卒業論文 レプリカ法による X線望遠鏡の反射鏡製作

清水 智央 (東京都立大学)1

2004年01月13日

 $^{1}tom_smz@mpuax0.phys.metro-u.ac.jp$

目 次

第1章	X 線望遠鏡とレプリカ法	3
1.1	X 線天文学と X 線望遠鏡	3
1.2	X 線望遠鏡とその反射鏡の違い	3
1.3	レプリカ法による反射鏡製作.................................	4
第2章	レプリカ法の概要	6
2.1	レプリカ法の流れ....................................	6
2.2	反射鏡基板の製作....................................	8
	2.2.1 反射鏡基板の切り出し	8
	2.2.2 バリ取り	8
	2.2.3 ローラーによる粗成形	9
	2.2.4 熱成形	9
	2.2.5 熱成形用アルミ母型と熱成形後のアルミ基板の表面形状	10
2.3	ガラスマンドレルへの反射膜 (金)の成膜	13
	2.3.1 マンドレル洗浄	14
	2.3.2 ガラスマンドレルの形状測定	14
	2.3.3 金の成膜	18
2.4	アルミ基板と反射鏡の接着..................................	20
	2.4.1 エポキシ樹枝の噴霧	20
	2.4.2 圧着	21
2.5	基板の剥離(反射鏡の完成).................................	21
	2.5.1 剥離	21
第3章	製作した反射鏡の評価	23
3.1		23
	3.1.1 反射鏡表面粗さ測定の目的	23
	3.1.2 反射鏡表面粗さ測定のサンプル	23
	3.1.3 反射鏡表面粗さ測定システム	24
	3.1.4 反射鏡表面粗さ測定の方法	27
	3.1.5 反射鏡表面粗さ測定の結果	28
	3.1.6 反射鏡表面粗さの評価	30
3.2	反射鏡母線方向の形状の測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
	3.2.1 反射鏡母線方向の形状の測定の目的	32
	3.2.2 反射鏡母線方向の形状測定のシステムと方法	32
	3.2.3 反射鏡母線方向の形状測定の結果	33
	3.2.4 反射鏡母線方向の形状の評価	33
3.3	X 線望遠鏡にセットしての測定	35

	3.3.1 X 線望遠鏡での測定結果と評価	36
第4章	レプリカ法の現状と改善点	37
4.1	現状での反射鏡の性能....................................	37
4.2	レプリカ法の現状....................................	37
4.3	現状での問題点	38

第1章 X線望遠鏡とレプリカ法

1.1 X線天文学とX線望遠鏡

X線天文学は、天体から発せられる電磁波のX線波長域(0.1から 100keV)を捕らえて、天体を観測 する学問である。X線は非常に高いエネルギーを持ち、また非常に透過率が高い。これにより、高温の プラズマ領域やブラックホール近傍の強い重力場、暗黒星雲や厚いガス雲で可視光では観測できないよ うな天体も観測できる。しかし、天体から発せられるX線の強度は非常に弱い。地球上では大気に吸収 されてしまったりして、なかなか観測できない。そこで、X線の観測は主に上空(宇宙空間)で、望遠 鏡と検出器(エネルギーと時間分解能を持つ)を用いて行う。近年のX線天文衛星には、ヨーロッパの 「XMM」やアメリカの「Chandra」などがある。これらに搭載されているX線望遠鏡は非常に高い角分 解能を持っている。これに対して、日本で打ち上げる予定の「Astro-E2」は集光力とエネルギー分解能 に優れている。

1.2 X線望遠鏡とその反射鏡の違い

この日本の「Astro-E2」とアメリカの「Chandra」は、ともに X 線望遠鏡でありながら、大きく違う。望遠鏡の性能を表す値として、集光力(有効面積)・解像力(角分解能)・視野がある。X 線望遠鏡は、一般の可視光の望遠鏡とは異なり、レンズで集光させることはできない。また、X 線は屈折率が非常に1に近く、全反射をえるためには、非常に小さい角度で X 線を入射させて反射させなければならない。この時に用いられるのが、斜入射系の望遠鏡である。



図 1.1: 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)

非常に小さい角度で入射してきた X線を、反射鏡を使って 2回反射させて集光させる。この時、この

反射鏡の鏡面形状の誤差が解像力(角分解能)に非常に大きな影響力をもっている。そこで、鏡面の形 状をできる限りよくするために、「Chandra」では直接研磨法という方法を用いている。この方法はゼ ロデューアガラスを直接研磨して加工し Wolter-1 型の形に正確に加工する。そして、その面に金など を蒸着させる。この方法はガラス面を直接研磨するため、非常に精度よく反射面の形状を作り出すこと ができ、またゆがみも少ない。そのため、角分解能(解像度)は非常に高精度を実現できる。その一方 で、ガラス基盤の厚さが数 cm にもなるため、開口効率が悪く非常に重くなる。角分解能で 0.5 秒角とい う非常に高い精度を持つ「Chandra」に対して、日本の衛星「Astro-E」の角分解能は100秒角である。 「Astro-E」の場合は限られた大きさ・重量の中で、集光力を上げるため、非常に開口効率がよくなるよ うに設計されている。具体的には多重薄板型X線望遠鏡と呼ばれ、一枚一枚の鏡面をできる限り薄くし て、積層数を増やして開口効率を上げる。この場合、鏡面の製作には「Chandra」のような厚さ数 cmの ガラスを用いた直接研磨法を使用できない。そこで一枚、一枚の反射鏡は約150µmのアルミで、この アルミにガラス母型に蒸着させた金などを移しとって反射鏡を製作する。この方法を直接研磨法に対し てレプリカ法と呼ぶ。レプリカ法では、150μmという非常に薄いアルミ板を使っているのと、反射鏡 の製作枚数が膨大であるため、正確にWalter-1型の二次曲面に加工することはできない。したがって円 錐形で近似して加工した反射鏡を使う。反射鏡鏡面の荒さに関しても、ガラスを加工したときのような 精度ではないので、一度ガラスの母型に金を蒸着させて、それを移しとるようにして、きれいな鏡面を 得る。しかし、先にも書いたように、円錐で近似している点、反射鏡の加工精度が直接研磨型に対して よくない点、また、反射鏡の枚数の関係上それらを正確な位置に固定できない点などが原因となり、高 角度分解能を実現できていない。

表 1.1: Chandra と Astro-E の比較—

衛星名	口径 (cm)	ミラー長 (cm)	焦点距離 (m)	ネスト数 (枚)	角分解能(秒角)
Chandra	120	84	10	6	0.5
Astro-E	40	10	4.75	175	120

1.3 レプリカ法による反射鏡製作

このように、多重薄板構造を用いて日本の「Astro-E」の望遠鏡は、アメリカの「Chandra」の望遠鏡の1/100の重量を実現し、1/3の口径で同等の有効面積を実現することができた。しかし、1)反射鏡製作の容易さから「Walter-1」型の二次曲面を円錐で近似させている点や、2)反射鏡の製作段階で生まれる反射面等の形状誤差がある点、3)厚さ150µのアルミ基板に金を移しとった反射鏡を上下のアライメントバーでしか固定できてないために反射鏡の位置に誤差が生じている点などのために、「Chandra」では0.5秒角を実現している角分解能において「Astro-E」では100秒角までしか実現できていない。

