

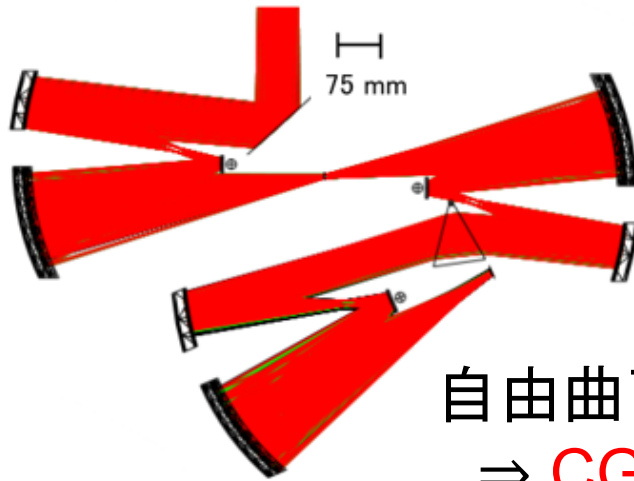
2025/11/10-11

マイクロミラー技術を用いた 可変CGH干渉計による 自由曲面鏡の表面形状測定

小野 菖平(名古屋大学, M1)

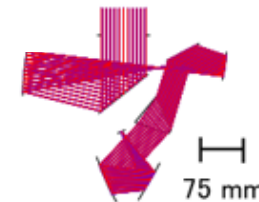
國生拓摩, 中原勇人, 近藤翼,
金田英宏(名古屋大学), 木野勝(京都大学)

- **自由曲面鏡**: 少ない光学面数で広視野の光学系を実現
⇒ 小型化・軽量化が必要な衛星搭載機器に有用



<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160002427/download/20160002427.pdf>

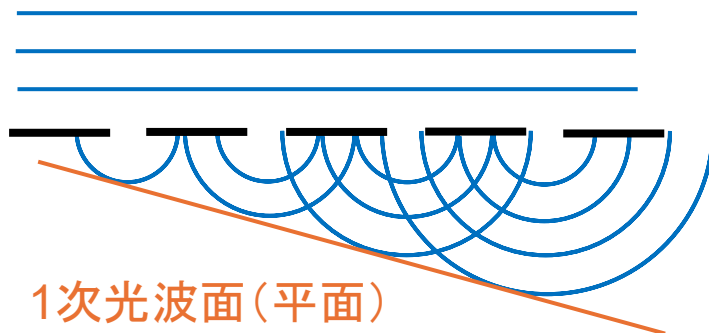
体積97%減



自由曲面鏡の形状測定
⇒ **CGH干渉計**が有用

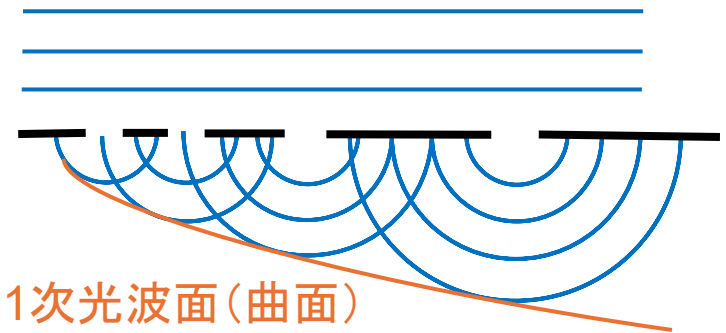
- **CGH** (Computer Generated Hologram): 任意の波面を生成可能

回折格子(等間隔)



1次光波面(平面)

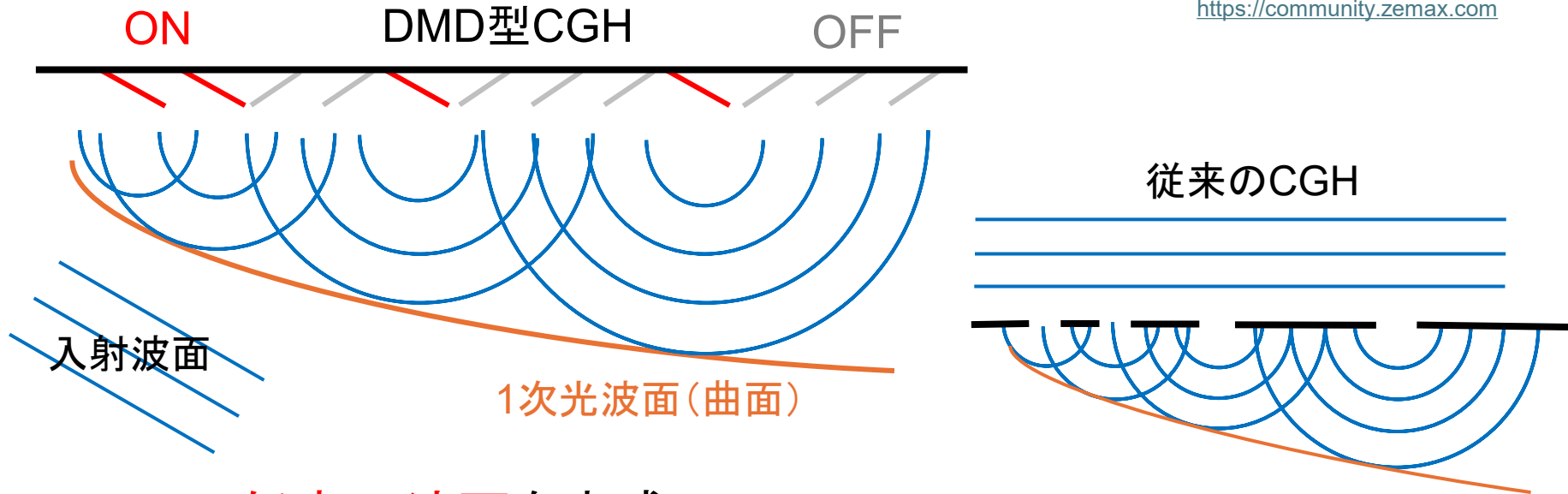
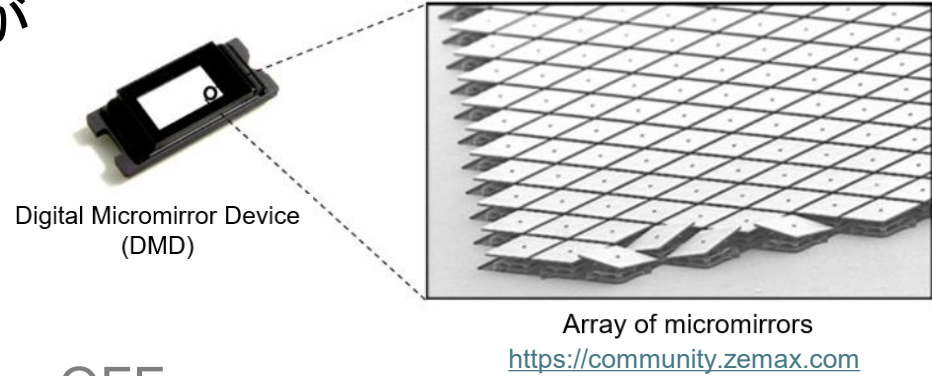
CGH(不等間隔)



