

最新技術で挑む “すばる”望遠鏡

薄型主鏡・補償光学・高感度撮像素子

家 正則

国立天文台ハワイ観測所

1997年4月、文部省国立天文台ハワイ観測所がハワイ島のヒロ市のハワイ大学キャンパスに開設された(図1)。ハワイ観測所は、ハワイ島マウナケア山頂に1999年度の完成を目指して、急ピッチで組立調整が進められている有効口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡“すばる”(図2)を運用する研究所である。“海外”設置施設としては南極観測基地の例があるが、外国設置の国有研究施設としては、ハワイ観測所が日本初のケースとなった。前例のないことだらけだが、日本の学術研究の真の国際化のよい前例となるよう、各方面のご理解とご支援のもと、関係者一同奮闘している。本稿ではここに至るまでの経緯を簡単に振り返り、“すばる”望遠鏡に用いられたさまざまなハイテク技術を中心にご紹介しよう。

大型光学赤外線望遠鏡建設の背景

それまで可視光でしか宇宙をみることができなかつた人類は、20世紀の後半に入ると電波望遠鏡、X線観測衛星などの新しい“目”を得て、宇宙をみはじめた。そこには、予想することさえできなかつた世界が拓がっていた。光の天文学でも、1970年代に4m級望遠鏡が多数建設され、80年代には光検出器が、量子効率1%程度の写真乾板から、量子効率が80%にもおよぶCCD(電荷結合素子)に置き換わったことによって、大きな進歩があった。だが、光検出器の性能はすでに理論的な限界に近づいており、さらに観測限界を深め

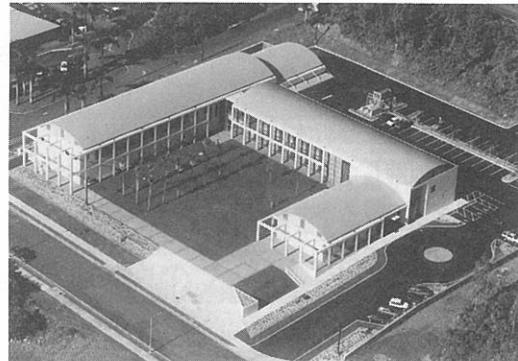


図1 国立天文台ハワイ観測所。

るには、より大きくしかも精度のよい望遠鏡を建設する必要があることが、はっきりとしてきた。このような中で、旧東京大学東京天文台(現国立天文台)では、1984年ごろから次世代の大型望遠鏡の計画を本格的に練りはじめた。

なぜハワイか

次世代の大型望遠鏡の建設に最適な場所は、国内に限らず、世界規模で探すことになった。望ましい場所の条件は、(1)暗い夜空、(2)高い晴天率、(3)良好なシーリング(星像がシャープに見えること、後半参照)、(4)乾燥し降水量の少ないとこと、(5)道路、電気・水道・通信の確保の容易さ、(6)政情・治安のよさ、などである。国内の候補地は、上の(1)から(3)の条件で、海外の候補地に太刀打ちできない。現在、世界的にみて大型望遠鏡が集中しているところとして、ハワイ島マウナケア山頂(海拔4200m)、カナリー諸島ラパルマ島山頂(海拔2400m)、チリのアンデス高原ラシヤ山頂(海拔2400m)が有名である。

すばる望遠鏡の建設候補地については、比較的早い時期にマウナケア山頂に絞り込み、山頂を管理するハワイ大学との交渉のうえ、基本的了承が得られた。ちなみに、ハワイ島はホノルルのあるオアフ島から飛行機で40分の位置にあり、人口密度も低く、山頂へは町灯りはほとんど届かない。雲の上にそびえる山頂では年間平均65%の観測

