

すばる望遠鏡と光学技術

題 目
TITLE

Optical Engineering and the Subaru Telescope

氏 名
NAME

家 正則

Masanori Iye

所 属
AFFILIATION

国立天文台
National Astronomical Observatory

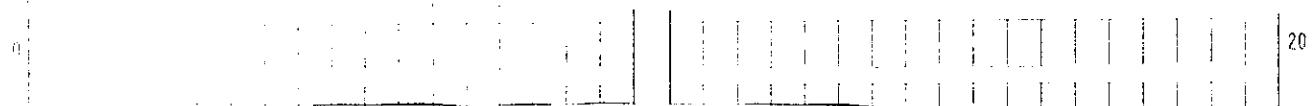
住 所
ADDRESS

181-8588 三鷹市大沢 2-21-1
Osawa 2-21-1, Mitaka Tokyo 181-8588 Japan

あらまし

16 国立天文台が 1991 年度から海拔 4100 m のハワイ島マウナケア山頂に 9 年計画、総予算約 400 億円で建設を進めてきた有効口径 8.2 m の大型光学赤外線望遠鏡すばるが、1999 年 1 月にファーストライトを迎えた。具体構想から 15 年の歳月をかけ、世界の最先端技術を結集して建設したこの望遠鏡は、150 億光年彼方の宇宙の果てまで見通す力も持つ究極の遠隔計測装置である。望遠鏡システムに用いた計測技術とすばる望遠鏡の目指す科学について紹介する。

The 8.2m Subaru Telescope, that has been under construction by the National Astronomical Observatory atop Mauna Kea since the fiscal year 1991 for 40 billion yen, has made the first light observation in January 1999. The telescope incorporates various top expertises available from all over the world and enables sensing radiation from objects 15 billion light years away, almost at the edge of the universe. The scientific objectives and the new technologies developed for the Subaru telescope are introduced.



1. 主鏡の製作

天体望遠鏡の主鏡に用いるのは熱膨張係数の極めて小さい光学ガラスである。1948 年に完成したパロマー山天文台の 5 m 主鏡は、1 度あたりの膨張率 100 万分の 1 程度のパライレックス・ガラスを蜂の巣構造の鋳型に流し込み、中空構造とすることで軽量化を実現した。アリゾナ大学のグループはオハラ社の E 6 ガラスを用いて、この方法で 8 m 級の鏡の製作を目指している。だが、膨張率 100 万分の 1 の鏡の場合、良い結像性能を保つには、実現が困難なレベルの温度制御が必要となる。すばる望遠鏡の主鏡には膨張係数がさらに 2 枝小さいガラス材であるコーニング・ガラス社の超低膨張ガラス (ULE) を採用した。一度に 30 トンにも及ぶ ULE を均質に製作することはできないので、直径 1.5 m 程度の ULE の六角形部分鏡材を 44 個作り、これを 55 個のブロックに整形して、直径 8.3 m の

性がある。問題はこれらの 55 個のブロックをどう並べるのが良いかという問題であった。55 個のブロックの並べ替えは全てが置き換え可能であれば、55 の階乗($= 10^{73}$)とおりある。置き換えにはいくつかの制限があり、実際にはこれより少ないが膨大な数であることには変わりない。これについては、シミュレーテッド・アニーリング法を用いた膨大な計算機シミュレーションが行われ、温度変化による主鏡の形状変化が、後で述べる能動支持機構で直しやすいものとなるように、最適化することとした。この検討の結果、最適化を考えない場合と比べて、熱変形誤差を約 6 分の 1 にすることができることがわかった。

こうしてできあがった鏡材は、光学研磨を請け負ったピツバーグのコントラベス社に運ばれた。実際に鏡を測定しながら研磨を進めるには、鏡の近軸曲率半径に相当する 30 m の高さの空間が必要である。コントラベス社は、石灰岩の採掘坑跡を拡幅して、地下に 30 m の縦穴を用意した。地上に高さ 30 m の塔を建設するに比べると、風による振動や日照による温度変化が無い分、計測には有利である。主鏡の研削・研磨は回転台に乗せた主鏡をゆっくりと回転させ、門型レールを走行する研磨機の先にとりつけられた研磨ヘッドが回転し、主鏡面上をリサージュ図形を描きながら研磨してゆく。もちろん、この工程は計算機制御である。

