

逐次三点法による鏡面形状計測

安東研M1 下田智文

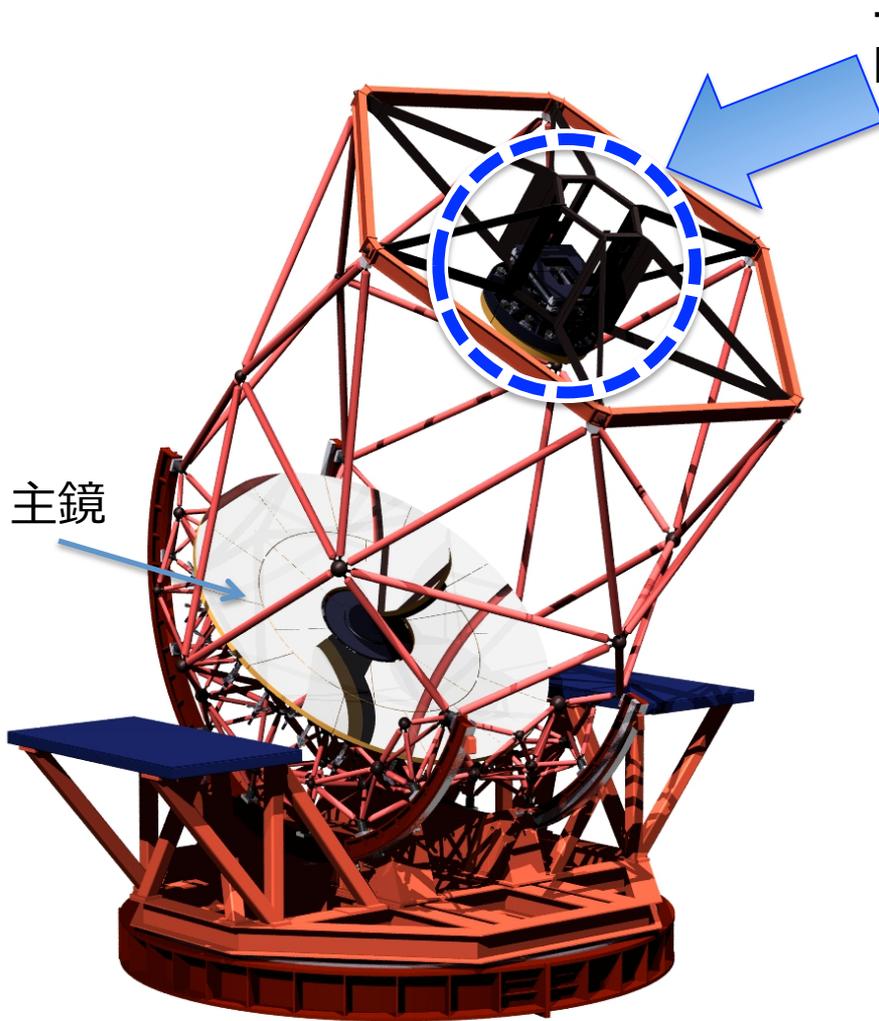
2015/4/16 中間報告会

目次

- 研究背景
- 計測原理
- 要求精度
- 実験内容 & 計測装置
- 結果
- まとめ

研究背景

目標：京大3.8m望遠鏡の副鏡

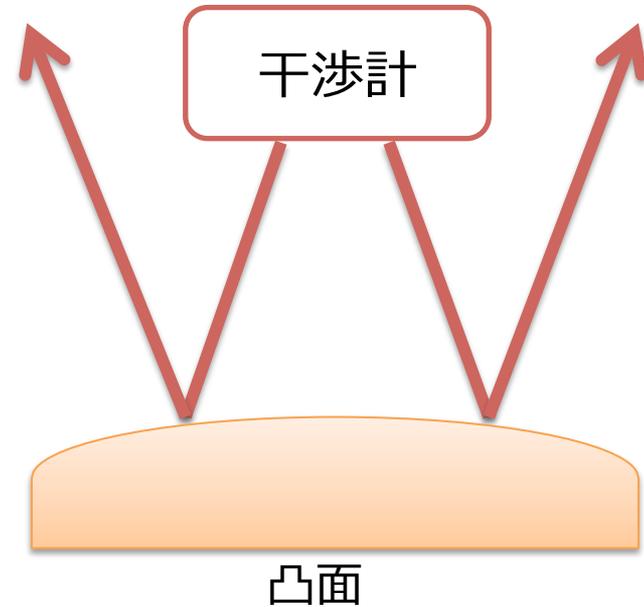
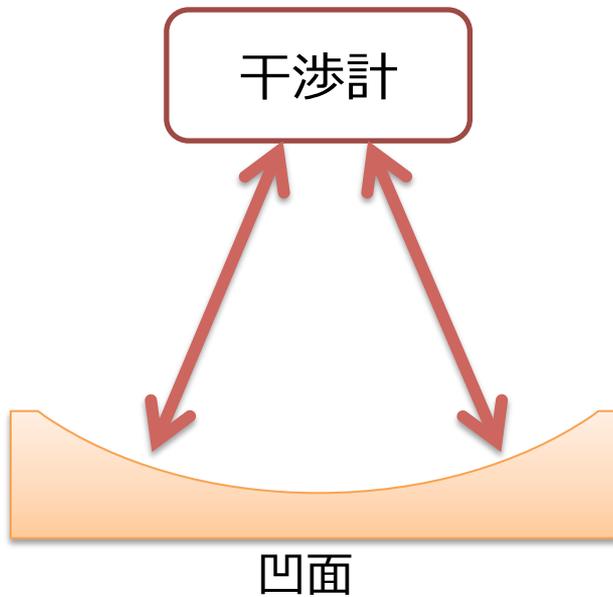


