

小型屈折型補償光学装置CRAOの開発

AOシミュレーションを用いた波面エラーバジレットの評価

京都産業大学 理学研究科M2

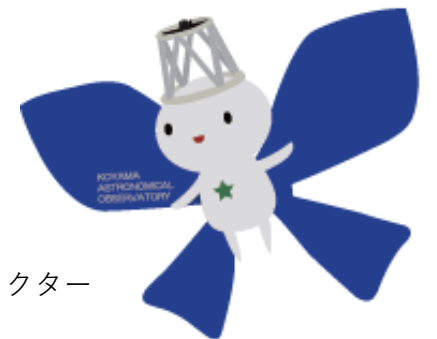
坂部健太

小島礼己、樽田順、池田優二(京都産業大学)

大屋真(国立天文台)

目次

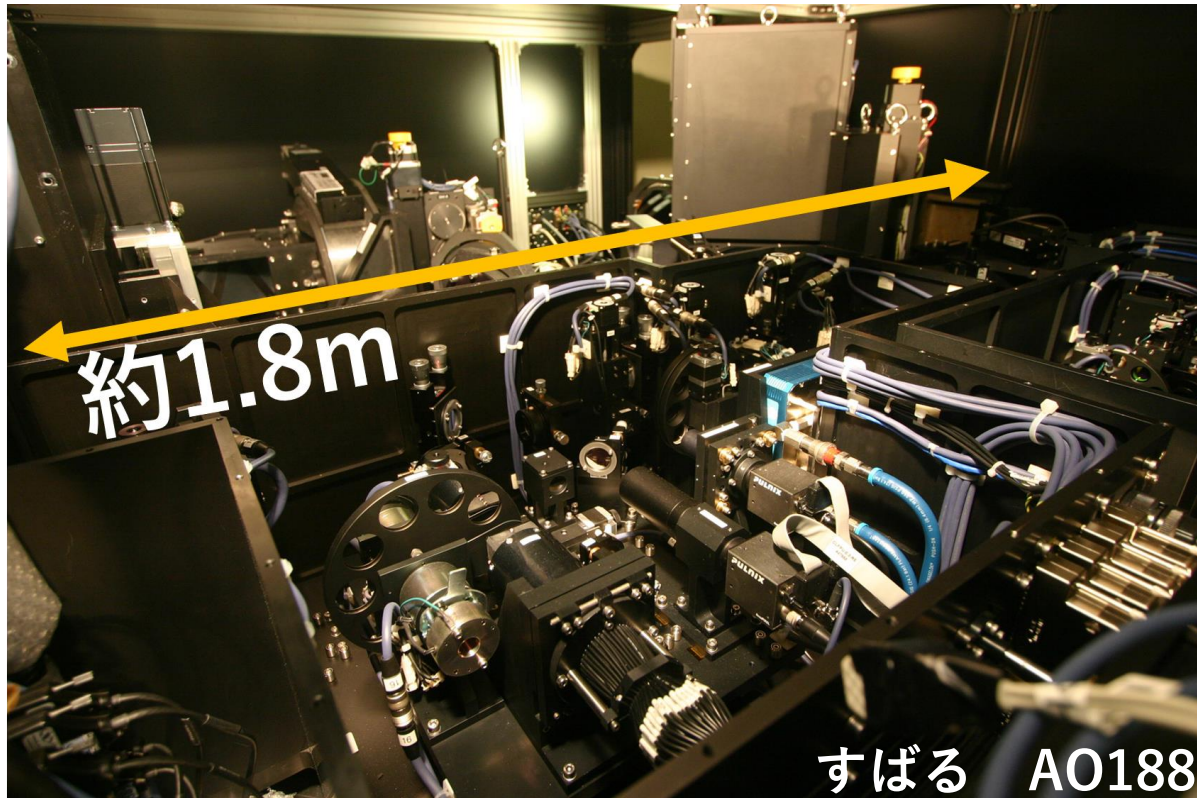
1. イントロダクション
2. YAOシミュレーション
3. 議論
4. 今後の予定



神山天文台マスコットキャラクター
ほしみ〜るちゃん®

1. イントロダクション ~AOの課題~

補償光学(AO)は、望遠鏡には**必須**の装置



AOの課題

装置の大型化

&

製作コストが膨大

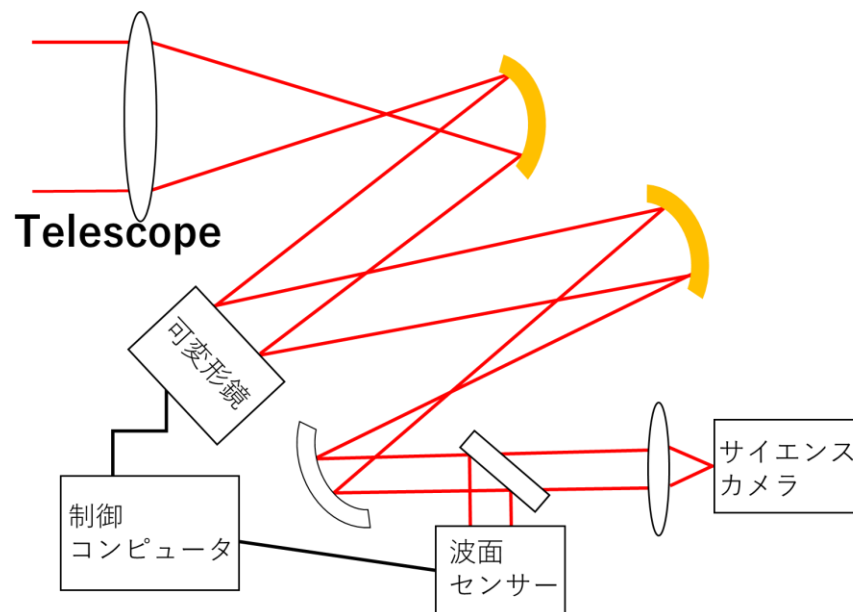
➡ 中小型望遠鏡に普及しにくい

1. イントロダクション ~CRAO~

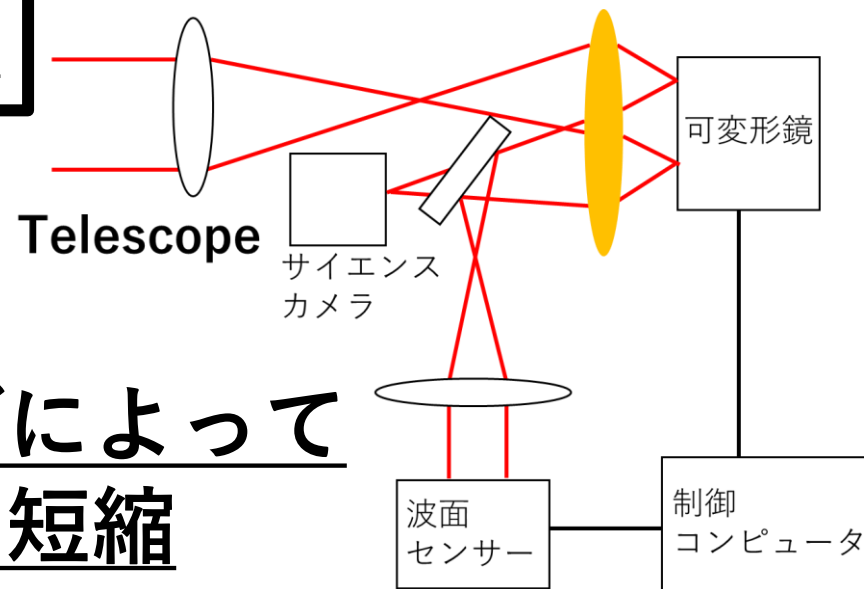
開発テーマ 「小型で安価なAO」

- 開発目標
1. 小型化 装置サイズ < A4用紙サイズ
 2. 安価 装置製作費用 < 500万円

反射型



屈折型



レンズによって
光路を短縮

1. イントロダクション ~CRAO~

開発テーマ 「小型で安価なAO」

- 開発目標
1. 小型化 装置サイズ < A4用紙サイズ
 2. 安価 装置製作費用 < 500万円

既成の光学素子を利用することで、コストダウン



波面センサ

Thorlabs社
WFS30-14AR



可変形鏡

Thorlabs社
DM140A-35-UM01

1. イントロダクション ~CRAO~

開発テーマ **「小型で安価なAO」**

小型屈折型補償光学装置

CRAO (Compact Refractive Adaptive Optics)



波面センサ

Thorlabs社
WFS30-14AR



可変形鏡

Thorlabs社
DM140A-35-UM01

可変形鏡(DM)
SATURN+
TTステージPSH4

レンズを使用し、
ダブルパス光路により
光路を短縮

天体光

サイエンスカメラ(SC)

270mm

ダブルパスレンズ
(DPL)

波面センサ(WFS)
GE680

CRAO
(2020ver.)

