

MEMS 技術を用いた超軽量X線望遠鏡の開発

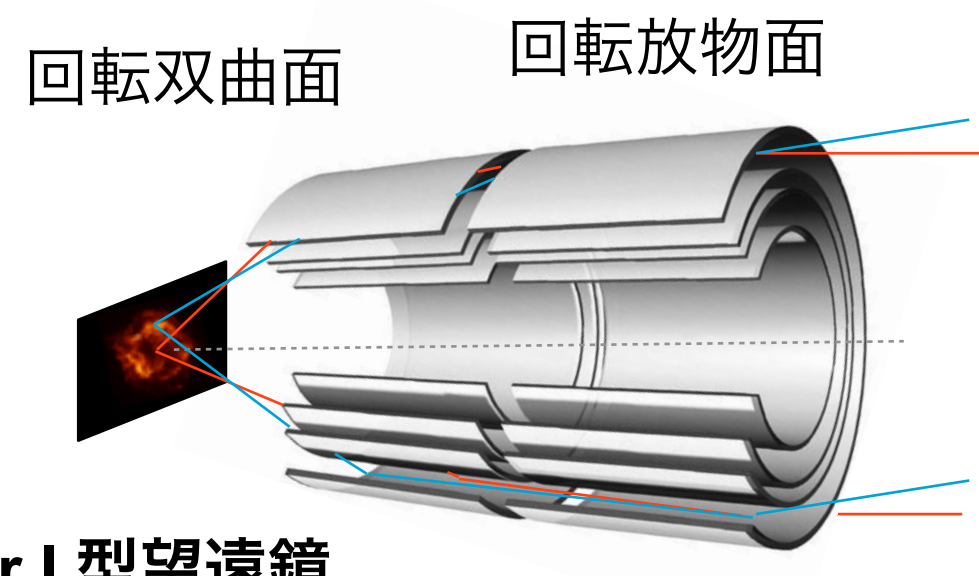


大坪亮太¹, 江副祐一郎¹, 石川久美², 沼澤正樹¹, 伊師大貴¹, 藤谷麻衣子¹, 福島碧都¹, 鈴木光¹, 永利光¹, 湯浅辰哉¹, 大橋隆哉¹, 満田和久², 森下浩平³, 中嶋一雄⁴, 金森義明⁴

