

## ■リサーチ

# 天文学における 補償光学

家 正則

たき火越しの景色がゆらいでみえたり、舗装道路からのかけろうで遠くの車がゆがんでみえる現象は、だれもがよく経験するところである。これは空気の屈折率が対流で乱され、光線が微妙に曲がるからである。精度の高い天体観測では、大気中のわずかな温度ムラによるかけろうが問題となる。というのも、理論上は望遠鏡の口径に比例するはずの解像力が、実際には口径 20 cm 以上ではこのかけろうのせいで頭打ちになってしまうからである。

これまで、望遠鏡の口径で決まる限界の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、各瞬間間に乱れの影響を補正することによって、きわめて高い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<sup>(1)</sup>。その方法が、補償光学である。

## シーディング

手初めに、恒星のみかけの大きさを計算してみよう。太陽の実直径は 70 万 km、光が横切るのに要する時間にすると 2.3 秒、つまりその大きさは 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、したがってとなりの α ケンタウリ星からみても、太陽の大きさはせいぜい 4 ミリ秒角にしかならない。より遠くには直径が太陽の 100 倍以上もある超巨星もあるが、実際にすべての星は無限遠にある点光源とみなせる。

しかし、光は波だから、完全な望遠鏡で点光源

## RESEARCH

を観測しても、点像のみかけの大きさは光の回折によってきまる大きさ(回折限界)以下にはならない。望遠鏡の口径を  $D$ 、光の波長を  $\lambda$ としたときの回折限界は視直径で  $2.4\lambda/D$  ラジアンである。波長  $0.5 \mu\text{m}$  の光に対して、口径 20 cm の場合の回折限界は  $6 \times 10^{-6}$  ラジアン = 1.2 秒角、また口径 8 m なら 0.03 秒角となる。理論的には望遠鏡の口径を大きくさえすれば、それに応じて解像力が上げられるはずである。

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。これが冒頭に述べた大気中の温度ゆらぎによるボケである。このような大気の乱れによってボケた星像の大きさを、天文学ではシーディングと呼ぶ。シーディングは気象状況によってもかなり変化するが、国立天文台の岡山天体物理観測所では 2.3 秒角、東京大学木曾観測所では 2.7 秒角、海拔 4200 m のハワイ島マウナケア山頂では 0.7 秒角といわれている。シーディングのよい場所を求めて、全地球規模で調査が行なわれた結果、口径 4 m 以上の大型望遠鏡の建設がハワイ島、アンデス高原、カナリー諸島の 3 カ所に集中するようになった。

天体観測の精度(S/N 比)は、望遠鏡の集光力、光の利用効率、それとシーディングの相乗効果で決まる。1980 年代には、光検出器が写真乾板から CCD などの半導体撮像素子に代わり、光の利用効率が約 50 倍になった。1990 年代には日本の“すばる”をはじめ世界の 8 m 級の望遠鏡が完成し、人類の目の集光力は 4 倍になる。さらに、補償光学が実用化されればシーディングが 30 倍改善され、輝度が 900 倍も高くなる可能性が開けてきた。

実はこれまでにも、後処理で画像解析し回折限界の解像力を達成する技術として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を挙げた。しかし、リアルタイムで像を絞り込める補償光学は、極限的な天文観測——宇宙の果てのクエーサーの観測、太陽系以外の惑星系の発見、分光観測の限界向上などに大き

