加するので大きめの容器を使うようにす る。また、硬化前の粘性が低いほど脱泡時の体積膨張率が大きく脱泡が困難になり時間がかかる。
- 4. 脱泡完了後、真空槽からゴムを取り出し、金型にゴムを流し込む。このとき、ゴムの流動性をよくす るためにあらかじめ金型を加熱しておく。ゴムを流し込んだら上から蓋をし加圧する。

5. 硬化時間を早め、流動性を良くするために加熱する。硬化温度は 70°C で1時間加熱する。

6. 硬化後、恒温槽から取り出しふたを開け金型からゴムを取り出す。

完成したゴムフィラーの片面にマイラーフィルムを貼り付ける。このマイラーフィルムは、アライメ ントプレートのスリットにゴムフィラーを挿入しやすくするために用いる。マイラーフィルムを貼った 面を反射鏡背面と接触させて、マイラーフィルムをガイドにしゴムフィラーの先端部分をスリットに入 れる。その後、マイラーフィルムを引くとゴムフィラーをスリットに簡単に入れることができる。



図 4.28: ゴムフィラー製作手順



図 4.29: 主剤に硬化剤を添加した様子



図 4.30: 脱泡時の様子



図 4.31: 完成

# 第5章

# レプリカ法による反射鏡製作システムの構築

反射鏡は言うまでもなく望遠鏡の性能を左右する重要な部位であり、新望遠鏡を開発し製作するために 反射鏡製作システムを確立することは、本論文の重要な課題の1つである。前章でも述べたように既存 のASTRO-Eの反射鏡の表面形状にはいくつかの問題があった。本章では製作システムを確立するとと もに、これらの問題の原因を探る。さらに、前章で検討した新支持方式に見合った反射鏡の製作を行う。

# 表面形状劣化原因の究明

今までの形状補正効果の検討は主に、ASTRO-Eの予備の反射鏡を使い行っていた。この測定から、 反射鏡の表面形状にはいくつかの種類があり、その種類によって表面形状の補正効果のあらわれかたに 違いが見られた。このような角分解能の低下につながるような表面形状は大別すると2つの種類に分け ることができる。1つは反射鏡の母線方向全体にわたって存在するような、表面波長スケールの大きく 緩やかな傾斜を持つ形状である。このような形状をもつ反射鏡は比較的補正しやすく、測定に用いた反 射鏡の多くにこのような緩やかな変化をもつ形状が見られた。しかし、必ずしも補正できるわけではな く、補正効果が現れないものも存在した。

そして、もう1つは上で述べたものと対照的に、局所的で急な傾斜を持つような形状である。このような形状は、すべての反射鏡に見られるわけではなく緩やかな形状に比べ存在確率は低いが、補正は難しく形状補正に成功した例は少ない。

反射鏡の形状補正をより的確に行うためには、上述した2種類の形状が製作段階のどの工程で発生したものなのか突き止める必要がある。とくに、補正の難しい局所的な形状は製作工程の段階から形状を 劣化させないような工夫が必要である。

## 厚さの異なる反射鏡の製作

前章で述べたように、150 [ $\mu$ m]のASTRO-Eの反射鏡では5 [ $\mu$ m]の形状を補正するためには8 [gw/cm] の荷重を加えなければならず、リファレンスとなるスリット間の梁は大きくたわんでしまう。このよう に、鏡面形状の補正しやすさや反射鏡の間隔が1 [mm] 程度しかないことを考慮すると、基板はできるだ け薄いほうが良い。しかし、薄ければ薄いほうが良いというわけではなく、反射鏡方位角方向のアライ メントプレート同士の支持間隔程度は形状補正効果が伝播し、かつ形状をたもてなければならず、ある 程度の強度をもたせなければならない。このように形状補正を行うことを目的とした新支持方式に合っ た基板の厚さを検討するために、150 [ $\mu$ m]のASTRO-Eの反射鏡よりも薄い、厚さ120 $\mu$ の基板を用 いて反射鏡の製作を行った。 5.1 レプリカ法の流れ

斜入射多重薄板型 X 線望遠鏡は、開口効率を高めるために反射鏡の基板を薄くし、動径方向に多数枚 積層する。しかし、薄い基板は研磨などの表面加工が困難である。このような薄い基板をもつ反射鏡の 製作に有効な方法がレプリカ法である。レプリカ法とは、平滑な母型(ガラスマンドレル)に反射膜を成 膜し、接着剤(エポキシ樹脂)を用いて薄板基板に離形・転写する技術であり、以下の工程に分けること ができる(図 5.1)。

基板の製作

- バリ取り
- ローラーによる粗成形
- 熱成形
- 2. ガラス母型 (マンドレル) に反射物質を成膜

3. 基板と反射膜の接着

- エポキシの噴霧
- 基板の圧着
- エポキシ硬化

4. 基板の剥離

ガラス母型上の薄膜がエポキシを介してアルミ基板へ転写されるレプリカ法によって製作された反射 鏡の鏡面は母型の表面形状を反映する。レプリカ法を用いることで薄く荒れた表面を持つアルミ基板で も、表面の滑らかな母型から鏡面を写し取ることで表面の滑らかな反射鏡面を得ることができる。

以下では反射鏡製作の各工程を詳しく説明し、母型やアルミ基板などの各工程での特徴的な表面形状 を検討する。








5. エポキシ噴霧



7. エポキシ硬化



2. ローラーによる粗成形



4.マンドレルに金を成膜





8.剥離

# 図 5.1: 反射鏡製作手順

**5.2** 反射鏡基板の製作

X線望遠鏡はWolter I型光学系を採用しており、反射鏡は回転放物面と回転双曲面を円錐近似した形状をしている。このため同じように円錐形状をしているASTRO-Eの基板では、反射鏡背面から荷重を加えたときの基板の応答が複雑になってしまい思うように、補正効果を検討することができなかった。 そこで本測定では、形状補正効果の検討を行うために基板の形状は円柱型を採用した。

基板の製作は、基板の切り出し、ローラーによる粗成形、熱成形の3つの工程から成り立っている。

5.2.1 バリ取り

基板の切り出しは文字通り、基板の外形を切り出す工程である。アルミ基板はローラーによる粗成形 ののち、熱成形を行うので外形の大きさがそろっていないと基板形状を劣化させる大きな原因となる。 そのため、基板はすべて放電加工で切り出している。

放電加工で切り出した基板は、刃物で切り出した基板に比べて端面のバリは格段に少なく小さいが、 まったくでないというわけではなく多少のバリは出る。基板の端面にバリが存在すると、外形がそろっ ていない場合と同様に熱成形の際に基板形状を劣化させる原因となる。このようなバリを取り除くため に基板端面のバリ取りを行う。切り出したアルミ基板は、はじめに図 5.2のようにルーターを使い荒くバ リ取りを行う。その後、 2000 番の紙やすりを使いルーターにを使う事で新たに生じたバリを取り除き、 きれいに仕上げる。



図 5.2: バリ取り - 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

#### 5.2.2 ローラーによる粗成形

切り出し、バリ取りを行ったアルミ基板を、図 5.3のようにローラーを通して円柱形に粗成形する。粗 成形の目的は熱成形用金型への基板の配置を容易にするためのものである。基板の外形がそろっていて も、金型の上に精度よく配置することが出来なければ形状を劣化させてしまう。



図 5.3: 粗成形 - 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

### 5.2.3 熱成形

ローラーで粗成形したアルミ基板は、反射鏡の形状に精密加工された母型(金型)に押し付け加熱する ことにより、目的とする形状に成形する。この工程を熱成形と呼ぶ。金型には、真空排気用の穴が開け られており、図 5.4のように基板の大きさに切り出したシリコンシート(ガスケット)を貼り、ロールし たアルミ基板をガスケットと同じぐらいの厚みとなるように積層し、ガスケットの枠の中に配置する。



図 5.4: 熱成形 - 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

その上からカプトンフィルムを貼り、密閉して真空排気を行うと、基板はカプトンフィルムの側から 大気圧<sup>1</sup>で円柱金型に押しつけられる。この状態で160 まで加熱し10時間加熱することで、基板は目 的とする形状に成形される。熱成形の際には、基板を重ねるため1枚1枚の基板の歪みや、基板の切断 面に生じるバリ、基板の間へのほこりの混入が形状劣化の原因となる。すでに述べたように基板は多数 枚積層して熱成形するため、内側の基板にこのような形状を劣化させる原因があると、その基板よりも 外側に積層した基板はすべて形状を劣化させてしまう。熱成形した基板の形状精度が、レプリカ鏡自体 の形状に大きく作用するので、熱成形における基板の選択、取扱には細心の注意を払わなければならな

