

紫外域でのコーティング性能向上 UV-enhanced Coating for Telescope Optics

林 左絵子 (国立天文台)

Saeko S. Hayashi (National Astronomical Observatory of Japan)

概要

地球上のサイトであっても、大気の紫外光透過率が良く、紫外線観測を行うことが可能なサイトがある。望遠鏡の光学系について、可視光から赤外にかけての性能とともに、紫外域でのコーティング性能を向上させることにより、紫外線観測天文学を大きく発展させることができるのではないかと。そのようなコーティングについて各所で開発が進んでいる。地上望遠鏡用に実用化するためには、コーティングの耐久性と再コートのための剥離性をともに両立させることが課題である。また運用に当たっては、剥離に必要な薬品および廃液の管理が大きな課題である。離島での入手性および環境負荷からしても、できるだけ再利用できることが望ましい。

Abstract

This report discusses efforts in making telescope optics more reflective in the ultraviolet. Some ground-based telescope sites have decent transmission of UV light, and ability to observe that range will benefit the astronomy. Thanks to the UV-enhanced coatings developed for the space telescopes and astronomical instruments, it is becoming more feasible to have coating that has good reflectivity from UV to IR. The difficulty for the ground-based telescopes is that the environment contributes to the degradation of the coating, and re-coating is necessary. The requirements of durability versus strippability are somewhat contradictory. The waste control, and possible reuse, is another big issue for TMT, for 20 segments recoat per month will produce large amount of various waste.

1. 紫外域まで観測したい

マウナケアやラパルマのような地上望遠鏡適地では、波長 350nm でも 6 割を超える透過率がある。たとえばすばる望遠鏡では、300 nm に近い波長のスペクトル線観測が行われている。313 nm にあるベリリウム同位体の輝線は、このベリリウムがすみやかにリチウムになることから、リチウムの起源に関する貴重な知見を与える (参考: すばる望遠鏡ウェブサイトの観測成果記事 [2021 年 7 月 6 日](#) 付けの記事、[2015 年 2 月 18 日](#) 付けの記事)。標高が高く乾燥したサイトであれば紫外線の透過率が良いことから、このような重要なテーマの観測が可能になる。TMT では観測可能な波長域を 0.3–30 ミクロンとしており、メートルサイズのクラスの反射光学系に適用できるコーティングが求められる。

2. 広い波長域で高性能の均一・一様なコーティングを実現する

TMT の望遠鏡光学系のコーティングに求められる要素は次のようにまとめられる。

- 波長 0.3–30 ミクロンの範囲で反射率が高い。赤外域では放射率が低いとも言い換えられる。

- 反射率の波長依存性が連続的である、すなわち狭い波長域での急激な変化が無い。
- 反射率が光学系全面にわたり、一様である。
- 成膜の一様性、均一性。主鏡セグメント、副鏡、第3鏡いずれも中心穴がないので要注意。

TMT では主鏡、副鏡、第3鏡についてファーストライト時のコーティングとして、ジュミニ望遠鏡で実用化されている銀を主体とするコーティング (Boccas et al. 2004, SPIE 5494, 239) を施す。基盤材への付着性および保護のため、マグネトロンによるスパッタ方式により銀の上下に多層膜を作る。

