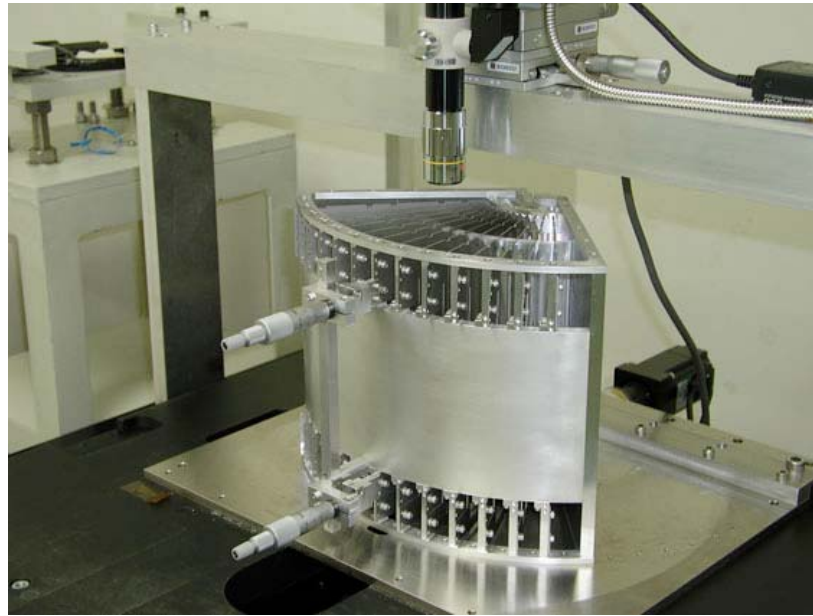


高角度分解能を目指した 多重薄板型X線望遠鏡の開発と その性能評価



宇宙物理実験研究室

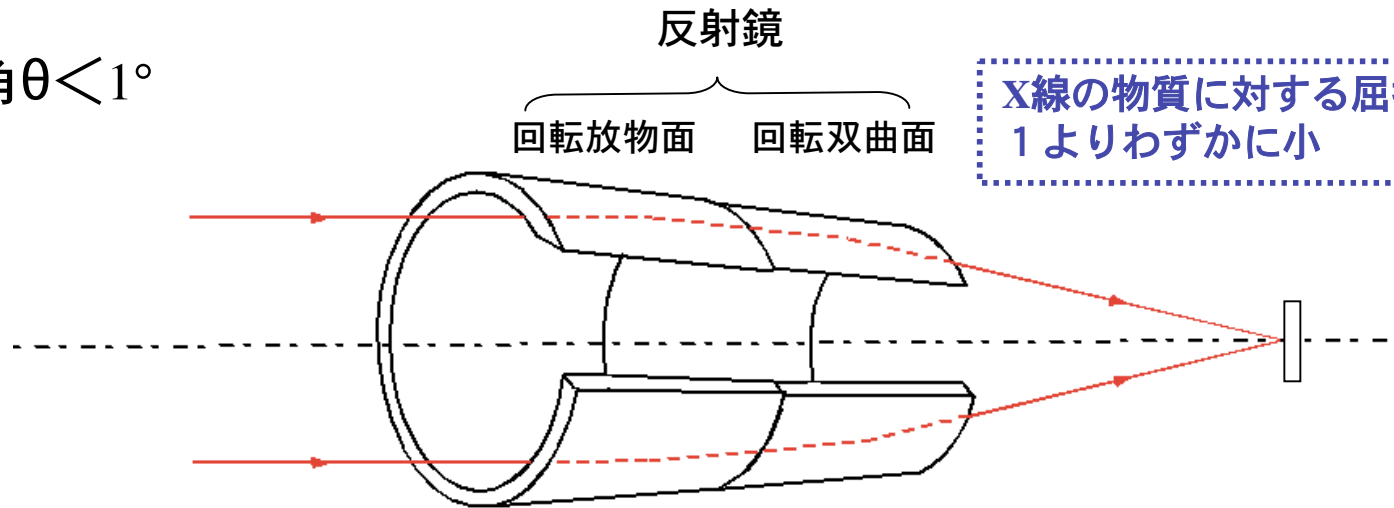
窪田 廉

目次

- 多重薄板型X線望遠鏡について(すざく望遠鏡)
- 望遠鏡の結像性能と決定要因
- アライメントプレートとその調整
- X線による望遠鏡の性能評価
- 結像性能決定要因の分離
- まとめ

X線望遠鏡(XRT)・・・天体からのX線を集光・結像させる

入射角 $\theta < 1^\circ$



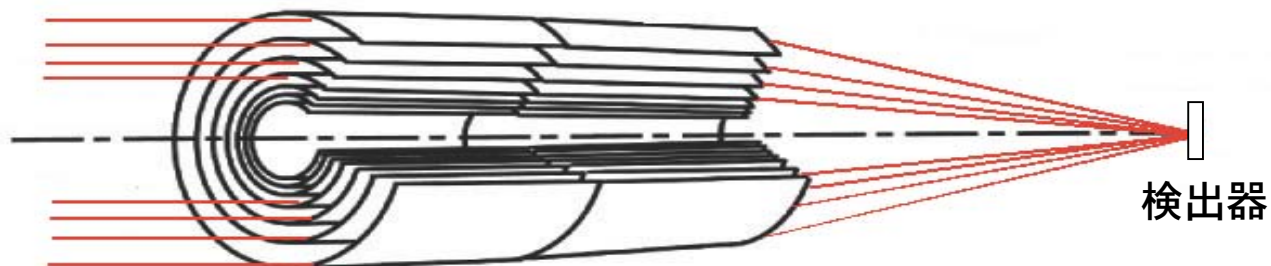
X線の物質に対する屈折率は
1よりわずかに小

Wolter I型斜入射光学系

検出器

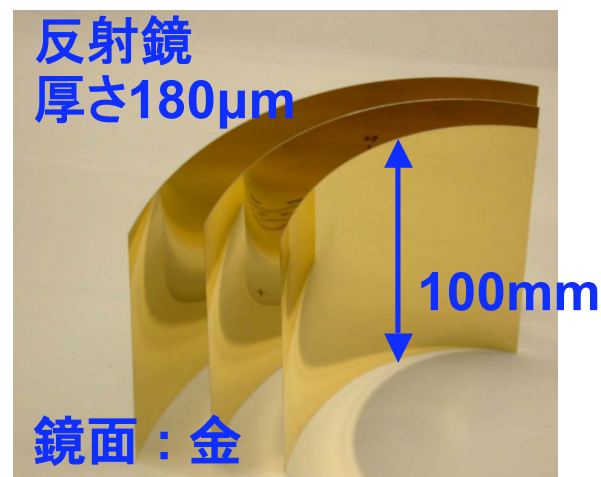
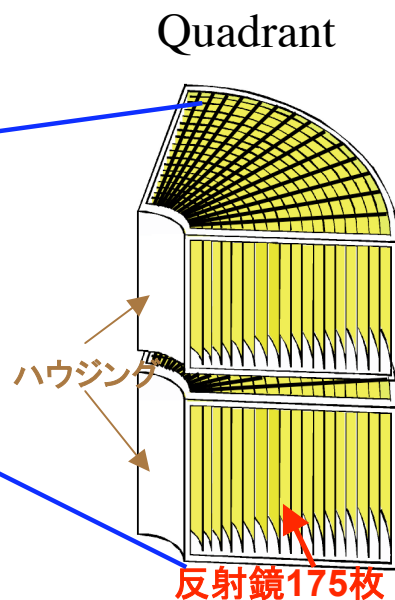
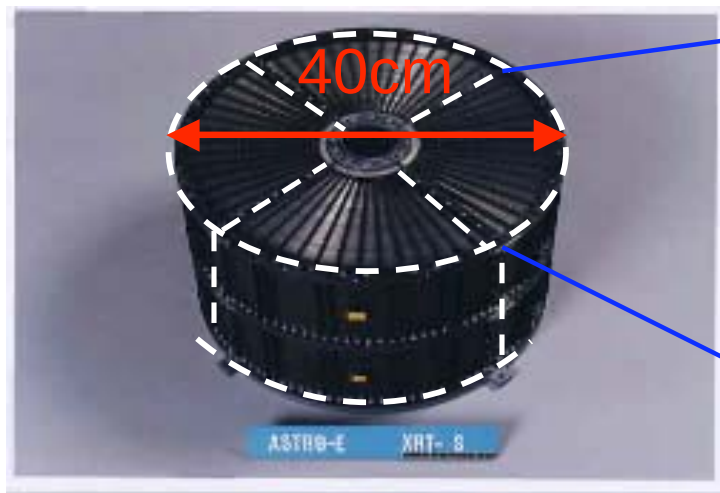
見込む面積が小さいので集光できる光子が少ない
「多重薄板型」X線望遠鏡