上にあげた3つの要因の中で特に角分解能劣化に起因しているのは、2)反射鏡の形状誤差、3)反 射鏡の位置決め誤差である。もしこの点を改良できれば、高い集光力と高解像度(高い角分解能)をと もに実現することができるはずである。高い集光力を維持するために、多重薄板型構造を用いながら、 角分解能劣化原因を少しでも改良し、Chandraのようなより高解像度のX線望遠鏡の開発を目指す。

「Chandra」のような高解像度を実現させるためには、2)反射鏡の形状誤差、3)反射鏡の位置決め誤差について改善しなければならない。本論文ではこの二つの要因のうちの2)の反射鏡形状誤差に注目し、実際にレプリカ法で望遠鏡にセットする反射鏡を作りながら、より良い反射鏡の製作、そしてその妨げになっている問題点について考えていく。



図 1.2: 結像性能劣化の要因



図 1.3: 多重薄板型望遠鏡に用いる反射鏡―実際に製作したもの

第2章 レプリカ法の概要

2.1 レプリカ法の流れ

レプリカ法の大まかな行程を述べると、まず反射鏡の基板の製作を行う。基板の製作と平行して、ガ ラスの母型(この母型をガラスマンドレルという)に対して反射物質(ここでは金)の成膜を行う。そし て、反射鏡基板と反射物質の膜ができたら、それぞれを接着剤で接着する。最後にガラスマンドレルか ら反射基板を反射物質の膜と共に剥離する。図2.1のような流れで反射鏡を作る。

1. 基板の製作

- 基板の切り出し
- バリ取り―図 2.1 の 1
- ローラーによる粗成形——図 2.1 の 2
- 熱成形──図 2.1 の 3
- 2. 反射物質の成膜
 - ガラスマンドレルの洗浄
 - ガラスマンドレルに反射物質を成膜——図 2.1 の 4

3. 基板と反射膜の接着

- エポキシの噴霧—図 2.1 の 5
- 基板の圧着──図 2.1 の 6
- エポキシ硬化——図 2.1 の 7

4. 反射鏡の完成

● 基板の剥離──図 2.1 の 8

このようにして、ガラスマンドレルの表面形状を写し取ることによって、精度良く加工することが困 難な薄いアルミ基板の表面に滑かな反射鏡面を作り出すことが出来る。







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



6. 真空圧着



8.剥離

図 2.1: 反射鏡製作手順

2.2 反射鏡基板の製作

多重薄板型望遠鏡は Wolter1 型光学系を円錐近似しているため、反射鏡も円錐形にしなければならない。円錐形の反射鏡制作のためにも反射鏡の外形形状を決める基板は精度よく加工しなければならない。

2.2.1 反射鏡基板の切り出し

基板の形状は反射鏡の形状を決めるものであり、また基板の外形形状が揃っていないと熱成形時の基 板形状劣化の大きな原因になる。そのため、反射鏡の切り出しも精度よく行う必要がある。そこで反射 鏡基板を切り出しにはサブミクロンの精度で金属を加工できる放電加工を用いる。円錐形反射鏡の製作 のため、反射鏡基板は切り出しの段階から円錐を展開した形にしておく。切り出した基板は扇形をして いて、その上下の曲率は反射鏡の望遠鏡内のセットされる位置によって決まる。表 2.1 のパラメータは 望遠鏡中心から半径 100mm の所にある反射鏡 (以下、R71 とする。R71 は内側から 71 番目の反射鏡と いう意味である。)のものである。

	Top-Radius[mm]	Bottom-Radius[mm]	Elevation[degree]
Primary	100.0595	100.0589	0.3022
Secondary	99.9418	98.3340	0.0044

表 2.1: 反射鏡のセットされる場所 (アライメントプレート溝内)のパラメータ- R71の反射鏡のパラメータ

2.2.2 バリ取り

放電加工で切り出した場合でも、端面にはバリが残ってしまう。このバリが残っていると、熱成形時に 基板形状劣化の原因になる。この形状劣化を避けるため、このようなバリを取り除く、バリ取りの作業 を行う必要がある。具体的には、まず、図 2.2の様にルーターを使って荒くバリを取り、その後に 2000 番の紙やすりを用いて、きれいに仕上げる。



図 2.2: バリ取り - 左図:模式図、右図:実際の作業の様子

2.2.3 ローラーによる粗成形

切り出し、バリ取りを済ませたアルミ基板を図 2.3 のようにローラーを通して円錐形に粗成形する。こ のローラーを使った粗成形により、基板を熱成形金型に精度よく配置できるようにする。熱成形金型へ の配置精度も熱成形時の基板形状劣化に大きく関係する。基板をローラにかける時は、ローラーや基板 表面にゴミ等が付着していると基板に付いてしまい、ゴミが基板に入り込んでしまって取れなくなった り、熱成形時に混入して基板形状を劣化させる。そのため、粗成形のためにローラーを通す時は定期的 に乾燥空気等で基板にゴミ等が付かないようにする。



図 2.3: 粗成形 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

2.2.4 熱成形

熱成形とはローラーにより粗成形したアルミ基板を、反射鏡の形状に精度よく加工したアルミの母型 に押し付けながら加熱する事により、反射鏡の形状に成形する事である。アルミ母型の表面は、理想的 な反射鏡の形である円錐形に加工されている。



図 2.4: 熱成形 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

図 2.4 のように真空排気用の穴が開けられていて、その周りに基板の形状より四方を 5mmm ほど大き く切り抜いたシリコンシート(ガスケット)を貼り、ロールして粗成形したアルミ基板をガスケットと 同じくらいの厚みとなるように積層し、ガスケットの枠内に配置する。積層の際、一枚一枚のアルミ基 板がずれないように、またアルミ基板が熱成形金型の真中に配置されるように精度よくあわせる。

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。これにより、アルミ基板はカプト ンフィルムの側から大気圧(単位面積あたり約 1kg/cm²)で円錐形をしたアルミの熱成形母型に押し付 けられる。この状態で加熱して、基板を目的の形状に成型する。今回の実験では、厚さ 120µm と 150µm の基板を使用した。基板の厚さの違いによるパラメータの違いは 2.2 にまとめる。

表 2.2: 行なった熱成形のパラメーター—120µmR40p&s、R71p&s、そして 150µmR71p&s を 2 回熱成型した。用い たシリコンシートの厚さは 3mm

反射鏡基板の厚さ	加熱温度	加熱時間	積層枚数
$120 \mu { m m}$	160	10 時間	21 枚
150µm-1 回目	200	10 時間	19 枚
150µm-2 回目	200	12 時間	19 枚

熱成形の際は一度で多数の基板を成形するために基板を積層して行う。このため、一枚一枚の基板の 歪みやへこみ、基板切断面のバリや埃の混入などがあると、他の基板にも形状劣化が伝播してしまう。 熱成形した基板の形状制度はレプリカ後の反射鏡精度にも大きく影響するため、熱成形時の基板の選択、 取り扱いには細心の注意を払わなければならない

