

CFRPを用いた軽量高角度分解能X線反射鏡の開発

梶谷紀香¹, 栗木久光¹, 相田望¹, 今村竜太¹, 久保実生¹, 松本浩典², 石田学³, 前田良和³
 (1:愛媛大学 2:大阪大学 3:宇宙科学研究所)

CFRP製X線望遠鏡

宇宙からやってくるX線を観測するために用いられるものとしてX線望遠鏡がある。X線望遠鏡の光学系はWolter1型を採用することが多く、この光学系では反射鏡を同心円状に、共焦点配置する (Figure 1-1)。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線天文衛星さくでは厚さ0.150mmの薄いアルミニウム製反射鏡を約200層重ねていた。しかし、アルミニウム製多重薄板型望遠鏡は集光力は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X線観測においてはその性能を向上させなければならない。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HPD=20 arcsec)を有する望遠鏡の製作を目指し、従来のアルミニウムの代わりに炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を用いたX線反射鏡開発を行っている (Figure 1-2)。CFRPはメリットとして成形のしやすさがあり、複雑なWolter1型形状を1枚の基板で成型 (二段一体型) ができるため、基板形状精度の向上を期待できる (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ち、さらにアルミニウムより密度が小さいことによる望遠鏡の軽量化にも貢献する。

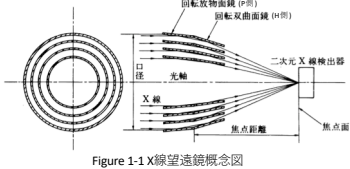


Figure 1-1 X線望遠鏡概念図



Figure 1-2

薄板ガラス法でWを蒸着したCFRP製反射鏡基板サンプル (ID: 191210a)

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	Wolter1型
それぞれの2次曲面	別々に制作しアライメントバーで接続	二段一体型
反射面形成法	レプリカ法	薄板ガラス法
角度分解能(HPD)	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。これを用いたX線反射鏡の課題は、
 ・X線反射面の凹凸をなくす
 ・反射鏡を組み立てる際の位置決め誤差をなくす
 ことである。他にもCFRPを用いるデメリットとして、吸湿膨潤による基板の形状変化や、樹脂の収縮により炭素繊維が表出するプリントスルーが挙げられるが、以前のポスターで先行研究による対策を報告したため、ここでは割愛する。本ポスターではX線を用いた最新の性能測定の結果を反射鏡の形状を比較することで理解するとともに、表面の凹凸が出にくいガラスの貼り付け法について考察する。

CFRP基板製作条件

プリブレグ : 日本グラファイトファイバー製E7026B-05S(50 μm厚)
 積層条件 : 5層積層 [0/90/90/90/0]
 形状 : 焦点距離12 m, 直径200 mm, Wolter-I型1/4周分
 成型法 : 真空バッキング法, 130 °C, 7時間で硬化
 吸湿対策 : 反射面にW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 : スーパーインバー製Wolter1型母型を使用する。

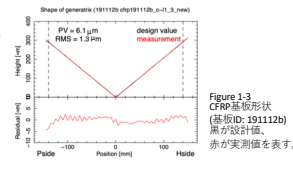


Figure 1-3 CFRP基板形状 (基板ID: 191112b) 黒が設計値、赤が実測値を表す。

反射鏡の性能評価

大型放射線施設Spring-8でのX線評価

後述する薄板ガラス法で製作された反射鏡の性能を測定するため、2020年7月にSpring-8でのX線評価を行った。(基板ID: 191210a) Spring-8での実験はFigure 2-1のセットアップで行った。X線帯域は20keV、焦点距離は約12mで、母線方向に幅のあるビームを反射面ほぼ全面に照射した。そこで得られた結果をFigure 2-2, 2-3に示す。これより、X線評価ではHPD=150 [arcsec] という結果が得られた。なお、像が1箇所集中しているということは、基板形状がWolter1型に近いことを示しており、ハウジングへの配置精度が良いと考えられる。

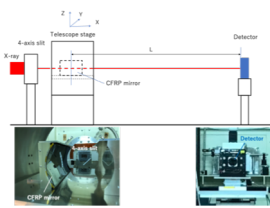


Figure 2-1 Spring-8でのX線反射性能測定のセットアップ

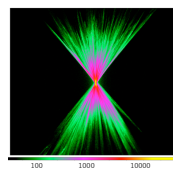


Figure 2-2 焦点位置でのX線画像。この層状の要部分が焦点で、そこから層状に広がる光は、形状精度が高い事により焦点に集光されなかった光である。色は、X線強度を示し、ここでは対数表示をしている。(size: 8.57 × 8.57)

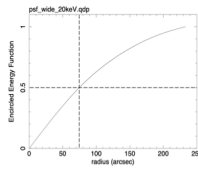


Figure 2-3 X線評価での結像性能EEF(Encircled Energy Function)を表すグラフ。EEFとは全光束に対して半径内にどれくらい光量が入っている割合を表す。そのため輻射半径をとっており、EEF=0.5のときのrを2倍するとHPDが得られる。

反射鏡の形状評価

愛媛大学内での反射鏡の性能評価には、レーザー変位計を用いた形状評価を行っている。今年度、ストレート基準器を導入したことで、1μmの精度での測定が可能になった。

評価方法

- (1) レーザー変位計で反射鏡表面の変位を測定
- (2) 得られた変位と設計値の差をとる
- (3) (2) からスロープ分布を求め、その分布の標準偏差を計算することでHPDを導出する

