

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

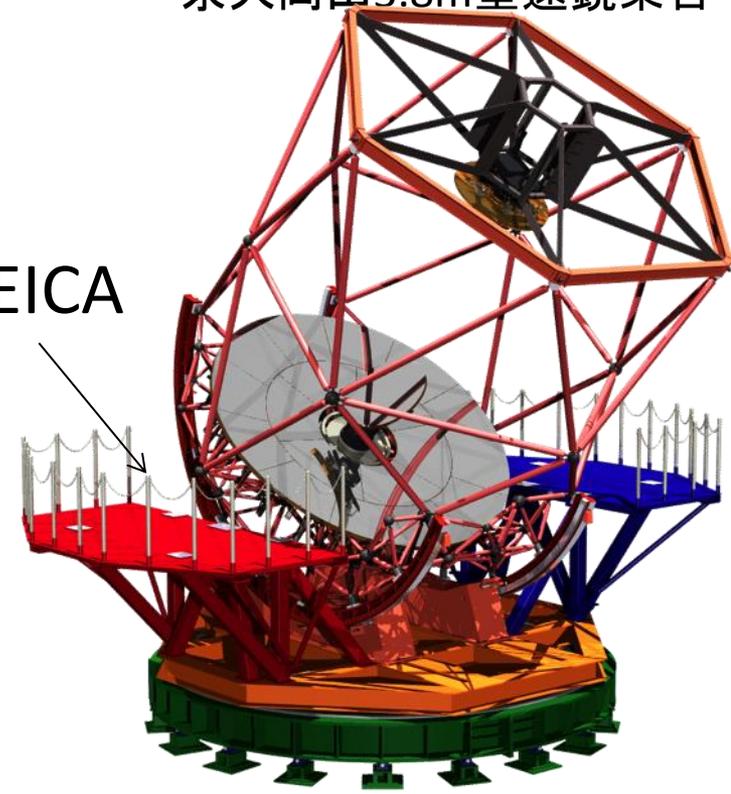
京大岡山3.8m望遠鏡架台

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

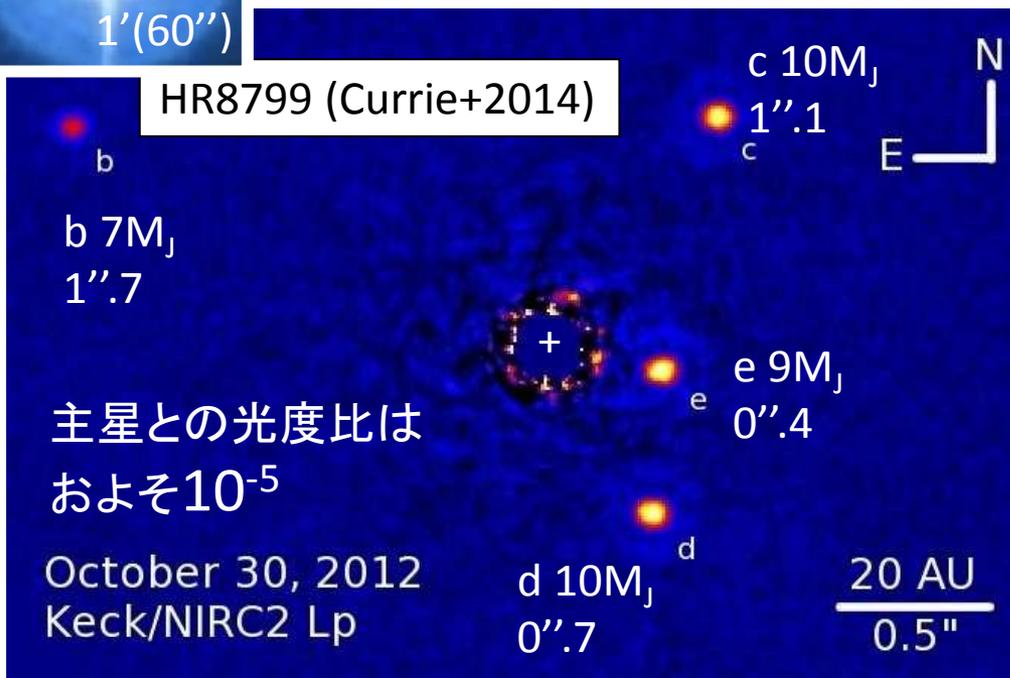
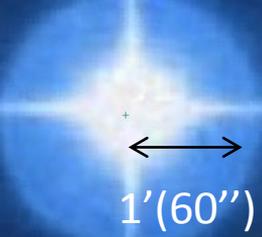
内容

- SEICA ExAOのWoofers実験

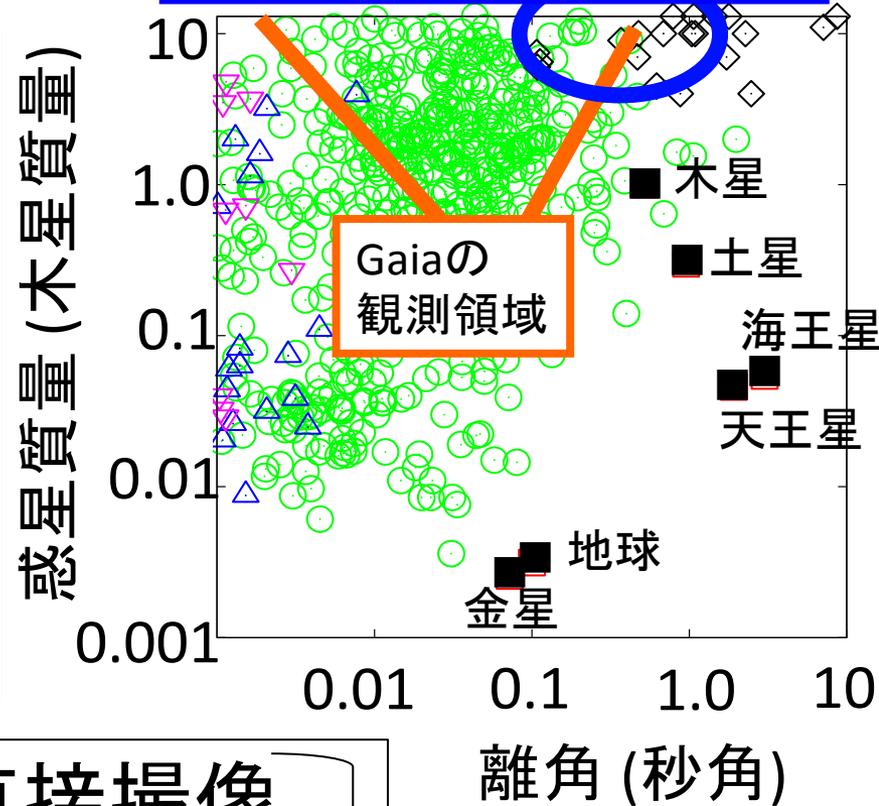
SEICA



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

ExAO進捗:[前回まで]

1. AO制御実験[Woofer AO]

1. Woofer実験環境整備

~~1. 光学系調整[完了]~~

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[落選]~~

~~2. 国立天文台共同開発経費[落選]~~

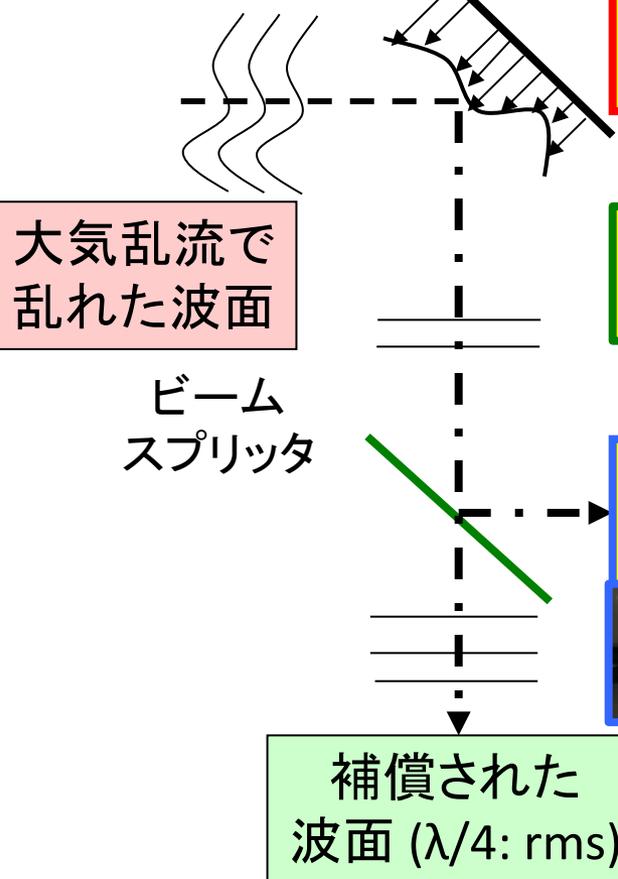
3. **ABCプロジェクト経費[応募中]**

4. **TMT戦略経費[応募中]**

意義:: 補償光学 (Adaptive Optics)

◆ 大気による波面乱れをリアルタイム補正

Woofer AOの例



1. DM 可変形鏡



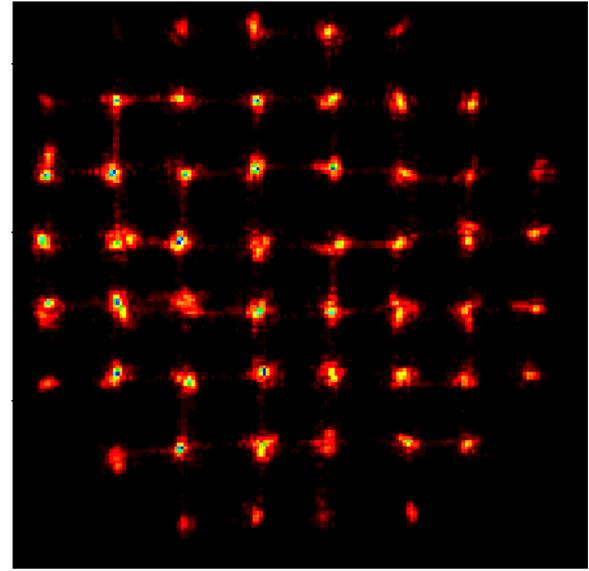
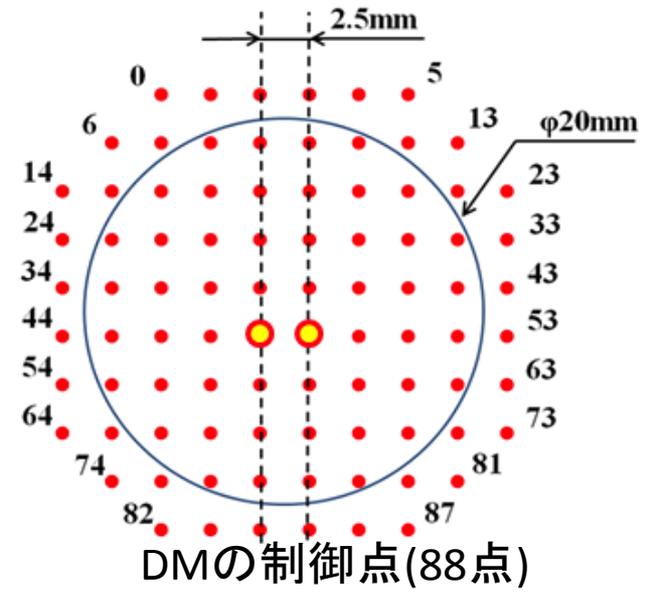
3. 計算システム



2. WFS 波面センサ



仕様を決定する



WFSの測定点(52点)

ExAOパート(極限補償光学系)