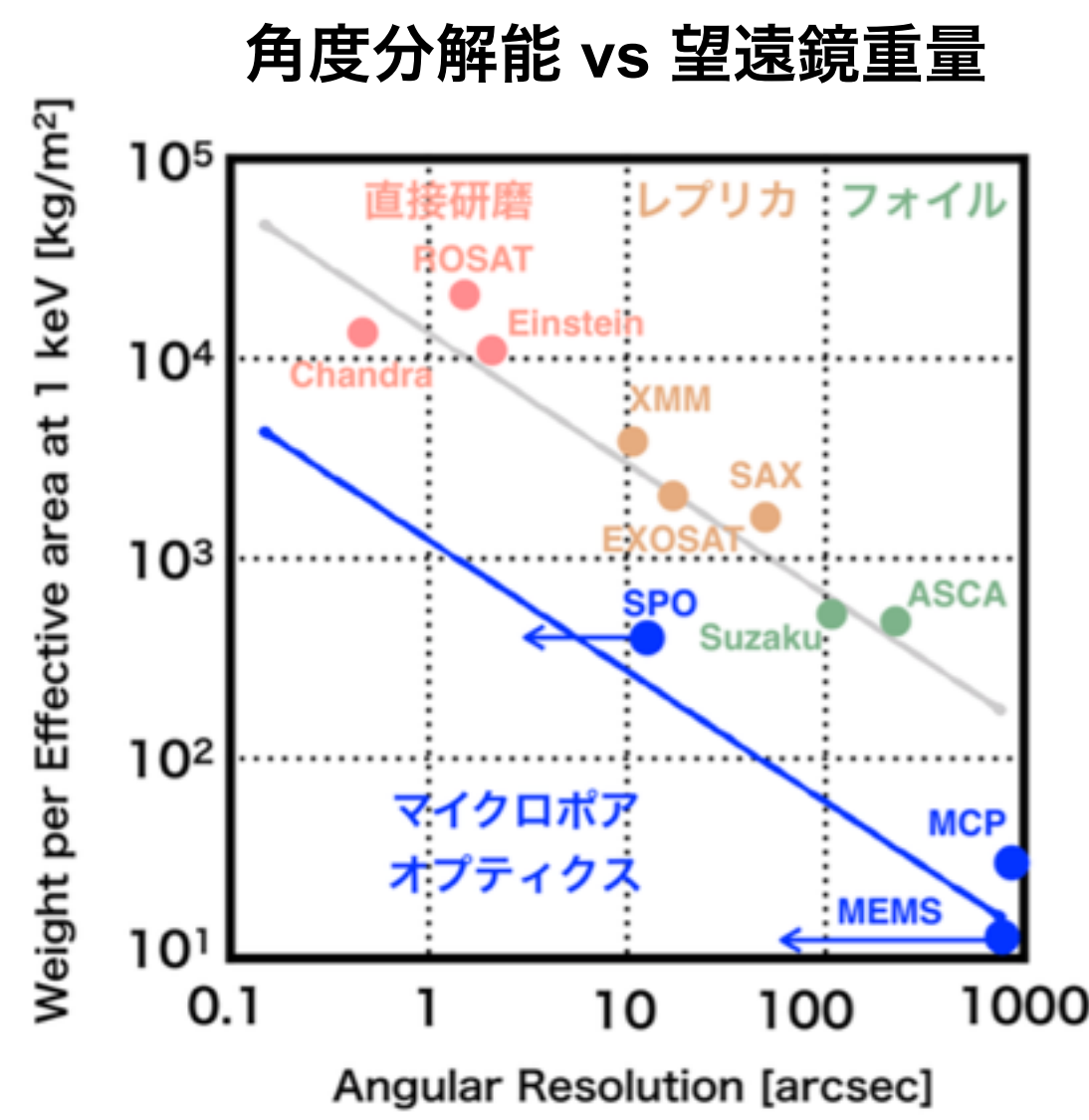
¹ 首都大学東京, ² ISAS/JAXA, ³ 九州大学, ⁴ 東北大学

Introduction

宇宙X線において、天体からの光子を集め、像を取得するための望遠鏡は必須となってきた。物質のX線に対する屈折率は1よりも小さいため、下图のような斜入射光学系が用いられる。

