

# 極限補償光学の進捗

山本広大,

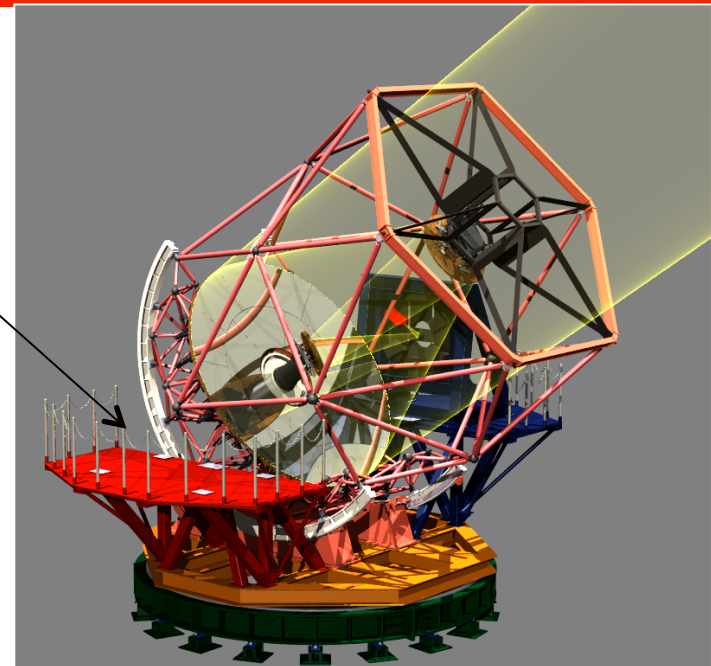
木野勝, 西岡秀樹, 津久井遼(京都大学)

入部正継, 藤田勝(大阪電気通信大学)

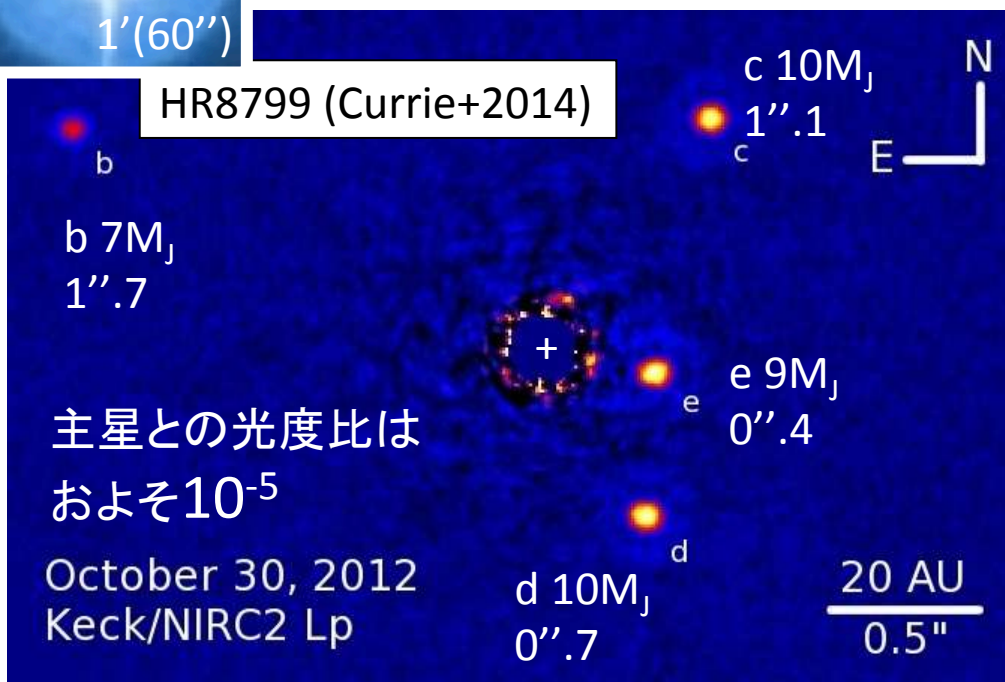
惑星撮像装置SEICA[Second-generation  
Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao]

SEICA

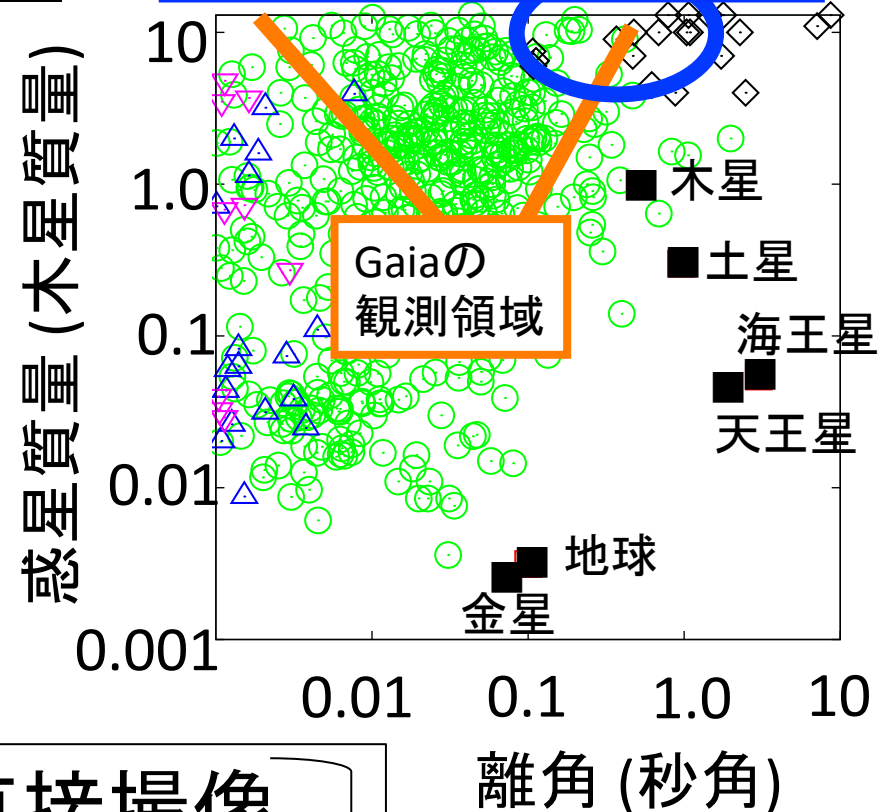
京大岡山3.8m  
せいめい望遠鏡架台



# SEICA: 意義・目標



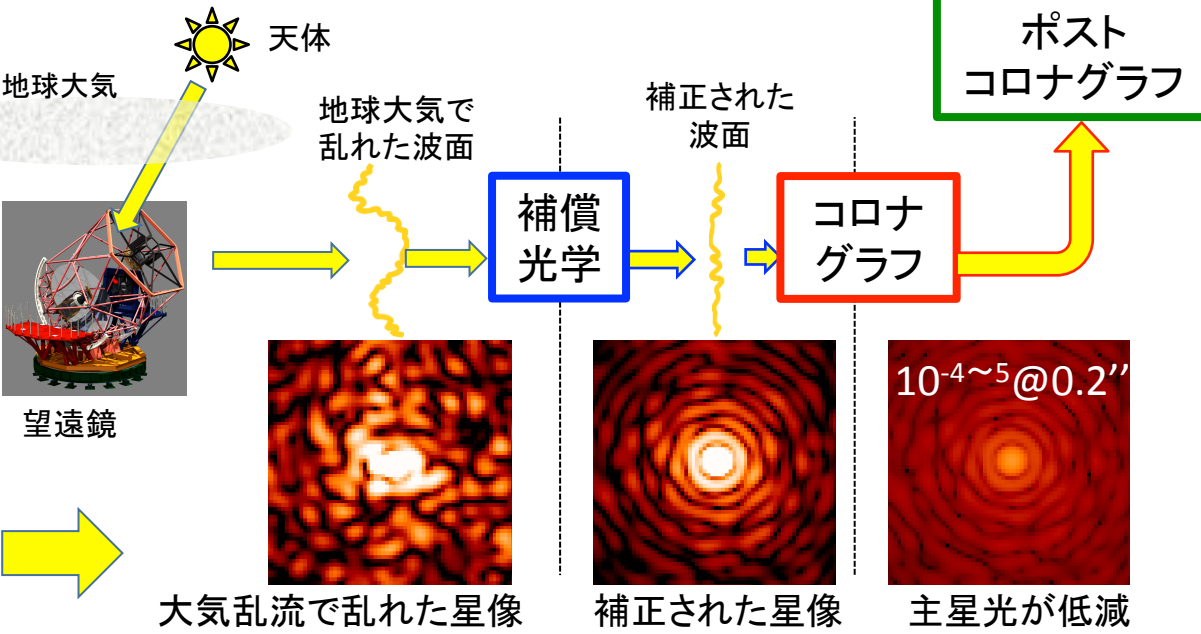
他観測で発見済の惑星を観測  
→キャラクターゼーション



- ◆木星型太陽系外惑星の直接撮像  
→0''.2-0''.3で $10^{-5}\sim-6$
- ◆先進技術のテストベッド[FPGA制御, PDI WFS, SPLINE, ポストプロセス]

H31/2019  
にFL

# 高コントラスト技術



~高コントラスト装置の状況~  
**[旧世代の技術の発展系]**  
 ➤ Gemini/GPI  
 ➤ VLT/SPHERE  
 ➤ Keck/NIRC2

**[新世代の概念と技術]**  
 ✧ すばる/SCEXAO [競合]  
 ✧ **本研究**

本研究で開発する技術

**京都** 極限補償光学 ◆ FPGA 制御装置 ◆ 点回折干渉型センサ

**北海道** コロナグラフ ◆ ナリング干渉計型

**東大/国立天文台** ポスト-コロナグラフ ◆ スペックルナリング ◆ 高分散分光器(目標) ◆ 瞳再配置撮像(将来)

~補償光学性能向上~  
**従来の10倍**  
 - 高速 (→10kHz)  
 - 精細 (→2000素子)  
 - 精密 (→50nm)  
**の計測・制御が可能に**

基盤(S)ヒアリングスライドより

# SEICA: 全体進捗: 前回

## ◆ ExAO: Woofer AO

- 実験環境再整備: 岡山上空(フリード長10cm, 風速10m/s)
- AO実験: 制御実験(@633nm)=>シミュレーションへ
- 実機設計: 設計中 近赤外ではSR~0.1程度

## ◆ ExAO: Tweeter AO

- 波面センサ: 点回折干渉計WFS原理実証中 + SHWFS開発中
- FPGA制御装置: 原理実証試験(カメラ読込)(TMT戦略経費)

## ◆ コロナグラフ: SPLINE

- プリズム/サバール板: 確保・原理実証済, 環境試験中
- 実機製作開始: 設計中 (TMT戦略経費)

## ◆ ポストプロセス: スペックルナリング方式

- 原理実証試験準備開始: 物品確保完了, 実証試験中



# 予算状況 (18/09/08現在)

## ◆昨年度獲得

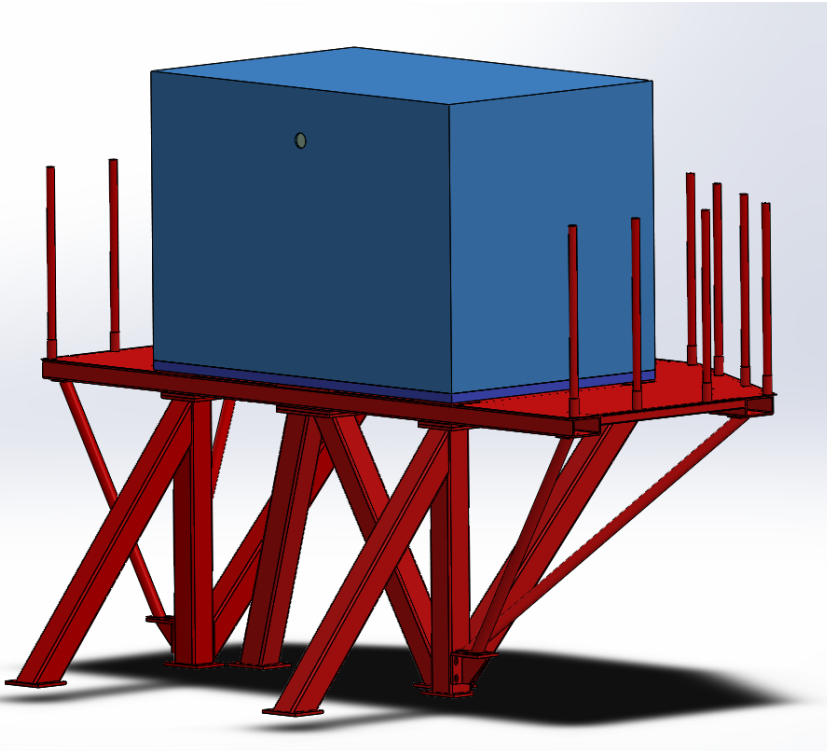
- ABCプロジェクト経費: Woofer WFS実機設計
- TMT戦略経費: SPLINE(コロナグラフ)実機設計  
+Tweeter FPGA制御試験機開発

## ◆本年度獲得

- 基盤A(代表長田): 5年(開発4年観測1年)3300万
  - ◆光学系+カメラ: 1500万
  - ◆恒温定盤+除湿筐体: 1500万
- ~~基盤S(代表長田): 5年(開発3年観測2年)1.66億~~
- TMT戦略経費: SPLINE実機製作 240万 (北大/村上)  
+FPGA制御開発 300万 (大電通大/入部)

# SEICA全体図

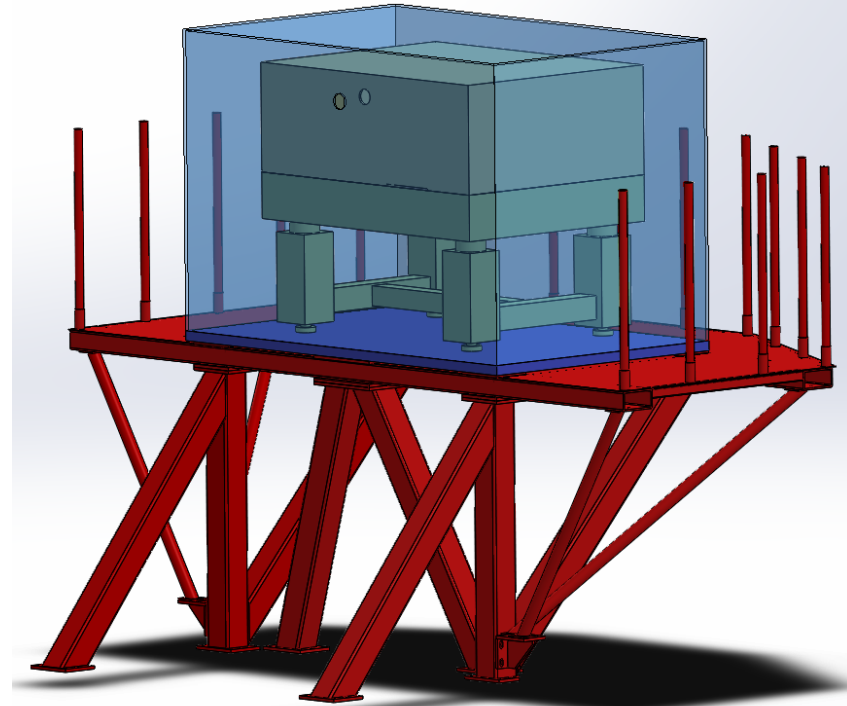
## ◆外観サイズイメージ



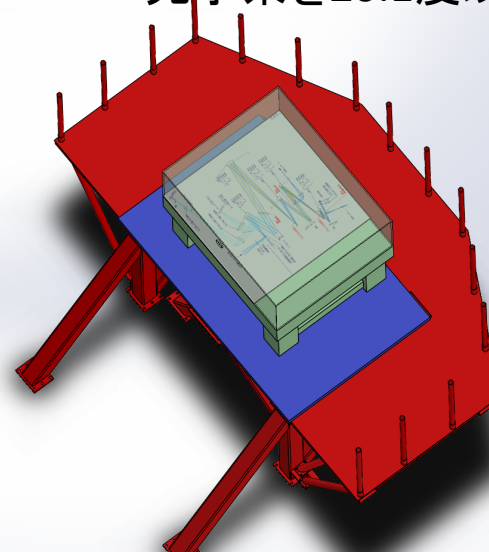
外観イメージ

2.2x1.4x1.5 (m)