・・・非常に**薄い**反射鏡を**多数**同心円状に並べたもの



多重薄板型X線望遠鏡の構造

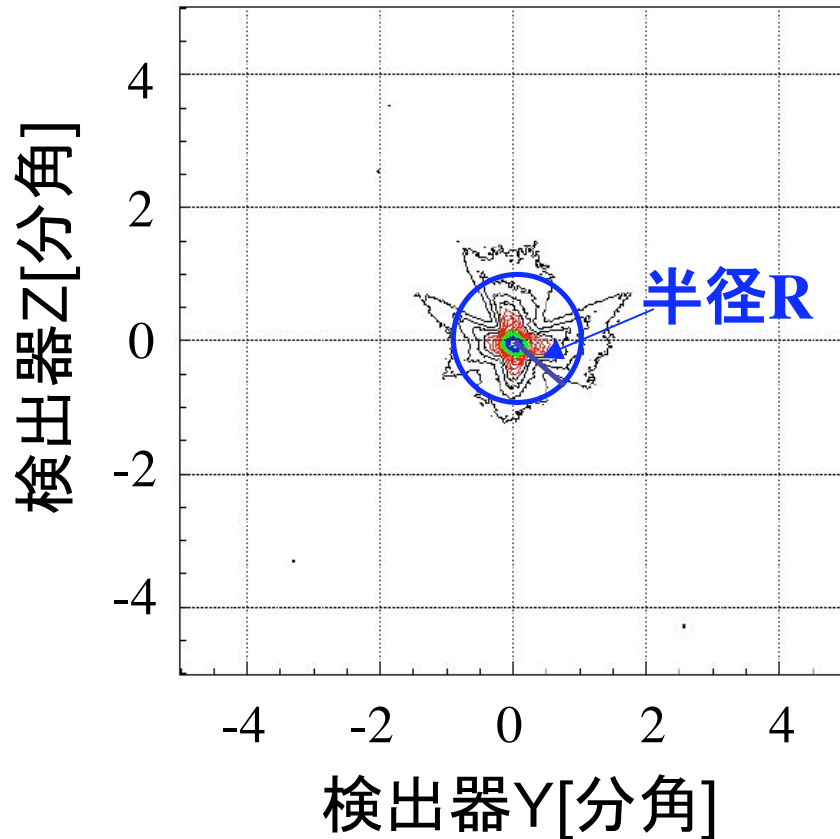
すざく衛星搭載X線望遠鏡



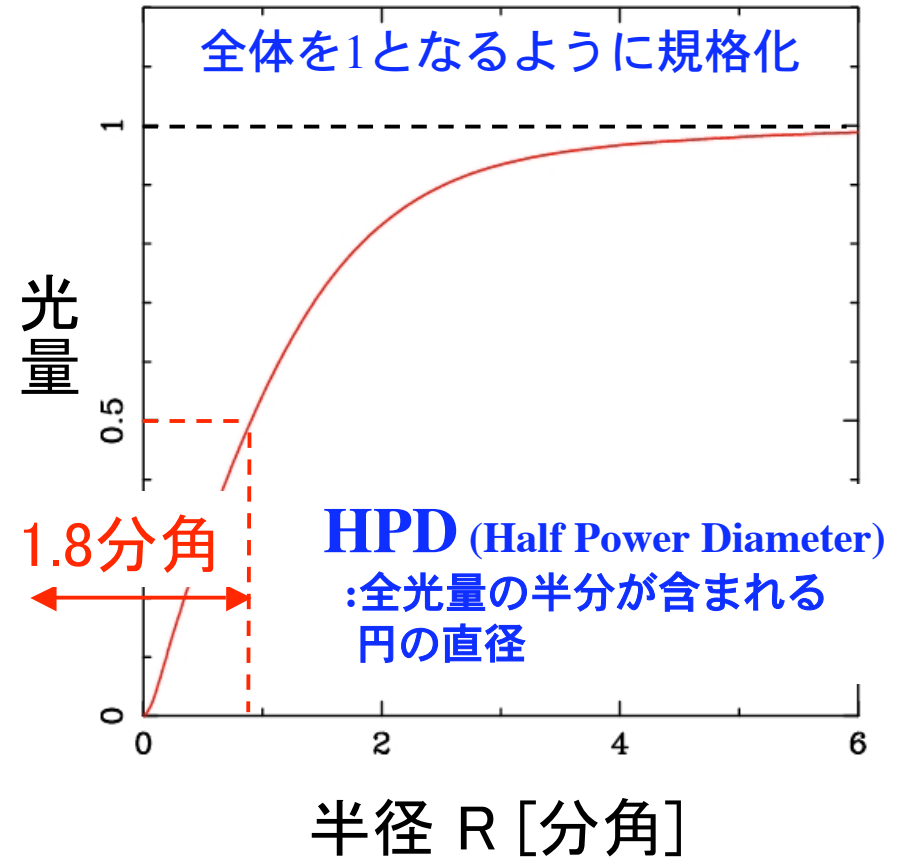
2次曲面を円錐面で近似

すざくのイメージ

焦点面でのイメージ

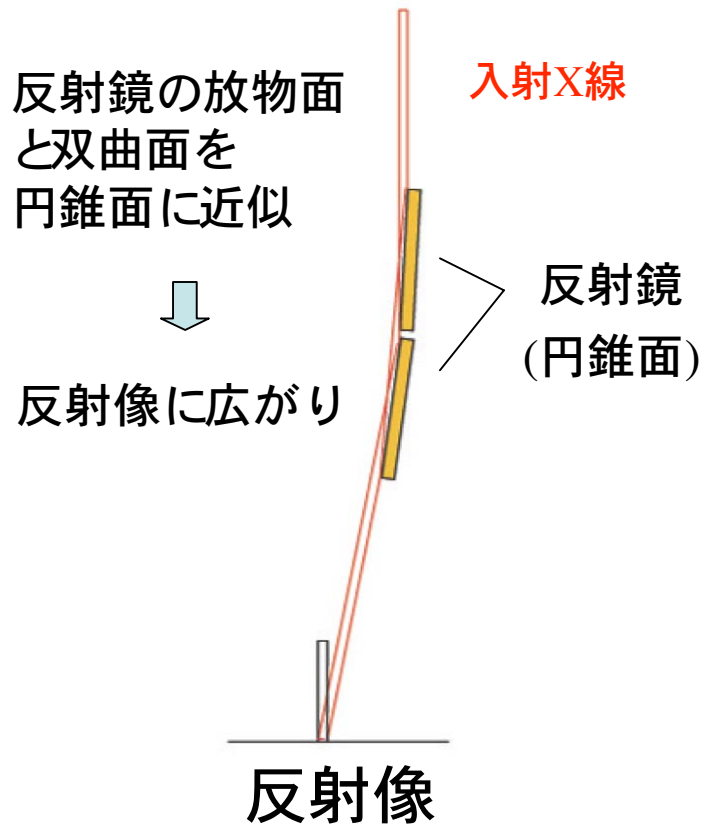


半径Rの円内に入る全光量



性能の決定要因

① 反射鏡の円錐近似



原理的な性能限界

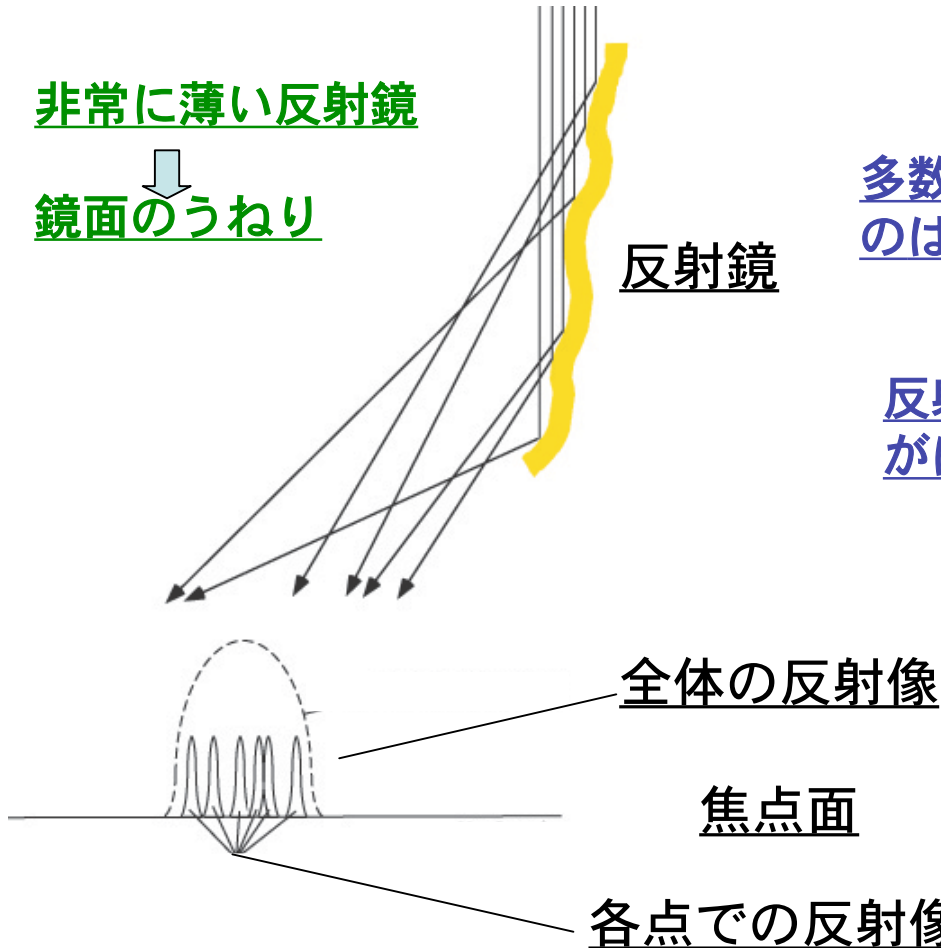
性能の決定要因

②反射鏡鏡面の形状誤差

非常に薄い反射鏡

↓
鏡面のうねり

反射鏡



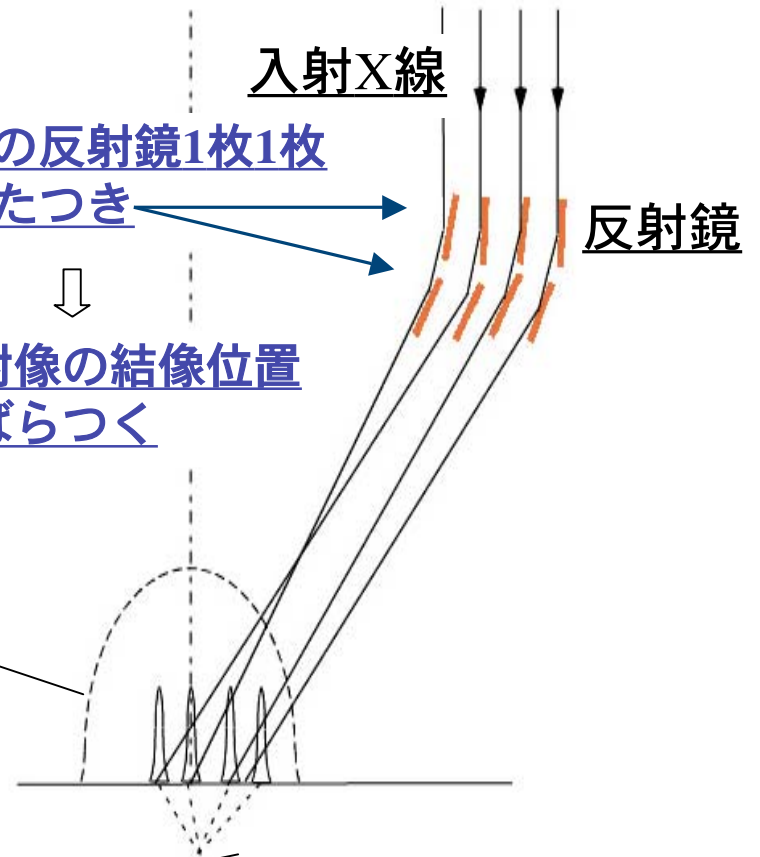
③反射鏡の位置決め誤差

多数の反射鏡1枚1枚
のばたつき

↓
反射像の結像位置
がばらつく

入射X線

反射鏡



性能の決定要因

②反射鏡

反射鏡の
と双曲面
円錐面

反射像

形状誤差：
