

# 極限補償光学装置の進捗

山本広大(京都大学)

SEICA開発チーム

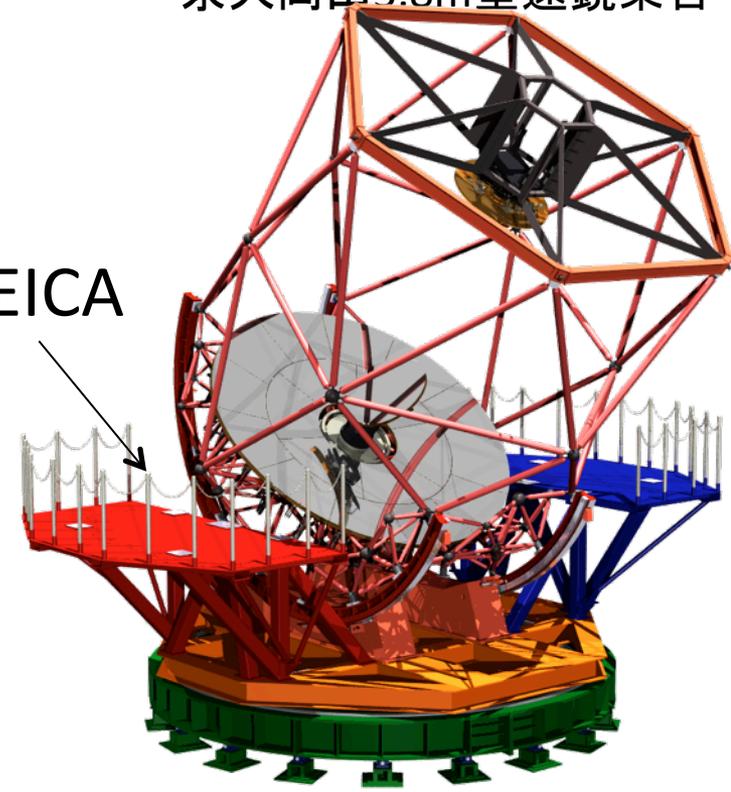
惑星撮像装置SEICA[Second-generation  
Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao]

内容

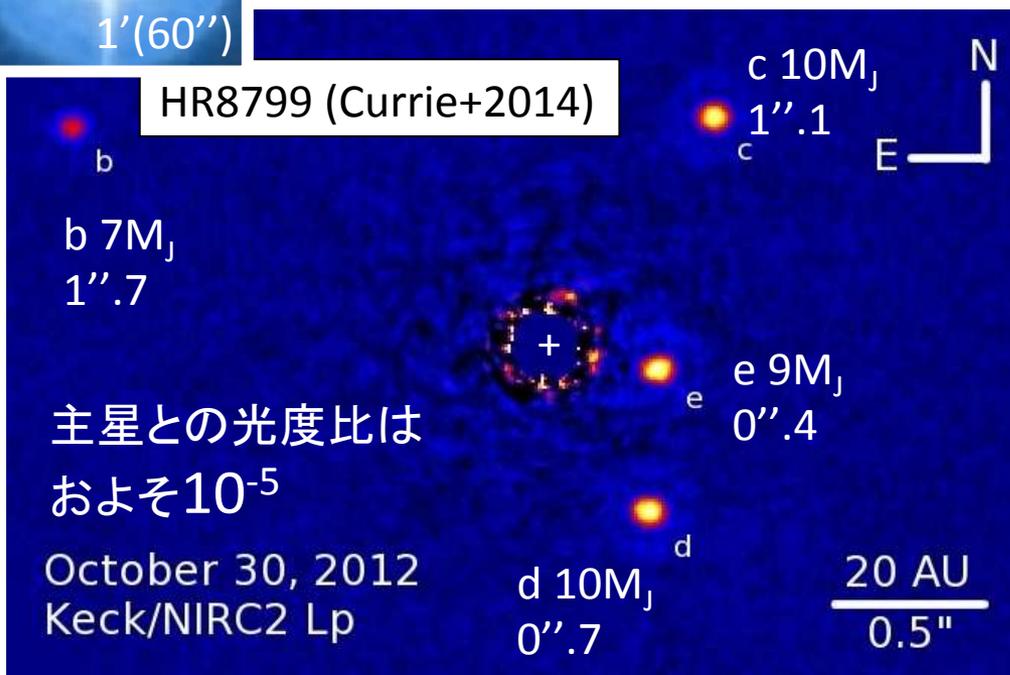
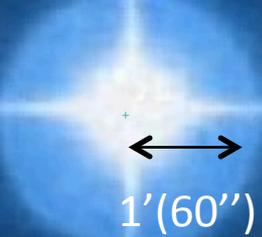
- SEICAの意義・目的
- SEICA-ExAOの進捗

京大岡山3.8m望遠鏡架台

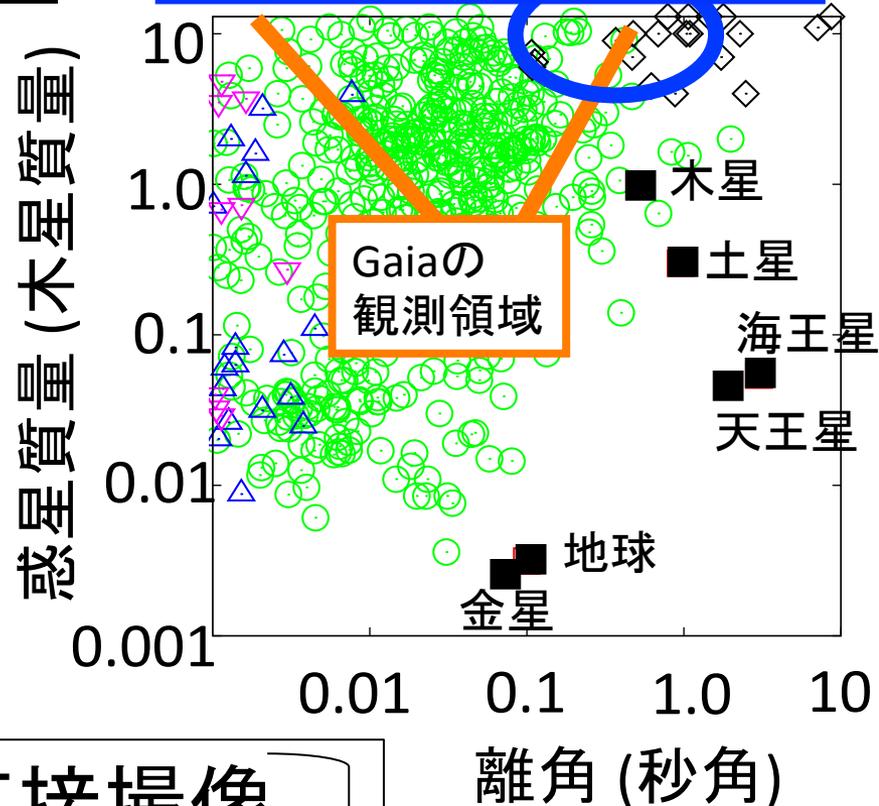
SEICA



# 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

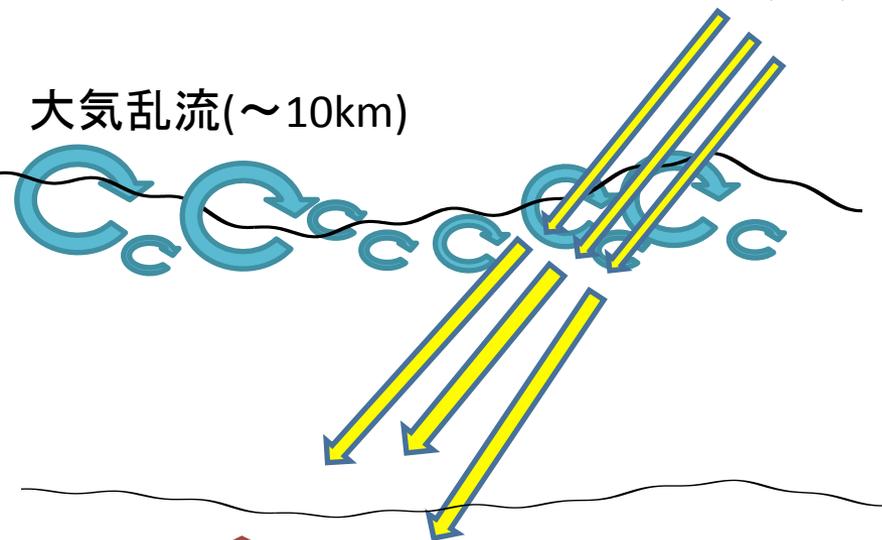
# SEICA: 意義: Imaging観測の難点

## ◆天体からの光は大気乱流で乱れる

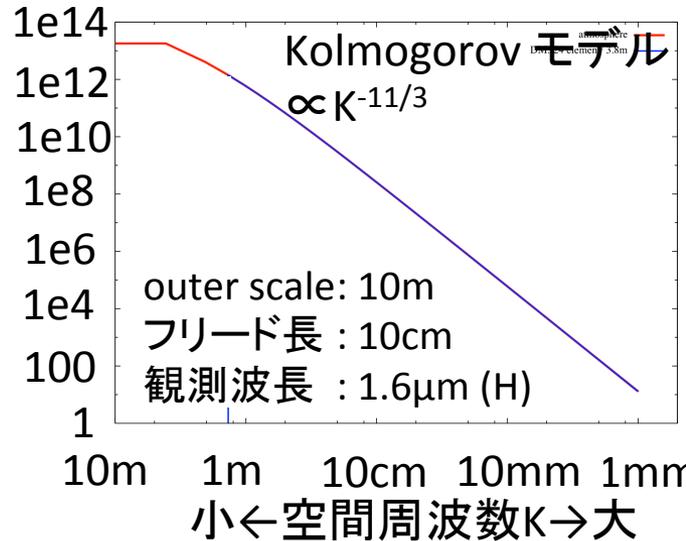
温度ムラ→密度ムラ→屈折率ムラ  
乱流渦の大きさ 数cm—数十m



大気乱流(~10km)



