

第17回

3-003-3

光技術応用システムの フィージビリティ調査報告書 XI

—高感度・高分解能光計測技術—

平成 3 年 3 月

財團 法人 光産業技術振興協会

3.1.3 能動光学と波面補償光学

(1) 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）を建設する計画を推進している。性能向上とコストダウンを実現するため、この望遠鏡の主鏡は直径8.2mに対して厚さがわずか0.2mのガラス材で作る。

鏡面のたわみを光の波長より十分に小さくするため、JNLTでは「能動光学」方式という制御技術を用いる。この新技術を発展させると、大気のゆらぎによる星像の揺れやぼけを直す「補償光学」が実現する。能動光学と補償光学の原理と開発状況についてJNLT計画を軸に解説する。

(2) JNLT計画

(a) 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3.1.3-1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。1970年代以降も4m級望遠鏡が10台ほど建設されたが、口径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。これは5m以上の望遠鏡を精度良く作ることが技術的に困難だったためであるが、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、間接的な原因となった。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からである。

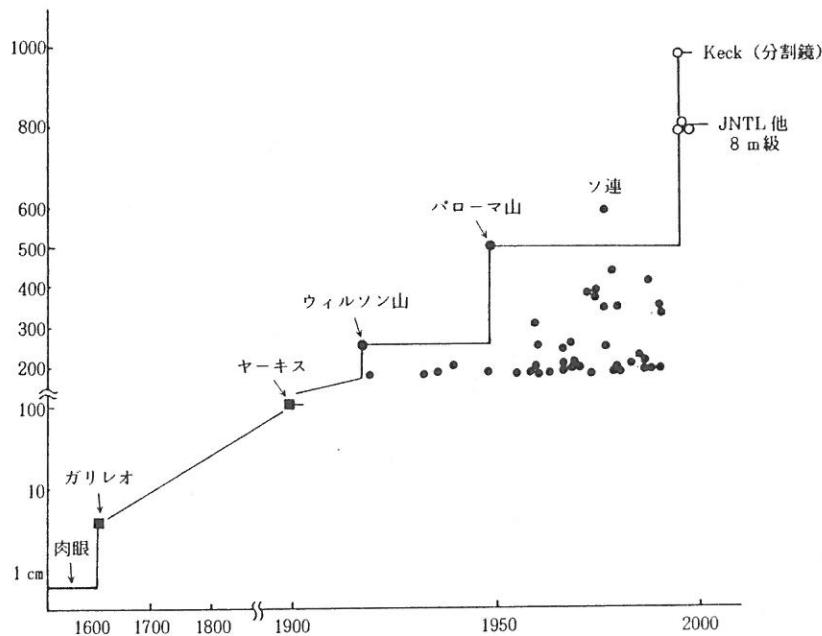


図3.1.3-1 望遠鏡口径増大の歴史。角印は屈折望遠鏡、丸印は反射望遠鏡を示す。

だが、1980年代には検出器の技術が成熟し、これ以上の量子効率の大幅な改善が見込めなくなった。このため、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来た。

(b) JNLT計画

国立天文台では1984年からJNLT計画を練ってきた。これは、天体観測を行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^{1) 2)}。

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我々から遠ざかっている。遠い天体を研究することは、宇宙が若かった時代の様子を調べることに通じる。そのような天体からの光はドップラー効果により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。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3.1.3-2）。

(3) 能動光学

(a) はじめに

JNLTのような巨大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。だが、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³⁾。能動光学（Active Optics）と呼ぶこの方式で精度の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。

(b) 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約14分の1以下になるように保つ必要がある。8 mの望遠鏡では約30 nmという精度になる。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。これまででは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、大型望遠鏡の場合は、これではガラス材が重くなり、コストが「天文学的な数字」になってしまう。

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る。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。

(c) 能動光学の原理

能動光学の原理を図3.1.3-3に示す。鏡面の形状誤差を「測って」、鏡の形を「直す」ことをフィードバック回路で実現するというのが基本的な原理である。鏡面の測定には光学的測定と力学的測定の独立な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、鏡の変形の様子を直接測る。光学的測定は大気による変動成分を除くために、およそ1分間の平均を取る。このため鏡面の速い変化は追えないが、星を用いた直接測定なので信頼度が高い。力学的方法としては、鏡を支える力の分布をセンサでモニタする。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、正確な鏡面測定ができる。力学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、普段は力学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。JNLTでの採用を検討している2重サー

