

# 広視野多天体補償光学のための トモグラフィック波面再構成の検証

東北大学大学院 理学研究科 天文学専攻 修士1年 秋山研究室

大野 良人

## 概要

補償光学は大気揺らぎを補正して、地上から望遠鏡の回折限界に近い高分解能な観測を実現するシステムであり、世界中の大型望遠鏡で使用されている。さらに現在次世代の超大型望遠鏡を見据えた新しい補償光学のひとつとして、広視野多天体補償光学(MOAO)が考えられている。このMOAOでは複数のガイド星とトモグラフィックの手法を用いることで、広視野の大気を立体的に再構成し、その情報から広視野内の複数の天体に対して同時に補償を行うシステムである。

われわれこの「トモグラフィック再構成」を開発・検証するために、計算機上でのMOAOシミュレーションと、実験室の光学系でのMOAOの再現実験を進めている。今回はシミュレーションの初期結果と実験室での複数の大気を想定した場合のトモグラフィック再構成の結果を報告する。

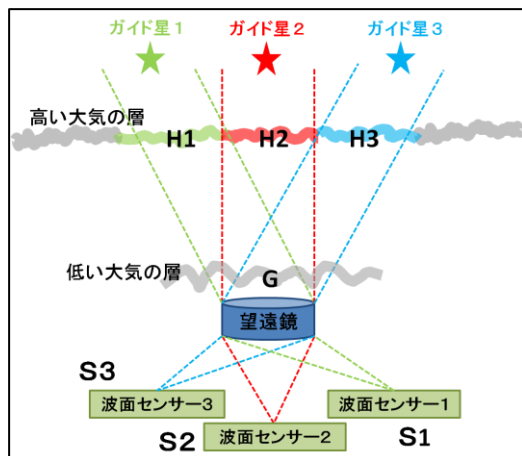
## 補償光学とは？

地上観測では、大気中の屈折率の局所的な違いにより、天体からの光の位相が歪められ最終的な像が悪くなる。これを補正するのが補償光学である。

まず、これまで補償光学について簡単に説明する。従来の補償光学は、一つのガイド星からその星からの光が通る経路の大気揺らぎを波面センサーによって測定する。その情報を用いて、最終的に補正したいターゲット天体の光を補正する。よって、従来の補償光学ではガイド星の周辺しか補正が効かず、ターゲット天体がガイド星から離れてしまうと補正ができなくなるという限界があった。

## 広視野補償光学

これに対して、広視野の補償光学は複数のガイド星を用いて、一度に複数の方向の



の大気揺らぎを測定する。この情報を用いて大気の立体的構造を再構成する。例えば、左の図1のような、大気が2層であるような簡単な場合を考える。各ガイド星からの光は高い大気層の影響と、低い大気層の影響をうける。各波面センサーの測定値をSとすると次のよう式で書ける。

$$S1 = G + H1, S2 = G + H2, S3 = G + H3$$

この式の最適解を求めることで各高さの層を再構成できる。このように複数の方向

の情報から、立体的な構造を再構成する手法をトモグラフィと呼ぶで、ここではトモグラフィック再構成と呼ぶ。このように求めた情報を用いることで広視野の大気揺らぎを補正し、広視野補償光学を達成する。

広視野補償光学には、いくつかの種類がある。地上付近の大気揺らぎのみを補正するものをGROUND LAYER AO (GLAO)、視野全体に対してすべての大気揺らぎを補正するものをMULTI CONJUGATE AO (MCAO)、視野内の複数の天体付近だけ補正するものをMULTI OBJECT AO (MOAO) などがある。それぞれメリット、デメリットがあるのだが、違いは基本的に補正の仕方であり、トモグラフィック再構成の段階では違いはそこまでないので詳細の説明は省略する。

## 研究内容

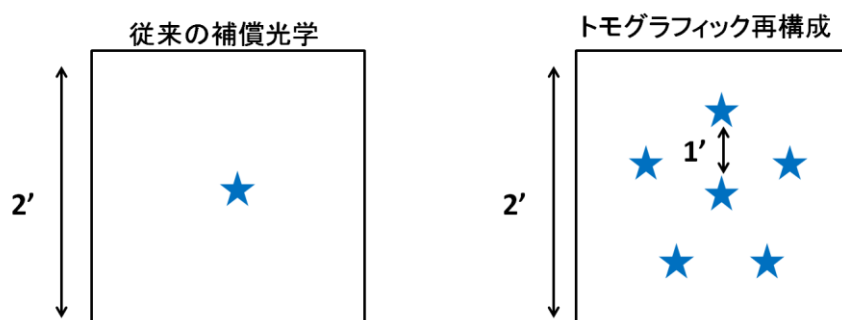
私はこの広視野補償光学に必要なトモグラフィック波面再構成を開発・検証するために以下の二つの研究を行っている。

