

系外惑星撮像装置SEICAの開発： 全体進捗

○山本広大(京都大学),
青戸敬起, 栗田光樹夫, 木野勝(京都大学),
津久井遼 (ロジストラボ),
入部正継, 藤田直希(大阪電気通信大),
河原創(宇宙研),
小谷隆行, 村上尚史(ABC/NOAJ),
田村元秀

山本広大(京都大学)

本日の内容
SEICAの概要
進捗

高次補償光学系の
制御試験



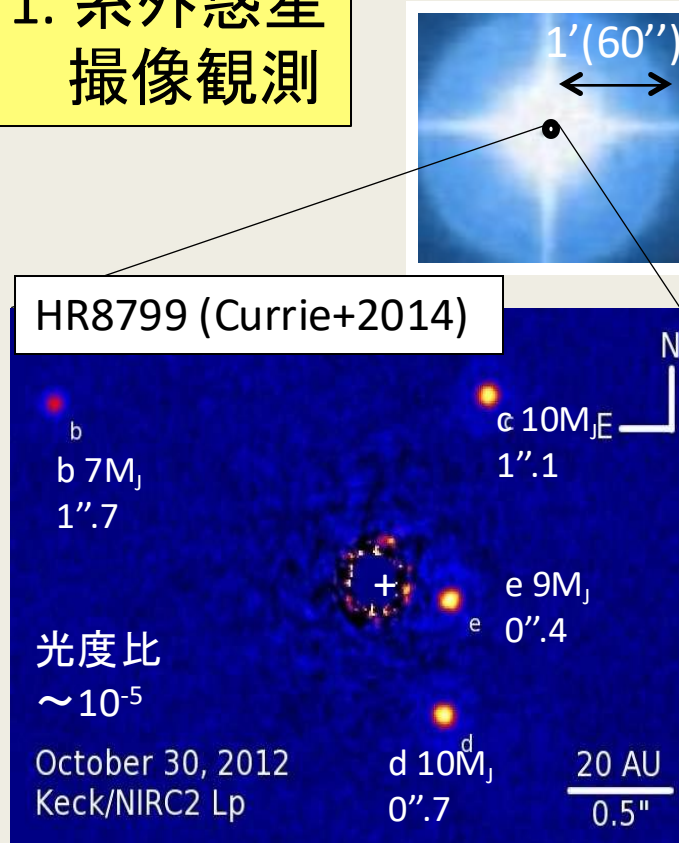
SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive Optics)

目的: 系外惑星直接撮像 + 装置開発

熱放射

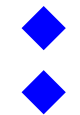
1. $0''.2$ 秒角以遠($2\text{AU}@10\text{pc}$)で木星質量の惑星 + 褐色矮星の検出 / キャラクター化
2. 惑星撮像装置(for TMT)に搭載する先進技術開発・実証

1. 系外惑星撮像観測



2. 技術開発

補償光学
(ExAO)

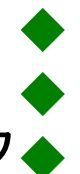


FPGA controller for ExAO
直接位相計測型波面センサ

コロナグラフ

ナリング干渉計型

ポスト-
コロナグラフ



スペックルナリング (SLM etc...)
瞳再配置撮像
高分散分光器 など

その他



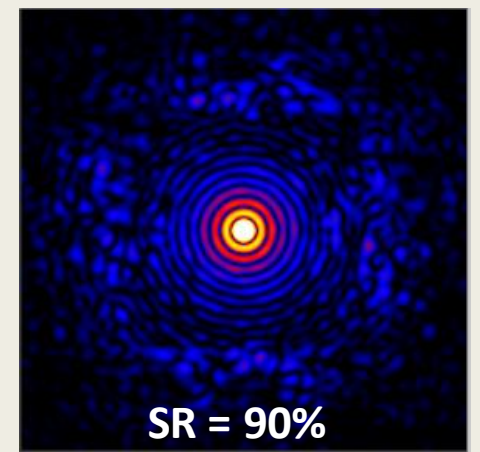
分割主鏡ならではの
高コントラスト技術
高精度温度制御

など開発中

SEICA: ExAO: 仕様と構成

装置目標

高精度 (ストレーラ比0.9→ $\lambda/20$; rms @Hバンド)
→高頻度 (5-10 kHz)
→高空間周波数 (1辺24素子)



SR = 90%

目標とする星像

1. 低次補償光学

傾斜計測: Tip-Tilt + Woofer
低速、粗いが大振幅波面制御

Tip-Tilt部 星像を安定

Woofer部 $\lambda/4$ 程度まで

T-T: 2軸

ダイクロ1

$\lambda: 0.4-0.5 \mu\text{m}$

CPU1

T-T sensor

Frame rate: 100Hz

限界等級: 10mag@B

Woofer DM
88 actuators

ダイクロ2

$\lambda: 0.5-0.7 \mu\text{m}$

CPU2

SHWFS

Frame rate: 1kHz

限界等級: 8mag@R

2. 高次補償光学

位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御

Tweeter部 $\lambda/20$ 程度

Tweeter DM
492 actuators

ダイクロ3

$\lambda: 0.7-0.9 \mu\text{m}$

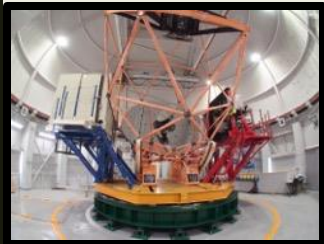
FPGA

位相
波面センサ

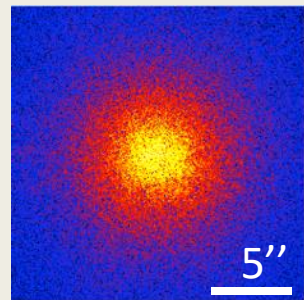
Frame rate: 6.5kHz

限界等級: 6mag?

コロナグラフ
装置へ



望遠鏡から



5''

