

# 天文学における補償光学

国立天文台 家 正則・高見 英樹・早野 裕

## 1. はじめに

20世紀に大型化が進んだ天体望遠鏡は、より遠くのより微かな天体をより詳しく見ることを可能にし、現代の宇宙観の形成に決定的な役割を果たしてきた。望遠鏡大型化のメリットは集光力の増大と空間解像力の増大である。空間解像力は観測波長 $\lambda$ と望遠鏡口径Dの比で決まる「回折限界（ $1.2\lambda/D$ ）」が理論的なりミットだが、口径20cm以上の望遠鏡では、実は大気のゆらぎが空間解像力を制限している。大気のゆらぎで決まる星像の大きさを観測天文学では「シーアイング」と呼ぶ。このため、新しい望遠鏡の建設はシーアイングの良いサイトを選んで行う。地上では最高の観測適地とされているマウナケア山頂に設置した口径8.2mのすばる望遠鏡でも、可視光でのシーアイングは通常0.6秒角程度で、実際の解像力は理論的な回折限界（0.015秒角）の40倍程度に劣化する。

しかしながら、大気の揺らぎによる光波面の擾乱を実時間計測し、高速応答可変形状鏡を駆動して、その擾乱を補償することにより、望遠鏡の解像力を回折限界にまで改善することができるはずである。このアイデア自体は、実は半世紀前にすでに発表されていたが<sup>1)</sup>、実用的なシステムができるまでには光学技術と制御技術の成熟を待たねばならなかった。本稿ではすばる望遠鏡<sup>2)</sup>用に開発した補償光学系を例にとってその原理と実際を解説する。この実時間補償光学は、画像の後処理で画質を改善する手法ではノイズに埋もれてしまうため見ることができないほどの暗い微かな天体をも浮き彫りにでき、また補償光学を併用した分光観測では暗い天体の分光を可能にするなど大きなメリットがある。

## 2. 補償光学の原理と主要構成要素： 波面センサーと可変形鏡

大気の温度ゆらぎに伴う屈折率のムラは、透過する光の波面を乱す。このため地球大気に突入するまでは平面波であった天体からの光波面は望遠鏡に届くまでに乱れてしまう。波面の乱れ具合を表すパラメータとして、波面が揺っていると見なせる典型的なスケール（ $r_0$ ：フリード長）を用いる。フリード長はマウナケアなどの条件の良いサイトでも可視光では通常およそ20cm程度となってしまう。このフリード長で決まる回折限界がシーアイングに相当する。補償光学は乱れた波面を平面波に近い形に戻すことで実効的なフリード長を望遠鏡口径にまで大きくする技術であり、システムは波面センサー、可変形状鏡、これらをつなぐ高速制御系からなる。また、後述するが、補償光学の適用範囲を広げるためのレーザーガイド星生成システムが不可欠な要素として重要となる（図1）。

現在実用化されている波面の測定法としては、波面の傾斜（1次微分）の分布を測るシャックハルトマン方式と波面の曲率（2次微分）の分布を測る曲率センサー方式の2つがある（図2）。

シャックハルトマン方式では、望遠鏡焦点後方の瞳位置に置いたマイクロレンズアレーで望遠鏡の主鏡を領域分割し、それぞれの領域のつくる星像が基盤の目のように並ぶようにしたカメラを用いて明るい星を高速撮影する。本来はきれいな基盤の目に並ぶべき星像群が大気のゆらぎによりゆがんだ配置になるのを測定すると、各星像の位置のずれから対応する分割領域の波面の傾斜ベクトルを求めることができる。この情報から全体の波面乱れの分布を把握することができる。波面曲率センサーは望遠鏡瞳面の前後での照度が波面曲率の正負により逆向きの濃淡を生じることを利用したカメラで、瞳面前後で

