

# 系外惑星撮像観測のための 極限補償光学開発I: 光学系の設計

山本広大(京都大学)

SEICA開発チーム

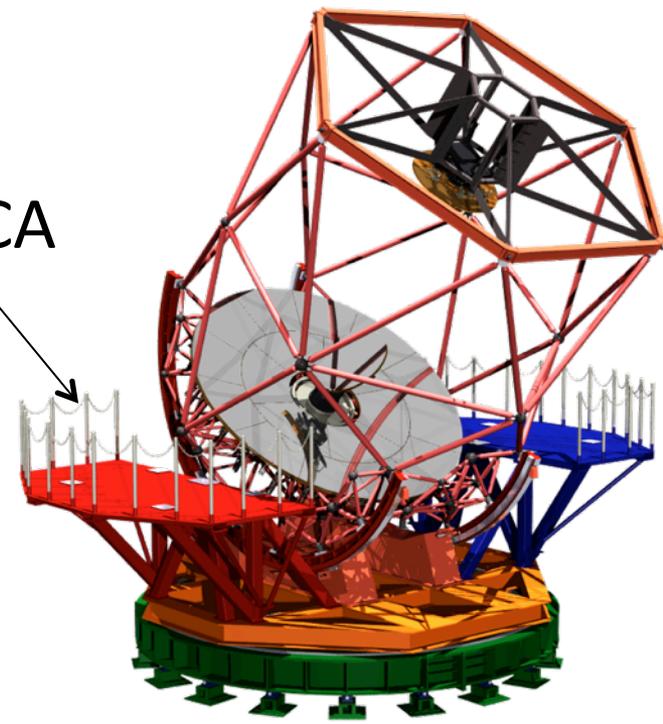
京大岡山3.8m望遠鏡架台

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

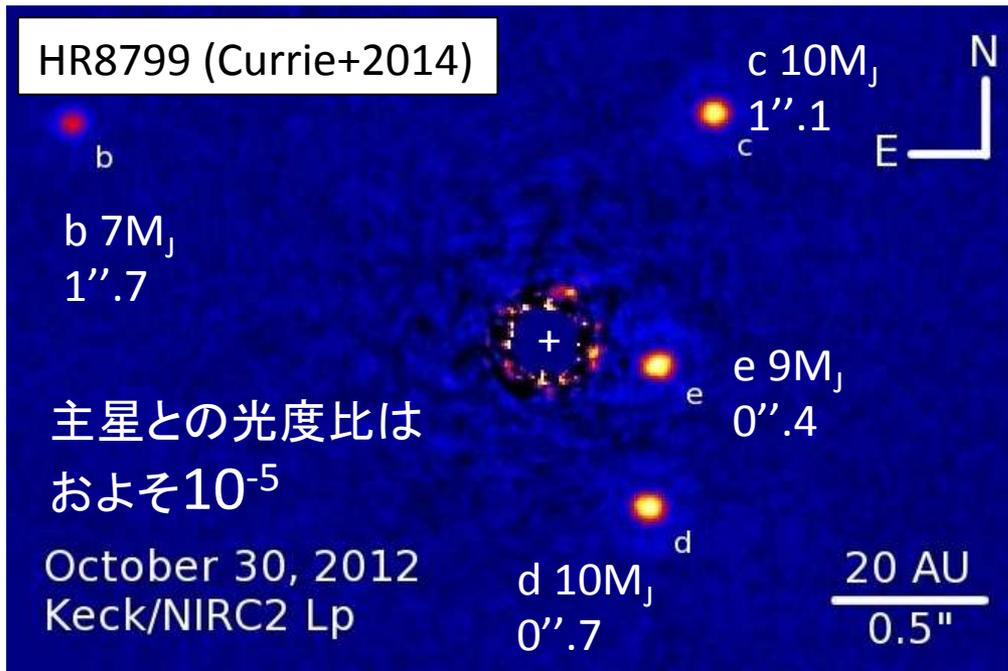
内容

- ◆ SEICAの意義・目的
- ◆ SEICA光学系設計
- ◆ SEICA実機製作
- ◆ SEICAスケジュール

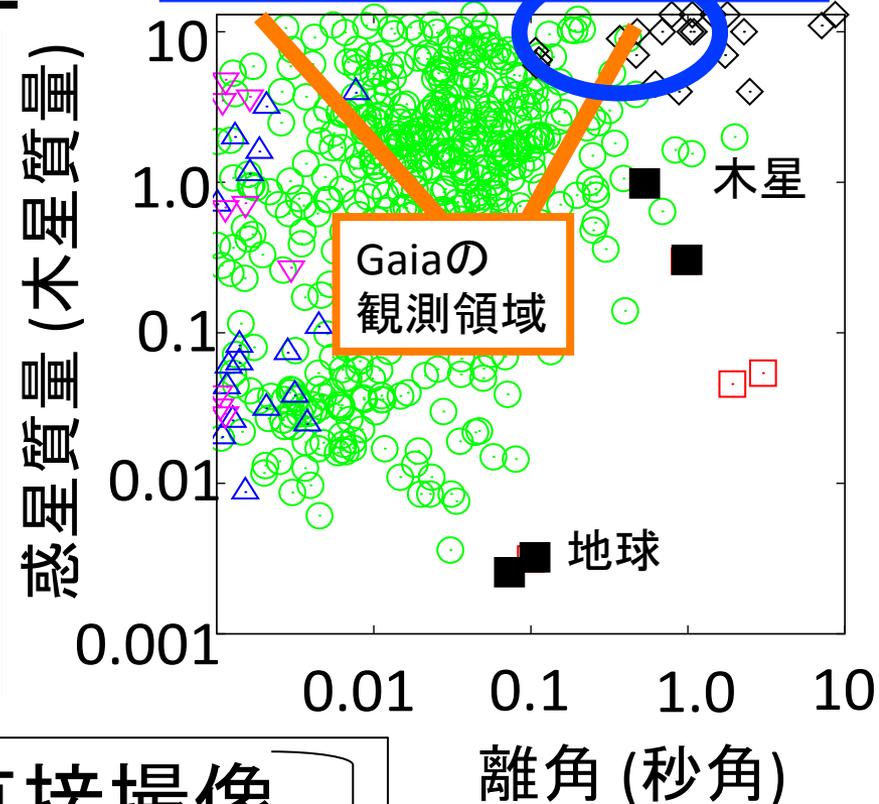
SEICA



# 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

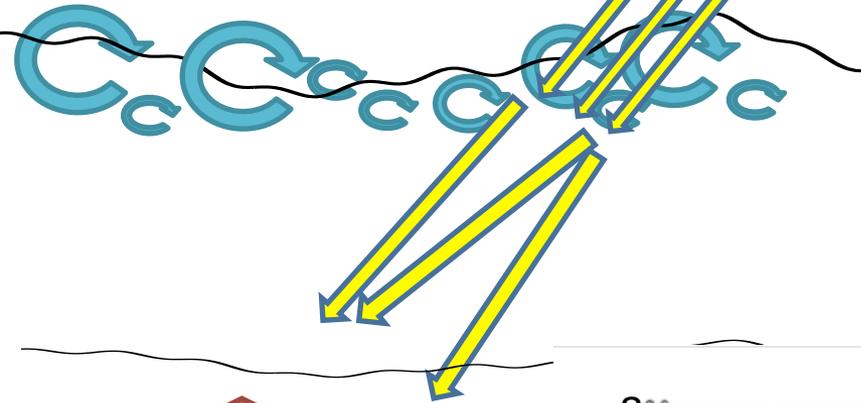
# 地上から直接撮像観測する流れ

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)

