

独自の次世代高性能多重薄板型電鍍 X 線望遠鏡の開発

瀧川 歩¹

竹原 佑亮¹, 叶 哲生¹, 山口 隆正¹, 石田 直樹¹, 田村 啓輔^{2,3}, 山口 豪太⁴, 伊藤 旺成⁴, 竹尾 陽子⁴, 久米 健大⁵, 松澤 雄介⁵, 齊藤 貴宏⁵, 平栗 健太郎⁵, 橋爪 寛和⁵, 三村 秀和⁴, 三石 郁之¹

¹ 名古屋大学, ² NASA/GSFC, ³ University of Maryland U.S., ⁴ 東京大学, ⁵ 夏目光学株式会社

Abstract

我々は、地上 X 線結像系開発で構築した独自の小口径超高精度電鍍技術を用いて、軽量性と高結像性能を併せ持つ次世代宇宙 X 線望遠鏡開発を進めている。この実現には、地上電鍍鏡開発技術を用いた高精度反射鏡の一桁以上の大口径・長焦点化と、二段一体全周反射鏡の精密位置調整が行える支持機構の開発が必要となる。現在我々は、2023-2024 年に打ち上げが予定されている太陽観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載に向け設計した Wolter-I 型反射鏡 (口径: 60 mm, 全長: 220 mm) とその支持機構開発に着手している。SPring-8 にて試作反射鏡の結像性能を評価した結果、FWHM ~30 秒角 / HPW ~60 秒角 (@ 15 keV) となり、マンドレルに由来する母線方向の長周期 (>> mm スケール) の形状誤差が支配的であることがわかった。現在は、この長周期の形状誤差を 2 桁小さくした新たなマンドレルを用いて反射鏡製作を進めている。支持機構開発については、基本設計と試作品の製作を終え、最も厳しい環境試験の一つである振動試験を実施し、Z 軸 20 Grms, X/Y 軸 7 Grms の振動耐性を有していることを確認した。今後は、反射鏡固定方法の検討をはじめ、各種宇宙環境耐性評価試験を進めていく。

宇宙 X 線望遠鏡

これまでの X 線望遠鏡には、軽量性と結像性能の間に負の相関が存在。我々は **高い結像性能** かつ **軽量性** を併せ持つ独自の次世代 X 線望遠鏡の目指している。この実現には

- 高精度な反射鏡
- 高精度な反射鏡位置調整機構

が必要。まずは、**高結像性能化** を目標に、2023-2024 年打ち上げ日米共同太陽観測ロケット FOXSI-4 (e.g., Krucker et al., Proc. of SPIE, 2013) 搭載に向けた望遠鏡開発を進める。

