

特集回望遠鏡光学—反射編

ハイテク望遠鏡 JNLT

—能動光学と補償光学—

家 正則

(国立天文台)

■はじめに

国立天文台はハワイ島マウナケア山頂に、一枚鏡としては世界最大の大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT) を建設する計画を練っている。性能向上とコストダウンを図るため、この望遠鏡の主鏡は直径 8.3m に対して厚さがわずか 20cm のガラス材で作る。磨いた鏡面が光の波長ほどもたわまないように保つため、JNLT の研究グループは「能動光学」方式という制御技術を開発した。また、この新技術の応用として、大気のゆらぎによる星像のゆれやぼけを直す「補償光学」の開発にも着手している。

JNLT 計画を簡単に紹介し、そこで用いられるハイテク技術の目玉である能動光学と補償光学について解説する。

1. JNLT 計画

1.1 望遠鏡大型化の歴史

ガリレオが 1610 年に望遠鏡を天体観測に用いて以来、宇宙を見る人類の瞳の大きさは着実に増大してきた。図 1 は望遠鏡の口径が大きくなってきた歴史を示したものである。レンズを用いた屈折式望遠鏡は 1897 年にヤーキス天文台に完成した 101cm 望遠鏡が最大で最後となった。屈折式は望遠鏡の筒が長くなり不便なのと色収差を完全には除けないため、これ以後の大型望遠鏡はすべて反射式望遠鏡となった。1917 年にウィルソン山の 257cm 望遠鏡が完成し、1948 年にはパロマー山の 508cm 望遠鏡が完成した。

おもしろいことに、1970 年代以降も 4m 級望遠鏡が 10 台ほど建設されたが、5m 以上の望遠鏡はソ連の 6m 以外は一台も建設されていない。これには 2 つの理由がある。ひとつは 5m 以上の望遠鏡を精度良く作るのが技術的に困難であったためである。ソ連の 6m 望遠鏡も成功作とは言えないようである。もうひとつのは、この間に光検出器が乳剤写真から CCD などの半導体検出器に発展したことにある。望遠鏡を大きくしないでも実質的に観測能率を大幅に向上させることができたのである。

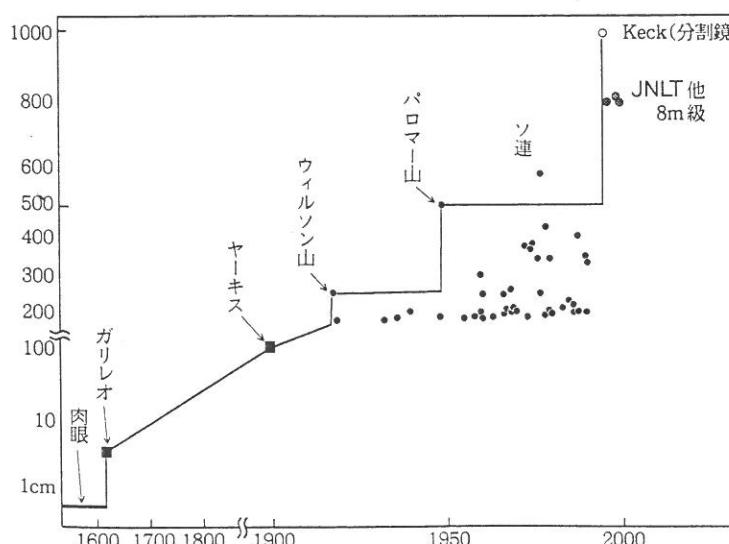


図 1 望遠鏡口径増大の歴史。■は屈折望遠鏡、●は口径 1.8m 以上の反射望遠鏡を示す。

だが、検出器の技術が成熟し、

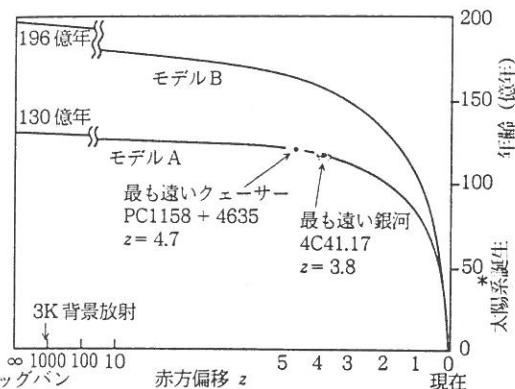


図2 赤方偏移 z と遡及時間。時間のスケールは採用する宇宙モデルにより異なる。モデルAはハッブル定数 $H_0 = 50\text{km/sec/Mpc}$, $q_0 = 0$ の場合で、宇宙年齢は約130億年となる。 $H_0 = 50\text{km/sec/Mpc}$, $q_0 = 0.5$ のモデルBでは宇宙年齢が約196億年となる。

