

## 小型衛星計画 DIOS 搭載 4 回反射 X 線望遠鏡用反射鏡の可視光形状評価

萬代 絢子 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

ダークバリオン探査のための小型衛星計画 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) は中高温銀河間物質 (WHIM; Warm/Hot Intergalactic Medium) の空間構造解明を目的としている。WHIM は面輝度が低く、広がっているため、大有効面積かつ広視野の望遠鏡が必要である。このため、我々は X 線望遠鏡として、従来の 2 回反射光学系に代わり、4 回反射光学系を採用することで、短焦点距離 (700 mm) 化し、大口径 (600 mm) かつ大視野 (~ 50 分角) の実現を目指している。

本望遠鏡は厚さ 0.22 mm の薄い反射鏡を同心円状に多数配置した構造を持っている。現在製作中の半径 250 mm 付近の反射鏡 4 段 10 組を X 線を用いて性能を評価したところ、結像性能は ~ 8.8 分角であり、目標の 5 分角には達していなかった。結像性能の主な劣化要因は反射鏡の円周方向の形状誤差であった。この形状誤差が生じる要因の 1 つは、実際にできた反射鏡の半径が設計値からずれていることである。本研究の目的は、反射鏡をハウジングに搭載することによる形状誤差の変化を明らかにすることである。測定の容易性から可視光を用いて反射鏡単体の形状評価と、反射鏡をハウジングに入れた状態での形状評価を行った。その結果を比較したところ、反射鏡を 1 回ハウジングに入れることで円周方向の形状誤差は大きく変化せず、母線方向の形状誤差は変化した。また、母線方向・円周方向ともに、形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向は見られなかった。しかし、1 枚のみ形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向が見られた反射鏡があった。このことから反射鏡を入れる溝を決めるパラメータとして反射鏡の top 側の半径は適切ではないと考えられる。

## 1 研究背景

### 1.1 DIOS 衛星

現在の宇宙の組成は、ダークエネルギーやダークマターが大半を占めており、バリオンは 4% ほどであると言われている。しかし、電磁波を用いて観測可能なバリオンでさえも半分程度はまだ観測されていないため、ダークバリオンと呼ばれる。ダークバリオンの多くは 10 万度から 1000 万度の温度をもち、銀河団同士を結ぶフィラメント状の宇宙の大規模構造に沿って WHIM として分布しているとされている。この WHIM からの酸素輝線を観測することで WHIM の空間分布を観測的に明らかにすることが DIOS 計画の目的である。

WHIM は密度が低く、面輝度が低いため大有効面積かつ広視野の X 線望遠鏡が必要とされる。そこで我々は従来の 2 回反射光学系にかわり 4 回反射光学

系を採用することで [1]、短焦点距離 (700 mm) 化し、大口径 (600 mm) かつ大視野 (~ 50 分角) の実現を目指している。

### 1.2 4 回反射 X 線望遠鏡開発の現状と課題

X 線は全反射を利用して集光・結像させる。従来の X 線望遠鏡は、2 回反射光学系の Wolter-I 型光学系が用いられている。しかし、DIOS 衛星では円錐近似で Wolter-I 型光学系を 4 回反射に発展させた光学系を用いる。この光学系を用いることで、大口径を保ったまま焦点距離を短く、つまり視野を広げることができる。現在この望遠鏡の口径 500 mm 付近の反射鏡を製作中である。

反射鏡はハウジングと呼ばれる、反射鏡支持機構に搭載する。このハウジングは 1 周を 4 等分したも

ので、高さは約 175 mm、半径は約 300 mm である。従来の X 線望遠鏡においては反射鏡の支持・位置決め機構としてアライメントバーとよばれる、支持棒に反射鏡を差し込む溝が切つてあるものを複数用いて、反射鏡を支持しているが、本望遠鏡では各段のアライメントバーが一体となった構造のアライメントプレートを用いている。アライメントプレートに刻まれている各溝の幅は 240  $\mu\text{m}$  である。また、各溝同士の間隔は約 1.4 mm となっている。

反射鏡は X 線が入射する方向から順に 1 段目、2 段目、3 段目、4 段目と定義する。図 1 に反射鏡をハウジングに挿入した後の様子を示す。

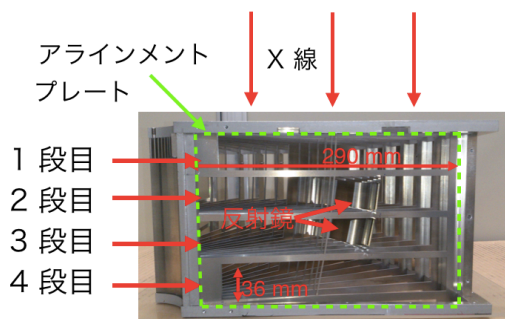


図 1: 1/4 周ハウジング。2・3 段目の反射鏡が搭載されている

望遠鏡の結像性能を示す指標として、Half Power Diameter (HPD) が用いられる。これは、点源からの全光量の半分が入る円の直径である。結像性能の劣化要因として、反射鏡の形状誤差などが考えられる。反射鏡の母線方向にうねりがあると反射鏡の法線ベクトルの向きがばらついてしまい、像が動径方向に広がりを持ってしまう。これを反射鏡の母線方向の形状誤差と呼ぶ。また、反射鏡の円周方向にうねりがあると結像位置がばらついてしまう。これを反射鏡の円周方向の形状誤差と呼ぶ。

