

能動光学と補償光学

家 正 則

1. 能 動 光 学

巨大構造物である大型望遠鏡を建設するには主鏡を軽量化することが必要である。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。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。能動光学の原理と実際について解説する。

1.1 能動光学の必要性

望遠鏡の鏡面は光の波長程度の変形さえ生じないようにする必要がある。天体を観測するとき望遠鏡はいろんな姿勢に傾く。従って自重のかかる方向は一定していない。鏡の支え方が安易だと、鏡が変形してしまい良い像が得られない。自重変形を小さくするには、主鏡のガラス材を十分に厚くして堅くするのが常識であった。ところが、大型望遠鏡の場合、これではガラス材の重量が非現実的に大きくなり、鏡を支える構造物も大きく重たくなるため、コストが天文学的な数字になってしまう。

鏡を薄くて軽量なものにできれば、全体が身軽になる。このことは、地上の大型光

学望遠鏡に限らず、電波望遠鏡、宇宙空間に打ち上げるアンテナや望遠鏡にも共通の願いであった。薄くて柔らかい鏡を常に理想面形状に保てるようにすることが大型の望遠鏡を実現するための最大の課題であった。

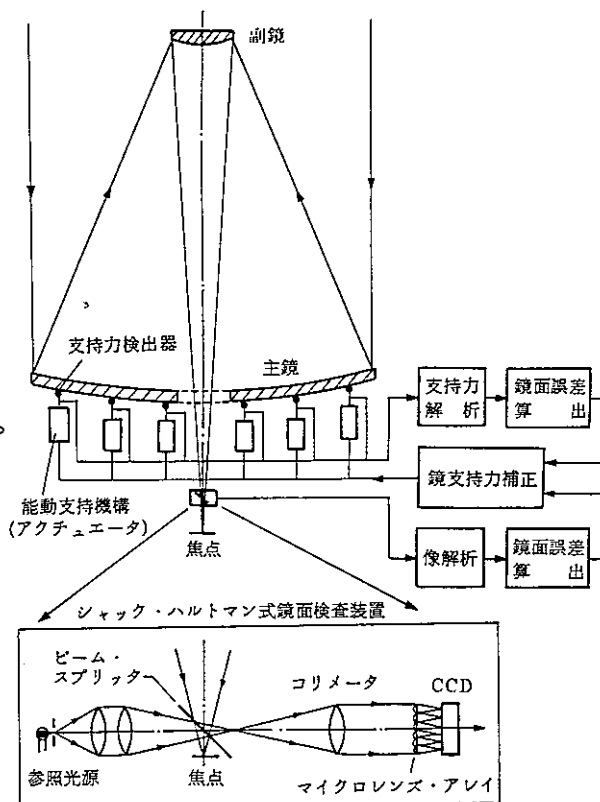


図1 能動光学システムの構成原理

この問題を解決する有力な方法が能動光学方式である。ハワイ島マウナケア山頂（標高4200m）に建設を計画中の大型光学赤外線望遠鏡（JNLT）では、従来の設計常識を破る薄さのガラス材を主鏡に用いる。直径8.2mの主鏡面を光の波長の10分の1（最大振幅0.05 μm ）以内の誤差で理想的な曲面形状に磨きあげ保持するため、能動光学方式を採用する方向で具体的な研究が進められている。

1.2 能動光学の原理

能動光学の構成原理を図1に示す。鏡の形状を「測る」とこと、その情報を使って鏡を「直す」ことをフィードバック回路で結ぶというのが基本的な原理である¹⁾⁻²⁾。鏡面の測定には光学測定と機械測定の独立な2つの方法を用いることができる。光学的方法としては、後述のシャック・ハルトマン型鏡面測定装置で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流れ成分を除去するためおよそ1分間の平均を取る必要がある。このため測定間隔は約1分ごとに行うのが限度であるが、星を用いた直接測定なので信頼度が高い。機械的方法としては、鏡の各支持点の支持力を力センサでモニタし、鏡面変形を推定する。支持力分布誤差と鏡面変形は弾性体に関する「フックの法則」により関係づけられる。機械的な測定は間接的だが、高速度で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0.1秒ごとに支持力の設定を更新する必要があるため、普段は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重サーボ機構がJNLTでは考えられている。JNLTの能動光学機構の全体構成を図2に示す。