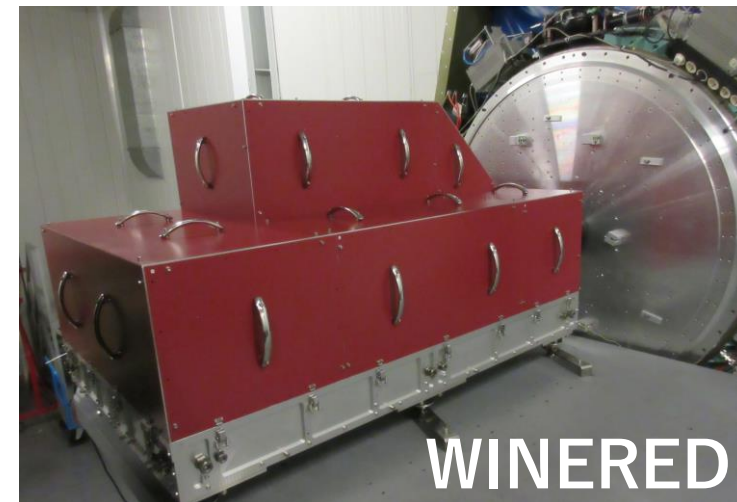
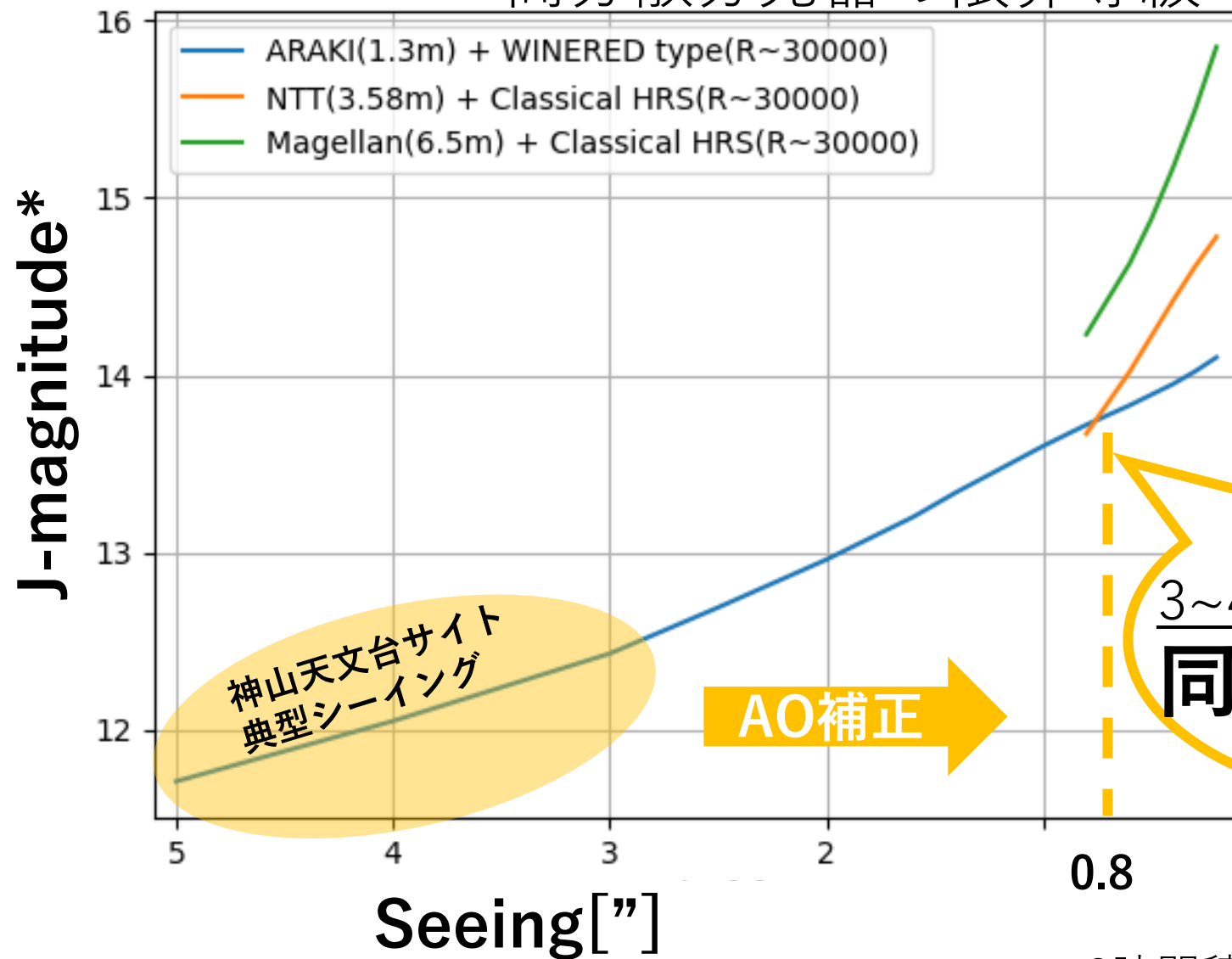
390mm

装置仕様 (北尾 2012)

光学系	透過型
補償方式	Modal- Control w/ closed Loop
波長域	400nm~700nm
動作周波数 (帯域幅)	200Hz
装置視野	30arcsec
限界等級	4mag(V-band)
補償性能	波面残差,(RMS) 1350nm→ 315nm
	Seeing 3.0 arcsec→ 0.8 arcsec

SE(第2世代)

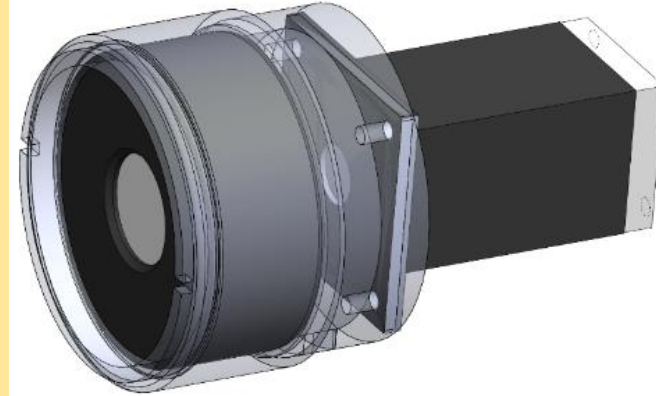
1. イントロダクション ~補償性能~ 高分散分光器の限界等級



WINERED

3~4mクラスの望遠鏡と
同じ限界等級！

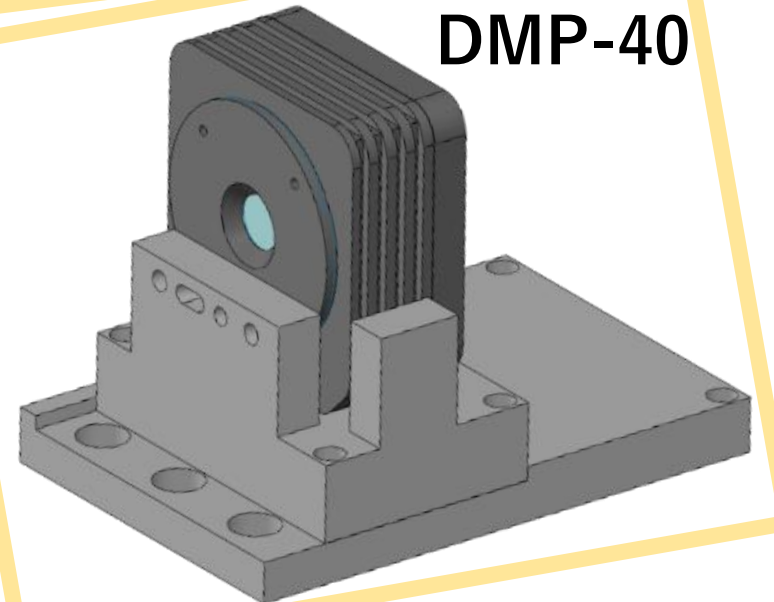
1. イントロダクション ~開発状況~



**SATURN &
TTステージ**

CRAO開発年表

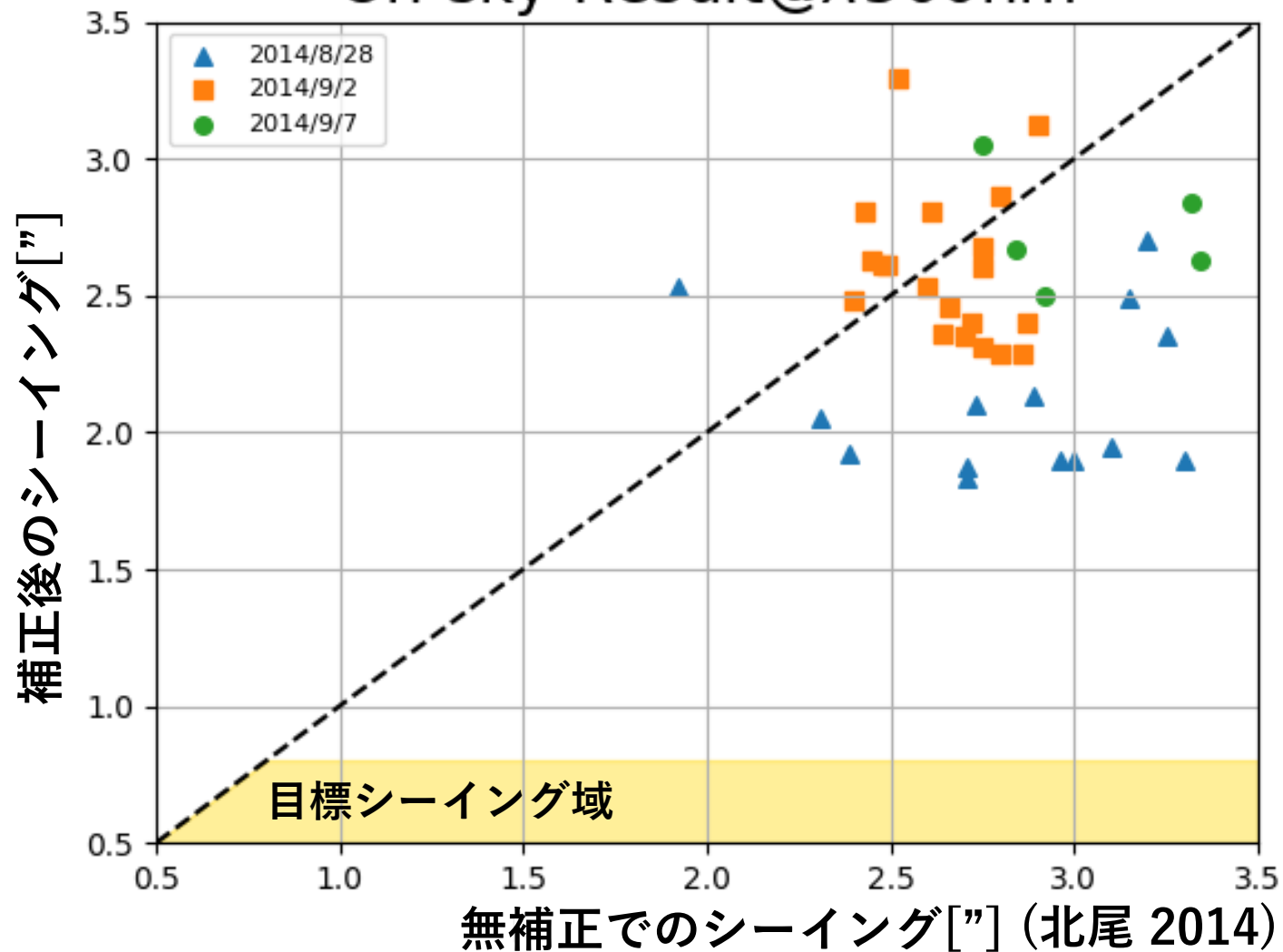
2011年度	開発着手
2012年度	仕様決定
2013年度	筐体設計
2014年度	ファーストライト (CRAO1号機)
2015年度	可変形鏡交換 (CRAO1.5号機)
2016年度~2017年度	休止
2018年度~	開発再開



