

# 極限補償光学の進捗

山本広大,

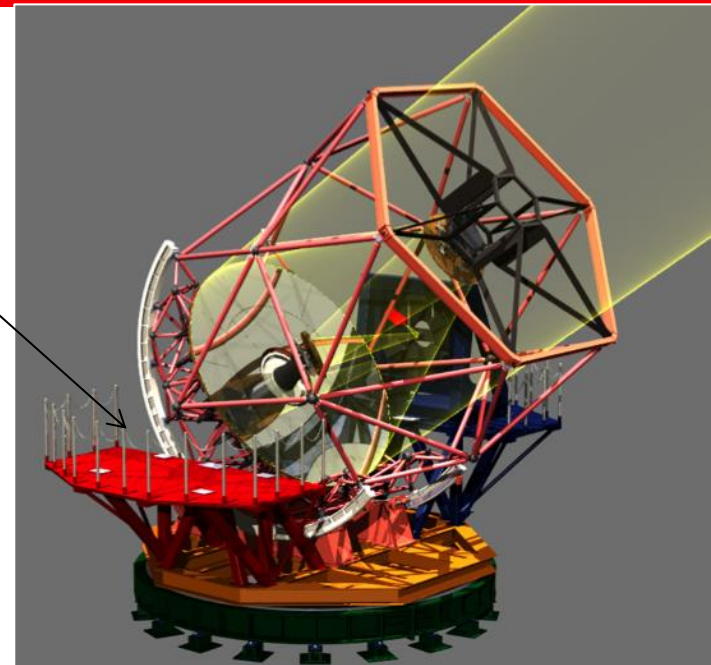
木野勝, 西岡秀樹, 津久井遼(京都大学)

入部正継, 藤田勝(大阪電気通信大学)

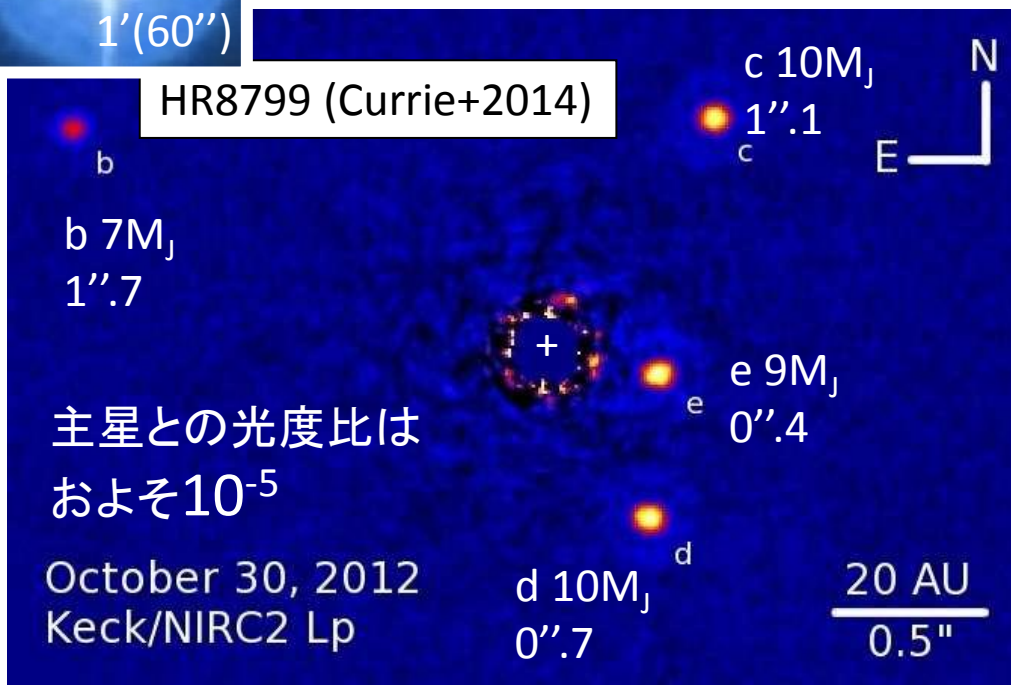
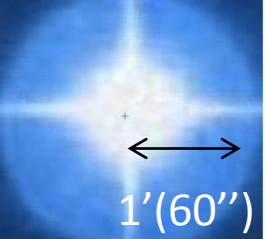
惑星撮像装置SEICA[Second-generation  
Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao]

SEICA

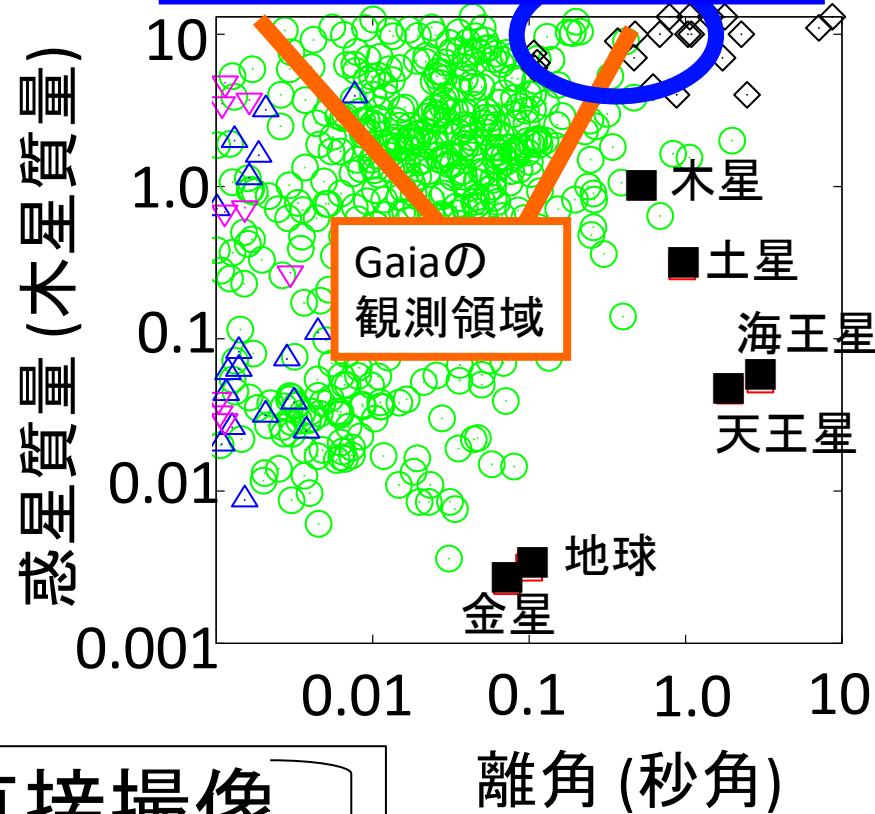
京大岡山3.8m  
せいめい望遠鏡架台



# SEICA: 意義・目標



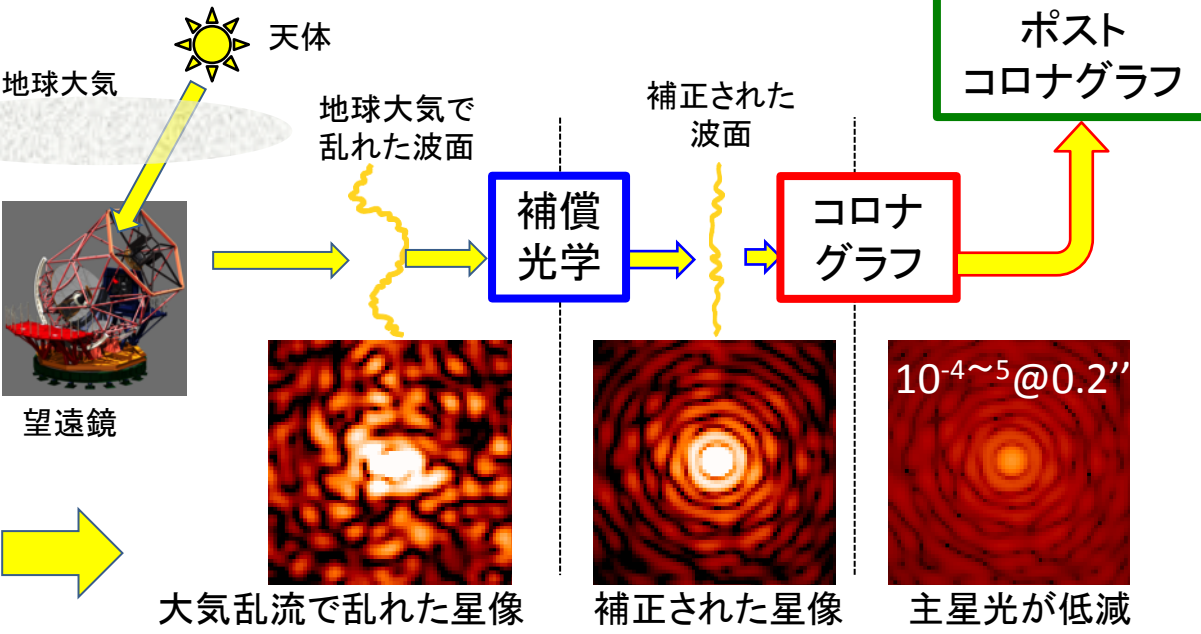
他観測で発見済の惑星を観測  
→キャラクターゼーション



- ◆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/SCEExAO [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**