副鏡のスペック

形状	凸双曲面
直径	1066mm
曲率半径	3335mm

大型凸面計測の困難性

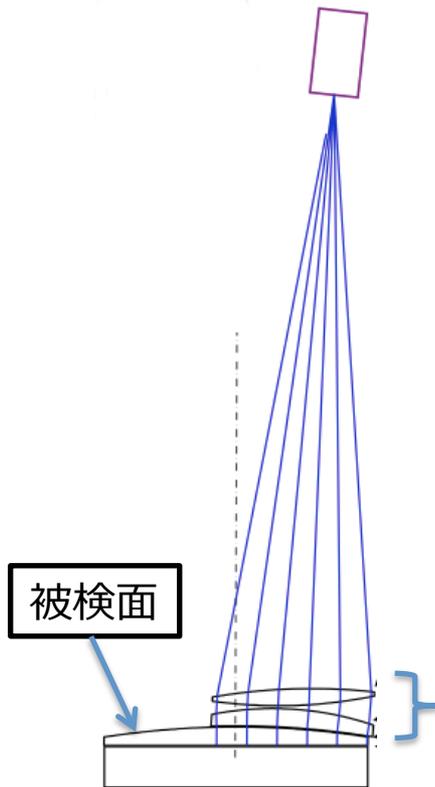
- 干渉計による計測
 - 干渉計からの光を再び干渉計に戻す必要がある



そのままでは計測できない

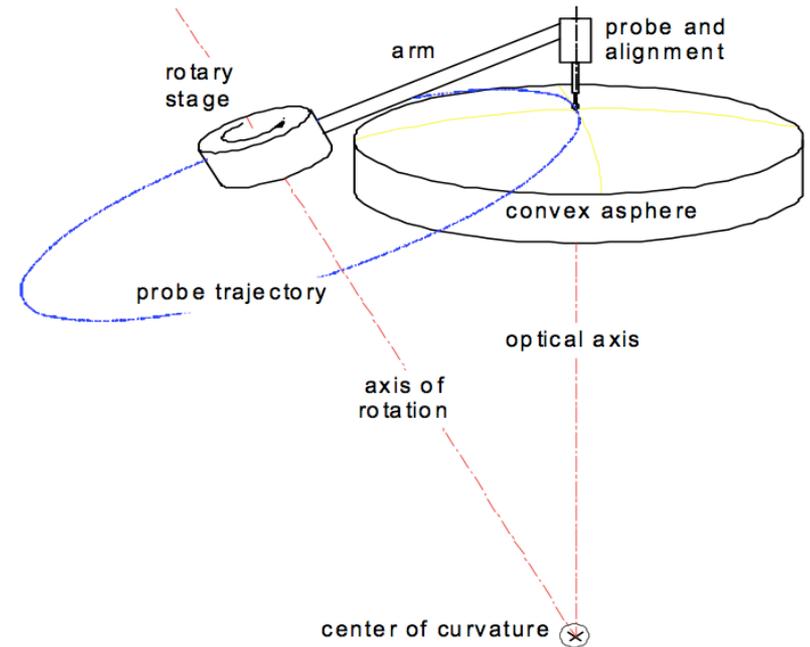
先行研究

- Sub-aperture interferometry



Burge et al. 2008

- Swing-Arm



Su et al. 2009

計測原理

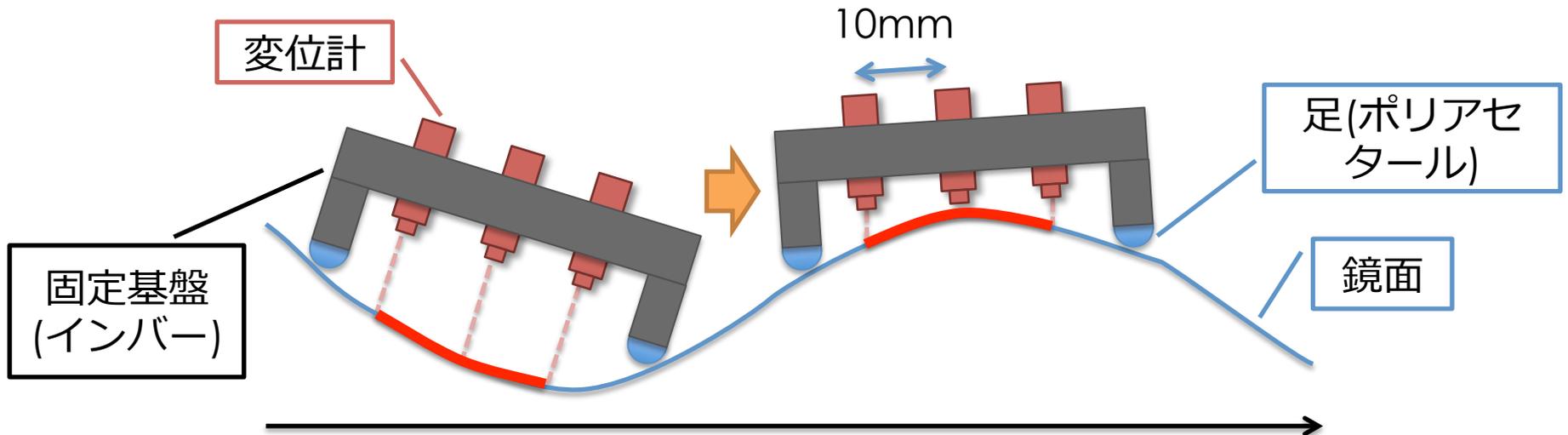
引きずり逐次三点法

引きずり

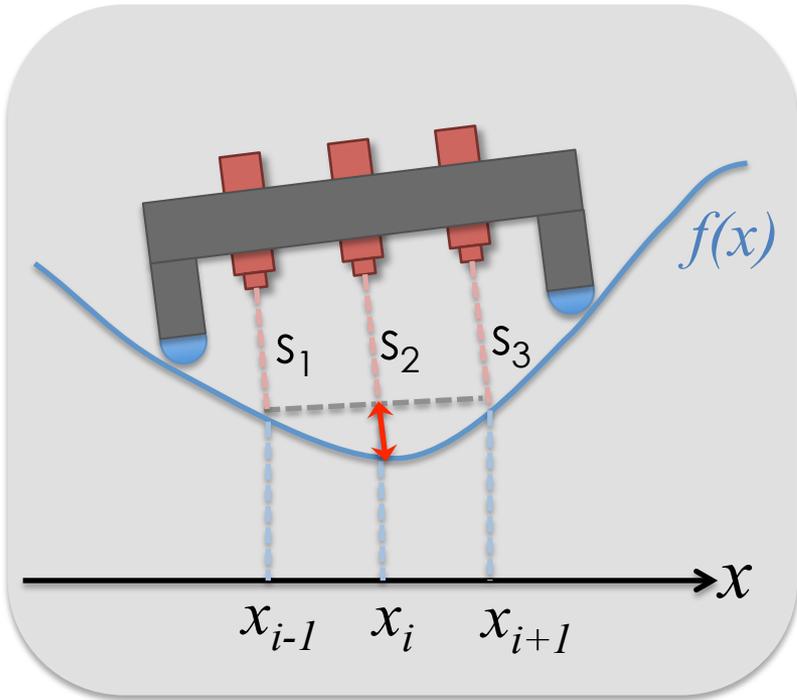
変位計の固定基盤に足をつけ、鏡面に接触させたまま引きずることでスキャン

逐次三点法

3つの変位計を用いて局所的な曲率を計測位置を変えて順次計測することで形状を算出



逐次三点法：計算式



$$\begin{aligned}
 \updownarrow &= s_2 - \frac{s_1 + s_3}{2} \equiv s(x_i) \quad : \text{計測値} \\
 &= \frac{f(x_{i-1}) + f(x_{i+1})}{2} - f(x_i) \quad : \text{形状}
 \end{aligned}$$



≡ 2階積分

$$f(x_n) = f(x_0) + n(f(x_1) - f(x_0)) + 2 \sum_{i=1}^n (n-i)s(x_i)$$

高さの基準位置と全体の傾きの項(無視)

ゼロ点誤差 ⇒ 曲率誤差

- センサのゼロ点の不定性⇒曲率の不定性

$$s(x_i) + \alpha \quad \longrightarrow \quad f(x_n) = 2 \sum_{i=1}^n (n-i)s(x_i) + \alpha n(n-1)$$

ゼロ点誤差 曲率誤差

- 曲率誤差は焦点位置の調整でほぼ補正可能
 - 曲率半径10mm程度の誤差(形状で~10-100 μ mの誤差)は許容範囲
 - 機械案内による計測で補うことが可能

以下では形状の2次以下の成分は除く

要求精度

要求精度

- 構造関数 : $rms(r) \equiv \sqrt{\langle (f(\vec{x} + \vec{r}) - f(\vec{x}))^2 \rangle}$ $f(\vec{x})$: 形状
 $|\vec{r}| \equiv r$

要求精度

$$rms(r) \leq \sqrt{\underbrace{\frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2}_{\text{大気揺らぎ}} \underbrace{6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}}_{\text{傾斜成分の補正}} \left[1 - 0.975 \left(\frac{r}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + \underbrace{2\sigma^2}_{\text{散乱光}}}$$

λ : 観測波長

r_0 : フリード長(大気揺らぎの典型的長さ)

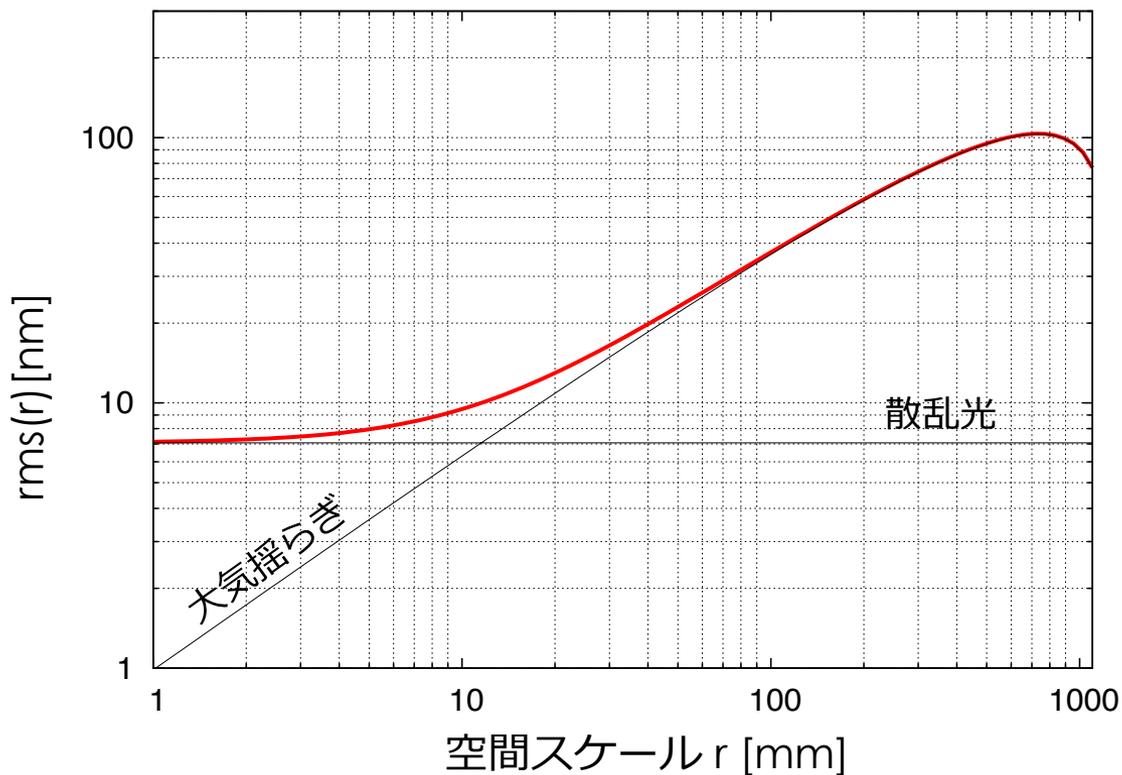
D : 副鏡の直径

σ : 表面粗さ

$$\frac{I_{scatter}}{I_{in}} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right)$$

要求精度

$$rms(r) \leq \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \left[1 - 0.975 \left(\frac{r}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + 2\sigma^2}$$



$\lambda = 1.65 \mu\text{m}$
 $r_0 = 3.5 \text{m}$
 $D = 1.15 \text{m}$
 $\sigma = 5.0 \text{nm}$

