

最近の技術から

天文学における補償光学

家 正 則

国立天文台・大型光学赤外線望遠鏡計画推進部 T181 三鷹市大沢 2-21-1

1. 補償光学とは

太陽の直径は70万kmつまり2.3光秒である。恒星の距離は最も近い α ケンタウリ星でも4.3光年。したがって、恒星の見かけの直径は、少数の例外を除くと、0.001秒角以下であり、実際上無限遠にある点光源とみなせる。口径Dの望遠鏡で星を観測すると、理想的な場合には、星像の角直径は波長 λ での回折限界 $2.4\lambda/D$ にまで小さくなるはずである。口径1m、波長 $0.5\mu\text{m}$ なら、回折限界は 1.2×10^{-6} ラジアン=0.25秒角となる。

ところが、実際には望遠鏡の口径を大きくしても、星像直径は1秒角以下にはなかなかならない。これは、大気中の温度ゆらぎによる屈折率のわずかな乱れのため、光波面が乱されるからである。このような大気の乱れに起因する星像のボケの強さを、天文学ではシーイングと呼ぶ。シーイングは1分間以上露出した天体画像中の星像直径を測定することにより評価できる。シーイングは場所と気象状況により、かなり変化するが、国立天文台岡山天体物理観測所では最頻値2.3秒角、東京大学木曾観測所では最頻値2.7秒角、海拔4200mのハワイ島マウナケア山頂では最頻値0.7秒角と言われている。シーイングの良い場所を求めて、全地球規模で調査が行われた結果、大型望遠鏡の建設はハワイ島、アンデス高原、カナリー諸島の3箇所に集中するようになった。大気外出ればもちろんシーイングは問題にならなくなるが、大型望遠鏡を宇宙空間に建設することは予算と観測効率の面から、まだ現実的ではない。

従来は、望遠鏡の回折限界に相当する空間解像力を実現するには、宇宙空間に出るしかないと考えられてきた。ところが、乱れた大気の底からでも、実時間で乱れの影響を除去して、回折限界に迫る空間解像力を達成できることが実証され、21世紀を前に天体観測の世界では大きな意識革命が進行している。

乱れた媒質を伝播する電磁波が受ける位相乱れを計測し、位相乱れ補償素子を用いて、ビームの位相を実時間

で整えることにより、解像力と輝度を向上させる技術を、ここでは補償光学と総称する。補償光学の技術は、天体観測に限らず、高出力レーザー、短波長光ステッパー、マイクロレーザー手術、レーザー計測、光通信などの分野での応用が考えられよう。

2. 補償光学の原理・技術

補償光学の原理を可視域での天体観測用補償光学系を例に解説しよう。まずは位相乱れの計測と乱れの原因の物理的な理解が前提となる。空間波長数m以下では、大気の揺らぎは乱流のコルモゴロフ則にほぼ従うことが知られている。位相乱れが約 π ラジアンを越し、相関がなくなるスケールをフリード長と呼ぶ。フリード長は電磁波波長の1.2乗に比例するので、同じ口径の望遠鏡を用いる場合、観測波長域が短波長になるほど、位相乱れが複雑になり、測定も補償も困難になる。通常、可視域ではフリード長は約10cm程度であり、口径1mの望遠鏡では約100個の独立な位相を持つビームが混在することになる。

波面測定には測定視野方向の星を光源として用いる。波面位相測定法は大別すると、波面の一次微分（勾配）を測定する手法と、波面の二次微分（曲率）を測定する方法とに分類できる。前者の方法としては、シャックハルトマン法¹⁾とシャーリング干渉法が代表的である。シャックハルトマン法では、平行光束中の瞳位置に置いたマイクロレンズアレーにより、焦点面に結像した多数の星像の配列の歪みから波面を求める。後者の方法としては、ピンボケ像の輝度ムラからポアソン方程式を解いて波面を求めるロジエ法²⁾が実用化されている。

波面測定の空間分解能はフリード長とマッチしなければならない。時間分解能はフリード長と有効風速の比で決まり、可視域ではミリ秒程度が要求される。光源として視野中心にない星を使う場合、視野中心方向からのビームと中心からはずれた光源星方向からのビームとでは、大気の異なる部分を通過するため、はずれるに従っ

て位相乱れの測定誤差が大きくなる。このため特に可視域では、光源星は視野中心からせいぜい 10 秒角以内にあるのが望ましい。半径 10 秒角以内にある星は通常、光源星として使えるほど十分明るくはない。したがって、補償光学のための波面位相測定には、高速・高感度・低雑音の二次元カメラが必要となる。詳しく述べるには紙数がないが、任意の方角に十分明るい人工光源を作り、補償光学を活用するためのレーザー星発生技術の開発も進められている³⁾。