2014 年 11 月に Al の  $K\alpha$  線を用いて X 線測定を行ったところ、結像性能は 4 段 1 組の最も良いところで 6.5 分角であり、目標の 5 分角には達していなかった。また、反射鏡の母線方向の形状誤差は 4.5 分角、円周方向の形状誤差は 7.2 分角であり、円周方向の形状誤差が支配的であることがわかった。

円周方向の形状誤差が生じる原因として、出来上

がった反射鏡が設計値より大きいことがあげられる。このため、反射鏡をハウジングに入れる時に実際の半径より小さな曲率半径の溝に入れることになり、反射鏡が歪むと考えられる [2]。

そこで本研究では可視光を用いて反射鏡の形状誤差の変化を調べた。可視光を用いる利点としては測定が比較的容易であること、反射鏡の各段の評価が可能であることなどがあげられる。まず反射鏡を自立させた状態 (フリースタANDINGと呼ぶ) での形状とハウジングに入れた状態での形状誤差の変化を調べた。次に、反射鏡の半径と実際に入れるハウジングの溝の曲率半径が異なるときの形状誤差の変化を調べた。

## 2 可視光測定

可視光測定のセットアップを図 2 に示す。光源からでた光はハウジングの中またはプレートに置いたサンプル表面にあたり、反射光をピントを無限遠に合わせ、レンズをつけたカメラで撮影する。平行光の平行度は  $\sim 7$  秒角であった。

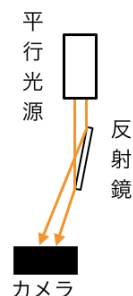


図 2: 可視光測定のセットアップ

### 2.1 解析方法

この測定では、カメラのピントを無限遠にあわせてレンズをつけているため、平行光は一点に集光する。つまり、完全な円錐鏡からの反射光は平行光になるはずなので、動径方向に幅を持たない円弧像として撮像される。しかし、実際には先に述べたように、反射鏡には母線方向の形状誤差があるので反射

像は動径方向に幅を持つ。実際に得られたイメージから反射像の動径方向の輝度分布を切り出す(図 3)。この輝度分布の幅が反射像の動径方向の像の広がり

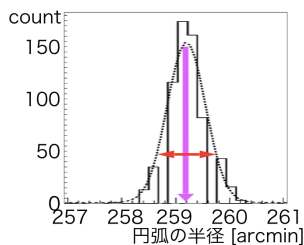


図 3: 反射像の動径方向の輝度分布。ピーク位置(マゼンタの矢印)が結像位置を表し、幅(赤の矢印)が動径方向の像の広がりを表す。

を表す。輝度分布を円周方向に多数切り出すことによって、反射鏡の部分的な母線方向の形状誤差が得られる。この幅の平均を求めると反射鏡の平均の母線方向の形状誤差が得られる(図 4 左)。また、図 3 の輝度分布のピーク位置は反射光の結像位置を表す。各輝度分布に対してピーク位置のばらつきを求めることによって反射鏡の円周方向の形状誤差が求まる(図 4 右)。

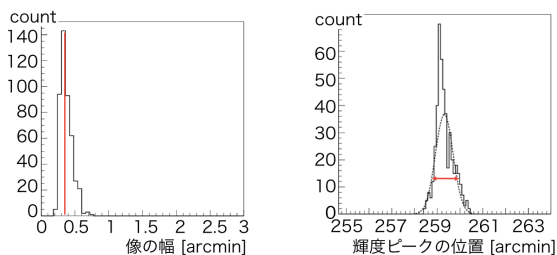


図 4: 輝度分布の幅の分布(左)、輝度ピークの分布(右)。幅の分布の平均値(赤の実線)が母線方向の形状誤差を表し、輝度ピークの分布の幅(赤い矢印)が円周方向の形状誤差を表す。

## 2.2 測定手順

まずはそれぞれの反射鏡のフリースタANDINGの像を撮影した。その後、反射鏡を自然形状を保つハウジングの溝の位置に入れて 1 回反射の像を撮影

した。この測定を測定 1 と呼ぶ。次に、反射鏡を半径が自然形状でない溝に入れることで形状がどのように変化するか調べるため、反射鏡を入れるハウジングの溝をずらしていった。この時、反射鏡をハウジングに入れることで変形が起きないことを確認するため反射鏡をハウジングに入れる前後でフリースタANDINGの像を撮影した。この測定を測定 2 と呼ぶ。

## 3 結果と議論

半径の測定結果を表 1 に示す。半径は反射鏡をテンプレートに沿わせて測定した。測定誤差は  $\pm 1.0$  mm であった。本研究では、反射鏡を入れるハウジングの溝を決めるパラメータとして Top 側の半径を用いた。