# SEICA: 全体進捗: 前回

## ◆ ExAO: 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: 制御実験(@633nm)
- 実機設計: 設計中 (ABCプロジェクト経費) 近赤外ではSR~0.1程度
- Tweeter制御装置: 設計開始(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

## ◆ 温度管理範囲

- コロナグラフで温度測定、管理の試験

# 予算状況

## ◆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

## ◆獲得

- 基盤A(代表長田): 5年(開発4年観測1年)3300万

## ◆応募中

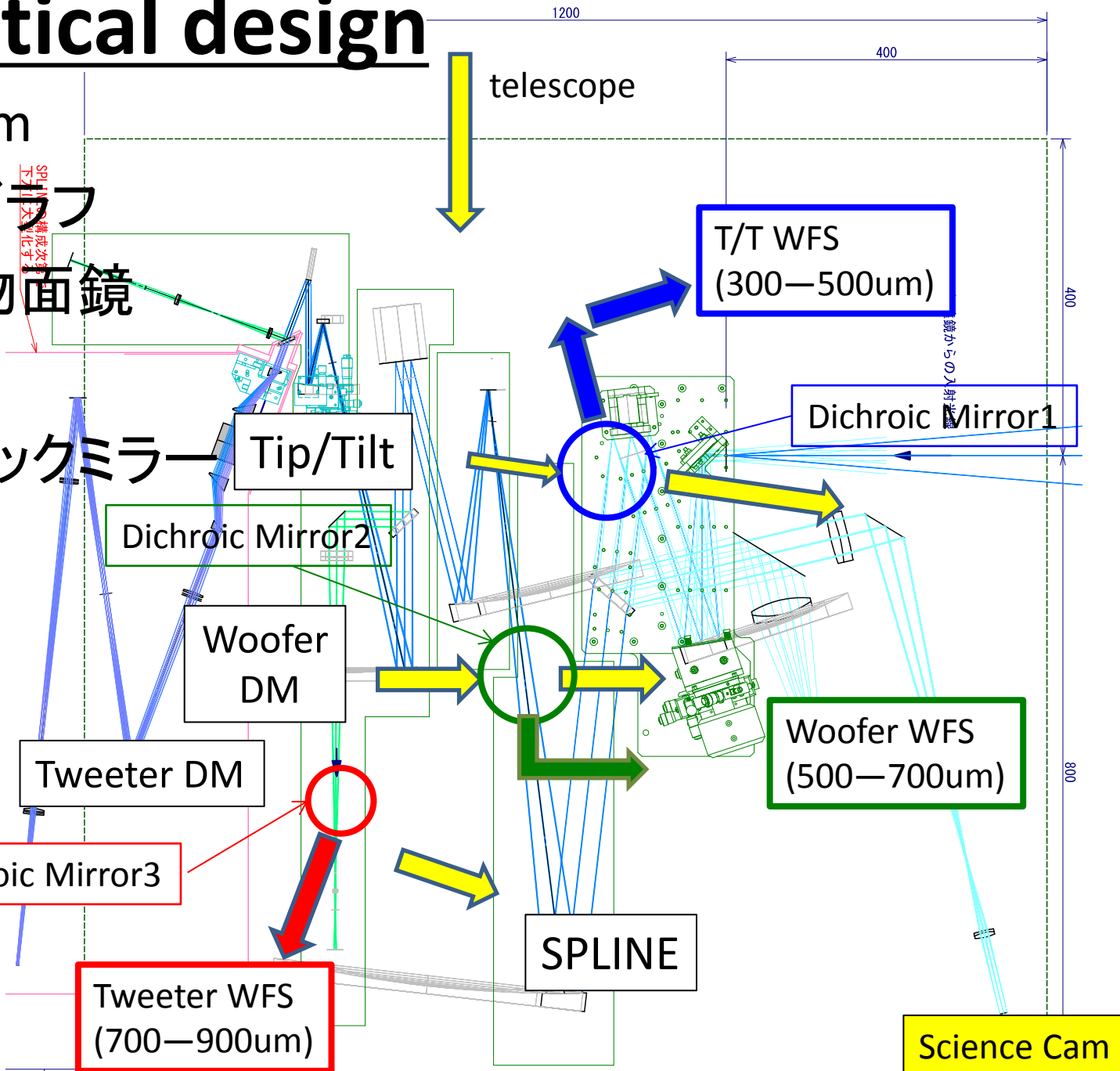
→ヒアリングへ！！！！

- 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  
+FPGA制御開発

# SEICA: optical design

- ◆ 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

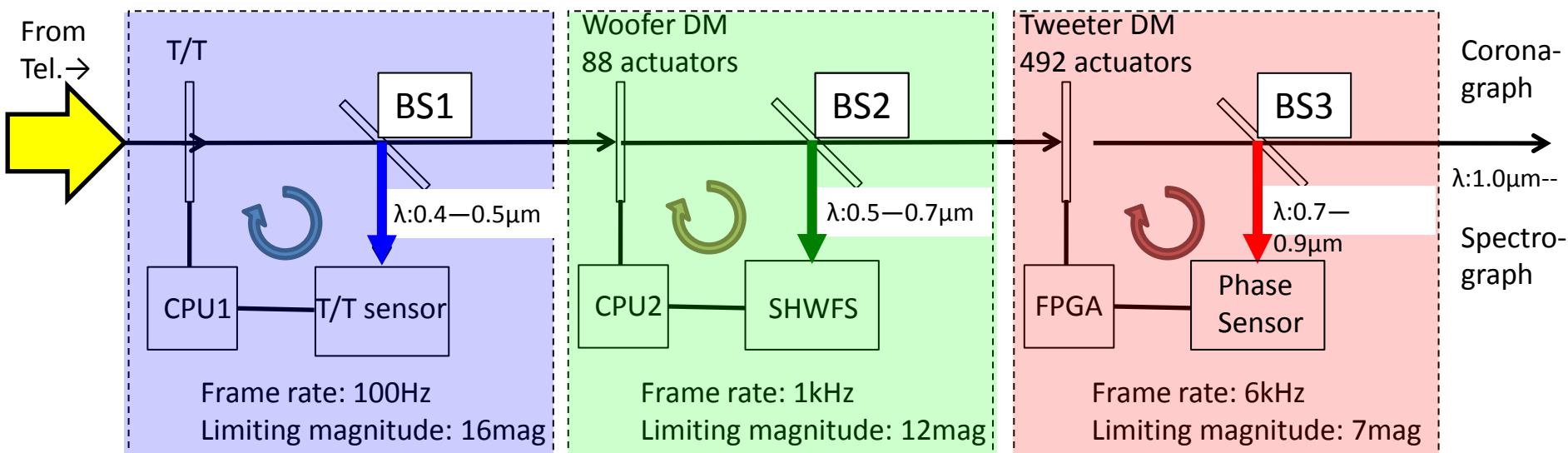


Science Cam



# SEICA: 極限補償光学

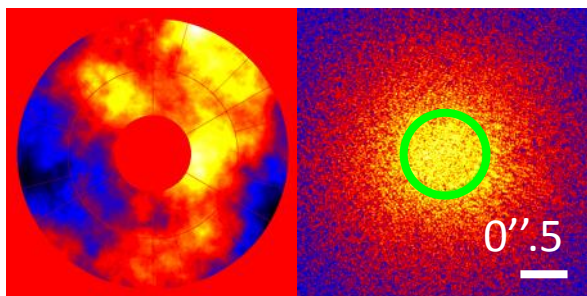
◆要求仕様: 精度:  $\lambda/20$ , 速度: 5—10kHz, 測定点: 492 elements



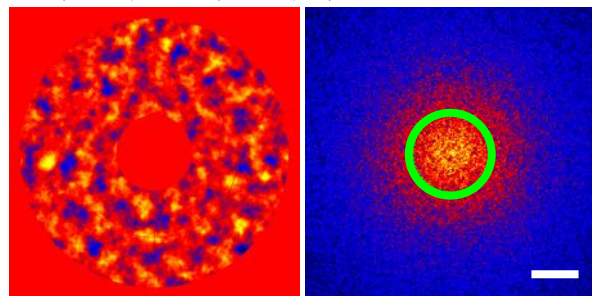
**Tip/Tilt:** 10mas pointing

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

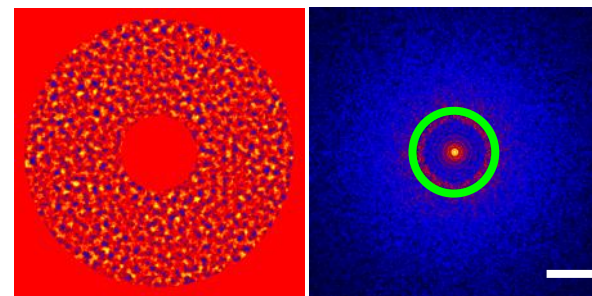
**Tweeter:** 高速 [6.5kHz]  
高精度 [ $\lambda/20$ ]  
高空間周波数:  $24^2$



