



# ヤトイがついた大型鏡面の三点支持研削加工

橋ヶ谷武志<sup>1</sup> 栗田光樹夫<sup>1,2</sup> 高橋啓介<sup>2</sup>

1:京都大学, 2:(株)ロジストラボ

# 背景



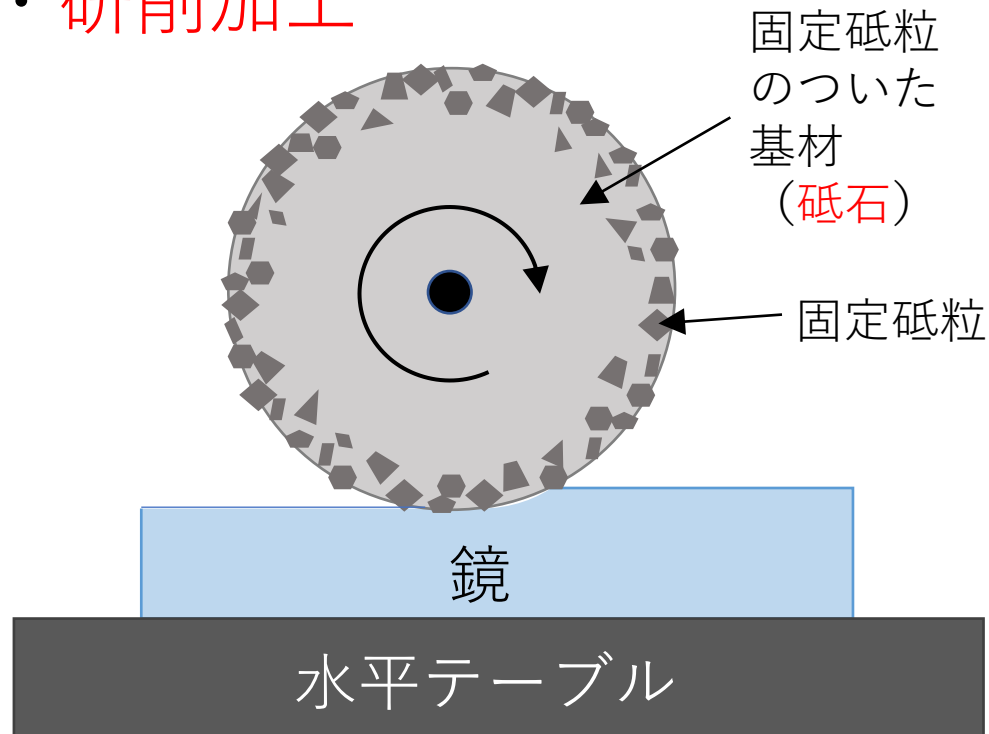
- せいめい望遠鏡の姉妹機をインドネシアに建設中
- そこに取り付ける鏡の加工方法について研究

