

COATING OF SUBARU TELESCOPE 8.2-M PRIMARY MIRROR

N.Ohshima, T.Kanzawa, M.Yutani, T.Kurakami, M.Nakagiri, Y.Torii, G.Sasaki, Y.Kamata,
S.S.Hayashi, K.Okita, K.Omata, K.Imi, R.Potter, T.Ishikawa*, and T.Noguchi

National Astronomical Observatory of Japan and
*Mitsubishi Electric Corporation Communication Systems Center

「すばる」望遠鏡の 8.2m 主鏡コーティング

概要

アメリカ合衆国ピッツバーグ郊外の石灰石廃坑の中での研磨を終えた大型光学赤外線望遠鏡(以後愛称の「すばる」と呼ぶ)の主鏡は、ミシシッピー川を下り、パナマ運河を経て、ハワイ島マウナケアの山頂へ 1998 年 11 月 5 日(ハワイ時)に到着し、輸送後の主鏡受け入れ検査を終えて、11 月 8 日には事前実験の条件通り、洗浄後にアルミニウムの真空蒸着が施され、世界最大級の主鏡として姿を現した。その後、「すばる」望遠鏡に組み込まれファーストライトも終え、性能の高さを示す数々の初画像を得るなど順調に試験観測が行われている。主鏡蒸着の主な結果は、今回同時に蒸着したプレパレートサンプル鏡を測定して、膜厚は約 1,250 nm、反射率は $90 \pm 1\%$ (500nm)、赤外反射率は 96~97%(2.2micron)が得られている。

1 これまでの経緯

研磨精度(12nm rms)を誇る「すばる」の主鏡も、ガラス単体のままの反射率は 4%と低く、アルミニウム蒸着が施されて、はじめて 90%以上に及ぶ高反射率を持ち、その有効口径 8.2m による集光力を発揮する。ただし、「すばる」の主鏡は直径 8.3m (外形)もあり、計画当初、天体望遠鏡の主鏡コーティングに実績を持つ蒸着法を採用するか、真空チャンバーを低く造れるスパッタリング法にすべきかと選択に悩んだ。当時の技術では、膜厚の均一性に難を感じ、反射特性を見極めるための小規模実験でも優位な結果が得られないまま、蒸着法を選定した。その後の技術進展により、VLT(ヨーロッパ連合がチリに製作の望遠鏡)や GEMINI (アメリカ、イギリス、カナダなどが製作の望遠鏡)では、スパッタリング法が採用されている。

2 「すばる」主鏡用蒸着設備

2.1 9 m真空蒸着装置

「すばる」望遠鏡のサイトであるマウナケア山頂の標高は約 4,200m、空気も気圧 0.6 と希薄である。山頂での調整を最少限にとどめるため、製作会社である PSI 社は、シアトルで仮組調整を計画した。真空引き仕様(大気圧から 1×10^{-6} Torr まで 4 時間)を満たした装置は、運河を下り太平洋航海のバージ(筏)に乗り継ぎ、ハワイ島北西部に位置するカワイハエ港で陸揚げされ、上釜と下釜とに分割されてそれぞれ 2 日間をかけて山頂に運ばれた。図 1 は、ドーリーと呼ばれる特殊車両(荷台の高さと傾斜を独立に調整する 48 輪を持ち、道路面に対して常に積載物を水平に保つ)に上釜を載せ、山頂へ運搬中の写真である。一体物では主鏡セルに匹敵する重さであるが、主鏡セルのように厳重な梱包はなされていない。上釜の直径は 9m 強、高さ 5m 弱、重量 40 トンの大きさである。図 2 は「すばる」のドーム全景であり、直径 40m、高さ 44m、回転部の重量約 1,800 トン、夜間に望遠鏡で観測するためには、L 型の開口扉を開ける。ドーム下部の中央に

は、望遠鏡を据え付ける基礎であるピア（直径約 16m）もあり、図 3 の平面図に示すように、真空蒸着装置は幅 12m のドーナツ状床に関連設備共々壁面に接するばかりに配置されている。

