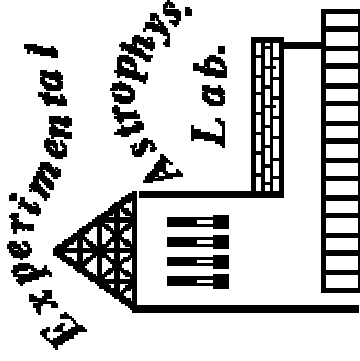
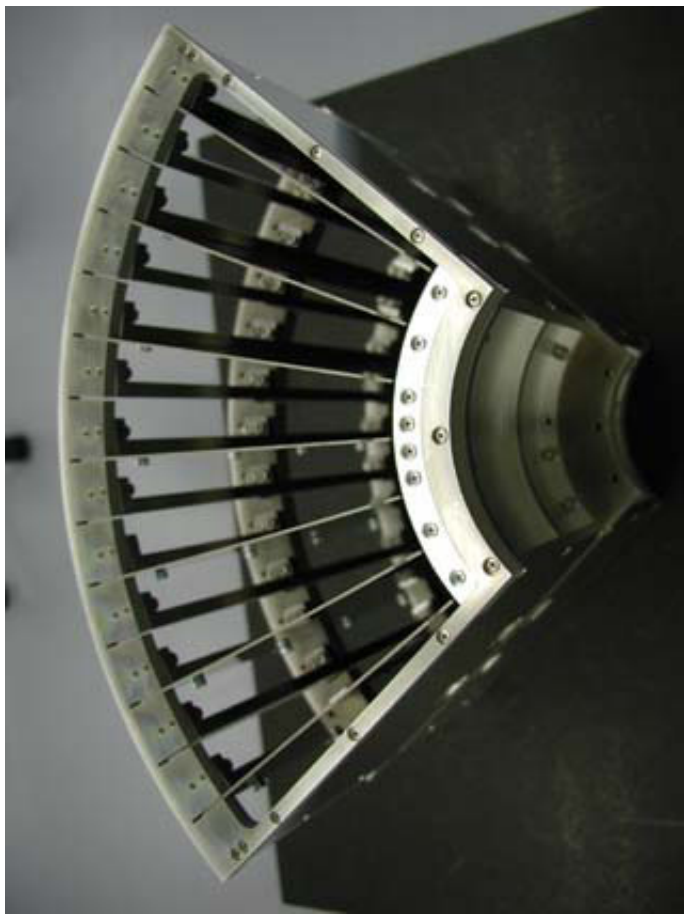


