

X線望遠鏡用薄肉一体型反射ミラーの開発

○鳥居 龍晴^{A)}, 松下 幸司^{A)}, 青山 正樹^{B)}, 増田 忠志^{A)},

^{A)} 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

^{B)} 分子科学研究所 装置開発室

概要

宇宙が発する X 線を集光させ、撮像することにより銀河の生成、進化の過程を解明する研究が行われており、その観測装置に X 線望遠鏡が用いられている。X 線は可視光のおよそ千分の一の波長であるため、X 線望遠鏡には図 1 に示したような高い反射率が得られる極端な斜入射型反射光学系が用いられる。この光学系は、若干のテーパを有する円筒形状のアルミ製反射ミラー（肉厚 t 0.15~0.3 mm）を同心円状に設置させ、1/3 円周に分割したものをアライメントバーで高精度に配置することでテーパ円筒に構成される。このアライメントバーの数量が望遠鏡の開口率（集光効率）に影響するため、分割ミラーから一体型のミラーにすることでアライメントバーの数量を減少でき、集光効率の向上と望遠鏡全体の軽量化が可能となる。

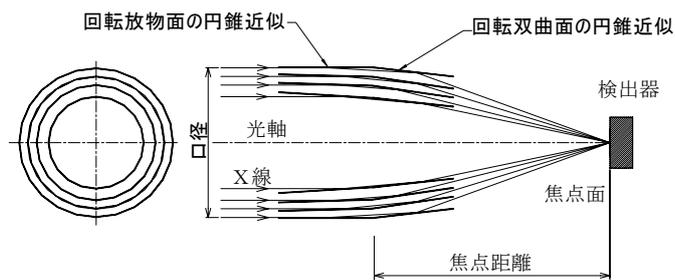


図 1 斜入射型反射光学系の概念図

我々は、現在の衛星搭載用 X 線望遠鏡のミラーと比べて、開口率が高く軽量化がはかれる一体型の反射ミラーの開発を行っている。試作したミラーは、外径 ϕ 150 mm、長さ 160 mm、肉厚 t 0.3 mm の非常に薄肉の 4 段テーパを有する円筒形状である。今回、このような薄肉円筒形状をしたミラーの試作において、いくつかの方法とそれらの加工精度について報告する。

1 一体型反射ミラーの形状と要求精度

今回試作した一体型反射ミラーは、図 2-(a)に示すような外径 ϕ 154 mm、長さ 150 mm、肉厚 t 0.2 及び 0.3 mm の 2 段テーパと図 2-(b)に示す外径 ϕ 180 mm、長さ 160 mm、肉厚 t 0.3 mm の 4 段テーパを有する非常に薄肉の円筒形状である。それらの加工精度として、母線の直線性を $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下（テーパ部の一段当たり）にすることが要求された。

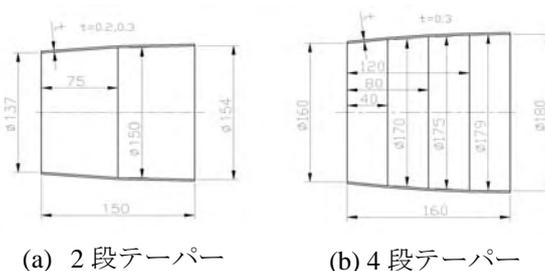


図 2 一体型反射ミラーの形状

2 試作方法とその形状精度

このような薄肉円筒形状のミラー製作では、これまで、分子科学研究所において電子ビーム溶接を用いて直径 ϕ 60 mm（1/2.5 モデル）、 t 0.2 mm の開発¹⁾が行われており、また、NASA では接着剤で固定する方法で開発を行っている。

我々は、このような薄肉円筒形状のミラー製作をヘラ絞り加工や素材から切削加工する方法で試作を行った。

2.1 ヘラ絞り加工とその修正加工法による試作とその形状精度

ヘラ絞り加工とは、金属素材を治具などに固定し、それを回転させながらローラーやヘラを押し当てて塑性変形させ、徐々に金型に近づけて成形する加工方法である。このヘラ絞り加工後に修正加工を行うことで高精度なミラーの開発が可能と考えた。

図3には、図2に示した2段テーパ形状のミラーを肉厚 $t0.8\text{ mm}$ のアルミ材料(A1100)からヘラ絞り加工したミラーの真円度を、図4に母線の直線性を示した。ヘラ絞り加工後の精度は、真円度が 1 mm 程度、母線の直線性が $\pm 0.1\text{ mm}$ 、肉厚が 0.4 から 0.7 mm の不均一であったため、以下の修正方法での試作を行った。

