

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

野口 猛, 家 正則, 三上 良孝, 鳥居 泰男, 沖田 喜一,
山下 泰正, 田中 済*, 田畠 真毅**, 伊藤 昇**

Active Optics Experiments with a 62 cm Thin Mirror

by

T. Noguchi, M. Iye, Y. Mikami, Y. Torii, K. Okita, Y. Yamashita
W. Tanaka*, M. Tabata**, and N. Itoh**

(1990年9月30日受付)

Abstract

In order to find out any practical problem associated with the active optics concept to be implemented in the 8 m JNLT, second series of experiments have been carried out using the newly assembled proto-type active-optics telescope with a 62 cm thin mirror supported by 9 actuators and 3 fixed points. The structure and working principles of the 62 cm active-optics proto-type telescope and the actual procedures of experiments are fully described. The practical performance of the system was demonstrated by artificially generating some of the fundamental aberrations, e.g., astigmatism, coma, and spherical aberration as desired. The deformations induced by the changes of the telescope elevation angle and the ambient temperature were precisely measured and were shown to be removable by applying the closed-loop control. In addition to the originally planned experiments, the image deterioration due to the mirror seeing effect was quantitatively evaluated with the present system and the effect of flushing flow to blow away the turbulence was evaluated. The importance of the adaptive optics is also emphasized by means of a numerical simulation. The present series of experiments have demonstrated that JNLT active optics system is realizable with the current technologies.

1. はじめに

大型望遠鏡計画は最新技術の開発と応用を的確に見込むことによって成り立つものである。ハワイ島マウナケア山頂（標高 4,200 m）に建設予定の大型光学赤外線望遠鏡（Japan National Large Telescope, 以下では JNLT と略記する）は、多くの新技術の導入を計画している。中でも口径 8.3 m の主鏡はこれまでの設計常識を破る、厚さ 20 cm の薄メニスカス型（皿状）の超低熱膨張ガラス材を採用する。主鏡の大口径化は重量の増加を招き、自重変形が問題になる。従来は、主鏡口径に対して十分な剛性を持つ厚さ（例えば口径の

1/6 の厚さ）を設計目標にしてきたが、鏡のみならず主鏡セルおよび架台全体の剛性を上げる設計思想には限界がある。そこで、主鏡の軽量化を目指して種々の開発が行われている。JNLT では薄メニスカス軽量鏡を採用して、自重変形だけではなく外乱による変形をも測定して、高性能のアクチュエータで理想鏡面に保つように補正制御する。主鏡の軽量化の方法としてはこの他に、ハニカム鏡方式やセグメント鏡方式などがあるが、ハニカム鏡は複雑な内部構造を有するために熱変形の補正が難しく、セグメント鏡では鏡間の位相調整が難しく、並べた隙間からの熱放射による赤外性能の劣化の問題がある。

本稿は、能動光学基礎実験 (Iye et al. 1989, Iye 1989) で得た経験を発展させた第2期能動光学実験として、測定および解析方法の確立を図

* 東京大学理学部天文学教室 (Dept. of Astronomy, Univ. of Tokyo)

** 三菱電機株式会社 (Mitsubishi Electric Corporation)

り、処理時間の短縮により、遅いながらも実時間による静的制御を可能にしたことについて報告する。この実験は、62 cm 薄メニスカス実験望遠鏡を国立天文台三鷹構内の実験室に据え付けて、1989年10月から1990年6月まで継続して行った。JNLT で必要となる「鏡面形状を測定して直す」という開発の基本的目標はこの実験で達成できたと結論できる。

2. 実験の概要

2.1 能動光学実験の経緯

能動光学の基本原理は光学系の変形（自重変形、研磨誤差、調整誤差、熱、風その他の外乱による変形）を測定して、変形量を知り、矯正することである。この原理に基づいて基礎実験を行い基本概念を確立したのは、欧州南天天文台(ESO)の Wilson et al. (1987) である。

JNLT ワーキンググループ（以下 WG と略記する）は1985年に能動光学方式を採用する方向で具体的な技術検討を開始した。主鏡の自重変形に対する支持点の位置および配置についての有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションの結果、重量約20トンの主鏡面の形状を約 $0.1 \mu\text{m}$ の誤差で保持する必要のあることを導いた (Watanabe 1987)。また、ESO の実験を補う形で能動光学実験を開始して、独自に能動支持のための高性能アクチュエータを開発して(Nishimura et al. 1988)、ホログラフィ法による性能評価を行い (Itoh et al. 1989)、鏡面測定のためのシャック・ハルトマン装置を試作して十分な性能を備えていることを確かめた (Noguchi et al. 1989)。さらに、1988年4月から5月にアクチュエータの総合性能を評価する目的で第1期能動光学実験を行った。これは ESO の基礎実験が高度回転軸固定（鏡面を天頂に向かたままでの形状矯正実験）であったのに対して、高度軸を傾斜させた場合の実証をねらった点で、ESO の実験を一步進めることを企画したものであった。予め FEM で計算した支持力で支えた 62 cm 実験鏡の鏡面をシャック・ハルトマン装置で測定して、鏡面を制御するのに十分な性能を有することが検証された (Iye et al. 1989, 家・山下 1989)。

2.2 実験の目的

第1期能動光学実験においては、予め FEM で計算した支持力配分と鏡面の変形、主鏡支持部全体の姿勢を傾けた場合の変形などをシャック・ハルトマン装置で測定して、取得データを解析した結果、FEM の計算とのよい一致を確認した。しかし、これまでの実験では能動支持のための個々のプロセスに対して各々十分な性能を有することが検証できたにすぎない。そこで、この経験を発展させてシャック・ハルトマン装置からの取得データの処理手続きを確立して、データ取得および処理のソフトウェアを整備（機械語化）してパソコン・コンピュータ上でのスピードアップを図り、実時間で鏡面形状の矯正を自動的に制御できるように改良した。従って第2期能動光学実験では、遅いながらも実時間における鏡面形状制御の基礎の確立と、総合性能の評価を目的とした。

2.3 実験望遠鏡と能動支持機構の概要

装置の構成

実験装置は三鷹構内で高さ 6 m のスペースが確保できる気球実験室に据え付られた。その主な構成は 62 cm 実験望遠鏡、能動支持制御機構（シーケンサを含む）、シャック・ハルトマン鏡面検査装置、温度測定器および RS232C でネットワーク化された4台のパソコン・コンピュータである（図1参照）。

実験望遠鏡

実験望遠鏡は図1に示すように鏡筒部と架台部を有する。鏡筒部は架台部に高度回転軸で支えられて、カウンター・ステップ駆動方式により高度角 $0 \sim 92^\circ$ 、最小駆動ステップ $1/500^\circ$ まで計算機制御できる。但し、高度角（EL 角）の絶対値は $10''$ 読みのクリノメータを用いて視察により読み取り較正する。方位軸方向の駆動は今回の実験では不要なので、架台部はレベル調整用のジャッキボルトで直接コンクリート床に固定されている。鏡筒部のセンター・セクションには主鏡セルが付き、セルには後述する支持機構に支えられた主鏡（球面鏡、 $F/5$ 、曲率半径約 3 m）が納められている。筒先を支持するためのトラス（梁）はアルミ製の箱型材で作られていて、設計における先端でのたわみは $200 \mu\text{m}$ である。望遠鏡の姿勢を天

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

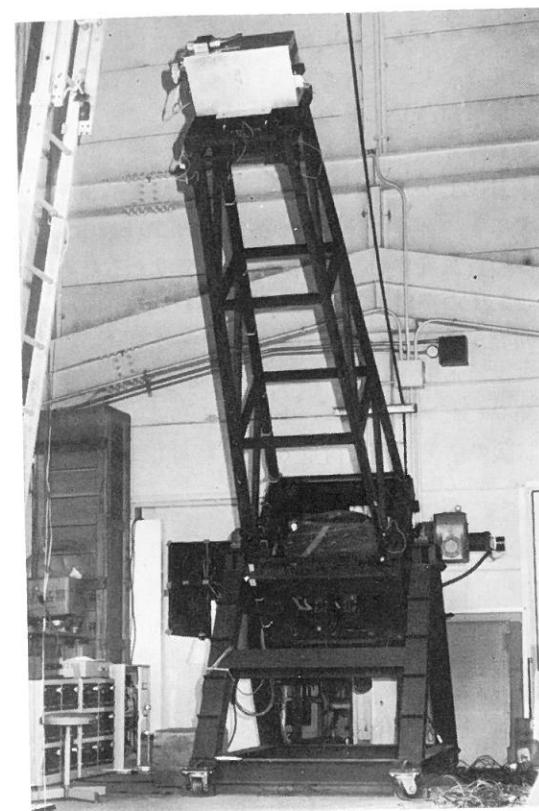
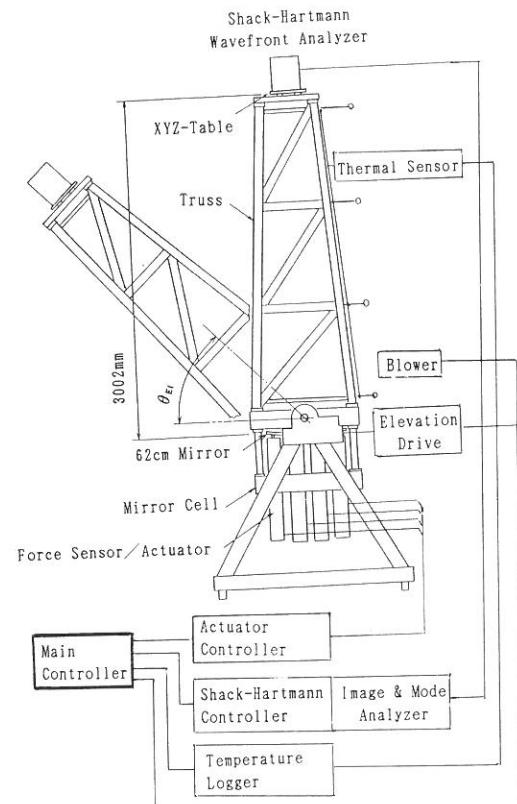


図 1 第2期 62 cm 薄型鏡能動光学実験装置。（左）気球望遠鏡実験室に据え付けられた 62 cm 実験望遠鏡、（右）62 cm 実験望遠鏡システム概念図。



頂から水平位置へ変えて、シャック・ハルトマン装置の CCD カメラ上でのスポット移動から求めた実測値は約 $400 \mu\text{m}$ （鏡の反射は考慮してある）であった。筒先には 3 軸 (XYZ) の微調機構と共にシャック・ハルトマン装置が装着されている。この位置は主鏡の曲率中心にあたるので、装置内の光源から照射すると、主鏡で反射した光は再び戻ってきて結像する。

主鏡と支持機構

実験望遠鏡の主鏡は表1に示す諸元を持ち、図

表 1 62 cm 薄型鏡の諸元

口径:	620 mm
厚さ:	21 mm
形状:	球面、メニスカス型、曲率半径 3,002 mm
材質:	バイレックス、ヤング率 $6,400 \text{ kgf/mm}^2$ ポアソン比 0.20、比重 2.23

