

# 大型望遠鏡すばるにおける計測と制御

佐々木 敏由紀\*・家 正 則\*\*

\* 国立天文台 ハワイ観測所

650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii, U. S. A.

\*\* 国立天文台 光学赤外線天文学・観測システム研究系

東京都三鷹市大沢 2-21-1

\* National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii, U. S. A.

E-mail: sasaki@naoj.org

## 1. 8.2 m 光学赤外線望遠鏡すばる

国立天文台が1991年度から海拔4100mのハワイ島マウナケア山頂(図1)に9年計画で建設を進めてきた有効口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡すばる(図2)は、1999年1月末にファーストライトを迎える予定である。2000年度からの一部共同利用開始に向けて、望遠鏡および観測装置の試験調整が現在続けられている。この望遠鏡計画は1984年ごろから検討を重ね練られてきたものであり、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡や宇宙科学研究所の一連のX線天文衛星とともに、日本の天文科学の大きな柱となることが期待されている。ハワイ島の町ヒロに設置された国立天文台ハワイ観測所は、わが国が外国

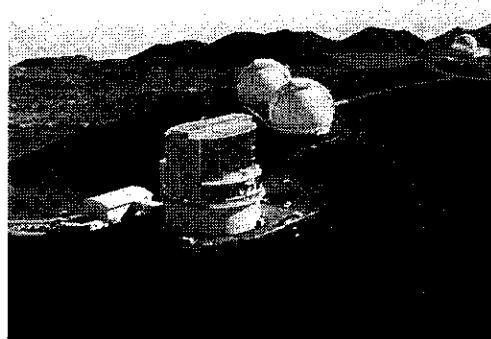


図1 マウナケア山頂とすばる望遠鏡ドーム。すぐ後方の2つのドームはケック望遠鏡。右上はNASAの赤外線望遠鏡ドーム

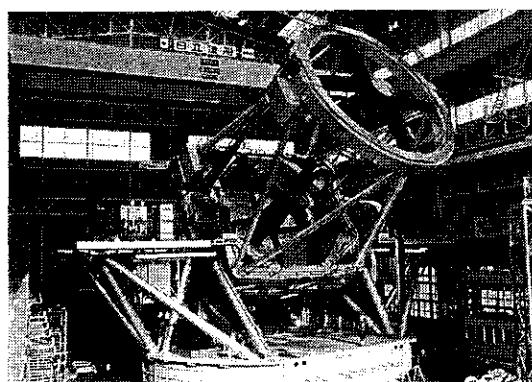


図2 すばる望遠鏡国内仮組調整時の写真 (1996年秋)

\*\* National Astronomical Observatory, 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo, Japan

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

キーワード：大型望遠鏡 (large telescope), 薄型鏡 (thin mirror), 能動光学 (active optics), 追尾制御 (tracking control), 観測制御 (observation control).

JL 0012/98/3712-0822 © 1998 SICE

に設置した初めての国立研究施設となり、教官・技官・事務官合わせて24名が赴任し、長期出張の職員や現地雇用の職員とともに望遠鏡の建設・運営に当たっている。

本稿では、この望遠鏡計画に用いられたさまざまな計測技術と制御技術の一端について紹介する。

## 2. 光学系の計測と制御

### 2.1 主鏡の製作

大型天体望遠鏡の建設では、まずその主鏡の製作をどのようにして実現するかが鍵となる。光学赤外線望遠鏡すばるの場合、1984年から6年以上にわたる諸々の検討を重ねた結果、1枚ものの鏡としては世界最大の有効口径8.2m、曲率半径30mの鏡を製作することになった。

天体望遠鏡の主鏡として使えるのは熱膨張係数のきわ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5m主鏡は、1度あたりの膨張率100万分の1程度のパイレックス・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E6ガラスを用いて、この方法で8m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桁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)を採用することとした。

