

すばる望遠鏡と観測装置の技術開発

家 正 則

〈国立天文台光赤外研究部 181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 e-mail: iye@optik.mtk.nao.ac.jp〉

すばる望遠鏡による観測成果は、先端技術を導入して製作した観測装置と望遠鏡の結像性能に負うところが大きい。本稿では、すばる望遠鏡建設と観測装置開発の裏舞台にあったいくつかの技術開発のエピソードと、補償光学技術など最先端の光制御技術の原理、そして次世代の超大型望遠鏡の実現に向けた開発について解説する。

1. 「技術検討会」と「8 m クラブ」

基本設計

光赤外天文学者が結成した光学天文連絡会は激論の末、1984年に 7.5 m 大型光学赤外線望遠鏡計画の推進を決議した。これを受け、東京大学東京天文台（1988年からは国立天文台）は、延べ50回の「技術検討会」を開催し、望遠鏡構想の具体化を進めた。有効口径を 8.2 m に格上げするなどの紆余曲折があったが、1991年から建設が開始され、1999年に「すばる望遠鏡」が完成した。¹⁾⁵⁾

望遠鏡設計はまず観測目的に適した光学系の設計から始まる。さまざまな目的の観測装置を装備するため、すばる望遠鏡では筒先の主焦点、主鏡の裏側のカセグレン焦点、望遠鏡の両サイドにナスミス焦点を備えることが早い時期に合意された（図1）。最大の課題であった主鏡については、単一の薄いガラス鏡を後述の「能動光学」方式を用いて、反射面形状を制御し性能を出す方式とすることにした。

東京天文台岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡に筆者が液体窒素冷却 CCD カメラを導入したのは1986年のことであった。最初の CCD はわずか16万画素で大きさも 1.5 cm 角程度でしかなかったが、写真乾板の時代が終わることを示すには十分な性能だった。CCD の大型化、モザイク化に目処があったわけではないが、すばる主焦点の視野は、視野補正レンズの製作限界一杯を確保することとした。

8 m クラブ

さて、このようにして基本方針が固まり、すばる望遠鏡の建設が始まろうとしていた頃、後発の米・英・カナダ他の国際構想 8.0 m ジェミニ (Gemini) 望遠鏡計画が予算承認

の最終段階にきていた。そこでジェミニグループが、先行して 8.1 m VLT (Very Large Telescope) の建設に着手していた欧州南天天文台 (ESO) と日本のすばるグループに呼びかけ、互いの計画を比較検討する場を設けることになった。「8 m クラブ」と名づけた会議は、1994年までに計 5 回開催された。この三つのグループは互いにライバル関係にあるが、8 m 級の薄いガラス鏡を能動光学方式で実現するという、初挑戦の共通課題を持っていたため、8 m クラブの議論は大変率直で中身のある交流となった。

互いの計画を比較すると、ゴールが共通なのにアプローチが三者三様であることが浮き彫りになった。まず、主焦点を備えるのは、すばる望遠鏡だけであった。主焦点装置は望遠鏡構造への負担が大きく、ドームも大きくなり、予算も高くなるため米欧の 8 m 級望遠鏡は主焦点を断念した。また、すばるでは、主焦点カメラや副鏡類を交換し、カセグレン観測装置も交換して運用することにしたが、米欧の望遠鏡では副鏡や観測装置は交換しない方式を選んだ。これは装置交換の再調整に時間がかかり、観測効率が下がるという経験からの判断だった。

当時、米欧の一部の研究者からは、すばるの基本方針は野心的過ぎないかと心配する声があった。この不安を解消したのが、後述するすばらしい性能の主焦点補正光学系の完成と、副鏡やカセグレン装置のロボット交換機構の実用化であった。

2. 「能動光学」と主鏡精度

能動光学

比較的剛性の低い薄ガラス主鏡の反射面形状を測定し、鏡の力支持機構をリアルタイム制御して、低次の変形モードを修正すれば、常に理想的な鏡にすることができるという「能動光学」のアイデアは、欧州南天天文台の R. ウィルソンが1980年代初めに提唱したものである。一見関係なさそうだが、銀河円盤の自己重力振動の問題を研究していた筆者には、構造行列の固有値問題に帰着するこの考え方は極めて素直に受け入れることができた。

