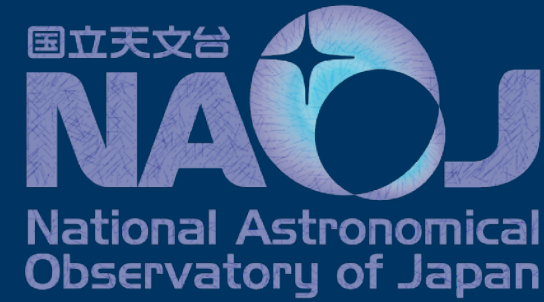


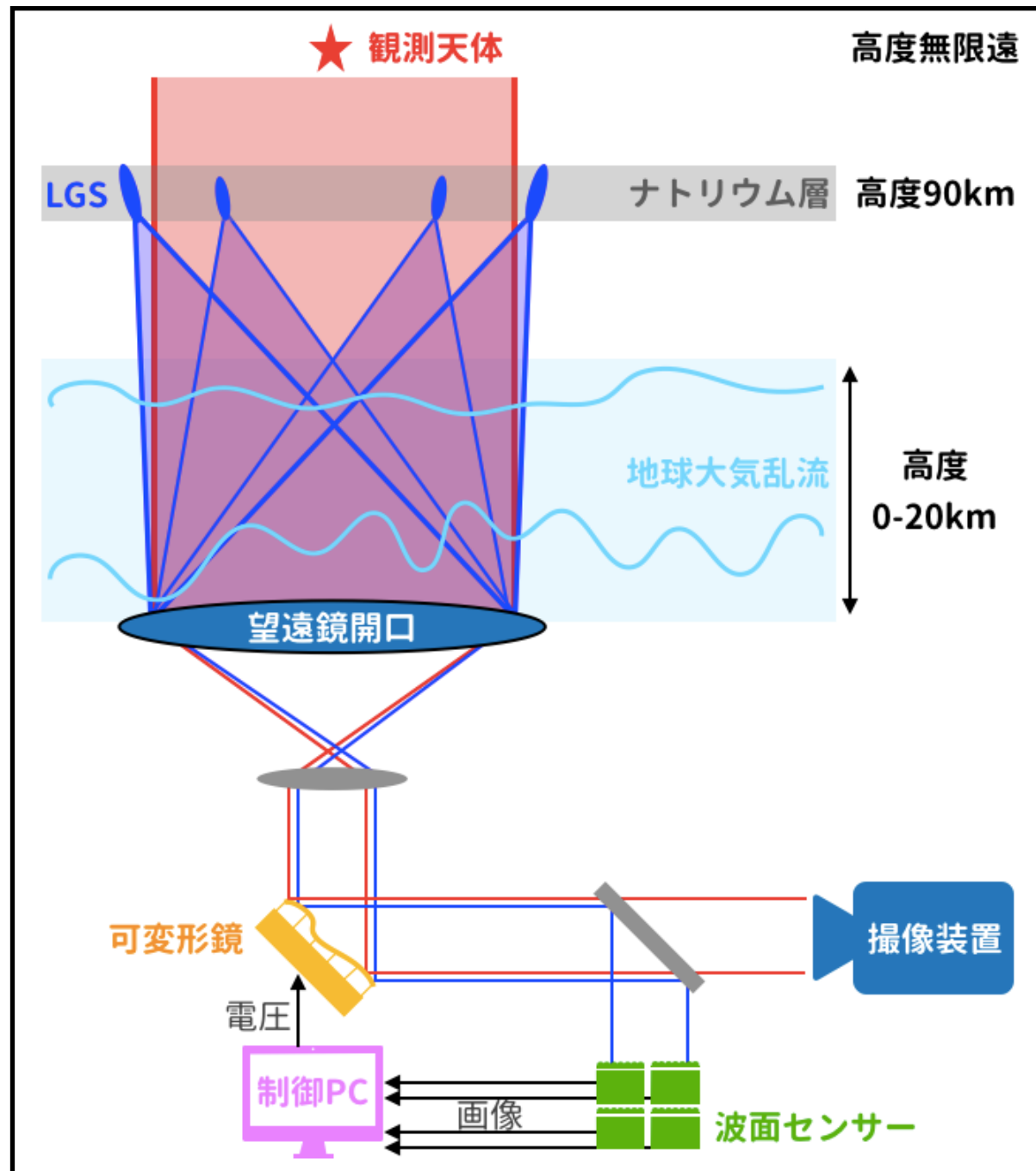


シャックハルトマンセンサによる大気乱流高度分布の推定

大金 原, 秋山 正幸 (東北大学), 大屋 真, 大野 良人 (国立天文台)

トモグラフィAOと大気乱流強度分布

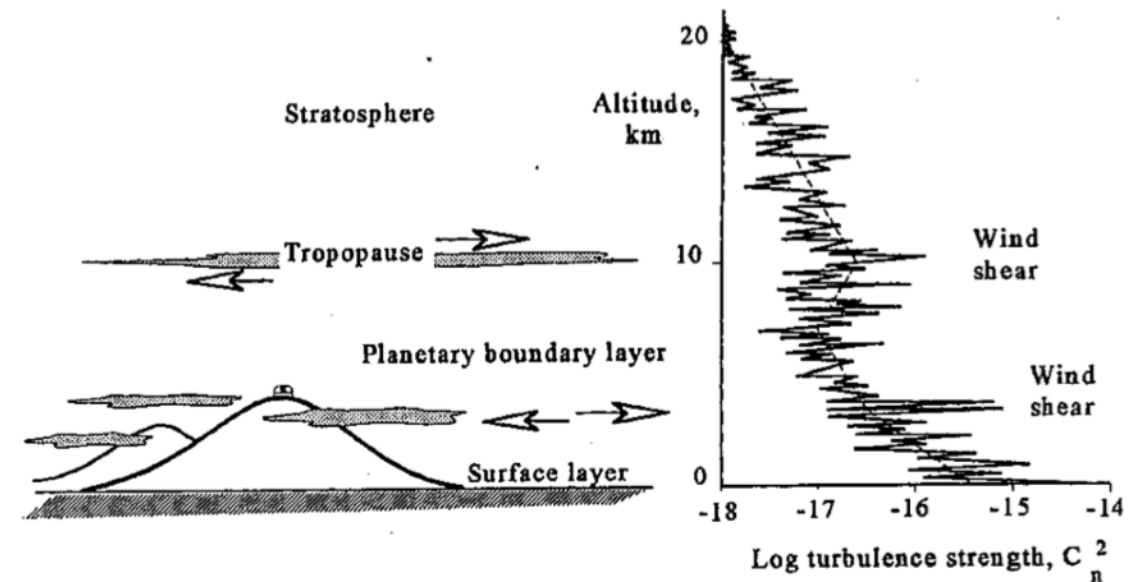
ULTIMATE-START: すばる望遠鏡におけるLTAO



- トモグラフィに使える情報は縮退度が高く、数が少ない
 - ・ レーザー星の間隔~数十秒角
 - ・ レーザー星の個数~数個
- トモグラフィ計算の事前情報
= 大気ゆらぎ強度の高さ分布が必要
- ~1kmで分解した高さ分布が必要 (Fusco & Costille 2010, simulation)
- 高さ分布の変動
 - ・ 季節変動
 - ・ 時間変動(数分-数十分)
 - ・ 方向による違い

