



23. 大型天体望遠鏡の最新研磨技術

家 正 則

はじめに

20世紀の反射望遠鏡建造の歴史を振り返ると、1917年に完成したウィルソン山の257cm鏡、1948年に完成したパロマー山の508cm鏡を頂点として大型化指向は一段落し、その後は口径増大よりも、望遠鏡としての高精度化に重点を置いた設計がなされ、1980年代末までに世界中で3 - 4 m級望遠鏡が11台建造された。

実際、1970 - 80年代の電子技術、半導体技術の急速な発展により、光検出器の量子効率は約1%から最大約80%にまで増大した。望遠鏡口径はこの間、頭打ちであったにもかかわらず、おかげで、天体観測能力が飛躍的に増大した。しかしながら、1980年代後半には光検出器の改善がほぼ完了したことと、赤外線検出器が急速

に進歩したことを受け、可視域から赤外線域までに最適化した超大型望遠鏡を建設して、天体観測能力を高める必要性が明確になり、各國で次世代の8 - 10m級望遠鏡の建造が検討され始めた。日本の国立天文台も、1991年度から9年計画でハワイ島に単一主鏡としては世界最大の口径8.2m望遠鏡の建設を進めている¹⁾(図1)。

これらの超大型反射望遠鏡建設の過程で、大型非球面鏡の研磨に関連して、様々な新技術が開発されてきた。以下に、鏡面測定法と鏡面研磨法に関する最新技術について概観する。

2. 鏡面測定法

2.1 干渉測定法²⁾

鏡面を正しく研磨するには鏡面を正確に測定することが不可欠である。大型凹非球面の測定法としては、曲率中心において点光源からの光束をスリレンズを用いて被検非球面に垂直に光線が入射するように変換し、被検面からの反射光と基準面からの反射光の干渉縞をフィゾー干渉計で測定するのが最も一般的である。

干渉計としてはこの他にもシアリング干渉法、ゾーン・プレート干渉法、トワイマン・グリーン干渉法、偏光干渉法などを用いる場合もある。さらには、基準面を移動させて位相シフトを与

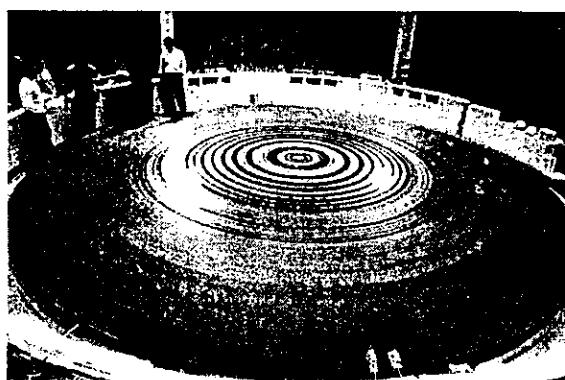


図1 一体化融着工程、球面化工程を終えたすばる望遠鏡8m主鏡用ガラス材

国立天文台 大型光学赤外線望遠鏡計画推進部 Masanori IYE

〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1

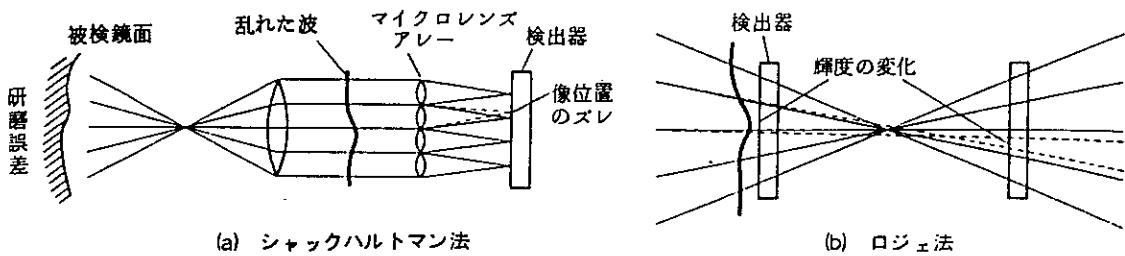


図2 シャック・ハルトマン法と曲率測定法

えたり、ドップラー効果による周波数変調により位相シフトを与えて³⁾、フリンジ・スキャン法により位相分布を求める方式のものや、高輝度光源を用い短時間露出により空気の揺らぎをフリーズして計測精度を上げ、統計処理により揺らぎの効果を除去する方式のものなどが製品化されている。積極的な振動補償光学系を組み込んだ干渉計も開発されている。

これらの方法で求めた干渉縞を解析することによって鏡面形状を再現するが、最近はコンピュータ制御の画像取得解析システムによりリアルタイム処理で鏡面測定結果が得られるようになってきた。