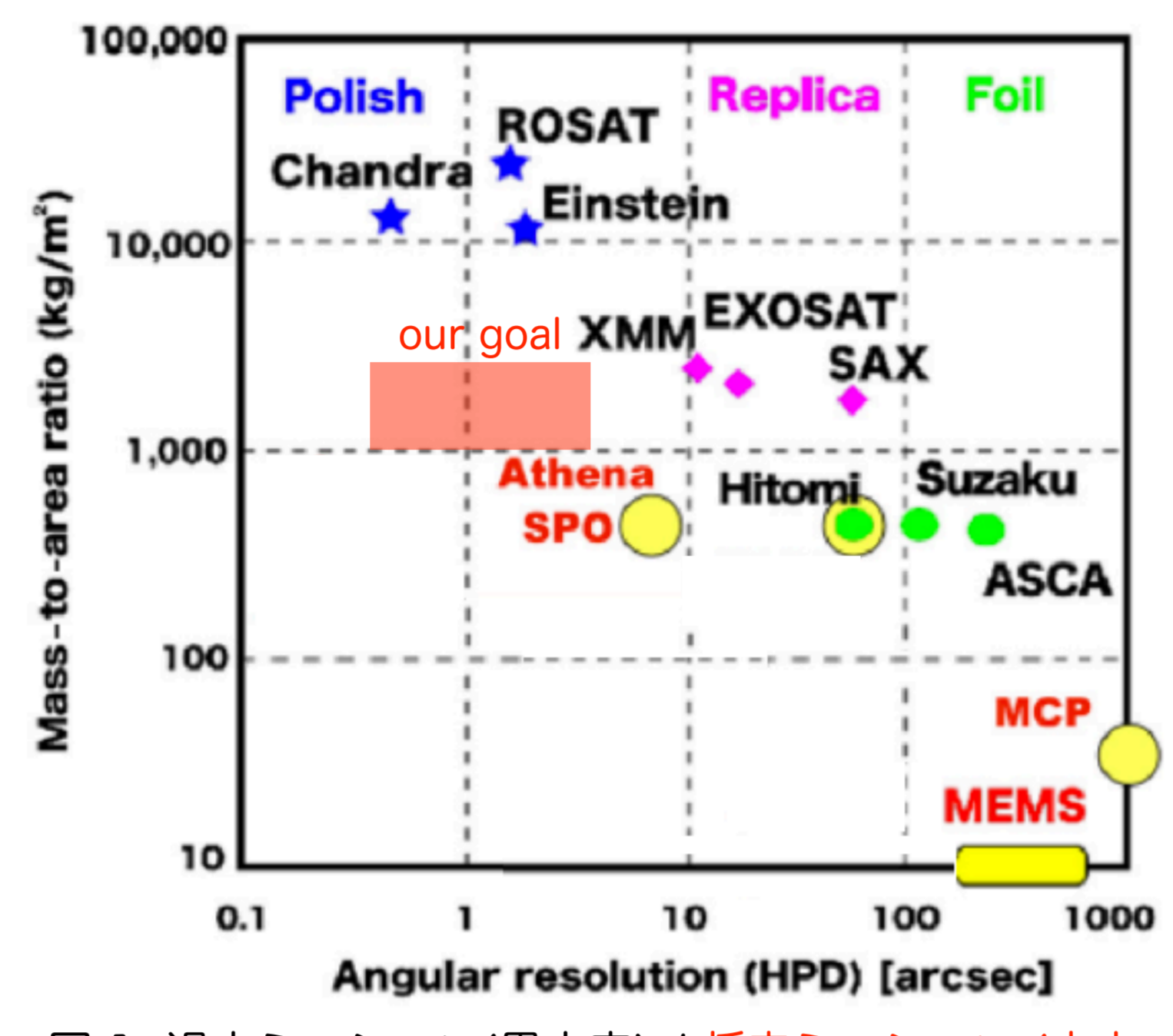


図 1: 過去ミッション(黒文字) / 将来ミッション(赤字)の光学系の実際の / 目標の性能 (Ezoe et al., JATIS, 2018)

反射鏡開発

地上 X 線結像系開発で構築した独自の小口径超高精度電鍍技術 (e.g., Takeo et al., Appl. Phys. Lett., 2020, Mimura et al., Rev. Sci. Instrum., 2018) を用いて反射鏡開発を進めている。これまで、従来口径に対し 6 倍もの $\phi 60$ mm 円筒・円錐鏡の成功を受けて、**Wolter-I 型電鍍鏡の試作に成功**。(Yamaguchi et al., Proc. of SPIE, 2020, Mimura et al., Proc. of SPIE, 2020)

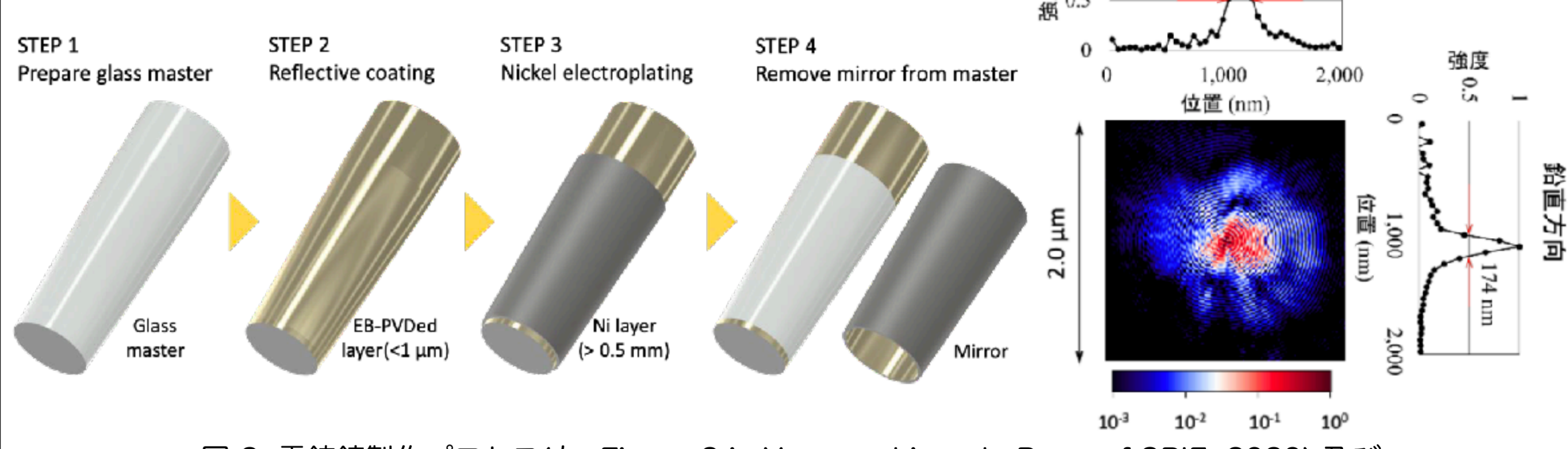


図 2: 電鍍鏡製作プロセス(左, Figure 2 in Yamaguchi et al., Proc. of SPIE, 2020) 及び地上結像系イメージと各軸のプロファイル(右, Takeo et al., Appl. Phys. Lett., 2020)

Wolter-I 型反射鏡の結像性能評価

形状測定から推定される結像性能の評価
マンドレル, 反射鏡に対し, 形状測定を実施。
円周方向の形状誤差: PV < 1 μm → << 1 arcsec @ f.l. 2 m
母線方向の形状誤差: ~50 - 60 arcsec (2 回反射, HPD)

