

JNLT の 能 動 光 学

家 正 則*・山下 泰正*

1. はじめに

ハワイ島マウナケア山頂(高度 4200 m)に建設を計画中の 7.5 m 大型光学赤外線望遠鏡(JNLT)には数々の新技術が盛り込まれている。とりわけ、望遠鏡の顔とも言える主鏡には、従来の設計常識を破る薄さのガラス材を用い、「能動光学」方式で鏡の面形状を制御するという全く新しい方法が採用される予定である。この「能動光学」方式の原理、その実現のための技術開発の状況について報告する。

2. JNLT は「軽薄」に

JNLT では直径 7.5 m の主鏡を光の波長の数分の 1 (約 0.1 μm) 以内の誤差で理想的な曲面形状に保たねばならない。これは東京都全域を 1 mm の精度で地ならしするようなものである。光学研磨工場で 2~3 年かけてガラス材を理想面に磨きあげても、望遠鏡に付けたときにその形がずれてしまえば、せっかくの苦労も水の泡である。工場と山上での観測時とは、温度環境、鏡の姿勢、風などによる外乱環境が全く異なる。従って、熱膨張率の低いガラス素材を選び、その厚さや支持方法を吟味して、歪みが許容範囲以内に収まるようにする必要がある。平均風速 7 m/sec のマウナケアでは望遠鏡を風からもできる限り守ってやる必要がある。

従来は、鏡の剛性を高くするため主鏡のガラス材の厚みは直径の 6 分の 1 程度は必要であるというのが、設計者の常識であった。ところが、JNLT の場合、これでは厚みが 1 m 以上となり、ガラス材の重量だけで 100 トンを越してしまう。光学用の特殊で均質なガラス材を 100 トンも使うのでは材料を用意するだけでも 10 年以上かかる。それに、鏡を支える構造物も大きく重たくなり、天文学者でさえ驚くようなコストになってしまう。

従って、JNLT を実現するには、まず主鏡を出来るだけ軽量化する必要がある。軽量化には 2 つの方法がある。1 つは、主鏡ガラス材を厚さ 20 cm 程度の薄皿型にするというメニスカス方式であり、もう 1 つは、厚さは 1 m 程度だが内部を出来るだけ中空にするというハネカム方式である。パロマー山の 5 m 望遠鏡はこのハネカム方式の代表例である。どちらが、JNLT に適しているかについて詳しい検討がなされた。

ハネカム鏡を作るにはコア材を並べ、そのすきまにガラスを流し込んで蜂の巣構造にする。このため、ガラス

材はコア材よりも融点が低く、粘度も低くて隙間に流れ込み易いものでなければならない。このような性質を兼ね備えたガラス材はボロシリケート系のものしかない。残念ながら、ボロシリケート系のガラス材は熱膨張率が $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、大型鏡用としては不満である。ハネカム鏡を採用する場合は極めて高精度の温度制御が必要となる。一方、メニスカス鏡は熱膨張率が $10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ 程度のガラス材が利用できるため温度制御がかなり楽になる。ただし、薄皿型にすると剛性が低くなるため、形状のたわみを除去する工夫が必要となる。

鏡がたわむ様子は有限要素法というプログラムを用いてコンピューターで解析した。ハネカム鏡は固いため支え方が多少おおざっぱでもまずまずの結像性能を達成することができる反面、ガラスの内部構造が複雑なためいろいろ制御しても、極めて良い像を得ることは困難である。一方、メニスカス鏡の場合は支え方に細心の注意を要するが、上手に支えればガラス材が均質なため極めて良い像が得られることがわかった(図 1)。最適な力配分で支えるというも易しくはないが、熱管理よりは考え方がすっきりしている。そこで、JNLT では薄メニスカス主鏡を上手に支える「軽薄」方式を採用することにした。