大気乱流のパワースペクトル



望遠鏡主鏡面での  
位相ムラ(シミュレーション)

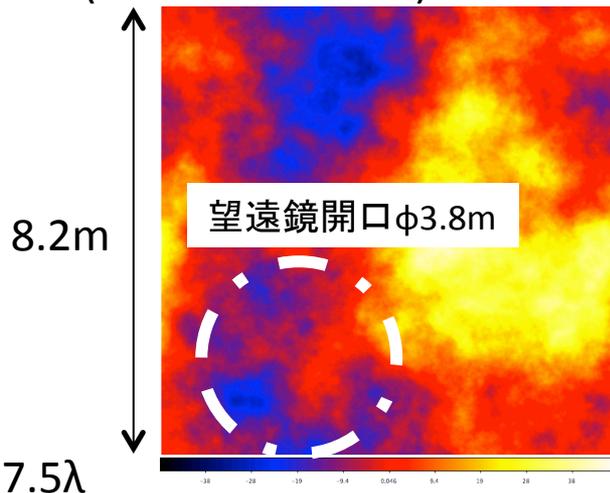
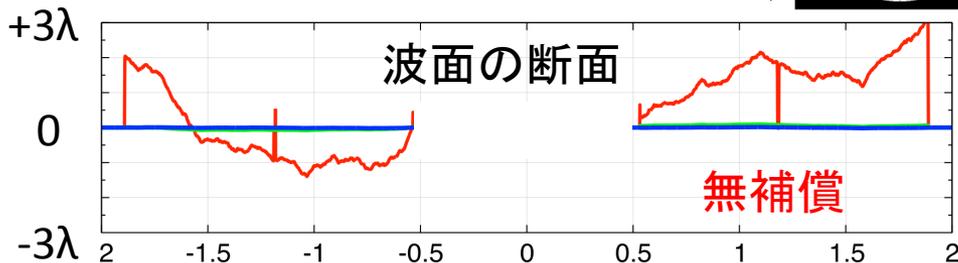
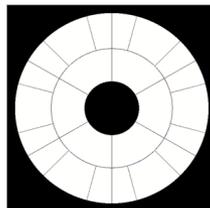
地上



望遠鏡

望遠鏡瞳パターン

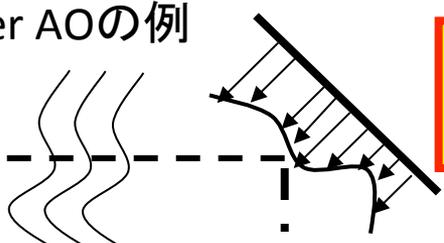
3.8m



# SEICA: 意義:: 補償光学

## ◆ 大気による波面乱れをリアルタイム補正

Woofer AOの例



大気乱流で乱れた波面

ビームスプリッタ

補償された波面 ( $\lambda/4$ : rms)

1. DM  
可変形鏡



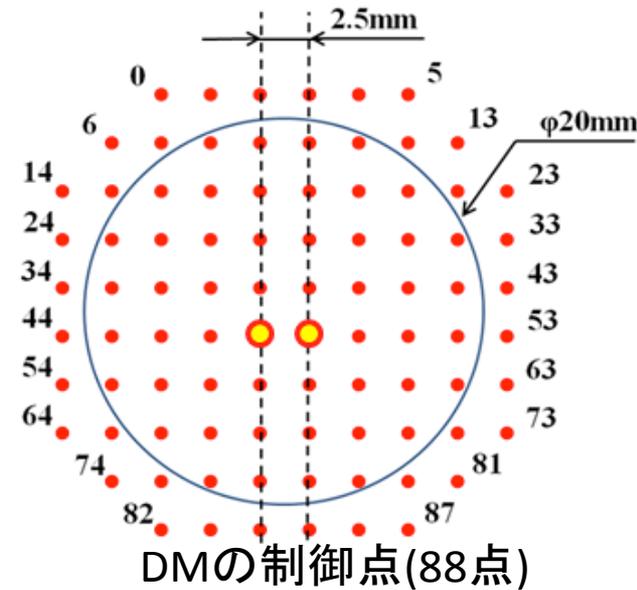
3. 計算システム



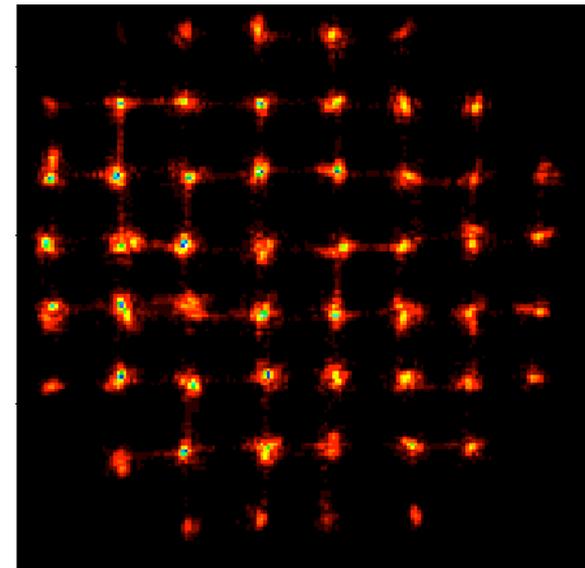
2. WFS  
波面センサ



仕様を決定する



DMの制御点(88点)



WFSの測定点(52点)

# SEICA: 光学系:: 概念図

天体から



地球大気



望遠鏡 (主-第三鏡)



