

## なゆた望遠鏡の主鏡・副鏡・第三鏡再蒸着

高木 悠平<sup>1,2</sup>、伊藤 洋一<sup>1</sup>

1) 兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 西はりま天文台

2) 国立天文台 ハワイ観測所

## Mirror Recoating of Nayuta Telescope

Yuhei TAKAGI<sup>1,2</sup>, Yoichi ITOH<sup>1</sup>

1) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo-gun Hyogo 679-5313, Japan*

2) *National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

*E-mail: yuhei.takagi@nao.ac.jp*

(Received 2016 December 20)

### 概要

兵庫県立大学西はりま天文台にある2m望遠鏡（なゆた望遠鏡）の主鏡・副鏡・第三鏡の洗浄・再蒸着作業を行った。本再蒸着作業では反射面となるアルミの薄膜とともに、鏡面の反射率の維持と保護を目的とした保護膜（ $\text{SiO}_x$ ）を蒸着した。なゆた望遠鏡の蒸着は2009年に行われたが、当時は主鏡をスペインまで輸送して行ったため、より低コストで実施する必要があった。今回は蒸着作業は国内にて実施する方法を検討した。アルミニウム膜の厚みは100nm、保護膜蒸着後の反射率のピーク波長を550nmと設定し、その仕様を満たした新しい反射膜および保護膜を各鏡の表面に形成した。各鏡を望遠鏡に戻した後にハルトマンテストを実施して光軸調整を行い、ハルトマン定数は0.34秒となった。

### Abstract

We conducted the realuminization of the primary, secondary, and tertiary mirror of the Nayuta Telescope. The realuminization was last conducted on 2009 by transporting the primary mirror to Spain. Therefore we considered a method to carry out the realuminization internally, in order to reduce the cost. All of the mirrors were recoated with aluminum, with a thickness of 100nm, and  $\text{SiO}_x$  for protection. The thickness of overcoat was controlled by fixing the peak-wavelength to 550nm in the reflection spectrum. Hartmann test was conducted after all the mirrors were remounted on the telescope, giving the Hartmann constant of 0.34 arcsec.

**Key words:** Telescopes

## 1. はじめに

兵庫県立大学西はりま天文台の2m望遠鏡（なゆた望遠鏡）は2004年より10年以上に渡り運用されている。なゆた望遠鏡の主鏡・副鏡・第三鏡はアルミが蒸着されており、さらに鏡面保護を目的としたオーバーコートが施されている。しかし、オーバーコートがなされている状況でも、水蒸気や細かな砂粒・ダスト等に起因する鏡面劣化が生じ、反射率が低下する。2012年に西はりま天文台が兵庫県立大学に移管され、研究目的の観測が本格化したことや、2013年より開始された共同利用観測を通じて日本全国の天文学者の需要が高まったことを受け、より効率的なデータ取得を可能にするため、再蒸着作業が必要になった。

本稿では、7年ぶりの主鏡再蒸着と開所以来となる副鏡・第三鏡の再蒸着についてまとめる。

## 2. 経緯

### 2-1. 2009年の再蒸着作業

主鏡の初回再蒸着作業はファーストライトから約5年経過した2008年12月～2009年3月に実施された。当時の再蒸着作業は、望遠鏡を製作した三菱電機と、鏡の製作時の蒸着を実施したSAGEM社（フランス）に委託の上行われた。主鏡は主鏡セルに格納された状態で、関西国際空港から航空機で輸送され、Calar Alto天文台（スペイン）に持ち込まれた。Calar Alto天文台で主鏡セルから取り出された主鏡は、洗浄作業（古い薄膜の除去および清掃）と再蒸着作業を経て、再び日本に空輸され、望遠鏡に再装着された。この再蒸着作業の様子は以下のとおりである。

- 反射膜はアルミニウムとし、その上に、保護膜をコーティングすること
- コーティング後の達成すべき反射率
  - － 390-800nmの可視光領域において、平均80%以上の反射率を達成すること
  - － 1-2.5 $\mu$ mの近赤外線領域において、平均85%以上の反射率を達成すること

アルミニウム及びオーバーコートは鏡面上向きで実施された。鏡面上向きの状態で保護膜を蒸着させることは原理的に難しいため、Plasil<sup>1</sup>を原料としたCVD(CheMical Vapor Deposition：化学的気相成長法)が採用された。Plasilはヘキサメチルジシロキサン(HMDSO)から生成されたもので、アルミ蒸着後にHMDSOガスをチャンバに封入し、放電することで発生するSiO<sub>x</sub>で保護膜を形成させることができる。この手法による保護膜形成はPlanck衛星でも行われている(Tauber et al. 2010)。

図1は再蒸着後の反射率を示している。主鏡蒸着時、主鏡と共にチャンバ内に設置したサンプルピースの反射率は、SiO<sub>x</sub>のオーバーコートによりアルミニウムのみの反射率に比べてわずかに低い値になっているが、目標反射率より5%以上高い値を示しており、高反射率を確保できていた。

### 2-2. 2009年再蒸着以降の鏡面劣化

なゆた望遠鏡は、西はりま天文台の宿泊者・来台者を対象とした毎晩の観望会に加え、2012年より天文学研究を目的とした観測が毎晩行われているため、主鏡が外気にさらされている機会が非常に多い。鏡面の劣化は進行し、2013年12月時点の主鏡反射率は76.1%(測定波長：670nm)で、2009年の再蒸着直後に比べより約12%低下した(新井 他 2013)。2013年5月より、無水エタノールを使用した鏡面清掃を年2-3回実施する体制を整え、反射率の劣化を防ぐことを試みた。しかし、2015年より導入した光沢計を用いて反射率の相対的な低下率を記録したところ、2015年の1年間で約5%低下した。鏡面の劣化は定期的な清掃で防ぐことができる