現状ただの箱だがフレームに  
パネルを取り付ける方式にして  
外形を小さくする予定



恒温(水冷)定盤(日本防振工業)で  
光学系を $\pm 0.1$ 度環境で安定化

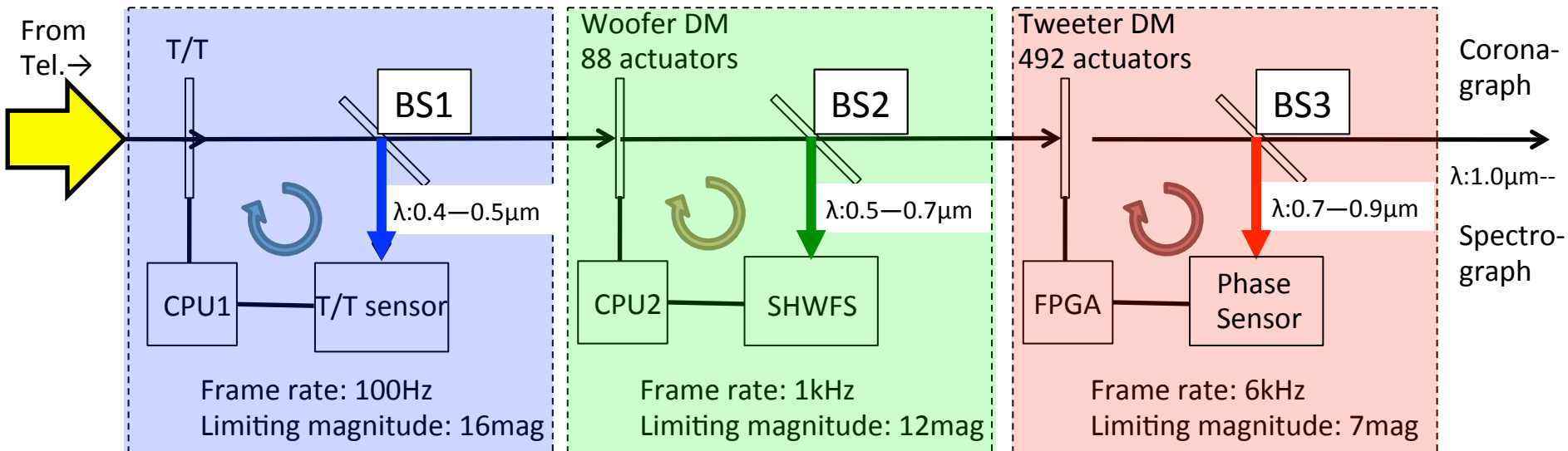


光学系はスペースに  
余裕あり  
制御PC・ドライバなど  
は定盤下、周囲へ

検討:窓材、曇り止め

# SEICA: 極限補償光学

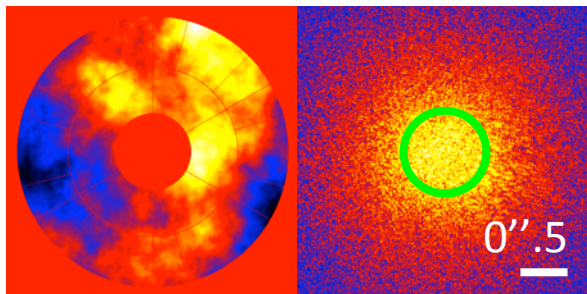
◆ 要求仕様: 精度:  $\lambda/20$ , 速度: 5—10kHz, 測定点: 492 elements



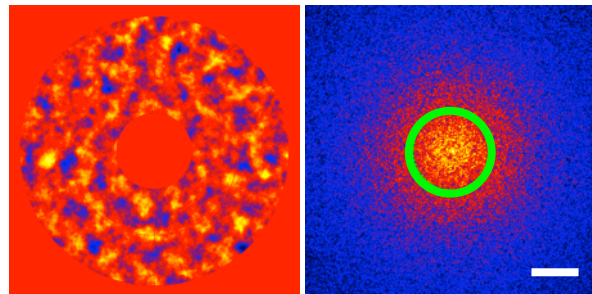
**Tip/Tilt:** 10mas pointing

**Woofer:** 低速 [1kHz]  
 大まか [ $\lambda/4$ ]  
 大-ダイナミックレンジ

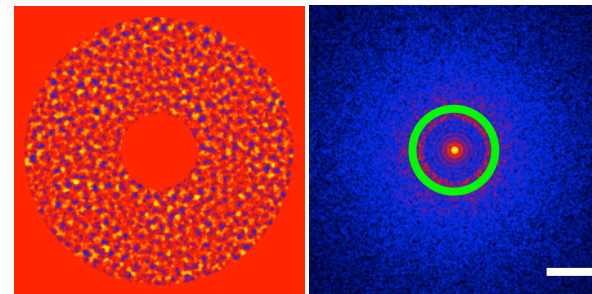
**Tweeter:** 高速 [6.5kHz]  
 高精度 [ $\lambda/20$ ]  
 高空間周波数:  $24^2$



No AO



after Woofer AO



after Tweeter AO

Strehl ratio 0.02

0.3

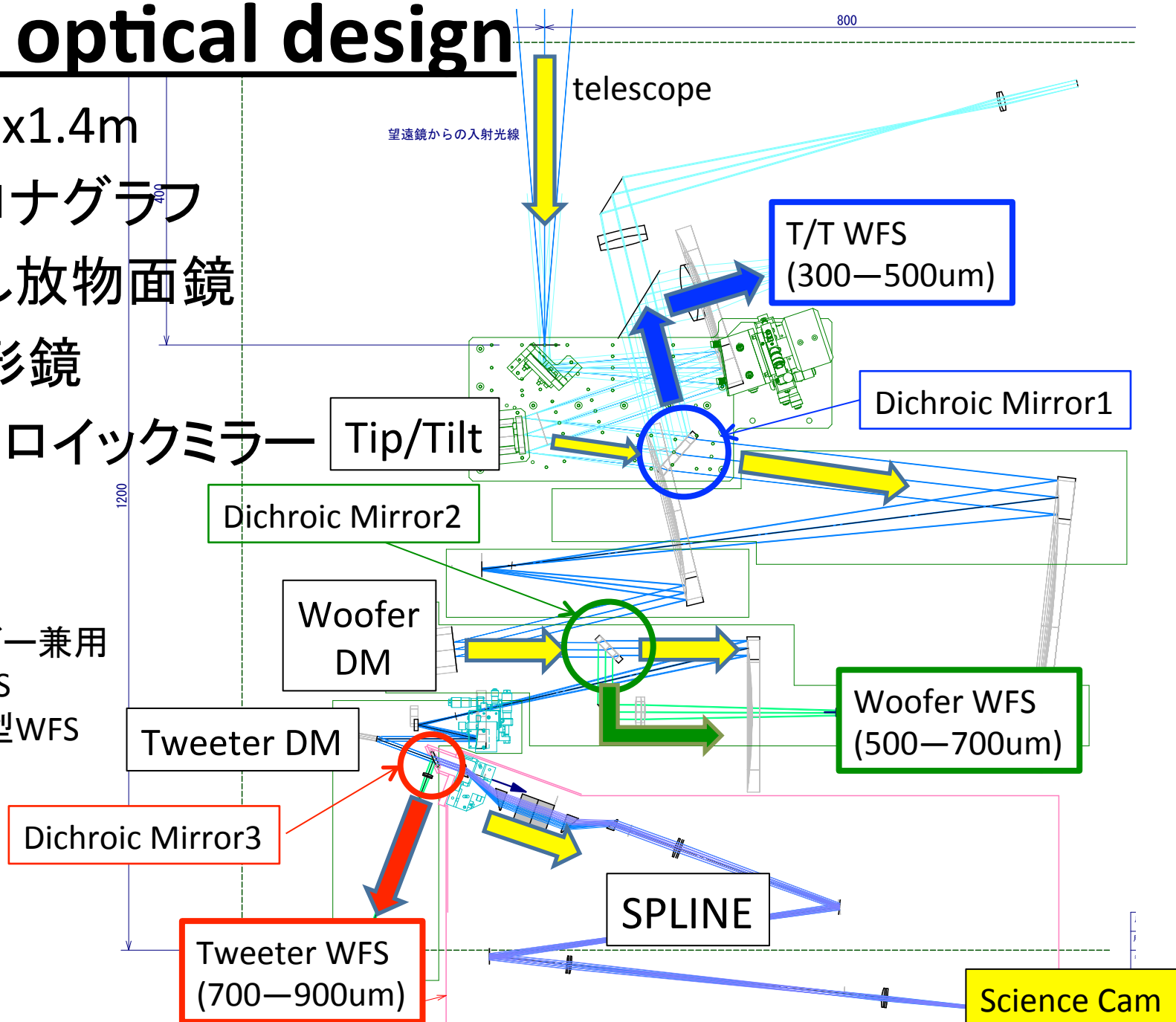
0.9

# SEICA: optical design

800

- ◆ 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



# 本日の報告

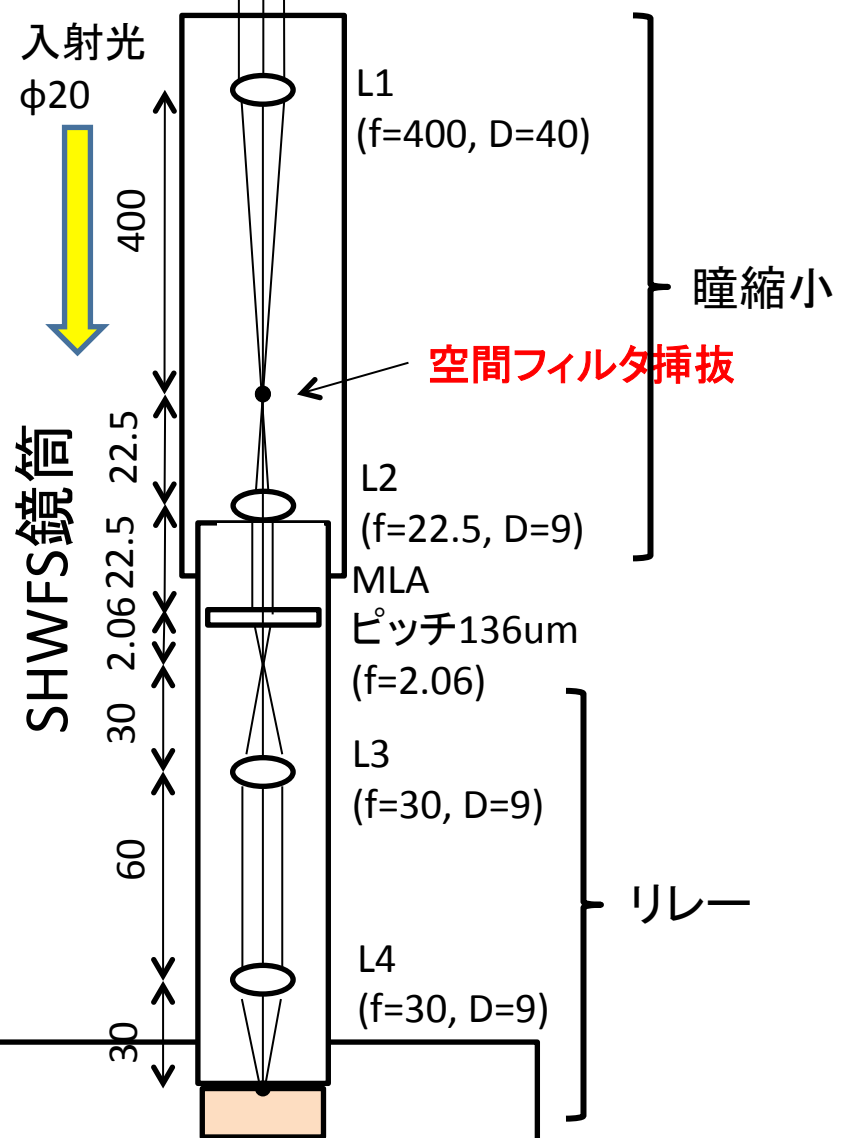
## ◆ Woofer AO

- センサー系: 実機設計
- 制御試験: 実験とシミュレーション (藤田)

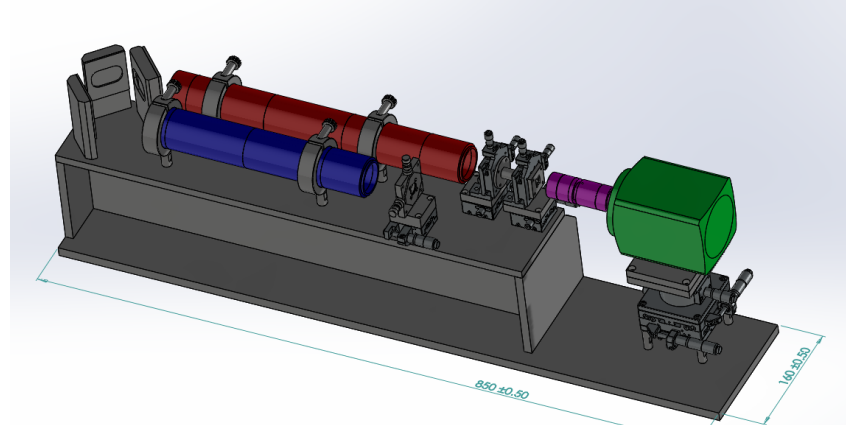
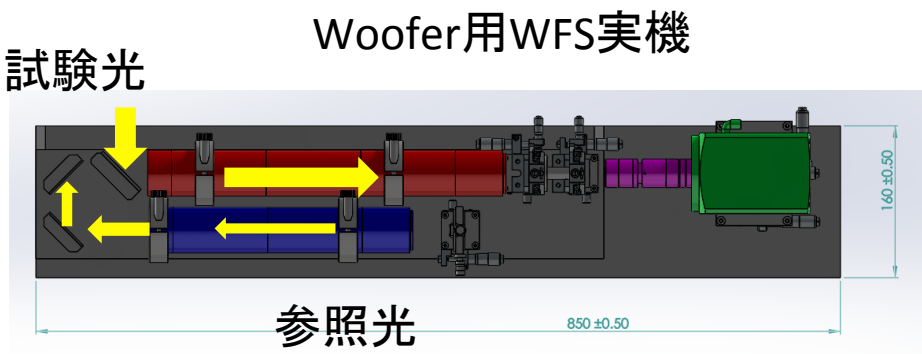
## ◆ Tweeter AO

- センサー系: PDI波面センサ (西岡)
- センサー系: SHWFS波面センサ (津久井/山本)
- [制御装置: FPGA開発]

# Woofler AO: センサー系:: 設計



sCMOS[浜ホトORCA flash4.0]  
6.5um, 2048x2048



- ◆ AO系への組み込みを容易に
- ◆ ハーフミラーで可動部なし
- ◆ 高次の波面エラーをカットする空間フィルタを導入可能

近日中に設計完了、製作へ  
実験、シミュレーションの詳細は藤田くん



# Tweeter AO: 波面センサ開発

## ◆ Tweeter AOの要求仕様:

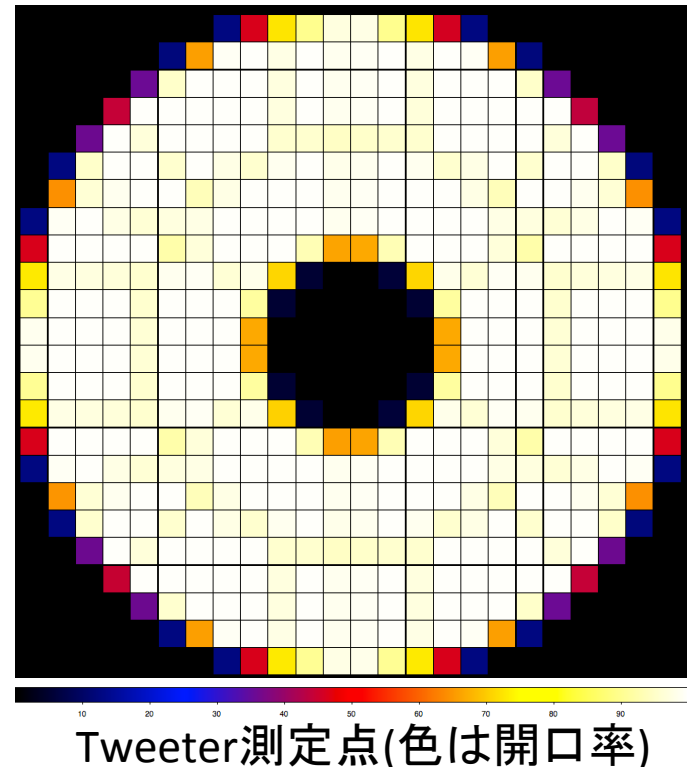
- 入射波面:  $\lambda/4$  (rms:  $\sim 300\text{nm}$ )  $\rightarrow$  P-Vで $\sim 900\text{nm}$
- 目標精度:  $\lambda/20$  (rms:  $\sim 60\text{nm}$ )
- 波面測定点数: 24(1次元)  $\rightarrow$  492素子(有効460素子)
- 波面測定頻度: 6.5kHz



sCMOSカメラ  
浜松ホトニクス  
ORCA-flash4.0 v2

読み出し速度:

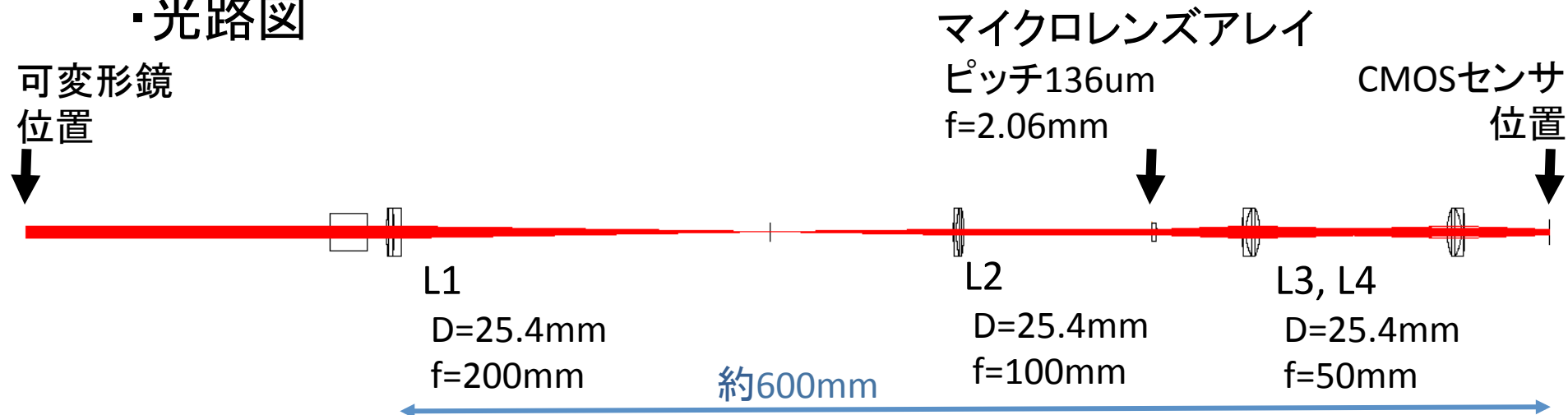
2048x8:	25kHz
2048x64:	3.2kHz
2048x192:	1.1kHz ← Woofer WFS現状
2048x256:	0.8kHz
2048x512:	0.4kHz ← Tweeter SHWFSの場合



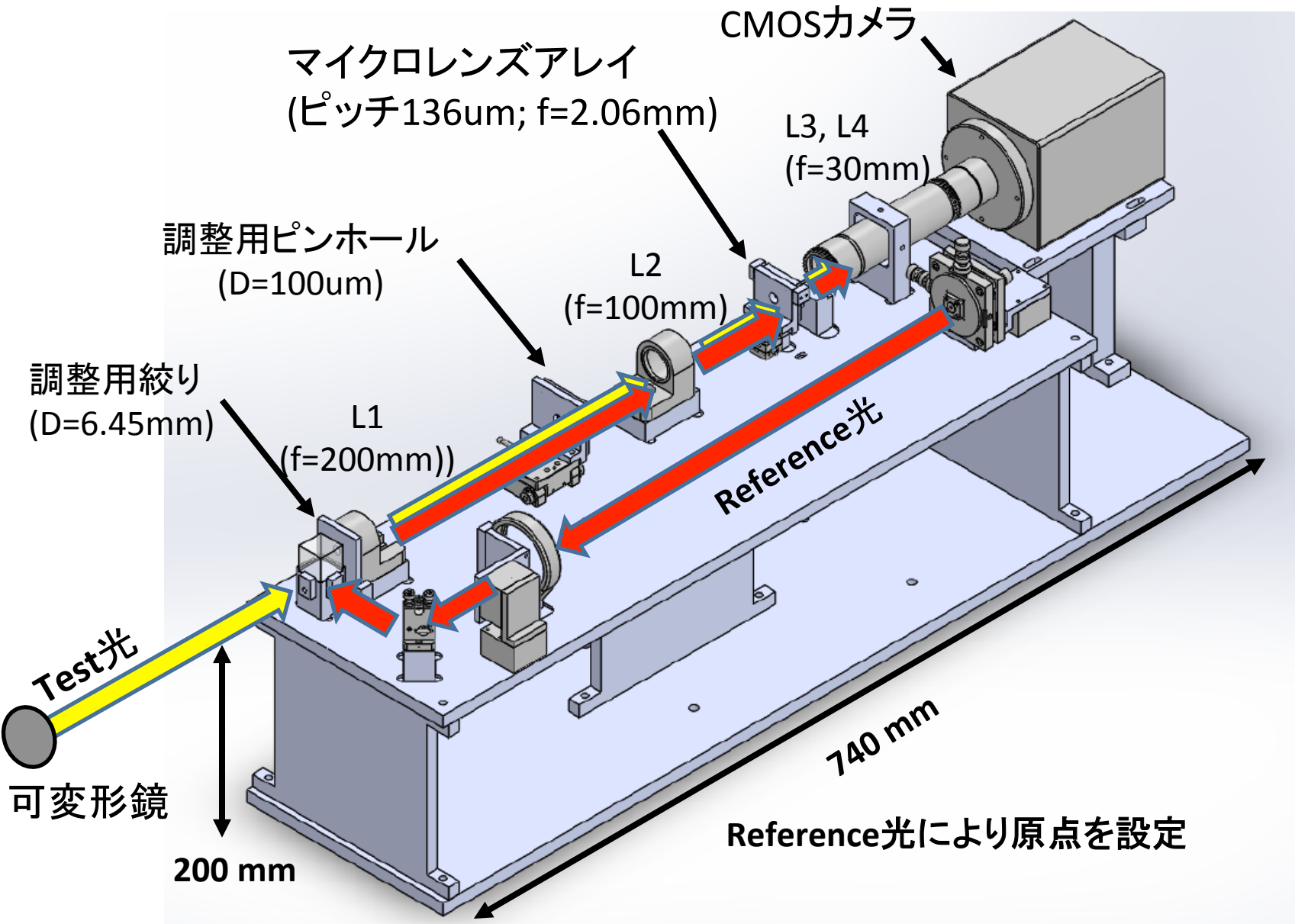
# Tweeter AO: 実験用SHWFS の概要

- FPGAを用いたTweeter AOの制御実験に使用
- 特徴
  - 測定点数: 差し渡し24点
  - 測定レンジ:  $\pm 400\text{nm}$  (PDI WFSと同等)
  - 波面誤差  $60\text{nm}$  (RMS) まで感度を持つ
  - 波長域:  $700\text{-}900\text{nm}$  (中心波長  $800\text{nm}$ )

## ▪ 光路図



# Tweeter AO: SHWFSの機械設計



# Tweeter AO: SHWFSの実機作成



# Tweeter AO: SHWFSの波面誤差(1/2)

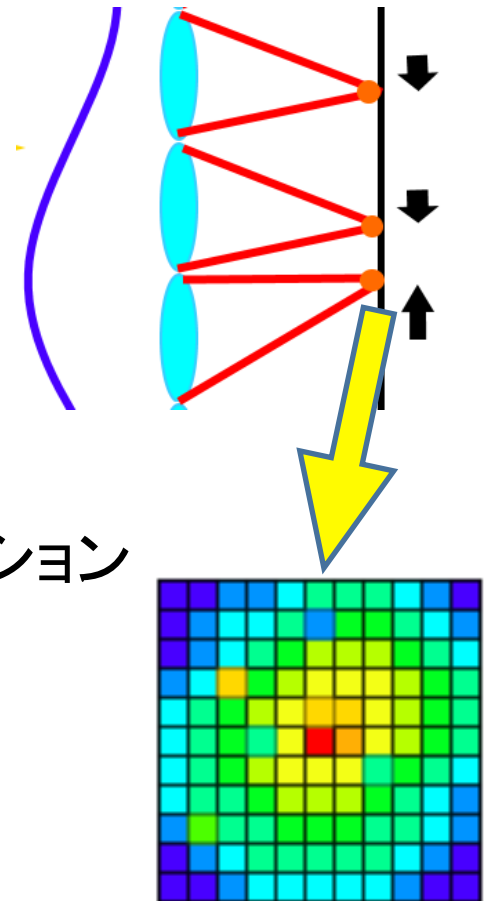
- 検出面でのノイズ

- spot位置の検出誤差 (SN比に依存)

- 波面形状の測定誤差

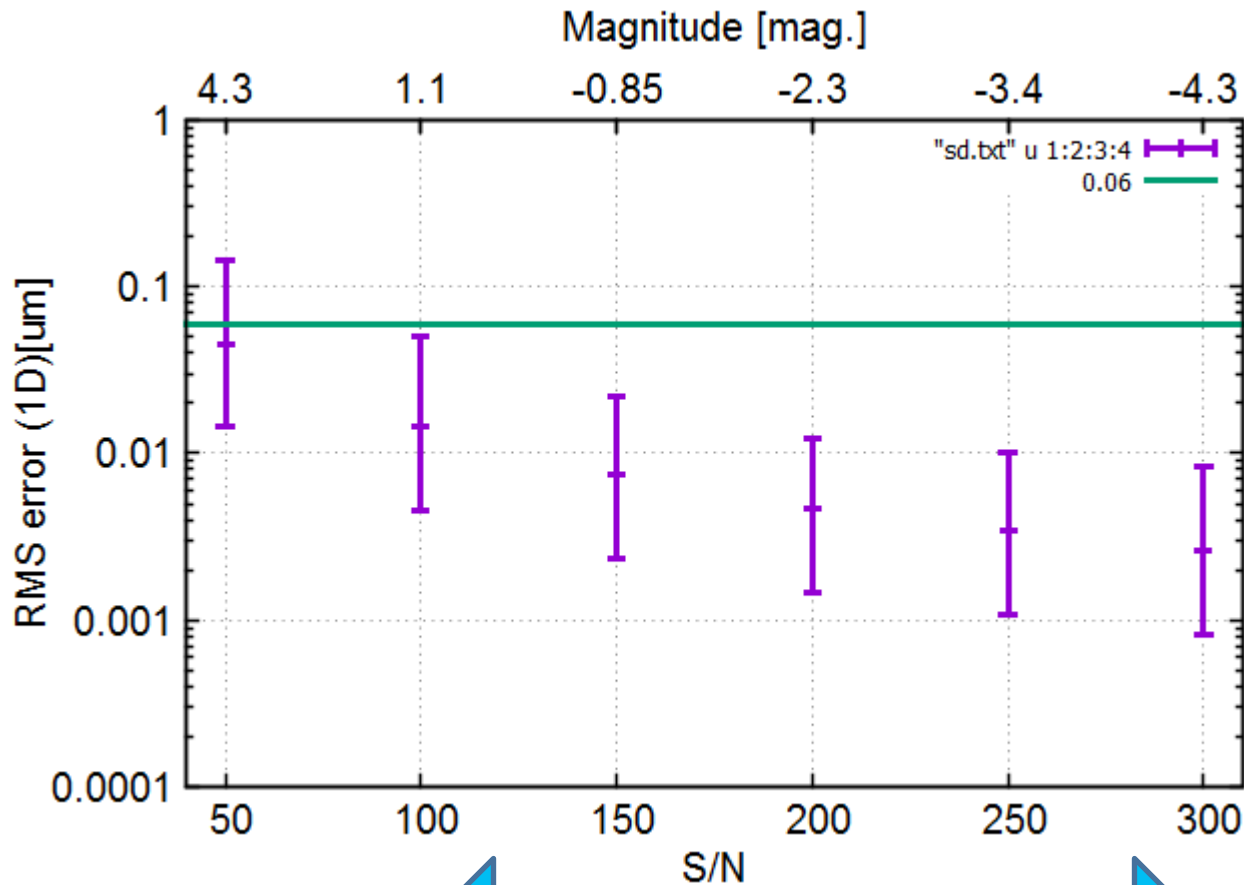
- SN比と測定誤差 (RMS) との関係をシミュレーション

- ポアソンノイズ, 読み出しノイズを考慮



# Tweeter AO: SHWFSの波面誤差(2/2)

シミュレーションの結果



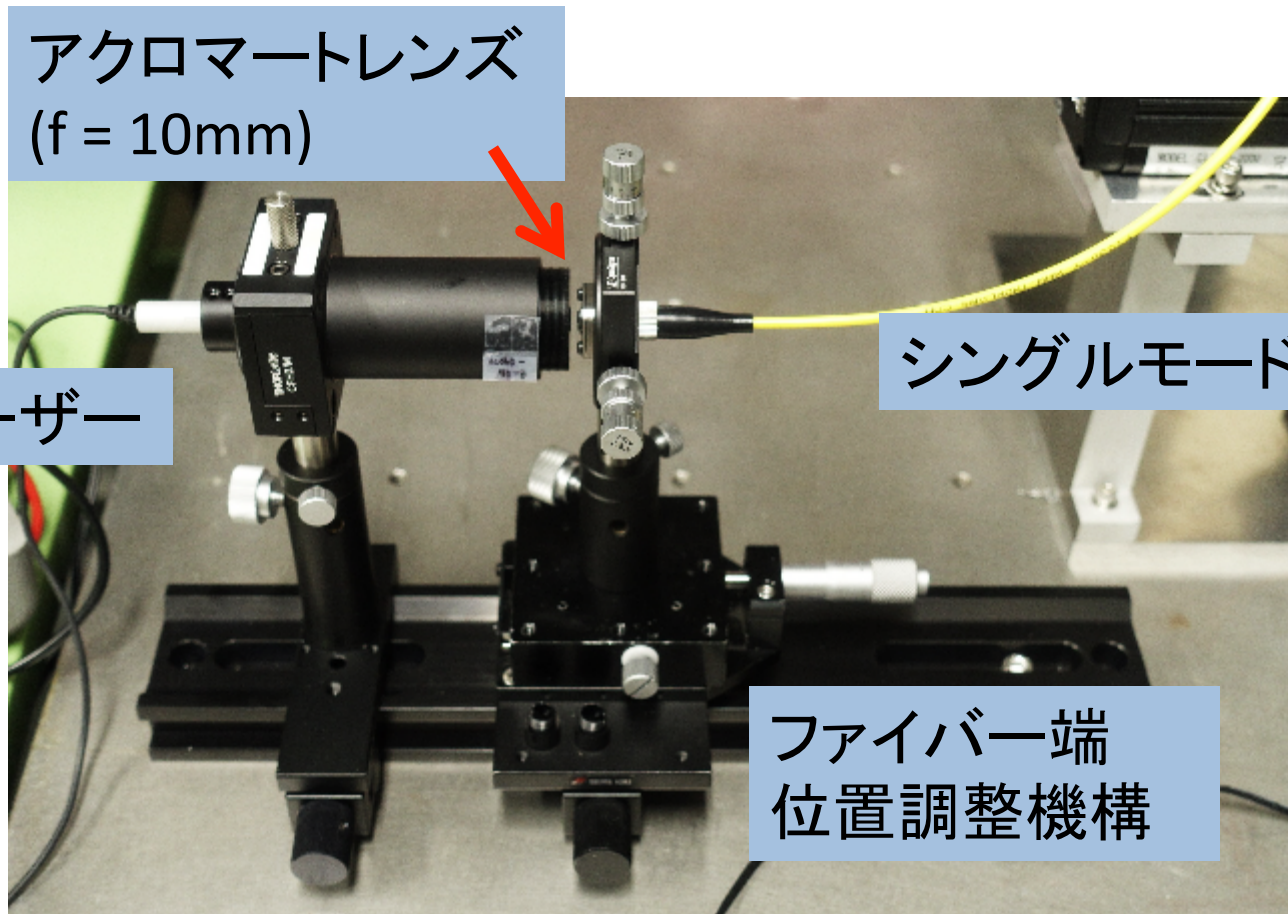
60nm  
(=  $\lambda / 20$   
@1.2um)