2に配置を示したように 9 本のアクチュエータ（能動支持機構）と 3 個の固定点（固定支持機構）に

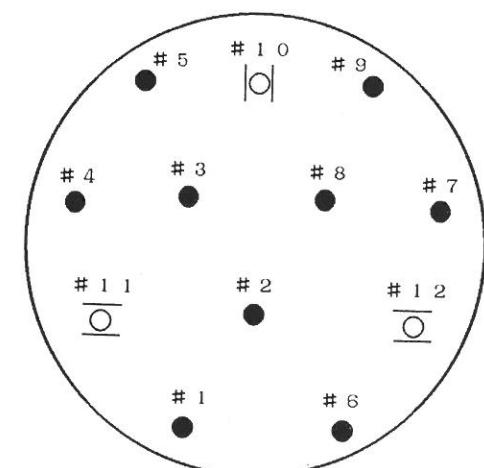


図 2 アクチュエータの配置。#1～#9までがアクチュエータ、#10～#12が固定支持点。

よって支持される。12の支持機構は、高度軸回転で生じる主鏡のラテラル方向（鉛直面内で光軸と直交する方向）の荷重を支えるためのカウンタ・バランスの役目も果たす。その際、支点が主鏡厚の重心になるように、主鏡裏面に接着した支持用ソケットにバランス用荷重を付加した。第1期能動光学実験において、高度軸の回転で大きな傾斜誤差を生じた原因是、鏡筒の代わりに片持ちのベンチを用いたことと、主鏡と支持機構の間にあるロードセルの重量配分を間違えて支持力配分を行ったためである。今回は十分検討してたわみの少ない新しい鏡筒を製作して、重量配分も再度チェックして実験に臨んだ。主鏡には13箇所に貫通し

た穴があいているが、これは当初ミニチュアのアクチュエータでの実験（上述の支点位置を鏡の重心にするため）を考えていたからである。今回の実験では、JNLT の主鏡支持に適応できるように実機サイズのアクチュエータを用いた。

JNLT の主鏡が仮に20トンで支持点が300点とすると、各点で受け持つ荷重は約 70 kgf になり、鏡の自重変形を $0.1 \mu\text{m}$ 精度で支えるためには $\pm 5 \text{ gf}$ の精度で力を発生できるアクチュエータの開発が必要であった。また、従来の歪ゲージ型ロードセルでは 0.1% 精度のものが限界であった。開発したアクチュエータおよびロードセルの単体試験の結果、最大荷重 60 kgf に対して誤差 $\pm 2 \text{ gf}$

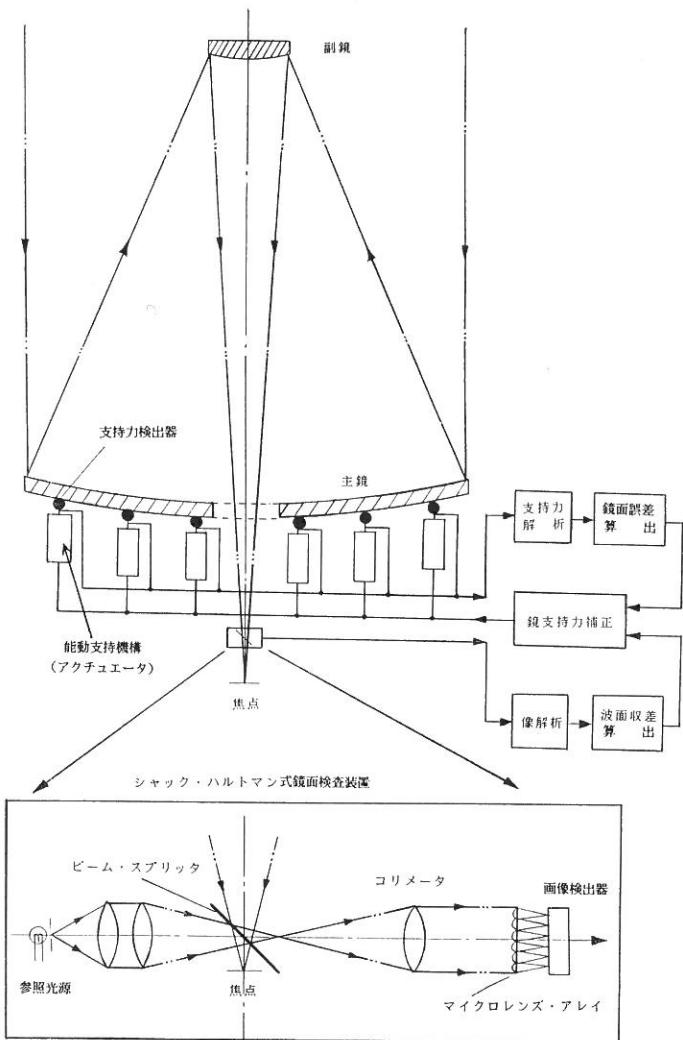


図 3 シャック・ハルトマン式鏡面検査装置原理

測定原理

従来のハルトマン法とシャック・ハルトマン法を比較すると、従来のハルトマン法では筒先に多数の穴のあいたハルトマン板を置き、各穴を通過して鏡面で反射した光束を焦点の前後（各光束が十分分離するように焦点からずらした位置）で光軸に垂直な面の座標 (X, Y) を測定して、全光束の焦点前後を結んだ幾何光学的断面が最小になるところ（最小錯乱円）を焦点と定義して、焦点における光束の分布を解析する。一方、シャック・ハルトマン法では、焦点の後方に主鏡像（瞳）をつくり、その上にハルトマン板に代えてマイクロレンズ・アレイを置く。マイクロレンズで結像する各像点は主鏡の対応する各部分で結像した星像であり、それぞれの光学収差を含んでいる。従って、ピンホールで参照光の球面波をつくり、ビーム・スプリッタなどを用いてマイクロレンズを通過した基準光源の結像点と、星を光源として主鏡で反射して同じマイクロレンズを通過した各星像点との差を取り出せば、望遠鏡に起因した光学収差を測定することになる（図 3）。各像点の測定には CCD カメラなどの画像取得装置を用いる。

2.4 シャック・ハルトマン装置

開発の経緯

光学望遠鏡の鏡面性能を総合的に評価する一般的方法として広くハルトマン法(Hartmann 1904)を改良したものが用いられてきた。しかし、従来のハルトマン法では望遠鏡の筒先に主鏡口径を覆う多数の穴のあいたハルトマン板を装着して測定することが必要であり、大型望遠鏡においてはハルトマン板の製作および装着に困難を伴う。そこで、大型のハルトマン板を用いる代わりに、主鏡像位置に小型のハルトマン板を置く変形ハルトマン法や主鏡像位置にマイクロレンズ・アレイを置くシャック・ハルトマン法が大型主鏡の検査法として注目を集めている。

JNLT の WG は、ESO で開発したマイクロレンズ・アレイを入手して装置開発を行い、高い精度を有すること (Noguchi et al. 1989) を確認した。計画中の JNLT の主鏡形状の測定および鏡面モニターとしてシャック・ハルトマン装置の採用を考えている。

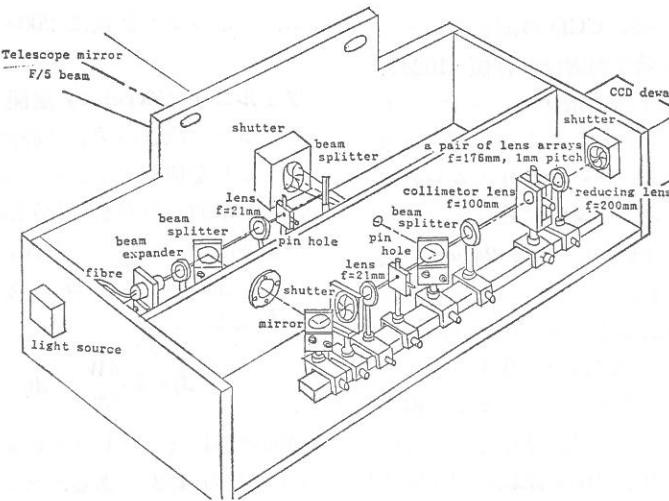


図 4 シャック・ハルトマン装置模式図

装置の主な諸元

- (1) マイクロレンズ・アレイ (ハルトマン・スクリーン) ESO 製,
幅 1 mm ピッチ, 長さ 44 mm の円柱型レンズが 40 本並んだ厚さ 2 mm のガラス基板 (44×44 mm) を 2 枚直交させて用いた。
これとは別に国産の新設計のマイクロレンズアレイを製作評価中である。
- (2) CCD カメラ
日本 TI 社製, TC215/VID289, ペルチェ素子冷却, 画素ピッチ 12 μm , 画素 1024 × 1000 (約 12 mm 角) を 2×2 のビンディングして用いるので 1 画素は 24 μm , 画素 512×500。
- (2) 光学系設計
マイクロレンズ・アレイ上の主鏡像は測定点が 10 輪帶 (総数約 300 点) になるように, 20 mm に設計した, そこで約 1/2 の縮小光学系を入れて, CCD 上の主鏡像は約 11 mm である。
- (4) 光路切り換え
ダイクロイック・ミラーとシャッターの自動操作による光路切り換え方式により, 光路切り換えのための駆動部をなくして, 装置の安定性を高めた。

像検出アルゴリズム

CCD 出力は 12 ビットの AD コンバータでデジタル化され, 8M バイトの増設メモリに 2 バイト/画素で記録されている。CCD の画素サイズは 12 μm の正方形で, 有効な画素は公称値 1024×1024 より少し少しが取扱に便利なようにメモリ上はダミー・データを入れてある。また, このままで画素数が多すぎてデータ取り込みや処理に時間がかかりすぎるので 2×2 のビンディングを行なっている。従って画素サイズは 24 μm , 画素数は 512×512 となる。

バイセクションの方法は色々あるが, 今回用いた方法はスポットの重心の位置を計算することを実現した。まず予め取り込んであるスカイと称するバックグラウンド・データの引算を行う。次に CCD の端から順に正方形の部分領域を切り出してきて, しきい値を越えた画素を検出し, そこを中心として領域を設定し, その中にピーク値を検出する。さらに, そこを中心として同じ大きさの領域を設定し, その中のピーク値を検出する。その位置が前の位置と一致するまでこれを繰り返す。領域が決まつたらその中に重心位置を計算する。このとき領域全体での強度の平均値を求めて引き算し, 値が 0 以上の画素のみを計算に使用する。これによってローカルなバックグラウンドが消去できるだけでなく, 明るいスポットでは自動的にしきい値が上がることになる。スポット全体の強度を求め, これがある値に達しない場合には傷として除去する。次のスポット位置は大体予測できるのでその付近に領域を設定し, その中にピークを検出する。X 方向に検出して行なうと CCD の端を検出したら X 位置は変えずに Y 方向に予想されるピッチだけずらして領域を設定する。こうすることによりスポットが X, Y 軸と傾いて並んでいても次の位置が検出できる。テストの結果, ピーク検出時の領域の大きさは 20 画素, 重心検出時の領域の大きさは 16 画素がよいことが分かった。

