

特集：各種装置における光学系

口径8m望遠鏡JNLTの光学系

国立天文台*
家 正則

1. 望遠鏡計画の概要

国立天文台は平成3年度から9年計画で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（英語名=JNLT、愛称=すばる）の建設を進めている^{1)~3)}。JNLTは、地球大気を透過する波長0.3μmの近紫外線から30μmの中間赤外線までの電磁波により、遠宇宙を観測するための望遠鏡である。この望遠鏡は、(1)能動光学や補償光学の採用による高解像力、(2)新方式のドームによる望遠鏡まわりの空気の温度ゆらぎの抑制、(3)現存の4m級望遠鏡の4倍以上の大集光力、(4)約2桁にわたる広い観測波長域、(5)主焦点、カセグレン焦点、両ナスミス焦点の具備による多様な観測への対応性、などの従来にない特徴を備えている。わが国のJNLTはほぼ同時に計画が進行している欧州連合のVLT計画、米英加共同のGEMINI計画などとともに、21世紀の観測天文学を担う望遠鏡として期待されている。

8m主鏡ガラス材の製造に3年、研磨に3年の歳月を要するため、望遠鏡に初めて光が通るのは平成10年（1998年）になる見通しである。平成5年現在、超低膨張ガラス材の製造、望遠鏡構造の製作、現地での望遠鏡基礎部の工事などが、計画どおり順調に進んでいる（写真1）。本稿では、JNLTの光学系について以下に紹介する。

2. 8m望遠鏡の基本光学系

2.1 基本光学系パラメーター

JNLTの主鏡は、有効口径 $D_1 = 8.2\text{m}$ 、曲率半径 $r_1 = 30\text{m}$ 、非球面係数 $b_1 = -1.00835$ の凹型回転双曲面となるよう製作される。この形状は、副鏡との組合せにより、合成焦点距離 $f_{\text{cas}} = 100\text{m}$ 、焦点引出し量（主鏡前面から後方へ測ったときの焦点位置までの距離） $BF_{\text{cas}} = 3.0\text{m}$ のリッチ・クレチアン光学系の解として定義されている（図1）⁴⁾。リッチ・クレチアン系とは、カセグレン焦点で主鏡と副鏡の球面収差とコマ収差がそれぞれ互いに打ち消すように、設計された2面反射光学系であり、広い視野が確保できる望遠鏡光学系である。非球面研磨技術の向上に伴い、近年の望遠鏡光学系は放物面主鏡を持つ古典的なカセグレン系から、次第にJNLTのようなリッチ・クレチアン系に移行してきた。回折限界を考慮し

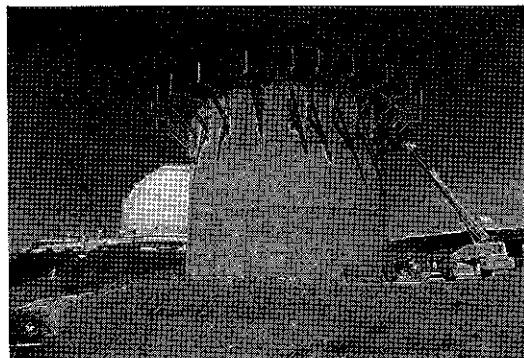


写真1 マウナケア山頂におけるJNLT望遠鏡基礎工事状況

*〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1
☎0422-34-3703

特集：各種装置における光学系

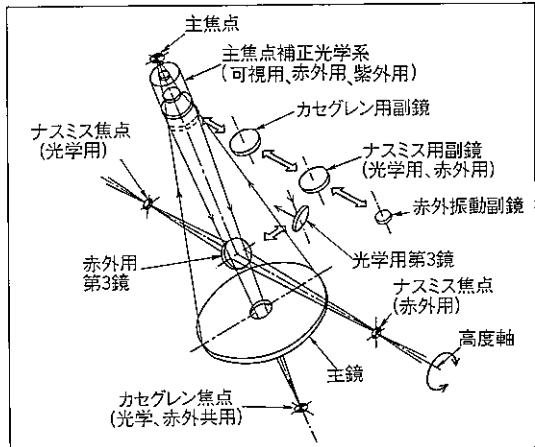


図1 JNLT光学系概念図

て、主鏡の研磨誤差は局所的には rms 波面誤差で $\lambda/35$ 以下としている。大局的には後述の能動光学を見込んでこれより少し緩めることができる。主鏡の曲率半径誤差は 70mm、非球面量誤差は 0.00019 よりそれぞれ十分小さくなければならぬ⁵⁾。

