

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を用いた X 線反射鏡の開発

吉田 鉄生¹, 大上 千智¹, 横田 翼², 栗木 久光¹, 松本 浩典³, 三石 郁之², 大松 茉喜¹, 中野 慎也², 大塚 康司², 吉田 篤史², 石田 直樹⁴

(1: 愛媛大学, 2: 名古屋大学, 3: 大阪大学, 4: 玉川エンジニアリング)

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は炭素繊維と樹脂から構成される複合材料であり、比較的軽量で高い成型性を持つため、軽量・強度が要求される航空・宇宙関連分野で構造系部材としてよく用いられている。CFRPが持つこれらの特徴は望遠鏡の大型化に適したものであり、望遠鏡の筐体だけでなく反射鏡としても注目されている。我々は、CFRPが宇宙観測用望遠鏡基板の有力な候補になると考え、開発を進めてきた。しかし、CFRPにはプリントスルーや膨潤変形といった光学素子として利用する際の欠点を持ち、反射鏡として利用するにはこれらの欠点を克服する必要がある。そこでこれらの欠点を克服する方法を研究、解明し、Wolter形状CFRP基板に反射膜を形成する方法、X線反射鏡を精度よく望遠鏡ハウジング内に配置する方法を開発研究している。本発表では、それぞれの項目における開発の現状を報告するとともに、2017年11月末に実施した大型軌道放射光施設SPring-8での実験について、初期解析の結果もまじえて報告する。

CFRP製X線反射鏡

X線は斜入射でのみ全反射を起こすため、X線望遠鏡にはWolter光学系のような斜入射光学系が用いられる。図1-1は「すざく」などのX線天文衛星で用いられたWolter-I型光学系の概念図である。この型の望遠鏡ではX線の集光力を高めるために、図1-1にあるように同じ焦点距離を持つX線反射鏡を層状に重ねて使用する。多重薄板型望遠鏡は、特に集光力に重点を置き、厚さ0.1~1mm程度の薄いアルミニウム製反射鏡を200層程度重ねている(図1-2: 多重薄板型望遠鏡)。アルミニウム製多重薄板型は集光力の点で優れているが、結像性能の点では劣っている。我々は高集光力でありながら、高角度分解能を有する望遠鏡を目指し、新しい反射鏡としてCFRP製X線反射鏡の開発を行っている。CFRPは右の特徴で示した利点を持ち、2種類の回転二次曲面(回転放物面; 以下P側、回転双曲面; 以下H側)からなるWolter-I型形状を1枚の基板で成型できるという特徴を持つ。(図1-3)

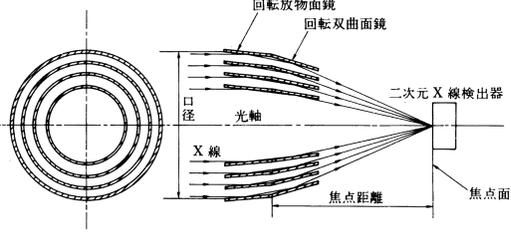


図1-1: X線望遠鏡概念図

CFRPの特徴
密度が小さい→望遠鏡の軽量化
比強度が高い
熱膨張率がほぼ0→形状の保持
成型性が良い→Wolter型二段一体型

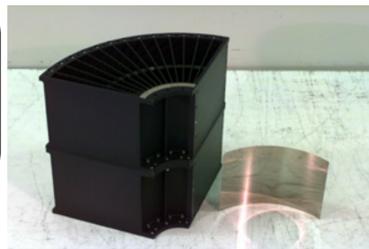


図1-2: すざく衛星搭載多重薄板望遠鏡(アルミニウム基板) 軽量で、集光力は高いが、結像性能の面で劣っている。

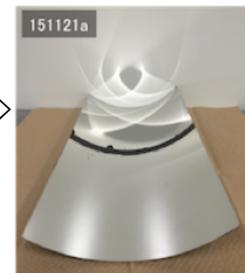


図1-3: CFRP製X線反射鏡基板 レプリカ法で表面にPt成膜を行っている。

表1-1: アルミニウム製基板とCFRP製基板の比較

	アルミニウム基板	CFRP基板
基板形状	円錐近似	Wolter-I型
二次曲面接続部	2つの曲面を別々に製作、接続はアライメントバー	二段一体型
反射鏡面	レプリカ	レプリカ
角度分解能	1~2 arcmin(ASTRO-H)	20 arcsec(目標値)

