

# 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

〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1

Tel : 0422-34-3703, Fax : 0422-34-3608

## 1. 8m「すばる」望遠鏡計画

文部省国立天文台は、一枚鏡としては世界最大の大型光学赤外線望遠鏡（J N L T：愛称「すばる」）の建設を、1991年度から9年計画で進めている<sup>1-2)</sup>（図1）。光学系は口径8m、曲率半径30mの主鏡を副鏡と組み合わせて、カセグレン焦点で合成F/12.2の広視野を実現するリッチ・クレチアン系である。マウントは経緯台方式、ドーム上部は望遠鏡に同期して回転する。建設予定地は地上で最

も天体観測に適しているハワイ島のマウナケア山頂（海拔4200m）である。この望遠鏡の主鏡は、直径8mに対して厚さがわずか20cmの超低膨張ガラスで作る。常識やぶりの薄さだが、鏡面がたわまないようにコンピュータ制御の264個のアクチュエータでバランス良く支える。この技術を「能動光学」と呼んでいる。また、この技術の応用として、大気のゆらぎによる星像のゆれやぼけを直す「補償光学」の研究が進められている。「すばる」望遠鏡を例に、天文学における能動光学と補償光学技術について解説する。

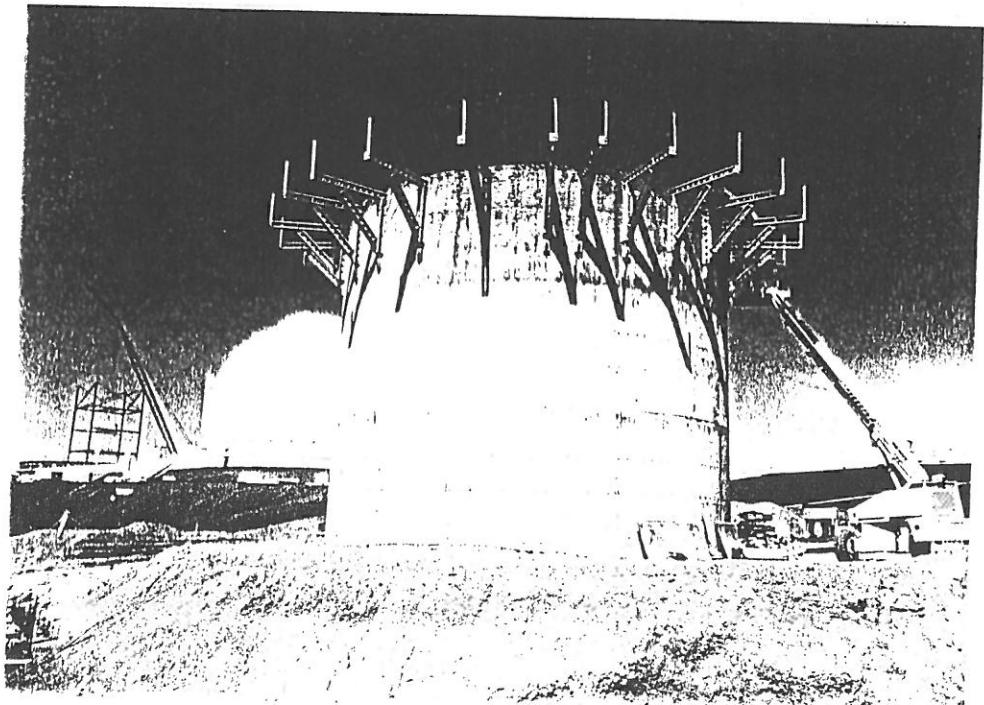


図1 建設が進む「すばる」望遠鏡

## 2. 能動光学 3-4)

望遠鏡の鏡面は設計形状からの誤差が光の波長の約14分の1以下になるように保つ必要がある。望遠鏡はいろんな姿勢に傾けるため、自重のかかる方向は一定していない。これまで自重変形を小さくするため、主鏡のガラス材を充分に厚くして「堅くて変形しない」鏡にするのが常識であった。ところが大型望遠鏡の場合には、これではコストが「天文的な数字」になってしまう。鏡を薄くして軽くしたいが、すると鏡は変形しやすくなる。