0.85分角

円錐近似：
0.3分角

すざく搭載：1.8分角

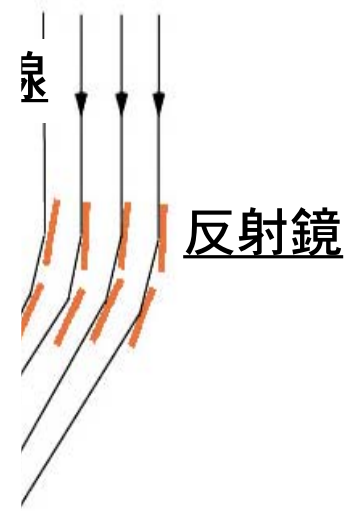
位置決め誤差：1.5分角

$$\sqrt{0.3^2 + 0.85^2 + 1.5^2} \sim 1.8 \text{分角}$$

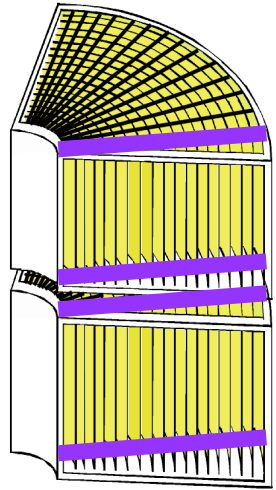
位置決め誤差を抑える

原理的

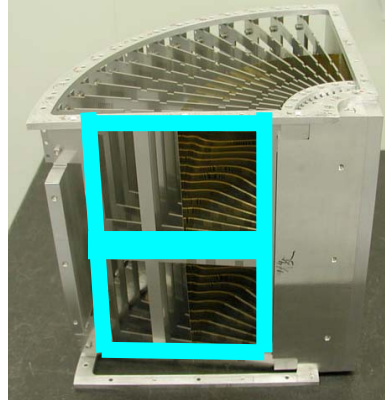
位置決め誤差



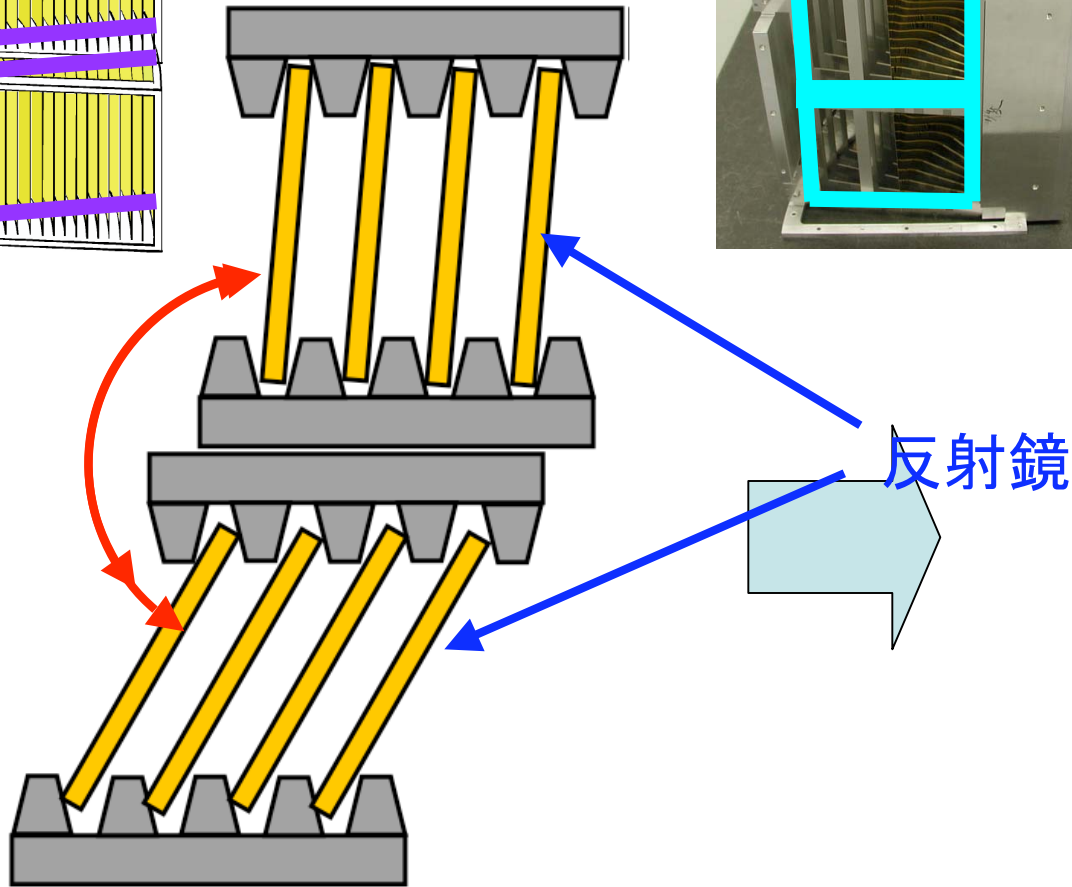
位置決め誤差の要因



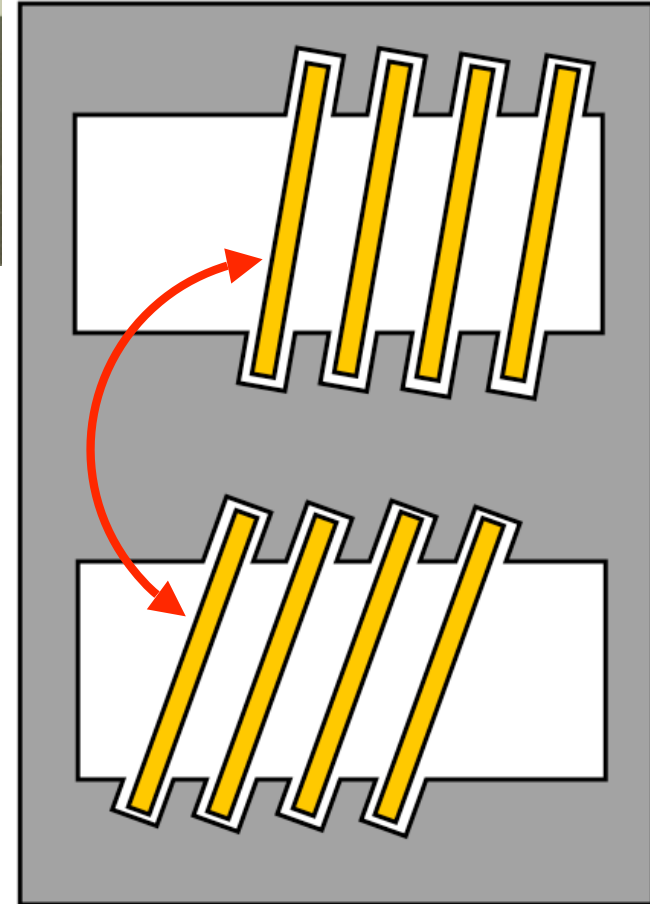
アライメントバー



アライメントプレート

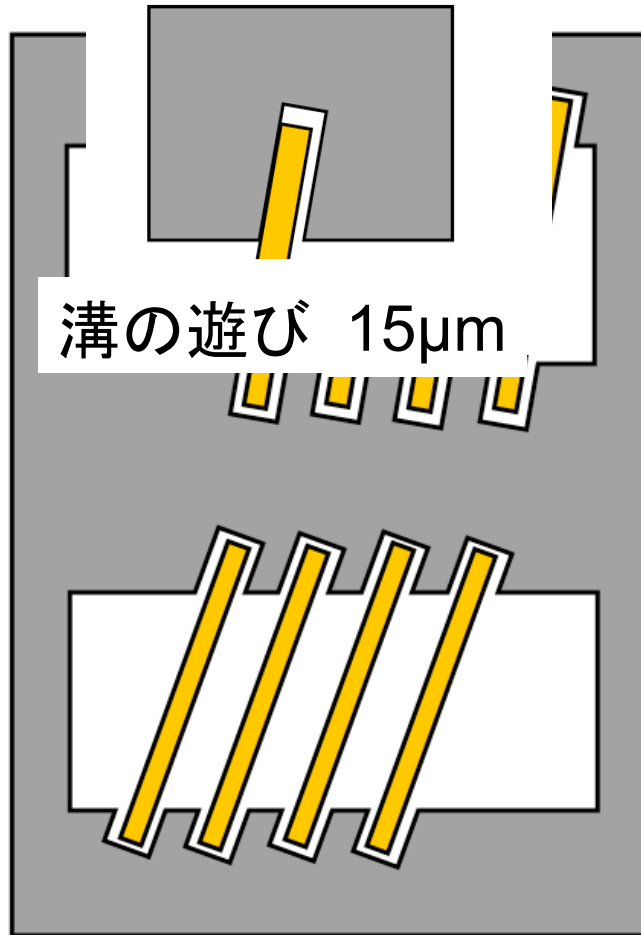


反射鏡のなす角
が変化する

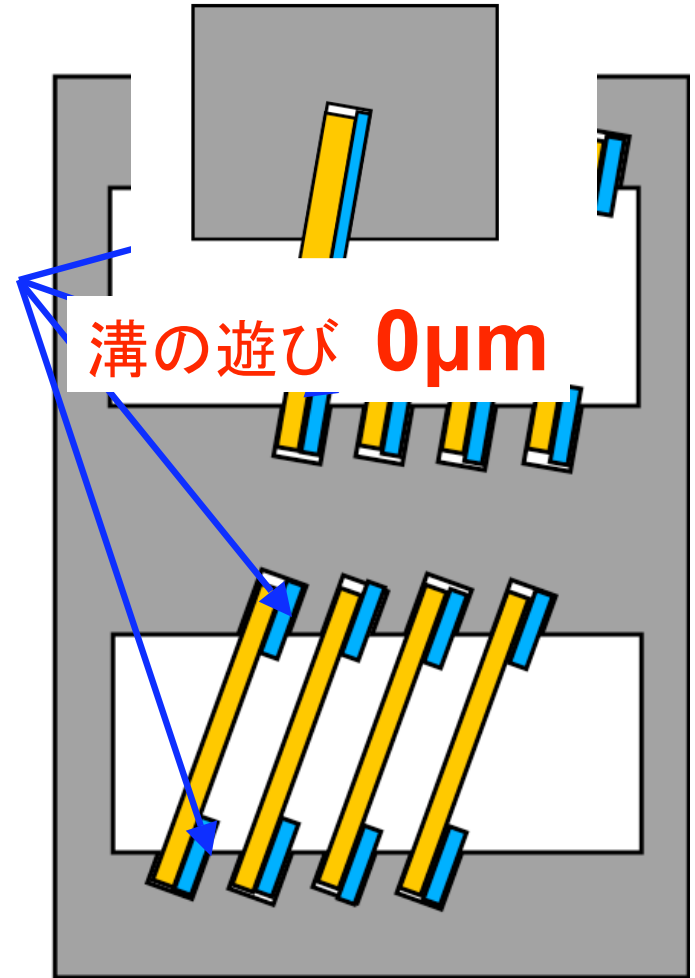
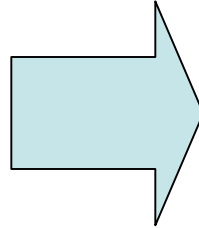


