開発物語

すばる望遠鏡

～実現のかぎ：主鏡支持システムの開発～

三菱電機株式会社 伊藤 昇
Noboru Ito

まえがき

すばる望遠鏡はハワイ島の標高 4,200 m のマウナケア山頂にある国立天文台の光学赤外線望遠鏡である。その有効口径は 8.2 m と世界最大級であり、また解像度も 0.2 秒角（1 秒角は 1 度の 1/3,600）という世界最高レベルの性能を満たしている。

人類は今まで望遠鏡を用いて、ビッグバンから宇宙が始まったことや、宇宙にはダークマターと呼ばれる光を発しない大量の未知の物質あるいは粒子があること等を裏付けたり、発見したりしており、望遠鏡は科学の発展のために必要不可欠な道具である。

すばる望遠鏡も、1999 年に完成後、大口径・高解像度という特長を生かし、最遠方銀河を次々と発見する⁽¹⁾ など世界最先端の研究に貢献してきた。更に現在、従来のニュートン、アインシュタインの物理の法則では説明できない宇宙膨張の加速度を正確に調査し、物理の新しい法則の研究に役立てようという計画も立案されている⁽²⁾。

すばる望遠鏡はこのような将来も活躍することが期待されているが、本稿では高解像度実現に貢献した主鏡支持システムの開発・設計・製作当時を振り返りその経緯を紹介する。まず、すばる望遠鏡の概要を説明する。

すばる望遠鏡の概要

すばる望遠鏡の概要・構成を図 1 に示す。観測天体の光は主鏡・副鏡で反射され観測装置に集光する。主鏡・副鏡は鏡筒で保持されている。星を追尾するために、鏡筒は高度軸回りに回転し、鏡筒を支持する架台は方位軸回りに回転する構造となっている。運用は計算機だけで天体追尾するモードと、観測天体近傍の明るい星をガイド星として使用するモードがある。後者の場合、ガイド星の光の一部は鏡面測定装置に導かれ鏡面誤差を補正する支持力が求められ、アクチュエータ（主鏡支持力発生機構）にフィード

バックされる。ガイド星の残りの光により追尾誤差が求められ望遠鏡の駆動制御装置にフィードバックされる。鏡筒、架台等の外観を図 2 に示す。

すばる望遠鏡の高解像度に大きく貢献している一つは高精度なアクチュエータと主鏡支持制御計算機等からなる主鏡支持システムである。主鏡支持システムが、望遠鏡の姿勢等が変化しても、鏡面の形状を 0.1 μm 程度で常に正しく保つことにより、高解像度が得られている。

図 1 すばる望遠鏡の概要・構成

図 2 鏡筒・架台等の外観（写真提供：国立天文台）

直径 8 m の鏡面の形状誤差（凹凸）を $0.1\mu\text{m}$ 以内に抑えるということは、例えて言えば、直径 8 m の円板を関東平野相当にまで拡大したとしても、その凹凸は 1 mm しかないということになる。

すばる望遠鏡建設の背景

すばる望遠鏡建設の検討が始まったのは 1980 年代である。当時、欧米は口径 3 ～ 5 m クラスの望遠鏡を保有していたが、日本は 1960 年に建設された岡山観測所の口径 1.88 m が最大であった（図 3）。

1980 年代までは観測装置の撮像素子等の性能向上により口径を大きくしなくても天文学の成果を出すことができたがそれも限界となり、欧米は 1980 年代に入って 8 m クラスの望遠鏡建設計画を検討するようになった。

この機会に日本も一気に世界最大級の望遠鏡を建設しようということで、すばる望遠鏡建設の検討が開始された。8 m クラス望遠鏡建設には多くのブレークスルーが必要でその一つが主鏡支持システムであった。

図 3 大形望遠鏡の口径と完成年⁽³⁾

従来の主鏡支持システム

従来の主鏡支持システムの概念を図 4 に示す。例えばパロマ山の 5 m 望遠鏡では、主鏡の厚みを直径の 1/6 程度と大きくし、基本的に主鏡の剛性を上げることにより主鏡の自重変形をできるだけ抑える方式が採用されていた。主鏡は主鏡セルから固定点（3 か所）で固定されている。更に自重変形を軽減するためてことおもりからなる支持機構が設けられている。主鏡の姿勢が水平の場合は、てことおもりで主鏡の厚み方向に主鏡の自重を支持する力を発生し、主鏡の厚み方向の自重変形を抑えている。主鏡の姿勢が垂直の場合は、主鏡の外周に設けられているてことおもりが主鏡の半径方向に力を出し主鏡の半径方向の自重を支持している。主鏡が任意の姿勢でも、厚み方向を支持する力と半径方向を支持する力が重ね合わせられて主鏡が支持される。