すばる望遠鏡の能動光学方式の採用は、直径 62 cm の球面鏡にすばる主鏡支持用に開発中であったアクチュエータ^{†1)}を 9 本取り付け、その鏡面形状を十分な精度で測定し制御できることを実証した試験（図2）で本決まりとなっ

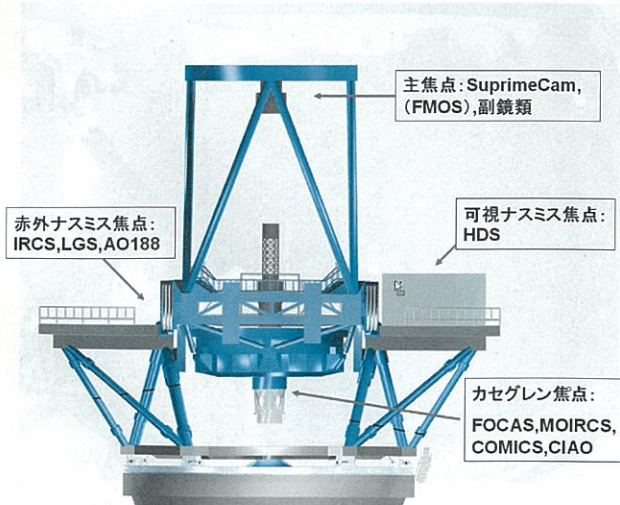


図1 すばる望遠鏡の四つの焦点と搭載装置類。

^{†1)~†4)} の用語説明は、本文末にある。

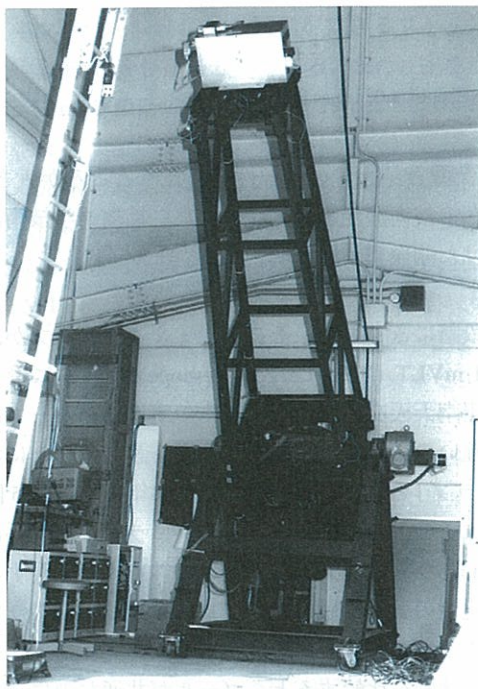


図2 すばる望遠鏡実現のブレークスルーとなった 62 cm 能動光学実証試験装置 (1989年10月)。

た。主鏡測定には当時、国立天文台で手作りしたジャック・ハルトマン型カメラ¹²を用いた。

すばる望遠鏡の実際のシステムは直径8.3 m、厚さ20 cm、重さ22トンの超低膨張ガラス主鏡を261個のアクチュエータと3カ所の固定点で支え、天体の追尾中も支持力をフィードバック制御して、その反射鏡面の形状を理想的な回転双曲面形状に維持する。ときおり、明るい恒星を光源として、ジャック・ハルトマン型カメラで主鏡の絶対形状を測定し、最適な支持力の設定を校正する。形状の時間変化はアクチュエータに内蔵した高精度センサーで測定した支持力分布から算出する。このために必要な誤差0.01%の高精度力センサーは、応力による音叉の振動数の変化を測定する新しい方式のものが開発され、実用化することができた。

能動光学系は実時間制御系なので、状況の変化に対応して自重変形誤差、熱変形誤差、研磨・調整誤差などをほぼ完全に除去でき、光学系の自動合焦、自動収差除去が実現できる。

薄レンズのポケット

コーニングガラス社で製作された直径8.4 m厚さ30 cmの超低膨張ガラス材の研削・研磨は、ピッツバーグ近郊の石灰岩の採掘跡の地下にあった同社の施設を拡張して行うことになった。地下施設は気温の変化や風の影響を受けないという利点がある。まず、ガラスの裏面に261個の主鏡支持用アクチュエータを差し入れるポケットを掘った。ポケットの隅に傷があると、規定以上の力がかかったときに傷が進行して、大切な主鏡が割れてしまう恐れがある。ポケットを掘らないほうが安全だが、その場合は力の作用点をガラスの重心面に一致させることが困難なため、鏡の