<sup>1</sup> PlasilはBalzers社の登録商標である。Balzers社の施設はCalar Alto天文台内にある。

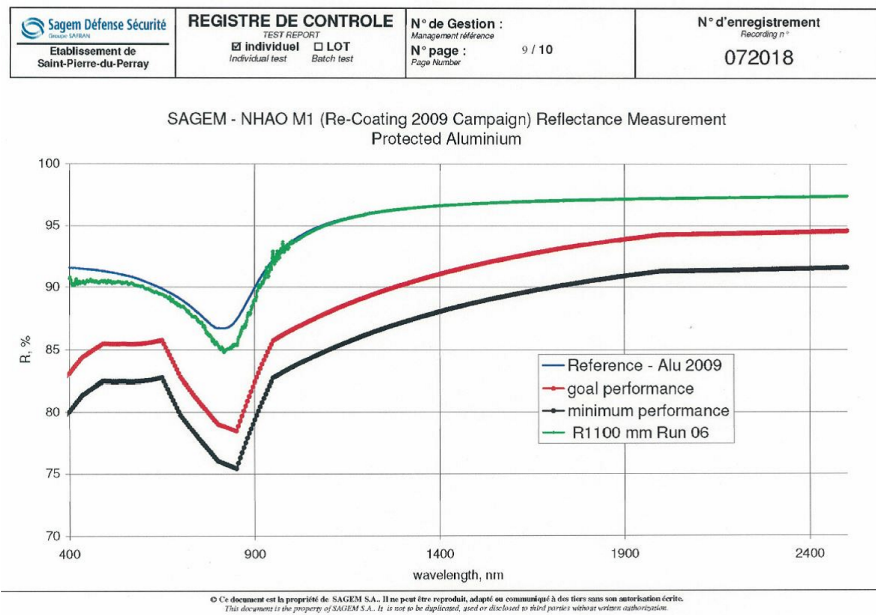


Fig. 1. 2009 年再蒸着時の反射率特性。青線はアルミニウムの反射率、緑線が蒸着時に一緒にチャンバに入れたサンプルピースの反射率、赤線が反射率目標値、黒線が仕様反射率の下限である (カラー版は西はりま天文台ウェブサイトを参照)。

ような状態ではないことを示しており、早急に再蒸着作業を行う必要があった。図 2 は鏡面で目立った劣化の様子を示している。

### 2-3. 2 回目の再蒸着の検討

なゆた望遠鏡の直径 2m の主鏡の再蒸着が行える環境は世界的にも限られている。2009 年に行った欧州での再蒸着を再度行うことも可能であるが、作業が長期間に及ぶこと、また輸送を含めたコストが膨大になる。オーバーコートを含む再蒸着作業は理想的には 5 年に一度程度実施するのがよいとされ、今後の中長期的運用を視野に入れた蒸着方法を確立する必要がある。したがって今回の蒸着作業は国内で行うことを前提として検討を進めた。

検討の結果、茨城県つくばみらい市にある株式会社三光精衡所に蒸着作業を委託することを決めた。三光精衡所は東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画で建設される 6.5m 望遠鏡の再蒸着作業及び蒸着装置の作成など、大型光学望遠鏡の蒸着作業の実績があり、2.8m、3.6m、4.5m の蒸着装置や、高さ約 2.8m のスパッタリング装置を保有している。なゆた望遠鏡の主鏡再蒸着には後者のスパッタリング装置内に鏡を立てた状態で導入し、蒸着が行えるように装置をカスタマイズして作業を行うことにした。蒸着作業を行うための治具などの設計・開発の初期費用はかかるものの、一度手法が確立されれば将来的には比較的少ないコストで再蒸着作業を行うことが可能になる。

上記のような方法以外にも、さまざまな蒸着手段を検討した。大型望遠鏡の主鏡再蒸着作業を最も高い頻度で行っているのは国立天文台岡山天体物理観測所である。この天文台には口径 1.88m の鏡を蒸着することができる真空釜がある。口径 2m のなゆた望遠鏡の主鏡は、サイズとしては真空釜に収めることができると考

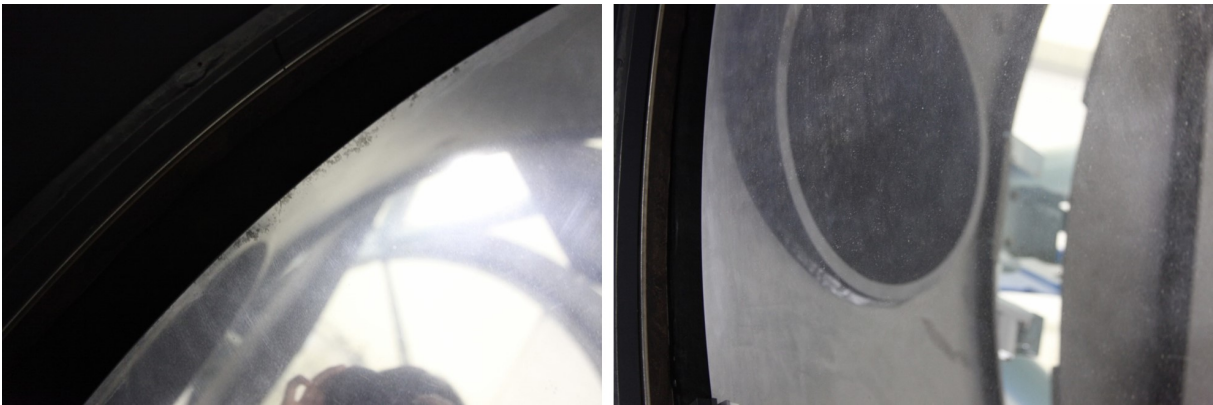


Fig. 2. 2014年4月頃の鏡面の様子。(左) 鏡面の淵では黒い模様が目立ち始めた。このような箇所ではアルミニウム膜がなくなっている。(右) 鏡面全体は白く曇ったように見える。曇りの一つ一つは白いまばらな模様で、無水エタノールで洗い流しても除去できなかったため、汚れではなく反射膜の劣化であると考えられる(カラー版は西はりま天文台ウェブサイトを参照)。

えられるが、真空釜への固定作業などを考慮すると、この真空釜で作業を行うことは現実的には難しい。また、オーバーコート作業が不可能なため、1年に一回という高頻度で蒸着作業を行う必要があり、鏡の着脱や輸送に伴うコストがかかる。さらにこの蒸着釜そのものが今後も長期的に使用される可能性が低い。一方、独自の蒸着装置を西はりま天文台内に設置することも検討されたが、再蒸着装置の維持管理や蒸着に必要となるコストは国内業者に委託する場合よりも高くなる。