大気ゆらぎモデル

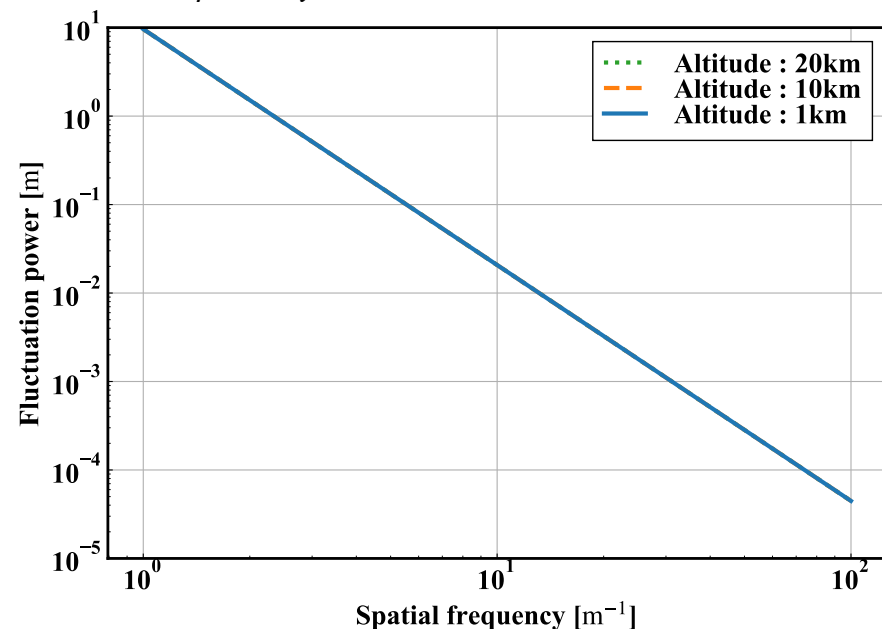
- 各位置で屈折率の異なる層構造＝大気ゆらぎ層
- 複数の大気ゆらぎ層が高さ方向に存在
- ゆらぎ層の強度は構造定数 $C_N^2(h)$ で特徴づける
- コルモゴロフモデル (Kolmogorov 1941) $\Phi_\phi(f_x, f_y) = 9.7 \times 10^{-3} f^{-11/3} C_N^2(h)$
- 光の位相を乱す
- 地上までフレネル伝搬 → 位相ゆらぎと振幅ゆらぎに分離



