

# レプリカ法に代わるCFRP上でのX線反射面形成法

吉田 鉄生<sup>1</sup>, 粟木 久光<sup>1</sup>, 松本 浩典<sup>2</sup>, 三石 郁之<sup>3</sup>, 相田 望<sup>1</sup>, 中澤 知洋<sup>3</sup>, 大塚 康司<sup>3</sup>, 清水 貞行<sup>3</sup>, 米山 友景<sup>2</sup>, 井出 峻太郎<sup>2</sup>, 石田 学<sup>4</sup>, 前田 良知<sup>4</sup>, 中庭 望<sup>4</sup> (1:愛媛大学 2:大阪大学 3:名古屋大学 4:宇宙科学研究所)

E-mail: yoshida.tessei@astro.phys.sci.ehime-u.ac.jp

## CFRP製X線反射鏡

X線望遠鏡によく用いられるWolter-I型光学系は、X線を効率良く集光するため、同じ焦点距離を持つX線反射鏡を層状に重ねた構造になっている(Figure 1-1)。その中でも特に集光力に重点を置いたものが多重薄板型望遠鏡であり、X線天文衛星さくくでは厚さ0.1-1 mm程度の薄いアルミニウム製反射鏡を約200層重ねていた。確かにアルミニウム製多重薄板型望遠鏡は集光力の点で優れているものの、結像性能の点では劣っており、遠方宇宙の探査においては充分な性能であるとは言いがたい。そこで我々は、**高集光力でありながら高角度分解能(目標値 20 arcsec)を有する望遠鏡の作成を目指し、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)製のX線反射鏡開発を行っている(Figure 1-2)**。CFRPは2種類の回転二次曲面からなるWolter-I型形状を1枚の基板で成型できるため、高い分解能が期待できる(Table 1)。また、熱膨張率がほぼ0であるため高い寸法安定性も併せ持つ。さらに、アルミニウムより密度が小さいため望遠鏡の軽量化にも貢献する。

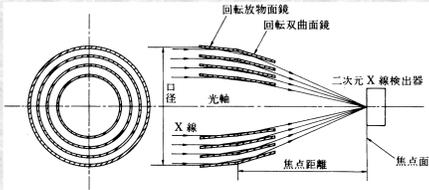


Figure 1-1. X線望遠鏡概念図。



Figure 1-2. レプリカ法でPtを成膜したCFRP製反射鏡基板サンプル(基板ID: 151121a)。

Table 1. アルミニウム基板とCFRP基板の比較

	アルミニウム基板	CFRP基板
基板形状	円錐近似	Wolter-I型
それぞれの二次曲面	別々に製作、接続はアライメントバー	二段一体型
反射面形成法	レプリカ法	レプリカ法 / 薄板ガラス法
角度分解能	1-2 arcmin (ひとみ)	20 arcsec (目標値)

CFRP基板の製作条件を右にまとめた。非接触三次元計測器NH-6で測定した基板形状をFigure 1-3に示す。

CFRPはアルミニウムに比べ構造部材として優れているが、一方で吸湿膨潤による形状変化や、樹脂が硬化収縮や熱収縮を起こすことで炭素繊維などの構造が表出する(プリントスルー)といった、光学部品としての欠点を抱えている。これらについては「防湿効果フィルムを基板に付加する」「接着剤を常温硬化する」といった対策が有効であると、2018年宇宙科学シンポジウムにおいて報告した(P-182)。本ポスターでは、Wolter-I型形状のCFRP基板に対し、X線反射面を形成する方法について報告する。

### CFRP基板 製作条件

プリプレグ: 日本グラファイトファイバー製E7026B-05S(50 μm厚)  
積層条件: 8層擬似等方積層  
形状: 焦点距離12 m, 直径200 mm, Wolter-I型1/4周分  
成型法: 真空バグging法、130 °C, 7時間で硬化  
吸湿対策: レプリカの容易さと反射面にPtが成膜されることから、裏面のみに防湿フィルムを付加した。  
補足: プリプレグ1枚あたりに位置調整穴を15個を開けた。スーパーインバー製母型を使用した。