### 3. 準備

#### 3-1. 蒸着手順の決定

##### (a) 保護膜(オーバーコート)の形成方法

鏡面のオーバーコートをする場合、Calar Alto 天文台で行われているような CVD やスパッタリングを行えば鏡面上向き、すなわち鏡が最も安定した状態で作業を行うことができる。一方、保護膜を蒸着で形成する場合は鏡面を立てるかもしくは裏返し(鏡面下向き)にする必要がある。大型鏡の保護膜はできるだけ均一の厚みで形成することが反射率特性を管理する上で望ましい。Plasil を使用した保護膜形成方法は Calar Alto 天文台の独自性が高いことや、スパッタリングによる保護膜形成は膜厚の均一性を保つことが難しいことを考慮し、今回はより一般的な方法である蒸着法による保護膜形成を選択した。

##### (b) 主鏡の取り回し方法

保護膜を蒸着法にて形成するため、主鏡を立てるもしくは裏返す方法を検討する必要性が生じた。なゆた望遠鏡の主鏡は最も厚い箇所でも 200mm しかないため、慎重に取り回す必要がある。三菱電機の協力のもと、主鏡の構造解析の結果から主鏡を立てても問題が生じないような専用の治具を作成した(図3)。主鏡の加重の大半はカセグレン穴周辺の治具が担い、周辺部に備え付けたパッドで主鏡を支える構造となっている。鏡面上向きの状態で鏡を持ち上げる際は中心にあるフックを通じて吊り上げる。なおこの治具は運搬、洗浄、蒸着のす



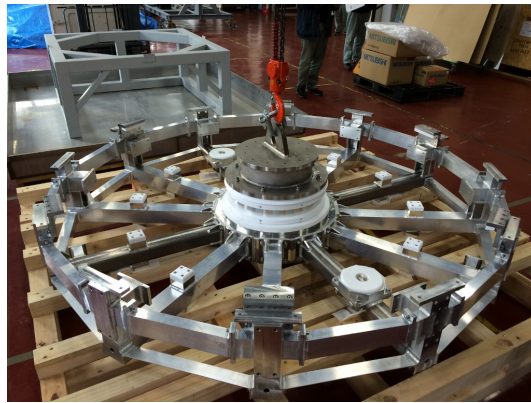


Fig. 3. 主鏡治具。左奥に見えている物が洗浄時に使用する台（洗浄台）である。



Fig. 4. (左) 主鏡治具に取り付ける耳軸。これを軸として主鏡を立てる動作を行う。(右) 回転台。左手前と右奥部に耳軸を取り付ける箇所が見える。

すべての行程で主鏡を支えるような仕様となっている。

主鏡治具以外にも主鏡の作業・取り回しに必要な器具を準備した。古いアルミニウムと保護膜を剥離・洗浄する際の台として洗浄台を準備した(図3)。また、主鏡は蒸着釜に入れる前に立てる必要があるが、これは回転台と呼ばれる台に乗せて行う(図4左)。耳軸(図4右)を主鏡治具に取り付けた状態で回転台の上に乗せ、鏡の回転動作を行う。回転台は主鏡そのものを移動させる際にも使用する。

### 3-2. 仕様の決定

蒸着後の反射率の仕様などは、2-1章で述べたものを踏襲する一方、保護膜の厚みを指定することにした。保護膜の厚みは、反射率のピーク波長と相関があるためである。ピーク波長は、保護膜の表面で反射された光と、保護膜を通過してアルミニウム膜の表面で反射した光の位相が合うような光の波長になる<sup>2</sup>。従って、保護膜

<sup>2</sup> 保護膜表面で反射した光の位相は180度ずれる。また、保護膜を通過してアルミニウム表面で反射した可視光～近赤外域の光の位相もほぼ180度ずれる(保護膜内でアルミニウム表面で反射する光の位相のずれ量には波長依存性がある。500nmだと位相はおおよそ160度ずれ、2500nmになると約175度になる(川野元、private communication))。保護膜の厚み $d$ は、ピーク波長を $\lambda_p$ 、保護膜を形成する物質の屈折率を $n$ とすると、可視光域では $d \simeq \lambda_p/2n$ となる。

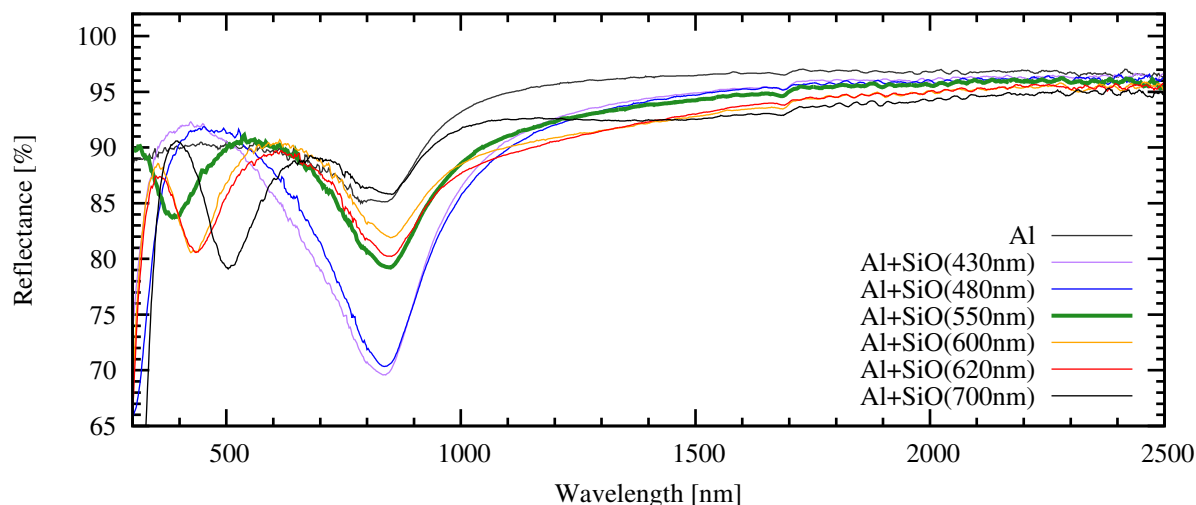


Fig. 5. 保護膜の膜厚を変え、反射率のピーク波長を変化させた際の反射率特性。括弧内の数値が目標ピーク波長である。Alはアルミニウムのみの反射率特性を示す。主鏡、副鏡、第三鏡で採用した膜厚時の反射率特性のみ太線で示されている。