No AO



after Woofer AO



after Tweeter AO

Strehl ratio 0.02

0.3

0.9

# 本日の報告

## ◆ Woofer AO

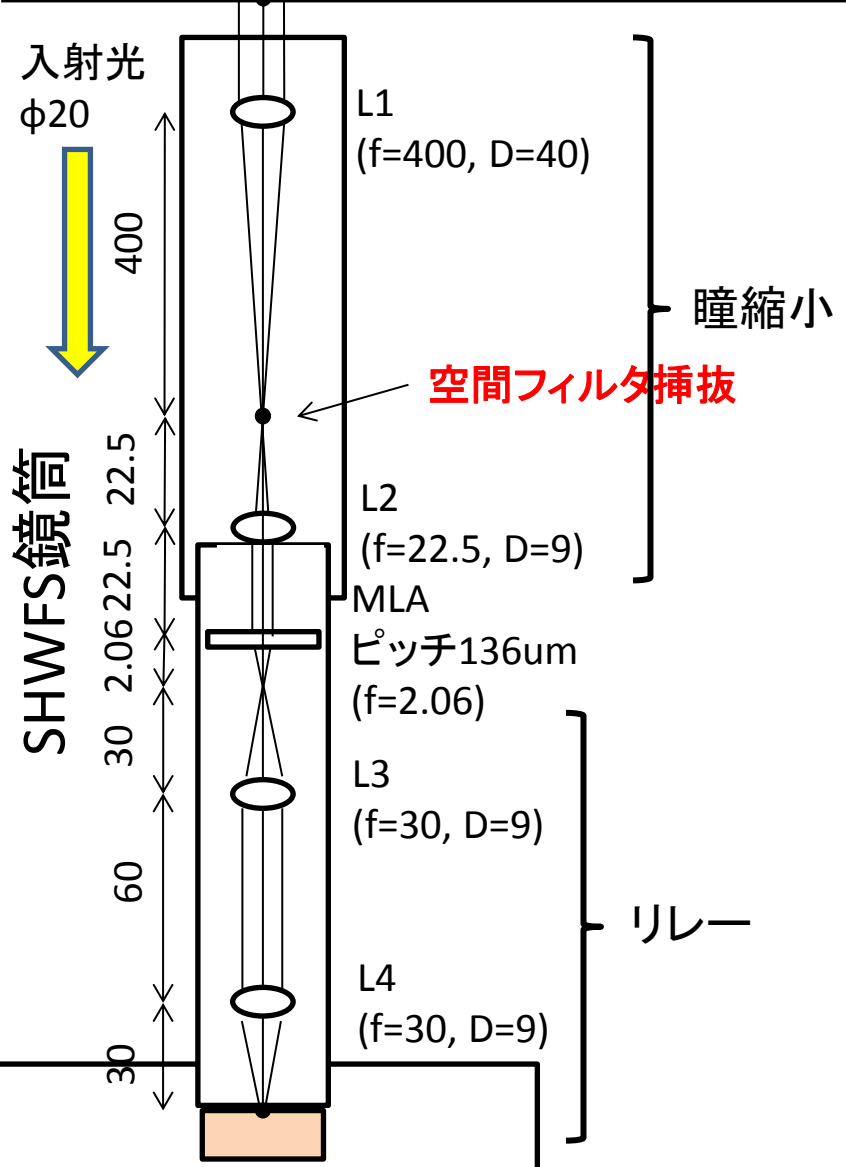
- センサー系: 実機製作
- 制御試験: シミュレーション

## ◆ Tweeter AO

- センサー系: PDI波面センサ
- センサー系: SHWFS波面センサ
- 制御装置: FPGA開発

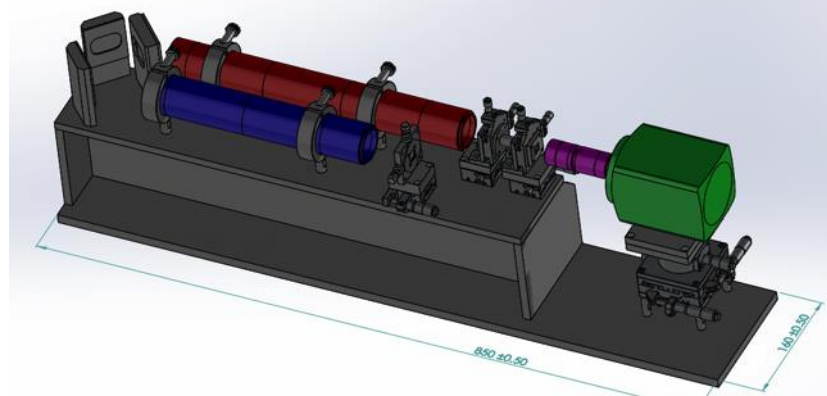
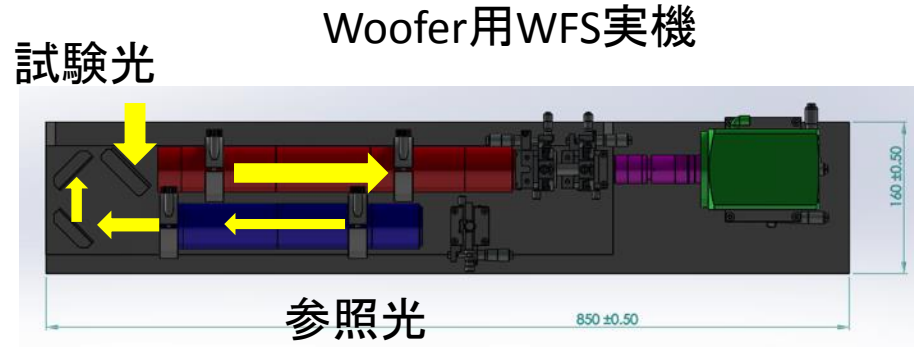


# Woofers AO: センサー系:: 設計



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

←次頁



- ◆ 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

# Woofers AO: 制御シミュレーション

◆ 藤田くん

# Tweeter AO: 波面センサ開発

## ◆ Tweeter AOの要求仕様:

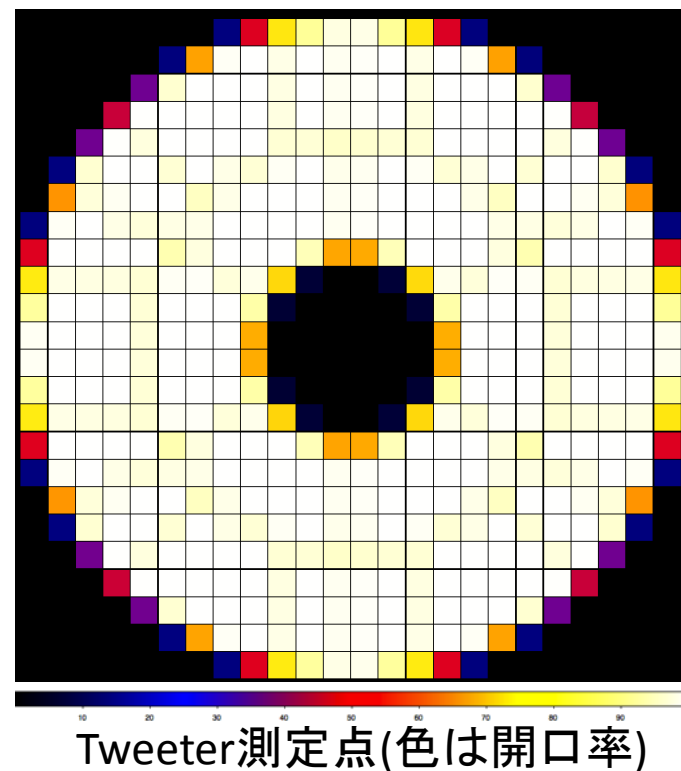
- 入射波面:  $\lambda/4$  (rms:  $\sim 300\text{nm}$ )  $\rightarrow$  P-Vで $\sim 900\text{nm}$
- 目標精度:  $\lambda/20$  (rms:  $\sim 60\text{nm}$ )
- 波面測定点数: 24(1次元)  $\rightarrow$  492素子(有効460素子)
- 波面測定頻度: 6.5kHz



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

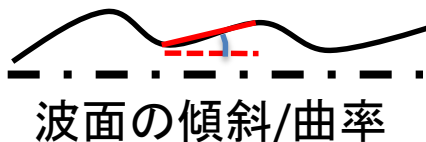


# Tweeter AO: WFS方式の選択

WFS (波面センサ)による波面形状(エラー)の計測方法

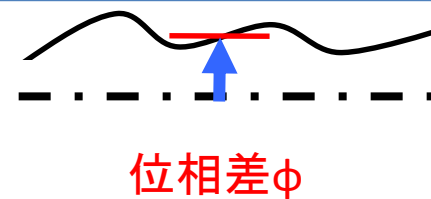
## A. 幾何学的計測

計測対象の波面  
理想的な波面



## B. 直接位相計測

計測対象の波面  
理想的な波面



	幾何学的計測	直接位相計測
取得量	傾斜・曲率	参照面との位相差
長所	<ul style="list-style-type: none"><li>・測定可能なレンジが大きい</li><li>・光学系が比較的簡素</li><li>・採用実績が多い</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・形状測定で誤差伝藩がない</li><li>・<b>多点・高精度で有利</b></li><li>・計算が簡単(ex. 差分2回と除算1回)</li></ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"><li>・形状計測で誤差伝藩が生じる<ul style="list-style-type: none"><li>- 傾斜は1階積分</li><li>- 曲率は2階積分</li></ul></li><li>・SHWFSは重心計算が必要</li><li>→<b>素子数大で不利</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・測定レンジが小さい<ul style="list-style-type: none"><li>±1λ、±π [rad]</li></ul></li><li>・最低3つの位相差測定(ex. 0, π, π/2, -π/2)が必要</li></ul>
使用例	<b>シャックハルトマンセンサ</b> (ex. GPI, SEICA:Woofer AO) 曲率センサ(ex. HiCIAO/AO188)	fixed-ピラミッドセンサ(ex. SCExAO) Zernikeセンサ(ex. Palomar) <b>点源回折干渉計センサ</b> (ex. SEICA)

