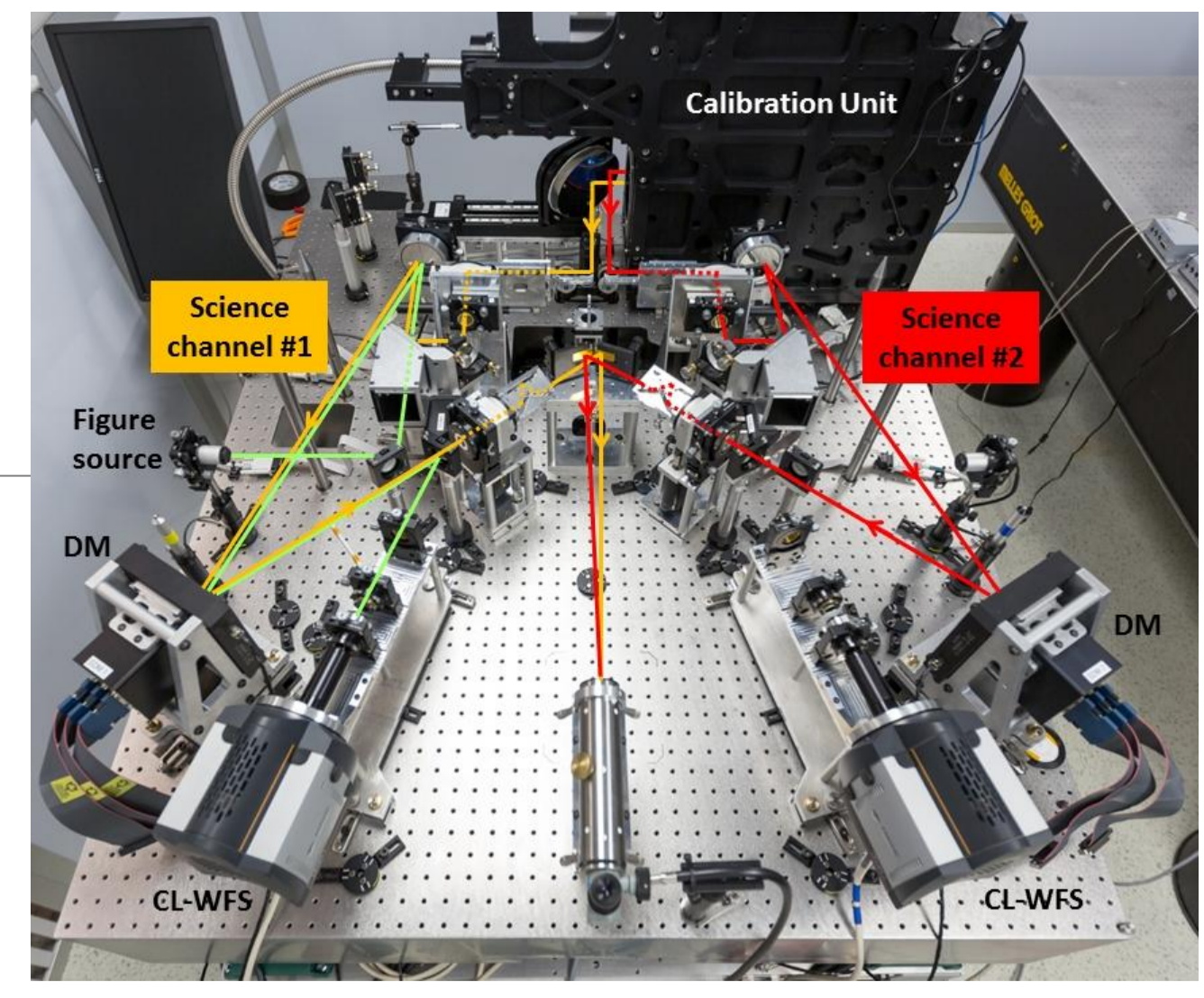


# すばる/RAVENのon-sky観測で得られた大気揺らぎのモード分解

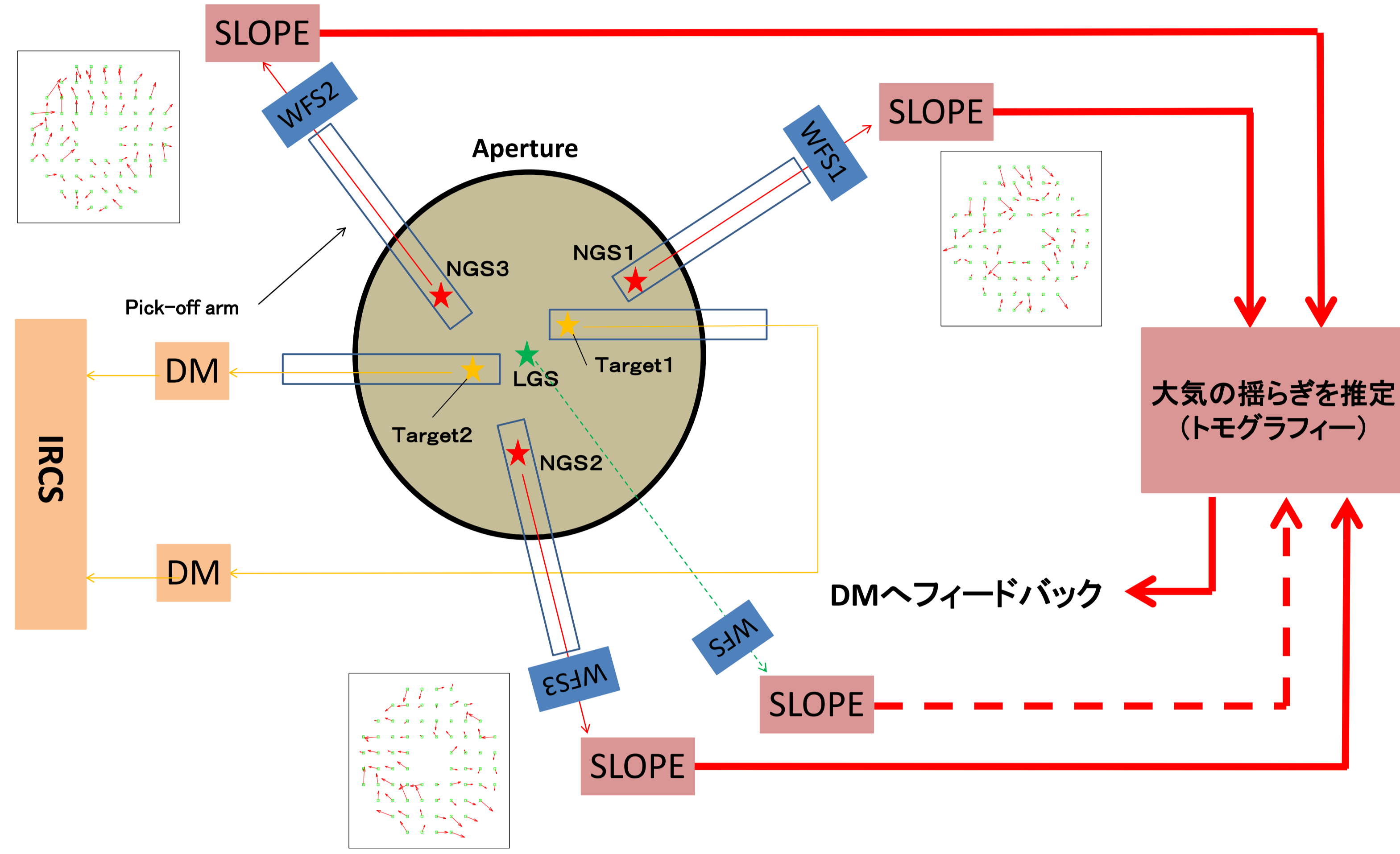
東北大学大学院天文学専攻秋山研究室修士1年 山崎公大

## 1. Introduction

多天体補償光学とは回折限界に迫るような星像を望遠鏡開口内の広い視野にわたって達成することを可能にする技術であり、将来的に建設が予定されているTMTにもその概念と採用した装置の導入が提案されている。この概念を実用に移すにあたっての技術的課題を検証するために開発されたのが多天体補償光学試験装置RAVENである。2014年5月と8月にはすばるサイトでのon-sky観測が行われ、開ループ制御やトモグラフィ推定など多天体補償光学技術に関する性能評価について実績を上げている。今回は私はRAVENのon-sky観測で得られたデータの解析を行い、RAVENの波面センサーで観測的に得られた波面slopeの相関行列から、波面slopeのモード分解を精度良く行うための直交関数系を構築する手法を開発した。



