

ファーストライトを迎えた 8 メートルすばる望遠鏡

大坪 政司*・家 正 則**

1. すばる望遠鏡計画の概要

1.1 望遠鏡大型化の歴史

天体望遠鏡の歴史は 1609 年にガリレオ・ガリレイが自作した望遠鏡で夜空を眺めたことから始まった。対物凸レンズと接眼凹レンズからなり正立虚像を見るガリレオ式屈折望遠鏡から、接眼レンズも凸レンズにして倒立実像を見るケプラー式屈折望遠鏡の発明、フラウンホーファーの色消しレンズの発明などを経て、1901 年完成のヤーキス天文台の 101 cm 屈折望遠鏡が頂点となった。だが、屈折望遠鏡では色収差の問題の根本的解決ができない。ニュートンの開発した反射望遠鏡がガラス研磨技術と反射面形成技術の成熟によりやがて実用化され、20 世紀は反射望遠鏡の時代となった。

1917 年に完成したウィルソン山の 100 インチ望遠鏡を駆使したエドウィン・ハッブルによる膨張宇宙の発見に勢いを得て、1948 年にはパロマー山に口径 5 m の巨大望遠鏡が完成した。その後、欧米の天文台は、新しい望遠鏡の建設場所をより観測条件のよい海外適地に求め、1960~70 年代には口径 4 m クラスの望遠鏡が競って建設された。20 世紀後半は口径の拡張こそ一旦滞ったが、レーザー干渉計の実用化などにより鏡面の質は向上し、可視光検出器が乳剤写真から半導体 CCD へ移行し、赤外線画像検出器の実用化もあって、観測天文学が大いに発展した。

1.2 わが国の望遠鏡の歴史

東京大学東京天文台長萩原雄祐らの尽力で、岡山天体物理観測所（現国立天文台岡山天体物理観測所）に当時世界第 6 位の口径を誇る 188 cm 望遠鏡が完成したのは今から

39 年前、1960 年のことであった。60~70 年代にはこの望遠鏡を用いて、炭素星の分類、X 線星の同定、A 型特異星の研究などが行われた。だが、高度経済成長とともに観測所の夜空が急速に明るくなり、銀河などの微光天体の観測は困難となった。空の暗い木曾に広視野撮像のできる 105 cm シュミット望遠鏡を備えた東京大学東京天文台木曾観測所が 1974 年に完成し、銀河の撮像観測などが進められた。すでにこの当時から次世代の大型望遠鏡を望む声上がり始めていたが、東京天文台は光学と並ぶ地上天文学の重要分野である電波天文学の地歩を固めるため、45 m 電波望遠鏡と 5 素子 10 m 電波干渉計からなる野辺山宇宙電波観測所を最優先に進めた。電波望遠鏡の建設に目処が立った 1980 年代に入ると次期大型光学望遠鏡の具体構想の検討が始まった。国内に 3 m 級望遠鏡をまず建設するか、一挙に海外適地に大型望遠鏡を建設するかについて大議論の末、海外大口径計画推進の方針が決まったのが 1983 年である。

1984 年夏から、大型光学赤外線望遠鏡技術検討会を組織し、大学や研究機関およびメーカーの技術者を招いて検討を重ね、その細部が具体化された¹⁾。後述する能動光学の実証実験が 1989 年に成功し²⁾、7.5 m JNLT (Japan National Large Telescope) プロジェクトとしてその概要がまとまった。調査費がつき本予算がつくまでの間に欧州南天文台が 8 m 望遠鏡建設を決めたこともあり、JNLT は口径を 8.2 m にグレードアップしてスタートすることにした³⁾。その実現のためには下準備を含めると 15 年の歳月がかかったが、望遠鏡は「すばる望遠鏡」と命名され、建設が進み⁴⁾、1999 年 1 月にファーストライトを迎えた。

1.3 すばる望遠鏡計画の概要

すばる望遠鏡が設置されたのは、米国ハワイ州ハワイ島のマウナケア山国際観測所である。マウナケア山山頂は世

*国立天文台ハワイ観測所 (650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA)

**国立天文台光学赤外線天文学・観測システム研究系 (〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1)

E-mail: iye@optik.mtk.nao.ac.jp

界トップといわれる観測適地である。街から離れていて光害がなく、晴天率が高く、大気の色度が安定しているので星が瞬かずにシャープに見える。星像の大きさを天文学ではシーイングサイズ（後述）と呼ぶ。気象状況によるが、マウナケアではシーイングサイズは平均で0.6秒角程度であり、岡山や木曾の天文台での平均値の約1/4となる。赤外線での観測の妨げとなる水蒸気も少ない。このように天体観測にはうってつけの場所なのである。山頂の貴重な自然を保護するため、今世紀中には合計13台までの望遠鏡の建設が認められているが、現在建設中のものを含めるとすでに満席となった。

山頂は標高4200m、酸素が地上の60%しかないため高山病の危険性がある。病気といえなくても頭痛が続くのは当たり前、階段を急ぎ足で登ろうものならば息苦しくなる。山頂へは四輪駆動車でなければ上がることが困難である。冬期は雪が降ることもあり、マウナケアはハワイ語で「白い山」という意味だという。一方、緯度が低く太平洋という大きな熱浴の中にあるため、標高の割には気温変化が小さい。夏の最高気温が10°C程度、冬期の最低気温が-5°C程度で、夜間の平均気温は一年中0°C前後である。

