

# ガラスコーティングによるレプリカ母型の 高精度化開発研究

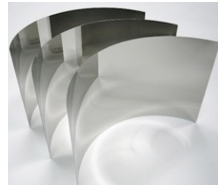
名古屋大学大学院 宇宙物理学研究室 X線グループ (Ux研)

博士課程前期1年 出本 忠嗣

我々の研究室では、次期X線天文衛星ASTRO-H搭載用硬X線望遠鏡(HXT)の開発を行っている。HXTに搭載する反射鏡の製作には、母型の表面を写し取るレプリカ法を用いている。この方法は、反射鏡の表面形状は母型の表面に依存する。しかし、表面形状の良い母型が見つからない径も多い。そのためGlass Coated Mandrel(GCM)と呼ばれる新たな母型の開発が行われている。今回は、 $\Phi 365\text{mm}$ の径でGCMを製作、評価した。

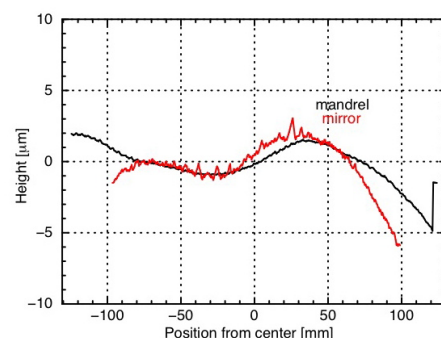
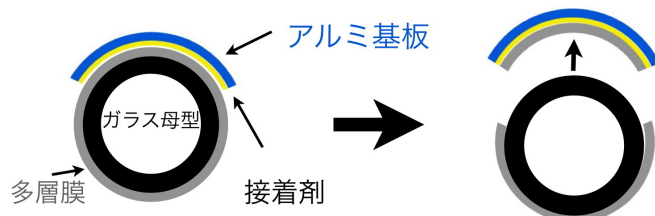
## 1 硬X線望遠鏡

我々が開発している望遠鏡は、Wolter-I型斜入射光学系を用いており全体で1278枚の反射鏡を使用する。反射鏡は、長さ200mm,厚さ0.22mmで反射鏡面にはPt/C多層膜スーパーミラーを用いている。要求される結像性能は望遠鏡全体で1.7分角で、反射鏡面形状誤差によるものは1分角(2回反射換算では1.2分角)としている。



## 2 反射鏡製作(レプリカ法)

反射鏡製作にはレプリカ法を用いている。レプリカ法の主な行程は、1.表面が非常に滑らかなレプリカ母型(我々の研究室ではガラス母型を採用)に多層膜を成膜、2.反射鏡面と熱成形したアルミ基板を接着剤で接着、3.離型しアルミ基板の表面に多層膜を写し取る、の行程である。このレプリカ法で重要なことは、反射鏡の表面形状は母型の形状を写し取るので結像性能は母型の形状に依存することである。



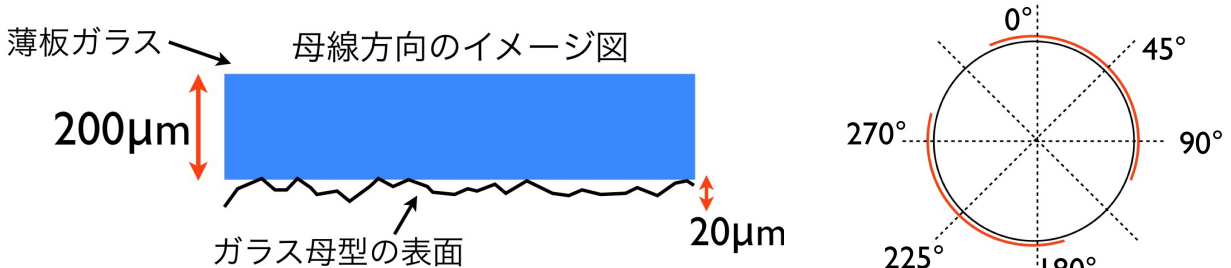
上の図はガラス母型(黒)と反射鏡(赤)の表面形状を比較したもの。縦軸：高さ( $\mu\text{m}$ )、横軸：母線方向の位置(mm)。よく一致していることがわかる。