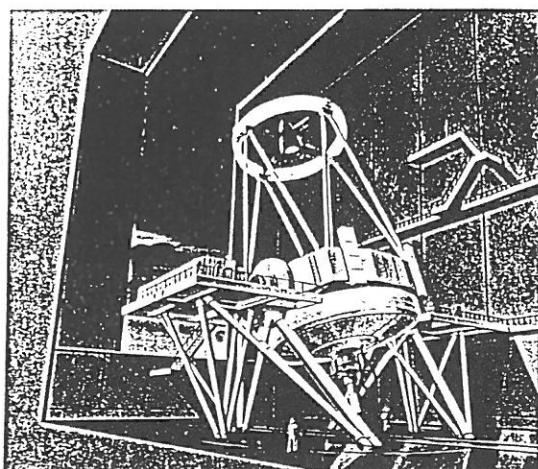
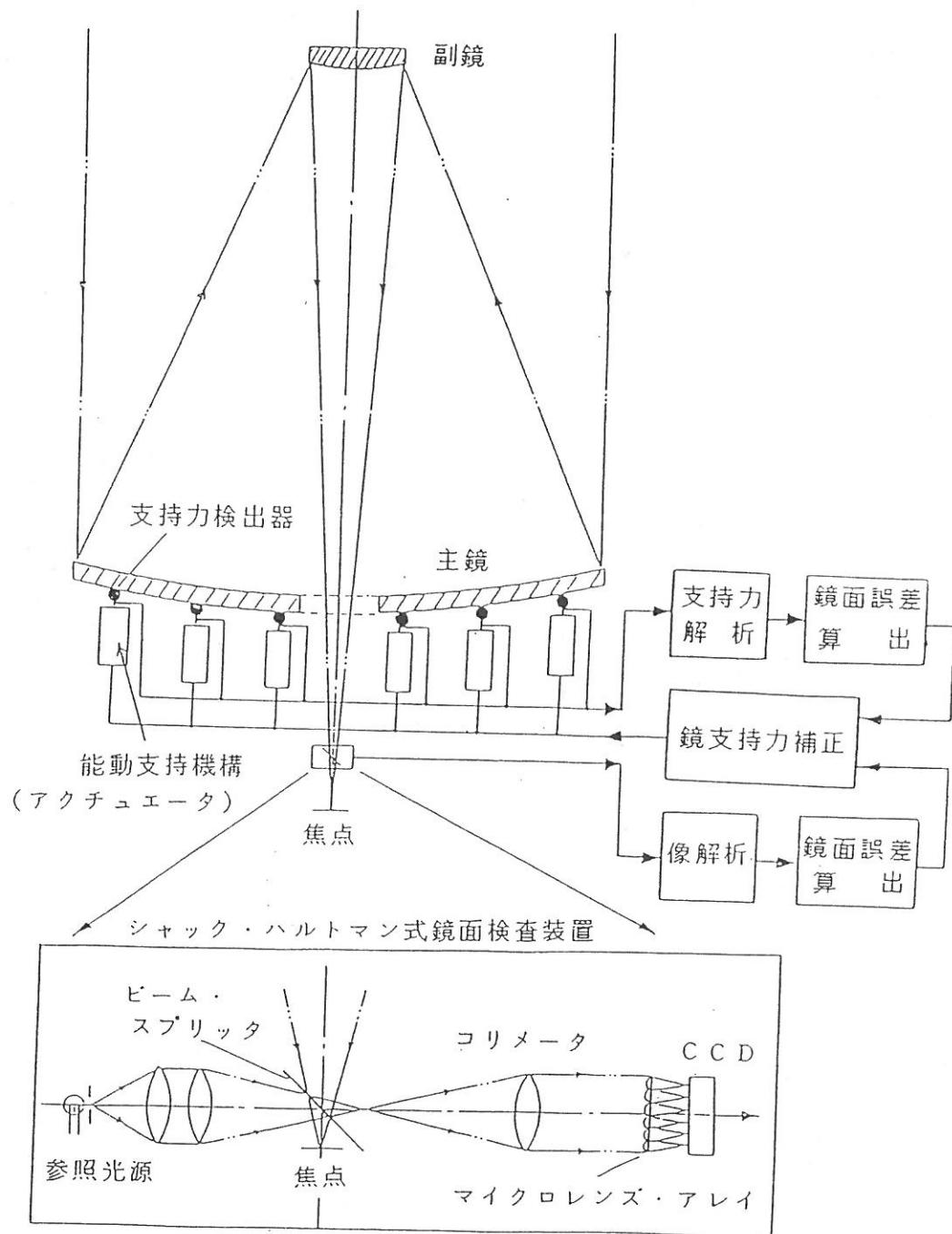


図3.1.3-2 JNLTの完成予想図



ボ方式の能動光学機構の概念図を図3.1.3-4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まとめて補正することができる。