鏡面の計測は、はじめのうちは接触センサーをヘッドに搭載して、三次元測定を行うが、研磨の進行とともに波長 10 ミクロンの赤外レーザー干渉計による計測、さらに最終的には波長 0.63 ミクロンの可視レーザー干渉計による計測を行った。主鏡の面形状は回転放物面に近い特定の回転双曲面にしあげねばならない。8.2 m の鏡で集めた光の 80 % 以上を焦点面上で 0.1 秒角に相当するスポットに結像させるには、鏡面の平均形状誤差を光の波長の 14 分の 1 以下に抑える必要がある。計測には曲率中心からレーザー光を広げて鏡面に照射し、反射光を曲率中心で受ける。主鏡は球面とはわずかに異なるので、その分を補正するヌルレンズを曲率中心の手前に置き、干渉縞を計測して鏡面形状を求める。このヌルレンズが原器となるので、ヌルレンズ自体に誤差がないことを慎重に吟味した。また、主鏡の曲率半径が設計値とずれると、望遠鏡筒を改修しなければならなくなるので、曲率半径が正しいかどうかも、レーザー測距や校正されたテープを用いて何重にもチェックした。球面からのずれの量もヌルレンズによる計測の他に、ナイフシフト法などを用いて独立にチェックした。こうして、1998 年 7 月に主鏡の研磨が完了し、世界最大かつ平方根自乗平均形状誤差 12 nm という世界最高精度の 8.2 m 鏡が完成した（図 1）。

2. 主鏡能動支持機構

研磨後の主鏡は厚さ 20 cm で 23 トンの重さとなった。天体を追尾するとき望遠鏡の姿勢が変化するため、鏡の支持機構にかかる鏡の自重分布は時々刻々と変化する。直径の 41 分の 1 しかない薄い鏡の自重変形を無くすには、原理的には鏡を水銀などの流体上で浮いている状態に保てばよい。だが、実際には鏡を傾ける必要もあり、扱いにくい水銀での実現は現実的でない。そこで、鏡の形状を常に計測し、鏡を能動的に浮いている状態に制御する能動光学システムを採用することにした。計算機シミュレーションの結果、鏡の支持は 8 つの同心円上にほぼ均等に配置した 264 点で行うこととした。1 点あたりの鏡の荷重は望遠鏡の姿勢により 0 kg から 90 kg まで変化する。これに約 60 kg までの付加補正力を発生できるようにしておき、鏡の形状をフックの弾性変形の法則に則り、力で制御しよう

というシステムである。力制御の精度としては 90kg に対して 1 万分の 1 の 10 g 以下の制御が必要であり、各点の支持力の計測の精度が問題となった。これについては、音叉型水晶発振子の振動数が張力に応じて変化するのを利用して支持力を求める超高精度力センサーが開発され、目標精度を達成した。264 点での支持力分布がわかれば、有限要素法により、計算機シミュレーションにより、その姿勢での期待される支持力分布と比べることにより、支持力誤差分布 f_{ij} ($i=1,264$) を求めることができ、対応して鏡面がどう変形しているかが計算できる。

実際の鏡面の測定には、焦点前に挿入したシャック・ハルトマン型鏡面測定装置を用いて、光学的に鏡面をときどき計測し、力支持の制御ループを校正する。シャック・ハルトマン型鏡面測定装置は、望遠鏡の瞳面に置いたマイクロレンズアレーで主鏡を約 200 個の小部分に分割し、明るい星を撮影すると焦点面上で各小部分からの独立な星像がその数だけできる装置である。大気のゆらぎを平均化するため、約 30 秒間の露出をかけると、鏡が理想的な光学面を達成していれば、200 個の星像が碁盤の目のようにきちんと整列する。星像の並びに乱れがあれば、その向きと変位量から鏡の対応する部分の局所傾斜の誤差ベクトルを求めることができる。

