

2017年主鏡再蒸着：蒸着工程

○沖田博文

(国立天文台ハワイ観測所)

概要

すばる望遠鏡の主鏡再蒸着及び関連保守作業を2017年10月2日～12月14日にかけて実施した。本講演では「蒸着行程」の準備から本番までの工程の概要と改善点について報告する。加えて今回の主鏡再蒸着での新たな取り組みとして、(1) 主鏡の分光反射率をオンサイトで直接測定できる反射率測定器の開発、(2) 主鏡にコーティングしたアルミニウムの膜厚推定手法の改良、も行った。これらの結果についても報告する。

1. 蒸着工程の概要と経過

ハワイ観測所すばる望遠鏡の主鏡蒸着は、1998年に第1回目の蒸着を実施して以来、今回2017年の実施で第8回目の作業となった。今回の再蒸着作業の場合、蒸着工程としては、駆動系の試運転を2017年3月から実施し、8月からはプリウエットフィラメントの量産と真空蒸着釜内部の準備作業を実施し、9月に電力系の試運転等を実施し、問題が無いことを確認した。機械部分のグリスアップ、制御装置内の電球バルブの交換、グローロッドの停止位置の微調整等を行った。マイスナーコイルおよびクライオポンプで使用する大量の液体窒素（十分な余裕をみて1000ガロン）は3ヶ月前に手配を開始した（ハワイ島内ではこの量の液体窒素の調達が困難で、オアフ島から容器ごと輸送する必要があるため）。

10月に入ってから最終的な動作確認を実施した。フィラメントの取り付けは蒸着実施の前々日の10月18日に行い、二次洗浄が完了した10月19日夕方から真空蒸着釜を閉め、真空引きを開始した。翌10月20日は早朝より液体窒素の供給を開始して真空釜内を高真空にし、グロークリーニングを実施後、午後にフィラメントに電流を流してアルミニウムを蒸発させ、蒸着を実施した。

蒸着ではアルミニウムを溶け込ませたタングステンフィラメントを288本使用するが、電源容量から96本ずつ3回に分けて蒸着している。アルミニウムはフィラメントにかける電圧を8.8Vから16.2Vに上昇する8秒間でほぼ蒸発すると考えられる。そのため蒸着そのものは8秒×3回=24秒で行われることになる。

蒸着後、真空引きを停止して10月22日から約半日掛けてゆっくりと大気開放を行った。10月23日には真空蒸着釜を開けて仕上がり状態を目視で確認すると共に、反射率の測定も行った。

2. 測定データ

今回の蒸着作業中に制御装置で取得した電圧、電流、圧力のログを図1～3に示す。電源装置は交流60Hzで電圧を制御している。電圧が1V程度と低い時に値が安定しないのは電源装置の特性と考えている。今回の蒸着では3回ともほぼ設定通りの電圧変化をしていた。

電流について、上昇後にいったん値が大きくなり、その後ある一定値に向かうような傾向が見られた。これはフィラメントの温度上昇に伴い抵抗値が低下したため、流れる電流も低下したと理解できる。

圧力について、1回目の蒸着では 5.2×10^{-6} Torr、2回目は 7.8×10^{-6} Torr、3回目は 1.2×10^{-5} Torrであった。この圧力環境下でのアルミニウム原子の平均自由行程は、それぞれ9.5m、6.3m、4.1mである。そのためアルミニウム原子は蒸着釜内の大気分子に衝突することなく主鏡表面に到達したと考えられ

る。加えて、アルミニウム原子の気体分子束と残留大気分子の分子束を比較することで不純物混入量を見積もったところ、それぞれ 2.2%、3.3%、5.0%であった。なおこの値は上限値で、実際の混入量はこれより 1 桁程度小さいと思われる。