の厚みを変えればピーク波長を変化させることができる。図5は、三光精衡所で作成したピーク波長の異なるサンプルピースの反射率特性である。測定は国立天文台先端技術センターにある分光光度計 SolidSpec-3700 及び京都産業大学の紫外可視分光光度計 V-670 を使用した。今回は主鏡だけでなく副鏡及び第三鏡も再蒸着させるため、主鏡、副鏡、第三鏡でピーク波長を変えて広い波長域で一定の反射率を保持したり、すべての鏡のピーク波長を一定とし、ある特定の波長での反射率を高く留めておくようなことも可能である。今回の再蒸着では、主鏡、副鏡、第三鏡ともピーク波長が550nmになるような膜厚でオーバーコートし、可視光域での観測効率を高くする方針とした。一方アルミニウムの膜厚は100nmとした<sup>3</sup>。

### 3-3. 膜厚均一性

主鏡面全体で膜厚を均一にするため、本作業に先立って蒸着試験を繰り返し行った。今回の蒸着において、反射膜と保護膜の材料は、ボートに入れた状態で加熱する。このボートは鏡面からおおよそ400mm離れた場所に等間隔に設置される。各ボートに入れる膜の材料の量を調節し、鏡面全体で均一な膜が形成されるようにする。

試験は、主鏡の形状を模した模型にサンプルピースを設置して蒸着装置に入れて行われた。サンプルピースは鏡面全体をカバーするように等間隔に配置すると同時に、ボートとボートの間にあたる箇所でも膜厚のムラが生じていないことを確認するために、ある特定のボートとボートの間に連続してサンプルピースを設置した。これにより鏡面全体での膜厚分布と、局所的な膜厚分布が均一であることを確認できるようにした。繰り返し試験を行い、アルミニウムの膜厚は鏡面全体で約109nmで分布させられるような条件を整えた<sup>4</sup>。

<sup>3</sup> 膜厚を100nm以上とすると膜表面の粗さが目立ち始めるとされており、すばる望遠鏡をはじめ、岡山天体物理観測所など100nmという厚みを採用している望遠鏡が多い。100nmの厚みのアルミニウム薄膜だと、人間の目でわかる程度に光が透過するが、実際には50nm程度の厚みがあれば透過する光は0.1%程度である。150nmまで厚みを増すとこの透過光はほぼ見えなくなる。

<sup>4</sup> この値はすべてのサンプルピースの膜厚の平均値で、サンプルピース中最大の厚みを持つものは117nm、最少が103nm、標準偏差は約4nmである。

オーバーコート膜厚分布の均一性は反射率のピーク波長で定義した。鏡面にあたる箇所を設置したサンプルピースは本番の蒸着作業時には当然設置できないため、鏡面の外側に該当する場所にもサンプルピースを設置した。これら鏡面外部にあるサンプルピースの反射率ピーク波長が、鏡面部のサンプルピースの反射率ピークが550nmでそろった時にどのような振る舞いを示すかを事前に調べた。その結果、鏡面外部のサンプルピースのピーク波長が $525\pm 20\text{nm}$ に収まればよいことが判明した。本蒸着の成否はこの数値を持って判断することとした。

副鏡および第三鏡についても、主鏡と同様に鏡面を模した模型を作製し、事前試験を行った。副鏡・第三鏡は小さいため、主鏡のように鏡面を立てて蒸着するのではなく、鏡面下向きの状態で蒸着作業を行う。この作業に使用する蒸着装置は主鏡で使用するスパッタリング装置とは別で、三光精衡所が通常蒸着に使用している真空釜で行う。副鏡・第三鏡の蒸着時は、膜厚を均一にするため鏡体を回転させながら行う。本蒸着後の評価を行うためのサンプルピースは鏡体横に設置し、鏡体と一緒に回転させる。主鏡と同様、サンプルピースのピーク波長が $525\pm 20\text{nm}$ に収まることを条件とした。

#### 4. 本作業

主鏡・副鏡・第三鏡の再蒸着は表1のようなスケジュールで行われた。

Table 1. 主鏡・副鏡・第三鏡の再蒸着行程

日程	作業内容
主鏡	
2016/01/18-22	取り外し及び運搬
2016/01/25-29	剥離・洗浄
2016/02/01-02	蒸着装置内へ導入、真空引き
2016/02/03	蒸着(1回目)・テープテスト
2016/02/03-09	再剥離・洗浄
2016/02/11	蒸着装置内へ再導入、真空引き
2016/02/12	蒸着(2回目)・テープテスト
副鏡	
2016/01/18-22	取り外し及び運搬
2016/02/03-11	剥離・洗浄
2016/02/18	蒸着・テープテスト
第三鏡	
2016/01/18-22	第三鏡ユニット取り外し
2016/02/08-09	第三鏡取り外し
2016/02/10-15	剥離・洗浄
2016/02/19	蒸着・テープテスト