1次光波面(曲面)

➤ Digital Micromirror Device (DMD, Texas Instruments社)

- マイクロミラー(5.4 μm ピッチ)が格子状に並んだデバイス
- ON/OFF状態の制御で反射型回折格子の役割を果たす

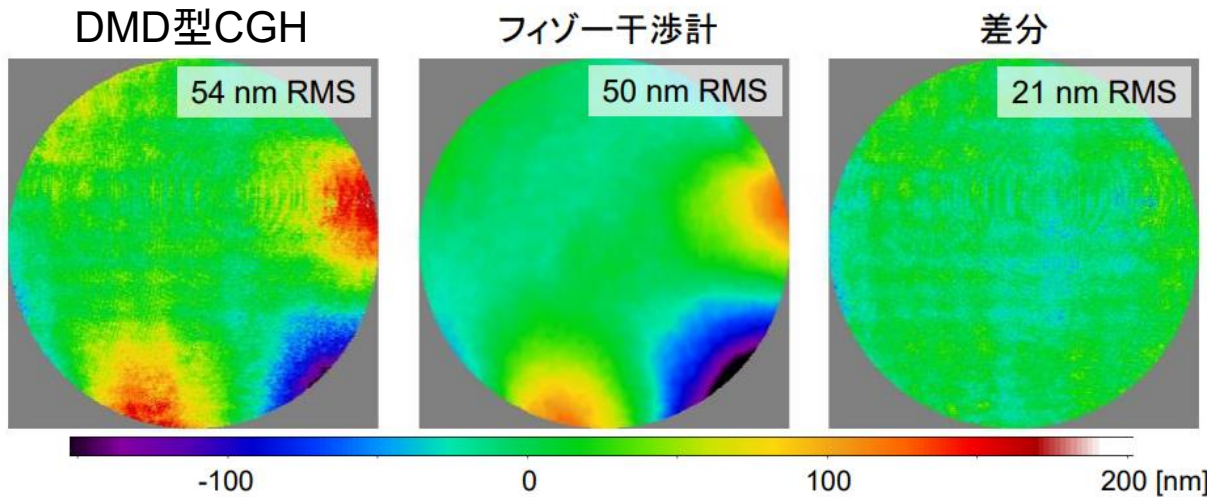


⇒ DMDで**任意の波面**を生成

⇒ あらゆる鏡面を**単一素子**で測定できる**高汎用な可変CGH**を開発

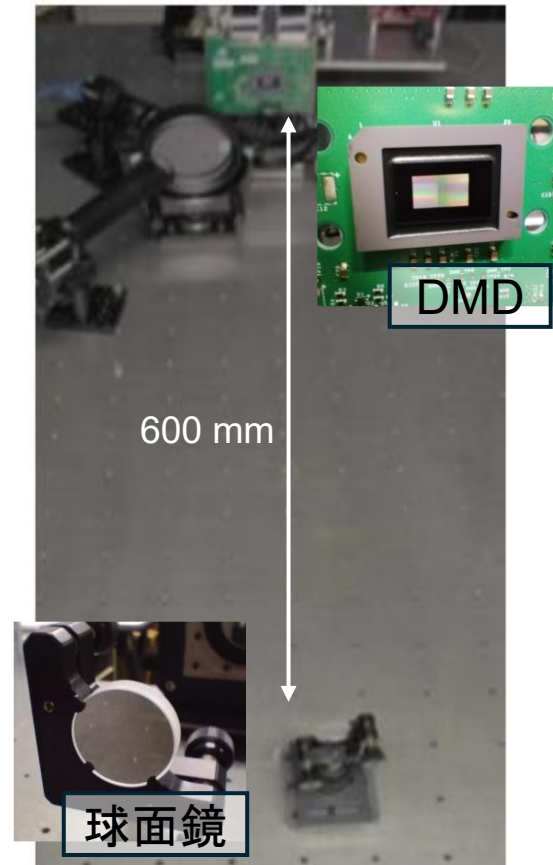
➤ 先行研究での実績

- DMD型CGH干渉計で球面鏡を測定：絶対精度 21 nm RMS
⇒ 赤外線衛星搭載機器の要求測定精度 < 60 nm RMS を達成



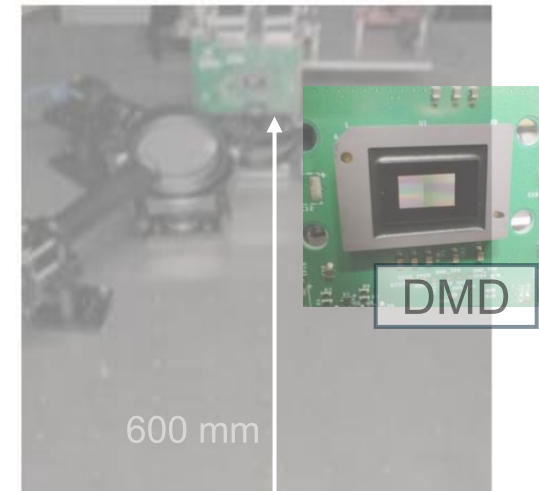
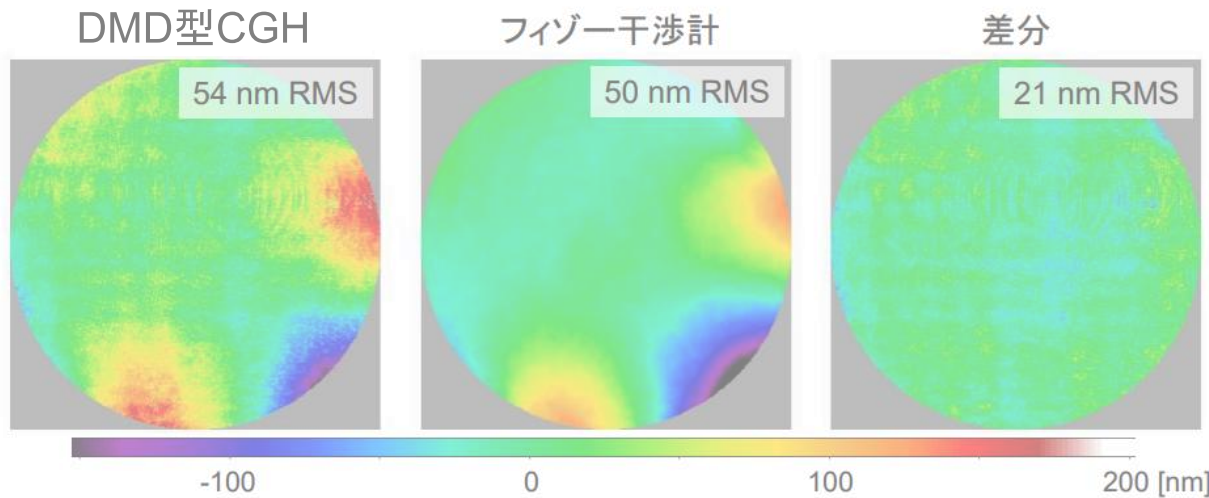
➤ 自由曲面鏡の測定に向けた課題