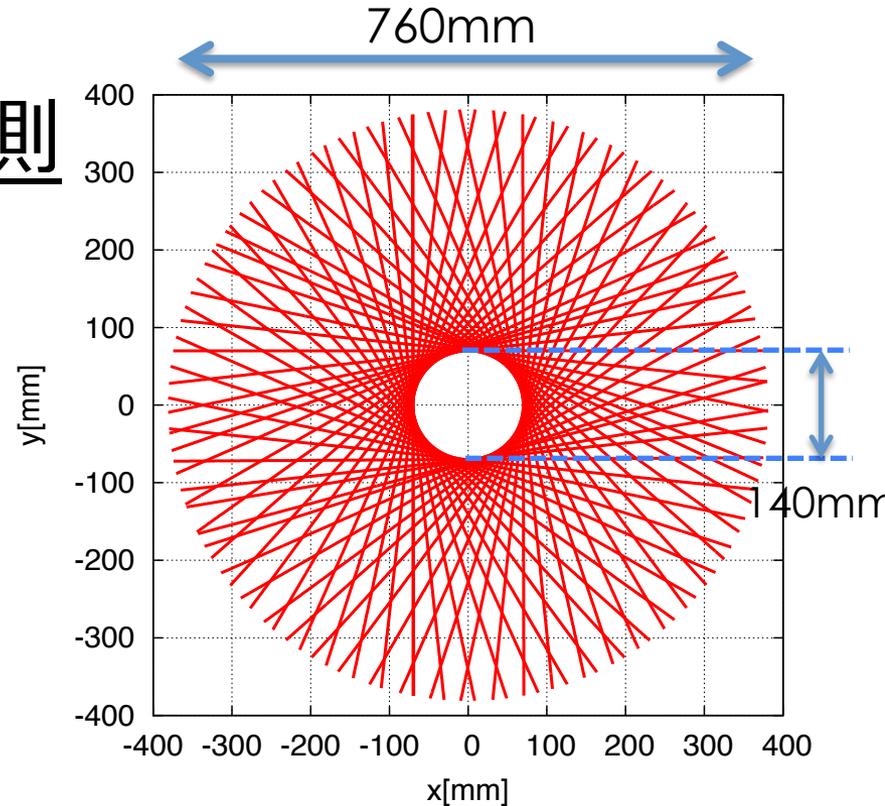
実験内容 & 計測装置

本実験の内容

- φ800球面鏡の全面計測

計測対象スペック

形状	凹球面
直径	794mm
曲率半径	1633mm
材質	クリアセラム

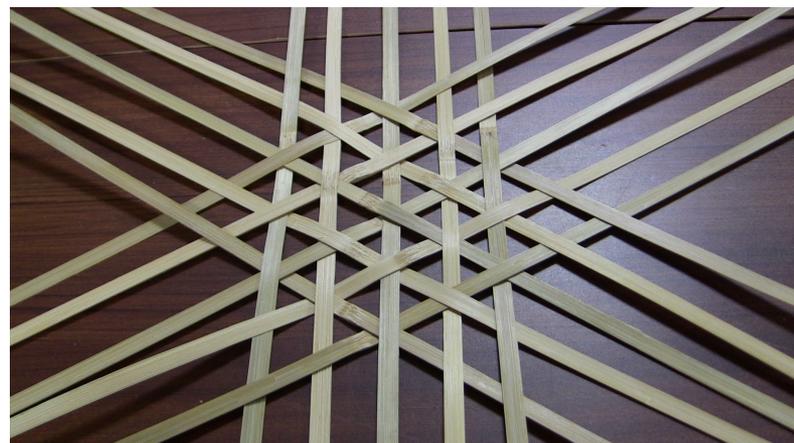


計測パス (約60本)

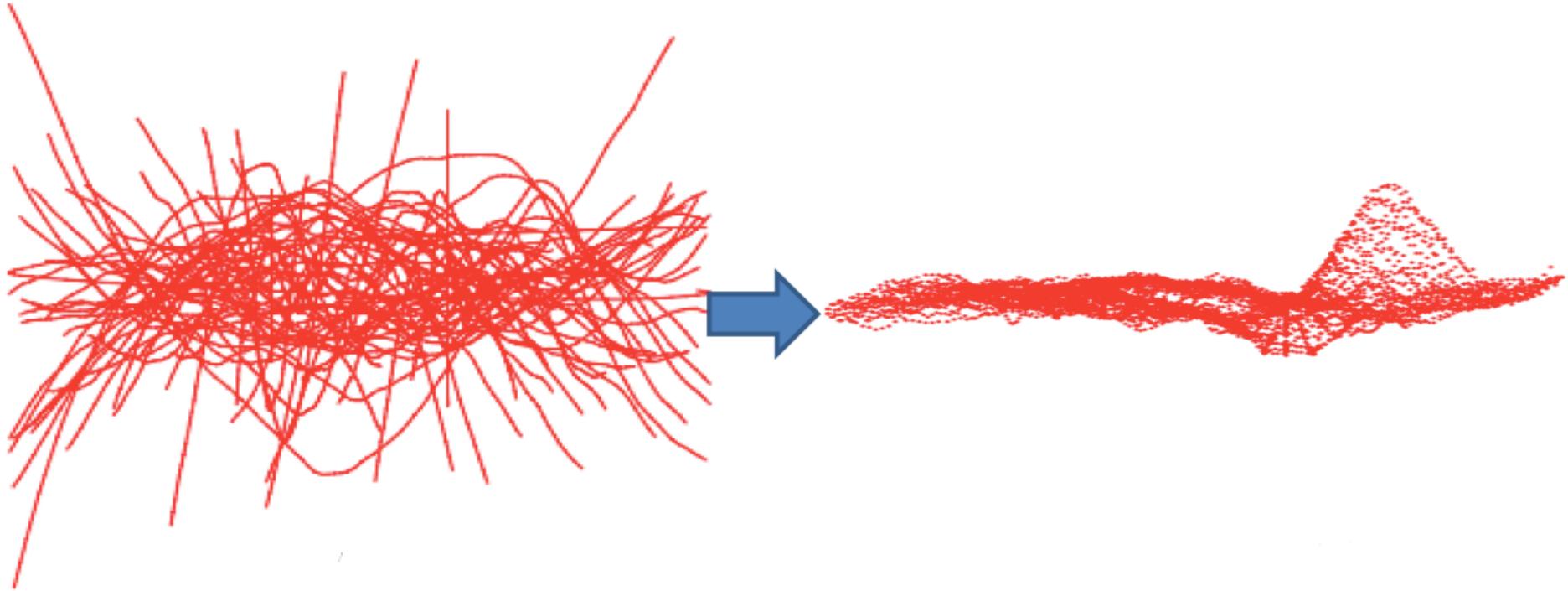
- パスに沿った断面形状60本から **ステッチング** により全面形状を求める

※ステッチングとは

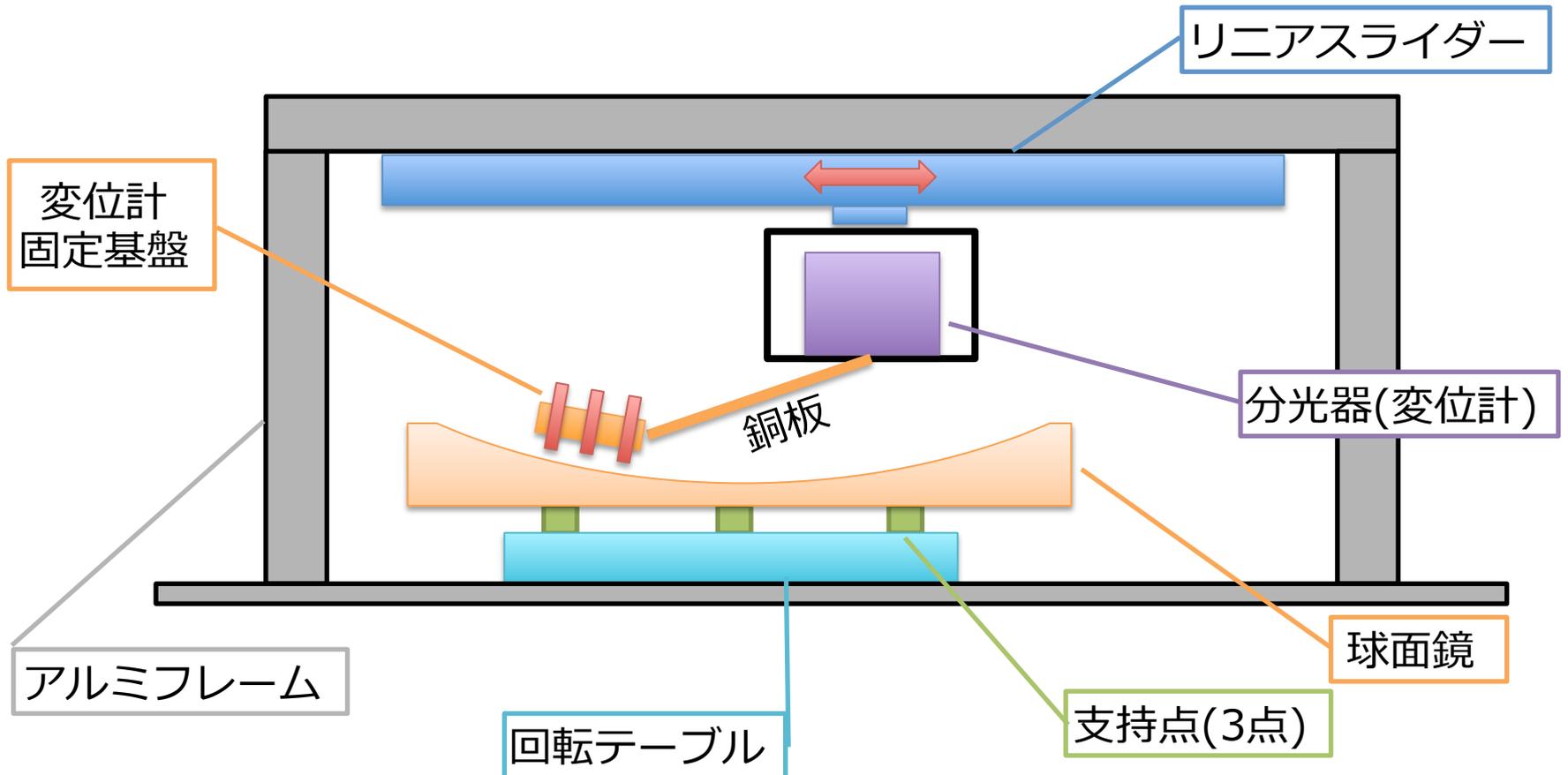
- 重複領域のある複数のデータ同士の接続方法（京大 栗田氏が考案）
- データを弾性体として扱い、重複領域(交点)で各データをつなぐ
 - 竹ひごを編むイメージ