こうして、シャック・ハルトマン鏡面測定装置のデータを解析すると、鏡面形状の誤差分布を 2 次元的に求めることができる。測定した誤差分布は、ガラス主鏡の固有変形モードで展開して、各モードの振幅 a_j を求め、これらの基本変形の線型結合として一意的に表現する。支持力誤差分布と鏡面形状が計測できれば、両者は鏡の構造行列 M_{ij} を通じて、

$$a_j = M_{ij} \cdot f_{ij},$$

で結ばれるはずである。実際に支持点の一つずつに、支持力誤差 $f_{i=1}$ を与えて、鏡の応答変形を計測すれば、構造行列 M_{ij} を求めることができる。構造行列が求まれば、その一般化逆行列 M_{ij}^{-1} を求めておくと、任意の鏡面誤差 $*a_j$ が発生しているときに、これを修正するのに必要となる補正支持力分布 $*f_{ij}$ を次式で算出できる。

$$*f_{ij} = M_{ij}^{-1} *a_j,$$

これが能動光学方式の原理である。

3. 望遠鏡架台

望遠鏡は地球の自転に伴う天体の日周運動を追尾する機能が必要である。水平軸と垂直軸のまわりに駆動する構造が対称で簡単な経緯台方式の採用で、従来の赤道儀方式より架台が軽量化されているとはいえ、可動部の重量は 500 トンにも達する。長いときは 1 時間以上にも及ぶ露出時間の間、正確に追尾を行わないと、光学系で実現したシャープな画像が流れてしまう。すばる望遠鏡の追尾仕様は 10 分間ガイドなしでも、追尾誤差が 0.2 秒角以下という厳しいものとした。このような高い追尾精度を実現するには、摩擦やガタのない方式の採用が不可欠であり、静圧軸受けを採用し、ダイレクトドライブモータで駆動することとした。位置計測には光学読みとり方式のテープエンコーダを使用した。500 トンの可動部は厚さ 50 ミクロンの油膜の上に浮いて、なめらかに走行する。このためには架台の走行するレールの設定精度が重要であり、山頂の厳しい作業環境の中で慎重な計測が繰り返され、全体の平面度 0.3mm に設定された。

追尾誤差は天体を望遠鏡で追尾している間にその方向がどの程度ふらつくかを示す量である。その誤差配分は 0.07 秒角 rms であるが、山頂での調整作業を軽減するため、事前に国内の工場で望遠鏡構造を仮組して調整した結果、角度検出系の誤差として方位角方向で 0.014 秒角、高度軸方向で 0.014 秒角 rms を実現し、またトルク変動誤差も両軸とも 0.025 秒角 rms 以下を実現した。追尾誤差としてはこのほかに望遠鏡にあたる風の外乱による誤差があるが、追尾制御のフィードバックループの調整により、実際の風外乱のパワースペクトルを持つ平均風速 7 m/sec の風圧外乱を入力した場合の追尾誤差は 0.046 秒角という結果が得られている。この追尾制御ループには 20 次程度の次数のモードフィルターが組み込まれている。

指向誤差は望遠鏡を任意の天体に向けたときにどれだけ正しくその方向に向くかを示す量であり、位置の精密に知られている多数の星の位置を実際に望遠鏡で測り、望遠鏡のくせを補正することで 1 秒角の精度を達成している（図 2）。

4. ドーム

マウナケア山頂の厳しい気候条件から望遠鏡を守り、夜間の観測条件を保持するためにドームがある。ドーム形状は、ドーム開口部からの空気の流れが適切になるように円筒形とした。すばる望遠鏡は主鏡周辺の温度差による星像劣化を抑えるために、望遠鏡鏡筒への風の流れを規制する黒塗りの巨大な壁（通称グレートウォール）がドーム内に設置されている。望遠鏡の一部であるナスマス台がグレートウォールからドーム内に張り出した形となっており、望遠鏡駆動に同期したドーム制御を行う。ドーム位置はドーム外周に沿つてバーコードを用いたエンコーダシステムを設置している。駆動精度は 0.1 度である。ドーム可動部の総重量は 2000 トンにも達する（図 3）。