 $<sup>^{1}</sup>$ 大気圧から 1Torr まで減圧したとすると、単体積当たり約 1kg/cm $^{2}$ の荷重が加わる。

L١。

# 5.2.4 熱成形金型の表面形状

レプリカ法で製作した反射鏡は、ガラス母型の表面形状を写し取るように、熱成形を行ったアルミ基 板は押し付けた熱成形金型の形状を大きく反映する。そのため、金型は精度よく加工されていなければ ならない。そこで、熱成形用金型の表面形状を共焦点型のレーザー変位計を用いて測定した。真空引き 用の穴を中心に10度間隔で母線方向の形状をマンドレル全周にわたって測定した。図 5.5に測定した結 果を平面に展開し3次元的に表現したものを、図 5.6に縦横の縮尺を合わせ2次元的に表現した金型表面 の形状を示す。このように、真空引き用の穴の周辺は多少ゆがんでいるものの、熱成形に使用する部分 は金型の中心部分がやや鞍型にくぼんでいるが、その大きさは1 [µm] 以下であり非常に高い精度で加工 されていることがわかる。このことから、熱成形した基板が金型の表面形状と同程度の形状まで成形す ることができれば、基板は1 [µm] 以下の凹凸に抑えることが出来ることを示している。



図 5.5: 熱成形金型の表面形状 (3 次元) - 熱成形金型の母線方向の形状を 10 度ごとに測定し、方位角方向に展開し 3 次元的に展開した。



図 5.6: 熱成形金型の表面形状 (2次元) 一図 5.5の母線方向の長さと方位角方向の長さの縮尺をそろえ 2次元的に示した。中心付近のくぼみは真空引き用の穴。

4.2 章で述べたように、反射鏡の形状を評価するために用いた法線揺らぎを使い、熱成形金型の形状を 評価する。図 5.5,5.6で求めた熱成形金型の母線方向の形状から、法線揺らぎを求めると図 5.7のように なり金型表面の平均的な法線揺らぎは、7.9 秒角となった。



図 5.7: 熱成形金型表面の法線揺らぎ - 母線方向の形状から 5 [mm] 毎に法線法線揺らぎ (HPW) を求めた。

この金型を用い、製作した基板がこの金型の形状を正確に写し取れたとすると、今求めた 7.9 秒角の 法線揺らぎから望遠鏡の角分解能を見積もると 20 秒角となり、熱成形を行ったアルミ基板は、バリやほ こりによって形状劣化が起こらなければ非常に高い角分解能を得る事ができる。

5.2.5 基板の表面形状

次に熱成形の前と後で基板の同じ位置を測定し、熱成形による基板形状の変化を測定した。図 5.8に熱 成形前の基板の母線方向の形状と熱成形後の形状を測定した結果を示す。



図 5.8: 熱成形による基板形状の変化 - 黒線がローラーによる粗成形のみの基板母線方向の形状、赤線が熱成形後の表面 形状を示している。

このように、熱成形前の基板表面に存在していた 5 [ $\mu$ m] 程度の PV 値が 1-2 [ $\mu$ m] まで補正されてい ることがわかる。図 5.8に示した熱成形後の形状は、熱成形時に積層した基板のうち金型に近い内側で熱 成形した基板だが、外側の基板と比較しても母線方向の形状はほとんど変わらない。これは、アルミ基 板は 1 [ $\mu$ m] 以下で厚さが均一であることを示している。基板の厚さむらが 1 [ $\mu$ m] よりも大きなスケー ルで存在していたとすると、厚さむらは外側に積層した基板ほど形状を悪化させるように働くからであ る。

熱成形金型と同じように、母線方向の形状から法線揺らぎを求めると、熱成形後の基板は金型よりも 悪くなり 16 秒角程度となるものの、熱成形前の基板の法線揺らぎ (約 100 秒角)と比較すると 1/6 以下 に補正されていることがわかる。本節のはじめに述べたように、熱成形金型の形状を完全に写し取るこ とができれば、基板の法線揺らぎも 8 秒角程度になるはずであり、法線揺らぎが 16 秒角まで劣化が見ら れることは、熱成形の工程に改善の余地が残っていることを示している。しかし、 16 秒角としても同じ 製法で製作している ASTRO-E の反射鏡の角分解能は表面形状誤差によって 19 秒角から 80 秒角まで劣 化していることを考慮すると、表面形状誤差を引き起こすもっとも大きな原因は基板自体にはなく、基 板の製作以降の工程でおきていると言える。

#### **5.3** 反射膜の成膜

反射物質の成膜は、スパッタリング現象を利用したスパッタリング法を用いてガラス母型の表面に金 を成膜する。スパッタリング現象は1842 年に Grove によって発見された現象で、固体ターゲットの表 面に高エネルギーの粒子を入射させると、この粒子の運動エネルギーを得て表面付近の原子・分子間で 衝突が生じ、そのエネルギーが原子・分子の結合エネルギーよりも大きい場合に表面からターゲット物 質が飛び出す現象である。スパッタリング法の詳細については、5.3.2章で述べる。

## 5.3.1 マンドレルの洗浄

本章の導入部でも述べたようにレプリカ法の最大の利点は、薄いアルミ基板に母型となるガラス母型 の滑らかな表面形状を写し取ることができることである。しかし、マンドレルの表面に汚れや水跡、傷 などがあると、マンドレルの表面形状とともにレプリカ法を用いることによってあわせて写し取ってし まい、結像性能や反射率を低下させる原因となる。そのため反射膜の成膜前に行うガラスマンドレルの 洗浄は、反射鏡の性能を決める重要な工程といえる。そこで、本章ではマンドレルの洗浄方法について 議論する。

マンドレルの洗浄においてもっとも注意深く取り除かなければならないものは、前回のレプリカ反射 膜成膜時に付着した蒸着物質の残りである。ちりや埃に比べて表面に残った蒸着物質は取れにくく、特 にマンドレル表面に傷があるとその部分に金が残り非常に剥がれにくくなる。マンドレル表面に金が残っ ているとその部分は、基板を剥離する際にも剥がれずに残っている可能性が高い。また、蒸着物質やご み以外にも洗浄に使うエタノールやイオン交換水の中に含まれている不純物にも注意しなければならな い。マンドレル表面に水滴が残っていると、乾燥した後もその部分には水跡が残る。

本論文では以下のような工程をとることにより、ガラスマンドレルの洗浄を行った。

第5章 レプリカ法による反射鏡製作システムの構築

#### 1. マンドレルに残った蒸着膜をテープで剥離

#### 2. テープで取れなかった蒸着物質をかみそりなどの硬いものを押し当ててとる

#### 3. イオン交換水で洗浄

#### 4. エタノールで洗浄

5. 再びイオン交換水で洗浄し表面の水滴をエアーで吹き飛ばす

#### 6. 恒温槽で乾燥

2.の工程では、ガラスマンドレルを傷つけないように注意しなければならない。かみそりは、反射物 質を削ぐのではなく、あくまで押し当てて取るために用いる。3.の工程では、マンドレル表面に付着し ている埃やごみ、剥がれた反射物質を洗い流す。4.の工程ではガラス表面に付着した油やテープの粘着 物質を取り除く。5.の工程では4.で使用したエタノールの内部に含まれている混入物を洗い流す。そ して、イオン交換水のなかに含まれている混合物を表面の水滴として残さないためにエアーを使って吹 き飛ばす。最後に80度のオープンで乾燥させる(6.)。

#### 5.3.2 金の成膜

洗浄し終わったガラス母型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ている (図 5.9)。膜厚のはターゲットとマンドレルの間にコリメータを置きマンドレルを自転させて制御している。

#### スパッタリング法の原理

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創られる。ここにターゲットを陰極として数 100 ~ 1000 V 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 マ中の陽イオンを陰極付近の陰極電位高下で加速させ、ターゲットに衝突させることによりスパッタリ ング現象を得ている。この現象で発生した粒子をスパッタ粒子といい、陽イオンー個あたりに発生する スパッタ粒子の平均個数をスパッタ率という。スパッタガスには、化学的に安定で他のガスよりも大き なスパッタ率が得られる 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、 10 eV オーダーの高いエネルギーを持つことである。このような高エネルギーの粒子に よって形成された薄膜は、表面での原子の移動が起こり易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に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成膜中の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。



4.マンドレルに金を成膜



蒸着前

蒸着後

図 5.9: 金の成膜 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

スパッタリング法にはいくつかの種類があるが、本論文では大阪真空社製のスパッタ装置を使用して いる(図 5.9)。本測定で使用している大阪真空社製の DC マグネトロンスパッタ装置は、放電空間に磁 場を掛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り、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、より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。