1980年代にはCCDの量子効率は100%に近づいた。これ以上の大幅な改善が見込めなくなつたため、21世紀に向けて再び巨大望遠鏡を建設しようという機運が盛り上がってきた。

1.2 JNLT計画

国立天文台では1984年から全国の天文学研究者と協力してJNLT計画を練ってきた。これは、天体観測を行なうのに世界一適した場所とされているハワイ島のマウナケア山頂（海拔4200m）に世界一の望遠鏡を作ろうという計画である。

近年の観測天文学は宇宙の果てに迫ろうとしている。膨張宇宙論によれば、遠い天体ほど高速度でわれわれから遠ざかっている。遠ざかる速度はドップラー効果によるスペクトルの赤方偏移 z を測れば求められる。図2は赤方偏移と遡及時間（あるいは天体からの光の伝播時間）の関係を、ある宇宙モデルについて示したものである。現在知られている最も遠い天体は $z = 4.73$ のクエーサーである。この天体は、宇宙モデルにもよるが、宇宙が始まってからせいぜい10億年程度の宇宙初期の天体である。遠い天体を研究することは、宇宙が若かった時代のようすを調べることに通じる。もっと遠い昔の天体を発見し詳しく観測できれば、宇宙の始まりをよりよく理解できるはずである。そのような天体からの光は大きく赤方偏移しているので、赤外線での観測能力が重要となる。図3に天体の主な線スペクトルの波長が赤方偏移により変化するようすを

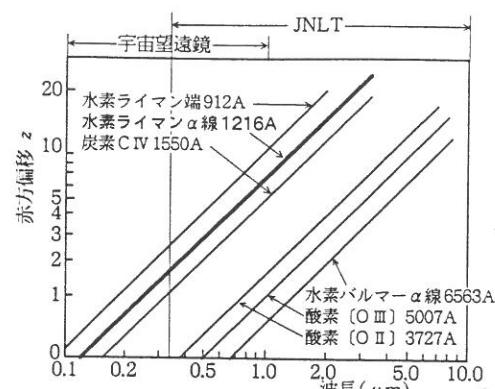


図3 主なスペクトル線の波長と赤方偏移 z 。最も重要なスペクトル線である水素原子のライマン α 線(1216Å)は、 $z > 7$ の天体では $\lambda > 1 \mu\text{m}$ の赤外線として観測される。

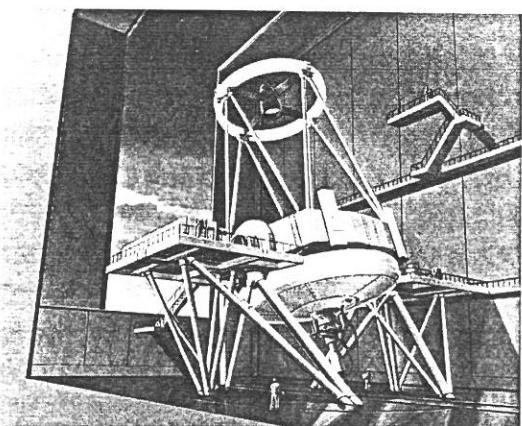


図4 JNLTの完成予想図。

示した。例えば、最も重要なスペクトル線である水素原子のライマン α 線は赤方偏移 $z > 7$ では赤外線観測装置を備えた望遠鏡でないと観測できないことがわかる。JNLTは、宇宙誕生の謎を解き明かすため、このような観測が出来るように計画された望遠鏡である（図4）。

2. 能動光学

巨大な望遠鏡を建設するには主鏡を軽くすることがポイントとなる。軽くし過ぎると鏡が柔らかくなり変形してしまう。今までの望遠鏡は「堅い」鏡を用いるのが常識であった。堅い鏡は変形してしまったら直しようがない。JNLTでは「少し柔らかめ」の鏡を用いる。柔らかさを逆手に取って、いつも設計どおりの鏡面になるように制御しようというのが発想の原点である。能動光学（Active Optics）と呼ぶこの方式で良い望遠鏡を安く実現できることが、JNLTグループ