重心検出の精度はよいときで 1/20 画素 (約 1 μm), 悪いときでも 1/10 画素と見積られる。使用しているマイクロレンズが円柱の組合せなので X と Y 方向に回折縞が出ているのが分るがその影響は少ない。画素毎の感度むらの補正是していないが, 使用している CCD は感度むらが極めて小さいので実用上障害は検出されていない。2 回目からは, 前の位置データを使ってスポットの検出を行うことができる。能率は格段に向上する。スポットの総数は 200~300 である。

ツェルニケ (Zernike) 展開

スポット位置のずれは波面の傾きに対応しており, これを積分することにより波面の形状 (厳密には基準面からのずれ) が求められる。波面 (波面の基準面からのずれ) の式を $W(x, y)$ とし, スポット位置のずれを $\Delta\xi, \Delta\eta$ とすれば, 比例係数を k として,

$$\Delta\xi = k \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \Delta\eta = k \frac{\partial W}{\partial y} \quad (1)$$

鏡面の形状 (ずれ) はその位置での波面の形状 (ずれ) の 1/2 である。スポット位置のみでしか与えられていない波面の傾きをそのまま積分する

のはあまりよい方法ではない。閉曲線に沿って積分して元に戻ると誤差のために差が生ずるが, これが閉曲線の取り方で変化する。面形状を級数に展開してこれにフィットするのがよく, 級数は直交系を選ぶのが望ましい。ツェルニケ多項式は軸対称な面の展開に適した級数で, 円周方向は三角級数に展開する。即ち, 波面 W を極座表系 (ρ, θ) で表すと, ツェルニケ多項式を $R_n^m(\rho)$ として,

$$W(\rho, \theta) = \sum_n A_n^0 R_n^0(\rho) + \sum_n \sum_m (A_n^m \cos m\theta + B_n^m \sin m\theta) R_n^m(\rho) \quad (2)$$

のように展開できる。 $R_n^m(\rho)$ の具体的な形は光学の教科書 (例えば Born and Wolf 1959) を参照されたい。直交系であるから各項の係数 A_n^m, B_n^m は独立に決定することができる。有限項で切ることはある種のフィルタリングを行うことに対応する。

実際にはその微分がスポット位置のずれとして検出されるので, フィッティングは微係数について行わなければならない。極座表系 ($x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta$) では,

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial x} &= \frac{\partial W}{\partial \rho} \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \sin \theta, \\ \frac{\partial W}{\partial y} &= \frac{\partial W}{\partial \rho} \sin \theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

である。ツェルニケ多項式の微分形は直交系ではないので, フィッティングは最小自乗法で行なった。項数をどこまで取るかは問題であるが一応 6 次, 27 項まで取ることにした (0 次にあたる鏡の絶対位置はきまらないので落してある)。この選択は色々の面から検討してほぼ適正であったと判断している。スポットの数は 250 程度であり, ずれの量は X と Y 方向につき与えられるので観測方程式の数は 500 程度となる。これから 27 の係数を決めるため各係数の誤差はかなり小さくなる。同じ状態で繰り返し測定した結果では, 面の傾きを表す A_1^1, B_1^1 を除けば係数のばらつきは数 nm 程度におさまっている。

ツェルニケ多項式のそれぞれの項は光学収差に対応している。しかも低次の項はザイデル収差にほぼ対応している (図 5 参照)。係数の自乗をオーダー ($n+1$) で割ったものの和はストレール数

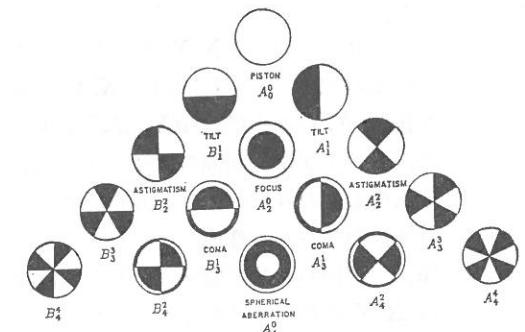


図 5 ツェルニケ係数の模式図

(後述する) に対応づけられ, 焦点像の評価に結び付けられる。

データ取得の手順

A. 取得準備

- (1) データ取得のためのパラメータの設定
CCD カメラ関連 (ビンディング, ゲイン, バイアス, サンプリングレイト, etc.), 露出時間, 像検出関連, ペアーリング, 関連記録 (コメント) など。
- (2) 基準像 (参照光源からのピンホール像)
取得
予め CCD のダークを測定しておいて差し引く, 基準像画面から像検出プログラムにより, 基準像の X, Y 座標および輝度の数値 (スポットデータと呼ぶ) などを取得する,
- (3) 目的像 (主鏡からの光束で結像したもの)
取得
予め CCD 上のバックグラウンドを測定しておいて差し引く, 目的像画面から像検出プログラムにより, 基準像の X, Y 座標および輝度の数値などを取得する。
- (4) 取得データ中の不良像の除去 (リジェクション)
主鏡端や支持具の影などの回折影響を受けている像の除去 (像の平均輝度の 90% 以下を自動的に除去)。

- (5) 基準像と目的像の同定 (ペアーリング)
それぞれの像データ画面上の目印点近傍

- の2点の番号をカーソルで選択する、選択した2点の像から X, Y 原点、倍率および回転の補正を行い目的像の X, Y と基準像の X, Y の座標差 dX, dY を求めて、その差が像点間隔の $1/2$ (12画素)以内のもののみをペアと同定する。
- (6) 目的像のテーブル作成
(5) で選択した基準像と同定した目的像の X, Y 座標および輝度のテーブルを作成する。
- B. データ取得ループ
(7) 取得指令の割り込み待
RS232Cによりデータ取得指令の割り込みが来ると(8)へ進む。
割り込みが発生しない場合は(11)へ進む。
- (8) 目的像の取得
予めCCD上のバックグラウンドを測定しておいて差し引く、(6)のテーブルにある X, Y 座標値を初期値にして、テーブルに登録された目的像のスポットデータ(像の X, Y 座標と輝度など)を取得する。
- (9) ツェルニケ多項式を用いた光学収差の解析ツェルニケ多項式展開(6次)して、係数27項を求める。
- (10) 結果の転送とモニター表示
ツェルニケ係数27項とコメントをRS232Cで主制御計算機に転送する、目的像同定テーブルを更新する、
主なツェルニケ係数をモニターとしてグラフ表示する。
- (11) 終了指令の判別
終了指令を判別して継続なら(7)へ戻る、終了指令が来たら終了する。

シャック・ハルトマン装置のデータ取得所要時間
パソコン(NEC-9801VX)を用いて、シャック・ハルトマン装置のデータ取得を行った場合の処理に対する所要時間を以下に示す。但し、露出時間が26秒より長くて連続的に繰り返しデータ取得する場合には、露出時間の間に前回のデータ処理を行える。

露出時間	: 2秒(パソコンタイマーとシヤッターの同期による下限)以上
CCD 読出	: 12
背景差引	: 2
像検出	: 5
ツェルニケ係数	: 18
RS232C 転送	: 1

装置の測定精度

装置の測定精度は岡山天体物理観測所の188cm鏡ニュートン焦点および堂平観測所の91cm鏡直焦点で検定した。その結果、内部誤差は数nmであることを確認した(Noguchi et al. 1989)。

2.5 制御系

鏡面形状制御

鏡面形状制御において、アクチュエータに対する指令支持力(以下指令値と略記する)を与える前段処理で区分すると、開ループ(望遠鏡高度角に応じたモデルによる制御)と閉ループ(シャック・ハルトマンの実時間測定結果による制御)制御モードがある(4.4節で詳細を述べる)。これらの指令値はRS232Cを介してシーケンサに送られて、シーケンサはアクチュエータのモーターを駆動させる。このときの駆動速度などのパラメータは予めRS232Cで転送することにより設定する。シーケンサは指令値とロードセルの現在値の差に対して3段階の駆動速度を持つ。シーケンサはロードセルの値(帰還値)をマルチプレクサを介して取り込み、指令値と比較の上で速度設定を行い、±5gf以内が10sec経過すると系が安定したと判断して、終了信号を返送してくれる。従って、動作完了までの所要時間が長いので、実時間での動的制御の実験を行うためにはシーケンサの処理プログラムを新たに作り直す必要があった。そこで、今回の実験は静的制御にとどめた。

パソコンネットワークとその役割

今回の実験では4台のパソコンをRS232C(9600ボート、8ビット、パリティ無し、ストップビット1)で接続して各種装置を分散方式で制御した。この方式のメリットは各装置を切り離して制御で

62cm薄型鏡による能動光学実験

3.2 剛性構造行列

剛性構造行列データの取得

剛性構造行列(以下単に構造行列と呼ぶ)データの取得に当たり、温度ドリフトの影響を避けるために、昼夜の温度変化の少ない日(例えば小雨の降る日)を選んだ。さらに、実験室内は2台の扇風機で攪拌して温度の一様性に心がけた。シャック・ハルトマン装置の露出時間は30秒、これは後述(5節)するミラー・シーリングの影響を比較的少なくするためである。望遠鏡の姿勢は3.1節で定義した基準姿勢(高度角90°)である。

図6は構造行列のデータを得るために1本のアクチュエータに与えた支持力指令値を模式的に示したものである。アクチュエータに与える実際の支持力指令値は、さらに基準支持力を加えたものになる。図6に示した支持力指令を9本のアクチュエータに対して順次繰り返し与えて制御する。この取得データは後述(4.1節)する線形性テストにも用いた。

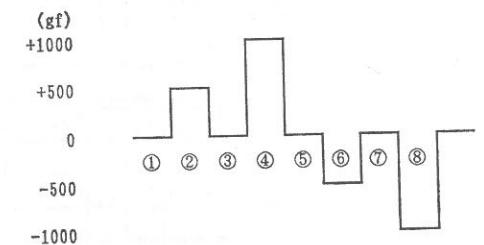


図6 アクチュエータに与えた支持力指令模式図。
基準姿勢における基準支持力を0gfとした支持力指令値の模式図。

ここで取得データと呼ぶのは、27項のツェルニケ係数、12点の支持力実測値(固定点を含めたロードセルの値、最小読み取り値1gf)、9点の支持力指令値、20点の測定温度、計測パラメータおよび取得日時などのコメントである。構造行列の測定所要時間は、9本のアクチュエータを1順測定(1セット)するのに約2.5時間、測定精度を上げるために繰り返し5順測定(5セット)すると約半日を要する。これらの測定手順は計算機を用いた自動スケジューリングにより実行できる。

逆行列の作成

鏡面変形はフックの法則に従うので、鏡面の変形に対する矯正力分布を知れば鏡の変形を矯正で

CM Comparison Test Raw Data (Residual)							
	A22 +0.80	B22 -0.80	A31 +0.15	B31 -0.15	A33 +0.30	B33 -0.30	A40 +0.10
A11 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B11 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A20 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A22 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
B22 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
A31 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
B31 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
A33 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
B33 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
A40 0 ±200	0	0	0	0	0	0	0
A42 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B42 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A44 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B44 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A51 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B51 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A53 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B53 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A55 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B55 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A60 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
(nm)	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6