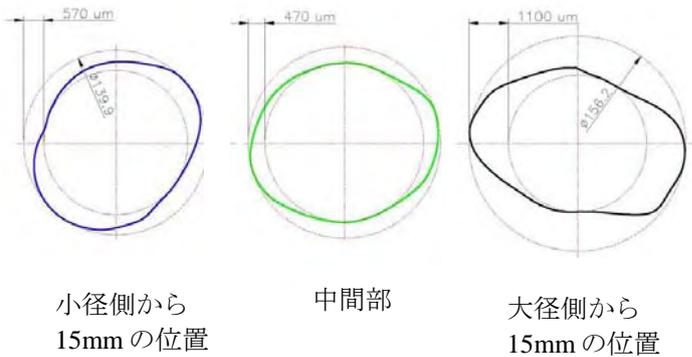


図3 ヘラ絞り加工後の真円度(材質:A1100、板厚 $t0.8\text{mm}$)

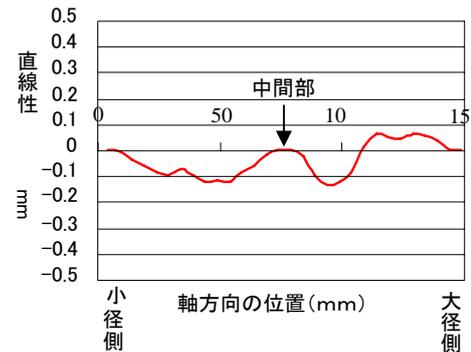


図4 ヘラ絞り加工後の母線の直

(A) 分割型金型による切削加工とその形状精度

ヘラ絞り加工後の形状精度は非常に悪いため、図5に示したような分割型金型を用いた切削による修正加工を試みた。図6に外周面を切削で修正後のミラーの真円度(0.2 mm)を、図7に母線の直線性($\pm 0.05\text{ mm}$)を示した。修正加工したことにより、真円度は $1/5$ 、直線性は $1/2$ 程度に精度が向上した。しかし、精度をさらに向上させるには外周面のみではなく内周面も切削加工する必要がある。

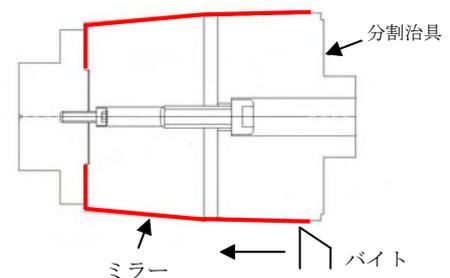


図5 分割型金型によるヘラ絞り加工後の修正加工法

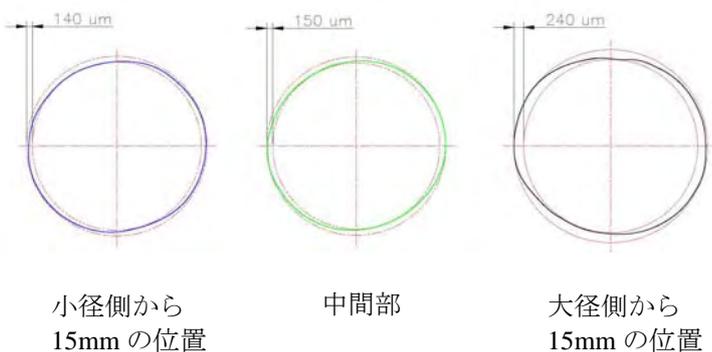


図6 切削で修正後のミラーの真円度

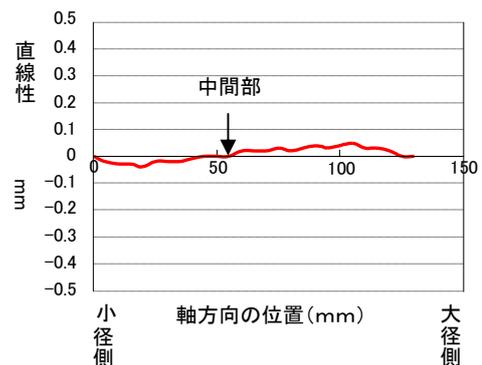
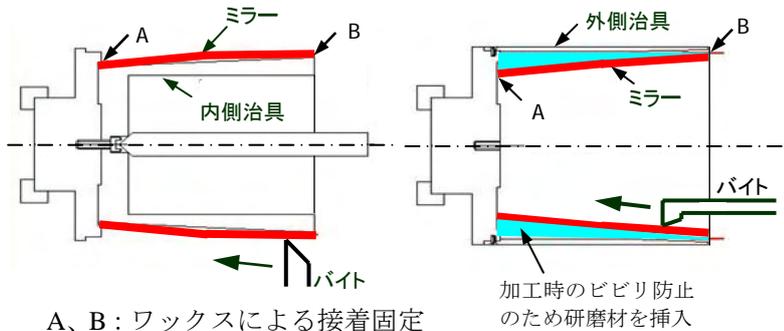