無補償

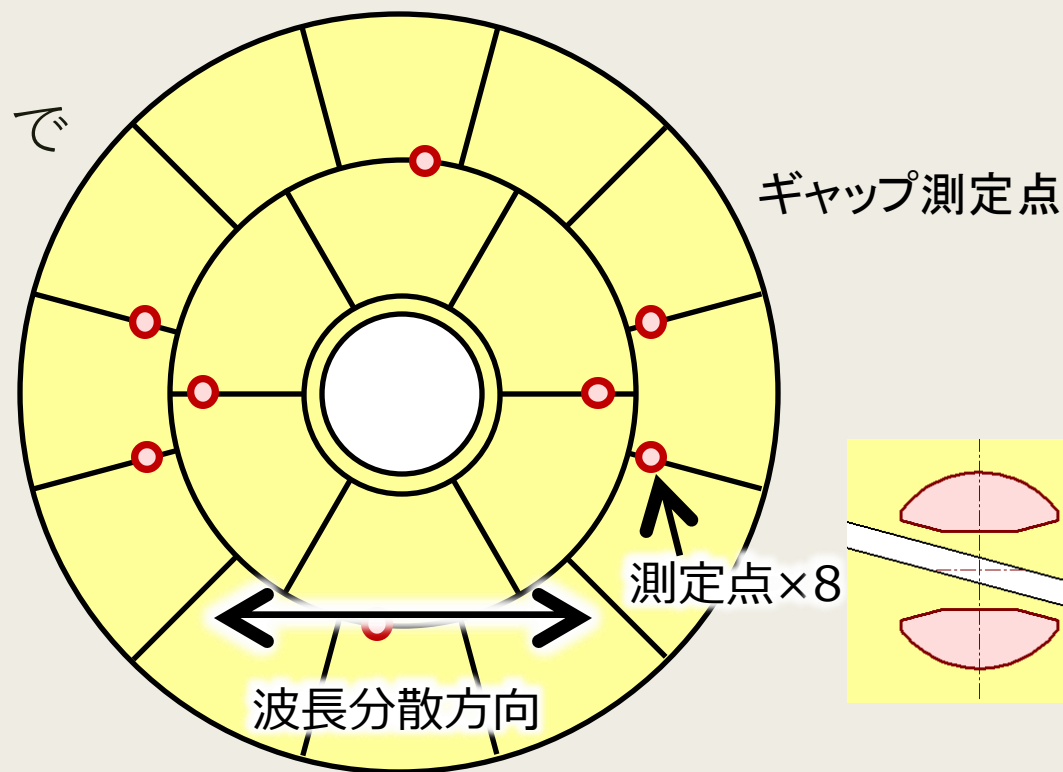
前回(2024.09)からの進捗

■ SEICA(青ナス)専用PCSカメラの設置決定

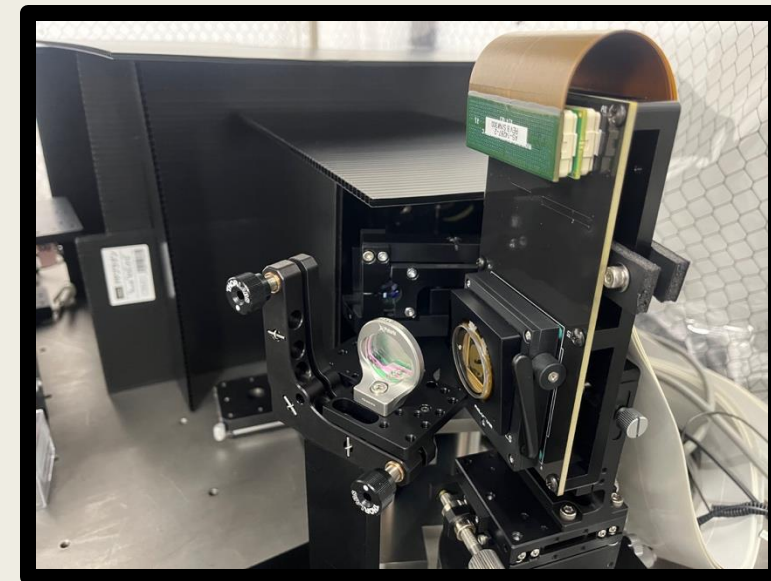
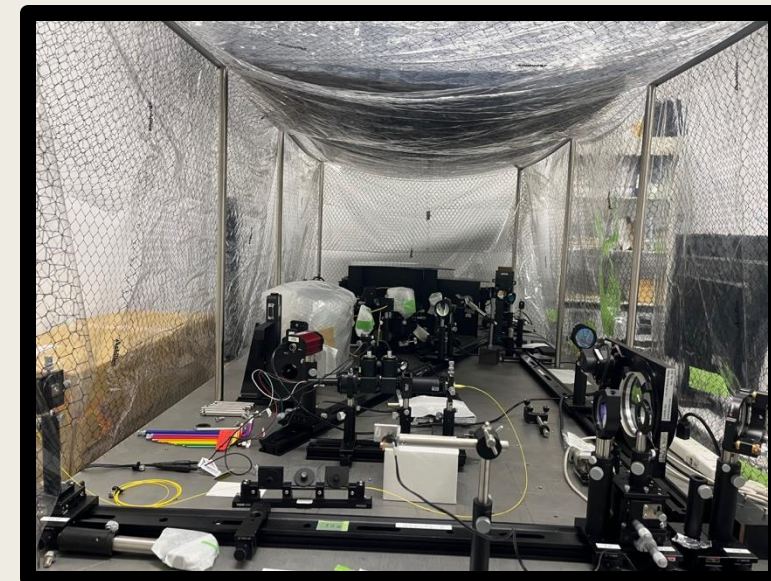
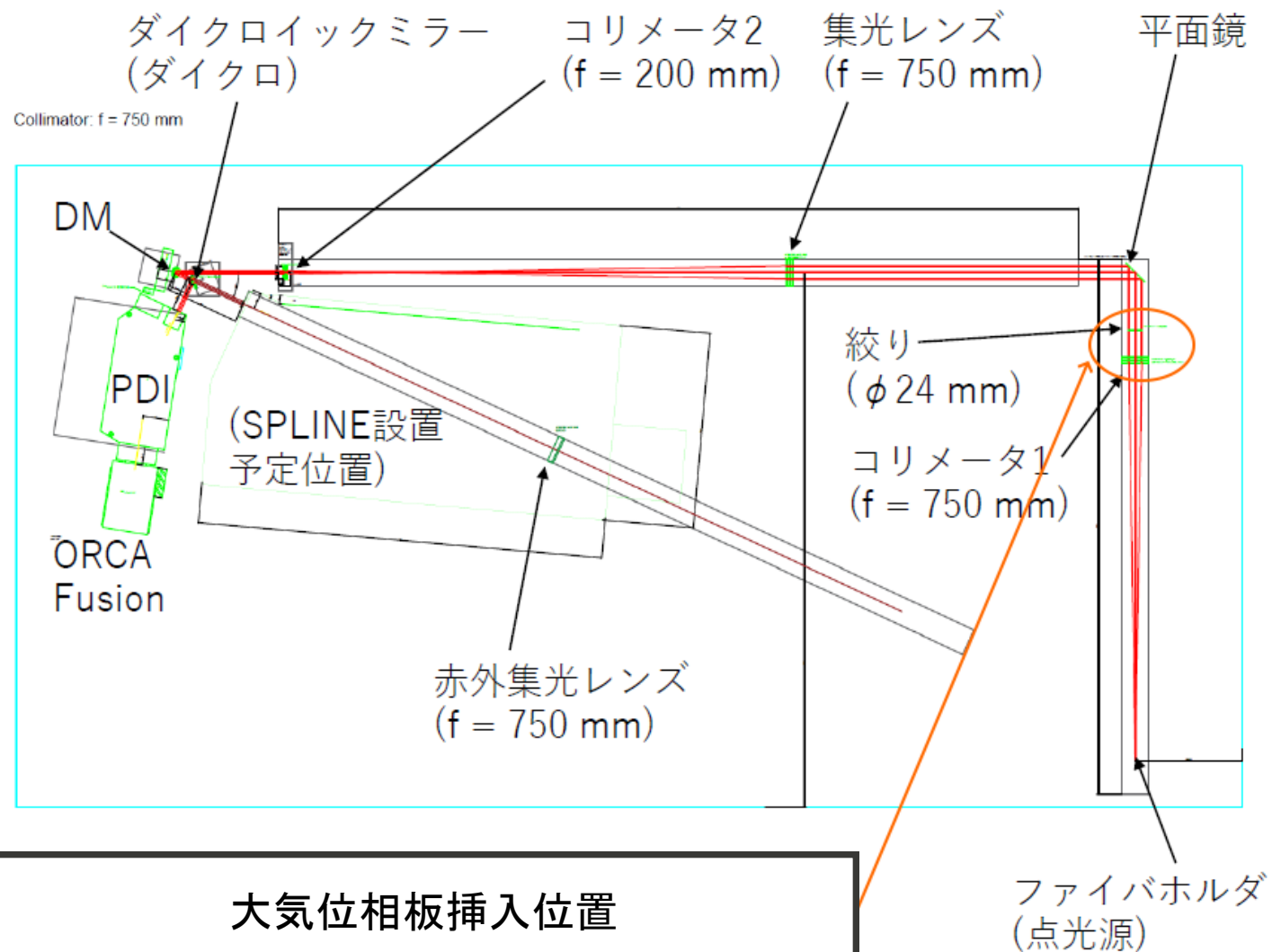
- 従来: 主鏡間ギャップのハーフミラーとレーザーによるダブルパス干渉
- 新規: ナスミス台の瞳再結像面での回折格子によるシングルパス干渉
Dispersed Fringe Sensor (DFS): JWSTなどでも導入されている
- 観測中にM3の切替が不要
- 3ポジションをイメージローターで切り替える必要があるが測定は～数分程度