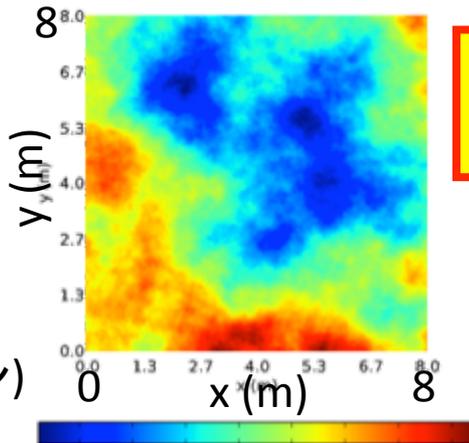


地上



望遠鏡

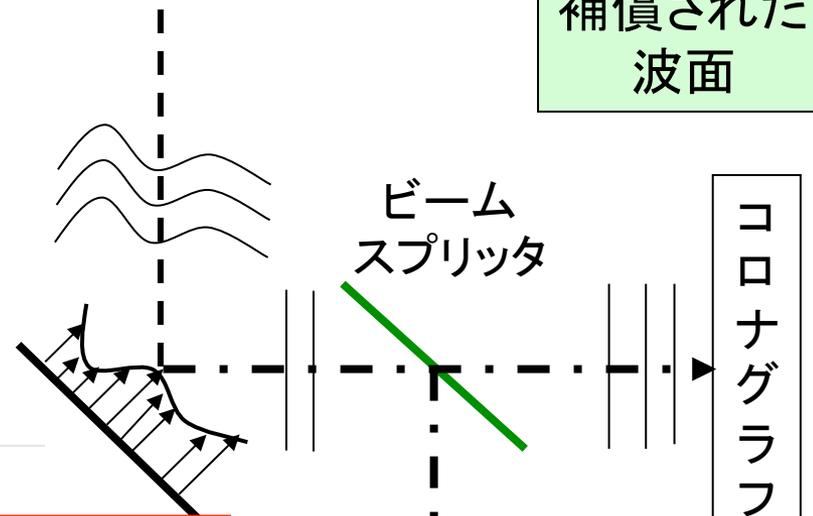
望遠鏡主鏡面での  
位相ムラ(シミュレーション)



(奥)  $-6.4\lambda$      $0.0\lambda$      $+6.4\lambda$  (手前)

大気乱流で  
乱れた波面

補償された  
波面



ビーム  
スプリッタ

コロナ  
グラフ  
光学系等

1. DM  
可変形鏡

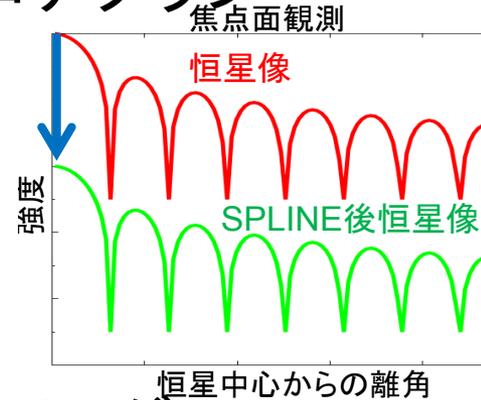
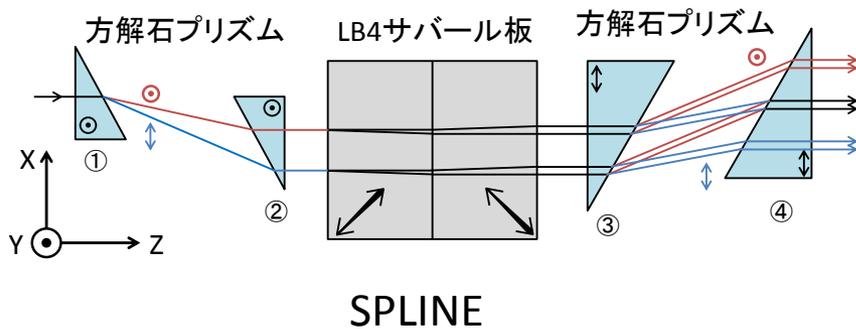
2. WFS  
波面センサ

3. 計算システム

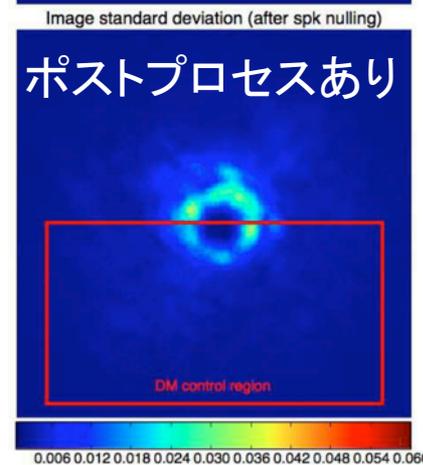
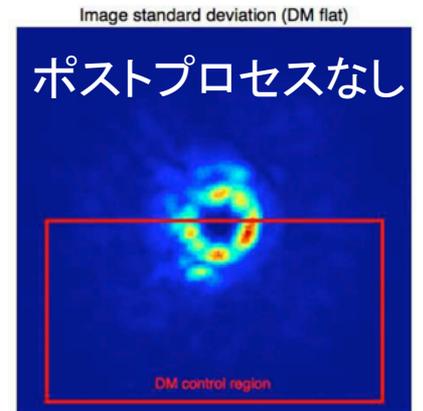
# SEICAの光学設計:AOの要求仕様

◆コロナグラフ+ポストプロセスで $10^5-6$ のコントラスト

◆コロナグラフ: SPLINE (Savart-Plate Lateral-shearing Interferometric Nuller for Exoplanets) 瞳面干渉型コロナグラフ



◆ポストプロセス: スペックルナリング



◆コロナグラフからの要求

◆星像安定性:  $<10\text{mas}$

◆Strehl比:  $>0.9$

→波面残差  $\lambda/20$

~60nm (rms; @Jバンド)