図 1 . マウナケア山頂に輸送中の蒸着装置上釜



図 2 . 「すばる」のドーム全景

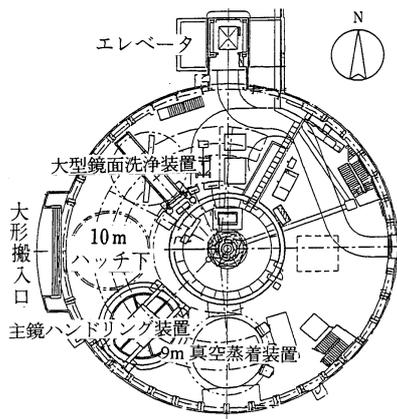


図 3 . ドーム下部の装置配置図

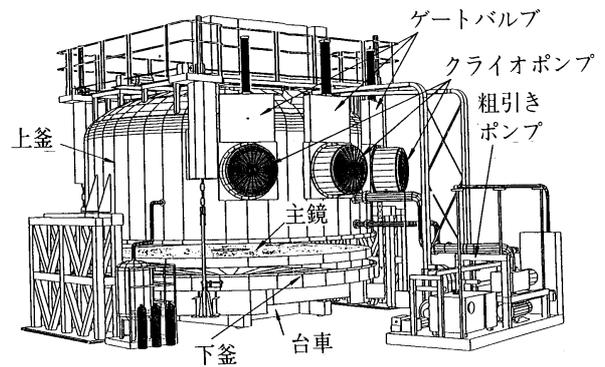


図 4 . 大型真空蒸着装置の概念図

すばる用真空蒸着装置の外形は、幅高さ共約 9m、総重量約 80 トンと巨大である。装置全体の理解を深めるための概念を図 4 に示す。主鏡の安全を優先させ、下釜に装備された 90 本に及ぶスプリング式支持機構で水平に保持し、成膜用蒸発源を上部に配置した。アルミニウムが十分に熔けないで落下すると、主鏡面にダメージを与えることになるので、三鷹構内の開発実験棟に設置された 1.6m 真空蒸着装置¹⁾により End-Loading 法²⁾を試みたが、より確実な方法を得るため、38cm 真空蒸着装置を導入して予めタングステンフィラメントにアルミニウムを付ける Pre-Wetting 法の実験³⁾から得たパラメータを「すばる」主鏡用の真空蒸着装置で確認した。直径 120cm のクライオポンプ 3 台、液体窒素冷却のマイスナーフィンとブースター付きメカニカルポンプ 2 台で真空チャンバーの上釜から真空引きを行う。主鏡を境に釜内部の上部を高真空に、裏面洗浄で汚が残る下部は低真空に分ける設計とした。真空引きの主回路のゲートバルブは圧搾空気圧で瞬時に開閉する。一連の制御は、シーケンサーとパソコン制御で自動化されているので、誤操作することはない。コーティング後の膜厚の一樣性 5% を目標として、288 本の蒸発用フィラメントは、計算機シミュレーションによって最適配置されていて、その検証は 4 節で述べる。蒸発直前の鏡面クリーニングは、定量のアルゴンガスを流しグローロット放電の回転によるイオン流（約 10 分間）を利用する。真空ゲージの他にも水晶の振動数を仲介とする膜厚計や蒸着装置の覗き窓の外から反射率をリアルタイムで測定し、フィラメントの電圧電流などと共にパソコンを介して計算機にデータを取り込むこと出来る。

2.2 主鏡セルへの着脱は主鏡ハンドリング装置で慎重に

軽量鏡である「すばる」主鏡の重量は約 23 トン、厚みは 20cm（従来型鏡の厚み対口径比は 1/6、すばる

の主鏡は 1/41) と薄く、主鏡能動支持用のアクチュエータ穴が掘ってある。研削中にはマイクロクラック (小さな傷、大きな傷は急速に成長して破損に至る場合がある) が生じ易く、その対策として面を取り、研削後の酸洗いや反射面以外も研磨したが、取り扱いに細心の注意を払う必要があるので主鏡セルに入れて運搬する方針にした。これらの検討結果、主鏡セルへの着脱作業はドーム下部に主鏡ハンドリング装置を設置することで対処することとし、主鏡をセルごと吊る揚力を持つ 80 トンクレーン、作業工程上ドーム上部と蒸着作業を行うドーム下部にそれぞれ主鏡をセルに入れたままで運搬するための台車を用意した。

