

国立天文台すばるの主鏡開発秘話

国立天文台名誉教授

成相 恭二

Hidden story of the Main Mirror of Subaru Telescope National Astronomical Observatory of Japan

Kyoji Nariai

Professor Emeritus, National Astronomical Observatory of Japan

すばるは文部省国立天文台がハワイに建設した口径 8.2 m の反射望遠鏡である。主鏡はコーニング社の ULE (Ultra Low Expansion Glass=超低膨張ガラス) で、外径は 8.3 m、厚さ 200 mm、中央が約 281 mm 凹んだメニスカス状になっている。最初から直径についての数字が 2 つも出てきて戸惑われる読者もおられたことと思う。望遠鏡の鏡を研磨する時にどうしても円周部分がだれてしまうので、端の 50 mm だけは研磨の仕様から外してある。だから望遠鏡の性能としての数字は有効口径で 8.2 m を使うが、ガラスを作る会社としては大きいほうの数値、つまり造ったそのものの外径、8.3 m を使うことが多い。ややこしいことには、赤外観測の時に視野の端で雑音を拾わないようにこの円周部分も磨いてあるそうで、こうなるとこの文を書いている私もどの数字が代表的なのかわからなくなっている。

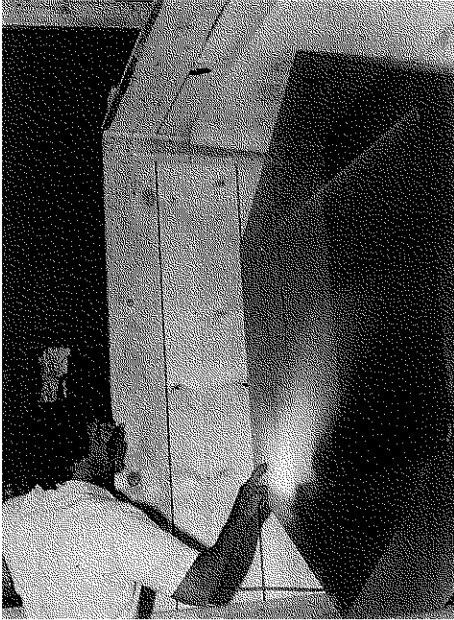
すばる望遠鏡は、世界の第一線で仕事をしたい、という光学赤外線分野での日本の天文学者の願いを叶えてくれるものである。だから

〒168-0063 東京都杉並区和泉 4-32-7
TEL 03-3324-2250
FAX 03-3324-2250
E-mail: nariaikj@cc.nao.ac.jp

1984 年頃に構想が具体化したときにはパロマー山の 200 インチ望遠鏡を越えるもの、ということで口径は 7.5 m (=300 インチ) だった。1970 年代に 3-4 m 級の望遠鏡が幾つも作られたが、やはりすばるの目標はパロマーを超えるものだったのである。そうは言うもののこれは簡単なことではなかった。と言うのも 1948 年に動き始めたパロマーの 200 インチは当時の技術の粋を尽くして完成されたものだからである。セルリエのトラス、ストロングのアルミ蒸着、ロスの主焦点補正レンズ、ブラウンの研磨などその後の大望遠鏡では当然のこのように使われるようになった技術が開発されている。パイレックスを使ったリブ構造の主鏡はその金字塔の頂点に立つものであろう。この鑄込み、輸送の時には全米が興奮のつばに巻き込まれたと「パロマーの巨人望遠鏡¹⁾」は伝えている。

大望遠鏡が相手にするのは角度にして 1 秒を切るような天体である。そのためには鏡が歪んではいけない。歪まないようにするには厚みを持たせる。直径に見合った厚さにすると当然重くなる。また鑄込んでから常温にするまでの

脚注 1: デービッド・ウッドバレー著, 原著 Glass Giant of Palomar 1939 年刊



ヘクスという工程に進み最終的に8mのメニスカス鏡材になります。この写真はヘクスの寸法を測っているものです。(国立天文台提供)

冷却時間も長くなる。パロマーはガラス材として熱膨張率の小さいパイレックスを使い、構造としては鏡の裏面をリブ構造にしたので重量が約20トン、冷却に9ヶ月かかった。同じ構造で直径を1.5倍にすると50トン以上、冷却には数年かかる。これでは不可能に近い。

ブレースルーは鏡を薄くすることだった。薄いと当然剛性は小さくなり、いわばヘナヘナになる。これを支持点を増やすことで鏡面を正しく保つようにした。直径7.5m厚さ20cmとし、従来は3点支持あるいはその拡張で鏡を支えていたのを、支持点間隔を狭くして20cmの厚さでも十分鏡面精度が保てるようにする。そして各支持点では与える力を制御する。すばるは最終的には264点(3点は位置決めに使う)で支えている。この薄い鏡を実現するのにパロマーの時代には使えなかった技術が2つあった。アクチュエーターと有限要素法である。三菱電機が開発したアクチュエーターは支