4段一体化
なす角を一定に

アライメントプレート



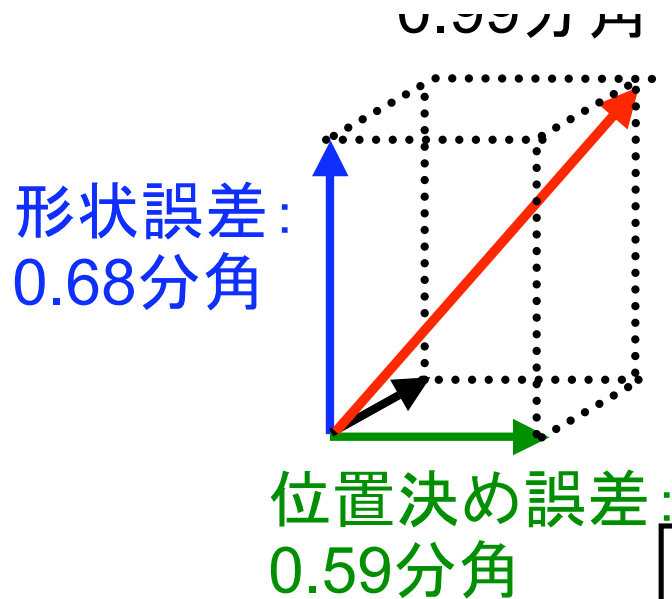
マイラー



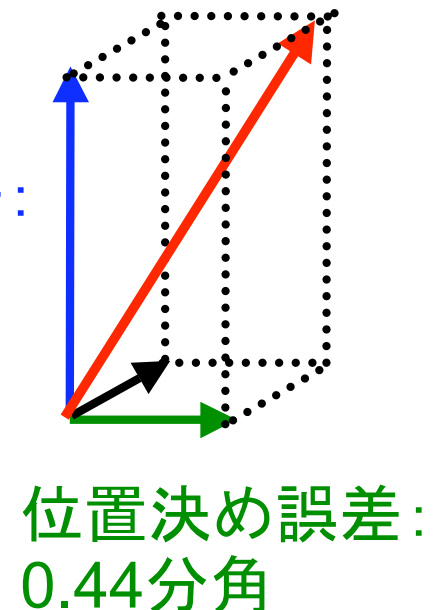
アライメントプレート

問題点

- 反射鏡へのストレスにより形状誤差が悪化(34%)
- 反射鏡の枚数が増えると溝を埋めるのが困難



形状誤差:
0.91分角



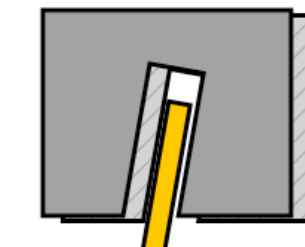
すざくの反射鏡3組

新しいアライメントプレート制作

形状を歪めず
位置決めを改善する

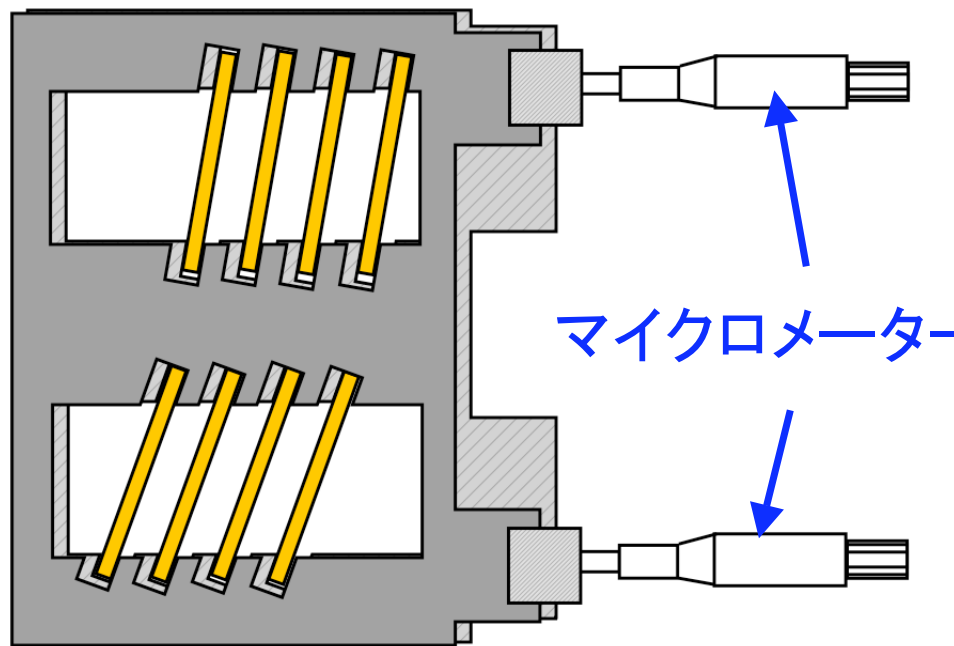
溝の遊び 35 μ m

位置決め誤差
0.59分角を切る

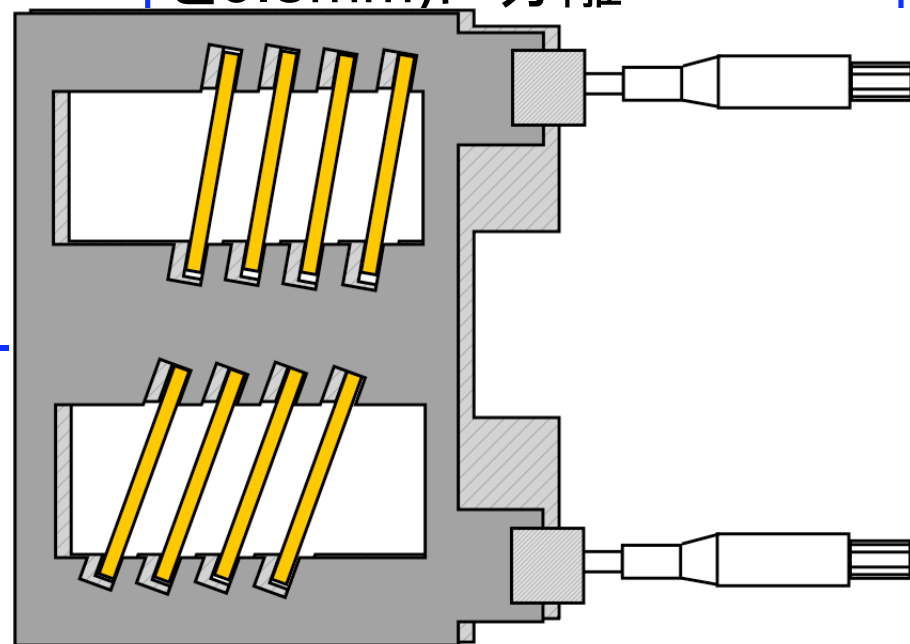


溝の遊び 0 μ m

トプレート(厚さ
2枚(厚さ1.0mm
に分離

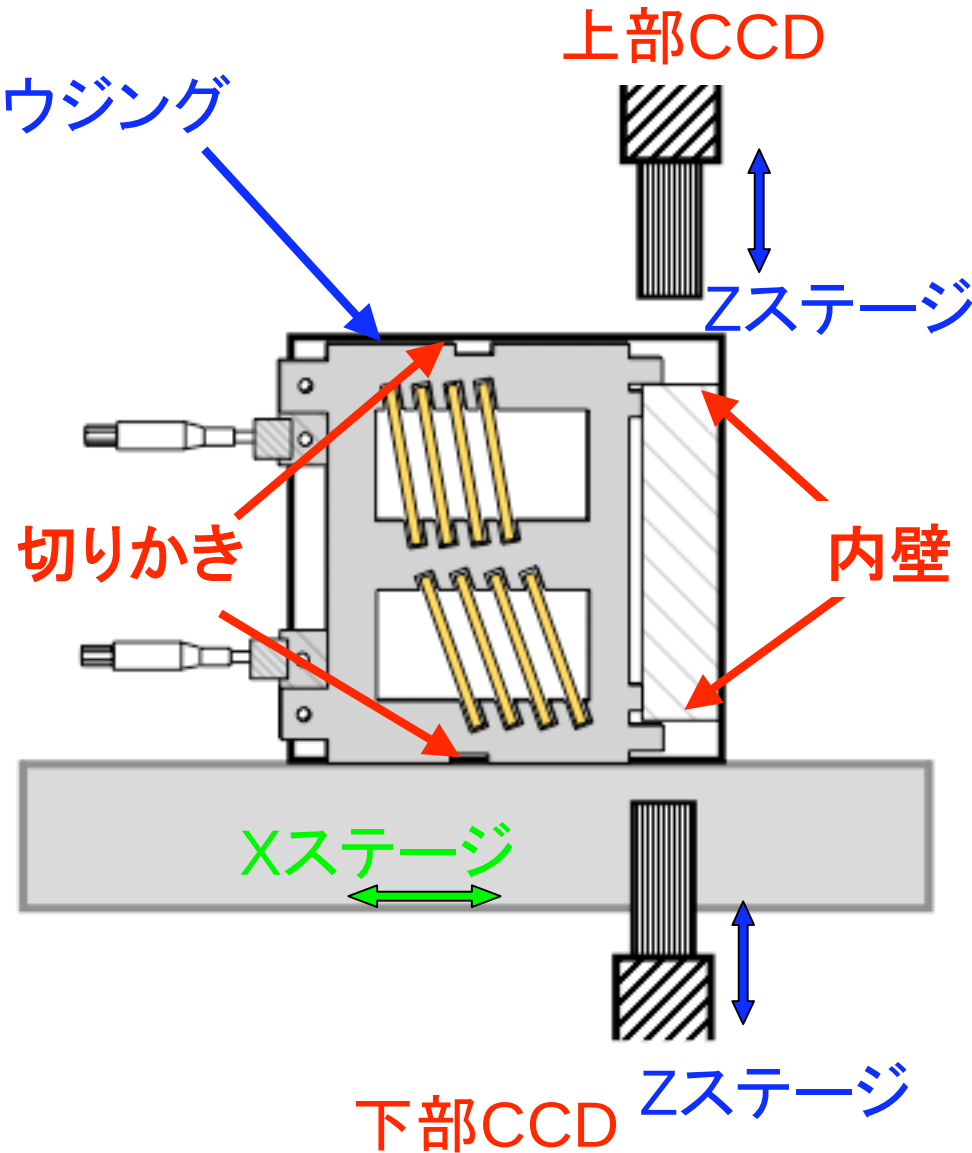
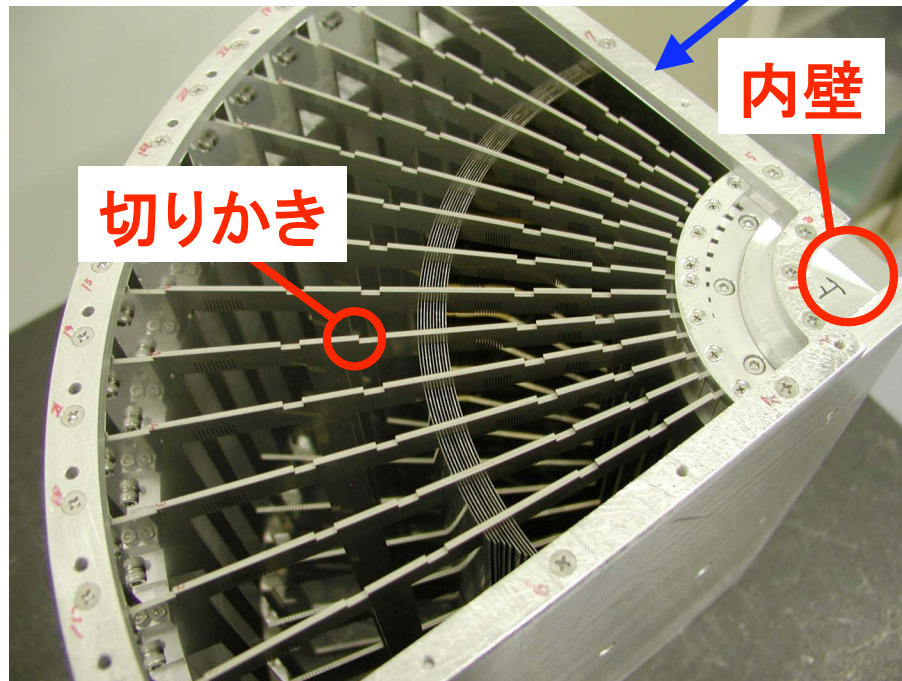