せいめい望遠鏡



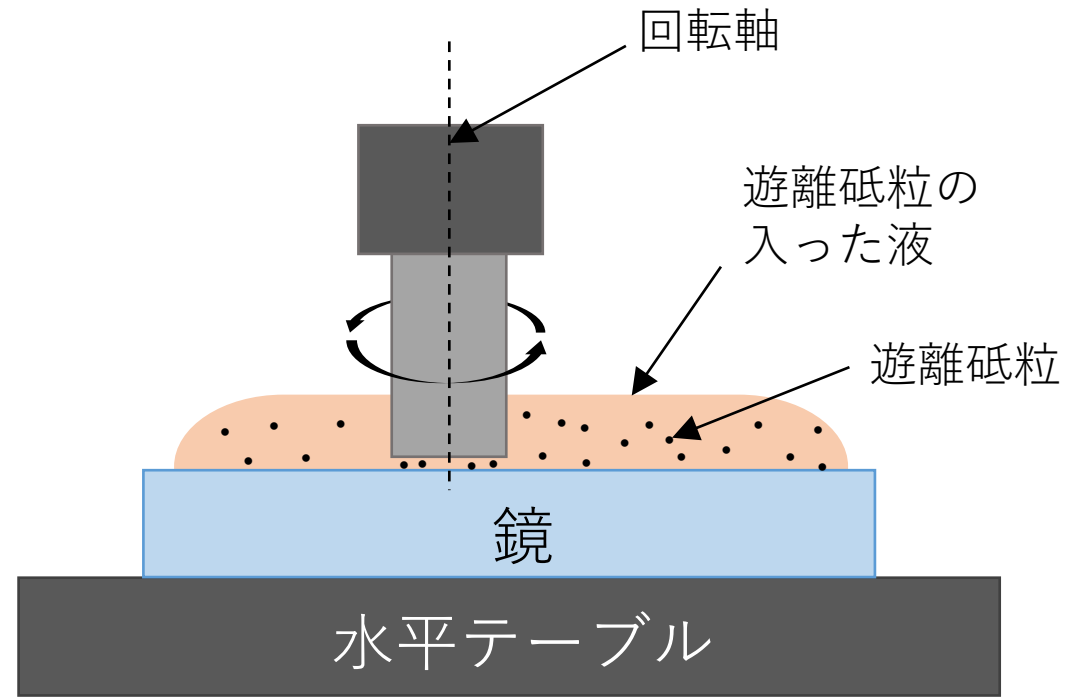
# 背景（一般的な鏡の加工方法）

## ・研削加工



- ・加工能率が良い
- ・加工精度が悪い

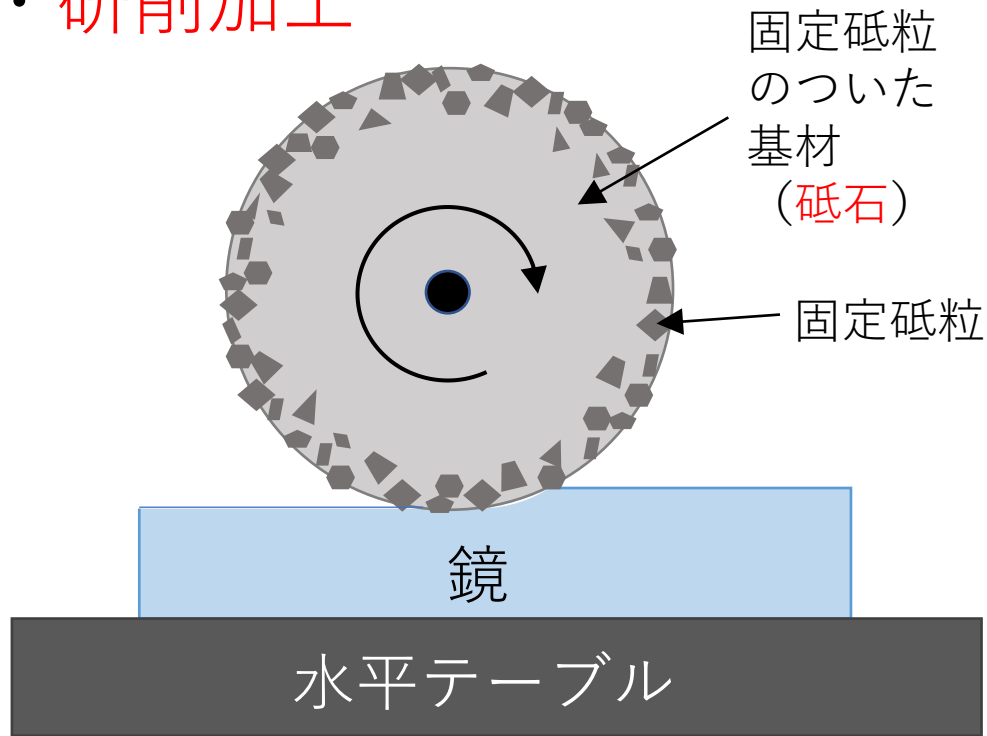
## ・研磨加工



- ・加工能率が悪い
- ・加工精度が良い

# 背景（一般的な鏡の加工方法）

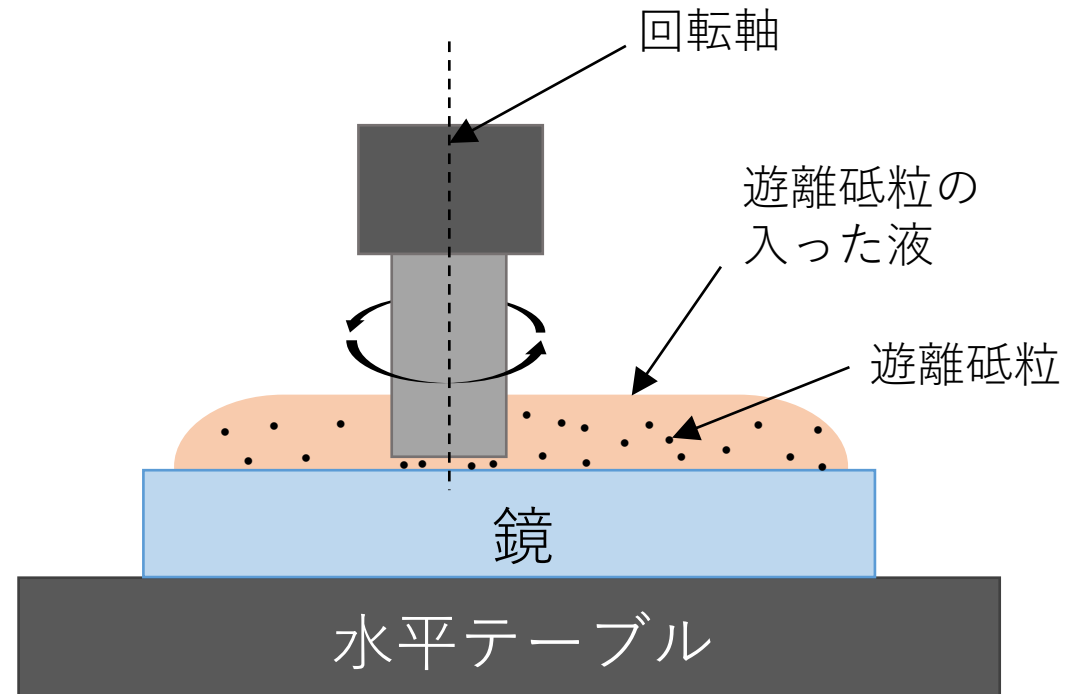
## ・研削加工



- ・加工能率が良い
- ・加工精度が悪い

研削加工で高い加工精度

## ・研磨加工

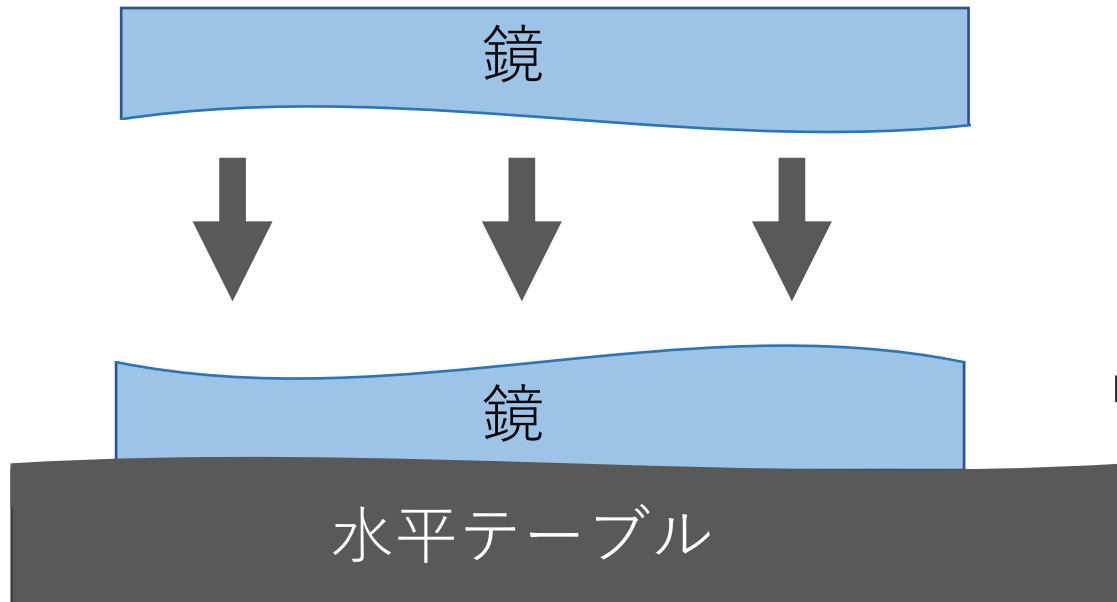


- ・加工能率が悪い
- ・加工精度が良い

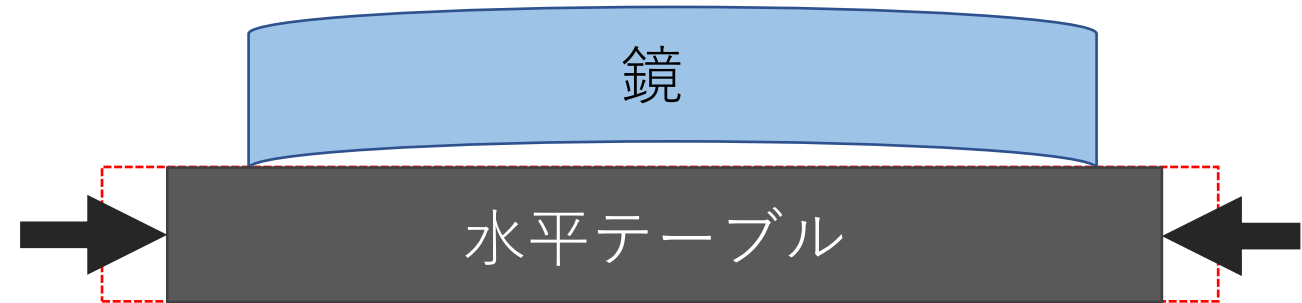
⇒ 研磨時間を短縮

# 水平テーブル固定の誤差要因

設置時の歪み



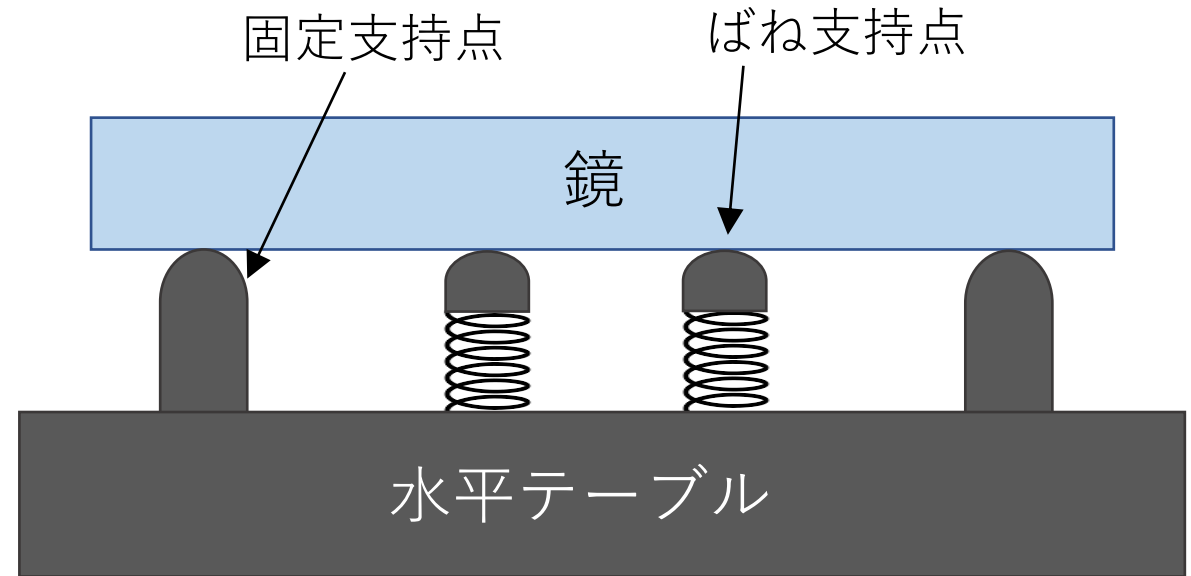
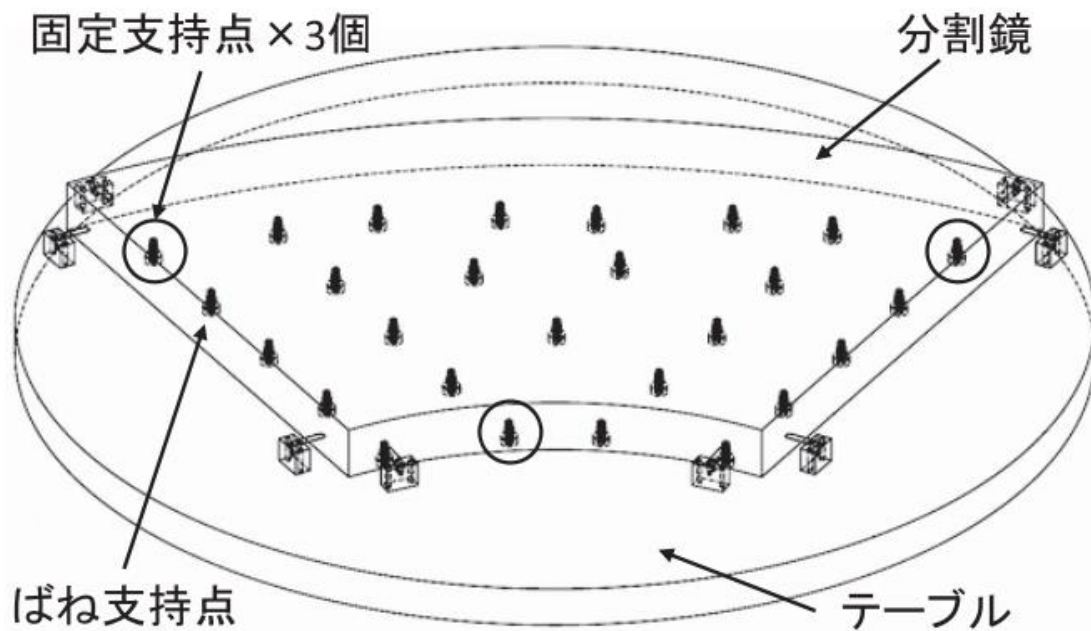
テーブルと鏡の熱膨張率の差



薄い鏡では特に深刻

# 背景（せいめい望遠鏡の鏡加工）

- 三点支持による研削



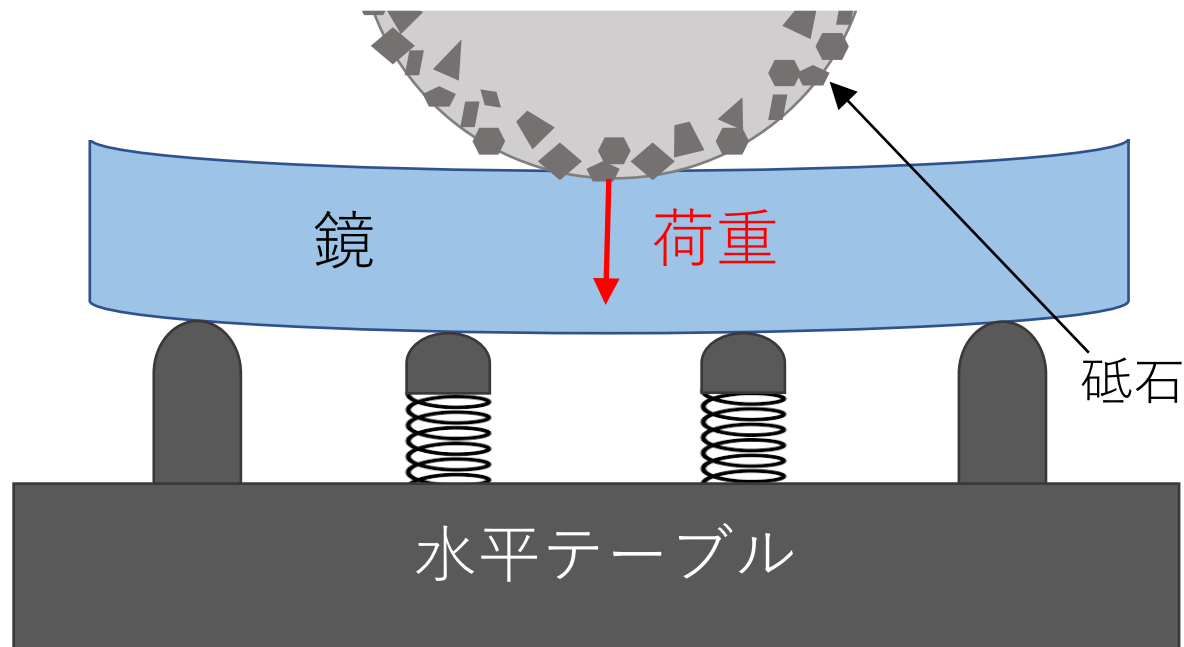
⇒ 接触由来の誤差をなくすために  
三点で支持

せいめい望遠鏡分割鏡の加工時の支持方法

出典 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/56/6/56\\_445/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/56/6/56_445/_pdf/-char/ja))

# 背景（せいめい望遠鏡の鏡加工）

- 三点支持による研削



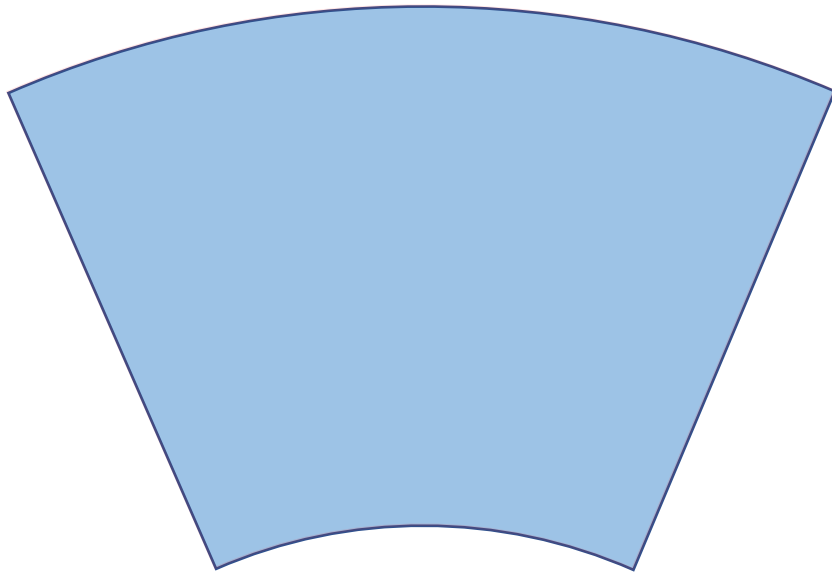
⇒ 砥石の荷重により鏡が変形

⇒ 変形した分を削り損ねる

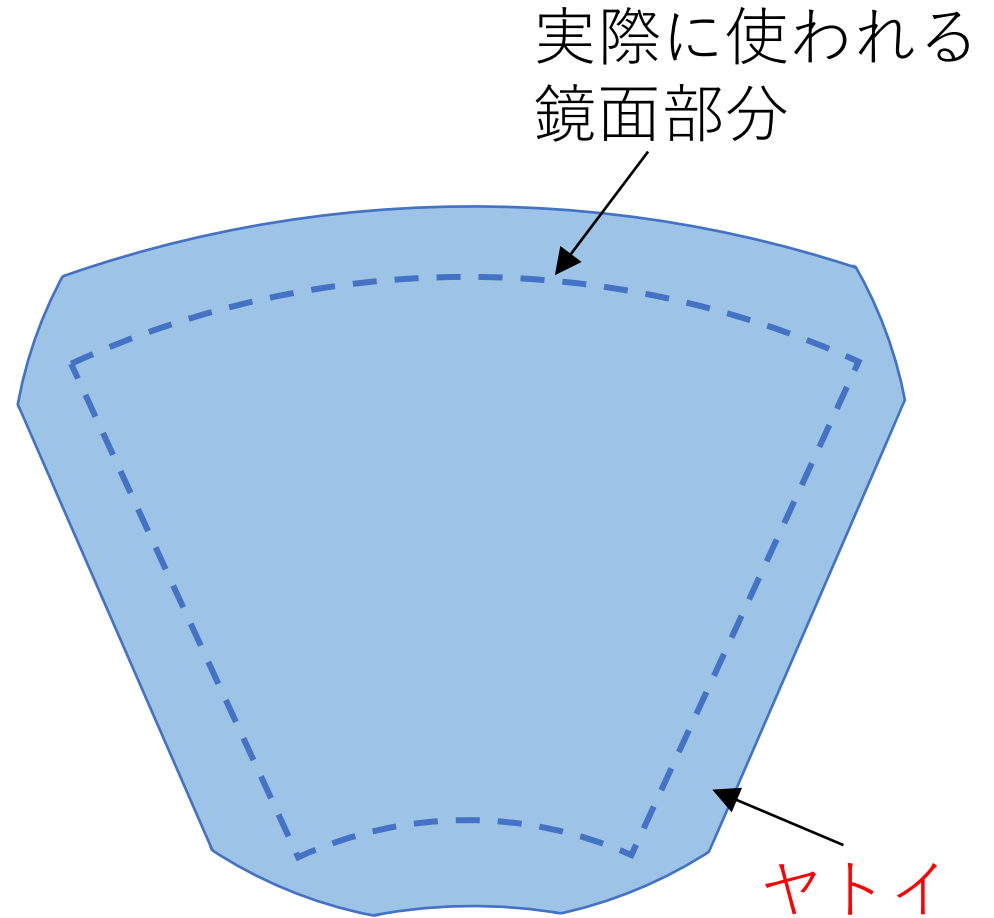
有限要素法解析により変形量を予測しその分を追加で削る  
以下これを「**補正研削**」と呼ぶ