(a) 矯正残差

CM Comparison Test Raw Data (Standard Deviation)							
	A22 +0.80	B22 -0.80	A31 +0.15	B31 -0.15	A33 +0.30	B33 -0.30	A40 +0.10
A11 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
B11 0 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A20 50 ±100	0	0	0	0	0	0	0
A22 100 0	0	0	0	0	0	0	0
B22 100 0	0	0	0	0	0	0	0
A31 100 0	0	0	0	0	0	0	0
B31 100 0	0	0	0	0	0	0	0
A33 100 0	0	0	0	0	0	0	0
B33 100 0	0	0	0	0	0	0	0
A40 100 0	0	0	0	0	0	0	0
A42 50 0	0	0	0	0	0	0	0
B42 50 0	0	0	0	0	0	0	0
A44 50 0	0	0	0	0	0	0	0
B44 50 0	0	0	0	0	0	0	0
A51 50 0	0	0	0	0	0	0	0
B51 50 0	0	0	0	0	0	0	0
A53 50 0	0	0	0	0	0	0	0
B53 50 0	0	0	0	0	0	0	0
A55 50 0	0	0	0	0	0	0	0
B55 50 0	0	0	0	0	0	0	0
A60 50 0	0	0	0	0	0	0	0
(nm)	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6	2 3 4 5 6

(b) 測定値の標準偏差

図 7 (a), (b), 逆行列展開制御項数の比較。7列並んでいる各図の上部は矯正対象係数と矯正量、21行並んでいる各図の左は評価に用いた主な係数と図のフルスケールを示し、各図の下部の2~6までの数字は展開制御項数 7, 10, 12, 15, 27に対応する。

きる。矯正力分布は各アクチュエータのロードセルで測定し、対応する変形量分布はシャック・ハルトマン装置を用いてツェルニケ展開した27項の係数として取り出す。その際に、温度ドリフトに起因する変形量を除く工夫として、指令支持力値で制御する前後の基準支持力制御で得たデータを平均して、指令支持値のものとの差を求めた。構造行列の一般式は式(4)で表すことができる。式中の a は収差分布ベクトル、 C は構造行列、 f は補正力分布ベクトル、 Nz はツェルニケ展開の項数、 Na はアクチュエータの数である。

$$a = C \cdot f \quad (4)$$

$$(Nz) (Nz \cdot Na) (Na)$$

得られた構造行列から鏡面を矯正制御するためのツェルニケ係数を選んで部分行列を作る。選んだツェルニケ係数の項数を以下では展開制御項数と呼ぶ。部分行列から行列の逆変換式（市販ソフト MATLAB）を用いて最適補正力を求める。最適補正力値 $\langle f \rangle$ を式(5)に表す。ここにおける C^+ は一般化逆行列を表し、 Nc は展開制御項数である。

$$\langle f \rangle = C^+ \cdot a \quad (5)$$

$$(Na) (Na \cdot Nc) (Nc)$$

展開制御項数と制御項数

鏡面の矯正制御において、逆行列作成の際に抽出した展開制御項数の中でさらに制御する係数を選択することができる。この場合に選択したツェルニケ係数を本稿では単に制御項数と呼び、展開制御項数 Nc と区別する。ただし実際の矯正に際しては、一般的に展開制御項数と制御項数が同数の場合を用いた。鏡面の制御の良否を評価するために用いた残存収差 δa は式(6)で表すことができる。

$$\delta a = a - C \cdot \langle f \rangle \quad (6)$$

$$(Nz) (Nz) (Nz \cdot Na) (Na)$$

展開制御項数（構造行列は1990年2月16日に測定し作成したもの）を7, 10, 12, 15, 27と変えて逆行列を作成して、4月4日に比較を行った。測定は各展開項数の逆行列当り6回行った。矯正対象の7係数は $A_2^2, B_2^2, A_3^1, B_3^1, A_3^3, B_3^3, A_4^0$ であり、矯正の実験は A_2^2 を $+0.8 \mu\text{m}$ 矯正することを目標にした場合の他、 B_2^2 を $-0.8 \mu\text{m}$, A_3^1 を $+0.15 \mu\text{m}$, B_3^1 を $-0.15 \mu\text{m}$, A_3^3 を

$+0.3 \mu\text{m}$, B_3^3 を $-0.3 \mu\text{m}$, A_4^0 を $+0.1 \mu\text{m}$ 矯正する場合について行った。制御の達成度を見るために基準姿勢での鏡面との差を求めて図7(a)に残差を、図7(b)には6回の測定の標準偏差を示した。7列並んでいる各図の上部には矯正対象係数と目標矯正量を表し、21行並んでいる各図の左には評価に用いた主な係数と図のフルスケールを、各図の下部の2~6までの数字は展開制御項数 7, 10, 12, 15, 27に対応する。従って、図7(a)の各図の縦棒の長さ（正負）は残差を表し、図7(b)の各図の棒の長さは測定値の標準偏差を示す。展開制御項数が少ないと矯正対象のツェルニケ係数がよく補正されている。一方、矯正対象以外のツェルニケ係数（例えば B_4^4 ）へ矯正残差がしづ寄せられるケースもある。

3.3 評価方法

ストレール数の定数

一連の能動光学実験で評価に用いるものは、式(7)から得られるストレール数 S (Born and Wolf, 1959) である。式(7)中の STR^2 は、シャック・ハルトマン装置で実測した鏡面の収差量をツェルニケ多項式展開して鏡面形状を表す係数 A_n^m として求めて、式(8)で示すように自乗和したものである。ここで λ は $0.7 \mu\text{m}$ (CCDのピクセル感度波長) である。

$$S_{\text{RAW}} = 1 - 2\pi^2 \text{STR}^2_{\text{RAW}} / \lambda^2 \quad (7)$$

式(7)で定義される S は、物理的には像中心の実測強度を回折限界時の理論強度で規格化した量であり、本来は $0 \leq S \leq 1$ であるが、式(7)では STR^2 が大きくなると近似が悪くなり実際のストレール数より過小評価になる。極端な場合は負になることがある。

$$\begin{aligned} \text{STR}^2_{\text{RAW}} &= \sum_{n=2}^{\infty} \left\{ 2(A_n^0)^2 / (n+1) \right\} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left[\left\{ (A_n^m)^2 + (B_n^m)^2 \right\} / (n+1) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ストレール数は、便宜上 S_{RAW} と S_{INT} (Intrinsic) の2種類を用いた。 S_{RAW} は式(8)で自乗和を求める際に27項のツェルニケ係数全部を用いたものであり、 S_{INT} ではそれから Tilt ($A_1^1 B_1^1$) と Defocus (A_2^0) を除いている。Tilt と Defocus

はイメージ・スタビライザやオート・フォカーサーが実用化できれば除去できるからである。

4. 性能評価

4.1 線形性

アクチュエータ単体の線形性テストは今期のテストの前に既に終えている。今回の実験では、鏡面を支えた場合における総合的な線形性テストを、1990年2月16日（5セット）、5月15日（5セット）および5月31日（7セット）に行った。データ取得の方法は3.2節で述べた通りであり、基準姿勢の主鏡に対して±500、±1000kgfの荷重を負荷した。解析では、前後の基準姿勢との差を求めて、ツェルニケ係数と負荷荷重の線形性について評価した。結果を図8に示す。9列並んでいる各図の上部にはアクチュエータの番号を示し、21行並んでいる各図の左に用いた主な係数と図のフルスケールを、各図の下部の横軸目盛り

は負荷荷重値をkgfで示した。各図の折れ線は線形からのずれ量を、縦棒の長さは3倍の標準偏差($\pm 3\sigma$)を表す。図8は2月16日の測定結果であるが、測定日の異なる他の解析結果とパターンが良く一致する。測定の再現性はよいので非線形からのずれを補正すれば、さらに精度を向上することができる。

4.2 ヒステリシス (Hysteresis) の測定

駆動機構の一般的な評価項目の一つとしてヒステリシスがある。この場合のヒステリシスとは支持力制御を実行後、予測できない履歴を持って支持力が変動することを言う。そこで、基準姿勢とそれに対してツェルニケ係数 A_2^2 を+0.8μm繰り返し矯正変形（閉ループ制御）させることにより、ヒステリシスの測定を行った。ヒステリシスの有無を調べるために、閉ループ制御を1回行って、非制御で30回モニター測定のみを行うこととした。その結果の1例を図9に示した。図中の測

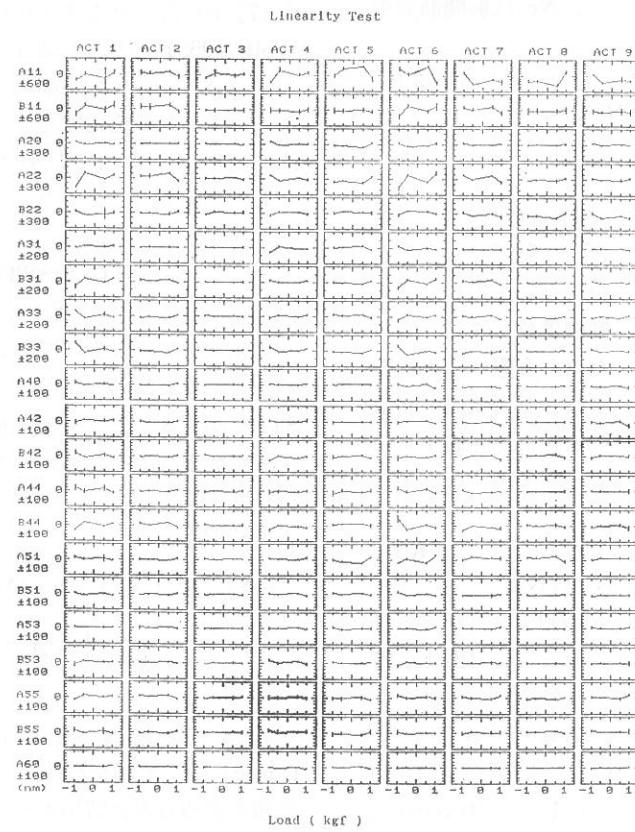


図8 線形性テスト。9列並んでいる各図の上部はアクチュエータの番号、21行並んでいる各図の左には評価に用いた主な係数と図のフルスケール、各図の下部の横軸目盛りは負荷荷重値をkgfで示す。

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

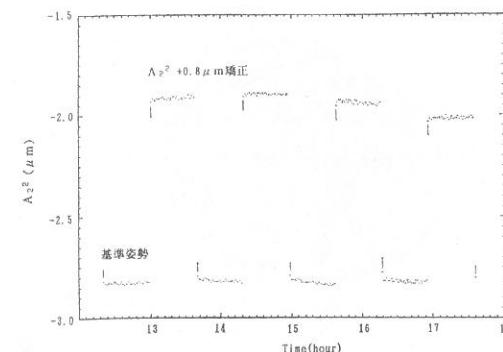


図9 ヒステリシス測定 A_2^2 の結果。各グループの先頭(縦線で示した)のみ閉ループ制御を行い、その後非制御で30回モニターのための測定のみ行った。下段のグループは基準姿勢、上段は A_2^2 を+0.8μm矯正した場合を示す。

定点の各グループの先頭は閉ループ制御を、その後の30点は非制御でモニターのための測定結果を、下段のグループは基準姿勢、上段は A_2^2 を+0.8μm矯正した場合を示した。制御をかけた各グループの先頭の1点と、非制御の30点の間には有意にギャップがある。ロードセルの支持力