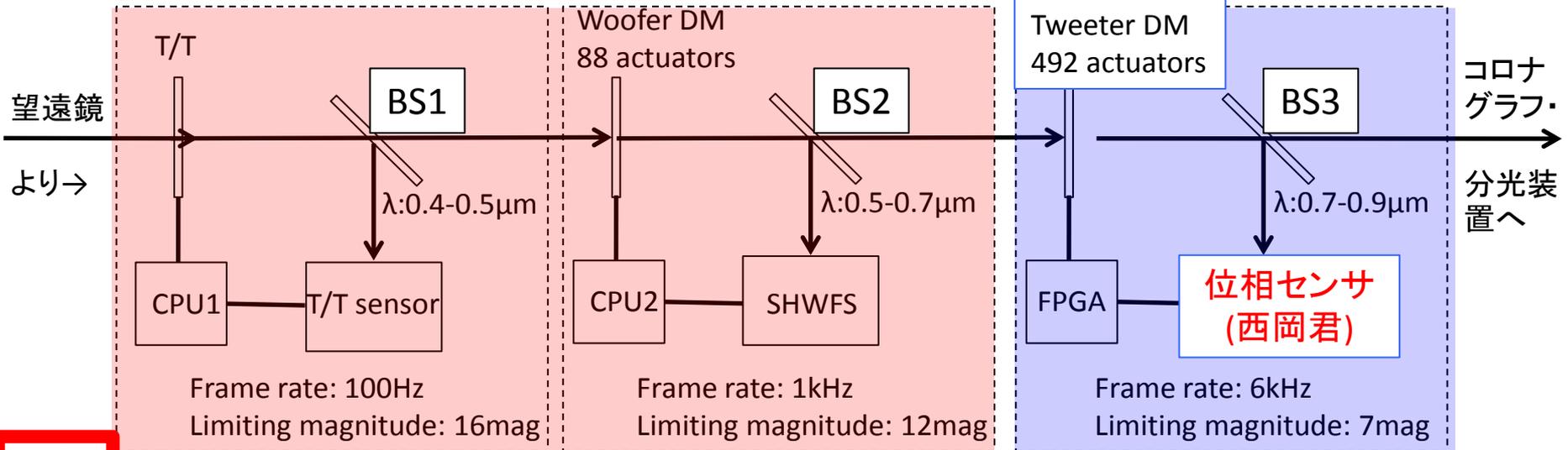
傾斜計測: T/T + Woofer
 低速、粗い波面制御

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

ExAOノパート:: WooferAO動作実験

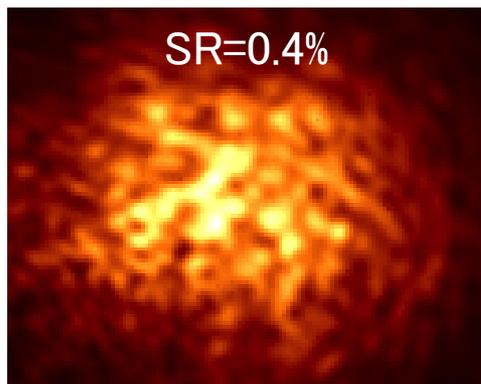
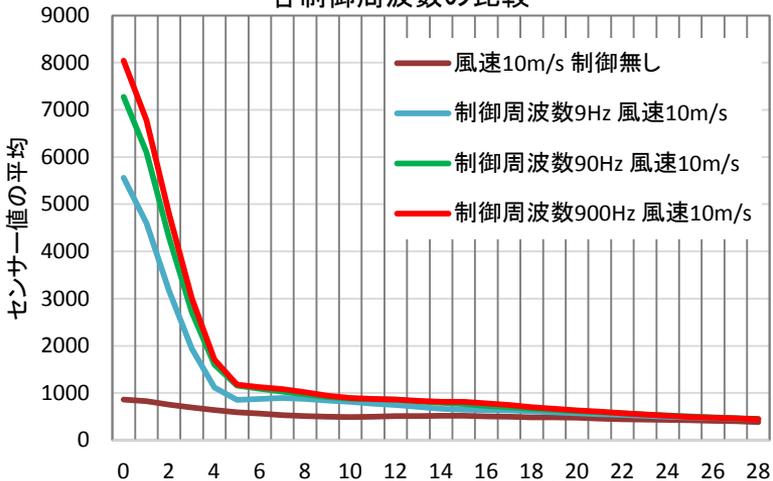
4/24

AO時
FWHM ~ 6 pix
回折限界
FWHM 4.5pix

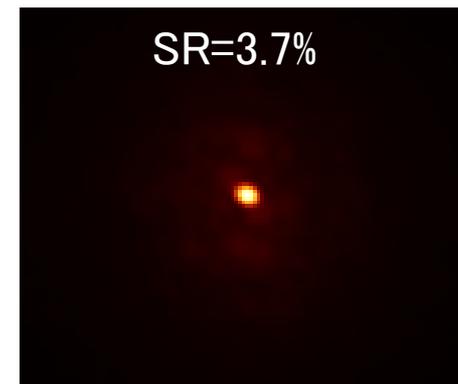
Woofer AO動作時の星像 (He-Neレーザー光源, 風速10m/s, 制御900Hz)
地球大気乱流模擬試験

ExAO: 評価試験 星像モニタ

各制御周波数の比較

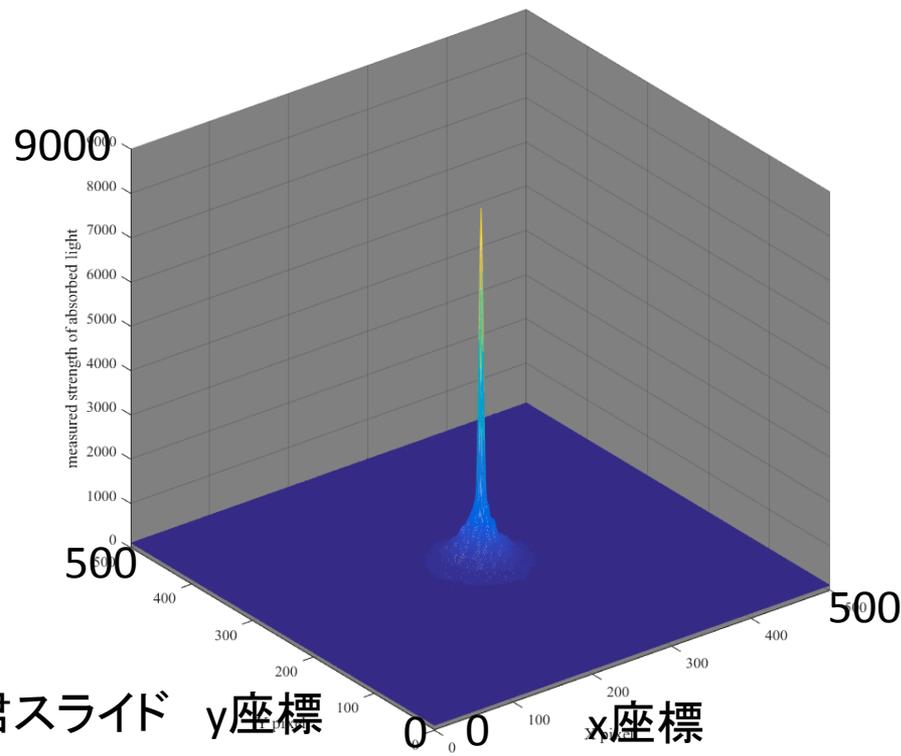
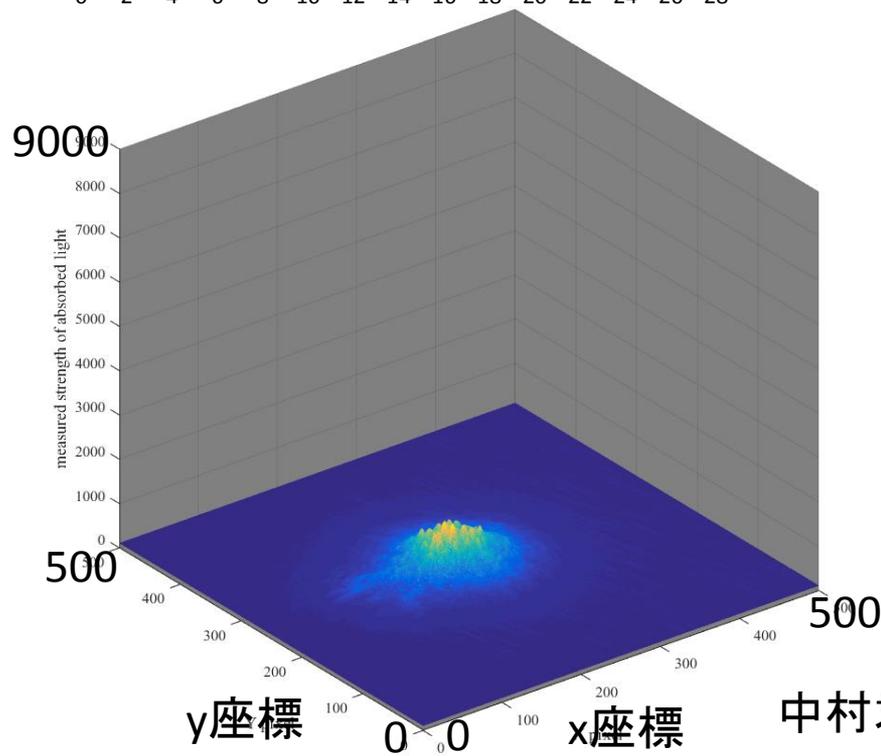


風速 10m/s 制御無し



風速 10m/s 制御周波数900Hz

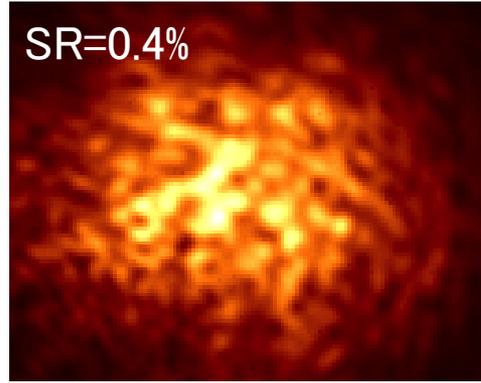
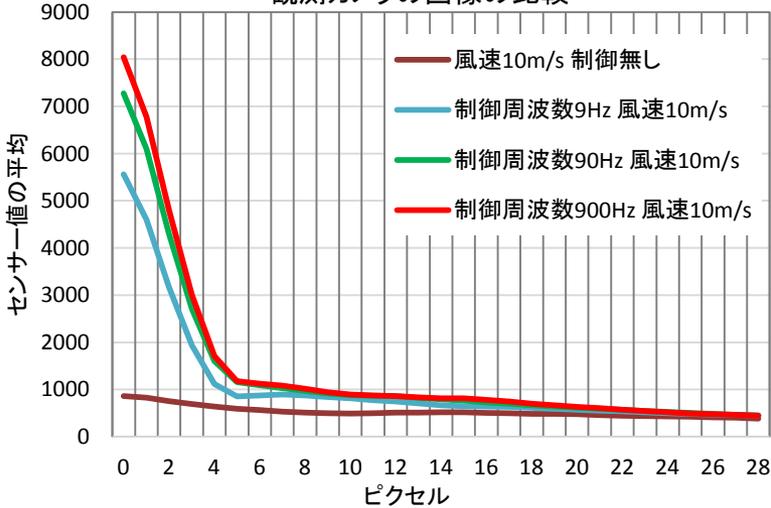
$\lambda = 633\text{nm}$ 風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)



