

## X 線望遠鏡用ガラス母型研磨の高精度化及び効率化

前島 将人 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

X 線望遠鏡の反射鏡の製作方法の一つにレプリカ法が知られている。この方法で作られる反射鏡の表面粗さと形状精度は圧着時に使用するガラス母型の表面の粗さと形状に大きく依存する。我々は表面粗さ 0.5 nm 以下の滑らかな表面と高い形状精度を持つガラス母型を研磨で製作することを目指している。現在の本研究の課題として、時間と手間がかかることがある。そこで、本研究ではガラス母型をより効率的に研磨すること、研磨したガラス母型を使って実際に反射鏡を製作しその表面粗さを測定することを目標とした。本研究では円筒ガラス研磨の効率化として、研磨剤の投入を必要としない研磨パッドを導入をした。これによって、研磨剤交換や研磨後の洗浄作業を短縮させることに成功した。また、この研磨パッドを導入することでむしろ 1 時間あたりの研磨量を  $0.030 \mu\text{m/h}$  から  $0.147 \mu\text{m/h}$  まで増加させた。次に、レプリカ法で反射鏡を製作し、8 keV の X 線を使って反射率の X 線入射角依存性を測定し、反射鏡表面粗さを見積もることで、研磨したガラス母型の表面粗さを評価した。これは研磨後のガラス母型の表面粗さが現在使用している触針式粗さ計の測定限界に到達したためである。測定結果より、ガラス母型の表面粗さは 1.0 nm 以下に低減していることが分かった。

## 1 研究概要

### 1.1 レプリカ法

多くの X 線望遠鏡は、放物面と双曲面に配置した反射鏡に 2 回反射させることによって光を集光する Wolter I 型斜入射光学系を採用している。その中でも、すぎく衛星や 2015 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H の X 線望遠鏡は多重薄板型望遠鏡と呼ばれ、薄い反射鏡を同心円状に共焦点配置することで軽量かつ大有効面積を持つ。この望遠鏡の製作方法の一つとして、ガラス母型に金属膜を成膜し、エポキシ接着剤を用いて圧着、離型することで基板に金属膜を転写させるレプリカ法がある。(図 1) この方法で作られる反射鏡表面は、ガラス母型の表面形状をそのまま写し取る。そのため、高い形状精度と滑らかな表面を要する X 線反射鏡の製作には、高い形状精度と滑らかな表面を持つガラス母型が要求される。

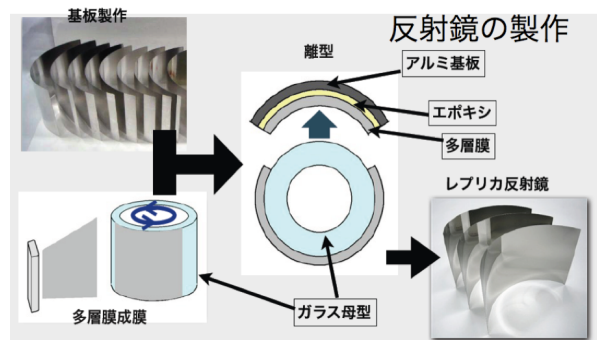


図 1: レプリカ法による反射鏡製作行程

### 1.2 ガラス母型研磨

現在、我々は溶融法で作られた市販品の円筒ガラス母型から母線形状が PV (Peak to Valley)  $10 \mu\text{m}$  以下のものを選別し、反射鏡製作を行っている。溶融法で作られる円筒ガラス母型は PV  $10 \mu\text{m}$  以下の高い形状精度をもつものは多くないため、レプリカ法で使用する円筒ガラス母型の選定には時間と人手が必要になる。これをふまえ、我々は形状精度の高いガラス母型を研削・研磨で製作する方法を考えた。研削ではガラス母型を高い形状精度に加工する