表 1: 反射鏡パラメータ

全長 [mm]	220
口径 [mm]	60
焦点距離 [mm]	2,000
鏡面物質	Ni

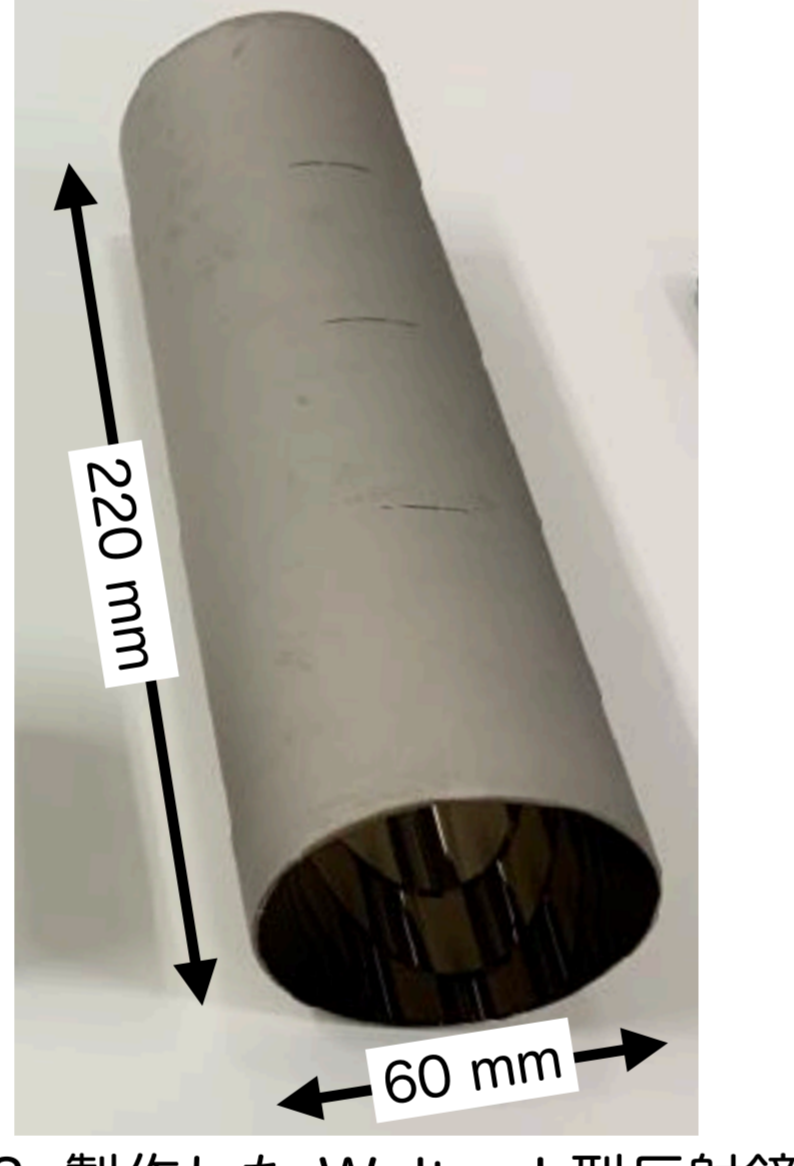
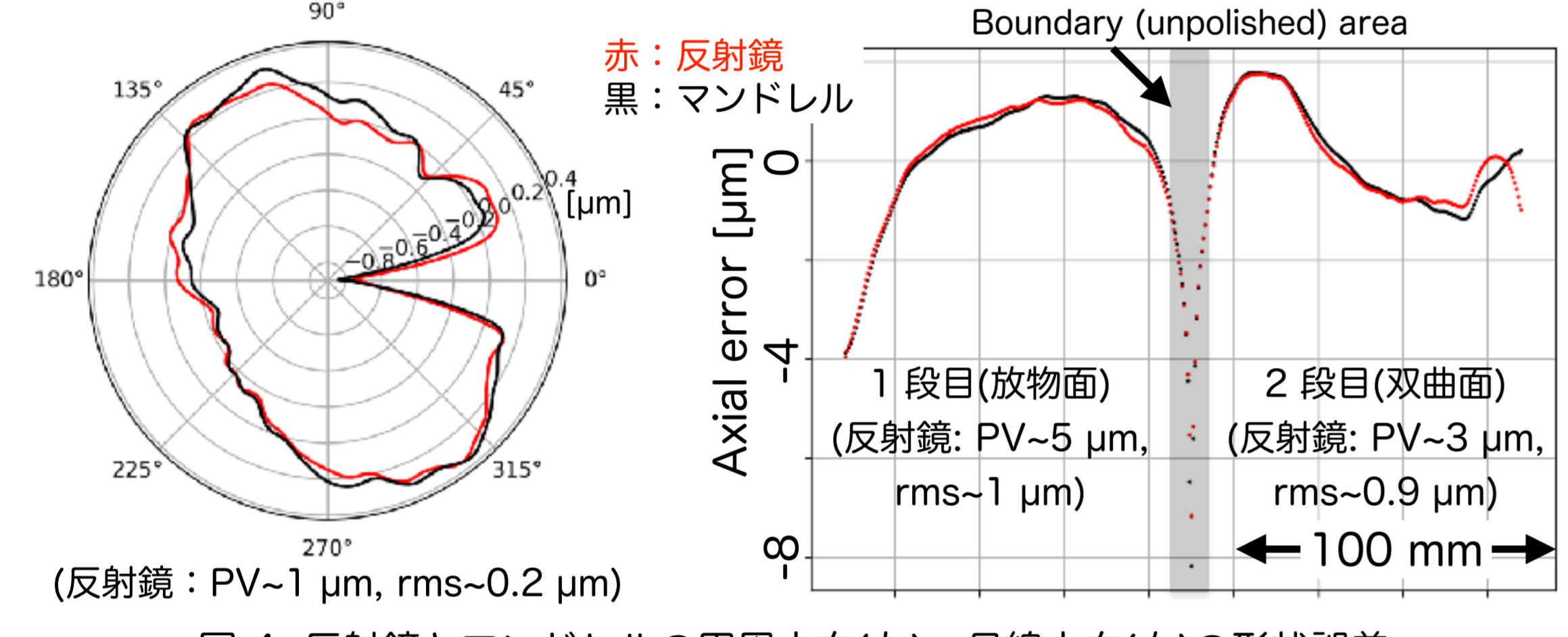


