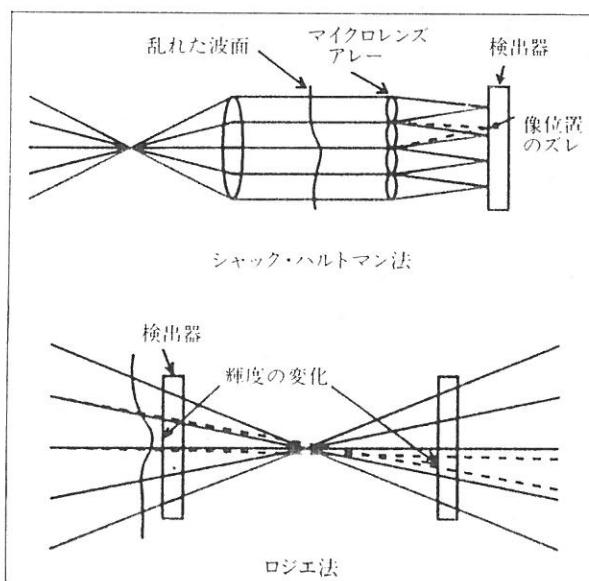
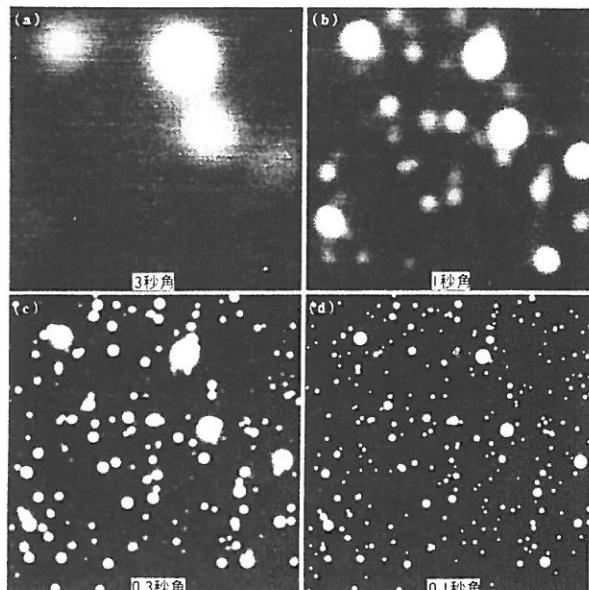


# 擾乱媒質中の波動伝播と補償光学

Wave Propagation in Turbulent Media and Adaptive Optics



Physics Today(1992) より

平成5年度文部省科学研究費補助金  
総合研究(A)  
課題番号: 05305008

研究代表者: 家 正則

国立天文台

# 開会の挨拶にかえて

## Opening Address

家 正則  
Masanori IYE

国立天文台  
National Astronomical Observatory  
〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1  
Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181 Japan  
Tel: 0422-34-3703, Fax: 0422-34-3608, E-mail:oiyexxx@cl.mtk.nao.ac.jp

### Abstract

The adaptive optics is a growing area of interest not just in astronomy but also in various applications of laser technology. The purpose of this conference is to bring together various expertise cultivated in this promising field, to exchange new ideas, and to nourish collaborative activities for the future.

To start with, the present status of the 8m JNLT project is shown briefly to provide a background understanding of the attempt made by the astronomical community.

やっと夏らしくなって参りましたが、本日は暑い中、総合研究（A）研究会「擾乱媒質中の波動伝播と補償光学」にご参加下さり、ありがとうございます。

補償光学は、天文学での応用だけでなく、レーザービームの質的改善、光計測の高精度化など、さまざまな分野での応用が有望視されています。

本日、第一日目は大気擾乱のセッション、明日第二日目は補償光学システムと波面測定に関するセッション、最終日は波面補償素子に関するセッションが中心となります。これから二日半にわたり、各々のご講演をもとに活発な議論をしていただければ幸いです。

最初にこの研究会開催の背景をご理解戴くため、天文学と補償光学の関係について、簡単に状況説明致します。

国立天文台は、1991年度から9ヶ年計画でハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に、口径8mの大型光学赤外線望遠鏡J N L T（愛称「すばる」）の建設を進めてい

ます<sup>1-3)</sup>（図1）。この望遠鏡の建設は、（1）銀河の誕生と進化、（2）恒星の誕生と進化、を具体的な二大テーマとして、人類の宇宙観を観測的に深めることを目的としています。光学・赤外線用のJ N L Tが完成すると、宇宙科学研究所のX線天文衛星、国立天文台野辺山の45m電波望遠鏡や六素子ミリ波干渉計、とならん日本観測天文学を支える基幹装置となります。

昨年の七夕の日にマウナケア山頂の現地でくわ入れ式を行い、始められた建設工事は、順調に進んでおり、望遠鏡を据え付ける基礎部分の工事が図2のように進んでいます。望遠鏡主鏡用の特殊ガラスの製造も終わり、今秋には直径8mの主鏡ガラス材が完成し、来年より三年間の研磨工程に入る予定です。望遠鏡本体の構造物の製造も図3のように進められています。このJ N L Tの結像性能を大きく向上させる展望を拓くのが、補償光学技術です。

この研究会を通じて、他分野の方々との交流が深まり、共同研究にまで発展するものが出てくることを期待しております。

#### 参考文献

- 1) 小平桂一：「J N L T計画の概要」、OplusE、143、pp.67-71（1991）
- 2) 家正則・海部宣男・小平桂一：「8m「すばる」望遠鏡計画」、物理学会誌、第47巻、第4号、269-276頁（1992）
- 3) 家正則、唐牛宏、小林行泰：「動きだした8mすばる望遠鏡計画」、応用物理学会誌、第62巻、第6号、540-551頁（1993）