すばる望遠鏡のドームは、直径40mの円筒形のコンクリート製下部構造の上に、望遠鏡と同期して回転する鉄骨構造の楕円筒形上部ドーム構造が載っている(図1)。古典的な半球形と異なる形を採用したのは、地表付近の接地境界層の乱れた空気を望遠鏡の前に巻き上げないようにするためである。下層部には、望遠鏡基礎ピアの周辺に8.2m主鏡の蒸着装置や洗浄装置、鏡を吊り上げる装置、運搬台車などが設置されているが、どれも大きな治具であり、直径40mのドーム下部空間も手狭なくらいである。

望遠鏡本体の架台は、建物の基礎とは独立なコンクリート製の基礎ピア上に、精密に設定した円形レールの上を回転走行する。500tの望遠鏡が静圧軸受けによる油圧で数十μmほど浮上するので、ダイレクトドライブモーターにより、摩擦なく滑るように動く(図2)。

図3に望遠鏡本体の概略構造を示す。望遠鏡筒は経緯台方式という、垂直な方位軸まわりの回転と、水平な高度軸に対する回転により、計算機制御で任意の方向に向けることができる。主鏡と副鏡等の補助光学系を組み合わせることにより、4か所に焦点を結ぶことができ、そのそれぞれに観測装置を取り付けることができる設計となっている。望遠鏡の顔である主鏡は、有効径8.2m、焦点距離15mで、264点でアクチュエーターによって支持する能動光学方式(後述)を採用することにより軽量化している。すばる望遠鏡に用いられている光学技術はきわめて多岐にわた

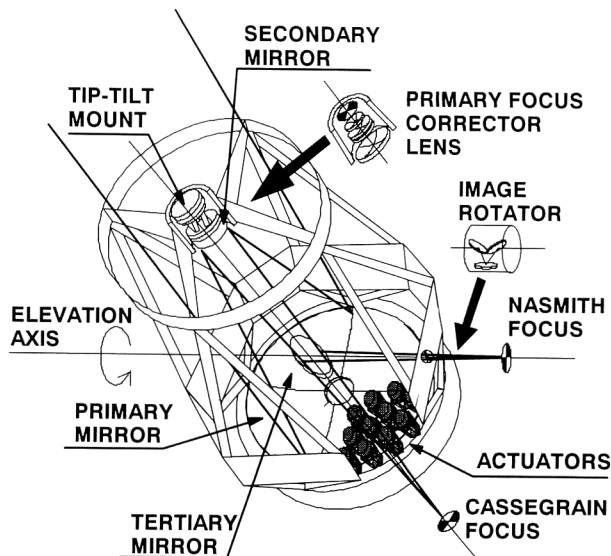


図3 望遠鏡構造。

るが、以下では主鏡・副鏡の製作、能動光学技術、観測装置等の3つに絞って解説する。

2. 主鏡・副鏡等の製作

2.1 主鏡の製作

主鏡用ガラス(鏡材)は米国ニューヨーク州にあるコーニング社カントン工場で製作された。主鏡は熱膨張率が1°Cあたり 10^{-8} 以下の超膨張率ガラスULEで製作することにした。品質の良いULE鏡材は口径1.5m程度のものしか作れないため、44枚の鏡材を順次製作し、六角形に切って、大型炉で加熱し融着して、1994年に直径8.3m厚さ30cmの世界最大のULE鏡材が完成した。融着後、最終形状に近づけるため、凸型に並べた煉瓦の上にガラスを置き、再度加熱してほぼメニスカス状の形状とした。

主鏡の研磨はペンシルバニア州のコントラベス・ブラッシャー・システムズ(CBS)社で行われた。この会社は100年もの歴史をもつ光学メーカーであり、口径3.68mの望遠鏡などの製作経験をもつ。すばるの主鏡の研磨は、本社のあるピッツバーグから80kmほど離れたワンパン工場で行われた。この工場は、石灰岩の採掘跡を利用した地下にあるため、年間を通して気温の変化が少なく、鏡面の精密な測定に有利である。

主鏡は裏返しの状態で工場に到着。回転テーブルの上に乗せた鏡材を高速回転する研削ヘッドで削り込む加工が始まった。裏面の研磨、アクチュエーター取り付け用の穴の加工を施した後に反転した。研削工程は、表面の凸凹が30μm程度になるまで繰り返され、その後研磨工程に入った。研磨工程では、3系統、264個の油圧パッドで支えら

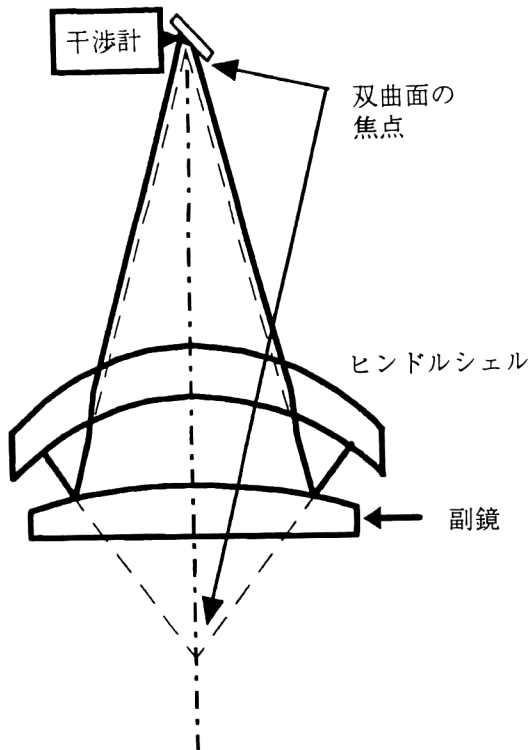


図6 ヒンドルシエル計測法の原理.