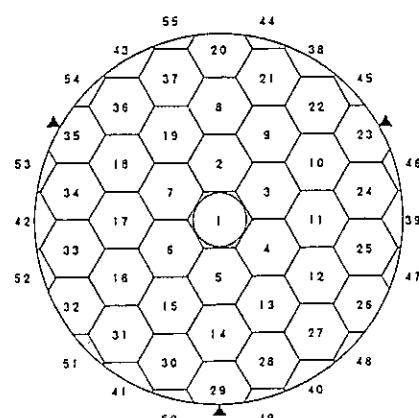


図3 8.3 m 主鏡鏡材製作時の部分鏡材ヘックスの最適配置問題

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、コーニング社では直径1.5m程度のULEのヘックスと呼ばれる六角形の部分鏡材を44個作り、これを55個のブロックに整形して直径8.3mの円盤となるように並べ、最後に大型炉でこれらを融着して1枚もののガラス材にする工法を採った。

ここで、すばるの計測と制御の工夫の第一段階があった。それぞれのブロックの熱膨張率は精密に測定され、1億分の1以下であることが確認されたが、その1桁下の数値に個性がある。

問題はこれらの55個のブロックをどう並べるのがよいかという問題であった。55個のブロックの並べ替えはすべ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<sup>2)</sup>(図3)。

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30m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30mの縦穴を用意した。地上に高さ30mの塔を建設するのに比べると、風による振動や日照による温度変化がない分、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图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をヘッドに搭載して、3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。8.2m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を、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ほかに、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12nm(50分の1波長)という世界最高精度の8.2m鏡が完成した。

## 2.2 能動支持機構による主鏡の形状制御

研磨後の主鏡は厚さ20cm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なくすには、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、鏡を能動的に力支持して浮いている状態に保つ能動光学システムを採用することにした<sup>3)</sup>(図4)。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0kgから90kgまで変化する。これに約60kgまでの付加補正力を発生できるようにしておき、鏡の形状誤差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10g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つた。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

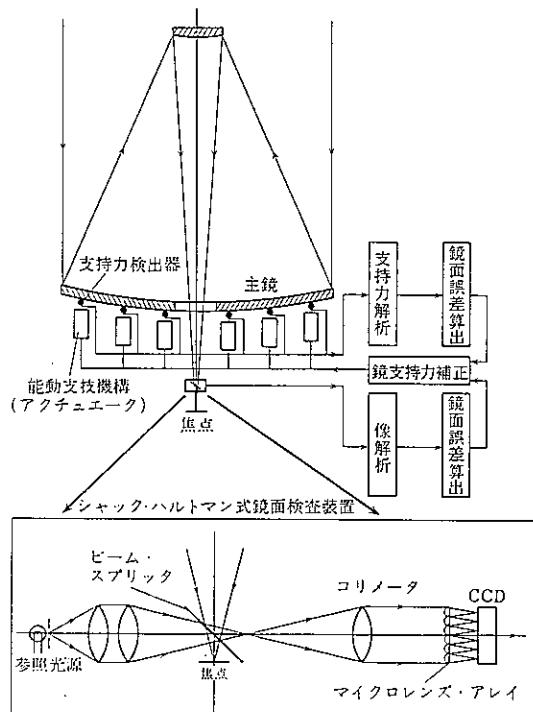


図4 能動光学システム概念図

るのを利用して支持力を求める超高精度力センサが開発され、目標精度を達成した。264点での支持力分布がわかれれば、有限要素法を用いた、計算機シミュレーションにより求めた、その姿勢での最適支持力分布と比べることにより、支持力誤差分布  $f_i$  ( $i=1, 264$ ) 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、内蔵のマイクロレンズアレーで主鏡を光学的に約200個の小部分に分割する装置である。この装置で明るい星を撮影すると焦点面上に各小部分からの独立な星像がその数だけできる。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となっていれば、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主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・ハルトマン型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  $f_i$  と鏡面形状  $a_j$  が計測できれば、両者は鏡の構造行列  $M_{ij}$  を通じて、

$$a_j = M_{ij} f_i, \quad (1)$$

で結ばれるはずである。実際に支持点の1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  $f_j$  を次式で算出できる。