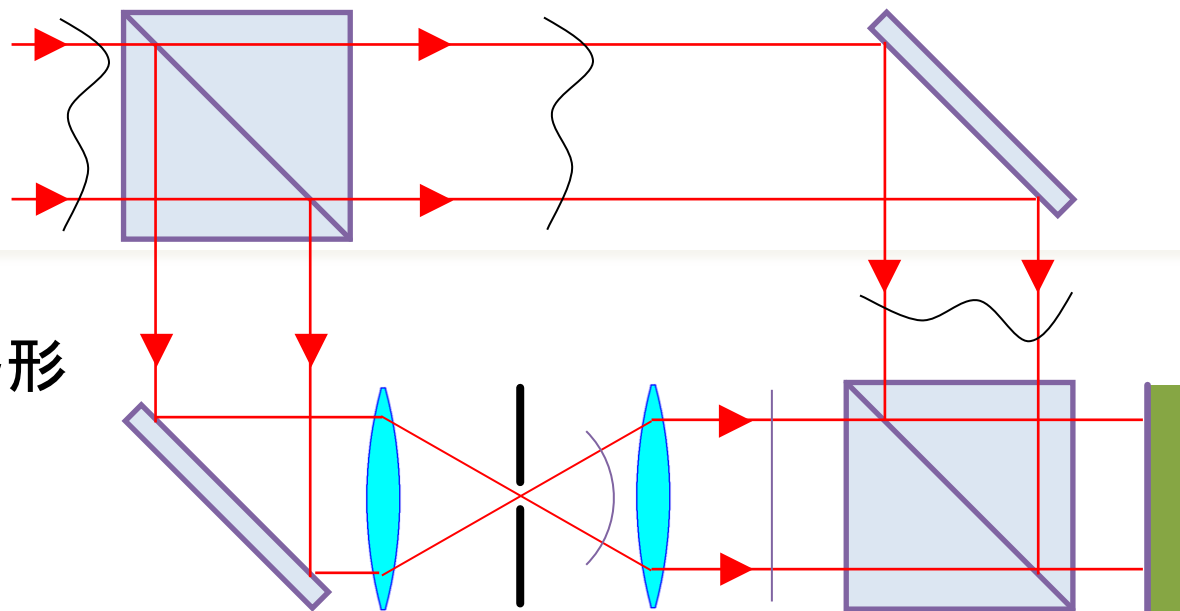
# Tweeter AO: 直接位相計測

主に干渉を用いる

## ◆マツハツェンダ型

- 光路を2つに分割
- 片側のみ波面を整形
- 結合させ干渉
- 位相差を与えて  
4つの干渉像を取得

- 非共通光路が長い

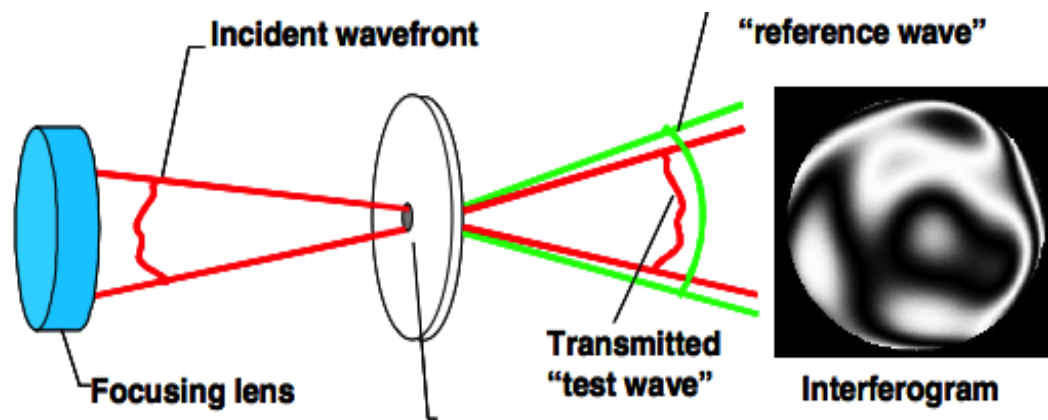


Mach-Zehnder型

## ◆点回折干渉系型

- ピンホールで整形
- 非共通光路なし
- 光路が単純で安定

- 瞬間で1位相しかとれない

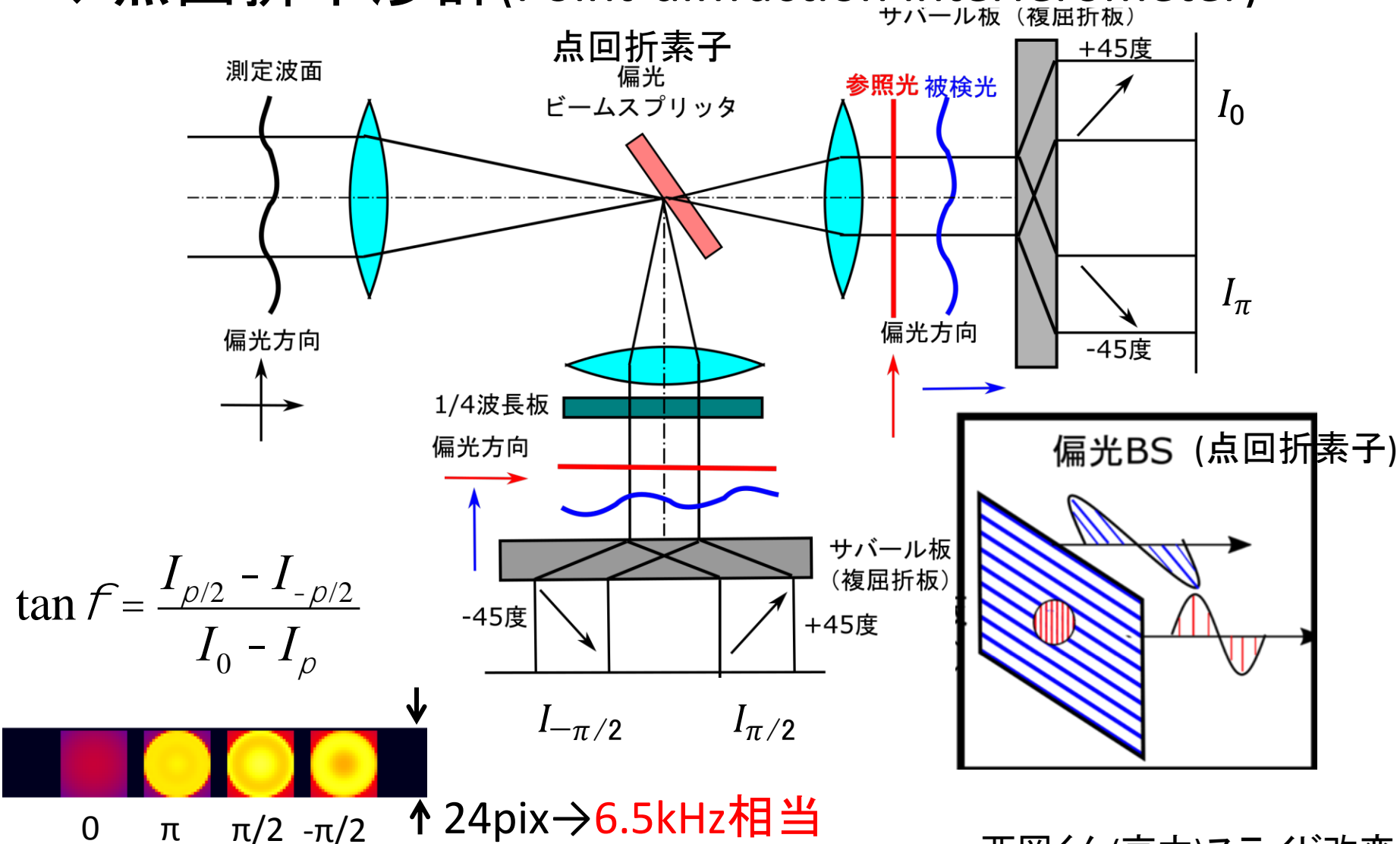


Point Diffractor  
点回折干渉計型

Smart & Steel 1975

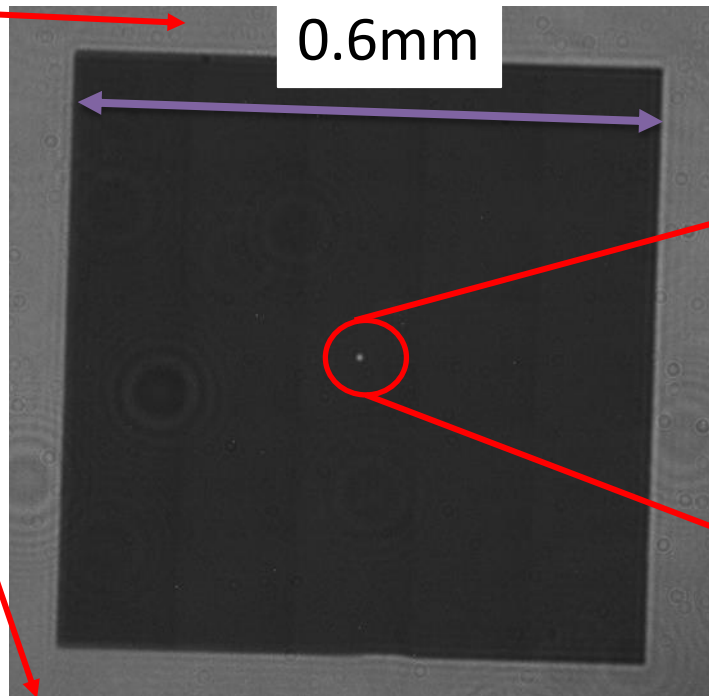
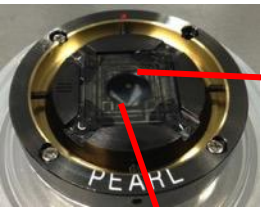
# Tweeter AO: PDI 波面センサ

