

太陽系内天体を追う，すばる

布施 哲 治

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI, 96720 U.S.A.〉
e-mail: tetsu@subaru.naoj.org

「地球は動く」——古代の人々にとって理解を超えていたことも、現代の我々にはごく当たり前の現象である。「天体も動く」——太陽系内の天体は太陽の周りを公転しているため、見かけの位置は時々刻々と変化していく。天体望遠鏡による太陽系内天体の観測は、これらの「動き」を考慮してはじめて実現される。本稿では、国立天文台ハワイ観測所が運用する大型光学赤外線望遠鏡「すばる」が狙うサイエンスの一つ、太陽系内天体の観測について、すばるの性能を振り返りながら解説していこう。

1. 観測のための道具

ハワイ諸島で最大のハワイ島、四国の半分ほどのこの島にある標高 4200 メートルの山が、マウナケアだ。富士山よりもはるかに高い山頂は、マウナケア国際天体観測所と呼ばれている。晴天が多い、夜空が暗い、大気が安定しているなど、天体観測に必要な環境が整っていることから、世界各国の天体望遠鏡が 10 台以上も立ち並んでいるのだ。まさに「天文台銀座」と呼ぶにふさわしい場所である（図 1）。

日本の大型望遠鏡「すばる」¹⁾は、技術の粋を結集させ、10 年の歳月をかけてマウナケア山頂に建設された。まず本章では、すばる望遠鏡や観測装置の性能について見ていく。

1-1. 光を集める

天体から届く光のうち、すばる望遠鏡が観測できる波長は、可視光と赤外線である。天体の光を集め、焦点に導く有効口径 8.2 m の

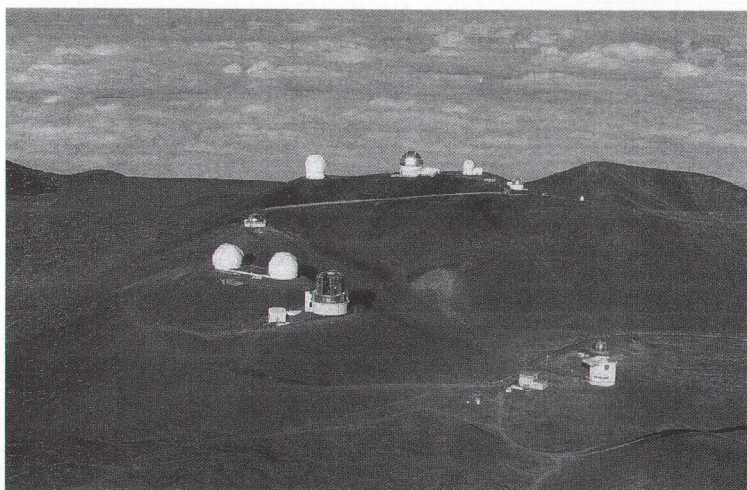


図 1：マウナケア山頂に並ぶ世界各国の望遠鏡。中央にある円筒形の建物が、すばる望遠鏡のドーム。

主鏡は、一枚の超低熱膨張ガラスからなっている。表面の平均誤差は、12 ナノメートル (1.2×10^{-8} メートル)。仮にガラスを関東平野の大きさに引き伸ばしたとしても、ガラス表面のでこぼこは、わずか新聞紙一枚程度である。非常に薄い主鏡を理想的な形に保つ機能は能動光学方式と呼ばれ、261 本のロボットアーム・アクチュエーターによって実現されている。

すばる望遠鏡は、高さ・横幅共に 20 メー

表 1：すばる望遠鏡の仕様

望遠鏡本体	
形式	経緯台式反射望遠鏡
高さ	22.2 m
最大幅	27.2 m
重さ	555 トン
主鏡	
有効直径	8.2 m
厚さ	20 cm
重さ	22.8 トン
材質	超低熱膨張ガラス
研磨精度	平均誤差 12 ナノメートル
光学系	
焦点距離	15 m
主焦点	F 比 2.0 (補正光学系含む)
カセグレン焦点	F 比 12.2
ナスミス焦点	F 比 12.6
駆動系	
最大駆動速度	0.5 度角/秒
観測可能仰角範囲	10 度～ 89.5 度