が試作したモデル望遠鏡で実証された。能動光学の原理と実際にについて解説する。

2.1 能動光学の必要性

望遠鏡の鏡面は設計形状からの誤差が光の波長の14分の1以下になるように保つ必要がある。8mの望遠鏡で約30nmという精度になるが、これはスケールアップすると直径80kmの土地を0.3mmの精度で地ならしすることに相当する（図5）。

望遠鏡はいろんな姿勢に傾くため、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。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が重くなり過ぎ、鏡を支える構造物も大きく重くなるため、コストが「天文学的な数字」になってしまう。

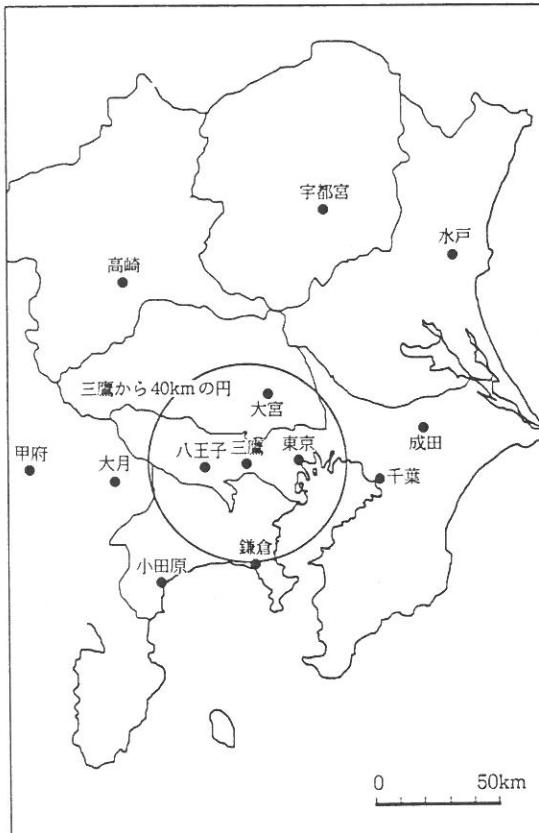


図5 JNLTの鏡面精度は直径80kmの土地を0.3mmの精度で地ならしするようなものである。

鏡を軽くできれば、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、電波望遠鏡や宇宙空間に打ち上げるアンテナにも共通の願いであった。軽くてしかも精密な鏡をいかにして作るかが最大の課題であった。

この問題を解決する有力な方法が能動光学方式である。

2.2 能動光学の原理

能動光学の原理を図6に示す。鏡面の形状を「測る」とこと、その情報を使って鏡の形を「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。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、後で述べるシャック・ハルトマン型鏡面測定装置で比較的明るい星を観測し、鏡の変形のようすを直接測る。光学的測定は大気の乱流成分を除くために、およそ1分間の平均を取る。このため測定は約1分ごとに行なうのが

