

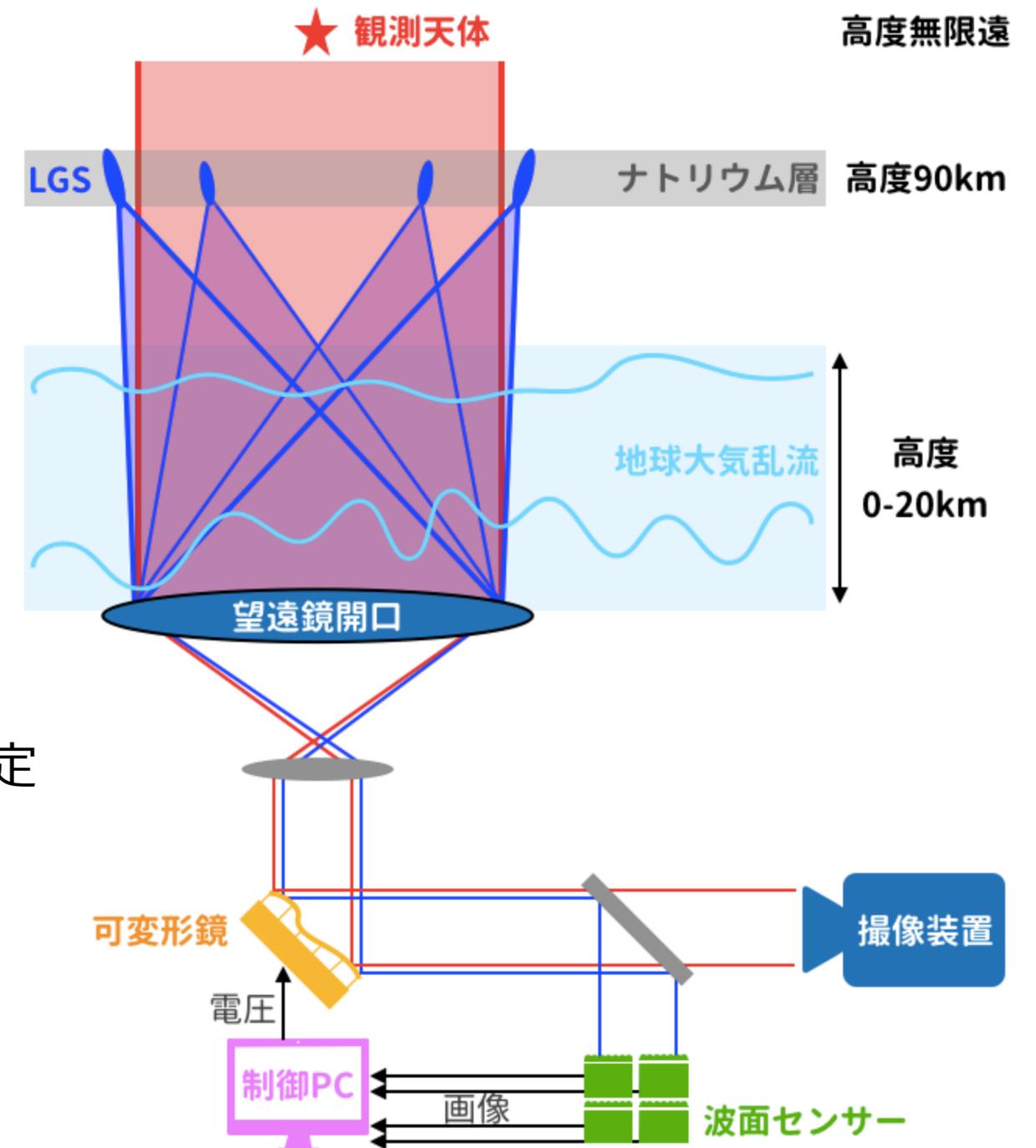
すばるトモグラフィー補償光学に向けた 大気ゆらぎの高度分布測定装置の開発

大金 原(東北大D2), 秋山 正幸¹, 大野 良人², 美濃和 陽典², 大屋 真², 寺尾 航暉¹, 赤澤 拓海¹

¹東北大学, ²国立天文台

- ▶ 複数のレーザーガイド星とトモグラフィー技術を用いた補償光学
- ▶ 大気ゆらぎプロファイル(高度方向の乱流強度分布)の重要性と測定方法
- ▶ すばる望遠鏡における大気ゆらぎプロファイリング計画と装置開発状況
- ▶ 将来展望とまとめ

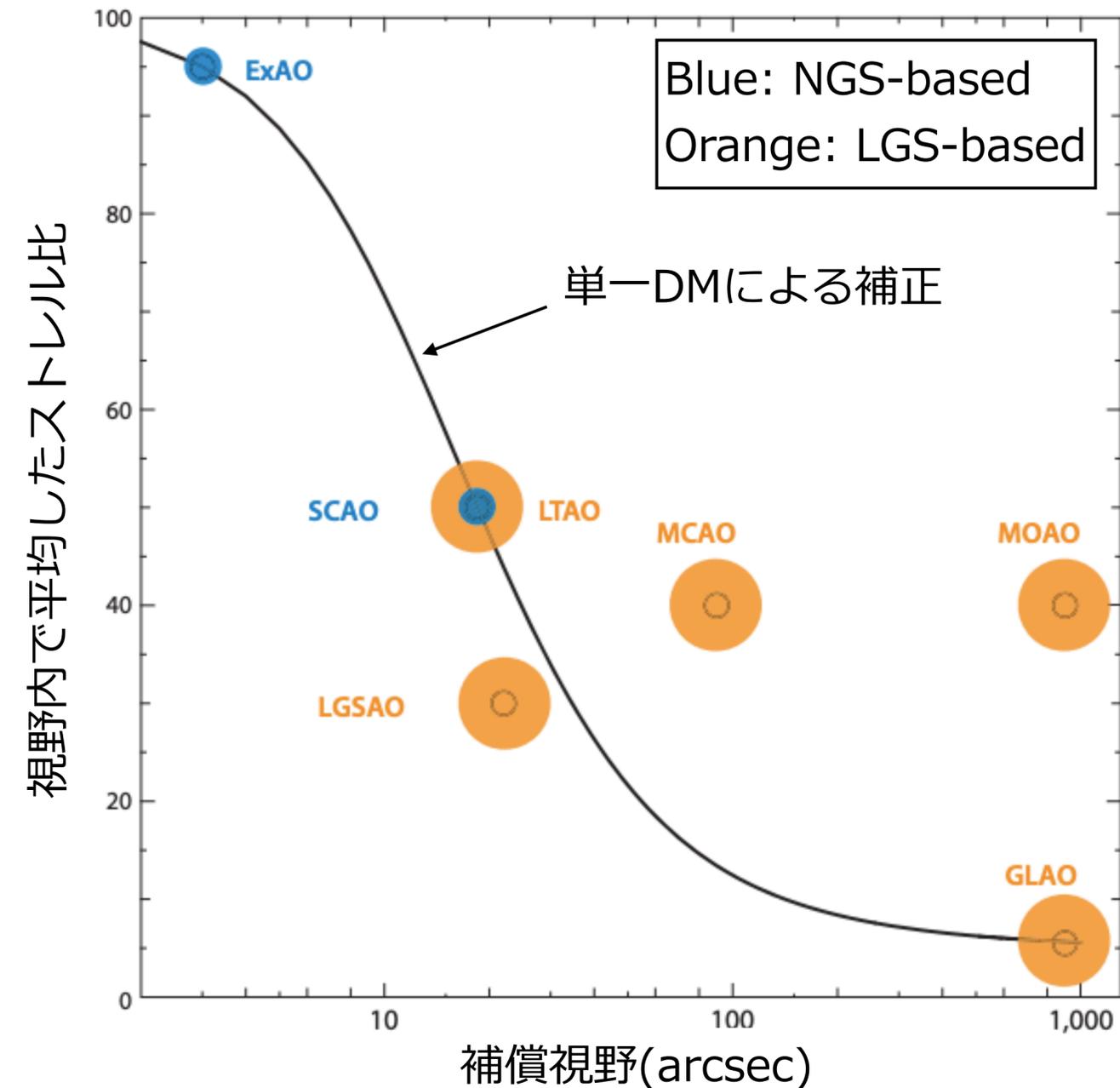
- ▶ 従来の補償光学(SCAO)の課題
 - ▶ 一度に補償できる視野が狭い
 - ▶ 可視光域では性能が低い
- ▶ 複数LGS + トモグラフィー による補償光学
 - ▶ 複数のLGS+WFSで、大気ゆらぎの測定方向を増やす
 - ▶ トモグラフィーの手法で、大気ゆらぎの3次元構造を推定
 - ▶ 観測方向に最適化した補償波面をDMに送る



- ▶ LTAO (Laser Tomography AO)
 - ▶ コーン効果を克服して高精度化・可視への対応
- ▶ GLAO (Ground Layer AO)
 - ▶ あらゆる方向に共通である地表層ゆらぎを補償
- ▶ MCAO (Multi Conjugate AO)
 - ▶ 複数のDMで高度ごとに補償
- ▶ MOAO (Multi Object AO)
 - ▶ 複数のDMで天体ごとに補償

LGSを用いた補償光学においては、

高精度のLTAO、広視野のGLAO



Hバンドにおける各種AOの性能 (Rigaut et al. 2018)