図7 切削で修正後のミラーの母線の直線性

(B) ワックス固定法による切削加工とその形状精度

外周面のみでの切削では形状精度が悪いため、内周面の加工も可能なワックス固定法を試みた。ヘラ絞り加工後のミラーの両端を低融点($50\sim 80^{\circ}\text{C}$)のワックスで固定して切削加工する方法を図8に示した。この方法ではミラーと治具が中央部では接していないため、肉厚が薄くなると変形しやすくなるため、ミラーと外

側治具の隙間にワックスや砥粒などを詰めて加工する方法で試作を行った。はじめに低融点のワックスをミラーと外側治具の隙間に溶融させて注入したが、ワックスが冷却し固化する際にワックスの収縮によりミラーが円周方向に 1 mm 以上の変形が生じてしまった。次に水を注入して加工を行ったが水漏れが生じやすかったため、最終的には研磨材（カーボランダム）を詰めて加工を行った。この方法で加工したのミラー（ $t0.4$ mm）の母線の直線性は ± 0.02 mm 程度の精度と非常に良好であった。写真 1 にミラーの肉厚を 0.4 mm まで加工した時に、切削時の振動によりミラーとフランジの一部が剥がれたため偏心してしまった加工例を示した。



A、B：ワックスによる接着固定
 (1) ミラー外周部の加工 (2) ミラー内周部の加工

図 8 簡易治具によるワックス固定法



写真 1 ワックス固定の一部が剥がれ、ミラー偏心による加工例

2.2 分割外側治具加工法とその結果

へら絞り加工後に切削で修正加工したミラーの形状精度をさらに良くするため、素材から切削加工する方法を試みた。この方法は、量産には不向きであるが加工精度の高いミラーの加工が可能と考えた。この方法では、図 9 のような内側治具加工法と図 10 のような外側治具加工法の 2 つの方法があり、分割した外側治具を用いた加工法（分割外治具加工法）では、内側治具加工法に比べ以下の利点がある。

- (1) 分割型治具にすることで加工後にミラーと治具が容易に分離できる。
- (2) ミラー内側（X 線反射面側）の加工が最後のため、必要とする内面にキズが残らない。
- (3) 加工時の熱によるミラーの膨張にて摩擦力が増える方向に働くため、ミラーのすべりが生じにくい。

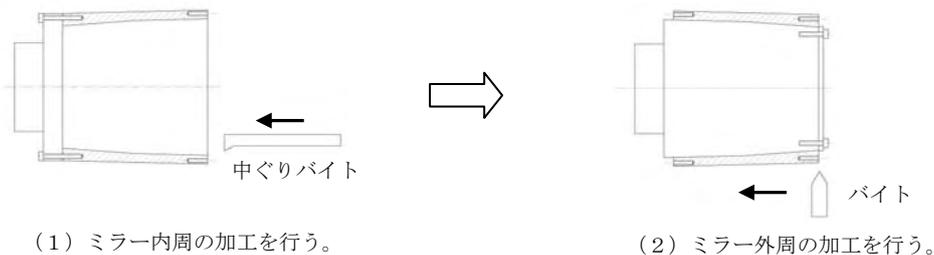


図 9 内側治具加工法の加工手順

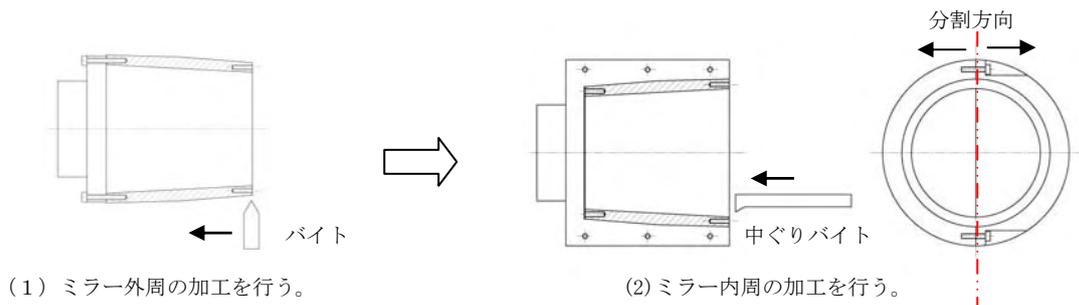


図 10 分割外側治具加工法の加工手順

上記理由により、図 10 に示した分割外治具加工法で 2 段及び 4 段テーパミラーを汎用 NC 旋盤 (LN-32 : テクノワシノ社製) 及び超精密旋盤 (UPL-1 : 理研製鋼社製) で試作加工を行った。この方法での加工手順は①図 10-(1)のように肉厚が 10 mm 程度のアルミニウム円筒形状からミラー外周部を仕上げ加工する。②肉厚が 3 mm 程度まで内周部を加工する。③図 10-(2)のようにミラーを分割外側治具に挿入して必要な肉厚まで加工する。写真 2、3 に最終仕上げ加工に超精密旋盤 (UPL-1 : 理研製鋼社製) を用いた加工法を示した。