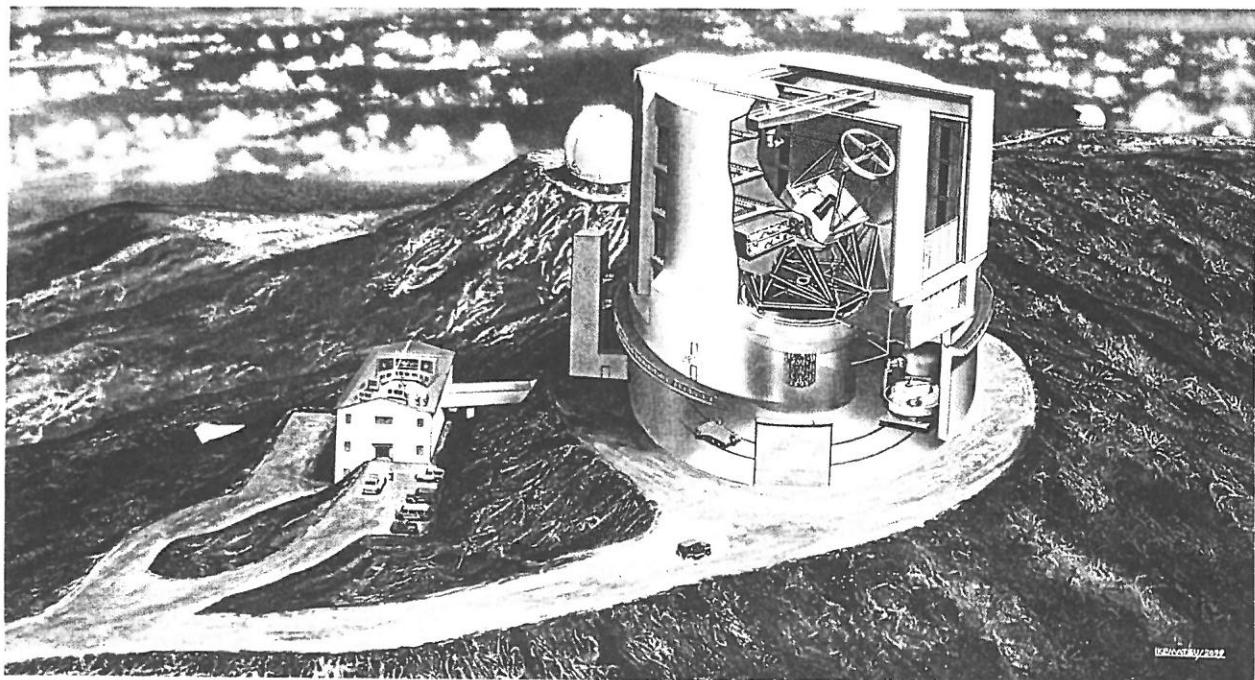


図1 J N L T完成予想図

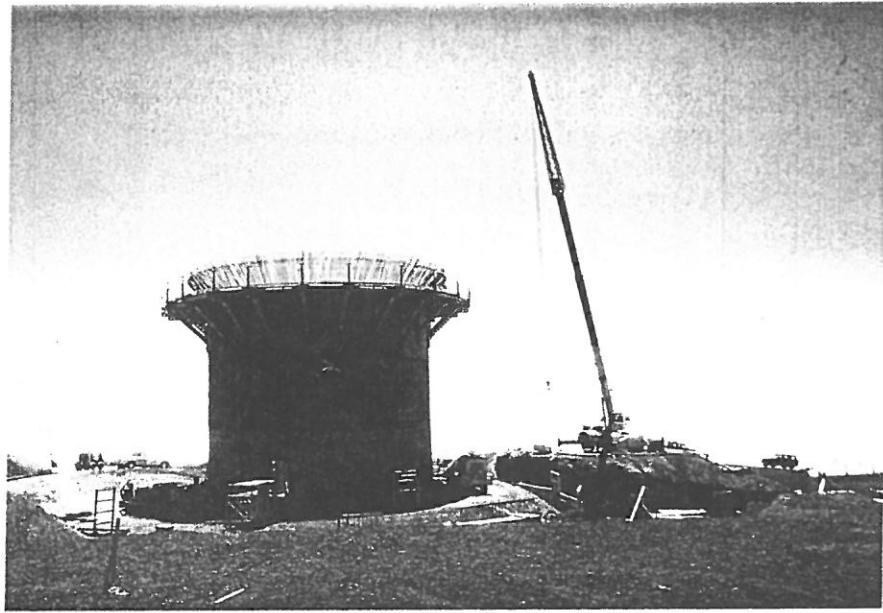


図2 ハワイ島マウナケア山頂での望遠鏡基礎部分の工事風景

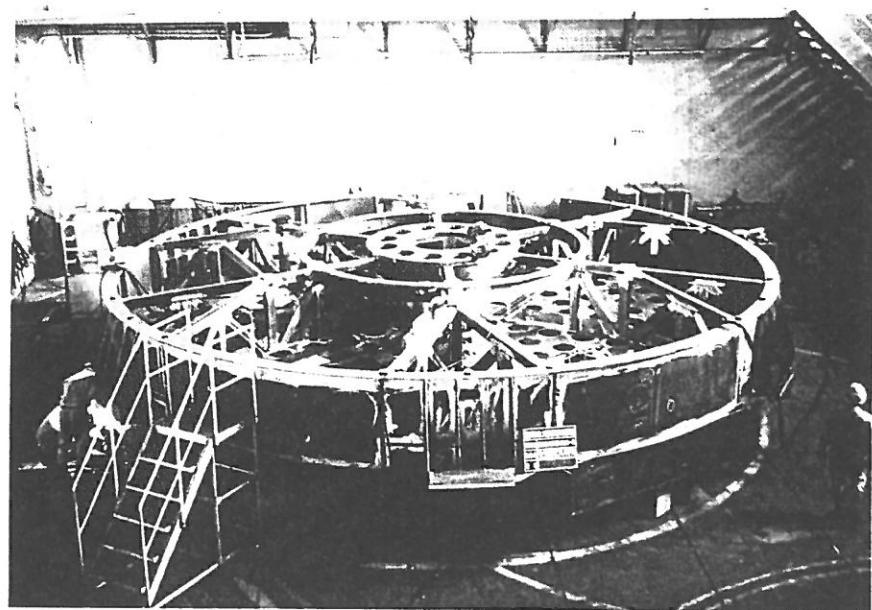


図3 望遠鏡主鏡枠構造物の制作風景

# 総合研究（A）研究会 「擾乱媒質中の波動伝播と補償光学」

## 目 次

・開会の挨拶にかえて	家 正則(国立天文台)	i
<b>1. 大気のゆらぎの物理 : ゆらぎの測定、乱流、物理過程</b>		
13:10-15:10 座長(高見英樹)		
・大気光全天イメージングによる 超高层大気ゆらぎの観測	福西 浩(東北大・理)	1
・ライダーによる大気微細構造の観測	内野 修(気象研)	8
・大気境界層における乱流変動について	藤谷徳之助(気象研)	12
・ドーム内シーディング測定装置の開発	西原英治(総研大)他	17
・62cm実験望遠鏡によるミラーシーイング測定	野口 猛(国立天文台)	23
・光学望遠鏡表面空気層の熱流動解析 とシーディング予測	古藤 健(三菱電機)	33
・CT <sup>2</sup> 測定器の製作	三上良孝(国立天文台)	39
15:40-17:20 座長(高遠徳尚)		
・電波シーディングの測定とその対策	石黒正人(国立天文台)	45
・Radio Seeing at Nobeyama	森田耕一郎他(国立天文台)	52
・電波位相モニターによるLMAサイトの開発	斎藤正雄(東大・理)	60
・ウインドプロファイラによる大気乱流測定	大野裕一・増田悦久(通総研)	67
・Atmospheric Turbulence of Small Outer Scale	高遠徳尚(理化学研)他	73
<b>2. 亂れた媒質中の波動の伝播 : 亂流理論、概念の整理</b>		
09:30-11:50 座長(馬場直志)		
・乱流媒質中を伝搬した光波の強度変動	伊藤繁夫(東洋大・工)	79
・大気ゆらぎによる2波長レーザビーム 方向変化の実験的検討	松本弘一・曾 理江(計量研)	84
<b>3. 補償光学システム : 応用例、具体的システム</b>		
13:30-15:30 座長(実野孝久)		
・すばる望遠鏡の能動光学系と補償光学系	家 正則(国立天文台)	91
・Compensated Imaging System	J. R. Vyce/J. W. Hardy(Itek)	99
・補償光学を利用したステラーコロナグラフ	田村元秀(国立天文台)	106
・光学赤外線天体干渉計と補償光学	佐藤弘一(国立天文台)	113
・イメージスタビライザに関する現状報告	早野 裕(東大・理)	117
・大出力レーザーとアダプティブ光学系	植田憲一他(電通大)	125
・レーザービーム強度分布整形について	根本孝七(電力中央研)他	136
・三次元的な大気揺らぎの光学的計測	大坪政司(総研大)他	145
・Direct Imaging Digital Lens for Transient Radio Source Survey	大師堂経明(早大)他	149

## 4. 波面ゆらぎの測定法 : 方式の比較、高速カメラ

16:00-18:00 座長(家正則)

- Shearing Interferometers : Flexible Sensors for Astronomical AO B. Horwitz(Itek) 157
  - シャック・ハルトマン鏡面測定装置のデータ処理 田中 浩(国立天文台) 163
  - Applying Hartmann Wavefront Sensing Technology to Precision Optical Testing of the Hubble Space Telescope Correctors A. Wirth et al. 170
  - シャックハルトマン法による光学素子の波面歪計測 尹 根榮他(阪大・レーザ核研) 180
  - 補償光学用波面曲率センサー 高見英樹(通総研) 189
