

# 将来衛星に向けたマイクロマシン技術を用いた 超軽量X線光学系の開発の現状

中村果澄<sup>1</sup>、江副雄一郎<sup>1</sup>、石川久美<sup>2</sup>、小川智弘<sup>1</sup>、佐藤真柚<sup>1</sup>、沼澤正樹<sup>1</sup>、武内数馬<sup>1</sup>、寺田優<sup>1</sup>、大橋隆哉<sup>1</sup>、満田和久<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>首都大学東京、<sup>2</sup>理化学研究所、<sup>3</sup>ISAS/JAXA

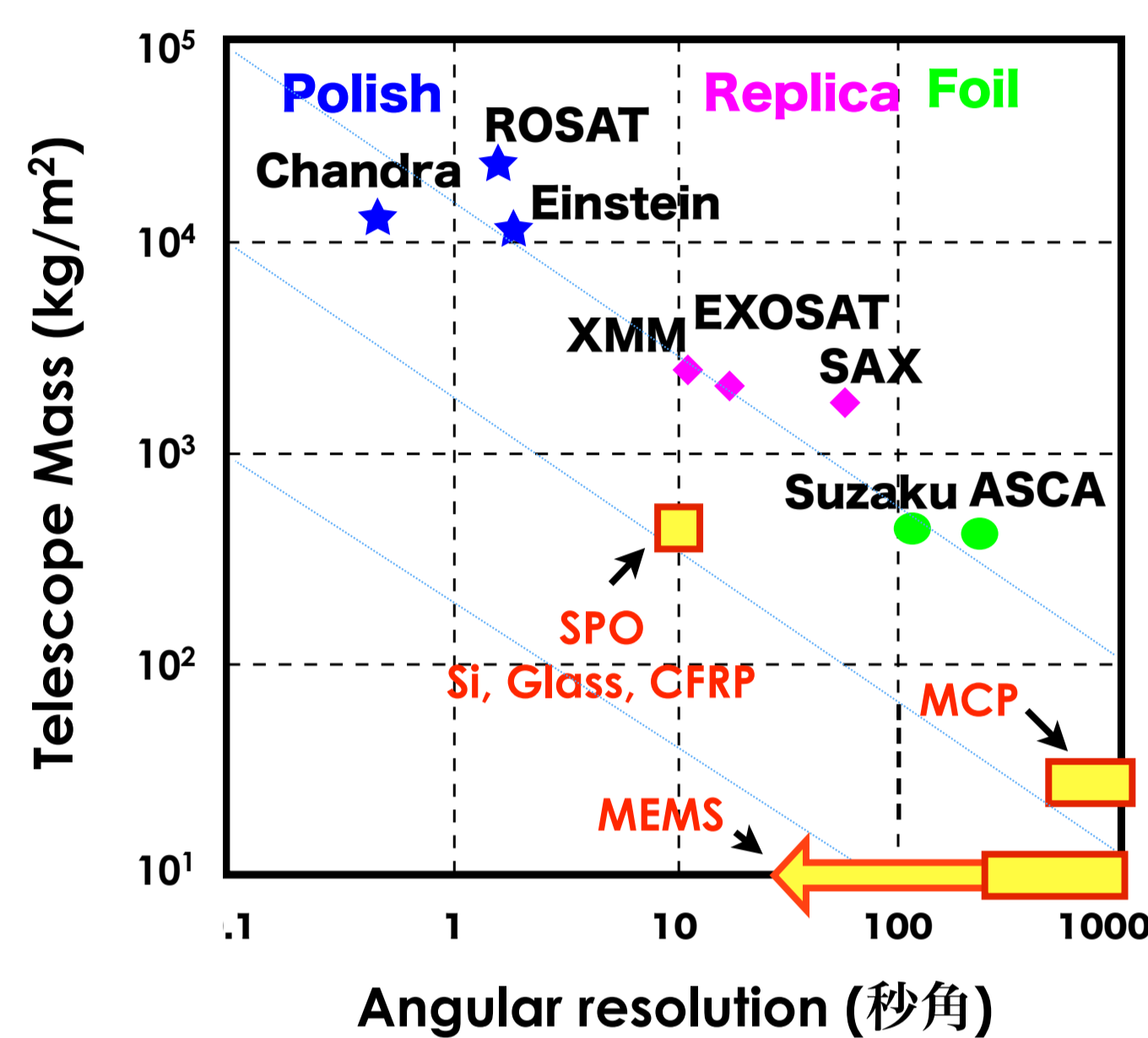
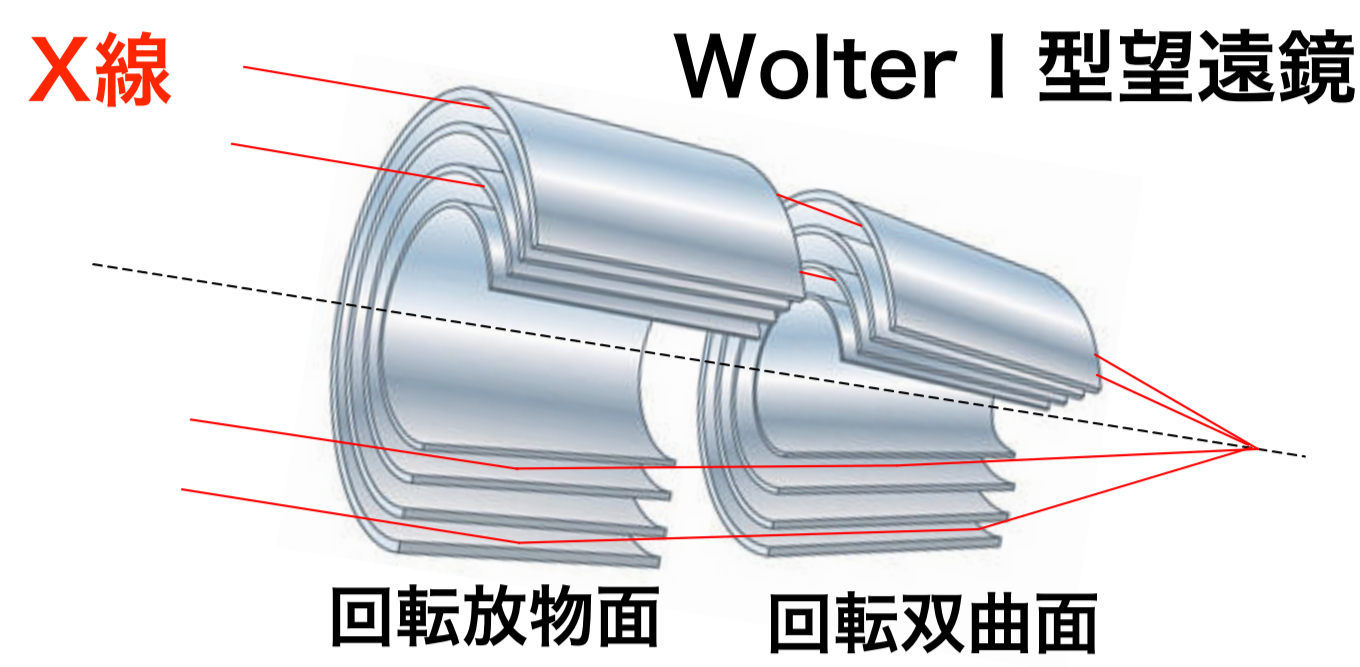
概要：宇宙X線観測において天体からのX線を集光し結像する光学系は必要不可欠である。X線は地球大気で吸収されてしまうため、衛星に搭載する必要がある。そのため軽量で角度分解能に優れた光学系が求められる。我々は将来衛星に向けて独自の超軽量X線光学系の開発を行っている。