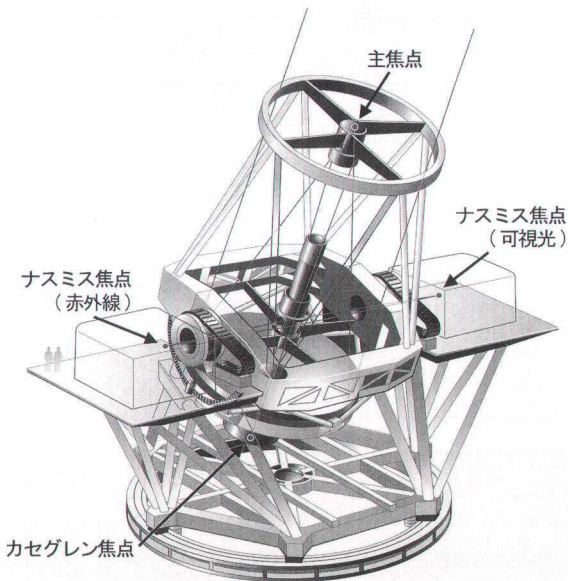


図 2：4つの焦点が備わる、すばる望遠鏡の模式図。
(画・遠藤孝悦、日経サイエンス 1996 年 2 月号より)

ル、重さが 500 トンを超える巨大な構造物にもかかわらず、形状が計算値から 10 マイクロメートル (0.01 ミリメートル) 以上の歪みがあってはならないという厳しい条件のもとに造られた。駆動系にリニアモーターを採用したことにより、望遠鏡は音もなく動くのだ。

10 階建てのビルに相当する高さ 43 メートルの円筒型ドームに、すばるは収まっている。この独特の形は、水流実験や風洞実験、三次元流体シミュレーションから決められた。

巨大かつ精密な望遠鏡とドームにより、星像の総合分解能は、0.2 秒角を達成している。図 2 はすばる望遠鏡の模式図、表 1 には仕様をまとめた。

1-2. 光を受ける

すばる望遠鏡本体の役割は、天体から届く光を集めることにある。その後、焦点に結んだ天体の光を電子情報に変換する機器が観測装

置だ。すばる望遠鏡には、現在 7 つの第一期観測装置が用意されている (表 2)。

すばるを含め、最近の望遠鏡には波面補償光学装置 (Adaptive Optics; AO) が備わるのが普通になってきた。大気の揺らぎによって乱された天体の光の波面をリアルタイムで補償し、望遠鏡の口径で決まる解像力 (回折限界) を実現する装置が AO である。現在稼動しているすばるの AO では、IRCS と組み合わせて、0.13 秒角離れた連星系の分光に成功するなどの成果をあげてきた。

観測装置は、現在あるもので終わりというわけではない。新しい天文学の要求に答え、未知なる発見を目指して、次世代の装置が

表 2：すばる望遠鏡の第一期観測装置

撮像観測装置			
観測装置名	視野	ピクセルスケール	フィルター数
CIAO	12", 22"	0.012", 0.022"	20
CISCO	110"	0.11"	14
COMICS	42"× 32"	0.133"	12
FOCAS	直径 6'	0.1"	14
IRCS	23", 60"	0.023", 0.058"	18
Suprime-Cam	34'× 27'	0.20"	10
分光観測装置			
観測装置名	分解能	スリット長	ピクセルスケール
CIAO	300–1,200 (0.06", 1.0")	22"	0.022"
COMICS	2,000 (0.33")	40"	0.165"
FOCAS	250–2,000 (0.4")	6', 多天体	0.1"
HDS	100,000 (0.38")	10", 60"	0.13"
IRCS (グリズム)	200–1,400 (0.15"–0.90")	23", 60"	0.023", 0.058"
IRCS (エッシェル)	5,000–20,000 (0.15"–0.60")	4.8"–9.6"	0.060"
OHS/CISCO	300–1,000 (0.5"–1.0")	20", 60"	0.11"

