

# 次世代硬 X 線望遠鏡ハウジングの超精密形状計測技術

難波 義治, 篠崎 烈

國枝 秀世, 古澤 彰浩, 宮澤 拓也, 石田 洋輔 (名古屋大学), 内村浩 (東芝機械)

The hard X-ray telescope which will be loaded into the next generation international X-ray astronomical satellite ASTRO-H, to be launched in 2014, consists of 1,278 sheets of Pt/C multilayer-coated thin foil mirrors which are as thin as 0.2 mm in thickness. Those thin foil mirrors are arranged with high density between an inner and outer cylinder inside the hard X-ray telescope housing in order to reflect X-ray accurately and make X-ray images on the focal plane. Therefore high assembly accuracy for the hard X-ray telescope housing, especially the inner cylinder which fixes those thin foil mirrors, is required. In this research, ultra-precision shape measurement of the hard X-ray telescope housing with a large ultra-precision diamond turning machine and laser displacement sensor is considered.

## 1. はじめに

近年, 天文学の分野では宇宙から天文観察を行なう宇宙望遠鏡が開発され, 日本や米国, 欧州によって利用されている. 特に天体から発せられる X 線を捉え, さまざまな情報を得る「X 線天文学」という分野では, 1979 年の「はくちょう」から 2005 年の「すざく」に至るまで 5 機の X 線天文衛星が打ち上げられ, 宇宙科学の分野において数々の有用な情報を提供してきた. 一方, 2013 年度に打ち上げ予定である次世代国際 X 線天文衛星 ASTRO-H には, 波長 0.01nm の硬 X 線を捉える硬 X 線望遠鏡が搭載される計画であり, 現在, JAXA や NASA, 各研究機関等によって, その開発が進んでいる. 波長が非常に短い X 線は, Pt/C 多層膜反射鏡<sup>1)</sup>で集光・結像することができる. 最終的に得られる結像性能を向上させるためには, 反射鏡の形状および表面精度と共に反射鏡の組立てにも高い精度が要求されると考えられる.

本報告では, 次世代硬 X 線望遠鏡用反射鏡の組立て精度に大きく影響を与えると考えられる「ハウジング」の形状精度を把握するために, 反射鏡製作用大型非球面金型を加工することを目的として開発された大型超精密非球面加工装置を用いて行なった形状計測技術について報告する.

## 2. 次世代硬 X 線望遠鏡の概要

X 線は非常にエネルギーが高いため, 一般的には効率よく集光させることが難しいと言われている. 特に波長が 0.01~0.1nm と非常に短い硬 X 線においてはエネルギーが 10~100keV と高く, 可視光の 1,000 倍以上になる. このような特性を持つ硬 X 線であるが, 多層膜の反射鏡に対して 1° 以下の微小角度で斜入射した場合に限っては, 「ブラッグ反射」という現象が起これ, X 線をコントロールすることが可能となる<sup>2)</sup>.

図 1 に, 代表的な X 線望遠鏡であるウォルター I 型斜入射 X 線望遠鏡の構造を示す. ウォルター I 型望遠鏡は, 放物面および双曲面形状の反射鏡を前後に配置し, 放物面側から 1° 以下の微小角度で斜入射した X 線を双曲面で反射させて任意の距離で設定された焦点で結像させることができる. しかし, 入射角度が 1° よりも大きい場合は, 反射せずに望遠鏡を通過してしまい結像することがで

きない。また、集光するエネルギー値を高めるためには、Pt および C を交互に 10 層程度積層した多層膜を用いた反射率の高い反射鏡<sup>3)</sup>を同心円状にできるだけ多く狭い間隔で重ね合わせる必要がある。こうすることで、より効率よく集光面積を増やし、得られる X 線のエネルギーを高めることができる。このような特徴を持つウォルター I 型望遠鏡は、軽量で高能率に集光面積を大きくすることが可能であることから、理想的な硬 X 線望遠鏡として期待されている。