■ コロナグラフ(SPLINE)の移設

■ 高次補償光学系の実験室実験



SEICA: 高次補償光学系: 制御実験



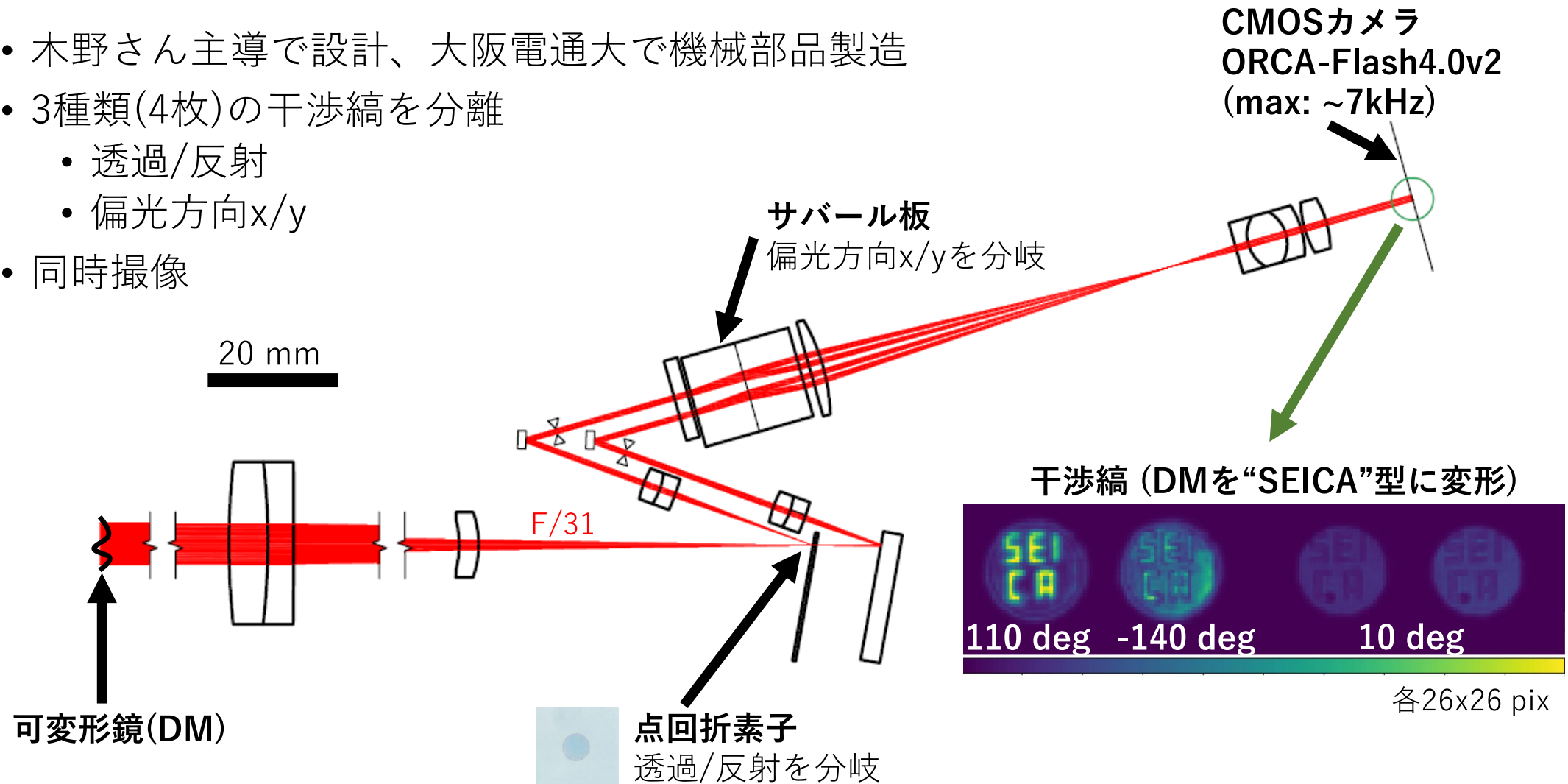
SEICA: 高次補償光学系: PDI WFS

津久井さんスライドより

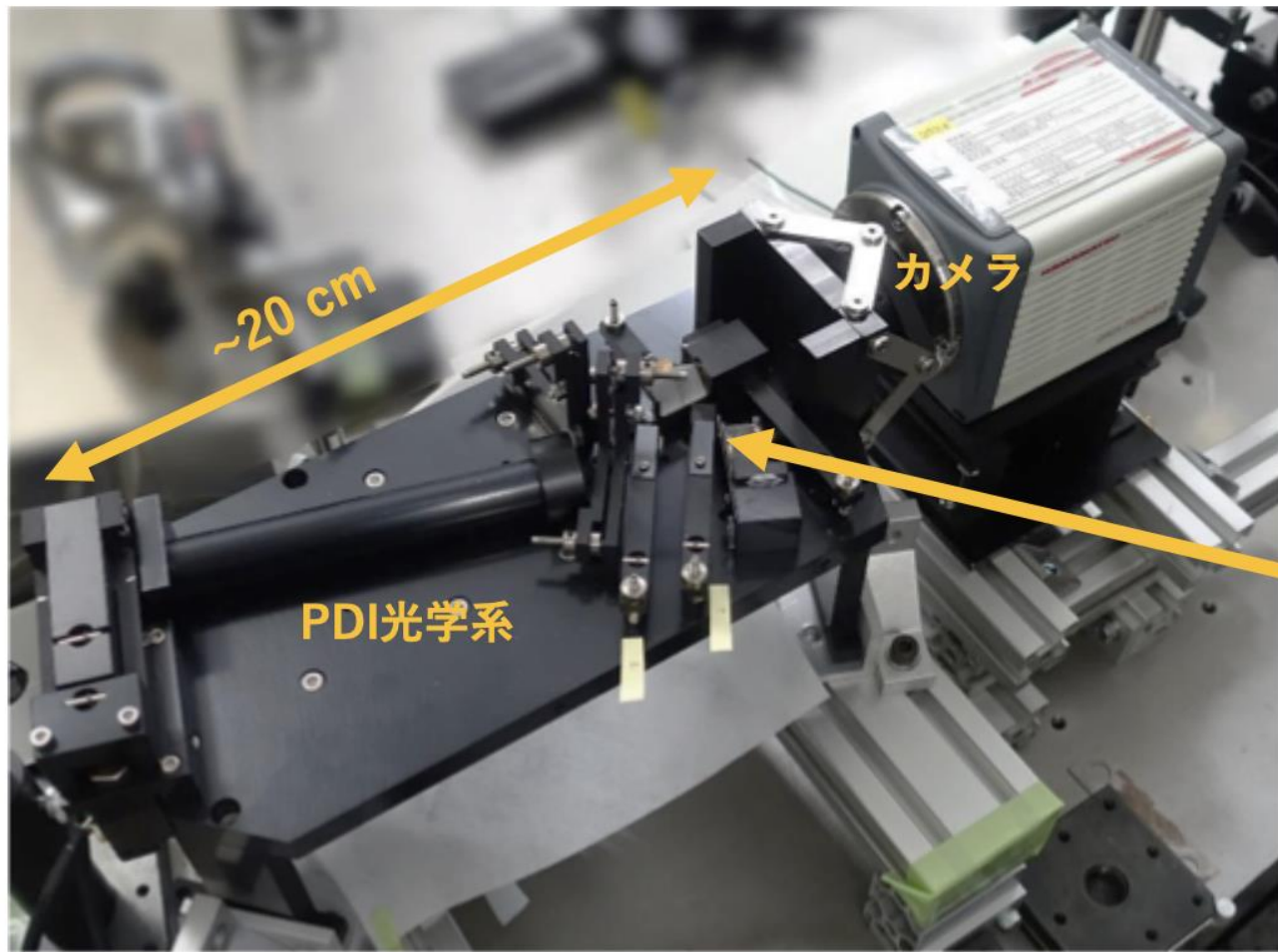
光学系の開発

7/14

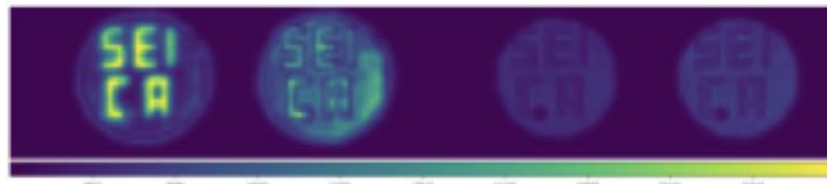
- 木野さん主導で設計、大阪電通大で機械部品製造
- 3種類(4枚)の干渉縞を分離
 - 透過/反射
 - 偏光方向x/y
- 同時撮像



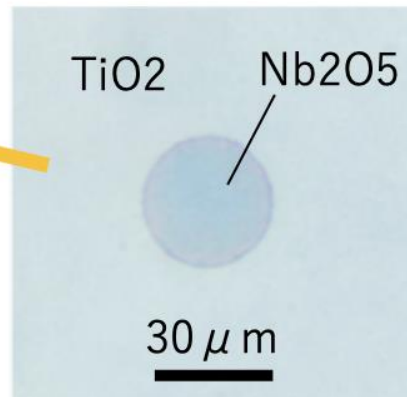
PDI WFS実機



-120deg, +120deg, 0deg, 0deg



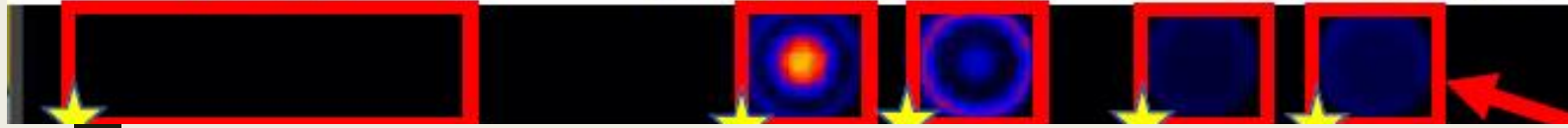
干渉縞画像
(Tsukui+2023)



