



# 小型屈折型補償光学装置CRAO

AOシミュレーションの理想と現実

京都産業大学大学院  
理学研究科物理学専攻

坂部健太(D2)

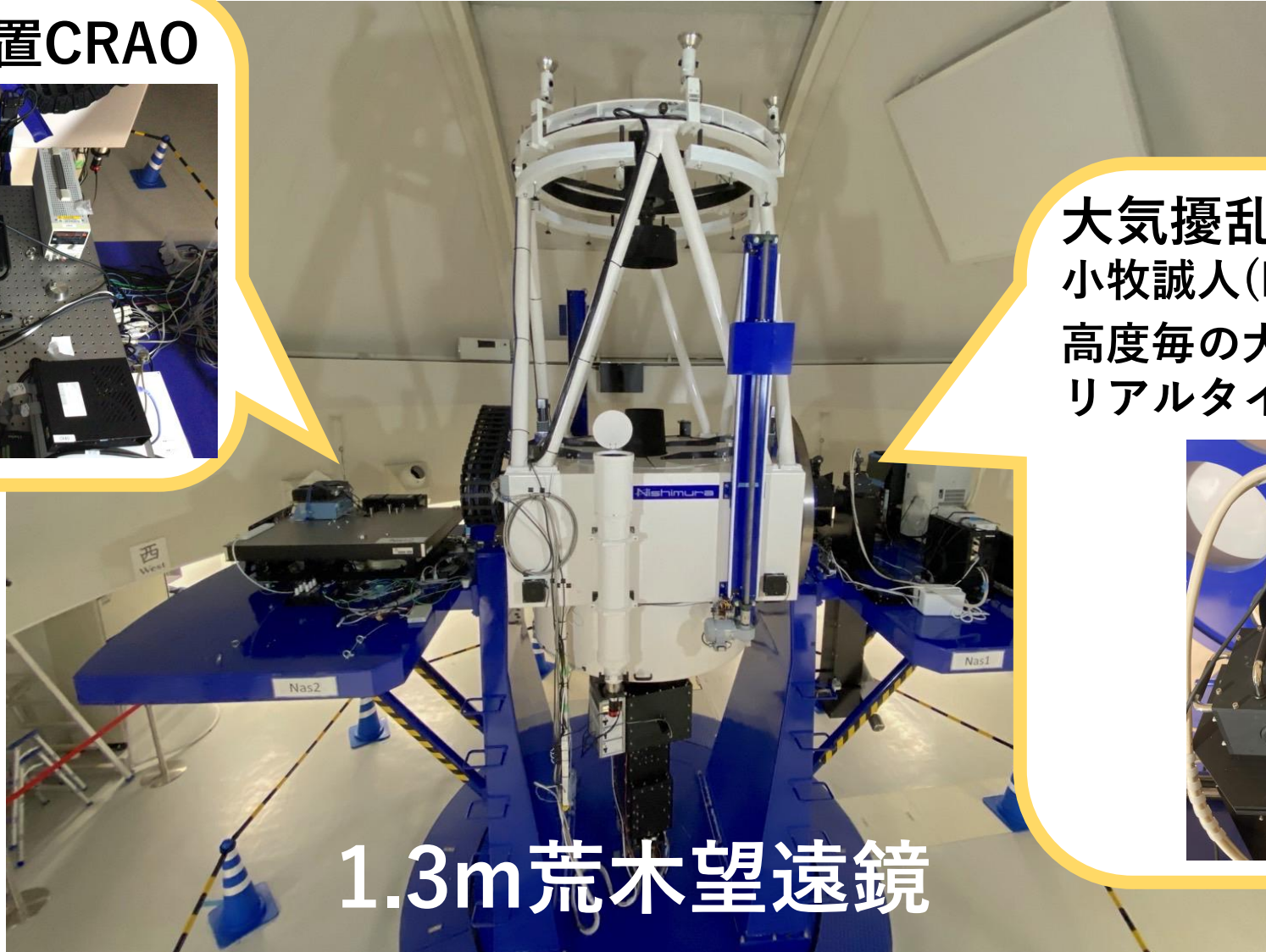
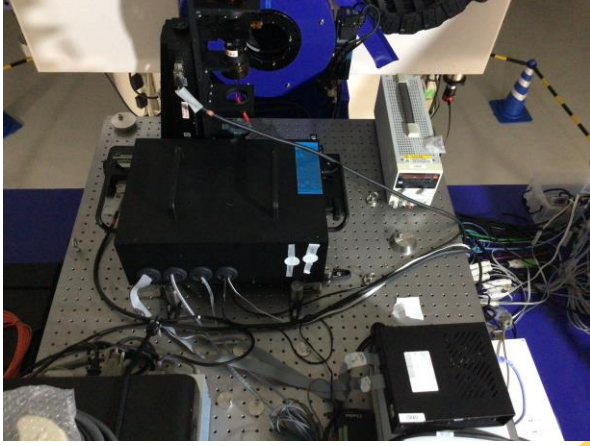
小牧誠人(M1)、樽田順(D3)、  
池田優二、河北秀世(京都産業大学)  
大屋真(国立天文台)

# 目次

1. イントロダクション
2. 室内実験による性能評価
3. TTステージの特性再調査
4. DMの特性再調査
5. まとめ

# 神山天文台におけるAO関連装置

## 補償光学装置CRAO

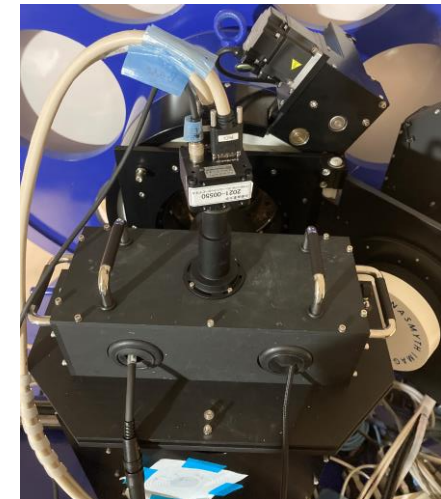


1.3m荒木望遠鏡

## 大気擾乱モニタMAMO

小牧誠人(M1)

高度毎の大気揺らぎを  
リアルタイム測定

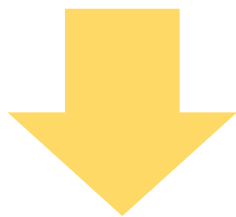


補償光学



## 大気擾乱モニタMAMO

高度毎の大気乱れ情報



## AOシミュレーション

乱れのパターンごとに最適なAOパラメータを事前に計算



最適なAOパラメータ



## 小型屈折型補償光学装置CRAO

MAMO

ぎを





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)

ダブルパスレンズ  
(DPL)

270mm

波面センサ(WFS)  
GE680

## 装置仕様 (Sakabe+ 2022)

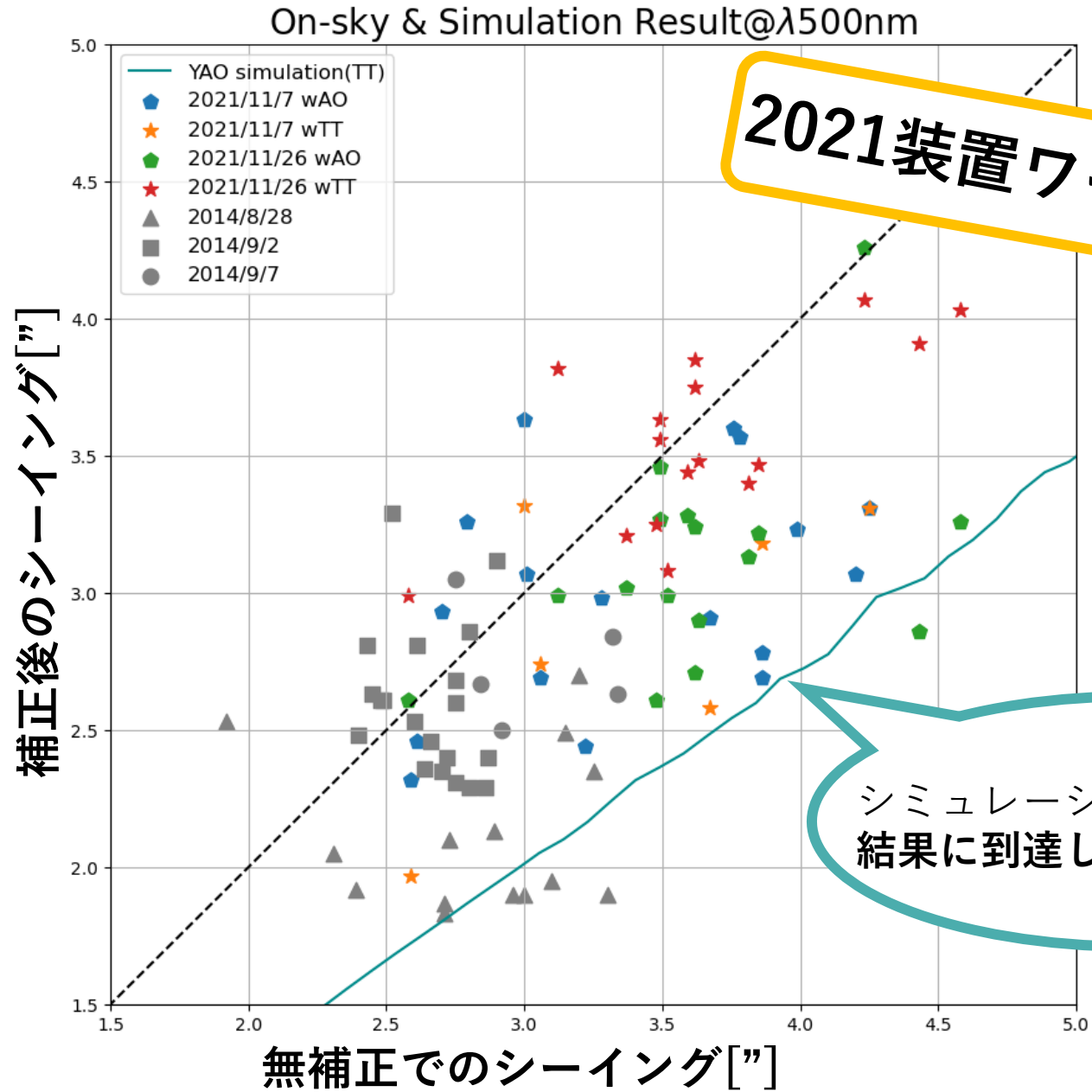
|                  |                                 |
|------------------|---------------------------------|
| 光学系              | 透過型                             |
| 補償方式             | Modal- Control<br>w/closed Loop |
| 波長域              | 400nm~700nm                     |
| 装置視野             | 30"                             |
| 目標補償性能<br>Seeing | 3.0"→ <b>0.8"</b>               |

iPhoneSE(第2世代)

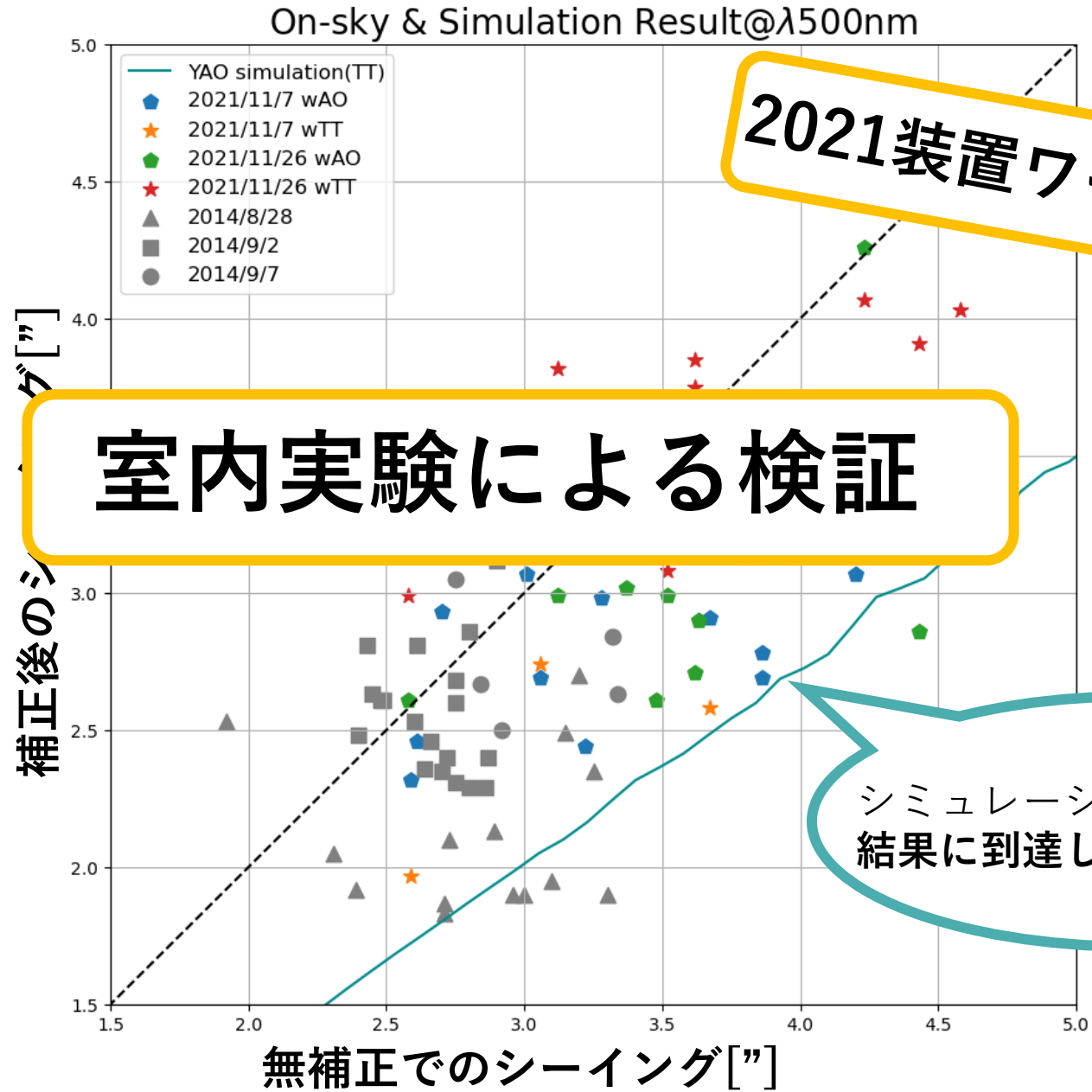
小型AO装置CRAO  
(2021ver.)