$$f_j = M_{ij}^{-1} a_j, \quad (2)$$

これが能動光学方式の原理である<sup>3)</sup>。

### 2.3 周辺光学系

主鏡と平行して、可視光カセグレン焦点用、赤外カセグレン/ナスミス焦点用、可視光ナスミス焦点用の副鏡を作製するが、これらは直径約1.3mの双曲凸面鏡であり、その形状の測定はヒンドルシェルと名づけられたヌルレンズを用いた巧妙な光学系を組んで行った。このほかにも、主焦点で直径30分角におよぶ広い視野の観測を可能にするための主焦点補正光学系、地球大気の屈折率がわずかながら波長依存性をもつため天頂以外では天体の像が色づいてしまうのを補正するための大気分散補正光学系、経緯台方式での追尾駆動に伴う視野回転を補正するための視野回転補正光学系など、複雑な光学計測と精密な駆動制御を要するシステムが多数ある<sup>4)</sup>。

## 3. 機械系の計測と制御

### 3.1 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の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、Davenportの風外乱のパワースペクトルをもつ平均風速7m/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(図5)。

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、目標設計値は1秒角である。これについては、位置の精密に知られている多数の星の位置を実際に山頂に据え付けた望遠鏡で測り、望遠鏡のくせを補正することで最終目標に迫ることになる。

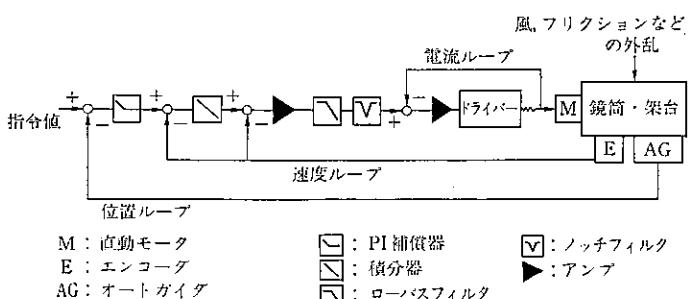


図5 望遠鏡追尾制御ブロック図

### 3.2 ドーム制御

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。ドーム位置制御はドーム外周に沿って設置したバーコードを用いたエンコーダシステムを用いる。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。

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危険ものである。星像の劣化は上空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1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、乱気流による影響を極力少なくするように、水流実験、計算機シミュレーションでドーム形状を決定した<sup>5)</sup>。ドームは、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は、主鏡表面上に通風することによって流し去ることにした。この方法が有効なことは事前実験で示された<sup>6)</sup>。

このため、ドームには、ルーバ、トップスクリーン、ウィンドスクリーンが設置され、ドーム内に吹き込む風の制御を能動的に行う。そのための気温、気圧、湿度、風向、風速、および空気揺らぎセンサ( $C_T^2$ センサ)などがドーム内各所に設置されている。 $C_T^2$ センサは約1m離れた2点における気温の差の平均自乗誤差を計測するものであるが、空気のゆらぎの目安となり、星像サイズとのよい相関があることが知られている。 $C_T^2$ 測定で予測され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を要するので、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。熱容量の大きい太平洋のまっただ中に浮かぶマウナケア山頂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される。

## 4. 装置運用に関する計測と制御

### 4.1 計算機ネットワーク

すばる望遠鏡では、マウナケア山頂の天体観測に優れた気象条件を余すところなく生かすため、ドーム内での人為的な熱源を除去するように望遠鏡、ドーム、観測装置の製作が進められている。夜間の観測はドームから隔離された制御棟で行う。そのため、望遠鏡、観測装置の遠隔操作が可能で、かつ、夜間の高山での操作者の判断力低下時にも高度で複雑な観測を遂行することが可能なように、観測制御システムを設計した。