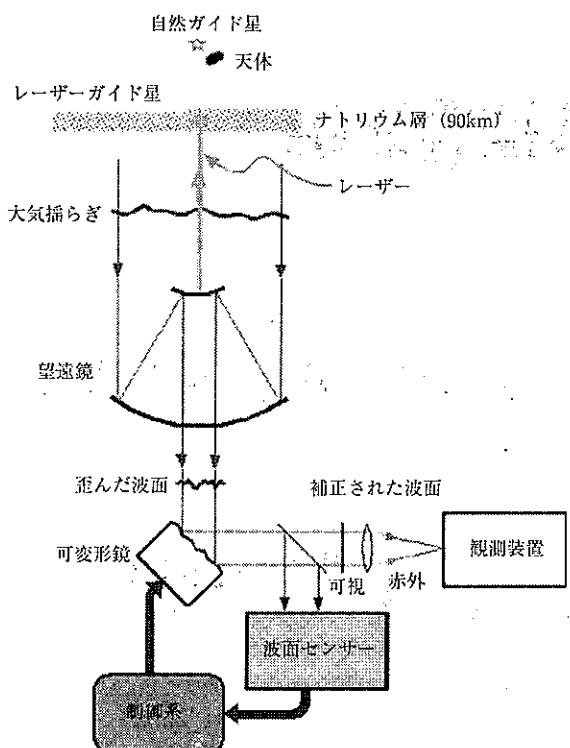


図1 天体観測における補償光学系の概念図

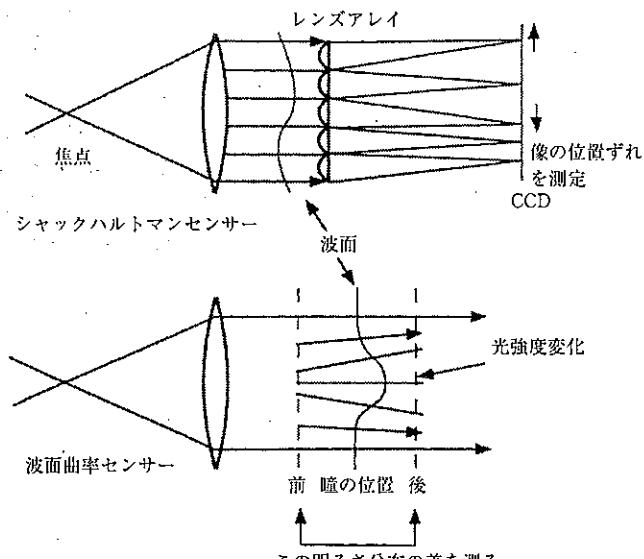


図2 波面測定の原理

の照度の比を高速測定することにより、各分割領域での波面曲率を求めることができる。この曲率情報と瞳外縁での波面傾斜の測定値から波面を再生することができる。

波面を矯正するには、薄い小型鏡の裏に複数のピエゾ駆動素子を貼り付けた可変形状鏡を用い、測定した波面乱れが矯正されるように鏡の表面形状を実時間で高速駆

動する。積層型ピエゾ素子を正方配列した可変形状鏡は、正方配列のCCDを検出器として用いるシャック・ハルトマンセンサーと併用されることが多い。バイモルフ型ピエゾ素子を同心円状に配置した可変形状鏡はアバランシュ光ダイオードアレーをセンサーとする曲率センサーと併用される。シャック・ハルトマン方式は星像の位置ずれを測定するため、分割領域の光を複数の画素で受光する必要があり、またCCDの読み出し雑音があるため、明るいガイド星が必要である。曲率センサー方式は分割領域からの光を全部まとめて測定すれば良いのと、読み出し雑音のない光ダイオードを用いるので、感度的には有利であるが、システムが大きくなると高価になってしまう。

補償動作は波長2.2ミクロロンの近赤外線では毎秒約1,000回行う必要がある。波長が短くなるとフリード長がほぼ比例して短くなるため、分割領域数は波長の2乗に反比例して増える。また、上層大気の風速が一定であるするとゆらぎのパターンがフリード長を移動する時間も波長に比例するので、補償光学系に対する仕様は波長の3乗に反比例して厳しくなる。このため、現状では波長1ミクロロンより長い近赤外線での補償光学が実現しているが、可視光での補償光学の実現は今後の課題となっている。

