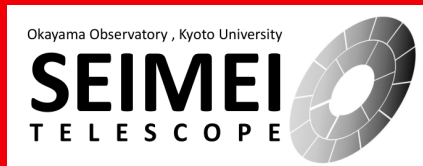


極限補償光学の進捗

山本広大,

木野勝, 西岡秀樹, 津久井遼(京都大学)

入部正継, 藤田勝(大阪電気通信大学)



惑星撮像装置SEICA[Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao]



標高370m+ピラー+主鏡12m

京大岡山3.8m
せいめい望遠鏡架台



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

◆ 目的:系外惑星直接撮像

熱放射

- 0".2秒角以遠(2AU@10pc)で木星質量の惑星の検出/キャラクタリゼーション
- 惑星撮像装置(for TMT)に搭載する先進技術開発

ExAO

- ◆ FPGA controller for ExAO
- ◆ 直接位相計測型波面センサ

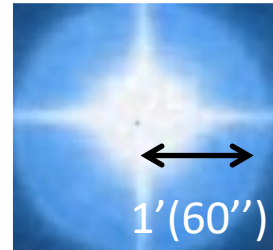
コロナグラフ ◆ ナリング干渉計型

- ◆ スペックルナリング
- ◆ 瞳再配置撮像
- ◆ 高分散分光器

- ◆ 分割主鏡ならではの
高コントラスト技術 等....

◆ 利点:3.8m望遠鏡へ搭載

- 望遠鏡へのアクセスが容易
メンテナンス、改良、観測....



HR8799 (Currie+2014)

b
b 7M_J
1".7

c 10M_E
1".1

e 9M_J
e 0".4

光度比
~10⁻⁵

October 30, 2012
Keck/NIRC2 Lp

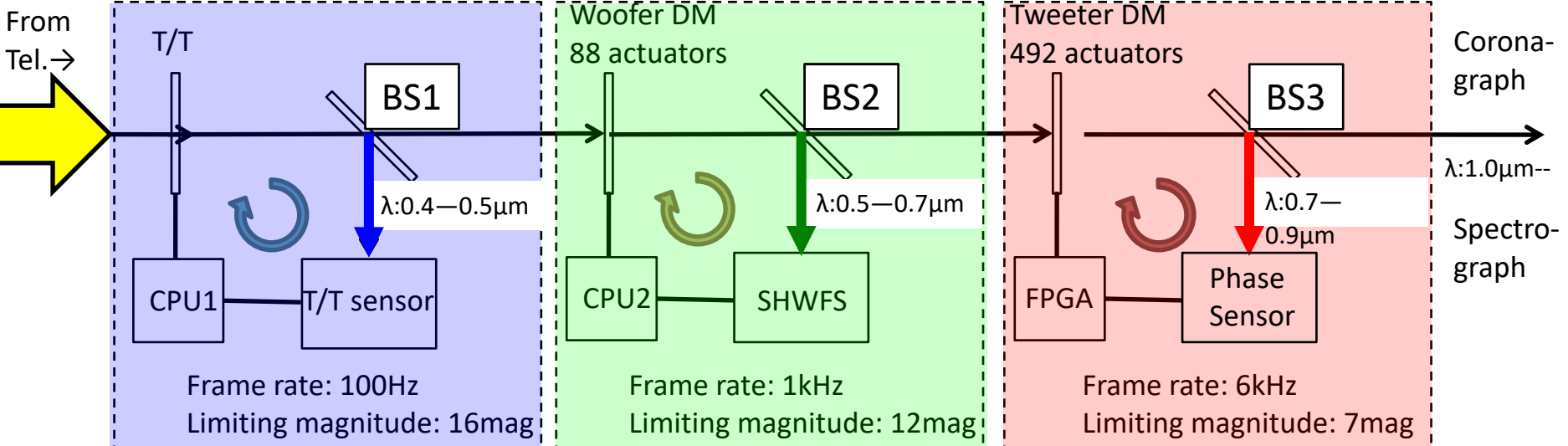
d 10M_J
0".7

20 AU
0.5"

FY.2021 F.L.目標

SEICA: 極限補償光学

◆要求仕様: 精度: $\lambda/20$, 速度: 5—10kHz, 測定点: 492 elements

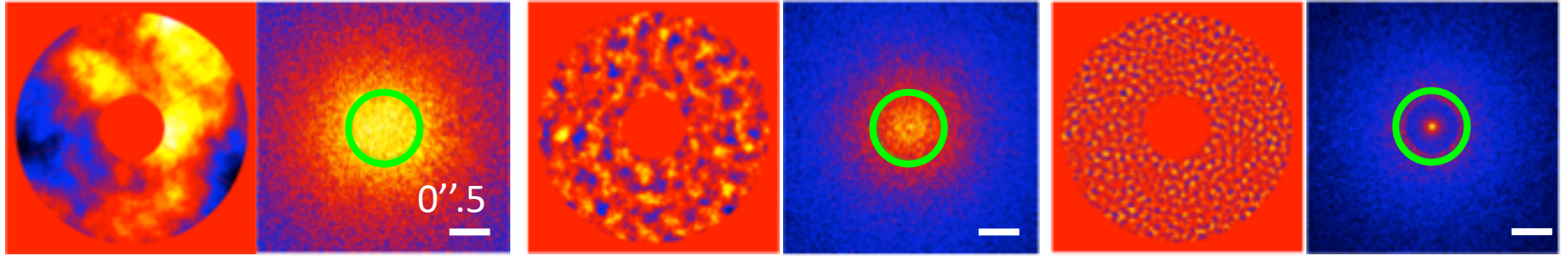


Tip/Tilt: 10mas pointing

Woofer: 低速 [1kHz]
大まか [$\lambda/4$]

Tweeter: 高速 [6.5kHz]
高精度 [$\lambda/20$]
高空間周波数: 24^2

シミュレーション(波面/星像)



Strehl ratio 0.02 0.3 0.9

極限補償光学: 本日の報告

◆ SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性、定盤の試験

◆ Woofer AO

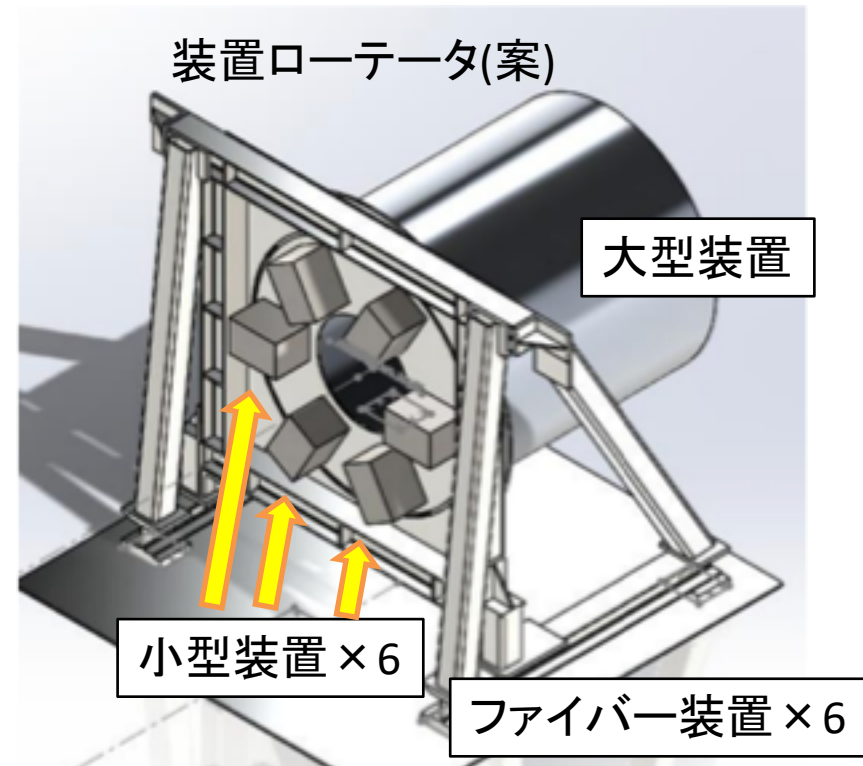
- センサー系: 実機設計
- 制御試験: 実験とシミュレーション

◆ Tweeter AO

- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

せいめい3.8m望遠鏡: 観測装置

- ◆主鏡: 3.8m (6+12枚分割鏡) F/6
- ◆ナスミス焦点2箇所¹に8台の観測装置
 - 装置ローテータ: (現在)7台(大型+小型+ファイバ)
 - ナスミス台占有装置: 1台(SEICA)



せいめい3.8m望遠鏡: 観測装置

ナスミス(青)

- ◆ 惑星探査装置 (SEICA)

ナスミス(赤)

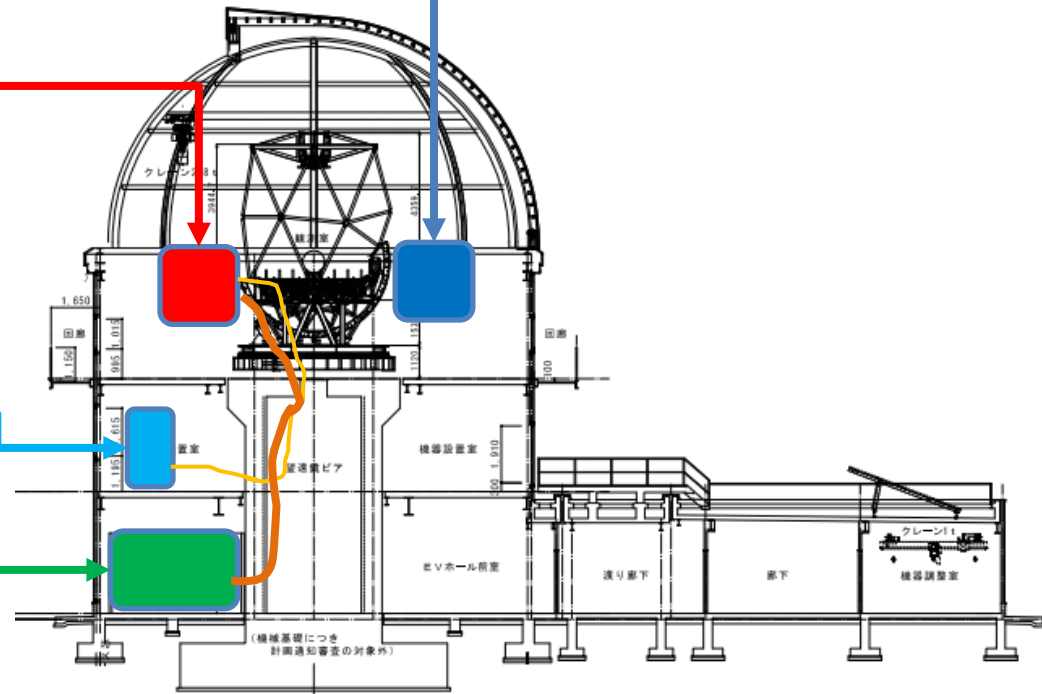
- ◆ 高速測光分光装置
- ◆ 赤外偏光撮像装置
- ◆ 多色同時撮像カメラ

装置設置室(2F)

- ◆ ぐんま高分散分光器 (GAOES)

分光器室(1F)