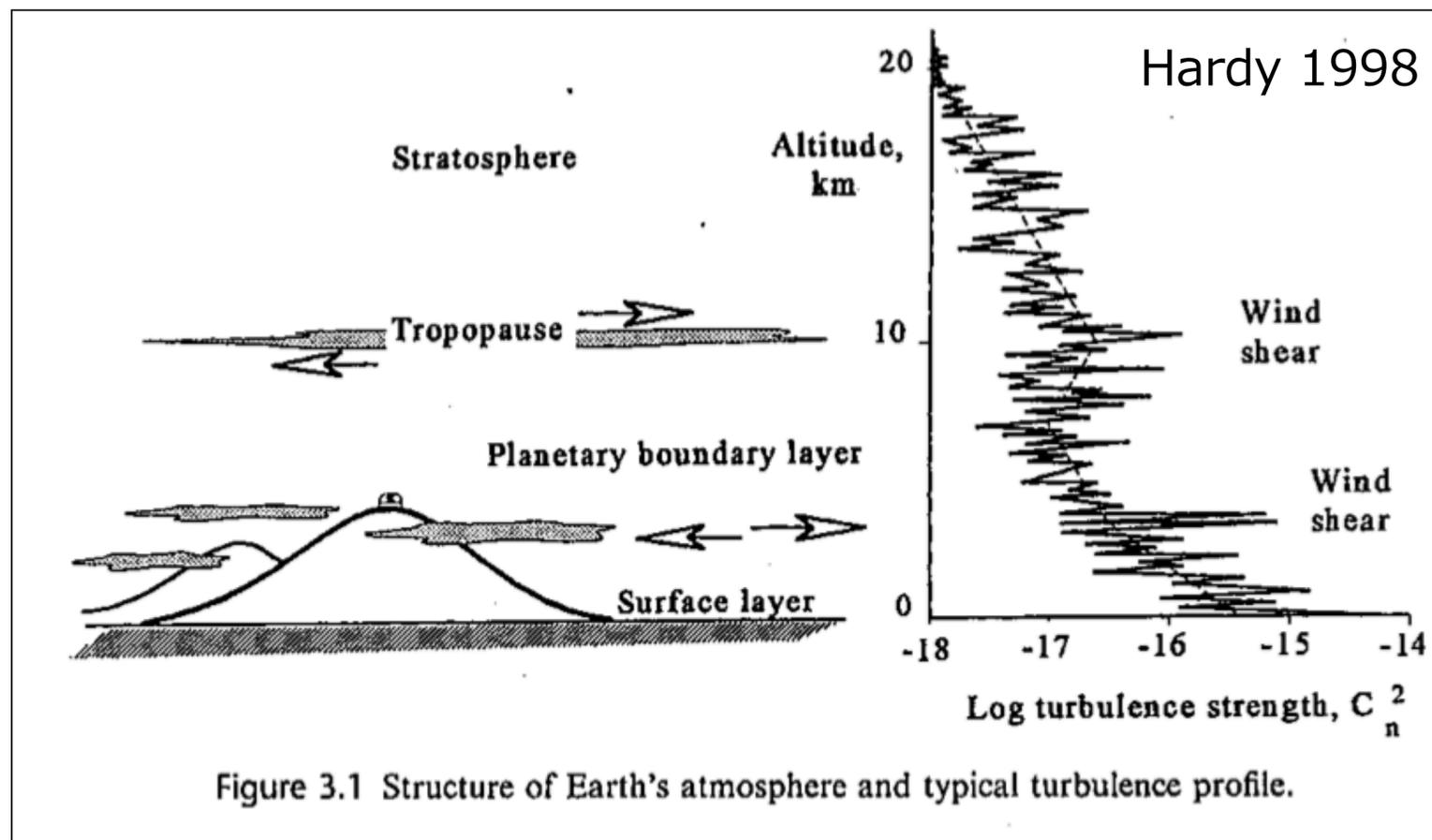
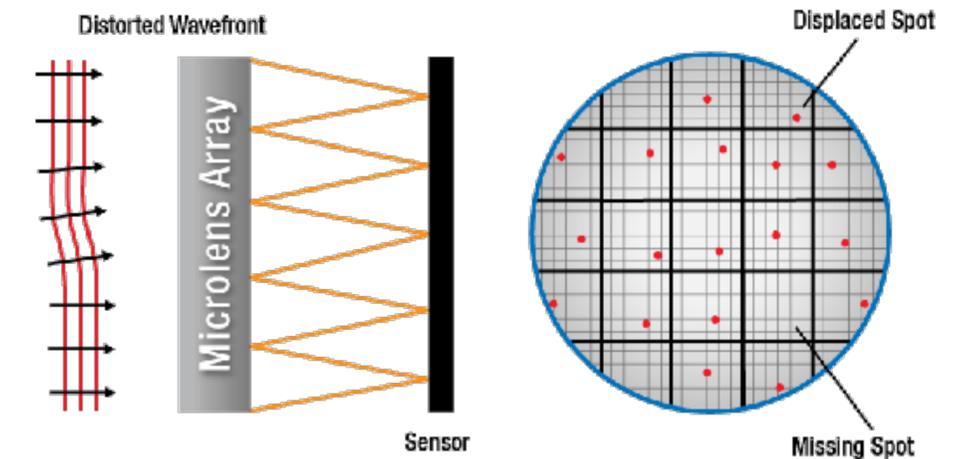
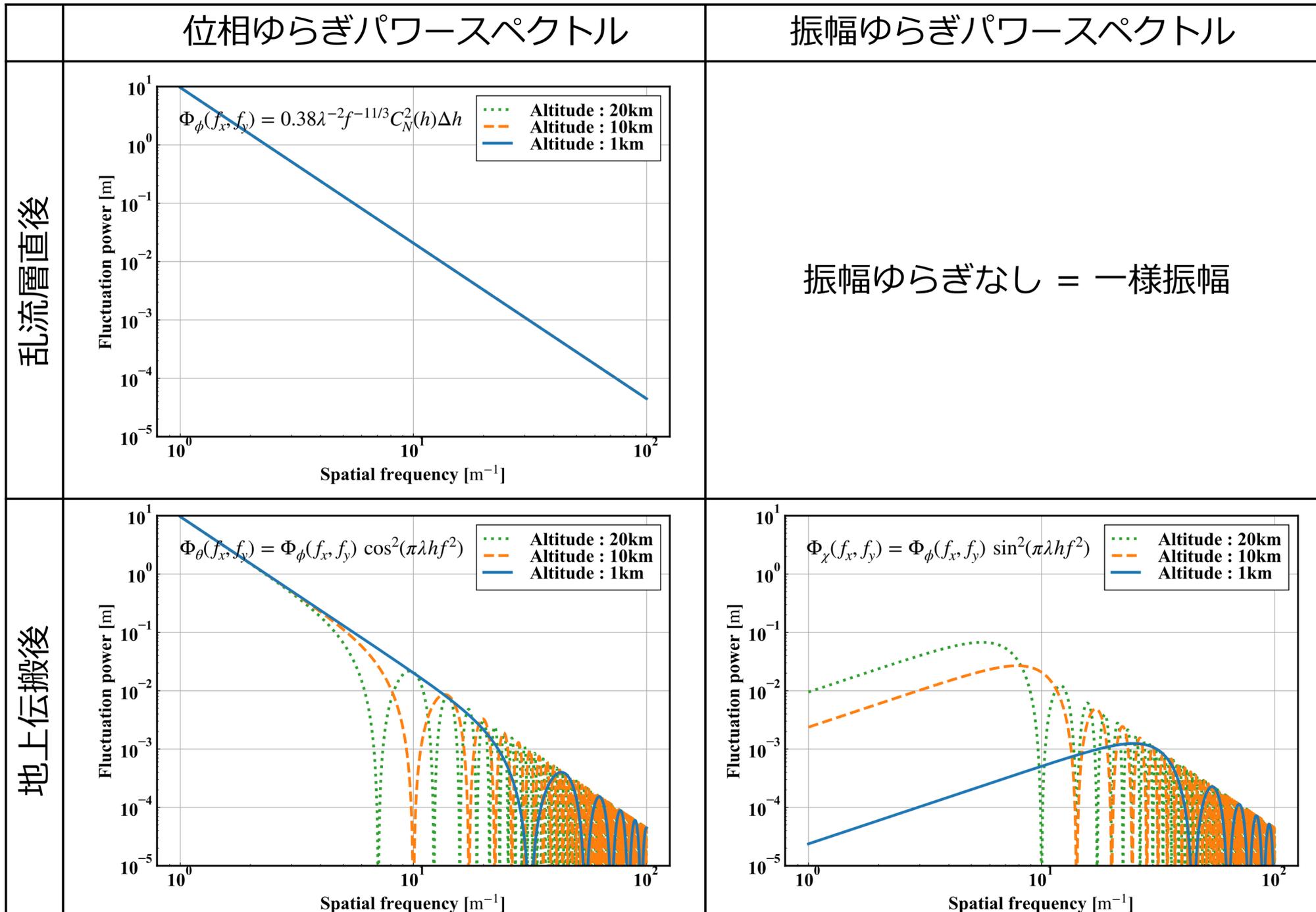


Figure 3.1 Structure of Earth's atmosphere and typical turbulence profile.

percentile seeing	25%-ile (good)	50%-ile (moderate)	75%-ile (bad)	speed	direction
height	fractional contribution				
0 km	0.7546	0.7316	0.6882	5.6 m/s	0°
0.5 km	0.0497	0.0650	0.0798	5.77 m/s	50°
1 km	0.0141	0.0193	0.0398	6.25 m/s	100°
2 km	0.0133	0.0252	0.0395	7.57 m/s	150°
4 km	0.0545	0.0574	0.0551	13.31 m/s	200°
8 km	0.0467	0.0500	0.0548	19.06 m/s	250°
16 km	0.0671	0.0515	0.0428	12.14 m/s	300°
$\int C_N^2 \times 10^{-13} m^{1/3}$	3.5781	5.2770	8.1360		
$r_0(0.5\mu m)$	14.9cm	11.8cm	9.1cm		
fwhm(0.5 μm)	0.56"	0.73"	0.97"		
fwhm(AG)	0.49"	0.64"	0.84"		

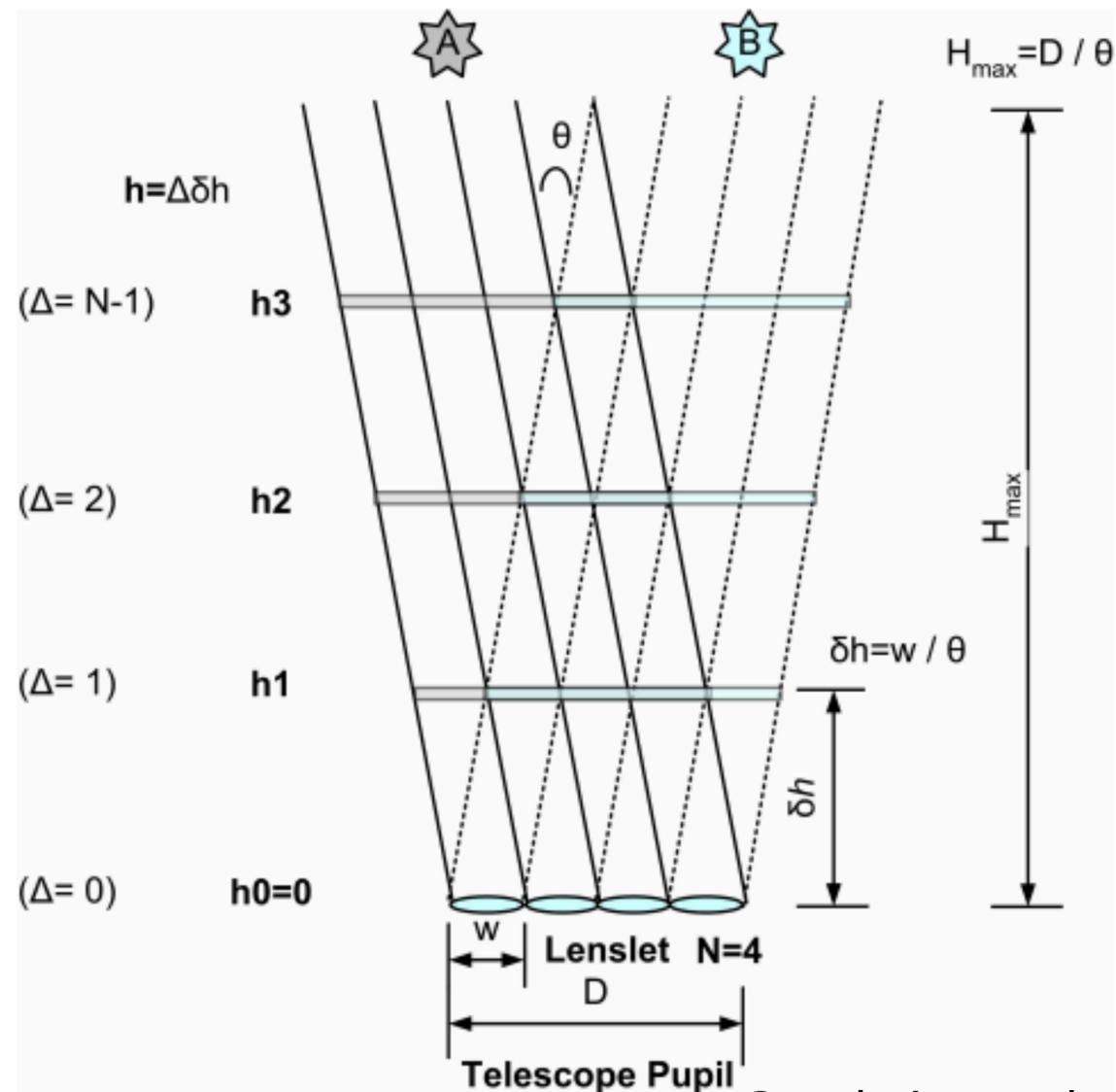
Mauna Kea atmospheric turbulence model profile
(Oya+2014, SPIE)

- ▶ 大気ゆらぎ強度を、地表からの高度の関数で表したものの
- ▶ 大気ゆらぎ強度は、大気屈折率構造定数 C_N^2 で定量化される
- ▶ AOの設計、トモグラフィー推定の事前情報などに有用



- ▶ Shack-Hartmann波面センサー
 - ▶ マイクロレンズアレイと検出器からなる
 - ▶ スポットの位置
 - 波面(位相)
 - ▶ スポットの明るさ
 - シンチレーション(振幅)

Slope Detection And Ranging (Wilson 2002)



Goodwin et al. 2007 (一部改変)