2.2 非干渉測定法⁴⁾

干渉計測法の他には、望遠鏡実装時の測定法として多用されるようになってきたシャック・ハルトマン法⁵⁾や、補償光学系の簡便な波面測定法として注目されている曲率測定法が、大型鏡面の測定でも実用化されている(図2)。

シャック・ハルトマン法は主鏡像上に配置したマイクロレンズ・アレーにより、格子状の測定点における鏡面の勾配ベクトルを測定するものである。シャック・ハルトマン法に干渉を導入した方式も実用化されている⁶⁾。鏡面の一次微分に相当する勾配ベクトルの分布を一度空間積分することにより、鏡面を評価できる。

曲率測定法⁷⁾は鏡面の二次微分に相当する曲率を焦点内外のデフォーカス像の輝度分布の差から求める方法であり、被検鏡の周辺部での鏡面の勾配を境界条件として、空間積分を二度行うことによりポアソン方程式を解くと、鏡面を再現できる。

2.3 ヌルレンズ

8mすばる望遠鏡の主鏡研磨では、その初期には波長 $10.6\mu\text{m}$ のCO₂レーザー光源と赤外用ゲルマニウムヌルレンズを用いて測定・研磨を行い、終盤では波長 $0.633\mu\text{m}$ のHe-Neレーザー光源と可視光用ヌルレンズに切り替える。

研磨はヌルレンズを頼りにして進めるので、ヌルレンズの各面が正しくつくられているか、レンズ間隔、軸合わせが正しいかを慎重にチェックしておくことが大切である。実際には赤外用ヌルレンズと可視用ヌルレンズを独立につくり、それぞれの検定を独立に行った上で、赤外から可視に切り替えるときに両方のヌルレンズでの測定に矛盾がないことを確認する。さらに、独立なペンタプリズム法などにより球面収差がないことを確認する。

ハッブル宇宙望遠鏡の主鏡研磨には3つのヌルレンズが製作され、それらでの測定結果に矛盾が見られたが、その原因を充分に突き止めないまま、最後のヌルレンズを信じて主鏡を仕上げたために、大きな球面収差が残り、大問題になった事件は記憶に新しい。

2.4 8m鏡面測定設備

実際の鏡面測定では、空気の擾乱による測定波面の乱れと測定光学系の振動の2大難問に対処しなければならない。除振のため研磨工場は、地盤が安定し交通の往来の激しくない所に建設される。8m鏡の曲率半径は約30mにもなるので、主鏡の測定には30m以上の高さを確保した空間が必要となる。

欧洲南天天文台の8m望遠鏡VLTの主鏡は高さ32mの塔を備えた工場で研磨される⁸⁾。主

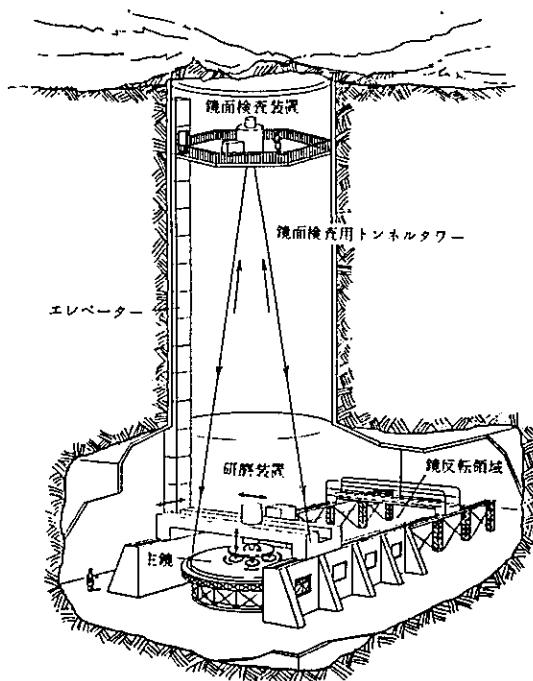


図3 すばる望遠鏡主鏡の精密研磨設備

鏡とその約30m上方に設置する鏡面測定光学系の間の空気が揺らがないようにするため、二重の断熱壁でこの空間を覆い、二重壁の間の空間を強制空調して温度差を小さくする。内側の測定空間についても、気流を制御して上下の空気を還流させ温度差の解消に努める。風による塔の振動を避けるため外壁と内壁とは基礎を別にする工夫も施している。

日本の8m望遠鏡「すばる」の主鏡は、石灰岩の採掘鉱を拡幅して建設された工場で研磨される。地中の工場は、日照の影響を受けず温度が安定していて、風による振動もないという利点を持つ(図3)。ここでも気流を制御して温度の一様化に努めることには変わりはない。