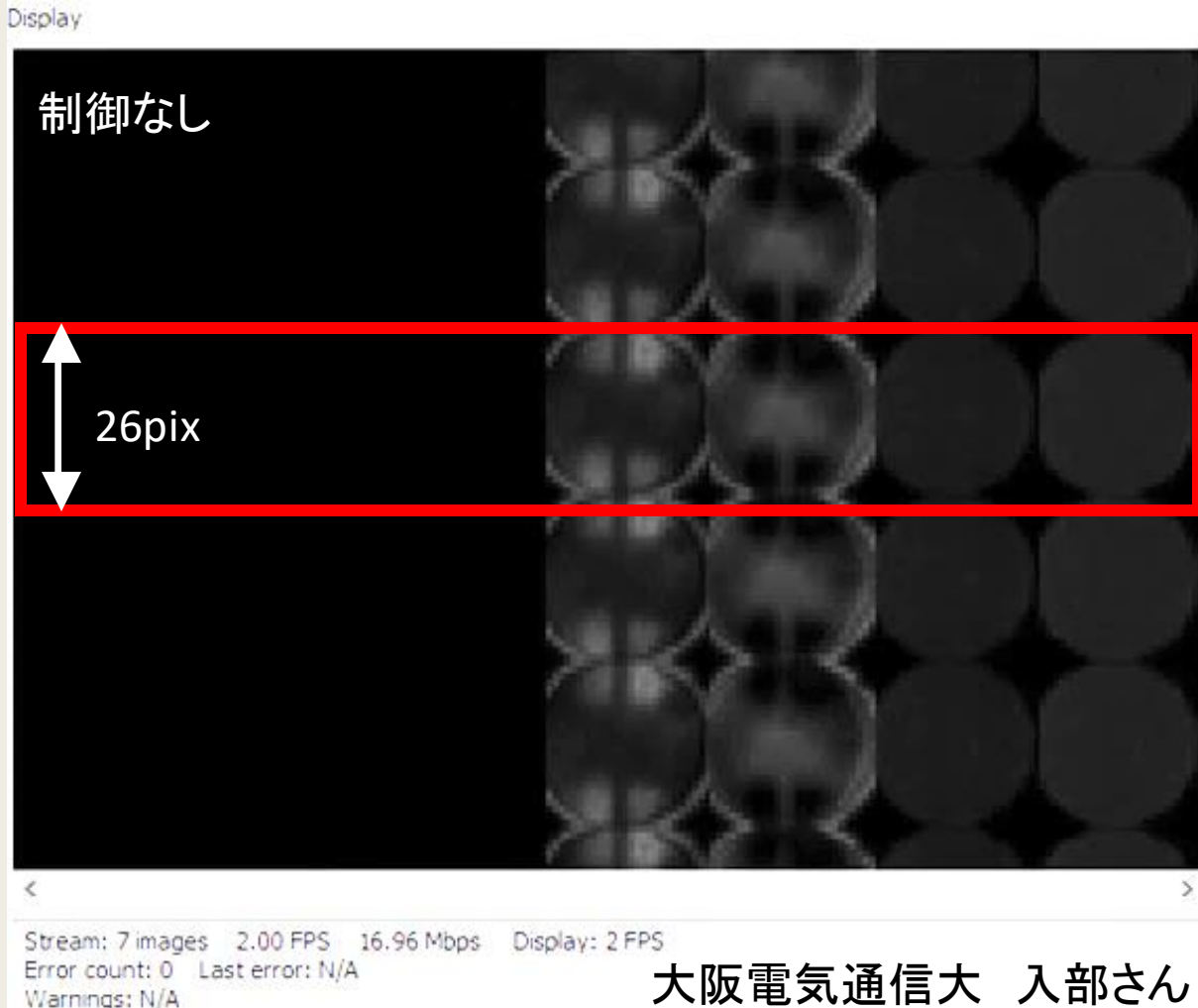
点回折素子
(#03-40)

高次補償光学系：波面センサ読出し試験

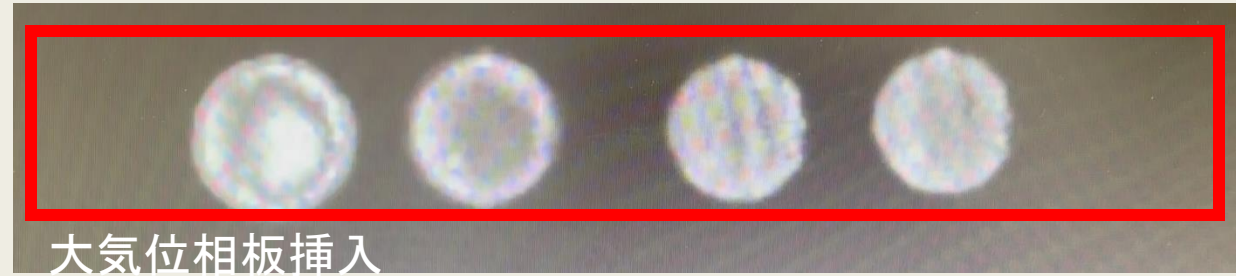
$I_0(x, y)$ $I_1(x, y)$ $I_2(x, y)$ $I_3(x, y)$ $I_4(x, y)$



バイアスと
4位相差画像の同時取得



大阪電気通信大 入部さん

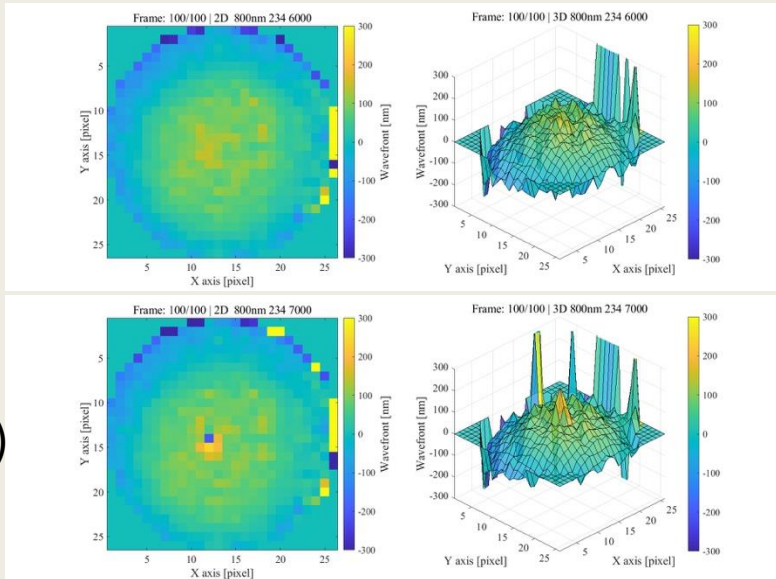


高次補償光学系実験

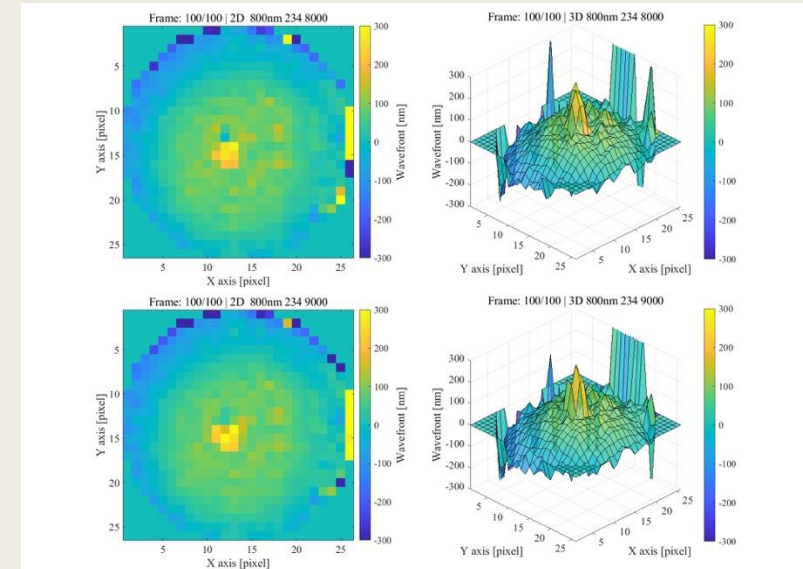
■ FPGAによるAO制御実験

- DMで反射された波面をPDIで測定する

中点(6000)



+2000(8000)

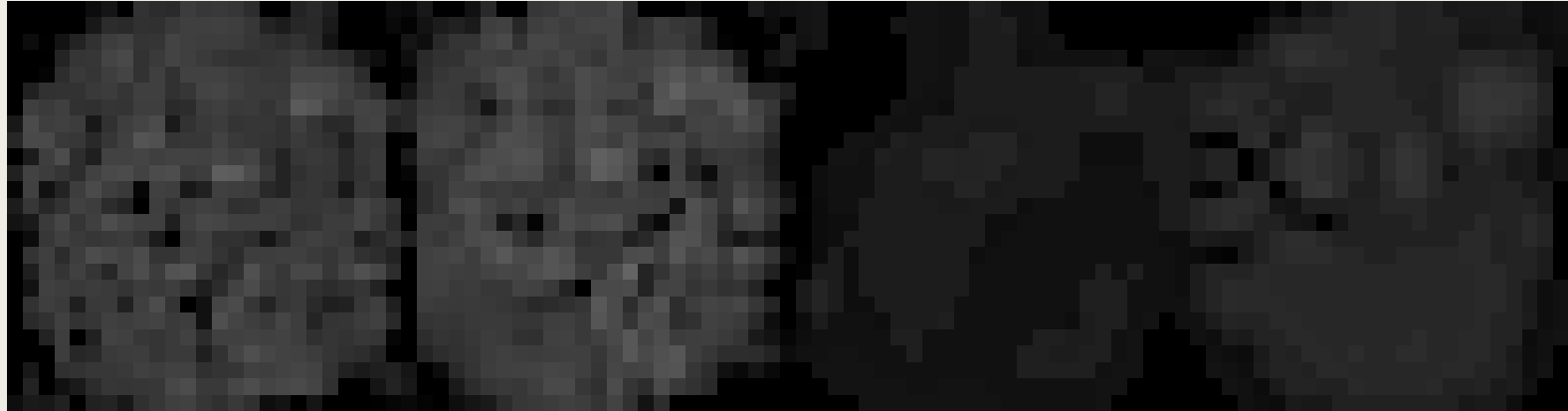


+3000(9000)