主鏡ハンドリング装置の主要部は、大きな門型クレーンと吊り治具で構成され、主鏡を吊るパッドの配置や鏡にかかる応力分布などの計算機シミュレーションを行い、主鏡の外周に 18、中央穴の周りに 6 個のパッドを備えた。主鏡を支える 261 のアクチュエータは、主鏡裏面穴にインバーソケット (主鏡材の ULE ガラスに合わせて低膨張金属製) ではめ合い接合されていて 3 固定点と共に全体の位置を決め、吊り治具を一旦主鏡セルのフランジに軟着陸させるためのダンパー機構 (蒸着下釜にも対応) 折りたたみ式の 24 パッドは不凍液を使った圧力伝達で展開して、それぞれ均等に荷重を移行させるなど、随所に工夫がなされている。図 5 は、主鏡ハンドリング装置を用いて主鏡単体を蒸着下釜へ吊り込んでいる風景を示した。

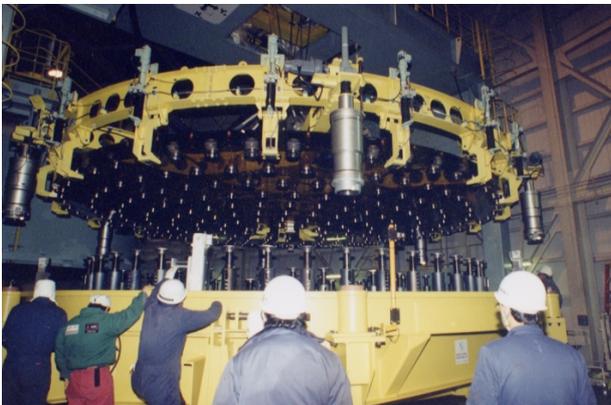


図 5 . 主鏡ハンドリング風景



図 6 . 主鏡洗浄風景

2.3 蒸着の前処理は大型鏡面洗浄装置で

主鏡反射面の劣化を抑えるための工夫として、望遠鏡に組み込んだ状態で降り積もる塵埃をドライアイススノーで吹き払う装置が用意されているが、毎年 1 度程度の再蒸着を計画している。

古い膜の溶解剥離に始まる洗浄処理を、空気の薄い山頂で人海戦術だけに頼るのは回避し、如何に洗浄の手扱が可能か、実験を重ねて漸く大型鏡面洗浄装置が出来上がった。図 6 は、純水で洗浄中の風景である。装置の高さは 9.65m 柱間 10.3m の門型構造とブリッジに支えられている。主鏡の上面まで降りてくる洗浄部は、根車状の原水・純水ノズルと溶解液 (35%塩酸 1000cc に水 1000cc を希釈し硫酸銅 30g を加える) ノズル・モップ、使用後のモップからの液だれをトレイの上に移動させて防ぐ機構をぶら下げて、風車のように最高速度で 1 分に 1 回、一方向に滑らかに回転する。洗浄装置の周辺部には、原水タンクに重ねて純水と温純水タンク、洗浄および抵抗値 10M ・cm を精製する純水プラント操作盤がある。蒸着時間の合間に主鏡セルの保守を行うため、セルを載せた台車がこの下を通過できるように洗浄部は 2.8m 上昇する。

今回の洗浄は事前に実験で得た、1)主鏡面保護膜 (運搬時の) の残留物は綿布紙にアルコールを付けて拭き取り、2)初回なので従来通り重曹を用いた洗浄、3)60 の温純水洗浄、4)人海戦術で行ったアルコール拭き仕上げ、などを 2 日にわたり、洗浄に要した実働合計約 10 時間の作業が約 10 人で行われた。