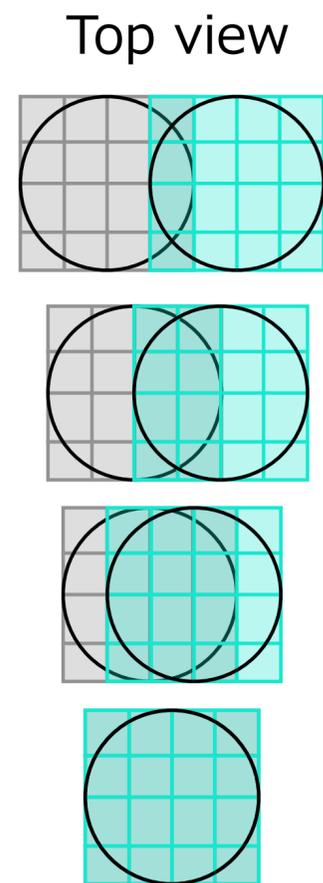
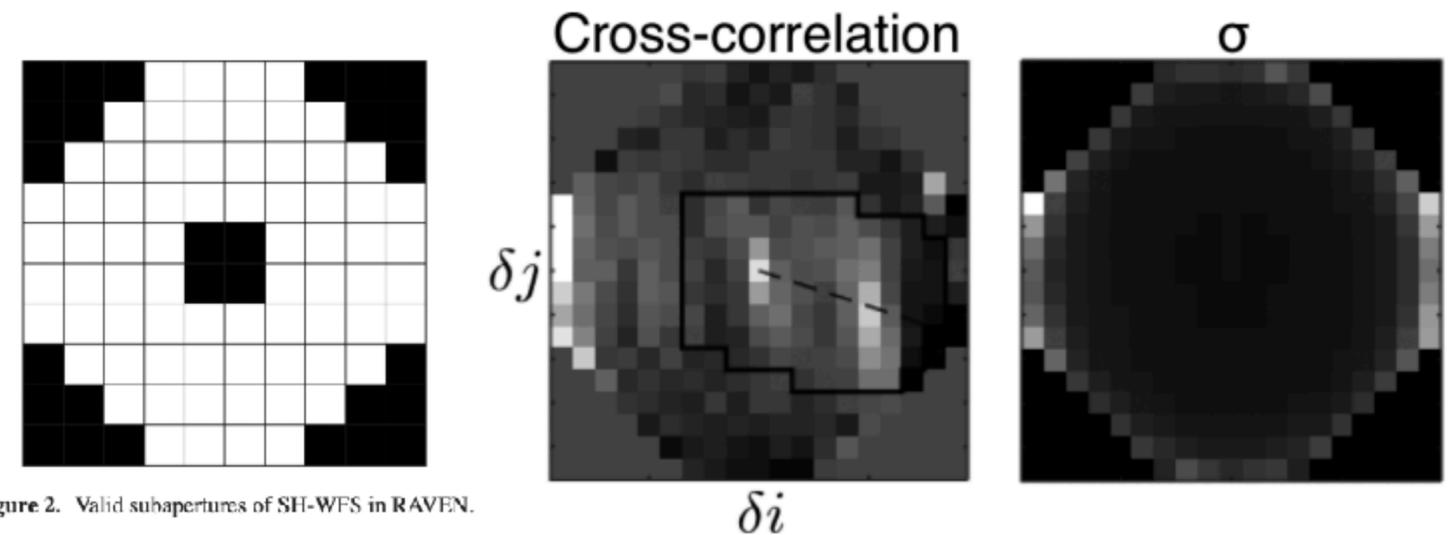


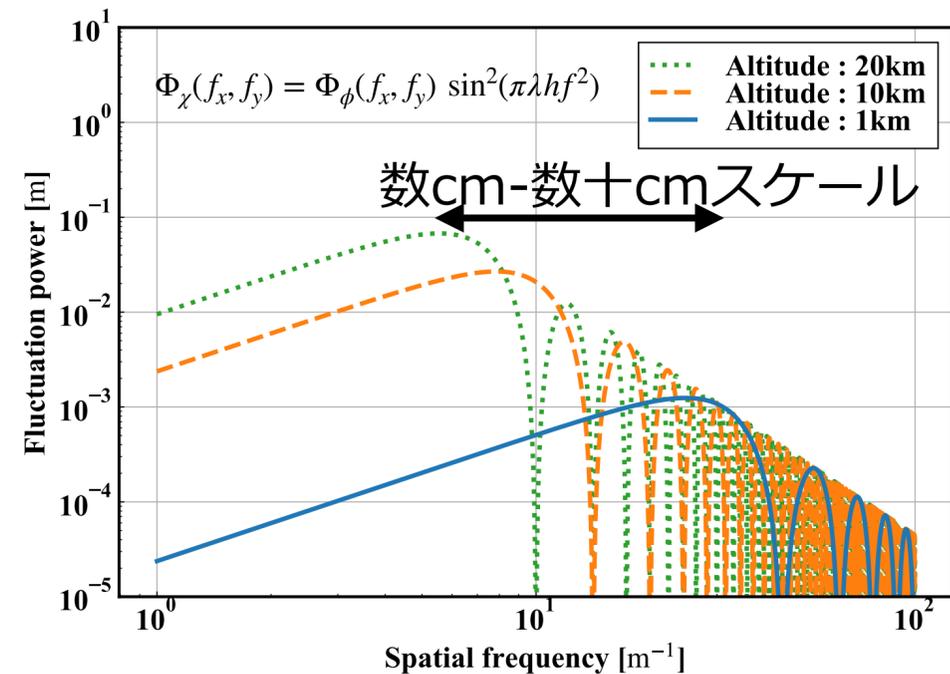
Figure 2. Valid subapertures of SH-WFS in RAVEN.



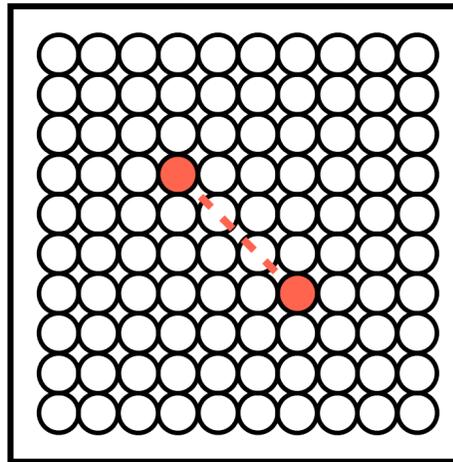
Ono et al. 2016

- ▶ 2つの方向の波面センサー測定値の相互相関をとる
- ▶ 相関長→ゆらぎ高度、相関の大きさ→ゆらぎ強度
- ▶ 最大高度は、望遠鏡開口サイズ/星の離角できまる
- ▶ 高度分解能は、サブ開口サイズ/星の離角できまる

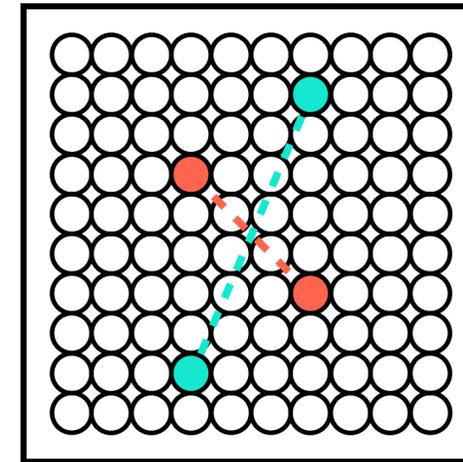
Shack-Hartmann Multi Aperture Scintillation Sensor (Ogane et al. 2021)



Normal aperture pattern of SH-MASS



Differential aperture pattern of SH-MASS

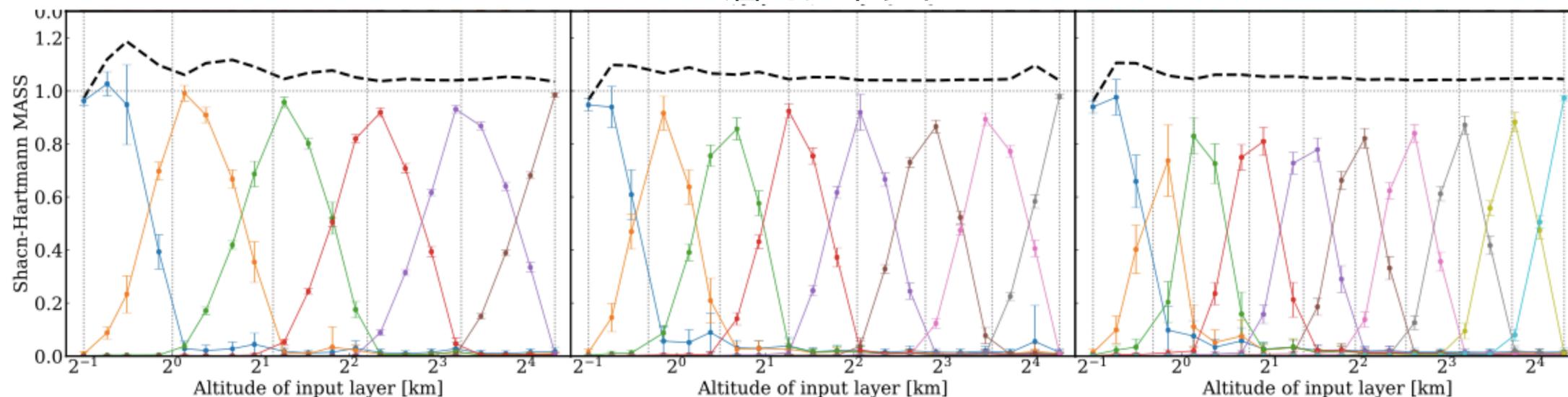


- ▶ 一定間隔だけ離れたサブ開口ペアで、シンチレーションの大きさを測定
- ▶ 様々な間隔での測定から、フィッティングによりプロファイルを求める
- ▶ 乱流モデルの仮定が必要
- ▶ 小さいサブ開口 (直径数cm)が必要
- ▶ 地表層ゆらぎはシンチレーションを生まないので測定不可

6層でフィット

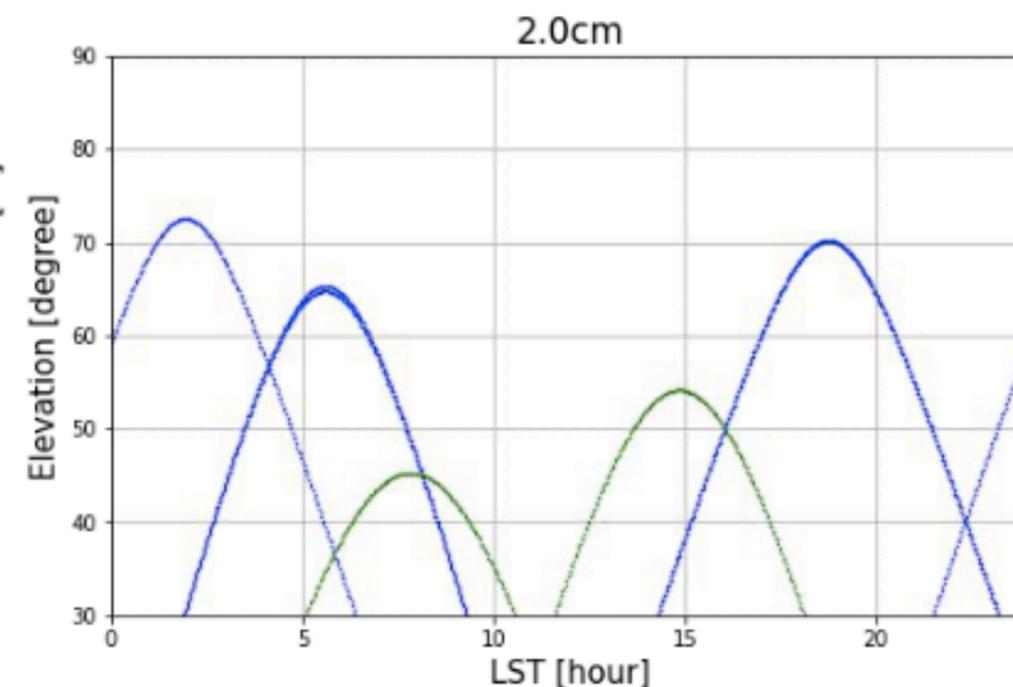
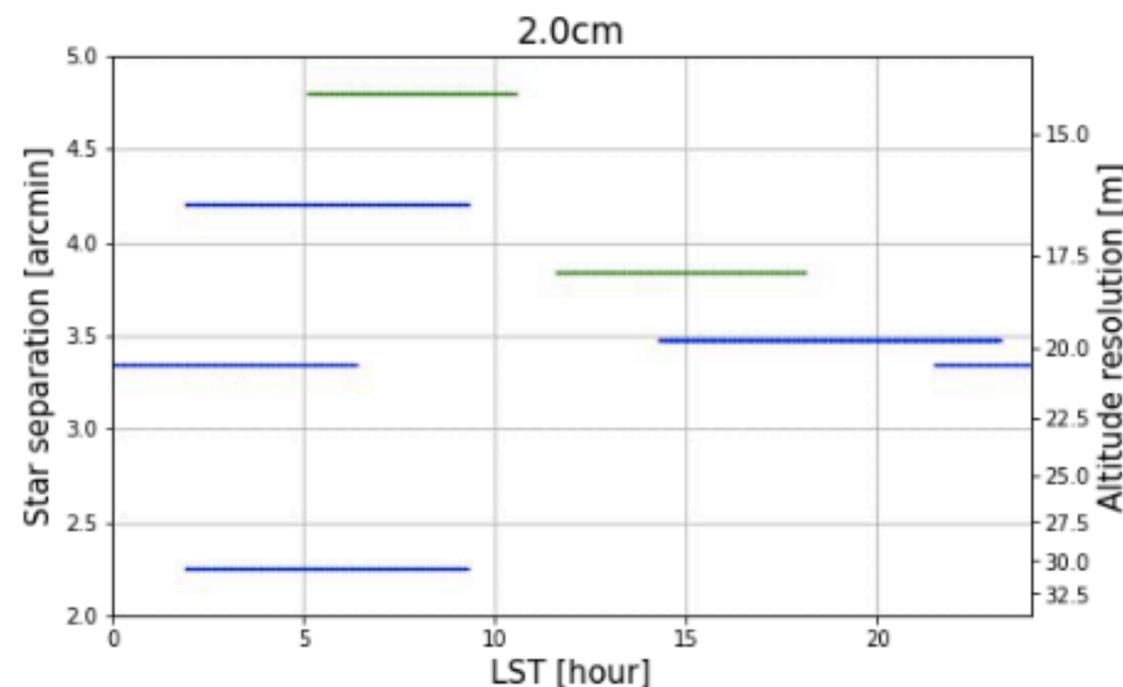
8層でフィット