天体観測遂行のためには、望遠鏡・ドームの各種駆動制御や光学系の制御、観測装置制御やデータ取得、アーカイブシステム、データ解析システムなどを統合して運用する必要がある。これらの多くの被制御対象が、密に結合されて協調動作をなし、統合的な観測システムを構成するようにハードウェアとソフトウェアを設計してきた。マウナケア山麓のヒロや日本からの遠隔制御操作を含めて、観測、保守に機能的効率的に動作し、かつ、高い安全性を合わせもつことを目指した。複雑で多岐に渡る制御項目を有機的に結合するために、ネットワークで結合し階層化された制御系として構成した<sup>7), 8)</sup>。すばる制御系は、望遠鏡制御システムと観測制御システムに大きく分かれて構成されるが、それぞれは、操作者がアクセスする操作端末計算機層、統合機能制御を行う制御サーバ層、ハードウェア制御を行う計算機層に分かれている。これらの各階層および制御システム間は標準的なネットワーク結合で疎に結合されている。ネットワークは、制御系、データ系、外部アクセス系に分離されている。生成される天体データは最大20MB/secと予想され、制御系とデータ系を分離することによって準リアルタイム制御を保証するようしている。各種制御は制御メッセージを交換して行い、各機器からのステータスなどの情報は一元管理を行って、統合的制御を可能としている(図6)。取得された天体データは、山頂制御棟とヒロ研究棟を結ぶOC 12(622Mbps)でヒロ研究棟のデータアーカイブシステムに転送され保存される。

### 4.2 観測装置、付帯設備

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學を支えてきたとい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CCDにほぼ完全に置き換わった。天体観測の場合、CCD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画素で60mm×30mmの大きさをもち、しかも読み出し回路を一方向にまとめて、モザイク化が可能な高感度大型CCD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