# SEICAの光学設計: AO系パラメータ

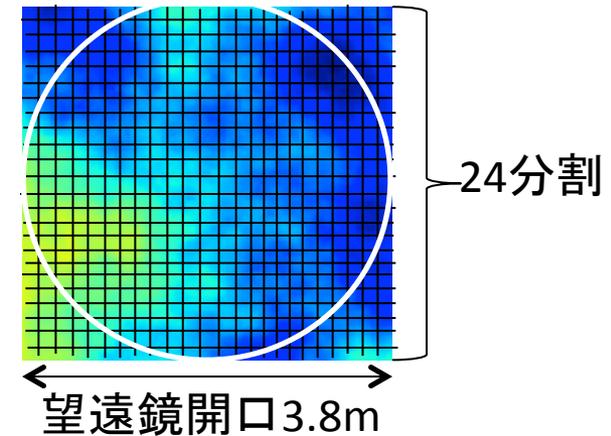
## ◆制御点数:

– 岡山でのフリードパラメータ $r_0 \approx 15\text{cm}$  (@800nm)

–  $3.8\text{m}/15\text{cm} = 25$ 分割

→ DM分割数: 1次元 **24分割**

計 **492素子**



## ◆制御速度:

◆ 24素子で風速10m/sならば0.016秒で隣の素子に移動。

◆ 1/10素子分の移動に押さえるためには1.6msecの制御

→  $1.6/10\text{msec} =$ **6kHz以上**での制御ループ

SEICA-ExAO: **10mas**の安定性、 **$\lambda/20$** の高精度

**5—10kHz**の高頻度、**24素子**の高空間周波数

# SEICAの光学設計:DM選定

3段階で4つの条件を満たす補正

## 1) 位置安定性: TipTiltミラー系

~10mas, 100Hz

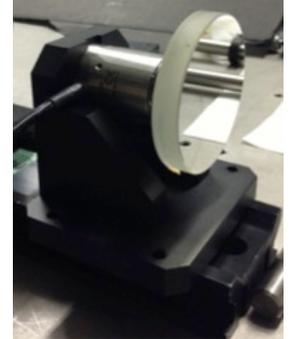
T/T補正後の波面残差は~2um(rms)

## 2) 低時間・空間周波数補償: Woofer系

8素子(88素子), 1kHz,  
ストローク11.3um

## 3) 高時間・空間周波数補償: Tweeter系

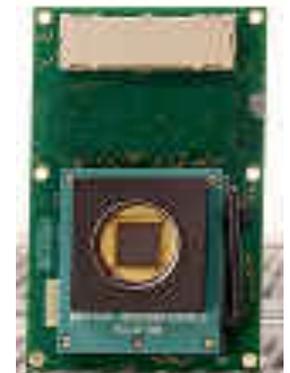
24素子(492素子), 8.5kHz,  
ストローク1.5um



T/Tミラー



Woofer DM  
φ20mm, 88素子



Tweeter DM  
φ6.4mm, 492素子

# SEICAの光学系設計:概観

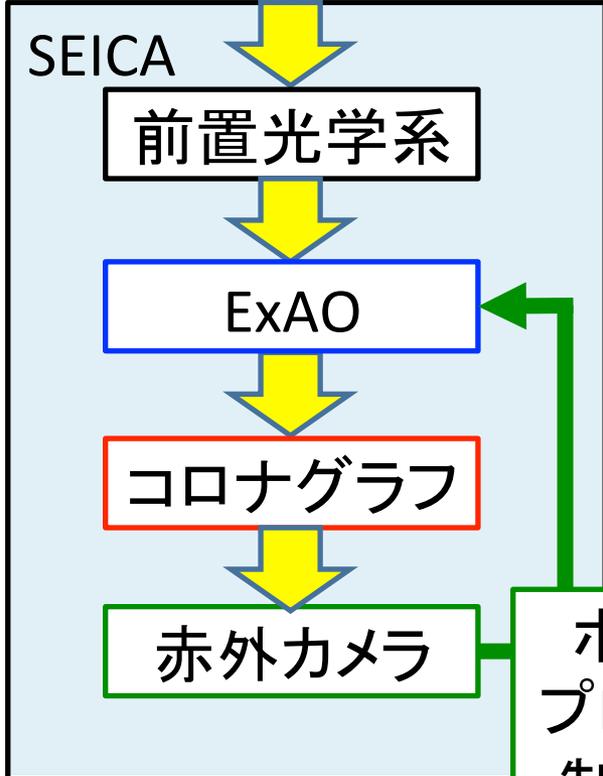
天体から



地球大気



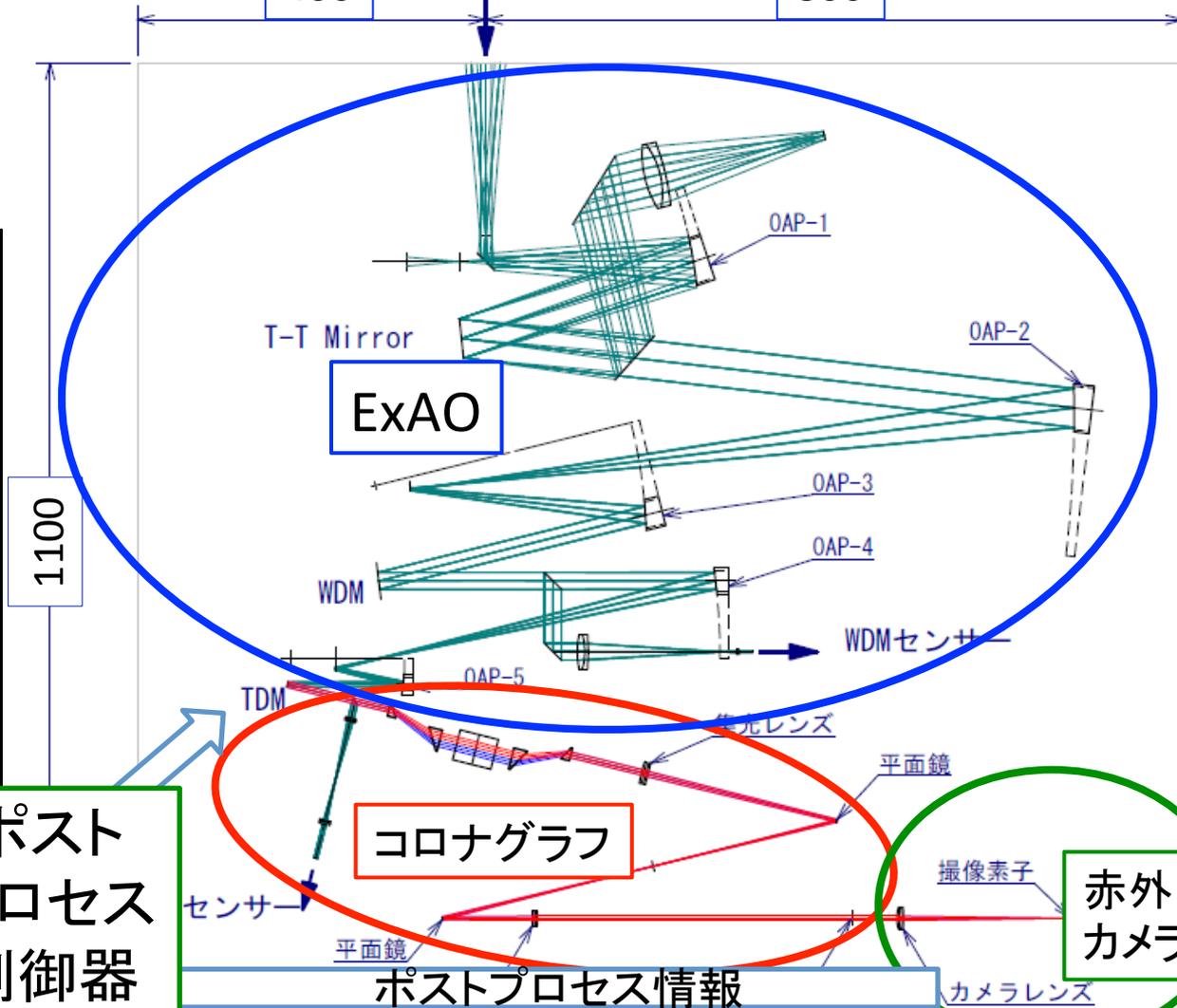
望遠鏡 (主-第三鏡)