## ◆1. 宇宙X線光学系

X線の物質に対する屈折率は1よりわずかに小さく、**宇宙X線光学系**では、右図に示す、全反射を用いた Wolter I型光学系が広く用いられる。X線を効率よく反射させるため、反射鏡の表面はX線の波長と同程度(1 keV = 1.24 nm)に滑らかな必要がある。また有効面積のため、多数の反射鏡を正確に配置する必要がある

反射鏡の形状を上げるためには、厚く剛性の高い基板が必要なため、結果として、宇宙X線光学系の**角度分解能と重量**は右図に示すような、トレードオフ関係にある。

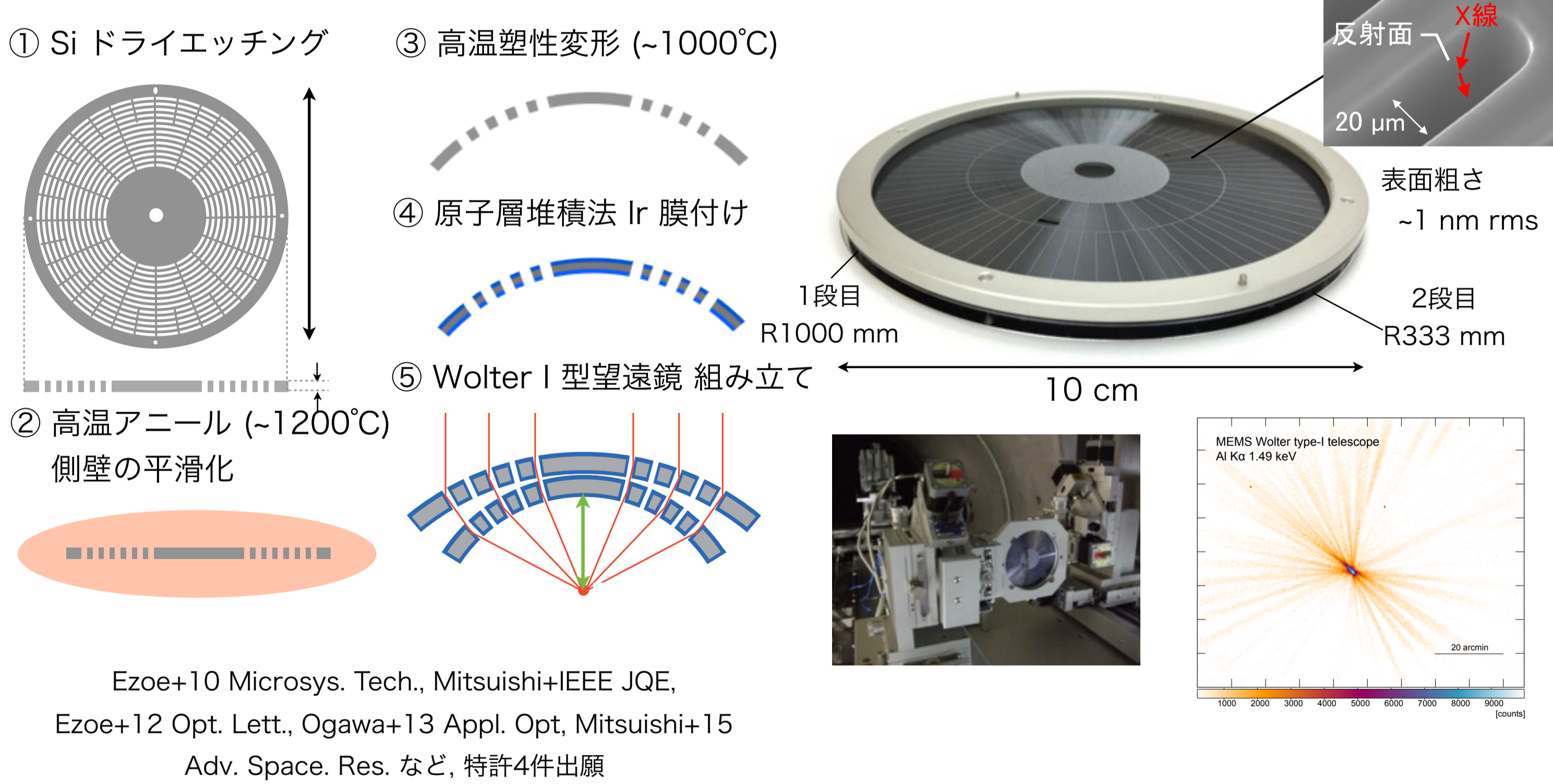
次世代の衛星計画に向けて、世界各国で軽量鏡の開発が進んでいる。我々は鏡を一括して大量生産する、軽量かつ角度分解能の良い**微細穴光学系**の開発を進めている。