従来の研削の誤差： $5\sim 10\ \mu\text{m}$  → 三点支持での研削の誤差： $< 1\ \mu\text{m}$

# 問題と解決策



縁ダレが発生した

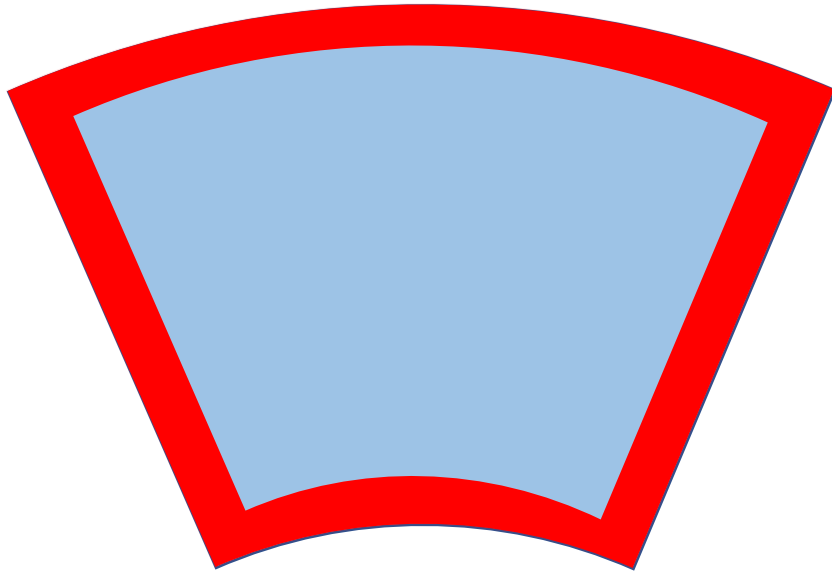


ヤトイをつけた

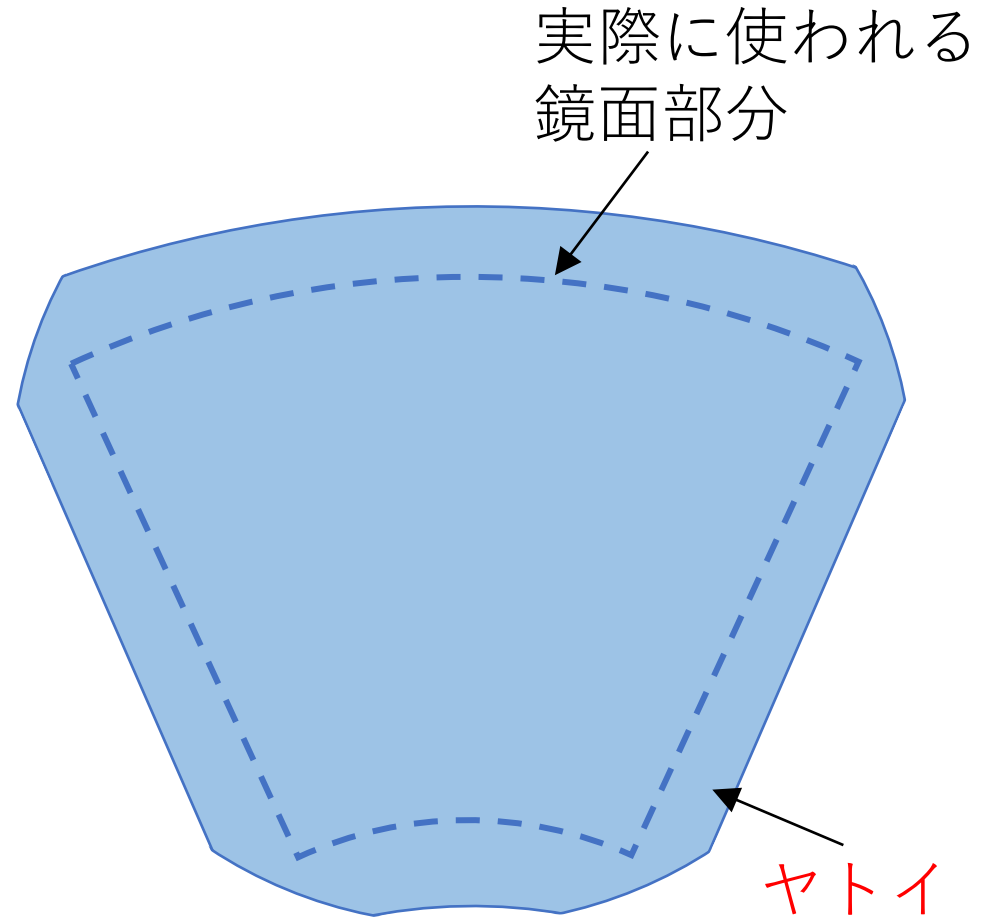
⇒ヤトイがついた鏡に対して三点支持研削を検討



# 問題と解決策



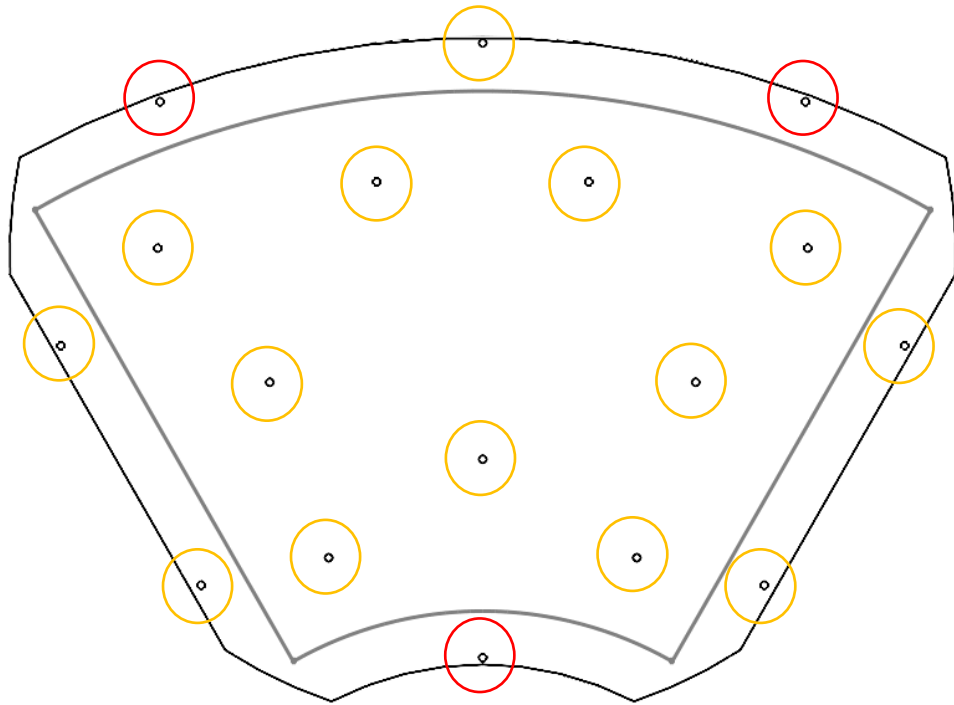
縁ダレが発生した



ヤトイをつけた

⇒ヤトイがついた鏡に対して三点支持研削を検討

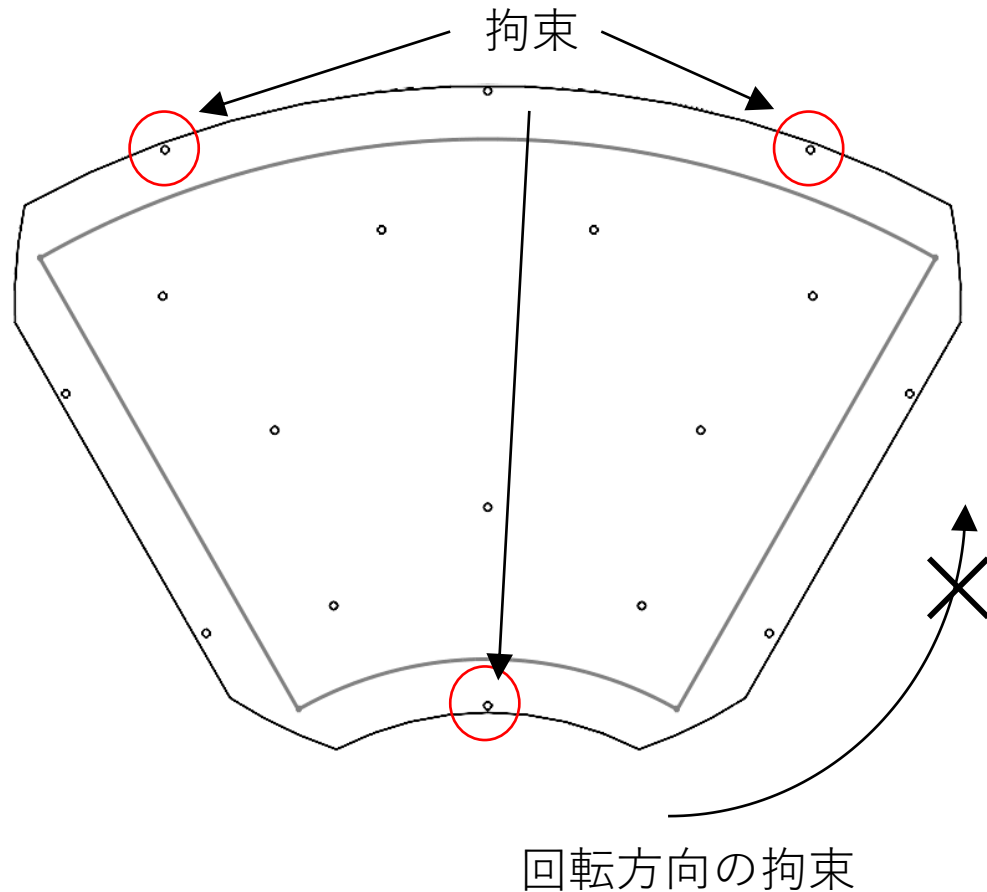
# 支持点位置の検討



ヤトイをつけた分割鏡の支持点位置  
赤丸が固定支持点3つ、黄色丸がばね支持点を表す。

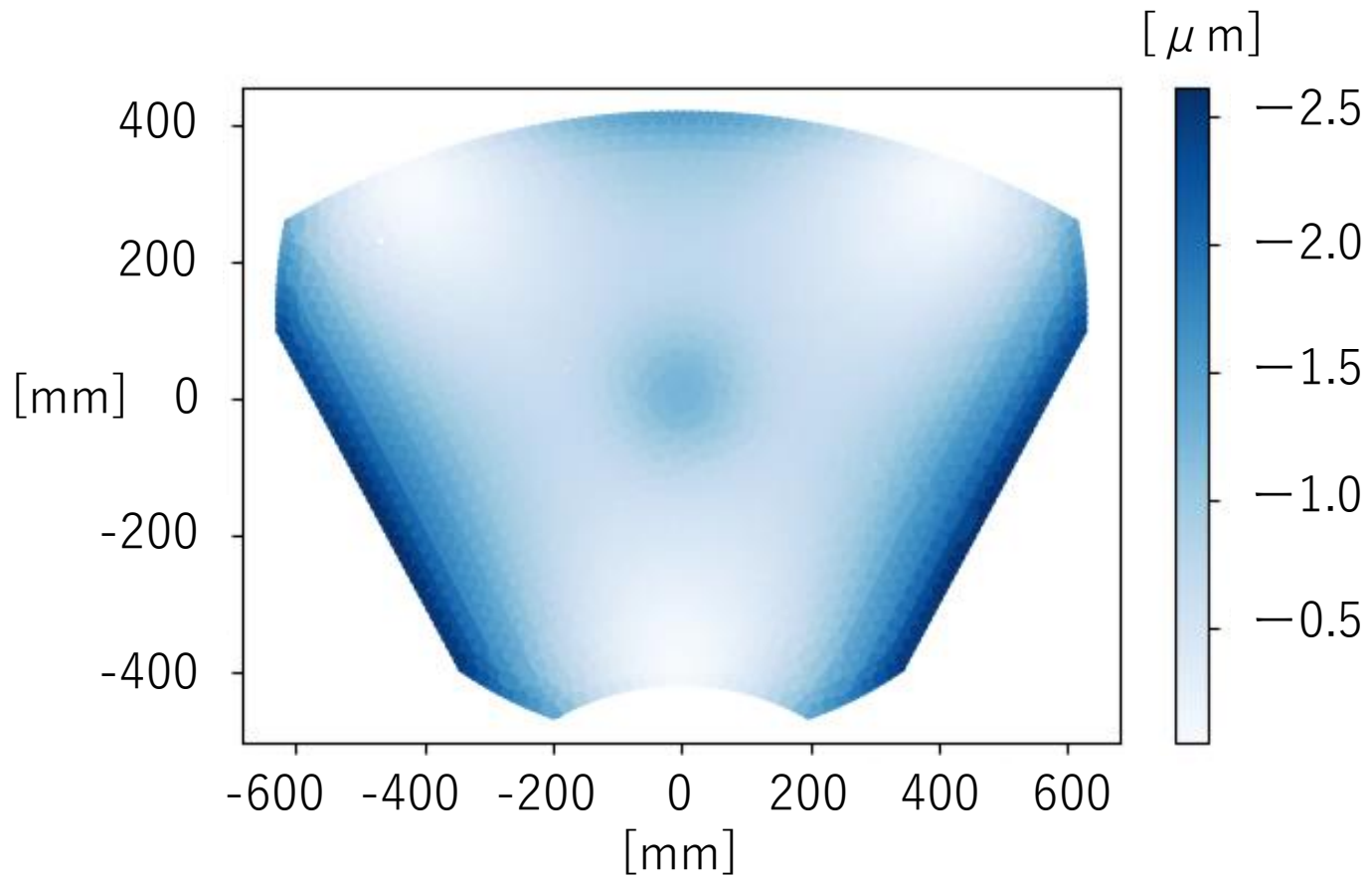
- 支持点の位置
  - 自重変形が鏡面精度に対して無視できるような位置  
(典型値： $31.7\text{nm} < \lambda / 10$ )
- その中から**固定支持点3つ**
  - 砥石からの荷重によって転覆しないような位置

# 変形量の計算



- 拘束条件を決定
    - 固定支持点3点を拘束
    - 回転方向の拘束
    - ⇒ 加工時の拘束状態を再現
  - 砥石の荷重を鏡面各点  
(計5400点ほど) に順次かけていき  
その点での変形量を計算
- 砥石荷重による変形量マップを

# 変形量の計算



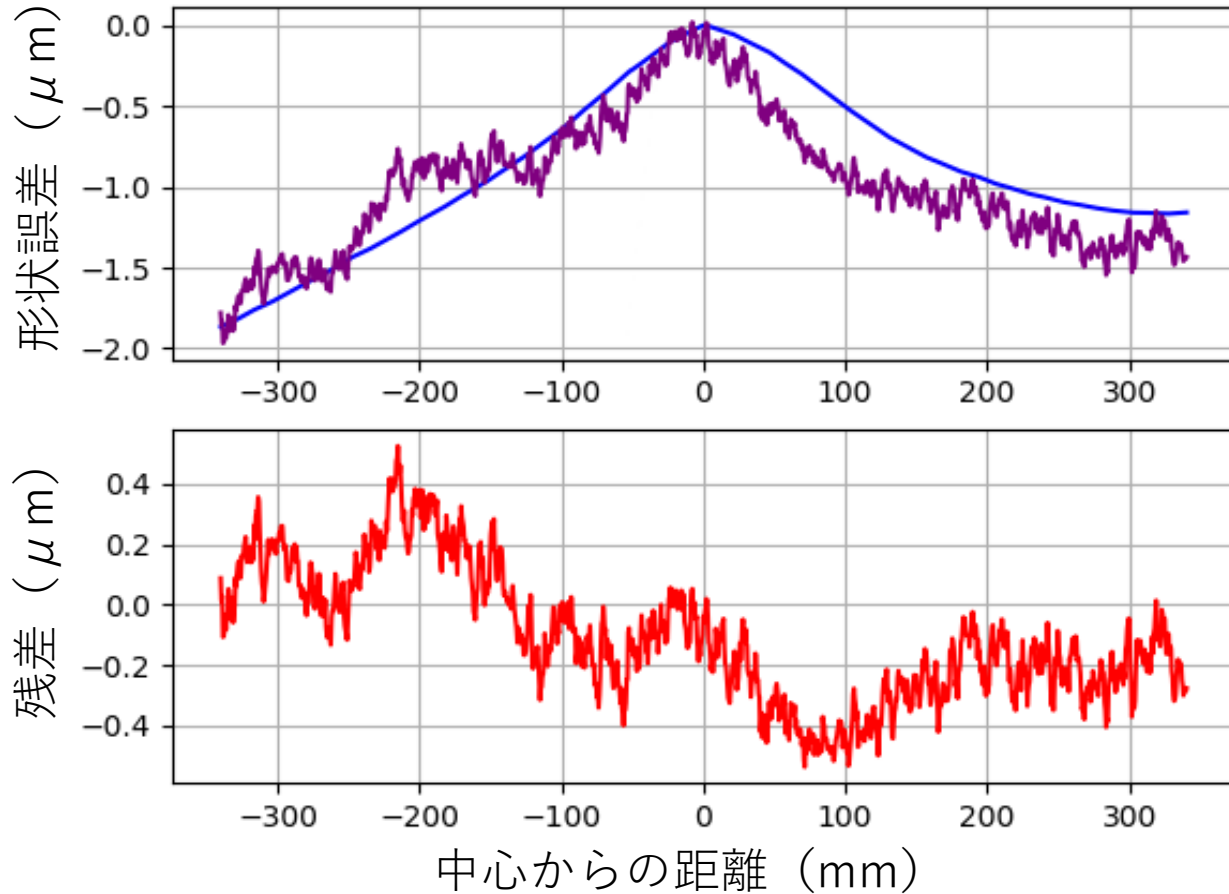
一度無補正で加工し、その際の加工誤差を全て砥石荷重による変形で生じたと仮定

左のマップと比較することによって荷重を計算

砥石荷重の典型値35Nで生じた変形量マップ

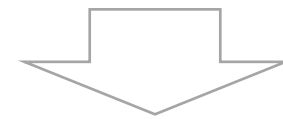
# 結果と考察

フィッティングの結果と差分 (1例)



紫：補正研削前の鏡の形状誤差，  
青：28Nの荷重による変形量 = 断面形状，  
赤：紫 - 青 = 補正後に残ると予想される量

- 砥石の荷重 : 28N
- 補正研削前の形状誤差 :  $1.1 \mu\text{m}(\text{rms})$



- 補正研削後に残る形状誤差 :  $0.2 \mu\text{m}(\text{rms})$

⇒ この精度での研削加工が期待



# まとめと今後の展望

## まとめ

- ・ 縁だれ防止のため鏡の周りにヤトイをつけて加工を行うことを考えた
- ・ その際に、新たな鏡形状の三点支持加工のために必要な支持点位置と砥石荷重による変形量（補正加工量）を見積もった
- ・ その補正をかけた時、最終形状は $0.2\mu\text{m}$ になることが予想された  
⇒この精度での研削加工が期待される