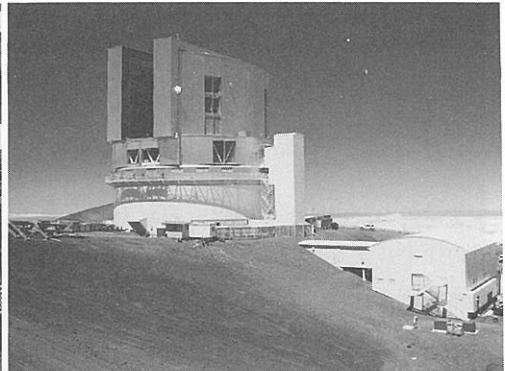
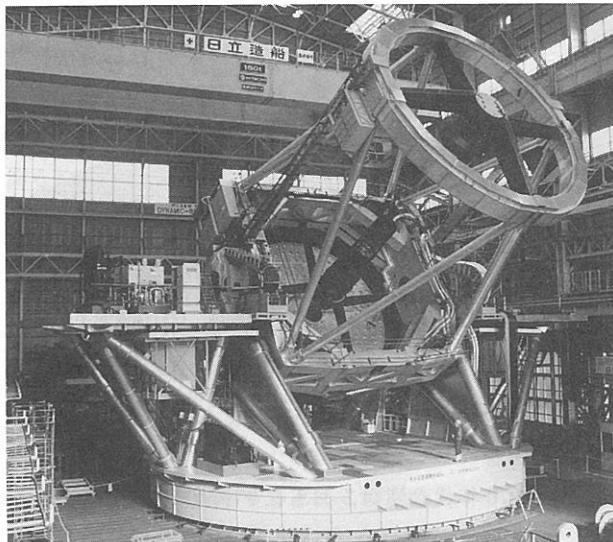


図2 国内工場で組み立て試験中のすばる望遠鏡(左)と、マウナケア山頂に完成したすばる望遠鏡ドーム(上)。現在はすでにドーム内にすばる望遠鏡が据えつけられている。

可能夜があり、その大半が雲一つない晴天夜である。マウナケア最大の自慢はそのシーリングのよさであろう。マウナケア山は絶海の孤立峰であり、風を乱す原因となる高い山が周囲にないため、年平均7m/秒の比較的強い風が吹いているが、その風には乱れがない。このためシャープで安定した星像が得られる。“星がきれいに瞬く”というが、実は天文学者は星が瞬くのを嫌うのである。

軽量鏡と能動光学

望遠鏡用のガラスは、温度が数°C程度変化しても歪まないものでなければならない。そのため熱膨張率が1°Cあたり1億分の1以下の特殊な超低膨張ガラスを使う。大型望遠鏡の建設予算は、ごく大ざっぱには主鏡の重さに比例する。主鏡が重いとそれに応じて、望遠鏡の構造やその土台までが大がかりになるからである。数字を桁数でしか考えないといわれる天文学者だが、予算規模は現実的な範囲に収めねば話にならない。そこで結局、ガラスの厚さを従来の常識の6分の1以下にまで薄くして軽量化することにした。しかし、直径8.3m厚さ20cmのガラスは、それでも24トンもの重量となる。天体を追尾すると鏡の姿勢が変わるために自重による鏡面の変形量が変化する。そこで、鏡を支える力をうまく調節して変形量を

光の波長の数%以下に抑えるよう、鏡面の形状を制御することにした。適度に薄くすることによって、経費削減だけでなく、制御もしやすくなる。これまでの望遠鏡では主鏡はたわまないように厚めにし、できあがった鏡には触らないというのが常識であった。すばる望遠鏡はこの常識を破り主鏡を薄くして、コンピュータ制御でたわみを常に取り除くことにした。この新しい方式を能動光学方式と名づけた。

能動光学方式の実現のためには、誤差1万分の1以下の超高精度力センサーの開発や、鏡面測定のための特殊な光学装置の開発が必要であった。これらの課題もクリアして、1988年には能動光学方式の実証実験に成功し、計画推進に弾みがついた。

直径8mのガラスを作り、研磨した実績のある会社は、当時世界中どこにもなかった。ガラスマーカーとの製作工程の綿密な検討を重ねて、1994年にはすばる望遠鏡の主鏡用の直径8.3m超低膨張ガラス材が完成した。完成したガラス材は光学研磨会社に運ばれ、鏡面の研磨が1997年現在、最終段階に向けて進行中である。8mのガラス表面を光の波長の20分の1の精度で磨くということは、単純にスケールアップすると直径80kmの土地を0.3mmの精度で地ならしするようなものである。高精度の設備と長年の経験をも