CFRP反射鏡製作

CFRP 基板の2つの欠点とその対策

(1)炭素繊維の構造が表出するプリントスルー
プリントスルーとは、CFRPに含まれる樹脂が硬化収縮、硬化後の熱収縮を起こし、炭素繊維や炭素繊維束の構造が表面に出る現象である。この構造を消す方法として、レプリカの接着剤の硬化温度を室温にすることが有効である(Sugita+ 2015)、高温硬化の反射鏡と比べると経年によるプリントスルーの表出が見られなかった。
(2)樹脂の吸湿による膨潤、形状変化
CFRPに含まれる樹脂が吸湿をすることで膨潤変形する。吸湿を避けるために防湿効果フィルムをCFRP基板に付加することが有効であることがわかった。図2-2は、湿度100%、温度60℃の環境下での吸湿率の時間変化を示している。吸湿速度の違いから、防湿フィルム(IB-PET-PXBフィルム)の効果が確認できる。

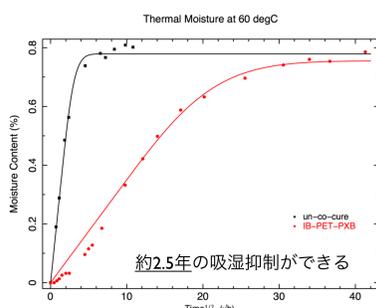


図2-1: 吸湿率の時間変化

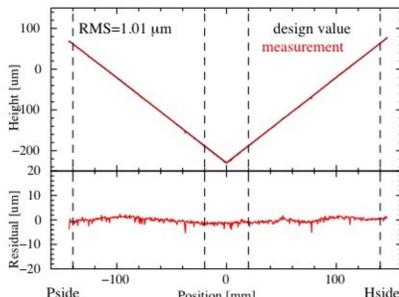


図2-2: 基板形状(170929a)

CFRP基板製作

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(50μm厚)
積層条件: 8層擬似等方積層
形状: 焦点距離12m, 直径200mm, Wolter-I型1/4周分
成型法: 真空バッキング法、130℃, 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
スーパーインバー製母型を使用

非接触三次元計測器NH-6で基板を測定した結果を図2-2に示す。

レプリカ

ガラスなどなめらかな表面にAu, Ptなどを成膜し、それ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。本実験では1000ÅのPt単層膜を成膜している。

(1)円筒ガラス
レプリカ型として円筒形状ガラスを用いる方法。プリントスルー軽減のため常温で硬化する。レプリカはP側、H側別々に行う。
(2)GCM(Glass Coated Mandrel)法
薄板ガラスを金属製金型に巻きつけたものをレプリカ型として使用する方法。真空バッキング法で加圧してP,H側を転写する。Wolter-I型形状の金型を使用することができる。



図2-3: 円筒ガラス



図2-4: GCM法

表2-1にSPring-8実験のサンプルの4枚の反射鏡の基板製作とレプリカ条件を示す。反射鏡の中央は二次曲面の切り替わり部分のためレプリカできない。図2-5はGCM法でレプリカしたCFRP基板(170929a)の母線形状である。

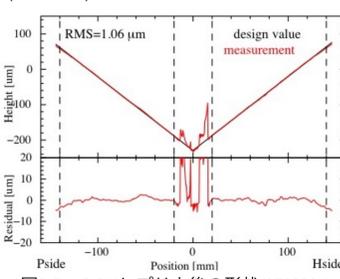


図2-5: GCMレプリカ後の形状(170929a)

