

2015/12/8

第5回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ

於 東北大学

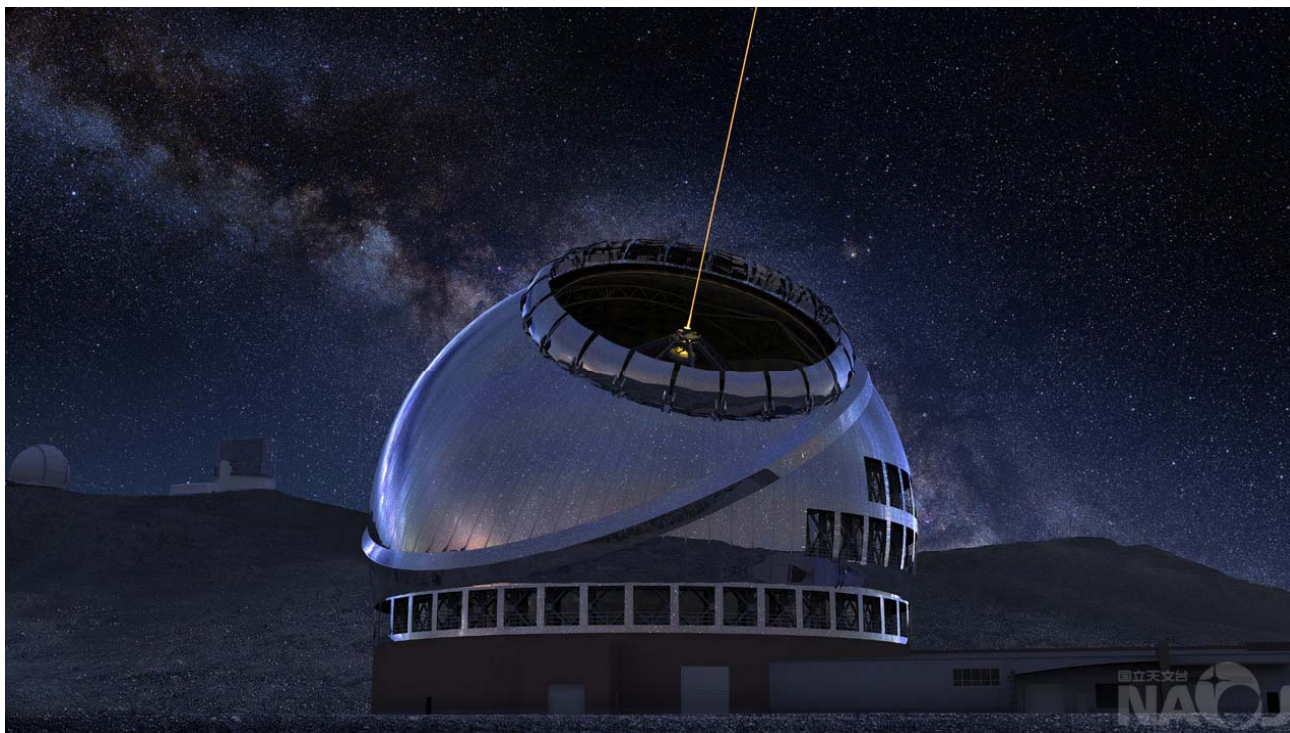
Subaru/RAVENのon-sky観測データを用いた トモグラフィック再構成行列の推定

東北大学修士2年 山崎 公大

秋山 正幸(東北大学)、大野 良人(東北大学)、

大屋 真(国立天文台)

TMTプロジェクトにおける広視野補償光学



- TMT 第1期観測装置

 - IRIS (InfraRed Imaging Spectrograph) ⇒ 撮像+面分光 with AO (NFIRAOS)

 - IRMS (Infrared Multi-slit Spectrograph) ⇒ 広視野多天体分光 with AO (NFIRAOS)

- TMT 第2期観測装置

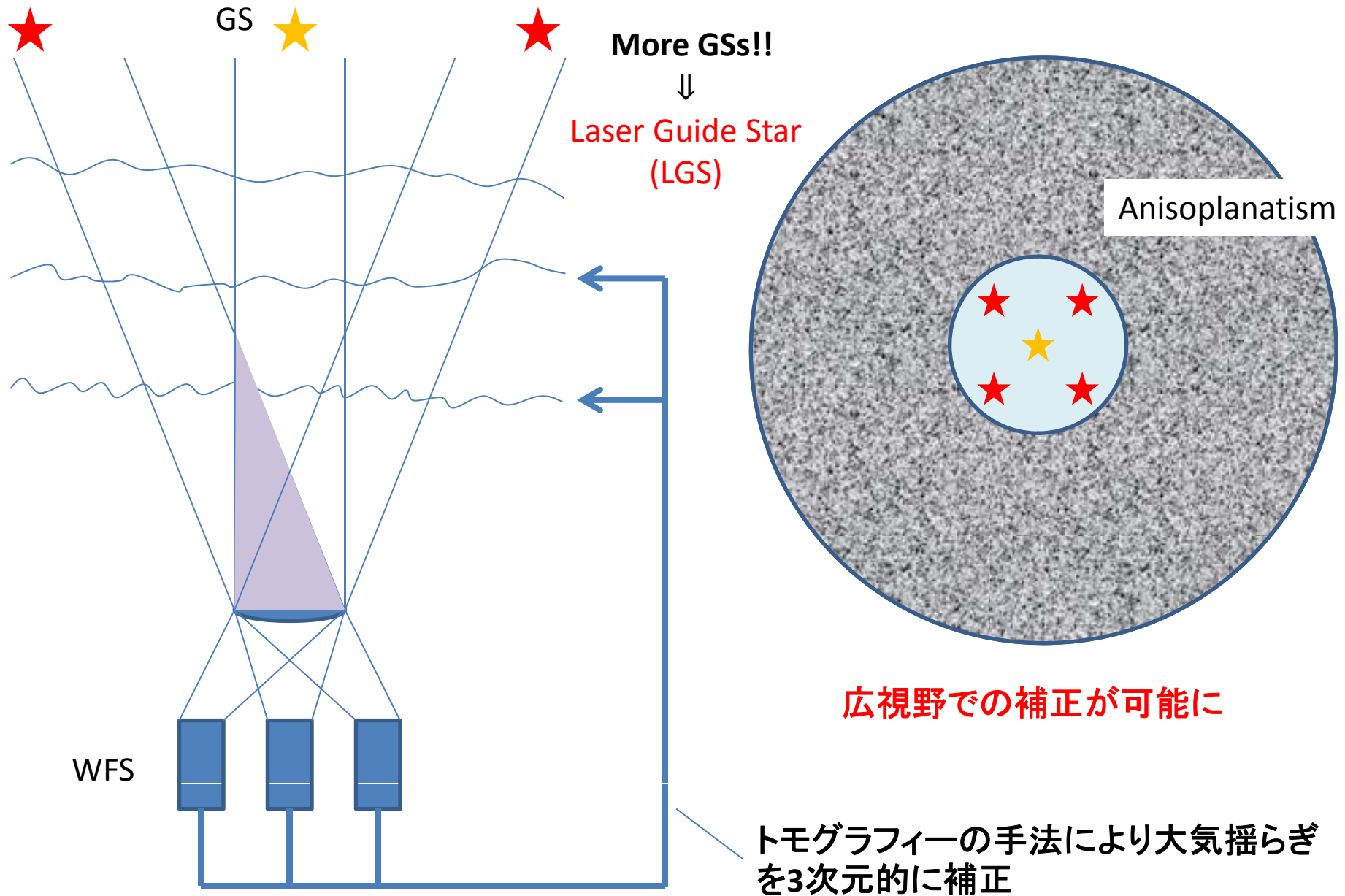
 - IRMOS (InfraRed Multi-Object Spectrograph) **TMT-AGEプロジェクト**