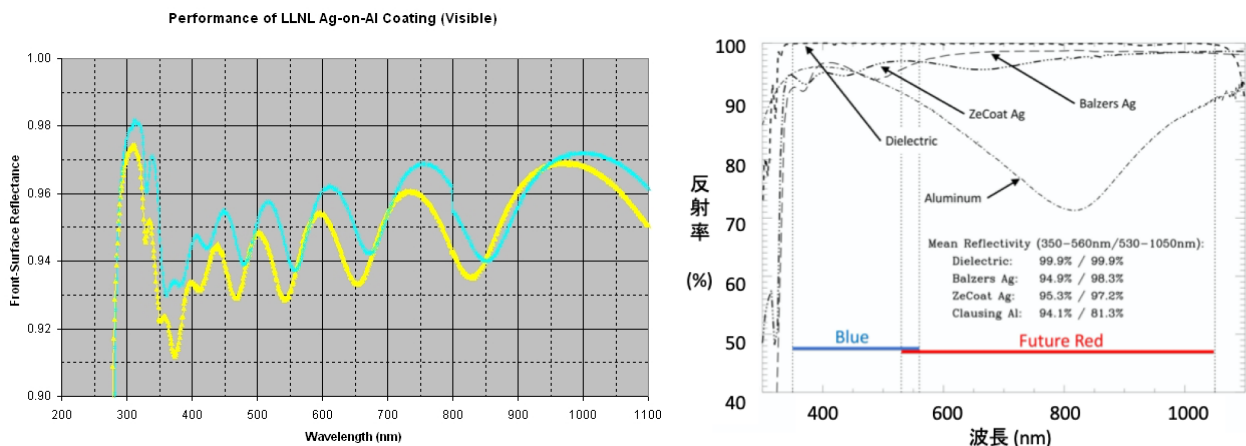
さらに将来、紫外光での性能強化のための拡張に備え、マグネトロン+ターゲットの組み合わせを増設できるようにしている。2021 年に行われた TMT の副鏡および第3鏡コーティング装置の[概念設計審査](#)において、その確実な増設が盛り込まれた。

次世代超大型光学赤外線望遠鏡3台 - TMT, GMT, ELT - のうち ELT の製作が先行している。主鏡セグメントのコーティング装置2台のうち1台が既に工場でのテストを終え、チリ現地に運ばれた。パンデミックの影響で予定が遅れているようであるが、組み立てが進んでいるはずである。

3. 望遠鏡光学系への適用 成膜の見通しあり

紫外性能も良いコーティングが、宇宙望遠鏡や観測装置内の光学系用に開発されてきた。

下にケック望遠鏡の観測装置に使われている光学コーティングの例を示す。



左: Low Resolution Imaging Spectrometer (LRIS) の直径 54 cm コリメータ鏡の反射率 (ケック望遠鏡のウェブサイト)。右: Keck Cosmic Web Imager (KCWI) 光学系の反射率 (Morrissey et al. 2019, ApJ, Vol 864, id 93)

次に望遠鏡光学系での使用例を示す。

Kepler 宇宙望遠鏡 主鏡直径 1.4 m

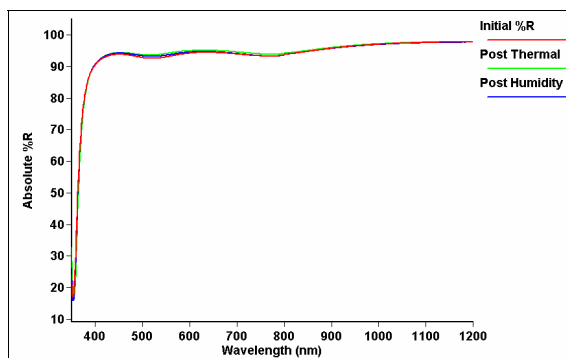


Figure 4: Protected Ag Coating with Five-Layer HL Interference Coating.

- [硝材 ULE](#), [研磨 Brasher LP](#)
これはすばる望遠鏡主鏡と同じ組み合わせ)
- コーティング 銀ベース
Surface Optics Corporation 社