は変化していないので、支持力のドリフトは検出できていない。非制御の30点の変化は後述するミラー・シーリングによるものである。他の方法(線形性テストのデータ取得に似た方法)でもヒステリシスの測定を行い、4番と5番のアクチュエータを駆動した場合が他のアクチュエータよりヒステリシスが大きく、係数によっては15%を越えるヒステリシスを持つ。通常の駆動機構は5%程度のヒステリシスを持つと言われていて、制御ループが速ければ実害はないと思われるが原因を究明するには至っていない。

4.3 矯正実験

62 cm 実験望遠鏡による矯正実験

62cm実験鏡の鏡面形状の制御自由度は9本のアクチュエータで制限されている。従って、複雑な補正はできない。今回の矯正実験では、展開制御項数(構造行列は1990年2月16日のものを用いた)7項で逆行列を作成して、矯正時にも同じ7項を制御対象として補正制御を行った。矯正対象のツェルニケ係数は、非点収差(A_2^2 を+0.8μm

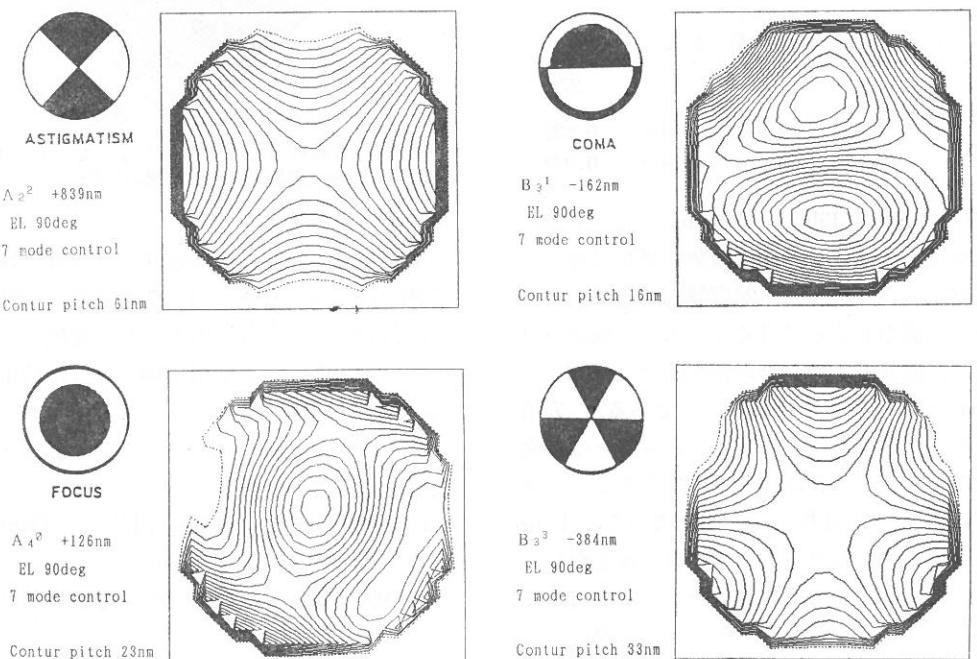


図10 非点収差、球面収差、およびコマ収差の矯正結果の比較。非点収差 A_2^2 を+0.8μm、球面収差 A_4^0 を+0.1μm、コマ収差 B_3^1 を-0.15μmおよび三角非点収差 B_3^2 を-0.3μm矯正した結果。等高線は20本、各図のピッチは異なる。各収差に対応した模式図を左に示す。

矯正する), コマ収差 (B_3^1 を $-0.15 \mu\text{m}$ 矯正する), 三角非点収差 (B_3^3 を $-0.3 \mu\text{m}$ を矯正する, および球面収差 (A_4^0 を $1 \mu\text{m}$ 矯正する) である。それぞれの矯正に対して, 矯正前の基準姿勢との差を求めて, 矯正結果を図10に等高線図として示した。等高線は20本, 各図のピッチは異なる。各収差に対応した模式図(左上)に似ている鏡面形状を示すことから, よく矯正されていると結論できる。支持力値を見ると, 鏡が球面およびコマ収差の矯正に対して固く, 非点収差の矯正に比べて大きな補正支持力が必要なので, 矯正量を少なくして実験を行った。

鏡面矯正の数値シミュレーション

鏡面矯正の数値シミュレーションは, 展開制御項数(構造行列は1990年3月31日のものを用いた)27項で逆行列を作成して得たものを用いた。シミュレーションでの矯正では制御項数7, 12, 24, 27項を対象として, 矯正時の制御項数の数との比較を試みた。矯正対象のツェルニケ係数は, 非点収差(A_2^2 を $+0.8 \mu\text{m}$ 矯正する)および球面収差(A_4^0 を $+0.1 \mu\text{m}$ 矯正する)である。

表2 数値シミュレーションによる制御項数の比較

矯正係数	制御項数			
	7	12	24	27
A_2^2	0.928	0.937	0.937	0.832
A_4^0	0.920	0.963	0.972	0.923

評価には S_{INT} (TiltとDefocusを除く)を用いて結果を表2に示す。制御項数の増加に伴い全体に残存収差が漸減して、24項制御が最良である。27項制御がかえって良くないのは、構造行列取得の際に温度ドリフトの影響を受けた Tilt と Defocus を制御対象に含めたためである。7項制御の場合、制御対象の係数だけを見るとほぼ完全に残差が無い。これは、9本のアクチュエータの自由度以下の制御ケースゆえである。しかし、その場合でも対象外の係数へ矯正残差がしづ寄せられている。制御項数を増やすと制御対象外の係数へのしづ寄せ矯正残差が減少するので、その結果全体の残差が減少する。展開制御項数7項で得た逆行列を用いた数値シミュレーションでも、同様の傾向を示すが、対象外の係数の残差の

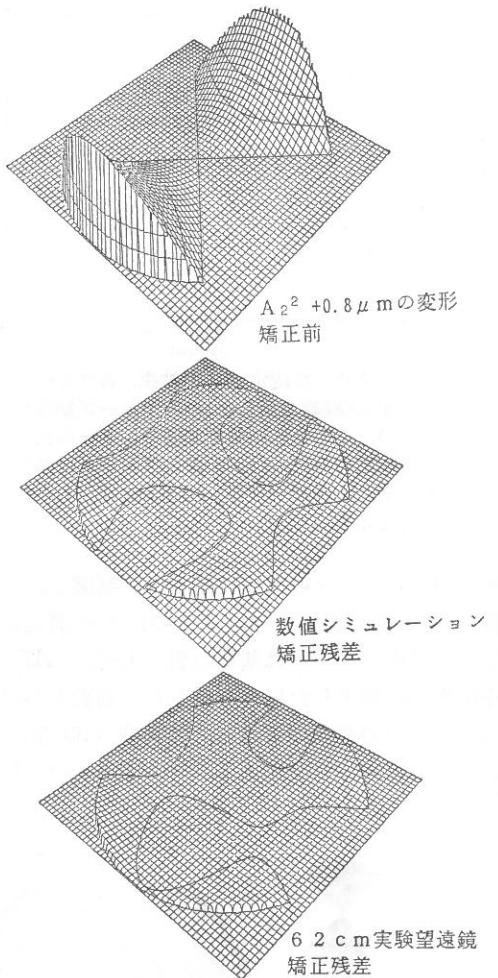


図11 非点収差矯正の数値シミュレーションと62 cm 鏡実制御との結果の比較

様子が異なる。

図11には、展開制御項数(構造行列は1990年3月31日のものを用いた)27項での逆行列を用いて、制御対象項数27項の矯正を、数値シミュレーションと62 cm 実験望遠鏡で行った結果を示した。矯正対象のツェルニケ係数は非点収差(A_2^2 を $+0.8 \mu\text{m}$ 矯正する)である。矯正前の鏡面、数値シミュレーションによる矯正残差および62 cm 実験望遠鏡の矯正残差(TiltとDefocusを除く)の結果を示した。双方の結果は似ているが、残差の値は62 cm 鏡の実制御の方がやや大きい。

外乱(錐を鏡面に載せて発生させた)の矯正実験

上述した矯正実験の他に、外乱として鉛の錐(480 gf)を鏡面に載せて矯正実験を行った。望遠

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

鏡が基準姿勢の位置で鏡面上に錐を載せて、閉ループ制御により再び基準姿勢の鏡面状態に矯正すると、ツェルニケ係数で見て元の形状にほぼ復することを確認した。この場合のロードセルの荷重合計は472 gf(ロードセルの荷重補正率98%とよく一致する)増加していた。

4.4 高度軸回転(EL)による姿勢差に対する鏡面形状の矯正

開ループ制御標準モデル

高度軸の回転に伴うアクチュエータの支持力指令値 F_i は次の式(9)によって与えられる。

$$F_i = W_i \cdot \alpha_i \cdot \sin(\theta_{\text{EL}} + \theta_0 + \beta_i) - W'_i \quad (9)$$

ただし、 W_i は i 番目のアクチュエータが分担するガラスおよび金具の重量(gf)の和、 W'_i は金具の重量(gf)、 α_i はロードセルで検出する荷重と実荷重の比、 θ_{EL} は望遠鏡高度軸の角度読み取り値(deg)、 θ_0 は望遠鏡高度軸の角度原点補正值(deg)、 β_i は主鏡光軸とロードセルの荷重検出方向との取り付け誤差(deg)である。

高度軸回転制御モードの比較

今回の実験では、高度軸回転に伴う鏡面形状の矯正制御を次の3モードで比較した。

- (1) 前項で述べた開ループ制御標準モデルを用いた制御モード、
- (2) 7展開制御項数($A_2^2 B_2^2 A_3^1 B_3^1 A_3^3 B_3^3 A_4^0$)から求めた逆行列で7制御項数で解いた補正

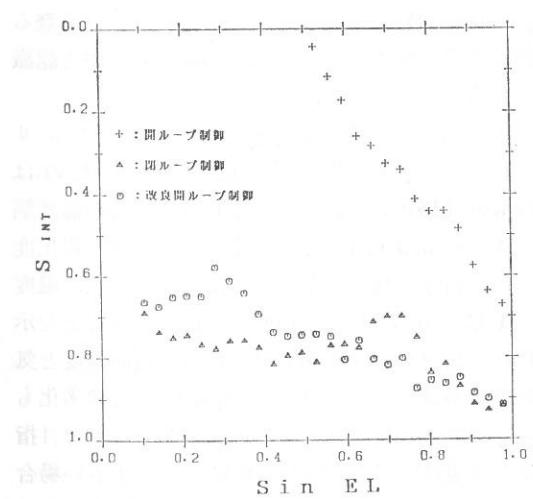


図12 3種の制御モードによるストレル数の高度角依存性

支持力を用いて、基準姿勢(EL 90°)での鏡面形状を制御目標とした、閉ループ制御モード、(3)(2)における制御で用いた補正支持力をテブルとした、改良開ループ制御モード。