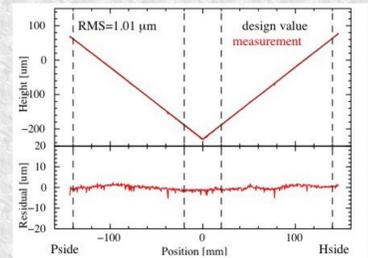


Figure 1-3. CFRP基板形状 (基板ID: 170929a)。黒が設計値、赤が実測値を表す。

## X線反射面形成法

**レプリカ法** ガラスなどの滑らかな表面を持つ母型(マンドレルと呼ぶ)に成膜されたAuやPtを、接着剤を介して望遠鏡基板に転写し、X線反射面を形成する方法である。工程のイメージをFigure 2-1に示す。本実験では1000ÅのPt単層膜を成膜した。

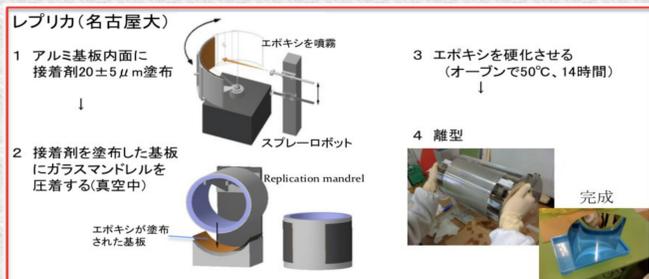


Figure 2-1. レプリカ法の工程イメージ。

### (1) 母型に円筒マンドレルを用いる

レプリカ型として円筒形状ガラスを用いる方法。Wolter-I型形状のCFRP基板に対しては反射膜の欠損が発生しやすく、反射面全体で良好な形状を出すことが困難であるため、本実験の母型としては適していない。

### (2) 母型にWolter-I型マンドレルを用いる

レプリカ型としてWolter-I型形状ガラスを用いる方法。円筒マンドレルと比べ、良好な形状を出すことができる。ただし製作には時間と予算が必要。

### (3) GCM法(Glass Coated Mandrel)

Wolter-I型形状の金属金型に、薄板ガラス(厚さ~50 μm)を貼り付けたものをレプリカ型として用いる方法。"平滑なガラスに蒸着した金属膜"を転写することにより、設計値とのズレσ<sub>rms</sub>~2 μmを達成可能(Figure 2-2)。金属金型そのものを平滑にする必要がないため、比較的安価で製作することができる。しかしWolter-I型形状のCFRP基板をマンドレルから剥がす作業(離型: Figure 2-1の工程4)が困難なため、本実験にGCM法を用いることは現実的でない。

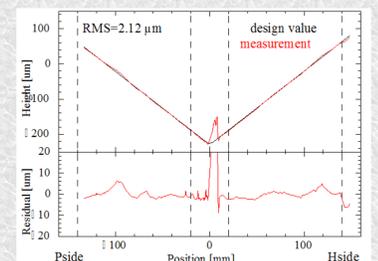


Figure 2-2. GCM法を用いて反射面形成したあとのCFRP基板形状。

### 薄板ガラス法

3つのレプリカ法はいずれもCFRP基板の反射面形成法としては課題があることが分かった。そこで我々は、レプリカ法に代わる反射面形成法として薄板ガラス法に注目した。この方法では、基板に薄板ガラス(厚さ~50 μm)を接着剤で直接固着し、薄板ガラスに反射面となる金属を成膜する。本実験ではレプリカ法と同じく、1000ÅのPt単層膜を成膜した。設計値とのズレはGCM法とほぼ同じσ<sub>rms</sub>~2 μmである(Figure 3-1)。

- 利点: GCM法で困難であった離型を行わなくてよく、比較的容易に反射面を形成することができる。
  - 問題点1: 目視で確認できる大きさのシワが発生する。Pt成膜で生じるストレスが原因か?(W成膜では目視で確認できるシワは発生しない。)
  - 問題点2: 接着剤を基板全面に塗布した場合、ガラス表面にCFRP上の繊維構造に由来した凹凸が発生する可能性がある。
- 上記2つの問題点を解決するため、**薄板ガラスに成膜したあとに、点状に接着剤を塗布して基板固着する**、という工程で基板製作したところ、シワや繊維構造起源の凹凸をほぼ抑えることができた。そのように製作した基板(ID: 181024)に対して、以下のように性能測定を行った。