SEICA

前置光学系



ExAO



コロナグラフ



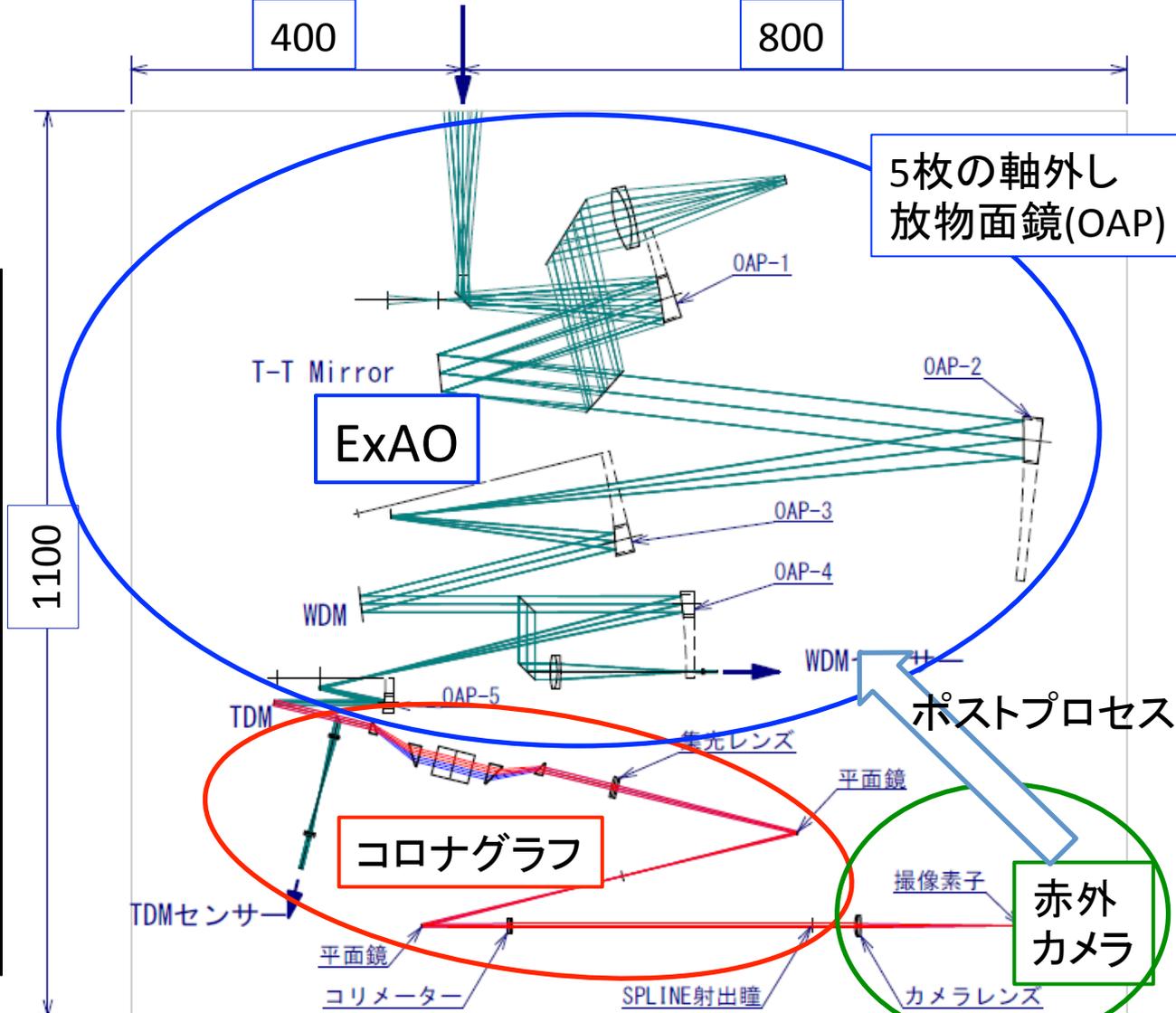
赤外カメラ



望遠鏡→前置光学系からの入射光線

400

800



# SEICA: ExAOパート(極限補償光学系)

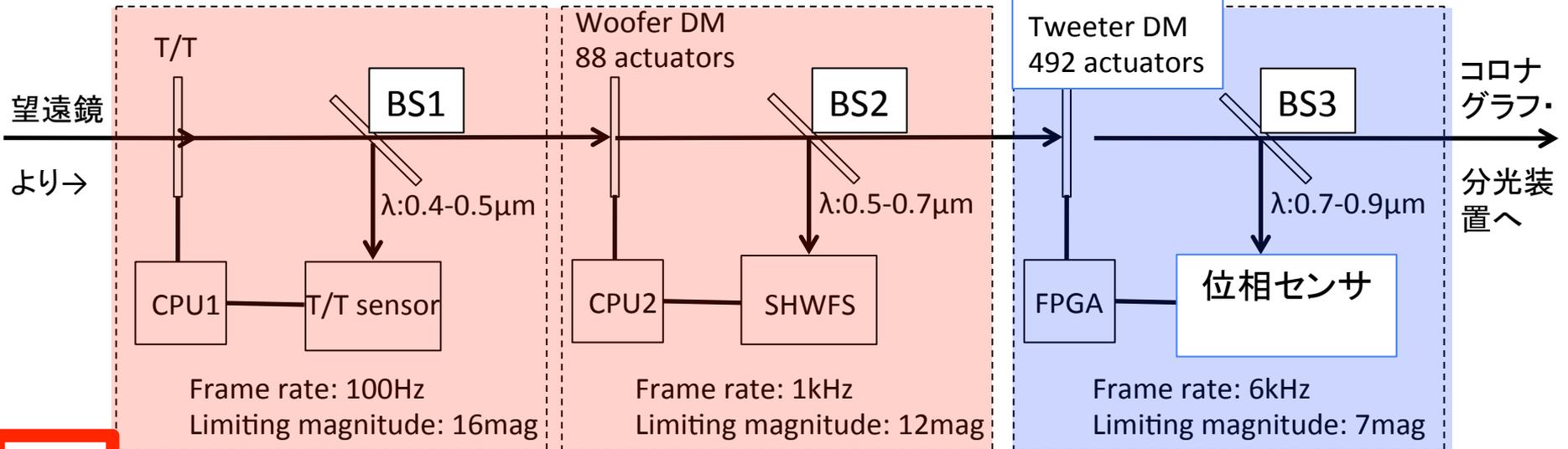
傾斜計測: T/T + Woofer  
低速、粗い波面制御

位相計測: Tweeter  
高速、高精度波面制御

Tip/Tilt部 視野内で星像を安定させる

Woofer部  $\lambda/4$ 程度まで波面補償する

Tweeter部  $\lambda/20$ 程度まで波面補償する



目標

高精度 ( $\lambda/20$ ; rms)  
高周波 (5-10 kHz)  
高空間周波数 (1辺24素子)

←コロナグラフにおいて何処までの精度が必要か再検討中

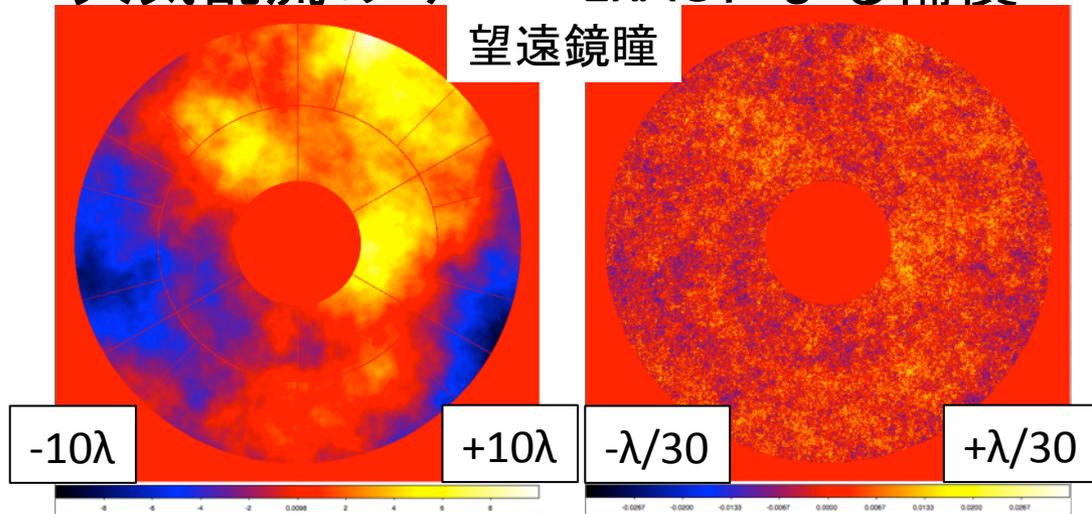
$0''.2-0''.3$ で $10^5-6$

# SEICA: ExAO後のコントラスト

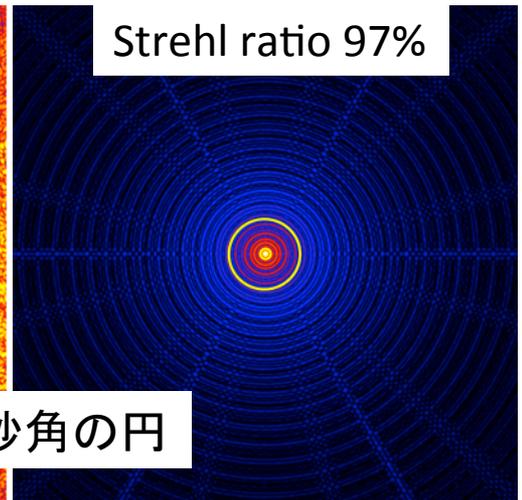
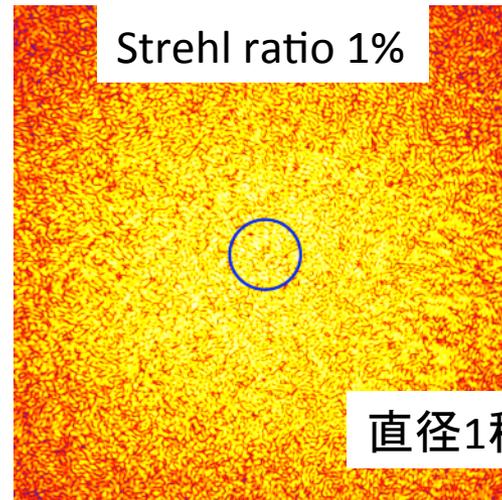
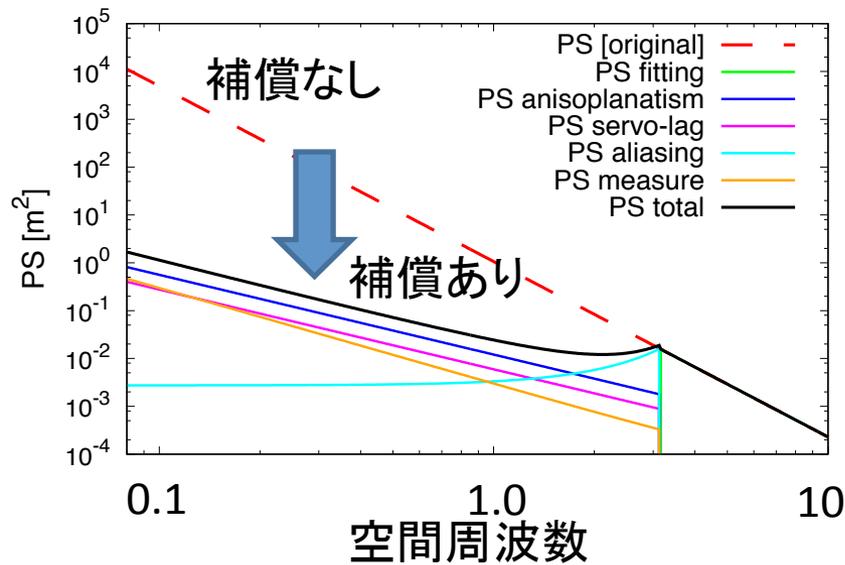
乱流層: 高度10km  
 フリード長: 10cm  
 風速: 10m/s  
 天頂角: 60度 (仰角30度)  
 センサー波長: 0.8 $\mu$ m  
 観測波長: 1.65 $\mu$ m  
 波面測定: 8.5kHz (制御850Hz)  
 補償点数: 差し渡し24素子  
 計495素子

大気乱流のみ

ExAOによる補償



大気乱流と補償後のパワースペクトル



直径1秒角の円

補償前/後の位相形状と星像(時間平均なし: 10msec)

# ExAO進捗:

## 1. AO制御実験[Woofer AO]

### 1. Woofer実験環境整備

#### 1. 光学系調整

### 2. Woofer実験開始

1. 基準実験系での試験 [AO基本性能, 風速, 等級etc...]