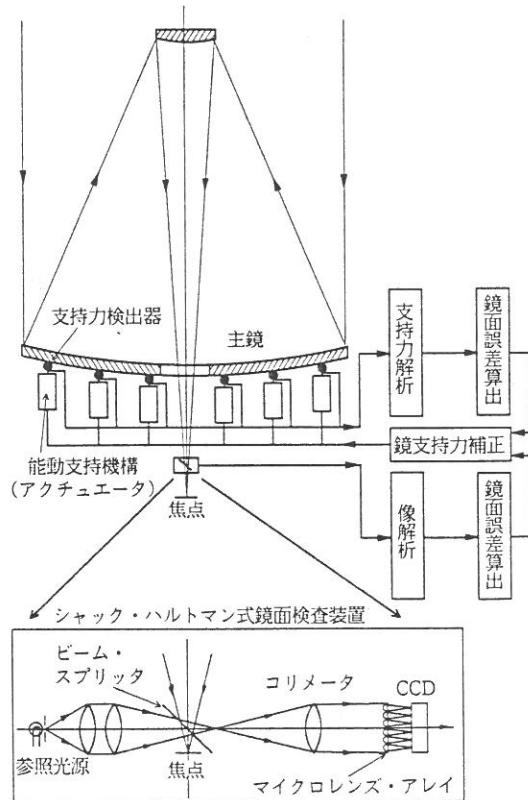


図6 能動光学システムの構成原理。

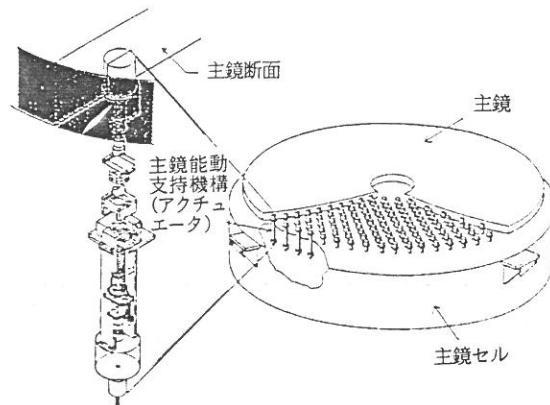


図7 JNLTの能動光学機構の予想図。

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、鏡を支える力の分布をセンサでモニタし、鏡面変形を推定する。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。機械的な測定は間接的だが、高速度でサンプリングを行なえるという利点がある。天体を追尾中は約0.1秒ごとに支持力を調整する必要があるので、普段は機械的な測定をもとに制御を行ない、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JNLTでは考えられている。JNLTの能動光学機構の概念図を図7に示す。

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や研磨誤差など、時間変化の比較的遅い成分や変化しない成分を

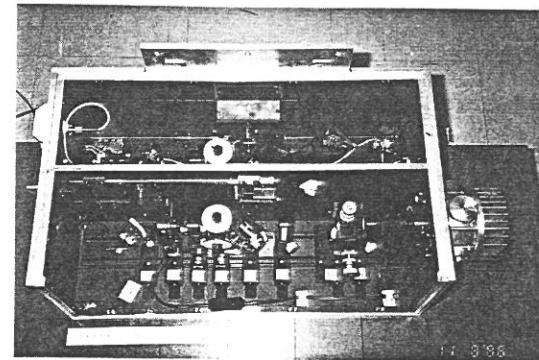


図8 国立天文台で開発したシャック・ハルトマン型波面解析装置。

まとめて補正することができる。マウナケアでは年平均7m／秒の風が吹いているが、風速の変動は小さいため、風圧による変形もその一定成分については補正できるかもしれない。

2.3 鏡面を測る装置

鏡面測定用シャック・ハルトマン装置の一例を図8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。鏡が局所的に変形するとその部分で反射された光線の向きが変化する。光線の傾きに応じて焦点面上の星像の位置が移動する。300個の星像の配置のずれから、鏡面の変形状態がわかる。検出には天体観測用CCDカメラを冷却して用いる。この

シャック・ハルトマン装置の測定誤差はわずか数nm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。また仮にあってもそのような細かい変形を直すのは困難である。ここで注目するのは大まかな変形である。鏡面の変形は、ガラス円盤の図9のような基本的な変形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充分である。図9のパターンは基本的な光学収差のパターンにも対応している。