	20 cm 厚 メニスカス鏡	ハネカム鏡*
直 径	7.5 m	7.5 m
鏡 厚	20 cm	90 cm
F 比	2.0	2.0
重 量	19 トン	14 トン
必要支持点数	396 点	80 点
1 点あたり支持力	50 kg	175 kg
支持力の必要精度(1)		
axial	0.14 kg	1.5 kg
radial	2.7 kg	244 kg
radial 支持位置の必要精度(2)		
	0.05 mm	0.5 mm(?)
変形量(力誤差なしで)		
水平時	0.06 μm	0.2 μm
垂直時	0.10 μm	0.5 μm

* ハネカム鏡は中央プレートがある場合

- (1) 30 度に傾けたとき、0.1 μm の変形を生じる一支持点あたりの誤差量
- (2) 90 度(垂直)に立てたときに、0.1 μm の変形を生じる支持重心のずれ

* 国立天文台 Masanori Iye and Yasumasa Yamashita: Active Optics for JNLT

図 1 ハネカム鏡と薄メニスカス鏡の対照表

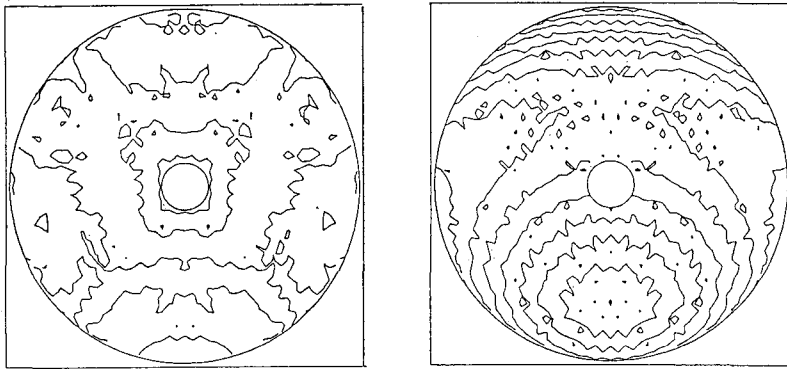


図 2 鏡の自重変形
 (左) 鏡が水平のとき. 最大振幅は 57 nm, RMS 振幅は 9 nm.
 (右) 鏡が垂直のとき. 最大振幅は 100 nm, RMS 振幅は 20 nm.

20トンのガラス材の自重によるたわみが最大でも 0.1 μm 以下となるようにするには, 一体何点で支えてやれば良いのか. この問題については, 396 点での最適な支持を行えば鏡が垂直になっても水平のときでも十分な鏡面精度が得られることが示された (図 2). 最近, 支持点数を更に減らす方向で検討を行った結果, 支持点間のたわみは約 2 倍に増えるが, 264 点でもなお必要な精度を満たすことがわかった.

3. 能動光学の原理

「能動光学 (Active Optics)」という概念の基礎を確立したのは欧州南天天文台の R. Wilson であろう. やや先走りするが, 能動光学は最近研究が盛んになってきた「波面補償光学 (Adaptive Optics)」の前段階と位置付けることができる.

JNLT の能動光学の構成原理を図 3 に示す. 鏡の形状を「測る」ことと, 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. JNLT では, 特に鏡面の測定に光学測定と機械測定の独立な 2 つの方法を相補的に用いる. 光学的な測定では, 観測天域の星を後述のシャック・ハルトマン装置で観測し, 鏡の変形の様子を直接測る. 光学的な測定は読みだし速度の制約や大気の流れ成分の平均化のためおよそ 1 分ごとに行うのが限度であるが, 星を用いた直接測定であるため信頼度が高い. 機械的な測定では, 鏡の各支持点の支持力をロードセルでモニタし, 鏡面変形を推定する. 機械的な測定は間接的ではあるが, 高速度でサンプリングを行えるという利点がある. JNLT の能動支持方式では 0.1 秒ごとに支持力の設定を更新してやる必要があるため, 普段は機械的な測定をもとに制御を行い, とどろき光学的な測定で校正するという 2 重フィードバック機構を考えている. 能動光学機構の全体構成を図 4 に示す. JNLT は巨大で精密な「ロボット望遠鏡」なのである.