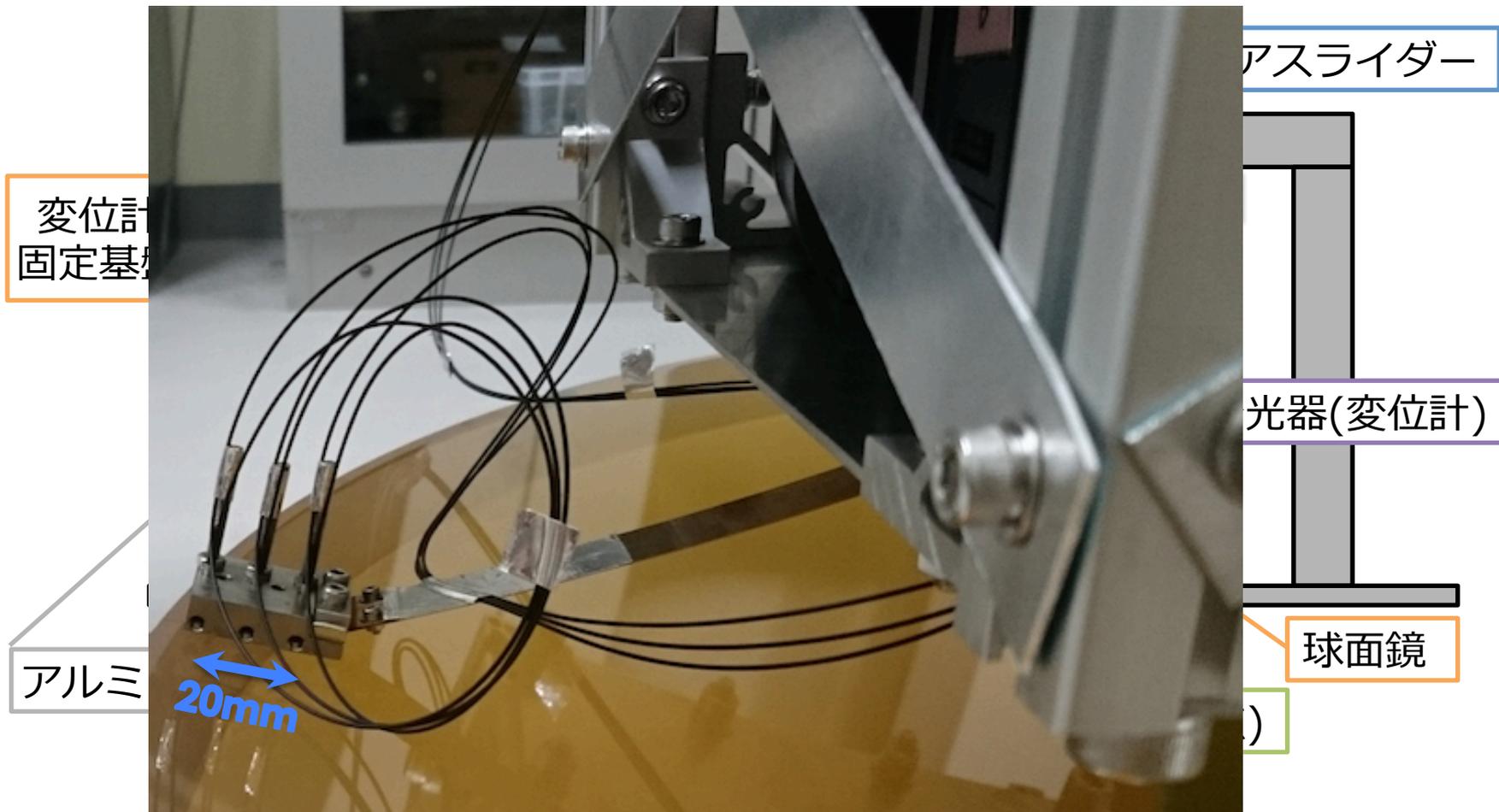
※ステッチングとは



計測装置



計測装置

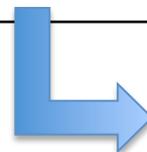


変位計

- KEYENCE社製 レーザー分光干渉計 SI-F01



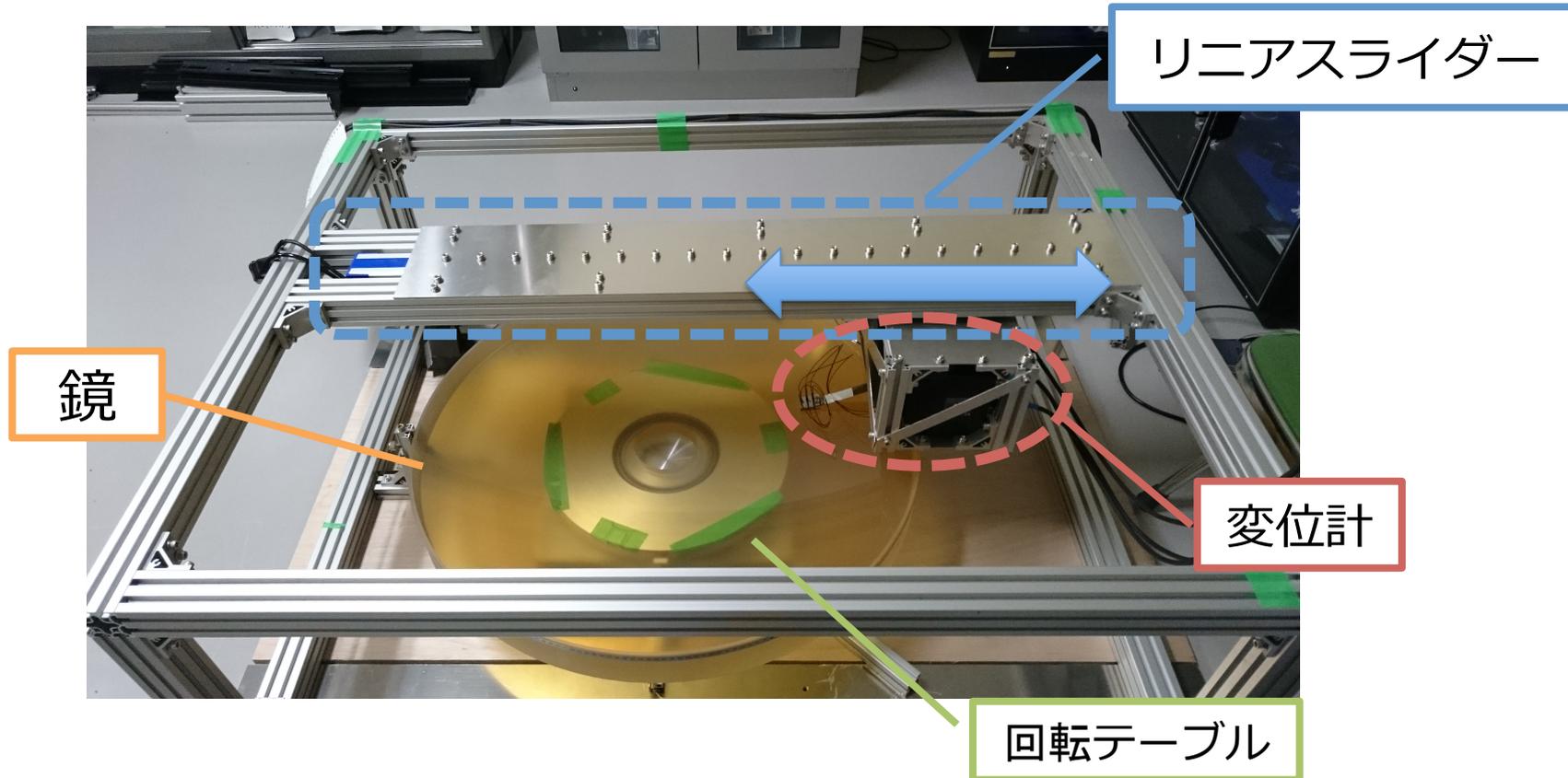
測定範囲	サンプリング周期	スポット径	計測誤差
0.05-1.1mm	200 μ s(5kHz)	20 μ m	~0.5nm rms ※実測値