ことは可能だが、RMS 0.5 nm 以下の滑らかな表面を得ることはできない。そこで、本研究では研削によって高い形状精度を得たガラス母型を用いて、その形状精度を保ちながら研磨によって滑らかな表面に加工することを目指す。研削及び研磨によるガラス母型の製作が実現すれば、形状精度の高いガラス母型が安定して供給可能となる。

我々は、有限会社衣笠石英に依頼し PV 10  $\mu\text{m}$  以下の形状精度に研削加工した後、愛媛大学で開発した研磨装置を用いて研磨加工することでガラス母型の製作を行う。本研究の目標は、形状精度を保ったまま、表面粗さ RMS(Root Mean Square) 0.5 nm 以下に研磨加工することとした。本研究では試料として外径 200 mm、母線方向長さ 400 mm の SCHOTT 社製ホウケイ酸円筒ガラスを用いた。

研磨加工は、円筒ガラスに研磨パッドを押しあて軸中心に回転させることで行う。(図 2) また、研磨目的に応じ、研磨条件を変えることで効率よく研磨を行う。便宜上、本研究では 1  $\mu\text{m}$  以上の凹凸を削ることを目的とする荒削り研磨とそれ以下の凹凸を削ることを目的とする仕上げ研磨に分類した。

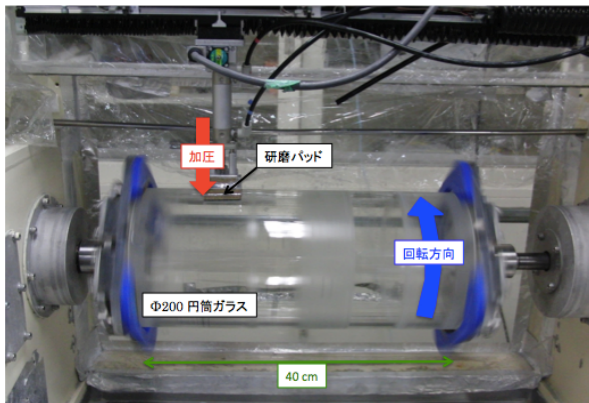


図 2: 円筒ガラス研磨の様子

## 2 ガラス母型研磨の効率化

従来のガラス母型研磨では、作業手順が複雑かつ母線幅 5 cm 研磨に約 80 時間かかるという問題点があった。そこで、研磨の効率化のために、これまで使用してきた研磨剤の投入を必要とする遊離砥粒研

磨パッドに代わり、研磨剤の投入を必要としない固定砥粒研磨パッドの導入した。固定砥粒研磨パッドを導入することで、手間のかかる研磨作業の研磨剤の調合、補充、洗浄を省略することが可能となった。

### 2.1 研磨条件の設定

研磨条件は以下の項目の組み合わせによって設定した。なお、研磨パッドと試料との相対速度は約 1160 mm/s に設定した。

- 研磨パッドと砥粒  
研磨パッドは、固定砥粒研磨パッドと遊離砥粒研磨パッドを使用した。固定砥粒研磨パッドは、研磨の際に研磨剤の投入が必要としない、研磨材を内包した研磨パッドである。遊離砥粒研磨パッドは、研磨の際に研磨剤の投入を必要とする、研磨材を内包しない研磨パッドである。砥粒はダイヤモンド砥粒と炭化ケイ素砥粒を使用した。
- 加圧  
研磨パッドに加える圧力は 3~9 kPa とした。
- 時間  
本研究では、3~5 時間研磨ごとに表面粗さ測定を行い、その結果より研磨時間を調節した。

### 2.2 研磨結果

本研究では 2 通りの条件で研磨を行った。各研磨条件とその結果を以下に示す。

#### 2.2.1 研磨条件 1

研磨条件 1 では、荒削り研磨では炭化ケイ素砥粒、仕上げ研磨ではダイヤモンド砥粒を内包する固定砥粒研磨パッドを使用した。研磨条件を表 1 に、研磨結果を図 3 に示す。研磨条件 1 で研磨後のガラス母型表面では幅 1.5 mm スケールの研磨ムラが目立った。