2.2.5 熱成形用アルミ母型と熱成形後のアルミ基板の表面形状

レプリカ法で製作する反射鏡がガラスマンドレルの表面形状を写し取るように、熱成形を行ったアル ミ基板は熱成形金型の形状を反映したものとなる。そのため、金型は精度よく加工された表面形状のよ いものでなければならない。この熱成形に用いる円錐形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。この測定システムについての詳細は 3.2.2 で述べる。

円錐形金型の測定は穴から 200 mmのところまでで、真空引き用の穴を中心に、左右へ 25 度間隔で 測定した。図 2.5 は半径 100 の熱成形金型の表面形状測定結果を方位角方向に展開し 3 次元的に表した ものである。望遠鏡の Primary と Secondary に用いられる反射鏡はそれぞれ円錐形状が異なるため、2 種類の金型が必要になる。それぞれを R71-P、R71-S と ID を与え区別した。図 2.5 から分かるように、 真空引きの穴の周辺は、多少ゆがんでいるが、実際に熱成形に使用する部分は 1[µ m] 程度の凸凹しか存 在しない。したがって、熱成形によって金型と同程度の反射鏡基板ができると考えると、1 [µ m] 程度 の凸凹しかない反射鏡基板がつくる事ができるということである。反射鏡の形状測定に用いる法線揺ら ぎを使って、熱成形金型の形状評価を行う。(法線揺らぎの定義についてはで述べる。) 図 2.5 の母線方 向の形状から、実際に熱成型に使用する約 100mm(正確な反射鏡の母線方向の長さは 101.6mm)の間の 法線揺らぎを求め、その平均を表 2.2.5 にまとめる。

ID	平均法線揺らぎ(秒角)
R71-P	7.8
R71-S	16.3

表 2.3: 熱成形金型表面形状の平均法線揺らぎ



図 2.5: 熱成形金型表面形状 - 熱成形金型の母線方向の形状を真空引き用の穴を中心に 25 度ごとに測定し、方位角方向 に展開し 3 次元的に表した。右図:R71-P, 左図:R71-S

次に反射鏡基板が熱成形の前後で形状がどのように変化したかを知るため、基板の母線形状を測定した。熱成形前の基板を傷付けることはできないので、比較は同じ基板の熱成形前後ではなく、粗成形だけの基板と熱成形した基板で比較した。)120µmの基板はR71-sで150µmの基板はR71-pで、粗成形のロールがけのみ行なった基板と、熱成形時に一番下にセットして熱成形を行なった基板(熱成形金型に 直接接して熱成形された基板)をレーザー変位計を用いて母線形状を測定しそれぞれを比較して、図2.6 に表した。



図 2.6: 粗成形と熱成形の差----左図:120µm、右図:150µmの基板で、それぞれ黒が粗成形のみの基板の母線形状で、赤が熱成型された基板の母線形状。

図 2.6 の母線形状から法線揺らぎを求めて、 2.4 にまとめる。熱成形を行なった反射鏡基板の法線揺 らぎは 30 秒角前後となっており、にまとめた熱成形金型の母線形状の法線揺らぎよりかなり悪くなって しまっていることが分る。しかし、粗成形のみの反射鏡基板と比較すると格段に良くなっていることが 分る。

反射鏡基板	粗成形基板の法線揺らぎ (秒角)	熱成形基板の法線揺らぎ (秒角)
R71s (120μ)	112	34
R71p (150 μ)	64	24

表 2.4: 粗成形・熱成形基板の母線方向の法線揺らぎ―

前述したように、反射鏡基板が熱成形金型通りに熱成形されていれば、母線形状の法線揺らぎは10秒 前後となるはずが、現実には30秒前後なってしまっており、この事は熱成形の行程、または熱成形以前 の行程に改善の余地があることを示している。しかし、現在問題になっているのは数 µ 程度の形状で、 もし理想的にレプリカ法が行なわれれば、このような数 µ 程度の形状劣化は反射物質の膜を接着するた めの接着剤で吸収し、ガラス母型の形状を写し取れるはずである。



次に熱成形金型に積層した基板が、外側にいくにつれてどのように形状が変化していくかを調べた。

図 2.7: 熱成形された基板の母線形状の積層位置による変化—熱成形後時に積層された基板の数枚の母線形状を 重ねた。ID のナンバーが大きい (外側に積層された) 基板ほど端の形状が悪くなって行っていることが分る。

120µm は内側から 1、5、10、15、20、23 枚目、150µm は内側から 1、5、10、15、19 枚目の形状を、 図 2.7 には重ねて、図 2.8 にはならべて表示した。これら 2 つの図から分るように熱成形された基板の母



図 2.8: 熱成形された基板の母線形状の積層位置による変化 — 熱成形後時に積層された基板の数枚の母線形状を ならべた。ID のナンバーが大きい (外側に積層された) 基板ほど端の形状が悪くなって行っていることが分る。

線形状は大部分は内側でも外側でも同じ形状をしている。この事から基板は1~2µmの精度で厚さが均 一であることが分る。もしも基板に厚さむらが存在すれば、熱成形の性質上それは外側の基板へと伝搬 し外側の基板の大きく変型させてしまうからである。

しかし、基板の両端の 5mm 程度の範囲では外側にいくほど基板の形状が悪くなっていっていることが 分る。この部分は熱成形の前段階であるバリ取りの行程で加工した部分である。そのため原因として最 も考えやすいのはバリ取りの際に両端の基板の厚みにむらが出来てしまうのではないかと言うことであ るが、はっきりとした原因は未だに分っていない。この形状劣化はひどいものでは 10[µm] 以上のスケー ルでおこってしまっている。このスケールになると前述したような接着剤による吸収が効かなくなる可 能性があるため、アルミ基板は出来るだけ内側に積層したものを使用した方が良いと考えられる。

2.3 ガラスマンドレルへの反射膜(金)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マンドレルの表面に反射物質の膜(金の膜)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、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ターゲットの表面から原子・分子が飛びだす現象である。スパッタリング法については後述する。

2.3.1 マンドレル洗浄

?? レプリカ法の最大の利点は、薄いアルミ基板の表面に母型となるガラスマンドレルの滑かな表面形 状を写し取る事により滑かで法線揺らぎの少ない鏡面を得ることである。ここで重要になってくるのは ガラスマンドレルの表面である。ガラスマンドレルの表面形状の法線揺らぎが小さく理想的な形状であ る事も大切であるが、表面に汚れ等がない事も重要な要素である。母型であるガラスマンドレルの表面 に汚れや水跡、傷などがあると、レプリカに法によってマンドレルの表面形状と供にそれ等も写し取っ てしまい、結像性能や反射率を低下させる原因ともなる。そのため、スパッタリングで成膜する前に行 なうガラスマンドレル洗浄は反射鏡性能を決める重要な行程である。

