

# 機械計測とロボット研磨に よる放物面鏡の製作状況

栗田光樹夫（京都大学）

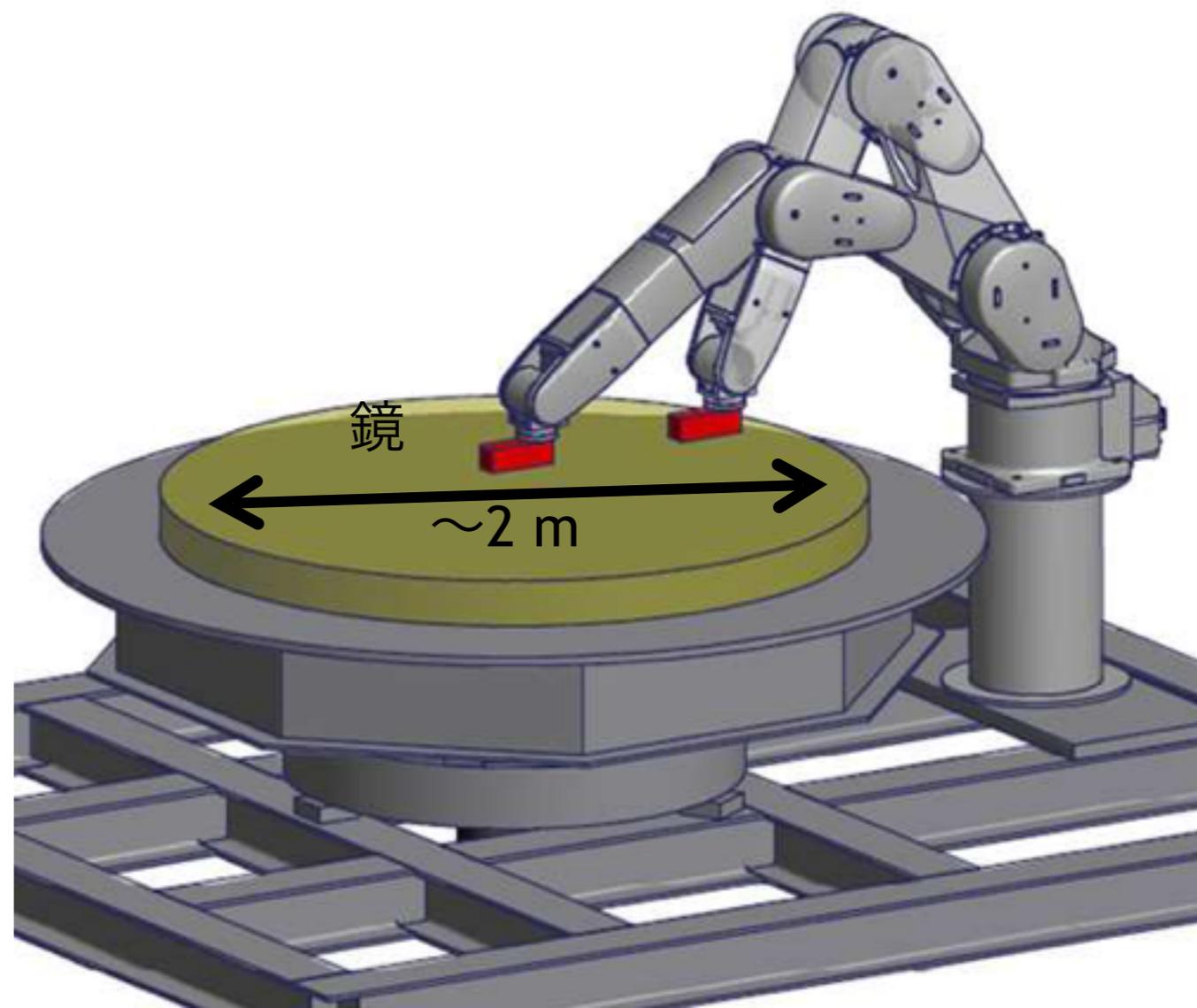
所仁志（アストロエアロスペース）

吉田泰、大川裕貴、石井遊哉、今西萌仁加（京都大学）

高橋啓介（アストロエアロ）

# 目的

- ・ ロボットアームのみで研磨と計測を行い、メートルクラスの自由局面の製作工程の擁立



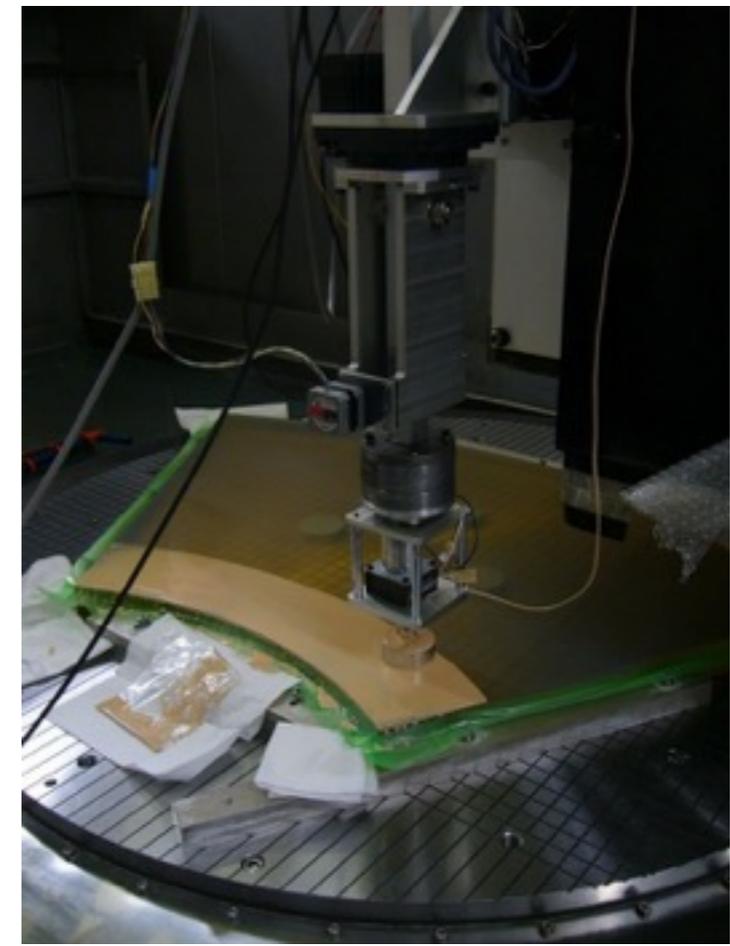
# これまで

## 成果

- 研削盤による
- 研削と研磨を行い
- 干渉計で計測を行い、
- メートルクラスの
- 主鏡の製作工程を確立した