図 4 従来の主鏡支持システムの概念

すばる望遠鏡の主鏡支持システム

8 m クラスの主鏡で従来のように厚みを大きくすると主鏡の重量だけで 100 t 以上となり、また製造（鋳込み）に 10 年以上かかり、実現が困難である。そこですばる望遠鏡ではこの課題を克服するために図 5 に示すように主鏡の厚みを薄くするアプローチを採用した。

すばる望遠鏡の主鏡部構造を図 6 に示す。主鏡の最大径は 8.3 m（有効部は 8.2 m）厚みは 200 mm と従来と比較して大幅に薄くした。主鏡は 261 個のアクチュエータ（支持力発生機構）で支持され、3 個の固定機構で主鏡セルに

図 5 すばる望遠鏡の主鏡実現のためのアプローチ

図 6 すばる望遠鏡の主鏡部の構造

図7 アクチュエータの原理

固定される。

所用の鏡面精度を満たすためにはアクチュエータの最大支持力は1,000 Nで、厚み方向の支持力精度は0.01 Nが必要である。この要求を満たすために図7に示すアクチュエータ案に至った。

厚み方向の力はモータでばねを縮めて発生させ、主鏡に加わった力を高精度力センサで測定する。その信号はアクチュエータ制御CPUにフィードバックされ主鏡支持制御計算機からくる力指令値と比較され、主鏡に加わる力が力指令値に等しくなるようにモータを制御する。このような構成とすることにより、外乱、例えば温度変化等により主鏡と主鏡セルに相対変位が生じ、ばねの圧縮量が変化しても常に厚み方向の力は指令値どおりとなるように制御される。

なお、半径方向の力の要求精度は厚み方向ほど厳しくないため従来のでこ方式を採用した。このような構成とすることにより、アクチュエータの形状が縦長になり主鏡の裏に261個配置できるようになった。

主鏡支持システムの開発・設計・製造経緯

すばる望遠鏡の開発からファーストライト（初めて星の光を受けるイベント）までの流れを図8に示す。望遠鏡本体は国内で製造し、主鏡の鏡材製造と研磨は米国のメーカーで実施した。望遠鏡本体は日本で仮組し、できる試験は全て仮組で実施した。その後、主鏡支持システム以外は現地山頂に直接輸送・組立、主鏡支持システムは米国の研磨メーカー（場所はピッツバーグ）に輸送し主鏡との組合せ試験を実施し、その後現地山頂に輸送した。各段階の経緯と振り

図8 開発からファーストライトまでの経緯

返って感ずることを述べる。

■ 実現性検討

国立天文台が1984年から、各種メーカーが自主的に参加できる大形光学赤外線望遠鏡の勉強会を始めた。筆者もこの勉強会に参加し、以後すばる望遠鏡の開発に関わるようになった。

「すばる望遠鏡の主鏡支持システム」の章で述べたように開発当初、欧米でも8m級の望遠鏡計画がスタートしていた。特にすばる望遠鏡のライバルは欧州のVLTと米国のGemini望遠鏡であった。更に、両望遠鏡ともすばる望遠鏡と同じく薄形鏡を採用した。薄形鏡の場合、高精度な主鏡支持システムが必要である。当時日本は、大形望遠鏡製造の経験がなかったが、ここで、より高精度な主鏡支持システムを開発することができれば一挙に欧米より優れた望遠鏡を日本の天文台に提供できることになる。

ここでは主鏡支持システムの中のアクチュエータを例に取り、主要な検討・開発を実施した1985～88年について各年ごとの経緯を述べる。

(1) 1985年

海外の4mクラス望遠鏡の文献を調査し、更に8mクラス望遠鏡建設に関する学会などにも参加し、海外の動向を徹底的に調査した。4mクラスの望遠鏡は、油圧あるいは空気圧で主鏡を支持しており、欧米は8mも同様の方式の検討を進めていた。ところがこれらの方式の場合、油や空気をピストンあるいはベローズ（空気枕のようなもの）に封じ込めて力を発生させるため、ピストンの摩擦やベローズのヒステリシスが問題となり支持力精度を上げるのが困難であった。

そこで、本来の要求に立ち戻り、力を正確に発生させるという機能を満たすには、ばねとモータで力を発生させ、それを正確に測定・制御してはどうかという漠然としたア

アイデアが浮かんできた。

この頃以降、解決すべき課題が頭から離れなくなり、寝ても覚めてもそのことを考えるようになる。寝る前に気がついたアイデアや、夜中、目を覚まして気になったことをメモにするようになってきた。