 - 地表層補償光学(GLAO)+ 多天体補償光学(MOAO) + IFU

視野10分角

ビクトリア大学、国立天文台ハワイ観測所のチームと共同で研究

広視野補償光学



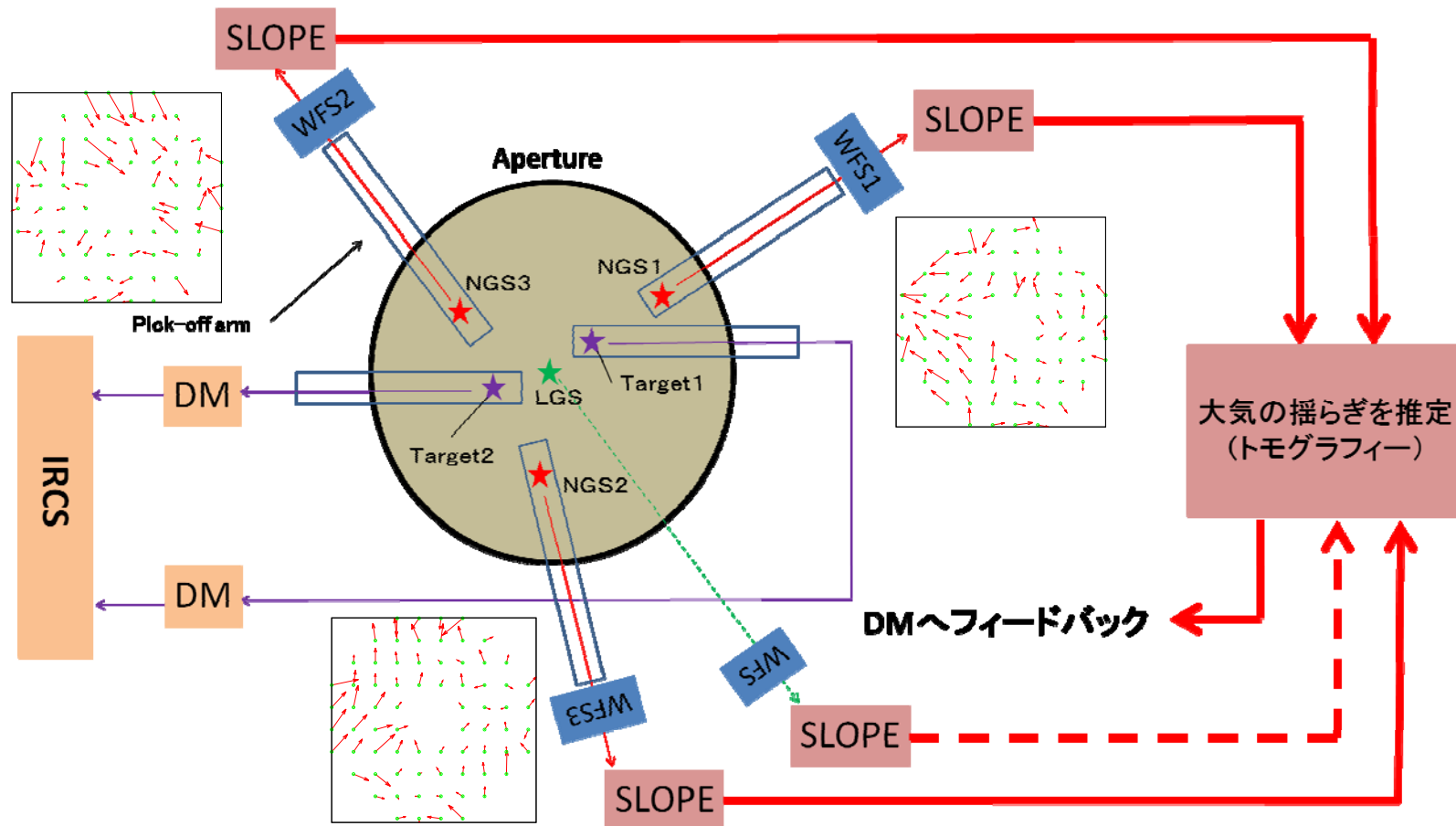
RAVEN

- ビクトリア大学(カナダ)を中心に東北大学、国立天文台ハワイ観測所が協力
 - MOAO(多天体補償光学)の実証実験装置
 - 2014年5月,8月、2015年6月にon-sky観測を実施 @すばる望遠鏡
-
- RAVEN仕様

AOシステム	MOAO
観測装置	IRCS
サイエンス チャンネル数	2
波面センサー(WFS)	3NGS + 1 on-axis LGC
Field of Regard	3.5 arcmin
Science Field 視野	4 arcsec
Ensquared Energy(EE)	>30% (140mas ,H-band)
Throughput	AO188の80%
WFS限界等級	R<14

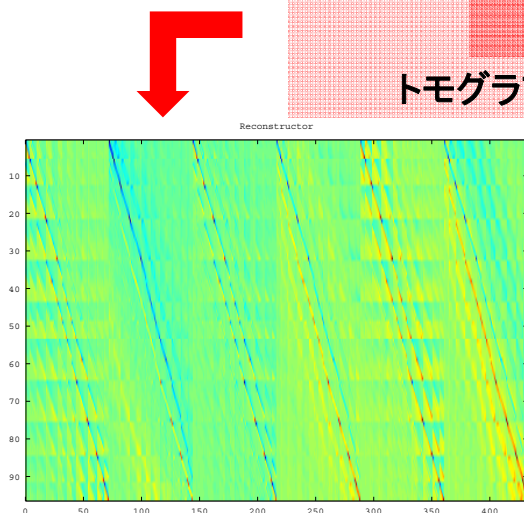
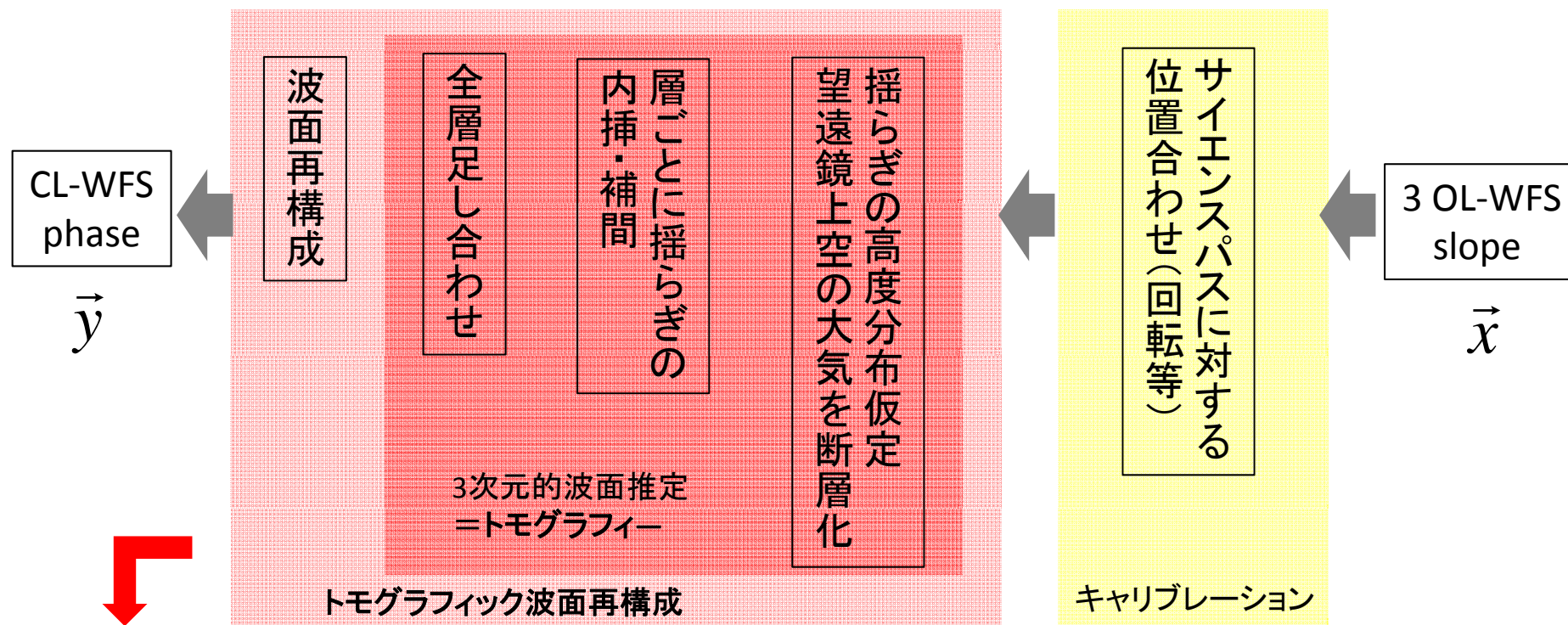
RAVEN システム概要