能動光学では、望遠鏡の姿勢の変化に伴う鏡の変形だけでなく、研磨誤差や調整誤差による鏡面の理想面からのずれ、温度変化に伴う変形など、時間変化の比較的遅い成分をまとめて補正するこ

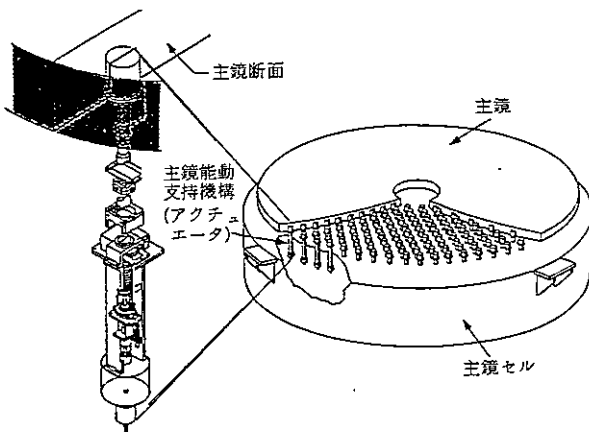


図2 JNLTの能動光学機構

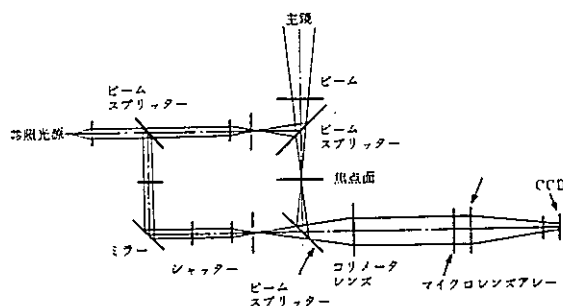


図3 シャック・ハルトマン波面解析装置光学系

とができる。マウナケアでは年平均7m/秒の風が吹いているが、風速の変動が小さいため、風荷重による変形もその一定成分については補正できよう。変動が速い成分については能動光学では補正しきれないが、変動の速い成分は振幅が一般には小さいため、望遠鏡を風からある程度守ってやれば支障はない。

1.3 鏡を測るシャック・ハルトマン装置

鏡面測定用シャック・ハルトマン装置の一例を図3に示す。この装置で星を観測すると、トンボの複眼のようなマイクロレンズ・アレイにより、約300個の星像が焦点面上に結ばれる。主鏡の形状が局所的に理想面からずれるとその部分を通る光波面がゆがむ。光波面のゆがみ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、鏡面の変形状態が分かる³⁾。検出には天体観測用CCDカメラを空冷して除

くため、鏡面測定には1分程度の積分が必要である。

鏡が局所的に「つるつる」に磨かれていれば、変形の高周波成分は本来小さいはずであり、また仮にあってそのような短波長の変形を直すのは困難である。ここで注目するのは低周波成分である。鏡面の変位分布は、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・ツェルニク多項式を用いるのが分かり易い。ツェルニク展開は、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4にツェルニク多項式と光学収差の関係を示す。

このジャック・ハルトマン装置のテストを様々な角度から行った結果、従来の古典的なハルトマン法を上まわる安定性と精度を有することが分かった。装置自体の内部誤差はわずか数nmである。8.2m鏡では、CCDカメラの性能を考慮すると、1分間の積分でおよそ14等星までを鏡面測定の光源として利用できよう。

1.4 鏡を直すアクチュエーター

能動光学のもう1つの重要な要素は正確な支持力制御の実現である。支持力を発生する方法として、油圧や空気圧を利用する流体支持法と、てこやばねを利用する機械支持法とがある。流体支持法は熱の制御がし易いが、流体のシールと圧力弁の精度が常に問題となる。機械支持法のなかでも

てこ法は精密制御が困難だが最も単純である。ばね法は計算機制御に乗り易いが、排熱を考える必要がある。

24トンのガラス材の自重によるたわみが最大でも0.05 μm 以下となるようにするには、約400点で支えれば良いことが有限要素法という計算機プログラムを用いた解析により、確かめられている⁴⁾