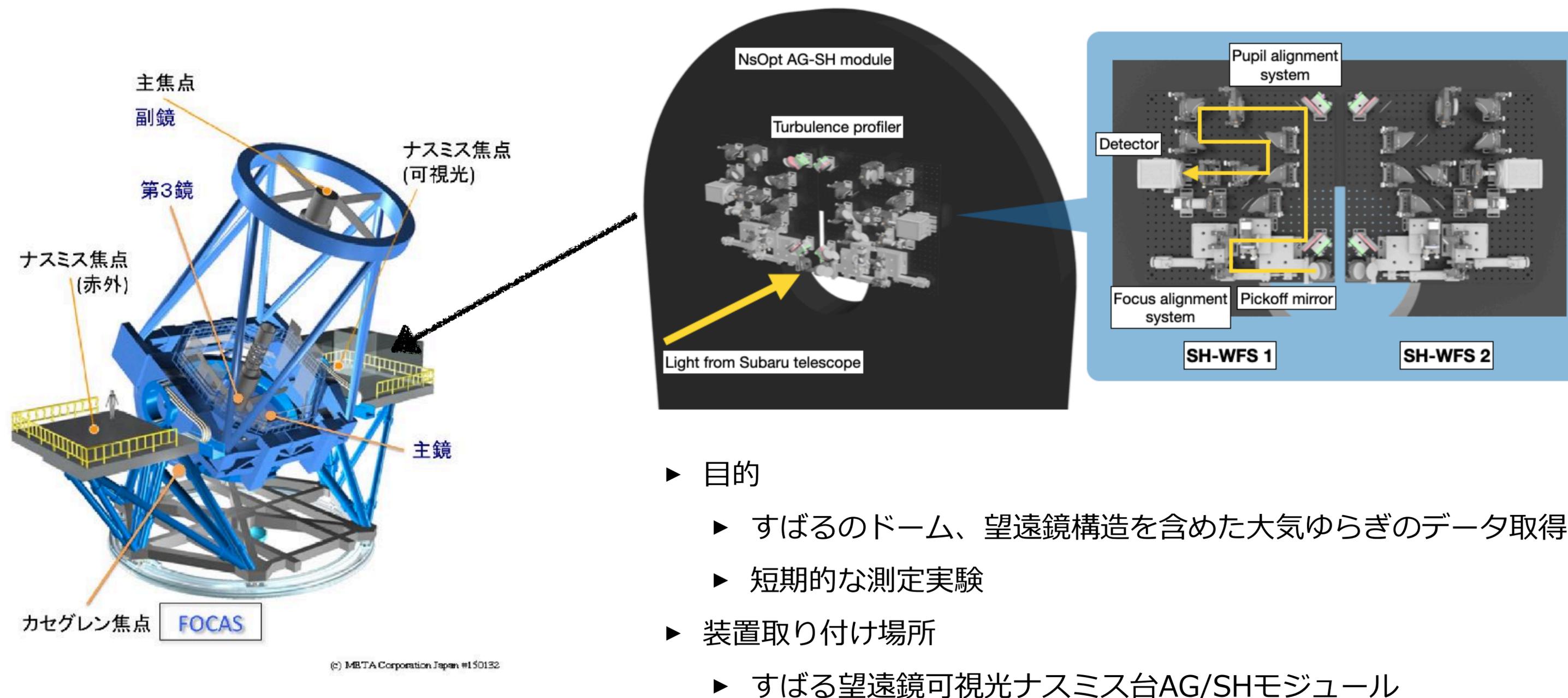
10層でフィット



- ▶ 望遠鏡の瞳を細かく分割 & 離角の大きな星のペア
 - ▶ SH-MASSで高層ゆらぎ、SLODARで地表層ゆらぎが同時測定可能！
- ▶ 測定の条件
 - ▶ 測定のSN比：>5
 - ▶ 星ペアの離角：3-5分角
 - ▶ 上2つを満たす明るさ・離角の星ペアがどの時間帯でも観測できること → サブ開口の口径を2cmに決定

	SLODAR	SH-MASS
高度範囲	~300m以下	~600m以上
高度分解能	~20m	数km





ナス
カセ
焦点
(
)

NsOpt AG-SH module
Turbulence profiler
Light from Subaru telescope

Pupil alignment system
Detector
Focus alignment system
Pickoff mirror

SH-WFS 1
SH-WFS 2

- ▶ 目的
 - ▶ すばるのドーム、望遠鏡構造を含めた大気ゆらぎのデータ取得
 - ▶ 短期的な測定実験
- ▶ 装置取り付け場所
 - ▶ すばる望遠鏡可視光ナスミス台AG/SHモジュール

波面センサー

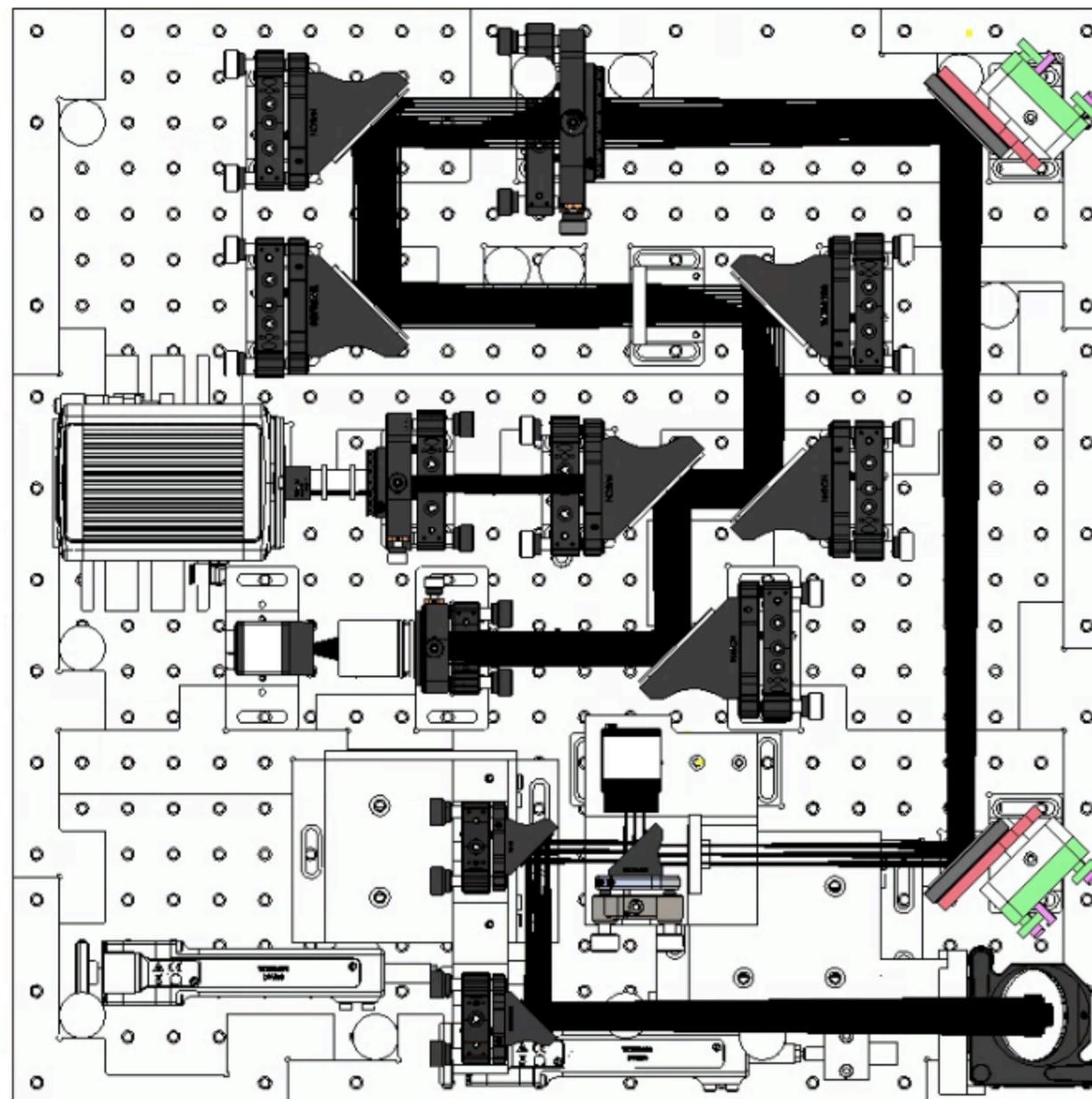
- 1.4x1.4mの瞳を66x66に分割したスポット像が見える
- 6.5 $\mu\text{m}/\text{pix}$
- 2k x 2k
- 3 pix/spot
- 25 arcsec/subap

瞳カメラ

- 直径3mの瞳像が見える
- 2つの波面センサー間での瞳の一致をスパイダーパターンで担保
- 5.5 $\mu\text{m}/\text{pix}$
- 2k x 2k

焦点調整トロンボーン/ステージ

- 15mm駆動で離角3-5分角の星のフォーカスを調整



* 2つの波面センサーのうち左側のみ表示

瞳調整ミラーペア

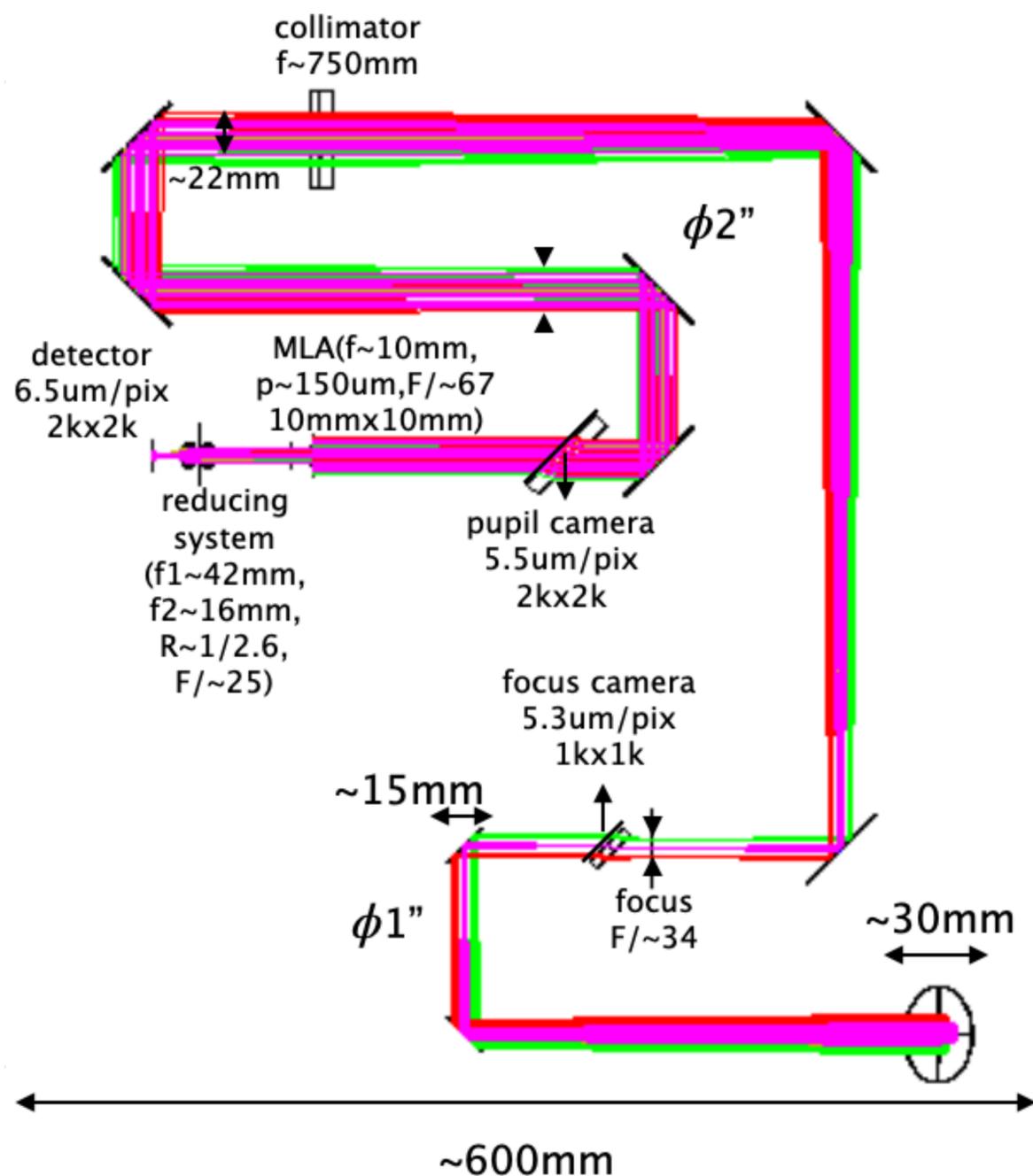
- 8mの瞳のうち、用いる直径3mの領域を決める
- 2-3 deg for 8m pupil
- 2.5-3.75 mdeg for 1cm pupil

