

大型鏡開発に魅せられた人々

家 正 則

〈国立天文台 TMT 推進室〉

m.iye@nao.ac.jp



20世紀末から21世紀にかけての観測天文学の大躍進を支えたのは、8-10 m級望遠鏡の登場でした。それまでの技術では4 m級が限界でしたが、三つの新方式が競って開発され、このブレークスルーがもたらされました。本稿では、それぞれの開発の中心を担ったロジャー・エンジェル (Roger Angel), レイモンド・ウィルソン (Raymond Wilson), ジェリー・ネルソン (Jerry Nelson) の業績にスポットライトを当て、筆者とのエピソードも交えて、ご紹介させていただきます。この3氏には2010年度のカブリ賞が授与され、当時のオバマ大統領がホワイトハウスで祝福しました。

1. ハニカム軽量鏡方式

パロマー山天文台の5 mヘール望遠鏡の主鏡は、ガラスを肉抜きして軽量化するため、1940年代に初めてハニカム構造にして製造されました。ガラスの溶解鑄型に複数の耐火コア材を配置し、それらの隙間に溶けたガラスが流れ込み、冷却固化後にコア材を裏面から除去することで、肉抜き軽量化ガラスを実現したのですが、最初の熔解ではコア材を固定していた金属ボルトが高温のため抜けてコア材が浮き上がり失敗したそうです¹⁾。

オックスフォード大学とカリフォルニア工科大学出身の天体物理学者ロジャー・エンジェル (図1) は、アリゾナ大学に落ち着いた後に大型鏡の製作に従事し、1970年代にハニカム軽量鏡の手法

を発展させ、熔解鑄型を回転させつつ自然冷却させることで表面を回転放物面に成型し、主鏡の研削/研磨シロを少なくする方法を実現しました。ロジャーはアリゾナ大学キャンパスのフットボールスタジアムの下にガラスの製作と研磨ができるスチュワート天文台鏡研究所をつくり、マルチミラー望遠鏡MMT、マゼラン望遠鏡用の6.5 m主鏡など米国の多くの望遠鏡の主鏡を製作しました (図2)。その後LSSTの8.4 m主鏡や、大マゼラン望遠鏡の8.4 m主鏡の製作がここで続けられています。

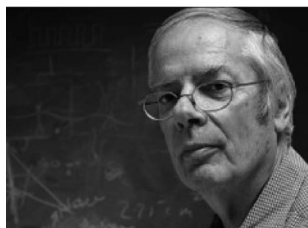


図1 ロジャー・エンジェル。

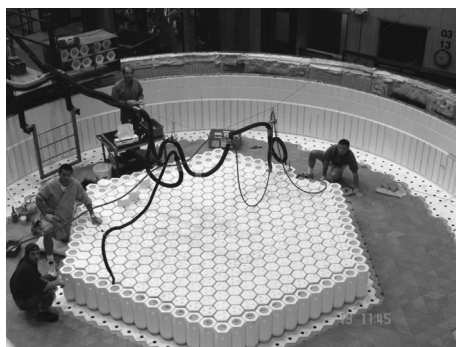


図2 スチュワート天文台鏡研究所。ハニカム鏡材製作のため、鑄型となるコア材を溶解炉に並べているところ。

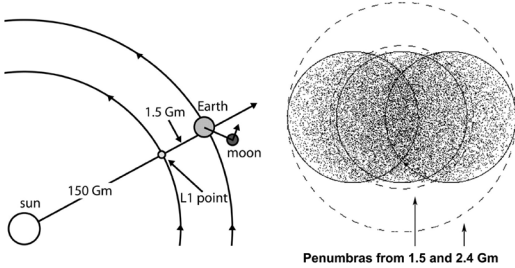


図3 L1点に展開したフレネルフィルム群による温暖化防止日傘.



図4 レイモンド・ウィルソン.

