

題目
TITLE波面補償光学
ADAPTIVE OPTICS氏名
NAME家正則
Masanori IYE所属
AFFILIATION

国立天文台

National Astronomical Observatory

住所
ADDRESS

東京都三鷹市大沢2-21-1

あらまし

天体からの光波面は地球大気を通過する際に大気乱流により乱される。このため地上の大型望遠鏡の解像力は1秒角程度に制限されてきた。回折限界に近い解像力を実現するため、光波面の乱れを実時間で測り修正しようというのが補償光学(Adaptive Optics)である。その原理(図1)と最近の進展を紹介する。

英文

ABSTRACT The wavefront of radiation from astronomical objects is distorted by the turbulent atmosphere, which eventually has limited the angular resolution of large ground based telescopes at about 1 arcsec. The adaptive optics is an approach to restore the angular resolution corresponding to the diffraction limit by measuring and correcting the distorted wavefront in real time. The author attempts to review the principle and recent developments of the adaptive optics systems.

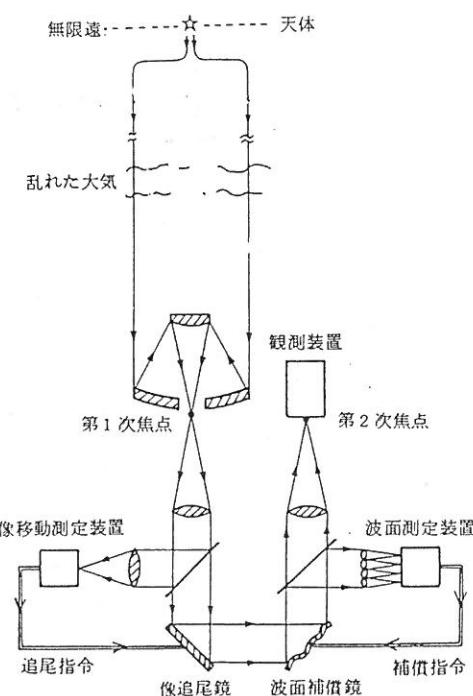
本文

1. シーイング

望遠鏡の解像力の理論的な限界は、観測波長 λ と望遠鏡の直径Dの比で決まる。

これは回折限界と呼ばれ、およそ $1.22\lambda/D$ ラジアンである。直径1mの望遠鏡では回折限界は 5×10^{-7} ラジアン、つまり

図1 補償光学システムの概念。星を光源として、波面測定装置で大気の揺らぎを実時間測定する。高速像追尾装置と波面補償鏡を用いて波面を補正すると、望遠鏡の回折限界に迫る解像力を達成できる。



り約 0.1秒角になる。ところが、実際に 1 m 級の望遠鏡で得られる星像の大きさは 1 秒角以下にはなかなかならない。これは、大気中の温度の揺らぎが屈折率をわずかに変化させ、かけろうのように星の像を乱してしまうためである。このようなかけろうの強さのことを、天文学ではシーリングと呼んでいる。

波面の位相がその範囲では一定であると考えて良い長さを、フリード長 r_0 と呼ぶ。 r_0 はシーリングの目安であり、可視域の $0.5 \mu\text{m}$ では通常数 cm 程度、大気の状態の良い時でもせいぜい 20 cm ぐらいである。国立天文台が建設を開始した口径 8 m の望遠鏡 (J N L T) の場合、 r_0 が 20 cm のときは、その光束のなかに約 1600 個のバラバラな波面の光がやってくることになる。このバラバラな波面をそろえようというのが補償光学である。

波面を乱すのは、星間ガスの密度ゆらぎ、地球上層大気の密度ゆらぎ、接地境界層の密度ゆらぎ、望遠鏡ドーム内部の空気の密度ゆらぎ、主鏡表面から立ちのぼるかけろうなどである。波面ゆらぎの

空間スペクトルは空間波長 λ の成分のパワーが $\lambda^{-5/3}$ に比例するというコルモゴロフの乱流スペクトルで、かなり良く表現できることが確かめられている。時間スペクトルも広帯域にわたっていて、マウナケアでの最近の測定では 20 cm の領域にわたる自己相関が 50% になるタイムスケールはわずか 2 ミリ秒とされている。従って完全な補償を行うには、1 kHz ぐらいまでの補償能力が要求されることになる。