  - 焦平面強度分布からの波面センシング 馬場直志・岸野彰文(北大・工) 195
  - Wavefront Reconstruction Error of Shack-Hartmann Wavefront Sensors 高遠徳尚(理化学研)他 201
  - The Development of High Speed and Low Noise CCD for WF Sensor and Steradian Telescope 上野宗孝(東大・教養) 211
  - マイクロレンズ測定 鳥居泰男(国立天文台) 213
  - Phase Unwrapping by Neural Network 武田光夫(電通大)他 219
- 9:30-11:30 座長(植田憲一)

## 5. 波面補償素子 : 可変形状鏡、位相共役鏡

13:00-14:20 座長(松本弘一)

- 補償光学用一体型形状可変鏡の開発 一ノ瀬祐治(日立・I&D研) 225
- メンブレン可変形鏡の開発 高見英樹(通総研) 231
- A Stacked Array Mirrors and Bimorph Mirrors Comparison J. P. Gaffard et al. 235  
(Laserdot)
- Objective Comparison between Stacked Array Mirrors and Bimorph Mirrors P. Gosselin et al. 241  
(Laserdot)
- ティルト・フォーカス補償光学系 河野嗣男他(都立科技大) 251

14:50-16:10 座長(河野嗣男)

- 位相共役の原理と方法 上江洲由晃(早大・理)他 257
- 縮退四波混合による位相共役発生の計算機実験 伊藤進一(東京工芸大)他 263
- 位相共役鏡による波面補償 小原正孝他(石川島播磨) 270
- 位相共役鏡によるレーザーの高輝度化 吉田國雄他(大阪工業大) 275

## 付録

- 天文月報記事 家正則(国立天文台) 285
- 「擾乱媒質中の波動伝播と補償光学」研究会
- 参加者名簿
- あとがき
- 参加者集合写真

# すばる望遠鏡の能動光学系と補償光学系

## The Active and Adaptive Optics Systems of 8m SUBARU Telescope

家 正則  
Masanori IYE

国立天文台

National Astronomical Observatory

〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1

Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181 Japan

Tel: 0422-34-3703, Fax: 0422-34-3608, E-mail: oiyexxx@c1.mtk.nao.ac.jp

### Abstract

The active optics system of JNLT (=SUBARU) allows controlling the surface shape of the 8.2m primary mirror of 20cm thickness supported by 264 electro-mechanical actuators under computer control. This system can be used to compensate for gravitational flexure, thermal distortion, polishing and alignment errors. Another benefit of this system is the realization of a limited zooming capability achieved by correcting the spherical aberration associated with the shift of secondary mirror to change the back focal length.