「能動光学」方式では、柔らかさを逆手に取って、鏡面をいつも設計どおりの面形状になるように自動制御する。このため、鏡面の形状誤差を「測って」、鏡の形を「直す」ようにフィードバック回路を構成する。鏡面の測定には光学測定と機械測定の独立な2つの方法を用いる。光学的方法としては、あとで述べるシャック・ハルトマン型鏡面測定装置を用いて比較的明るい星を観測し、鏡の変形の様子を直接測る。光学的測定は大気の乱流による誤差を除くために、およそ1分間の平均を取る。機械的方法としては、鏡を支える力の分布をセンサでモニタし、正しい力分布との差から鏡面変形を計算する。支える力の誤差と鏡面の変形量は「フックの法則」により関係づけられるから、正確な推定ができる。機械的測定は間接的だが、高速度サンプリングを行えるという利点がある。天体を追尾中は常に機械的な測定をもとに制御を行い、ときどき光学的な測定で較正するという2重のサーボ機構が「すばる」望遠鏡では考えられている。「すばる」の能動光学機構は図2のようなものになる。

能動光学では、姿勢の変化に伴う鏡の変形だけでなく、温度変化に伴う変形など時間変化の比較的遅い成分や、研磨誤差など変化しない成分をまとめて補正することができる。さらにある程度は、鏡を積極的に変形させることにより焦点距離を変える、いわば「ズーム」機能を持たせることができる。これらは、従来の望遠鏡にはできなかった芸当である。

鏡が局所的に「つるつる」に磨かれていれば、細かい変形は本来小さいはずである。能

動光学で注目するのは大きな変形である。鏡面の変形は、ガラス円盤の固有モードの重ね合わせと見なすことができる。実際には30種類ぐらいの変形パターンまで考慮すれば十分である。鏡の変形パターンは基本的な光学差のパターンにも対応している。

支持点が264個の場合、各点の受け持つ自重は90kg重となる。鏡面を補正するための力のゆとりを考え、0-150kg重の範囲にわたり15g重以下の誤差で力を制御できる高精度アクチュエーターをJ N L T用に新開発した。

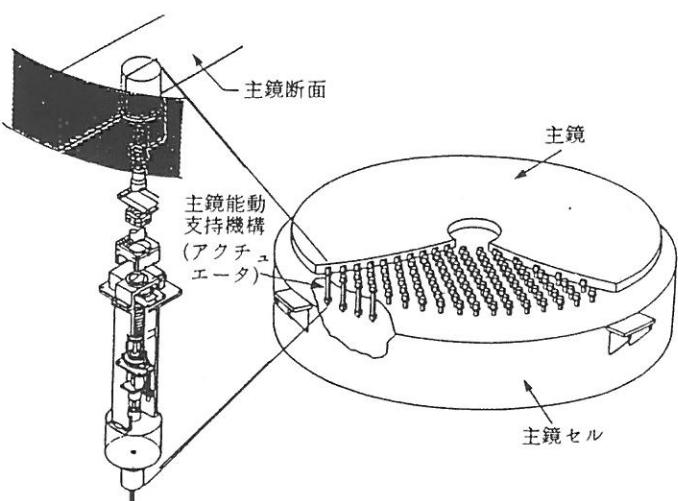


図2 「すばる」望遠鏡の能動光学機構の概念図。直径8mの薄鏡は264個のアクチュエーターで常に最適状態に支えられる。

## 3. 補償光学

### 3. 1 シーイング

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アルファケンタウリ星でも4.3光年。従って、恒星の見かけの直径は、小数の例外を除くと、0.001秒角以下であり、实际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 $\lambda$ 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 $0.5\mu m$ なら、回折限界は  $1.2 \times 10^{-6}$  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り屈折率がわずかに乱れるため、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、天文学ではシーアイントと呼ぶ。シーアイントは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。シーアイント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。シーアイント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ヶ所に集中するようになった。大気外に出ればもちろんシーアイントは問題にならなくなるが、8m級の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。