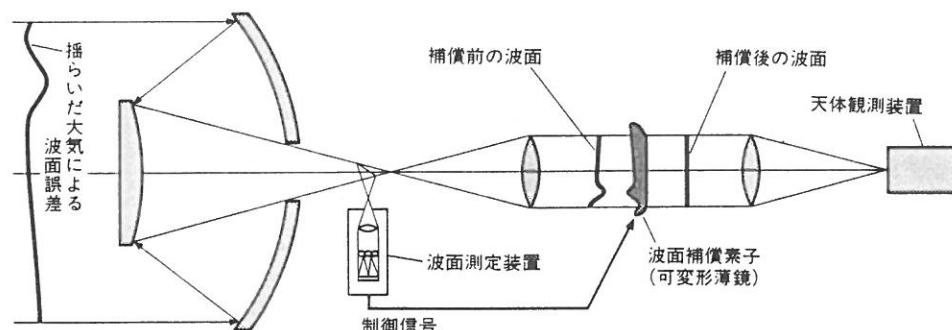


図 1 補償光学系の概念図。大気のゆらぎによる光波面誤差を波面測定装置で測り、波面補償素子(可変形薄鏡)で修正すると、望遠鏡の解像力の限界に近いシャープな画像が得られる。

な貢献が期待されている。

## 波面の乱れの観測

大気の乱れを光学的に捉え、それをリアルタイムで補償するシステムが補償光学である(図 1)。乱れを補正するには、まず乱れの強さを測定しなければならない。

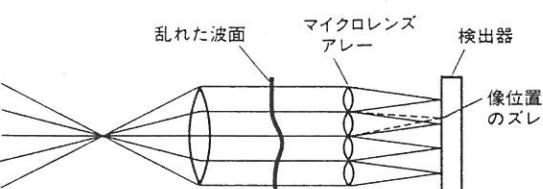
波長 1 m 以下では、大気のゆらぎは乱流のコルモゴロフ則にほぼ従うことが知られている。すなわち、山頂地形などで発生した大きな渦が小さな渦にカスケード的に分裂して乱流状態となっていると考えられる。(10 m 以上のスケールまでコルモゴロフ則が成り立っているかどうかは、まだ測定が不十分で論議的となっている。) このような乱流のなかで、光波面の乱れは場所によって位相が異なってくる。光波面の乱れに相關がなくなるスケールを、フリード長と呼んでいる。フリード長は乱れの強さの目安となる。通常の大気では、可視域の光に対するフリード長は 10 cm 程度であり、口径 1 m の望遠鏡では約 100 個の独立な位相をもつビームが混在することになる。す

なわち、100 個の独立な位相を測定しなければならない。ちなみに、フリード長は光の波長の 1.2 乗に比例するので、観測波長域が短波長になるほど乱れが複雑になり、測定も補償も困難になる。

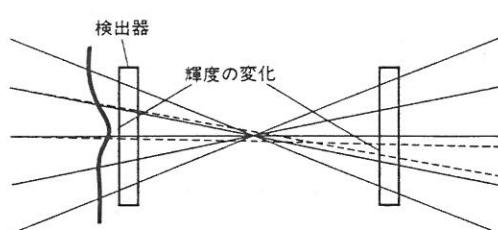
波面を測定する方法はいくつか開発されている。代表的なシャックハルトマン法では、平行光束中の瞳位置に置いたマイクロレンズ配列によって焦点面に結像した、多数の星像の配列のひずみから波面を求める。また、ピンボケにした星像の輝度ムラからポアソン方程式を解いて波面を求めるロジエ法も実用化されている(図 2)<sup>(2)</sup>。

このような測定を、大気中の乱れの状態が変化するより速やかに行なわなければならないわけである。つまり要求される時間分解能はフリード長を風速で割った程度で、可視域ではミリ秒程度の高速応答性が要求されることになる。

また、波面測定には明るい光源星が必要である。しかしこのような星のそばの天体しか補償光学の恩恵に与れないとする、その効用も限られたものになる。そこで、任意の方角に十分明るい人工光源を作り、補償光学をいつでも活用できるようにするというレーザー星発生技術が開発されてい