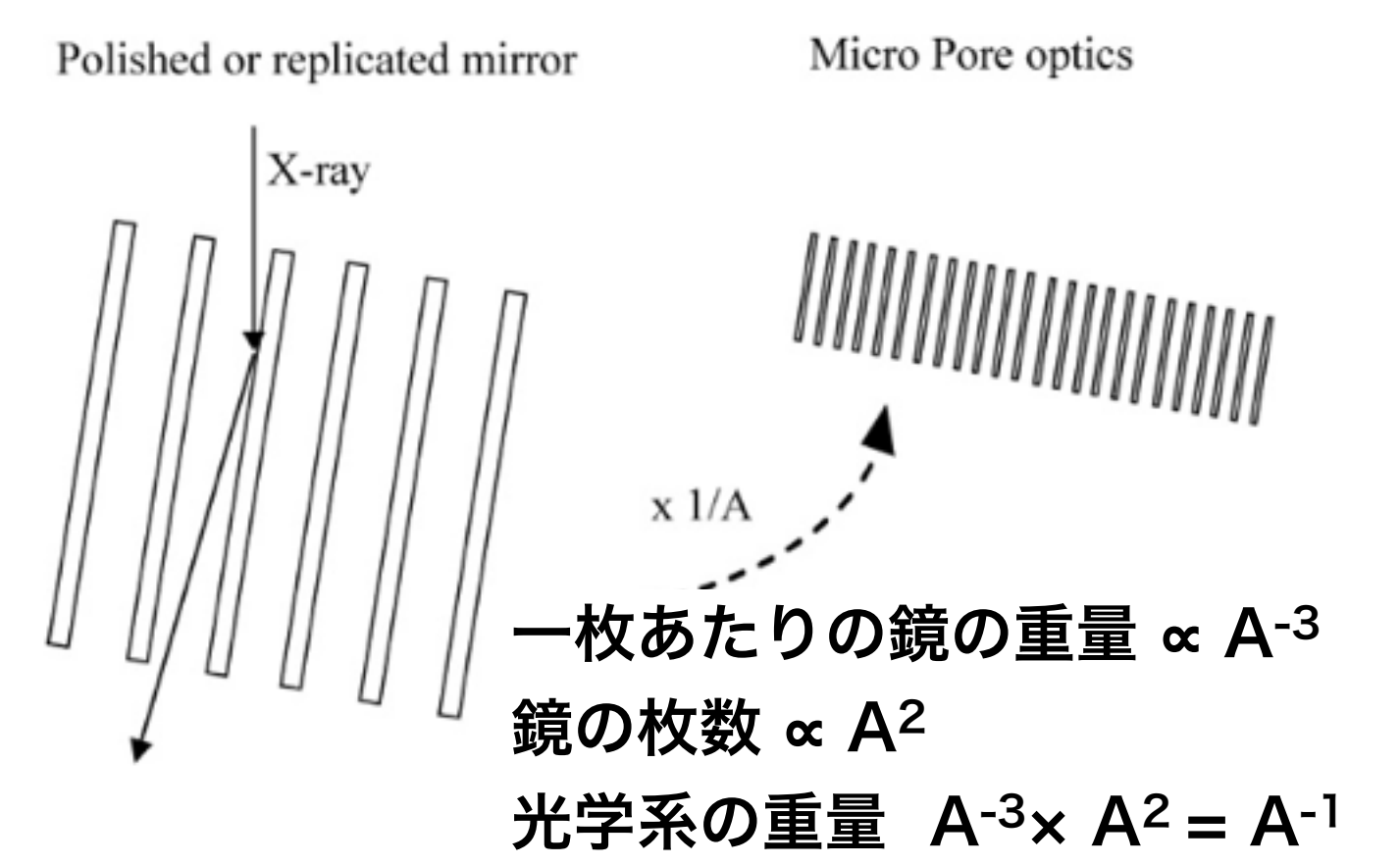


Wolter I 型望遠鏡



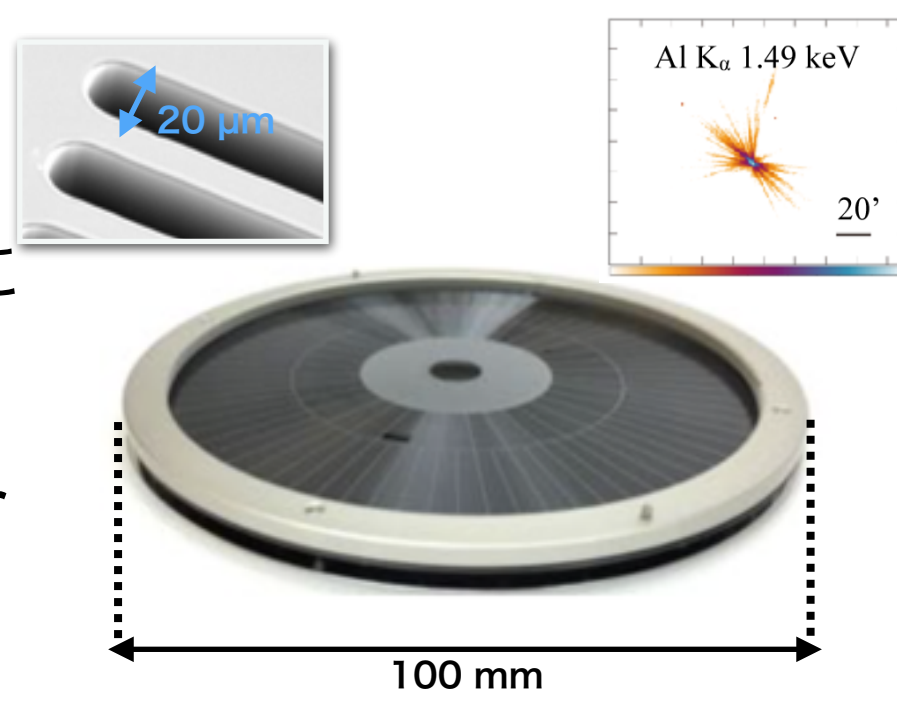
しかし、従来の望遠鏡は角度分解能と重量に左に示すようなトレードオフ関係があった。我々はこれを打破するためマイクロポア光学系(右図)として、独自のMEMS (マイクロマシン) 技術を複合的に用いる**世界最軽量望遠鏡**を開発している。我々はインハウス製作した光学系を用いて世界初の反射結像に成功してきた[1-14]。