「乱れた大気の底からでも、リアルタイムで乱れの影響を除去できれば、回折限界に迫る空間解像力を達成できる」という補償光学の概念は、1953年にバブコックが提案した<sup>5)</sup>。天文学でもこのような技術が実用化できることが最近実証され、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。

「補償光学」は技術的には「能動光学」を高速化したものと位置づけることができる。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、レーザー計測などの分野での応用が考えられよう。

### 3. 2 光波面測定

補償光学システムの構築に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、相関が無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内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（図3）。勾配測定法としては、シャック・ハルトマン法とシヤ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。国立天文台で試作したシャック・ハルトマンカメラ<sup>6)</sup>は、内蔵したマイクロレンズ・アレーが主鏡の像を約300個の領域に分割し、その各々の部分からの光をそれぞれ焦点面に結ぶ働きをする。この300個の星像の配置のずれから、波面誤差の分布状態を測定することができる。曲率測定法としては、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<sup>7)</sup>が実用化されている。

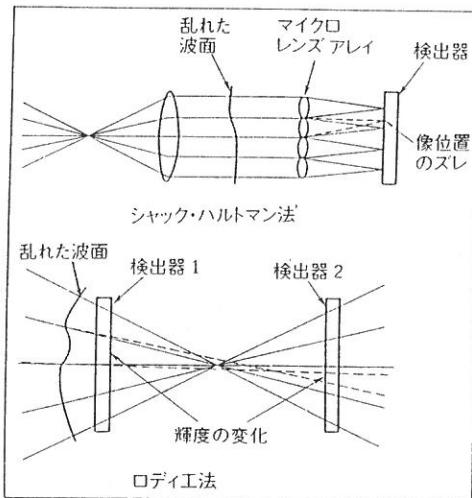


図3 波面測定におけるシャック・ハルトマン法とロジエ法

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充分明るくはない。従って、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の開発が鍵となる。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によって実用化できる可能性がある。

### 3. 3 補償鏡

波面計測ができれば、波面補償へと進める。能動光学の場合と違って、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たのではなく時間的に間に合わない。焦点後の光学系がつくる主鏡像の位置に高速応答性の波面位相補償素子を置き、波面誤差を補償する。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<sup>9)</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。

波面測定情報を入力として、補償素子駆動情報と出力する高速制御系も重要な開発項目となる。

### 3. 4 レーザーガイド星

補償光学が天文学で実用になるかどうかは、波面測定ができるかどうかにかかっている。実際に観測したい天体が十分明るければ、その天体を波面測定の光源として用いる。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できれば10秒角以内にあることが必要である。そこで、任意の方向に波面測定用の明るい星を作れないだろうかという発想が生まれた。

地表から約90kmの上層大気中に、ナトリウム原子の密度が濃い厚さ10kmぐらいの層がある。ナトリウム原子を励起する波長589nmの強力なレーザーをこの層に当てれば、ナトリウム原子が発光して十分に明るい人工の星を任意の方向に作ることができる<sup>10)</sup>。これとは別に、高出力のパルスレーザービームを望みの方向に打ち上げ、高度数kmの大気からのレイリー散乱光のみをタイミングを併せて受ける方式も開発されつつある。これらの技術が実用化されれば、地上の望遠鏡でも大気の揺らぎを意識しないで観測することが可能となる<sup>11)</sup>（図4）。