# Tweeter AO: SHWFSのReference光源

- ・808nm半導体レーザー(Thorlabs CPS808S)をファイバーに集光  
→ SHWFS実機のリファレンス光源用ファイバーホルダに接続



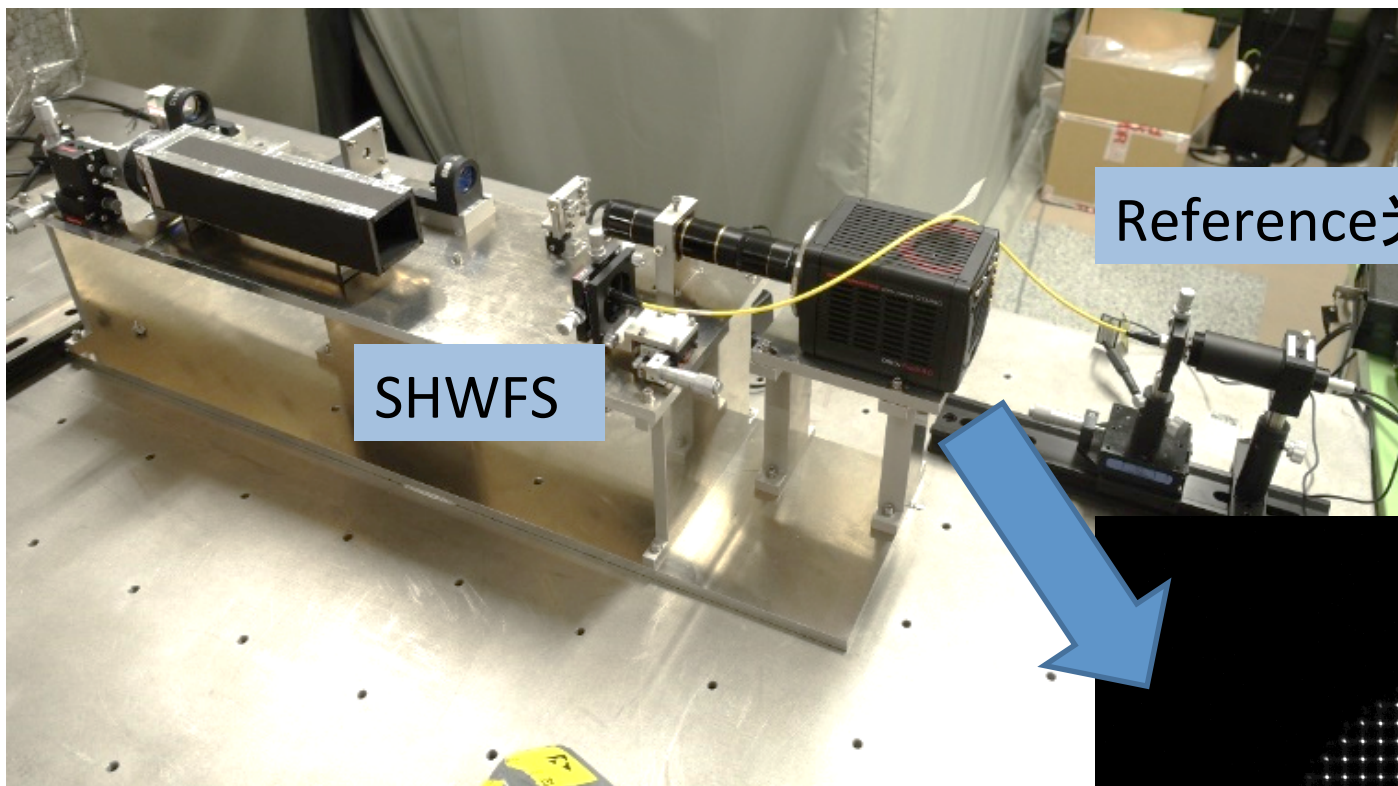
アクロマートレンズ  
( $f = 10\text{mm}$ )

シングルモードファイバー

ファイバー端  
位置調整機構

半導体レーザー

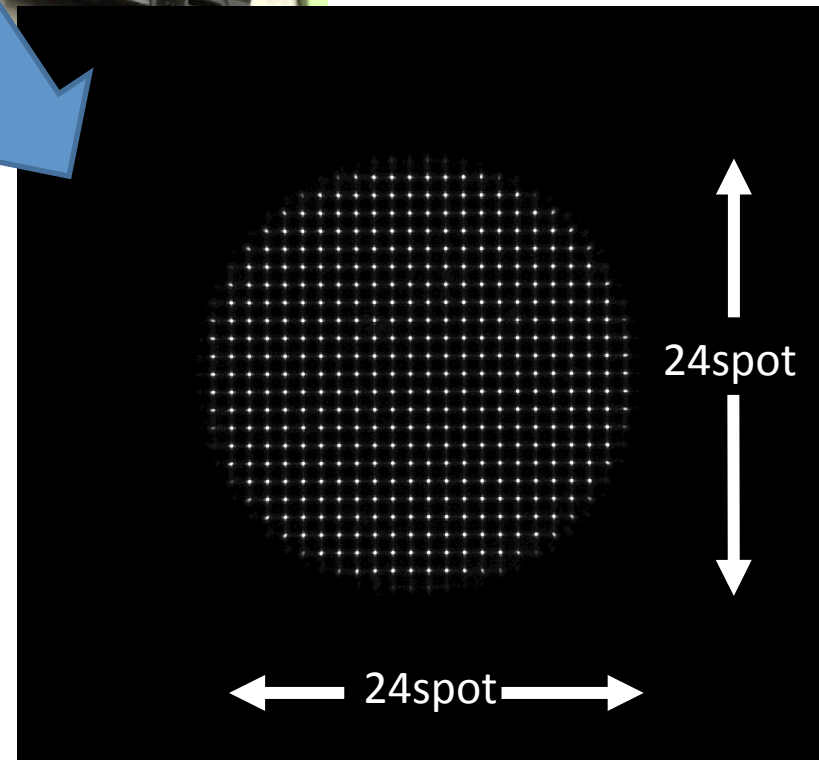
# Tweeter AO: SHWFSのReference光源



Reference光源

SHWFS

中央部のspotの強度 :  $S/N > 200$   
(露光 1/400 sec)  
各spotのFWHM  $\sim 2$ pix  
(設計値) 1.7pix

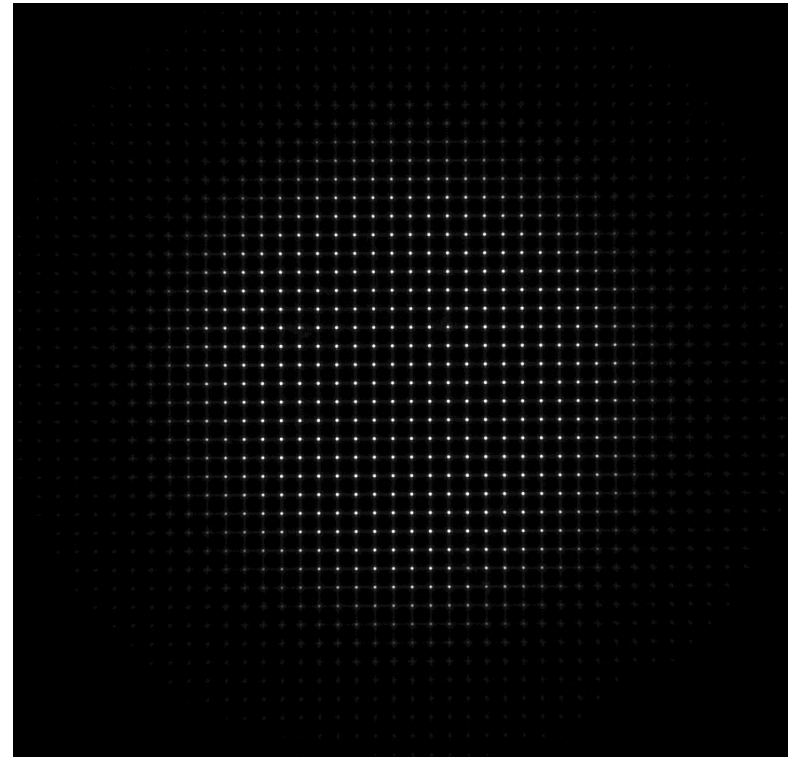
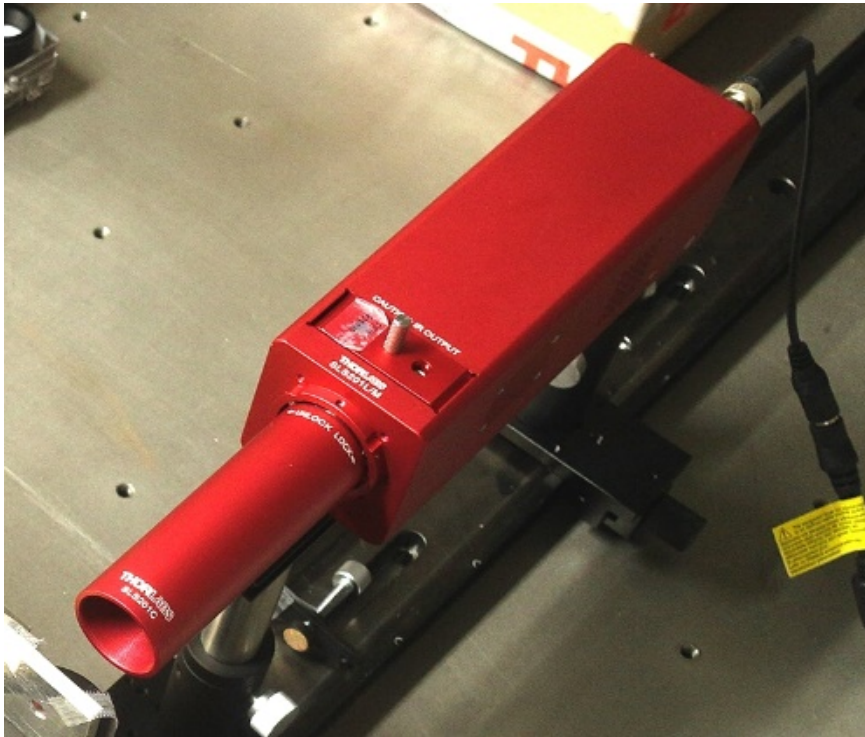


24spot

24spot

# Tweeter AO: SHWFSのTest光源

- ・タングステンハロゲン光源 (Thorlabs SLS201L, T=2796K)  
+ バンドパスフィルタ (800±5nm)
- ・将来的にTest光を1.2umとすることを考慮して白色光源を選択
- ・当面は800nmで制御実験



# Tweeter AO: SHWFSのTest光源

- ・想定: Reference光源と同様にファイバーに集光
  - 実際: 集光の効率が想定よりも非常に悪く強度不十分
- ・対応を検討
  - 露光時間の延長
  - Reference光源用レーザーの流用

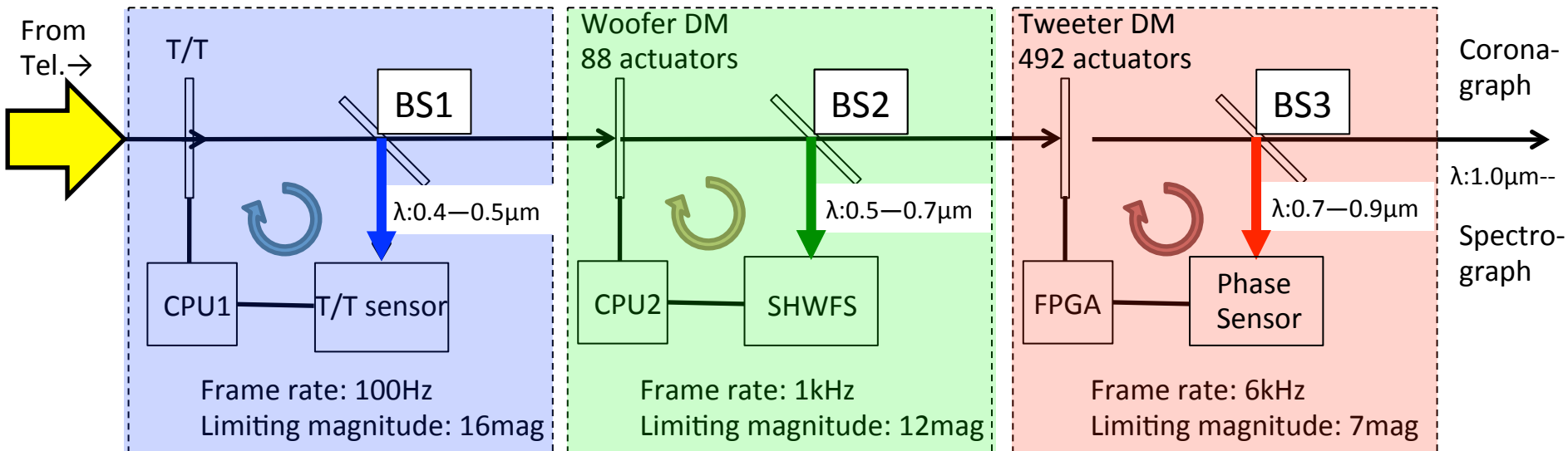
# Tweeter AO: SHWFS開発の今後

- 光源強度の実測、確認を進める
- spot形状、間隔、強度ムラなどの確認
- Tweeter AO制御実験の光学系へのSHWFS組み込み、調整  
→制御実験へ



# SEICA: 極限補償光学

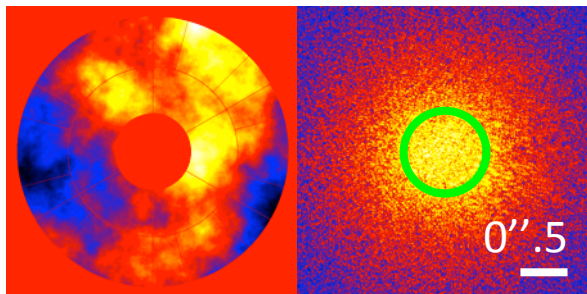
◆ 要求仕様: 精度:  $\lambda/20$ , 速度: 5—10kHz, 測定点: 492 elements



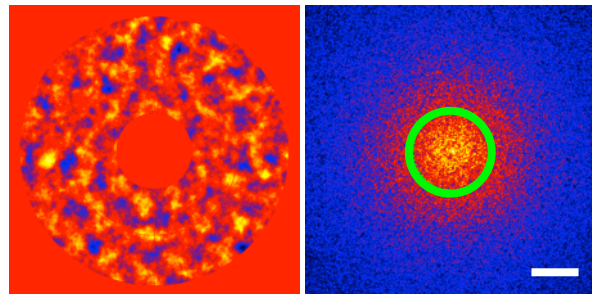
**Tip/Tilt:** 10mas pointing

**Woofer:** 低速 [1kHz]  
 大まか [ $\lambda/4$ ]  
 大-ダイナミックレンジ

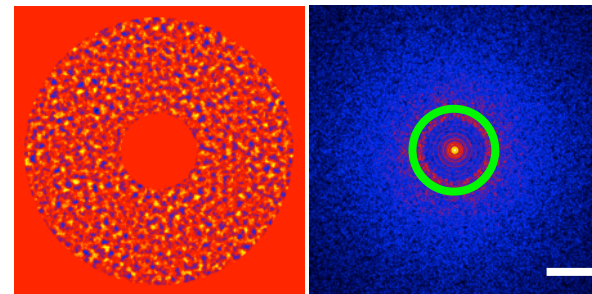
**Tweeter:** 高速 [6.5kHz]  
 高精度 [ $\lambda/20$ ]  
 高空間周波数:  $24^2$



No AO



after Woofer AO



after Tweeter AO

Strehl ratio 0.02

0.3

0.9



# SEICA: 全体進捗: 今回

## ◆ ExAO: Woofer AO

- 実験環境再整備: 岡山上空(フリード長10cm, 風速10m/s)
- AO実験: 制御実験(@633nm)=>シミュレーションへ
- 実機設計: 設計中 近赤外ではSR~0.1程度

## ◆ ExAO: Tweeter AO

- 波面センサ: 点回折干渉計WFS原理実証中 + SHWFS開発中
- FPGA制御装置: 原理実証試験(カメラ読込)(TMT戦略経費)