390mm

# 観測結果



# 観測結果



# 目次

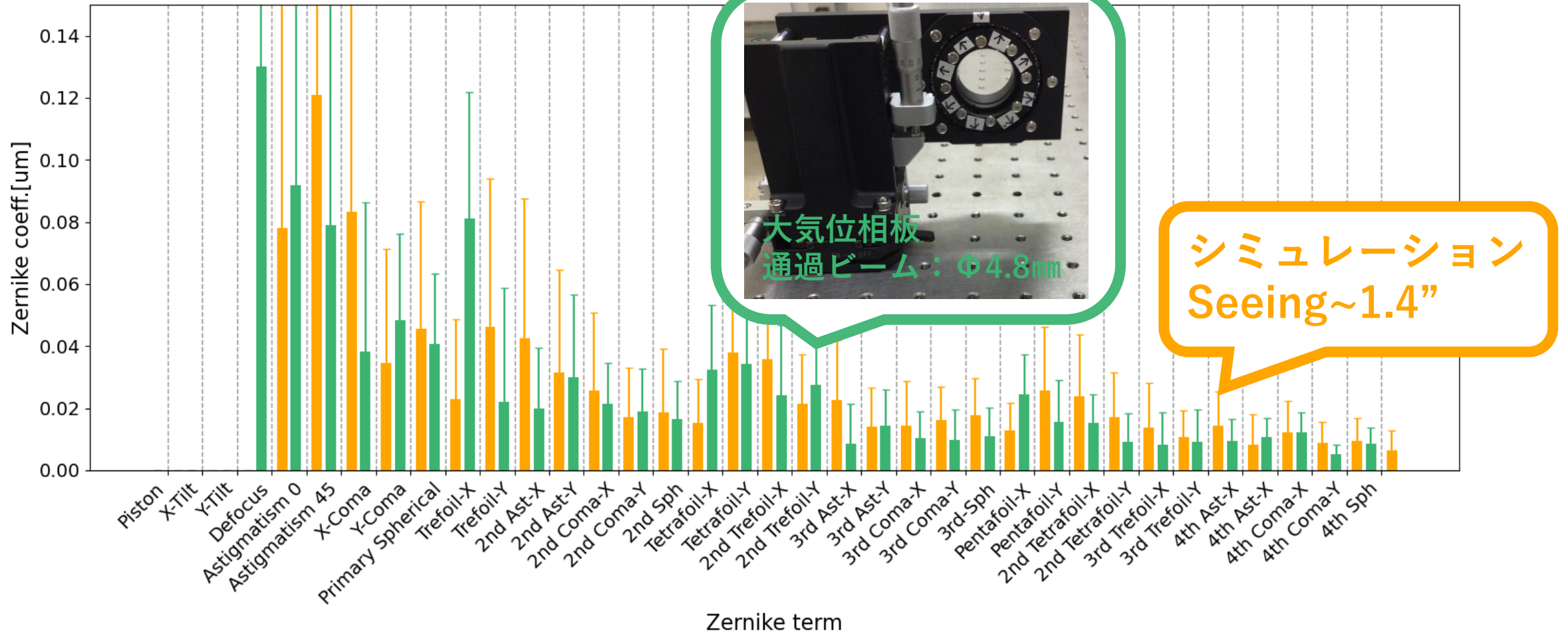
1. イントロダクション
- 2. 室内実験による性能評価**
3. TTステージの特性再調査
4. DMの特性再調査
5. まとめ



# 大気位相板の条件決定

大気擾乱位相板とシミュレーションの作る波面の比較

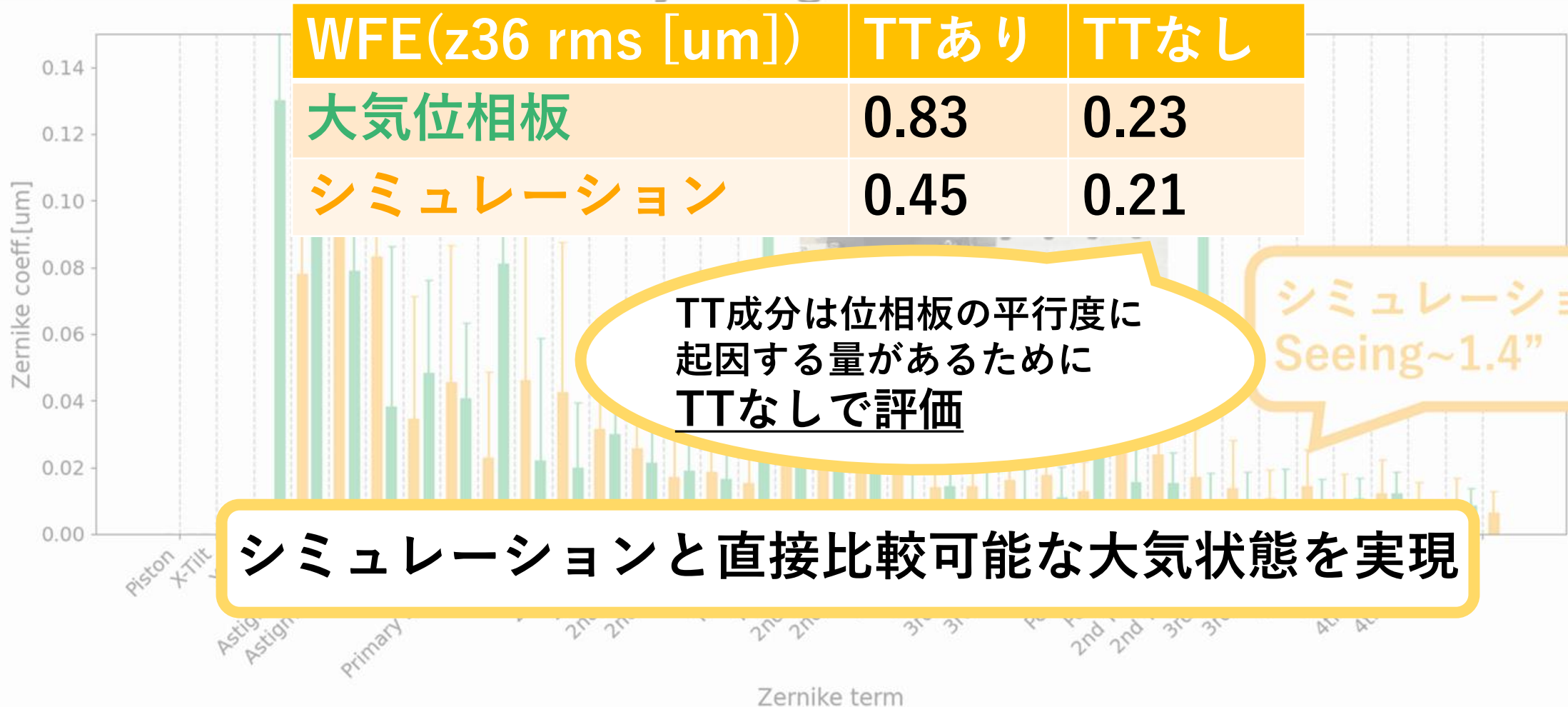
使用したAOシミュレーター：yao(Rigaut+ 2013)



# 大気位相板の条件決定

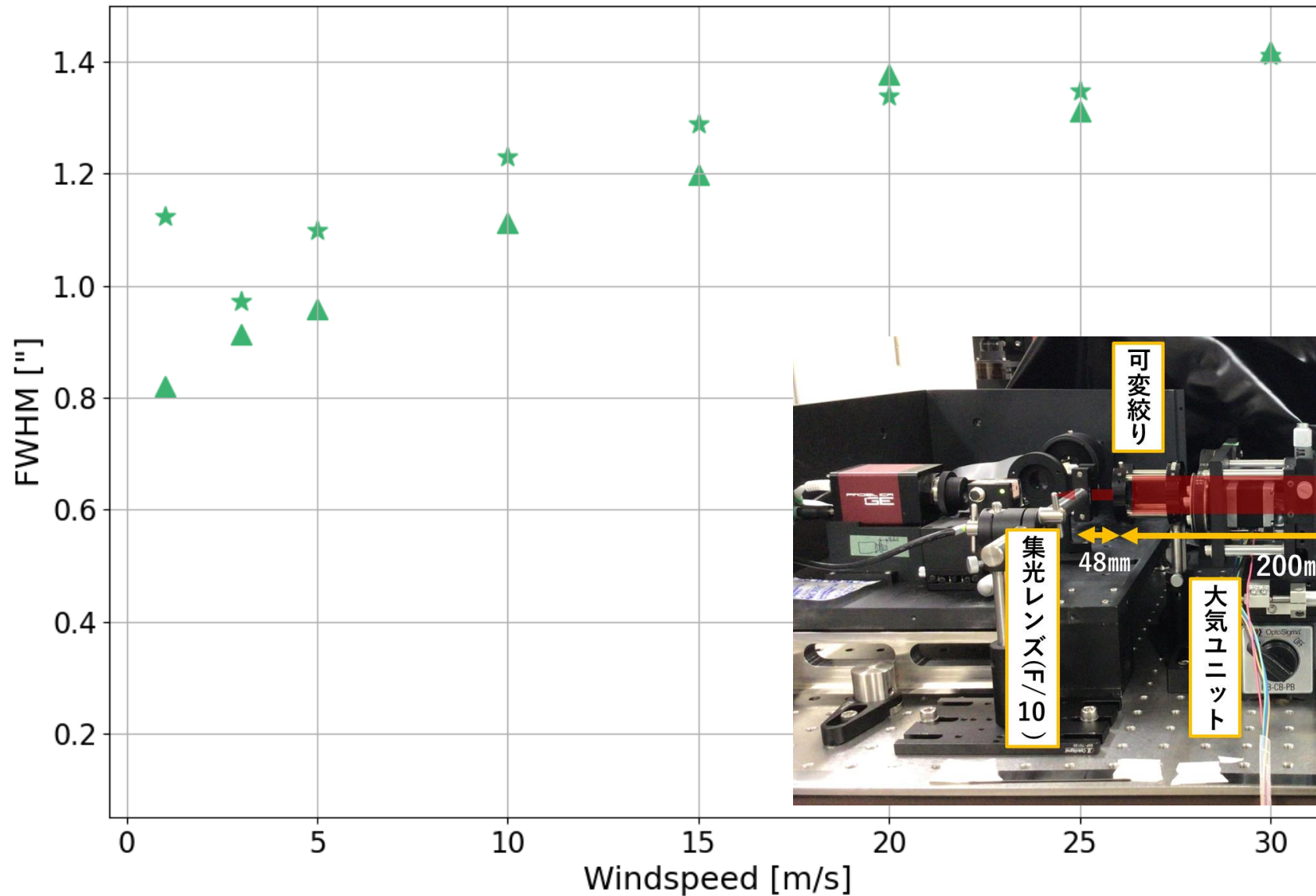
大気擾乱位相板とシミュレーションの作る波面の比較

使用したAOシミュレーター：yao(Rigaut+ 2013)