DMP-40

1. イントロダクション ~ 先行研究 ~

On-sky Result@ $\lambda 500\text{nm}$

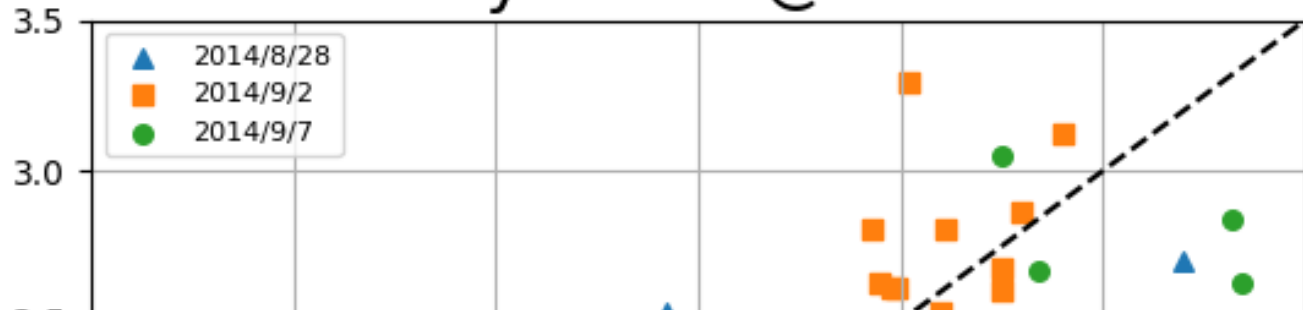


京都産業大学
1.3m反射望遠鏡



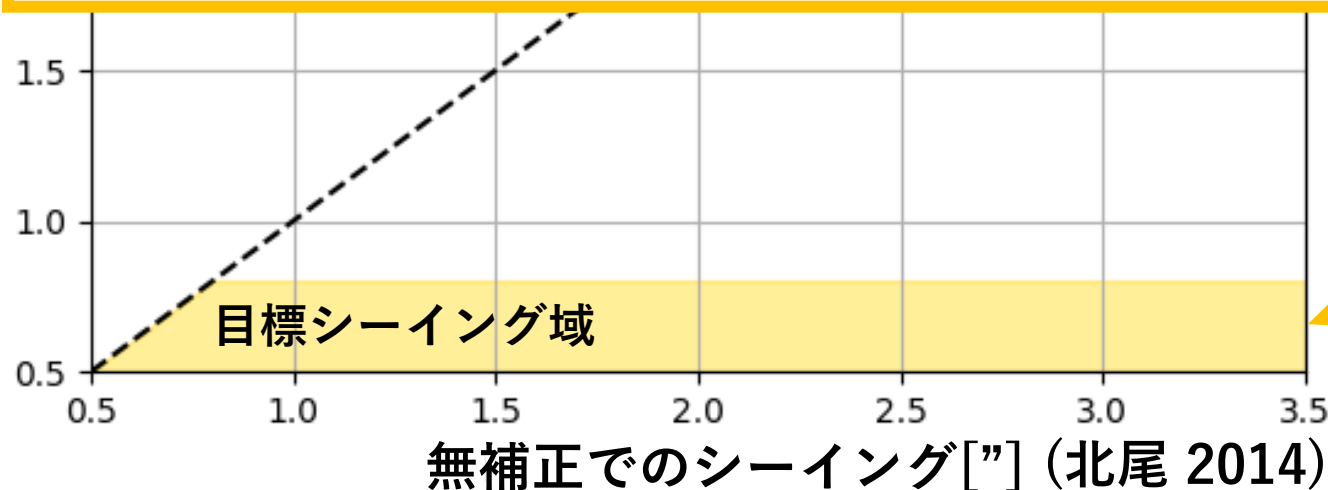
1. イントロダクション ~ 先行研究 ~

On-sky Result@ $\lambda 500\text{nm}$



研究目的：性能未達成の原因究明

補正後のシーイング["]



目標値 ($0.8''$) に
未到達

1. イントロダクション ~先行研究~

WFS、DMなど複数の素子が相互に関係しているため、
個々の影響を**実験的に究明することは難しい**

- ユニットごとの影響が分離可能
- 再現性が取り易い

シミュレーションで再現

原因究明

目次

1. イントロダクション

2. YAOシミュレーション

3. 議論

4. 今後の予定

2.YAOシミュレーション ~条件設定~

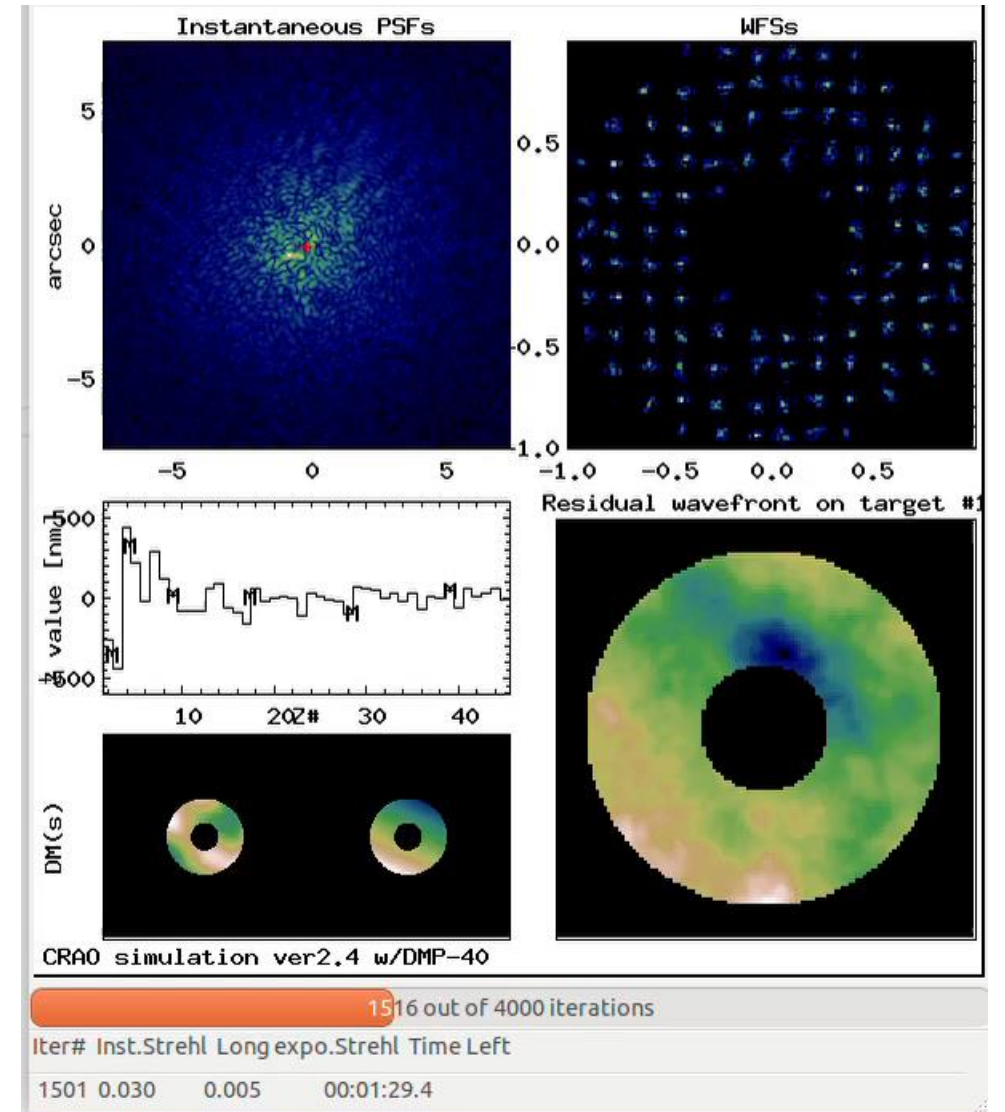
使用シミュレータ:

YAO(Yorick Adaptive Optics)

[F.Rigaut + 2013]

インタプリタ言語Yorickで書かれた
AOシミュレータの1つ

リアルタイムに
可変形鏡、波面センサ、PSFの
疑似画像を表示



2.YAOシミュレーション ~大気~

大気パラメータの設定

大気高度[m]	0	400	6000	10000
---------	---	-----	------	-------

重みづけ	0.2	0.4	0.1	0.3
------	-----	-----	-----	-----

風速[m/s]	1	1	31	42
---------	---	---	----	----

風向	S→N	S→N	S→N	S→N
----	-----	-----	-----	-----

フリード長[cm]	3.4	3.7	4.1
(シーイング["])	(3.3)	(3.0)	(2.7)