図 3: 製作した Wolter-I 型反射鏡

X 線を用いた結像性能の初評価 @ SPring-8 BL20B2

測定条件

- Energy: 15 keV
- ビームサイズ: 0.1 × 5 mm
- 入射角: 0.2 度

測定結果

- HPW: ~57 arcsec, FWHM: ~28 arcsec

形状誤差の結果と比較
>> mm スケールの形状誤差が支配的

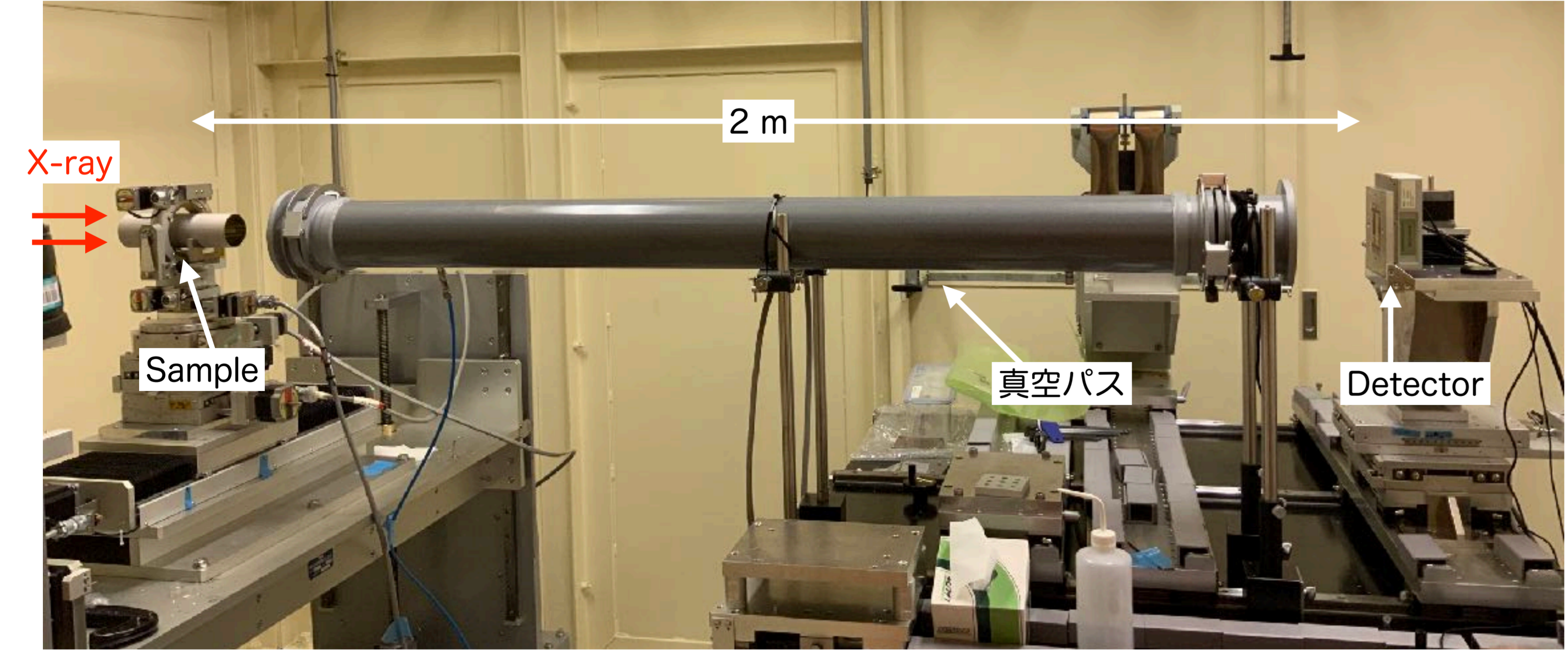


図 5: SPring-8 での測定セットアップ