任意の姿勢にある鏡の重量は鏡の光軸方向（アキシャル）成分と高度軸に垂直な面内で光軸に垂直な（ラジアル）成分とに分けられる。有限要素法の解析ではアキシャル方向の支持力は0.01%の精度が要求されるのに対し、ラジアル方向の支持力の誤差は0.2%ぐらいまで許される。そこでJNLTでは、精度はやや低い機械的に常にバランスがとれるてこ方式をラジアル支持に採用し、アキシャル支持は高精度で力制御を行うために、ばね方式を採用することになっている。

支持点が324個の場合、各点の受け持つ自重は71kg重となるが、0～90kg重の範囲で5g重の精度で力を発生できるアクチュエーターの開発が必要であった。高精度のアクチュエーターの開発には、まず高精度の力検出器が必要である。従来の歪みゲージ型力センサでは0.1%精度のものが限界であったが、このアクチュエータ用に新たに開発された音叉型の力センサで、0.01%の高精度を実現することに成功した⁵⁾（図5）

1.5 能動光学実証望遠鏡

高精度力センサを組み込んだアクチュエータ、高精度鏡面測定用ジャック・ハルトマン装置、それに特に試作した直径62cm、厚さ2.1cmの薄型鏡を組み合わせ、能動光学の実証実験が1989年秋から国立天文台で行われた。この実験モデルでは62cm鏡を9個のアクチュエータと3個の固定点で支え、鏡面をジャック・ハルトマン装置で測定することができる（図6）。この実験では、まず実際に

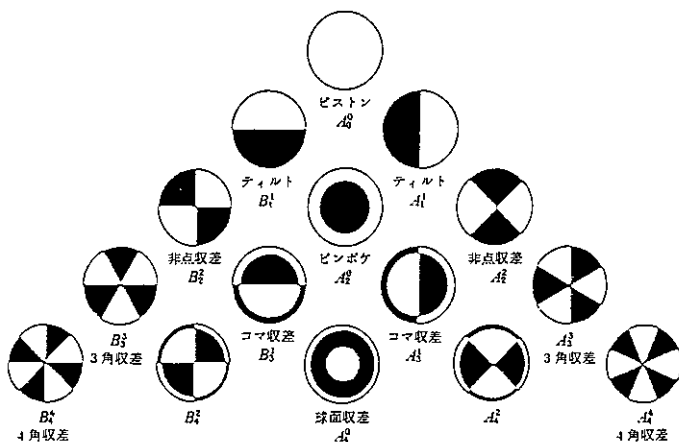


図4 フーリエ・ツェルニク多項式と対応する光学収差

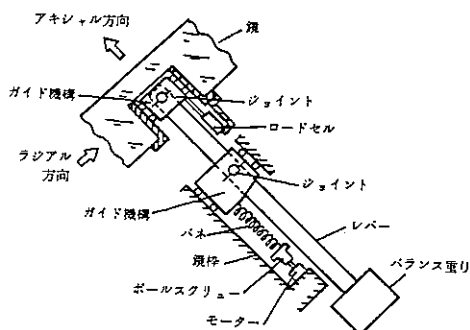


図5 能動光学用アクチュエータの機構原理

62 cm 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7)。アクチュエータ数の多いJNLTでは実質的には任意の変形を矯正できる。どこまで直すかは精度と時間の兼ね合いで決めることになる。また、波面収差測定をもとに閉ループ制御を行うと、基本的には回折限界の結像性能を達成できることも実証された⁶⁾

2. 補償光学

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に、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。補償光学は技術的には能動光学を高速化したものである。その原理(図8)と最近の進展を紹介する。

2.1 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1 mの望遠鏡では回折限界は 5×10^{-7} ラジアン、つまり約0.1秒角になる。ところが、実際に