#### 5.3.3 マンドレルの形状測定

金を成膜するガラスマンドレル(母型)は、溶かしたガラスを円柱状に引き抜き、表面を液面の滑らか さを保ったまま固める引き抜き法で製作している。この方法で製作されたマンドレルは非常に平滑な表 面を形成することができるが、マンドレルの母線方向に大きなうねりを生じてしまう。すでに述べたよ うにレプリカ法は、マンドレルの表面形状を写し取るので、マンドレル表面の形状よりも平坦な反射鏡 を製作することはできない。つまり、使用したマンドレルの表面形状から求められる結像性能が、反射 鏡の結像性能の上限値となるので、ガラスマンドレルの表面形状を十分理解しておく必要がある。また、 反射膜の転写が成功したかどうかを知るためには、マンドレル表面に様々なうねりが存在しているので 反射鏡面の形状を測定するだけでは不十分である。レプリカ法において転写の良し悪しを調べるために は、対応するマンドレルの位置を測定し正しく形状を写し取れているかを調べなければならず、そのた めにもマンドレル形状を測定しておかなければならない。本測定では反射鏡製作に3つのガラスマンド レルを用いており、ID=1,2,3 というように通し番号を付けて管理する。

マンドレルの測定は、熱成形金型と同じように共焦点型のレーザー変位計を用い、10度ごとにマン ドレル母線方向の形状を測定した。測定の結果、マンドレルの表面形状はそれぞれのマンドレルによっ て大きく異なっており、ID.3のマンドレルがもっとも表面の形状がなだらかで、ID.2のマンドレルが もっとも表面の凹凸が大きいことが分かった。図 5.10に ID.2のマンドレルの表面形状を3次元的に表し たものを、図 5.11に動径方向の長さと母線方向の長さの縮尺をそろえた2次元形状図を示す。同様に、 ID.3のマンドレル表面の測定結果を図 5.12(3次元形状図)、5.13(2次元形状図)に示す。



図 5.10: ID.2 マンドレルの表面形状 (3 次元) - 熱成形金型の母線方向の形状を 10 度ごとに測定し、方位角方向に展開し 3 次元的に展開した。



図 5.11: ID.2 マンドレルの表面形状 (2次元) -図 5.10の母線方向の長さと方位角方向の長さの縮尺をそろえ 2次元的 に示した。



図 5.12: ID.3 マンドレルの表面形状 (3 次元) - 熱成形金型の母線方向の形状を 10 度ごとに測定し、方位角方向に展開し 3 次元的に展開した。



図 5.13: ID.3 マンドレルの表面形状 (2次元) -図 5.12の母線方向の長さと方位角方向の長さの縮尺をそろえ 2次元的 に示した。

このようにマンドレル表面には、典型的には 5-10 [µm]、形状の悪い部分では 10 [µm] 以上のうねりが 存在している。測定したマンドレル母線方向の形状から、マンドレルの法線揺らぎをもとめると図 5.14の ようになる。各マンドレルの平均の法線揺らぎを求めると ID.2 は 69 秒角、 ID.3 は 22 秒となる。この マンドレルを用いて反射鏡を製作し、アルミ基板にマンドレルの形状を正確に写し取れたとし望遠鏡の 角分解能に換算すると、 ID.2 のマンドレルは 3.2 分角、 ID.3 のマンドレルは 1.0 分角となる。このよ うに使用したマンドレルによって反射鏡の表面形状誤差は大きく異なることが予想される。表 5.1に、反 射鏡製作に用いた 3 つのマンドレルの平均法線揺らぎをまとめる。

ID	平均法線揺らぎ (秒角)
1	25
2	69
3	22

表 5.1: マンドレルの平均法線揺らぎ



図 5.14: マンドレル表面の母線方向の法線揺らぎ - 母線方向の形状から 5 [mm] 毎に法線法線揺らぎ (HPW)を求めた。右図:ID=2 マンドレルの法線揺らぎ、左図:ID=3 マンドレルの法線揺らぎ

5.4 基板と反射膜の接着

#### 5.4.1 エポキシの噴霧

成膜されたマンドレルと反射鏡基板を接着するために、基板に接着剤となるエポキシを噴霧する。本 測定で用いたエポキシ樹脂は Epoxy Technology Inc 製の EPO-TEK 301-2 を用いた。 EPO-TEK 301-2 は、アウトガスの非常に少ないエポキシで A 剤と B 剤の 2 液からなり 100:35 で混合し、粘性を下げ るためにトルエンで 80% 希釈し用いる。また、エポキシ樹脂は水分が混入すると硬化時間を遅らせたり まったく硬化しなくなるといったような硬化阻害を起こすので、エポキシ混合時は十分注意を払わなけ ればならない。 エポキシの噴霧は、基板の曲率を持った広い面にエポキシの厚みを均一に、しかもエポキシの厚みを ミクロン単位で制御する必要がる。そのため、図 5.15のようなスプレーシステムを構築した。このシス テムは、上下に動く Z ステージに固定されたスプレーノズルと、アルミ基板をのせる回転ステージから なる。各ステージの動作は、連動させてプログラムで制御することができる。今回のレプリカ鏡製作で は回転ステージが 10 度動くごとに Z ステージが上下に 1 往復するように設定した。回転ステージの往復 回数、ステージの移動速度を変えることにより、基板にスプレーされるエポキシ量を調節することがで きる。

スプレーノズルはスプレーイング・システム・ジャパン社製のエアーアトマイジングノズルを用いた。 図 5.15のようにスプレーノズルの上部から空気を入れると、差圧により下部に取り付けられたエポキシ を吸い上げる。吸い上げられたエポキシは空気と混合させることで、最小径 7 [µm]の微粒子を生成する ことがでる。また、スプレーパターンは円形のラウンドパターンを採用した。



図 5.15: エポキシの噴霧 - 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

## 5.4.2 圧着

スプレーした基板と金を成膜した母型を接着し、エポキシを硬化させる。アルミ基板とマンドレルの 接着は、間に空気の混入を避けるために真空層の中で行なう必要がある。また、エポキシには空気と希 釈剤として用いたトルエンが入っており、これらを脱泡し飛ばさなければならない。そこで、図 5.16の 様な圧着システムを構築した。

図のように真空層の内部に Z ステージがあり、エポキシの脱泡後大気中に戻すことなく圧着すること が出来る。チャンバー内部の気圧が 1Torr に達するとエポキシの脱泡はほぼ完了するので、ゆっくりと Z ステージを降下させ母型と基板を圧着する。圧着後、チャンバーをリークし Z ステージをゆっくりと 上昇させてから母型と圧着した基板を取り出す。取り出した母型と基板は、 50 度のオーブンにいれ加熱 硬化する。今回使用した EPO-TEK 301-2 は、室温 (23 度) で 48 時間、 80 度で 1.5 時間で硬化する。 しかし、硬化温度を上げすぎると、エポキシとアルミ基板の熱膨張率の違いにより、剥離時に鏡面にダ メージが現れる (5.5.1章参照)。このような反射鏡面へのダメージを避けるため、 50 度で 5 時間加熱後 オーブンから取り出し、その後室温で硬化させた。



図 5.16: 圧着 -- 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

### 5.5 基板の剥離

エポキシが完全に硬化したらマンドレルから基板を剥離する。エポキシは水が混入すると、硬化が遅 れたり全く固まらなくなることがあるので、剥離前には必ず硬化具合を確認する必要がある。



図 5.17: 基板の剥離 - 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

## 5.5.1 剥離による表面のダメージ

反射鏡製作において製作方法を誤ると、反射鏡鏡面にダメージを与えてしまうことがある。もっとも 多いダメージは、マンドレル表面に傷や金の剥がし残りによってマンドレル表面から部分的に金を剥離 できず反射鏡面の1部が欠損することである。このような原因に依って生じる欠損は比較的小さな欠損 となる。また、鏡面の欠損は圧着が不十分な場合に起こる。圧着の失敗は、エポキシの量が少ない場合 や圧着時にマンドレルと基板の向きを揃えて置かれていない場合によく見られ、マンドレルと基板が完 全に密着せずに隙間が生じるため比較的大きな欠損となる。

反射鏡面の欠損以外にもエポキシの脱泡が不十分な場合や、硬化温度を高くしすぎると鏡面にダメー

ジが現れる。脱泡が不十分な場合には図 5.18左図のようなダメージが表面に現れる。しかし、図 5.16に 示した圧着システムを構築することでこのようなダメージのほとんどは解消することができる。



図 5.18: 表面のダメージ - 左図: 脱泡が不十分な場合に起こる形状劣化。、右図: 硬化温度の上げすぎにより起こる形状劣 化原因。

硬化温度を上げすぎると、アルミ基板や金の反射膜に比ベエポキシの熱膨張率が大きいために表面に しわ状のダメージが見られる (図 5.18右図)。特にエポキシの線膨張率<sup>2</sup>は、  $T_g$  温度 (ガラス転移温  $T_g$  度) 未満か以上かで大きく異なり、 EPO-TEK 301-2 では  $T_g$  未満よりも  $T_g$  以上の場合の線膨張率は約 3 倍大きくなる。このため、エポキシ硬化温度は  $T_g$  温度の 65C° 以下でなければならない。表 5.2に反射 鏡製作に用いる物質の線膨張率をまとめる。