マイクロメーター



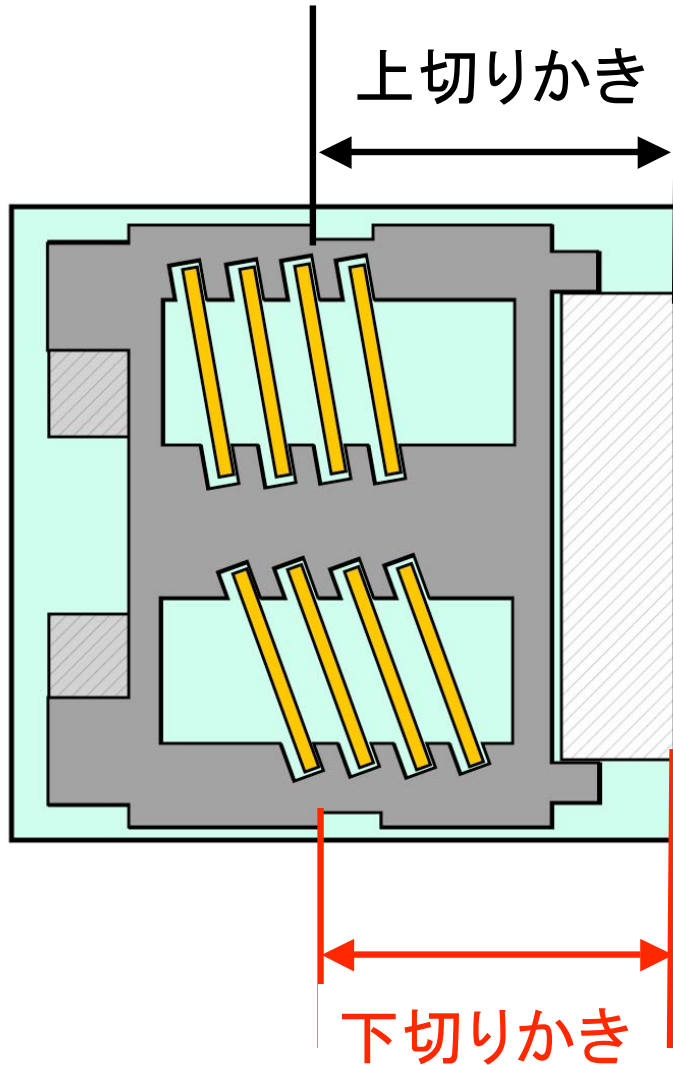
今回は試作した反射鏡10組を使用

アライメントプレートの調整システム

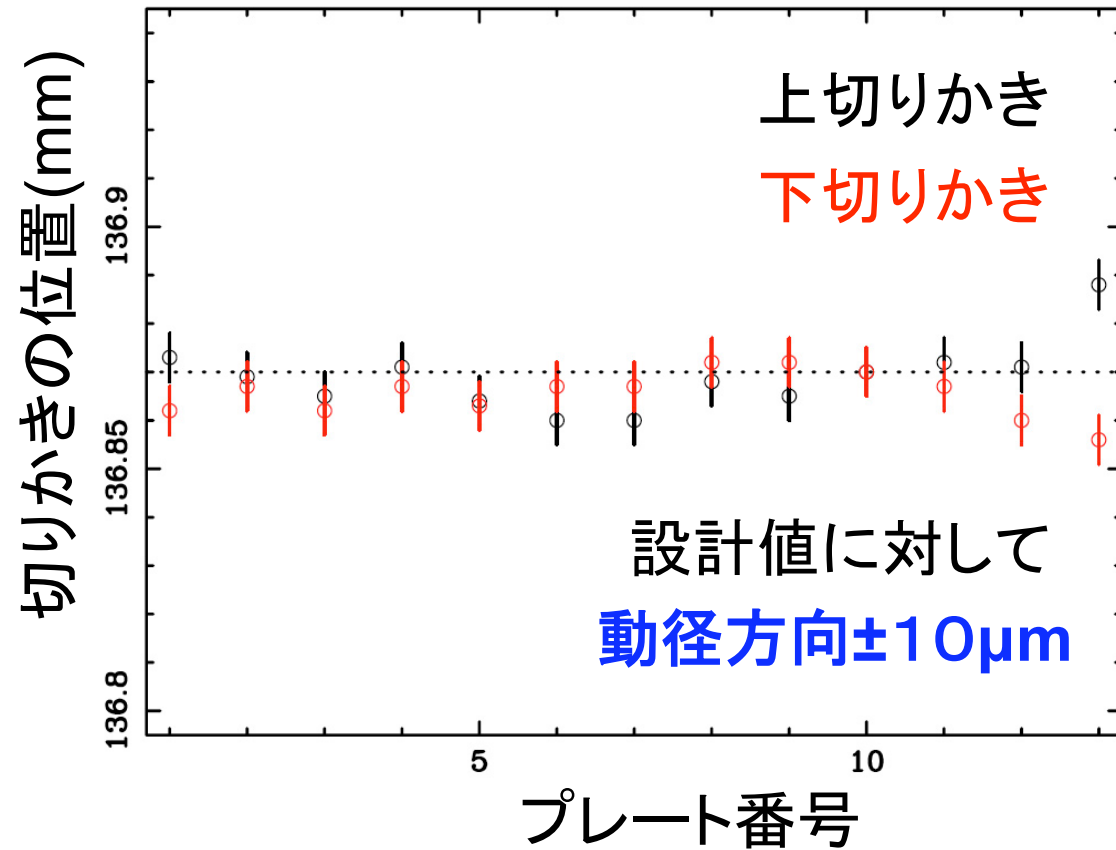


アライメントプレートの位置決め

2枚(厚さ1.0mmと0.5mm)の
プレートをそろえる

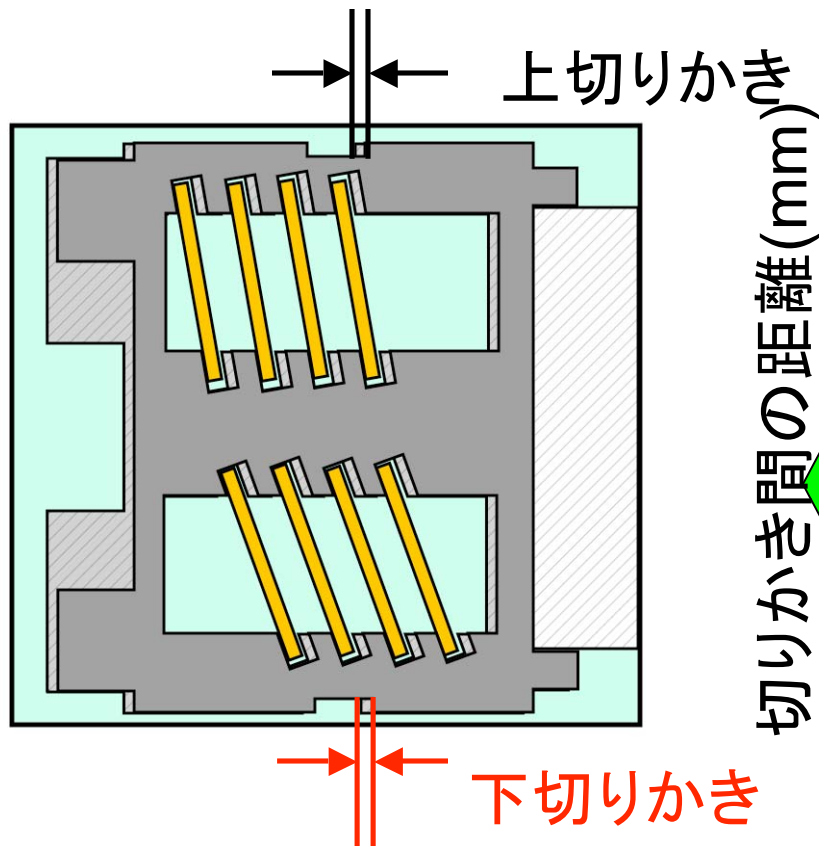


切りかきの望遠鏡中心からの位置



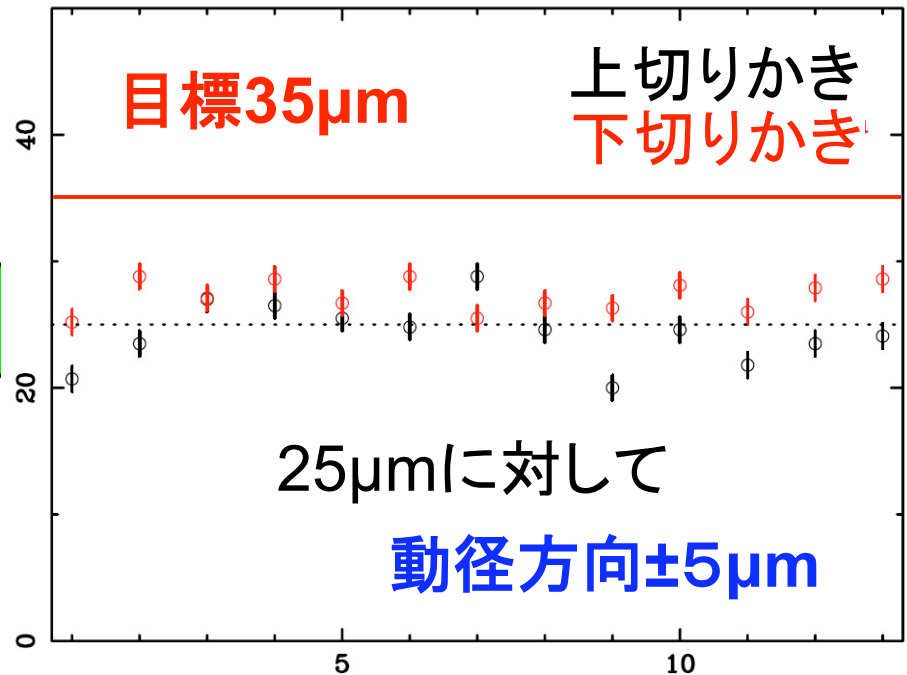
溝の遊び $35\mu\text{m}$

溝幅の調整



厚さ1.0mmと厚さ0.5mmの
プレートの切りかき間距離

厚さ1.0mmと厚さ0.5mmの
厚さ0.5mmのプレートを
内側に35μm埋め込み



溝の遊び10μm

溝幅の調整



厚さ1.0mmと厚さ0.5mmの
溝の切りかき間距離

厚さ1.0mmと厚さ0.5mmの
溝の切りかき間距離

溝の遊び35 μ m(調整前) 溝の遊び10 μ m(調整後)

X線での評価を行った

II

厚さ1.0mmと厚さ0.5mmの
プレートの切りかき間距離

9

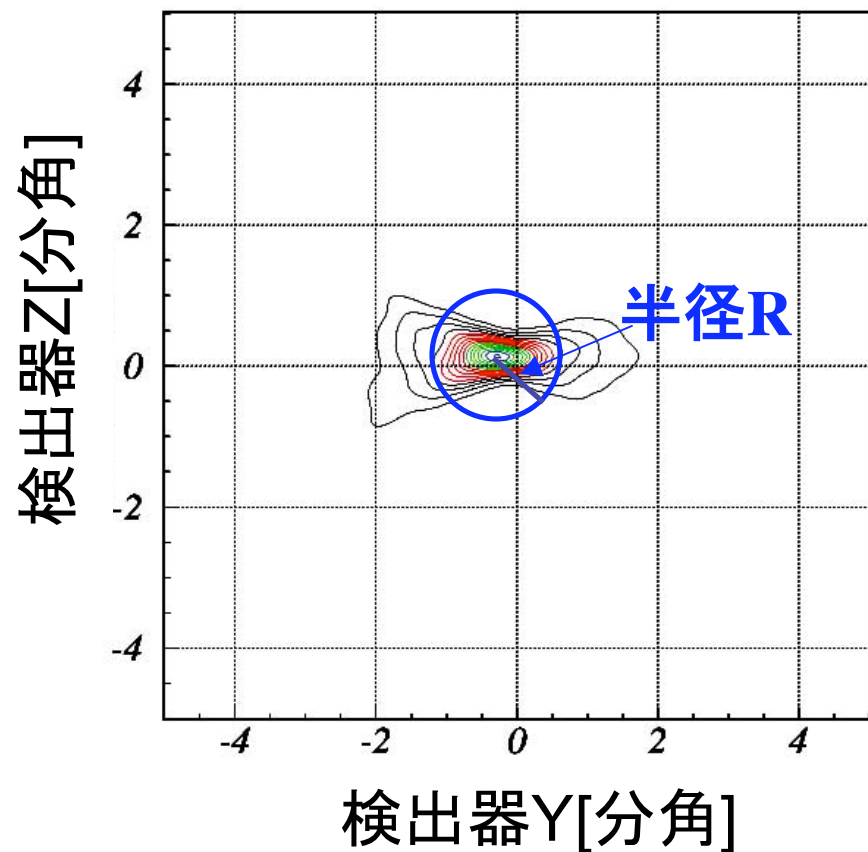
10

プレート番号

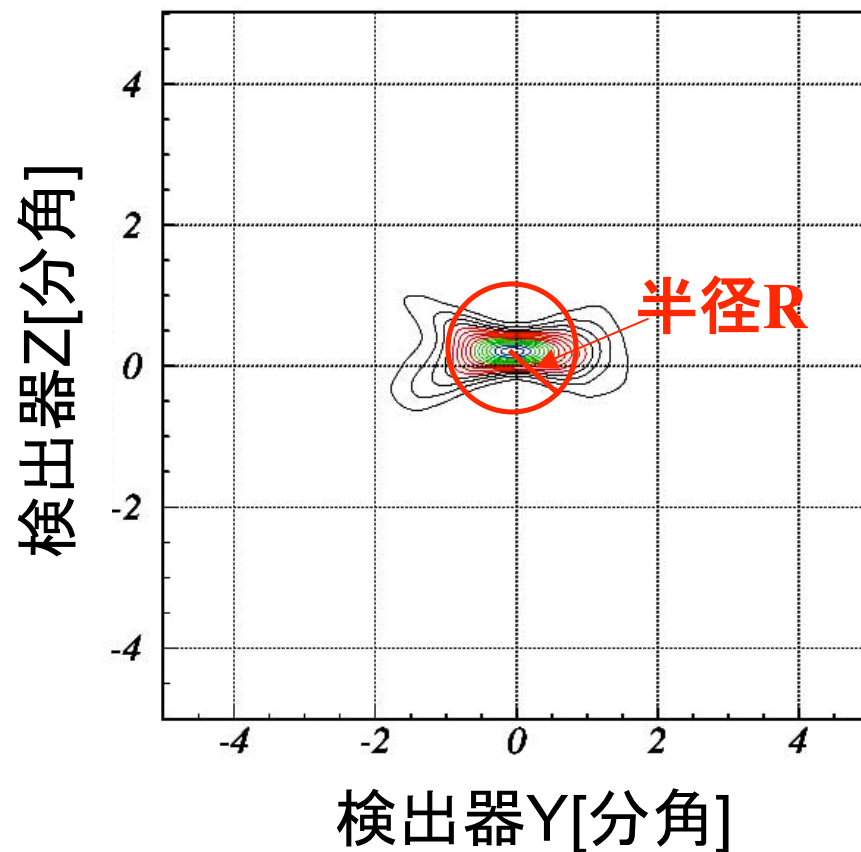
溝の遊び10 μ m

望遠鏡全体のイメージ

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$



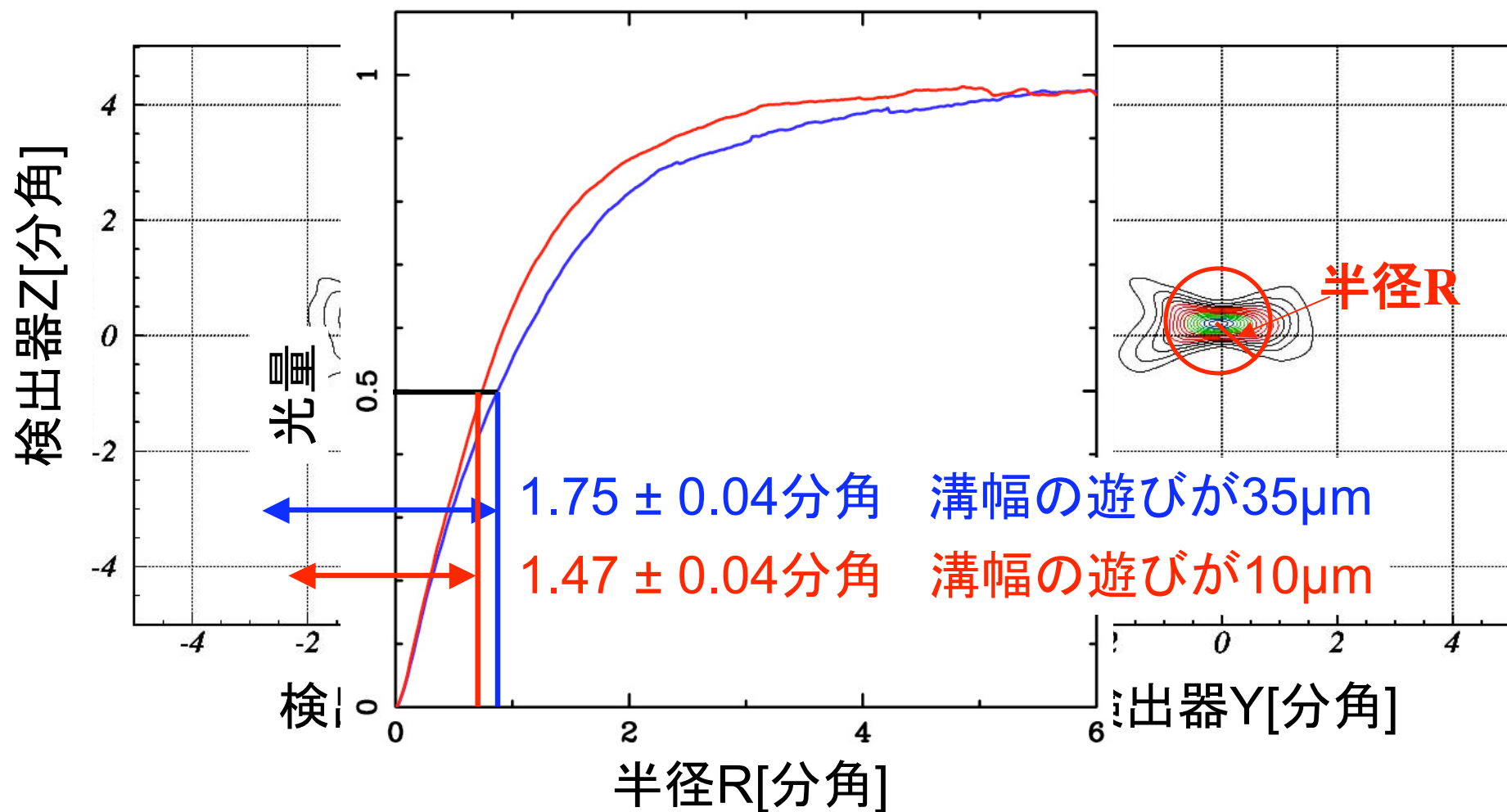
溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$



