

# 実験室における広視野多天体補償光学 の評価、および開発

東北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

地上の大型望遠鏡は地上の大型望遠鏡は大気の影響により、その性能を100%使用できていない。その大気の影響を補正し、大型望遠鏡の性能を引き出すのが補償光学(Adaptive Optics, AO)である。現在、世界の大型望遠鏡でこのAOシステムが活躍している。しかし、従来のAOシステムは一度に補正できる範囲が非常に狭い。次世代のAOシステムとして、より広視野なAOシステムが検討されている。本発表では、従来のAOと次世代のAOについて説明する。さらに私が今研究している、広視野補償光学のための基礎実験について報告する。

## 地上での観測

地上での観測の良し悪しを決めるものとしておもに①回折限界、②シーイングのふたつがある。

### 1. 回折限界

これは望遠鏡自体の理論的な解像力を表し、次のような式で書ける。

$$\theta_{\text{lim}} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

ここで $\theta_{\text{lim}}$ は回折限界を角度で表わしたものである。 $\lambda$ は観測波長、 $D$ は望遠鏡の口径の直

径である。この式より、理論的には望遠鏡が大型であるほど回折限界は小さくなる、つまりより細かいものが見えるということになる。

### 2. シーイング

これは大気の影響によって星像がぼやけてどのくらいの大きさになるかを表すもので、望遠鏡の立地条件による。例えば、乾燥した場所や高度が高く空気が薄い場所などではこの影響は小さい、つまりシーイングは小さくなる。

例として、ハワイ、マウナケアにある 8.2m すばる望遠鏡と仙台にある東北大学 51cm 望遠鏡で K バンド( $\lambda = 2.2\mu\text{m}$ )で観測した場合を考えてみる。

	口径 (m)	回折限界 (arcsec)	シーイング (arcsec)
すばる	8.2	0.07	0.4
東北大	0.51	1.09	1

まず東北大学ではシーイングと回折限界がほぼ等しいので、51cm 望遠鏡はその性能を発揮していると言える。マウナケアの場合、4000m 級の高い山の上なのでシーイングは仙台に比べて非常に良い。しかし、すばる望遠鏡の回折限界を満たすほどではない。つまり、すばる望遠鏡は回折限界 0.07arcsec という高性能を持ちながら、シーイングの影響でそれを発揮できていないことになる。

この解決策としては、ひとつに宇宙での観測がある。宇宙空間では大気は存在しないのももちろん大気の影響を無い。しかし、宇宙空間に望遠鏡を打ち上げることは技術面、資金面ともに難しく、また打ち上げた後も修理やアップデートしにくいという問題もある。

この大気の影響を地上で補正し、望遠鏡の性能を 100% 発揮させるのが補償光学(Adaptive Optics)である。

### 従来の補償光学

天体は地球から非常に遠いため、天体からの光は並行光かつ等位相、つまり平らな波面で地球に届く。しかし、大気の影響(局所的な屈折率の違い)により天体の光は局所的に位相が変化し歪められ、望遠鏡に届くころには波面は歪めんでしまっている。この歪められた光が望遠鏡で集光されることによって、天体の像がぼやけ、観測の精度が落ちるのである。従来の補償光学では、図 1 のような仕組みになっている。大気の情報を得るために、まずガイドスター(Guide Star, GS)と呼ばれる星