(2) 1986 年

力を正確に測定するために、いろいろな力センサメーカーに当たってみた。力センサに要求される性能は測定レンジ 1,000 N、精度は 0.01 N である。精度の測定レンジに対する比は 10^{-5} である。ところがこの精度を満たす力センサメーカーはなかなか見つからなかった。あるとき薬剤の量(重さ)を正確に測る秤の精度を見てみると 10^{-5} 以上の精度を持っているものが目に止まった。秤は力センサにより重さを測定している。この秤は音さ式と呼ばれる力センサを用いていた。この方式の原理はギター等の弦のように力(張力)が弦に加わるとその周波数が変化することを利用して力を測定するものである⁽⁴⁾。このメーカーと打合せをし、アクチュエータ用の力センサの開発を依頼したところ快く引き受けて頂いた。これでやっと開発の道筋あるいは全貌が見えてきた。ここで試作アクチュエータの設計に取りかかった。音さ式の力センサの開発には時間がかかるために、とりあえず既存の力センサを組み込んだアクチュエータを試作した。

(3) 1987 年

アクチュエータのもう一つの大きな課題は図 7 の主鏡側のスライド機構である。図中スライド機構は模式化して主鏡側の支点構造と主鏡の間に玉を設けたベアリングとして表しているが、ベアリングでは摩擦等の影響で正確に主鏡に加える力を測定できない。そこで板ばねを用

いた平行リンク機構を検討していた。当初、平行リンク機構を薄い板のろう付けという製作方式で試作を繰り返した。ところが形状誤差により主鏡の半径方向の力が厚み方向の力に影響するという問題が発生し、頭を抱えていた。当初の開発は 2～3 名で進めていたが、この頃に、後にすばる望遠鏡の構造等を担当する技術者が開発に加わった。彼が今までの経緯をすべて理解し一緒に検討を進めることになった。議論の末、このスライド機構について、機械加工方式による全く異なる形状の弾性平行リンク機構の形状を考案し、問題を解決することができた。音さ式力センサの試作品が完成し、アクチュエータに組み込んだ。ところが音さの周波数でその周りの部品が共振し、所定の精度が得られなかったが、これを避けるような部品の形状の改良を数回繰り返し、精度が達成できた。実際の望遠鏡搭載時と同じように傾けて支持力精度を測定し目標どおり 0.01 N の精度が満たされていることが確認できた。その様子を図 9 に示す。

(4) 1988 年

欧州で開催された 8 m 望遠鏡建設の学会でこの成果を発表すると驚きの声が上がったのを覚えている。

このように頭の中のイメージが物となり、動き、意図した性能を発揮することが確認できるという技術者の醍醐味を味わうことができ、更に次の課題にチャレンジしようという気持ちがわいてきたのを思い出す。

■ 実現性検討を振り返って感じること

主鏡支持システムの開発を通じて学んだ開発者あるいは技術者として大事と考える項目を挙げる。幾つかの項目については先人の言葉で、当てはまると思われるものを「」内に筆者なりの理解で記載した。

(1) 開発・仕事の目標に対する強い動機

この開発ができれば、客先に喜んで頂ける、社会に役立つものを提供できる、世界一のものができる等の動機を強く持つことが大切である。日々の仕事も同様で、例えば、仕事を期限内に完成させることで、客先に満足してもらえという気持ち等を大切にしていかなければならないと考える。

(2) 開発・仕事の全貌を見て作業を進める

例えば、アクチュエータ開発の場合、高精度力センサの実現性が得られた段階で開発の道筋が見渡せ、詳細作業に取り組めた。どのような開発・仕事も同じで、開発・仕事のゴールまでの道筋あるいはビジョンをできる限り早い段階で見通しておくこと、あるいは関係者に示すことが重要である。

図 9 試作アクチュエータの支持力精度試験⁽⁵⁾

(3) 執着心・あきらめない気持ち

「たとえあなたが頭脳明晰でないとしても言い訳できないことがある。それは日々、労力を惜しまず努力したか？」⁽⁶⁾

新しいアイデアを生み出したり、困難な課題を克服するためには、日々、考え続けるということが必要である。反復することにより答えが見つかることが多々ある。

(4) 原理に立ち返り、本質にせまる

「大事な学問は、まず倫理学、その次は物理学、数学、国語」⁽⁶⁾

アクチュエータの開発では正確に支持力を発生させるということがどういうことか、その本質に立ち返った。

例えば物の動きに関わることであれば、応用力学や制御工学を使用しなくても、ニュートンの運動方程式・微分・積分を知っていれば全ての事象が把握できる。応用力学や制御工学の手法等を利用すれば効率的であるが、新しいことを開発する時には基礎（物理学、数学等）を理解し、それを課題解決に適用することが必要である。基礎を理解し応用することでより本質的な開発が可能となる。