## ◆ 点回折干渉計(Point-diffraction interferometer)

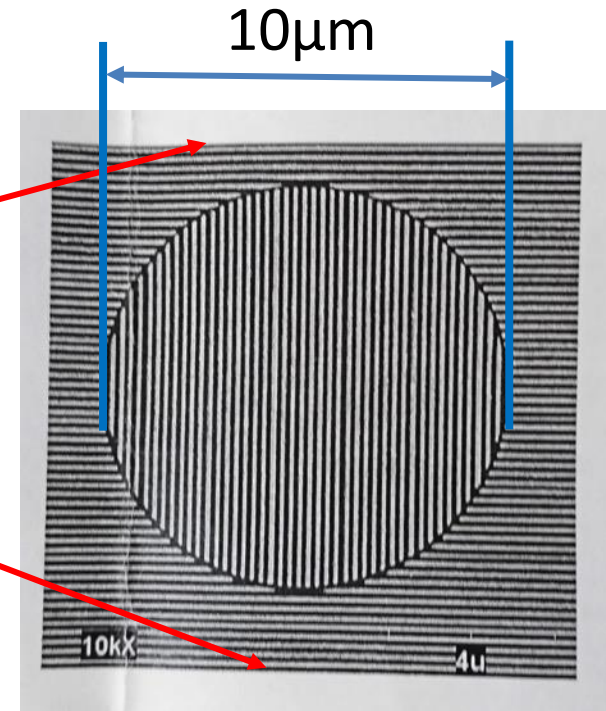


# Tweeter AO: 点回折素子

## ◆電子ビーム描画による微細エッチング



顕微鏡写真(偏光フィルタ)



電子顕微鏡写真

ワイヤグリッド: 幅100nm 高さ60nm ピッチ230nm

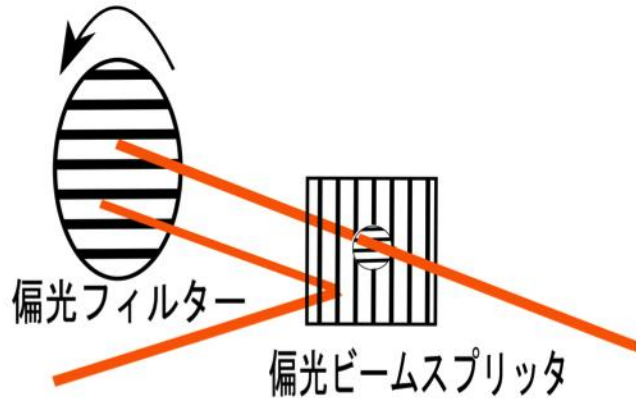
基盤: 1-2nmのシリコン, 表面: 電子顕微鏡用に数nmのプラチナ層

パターン表面は金

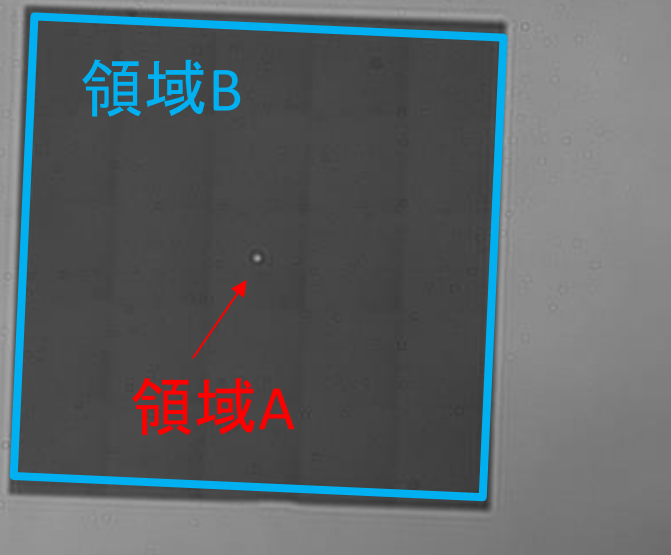
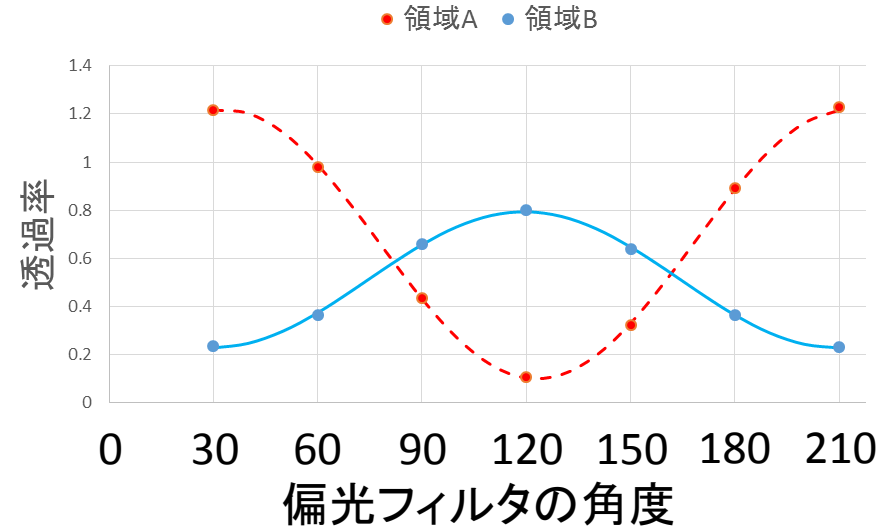


# Tweeter AO: 点回折素子の消光比

## ◆ 要求される消光比 > 3



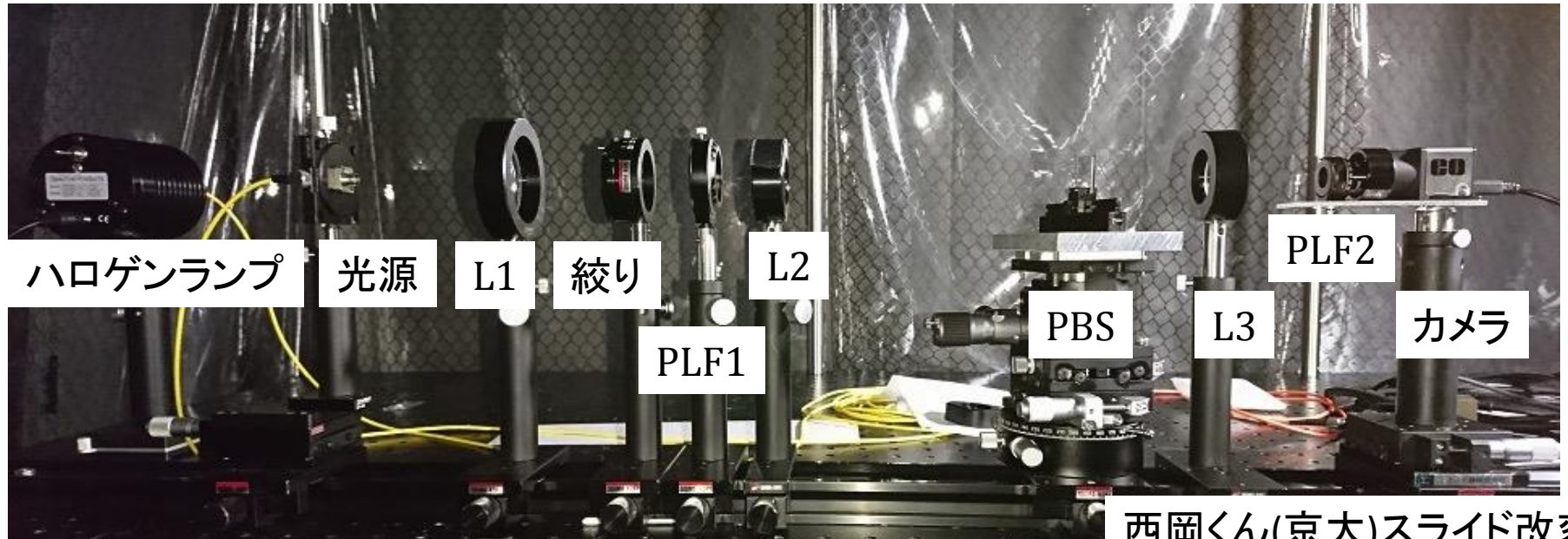
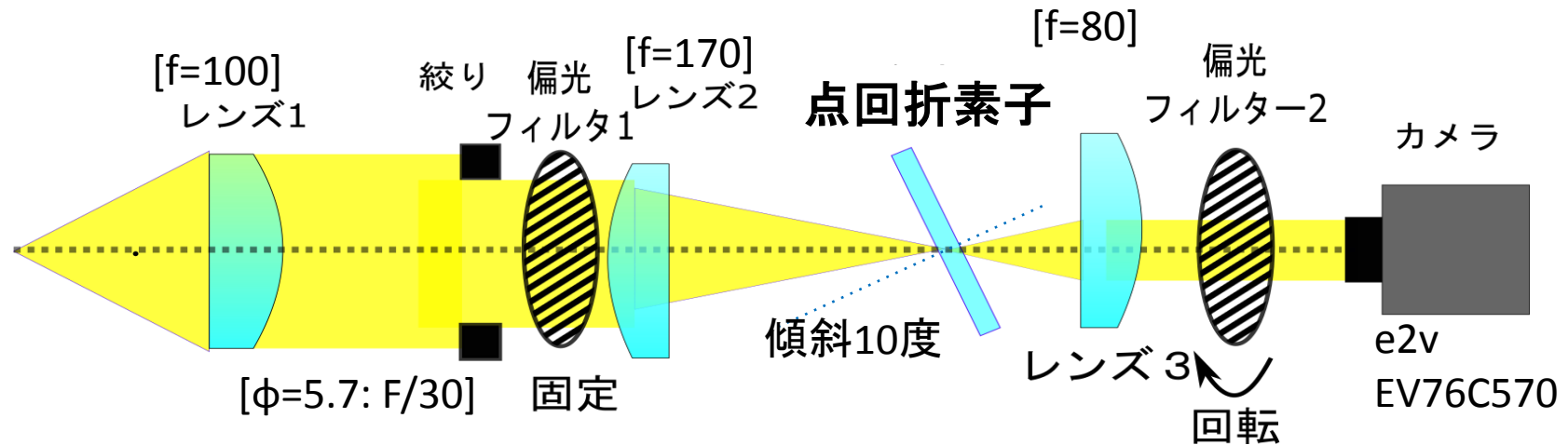
領域A・Bの透過率