れた主鏡を回転テーブルの上に乗せ、毎分最大6回転させる。鏡面上に研磨材を含んだ液を撒き、ピッチを貼りつけた研磨ラップと呼ばれる板を自転させながら鏡面に押しつけて、研磨を行う。研磨ラップは門型レールに沿って半径方向に動き、鏡面が回転することで全面をカバーする。研磨量は研磨材の粗さ、研磨圧、走行時間などによるので、磨き過ぎないように、確かめながら研磨を進める(図4)。ラップは最大で3mのものから、最終段階では15cmのものまでさまざまな大きさのを使い、状況次第でピッチだけでなく、真鍮やガラス、絨毯を貼りつけて研磨した。主鏡鏡材は直径8.300mであるが、鏡面とするのは直径8.260mの部分であり、実際に観測に用いる有効径は8.200mである。

2.2 鏡面の干渉計測

主鏡は口径8.2m、曲率半径30m、非球面定数 -1.00835 の回転双曲面である。ここでいう非球面定数 b は次式で与えられる鏡面形状を示すパラメーターである。

$$z = \frac{r^2}{R(1 + \sqrt{1 - (b+1)r^2/R^2})}$$

z は鏡面の高さ、 r は中心からの距離、 R は鏡の半径である。この非球面係数 b の値が0で球面、0から -1 の間は楕円、 -1 で放物面、 -1 以下だと双曲面である。主鏡は $F1.83$ という明るい鏡のため、外周部分は中心より約30cmも高い。

従来のカセグレン式望遠鏡では、主鏡を放物面、副鏡を双曲面としていたが、すばるの光学系は、カセグレン焦点でリッチー・クレチアン光学系となるように設計されている。この光学系では、主鏡の非球面定数と副鏡の非球面定数を調整することにより、球面収差とコマ収差を打ち消している。カセグレン焦点、ナスミス焦点で最大の収差は像面湾曲で、その曲率半径は -2409 mmとなる。

ワンパン工場では主鏡の真上、30mの高さのプラットホーム上に干渉計を設置し、主鏡の形状測定を行いながら研磨を進めた。鏡干渉計測には、研磨初期で形状残差がまだ大きい間は波長 $10\mu\text{m}$ の CO_2 レーザー光を用いた赤外干渉計を用い、後半の高精度な測定には波長 638nm のHeNeレーザー光を用いた同時位相シフト方式の可視干渉計(PSPI)を用いた。非球面量が大きいため、主鏡の中心と外端とでは、曲率半径が30cm弱も異なる。これを補正するため、3枚の球面鏡を組み合わせたヌルレンズをつくって干渉計測を実現した。

干渉測定でもっとも障害になるのが、振動や空気のゆらぎである。干渉縞を見ていると、1秒以下の速度で干渉縞の位相や形が変化する。PSPIはCCDカメラを4つ内蔵しており、4位相の干渉縞を高速に取得し、さらに自動的に平均する仕組みをもっている。すばるの主鏡の計測時は望遠鏡の周りに10台以上のファンを設置し、常に空気をかき混ぜながら測定した。もし光路中に空気の温度の勾配があり、測定している間に解消されないと、それが形状として残ってしまうからである。

非球面研磨開始後は、1997年末に平方根自乗平均誤差(rms)で 1750nm あった形状誤差が対数的に減り続け、1998年7月に、 12nm に達した時点で終了した。このときの測定は、鏡をターンテーブルで回して8方向の向きでそれぞれ200回の干渉計測を行い、その結果を平均した。これは測定光学系に残るわずかな収差のうちの非対称成分をキャンセルさせるためである。

すばる望遠鏡の主鏡が世界最大で最高の面精度に仕上がったことは、研磨台から主鏡能動支持機構に載せかえて行った8月の確認測定で裏付けられた(図5)。研磨中の主鏡の形状は、rms値以外に構造関数とencircled energyを指標として評価を行った。構造関数とは、鏡面上で一定距離離れた2点の高さの差の自乗平均で定義される量であり、すばる望遠鏡主鏡では最終的には、80, 320, 1280, 5120mmの距離に対して、18.5, 28.2, 31.6, 34.8nmの値となった。これらの数値は光の波長に対して1桁以上小さい値であ

り、あらゆる空間スケールで鏡が滑らかに磨かれていることを示している。Encircled energy は、主鏡で集められた光が星像中心からの一定半径内に含まれる割合を示す指標であり、すばる主鏡では直径 0.1 秒角の円内に 89% の光が集まるといった結果になった。鏡面が理想的に磨かれた場合でも回折現象により 94.6% 以上を集めることはできないので、十分に満足できる結果である。