写真 2 超精密旋盤 (UPL-1 : 理研製鋼社製) によるミラー外周加工



写真 3 超精密旋盤 (UPL-1 : 理研製鋼社製) によるミラー内周加工

試作したミラーの肉厚の違いによる加工精度を表 1 に、また、加工機の違いによる加工精度を表 2 に示した。表 1 より肉厚が t0.3 mm では母線の直線性の精度が要求精度以下の $\pm 8 \mu\text{m}$ で加工できたが、t0.2 mm のものは $\pm 12 \mu\text{m}$ であった。また、表 2 より超精密旋盤を用いた外側分割治具による 4 段ミラー (最大直径 ϕ 180、長さ L=160 mm、t0.3) の加工精度は、母線の直線性が 4 段共に $\pm 4 \mu\text{m} / 40 \text{mm}$ 以下であり非常に高精度なミラーが開発できた。尚、写真 4、5 に試作加工した一体型薄肉ミラーを示した。

表 1 ミラーの肉厚と加工精度

番号	2-1	2-2
加工機	LN-32	
テーパ段数	2	
最大直径 (mm)	154	
最小直径 (mm)	137	
長さ (mm)	150	
肉厚 (mm)	0.32	0.21
母線直線性 (um)	$\pm 8 / 75 \text{ mm}$	$\pm 12 / 75 \text{ mm}$
真円度 (um)	230	—

表 2 加工機の違いによる加工精度

番号	4-1	4-2
加工機	LN-32	UPL-1
テーパ段数	4	
最大直径 (mm)	180	
最小直径 (mm)	160	
長さ (mm)	160	
肉厚 (mm)	0.3	
母線直線性 (um)	$\pm 5 / 40 \text{ mm}$	$\pm 3.4 / 40 \text{ mm}$
真円度 (um)	810	160

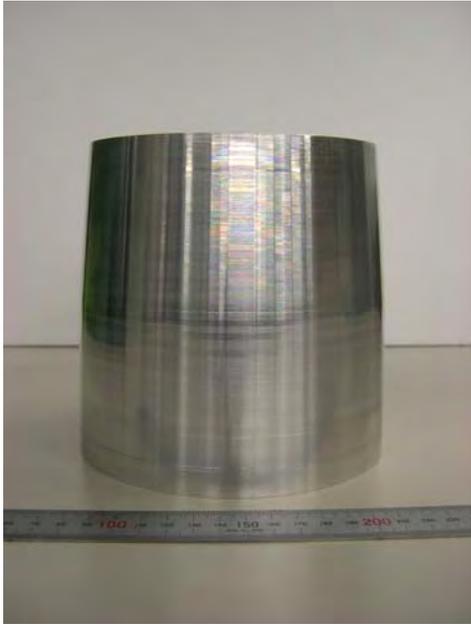


写真4 分割外側治具加工法で試作したミラー
テーパー2段（加工機：LN-32）
（直径φ154 mm、長さ L150 mm、肉厚 t0.2 mm）



写真5 分割外側治具加工法で試作したミラー
テーパー4段（加工機：UPL-1）
（直径φ180 mm、長さ L160 mm、肉厚 t0.3 mm）

3 おわりに

薄肉円筒形状のミラーの試作加工により、ワックス固定法においても $\pm 20 \mu\text{m}$ 程度の精度で加工できた。また、超精密旋盤を用いた分割外側治具加工法では、母線の直線性が $\pm 4 \mu\text{m}$ 以下の高精度なミラーを試作することができた。この方法では、今回試作した他の方法と比べ、加工後にミラーを治具からスムーズに取り外しできることがわかったが非常に薄肉のミラーのため注意を要する。また、超精密旋盤は汎用 NC 旋盤と比べ駆動精度が非常に良好のため、ミラーの加工精度誤差が1/10程度となることを期待したが若干の向上に留まった。今後、加工法を工夫しさらに精度の向上を目指す予定である。

参考文献

- [1] 近藤、鈴井：電子ビーム溶接法によるアルミ製薄肉テーパ円筒の製作、Annual Report2008、分子科学研究所装置開発室、21-23、2009.