2. WFSパラメータの最適化試験[マイクロレンズ, ROI etc...]

3. 近赤外対応

## 2. SEICA実機設計: Woofer AO

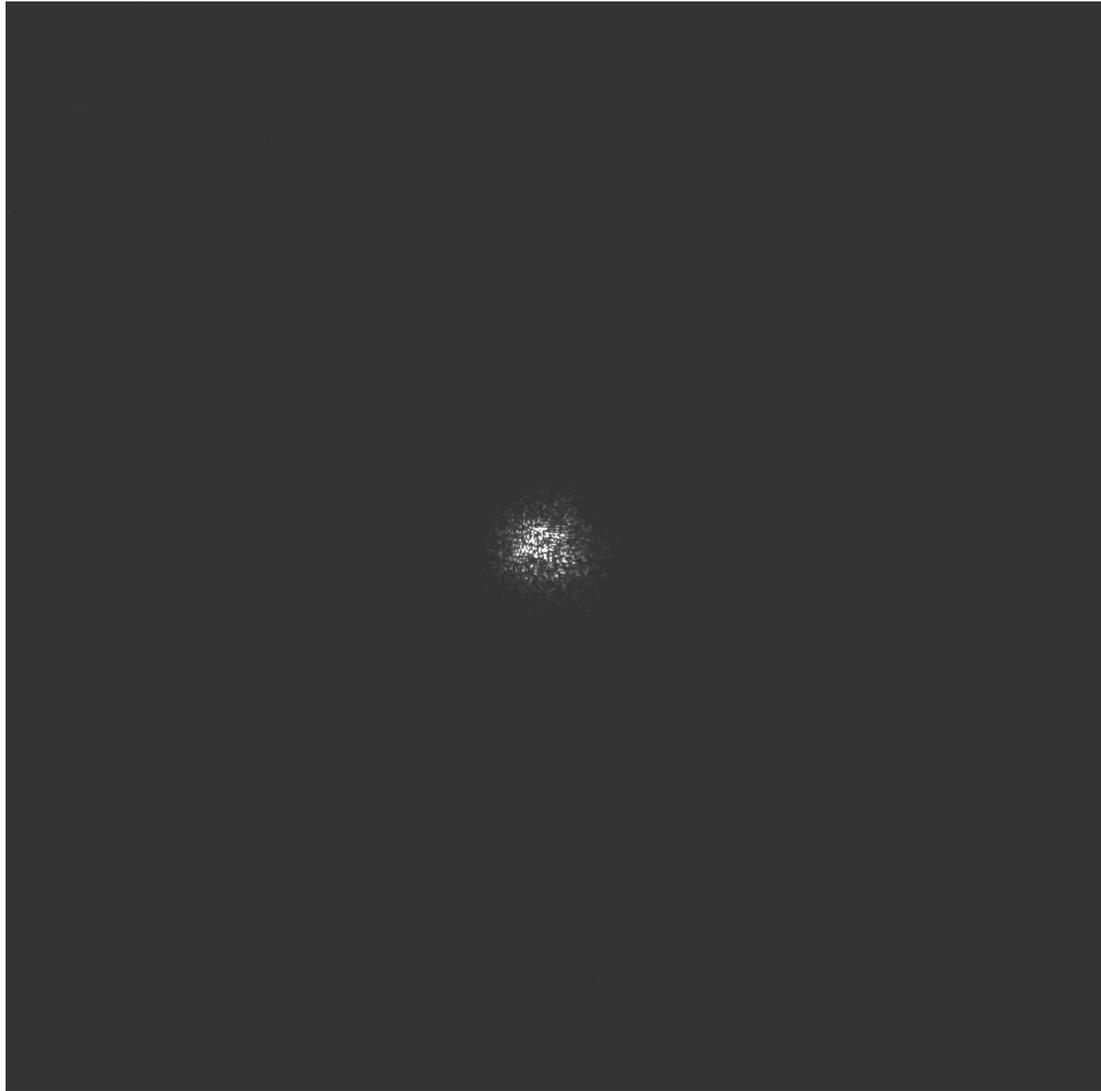
### 1. Woofer用SHWFS構造体最終設計

## 3. H29年度予算への応募

1. 自然科学機構(NINS)分野融合共同研究

2. 国立天文台共同開発経費

# ExAOノパート:: WooferAO動作

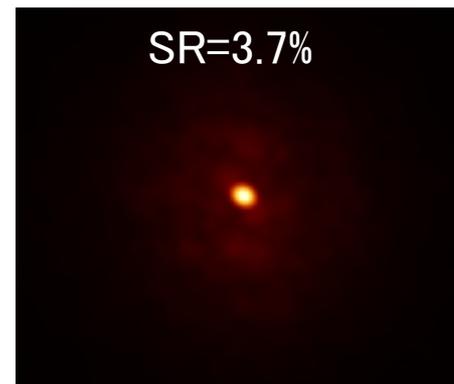
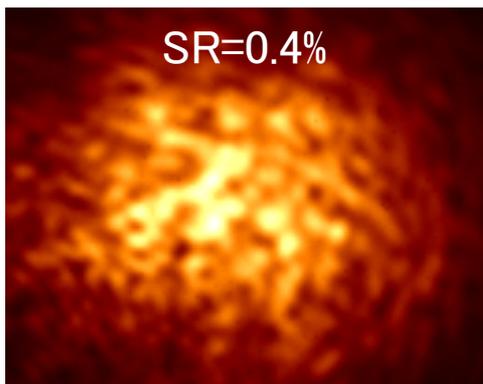
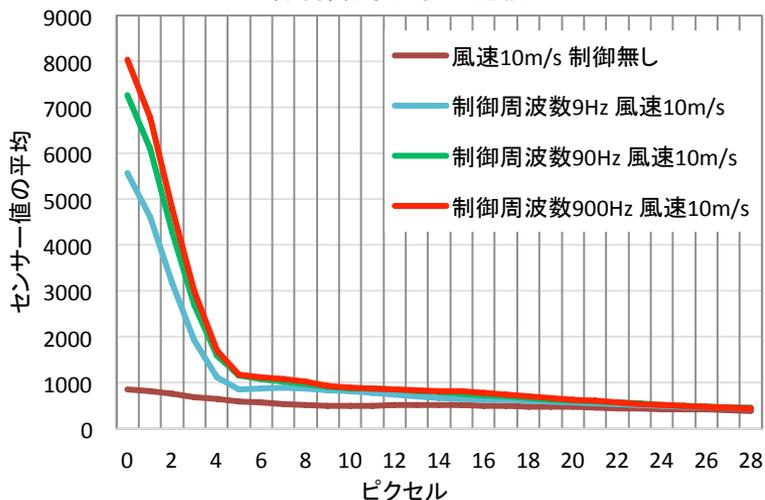


AO時  
FWHM  $\sim 6$ pix  
回折限界  
FWHM 4.5pix

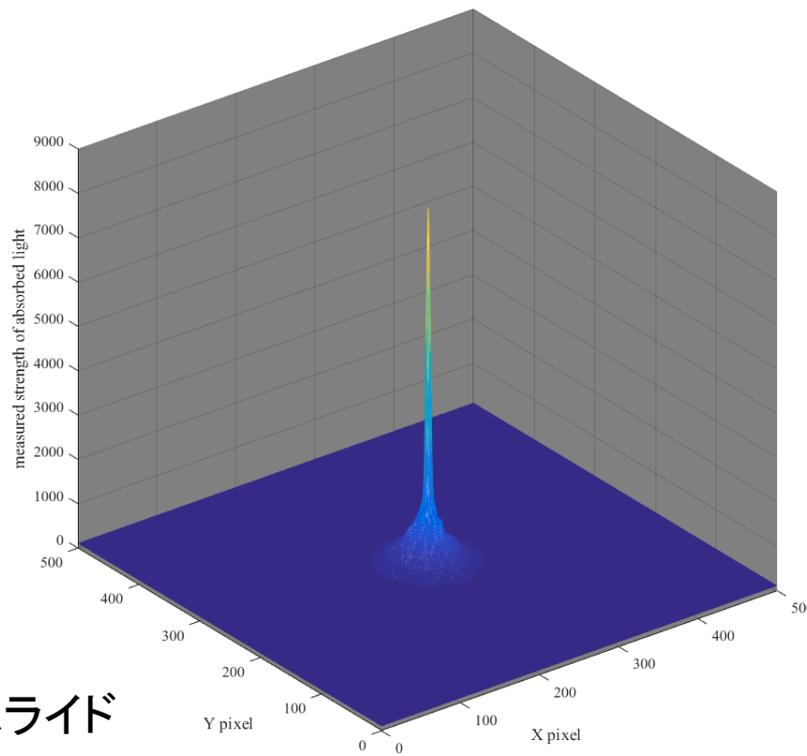
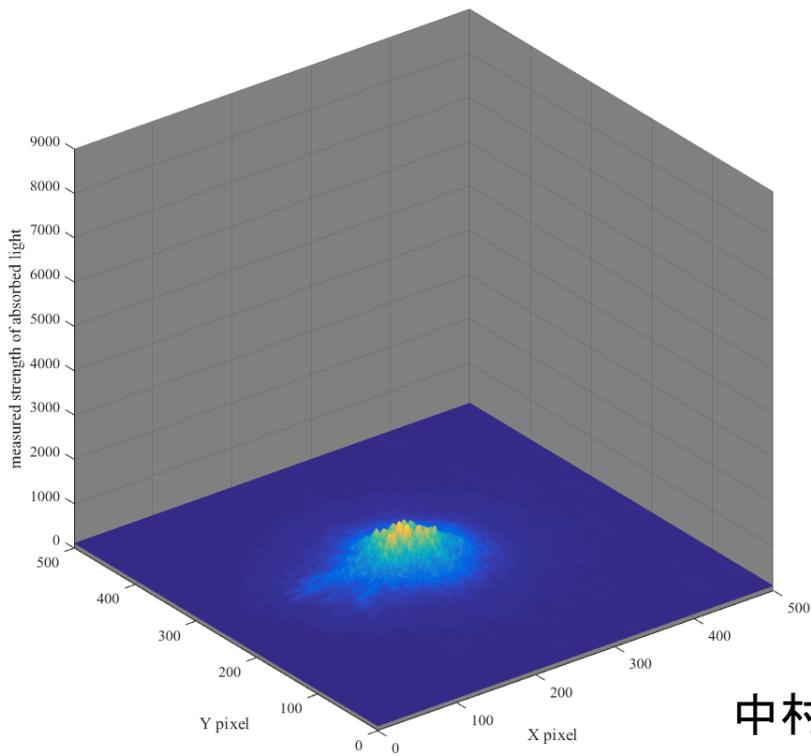
Woofer AO動作時の星像 (He-Neレーザー光源, 風速10m/s, 制御900Hz)