- ◆ 可視面分光装置 (KOOLS-IFU)
- ◆ 近赤外相対測光分光器
- ◆ 可視高分散分光器



- ◆ KOOLS-IFUの共同利用/京大時間観測が2019年2月よりスタート！！
- ◆ 当面位相合わせが必要ない観測/装置

極限補償光学: 本日の報告

◆ SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性確認、定盤の試験

◆ Woofer AO

- センサー系: 実機設計と製作
- 制御試験: 実験とシミュレーション

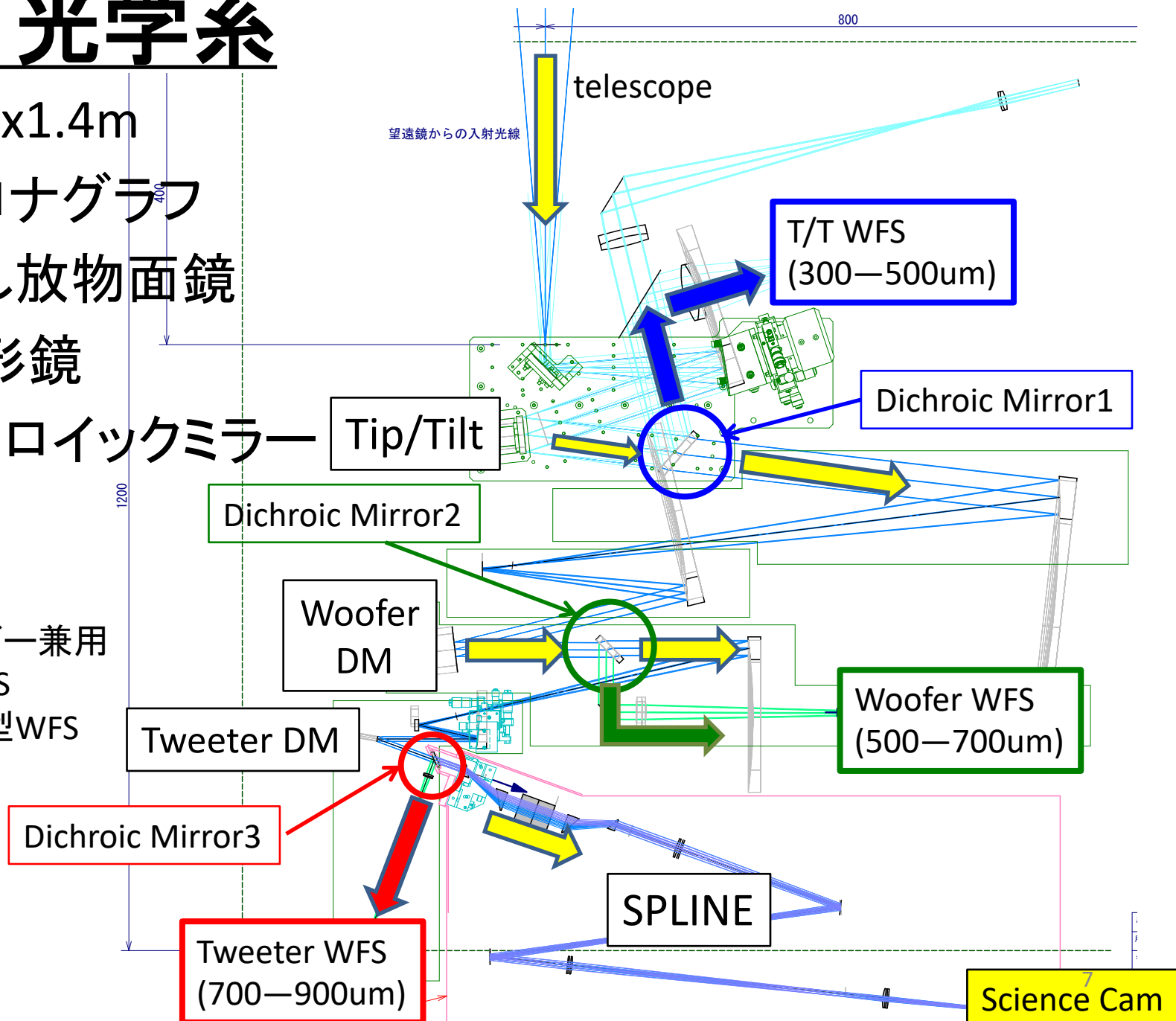
◆ Tweeter AO

- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

SEICA: 光学系

- ◆ size: 1.2x1.4m
- ◆ AO+コロナグラフ
- ◆ 5 軸外し放物面鏡
- ◆ 3 可変形鏡
- ◆ 3 ダイクロイックミラー
- ◆ 3 WFS

T/T WFS: ガイダー兼用
W WFS: SHWFS
T WFS: 位相型WFS



SEICA: 構造体

◆ 気温変動の影響

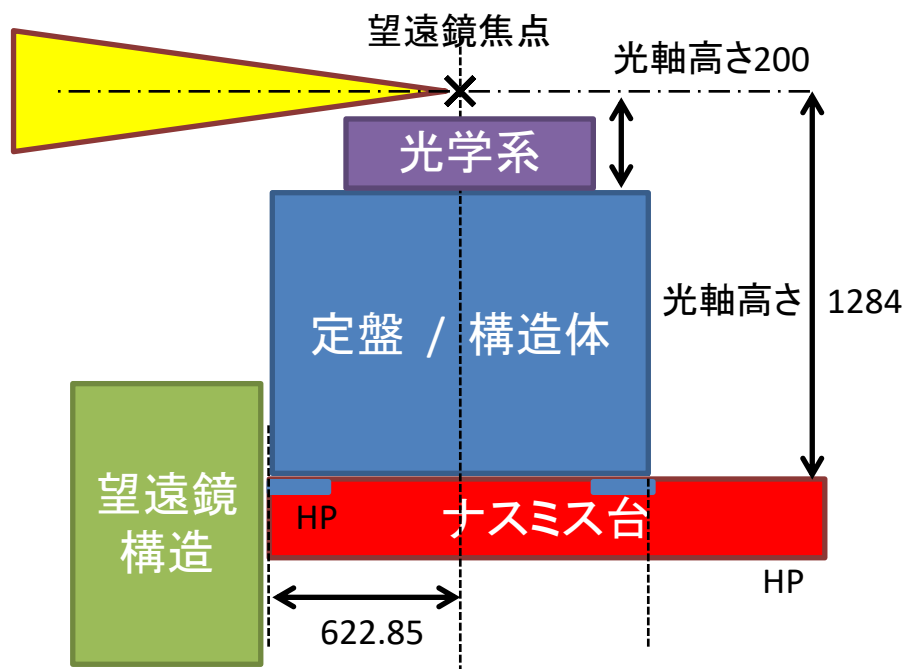
- 通年で0-30°Cの変化(岡山)
- 構造系: ステンレス
- 光学系: アルミ
- 光軸高さ変動: $\pm 20\mu\text{m}$
- TipTilt $\rightarrow 0.18\text{arcsec}$
- 瞳ズレ $\rightarrow 0.1\% @ \text{Woofers}$
- $\rightarrow 0.3\% @ \text{Tweeters}$

◆ 湿度忌避

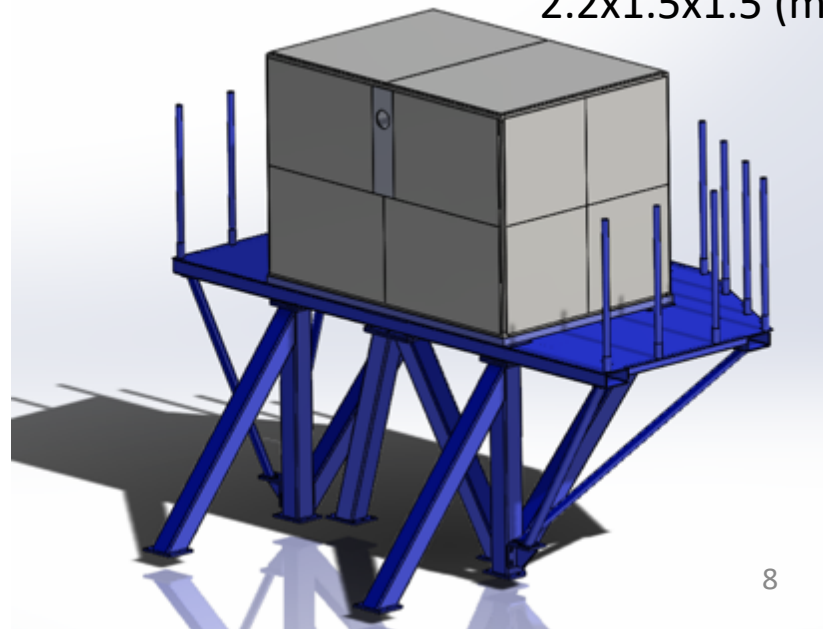
- コロナグラフ部分に潮解性のプリズムを仕様

◆ 装置内部からの熱流出抑制

検討: 窓材、曇り止め



装置サイズ
2.2x1.5x1.5 (m)



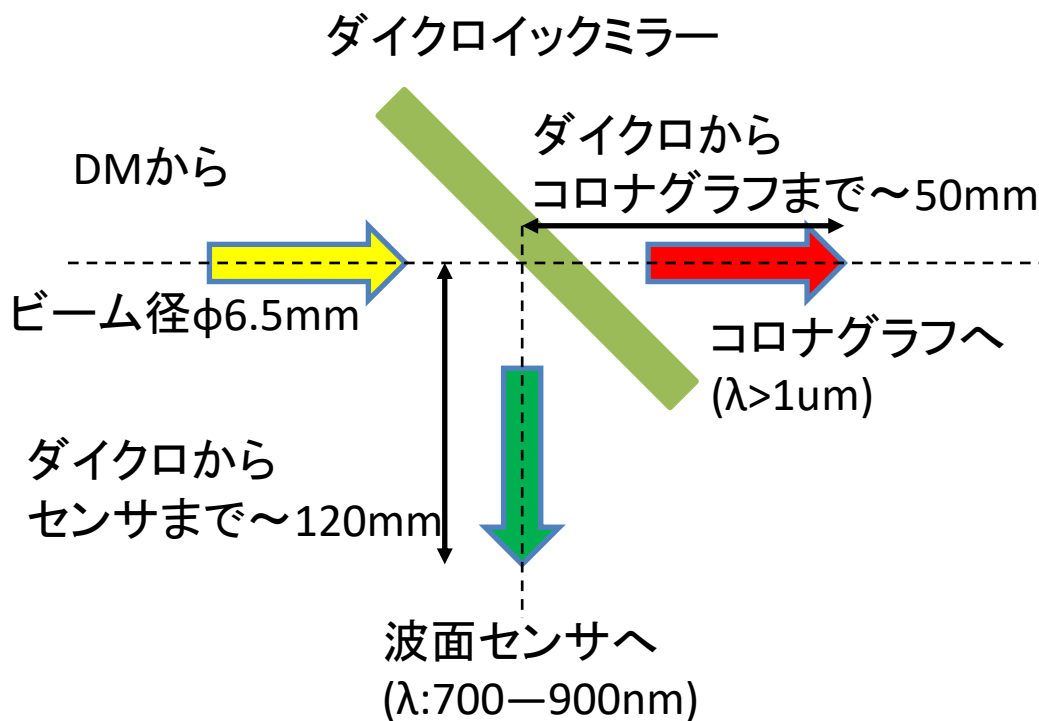
SEICA: 温度管理の必要性

◆コロナグラフの要求視線方向精度: ~10ミリ秒角

◆波面センサの方式: 位相計測(PDI: 西岡)

– tip/tilt残差が大きくなると計測誤差が大きくなる

→コロナグラフ/WFSの軸が非共通光路で変動



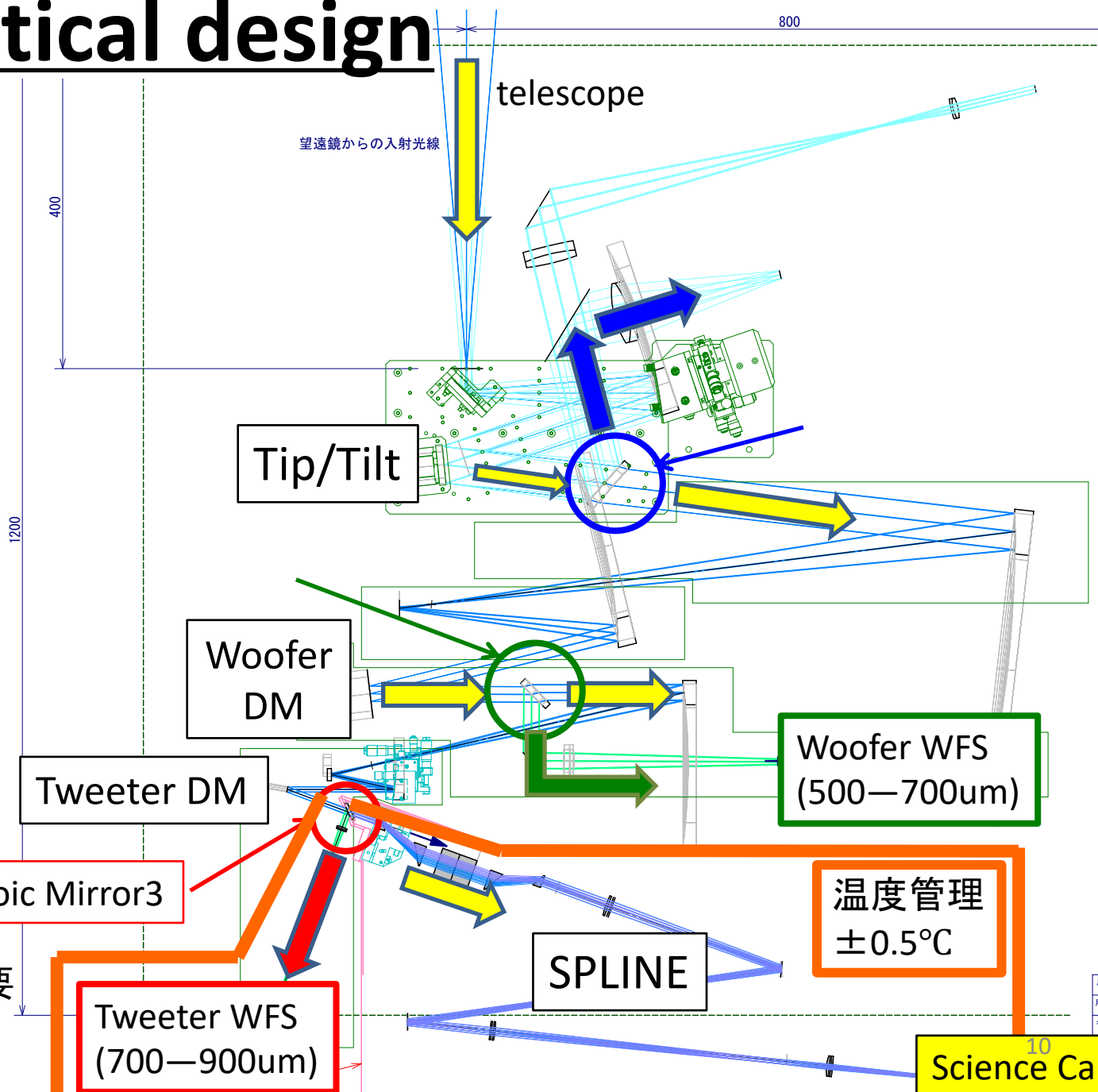
	指向誤差
望遠鏡開口(3.8m)	10ミリ秒角
Tweeter後(6.5mm)	5.8秒角