1. 数値シミュレーションによるトモグラフィック波面再構成アルゴリズムの開発
2. 実験室でのMOAOシステムの実証

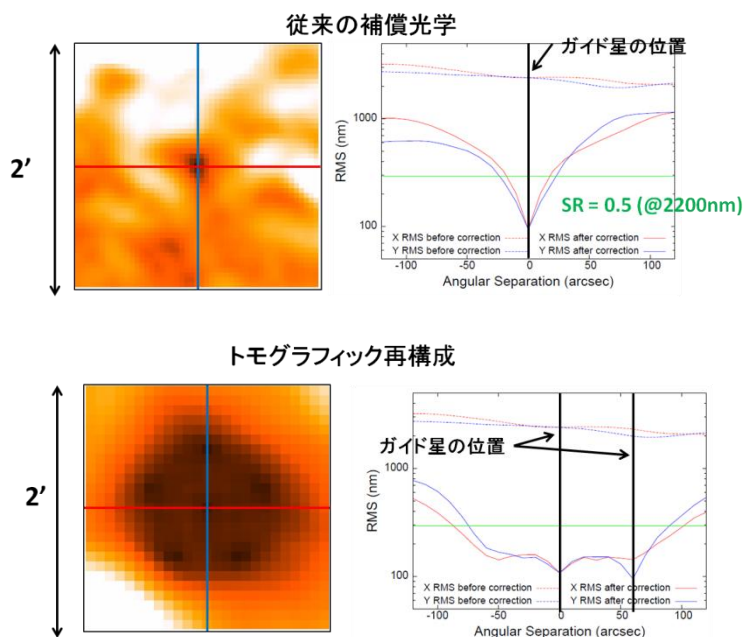
1. 数値シミュレーションによるトモグラフィック波面再構成アルゴリズムの開発

トモグラフィック波面再構成は複数のガイド星の情報を用いるため、従来の補償光学よりも計算量が増加し、さらに計算誤差も増加する。しかし、リアルタイムで補償を行うためにはこの計算を正確かつ、大気の変化スピードよりも高速で繰り返す必要がある。速度はだいたい **1kHz** あれば十分であると言われており、トモグラフィック再構成を実現する上でネックとなっている。

今回は、シミュレーションの初期結果について報告する。今回はまず従来の補償光学とトモグラフィック再構成を用いた場合による補正結果の違いを比較する。それぞれの場合で用いたガイド星の配置は図 2 のとおりである。



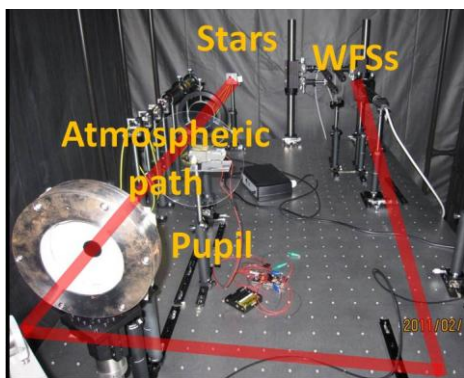
想定した口径は **8m** で、大気揺らぎのモデルはマウナケア山頂の平均的な値を使用した。



上の図が結果である。それぞれ左のコントラストの図は、補正後の波面誤差がどれだけ残っているかを示したもので黒い方が波面誤差が小さい。従来の補償光学でガイド星の周辺の狭い領域でしか補正が効いていないのに対して、トモグラフィック波面再構成を使用した場合、ガイド星周辺だけでなくその周りの広い範囲で補正が効いていることがわかる。右のグラフは、コントラスト上の赤と青線での断面図を表して

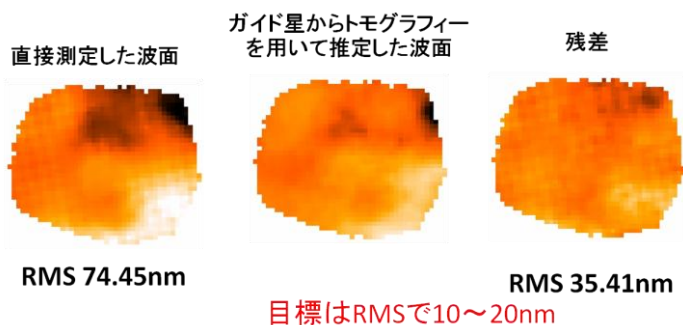
いる。これも同じようにトモグラフィック波面再構成を用いた方が広い範囲で補正が行われていることがわかる。しかし、これは非常に波面の測定誤差などが含まれていない理想的な場合の計算であるので、今後はより現実的な場合で考えていきたい。また、計算速度についてはまったく考慮していないので GPGPU による並列計算などを使用して、高速化も図っていきたい。

## 2. 実験室での MOAO システムの実証



実際の装置を作るときは、これまで述べたような計算による誤差のほかに、光学系のアライメントや実際に可変鏡で補正したときの誤差なども考慮する必要がある。それらを定量的に評価するため、我々は1の数値シミュレーションと合わせて、実際に光学系を組んでトモグラフィック波面再構成の実証実験を行っている。実験室の光学系は左の図のようになっている。まず、3つのガイド星と一つのターゲット天体を再現した4つの光源を用意する。最終的に3つのガイド星から推定したターゲット天体の波面と、直接測定したターゲット天体の波面を比較することでトモグラフィック波面推定の精度を評価する。大気揺らぎを再現するものとしては、現在プラスチック板と透過型位相変調器を使用している。しかし、これだけでは実際の大気揺らぎを再現するには不十分であるので、今後より現実的な大気揺らぎを再現するものを用意したい。

今回はこの二つでのトモグラフィック波面再構成のテストを行った。結果は以下の図である。



トモグラフィック波面再構成によって、有る程度は推定できてあり RMS も下がっている。しかし、この光学系での精度は RMS10~20nm までいけることがわかっているのでそれに比べると不十分である。この補正誤差の理由としては、アルゴリズムのミス、アライメントの調整ミスがあげられるので再度計測したい。

## 今後

実験に関しては、まずは現状の光学系でしっかり誤差評価をしていきたい。さらにシミュレーションの準備が大方終わっているので、様々なパターンでシミュレーションしつつよりよいアルゴリズムの改善も行っていきたい。