

# 能動光学望遠鏡 JNLT

家 正則

国立天文台がハワイ島に建設を計画している大型光学赤外線望遠鏡(JNLT)は、その主鏡を軽量化し常に最良の状態で観測するために、能動光学方式(active optics)を採用する方針である。鏡面形状を検査してコンピューター制御で常に理想面に保つというこの方式を実現できることが、モデル望遠鏡で実証された。この技術の延長上にある補償光学(adaptive optics)が実現すると、JNLTの天体解像力はさらに大幅に向上し、ハッブル宇宙望遠鏡を上回ることになる。

## ■ 軽薄短柔な鏡

ハワイ島マウナケア山頂(高度4200メートル)に建設を計画中の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る。とりわけ、望遠鏡の顔ともいえる主鏡には、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<sup>1)</sup>で鏡の面形状を制御するというまったく新しい方法が採用される予定である。JNLTでは直径約8メートルの主鏡面を光の波長の10分の1(最大振幅0.05マイクロメートル)以内の誤差で理想的な曲面形状に磨きあげねばならない。これは東京都全域を1ミリメートルの精度で地ならしするようなものである。

普通のガラスでは気温がほんのわずか変化しただけでも鏡が変形してピンボケになってしまう。この問題を避けるため、従来から望遠鏡には熱膨張率が $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下のガラスが用いられてきたが、熱変形はいつも厄介な問題であった。幸い、最近は熱膨張率が $10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ 程度のガラス材が利用できるため、熱的変形は許容範囲内になんとか抑えることができるようになった。

天体を観測するとき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。自重変形を小さくするには、主鏡のガラス材を充分厚くして堅くするのが常識であった。ところが、JNLTの場合これでは厚みが1メートル以上となり、ガラス材の重量だけで100トンを越してしまう。鏡を支える構造物も大きく重くなり、大きな数字に慣れっここの天文学者でさえ驚くようなコストになってしまふ。また、鏡筒を短

くしてドームを小さくするため、主鏡の焦点距離は直径2倍程度とたいへん短く、裏が平面の鏡だとガラス鏡の厚さは中心と縁とでは23センチメートルも違うことになる。

主鏡ガラス材を厚さ20センチメートル程度の薄皿型にすれば、ガラス重量を20トン程度に軽量化することができる。しかし、鏡を単に薄くしたのではたわみが生じやすく、良い望遠鏡にはならない。薄くて柔らかい鏡を常に理想面形状に保てるようにな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。

## ■ 能動光学の原理

JNLTの能動光学の構成原理を(図1)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<sup>2)</sup>。JNLTでは、鏡面の測定に光学測定と機械測定の独立な2つの方法を用いる。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乱流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ーでモニターし、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。JNLTでは観測中は0.1秒ごとに支持力の設定を更新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い、ときどき光学的な測定で