### 3. すばる望遠鏡のレーザーガイド星補償光学系

国立天文台は36個のアバランシュ光ダイオードをもつ波面曲率センサーと36個のバイモルフ型ピエゾ駆動素子をもつ可変形状鏡を組み込んだ補償光学系を実用化し(図3)、すばる望遠鏡の解像力をほぼその回折限界にまで高めることに成功し、2002年から共同利用観測に供し

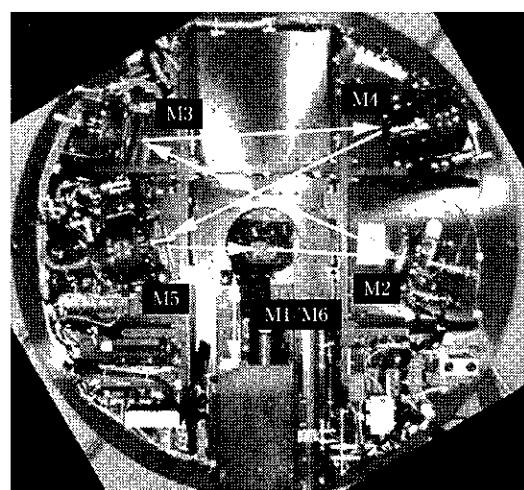


図3 すばる望遠鏡の36素子補償光学系 (M4が可変形状鏡)

ている<sup>11)~18)</sup>(図4)。この装置を用いて、これまでで最も暗い銀河の撮影に成功し初期宇宙での銀河の数と分布の観測の最前線を切り開いた研究<sup>9)</sup>、重力レンズ効果で像が2つ見えるクエーサーのスペクトル吸収線のわずかな差から銀河間雲のサイズを求めた研究、原始惑星系円盤での渦巻き構造を発見した研究<sup>10)</sup>(図5)などの成果が得られている。

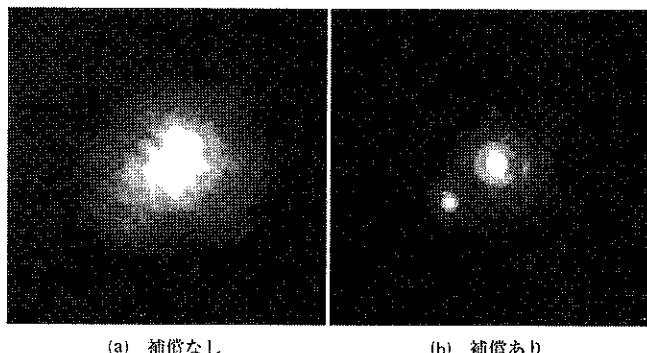


図4 すばる望遠鏡36素子補償光学系による2重星像の改善実例

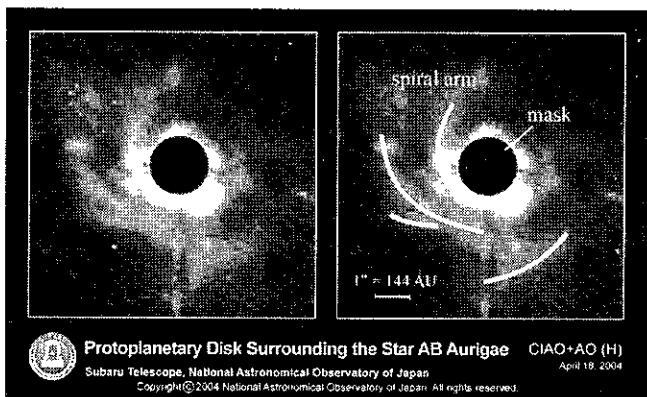


図5 補償光学装置とコロナグラフ撮像装置CIAOにより撮影したぎょしゃ座AB星の原始惑星系円盤の渦巻き構造

この36素子補償光学系の開発経験を活かして、我々は補償素子数が約5倍の188素子のより高度な新補償光学系を製作中である。この新補償光学系<sup>11)12)</sup>のもう1つの開発の目玉がレーザーガイド星生成システムである。36素子補償光学系は12等星より明るい星をガイド星として用いるため、目的の観測天体のすぐそばにガイド星として使える明るい星がないと折角の補償光学系が使えないという難点があった。数の少ない明るいガイド星に頼ることなく、いつでもどこでも補償光学の恩恵に浴するために、十分に明るい「人工星」を作ってしまうのがレーザーガイド星生成システムである。このための専用レーザーを理化学研究所の協