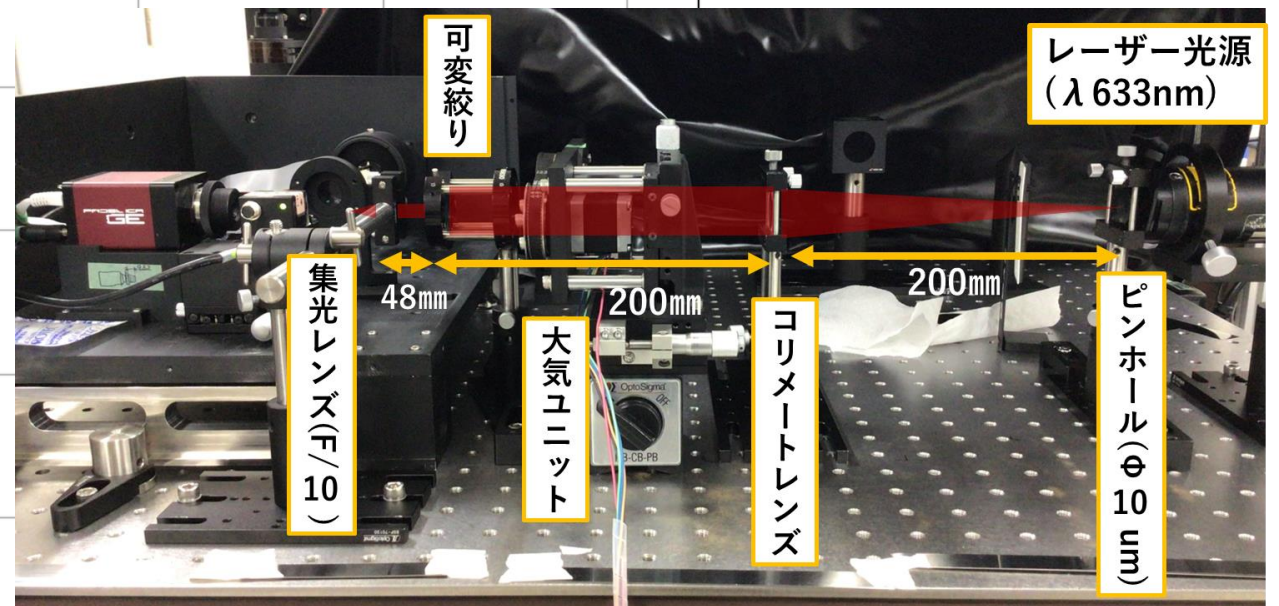
シミュレーションと直接比較可能な大気状態を実現

# 性能評価結果

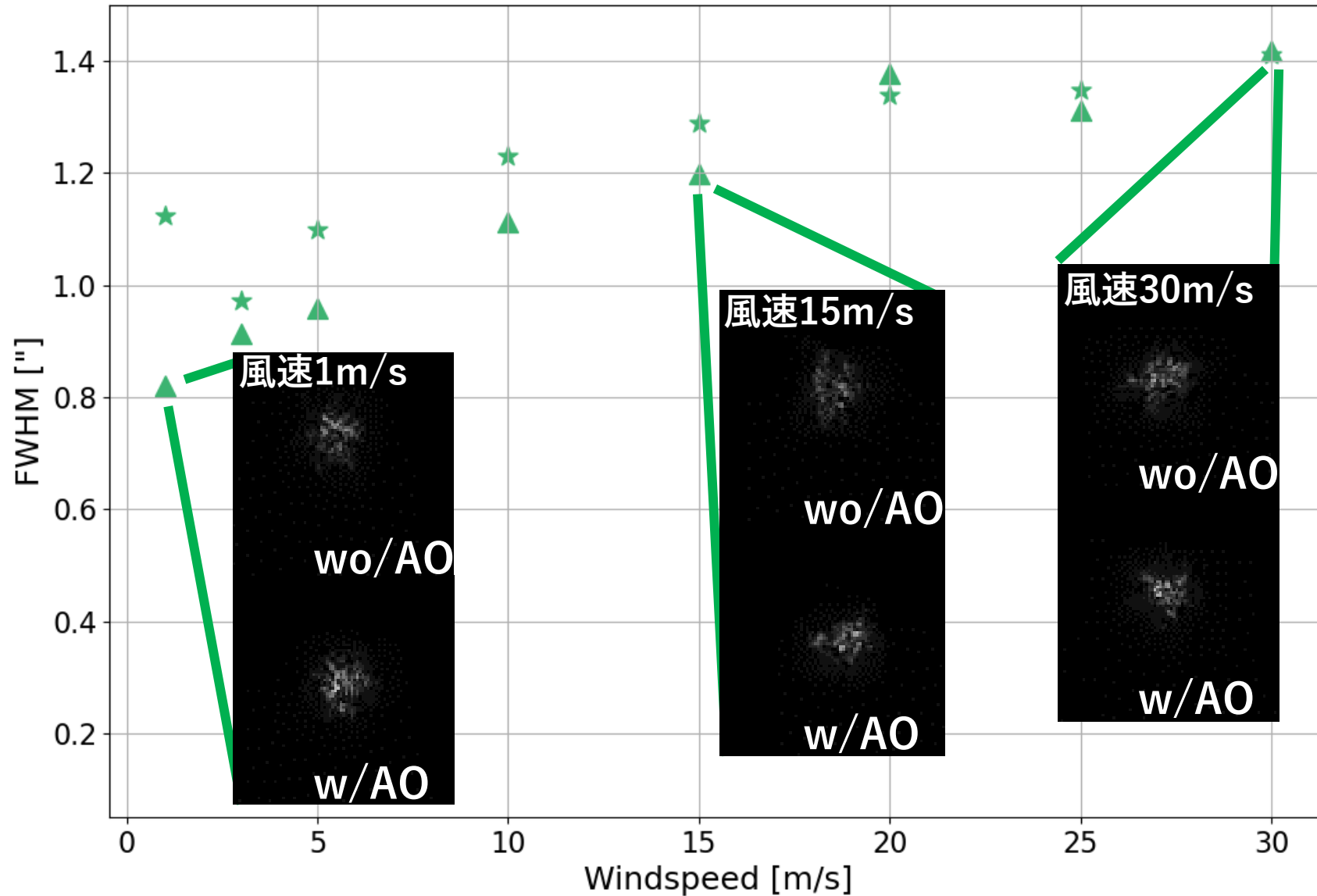


- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ

## 実験光学系



# 性能評価結果

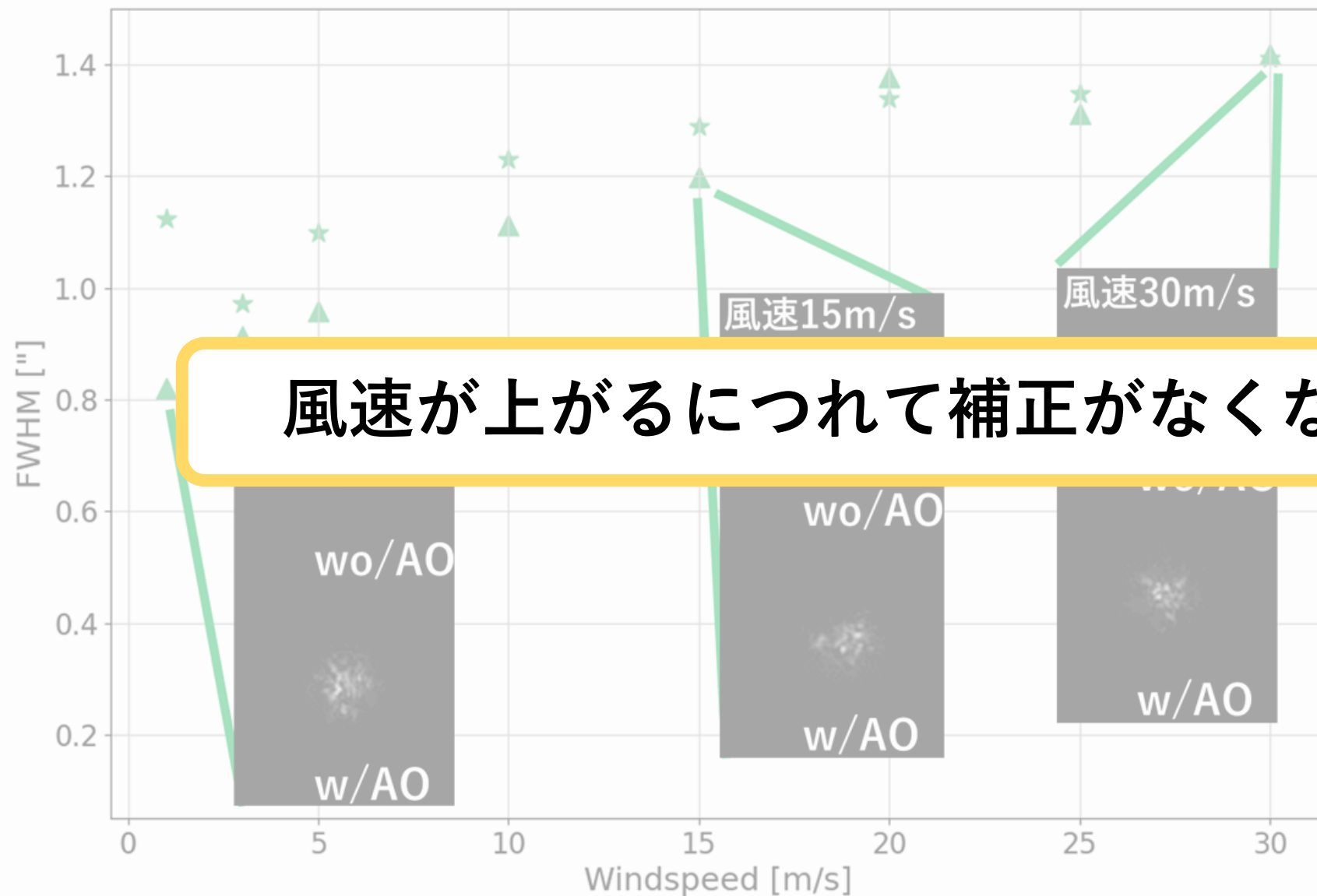


- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ

## 室内実験AO条件

|        |           |
|--------|-----------|
| 帯域幅    | 150~180Hz |
| AO補正時間 | 10s       |
| TTゲイン  | 0.3       |
| DMゲイン  | 0.4       |

# 性能評価結果



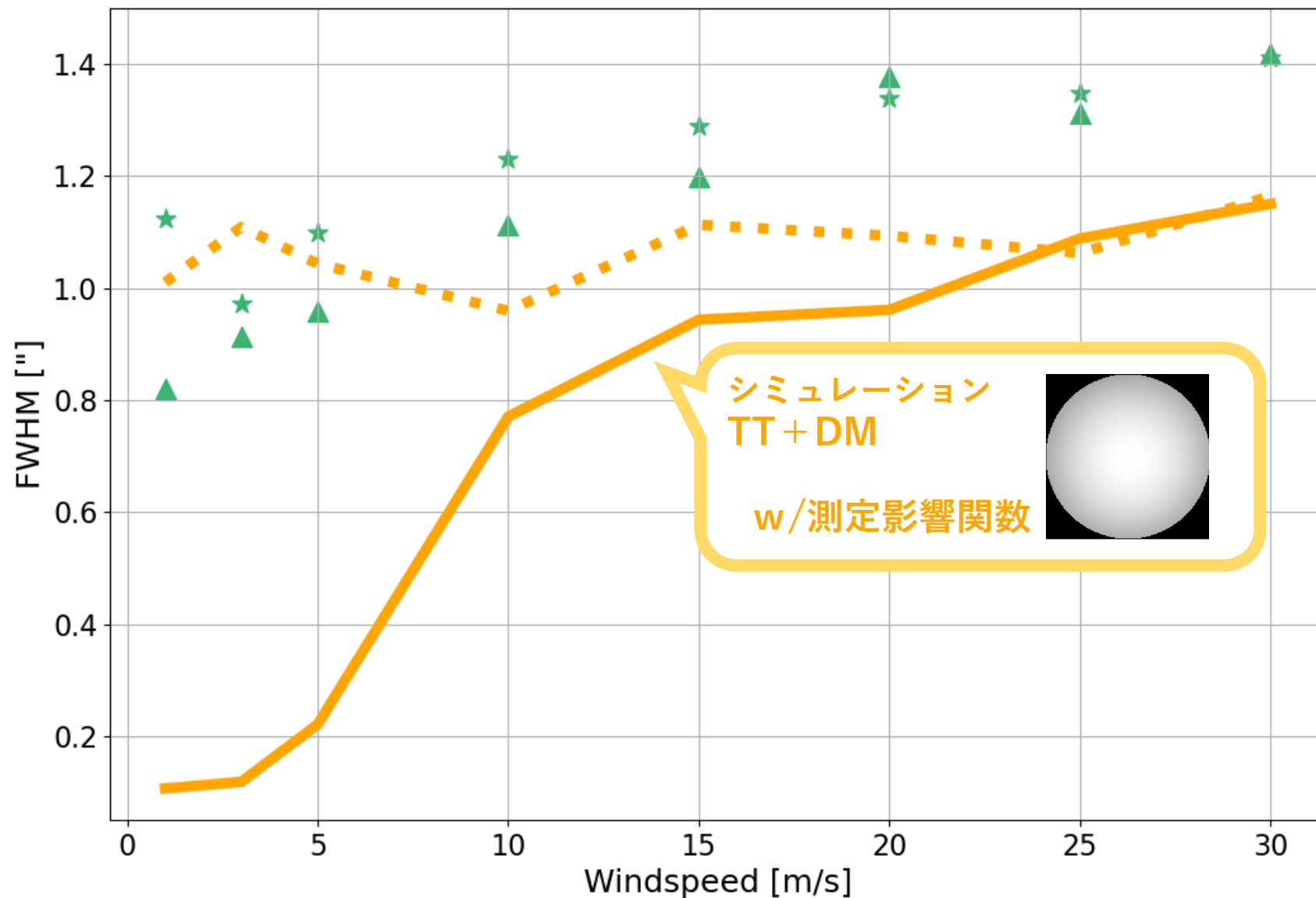
風速が上がるにつれて補正がなくなる

- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ

## 室内実験AO条件

|       |           |
|-------|-----------|
| 帯域幅   | 150~180Hz |
| 時間    | 10s       |
|       | 0.3       |
| DMゲイン | 0.4       |

# 性能評価結果



- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ
- : シミュレーション TTのみ

## 室内実験AO条件

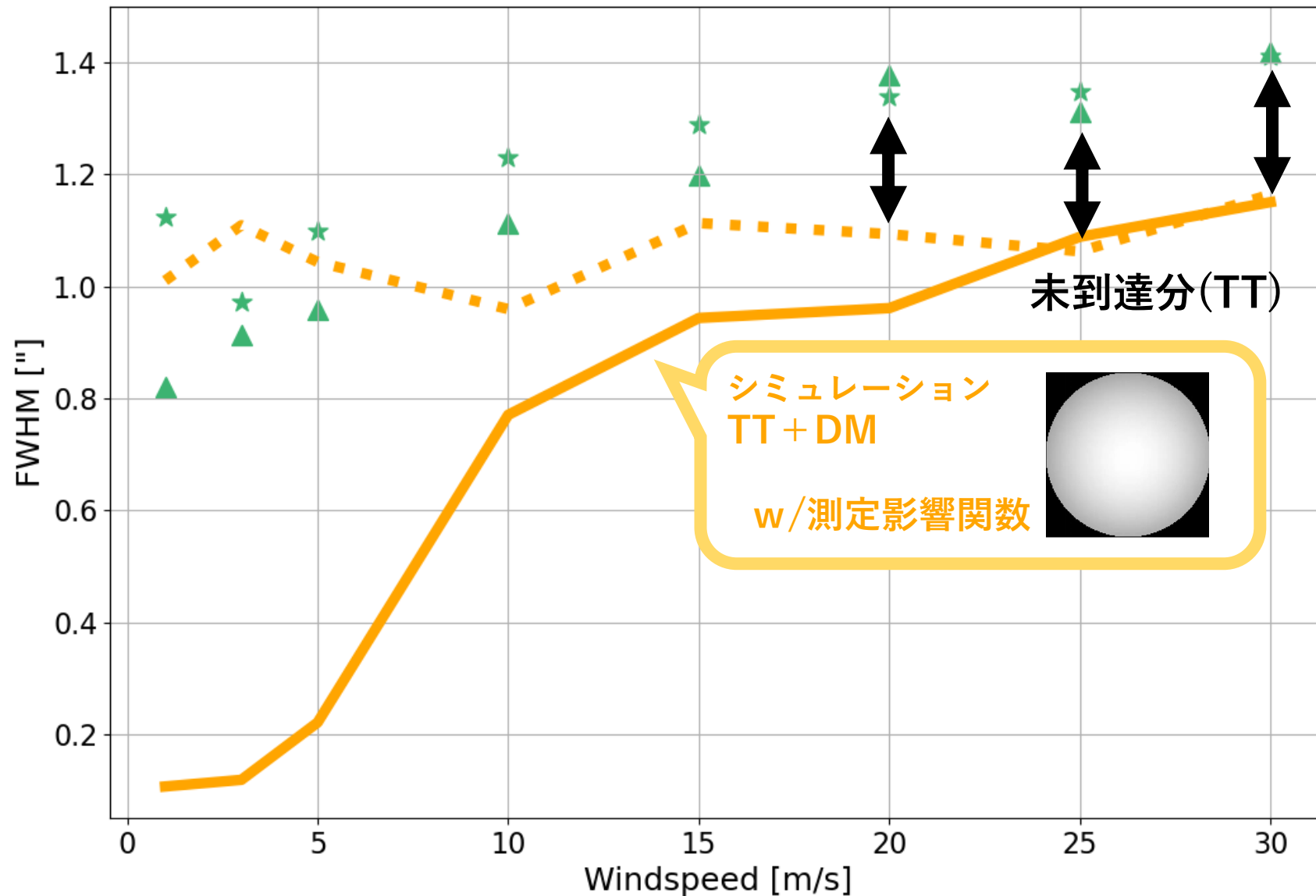
|        |           |
|--------|-----------|
| 帯域幅    | 150~180Hz |
| AO補正時間 | 10s       |
| TTゲイン  | 0.3       |
| DMゲイン  | 0.4       |

## シミュレーション条件

|        |       |
|--------|-------|
| Seeing | 1.4"  |
| 動作周波数  | 166Hz |
| AO動作時間 | 25s   |
| 大気層数   | 1     |



# 性能評価結果



- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ
- - - : シミュレーション TTのみ

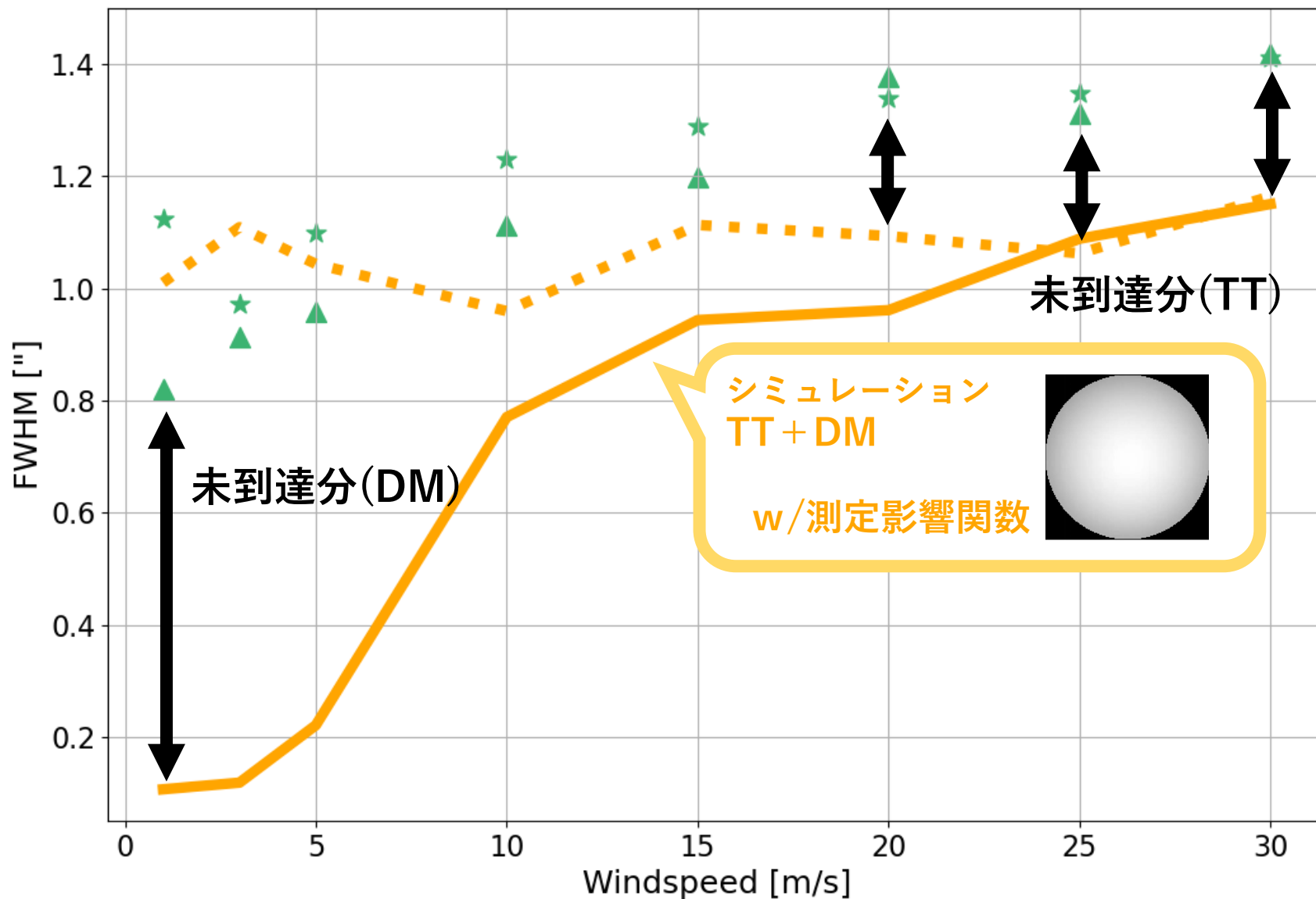
## 室内実験AO条件

|        |           |
|--------|-----------|
| 帯域幅    | 150~180Hz |
| AO補正時間 | 10s       |
| TTゲイン  | 0.3       |
| DMゲイン  | 0.4       |

## シミュレーション条件

|        |       |
|--------|-------|
| Seeing | 1.4"  |
| 動作周波数  | 166Hz |
| AO動作時間 | 25s   |
| 大気層数   | 1     |