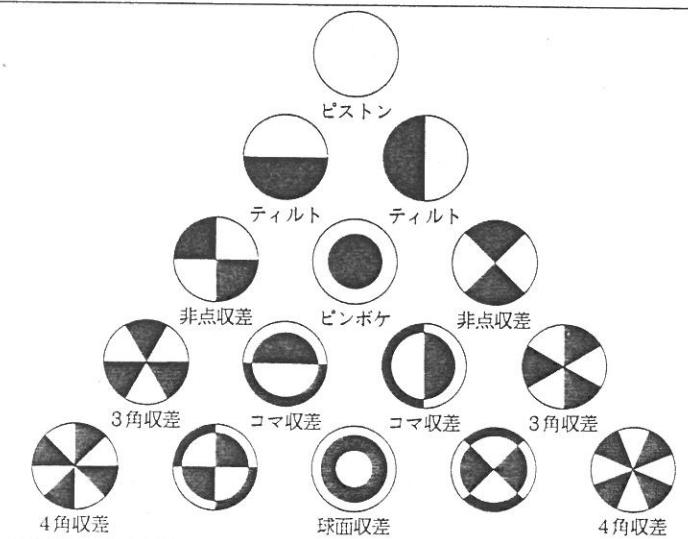


図9 鏡の基本変形パターンと対応する光学収差。

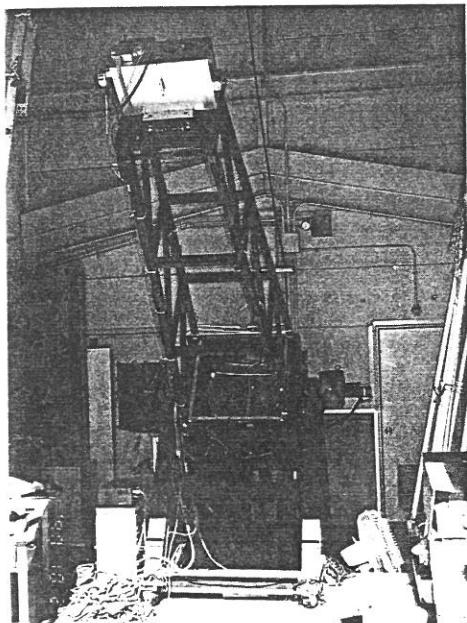


図10 国立天文台の62cm薄型鏡能動光学実証望遠鏡。

2.4 鏡を直すアクチュエーター

能動光学を実現するには正確な支持力の制御が必要である。支持方式としては、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がある。流体支持法は流体のシールと圧力弁の精度が問題となる。機械支持法のなかでも、てこ法は精密な制御が困難だが最も単純である。モータ駆動のバネを用いる方法は計算機制御に適している。

24トンのガラス材の自重によるたわみが最大でも $0.1 \mu\text{m}$ 以下となるようにするには、約300点で支えれば良いことが計算機を用いた解析により、確かめられている。

任意の姿勢にある鏡の重量は、鏡の光軸方向(アキシャル)成分と鉛直面内で光軸に垂直な(ラジアル)成分とに分けて支える。アキシャル方向の力は0.01%の精度が必要なのに対し、ラジアル方向の力の誤差は0.2%ぐらいまで許される。そこでJNLTでは、精度はやや低いが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のばね方式を採用することにしている。

支持点が324個の場合、各点の受け持つ自重

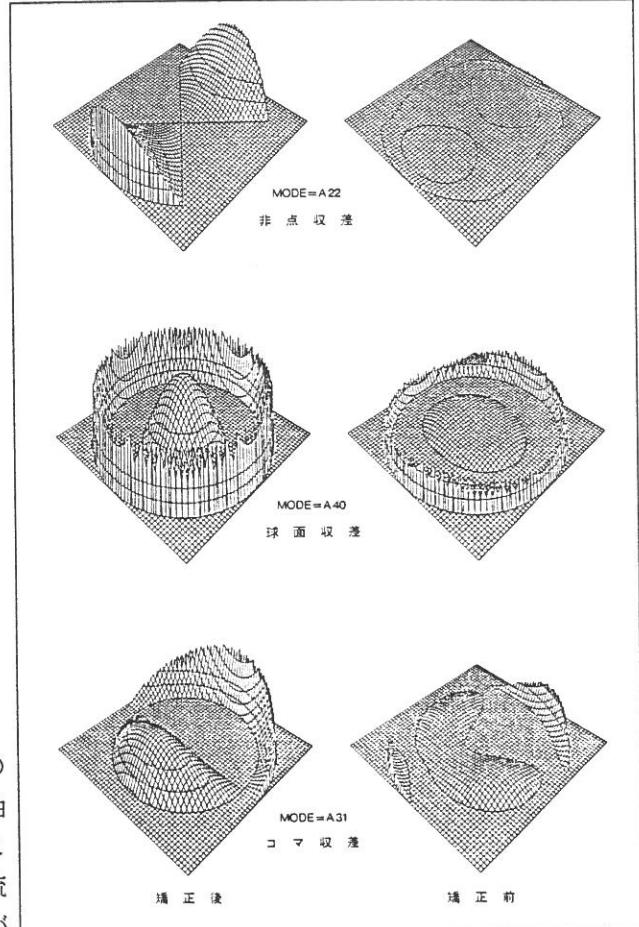


図11 能動光学による62cm鏡面矯正の実例。変形量が正の部分のみを表示。上：非点収差。中：球面収差。下：コマ収差。左列：矯正前の収差。右列：矯正後の残存収差。

は71kg重となる。鏡面を補正するための力を考へると0~90kg重の範囲にわたり、5g重の精度で力を制御できるアクチュエーターの開発が必要である。JNLT研究グループではそのようなアクチュエーターの試作にも成功している。

2.5 実証望遠鏡

試作した高精度アクチュエーターと鏡面測定用シャック・ハルトマン装置を直径62cm、厚さ2.1cmの薄型鏡と組み合わせて、能動光学の実証実験を1989年秋から国立天文台で行なった。この実験モデル(図10)では62cm鏡を9個のアクチュエーターと3個の固定点で支え、鏡面をシャック・ハルトマン装置で測定する。この実験では、まず実際に62cm鏡を用いて鏡面変形の矯正を試みた。アクチュエーターが9本しかなかったため、複