すばる望遠鏡 観測制御システムソフトウェア概念図

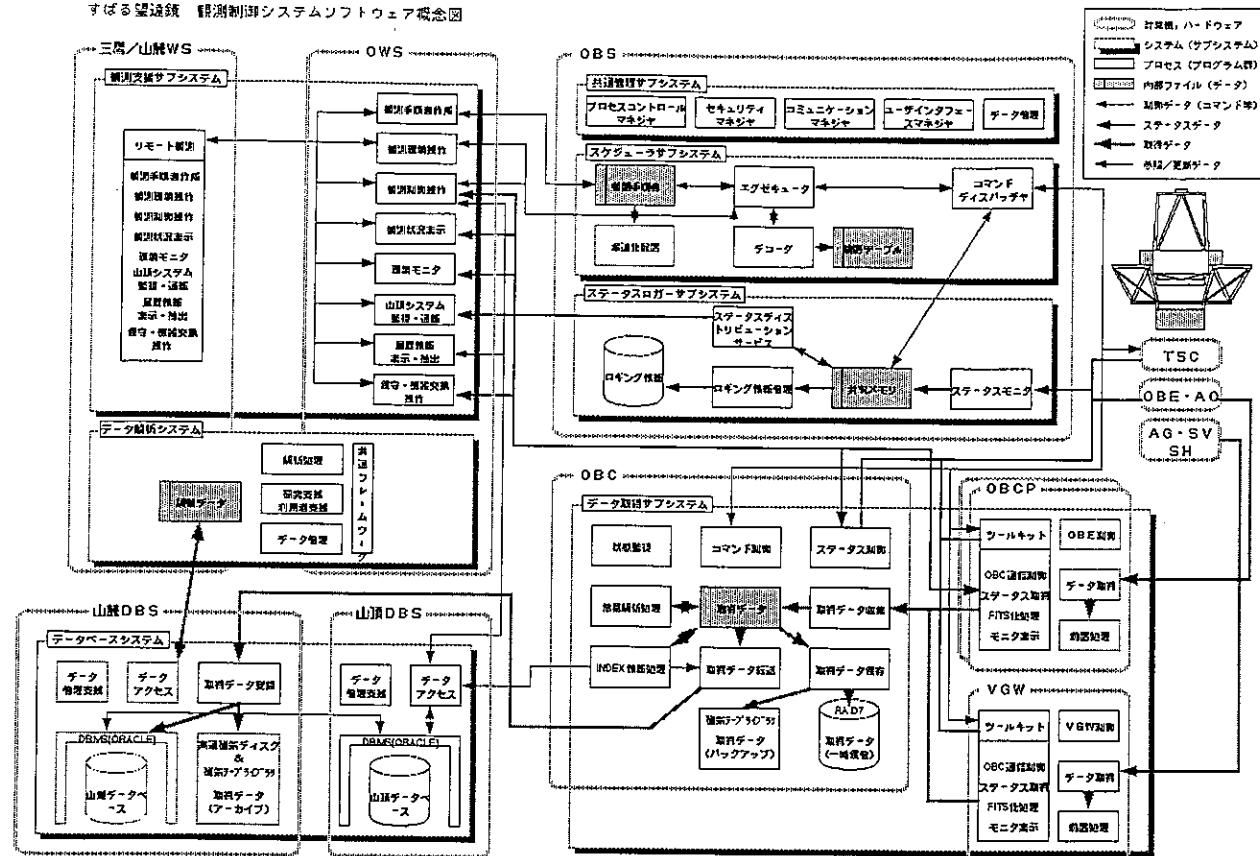


図6 すばる望遠鏡観測制御システムのソフトウェアブロック図

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、CCD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、高解像度観測ができるカセグレン焦点、大型装置を設置できる2つのナスミス焦点の合計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、これらの装置により撮像機能と分光観測機能が満たされる。

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ってきた<sup>7)</sup>。

#### 4.3 観測制御、遠隔観測

すばる望遠鏡制御系を構成する多種のソフトウェアは、相互に連携して動作する(図6)。コマンドメッセージの交換、および、ステータスデータと天体データベースの集中管理によるデータの共有化に基づいて、協調動作が実現されている。データ伝送時間による制御遅れは0.1秒として、より時間精度の必要な制御は予測制御または下位レベルでの直接制御としている。新たな装置の追加や制御の拡張が

容易なように、コマンドメッセージは可能な限り抽象化して装置特有なコマンドの隠蔽を計るようにしている。

観測制御機能としては、1)観測シーケンスの統合とスケジューリング機能を実現する観測制御機能、2)ステータス情報を一括管理するステータスロガー機能、3)観測データ取得、保存、転送機能、4)取得データの簡易解析とクイックルック機能、5)安全監視・資源管理機能、6)天候監視機能、7)オペレーションレベルの管理とアクセス制御機能、がある。

観測操作時の不注意な操作による危険防止や違法コマンドによる他の操作への影響の回避を行いながら、なおかつ使いたい機能への自由なアクセスを保証するために望遠鏡・観測機器制御のオペレーションレベルを設定し、オペレーションレベル認証機能を用意している。想定されている望遠鏡オペレーションレベルとしては、観測者、観測者支援者および望遠鏡オペレーター、システム管理者が用意されている。

観測装置の成熟度に応じた以下の4つの観測制御モードを用意し、柔軟に対応できるようにしている。

- 1) 透過モード：望遠鏡・観測装置の立ち上げ期やデータバック時に用い、観測制御システムが未完成の時点でも観測可能とするモードである。
- 2) 会話型モード：観測制御システムからの会話型のコ

マンド入力による制御であり、初期に以下の登録型モードをデバッグするためにも用いる。

- 3) 登録型モード：あらかじめ登録されている観測シーケンスに従って順次実行する観測モードで、運用に用いる標準的なモードである。
- 4) 自動モード：変化する天候や観測経過を参照しながら最適観測を判定し実行する観測モードで、将来の実現を目指している。

これらの観測モード以外に装置の製作時などには、観測制御システムと結合していない環境下でのローカル制御がある。また、装置の開発・検査のために、いくつかのシミュレーション機能が用意されている。

すばる望遠鏡観測制御システムで構想されている自動観測モードでは、観測者が通常行う観測シーケンスの決定を支援する機能を実現することを目指している。観測を左右する要因としては気象、観測条件、望遠鏡機器条件、観測装置条件、天文学的要件がある。観測者は、大気による星像の乱れ具合に応じた適切な観測天体の選択、観測天体の天球上での位置や大気減光を考慮に入れた観測時間の調整、必要な校正データの取得手順の決定を行っている。自動観測モードでは、これら観測シーケンス決定要因を加味して最適な観測スケジュールを選択する。自動スケジューリング機能としては、ハッブル宇宙望遠鏡や衛星などのスケジューリングのために宇宙望遠鏡科学研究所で開発されたソフトウェア SPIKE をすばる望遠鏡用に機能拡張して用いる準備を進めている。すばる望遠鏡では、各種の観測プロポーザルを集めて観測所が観測を実施するキューノートも行うことを見込んでいるが、自動スケジュール機能はキューノートには大きな威力を発揮するであろう。