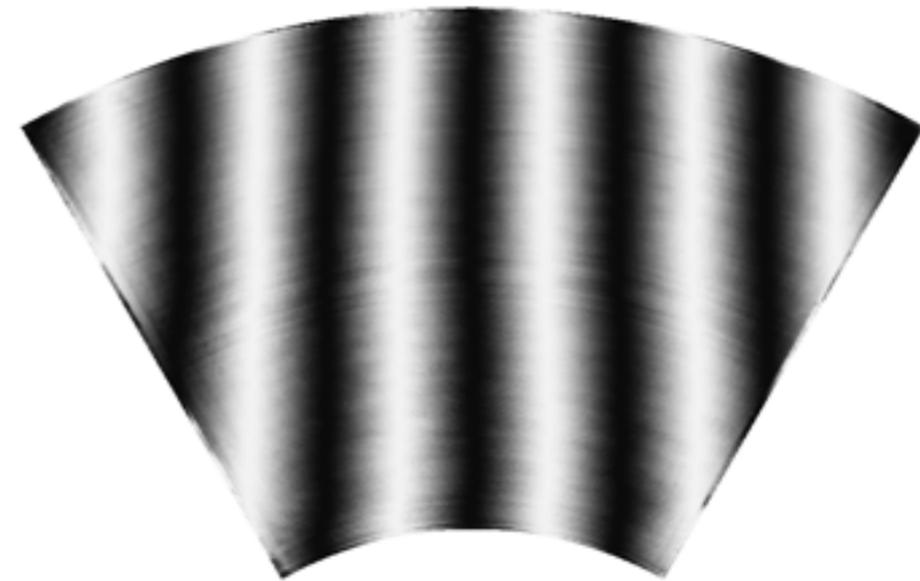
研削



研磨

## 課題

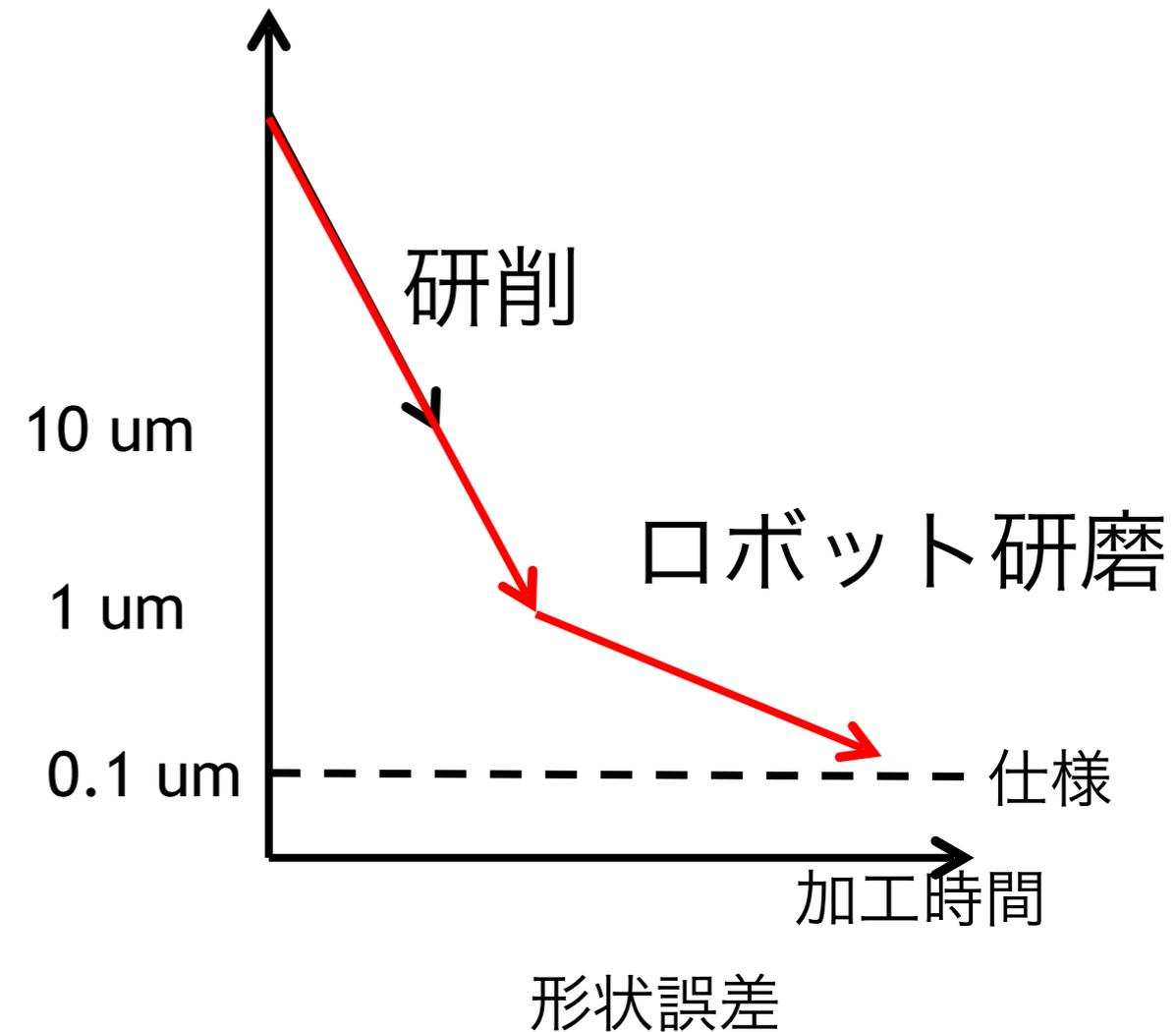
- 研削と研磨の分離
- 研磨機と計測器の融合
- 自由曲面への対応
- コンパクト化



干渉計

# 本加工と計測

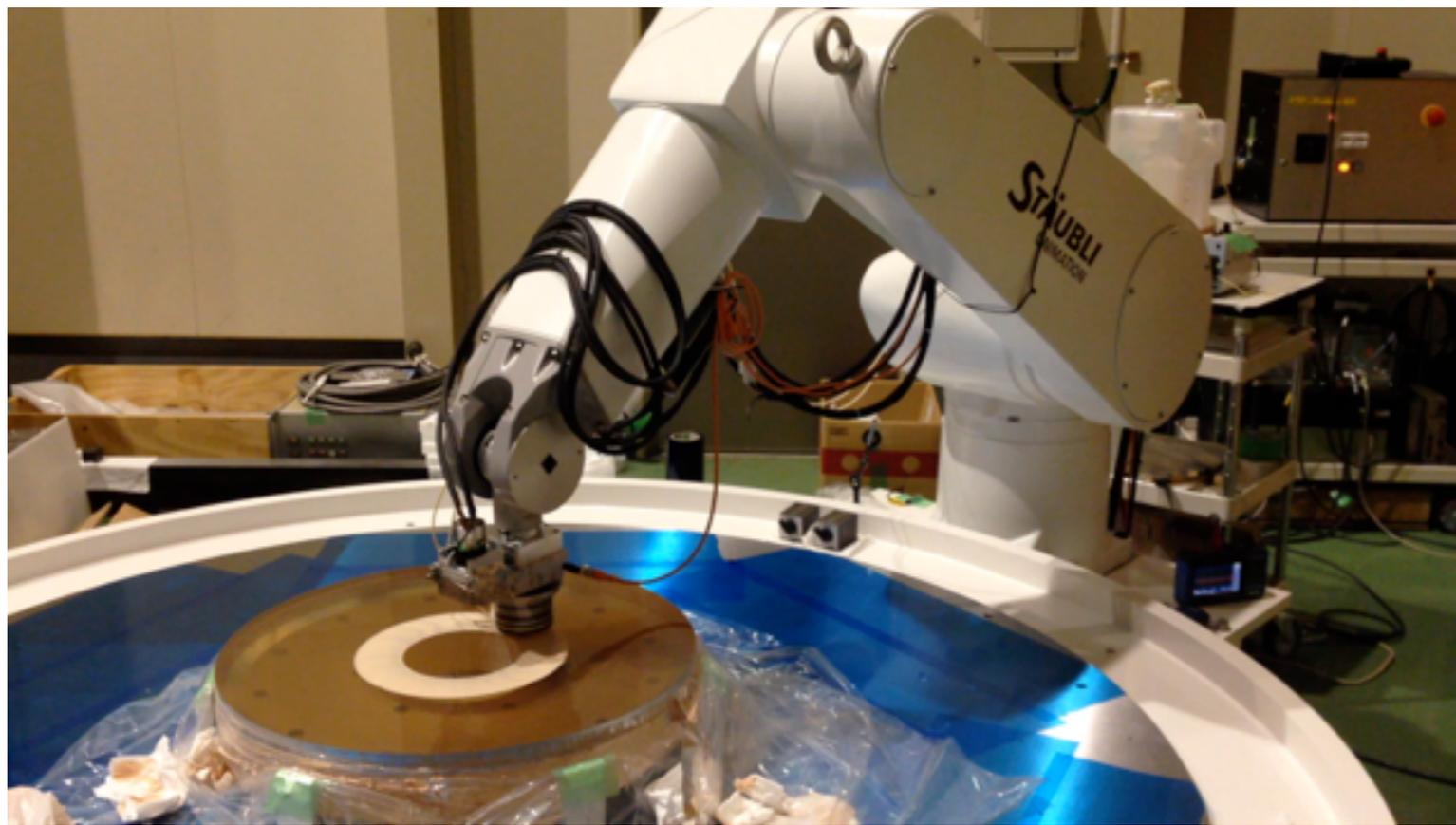
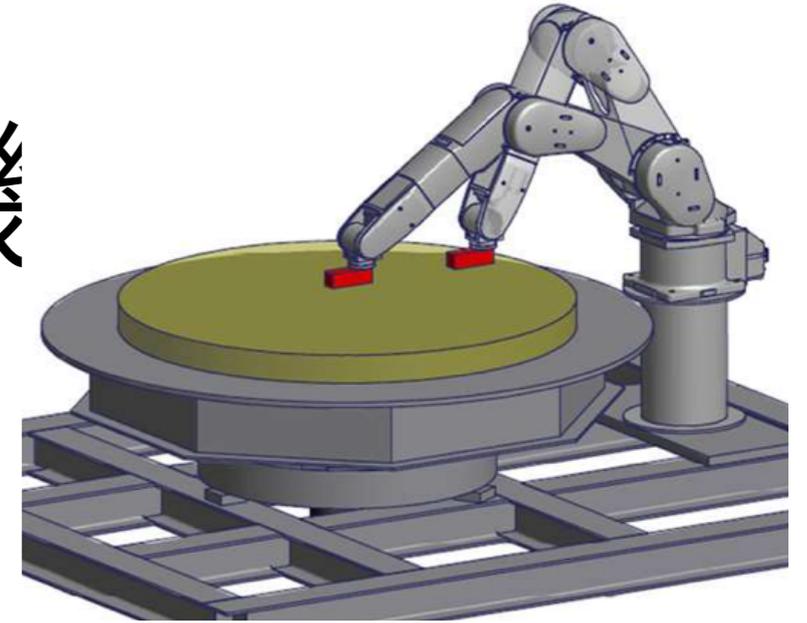
- $\Phi 600$  R=3000 の放物面
- 硝材：クリアセラム
- 研削盤で1 $\mu$ レベルまで加工
- ロボットで研磨と計測