Hardy 1998

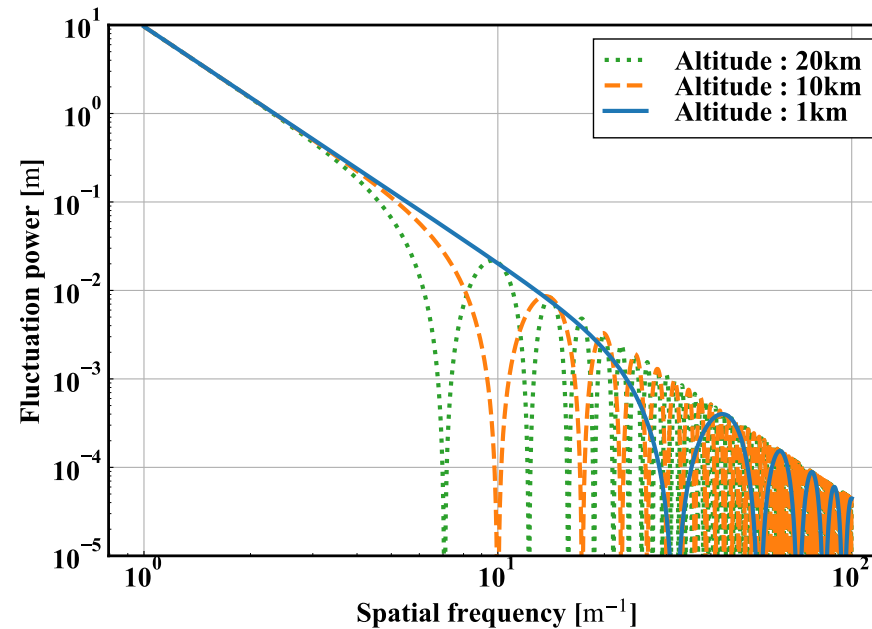
位相ゆらぎパワースペクトル@乱流層

$$\Phi_\phi(f_x, f_y) = 0.38 \lambda^{-2} f^{-11/3} C_N^2(h) \Delta h$$



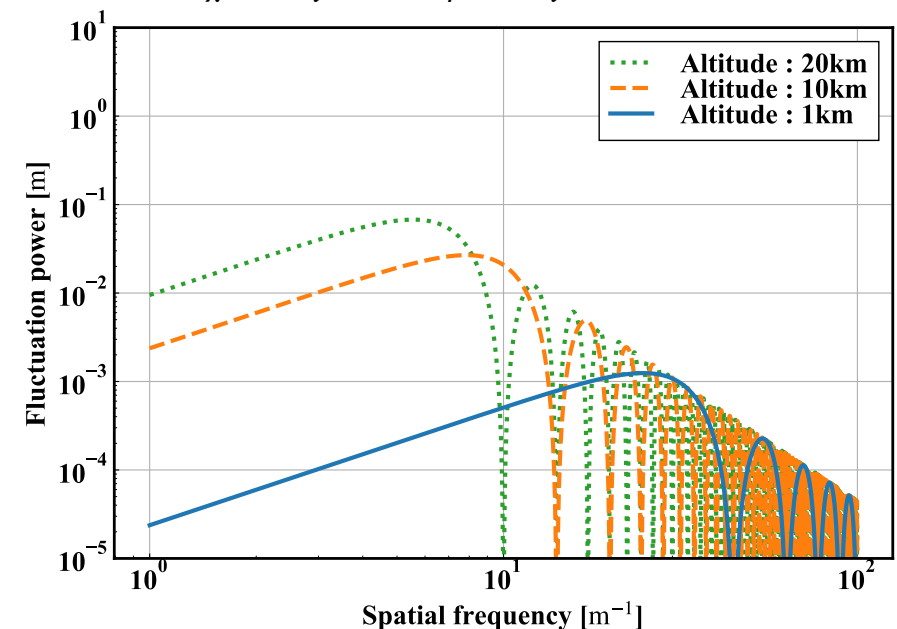
位相ゆらぎパワースペクトル@地上

$$\Phi_\theta(f_x, f_y) = \Phi_\phi(f_x, f_y) \cos^2(\pi \lambda h f^2)$$

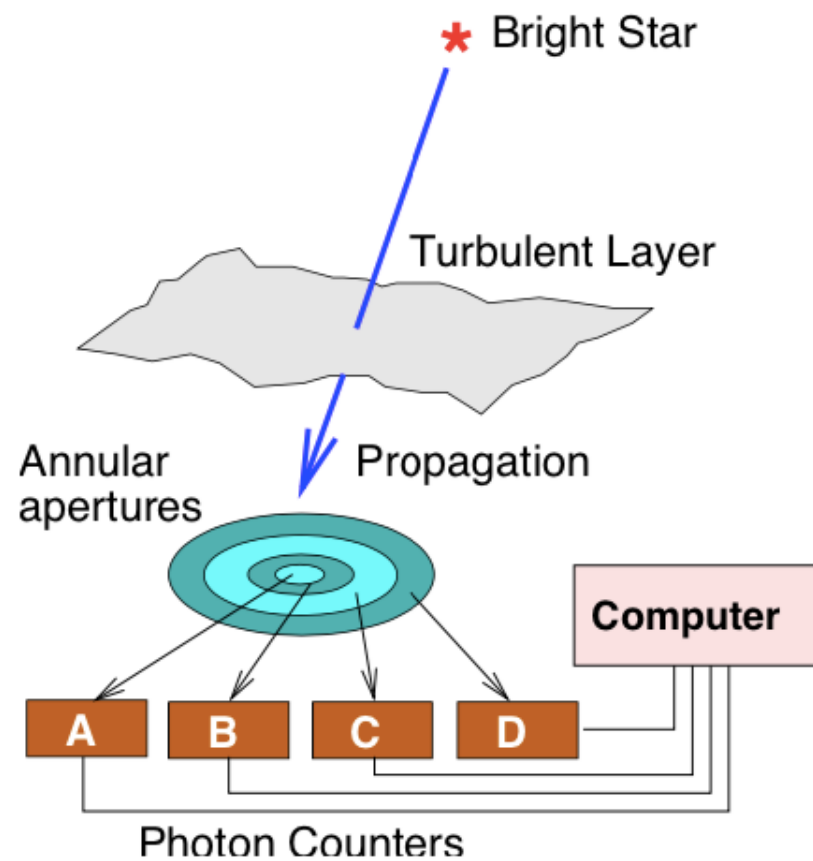


振幅ゆらぎパワースペクトル@地上

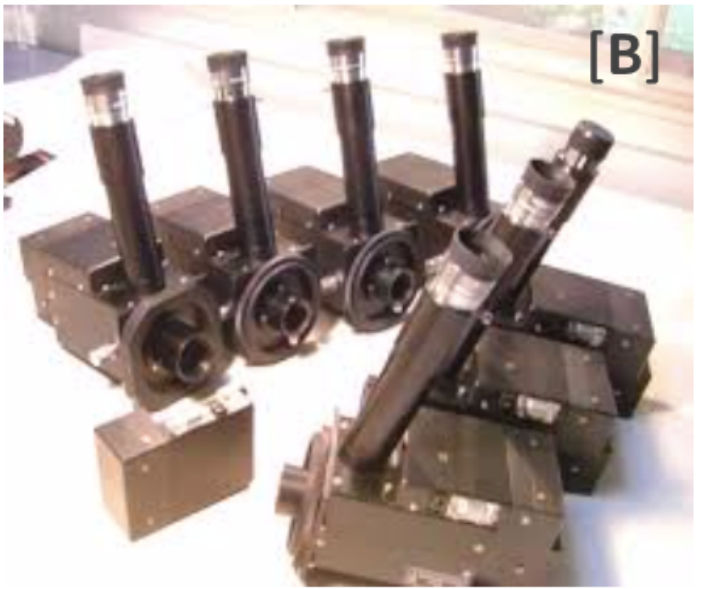
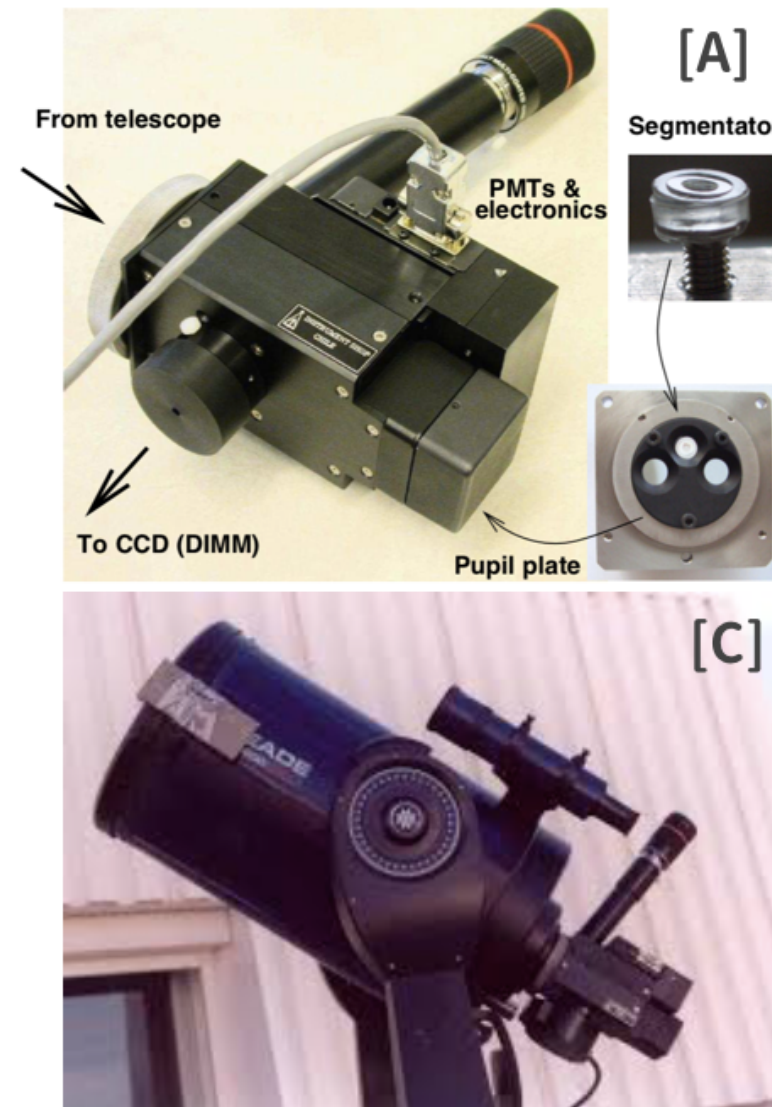
$$\Phi_\chi(f_x, f_y) = \Phi_\phi(f_x, f_y) \sin^2(\pi \lambda h f^2)$$