The adaptive optics system installed for JNLT will compensate for the wave-front distortion caused by the atmospheric turbulence of up to 1kHz. Successful operation of the adaptive optics system will allow high resolution imaging of astronomical objects at diffraction limit. The astronomical impacts of the active and adaptive optics systems that will be available for 8m telescopes are discussed.

### 1. J N L T の能動光学系

#### 1. 1 能動光学方式

1998年にファーストライトを迎える予定で建設が進められているJ N L T<sup>1-3)</sup>は、直径8.2mの主鏡を264本のアクチュエータで支持し、その支持力度を制御して、鏡面形状を理想形状に保つという「能動光学」方式を採用した望遠鏡である。この能動光学方式の概念を図1に示す。

望遠鏡の高度角や温度分布などの入力情報をもとに、計算機は鏡面が理想的な回転双曲面となるように264点での支持力度分布を算出する。この計算機指令値に一致した力で鏡を支えるよう、264本のアクチュエータに内蔵した高精度力検出器の出力値分布を時々々と制御する。計算機内部のモデルさえ正しければ、このような支持力度制御ループで鏡面を常に理想的な形状に保つことができるはずである。モデル計算による支持力度分布が実際に妥当な鏡面形状を実現しているかどうかは、光学的なシャックハルトマン法(図2)を用いて、視野内の実際の星を光源としてときどきチェックする。この校正に用いるシャックハルトマンカメラ<sup>4)</sup>については、後ほど田中氏の詳しい講演がある。