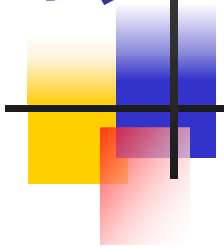
高角度分解能多重薄板型 X線望遠鏡の開発

東京都立大学 理学研究科
物理学専攻 修士課程
宇宙物理実験研究室



早川 彰



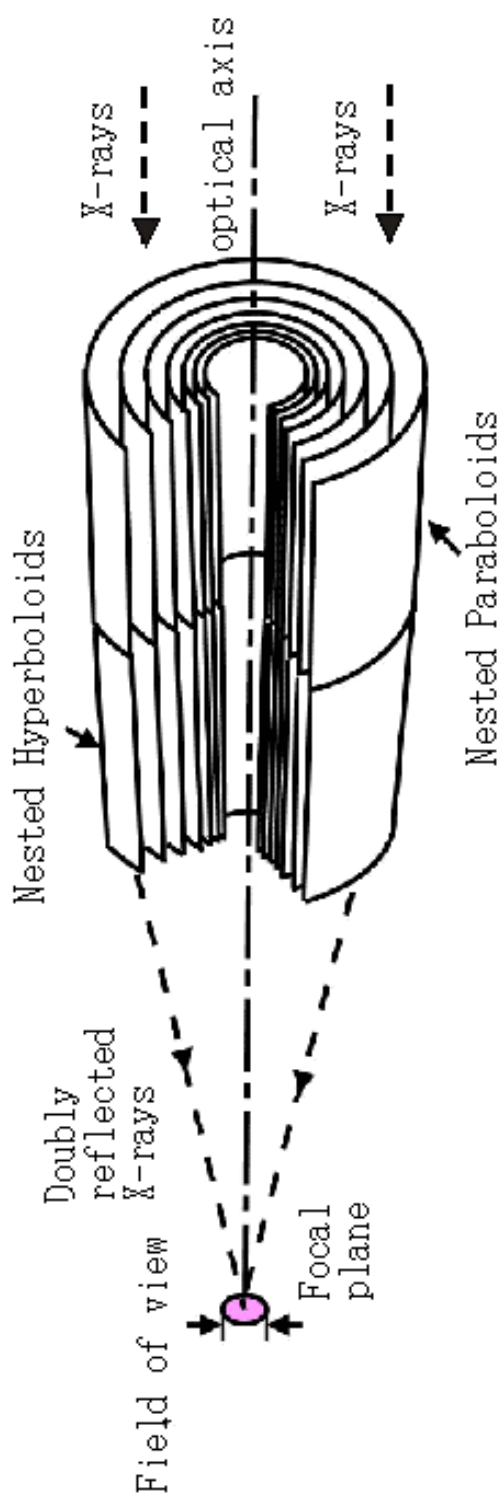


本研究の目的

高い角分解能と広い有効面積を
持った望遠鏡の開発！！

X線望遠鏡

- X線は波長が短く極端な斜入射(<1 度)でのみ全反射する。
→ 斜入射光学系
- 軸外光の結像性能を向上。焦点距離の短縮。
→ Wolter I 型光学系
- 見込む面積が狭い。 → 動径方向に積層



X線望遠鏡の性能を表す2つの

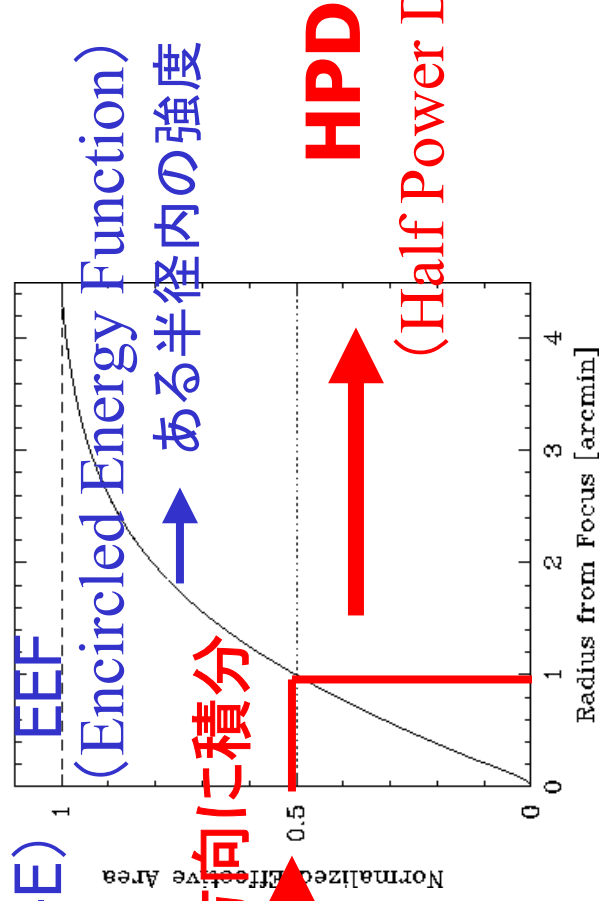
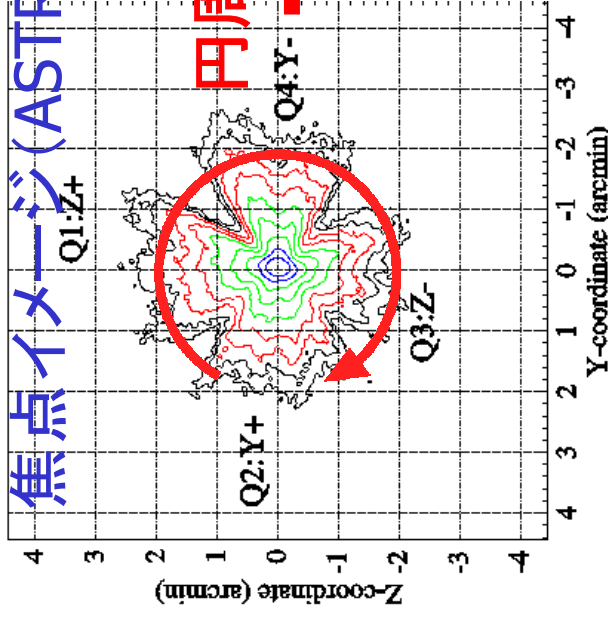
指標