2.5 凸副鏡の測定

凸型双曲副鏡の測定には副鏡の直径よりも大きな球面凹面鏡を用いるヒンドル球方式がよく知られている。だが、副鏡が大型化していくとこのような方法も現実的ではなくなる。ヌルレンズを用いる修正ヒンドル法や、研磨鏡面を裏側から測定する方法、コンピュータ作画のホログラムを備えた基準面を被検面に向かい合わせて干渉縞を見る方法⁹⁾などが試みられている。

また、大口径被検面を部分領域ごとに干渉測定し、測定結果を合成することによって¹⁰⁾、大型凸非球面の形状を求める手法も研究されている。

3. 鏡面研磨技術の発展

3.1 前加工

まずガラス鏡材の鏡面となる位置に泡やキズがないことを確かめた上で、裏面と側面を研削加工する。すばる望遠鏡の主鏡の場合、能動支持用アクチュエータを埋め込む方式で支持するため、多数のポケットを裏面に掘る必要がある。裏面と側面の加工が終わると鏡材をつりあげ、裏返して、表面の加工を行う。24トンにもなる貴重な鏡材を安全に運搬、支持、反転するための治具の設計製作も大仕事である。機械研削で表面形状を1mm以下の誤差に仕上げ、プロフィロメータなどで形状確認をしたあと、いよいよ鏡面研磨の工程に入る。

3.2 鏡面研磨

鏡の研磨はモグラ叩きに似ている。出ている山を着実につぶしてゆくことが大切である。山と谷を見誤って谷を削ってしまうと、その分全体を磨き直すことにもなりかねないので、一大事である。通常、一工程での各点での研磨量が目標量の2/3程度となるように、研磨時のラップの押し付け圧力 p 、ラップと鏡面との相対速度 v 、その点での滞在時間 t を調節する。この時用いる研磨ラップの大きさは、能動光学方式の鏡の場合は最終的には支持点間距離よりも小さいレベルでのリップルが無くなるように選ぶ必要がある。

鏡の支持点が離散的な場合、鏡は自重により支持点間でたわむ。たわみ量は鏡が水平のときに最大で鏡を垂直に立てるとゼロになる。研磨は通常鏡を水平にして行うので、研磨時には鏡は自重と研磨圧の和で変形した状態で磨かれることになる。研磨時も離散的な支持法をとると、研磨圧分だけは支持点で余計に削ることになる

ので、研磨終了後に測ると支持点間が逆に飛び出す形のリップルが生じやすいので注意を要する¹¹⁾。

最終仕様の範囲以内に達するのに研磨・測定のサイクルが何工程必要であるかは、研磨の工期と予算を確認する上で重要である。以前は、研磨により上昇した鏡材の温度を鏡面測定までに冷ます必要があり、鏡面測定も干渉縞を撮影した写真を現像後、計測するという手間があつたため、一工程に数日を要した。最近では熱膨張率が小さいガラス材を使用するようになったことと、干渉縞測定などにCCDカメラが利用され、フリンジ評価も計算機で行えるようになったため、一工程を一昼夜でこなせるようになってきた。研磨初期には研磨ラップを主鏡上を遊星回転させて磨いて行くが、終盤はコンピュータ制御または熟練者が手で磨いて行く。

3.3 曲げラップ法

アリゾナ大学鏡研究所では、ボロシリケート系の硝材を用いたハネカム構造軽量鏡を製作しているが、その研磨には能動変形するラップを開発して非球面鏡の研磨などを行っている。小型のラップを用いると鏡面への当りが良い反面、大型鏡を磨くには多大の時間を要することになる。大型のラップなら、細かいリップルを残さずに比較的短時間で研磨を進めることができくなる可能性があるが、非球面鏡の場合はラップの形が一定では磨けない。そこでアリゾナ大学では、12個のモーメントアクチュエータ内蔵の形状可変な1200mm径のアルミ円盤ラップを試作して、ラップが回転並進運動するのに同期してアクチュエータのモーメントを制御し、常に全面が目的の非球面になるようにラップを変形させるという方法を開発した。この方法で実際に約21週間でf/1.75の3.5m鏡をRMS研磨誤差16nmに磨き上げることに成功している¹²⁾。

3.4 曲げ鏡研磨法とイオンビーム研磨

ケック望遠鏡は36枚のセグメント鏡を合わせ

た主鏡を持つ。主鏡は球面鏡ではないから、36枚のセグメントは同一の鏡面ではなく、設計上は6種類の異なる非球面鏡となる。ケック望遠鏡の場合、直径2mの非球面を磨き、その後で六角形に切り落としたが、切り落としに伴う変形が大きく、最初は仕様を満たすことができなかった。ケックグループでは各々のセグメント鏡に30本のバネを仕掛けて、鏡を曲げながら研磨する方法を採用したが、目標面精度の達成に苦労した。その後、鏡を曲げながらイオンビーム研磨する手法を開発して、RMS面誤差を42nmから13nmに抑え込むことに成功して、この困難を解決した¹³⁾。