图2 JLNL7的能斯特光学微球

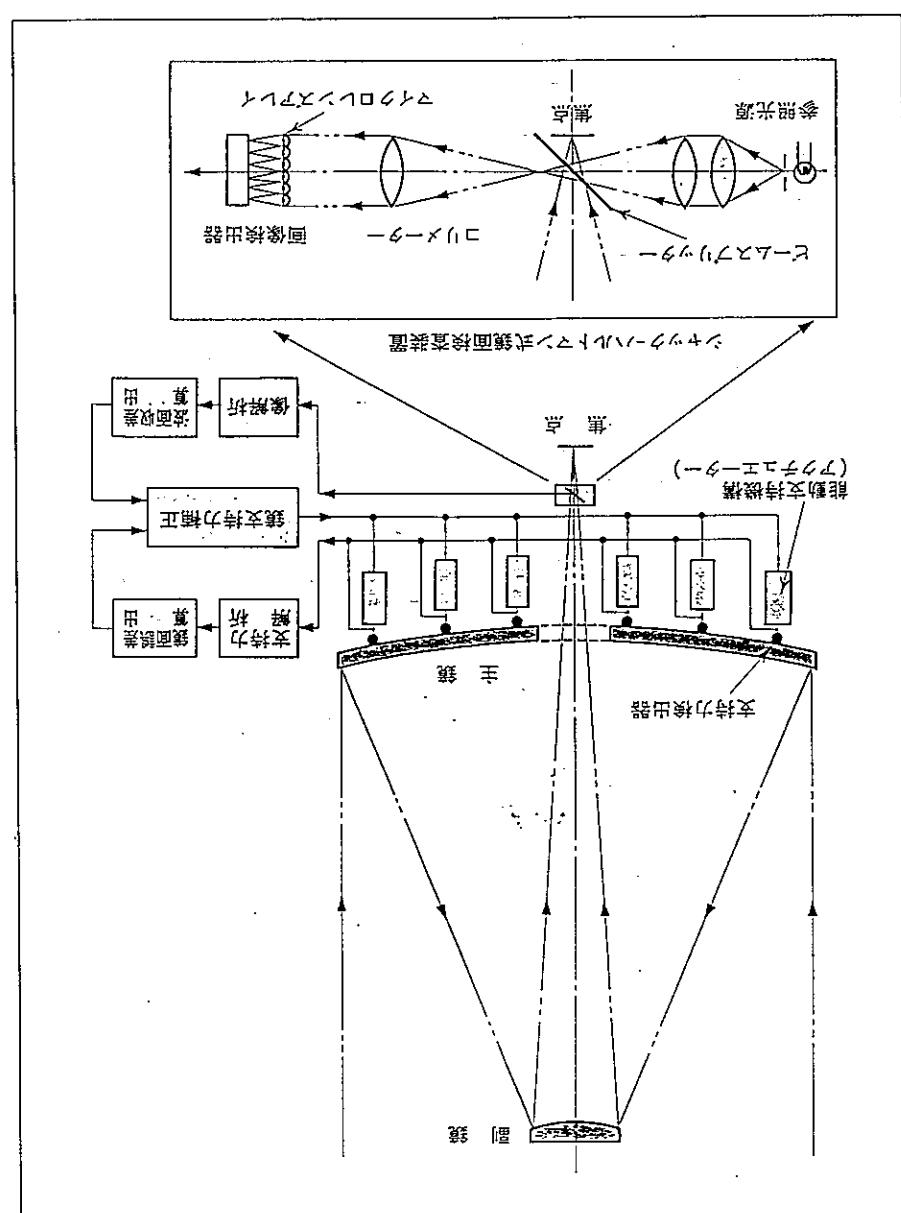
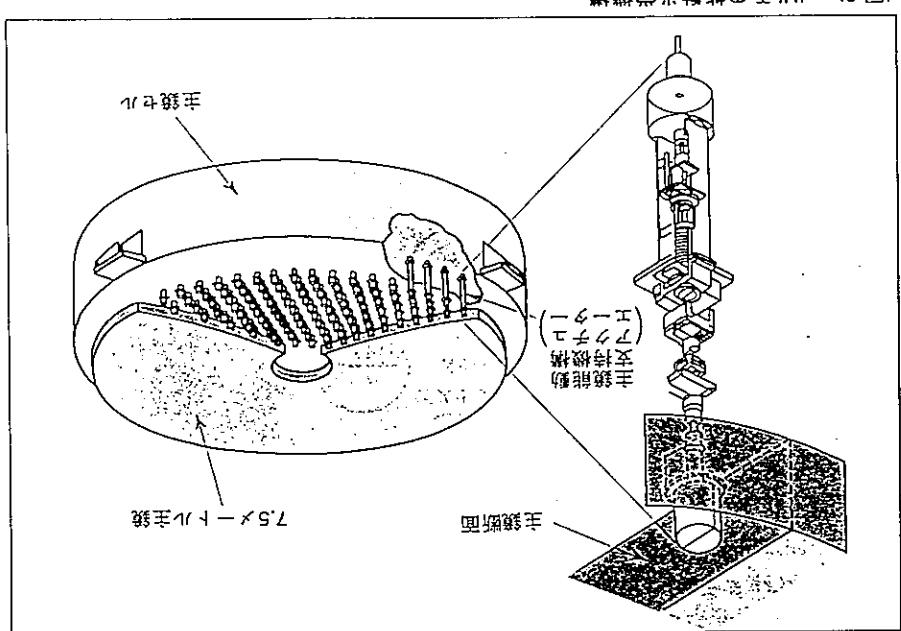