反射鏡構成物質	線膨張率
アルミ	$23 \times 10^{-6}$
金	$14{\times}10^{-6}$
EPO-TEK 301-2(T <sub>g</sub> 温度未満)	$62{ imes}10^{-6}$
EPO-TEK 301-2(T <sub>g</sub> 温度以上)	$177{\times}10^{-6}$

表 5.2: 反射鏡構成物質の線膨張率

## 5.5.2 反射鏡鏡面形状

正反射型のレーザー変位計を用いて、剥離後の反射鏡の形状測定を行なう。以前にも述べたように、 レプリカ法によって製作された反射鏡の鏡面は平滑なガラス母型の表面形状を写し取ることで薄いアル ミ基板に滑らかな反射面を形成している。製作された反射鏡の性能を評価するもっともよい方法は、反 射鏡鏡面とレプリカに使用したマンドレルの対応する位置を測定し、マンドレル形状を正確に写し取れ ているかを調べれば良い。図 5.19に本論文で構築した反射鏡製作システムを用いて製作した反射鏡の鏡 面形状とマンドレル(ID3)の対応する位置の表面形状を示す。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>温度が 1C° 上昇する当たりに膨張する長さ方向の割合を示し、線膨張率  $\alpha$  は  $\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt}$  で与えられる。ただし、  $l_0$  は 0C° における長さ、 l は tC° における長さを示す。



図 5.19: 反射鏡の表面形状と対応する位置のマンドレル形状 — (赤実線が製作した反射鏡の鏡面形状、黒丸が対応するマンドレルの表面形状を表す。ただし、同じ反射鏡の2線を測定した。)

このように、反射鏡はマンドレルの表面形状を写し取れていることがわかり、構築した反射鏡製作シ ステムを用いる事で、十分な性能を持つ反射鏡を製作する事ができることを示している。

ASTRO-E の厚さ 150 [µm] のアルミ基板と異なり、本論文で使用しているアルミ基板は厚さ 120 [µm] なので、剥離時にアルミ基板にかかる動径方向の力によってアルミ基板の形状が歪んでしまう可能性が ある。そこで、図 5.19で測定した反射鏡の背面形状を測定した。その結果、図 5.20左図のように基板の 形状は剥離前にもともとあった 1-2 [µm] と同程度の歪みしかなく、剥離によって反射鏡母線方向の形状 に与える影響はほとんどないと言える。



図 5.20: 反射鏡背面の形状 — (左図: 剥離時基板の歪みが少ない反射鏡の背面。右図: 基板の剥離時に基板に歪みを生じた 反射鏡の背面。)

しかし、すべての反射鏡で基板の剥離に成功したわけではなく、諸要因から剥離中に基板に強い力を 加えてしまったこともあり、このような反射鏡の背面は図 5.20左図とは異なり、大きな歪みが生じてし まっている (図 5.20右図)。このような基板の歪みを生じさせないためには、基板の剥離方法の確立が不 可欠であるが、今のところ剥離方法の確立にはいたっておらず今後の課題の1つである。

ガラス母型の法線揺らぎから見積もった望遠鏡の結像性能は、ID2のマンドレルで 3.2 分角、ID3の

マンドレルで1分角だったが、それぞれのマンドレルで製作した反射鏡鏡面の法線揺らぎから結像性能 を求めると2.9分角、55秒角となり、それぞれのマンドレルと同程度の結像性能になっている。このこ とからも、マンドレル表面の形状を写し取ることが出来ていると判断出来る。

反射鏡製作システムを構築する目的の1つとして、表面形状劣化原因の究明ということをあげた。実際に反射鏡を製作してみた結果、熱成形を行ったアルミ基板の形状は非常に平坦であり、鏡面に存在する大局的な構造は多くの場合マンドレルがもともともつ形状自体がうねりを持っていることが分かった。 また、大局的な構造は、基板を剥離する際に基板に強いストレスを加え基板をゆがめてしまうことでも 生じる。それに対し、局所的な構造は熱成形の工程で生じ基板の間にごみが混入したり、基板端面にバ リがあると起こることがわかった。次章では、このような形状の補正を試みる。

# 第6章

# 形状補正効果の検討

本章では、4章で述べたテストプレートとゴムフィラーを用い5章で製作した反射鏡鏡面の形状補正を 行い、その効果を検討する。

まず始めに厚さ 120 [µm] の基板の荷重に対する応答を測定し、その後、適切な荷重のもとで補正効果 の検討を行う。また、本論文では 100 [µm] の基板を使った反射鏡の製作は行っていないが、すでに述べ たように薄い基板ほど形状補正は容易になるので厚さ 120 [µm] の基板とあわせて応答を測定した。

# 6.1 アルミ基板の特性

共焦点型レーザー変位計を用いた測定システムを使い、荷重に対するアルミ基板の応答を測定した。 応答の測定は、実際の反射鏡と同様に母線方向の長さを 101.6 [mm]、位相角方向の長さを 175 [mm] と なるように外形を切り出し、 R が 100 [mm] となるように熱成形を行ったアルミ基板の背面から重さ 3.2 [g] の 10 [mm] 角ブロックをのせ、基板のたわみ量を調べることで行った。図 6.1左図に厚さ 120 [ $\mu$ m] の基 板の応答を測定した結果を示す。図 6.1左図から母線方向の最大たわみ量を求めると図 6.1右図のように なり、この図から反射鏡鏡面に存在する典型的な凹凸の大きさである 5 [ $\mu$ m] を補正するために必要な荷 重は、 3.5 [gw/cm] ともとまる。このように、 ASTRO-E の 150 [ $\mu$ m] の基板をもつ反射鏡を補正する ために必要な 8.0 [g] に比べて、半分以下の荷重で同じ 5 [ $\mu$ m] の変化を鏡面し加えることができるとい う結果がえられた。同様に 100 [ $\mu$ m] の基板に対しても同じ測定を行った (図 6.2)。その結果、 5 [ $\mu$ m] の凹凸を補正するために必要な荷重は 1.7 [gw/cm] となった。

ここで 100 [µm] と 120 [µm] の基板の測定から得られた結果に厚さ 150 [µm] の ASTRO-E の反射鏡 から求めた 8 [gw/cm] を加え、横軸に基板の厚さ、縦軸に 5 [µm] の形状補正を行うために必要な荷重を とると図 6.3の黒丸ようになる。 ASTRO-E の反射鏡はアルミ基板単体ではなく、金とエポキシをあわ せた 3 層からなっているが、金の層はアルミ基板に比べ 3 桁以上薄く、エポキシはアルミに比べ 3 桁以 上ヤング率が小さいので、反射鏡の強度はアルミ基板単体の場合とほぼ変わらない。荷重と厚さの関係 は、基板がアーチ状の構造のない平板なら荷重は厚さの 3 乗に比例する。そこで、荷重と厚さの関係を 3 乗の関数でフィッティングを行うと図 6.3の実線のようになり近似的に、

$$w = 2.3 \times 10^{-6} h^3$$

という関数で表すことができる。





4.4.2章で求めたように、ステンレス製のアライメントプレートのスリットに反射鏡を通し、母線方向 にわたって 8 [gw/cm] の荷重を加えるとリファレンスとなるスリット間の梁は、厚さを 5 [mm] として も 1 [ $\mu$ m] のたわみを生じてしまい、より現実的な厚さ 1 [mm] を採用するとたわみ量は 100 [ $\mu$ m] 以上 になってしまう。しかし、本章で求めた結果をもとに厚さ 150 [ $\mu$ m] の基板をもつ ASTRO-E の反射鏡 の代わりに厚さ 100 [ $\mu$ m] の基板を用いたとしても、梁の厚さを 1 [mm] にすると 10 [ $\mu$ m] 以上のたわみ を生じてしまう。この様に梁のたわみ量のみを考慮すると、本測定で測定したどの厚さの基板を用いて も目標とする 1 [ $\mu$ m] 以下に抑えることは出来ない。梁のたわみ量を 1 [ $\mu$ m] 以下にするためには、梁に 加える荷重を 0.06 [gw/cm] 以下にしなければならず、6.1式から 0.06 [gw/cm] 以下の荷重で 5 [ $\mu$ m] の 凹凸を補正することができる基板の厚さを求めると 30 [ $\mu$ m] となってしまう。市販のアルミフォイルの 厚さが 15 [ $\mu$ m] であることからも分かるように、 30 [ $\mu$ m] の基板を用いることは非現実的である。この ように、現段階で ASTRO-E の望遠鏡と同程度の間隔で反射鏡を積層することは困難であり、もたれ合 いの効果や基板の母線方向の長さを短くした 4 段型の望遠鏡を検討しなければならない。