マイクロポア光学系の概念



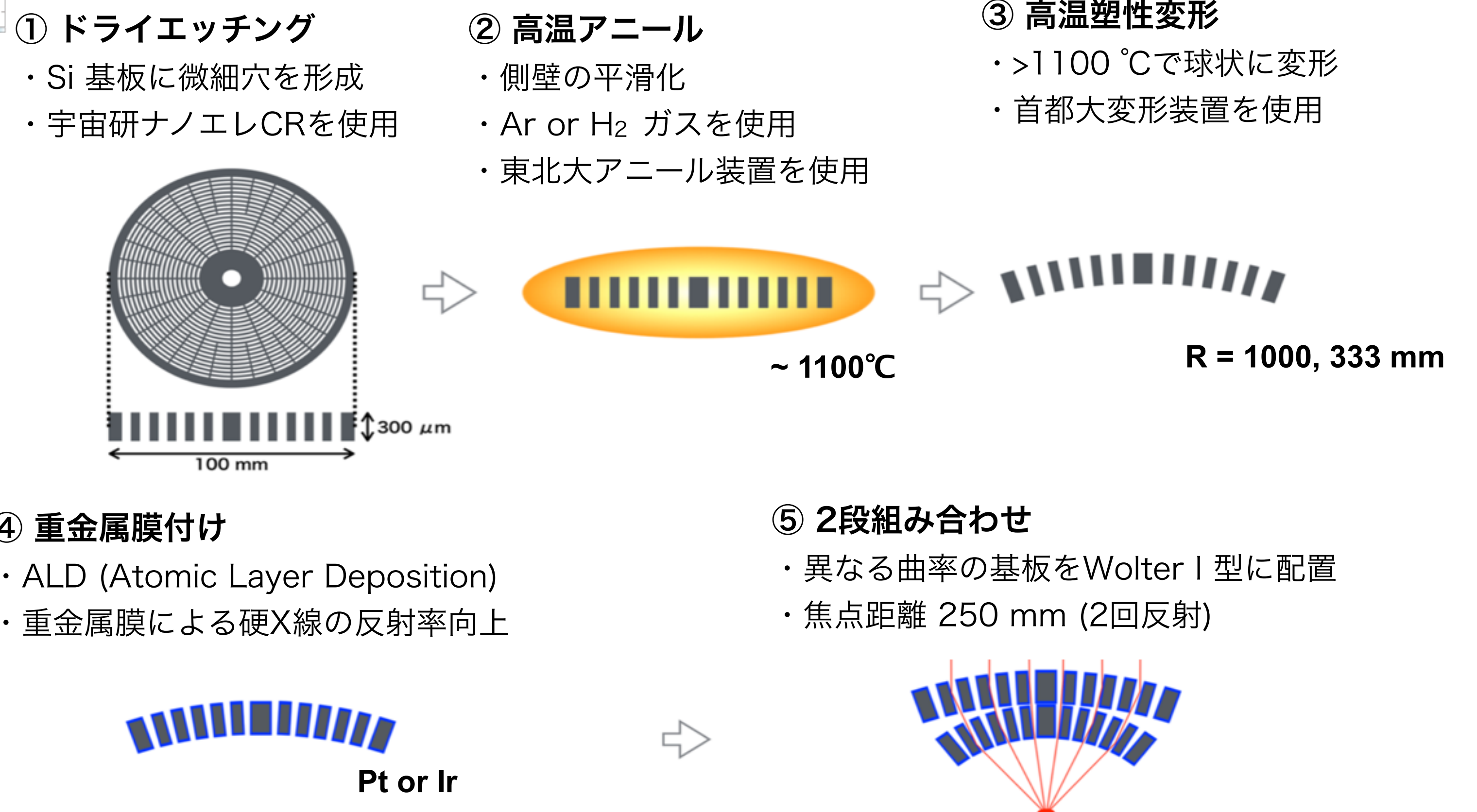
MEMS X-ray Telescope

MEMS X線望遠鏡の製作プロセスを右に示す。薄い Si 基板に多数の微細穴をドライエッチングで形成し、その側壁を反射鏡として用いるように平滑化した上で変形し、重ねて Wolter I型望遠鏡とする。基板が薄いので従来よりも1桁以上軽量となり、短焦点距離で理想曲面の近似の影響が小さい。中大型衛星のみならず、超軽量かつコンパクトなX線望遠鏡を必要とする超小型衛星にうってつけであり、2020年代前半を目指す ORBIS、GEO-X 衛星を目標に開発を進めている。