図18 能動光学によるもののはん

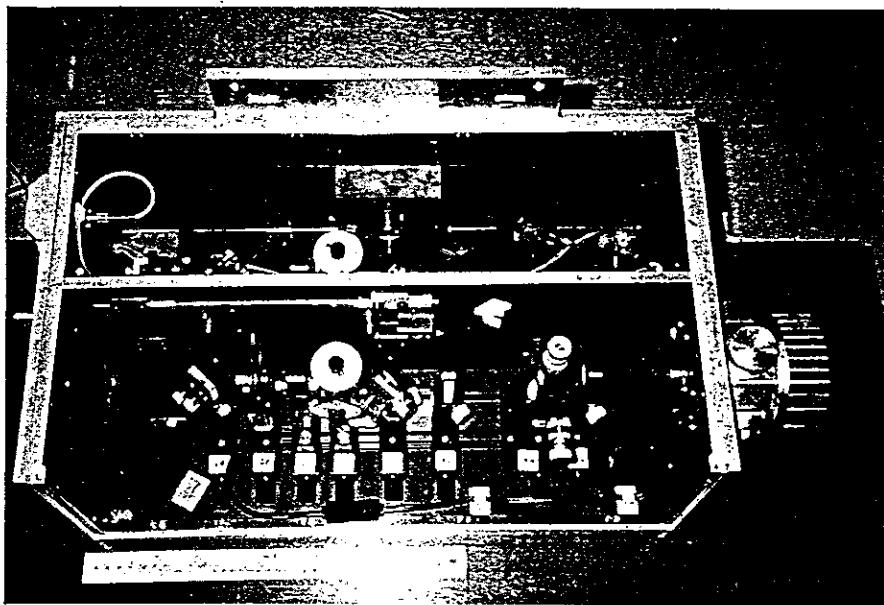
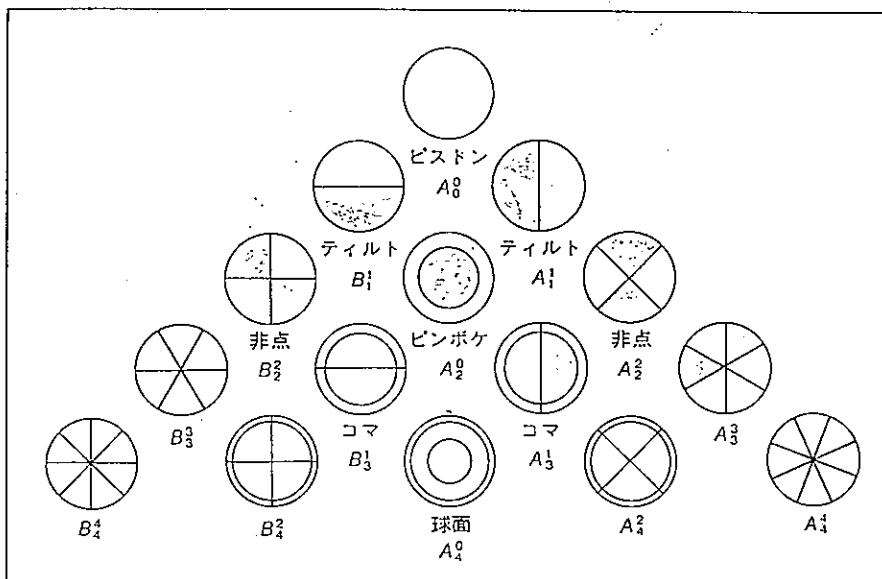