# ExAOパート:: 評価試験 星像モニタ

各制御周波数の比較



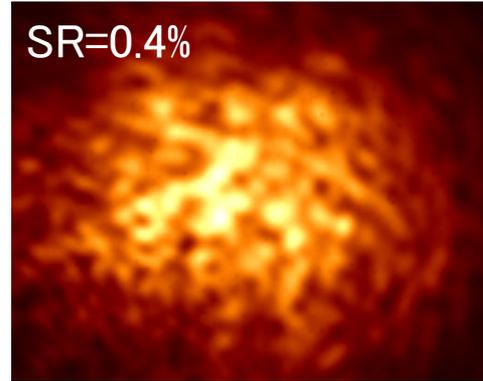
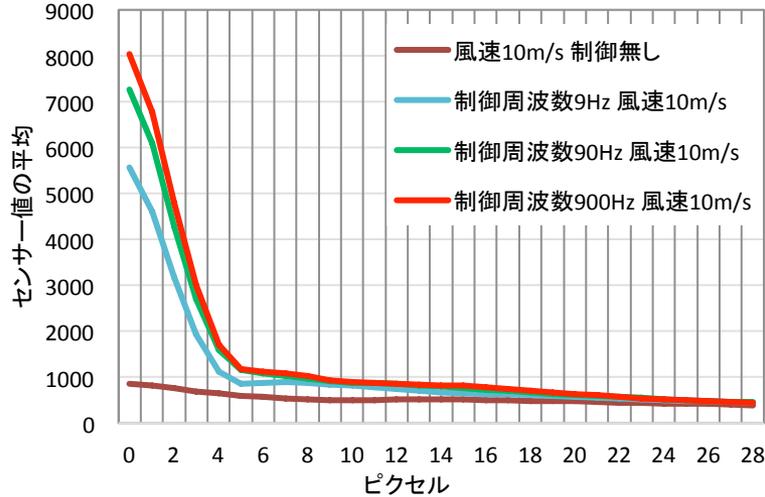
$\lambda=633\text{nm}$  風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)



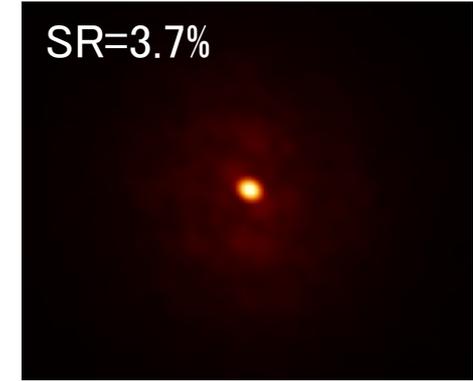
中村君スライド

# ExAOパート:: 評価試験 SR測定

観測カメラの画像の比較



風速 10m/s 制御無し

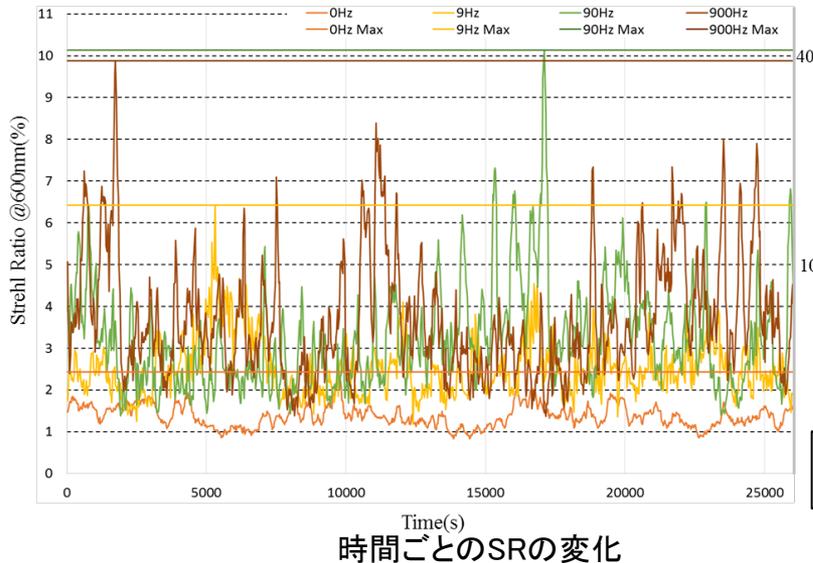


風速 10m/s 制御周波数900Hz

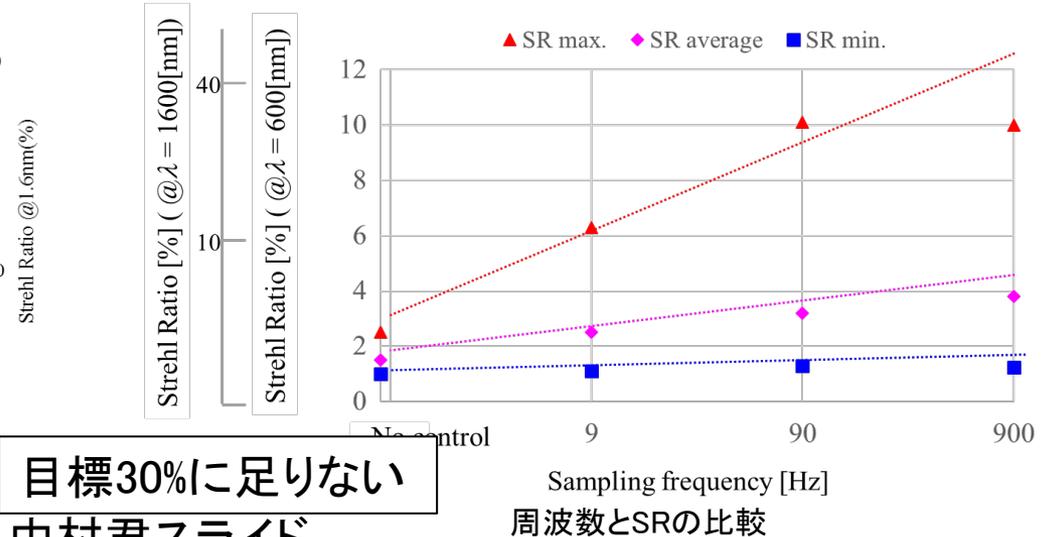
$\lambda = 633\text{nm}$  風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)