形状の制御誤差が大きくなる。詳細は省くが細心の安全策を講じて、最高性能を目指すこととした。プロジェクトの中でもリスクのある決断の一つだった。

鏡面測定法

鏡面を正しく研磨するには鏡面を正確に測定することが不可欠である。凹非球面の測定法としては、曲率中心においた点光源からの光束をヌルレンズ¹³で被検非球面に垂直に光線が入射するように変換し、被検面からの反射光と基準参照光の干渉縞をフィゾー干渉計¹⁴で測定するのが最も一般的である。短時間露出により空気の揺らぎを凍結した計測を多数行い、統計処理により揺らぎの効果を除去して鏡面形状を評価する。

主鏡の測定はヌルレンズを頼りにして進めるので、ヌルレンズに間違いがあってはならない。実際には赤外用ヌルレンズと可視用ヌルレンズを独立に作り、研磨誤差が小さくなり測定方式を赤外から可視に切り替えるときに両方のヌルレンズでの測定に矛盾がないことを確認した。

鏡面研磨

研磨の基本はモグラ叩きに似ている。鏡面のわずかな山を着実につぶしていくことが大切である。山と谷を見誤って谷を削ってしまうと、その分全体を磨き直す必要が生じ、一大事である。通常、一工程での各点での研磨量が目標量の2/3程度となるように、研磨砥石の押下圧、砥石と鏡面との相対速度、その点の総通過時間を調節する。研磨は直径3 mの大型砥石からしだいに小さいサイズの砥石に移行する。

研磨の最終検査は山頂で使う実際の主鏡支持装置を研磨工場に持ち込み行った。契約上は1998年8月上旬に仕様値をクリアしたが、当時、フランスのレオスク社で先行製作された欧州南天天文台の8 m主鏡の1枚目の仕上げ精度を超えることを目標にさらに2週間の研磨を行った。その結果、能動支持機構で修正できる変形モードの補正後の形状誤差が14 nmの世界最高の鏡が完成し(図3)、1998年8月