10000m

42m/s

6000m

31m/s

400m

1m/s

0m

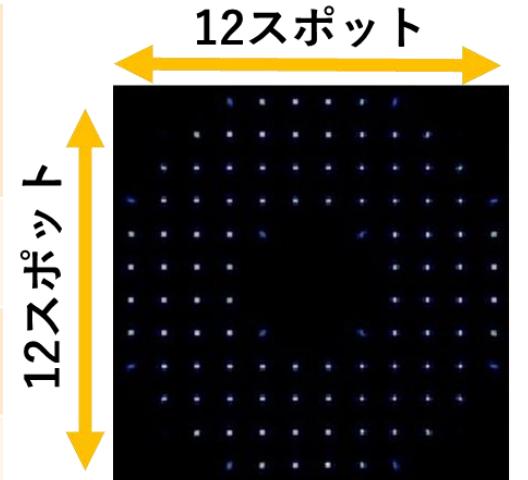
1m/s



2.YAOシミュレーション ~条件設定~

AOシステム

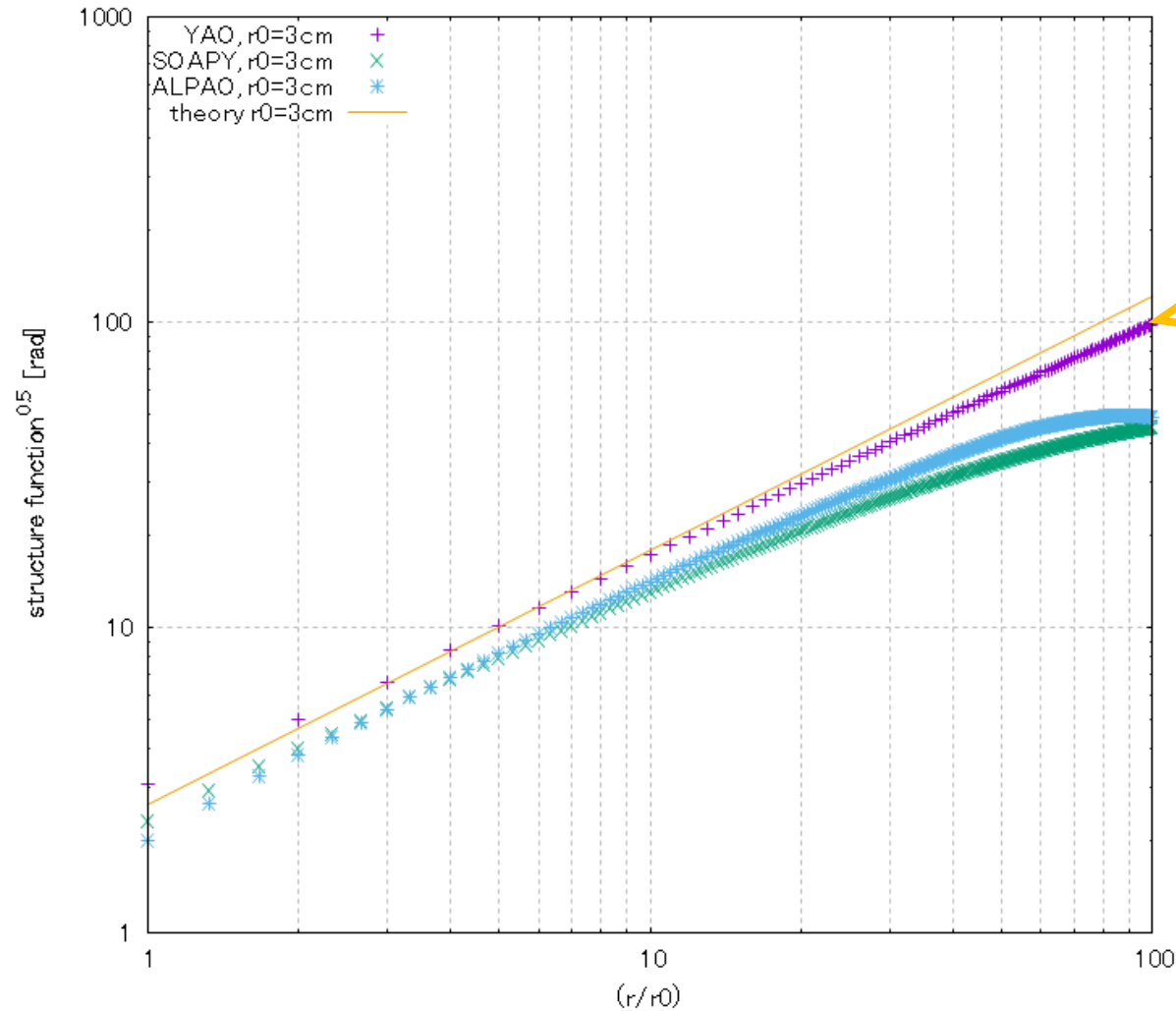
WFS	12x12 Shack-Hartmann
DM	40素子 Stacked-Array
制御行列	SVD(特異値分解)
補償方式	Closed-Loop
動作周波数	200Hz
ガイド星(V-band)	1 mag
シミュレーション回数	4000回 (AO動作時間 20s)
望遠鏡口径	1.3m(荒木望遠鏡)



2.YAO ~位相スクリーンの検証~

ポイントその1

大気構造関数のAOシミュレータ値と理論値を比較



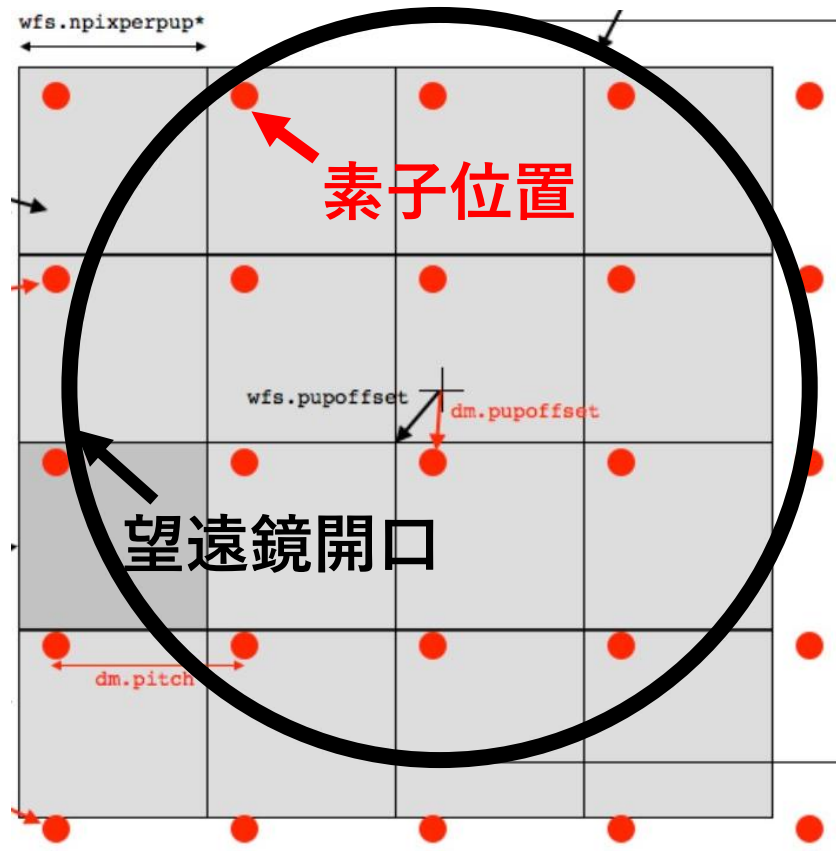
YAOの位相スクリーンは
理論値と概ね一致！



2.YAOシミュレーション ~条件設定~

ポイントその2

YAO上でのDM素子配置



実際の素子配置

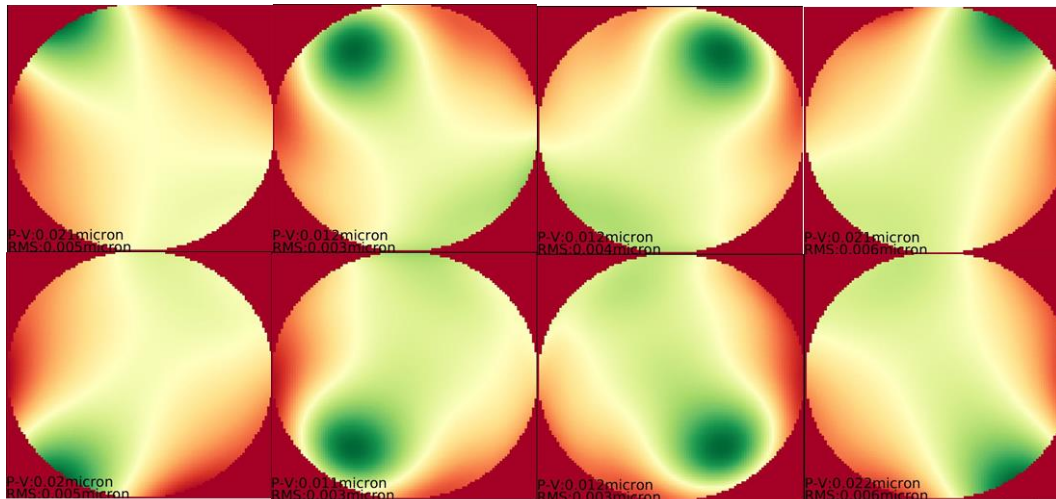


素子配置が大きく異なる！！

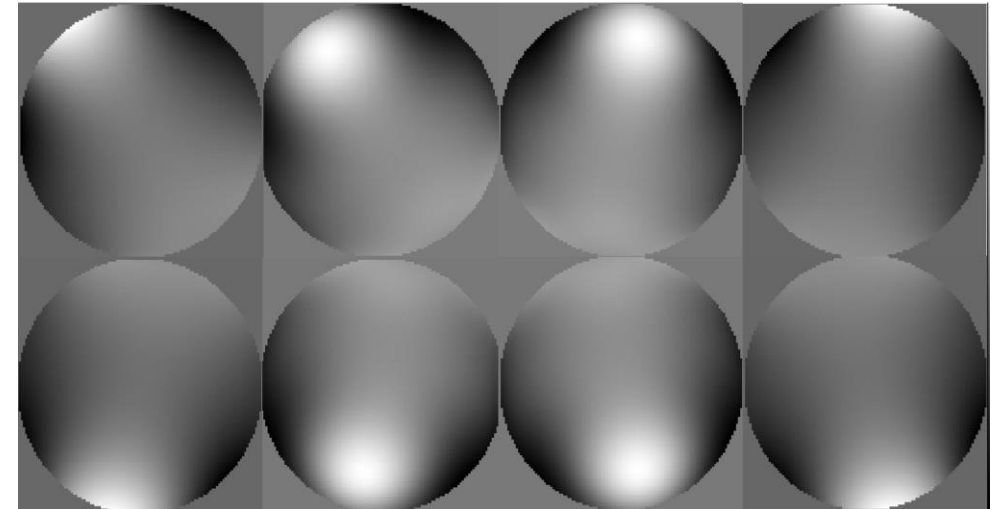
2.YAOシミュレーション ~条件設定~

ポイントその2

可変形鏡形状測定結果



影響関数(YAO用)