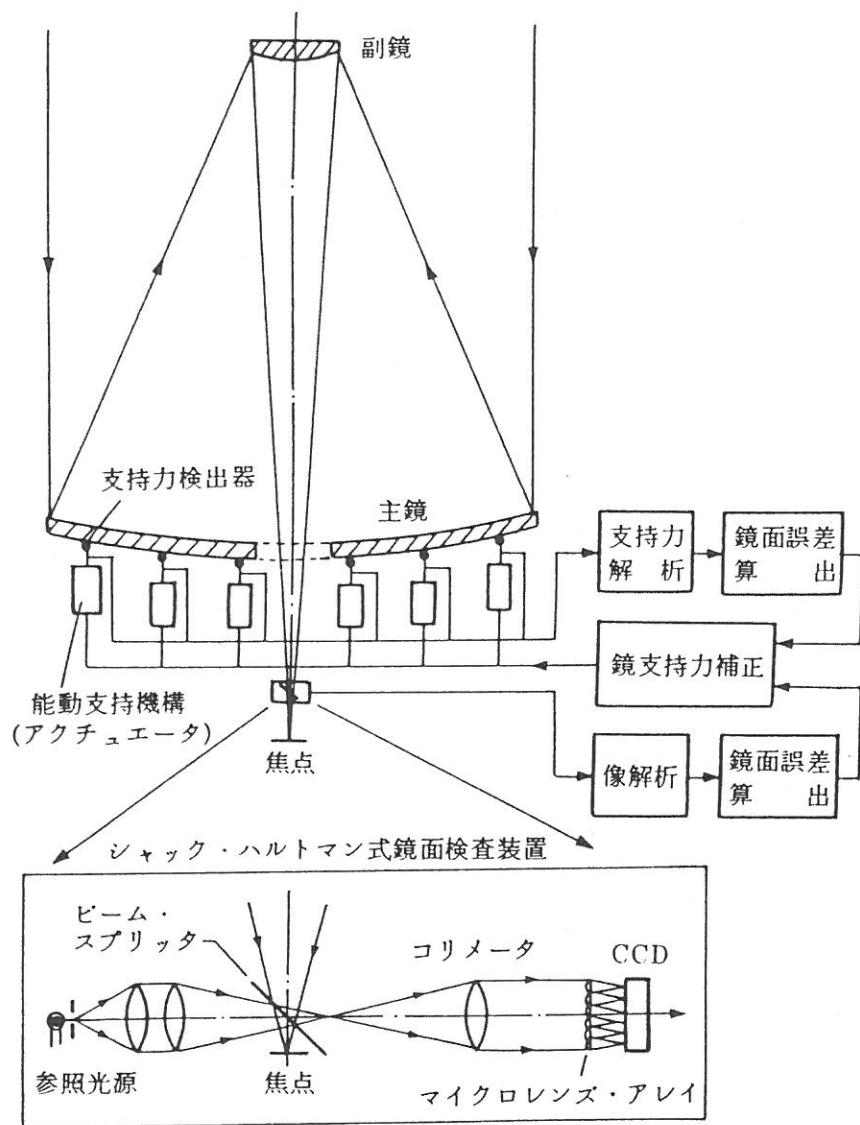


図1 J N L Tの主鏡能動光学系

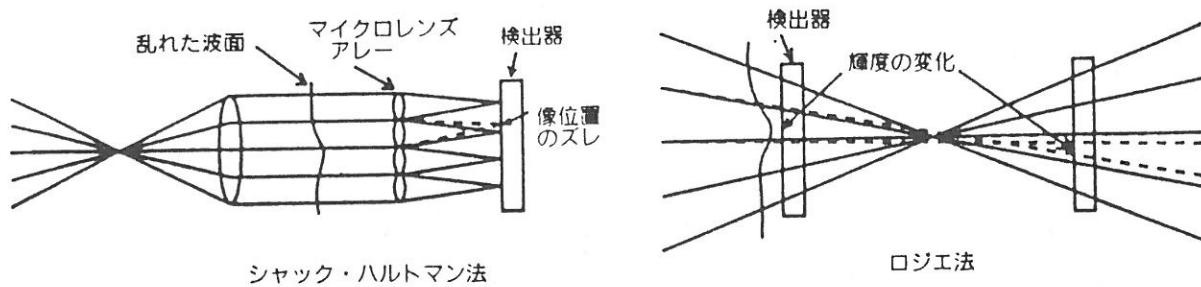


図2 ロディエ法とシャック・ハルトマン法

## 1. 2 アクチュエータ

264本のアクチュエータは、それぞれが受け持つ鏡材の荷重がほぼ等しくなるように8重のリング上に配置する。アクチュエータの力の作用点を鏡材の局所重心に一致させるために鏡材には裏側から264個のポケットを掘り、アクチュエータの先端部を挿入する(図3)。アクチュエータは各々が鏡材重量の望遠鏡光軸方向(アキシャル方向)成分と垂直面内で光軸に垂直な方向(ラジアル方向)成分の2成分を支えられるように設計されている<sup>6)</sup>。望遠鏡を傾けたとき、鏡が横すべりしないようにするためにラジアル成分の支持が必要となるが、ラジアル方向支持の力精度は比較的緩いので、テコとカウンターバランスを用いた「やじろべい」方式で、受動的にバランスを取ることにした。鏡面形状制御にとって重要なアキシャル方向は力誤差を0.01%以下に抑える必要があるため、計算機制御のエレクトロ・メカニカルなアクチュエータとした。アクチュエータの具体的な構造と原理を図4に示す。基本的にはモーターでボールネジを回転させ、バネを押し縮めて力を発生するというものである。実機用アクチュエータは支持荷重範囲0-150kgについて力誤差15g以内の性能を達成する。

## 1. 3 能動光学方式の効用

能動光学方式の採用は、これまでの望遠鏡では達成できなかった種々の最適化の可能性を開くこととなった。J N L Tの能動光学系は望遠鏡の姿勢による自重変形の補正を主たる目的として考えられたシステムだが、温度差による主鏡の熱変形の補正も可能である。実際、研磨時は20°C程度の室温環境で研磨するが、マウナケア山頂での使用時にはほぼ0°Cとなるため、研磨時に完全な鏡面でも山頂では20°C程度の温度差分だけ鏡面が変形する。主鏡は熱膨張率が数×10<sup>-9</sup>/°Cの超低膨張ガラス製の六角部分鏡材44枚分を融着して直径8mの一体化鏡材にするが、部分鏡材のわずかな熱膨張率の差による変形が生じる可能性がある。このような反り変形も単純なものは能動光学システムで直すことができる。44枚の部分鏡材の並べ方は、能動光学系で直しにくい変形が最小になるように決めた(図5)。この並べ方を採用すると、20°Cの温度差で生じる1.3μmRMSの鏡面変形を、能動光学補正により約80分の1の0.015μmRMS程度にまで小さくすることができます。

J N L Tは、カセグレン焦点(F/12.2)とナスマス焦点(F/12.6)が、それぞれリッチクレチアン光学系となるように設計されていて、可視光用の副鏡はそれ専用のものを付け変えて用いることになっている。赤外観測の場合は金蒸着を施した赤外用副鏡を用いるが、可視域に比べて波長が長い分、波面誤差が目立たないので、副鏡交換をしないでカセグレン焦点の観測装置とナスマス焦点の観測装置を迅速に切り替えて観測することが、能動光学のおかげで可能となる。具体的には、赤外カセグレン副鏡の位置を32mmだけ主鏡側に近づけると焦点距離が100mから108.5mに延びて、ナスマス焦点位置に達する。このままでは大きな球面収差が残るため観測はできないが、能動光学方式を利用して主鏡の形状をこの球面収差が消えるように修正すると、ナスマス焦点でも直径1分角程度の視野なら、充分実用になる結像性能が得られる。このような芸当も能動光学ならではである。ナスマス焦点で像回転補正光学系を用いる場合や、観測装置の都合によりカセグレン焦点で焦点面を本来の位置からかなりの距離移動する場合などにも、能動光学系による球面収差の除去でズーミングを行う計画である。

また、光学研磨誤差や光軸調整誤差についても、ある程度の補正を能動光学系により補正することができよう。これまでの望遠鏡は、剛構造であり山頂で一旦調整したら状況が変化しても対応することができないシステムであったのに対し、能動光学系は状況変化に対応して光学系を常に最適な状態に保つことのできるシステムとなる。

能動光学系はその修正を主鏡により実現するため、1Hzより速い変化にはもともと対応できないシステムである。大気ゆらぎなど1Hzより速い変動に対応するには自ずから別のシステムが必要となる。これを実現するのが補償光学系である。図6に能動光学系と補償光学系が対象とする補正誤差要因をまとめた<sup>6)</sup>。

