

# 補償光学による天体像の改善

高遠徳尚(基礎科学特別研究員)、山口一郎、家 正則\*

理化学研究所 光工学研究室

〒 351-01 埼玉県和光市広沢 2 - 1 Tel. 048-462-1111

\* 国立天文台 光学赤外線天文学研究系

〒 181 東京都三鷹市大沢 2 - 2 1 - 1 Tel. 0422-34-3703

## Prototype of Adaptive Optics

Naruhisa Takato, Ichirou Yamaguchi, Masanori Iye\*

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama 351-01 Tel. 048-462-1111

\* National Astronomical Observatory

Osawa 2-21-1, Mitaka-shi, Tokyo 181 Tel. 0422-34-3703

We have been developing an adaptive optics to compensate distorted wavefront in real time for astronomical use. Performances of the developed image stabilizer and deformable mirror are reported. Also reported is error estimation of Shack-Hartmann wavefront sensing.

### 1. 補償光学の必要性

現在、国立天文台ではハワイ・マウナケア山頂(高度4200m)に口径8.2mの可視・近赤外線天体望遠鏡を建設中である(通称「すばる望遠鏡」)。マウナケア山頂は、大気条件が最も観測に適しているため選ばれた場所であるが、それでも大気の揺らぎは結像性能に大きく影響を与える。

天体などからの光が大気中を伝搬すると、大気の屈折率のゆらぎ(主に温度ゆらぎ)によって、その波面が乱される。口径8mの望遠鏡の場合では、分解能は回折限界の1/10以下になってしまう。分解能が低下すると天体の微細な構造が観測できなくなるばかりでなく、像がぼやけるので輝度も低下し、暗い天体が観測できなくなってしまう。補償光学はこのような乱された波面を、実時間で元の正しい波面に直すシステムである。

我々は図1のような装置を試作中である。シャック・ハルトマン法などの波面測定器により参照光源(星など)からの波面を測定し、その情報をもとに参照光が平面波になるようにtip-tilt鏡(TM)・可変形鏡(DM)を駆動する。ここではtip-tilt鏡だけを使って、実際の星の像を補償した結果と、試作した可変形鏡の特性について述べる。またシャック・ハルトマン法で波面を測定したときの測定誤差についても簡単に報告する。

### 2. イメージ・スタビライザによる天体像の補償

大気による波面誤差のうち、波面の傾き(tip-tilt)成分が最も大きい。そのため望遠鏡の口径が大気のコヒーレント長( $r_0$ )に比べてあまり大きくない場合には、この成分を

補償しただけでも像の改善が期待できる。そこで、ピエゾ・アクチュエータで傾きが変えられる鏡を使ったイメージ・スタビライザを製作し、口径1.9mの望遠鏡（国立天文台・岡山）に取り付けて実際の星の像を補償する実験を行った。波面センサには4分割フォトダイオードを使い、その差信号を制御に用いた。図2に補償前と補償後の星像、図3に radial profile を示す（図2とは別の星）。半値幅で76%、ピーク値で1.4倍に改善されている。この改善率はそのときの大気の手0から決まる理論値とほぼ等しく、目的が達成されている。また図4は4分割フォトダイオードの差信号のパワースペクトルで、約150Hzまで補償できていることがわかる。

### 3. 可変形鏡の試作

波面誤差の高次の項を補償するための鏡として、可変形鏡を試作した（図5）。直径55mm、厚さ0.5mmの合成石英製の鏡を37本のピエゾ・アクチュエータ（トーキン NLA5x5x18）で押し引きして、任意の形状にする事ができるものである。薄鏡とアクチュエータとは磁石によって取り付けられており、薄鏡をアクチュエータから取り外すことが可能である。そのためアクチュエータが故障したときでも、それだけを交換すれば良くすべてを作り直す必要はない（実際には、一度取り外した鏡を再び取り付けると、どうしても鏡面精度が悪くなるので、鏡も取り替えることになる）。