## ◆ コロナグラフ: SPLINE

- プリズム/サバール板: 確保・原理実証済, 環境試験中
- 実機製作開始: 設計中 (TMT戦略経費)

## ◆ ポストプロセス: スペックルナリング方式

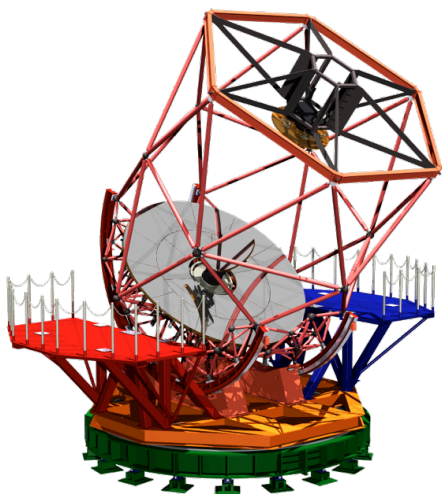
- 原理実証試験準備開始: 物品確保完了, 実証試験中

# まとめ

- ◆ 極限補償光学の予算獲得に可能性が
- ◆ Woofer実機の製作進行中
- ◆ Woofer試験の最終評価=>論文へ
- ◆ Woofer試験の結果からシミュレーションへ
- ◆ Tweeterセンサー2種開発中
- ◆ Tweeter制御用FPGA開発中



# 極限補償光学装置の開発： 制御実験とシミュレーションによる評価



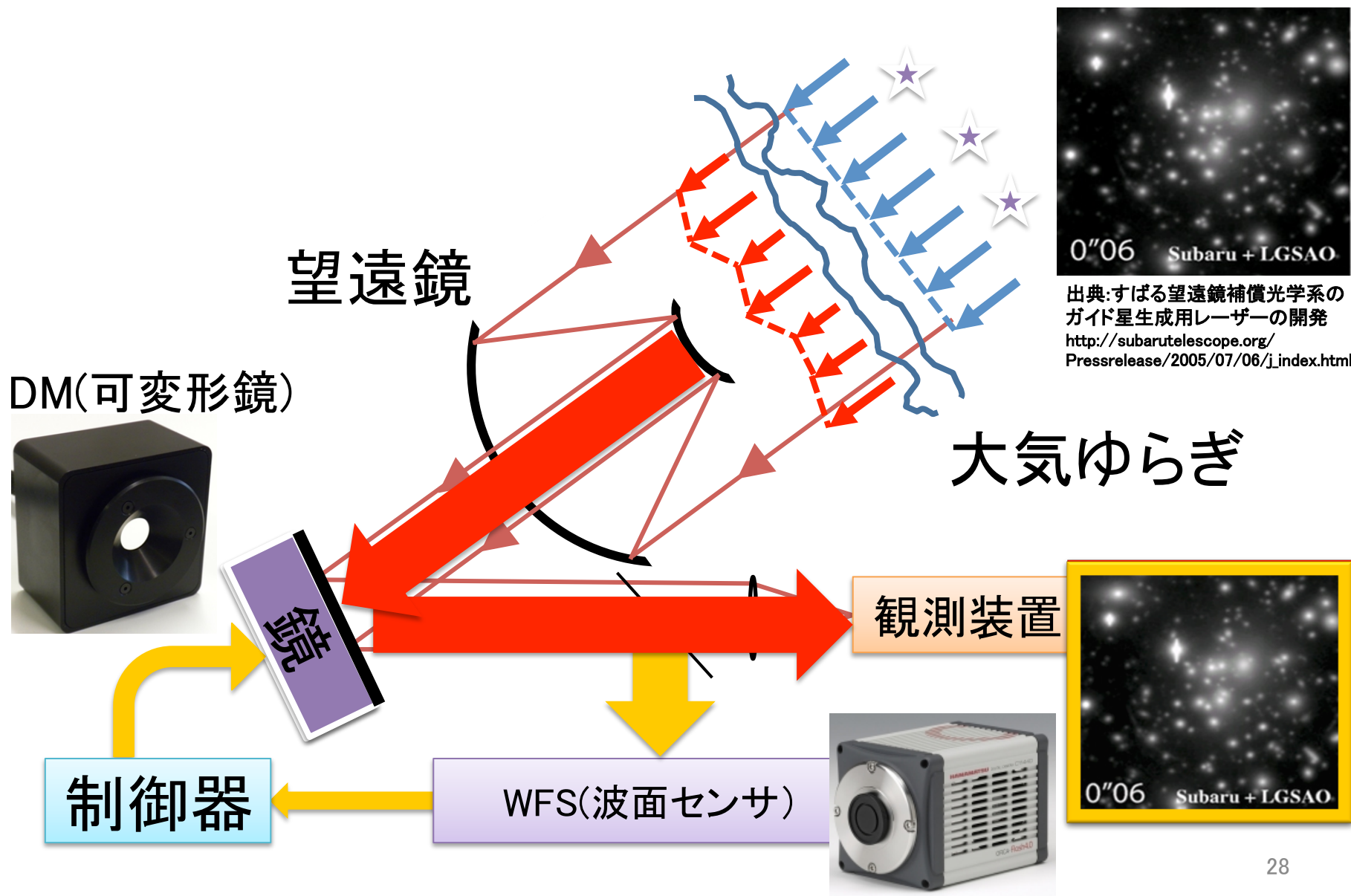
大阪電気通信大学大学院  
工学研究科 制御機械工学専攻  
MM18A012  
藤田 勝

# 発表内容

- 1.補償光学概要
- 2.可変形鏡の仮想平面状態構築
- 3.制御実験
- 4.シミュレータ進捗
- 5.結言

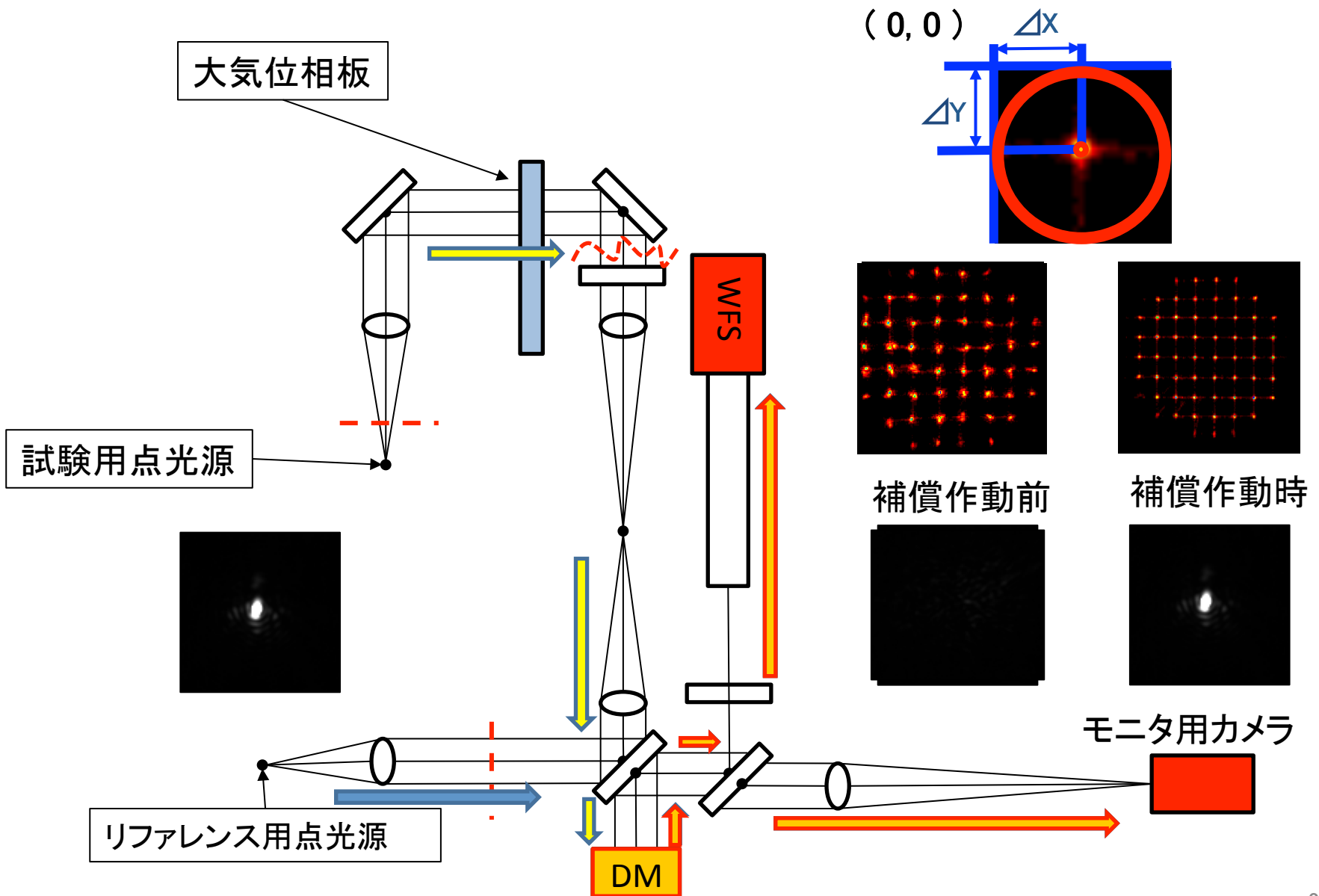
# 1. 補償光学概要

## 補償光学概要



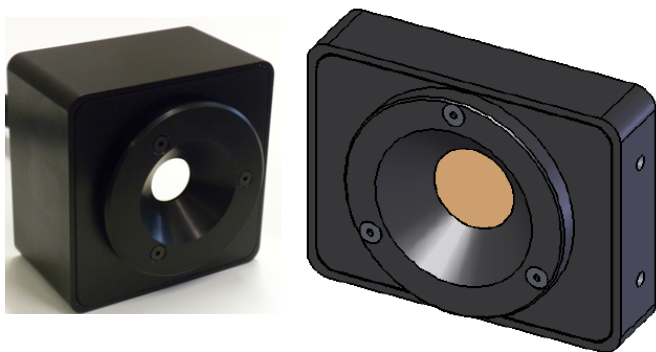


# 1.補償光学概要

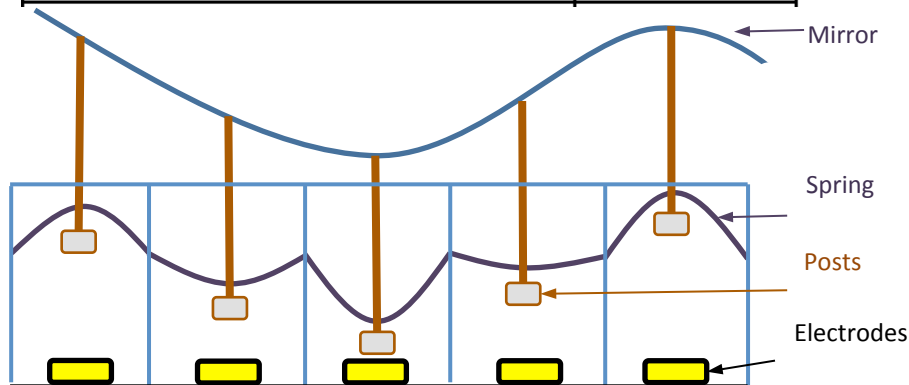


# 1.補償光学概要

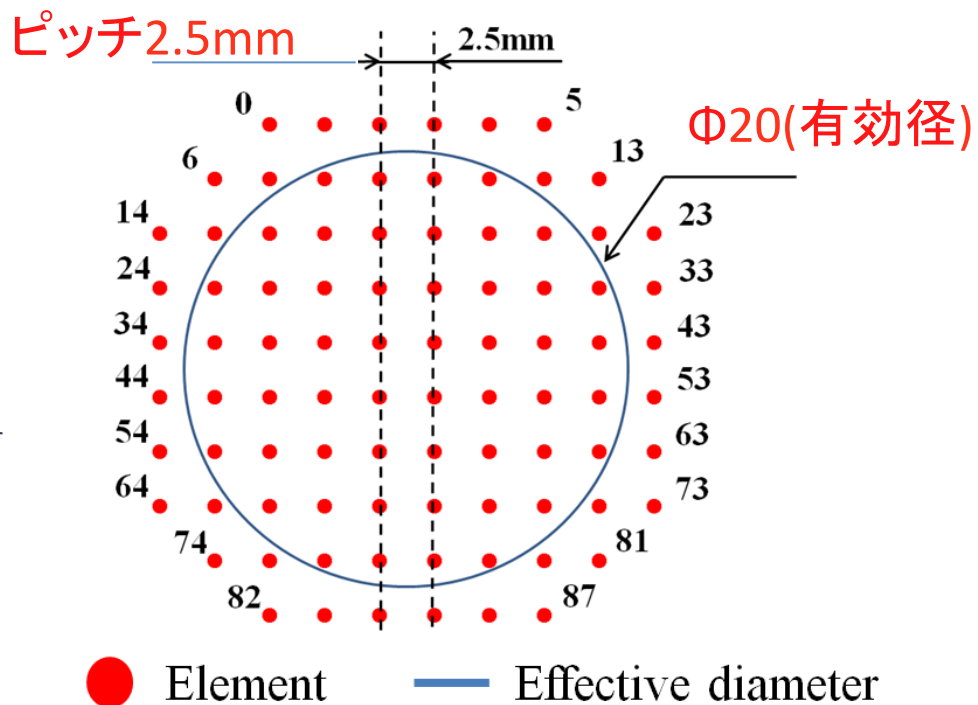
## 補償光学装置概要 可変形鏡(ALPAO社製 ALPAO DM 88-25)