MASS



Tokovinin et al. 2003

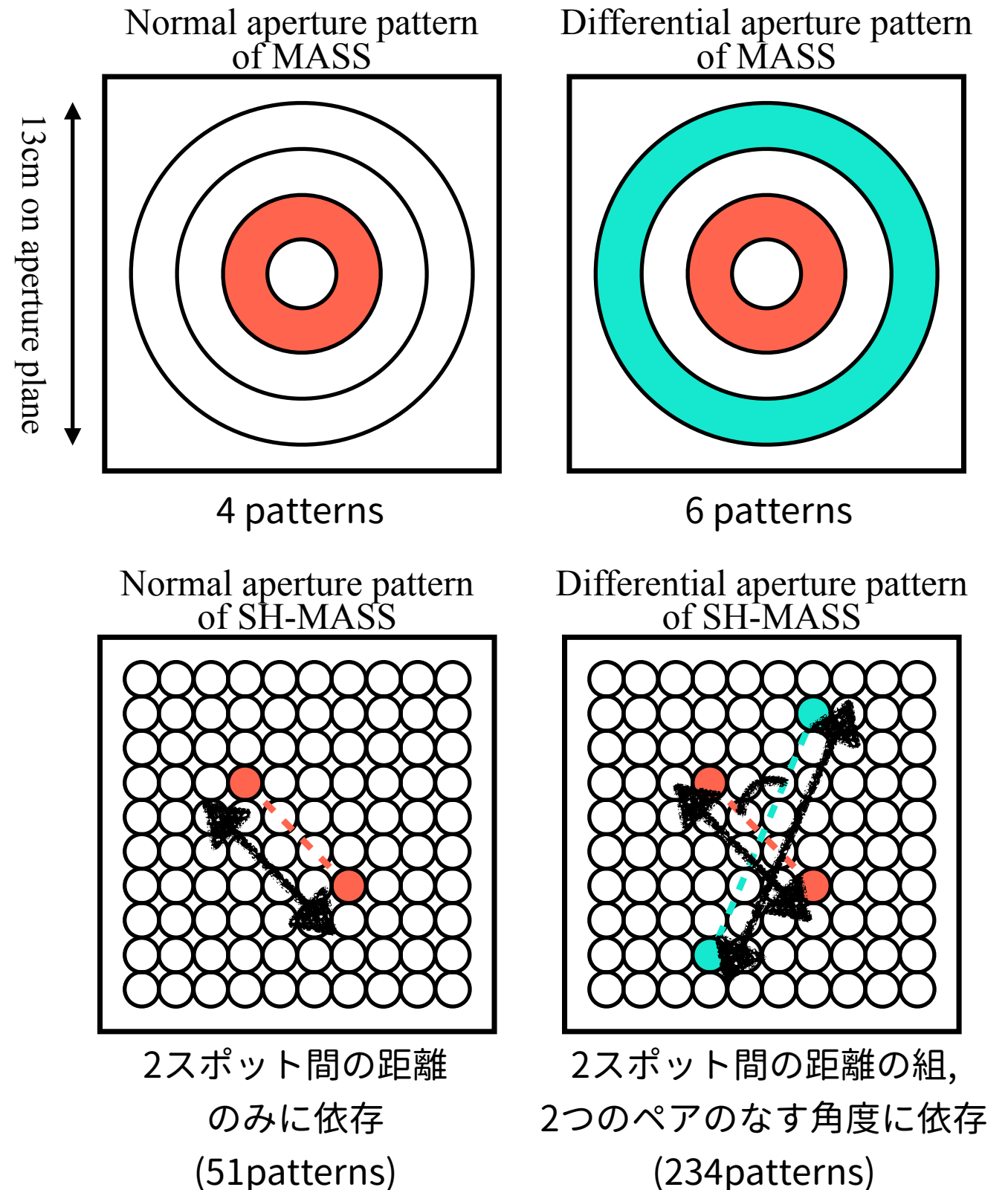


(Cerro Tololo Inter-American Observatory)

- Multi Aperture Scintillation Sensor (Korniliv et al. 2003)
- 4つの円環開口(直径 2.0, 3.0, 7.0, 13.0 cm)で1つの星を高速測光(数百Hz)
- 開口・開口同士のライトカーブの分散・共分散を計算
- 6つの大気ゆらぎ層(高さ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 km)からの寄与としてフィッティング

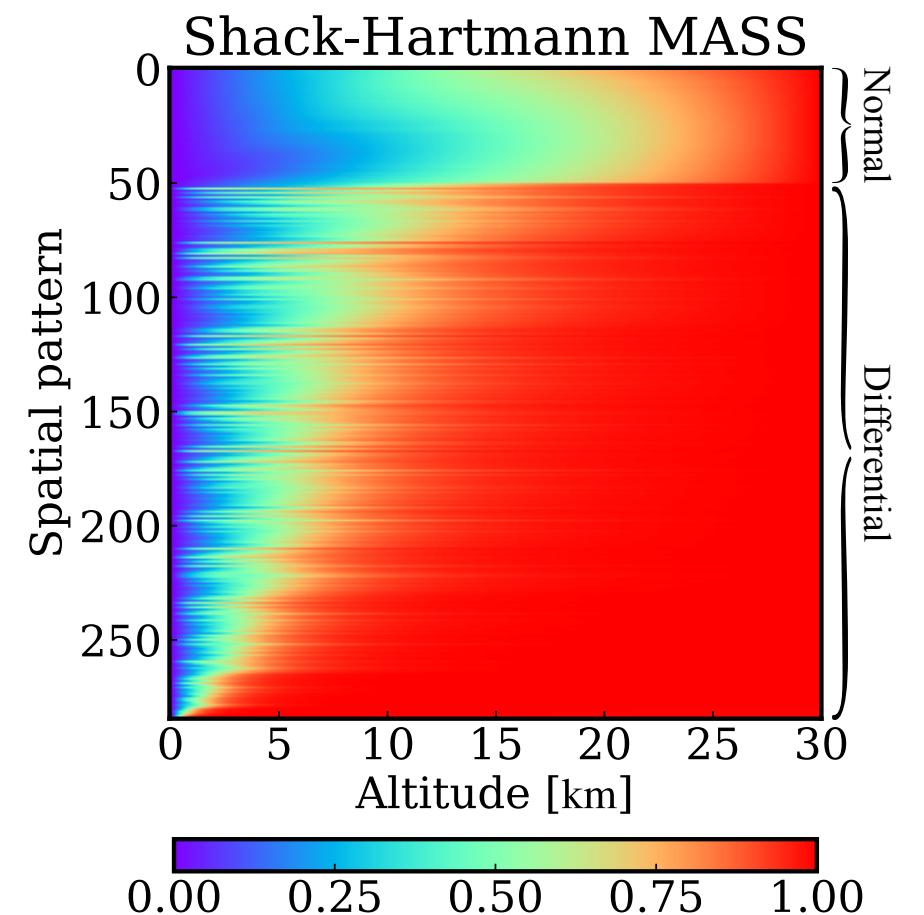
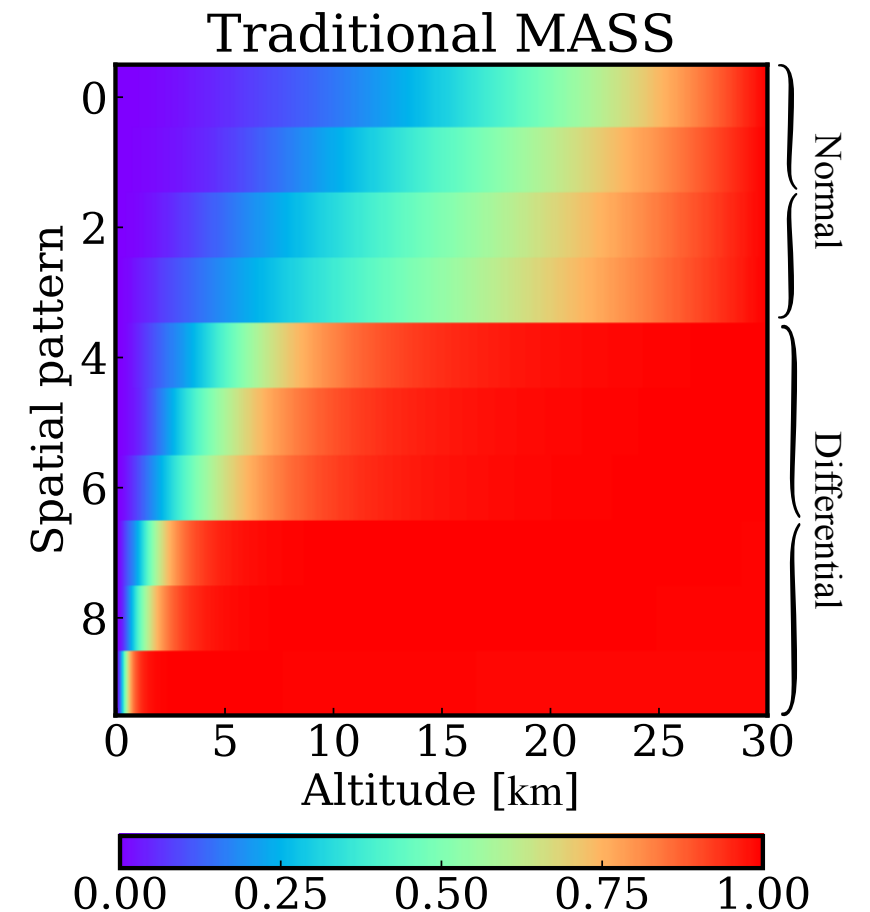
MASS with Shack-Hartmann sensor