焦点カメラ

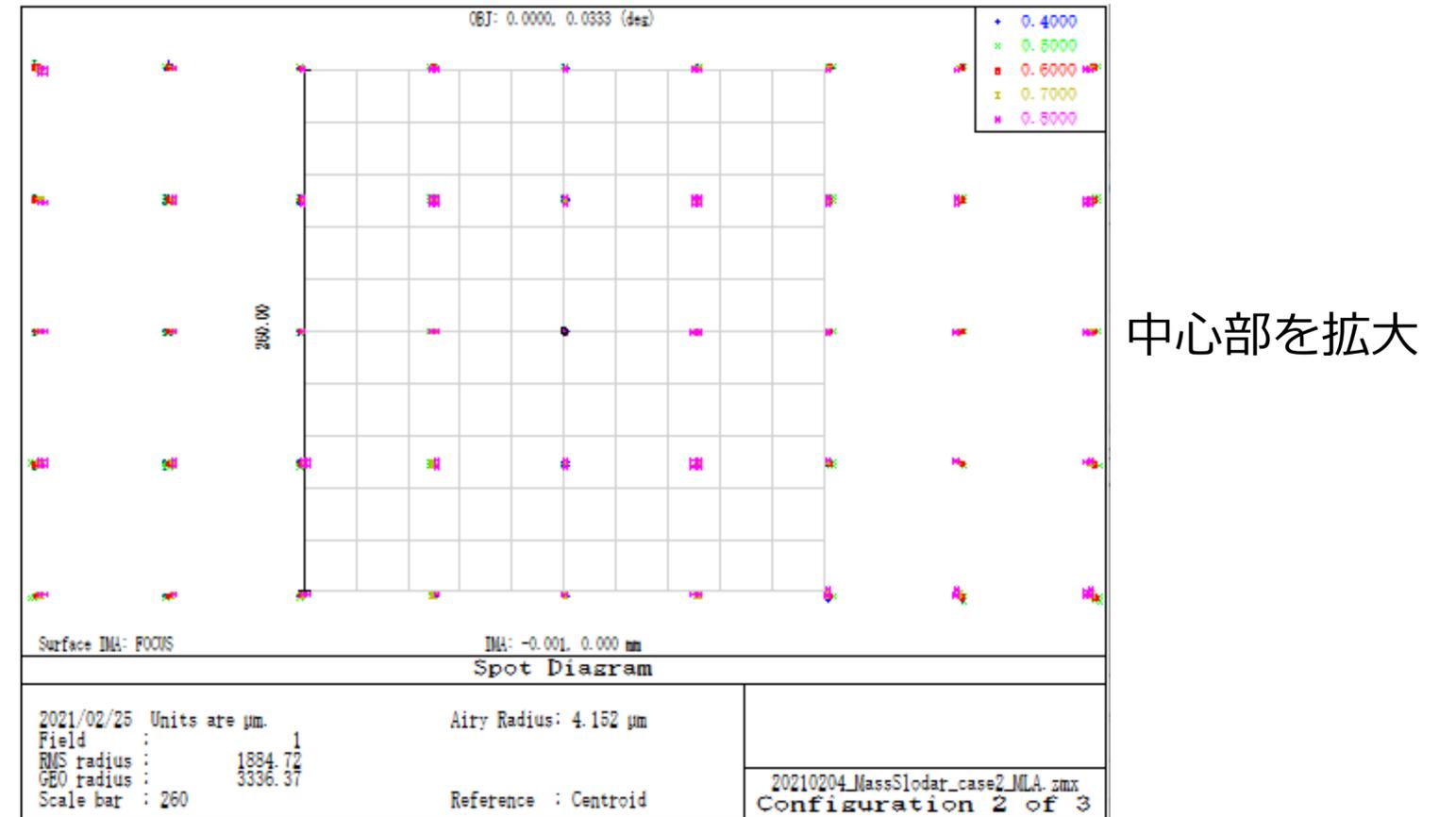
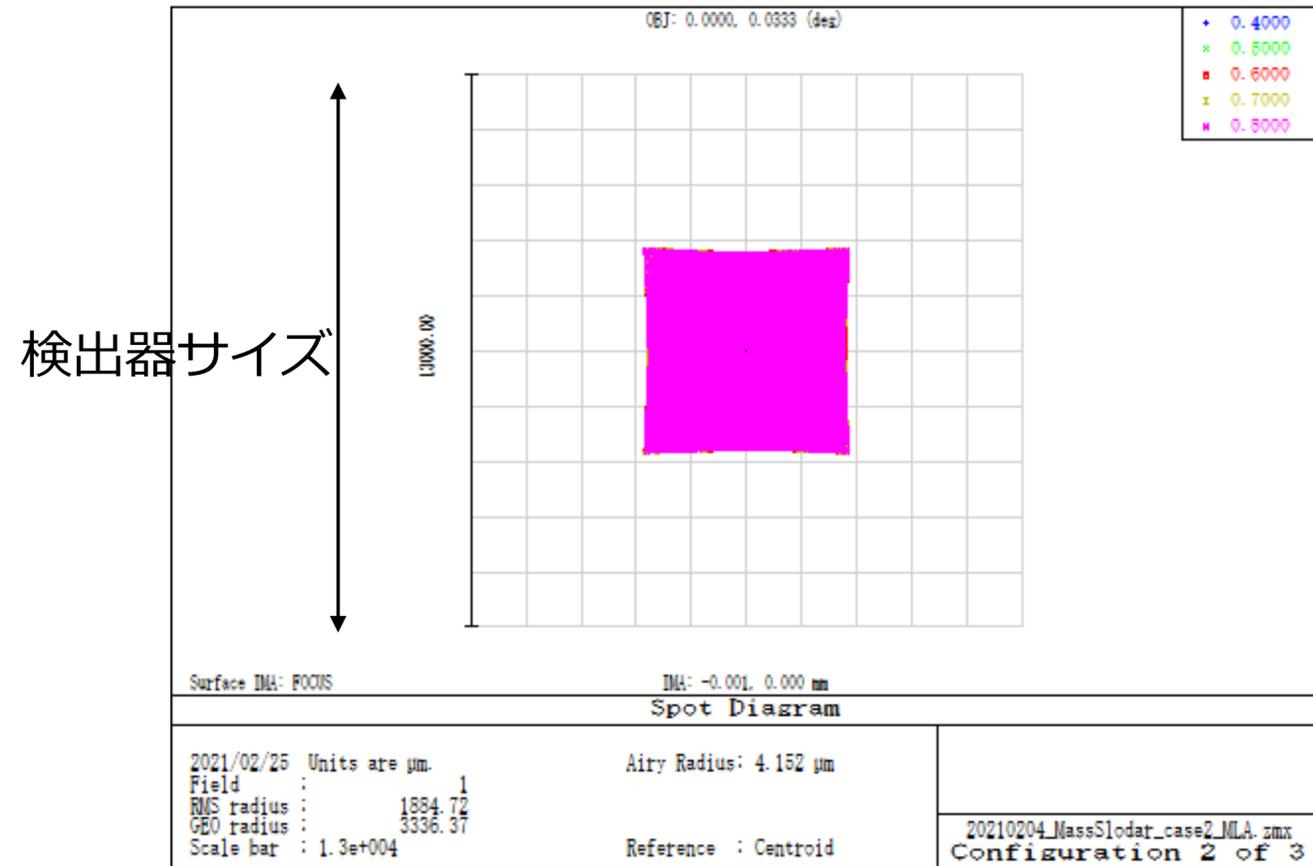
- 星の導入・フォーカスの確認
- 5.3 $\mu\text{m}/\text{pix}$
- 1k x 1k
- FoV : 10 x 10 arcsec