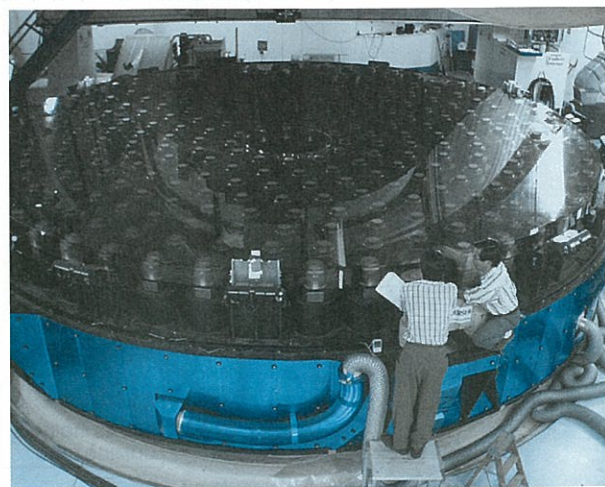


図3 主鏡の最終検査。裏面の能動支持機構のアクチュエータ群が透けて見える。

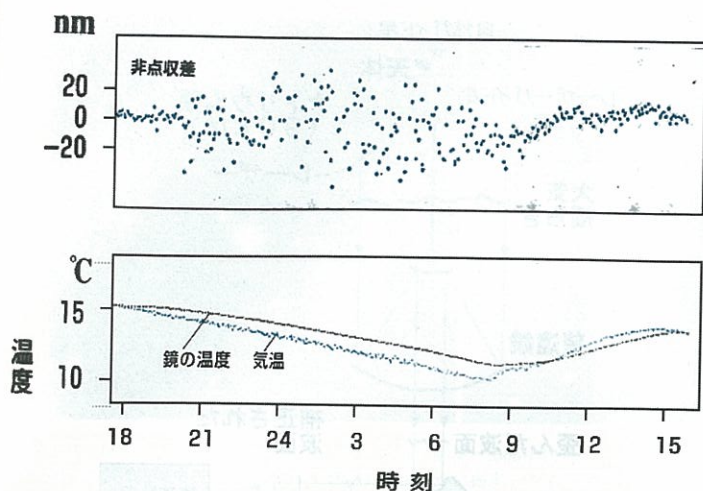


図4 ミラーシーイング現象の発見。気温が低下していく夜間、遅れて冷える鏡面の温度が気温より高く、鏡から陽炎が立つため、波面測定値が乱れることが示された。

26日に現地で記者会見を行った。翌朝の現地新聞には当時封切りされていた日本映画「ゴジラ」にかけて、「ゴジラのコンタクトレンズが完成した」という見出しが躍った。

3. 星像改善の方策

ミラーシーイング

62 cm 鏡の能動光学実証実験の過程で思わぬ発見があった。鏡の形状測定を精度良く行うため、人や自動車による外乱の少ない夜間に連続自動測定試験をしたところ、期待に反して夜間の測定データのほうが昼間に測ったデータより、値がばらついてしまった(図4)。この原因は鏡から立つ陽炎であった。気温が下がっていく夜間、熱容量の大きい鏡の温度降下は気温の降下より必ず遅れる。このため、気温より鏡が暖かい状態になり、鏡から陽炎が立つ現象が起こるのである。この発見は、世界中の望遠鏡が、実は夜間、鏡から陽炎を立たせながら観測していることを意味する。明確な測定データとしてこのことを立証したこの論文は海外でも注目され、望遠鏡の熱管理の重要性が認識されるきっかけとなった。陽炎は明らかにシーイング(大気揺らぎによる星像の揺らぎ)を悪くするので、すばる望遠鏡では主鏡を、予測される夜間気温より2-3度低い温度に昼から予冷し、陽炎が立たないように工夫することにした。

通風ドーム

もう一つの工夫はドームの構造である。まず、従来の常識であった半球形のドームに比べて地上付近の乱れた風(接地境界層)を巻き上げず、両側に流すことができる円筒型ドームを採用した。さらに、ドームに十分な開口部を設けて適度な通風を確保し、ドーム内外の気温差が生じないようにした。そして、望遠鏡の両側に高さ20 m長さ35 mの黒壁を設けて、流れる風が乱れないように工夫した。銀河の分布の大規模構造の研究にちなんで、この黒壁をグレートウォールと名づけた。

これらの工夫が実際にそれぞれどれくらい効いているの

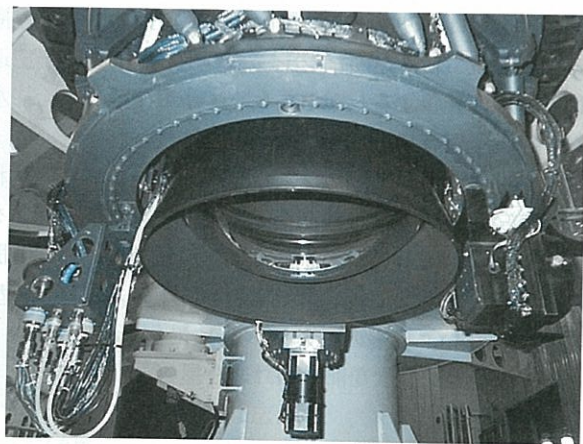


図5 主焦点補正光学系の第一レンズ。

か、定量的な分析はまだできていない。だが、すばる望遠鏡の星像が同じマウナケア山頂の他の望遠鏡に比べて良い理由の一つであることは間違いない。

4. 主焦点の活用

すばる望遠鏡の自慢は視野の広い主焦点カメラの活躍である(宮崎氏の稿参照)。他の8 m級望遠鏡が主焦点を断念した理由の一つは、広い視野の端まで良い画質を確保するための大型の補正レンズ系の設計・製作が困難だったからである。

キャノンの光学設計者武士邦雄さんの独創的なアイデアで、新しい方式の大気分散補正機能を搭載した補正レンズ系の設計が完成した。武士さんはこの設計研究で総合研究大学院大学の論文博士号を取得した。色収差補正のために必要な大型の低分散ガラス材を製作したオハラ社とそのガラスを研磨したキャノン社は、実際の製作過程でガラスが破損するなどの困難に突き当たったが、最終的にはすばらしい補正レンズ系が完成した(図5)。

5. ロボット運用

すばる望遠鏡は主焦点、カセグレン焦点、二つのナスマス焦点の、合計4カ所で観測が可能である。これらの焦点を使い分けるため、望遠鏡の先端にカセグレン焦点用の可視光用副鏡、赤外線用副鏡、ナスマス焦点用の可視光・赤外線兼用副鏡、それに主焦点補正光学系と一体となった主焦点カメラのどれかを装着する。これらのトップユニットはどれも重量が1トン以上に及ぶので、人力での交換作業は不可能である。ドーム上部のトップユニット格納場所から、望遠鏡の先端に必要な副鏡を運び、脱着交換するための半自動交換装置が製作された。