2. 波面測定

天体からの波面がどう揺らいでいるかを測ることが、補償光学の第 1 歩である。波面ゆらぎの測定法としては、シャック・ハルトマン法が良く用いられている¹⁾。波面測定用シャック・ハルトマン装置の一例を図 2 に示す。この装置で星を観測すると、マイクロレンズ・アレーにより、約 300 個の星像が焦点面上に結ばれる。光波面の局所的な傾きに応じて、焦点面上の対応する星像の位置が移動する。300 個の星像の配置のずれから、光波面がどの部分でどれだけずれているかを時々刻々測ることになる。星像の配置のずれから、各点での波面の傾きの誤差が得られる。これを空間的に積分してやると波面の変形状態が分かる。このシャック・ハルトマン装置の性能テストを鏡面測定に関連して様々な角度から行った結果、装置自体の内部誤差がわずか数 nm であることなどが確認されている。

前述したように補償光学を実現するには、波面検出については 1 ミリ秒程度の

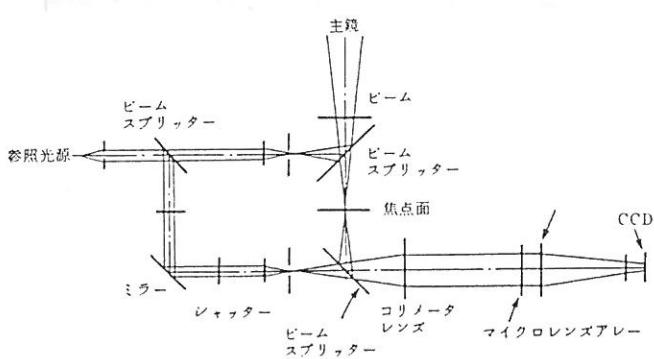


図 2 シャック・ハルトマン波面解析装置光学系

時間分解能が要求される。このためには高速読み出しの高感度低雑音2次元カメラの開発が鍵となる。微かな星を光源としてこのような高速で測定することは容易ではないが、半導体技術の急速な進歩により波面の高速測定が可能になりつつある。

波面の変位分布は、円盤に対する完全直交関数系で展開し、30項程度の係数で表せば十分である。完全直交関数系としては、フーリエ・ツェルニケ多項式を用いるのが分かり易い。ツェルニケ展開は、ザイデル収差などの光学収差と良く対応し、その光学的な解釈が容易だからである。図3にツェルニケ多項式と光学収差の関係を示す。光学系に起因する波面誤差は時間変動が遅いから、波面乱れの一定成分は光学系によるものとして除去して考える。

実際に観測したい天体が暗いときには、近くの明るい星を光源として用いる。波面測定用の星と目的天体とは、大気の揺らぎが共通である必要がある。このためには、目的天体と波面測定用の星とは角度にしてせいぜい1分角以内、できれば10秒角以内にあることが望ましい。

3. 補償鏡

補償光学では波面の誤差を高速に直す必要があるので、主鏡を矯正変形させるのでは間にあわない。焦点後のコリメータ光学系がつくる主鏡の像位置に配置した薄くて柔らかい鏡を波面誤差と逆相に変形させる。1枚続きの薄い鏡やフィル

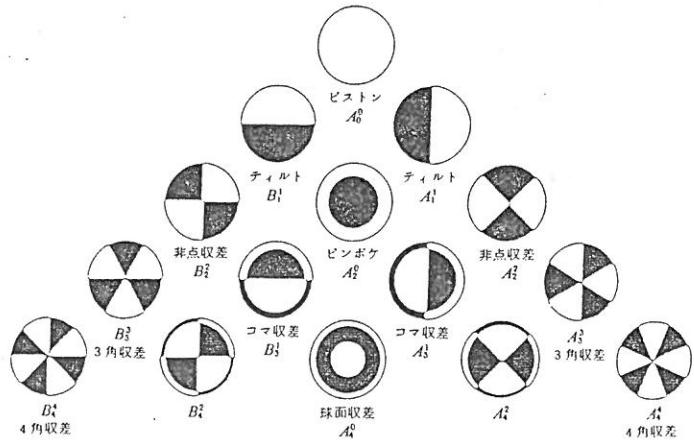


図3 フーリエ・ツェルニケ多項式と対応する光学収差

ムを多数のアクチュエータで裏から押し引きする方式が主流である。変形させるアクチュエータとしては、積層型またはバイモルフ型のピエゾ素子が用いられる²⁾。ピエゾ素子の場合、アクチュエータのストロークは数 μm 、個数は最大500個程度のものが作られている。ピエゾ素子はその接着、発熱、ヒステリシスなどの制御に工夫が必要だが、技術的には天体観測用補償鏡は実現可能とされている。

4. 補償光学の実例

波面の揺らぎを完全に補償するのを全補償と呼ぶ。これに対し、波面の揺らぎのうちの空間的低周波成分のみを補償することを部分補償という。波面の傾きのみを補償するのが最低次の部分補償である。これは星像の揺れを止めることに相当する。補償光学の前段階として、平面鏡を高速で駆動して傾き補償を行う像追尾装置が開発されている。図4に国立天文台で開発した高速像追尾装置を用いた