Elements	88(52)
Effective diameter	20mm
Distance of elements	2.5mm



Actuation principle of DM



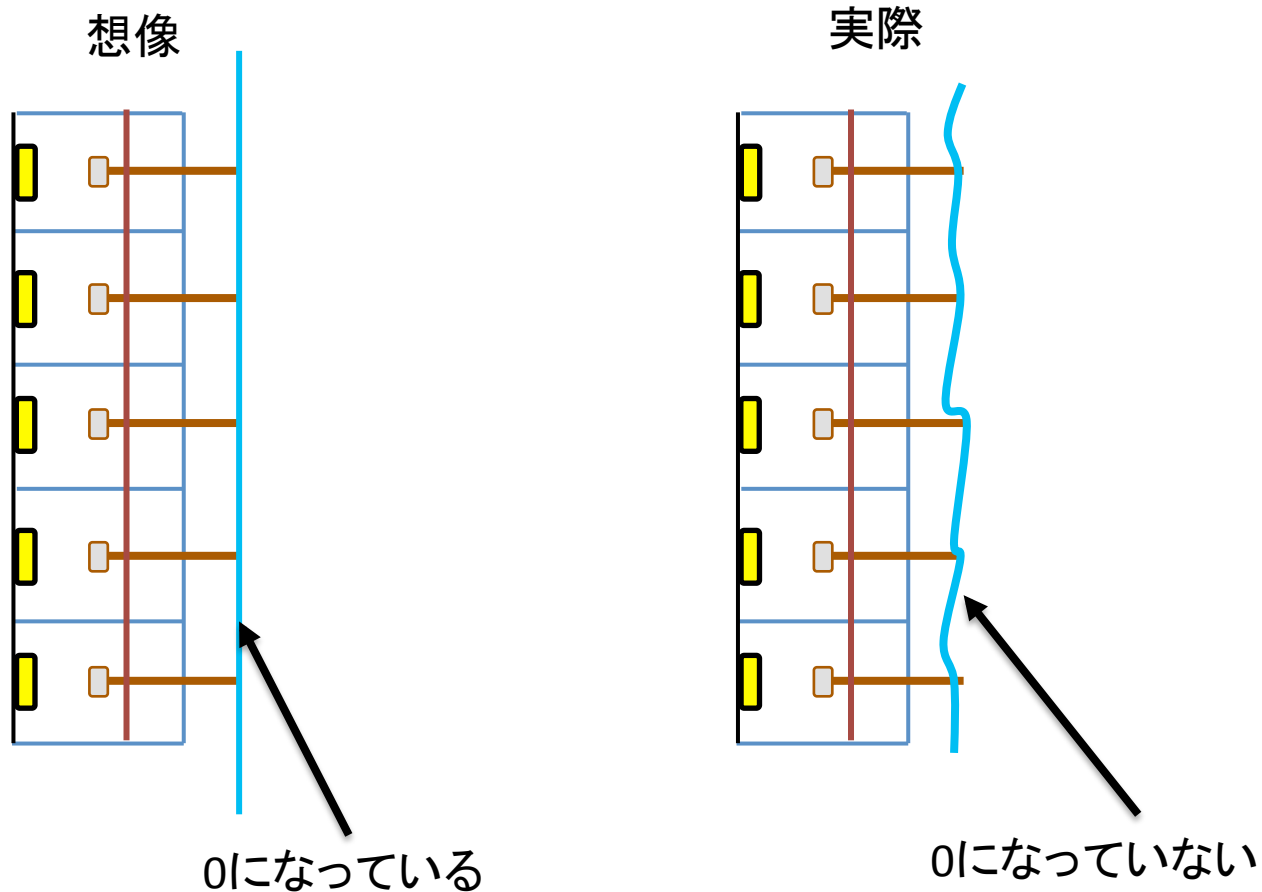
# 発表内容

- 1.補償光学概要
- 2.可変形鏡の仮想平面状態構築
- 3.制御実験
- 4.シミュレータ進捗
- 5.結言

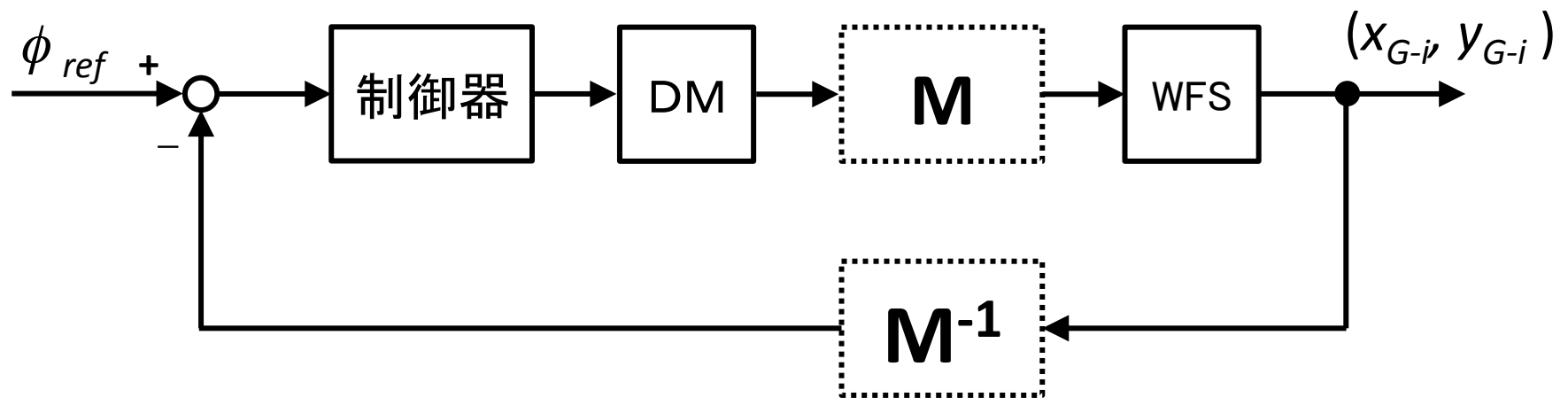
## 2.可変形鏡の仮想平面状態構築

DMに指令値0を入力

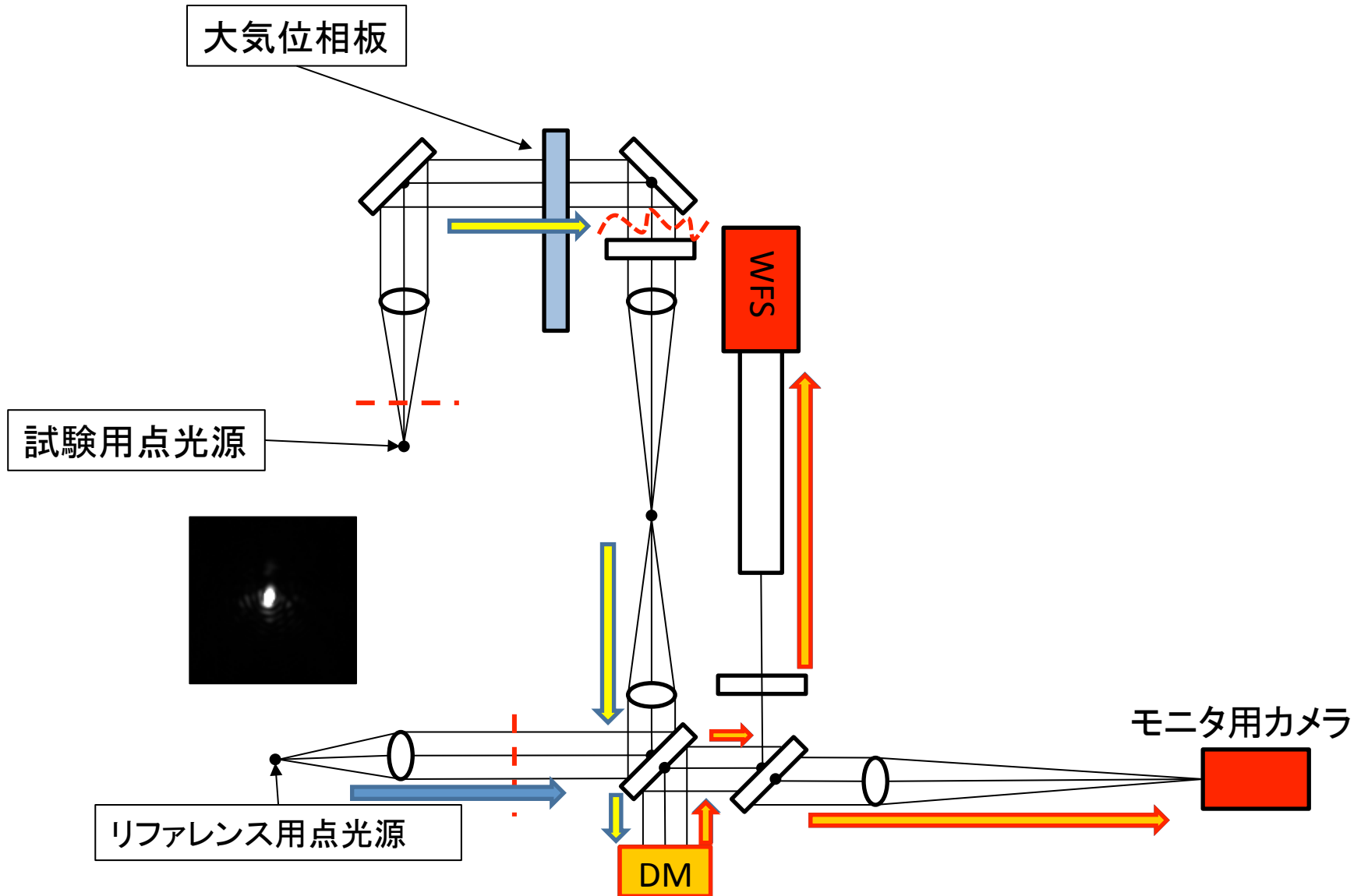
DM断面図



## 2. 可変形鏡の仮想平面状態構築

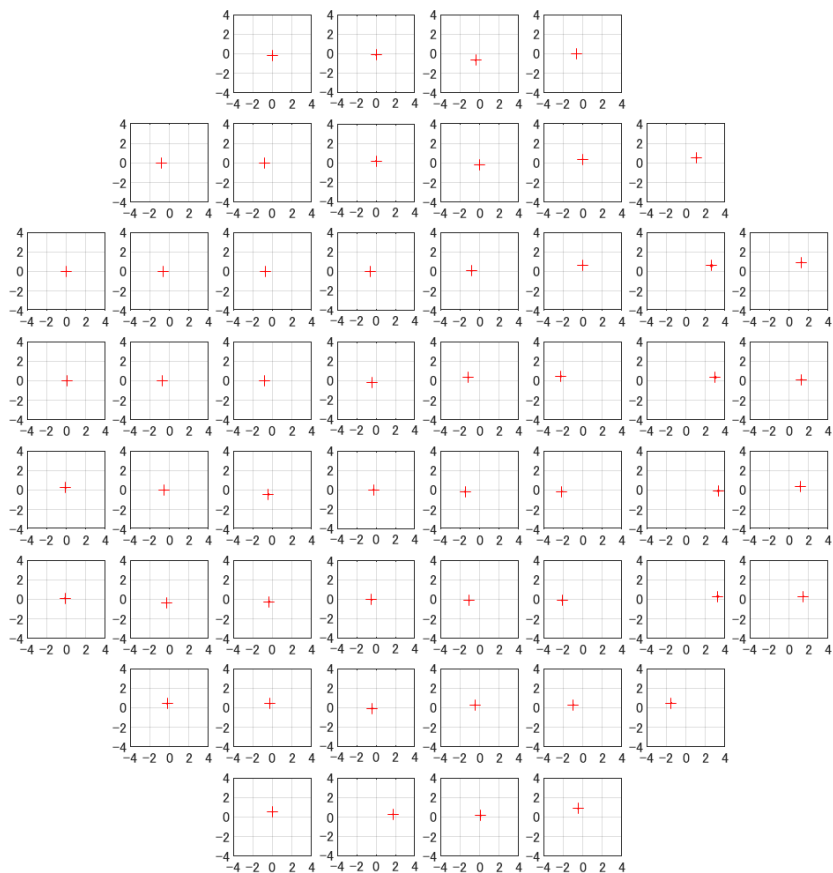


## 2. 可変形鏡の仮想平面状態構築

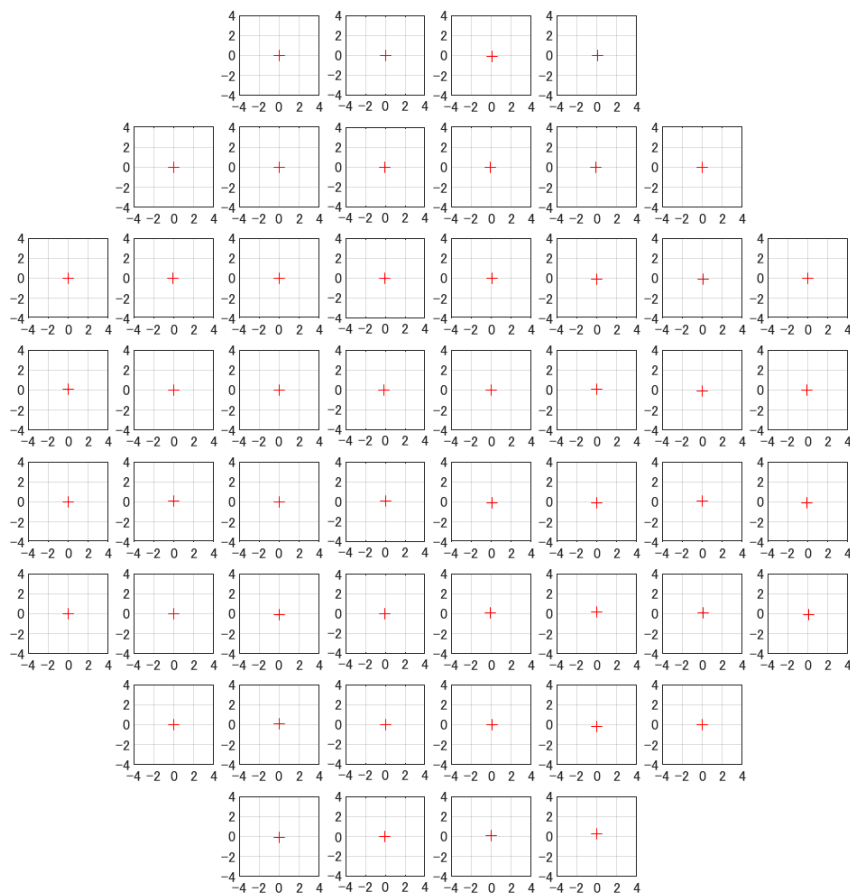