表2-1: 基板製作、レプリカ条件

	Segment A	Segment B	Segment C	Segment D				
サンプルID	170929a	170929b	170901a	171026b				
レプリカ母型	GCM	円筒ガラス	GCM	GCM				
積層構成	[0/45/-45/90] _s	[0/45/-45/90] _s	[0/45/-45/90] _s	[0/45/-45/90] _s				
硬化条件	常温	常温	常温	常温				
	P	S	P	S	P	S	P	S
硬化時間(hr)	114	93	96	93	71			
備考								一部欠損あり

X線反射鏡位置決め機構の開発

従来の位置決め法: 多重薄板型の場合、100層以上の反射鏡を1~3mmの間隔で配置する必要がある。その際、従来は櫛の歯状の溝をもつアライメントバーを用いて反射鏡の位置を決定していた。櫛の歯の溝幅は基板厚さよりも大きいため、その分位置決め誤差が生じており、30 arcsec以下の高角度分解能望遠鏡には適していない。

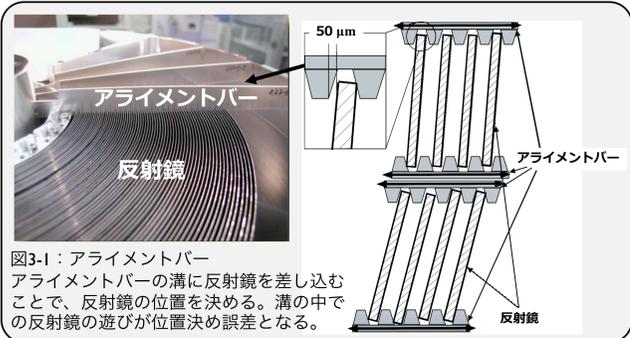


図3-1: アライメントバー

アライメントバーの溝に反射鏡を差し込むことで、反射鏡の位置を決める。溝の中の反射鏡の遊びが位置決め誤差となる。

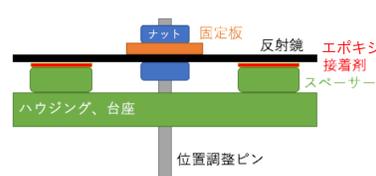


図3-2: 基板位置調整実験の概念図

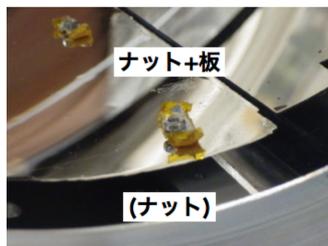


図3-3: 反射鏡と位置調整ピンの接続部

ピエゾアクチュエータを使った新しい位置決め法:
前年度までの研究で、ピエゾアクチュエータ(以下ピエゾ)を用いて平板基板を2μm以下の精度で位置調整できることがわかった(岩切2017)。この状態で固着することで調整した位置での固定が可能である。図3-2は位置調整と固着部の模式図である。エポキシ系接着剤をスペーサー上部に塗布し接着剤硬化前に反射鏡を位置調整する。

・1/4周反射鏡への適用

1枚の1/4周反射鏡に12台のピエゾを取り付け、ドライブロッドと反射鏡は図3-2,3のように位置調整ピンを用いて接続する。レーザー変位計LT-9000で測定しながら位置調整を行う。調整の結果、目標値と測定値とのずれがサブμm以下と精度良い調整ができた。これは結像性能で数arcsecに該当する。調整後の母線形状を図3-4に示す。