制御無しに比べてSRが上昇しているが  
不安定なSR変動

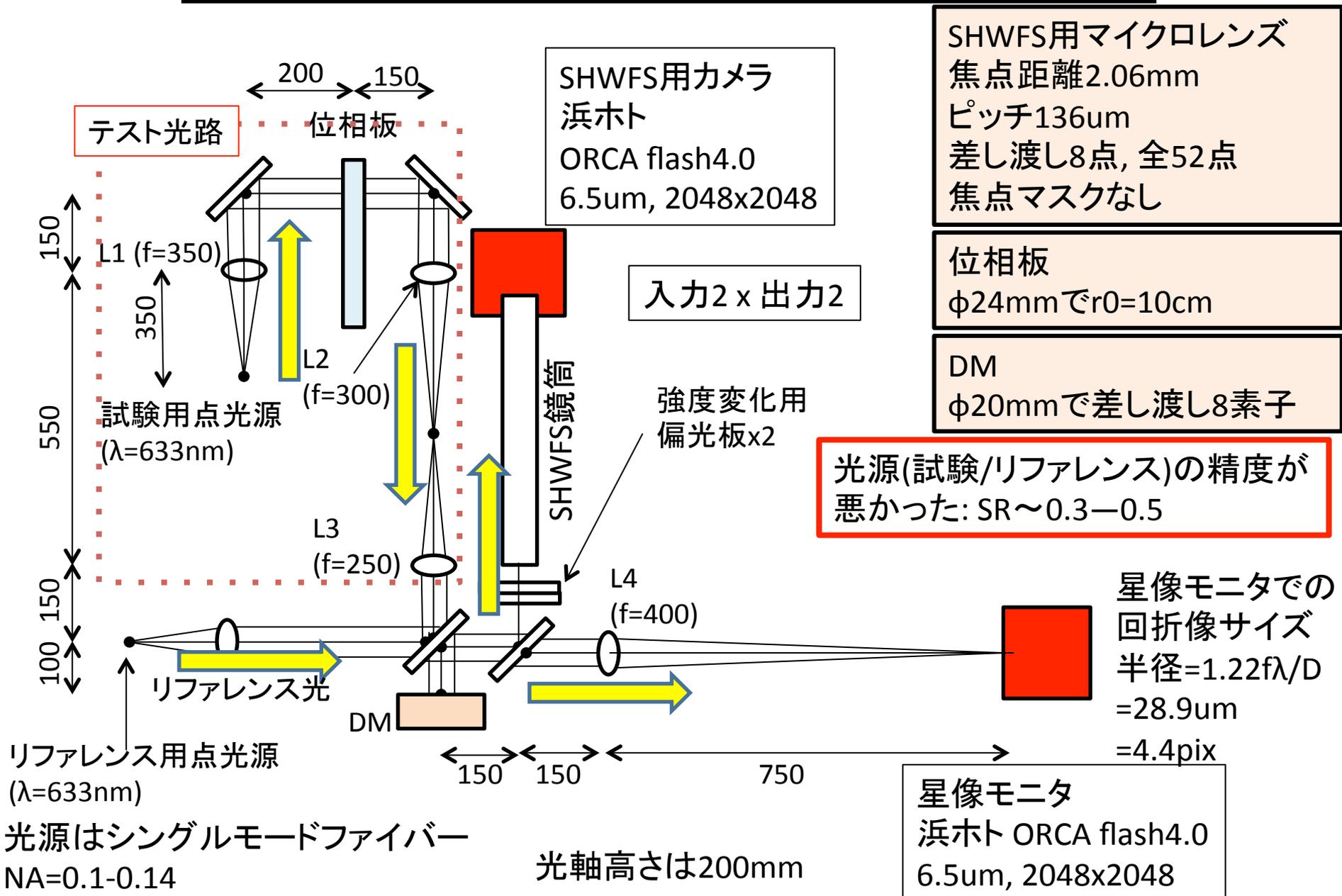
制御帯域が高速化すると補償精度も向上



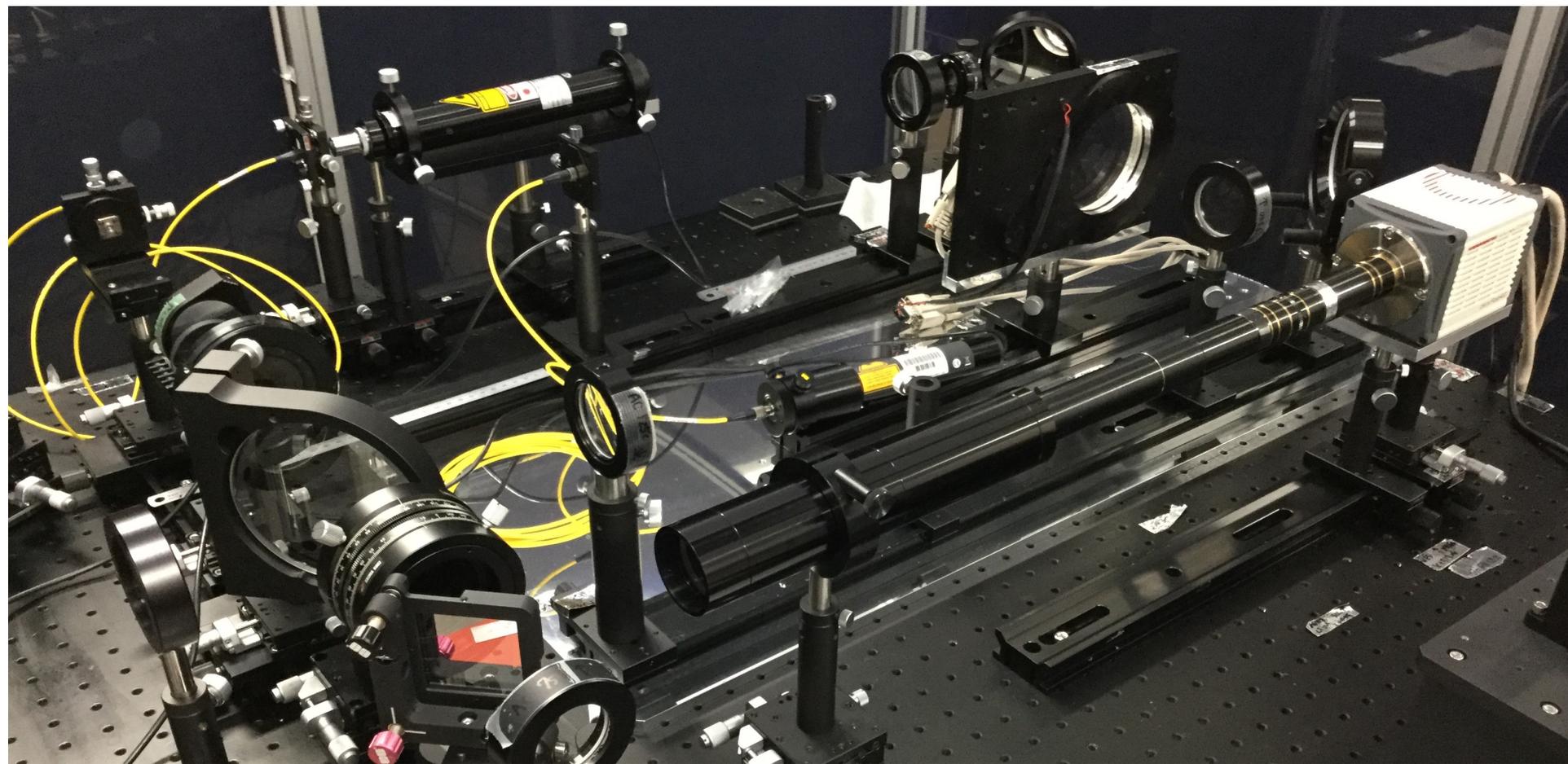
目標30%に足りない  
中村君スライド



# ExAOパート:: 性能評価試験



# ExAOパート: 光源精度の向上

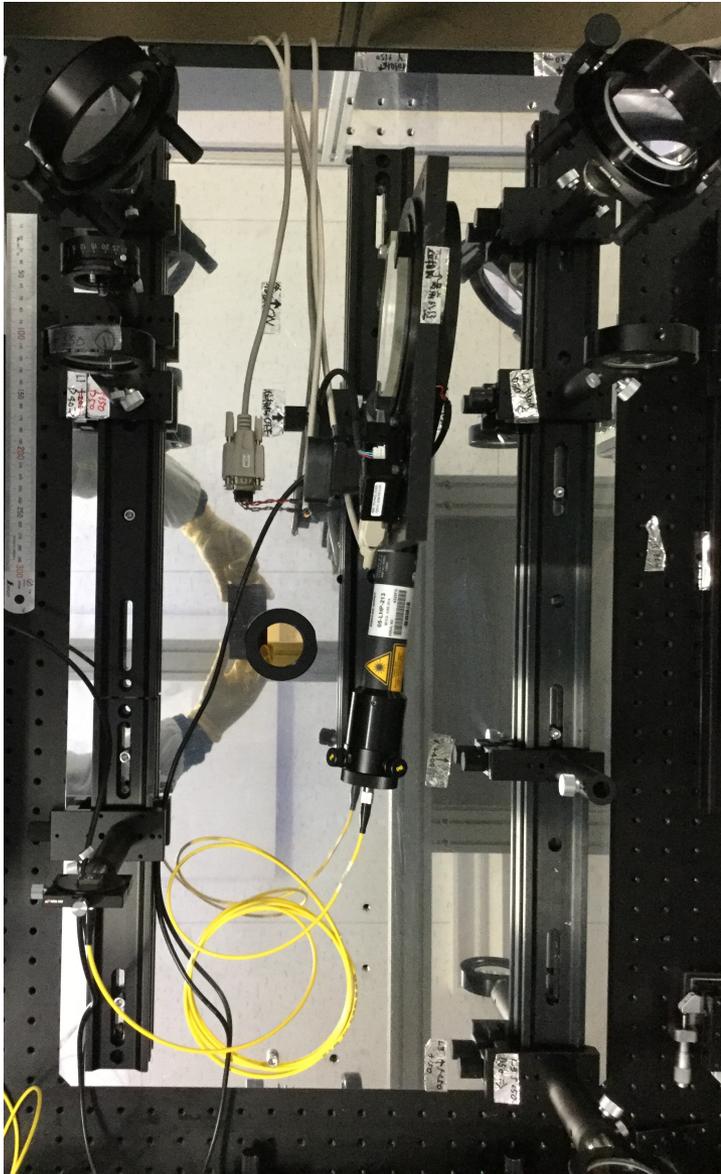


# 実験用光源の調整

試験光源系

- ◆ 光源全体をひとつのユニットに
- ◆ 非点収差が大→レンズの設置角度を  $\pm 0.5$  度以内

– 波面精度 PV:  $0.16\lambda$ , rms:  $0.04\lambda$  → SR=0.92  
レンズの角度確認



レンズの背後に  
平面鏡設置



光源(ファイバー)  
高さ, 角度ズレ



高さ, 角度  
100um, 1分角  
で調整完了

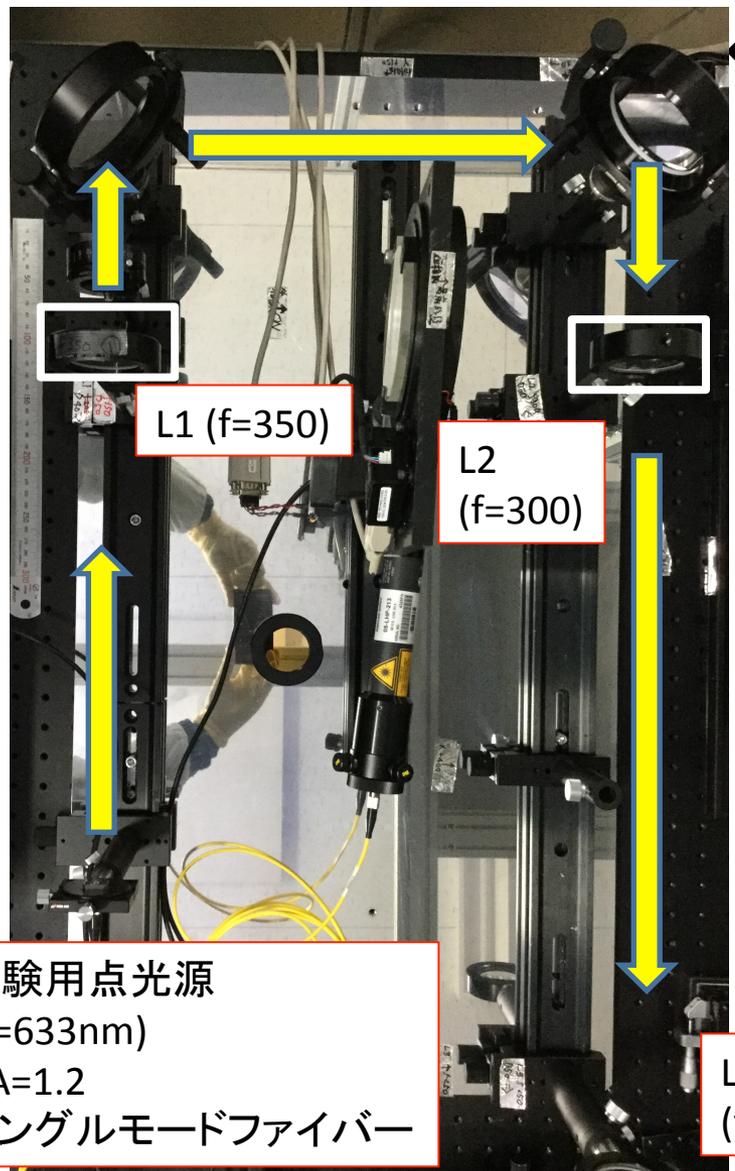
SR	位相板	前回	今回
リファレンス	—	0.5	0.8
試験光源	なし	0.3	0.8
	あり	0.004	0.003

# 実験用光源の調整

試験光源系

- ◆ 光源全体をひとつのユニットに
- ◆ 非点収差が大→レンズの設置角度を  $\pm 0.5$  度以内