# ロボットアームと研磨機

メーカー：STAUBLI（スイス）

自由度：6軸＋ターンテーブル1軸



研磨の様子（動画）



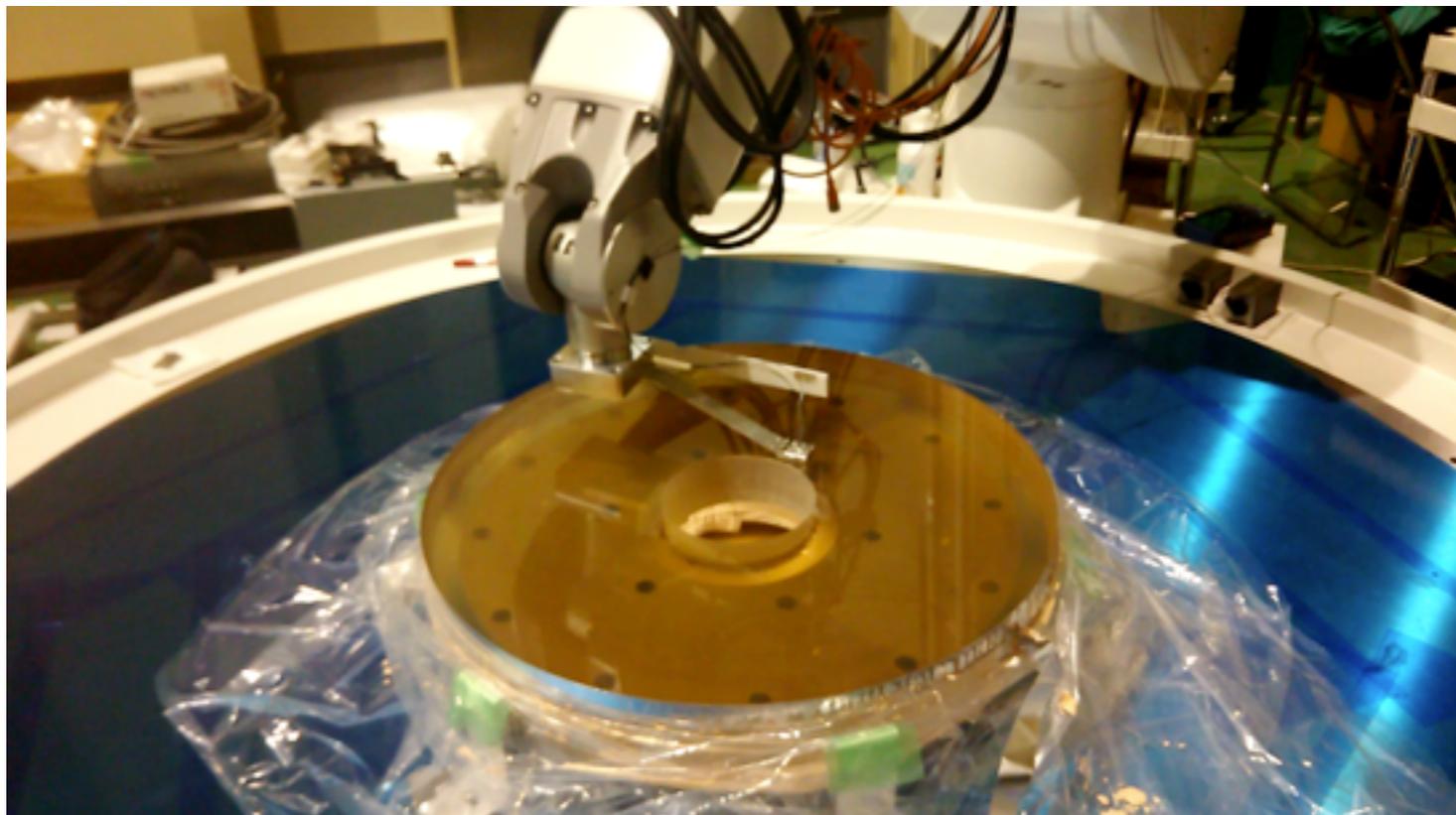
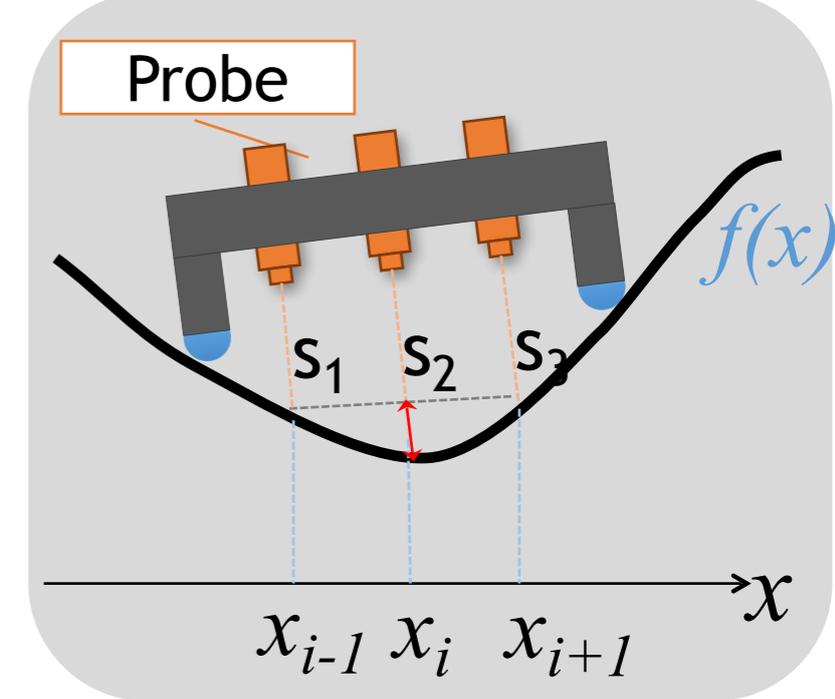
Φ600の鏡とロボットアーム  
アストロエアロスペース

