

すばる望遠鏡の補償光学

高 遠 徳 尚

Adaptive Optics System for Subaru Telescope

Naruhisa TAKATO

Adaptive optics is a feedback system which compensates images through turbulent medium. Adaptive optics system for Subaru Telescope on Mt. Mauna Kea, Hawaii is described.

Key words: adaptive optics, astronomical instruments

子供のころ、親に買ってもらった口径6 cmの小さな望遠鏡で星を見たら、ポツンとした星のまわりを回折リングが取り囲んでいて、妙に感動したのを覚えている。大きくなって口径50 cmの望遠鏡を覗く機会があり、さぞよく見えるだろうと期待したのだが、「あれ〜」とがっかりした記憶がある。木星などは眩しいくらい明るいのだが、像はぼけぼけで解像度は小さな望遠鏡と大差なかったからである。

1. 補償光学系

がっかりした原因は、地球大気の乱流にある。空気の温度むらが屈折率むらを引き起こし、結像性能が落ちるのである^{1,2)}。大気ゆらぎが結像性能に及ぼす影響を考えると、重要となるパラメーターが2つある。そこを伝搬した光波面の位相のコヒーレント長 r_0 (Friedパラメーター) と、波面変化のタイムスケール τ_0 である。Friedパラメーター r_0 は大気(長時間露出) MTF (modulation transfer function) の体積が、大気がないときの口径 r_0 の無収差望遠鏡の MTF の体積と等しくなるように定義されている(要するに、口径を r_0 より大きくしても解像度は上がらない)。

r_0 の値は日本では夏場のよいときでも10 cm程度、ハワイ島のマウナケア山頂では20~30 cmである(可視光で)。口径8 mの大望遠鏡を作っても、そのままでは口径30 cmの望遠鏡と解像度の点では同じになってしまう。大口径望遠鏡が本来もつ解像力を得るためには、大気ゆらぎを実時

間で補償するシステム(補償光学系, adaptive optics; AO)が必要である。

大気の乱流自体は(あまり大きなスケールを考えなければ)べき乗スペクトルなので、乱流自体に典型的なスケールはなく、そこを伝搬した光波面にも特徴的スケールはないが、結像性能は波面ゆらぎが光の波長の何倍なのかで決まるので、波長に応じたスケール r_0 が出てくる。したがって r_0 は波長 λ の関数で、コルモゴロフ乱流の場合 $\lambda^{6/5}$ に比例する。

時間変化のタイムスケール τ_0 は、例えば空間スケール r_0 で平均した波面の自己相関が $1/e$ になる時間差として定義される。マウナケア山頂では1 ms程度であるが、ジェット気流下にある日本の冬ではそれよりずっと短い。

2. 補償光学系の構成

AOシステムについての幅広い紹介は、すでに単行本が出版されているので、それを参考にしていただきたい^{2,3)}。ここでは国立天文台の高見を中心に開発したシステム^{4,5)}が採用した方式について述べる[†]。

筆者らのシステムでは、最適化波長を $2.2 \mu\text{m}$ 、補正素子数は36とした。1素子あたりの大きさが、望遠鏡の主鏡上で約1.2 mとなり、マウナケア山での大気が良いときの r_0 ($2.2 \mu\text{m}$ で)に相当する。AOシステムは大きく3つの部分よりなる(図1, 図2)。波面を直す部分、直した波面を計測する部分、それらを制御する部分である。

国立天文台光学赤外線天文学・観測システム研究系(〒181-8588 三鷹市大沢2-21-1) E-mail: takato@optik.mtk.nao.ac.jp