表 1: 研磨条件 1

分類	研磨パッド (砥粒)	加圧 (kPa)	時間 (hour)
荒削り研磨	固定砥粒研磨パッド (炭化ケイ素)	3.3~8.8	49.0
仕上げ研磨	固定砥粒研磨パッド (ダイヤモンド)	3.3~8.8	10.0

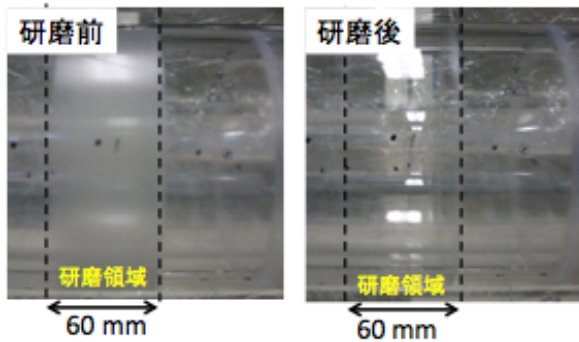


図 3: 研磨条件 1 で研磨前後ガラス母型表面

### 2.2.2 研磨条件 2

研磨条件 2 では、荒削り研磨ではダイヤモンド砥粒の固定砥粒研磨パッドを、仕上げ研磨では炭化ケイ素の研磨剤と遊離砥粒研磨パッドを組み合わせで使用した。研磨条件を表 2 に、研磨結果を図 4 に示す。研磨条件 2 ではガラス母型表面を均一に研磨することができた。

表 2: 研磨条件 2

分類	研磨パッド (砥粒)	加圧 (kPa)	時間 (hour)
荒削り研磨	固定砥粒研磨パッド (ダイヤモンド)	3.3~5.5	53.0
仕上げ研磨	遊離砥粒研磨パッド (炭化ケイ素)	3.3	29.0

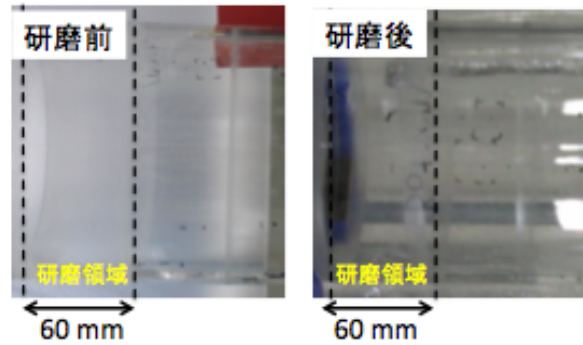


図 4: 研磨条件 2 研磨前後ガラス母型表面

## 2.3 研磨の効率化

作業手順簡略化を図るために固定砥粒研磨パッドを導入したが、時間あたりの研磨量が小さければ実用は現実的ではなくなる。固定砥粒研磨パッドを導入したときの1時間あたりの形状変化量を研磨効率として評価した。従来の研磨条件と研磨条件 1, 2 の結果比較を表 3 に示す。なお、研磨条件 2 の研磨効率は形状変化量が測定装置の再現性に埋もれたため、研磨条件 2 における研磨効率の上限を記した。研磨条件 1 では従来より高い研磨効率を得られたが、均一に研磨できなかった。研磨条件 2 では従来より高い研磨効率は得られなかったが、固定砥粒研磨パッドを用いて均一に研磨できた。

表 3: 研磨条件ごとの研磨効率の比較

荒削り方法	研磨条件 1 固定砥粒研磨 (炭化ケイ素)	研磨条件 2 固定砥粒研磨 (ダイヤモンド)	従来研磨条件 遊離砥粒研磨 (炭化ケイ素)
研磨効率 ( $\mu\text{m}/\text{hour}$ )	0.147	<0.047	0.030

固定砥粒研磨パッドを導入することで研磨作業の一部を簡略化し、また1時間あたりの研磨量を 0.030  $\mu\text{m}/\text{h}$  から 0.147  $\mu\text{m}/\text{h}$  まで増加させることに成功した。しかし、高効率の研磨を追求すると研磨ムラが大きくなることが分かった。