- ガイド星 (NGS3個 + LGS1個)
- サイエンスターゲット2天体
- シャックハルトマン波面センサー (WFS) ⇒ 波面slopeの測定
- トモグラフィー推定 ⇒ 可変形鏡 (DM)で補正 ⇒ 分光/撮像 (IRCS)



大気揺らぎの推定

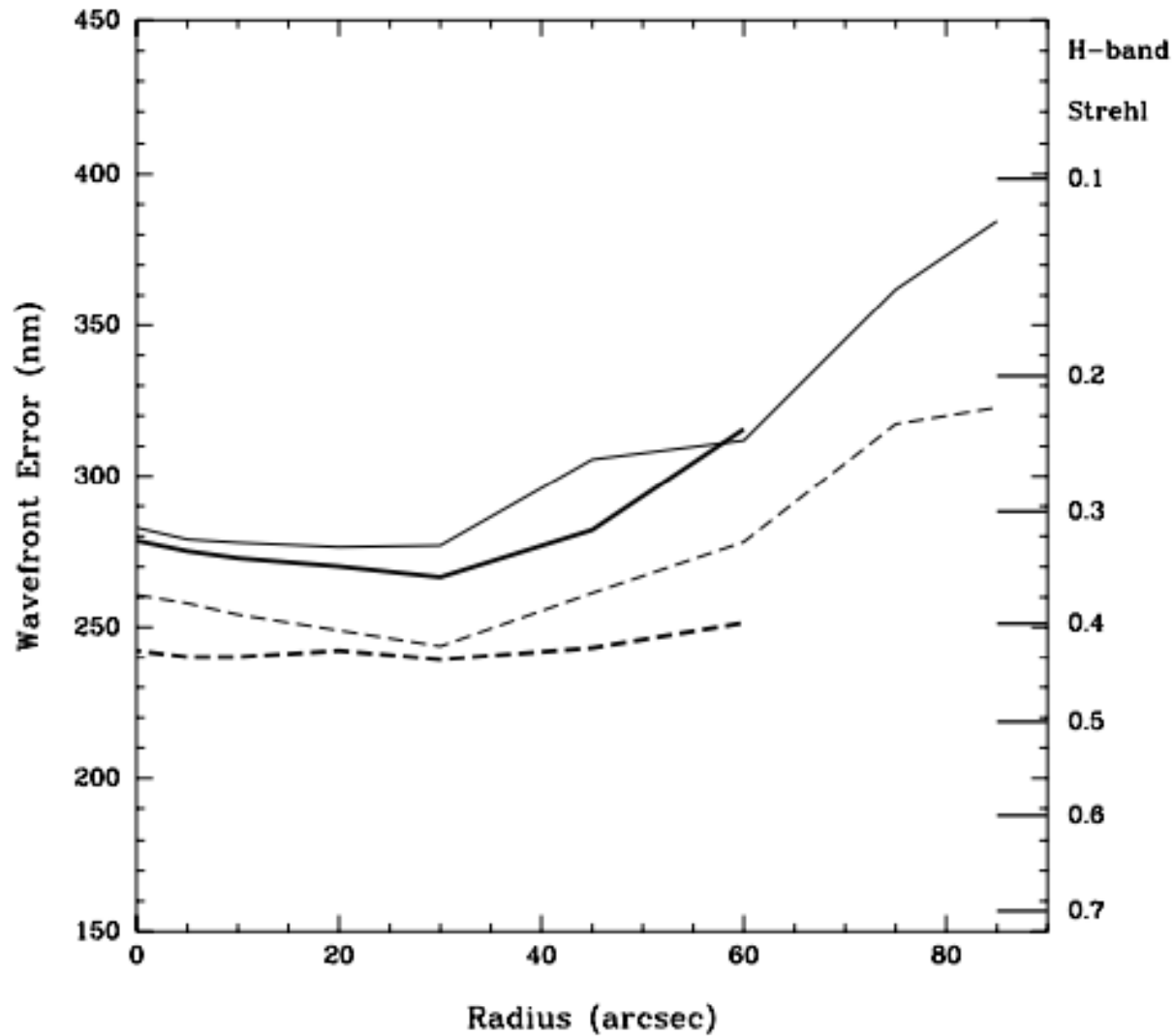
- 3つの開ループWFSの測定値からサイエンスタarget方向の大気揺らぎを導く行列の作成



$$\vec{y} = R \cdot \vec{x}$$

トモグラフィック波面再構成行列

性能シミュレーション



- RAVENのBaseline GS配置 (NGSのみ)を仮定した時の波面推定精度
- 横軸: location
- $r_0=15.6\text{cm}$
- GS配置: 半径45秒のリングに3つのNGS

トモグラフィック波面再構成の妥当性

- トモグラフィック再構成行列はモデル化されたものを使用

$$\vec{y} = R\vec{x} \quad \text{トモグラフィック再構成}$$

$$\hat{R} = (YX^T)(XX^T)^{-1} \quad \leftarrow \text{モデル化}$$

パラメータ

- ・高度プロファイル
- ・大気揺らぎパワースペクトル
- ・位相 \leftrightarrow slope関係
- ・波面センサーの位置関係
- ・GS配置 など