能動光学では, 研磨誤差や調整誤差による理想面からの鏡面のずれ, 望遠鏡の姿勢の変化に伴う鏡の変形, 温

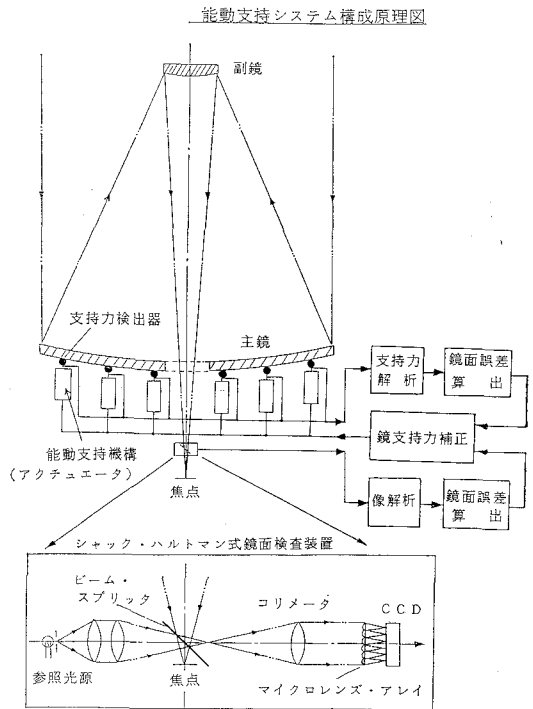


図 3 能動光学システムの原理

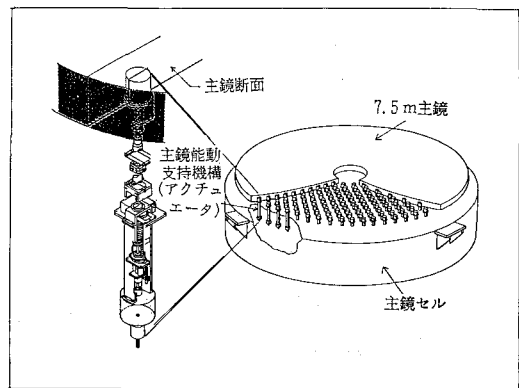


図 4 JNLT の能動光学機構

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。マウナケアでは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。ただし，変動が激しい成分については補正しきれない。変動の速い成分は振幅が小さいはずであるが，望遠鏡を風からある程度は守ることが必要である。

能動光学をさらに高速化すると，波面補償光学に至る。地球大気の影響によるいわゆるシーイングを実時間で補償しようとするのが波面補償光学である。これには100 Hz 程度の高周波成分の補償が必要のため，主鏡を直すかわりに焦点近くの光路中に小さな薄鏡を置き，これを高速で微小変形させて波面を直す。波面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。

4. 鏡を測る「トンボの眼」

鏡面測定のために JNLT グループは，シャック・ハルトマン装置という波面解析光学系を試作した(図5)。その原理を図6に示す。トンボの複眼のようなマイクロレンズ・アレーを，コリメータレンズがつくる主鏡の像位置に置くと，各々のマイクロレンズは対応する主鏡の一部からの光を焦点面上に結ぶ。主鏡の形状が理想面からずれると局所的な勾配のずれを生じ，勾配のずれに応じて焦点面上のスポットの位置が移動する。従って，参照光源がマイクロレンズ・アレーによって焦点面上に結