## ◆2. MEMS X線光学系

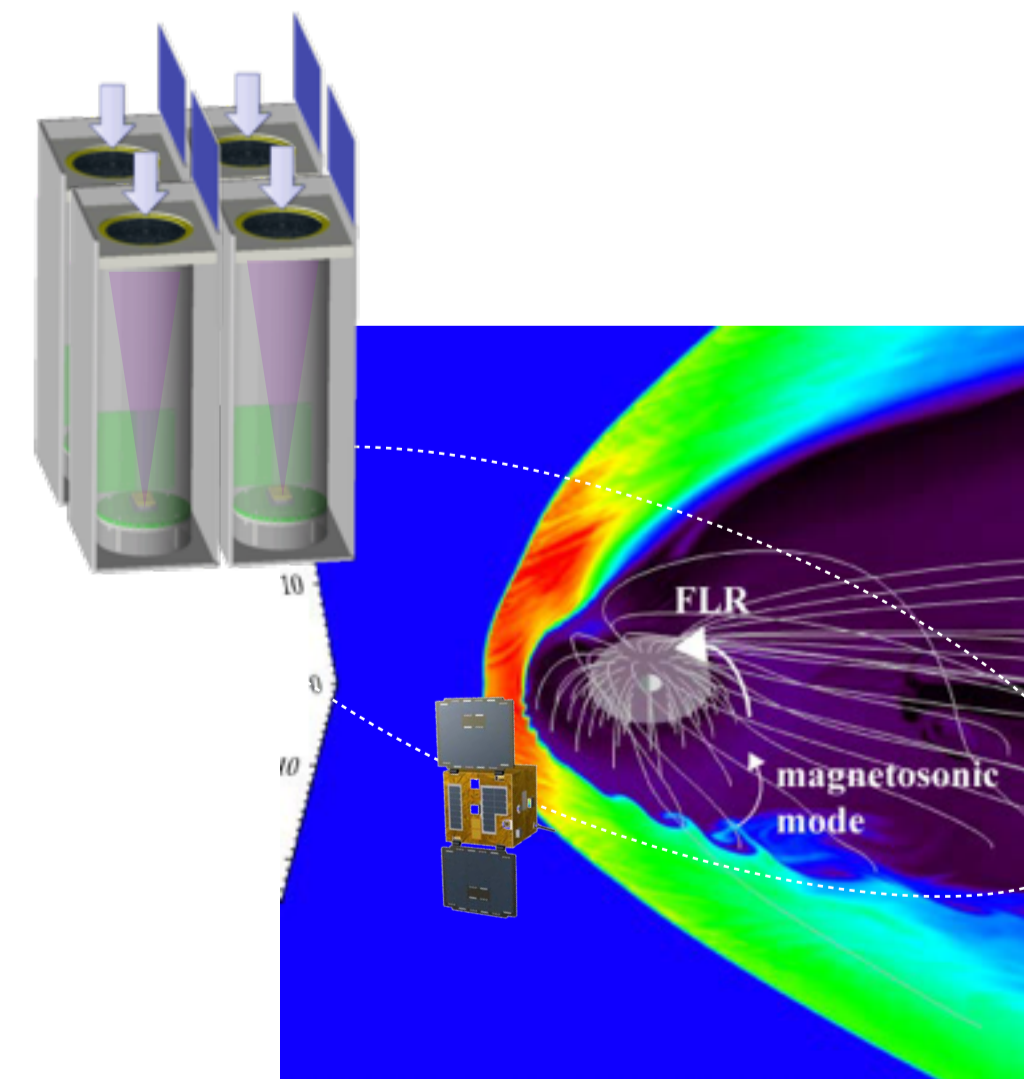
我々の光学系は、**マイクロマシン**製作のための微細加工技術を用いて、薄いシリコン基板から製作する。製作プロセスは以下の5ステップから成る。

- ① 厚さ 200-300 μm の4' シリコン基板にドライエッチング技術で曲面穴を製作。
- ② 穴側壁の平滑化のため、アルゴン・水素雰囲気下で高温アニール。
- ③ 平行X線を1点に集光させるため、高温塑性変形で球面変形。
- ④ 反射率向上のため、原子層堆積法により Ir などの重金属を基板に膜付け。
- ⑤ 曲率半径の異なる2枚の基板を重ね、Wolter I型光学系として完成。