アクチュエータは8mm間隔で正三角形格子状に配列されている。ストロークは14 $\mu$ mあるが、隣り合うアクチュエータ間での高さの差は、薄鏡の引張り強度で制限されていて、最大約5 $\mu$ mである。

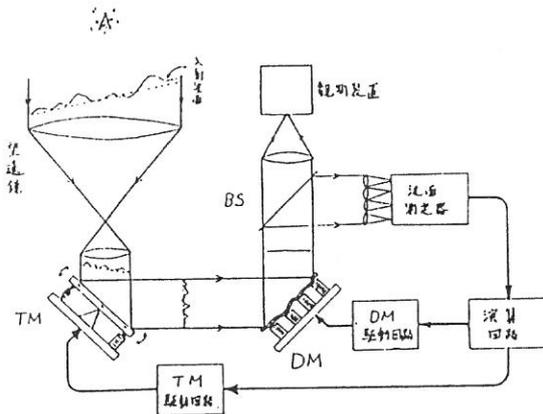


図1 補償光学系の概念図

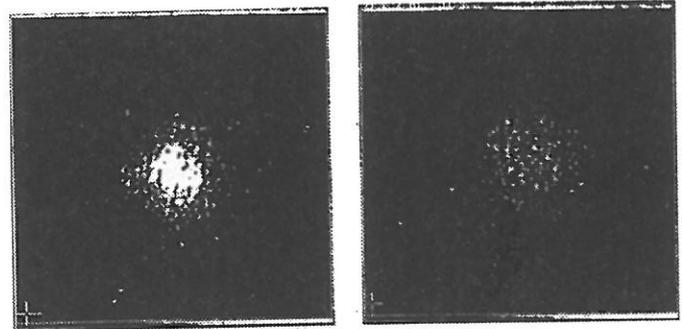


図2 イメージ・スタビライザによる星像の改善 I  
(左：補償前 右：補償後)

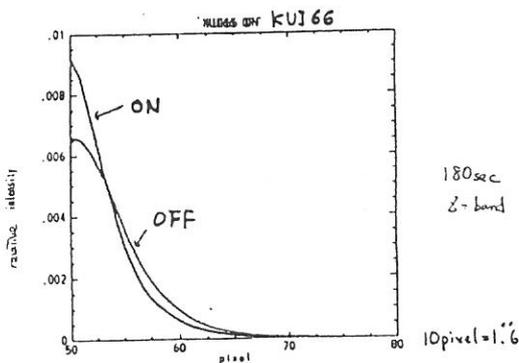


図3 イメージ・スタビライザによる星像の改善 II

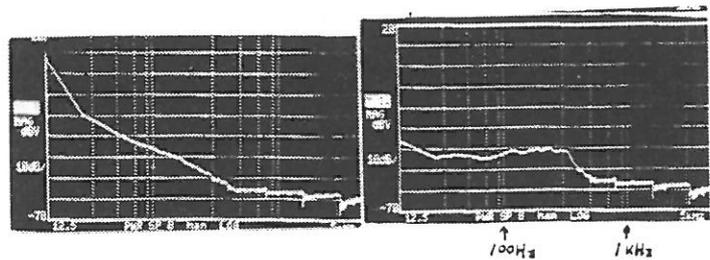


図4 イメージ・スタビライザの周波数特性  
(左：補償前 右：補償後)

図6にアクチュエーターに電圧をかける前の薄鏡の表面形状を示す干渉縞と、これを平面になるようにアクチュエーターを動かした後の干渉縞を示す。表面高低のP-V値およびrms値は、補正をかける前の $3.1\lambda$ 、 $0.7\lambda$ がそれぞれ $0.44\lambda$ 、 $0.08\lambda$ に改善されている( $\lambda = 0.63\mu\text{m}$ )。

一つのアクチュエーターを変位させたときの、鏡の応答変形(influence function)を図7に示す。隣接するアクチュエーターの位置までは鏡面に当然変形の影響が出るが、それより外側にはほとんど影響していないことがわかる。また可変形鏡の周波数特性を図8にしめす。約1kHzの帯域があるが、この特性は piezo の電気容量とドライバーの電流容量で決まっており、鏡の機械的な帯域ではない。