### ■RAVENのシステム概要



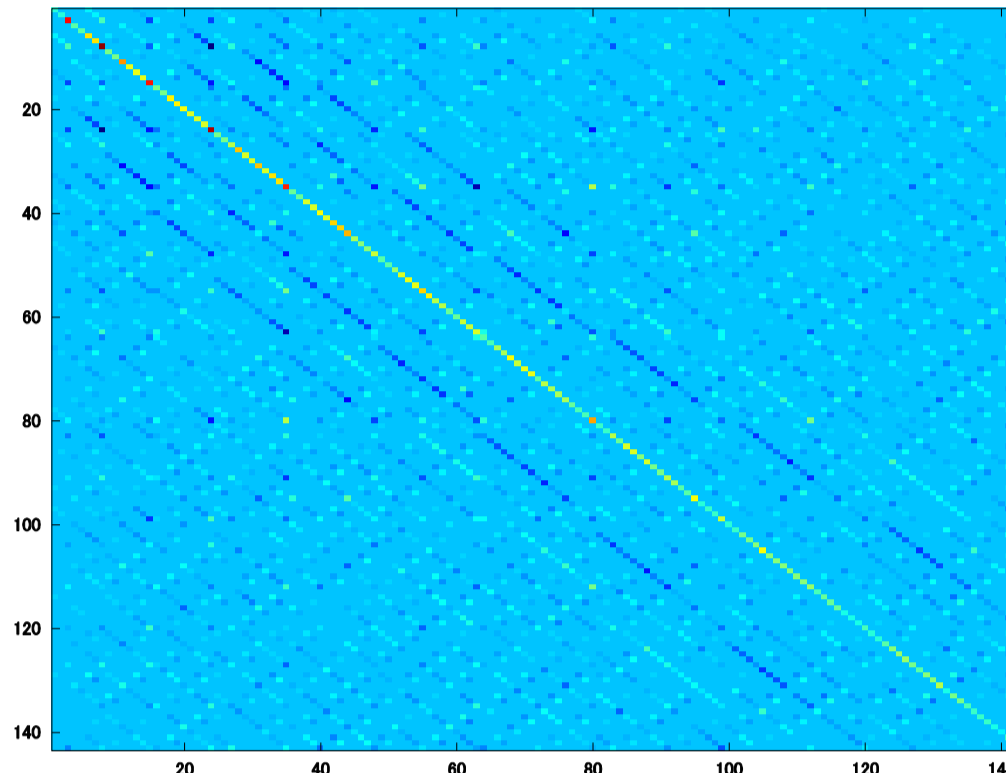
### ■研究の背景

任意の関数をモード分解するための関数列(モード)に必要な条件

1. 正規直交系であること(正規直交性)
2. 全関数空間を表現できること(完備性)

• Zernike-Slopeモードの直交性

ZernikeモードをSlope化し、RAVENのシャックハルトマンセンサーの副開口部上で離散化 ⇒ 直交性の確認



対角成分 ⇒  $\int Z_i(\vec{x})^2 d\vec{x}$   
 非対角成分 ⇒  $\int Z_i(\vec{x})Z_j(\vec{x})d\vec{x} \quad (i \neq j)$   
 モード展開に用いるためには非対角成分はゼロであることが望ましい

Zernike Slopeの直交性(カラーマップ)