- 干渉計と鏡の**アラインメントが困難**
- 赤外線観測では、**極低温冷却に伴う振動**
⇒ **振動耐性の高い**データの取得・解析が必要



➤ 先行研究での実績

- DMD型CGH干渉計で球面鏡を測定：絶対精度 21 nm RMS
⇒ 赤外線衛星搭載機器の要求測定精度 < 60 nm RMS を達成



➤ 自由曲面鏡の測定における課題

本研究の目的

- マイクロミラーデバイスを用いた自由曲面鏡の測定に向けた
- 鏡のアライメント手法の開発
- 振動耐性の高いデータの取得・解析手法の開発

➤ 干渉光学系 (Kino & Kurita 2012)

- 「せいめい」分割主鏡の形状測定のコセプトがベース
- 被検/参照光の0次+1次の光が干渉

➤ DMDを用いたアラインメント手法

- DMDで鏡面の上下左右4点に収束するCGHパターンを設計

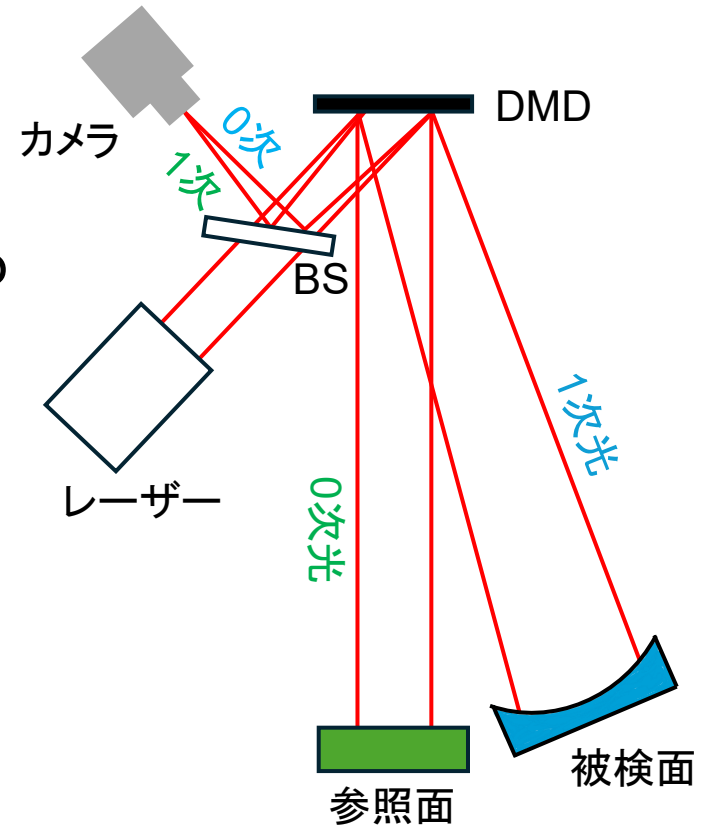
⇒ スポットの2次モーメント

$$\mu = \frac{\sum_i I(r_i)(r_i - r_G)^2}{\sum_i I(r_i)}$$

I : 強度, r_G : スポットの重心座標

が最小になるようにアラインメント

- アラインメント精度: $<10 \mu\text{m}$ が目標



➤ 干渉光学系 (Kino & Kurita 2012)

- 「せいめい」分割主鏡の形状測定のコセプトがベース
- 被検/参照光の0次+1次の光が干渉

➤ DMDを用いたアラインメント手法

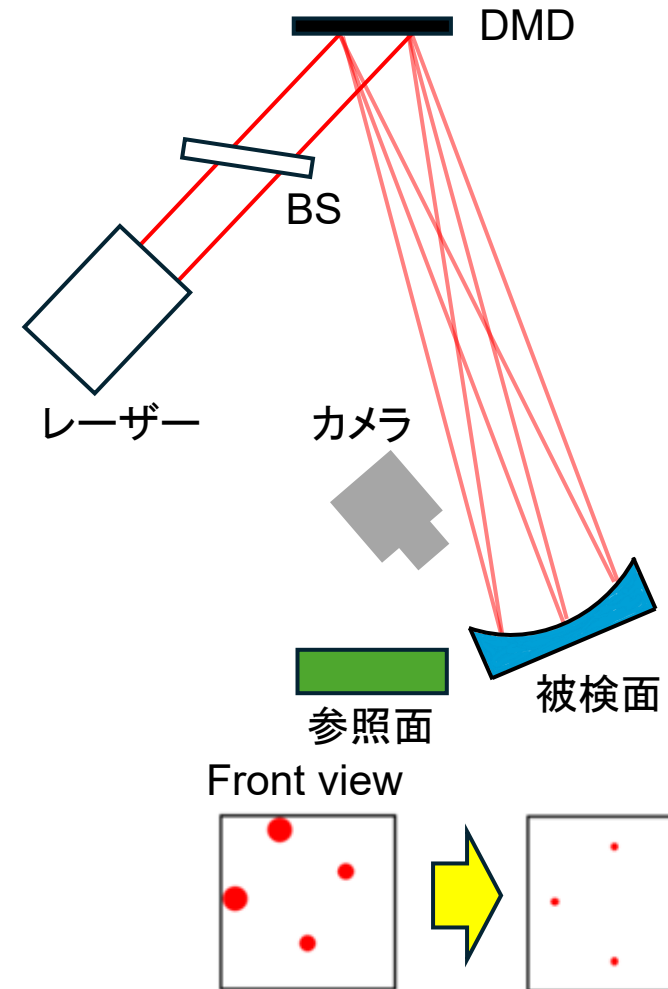
- DMDで鏡面の上下左右4点に収束するCGHパターンを設計
- ⇒ スポットの2次モーメント

$$\mu = \frac{\sum_i I(r_i)(r_i - r_G)^2}{\sum_i I(r_i)}$$

I : 強度, r_G : スポットの重心座標

が最小になるようにアラインメント

- アラインメント精度: $<10 \mu\text{m}$ が目標



➤ 干渉光学系 (Kino & Kurita 2012)