マンドレル洗浄の際に、一番始めに注意深く取り除かなければならないものは、前回の反射膜成膜時 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、 その部分はレプリカで剥離する際にも金を基板に写し取ることが出来ず、反射鏡に剥し残しが出来てし まう。また、蒸着物質やゴミ等の洗浄前からあるもの以外にも、洗浄に用いるイソプロパノールやイオ ン交換水に含まれる不純物質にも注意しなければならない。マンドレル表面上に水滴が残っていると、 乾燥した後もその部分に水跡が残る。

実際にガラスマンドレルの洗浄は以下の様に行なった。

- 1. マンドレルに残った蒸着膜をテープで剥離
- 2. イソプロパノールで洗浄
- 3. イオン交換水で洗浄
- チープで取れなかった蒸着物質をイオン交換水をかけながら、かみそりなどの硬いものを押し当てて とる
- 5. 表面の水滴をエアーで吹き飛ばす
- 6. 恒温槽で乾燥

1. では、マンドレルに残っている金をテープを使って剥す。この行程で、マンドレルに残っている金 は出来る限り取り除くようにする。2. 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。それとともに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。3. の行程では、 2. 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。4. の行程では、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。また、この際マンドレル上でイオン交換水を乾燥させてしまわないように、常 に全体に水をかける様に気を配る。イオン交換水が前にも述べたように、イオン交換水が乾燥してしま うと、水跡の原因になってしまう。5. 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。こまかい水滴も少しも残さないように気をつける。 (6.) 最後に 50 度の恒温槽で乾燥させる。

2.3.2 ガラスマンドレルの形状測定

金を蒸着するガラスマンドレルは、溶かしたガラスを円柱状に引き延ばし表面を溶けた状態の液面の 滑らかさを保ったまま固める、引き抜き法と言う手法で制作されている。この手法で制作されたマンド レルは非常に滑らかな表面を形成することが出来るが、マンドレルの母線方向に 10µm 程のスケールの うねりを生じてしまう。すでに述べたように、レプリカ法は母型であるガラスマンドレルの表面形状を 写し取ることで平坦な鏡面を得ているため、ガラスマンドレルの表面形状よりも平坦な反射鏡を制作す ることは出来ない。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充分把握しておく必要がある。レプリカ法はガ ラスマンドレルの表面形状を写し取る事により、表面形状の良い反射鏡を製作する方法なので、ただ単 に反射鏡の形状が良くなっても意味がない。たとえ表面形状のきれいな反射鏡が出来たとしても、その 反射鏡の形状がガラスマンドレルの形状を写し取っていないとそれはレプリカ法として成功しておらず、 安定したきれいな反射鏡の製作が不可能であることを意味する。レプリカ前に製作できる反射鏡の結像 性能の上限値を知るためにも、またレプリカ法の評価をするためにも、マンドレルの形状を測定してお

現在、反射鏡制作に使用しているガラスマンドレルは2種類ある。いずれもショット社のガラスを使用しているが1種類はシバタ科学を通して購入したもので、2002年の秋から使用している。このマンドレルは直径が180mmで3本あり、区別のためIDに「old」と付ける。もう1種類は、同じくショット社のガラスだが、名古屋大学において切断されたものである。名古屋大学で切断されたマンドレルは直径180、200、225、320のものが各10本づつで、40本ある。(一種類の径については10本ずつあるが、これらのマンドレルは一本のガラスマンドレルを10本に切断していて、両端の2本は形状がわるく利用できないため、実質使えるのは1つの径につき8本ずつである。)

今回の製作で使用しているガラスマンドレルは主に名古屋大学で切断されたものを使用しており、直径 180、200のものを使用した。それぞれを R90、R100として各マンドレルに1から10の ID を付けた。 以下に測定したガラスマンドレルの形状と測定ラインごとの法線揺らぎを示す。



図 2.9: 上図:R100-1、下図:R100-3



図 2.10: 上から、R100-4、R100-5、R100-6、R100-7



図 2.11: 上から、R100-8、R100-9、R90-1、R90-2



図 2.12: 上図: R90-3、下図: R90-4

以上が主に今回の実験で使用したガラスマンドレルのデータである。それぞれ左側がマンドレル形状 を展開し3次元にして示したものであり、右側が各測定ラインごとに法線揺らぎを求めて示したもので ある。

2.3.3 金の成膜

洗浄の終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法を用いる。 スパッタリング法とは高真空(1mTorr)の電極間にスパッタガスとよばれるガスを流しこむと、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か ら1000V程度の高電圧をかけると、電子は加速され、エネルギーを増ながら次々にガスを電離させる。 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言い、陽イオン一個あたりに発生 するスパッタ粒子の平均箇数をスパッタ率と言う。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、10eV オーダーの高いエネルギーをもつことである。このような高い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おこりやすいのでより緻密な膜になる。また、スパッ 夕法は成膜測度が一定で膜厚の制御性に優れていることも利点の一つである。

しかし、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



蒸着前

蒸着後

図 2.13: 金の成膜 – 左図:模式図–ターゲット近傍には永久磁石によりアルゴンのプラズマが閉じ込められ、電場により アルゴンイオンがターゲットに打ち込まれる、右図:実際の作業の様子

とが出来ないことである。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 あると言われている。

スパッタリング法にはいくつかの種類があるが、この実験では大阪真空社製のスパッタ装置を使用している。この大阪真空社製の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 うになり、電子をターゲット近傍に閉じ込めることが出来るため、陽イオンの生成率を上げ、成膜速度 を上げることが出来る。また、より低いガス圧で安定したプラズマを作りだすことが出来る。

この大阪真空社製のスパッタ装置を用いてガラスマンドレルにスッパッタを行ない、反射物質である 金の膜を成膜する。

2.4 アルミ基板と反射鏡の接着

2.4.1 エポキシ樹枝の噴霧

ガラスマンドレルに成膜された金の膜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。本測定で使用したエポキシ樹脂はは 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 2.14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 2.14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 2.14: エポキシの噴霧 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

2.4.2 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 2.15の 様な圧着システムを構築した。



図 2.15: 圧着 - 左図:模式図、右図:実際の作業の様子

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)。このような反射鏡面へのダメージを避けるため、50 度で硬化させた。

2.5 基板の剥離(反射鏡の完成)

2.5.1 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。現行の剥 離法としては、反射鏡とガラスマンドレルの間にレンズクリーナーを滑り込ませ形状を歪めないように ゆるやかに剥離する手法を採用している。

以前は、端をテープで持ちあげ、少しずつ手で剥していく手法を取っていた。その後、端を持ちあげて から乾燥空気を流しこんで剥していく手法も試した。しかしいずれも円周方向の形状をゆがめる割合が 非常に高かった。そこで現在はレンズクリーナーを用いた手法を用いている。端を持ちあげるところま では今までと同じであるが、そこにレンズクリーナーを滑り込ませる。滑り込ませたレンズクリーナー を少しずつ進める。レンズクリーナーを入れると、反射鏡が自然に剥がれていくので、剥がれて行くの を待ちつつ少しずつ進める。この方法はレンズクリーナーが反射鏡鏡面に直接触れるため鏡面への影響