#### 4. シャック・ハルトマン波面センサーでの波面検出誤差

波面センサーは、補償光学系の中でも最も重要な構成要素である。天体像を補償する場合、参照光源として使える星が暗いものまで使えなければ、実用的でない。また時間的には、1kHz程度の周波数までは補償しなければ、十分な効果が得られない。したがって、暗い光源に対して精度良く高速で波面形状を測定できるセンサーが必要である。この条件を満たす波面センサーを現在設計中である。ここでは波面検出にシャック・ハルトマン法を用いた場合に、どのくらいの検出精度が得られるかをシミュレートした。

シャック・ハルトマン法とは、図9のように開口の像の位置にマイクロレンズ・アレイを置き開口を小開口に分割し、それぞれの小開口によってできる参照光源の像(ハルトマン・スポット)の位置(小開口の位置での波面の傾きに相当する)を測定して、波面形状を求める方法である。このスポット位置をベクトル $g$ で表し、乱された波面 $W$ を Zernike

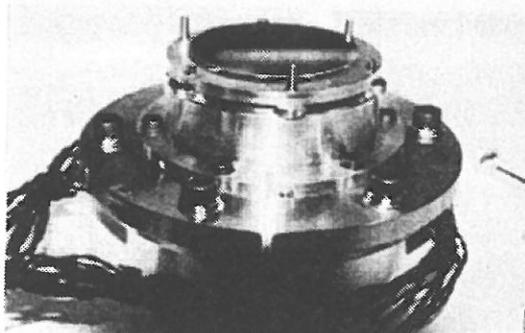


図5 可変形鏡の外観

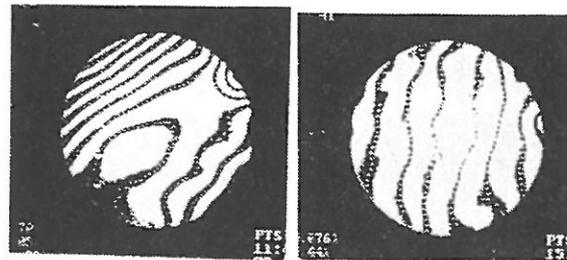


図6 薄鏡の鏡面精度の改善  
(左:補正前 右:補正後)

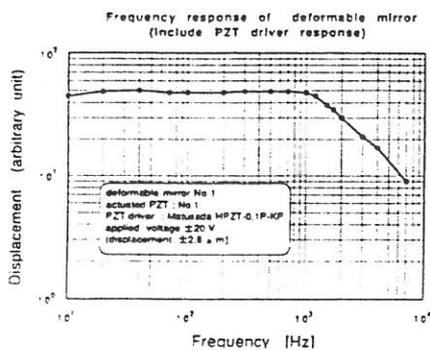


図8 可変形鏡の周波数特性

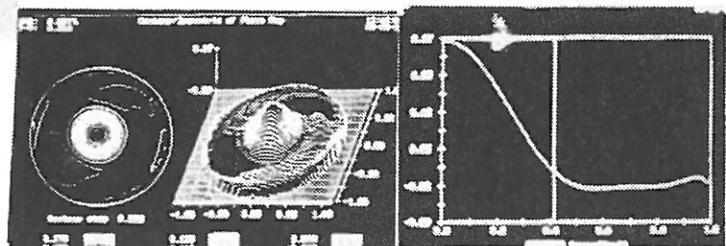


図7 可変形鏡の応答変形 (隣りのアクチュエーター)

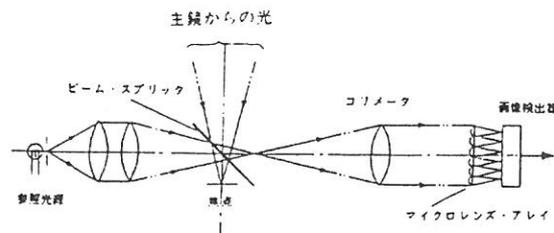


図9 シャック・ハルトマン法の測定原理  
(国立天文台大型光学赤外線望遠鏡計画説明書より)