ピックオフミラー/ステージ

- 30mm駆動で離角3-5分角の星を補足

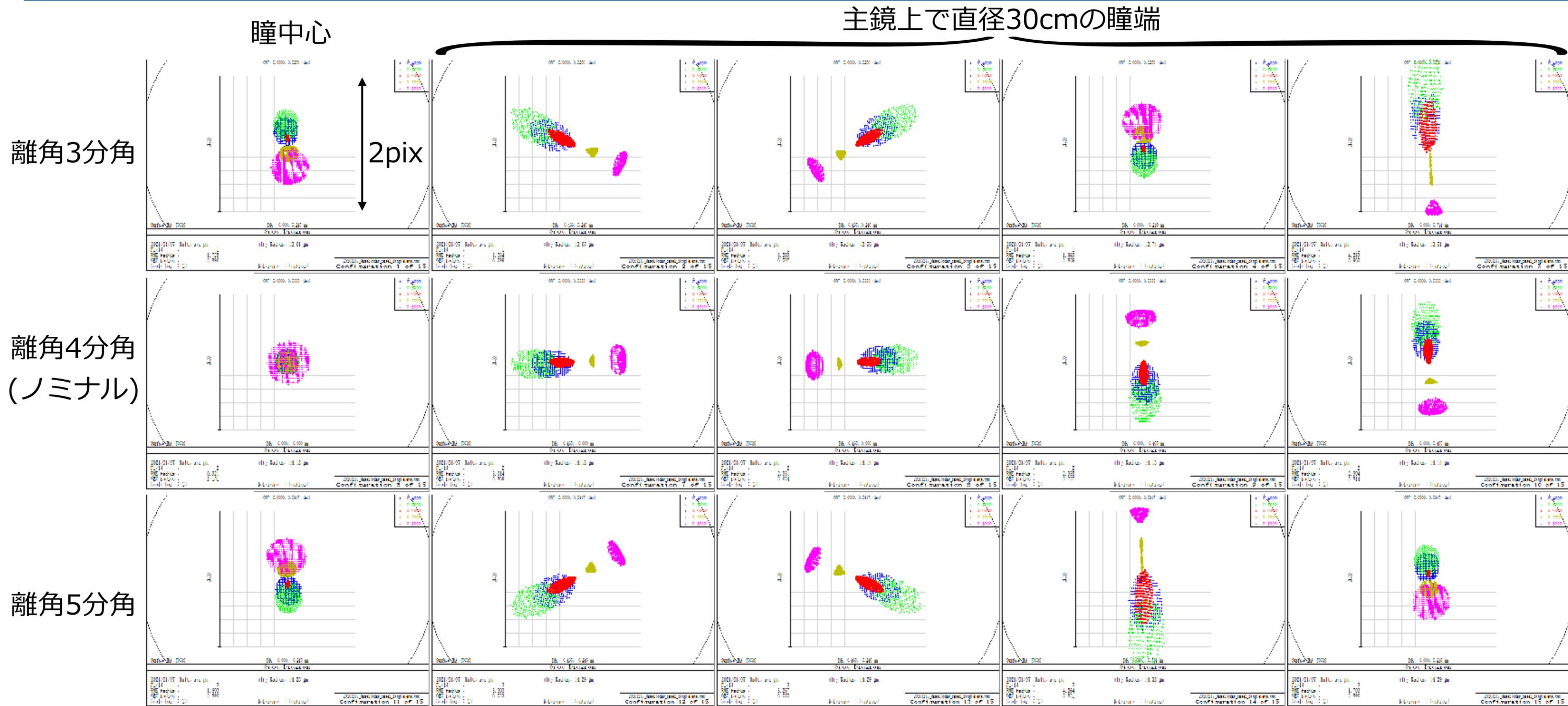


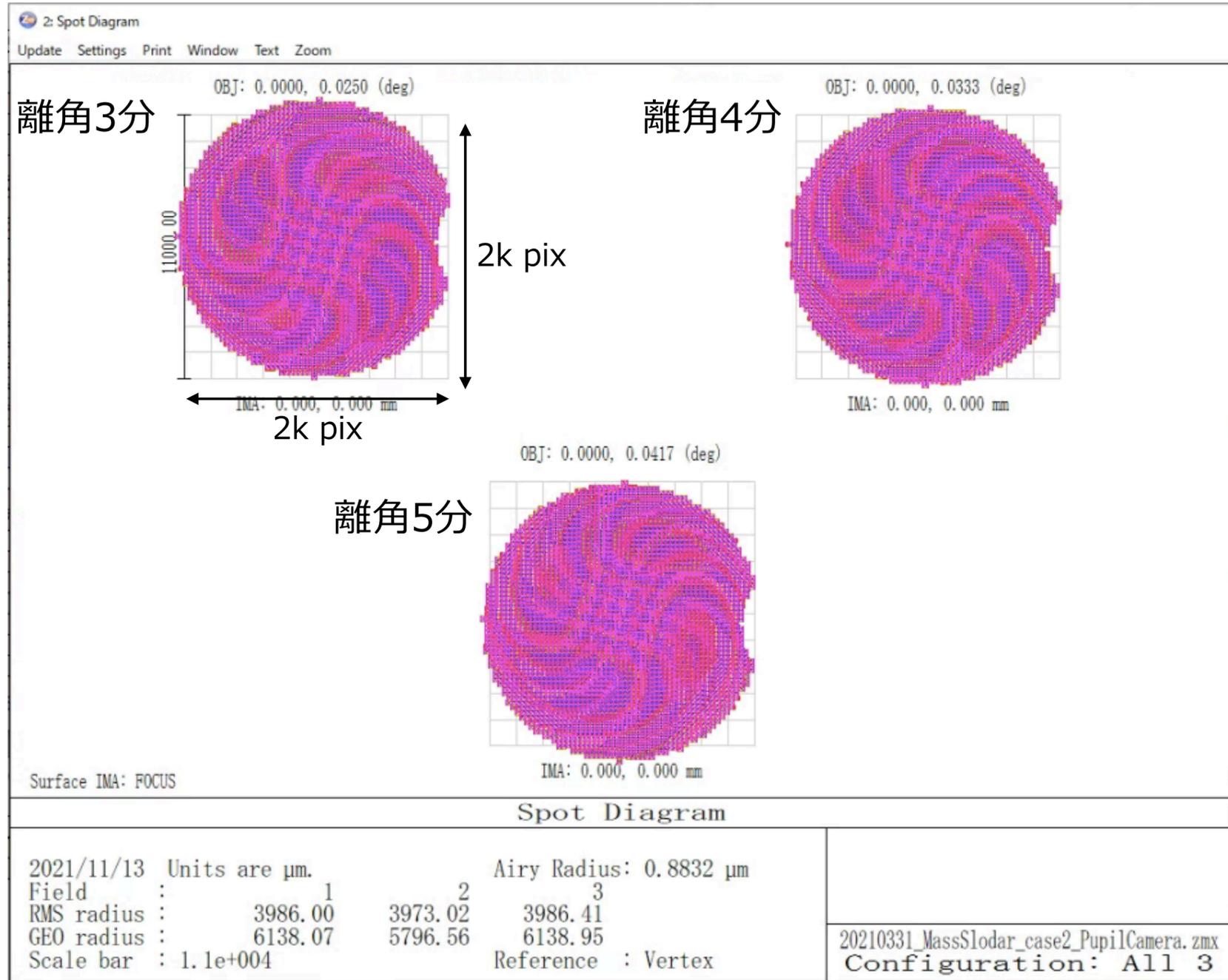
光学系	パラメータ	型番
pickoff mirror	φ2"	Thorlabs BB2-E02
trombone mirror	φ1"	Thorlabs BB1-E02
BS (focus cam)	φ1"	Thorlabs BSF10-A
detector (focus cam)	1kx1k, 5.3um/pix	IDS UI-3240CP
picomotor mirror	φ2"	Newport 8853
collimator	φ2", f=750mm	Thorlabs ACT508-750-A
fold mirror	φ2"	Thorlabs BB2-E02
MLA	150um pitch, f=10mm	Okotech APO-Q-P150-F10
reducer (MLA)	f1=42mm, f2=16mm	Thorlabs MAP051950-A
detector (WFS)	2kx2k, 6.5um/pix	Hamamatsu ORCA-Flash 4.0 v2
BS (pupil cam)	φ2"	Thorlabs BSF20-A
reducer (pupil)	f1=100mm, f2=50mm	Thorlabs MAP1050100-A
detector (pupil cam)	2kx2k, 5.5um/pix	IDS UI-3240CP



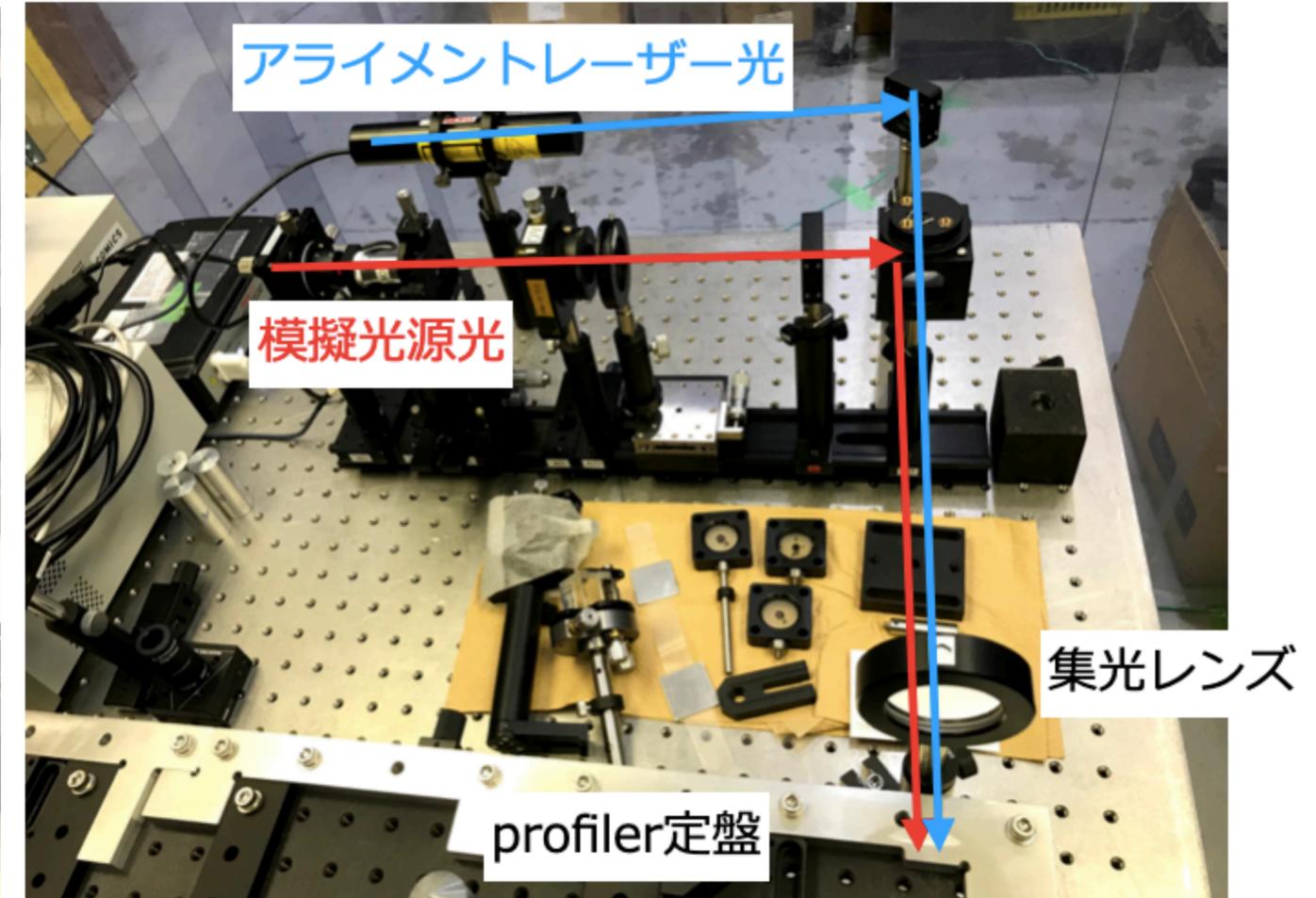
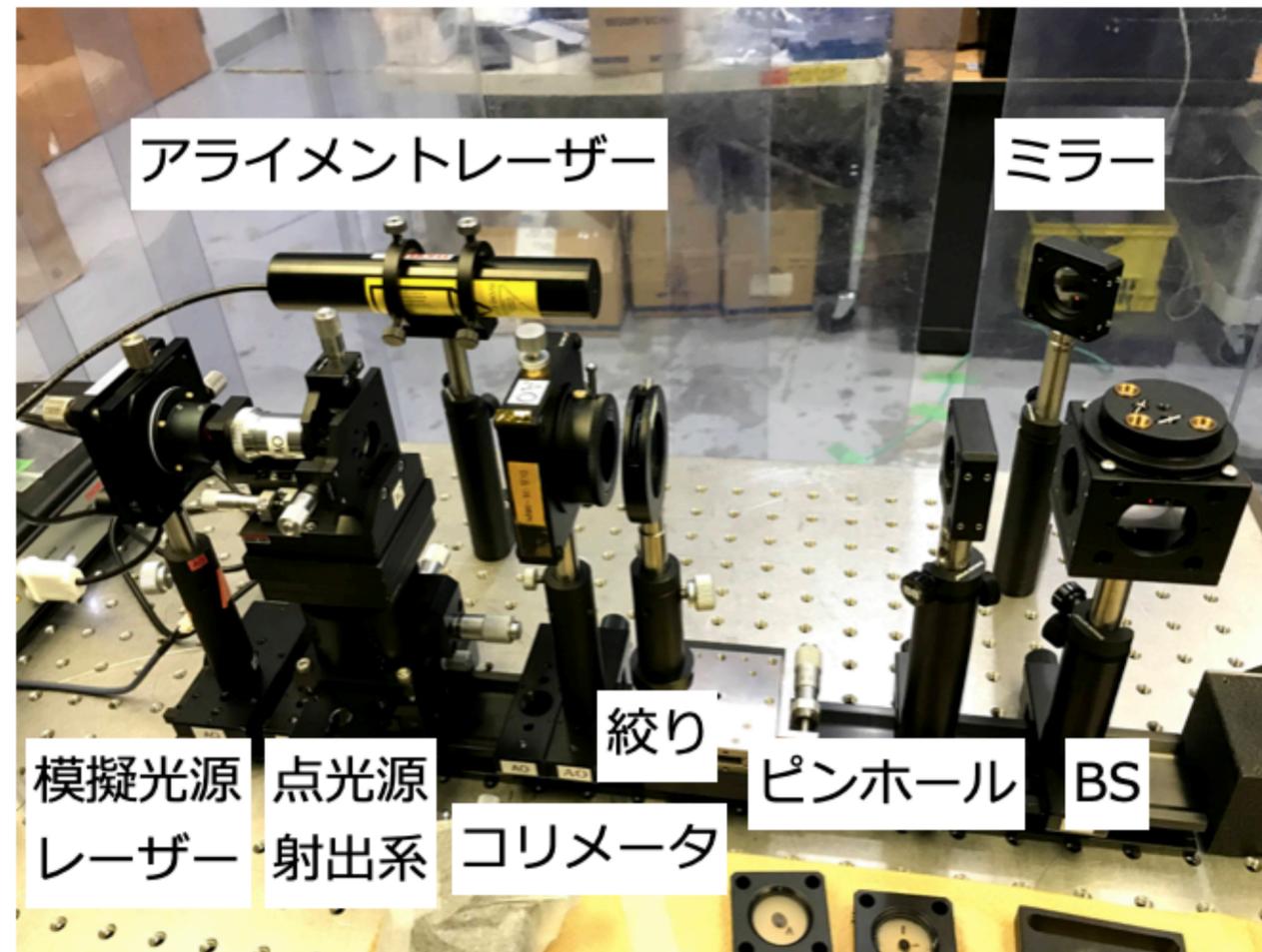
- ▶ 主鏡上で $\sim 1.4 \times 1.4 \text{m}$ の瞳スポット像(66x66 spots)が、検出器の中心部16%(面積)の領域に結像
- ▶ CMOSセンサーで中心部(15x15 spots)だけを $\sim 500 \text{Hz}$ で読み出し
- ▶ サブ開口視野は 10pixel $\sim 25 \text{ arcsec}$
- ▶ スポットを 2pixel サンプリング