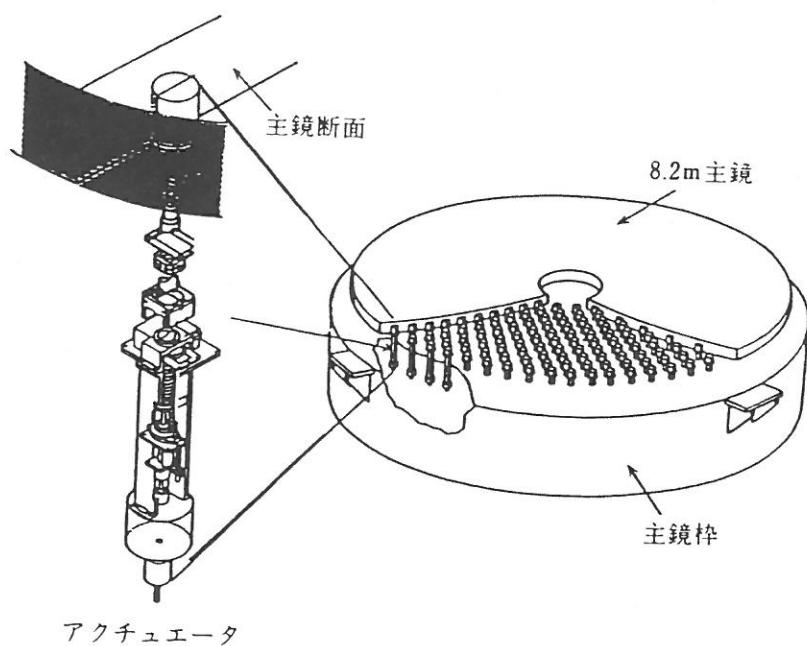


図3 J N L Tの主鏡能動支持機構

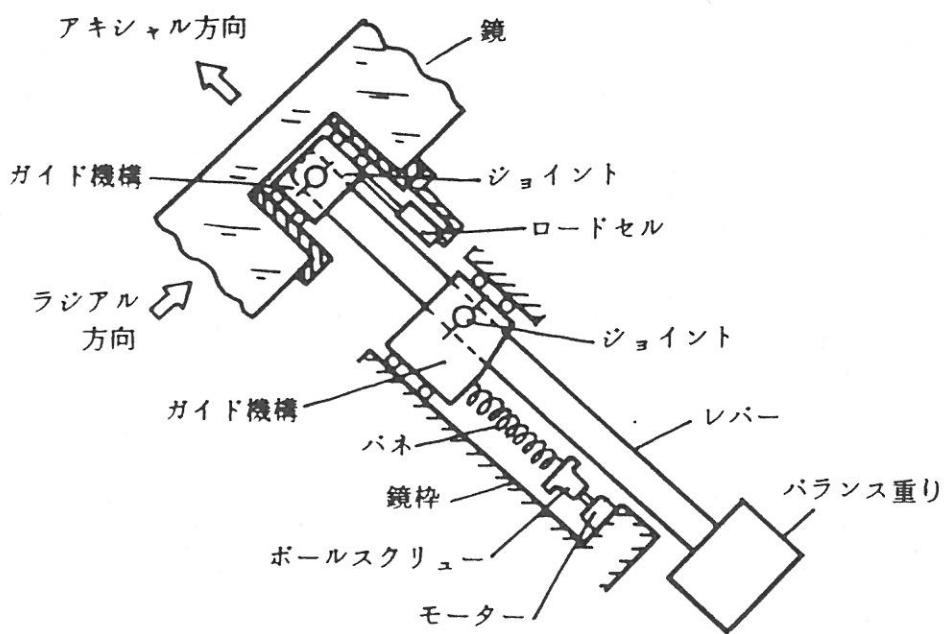


図4 アクチュエータの動作原理

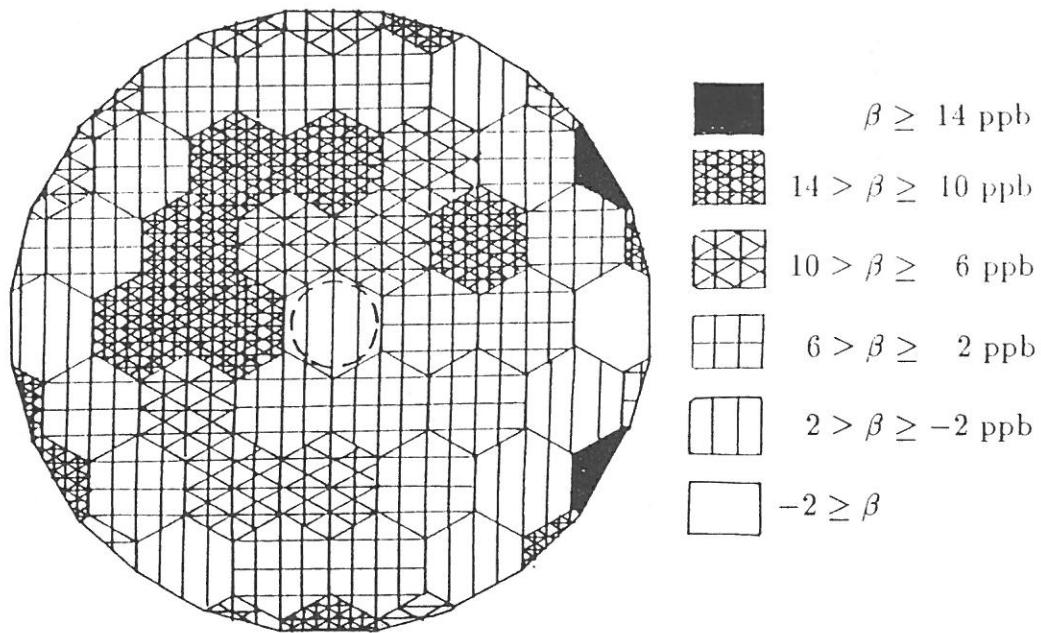


図5 主鏡部分鏡材の実際の並べ方

	能動光学 Active Optics	補償光学 Adaptive Optics
補正要因	高度角変化に伴う自重変形の変化分 研磨時と山頂の温度差に伴う変形 季節／日々の温度変化に伴う変形 焦点位置変更に伴う球面収差 研磨誤差の低空間周波成分 光軸調整誤差の一部 風圧変形の一定成分	大気の温度ムラに起因する 像位置変動、ピンボケ、 より高次の波面ゆらぎ 風圧変形の高速成分
補正鏡	主鏡（直径8.2m）	波面補償鏡（直径10cm程度）
補正速度	1 Hz	1 kHz