- 「せいめい」分割主鏡の形状測定のコセプトがベース
- 被検/参照光の0次+1次の光が干渉

➤ DMDを用いたアラインメント手法

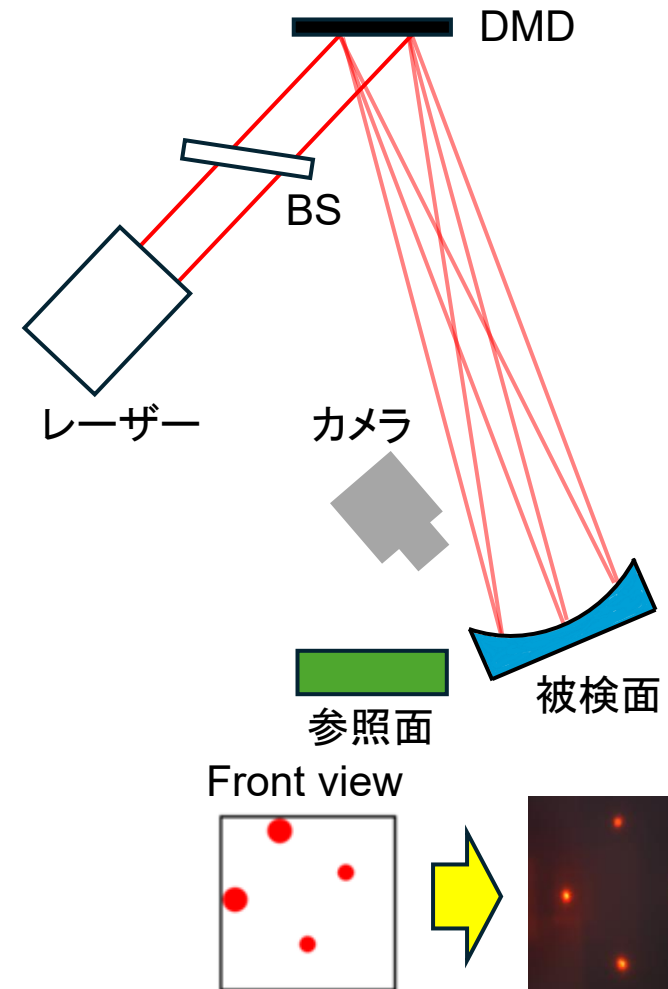
- DMDで鏡面の上下左右4点に収束するCGHパターンを設計
- ⇒ スポットの2次モーメント