スキャン速度~20mm/s
⇒ 250データ/mm

計測環境

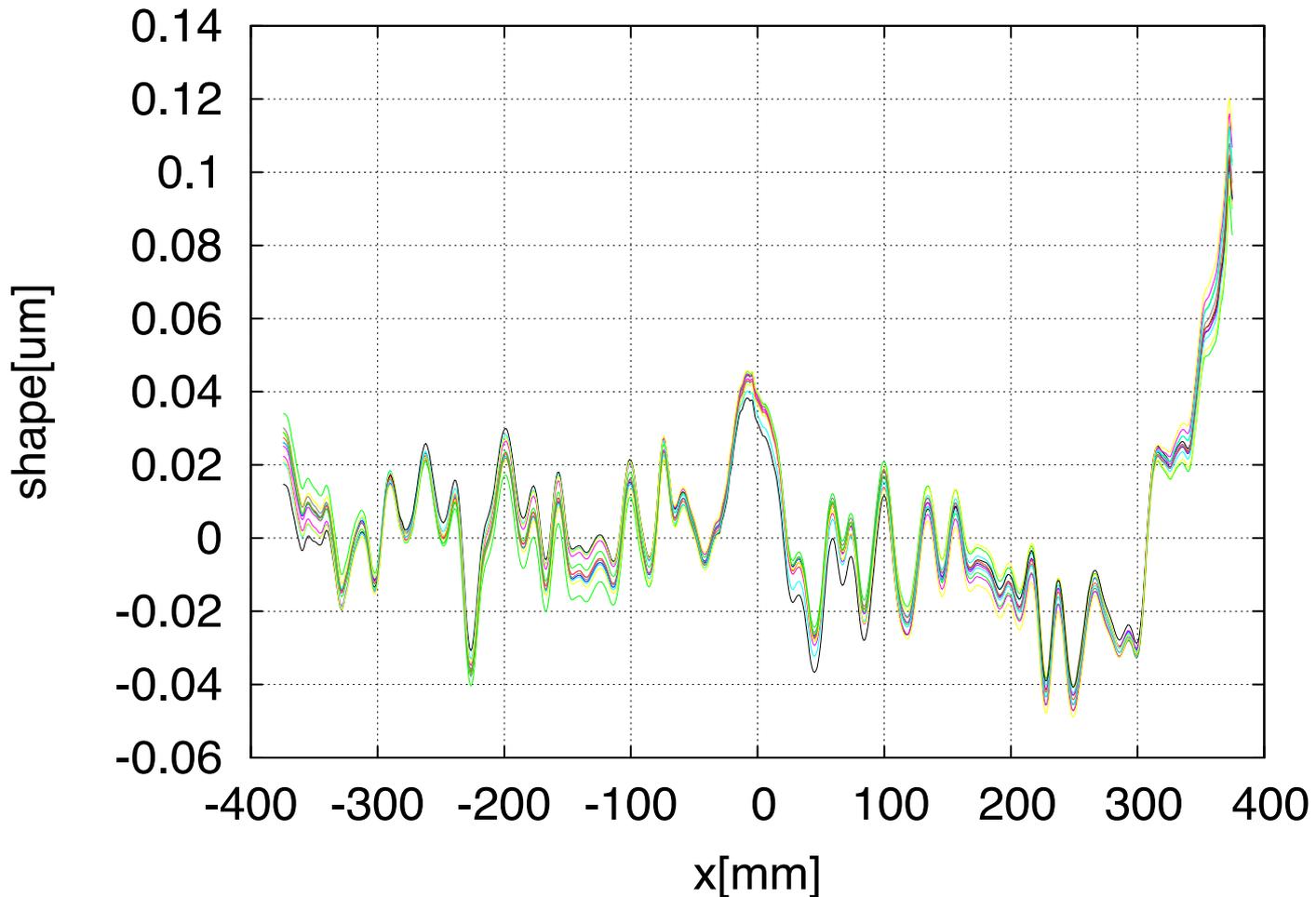
- 京都大学理学部 4号館5階 光学実験室
- 空調なし



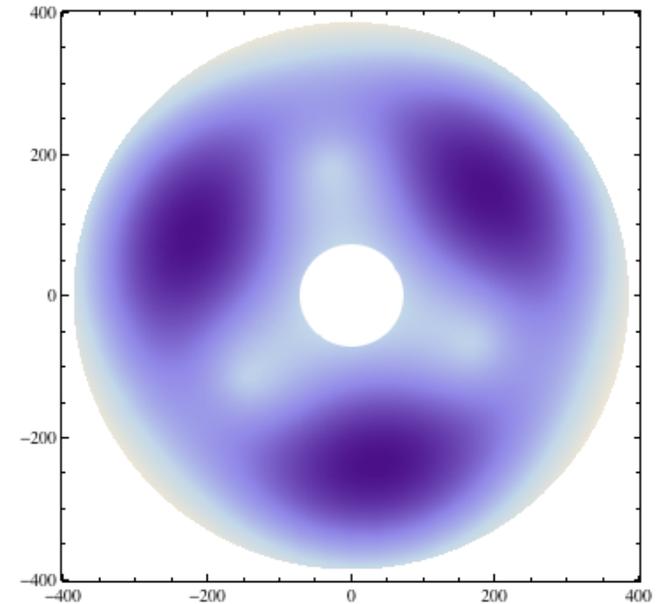
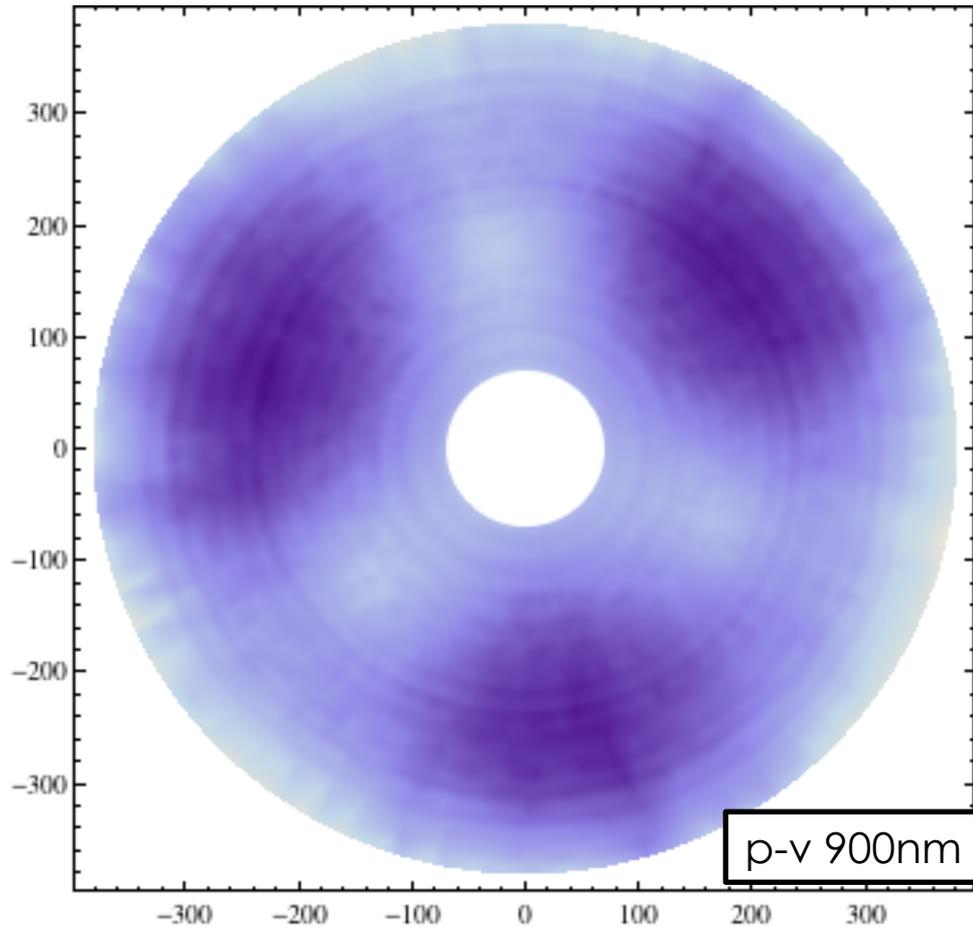
結果