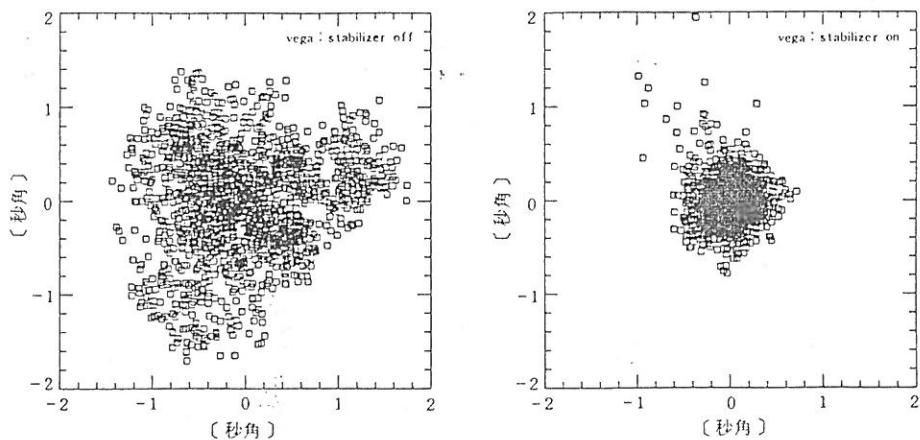


図4 イメージスタビライザによる像改善例

時と用いなかった時の星像の大きさの違いを示す。8 m級の望遠鏡の場合、可視光で全補償を達成するには約1000項の補償を要するが、シミュレーションによると100項程度の補償でも像をかなり改善することができることが示されている。波面補償がおおまかで良い赤外線の場合、傾きの補償を行うだけでもかなりの像改善になる³⁾。

5. 能動光学

国立天文台がハワイ島に建設を開始した口径8 mの大型望遠鏡では、主鏡を軽量化することが大前提であった。軽量化に伴う鏡の剛性の低下を補い、最良の状態で観測するため、鏡面形状をモニターしてコンピュータ制御で常に理想面に保とうというのが能動光学方式(Active Optics)である。能動光学は波面補償光学と原理的には共通な技術である。この方式を実現できることが国立天文台においてモデル望遠鏡で実証された。モデル望遠鏡には高精度力センサを組み込んだアクチュエータ、高精度鏡面測定用シャック・ハルトマン装置、それに特に試作

した直径62cm、厚さ2.1cmの薄型鏡が組み込まれた(図5)。まず実際に62cm鏡を用いて、鏡面変形の矯正を試みた。アクチュエータが9本しかないため、複雑な変形を完全に矯正することはできないが、基本的な変形モードは数値シミュレーションどおりに矯正できることが示された(図6)。アクチュエータ数の多いJNL Tでは実質的には任意の変形を矯正できるはずである。また、波面収差測定とともに閉ループ制御を行うと、基本的に



図5 国立天文台の62cm薄型鏡能動光学実証望遠鏡

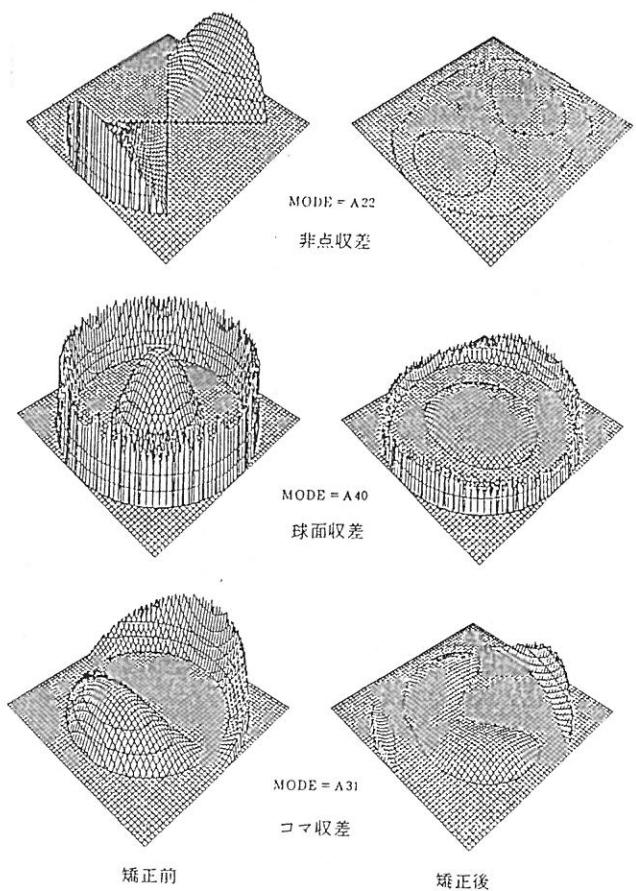


図 6 能動光学による 62cm 鏡面矯正の実例。変形量が正の部分のみを表示。
 (上) 非点収差 (中) 球面収差 (下)
 コマ収差。 (左列) 矯正前の収差
 (右列) 矯正後の残存収差。