- 現実の観測にどこまで対応できるか？

On-sky観測では、現実の観測コンディションや装置の機械的特性など、トモグラフィーマデルに含めきれないパラメータの影響を受けると予想できる。



既定のトモグラフィーマデルが現実のon-sky観測に適用できているかを検証し、MOAOの実用化に向けて課題点を洗い出すことが必要

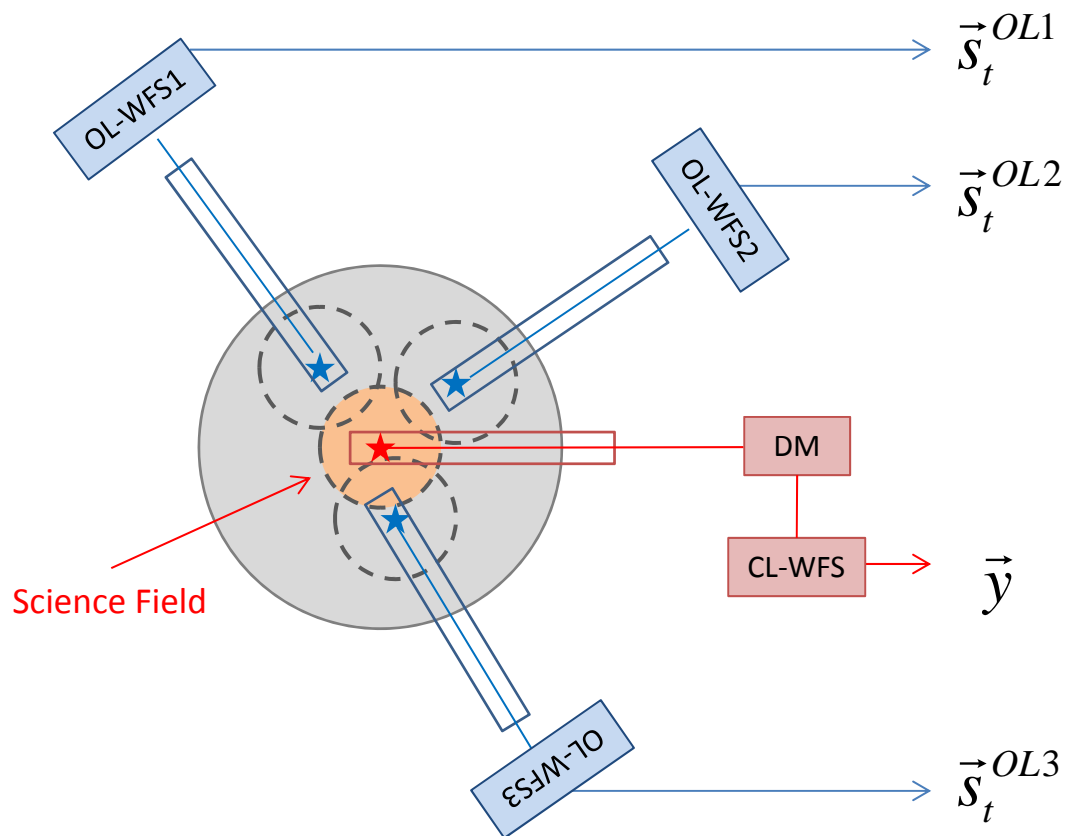
トモグラフィック再構成行列を 経験的に求める手法

- Learn & Apply 法 (Vidal et al.2010)
 - ✓ EAGLE(Elt Adaptive optics for GaLaxy Evolution)のMOAO実証装置CANARYのトモグラフィックアルゴリズムとして提案

$$\begin{aligned}\widehat{R} &= (YX^T)(XX^T)^{-1} \\ &= \underline{C_{cl,ol} C_{ol,ol}^{-1}} \quad \leftarrow \text{共分散行列}\end{aligned}$$

- ✓ 共分散行列の計算にはon-skyで**実際に測定されたSlopeデータを用いる**
- ✓ 行列計算のために一定期間データを記録、蓄積 ⇒ Learn
- ✓ 計算した行列を適応 ⇒ Apply
- 実際の観測コンディション、装置の機械的特性、大気揺らぎの性質等を反映したトモグラフィック再構成行列を経験的に導くことができると期待される。
- 再構成行列の構造を比較することでトモグラフィック手法の課題点の洗い出しに繋がる

経験的トモグラフィック波面再構成行列



$$\vec{x}_t = \begin{bmatrix} \vec{s}_t^{OL1} \\ \vec{s}_t^{OL2} \\ \vec{s}_t^{OL3} \end{bmatrix}, \vec{y}_t = \vec{s}_t^{CL}$$

波面slopeの測定データセット

$$\mathbf{X} = \{\vec{x}_t\}, \mathbf{Y} = \{\vec{y}_t\}$$

$[432 \times L]$ $[144 \times L]$



$$\mathbf{Y} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}$$

MMSE法

$$\hat{\mathbf{R}} = \arg \min_R \langle \|\mathbf{Y} - \mathbf{R}\mathbf{X}\|^2 \rangle$$

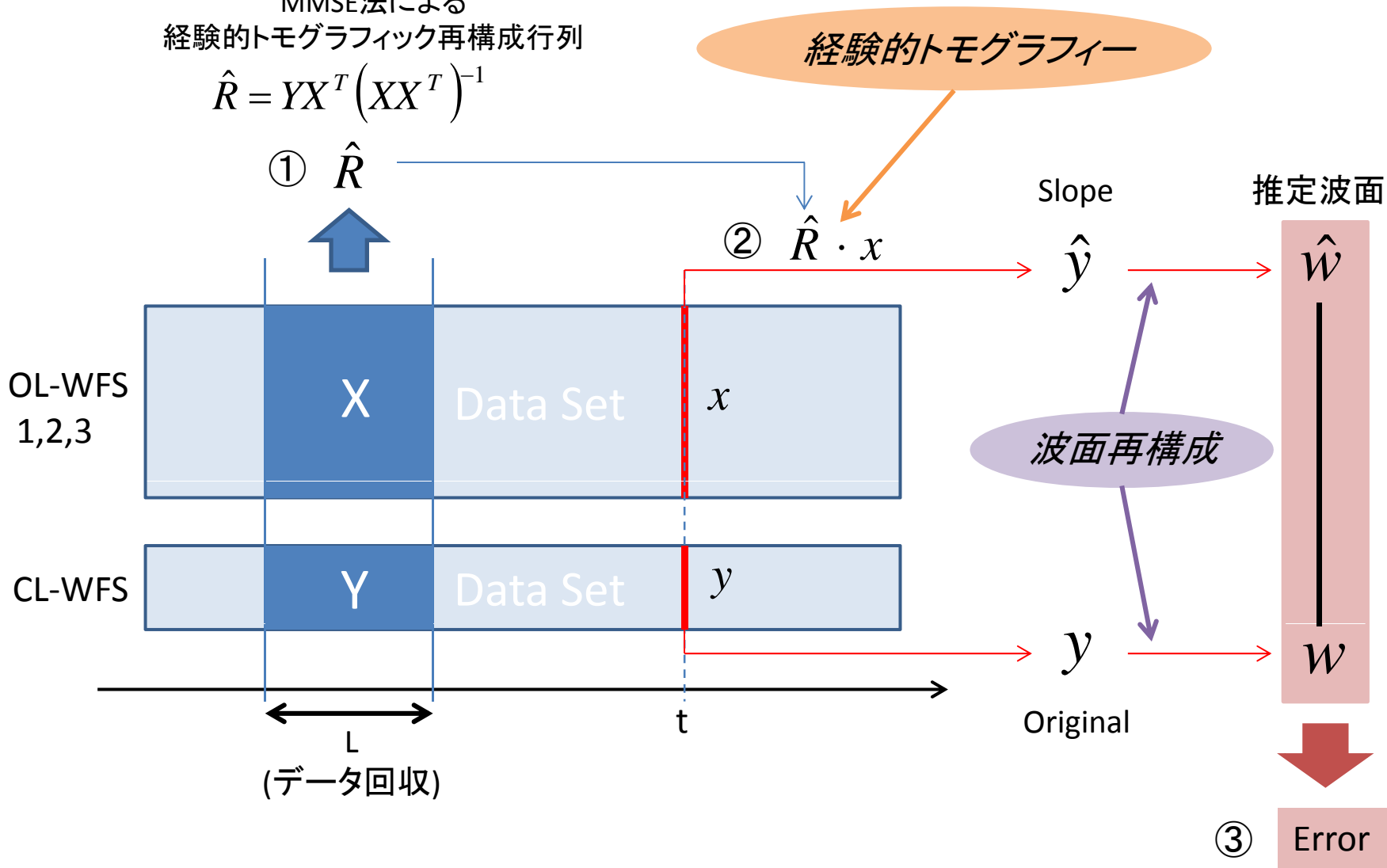
$$\Leftrightarrow \hat{\mathbf{R}} = \mathbf{Y}\mathbf{X}^T (\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1}$$

開ループ測定値(\vec{x})からサイエンス対象方向の揺らぎ(\vec{y})を関係付ける行列を
MMSE(Minimum Mean Square Error)法により求める

RAVEN on-skyデータの解析 (経験的トモグラフィ)