# 性能評価結果



- ▲ : 室内実験TT + DM
- ★ : 室内実験TTのみ
- : シミュレーション TTのみ

## 室内実験AO条件

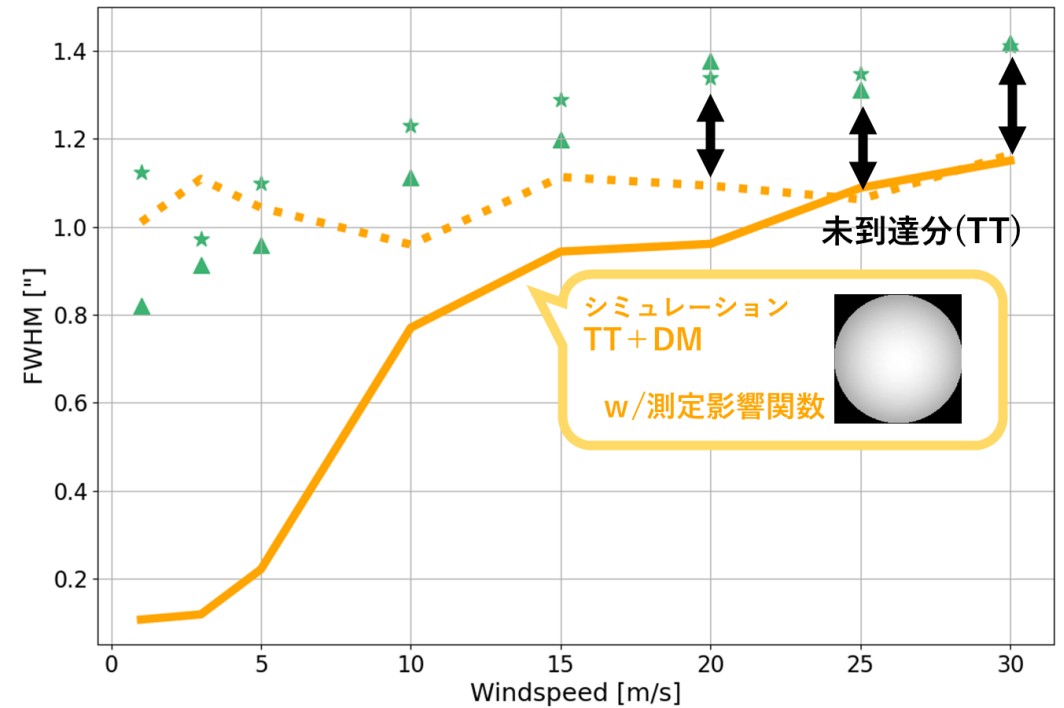
|        |           |
|--------|-----------|
| 帯域幅    | 150~180Hz |
| AO補正時間 | 10s       |
| TTゲイン  | 0.3       |
| DMゲイン  | 0.4       |

## シミュレーション条件

|        |       |
|--------|-------|
| Seeing | 1.4"  |
| 動作周波数  | 166Hz |
| AO動作時間 | 25s   |
| 大気層数   | 1     |

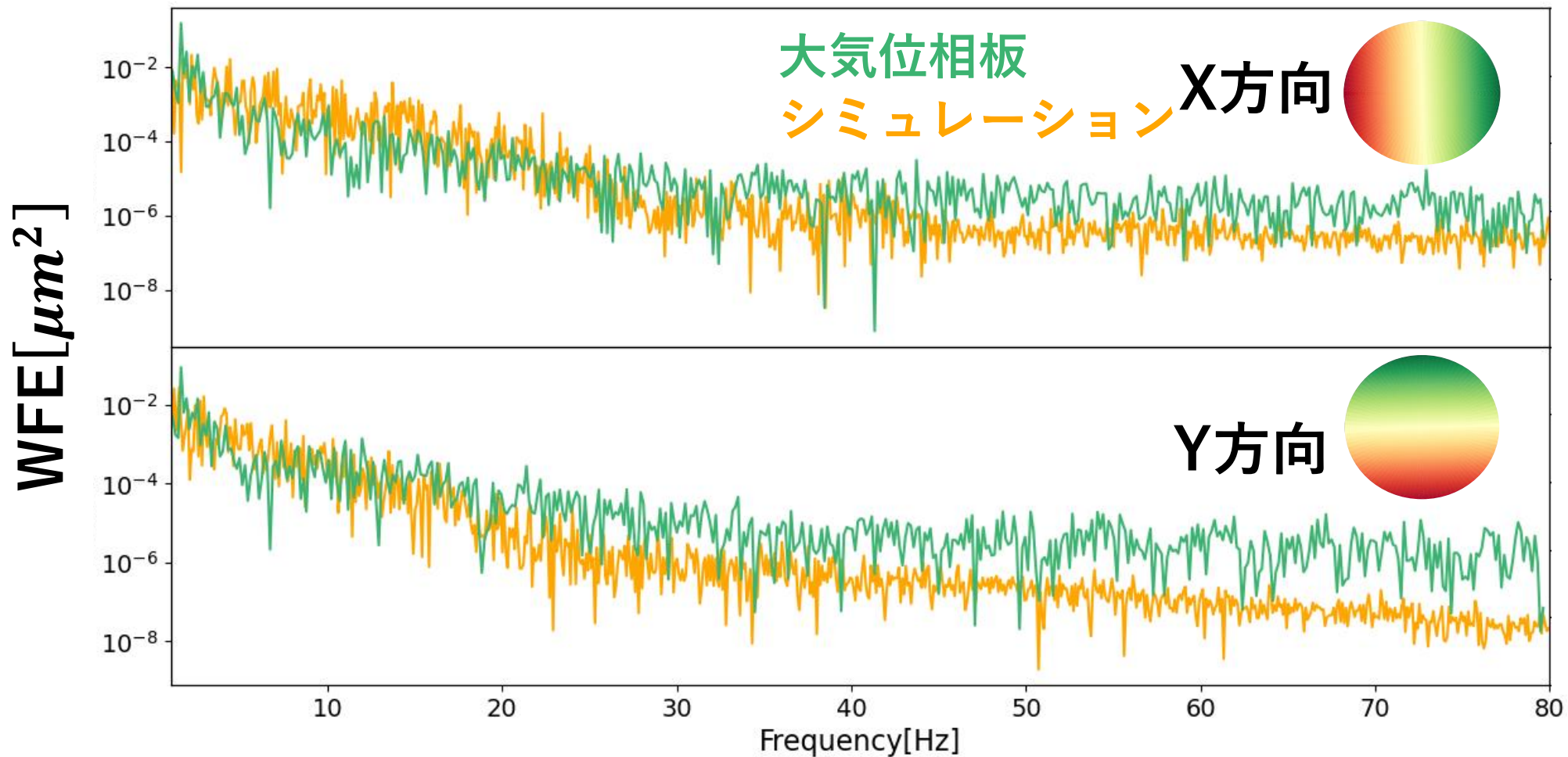
# 目次

1. イントロダクション
2. 室内実験による性能評価
3. TTステージの特性再調査
4. DMの特性再調査
5. まとめ



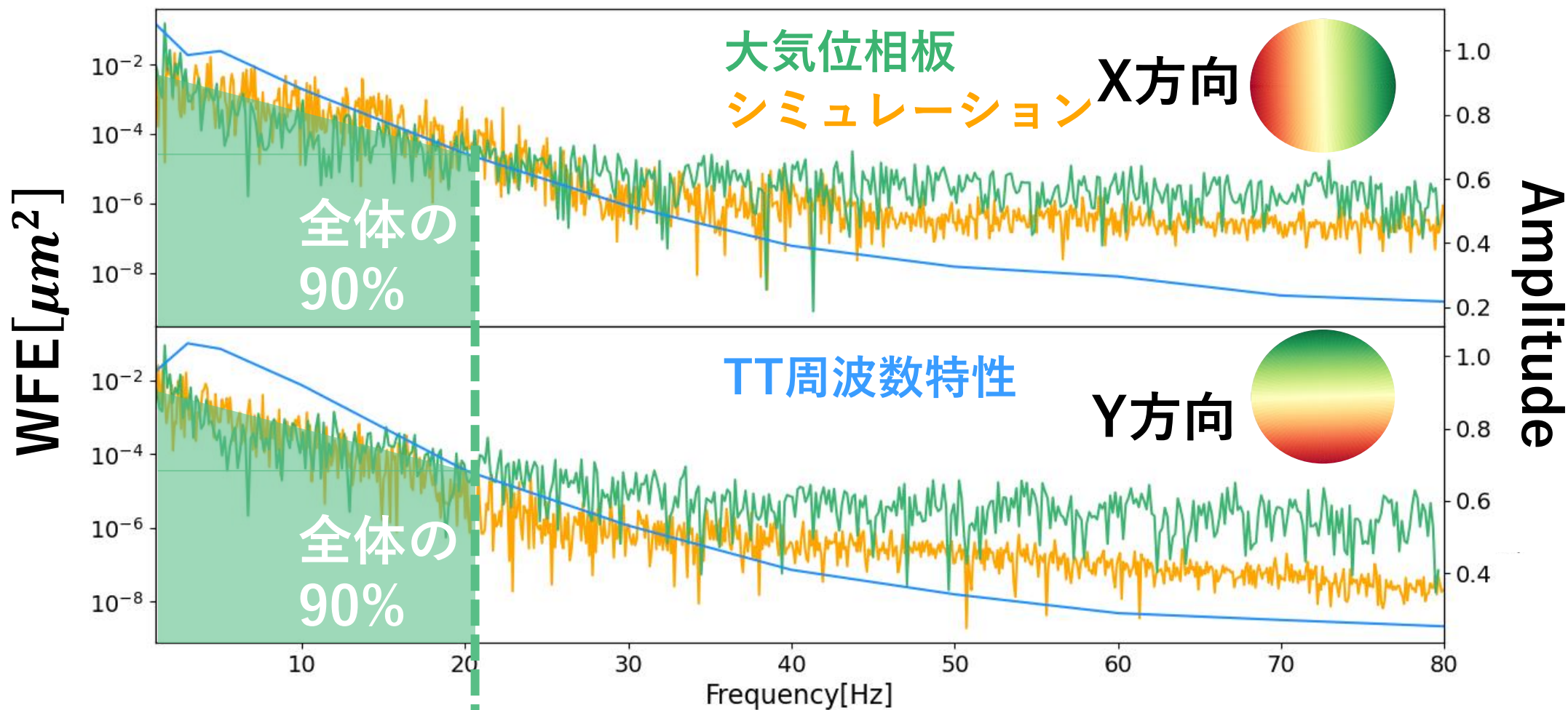
# TT成分の特性調査

大気位相板と位相スクリーンのパワースペクトル



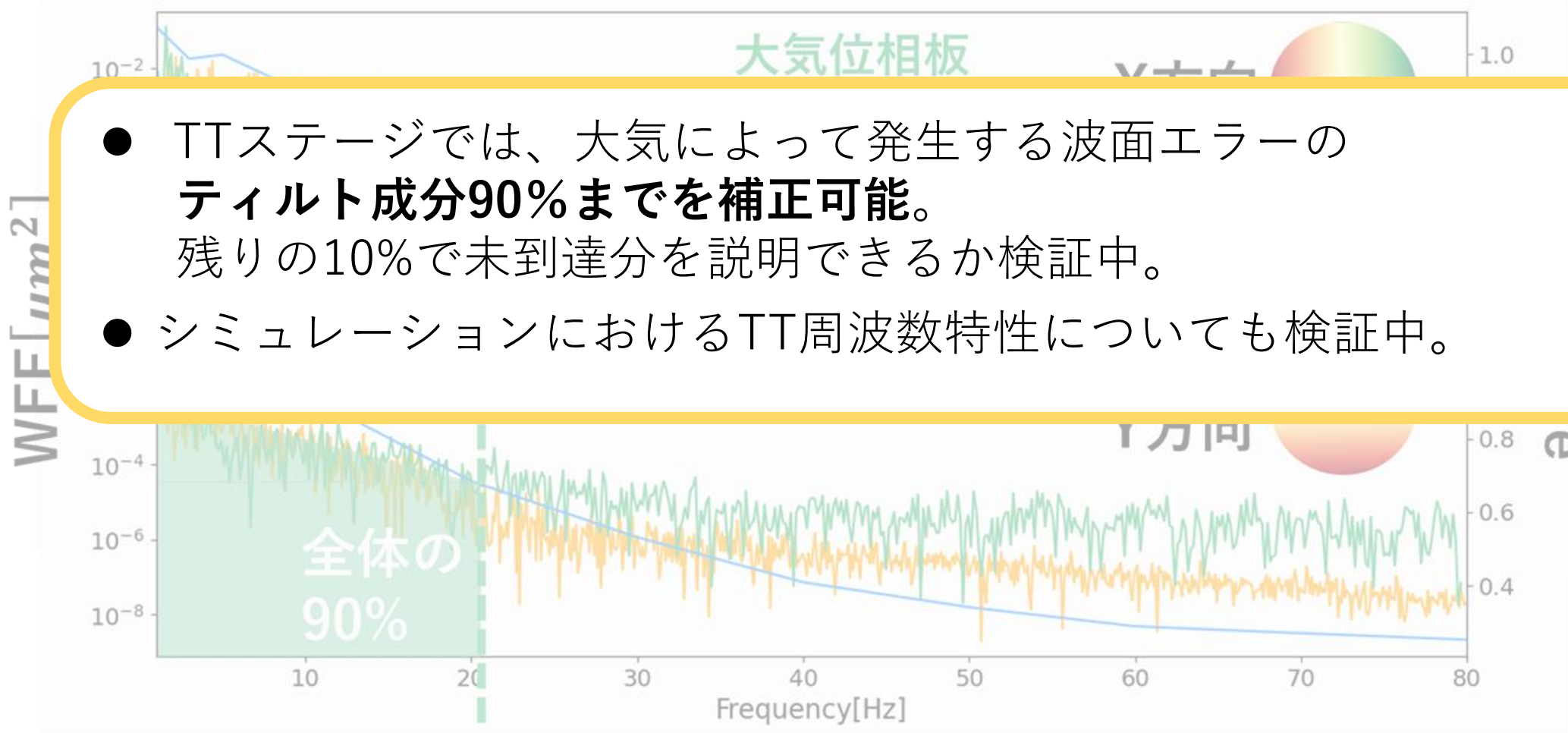
# TT成分の特性調査

大気位相板と位相スクリーンのパワースペクトル



# TT成分の特性調査

大気位相板と位相スクリーンのパワースペクトル

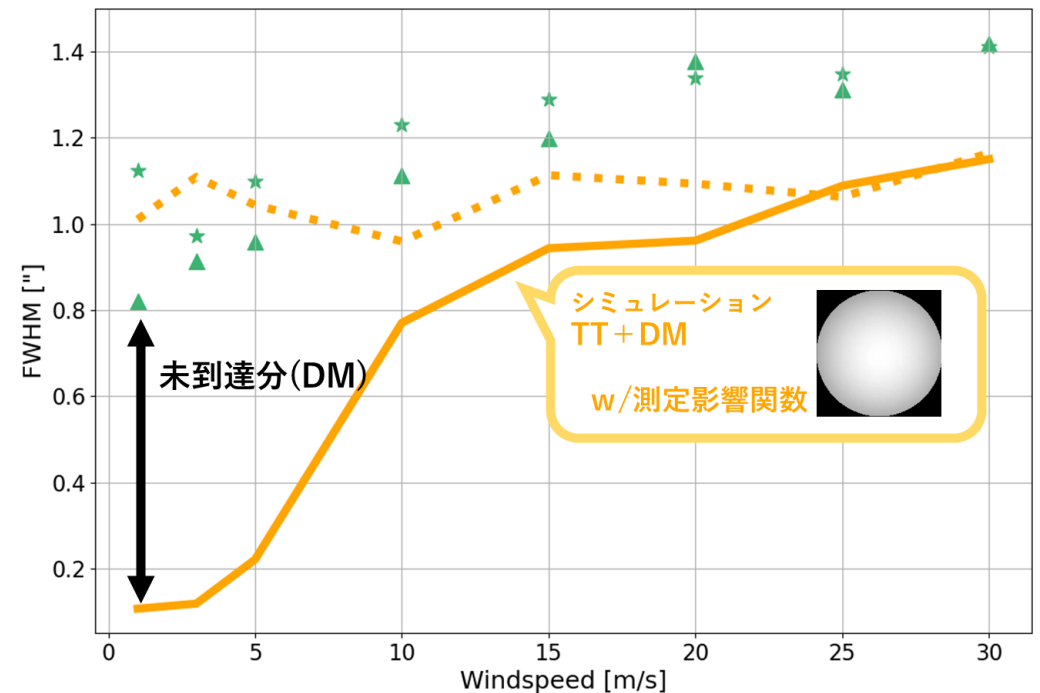


- TTステージでは、大気によって発生する波面エラーの **ティルト成分90%までを補正可能**。  
残りの10%で未到達分を説明できるか検証中。
- シミュレーションにおけるTT周波数特性についても検証中。