すばる望遠鏡での観測は、望遠鏡・ドームから離れた制御棟から行う準遠隔観測である。観測場所を山頂制御棟からマウナケア山麓のヒロ研究棟に移して遠隔観測を行うことも想定している。天体の遠隔観測のためには、機器の操作、表示が遠隔で可能であるだけでなく、取得天体データの転送とクイックルック、天候監視、補給作業・機器交換、および望遠鏡・ドーム動作の異常処理が可能でなくてはならない。当然、ネットワーク・セキュリティの確保は必要である。山頂と山麓研究棟は高速ネットワークで接続されているので、取得天体データの転送とクイックルックは常時可能である。また、天候監視カメラが設置されるので、天候状況による観測手順の変更が可能である。しかしながら、異常時の対処や補給作業・機器交換については、山頂での支援操作が不可欠となる。今のところ、山頂の望遠鏡・観測装置操作者の支持を得て、観測者が遠隔地から観測を実施することを想定している。日本国内から観測については、現状のネットワークでは取得天体データの転送に問題が生じる。データ圧縮による効率的なデータ転送手法が必要となる。ヒロ研究棟からの遠隔観測は当面の目標であり、

日本からの遠隔観測は将来の課題としている。

## 5. 最後に

すばる望遠鏡システムを計測と制御の観点から概説した。ファーストライトを控えて初期に想定した機能とその精度が達成されていることが確認されつつある。初期に立ち上がる観測装置7台がそれぞれの観測精度を達成し、近い将来広く観測者に公開されていくはずである。すばる望遠鏡を用いた本格的観測が進めば、観測で要求される精度や機能はより高度なものとなっていくであろう。すばる望遠鏡は、将来の天体観測に要求される望遠鏡・ドームの基本的な機能、および機能の拡張性を組み入れて製作した。良い望遠鏡の寿命は50年とも言われている。観測的研究での成果を挙げつつ、将来の観測で要求される新機能・精度を満足するよう、すばる望遠鏡自体と観測装置をアップグレードする努力が今後も続く。

(1998年9月18日受付)

### 参考文献

- 1) 家 関口、大坪、高見、山下：特集・天体望遠鏡と光技術、光技術コンタクト、36, 5/41 (1998)
- 2) 西口、三神、下山、佐々木、市川、家：大型望遠鏡の主鏡材最適配置問題へのシミュレーティッド・アニーリングの応用、計測自動制御学会論文集、31-1, 116/125 (1995)
- 3) 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, in Advanced Technology Optical Telescopes IV, SPIE Proc., 1236, 929/939 (1990)
- 4) M. Iye, T. Noguchi, Y. Torii, Y. Mikami and H. Ando : Evaluation of Seeing on a 62 cm Mirror, PASP, 103, 712/722 (1991)
- 5) T. Sasaki, Y. Chikada, R. Ogasawara, S. Ichikawa, W. Tanaka, T. Noguchi and K. Okita : Concept Design of a Control System for the SUBARU Telescope, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A, 352, 75/78 (1994)
- 6) W. Tanaka, T. Sasaki, T. Noguchi, K. Okita, K. Nakamura, F. Ito, Y. Katsuki and S. Ishihara : Control System for the Subaru Telescope, Proc. SPIE 3351, 478/483 (1998)
- 7) 家 正則：能動光学と補償光学、光技術コンタクト、29-1, 10/18 (1991)

### [著者紹介]

佐々木 敏由紀 君

1949年5月2日生。国立天文台ハワイ観測所助教授。73年京都大学宇宙物理学科卒業。85年国立天文台岡山天体物理観測所、93年国立天文台大型望遠鏡推進部、97年から現職。専門は銀河天文学、画像処理システム、望遠鏡制御システム、観測装置の開発研究に従事。現在は、すばる望遠鏡制御システム、FOCAS観測装置の開発に従事している。理学博士。



家 正則 君

(本号 821 ページ掲載)