[†]http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru_ao/

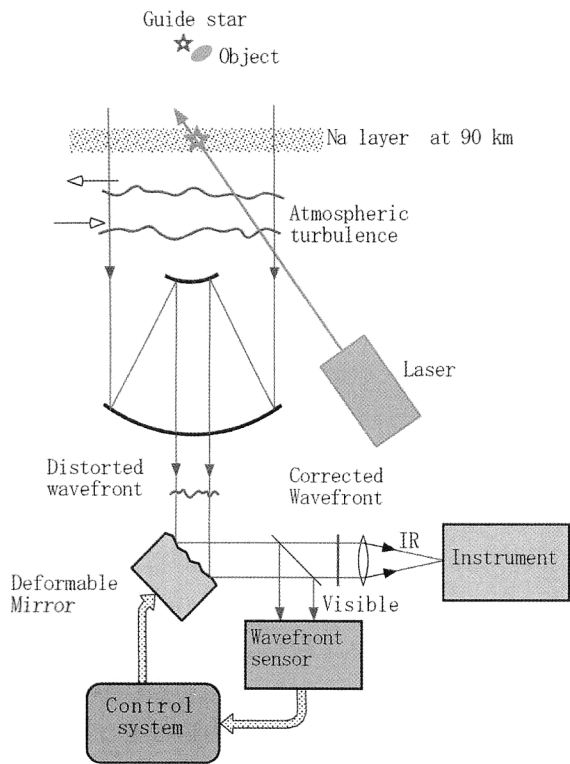


図1 補償光学系の原理図⁵⁾。

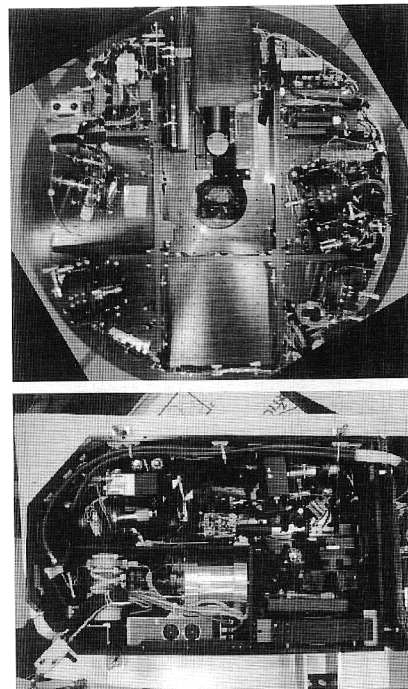


図2 すばる望遠鏡用補償光学系。(上) 可変形鏡を含む層 (直径1.6 m)、(下) 波面センサー。

2.1 波面センサー

筆者らは少素子数の場合に適した、曲率センサー方式を採用している。曲率センサーは波面のローカルな曲率を測定するもので、瞳位置の前後での光強度差が波面の曲率(2階微分)に比例することを利用している。

曲率から波面を求める積分の境界条件に相当するものは、瞳前後像の「形」である。すなわち光センサーの最外周素子の光強度差は、その場所での波面のチルト(1階微分)を表している。

瞳の前後の光強度は時分割でサンプルしている。瞳の前後像を作るには、ペリクルミラーを利用した振動鏡を使う。パイプの一端にペリクルミラーを張り、もう一端からスピーカーで音をならすと、ペリクルミラーはパイプの長さで決まる気柱の共振周波数近辺で大きく凹凸状に振動する。この鏡を焦点位置に置けば、瞳像を光軸方向に前後させることができる。振動周波数は約2 kHzに設定してある。

瞳面上にはマイクロレンズ・アレイを設置して、ローカルな光強度を測定する。マイクロレンズ・アレイは6-11-19分割の3リング構造をしたプラスチック・モールドレンズで、ダイヤモンドターニングで金型から製作した。マイクロレンズで集められた光は、36本の光ファイバーでアバラシ・フォトダイオード(APD)に送られ、振動鏡の振動

と同期して光子計数される。

2.2 可変形鏡

波面を直す素子にはバイモルフ鏡を使用している。バイモルフ鏡は板厚方向にポーリングした2枚の piezoelectric 板を、ポーリング方向を向かい合わせにして、間に電極を挟んだものである。piezoelectric 板の一方の片面はレプリカ鏡になっている。電極に電圧を印加するとバイメタルと同じ原理で、その部分だけがローカルに曲率をもつ。

使用したバイモルフ鏡はCILAS社に特注したもので、光が当たる部分の有効径が $\phi 60$ mm、全体の直径約 $\phi 150$ mm、厚さ2 mmほどである。

2.3 制御方法

AOシステムは多入力・多出力(36入力36出力)系であるため、独立な系の集まりとして表現できるようにすることが重要である。図3は可変形鏡を駆動したときのセンサーの反応を示している(レスポンス行列)が、これができるだけ対角行列になるように系を設計する。曲率センサーとバイモルフ鏡の組み合わせは、対角性がよい。

対角性が崩れる要因には、設計で決まるマイクロレンズ・アレイと可変形鏡とのマッピング、光学素子の位置ずれ、可変形鏡のクロストークなどがある。これらが込みになったレスポンス行列から逆行列(制御行列)を計算して、モデル化誤差を吸収する。