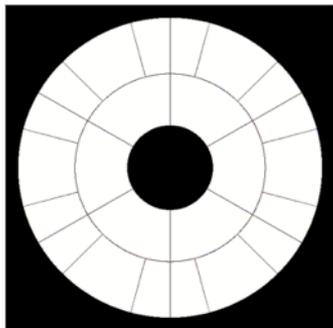
望遠鏡→前置光学系からの入射光線

400

800



# SEICA光学図

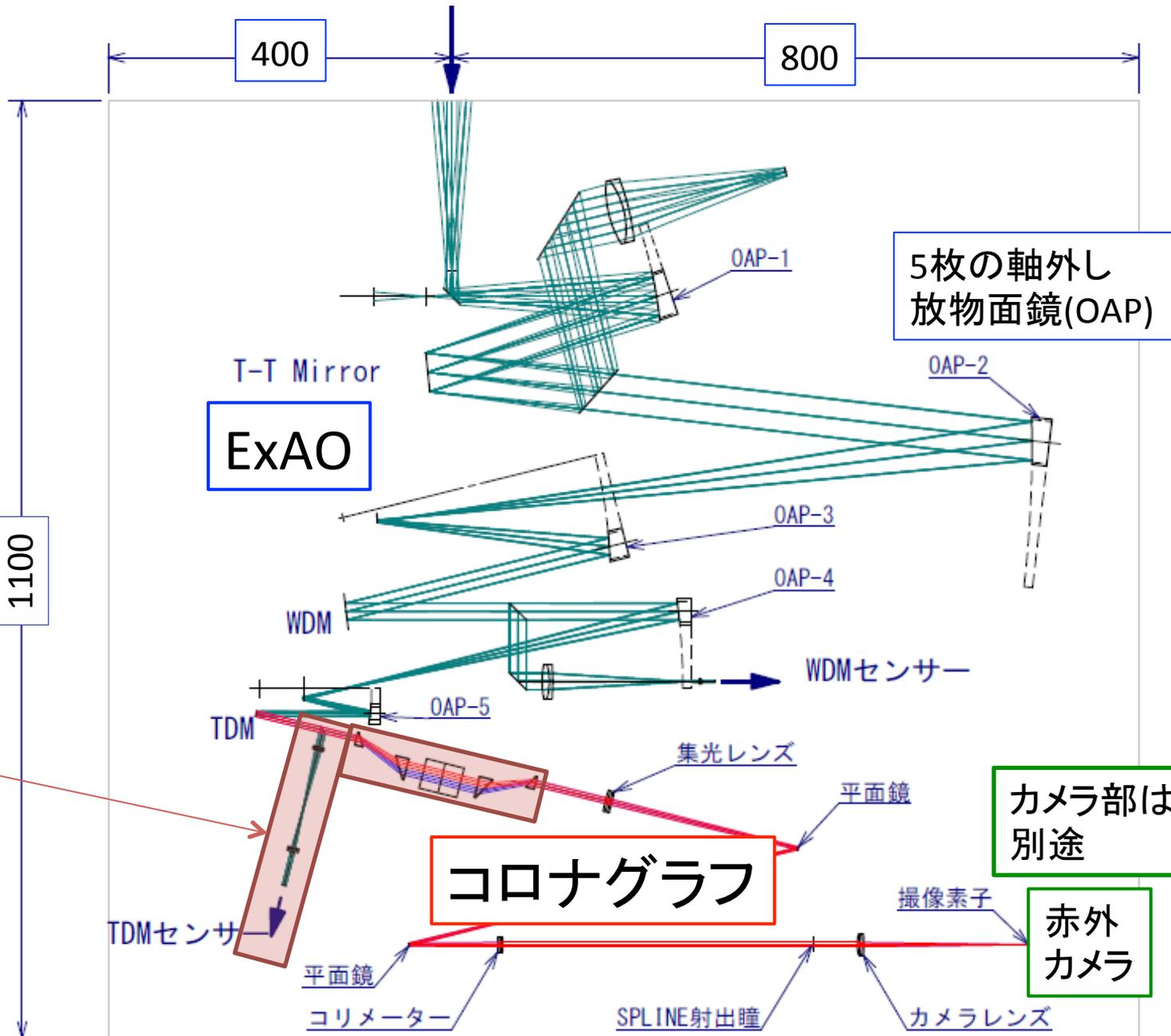


望遠鏡瞳形状

光学系全体は  
 $20^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ で

恒温部分  
(中心 $20^{\circ}\text{C}$ ,  
 $0.1^{\circ}\text{C}$ :p-v)

望遠鏡→前置光学系からの入射光線



ExAO

5枚の軸外し  
放物面鏡(OAP)