##### 4-1. 主鏡・副鏡・第三鏡 取り外し及び運搬

各鏡は次のような順序で取り外された。各作業は三菱電機が担った。

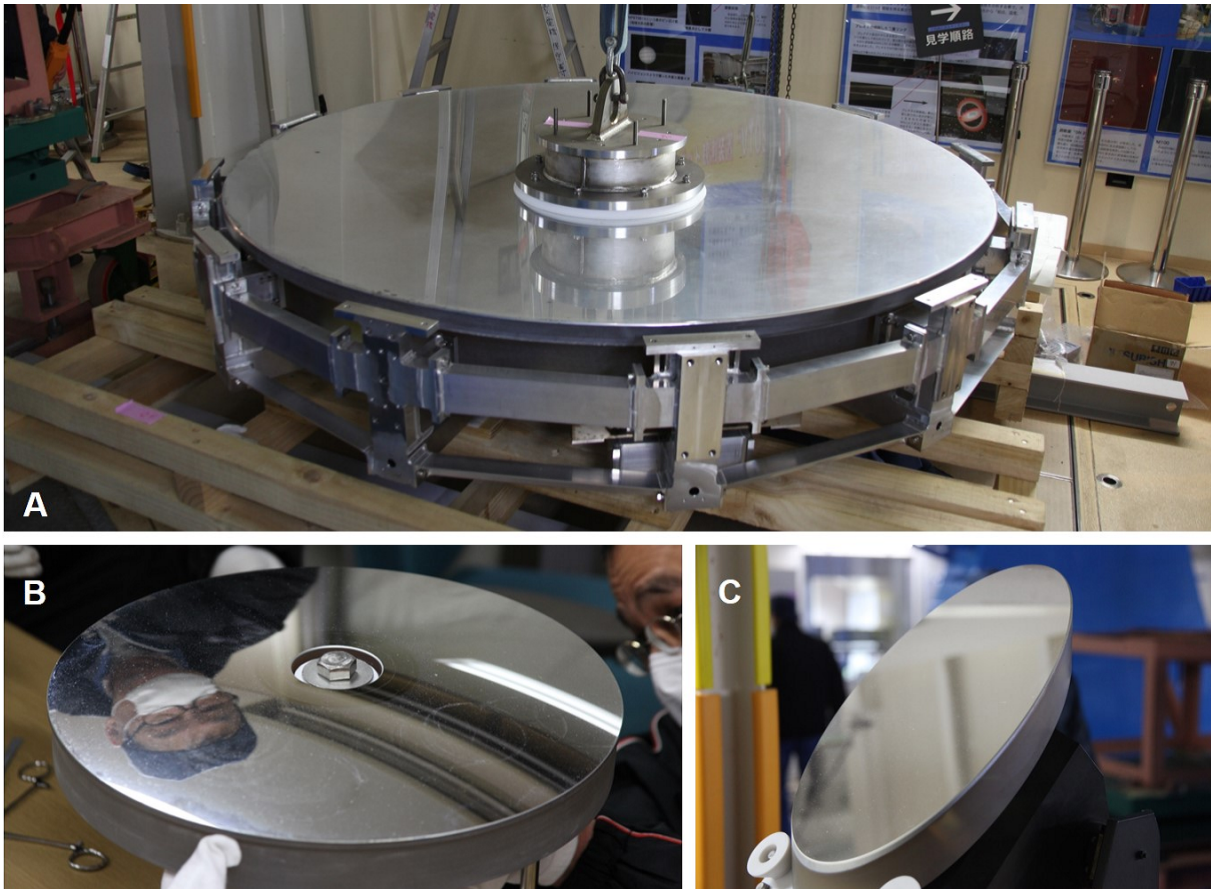


Fig. 6. A. 蒸着前の主鏡の様子。全面が白濁しており、淵には黒くなっている箇所がある。黒い箇所は、主鏡の裏面から光を当てると透けて見えるため、アルミニウムがはがれて欠落していることが分かった。 B. 蒸着前の副鏡の様子。副鏡も全体的に白くなっているが、主鏡に比べると汚れは少ない。主鏡同様、淵の一部でアルミニウムがなくなっている箇所がある。また、円形の跡が見られるが、これは以前反射率測定器を使用した際についてしまったと思われる。 C. 蒸着前の第三鏡の様子。副鏡同様わずかに白く曇っている。

- (1) 副鏡取り外し
- (2) カセグレン焦点観測装置取り外し
- (3) 装置交換機構及びカセグレン焦点インストルメンタルローテータ取り外し
- (4) 第三鏡ユニット取り外し
- (5) 主鏡セル取り外し
- (6) 主鏡をセルから取出し、治具に取り付け
- (7) 主鏡・副鏡搬出

図6は取り外された主鏡・副鏡・第三鏡の様子である。取り外した主鏡と副鏡はエアサス車に載せた上で運搬した。なお第三鏡は、鏡が取り付けユニットに固着してしまい通常の方法で取り外せなかったことから、取り外し用の器具を追加で準備して後日取り外し、輸送した。



## 4-2. 剥離・洗浄

各鏡は1日かけて茨城県つくばみらい市にある三光精衡所まで輸送された。剥離・洗浄の行程の概要は以下の通りである。

### (1) 養生

主鏡側面に洗浄液が付着しないよう、ビニールなどを養生テープで張り付ける。特に、ミラーサポートと呼ばれる主鏡側面にある主鏡の位置決定用の治具は念入りに養生する。

### (2) 水洗

純水を鏡面全体にかけ流し、埃などの汚れを落とす。

### (3) アルミニウム膜及び保護膜の剥離

柄杓を使い10%NaOH水溶液を鏡面にかけながし、古いアルミニウム膜および保護膜を剥がす。

### (4) 洗浄

純水を再度鏡面にかけて洗浄する。

### (5) アルコール置換

素早く乾燥させるため、アルコールを鏡面全体にかけ流す。

### (6) 残った古いアルミニウム膜の剥離

鏡面の淵や、NaOH水溶液のかけ流しだけでは取り除ききれなかった古い膜は、NaOHを染み込ませたコットンを該当箇所しばらく置くことで剥離させる。剥離がすべて完了したら純水洗浄後、アルコール置換を行う。

### (7) 拭き上げ

最後の拭き上げを行う。拭いた後がシミにならない様、拭き上げ作業は鏡面を立てた状態で行う。

一般的にオーバーコートが施されている場合、剥離には2-3日かかるとされている。実際、副鏡・第三鏡の剥離には数日要したが、一方で主鏡の剥離は15分程度で完了した。この原因として考えられることは、主鏡の保護膜が著しく劣化していたか、保護膜そのものが薄かったことなどが考えられる。

NaOH水溶液で古い薄膜をはがし終えた後、鏡面の一部に光沢のある点状の汚れが複数残った。拡大鏡で観察すると小さなアルミニウム塊であることが分かった(図7)。これは鏡作成時もしくは2009年の再蒸着時に付着したと思われるアルミニウムの滴のようなものと考えられる。このような塊はNaOH水溶液を浸したコットンを用いても取り除くことができなかった。無理に除去しようとすると傷の原因となるため、今回の剥離作業でこのような塊をはがすことは見送った。

副鏡・第三鏡はNaOH水溶液に数日浸しておくことで古い膜を除去できた。しかし、特に副鏡の周辺部に剥離・洗浄では取り除ききれない模様があり、これは鏡面そのものが荒れているためであると考えられる。今回の蒸着では特に処置は行わなかった。