表 1: 半径の測定結果

ID	段数	設計値 [mm]		測定値 [mm]	
		Top	Top	Top	Top
001	1	235.5	248.6	235.5	248.6
002	1	242.2	248.7	242.2	248.7
003	2	233.8	246.3	233.8	246.3
004	2	245.4	248.0	245.4	248.0
005	3	228.7	236.3	228.7	236.3
006	3	240.1	242.3	240.1	242.3
007	4	220.3	236.7	220.3	236.7
008	4	226.5	236.3	226.5	236.3

測定 1 について、母線方向と円周方向の形状誤差を求め、図 5 にまとめた。このグラフの傾きを求め

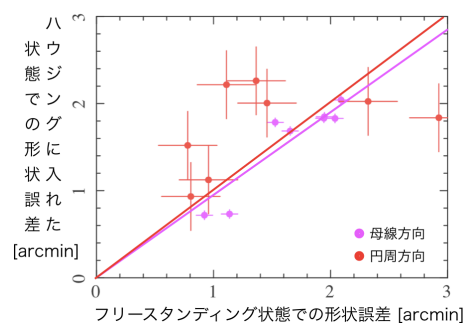


図 5: 反射鏡のフリースタANDINGの状態とハウジングに入れた状態の形状誤差の比較

ると母線方向は  $0.95 \pm 0.02$  (図 5 のマゼンタの実線)

であり、円周方向は  $1.0 \pm 0.1$  (図 5 の赤の実線) であった (エラーは信頼区間 90%)。これより円周方向の形状誤差に大きな変化は見られなかったが、母線方向の形状誤差は変化したと考えられる。

測定 2 の結果として、代表的な 2 枚の反射鏡 (表 1 中 ID 002, 003) の結果を図 6 に示す。図 6 上を見

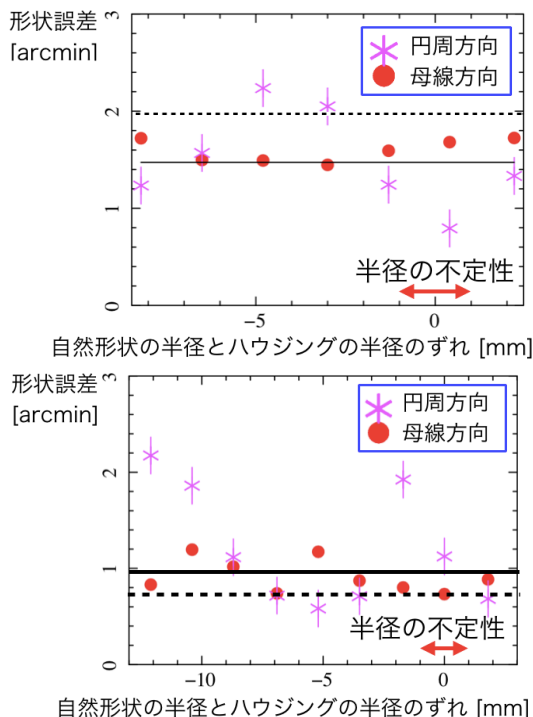


図 6: 上 : 003 の結果、下 : 002 の結果。  
縦軸は形状誤差、横軸は反射鏡の自然形状の半径とハウジングの溝の半径のずれである。またフリースタANDING測定における形状誤差の母線方向の平均を実線で示し、円周方向の平均を破線で示す。

ると、母線方向・円周方向ともに、形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向は見られなかった。同じような傾向が他の 6 枚の反射鏡についても見られた。このことから、反射鏡を入れる溝を決めるパラメータとして反射鏡の top 側の半径は適切ではないと考えられる。そのため、反射鏡の傾きなど他のパラメータを見つける必要がある。しかし、1 枚のみ形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向が見られた反射鏡があった (図 6 下)。この反射鏡については、偶然、傾きなど他のパラメータもあっ

ていたと考えられる。

## 4 まとめ

DIOS 衛星の 4 回反射 X 線望遠鏡の反射鏡を、ハウジングに入れることの形状誤差の変化と入れる溝をずらすことによる形状変化を調べるために可視光測定を行った。反射鏡をハウジングに 1 回入れることで円周方向の形状誤差に大きな変化は見られなかったが、母線方向の形状誤差は変化した。また、母線方向・円周方向ともに、形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向は見られなかった。しかし、1 枚のみ形状誤差がハウジングの溝の半径と自然形状の半径の差とともに変わる傾向が見られた反射鏡があった。このことから反射鏡を入れる溝を決めるパラメータとして反射鏡の top 側の半径は適切ではないと考えられる。

今後、本望遠鏡の全体的な性能を向上させるために、反射鏡を入れる溝を効率的に選べるよう、反射鏡の top 側の半径に変わる新たなパラメータを見つけることが必要である。

## 謝辞

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

- [1] Tawara, Y., et al. 2005, SPIE, 5900, 132
- [2] 馬場崎康敬. ダークバリオ探査衛星 DIOS 用 4 回反射型 X 線望遠鏡の性能改善のための研究、名古屋大学、2015 年、修士論文