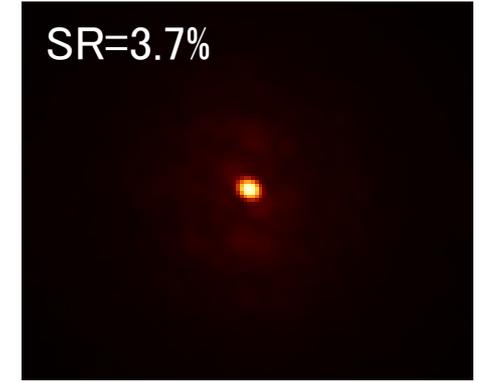
中村君スライド

ExAO: 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

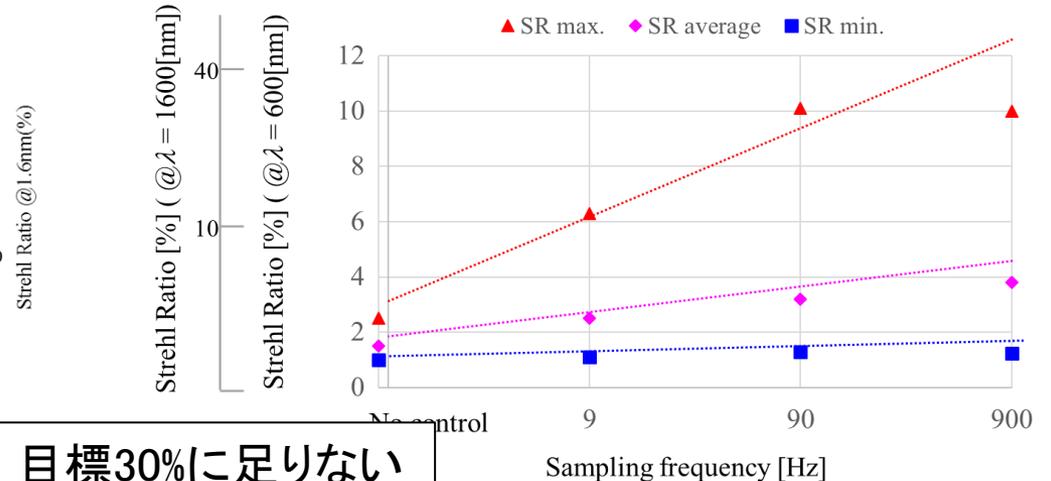
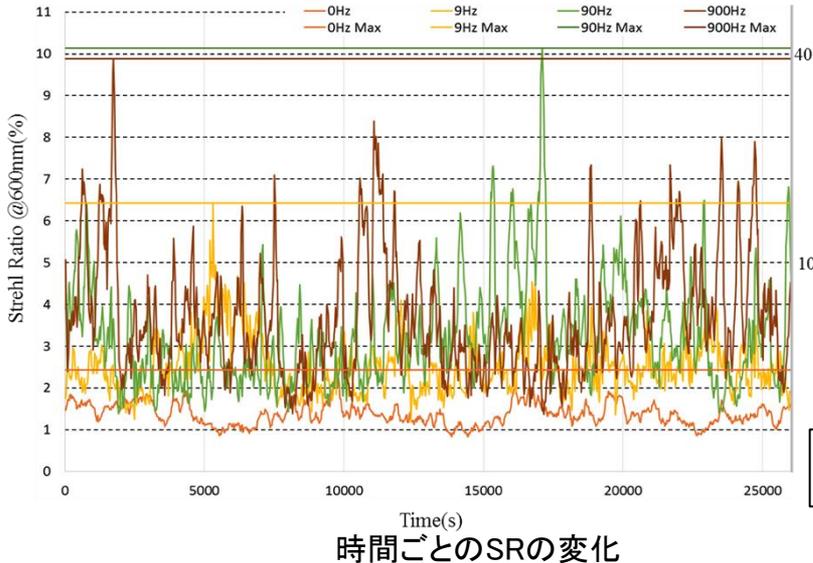


風速 10m/s 制御周波数900Hz

$\lambda = 633\text{nm}$ 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



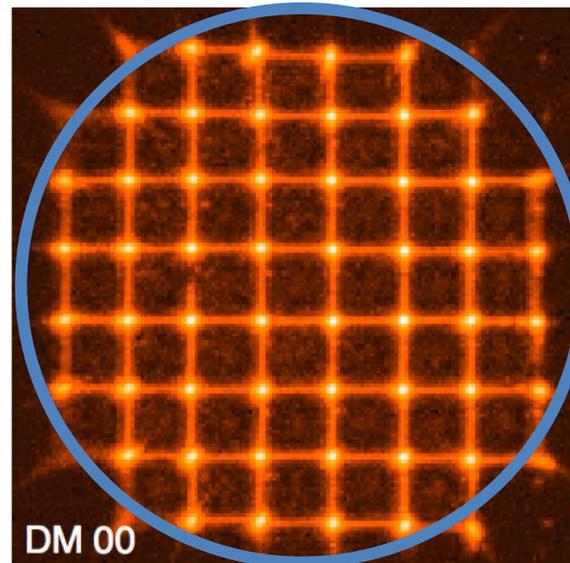
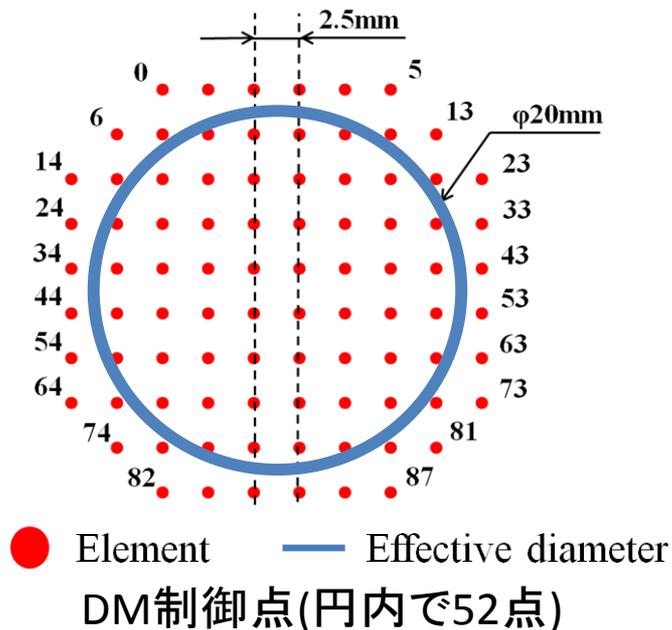
目標30%に足りない
中村君スライド

周波数とSRの比較

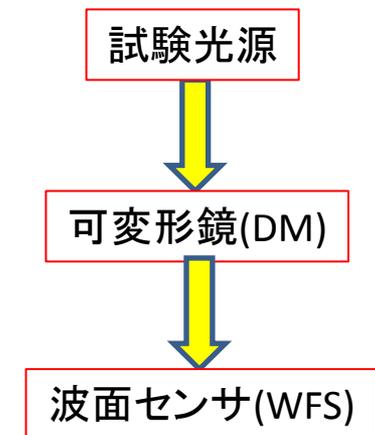
ExAO: Woofer AO

- ◆ 目標性能(SR=0.3@1.2 μ m)へ最適化試験
 - 光源精度: SR=0.3 \rightarrow 0.8(@0.633 μ m) [前回]
 - WFS測定点数: 52素子
 - DM制御点数: 52点
 - 作用行列の精度
 - 制御パラメータ: 比例ゲイン(Kp)

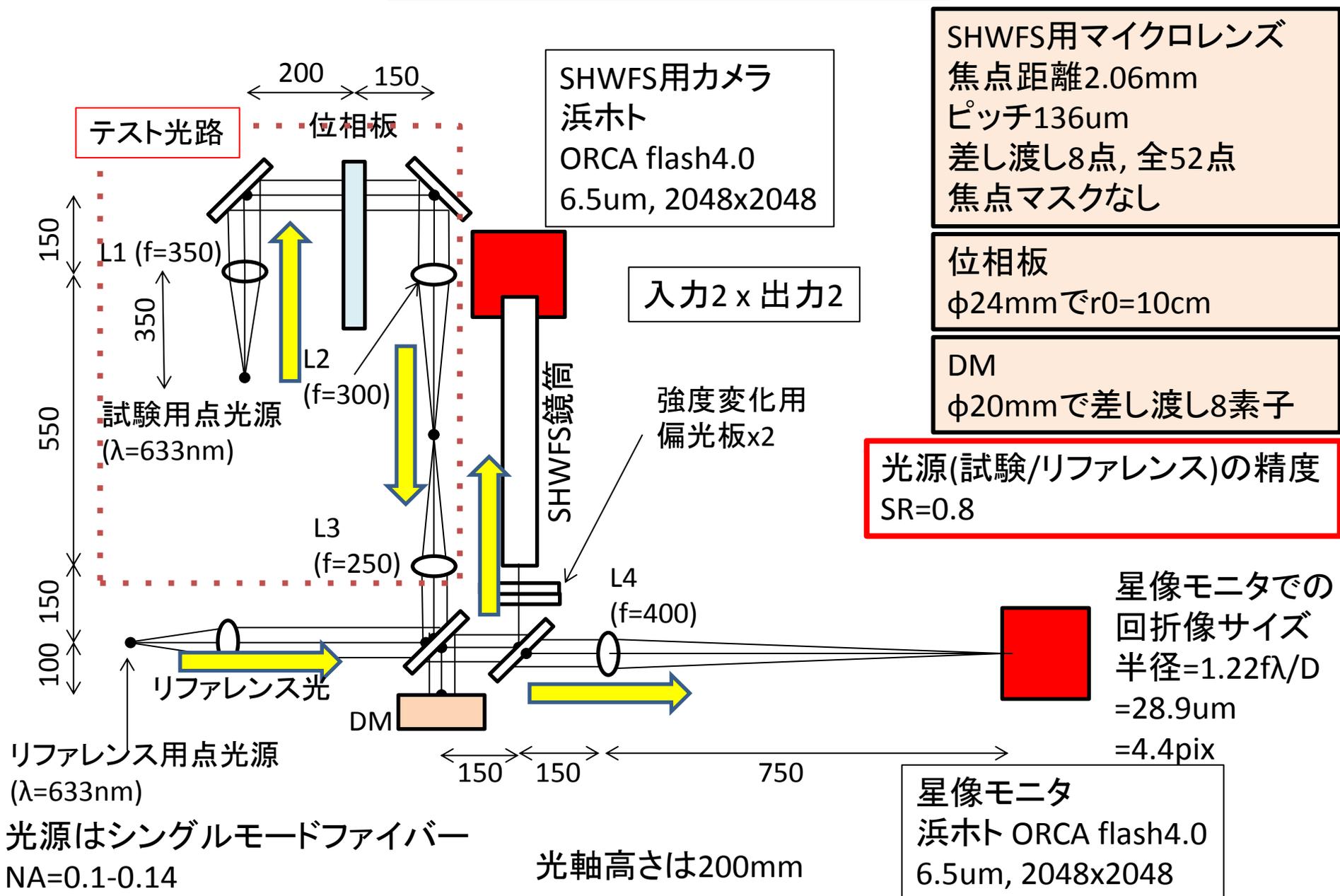
[今回考慮]



WFS測定点(52点)

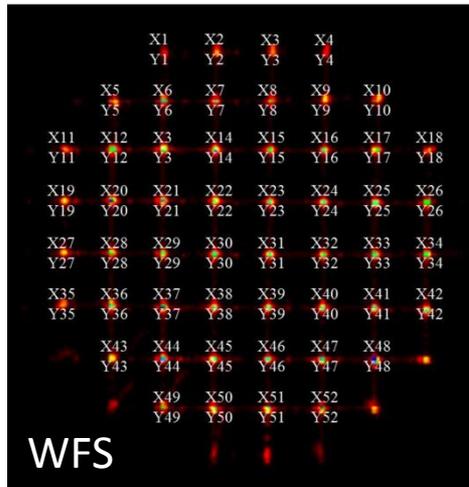


ExAO: 試験環境



補償光学: 制御系

- ◆ WFSの入力(52素子)からDMへの出力(88素子)
 - SH-WFSはx, yの波面傾斜を測定→ $52 \times 2 = 104$ 要素



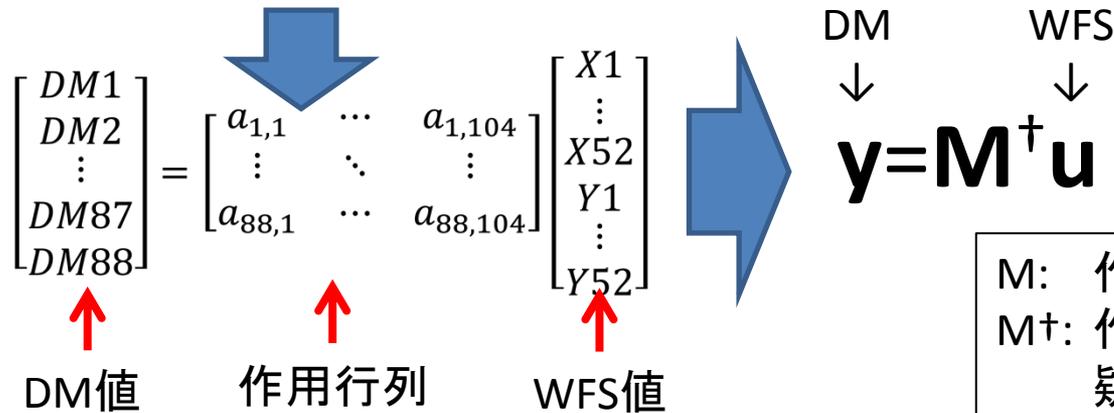
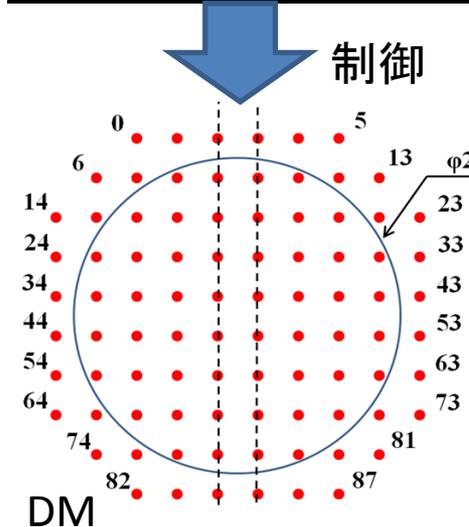
WFS入力値とDM出力値間の連立方程式

$$DM1 = a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \dots + a_{1,52}X_{52} + a_{1,53}Y_1 + a_{1,54}Y_2 + \dots + a_{1,104}Y_{52}$$

$$DM2 = a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{2,52}X_{52} + a_{2,53}Y_1 + a_{2,54}Y_2 + \dots + a_{2,104}Y_{52}$$