コロナグラフ

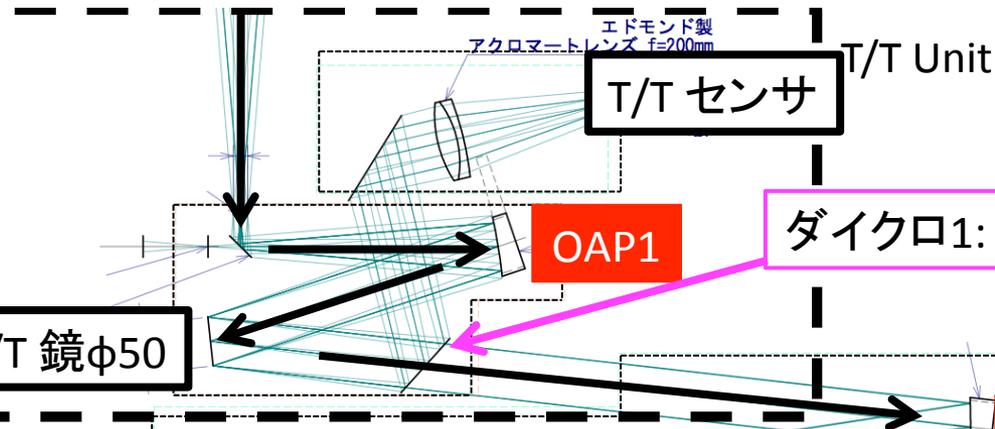
カメラ部は  
別途

赤外  
カメラ

# SEICA補償光学部

高精度:  $\lambda/20$ ,  
高周波: 5-10kHz  
高空間周波数:  
差し渡し24素子

望遠鏡から



T/T センサ

T/T Unit

エドモンド製  
アクロマートレンズ f=200mm

OAP1

ダイクロ1: R/T 500nm

T/T 鏡φ50

OAP2

ダイクロ2: R/T 700nm

OAP3

Woofer Unit

WDM(φ20)  
1辺 8素子(pv: $\lambda/4$ )

OAP4

Woofer部  
Strehl ratio  $\sim 30\%$

WooferWFS  
SHWFS+CPU

TDM(φ6.5)  
1辺24素子(pv: $\lambda/20$ )

OAP5

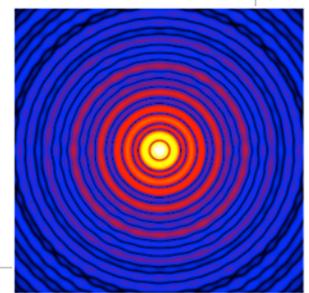
f = 129.78mm  
off ax. 30mm  
D = 25mm  
C. A. = 15mm

コロナグラフ・  
分光装置へ

FPGA計算  
5-10kHz

TweeterWFS  
位相計測センサ

ダイクロ3: R/T 900nm



補償光学後の星像(SR=90)

Tweeter部  
Strehl ratio 90-95%

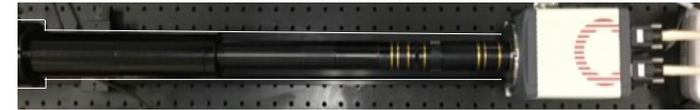
理論的原理実証  
Imada+2015, Yamamoto+2015

# SEICAの光学設計: WFS

## ◆ Woofer: シャックハルトマンWFS

– 8x8 (52点), 1000fps

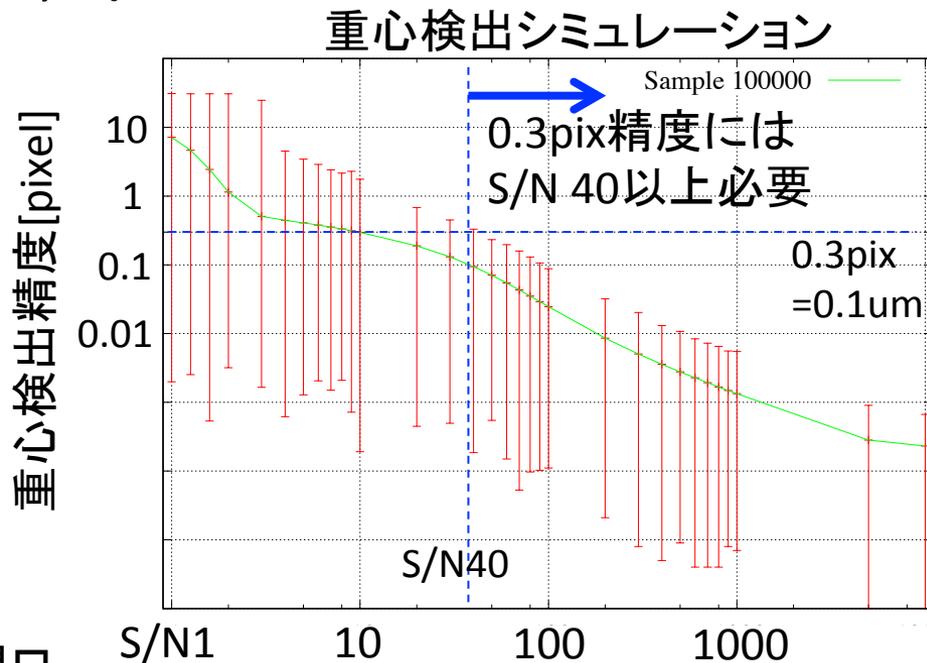
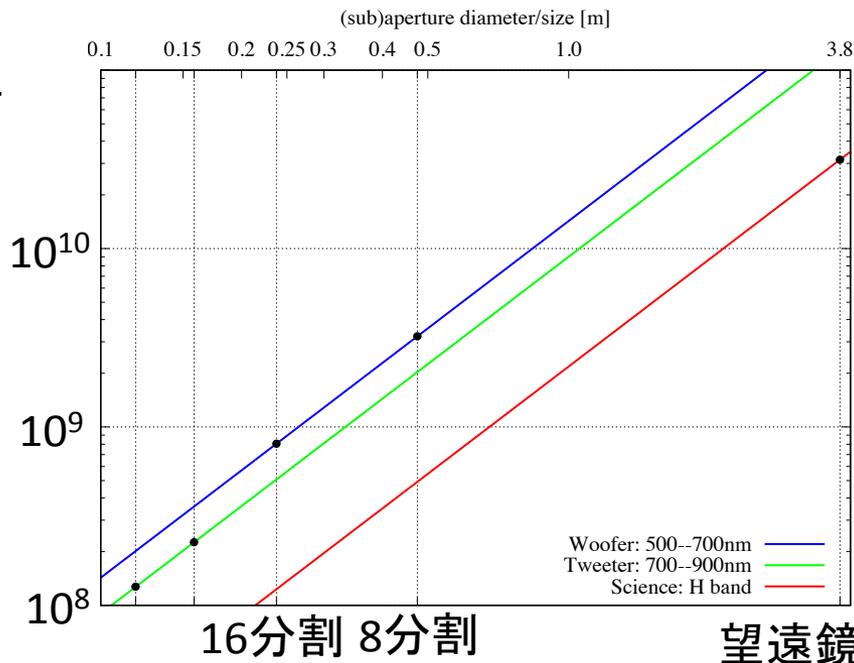
– 測定精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ , 測定限界7.5等@ 0.5–0.7 $\mu\text{m}$