以上のことから、反射鏡の結像性能の向上には形状の良い母型は必要不可欠であることがわかる。しかし、我々の研究室では大量のガラス母型を選別し購入しているが、形状の良い母型がない径も多いのが現状である。そのような径で表面形状のあまり良くないガラス

母型から、表面形状の良い母型を作りだすことを目的として研究開発されているのが、GCMである。

### 3 Glass Coated Mandrel (GCM)

GCMは厚さ $200\mu\text{m}$ の薄いガラス板をガラス母型に巻き付け長辺、短辺の端をカプトンテープで固定することで作られる。

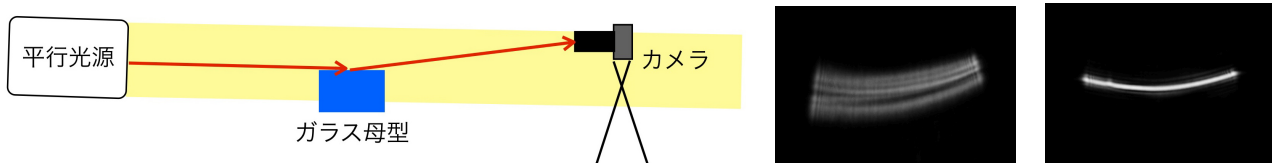


左の図はGCMの母線方向のイメージ図で、ガラス母型の表面の凸凹がおよそ $20\mu\text{m}$ 程度に対し薄板ガラスの厚さはその10倍程度である。右の図はGCMの断面図で角度は下記で述べる測定ラインを示している。赤い線は薄板ガラスを示しており、長さの都合上1つのガラス母型に対し2枚の薄板ガラスを使用している。

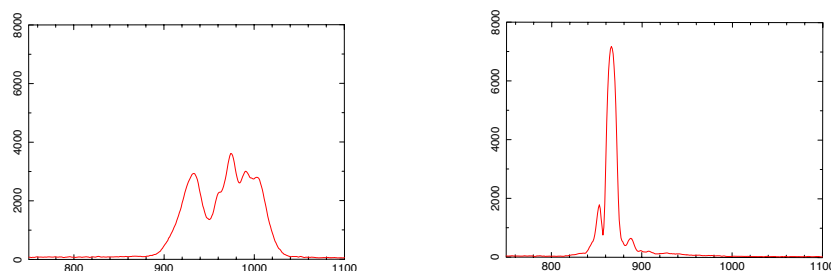
### 4 本研究の目的

GCMは先行研究(N.Yamane名古屋大学修士論文2010)において $\Phi 240\sim\Phi 300\text{mm}$ の径で要求精度(1分角以下)を満たす反射鏡を製作できることを実証している。しかし、大きい径では $\Phi 450\text{mm}$ まで反射鏡が必要である。本研究では、そのうち $\Phi 365\text{mm}$ の径でGCMを製作。1.薄板ガラスを巻く前後で表面形状を比較(表面形状の向上が見られるか)、2.反射鏡を製作、表面形状を測定(HXTの要求精度を満たすか)を目的に測定を行う。

### 5 可視光による性能評価



上の左の図のように平行光源とCCDカメラを設置して測定を行った。ガラス母型の表面での1回反射の像を見ている。右の2つの図が得られるイメージ(例として $225^\circ$ ラインを挙げている)である。左図が薄板ガラスを巻く前で、右図はGCMである。左図は像が広がっており、右図はとてもシャープな像が得られていることがわかる。



上の図はイメージの縦方向のプロジェクションをとったデータで、縦軸：反射光の強度、横軸：位置[pix(4arcsec/pix)]である。左図が薄板ガラスを巻く前、右図がGCMでデータもGCMがよりシャープな像を得ていることがわかる。