→1.4 μm のズレ(50mmで)
↔1.2 μm の変動($\Delta 1^\circ\text{C}$)

1. 観測中に温度安定化
 1. 空間的(ムラ)
 2. 時間的
2. 温度変動分の補正
 1. ダイクロをアクチュエータ駆動

SEICA: optical design

800



Dichroic Mirror3

Tweeter DM

Woofers DM

Tip/Tilt

telescope

望遠鏡からの入射光線

Woofers WFS (500—700um)

温度管理 ±0.5°C

SPLINE

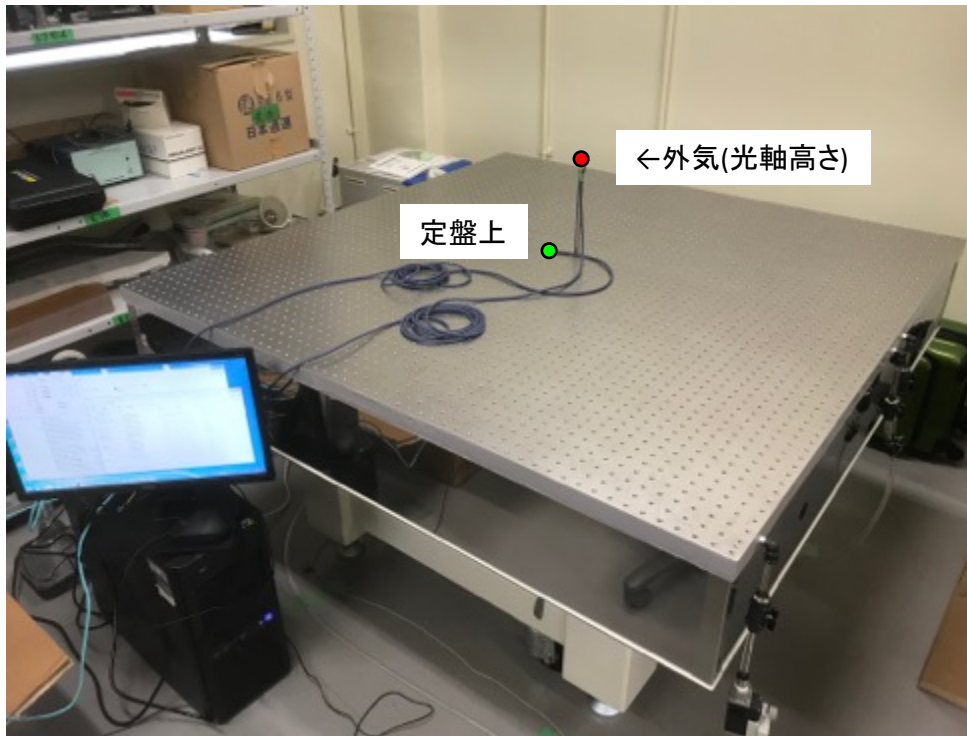
Tweeter WFS (700—900um)

Science Cam

高精度温度管理が必要

SEICA: 水冷定盤の動作

◆ 水冷式定盤で温度安定化可能か



日本防振工業 WHB-1414TS

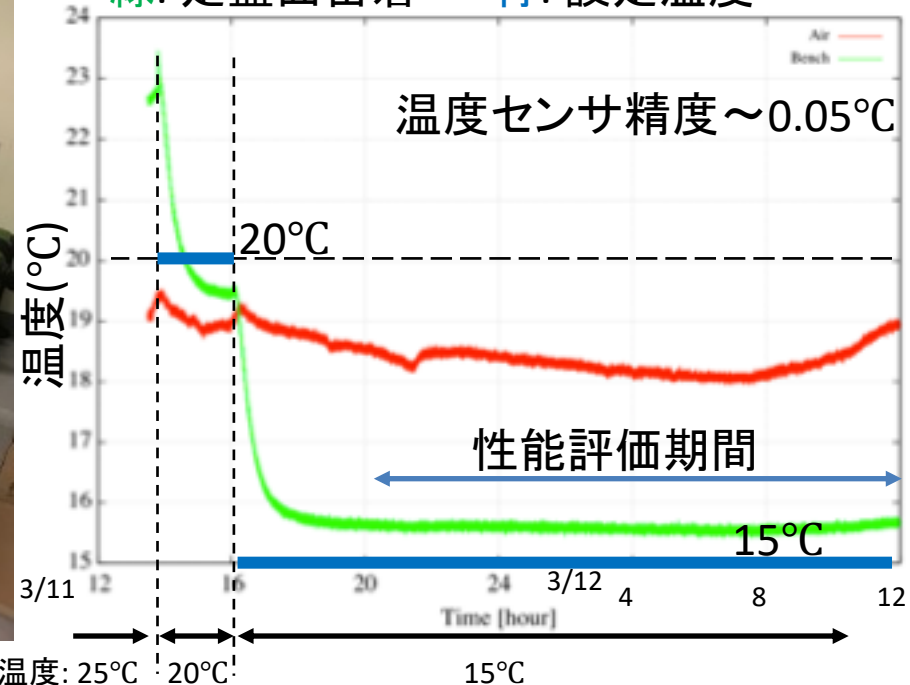
温度変化の時定数～26分

2019/03/11 13:30—03/12 12:00

赤: 外気(定盤から20cm上空)

緑: 定盤面密着

青: 設定温度



温度安定時(20時以降)

定盤上: $15.58 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (p-v: 0.38°C)

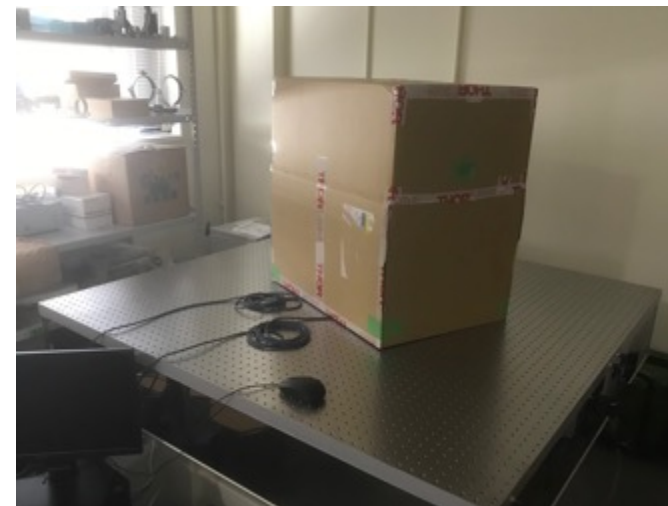
外気温: $18.35 \pm 0.23^{\circ}\text{C}$ (p-v: 1.12°C)

→外気温が変動しても 0.5°C 以内に収まりそう

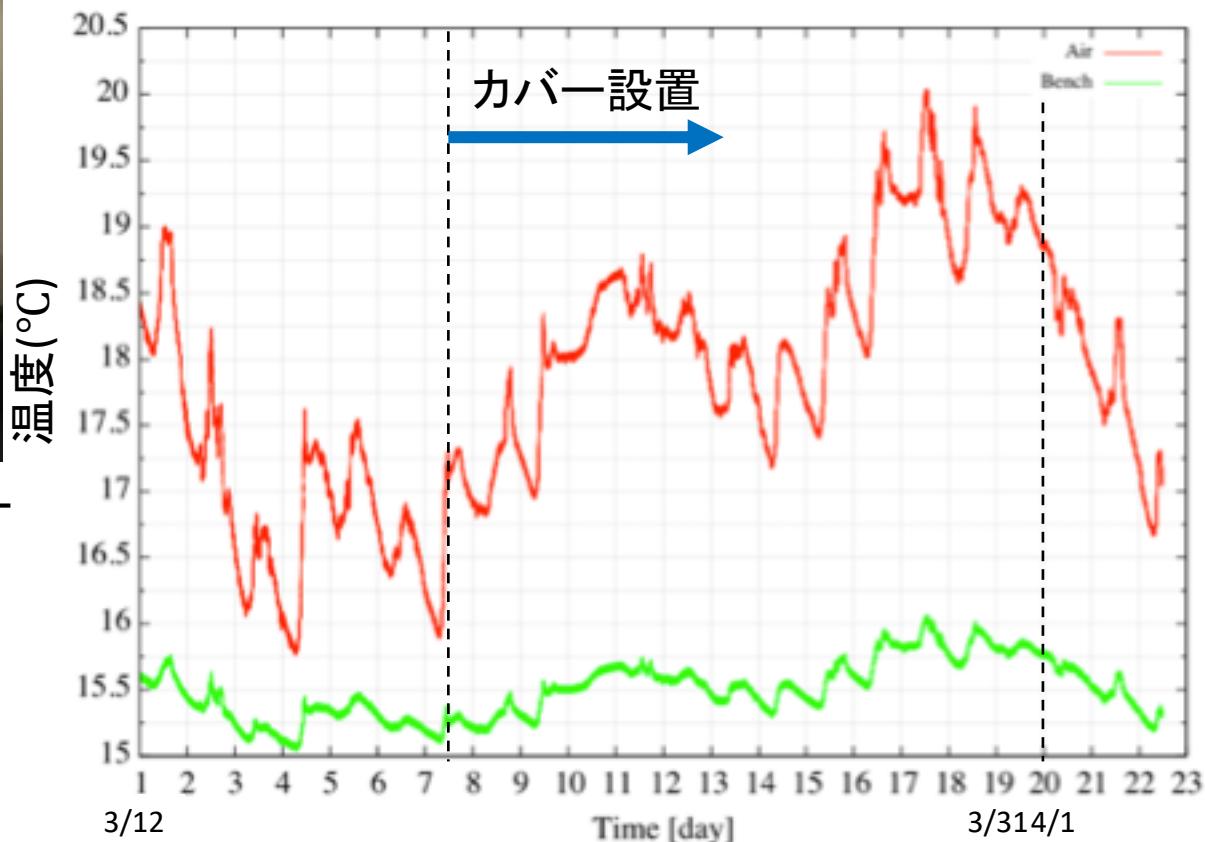
SEICA: 水冷定盤の長期安定性

◆ 安定性の評価: 1日 → 23日間 2019/03/12 0:00—04/12 12:00

赤: 外気(ダンボール内20cm上空)
緑: 定盤面密着



日よけ、風よけダンボールカバー



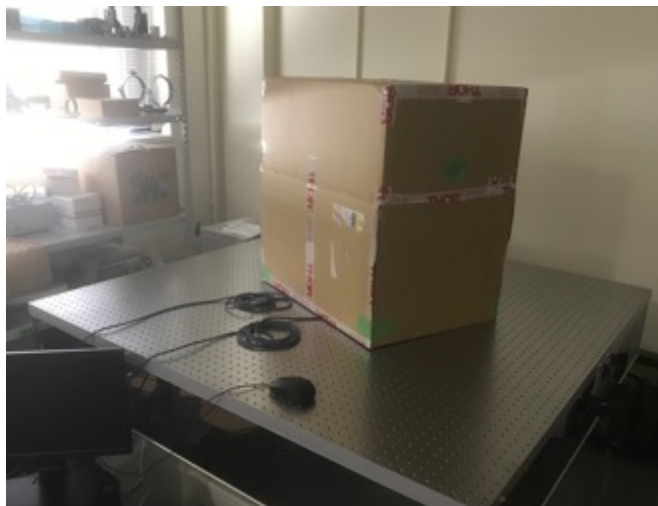
短期間の予測:

外気温が変動しても 0.5°C 以内に収まりそう

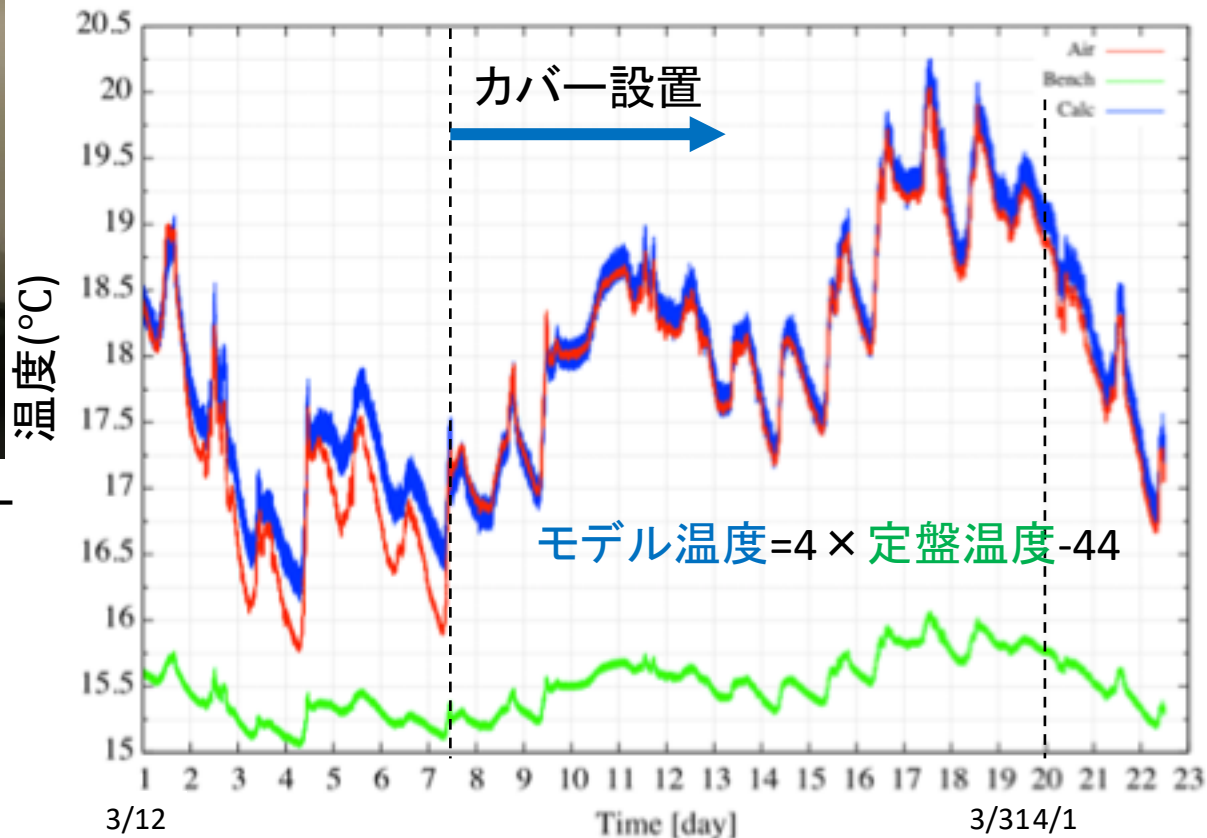
→外気温 4°C 変動しても $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内に収まっている

SEICA: 水冷定盤の長期安定性

◆ 安定性の評価: 1日 → 23日間 2019/03/12 0:00—04/12 12:00
赤: 外気(ダンボール内20cm上空)
緑: 定盤面密着 青: モデル



日よけ、風よけダンボールカバー



今後の温度環境

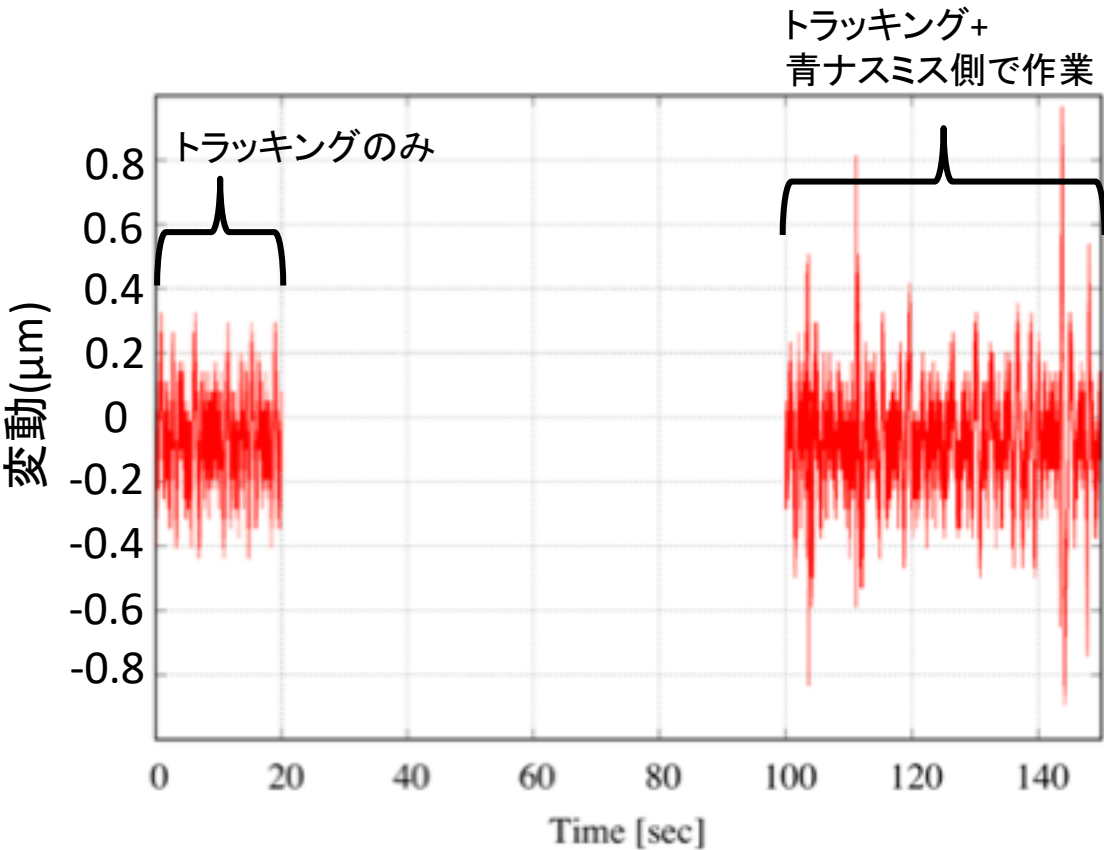
定盤によって温度変動はおよそ1/4に抑えられている

1. 温度変動が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ に抑えられるような環境整備
2. 水冷定盤の設定温度を能動的に制御

SEICA: ナスミス台振動特性

◆ナスミス台の振動特性

望遠鏡トラッキング中(2018/12/17)
赤ナスミス台に振動計を設置



トラッキング中の振動はほぼ無視できる



せいめい望遠鏡架台

極限補償光学: 本日の報告

◆ SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性確認、定盤の試験

◆ Woofer AO

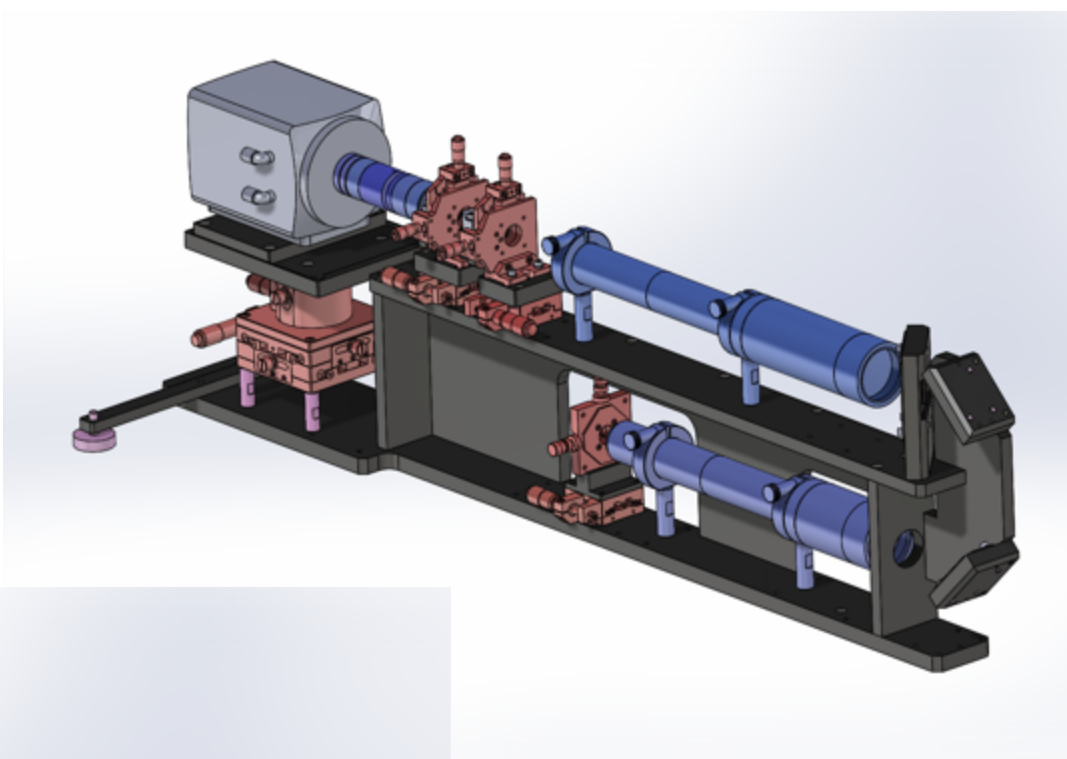
- センサー系: 実機設計と製作
- 制御試験: 実験とシミュレーション

◆ Tweeter AO

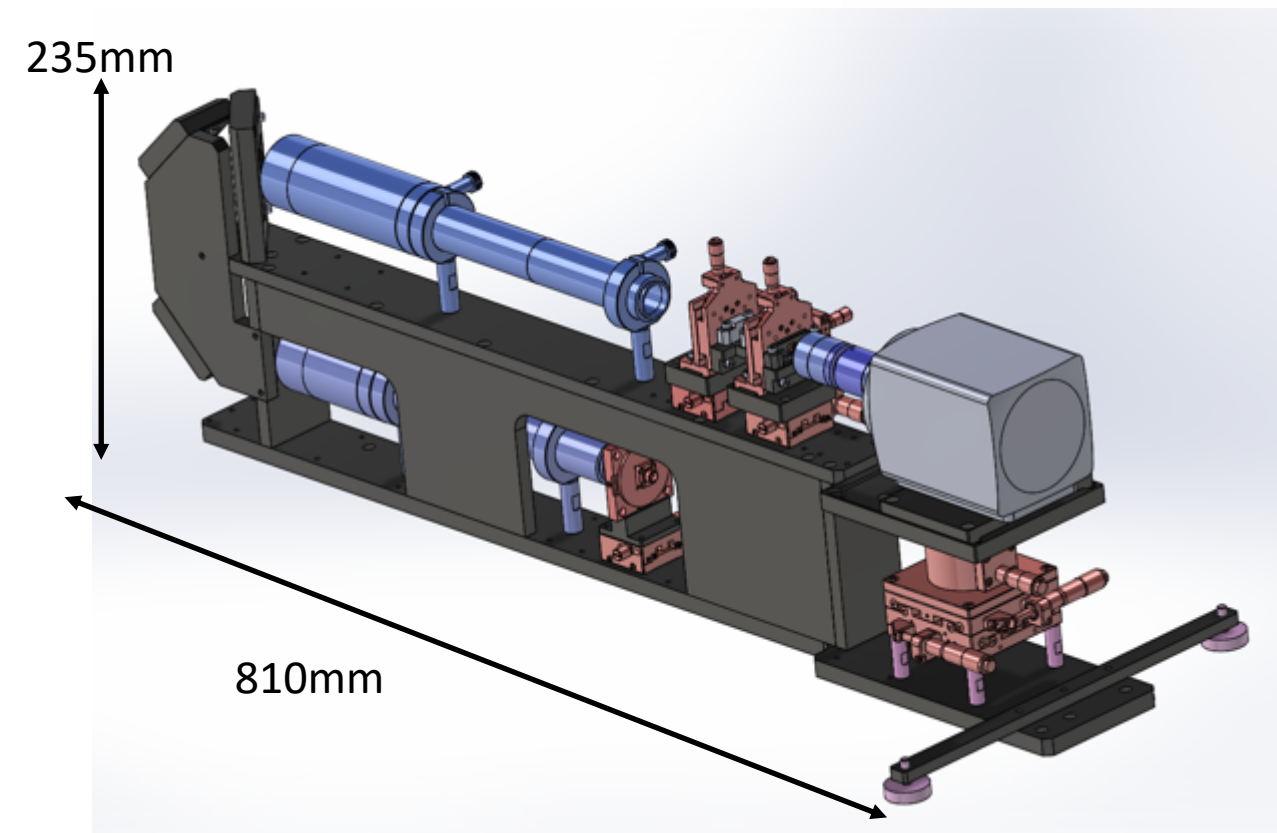
- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