⋮

$$DM88 = a_{88,1}X_1 + a_{88,2}X_2 + \dots + a_{88,52}X_{52} + a_{88,53}Y_1 + a_{88,54}Y_2 + \dots + a_{88,104}Y_{52}$$

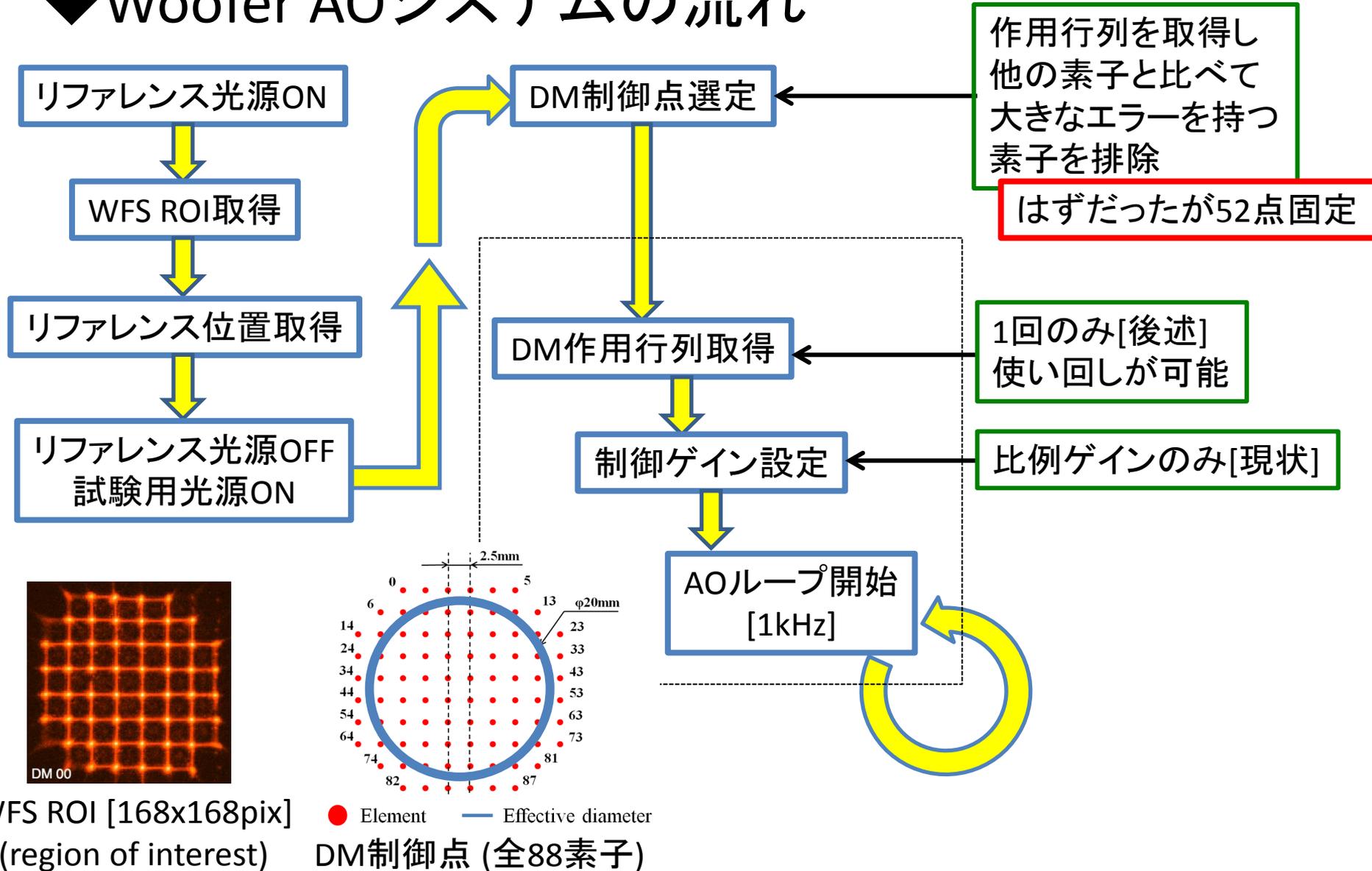


M: 作用行列
 M⁺: 作用行列の
 疑似逆行列
 y: DMの司令値
 u: WFS測定値

前もって $u = M y$ から M を測定
 → 作用行列の精度に問題?