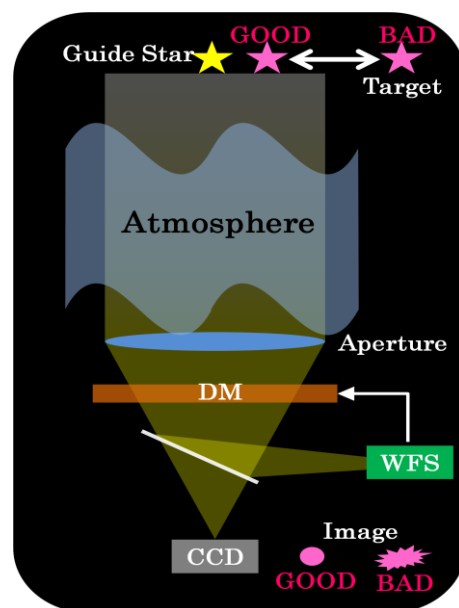


図 1

を観測する。このガイドスターは大気の情報をしっかり得られるようにある程度明るくなくてはならないので、最終的な目標天体とは別の近くの明るい星、もしくはレーザーで人工的に作られた星が選ばれる。ガイドスターからの光は歪められ、その波面は平らではなくなる。この歪んだ波面を波面センサー(WaveFront Sensor, WFS)で測定する。次に、この波面センサーの情報から反射したときにガイドスターの光の波面が平らになるような形に変形鏡(Deformable Mirror, DM)の形を変える。この後に来た光は、この可変形で一回反射されることにより平らな波面になる、つまり大気の影響を除いたことになる。ガイドスターとは別の目標天体がガイドスターの近くにあれば、これらからの光は大気中の同じ経路を通ってくるので同じような揺らぎ方をするはずである。よって、先程変形させた可変形鏡で目標天体の光を反射させれば、大気の影響を補正した観測が可能となる。

また、大気は常に時間変化していることも考慮しなければならない。大気が変化した場合変形した可変形鏡で反射した光の波面は、その大気の変化分だけ歪んでセンサーで感知される。よって、その分だけ可変形鏡の面を変化させる。この流れ、観測→波面センサー→可変形鏡→観測→・・・を

波面の変化より早く繰り返すことで時間変化する大気の影響をリアルタイムで補正する。(図2)

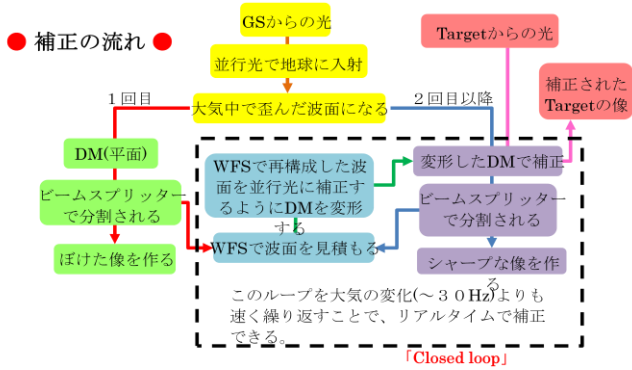


図 2

従来の補償光学のデメリットとして、ガイドスターから一定の範囲しか一度に補正できないことがあげられる。目標天体がガイドスターから遠い場合、それぞれの光は大気中の違う経路を通るためガイドスターからの情報による補正が、目標天体に適用できなくなってしまう。この補正が効く範囲は可視で数 arcsec、赤外で数 10arcsec と非常に限られた範囲である。

### 広視野多天体補償光学

従来の補償光学の限られた補正範囲という問題を解決するために、現在より広範囲を一度に補正できるような新しい補償光学のシステムが検討されている。そのうちのひとつとして広視野多天体補償光学(Multi Object AO, MOAO)がある。これは複数のガイドスターを用いることで広い補正範囲を確保し、その領域内の複数の天体に対して補正を行うというものである。

例としてガイドスターが3つの場合について、基本的なシステムは図3、図4に示してある。まず複数のガイドスターからの情報をそれぞれに対応する波面センサーで測定する。このとき、それぞれのガイドスターからの光は大気中のそれぞれの経路の大気の情報を持ってくる。この複数の経路の大気の情報と、理論的な大気モデルから複数の高さでの大気情報を計算する。今回の図は