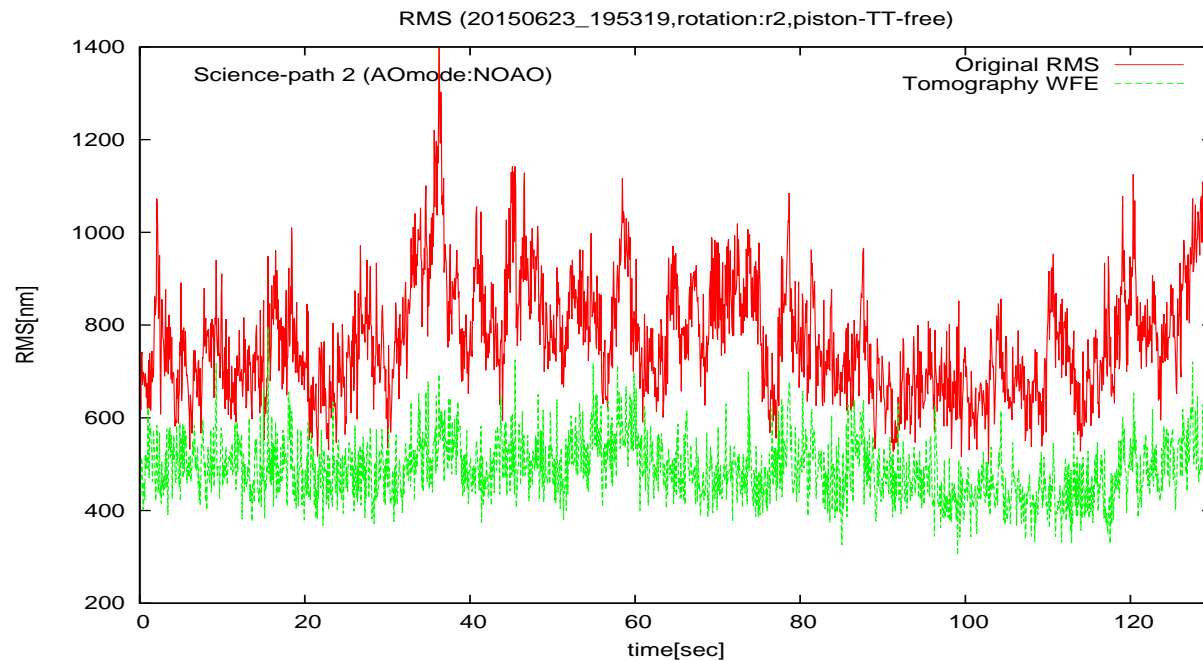
MMSE法による
経験的トモグラフィック再構成行列

$$\hat{R} = YX^T (XX^T)^{-1}$$



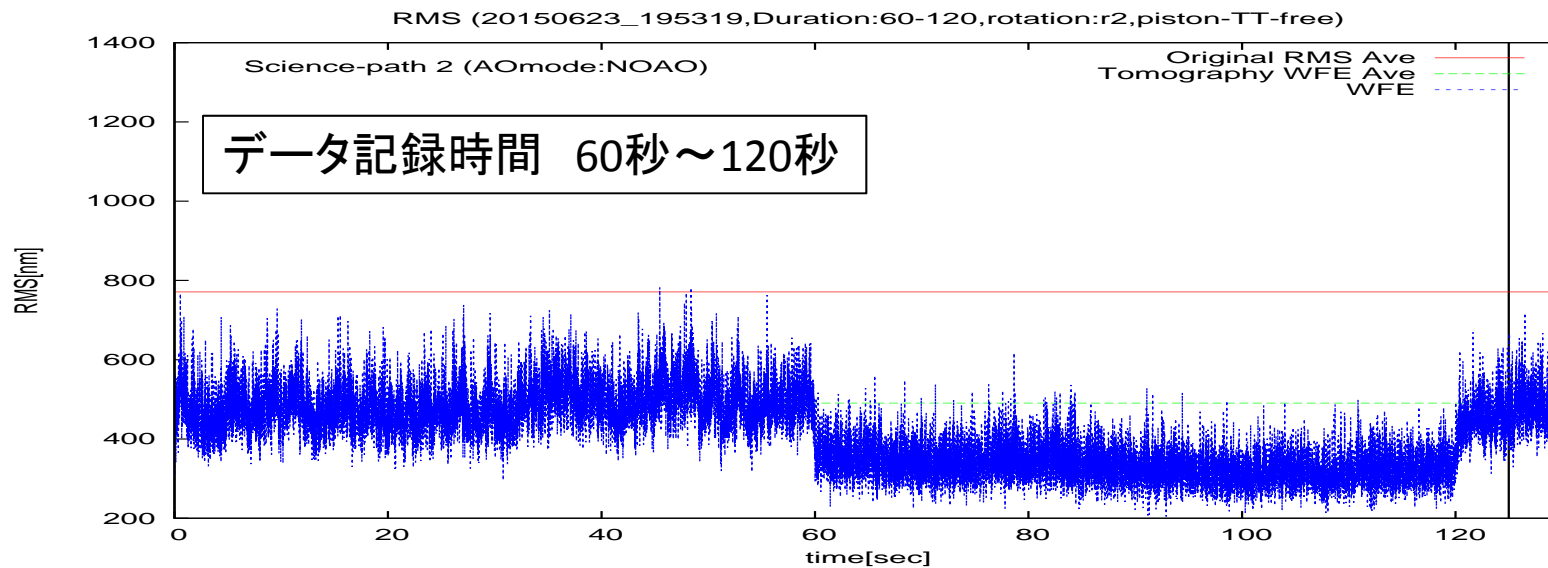
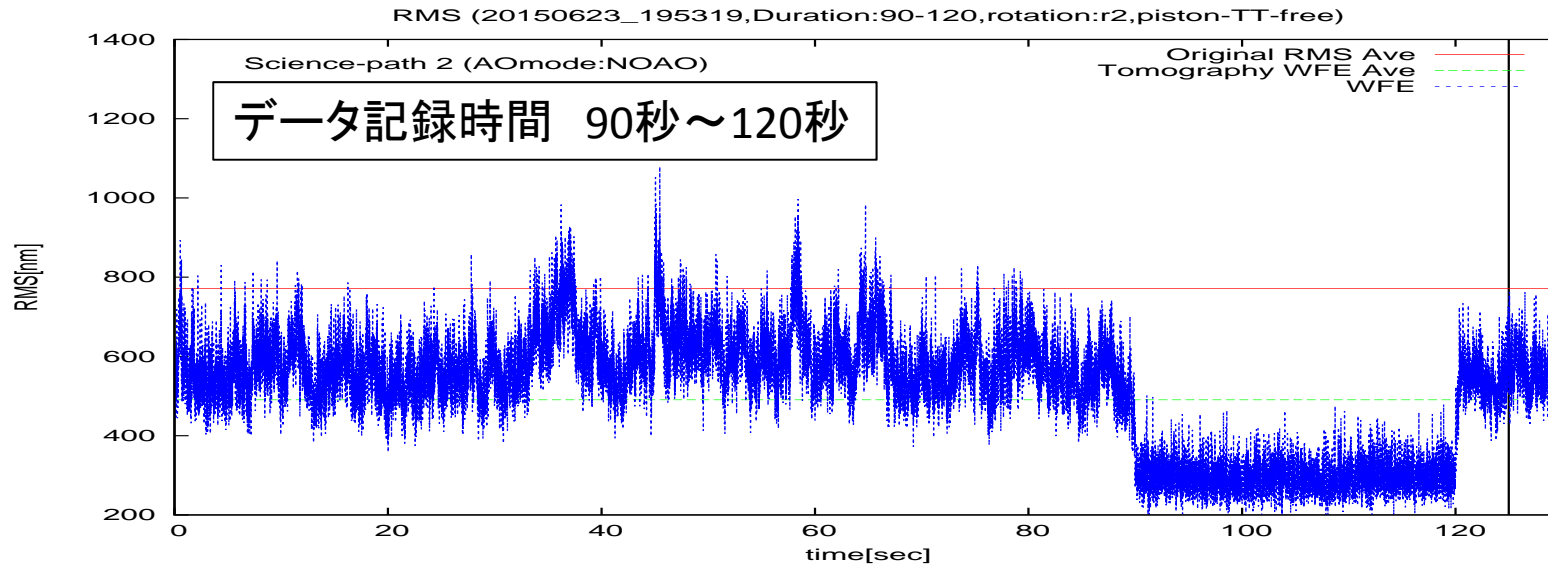
データ

- 観測名 : Fd38
- 観測日時 : 2015/6/23 19:53:19 ~ 19:55:51 (132秒)
- Science Channel : ch2
- AO モード : NOAO (LGS無し)