波面センサー像：スポット像

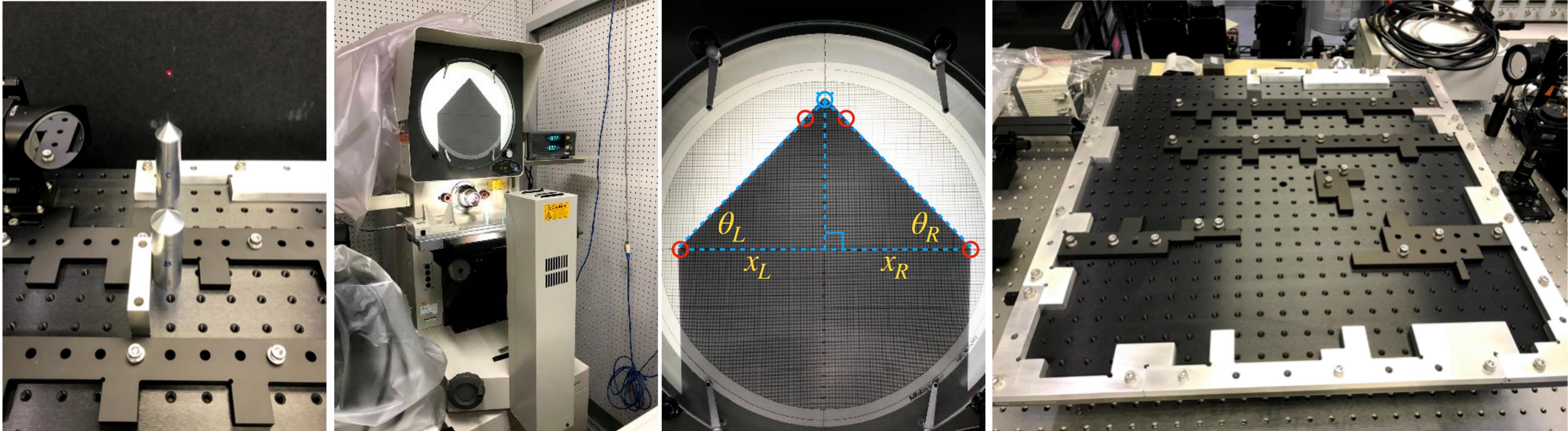




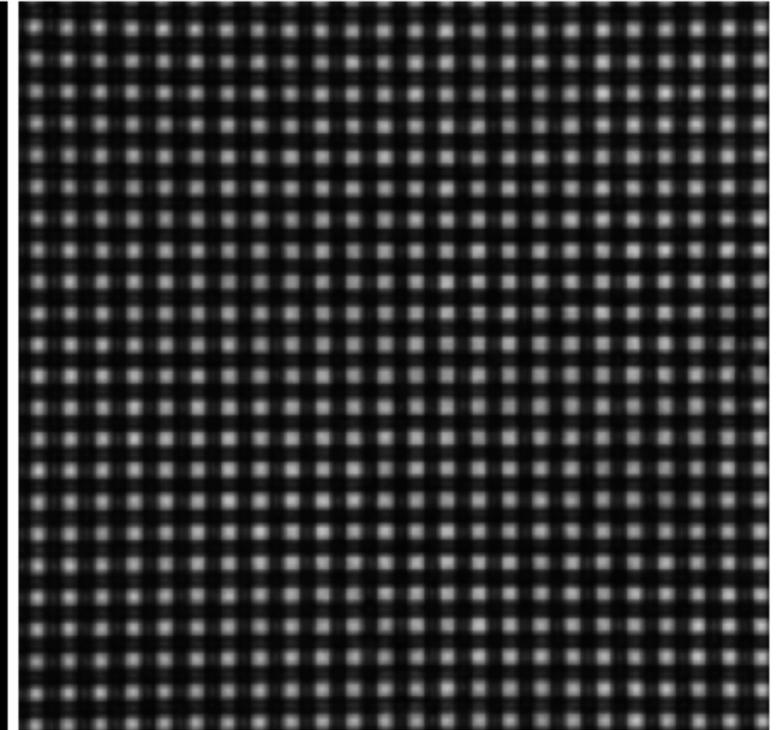
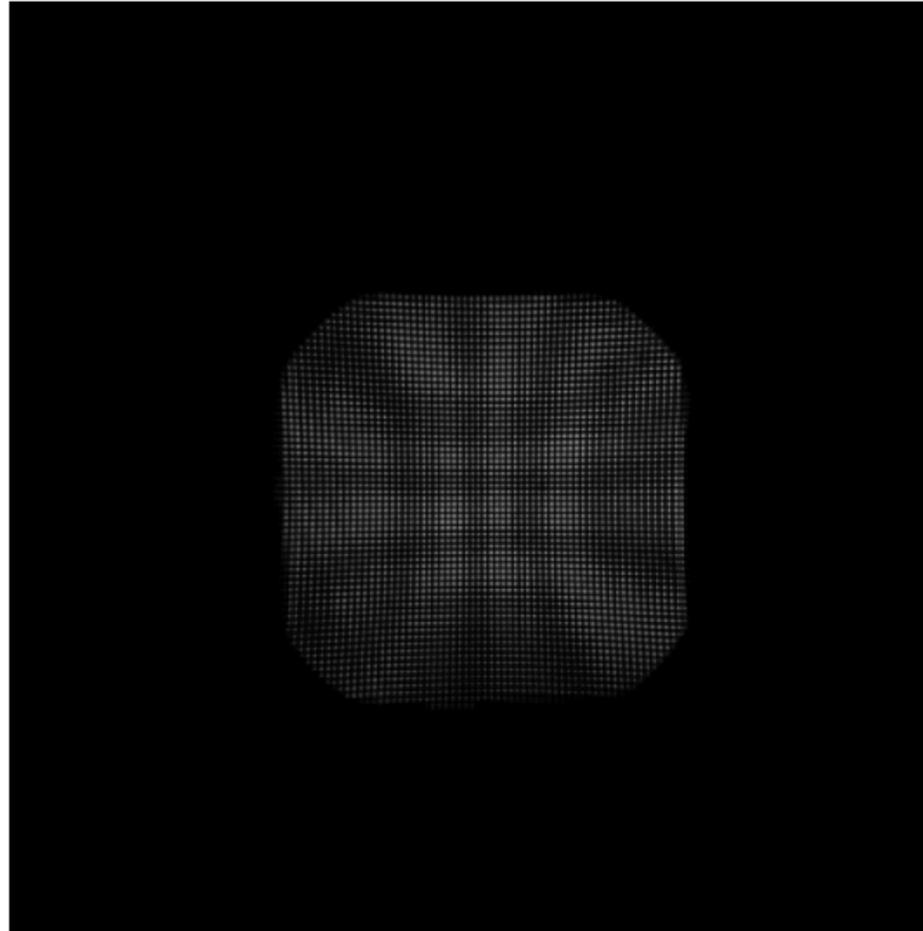
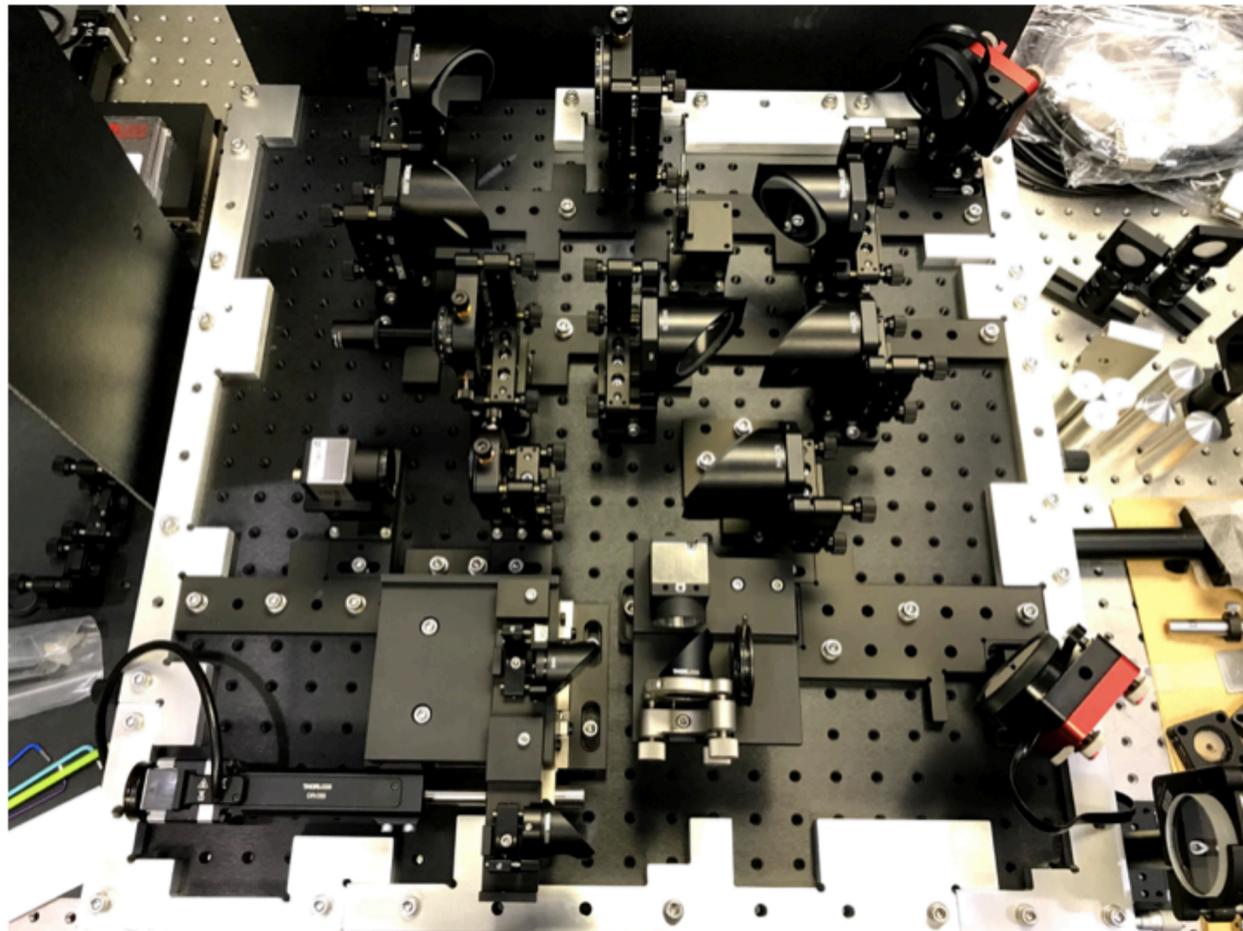
- ▶ 主鏡上で $\phi 3\text{m}$ の瞳像が、検出器いっぱい
に結像
- ▶ 離角3,5分の星に対して数%の瞳シフト
- ▶ 実際には望遠鏡のスパイダーが見える
- ▶ 2つの波面センサー間で瞳が一致するよう
に、瞳調整ミラーペアにフィードバック