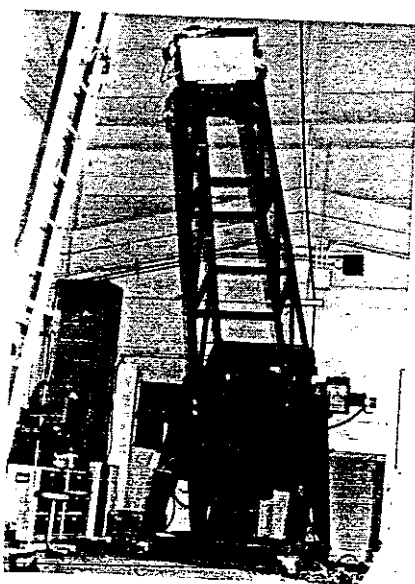


図6 国立天文台の62 cm 薄型鏡能動光学実証望遠鏡

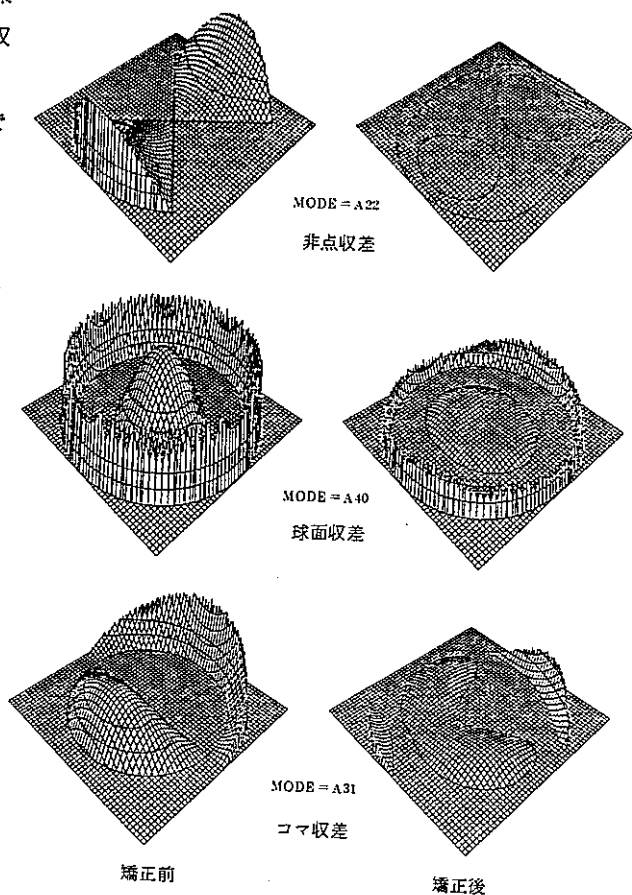


図7 能動光学による62 cm 鏡面矯正の実例。変形量が正の部分のみを表示。(上)非点収差 (中)球面収差 (下)コマ収差 (左列)矯正前の収差 (右列)矯正後の残存収差

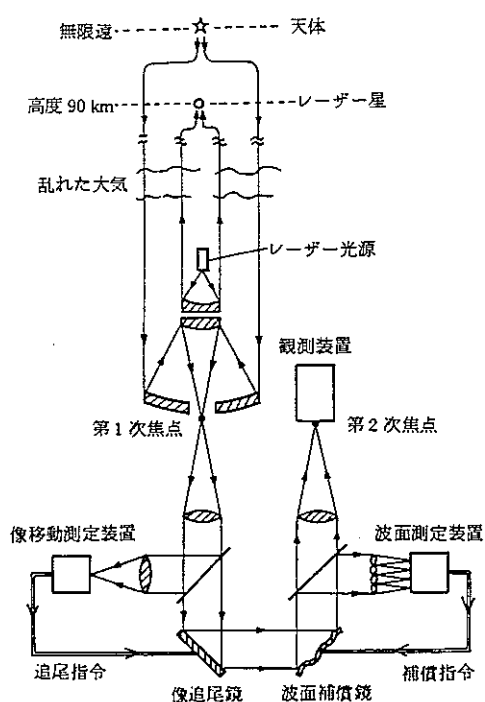


図8 補償光学システム概念。レーザー星を用いて、波面測定装置で大気揺らぎをリアルタイム測定する。像追尾装置と補償鏡を用いて波面を補正すると、望遠鏡の回折限界に迫る解像力を達成できる。

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、かげろうのように星の像を乱してしまうためである。このようなかげろうの強さを、天文学ではシーイングと呼んでいる。

かげろうを完全に無くすには、宇宙空間が大気のない月面に行く必要があると考えられてきた。「大気の揺らぎを測って直せば、地上からでも大望遠鏡の回折限界の分解能が得られる」という補償光学の概念は、1953年にバブコックが提案した⁷⁾。10 cm程度の小口径望遠鏡で星を観察すると、大気の乱れの影響で星がこちらへこちらへとふらふら踊るのが分かる。口径1 m以上の大望遠鏡では、星の位置の踊りかたは小口径の望遠鏡の場合に比べて目立たないが、星が全体にふやけて見える。これは、小望遠鏡で見るランダムな星の踊りが大望遠鏡では多数重ね合わさるためである。