# ロボットアームと計測

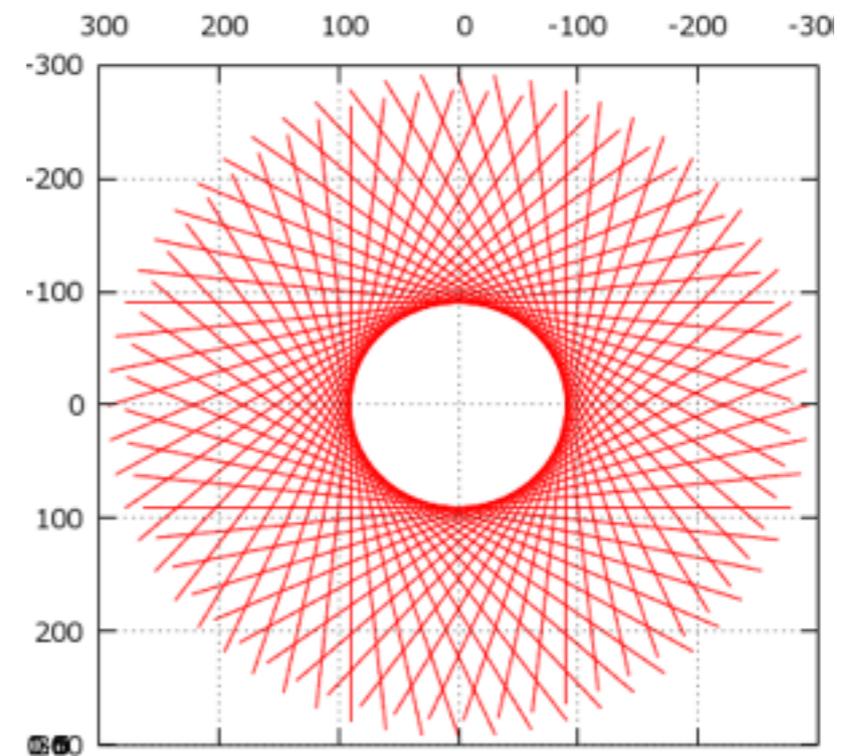
計測原理：ひきずり3点法

ロボットのヘッドの先にプローブを交換取り付け

計測時間：45分程度（今後30分程度に）



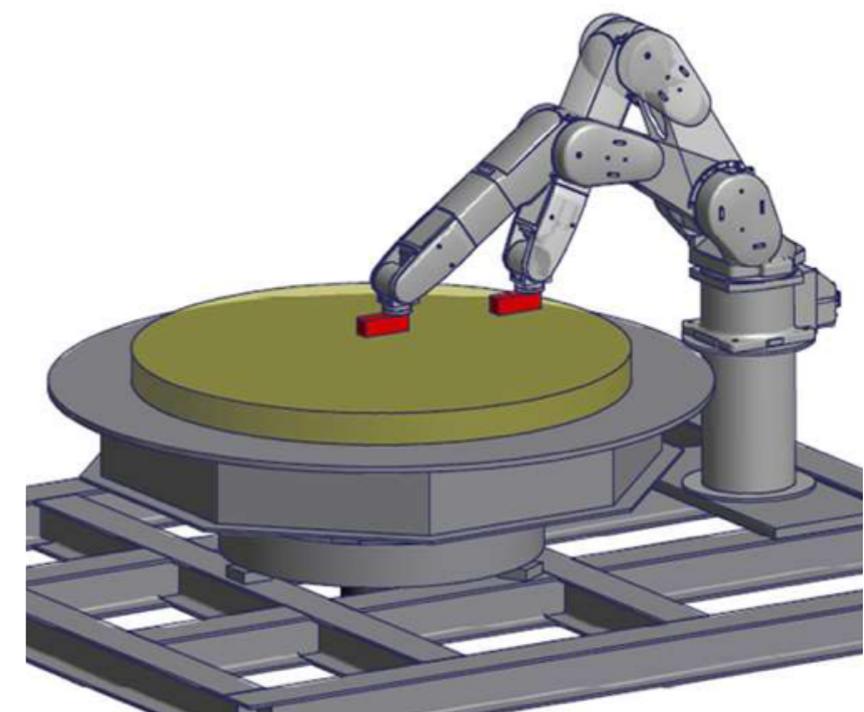
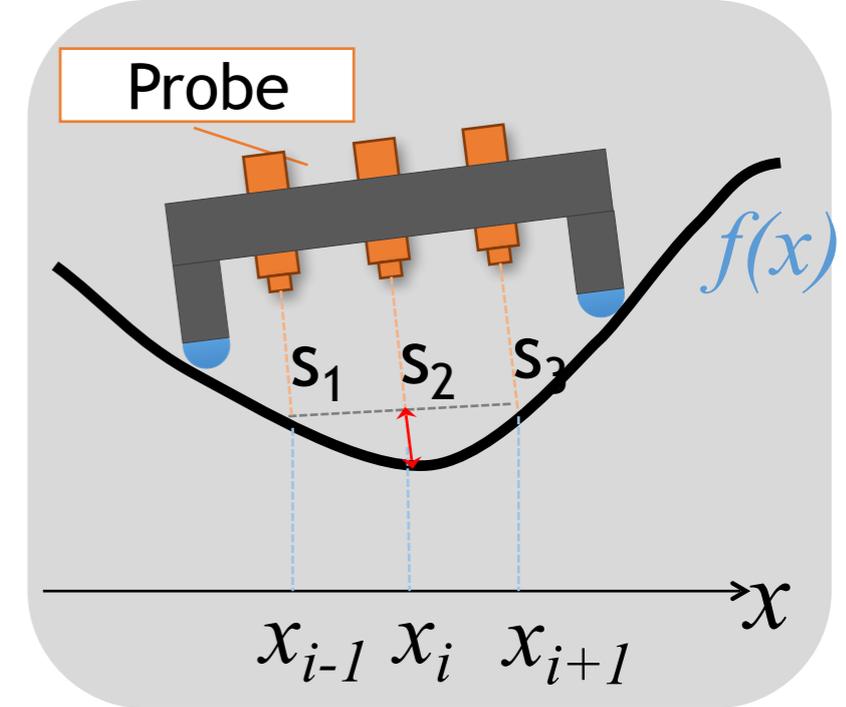
計測の様子（動画）



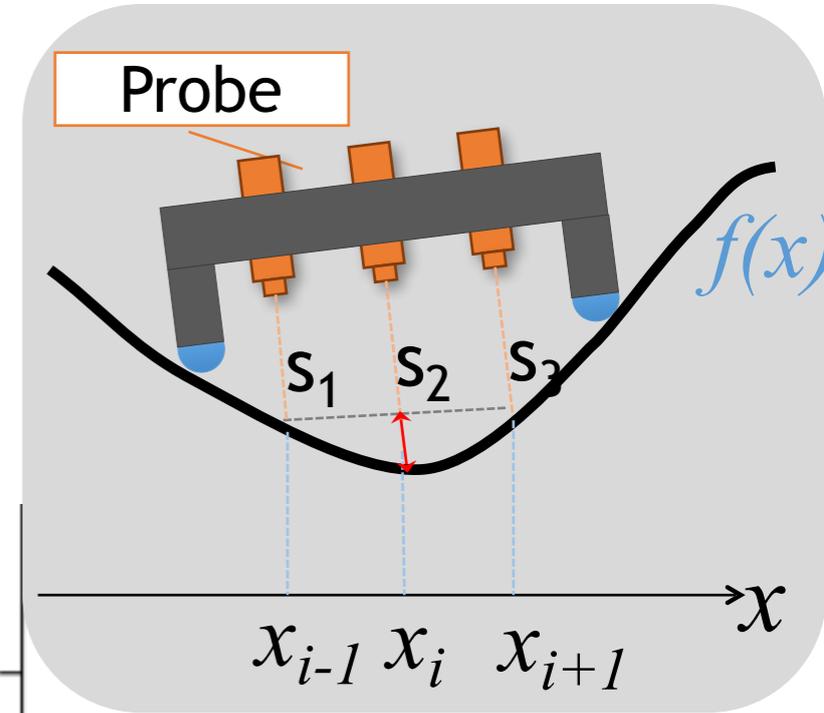
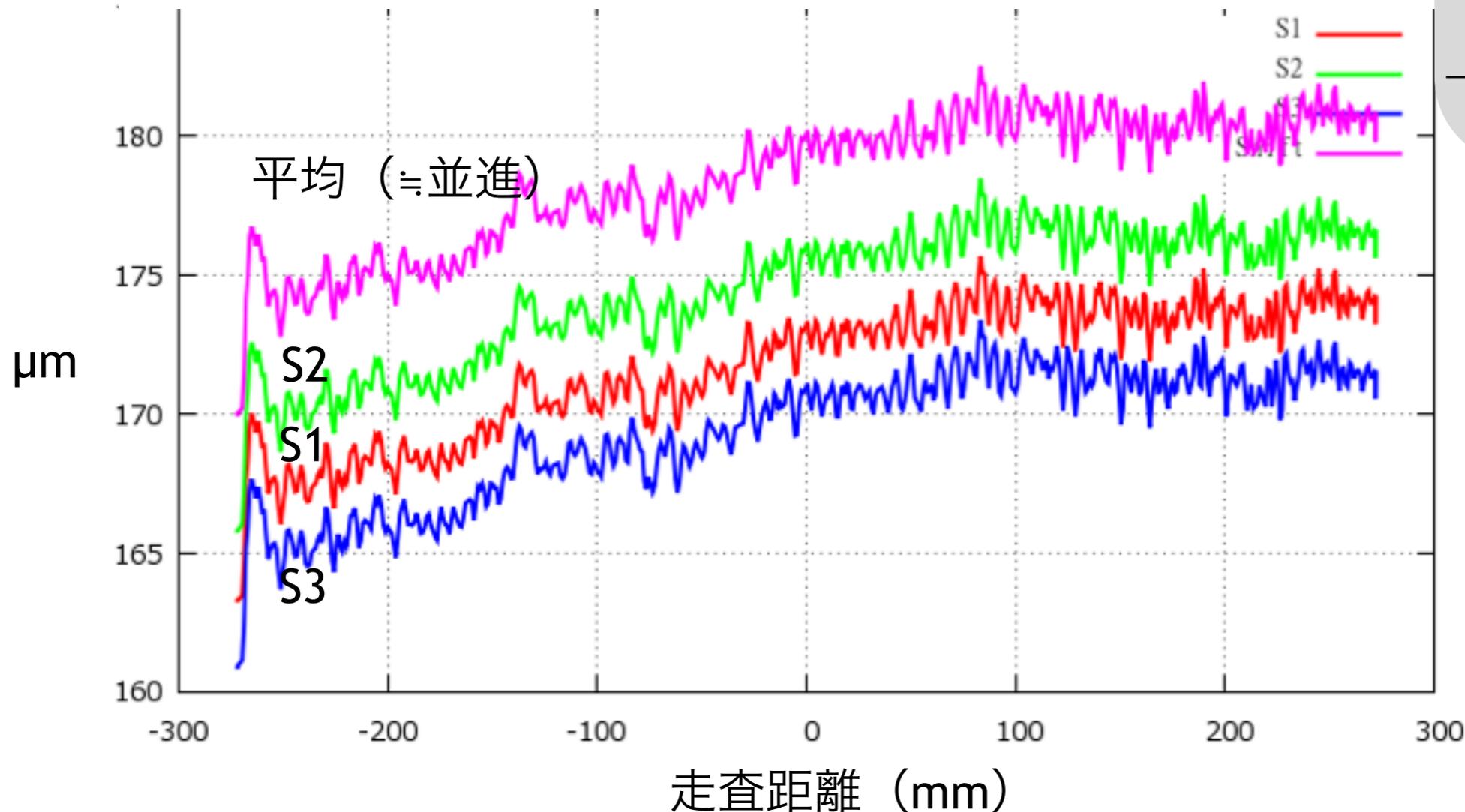
6度おきに60本の計測

# ひきずり3点法の特徴

- 無基準で自由曲面を計測可能
  - ただし、曲率は不定
- オン・ザ・マシン計測
  - 効率的で安定なフィードバックシステム
- 耐環境性
  - 通常環境で可能
- 加工機を計測機に拡張可能
  - 計測範囲も無制限
- コンパクト
  - 干渉計のように曲率半径相当の空間は不要
- シンプル・廉価
  - 駆動部の誤差の影響を受けない
  - センサも廉価なもので対応可能