持力を10万分の1の精度で制御できるいわばロボットである。有限要素法は物体を細かい部分に分け、お互いに働く力の関係を式で表しておいて物体の変形を解く方法で、未知数が1000以上もある連立方程式を解くことになる。大型コンピュータの発達によって可能になった技法である。

鏡材になるガラスの候補として、パイレックスより百倍も熱膨張率が小さいものが二種類あった。一つはコーニング社のULE、もう一つはショット社のゼロデュアである。両方とも熱膨張率がプラスとマイナスのものを使って全体でゼロに近くするのだが、ULEは成分の混合比で、ゼロデュアは冷却時の熱処理による結晶の割合で実現している。それまでに世界で誰も300インチの鏡材は作ったことがない。コーニングは小さなブルと呼ばれるものをまず造り、六角形にした後融合させて大きな鏡材を作る。この技術ですばるの鏡を作れる、と提案してきた。ショットは大きな鏡の冷却に何回か実験をしなければならぬが、方法が確立したら幾つでも造れるということだった。われわれは結局コーニングのULEを選んだ。ジュミニ(アメリカ、イギリス、カナダ、ブラジル、アルゼンチン、チリがハワイとチリに各々1つ置く8m望遠鏡)もULEだ。ショットはVLT(ヨーロッパ天文学連合がチリに作る4基の8m望遠鏡)を受注し、予定通り実験をした後よい鏡を作った。

すばるがULEを選んだ最大の理由は既存の技術の延長でできる見通しが立ったからである。鏡が入るだけの炉は造らなければならなかったが、技術として開発要素は少なかった。一方でゼロデュアは大きな鏡材の熱処理と言う大きな開発要素があったこと、ヨーロッパの中のVLTといういわば身内のお得意さんが優先されることは目に見えているので、日本の都合は後回しにされるだろうこと、などがあって踏

み切れなかった。開発要素ということではアリゾナ大学のロジャー・エンジェルが研究していたハニカム鏡もそうだった。ハニカム鏡はパロマーのリップ構造の発展版とも言える物で、表裏2枚の板の間が蜂の巣構造の空洞になっている。空洞を造るための珪藻土の鋳型はガラスができた後で粉々に壊して、裏面にある穴から掃きだしてしまう。鋳型の構造が複雑なのでULEでは粘性が高くて細部まで入らない。それでホヤのボロシリケート・ガラスを使っていた。ショットは提案の時にスケジュール、費用も示したのだが、エンジェルは共同研究をしてくれ、と言うだけで予定も費用も示さない。早い時期に候補からははずさざるを得なかった。

大きな計画にはついてまわる開発要素は日本の予算制度に組み入れにくい、ということもあるが、予定、費用について見通しの立てられない開発は危険である。パロマーの例がある。最初はジェネラル・エレクトリックが熔融水晶の鏡を作るはずだったが、不幸な失敗が重なって中止になった。中止になったときはロックフェラー財団に200インチ鏡の製作費用として出して貰った600万ドルのうちの60万ドルを使っており、しかも成功の見通しは立っていなかったのである。その後でコーニングのバイレックス鏡が作られた。

望遠鏡は天頂から水平線に近い所まで傾きを変える。普通はこの傾きが変わる鏡を支えるのに光軸方向は鏡の底で支え、軸に直角の方向は鏡の縁で支える。しかしすばるの主鏡支持方法は他の8m級望遠鏡と異なっている。各支持点はローカルな重心に位置するようにしてあるので鏡が傾いても鏡の部分部分に余分な力はかからず、変形も小さい。これを実現するために主鏡の裏面にアクチュエーターの支持点部分が入る、直径100mm、深さ150mmの穴を261個あけてある。ULEの場合は穴あけ作業を行った後エッチング処理をキチンとしてあれ

ば良いということだった。ゼロデュアに穴をあげるとその後で再度熱処理をする必要があり、難しそうだった。このこともすばるがコーニングのULEに決める要因だった。局部重心支持が効果を見せるかどうかは、これからの観測で示されるはずである。楽しみに待ちたい。

前にも述べたようにすばる望遠鏡の鏡の直径は最初7.5mと計画されていた。しかしすばるより後に計画が固まったジェミニとVLTは合計6つの8m級望遠鏡を作る事になっていた。このままで行くとすばるは単一鏡としては第7位、ケックも入れると第8位になってしまう。それで計画責任者の小平はあるとき突然、私たちのすばる望遠鏡が世界の大望遠鏡の中で首位に立つように直径を8mにする事を決めた。文部省もそれを承認した。しかし、もし他の計画が自分たちの鏡を世界最大にするために「ちょっとだけ」大きくしたら追い抜かれてしまう。それで小平は文部省、大蔵省には内緒ですばるの鏡が有効径8.2m、外径8.3mと決めたのである。