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、便宜的にフリード長 r_0 と書く。 r_0 はシーイングの目安であり、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 くらいである。 r_0 が20 cmのときは、8 mの望遠鏡のなかに約1600個のバラバラな波面の光がやってくる。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、地球上層大気密度揺らぎ、接地境界層の密度揺らぎ、望遠鏡ドーム内部の空気密度揺らぎ、主鏡表面から立ちのぼるかげろうなどである。波面揺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⁸⁾。従って完全な補償を行うには、1 kHz くらいまでの補償能力が要求されることになる。

2.2 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。波面揺らぎの測定法としては、前述のジャック・ハルトマン法が良く用いられている³⁾。この場合は鏡の癖を測る代わりに、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。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ミリ秒程度の時間分解能が要求される。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、高速読み出し専用の2次元固体素子カメラを用いて波面を測定することが可能になりつつある。

最近、ジャック・ハルトマン法と原理的に異なる新しい方法として、ロジエ法が提案されている⁹⁾。ジャック・ハルトマン法では波面の一次微分であ

る勾配の分布を測るのに対し、ロジエ法では波面の2次微分である曲率の分布と周辺での勾配の分布を測る。基本的には、周辺での勾配を境界条件として、内部での曲率測定値を2回積分して波面を再現する。この方式の利点は、測定した曲率の誤差信号を対応するアクチュエータへの入力信号として、直接アナログ入力できる可能性があることである。直接フィードバックをしない場合には、基本的には2回積分を要する方式なので誤差が積み重なりやすい。

2.3 補償鏡

補償鏡を用いた補償光学の試みは1970年代から始められたが、レーザー光の絞り込みをねらった開発が中心であり、¹⁰⁾ 天体観測への応用は本格的には進まなかった。

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ため、主鏡を矯正変形させることはできない。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。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。ピエゾ素子ではその発熱、ヒステリシスなどの制御に工夫が要するが、技術的には天体観測用補償鏡は実現可能とされている。図9は36個のニオブ酸マグネシウム塩(PMN)ピエゾ素子を用いた補償鏡の実例である。¹¹⁾

別の方式としては、多数の小さな鏡を独立に駆動する方式(セグメント方式)があるが、¹²⁾ 個々の鏡の位相を合わせるのが大仕事である。液晶型の位相変調素子を用いる方式も考えられるが、偏光を伴うため応用範囲が限られる。

波面測定装置で測定した波面変位分布から、補償鏡のアクチュエータの制御量を算出するには、高速の専用プロセッサを用いる。演算の安定化の

ため、モード・フィルタリングを行うのが望ましく、能動光学の場合と同様に波面誤差を円盤に対する完全直交関数系で展開する。

2.4 レーザー星

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。任意の天域を観測するには、どの方向でも波面の揺らぎを測るのに十分な明るさの星がなければならない。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。ところが、任意の視野1分角にほぼ確実に入ってくる最も明るい星は約20等星でしか