## 今後の展望

- ・ 実際に補正研削を行い加工精度がどのくらいになっているかを確認める

# Appendix

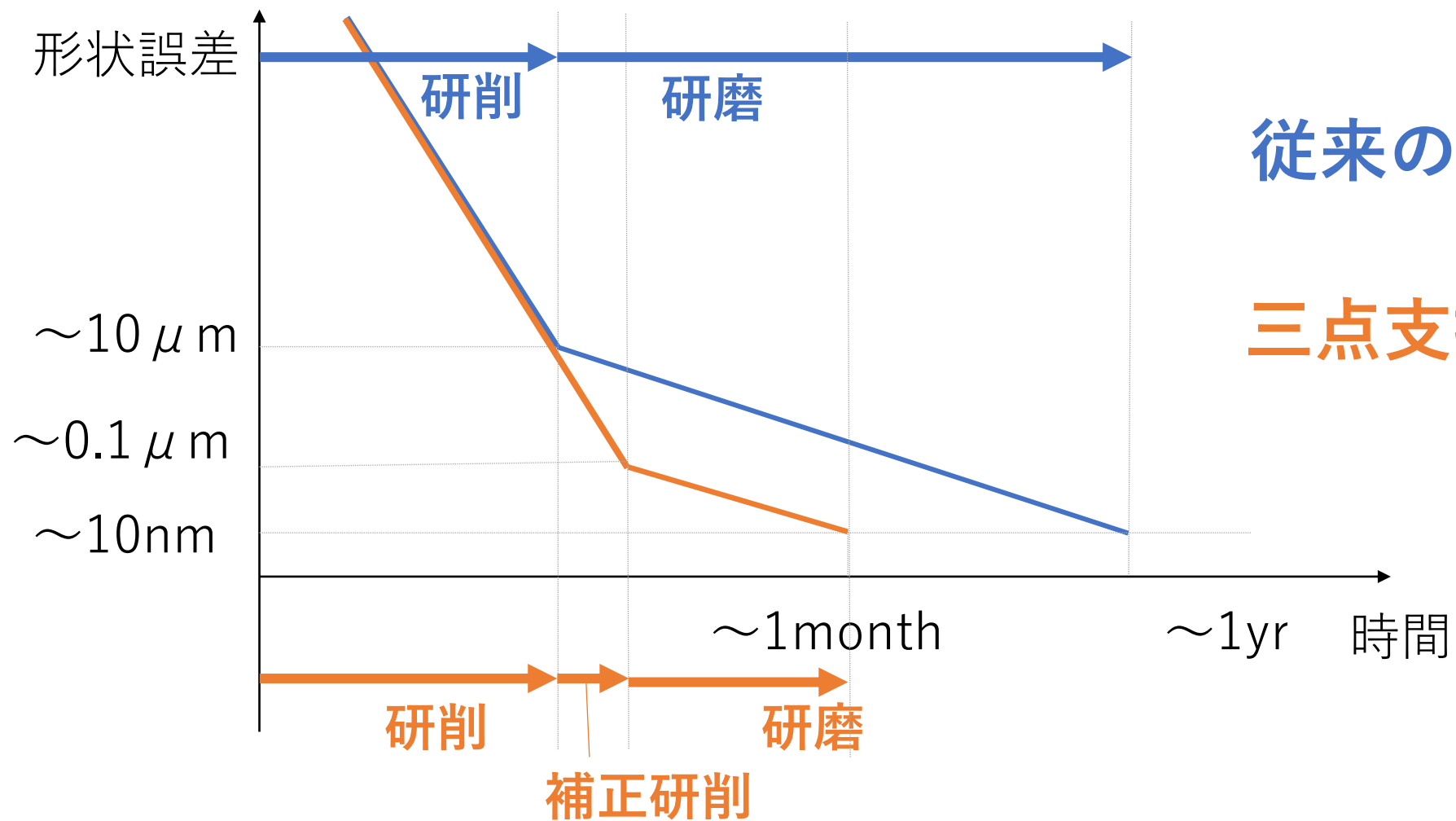
# 材料

- ・ ガラス材料：クリアセラム-Z HS (OHARA)  
ヤング率：92GPa ポアソン比：0.25 密度：2.55g/cm<sup>3</sup>

# 加工の様子



・ 時間経過の概略図



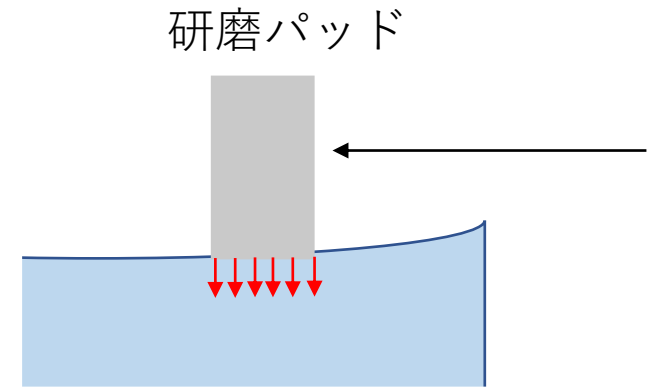
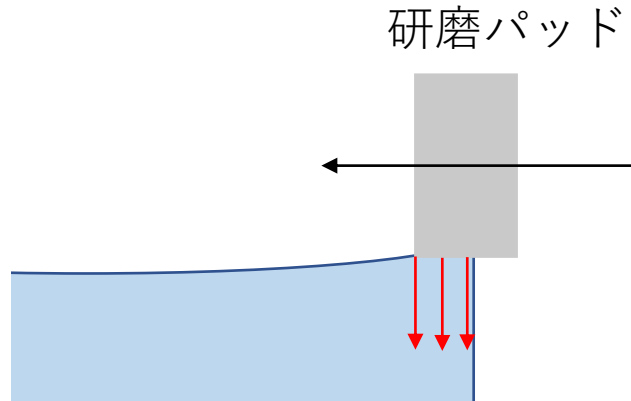
従来の方法

三点支持による方法



# 縁部分での形状誤差要因

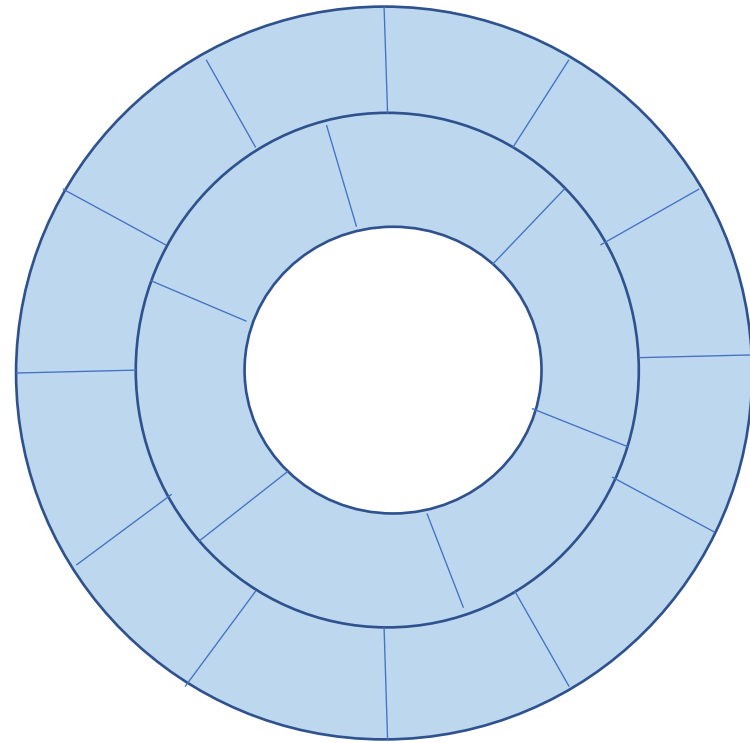
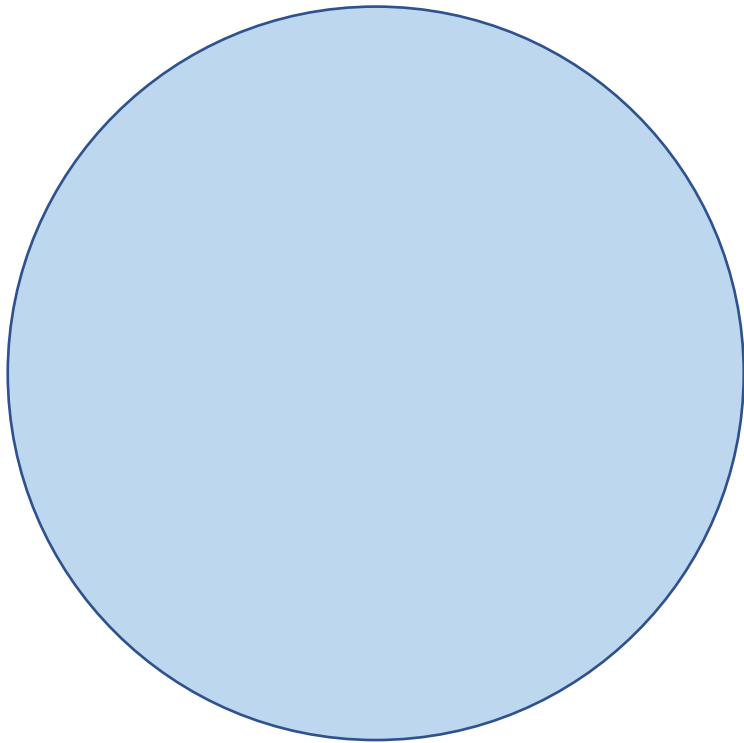
- ・ 要因の一つ



研磨パッドが鏡面内に入っていくときに余分に削ってしまう。

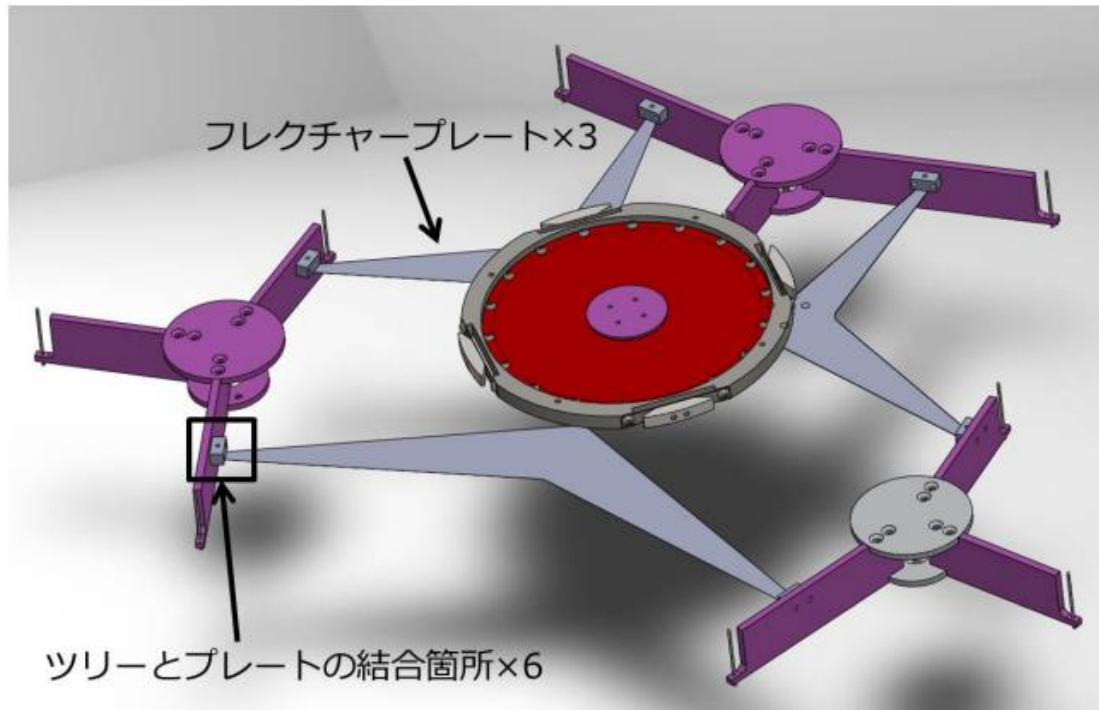
# 分割鏡の縁ダレ

- ・一枚鏡は縁部分を使わなければ良いが分割鏡はそういうわけにはいかない



縁となる部分が多い

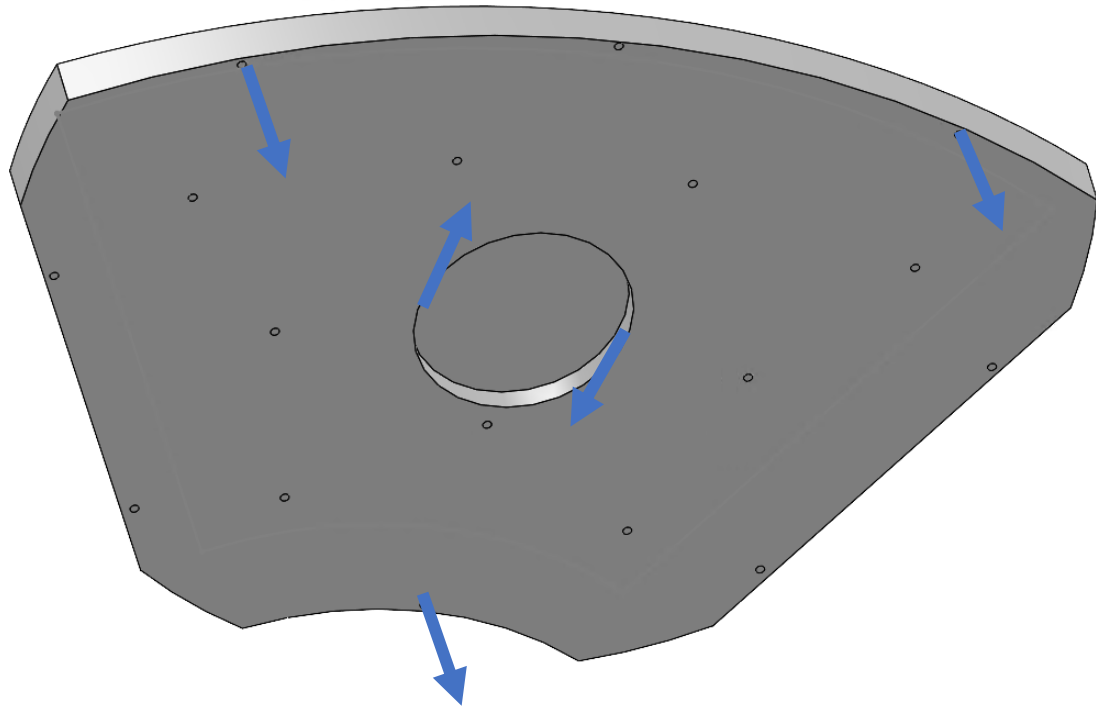
# 支持点について



主鏡支持機構（細野さん修論より）

- ・研磨の際は、主鏡の支持機構に乗せて研磨をする。  
※最終形状が架台に乗った状態での理想形状になってほしいため
- ・せいめいの際は  
研削加工の支持→主鏡の支持  
で変化があっても問題ない  
※ホイップルツリーの位置が最適化されているから
- ・今回はヤトイがあるので、  
研削加工の支持→主鏡の支持＋  
ヤトイ支持で変化があると鏡の  
自重変形が無視できなくなる