比較条件を揃えるために、温度ドリフトの少ない日を選んだが多少の影響を受けた。それは測定所要時間が長いためで、高度角 90° から 6° まで 2° 每に高度を変えて、開、閉、改良開ループをそれぞれ2回繰り返したので、往復でほぼ1昼夜を要した。解析は基準姿勢との差を S_{INT} で評価した。Tilt と Defocus を除いて評価したのは閉ループにおいてこれらの項目を制御項目に入れてないことと、トラスなどの熱変形を完全に除去して評価することができないことによる。図12は解析結果である。閉ループ制御モードは、高度軸回転で変形した主鏡を見事に矯正している。改良開ループ制御も閉ループに近い矯正が実現しているが、多少閉ループに劣るのは、温度変化の影響を補正できないからである。開ループは高度角に依存した矯正残差がある。

固定点反力の残存誤差($\sin 2\theta$ 成分)

開ループ制御標準モデルを用いて、高度軸回転に伴う鏡面形状の補正制御を行ったとき、各アクチュエータの駆動終了後の支持力は標準モデルの

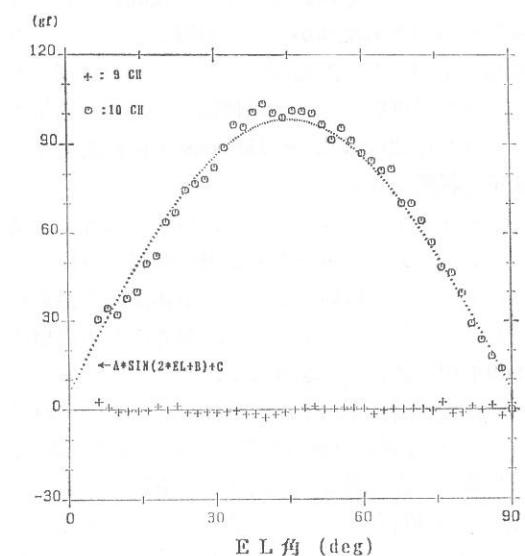


図13 固定点反力の残存誤差($\sin 2\theta$ 成分)上部は10番の固定点の反力、下部は9番のアクチュエータの支持力を示す。

指令値と 5 gf 以内で一致しているにも拘らず、固定点には高度角 (θ_{EL}) に依存する $\sin 2\theta$ 成分の反力残存誤差が存在することが分かった(図13 参照)。解釈の可能性の一つとして、アクチュエータの支持点に力を伝達するためのリンク機構のたわみが考えられたが、アクチュエータ当たり最大 33 gf の残存誤差の 30% しか説明できない。現状では他に原因を見つけることができない問題点の一つである。但し説明はつかないが、モデルのパラメータを変えれば補正はできるので実用上は支障ない。

4.5 温度変形

実験室内的昼夜の温度差は温度モニターによる 10°C 程度となる。また室内気温の非一様性が原因で、トラス、主鏡セルおよびアクチュエータなどの金属部の温度分布も異なる。これらの解析に用いたデータは、後述(5節)するミラー・シーリングの測定と同じものである。

温度解析の結果、屋外の天候が大きく影響を及ぼしていて、熱の出入りは主に南側の金属シャッター、屋根および地面を通じて行われると推論できる。金属シャッターを通して熱の出入りは、望遠鏡を天頂に向けてその周辺の気温を南北で比較した結果、昼は南側が高温、夜間は南側が低温であることで裏付けられる。また、夜間においては屋根からの放射冷却が大きく影響している。この推論に基づくと、遅延時間はあるものの昼夜のサイクルで規則的にトラスが伸縮して、その結果ツェルニケ係数の Tilt と Defocus の値が変動する様子を説明できる。

ロードセルの温度ドリフトについては既に言及したが、アクチュエータ非制御中の固定点反力をモニターして気付いたことは、単体試験で得られたものより大きいことである。参考のため図14に 1989年12月22日から23日にかけて生じたドリフトと支持点の関係を示す。もし単なるセンサーのドリフトなら、固定点反力が変化しないはずである。この場合、測定開始を基点として $+7^{\circ}\text{C}$ でトータル荷重 $+40\text{ gf}$ のドリフトがあった。原因是、アクチュエータと固定点支持機構の材質の相違による伸縮の差で、膨張係数と温度差を用いて実際に鏡にかかる荷重の変化量を考えると量的説明で

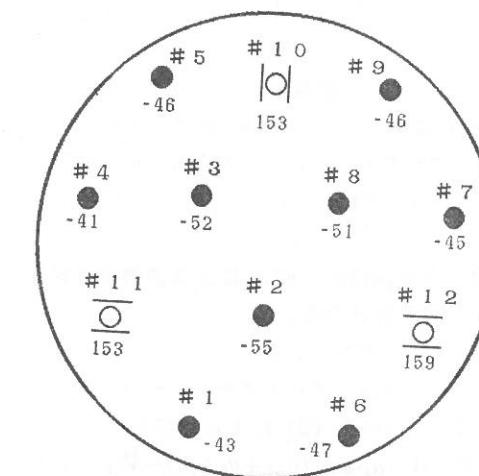


図 14 支持機構の材質の伸縮差に起因したロードセルの温度ドリフト。図中で示した数字は gf であり、 7°C 温度上昇時のドリフト結果。

きる。JNLT 実機において、気を付けるべき教訓の一つである。

5. ミラー・シーリング

5.1 ミラー・シーリング測定の契機

大型望遠鏡の空間分解能は、回折限界ではなく事実上は地球大気の密度揺らぎにより生じた波面劣化で制限される。このため、大型望遠鏡の建設は乱れの少ない観測適地を選択して行われてきた。近年、空間分解能を劣化させるシーリングに対する研究が盛んに行われて、ドーム内の微熱乱流、特に熱容量の大きい主鏡から光路に立ち登る熱揺らぎを抑えることが重要な課題の一つと認識されるようになった。

主鏡面からの微熱乱流と結像劣化を、シュリーレン・カメラを用いて意欲的に研究したのは Lowne (1979) である。バイレックス鏡の温度馴染み率が $0.5^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ であること、結像の劣化度が鏡面温度と周辺気温の差に比例すること、温度差 1°C で $0.5''$ 相当の結像劣化が生じることを示した。ただし、Lowne の測定は、鏡面温度と気温の差が 2°C から 8°C と比較的大きく、像劣化も大きい場合に限られている。高空間分解能を目指す大型望遠鏡では、温度差 2°C 以下の小さい場合についてさらに精度よく測定を行う必要がある。

62 cm 鏡能動光学実験の24時間モニター測定の

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

解析から、鏡面形状係数の測定分散が夜間大きくて昼間小さいことに気付いた。温度分布の変化を併せて解析した結果、鏡やアクチュエータの熱慣性が大きいために、夜間の鏡面温度が周辺気温の低下に追随できずに、鏡面より微熱乱流が発生するために測定分散が大きくなることが判明した。実験室内で密度的に安定成層をしている光路中の空気を、鏡面で発生した微熱乱流が揺るがしていいたのである。鏡面形状を測定するシャック・ハルトマン装置は、数 nm の測定精度を持ち、鏡面で発生する微熱乱流で生じる結像劣化、即ちミラー・シーリングを測定できることが、この測定から明らかになった。そこで、温度差、露出時間および送風効果(風速、鏡面間距離)などとミラー・シーリングの関係を調べる実験を企画した。この実験の一部は1990年2月に米国のツーソンで行われた SPIE で速報として報告した。(Iye et al. 1990)。同様の実験は、米国国立光学天文台の大型望遠鏡開発グループでも SPIE で報告している(Barr et al. 1990)。

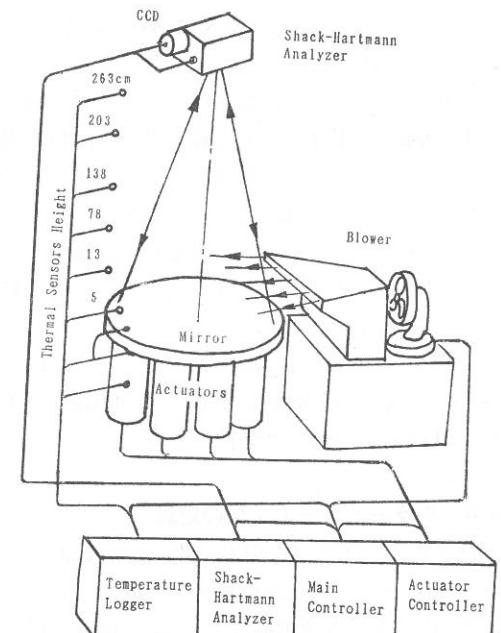


図 15 ミラー・シーリング実験システムの概要

5.2 測定の概要

ミラー・シーリング測定の実験システムの概要を図15に模式的に示す。温度測定には20本のビー

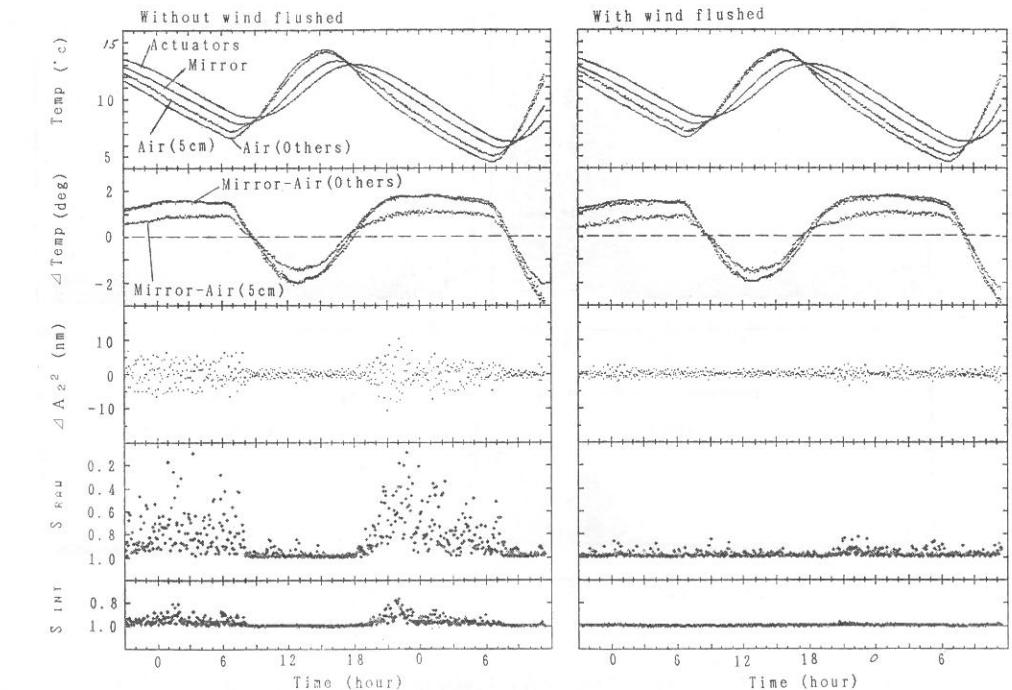


図 16 ミラー・シーリング連続モニターの測定例。上段から主鏡と望遠鏡周辺空気などの温度変化、主鏡に対する周辺空気の温度差、ツェルニケ係数 A_2^2 の20分平均からの差、ミラー・シーリングの評価関数ストレール数 S_{RAW} 、ストレール数 S_{INT} (Tilt と Defocus を除く)。