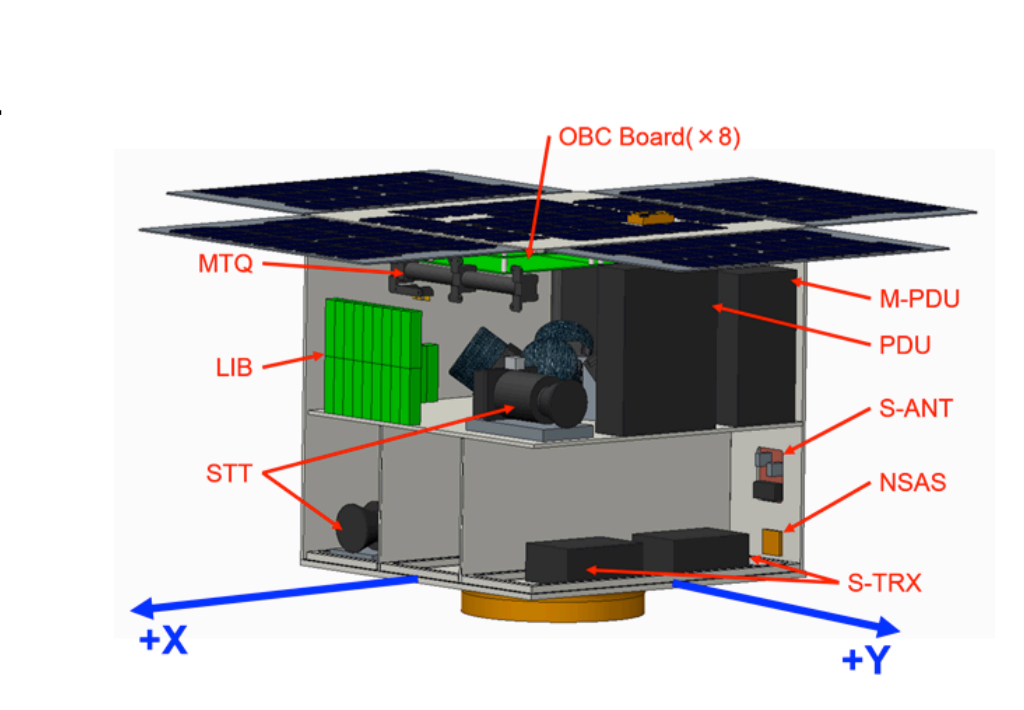


## ◆3. 目標とする衛星計画

**小型衛星計画 GEO-X** (首都大, 名古屋大, ISAS ほか)  
 地球磁気圏からの電荷交換X線をもちいて、磁気圏の衝撃波、カスプ、シースをX線ではじめて可視化することを狙う小型衛星計画。4' MEMS X線光学系を4台搭載し、0.3-2.0 keV において広視野 (Φ4 deg) 撮像分光 (角度分解能 <10') を行う。