った技術者が、根気よく作業を続けて、はじめて完成できるものである。

よりシャープな結像をめざす補償光学

望遠鏡の理論的解像力は、観測波長と望遠鏡口径の比で決まり、その値は、回折限界と呼ばれている。例えば、波長 0.5 ミクロンの可視光を観測するとき、有効口径 8.2 m のすばる望遠鏡では、回折限界の星像は 0.03 秒角となる。能動光学方式の採用によって、すばる望遠鏡はその姿勢や温度が変化してもいつも光学的にチューンアップされた望遠鏡となる。だが、地上に設置する望遠鏡は、ゆらぐ大気越しに観測をおこなうという宿命を負っている。ゆらぐ大気には、わずかながら温度分布のムラが生じる。温度ムラは、屈折率のムラの原因となり大気を通過する光の波面を乱す。そのため、星の像が拡がり、ぼけてしまう。この拡がりの大きさを天文学者はシーアイングと呼んでいるのである。気象条件によるが、シーアイングは、可視光の場合、ふつう 1 秒角程度、マウナケアで条件の良い時でも 0.3 秒角程度である。

つまり、地上の通常の大型望遠鏡は、その理論限界の解像力を達成できないでいるわけである。

能動光学システムをより小型化して応答を速くすることによって、それまでの望遠鏡では対処が不可能であった、大気のゆらぎによる観察画像の劣化に対してもある程度の対応ができる具体的な道が拓けてきた。この道のりのなかで最初に開発したのは、イメージスタビライザーと呼ぶ装置であり、大気のゆらぎのため焦点面上で動きまわる天体の像を止めてしまおうというものであった。大気のゆらぎは速い変動成分をもつたため、毎秒 1000 回以上の修正をかける必要があり、団体の大きい主鏡の能動光学システムでは対応できない。だが、望遠鏡の焦点面近くに小型の可変形鏡を挿入し、高速に駆動して波面補正をすることによって、大気乱流の影響を打ち消すことができる。この技術を補償光学と呼んでいる。

補償光学のアイデアは、1953 年に天文学の研究論文のなかではじめて提案されたが、その後

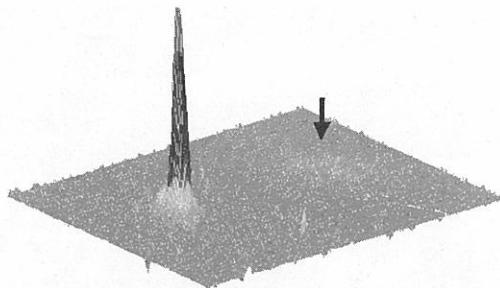


図 3 補償光学による像改善の実例。(右)補償光学系を駆動していないときは、星の像が拡がってピークがほとんどみえない。手前のピークはノイズ。(左)補償光学系を駆動させると、光が中心に集中し輝度もあがり、像がシャープになる。

1970 年代からは、おもにアメリカ合衆国の防衛研究の一環として秘密裏に開発が進められてきた。コンピュータ技術の成熟とともに、防衛研究とはまったく独立に 1990 年ごろ観測天文学の分野で完成度の高い補償光学システムが開発された。この時期がちょうど米ソ緊張緩和の時期とも一致したこともあるって、防衛面での補償光学研究の機密扱いも解除され、補償光学研究は天文学や応用光学で一躍脚光をあびる研究分野となった。

比較的実現が容易な近赤外線用の補償光学システムは、世界的にみても、すでにいくつかの天文台で実用レベルの装置が稼働しあげている。国立天文台でも、高見英樹助手を中心とした開発グループが近赤外線用プロトタイプ装置を完成させ、星像をよりシャープにできることを実証した(図 3)。すばる望遠鏡には、この装置の改良版を使う予定である。