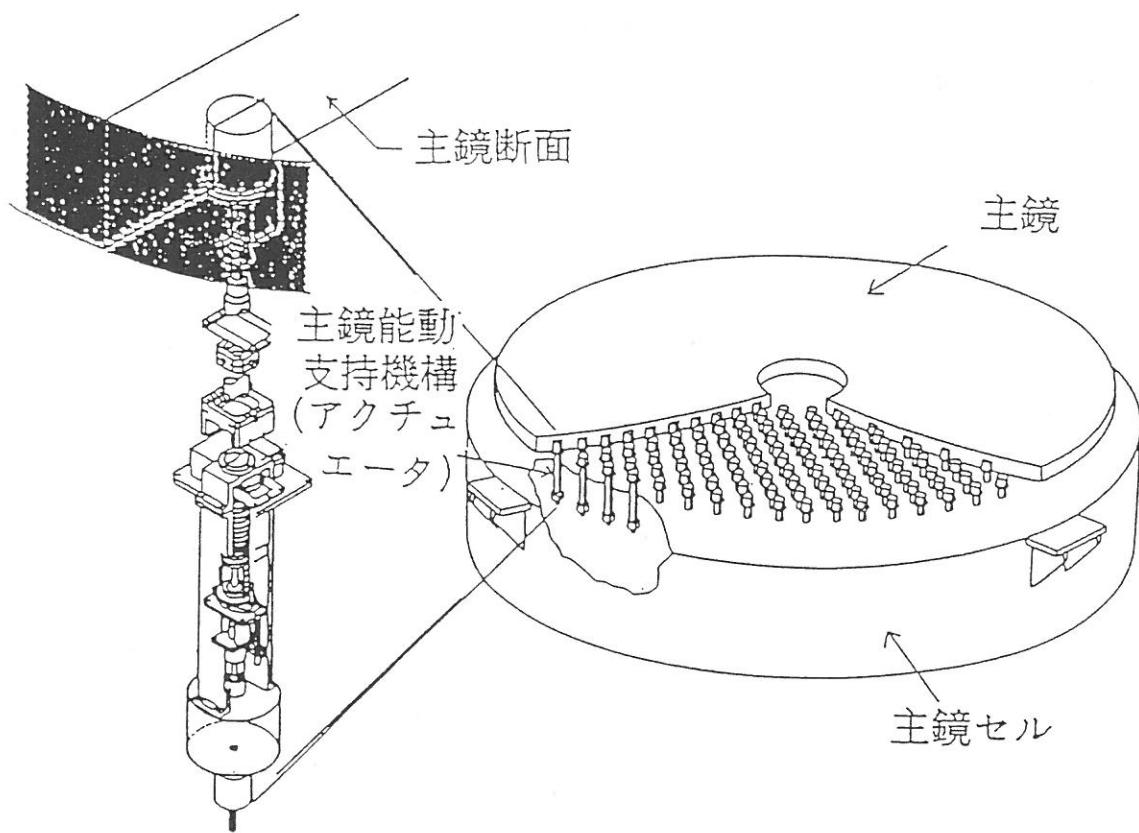
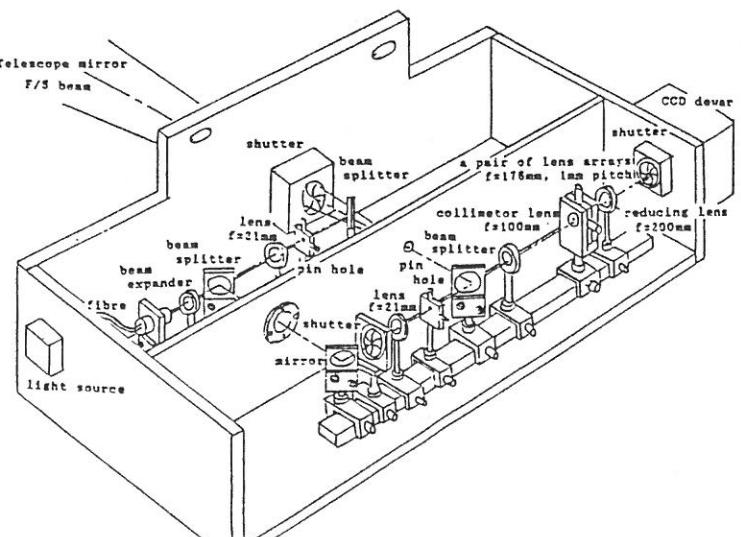


図3.1.3-4 JNLTの能動光学機構の予想図

(d) 鏡面を測る装置

鏡面測定用シャック・ハルトマン装置の原理は図3.1.3-3に示した。国立天文台が試作した装置の概観を図3.1.3-5に示す⁴⁾。この装置で星を観測すると、コリメータレンズがつくる主鏡の像位置においてマイクロレンズ・アレーにより、約300個の星像が焦点面上で格子状に結ばれる。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ずれる。300個の星像の配置のずれから、鏡面の変形状態が分かる。冷却CCDカメラを用いたこの装置の場合、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なはずである。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3.1.3-6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



3.1.3-5 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

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。ツェルニケ多項式で表せる図3.1.3-6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。