WoofersWFS

◆ 実機搭載用SHWFS系の設計・製作



黒: 大阪電通大製作
青: Edmund
赤: Sigma
ピンク: MISUMI

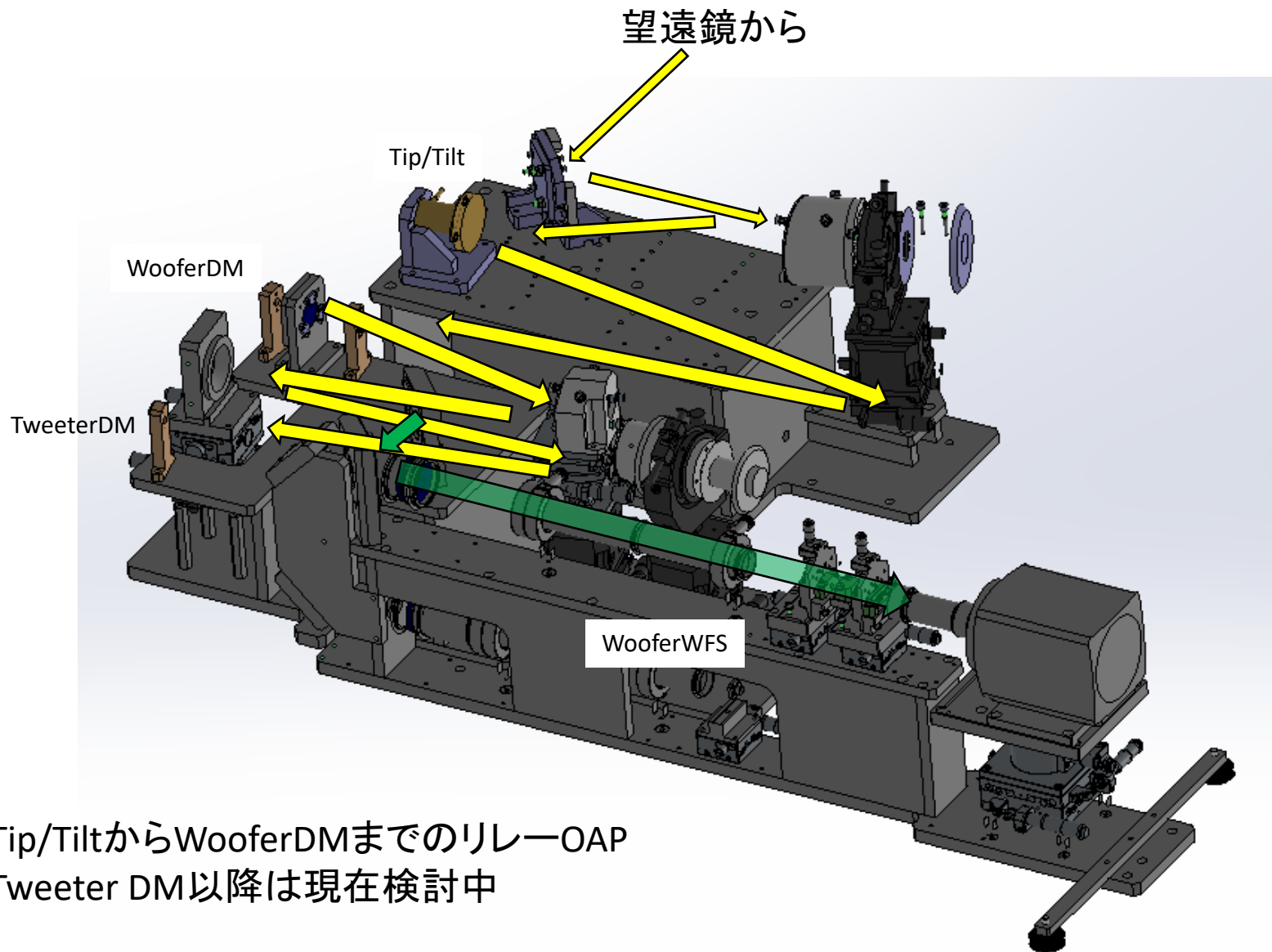


Woofers WFS実機



組み立て完了。今後調整、性能評価へ

SEICA: Woofer AO実機設計・製作



極限補償光学: 本日の報告

◆ SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性確認、定盤の試験

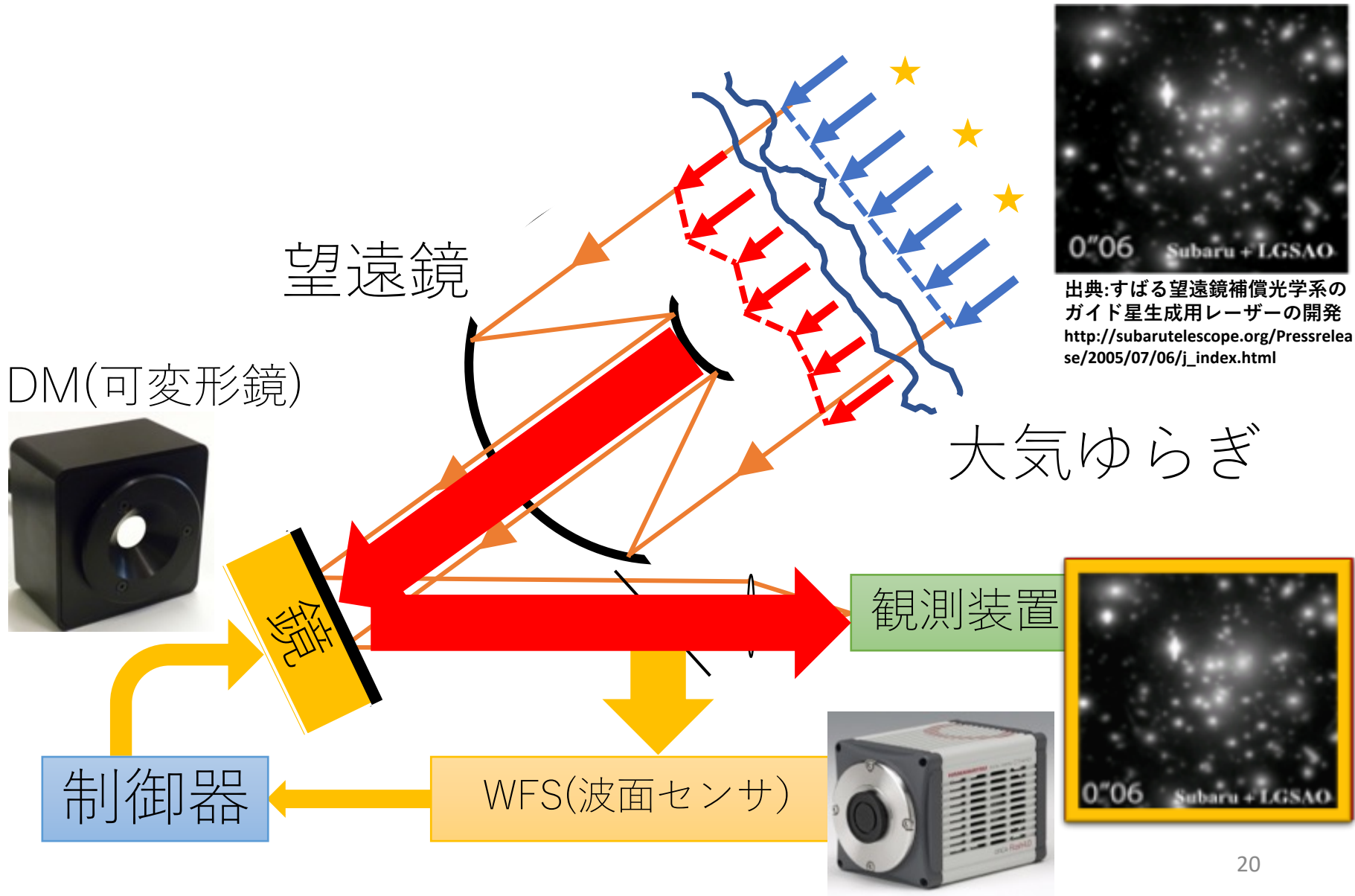
◆ Woofer AO

- センサー系: 実機設計と製作
- 制御試験: 実験とシミュレーション

◆ Tweeter AO

- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

補償光学概要



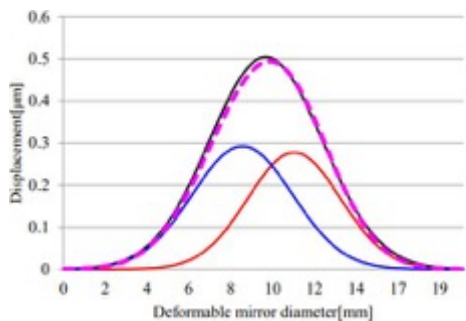
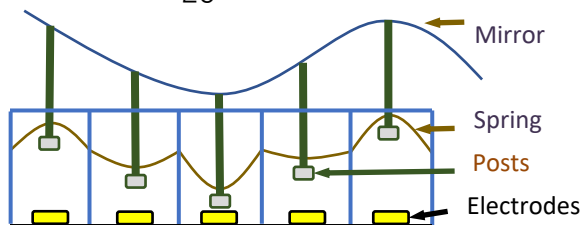
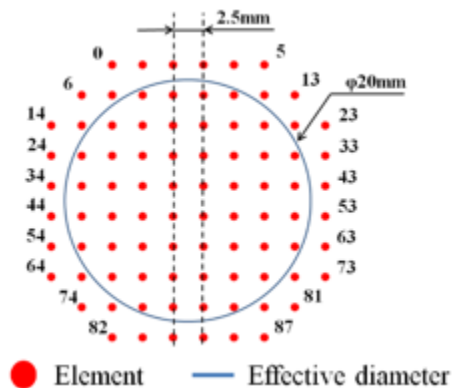
補償光学装置概要

可変形鏡 (DM: Deformable-mirror)

波面センサ(WFS: Wave-Front Sensor)



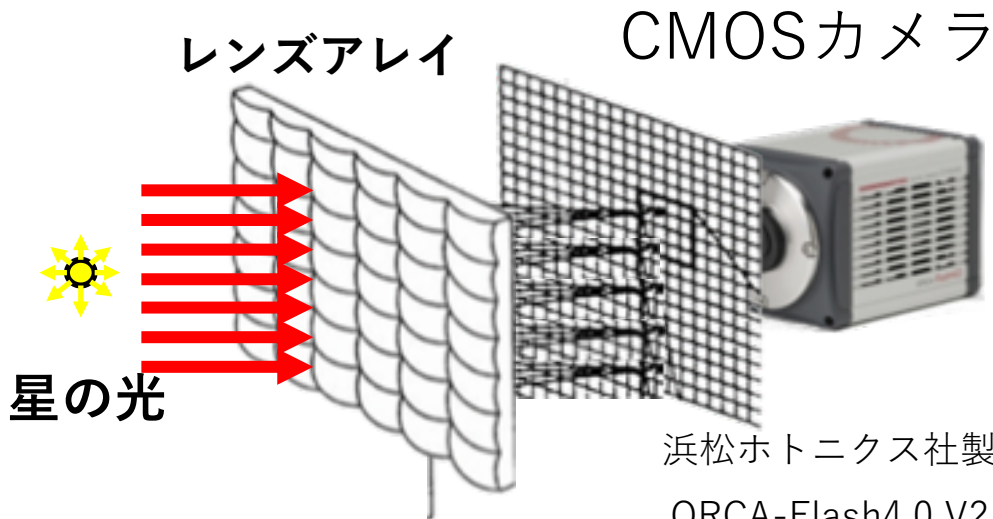
ALPAO社製
ALPAO DM 88-25



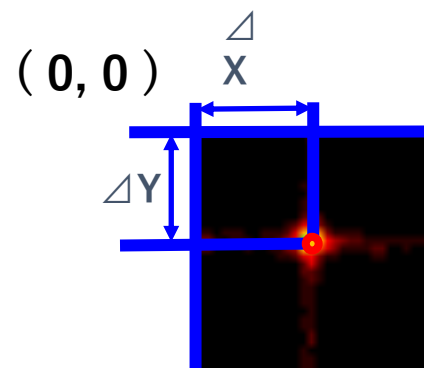
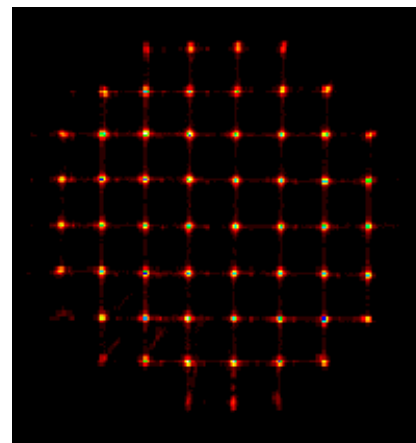
他素子への影響