MEMS Wolter I 型望遠鏡

- ・重さ ~10 g
- ・厚さ 300 μm
- ・焦点距離 250 mm



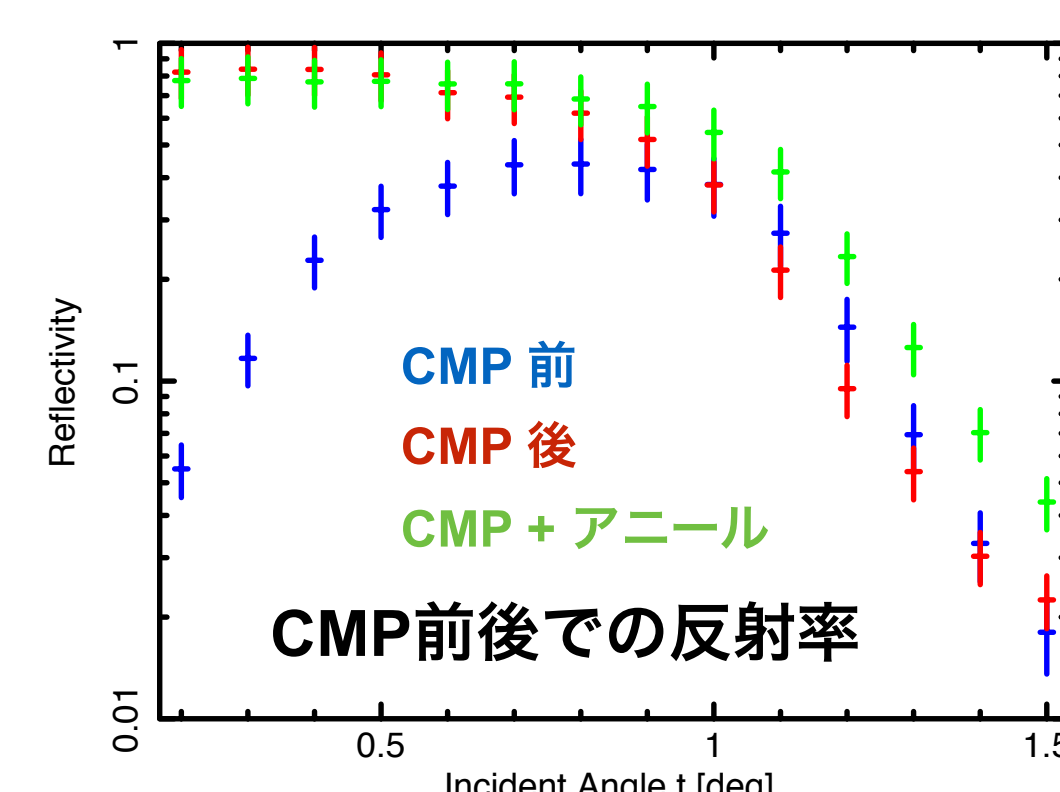
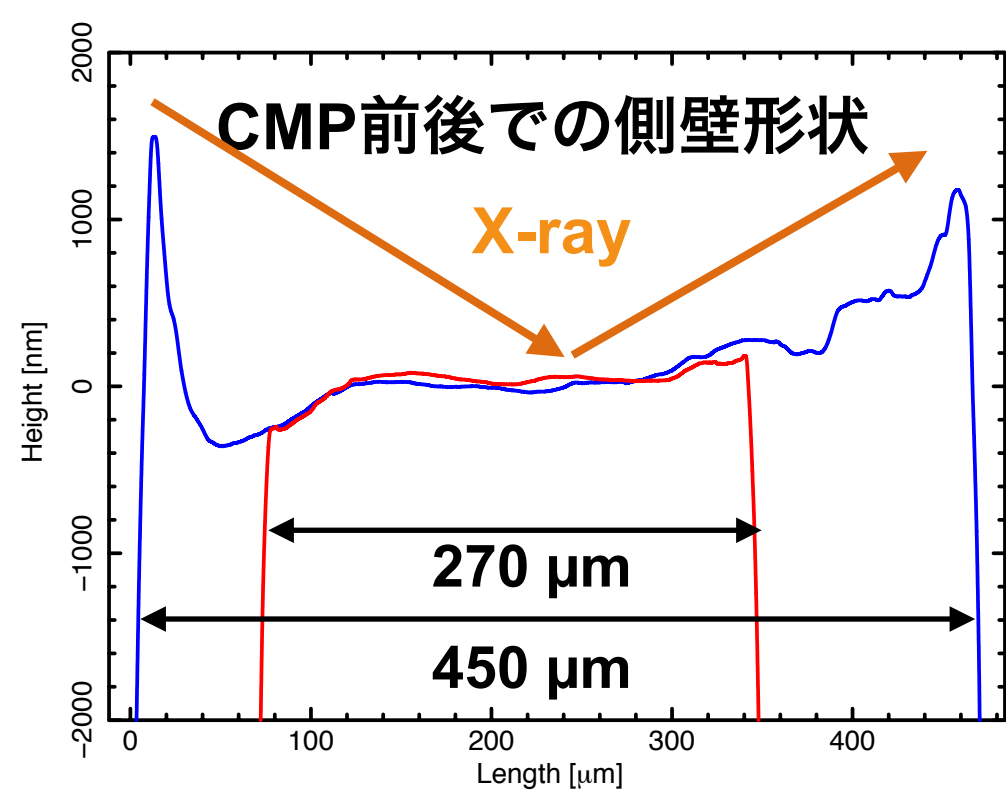
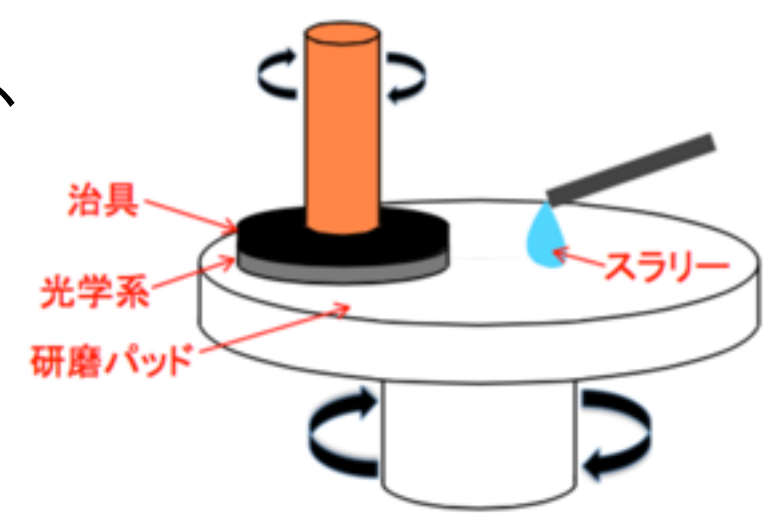
	ORBIS (ORbiting Binary brack-hole Investigation Satellite)	GEO-X (GEO-space X-ray imager)
衛星	50 x 50 x 50 cm, 50 kg	12 U Cubesat, 50 kg (推進系込み)
目的	バイナリブラックホール探査	地球磁気圏X線可視化
エネルギー	0.5-10 keV	0.3-2 keV
装置	MEMS Wolter I + CCD	MEMS Wolter I + DepFET
目標	2020年頃	2020年代前半