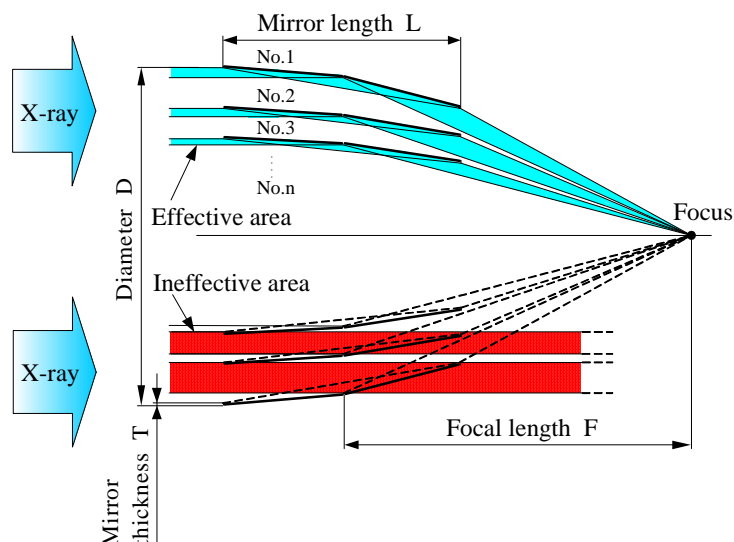


Fig. 1 Structure of a grazing incidence X-ray telescope

図 2 に、設計された硬 X 望遠鏡の詳細構造を示す。なお、構造を理解しやすくするために、反射鏡の厚み方向は拡大して描画している。X 線望遠鏡は、図 1 に示した焦点軸に平行な内部シリンダを基準として、厚さ 0.2mm の Pt/C 多層膜反射鏡を間隔の基準となるアライメントバーで高密度に固定配列している。このように 1,000 枚を越える反射鏡が非常に狭い間隔で配列されていることから、反射した X 線の結像性能を上げるためには、多層膜反射鏡および望遠鏡ハウジングの組立て精度が非常に重要であると考えられる。

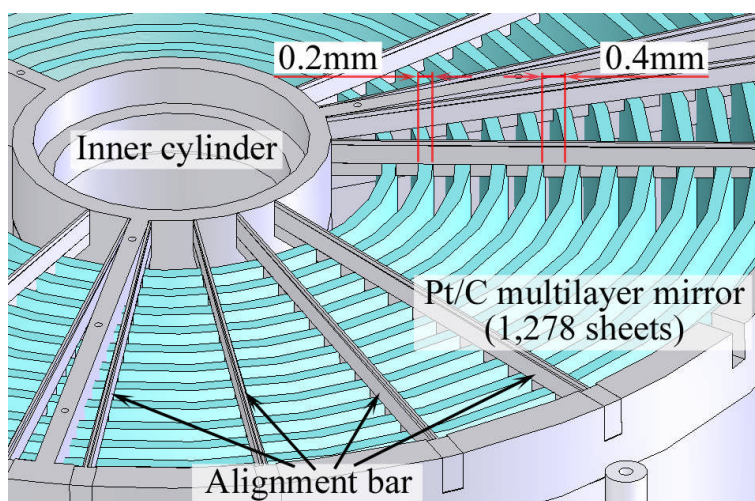


Fig. 2 Structure of a hard X-ray telescope housing with Pt/C multilayer-coated mirrors

### 3. 超精密形状測定の概要

測定方法および測定の概略図を図3に示す。測定は、2013年度に打ち上げ予定のASTRO-Hに搭載される硬X線望遠鏡のハウジング中央のシリンダ部分について行なった。ハウジングは、直径480mm、高さ490mmであり、測定部分は主に上内部シリンダや下内部シリンダ等、5種類の部品によって構成されており、材質はジュラルミンである。測定には、大型非球面金型を加工するために開発された大型超精密非球面加工装置（UTD-600A，東芝機械）<sup>3), 4)</sup>を使用した。同加工機は、Y軸およびZ軸の動作範囲420mmであり、制御分解能1nmおよび運動精度0.40 $\mu$ m/300mmを有する。測定器は、レーザ変位計（LK-G30，キーエンス）を使用し、固定治具と共に刃物台に固定してZ軸方向の測定範囲410mmを測定した。

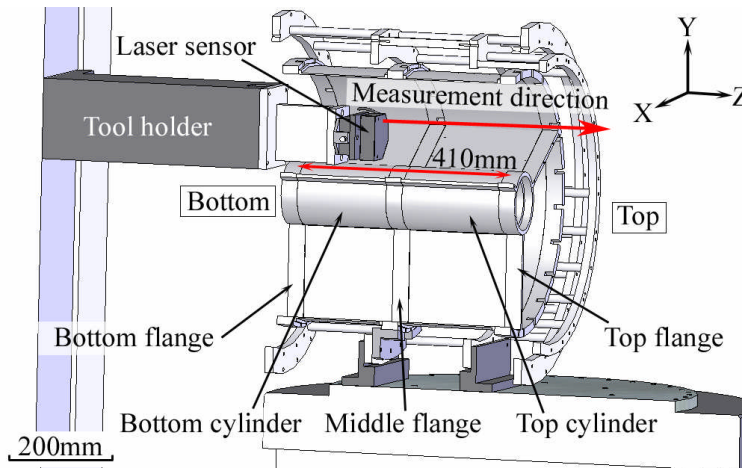


Fig. 3 Schema of the ultra-precision shape measurement and hard X-ray telescope housing structure