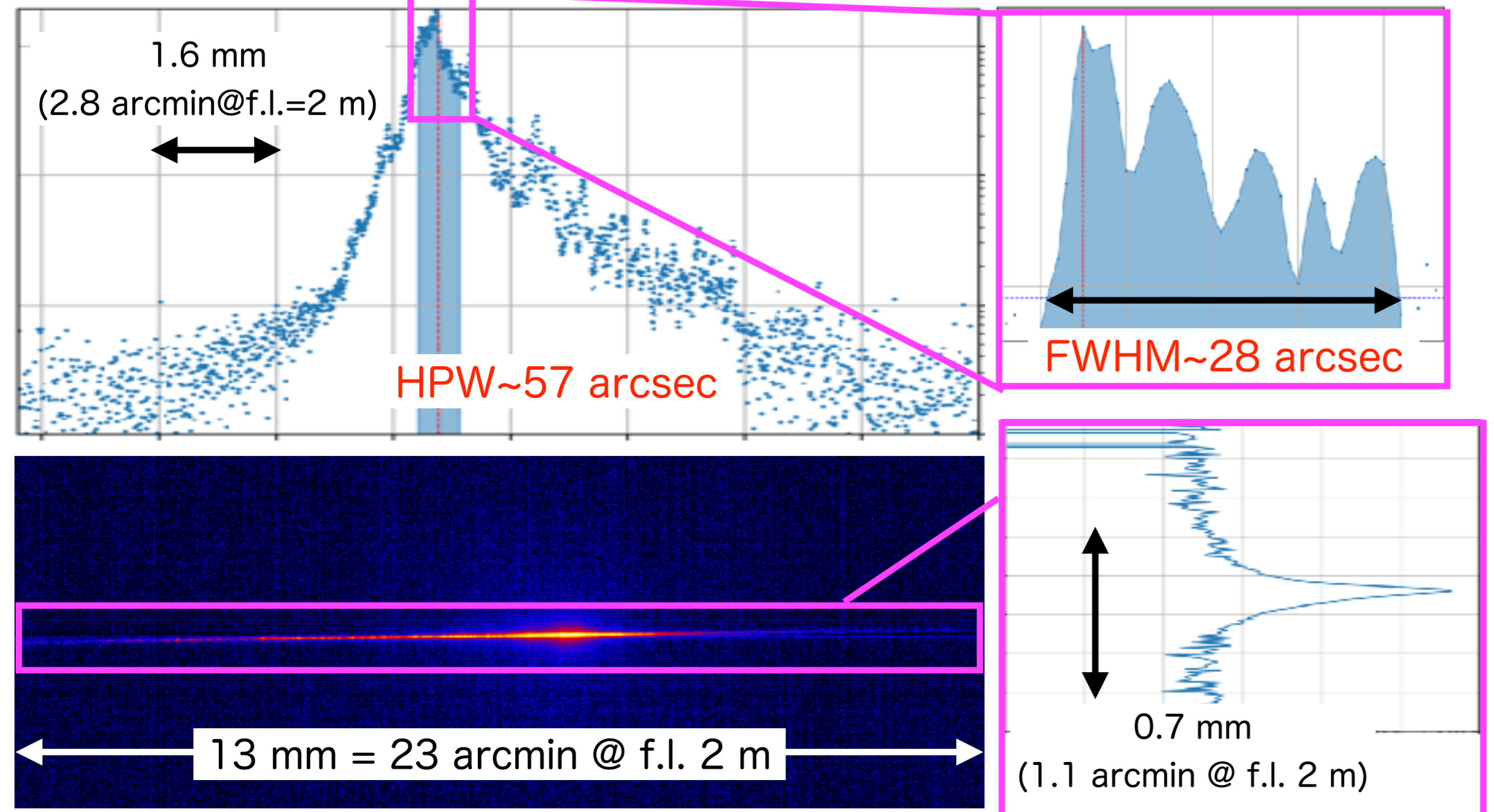


図 6: ファーストライトイメージ@15 keV 及び各軸の射影プロファイル

二段一体型全周鏡用支持機構の開発

FOXSI-4 搭載に向け、**本反射鏡に特化した支持機構の基本設計を終え、試作までが完了** (素材: ステンレス)

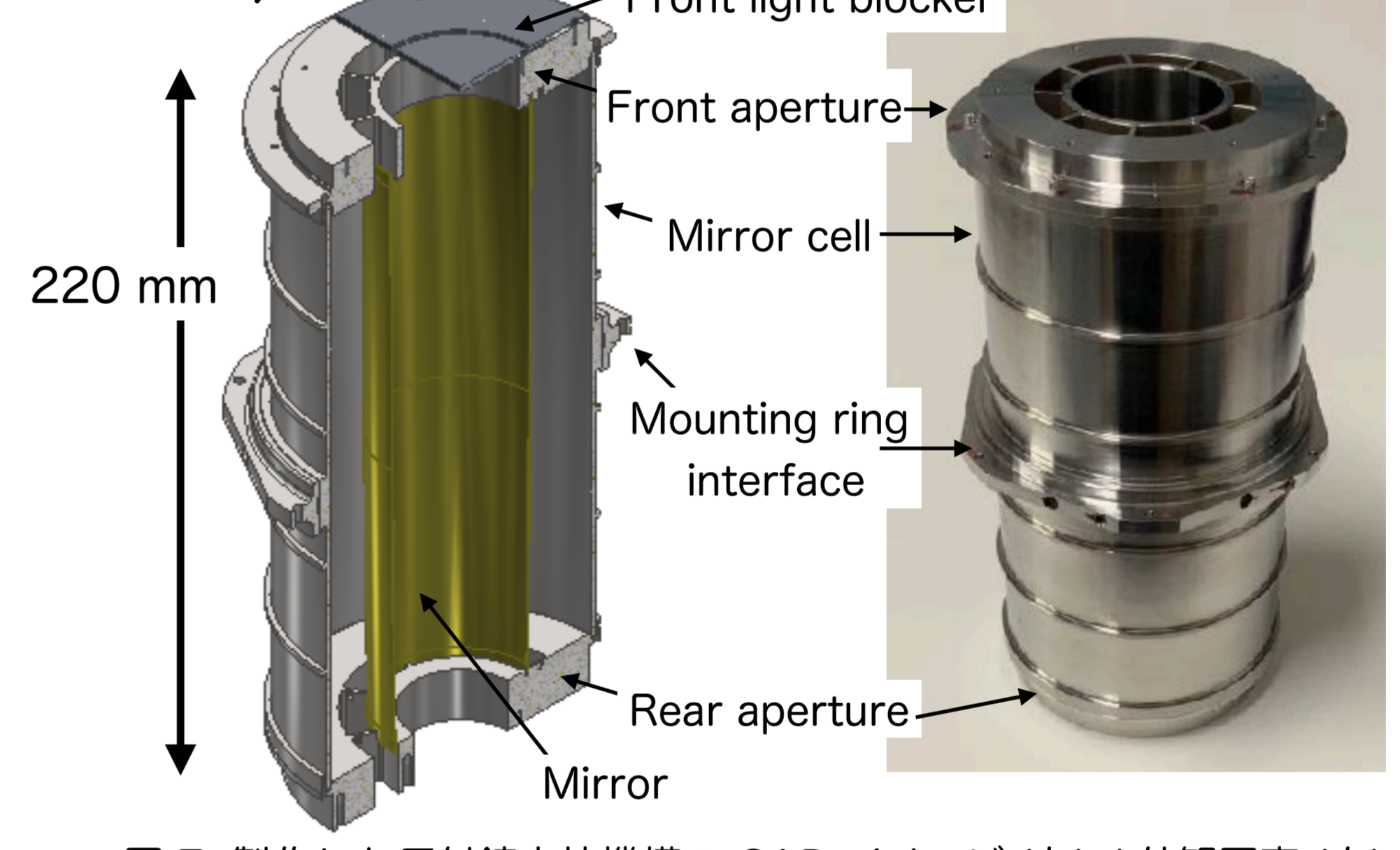


図 7: 製作した反射鏡支持機構の CAD イメージ(左) / 外観写真(右)