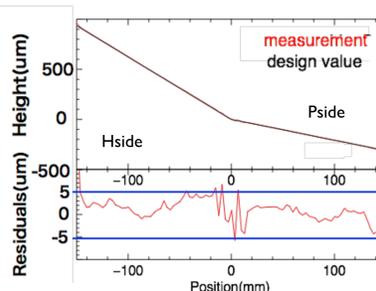
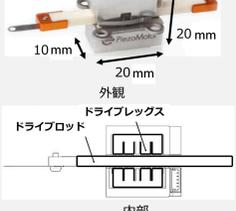


図3-4: 位置調整後の形状

ピエゾアクチュエータ

圧電効果を使用した装置でドライブロッドとドライブレグから構成されている。ドライブレグに圧電素子がついており、素子にかかる電圧を変化させると、ロッドを動かすことができる。ロッドのストロークは最大30mm、分解能は約2.4nmのものを使用した。



位置調整後の1/4周円筒基板のP~H側300mmの母線形状をレーザー変位計LT-9000で測定した。測定した反射鏡の測定値(赤)と設計値(黒)を比較し、その残差をグラフ下部に示している。反射鏡中心部を除いた部分で設計値とのずれは、±5μm程度であった(中心部は鏡面がないため未調整)。

反射鏡の結像性能について

2017年11月末に大型放射光施設SPring-8にて、位置調整済みの1/4周反射鏡4枚に対し、20keVのX線を入射させ反射鏡の結像性能測定実験を行った。

ビームサイズ: 10x5mm
測定ピッチ: 入射角度を0.04degずつ振り測定
望遠鏡360deg分を測定
検出器: シンチレータ付きCMOSカメラ

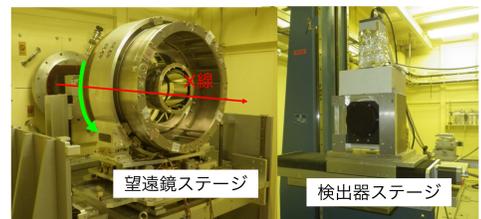


図3-5: 実験装置の概略図

図3-5は使用したSPring-8のビームラインBL20B2の概略図と各ステージである。



図3-5: 実験装置の概略図

図3-6は焦点面で得られた2回反射による反射像を射影したものである。これをガウシアンで再現し、HPW(Half Power Width)を取得した。図3-7は望遠鏡一周分の各点で得られたHPWをsegmentごとに表示したものである。GCMレプリカに比べ円筒ガラスによるレプリカ(segB)の反射鏡の方が小さいHPWが得られた。

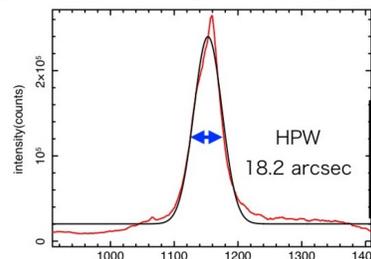


図3-6: 170929bのある箇所でのHPW

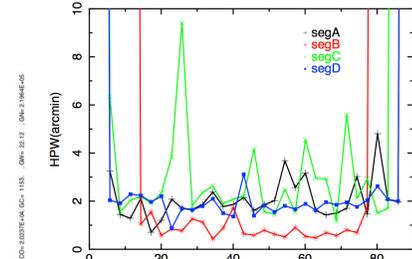


図3-7: 各segmentのHPW

まとめ

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。CFRPは基板として使用する際にプリントスルーの表出、吸湿膨潤という2つの欠点があるが、それぞれ接着剤の硬化温度を常温にする、防湿フィルムを付加するという対策が有効であると我々の研究でわかった。反射鏡製作については基板、レプリカ法の反射鏡共に母線形状がσ=1μmと高精度で製作できた。位置調整は目標値とサブμmの誤差で精度良く調整できることがわかった。今後は調整場所とピエゾの数を検討していく。SPring-8の実験結果では円筒ガラスによるレプリカの反射鏡で20 arcsec以下が得られたが、GCM法の反射鏡では同程度の結像性能が得られておらず、改善が必要である。