

# X線望遠鏡ミラーのレプリカマンドレルの開発

## (研磨加工の基礎実験)

○ 近藤聖彦、鳥居龍晴、與話節生、増田忠志

名古屋大学理学部技術部

### 1 はじめに

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ため、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波長であるため、X線望遠鏡には、図1に示すように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。解像力は、X線を集光させる反射ミラーの表面粗さ、形状精度と真円度で決定されるため、反射ミラーを高精度に製作する必要がある。2010年にNeXT(次期X線天文衛星)に高精度のX線望遠鏡を搭載し宇宙の加速がどのような機構で、どこで起きているかを解明する計画がある。今回、このX線望遠鏡の反射ミラー開発に必要とされる研磨加工の基礎実験を行ったので報告する。

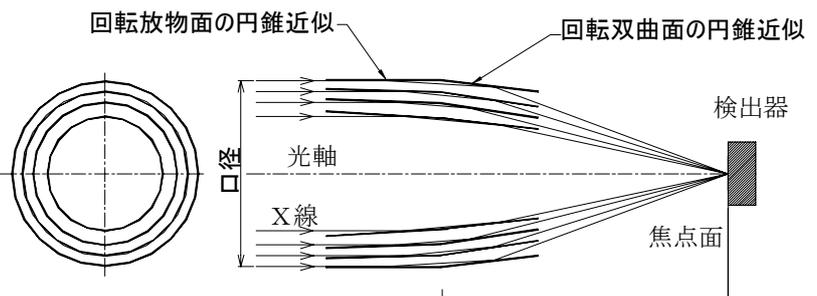


図1 斜入射型反射光学系の概念図

### 2 X線望遠鏡用反射ミラーとレプリカマンドレル

X線望遠鏡の反射光学系は、円錐形状の反射ミラーを同心円上に設置させて組み立てられる。反射ミラーは、厚さ  $t$  0.15 mm のアルミ箔で直径  $\Phi$  118 mm から  $\Phi$  393 mm (長さ  $L=120$ mm) の間に二段で 500 種類以上の異なるサイズで出来ており、4分割して製作し、同サイズのを組み合わせることで円錐形状にする。

反射ミラーの製作過程は、(1) アルミ箔 ( $t$  0.15mm) を切断し、成型マンドレルを用いて円錐状に成型させる。(2) レプリカマンドレルに反射率の高い金膜、白金膜等を蒸着し、その表面にエポキシ剤をスプレーする。(3) (1) で成型させたアルミミラーをレプリカマンドレルに押し付け、金膜等をアルミミラー側に接着させる。そのため、金等の蒸着膜の表面状態はレプリカマンドレルの表面粗さで決まる。現在、レプリカマンドレルには引抜きガラスパイプを使用しているが、これは、表面粗さについてはほぼ満足できるが、形状精度が数十～数百 $\mu$ m と悪いため、高分解能のミラーを製作するには、高精度で鏡面を有したレプリカマンドレルの開発が必要となる。

そのレプリカマンドレルに要求される精度は、表面粗さを 0.3nm Ra 以下、形状精度は真円度、テーパ部分(母線)の直線性共に 0.1 $\mu$ m 以内である。このレプリカマンドレル(図2)を金属製にすれば、高い形状精度のものが任意の寸法に製作可能となる。レプリカマンドレルは軽量にするためアルミ合金で製作し、キズの発生を抑えるために表面の硬度が高く、非晶質でダイヤモンドバイト切削可能なカニゼン(Ni-P)メッキを表面に施す。そのメッキ面を鏡面に研磨加工することで、形状精度、表面粗さ共に良好なレプリカマンドレルの開発が可能になる。