2.3 凸面副鏡の計測法

副鏡は 3 次元測定器で測定しながら粗研磨を行った後、主鏡と同様に干渉計で測定しながら精研磨を進めた。望遠鏡の副鏡は大抵は双曲凸面鏡である。小さな凸非球面鏡であれば、非球面レンズや複数のレンズを組み合わせたヌルレンズか、コンピューターホログラム (CGH) を用いれば干渉計測が可能である⁹⁾。だが、すばるの副鏡は口径が 1.3~1.6 m もあるため、そのような手段は使えない。そのためヒンドルシェル法という方法で測定した (図 6)。

ヒンドルシェルは、両面の曲率半径がほぼ等しい球面メニスカスレンズで、凸面副鏡の上に覆い被せるように配置して用いる。この測定法の原理は次のとおりである。双曲凸面副鏡の外焦点位置に置いた干渉計から出た光は、ヒンドルシェルを通過して副鏡の鏡面で反射し、球面波として広がるが、ヒンドルシェルの凹面側表面で再反射した一部の光は、同じ経路を通り干渉計に戻る。ヒンドルシェル法は一見複雑に見えるが、実はカセグレン望遠鏡の光学系を反転して光を往復させたものという見方ができる。ヒンドルシェルの凸面の曲率は凹面と合わせて球面収差がなくなる曲率に設計され、副鏡とヒンドルシェルの間の距離を調整することで、若干の非球面定数の調整が可能である。この測定法では、ヒンドルシェルを別の球面鏡と組み合わせて測定することで、測定系自体に起因する波面誤差を較正することが可能である。

3. 能動光学と補償光学

3.1 能動光学主鏡

すばる望遠鏡のガラス主鏡は厚さが直径の 40 分の 1 しかない。薄くすることで 23 t にまで軽量化し、全体のコストと製作工期を圧縮する狙いが一方にあったが、もう一方では適度な薄さにすることで鏡を柔な構造にし、コンピューター制御で常時理想的な鏡面を維持しようという積極的な動機があった。鏡の面形状を制御するという発想の望遠鏡を能動光学方式と呼ぶ。

主鏡の形状はシャック・ハルトマン型鏡面センサーで比

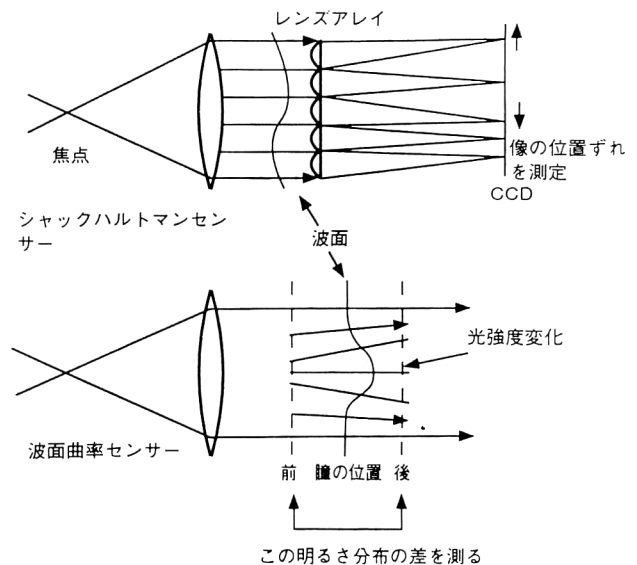


図7 シャック・ハルトマン型波面センサーと波面曲率センサーの原理。

較的明るい恒星を用いて測定する。シャック・ハルトマン・センサーでは、内蔵したマイクロレンズアレイにより、恒星が基盤の目のように並んだ像を結ぶ。主鏡形状に誤差があるとこの基盤の目が歪む(図7)。この歪みを計測すると、主鏡の形状を求めることができる。主鏡の形状誤差がわかれば、主鏡を支えている 261 個のアクチュエーターの支持力分布を調整して、直すことができる。これが能動光学の原理である。アクチュエーターは、モーターを回転させるとボールスクリューでバネを押し縮めて力を発生する方式である。力がかかると音叉型振動子の振動数が変化するのを測定することで、1 万分の 1 の精度の支持力測定を達成した。主鏡が傾けられた状態でも鏡の重心で支えるため、アクチュエーターの頭は主鏡に埋め込んだ。鏡の裏面と側面で支える場合よりも鏡全体の撓みは少ない。

3.2 補償光学系

望遠鏡による天体観測の分解能を決めているのは、大気屈折率分布による光の波面の乱れである。天文業界では、大気ゆらぎによる像の広がり大きさをシーイングと呼ぶ。例えば東京ではシーイングサイズは可視域で 3 秒角 (15 ミリラジアン) にもなる。これは口径 3 cm の回折限界に相当する。つまり東京では、口径 3 cm の望遠鏡と口径 1 m の望遠鏡は集光力には大きな違いがあっても、空間分解能としては大差がないということになる。

1960 年代からシーイングの良いサイト探しが行われるようになり、1970 年代からは欧米の新しい望遠鏡は自国領土に拘らず、海外の良いサイトに建設されるようになって