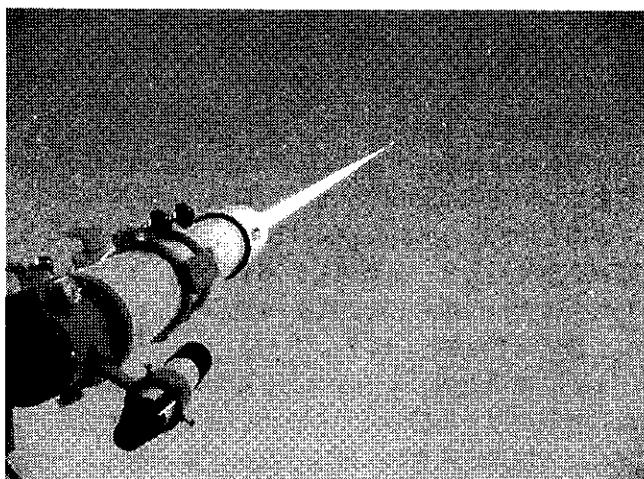


図6 全固体レーザーの送出によるレーザーガイド星生成実験(理化学研究所)

力を得て開発することに成功した(図6)。

これは波長1,064nmと1,319nmの2つのNd:YAGレーザー光を非線形光学結晶に入射して、その和周波にあたる波長589nmのナトリウムD線での発振を可能にした出力4Wの全固体レーザー光源である<sup>13)</sup>。レーザー光は光ファイバーですばる望遠鏡の先端に取り付けた直径50cmのレーザー送出望遠鏡まで伝送され、そこから目標天体の近くに向けて打ち上げられる(図7)。レーザー光は高度約100kmにあるナトリウム原子層のナトリウム原子を励起して約12等星以上の明るさで光らせるので、これを光源として大気のゆらぎをいつでもどこでも測ることが可能になる。実際にはすばる望遠鏡から打ってつくる「人工星」は望遠鏡と共に動くので、大気による星像の揺れは独立に自然の星を使って測る必要があるが、このための星は12等星ほど明るい必要はないので、容易に目的の観測天体の近くに見つけることができる。レーザーガイド星生成システムを使った観測は2007年から開始する予定である。

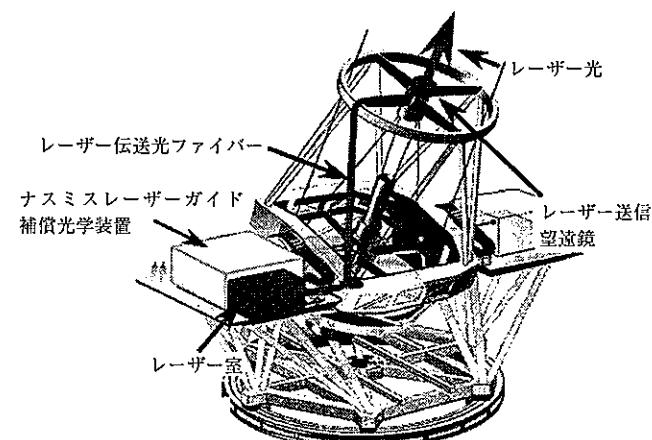


図7 レーザーガイド星生成システム概念図

## 4. おわりに -将来の展望-

補償光学系で像質の改善ができる視野をさらに拡大するため、複数の光源を同時計測して、断層撮影法で大気擾乱を3次元的に把握し、複数の形状可変鏡を用いてより高度な補償を行うための検討と開発が進み始めている。これらを見据えて、発展著しい補償光学技術をフル装置した次世代の口径30m級望遠鏡<sup>11</sup>を建設する構想についても、日米欧での検討が始まっている。