- 有効面積 ($S_{\text{eff}}(E)$)

$$S_{\text{eff}}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E) d\theta$$

$S(\theta)$: 入射角が θ のときの開口面積
 $R^2(\theta, E)$: 入射角 θ 、エネルギー E の時の鏡面の反射率

- 角分解能 (HPD)



X線望遠鏡の種類と性能

■ Chandra(直接研磨)型

反射鏡をガラスから直接研磨し製作する。

- 高角分解能 **0.5秒角**
- 低開口効率 **$\sim 1\%$ (@8keV)**
- 大重量 **1484kg**

■ Astro-E(多重薄板)型

反射鏡をしプリカ法により製作する。

- 低角分解能 **2.1分角**
- 高開口効率 **$\sim 27\%$ (@8keV)**
- 軽量 **18kg**

**高い角分解能と開口効率の両立は
非常に困難！！**



積層数:175枚



多重薄板型望遠鏡の 角分解能劣化原因

- 円錐近似による誤差

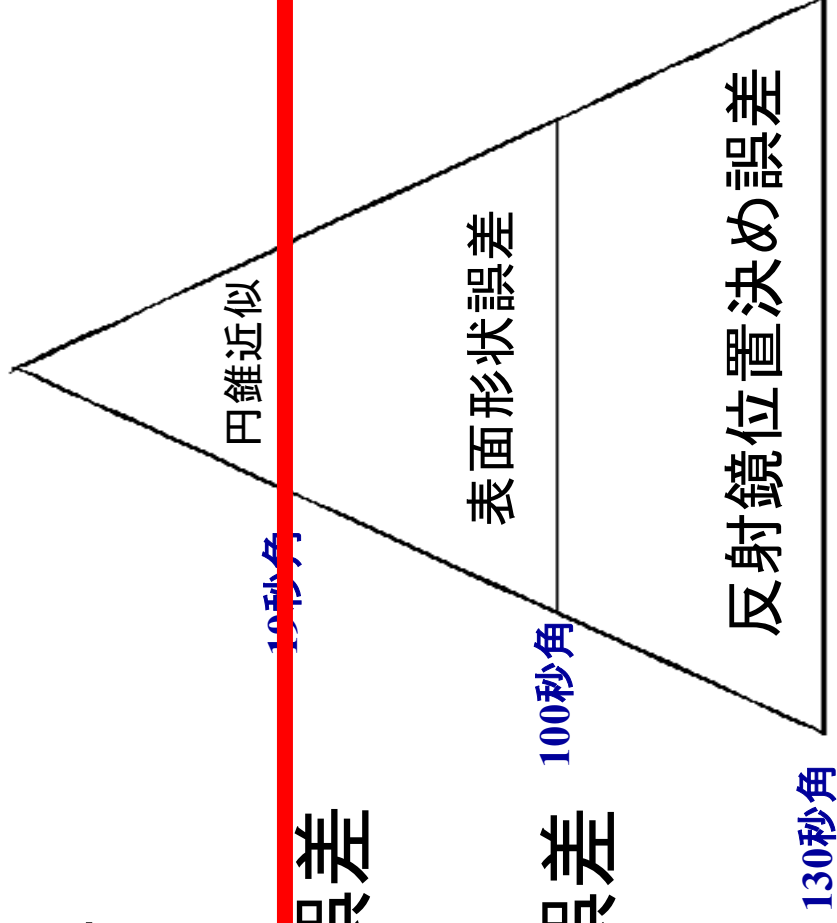
～19秒角

- 反射鏡表面の形状誤差

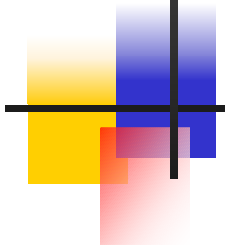