$$\mu = \frac{\sum_i I(r_i)(r_i - r_G)^2}{\sum_i I(r_i)}$$

I : 強度, r_G : スポットの重心座標

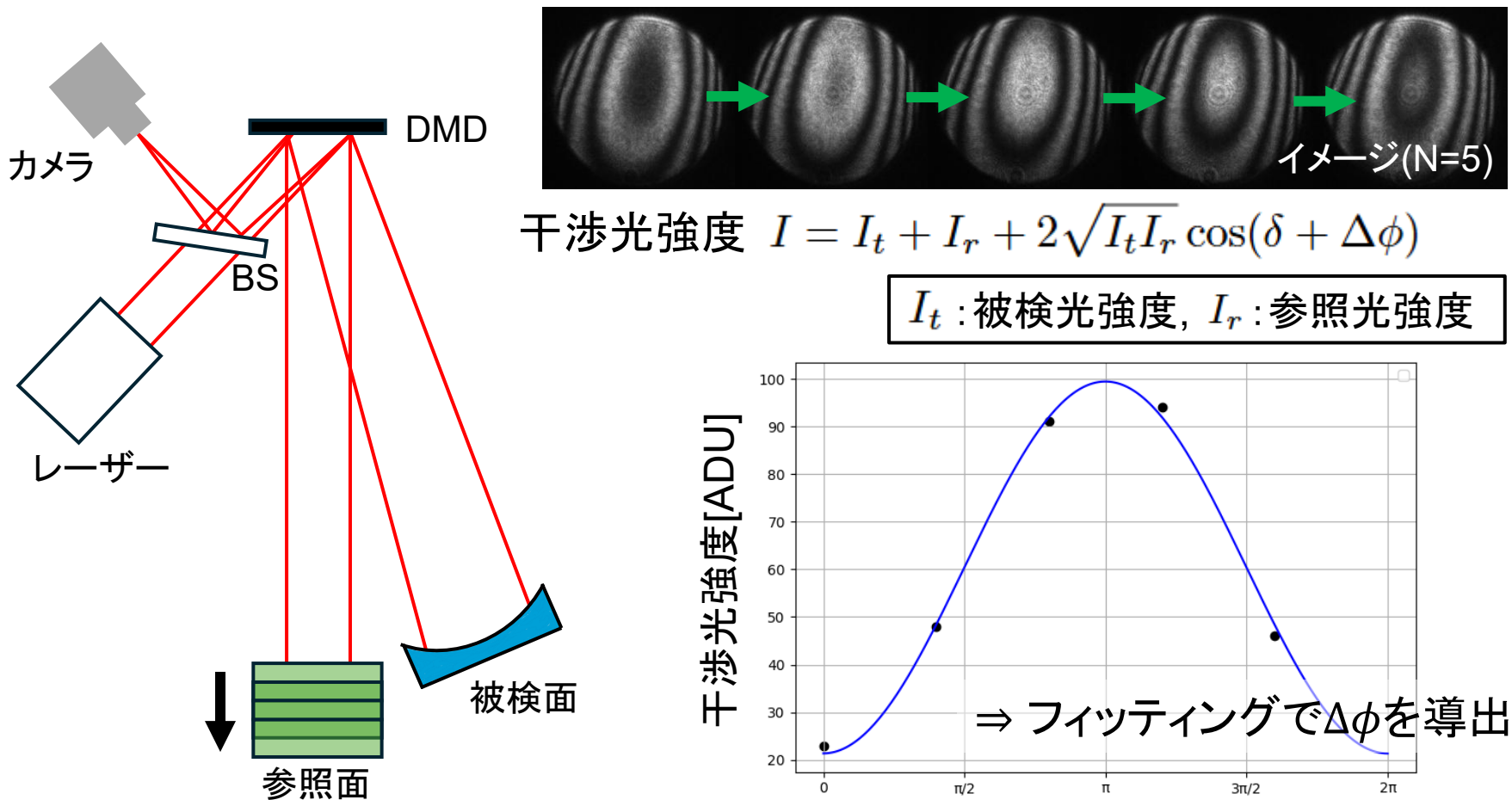
が最小になるようにアラインメント

- アラインメント精度: $<10 \mu\text{m}$ が目標



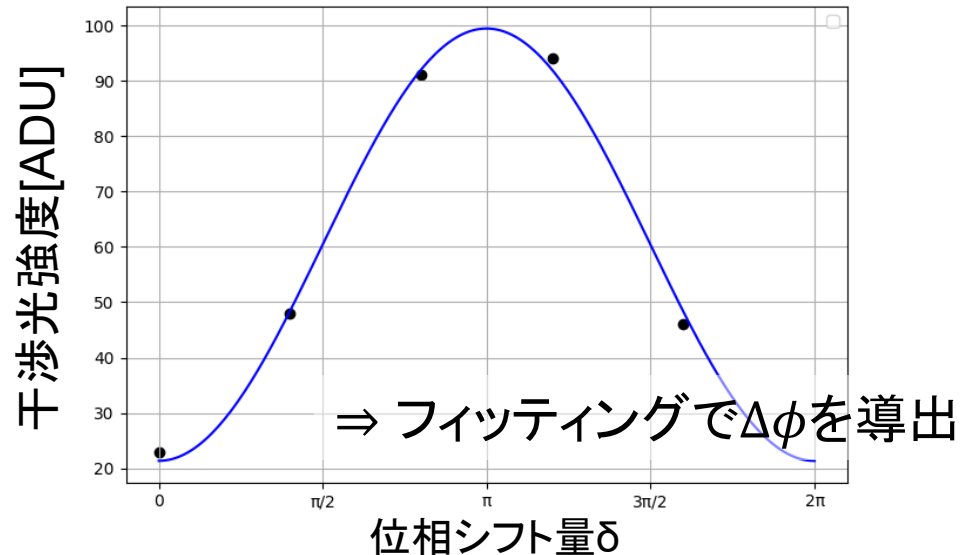
➤ 位相シフト解析の最適化 N : 位相サンプリング数, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

位相シフト法: 既知の位相量 $\delta = 2\pi n/N$ ずつ参照面をシフトし、
形状誤差に対応する初期位相差 $\Delta\phi$ を求める



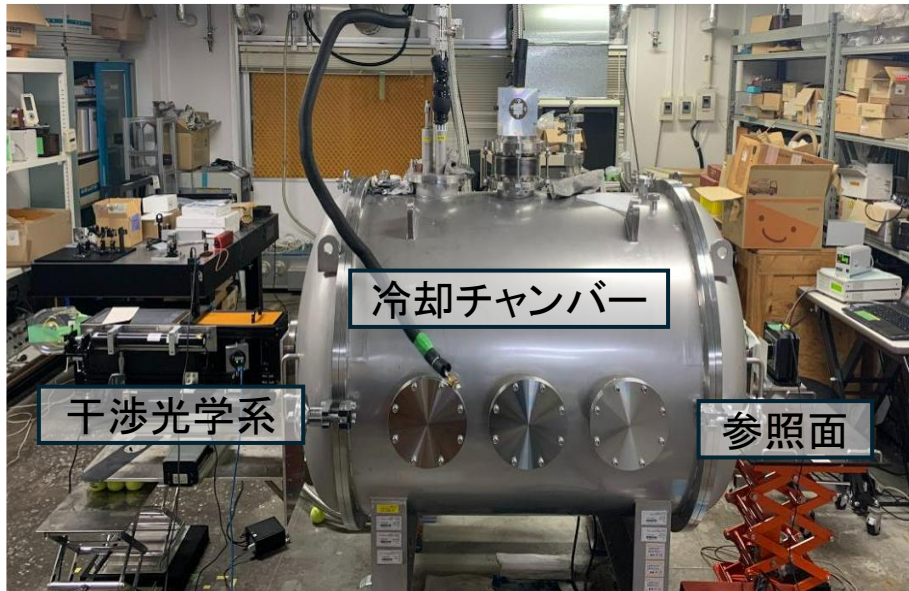
干渉光強度 $I = I_t + I_r + 2\sqrt{I_t I_r} \cos(\delta + \Delta\phi)$

I_t : 被検光強度, I_r : 参照光強度



➤ 位相シフト解析の最適化

- ① 参照面を往復させ、各観測セットのデータを**スタック**
- ② 等間隔ビンで区切って、ビン内の平均値に対して**フィッティング**
- ③ 位相の決定精度を**サンプリング数ごとに比較**する

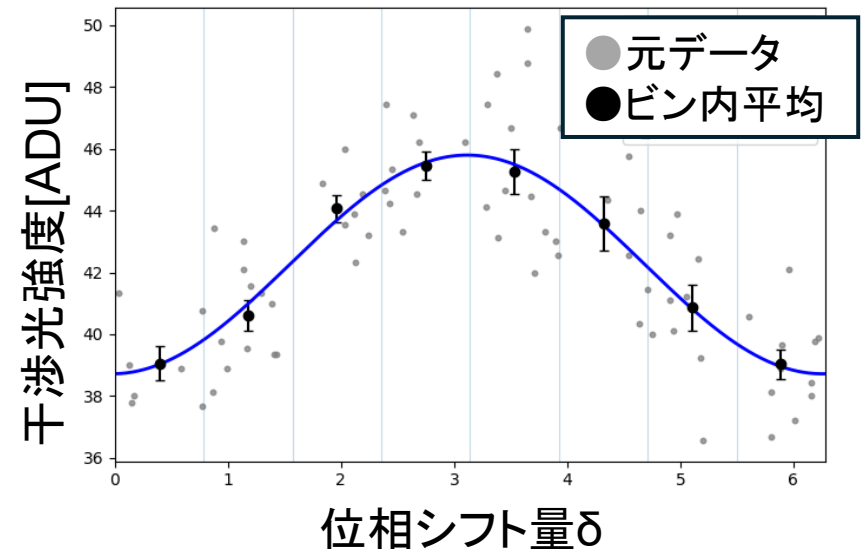


実験セットアップ

※既存のCGH干渉計を使って常温下で測定。

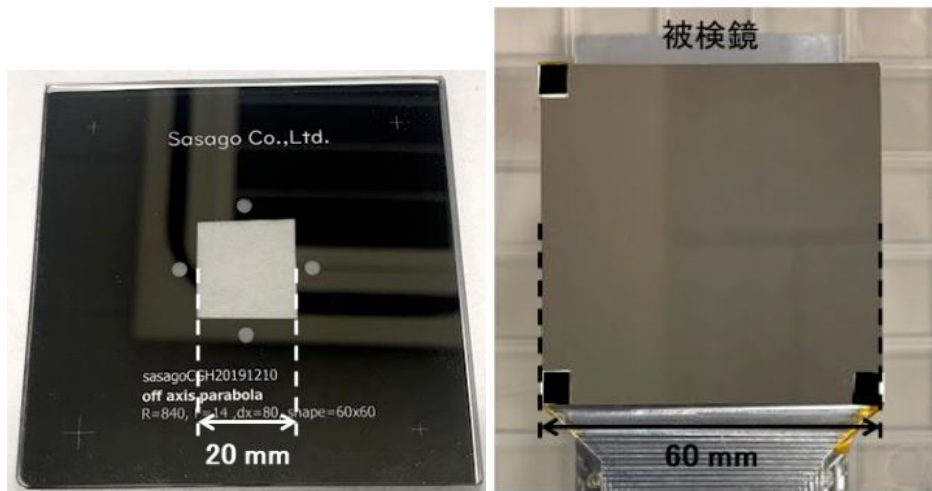
干渉光強度

$$I = I_t + I_r + 2\sqrt{I_t I_r} \cos(\delta + \Delta\phi)$$

 I_t : 被検光強度, I_r : 参照光強度

➤ 位相シフト解析の最適化

- ① 参照面を往復させ、各観測セットのデータを**スタック**
- ② 等間隔ビンで区切って、ビン内の平均値に対して**フィッティング**
- ③ 位相の決定精度を**サンプリング数ごとに比較**する