非対角成分がゼロにならないモードの組み合わせがあることが判明

精度良くモード分解を行うには都合の良い直交関数系を構築することが必要

## 2. Methodology

### ■経験的直交関数展開

経験的直交関数展開とは、観測的に得られた離散的データ(確率変数)の相関行列を基に構成した直交関数列(モード)を用いて、観測データのモード分解・分析を行う手法である。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1m} \\ F_{21} & F_{22} & & F_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_{n1} & F_{n2} & & F_{nm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix} \Rightarrow x = F \cdot f$$

離散的データ(確率変数)  $x$   
 展開係数  $f$   
 直交関数系(モード)  $F$

$$x^T = (Ff)^T = f^T F^T$$

$$xx^T = Fff^T F^T$$

$$E(xx^T) = F \cdot E(ff^T) \cdot F^T$$

$$C = FF^T$$

$$CF_i = FF^T F_i = \lambda_i F_i$$

経験的直交関数展開  
 相関行列  $C$  の固有値  $\lambda_i$ 、固有ベクトル  $F_i$  を決定する問題

$$E(ff^T) = I$$

単位行列  
 ( $\because f_i$  は無相関な確率変数)

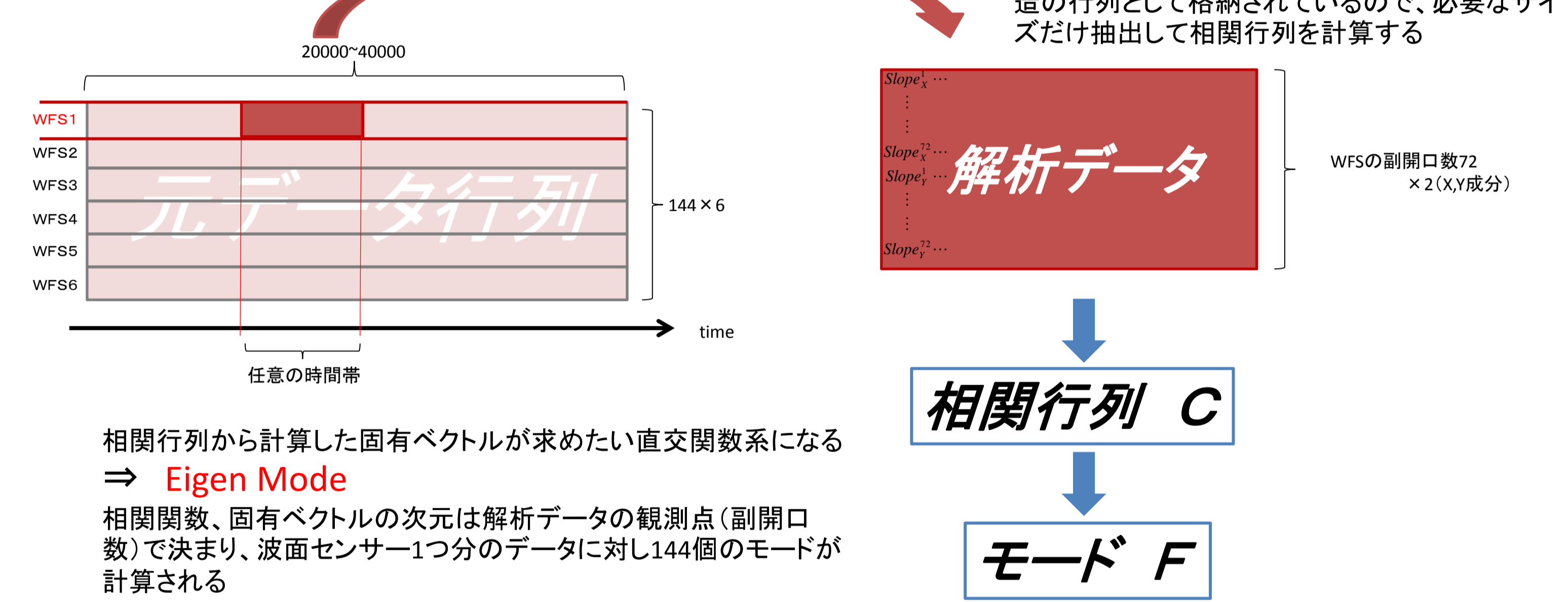
$$E(xx^T) = \{x_i x_j\} = \{R_{ij}\} = C$$