～100秒角

- 反射鏡の位置決め誤差

～130秒角



→ 補正することにより19秒角まで改善が可能！

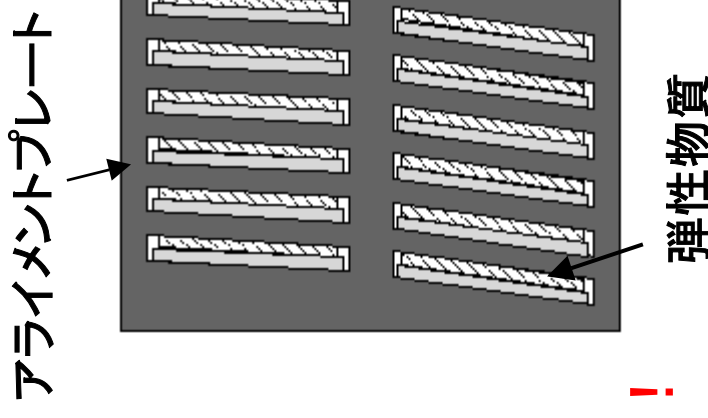


高角分解能化の指針

- 反射鏡の位置決め誤差
 - ・アライメントバーの位置決め誤差
 - ・グループ(溝)内の遊びによる誤差
 - 鏡面形状誤差
 - 位置決め誤差と形状誤差を同時に補正！
- **高角分解能と高開口効率を同時に実現！**

研究内容

- ・ 反射鏡製作システムを構築
- ・ 反射鏡の形状補正
- ・ アライメントプレートを導入した望遠鏡の試作



反射鏡母線方向の形状と 法線揺らぎ

■ 法線揺らぎ

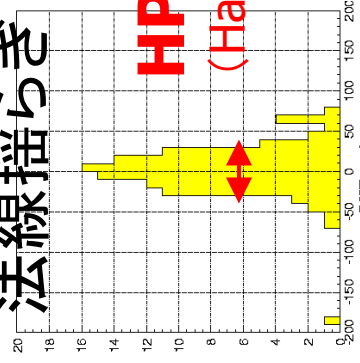
$$\text{法線揺らぎ: } \theta \quad \theta_{normal} \quad \arctan \frac{f(x_i)}{x_i} \quad \frac{f(x_{i+1})}{x_{i+1}}$$

→ 実際にはある区間の法線を求める。

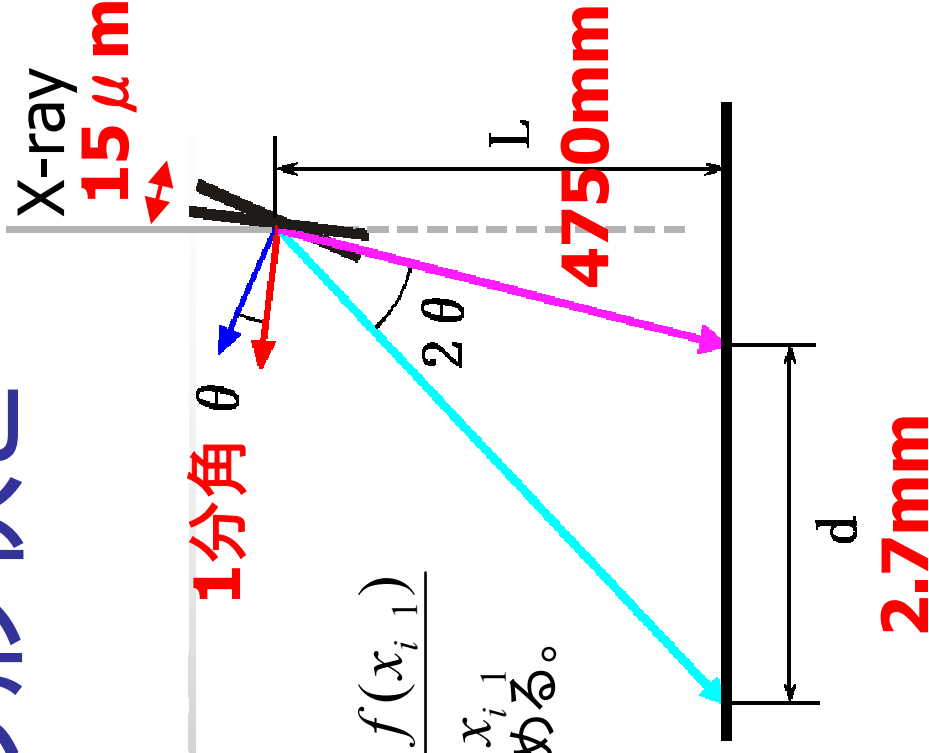
$$d = L \tan 2\theta \quad (\theta \ll 1)$$