(a) シャックハルトマン法



(b) ロジエ法

図 2 波面乱れの測定法。波面の傾きを測るシャックハルトマン法(a)と波面の曲率を測るロジエ法(b)。

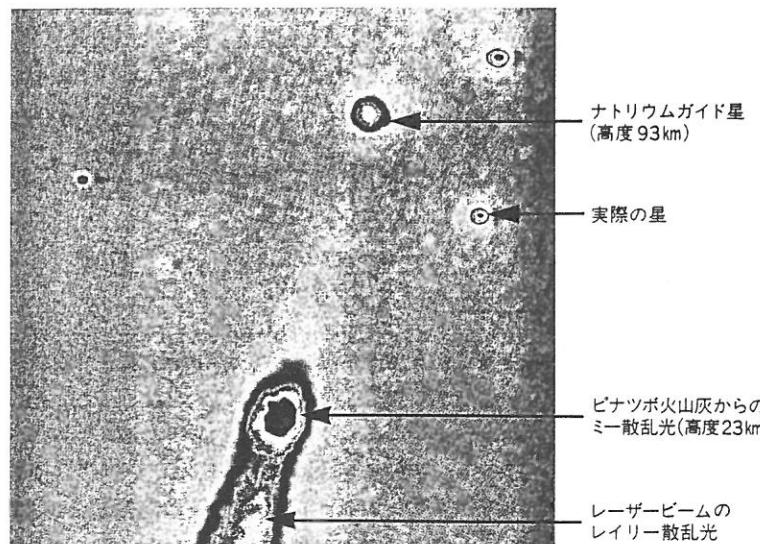


図3 レーザーガイド星<sup>(3)</sup>。ナトリウム原子を励起する波長 589 nm のレーザー光を高度 90 km のナトリウム層に照射することによって、任意の方角に波面測定のための人工のレーザー光源星をつくることができる。

る<sup>(3)</sup>。地上 90 km の上層大気中にはナトリウム原子密度の濃い層がある。この層にナトリウム D 線(波長 589 nm)で発振するレーザー光を照射すると、光励起されたナトリウム原子が発光し、レーザー人工星をつくることができる。この技術を使えば、ほほどんな天域でも補償光学の利用が可能となるだろう(図 3)。

#### 実証観測のインパクト

波面計測ができれば、波面補償へと進める。形状が可変な鏡面素子を高速に駆動するシステムが開発されている。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<sup>(4)</sup>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。

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、1980 年代の末から、ヨーロッパ南天天文台、ハワイ大学天文研究所、マサチューセッツ工科大学などいくつか成功している(図 4)<sup>(5)</sup>。2 m 級望遠鏡による地上からの観測でも、星像直径が 0.1 秒角のシャープな画像が得られたことは、世界中の天文学者の夢を膨らませるものであった。

#### “すばる”望遠鏡の 補償光学システム

国立天文台では、ハワイ島マウナケア山頂に建設中的一枚鏡としては世界最大の 8.2 m 望遠鏡 “すばる”<sup>(6)</sup>に、補償光学の機能をもたせるための研究開発を行なっている。この技術が実用化されると、天体解像度は 1980 年代の 1 秒角に比べて、最高では回折限界の 0.03 秒角になると期待される(図 5)。この開発の鍵を握るのが、波面測定のための高速・高感度・低雑音カメラである。毎秒約 1000 フレームの撮像が可能なカメラとして、雪崩型光ダイオード・アレーと、並列繰り返し読みだし方式の CCD の開発を進めている。

“すばる”では、まず赤外線観測で回折限界の空間分解能を達成できる補償光学システムを実用化する。このため、曲率センサー方式の波面測定装置と薄膜可変形鏡を組み合わせたプロトタイプシステムを構築中である。また、補償光学システムを有効に活用するため、ドーム内の空気の亂れを測定するドームシーリングモニターの開発<sup>(7)</sup>、主鏡からの対流の発生条件の測定、通風機能を備えた新型ドームの設計など、熱的環境の制御法の一連の研究や、補償光学の補正視野を拡大する方法として、トモグラフィ手法を用いた大気擾乱の立体的な測定法と多段補償システムの検討も進め