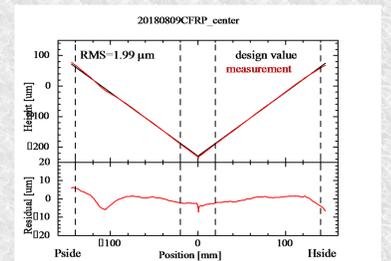


Figure 3-1. 薄板ガラス法を用いて反射面形成したあとのCFRP基板形状。

### 反射鏡の性能測定

薄板ガラス法を用いた反射鏡の性能を測定するため、可視光線(g-band)とX線(8 keV)を用いて反射プロファイルを取得した(基板ID:181024)。可視光測定は愛媛大学において平行光を基板に当てることで実験を行い、X線測定は宇宙科学研究所のビームラインを用いて実験を行った。反射像はそれぞれFigures 3-2, 3-3である。

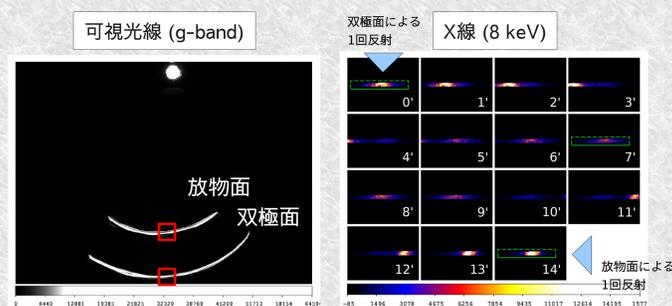


Figure 3-2. 可視光線の反射像。画像上側が光源、下側が基板である。それぞれ奥、手前に位置している。赤四角が基板の母船方向中央ラインを示している。Figure 3-3の像はこの位置で反射したX線像である。

Figure 3-3. X線の反射像。CCD検出器の位置を変えず、基板の傾きを1 arcminずつ変えた時の像を並べている。0-3が双極面、11-14が放物面による1回反射像。5-9に写っているのが2回反射したX線像である。

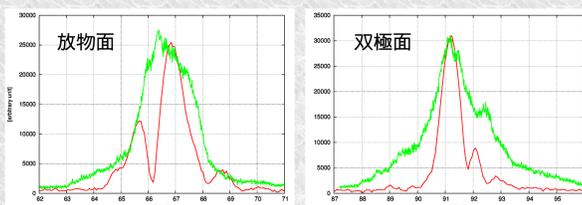


Figure 3-4. 可視光線とX線の反射プロファイル。左図が放物面、右図が双極面の1回反射を表す。

Figure 3-4 は可視光線とX線の反射プロファイルである。可視光線(赤)はローカルピークがあるものの、どちらの二次曲面もメインピークは**角度分解能40-50 arcsecを達成した(HPW: Half Power Width)**。対してX線(緑)のHPWは2-3 arcminであり、整合性が取れていない。この原因は分かっていないが、CFRP基板の細かい凹凸がガラス面に表出し、波長の短いX線だけがその影響を顕著に受けてしまった可能性が考えられる。今月下旬、SPring-8にてその影響を確かめる実験を計画中である。

### まとめと今後

我々は高集光力、高角度分解能を同時に達成する望遠鏡の実現を目指し、CFRPを用いたX線反射鏡の研究・開発を行っている。異なる二次曲面を二段一体として成型できるCFRPに対し、レプリカ法の適用はいくつかの課題が残り困難である。そこで我々は、薄板ガラスに金属を成膜する「薄板ガラス法」を用いることで反射面形成を行うことにした。シワや凹凸が発生するといった問題点はあるが、基板固着と成膜の順を逆にすると、点状に接着剤を塗布する、などの対策でそれらをほぼ抑えられることが分かった。現在、可視光線では角度分解能40-50 arcsecを達成している。しかしX線において2-3 arcminとなる原因の特定には至っていない。今後は気球実験を目指した開発を実施する予定である。