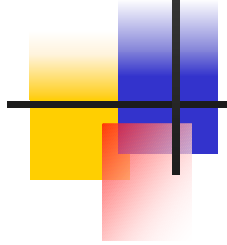
■ 法線揺らぎ → HPD

法線揺らぎ



$$\text{HPW} \rightarrow 2 \sqrt{2} \quad \text{HPW}$$

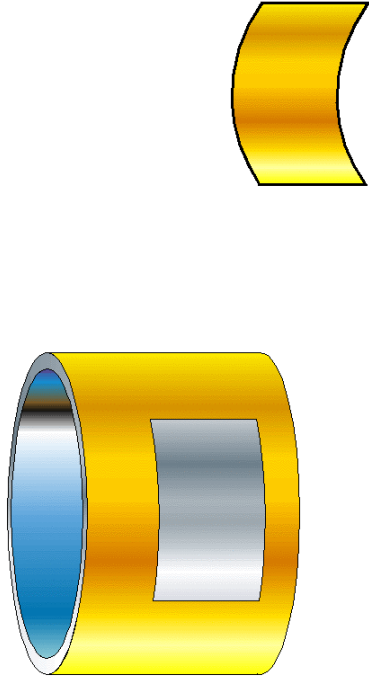




反射鏡製作システムの構築

- 基板の製作
熱成形 100秒角 → 16秒角
(法線揺らぎ)
- 母型に反射膜を成膜
- スパッタリング法
- 基板と反射膜の圧着
- 基板の剥離

→ 母型表面の形状を正確に
基板に転写！！



表面形状測定システムの構築

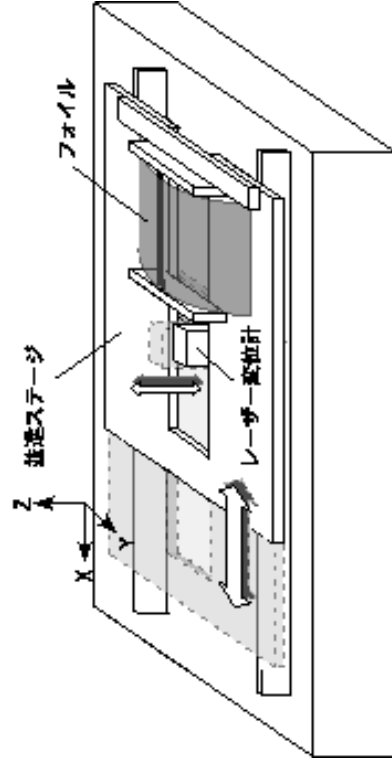
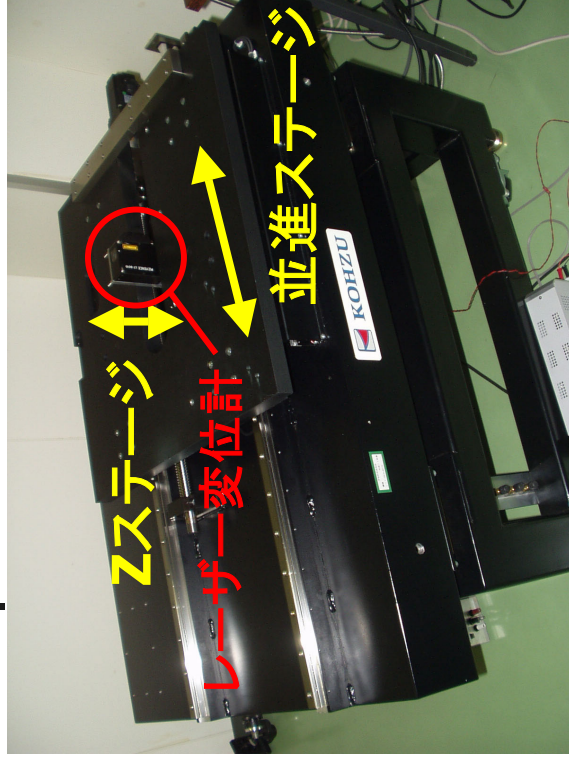
■測定手順