海拔 4139m の JNLT 建設地、マウナケア山頂地域は、晴天率が高く湿度が低いのに加えて、上空大気の乱れが小さくシーアイングが良いことで知られている。最近の実測でもシーアイング最頻値は半值全幅で 0.6 秒角程度、最良値は 0.3 秒角以下といわれている。このような、良い立地条件を活かすため、JNLT 光学系は、各焦点の写野端、波長域端で半値全幅 0.2 秒角以下の結像が得られるように、光学設計目標を設定した。主鏡はアルミニウム蒸着し、保護膜はつけない。反射率の劣化を防ぐため、表面に付着するダストを定期的に吹き払い、反射率の劣化に応じて 1~5 年ごとに専用の蒸着槽で再蒸着する予定である。

2.2 主鏡能動光学

鏡の自重変形を小さくするためガラス材を十分に厚くするという従来の方式は、JNLT がめざす有効径 8.2m の高精度主鏡の製作には、精度面でもコスト面でも現実的でない。このため早い段階から、JNLT ではガラスの厚さを極力小さくして軽量化を図り、自重変形は積極的に形状制御することで打ち消すという方針を立てた。「能動光学」

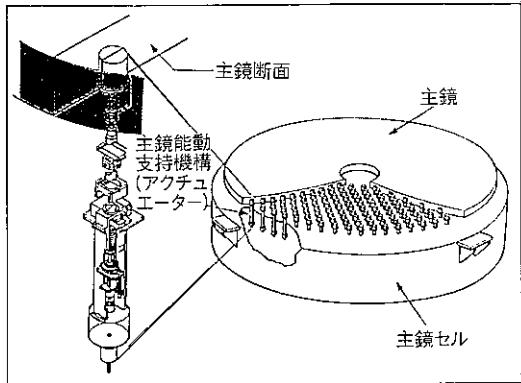


図2 主鏡能動支持機構

と名づけたこの概念は VLT, GEMINI でも採用されている。JNLT では、他の 2 計画と異なり、ガラス鏡材の光軸方向の支持と光軸に垂直な方向の支持を同時に実現するアクチュエーターを 264 本用いて、重さ約 24t の超低膨張ガラス主鏡の形状を制御する^{6), 7)}(図 2)。

主鏡形状は主鏡の固有振動モードで展開して表現し、制御バンド幅 1Hz で約 30 項程度までの制御を考えている。JNLT の能動光学用アクチュエーターはおのおのがガラス重量の 1/264(約 90kg 重)を支え、さらに最大 20kg 重までの補正力を発生して形状制御できるように設計されている。したがって、ザイデル収差との対応がよいツェルニケ多項式で展開した場合、JNLT の能動光学系は球面収差 (A_{40}) で約 3.6 μm の補正能力を備えることになる。能動光学系の採用は、望遠鏡光学系の自重変形、熱変形、研磨誤差、光軸調整誤差など、従来の望遠鏡では対処しきれなかった誤差についても、常に最適化した状態を実現する道を開くものとして、極めて重要である(図 3)。今後の大型望遠鏡には能動光学系の採用が前提とされるであろう。

2.3 副鏡群

JNLT の可視域用カセグレン副鏡は、直径 $D_2^{\text{Copt}} = 1.330\text{m}$ (視野 12 分角用)、曲率半径 $r_2^{\text{Cas}} = 5.524\text{m}$ 、非球面係数 $b_2^{\text{Cas}} = -1.9173$ の凸型の回転双曲面で、主鏡からの距離 $d_{\text{Cas}} = 12.652\text{m}$ の位置に置くことになる。 $F/12.2$ のカセグレン焦点では、補正光学系なしで視野直径 6 分角にわた