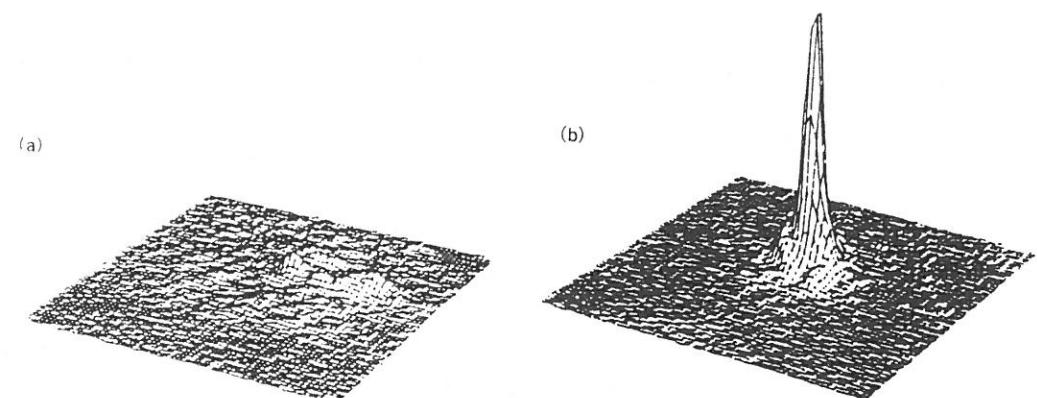


図4 補償光学によって星像が改善された例<sup>(5)</sup>。(a)通常の観測の場合、(b)補償光学を動作させたとき、レーザー星を用い、プロキオン(0 等星)を撮影したもの。

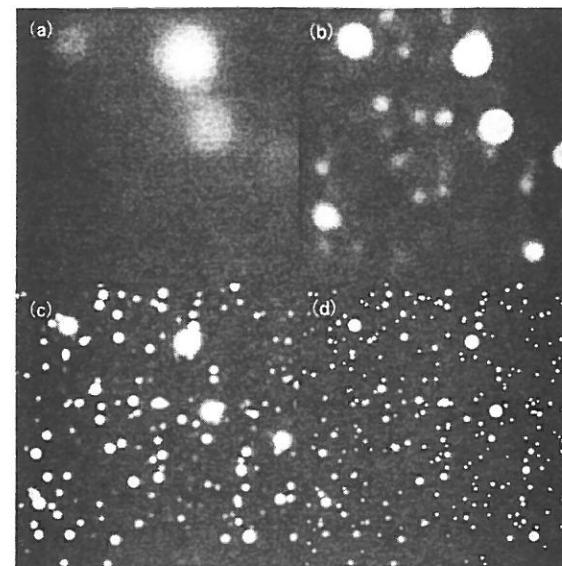


図5 解像力と天体の見え方のシミュレーション。(a)典型的な 3 秒角の星像の場合、(b)1 秒角の星像の場合、(c)0.3 秒角の星像の場合、(d)0.1 秒角の場合。視野は 25 秒角四方。現在の天体観測は(a)または(b)程度の解像力がふつうだが、補償光学が実現すると解像力は(c) (d)あるいはそれ以上になる。

#### 文 献

- (1) J. M. BECKERS: Ann. Rev. Astron. Astrophys., 31, 13(1993)
- (2) 高見英樹: OplusE, 143, 90(1991)
- (3) G. COLLINS: Physics Today, Feb., 17(1992); 邦訳: パリティ, 7, 52(1992)
- (4) J. W. HARDY: SPIE. Proc., 1114, 2(1989)
- (5) C. A. PRIMMERMAN et al.: Nature, 353, 141 (1991)
- (6) 家正則ほか: 日本物理学会誌, 47, 269(1992); 唐牛宏: 科学, 64, 114(1994)
- (7) M. IYE et al.: Publ. Astron. Soc. Pacific, 104, 760(1992)
- (8) V. I. TATARSKI: Wave Propagation in a Turbulent Medium, Dover(1961)

(Masanori IYE)

国立天文台大型光学赤外線望遠鏡計画推進部