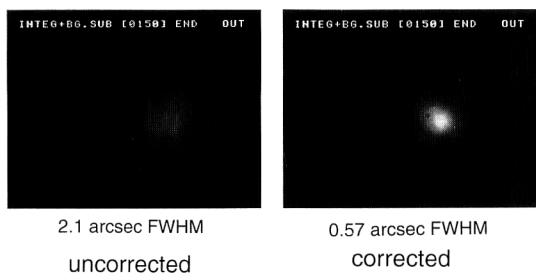


図8 プロトタイプ補償光学装置による像改善事例。

た。その代表が、南米チリの高原に建設された欧州南天天文台や米国のセロトロロ天文台、大西洋のカナリー諸島に建設されたラパルマ天文台やハワイ島のマウナケア国際天文台である。マウナケアやラパルマは大洋の孤島の単独峰であり、これらの観測地ではシーイングは平均で1秒角以下であり、条件の良いときには0.3秒角程度にまでなる。しかも晴天率が高いため、世界の観測所が集中するようになった。

シーイングの良い場所を選ぶだけでなく、シーイングを積極的に制御しようというのが補償光学系である。大気ゆらぎによる像の劣化を実時間で測定し、反射鏡面を高速変形させて補正するというアイデアが出されたのは1953年のことである⁹⁾。当時の技術ではとても実現できるものではなかったが、防衛関係で研究が秘密裏に進められてきた。1980年代に入りコンピューター、制御技術、受光素子が進歩したこと、米ソの緊張緩和に伴い防衛技術の公開が始まったこともあり、1990年代に入ると天文学でも開発研究の取り組みが進んだ。現在の成功につながった最大の要因は、補償光学系を大口径望遠鏡に取り付け、可視域よりも簡単な近赤外域での観測に的を絞るという実用的なスタンスでの取り組みが始まったことにある。補償光学系では、望遠鏡に入射する波面を波長以下の精度で測り、補正する必要がある。波面を測る光源としては恒星を用いる必要があり、観測のすぐ近くに明るい恒星がなければならない。近赤外域では、少ない素子数、遅い時定数で補正しても回折限界での観測が可能であり、かつ、要求される波面測定精度も緩い。暗い星で補正が可能であり、観測に有意義なレベルでの補正ができる確率が、可視域で補償光学を用いる場合と比較して、格段に高いのである。

多くの研究者は補償光学系に疑問をもっていたが、この2~3年で実用の域に達したといえる。その牽引役となった

のはハワイ大学の Francois Roddier らのグループで、波面曲率センサー⁷⁾を用いた少素子の補償光学系で科学的に実用的なシステムを完成させた。補償光学系を天文学に用いる試みは1990年ごろから始まっていたが、ジャック・ハルトマン・センサーを用いたシステムが多く、受光素子として CCD を用いていた。また、そのほとんどのシステムは素子数が多かったため、CCD の読み出し雑音のために暗い星を参照星として使えなかった。それに対して Roddier らは対象を近赤外観測に絞り、素子数を減らしただけでなく、波面曲率センサー方式を使うことで受光素子として光子計数方式のアバランシ・フォト・ダイオード (APD) を用いた。光子計数方式の APD は、感度は CCD と大差ないが、高速な読み出しを行っても読み出し雑音がないため、暗い星を高速に測定する必要がある補償光学系に適している。

すばる望遠鏡では1999年夏に近赤外用補償光学系をカセグレン焦点に装備する。この補償光学系は36素子の曲率センサーと36素子のバイモルフ可変鏡をもち、波長1 μm 以上で回折限界の結像を実現する見込みである。図8にプロトタイプ補償光学系による実証実験の結果を示す。近赤外分光撮像装置とコロナグラフ撮像装置はこの補償光学系を利用する予定である⁹⁾。

4. 各焦点と観測装置

すばる望遠鏡の光学系⁹⁾と各焦点に装備される観測装置について概説する(表1)。

4.1 主焦点

すばる望遠鏡の主鏡だけでは収差が大きく実用にならないが、複数のレンズからなる主焦点補正光学系を付けると、30分角にわたる広い視野をカバーできる観測が可能となる。この主焦点には大型 CCD 素子10枚を近接配置し、合計8000万画素の大型カメラが装備される。主焦点補正光学系には、大気屈折率により低高度の天体が色づく現象を補正する、すばる望遠鏡独自の設計の大気分散補正系が組み込まれている。経緯台方式に伴う像の回転は、観測装置を回転して追いかける。主焦点のファーストライトは1999年後半の予定である。

4.2 カセグレン焦点

主焦点の手前に双曲面の副鏡を設置して光を折り返し、主鏡中央部の穴を通して主鏡の裏側に結ぶ焦点を、カセグレン焦点という。大望遠鏡では最も用いられることの多い焦点であり、すばる望遠鏡では合成焦点距離100m、焦点スケール2秒角/mmで、6分角の視野をカバーする。カセ

表1 すばる望遠鏡の5焦点.