- 1、Zステージで対象物までの距離を調節。
- 2、並進ステージを動かしつつレーザー変位計で対象物までの距離を測定。

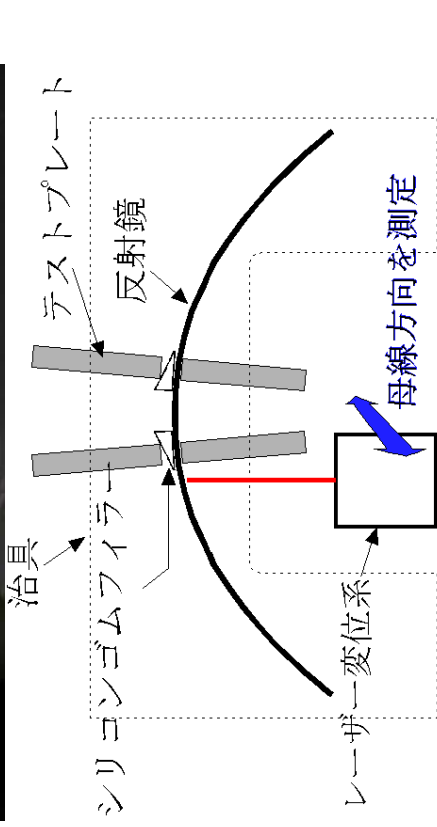
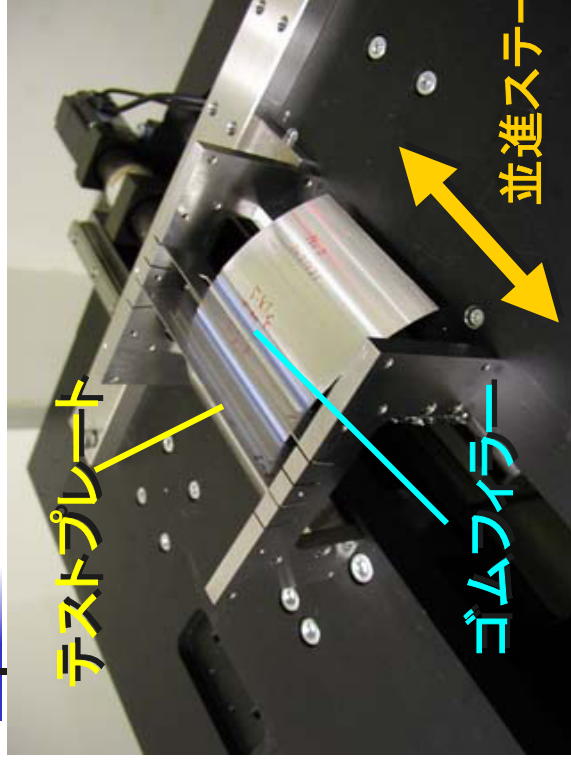
■システム全体の精度