自作プログラムで
変換



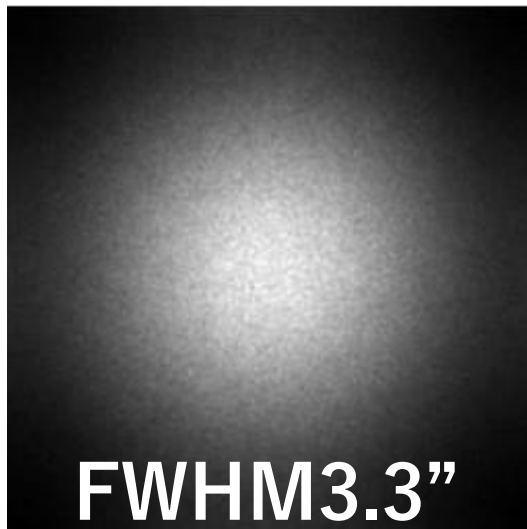
2.YAOシミュレーション ~結果~

シーイング3.3”での結果

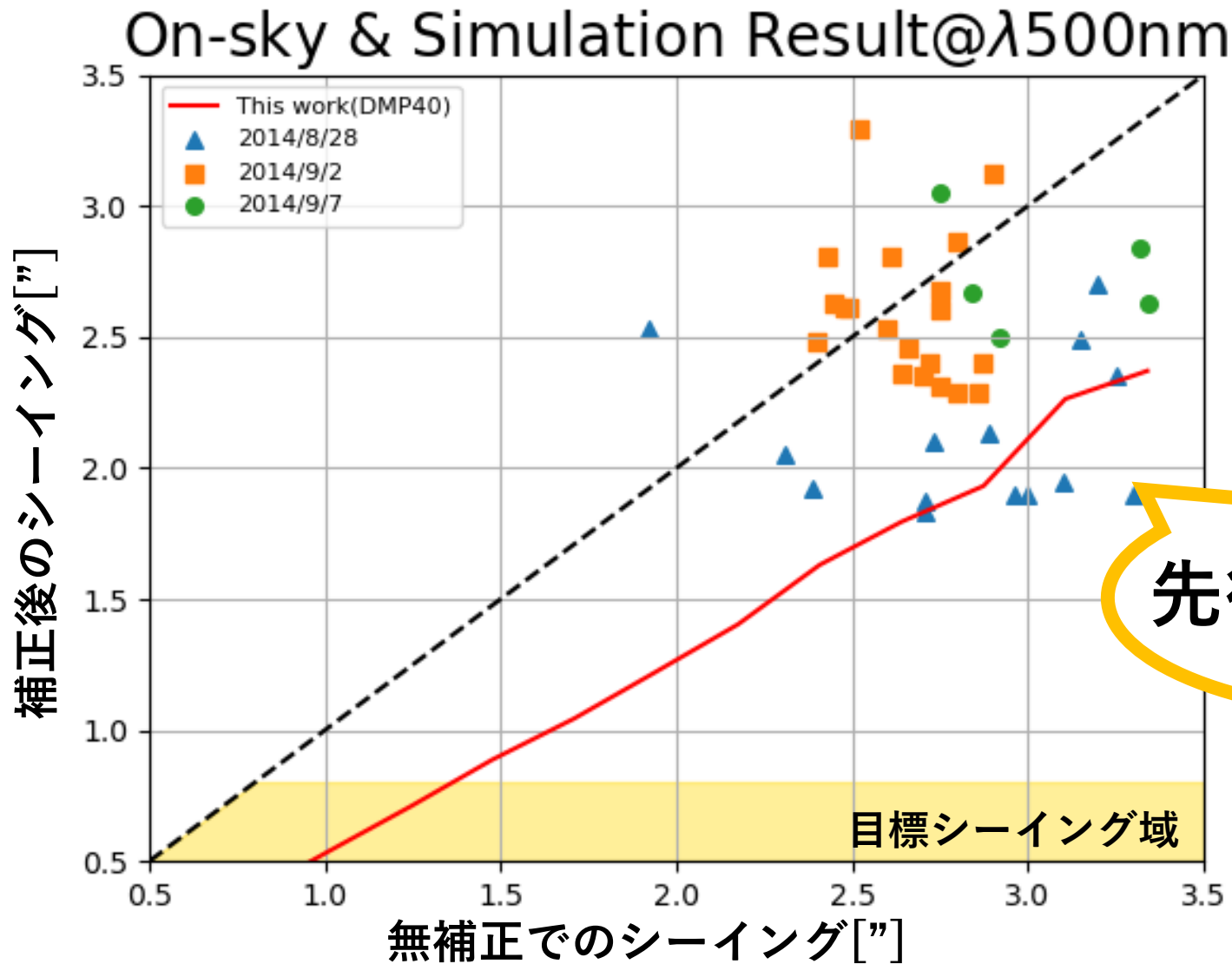
波長[nm]	FWHM[”]	WFE(rms)[nm]
400	2.36	764 ± 377
550	2.30	
700	2.04	

目標性能(<0.8”)が出ていない

シミュレーション結果のPSF@λ 550nm



2.YAOシミュレーション ~結果~



目次

1. イントロダクション
2. YAOシミュレーション
- 3. 議論**
4. 今後の予定

3.議論 ～エラーバジェット～

AOシステムで起こりうるエラー項目(Hardy,1988)

- 波面測定エラー： σ_M
- AO動作時間遅れによるエラー： σ_T
- 可変形鏡形状再現によるエラー： σ_F
- ガイド星と観測天体の方位誤差： σ_A etc ...

CRAOシステムで考慮すべきエラー式

$$\sigma_{\text{sys}}^2 = \sigma_M^2 + \sigma_T^2 + \sigma_F^2 \quad \sigma_{\text{sys}}^2 : \text{システム全体の誤差}$$

3.議論 ~エラーバジエット~

CRAOシステム評価式

$$\sigma_{\text{sys}}^2 = \sigma_{\text{M}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2 + \sigma_{\text{F}}^2$$

σ_{sys}^2 : システム全体の誤差

σ_{M}^2 : 波面センサ波面測定誤差

σ_{T}^2 : AO動作時間遅れ誤差

σ_{F}^2 : 可変形鏡形状再現誤差

$$= \sigma_{\text{M}}^2 + \sigma_{\text{TB}}^2 + \sigma_{\text{TF}}^2 + \sigma_{\text{F}}^2$$