New process

今年度は反射率と角度分解能の向上に向けた2つの新プロセスを導入した。

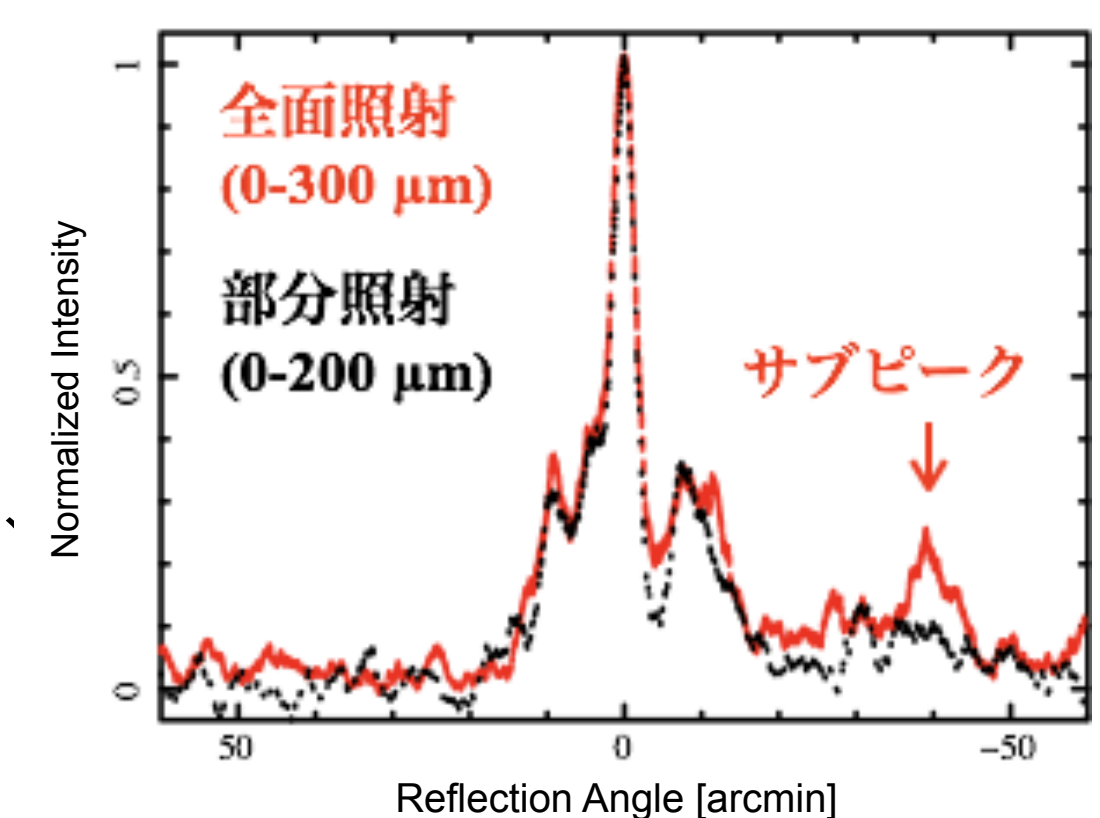
① Chemical Mechanical Polishing (CMP)

ドライエッチング後の側壁両端にはバリ構造があり、実効的に反射面を減らすという問題があった。そこで右のように基板の両面を研削・研磨する工程を試した。そして下に示すように両面のバリ除去と反射率の大幅な向上に成功した。CMP後にアニールを行うと表面粗さ ~0.4 nm rms であり、CMP前と変わらない。良い反射面を残すことで今後、角度分解能の向上も期待できる [15]。