	主焦点	光学カセグレン	赤外カセグレン	光学ナスミス	赤外ナスミス
主鏡曲率半径 [mm]	15000	15000	15000	15000	15000
合成焦点距離 [mm]	15318	100000	100000	104207	110605
視野 (直径)	30 分角	6 分角	6 分角	3.5 分角	3.5 分角
主鏡非球面係数	-1.00835	-1.00835	-1.00835	-1.00614	-1.01755
副鏡曲率半径 [mm]	-	-5524.2967	-5524.2967	-5877.4200	-5524.2967
副鏡非球面係数	-	-1.9173222	-1.9173222	-1.865055	-1.9173222
副鏡サイズ [mm]	-	1330	1265	1400	1265

グレン副鏡はアルミニウム蒸着の可視光用副鏡と金蒸着の赤外用の副鏡を用意した。副鏡を可視、赤外の観測で使い分ける理由は、熱放射である。可視は視野全体で主鏡全体を見渡せるようなサイズにするが、赤外の観測では主鏡の周りは熱の影響で光って見えてしまうので、主鏡の周りが見えないように小さめに作った。

また赤外観測では、夜空からの背景赤外線を精密に除去する必要があり、観測天体とそのそばの夜空を交互に測定して観測天体からの赤外線だけを取り出す手法を使うことがあるので、赤外線副鏡は30秒角の幅でカタカタと精密に首振り運動ができるようにした。

カセグレン焦点には、29等星までの撮像観測と、観測星野に合わせた多穴マスクを焦点面に配置して、100個程度の天体のスペクトルを一度に測定できる可視光用の微光天体分光撮像装置 (FOCAS)、1~5 μm の近赤外線領域での撮像と分光観測ができる近赤外線分光撮像装置 (IRCS)、それに8~13 μm の中間赤外線での撮像と分光観測ができる中間赤外線分光撮像装置 (COMICS) の3つの汎用観測装置に加えて、補償光学系と組み合わせでシャープに絞った恒星の光を隠し、その周辺の微かな伴星や惑星を観測しようというコロナグラフ撮像装置 (CIAO) が用意されている。これらの観測装置は、コンピューター制御の自動交換システムで望遠鏡に装着交換される。カセグレン焦点にも大気分散補正光学系が装備されており、像の回転は装置を回転追尾することで補償する。

4.3 ナスミス焦点

副鏡で折り返した光を高度軸の位置で平面斜鏡で90°曲げて、水平に引き出したのがナスミス焦点である。ナスミス焦点は鏡筒の動きによらず一定の位置に結ぶので、大きな重い観測装置を設置するのに適している。斜鏡の向きを変えると、望遠鏡の左右にナスミス焦点を配置できるので、大型の高分散分光装置と夜光除去分光装置が左右のナスミス焦点に設置される。ナスミス焦点では、経緯台方式に伴う天体像の回転については、平面鏡3枚を組み合わせた像

回転補償装置を用いて補償する。

4.4 観測支援装置

各焦点には、主鏡と副鏡による光学系の結像状況を評価するためのシャック・ハルトマン型鏡面センサーと、望遠鏡の自動追尾のためのオートガイダーが取り付けられている。

長時間の積分を行う望遠鏡での観測にとって、日周運動する天体を追尾する機能は、光学系と同様に重要な要素である。望遠鏡の向きは精密なエンコーダーで読みとり、ガタのない直動モーターでスムーズに駆動する。すばるで得られるシャープな星像に見合った追尾精度として、露出中の追尾誤差を0.1秒角以下に保つことが要求される。露出時間は観測によって大きく異なるが、数分の露出が行われるのが普通であり、高分散分光や狭帯域フィルターを使う撮像では数十分から数時間に及ぶ。

望遠鏡にはオートガイダーが取り付けられている。これは装置の視野外にある明るいガイド星の光を結像するカメラであり、CCD上の星像重心を測定して追尾信号を補正するのに用いる。さらに、大気のゆらぎによる追尾誤差をも克服するため、赤外線副鏡については10 Hzという高速で駆動できる仕組みにして、大気ゆらぎによる星像のふらつきを補正することもできる。

4.5 観測装置

すばる望遠鏡に搭載される共同利用の観測装置は表2に掲げる7台である。観測装置の機能は、観測波長域、波長分解能、観測視野、空間分解能が主要要素となる。波長域は受光素子で決まり、シリコン半導体のCCDが可視(0.35~1 μm)、HgCdTeやInSbなどの複合半導体撮像素子が近赤外(1~5 μm)、SiAsなど撮像素子が中間赤外(5~20 μm)を分担する。

分光は高分散であるほど良いのだが、暗い星や銀河を観測する場合は、ノイズの影響を減らすために低分散にせざるを得ない。プリズムと透過回折光子を一体化し回折光を直進させるグリズムと呼ばれる分散素子や、古典的な反射



図1 すばる望遠鏡ドーム。(宮下暁彦氏撮影)