図4に、大型超精密非球面加工装置による測定の外観を示す。ハウジングは、上部がZ軸プラス方向を向くように主軸面に治具を使用して固定し、ハウジングの中心にあるシリンダのA, B, C各点について、図4手前方向に向かって測定を行なった。

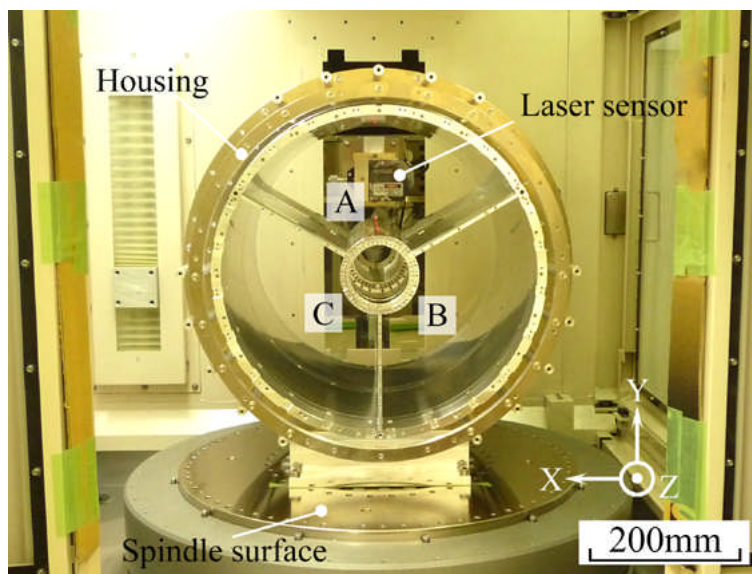
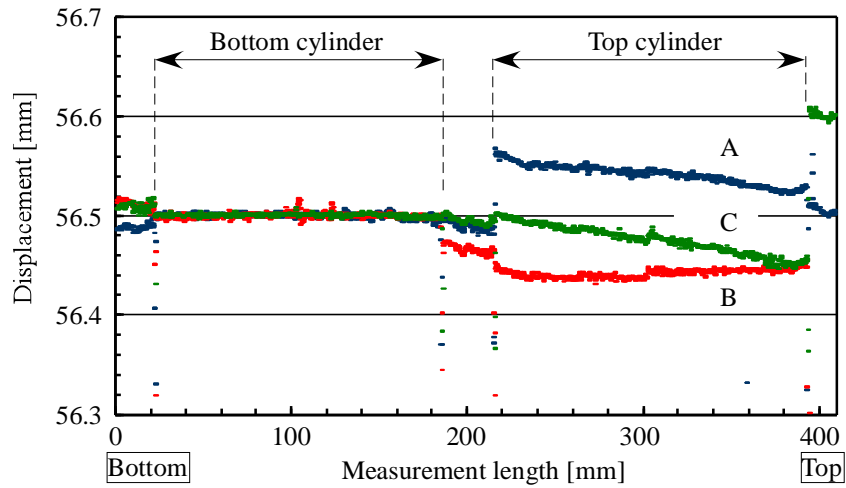


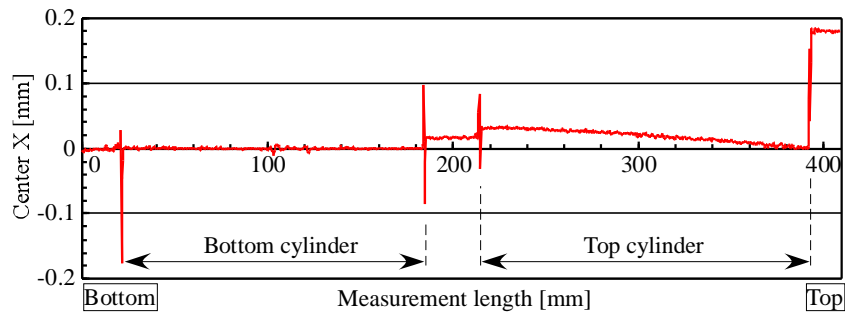
Fig. 4 Overview of the ultra-precision shape measurement with large ultra-precision turning machine