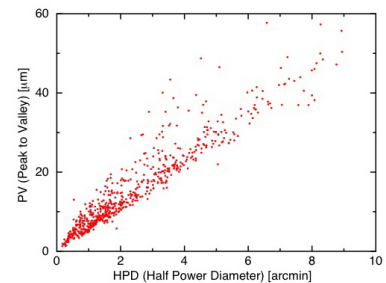
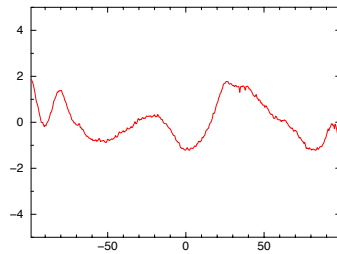
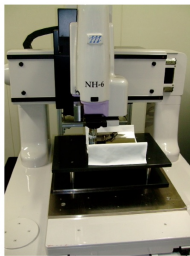
このデータより重心を求め、その重心からの累積度数が全データ数の半分となる幅を像の広がりとして表すと以下の結果となる。青：薄板ガラスを巻く前、赤：GCM

0°：7.4分角→0.98分角    45°：2.8分角→2.4分角    90°：9.9分角→1.4分角  
 180°：3.1分角→1.8分角    225°：4.1分角→0.72分角    270°：10.1分角→0.72分角

測定した全6ラインで表面形状の向上が見られることがわかる。特に、0°,225°,270°ラインは1分角以下で要求を満たしている。

## 6 反射鏡の表面形状性能評価

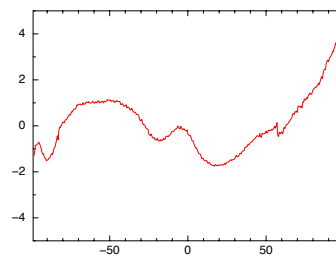
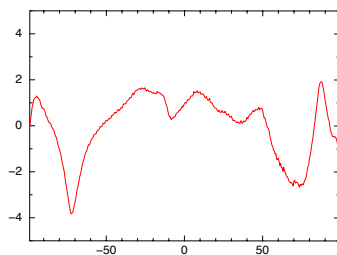
GCMから反射鏡を製作し、非接触式形状測定器を用いて測定を行った。



左の写真が非接触式形状測定器：レーザーサーボ式オートフォーカスト顕微鏡と高精度自動XYステージにより、形状を測定。分解能はXY：0.1  $\mu\text{m}$ 、Z(高さ)：0.01  $\mu\text{m}$ である。左の図が得られるデータ(これも例として225°ラインを挙げている)で、縦軸：高さ( $\mu\text{m}$ )横軸：母線方向の位置(mm)を示す。このデータから得られるPV(Peak to Valley)の値：最大値と最小値の差は3.5  $\mu\text{m}$ である。PV値は表面の凸凹具合を表すもので、要求精度は10  $\mu\text{m}$ 以下としている。この要求精度は、反射鏡のPV値と像の広がりとの相関図から得られるもので右の図が示している。縦軸：PV( $\mu\text{m}$ )、横軸：像の広がり(arcmin)。

像の広がり、左の図の法線分布のばらつきを見ると求められる。法線分布のばらつきの重心からの累積度数が全データの半分となる値を像の広がりとしている。

以下がその結果である。



225°：1.0分角    180°(左図)：1.7分角    270°(右図)：0.77分角

0°,45°,90°ラインの反射鏡はレプリカ行程の途中で薄板ガラスが割れてしまったため今回は製作できなかった。

## 7 まとめと展望

本研究では、 $\Phi 365\text{mm}$ の径でGCMを製作し、さらに反射鏡を製作した。それらを可視光及び非接触式形状測定器を用いて評価。可視光による性能評価を行った結果、測定した全6ラインで表面形状の向上が見られた。その内、 $225^\circ, 270^\circ$ ラインはGCM、反射鏡共に像の広がりが必要精度を満たすことができた。

今後はより多くのGCMを製作を行い、統計をとる必要がある。また今回は可視光でしか評価していないので、さらにX線による評価も必要になる。

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University, where this work was initiated during the YITP-W-11-08 on "Summer School on Astronomy & Astrophysics 2011".