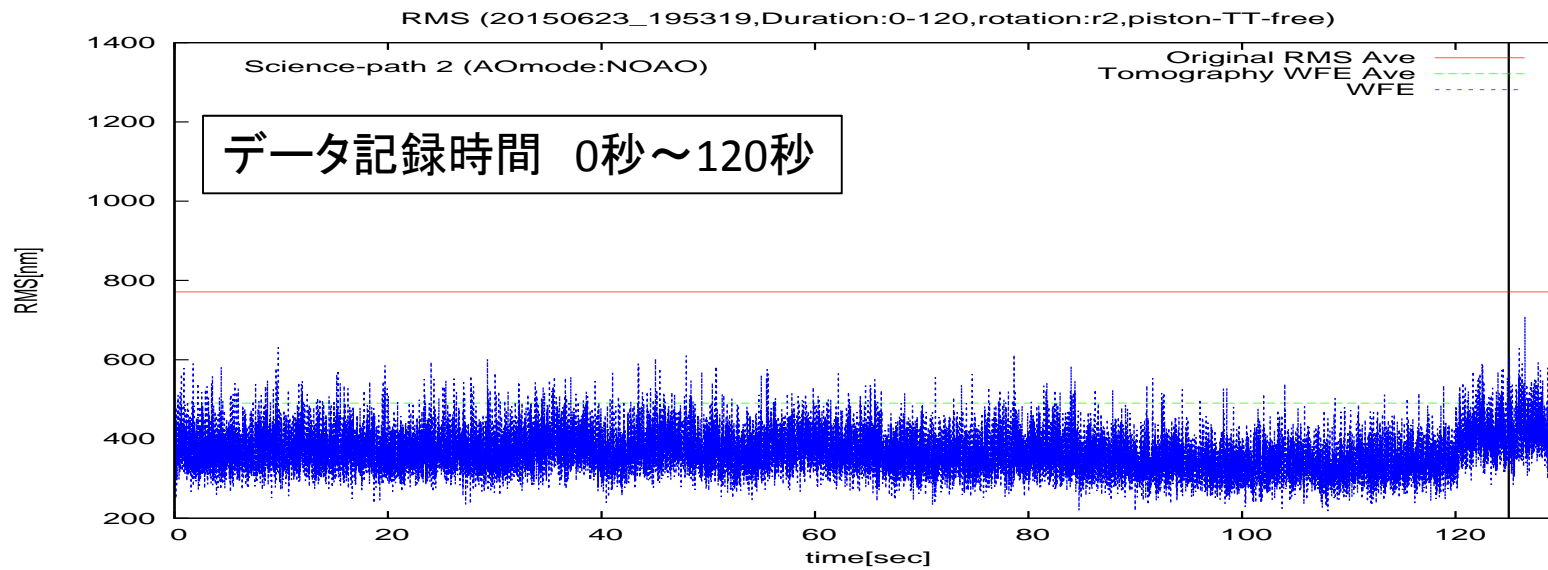
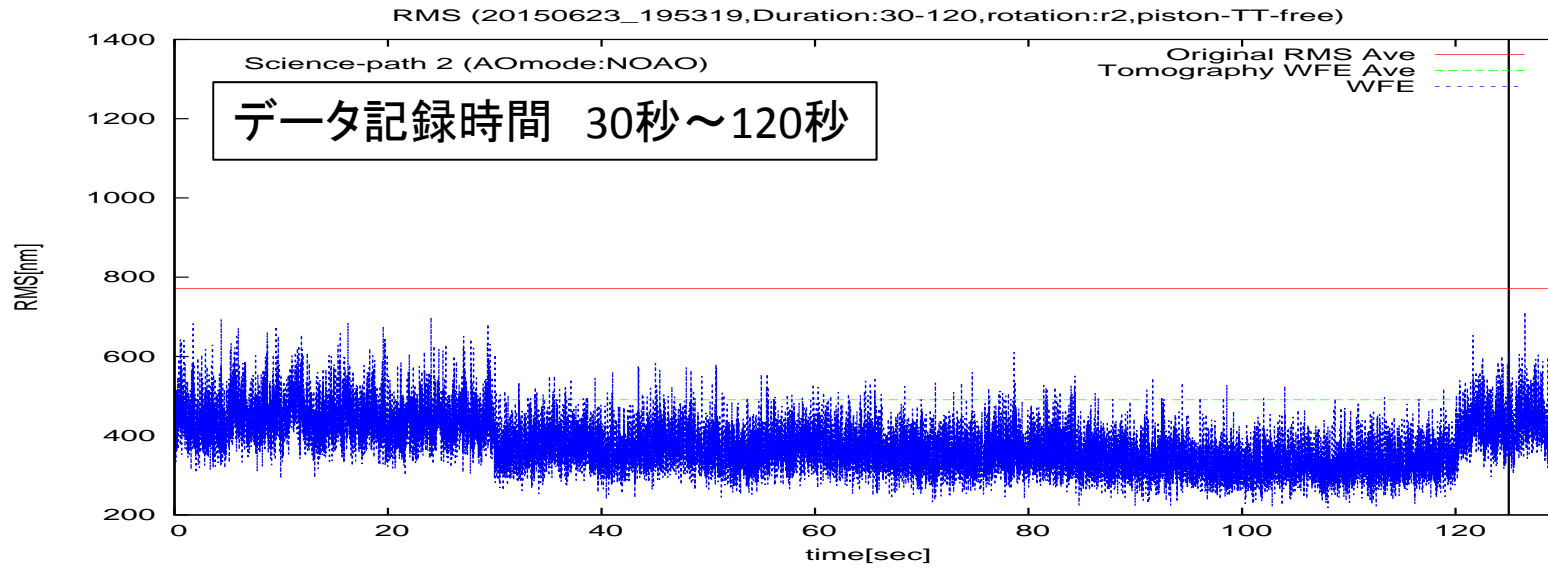


	Tomographic Error	Tomographic Error(TT-free)	Original RMS	Original RMS (TT-free)
平均RMS [nm]	640.90	490.58	1026.2	771.17
Σ [nm]	142.92	66.528	241.79	123.82