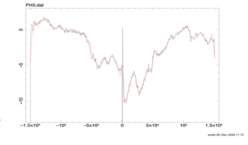


Figure 2-5 基板ID: 191210aの円周方向中心における母線の形状

Figure 2-5は、X線評価で用いた191210aの円周方向中心での (2) の結果をグラフ化したものである。

- (3) で得られた標準偏差は、P側とH側でそれぞれ42arcsecと27arcsecとなった。この値より、この箇所での結像性能はHPD=135 [arcsec] と予想される。

X線評価と形状評価の比較

X線評価と形状評価で用いた反射鏡は同一のものであり、測定箇所も円周方向の中心での結像性能を測定した。その結果、それぞれの評価で近いHPDを得ることができた。これにより、形状評価を行うことで、ある程度のX線評価の結果を予測することができるようになった。

X線反射面平滑化方法の開発

薄板ガラス法

基板に薄板ガラスを直接接着し、薄板ガラスの表面に金属を成膜することでX線反射面を形成する。従来のX多重薄板型X線望遠鏡の反射面形成に採用されていたレプリカ法の代替法として開発した。薄板ガラス法の工程をFigure 3-1に示す。これまでの研究成果より反射面の凹凸を抑えるために、以下の2点を採用している。
 ・接着剤として両面テープを採用し、CFRP基板全体を覆うように貼り付ける
 ・形状精度を上げるために、2と3の間で真空引きをする

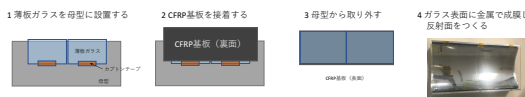


Figure 3-1 薄板ガラス法の工程概略

実験

薄板ガラス法 (Figure 3-1) の工程1に着目し、最も反射像がシャープになる薄板ガラスを固定する方法を調査した。今回の実験では、母型の放物線側のみを用いてガラスの固定を行った。

実験1 : 薄板ガラス固定位置の見直し (Figure 4-1)

実験2 : 薄板ガラス固定後、10min真空引きをして圧着させる

これまでは、Figure 4-1の1の方法で、真空引きせずに行っていた。

評価方法

- (1) 貼り付けた薄板ガラスを可視光上流から見て5ラインに分ける。(Figure 4-2)
- (2) 平行可視光を薄板ガラスの表面に当て、反射像を撮影。(Figure 4-3)
- (3) 円筒状の各点で動径方向の強度分布を作成し、それを加算する (Figure 4-4)。加算した強度分布をガウス関数でフィッティングし標準偏差を出す。

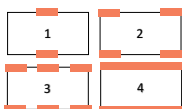


Figure 4-1 薄板ガラスの母型への固定方法。オレンジ色はカプトンテープで、ガラスの固定位置を示している。

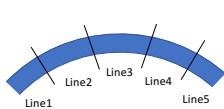
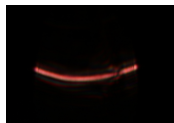
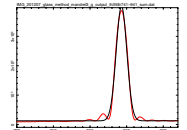


Figure 4-2 可視光評価時のLineの定義



← Figure 4-3 Method3のLine3での反射像

→ Figure 4-4 径方向の強度分布 (method3のLine3)



結果

Table 4-1 実験1 : 各Lineの強度 (径方向) から得られた標準偏差 (単位はCMOSの画素である)

method	3					4				
Line	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
標準偏差	10.7	11.3	13.5	14.0	33.6	9.8	16.1	14.5	14.9	29.1

Table 4-2 実験2 : 各Lineの強度 (径方向) から得られた標準偏差

method	3(真空引きなし)					3(真空引きあり)				
Line	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
標準偏差	8.1	8.4	7.9	8.4	7.9	8.3	8.5	8.1	8.9	8.1

(参考: 母型の反射像より得られた標準偏差は7.2)

実験1では、薄板ガラス中心のLine2,3,4でmethod3の形状精度が良いことが明らかとなった。また、Figure 3-1の工程2では中心部分から基板を貼り付けていくため、中心部の形状が良いmethod3の方が適しているであろう。なおmethod1,2はmethod3,4と比較して明らかに反射像が広がっていたために、解析を行っていない。
 実験2より、固定後の真空引きによる形状精度の向上は見られなかった。実験1と実験2では、同じmethod3であるにも関わらず結果が大きく異なっている。両者では、テープを貼る順序を変えており、この影響が出ているのかもしれない。

まとめと今後の課題

ストレート基準器を導入した形状評価システムを導入することで1μmの精度での測定が可能となり、学外でしかできないX線評価の結果を学内でできる形状評価と結びつけ、大まかな予測をすることが可能となった。この評価システムを用いて測定した191210aの結果では、P側の形状精度が低かったため、これを改善するためにP側の薄板ガラスの貼り付け法の検討を行った。この実験から、method3と呼ばれる方法がもっとも良好であった。また、密着性を高めるために行った真空引きについては顕著な効果が見られなかった。そして、実験2で行なったmethod3の結果 (a) が大きく異なっており、テープを貼る順序などが反射像に影響を与えていることが示唆され、今後の検討課題である。