図3 試作したシャック-ハルトマン  
波面解析装置

図4 フーリエ-ツェルニケ多項式と  
光学収差の対応

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-ツェルニケ多项式を用いるのがわかりやすい。ツェルニケ展開は、サイデル収差などの光学収差とよく対応し、その光学的な解釈が容易だからである。図4にツェルニケ多项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さまざまな角度から行った結果、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わかった。装置自体の内部誤差はわずか数ナノメートルである。8メートル鏡では、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。

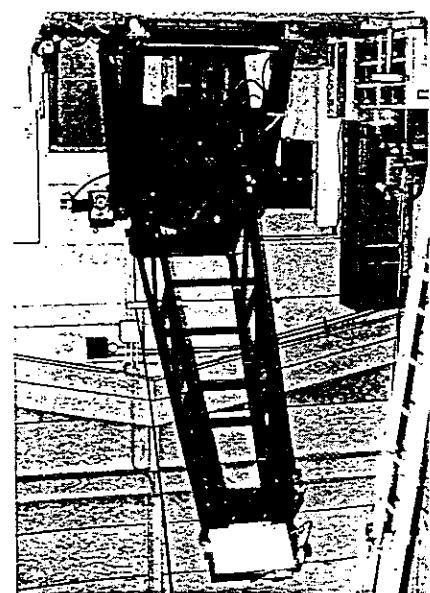
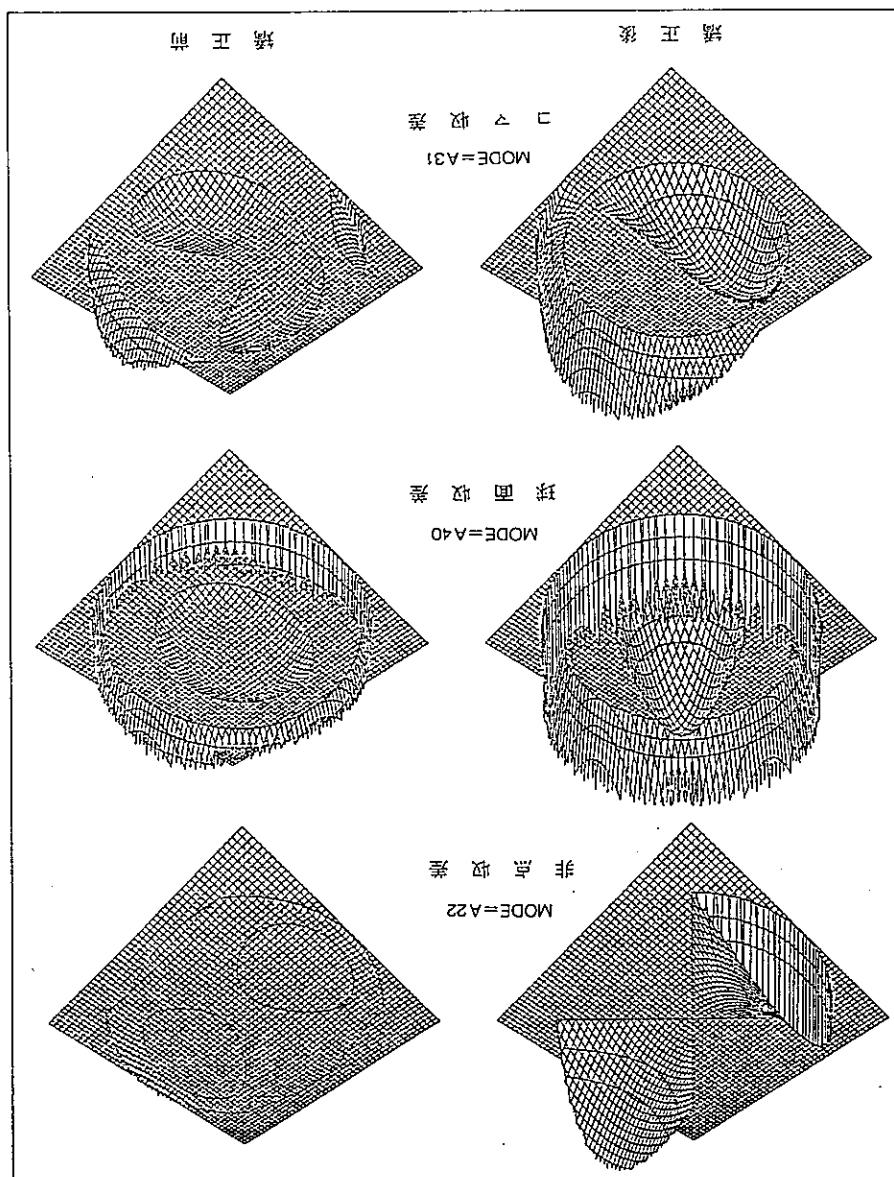
#### 鏡を直すアクチュエーター