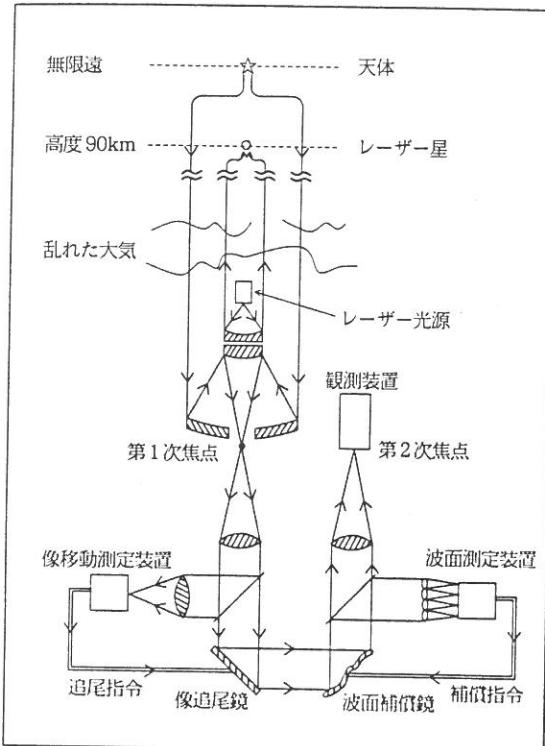


図12 補償光学システムの概念。レーザー星を作り、波面測定装置で大気の揺らぎを実時間測定する。像安定化装置と補償鏡を用いて波面を補正すると、望遠鏡の回折限界に迫る解像力を達成できる。

難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11)。アクチュエータ数の多いJNLTでは、原理的にはより一般的な変形も矯正できる。どこまで直すかは精度と時間の兼合いで決めるところになる。複雑な系の制御となるので、日本で発展の著しいファジー制御の考え方を取り入れることを検討している。

3. 補償光学

天体からの光は大気中の乱流によりその方向がわずかに乱される。4m級の大型望遠鏡の解像力は理論的には0.03秒角程度となるが、大気の乱れのため実際には1秒角程度にしかならなかった。理論的限界に近い解像力を実現するために、光線の乱れを時々刻々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。能動光学と補償光学の共通点と違い点を

	能動光学 Active Optics	補償光学 Adaptive Optics
矯正対象となる誤差	重力変形 熱変形 研磨誤差の一部 光学調整誤差の一部 経年変化 風圧変形の一部	大気乱流による星像の揺れ、ピンボケ、および高次波面誤差
補償要素	主鏡	補償鏡
時定数	1Hz	1kHz

表1 能動光学と補償光学の比較。

表1にまとめて比較し、補償光学の原理(図12)と最近の進展を紹介する。

3.1 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。たとえば、直径1m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1m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、かけらうのように星の像を乱してしまうためである。このようなかけらうの強さのことを、シーイングと呼んでいる。

かけらうを完全になくすには、宇宙空間か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すことができれば、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。口径10cm程度の小望遠鏡で星を観察すると、大気の乱れの影響で星があちらへこちらへとふらふら踊るのがわかる。口径1m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、小望遠鏡で見え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。光線の束が揃っていると見なせるのはせいぜい20cmぐらいまでである。つまり8mの望遠鏡の中には、約1600個のバラバラな光線の束がやってきている。このバラバラな光線の束を一つに揃えようというのが補償光学である。このような光線の束は

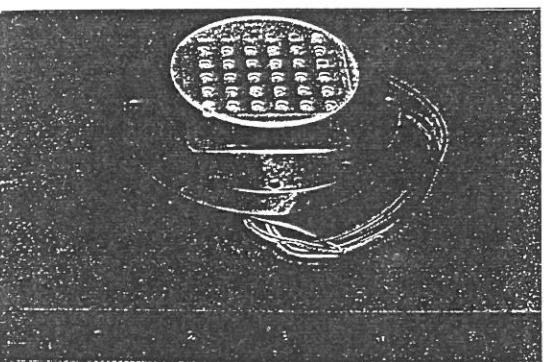


図13 36個のピエゾ素子で駆動される補償鏡(イーリーとホィラー 1989)。

かなり速く動き回るので、完全な補償を行なうには1kHzぐらいまでの補償能力が要求されることになる。

3.2 波面測定

天体からの光線の束が、あるいは光を波動と考えるとその波面が、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。光波面の揺らぎの測定法としては、前述のシャック・ハルトマン法がよく用いられている。こんどは鏡面の辺を測る代わりに、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。微かな星を光源として高速にこのような測定をすることは容易ではない。だが、半導体技術の急速な進歩により、高速読み出し専用のカメラを開発して波面を測定することが可能になりつつある。