は回折限界の結像性能を達成できることも実証された⁴⁾。

6. 補償光学・能動光学のメリット

能動光学／補償光学の効果をシミュレーションにより示したのが図 7 である。国内の観測所での平均的な星像は岡山天体物理観測所で 2.3 秒角、木曾観測所で 2.7 秒角と言われている。条件の良いハワイやチリの既存の望遠鏡では平均 1 秒角程度を達成しているところがある。能

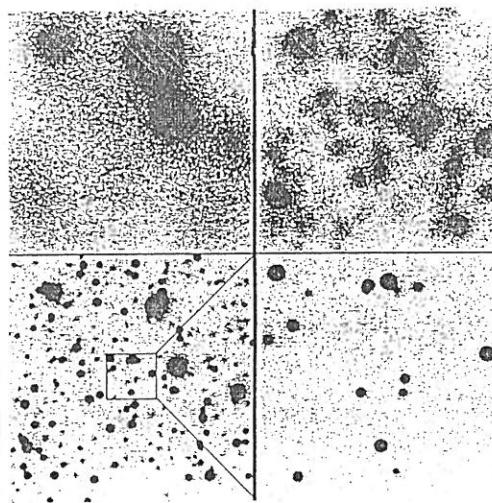


図 7 星像の大きさと星の見え方。
 (左上) 典型的な 3" の星像、
 (右上) 1" の星像、
 (左下) 能動光学での 0.3" の星像、
 (右下) 補償光学による 0.03" の星像。
 視野は 25" 四方。可干渉角は 10" を想定。

動光学で望遠鏡の収差を除去できれば、大気が安定した夜には星像が 0.3 秒角程度になるはずである。微かな星の観測には解像力がものをいうことが分かる。補償光学が実現すると、望遠鏡の口径で決まる回折限界の解像力を達成することができる。J N L T の場合、これは可視光では 0.02 秒角に相当する。図 7 には星像が 0.03 秒角にまで小さくなった時の同じ星野の見え方を拡大して示した。星像が 0.3 秒角のときには見えなかった天体がはっきりと分離して見えている。

補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合のよりはるかに高い。光をより集中することができるため、望遠鏡の効率も向上する。従って、以前より暗い天体が観測できるようになったり、より短

時間で撮影できるようになる。像がシャープになるため、分光においても分光器の入り口のスリットを狭めることができる。このため、分光器そのものをコンパクトで安定かつ安価なものにすることができる。

天体を観測するとき、観測装置の量子効率を ε 、望遠鏡の口径を D [m] 、観測波長を λ [m] 、焦点面での星像の大きさを θ [ラジアン] とすると、背景光雑音が無視できる場合には、信号雑音比は $S/N \propto \sqrt{\varepsilon D} / (\lambda \theta)$ と表すことができる。

1980年代に光検出器が乳剤写真から C D などの半導体撮像素子になったことにより、 $\sqrt{\varepsilon}$ は約 7 倍になった。現在は 4 m 級の望遠鏡が主流であるが、1990年代には J N L T など 8 m 級の望遠鏡が完成し、人類の目の大きさ D は 2 倍になるであろう。J N L T ではその主鏡に能動光学方式を採用することにより、条件の良い時には $1/\theta$ を約 3 倍にすることができるであろう。さらに補償光学が実用化されれば、 $1/\theta$ が約 30 倍になる。次世代の観測天文学で能動光学や補償光学の果す役割は大きい。

- 2) F. Roddier, M. Northcott, and B. Graves: 1990, preprint to appear in Publ. Astron. Soc. Pacific
- 3) F. Merkle et al.: 1990, The Messenger, ESO, 60, p. 9
- 4) Iye, M., Noguchi, T., Torii, Y., Mikami, Y., Yamashita, Y., Tanaka, W., Tabata, M., and Itoh, N. : 1990, SPIE Proc., Vol. 1236, p. 929

参考文献

- 1) Noguchi, T., Iye, M., Kawakami, H., Nakagiri, M., Norimoto, Y., Oshima, N., Shibasaki, H., Tanaka, W., Torii, Y., and Yamashita, Y. : 1989, Publ. Nat. Astron. Obs., Vol. 1, p. 49.