- SH-WFSの各スポットで高速測光
- 開口の定義
→ 2つのスポットペア
- 各ペアでカウント総和の
時間分散を計算
- 各ペア間でカウント総和の
時間共分散を計算
- 中心の一致する2つのペアに限る
- 全体の角度方向・並進方向
の違いは無視

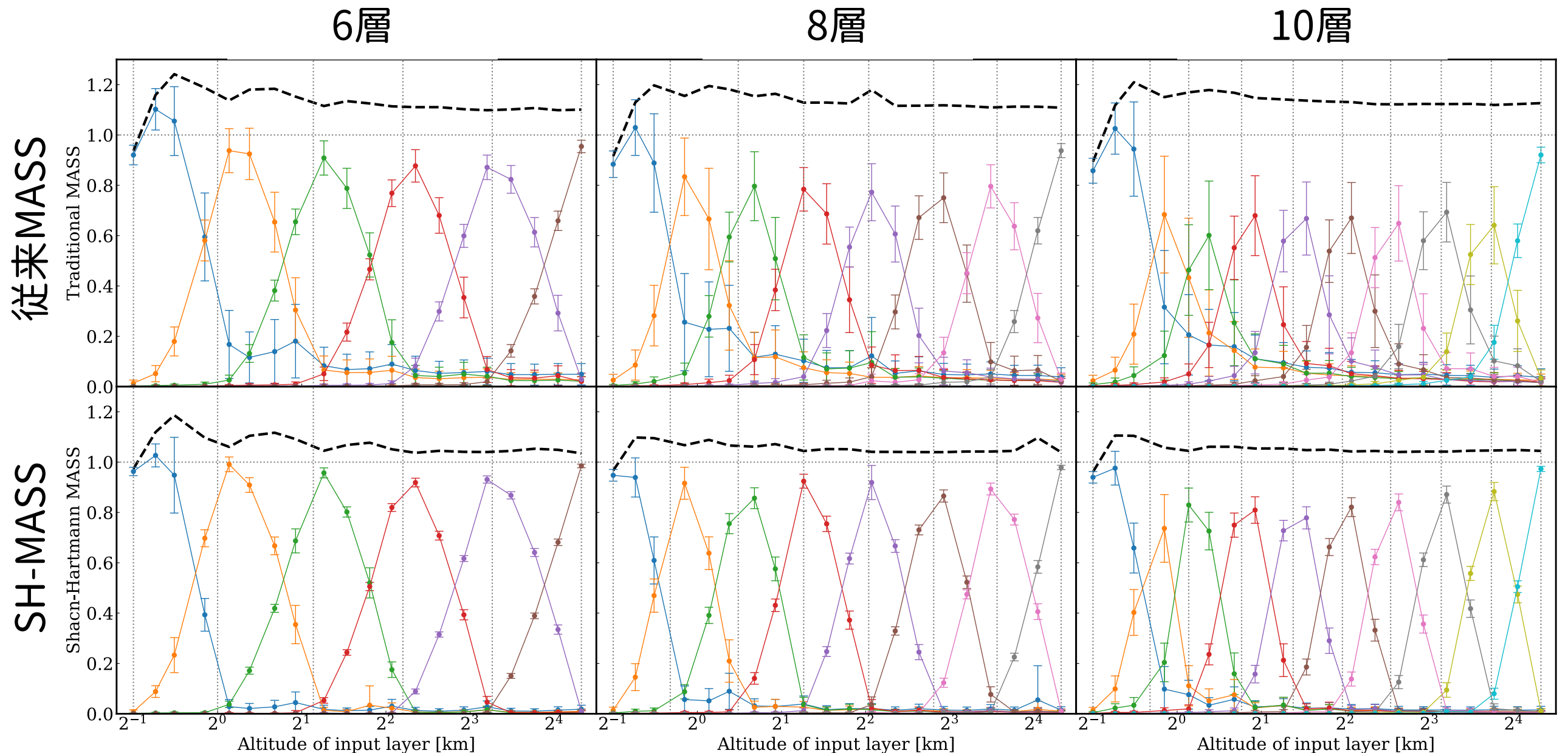


Weighting function matrix

- 各高度の大気ゆらぎ強度 $C_N^2(h)\Delta h$ と、各空間パターンでの明るさ変動値とを結びつける係数行列。
- 各行は最大値が1になるように規格化
- 高層ほどシンチレーションへの寄与が大きい
- 空間パターンごとに感度を持つ高度が異なる
- SH-WFSによる高度への連続的な感度