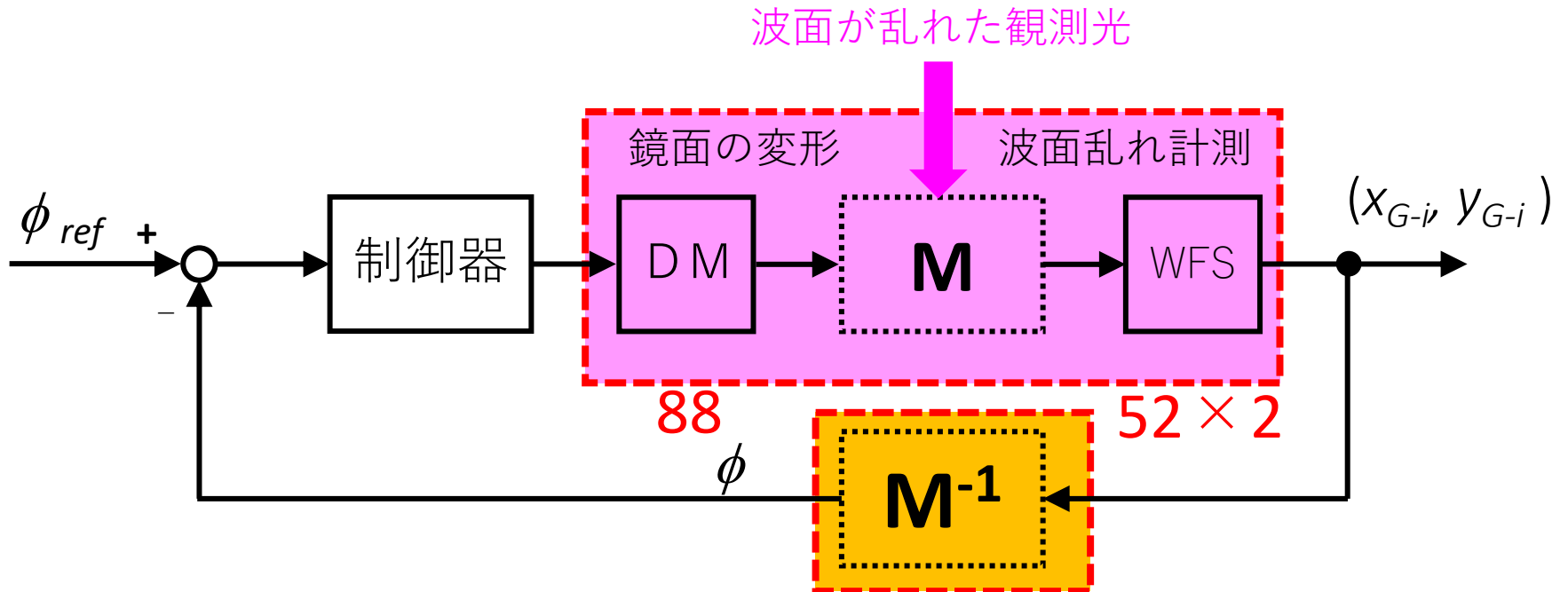
隣(2.5mm)→0.66
斜(3.5mm)→0.44

— No.48+No.49
— No.49
— No.48
- - - Calculated



浜松ホトニクス社製
ORCA-Flash4.0 V2





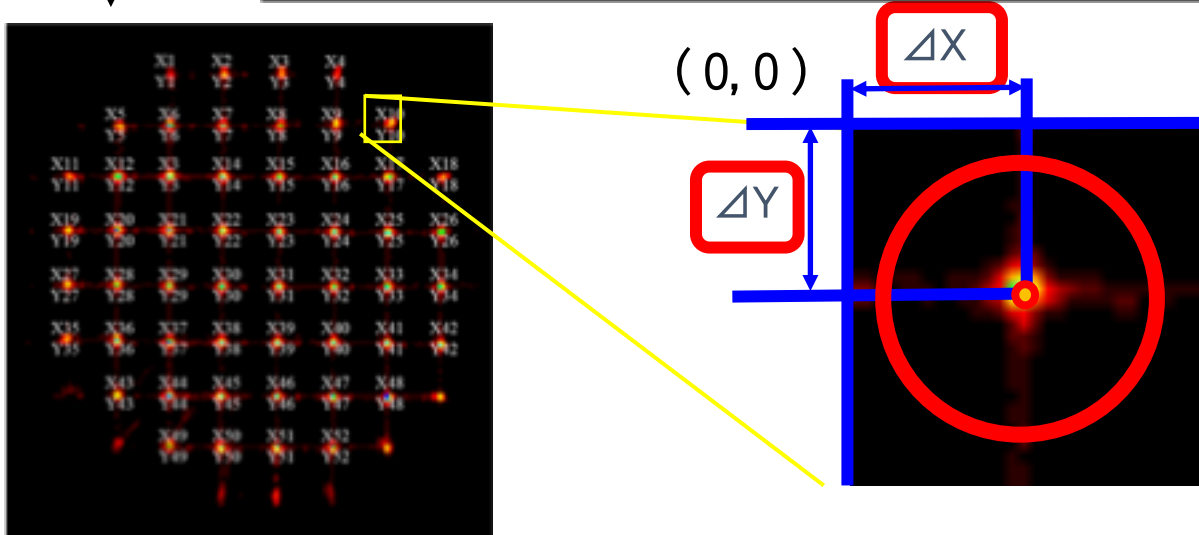
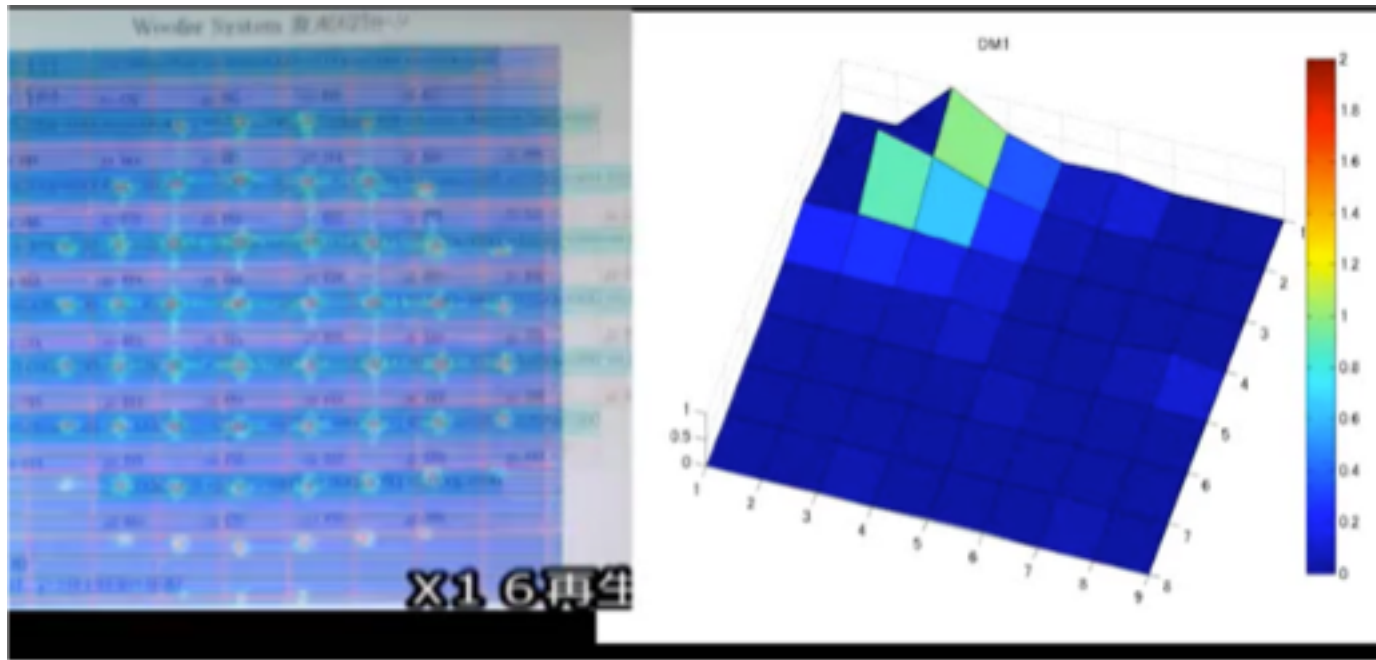
$$\begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{inv-11} & M_{inv-12} & \cdots & M_{inv-1,2m} \\ M_{inv-21} & M_{inv-22} & \cdots & M_{inv-2,2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{inv-n,1} & M_{inv-n,2} & \cdots & M_{inv-n,2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$$