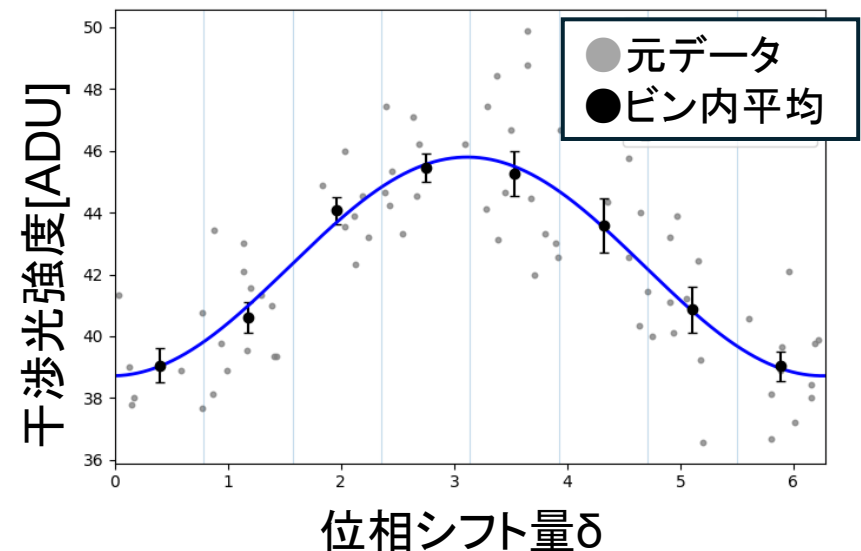
測定に使用したCGH(左)と軸外し放物面鏡(右)

※既存のCGH干渉計を使って常温下で測定。

干渉光強度

$$I = I_t + I_r + 2\sqrt{I_t I_r} \cos(\delta + \Delta\phi)$$

I_t : 被検光強度, I_r : 参照光強度



➤ DMDを用いたアライメント

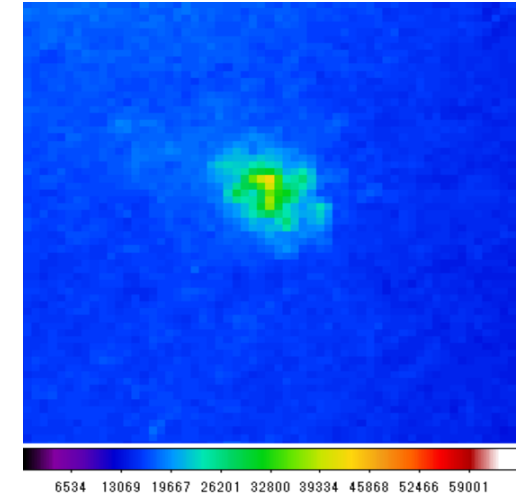
- スポットの重心位置の**再現性**

CGHパターンの切り替えに伴う
スポット位置の変化を10回測定

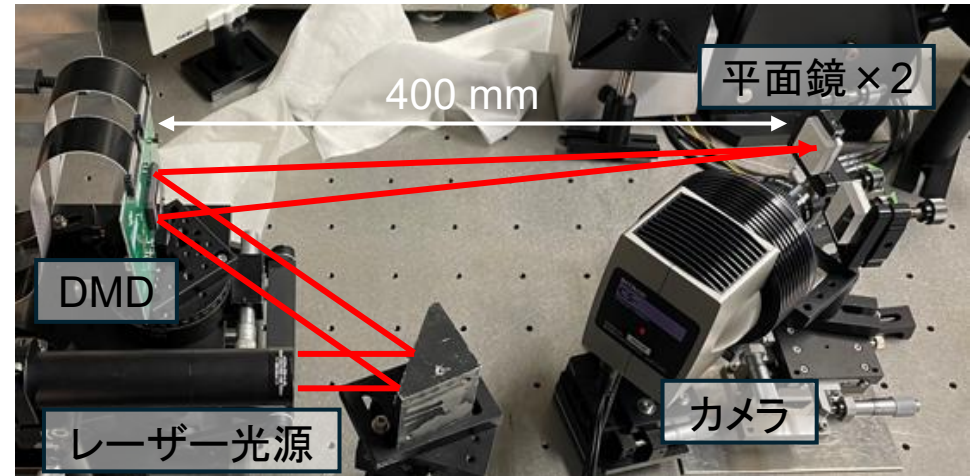
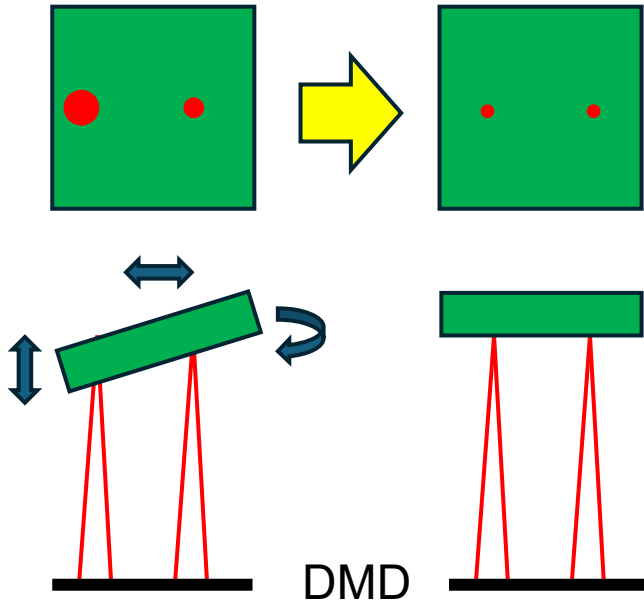
$$\Rightarrow \sigma \sim 0.1 \mu\text{m}$$