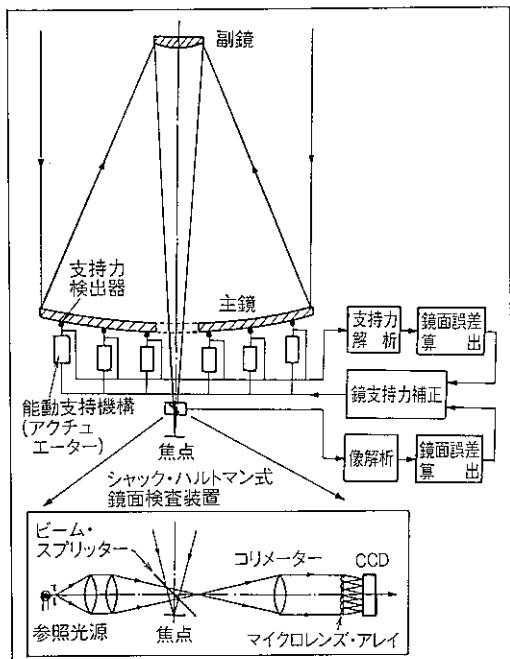


図3 主鏡能動光学系概念図

って、収差による星像直径が0.2秒角以下となる。ただし、像面は平坦ではなく、曲率半径2.4m程度の球面となる。アルミ蒸着の可視域用副鏡のほかに、直径 $D_2^{01R}=1.265\text{m}$ 、 $F/12.2$ の金蒸着の赤外域用副鏡を用意する。可視副鏡は主鏡で集めた光を漏れなく焦点に送るため、視野分だけ大きめにつくる。一方、背景熱放射を嫌う赤外副鏡は、焦点面で視野端から副鏡を見たとき、副鏡を通して主鏡の外の赤外放射率の高い部分を見ないように、小さめにつくる。

ナスマス焦点は、望遠鏡高度軸受けの端面よりさらに外側に設ける必要があるため、引出し量が $BF_{Nas}=4.6\text{m}$ となる。 $F/12.6$ 可視用ナスマス副鏡は、曲率半径 $r_2^{Nas}=5.809\text{m}$ 、非球面係数 $b_2^{Nas}=-1.8746$ の凸型回転双曲面で、主鏡からの距離 $d_{Nas}=12.517\text{m}$ の位置に置くことにより、ナスマス焦点も、合成焦点距離 $f_{Nas}=103.397\text{m}$ 、視野直径4分角のリッチ・クレチアン光学系とすることができます。赤外用ナスマス副鏡も設計されているが、当面は視野直径30秒角程度での使用を前提として、赤外用カセグレン副鏡を転用することを

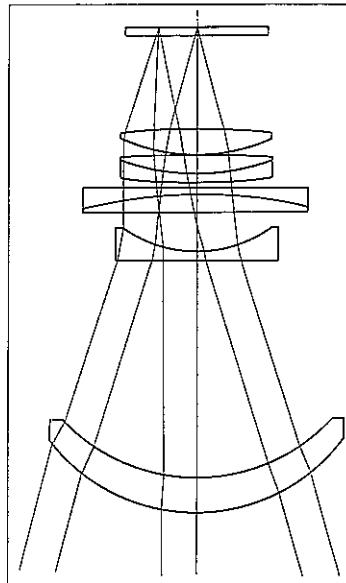


図4 新方式の大気分散補正光学系を備えた主焦点広視野補正光学系

考えている。この場合、赤外カセグレン副鏡を主鏡側に33mm近づけて、焦点引出し量を $BF_{Cas}=3\text{m}$ から $BF_{Cas}=4.6\text{m}$ に変更し、この変更に伴って発生する $A_{40}=2.47\mu\text{m}$ の球面収差は主鏡を形状修正することで対処する。この「ズーム機能」はまさに能動光学の面目躍如たるところである。

このほかに、波長 $3\mu\text{m}$ 以上の中間赤外線での観測の場合に必要となる振動副鏡として、曲率半径 $r^{CMIR}=1.950\text{m}$ 、非球面係数 $b_2^{CMIR}=-1.392$ の $F/35$ 赤外振動副鏡が用意され、カセグレン焦点とナスマス焦点での観測に利用される。

2.4 主焦点広視野補正光学系

カセグレン焦点でリッチ・クレチアン光学系となるように設計した双曲面主鏡のため、主焦点では光軸光も大きな球面収差のため、点像にならない。このため、透過型主焦点広視野補正光学系を用いて、視野直径30分角にわたり、画質の良い撮像ができるようとする。可視域用補正光学系は非球面を含むレンズ系により、広視野補正を実現する(図4)⁸⁾。第1レンズの口径は0.54m、曲率半径は前面が0.4924m、後面が0.5542mとなる。赤外用主焦点広視野補正光学系は、大口径の赤外透