4. 制御光学技術とこれからの研磨仕様

日本のすばる、欧州のVLT、米英加のGEMINI 8m望遠鏡3大計画は、いづれも能動光学¹⁴⁾の考え方を採用して、8m薄型主鏡の研磨に取り組んでいる。能動光学の考え方は研磨の仕様決定にも大きな影響を与えた。これらの望遠鏡では、主鏡に非点収差などの低次の研磨誤差がある程度残っても、能動光学方式で鏡面を修正することができる。従って、研磨は能動支持機構で直せない細かいリップルを残さないことに重点を置くことになり、研磨仕様を構造関数¹⁵⁾で表現することが必要となる。

また、これまで大気の揺らぎによって地上望遠鏡の空間解像度は1秒角程度に制限されてきたが、この宿命を打ち破る補償光学系の実用化にめどがついてきたことも、今後の望遠鏡の研磨の仕様を考える上では検討する必要があろう。これらの新しいオプトエレクトロニクス技術により、大型地上望遠鏡の能力が21世紀に向けて、飛躍的に向上しようとしている。

参考文献

- 1) 家正則、海部宣男、小平桂一：1992、物理学会誌、第47巻、第4号、p.269
- 2) 本田捷夫：1991、O plus E、No.143、p

- 109
- 3) Wizinowich, P. L. and Colucci, D. : 1990, SPIE Vol.1236, p.641
- 4) 河野嗣男 : 1991, Oplus E, No.143, p. 114
- 5) Noguchi,T., Iye,M., Kawakami,H., Nakagiri, M., Norimoto,Y., Oshima, N., Shibasaki,H., Tanaka,W., Torii, Y., and Yamasita,Y. : 1989, Publ. Natl. Astron. Obs., Vol.1, p.49
- 6) Korhonen,T. and Lappalainen,T. : 1990, SPIE Vol.1236, p.691
- 7) Roddier,C., Roddier,F., Stockton,A., and Pickles,A.: 1990, SPIE Vol.1236, p.756
- 8) Espiard,J. and Geyl,R.:1994, SPIE Vol.2199, p.1107
- 9) Burge,J.H.andAnderson,D.S.:1994, SPIE Vol.2199, p.181
- 10) Ootsubo,M., Okada,K. and Tsujiuchi, J.:1994, Optical Engineering, Vol.33, p.608
- 11) 山下泰正:1992,反射望遠鏡, 東京大学出版会, p.291
- 12) Anderson,D.S., Martin,H.M., Burge, J., Ketelsen,D., and West,S.C.: 1994, SPIE Vol.2199, p.199
- 13) Wizinowich,P., Mast,T.S., Nelson,J. E., and DiVittorio,M.:1994, SPIE Vol.2199 p.94
- 14) 家 正則 :1991, 光技術コンタクト, 第29巻, 第1号, 10頁
- 15) Tatarski,V.I. :1961, Wave Propagation in a Turbulent Medium, McGraw-Hill

~~~~~連載講座「オプトメカトロニクス時代の超精密研磨技術」~~~~~

連載を始めるにあたって

：

- 13. FFF加工
- 14. 超微粒子の電気泳動現象を利用した研削・研磨
- 15. 電解砥粒鏡面研磨技術
- 16. ハイドレーション・ポリシング
- 17. P-MACポリシング
- 18. 形状・寸法精度の超精密研磨
- 19-1 高精度球面研磨加工
- 19-2 非球面光学素子のスマールツール研磨
- 20. 平面研磨
- 21-1 各種オプトメカトロニクス部品の超精密研磨
- 21-2 結晶における超精密加工
- 22. レーザーガラスロッドの超精密研磨 吉田國雄, 河西敏雄 (" No. 10 595頁)

小林 昭 (Vol. 31 No. 5 254頁)

：

- 黒部利次 (Vol. 32 No. 2 115頁)
- 池野順一 (" No. 3 168頁)
- 清宮紘一 (" No. 4 214頁)
- 奥富 衛 (" No. 5 276頁)
- 河西敏雄 (" No. 6 331頁)
- " (" No. 7 388頁)
- 村上敏貴 (" No. 8 445頁)
- 野村和司 (" " 449頁)
- 河西敏雄 (" No. 9 497頁)
- 土肥俊郎 (" " 505頁)
- 天野耕一郎 (" " 510頁)
- 吉田國雄, 河西敏雄 (" No. 10 595頁)