# 実際の拘束



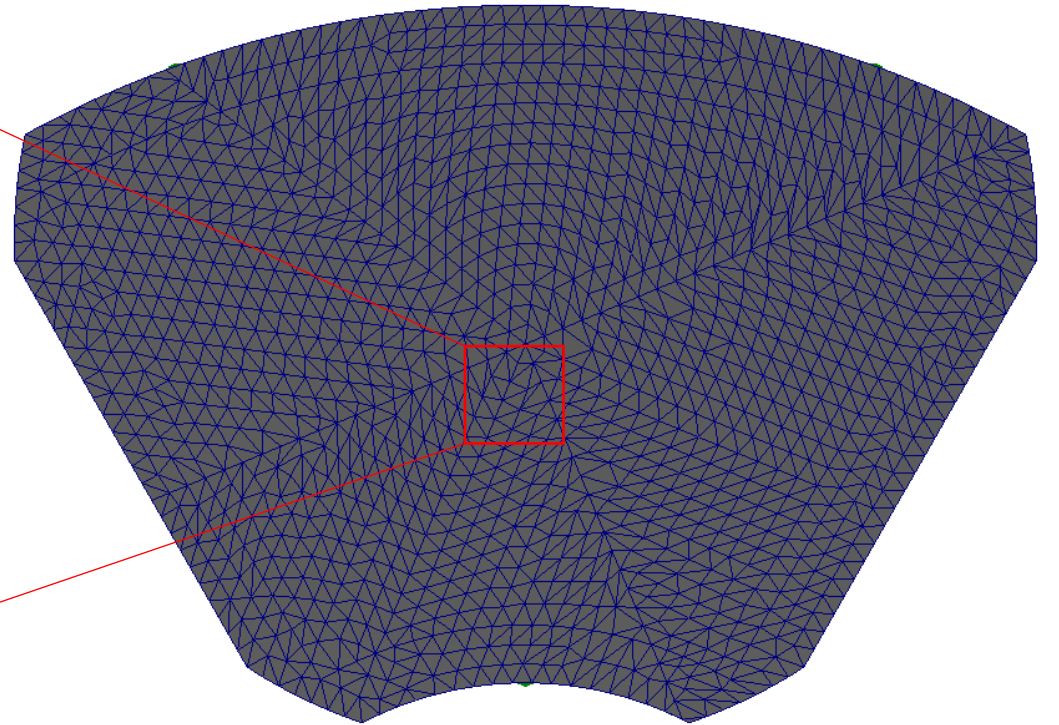
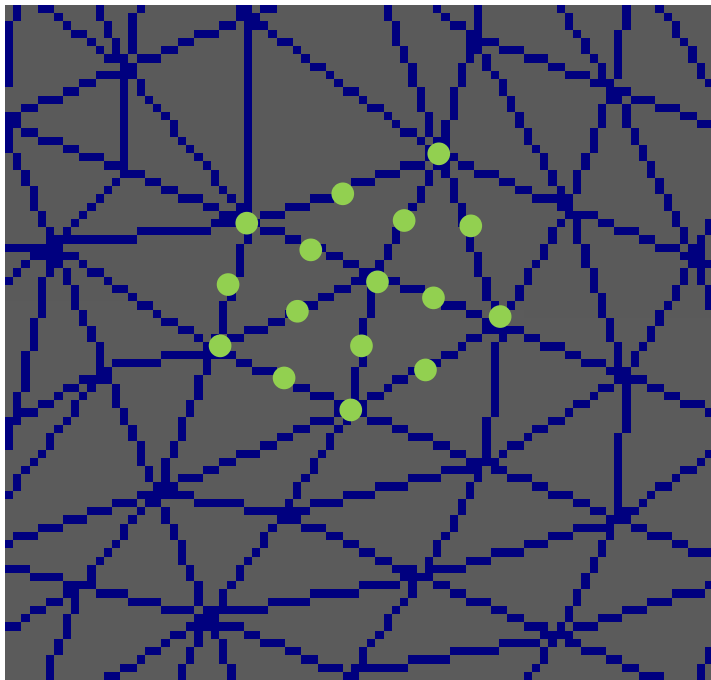
- 固定支持点 3 か所を垂直方向に拘束
- ザグリ穴の側面を回転方向に拘束

実際は回転方向はつかえ棒のようなもので固定



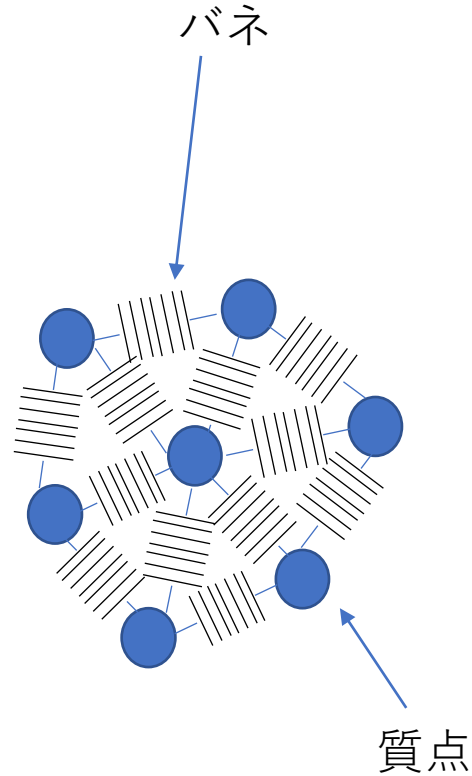
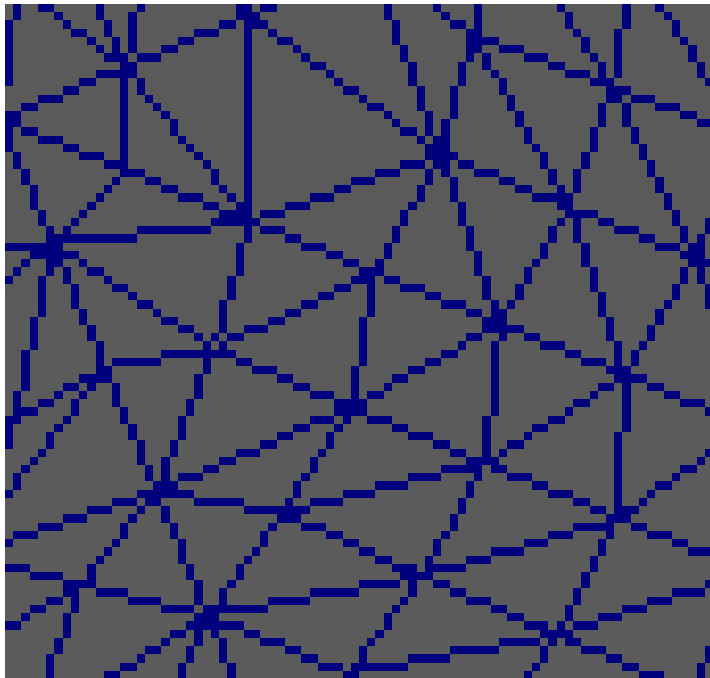
# 実際の鏡面上の点