表面形状が $\lambda/20$ のoptical flatを測定し、RMSを求める。

- 測定精度 : $\sim 0.07 \mu m$
- 再現性 : $\sim 0.1 \mu m$



反射鏡の形状補正

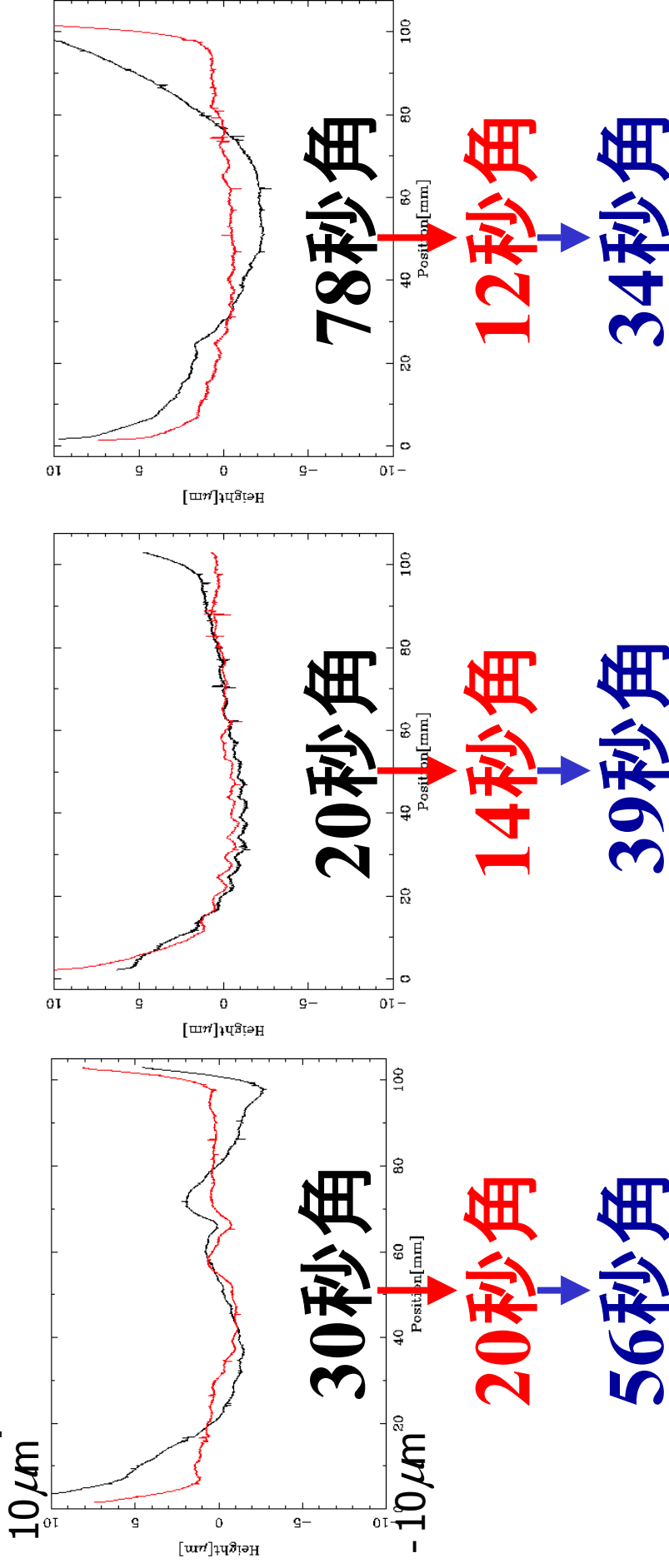


- 溝幅=200-1000 μm (100 μm 間隔)
- スリット断面の精度 <1 μm



- 厚さ=400-1600 μm (200 μm 間隔)
- 型枠の精度 <1 μm

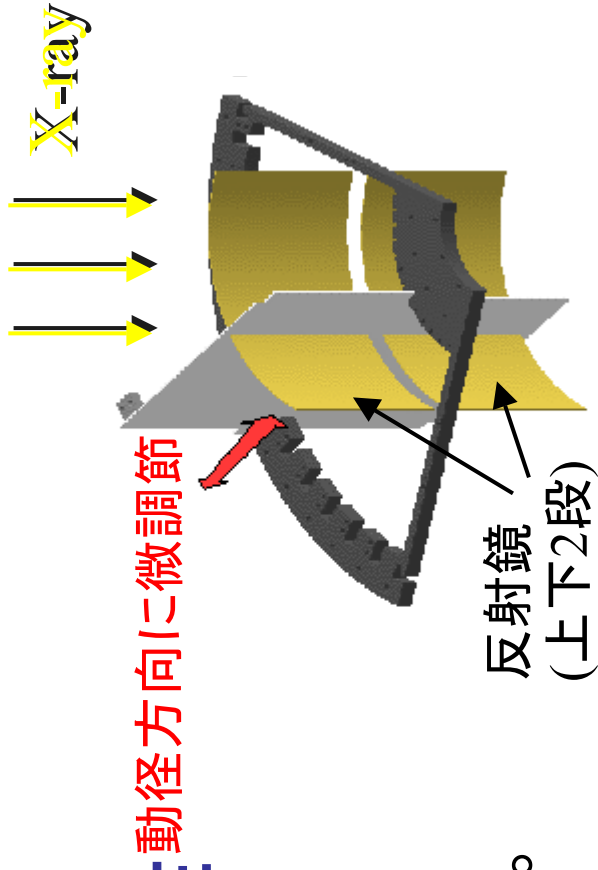