# 目次

1. イントロダクション
2. 室内実験による性能評価
3. TTステージの特性再調査
- 4. DMの特性再調査**
5. まとめ



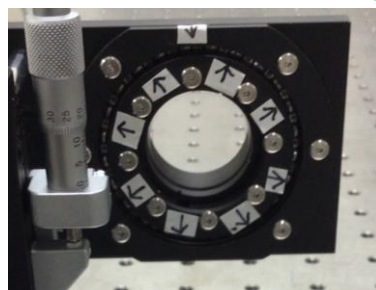
# フィッティングエラー

## シミュレーション条件

|        |       |
|--------|-------|
| Seeing | 1.4"  |
| 動作周波数  | 166Hz |
| AO動作時間 | 25s   |
| 風速     | 0m/s  |

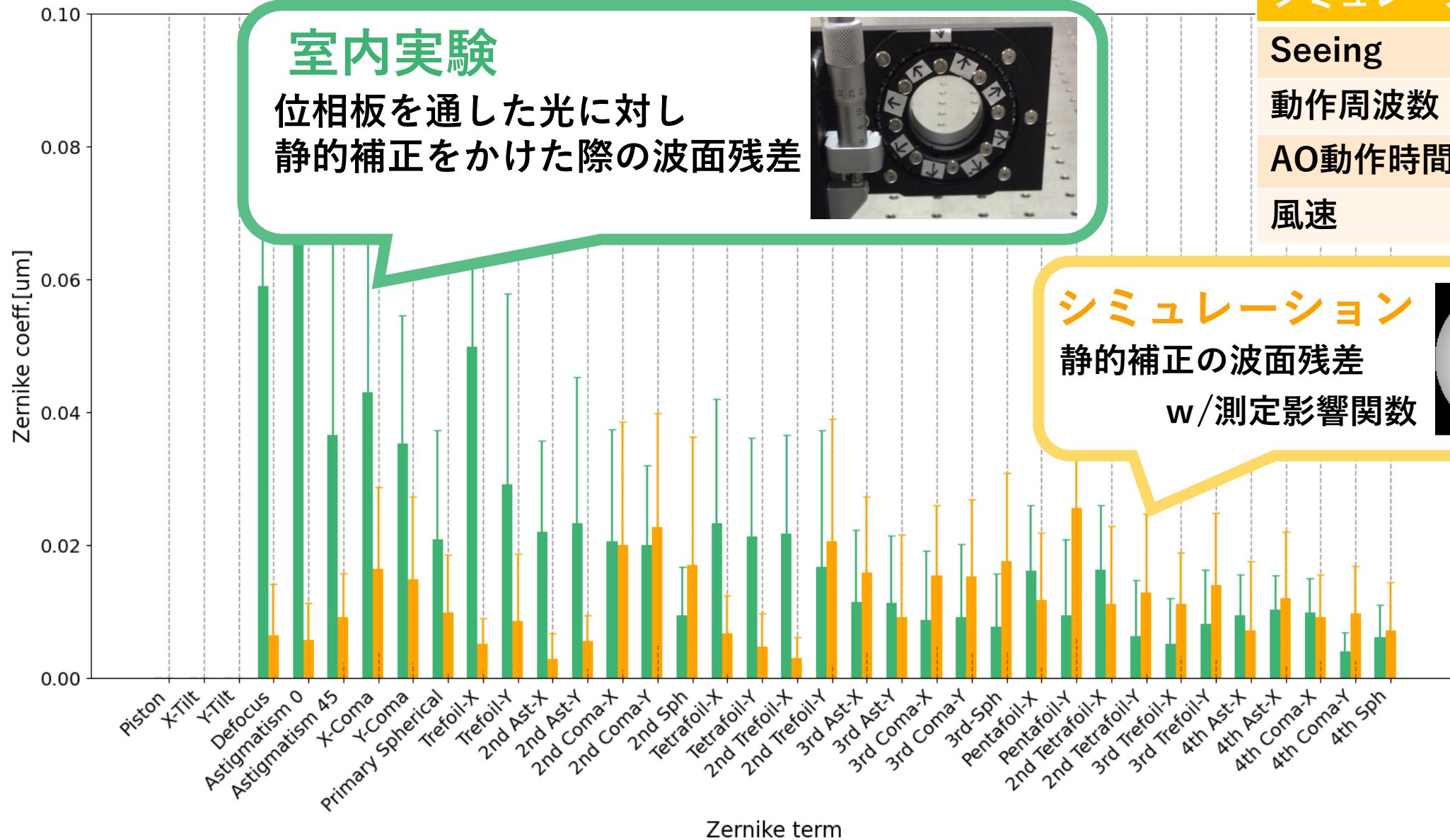
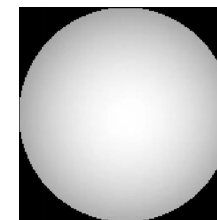
### 室内実験

位相板を通した光に対し  
静的補正をかけた際の波面残差



### シミュレーション

静的補正の波面残差  
w/測定影響関数



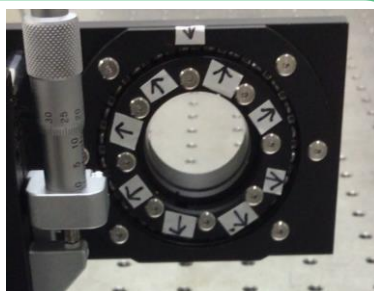
# フィッティングエラー

## シミュレーション条件

|        |       |
|--------|-------|
| Seeing | 1.4"  |
| 動作周波数  | 166Hz |
| AO動作時間 | 25s   |
| 風速     | 0m/s  |

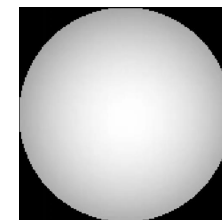
## 室内実験

位相板を通した光に対し  
静的補正をかけた際の波面残差

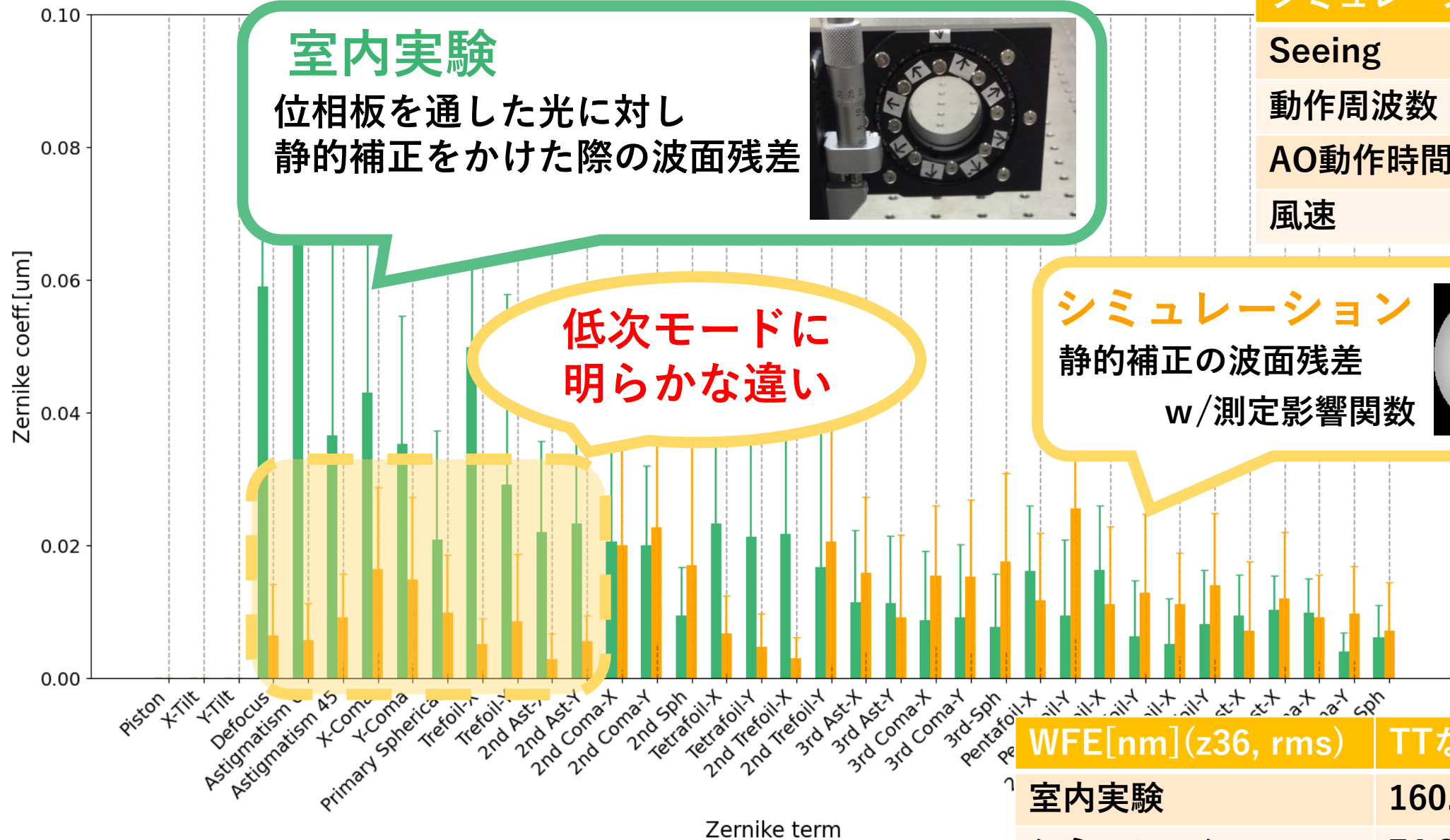


## シミュレーション

静的補正の波面残差  
w/測定影響関数



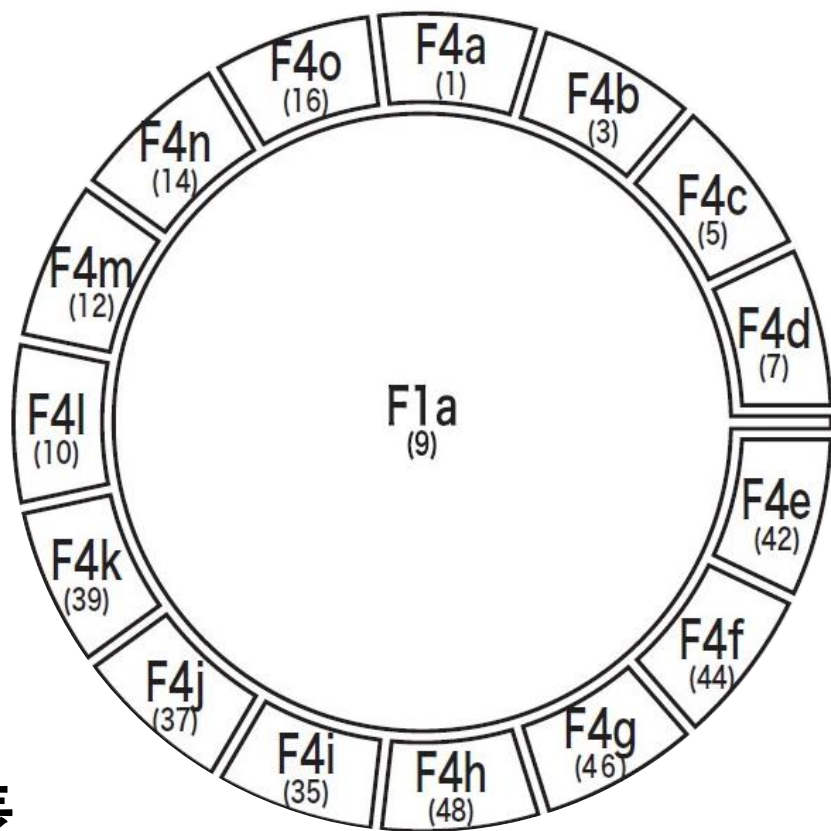
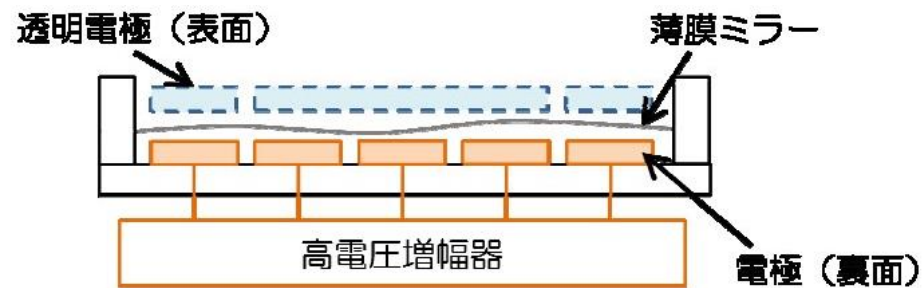
低次モードに  
明らかな違い



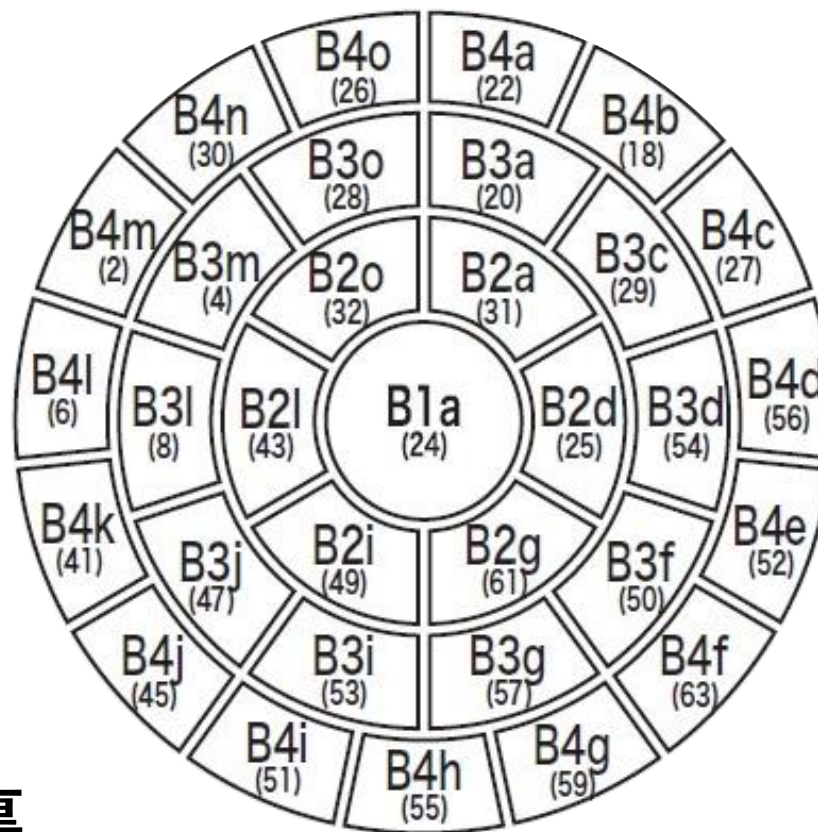
|                    |               |
|--------------------|---------------|
| WFE[nm] (z36, rms) | TTなし          |
| 室内実験               | 160.0+/-126.3 |
| シミュレーション           | 74.3+/-63.8   |