(5) 同じレベルを持った複数の人と議論

一人ではどうしても袋小路に入ってしまう。あるときは複数の人と議論することで短期間に新しい解決策が見つかる。この場合、その人は本人と同レベルの知識と、上記（1）に述べた強い動機を持っていることが必要である。

(6) 達成感と新たな挑戦への意欲

「仕事が人を育て、人が仕事を拓く」⁽⁷⁾

頭にイメージしたものが、図面となり、形になり、動作し、所定の性能を発揮したときに技術者としての強い達成感を味わうことで、今回は、より良いものを作ろうという意欲がわく。目的達成までの労力が大きければ大きいほどそこで経験したことは生かされ、本人の成長に役立つ。このサイクルを繰り返せると本人だけでなく組織、社会全体としても大きな力を出すことができる。

日々の業務でも今日の経験を明日に生かそうという姿勢が大切であると考える。

■ 設計製造

1991年から本格的なすばる望遠鏡の建設が開始された。筆者は以後、望遠鏡全体の開発にも参加することとなった。すばる望遠鏡の建設に携わった方は設計者だけでも協力会社等を含めると数百名になると考えられる。筆者が関係した多くの方、例えば、望遠鏡本体、制御装置、駆動モータ、望遠鏡構造の製作のかぎとなる技術者は上記「実現性検討を振り返って感じる」に示したことを大切にしていたと

感じる。筆者よりもはるかに頭脳明晰な人でも、打合せの翌日、新たな解決策を提示されることがよくあった。頭脳明晰であって更に日々努力されることほど頼りになることはない。

■ 仮組の状況

仮組時には研磨した主鏡が使用できないために、本物の主鏡と同じ質量とインタフェース形状を持つダミー主鏡を鉄で製作して組立・試験を行った。ダミー主鏡を主鏡セル・アクチュエータへ組み込むときの様子を図10に示す。

ダミー主鏡・主鏡セル・アクチュエータを望遠鏡本体に組み込み、鏡筒を傾け、ダミー主鏡を傾ける試験を望遠鏡駆動試験と同時に実施した。その状況を図11に示す。

仮組・試験の後、解体して、主鏡支持システム以外はマウナケア山頂に輸送し、主鏡支持システムは主鏡との組合せ試験のために研磨工場（ピッツバーグ）に輸送した。

■ 研磨した主鏡との組合せ試験

主鏡研磨の工程は当初の計画よりも遅れ、一方、ファーストライトの期限は迫っており、現地での調整期間を短縮せざるを得ない状況となった。研磨会社は遅れを挽回すべく24時間体制で研磨を実施していた。筆者は1998年4月からピッツバーグにある米国の研磨会社に駐在してその

図10 ダミー主鏡の主鏡セル・アクチュエータへの組込み
(写真提供：国立天文台)

図11 ダミー主鏡を傾けて支持する試験
(写真提供：国立天文台)

進捗をフォローすることとなった。

(1) 主鏡研磨と干渉計による鏡面形状測定

米国の研磨工場では、最終段階で干渉計による形状誤差測定とそれを修正する研磨が繰り返し行われた。工場のレイアウトを図12に示す。研磨工場は石灰岩の廃坑に建設されており、高さ40m、直径10mの縦穴を利用している。主鏡から近似曲率中心まで30m、ここに干渉計を設置し干渉計から発した光が主鏡で反射され干渉計に戻ってくる。この光と干渉計内部の基準の光とを干渉させ、主鏡の凹凸を測定した。

図12 研磨工場レイアウト（イラスト提供：国立天文台）

(2) 研磨精度 12 nm rms (root mean square)*

1998年7月、研磨精度は20 nm rms を達成、要求を満たした。

ところが、この時期欧州のVLTの4台のうちの1号機目が既にファーストライトに成功しており、その主鏡の研磨精度は15 nm rms であった。国立天文台と協議し世界一を目指し、更に研磨を続けた。その結果12 nm rms の研磨精度が達成された(図13)。このとき、研磨の現場の責任者は、24時間体制という厳しい条件であったが、このデータを見たときに感激し、直ちに研磨工場本社に結果を報告していたことが忘れられない。