## ◆ Tweeter: 点源回折干渉計WFS (位相計測)

– 24x24 (492点), 8500fps,  $\lambda/20$

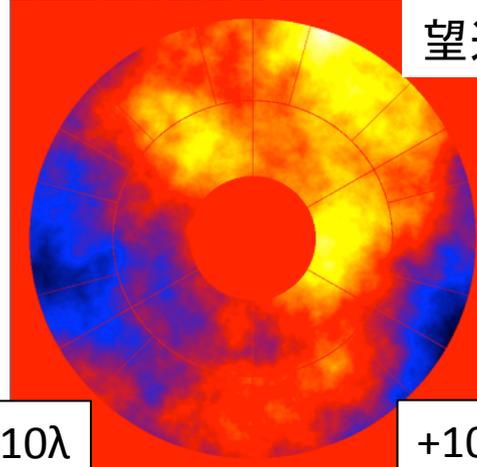
WFSのサブ開口毎の光子数/秒



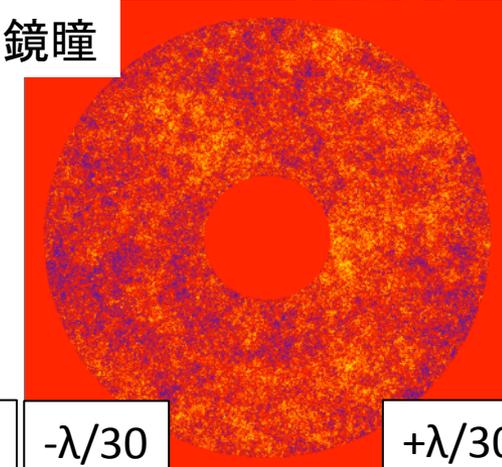
# SEICAの光学系設計: ExAO後コントラスト

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: 0.8um (Tweeter)  
 観測波長: 1.65um (Hバンド)  
 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



望遠鏡瞳

-10λ

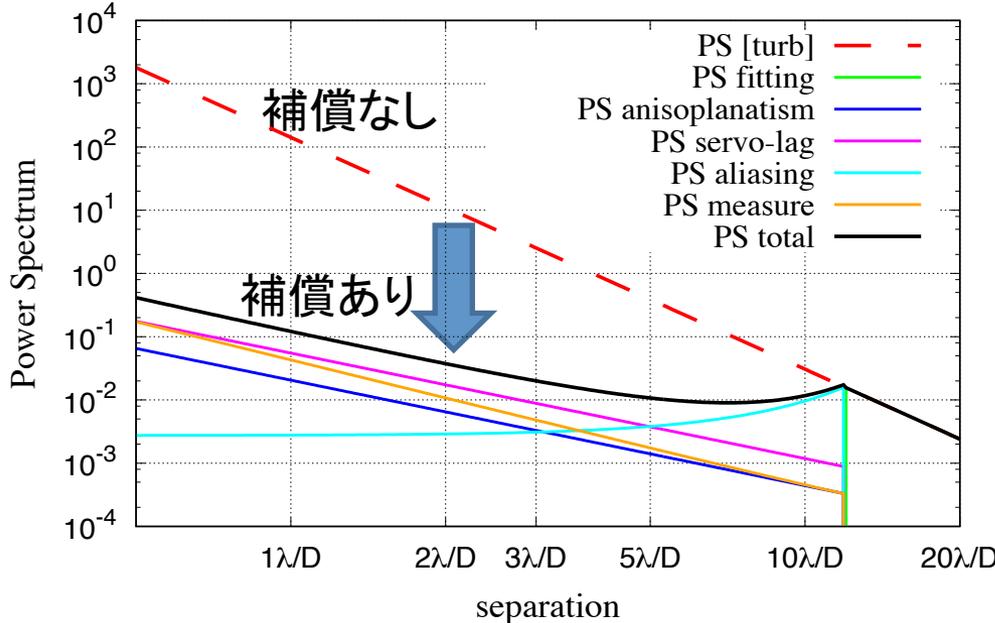
+10λ

-λ/30

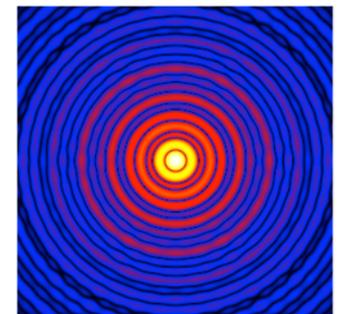
+λ/30

シミュレーション結果

大気乱流と補償後のパワースペクトル



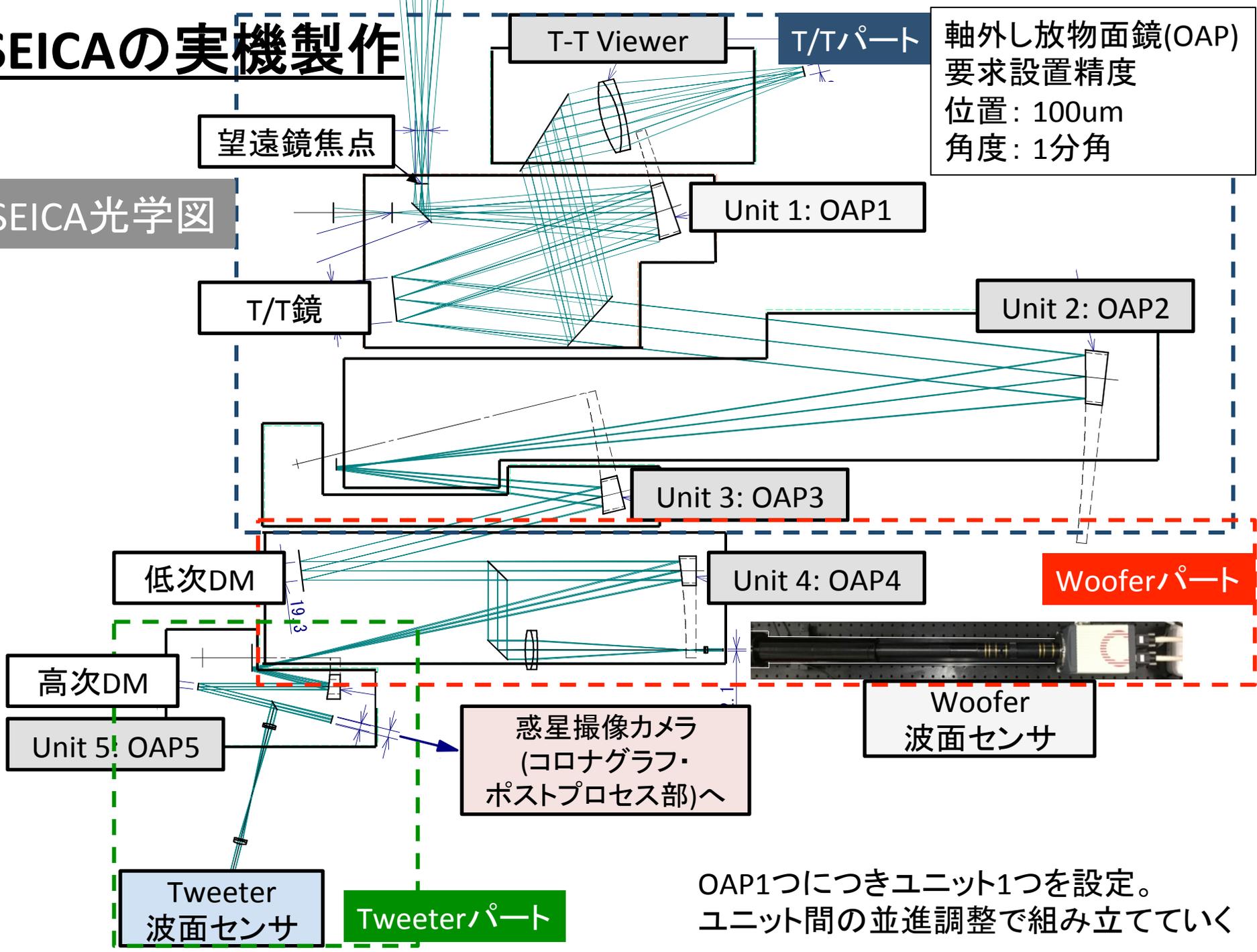
- ◆ : 補償なし
- ◆ : 補償後合計
- ◆ : フィッティング誤差
- ◆ : 大気分散誤差
- ◆ : 制御時間遅延誤差
- ◆ : エイリアシング誤差
- ◆ : 測定誤差



