

鏡の蒸着方法と性能維持について ～TAOと木曽シュミット望遠鏡の経験から～

高橋 英則（東京大学天文学教育研究センター木曽観測所）

概 要

望遠鏡は光学性能ひいては観測性能維持のために、定期的な鏡の反射膜の再生が必要である。その一つの方法として、一般的には毎年～数年毎に鏡面膜の剥離・洗浄・蒸着の工程が行われる。TAO望遠鏡は標高5,640mという高地にあり、その特殊性・作業性から蒸着は現場で行われる。蒸着装置に付帯する真空ポンプや電源、制御装置等すべての噛み合わせ後、輸出前に蒸着試験が行われ、光学的仕様を満たす成膜ができることを確認した。2021年11月には木曽シュミット望遠鏡主鏡の蒸着が9年振りに行われた。過去の何回かの蒸着の結果や国内外の大型望遠鏡の反射率データも含め、反射率の経年変化を考察したところ、サイトや鏡の保管方法、鏡の向きの違いなどによって、反射率の低下率が異なり、特に木曽シュミット望遠鏡の反射率低下率は、他の望遠鏡に比べて低いことがわかった。これらの結果から、最適な蒸着工程や鏡の光学性能維持のための方法を探ることができる。

1. 東京大学アタカマ天文台の蒸着装置

1-1. 東京大学アタカマ天文台の蒸着装置の概要

東京大学アタカマ天文台（The University of Tokyo Atacama Observatory：TAO）は、チリ共和国アタカマ高原チャナントール山頂（標高5,640m）に設置される口径6.5mの光赤外望遠鏡である。世界的にも抜群の赤外線透明度を活かして、広範な分野のサイエンスの展開を計画している。TAO望遠鏡は高山というサイトの特殊性から、蒸着装置は山頂に設置される。さらに、主鏡は主鏡セルから取り出されることなく、蒸着チャンバーにサンドイッチされる、つまり主鏡セルが真空チャンバーの一部として用いられるという特徴がある [1]。

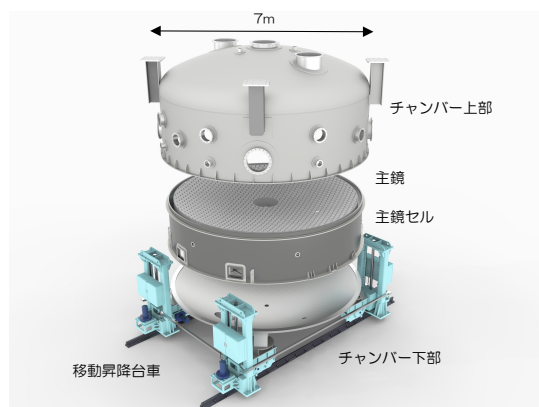


図1：TAO 6.5m用チャンバー

1-2. TAO 蒸着装置の成膜試験

蒸着チャンバー、電源、蒸着制御装置、真空ポンプおよびその冷却用のチラー等の付帯機器が2019年までに完成・納品された。2020年前半には、これらコンポーネントの設置、設計案を基にした配管・配線接続が行い、各装置の起動・基本動作試験および、蒸着システムとしての総合試験が進められた。試験内容としては、(1) 真空チャンバーとしての到達真空度、到達時間の測定、(2) 鏡洗浄後蒸着直前に行われる鏡面上の酸化膜の除去、分子レベルの洗浄のためのイオンボンバードに必要な封入ガスの選定、電流・電圧の最適パラメータ導出、(3) 金属蒸発時の印加電流・電圧値、印加のタイミング、継続時間などの最適値の導出、(4) フィラメントへのアルミのプレウエット量の最適化、などである。

蒸着においては真空度が高ければ高いほど膜の密着度が上がり、反射率も高くなることが知られている。可能な限りまた短時間で高真空を実現するために、4台のロータリーポンプ、4台のターボ分子ポンプ、4台のクライオポンプをハイブリッドに使用することで、ボンバードが可能な真空度は1時間以内、蒸着可能な真空までは半日程度で達することが確認された。

蒸着試験は、主鏡の曲率を模したサンプル台が設置され、計27枚のサンプルガラス（対称性を考慮し、直交する直径に渡る2軸と、90度の範囲のみにサンプルガラスを配置）で108箇所の成膜モニタリングを行なった。蒸着後はテープテストによる膜の密着強度、サンプル鏡の膜厚・反射率の測定などが実施された。イオンボンバードでは、最終的にすべてのサンプリング箇所テープテストをクリアするボンバードパラメータを得ることができた。使用するガスは最終的には酸素を選択した。TAOの蒸着装置では147本のフィラメントを4系統の電源で制御する。フィラメントに含浸しているアルミニウムを効