曲率センサーでは、波面のピストン成分は測れないから

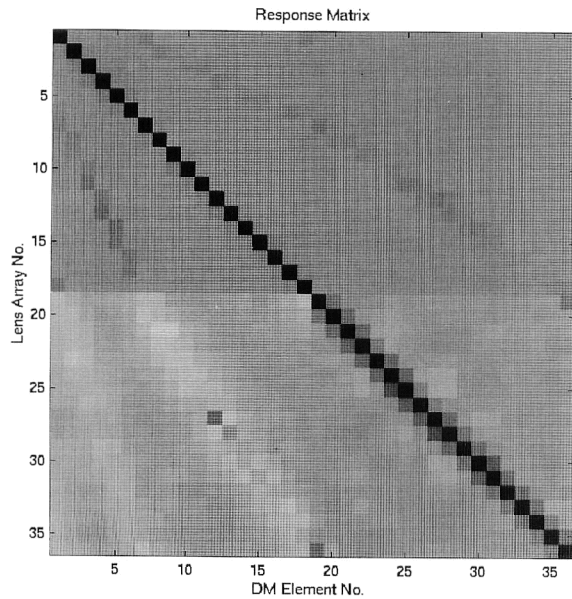


図3 レスポンス行列. 横軸が可変形鏡の電極番号, 縦軸が波面センサーの素子番号. グレイスケールは横軸の番号の電極を駆動したときの, 波面センサーのシグナルの強さを表す. 対角成分の他に, クロストークがみられる.

原理的にレスポンス行列は正則でない. 逆問題を解くときのように, 特異値分解して, ピストン・モードを落とす. 同様に位置合わせの悪さ等からくる他の「変なモード」もゼロにしなければ制御は安定しない.

3. 成果と今後

図4はAOにCIAO (coronagraphic imager with adaptive optics) とよばれる観測装置を取り付けて, すばる望遠鏡で撮られた画像である. 左のAOなしのぼけた像が, AOあり(右)では完全に2重星に分かれ, それぞれの星に回折リングができています. 口径8m本来の解像力を取り戻したことがわかる.

AOにも実用上本質的な問題が2つある. 1つは波面を測定するための明るい星が少ないことである. これはAOが使える天体が限られることを意味する. すでにぎりぎり暗いところでは, 1回の波面測定に使っている光子数が, 1素子あたり1~2個という状況で動作しており, 波面センサーの効率もすでに50%近くあるため, 大幅な改良は望めない.

もうひとつの問題は, 補正できる視野の広さが狭い(約1分角)ことである. これは大気の流れが高度の違う多層よ

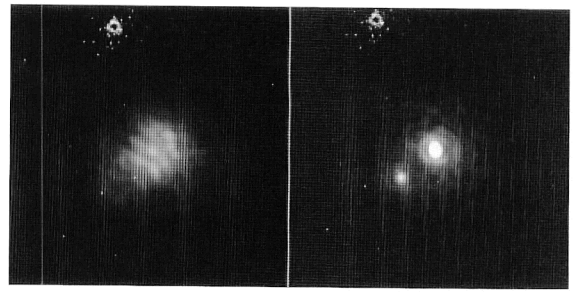


図4 AOの効果. すばる望遠鏡にAOをつけて得られた画像. (左) AOなし, (右) AOあり. 0.3"離れたそれぞれの星で, 回折リングがみえている (BS1852, 波長 $2.2\mu\text{m}$).

りなっていることに起因している.

これらの問題を解決する方法としてレーザーガイド星+多層 (multi-conjugate) AOが盛んに研究されている. 地球大気上層90kmにあるNa層をレーザー光で励起し, D線での発光を星のかわりとするれば, 任意の位置に参照星を作ることができる. さらにAOシステムを多層にして, 大気乱流の各層に対応した位置に可変形鏡を置けば, 補正できる視野を大きく拡大することが可能である. これが天体用AOシステムの究極かもしれない. ただし大気のない宇宙空間に出ることの得失を, 常に考える必要がある.

現AOシステムを製作するのに10年も掛かってしまった. 開発よりも「実用化」の側面が強い装置の製作に10年掛かり切りになるのは, 研究者としてはつらいものがある. 巨大科学に半分足を入れている天文学での装置開発体制の問題と, 研究者の幸福について考えさせられた10年でもあった.

文 献

- 1) V. I. Tatarski: *Wave Propagation in a Turbulent Medium* (McGraw-Hill, New York, 1961).
- 2) F. Roddier: *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- 3) R. K. Tyson: *Principles of Adaptive Optics* (Academic Press, London, 1991).
- 4) H. Takami, N. Takato, M. Otsubo, T. Kanzawa, Y. Kamata, K. Nakashima and M. Iye: "Adaptive optics system for cassegrain focus of Subaru 8.2 m telescope," Proc. SPIE, **3353** (1998) 500-506.
- 5) H. Takami: "Adaptive optics and laser guide star," J. Comm. Res. Lab., **46** (1999) 423-426.

(2001年3月22日受理)