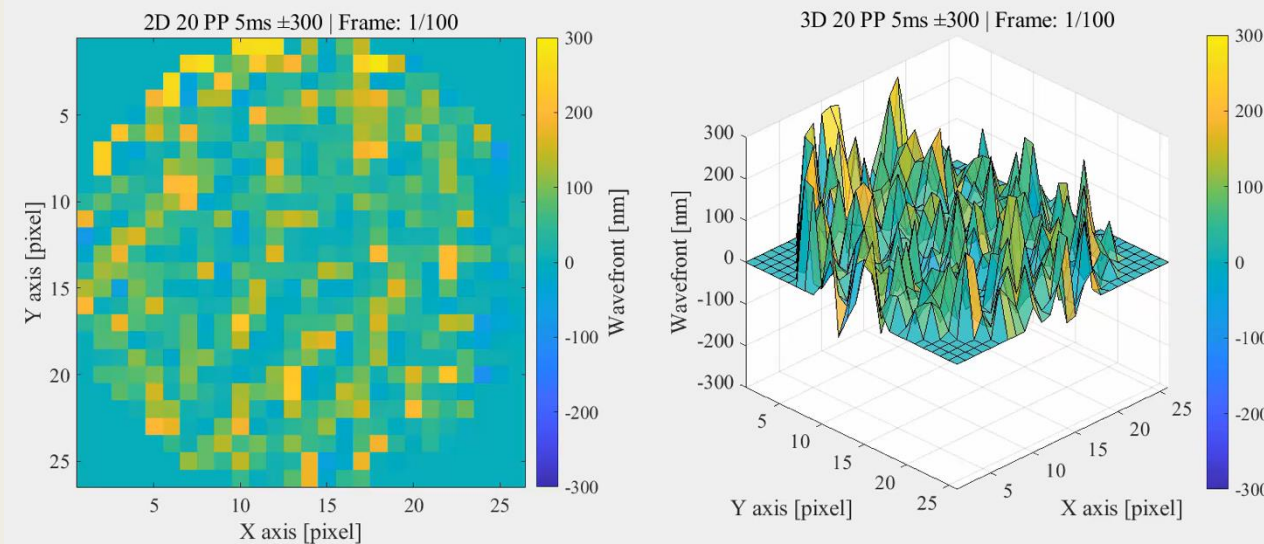
- PID制御の試験

- 岡山上空の大気乱流を模擬した位相板を用いた制御試験
- 現在はP制御だけを行ってみる

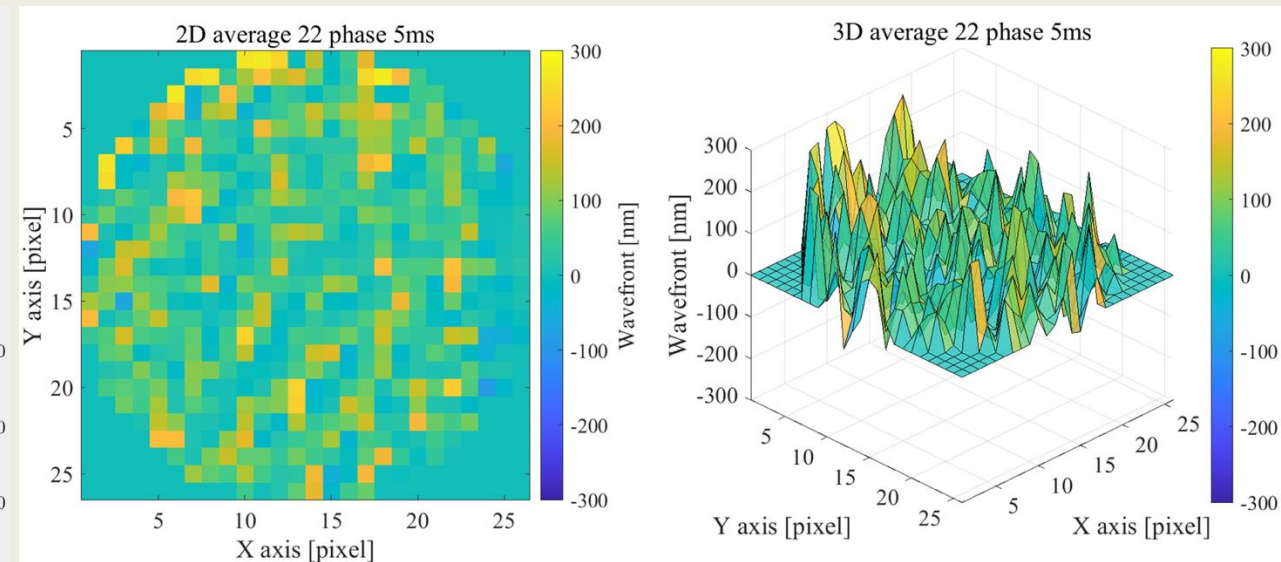
位相板 挿入(固定)時の測定結果 ($T_s = 5\text{ms}$)