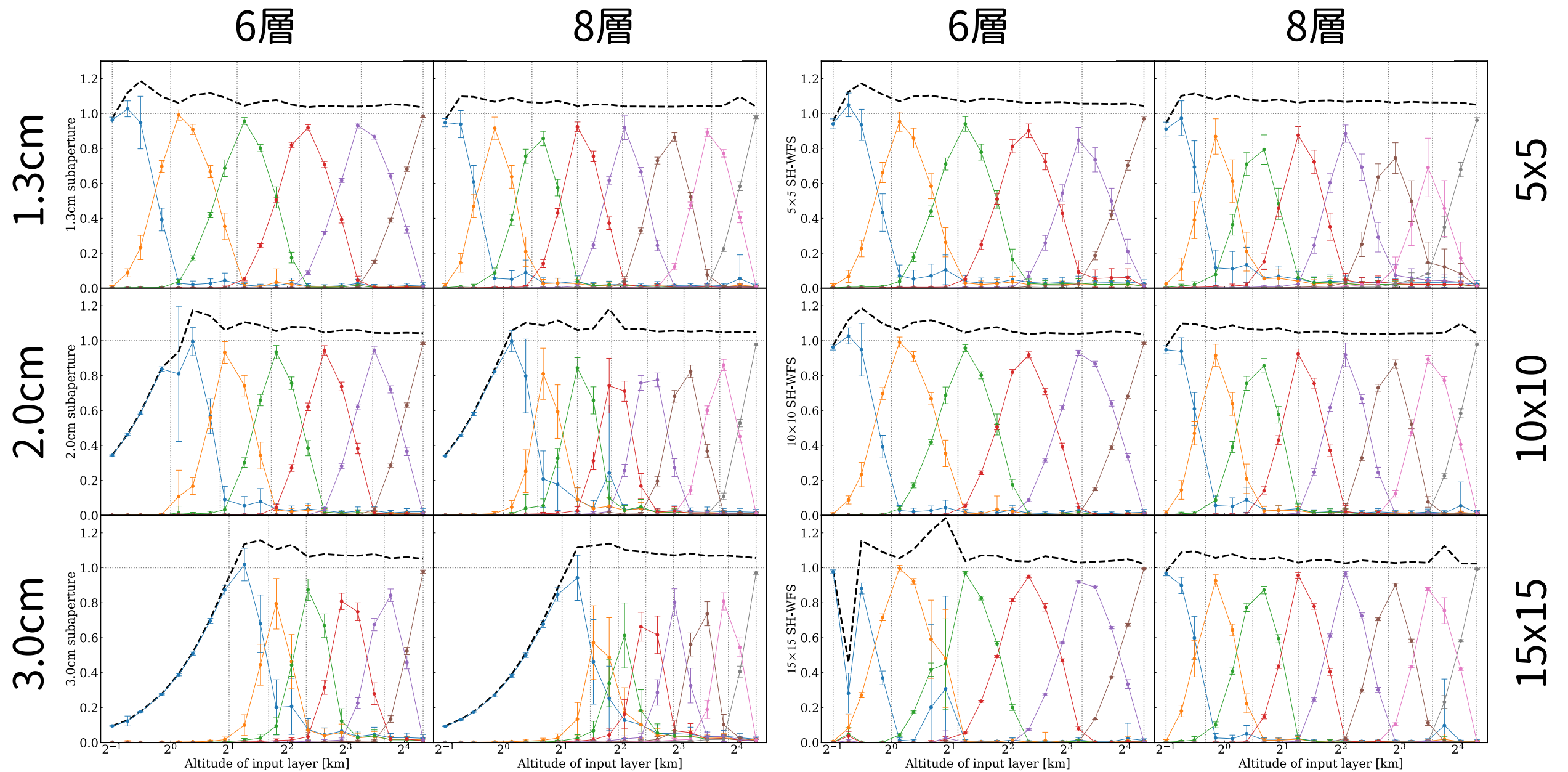


Response function



- ある高さ(横軸)に大気ゆらぎ層が1層ある場合に、MASSが推定する高さ(色線)のレスポンス(縦軸)がどうなるか。(黒破線はMASSの推定の合計)
- SH-MASS: 推定する層数を10層まで増やした場合でも高い分解能力を有することを確認。
- 大気ゆらぎの合計量推定に対しても精度向上。