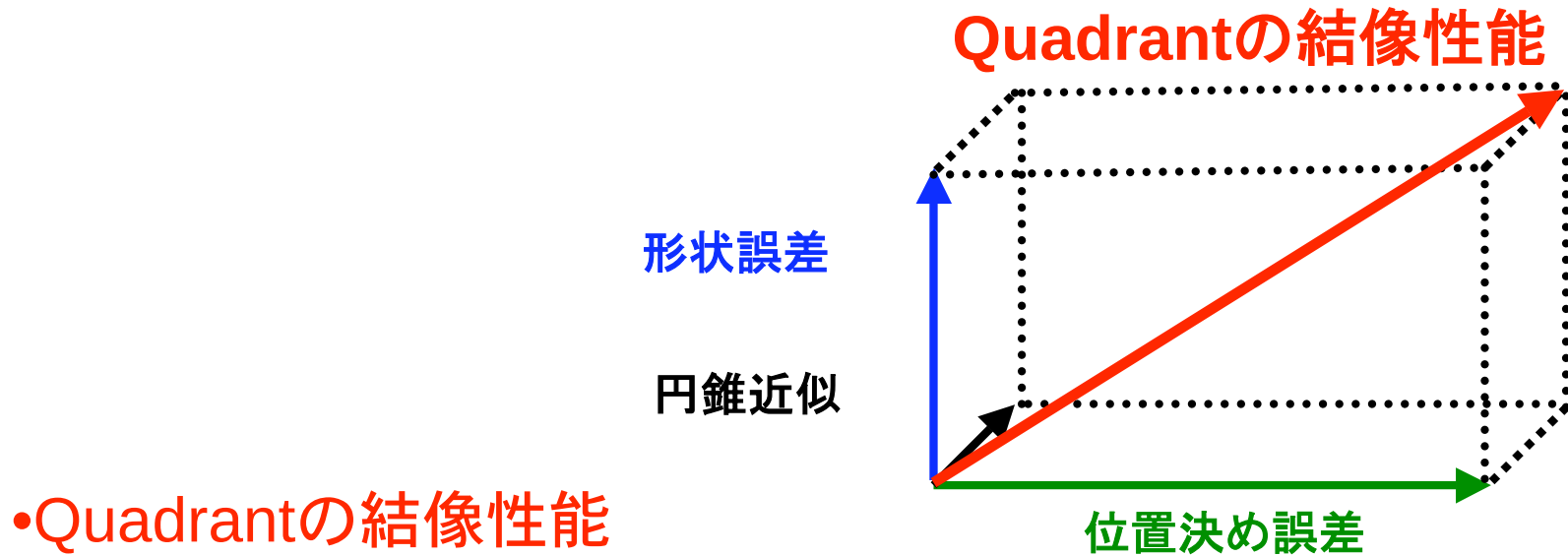
望遠鏡全体のイメージ

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$



結像性能決定要因の分離



- 反射鏡の位置決め誤差

- 反射鏡 1 組ごとの結像位置のばらつき

- 反射鏡 1 組のイメージの広がり

- 円錐近似

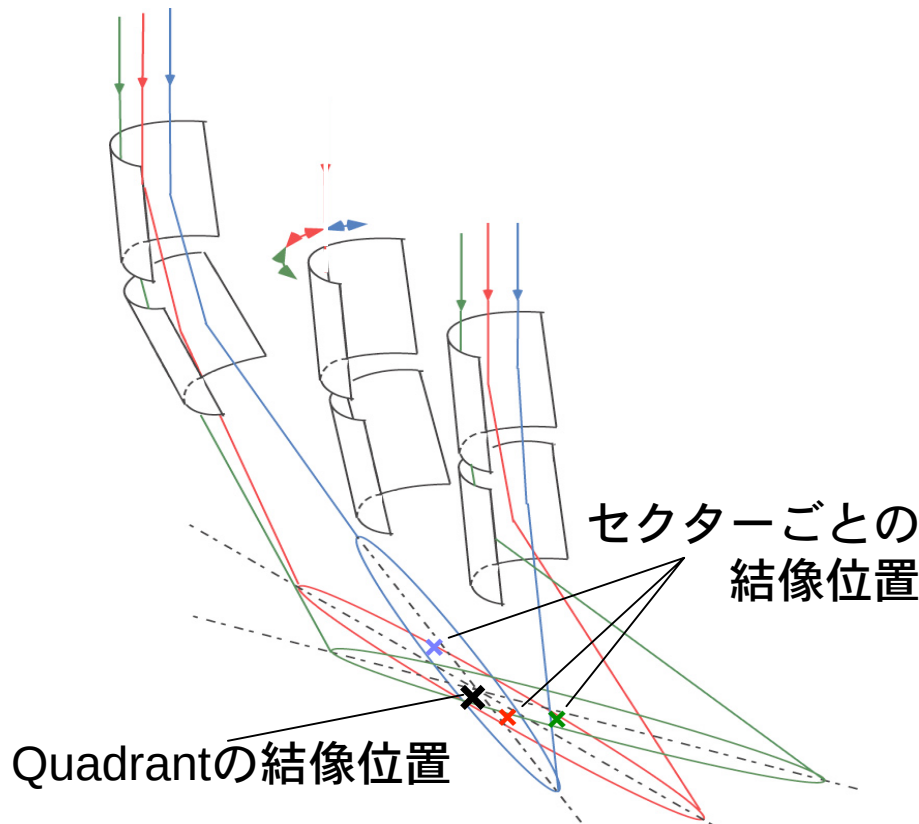
- 形状誤差

位置決め誤差の見積り

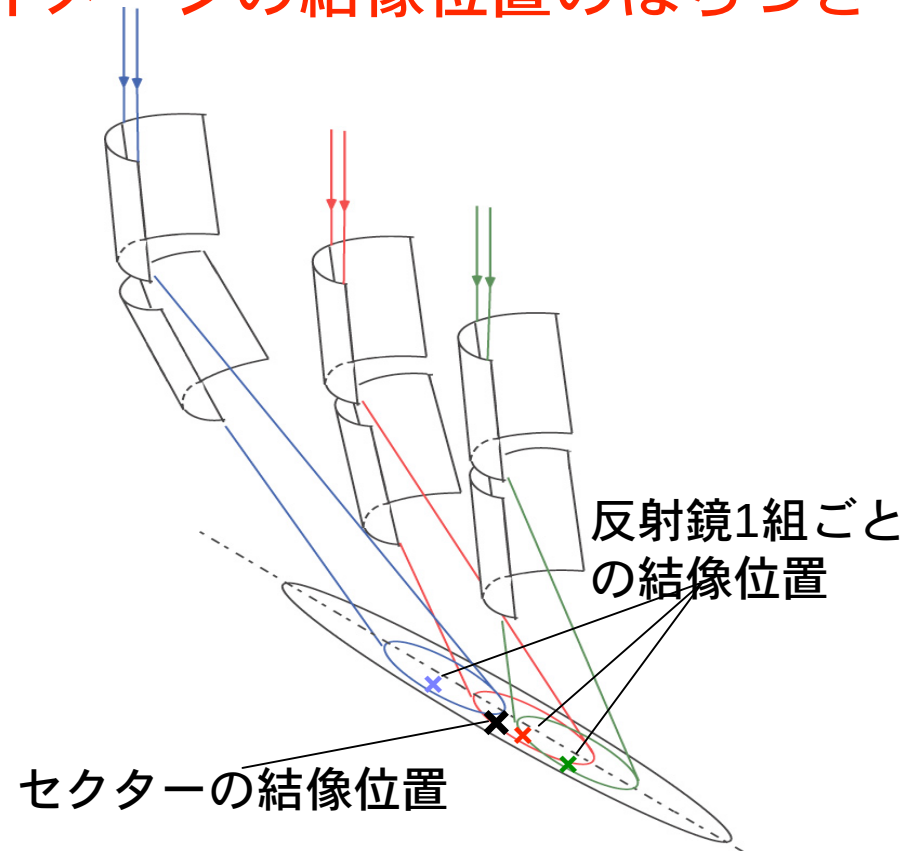
反射鏡 1 組ごとの
結像位置のばらつき

セクター結像位置のばらつき

セクター内での反射鏡 1 組の
イメージの結像位置のばらつき



セクターごとの結像位置のばらつき



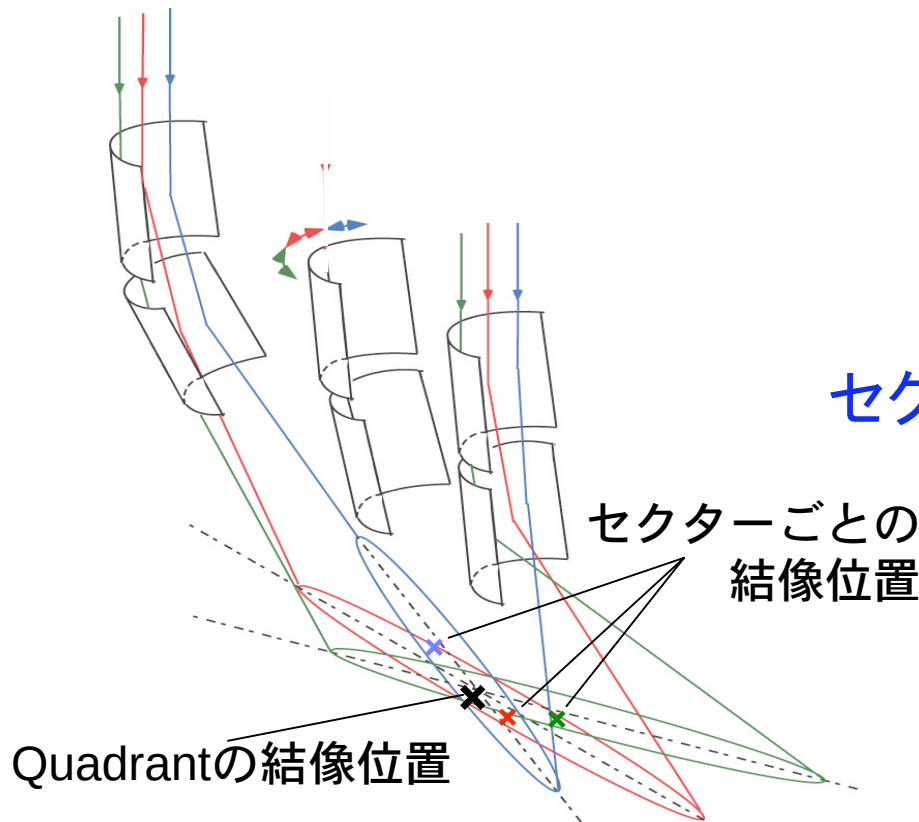
反射鏡 1 組ごとの結像位置のばらつき

位置決め誤差の見積り

反射鏡 1 組ごとの
結像位置のばらつき

セクター結像位置のばらつき

セクター内での反射鏡 1 組の
イメージの結像位置のばらつき

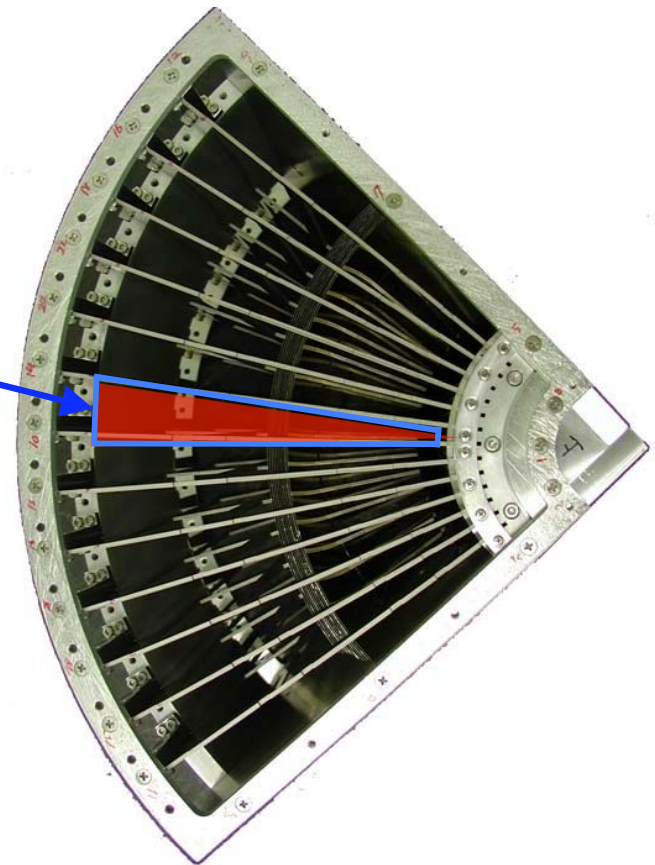