カセグレン焦点用の観測装置を格納するため、ドーム観測床に装置格納ベイを4カ所設けた。現在はFOCAS, MOIRCS, COMICS, CIAOの4装置を観測目的に応じて、半自動的に交換作業ができるようにしている。装置交換作業は、自走台車を用いて、次の出番のカセグレン焦点用の

観測装置を待機エリアから運び出し、望遠鏡の下まで運搬する。望遠鏡に組み込んだジャッキボルトが、装置を望遠鏡に引き上げ装着する。電気系ケーブルの接続や、冷却水・ヘリウム配管は自動脱着コネクタで接続される。

これらの「ロボット」技術が、当初不可能とさえ思われたすばる望遠鏡の多様な観測機能のスムーズな交換運用を実現した。すばる望遠鏡の副鏡交換、装置交換の頻度を聞くと、他の天文台の研究者は驚きの声を上げる。他の大型望遠鏡にはない、自慢の工夫といえよう。

6. 補償光学

その歴史

光の波長を λ 、望遠鏡の口径を D とすると、完全な光学系では星の回折限界像の直径は、角度にして $2.44\lambda/D$ ラジアンとなる。波長0.5ミクロン、直径8.2mのすばる望遠鏡のでは回折限界像は0.03秒角に相当し、直径2.4mのハッブル宇宙望遠鏡の解像力を3倍凌駕するはずである。だが、8m級望遠鏡の中でも最も「見え味」が良いと定評のあるすばる望遠鏡でも、平均的星像サイズは0.6秒角であり、回折限界と比べると約20倍もぼけた像となる。

この原因は地球大気の大気揺らぎに起因する光波面の乱れである。乱れた光波面を十分素早く直すことができれば、大気の揺らぎを打ち消して、回折限界の解像力を実現できる。この「補償光学」のアイデアは1953年にバブcockが提唱した。⁶⁾ 補償光学の技術は冷戦時代の1970年代に人工衛星を地上から監視することを目的に、巨額を投じて米国で密かに開発が進められていた。だが、70年代末には、全く独立に同じ技術の開発が天文学の分野で始まった。幸い冷戦の終結もあって、80年代末には技術公開が進んだ。実用的な補償光学装置が観測に登場したのは1990年代からである。⁷⁾

すばる望遠鏡グループでは1980年代末から基礎開発に取り組み、2002年にはカセグレン焦点に制御素子数36の補償光学系を完成させ、共同利用に提供した。^{8,9)} この補償光学系を用いて、原始惑星系円盤の渦状構造の発見、前主系列星の星周円盤の構造の解明、重力レンズクエーサーのスペクトル解析による銀河間雲のサイズの測定、クエーサー吸収線中の銀河間金属吸収線の発見など、さまざまな成果が得られた(林氏の稿参照)。

だが、波面揺らぎの測定に明るいガイド星が必要なため、この装置では遠宇宙の観測はほとんどできなかった。このため、科学研究費補助金特別推進研究(2002-2006年度)の補助を得て、第2世代の補償光学系として制御素子数188の補償光学系とレーザーガイド星生成システム(図6)を製作した。^{11,12)} 制御素子数が5倍になり、36素子の補償光学系よりも波面誤差をきめ細かく修正できるため、波長2.2ミクロンでは点光源の回折限界像の中心強度は36素子の補償光学系の2倍以上となった。さらに、これまでは補償が効かなかった0.8ミクロン付近のCCD感光域でも補償