PDIの4つの測定面

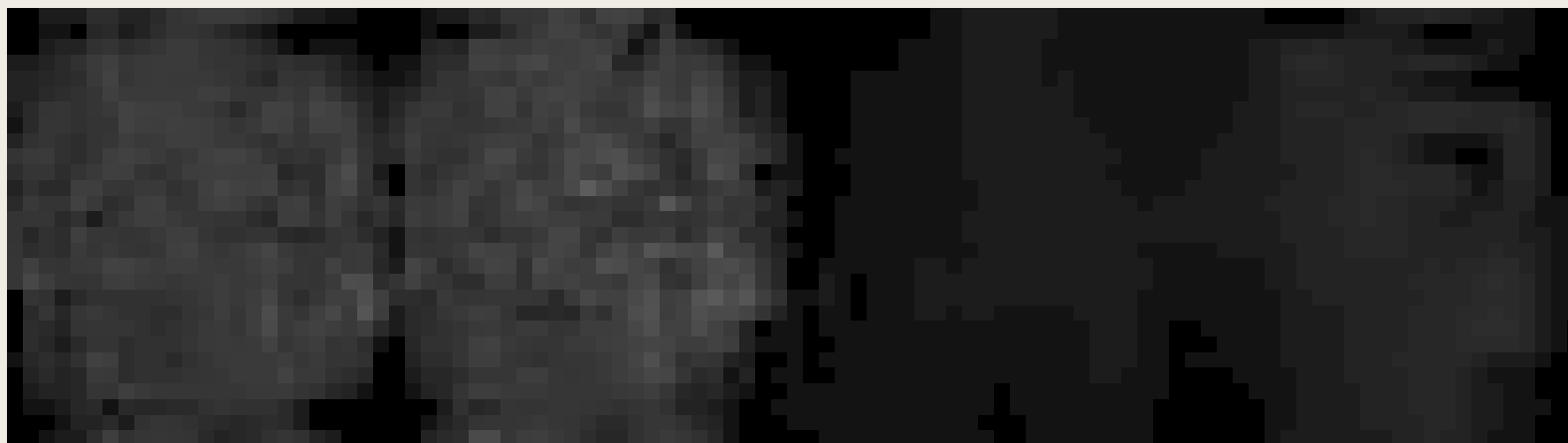


100フレームの動画

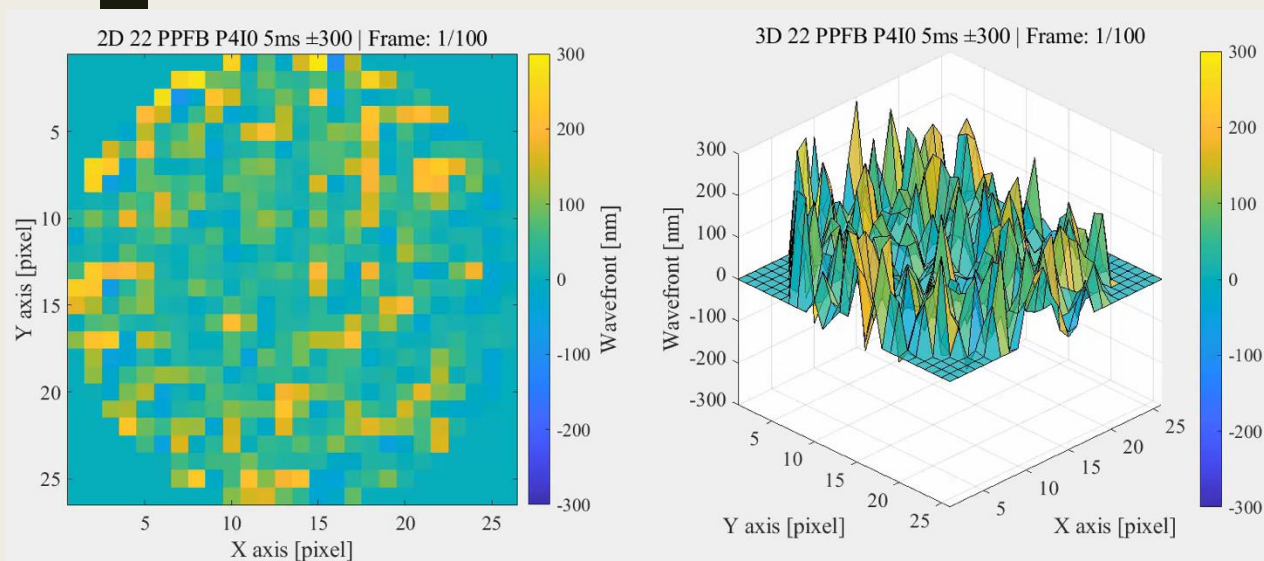


100フレームの平均

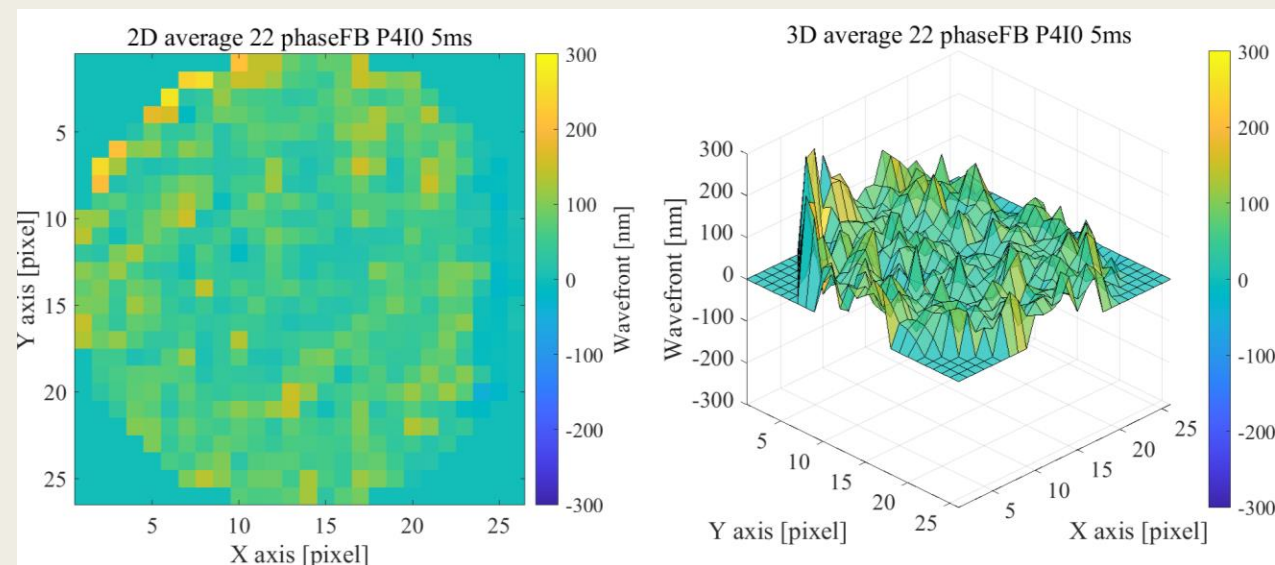
位相板 挿入(固定)時の制御結果 ($T_s = 5\text{ms}$, $K_p=4$, $K_i=0$)



PDIの4つの測定面

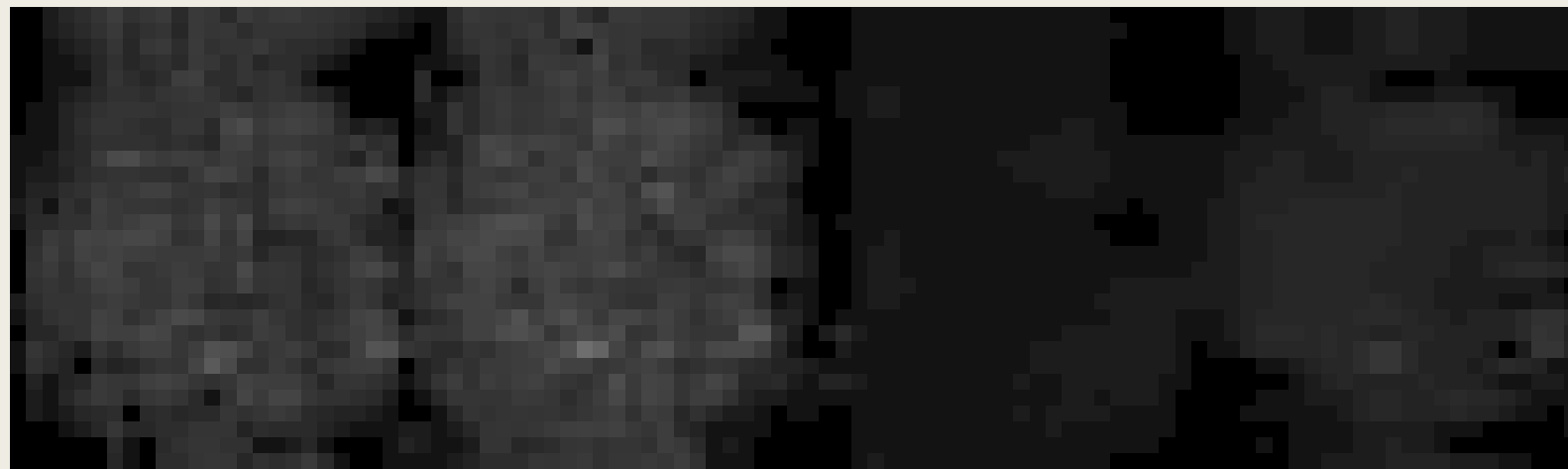


100フレームの動画

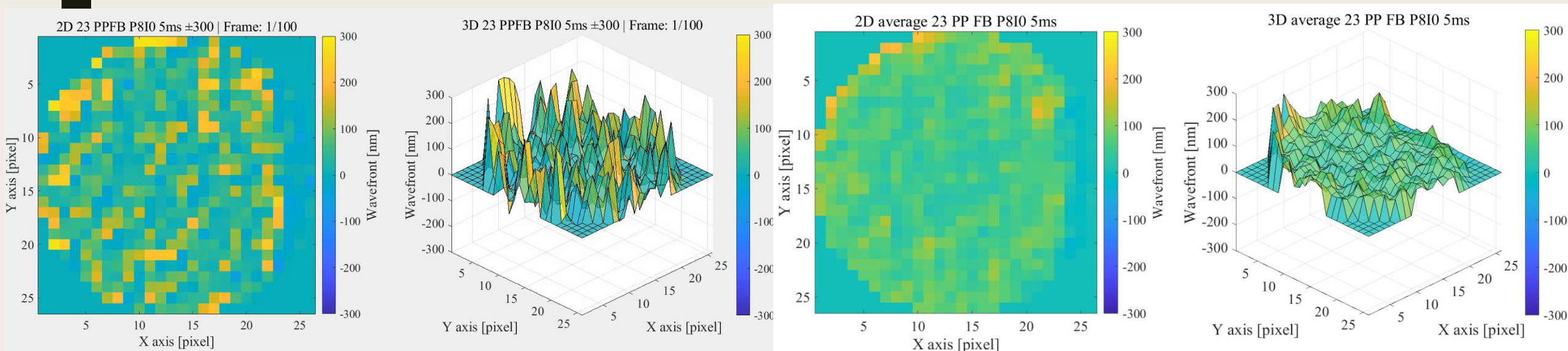


100フレームの平均

位相板 挿入(固定)時の制御結果 ($T_s = 5\text{ms}$, $K_p=8$, $K_i=0$)