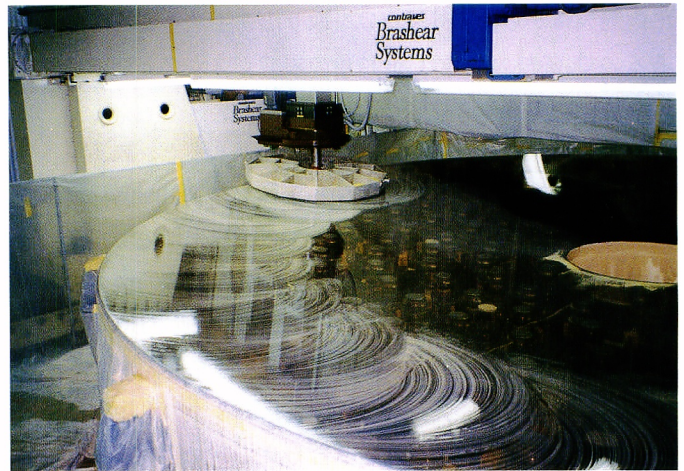


図4 研磨中の主鏡。

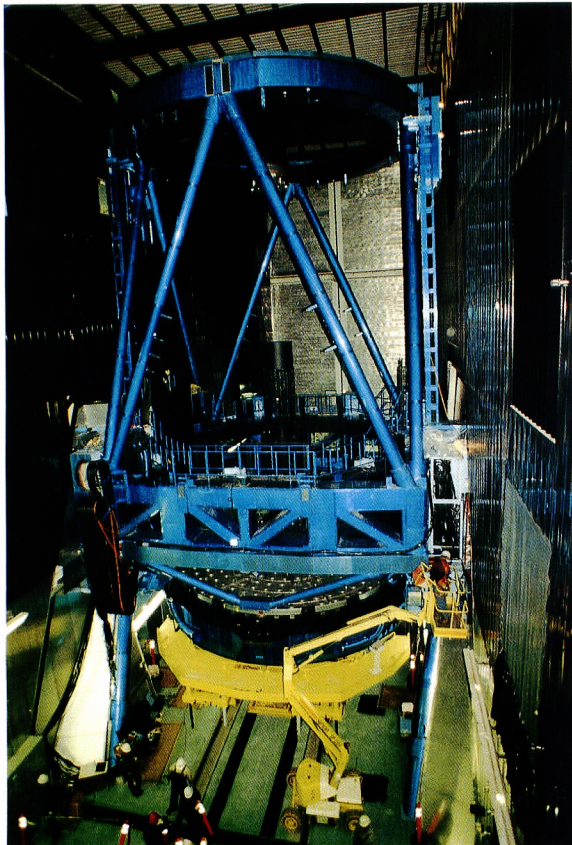


図2 ドーム内にそびえる望遠鏡。(宮下暁彦氏撮影)

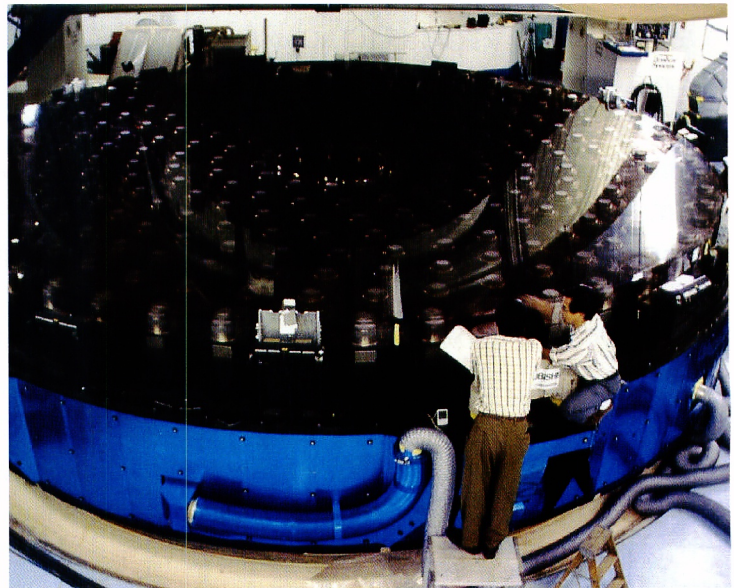


図5 ワンパン工場での主鏡の最終検査。(宮下暁彦氏撮影)



図9 輸送大作戦。(宮下暁彦氏撮影)



図10 主鏡の洗浄風景。(宮下暁彦氏撮影)



図11 近赤外線カメラ CISO によるオリオン大星雲。



図12 距離約50億光年の銀河団 CL0939+47, 可視光 CCD カメラ Suprime-Cam と CISO による画像を合成して作成。

表2 すばる望遠鏡観測装置一覧。

装置名	装置焦点	主な機能	感度波長	検出器 (画素数)
FOCAS	カセグレン	マルチ・長スリット分光, 撮像, 偏光	365~900 nm	CCD (1600万)
HDS	ナスミス	スリット分光	300~1000 nm	CCD (1600万)
Suprime Cam	主焦点	広視野撮像	365~1000 nm	CCD (8000万)
CIAO	カセグレン	コロナグラフ撮像・分光, 偏光	0.9~5.3 μm	InSb (100万)
IRCS	カセグレン	スリット分光, 撮像	1.0~5.3 μm	InSb (200万)
COMICS	カセグレン	長スリット分光, 撮像	8~25 μm	Si:As (47万)
OHS	ナスミス	高感度スリット分光, 撮像	0.9~1.8 μm	HgCdTe (100万)