日々開発されている。表 2 で紹介した装置が、第一期観測装置と呼ばれているのも、そのためだ。すばる望遠鏡では、次期 AO システムをはじめ、主焦点に取り付ける光ファイバー多天体分光装置 FMOS²⁾やカセグレン焦点につける近赤外線多天体分光撮像装置 MOIRCS³⁾などが、検討・開発されている。

2. 天体は動く

地上から見た天体は、地球の動きのため、時刻と共に大地に対して動いていく。さらに太陽系内の天体は、それ自身が太陽系内を運動していることにより、背景の恒星に対して見かけの位置が移動する。この章では、天体を観測する際に必要な望遠鏡の駆動について説明していこう。

2-1. 星を追いかける

恒星という名前は、相互の位置を変えないことからついた。しかし、地球の日周運動によって、地上から見た恒星や銀河の方位と高度は時刻と共に変化していく。同じ天体を長時間に渡って観測するためには、その見かけの動きをキャンセルするように望遠鏡を駆動する必要がある。このような機能を恒星追尾 (Sidereal tracking) と呼ぶ。

中小の望遠鏡に一般的な赤道儀式は、2 つある軸のうち、極軸を地球の自転軸と平行に設置する。その後、極軸を地球の自転に合わせて等速に回転するだけで、恒星追尾が実現されるのが特徴だ。一方、すばる望遠鏡にも採用されている経緯台式は、構造が簡単なため大型望遠鏡に使われることが多い。しかし恒星追尾を行うには二軸とも不等速度で駆動

させなければならず、高精度のエンコーダーとコンピュータによる制御が不可欠となる。

すばる望遠鏡では、観測天体の近傍にある星をオートガイダーと呼ばれるカメラで捕捉し、その星の動きに合わせて望遠鏡の駆動を行う。その結果、恒星追尾の精度は0.07秒角(RMS)を達成している。オートガイダーが使用できない場合でも、天体の追尾の精度は0.2秒角(RMS)を実現した。マウナケア山頂における平均的なシーイングが0.6秒角程度であることから、天体の追尾が十分な精度で行われていることがわかる。

2-2. 動いている天体を追う

太陽系内の天体は、太陽を焦点とする二次曲線の軌道上を公転している。そのため地球上の観測者から見ると、太陽系内の天体は背景の星に対してそれぞれが違う動きをするのだ。見かけの速さは、一般的に天体までの距離によって決まる。地球に近い天体ほど、移動速度は大きい。

天体の軌道の形や向き、軌道上の位置などを定めるパラメータを軌道要素という。移動する天体の位置(赤経・赤緯)は、軌道要素が正確に得られている天体の場合には、あらかじめ高い精度で計算することが可能だ。ジェット推進研究所⁴⁾やローウェル天文台⁵⁾のウェブサイトのよう、観測する天体と観測日時を指定すれば計算を行ってくれるサービスもある。

すばる望遠鏡により太陽系内の天体を観測するためには、現在のところ、観測者があらかじめ天体の予報される位置を計算する必要がある。日時や地球の中心(地心)から見た天体の赤経・赤緯、地心から天体までの距離などの情報を「駆動ファイル」と呼ばれるテキスト形式のファイルに保存する。駆動ファイルを望遠鏡の制御計算機に読み込ませると、す

ばるの地点から見た天体の位置に変換、大気による光の屈折などの補正を行った値によって望遠鏡を駆動させる仕組みになっている。

このように望遠鏡を太陽系内の天体の動きに合わせて追尾させることを非恒星追尾(Non-sidereal tracking)と呼ぶ。すばる望遠鏡の非恒星追尾は、オートガイダーを用いない恒星追尾と同程度の精度が確認されている。

3. すばるが捉えた小惑星

この章では、太陽系内天体の観測例として、文部科学省宇宙科学研究所と国立天文台が共同研究として行なった、小惑星 1998 SF36 の観測について紹介する。

3-1. MUSES-C ミッション

宇宙科学研究所⁶⁾は、2002年の年末に確定番号が25143の小惑星 1998 SF36 に向けて探査機を打ち上げる予定である。MUSES-C と呼ばれるこのミッションでは、2005年夏ごろ 1998 SF36 に探査機が到着、約5ヶ月の間、小惑星の近傍に滞在してさまざまな観測を行なうことになっている。