- ◆ 測定波長0.8um (Tweeter 0.7—0.9)
- ◆ 領域Bの消光比: ER~3.6
- ◆ 電磁波解析の計算値: 3—6程度  
→ 消光比は十分要求仕様を満たす

# Tweeter AO: PDI方式の原理実証1/2

## ◆ 光学試験による原理実証

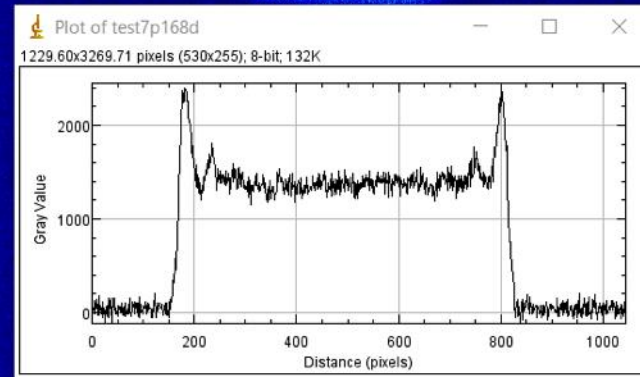
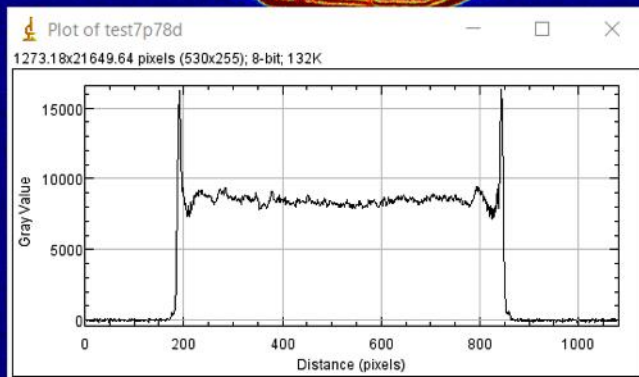
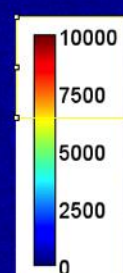
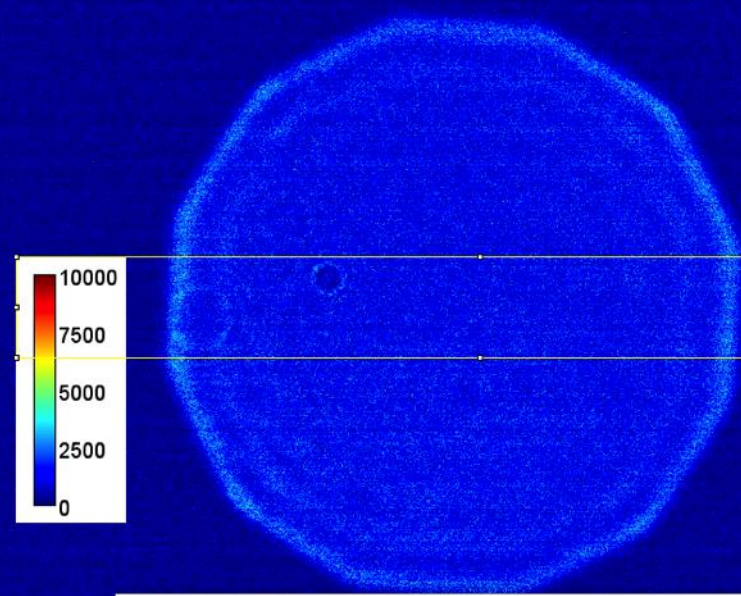
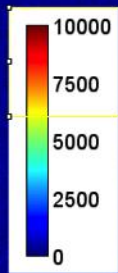
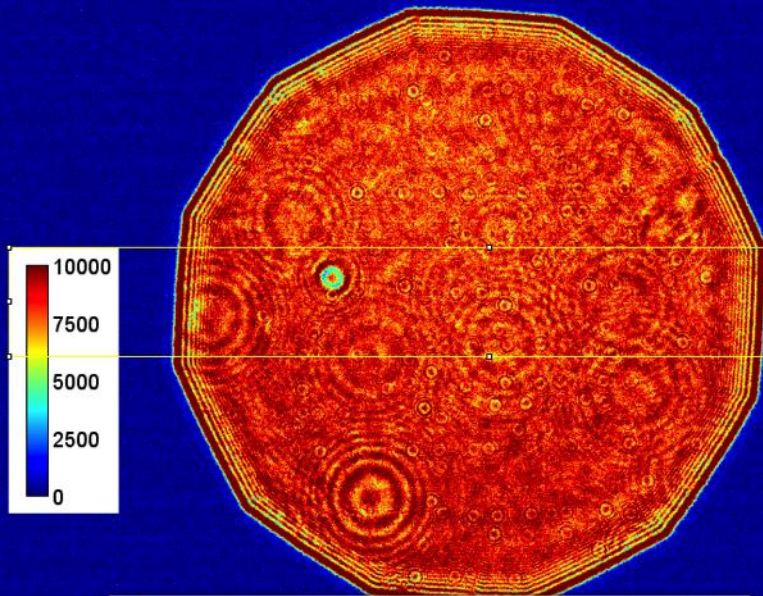


# Tweeter AO: PDI方式の原理実証2/2

## ◆平面波計測時

+45度側(位相差0)