# Zernikeモードの比較

## DM電極配置(Adaptica社 SATURN)



表



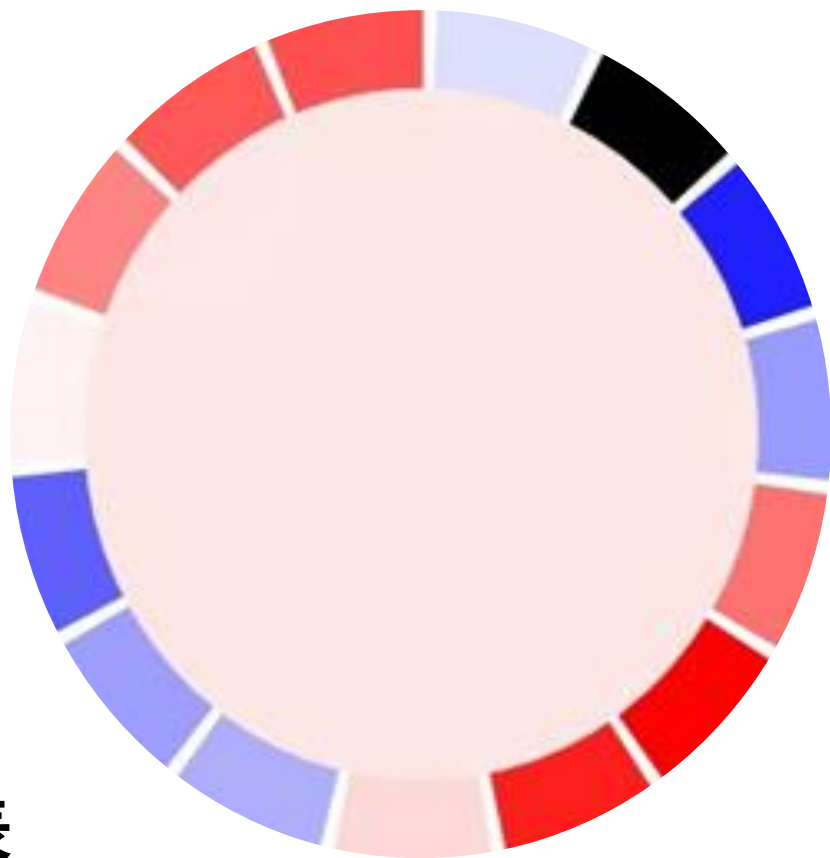
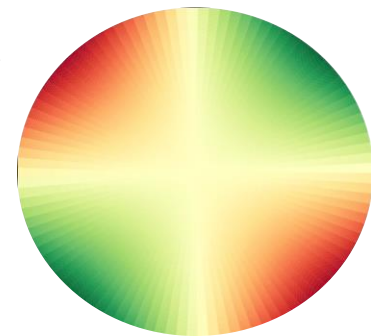
裏

# Zernikeモードの比較

DM電圧配置(Adaptica社 SATURN)

変形Zernikeモード

例: Ast-Y



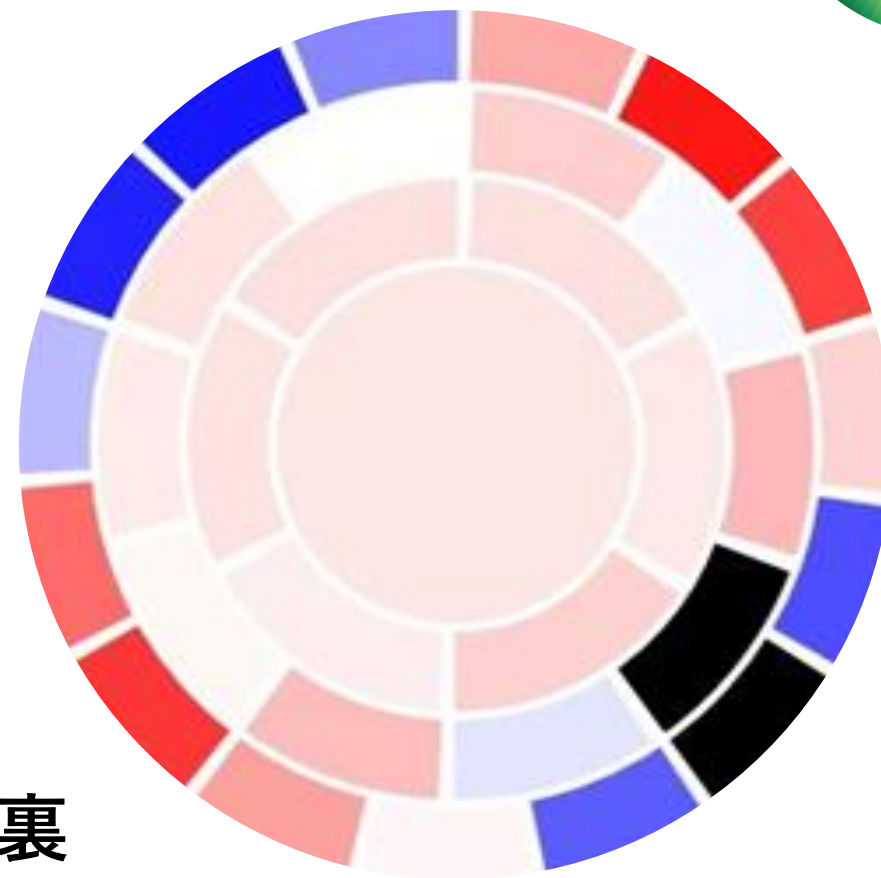
表

印加  
電圧

高



低



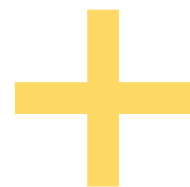
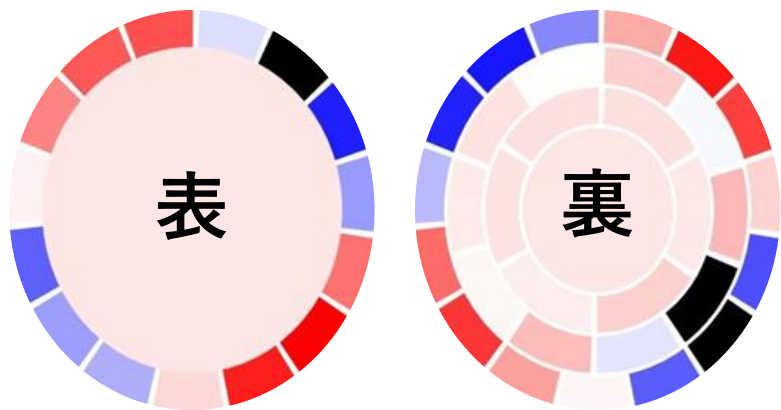
裏



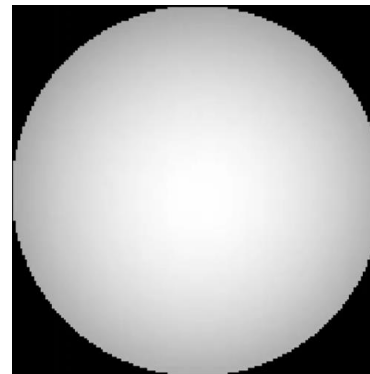
# Zernikeモードの比較

- 計算によるDM形状

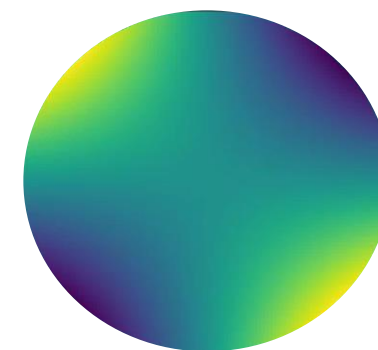
印加電圧



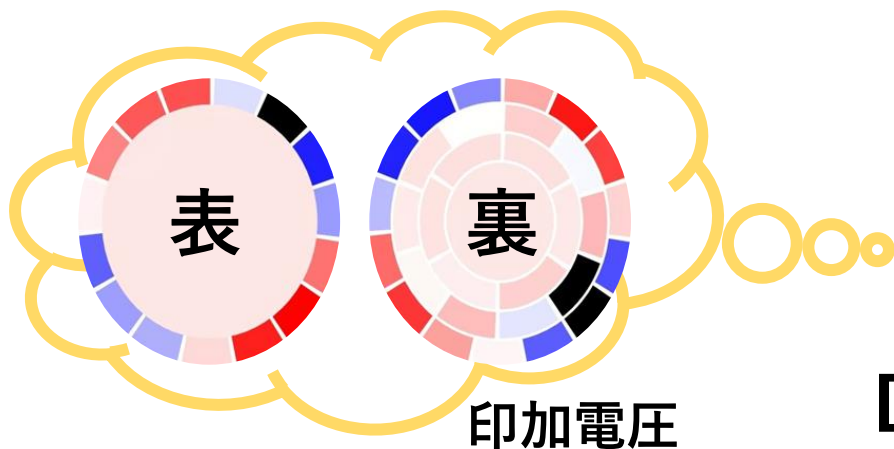
シミュレーション用  
DM影響関数



DM形状

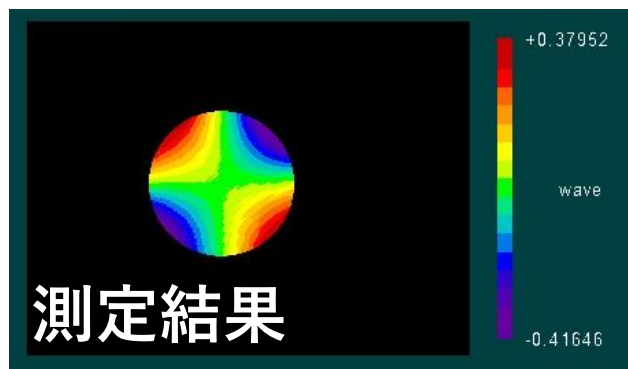


- 実機のDM形状



DM

Zygo干渉計



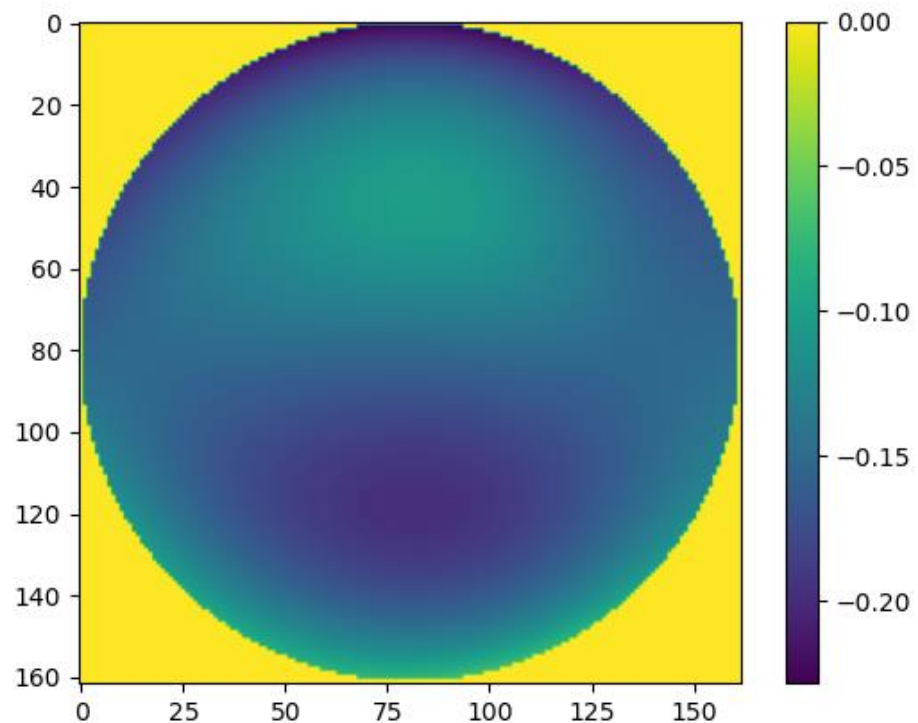
両者を比較



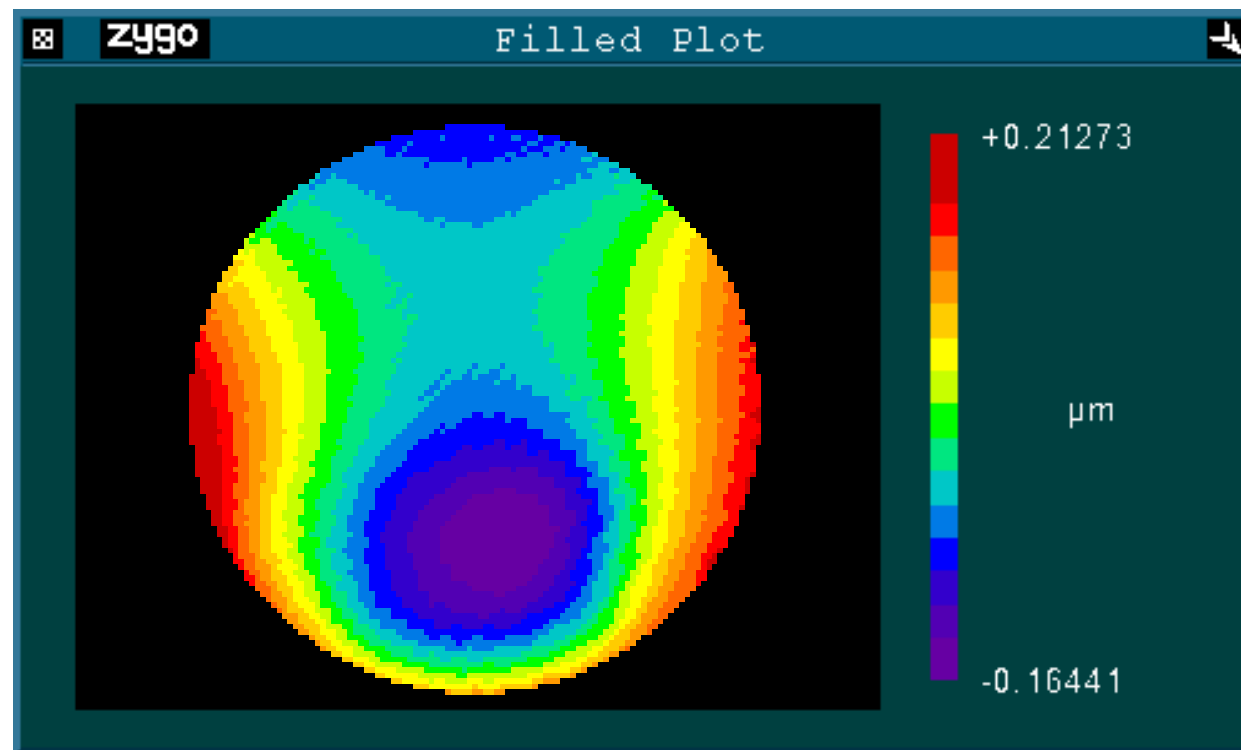
# Zernikeモードの比較

Coma-Y Zernike係数=-0.3[um]