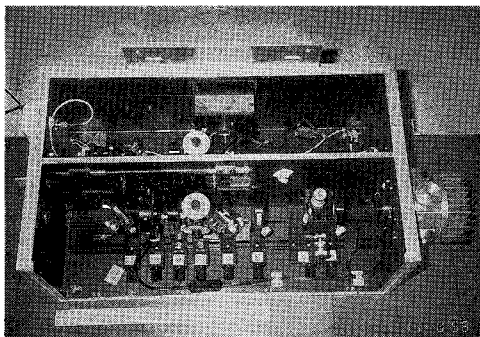


図5 試作したシャック・ハルトマン波面解析装置

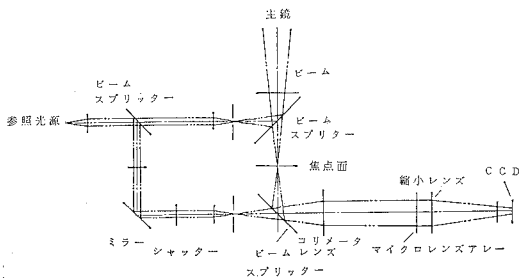


図6 能動光学実験用シャック・ハルトマン装置の構造

ぶスポットの位置と，星の光が主鏡とマイクロレンズ・アレーを経由して焦点面上に結ぶスポットの位置のずれから，鏡面の変形状態が分かるという寸法である。検出には天体観測用 CCD カメラを空冷して用いている。マイクロレンズ・アレーは今のところ円柱レンズを直交させた方式のものを使っているが，他の方式のアレーの開発も合わせ行っている。

実際には約300個のスポットの位置を測定し，それぞれに対応する主鏡上の各点における鏡面の変位を求める。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，また仮にあってても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。従って，変位分布は，円盤に対する完全直交関数系で展開し，10~30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・ツェルニケ多項式を用いるのが分かり易い。なぜなら，ツェルニケ展開は，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7にツェルニケ多項式と光学収差の関係を示す。

このシャック・ハルトマン装置のテストを様々な角度から行った。その結果，従来の古典的なハルトマン法と比べて格段の精度を有することが分かった。基本的には幾何光学的な測定なのだが，どこに波動光学的要素が含まれているのかと散々議論になったが，実際には光の波長以下の精度での測定が可能である。装置の内部変形による誤差は収差係数にしてわずか数nmである。7.5m鏡では，CCDカメラの性能を考慮すると，1分間の積分でおおよそ14等級までの星を測定に利用可能であろう。

5. 高精度アクチュエーター

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。流体支持法は発熱が少ないが，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

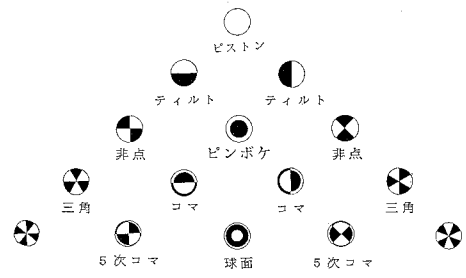


図7 フーリエ・ツェルニケ多項式と光学収差の対応

要がある。

任意の姿勢にある鏡の重量は鏡の光軸方向（アキシャル）成分と高度軸に垂直な（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 ではラジアル方向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、アキシャル方向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した。

支持点が 396 個の場合、各点の受け持つ自重は 50 kg 重となるが、0~60 kg 重の範囲で 5 g 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ロードセルでは 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開発された音叉型のロードセルで 0.01% の高精度を実現することに成功した。このロードセルを組み込んだアクチュエータの動作原理を図 8 に示す。1988 年の国際シンポジウムではこの高精度ロードセルが各国の注目を浴びた。支持点を 264 個に減らすときはこのアクチュエータの力調整範囲などを多少改良する必要があるが、力精度そのものは現状のもので十分である。