図  $6.3:5 \ [\mu m]$ の形状補正を行うために必要な荷重と基板の厚さの関係

6.2 ゴムフィラーによる加圧量の検討

6.1で求めた厚さ 120 [µm] のアルミ基板の形状を補正するために必要な 3.5 [gw/cm] の荷重を加える ために、ゴムフィラーをどの程度スリットに差し込めば良いか検討する。ゴムフィラーを角度の浅い方 からスリットに挿入していくと、ゴムの厚さとスリットの反射鏡の厚さを引いた残りの幅が一致した所 でゴムフィラーはスリット断面と接触し、さらに押し入れると反射鏡に圧力が加わる。図 6.4のように、 ゴムフィラー長手方向の任意の 10 [mm] を考えると、スリット断面と接触してる表面積は斜線部のよう になり、ゴムフィラーが薄ければ S = 10 [mm] ×d と表すとが出来る。



図 6.4: ゴムフィラー加圧面の模式図

このとき、接触部分のゴムのへこみ量を zとするとゴムの圧縮比 ( $\eta = z/h$ ) と発生する荷重 W の間には、 6.1式から、

$$\eta = \frac{W}{E \cdot S} \tag{6.1}$$

という関係が成り立つ。この式から、ゴムフィラーの材質に KE-1600 を全く希釈せずに用い (E=5.5×10<sup>6</sup> [N/m<sup>2</sup>])、 反射鏡に 3.5 [gw/cm] の荷重を加えるために必要な圧縮比  $\eta$  を求めると、 0.6% となる。仮に、幅 600 [ $\mu$ m] のスリットに厚さ 800 [ $\mu$ m] のゴムフィラーを挿入し h が 450 [ $\mu$ m] の位置で反射鏡に圧力を掛けたとす ると、ゴムフィラーは 3 [ $\mu$ m] 程度押し潰せば 3.5 [gw/cm] の荷重を加えることが出来ることになる。た だし、ゴムフィラーとスリット断面が接する d は 100 [ $\mu$ m] とした。同じ条件でゴムの種類だけを最も軟 らかいものに変えると圧縮比  $\eta$  は 10% 程度となる。

以後の測定では、 $\eta$ の値を参考にし 3.5 [gw/cm]の荷重が加わるようにゴムフィラーを挿入し形状補 正効果を検討した。

6.3 テストプレートを用いた形状補正

テストプレートとゴムフィラーを用いた形状補正効果の検討を行なう。図 6.5ようにテストプレート 2 枚を治具に固定する。実際に望遠鏡に組み込んだ場合と同じ用にテストプレートのスリットに反射鏡を 通し、ゴムフィラーを反射鏡を通したスリットの残りの隙間に入れて、反射鏡背面からスリットの断面 に押し付けて形状補正をおこなう。このとき 6.1章で検討したように、厚さ 120 [μm]の基板の反射鏡の 形状を補正するために必要な 3.5 [gw/cm]を目安として荷重を加えた。より顕著に補正効果を測定する ためにゴムフィラーをはさんだスリットのすぐ脇をレーザー変位計を使い形測定をおこなった。本測定 ではアルミ基板単体と金を製膜し反射鏡の状態にした基板の両方をスリットに通し補正効果を検討して おり、それぞれ共焦点型と正反射型のレーザー変位計を使い測定した。



図 6.5: 鏡面形状の測定

テストプレートを用いた形状補正効果の検討では、形状補正効果だけでなく次章で製作する望遠鏡ハ ウジングに導入するために、以下のような検討を行った。

- ゴムフィラーの硬さ
- ゴムフィラーの厚さ
- スリット表面の形状 (ピーニングの有無)
- スリットの幅

金を成膜した反射鏡は、反射面となる金の層 (~0.2 [µm]) とアルミ基板 (120 [µm])、この二つの層を 接着しているエポキシ層 (20-40 [µm]) から構成されている。特に、5章でも述べたようにエポキシ層は 1 [µm] 以下で平坦なアルミ基板と、5-10 [µm] 程度のうねりを持つガラスマンドレルの形状を写し取っ た金の層を接着するため、厚さむらが存在していると考えられ、アルミ基板単体に比べて複雑な応答を 示す可能性がる。そこで本測定では、ローラーによる粗成形のみのアルミ基板、熱成形を行ったアルミ 基板、金を成膜した基板 (反射鏡) の3通りの基板に対し形状補正効果の検討を行なった。

6.3.1 アルミ基板の形状補正

ローラーにより粗成形した基板の形状補正

粗成形のみの基板は、図 6.6の黒線のように大きくうねっているので、アルミ基板単体の補正効果を もっとも顕著に測定することができる。熱成形を行なっていないアルミ基板は、金を成膜した反射鏡と はことなり表面に 4-5 波長分の揺らぎが存在しており、法線揺らぎを用いた評価法では非常に大きな値 になってなってしまうため微妙な補正効果の違いを評価することが出来ないので、形状補正効果の検討 は、平均二乗根 (RMS)を用いた評価方法を採用する。図 6.5のように幅 600 [µm] のスリットに R が 100 [mm] になるように粗成形した 120 [µm] のアルミ基板を通し、もっとも厚い部分が 800 [µm] のシリコンゴ ムフィラーを挟んで形状補正を行った。補正効果と共にスリット断面の形状の影響を検討するために、 放電加工で切り出したスリットとさらにピーニング処理を行ったスリットを使い同じ条件で形状補正を 行った。その結果を図 6.6に示す。



図 6.6: 粗成形基板を用いた形状補正 -- 左図: 放電加工で切り出したスリット、右図: ピーニング処理を行ったスリット、 黒線は補正前、赤線は補正後の形状を示している。

それぞれの条件での加圧前後の RMS は、表 6.2 のようになる。このようにゴムで加圧する前の形状が 若干異なるものの、補正後の形状に特徴的な違いは見られず、スリット断面の形状がピーニング処理の 有無に関わらず同様の補正効果が得られていることを示している。

さらに、同様の粗成形アルミ基板を用いた形状補正の測定を、厚さと硬さの異なるゴムフィラーに対 しても行った。スリット幅は上記の測定と同様に 600 [µm] のスリットを用い、ピーニングによる違いが 見られなかったので、ピーニング処理は行なっていないスリットを使用した。ゴムフィラーは上記のよ うに硬さと厚さによる効果を調べるために、硬さの異なる 600 [µm] と、 800 [µm] の厚さのフィラーを それぞれ 2 種類ずつあわせて 4 本用意した。ゴムの硬さは希釈剤となる RTV シンナーを添加すること で変えることができ、もっとも硬さに違いの現れる KE-1600 を使い全く希釈しないものと、 50% 希釈 したものを用いた。全く希釈していないゴムに比べ、 50% 希釈したゴムの硬さは 1/2 以下になる。以下 に測定に用いた 4 種類のゴムフィラーの特徴をまとめる。

この4種類のゴムを挟み形状補正を行なった結果を図6.7に示す。また、加圧前後のRMSの変化を表6.2に示す。

測定の結果、 a と c のゴムフィラーに比べ b と d のゴムフィラーは高い補正効果を示しているいるが、 a と b、 c と d のゴムフィラーを比較すると特に違いは見られない。このように、ゴムフィラーの厚さの 違いによる補正効果に差は見られないが、ゴムの硬さによって得られる補正効果は異なり、硬いゴムの 方が高い補正効果を得る事ができた。

ID	厚さ ( $[\mu m]$ )	希釈剤の添加量 (%)
a	600	50
b	600	0
с	800	50
d	800	0

表 6.1: ゴムフィラーの種類 -分かりやすいように a-d の ID をつけた。



図 6.7: 厚さと硬さの異なるゴムフィラーを用いた形状補正 -- 左上: ゴムフィラー a、右上: ゴムフィラー b、左下: ゴムフィラー c、右下: ゴムフィラー d。黒線 - 補正前、赤線 - 補正後。

粗成形のみの基板に形状補正を行なった結果を以下にまとめる。

- ゴムを挟む事でアルミ基板単体の場合の形状補正効果を確認する事ができ、 RMS で 2 [µm] 程度の形状誤差を半分の 1 [µm] 程度まで補正する事が出来た。
- ピーニング処理の有無にかかわらず同程度の補正効果が得られた。
- 形状補正効果はゴムの形状によらず、ゴムの硬さのみによっていることがわかった。