σ_{TB}^2 : WFSの積分時間によってなまる誤差

σ_{TF}^2 : ループ遅れによる誤差

3. 議論

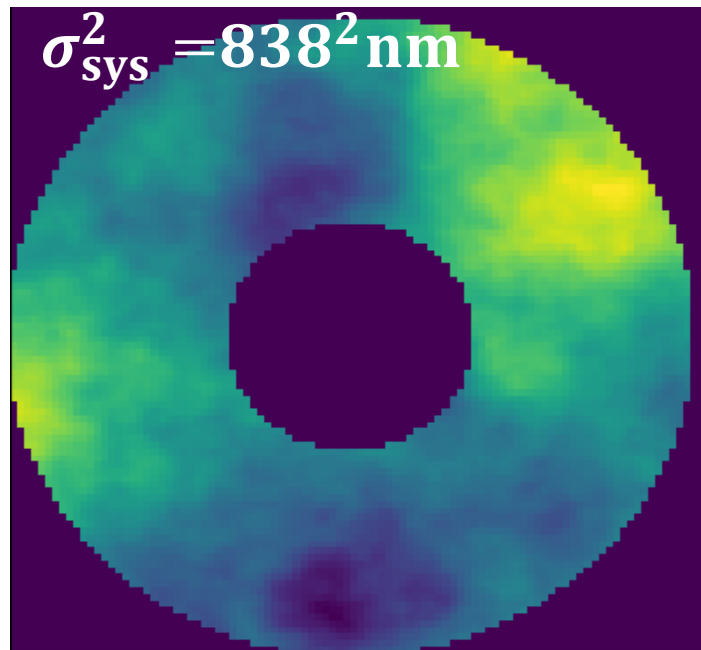
~シミュレーションでのエラーバジェット~

エラーバジェットのシミュレーション条件として

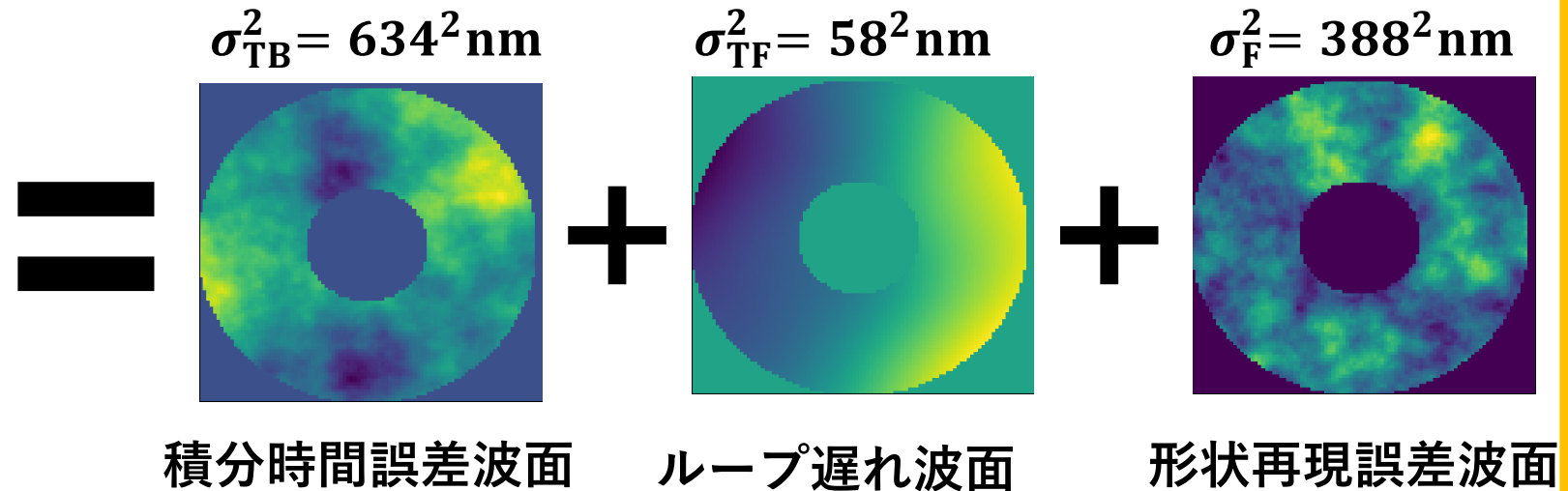
- センサーノイズなし ($\sigma_M = 0$ と仮定)
- 大気を上空10kmの一層モデル

理想的なCRAOモデルでのエラーバジェットの解析を実施

$$\text{CRAOシステム評価式 } \sigma_{\text{sys}}^2 = \sigma_{\text{TB}}^2 + \sigma_{\text{TF}}^2 + \sigma_{\text{F}}^2$$



システム全体の波面残差



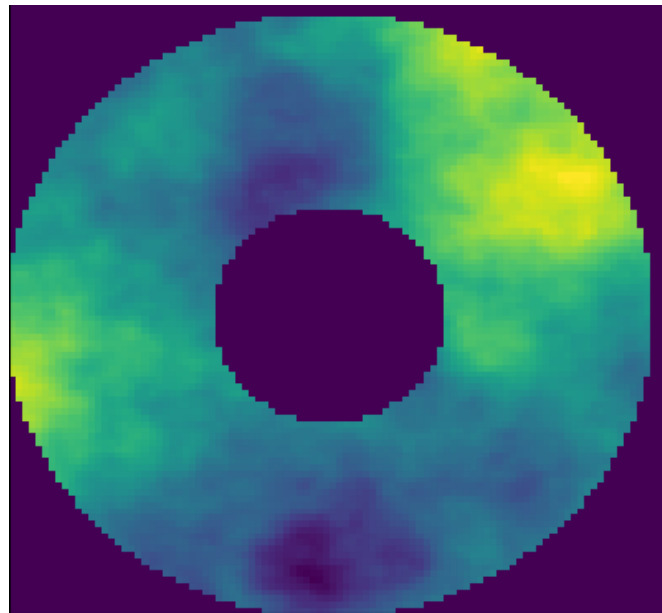
3. 議論

~シミュレーションでのエラーバジェット~

波面誤差 σ^2 の詳細な原因分析をシミュレーションで実施

Zernike多項式で波面残差を展開

Zernike基底ごとに分離することで細かな原因を探る



波面残差マップ σ_{WFE}^2

ゼルニケ係数

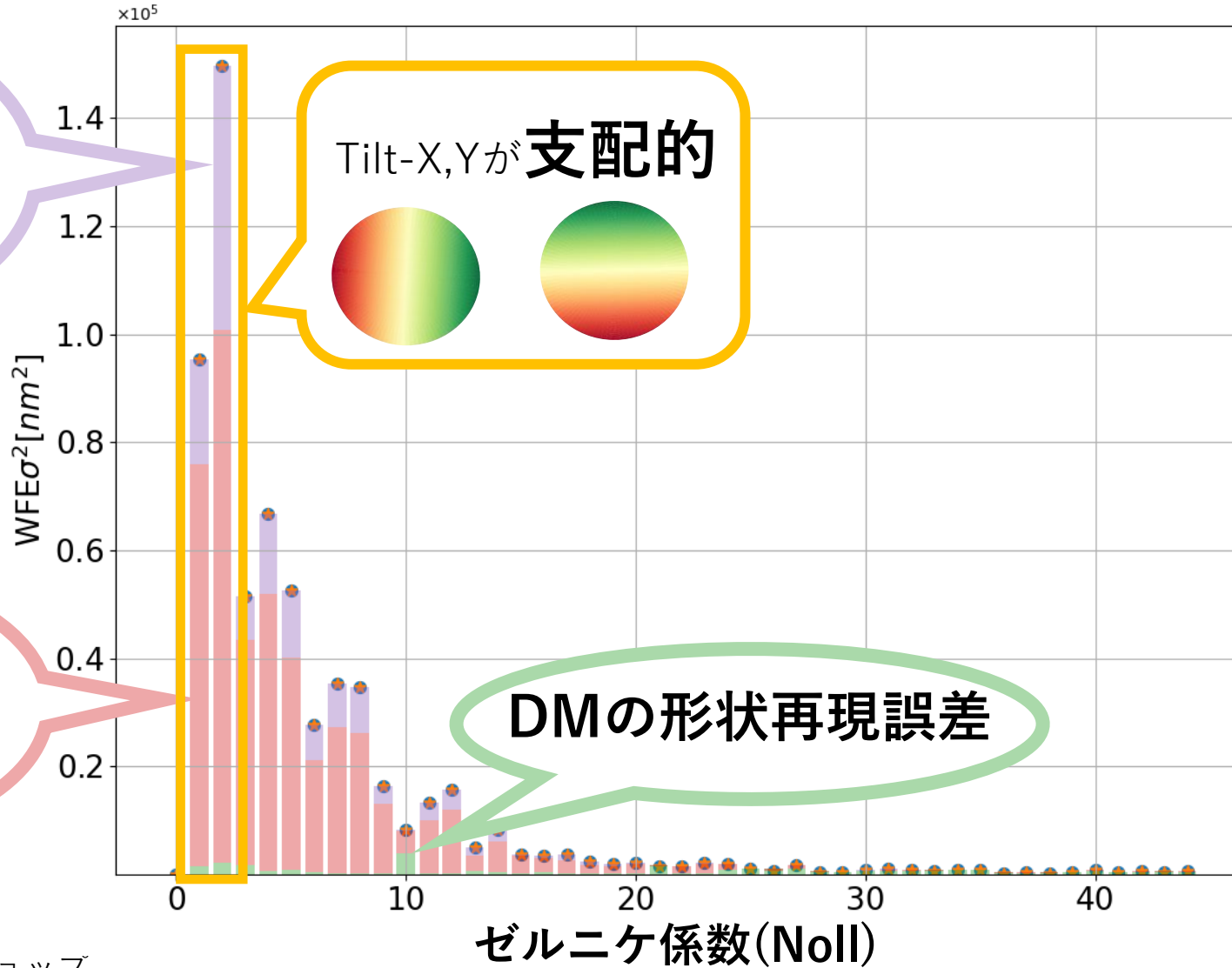
$$\approx \sigma_{Z1}^2 \text{ (circle) } + \sigma_{Z2}^2 \text{ (circle) } + \sigma_{Z3}^2 \text{ (circle) } + \dots + \sigma_{Z44}^2 \text{ (circle)}$$