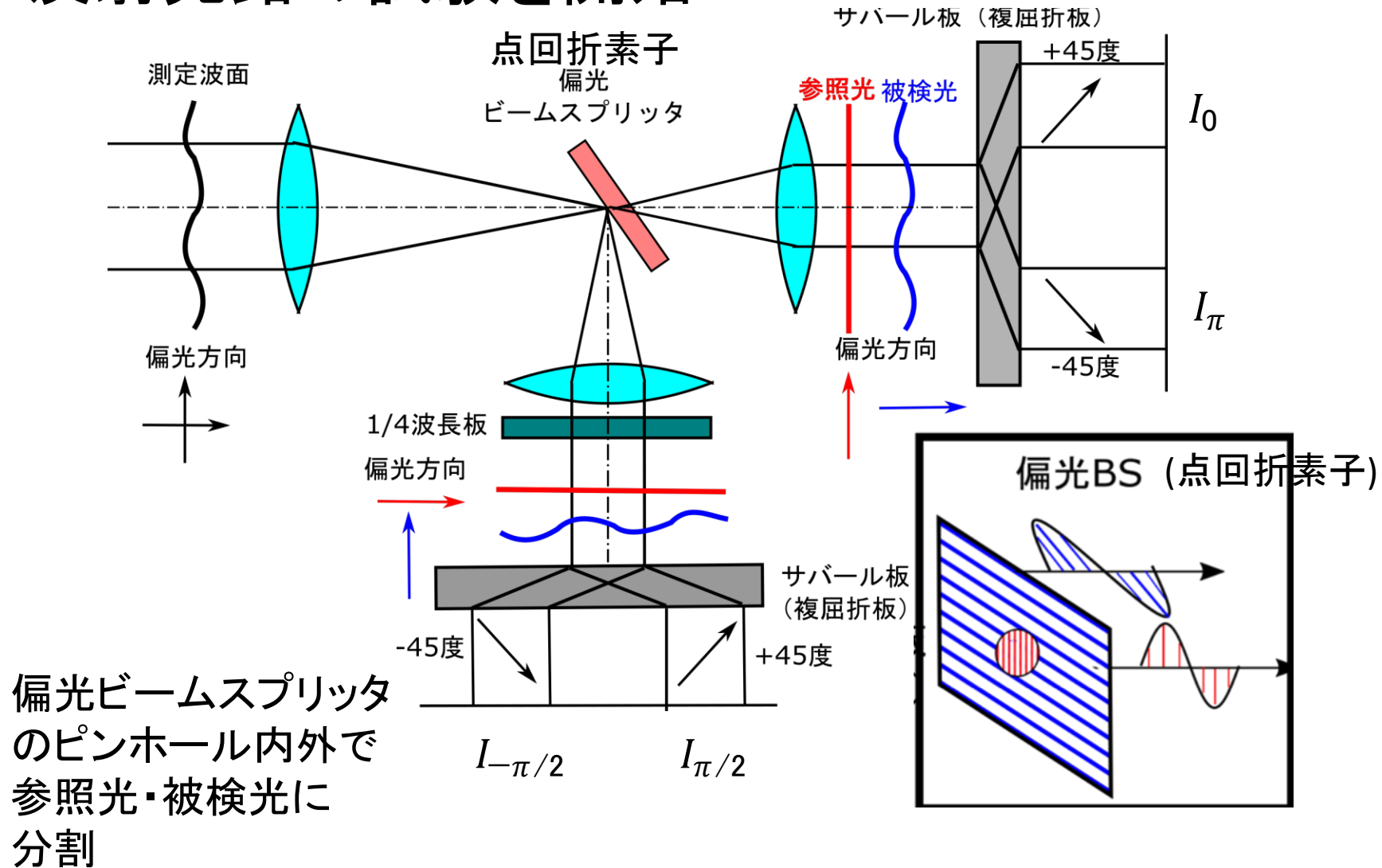
-45度側(位相差 $\pi$ )





# Tweeter AO: PDI 波面センサ

## ◆ 反射光路の試験を開始



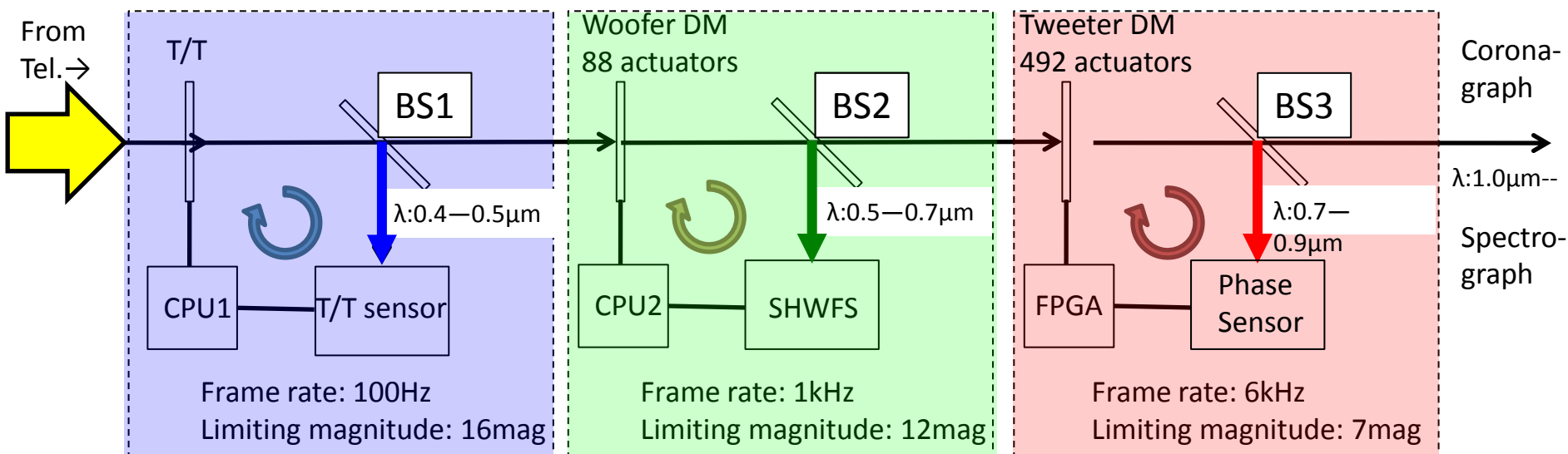
偏光ビームスプリッタ  
のピンホール内外で  
参照光・被検光に  
分割

# Tweter AO: SHWFS

◆ 津久井くん

# SEICA: 極限補償光学

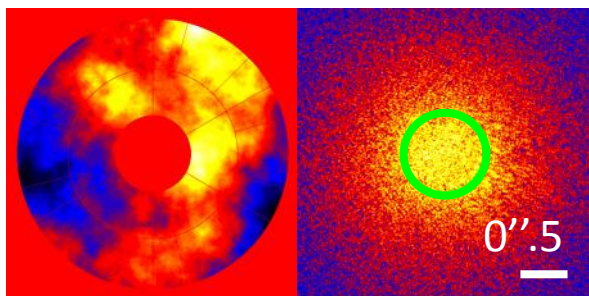
◆要求仕様: 精度:  $\lambda/20$ , 速度: 5—10kHz, 測定点: 492 elements



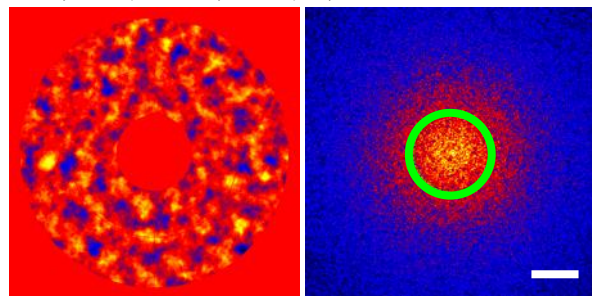
**Tip/Tilt:** 10mas pointing

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

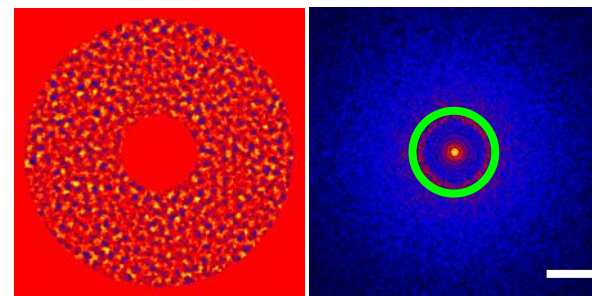
**Tweeter:** 高速 [6.5kHz]  
 高精度 [ $\lambda/20$ ]  
 高空間周波数:  $24^2$