図 2.16: 基板の剥離 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

が心配されるが、それに付いては 3.1 で検証する。円周方向の形状については、これまでに試した他の 方法よりゆがみのない形状が出来やすかった。



図 2.17: 製作した反射鏡—

第3章 製作した反射鏡の評価

3.1 反射鏡表面の粗さの測定

反射鏡表面の粗さが大きいと、反射率を下げ、また散乱をおこして結像性能の低下につながる。従っ て、表面の粗さは反射鏡の性能を決める重要なパラメータである。そこで、現状の反射鏡の性能を知る ためにも、またどのようなことが粗さに関係しているかを確かめるためにも、表面の粗さを測定した。

3.1.1 反射鏡表面粗さ測定の目的

1. 製作した反射鏡の粗さの把握

2. ガラスマンドレルの粗さへの影響を把握

3. 剥離手法の粗さへの影響を把握

1. 制作した反射鏡粗さの把握

現在制作している反射鏡の表面の粗さを測定し、我々が制作している反射鏡がどの程度の粗さをもって いるのかを調べる。また Astro-E2 の反射鏡の表面粗さと比較し、フライトモデルに比べてどの程度の 粗さを持っているのかを把握する。

2. ガラスマンドレルの粗さへの影響を把握

2.3.2 で述べたように、現在使用中のガラスマンドレルは2種類あり、1つはシバタ科学で、そしてもう 1つは名古屋大学で切断されたものである。それぞれ入手経路の異なるマンドレルはガラスの肉厚も異 なり、全く別のものである。これらのマンドレルの違いが粗さに与える影響を調べる。

3. 剥離手法の粗さへの影響を把握

反射鏡の制作の際に、いくつかの剥離手法を試した。その中の一つに、レンズクリーナーを反射鏡鏡面 とガラスマンドレルの間を滑べらして剥離する手法がある。他の手法の場合は一切反射鏡表面には触れ ないのだが、この方法の場合は反射鏡表面に直接レンズクリーナーが触れる事になる。従って、反射鏡鏡 面になんらかの影響を与えていることが考えられる。そこで、このレンズクリーナーを使って剥した反 射鏡と、一切鏡面には触れずに端から手で剥していった反射鏡の粗さの違いを見て、レンズクリーナー の摩擦による表面への影響をみる。

3.1.2 反射鏡表面粗さ測定のサンプル

表 3.1 にあるサンプルに対して X 線を用いて粗さの測定を行なった。まず、4 枚のサンプルに付いて 粗さの測定を行なうことによって、現在制作中の反射鏡がどの程度の粗さをもっているのかを確かめる。 また、4 枚のサンプルの内、3 枚はちがうマンドレルからレプリカしたものである。従ってこの3 種類の マンドレルからレプリカしたものを比較することによって、ガラスマンドレルの粗さへの影響を知る事 が出来る。また、サンプル2と3 に関しては同じマンドレルからレプリカした反射鏡であるが剥し方が 異なる。そこでこの2 つの粗さを比較する事により、剥し方、特にレンズクリーナーを用いた剥し方が 粗さに影響するかどうかを知る事が出来る。

SampleNo	Foil-ID	ガラスマンドレル ID	剥離手法	法線揺らぎ (秒角)
1	20030819 R40_p12	old-1	hand	160
2	20030820 R71_p23	5	Air	86
3	20030820 R71 s04	5	lens cleaner	16
4	20030820 R71_s11	1	Air	50

表 3.1: 粗さ測定のサンプル

3.1.3 反射鏡表面粗さ測定システム

粗さの測定は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙科学研究本部にある 5m ビームラインで X 線を用 いて行なった。このビームラインは最上流の X 線発生装置と最下流にあるサンプルチェンバーをダクト で結んで構成されている。図 3.1 と 3.2 はそれぞれ、上流からのビームラインの写真とサンプルチェン バーの写真である。また図 3.3 はビームラインの模式図である。



図 3.1: 5m ビームラインを上流上方から下 流を眺めたもの。手前から長く延びている 管がダクトで、その先の下流にチェンバー がある。手前にあるのはプレチェンバー。

図 3.2: チェンバー



図 3.3: 宇宙科学研究本部の 5m ビームライン 摸式図

最上流にある X 線発生装置とサンプルチェンバーは X 線の平行度を上げるため、距離を取ってダクト で結ばれている。ダクトを通ってサンプルチェンバーに到達した X 線はピンホールを通り、フィルター で単色化され、サンプルに到達する。今回は X 線に Ti – K_αを用い、フィルターには Ti フィルターを使 用した。サンプルチェンバーの中には、回転テーブルと回転アームから成る $\theta = 2\theta$ ステージがあり、こ の回転中心をビームが通るようにピンホール位置が調節されている。また、回転ステージ(θ ステージ) 上には Y ステージがあり、横方向にも移動することが出来る。サンプルは回転テーブル上の Y ステージ にサンプルホルダーで固定しておく。回転アーム (2θ ステージ)には検出器である、ガスフロー型比例計 数管をセットする。



図 3.4: チャンバー内部写真、左から比例計数管、スリット、反射鏡、フィルター、ピンホール。右側が 上流で写真に対し左に向かって X 線は進む。



図 3.5: 左奥が比例計数管その手前がスリット回転ステージとスリット、中央にサンプルとYステージ。

3.1.4 反射鏡表面粗さ測定の方法

反射鏡、X線ビームおよび検出器のアライメント

1. X線検出器の位置合わせ

X線ビーム軸上の障害物を全て移動させて取り除き、20ステージでX線ビームを横切るよう に検出器を移動させる。この時にX線強度を測定し、X線強度が最大になる位置を捜す。こ のX線強度が最大になる位置が、検出器の中心にX線が来る位置であり、この位置を検出器 の原点とする。

2. 検出器前スリットの位置合わせ

サンプルの位置をより精度よく決定するためサンプルアライメント中は検出器前にスリット をいれる。スリットは X 線強度を測定しながら X 線ビームを横切るように *Slit* – θ ステージ を回転させていくことでスキャンする。X 線のカウント数が最も大きくなる位置をスリット の原点とする。スリット幅は 0.1mm のものを使用している。

- 検出器+スリットの位置合わせ
 検出器前スリットが検出器の前にある状態で X 線ビームを 20 ステージの回転によりスキャンし、X 線のカウント数が最も大きくなる位置を改めて検出器の原点とする。
- サンプルと X 線の平行出し
 Y ステージを用いてサンプルを X 線のカウント数が半分程度になる位置に移動させた後、この位置でサンプルを θ ステージで回転させると、サンプルと X 線が平行になった時にカウント数が最大になる。この方法によりサンプルが X 線に平行でかつ、サンプルが X 線ビームの半分をかくす位置を求める。
- 5. X 線反射光による確認 サンプルを θ、検出器を 2θ だけ回転させ、検出器のみをこの付近で移動させ反射強度を確認 する。これは X 線ビームを隠しているものが目的のサンプルであることと 4. で求めたサンプ ル角度が正しいことを確認する目的がある。
- 6. サンプルの測定点の決定