図6 能動光学と補償光学の補正要因

JNLT Cassegrain Adaptive Optics Unit  
conceptual drawing

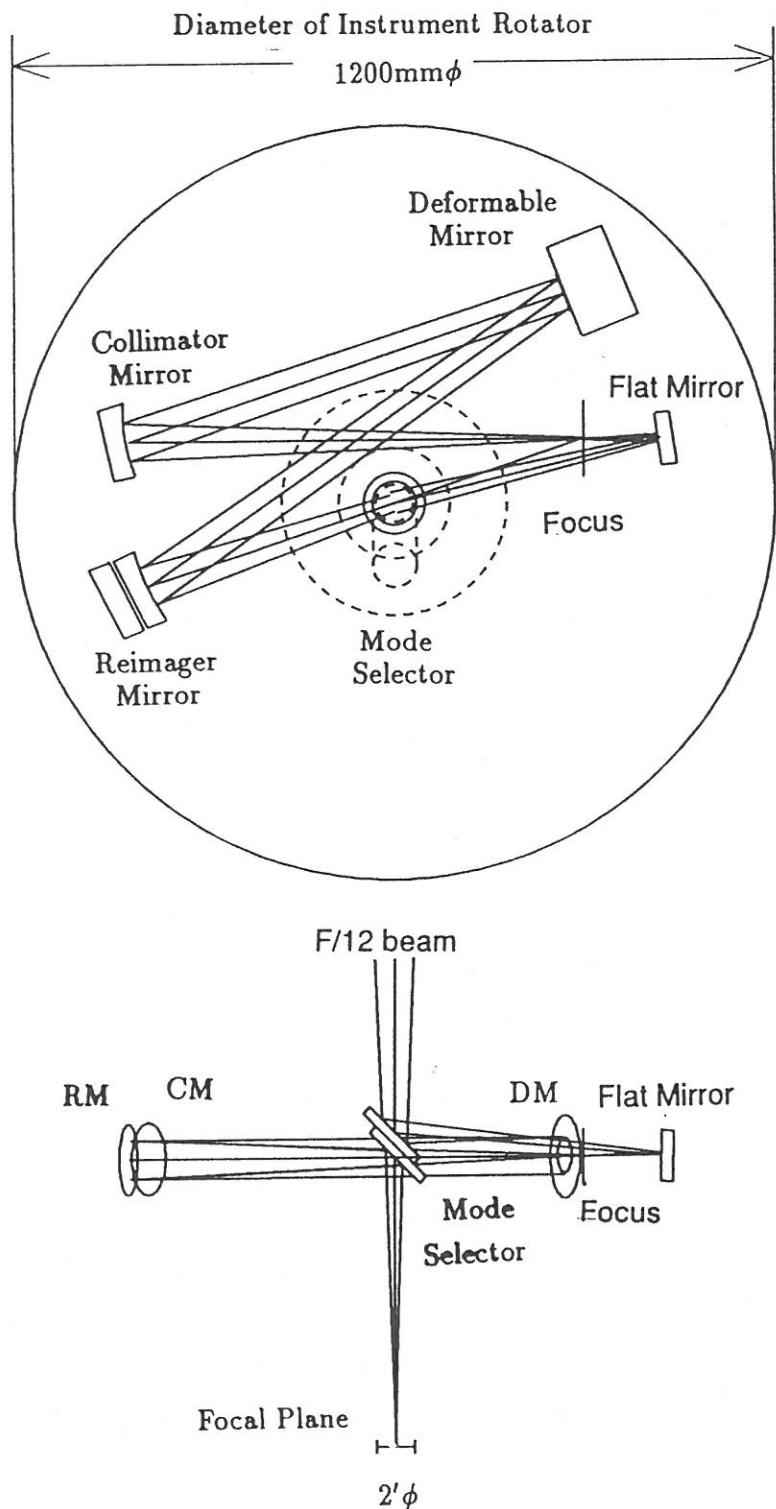


図 7 J N L T の補償光学系

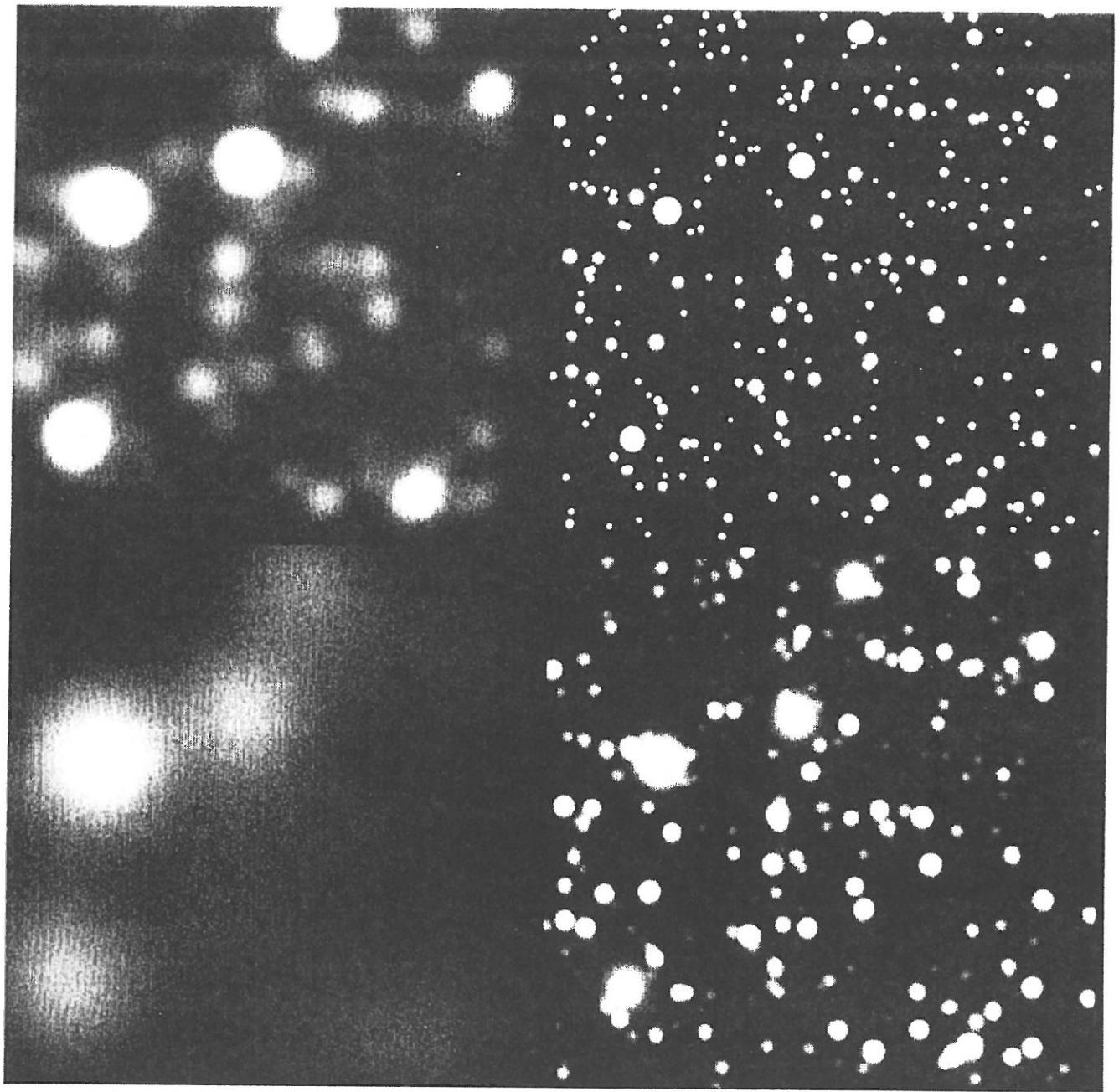


図 8 能動光学／補償光学による像改善の影響シミュレーション  
(左上) 星像直径 1 秒角、(右上) 星像直径 0. 1 秒角  
(左下) 星像直径 3 秒角、(右下) 星像直径 0. 3 秒角

## 2. J N L Tの補償光学系

### 2. 1 シーイング

上層大気の乱れが小さく、観測所として最高の立地条件を備えたマウナケア山頂にJ N L Tは建設される。望遠鏡を収めるドーム内外の熱環境についても、(1)一切の熱源をドーム内部から排除する、(2)予測夜間気温に合わせて主鏡やドーム構造物を昼間から冷却しておく、(3)万一内部の乱流が問題になるときは風を通して乱流を流し去る、などの対策を立て、細心の注意を払った設計をしている。このため、従来に比べてJ N L Tでは1秒角を切るシーイングを実現する頻度も高く、最良時には0.3秒角程度のシーイング実現を想定している。しかし、これでも8m望遠鏡の回折限界(可視光で0.03秒角)には、ほど遠い解像力である。その原因は大気中の温度ゆらぎによる波面の乱れとされている。

### 2. 2 補償光学系案

大気のゆらぎによる波面誤差を実時間で補正して、望遠鏡口径で決まる回折限界に近い空間解像力を実現するシステム<sup>7)</sup>として、補償光学系をJ N L Tのカセグレン焦点およびナスミス焦点で実用化することは、J N L Tの性能を飛躍的に向上させる上で極めて重要である。最初に実用化するカセグレン焦点用の補償光学系は、近赤外域でほぼ回折限界の解像力を達成することを目標として、種々のパラメータを決定する方針である。観測者から見ると、補償光学系を使用するか使用しないかは、シーイングの状況やガイド星が利用できるかなどの状況に応じて選択できるようにしたい。このためには、補償光学系を通した後の焦点位置やF比がもとの光学系と不変であることが必要となる。