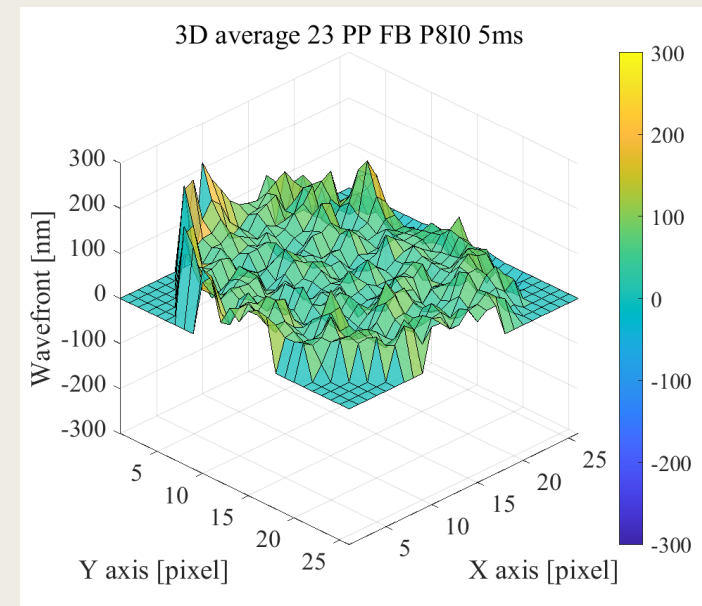
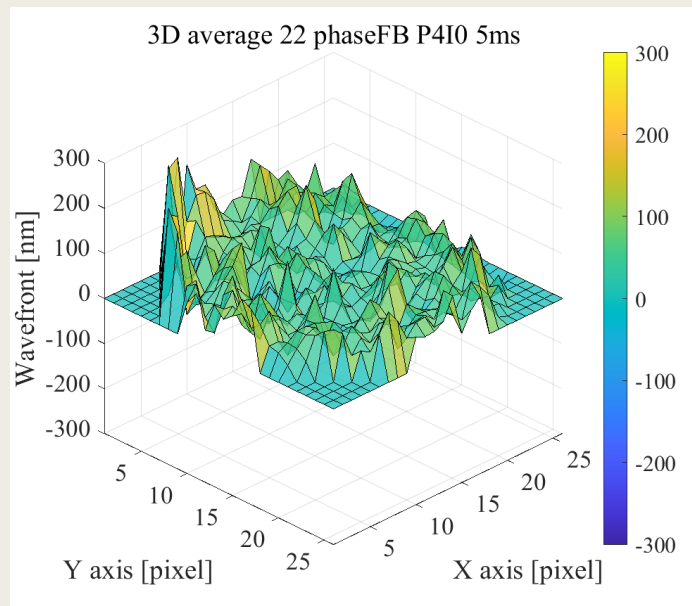
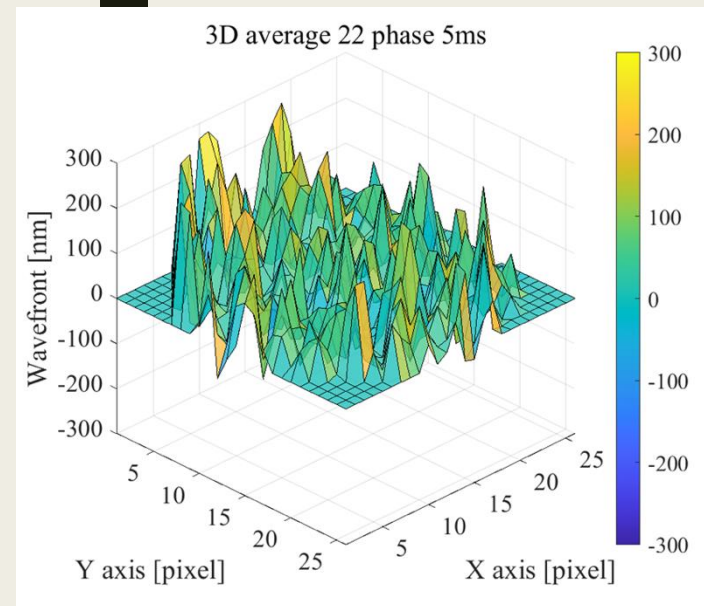
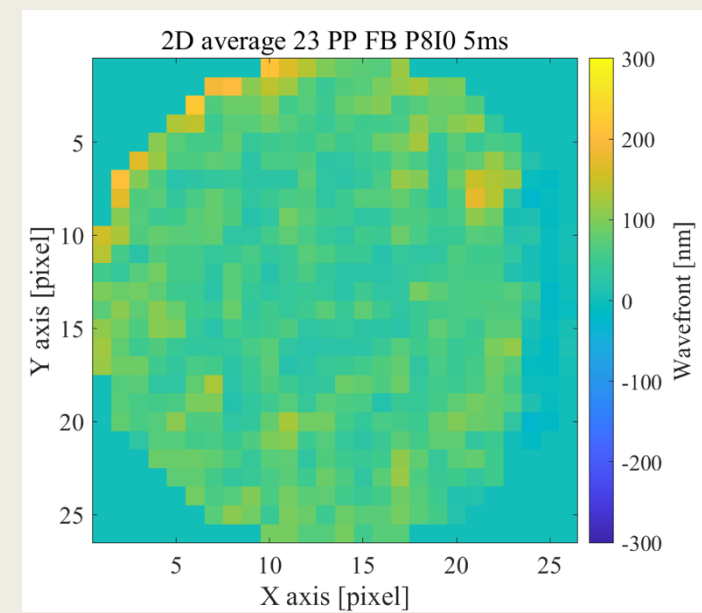
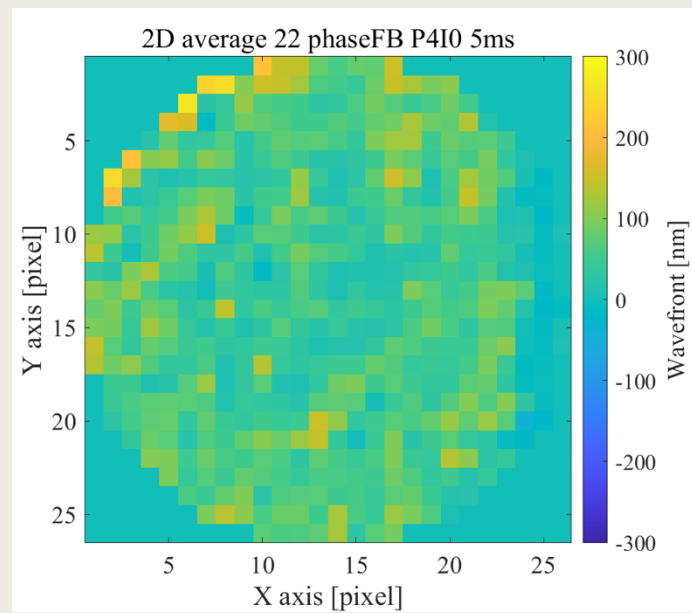
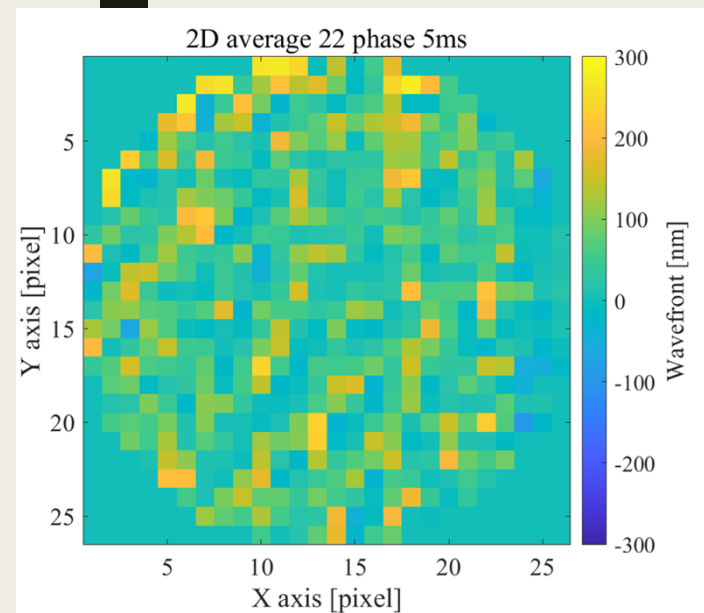
PDIの4つの測定面



100フレームの動画

100フレームの平均

■位相板挿入(固定)時の制御結果比較(5 ms×100フレーム平均)