計測結果：再現性

- 12回計測 ⇒ 再現性：rms～数nm



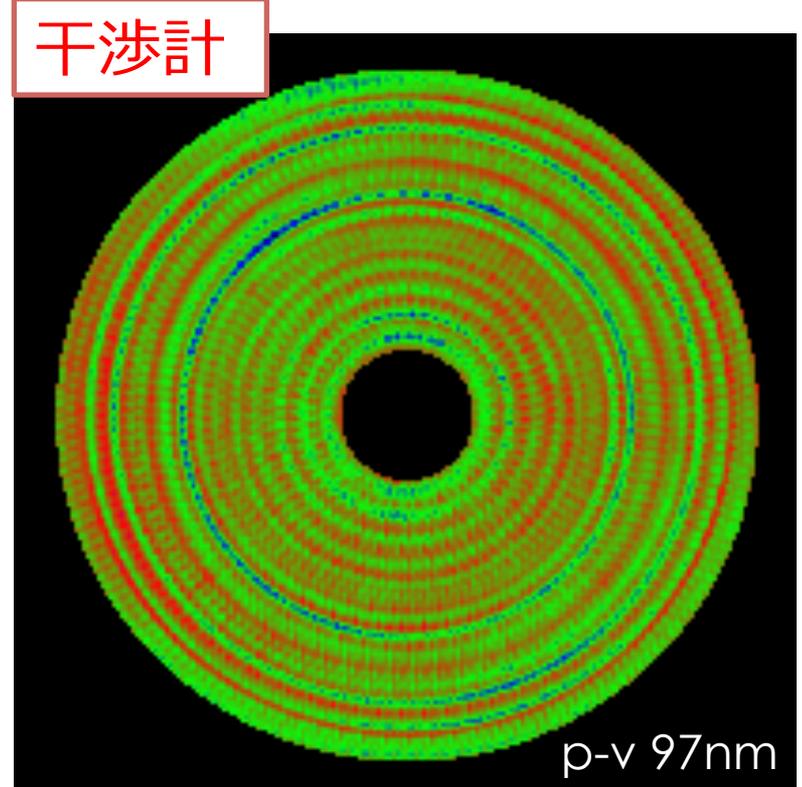
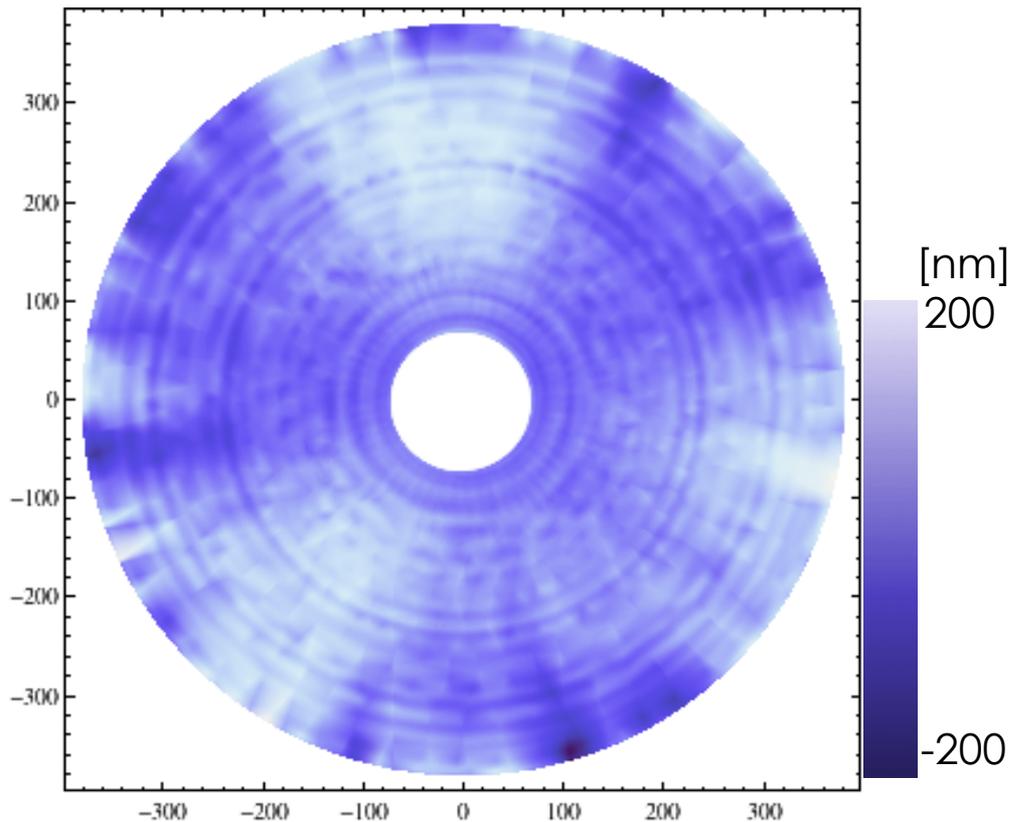
計測結果：形状



3点支持による自重変形量
(FEM解析)

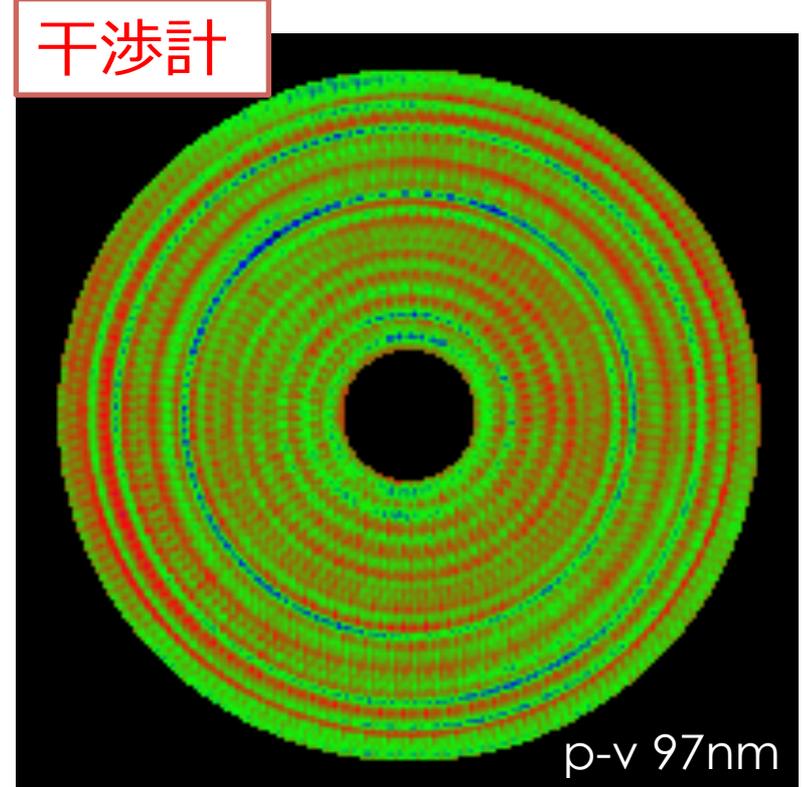
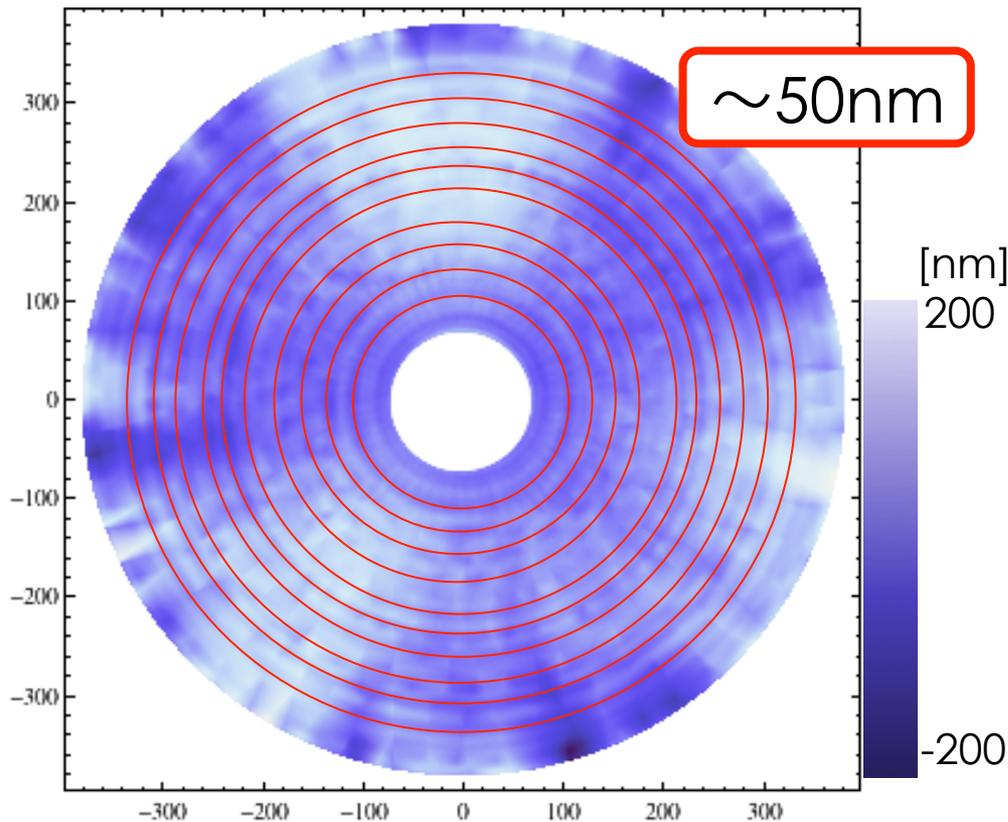
- 自重変形形状を捉えている