— 波面精度 PV:  $0.16\lambda$ , rms:  $0.04\lambda$  → SR=0.92  
 レンズの角度確認

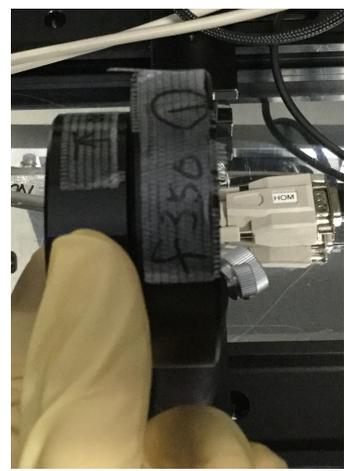


L1 (f=350)

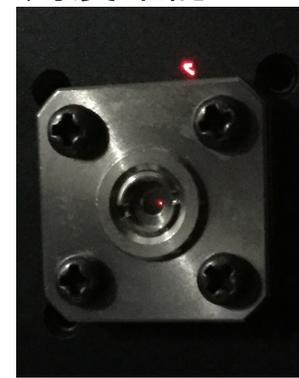
L2 (f=300)

L3 (f=250)

試験用点光源  
 $(\lambda=633\text{nm})$   
 NA=1.2  
 シングルモードファイバー



レンズの背後に平面鏡設置



光源(ファイバー)高さ, 角度ズレ

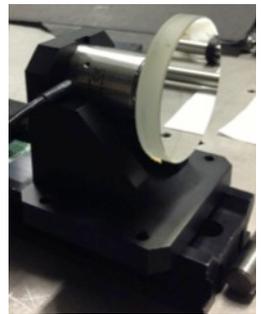


高さ, 角度 100um, 1分角で調整完了

SR	位相板	前回	今回
リファレンス	—	0.5	0.8
試験光源	なし	0.3	0.8
	あり	0.004	0.003

# ExAOノード

## T/Tパート



望遠鏡焦点

T-T Viewer

T/T鏡

Unit 1: OAP1 (完了)

Unit 2: OAP2

Unit 3: OAP3

低次DM

Unit 4: OAP4

## Woofersパート

高次DM

Unit 5: OAP5

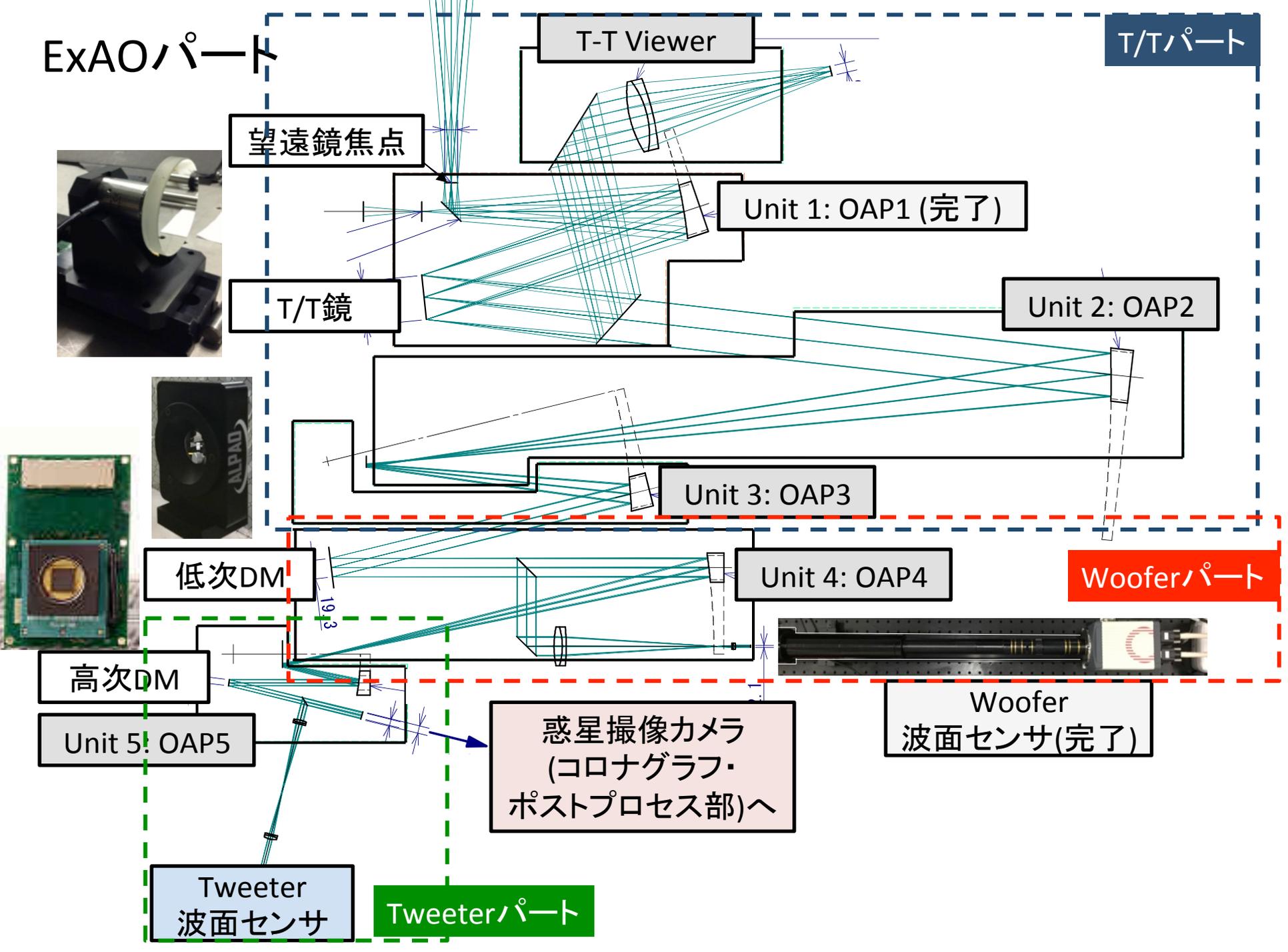
惑星撮像カメラ  
(コロナグラフ・  
ポストプロセス部)へ



Woofer  
波面センサ(完了)