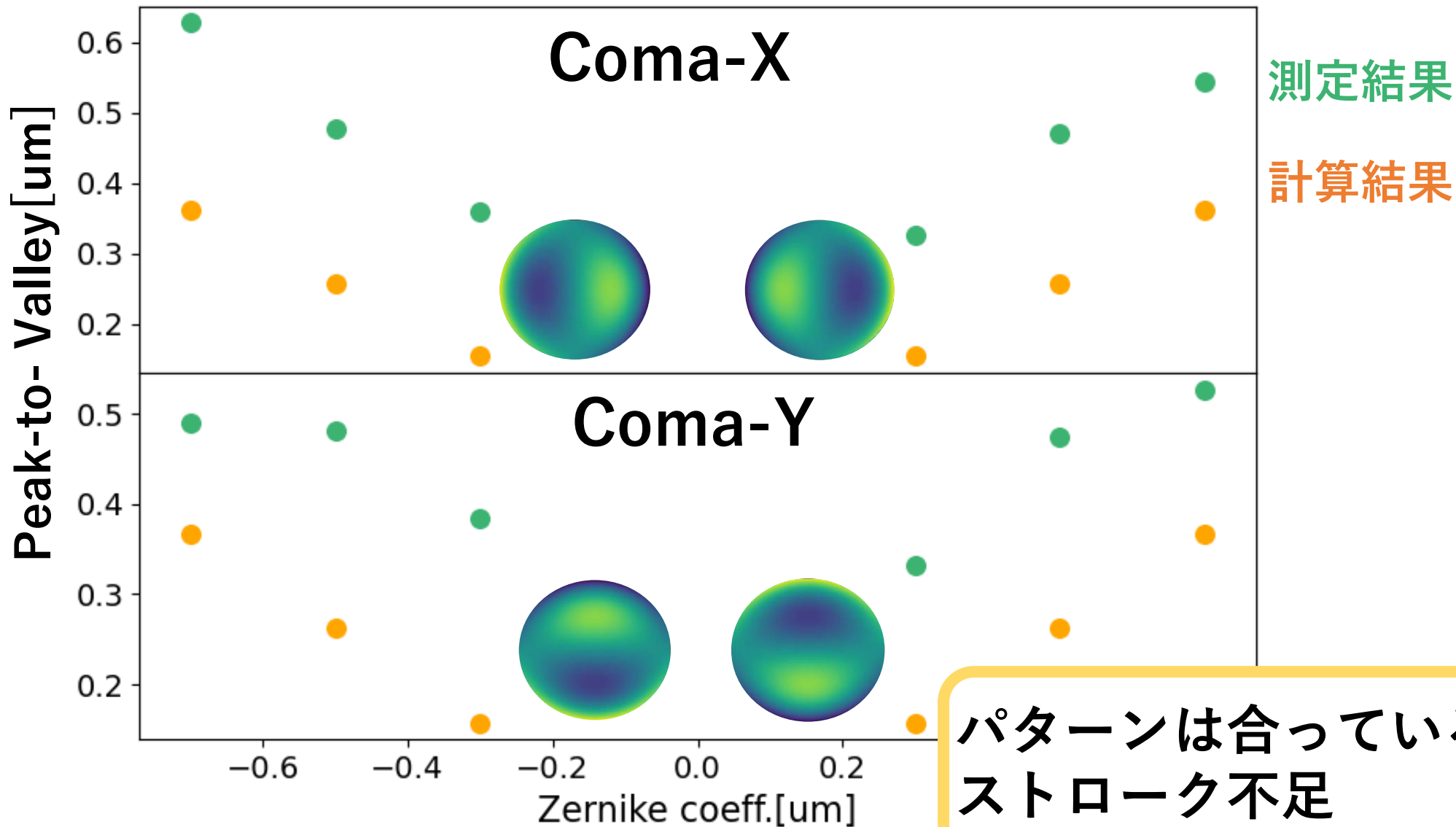
計算結果



測定結果

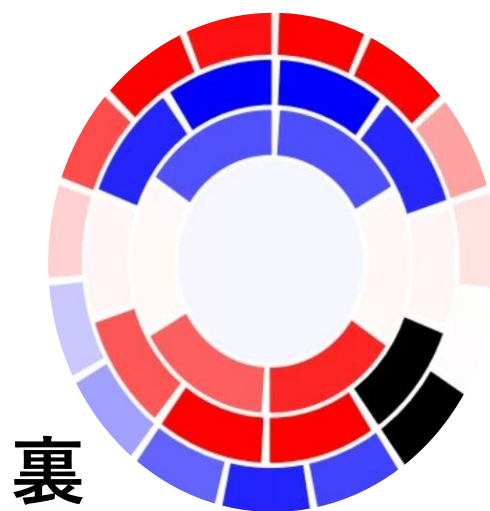
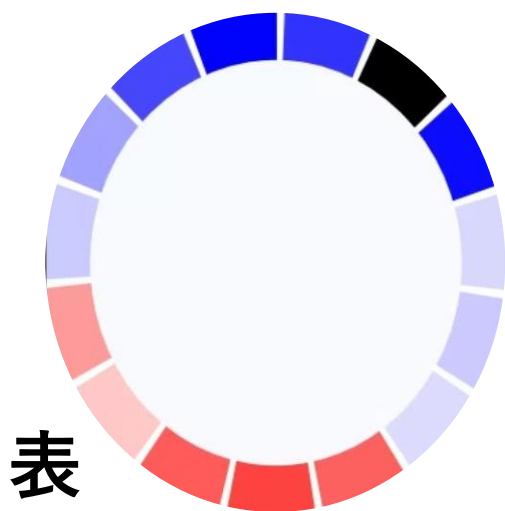


# Zernikeモードの比較



# Zernikeモードの比較

コマ収差(Coma-Y) Zernike係数=-0.3[um]



電圧

高



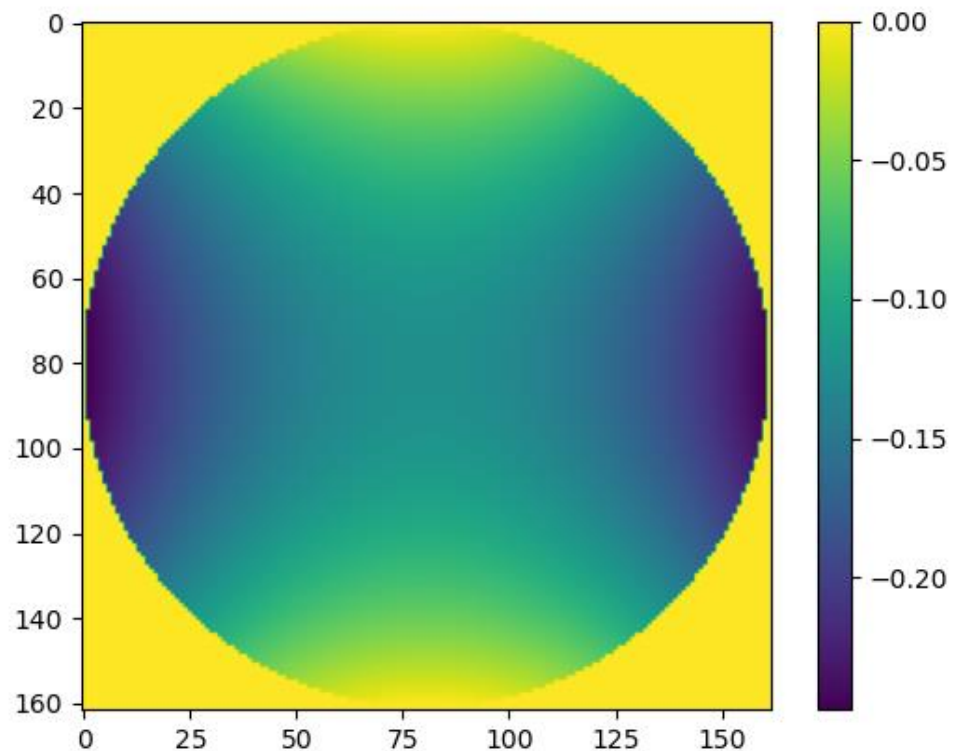
低

裏面2、3週目でコマの形状はほぼ決まる。  
ストロークが振り切っている。

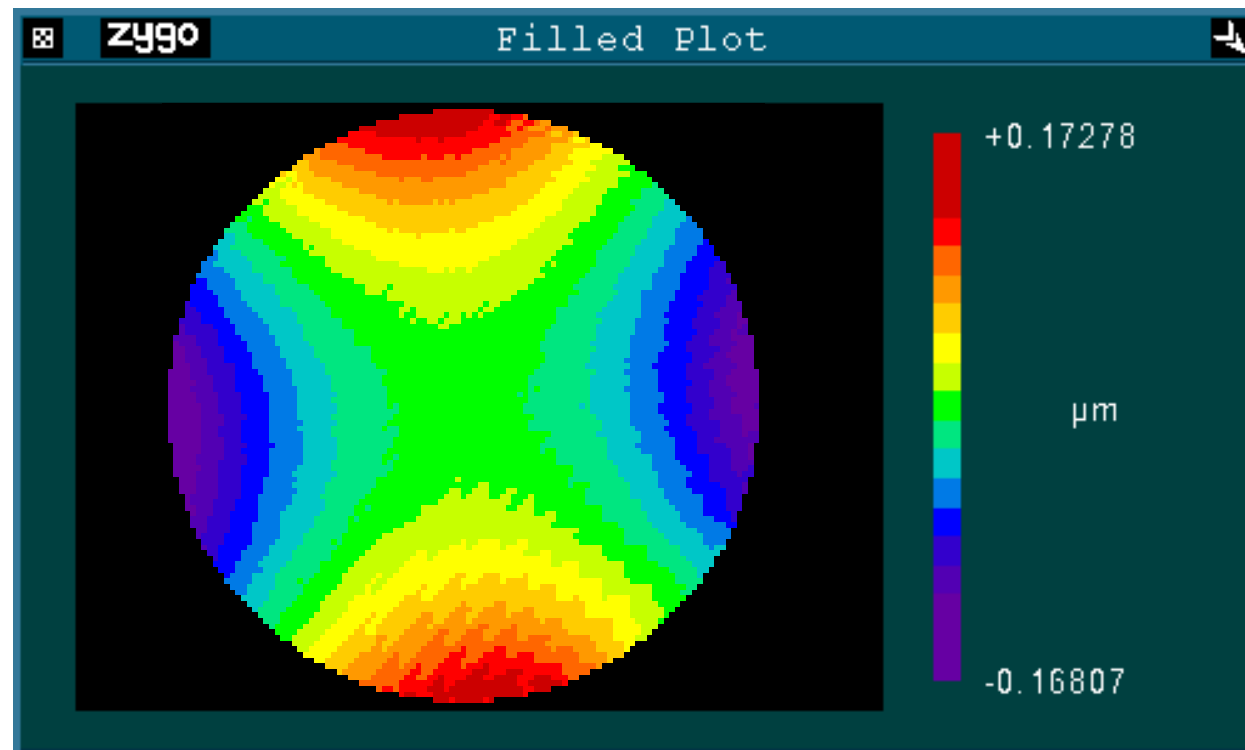
# Zernikeモードの比較

**Ast-X Zernike係数=-0.5[um]**

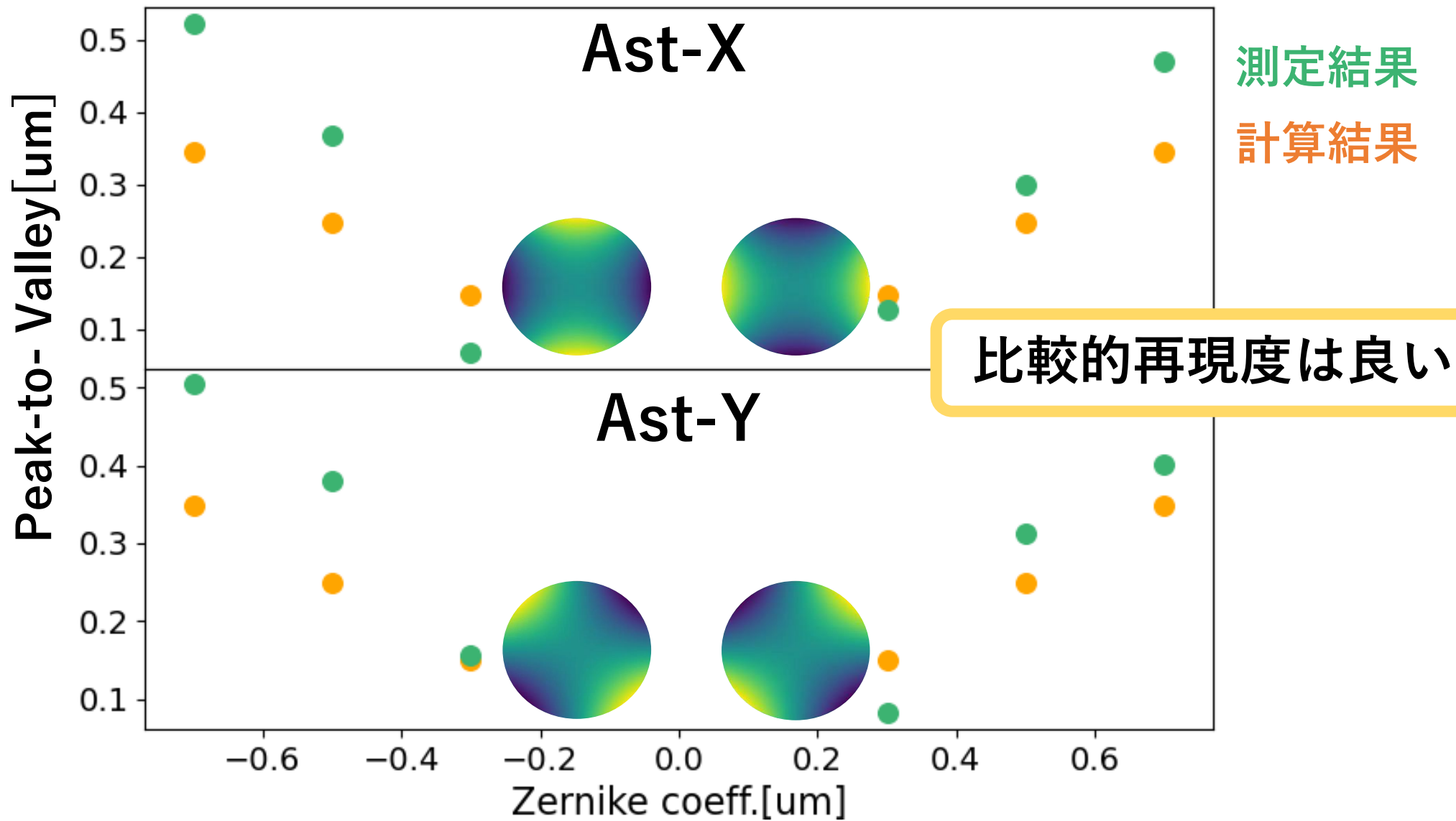
計算結果



測定結果

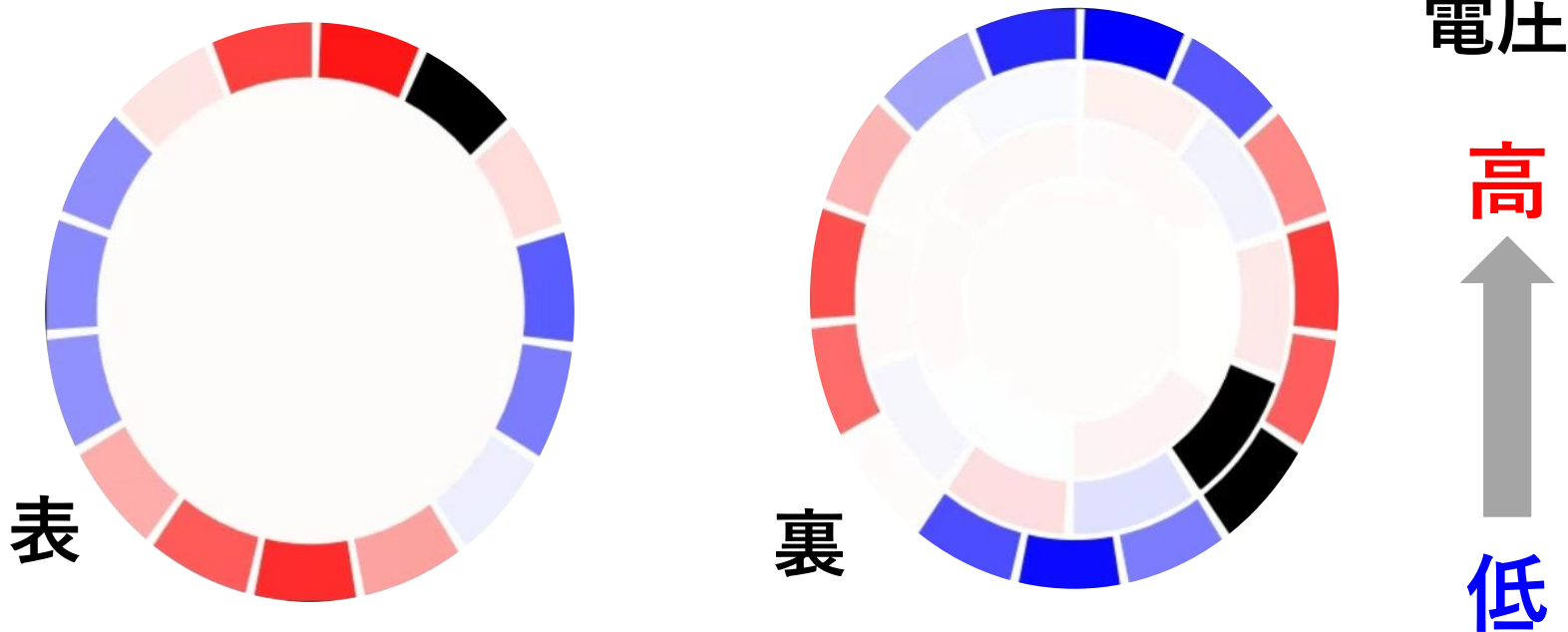


# Zernikeモードの比較



# Zernikeモードの比較

非点収差(Ast-X) Zernike係数=-0.5[um]



