

## 炭素繊維強化プラスチックを用いた次世代 X 線望遠鏡の開発

島 直究 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

従来の日本の X 線望遠鏡は多重薄板型と呼ばれる種類の望遠鏡を用いてきた。この望遠鏡は薄い反射鏡を同心円状に多数配置することで軽量かつ高い集光力を得ることができる一方、角度分解能が数分角程度に制限されてしまうという欠点を併せ持つ。その要因のひとつに、従来用いられてきたアルミ製の薄板基板では Wolter I 型光学系の二次曲面の形成が困難であり、光学系を円錐近似していることが挙げられる。今後の日本の X 線天文学の発展のためには、高い集光力を保持したまま結像性能を向上させる必要性があり、将来的には完全な Wolter I 型光学系を使用した望遠鏡の開発が必須となる。そこで我々は愛媛大学と共同で、炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) を基板として用いた望遠鏡の開発を行っている。炭素繊維に樹脂を含浸させて硬化させた複合材である CFRP は軽量かつ寸法安定性がよく、高剛性であるという利点を持つ。また任意の形状に成型が容易であるため、原理上完全な Wolter I 型光学系を使用した望遠鏡が製作できる。

現在は愛媛大学製作の 1/4 周二段一体 CFRP 基板 ( $\phi 200$  mm、各段 150 mm) を用いて反射鏡の製作を行っている。反射鏡製作手法は、ガラス母型に反射膜を成膜し、それをエポキシを用いて基板に転写させるレプリカ法を用いる。今回、製作した反射鏡 4 枚をハウジングに組み込み、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン (エネルギー 20 keV) において性能評価を行った。細く絞った平行 X 線ビームを用いて性能評価を行ったところ、ひとつの反射鏡全面では結像性能 3.0 - 4.5 分角程度であり、この結像性能劣化要因が反射鏡の母線方向と円周方向の形状誤差に切り分けられることが分かった。一方局所的には、最も良い位置で結像性能 20 秒角を達成した。本講演では X 線望遠鏡開発の現状と SPring-8 における測定結果について述べる。

### 1 次世代 X 線望遠鏡への要求

X 線領域では多くの物質の屈折率が 1 に極めて近く、X 線をほとんど屈折しないため、集光には鏡を用いた反射光学系を採用している。また X 線の直入射の反射率は非常に小さいので、X 線を臨界角 ( $\sim 1$  degree) 以下の小さい角度で全反射させて集光する斜入射光学系を用いる。特に回転放物面と回転双曲面を共焦点配置し、それぞれの凹面で 1 回ずつ、計 2 回反射させて集光する Wolter I 型斜入射光学系を用いるのが一般的である。図 1 に Wolter I 型光学系の断面図を示す。

我が国では集光力をできるだけ大きくした望遠鏡として、「多重薄板型」と呼ばれる種類の X 線望遠鏡の開発を行ってきた。これは、基板の厚さを極力薄くした多数の反射鏡を同心円上に配置したもので、軽量でありながら高い開口効率を実現する。一方で、製作の簡単のため Wolter I 型光学系の回転二次曲面を円錐近似している点、また反射鏡の薄さゆえに形

状保持が困難である点から、結像性能は数分角程度に制限されるという欠点も併せ持つ。今後の日本の X 線天文学の発展のためには、現在の高い集光力を保持したまま結像性能を向上させる必要がある。

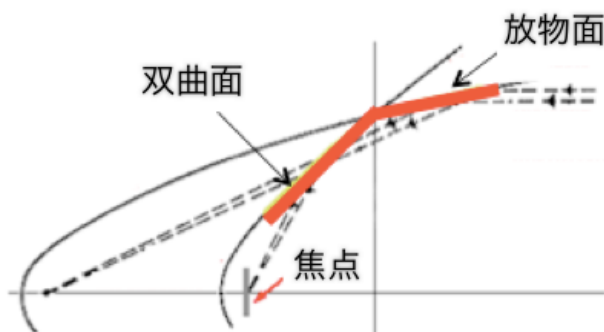


図 1: Wolter I 型斜入射光学系

## 2 炭素繊維強化プラスチックを用いた反射鏡製作

### 2.1 炭素繊維強化プラスチック

我々は、より高精度の次世代 X 線望遠鏡の開発の一つとして、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) を反射鏡基板に用いた多重薄板型 X 線望遠鏡の研究を行っている。CFRP は炭素繊維にプラスチック材を含浸させた複合材料であり、従来の日本の X 線望遠鏡用反射鏡基板に用いられてきた Al と比べ軽量 (比重が Al の 2/3) かつ寸法安定性がよく (熱膨張係数が Al の 1/8 以下)、高剛性である (ヤング率が Al の 2 倍) という利点を持つ。また任意の形状への成形が容易であるため、原理上完全な Wolter I 型光学系を使用した望遠鏡が製作できる。