**超小型衛星計画 ORBIS** (首都大, ISAS, 東京理科大 ほか)  
 汎用理学超小型衛星バスの確立を狙う工学実証衛星であり、理学機器として巨大ブラックホールの長期時間変動をX線でモニタリングすることで、ブラックホール-ブラックホール連星の証拠を得ることも狙う。2-10 keV において集光 (面積 ~1 cm<sup>2</sup> @ 2 keV) 観測を行う。



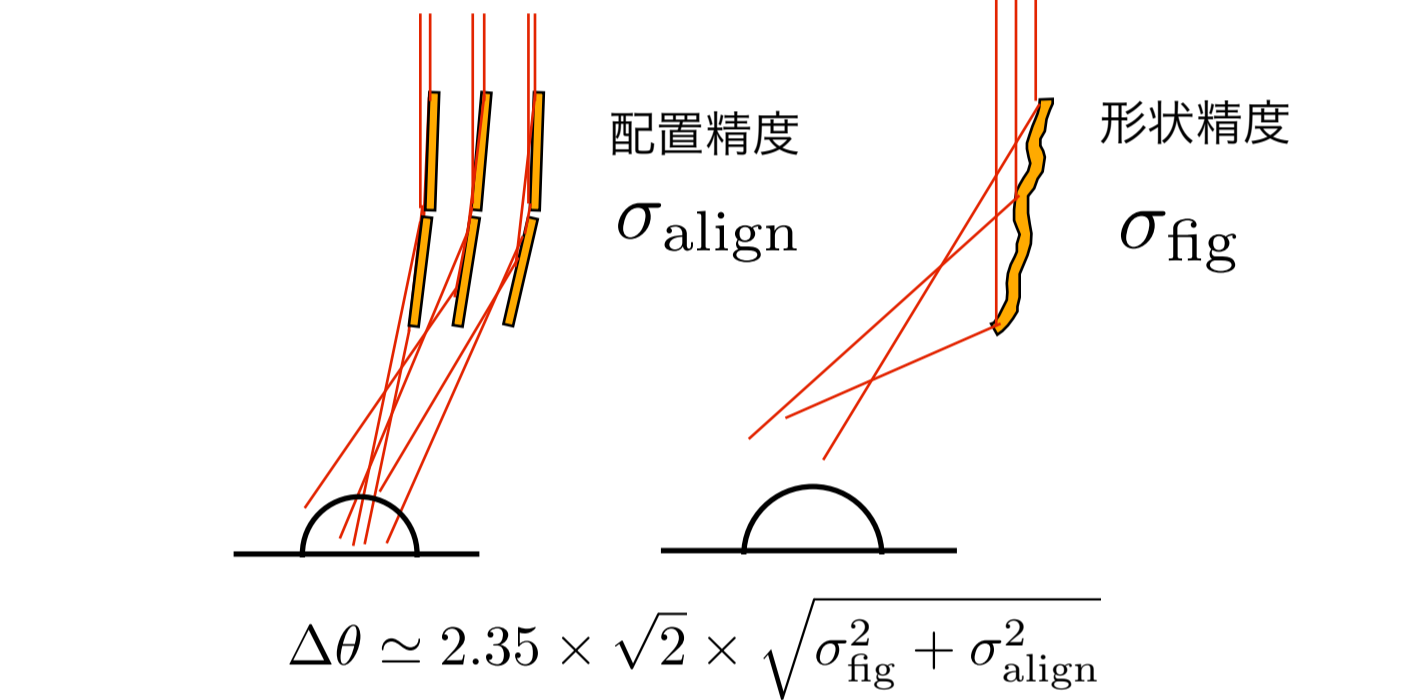
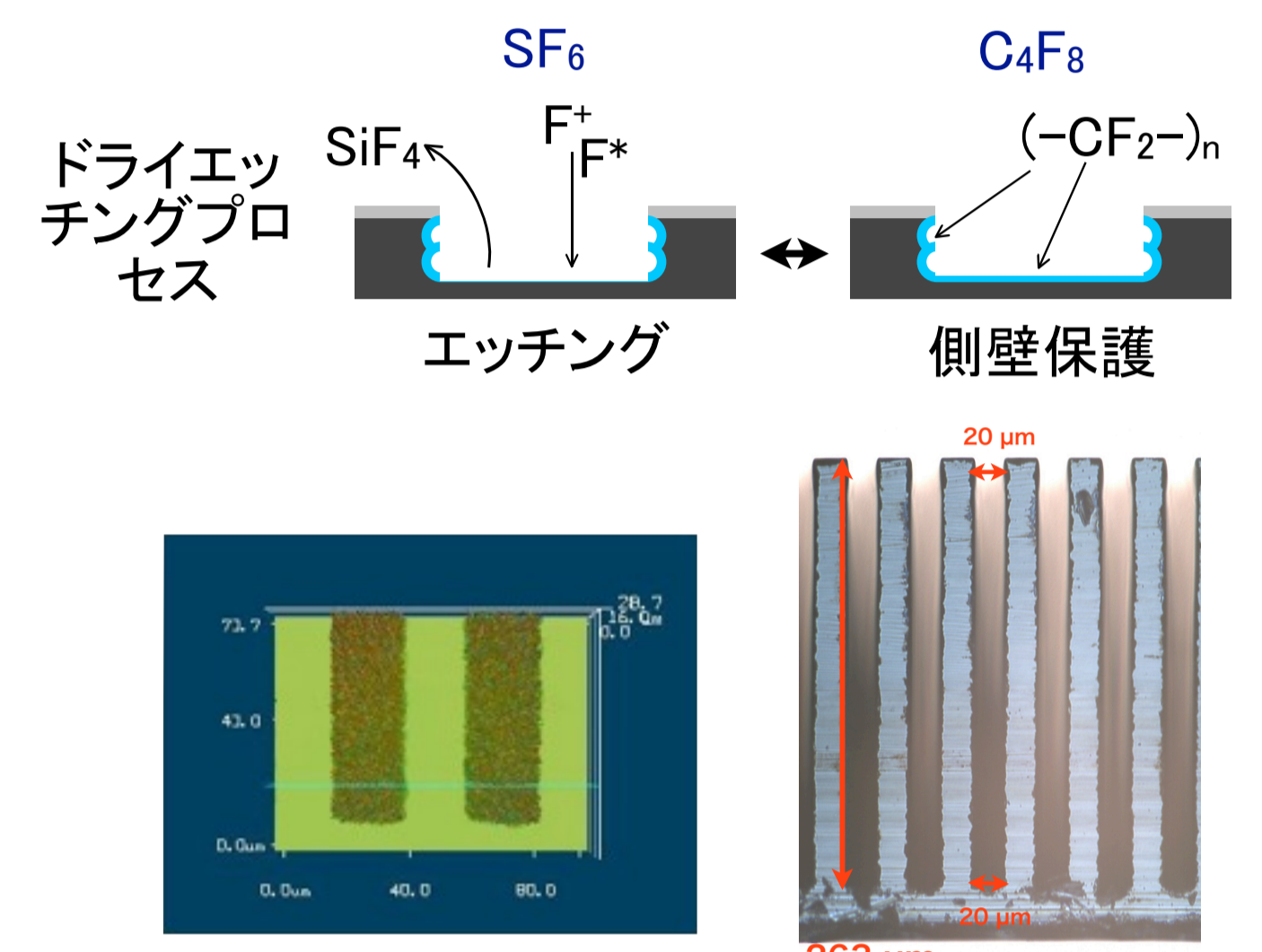
## ◆4. 今年度の開発