測定条件	RMS( $[\mu m]$ )	
(スリット幅 = 600 [ $\mu$ m])	補正前	補正後
放電加工	1.69	0.91
ピーニング処理	2.03	0.99
ID = a	1.52	1.08
ID = b	1.83	0.80
ID = c	2.36	1.07
ID = d	1.99	0.81

表 6.2: RMS を用いた形状補正効果の検討

6.3.2 熱成形を行なった基板の形状補正

次に熱成形を行なったアルミ基板を使い形状補正効果の検討を行なう。熱成形を行なったアルミ基板 は形状補正を行なわなくとも表面の形状は1 [µm]以下になっており、スリット断面の形状を考慮すると さらに形状が改善する事は考えにくく、ゴムフィラーを挟んでも基板の形状は変化しない場合がもっと も良い結果であると言える。言い変えれば、リファレンスとなるスリット断面の形状に問題があれば基 板の形状は悪化することを意味している。本節ではこの効果を利用し、ピーニング処理を行なった面と 放電加工のみ面の補正効果の違いを測定した。

測定には幅 600 [µm] のスリットと前節で高い補正効果が得られた d のタイプのシリコンゴムフィラー を用いた。図 6.8にピーニング処理を行なっていないスリットを用いて形状補正を行った結果を示す。同 じように図 6.9にピーニング処理を行なったスリットを用いて補正した結果を示す。



図 6.8: ピーニング処理を行っていないスリットを用いた形状補正 -- 黒線: 補正前、赤線: 補正後



図 6.9: ピーニング処理を行っていないスリットを用いた形状補正 – 黒線: 補正前、赤線: 補正後、黄線: プレート 底面の形状

その結果、ピーニング処理を行なうとスリット断面の形状が改善されると言う結果 (図 4.21参照) と相 容れない結果が得られた。このような結果になった原因は今のところ明確な答えが得られていないが、 テストプレートの歪みや、ピーニングによってスリット断面の縁が落ちることが関係していると考えら れる。幅 600 [µm] のスリットはテストプレートの中でもっとも下側に切られているので、スリット断面 の形状とプレート底面の大局的な形状は概ね一致していると考えられる。プレート底面を測定すると図 6.9の黄線ようになり、ゴムフィラーを挿入し加圧したアルミ基板の形状と比較的一致している。これは テストプレートの歪みが影響しているという前者の説を指示する結果となっている。

2002/12/08 2002/12/08

また、スリット断面の縁形状を顕微鏡を用い倍率500倍で撮影すると、図6.10のようになる。

図 6.10: プレート断面の縁の形状 - 左図: 放電加工のみのスリット断面の縁の形状、右図: ピーニング処理を行ったス リット断面の縁形状。 500 倍で撮影した。

このように、放電加工のみの縁は角が立っているのに対し、ピーニング処理を行うと縁の形状がまる まってくることが分かる。ゴムフィラーを使い基板を押し付けると、スリット断面の面よりも縁の部分 に押し付けられると考えられるので、縁がゆがんでしまえば押し付けている基板の形状もゆがめてしま う。この結果は後者の説を指示する。

本論文では、以上のような結果をもとに以後の測定に用いるスリットの形状は、放電加工のみのもの を用いることにした。

**6.3.3** 反射鏡の形状補正

アルミ基板を用いた測定から、

- ゴムフィラーの厚さは関係しない。
- ゴムフィラーの硬さは硬いほうがよい。
- ピーニング処理を行った場合と行わなかった場合であまり差はないが放電加工のみのほうが高い補 正効果を得られることが多い。

というような結果が得られた。

この結果を考慮し、放電加工で切り出した幅 600 [µm] のスリットに反射鏡を通し、 ID=d のゴムフィ ラーで反射鏡鏡面をスリット断面に押し付けて鏡面形状の補正を試みた。表面形状の評価は、粗成形の みのアルミ基板とは異なり反射鏡表面の形状はなだらかで表面波長のスケールも大きいので法線揺らぎ を用いる。形状補正効果の検討に用いている反射鏡は、 6 章で製作した 120 [µm] の基板を使った反射鏡 で、金の厚さは 0.2 [µm]、エポキシは 20-40µ 程度である。表 6.3に、本測定に使用した反射鏡と、レプ リカに用いたマンドレル、エポキシ厚をまとめる。

ID	使用したマンドレル	エポキシ厚
1	3	$31 \; [\mu m]$
2	3	$38~[\mu {\rm m}]$
3	2	$41~[\mu {\rm m}]$

表 6.3: 反射鏡の特徴

ID=1の反射鏡は、3つのなかで最も形状が悪く測定場所によっても大きく形状が異なる。また、マンドレルの表面には見られなかった局所的に表面波長スケールの小さな形状誤差が存在しており、マンドレルの形状を正確に写し取れていないと考えられる。これは、基板を母型から剥離する際に基板にストレスを加えてしまったために生じていると考えられる。

ID=2の反射鏡は3つのなかで最も形状がよく、マンドレルの形状を写し取ることが出来ており、アルミ基板も歪んでいない。

ID3の反射鏡は ID=2 と同様にアルミ基板に変形を加えることなくマンドレルの形状を反射鏡面に写 し取ることが出来たが、マンドレル自体の形状が大きく歪んでいるために反射鏡面も 10 [µm] 程度の歪 みを生じてしまっている。

各 ID ごとにそれぞれ 3 つの反射鏡にゴムフィラーを挟んで形状補正を行なった結果を図 6.11、 6.12、 6.13に示す。図 6.11、 6.13で補正後の両端が大きく切れ上がっているが、形状補正に用いているゴムフィ ラーは反射鏡の母線方向の長さに比べ短いため、反射鏡の端の部分は十分加圧出来ていないためにこの ような形状になっていると考えられる。また、図 6.12をみると 5-10 [mm] 程度の表面波長スケールの形 状が存在している。これは、反射鏡面に実際にこのような形状が存在しているわけではなく、ステージ の揺らぎを引ききれていないために生じている。このため、法線揺らぎは母線方向の形状を 5mm ごと にまとめて求めた。補正前と補正後の法線揺らぎを表 6.4にまとめる。

測定条件	法線揺ら	ぎ (秒角)
(スリット幅 = 600 [ $\mu$ m])	補正前	補正後
1	30	20
	60	22
	48	28
2	26	20
	12	18
	20	14
3	30	12
	78	12
	76	14

表 6.4: 法線揺らぎを用いた形状補正効果の検討 -ID=1-3の反射鏡から 3 箇所選び補正効果を検討した。

このように3つの反射鏡すべてで鏡面の形状を補正することが出来た。しかし、補正後の法線揺らぎ を見るとID2,3の反射鏡に比べID1の反射鏡はあまり補正されていないことがわかる。このような結果 となった原因として、マンドレルの形状を写し取れていないことや、ID2,3の反射鏡に比べ表面波長ス ケールの小さな形状誤差が存在していることが考えられるが、原因の特定には至っていない。

比較的よい補正効果が得られた ID2,3 の反射鏡の法線揺らぎから、4.3式をもちいて望遠鏡の角分解能 に変換すると平均して 2 分角から 42 秒角へ改善がなされたことに対応する。

このように本章の研究から、マンドレル形状を写し取ることができた反射鏡に対し、スリットとゴム フィラーを使った新支持方式を用いることで、母線方向の鏡面形状に高い補正効果が得られることが確 認できた。



図 6.11: ID=1 の反射鏡の形状補正結果 - 右図: 補正前後の反射鏡鏡面形状、左図: 補正前後の法線揺らぎ。黒線は補正 前、赤線が補正後を示す。



図 6.12: ID=2 の反射鏡の形状補正結果 - 右図: 補正前後の反射鏡鏡面形状、左図: 補正前後の法線揺らぎ。黒線は補正 前、赤線が補正後を示す。



図 6.13: ID=3 の反射鏡の形状補正結果 - 右図: 補正前後の反射鏡鏡面形状、左図: 補正前後の法線揺らぎ。黒線は補正 前、赤線が補正後を示す。

# 第7章

# 新望遠鏡の試作

前章の補正効果の検討の結果、アルミ基板の歪みやレプリカによって写し取ったマンドレルの歪みに対 してもゴムフィラーによる新支持方式を用いると、高い補正効果が得られることが確認できた。しかし、 今までの議論はすべて反射鏡単体に着目したもので角分解能も法線揺らぎから見積もったものに過ぎな かった。そこで、可視光による光学測定や反射鏡の位置測定、さらにX線測定をおこなうことによって 実際に上下二段組みの結像光学系として検討を行うために新支持方式を導入した望遠鏡の製作を行った。