2005年にミュンヘン郊外のリングバーク城で開催された補償光学の研究会では、近くの山への遠足からの帰り道、ロジャー、アルチェトリ天文台のピエロ・サリナーリ、筆者が意気投合し、補償光学技術や環境問題などさまざまな分野について、二時間にわたり大変啓発される会話をしたことを思い出します。

そういえば、アイデアマンのロジャーは、2006年には地球温暖化回避策として、太陽と地球の間の内部ラグランジュ点L1に直径60 cm、厚さ5ミクロンの透過フレネルフィルムプレートを置くとその半影がちょうど地球サイズ程度となるので、これを20兆個ばらまくことで太陽光の1.8%を散乱させる日除けを作る可能性について、詳細な地球環境改造の検討報告書を出しています²⁾(図3)。

2000万トンに及ぶ日除けフィルム群をL1にどうやって打ち上げるか、その制御はどうするかなど、思考実験としては大変面白い考察でしたが、失敗したときのリスクを考えると、大胆すぎ大変危険なアイデアだと感じました。後日、米国エネルギー省からの資金を得て、一部試作までしたこの話をロジャーから聴き、たいへん驚いたものです。

2. 薄メニスカス鏡方式

英国のインペリアルカレッジやドイツのツァイス社で光学の研究者だったレイモンド・ウィルソン(図4)は1980年代に、軽量化するため主鏡を

極力薄くし、剛性が低下して柔軟になる主鏡の表面形状をコンピュータ制御で所定の形に保つ「能動光学」のアイデアを提唱し、欧州南天天文台(ESO)の3.5 m新技術望遠鏡NTTでこの方式を1989年に実証しました。

能動光学では、マイクロレンズアレーを仕込んだシャック・ハルトマンカメラで明るい恒星を測定して得られる多数の恒星像の位置ずれの分布から、主鏡の形状を測定します。主鏡の裏面に配置した多数のアクチュエータの支持力をコンピュータ制御で調節して主鏡の歪みを直し、いつも主鏡面を理想形状に保とうというアイデアです。レイモンドは望遠鏡技術の集大成ともいえる教科書Reflecting Telescope Optics Iを2004年に、IIを2013年に刊行しています^{3),4)}。

1983-84年に1年間ESOに客員研究員として滞在していた筆者は、レイモンドのグループが試作中の1 m能動支持主鏡について何度も議論する機会がありました。アクチュエータ群の支持力変分の列ベクトルと、主鏡形状の変位をツェルニケ級数展開した係数からなる列ベクトルは、主鏡の構造行列で結びついています。

制御を鏡の構造行列の固有値問題に帰着させるこの考え方は、実は筆者の学位論文で銀河円盤の大局的振動を固有値問題として定式化した手法と基本的に同じでした。主鏡円盤の変形と銀河円盤の振動の問題なので筆者には直感的にもわかりやすく実現性も高いと確信しました。当時、ESOの1 m鏡試作機は全体を傾けた状態での試験はで

	薄メニスカス鏡	ハニカム鏡
材質	ゼロ膨張ガラス	ポロシリケート系ガラス
熱膨張率(/C)	1億分の1	100万分の1
融点	高融点	低融点
粘性度	高粘度	低粘度
内部変形	単純	複雑
温度制御	容易	困難
支持力精度	超精密	精密

図5 薄メニスカス鏡とハニカム鏡の特性比較.

きなかったため、日本で60 cm能動光学試験機を製作し、望遠鏡を傾けた場合に生じるゆがみも確かに直せることを1988年に三菱電機との共同研究で実証しました。

薄メニスカス鏡方式ではゼロ膨張ガラスを使います。ハニカム鏡では図2のようなコア材の隙間にガラスを流し込むため、粘性が低く融点もコア材より低いポロシリケート系ガラスを使う必要があります。ポロシリケート系ガラスは熱膨張率がゼロ膨張ガラスより100倍ほど高く、より厳しい温度制御が必要となります(図5)。

力制御は温度制御より見通しが良いとの判断もあり、準備段階に50回開催した技術検討会での議論の末、すばる望遠鏡は薄メニスカス鏡を能動光学方式で建設することになったのです⁵⁾。

すばる望遠鏡の主鏡はコーニング社の超低膨張率ガラスULEで作ることになりました。当時最大の鏡材は2 m径であり、44枚の鏡材を六角形に整形し、一部はさらに半分に割って55枚のパーツを直径8.3 mをカバーするよう並べ、全体を加熱炉で融着させて直径8.3 mの一枚主鏡材に仕上げることになりました(図6)。