焦点位置不変、ビームF比不変、視野1-2分角、コリメートビーム径50mm程度として、他の周辺光学系と占有空間が競合しない、光学系配置を模索中であるが、その一例として図7のような配置を検討している。第1期カセグレン焦点用補償光学系の製作は1996-97年度にかけて行うことになるだろう。1993-1995年度の3年間にその実用化に必要な技術開発を行う予定である。能動光学の実現により、現在国内の観測で達成されている平均約3秒角の星像が、平均1秒角以下、条件の良いときには0.3秒角、さらに可視域での補償光学の実用化により、0.03秒角になる。図8より、そのインパクトは非常に大きいことが分かる。

### 参考文献

- 1) 小平桂一:「J N L T計画の概要」、OplusE、143、pp. 67-71 (1991)
- 2) 家 正則・海部宣男・小平桂一:「8m「すばる」望遠鏡計画」、物理学会誌、第47巻、第4号、269-276頁 (1992)
- 3) 家 正則、唐牛 宏、小林行泰:「動きだした8mすばる望遠鏡計画」、応用物理学誌、第62巻、第6号、540-551頁 (1993)
- 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. Natl. Astron. Obs. Japan, Vol. 1, p. 49-55, (1989)
- 5) 野口 猛:「主鏡の能動支持(Active Support)」、OplusE、143、pp. 77-82 (1991)
- 6) 家 正則:「望遠鏡-能動光学と補償光学」、オプトロニクス、第11巻、第1号、pp. 164-170頁(1992)
- 7) 高見英樹:「補償(アダプティブ)光学系」、OplusE、143、pp. 90-96 (1991)