このミッションでは世界初の試みとして、探査機が小惑星表面の物質を採取、2007年夏に地球へ持ち帰るサンプルリターンを計画している。これまでは遠隔から観測するしかなかった小惑星の表面物質を手に入れられる意義は、きわめて大きいといえよう。

3-2. 小惑星とは

1801年にイタリアのピアッツィが最初の小惑星セレスを発見してから、これまでに軌道が確定した小惑星は約4万個を超え、少なくとも一度観測された小惑星は17万個にせまる勢いだ。

小惑星のほとんどは、小惑星帯(メインベルト)と呼ばれる火星軌道と木星軌道の間に存

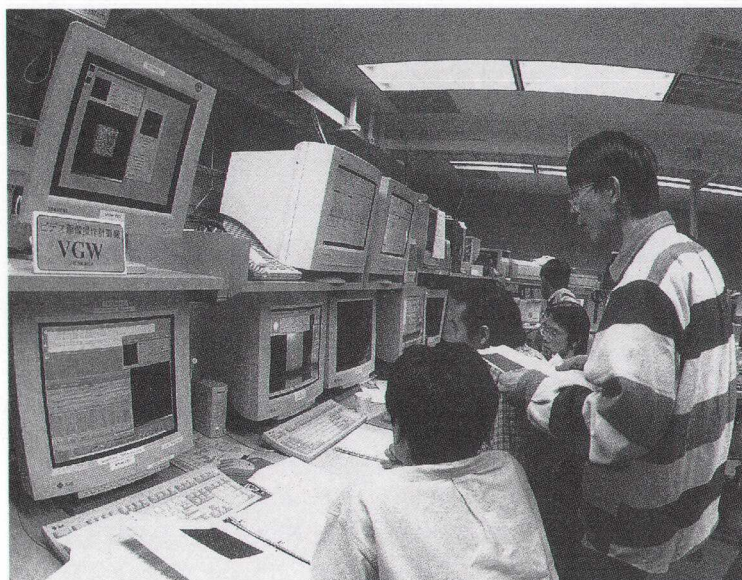


図3：小惑星（25143）1998 SF36 の FOCAS による観測の風景。
ハワイ時間 2001 年 12 月 31 日撮影。

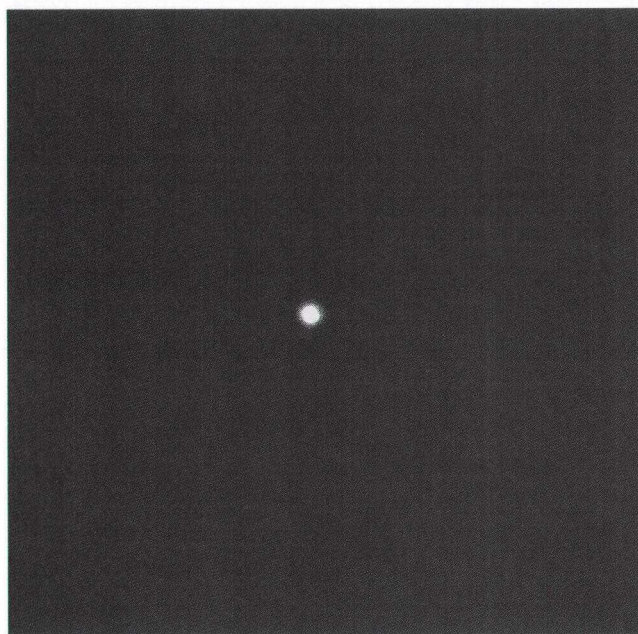


図4：IRCS がとらえた 1998 SF36 の近赤外線（Kバンド）の画像。視野 1 分角。
（画像処理・石黒正見，宇宙科学研究所）

在する。一方で地球軌道の近くにも、数多くの小惑星があることが知られてきた。このような地球近傍小惑星（Near Earth Asteroid; NEA）の数は、現在およそ 2,000 天体である。

NEA は地球に近いので、小惑星帯内の小惑星に比べ探査機が到達しやすい。アメリカ航空宇宙局（NASA）の探査機ニア・シューメーカーが訪れた小惑星エロスも、大きさ数十キロメートルの NEA だ。