天体観測において地球大気は減光と大気の乱れによる星像の劣化をきたす。星像の劣化は大気そのものに起因する劣化とドームや望遠鏡周辺での劣化がある。大気の安定したマウナケア山頂は天体観測にとって世界で最良の場所の一つである。ドームや望遠鏡周辺での劣化は、その劣化の原因を特定して対処することによって最小化することが可能である。すばる望遠鏡のドームは、気流による影響を極力少なくするよう、水流実験、計算機ミュレーションでドーム形状を決定した。ドームそのものの高さは、望遠鏡基礎部の固有振動数が低くならない範囲で高くして、主鏡が接地境界層による空気揺らぎの影響のある層の上に出るようにした。主鏡表面温度と周辺気温との差により発生する空気揺らぎに起因する星像劣化について、小望遠鏡での試験によって、主鏡表面上に通風することによって改善することが示された。

このため、ドームには、ルーバ、トップスクリーン、ウインドスクリーンがドーム周辺に設置され、ドーム内に吹き込む風の制御を動的に行う。そのための気温、気圧、湿度、風向、風速、及び空気揺らぎセンサー等がドーム内各所に設置されている。星像サイズを小さくするようにドーム内に吹き込む風の制御を行う。

ドーム内気温が周辺気温となじむのには時間が必要なので、日中のドーム内温度は夜間の気温を予測して空調制御する。マウナケア山頂では温度が比較的安定しているので温度予測は統計的に ± 2 度精度で可能である。主鏡の熱時定数は約 10 時間であるので、夜間の星像劣化を防ぐために、日中の主鏡温度は予測される夜間気温から 2 度低めに設定して

温度制御する。

5. 観測装置

望遠鏡で集めて結像した電磁波を検出し記録するのは検出器の役目である。検出器の飛躍的な性能向上が 1980 年代以降の観測天文学を支えてきたと言っても過言ではない。可視光域では写真乾板が、シリコン半導体をベースとした固体撮像素子 C C D にほぼ完全に置き換わった。天体観測の場合、C C D は感度は良いが面積的に小さいのが欠点であったが、最近は 4000×2000 で $60\text{mm} \times 30\text{ mm}$ の大きさを持ち、しかも読み出し回路を一方に向にまとめて、モザイク化が可能な高感度大型 C C D 素子が実用化された。すばる望遠鏡の主焦点カメラはこの大型素子を 10 個並べて 30 分角の視野を覆うものである。赤外線検出器も半導体撮像素子の時代となり、感光波長域に応じて InSb, HgCdTe, GaAs などの半導体素子が実用化され、C C D と同じような画質の撮像が可能になっている。

すばる望遠鏡には 30 分角の広い視野を誇る主焦点、高解像観測ができるカセグレン焦点、大型装置を設置できる 2 つのナスマス焦点の合計 4 つの焦点がある。これらの焦点に装備する合計 7 台の共同利用観測装置の製作が進められている。このうち 3 台は可視光用、3 台は近赤外線用、1 台は中間赤外線用の観測装置であり、どの波長域でも、これらの観測装置により撮像機能と分光観測機能が満たされる。図 4 は宇宙の果ての銀河やクエーサーの観測を狙う微光天体分光撮像装置 F O C A S である。撮像や偏光観測に加えて、一度に 100 個ほどの天体の分光観測もできる万能装置である。

能動光学の発展として、大気の揺らぎを実時間で計測し、焦点面近傍に置いた小型の可変形鏡を高速駆動して補償してしまう、補償光学装置も製作がほぼ終わり、近赤外線でのすばる望遠鏡の解像力を回折限界にまで高めることができた。補償光学をフルに利用するために任意の方向の上空 100km にパワーレーザーで人工的に疑似星を作る技術も開発中である。