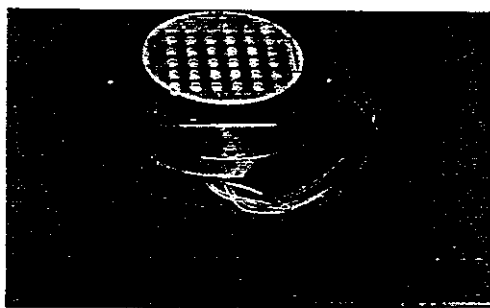


図9 36素子ピエゾ・アクチュエータを有する補償鏡¹¹⁾

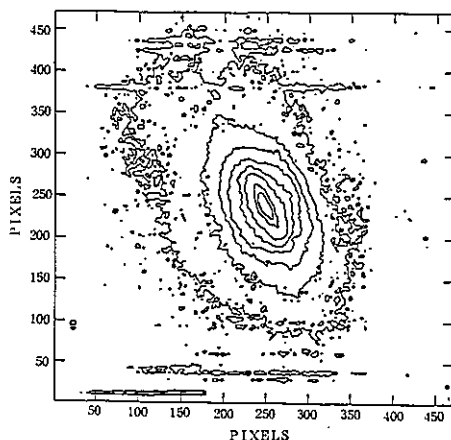


図10 初めて得られたレーザー星の像¹³⁾ 水平の筋は、本物の星がいくつか望遠鏡の前を横切ったもの。

い。任意の方向に波面測定用に 10 等星があれば良いのだが、1 分角以内に 10 等星がある視野は全天の 0.3 % でしかない。

地表から約 90 km の上層大気中に、ナトリウム原子の密度が濃い厚さ 10 km ぐらいの層がある。ナトリウム原子を励起する波長 589 nm の D 線（高速道路のトンネル照明などに使われているオレンジ色の光）で発振する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レーザー星を任意の方向に作ることができる。レーザー星を作る試みは近年トンプソンらにより始められており、1 分角程度の人工星を作ることに成功している¹³⁾ (図 10)。レーザー・ビームをより絞り込むには、人工星をつくるレーザー望遠鏡自体も補償光学系にすることが必要であるが、試算によると、200 パルス/秒、出力 30 ワット程度の Nd:YAG レーザーまたはエキシマレーザーを用いれば、実用に足る人工星を作ることができそうである¹⁴⁾

2.5 補償光学の実例

波面の揺らぎを完全に補償するのが全補償と呼ぶ。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 11 に国立天文台で開発した像追尾装置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。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。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。

図 12 は、ESO（欧州南天天文台）の口径 3.6 m の望遠鏡に補償光学装置を取り付けて観測することにより、解像力が劇的に改善されたことを示している¹⁵⁾ 赤外線の L バンド（波長 3.5 μm ）で、補償光学試作機を作動させて観測した場合と、作動させずに観測した場合を対比している。補償なしの像の直径は約 0.8 秒角であり、シーイングの大きさに相当している。補償を行うと、像の鋭さは約 3.5 倍になり、像直径は 0.22 秒角となった。これはこの波長での回折限界に相当し、回折リン

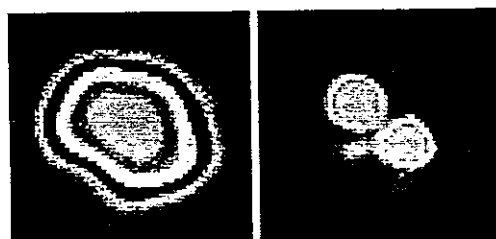


図 12 欧州南天天文台（ESO）での、補償光学による実証観測¹⁵⁾ 19 素子補償光学装置により、角距離 0.38 秒角の 2 重星を赤外線カメラで分解することに成功した。（左）補償ループ無しの場合（右）補償ループ有りの場合

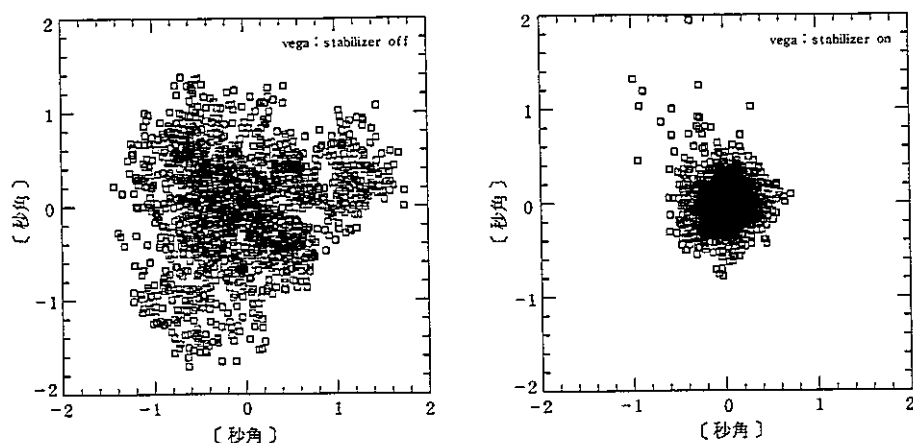


図 11 イメージスタビライザによる像改善例

グが良く見える。解像力が高まったおかげで、この5.5等星が二重星であることが分かった。二つの星の間隔は0.38秒角である。

この実証観測に使われた補償光学試作機は、5行5列のマイクロレンズアレーと100×100画素の2次元レチコン型検出器を備え100Hzで9等星まで波面測定を行えるジャック・ハルトマン型波面測定装置、19個のピエゾ・アクチュエータにより鏡面を±7.5μmまで変形できる直径70mmの補償鏡、最低次の波面傾斜のみを独立に補償するピエゾ駆動の像追尾鏡、波面誤差から各アクチュエータの駆動量を計算する専用プロセッサ、それに32×32画素のインジウム・アンチモン素子赤外カメラからなる¹⁶⁾