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、てこやはねを利用する機械支持法がある。流体支持法は熱の制御がしやすいが、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。ばね法はモーターからの熱を除去しなければならないが、計算機制御にのりやすい。

20トンのガラス材の自重によるたわみが最大でも0.05マイクロメートル以下となるようにするには、約400点で支えればよ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<sup>4)</sup>。

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で

(图6) 能助光比 $\geq 3$ 时， $\Delta L$ 随圆周率 $\pi$ 与 $\gamma$ 的差值而变化。当 $\Delta L$ 为零时， $\gamma = \pi$ ，即 $\gamma - \pi = 0$ 。



《图5》62女子手足一月薄型鳞能颗粒

首先，该面板收集传感器信息并进行处理。接着，它会根据这些信息调整机器人各部分的运动参数，如速度、方向等。同时，该面板还负责与外部设备（如摄像头、激光雷达）的数据交互，确保机器人的视觉和环境感知功能正常运行。最后，该面板将所有处理后的数据发送给执行机构，从而实现对机器人的精确控制。

龍德光學美正望遠鏡

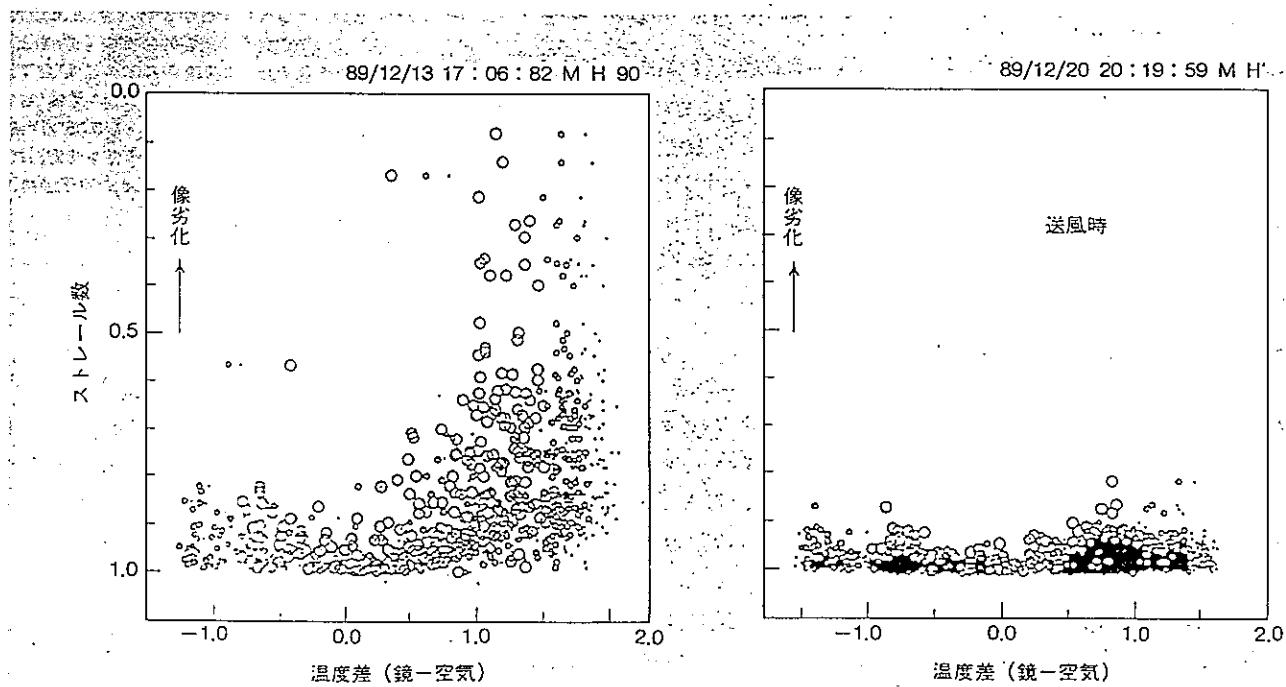
に、面白いことに気がついた。熱容量の大きいガラス鏡は空気より温度変化が遅いため空気とは温度差を生ずる。夜間は鏡の冷え方が遅いため、光路上の空気は下の方が暖かい不安定成層となり、対流による星像の劣化が起こってしまう。空気の乱れによる星像の劣化の程度を、鏡と周辺空気の温度差と比較したのが〈図7〉である。温度差が1°C以下でも、不安定成層のときには乱れが発生している様子がはっきりとらえられた。鏡の横から扇風機で風を送り微小乱対流を吹き流してやると、像の劣化が最小限に抑えられることも定量的に示すことができた。