#### 4. 次世代硬 X 線望遠鏡ハウジングの超精密形状測定結果

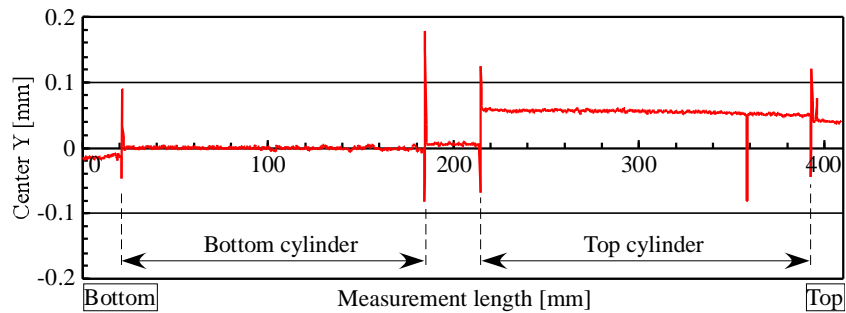
図 5 に、ハウジングの A, B, C 各点について形状測定を行なった結果を示す。これらの結果は、真直性が良い下内部シリンダを基準として、かつ上内部シリンダを直径の設計値 56.5mm として変位を測定したものである。図 5 に示す結果を見ると、上内部シリンダの変位は比較的大きく、A 点および C 点において、ハウジング上方向に向かって 60 $\mu$ m 程度傾斜しているのが分かる。一方、B 点において大きな傾斜は見られないが、設計値よりも全体的に 60 $\mu$ m 程度小さくなっていることが、これらの結果より確認される。



**Fig. 5** Assembly accuracy of inner cylinders on the hard X-ray telescope housing  
[Measurement length = 410 mm]



(a) Displacement in X axis



(b) Displacement in Y axis

**Fig. 6** Assembly errors of inner cylinder center in X and Y axis  
[Measurement length = 410 mm]

図 6 に、図 5 の結果から得られた上下内部シリンダの中心位置変位を示す。図 6(a)に示す X 軸方向の変位を見ると、上内部シリンダはハウジング上方向に向かって傾斜し、さらに上フランジには 180 $\mu\text{m}$  程度のずれが生じているのがわかる。図 6(b)に示す Y 軸方向では、上内部シリンダの傾きは小さいが、中心から 60 $\mu\text{m}$  程度変位していることが確認される。

前述したように硬 X 線望遠鏡ハウジングの内部シリンダは、最大 180 $\mu\text{m}$  の組立て誤差が生じており、これを基準とする反射鏡のアライメントに大きなずれを与えることが考えられる。したがって、次世代硬 X 線望遠鏡のハウジングは、再調整が必要であることが明らかになった。

## 5. おわりに

これまでの研究においては知ることが難しかった次世代硬 X 線望遠鏡ハウジングの形状精度を把握するために、大型非球面金型を加工するために開発された大型超精密非球面加工装置を用いた形状計測法を検討して以下の結果が得られた。

- (1) ナノメートルオーダーの運動精度を有する大型超精密非球面加工装置およびレーザ変位計を用いて、ハウジングの内部シリンダ組立て精度を問題なく計測することができた。
- (2) ハウジングの組立て誤差は、下内部シリンダよりも上内部シリンダの方が大きく、測定範囲 410mm において X, Y 軸方向で 60 $\mu\text{m}$  および 180 $\mu\text{m}$  程度であることが確認された。
- (3) 前述される組立て誤差は、ハウジング中央部にあるシリンダの構造による強度低下や全ての構成部品を組立てるための仕組みに由来して生じていると考えられる。

## 参考文献

- 1) Ogasaka, Y., et al., : Thin-foil multilayer- supermirror hard X-ray telescope for InFOCuS/SUMIT balloon experiments and NeXT satellite program, Proc. SPIE, (2007) 6688: 669903-1-668803-8.
- 2) Willingale R., Kunieda H., Okajima T., Naitoh M. : Optical design of the telescope for XEUS, Proc. SPIE, 5900 (2005) 124.
- 3) Namba Y., Cao G., Shinozaki A., Kunieda H., Ogasaka Y., Yamashita K. : Fabrication of Pt/C multilayer-coated thin foil mirrors for hard X-ray telescope loaded in ASTRO-H satellite, Proc. 24th ASPE Annual Meeting, 47 (2009) 176.
- 4) Namba, Y., Shimomura, T., Shimizu, T., Kunieda, H., Ogasaka, Y. and Yamashita, K., : Development of Large Ultra-Precision Diamond Turning Machine for Making Next Generation Hard X-Ray Telescopes, Proc. 22nd ASPE Annual Meeting, 45 (2007) 65.