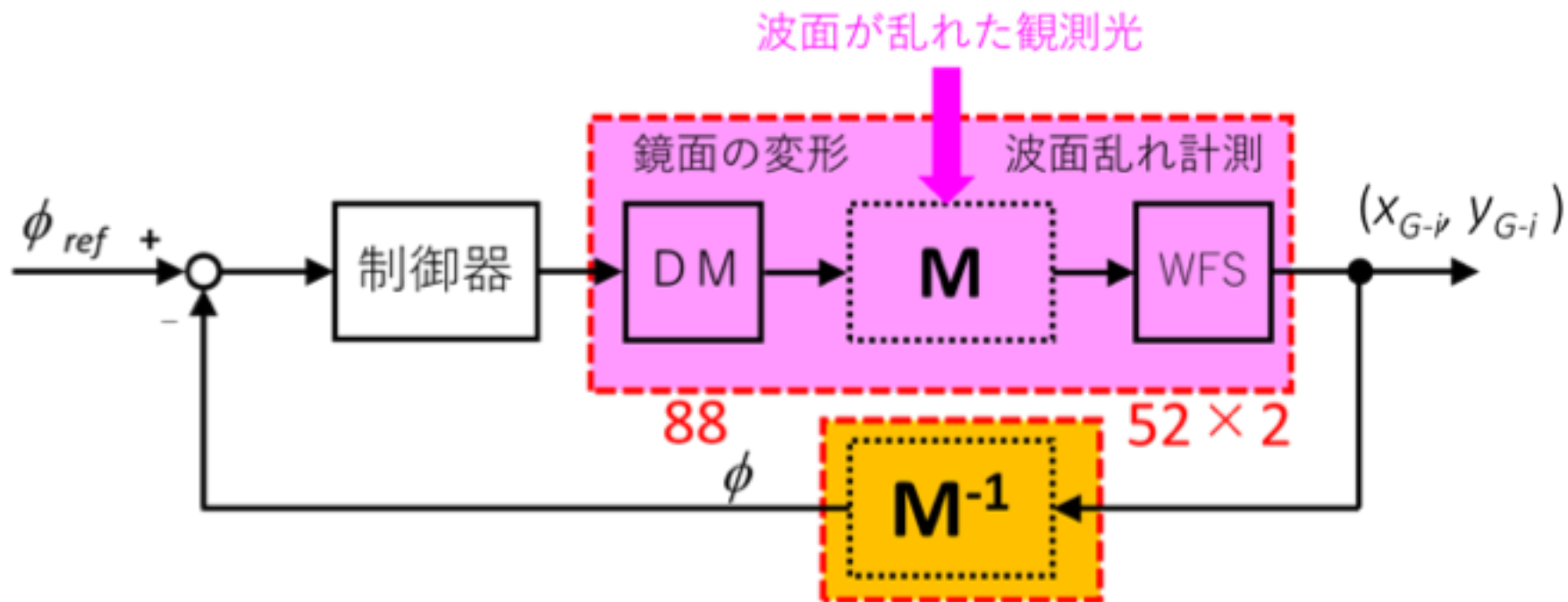
疑似逆行列

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

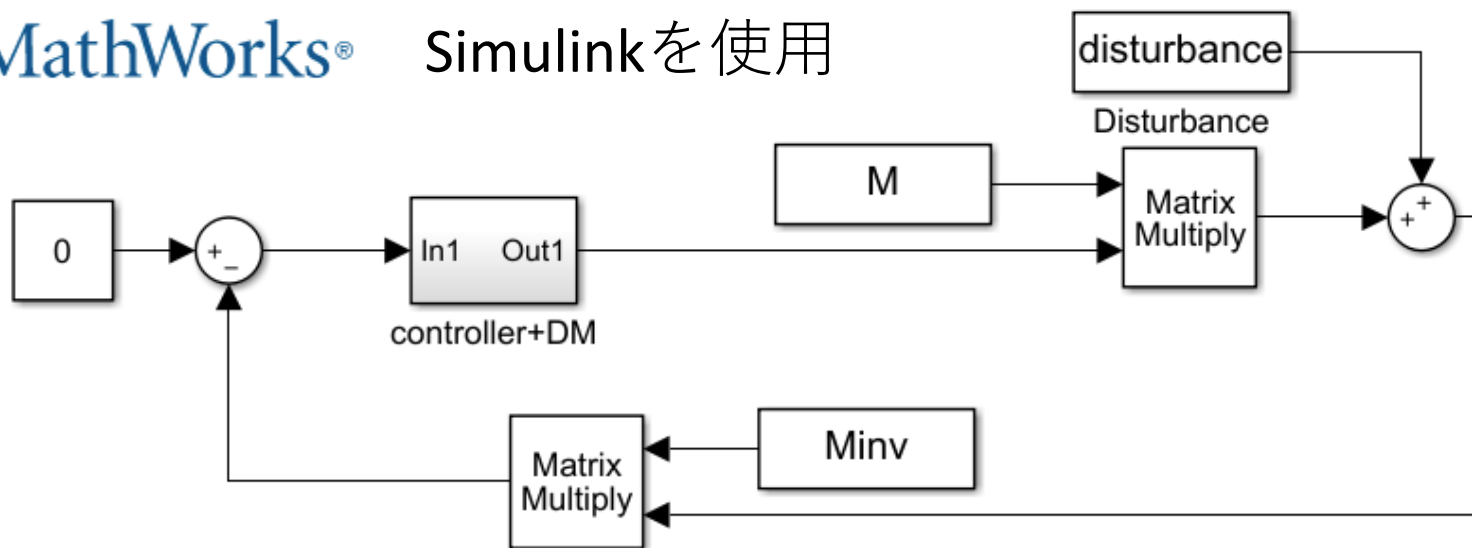
非正則な写像

作用行列Mの導出



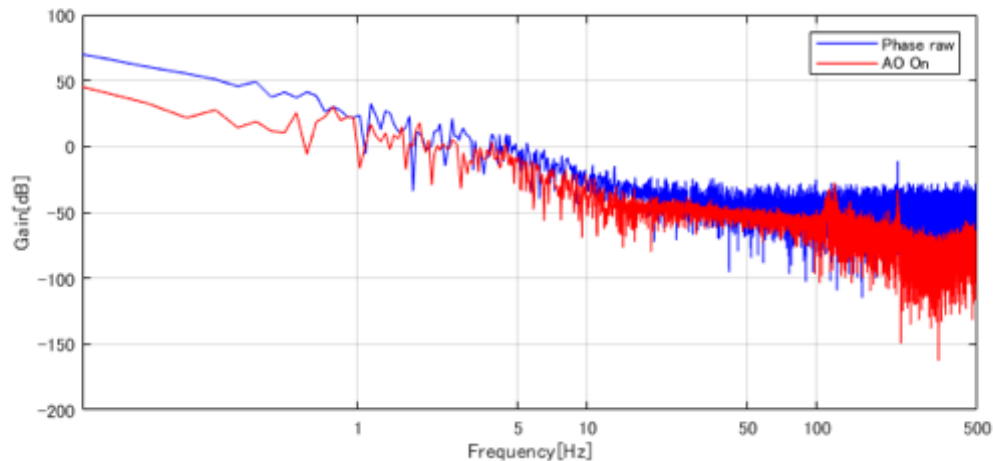
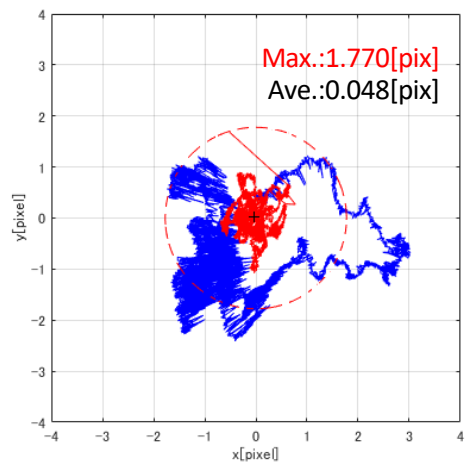


 MathWorks® Simulinkを使用

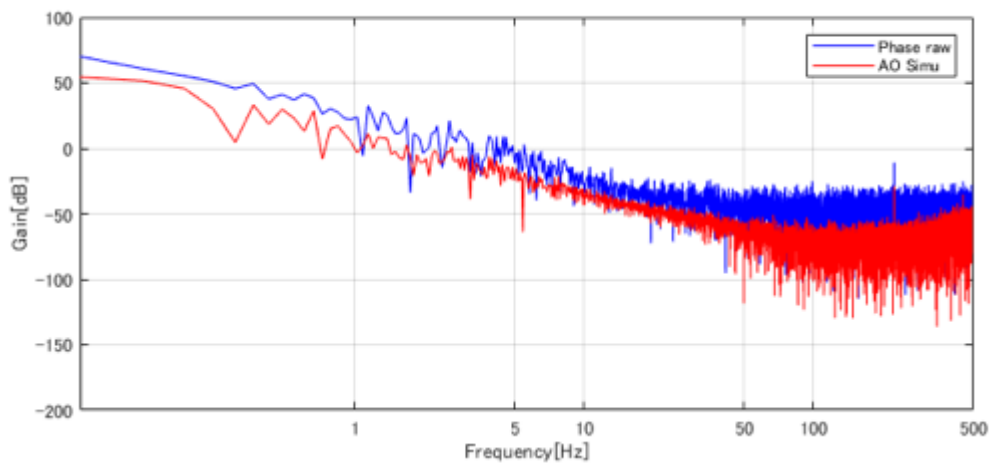
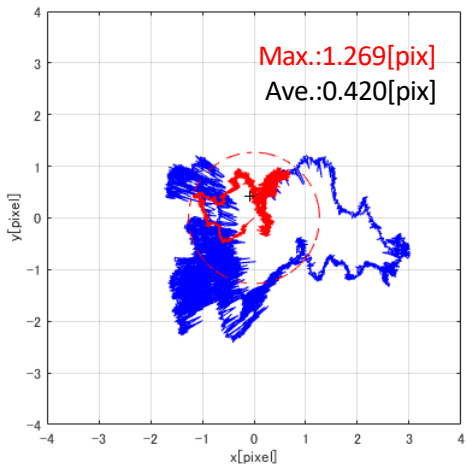


結果比較 10sec 約1kHz

実験系



シミュレータ



極限補償光学: 本日の報告

◆SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性確認、定盤の試験

◆Woofer AO

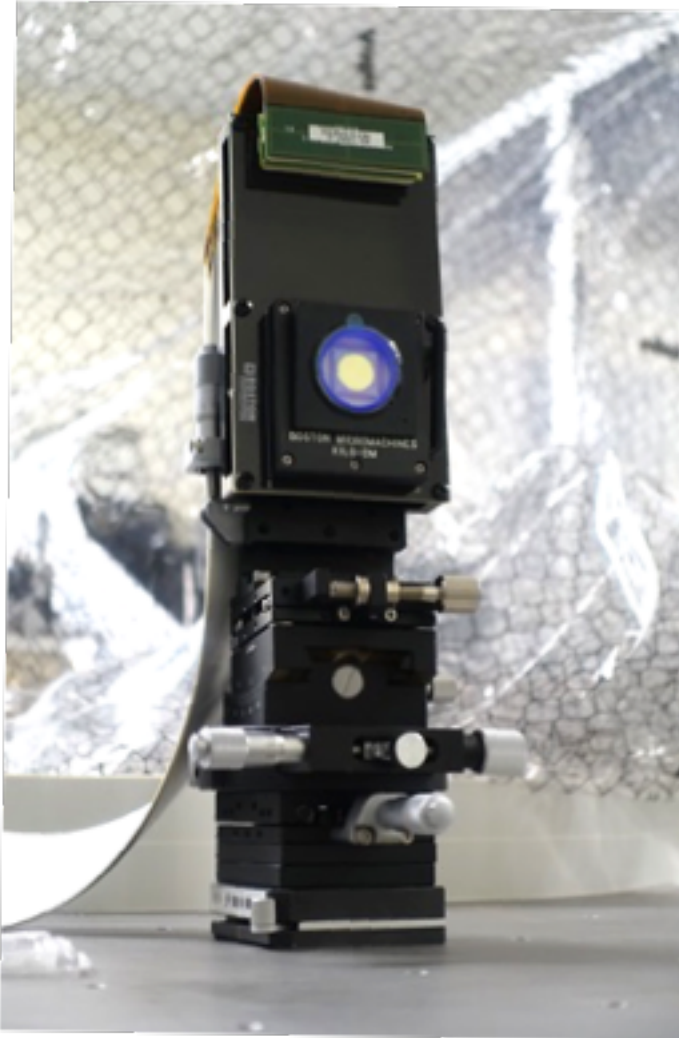
- センサー系: 実機設計と製作
- 制御試験: 実験とシミュレーション

◆Tweeter AO

- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ (西岡)
- 制御装置: FPGA開発

Tweeter AO: Tweeter DM立ち上げ

◆動作確認



BMC 492-DMと実験用5軸ステージ

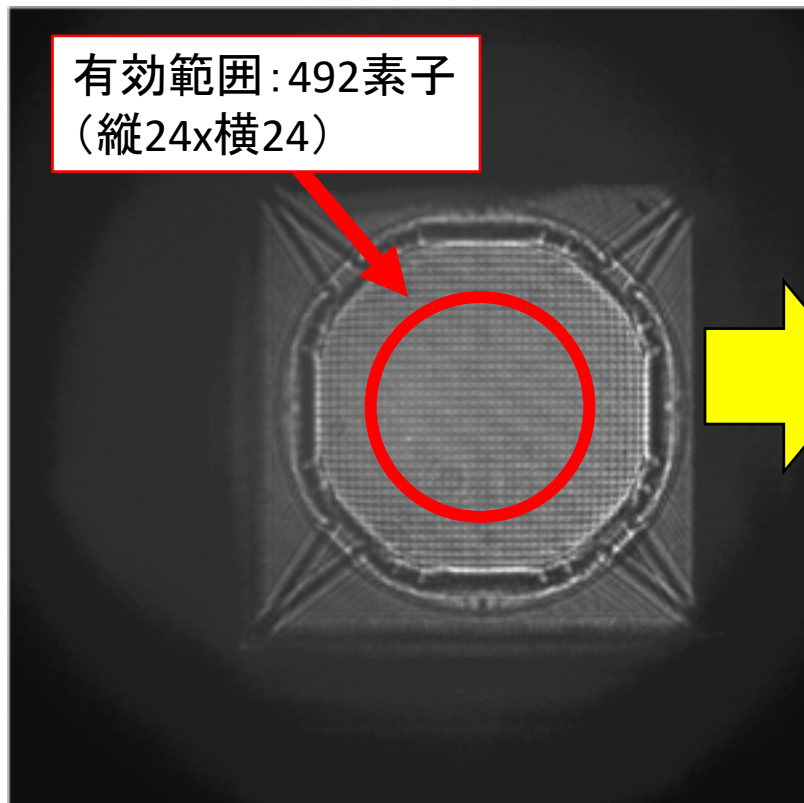


アクチュエータ動作(最大ストローク1.5um) 27

Tweeter AO: DM像の確認

◆DM鏡面像

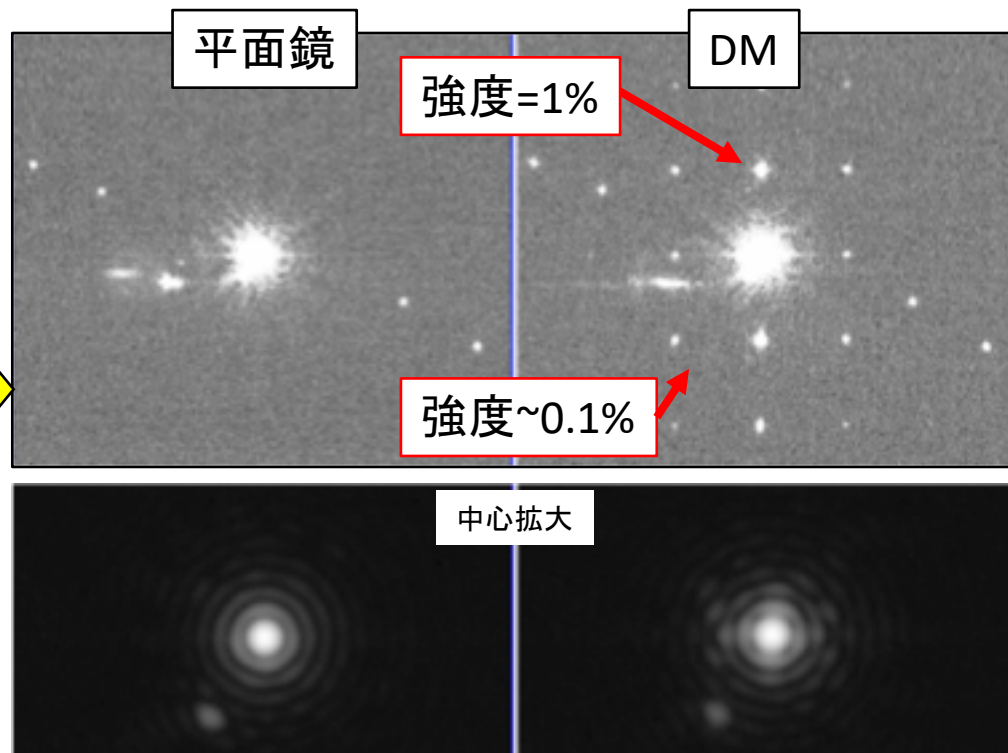
有効範囲: 492素子
(縦24x横24)