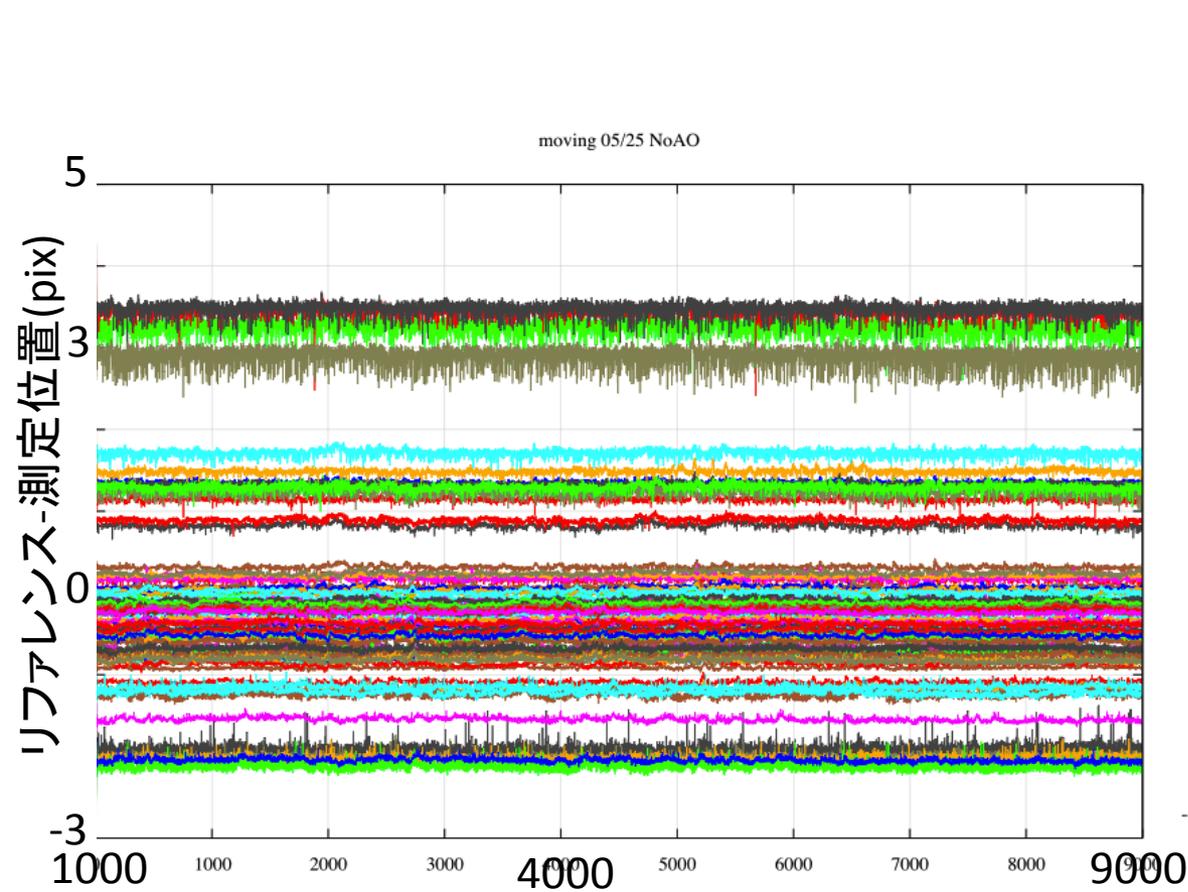
ExAO: AO制御手順

◆ Woofer AOシステムの流れ

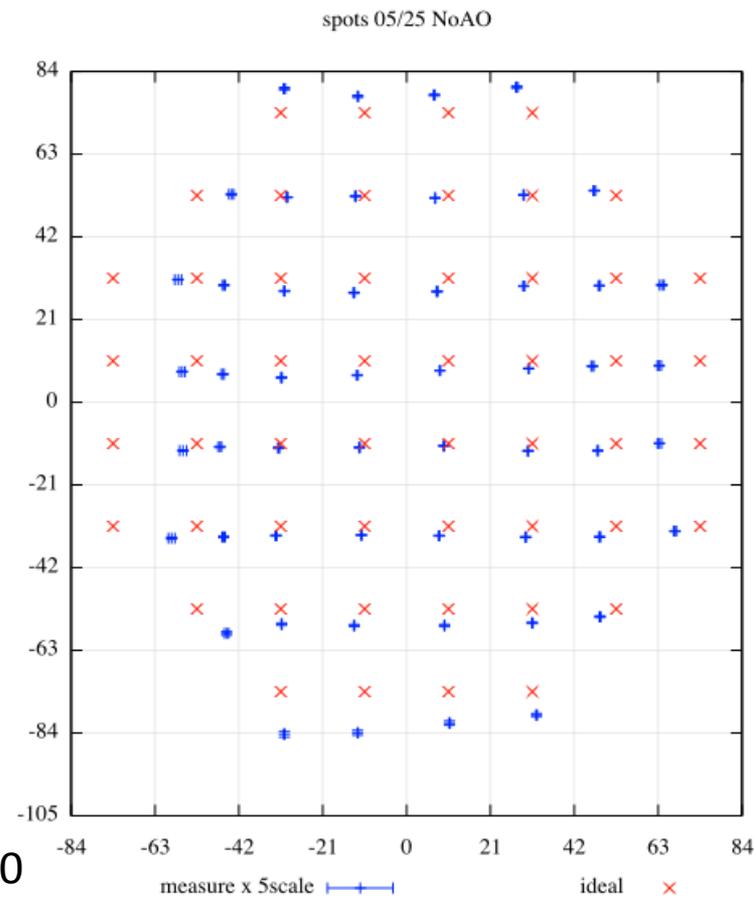


ExAO: 大気乱流なしAOなし

◆ AOがない場合: 非点収差あり



52測定点(x, y; 104個)のリファレンス位置とのズレ



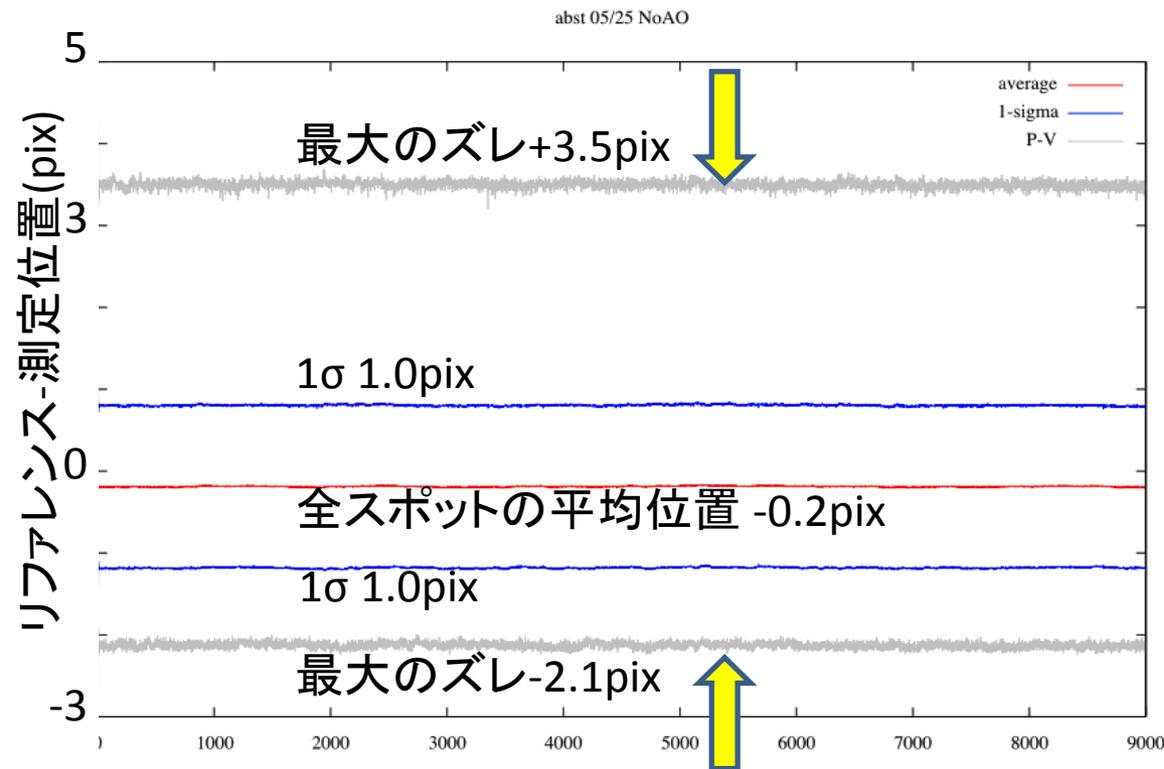
リファレンス位置(理想状態) ×
測定位置(5倍拡大) +

ExAO: 大気乱流なしAOなし

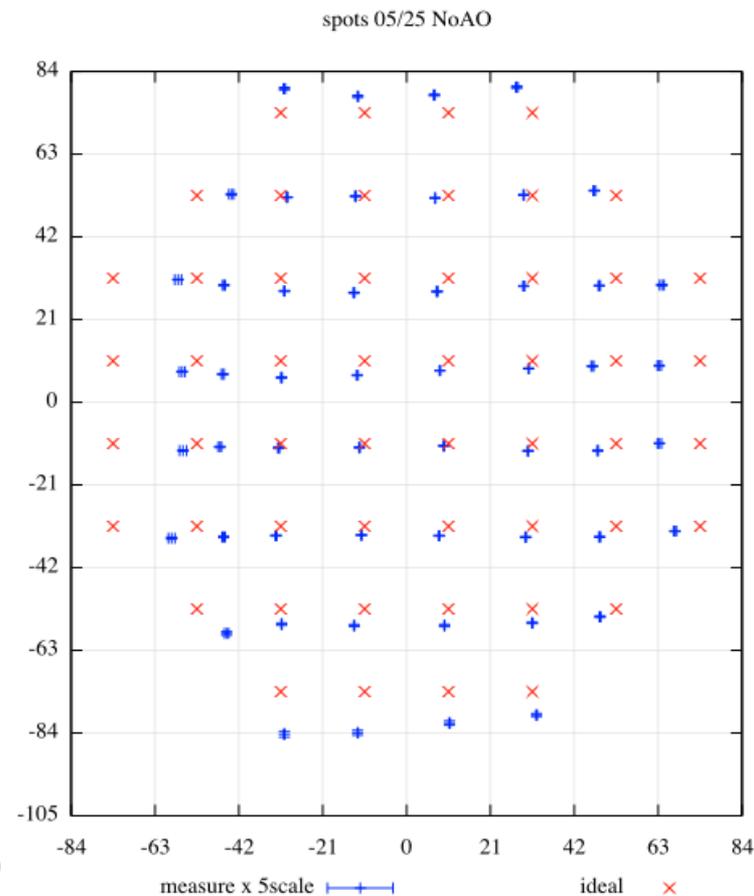
◆ AOがない場合: 非点収差あり

– 目標値: 0.1pix(rms)

104個の座標データの統計



52測定点(x, y)のリファレンス位置とのズレ



リファレンス位置(理想状態) ×

測定位置(5倍拡大) +

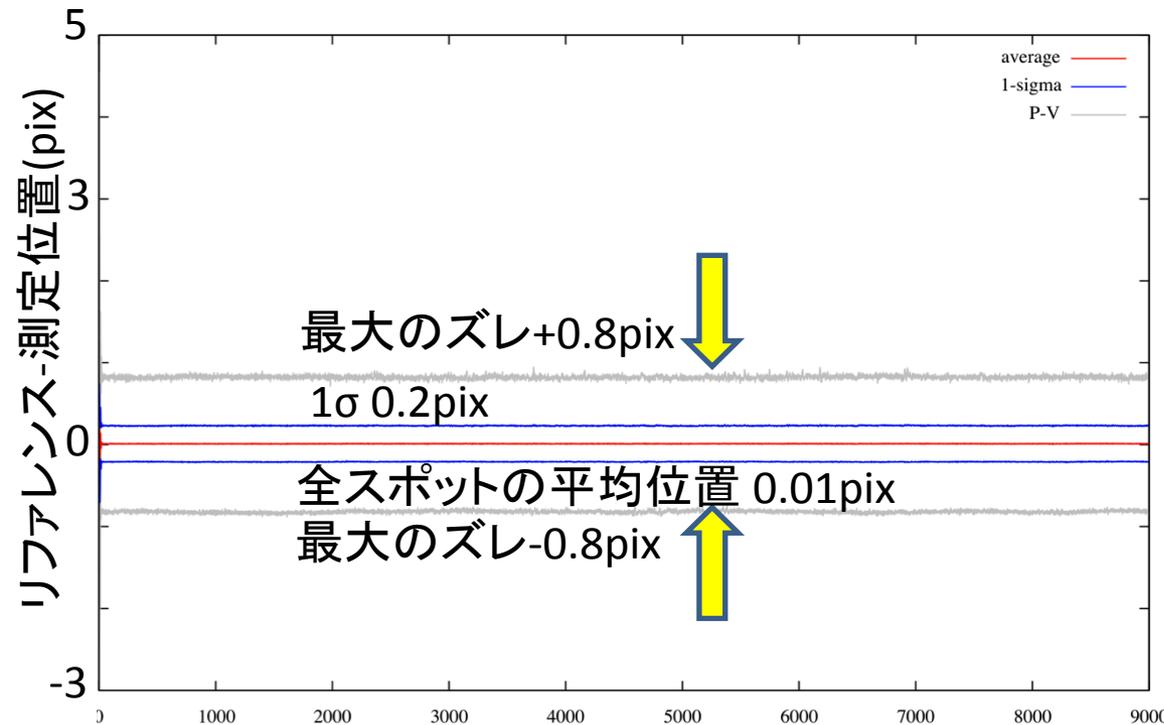
ExAO: 大気乱流なしAOあり

◆ AO制御: 中村君アルゴリズム(前回報告)

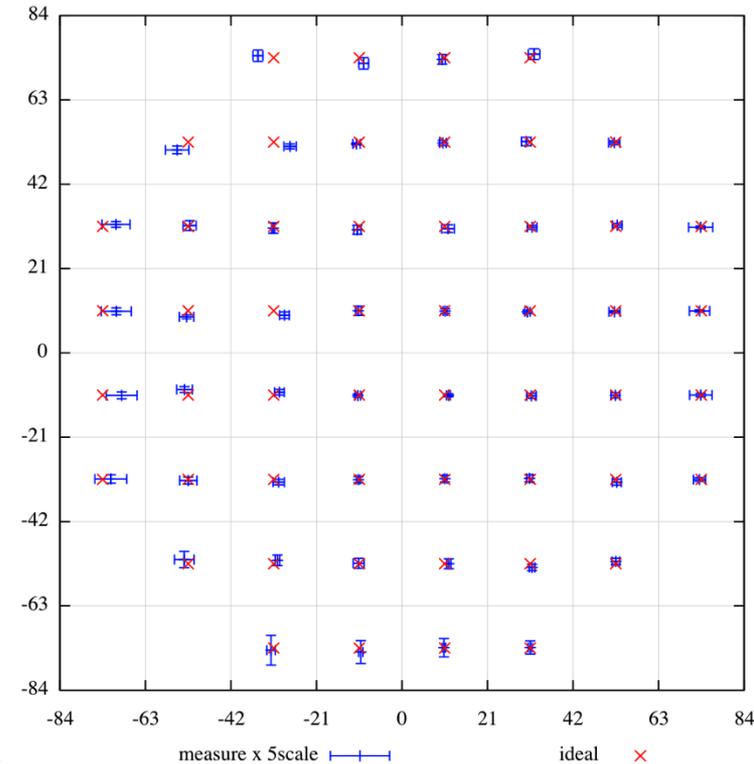
– 左側が制御しきれていない

104個の座標データの統計

abst 05/25 Nakamura Control



spots 05/25 Nakamura Control

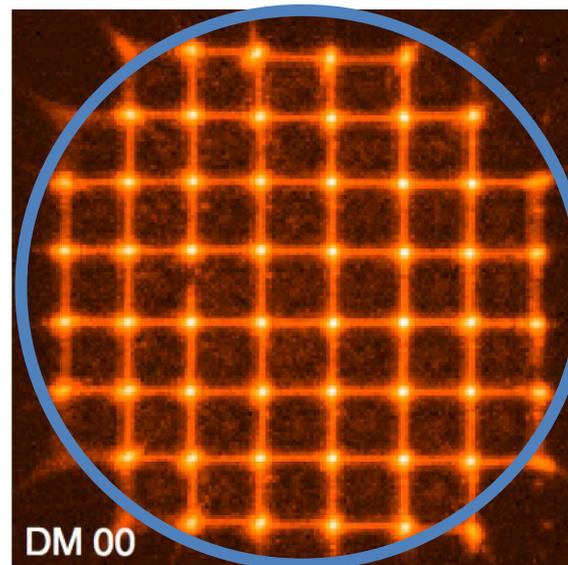
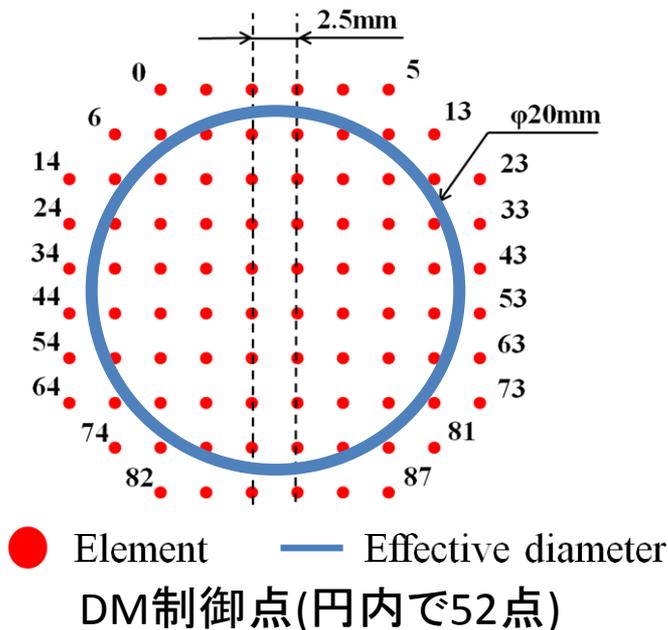