No AO



after Woofer AO



after Tweeter AO

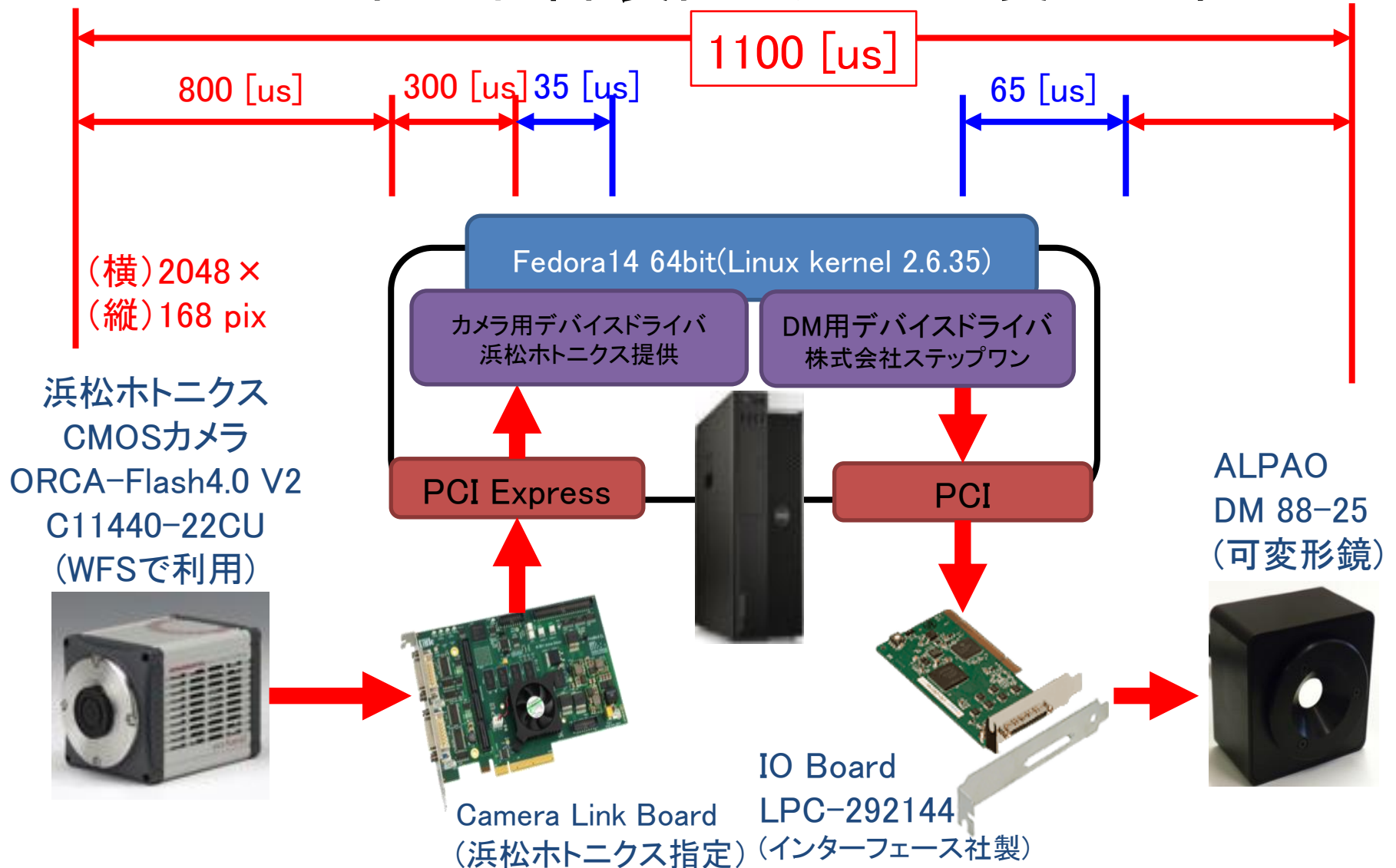
Strehl ratio 0.02

0.3

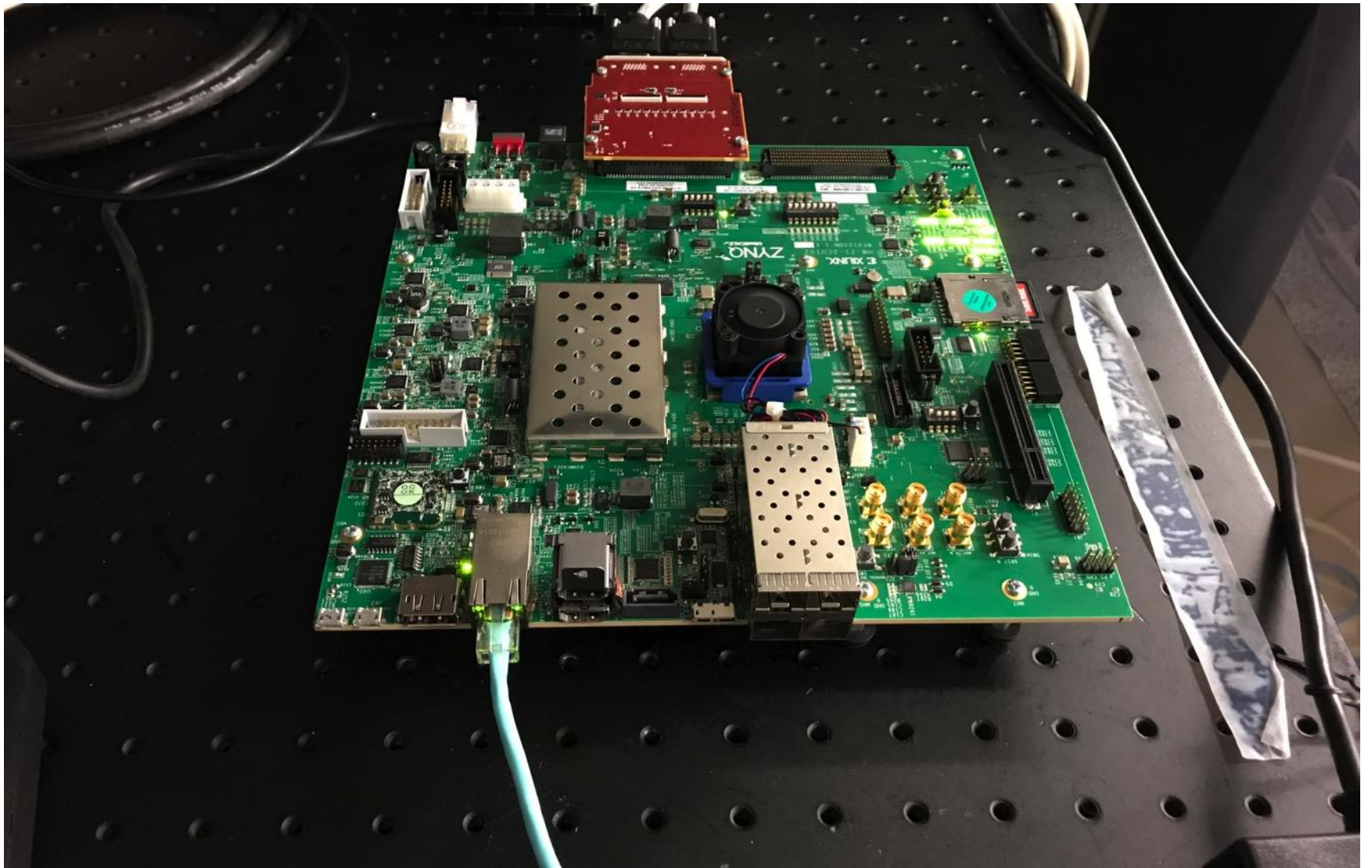
0.9

# Tweeter AO: FPGA制御1/2

## ◆ Woofer 系の制御装置と処理速度の内容





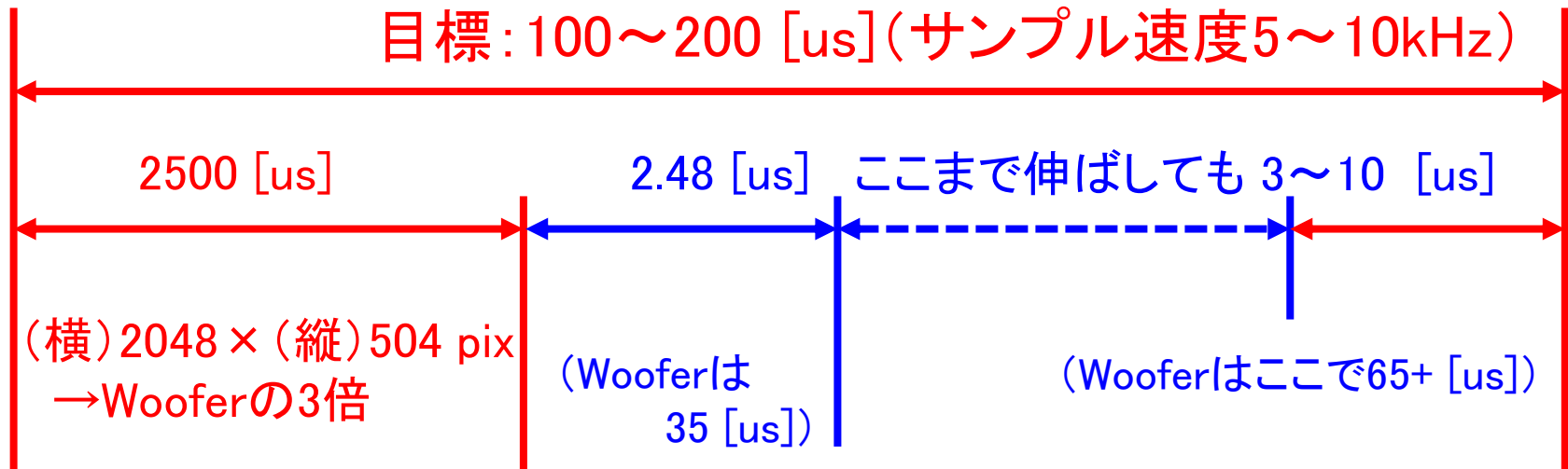


FPGA評価基板 + カメラリンクフレームグラバ

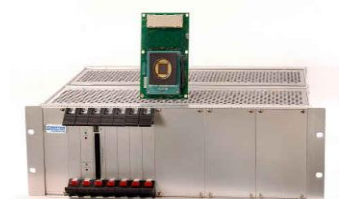
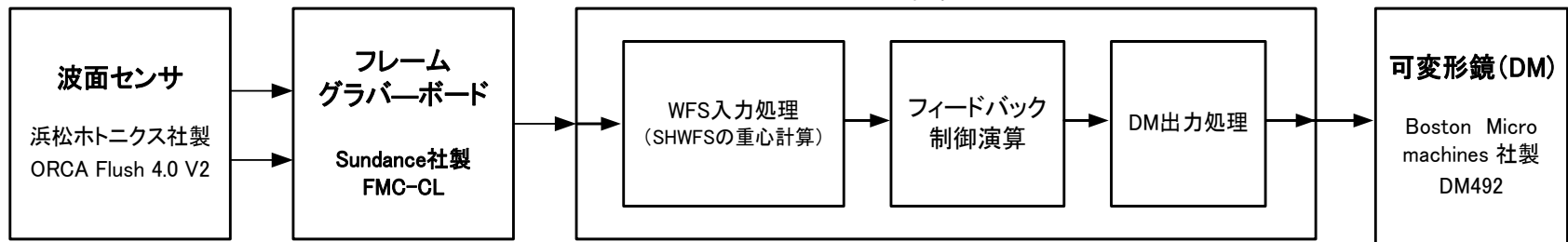
# Tweeter AO: FPGA制御2/2

(2018/4/28現在)

## ◆ Tweeter 系の制御装置と処理速度の内容



FPGA評価基板(ザイリンクス製 Zynq UltraScale+ MPSoC ZCU102 評価基板)



# 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 (ABCプロジェクト経費) 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