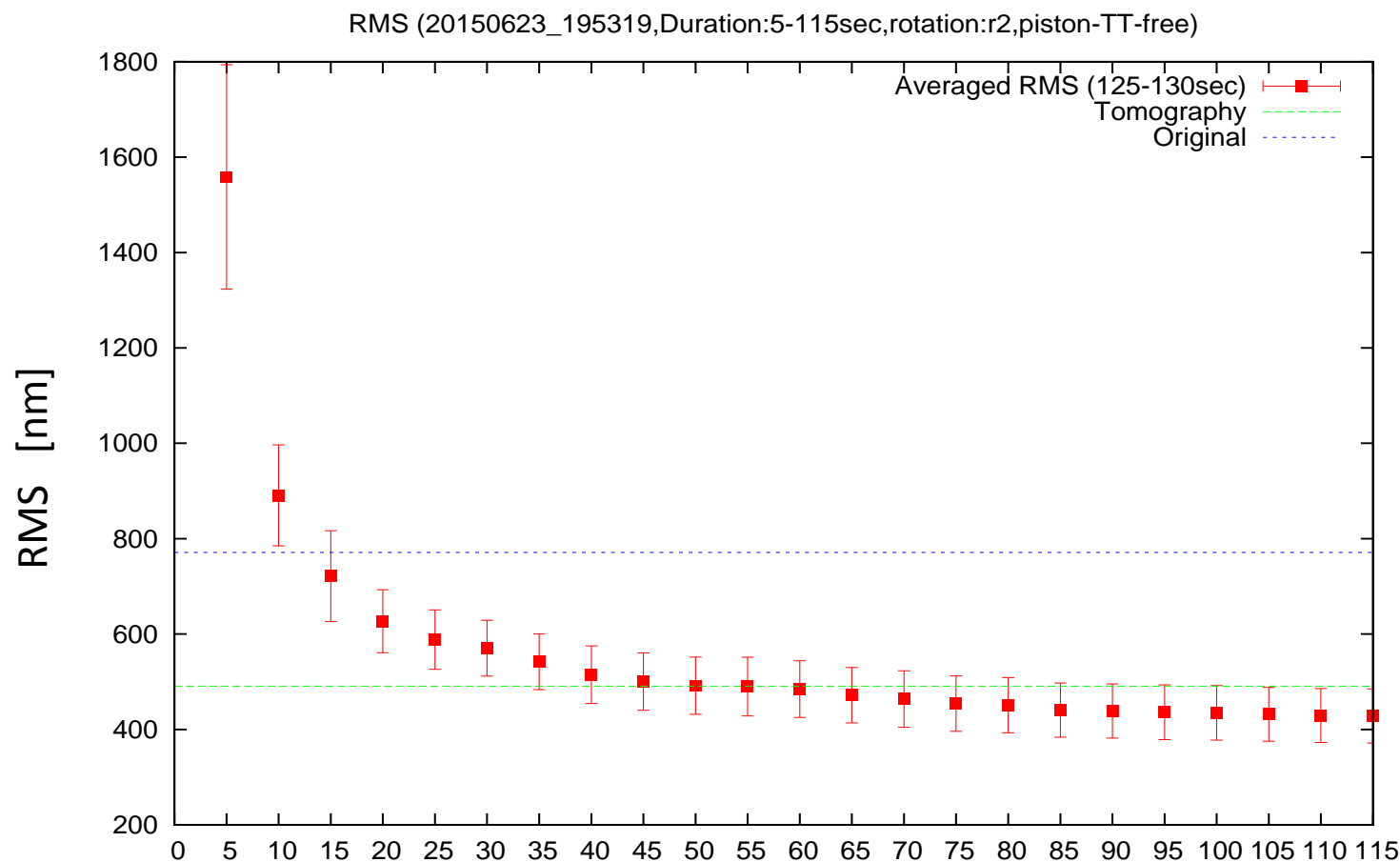
経験的トモグラフィー推定結果1



経験的トモグラフィー推定結果2



経験的トモグラフィック推定の性能評価

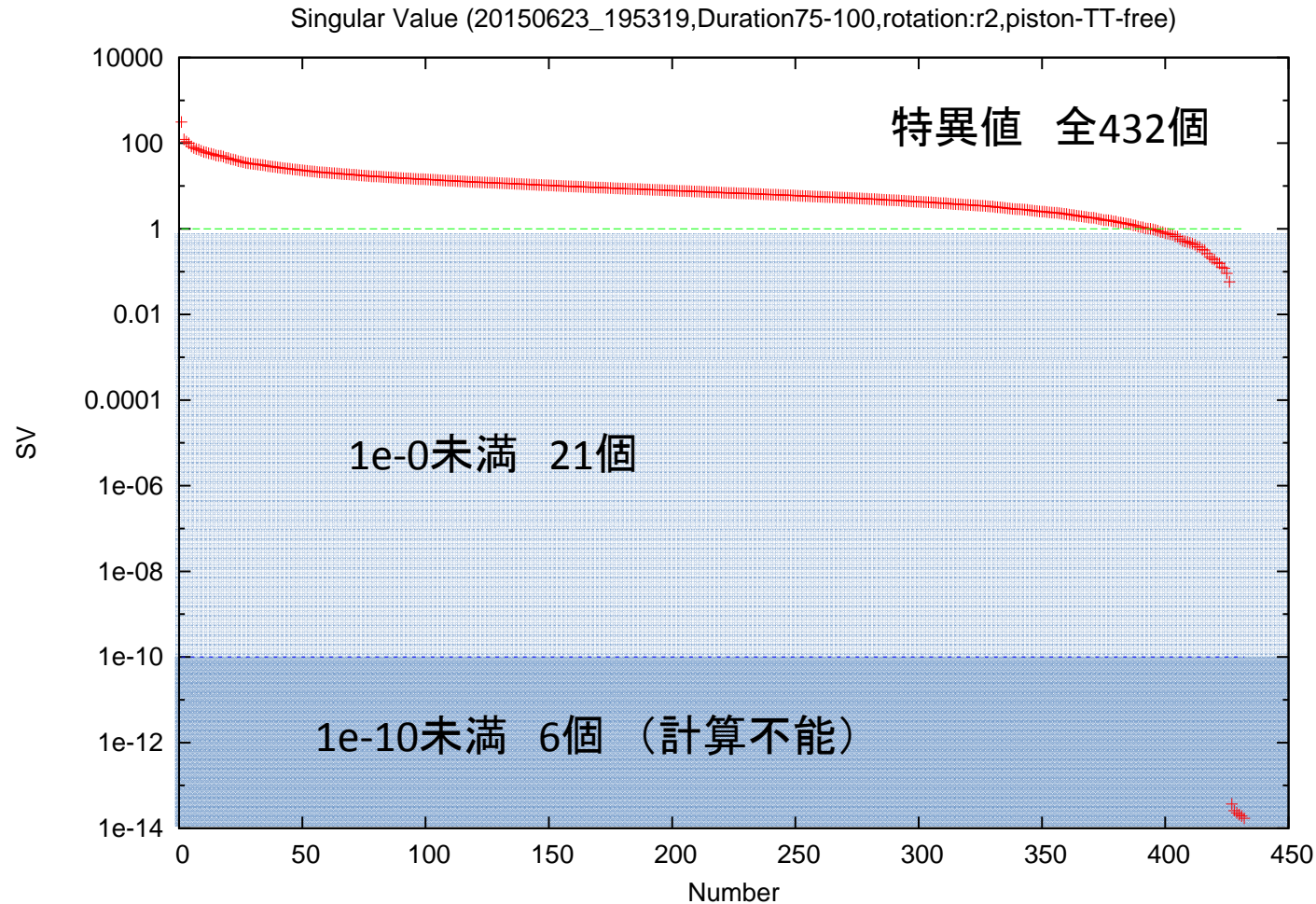


行列計算のためのデータ記録終了(120秒地点)から5秒後のWFEの平均値
データ記録時間を5秒間隔で変化

**記録時間を長く取るほどWFEが減少
トモグラフィー推定の精度を上回る精度を確認**

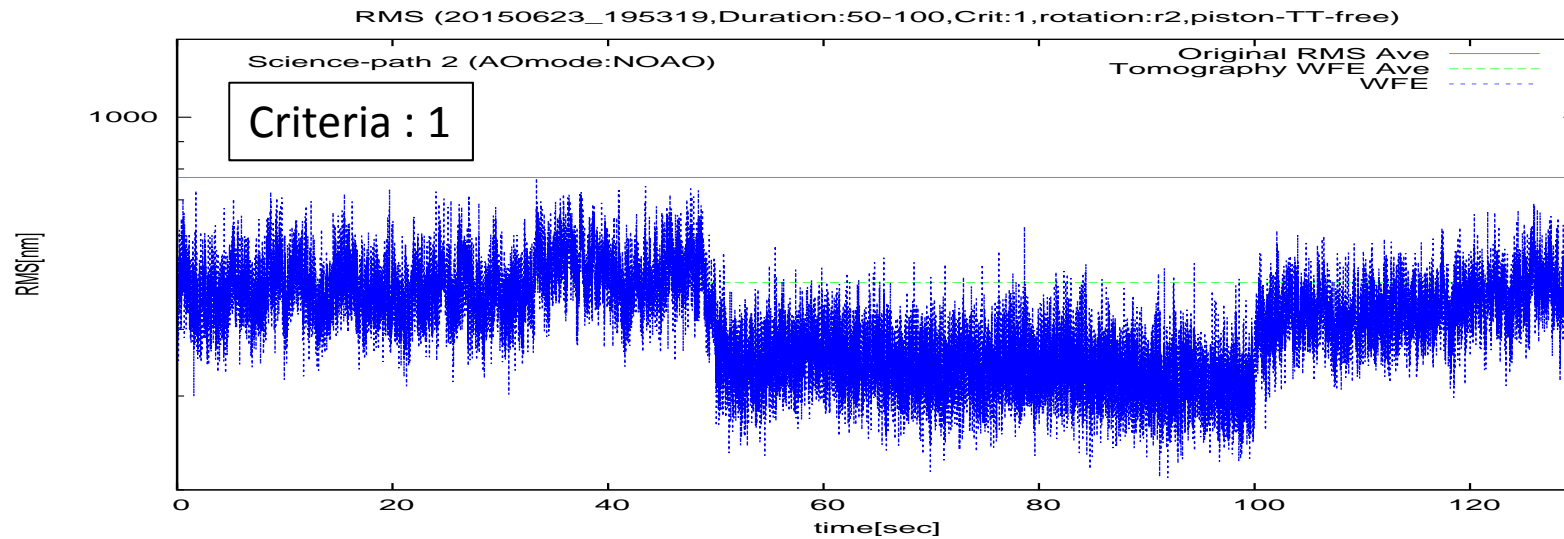
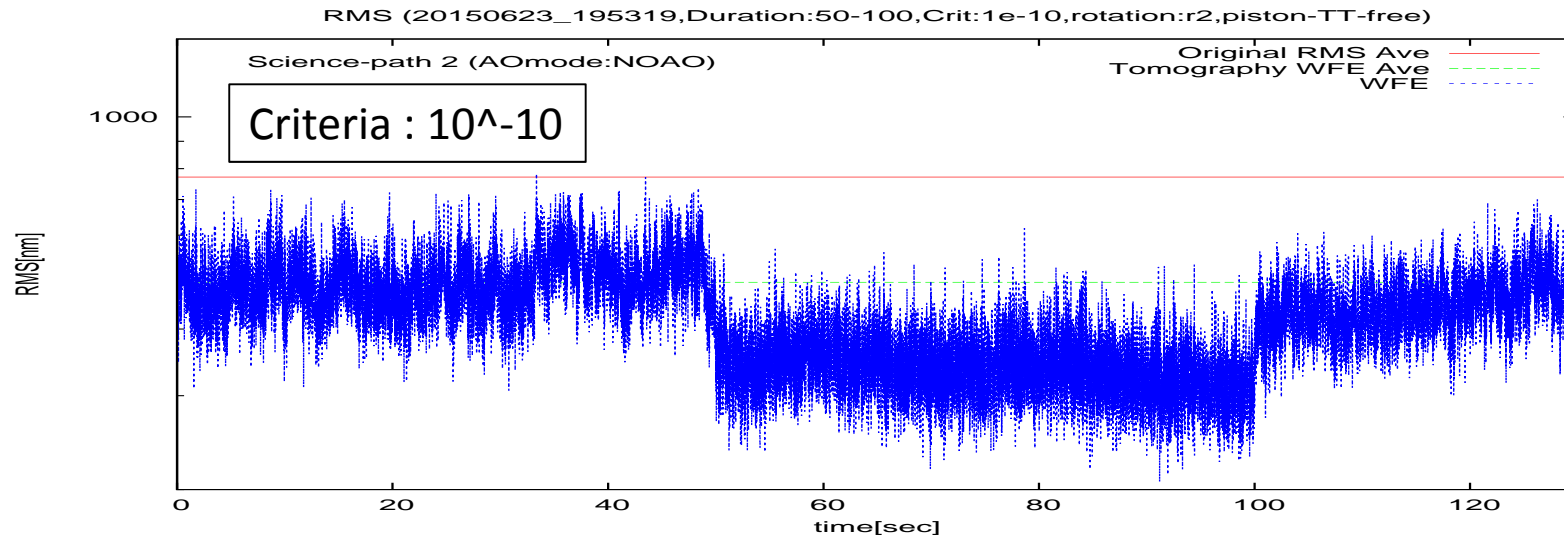
特異値によるノイズ依存性の低減

- 経験的トモグラフィック再構成行列の特異値



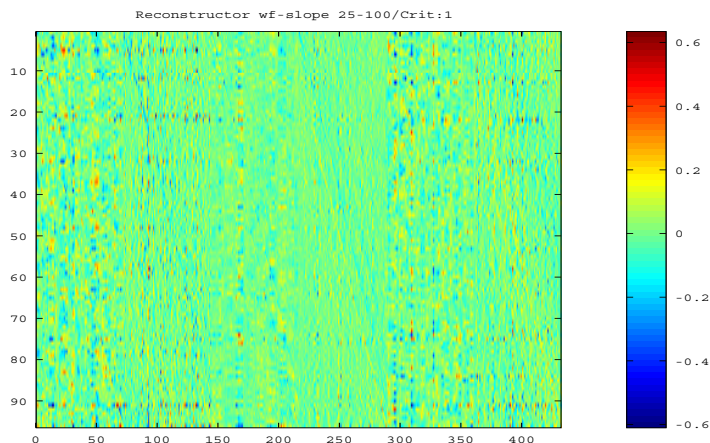
低すぎる特異値は疑似逆行列の計算時に省くことで、推定のノイズ依存を調整

特異値によるノイズ依存性の低減

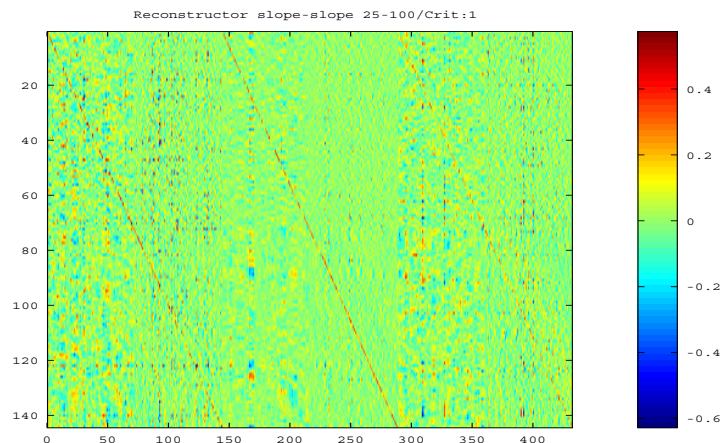


特異値によるノイズ依存性の低減

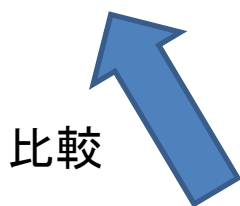