波面計測ができれば、波面補償へと進める。波面位相補償素子としては形状可変鏡面素子が使われる。位相変調型の補償素子も開発されているが、天体観測の場合には波長帯域、光損失、偏光特性などの問題が大きいため実用化されるには至っていない。形状可変鏡面素子としては、裏面に複数のピエゾ素子を接着した薄ガラス鏡⁴⁾が最も多用されているが、複数の小型分割鏡をそれぞれピエゾ駆動する方式や、薄膜を静電アクチュエータで変形させる方式も開発されている。波面測定情報を入力として、補償素子駆動情報を出力する高速制御系も重要な開発項目となる。

実際に、このような要素技術をシステムとして組み上げ、天体観測で星像直径をほぼ回折限界にまで圧縮して、解像度を上げるという実証観測が、1990 年代になって、欧州南天天文台、ハワイ大学天文学研究所、マサチューセッツ工科大学などでいくつか成功している（図 1⁵⁾。

地上からでも、2m 級望遠鏡で星像直径が 0.1 秒角のシャープな画像が得られることは、世界中の天文学者の夢を膨らませるものであった。この技術が成熟して 8m 級望遠鏡で実用化されると、天体解像度は 80 年代の 1 秒角に比べて、約 30 倍の 0.03 秒角になる。これまで

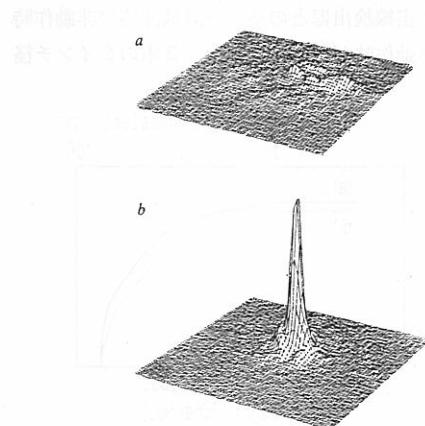


図 1 補償光学による星像の改善例。(a) 補償光学系非動作時、(b) 動作時。レーザー星を用い、プロキオン（0 等星）を撮影したもの。

にも、後処理で像解析して、回折限界の解像力を達成する技術としては、スペックル干渉法などの手法があり、明るい二重星の分離観測などで一定の成果がある。しかし、実時間で像を絞り込む補償光学は、スペックル干渉観測などと根本的に異なり、暗い天体の発見や分光観測の限界向上に大きな貢献が期待されている。

3. 高速・高感度・低雑音カメラ

国立天文台では、ハワイ島マウナケア山頂に建設を開始した、一枚鏡としては世界最大の 8 m 望遠鏡⁶⁾(JNLT) に補償光学の機能をもたせるべく、研究開発を行っている。この開発の鍵を握るのが高速・高感度・低雑音カメラの開発である。極微弱光を対象とする観測天文学からの技術への要求は、突拍子もない（良く言えば野心的な）ことが多い。現在、毎秒約 1000 フレームの撮像が可能な高速高感度超低雑音カメラとして、次の 2 種類のカメラの開発を行っている。一つは、アバランシュ・ホト・ダイオード・アレー、もう一つは並列スキッパー読みだし CCD である。前者は光電増倍型で本質的に無雑音にできる。100 素子以上の多素子化は、配線のこともあり困難なため、簡単な補償光学系の検出器としての応用を考えている。後者は多素子化に適しており、多重読みだしにより読みだし雑音を 1 電子以下にすることで実用化できる可能性がある。

なお、8 月 23~25 日の 3 日間、「擾乱媒質中の波動伝播と補償光学」研究会を国立天文台で開催する。広い立場から読者諸君に関心を持ってご参加いただければ幸いである。

文 献

- 1) T. Noguchi, M. Iye, H. Kawakami, M. Nakagiri, Y. Norimoto, N. Oshima, H. Shibasaki, W. Tanaka, Y. Torii and Y. Yamashita: "Shack-Hartmann wave-front analyzer," *Publ. Astron. Obs.*, **1** (1989) 49-55.
- 2) F. Roddier, M. Northcott and J. E. Graves: "A simple low-order adaptive optics system for near-infrared applications," *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **103** (1991) 131-149.
- 3) G. Collins: "Makings stars to see stars," *Phys. Today*, Feb. (1992) 17-21 (邦訳: パリティ, 7 (1992) 52-59).
- 4) J. W. Hardy: "Instrumental limitation in adaptive optics for astronomy," *SPIE. Proc.*, **1114** (1989) 2-13.
- 5) C. A. Primmerman, D. V. Murphy, D. A. Page, B. G. Zollars and H. T. Barclay: "Compensation of atmospheric optical distortion using a synthetic Beacon," *Nature*, **353** (1991) 141-143.
- 6) 家 正則, 海部宣男, 小平桂一: "8m「すばる」望遠鏡計画", *物理学会誌*, **47** (1992) 269-276.

(1993 年 2 月 24 日受理)