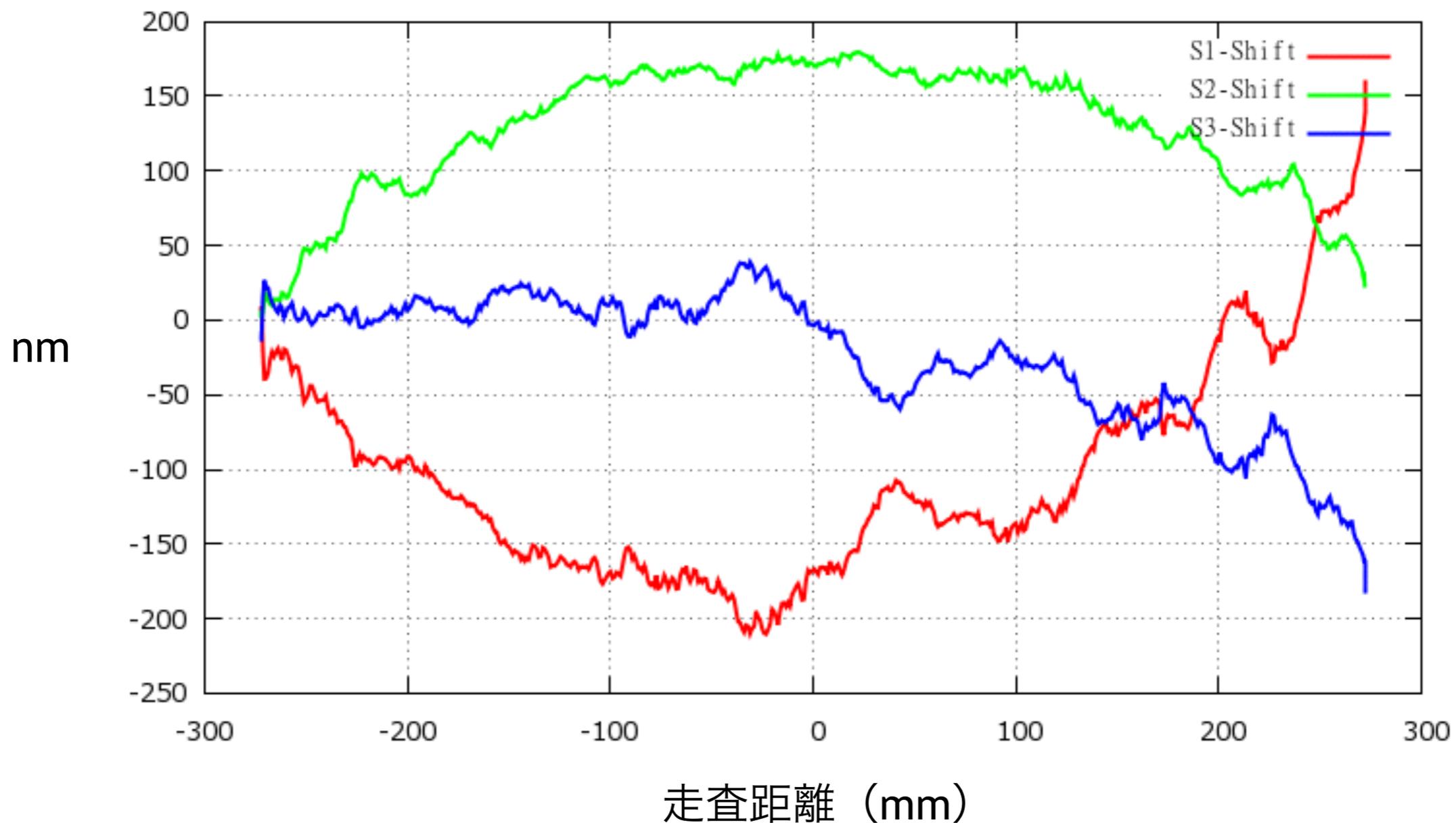
# センサの出力値



- 3つのセンサ値は基本的には同期しており、並進運動が主であることが分かる
- 3つのセンサは $1\mu\text{m}$ 程度で細かく振動し、 $5\mu\text{m}$ 程度の緩やかな変動がある。
- 振動は足と鏡面での摩擦が、緩やかな変動は治具の姿勢変化に伴うものと考えられる。