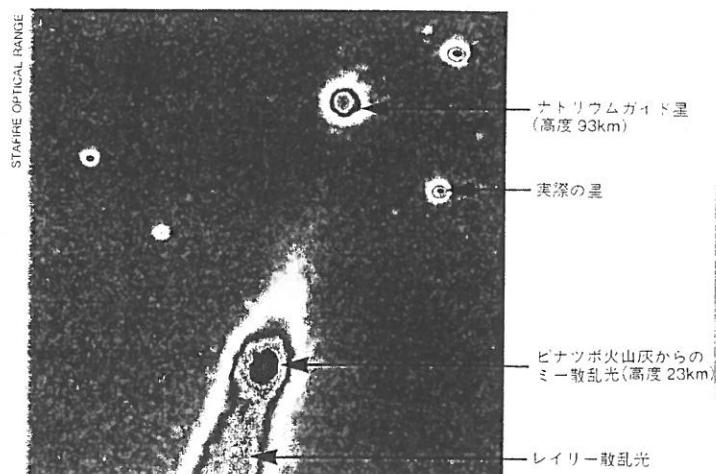


図4 レーザーガイド星（文献11より）

レーザー星を観測したい天体の周囲に複数個並べることができれば、大気の擾乱のようすを「断層写真」の手法を用いて「立体的に」測定することができるはずである。高層大気用、中層大気用、低層大気用といくつかの補償鏡を組み合わせれば、広い視野にわたり大気の揺らぎを完全に補償することも原理的には夢ではない。トモグラフィー法とも呼ぶべきこのような新しいアイデアに基づく研究も構想されている。国立天文台ではこの第一歩として、望遠鏡ドームの内部での大気揺らぎとドーム外の上層大気の揺らぎとを同時に分離測定できる全く新しい測定装置を開発し、その試験観測に成功した。

### 3. 5 補償光学の効能

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ごく大まかな成分のみを補償することを部分補償という。国立天文台では補償光学の手初めとして、平面鏡を高速で駆動して波面の傾きのみを補償する装置を開発した。働きとしては商品化された「プレンビー」カメラと似ているが、動作原理は全く異なる。この装置は星像の揺れを止めるので、「イメージスタビライザー」と呼んでいる。図5に「イメージスタビライザー」を用いた時と用いなかった時の星像の大きさの違いを示す。波面補償がおおまかで良い赤外線の場合、「イメージスタビライザー」を用いるだけでもかなりの像改善になる。

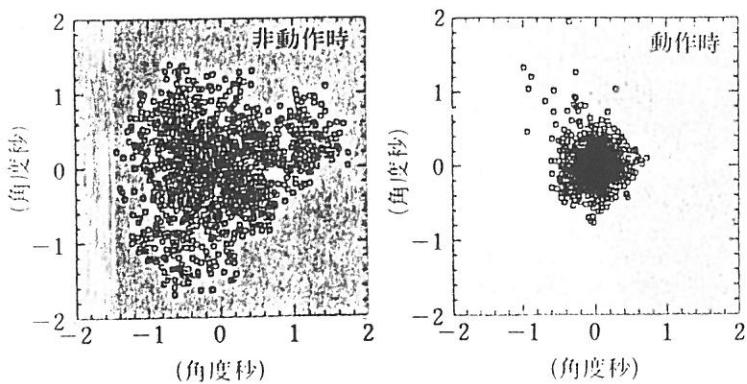


図5 イメージスタビライザによる像改善例

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いくつか成功している<sup>12-13)</sup>（図6）。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。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める補償光学は、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。

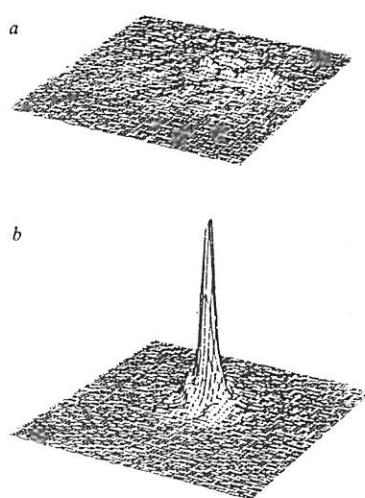


図6 補償光学による星像の改善（文献13より）。（上）補償光学系非動作時、（下）動作時。レーザー星を用い、プロキオン（0等星）を撮影したもの。

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3秒角の星像の、ハワイでの平均的な1秒角の星像、能動光学を用いるJ N L Tでの大気が安定した夜の0.3秒角の星像。微かな星の観測には解像力がものをいうことが分かる。さらに、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には補償光学が実現して、星像が0.1秒角にまで小さくなつた時の同じ星野の見え方を同じスケールで示した。補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合よりはるかに高い。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つたり、より短時間で撮影できるようになる。像がシャープにな