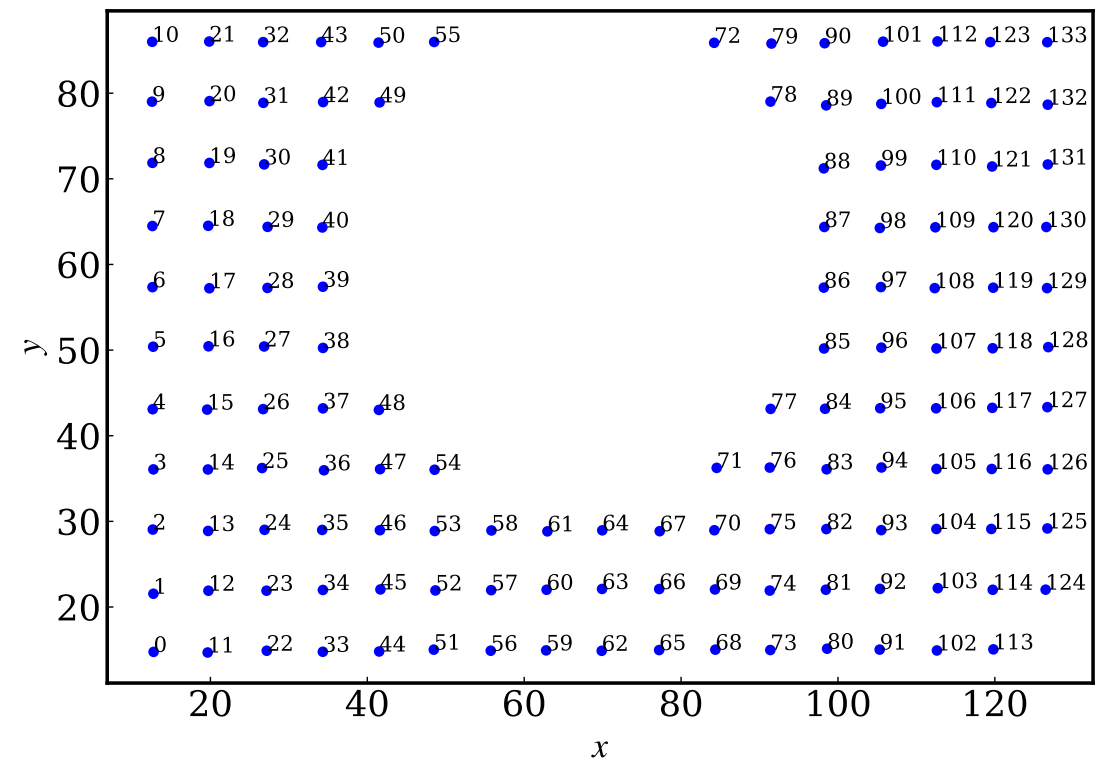
Response function



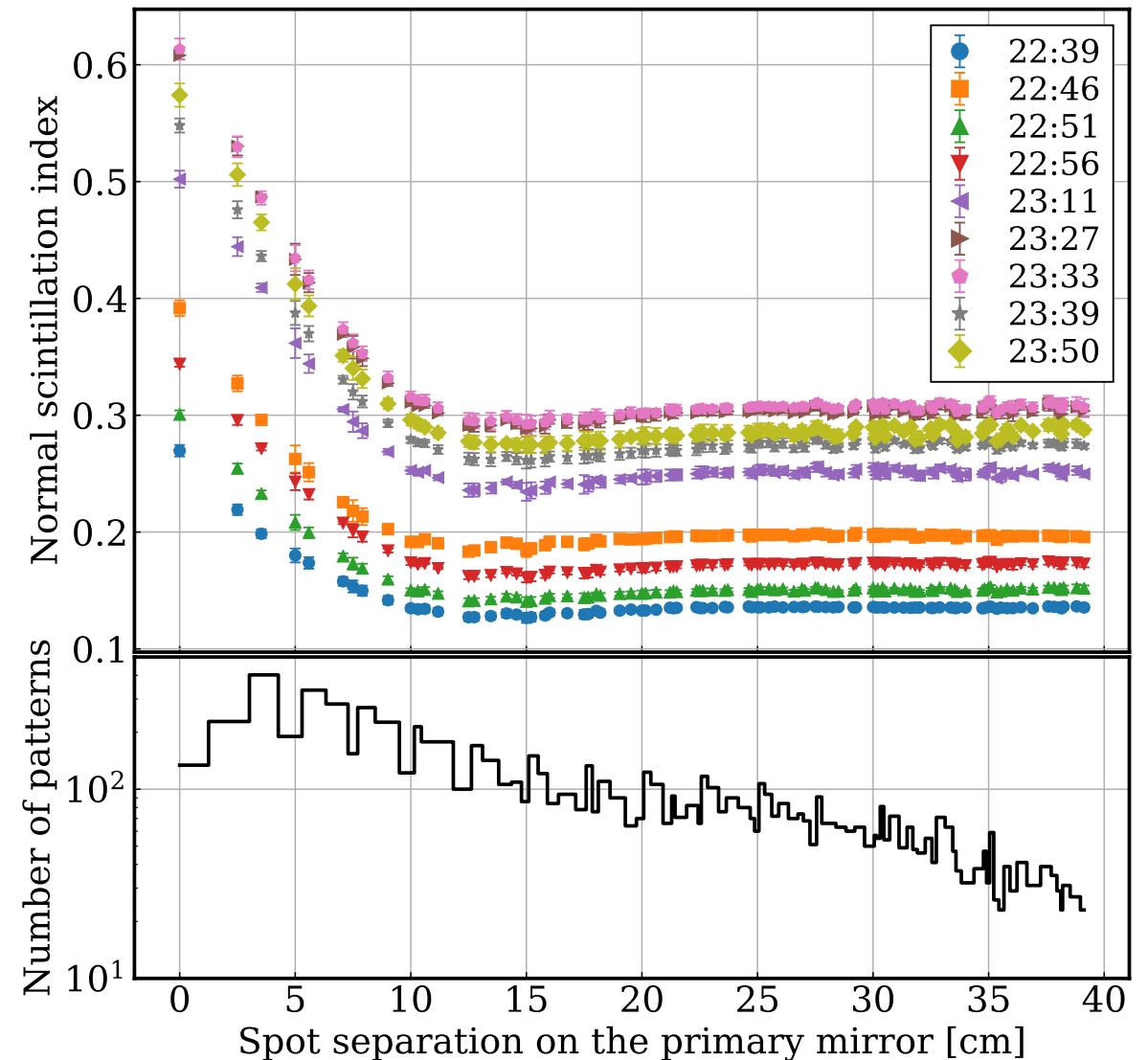
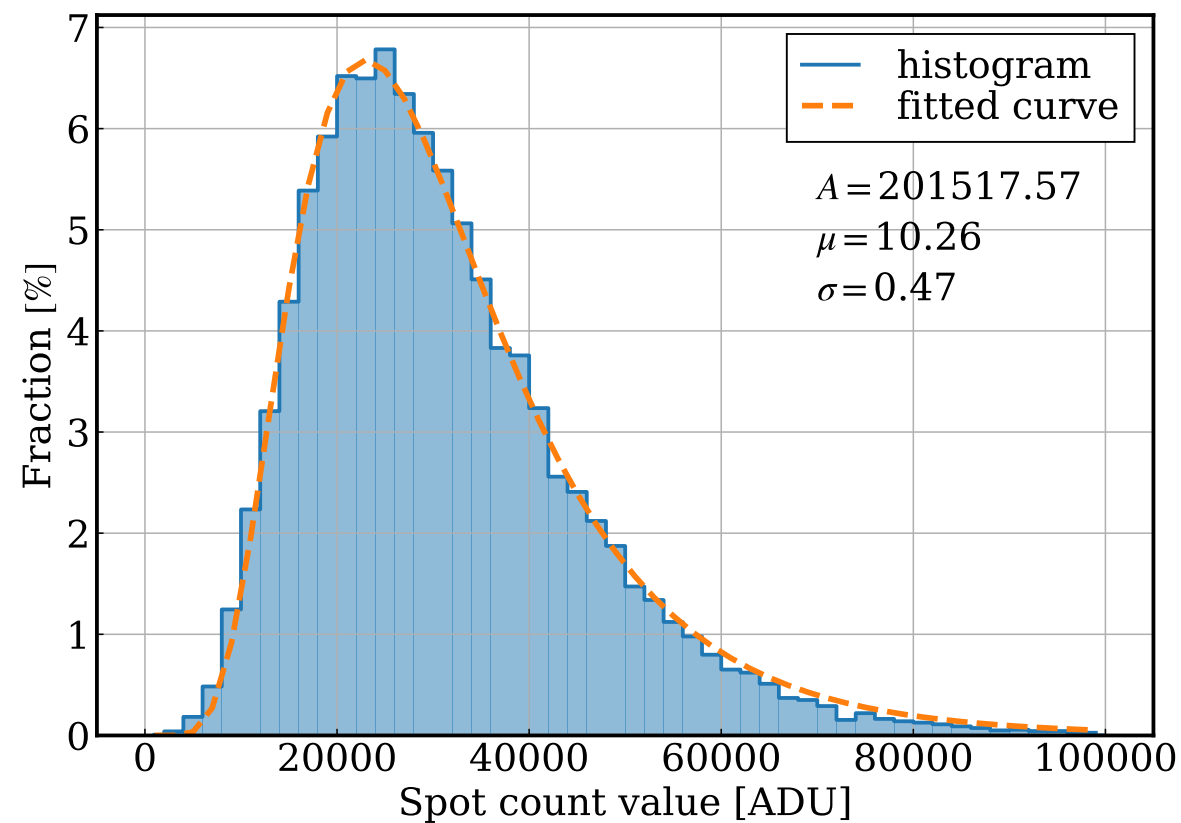
- 小さいサブ開口 → 低い層までプロファイル, 明るい星が必要
- 大きいフォーマット → 小さい推定エラー, 各層乱流強度の確率分布が複雑

東北大学50cm望遠鏡での実験

- Telescope: IK-51FC (51cm Cassegrain)
- Wavelength: Bessel's R (630nm)
- MLA: Thorlabs MLA150-5C (150um pitch)
- Camera: EMCCD (custom-made readout system)
- Detector: 124x124 24um/pixel
- Subaperture: 20x20 (2.5cm-diameter circle, 134 effective spots)
- Data acquisition: 500Hz x 1min x 9times
- Target: Deneb (R=1.14mag)
- Date: Oct.16th, 2019
- Location: Tohoku university, Sendai, Japan
- Elevation: 46deg→34deg