52測定点(x, y)のリファレンス位置とのズレ

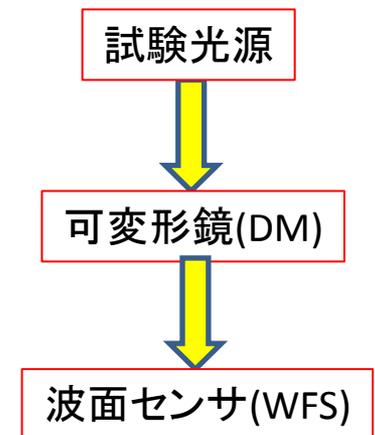
ExAO: Woofer AO

- ◆ 目標性能(SR=0.3@1.2 μ m)へ最適化試験
 - 光源精度: SR=0.3 \rightarrow 0.8(@0.633 μ m) [前回]
 - WFS測定点数: 52素子
 - DM制御点数: 52点
 - 作用行列の精度
 - 制御パラメータ: 比例ゲイン(Kp)

[今回考慮]



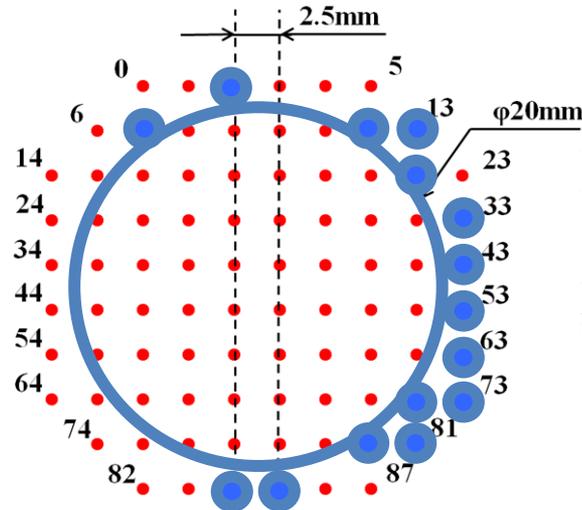
WFS測定点(52点)



ExAO: DM制御点

◆ DMの制御点を増やす[5/25試験]

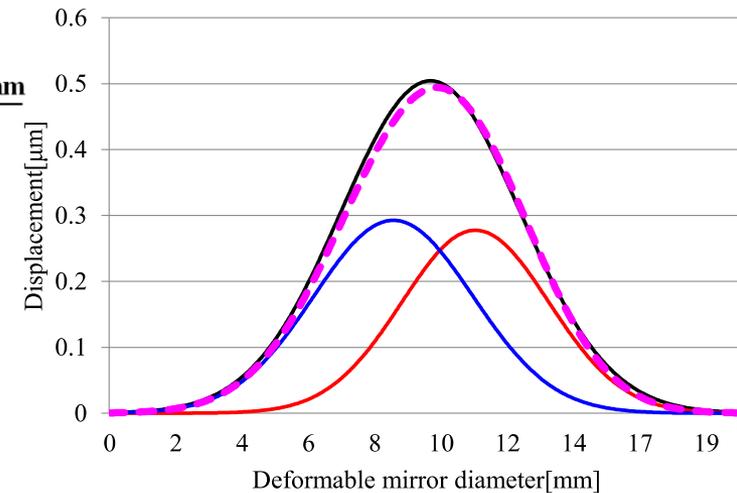
WFS画像と左右反転



● Element — Effective diameter

追加制御点
DM制御点(全点67個)

DM素子の振る舞い



1素子の制御が
他素子に伝搬する

選定基準

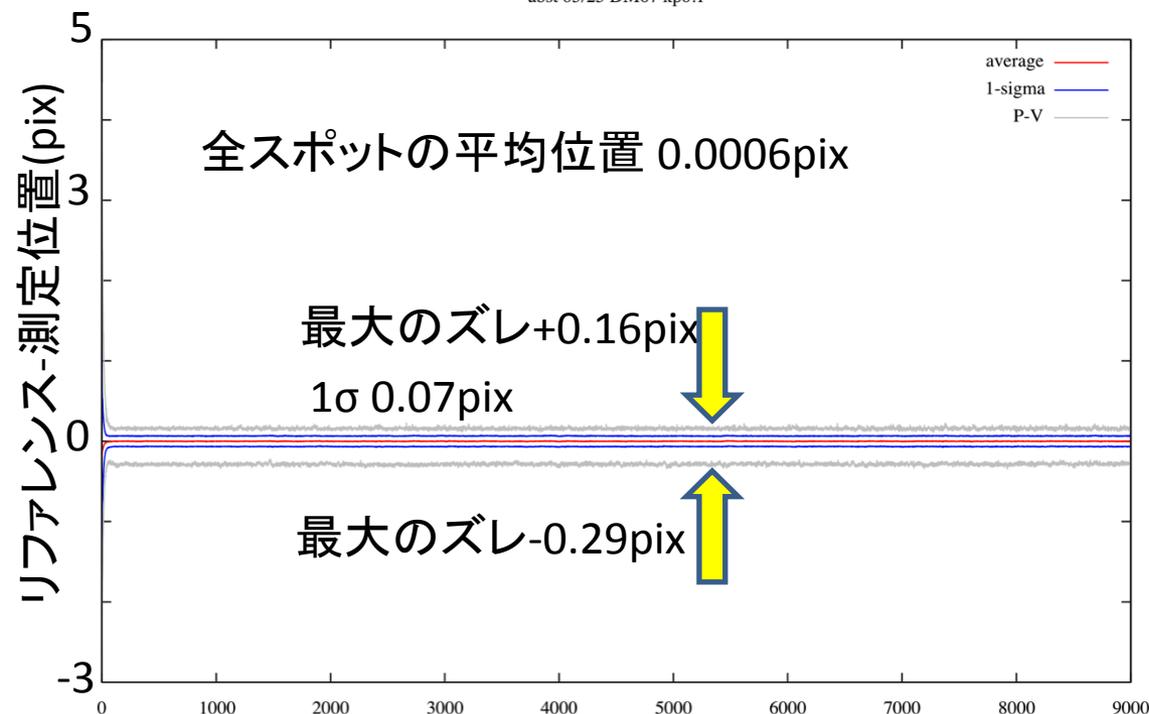
作用行列作成時に有効な反応を示した地点
→「有効」に関してまだ曖昧

ExAO: 大気乱流なしAOあり(DM多素子)

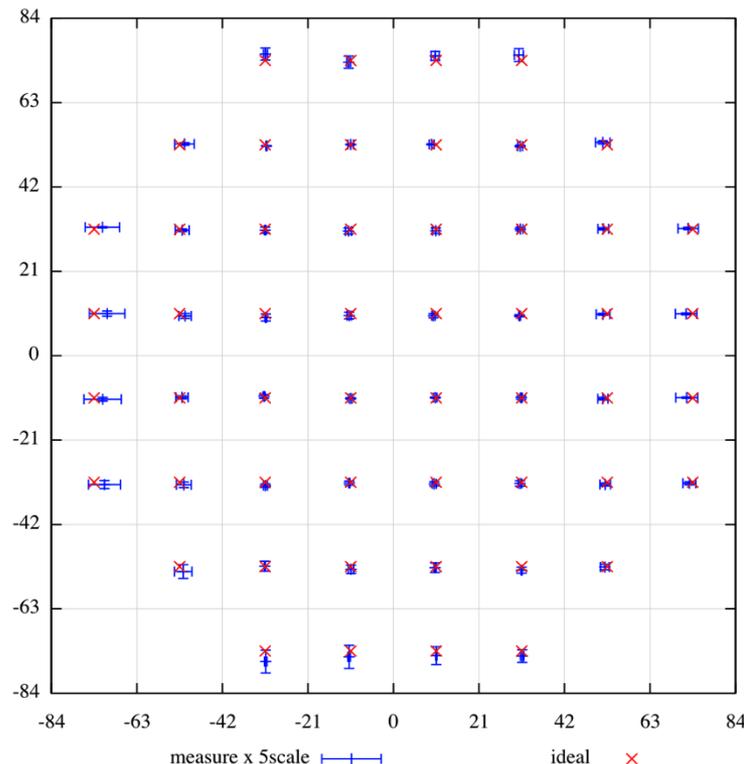
◆ AO制御: 制御素子を52→67へ

– 右側のエラーは大きいですが1σ内に
104個の座標データの統計

abst 05/25 DM67 kp0.1



spots 05/25 DM67 kp0.1



フレーム番号(1フレーム1m秒)

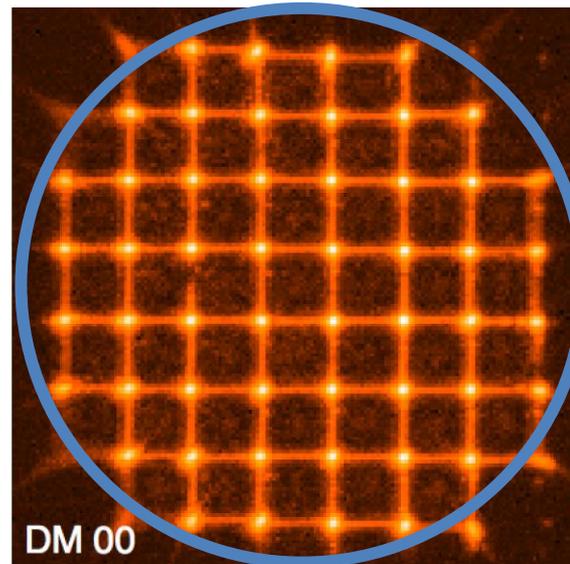
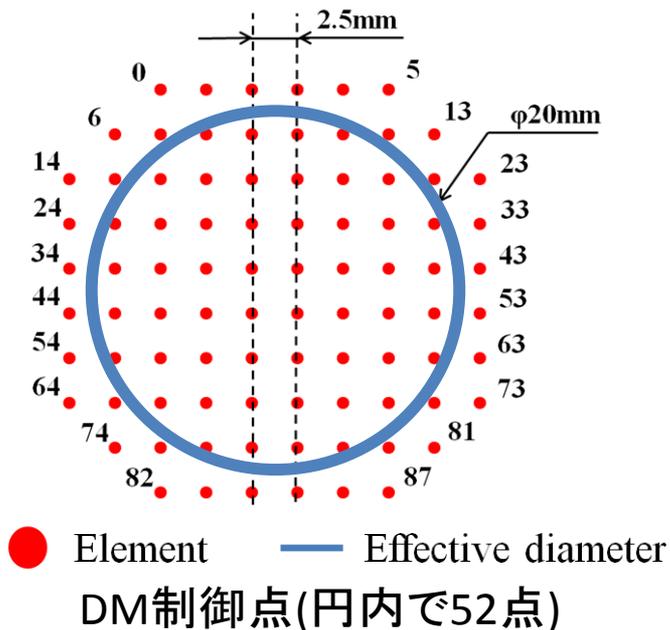
52測定点(x, y)のリファレンス位置とのズレ

リファレンス位置(理想状態) ×
 測定位置(5倍拡大) +

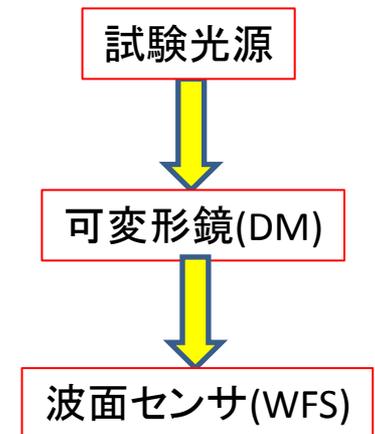
ExAO: Woofer AO

- ◆ 目標性能(SR=0.3@1.2 μ m)へ最適化試験
 - 光源精度: SR=0.3 \rightarrow 0.8(@0.633 μ m) [前回]
 - WFS測定点数: 52素子
 - DM制御点数: 52点
 - 作用行列の精度
 - 制御パラメータ: 比例ゲイン(Kp)

[今回考慮]



WFS測定点(52点)



ExAO: 作用行列多数回取得

◆ DMの作用行列取得

1. DMに司令値 y を与える
2. WFSの出力値 u を測定
3. 作用行列 M を得る

作用行列取得時

$$\begin{array}{cc} \text{WFS} & \text{DM} \\ \downarrow & \downarrow \\ \mathbf{u} = \mathbf{M} \mathbf{y} \end{array}$$

各DMに順次司令値を与えたときのWFS画像

↓

$$\begin{array}{cc} \text{AO制御時} & \\ \text{DM} & \text{WFS} \\ \downarrow & \downarrow \\ \mathbf{y} = \mathbf{M}^{\dagger} \mathbf{u} \end{array}$$