### 3 研磨後ガラス母型の評価

研磨したガラス母型表面が表面粗さ計の測定限界の RMS 10 nm 以下に達したため、反射鏡を製作し反射率の X 線入射角依存性から表面粗さを見積もった。

#### 3.1 反射鏡製作

研磨条件 2 で研磨したガラス母型を用いて、レブリカ法で Pt/C 多層膜反射鏡を製作した。製作した反射鏡の外観を図 5 に、製作した反射鏡の形状と使用したガラス母型の形状を図 6 に示す。図 6 より、反射鏡がガラス母型の形状を写し取っていることが分かる。

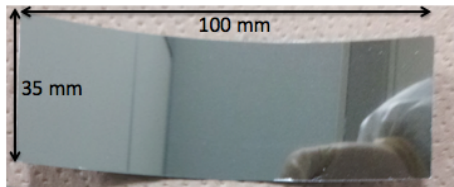


図 5: 研磨ガラス母型を用いて製作した Pt/C 多層膜反射鏡

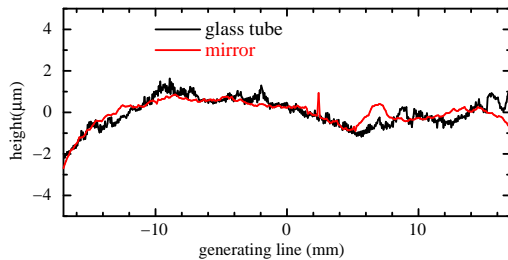


図 6: 製作した反射鏡 (赤) とガラス母型 (黒) の母線形状

#### 3.2 反射率の X 線入射角依存性

製作した反射鏡について、8.05 keV の X 線 (Cu K $\alpha$  線) を使って反射率の X 線入射角依存性を測定し、モデルと比較することで反射鏡の表面粗さを見積もった。図 7 に反射率の X 線入射角依存性の測定

結果を示す。実測値とモデルとをブラッグの二次ピークに注目して比較すると、表面粗さ RMS 1.0 nm のモデルは二次ピークがほとんど確認できないのに対し、実測値ははっきりと確認できる。このことから、反射鏡の表面粗さは RMS 1.0 nm 以下であることが分かる。反射鏡の表面粗さより、ガラス母型の表面粗さが 1.0 nm 以下に低減していることが分かった。

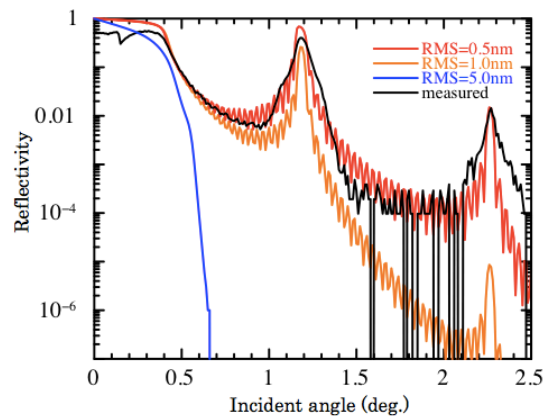


図 7: 製作した反射鏡の反射率 X 線入射角依存性 (実測値 (黒) と表面粗さ RMS 0.5(赤), 1.0(橙), 5.0(青) nm の反射率曲線)

### 4 まとめ

- 固定砥粒研磨パッドを導入することで、研磨作業の簡略化に成功した。また、研磨パッドの種類によっては遊離砥粒研磨より 5 倍近く高い研磨効率が得られた。しかし、研磨効率を追求すると研磨ムラが発生することが分かった。今後は研磨ムラの発生しない固定砥粒研磨パッドの選定を行う必要がある。
- ガラス母型の表面粗さを RMS 1.0 nm 以下に低減させることに成功した。

### Reference

- [1] 中出章太. 修士論文「円筒ガラス管研磨技術の開発」. 2013. 愛媛大学理工学研究科