図2 研磨前のレプリカマンドレル

### 3 実験装置の構造

開発するレプリカマンドレルの形状は円筒状であるが、今回は実験及び、粗さ測定のしやすさから平面による実験を行った。

本実験に用いた平面研磨装置は、図3に示す平面研磨盤（ラップマスター型：マルトー社製 MG-300）を改造したものを使用した。研磨方法は図4に示すように、ラップ定盤②（ $\phi 300$ ）上に保持リング①の内部に3個の試料④をワックスで接着した試料固定台③を置き、ラップ定盤②を回転させ、ラップ定盤②上に一定時間毎にスラリーを供給する。ラップ定盤②上の保持リング①と試料固定台③は、ラップ定盤②の周速度差により自転するため試料を均一に研磨することができる。保持リング①は、ラップ定盤②上に供給したスラリー③を均一になじませるためのものであり、2個のプーリーで支持している。

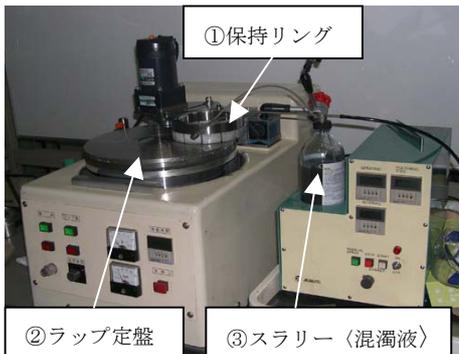


図3 平面研磨盤

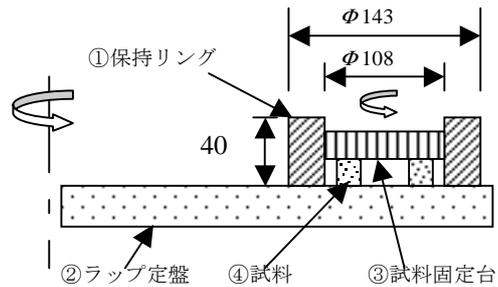


図4 研磨方法の詳細図

### 4 実験方法と実験結果

平面研磨装置による研磨加工条件には、研磨速度（ラップ定盤の回転数）、加工圧力、研磨砥粒材質、砥粒粒度および供給量、ラップ定盤材質等の多数の因子がある。本実験では研磨後の試料表面粗さに大きく影響すると考えられる条件について実験を行った。以下に実験内容と結果について述べる。

#### 4.1 加工圧力と表面粗さの関係

試料に与える加工圧力を変化させ、研磨面の表面粗さの影響について表1に示す研磨加工条件で実験を行った。加工圧力を変化させる方法として図4に示した試料固定台③に重量の異なるおもりを載せかえることで行った。試料はSUS304の円柱形状（ $\phi 20, t12$ ）の試料を使用し、タフピッチ銅製のラップ定盤で実験を行った。研磨剤にはハイプレスダイヤモンドスラリー（ $6\mu$  TD-PC S1-S 313：エンギス社製、ダイヤモンド粒径 $6\mu$  m）を使用し、50秒毎に2秒間供給した。また、試料と試料固定台との接着にはリードワックスM（日化精工社製）を使用した。図5に示すように加工圧力の変化による試料表面粗さの違いはそれほど無かったが、加工圧力を小さくした方が表面粗さは若干よくなる傾向にあることがわかった。表面粗さ測定にはフォームタリサーフ50e（ランク テーラーホブソン社製）を使用した。

表1 研磨加工条件

試料材質	SUS304
試料形状	$\phi 20, t12$
試料固定方法	両面テープ ( $80, 200\text{g}/\text{cm}^2$ 時)
	ワックス ( $130, 260\text{g}/\text{cm}^2$ 時)
ラップ定盤回転数	80rpm
ラップ定盤の材質	タフピッチ銅
使用スラリー	ダイヤモンド、 $6\mu$ m
スラリー供給量	2-50s
研磨加工圧力	80, 130, 200, 260 $\text{g}/\text{cm}^2$