計測結果（自重変形成分除去）



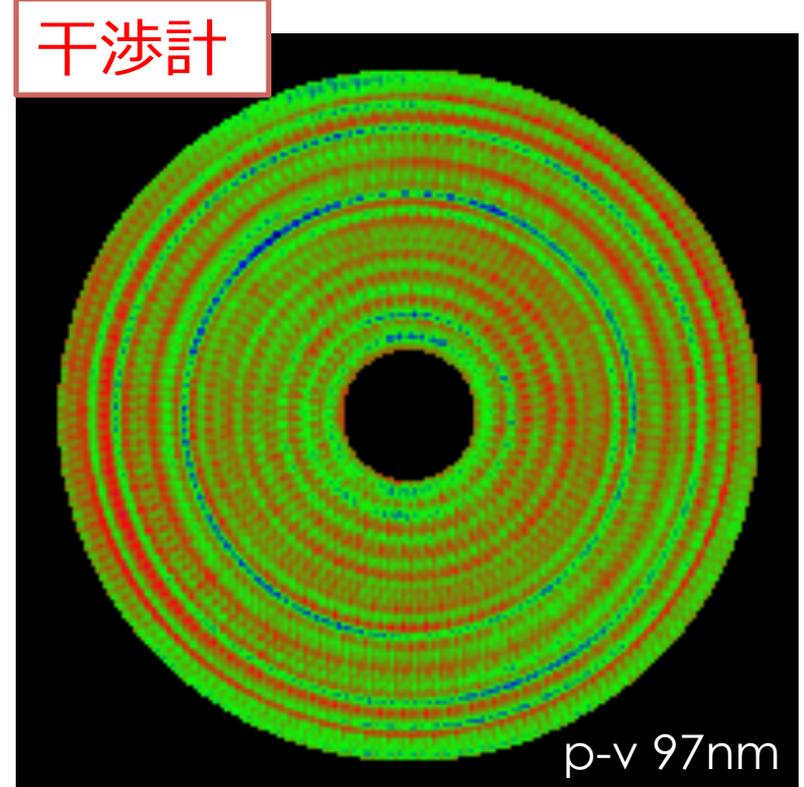
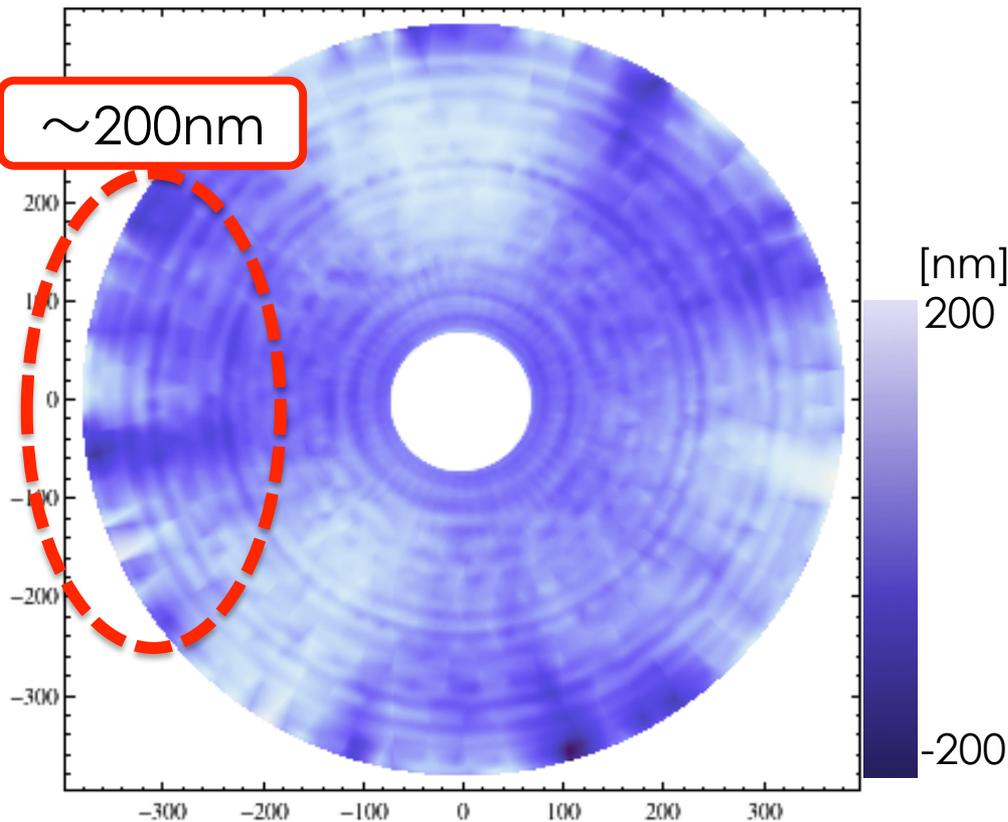
- 同心円状のパターンは干渉計とよく一致
- 縁付近で値がばらついている (~200nm) ← 計測誤差

計測結果（自重変形成分除去）



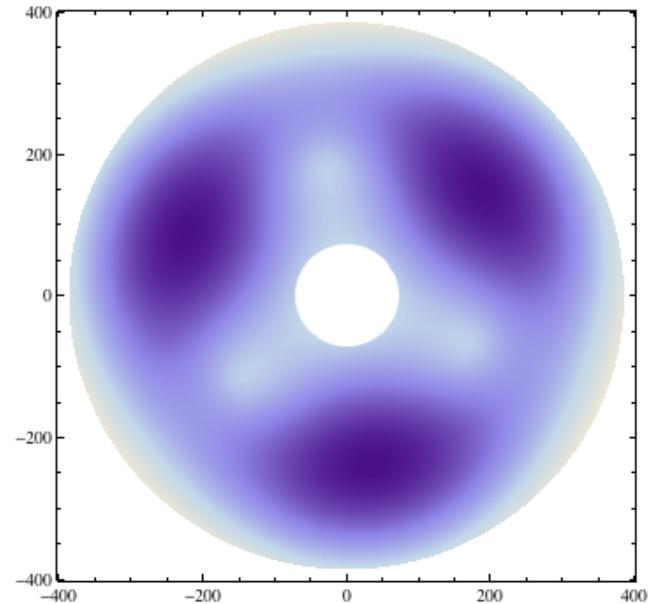
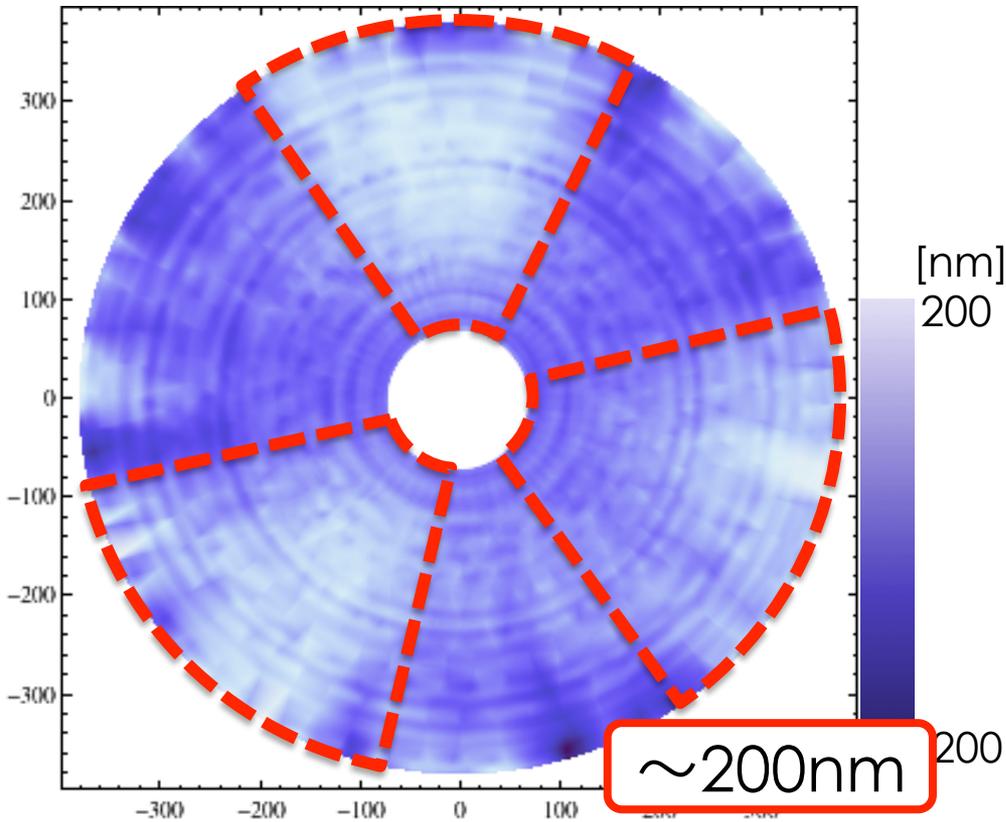
- 同心円状のパターンは干渉計とよく一致
- 縁付近で値がばらついている($\sim 200\text{nm}$) ← 計測誤差