率よく、均一に蒸発させるために、プレヒータリング、第一発火、第二発火の3回に分けて電流（電圧）を印加して、蒸着が実行される。複数回の蒸着試験の結果、膜厚はやや厚めの箇所があるものの最低でも 100nm 以上あり、赤外線波長での観測には問題ない値となった。また、アルミ含浸量を内周と外周で異なる値のフィラメントを配置することで、膜の一様性も調整できる。

今回の蒸着試験では主鏡セルがない状態で行われたが、蒸発源（フィラメント）が主鏡セルにインストールされた主鏡までの距離と同じになるように調整して行われた。実際の現場での再蒸着は主鏡だけでなく、副鏡、第3鏡の蒸着も行われる。その場合も主鏡セルがない状態で行われるが、今回の試験がそのモニターとなっている。試験の結果、このシステムで同条件での成膜が可能であることが示された [2]。

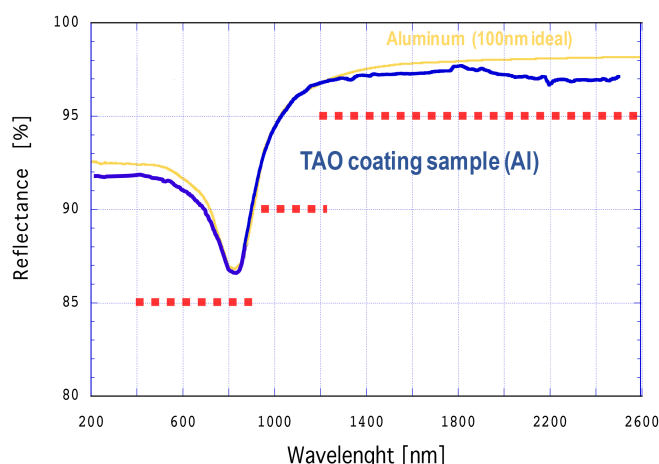


図2：サンプルミラーの反射率測定結果（青線）。ベアアルミの理想的な曲線と比較しても遜色ない値となっている。TAOの仕様値（赤点線）を十分に満たしている。

2. 木曽観測所シュミット望遠鏡

2-1. 木曽観測所シュミット望遠鏡の概要

木曽観測所は 1974 年に設置された観測所で、開口口径 105cm のシュミット望遠鏡を主力望遠鏡として現在まで運用が続けられている。焦点面にはこれまでに写真乾板、1KCCD、2KCCD、KWFC などが科学観測機器として搭載され、現在は 84 個の CMOS センサーを並べたトモエゴゼンカメラが、超広視野（9 度 φ）の動画観測を行っている。



図3：木曽シュミット 105cm 望遠鏡

2-2. シュミット望遠鏡主鏡の再蒸着

シュミット望遠鏡の主鏡は、1974 年の運用開始以降、最初の納品時を含め 7 回蒸着が行われている。他に反射率の向上のために不定期の水洗も行っている（表 1）。これは国内外中口径・大型望遠鏡よりも少ない回数となっている。2021 年 11 月には 9 年振りの再蒸着が国立天文台岡山天体物理観測所にて行われた。プロセスは、水洗・アルコール洗浄、蒸着チャンバーへの窯入れ、真空引き、ファイアリング（蒸着）、窯出し後のチェックという通常プロセスである。なお成膜金属はアルミニウムで、タングステンフィラメントにアルミニウムを予め含浸させるプレウエットを事前に行っている。

年月	蒸着 or 水洗	場所	コメント
1974年	蒸着	Nikon	木曽観測所開所
1982年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	
1990年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	
1991年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	所々に腐食あり。再蒸着。
2001年 7月	蒸着	岡山天体物理観測所	
2004年 11月	水洗	木曽観測所	
2008年 8月	水洗	木曽観測所	汚れが目立つため。
2010年 6月	水洗	木曽観測所	
2012年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	プレウエットも実施。
2019年 6月	水洗	木曽観測所	技術継承
2021年 11月	蒸着	岡山天体物理観測所	9年振り7回目

2-3. 反射率変化の評価と要因

今回、洗浄および蒸着の前後に反射率を測定した（KONICA-MINOLTA CM-2500c）。その結果、洗浄前後では大きな変化は見られなかったが、蒸着後は 2～3 %の反射率の向上が見られ（400～700nm）、誤差の範囲でベアアルミの（理想的な）反射率に近い値になっている。短波長側で反射率が低下してい

るが、これは膜厚が予想よりも薄い可能性やフィラメント由来のタングステンのコンタミなどが考えられるが、この原因については今後究明調査を続ける。実際問題として、トモエゴゼンのCMOSの感度が急激に低下する波長域なので観測感度などには影響がないと考えられる。