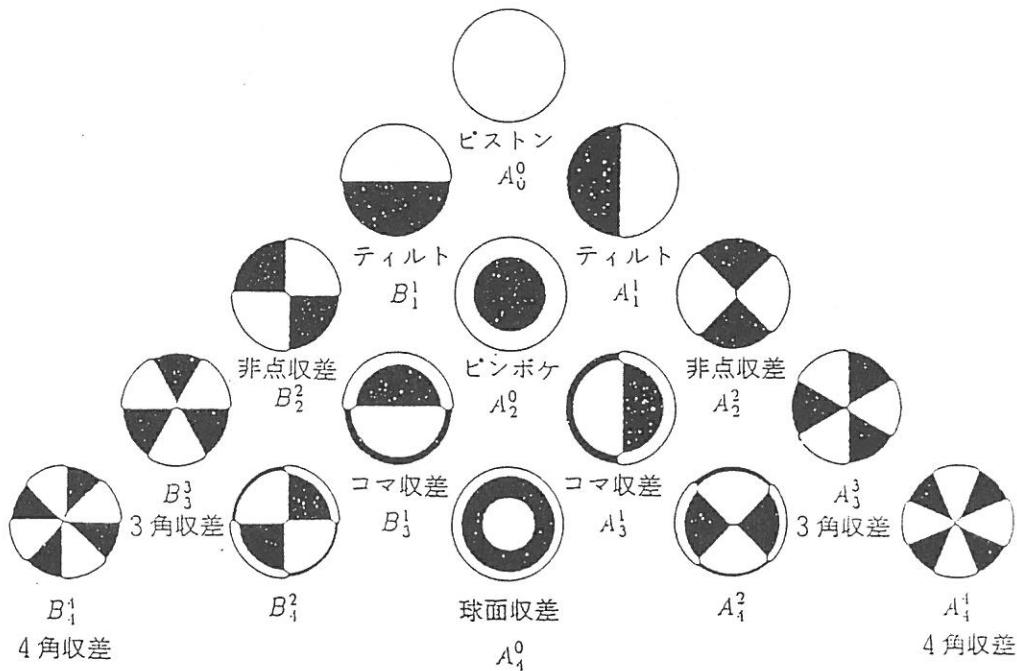


図3.1.3-6 鏡の基本変形パターンと対応する光学収差

(e) 鏡を直すアクチュエーター

能動光学を実現するには支持力の正確な制御が必要である。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とがある。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。

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。JNLTの場合、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アクチュエータを採用する。ガラス材の自重によるたわみを最大でも100nm以下とするには、約300個のアクチュエータが必要であることが、有限要素法を用いた解析により確かめられている⁵⁾。

支持点が324個の場合、各点の受け持つ自重は700Nとなる。鏡面を補正するための余力を考慮すると0-900Nの範囲にわたり、約0.05Nの精度で力を制御できるアクチュエーターが必要である。JNLT研究のグループではそのようなアクチュエータの試作に成功している⁶⁾。

(f) 実証望遠鏡

試作した高精度アクチュエータと鏡面測定用シャック・ハルトマン装置を直径0.62m、厚さ21mmの薄型球面鏡と組み合わせて、能動光学の実証実験を1989年秋から国立天文台で行った（図3.1.3-7）。この実験で

は薄型鏡を9個のアクチュエータと3個の固定機構で支え、鏡面をシャック・ハルトマン装置で測定しながら鏡面変形の矯正を試みた。アクチュエータが9本しかないと、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3.1.3-8)⁷⁾。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ることになる。