D型サーミスタ（宝工業 K.K., MB型, JIS 0.1 級, 分解能 0.01°C ）を用い, 解析に際してはセンサーの個性を較正した値を用いた。この実験では, Lowne や Barr らの実験と異なり, 鏡の温度設定や実験室内的温度制御は一切行わず, 鏡の熱慣性により生じる周辺空気との温度差で自然発生するミラー・シーイングを測定して評価した。従って, 温度差は天候に大きく依存して, 晴天日に大きく曇天日に小さい。条件を揃えるためには比較 1 項目につき数日の測定を重ね合わせた。さまざまな状況下の連続測定であり, 約90昼夜(1 昼夜 720 測定)のデータが得られた。

5.3 ミラー・シーイングの定義

図16に示したものは, 昼夜(36時間)にわたるミラー・シーイング連続モニターの測定例である。図中には, 各所の温度と主鏡に対する温度差, フェルニケ係数の中から代表例として非点収差(A_2^2)および係数の総合判断のためにストレール数を示した。夜間に係数の分散が大きくな

れることが分る。その原因是, 鏡の温度 T_{Mir} と周辺の気温 T_{Air} の差にある。鏡が気温より高い場合に分散が大きいことが顕著であることから, 鏡面から発生した微熱乱流により空気の密度揺らぎが起こり, 結像性能を劣化させていると推論できる。変動成分の中で, 長周期に大きく変化するものは機械的熱変形が主と考えられる。そこで, 図16には長周期成分を取り除くために, 移動平均(20分間の)を求めて平均からの差を算出したものを示した。この方法で求めた変動成分をミラー・シーイングと定義した。

ミラー・シーイングの評価には, シーイングの要因を検討するために3.3節で既に言及したストレール数 S_{RAW} と S_{INT} を用いた。 S_{INT} は S_{RAW} から Tilt と Defocus の成分を除いたものである。

取得データの解析結果の1例を図17に示す。図17の縦軸はストレール数であり, 横軸は鏡の温度から周辺の気温を差し引いた温度差である。図17左は送風を止めた場合, 右は送風した場合であり, 各々の上段は S_{RAW} 下段は S_{INT} で評価した

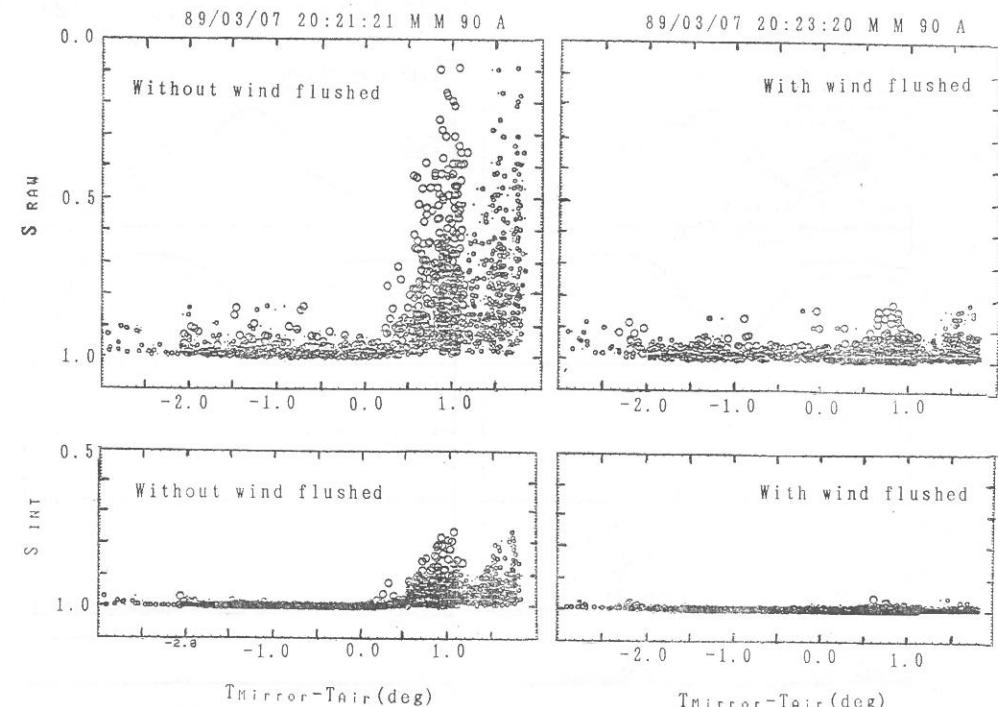


図 17 ミラー・シーイングの評価結果の例。図左は送風を止めた場合, 右は送風した場合であり, 各図の上段は S_{RAW} 下段は S_{INT} で評価したシーイングである(ストレール数は 1 が最良で理論的限界に相当する)。鏡の温度が高い場合にストレール数が小さくなり, 結像状態が悪いことが分かる。

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

シーキングである。ストレール数は 1 が最良で理論的限界に相当する。従って, ストレール数が小さくなるほど結像状態が悪いことを意味する。

5.4 鏡と周辺空気の温度差

鏡の温度が周辺の空気よりも高い場合にミラー・シーイングの劣化が顕著となる。この場合, 鏡の表面とすぐ上の空気との温度差がよい指標になるといわれている。今回の温度測定におけるセンサーの配置は, 主鏡で 3箇所(表面 1, 裏面 2), 周辺空気では鏡面鉛直上に 6 段の高さ(鏡の上 5, 13, 78, 138, 203, 263 cm)に各々 2箇所, アクチュエータで 3箇所およびトラスで 2箇所である。解析では以下に示す 3 ケースの温度差(ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3)を用いた。

- (1) ΔT_1 は鏡裏面 2箇所の平均温度と鏡の上 5 cm の空気 2箇所の平均温度との差,
- (2) ΔT_2 は鏡 3箇所の平均温度と鏡の上 5 cm の空気 2箇所の平均温度との差,
- (3) ΔT_3 は鏡 3箇所にアクチュエータ 2箇所を加えた平均と全高さの空気 10箇所の平均温度との差である。

上述の 3 ケースを比較するために, 今回の測定で得た露出時間 3 秒の全データ(約40昼夜分)の中から送風を止めた場合のみを選別して解析した。図18に結果を示した。図の上段は S_{RAW} , 下段は S_{INT} である。いずれのケースでも, 温度差と像劣化(ストレール数が小さい)の傾向は似ているが, 勾配が異なる。この結果は, 解析の際の温度差の取扱いには十分注意を要することを意味する。ケース(1)の ΔT_1 は他のケースより温度差

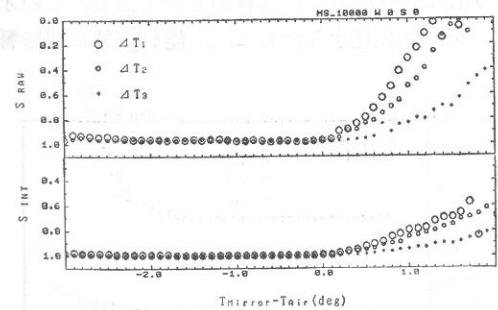


図 18 鏡と周辺空気の温度差とミラー・シーイング。周辺空気の温度差とミラー・シ主鏡と一イングの関係を測定点の異なる 3 通りの温度差(ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3)について比較した。

が小さい。以後の解析では ΔT_1 を用いることとする。ストレール数 0.8 まで結像劣化を許すと考えて, Tilt と Defocus を他の手段で補償すると, 鏡と周辺空気の温度差を 1°C 以下に保てば, よいミラー・シーイングが得られると推論できる。

5.5 露出時間の影響

ミラー・シーイングの評価を行う上で, 鏡面から発生する乱流の時間揺らぎについて検討する必要がある。そこで, 露出時間を 3, 10, 30 秒と変えて測定を行った。シャック・ハルトマン装置でスポットの重心を求めるのに十分な S/N を得るために, そして各露出時間で S/N に差を生じることのないように, 露出時間に応じて光源の明るさを調節した。

結果を図19に示した。図の上段は S_{RAW} , 下段は S_{INT} で評価したミラー・シーイングである。露出時間が長くなるとシーイングが平均されて, 温度差が大きくなるにしたがって大きく影響を及ぼす。従って, 露出時間が長くて平均効果の大きい場合の結像劣化の測定は不確かさが残る。温度差 1°C の範囲で露出 3 秒と 10 秒を較べると S_{RAW} では差があるのに S_{INT} では差がない。これは揺らぎの中で Tilt モードが速いことを意味すると推論できる。実際の揺らぎのタイムスケールは相当速いと思われていて, Barr et al. (1990) は 2 ms で画面をフリージングして撮像している。今回の測定結果では, 実際の結像劣化度より過小評価になっていることに注意する必要がある。

5.6 フラッシング効果

フラッシング効果の測定

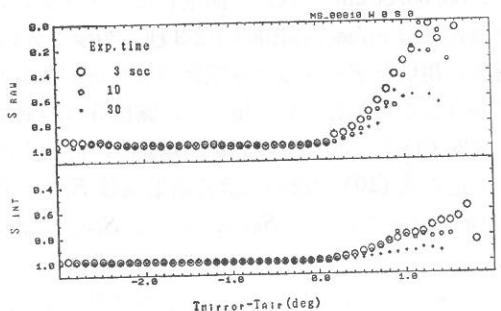


図 19 ミラー・シーイング測定に対する露出時間の影響

鏡面上で発生する微熱乱流を吹き飛ばせば、ミラー・シーリング劣化を抑制する効果があると言われている。そこで、幅 20 cm、長さ 70 cm の吹き出し口を持つプロワーを作製して、鏡面に対する吹き出し口の高さおよび風速の効果を測定した。プロワー効果を調べるために送風を止めた場合と送風した場合を交互に測定した。従って、測定は 2 分毎に、プロワーの ON/OFF は 4 分毎に行つた。実際には風速が安定するのを待って露出を開始し、露出終了後は送風を止めるように制御した。プロワーの風速分布を測定した結果、プロワーで作られるエア・カーテンの厚さは約 10 cm、流れ方向（南北）で多少の広がりを持つが、流れと直交方向（東西）の一様性はよい。

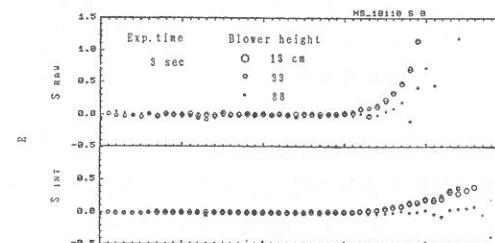
フラッキング効果の評価には、各温度差において式(10)により標準化した効果係数 E を用いた。式(10)中の S_F はフラッキング時のストレール数、 S_{NF} は送風を止めた場合のストレール数である。この方法は、Barr et al. (1990) が用いたものと同じである。

$$E = (S_F - S_{NF}) / S_{NF} \quad (10)$$

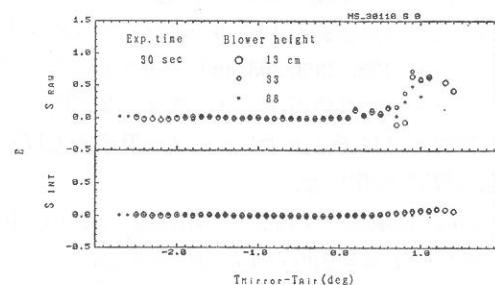
鏡の温度が周辺空気より高い場合、フラッキングによるミラー・シーリングの改善効果は著しく上がる。しかし、鏡の温度が周辺空気より低い場合には、風による攪拌が原因で僅かではあるが逆にミラー・シーリングの劣化が生じる。