### 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8〉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、木曽で2.7秒角といわれている。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。かすかな星の観測には解像力がものをいうことが、ご理解いただけよう。分光観測でも、星像を小さくできれば輝度を増大させることができるうえ、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高い信号雑音強度比で撮影することができる。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のメリットは計りしえない。

JNLTは主焦点のほかにカセグレン(リッチャー・クレティアン)焦点とナスマス焦点を有するが、当初カセグレン焦点とナスマス焦点は共通の焦点距離に配置し共通の副鏡を用いる構造で設計を始めた。ところが、具体設計を行うと口径比2の大望遠鏡では、焦点距離を共通にするのはたいへん難しいことがわかった。カセグレンとナスマスとで焦点距離を少し変えればどちらも都合の良い位置に観測装置を配置できるのだが、そうすると副鏡をいちいち取り替えねばならない。これらの焦点は多用されるものと予想されるので、切り替えがスムーズに行えるかどうかは、観測効率に大きな差を生ずる。このジレンマも能動光学方式のめどが着いたことで解決する道が開けた。そ

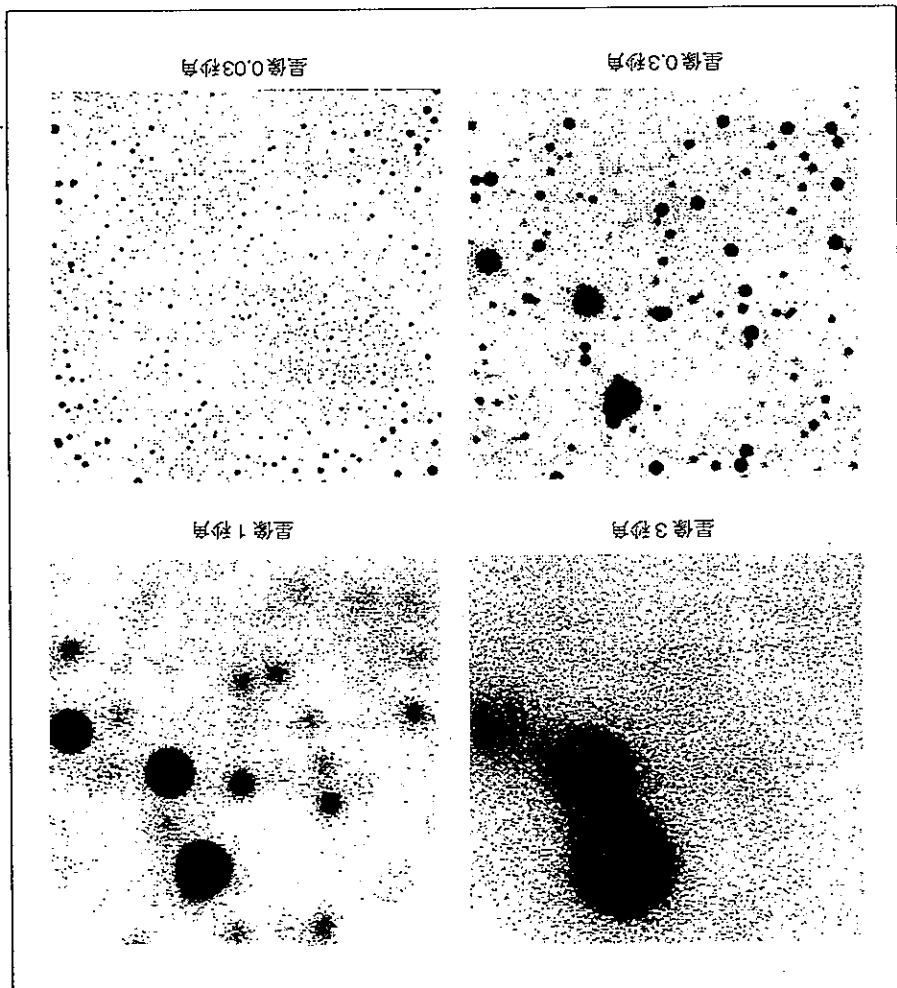


〈図7〉 鏡と空気の温度差(横軸)と結像性能劣化量(縦軸)の関係

(左)鏡のほうが温かい不安定成層の場合には熱乱流が発生し像が乱れる。(右)横から風を送ると乱流が吹き飛ばされるため、像の劣化を最小限にすることができる。

图8-4 显微镜放大率与焦距的关系图

图8 星系の大まな位置の見方