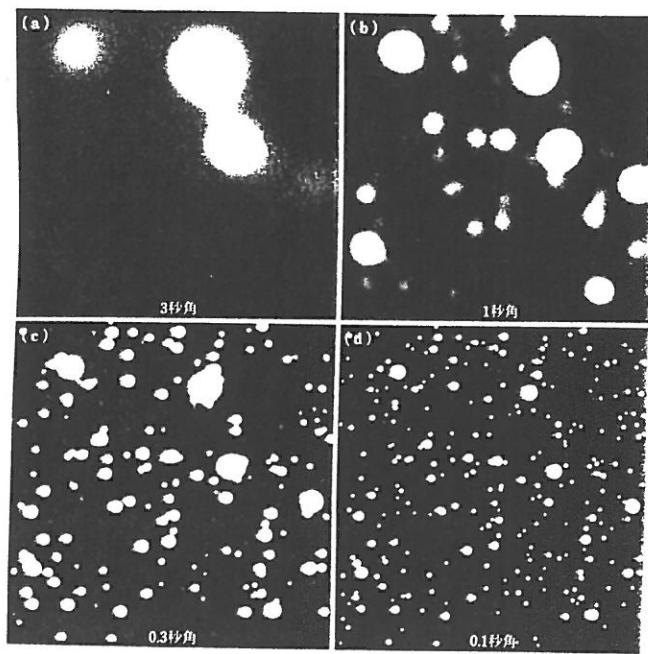


図7 星像の大きさと星の見え方。（左上）典型的な3秒角の星像、（右上）1秒角の星像、（左下）能動光学での0.3秒角の星像、（右下）補償光学が実現したときの0.03秒角の星像。 視野は25秒角四方。可干渉角は10秒角を想定。

るため、分光観測で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、分光器そのものを小型化して安定で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 $\varepsilon$ 、望遠鏡の口径をD、観測波長を $\lambda$ 、焦点面での星像の大きさを $\theta$  [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 (S/N比) は  $\sqrt{\varepsilon D} / (\lambda \theta)$  に比例する。1980年代に光検出器が乳剤写真からCCDなどの半導体撮像素子になったことにより、 $\sqrt{\varepsilon}$  は約10倍になった。現在は4m級の望遠鏡が主流であるが、1990年代には「すばる」など8m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。「すばる」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。さらに補償光学が実用化されれば、 $1/\theta$  が約30倍になる。これらのハイテク技術を取り入れたこれからの望遠鏡は、今までの望遠鏡の常識を大きく変えるものとなるであろう。21世紀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。

## 文献

- 1) 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、第47巻、269-276頁、(1992)
- 2) 家正則、唐牛宏、小林行泰：“動きだした8mすばる望遠鏡計画”、応用物理学誌、第62巻、第6号、540-551頁、(1993)
- 3) 野口猛、家正則、三上良考、鳥居泰男、沖田喜一、山下泰正、田中済、田畠真毅、伊藤昇：“62cm薄型鏡による能動光学実験”、国立天文台報、第1巻、第2号、151-173頁、(1991)
- 4) 家正則：“望遠鏡－能動光学と補償光学”、オプトロニクス、第11巻、第1号、164-170頁、(1992)
- 5) H. W. Babcock : Publ. Astron. Soc. Pacific, Vol. 65, p. 229-236, 1953.

# 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

〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1

Tel : 0422-34-3703、Fax : 0422-34-3608

## 1. 8m「すばる」望遠鏡計画

文部省国立天文台は、一枚鏡としては世界最大の大型光学赤外線望遠鏡（J N L T：愛称「すばる」）の建設を、1991年度から9年計画で進めている<sup>1-2)</sup>（図1）。光学系は口径8m、曲率半径30mの主鏡を副鏡と組み合わせて、カセグレン焦点で合成F/12.2の広視野を実現するリッチ・クレチアン系である。マウントは経緯台方式、ドーム上部は望遠鏡に同期して回転する。建設予定地は地上で最