サンプルをビームと垂直方向に移動させ、X 線を半分に切る位置を正確に求め、この Y 座標 の位置を Y₀ とする。その後、サンプルを適当な角度 θ_a だけ回転させた状態で再び Y ステー ジを動かし、X 線が半分になる位置 Y_a を捜す。これらの数値が決まると、X 線がサンプル のビームライン下流側の端から (Y₀-Y_a)/sin θ_a の位置に当たっていることがわかる。このよ うにして X 線の初期位置が決まる。

7. アライメントの修了

検出器前のスリットを光軸から外してサンプルアライメントは完了する。

反射率測定

反射率は基本的に反射光のスペクトルをダイレクトのスペクトルで割ることによって得ることができる。

- ダイレクトビームの強度測定
 光軸上からサンプルを外し、X線のダイレクトビームの強度を測定する。
- 2. 測定

サンプルを光軸上にもどしてから、サンプルを θ 回転させる毎に、検出器を 2θ 回転させ、入 射角 θ における X 線の反射強度を測定する。



図 3.6: 反射率測定中の各ステージの位置

ダイレクトビームの強度測定
 再びダイレクトビームの強度を測定し測定前後ではビームの強度に大きな変化がない事を確認する。

表面粗さの測定

$$R = R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta_i}{\lambda}\right)^2\right) \tag{3.1}$$

この式は、ある波長 λ のX線が表面粗さ σ の反射面で反射された場合の反射率Rと粗さが無い場合の反射面での理論的な反射率 R_0 との関係を示している。ここで、 R_0 は物質と光の入射角、エネルギーで決まる。そして反射率を θ の関数として測定した結果に、式 3.1の表面粗さ σ のみをフリーパラメータとしたモデルをフィッティングすることにより、反射鏡の表面粗さを評価する。

3.1.5 反射鏡表面粗さ測定の結果

 $Ti - K_{\alpha}($ 波長 $\lambda = 0.275[nm]$)を用いて測定を行なった結果を次に示す。表 3.2 は測定で求めたそれぞれのサンプルの反射鏡の粗さを表にまとめたものである。図 3.7 はそれぞれ理論反射率と実測データの反射率をフィットしたものである。

SampleNo	Foil ID	反射鏡表面粗さ (Å)
1	R40-p12	7.8 ± 0.06
2	R71-p23	5.0 ± 0.01
3	R71-s04	4.7 ± 0.01
4	R71-s11	5.0 ± 0.05

表 3.2: 今回測定した反射鏡の表面粗さ—



図 3.7:4 枚の反射鏡の表面粗さ―縦軸が反射率、横軸が反射鏡をかたむけた角度 (degree) を表している。黒点が実際 に測定されたある角度における反射率で、赤の実線が理論反射率。左上図:R40-p12、右上図:R71-p23、左下図:R71-s04、 右下図:R71-s11

図 3.8 は R71-s04 と、理想的に粗さが 0 であるモデルを考えて比較したものである。金の臨界角 (Ti-K α の時) である 0.98° のところで反射率が大きく落ちている事が図 3.8 から読み取れるまた、反射鏡 R71-s04 の粗さが 4.7Å あるため、理想的な、粗さ 0Å のモデル値より反射率が落ちているのが分る。



図 3.8: R71-s04 と粗さ0のモデル—赤い線は粗さ0の時のモデルで、R71-s04 黒の各点が実測データ

3.1.6 反射鏡表面粗さの評価

1. 制作した反射鏡の粗さについて今回測定した反射鏡の粗さは R40p-12 以外の 3 枚はだいたい 5(Å) 程度であることが分った。これを Astro-E2 衛星に搭載される反射鏡の粗さと比較する。



図 3.9: 反射鏡の表面粗さ -縦軸が反射率、横軸が反射鏡をかたむけた角度 (degree) を表している。黒点が実際に測定されたある角度における反射率で、赤の実線が理論反射率。左図:Foil R71-p23、右図:Astro-E2 Test QT foil P102

この結果から今回我々が製作した反射鏡は、Astro-E2衛星に搭載される反射鏡に比べて表面粗さ

表 3.3: 製作した反射鏡と AStro-E2 TestQT の反射鏡の表面粗さ—

Foil ID	反射鏡表面粗さ (Å)
Foil R71-p23	5.0 ± 0.01
Astro-E2 Test QT foil P102	6.3 ± 0.06

が同等かそれ以上のものが出来ていると言える。表面粗さに関しては現在製作している反射鏡は 衛星搭載に充分な性能を持っていることが分る。

 ガラスマンドレルの粗さへの影響について反射鏡の表面粗さとガラスマンドレルの関係に付いて 考える。サンプル2のR71-p23と3のR71-s04については、全く同じマンドレルからレプリカし た反射鏡である。この2枚の粗さは非常に近い値いになっている。またサンプル4のR71-s11に 関してもこの2枚と殆んど同じ値いになっている。サンプル2、3のガラスマンドレルと、サンプ ル3、4のガラスマンドレルは別のガラスマンドレルではあるが、これらは元は一本のガラスでそ れを切断して出来たため、非常に近い値いという結果は予想と一致する。

今回測定した4枚のうち、サンプル1のR40-p12のみは、他のサンプル違い、全く異なるガラス マンドレルからレプリカしたものである。結果、R40-p12のみ、他の反射鏡より非常に大きな粗さ を持っていることが分る。要因として考えられる事は、一つ目に元々ガラスマンドレルの持つ粗 さが非常に粗いものであったということが考えられる。また、もう一つの考えられる要因として、 R40-p12のレプリカに使用したガラスマンドレルは他のマンドレルより長く使用している。その ため、使用している間に表面の粗さが大きくなってしまったということも考えられる。 古いガラスマンドレルに関して、なぜ粗さが大きくなってしまったかという事はまだ明らかになっ

SampleNo	Foil ID	表面粗さ (Å)	ガラスマンドレル	剥離手法
1	R40-p12	7.8 ± 0.06	old-1	hand
2	R71-p23	5.0 ± 0.01	5	Air
3	R71-s04	4.7 ± 0.01	5	lens cleaner
4	R71-s11	5.0 ± 0.05	1	Air

表 3.4: 表面粗さと製作方法の関係—

ていないが、いずれにしてもガラスマンドレルが粗さに大きく影響を与えるという事は確かめる ことが出来た。

3. 剥離手法の粗さへの影響について今回測定した4枚のサンプルのうちサンプル3のR71-s04はレンズクリーナーを用いて剥した。すでに簡単には前述しているが、この手法は今回の反射鏡製作において行なったあたらしい手法である。今までは、手で端をもちあげ、そのまま手で剥して行っていた。また、手で端を剥してから、空気を流しこみ少しずつ剥していくという手法も試した。この二つの手法にに比べてレンズクリーナーを用いた手法の利点は円周方向にかたちを歪めることが少ないという点である。しかし、この手法では逆に大きな欠点があり、剥離中にレンズクリーナーが直接反射鏡鏡面に触れるという点である。肉眼で確かめる限り、大きな目立つ傷はないよ