## 4-3. 蒸着

主鏡・副鏡・第三鏡の蒸着時の主な行程は以下の通りである。

### (1) 鏡体を蒸着装置に導入

主鏡は、回転台(図4右)に載せた状態で立てた後、チェーンブロックで耳軸部を吊上げ、蒸着装置へ導入するためのレールに設置する。レールに固定した後、蒸着装置内へ主鏡を導入する(図8)。副鏡、第三鏡は鏡面を下向きにした状態で蒸着装置内へ設置する。



Fig. 7. (左) 主鏡鏡面に残った点状の汚れ。矢印の先に汚れがある。(右) 拡大鏡で汚れを観察したもの。光沢のある塊であることから、アルミニウムの滴であると考えられる。この図で示した汚れが鏡面状で最も大きな汚れで、大きさは0.5-1mm程度である。



Fig. 8. レールに設置された主鏡治具。このように立てた状態で、左側にある蒸着装置内へ導入する。なおこれはリハーサル時の写真であるため、主鏡は治具に収まっていない。

(2) 真空引き、イオンボンバード

イオンボンバードとは、蒸着装置内で行う最後の鏡面洗浄である。イオンボンバードでは、蒸着装置内に設置したボンバード用電極に高電圧をかけ、グロー放電によりプラズマを生じさせる。このプラズマ中のイオンが鏡面に当たり、鏡面に付着しているガスや塵などを落とすことができる。

(3) アルミニウムの蒸着

(4) 保護膜 ( $\text{SiO}_x$ ) の蒸着

蒸着時には各鏡の周囲にサンプルピースを設置し同時に蒸着を行い、これをテストピースとしてテープテストを行う。テープテストとは、蒸着した薄膜が十分な強度でガラス表面に付着しているかどうかを試すテストである。スコッチテープなどを蒸着面に密着させた後、一気にテープをはがし、蒸着した薄膜がガラス面に残るかどうかを見る。



副鏡・第三鏡は初回の蒸着でテープテストに合格したが、主鏡に関しては初回の蒸着後のテープテストで、蒸着したアルミニウムが完全にはがれてしまった。どのサンプルピースでも同様の結果となり、主鏡表面で実施したテープテストでも蒸着した薄膜がはがれたため、再度剥離・洗浄・蒸着を行うことになった。

蒸着面の密着強度が弱かった原因として考えられることはイオンボンバードの不足である。使用する蒸着装置の真空引きには通常一晩程度かけるが、今回は念のため1日以上かけて真空引きをしていた。これは主鏡の周囲にある治具に錆びがあったためである。通常錆びたものを真空釜に入れて真空引きをすると、錆びによって劣化した表面にガスや不純物がとどまってしまう、目標の真空度に到達するまで時間がかかる。そのため通常より長い時間真空引きをしたが、錆による真空度の悪化は起こらず、イオンボンバード時の真空度は通常より高い真空度で行われた。そのため蒸着装置内での抵抗値が増大し、イオンボンバード用の電極部で異常放電が生じ、十分なボンバードがなされなかったと考えられる。以上のことを加味し、蒸着試験と同じ真空度でボンバード・蒸着を行った結果、テープテストでも剥離が生じない薄膜を形成することができた。図9は蒸着が終了した各鏡の様子である。