測定されたシンチレーション

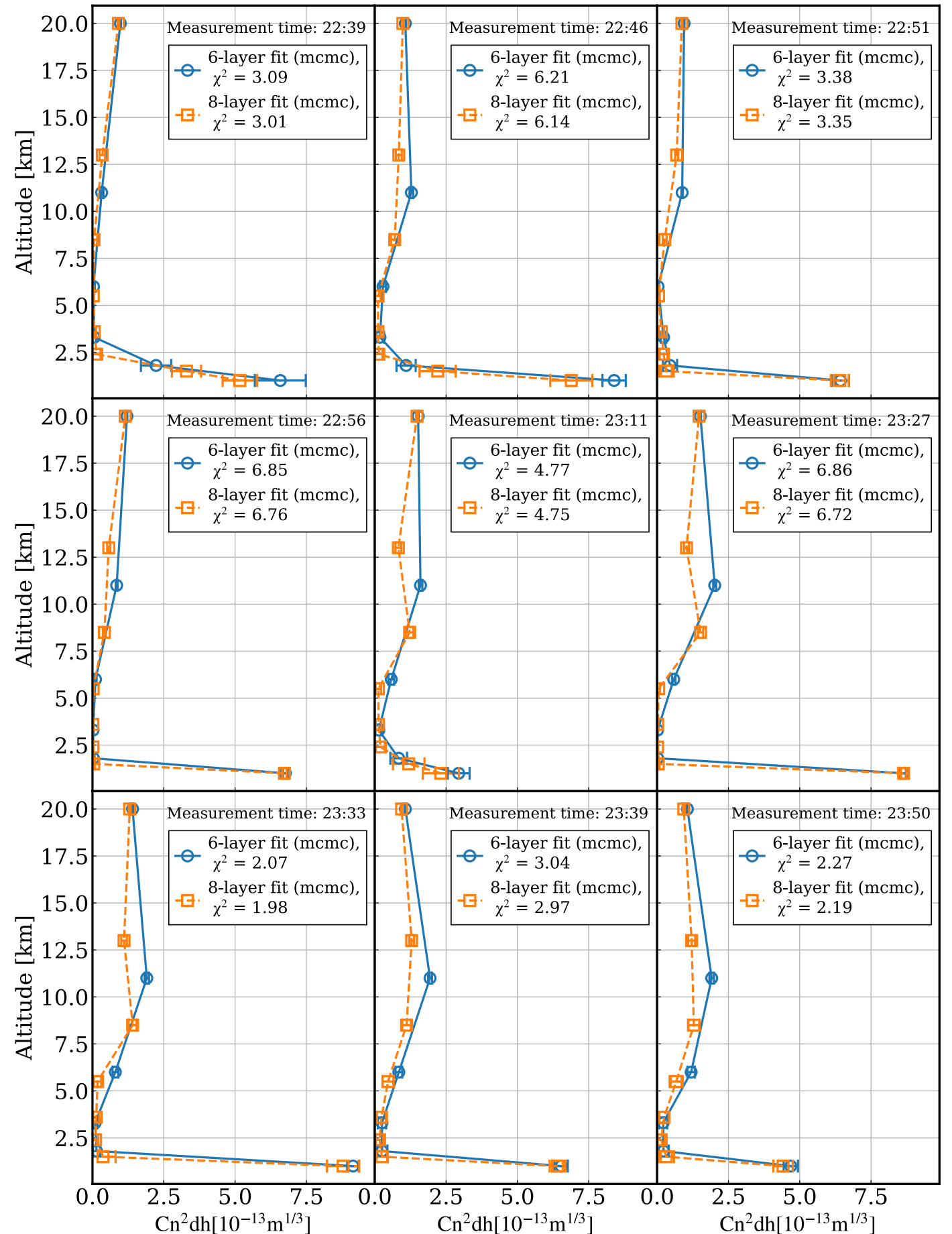


- 1つのスポットで測定された明るさのヒストグラム
→ 対数正規分布に従うことを確認
- スポット間距離~10cmで明るさ分散値が一定に
→ ~20km以上で大気ゆらぎがなくなることとコンシステント

$$\sqrt{\lambda h} = \sqrt{600\text{nm} \times 20\text{km}} \sim 11\text{cm}$$

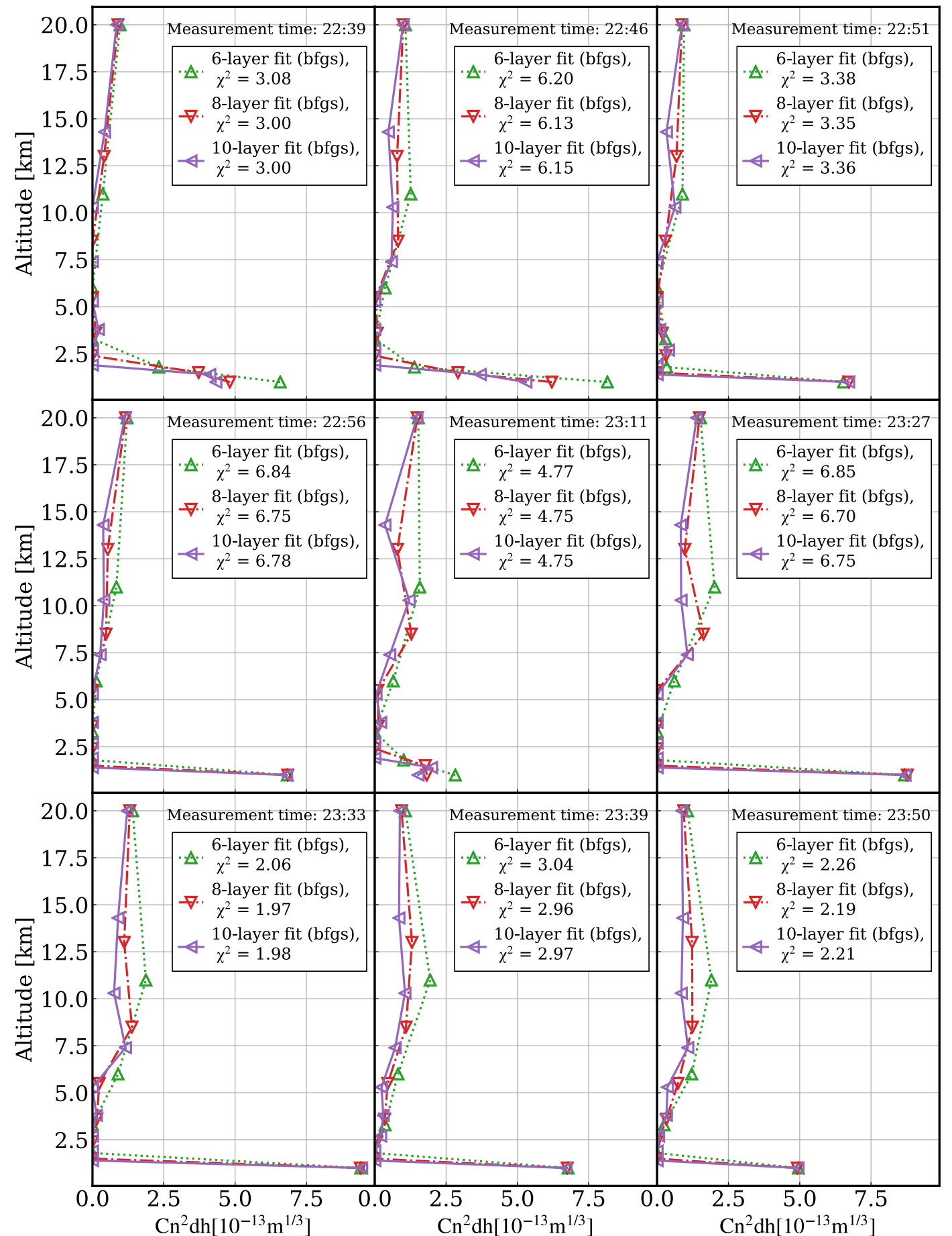
大気ゆらぎの高度分布

- 6層(青):1.0, 1.8, 3.3, 6.0, 11, 20 [km]
8層(橙):1.0, 1.5, 2.4, 3.6, 5.5, 8.5, 13, 20 [km]
で推定
- 全てのデータセットで $\chi^2 < 10$ で推定できた
- 地表付近で最大
- MCMCによる, 推定誤差付きの高度推定は計算時間が膨大 - 6層での推定に数十分かかる



大気ゆらぎの高度分布

- BFGS法による最適解計算
- 局所最適解の問題は同じ計算を1000回繰り返してその中の最適解を取ることで対処
- MCMC法による結果と6層, 8層で一致
- 10層(1.0, 1.4, 1.9, 2.7, 3.8, 5.3, 7.4, 10.3, 14.3, 20.0 [km])の推定が10分未満でできる



Future work

- すばる上空の大気ゆらぎの統計的測定
 - SLODARによる地表層測定+MASSによる高層測定
 - すばる望遠鏡を用いて短期間でキャンペーン的に行う
 - 波面センサー光学系の光学設計を開始した
 - ゆくゆくは小型望遠鏡に搭載して定常観測？
- DIMMモードの搭載
 - スポットの位置変動を様々なスポット間距離で計測

Summary

- トモグラフィックAOへの事前情報として，大気ゆらぎの高度分布の情報が必要．
- Shack-Hartmannセンサを用いたMASS手法の開発を行った．
 - Response function analysisにより従来手法より高い高度分解能が実現できることを確認．
 - Response function analysisにより最適なSH-WFSのパラメータを選択
 - 東北大学50cm望遠鏡での実験でプロファイリングの手続きを実証
- すばるサイトでの統計的測定に向けて光学設計を進行中
- 今回の結果については
 - SPIEポスター
（“Atmospheric turbulence profiling with a Shack-Hartmann wavefront sensor”）
 - 論文 (MNRASに投稿済み)
（“Atmospheric turbulence profiling with multi-aperture scintillation of a Shack-Hartmann sensor”）でも報告します．