セクターごとの結像位置のばらつき

セクター

セク

反射



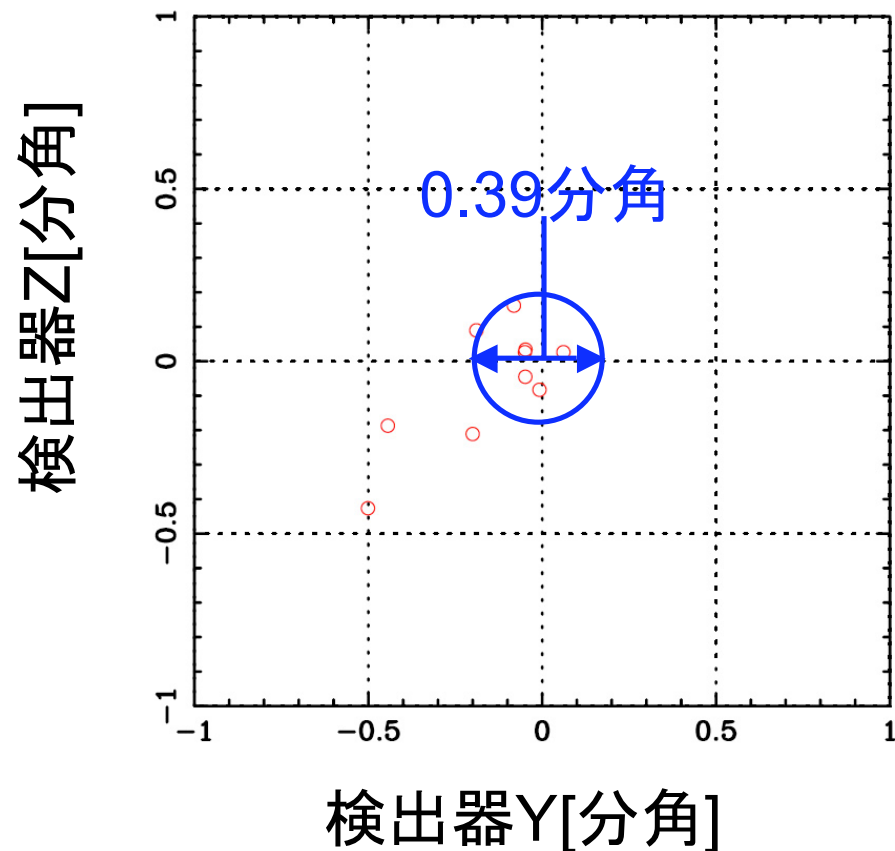
ごと

つき

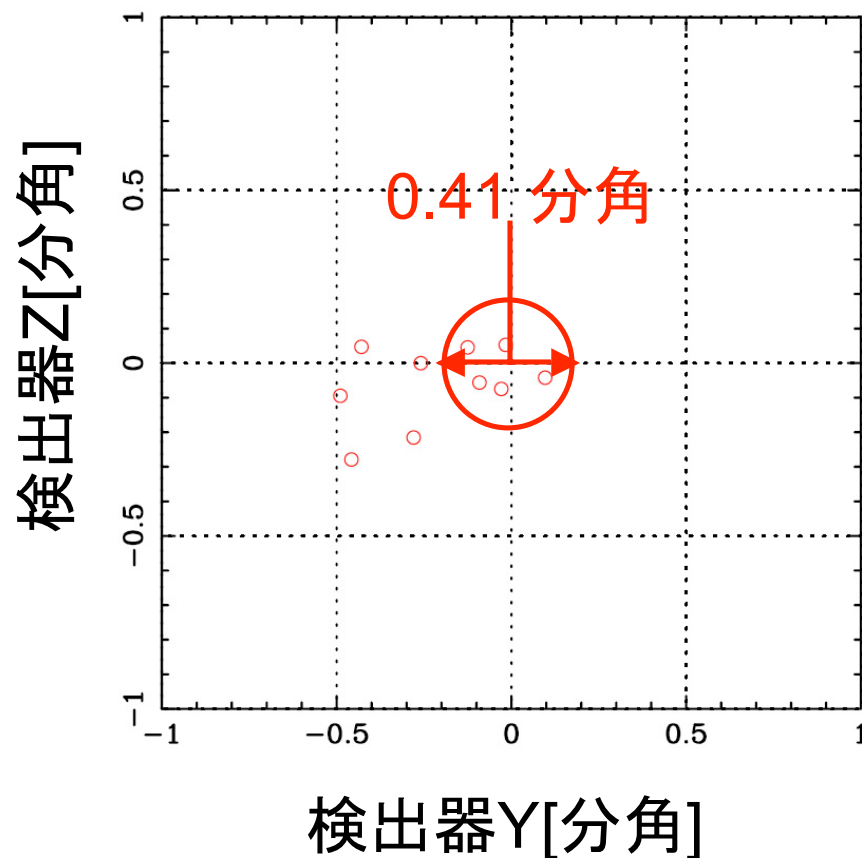
位置決め誤差(セクターイメージ)

セクター結像位置のばらつき

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$



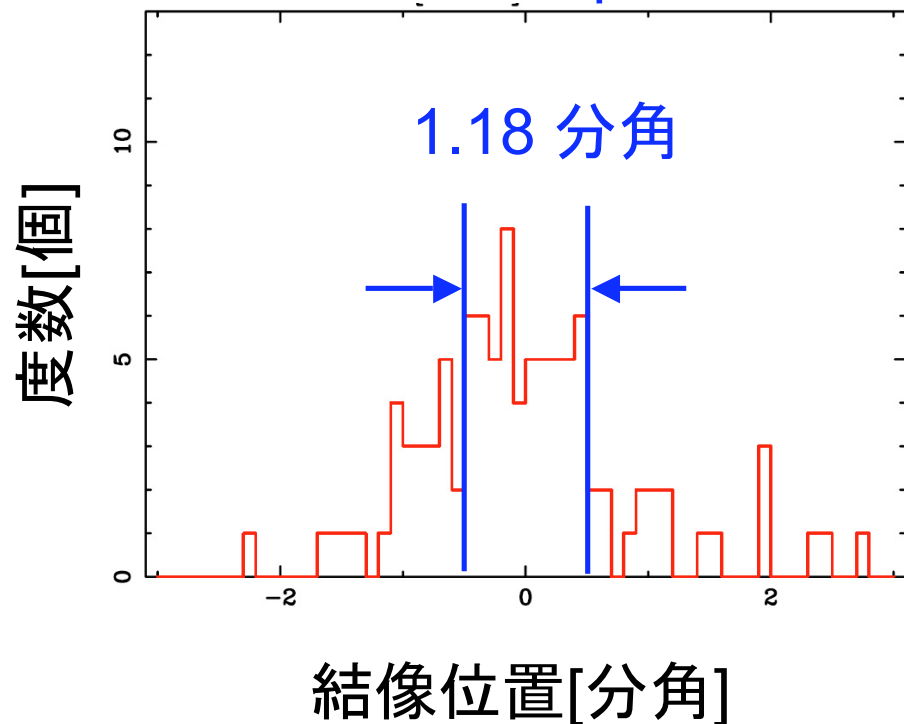
溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$



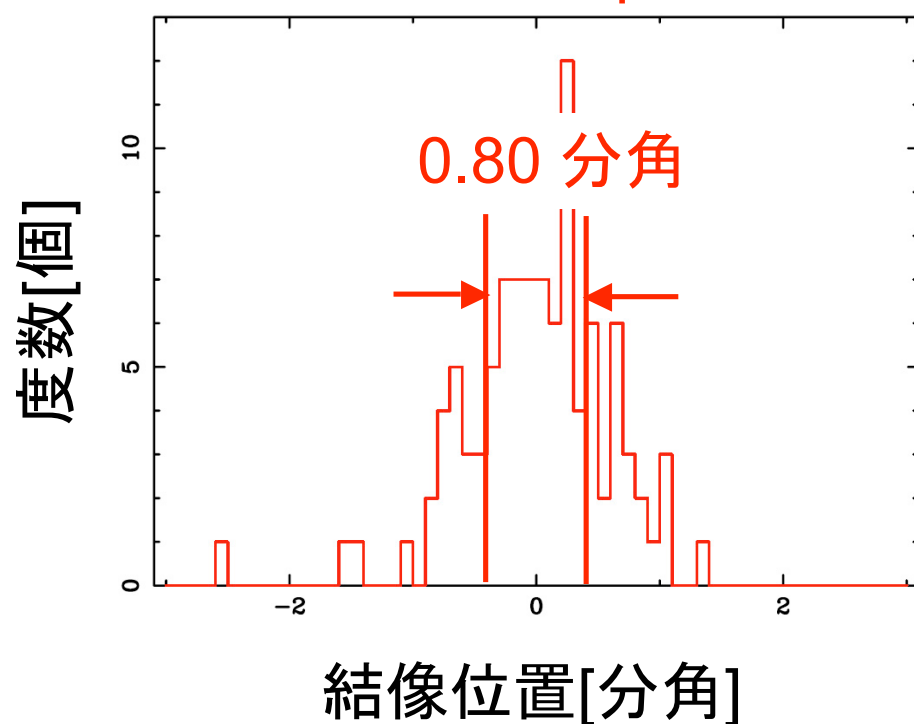
位置決め誤差(反射鏡1組ごとのイメージ)

反射鏡1組ごとの結像位置のばらつき

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$



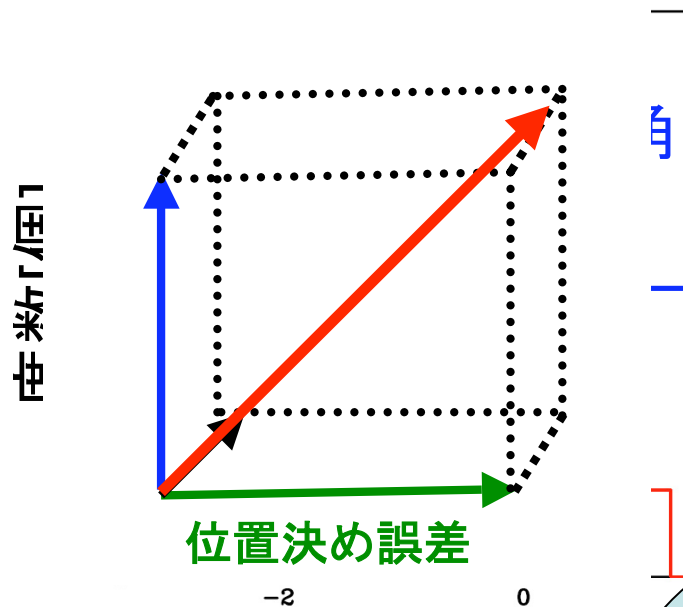
溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$



位置決め誤差(反射鏡1組ごとのイメージ)