メッシュを三角錐二次要素で切り  
その節点上に荷重をかけていった





# 有限要素法

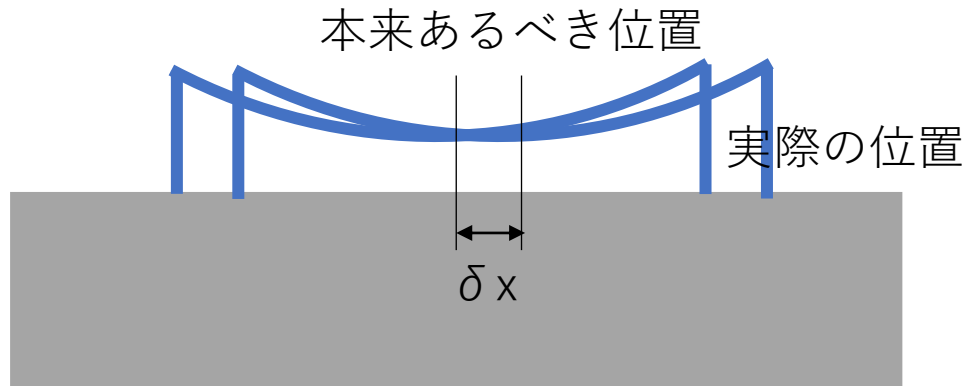


メッシュの節点を質点  
節点間をばねとみなす

- ・ある節点に力を加えるとそれを含む三角錐要素の変形量が計算される。
- ・その三角錐の変形から隣接する三角錐へ加わる力が求まり…

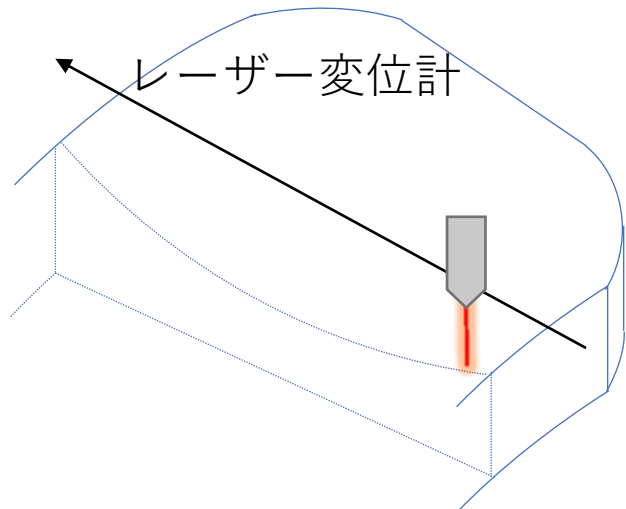
# 研削盤の座標原点ずれ

= 砥石に対して鏡の相対位置のずれ

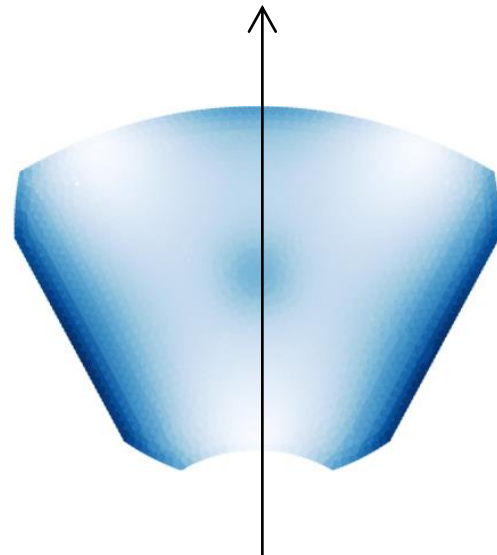


これによって  
 $a(\delta x)x$ という誤差を生じる  
実際に砥石荷重を求める  
際にはこれも考慮している

# 検討（変形量の計算）



①補正研削前の鏡の模式図



②有限要素法によって得られた変形量のマップ

①補正研削前の形状データを測定： $f(x)$

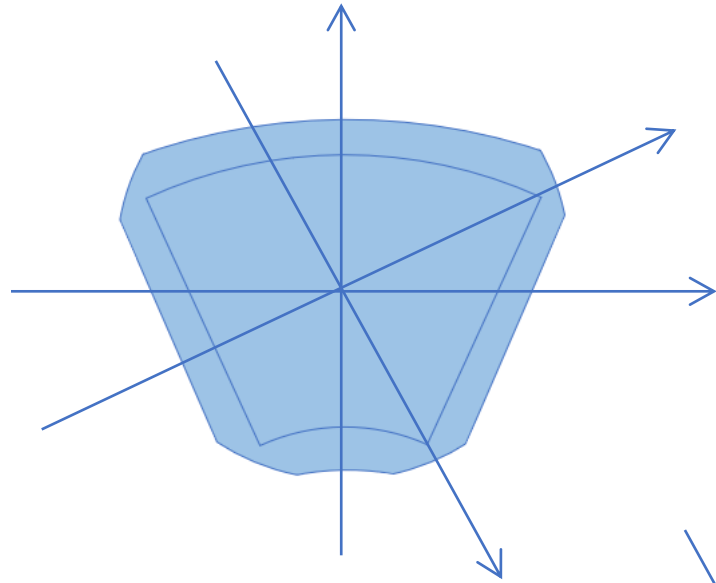
②有限要素法のデータで同じ断面形状を調べる： $u(x)$

・ $f(x)$ に $k \times u(x)$ をフィッティングして  
 $k$ を決める

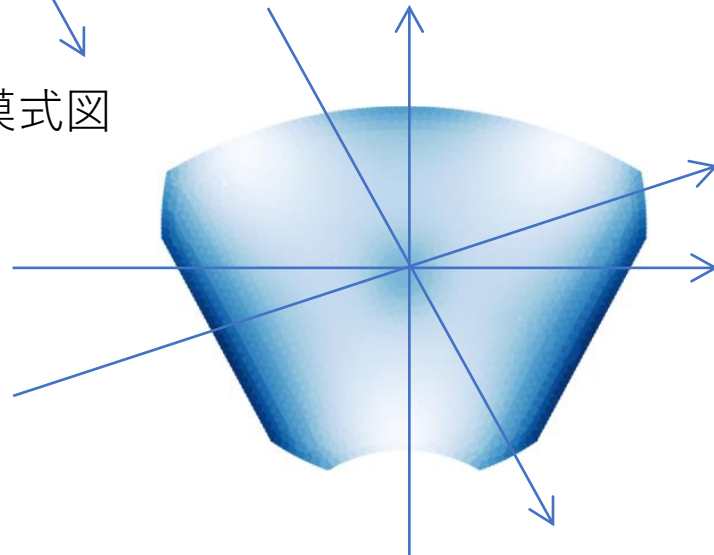
→砥石からの荷重は  $35k$  [N]に

→この荷重での変形量は $ku(x)$ に

# 実際の計測データ

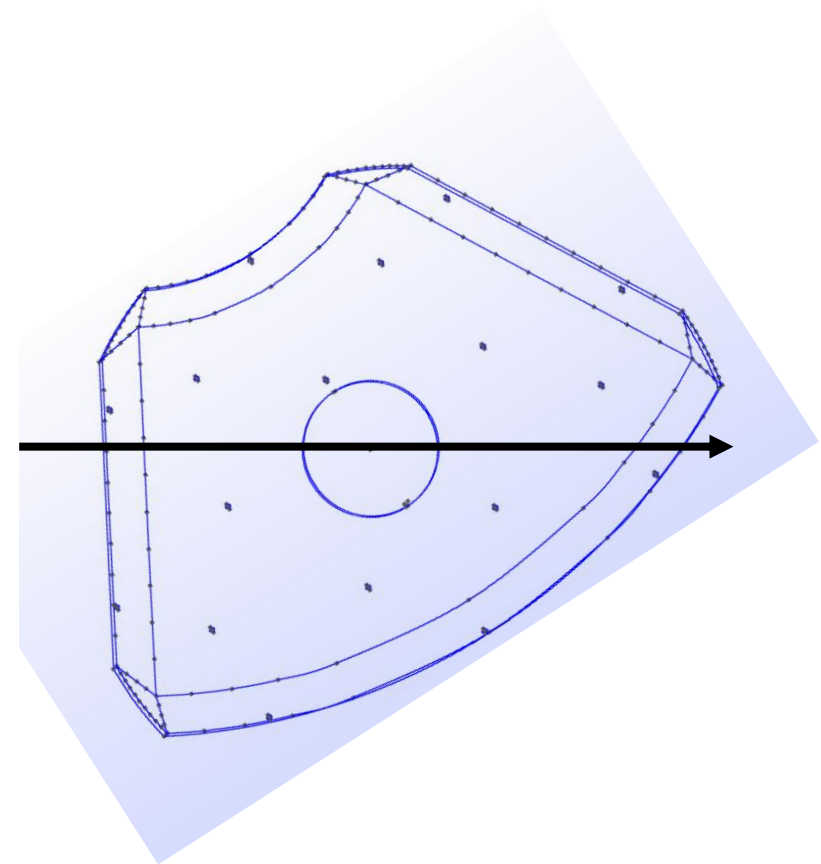
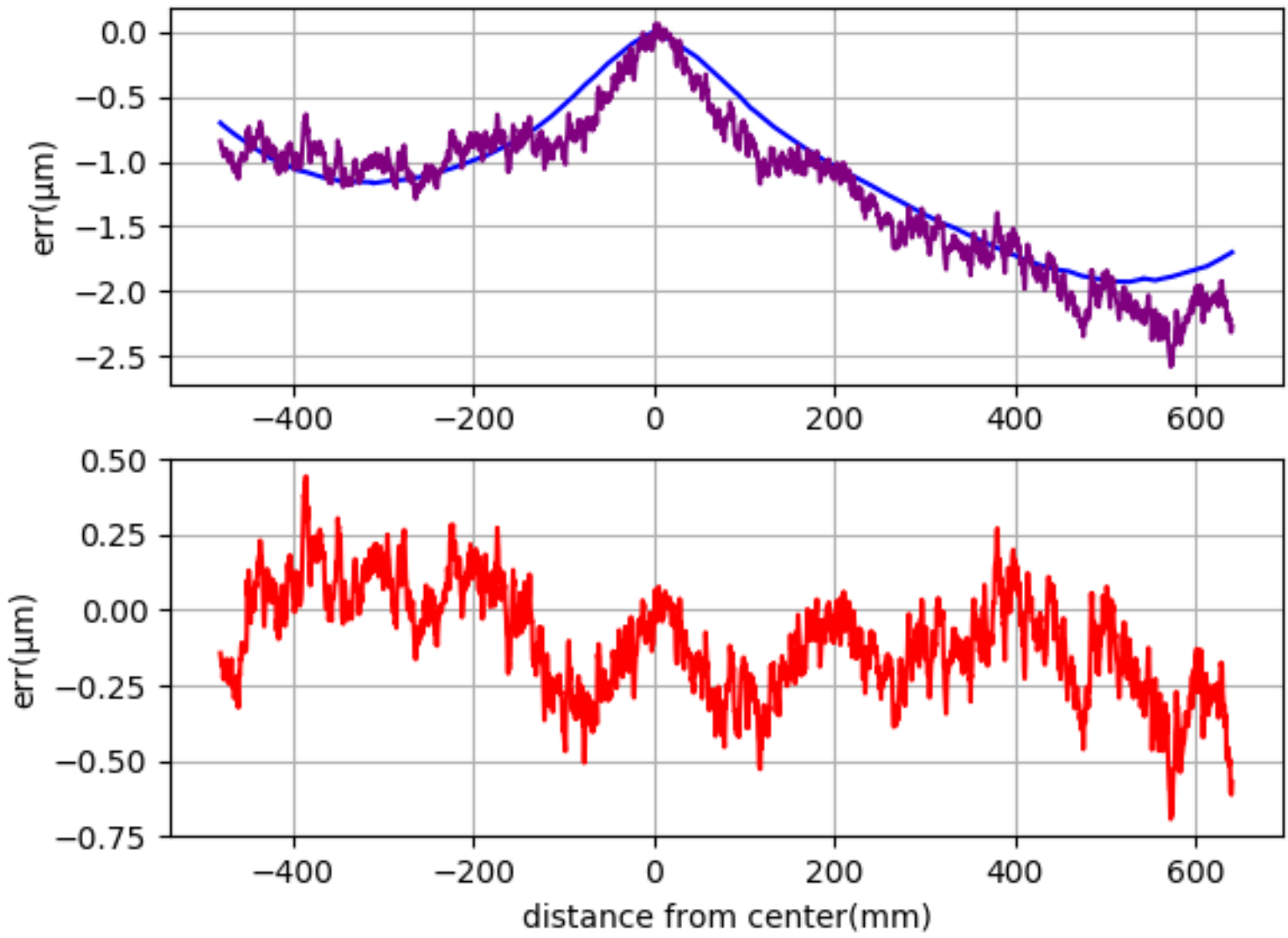


①修正加工前の鏡の模式図

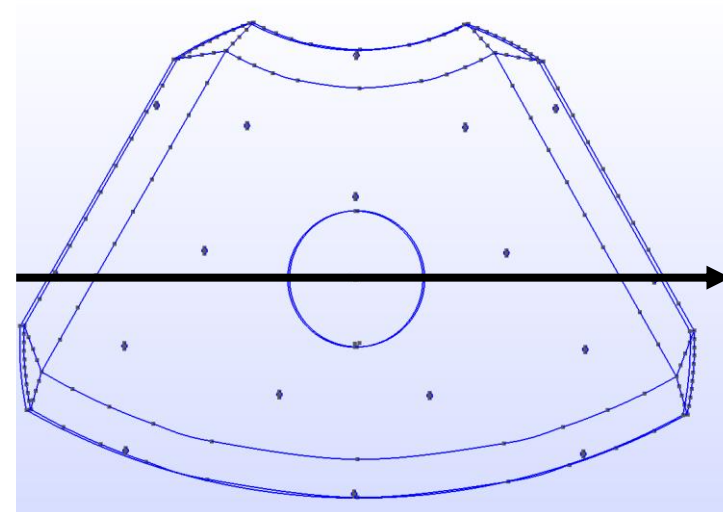
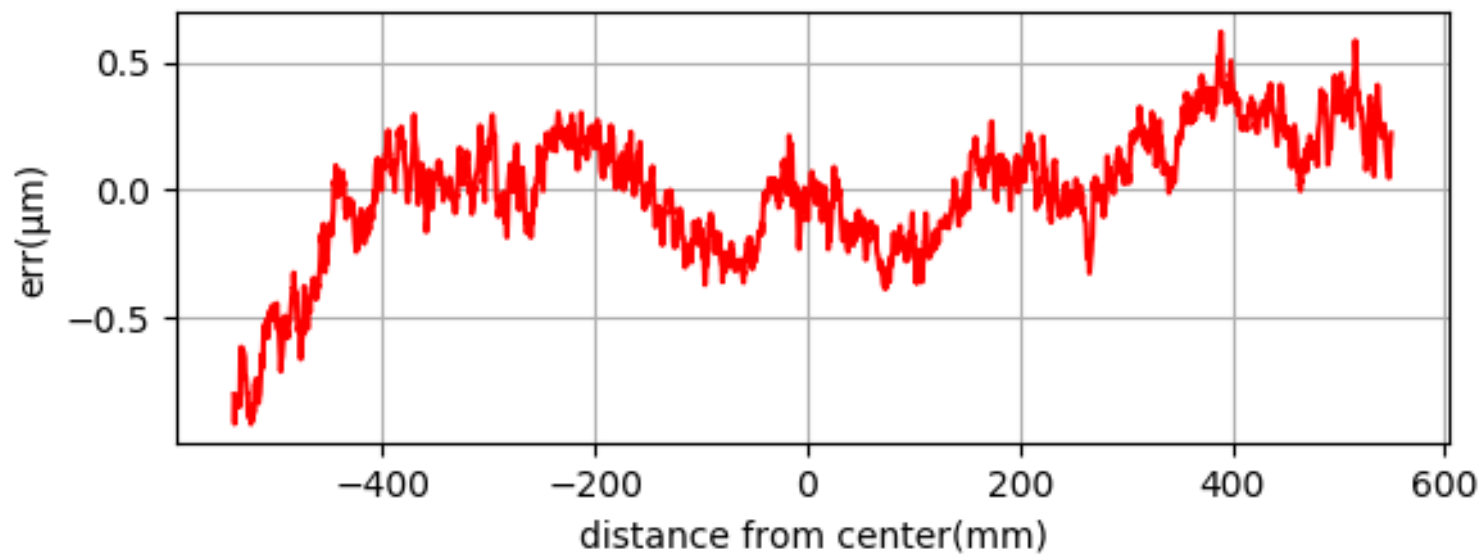
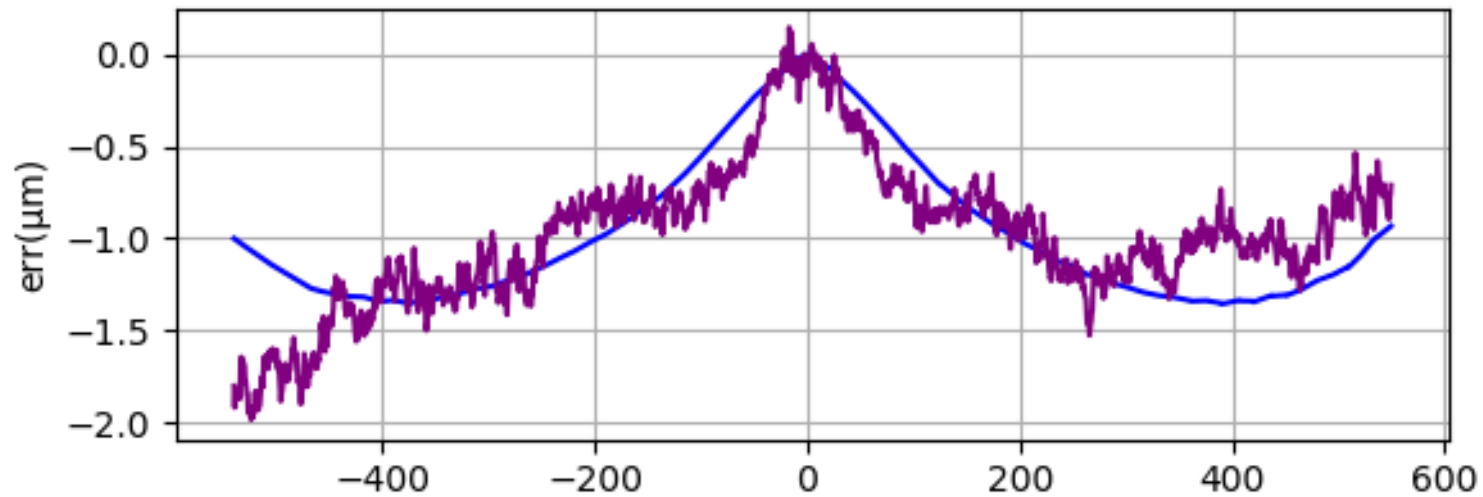


②有限要素法によって得られた形状誤差のマップ

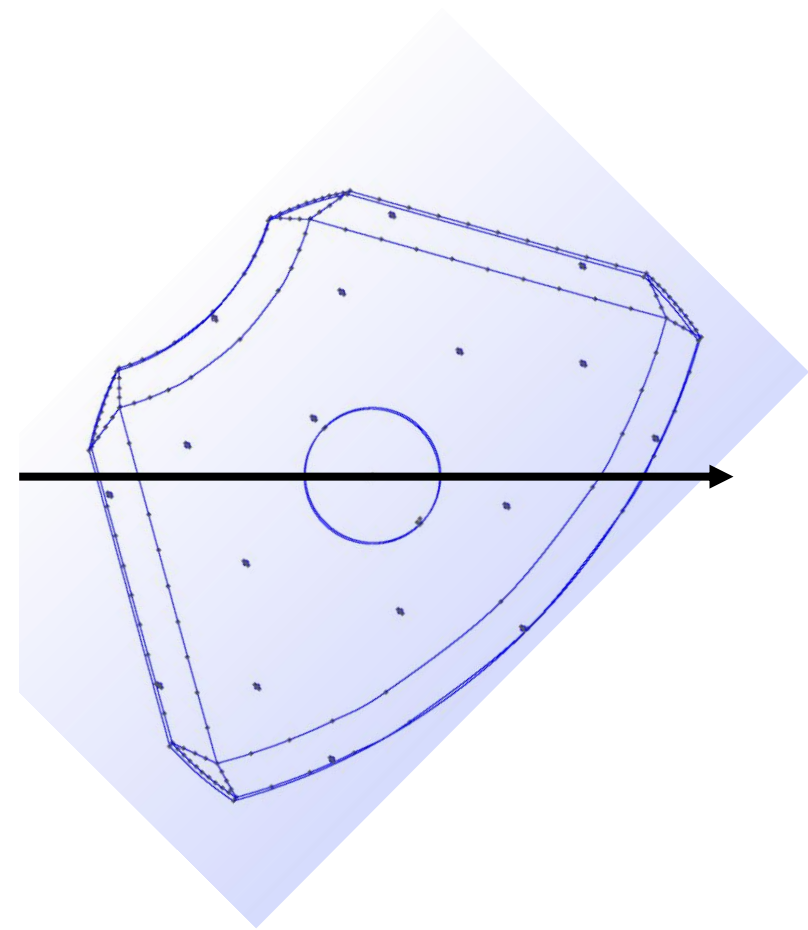
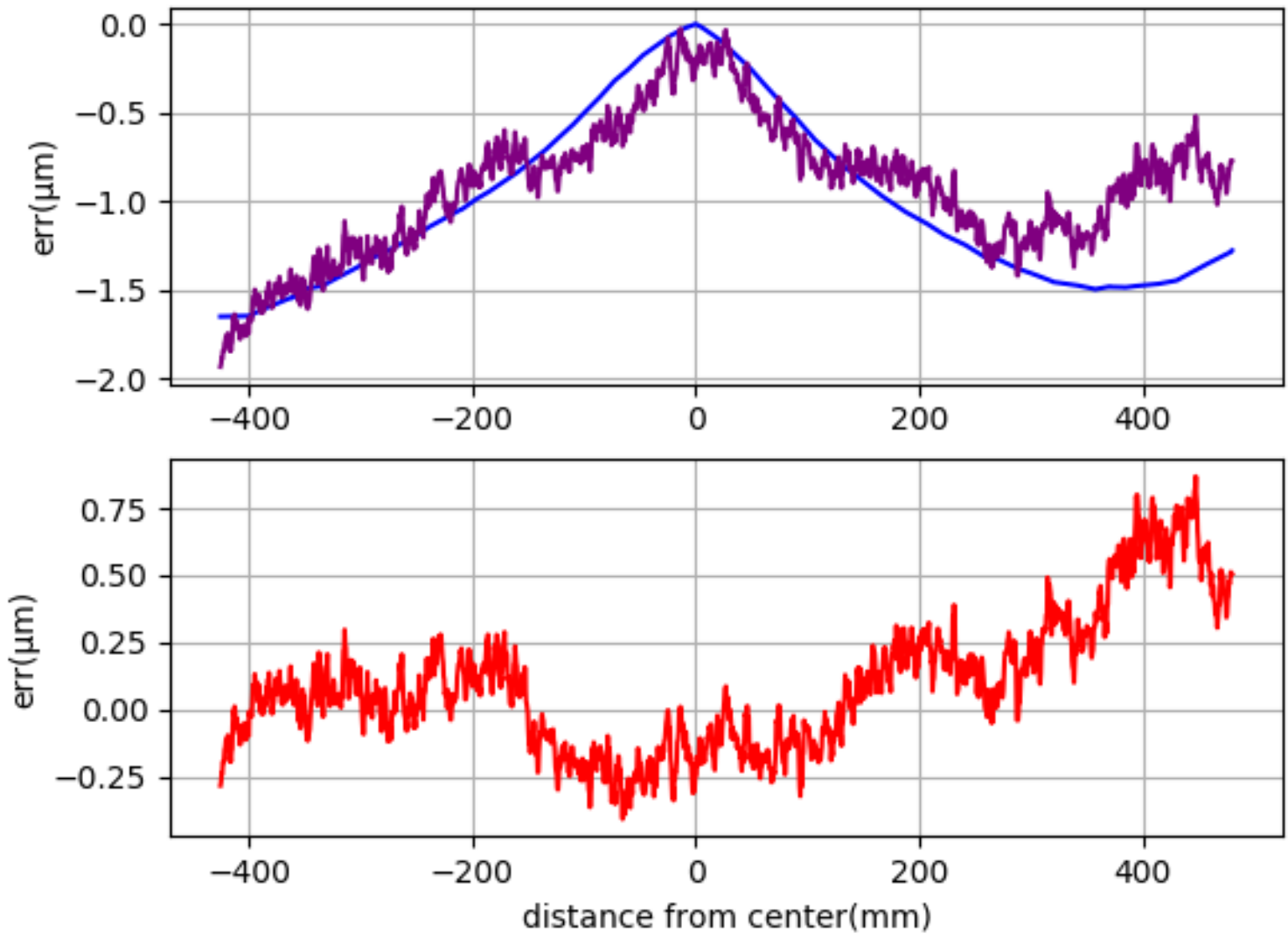
- 左のように8方向を選んで全ての断面において同時にフィッティングを行った  
(4方向往復)