3. 議論

~シミュレーションでのエラーバジェット~
シミュレーション解析結果

ループ遅れ
誤差

積分時間誤差



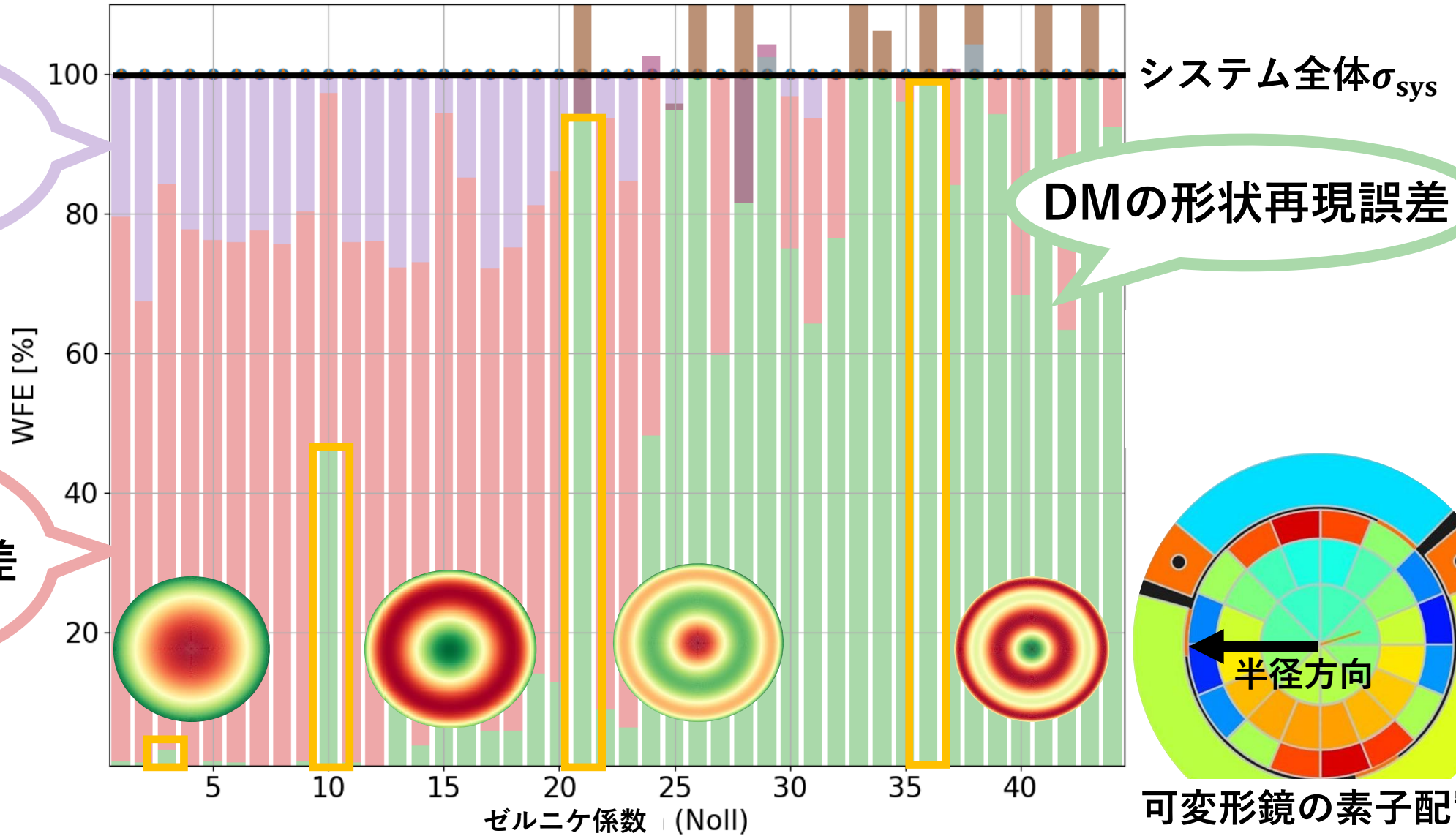
3. 議論

~シミュレーションでのエラーバジェット~
シミュレーション解析結果

ループ遅れ
誤差

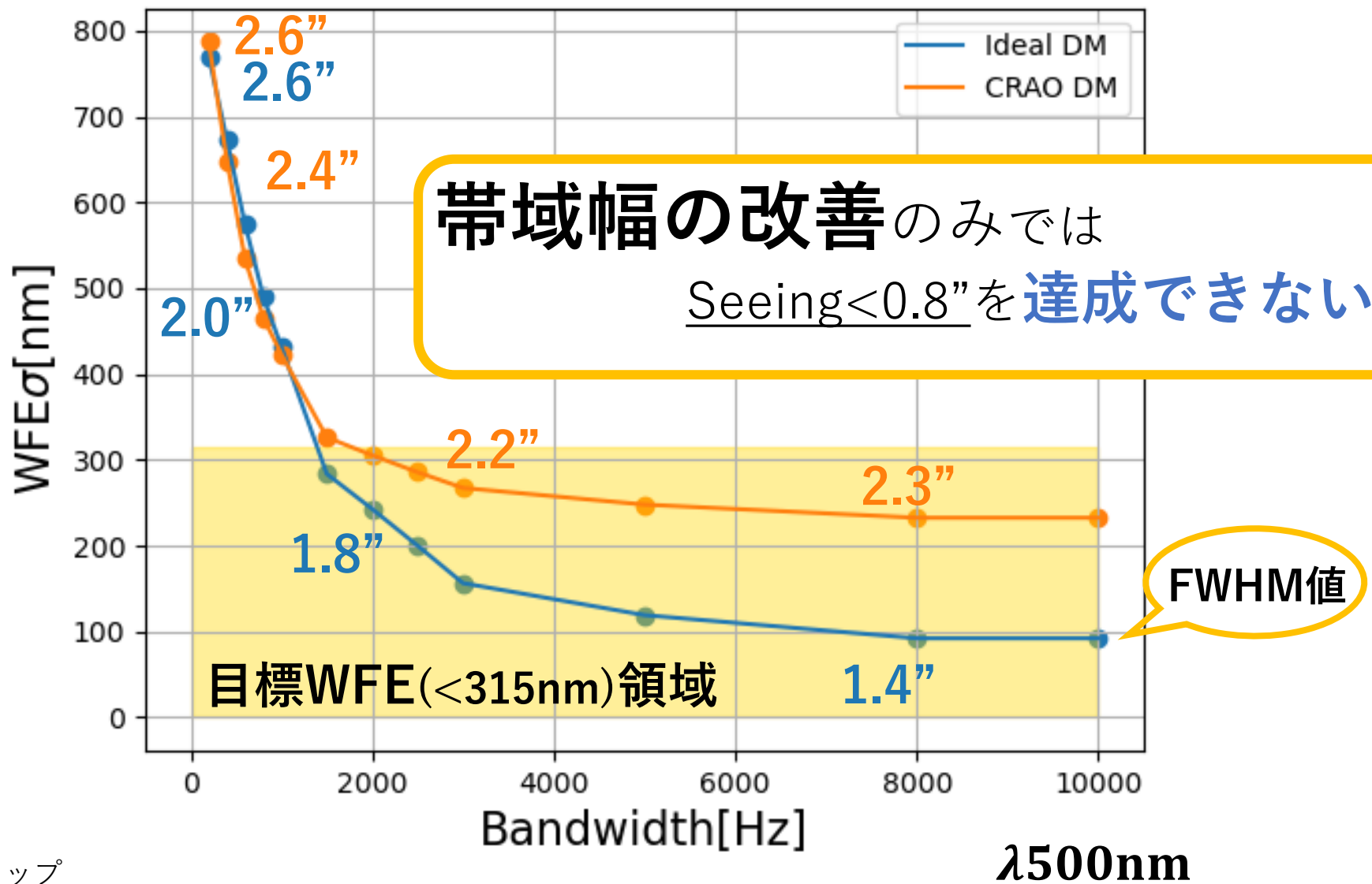
積分時間誤差

DMの形状再現誤差



3. 議論 ~理想的なモデルの検証~

理想的なDMとCRAO搭載DMでの波面残差の違い

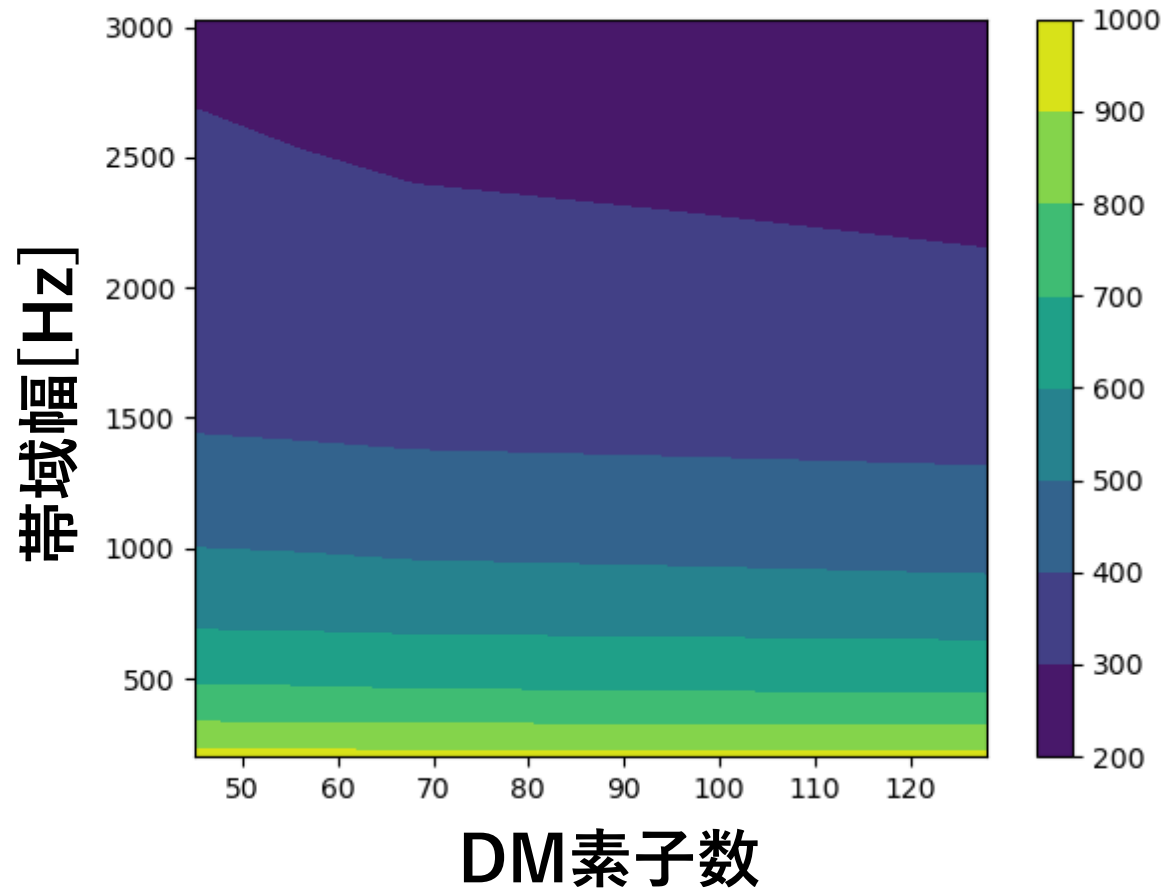


3. 議論

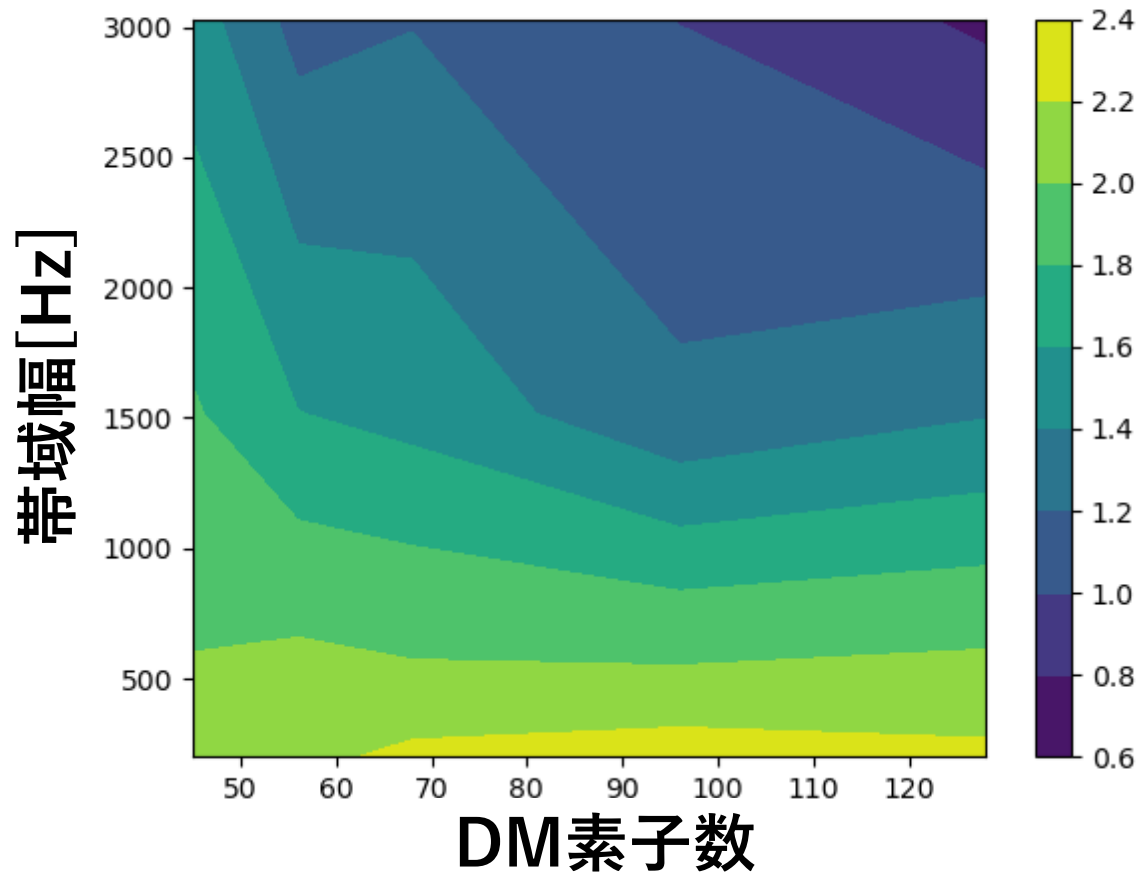
～理想的なモデルの検証～

理想的なDMでのシミュレーション

WFE [nm]



Seeing ["]



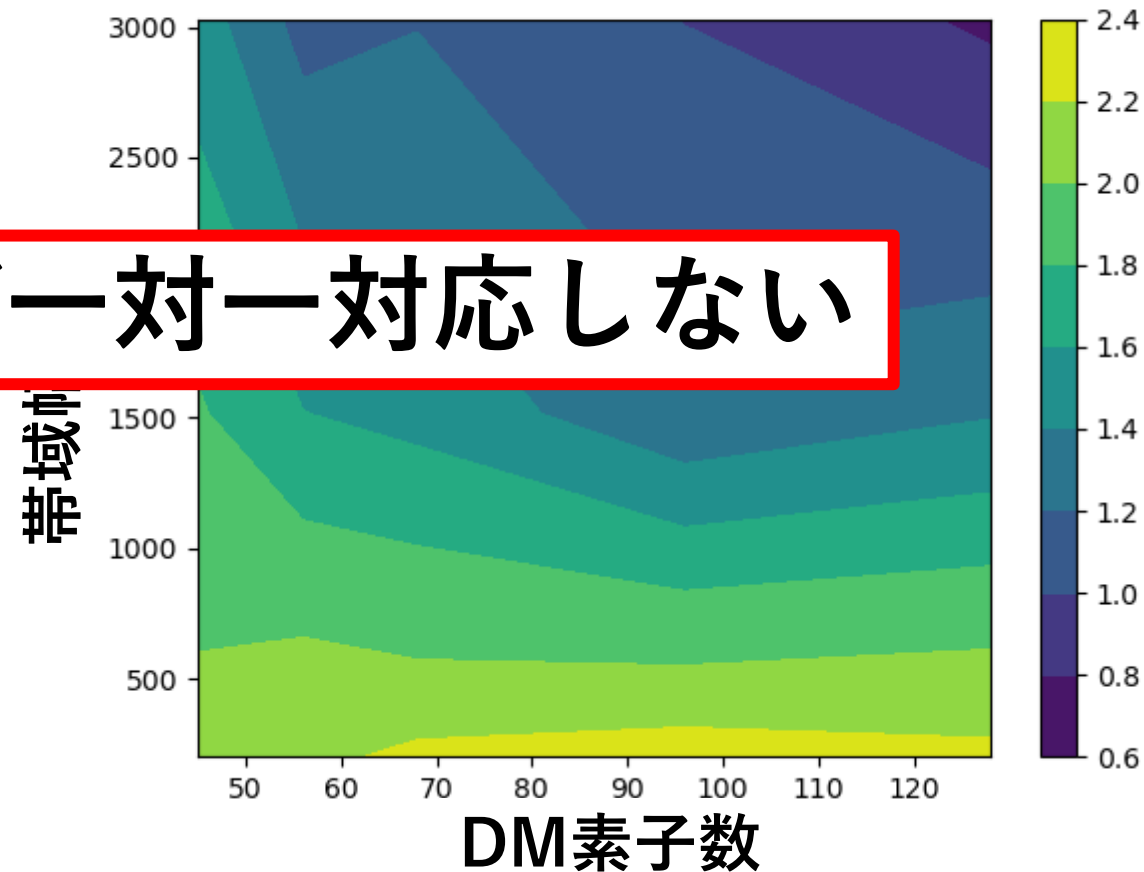