光学系的课程包括光学基础、光电子学、光通信、光纤通信、光电子器件、光信息处理、光子学、光子材料、光子工程等。光学系的课程设置注重理论与实践相结合，强调实验教学，培养学生的动手能力和创新能力。光学系的教师队伍实力雄厚，拥有一批具有丰富教学经验的教授和副教授，以及一批年轻有为的讲师和助教。光学系的科研实力强，承担了多项国家自然科学基金项目、省部级科研项目和企业合作项目，研究成果丰硕。光学系的毕业生广泛分布在科研机构、高等院校、政府部门、企事业单位等领域，成为各行业的重要人才。

既存の望遠鏡としては最高の光学結像性能を達成し、能動光学方式の有効性を裏付けたといえる。

実時間で大気のゆらぎを直す補償光学がJNLTで実現すれば、 $1/\theta$ を一挙に30倍にすることができる。補償光学の実現に向けて日欧米のグループが開発競争を展開している。天体観測において真の意味で補償光学を実現した例はまだないが、能動光学の確立によりその実現も現実のものとなってきた。

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したといえる。日本の、ひいては

世界の天文学の新時代を開くためここまで具体化したJNLTはぜひとも早期に実現したいと関係者一同が切に願っている。

#### 参考文献

- 1) R. Wilson, F. Franz, and L. Noeth: *J. Modern Optics*, 34, 485(1987).
- 2) M. Iye: *Astrophys. Space Sci.* 160, 149 (1989).
- 3) T. Noguchi, M. Iye, H. Kawakami, M. Nakagiri, Y. Norimoto, N. Oshima, H. Shibasaki, W. Tanaka, Y. Torii, and Y. Yamashita: *Publ. Natl. Astron. Obs.* 1, 49 (1989).
- 4) M. Watanabe: *Ann. Tokyo Astron. Obs.* 2nd Ser. 21, 241 (1987).
- 5) S. Nishimura, Y. Yamashita, M. Iye, N. Itoh, I. Mikami: in *Very Large Telescopes and Their*

*Instrumentation*, ed. M. H. Ulrich, ESO, Garching, (1988) p.577.