6. 目指す天文学

(1) 宇宙の構造と進化

遠い宇宙の天体からの光は地球に届くまでに時間がかかる。つまり遠くを見ればみるほど、宇宙の過去の姿を見ることになる。天文学者は遠くを見ることで、宇宙の地層を掘り下げ宇宙考古学的研究を行うのである。天体の光を虹のようなスペクトルに分解すると、その中に刻み込まれた原子や分子のスペクトル線から、天体の運動や化学組成、温度密度などさまざまな情報を読みとることができる。遠い天体からの光は微かであり、その光をさらにスペクトル分解するには、大きな鏡で光を一点に集める必要がある。すばる望遠鏡はこのような観測に活躍するはずである。すばる望遠鏡のファーストライト観測で撮影した銀河団アーベル 851 (図 5) は約 40 億光年の距離にあり、宇宙膨張のため光の速さの 40 % の速度で我々から遠ざかっている。可視光と赤外線カメラでこの銀河団の観測を行ったすばる望遠鏡はこれまでの可視光だけの観測では見つからなかった極めて赤い銀河を発見するなどの初期成果を挙げ始めている。

(2) 星・惑星の誕生

太陽系以外の恒星に木星や地球のような惑星がどれくらいあるのかについても、すばる

望遠鏡を用いたさまざまな観測計画が練られている。明るい母星の光を隠してその周辺の微かな惑星の光を捕らえる装置などを駆使しての新たな発見に期待している。生命発生の可能性を秘めた環境にある惑星がどのくらいあるのか、知的生命との交信など夢は広がる。宇宙の中での元素合成史を考えると、水素とヘリウムはビッグバン宇宙の最初の3分間で合成されたものであるが、炭素、窒素、酸素、鉄などほとんどの元素は、その後に生まれた恒星の核融合反応によりつくられたものである。我々人間もその材料となる元素のレベルにまで分解して考えるとすべて星起源の存在である。天文学の発展は人類の宇宙観をこのようなレベルで変革しようとしている。

参考文献

- 1) 家 正則、関口和寛、大坪政司、高見英樹、山下卓也：特集・天体望遠鏡と光技術、光技術コンタクト、36、5-41、(1998)
- 2) 佐々木敏由紀・家 正則：大型望遠鏡すばるにおける計測と制御、計測と制御、37-12、822、(1998)
- 3) 家 正則：ファーストライトを迎えたすばる望遠鏡、天文月報、92-4、232、(1999)
- 4) 大坪政司・家 正則：ファーストライトを迎えた8メートルすばる望遠鏡、光学、28-4、192、(1999)
- 5) 家 正則：銀河が語る宇宙の進化、培風館、(1996)
- 6) 「宇宙の果てに挑む」国立天文台ビデオ第3巻、天文学振興財団、1999年9月
- 7) 杉本大一郎：「天体と宇宙の進化II－宇宙の観測」、放送大学教育振興会、(1997)