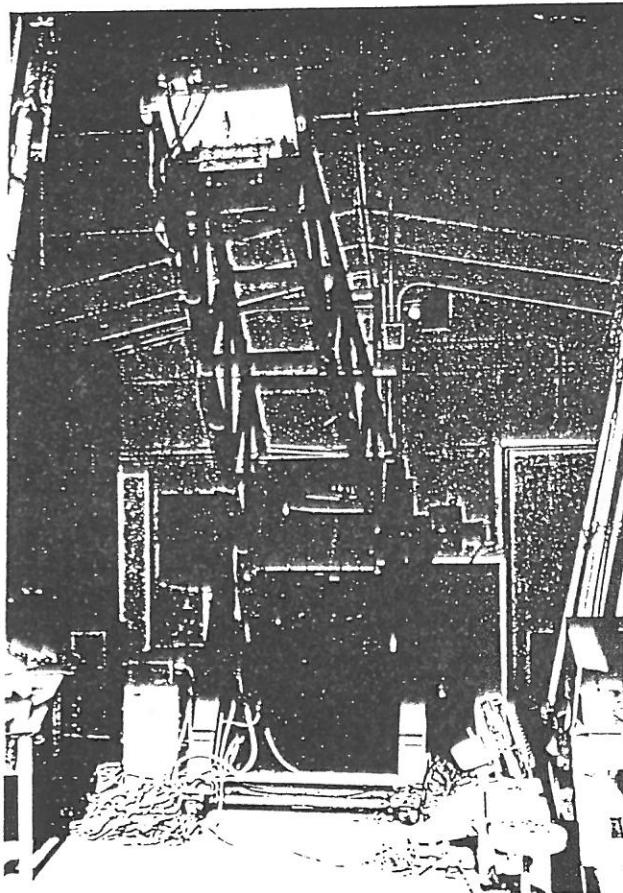


図3.1.3-7 国立天文台の0.62m薄型鏡能動光学実証望遠鏡

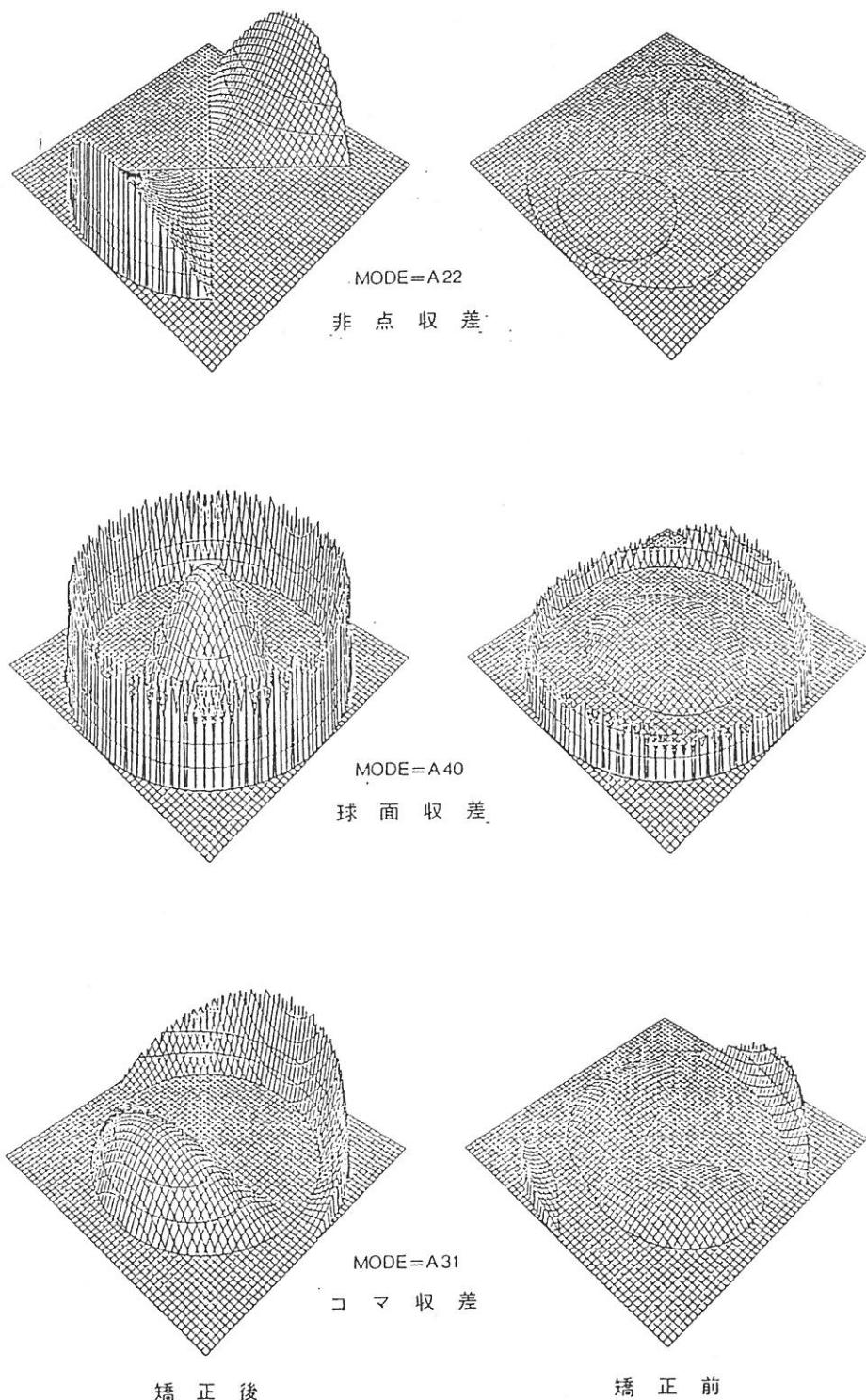


図3.1.3-8 能動光学による0.62m鏡面矯正の実例。変形量が正の部分のみを表示。
 (上) 非点収差 (中) 球面収差 (下) コマ収差 (左列) 矯正前の収差
 (右列) 矯正後の残存収差

(4) 補償光学

(a) はじめに

望遠鏡の結像性能は、実際には回折限界ではなく大気の乱れで制限されている。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（能動光学と補償光学をまとめてActive Opticsということもある⁸⁾）。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相違点を表3.1.3-1にまとめて比較し、補償光学の原理（図3.1.3-9）と最近の進展を紹介する。