我々はこれまでに 4' MEMS X線光学系の試作を行い、世界で初めて本手法でのX線反射と結像に成功してきた。X線評価により見積もられた表面粗さは ~1 nm rms と良好であるが、角度分解能は FWHM では 4' であるものの HPD は10倍程度悪く、改善が必要である。そこで今年度は、変形前の鏡の垂直性の改善を行うとともに、変形前後でのX線照射を行って、成因を詳しく調べることにした。

### (1) 配置精度の改善と評価

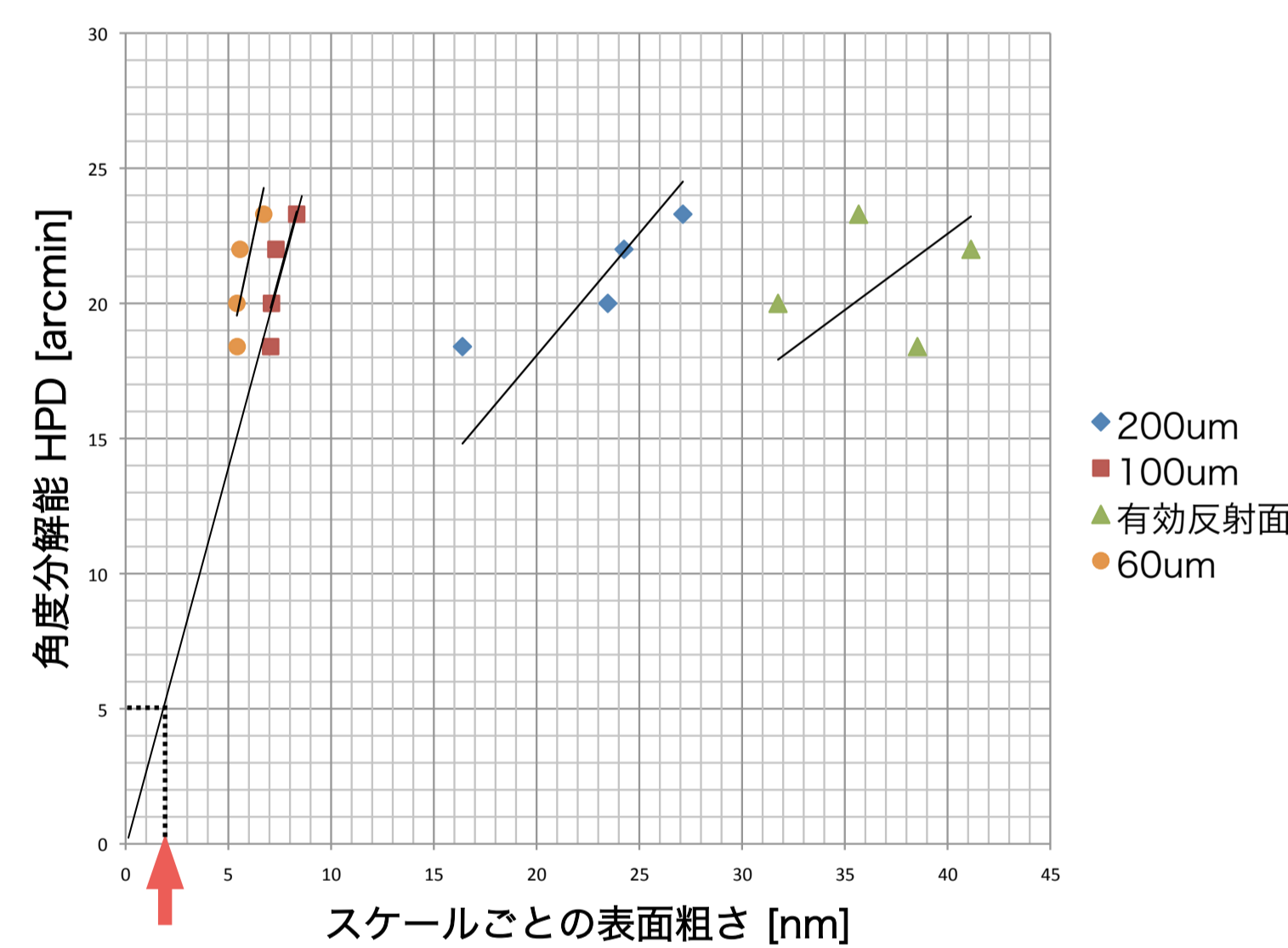
宇宙研ナノエレクトロニクススクリーンルームのドライエッチング装置を用い、エッチングと側壁保護のバランスを調整しつつ、基板をダイシングカットし、レーザー顕微鏡で垂直性をチェックして、**側壁の垂直性**を基板裏表での穴幅差にして、従来の~1 μm から ~0.1 μm と1桁程度改善した。