相関行列

$$F^T F = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & & \lambda_m \end{pmatrix}$$

直交条件

### ■解析手法

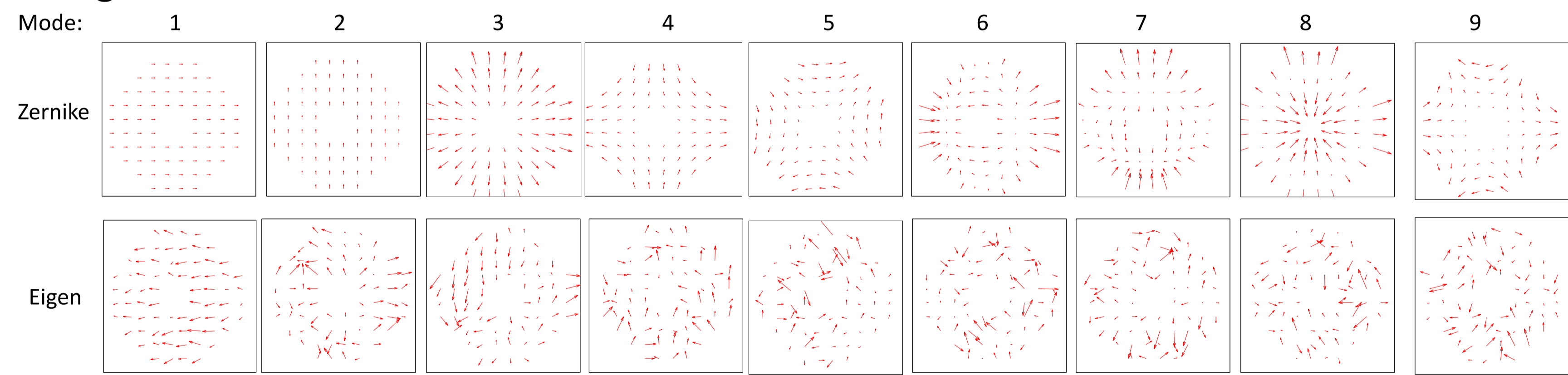


### ■経験的直交関数展開手法の利点

経験的直交関数展開は、観測データの統計的性質を反映するようにモード系を決定するため、大気揺らぎの特性や波面センサーの副開口部の形状などの影響も含めた最適なモード展開を実現することができると考えられる。今回のRAVENの観測では大気揺らぎの波面slopeのデータが十分にあるので、データの相関行列の解析は容易に行うことができる上、この手法では波面センサーで取得したslopeの情報から直接モード分解に持ち込むことができるので、解析手順をより簡略化することができるという利点もある。