うにみえるが、Åレベルの粗さを確認するため、今回の測定に全く同じマンドレルから、レンズ クリーナーを使って剥したサンプルR71-s04と空気を使って剥したR71-p23を測定した。この二 つのサンプルの粗を比較するR71-s04の方が若干よく、ほとんど差がない。この事から、レンズ クリーナーで剥した反射鏡に関しても、表面に悪い影響を与えていることはないと言える。

3.2 反射鏡母線方向の形状の測定

反射鏡の母線方向の形状(望遠鏡にセットしたときの光軸方向の形状)にゆがみがあると、X線を散乱 してしまい、焦点面で象をゆがめてしまう結果になり、高角度分解能の実現が不可能になってしまう。 ここでは製作した反射鏡の母線形状を測定し、現在製作している反射鏡の性能を調べる。

3.2.1 反射鏡母線方向の形状の測定の目的

反射鏡の母線形状は望遠鏡の角度分解能に大きく影響する。そのため、製作した反射鏡の評価として、 製作した反射鏡は全て母線形状の測定を行なった。X線望遠鏡にセットする反射鏡は主にこの母線方向 の形状のよいものを撰びセットした。現在までに100枚をこえる反射鏡を製作して来たが、今回はその 中で特に母線形状のよいものに付いてとりあげ、Astro-E2の反射鏡と比較する。

3.2.2 反射鏡母線方向の形状測定のシステムと方法

図 3.10 は母線方向の形状測定に用いたシステムである。





図 3.10: 測定システムの構成 -(上:実物、下:模式図)

製作した反射鏡は望遠鏡にセットするため、測定の際に鏡面形状をゆがめることは許されない。そこ で非接触型で、かつサブミクロンの精度で測定できるレーザー変位計を用いて反射鏡の母線形状を測定 した。(この測定システムは反射鏡の母線方向だけではなく、ガラスマンドレルや熱成形マンドレルの形 状測定にも使用した。)

このシステムは図 3.10 のようにレーザー変位計、X 軸・Z 軸併進ステージ、サンプル固定治具よりな りたっている。

レーザー変位計を測定対象物を下から見上げる形で取り付け、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に固定する。その後、X 軸併進ステージに よって対象物を図 3.10 の 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込み測定を行なう。 併進ステージには一般にピッチング、ヨーイングという鉛直方向のゆれと水平方向のゆれが存在する。そ のため最大形状誤差が 0.032[µm] である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 関数でフィットして差を取ることで除き、ステージ揺らぎのみを取り除くことが出来る。

レーザー変位計には三角測量の原理を利用した正反射型と、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共焦点型のレーザー変位計を使用した。鏡面などの 滑らかな面には正反射型、切削面などの荒れた面の測定には共焦点型のレーザー変位計を用いた。

3.2.3 反射鏡母線方向の形状測定の結果

ー年間を通し、レプリカ法で約100枚近くの反射鏡を製作した。前述したように、製作した反射鏡は 全て母線形状を測定し評価を行なった。

その中から例として4枚のサンプルを選び、形状を図3.11に示す。この5枚は比較的母線形状のうね りの少ない4枚である。

トップ、ボトムの両端において形状が大きくゆがんでいるが、その他の部分では比較的滑らかになっている。この母線形状の評価に付いては次で述べる。

3.2.4 反射鏡母線方向の形状の評価

母線形状の評価について考える。直接的に表面形状を評価する方法は、平均値から差分を取り表面形状の頻度分布を求め、平均二乗根 (RMS:Root Meab Square)を取る方法である。RMSの定義をに示す。

$$RMS = \frac{1}{l}\sqrt{\int_{0}^{l} [f(x) - \bar{f}]^{2} dx}$$
(3.2)

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、 \overline{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、表面凹凸の大きさを定量的に評価する ことが出来るが、望遠鏡の結像性能の評価に用いられる角分解能には直結しない。そこで法線揺らぎを 用いて表面形状を評価する。法線 n は

$$\boldsymbol{n} = \arctan(\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}})$$
(3.3)

のように隣り合った2点を結ぶ直線に直交するベクトル(法線ベクトル)として求めることが出来る。この時、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 θ_n とし、 θ_n の頻度分布を 法線揺らぎとして定義する。しかし、実際には測定対象物の面があれていたり、母線方向の形状測定シ ステムのところで述べたように、ステージの移動による振動、揺らぎのため3.3式では正確な法線揺ら



図 3.11: 製作した反射鏡の表面形状---

ぎを求めることが出来ない。そのため、測定したデータを一定間隔毎 (実際には 5mm で行なった) 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。 このようにして求め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、それ以上のピークを持ち正 規分布にならなかったので、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)を取ることで行なった。望遠鏡の角分解能を示す値 いにはもう一段階の計算が必要であるが、本論文では反射鏡単体の性能であるためこれ以上深くは触れ ない。

ここで定義した HPW の値いを前項で示した4枚の反射鏡に関して求めてみる。

Foil ID	法線揺らぎ (秒角)
R40 $p04(120mu)$	14
R71 $s04(120mu)$	16
R71 $s01-1st(150mu)$	14
R71 $s05-1st(150mu)$	10

表 3.5: 製作した反射鏡の法線揺らぎ—

粗さの時と同様に、Astro-E2のTestQTの反射鏡の母線形状を測定し比較してみる。



図 3.12: Astro-E2 Test QT 反射鏡の表面形状—

表	3.6:	Astro-E2	Test	QT	反射鏡の	HPW-
---	------	----------	------	----	------	------

Foil ID	法線揺らぎ	
Astro-E2 Test Qt p102	20	
Astro-E2 Test Qt s106	20	
Astro-E2 Test Qt s113	16	
Astro-E2 Test Qt s 113-2 $$	12	

このように、反射鏡母線方向形状のHPWで比較しても、我々が製作している反射鏡は、Astro-E2の 反射鏡と同程度であり、衛星搭載に充分な性能を持っていることが分る。

3.3 X線望遠鏡にセットしての測定

今回製作した反射鏡は現在、宇宙科学研究所と東京都立大学のチームで進んでいる高角度分解能多重 薄板型望遠鏡の開発において、実際にX線望遠鏡にセットしてX線での測定を行なった。測定方法や内 容についてはここでは述べないが、そのときの結果とAstro-E2の性能を比較する。

3.3.1 X線望遠鏡での測定結果と評価

我々の製作した反射鏡を用いたX線測定は2003年の秋と2003年から2004年にかけての冬の2回行なった。秋の測定には120μの基板を用いた反射鏡を使用し、冬のときは150μ基板の反射鏡を使用した。 (反射鏡基板の厚さは、望遠鏡の都合上変更した。本論文ではその詳細には触れない。)いずれの測定時 も最も出来のよい反射鏡、プライマリーとセカンダリー各5枚の10枚を使用して測定にのぞんだ。