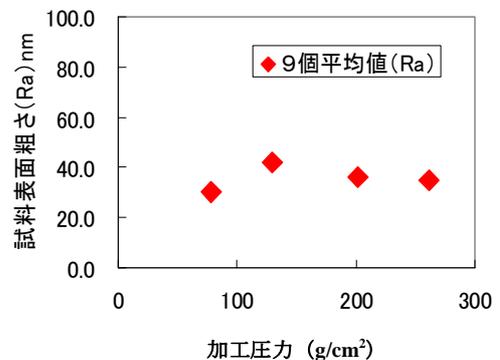


図5 加工圧力と表面粗さの関係

#### 4.2 試料硬度と表面粗さの関係

試料硬度の違いによる研磨面の表面粗さの影響について実験を行った。試料に SUS304、SUS420J2 (焼入)、SKH59 の 3 種類を使用して比較を行った。ラップ定盤にはタフピッチ銅製と鉛製を使用した。試料とラップ定盤材質以外の加工条件については 4.1 の実験と同じである。図 6 に示すように試料硬度の違いによる表面粗さの違いはほとんど無かった。

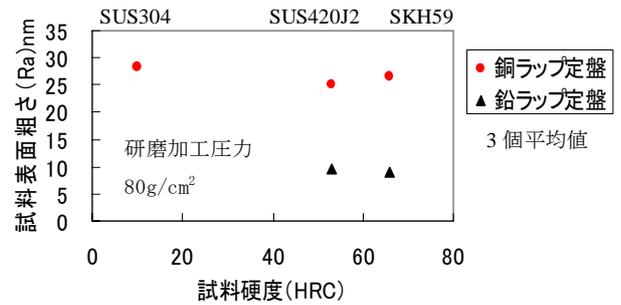


図 6 試料硬度と表面粗さの関係

#### 4.3 ラップ定盤材質の違いと表面粗さの関係

ラップ定盤の材質 (硬さ) の違いによる研磨面の表面粗さについて実験を行った。試料に SUS420J2 (φ20,t20) を使用し、ラップ定盤にはタフピッチ銅、アルミ合金 (A5052)、錫及び鉛の 4 種類について実験を行った。スラリー種類と供給方法については 4.1 の実験と同じである。

その結果、図 7 に示すように硬度の小さい定盤を使用して研磨した試料の方が表面粗さは小さくなることがわかった。表 2 に各ラップ定盤の材質硬度を示す。

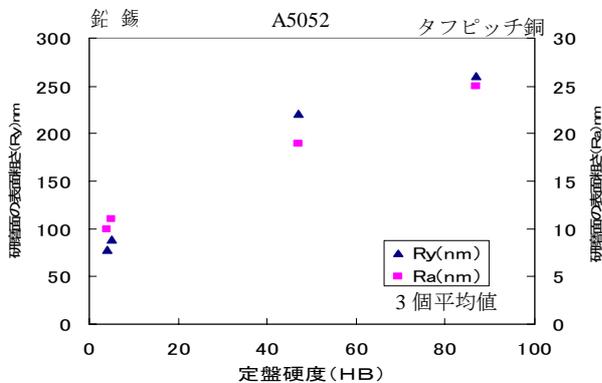


図 7 ラップ定盤の硬度と表面粗さの関係

表 2 ラップ定盤材質と硬度

ラップ定盤材質	硬度 (HB)
タフピッチ銅	87
A5052	47
錫	5.2
鉛	3.9

#### 4.4 ラップ定盤の溝の有無による表面粗さと平面度の違い

ラップ定盤に溝を付けることで平面度を向上させる効果がある。今回、ラップ定盤面に幅 3mm、ピッチ間隔 6mm の溝を渦巻状に加工した定盤と溝の無い定盤による研磨後の試料表面粗さと平面度の違いを調べた。研磨試料は SUS420J2 を用いて、ラップ定盤は鉛製を、スラリーはハイプレスダイヤモンドスラリー (3μ-STD-PC S1313: エンギス社製、ダイヤモンド粒径 3μm) を使用した。その他の加工条件は 4.1 の実験と同じである。平面度の測定結果を図 8 に示す。図 8 に示すように溝を有するラップ定盤で研磨した試料の平面度は 0.25μm であり、溝のない場合では 0.5μm となった。また、溝を有するラップ定盤では、表面粗さは 2nm Ra、溝のない場合では 4nm Ra 程度であった。平面度、表面粗さ共に溝を有するラップ定盤で研磨した方が良好な結果であった。本実験の研磨加工条件を表 3 に示す。