製作した支持機構 (反射鏡なし) に対し、振動試験を実施。以下の振動耐性を確認。

Z 軸: 20 Grms, X/Y 軸: 7 Grms

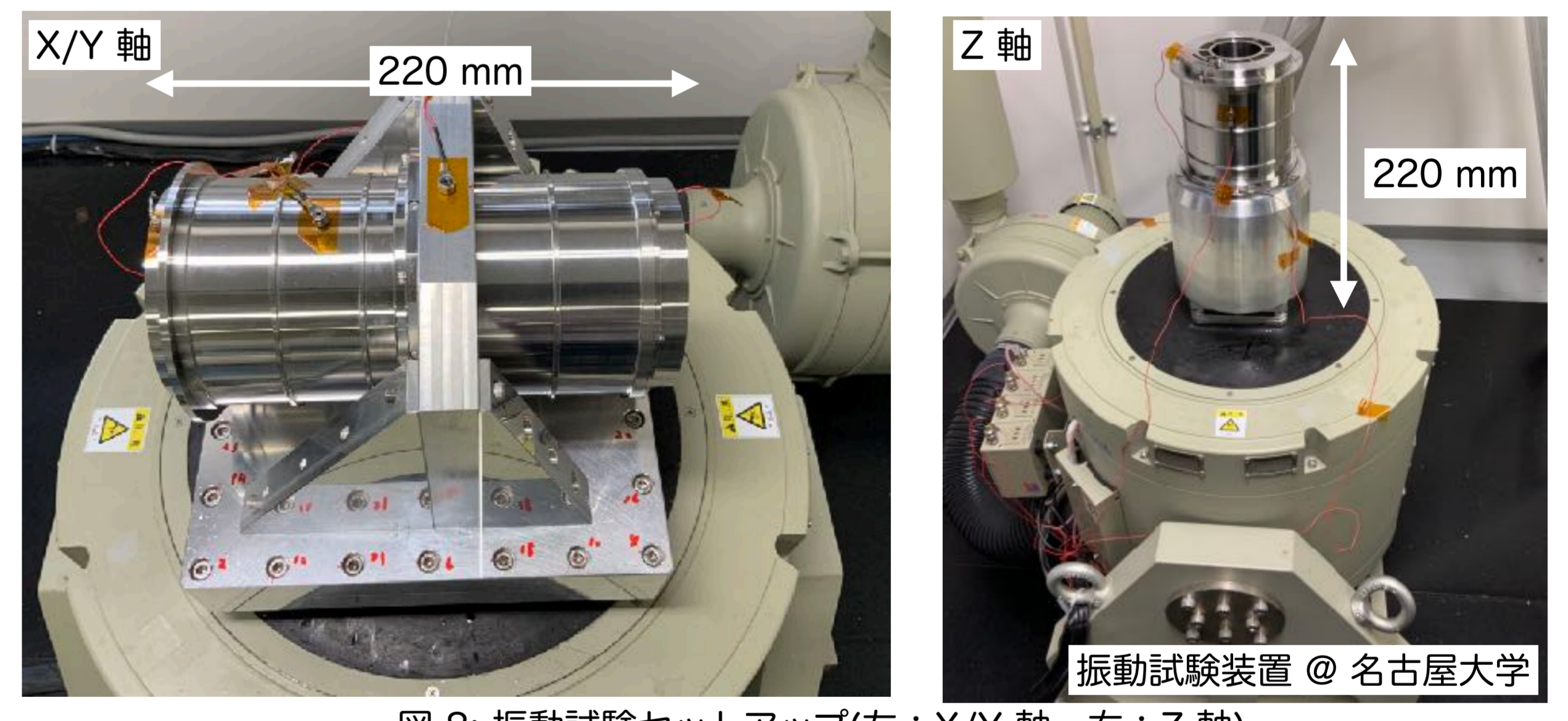


図 8: 振動試験セットアップ(左: X/Y 軸, 右: Z 軸)

今後の展望

反射鏡開発は、長周期の形状誤差を小さくした新たなマンドレル (母線方向の形状誤差: ~20" (2 回反射, HPD)) を製作し、現在反射鏡を製作中である。完成した反射鏡は今年度中に宇宙研にて評価予定である。支持機構開発については、反射鏡固定方法の検討や振動試験を含めた各種宇宙環境耐性評価試験を進めていく。