両面の4周目の素子で非点収差の形状は決まる。  
4周目のストロークに余裕がある。

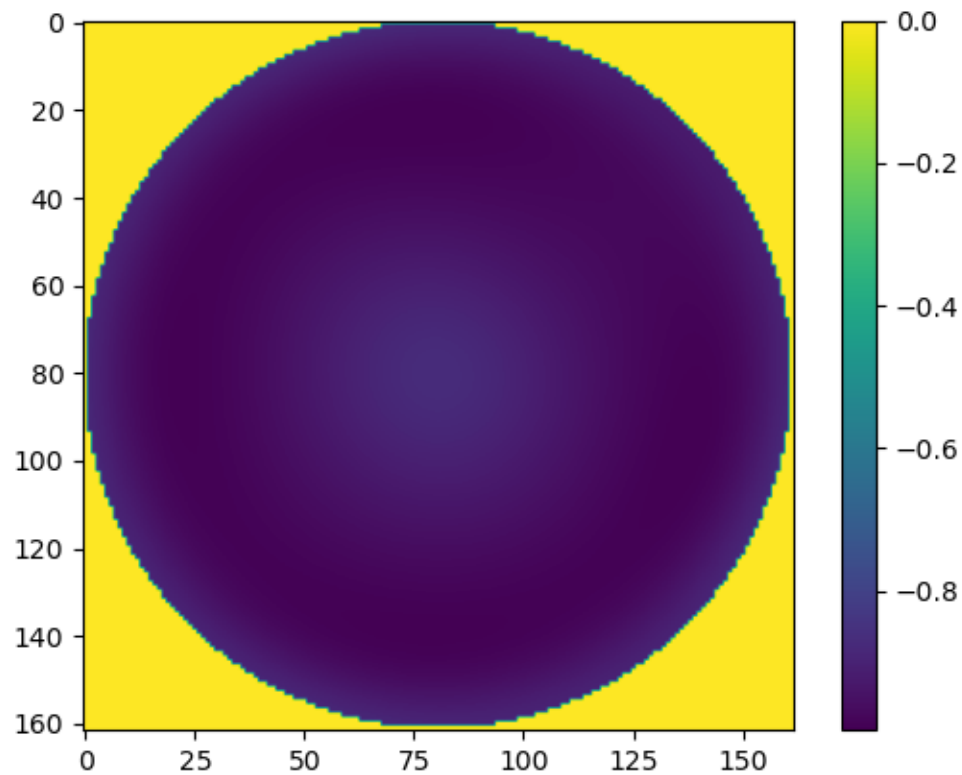
-0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6  
Zernike coeff.[um]



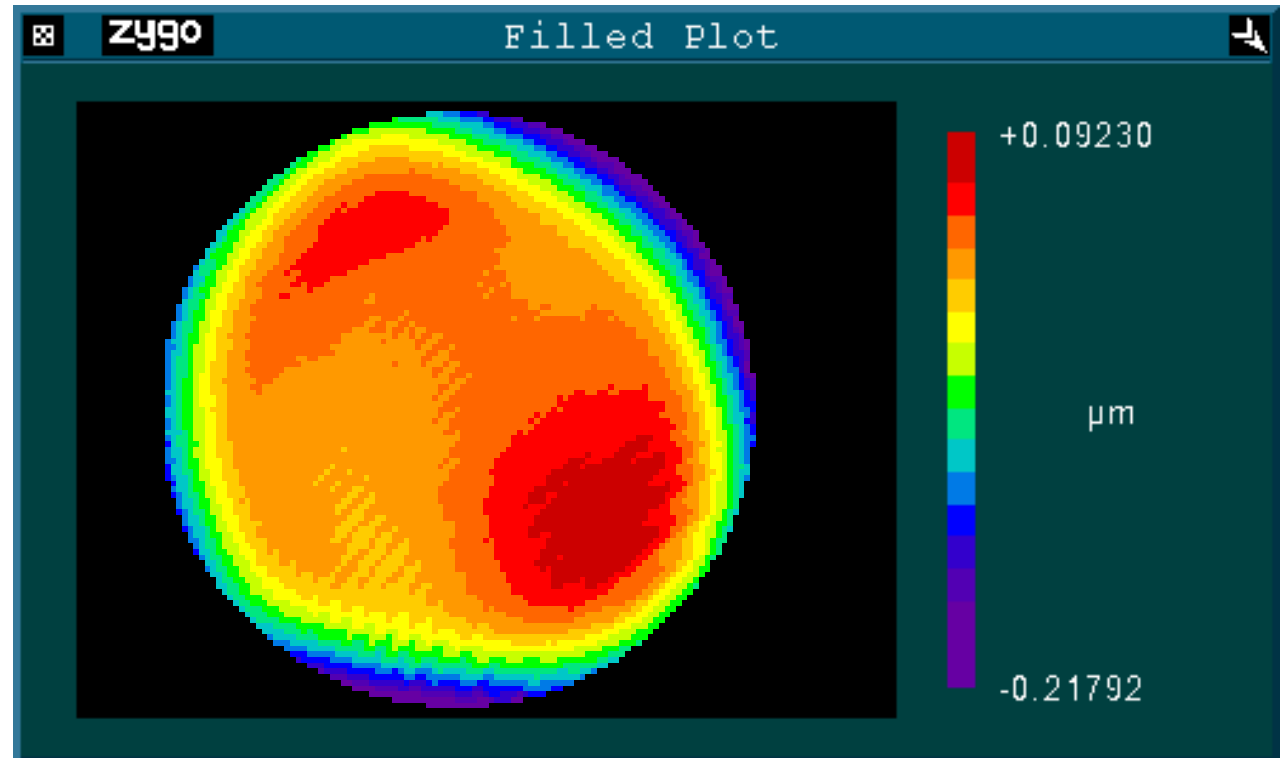
# Zernikeモードの比較

Prime-Sph Zernike係数=-0.3[um]

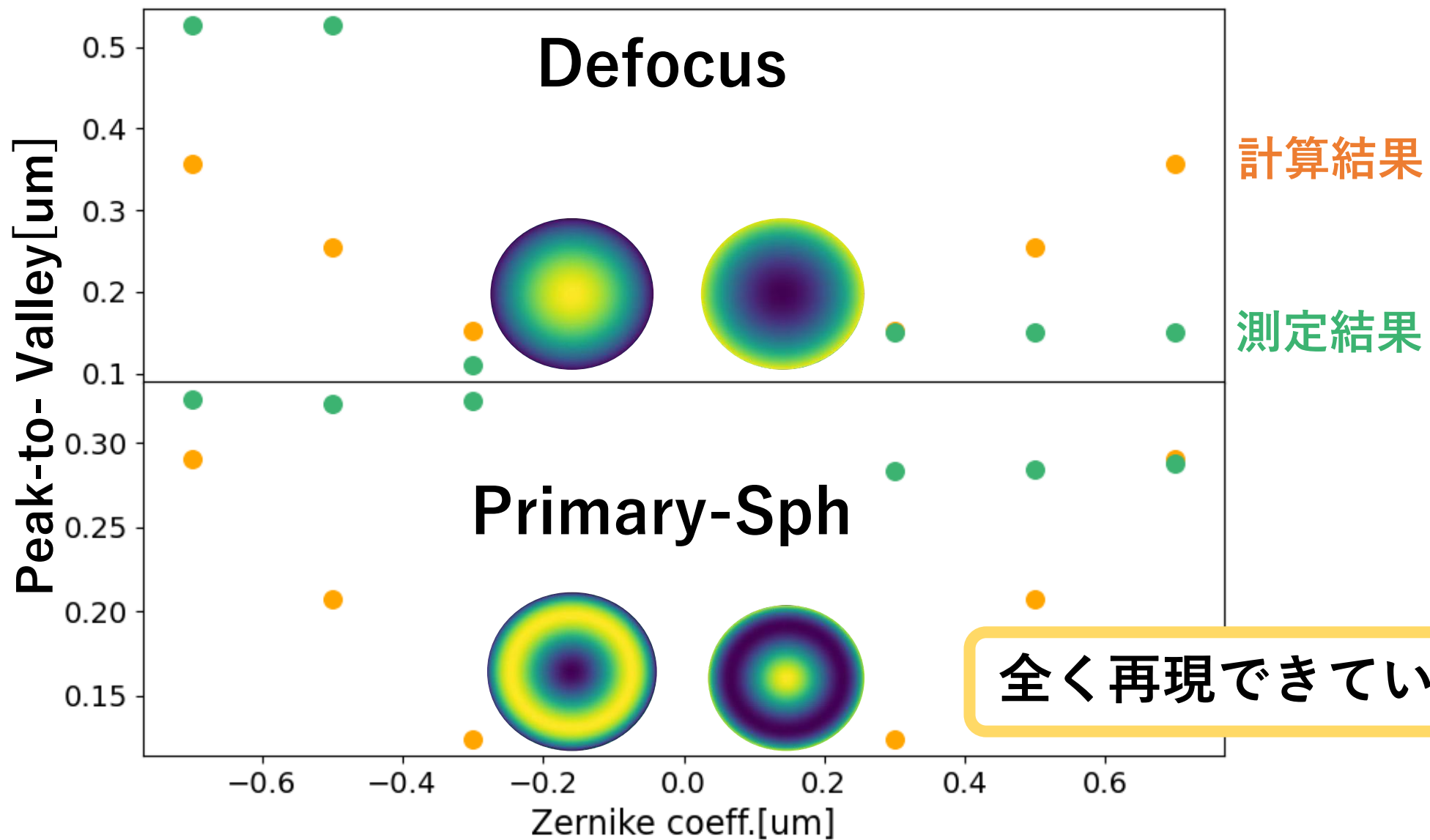
計算結果



測定結果



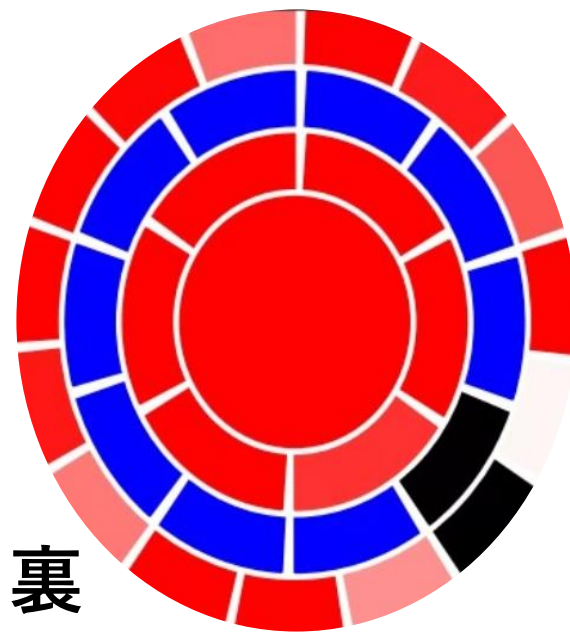
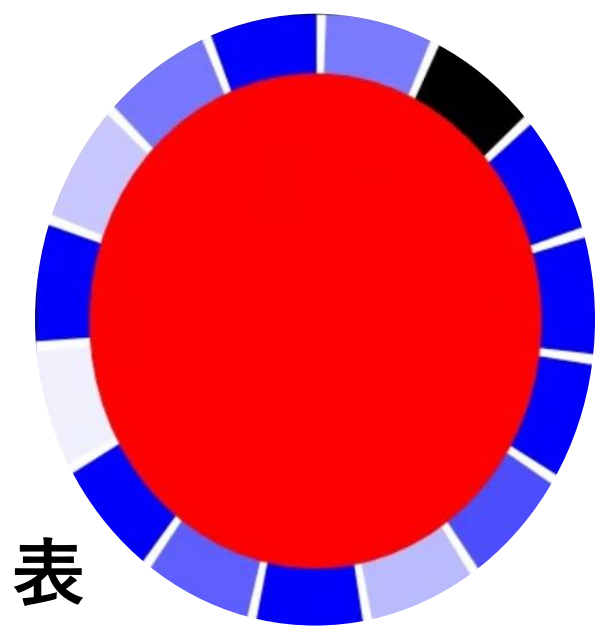
# Zernikeモードの比較



全く再現できていない

# Zernikeモードの比較

球面収差(Sph) Zernike係数=-0.3[um]



電圧

高



低

ほとんどの素子でストロークが振り切っている。  
球面収差を実現する自由度がない。

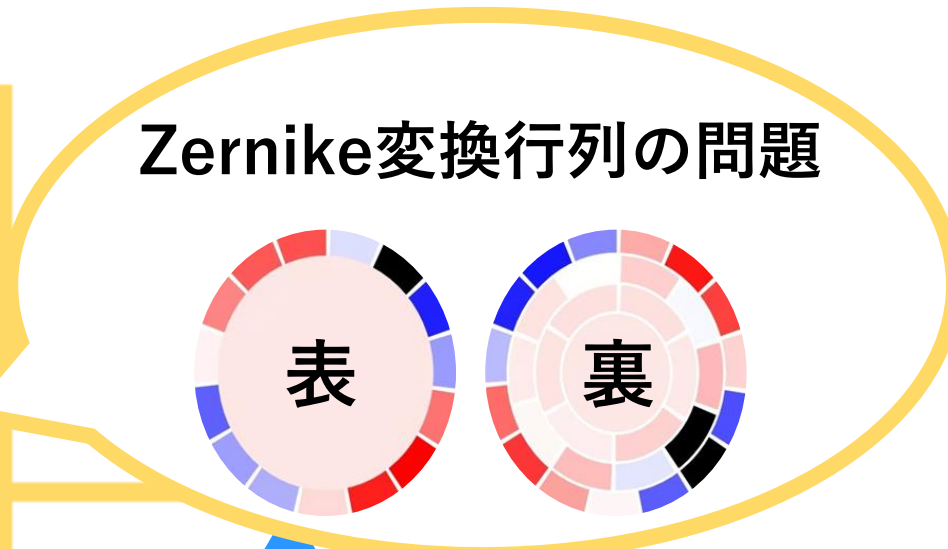
ない

-0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6  
Zernike coeff.[um]

# Zernikeモードの比較

|             | 形状再現  | ストローク   |
|-------------|---|---|
| Defocus     | NG   | NG   |
| Astigmatism | OK   |      |
| Coma        | OK   | NG   |
| Primary-Sph | NG  | NG  |

# Zernikeモードの比較

|             | 形状再現 | Zernike変換行列の問題   |
|-------------|------|--|
| Defocus     | NG   |  |
| Astigmatism | OK   |  |
| Coma        | OK   | シミュレーションでのDMは、裏面のみ   |
| Primary-Sph | NG   | NG   |

# Zernikeモードの比較

|             | 項目                           | ストローク |
|-------------|------------------------------|-------|
| Defocus     | DMのストローク不足が疑われる。<br>今後、追加調査。 | NG    |
| Astigmatism | OK                           | △     |
| Coma        | OK                           | NG    |
| Primary-Sph | NG                           | NG    |



# まとめ

- 京都産業大学神山天文台では**小型AO装置CRAO**を開発中。
- 室内実験を通して性能評価を行ったところ、2点の問題点が見つかった。
  1. TT補正は、**10m/sを超える風速**で補正が効いていない
  2. DM補正では、シミュレーションによる**補正結果と大きく乖離**
- 1については、大気乱れのパワースペクトルとTTステージの周波数特性を比較  
TTステージの周波数特性は**10Hz程度から低下**するため、  
風速25m/sの大気乱れでは**10%程度補正出来ない**ことが判明。
- 2は、実際のDM形状と影響関数を考慮し、計算で得られた形状と比較したところ、  
低次のモードにおいて**形状が再現できておらず、ストロークも不足**している  
場合があることが分かった。