Tweeter  
波面センサ

## Tweeterパート



# AO設計: Woofer AO

◆ダイクロイックミラーでのゴースト+色収差

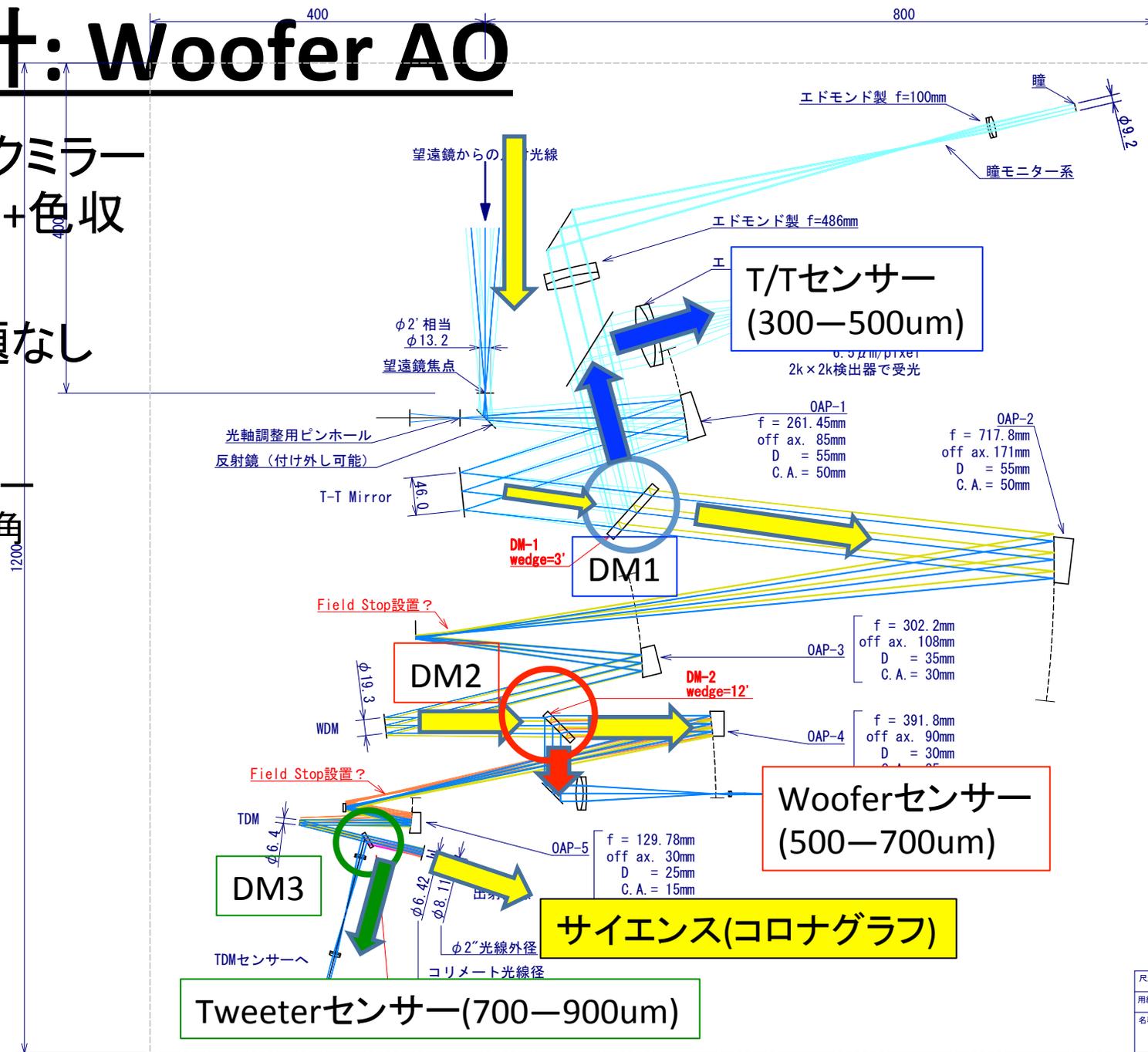
→WFSでは問題なし

ダイクロイックミラーのウェッジ角

DM1: 3分角

DM2: 12分角

DM3: 18.9分角



Tweeterセンサー(700—900um)

サイエンス(コロナグラフ)

Wooferセンサー(500—700um)

DM2

DM1

DM3

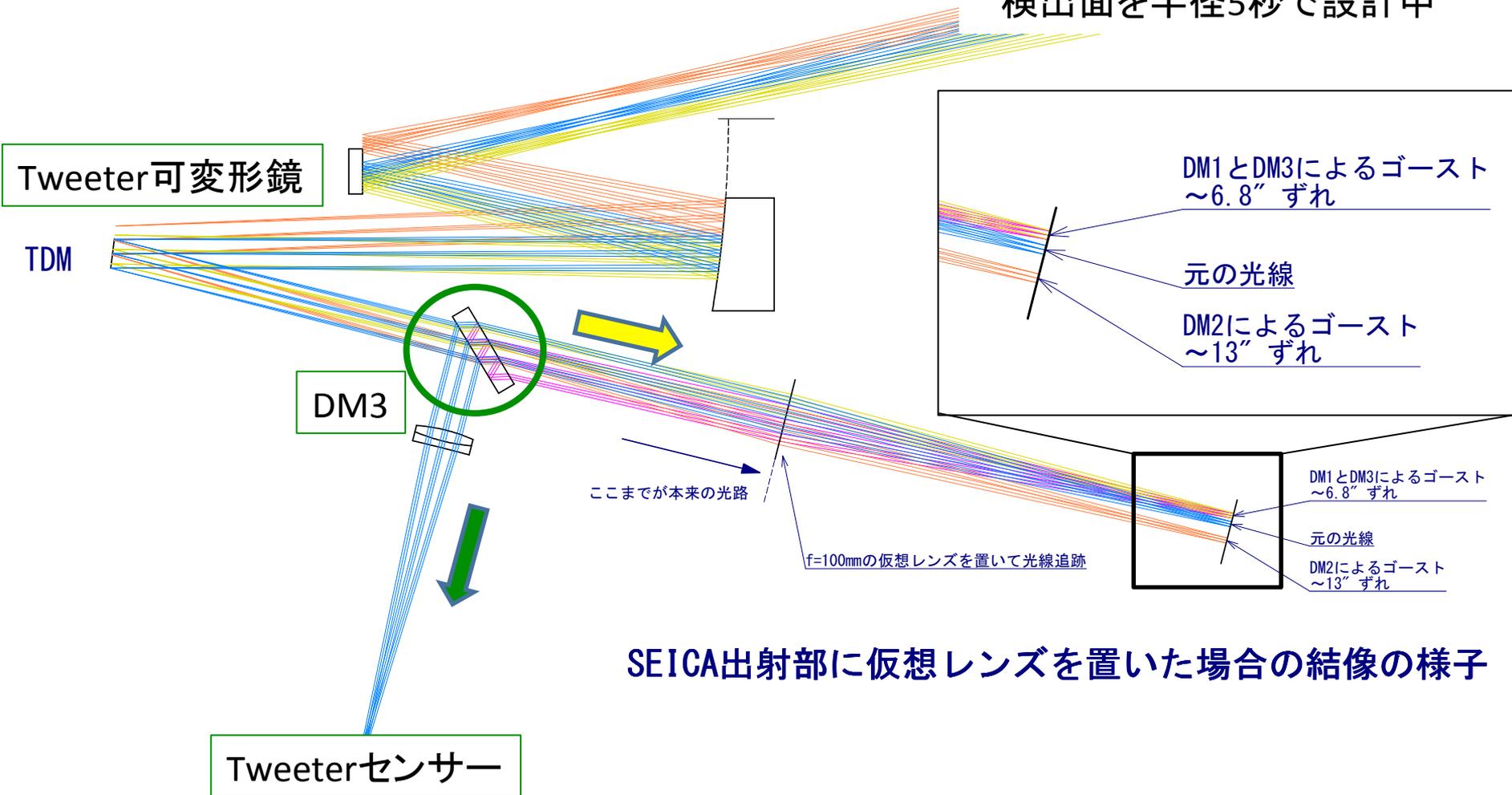
T/Tセンサー(300—500um)

# AO設計:ゴースト像

## ・ゴースト像

SEICA出射部付近の拡大図

ゴースト像は結像面で  
6".8, 13"ずれる位置へ  
→AOの視野は半径2秒、  
検出面を半径5秒で設計中



SEICA出射部に仮想レンズを置いた場合の結像の様子

# SEICA: 全体進捗: 今回

- ExAO: Woofer AOの開発進行
  - 実験環境再整備: 岡山上空(フリード長10cm, 風速10m/s)
  - AO実験  $SR=0.03-0.05$ 程度が何処まで改善するか(@633nm)
  - 実機設計開始: ABCとの協同で。 近赤外では $SR\sim 0.1$ 程度
  - NINS, 天文台へTweeter用予算
- コロナグラフ: SPLINE
  - プリズム/サバール板  
確保・原理実証済
  - 実機製作開始: 設計中
- 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
- 温度管理範囲
  - コロナグラフで温度測定、管理の試験