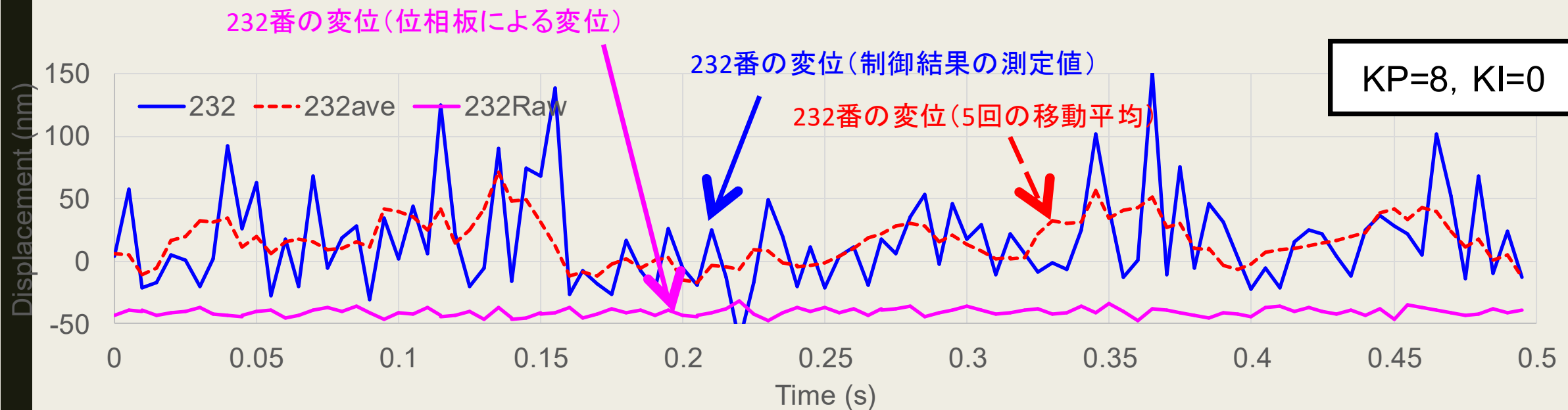
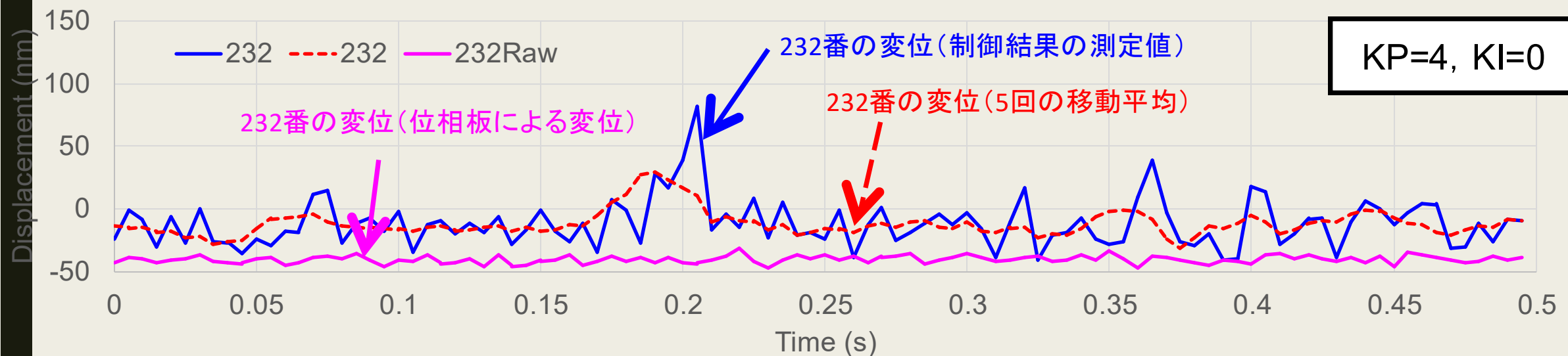


位相板固定:制御なし

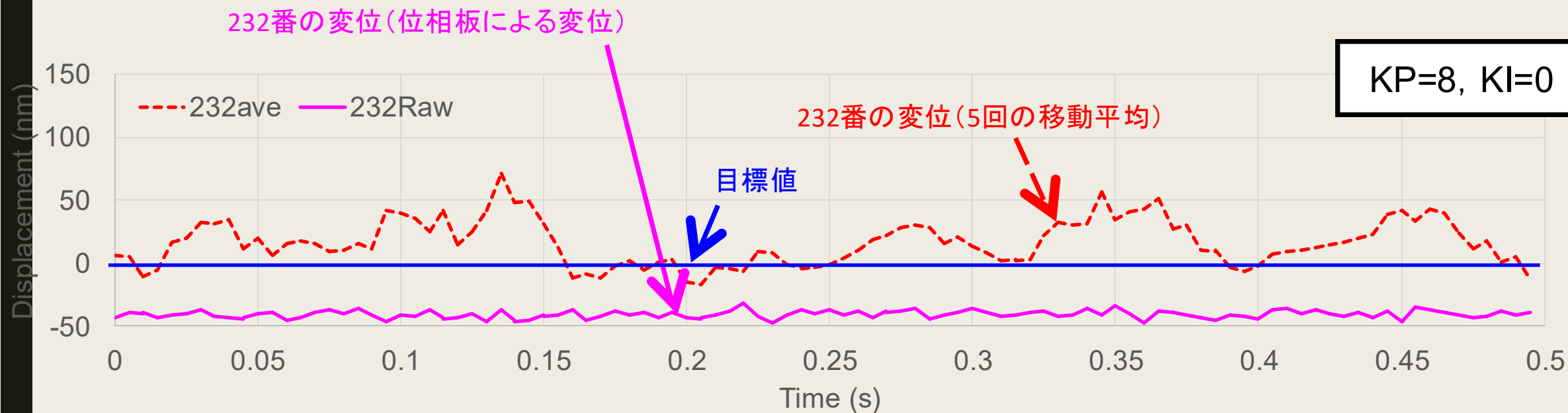
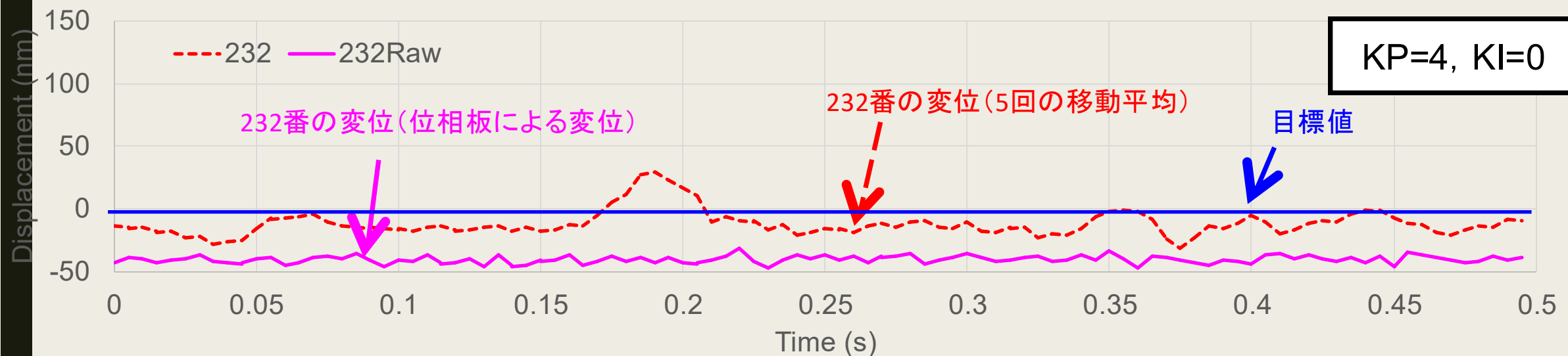
位相板固定:比例制御 $K_p=4$

位相板固定:比例制御 $K_p=8$

■位相板 挿入(固定)時の制御結果の比較($T_s=5\text{ms}$, 100 frameの時系列変化)



■位相板 挿入(固定)時の制御結果の比較($T_s=5\text{ms}$, 100 frameの時系列変化)



■位相板 挿入(固定)時の制御結果の比較($T_s=5\text{ms}$, 100 frameの時系列変化)

1. 比例ゲイン2倍($K_P=4 \rightarrow 8$, +6dB)により振動的な応答になる
2. 比例ゲイン2倍($K_P=4 \rightarrow 8$, +6dB)の効果は限定的
 1. もともと変位が小さい(ゼロ近傍)場所では効果なし
 2. 変位が大きい場所ではゲインが大きい方が偏差が小さくなっている
3. 比例ゲイン2倍($K_P=4 \rightarrow 8$, +6dB)で100フレーム平均値が小さくなるがそれは2(2)の効果が大い
4. DMアクチュエータの起動時定数が 1ms 以下なので, 5ms のサンプリング周期では応答が終わった後の値しか観測できない
 - DMの応答を観測するには 1ms 以下のサンプリング周期で実験する必要あり

まとめ

- コロナグラフSPLINEも含めほぼ全てのコンポーネントが岡山に到着
- 青ナス専用PCSによって観測効率を向上させる
- FPGAを用いた高次補償光学系のAOループ制御実験が行われている
 - PDI波面センサの調整や、制御ゲインの最適化、AOシステムのビルドアップが今後の課題
- 今後
 - 10月頃～：SPLINEの組み立て、調整、試験
 - 25年内：Tweeter AOの調整
 - 25年度内：AO＋コロナグラフの調整、試験