(3) 研磨した主鏡と主鏡支持システムの組合せ試験

研磨終了後、主鏡を研磨工場の研磨台から外し、日本から運んだ主鏡セル・アクチュエータと組み合わせた(図14)。研磨時点では主鏡表面には反射面のコーティングは

* rms : あるべき値と測定値の差の二乗平均の平方根。

図13 主鏡研磨精度（画像提供：国立天文台）

なく（この状態で十分干渉計測が可能である）、主鏡を透してアクチュエータが見える。干渉計で鏡面誤差を測定し、それを補正する支持力を実際にアクチュエータで加えることにより主鏡支持システム上で鏡面精度を上記と同レベルとすることができ、試験の目的は達成された。

1998年8月、主鏡・主鏡セル・アクチュエータを解体し、ミシシッピ川、パナマ運河経由ハワイに輸送した。主鏡の輸送状況の例を図15に示す。

ファーストライトのためには主鏡だけでなく副鏡も必要である。副鏡は1995年から、同じく米国で、製造開始されていたがこれも当初の計画より遅れ、その進捗フォローのために引き続きピッツバーグに駐在することとなった。副鏡の研磨が完成したのは1998年12月17日、直ちに航

図14 研磨した主鏡と主鏡セル・アクチュエータの組立（写真提供：国立天文台）

図15 主鏡の輸送状況の例（写真提供：国立天文台）

空便でハワイ現地へ輸送した。筆者も12月20日、ファーストライト作業支援のためにハワイへ移動した。

■ファーストライト

ファーストライト時の統合計算機から望遠鏡を操作する様子を図16に示す。

1998年12月24日、まず北極星を捉え、他の星の追尾も成功した。残る試験は主鏡支持制御システムの試験となった。

最終の主鏡支持システムのアルゴリズムチェック等のあと、1998年12月30日、主鏡制御支持システムオンのボタンを押すときがきた。鏡面測定装置からアクチュエータへのフィードバックサイクルは約30秒程度である。オ

図16 ファーストライト時の計算機からの望遠鏡操作
(写真提供：国立天文台)

(a) 主鏡制御スイッチオフ (b) スイッチオン
(星像がどんどんシャープに！)

図17 主鏡支持システム試験成功の瞬間

図18 ファーストライトのオリオン星雲画像
(写真提供：国立天文台)

ンの後このサイクルを繰り返すたびに図17(a)から(b)に示すように星像がどんどんシャープになり、一気に所定の性能を達成した。寝ても覚めてもすばる望遠鏡のことを考えるようになってから15年、安堵の気持ちで満たされたときを迎えることができた。

翌1999年1月、ファーストライトとして公表された画像の一例を図18に示す。

むすび

世の中で初めてのものを作るときは、その組織体制もさることながら、それを推進する人が大事であると強く感じる。すばる望遠鏡が建設できたのは、いろいろな方々が、日々、知恵を出し、労力を惜しまず努力されたからである。また開発から製造まで、各段階で、できることは可能な限り検証しておくことが重要であると考えます。

今後は、すばる望遠鏡が引き続き世界で活躍できるように支援したく、またそうなるように願っている。

最後にすばる望遠鏡建設に向けていつも温かく御指導頂いた国立天文台の皆様に改めて感謝する。

■文献

- (1) http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j_index.html
- (2) 村山 齊, 宇宙は何でできているのか, 幻冬舎新書, 2010.
- (3) 家正 則, すばる望遠鏡, 岩波ジュニア新書, 2003.
- (4) <http://www.vibra.co.jp/glossary/subaru/>
- (5) N. Itoh, "Mechanical design of force actuator for JNLT mirror support system," ESO Conf. on Very Large Telescopes and their Instrumentation, vol. 1, pp. 572-582, Oct. 1988.
- (6) マルクス・アウレリウス著, 神谷美恵子訳, 自省録, 岩波文庫, 初版1956, 改版2007.
- (7) 例えば, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/csr/backnumber/pdf/report03.pdf> page 43

伊藤 昇

1975 東大大学院機械工学研究科修士課程了。同年、三菱電機株式会社入社。大形衛星通信用アンテナ、大形望遠鏡の開発・設計に従事。1999～2003 三菱電機アメリカ、すばる望遠鏡エンジニアリングオフィス拠点長。2004 通信機製作所インフラ情報システム部主管技師長。2008 春の叙勲にて望遠鏡の制御技術に関して紫綬褒章を受章。2011-04 同社定年退職後、引き続き嘱託として望遠鏡関連の業務に従事。日本機械学会会員フェロー。