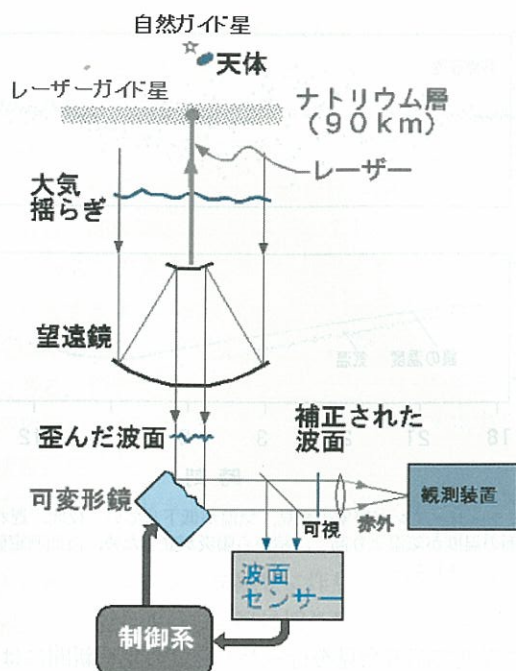


図6 レーザーガイド補償光学系の原理。自然ガイド星またはレーザーガイド星からの光が大気揺らぎで乱れる様子を波面センサーで測り、可変形状鏡を実時間高速駆動して波面歪みを補正すると、ガイド星近くの目的天体の回折限界像を観測することができる。

効果が認められ、観測の広がりが期待される。

波面測定装置と可変形状鏡

補償光学系は波面センサーと可変形状鏡からなる。補償光学系で使われる波面測定の原理はシャック・ハルトマン法¹²⁾ または波面曲率測定法である。

曲率測定法は波面の二次微分に相当する曲率の分布を瞳孔位置前後のデフォーカス像の輝度分布の比から求める方法である。波面曲率センサーは、大気の揺らぎにより主鏡の各部分を通過する光の波面がどう凸凹しているのかを直接測定するカメラである。

可変形状鏡としては、積層型のピエゾ素子を鏡面の裏側に多数貼り付けて押し引きする方式と、2枚のピエゾシートに独立電極を多数配置し、表側に反射面を形成したバイモルフ型可変鏡方式がある。積層型可変鏡はシャック・ハルトマン型カメラと相性が良く、バイモルフ型可変鏡は波面曲率センサーと相性が良い。

188素子補償光学系

すばる望遠鏡の補償光学系には、36素子系で実績のある波面曲率センサーとバイモルフ型可変鏡を発展させることにした。このシステムは、光束をマイクロレンズアレイで188分割し、各部分領域を通過する光をそれぞれ光ファイバーで光ダイオードに導き、毎秒1,000回測定する。光量の変化は波面の局所曲率に比例するので、この測定により、波面曲率の分布を把握できる。この測定情報を形状可変鏡の188個のバイモルフピエゾ素子の駆動電圧にフィードバックすることで、大気の揺らぎの効果をリアルタイムで打ち消すことができる。波面測定のマイクロレンズアレイの

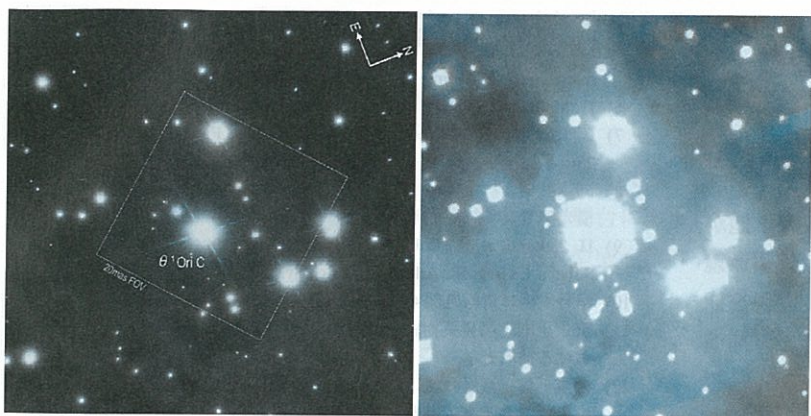


図7 188 素子補償光学系のファーストライト画像(2006年10月)。オリオン座のトラペジウム星団。すばる望遠鏡近赤外カメラ CISCO で1999年に撮影した右の画像(分解能0.6秒角)と比べると、左の補償光学系の画像(分解能0.06秒角)の切れ味の良さは一目瞭然である。

レンズ配置と可変形状鏡のピエゾ駆動電極の配置を最適化した設計を行い、それぞれを特注で製作した。

2006年10月に行った試験観測で、このシステムを使わないときに0.6秒角になる星像直径が、回折限界にあたる0.06秒角にまで改善されることを実証した(図7)。空間解像力を約10倍にし、感度が格段に改善されたことになる。