そして変形前の平板状態の基板にX線を照射することで、X線の焦点位置から、垂直性に起因する角度分解能の成分、いわゆる配置精度は ~3 分角と見積もられる。



### (2) 形状精度の評価

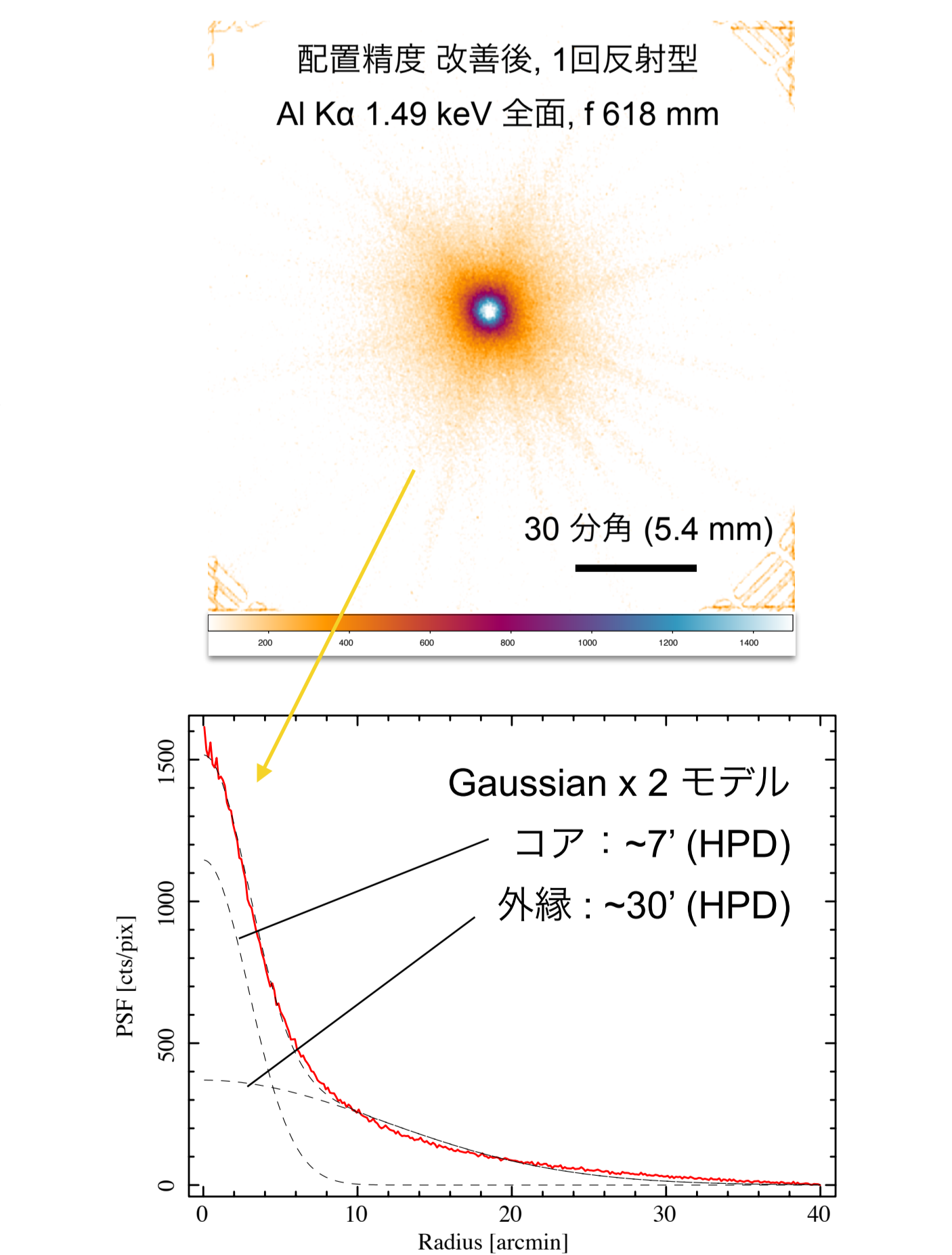
つづいて上記の平板状態の基板のX線照射によるX線の焦点広がりから、鏡の**形状精度**を見積もった所、~20-30' であることが分かった。これは従来のX線反射鏡に比べて、1桁程度悪い。鏡形状のどのスケールの表面粗さが最も形状に寄与しているか調べるため、300 μm の母線長の様々なスケールでの粗さと角度分解能の相関を、光学系の様々な場所で調べた所、右図のように、100 μm スケールが最も相関が良く、ここから形状精度 5' を達成するには、表面粗さは **2 nm rms** が必要と見積もられる。



### (3) 変形後の角度分解能

最後に基板を R 1000 mm で変形した後に1回反射光学系として全面照射した結果が右図である。焦点像は対称性が良く、配置精度が基板全体で改善していることが確認できる。一方で PSF などから、~30' に広がった成分が存在することが分かった。形状精度によるものと考えられる。このように配置・形状精度による**角度揺らぎ**は角度分解能に無視できない寄与を従来及ぼしていたことが分かった。

角度揺らぎを考慮した光線追跡計算を行った所、従来の Wolter I型光学系の有効面積も実測と計算値がほぼ一致することが確かめられた。



## ◆5. まとめと今後

今年度の成果から、角度分解能と有効面積の成因がほぼ明らかになった。右にまとめる。角度分解能の主な劣化要因は形状精度が大きく、ドライエッチング後の表面粗さをさらに押さえる必要がある。これは後工程、アニールなどで可能と考えられる。有効面積も同様に**形状精度**起因の角度揺らぎが原因であり、今後の最大の課題は形状精度と考えられる。

	成因	プロセス
角度分解能	形状精度	ドライエッチング, アニール
	配置精度	ドライエッチング, 変形
有効面積	角度揺らぎ	ドライエッチング, アニール, 変形
	バリ, くぼみ	ドライエッチング