回折格子が分散素子の主体となっている。

視野は広いものが有利だが、実際には光学系のサイズや収差の制限があるため、観測の目的に応じた視野を採用する。

5. ファーストライト

1998年11月初旬に主鏡はピッツバーグからパナマ運河経由の長旅を終え、山頂に到着した(図9)。早速、主鏡を洗浄して(図10)、大型真空槽でアルミ蒸着が行われた。12月24日のクリスマスの夜から望遠鏡を恒星に向けて、望遠鏡の指向原点の調整、光軸合わせ、主鏡の能動支持の調整、およびさまざまなソフトのチェックが進められた。望遠鏡の制御、観測装置の制御、観測データの取得保管、データ解析など、すばる望遠鏡のためのソフトウェアは膨大なシステムであり、一体何十万行のプログラムになるのか、考えただけでも気が遠くなる。

望遠鏡というと、主鏡や副鏡などの大きな光学部品が重要であることは間違いがないが、現代の望遠鏡による観測は、広範囲な工学技術の上に成り立っている。ドームの建築に関する土木技術、建築技術から始まり、望遠鏡の機械技術、電気技術、材料工学、熱設計、制御技術、計算機システムなど、すばる望遠鏡計画はさまざまな技術の集大成である¹⁰⁾。光学に限っても、能動支持、補償光学系、周辺光学系、洗浄蒸着技術、観測装置内部の光学設計、グリズムなどの光学素子製作技術、さらには光ファイバーを使って焦点上の多数の天体からの光を分光器に導く計画もある。もはや現代の天体望遠鏡に必要とされる観測技術は、古典的な光学技術にとどまらないのである。

1999年1月11日には近赤外撮像カメラで0.3秒角の星像での撮影が成功し、翌1月12日には可視光 CCD カメラで0.4秒角の星像での撮影が成功した。

最後になったが、天体観測のファーストライトを迎えたすばる望遠鏡が撮影した、息をのむような画像をいくつかご紹介しよう。図11は近赤外カメラで撮影したオリオン

大星雲の写真である。波長1.2 μm , 2.2 μm での画像と波長2.12 μm の水素分子輝線での画像をそれぞれ青, 緑, 赤に割り当てて色合成したものである。画面の中で赤色で表される分子輝線の発光フィラメントが、トラペジウムと呼ばれる明るい4つの青い星からかなり離れたところまで広がっている様子が初めて写し出された。近赤外カメラは京都大学のグループが開発した。

図12は距離約50億光年の銀河団 CL0939+47 (アーベル851) をすばる望遠鏡で撮影したもので、CCDカメラの赤色画像と近赤外画像を合成したカラー写真である。この領域はハッブル宇宙望遠鏡でも撮影されている。ハッブル望遠鏡の写真に写っている天体はすべて、露出時間が数分の1のすばる望遠鏡の画像で確認できる。解像力では少し劣るものの、すばる望遠鏡の集光力が実証された画像である。赤外線画像を合わせたこのカラー画像では、ハッブル望遠鏡では目立たなかった赤い銀河が発見された。CCDカメラは国立天文台と東京大学が開発したものである。

まだ微調整に入る前の段階でこのような素晴らしい解像力の観測が実現したことは、計画どおりとはいえ、関係者一同、大変うれしく思っている。だが、今後望遠鏡を最高の状態にもっていくには、まだ1~2年はさまざまな調整が必要であり、7台の共同利用観測装置をこれから2年かけてひとつひとつ立ち上げて行くことになる。

文 献

- 1) 山下泰正, 小平桂一, 家 正則: “超大型天体望遠鏡(JNLT)計画”, 精密工学会誌, **53**, No. 9 (1987) 49-52.
- 2) M. Iye, T. Noguchi, Y. Torii, Y. Mikami, Y. Yamashita, W. Tanaka, M. Tabata and N. Itoh: “Active optics experiments with a 62 cm thin mirror,” Advanced Technology Optical Telescopes IV, Proc. SPIE, **1236** (1990) 929-939.
- 3) 家 正則, 海部宣男, 小平桂一: “8 m 「すばる」望遠鏡計画”, 物理学会誌, **47** (1992) 269-276.
- 4) 家 正則, 関口和寛, 大坪政司, 高見英樹, 山下卓也: “天体望遠鏡と光技術”, 光技術コンタクト, **36**, No. 1 (1998) 5-41.
- 5) M. Otsubo: “Measurement of large plane surface shape by connecting small aperture interferograms,” Opt. Eng., **33**

- (1994) 608-613.
- 6) H. W. Babcock: "The possibility of compensating astronomical seeing," Publ. Astron. Soc. Pac., **65** (1953) 229-236.
 - 7) N. Roddier and F. Roddier: "Curvature sensing and compensation—A computer simulation," Proc. SPIE, **1114** (1989) 92-96.
 - 8) H. Takami, M. Iye, N. Takato, M. Otsubo, T. Kanzawa and K. Nakashima: "SUBARU adaptive optics program,"
Optical Telescopes of Today and Tomorrow, Proc. SPIE, **2781** (1997) 953-961.
 - 9) 家 正則: "8 m 天体望遠鏡 JNLT の光学系", O plus E, **167** (1993) 67-72.
 - 10) 家 正則: "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", 科学, **9** (1997) 644-647.

(1999年2月2日受理)