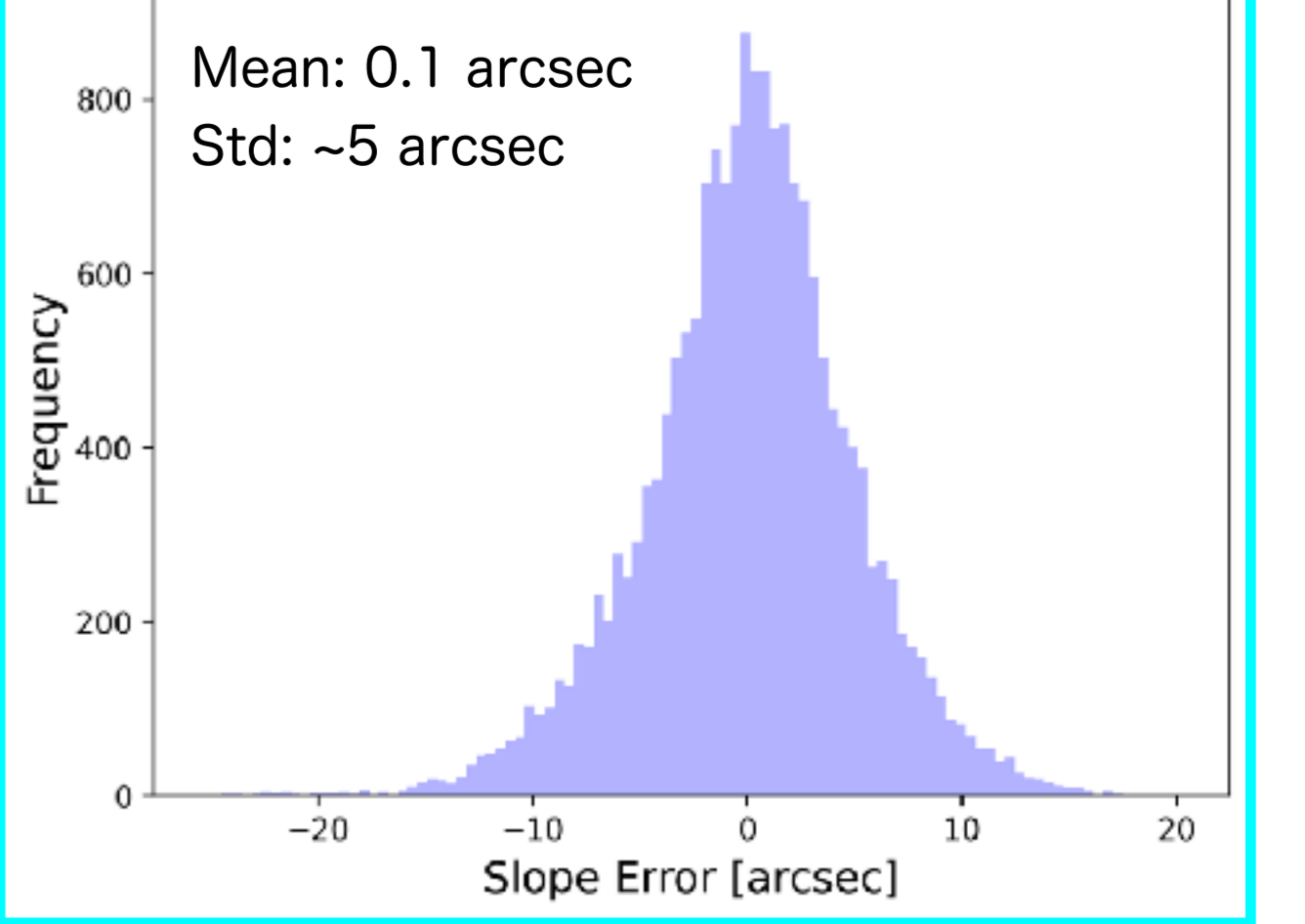
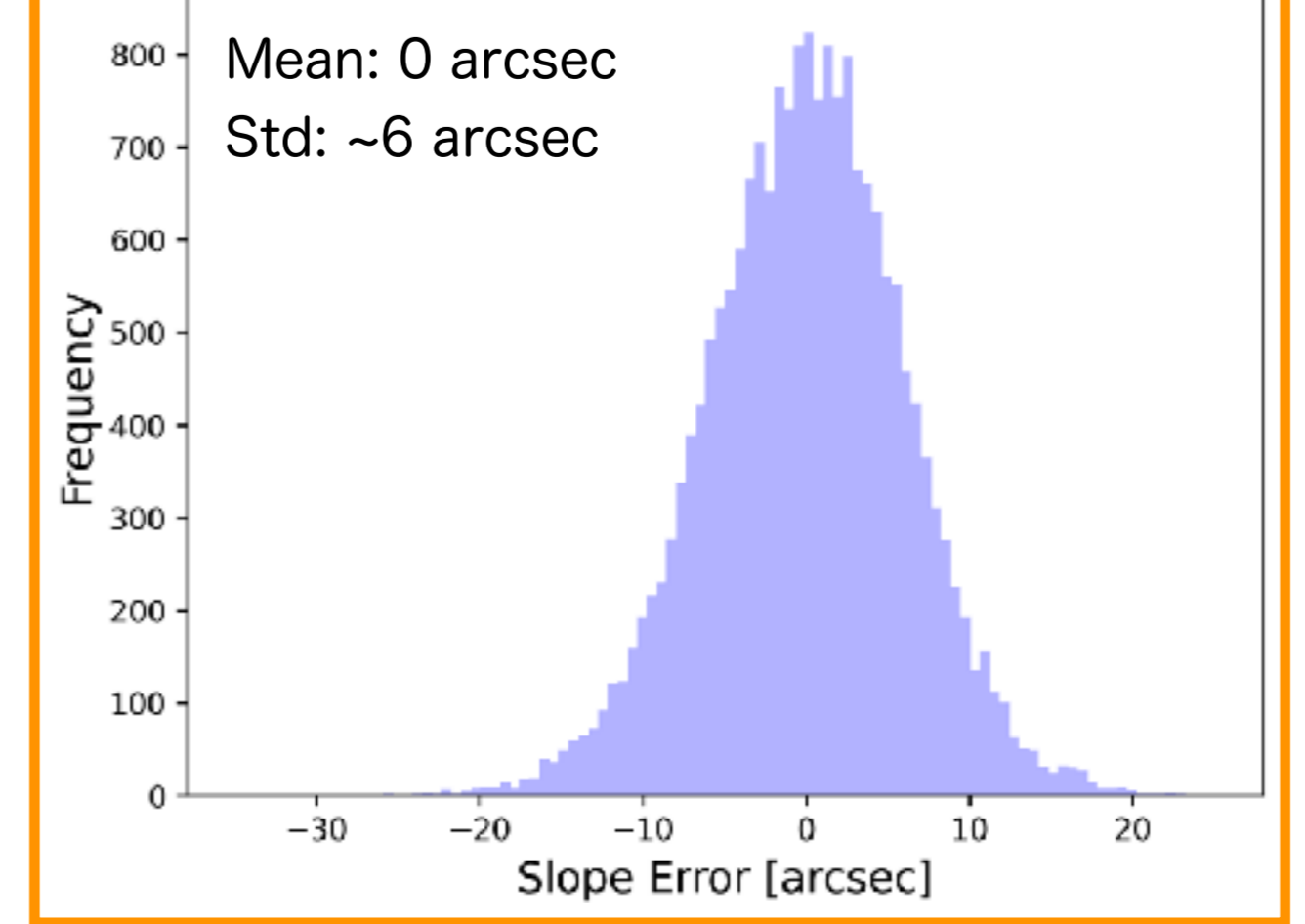