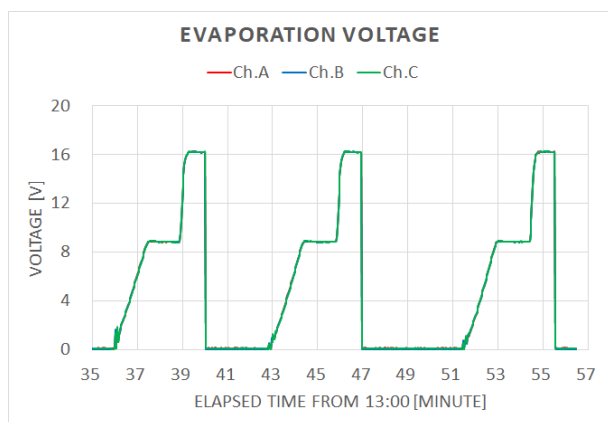


図 1. 電圧ログ

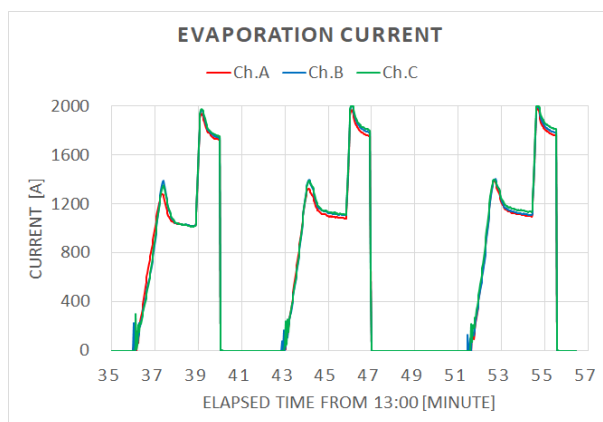


図 2. 電流ログ

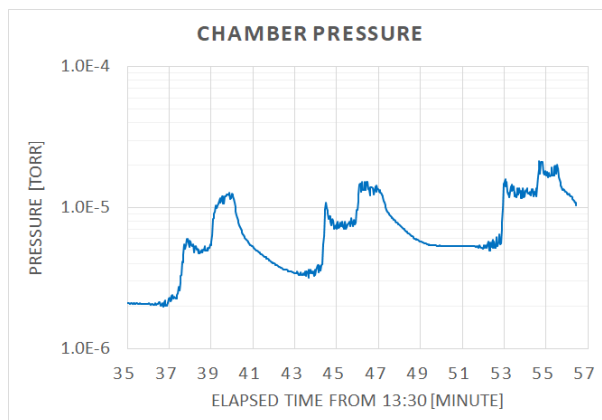


図 3. 圧力ログ

3. 改善点

全体の作業としては遅延無く蒸着工程を実施することが出来たが、いくつか改善すべき点も見つかった。

まず 1000 ガロンの液体窒素タンクローリーのページ音が非常に大きく、夜間に他の観測所から「爆発音がする」と報告があるなど、大きな問題となった。定期的なページをするとともに、他の観測所への周知も徹底するべきであった。

つぎにプリウェットフィラメントの取り付けの際、直前に選別を実施したが、判断に時間を要し、取り付けに時間がかかった。フィラメント量産時の重量管理を徹底することでこの時間のロスは防げるはずである。

そして今回の蒸着ではミラーハッチ故障に伴う修理があったため、直前まで蒸着の準備が出来ない項目もあり、時間的余裕が無かった。加えて蒸着作業が 10 月となり天候が不安定で大変であった。ベテラン作業員も退職または異動で不足する中、若手職員が手探りで実施せざるを得ない事も問題であった。次回の再蒸着時には十分なリソースを確保し、今回以上に安全・確実な作業となるよう心がけるべきである。

4. 反射率測定器の開発

主鏡反射率は表面に堆積した汚れや生じた傷等によって徐々に低下し、天体からの光子数が減少し、観測効率を低下させる。また正反射しなかったエネルギーは散乱光として、また吸収した場合には熱放射によって、バックグラウンドノイズは増大し、観測効率が悪くなる。そこでハワイ観測所ではドライアイスを用いた洗浄を定期的に行うだけでなく、今回実施のように数年に一度、アルミニウムコーティングをやり直し、高い反射率を維持するよう努めている。

ここで主鏡の状態を正しく理解するため反射率の測定が重要になるが、適切な測定器が無かったためこれまで実際の測定は困難であった。波長 670nm と 1300nm の 2 波長で測定が可能なポータブル測定器 (μ Scan) をこれまで使用してきたが、2 波長のみの測定でデータが不足すること、校正が現地で行えないことから反射率の絶対値を得ることが出来ないという欠点があった。またプレパラート等を用いたサンプルミラー (ウィットネスサンプル) を分光光度計で測定することも広く行われているが、設置場所が厳密には一致しないこと、熱容量が主鏡と大きく異なり熱環境や湿度環境が一致しないことから主鏡の反射率を本当に代表しているのか疑問が残る、といった問題があった。そこで主鏡の状態を正しく理解するため、主鏡反射率の絶対値の分光データを測定するポータブルな測定器を新規に開発した。

開発した測定器では反射率の絶対値の分光データを測定するため、ハロゲン光源、積分球、ファイバー分光器を用いた。ファイバー分光器を用いることで波長 380~950nm の範囲を波長分解能 2nm でデータ取得が可能となった。測定パス、リファレンスパス、ダークパスといった 3 種類のデータを取得することで、測定対象の有無以外、光学的に完全に等価な測定を実現することが可能で、このことから原理的に絶対反射率の測定が可能となった。さらに全体を小型・軽量に製作することで、望遠鏡に組み込まれた状態の主鏡に載せて測定することも可能となった。

開発した測定器を用いた測定の結果を図 4 に示す。主鏡反射率は波長 400nm で 92.1%、600nm で 90.5%、波長 800nm で 85.5%であった。蒸着前の主鏡反射率は測定箇所によって異なるが (非一様な汚れのため測定箇所によって反射率が異なると考えられる)、今回行った再蒸着によって、概ね反射率は 10~15%向上したことがわかる。蒸着後の反射率はこれまでの蒸着と同等の値であった。