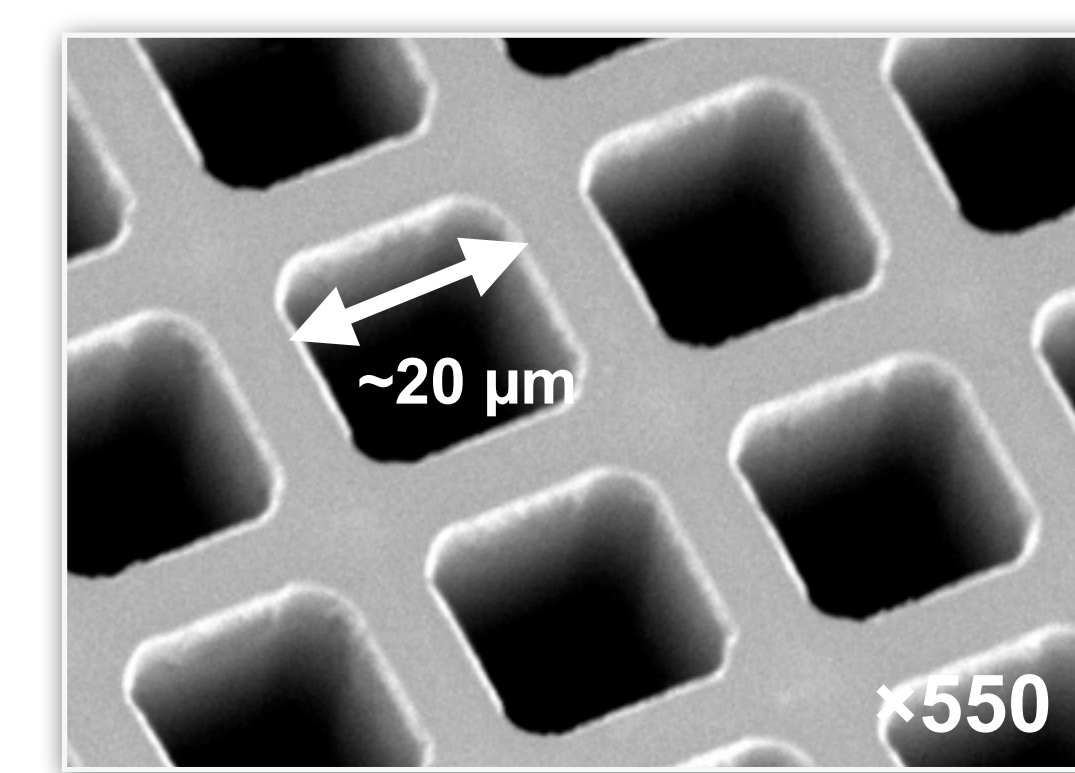
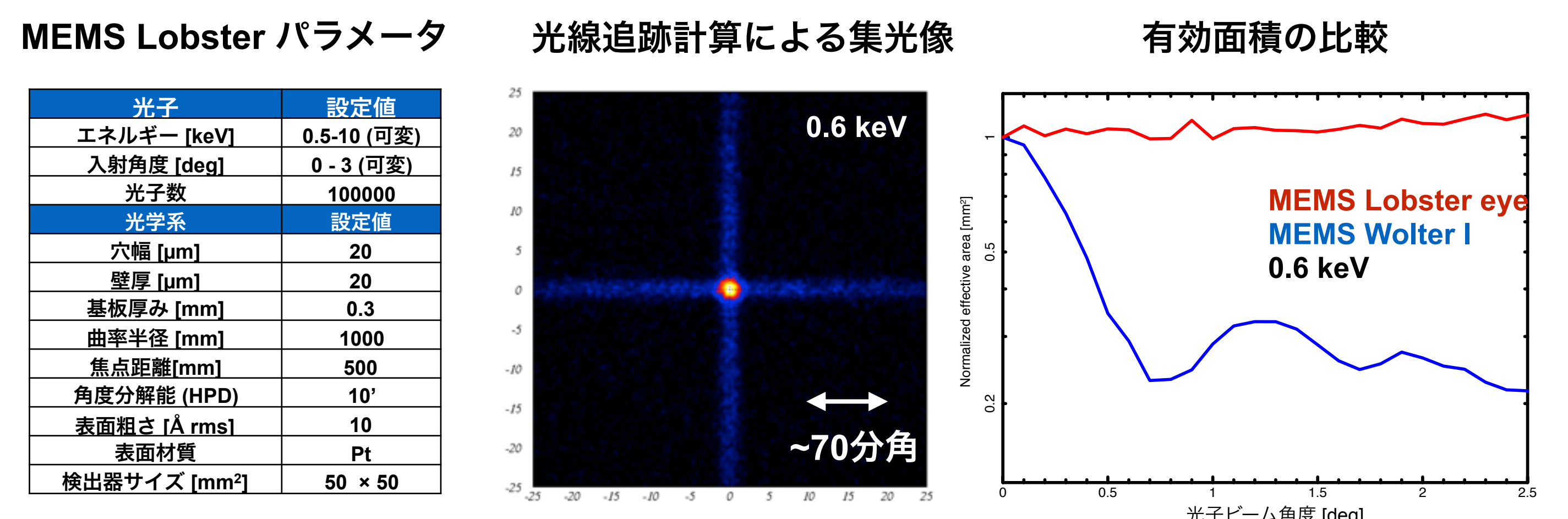
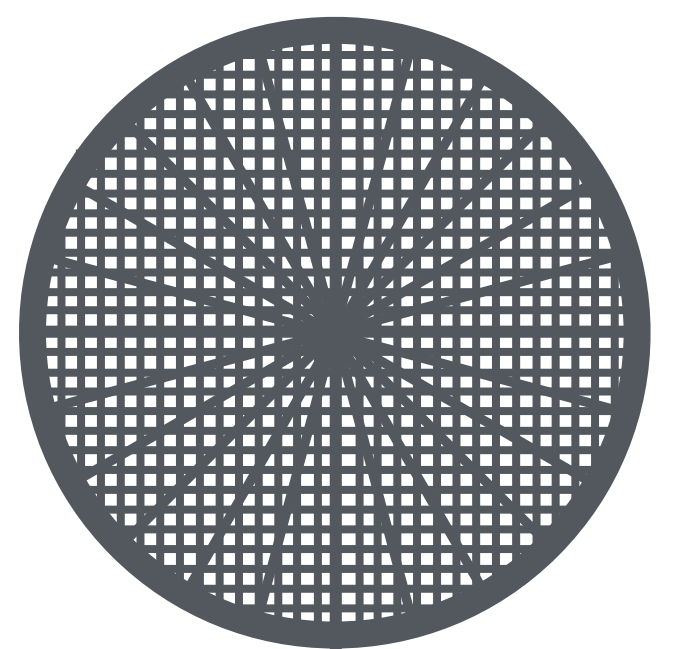
② 超長時間アニール