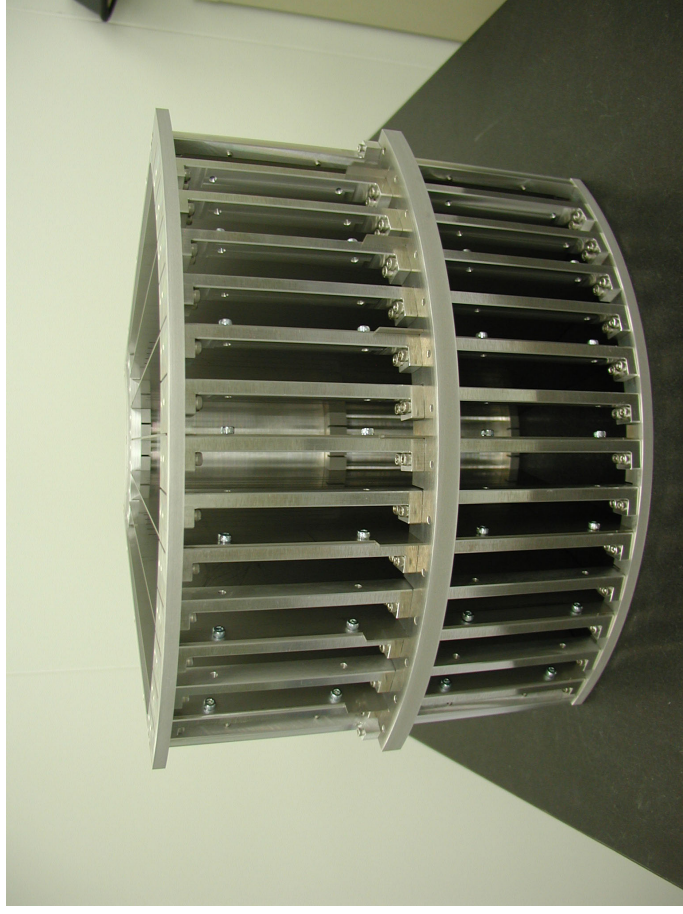
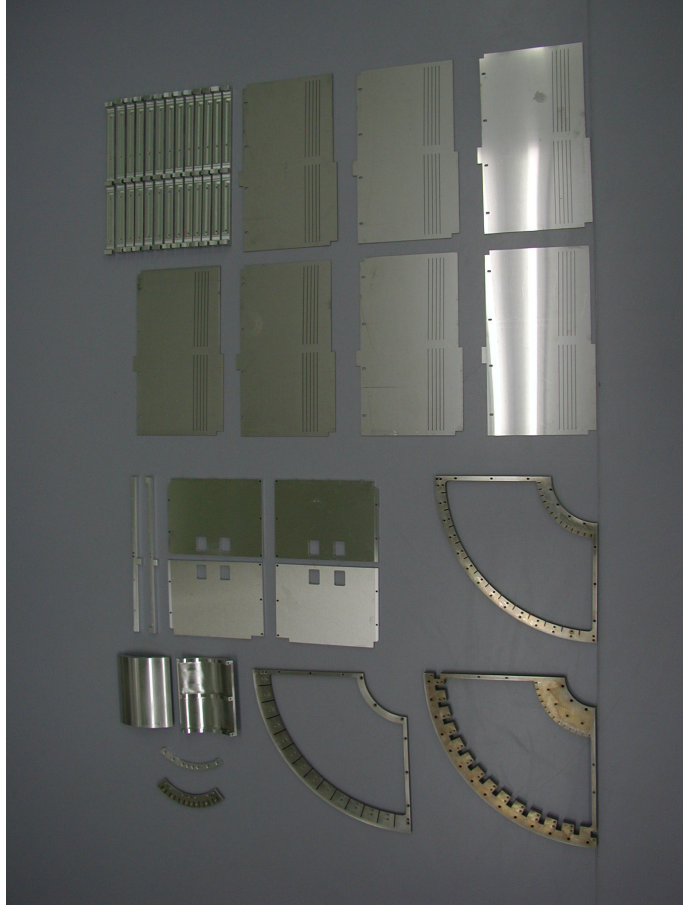
形状補正結果

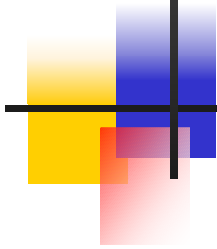


円錐近似を考慮しても<1分角の角分解能を達成！！

新望遠鏡の試作

- 上下一体で加工した
アライメントプレートを導入。
- 位置決定精度の向上。





まとめと課題

◆ 本研究の成果

- 反射鏡製作システムの構築
- 反射鏡の形状補正
- 新望遠鏡の試作

◆ 今後の課題

- 反射鏡製作の習熟
- 形状補正効果の方位角方向への伝播
- 新望遠鏡の性能評価
- X線測定