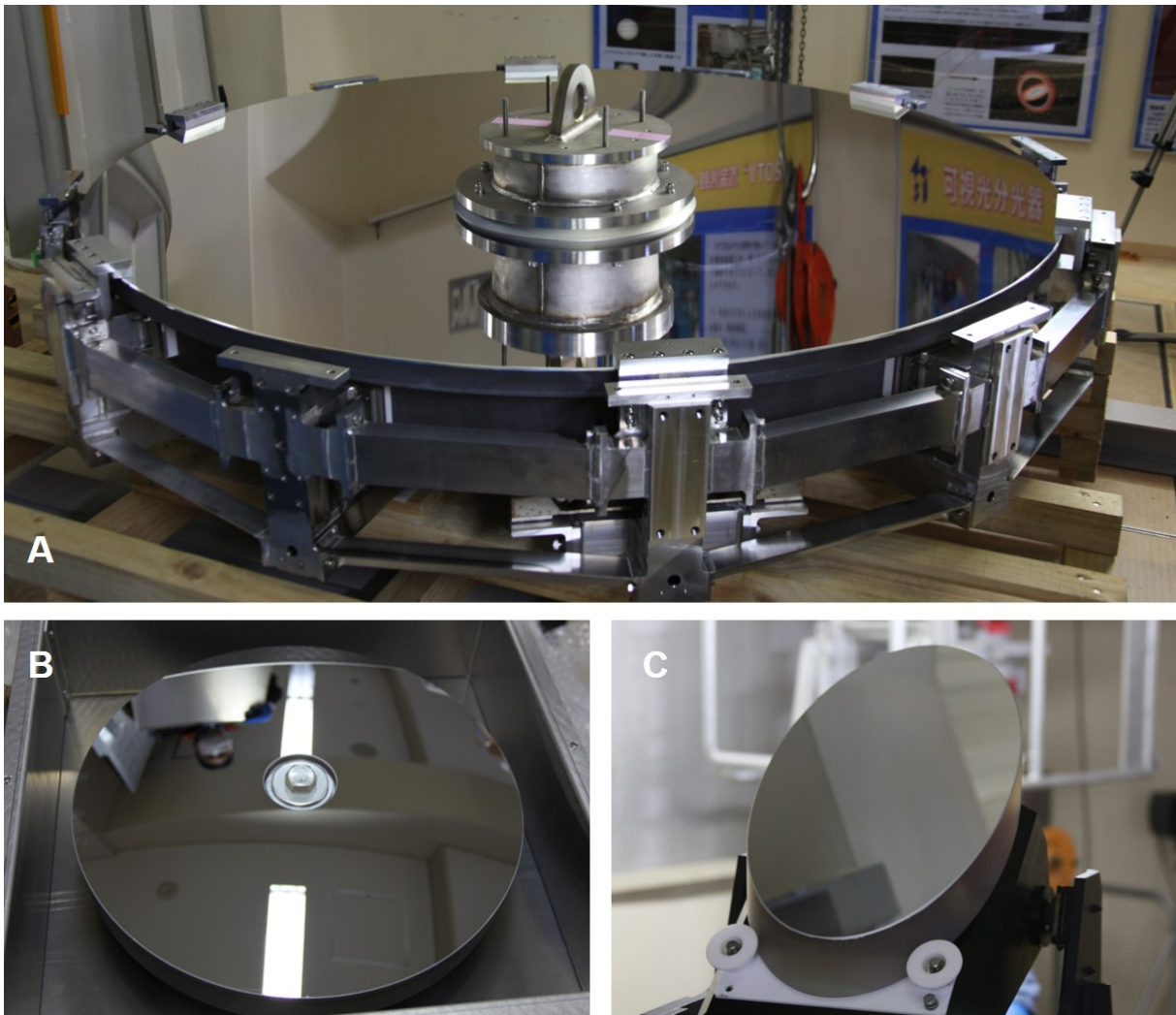


Fig. 9. 蒸着後の主鏡 (A)・副鏡 (B)・第三鏡 (C) の様子。

## 5. 望遠鏡の復旧と評価・調整

### (a) サンプルピースの反射率

主鏡・副鏡・第三鏡の蒸着後、分光光度計にてサンプルピースの反射率を測定し、ピーク波長が $525\pm 20\text{nm}$ に収まっているかどうかを確認した。図 10 は主鏡・副鏡・第三鏡のサンプルピースの反射率特性を示しており、いずれのサンプルピースのピーク波長も条件を満たしていることが分かった。

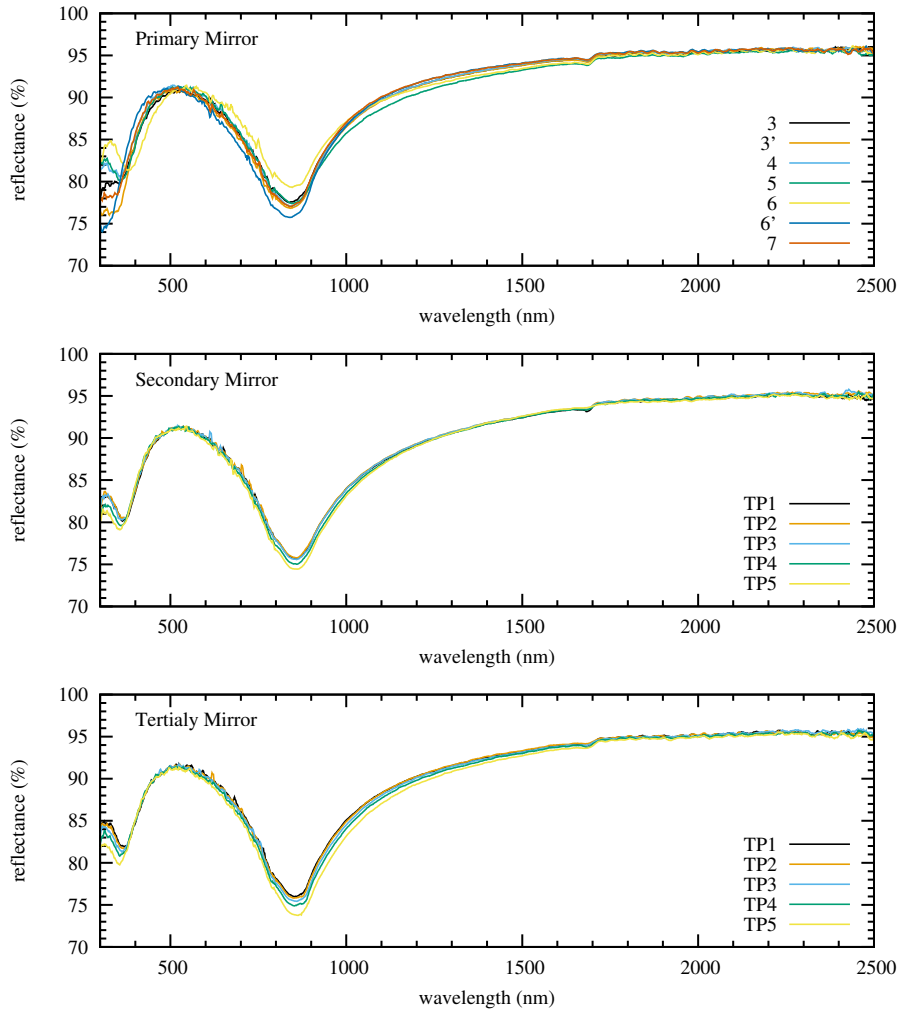


Fig. 10. 主鏡・副鏡・第三鏡のサンプルピースの反射率特性。主鏡のサンプルピースは、3が主鏡を正面から見たとき時計の9時方向にあり、以降反時計回りに30度毎に設置し、7が3時方向にある。いずれも主鏡の外周より100mm程度外側に置かれている。副鏡・第三鏡のサンプルピースは、蒸着時の回転軸から330mm離れた場所に、半径方向とは垂直方向の直線状に等間隔に置かれた。TP1とTP5は、半径方向の線と垂線が交わる点から125mm離れている。

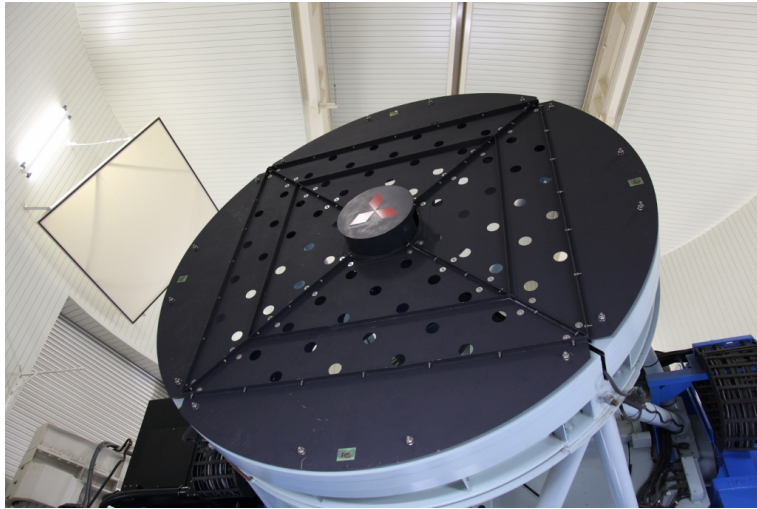


Fig. 11. ハルトマン板取り付け後の望遠鏡の様子 (右)。

(b) 各鏡の取り付け作業

各鏡は、4-1 章で述べた順とは逆の手順で望遠鏡に取り付けられた。主鏡を主鏡セルに戻す際、蒸着時に作成したサンプルピースを主鏡周辺に取り付けておき、反射膜の劣化の進行具合を評価できるようにした。