5. 膜厚推定手法の改良

主鏡にコーティングしたアルミニウムの膜厚は、薄すぎると反射率が低下して観測効率を低下させる一方、厚すぎる場合も膜厚の非一様性から主鏡の鏡面精度を悪化させ、天体がシャープに結像なくなり、観測効率を低下させる原因となる。そこでハワイ観測所では建設期の基礎実験に基づいて、これまで 100nm の膜厚を目標にアルミニウムをコーティングしてきた。

ここで膜厚を推定する方法は、蒸着装置にプレパラートを主鏡のすぐ傍に一緒に入れて蒸着し、後にレーザー顕微鏡で断面観察することで行ってきた。しかし断面観察には熟練を要し、測定結果が一定しないという問題があった。

そこで今回、レーザー干渉計 (Zygo) を用いた測定を考えた。基礎実験の結果、プレパラートでは表面形状が数 10λ と悪いため、簡単に膜厚に変換することが困難であることがわかった。また裏面がスリガラス状に加工されていないと裏面の干渉縞も重なって見えてしまい、うまく測定出来ないこともわかった。そこで裏面がスリガラス状に加工された表面精度 $\lambda/10$ のブランクミラーを使用したところ、これらの問題が生じず、レーザー干渉計で容易に測定出来ることができた。ブランクミラーの中央にカプトンテープを貼り、主鏡と共に蒸着、蒸着釜から取り出した後にカプトンテープを剥がしてレーザー干渉計で測定することで、容易に膜厚測定が可能である。

ブランクミラーは蒸着釜内の4箇所を設置してデータを取得した。測定はブランクミラー毎にそれぞれ3回ずつ行った。図5に測定結果を示す。これらの測定結果から、今回蒸着したアルミニウムの膜厚は110~120nmと推定される。

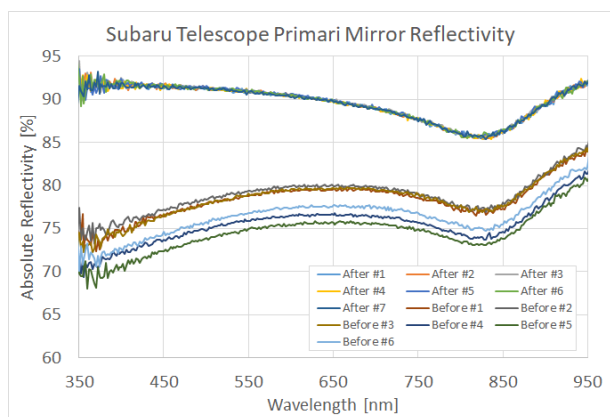


図4. 主鏡反射率

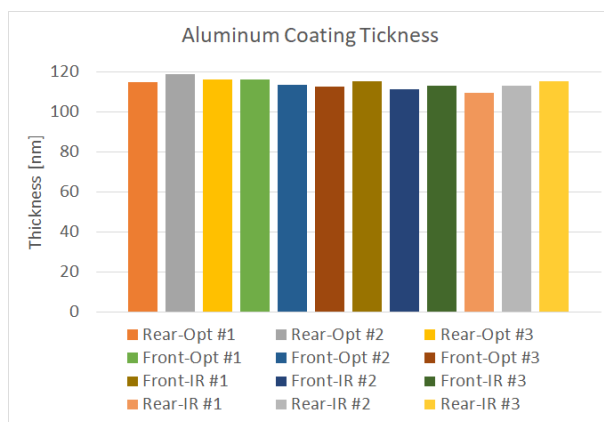


図5. アルミニウム膜厚

6. まとめ

すばる望遠鏡の主鏡再蒸着及び関連保守作業を2017年10月2日~12月14日にかけて実施した。蒸着行程は2017年3月から準備を始め、実際の蒸着は2017年10月20日に実施した。ほぼ順調に実施できたがいくつか反省点が残る結果となった。次回に生かしたい。主鏡再蒸着の結果、反射率は波長400nmで92.1%、600nmで90.5%、800nmで85.5%となった。また蒸着したアルミニウムの膜厚は110~120nmと推定される。最終的に、蒸着時に得られた電流・電圧・圧力のログデータ、及び蒸着後に測定した反射率と膜厚のデータから、今回の主鏡再蒸着は成功したと結論づけられる。

謝辞

主鏡再蒸着：蒸着工程では望遠鏡エンジニアリング部門、Day Crews、ハワイ観測所職員に加え、日本から作業支援に来ていただいた多くの皆様の多大な働きにより実施することが出来ました。特に野辺山宇宙電波観測所の倉上富夫氏には事前準備から作業当日まで詳細にご指導をいただきました。また高遠徳尚氏、林左絵子氏、美濃和陽典氏には反射率測定装置の開発で多くの的確な助言をいただきました。三鷹すばる室のサポートや、天文台執行部の特別なご配慮にも感謝いたします。主鏡再蒸着に関わった全ての皆様に感謝申し上げます。

参考文献

[1] 田澤誠一、他、「2013年度主鏡蒸着作業報告」、第33回天文学に関する技術シンポジウム収録、2013年