補償光学後の星像(SR=90)

# SEICAの実機製作

## SEICA光学図



軸外し放物面鏡(OAP)  
要求設置精度  
位置: 100um  
角度: 1分角

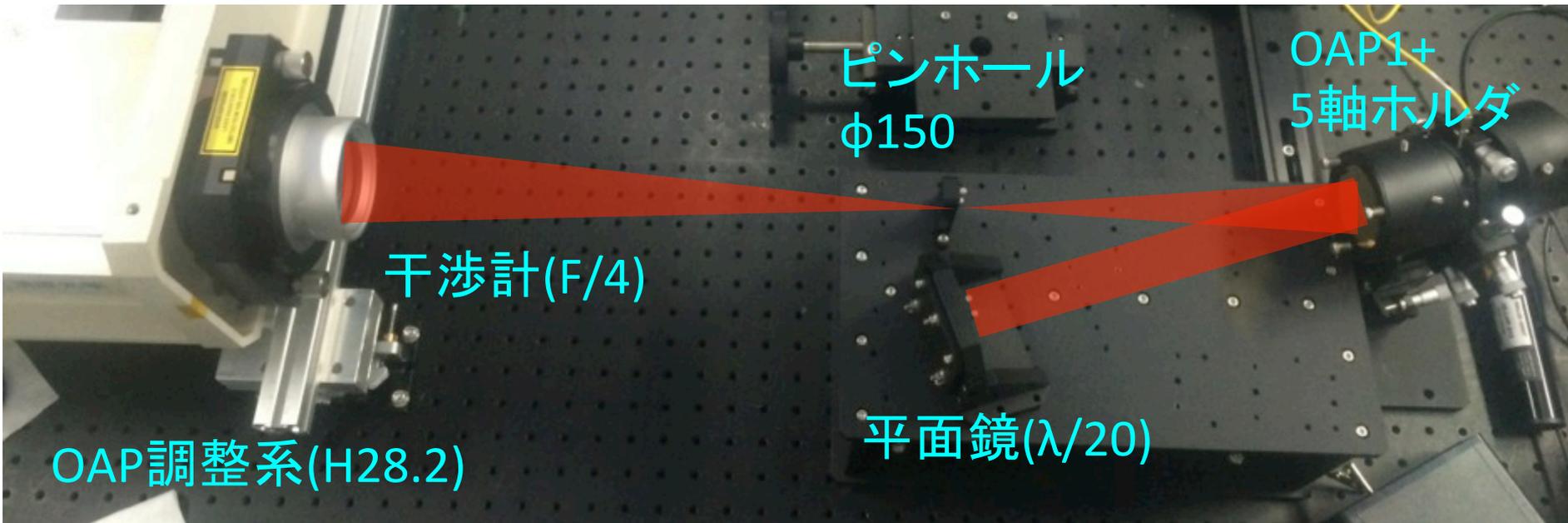
Woofers部分

Tweeter部分

OAP1つにつきユニット1つを設定。  
ユニット間の並進調整で組み立てていく

# SEICAの実機製作: OAP調整

- ◆OAPの5軸自由度をピンホールでX-Y平面の2自由度に
- 1. 干渉計の焦点とピンホールを一致させる( $\pm 75\mu\text{m}$ )
- 2. ピンホールから広がった光をOAPで平行光へ。
- 3. 機械精度で設置された平面鏡で折り返しOAP→ピンホールへ(2自由度の調整)
- 4. 干渉計でOAPの3自由度調整を行う

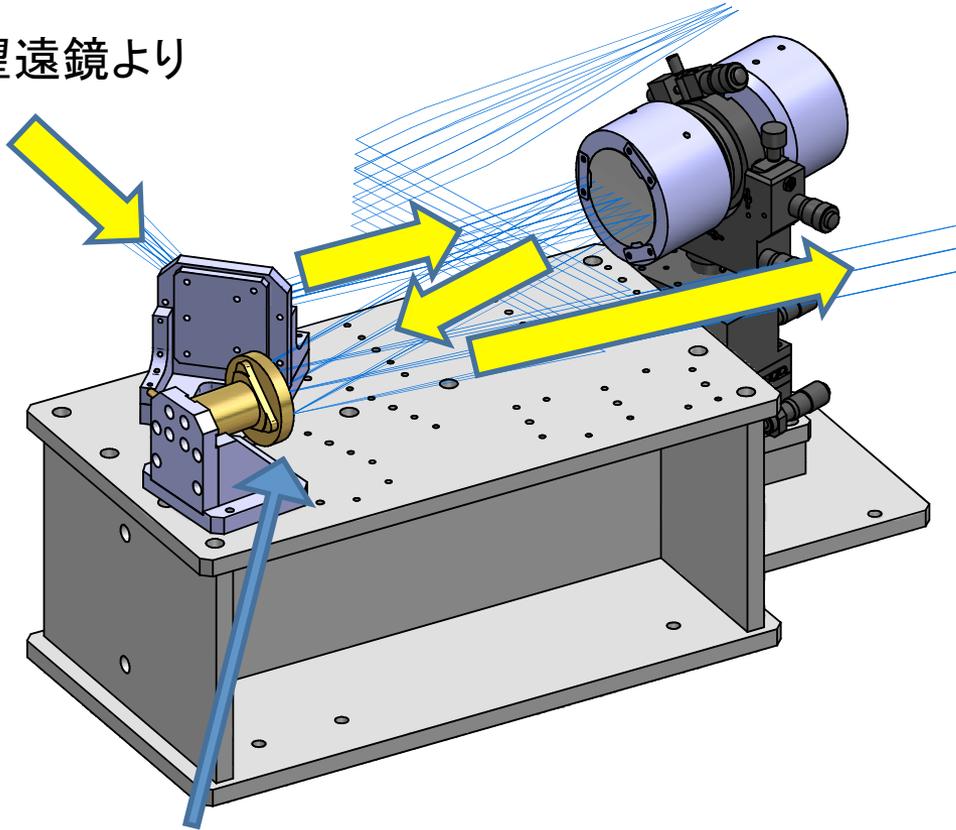


# SEICAの実機製作: 調整例) Unit1

ユニット1

OAPホルダ  
(X, Y, Z軸並進,  
2軸回転ステージ)