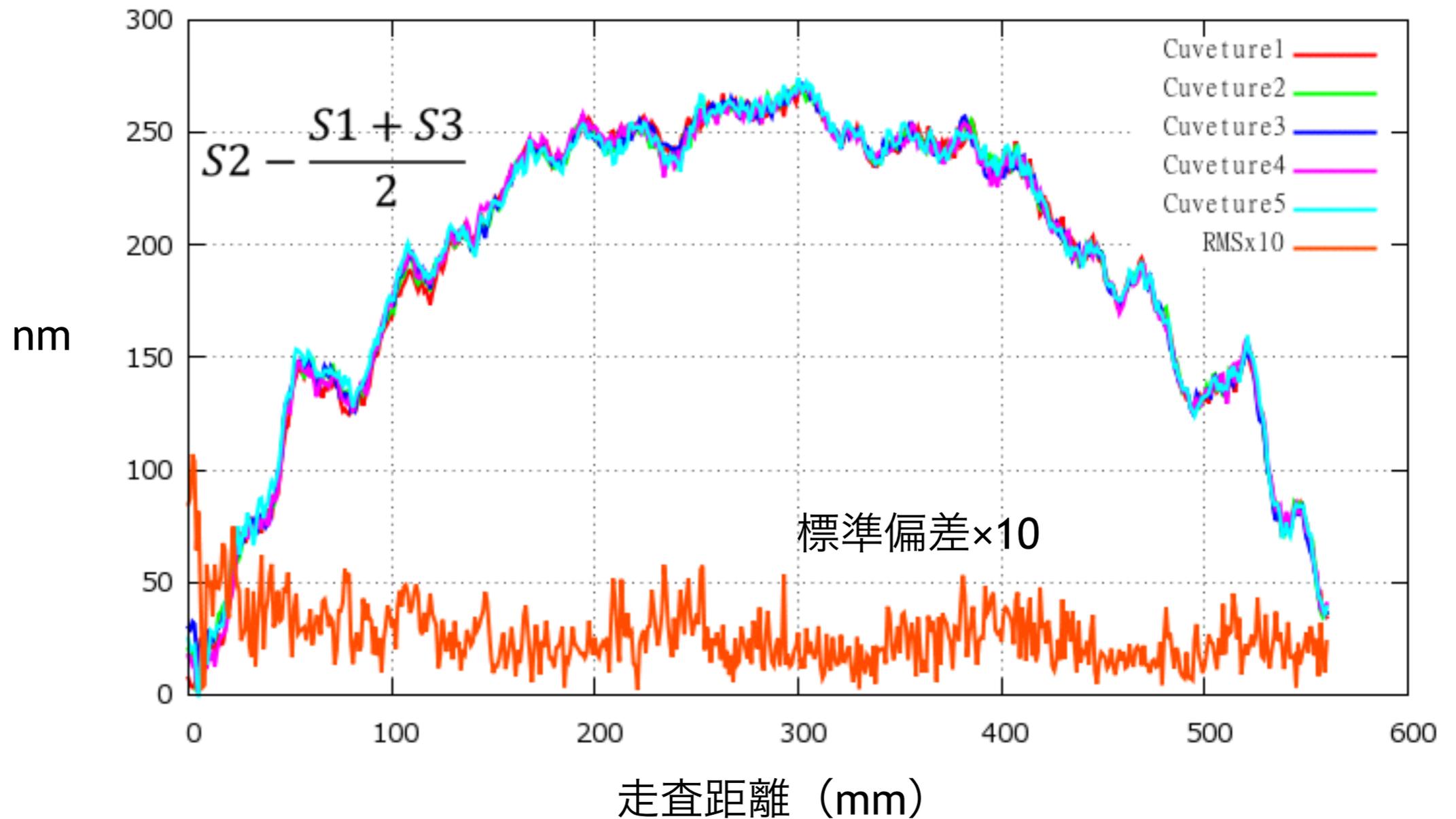
# 平均値からの残差

≒傾斜と形状



センサの両端S1（赤）とS3（青）が反転関係にあり、  
これは主にセンサ列の傾斜を意味する

# 曲率再現性



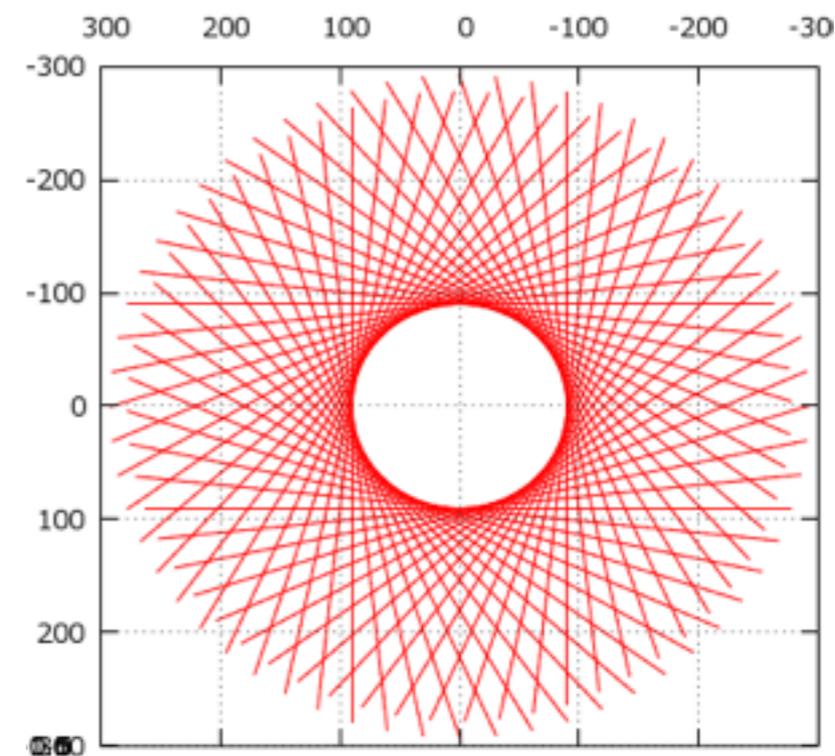
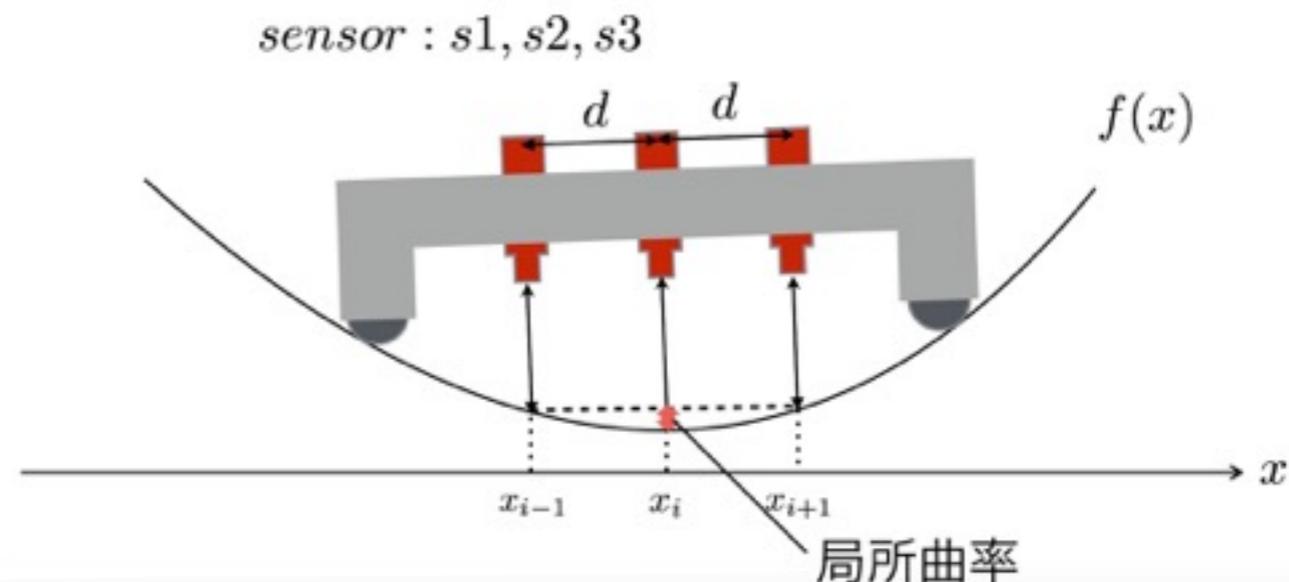
再現性～2.6 nm

※平面鏡の時より10倍ほど悪い

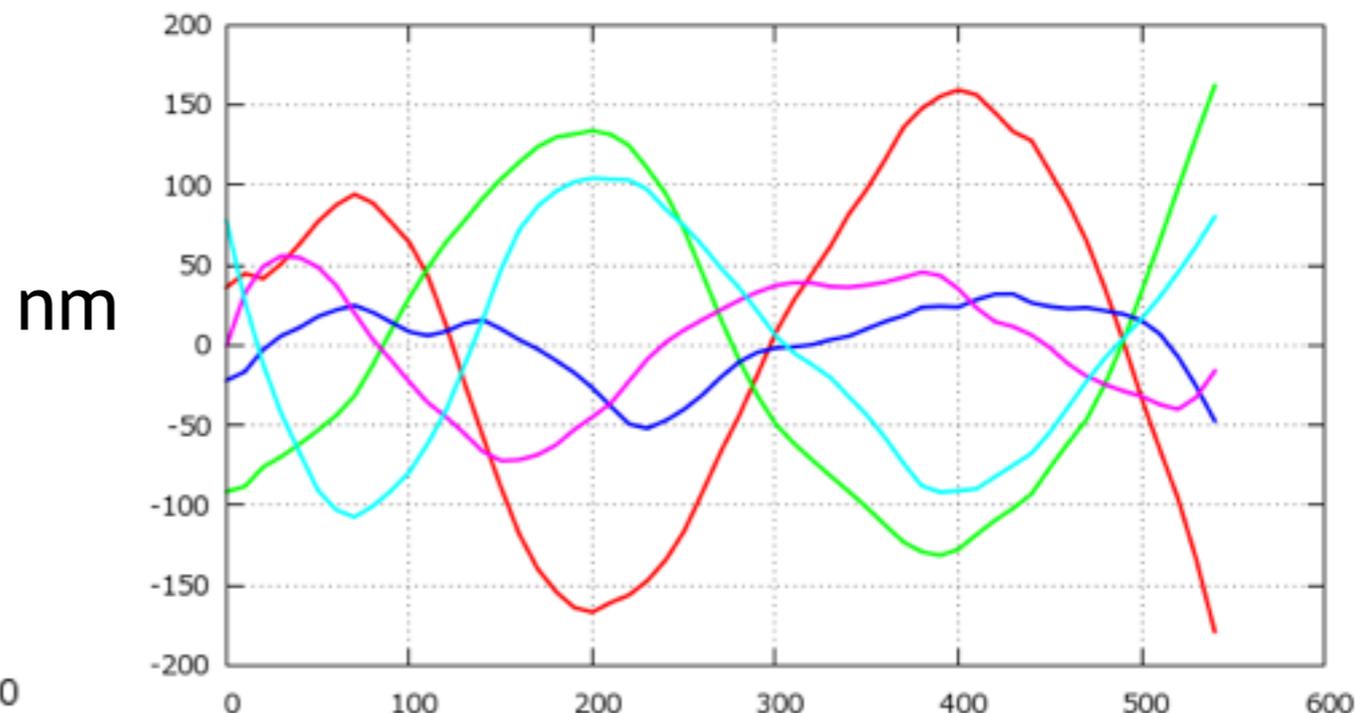
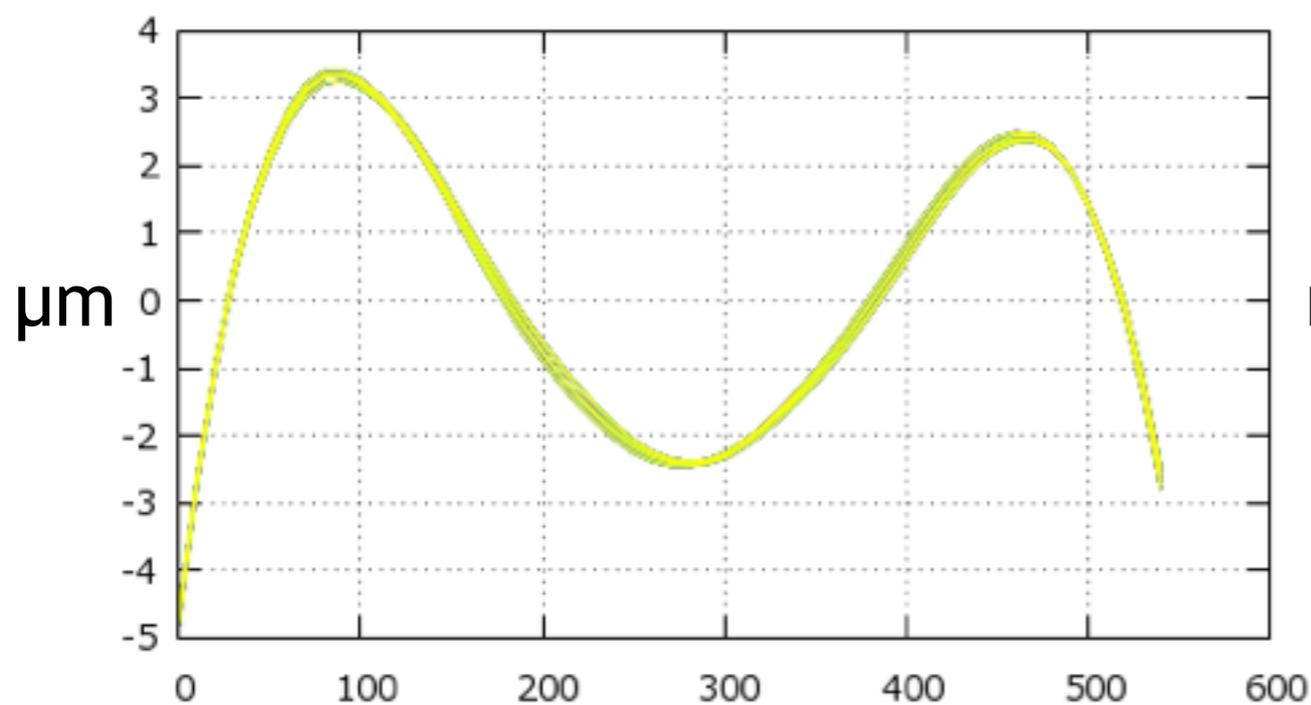
# データ処理