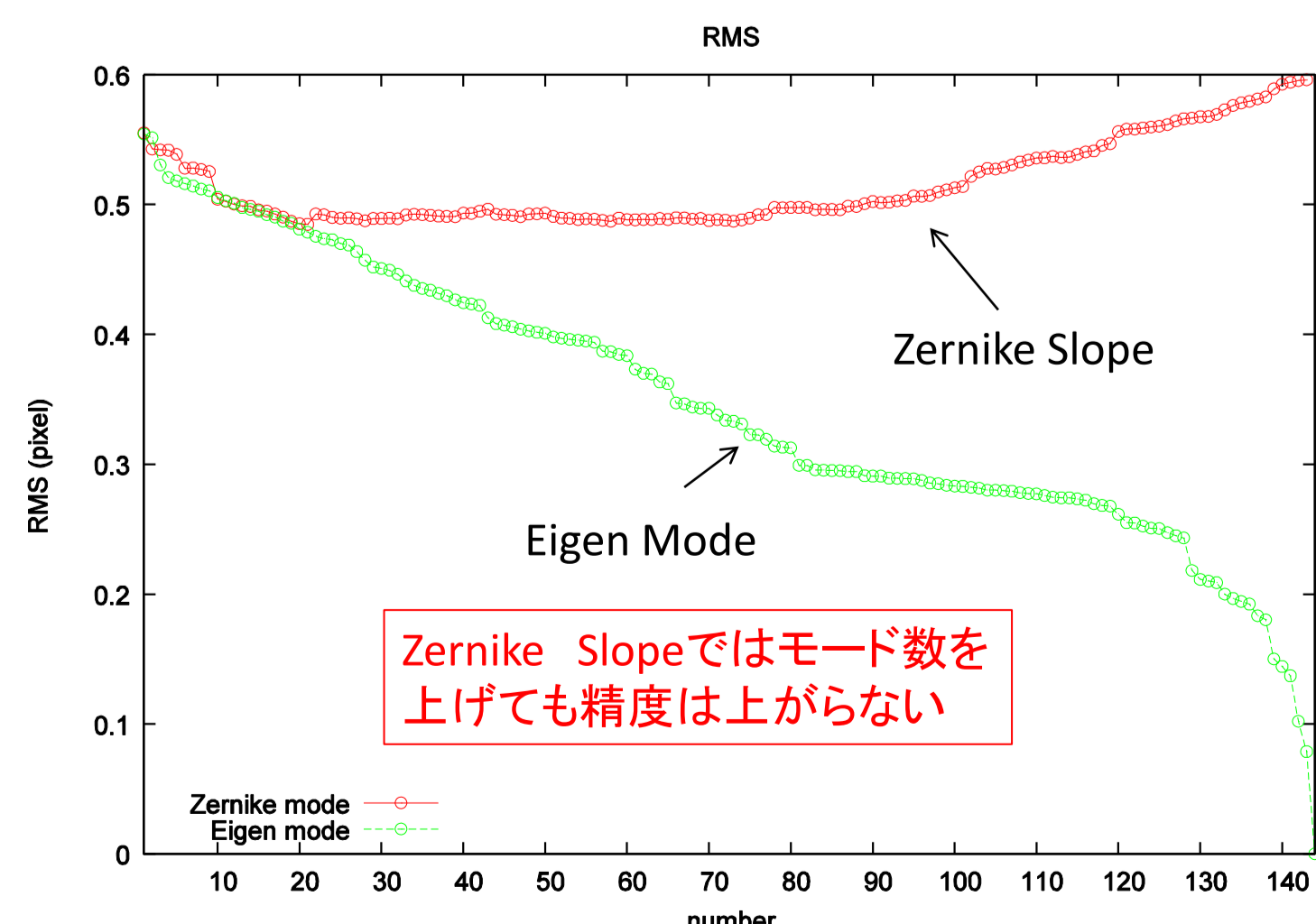
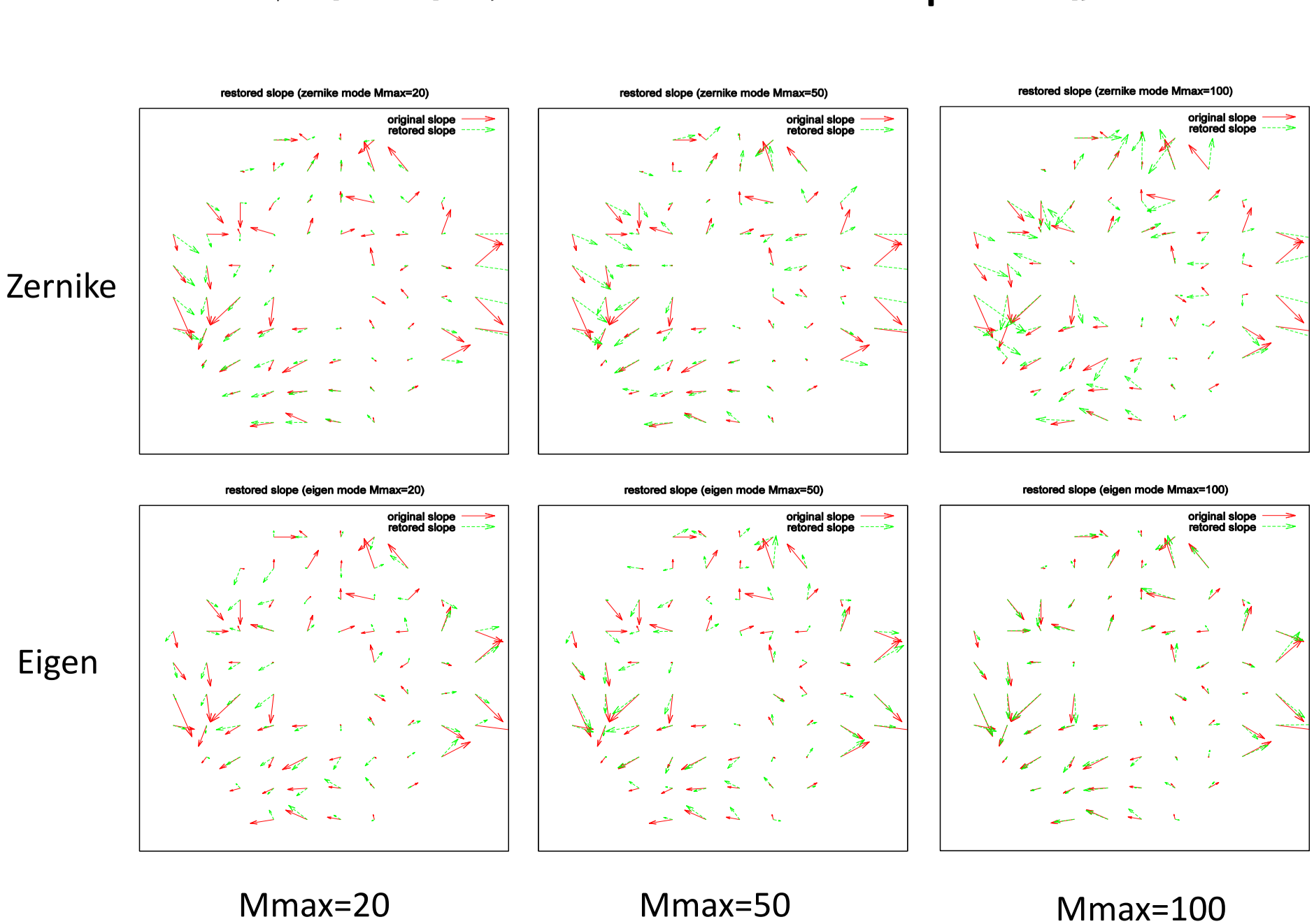
## 3. Result