3.3 補償鏡

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間に合わない。焦点後の光学系がつくる主鏡像の位置に薄くて柔らかい鏡を置き、この鏡面を波面誤差と逆向きに変形させる。一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ピエゾ素子が用いられる。図13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。

別的方式としては、多数の小さな鏡を独立に

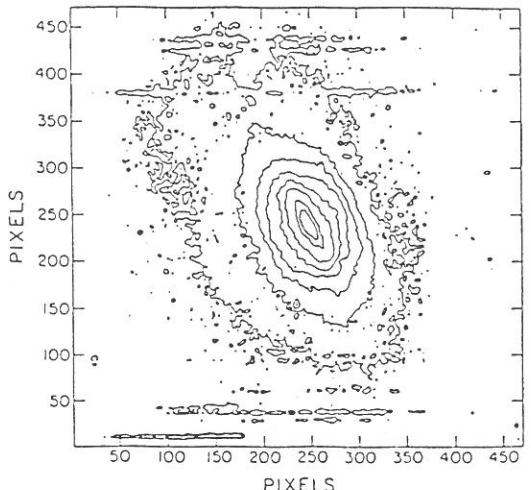


図14 初めて得られたレーザー星の像。水平の筋は、本物の星がいくつか望遠鏡の前を横切ったもの(トンプソンとガードナー 1987)。

駆動する方式(セグメント方式)もあるが、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。波面測定装置で測った波面誤差分布から、補償鏡のアクチュエータの制御量を計算するには、高速の専用プロセッサを用いる。

3.4 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。実際に観測したい天体が充分明るければ、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。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。

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充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可能性がある。レーザー星を作る試みは近年トンプソンらによ

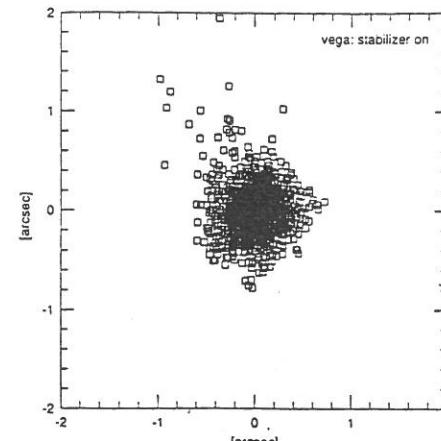
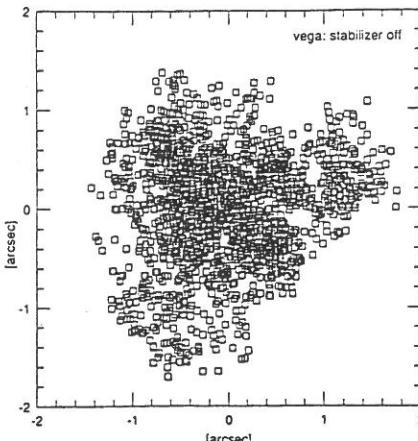


図 15 イメージスタビライザによる像改善例(東京大学理学部の高遠徳尚氏作成)。

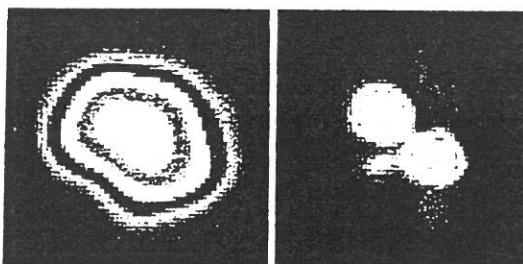


図 16 欧州南天天文台(ESO)での補償光学による初めての観測。補償光学により二重星を識別することに成功した(ESO メッセンジャー誌)。

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(図 14)。

3.5 補償光学の実例

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始めとして、平面鏡を高速で駆動して波面の傾きを補償する装置を開発した。これは星像の揺れを止めることに相当するので、像安定化装置と呼んでいる。図 15 に像安定化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。波面補償がおおまかでよい赤外線の場合、像安定化装置を用いるだけでもかなりの像改善になる。