## 7.1 設計の指針

新支持方式を用いる最大の目的は、反射鏡の位置決め誤差と鏡面の形状誤差を補正することである。 そのためには、上下二段の反射鏡を一体で加工したアライメントプレートを導入し、これらをハウジン グの中に精度良く位置決めしなければならない。このとき、ハウジング自体の強度が低下してしまうと、 ひねりやひずみが加わり結果的に位置決め精度を低下させてしまうので十分な強度を持たせなければな らない。

# 7.2 望遠鏡の設計

## 7.2.1 スリット形状の検討

6章の検討結果から、もっとも高い補正効果が得られた幅 600 [µm] のスリットを採用し、テストプレートと同じようにゴムフィラーをはさむことでスリット間の梁のたわみが 1 [µm] 以下になるように、スリット同士の間隔は 5 [mm] 以上となるようにした。スリットの位置と角度は ASTRO-E の反射鏡と同じになるように各パラメータを選択し、反射鏡の間隔が 5 [mm] 以上になるように反射鏡の数を間引いた。

また、R100 [mm] 用の熱成形金型しかないことから、アライメントプレートにスリットを切る位置は R100 [mm] 近傍のみとし、上下段5本ずつ合わせて10本のスリットを開けた。アライメントプレート に開けたスリットの位置を表7.1にまとめる。スリット断面の加工は、放電加工で行いピーニング処理は 行なわず、放電加工自体の精度を上げるためにカット回数を増やし7回カットした。この加工面を顕微 鏡を用い図4.19,4.20と同様に500倍で測定すると加工面の形状は図7.2に示すようになり、7回カット した面は図4.19と比べるとくぼみを示す黒い点の数が減り滑らかになっていることが分かる。この加工 面を、図 4.21と同様に鏡焦点型レーザー変位計を用い速度 1 で表面形状を測定すると図 7.1のようにな り、表面波長と振幅のどちらも減少していることが見て取れる。より定量的に評価するために表面形状 の平均値からの頻度分布を求めると図 7.3のように求まり、放電加工で 7 回カットした面の RMS は 1.29 [µm] となっていることが分かった。この値はテストプレートの加工面表面の RMS1.7 [µm] と比べると明らか に小さくなっている。



図 7.1: アライメントプレートの表面形状 - アライメントプレートは放電加工により 7回カットし加工した。加工面を 鏡焦点型変位計を用い速度1で測定した。ただし、マイナスy方向にプレートがありくぼんでいることを示している。



図 7.2: 表面の様子 --顕微鏡を使い 500 倍で撮影した。

図 7.3: 頻度分布 - 図 7.1で求めた表面形状の 10 [mm] の 範囲の頻度分布。

# 7.2.2 ハウジングとアライメントプレートの位置決め方法

アライメントプレートを精度良くハウジングの中に固定するためには、位置決めに関係する部品数を 出来るだけ少なくしなければならない。位置決めに関係する部品の数が増えるほど、それぞれの部品の 加工精度や組み付け精度が関係してくるために、精密な位置決めは困難となる。そこで新望遠鏡では、

## 第7章新望遠鏡の試作

#	ASTRO-E	Primary		Sec	condary
	foil No	top([mm])	bottom( [mm])	top([mm])	bottom( [mm])
1	57	91.2449	90.7599	90.6539	89.1991
2	64	95.9371	95.4271	95.3157	93.7848
3	71	100.8099	100.2739	100.1568	98.5490
4	78	105.8701	105.3072	105.1842	103.4955
5	85	111.1251	110.5342	110.4050	108.6322

表 7.1: アライメントプレートのスリット位置 -(表の値は望遠鏡中心からスリットの中心までの距離を示している。 反射鏡はスリット断面に押し付けた状態で ASTRO-E と同じ位置となる。)

図 7.4(1) のように望遠鏡中心に位置する「中板」と、そこから垂直方向に走る「外側の支柱」のみで位 置決めを行なうようにした。アライメントプレートは望遠鏡上部から「外側の支柱」をガイドにして挿 入することで方位角方向の倒れを防ぎ、アライメントプレート中段の両端にある精度良く加工した切り 欠き部分を「中板」に突き当てることで動径方向の倒れを防ぐ(図 7.4(2))。

このように中板と突き当て、外側の支柱をガイドにすることでアライメントプレートは、動径方向に 水平な1次元の自由度のみを残しハウジングの中で正確に位置を決めることが出来る。動径方向の自由 度を残したのは、組み上げ後焦点距離を調節するためである(図7.4(3))。このようにして組み上げた望 遠鏡ハウジングに反射鏡を通し、ゴムフィラーを使いスリット断面に反射鏡を押し付けることで位置決 め誤差と形状誤差を改善することができる。

#### 7.2.3 望遠鏡強度と支持方法

上述したように、望遠鏡ハウジングに歪みやひずみが生じると、その影響はハウジング内部のアライ メントプレートの位置決め精度にも伝播するため、このようなひずみもまた望遠鏡の結像性能を低下さ せる原因となる。そこで望遠鏡と外部治具を固定する位置を ASTRO-E 型の望遠鏡下部から、より望遠 鏡重心に近い中段(中板)で固定するように変更した。重心に近い中段で支持することで較正試験や振動 試験、さらには打ち上げ時に望遠鏡ハウジングに生じるストレスを軽減しゆがみやひずみを抑えること ができる。

### 7.3 望遠鏡の製作

7.2章で示したような点に注意を払い設計した望遠鏡ハウジングの製作を行なった (??参照)。ハウジン グは歪みなく十分な強度を持たせるために、アライメントプレートは反射鏡の位置決めを行うためにど ちらも高い加工精度を必要とする。そのため、ハウジングの製作は三鷹光器株式会社に、アライメント プレートの製作は株式会社大石にそれぞれ依頼した。

このようにして製作した望遠鏡の全部品を図 7.5に示す。

また、これらの部品を組み上げて完成した望遠鏡を図 7.6に示す。ただし、アライメントプレートは 7 枚しか製作していないので、図 7.6では実際の望遠鏡とは異なり 1 つおきにプレートを配置してる。



図 7.4: アライメントプレートの位置決め方法


図 7.5: ハウジング部品とアライメントプレート

### 第7章新望遠鏡の試作





図 7.6: 新望遠鏡の外観

### 第8章

## まとめと今後の課題

8.1 まとめ

本論文では高角分解能多重薄板型 X 線望遠鏡の開発を目指し様々な研究を行なった。特に反射鏡自体 に強度をもたせるのではなく、塑性変形を起こさない程度の圧力を加えることによって反射鏡鏡面の形 状を補正する方式は他に例がなく本論文のもっとも独創的な点である。本研究で得られた成果を以下に まとめる。

表面形状測定システムの構築

高角分解能を目指し、反射鏡の表面形状の研究を行なうためには、サブミクロンオーダーの高い精度 で形状測定を行なうことが出来るシステムの構築が不可欠である。本研究では、鏡面等の滑らかな面を 測定することが出来る正反射型のレーザー変位計に加え、新たに切削面の様な正反射型の変位計では測 定できない荒れた面、特に反射面を成膜する前のアルミ基板の形状を測定することが出来る共焦点型レー ザー変位計を用いた測定システムを構築した。共焦点型のレーザー変位計は正反射型に比べ分解能は低 いが、X軸ステージ、Z軸ステージと合わせた測定システムとしての測定精度及び再現性は0.07µm、 0.1µmとなり正反射型のレーザー変位計を用いた測定システムと同程度の性能が確認された。

レプリカ法による反射鏡製作システムの構築

新たにレプリカ法による反射鏡製作システムを構築した。反射鏡の製作は、基板の製作、反射膜の成 膜、エポキシ噴霧、圧着及び剥離の4工程からなっており、既存の熱成形システム、成膜システムに加 え新たに反射鏡製作の要となるエポキシ噴霧システムと圧着・剥離システムを構築した。本システムで 製作した反射鏡は、レプリカ法のもっとも重要な利点であるガラスマンドレルの表面形状を写しとるこ とが出来ており、充分な鏡面精度を持つ反射鏡を製作することが出来る。

#### 鏡面形状誤差原因の特定

共焦点型変位計を用いた測定システムの構築によりアルミ基板の形状を測定することが出来るように なったこと、さらに反射鏡製作システムを構築し実際に反射鏡を製作することが可能になったことによ り、いくつかの形状誤差原因を特定することが出来た。最も大きな鏡面形状の劣化原因は、レプリカ法 で表面形状を写し取るもととなるガラスマンドレルの形状が揺らぎをもっていることによっている。本 測定で用いたマンドレルは平均して 25 秒角程度の法線揺らぎをもっており、マンドレルの表面形状を完 全に写し取ることが出来たとしても望遠鏡の HPD は 1.2 分角となってしまう。その他にも、反射鏡剥離 時に基板に強いストレスを加えてしまうとマンドレルの形状とは異なる表面波長スケールの小さな形状 誤差を生じてしまうことや、熱成形時にゴミや塵が表面に付着していたりバリ取りを行なわないと基板 形状を劣化させる原因となることがわかった。