また、補償光学の手法は天文学観測の他にも、網膜上の視神経細胞を撮影診断するために眼球中の水様体のムラによる収差を補償して解像度を上げる試み、レーザー核融合やレーザー加工などの高出力レーザーのビーム品質を改善する試み、そのほかさまざまな分野への応用の検討と開発がなされており、光を制御する技術としての補償光学は今後更なる発展が見込まれる。

### ＜参考文献＞

- (1) Babcock, H.W., Publ. Astron. Soc. Pacific, Vol.65, pp.229-236 (1953)
- (2) 家正則：“すばる望遠鏡”，岩波ジュニア新書（2003）
- (3) すばる望遠鏡HP：[http://subarutelescope.org/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/j_index.html)
- (4) 家正則：科学，第64巻、6号、pp.354-357 (1994)
- (5) 36素子補償光学系HP（英語）：  
<http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/AO/index.html>
- (6) 高見英樹：パリティ、丸善、第17巻、5号、pp.22-28 (2002)
- (7) Takami, H. et al., Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.56, pp.225-234 (2004)
- (8) 早野裕：情報処理, Vol.45, pp.1239-1244 (2004)
- (9) Minowa, Y. et al., Astrophys. J., Vol.629, pp.29-44 (2005)
- (10) Fukagawa, M. et al., Astrophys. J., Vol.605, L53-56 (2004)
- (11) 188素子新補償光学系HP：<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~iye/tokusui.htm>
- (12) Hayano, Y. et al., Proceedings of the SPIE, Vol.4839, pp.32-43 (2003)
- (13) Saito, N. et al., Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe 2005), in press
- (14) 30m望遠鏡計画HP：<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~iye/eltproj.htm>

### 【筆者紹介】

**家 正則**（昭和24年8月13日生・北海道出身）  
国立天文台 研究連携主幹 光赤外研究部 教授  
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1  
TEL : 0422-34-3520 FAX : 0422-34-3527  
URL : <http://optic2.mtk.nao.ac.jp/~iye/>  
E-mail : iye@optik.mtk.nao.ac.jp

#### ＜主なる業務歴および資格＞

東京大学大学院博士課程修了、東京大学理学博士。東京大学理学部助手（1978年）、東京大学東京天文台助手、同助教授、国立天文台助教授を経て、1993年より同教授。東京大学教授、総合研究大学院大学教授を併任。

#### ＜過去の執筆実績＞

学術論文多数、高校地学教科書、啓蒙書等

### 高見英樹（昭和33年2月8日生）

国立天文台 ハワイ観測所 助教授  
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1  
TEL : 0422-34-3520 FAX : 0422-34-3527  
E-mail : takami@naoj.org

#### ＜主なる業務歴および資格＞

1981年、京都大学理学部卒業。1986年、同大学院理学研究科物理第二専攻単位認定退学。1988年、理学博士。1989年、郵政省通信総合研究所、赤外線天文学、補償光学系の開発に従事。1994年、国立天文台助手、すばる望遠鏡補償光学系開発およびそれを用いた天文学研究に従事。1999年、同助教授。2002年、ハワイ観測所勤務、現在に至る。

### 早野 裕（昭和42年8月7日生）

国立天文台 ハワイ観測所 上級研究員  
650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii, 96720 U.S.A.  
TEL : 1-808-934-5941 FAX : 1-808-934-5099  
E-mail : hayano@subaru.naoj.org

#### ＜主なる業務歴および資格＞

1955年、東京大学理学系研究科天文学専攻博士課程修了、博士（理学）。1995年、郵政省通信総合研究所非常勤研究員。2001年、国立天文台非常勤研究員。2003年、同上級研究員。2004年、ハワイ観測所勤務、現在に至る。衛星間光通信用補償光学系の開発（～2001年）、すばる望遠鏡レーザーガイド星補償光学系の開発とそれによる天文学研究に従事。