表3.1.3-1 能動光学と補償光学の比較

	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 及び高次波面誤差
補償要素	主鏡	補償鏡
時定数	1 Hz	1 kHz

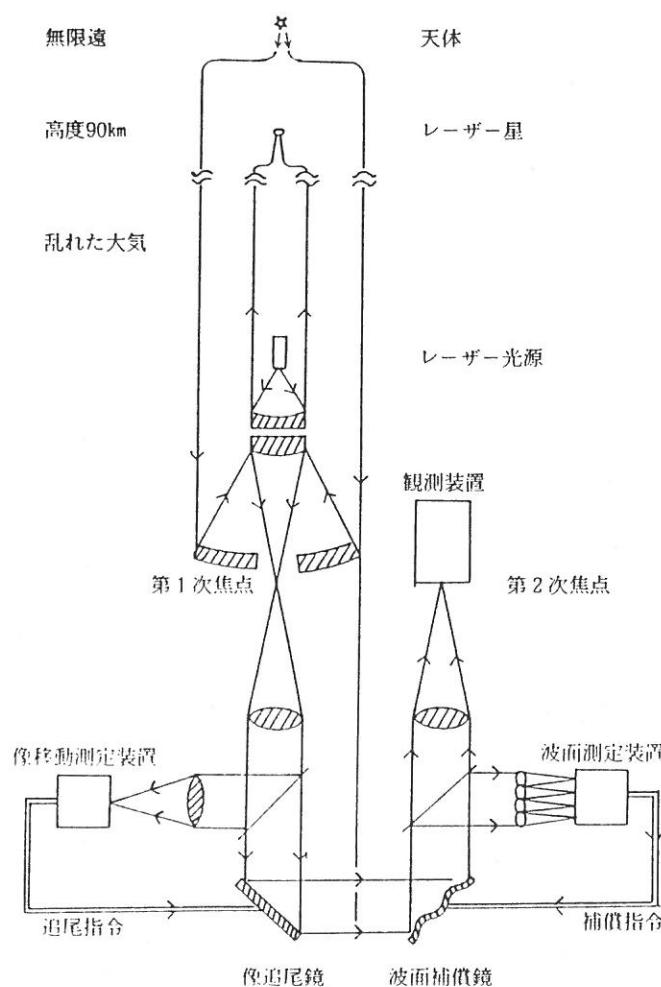


図3.1.3-9 補償光学システムの概念。レーザ星を作って、波面測定装置で大気の揺らぎを実時間測定する。像安定化装置と補償鏡を用いて波面を補正すると、望遠鏡の回折限界に迫る解像力を達成できる。

(b) 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。例えば、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秒角になるはずである。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。「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年にバブロックが提案した⁹⁾。

口径0.1m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分かる。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動きが、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0.2m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かなり速く動き回るので、完全な補償を行うには1kHzぐらいまでの補偿能力が要求されることになる¹⁰⁾。

(c) 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・ハルトマン法を用いることができるが、最近原理的に異なるロジエの方法が提案されている¹¹⁾。補償光学では鏡面の変形を測る代わりに、大気による光波面のずれ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が、半導体技術の急速な進歩により波面測定が可能になりつつある。

(d) 補償鏡

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3.1.3-10）¹²⁾。

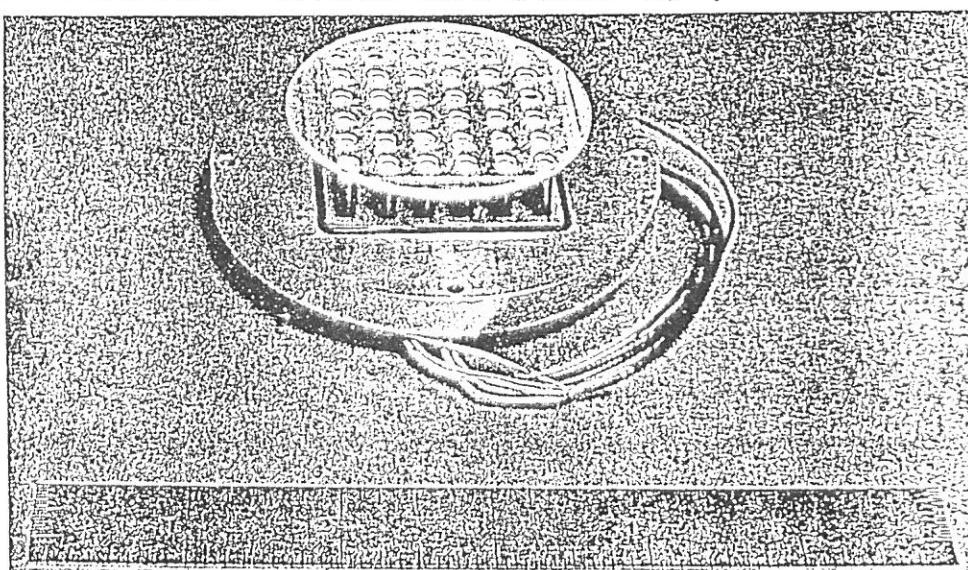


図3.1.3-10 36個のピエゾ素子で駆動される補償鏡。（Ealey and Wheeler）

別的方式としては、多数の小さな鏡を独立に駆動する方式（セグメント方式）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。