3. そのメリット

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13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、木曽観測所で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。JNL Tの場合、これは可視光では0.02秒角に相当する。図13には補償光学が実現して、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5倍のスケールで拡大して示した。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のス

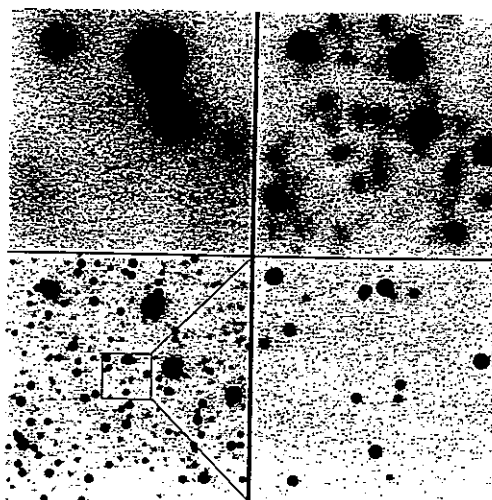


図13 星像の大きさと星の見え方。(左上)典型的な3"の星像、(右上)1"の星像、(左下)能動光学での0.3"の星像、(右下)補償光学が実現したときの0.03"の星像。視野は13"四方。右下の図のみ2.6"四方。

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 $S/N \propto \sqrt{\epsilon} D / (\lambda \theta)$ と表すことができる。

1980年代に光検出器が乳剤写真からCCDなどの半導体撮像素子になったことにより、 $\sqrt{\epsilon}$ は約7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JNL T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。JNL 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たす役割は大きい。

参 考 文 献

- 1) Wilson, R.: 1986, in "ESO's Very Large Telescope", p. 417.

- 2) Iye, M. : 1989, Astrophys. Space Sci., Vol. 160, p. 149.
- 3) 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.
- 4) Watanabe, M. ; 1987, Ann. Tokyo Astron. Obs. 2nd Ser., Vol. 21, p. 241.
- 5) Nishimura, S., Yamashita, Y., Iye, M., Itoh, N., Mikami, I. : 1988, in Very Large Telescopes and Their Instrumentation, ed. M. H. Ulrich, ESO, Garching, p. 577.
- 6) Iye, M., Noguchi, T., Torii, Y., Mikami, Y., Yamashita, Y., Tanaka, W., Tabata, M., and Itoh, N. : 1990, SPIE Proc., Vol. 1236, p. 929.
- 7) H. W. Babcock : 1953, Publ. Astron. Soc. Pac., Vol. 65, p. 229.
- 8) F. Roddier, M. Northcott, and B. Graves : 1990, preprint to appear in Publ. Astron. Soc. Pacific.
- 9) N. Roddier and F. Roddier : 1989, Proc. SPIE, 1114, p. 92.
- 10) J. W. Hardy : 1981, in High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelength, ESO Conference, Garching, p. 25.
- 11) M. A. Ealey and C. E. Wheeler : 1989, Proc. SPIE, 1114, p. 134.
- 12) N. A. Massie : 1982, Proc. SPIE 332, p. 377.
- 13) L. A. Thompson and C. S. Gardner : 1987, Nature, 328, p. 229.
- 14) C. S. Gardner, B. M. Welsh, and L. A. Thompson : 1989, Proc. SPIE 1114, p. 191.
- 15) F. Merkle et al. : 1990, The Messenger, ESO, 60, p. 9.
- 16) G. Rousset et al. : 1990, Astron. Astrophys., 230, L29.

ち
た。
う
大

主催 日本経済新聞社 (社)日本オプトメカトロニクス協会

同時開催 ファクトリーオートメーションショー'91

オプトメカトロニクスショー'91

光がひらく技術のとびら

1991年3月5日(火)～8日(金)

午前10時～午後5時(ただし最終日8日は午後4時終了)

東京・晴海見本市会場 A館 入場料 500円

当協会の展示ブースもございます。(本誌挟込みの招待券をご利用下さい。)