プロワー高とフラッキング効果

鏡面上の高さと生じている微熱乱流の影響を知るために、プロワーの吹き出し口の高さを変えて測定を行った。吹き出し口の高さは、センター・セクションの都合で鏡面上 13 cm が鏡に一番近く、他に 33, 60, 88 cm を選んで測定した。フラッキング風速は 1 m/sec、露出時間は 3 秒と 30 秒である。解析に用いたデータ数は各項目で異なるが 3 から 7 昼夜分を重ね合わせて用いた。露出 3 秒の結果を図 20(a)に、30秒を図(b)に示した。評価方法は上述の式(10)で求めた改善効果係数 E で、各図(a)(b)共に上段は S_{RAW} 、下段は S_{INT} による値である。図が煩雑になるので高さ 60 cm の結果は省略したが、33 cm より効果がやや少ない。露出 3 秒において 88 cm の効果が著しく低下している。また、 S_{INT} において効果が少ない、これは



(a)



(b)

図 20 (a) (b) プロワー高とフラッキング効果。
(a) 露出時間 3 秒におけるプロワー高とフラッキング効果、(b) 露出時間 30 秒におけるプロワー高とフラッキング効果。

ミラー・シーリングの主成分が Tilt であることを示唆している。30秒の結果を見ると、露出時間が長い場合、揺らぎの平均を測定しているので、フラッキング効果が少ないと高さの差が検出できていない。

風速とフラッキング効果

能動支持の鏡面を精度よく保持するためには風などの外乱を避けるべきであるが、一方シーリング劣化抑制のために送風が必要である。この矛盾を少しでも避けるためには、能動支持に悪影響

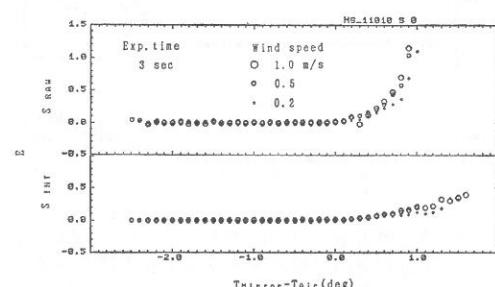


図 21 風速とフラッキング効果

62 cm 薄型鏡による能動光学実験

を及ぼさない程度の風速でフラッキングすることである。そこで、風速とフラッキング効果について測定した。測定条件として、プロワー高は鏡面上 13 cm、露出時間は 3 秒である。解析に用いたデータ数は、1.0 m/sec では 8 昼夜、0.5 m/sec および 0.2 m/sec では 4 昼夜分であり、これらのデータを重ね合わせて用いた。風速センサーはブリッジ熱平衡型（日本カノマックス社製、6141 型）を用い、風速分解能は 0.05 m/sec である。結果を図 21 に示す。図の上段は S_{RAW} 、下段は

S_{INT} の場合である。 S_{RAW} では風速が速い方がややフラッキング効果が上がるが、 S_{INT} においては大差ない。風速の効果については鏡面の大きさが 62 cm と言うこともあり差が少ない。速い風速についての実験は、プロワーのパワー不足で行うことができなかった。

5.7 星の見え方

星像の見え方の数値シミュレーション

星像の大きさは、光学系の性能、望遠鏡の追尾

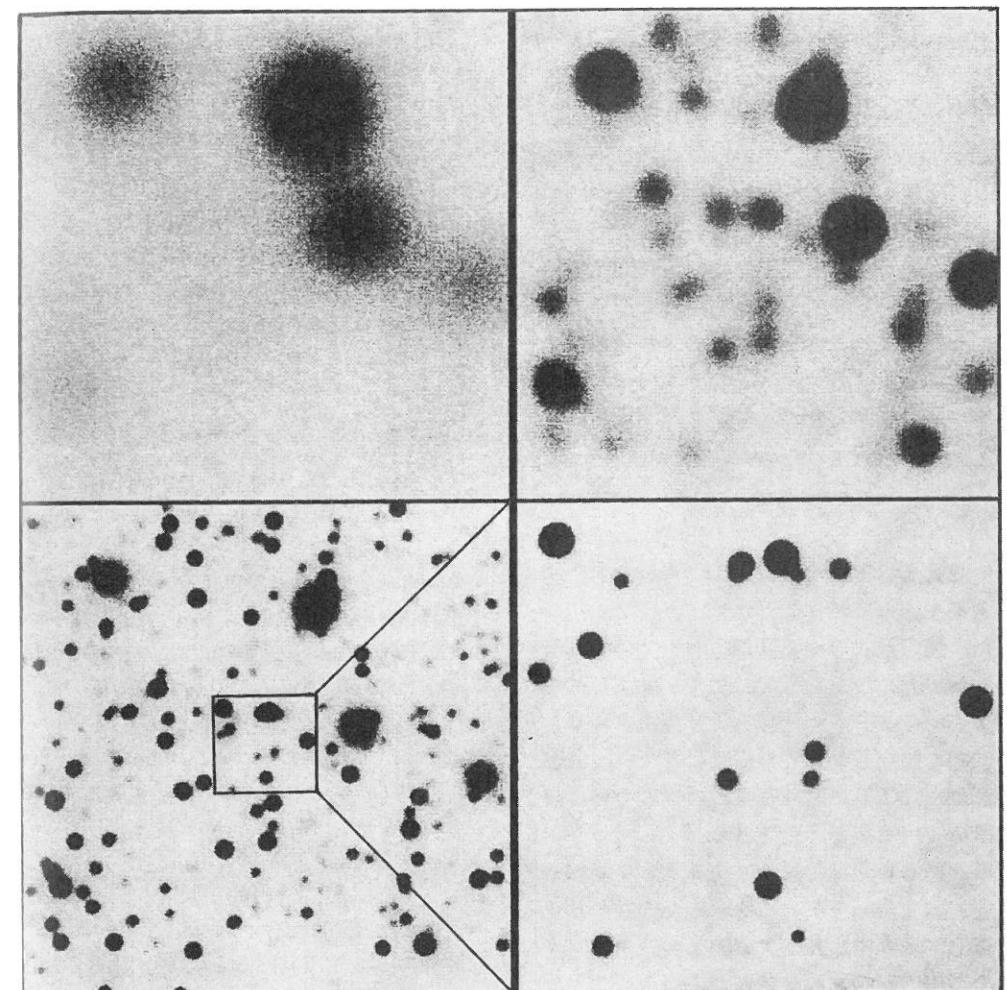


図 22 像の大きさと微光天体の見え方。リッチャー・クレティアン焦点の CCD 撮像を想定した数値シミュレーション。

星像直径：想定した望遠鏡

(左上) 3'' : 典型的望遠鏡、明るい星しか見えない。

(右上) 1'' : ハワイの現存望遠鏡、やや暗い星が見えはじめる。

(左下) 0.73 : JNLT、暗い星まで見えてくる。

(右下) 0.03 : JNLT のアダプティブ・オプティックスが実現した場合。

解像力は大気圏外での観測に近い。視野は他の 3 例の 1/5 を想定。

性能および大気のシーリングなどで決まる。図22に示したのは、JNLTのリッチャー・クレティアン焦点のCCD撮像を想定したシミュレーションである。星像が小さくなると非常に暗い天体まで見えてくる様子が分かる。補償光学を用い解像力が向上する場合は、実際には検出器の解像力にマッチするように像を拡大することが必要である。

補償光学 (Adaptive Optics)

JNLTをマウナケア山頂に設置した場合、波長 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下では大気の揺らぎが、また $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上では望遠鏡口径に対する回折限界が解像力を決める。大気の揺らぎによる光波面の乱れを補償するアダプティブ・オプティックスの技術開発によって、波長 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下でも、回折限界に近い解像力を実現して、地上の大型望遠鏡の性能を飛躍的に向上させ、大気圈外での観測に近い条件を実現できる可能性がある。補償光学とは、実時間で地球大気の揺らぎを測定して、補償光学系を用いて乱れた波面を修正することを指し、これから地上望遠鏡における最重要開発課題の一つである。今回の一連の能動光学実験は、補償光学実現への大きなステップと位置づけられる。

6. あとがき

今回の能動光学実験ではJNLTに用いるアクチュエータを想定して試作したプロトタイプを用いた。また、鏡面形状の補正制御において静的制御ではあるが、遅いながらも実時間で「計測して矯正する」という、一連の処理および制御アルゴリズムの基礎を確立した。この経験に基づいて改良を加えれば、JNLTにおける主鏡の能動支持は技術的に十分実現可能と考えられる。

今後の課題としては、速いダイナミック制御を行うこと、音叉形ロードセルを含めた各種の較正手順の確立、300本に及ぶアクチュエータに対する多入力多出力制御と故障診断などを含む実用レベルのアルゴリズムの開発などが必要である。さらに進めて補償光学を行うためには、イメージスタビライザ、オートフォーカサーなどの開発が望まれていて、実験の一部は既に開始されている。

謝 辞

稿を終えるに当たり、シャック・ハルトマン装置の開発を担当された大島紀夫、柴崎 肇氏に、開発されたCCDカメラを提供して下さった川上 肇、乗本祐慈氏に、62cm実験望遠鏡の据え付けに協力頂いた中桐正夫、宮下暁彦氏に、実験装置の製作と初期設定に協力頂いた三菱電機通信機製作所の佐鳥 敦、三神 泉氏に、実験場所を快く提供して頂いた平山 淳、日江井栄二郎教授に、ミラーシーリングの解釈に助言下さった安藤裕康助教授に、研究全般にわたり援助と助言を頂いた小平桂一教授に深く感謝致します。また数値シミュレーションに際しては、国立天文台天文学データ解析計算センターのFACOM M780を利用させて頂いた。

この研究は文部省機関特定研究、研究代表者：山下泰正「大型軽量鏡の能動制御システムの開発」および研究代表者：小平桂一「高解像観測のための望遠鏡構造物の解析」の補助を受けて行われた。

参考文献

- 9) Nishimura, S., Yamashita, Y., Iye, M., Itoh, N., and Mikami, I.: 1988, in *Very Large Telescopes and Their Instrumentation*, ed. M.H. Ulrich, ESO, Garching, p. 577.
- 10) Noguchi, T., Iye, M., Kawakami, H., Nakagiri, M., Norimoto, Y., Oshima, N., Shibasaki, H., Tanaka, W., Torii, Y., and Yamashita, Y.: 1988, *Publ. Nat. Astron. Obs.*, Vol. 1, p. 49-55.
- 11) Watanabe, M.: 1987, *Ann. Tokyo Astron. Obs. 2nd Ser.*, Vol. 21, p. 241.
- 12) Wilson, R., Franz, F., and Noethe, L.: 1987, *J. Modern Optics*, 34, p. 485.
- 13) 家正則・山下泰正：1989, 天文月報, 第82卷, 第12号, 308頁.