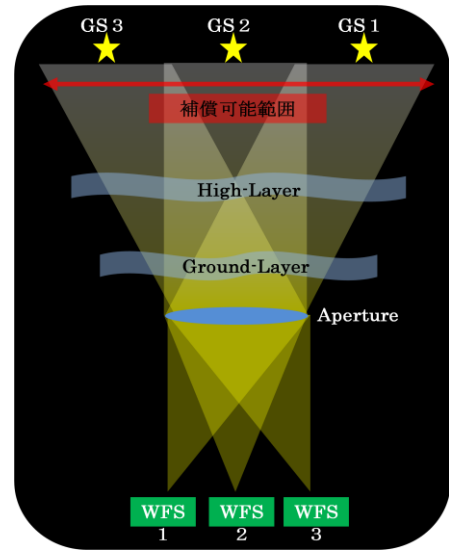


図 3

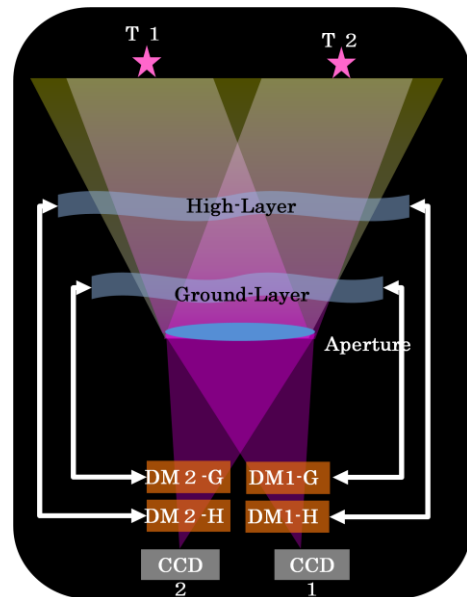


図 4

低い層(Ground Layer)と高い層(High Layer)の2層を計算した場合である。この2層の情報を使うことで広視野の補正範囲を確保できる。実際に確保できる補正範囲は数 arcmin と考えられている。

実際に補正するときは範囲全体ではなく、天体ごとに行う。範囲内から補正したい天体を選び、それらの数だけ補正用の小さな AO システムを用意して、天体ごとに独立した補正を行う。このとき大気情報は先程計算した2層内の、天体の光が通る経路での大気情報を用いる。補正するときの変形鏡も大気層の数だけ用意し、それぞ

れの大気の影響は、対応した可変形鏡で補正する。

MOAO のメリットとしては、天体ごとに小さな補正用 AO で補正するので、装置が大規模にならずより広視野を確保できるという点である。MOAO は面分光や多天体分光などで力を発揮すると考えられている。

MOAO 以外の広視野補償光学システムとしては MCAO(Multi Conjugate AO)、GLAO(Ground Layer)などがある。基本的なシステムは MOAO と同じだが、MCAO は確保した範囲全体を一度に補正することができる。その分、装置が大規模になる可能性があるが、銀河などの広がった天体を補正する場合は非常に効果的である。GLAO は MCAO のように視野全体を補正するのだが、用いる大気の影響は低高度の方が支配的であるので、MCAO より精度は落ちるが、それなりに補正できる。また、一層だけの補正でいいので MCAO よりもより広い視野の補正が期待できる。

## 実験内容

### 1. 全体像

MOAO のための実験として、まずは実験室において MOAO システムを再現することを考えている。今回は特に、波面センサーの測定から光の波面を再構成することを行った。可変形鏡をもちいての補正は今回は行っていない。図 5 が今回の実験室の光学系の実際の写真で、図 6 がその光学系の略図となっている。

### 2. 光源

この実験では 3 つのガイドスターと一つのターゲット天体を仮定している(図 6 では簡単のため 3 つしか表記していない)。レーザーの光を 4 つのシングルモードファイバーに分け、図 7 のような配置で出力することで 4 つの光