- 平面鏡2枚のアライメントを実施

※左右2点の輝点のみを使用。3軸の調整を実施。



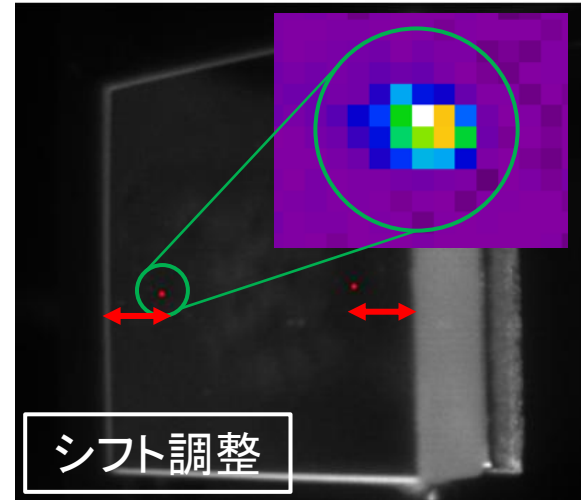
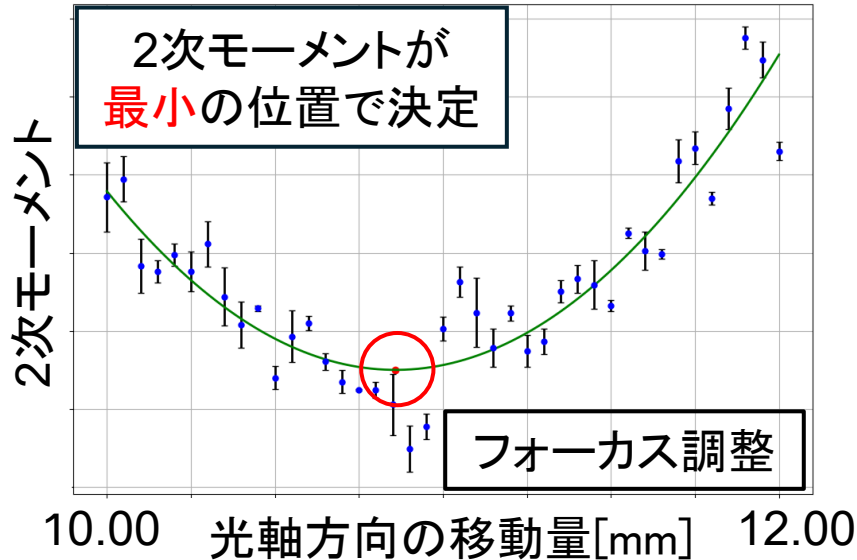
鏡面に当てたスポット画像