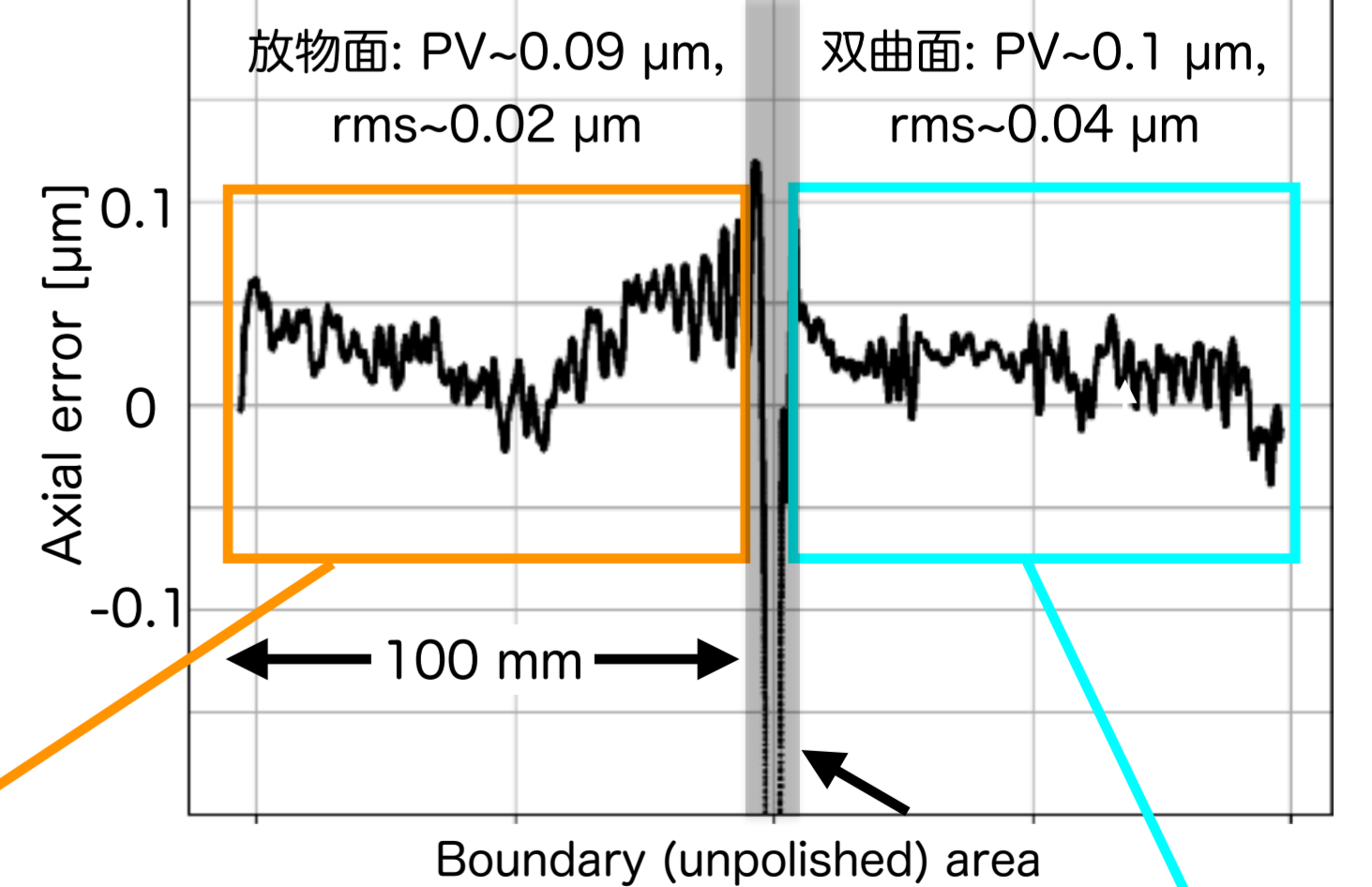


図 9: 新しいマンドレルの形状誤差(上) とそれらから求めた 放物面/双曲面 のスロープエラー(下)