6. 役者が揃って

高精度ロードセルを組み込んだ JNLT 実機用アクチュエータ、高精度鏡面測定用シャック・ハルトマン装置、それに能動光学実験のために特に試作した直径 62 cm、厚さ 2.1 cm の薄型鏡を組み合わせた能動光学の実験を 1988 年春に行った。この実験モデルでは 62 cm 鏡を 9 個のアクチュエータと 3 個の固定点で支え、鏡面をシャック・ハルトマン装置で測定することができる（図 9）。このモデルを実際に力支持してその鏡面変形が有限要素法による理論的な予測と一致するかどうかを実験的に調べた。その結果、変形の様子が予測どおりであることと、測定が十分な精度で行えることが確認できた。この時点ではまだ、実時間で鏡面変形の矯正を行うフィードバック

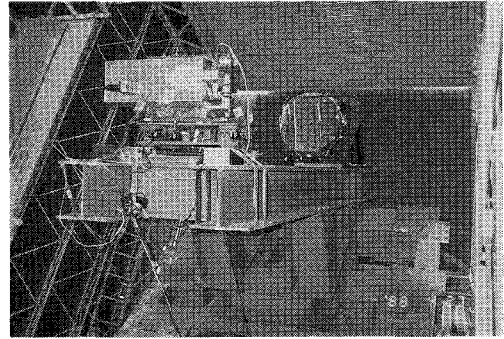


図 9 能動光学実験モデル

ル回路は組み込まれていなかった。

7. 鏡面の直し方

鏡の構造行列を K_{ij} 、支持力分布ベクトルを f_j 、($j=1, N_a$)、鏡面収差分布ベクトルを a_i 、($i=1, N_z$) と書くとき、弾性体に関する「フックの法則」(1) が成り立つ。

$$K_{ij} \cdot f_j = a_i \quad (1)$$

ここで、鏡面収差分布ベクトルは、鏡面の変形を円盤に対する完全直交関数系であるフーリエ・ツェルニケ多項式で展開したときの展開係数を成分とするベクトルである。 N_a は制御に使うアクチュエータの数、 N_z はツェルニケ展開の項数とし、 N_z 個の変形モードのうち N_o ($\leq N_z$) 個までを補正制御する場合を考える。数学的には N_z は無限大にするべきだが、実際は有限で打ち切ることになる。事前に各支持点ごとの応答を求めておけば、 K_{ij} を求めることが出来る。

任意の状態の鏡を測定して収差分布 a_i が分かったとき、最適補正力分布 $\langle f_j \rangle$ を計算するには、(1) の逆問題を解けば良い。62 cm 実験鏡の実測データをもとにして、 K_{ij} を求め、いろいろな変形モードについて逆問題を解いた。どの場合も補正力 $\langle f_j \rangle$ を作用させると、鏡の残留収差ベクトル $\delta a_i = a_i - K_{ij} \cdot \langle f_j \rangle$ の絶対値 $\|\delta a_i\|$ が確かに小さくなる（図 10）。補正後の残留収差は制御するモードの項数 N_o を増やすほど小さくなるが、 $N_o > N_a$

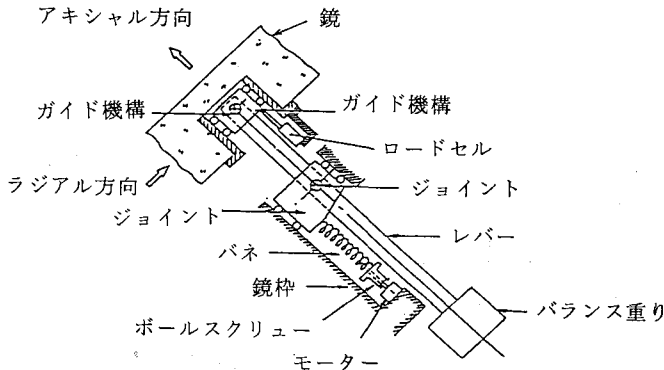


図 8 高精度アクチュエータの動作原理

ではあまり変わらないようである(図 11). 62 cm 鏡では制御自由度 N_a が 9 と小さいため, 複雑な変形の補正は十分には出来ないが, JNLT では実用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. このシミュレーションにより, 能動光学方式に対する技術検討は, 「測れる」から「直せる」へと一歩進み, JNLT で採用する能動光学方式が正しく機能することが実証された.