も天体観測に適しているハワイ島のマウナケア山頂（海拔4200m）である。この望遠鏡の主鏡は、直径8mに対して厚さがわずか20cmの超低膨張ガラスで作る。常識やぶりの薄さだが、鏡面がたわまないようコンピュータ制御の264個のアクチュエータでバランス良く支える。この技術を「能動光学」と呼んでいる。また、この技術の応用として、大気のゆらぎによる星像のゆれやぼけを直す「補償光学」の研究が進められている。「すばる」望遠鏡を例に、天文学における能動光学と補償光学技術について解説する。

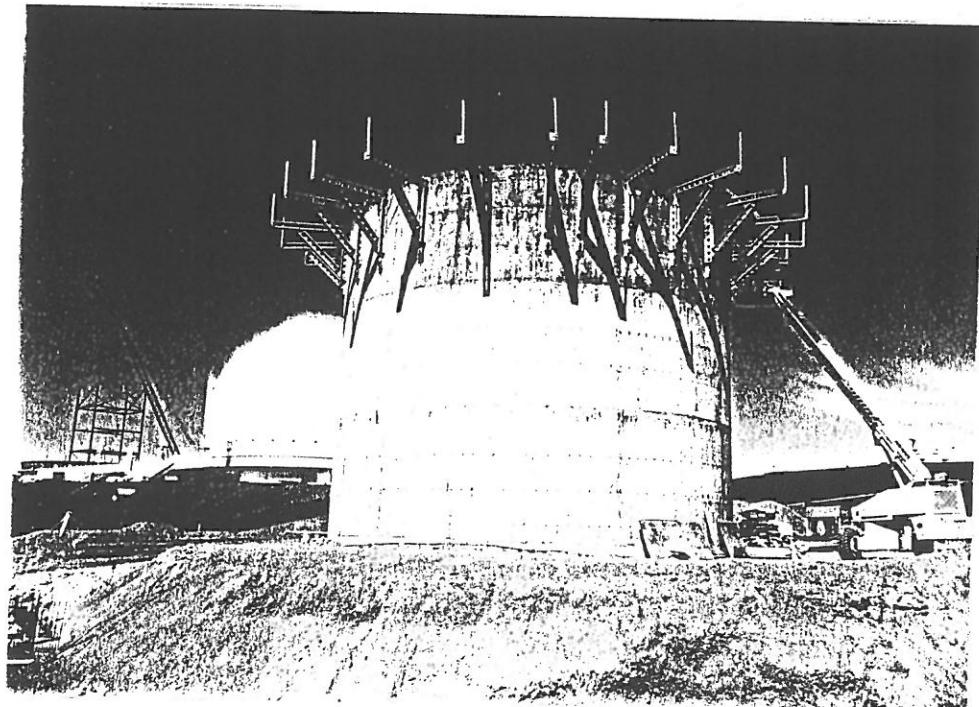


図1 建設が進む「すばる」望遠鏡

- 6) T. Noguchi, M. Iye, H. Kawakami, M. Nakagiri, Y. Norimoto, N. Oshima, H. Shibasaki  
W. Tanaka, Y. Torii, and Y. Yamashita :  
"Shack-Hartmann Wavefront Analyzer",  
Publ. Natl. Astron. Obs., Vol. 1, p. 49-55.  
(1989)
- 7) 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.
- 8) J. W. Hardy : "Instrumental Limitation in Adaptive Optics for Astronomy", SPIE Proc. Vol. 1114, p. 2-13, 1989.
- 9) M. A. Ealey and C. E. Wheeler: Proc. SPIE, 1114, p. 134, 1989
- 10) L. A. Tompson and C. S. Gardner: Nature, Vol. 32, p. 229, 1987
- 11) G. Collins : "Makings Stars to see Stars", Physics Today, Feb. (1992) 17-21, (邦訳:パリティ、7、(1992) 52-59.)
- 12) G. Rousset et al.: Astron. Astrophys., 230, L29, 1990
- 13) 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, Vol. 353, (1991) 141-143.