(e) レーザ星

補償光学が天文学で実用になるかどうかは、波面測定が確実にできるかどうかにかかっている。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ため、可視光の場合、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。このため、任意の方向に波面測定用の明るい人工星を作る可能性について研究がなされている¹³⁾。

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589 nmの強力なレーザ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星を任意の方向に作ることができる可能性がある。最近この方法でレーザ星を作る試みがなされ、1分角程度の人工星を作ることに成功している¹⁴⁾。

(f) 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3.1.3-11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。

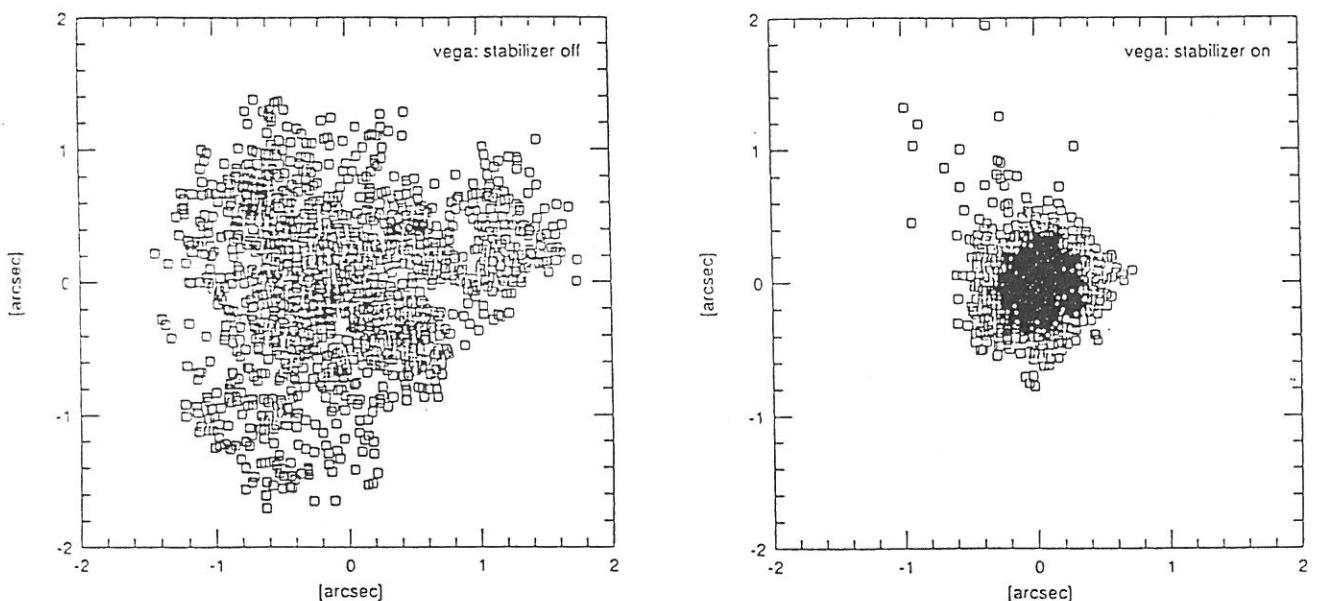


図3.1.3-11 イメージスタビライザによる像改善例（高遠，早野，西川，家）

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。ESO（欧州南天天文台）では最近口径3.6mの望遠鏡に19個のアクチュエータを内蔵する補償光学装置を取り付けて赤外線カメラで観測することにより、解像力が劇的に改善されることを実証した¹⁵⁾。波面補償がおおまかで良い赤外線の場合、像安定化装置を用いるだけでもかなりの像改善になる。

(5) 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3.1.3-12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。JNLTの場合、これは可視光では0.02秒角に相当する。図3.1.3-12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つた時の星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る。