# 2. 可変形鏡の仮想平面状態構築

仮想平面化前



仮想平面化後



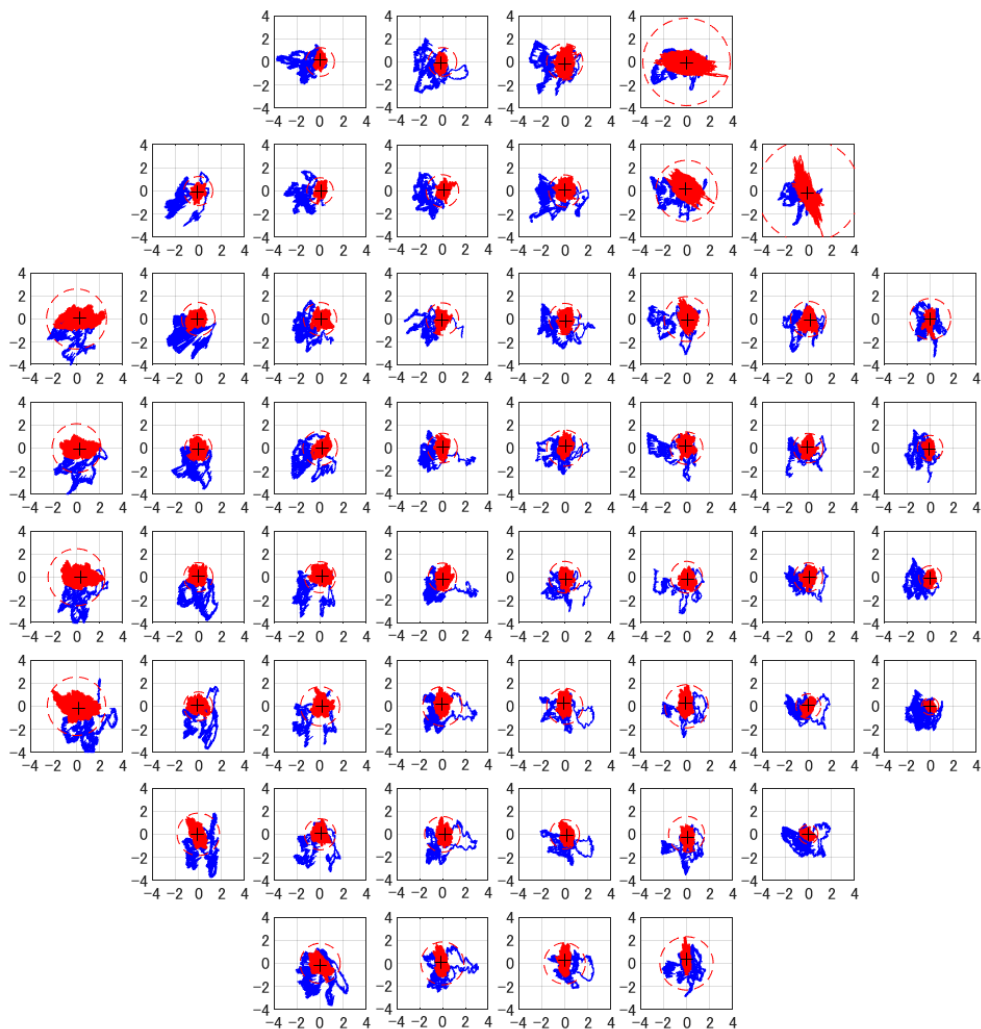
# 発表内容

- 1.補償光学概要
- 2.可変形鏡の仮想平面状態構築
- 3.制御実験
- 4.シミュレータ進捗
- 5.結言



# 3. 制御実験

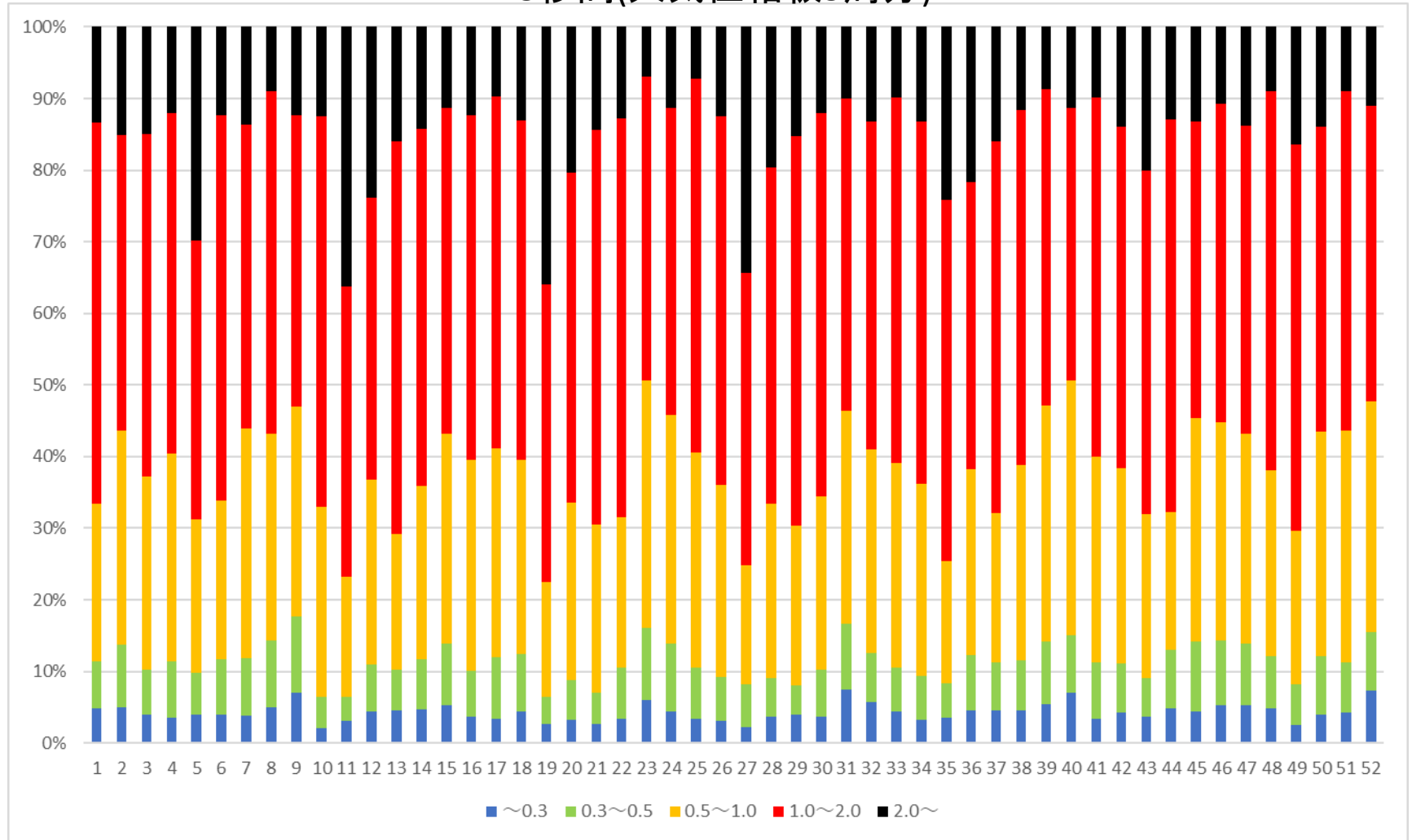
213秒間(大気位相板5周分)の制御結果



- 補償無しの際の重心の軌跡
- 補償有りの際の重心の軌跡
- 補償有りの際の重心の最大値
- + 補償有りの際の重心の平均位置

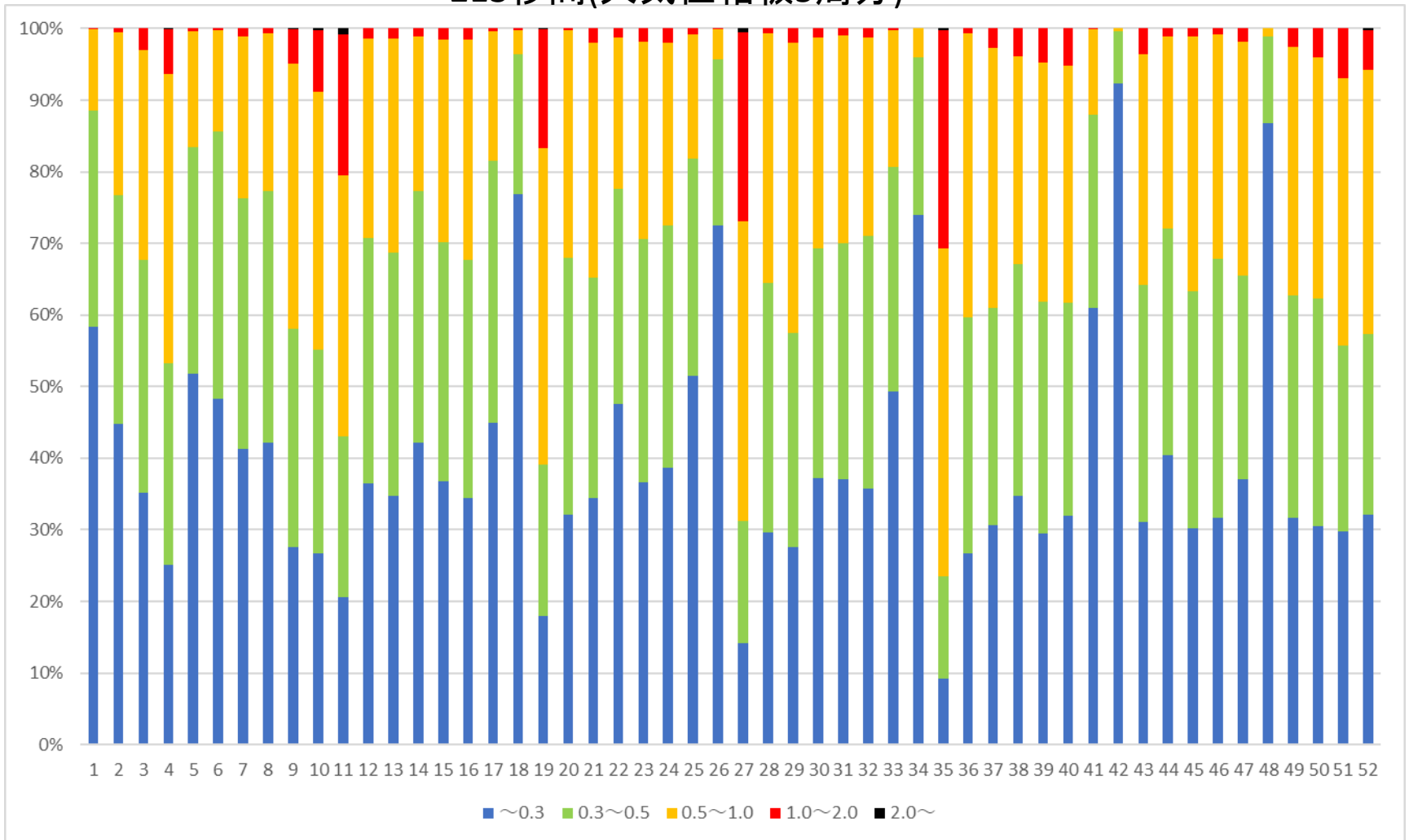
# 3.制御実験

補償をかけていない時の重心位置の分布  
213秒間(大気位相板5周分)



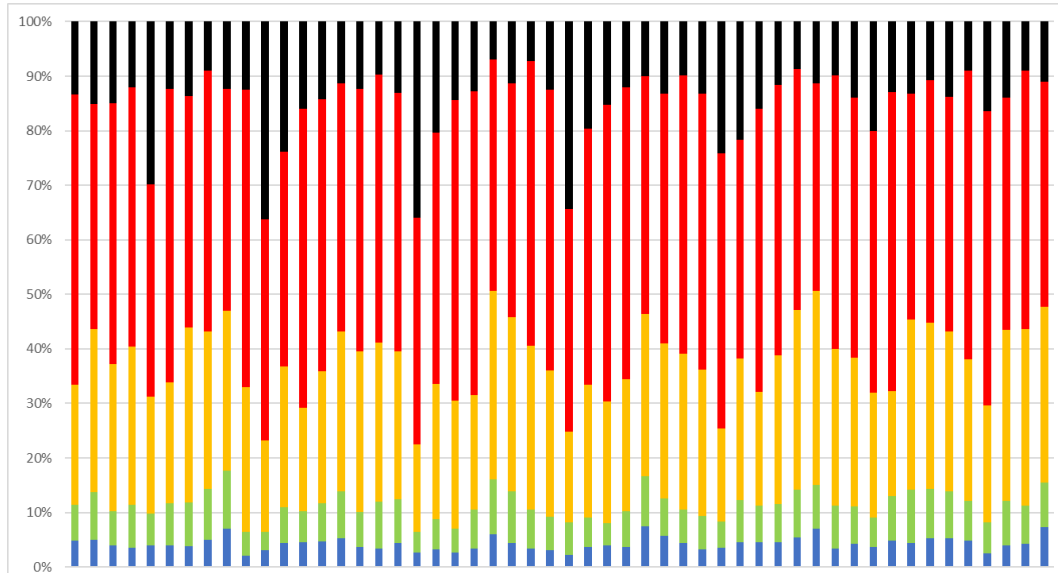
# 3. 制御実験

補償をかけている時の重心位置の分布  
213秒間(大気位相板5周分)