図 3.13: ポインティングスキャン — 破線はアライメントプレートを表している。

望遠鏡の測定の測定のなかで、図 3.13 のように非常に細かな測定を行なった。この測定の各点のイ メージをカウント数のピークの位置、重心の位置が一致するように重ね合わせた。これにより、反射鏡 の位置決め誤差による角分解能の劣化部分をなくし、、反射鏡単体での角分解能、すなわち hpd を算出 した。その中で、最も hpd の良かった反射鏡の hpd は 57 秒角であった。この値いは Astro-E2 の反射鏡 の hpd の公表値である 50 秒には残念ながら及ばないが、我々の反射鏡持つ性能も非常に高いことを示 している。



図 3.14: 製作した反射鏡を使用した X線望遠鏡 (HR-XRT) のイメージ —

第4章 レプリカ法の現状と改善点

4.1 現状での反射鏡の性能

3.1 では X 線を用いて反射鏡の粗さを,3.2 ではレーザー変位計を用いて反射鏡の母線方向の形状を,3.3 では望遠鏡にセットして X 線測定を行ない反射鏡の性能を算出した。いずれの測定においても、2005 年 に打ち上げ予定の Astro-E2 の反射鏡の性能と比較してきたが、我々が製作してきた反射鏡もフライト モデルに対応できる性能に近いものが出来ていることが確かめられた。しかし、現状ではこのように高 い性能を持った反射鏡は我々が製作した反射鏡の一部だけである。他の反射鏡は残念ながらこのように 高い性能では出来ていない。この状態ではフライトモデルレベルの反射鏡の量産などは不可能である。

4.2 レプリカ法の現状

現在、性能の高い反射鏡はまだ一部しかできていないことは前述した。しかしレプリカ法とは母型で あるガラスマンドレルの形状を写し取る方法であり、本来なら反射鏡表面の形状はガラスマンドレルの 形状と全く同じになるはずである。そこで、横軸にガラスマンドレルの法線揺らぎ、縦軸に反射鏡の母 線形状の法線揺らぎを図 4.1 にプロットしてみる。



図 4.1: ガラスマンドレルと鏡面形状の法線揺らぎの関係 — 横軸がガラスマンドレルの法線揺らぎ (秒角)、縦軸が 反射鏡鏡面の法線揺らぎ

本来、理想的にレプリカ法が行なわれていれば、鏡面形状とガラスマンドレルの形状は全く同じにな るはずであり、当然、法線揺らぎも同じ値いになるはずである。従って、プロットされた各点は図4.1の 中で傾き1の直線上に集まるはずである。しかし図4.1から分るようにプロットされた点は、ほとんど が傾き1の直線からはずれている。従って反射鏡鏡面は明らかにガラスマンドレルの形状を写し取れて いない。これから、なぜガラスマンドレルの形状を写し取れていないかを考える。

4.3 現状での問題点

ガラスマンドレルの形状を写し取れていない理由として考えられるのは、剥離時に反射鏡を曲げてし まっているということである。またもう一つ考えられる点は、ガラスマンドレルに付いている時にエポ キシの表面張力で反射鏡基板がが曲げられ、剥離後に反射鏡基板が元に戻ろうとして反射鏡鏡面の形状 を変えてしまっているということである。この二つの可能性についてさぐるため、熱成形後、剥離前(ガ ラスマンドレルに反射鏡基板がついている状態)、剥離後で反射鏡の背面の形状を測定し、反射鏡形状の 変化を見た。

測定結果を図 4.2、4.3 にまとめる。それぞれ、黒は熱成形のみをおえた状態、赤は剥離前の状態 (反 射鏡基板がガラスマンドレルについた状態)、緑は剥離後の状態の、それぞれ反射鏡背面の母線形状であ る。R71_p08、R71_15、R71_s07、R71_s16のように形状がほとんど変化しないものもあるが、その一方 で、R71_p05、R71_p07、R71_s05、R71_s06のように、熱成形後と剥離前ではほとんど形状が変化しな いのに剥離後に大きく形状がゆがんでいることが分る。これは剥離時に余計な力がかかってしまい反射 鏡をゆがめてしまっているためと考えられる。

そこで実際にゆがめてしまった反射鏡の背面形状と鏡面形状を比較し、ガラスマンドレルの形状を写 し取れていない原因が「ゆがめてしまっている事」だけ茄のかを考える。図4.4 は反射鏡鏡面の形状が、 ゆがめ方とどの程度関係があるかを調べるために、黒に反射鏡鏡面形状、赤にガラスマンドレルの形状、 緑に熱成形後の形状(鏡面側)、青に剥離後の反射鏡背面の母線形状を示した図である。鏡面の形状はた しかにだいたいの形としては剥離後の反射鏡背面形状に近いがきれいには一致していない。

一方、剥離前後で背面形状にあまり変化のない反射鏡、すなわち、剥離時にあまりゆがめていないと 考えられる反射鏡についてみてみる。R71_p08、s07 は図 4.2、図 4.3 から、剥離前後の形状の変化が少 いようなので、図 4.5 に黒に反射鏡鏡面形状、赤にガラスマンドレルの形状、緑に熱成形後の形状 (鏡面 側)、青に剥離後の反射鏡背面の母線形状として表した。確かに反射鏡鏡面の形状はガラスマンドレルの 形状と一致している部分も多いがやはり完全ではない。

これ等のことから、鏡面形状がガラスマンドレルの形状を写し取れていない理由として剥離時に反射 鏡をゆがめてしまっている事が大きく関っているが、原因はそれだけではなく他にもなんらかの原因が あるように考えられる。

4.4 まとめ

現状で、我々の製作した反射鏡はフライトモデルに対応できる反射鏡ができている事が分った。今後 はこの割合を高めていくため、金とガラスの関係を検証しより反射鏡が剥しやすくなるように研究を進 め、剥離法を改善して行く必要がある。また、反射鏡面がガラスマンドレルの形を写し取れいない原因 は、単に反射鏡を曲げているだけとはおもえないので、その原因も追究する必要がある。



図 4.2: 反射鏡背面母線形状の変化—黒は熱成形後、赤は剥離前、緑は剥離後の反射鏡背面の母線形状。それぞれ、 R71_p05、p06、p07、p08、p15、p16(150µの2回目)



図 4.3: 反射鏡背面母線形状の変化—黒は熱成形後、赤は剥離前、緑は剥離後の反射鏡背面の母線形状。それぞれ、 R71_s05、s06、s07、s15、s16、s18(150µの2回目)



図 4.4: 剥離後の反射鏡鏡面と背面の母線形状の関係――黒は反射鏡鏡面の形状、赤はガラスマンドレルの形状、緑 は熱成形後の形状(表面側)、緑が剥離後の反射鏡背面の形状。それぞれ、R71_p07、s05(150µの2回目)。反射鏡の鏡面形状 は大きくは反射鏡をゆがめた形に近いが、きれいに一致はしていない。



図 4.5: 剥離後の反射鏡鏡面と背面の母線形状の関係—黒は反射鏡鏡面の形状、赤はガラスマンドレルの形状、緑 は熱成形後の形状(表面側)、緑が剥離後の反射鏡背面の形状。それぞれ、R71_p08、s07(150µの2回目)。ゆがめている量が 少ないとおもわれる反射鏡ではあるが、ガラスマンドレルの形状を完全には写し取れていない。