フィッティングの様子 (上図) と差分 (下図)

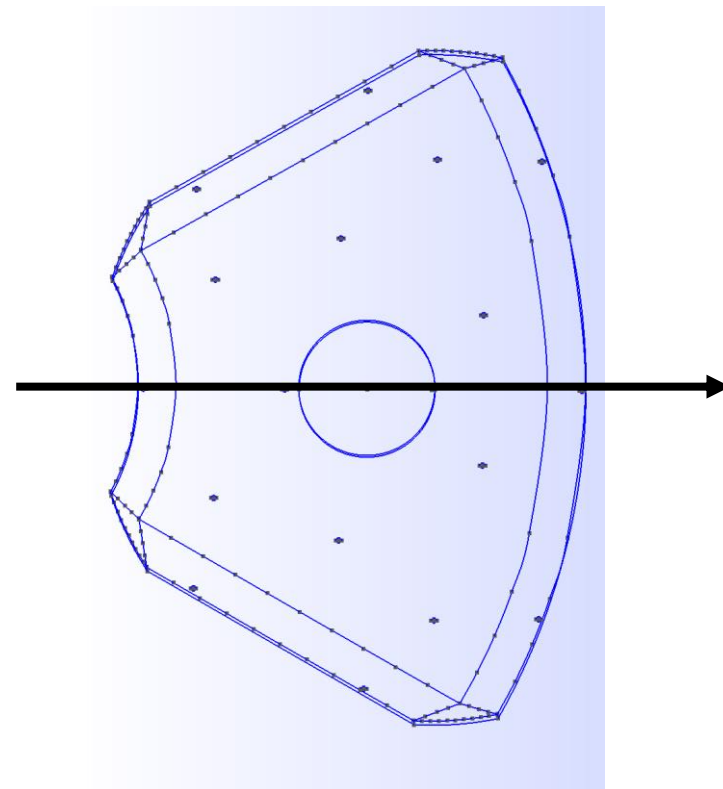
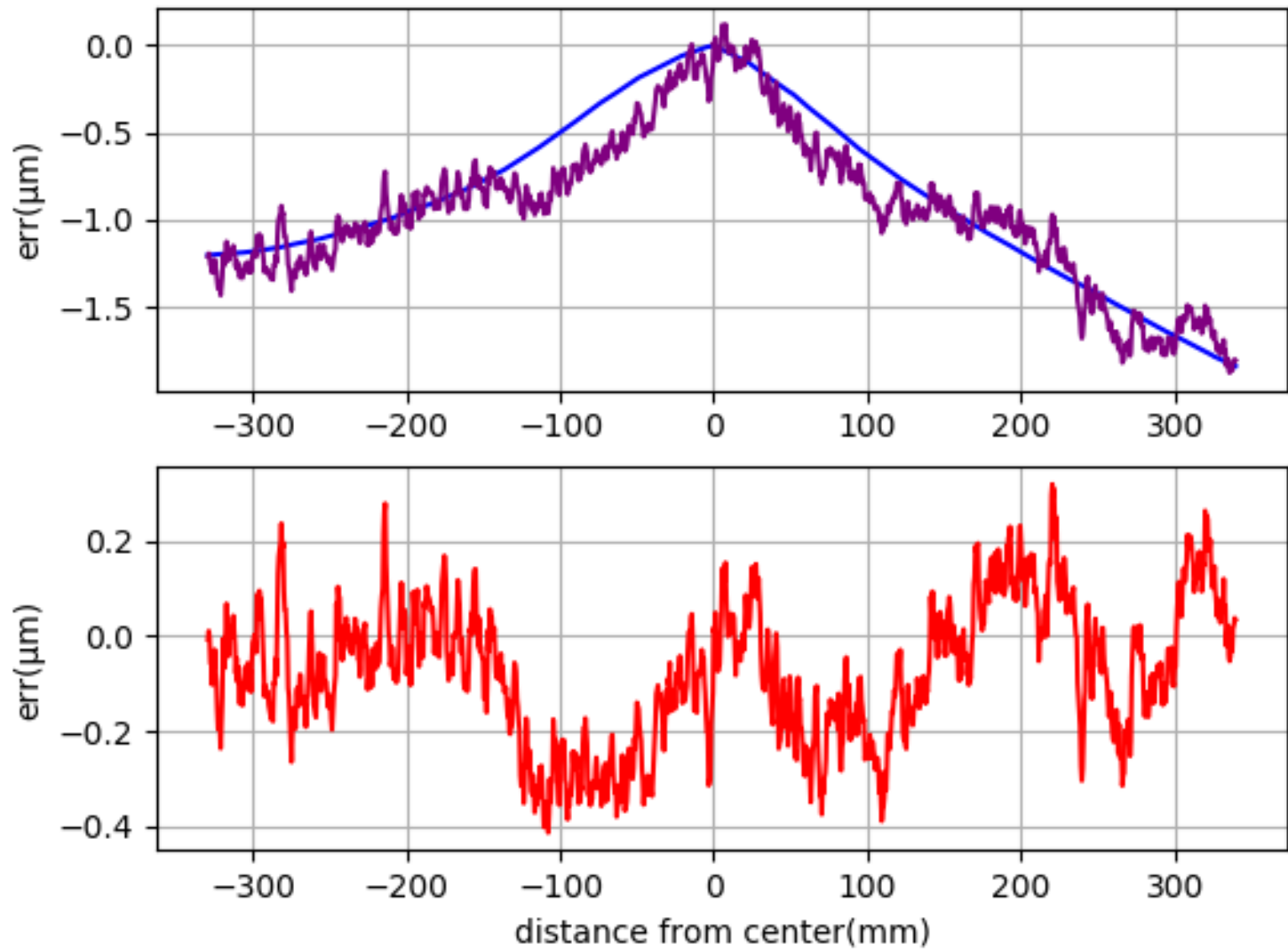


フィッティングの様子 (上図) と差分 (下図)

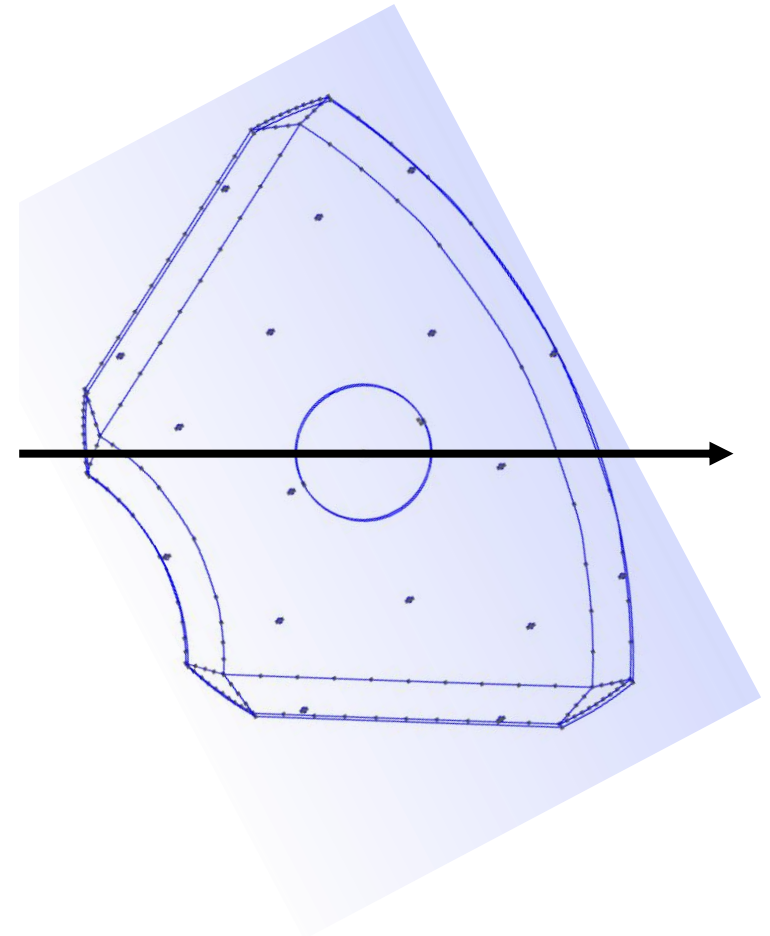
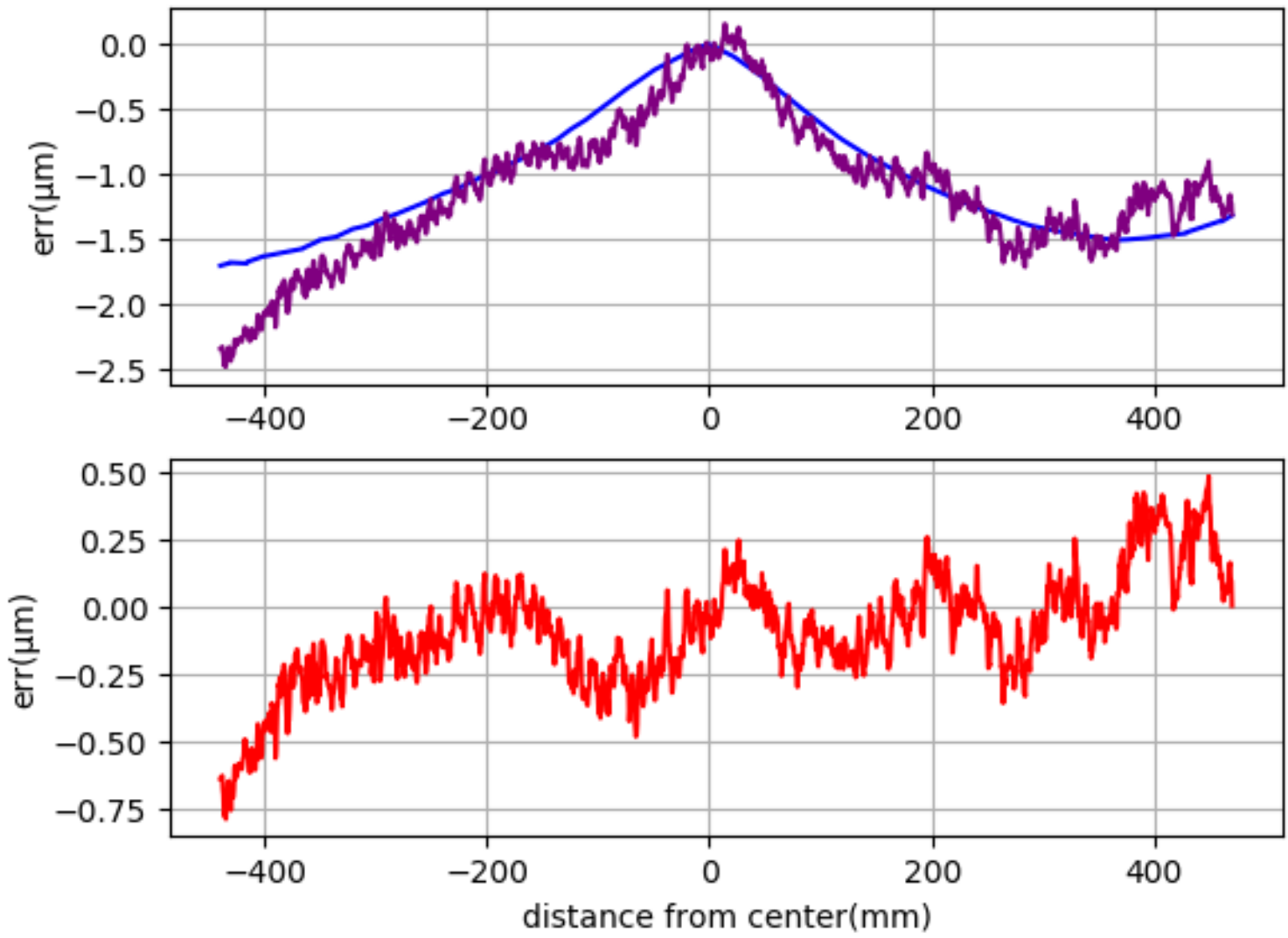


フィッティングの様子 (上図) と差分 (下図)