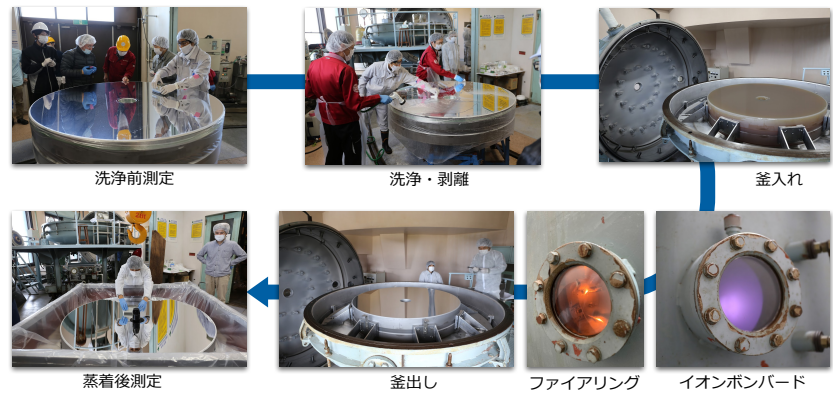


図4：蒸着の一連のプロセス。蒸着前測定から蒸着後測定まで約1日。

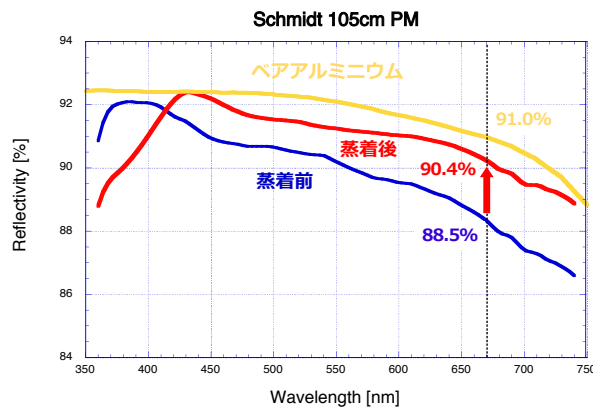


図5：蒸着前後の反射率

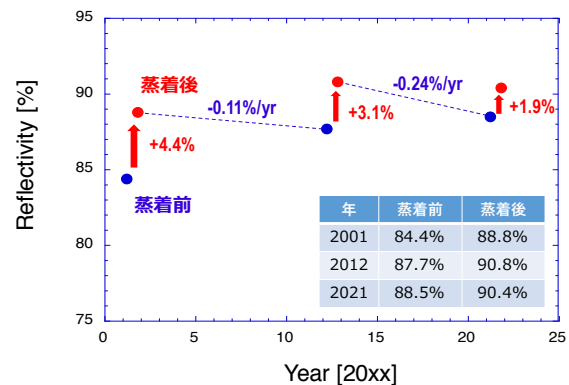


図6：反射率の経年変化

図6は直近3回の蒸着からの反射率の変化を表したものである。これを見ると低下率が $-0.11\%/yr$ (2001~2012年)、 $-0.24\%/yr$ (2012~2021年)となり、これを他の望遠鏡(すばる、CFHT、GMT)のデータと比較してみると(図7)、低下率が小さいことがわかる。これは、シュミット望遠鏡は補正板がある鏡筒構造やミラーカバーがあり、常に鏡が密閉された空間にあることで外部の汚れがつきにくい構造になっていることが大きな要因であると考えられる。さらに、すばる望遠鏡の主鏡、副鏡、第3鏡の反射率(効率)の経年変化と比較したものを図8に示す。すばる望遠鏡では通常運用時の多くの時間では、主鏡は反射面が上向き、第3鏡は45度、副鏡は下向きになっており、一方シュミット望遠鏡は横向きで保持されている。この図から反射率の低下率は鏡の保管の向き(角度)に依存していることがわかる。これも埃や塵の主鏡へのつきやすさ(つきにくさ)に関係し、延いては反射率に直結すると考察できる。ところで図9を見ると、いくつかの望遠鏡の反射率の経年変化にトレンドが見られる。このトレンドは設置環境や運用方法にも依存するが、各望遠鏡が設置されている標高に相関があるように見える。これは標高が高いほど湿度が低く、鏡の劣化の原因となる埃や塵につく水分が減少することが要因の一つであることが推測される。シュミット望遠鏡は標高1130mに設置されており、国内の他の望遠鏡よりやや高いところにあること、また夏期の湿度が低いことも、反射率の低下を抑えられている要因の一つかもしれない。