(c) ハルトマンテスト

主鏡及び副鏡を戻す際は、位置決め治具を用いて着脱前とほぼ同じ位置に鏡を戻すことができるものの、微調整が必要になるため、光軸調整を目的としたハルトマンテストを実施した。ハルトマンテストでは、望遠鏡のトップリングに穴が複数空いた板（ハルトマン板）を取り付け、焦点が合った位置から副鏡を一定方向に内側ないし外側にずらした状態で撮像を行う。対となった画像で、それぞれ対応するスポットを結んだ線が集まる点が焦点となるが、この焦点位置での交点の広がりを示す指標をハルトマン定数と呼ぶ(高橋他 1994)。

なゆた望遠鏡のトップリング部にハルトマン板を取り付け(図 11)、なゆた望遠鏡のカセグレン焦点に装着されている可視撮像装置 MINT(Multiband Imager of Nayuta Telescope) で試験を行った。試験中の光軸調整は、副鏡の位置を微動させることで行う。観測天体はおおぐま座  $\alpha$  星とし、焦点が合った状態より副鏡の位置を  $\pm 9.5\text{mm}$  シフトさせてデフォーカス像を取得し、ハルトマン板によるスポット像を取得した。このような画像を、光軸と垂直な平面上で副鏡を微動させつつ取得し、ハルトマン定数が最も小さくなる副鏡の場所を決定した(図 12)。解析には miniTAO チームが作成したソフトウェアを使用した。この結果、副鏡の位置は取り外し時とほぼ同じ位置で復元されており、ハルトマン定数は 0.34 秒角だった。

## 6. まとめ

兵庫県立大学西はりま天文台のなゆた望遠鏡の主鏡・副鏡・第三鏡の再蒸着作業を行った。日本国内で蒸着を行える方法を検討し、主鏡は鏡体を立てた状態でアルミニウムの反射膜の上に保護膜を蒸着する方法を確立した。アルミニウムの膜厚および保護膜蒸着後の反射率のピーク波長の仕様値を決定し、いずれの鏡も仕様を満たした状態で再蒸着が完了した。鏡面の反射率は 500nm 付近の可視光域で 90% を超えており、高効率で観測

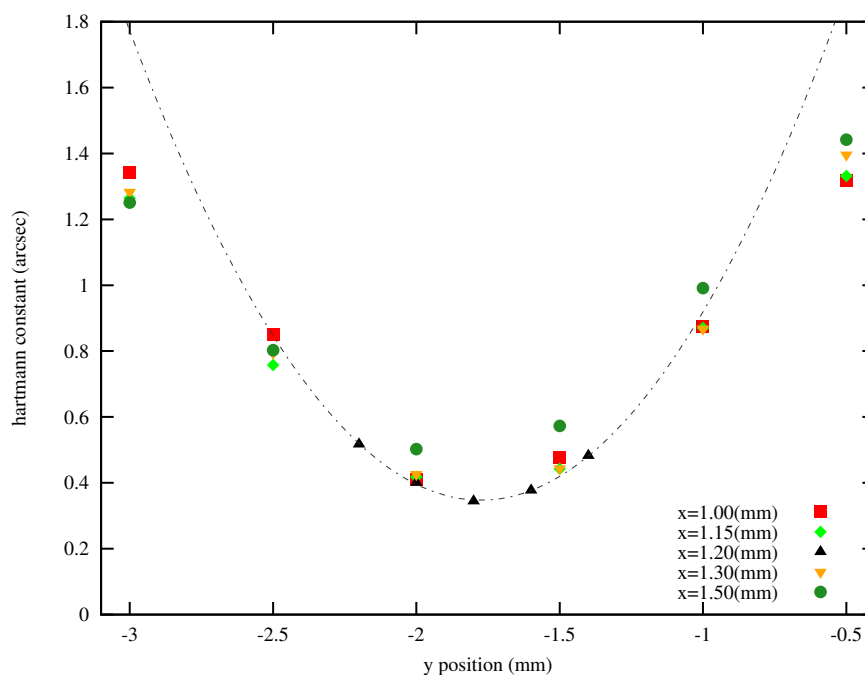


Fig. 12. ハルトマンテストの結果。横軸は副鏡の  $y$  軸方向の位置 (望遠鏡を高度 0 度まで倒したことを仮定した際、水平面と平行な方向が  $y$  軸方向、それと垂直な方向が  $x$  軸となる)、縦軸はハルトマン定数である。 $x$  の値を固定しつつ  $y$  の値を変化させてデータを取得した後、 $x$  の値を変化させ、また同様に  $y$  の値を変えつつデータを取得するという作業を繰り返し行い、最適な  $x$  および  $y$  の位置を決定した。点線は最適な  $x$ 、 $y$  の位置でのデータ点の近似曲線を示す。

ができるようになった。各鏡を望遠鏡に戻した状態でハルトマンテストを実施し、光軸調整を行った。2016年3月より通常の観測体制に戻り、観望会および研究観測を再開した。蒸着後も鏡面の反射率維持を目的とした洗浄作業を定期的に行っているが、鏡面を保護しつつ反射率を維持する方法を今後検討していく必要がある。

本蒸着作業は、株式会社三光精衡所、三菱電機の協力のもの実施された。また、日本国内での蒸着の実施手段の検討や各仕様の決定などには、東京大学天文センターの高橋英則氏に多くの助言を頂いた。ここに感謝の意を示す。

## 《参考文献》

Tauber, J. A., et al. 2010, A&A, 520, A2

高橋敦、尾久土正己、酒造晃子、横尾武夫 1994、西はりま天文台年報、第4号、12頁

新井彰、高木悠平、高橋隼、本田敏志、森鼻久美子、伊藤洋一 2013、西はりま天文台紀要、第1号、11頁