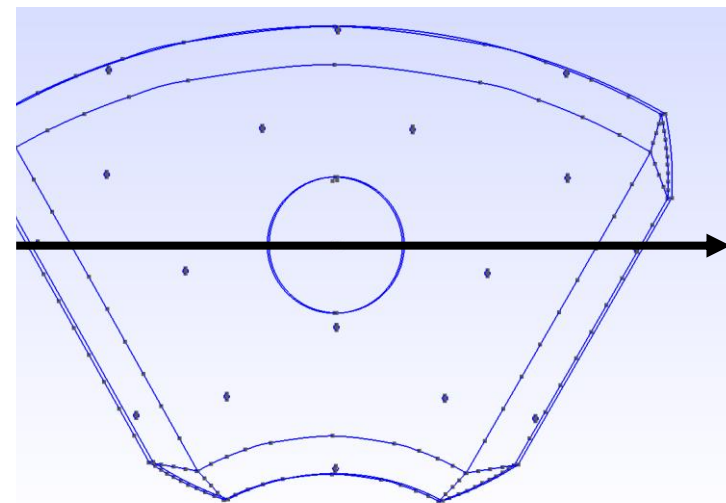
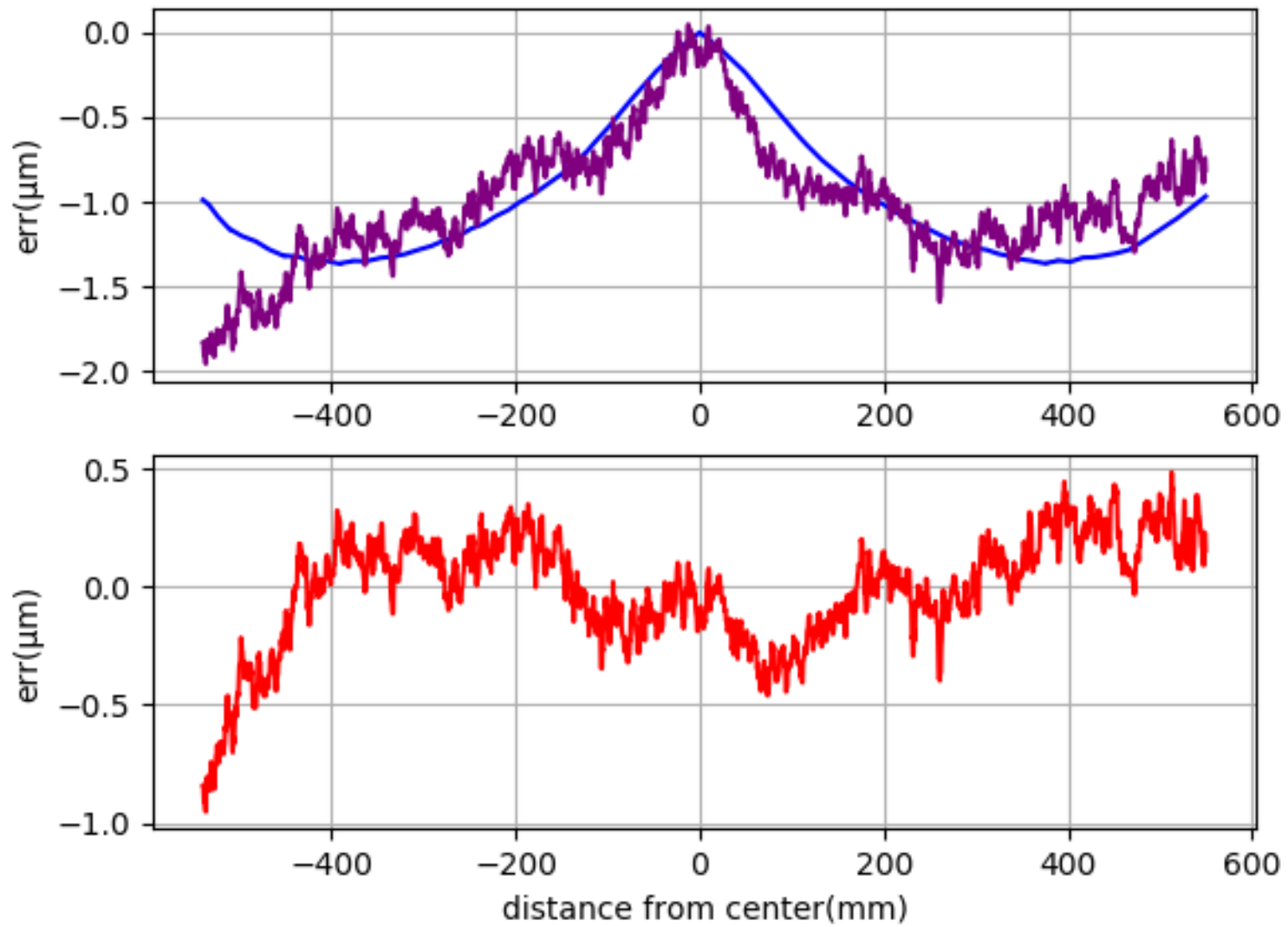




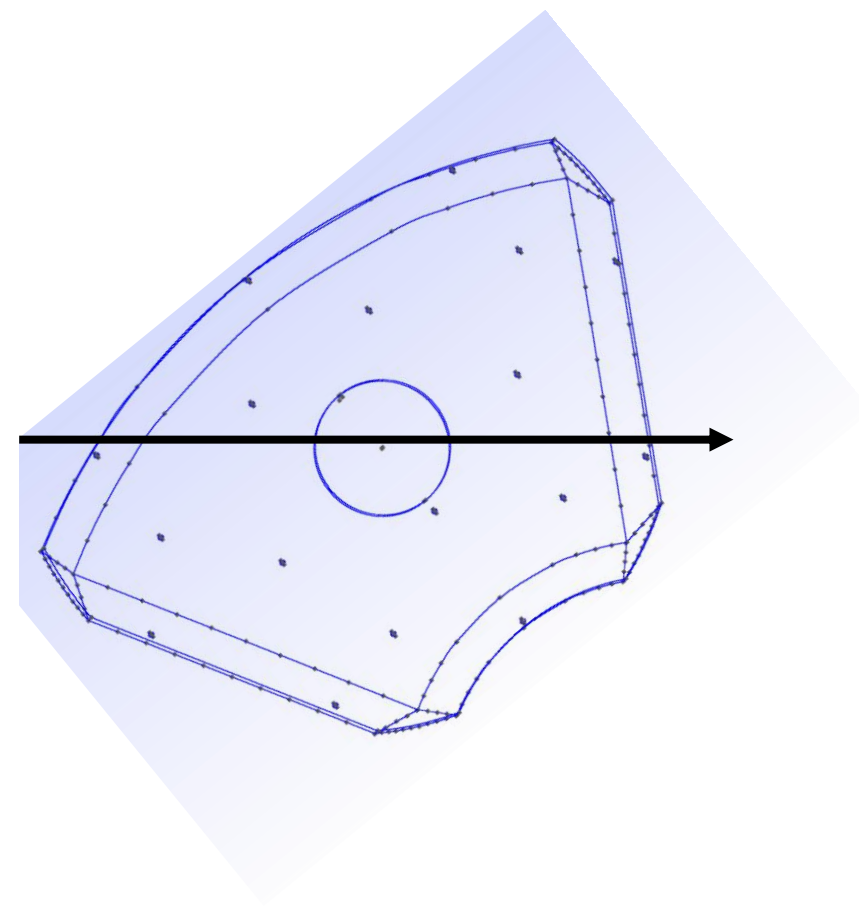
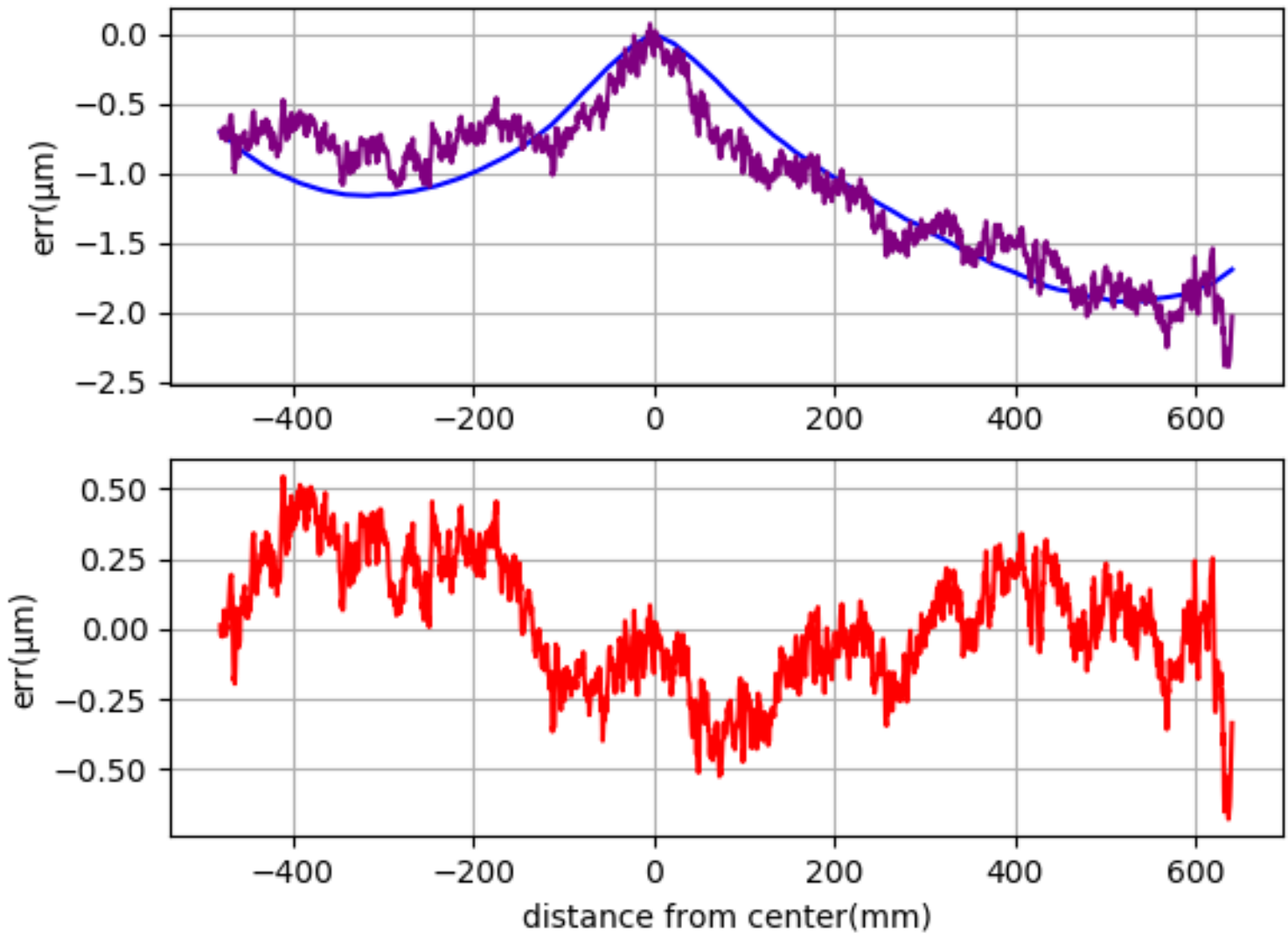
フィッティングの様子 (上図) と差分 (下図)



フィッティングの様子（上図）と差分（下図）



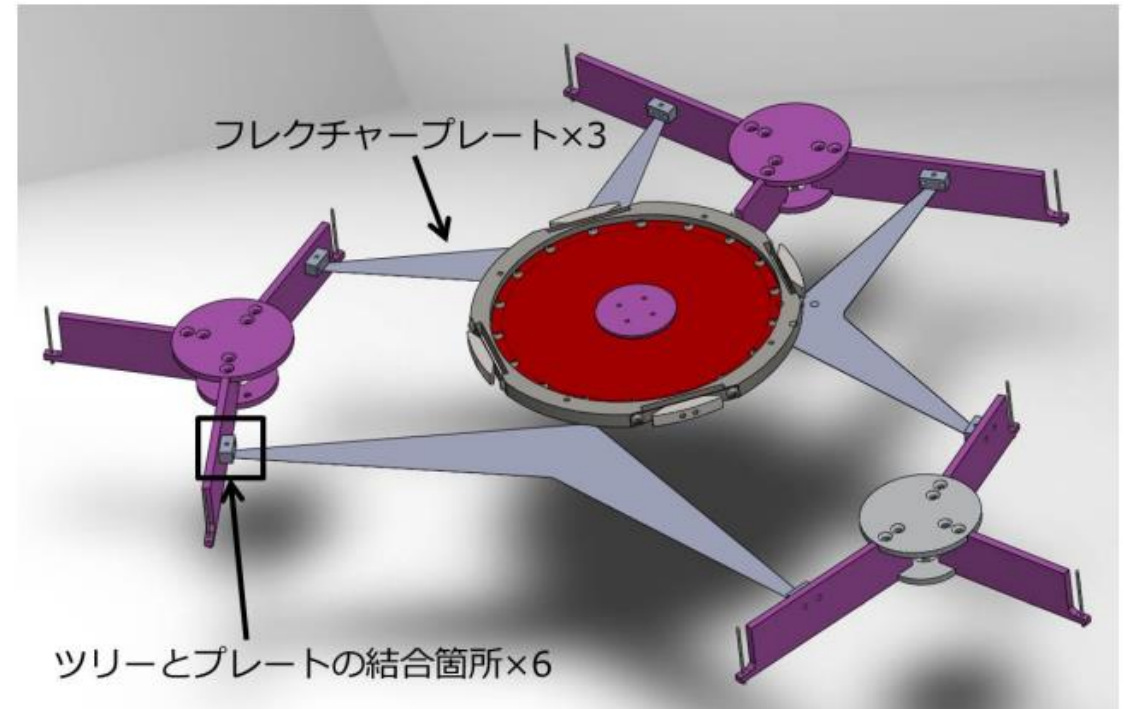
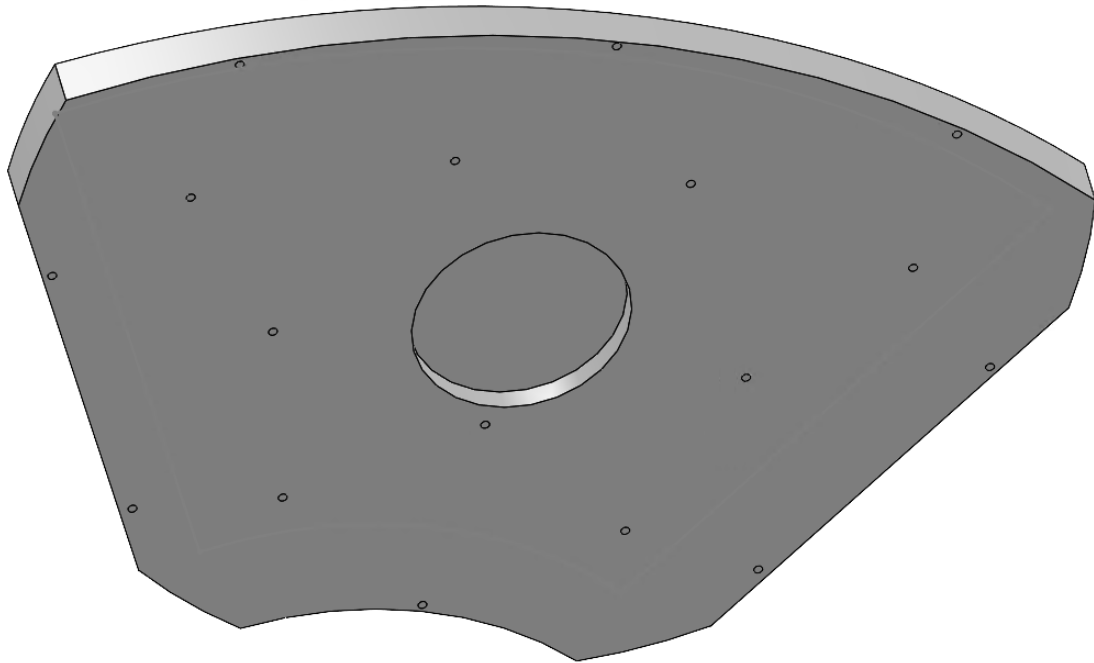
フィッティングの様子（上図）と差分（下図）



フィッティングの様子 (上図) と差分 (下図)

# ラテラルフランジについて

主鏡支持機構のラテラルフランジ  
(下図赤の部分) を取り付ける  
ための穴が開いている



# フィッティングで残った誤差は何か

- いくつかの要因が重なっていると思われるが

⇒ 砥石の形状誤差