- 6) M. Iye, T. Noguchi, Y. Torii, Y. Mikami, Y. Yamashita, W. Tanaka, M. Tabata, and N. Itoh: *SPIE Proc.*, 1236, (1990) in press.
- 7) H. W. Babcock: *Publ. Astron. Soc. Pacific* 65, 229 (1953).
- 8) J. W. Hardy: in *High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelength*, ESO Conference, Garching, 25 (1981).
- 9) M. Tarenghi: *SPIE Proc.* 1236 (1990) in press.

\* 補償光学の開発を行なってきた欧洲南天天文台(ESO)グループが近赤外域での補償光学観測の成果を最近発表した。補償素子数は、19個であるが本格的な補償光学といえるものである。この成果を含め、次号で補償光学について解説する。



## 高温超電導の応用

一高温超電導応用展開  
プログラム報告一

新技術事業団 監修 B5/予価9,000円

実用の領域に足を踏み入れつつある高温超伝導材料の研究・開発の最新動向を最前線で活躍している研究者・技術者がレポート。応用研究に携わる方々必読の一冊。

研究の現状と実用化への動き 研究の現状/実用化への動き/特許の現状分析

実用化への挑戦 (プログラム研究事例) 薄膜 スパッタ法による高温超電導薄膜/対向ターゲットスパッタ法による高温超電導薄膜/厚膜・バルク ゾル・ゲル法による高温超電導薄膜/ガス・デポジション法による高温超電導薄膜/Tl<sub>2</sub>B<sub>2</sub>CuO<sub>6+x</sub>の酸素量と結晶構造及び物性/微細加工 高温超電導体薄膜の微細加工技術/高温超電導膜による接合形成 テープ・線材 配向組織をもつBi系酸化物超電導テープの作製とその特性/液体急冷法による高温超電導テープ・薄膜技術による高温超電導線材/拡散法による高温超電導線材/銀被覆圧延法による高温超電導線材/銀被覆加工法により作製した多芯状クリウム系酸化物超電導テープ線材 磁気シールド ドクターブレード法による高温超電導体磁気シールドの応用 デバイス 光センサ・電界効果型トランジスタへの応用/CVD酸化物超電導薄膜の応用/高温超電導体の高周波電送デバイスへの応用/超電導薄膜の作製と磁気センサへの応用

## 高温超電導データブックI・II

新技術事業団 監修 I B5/定価24,720円 II B5/定価35,020円

国内外の膨大な論文内容を図・表・データの形で整理編集を行ない、その論文誌名、物質組成、臨界温度等の諸物性値を収録。さらに、世界の研究・特許の動向と現状についても解説する。

## 超電導のすべて～基礎から応用まで～

通商産業省工業技術院編 A5/定価3,605円

通商産業省工業技術院に設置された「超電導産業技術懇談会」報告を骨子として、わが国の超電導の第一線の研究者・技術者陣がまとめる。最新の超電導の研究のすべてを、広範な分野におけるその現状と将来展望など最新の内容で収録。

## セミナー 高温超伝導

- 福山秀敏・石川征晴・武居文彦 著 A5/定価1,854円
- 高温超伝導の入門書として、理論、実験、物質合成の側面より、現状をわかりやすくコンパクトに整理。理工系学部学生にとって格好の入門テキスト。

(定価は消費税込みです)

丸善 (出版事業部) 〒103 東京都中央区日本橋3-9-2 第二丸善ビル 営業(03)272-0391 銀座(03)272-0393