この口径の増加はかなり検討が進んだ段階で行われた。鏡材を製作するコーニング社はそのような変更はあっても技術的に何らの問題もない、という返事だった。炉はまだ造られていなかったから良かったのだろう。問題は望遠鏡機械部分およびドームのサイズを前と同じにしないと費用が跳ね上がることだった。元の設計では口径7.5m、主鏡の焦点距離15mである。この焦点距離を変えると筒長が変わりドームが変わる。それで焦点距離を据え置いて口径を増やす、という解を取るようになった。これで苦勞をさせられたのは実は私だった。私は計画の中では光学設計を担当していて、中でも主焦点補正系は山下さんと数年苦勞を積み重ねてようやくF/2の主鏡に使えるものを設計したところだった。光学系の収差は明るくなると急激に大きくなる。F/2からF/1.83への変化でその

後数ヶ月苦勞をしたように記憶している。非球面の数を2枚に増やし、要求されていた視野を30分から24分に値切って問題をクリアした。補正系についてはこれに続く話があるのだが、この文は主鏡についてのものなので省略する。

すばるのULE鏡材は直径1.6mのプールと呼ばれるものをまず造り、それを重ねて厚くし、端を切ってヘックスとよぶ六角形のものを造る。その後で8.3mの炉に並べ、融合させて大きな鏡材を作る。このプールの段階で超音波を使って熱膨張係数(CTE)を測定できる。プールの鑄込みが始まったころ、三菱電機の若い技術者(女性)がCTEの測定されたプールをどのように配置すれば鏡全体としての歪みが小さくできるか、という問題を解くアルゴリズムを開発した。これは素晴らしいことで、すばるだけではなく他の望遠鏡の鏡の製作にも使いたいという申し出があったように聞いている。しかし、しばらくしたらコーニングの技術者達が頑張ってプールの製作段階でのクォリティ・コントロールを強化した結果、製品のCTEのばらつきが一桁減り、あの素晴らしいアルゴリズムを使う必要が無くなったということだった。

1994年、鏡材が完成してペンシルヴァニアにあるコントラヴェスの工場に運ばれた頃、ハワイ島のコナで大望遠鏡のためのSPIEの会議があった。コーニングからはディック・スミスとメアリー・エドワーズが来た。彼らが会議場での展示に持ってきていたULEの接着見本のガラスをヒロにあるすばるのオフィスに借り受ける交渉をしているときに、ディックと長年の知り合いだと言うコダックのデビッド・クロウがいて、主鏡鏡材について言ったことは昨日のこのようによく覚えている。「私は30年以上大きな光学ガラスの製品を見てきたが、今度の鏡材のように素晴らしい仕上がりのを見たの

ははじめてだった。」公式の場ではないし、同じ業界ではあるが身内でもない人の言うことだから本音を聞いたと思ってよいだらう。ガラスというものは溶解冷却する過程で気を抜くと気泡が入ったり脈理ができたりするらしい。コーニングの中のすばる鏡材チームがいかに気合を入れて工程を進めていったかが、わきながら窺えたような気がした。パロマーの200インチの時のウッドバレーみたいな人が取材をしていなかったのは残念だった。

どこの望遠鏡でも鏡の搬入は最後と決まっている。でも機械部分のテストをそれまで待っているわけには行かない。それでダミー・ミラーというものが使われる。鉄製で形と重心を合わせてある。すばるでも製作され、ミラー・セルのテスト、工場での仮組み、マウナケアで組み立てた後の動作試験と活躍した。ところがダミー・ミラーはどの望遠鏡でも本物の鏡がくると無用の長物になってしまう。形から言えば長物ではなくて大物か円物である。マウナケアの上でもハワイ大学の88インチ望遠鏡やカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡の脇に転がしてある。すばるのダミー・ミラーはどうなったのだろうか。ただでくれてやる、と言われても、山頂からヒロの町に下ろすだけで数百万円の輸送費がかかりそうだ。日本まで持ち帰るとさらにかかる。持ってきたところで直径8m、重量23トンとなると個人の家には置くところがない。2年ほど前におしゃべりしながら考えついたアイディアは、ヒロのハワイ観測所の中庭に据えてバーベキュー・パーティの時のテーブル代わりにする、というのであったが。

なお、すばる望遠鏡が実現するまでの苦勞は、文芸春秋刊 小平桂一著 宇宙の涯てまで、に、また技術的な事柄は、平凡社刊 安藤裕康著 世界最大の望遠鏡「すばる」、に詳しいので是非お読みいただきたい。