- 非球面度を求める
  - 局所曲率(の2倍)の二回積分(逐次)
  - ゼロ点誤差による二次成分を引く
  - シフトパスの適用

$$s2(x_i) - \frac{s1(x_i) + s3(x_i)}{2} = \frac{f(x_{i-1}) + f(x_{i+1})}{2} - f(x_i) + \alpha$$



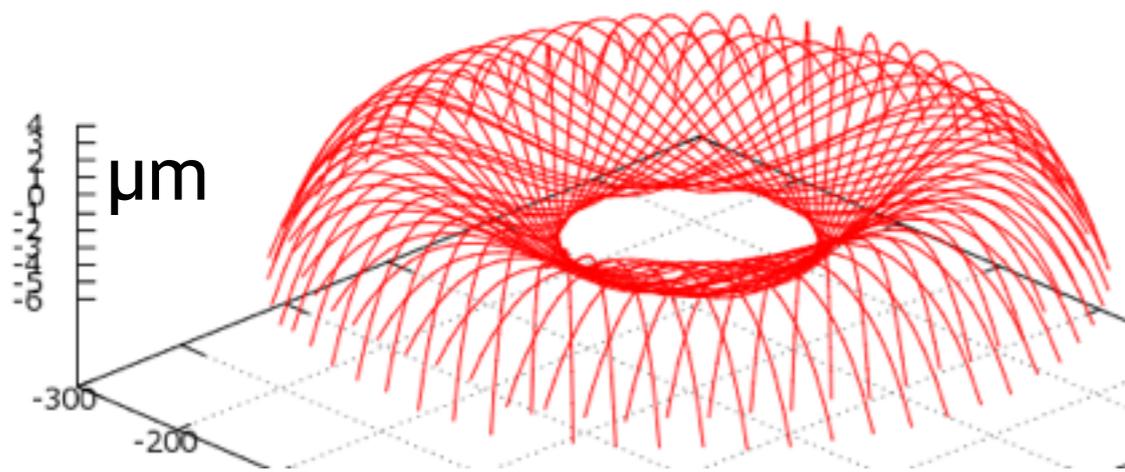
# 形状再現性



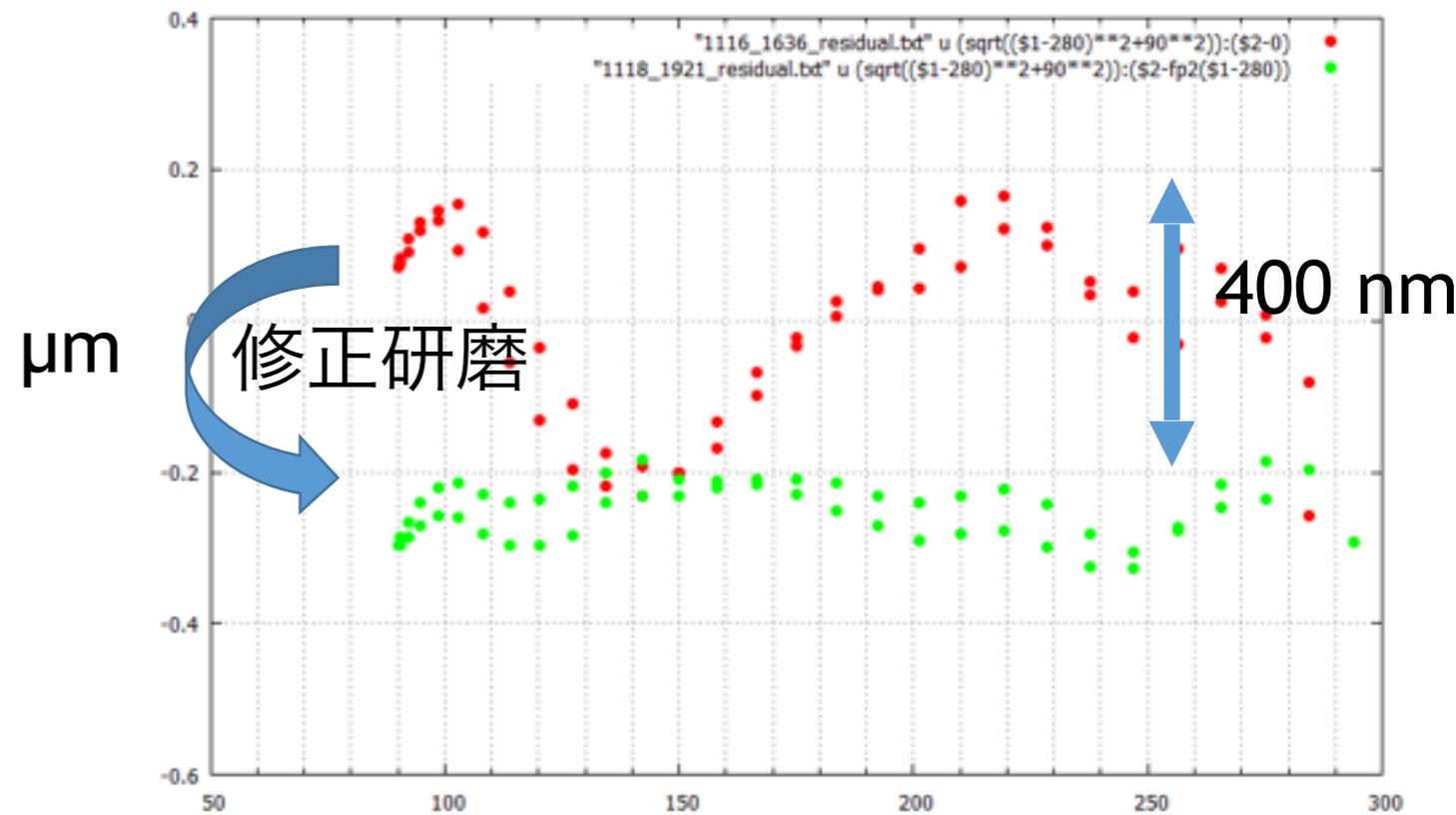
再現性： $\sim 80$  nm （許容範囲ではあるが）

※平面鏡の時は5nm程度だったので10倍ほど悪い

# 計測結果と修正研磨



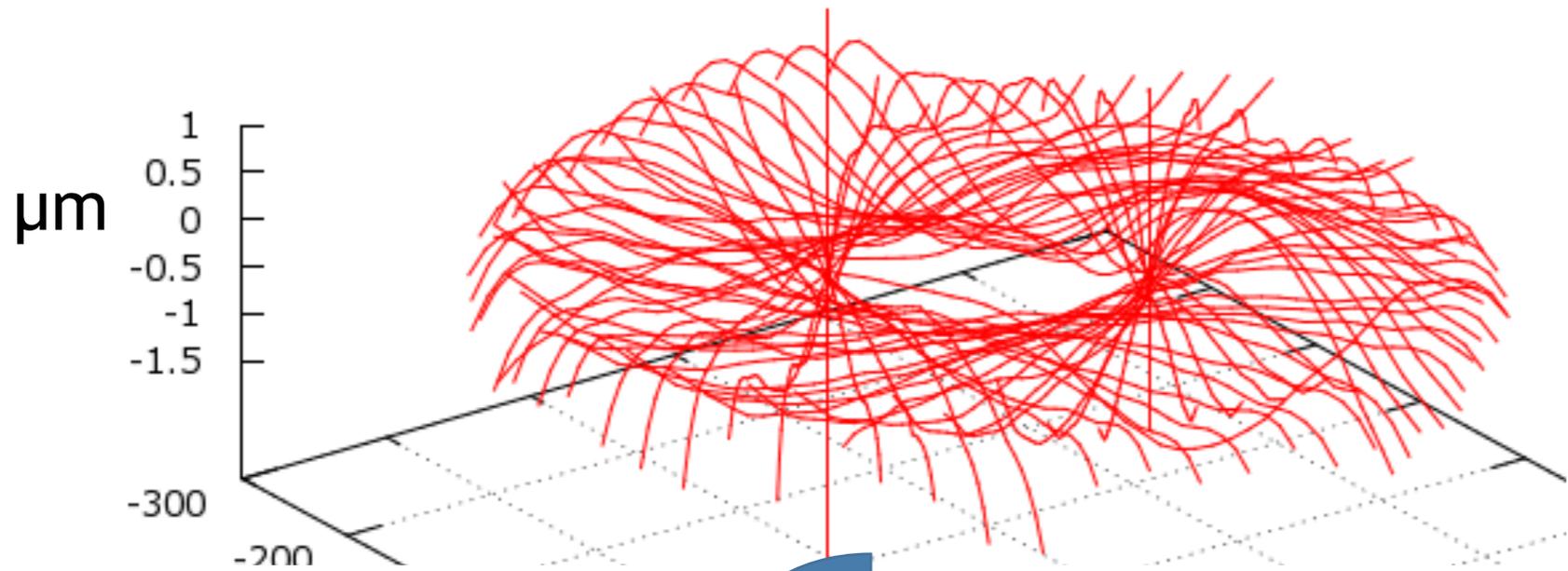
非球面成分



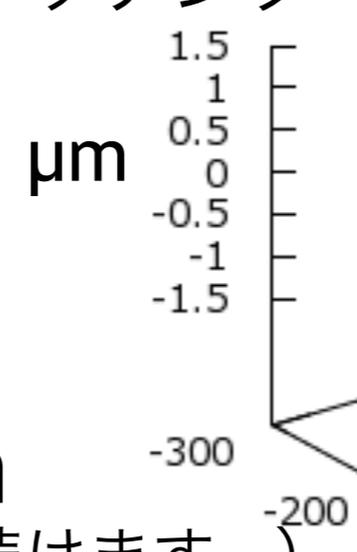
半径方向の平均誤差  
(理想非球面度からの差)