DM鏡面の像

→コロナグラフはシアリング干渉方式
→パターンが問題になるか？

鏡/DMの反射光をレンズでそれぞれ結像

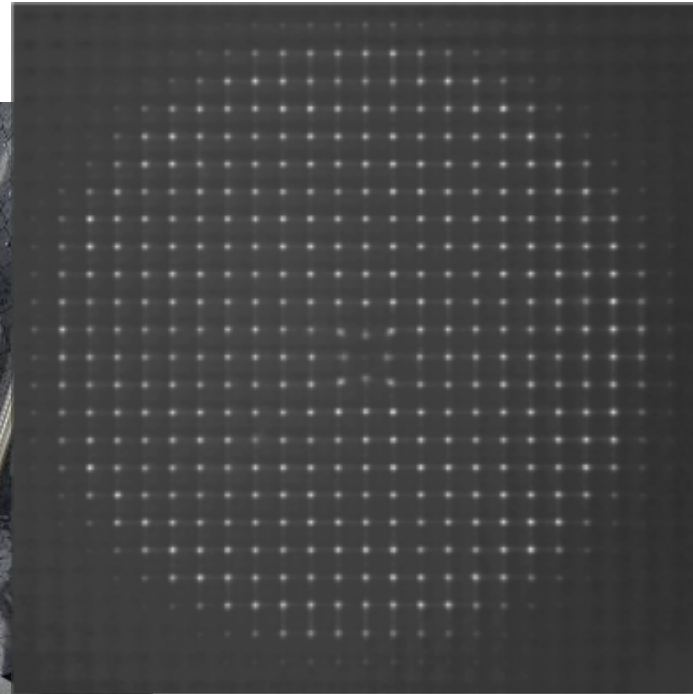
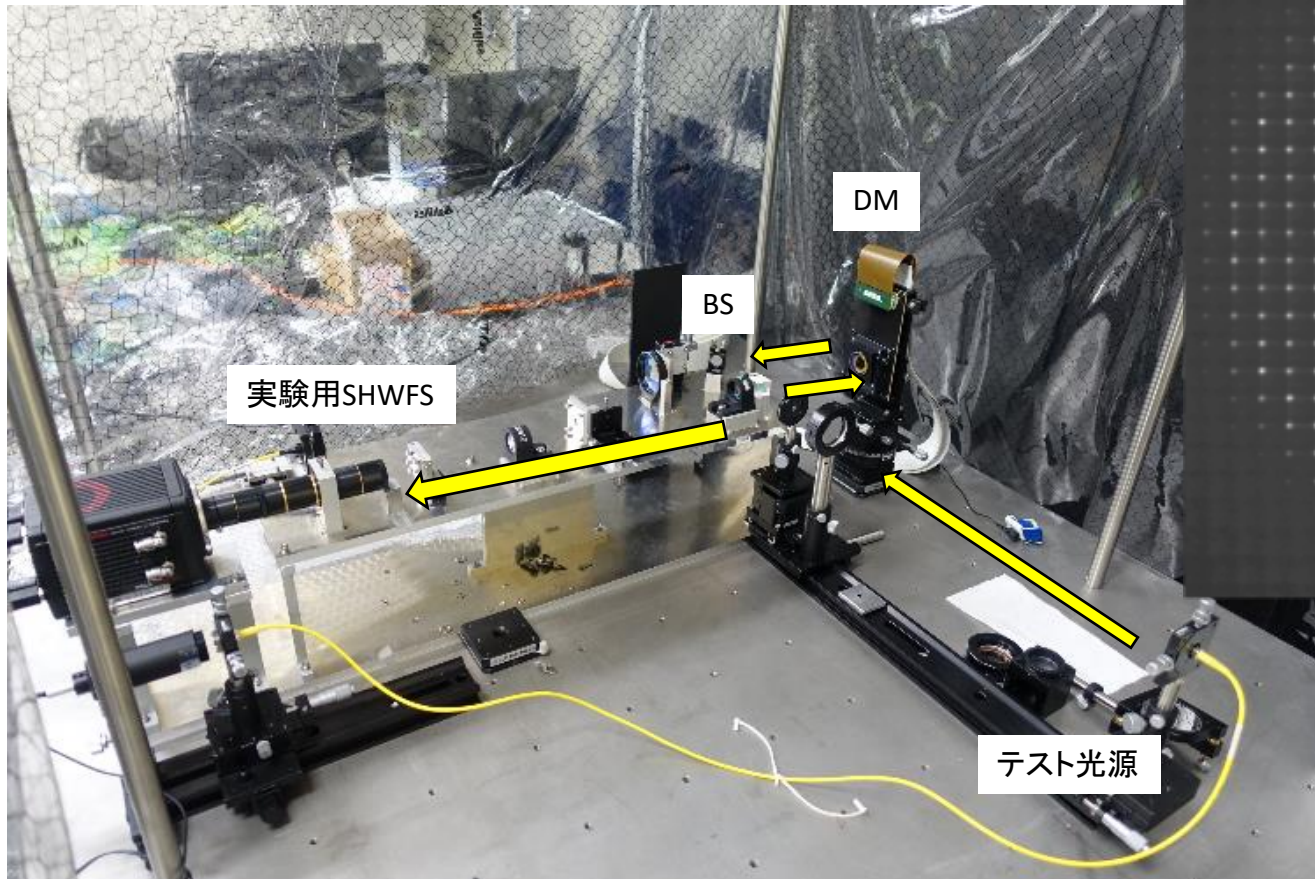


回折格子様の回折光と回折リングの歪みを確認
→ $\sim 22\lambda/D(1''.3)$ の位置なので
グリッドパターン由来であると思われる
→問題になるか？

Tweeter AO: SHWFSとDMの組み合わせ

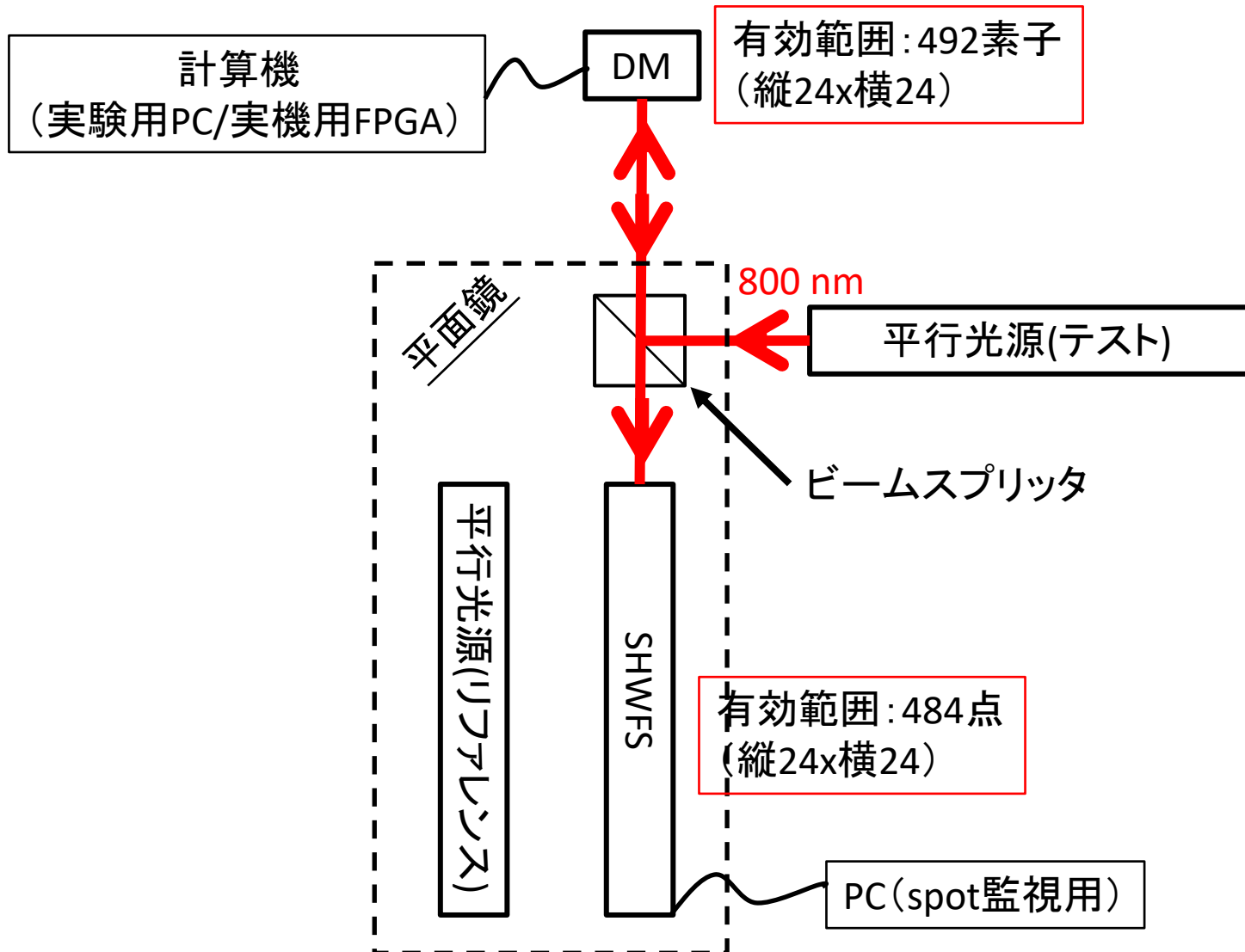
◆ FPGA制御試験用にSHWFS開発

-> DMの詳細な動作確認へ



DM1スポットのみ動作

補助：現行のTweeter AO実験用光学系



極限補償光学: 本日の報告

◆ SEICA全体

- ナスミス台の振動安定性確認、定盤の試験

◆ Woofer AO

- センサー系: 実機設計と製作
- 制御試験: 実験とシミュレーション

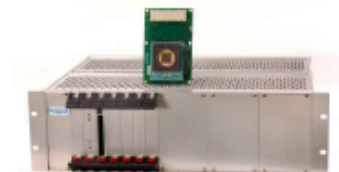
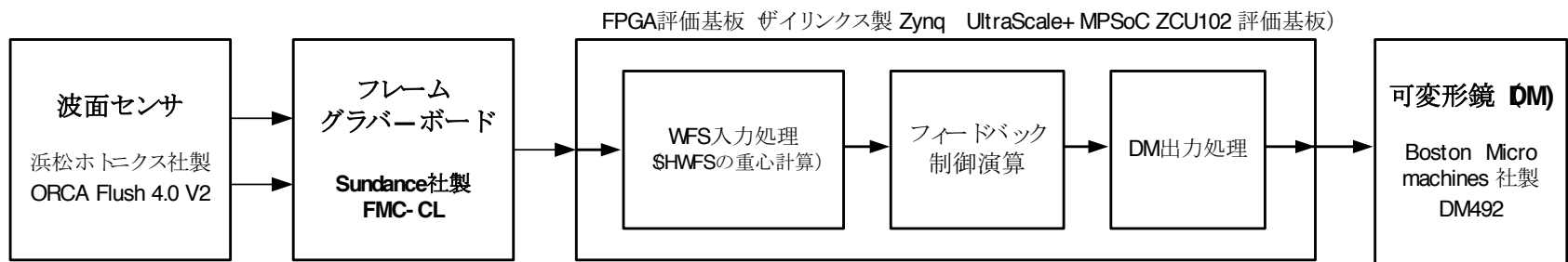
◆ Tweeter AO

- センサー系: SHWFS波面センサとDMの組み合わせ
- センサー系: PDI波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

Tweeter AO: FPGAとの接続

◆ WFS, DMとFPGAを接続

- WFS—FPGA: カメラからのSHWFSスポット取得 (18/9)
- FPGA—DM: 任意のスポット動作確認(19/2)
- PID制御試験(19/4予定)
- 大気位相板挿入での制御試験(19/5以降)



まとめ

◆ExAO系の開発進行中:

- 構造体: 定盤の確保、環境試験は問題なし
- Woofer: 実験、設計、実機製作までほぼ完了
- Tweeter: 実験準備ほぼ完了、設計進行
- TweeterWFS: 新方式の実証試験準備

◆FPGAの性能評価開始

- AO系への組み込み完了、今後制御試験