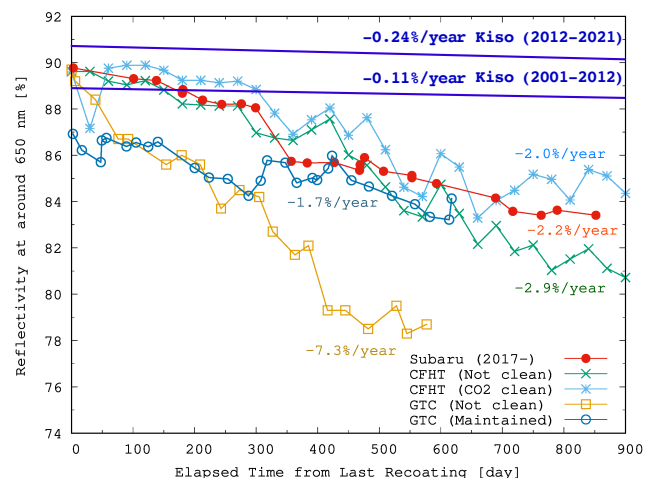


図7：反射率の他の望遠鏡との比較

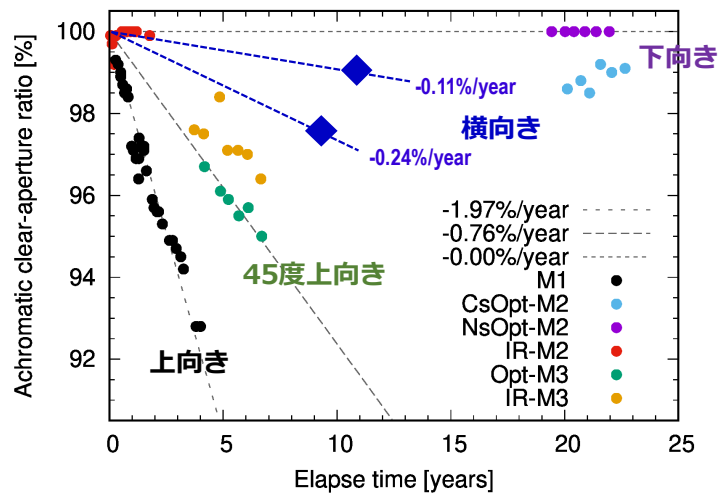


図 8：鏡の向きの違いによる反射率の経年変化

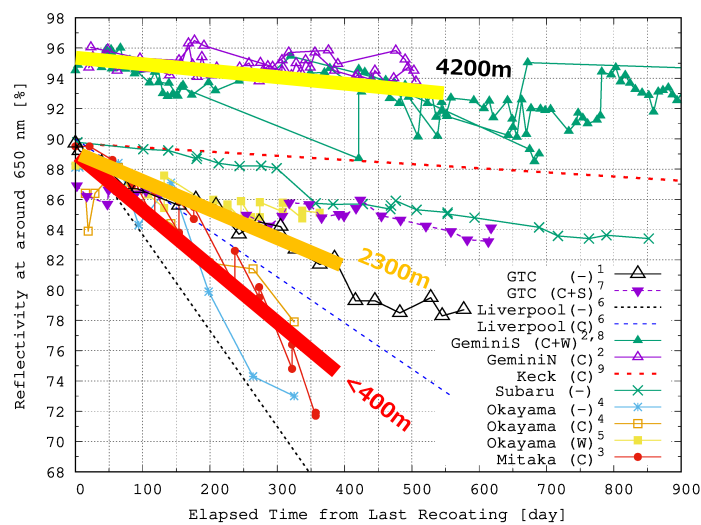


図 9：国内外の望遠鏡主鏡の反射率経年変化。設置標高によってトレンドが見られる。

赤線：400m 以下、橙線：2300m、黄色線：4200m。

3. 高反射率の実現（低下を抑える）のためには

まず反射率の初期値をできるだけ高い状態にすることが必要である。そのためには蒸着前の洗浄を丁寧に行う、また適切なイオンボンバードによって水酸化膜や微小付着物を除去しておくことが必要である。また蒸着はできるだけ高真空で行う、コンタミを避けるためにクリーンなフィラメントを用いる、さらにはファイアリング時の適切なパラメータ設定が必要である。成膜後の反射率低下のためには、日頃の埃落としが最重要で、その他に可能な限りミラーカバーを閉じておく、鏡が結露しないようにする、観測時以外は鏡の向きに注意する、長時間、埃や塵がついている状態で放置しないようにするなど、普段のメンテナンスが重要である。

本研究の今後の展開として、極端環境である TAO 望遠鏡をはじめ、様々な環境（クリーン度、標高、運用形態、望遠鏡形態等）での測定サンプルを増やし、長期的な測定を継続してデータを増やすことが重要である。また反射率・効率の波長依存性の測定、埃やダストのサンプルの取得・成分分析、その金属膜への影響の評価なども、反射率低下を防ぐための策を講じる情報として有効になると考えている。

4. 参考文献

- [1] Takahashi et al., 2016, SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 99064Q
- [2] Takahashi et al., 2020, SPIE 11445, Ground-based and Airborne Telescopes VIII, 1144564