反射鏡1組ごとの結像位置のばらつき

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

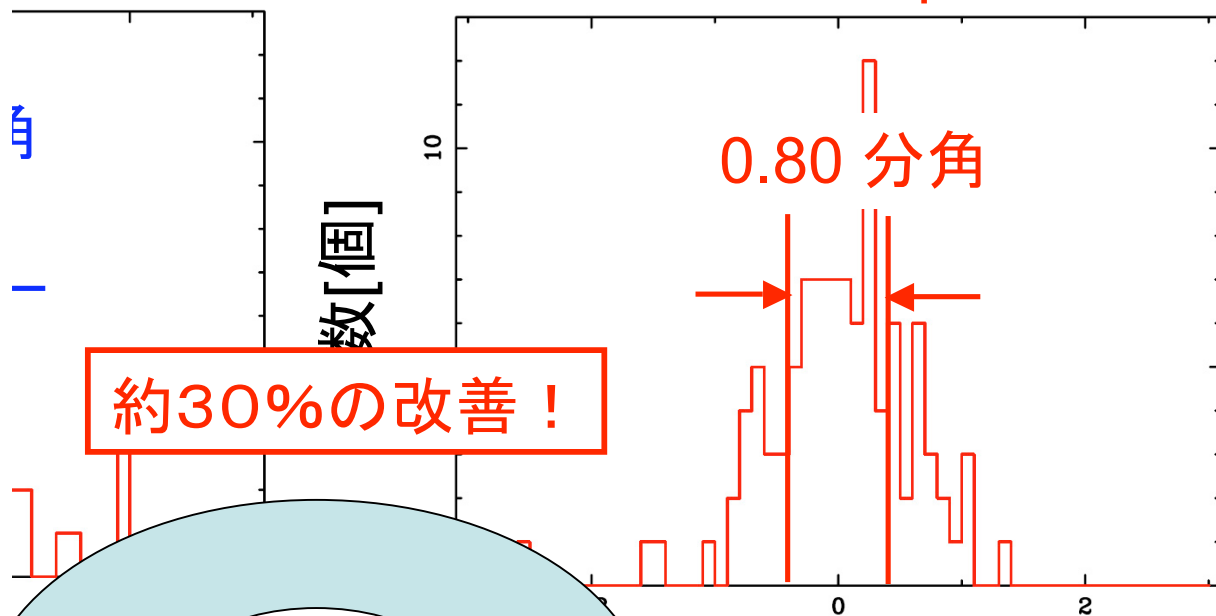


位置決め誤差

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

1.24 分角

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$



0.80 分角

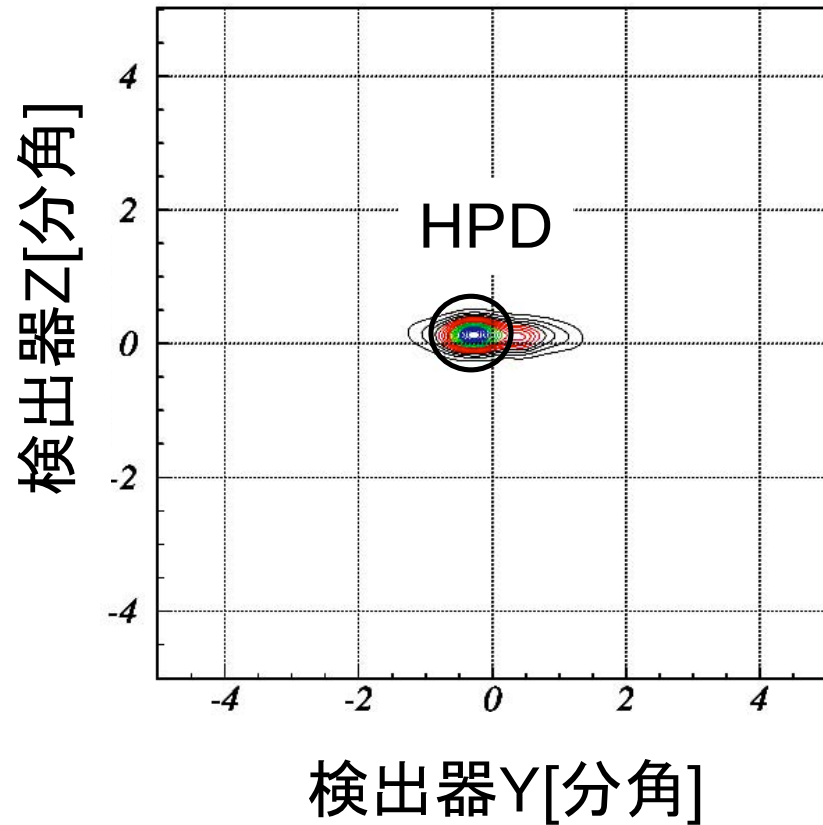
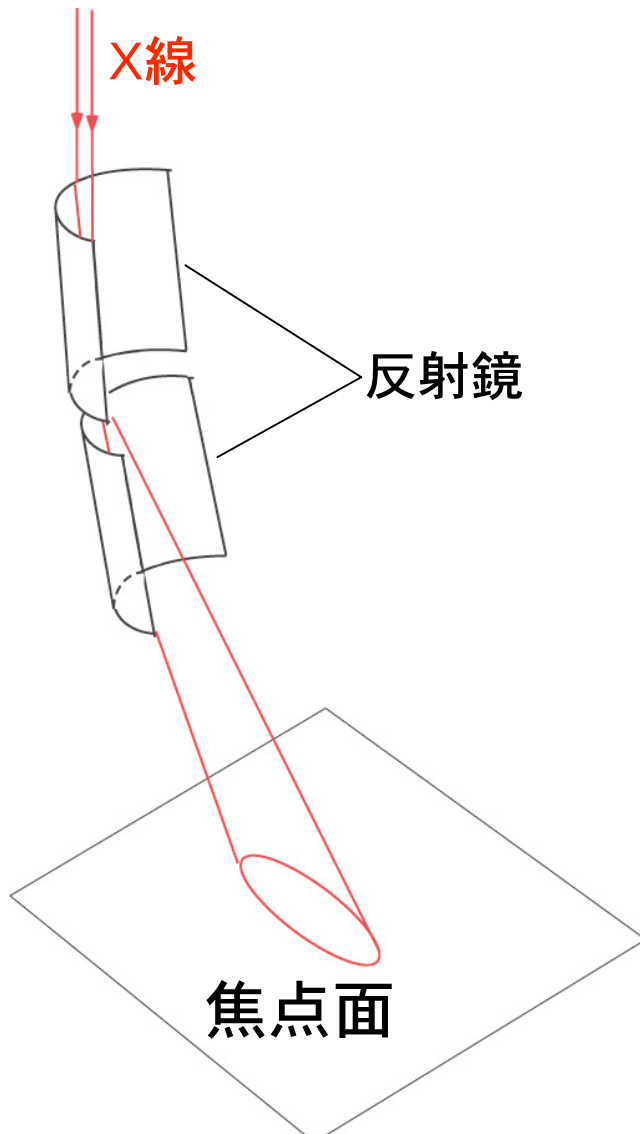
結像位置[分角]

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$

0.90 分角

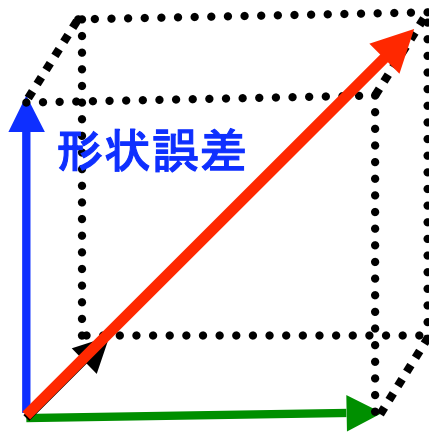
形状誤差を見積り

反射鏡1組のイメージの広がり

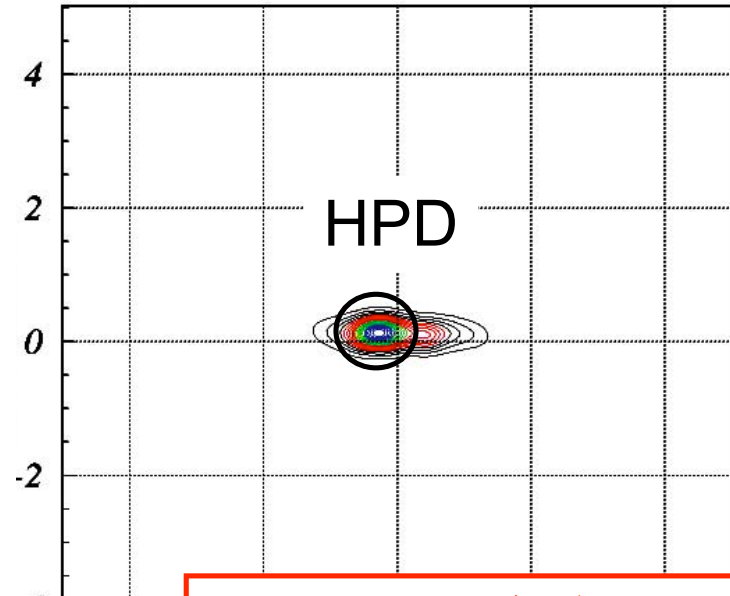


形状誤差を見積り

反射鏡1組のイメージの広がり



検出器Z[分角]



溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

1.22 分角

形状誤差

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

1.18 ± 0.04 分角

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$

1.30 分角

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$

1.26 ± 0.04 分角

まとめ

- アライメントプレートを改良(厚さ0.5mmと1.0mm)
- マイクロメーターによる調整法を確立
- 初めて自分たちで制作した反射鏡を10組使用



形状を歪めることなく
位置決め誤差を改善

溝幅の遊びが $35\mu\text{m}$

望遠鏡:
1.75分角

溝幅の遊びが $10\mu\text{m}$

望遠鏡:
1.47分角

形状誤差:
1.26分角

約30%の改善

形状誤差:
1.18分角

位置決め誤差:
1.24分角

位置決め誤差:
0.90分角



問題点とその原因

問題点

- 溝幅の調整が $10\mu\text{m}$ までしか行えなかった
- 位置決め誤差の改善が 0.90 分角に留まった

原因

- 厚さ 0.5mm のアライメントプレートの溝が設計値より $\sim 7\mu\text{m}$ 広い
- 厚さ $185\mu\text{m}$ の反射鏡が存在(設計値は $170\mu\text{m}$)
- 反射鏡に厚さムラ($170 \pm 7\mu\text{m}$)

実際は $17\mu\text{m}$ の
遊び

溝が $7\mu\text{m}$ 広い

溝幅調整を制限

$185\mu\text{m}$ の反射鏡

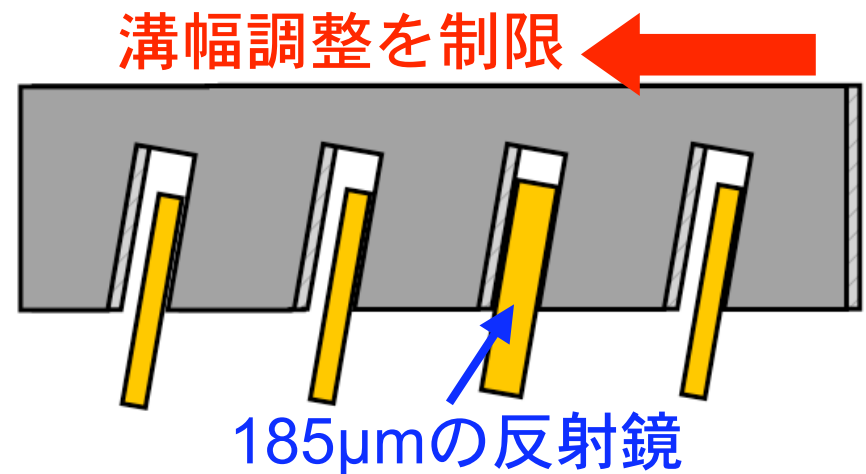
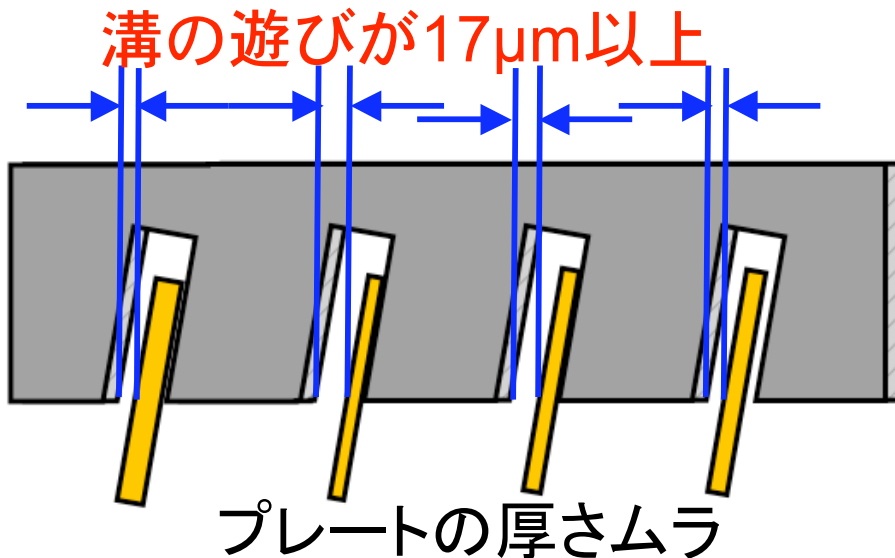
問題点とその原因

問題点

- 溝幅の調整が $10\mu\text{m}$ までしか行えなかった
- 位置決め誤差の改善が 0.90 分角に留まった

原因

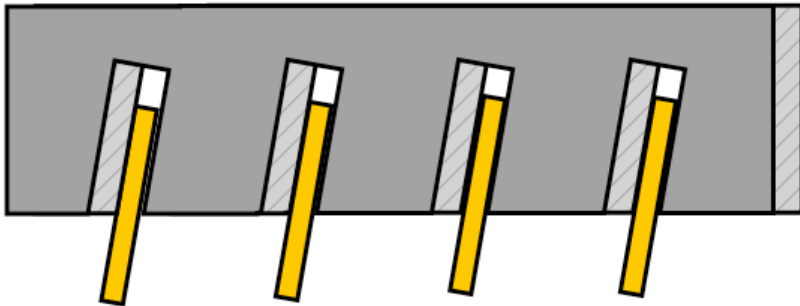
- 厚さ 0.5mm のアライメントプレートの溝が設計値より $\sim 7\mu\text{m}$ 広い
- 厚さ $185\mu\text{m}$ の反射鏡が存在(設計値は $170\mu\text{m}$)
- 反射鏡に厚さムラ($170 \pm 7\mu\text{m}$)



今後の展望

- 厚さムラのない反射鏡作り
- 厚い反射鏡を除去する

調整の利点を十分発揮



位置決め誤差の更なる向上

セクター内の1組のイメージのばたつき