X 線望遠鏡用 CFRP 基板は愛媛大学にて製作している。CFRP には多様な成形方法があり、本研究ではプリプレグ法を採用した。これは、炭素繊維を一方方向に引き揃えた織物にプラスチック材を含浸させたプリプレグと呼ばれるシート状の中間素材を、炭素繊維方向を変えながら母型の上に複数枚積層し、高温下で加圧・硬化して成形する方法である。本研究では図 2 のようにプリプレグの厚さや枚数、積層構成を変えた二種類の反射鏡基板を製作した。一般にプリプレグの積層方向は厚み方向に対して対照的になるよう積層し、斜め方向の積層を含む図 2 右の構成の方が剛性が高くなる。またこのようにして製作した、Wolter I 型光学系の放物面・双曲面一体型の 1/4 周 CFRP 基板を図 3 に示す。

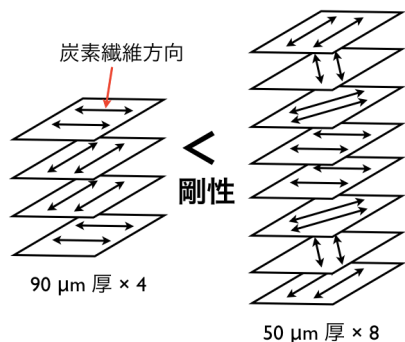


図 2: プリプレグ積層の様子

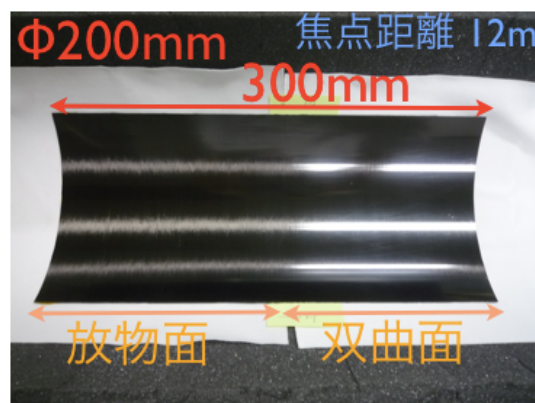


図 3: 1/4 周二段一体型 CFRP 基板

### 2.2 反射膜の成膜

基板内面への反射膜の成膜にはレプリカ法を用いた。レプリカ法とはガラスなどの平滑な母型に反射膜を成膜し、接着剤を用いて薄板基板に転写する技術である。以下にレプリカ工程の概略を示す。また図 4 に 1/4 周 CFRP 基板のレプリカ工程の様子を示す。

1. レプリカ用円筒ガラス母型に反射膜を成膜する。
2. 基板に対しエポキシ接着剤をスプレー装置を用いて噴布する。
3. 円筒ガラス母型と基板を貼り合わせる。
4. エポキシ接着剤を常温で硬化後、離型する。

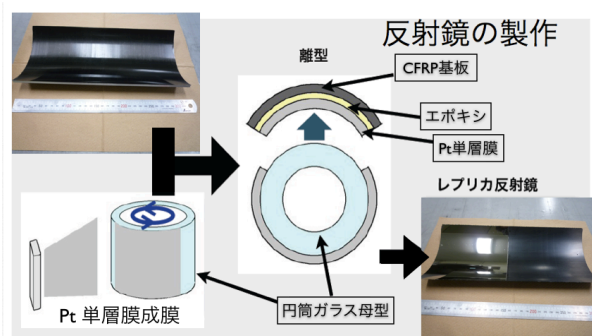


図 4: 1/4 周 CFRP 基板のレプリカ工程

### 3 CFRP 反射鏡の性能評価

#### 3.1 実験のセットアップ

製作した 1/4 周 CFRP 反射鏡 4 枚・一周分を保持機構であるハウジングに搭載し、大型放射光施設 SPring-8 の BL20B2 ビームラインにて性能評価を行った。4 枚のうち 2 枚は形状保持のため、図 5 のようにアルミ製の梁 (幅 1mm、高さ 3mm) を基板背面に、接着剤を用いて貼り付けた。プリプレグの積層構成など CFRP 反射鏡の詳細は表 1 の通りである。



図 5: 梁の貼り付けの様子

表 1: 性能評価を行った CFRP 反射鏡

積層構成	梁	剛性
50 $\mu\text{m}$ $\times$ 8 層 斜めあり	無し	高
90 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 層 斜め無し	無し	低
90 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 層 斜め無し	3 本	高
90 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 層 斜め無し	4 本	高

ビームラインのセットアップを図 6 に示す。X 線ビームの平行度は、ビームサイズが 10  $\times$  5 mm の時点で 10  $\times$  5 秒角で、エネルギーは二結晶分光器を用いて 20 keV に調節した。ビームサイズは上流側のスリットで絞ることで調整を行った。