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、天体観測への応用は本格的には進まなかった。

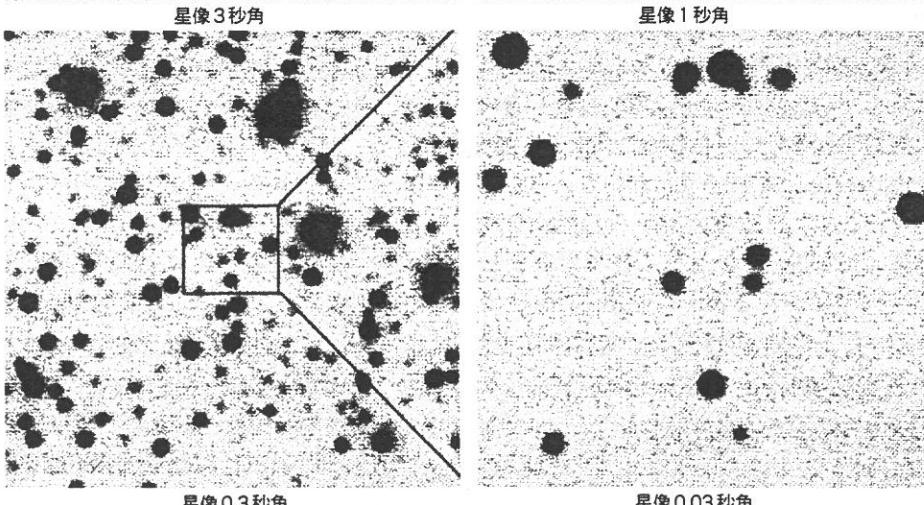
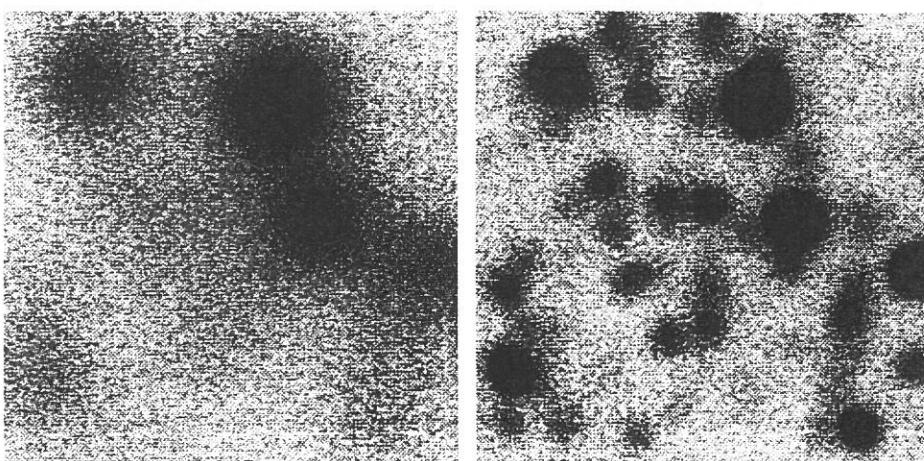
図 16 は、ESO(欧州南天天文台)の口径 3.6m の望遠鏡に補償光学装置を取り付けて観測する

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。波長 $3.5 \mu\text{m}$ の赤外線で、補償光学試作機を作動させて観測した場合と、作動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、シーディングの大きさに相当している。補償を行なうと、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ている。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わかった。ふたつの星の間隔は 0.38 秒角である。この試作機は赤外線用の装置で 19 個のアクチュエータを持つものであったが、国立天文台では可視光用の試作機の開発に取り組んでいる。

4. 新技術のメリット

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 17 である。国内の観測所での平均的な星像の大きさは岡山天体物理観測所で 2.3 秒角、木曾観測所で 2.7 秒角と言われている。条件の良いハワイの既存の望遠鏡では平均 0.7 秒角程度を達成しているところがある。能動光学で鏡の変形を除去できれば、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わかる。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。JNLT の場合、これは可視光では 0.02 秒角に相当する。図 17 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

図 17 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 5 倍拡大。



野の見え方をもスケールを 5 倍に拡大して示した。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。したがって、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ます。

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

1980 年代に光検出器が乳剝写真から 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 JNLT 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。JNLT 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。21 世紀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。