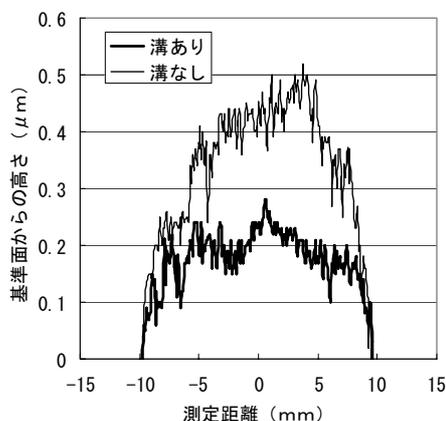


図 8 ラップ定盤の溝ありとなしでの平面の違い

表 3 研磨加工条件

試料材質	SUS420J2
試料形状	φ20、t 20
試料固定方法	両面テープ
ラップ定盤回転数	80 rpm
ラップ定盤の材質	鉛
使用スラリー	ダイヤ、3μm
スラリー供給量	2-50s
研磨加工圧力	80g/cm <sup>2</sup>

#### 4.5 クロス定盤によるメカノケミカルポリッシング

メカノケミカルポリッシングは、化学的なエッチング作用により小さなスクラッチを取り除く効果的な研磨法である。研磨試料には SUS420J2 及びカニゼンメッキを使用して実験を行った。前加工として鉛製ラップ定盤で研磨後、アルカリ性のスラリー（XL-2：エンギス社製、研磨剤：シリカ、粒径 40nm）を使用しクロス製ラップ定盤（クロス 545：エンギス社製）で研磨を行った。研磨加工条件を表 4、研磨結果を表 5 に示す。

表 5 に示すようにメカノケミカルポリッシングを行うことで SUS420J2 では表面粗さ 1 nm Ra、カニゼンメッキでは 2.8nm Ra まで向上させることができた。カニゼンメッキの方が SUS420J2 と比べて表面粗さが大きくなった理由として、メッキ面のピンホール等が原因ではないかと考えている。

表 4 メカノケミカルポリッシング加工条件

試料	SUS420J2、カニゼンメッキ
試料形状	20×15-t2.5、 $\Phi$ 20-t12
試料固定方法	ワックス
ラップ定盤回転数	80 rpm
加工圧力	80 g/cm <sup>2</sup>
スラリー供給量	点滴

表 5 メカノケミカルポリッシング前と後の表面粗さ結果

試料材質	前加工方法		前加工 Ra(nm)	メカノケミカル使用クロス	スラリー	Ra (nm)
	ラップ定盤	スラリー				
SUS420J2	鉛制定盤	ダイヤモンド、3 $\mu$ m	2	クロス (545)	XL-2	1
カニゼン	〃	〃	6	〃	〃	2.8

#### 5 まとめ

平面研磨加工の基礎実験として、研磨加工条件の因子である加工圧力、試料硬度、ラップ定盤材質等を変化させて研磨面の表面粗さを調べた。本実験で得た結果をまとめると次のようになる。

- (1) 研磨加工圧力を小さくすると、表面粗さも小さくなる傾向がある。
- (2) 試料硬度の違いによる表面粗さの変化は見られなかった。
- (3) ラップ定盤に硬度が小さい材質を使用した方が研磨試料面の表面粗さを小さくすることができた。これは、硬度が小さいとラップ定盤の平面上に供給するダイヤモンド砥粒が埋り込み安くなるため砥粒の突出し量が少なくなり、さらにラップ定盤上の浮遊砥粒も減少するためと考えられる。
- (4) ラップ定盤平面に溝を有すると無い時よりも、研磨試料面の表面粗さと平面度が 2 倍程度良好になった。その理由として、溝を有すると研削粉を除去しやすくなるため、表面粗さを向上させることができると考えられる。また、試料に等分布荷重が付加されたとき、溝がないと試料の外周で最大になるが、溝があると溝の端で最大になるため、平面度を向上させることができると考えられる。
- (5) メカノケミカルポリッシングにおいてカニゼンメッキは 2.8nm Ra の面粗さに研磨することができたが目標である 0.3nm Ra にするためにはさらに実験を必要とする。