望遠鏡による小惑星の反射スペクトルの観測と、隕石や鉱物の実験データから、表面物質の特性によって小惑星はいくつかのタイプに分類される。例えば、始源的な炭素質コンドライト隕石に似た C タイプ、石鉄隕石に似た S タイプ、鉄隕石に似た M タイプなどがある。

観測から推定した表面物質と実際の物質は、はたして本当に等しいのだろうか？ 間接的な議論のみだった小惑星の分類に、いまサンプルという新たな評価の手段が加わろうとしている。

3-3. 探査機を待つ天体

小惑星 1998 SF36 は、1998 年に発見された NEA である。探査機が向かうことが決まったにもかかわらず、明るさが V バンドで約 20 等級と暗いことから、我々が手にしている物理情報は乏しかった。最近の位置観測から軌道要素が正確に求まり、確定番号が 25143 と与えられたのだ。

世界中の大型望遠鏡が、探査機に向かう小惑星に向けられることになった。すばるも、その一つである。地球に近い 1998

SF36 は、背景の恒星に対する見かけの移動速度が大きい。筆者と宇宙科学研究所の安部正真氏・大場庸平氏は、すばるで非恒星追尾による観測の準備を進めることにした。筆者が1998 SF36 の軌道計算および駆動ファイルの作成、安部・大場両氏は観測手順作成の担当である。

まずは1998 SF36 のスペクトルタイプを推定するため、2000 年 12 月 31 日に FOCAS を用いた可視光による分光観測を行った(図3)。得られたデータから、1998 SF36 は S タイプであることが示唆された。続く 2001 年 3 月 10 日、11 日には、IRCS による近赤外線域のフィルター観測を実施している。図4は、K バンドで撮影した 1998 SF36 のイメージだ。解析の結果、1998 SF36 が FOCAS の結果を支持する S タイプであることがわかった。さらに、1998 SF36 の直径が 300 メートル程度であることも明らかされている。すばるの観測によって得られた情報は、小惑星近傍で行なう観測計画や搭載機器の設計に大きく反映された。

4. エピローグ

すばる望遠鏡のプロジェクトは、「宇宙の果てを見る」というコンセプトのもとに進められてきた。これまでに、銀河系内の惑星状星雲が持つ微細なガス構造を捉え、近傍のアンドロメダ銀河を構成する星一つ一つを分解、宇宙の果て近くにある爆発する銀河を写し出すなど、すばるはその能力をいかに発揮してきた。

本稿で見たように、すばるは遠方の天体だけでなく、我々に近い、太陽系内の天体を詳細に観測する能力も備えている。1998 年の天文月報 5 月号⁷⁾にある、筆者の記事のエピローグ「我々に最も身近な太陽系を“通り越して”しまうのは、実にもったいないであろう」を再びここに載せることにしよう。

それではさっそく、これまでにすばるが捉えた太陽系内天体の姿を特集記事でたっぷりと楽しみたい。

参考文献

- 1) すばる望遠鏡のホームページ
http://SubaruTelescope.org/j_index.html
- 2) 次期観測装置 FMOS のホームページ
<http://SubaruTelescope.org/staff/akiyama/FMOS/index.html>
- 3) 次期観測装置 MOIRCS のホームページ
<http://www.astr.tohoku.ac.jp/~tokoku/moircs/index.html>
- 4) ジェット推進研究所・太陽系力学グループのホームページ
<http://ssd.jpl.nasa.gov/>
- 5) ローウェル天文台のホームページ
<http://www.lowell.edu/>
- 6) 宇宙科学研究所ホームページ
<http://www.isas.ac.jp/j/>
- 7) 布施哲治、渡部潤一、関口朋彦、1998、憧れの“えくぼ”を追い求めて、天文月報、91(5)、203。

Subaru Tracks Solar System Objects

Tetsuharu FUSE

Subaru Telescope

National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: Subaru Telescope, operated by the National Astronomical Observatory of Japan, is one of the highest technology telescopes in the world. It has the ability not only to discover faint distant galaxies, but also to track nearer solar system objects accurately. We introduce the performance of the Subaru Telescope and show an example of observation on an asteroid in the solar system.