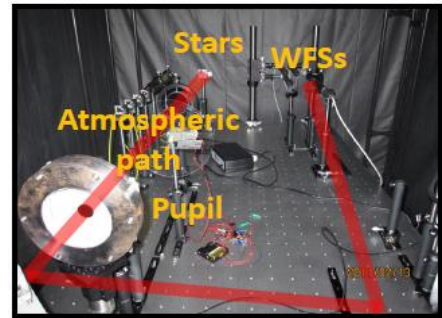


図 5

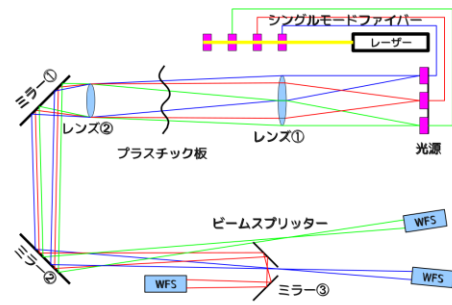


図 6

源を再現している。4 つの丸い穴がそれぞれ光源であり、真ん中の光源がターゲット天体、まわりの 3 つがガイドスターとする。

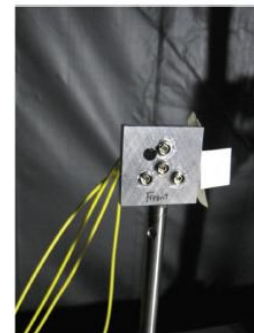


図 7

### 3. 大気揺らぎ

それぞれの天体からの光は並行光で望遠鏡に届くため、図 6 のレンズ①とレンズ②が大気中にあたり、レンズ②が望遠鏡の口径となる。大気による揺らぎは、その経路中にプラスチック板を置くことで再現する。今回は大気の影響は 1 つの場合で実験する。このプラスチック板を口径から 100mm、350mm、600mm の場所に置いた 3 つのパターンを行った。そ

それぞれのパターンで、プラスチック板上でのそれぞれの光源からの光の経路は図8のように重なる。一番太い実線がターゲットからの光の経路である。

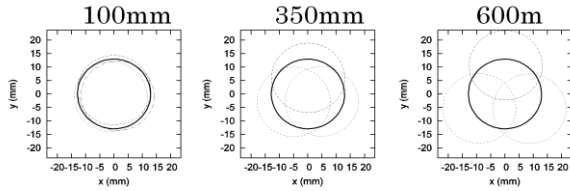


図 8

#### 4. 波面センサー

それぞれの光源からの光の波面は波面センサーで測定される。ここで波面センサーは Shack Hartmann Sensor(SHS)を用いた。SHSには小さなレンズを並べたマイクロレンズアレイが付いており、入ってきた光はマイクロレンズアレイのそれぞれのレンズによって集光し、図9のようなスポットが並んだイメージを作る。入射した光の波面が平らかな場合は図9のように点が綺麗に並ぶが、波面が歪んでいる場合はそれぞれのレンズに入射する光に傾きが変化するため図10のようにスポットの配置が平らかな場合に比べて動く。このスポットの動きを測定することで入射してきた光の波面の形状を再構成する。

平らかな波面

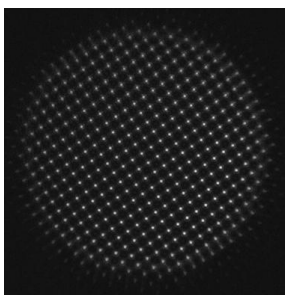


図 9

歪んだ波面

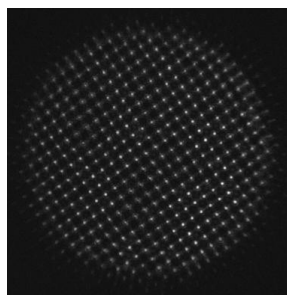


図 10

#### 5. 結果

今実験では測定した3つのガイドスターの光の波面から、ターゲットの光の波面を見積もることが目標となる。評価方法としては、3つのガイドスターから見積もったターゲットの波面と、直接測定したターゲットの波面を比較する。結果は次のページで示す。Mesuareが直接測定したターゲットの波面、Estimateが3つのガイドスターから見積もったターゲットの波面、Differenceがその差である。全体的な傾きは再現することができているが、細かい揺らぎは再現できていない。また、口径からの距離が離れるにつれて再現性は悪くなっているように感じる。原因としては光学系の問題、実験精度、アルゴリズムの問題が考えられるが、現在調査中である。

#### 6. これから

現在、様々な波面再構成の方法について勉強中である。また、実験もより精度の高い装置を導入したので結果の向上が期待される。今後はより現実に近い設定のなども考慮にいれながら実験を進めていきたい。具体的には大気層を複数にする、大気の揺らぎを時間変化させるなどを考えている。また、広視野補償光学で考えられるサイエンスについても検討していきたい。

# 実験結果