- ▶ ハワイ観測所にて光学系組み上げ・調整 (2021.05-06, 2021.11-)
- ▶ アライメント用レーザーとすばるを模擬したF付き光源を作成



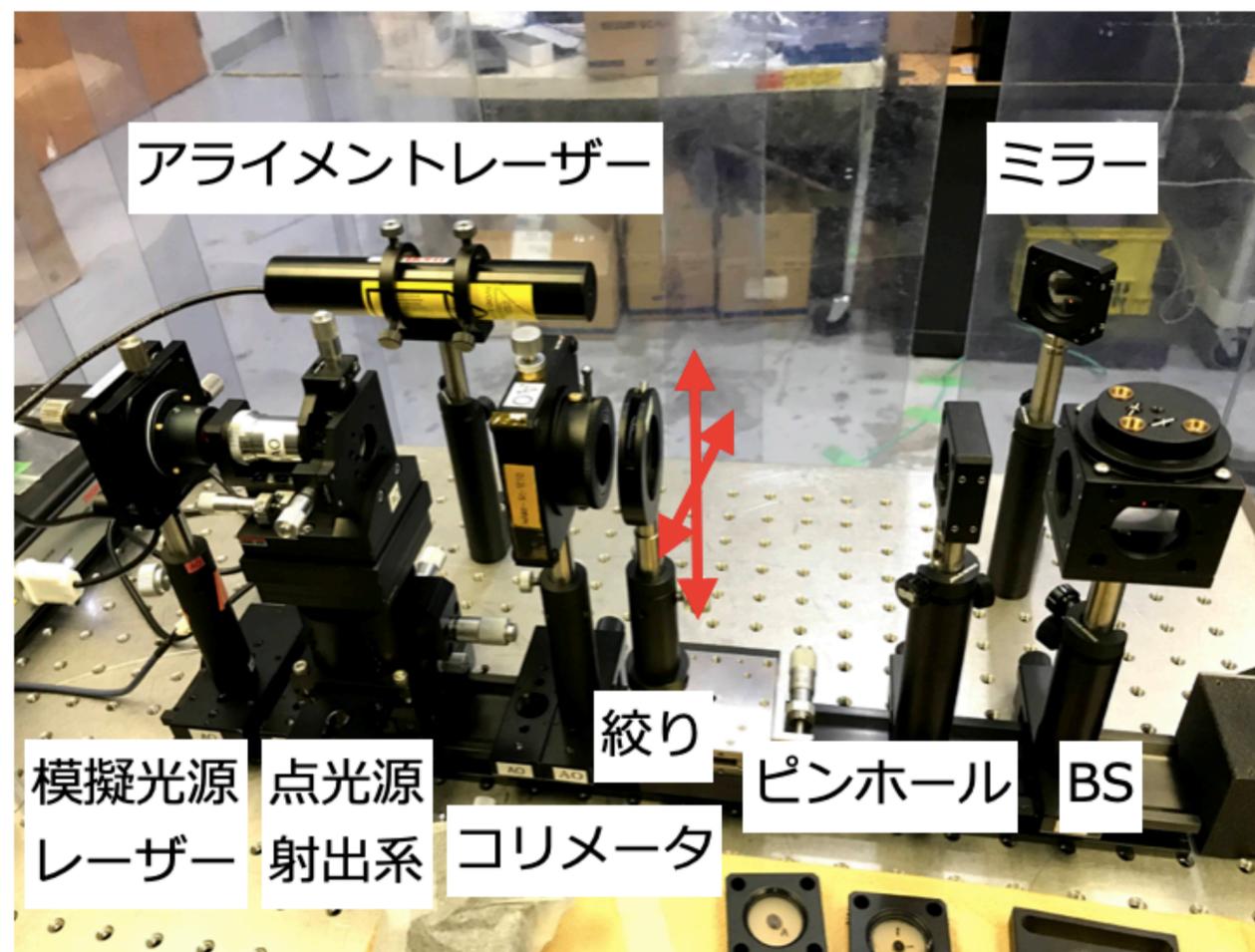
- ▶ アライメントレーザー + アライメントコーンを用いた目視での調整
- ▶ コーンはすばるのマシンショップで製作 (3つのコーンの高さの違いは5um以内)
- ▶ コーンを置く位置を示すジグはmisumiで製作



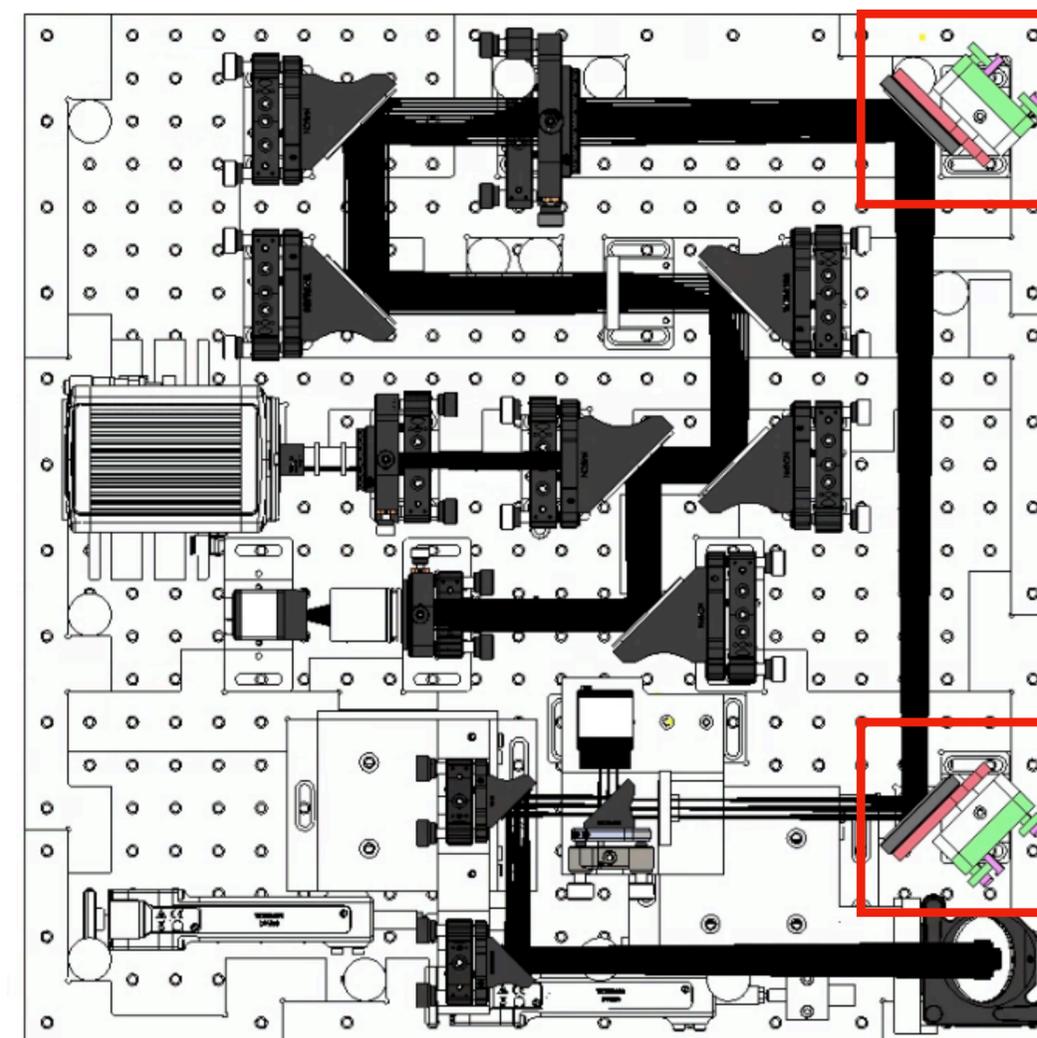
↑ 中心部拡大図(若干ピンぼけ)
← 波面センサースポット像

- ▶ 1つ目の波面センサーはほぼ完了 (残りはピックアップミラー)
- ▶ 2つ目を2022年1月に組み上げ予定

模擬光源系の絞り面をシフトさせて瞳ずれを作る



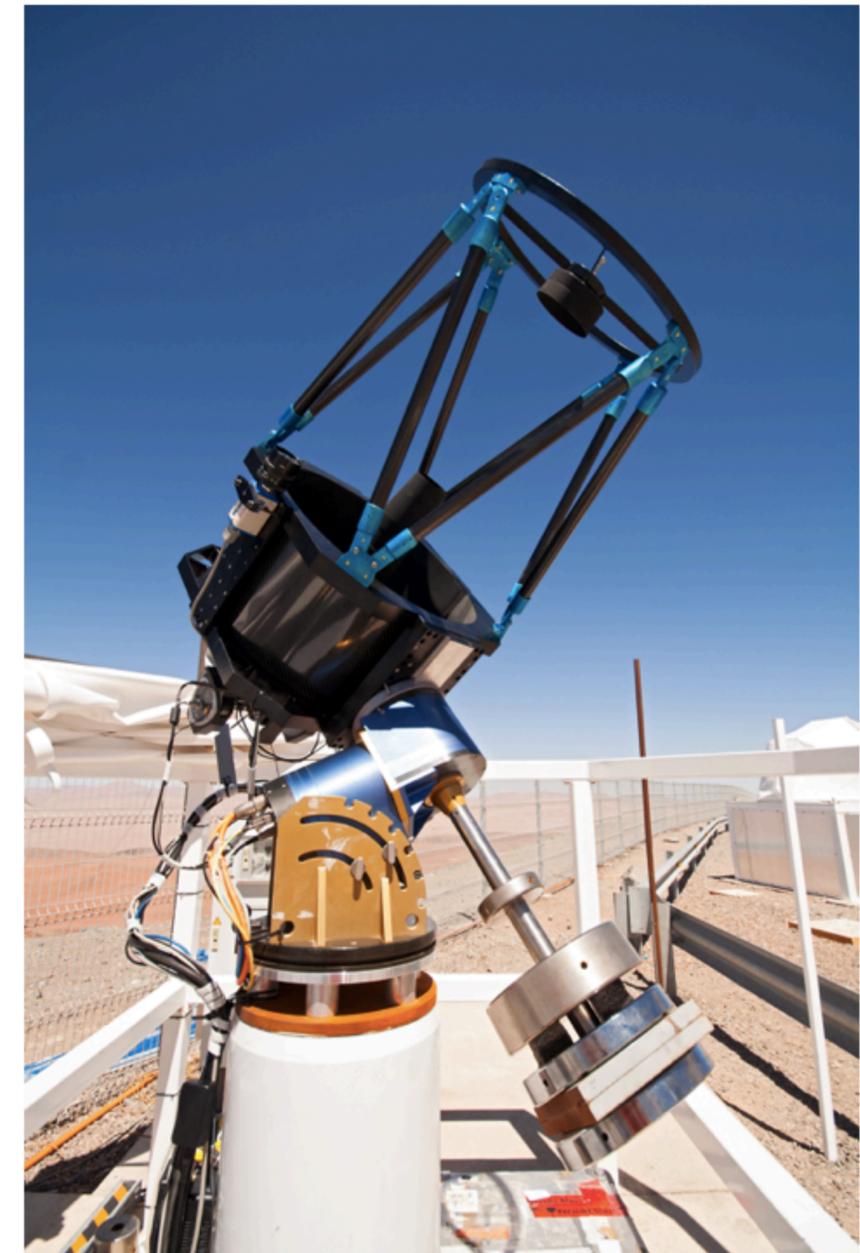
ミラーペアの傾きで瞳ずれを補正する



- ▶ ミラーペアは完全な焦点面・瞳面にあるわけではないので、光線シフト・ティルトへの寄与が縮退する
- ▶ 瞳ずれの量と方向に対して、どのように補正すべきかを実験室で予め較正しておく

- ▶ 2021年12月
 - ▶ 1つ目の波面センサーの残りの組み上げ
 - ▶ 1つ目の波面センサーの瞳補正試験
- ▶ 2022年1月
 - ▶ 2つ目の波面センサーの組み上げ
 - ▶ 2つ目の波面センサーの瞳補正試験
 - ▶ AG/SHモジュールへの取り付けジグの加工 (ハワイ観測所のマシンショップ)
- ▶ 2022年2月
 - ▶ 山頂輸送
 - ▶ 山頂実験室での調整確認・再調整
- ▶ 2022年3月
 - ▶ AG/SHモジュールへの取り付け(取り付け試験)
- ▶ 2022年4月以降
 - ▶ 測定実験

- ▶ やっぱり、長期的なモニタリング観測もしたい。
- ▶ すばる望遠鏡ドーム内に小型望遠鏡(口径~40cm)を設置し、SLODAR, SH-MASSを行うシステムの開発がスタート
 - ▶ 波面センサー光学系パラメータの選定
 - ▶ 望遠鏡の選定
 - ▶ 光学系設計



ESO SLODARシステム
(credit:eso.org)

- ▶ 複数レーザーガイド星+トモグラフィー推定による補償光学は、AOの広視野化・高精度化のために必要な技術であり、30-40m級望遠鏡の時代には標準搭載される技術でもある。
- ▶ 大気ゆらぎプロファイルは、観測サイトテストやAOの設計だけでなく、トモグラフィー補償光学の事前情報としても有益である。
- ▶ 望遠鏡瞳を細かく(数cmスケール)分割した波面センサーで、地表層から高層までを一度にプロファイリングすることが可能である(SLODAR & SH-MASS)。
- ▶ すばる望遠鏡に取り付けた来年度の測定実験に向けて、ハワイ観測所にて波面センサーシステムの開発を進行中である。
- ▶ ゆくゆくは、口径40cm程度の小型望遠鏡において同手法を実践することで、常設の大気ゆらぎプロファイラーを開発していく予定である