- 行列構造の比較



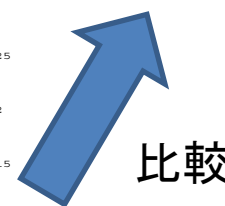
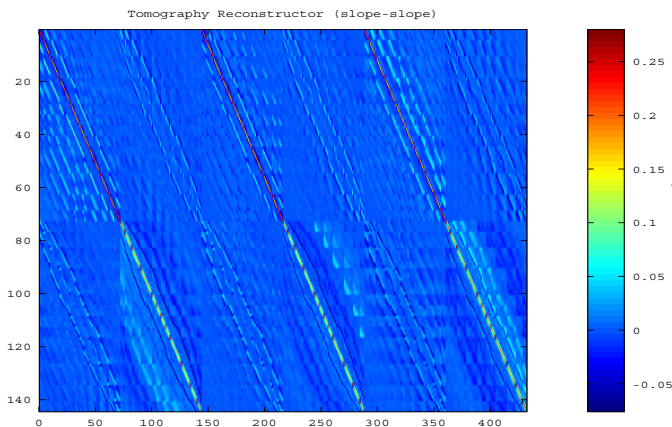
Criteria : 10^{-10}



Criteria : 1



比較



比較

上: 経験的トモグラフィック再構成行列
右: トモグラフィック再構成行列(モデル)

比較的大きい特異値までカットするとモデル行列の構造が捉えられる
⇒ トモグラフィーのモデルを経験的に再現している可能性

まとめと今後の展望

- まとめ

- ✓ 2015年6月のRAVEN on-sky測定データにLearn & Apply法を適用し、経験的にトモグラフィック再構成行列を構成。
- ✓ 既定の再構成行列によるトモグラフィーと経験的トモグラフィーの精度を比較 ⇒ データ記録時間によっては経験的トモグラフィーの精度が上回る結果。
- ✓ 経験的トモグラフィック再構成行列の推定性能及び行列構造と特異値との関連性の示唆。

- Future Work

- ✓ 経験的トモグラフィック再構成行列の構造からトモグラフィーのモデルとの対応関係を分析。
- ✓ on-sky観測においてトモグラフィー性能に影響を与えるパラメータを洗い出す。