実験セットアップ

➤ DMDを用いたアライメント

- 平面鏡2枚のアライメントを実施

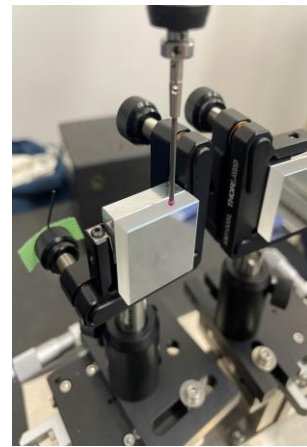


フォーカス: 2次モーメントを元に調整

シフト: 鏡面の端辺からの距離を元に調整

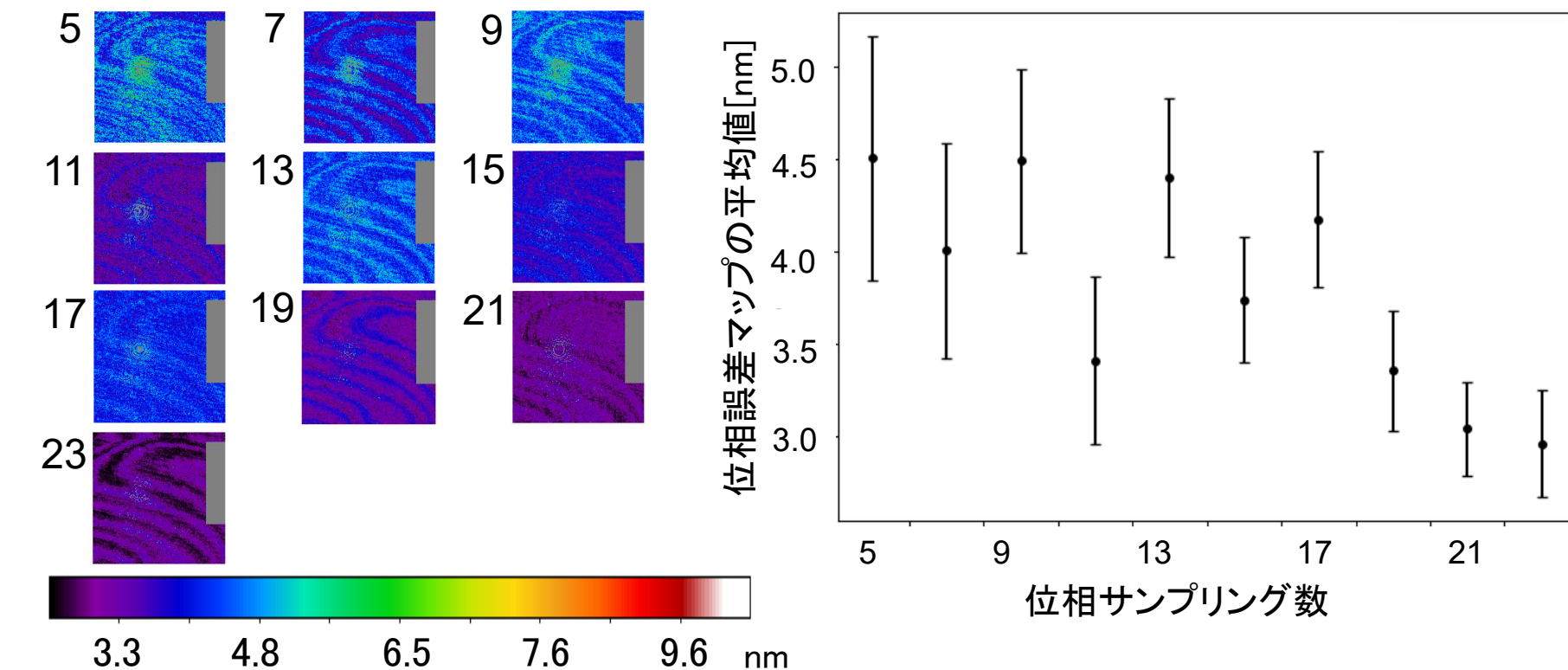
- 3次元測定器でアライメント精度 (鏡の相対位置)を計測

➡ 精度: シフト $\leq 300 \mu\text{m}$



➤ 振動耐性の高いデータの解析手法

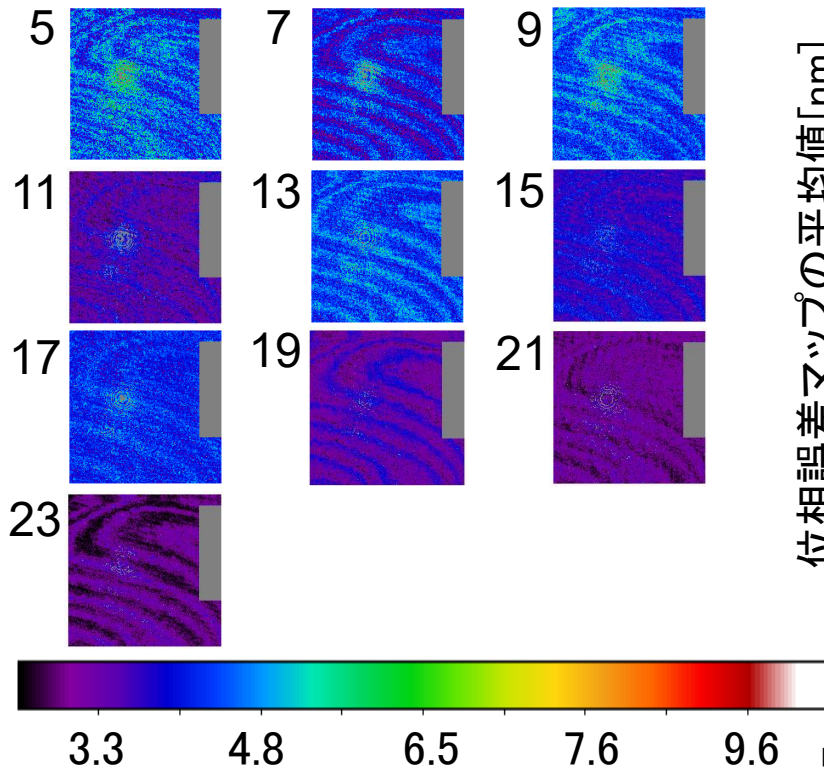
- 既存のCGH干渉計を用いて実験
- サンプルング数ごとの位相の決定精度を比較



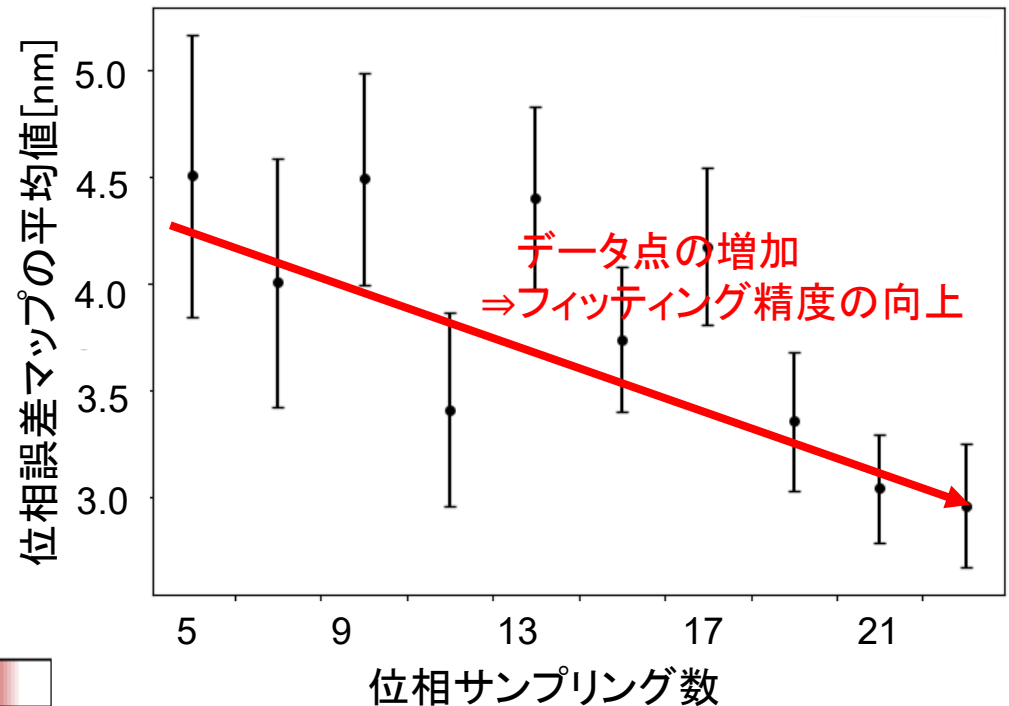
位相サンプリング数ごとの位相の誤差マップ(放物面鏡測定)

➤ 振動耐性の高いデータの解析手法

- 既存のCGH干渉計を用いて実験
- サンプルング数ごとの位相の決定精度を比較



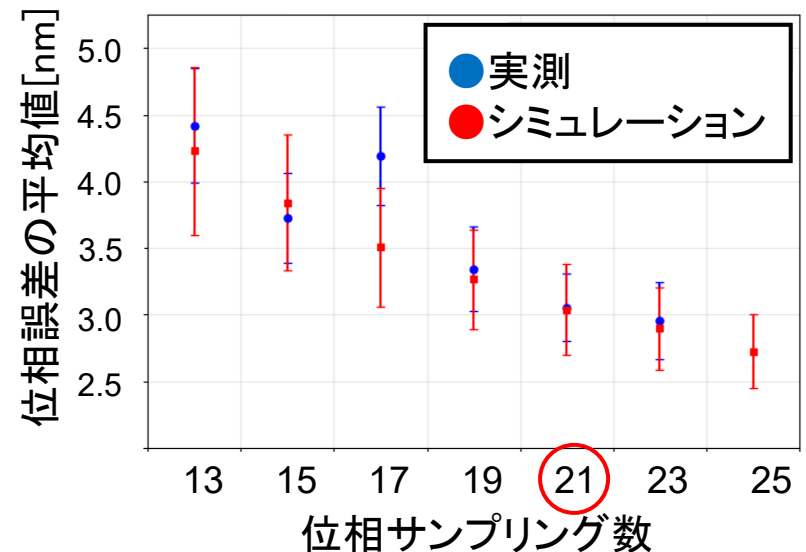
位相サンプリング数ごとの位相の誤差マップ(放物面鏡測定)



- DMDを用いたアラインメント: 設置精度 $<10 \mu\text{m}$ 未達成
- 調整 \Leftrightarrow 2次モーメント測定 のイテレーションが1回のみ
 - ⇒ イテレーション回数を増やして調整予定
- 上下含む4輝点を用いてアラインメント
- 振動耐性の高いデータの解析手法
- 測定系の振動環境を考慮したシミュレーション
参照面を固定して干渉縞の時間変化を測定

- 実測結果と傾向がおおよそ一致
- 赤外線衛星搭載の要求測定精度 $<60 \text{ nm RMS}$ に対して十分小さい

➡ 冷却下でも同様の評価を行う



- **Digital Micromirror Device**を用いた**可変CGH干渉計**による自由曲面鏡の表面形状測定が目的。
- 本研究の特徴
 - ①DMDを用いた鏡面の**アラインメント手法**の開発
 - ②**振動耐性の高い**データの取得・解析手法を開発
- 本アラインメント手法で目標設置精度を未達成。イテレーション回数を増やして再実験。**冷却環境下**での振動環境の測定および位相サンプリング数の最適化も実施予定。
- 今後、本手法を用いて自由曲面鏡および冷却した鏡の形状評価を行う。