特集：各種装置における光学系

過ガラスを用いる必要があり、光学設計と並行して大口径赤外透過硝材の開発研究が進められている。

3. 周辺光学系^{4), 9)}

3.1 大気分散補正光学系

大気の屈折率は波長依存性があるため、天頂以外では大気による色分散が生じ、そのままでは星の像に色ズレが生じてしまう。大気色分散は紫外域で著しく、赤外域では小さい。主焦点広視野補正光学系や、カセグレンおよびナスマス焦点部には、紫外・可視域用の大気分散補正光学系が内蔵される。従来の方式は、大気色分散に近い色分散を持つ硝材を選んで直視プリズムをつくり、2組の直視プリズムの頂角の向きを望遠鏡高度角に応じて、回転させることにより、大気色分散を打ち消すというものであった(図5)。カセグレン、ナスマス焦点にはこの方式の大気分散補正光学系を設置する。JNLTの主焦点広視野補正光学系には、望遠鏡高度角に応じて、レンズ系の一部を光軸に垂直に移動することにより、大気色分散を打ち消すというまったく新しい方式の大気分散補正光学系が採用される⁸⁾。

3.2 像回転補正光学系

従来の赤道儀方式の望遠鏡と異なり、天体の日周運動を追尾するために高度軸と方位軸の2軸を駆動する経緯台方式の望遠鏡では、焦点面で視野が回転する。これを補正するため、主焦点とカセグレン焦点では観測装置を回転するが、ナスマス焦点では光学的に天体像を逆回転して補正する。このための補正光学系を像回転補正光学系と呼ぶ。像回転補正光学系は3枚の平面鏡からなり、ナスマス焦点直前の望遠鏡高度軸の中に設置す

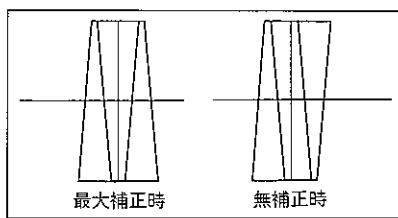


図5 2組の直視プリズムを用いた大気分散補正光学系

る。望遠鏡高度角の変化に応じて、この補正光学系全体をその半分の角度だけ回転することにより、ナスマス観測装置から見た天体像が回転しないようにすることができる。なお、像回転補正光学系使用時は、焦点引出量が $BF_{Nas}=4.95m$ に延びるが、ナスマス副鏡の移動と主鏡の能動形状補正で対処することができる。

3.3 鏡面測定光学系

鏡面測定にはシャック・ハルトマン光学系を用いる。シャック・ハルトマンカメラは、望遠鏡光路中の瞳位置に置いたマイクロレンズアレイにより、焦点面に基盤の目のように並んだ多数の星像をつくる。この星像配列の歪を測定すると、主鏡の対応部分の形状誤差が測定できる(図6)。天文台で試作したシャック・ハルトマンカメラは、主鏡上約300点の計測により数nmの測定誤差で、鏡面形状を測定できることが実証された¹⁰⁾。

3.4 その他の支援光学系

観測支援の光学系としては、このほかに観測装置の感度校正のための校正用一様光照射光学系、望遠鏡の追尾誤差を測定して微調するための自動ガイド光学系、分光器に正しく天体光が導入されているかどうかをチェックするためのスリット観察光学系などがある。