レーザーガイド星

補償光学系は非常に強力な装置だが、実際に働かせるには波面を測定する光源となる比較的明るい参照ガイド星が必要である。観測したい天体とガイド星が離れすぎていると、それぞれの光は大気の違いの部分を通ることになるので、波面補償がうまくいかなくなる。第一世代の36素子補償光学系では、明るいガイド星のごく近くしか観測できないため、全天の1%程度の領域しか観測できなかった。

そこで第二世代の補償光学系では、自然のガイド星に頼

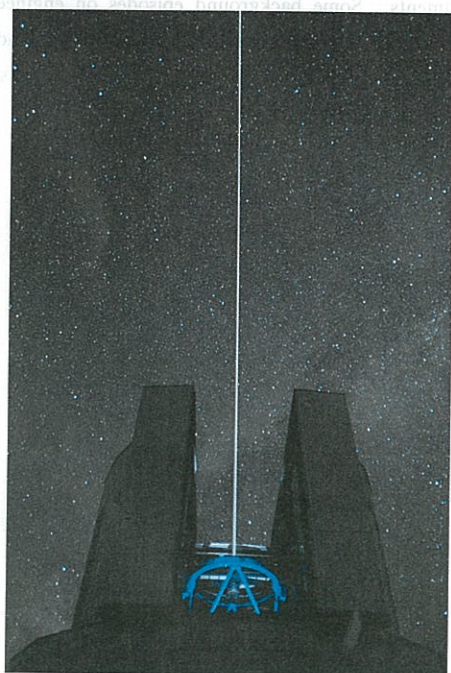


図8 レーザーガイド星生成システムによる初照射試験(2006年10月)。

らず、すばる望遠鏡から高出力レーザービームを放って、上層大気中に人工の「星」を作ってしまうことにした。地球大気の高さ約90 km には、ナトリウム原子の密度が濃い、厚さ10 km 程度の層がある。この層に、波長589 nm(ナトリウムD2線)のレーザー光を照射すると、ナトリウム原子が共鳴散乱で励起発光し、地上からはあたかも「星」のように見える。このようにして人工の星を作れば、補償光学で観測できる天域が格段に広がる。

レーザー光源は、理化学研究所の協力を得て、Nd:YAGの2波長のレーザーを混合して589 nmのナトリウムD2線で発振する

全固体和周波レーザーを開発した。レーザー伝送は、制御が必要な鏡リレー方式でなく、伝送損失の少ないフォトリソニック結晶光ファイバーを利用した。レーザー射出望遠鏡は、すばる望遠鏡の側面装備でなく、副鏡の裏側に装備することとした。

完成したシステムをすばる望遠鏡に搭載して、2006年10月に行った試験観測では、このレーザービームにより、十分な明るさの人工星を任意の方向に作ることができることが実証された(図8)。現在、本格的な共同利用観測開始に向けて、システムの最終整備に取り組んでいる。すばるで発見した赤方偏移7.0の最遠方の銀河などをレーザーガイド補償光学系で詳しく観測する計画や、補償光学観測が有効なガンマ線バースト天体、超新星、アンドロメダ銀河の球状星団の深撮像観測などについて、準備を進めている。

レーザーガイド補償光学系は、大型望遠鏡に必須の技術となった。マウナケア山のように多数の望遠鏡が設置されたところでは、各観測所が勝手にレーザーを撃っては、スターウォーズさながらになり、お互いの観測の邪魔になる。互いの観測スケジュールを調整し、レーザービームが他の観測の障害にならないようにビーム管制するシステムを全天文台の参加で構築中である。

補償光学の考え方は、天文学以外のさまざまな分野でも応用が検討され始めている。その一例が、人間の目の眼底検査への応用である。眼底を見ようとすると角膜・水晶体・ガラス体等を通して見ることになり、そこでの屈折率ムラにより眼底像はぼやけてしまう。しかし、眼底に極めて弱いレーザースポットを作り、それを参照光源として補償光学を働かせれば、視細胞1個1個が見えるほどの極めてシャープな画像での診断が可能となる。天文学の開発も実社会の開発につながるという良い例といえよう。

7. これからのすばる

第一世代の観測装置に加えて、多天体分光機能を持つ近赤外カメラとして現在世界最強となるMOIRCS、レーザーガイド補償光学系LGSAO188、そして主焦点の広視野を活

かして 400 天体を同時に分光観測ができるファイバー多天体分光装置 FMOS が完成しつつある。また、主焦点カメラ Suprime-Cam の 10 倍の視野を持つ Hyper Suprime-Cam の製作が始まろうとしている (林氏の稿参照)。