回転研削加工による軸対称の形状誤差  
を研磨により除去

# 最終結果



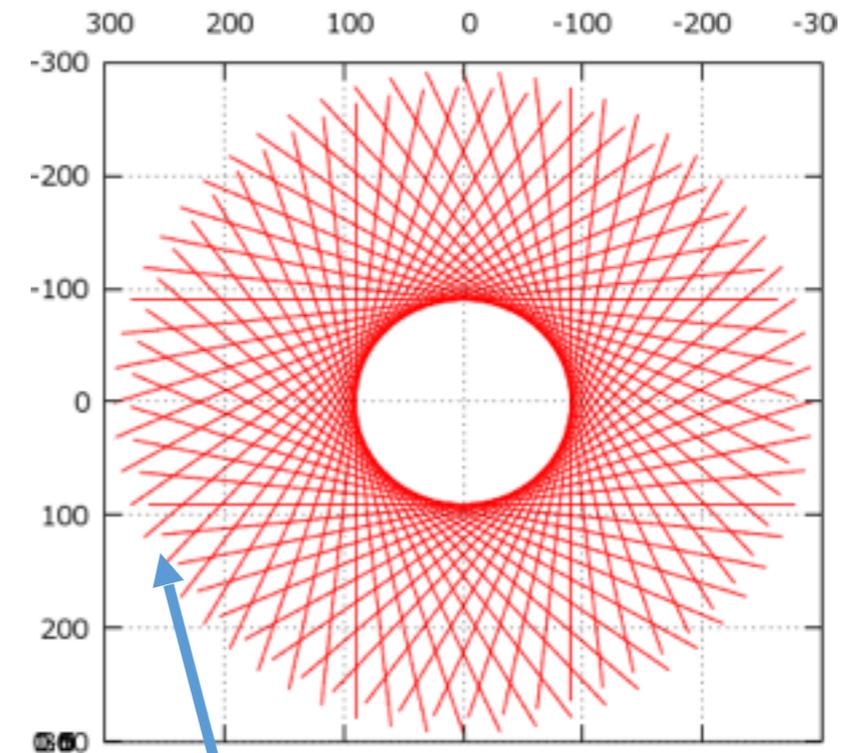
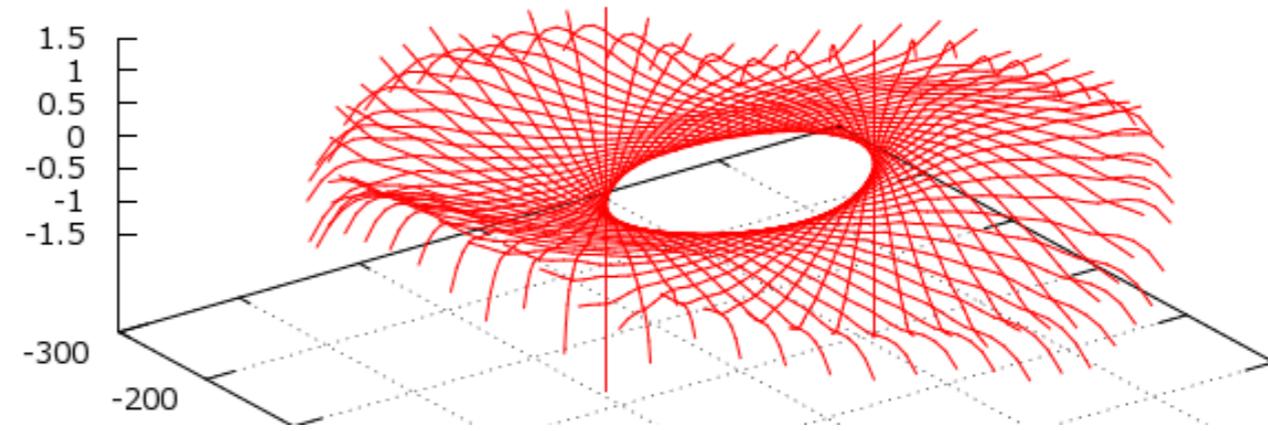
ステッチング



**RMS=280 nm**  
(引き続き試験を続けます。)

# 議論（反省点）

- 同心円パターンの修正研磨はできた。
- 干渉計では計測できない面粗度が悪い研削直後でも計測できるが、計測精度は $1\mu\text{m}$ 程度
- 引きずり治具が曲面に対応しておらず、不安定になり再現性が悪化した。
- うねりを確認できるが、計測値の面内座標の精度が悪く、これ以上考察できない（計測開始点を $0.1\text{mm}$ 誤ると $200\text{nm}$ の計測誤差を生ずる）。また、計測パスが非対称で、ステッチ交点が非効率であった。



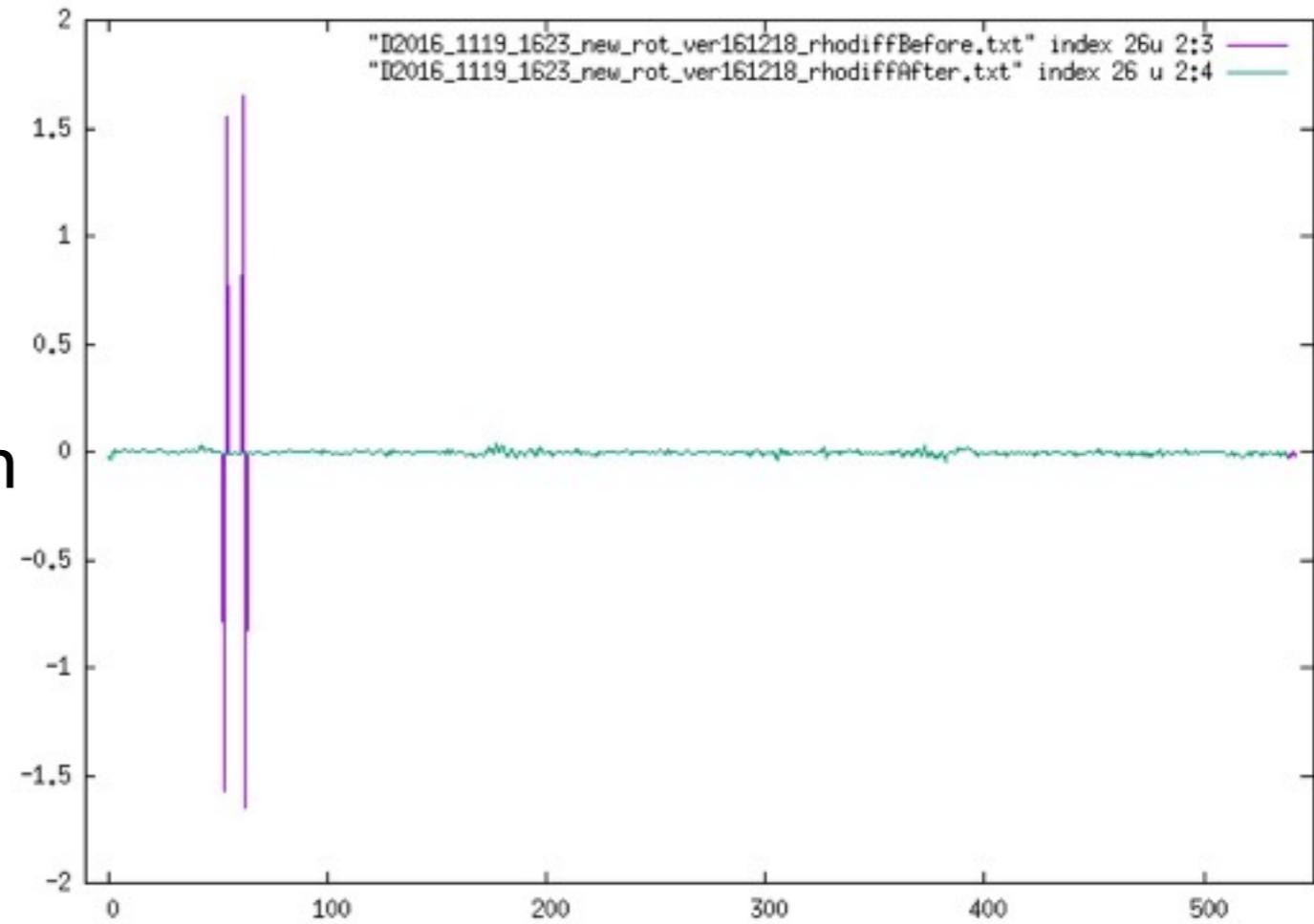
端は特にうねりやすいが交わっておらず、ステッチングが効果的にはたらかなかった

# 議論（反省点）

- 局所曲率の外れ値を考慮していなかった
  - シフトパスにより結果として大きな影響は及ぼさなかったが、外れ値による変動は大きいので除去する必要がある

局所曲率の微分値

mm



$\mu\text{m}$