### ■Eigen Modeの例



RAVENの副開口部のマスク形状に対応したモード形状の比較  
 上列: Zernike Slope  
 下列: 解析によって得られたEigen Mode

### ■モード展開係数による波面Slopeの復元



左図: 観測された大気揺らぎの波面Slopeをある上限のモード数(Mmax)まで展開した時の波面復元の様子  
 (赤: 元波面 緑: 復元波面)  
 上図: 展開の上限モード数を1~144の間で変化させた時の残差(RMS)の推移

• 波面slopeの相関行列の解析によって左に示した例の様な144個のモード(Eigen Mode)が得られる。これらは関数列として正規直交系を成している。

• また、モード分解の精度を検証するために、作成したEigen Modeを用いて波面slopeをモード分解し、得られた係数から元波面の復元を行った。その結果、Zernike slopeではモード数を増やしても元波面を復元できないのに対し、Eigen Modeではモード数を上げるにつれて元波面との残差が改善されることが確認できた  
 この実験結果から、Eigen Modeが波面slopeのモード分解に適しているモード系であることが分かった。

## 4. Conclusion & Future Work

今回の解析では、すばる望遠鏡を使って行われたRAVENのon-sky観測で得られた波面センサーのデータから、経験的直交関数展開の手法を用いた大気揺らぎのモード分解の手法を確立することができた。今後は波面再構成とも組み合わせ、位相差情報など性能評価に結びつくような量に変換することによって、得られたモードの特徴をより詳細に調べられるようにしようと考えている。また、大気揺らぎモデルから理論的に計算される波面slopeから同様のモードを構成した時の違いなども考察し、本手法の可能性について更に議論を進めていこうと考えている。