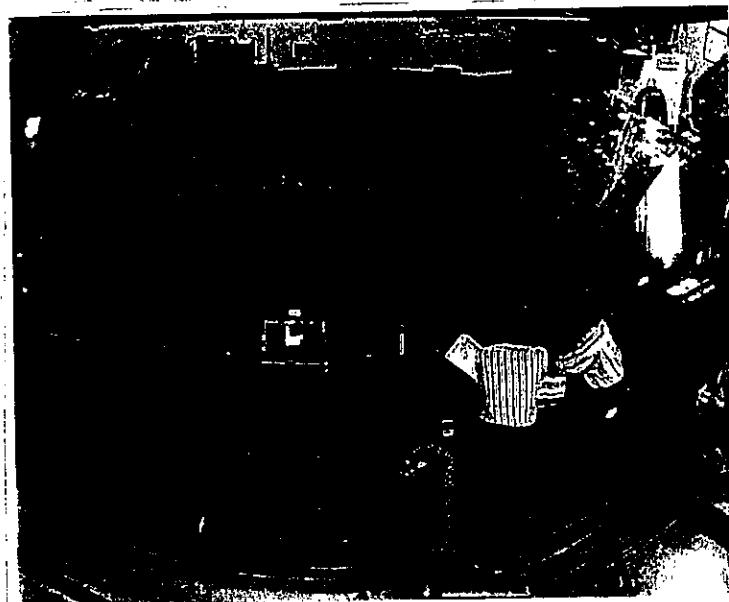


図1 世界最大で最高精度の8.2m鏡（宮下暁彦氏撮影）

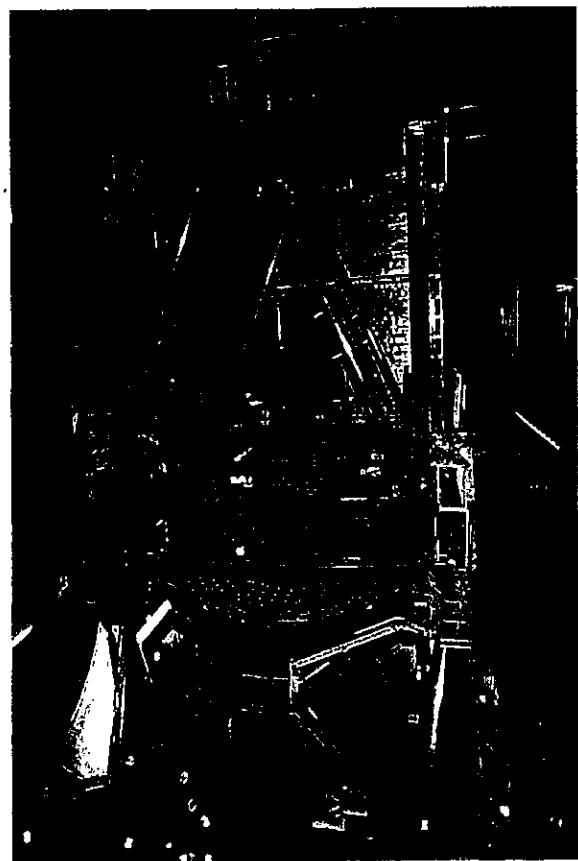


図2 ドーム内のすばる望遠鏡（宮下暁彦氏撮影）

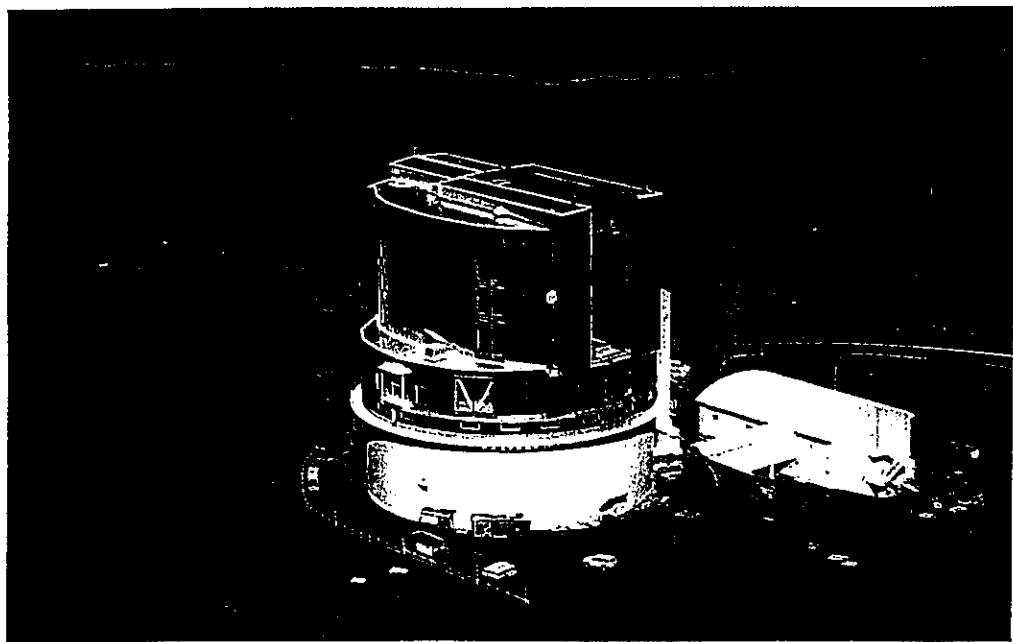


図3 マウナケア山頂とすばる望遠鏡ドーム（宮下暁彦氏撮影）。



図4 試験中の微光天体分光撮像装置FOCAS



図5 すばる望遠鏡モザイクCCDカメラで撮影した銀河団アーベル851。