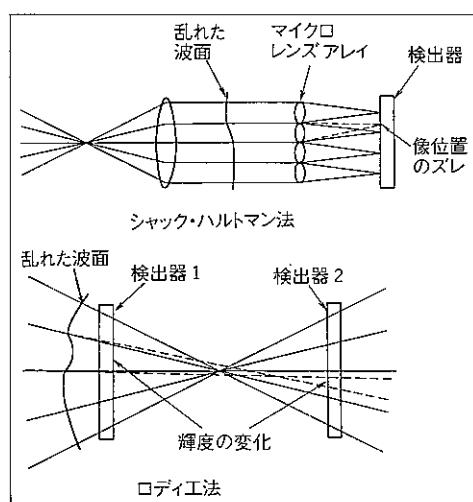


図6 鏡面測定や波面測定に用いられるシャック・ハルトマン法とロディエ法の概念図

特集: 各種装置における光学系

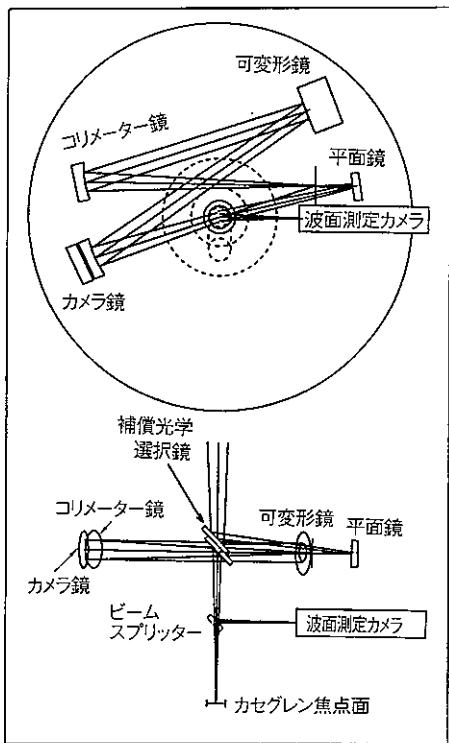


図7 JNL T カセグレン焦点用補償光学系概念図

4. 補償光学系

地上設置の大型望遠鏡の空間解像力は、望遠鏡口径で決まる回折限界ではなく、大気中の温度ゆらぎによる波面の乱れの強さが、実際上の制限となってきた。この乱れの強さを天体観測ではシーリングと呼んでいる。近年、波面の乱れを実時間で測定し、波面補正を行うという「補償光学」の実現可能性が高まり、これからの大気望遠鏡の空間解像力を大幅に向上させると期待されている¹¹⁾。JNL T では、観測目的に応じて補償光学系を容易に利用できるように、望遠鏡周辺光学系の一部として、補償光学系を組み込む方針で、その概念設計を進めている。

カセグレン焦点用の第1期補償光学系（図7）は、近赤外線観測で8m口径の回折限界に迫る解像力を実現することを狙ったシステムであり、ロディエ方式（図6参照）の37素子高感度光検出器による波面ゆらぎの高速測定と37駆動素子の可変

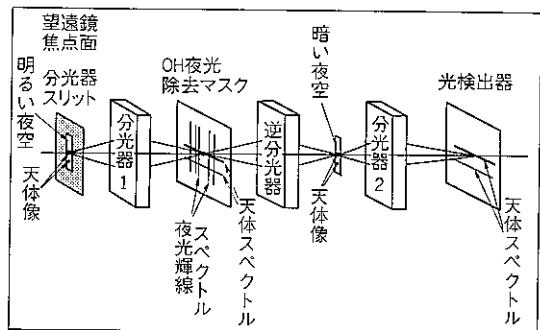


図8 OH 夜光除去分光器光学系概念図

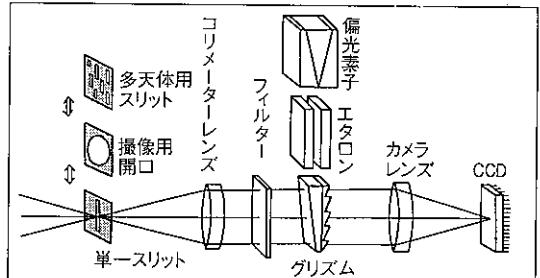


図9 さまざまな観測モードを実現する微光天体分光撮像装置FOCASの光学系

形鏡による波面ゆらぎの補償を行う制御システムである。通常のシーリング 0.6 秒角の時に15等級程度のガイド星を用いてこの補償光学系を使用すると、波長 $2.2\mu\text{m}$ では星像直径を回折限界の 0.1 秒角にまで改善することができ、ストレール強度比も 0.5 程度を達成することが見込まれている。補償光学は21世紀の大気望遠鏡には不可欠の技術である。