このとき、膨張率が 10^{-9} のレベルで僅かに異なる鏡材をどう並べるとベストな配列になるのかという問題が生じました。55枚の入れ替え問題は、大雑把には $55! = 10^{73}$ 通りもあります。1秒間に1億通りを計算できたとしても、すべてを調べるには宇宙年齢をはるかに超える時間がかかってしまいます。コンピュータシミュレーションで多

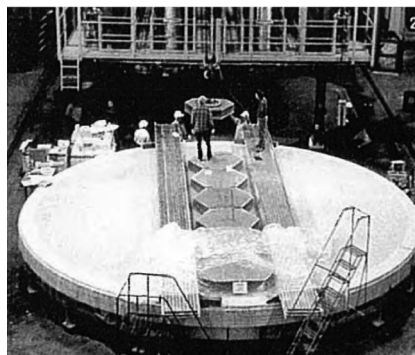


図6 すばる主鏡材は2 m径のゼロ膨張ガラス材ULEを多数並べ融着して1枚に仕上げた。

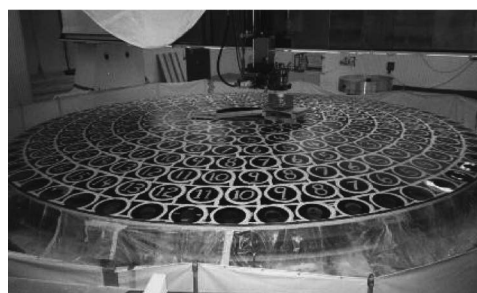


図7 すばる主鏡の裏面からの261個のポケット研削加工。

数のランダムな入れ替えの評価を行い、実用的な最適配置を見つけました。

融着過程が終わり、直径8.3 mの平板円盤になった鏡材を、中央が30 cmほど高い形の耐火レンガの山に載せて再加熱すると、周辺が垂れてメニスカス型(皿型)になり、その後の加工工程に進むことになりました。

すばる望遠鏡では裏面支持のアクチュエータを鏡材の重心面で作用させるため、裏面から261個のポケットを掘り、アクチュエータをポケットに挿入するという前例のない方式を決断しました(図7)。当時、欧州南天天文台のVLT、日本のすばる、米国のGEMINI計画の担当者が集まり技術協議を行った「8 mクラブ」では、すばるの方式は危険すぎないかと心配されました。もちろん、脆性破壊材料であるガラスへの穴開け作業は

慎重に行う必要があります。薄くて穴だらけの主鏡がその後の反転工程や研削研磨工程で割れるのではという心配は、最後までつきまといました。

幸い関係者の慎重な作業で1998年には主鏡が完成し、ハワイに届けられました。すばる望遠鏡は、すばらしい画質の望遠鏡として観測を開始し⁶⁾、その後の日本の天文学の飛躍に大きな貢献を果たしていることはご存じのとおりです。

3. 分割鏡方式

1944年1月15日にロサンゼルス郊外の田舎町で生まれたジェリー・ネルソンは高校生のときに夏の学校で天文学に接する機会を得、その町で大学へ進学した最初の子供となったそうです。1965年にカリフォルニア工科大学で赤外線での全天サーベイ用1.5 m望遠鏡の建設に携わり、素粒子実験でカリフォルニア大学から学位を取得しました(図8)。

1977年ローレンス・バークレー国立研究所に在籍中に、10 m望遠鏡検討のための5人委員会の委員に抜擢され、今日の10 mケック望遠鏡の元となる分割鏡方式の提案をまとめました。分割することで全体を軽量化し、コストダウンを踏むことができるのは自明でしたが、要素鏡は軸外しの非球面に研磨する必要があります。

通常の研磨方式ではこの難題はクリアできません。ジェリーはこの難題を「曲げ研磨法」で乗り越えようと考えました。鏡材の縁に曲げモーメントをかけて、鏡を曲げた状態で表面を球面に研磨し、研磨後に曲げモーメントを解除すると曲がり