◆ 1度だと測定精度が悪い

- M行列の精度が悪化
- AO制御でのDM出力悪化
- SR悪化

◆ 作用行列取得を複数回行い平均化

M: 作用行列
 M^{\dagger} : 作用行列の疑似逆行列
 y : DMの司令値
 u : WFS測定値

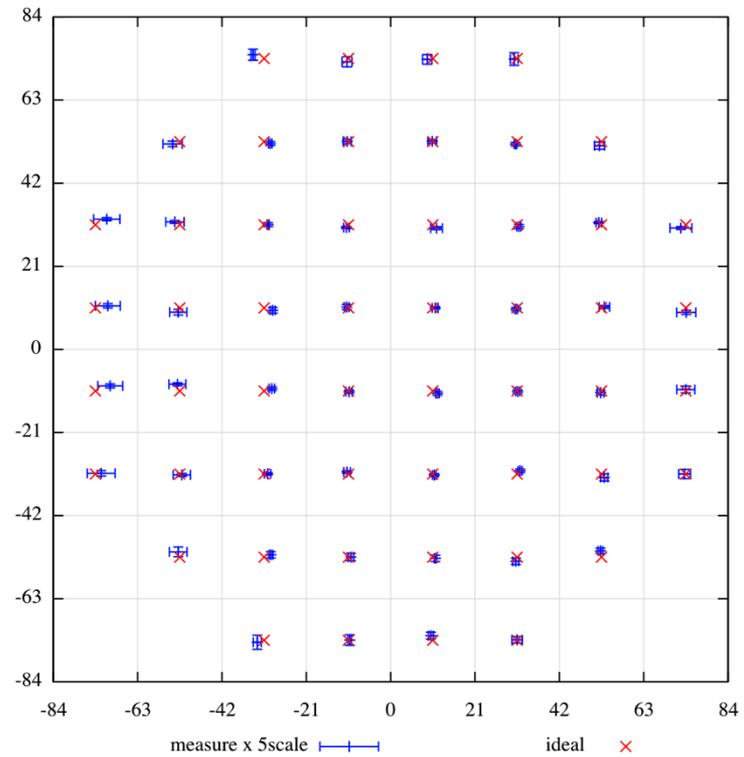
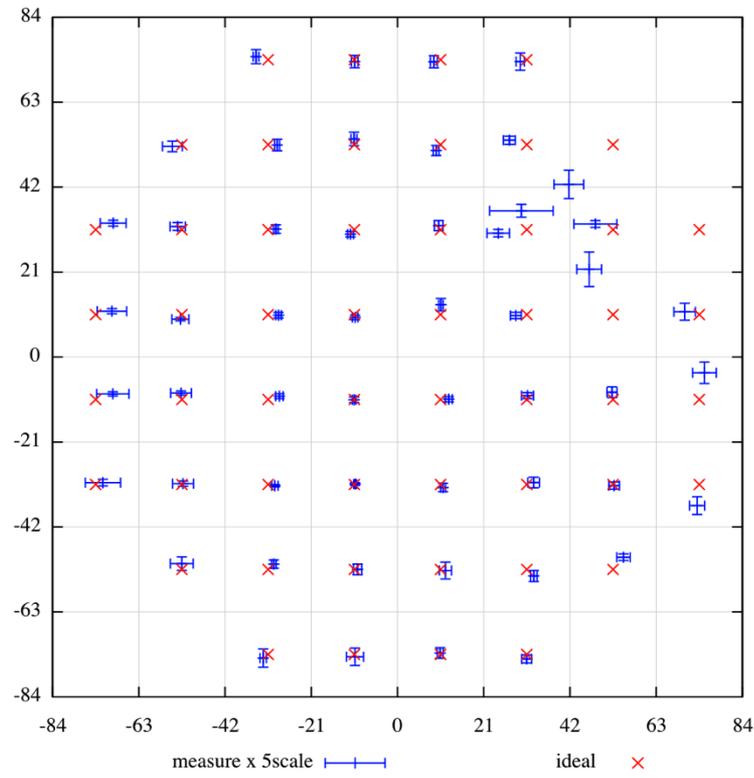
ExAO: AOあり(作用行列多数回取得)

◆AO制御: 作用行列取得を1—100回 [4/27]

— 精度が上昇。10回と100回で違いは見られなかった

作用行列取得1回
spots 04/27 Loop 1

作用行列取得10回
spots 04/27 Loop 10



リファレンス位置(理想状態) ×
 測定位置(5倍拡大) +

リファレンス位置(理想状態) ×
 測定位置(5倍拡大) +

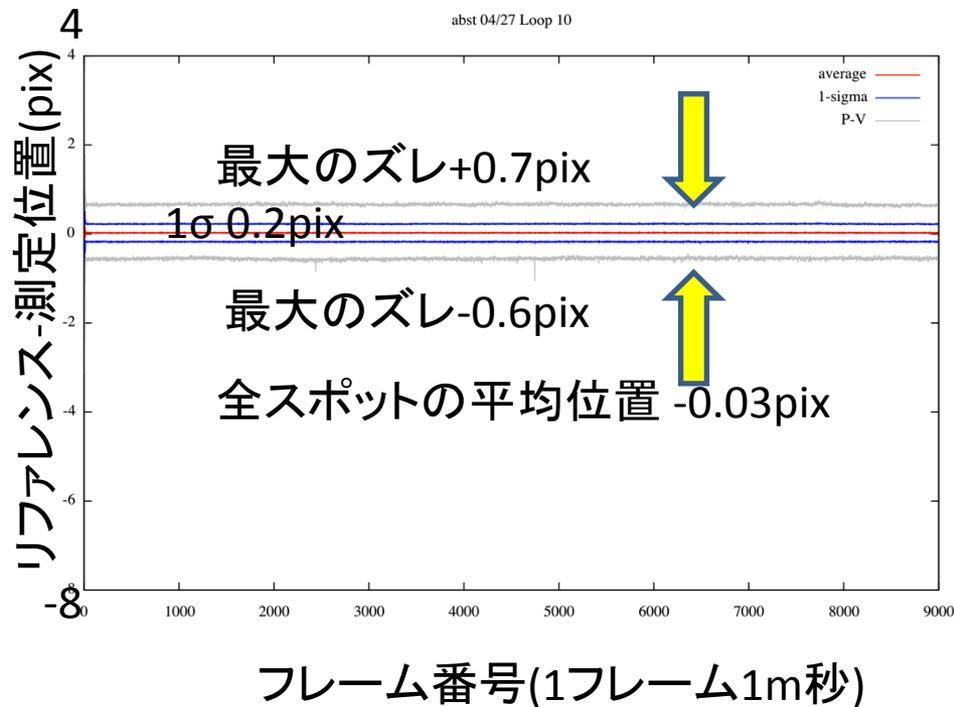
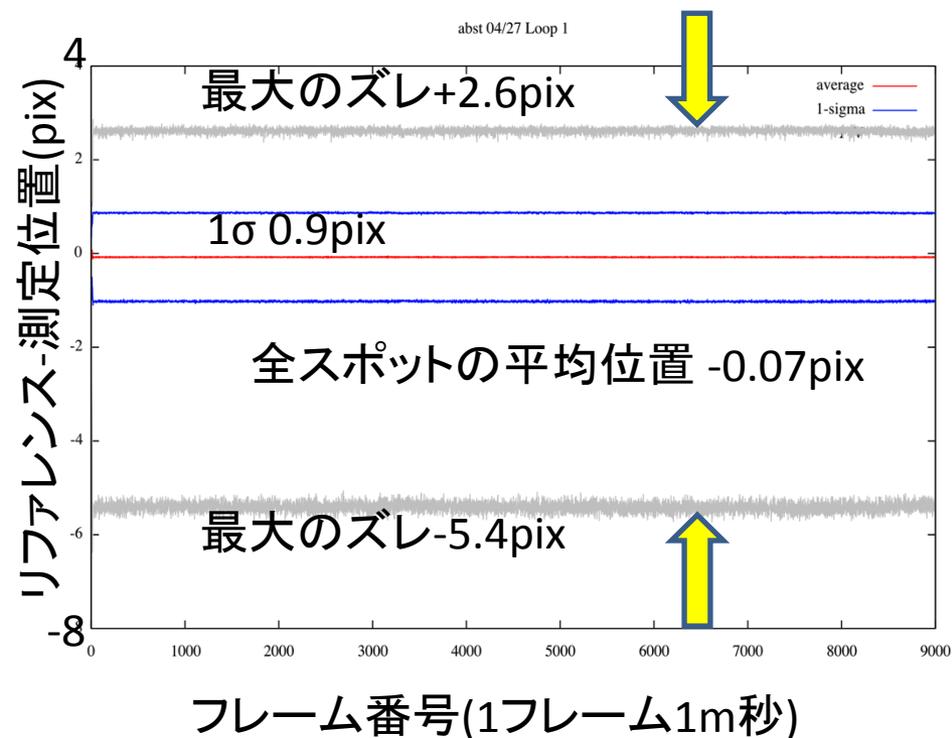
ExAO: AOあり(作用行列多数回取得)

◆AO制御: 作用行列取得を1-100回 [4/27]

- 多数回取得することでスポット変動をP-V1pix内に

104個の座標データの統計

104個の座標データの統計

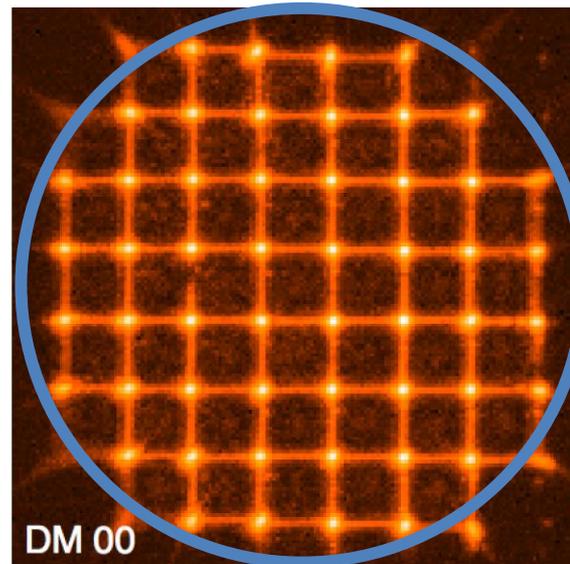
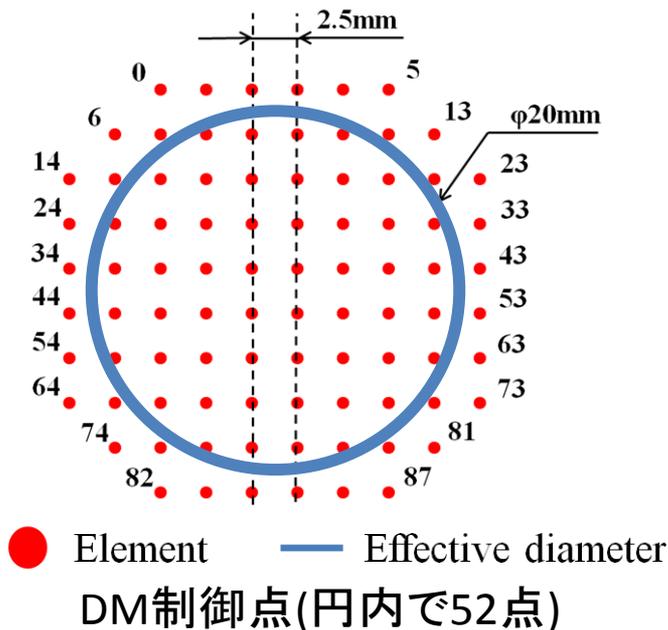


52測定点(x, y)のリファレンス位置とのズレ

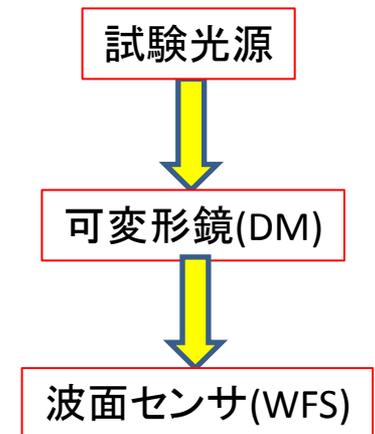
ExAO: Woofer AO

- ◆ 目標性能(SR=0.3@1.2 μ m)へ最適化試験
 - 光源精度: SR=0.3→0.8(@0.633 μ m) [前回]
 - WFS測定点数: 52素子
 - DM制御点数: 52点
 - 作用行列の精度
 - 制御パラメータ: 比例ゲイン(Kp)