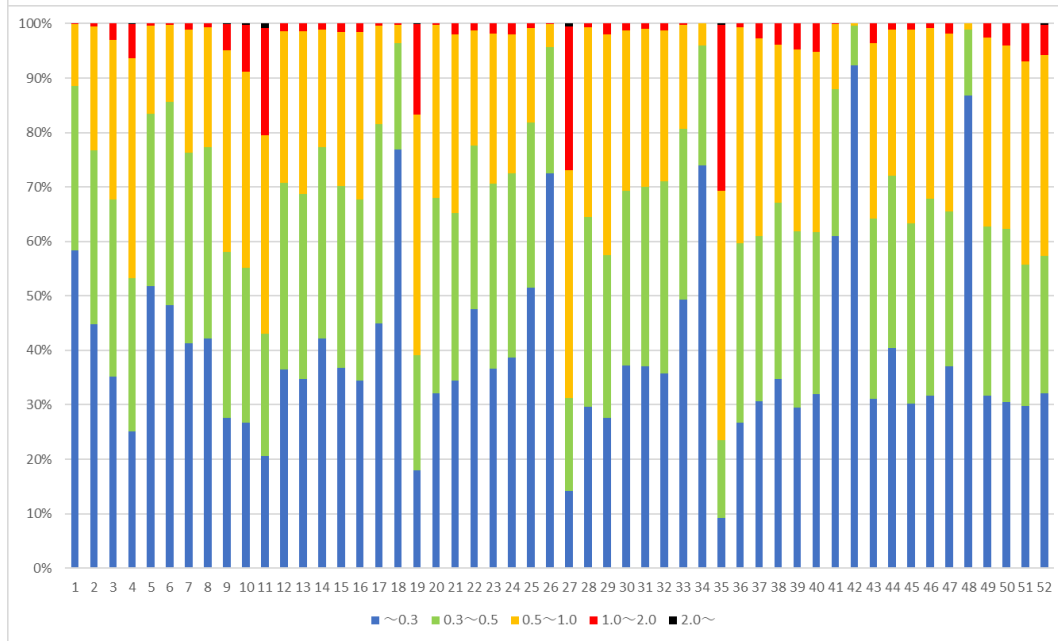


# 3. 制御実験

補償無し



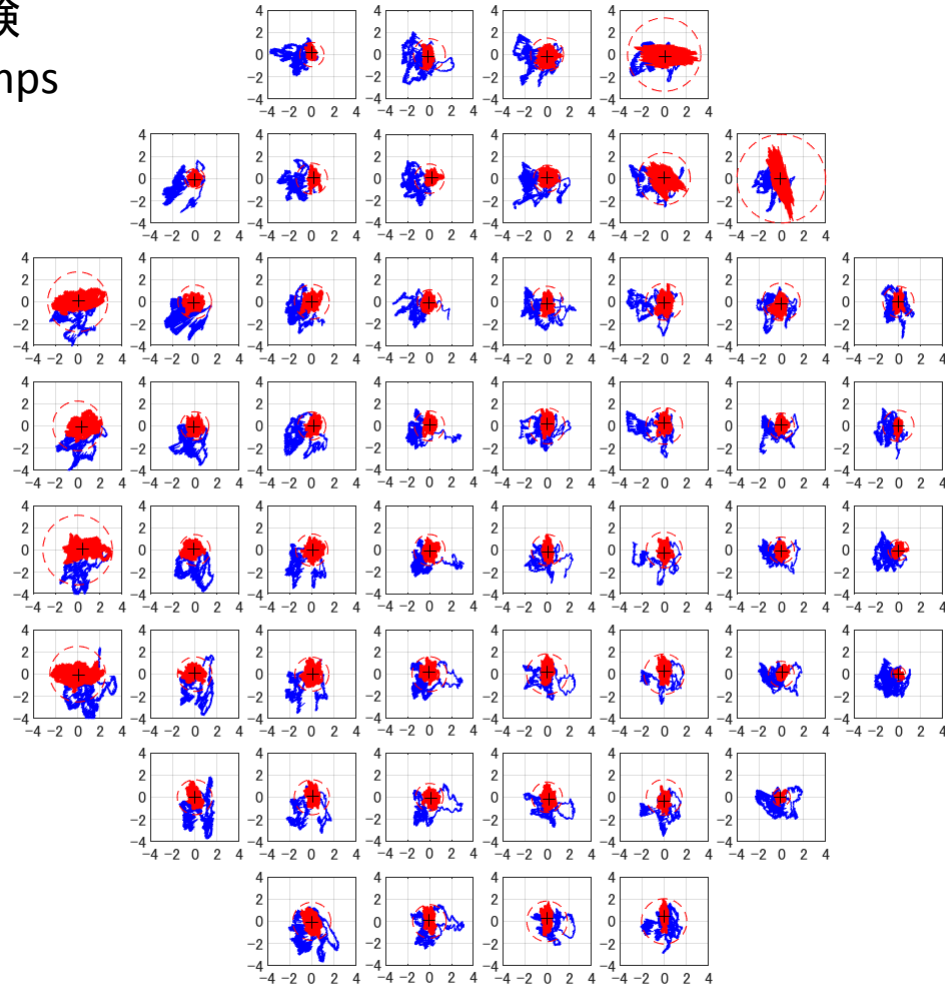
補償有り



# 3. 制御実験

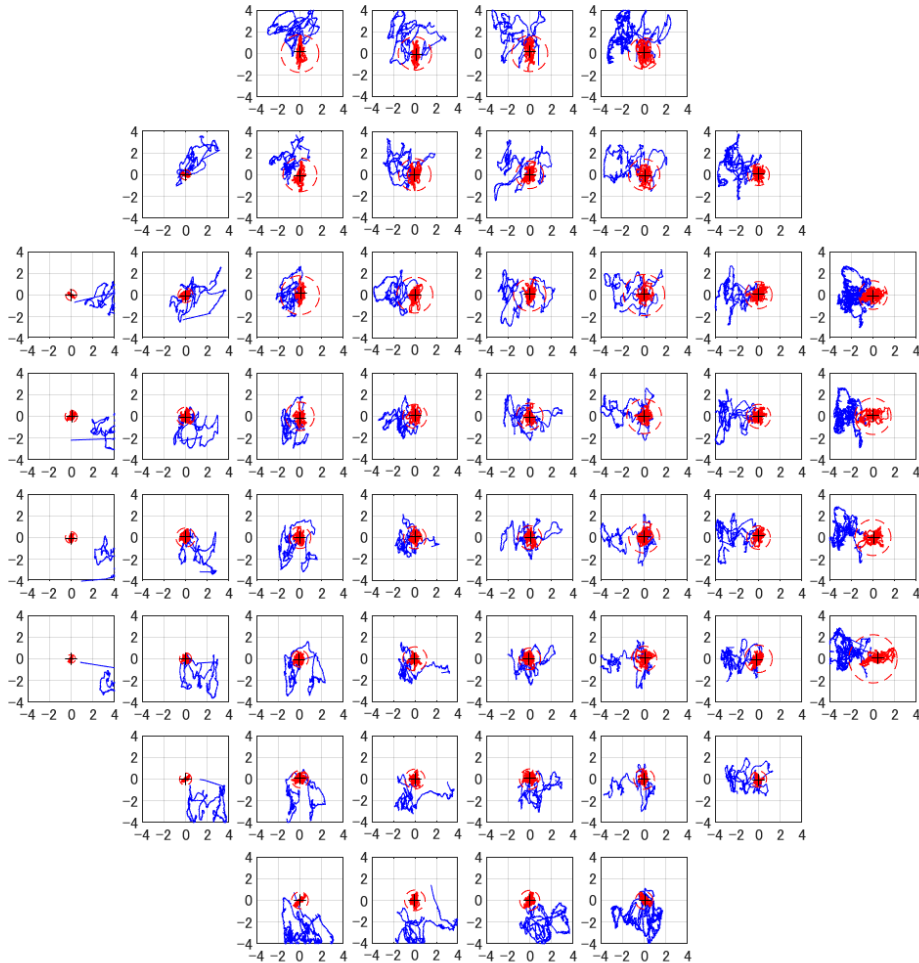
風速を変えての実験

14mps→10mps→6mps

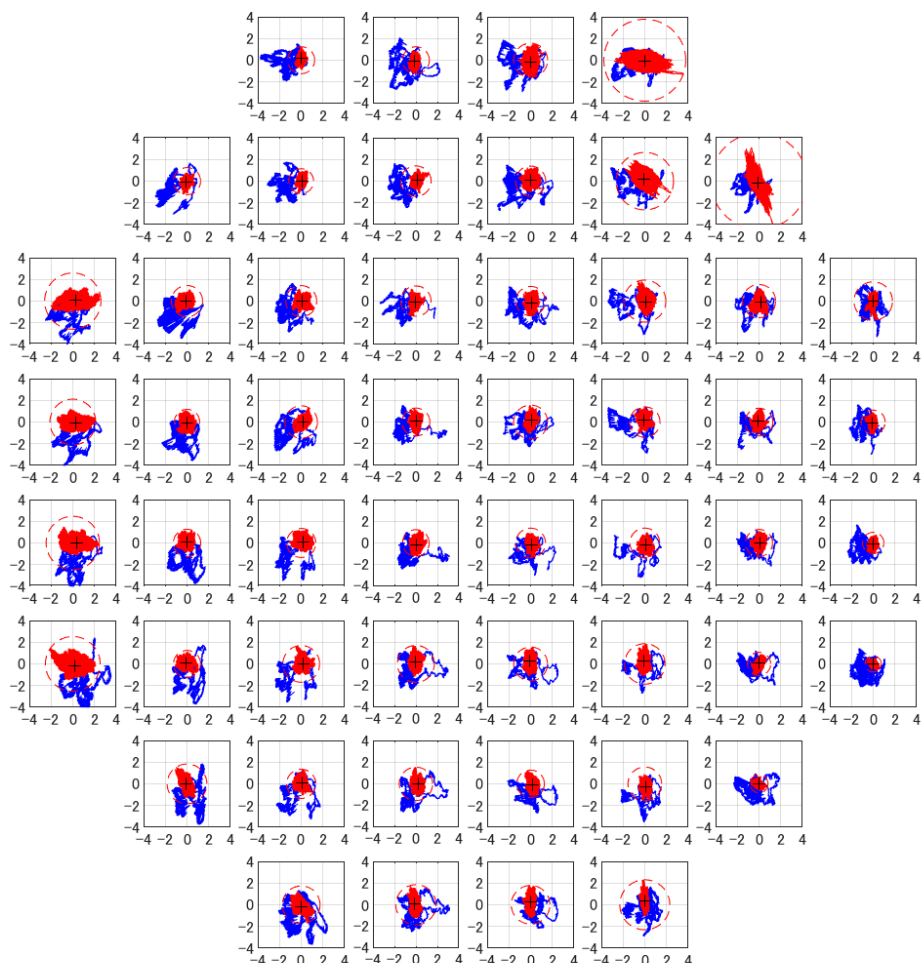


# 3.制御実験

## 6月に行った実験の結果(10sec)

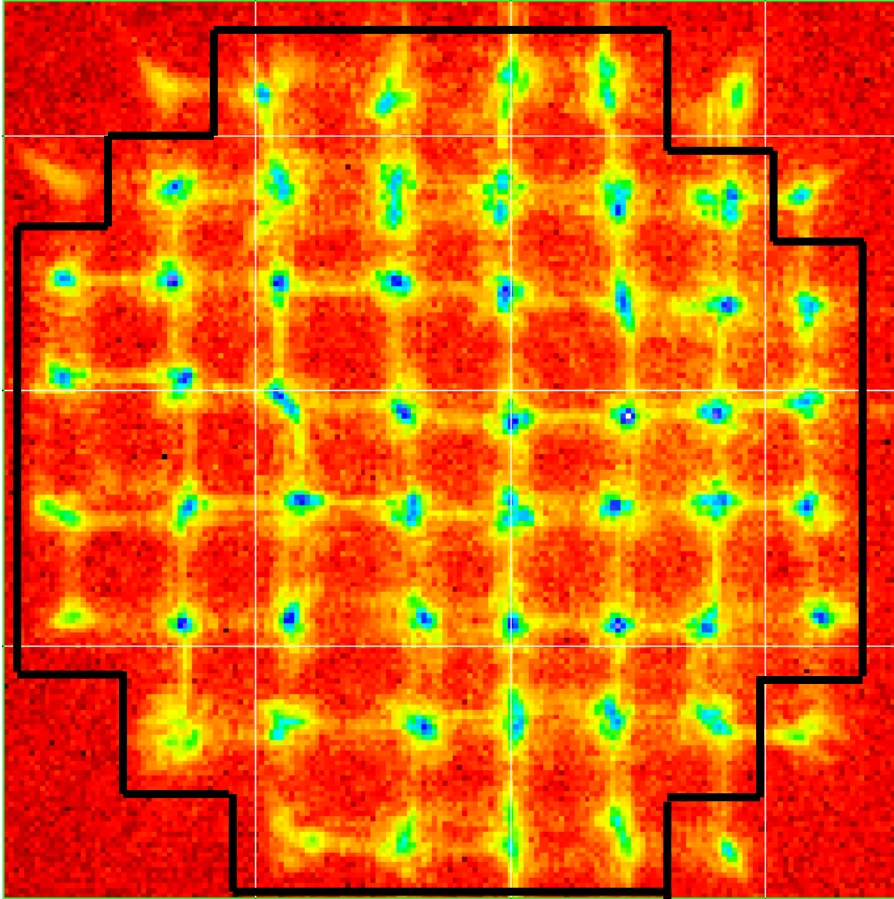


## テスト光源等調整後



# 3. 制御実験

位相板を止めた状態でのSHWFSが取得している画像

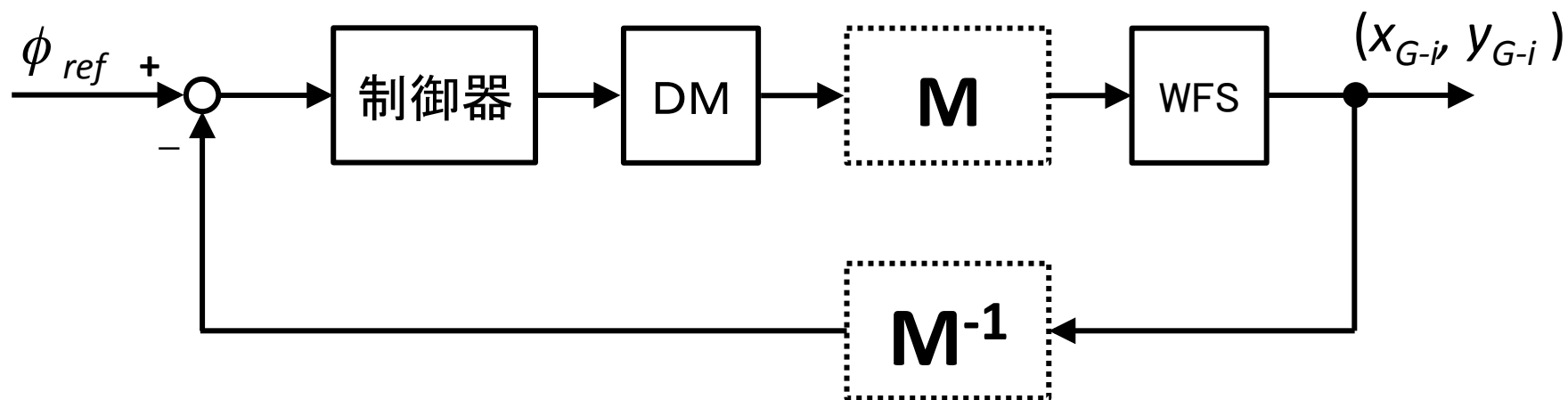




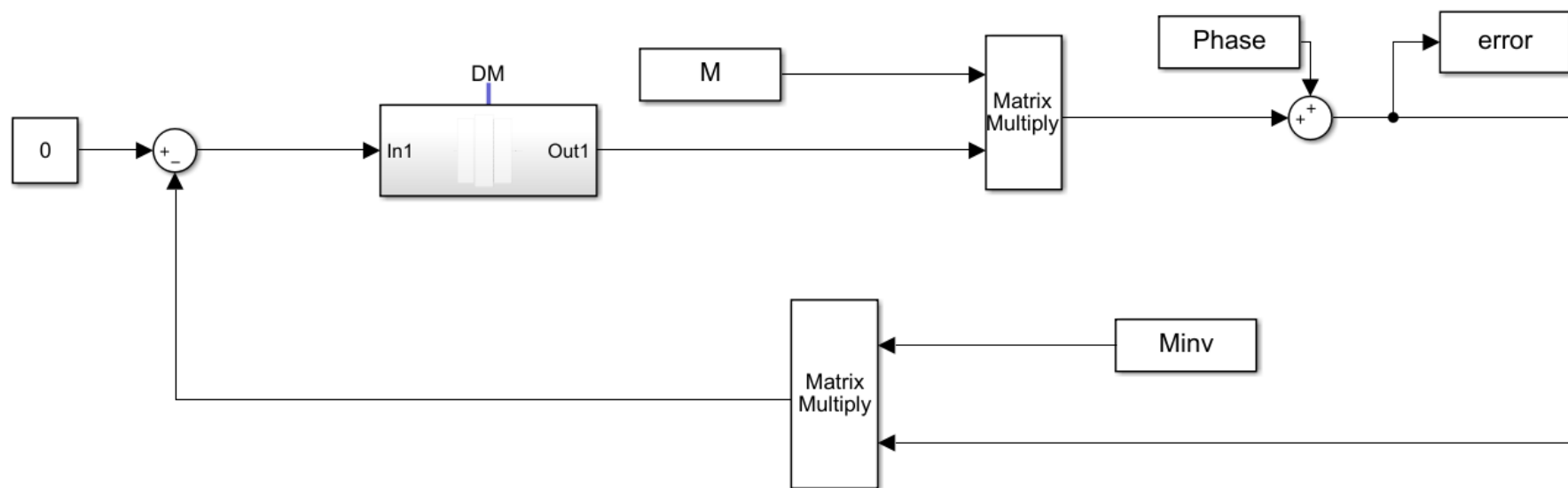
# 発表内容

- 1.補償光学概要
- 2.可変形鏡の仮想平面状態構築
- 3.制御実験
- 4.シミュレータ進捗
- 5.結言

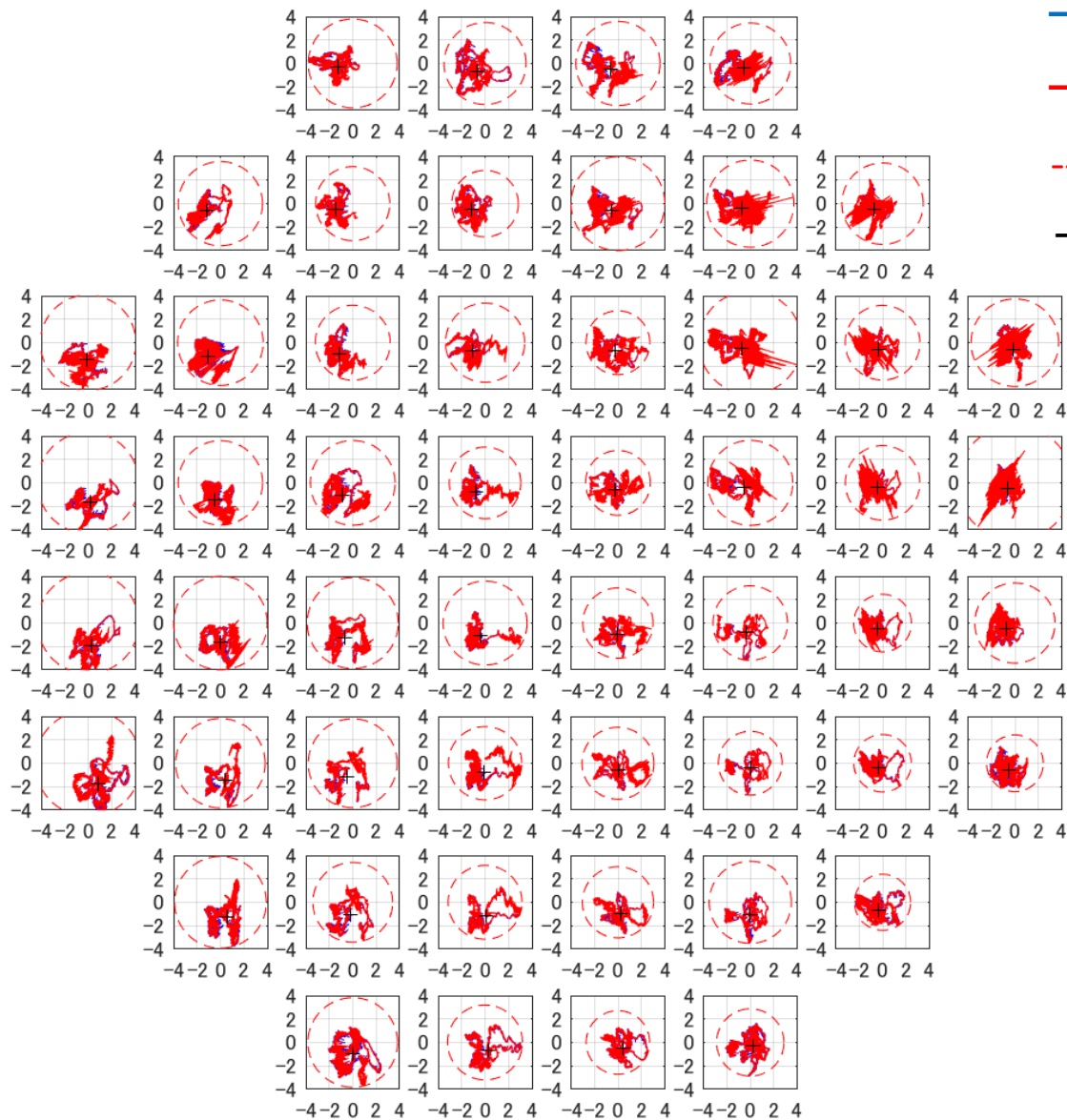
## 4. シミュレータ進捗



# 4. シミュレータ進捗



# 4. シミュレータ進捗



- 補償無しの際の重心の軌跡
- 補償有りの際の重心の軌跡
- - - 補償有りの際の重心の最大値
- + 補償有りの際の重心の平均位置

— と — はほぼ一致している。

# 発表内容

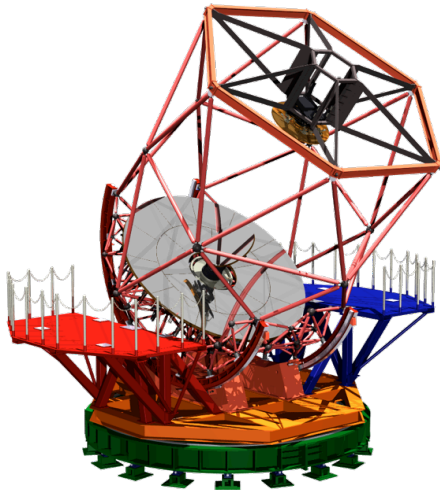
- 1.補償光学概要
- 2.可変形鏡の仮想平面状態構築
- 3.制御実験
- 4.シミュレータ進捗
- 5.結言

## 5. 結言

実験: 補償精度が上がらないのは  
Tip/Tiltの影響が大きいと推測する.  
今後, 確認のため更に実験を行う.

シミュレータ: 一先ず完成.  
今後, 実験系で行いづらいテストを行い  
実験系へのフィードバックを行う

# 極限補償光学装置の開発： 制御実験とシミュレーションによる評価



大阪電気通信大学大学院  
工学研究科 制御機械工学専攻  
MM18A012  
藤田 勝



◆おわり