変形が戻り、非球面になります。これが所望の非球面となるように研磨時にかける曲げモーメントの分布を案配するというアイデアです。

ただでさえ前例のない、困難な挑戦ですが、仮にこの方式で非球面要素鏡が実現したとしても、実際に36枚の分割鏡の位置と向きを合わせ、隣接する要素鏡との高さを光の波長の10分の1のレベルでそろえて位相を合わせることは、さらなる困難と考えられました。しかしジェリーは、確固たる信念のもとケック望遠鏡での開発を続け、168個のエッジセンサーを鏡材の合わせ目に配置して段差を測定し、108個のモーターで鏡の姿勢を調整して全体を1枚続きの主鏡として機能させることに成功したのです。

10 m望遠鏡計画では、分割鏡方式はその余りの複雑さのためカリフォルニアでも実現困難と当初考えられました。実は、すばる望遠鏡の設計を検討したとき、私たちもこの方式は実現不可能と判断しました。1994年10月に早稲田大学で開催したすばる望遠鏡計画の国際的お披露目シンポジウムに招待講演者として招いたジェリーが、分割鏡方式のケック望遠鏡の性能を淡々と発表するのを聴いて、その成功にたいへん驚いたのをよく覚えていますが⁷⁾(図9, 10)。

ジェリーは1994年にカリフォルニア大学サンタクルツ校の教授となります。1995年には、スペインがすばる望遠鏡を参考に8 m望遠鏡計画を練り、その国際評価委員会にジェリーと筆者ほか数名が招かれました(図11)。この評価委員会で分割鏡方式の実績とメリットの説明に熱弁を奮ったジェリーに動かされ、スペインは計画を変更して、分割鏡方式で10 m望遠鏡GTC計画を推進することになったのです。

ジェリーとは望遠鏡技術に関するさまざまなメールのやりとりのほかにも忘れがたい思い出があります。1986年まだすばる望遠鏡の概算要求を進めていたころの話ですが、筆者は水泳中に膝を痛めてしまいました。診断してもらったところ、高



図8 ジェリー・ネルソン。



図9 1994年10月 早稲田大学で開催したすばる望遠鏡計画のお披露目シンポ。



図10 懇親会で和太鼓を熱演するジェリー（左から二人目）。熱演のあまり手のひらは血だらけに。

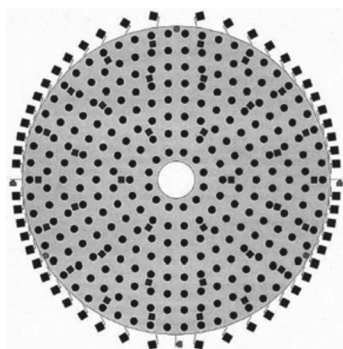


図11 スペイン8m望遠鏡計画書から。当初計画はすばる望遠鏡と同じ薄メニスカス鏡を261点で能動支持する方式だった。

校生の時にサッカーで割った膝の半月板が膝関節内でずれて引っかかっているというのです。従来なら膝を切開して半月板を除去するのだそうですが、割れた半月板をファイバー内視鏡による縫合手術をして戴くことになりました（図12）。後で



図12 膝のメニスカス手術時の筆者と、最初のワープロエッセイ「割れたメニスカス」（1986年）。

聴いたところ日本でもまだ10例目程度の先端手術だったそうです。

このとき知ったのですが膝の半月板のことを医療用語でもメニスカスというのだそうです。1カ月の入院中に当時初めて購入したワープロで「割れたメニスカス」というエッセイを書きました。

そのエッセイは次のジョークに集約されます。“Subaru meniscus can be re-fused even if it is broken to 2 pieces, but we definitely refuse such a remedy.”（すばるのメニスカス主鏡はULE部分鏡材を融着して作ったものなので、原理的には万一二つに割れても融着し直すことができる。自分の膝の割れたメニスカスも縫合手術で治った。だが、そんなリスク回避策はすばるでは受け入れられない。）これは再融着（re-fuse）と拒否（refuse）にかけたブラックジョークです。

メニスカス主鏡が自慢のすばる望遠鏡の計画を練っている当事者が、メニスカスを割ったのでは縁起が悪いことおびただしいので、このエッセイは封印していたのですが、1995年のスペイン望遠鏡の国際評価で一緒になったジェリーとの酒の席で、ついこの話を披露しました。

酒の勢いですばる主鏡に関するもう一つのジョーク，“Though a very delicate and risky process, boring 261 pockets is really time consuming and boring.”（ガラス主鏡に261個もの穴をうがつのはいへん危険で慎重を要する作業だが、時間が

かかり退屈な仕事でもある)も披露すると, Jerry はたいへん気に入ってくれました. boreに「穴を空ける」と「退屈」の二つの意味があることにかけてジョークです. その夜すぐジェリーから世界の望遠鏡関係者に家のジョーク2例がメールでばらまかれてしまいました.