日本の光赤外天文学コミュニティは、すばる望遠鏡の活躍を次世代に引き継ぐため、カリフォルニア工科大学他が中心となって検討を進めている、口径 30 m の次世代望遠鏡計画 (TMT) に合流して、マウナケア山での建設実現を期している。¹³⁻¹⁷⁾ すばる望遠鏡の主焦点機能の増強と、補償光学系の新たな開発は 2010 年代後半に到来する 30 m 級望遠鏡の時代に向けた戦略である。天文学と物理学の接点がかかりますように広く強くなる中、一般の方にも親しみやすい天文学での成果は、物理学界にも共有していただけたと考える。

用語説明

^{†1} アクチュエータ

鏡の支持力を内蔵の力センサで測定し、計算機制御でボールネジを回転してバネを圧縮し、支持力を変化させる駆動装置。

^{†2} シャック・ハルトマン型カメラ

鏡面測定や補償光学の波面測定に用いるマイクロレンズ光学系。点光源からの光束を瞳面に置いたマイクロレンズで分割し、各レンズが作る像の位置ずれから各部分光束の波面傾斜 (波面の一次微分) を測定する装置。測定結果から主鏡面の形状誤差や大気の揺らぎによる波面誤差が把握できる。

^{†3} ヌルレンズ

被検面が所望の非球面となっているかを光学的に検証できるようにするレンズ。被検面が所望の非球面るとき、レンズを通し被検面から反射した光が球面となるように設計される。

^{†4} フィゾー干渉計

参照面と被検面からの反射光の干渉縞により被検面をテストするための最も多用されている干渉計。

参考文献

- 1) 家 正則, 海部宣男, 小平桂一: 日本物理学会誌 47 (1992) 269.
- 2) 山下泰正: 『反射望遠鏡』(東京大学出版会, 1992) p. 291.
- 3) 安藤裕康: 『世界最大の望遠鏡』(平凡社, 1998).

- 4) 家 正則: 『すばる望遠鏡』(岩波書店, 2003).
- 5) M. Iye, et al.: Publ. Astr. Soc. Jpn. 56 (2004) 381—Current Performance and On-Going Improvements of the 8.2 m Subaru Telescope.
- 6) H. M. Babcock: Publ. Astron. Soc. Pacific 65 (1953) 229.
- 7) C. Roddier, F. Roddier, A. Stockton and A. Pickles: SPIE 1236 (1990) 756.
- 8) 高見英樹: パリティ 17 (2002) 22—分解能 0.06 秒角の星像を得る: 補償光学でシャープな星像を.
- 9) H. Takami, et al.: Publ. Astr. Soc. Jpn. 56 (2004) 225—Performance of Subaru Cassegrain Adaptive Optics System.
- 10) 早野 裕: 情報処理 45 (2004) 1239—補償光学.
- 11) 家 正則, 高見英樹, 早野 裕: 光アライアンス (2006) 8—天文学における補償光学.
- 12) 大屋 真, 渡邊 誠: 光技術コンタクト 45 (2007) 227—すばる望遠鏡レーザーガイド補償光学システムの開発.
- 13) 家 正則著監修: 『21 世紀の宇宙観測』(誠文堂新光社, 2002).
- 14) M. Iye: Proc. SPIE 5489 (2004) 417—Concept study of Japan Extremely Large Telescope.
- 15) M. Iye: Proc. SPIE 6269 (2006) 626905—Current and future Subaru instruments.
- 16) 家 正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利編: 『宇宙の観測 I—光・赤外天文学』(日本評論社, 2007).
- 17) 家 正則: 科学 (2007) 9 月号 938—光赤外超大型望遠鏡と次世代宇宙望遠鏡.

著者紹介



家 正則氏: 国立天文台教授。専門は銀河物理学。すばる望遠鏡計画、次世代超大型望遠鏡計画を推進し、最速銀河の観測的研究や補償光学技術の開発的研究を進めている。

(2007 年 10 月 3 日原稿受付)

Technology Developments for Subaru Telescope and Its Instruments

Masanori Iye

abstract: Scientific discoveries made with Subaru Telescope owe much to its superb image quality and unique capabilities of high-tech instruments. Some background episodes on engineering the Subaru Telescope and its instruments, the principle and performance of the adaptive optics technology, and the status of next generation large telescope projects, are described.