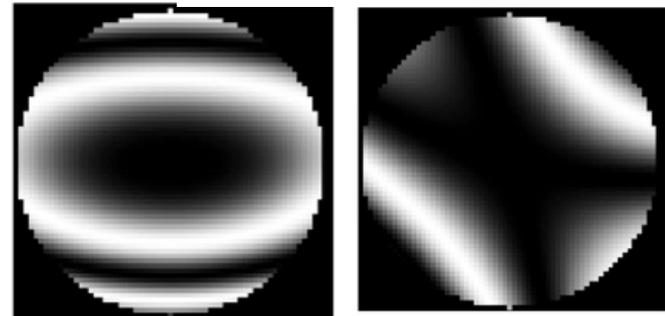
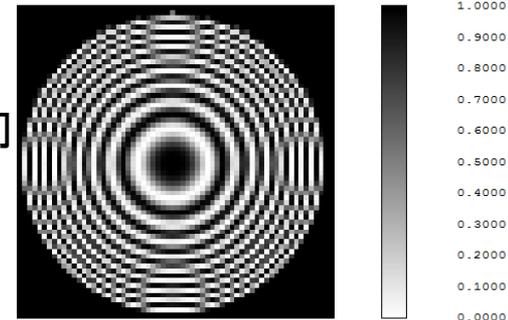
望遠鏡より



TTミラー

- ◆ 2自由度は光線がピンホールに戻る条件で拘束する
- ◆ 3自由度を干渉計の波面形状測定で拘束
  1. 波面形状を直交モードに分解
  2. 各モードの係数×変位量の行列を作成
  3. 逆行列を求めて調整量を推定

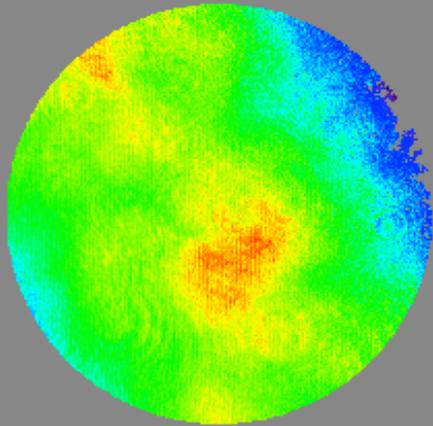
光軸方向  
自由度



垂直方向傾き 水平方向傾き

OAP3自由度測定 of 直交モード

# SEICAの実機製作: OAP調整結果



光源とピンホールの  
要求設置精度

x, y : 100  $\mu\text{m}$

z : 1 mm

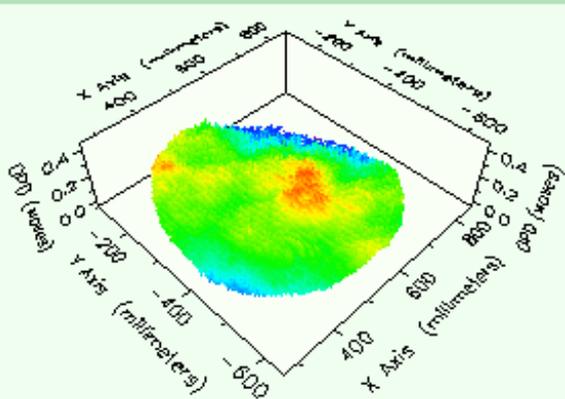
現在の設置精度

x, y : 75  $\mu\text{m}$

z : 0.1 mm

- ◆ 要求設置精度
  - ◆ 位置精度: 100 $\mu\text{m}$
  - ◆ 角度精度: 1分角
- 波面精度で0.3 $\mu\text{m}$

IntelliWave: OPD Map [3A1,M,TMD] (waves)  
FILE: INTELLIWAVE1.ESD



0.1 $\mu\text{m}$

- ◆ ユニット1の波面形状誤差
  - ❖ OAP1の位置調整精度
  - ❖ OAP1と平面鏡の鏡面精度
- 0.10 $\pm$ 0.02 $\mu\text{m}$  (PV)

要求を満たす設置調整完了

Range (PV) = 0.3085 waves, RMS = 0.0529 wa

0.0 $\mu\text{m}$

# SEICA: 開発グループ

## ◆ Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao

- 全体: 山本
  - 極限補償光学(ExAO)部: 木野, 森本(京大), 松尾(阪大), 入部, 中村(大阪電通大)
  - コロナグラフ部: 村上, 黒田(北大)
  - ポストプロセス部: 小谷(国立天文台), 河原(東大)
- 6拠点, 10名  
隔週程度のビデオミーティング

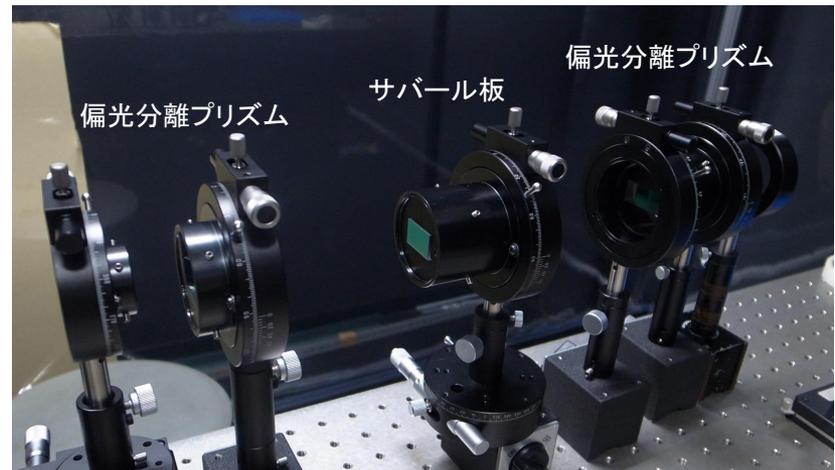
# SEICA: まとめ全体進捗

## ◆ ExAO: Woofer AOの開発進行

- 実験環境整備: 岡山上空(フリード長10cm, 風速10m/s)
- AO実験(入部さん発表) **SR=0.03—0.05程度(@633nm)**
- 実機設計開始: ABCとの協同で。 **近赤外ではSR~0.1程度**

## ◆ コロナグラフ: SPLINE

- [H27年度末まで]  
プリズム/サバール板  
確保・原理実証済
- [現在]実機製作開始



北大実験

## ◆ 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

## ◆ カメラ選定開始: J, Hバンド、100fps(ポストプロセス用)