補償光学は、天文学以外へも応用が効く技術であり、レーザー加工、レーザー核融合、ウラン濃縮、光通信、医療・診断、レーザー手術などさまざまな分野での実用化の研究が進められている。補償光学を組み込んだゴーグルが開発され、すべての人の視力が 2.0 以上となる時代がやがてくるかもしれない。

レーザーガイド星生成計画

可視光で動作する補償光学系が完成すれば、現在 0.3 秒角をめざしているすばる望遠鏡の可視光

での解像力は、さらに約10倍以上に向上する。解像力0.03秒角はハッブル宇宙望遠鏡の解像力の約3倍となる。補償光学システムを実際に働かせるためには、観測したい方向の大気のゆらぎを測らねばならない。それには十分に明るいガイド星が必要だが、任意の方向に都合よく明るい星があるわけではない。そこで補償光学の実用化の鍵を握るとみなされているのがレーザーガイド星生成計画である。高度90kmの大気中には、流星起源とされるナトリウム原子密度の濃い層があることが知られている。ナトリウム原子を励起する波長589nmの光で発振するレーザービームを、地上からこの層に照射すると、この層のナトリウム原子が励起され、波長589nmのオレンジ色の光を発する人工の“星”ができる(図4)。実際に観測したい天体のすぐ近くの方向に、このようなレーザーガイド星を作つてやれば、高度90kmから下のゆらぎの大きい大気層でのゆらぎのようすを測る光源として利用できるというわけである。

さまざまな工夫——油に浮いた望遠鏡、自動ロボットシステム

すばる望遠鏡ではその視力を高めるため、光学系をインテリジェントなものにしたが、高精度な天体観測を効率よく行なうことができるようそのほかにもさまざまな工夫がなされている。重さ500トンの望遠鏡は、きわめて精密に研磨され、注意深く水平に敷かれたレールの上を、厚さ数十ミクロンの油膜を介して浮いた状態で駆動される。摩擦がほとんどないので、これだけの重さの望遠鏡を手で押して動かすことができるほどである。

望遠鏡には主焦点、カセグレン焦点、二つのナスミス焦点があり、焦点ごとに専用の補正レンズか副鏡を装着して観測する。また、波長0.3ミクロンの紫外線から20ミクロンの中間赤外線までの観測目的に応じた撮像装置や分光器などユニークな観測装置が7台製作されている。観測装置はどれも重さが1トン以上となる。山頂の厳しい環境下の作業の危険回避と観測効率の向上を計るた



図4 レーザーガイド星生成実験。アメリカのStarfire Optical Rangeでの実験のようす。左側の太いビームはYAGレーザー、右側の細いビームはナトリウムレーザー。大気中のほこりや分子による散乱のため途中のビームがみえている。(Roger Ressmeyer/© Corbis)

め、装置交換は専用の自動ロボットでおこなう。すばる望遠鏡はすべての機能が計算機で制御される、まさにハイテクシステムである。

観測装置の性能を左右するのが光検出器である。すばる望遠鏡の観測装置には量子効率が80%を越す800万画素の大型CCD素子や、HgCdTeやInSbなどの複合半導体を用いた高感度赤外線撮像素子を開発し搭載する。観測装置内の光の損失を最小限に抑えるため100層を越す多層膜による高反射率鏡などの先端的技術開発や、口径8mの大型鏡の洗浄・蒸着装置の製作、大気色分散補償装置や焦点部の観測支援装置類、経緯台式望遠鏡に必要な像回転補償装置などについても、前例のないさまざまな創意工夫がなされている。

望遠鏡・ドーム・観測装置の構成部品数、制御システムのプログラム行数、計画を支えた人々の数、どれをとっても膨大な数である。巨大システムはなかなか当初の構想どおりには動かないことがある。だが、すばる望遠鏡は1998年秋には試験観測を開始する予定で、現在ラストスパートにかかるところとしている。すばる望遠鏡による新発見が続々と本誌に報告される日がもうすぐくることを期待している。(Masanori IYE 国立天文台)