5. 観測装置光学系

JNL T の観測装置として、現在約10個の観測装置提案がなされ、その光学系の具体設計が進められている。可視光撮像用カメラ、赤外撮像用カメラ、中間赤外撮像用カメラ、微光天体分光撮像装置、高分散分光器、赤外冷却分光器、中間赤外分光器、OH 夜光除去分光器、コロナグラフ撮像カメラ、多天体分光器、などである。

このうち、OH 夜光除去分光器は、 $1\sim2\mu\text{m}$ 域の近赤外線観測での大きな背景放射雑音成分である地球大気中の OH 分子輝線成分のみを高分散ス

特集：各種装置における光学系

ペクトル像面でのマスキング処理で取り除き、天体からの赤外線のみを再度白色光に戻して、スリット撮像または低分散分光する装置（図8）であり、背景光強度を1/30程度にまで低減できるという極めてユニークな装置である¹²⁾。

JNLTの初期観測で多用されると期待されている微光天体分光撮像装置（図9）は、透過光学系中にグリズム（プリズム上に透過回折格子を貼り合わせ、1次スペクトルを直進させる分光素子）、ファブリ・ペローエタロン、偏光素子、フィルターなどを挿入して、撮像や種々の分光観測モードを実現する汎用観測装置である。

これらの光学系の設計には、それぞれの観測目的に応じて、さまざまな工夫が必要とされる。赤外観測装置の場合、赤外背景放射を低減するために光学系自体も液体窒素温度あるいはそれ以下に冷却する場合がある。このような場合は、観測装置の姿勢変化に伴う変形に加えて、冷却による変形についても設計時に十分な検討を行う必要がある。国立天文台で赤外分光器用に開発された四面反射非球面金属鏡光学系は、色収差がなく、冷却しても同種材料の光学素子と箱体が相似収縮するため、常温で可視光により光学系の検定ができるという利点を持っている¹³⁾。このように、観測装置の光学系にも新しいアイデアがいろいろと盛り込まれている。

6. まとめ

口径8mの「能動光学」方式の主鏡、望遠鏡先端につけられる口径1m級の複数の副鏡や主焦点広視野補正光学系、大気分散補正光学系や像回転補正光学系、観測支援のための鏡面測定光学系、校正用一様光照射光学系、スリット観察光学系、自動ガイド光学系、などの種々の周辺光学系、大気のゆらぎを補償する補償光学系、それに各種観

測装置の光学系など、JNLT計画にはユニークな光学系が多数計画されている。赤外観測装置については、光学系まで冷却を要するものもあり、各光学系の収差最適化、スループット向上、製作法、試験調整法、などチャレンジングな課題が山積している。読者諸兄のご批判・ご助言を仰げれば幸いである。

参考文献

- 1) 小平桂一：「J N L T 計画の概要」，O plus E, 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，pp. 269~276 (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，pp. 540~551 (1993)
- 4) 成相恭二：「J N L T の光学系」，O plus E, 143, pp. 72~76 (1991)
- 5) C. Cao, Y. Yamashita, K. Narai, and M. Iye: "Manufacturing Tolerances and Alignment Sensitivities of SUBARU Two-Mirror System", Publ. Natl. Astron. Obs. Japan, 3, pp. 7~9 (1993)
- 6) 野口 猛：「主鏡の能動支持 (Active Support)」，O plus E, 143, pp. 77~82 (1991)
- 7) 家 正則：「望遠鏡一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 (1992)
- 8) 武士邦雄、成相恭二：「横移動による大気分散補正装置を備えた主焦点補正光学系」，日本天文学会1993年秋季年会講演予稿集，D065
- 9) 家 正則：「口径 8m『すばる』望遠鏡とその補助光学系」，第17回光学シンポジウム講演予稿，pp. 43~47 (1992)
- 10) T. Noguchi, M. Iye, H. Kawakami, M. Nakagiri, Y. Norimoto, N. Oshima, H. Shibusaki, 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, pp. 49~55 (1989)
- 11) 高見英樹：「補償（アダプティブ）光学系」，O plus E, 143, pp. 90~96 (1991)
- 12) T. Maihara, F. Iwamoto, D. N. B. Hall, L. Cowie, A. T. Tokunaga, and A. J. Pickles: "An OH Airglow Suppression Spectrograph Design and Prospects", Proc. SPIE, 1946, in press (1993)
- 13) 小林行泰：国立天文台ニュース，No. 31, pp. 5~6 (1993)