[今回考慮]



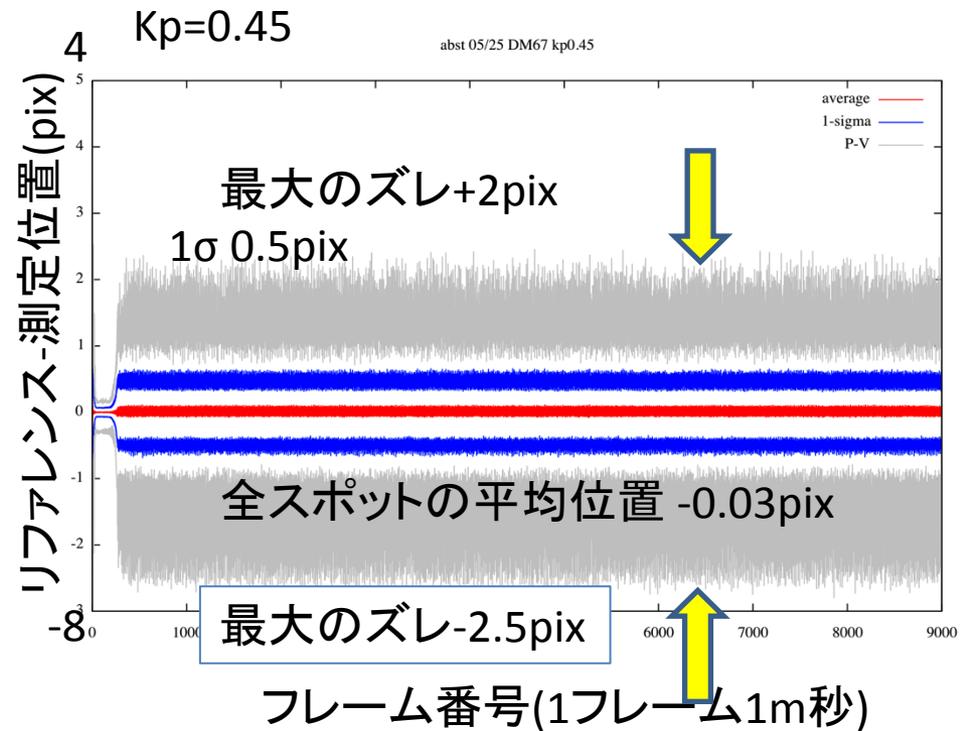
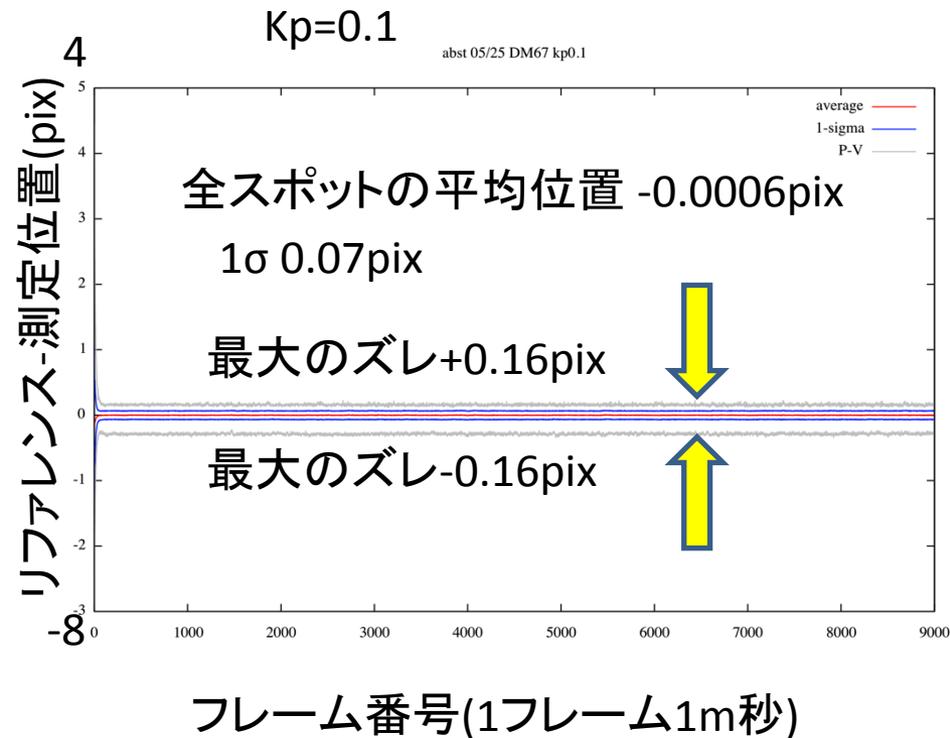
WFS測定点(52点)



ExAO: AOあり(比例ゲイン調整)

◆ AO制御: 比例制御のゲイン K_p

– K_p を大きくしすぎると発信してしまう

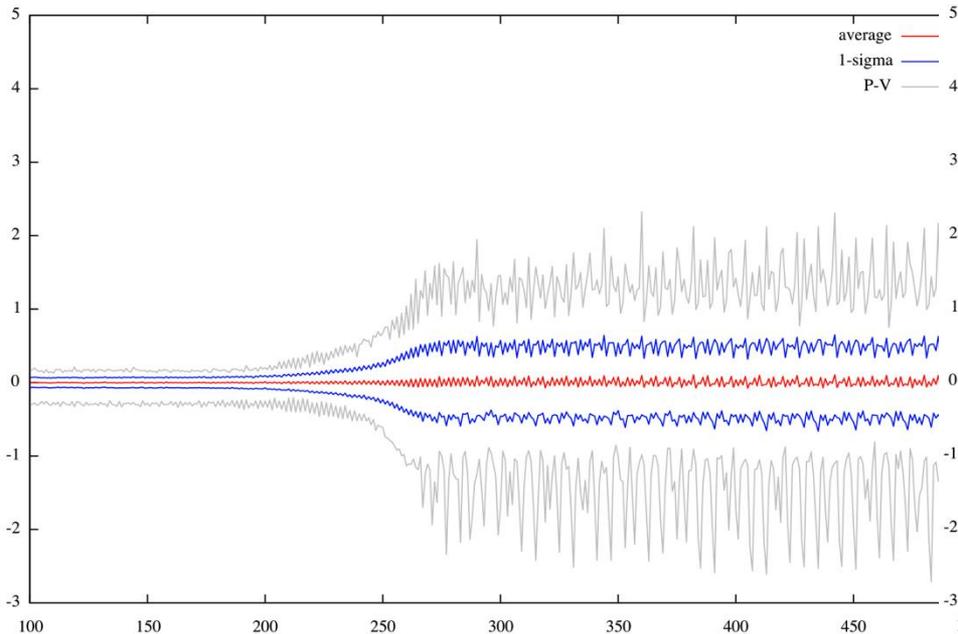


52測定点(x, y)のリファレンス位置とのズレ

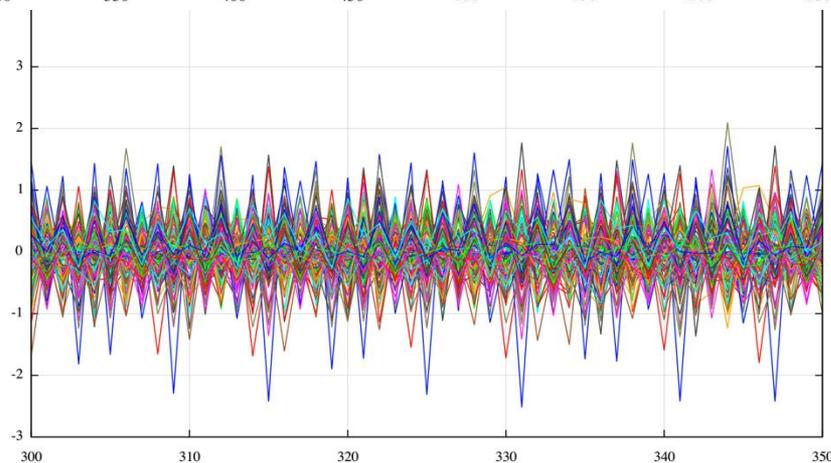
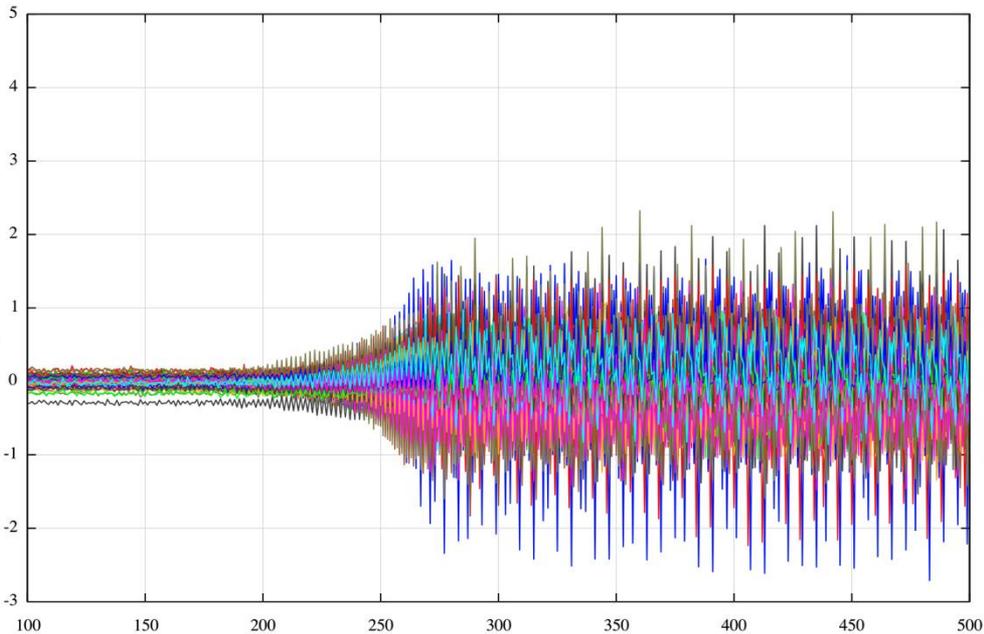
ExAO: AOあり(比例ゲイン調整)

◆ $K_p=0.45$ の時200フレーム(~ 0.2 秒)で発信開始

abst 05/25 DM67 kp0.45



moving 0525_7kp0.5



ExAO: 実験まとめ

◆ DMの平面出し制御

◆ WFSの1pixは0.429 μm の波面残差相当

– 0.67 λ /pix @633nm, 0.35 λ /pix @1.2 μm

制御期間中の平均値

	DM 点数	M 行列	比例 ゲイン	平均	σ	最小	最大	σ (λ)	SR (換算)
AOなし				-0.188	0.99	-2.13	+3.50	0.66	-
AO あり	52	1	0.45	0.011	0.22	-0.82	+0.83	0.15	0.42
				-0.077	0.95	-5.41	+2.62	0.64	-
	10	0.025		0.20	-0.56	+0.66	0.13	0.49	
		67		0.003	0.48	-1.44	+1.33	0.32	-
	0.1	0.001		0.07	-0.29	+0.16	0.04	0.92	

試験日が異なる

発振

リファレンス光源のSRは0.8

パラメータサーベイは出来ていないので

→Woofler WFSでは測定出来ない

最適値は不明

高次の波面残差が0.03 λ 程度

まとめ

◆ Woofer AOの基本パラメータ試験中

- 制御波面残差 0.067pix (σ , $0.045\lambda \rightarrow \text{SR}0.92$ 相当)
- DM制御点数、作用行列平均化、制御ゲインの依存性と最適値を求める
- \rightarrow 実験だけでは制御できていない依存性などがあるので、シミュレーションを行う
- \rightarrow SRを完結に取得できるように

◆ 大気乱流の補償を行えるよう