計測結果（自重変形成分除去）



- 同心円状のパターンは干渉計とよく一致
- 縁付近で値がばらついている(~200nm) ← 計測誤差

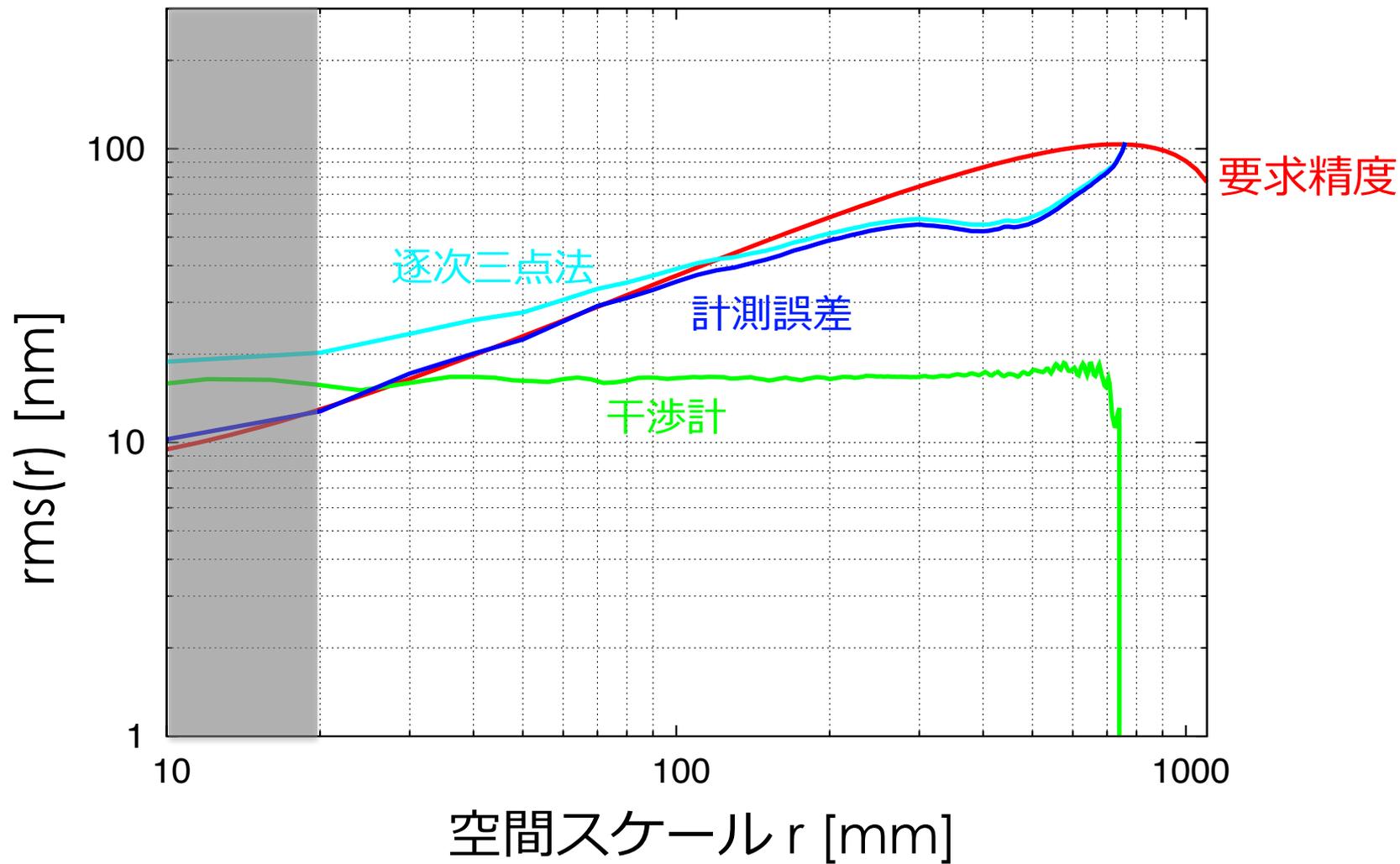
三つ葉成分



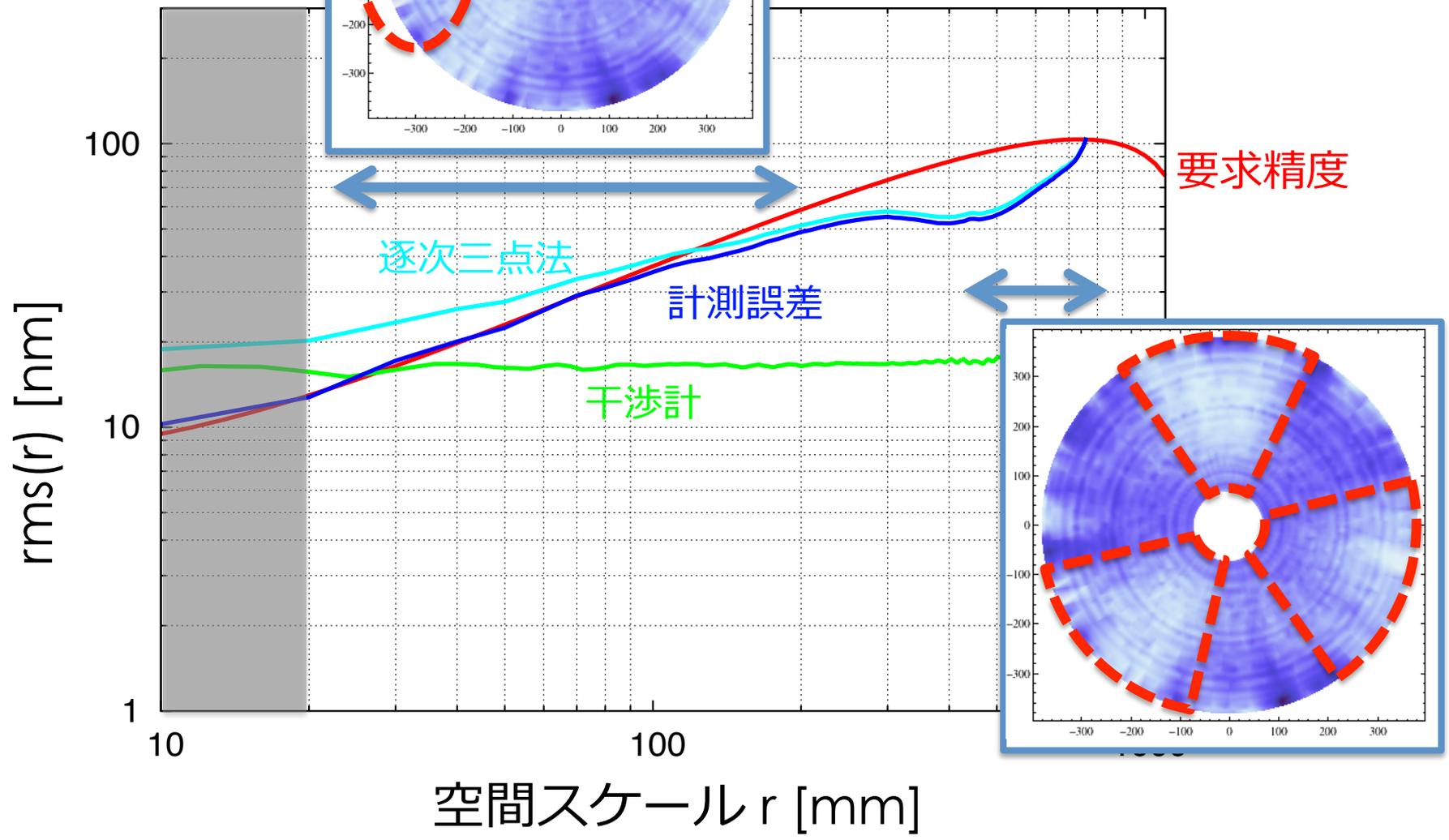
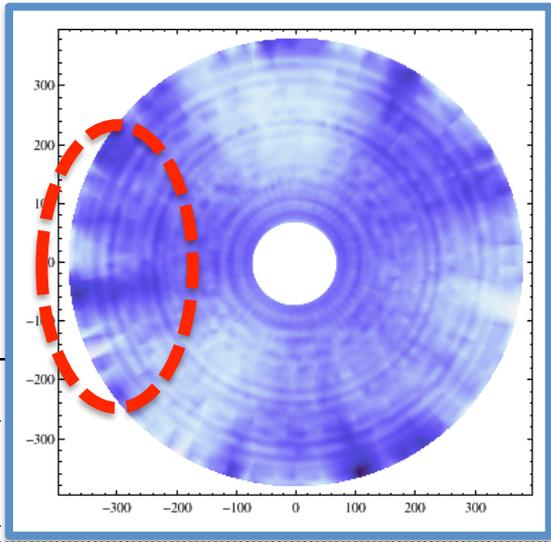
3点支持による自重変形量
(FEM解析)

- 三つ葉状のうねり ($\sim 200\text{nm}$) \rightarrow 支持点に関係 (摩擦などか)

構造関数

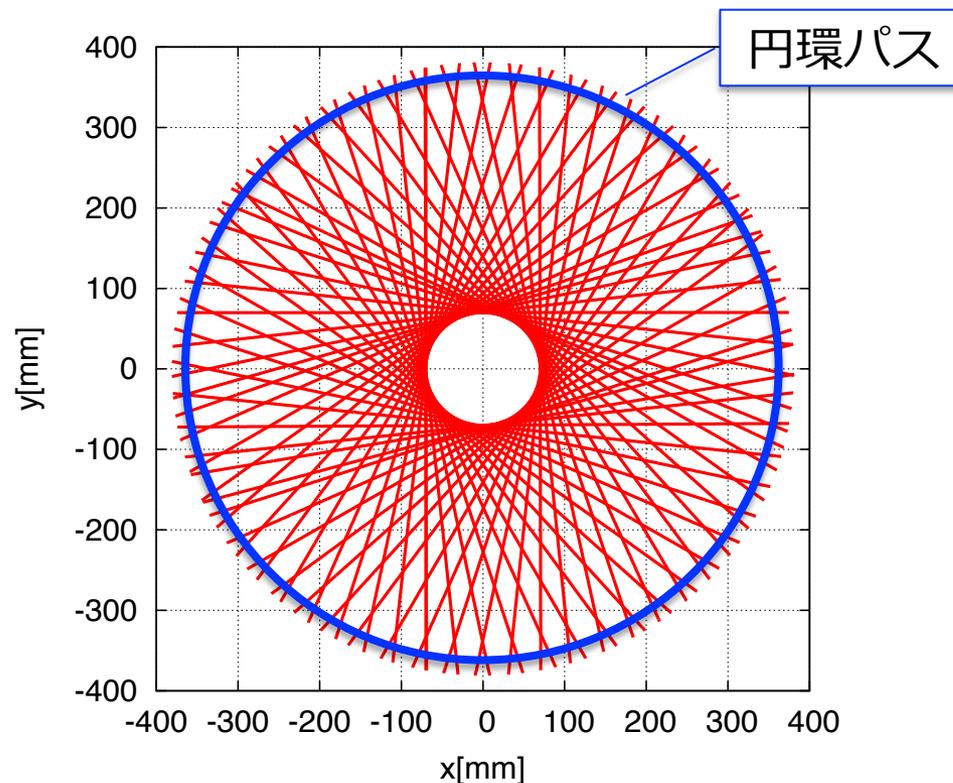


関数



計測誤差の改善（今後）

- 縁に沿った円環パスでの計測を追加
– ステッチングにより縁の誤差を抑える



まとめ

- 逐次三点法により、要求精度をぎりぎり満たしそうな計測結果が得られた
- 縁に沿って円環状の計測を行うことにより、さらなる精度改善が見込まれる