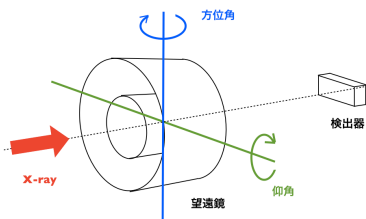


図 6: SPring-8 ビームライン セットアップ

#### 3.2 反射鏡ごとの性能評価

X 線のビームを 10  $\times$  5 mm に絞って反射鏡に照射し、その 2 回反射像を一周分撮像した。それぞれの反射鏡について像を重ねた結果を図 7 に示す。図 7 各像左下に表示した結像性能は、全光量の半分が入る円の直径 (Half Power Diameter : HPD) で定義した。この結像性能は (i) 母線形状の劣化による像の広がり (ii) 各像の結像位置のばらつき の二種類の成分が合計されたものである。結像性能の劣化要因を各成分に分けて HPD を評価したものが図 8 で、左が各像の結像中心を揃えて重ねたイメージ、右が各像の結像中心をプロットしたものである。この操作を全ての反射鏡に対して行い、まとめたものが表 2 である。表 2 を見ると、剛性の低い反射鏡の結像性能が悪く、特に母線形状による劣化が大きい結果となった。このことから、形状保持力、つまり剛性の高い反射鏡を用いる必要があることが分かった。また結像位置のばらつきはどの反射鏡についても同程度に表れている。結像位置のばらつきは母線方向の法線方向が分布をもつことで生じるため、反射鏡の真円度の向上あるいは保持機構による位置合わせの精度に改善の余地があることが分かった。

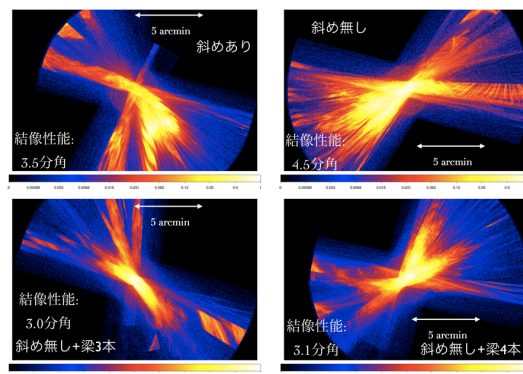


図 7: 反射鏡ごとの像

表 2: 反射鏡ごとの性能評価まとめ

積層構成	剛性	結像性能 [分角]	母線形状 [分角]	結像位置のばらつき [分角]
斜めあり	高	3.5	1.6	2.8
斜め無し	低	4.5	2.9	2.8
斜め無し+梁3本	高	3.0	1.9	2.8
斜め無し+梁4本	高	3.1	2.1	2.0

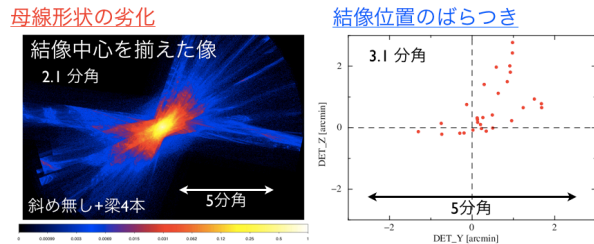


図 8: 結像性能劣化成分の切り分け

- 反射鏡単体の結像性能は 3.0 ~ 4.5 分角であり、この劣化要因を母線形状劣化と結像位置のばらつきの 2 つの要因に切り分けた。反射鏡には剛性の高い CFRP 基板を用いる必要があり、真円度や保持機構の調整精度にも改善の余地があることを確認した。
- 局所的な結像性能は最も良い位置で 20 秒角を達成した。

### 3.3 反射鏡の局所的な性能評価

X 線を  $10 \times 1$  mm の細いビームに絞り、局所的な性能を調べた。母線形状が良いと思われる点にビームを照射し、二回反射像がもっとも良くなるよう反射鏡の角度を動かした。図 9 左側に局所的な性能が最も高かった位置における二回反射像、右側にその光度(赤点)をガウスフィット(黒線)した結果を表す。結像性能は全光量の半分が入る幅 (Half Power Width: HPW) で定義した。この結果から、局所的ではあるものの最も良い位置では結像性能 20 秒角を達成していることが分かった。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- 山下 広順, 1999, 『X 線結像光学』培風館  
 岩瀬 敏博, 2015, 修士論文 名古屋大学大学院 理学研究科

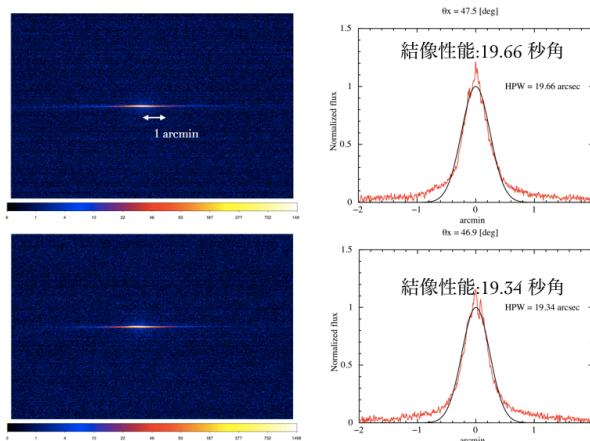


図 9: 局所的な結像性能の評価

## 4 まとめ

- 大型放射光施設 SPring-8 にて、製作した 1/4 周二段一体型 CFRP 反射鏡の性能評価を行った。