8. 能動光学の効能

能動光学の効果をシミュレーションしたのが図 12 (=表紙) である. 国内の観測所での平均的な星像は岡山で 2.3 秒角, 木曾で 2.7 秒角と言われている. ハワイやチリの既存の望遠鏡では平均 1 秒角程度の星像を実現しているところがある. 能動光学を用いる JNLT では, シ

ーリングの良い夜には星像が 0.2~0.3 秒角程度になるはずである. さらに, 能動光学の実績をもとに波面補償光学が実現すれば, 星像は最高で 0.02 秒角にまで小さくなり得る. 微かな星の観測には解像力がものをいうことが, 図 12 でご理解いただだけよう. 撮像観測に限らず, 分光観測でも星像を小さくできれば, 分光器のスリット幅を狭くして, シャープなスペクトルを S/N 良く撮ることができる. 能動光学で望遠鏡がいつもピントの良いシャープな結像をするようになることは, 良いことづくめなのである.

宇宙の構造, 銀河や恒星・惑星系の形成過程, など数々の謎を解明するうえで, JNLT に大きな期待が寄せられていることは, たびたび紹介されている. 最大の技術開発項目であった「能動光学」方式にめどが着いたこと

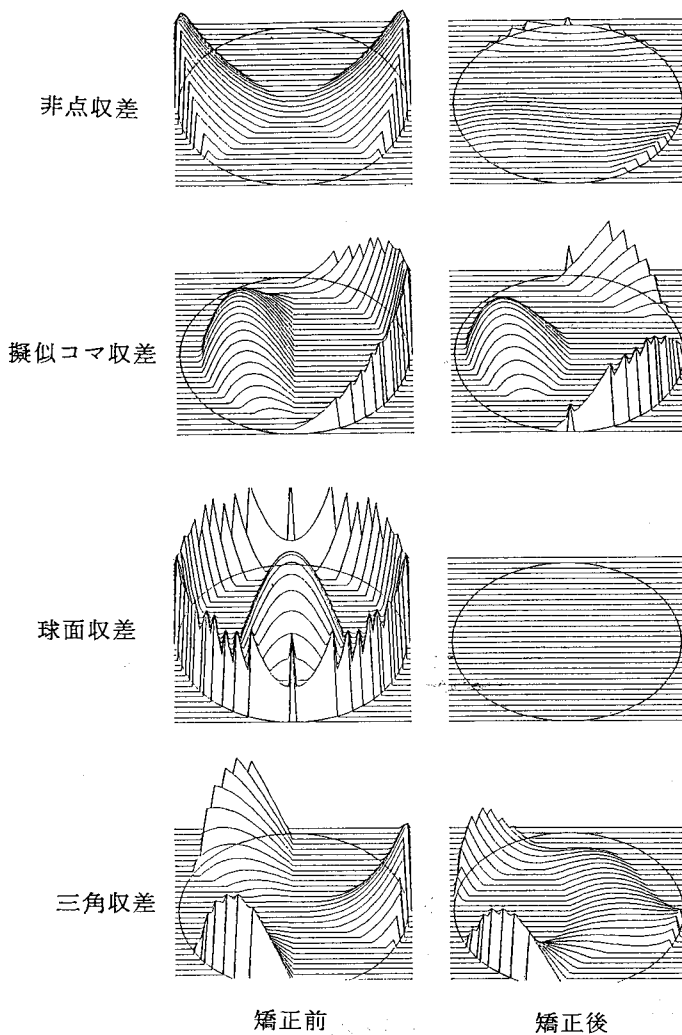


図 10 各収差の矯正前(左)と矯正後(右)の鏡面変形. 上から非点収差, 擬似コマ収差, 球面収差, 三角収差の各場面について理想面からのずれを(正值の領域のみ)拡大表示している.