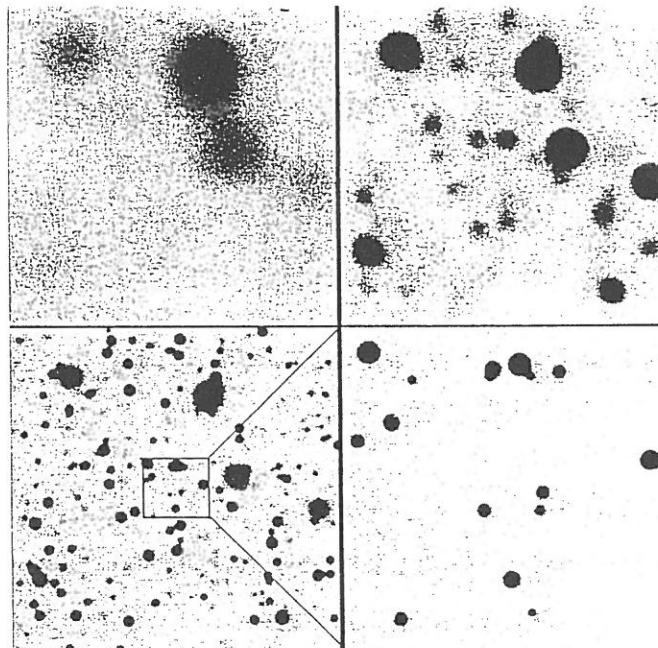


図3.1.3-12 星像の大きさと星の見え方。(左上) 典型的な3"の星像、(右上) 1"の星像、(左下) 能動光学での0.3"の星像、(右下) 補償光学が実現したときの0.03"の星像。視野は25"四方。可干渉角は10"を想定。

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。

天体を観測する時、観測装置の量子効率を ϵ 、望遠鏡の口径をD、観測波長を λ 、焦点面での星像の大きさを θ 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 $\sqrt{\epsilon} D / (\lambda \theta)$ 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、 $\sqrt{\epsilon}$ 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す役割は大きい。

参考文献

- 1) K.Kodaira : Outline of the JNLT Project,Astrophys.Space Sci.,160 (1989) 137—144.
- 2) M.Iye : Active Optics Experiments for Thin Meniscus Mirror,Astrophys.Space Sci.,160 (1989) 143—151.
- 3) R.Wilson : Active Control and Mirror Support for the VLT,ESO's Very Large Telescope,ed.S.D.D'Odorico and J.-P.Swings,ESO, Garching, (1986) 417—441.
- 4) T.Noguchi, M.Iye, H.Kawakami, M.Nakagiri, Y.Norimoto, N.Oshima, H.Shibasaki, W.Tanaka, Y.Torii and Y.Yamashita : Active Optics Experiments I:Shack-Hartmann Wave-Front Analyzer to Measure $F/5$ Mirrors, Publ.Nat.Astron.Obs.Japan,1 (1989) 49—55.
- 5) M.Watanabe : Deflection Study of 7.5m Lightweight Mirrors. I. Thin Meniscus Mirrors, Ann.Tokyo Astron.Obs.2nd Ser., 21 (1987) 241.
- 6) S.Nishimura, Y.Yamashita, M.Iye, N.Itoh and I.Mikami : Mechanical Design of Force Actuator for Japanese National Large Telescope,in Very Large Telescopes and Their Instrumentation, ed.M.H.Ulrich, ESO, Garching (1988) 577—582.
- 7) M.Iye, T.Noguchi, Y.Torii, Y.Mikami, Y.Yamashita, W.Tanaka, M.Tabata and N.Itoh : Active Optics Experiments with a 62cm Thin Mirror, SPIE Proc., 1236 (1990) 929—939.
- 8) J.W.Hardy : Active Optics — A New Technology for the Control of Light, Proc.IEEE, 66 (1987) 651—698.
- 9) H.W.Babcock : The Possibility of Compensating Astronomical Seeing, Publ.Astron. Soc.Pac., 65 (1953) 229—236.
- 10) F.Roddier, M.Northcott and J.E.Graves : A Simple Low Order Adaptive Optics System for Near Infrared Application, Publ.Astron.Soc. Pacific, (1990) 131—149.
- 11) N.Roddier and F.Roddier : Curvature Sensing and Compensation:a Computer Simulation, Proc.SPIE, 1114 (1989) 92—96.
- 12) M.A.Ealey and C.E.Wheeler : Modular Adaptive Optics, Proc.SPIE, 1114 (1989) 134—144.
- 13) L.A.Tompson and C.S.Gardner : Experiments on Laser Guide Stars at Mauna Kea Observatory for Adaptive Imaging in Astronomy, Nature, 328 (1989) 229—231.
- 14) C.S.Gardner, B.M.Welsh and L.A.Thompson : Sodium Laser Guide Star Technique for Adaptive Imaging in Astronomy, Proc.SPIE, 1114 (1989) 191—202.
- 15) F.Merkle, G.Gehring, F.Rigaut, P.Kern, P.Gigan, G.Rousset and C.Boyer : Adaptive Optics at the ESO 3.6-m Telescope, The Messenger, ESO, No.60 (1990) 9—12.
- 16) G.Rousset, J.C.Fontanella, P.Kern, P.Gigan F.Rigaut, P.Lena, C.Boyer, P.Jagourel, J.P.Gaffard and F.Merkle : First Diffraction-Limited Astronomical Images with Adaptive Optics, Astron.Astrophys., 230 (1990) L29.