#### 連続体支持による反射鏡の形状補正

連続体支持方式を用いることでアルミ基板がもともと持つ形状誤差や、マンドレル形状を写し取るこ とで生じる形状誤差のどちらも補正することが出来た。アルミ基板の形状誤差は、RMS で 2µm から 0.8µm へ補正することができた。ただし RMS は、表面形状を平均値からの差分をとり頻度分布を求めること で求めた。マンドレル形状に起因した形状誤差は、望遠鏡 HPD で評価すると平均して 1.9 分角から 40 秒角へ補正することに成功しており、もっとも形状が良くなったものは 30 秒角まで補正することができ た。

高角分解能望遠鏡の試作

連続体支持方式を導入した X 線望遠鏡の試作を行なった。本論文で製作した望遠鏡は、多重薄板型望 遠鏡の結像性能低下の主要因である表面形状誤差と位置決め誤差を同時に解決することができ、高い角 分解能と開口効率を同時に実現することができる。また、従来の望遠鏡とは異なり、中段で支持するよ うに変更したことにより、より重心に近い位置で保持することができ望遠鏡にかかるストレスを軽減す ることができる。

8.2 今後の課題

形状補正効果の方位角方向への伝搬測定

実際の望遠鏡で形状補正を行なうためにはアライメントプレートの間隔分の長さ、つまり1 セクター分程度は補正効果が方位角方向に伝搬しなければならない。本研究の結果、支持部分 の近傍では高い補正効果が確認できたので今後は、方位角方向への形状補正効果の伝搬につい て詳しく検討しなければならない。

反射鏡端面の形状補正

第6章で形状補正効果について詳しく検討を行なったが、反射鏡母線方向を測定すると中心 部分は非常に良く補正されているが、端面の形状が悪化してしまう様子がしばしば見られた。 これは形状補正を行なうために挟んでいるゴムフィラーの長さが、反射鏡母線方向の長さに比 べ若干短いことが影響していると考えられるが、それだけではこのように大きく立ち上がる理 由になっているとは考えいにくい。より高い角分解能を目指すためには、反射鏡中心部だけで なく縁の部分まで形状を補正しなければならず、今後はこのような端面の形状まで補正するこ とを考える必要がある。

支持方式の確立

本研究の結果、ゴムフィラーの形状や硬度、スリット形状によって得られる補正効果が異な ることが明らかになった。また、同じゴムフィラー、スリット形状を選択してもゴムフィラー の挿入仕方によって補正効果が異なることもわかった。このようなことから、現在の形状補正 効果は最高のものではなく改良の余地があり検討を行なう必要がある。また、実際に望遠鏡を 製作するためには、すべての反射鏡を同じように加圧しなければならないので、一定の力で加 圧する方法を確立しなければならない。

#### 反射鏡製作方法の習熟

本研究では、反射鏡製作システムを構築しマンドレル形状を写し取った反射鏡の製作に成功 した。しかし、接着用エポキシの噴霧量のコントロールや、剥離方法の確立などまだつめ切れ ていない項目が沢山ある。今後は形状補正効果を突き詰める共に、反射鏡製作方法も研究して 行かなければならない。

#### 光学測定

製作した反射鏡は母線方向の形状のみに着目してきたが、反射鏡の性能を評価するには方位 角方向の真円度や反射率も評価する必要あり、平行光源による真円度の測定や、 X 線による反 射率の測定を行わなければならない。また、形状補正効果の検討方法はレーザー変位計を用い た表面形状測定を使っているが、より定量的で現実的な評価をするためには実際に X 線測定を 行なう必要がある。特に、新たに製作した望遠鏡はレーザー変位計による形状測定が困難なた め、補正効果の検討を行なうためには X 線での測定が不可欠である。

望遠鏡構造の検討

厚さ 120 $\mu$ m の反射鏡を用いた場合、形状補正を行なうためには 3.7g/cm の荷重を加えなけ ればならず、リファレンス面となるスリット間の梁に加えると 50 $\mu$ m 以上たわんでしまう。こ のような問題を解決する方法として、反射鏡光軸方向の長さを半分にし、現在の 2 段型の望遠 鏡とはことなる 4 段型の望遠鏡が有効であると考えられる。梁のたわみ量は長さの 4 乗に比例 するので、材質にステンレスを用い梁の長さを半分にした場合、最大たわみ量は 4 $\mu$ m 程度と なり、いぜんとして目標とする 1 $\mu$ m 以下のたわみ量には達しないが、だいぶ現実的な値になっ たといえる。

この様に、反射鏡光軸方向の長さを短くすることや、反射鏡の間隔を広くすることで梁のた わみ量を小さくすることができるので、最適な望遠鏡の構造を検討する必要がある。 付録 A

ゴムフィラー型枠の製作図面

で製作したのゴムフィラー型枠図面を載せる。型枠の製作は、反射鏡を均一に加圧することが 出来るように、面精度を高めた加工を行なった。 付録 B

プレート治具の製作図面

4.4.2で製作したテストプレートを保持しレーザー変位計を用いて測定するために製作したの治 具の加工図面を載せる。プレート治具はテストプレートを差し込んだ時に、プレート最下の溝 が R=100 [mm]、150 [mm] となる2種類の治具を製作した。実際の製作は、ユウエイ研機に 依頼した。

# 付録 C

## 新望遠鏡の製作図面

?? 7章で製作した、アライメントプレートと新望遠鏡ハウジングの図面を載せる。アライント プレートはステンレスを用いており、製作は株式会社大石に依頼した。

真望遠鏡は止め板、支持板、上板、中板、そこ板、内側の支柱(上、下)、外側の支柱、横の 支柱、側板からなり、全てアルミニウム合金で製作されている。製作は三鷹光器株式会社に依 頼した。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に御指導・御協力を頂きました。指導教官である石田 学先生には、実験に対する心構えから文章の校正にいたるまで、研究全般わたり御指導・御協 力を頂きました。また、それだけでなく2年間の大学院生活を通してあらゆることでお世話に なりました。石田先生なくして私の大学院の2年間は語れません。心より感謝しております。 ありがとうございました。

大橋隆哉先生には、天文学全般の様々な知識を頂きました。大橋先生の鋭いアドバイスは研 究に行き詰まったときに大変助けになりました。大橋研の一員にさせて頂いたことを心より感 謝いたします。ありがとうございました。国枝秀世先生には、 X 線望遠鏡全般わたって教え て頂くともに、望遠鏡の設計において多くの助言を頂きました。感謝しております。山崎典子 先生には物理の考え方から、実験の助言に到るまで大変お世話になりました。石崎欣尚さんに は、プログラミングや PC のトラブルなど計算機全般にわたって助けて頂きました。前田和良 さんには製作した望遠鏡に素敵な名前を付けて頂きました。見崎一民さんには、実験や物理学 の基礎から御指導頂きました。柴田亮さんには、基礎的なことから実験の進め方にいたるまで 多くの助言を頂きました。同期の篠崎·M·慶亮君、森田ウメ~代さんは天文学や物理学のこと について多くの議論を交わしました。また、真夜中にくだらない話をして、研究に行き詰まっ たときに息抜きをすることが出来ました。ともに研究に取り組んだ伊藤啓さんには、多くの議 論を交わすだけでなく多くの助言や御協力を頂きました。井上智暁君には実験を手伝って頂く ともに、修士論文の写真のモデルになって頂きました。石川輝さん、佐藤浩介君、古賀丈雄君 は多くの議論を交わすと共に、沢山の助言を頂きました。幅良統さん、森英之さんには、実験 を助けて頂くだけでなく測定や解析方法についても教えて頂きました。飯塚亮君は共に実験を 行ない議論を交わしました。また、修士論文の手伝いもして頂きました。森久秦二郎君、伊藤 昭治君には本論文の重要な行程を手伝って頂きました。

また、三鷹光器の勝重さんと長谷部さんには、師走の忙しい時期にもかかわらず、稚拙な図 面から望遠鏡ハウジングを製作していただくだけでなく、多くの助言を頂きました。大石さん には、高い精度を必要とするアライメントプレートを製作して頂きました。

多くの方々の御指導と御協力のもとに本論文を完成させることが出来ました。お世話になっ たすべての方々に感謝いたします。

最後に経済的に支えて頂いた、両親に感謝致します。

## 参考文献

- [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. Master's thesis, 名古屋 大学, 2000,
- [9] 伊藤啓. X 線望遠鏡結像性能向上の研究. Master's thesis, 東京工業大学, 2002,
- [10] 加藤正磨. 直接レプリカ多層膜スーパーミラー反射鏡の製作と光学特性評価. Master's thesis, 名古屋大学, 2002,