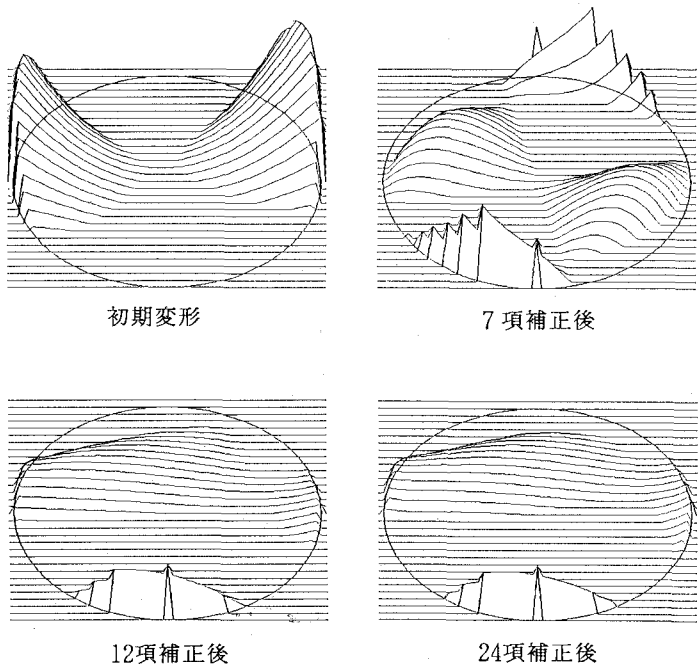


図 11 62 cm 鏡の初期変形状態(左上)と補正後の残留変形
(右上: 7項補正, 左下: 12項補正, 右下: 24項補正)

により、これらの期待に答えられる可能性が高まったといえる。JNLTは可視域から近赤外線域において、従来の限界をはるかに上回る観測性能を持つ望遠鏡となる。

9. 最後 に

これまでの研究により、能動光学を実現するための基本的な問題はすべて解決済みである。現在は、能動光学機構を実時間で実現するデモンストレーション用の工学実験を企画している。最適化を更に進めるために、能動光学の修正範囲の検討、アクチュエータ故障時の対策の確立、保守時の運用手順などの確立、簡素化による経費削減などにも具体的に着手している。より積極的には能動光学による双曲面主鏡の離心率の修正により、ナスミス焦点とカセグレン焦点の引き出し量を適正化する構想を検討している。

とにかく、ここまで具体化した JNLT は是非とも早期に実現したいと関係者一同が切に願っている。日本の天文学の発展のためにも、読者諸兄諸姉のご支援を心からお願いしたい。

この研究には実に多くの方々に参加されてきた。研究の一部は民間共同研究や試験研究、機関特定研究として行われた。国立天文台 JNLT ワーキンググループのメンバーに加えて、Wilson (ESO), 小鍛冶, 黒河 (機械技研), 伊藤, 三神, 柏瀬, 宮脇, 田畑, 佐々木, 佐鳥 (三菱電機), 渡辺 (アドイン研究所) の諸氏の創造的な研究とたゆまぬ努力が、この報告となったことを記しておく。

参 考 文 献

Iye, M., et al.: 1989. Publ. Natl. Astron. Obs., Vol. 1, p. 63.
 Iye, M.: 1989. Astrophys. Space Sci., Vol. 160, p. 143.
 Nishimura, S., et al.: 1988. in "Very Large Telescopes and their Instrumentation", p. 577.
 Noguchi, T., et al.: 1989. Publ. Natl. Astron. Obs., Vol. 1, p. 49.
 Watanabe, M.: 1987. Ann. Tokyo Astron. Obs. 2nd Ser., Vol. 21, p. 241.
 Wilson, R.: 1986. in "ESO's Very Large Telescope", p. 417.
 Yamashita, Y. and Nishino, Y.: 1989. Publ. Natl. Astron. Obs., Vol. 1, p. 1.