ジェリーは1999年には補償光学センターの初代所長となります. 2003年以降, TMTの基本設計をリードしてきましたが⁸⁾, 2011年脳卒中で倒れた後も, 電子メールで有益な技術的助言を発信してきました.

ジェリーの偉業を称える研究会を企画できないかと3年前に筆者からも提案し, 2017年4月の開催に向けて準備してきたのですが, 諸般の事情で開催が7月になってしまいました. そんな矢先の6月10日にジェリーは享年73歳で逝去されたのです. 直接再会して, 労をねぎらう機会を失ってしまったのは, 誠に心残りでした.

サンタクルツ市内のホテルで開催された偲ぶ会には, 100人余りが参加し, その半数ほどの人が次々に登壇して, ジェリーの明晰な頭脳と飽くなき探究心のエピソードを紹介して称えました. 気さくで飾らぬ性格のジェリーは, 他人の発表に問題があることに気づいた場合, いつも笑顔のまま, 「そのスライド9枚目の意味がよく理解できないのだけど…」という問いかけから, 鋭く正しい指摘が始まったということを複数の人が語っていました. 筆者も海外からの参加者として, すばる建設時代の交流やスペインの望遠鏡計画のレビューと一緒に参加した思い出とTMTでの交流の経緯などをお話させていただきました.

4. あとがき

本稿で紹介した3氏は4 m級から8-10 m級へ, さらには30 m級望遠鏡の実現への道を拓いてくれました. しかし, 大型化に伴う予算規模の制約から, 100 m級以上の次の「超超大型望遠鏡」計画を具体化するには, 新たなアプローチが必要と

想われます. すばる実現の道はそれなりにたいへんでしたし, TMTは今もたいへんです. でもゴールははっきり見えています. その次のゴールは今のところ筆者には見えていませんが, 実現可能性のあるアイデアの登場に期待しています.

本稿はジェリー逝去直後の2017年7月に起案したのですが, 寄稿が遅れて「六日の菖蒲」となってしまいました. 同氏のご冥福を改めてお祈りします.

参考文献

- 1) ウッドベリー, D. O. (関正雄, 湯浅博, 成相恭二 訳), 2002, パロマーの巨人望遠鏡 上・下 (岩波文庫)
- 2) Angel, R., 2006, Proceedings of National Academy of Science, 103(46), 17184 <http://www.pnas.org/content/103/46/17184.full>
- 3) Wilson, R. N., 2004, Reflecting Telescope Optics I 2nd ed., (Springer, Berlin)
- 4) Wilson, R. N., 1999, Reflecting Telescope Optics II 1st ed., (Springer, Berlin)
- 5) 家正則, 2003, すばる望遠鏡 (岩波ジュニア新書)
- 6) Iye, M., et al., 2004, PASJ, 56, 381
- 7) Nelson, J., 1995, in Scientific and Engineering Frontiers for 8-10 m Telescopes, eds. Iye, M., & Nishimura, T., (Universal Academy Press, Tokyo), 46
- 8) <http://www.tmt.org/> (2018/02/02)

Pioneers of Large Mirrors

Masanori IYE

National Astronomical Observatory

Abstract: The great advancement of observational astronomy since 1990s was brought by new generation of 8-10 m telescopes. The breakthrough from 4 m class telescopes to 8-10 m or even larger ones was made possible by three different approaches to produce their primary mirrors led by Roger Angel, Raymond Wilson and Jerry Nelson, respectively. These three leaders won 2010 Kavli prize for their pioneering achievements and got celebrated by president Obama at the White House. This essay highlights the key technologies developed by them and delivers some personal episodes the author experienced with these gifted intellects.