多項式で表したときの係数を  $a$ 、測定された波面  $W'$  を有限の項数で当てはめた時のそれを  $a'$  とすれば、

$$\begin{aligned} a' &= A(g+n) \\ &= AGa + An \end{aligned}$$

ここで  $A$ 、 $G$ 、 $n$  はそれぞれスポット位置から波面を求める行列とマイクロレンズアレイの動きを表す行列、スポット位置のノイズを表すベクトルである。これより波面の測定誤差  $E$  は  $T = AG$  とすると、

$$\begin{aligned} E &= \langle \iint (W - W')^2 d^2x / \iint d^2x \rangle \\ &= \text{Tr}(\langle aa^t \rangle + \langle a'a'^t \rangle - 2 \langle aa'^t \rangle) \\ &= \text{Tr}(\langle aa^t \rangle + T \langle aa^t \rangle T^t - 2 \langle aa^t \rangle T^t + \sigma_g^2 AA^t) \end{aligned}$$

ここで  $n$  の分散 ( $\sigma_g$ ) は皆等しく互いに独立とした。 $\langle \dots \rangle$  はアンサンブル平均、 $\text{Tr}$  は行列のトレースを表す。大気が Kolmogorov 乱流の場合  $\langle aa^t \rangle$  は計算できるので、それを使えば測定誤差  $E$  が計算できる。

図 10 は波面の当てはめに使った項数と、波面誤差の関係を様々な小開口の数にたいして図示したものである。小開口の数が多いほど高次の項まで再現でき誤差が小さくなるが、度を越して高次まで得ようとする、かえって誤差が大きくなってしまふことがわかる。得たい項数の約 4 倍の小開口数を取れば、最も効率が良くなることがわかる。またスポット位置の測定誤差が結果にどの程度影響するかを示したのが、図 11 である。この図より、すばる望遠鏡の場合に近赤外線で十分な補償効果を得るためには小開口位置での波面の傾きを  $0.01$  以下で測定する必要があることがわかる。

小開口の数が多いほど測定精度は高いが、参照光源はそのぶん明るくしなければならない。したがって、これらの結果を使って最適な小開口の数を決めていく必要がある。

#### 4. まとめ

天体観測のための補償光学系を開発中である。現在までのところ、波面の傾き成分を補償する装置は実用化できた。さらに高次の波面誤差を直すための 37 アクチュエーターの可変形鏡を試作中である。今後は高速・高精度の波面センサーを開発して、全ての構成要素を組み合わせ、補償光学系を実用化したい。

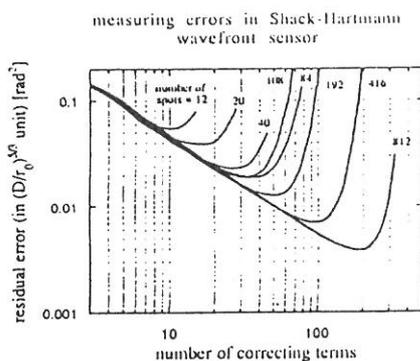


図 10 波面測定誤差と測定項数の関係

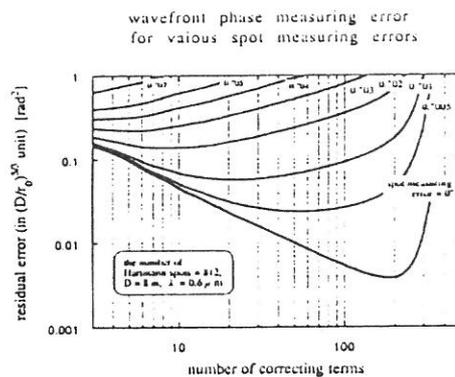


図 11 波面測定誤差へのスポット位置測定誤差の影響