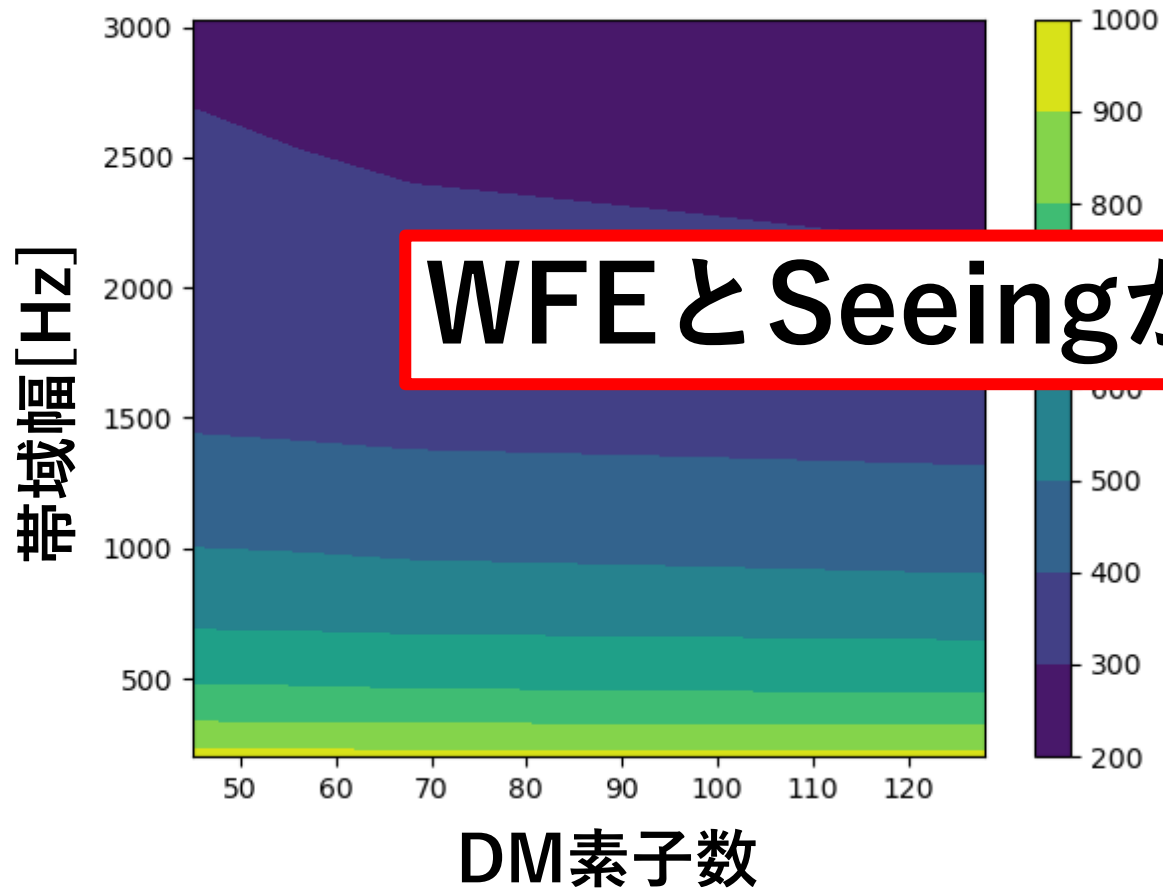
3. 議論

～理想的なモデルの検証～

理想的なDMでのシミュレーション

WFE [nm]

Seeing[""]



WFEとSeeingが一对一对応しない

4. まとめ

1. 京都産業大学では、次世代AOや中小型望遠鏡で重要となる技術開発の一環として **小型で安価なAO(CRAO)**の開発を行っている
2. AOシミュレーション結果、神山天文台サイトでCRAOを用いた場合到達星像はFWHM \sim 2.0-2.4"であり **実機のオンスカイ結果と矛盾ない結果**が得られた
3. 補正後の波面誤差量の解析から **時間遅れ誤差**が**支配的**であることが分かった
4. **SeeingとWFEは一対一対応しておらず**、帯域幅を大きくするのみでは、seeingの改善は限定的であることが判明した

- 今後は、
- SeeingとWFEの関係について詳細な調査
 - Seeing $<$ 0.8"を達成できる設計パラメータの探索
 - 設計パラメータに基づくCRAOの改良