3 蒸着性能の評価

3.1 プレウェットフィラメントの蒸発

フィラメントの材質はタングステン、素線径約 1mm、長さ約 60cm の 3 本撚り、16 巻きのコイル状（コイル径 10mm）である。このフィラメントに予め 38cm 真空装置で純度 99.999% のアルミニウムを約 0.7g 溶かし付けたものをプレウェットフィラメントと呼び、玉のない素性の良いものを選別し、酸素吸収剤を同封した袋で保管する。総数 288 本をマウナケアの電力供給事情で 3 回に分け、蒸発時には、8 分かけて電圧 7V にし、2 分間ホールドし、各 96 本の加熱状態が揃ったところで 5 分かけてファイアリングと呼ぶ高い電圧（15V）状態にするとアルミニウムが一斉に蒸発する。実験によると、ファイアリング時に蒸発するアルミニウムの割合が高いほど高反射率が得られ、特に紫外域では顕著である。「すばる」方式では、急激に電圧を高くするとスピッツと呼ぶアルミニウムの塊が飛び鏡面を傷つけるので、10 /sec の蒸発レートまでしか達成できていないが、分光反射率の測定（UV-3100PC）結果は十分に仕様を満たしている（図 7 参照）。

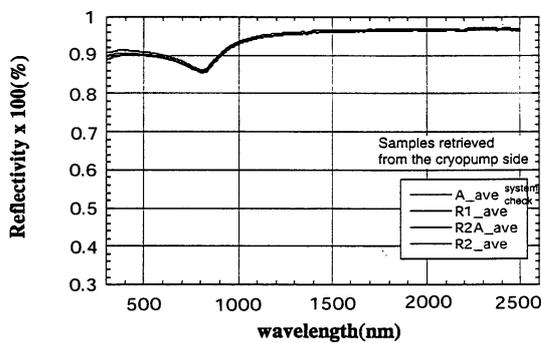


図 7. 初回蒸着の分光反射率特性

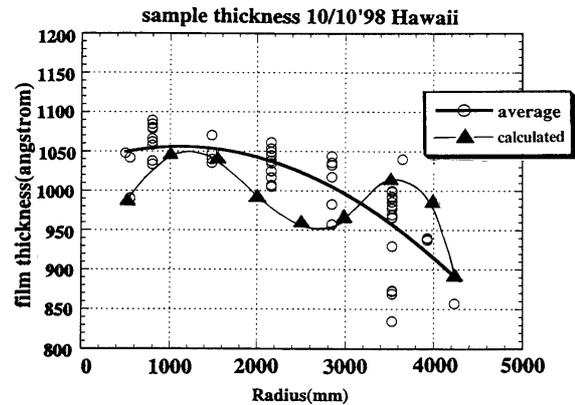


図 8. 膜厚の一様性（98.10.10 の結果）

3.2 膜厚の一様性

膜厚の一様性の検証は、主鏡代わりのサンプル（予めアルミニウム蒸着を施した上から出ガスの少ないカプトンテープを貼り、蒸着後テープを剥がして段差を作る）を配置し、Zygo Maxim-NT で測定する。1998 年 10 月 10 日で得られた半径方向の膜厚分布の結果について図 8 に示す。図 8 に示した数値シミュレーションと多少異なるのは 3 回に分けたゾーン毎の蒸発の一部が不完全であったことと解釈している。平均膜厚の仕様値は $700 \sim 1,300 \pm 5\%$ であり、アルミニウムの蒸発量でコントロールする計画であった。図 8 の実験では、フィラメント 1 本当たりアルミニウム蒸発量は約 0.4 ~ 0.6g、膜厚 900 ~ 1,050、膜厚計 839（近傍サンプル 855）であった。今回の蒸発量は 3 回共 0.6g と揃っていて、膜厚計 1,099（サンプル 1,030）であり、図 8 の結果と数値シミュレーションを考慮して、平均膜厚は 1,182 ~ 1,330 と推測できる。膜の厚さの実績では 1997 年 6 月 10 日の実験で蒸発量約 0.8g、平均膜厚 1,750、膜厚計 1,052（サンプル 1,689）が得られている。本稿では触れないが、赤外線用副鏡に対して、下地であるクロームの上に銀蒸着を施す方法も確立した。

参考文献

- 1) 佐々木五郎、他：天文機器開発実験センターの中型真空蒸着装置、国立天文台報、3、35-43(1996)。
- 2) 鎌田有紀子、他：中型実験装置を用いた蒸着基礎実験、国立天文台報、3、45-55(1996)。
- 3) S.S.Hayashi, et.al: "Status of the Coating facility of Subaru telescope", Proc.SPIE3352, 454- 462(1998)。