鏡形状はエッチングにより生じた表面のうねりに影響を受ける。そこで高温アニール工程を従来の 2 hr から 100 hr に大幅に長時間化することで、拡散長を伸ばし、表面形状の改善を試みた。右に示すように 100 hr 後は 2 hr 後に比べて、FWHM が改善し、鏡1枚照射で 3-5分角を達成した。一方、HPW (Half Power Width) は 10-15分角であり、反射面のバリ付近が寄与していることが分かった。上記 CMP で改善が期待できる [16]。



MEMS Lobster eye X-ray telescope

我々は Wolter I型望遠鏡に比べて、より広視野を実現しうる Lobster eye optics に注目した。甲殻類の眼を模した光学系であり、微細穴四角穴の直角を作る2辺での2回反射で集光結像する。すでにガラスファイバーを用いた手法で製作されてきたが、高価であり、また大きな素子を作るのが困難であった。MEMSの手法では比較的、大型の基板からエッチングと変形で製作できるため利点は大きい。そこでまず光線追跡計算を用いて基本設計を行った。結果として、Wolter I型に比べて、像は広がるが、広視野になることを確認できた。



我々は試作の第一段階として、厚さ 300 μm の Si 基板にドライエッチングで 20-30 μm 四方 (アスペクト比 10-15)の微細格子の形成を行った。結果、左に示すようにエッチングにより微細格子を壊さずに貫通することに成功した。今後は本素子にアニール、高温塑性変形、重金属膜付けを行って完成させたい。

Summary

- ・ MEMS 技術を用いた独自の超軽量X線望遠鏡の開発を推進している。
- ・ 今年度は反射率と角度分解能の向上に向けた新プロセスを確立した。
- ・ 将来衛星搭載に向けて、次年度は Wolter I型望遠鏡を再度試作し、性能評価を行う。
- ・ 並行して、新たに MEMS Lobster eye 望遠鏡の検討を開始し、素子の試作を行っている。

References

- [1] Ezoe+10, Microsys. Tech., 16, 133
- [2] Ezoe+10, IEEE JQE, 26, 1295
- [3] Mitsuishi+10 IEEE JQE, 2010, 26, 1309
- [4] Yamaguchi+10, CIRP, 49, 351
- [5] Mitsuishi+12, Sens. Act., 188, 411
- [6] Riveros+12, J. MSE, 134, 051001
- [7] Ezoe+12, Opt. Lett., 37, 779
- [8] Ogawa+13, Appl. Opt., 52, 5949
- [9] Mitsuishi+16, ASR, 57, 320
- [10] Numazawa+16, JJAP, 55, 06GP11
- [11] Ogawa+16, Microsys. Tech, 23, 1101
- [12] Ishikawa+16, Microsys. Tech, 23, 2805
- [13] Takeuchi+17, JJAP, 56, 06GN04
- [14] Takeuchi+17, Appl. Opt. 57, 3237 (Editor's Pick)
- [15] Fukushima+18, Proc. MNC
- [16] 伊師 +2019年春 応用物理学会発表予定