図の出典: Sheikh et al. 2008, SPIE 7010

James Webb 宇宙望遠鏡は赤外観測用のため、金ベースで赤外域の高性能を達成している。

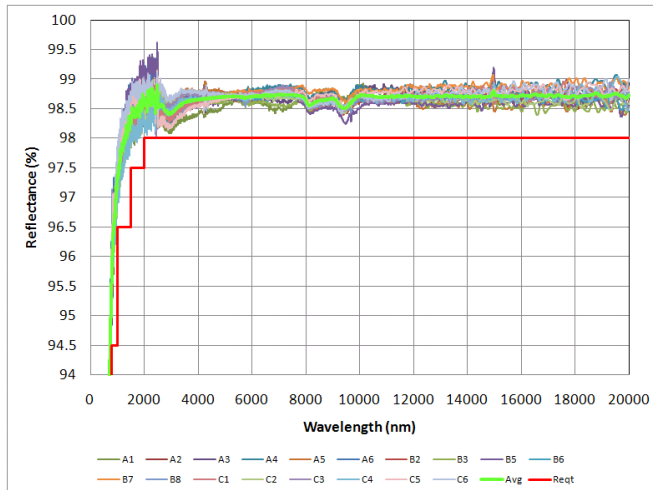


Figure 3. Spectral reflectivity for the 18 PM segments after coating

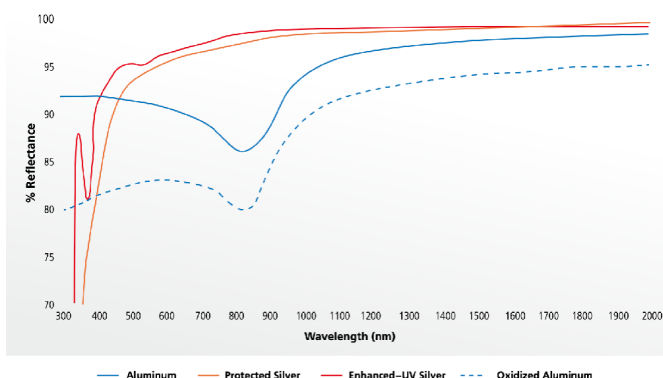
- 硝材 ベリリウム、研磨 Tinsley Laboratories (現在の Coherent TMT 主鏡の研磨の米国分担当)、6 角セグメントのさしわたし 1.3 m、18 枚のセグメントで主鏡を構成。
- コーティング 金ベース QCI (Quantum Coating Incorporated)

図の出典 : Lightsey et al. 2012, SPIE 8442-119

ELT は主鏡セグメント用のコーティング装置 2 台と副鏡／第 3 鏡コーティング装置をベルギーにベースのある AGC Plasma Technology Solutions が受注した。下の写真はドイツの工場で性能検証を終えた M1 コーティング装置。(出典 : Schotsaert et al. 2020, SPIE 11451, doi: 10.1117/12.2560685)



Reflectivity of Typical AGC Mirror Coatings



AGC も紫外性能を向上させる取り組みをしており、左の図は www.agc-plasma.com リーフレットより引用。グラフで紫外域に伸びているのが見てとれるが、分光特性的にはよろしくない。ピークやギャップの位置がずれると、セグメントごとに分光反射特性が異なることになり、観測への影響があると思われる。

4. 耐久性 vs. 剥離性

観測装置光学系でデューワー内にあるものは、真空かつ温度コントロールありという環境にあり、宇宙望遠鏡は大気汚染の影響を心配する必要が無い。どちらの場合も再コートを考えなくとも良いため、それぞれの環境に応じて考えられる最良の方法で耐久性のあるコーティングを施すことができる。(地球外に送る望遠鏡や観測装置であっても、月や火星で使うものは地球での場合と似たような環境耐性が再び問題になるであろう。)

地上望遠鏡の場合は、観測のために外気にさらされることから、環境要因によるコーティングの劣化を避けることができない。また望遠鏡構造や建物などからの落下物、液体もれなども運用上は避けられないものである。劣化への対処としては、CO₂ などによる in-situ cleaning や水洗いによる延命をはかることと、古いコーティングをはがして再コートするといういずれも大掛かりな作業を伴うものになる。

運用上の環境に対するコーティングの耐久性と、再コートに際しての剥離性との見計らいは、重要な課題である。

別の講演で、望遠鏡を使わない日中にどの姿勢にしておくかで汚れ具合が異なる、従ってコーティングの劣化スピードが異なることが示された (→高橋英則さん講演)。これによると下向きがベストであることはもちろんだが、直立させておくだけでも効果がある。TMT の場合、昼間のレスト位置が仰角ゼロ度なので、望遠鏡光学系全てが直立した状態となる。主鏡はもちろん曲率があるので、下側のセグメントはやや上向きとなるものの、定期的に CO₂ クリーニングをすることでホコリの付着と定着を最低限にすることができよう。第3鏡はナスミス焦点を向いているため直立となるが、床側を向くことができれば、ホコリが落ちやすくなるだろう。

5. 剥離に伴う薬品の管理と再利用の可能性

すばる望遠鏡の赤外副鏡や第3鏡は金属のみのコーティングであって、剥離には1種類の薬品だけを使えば良い。しかしジェミニ望遠鏡用の多層膜付きコーティングになると、複数の毒劇物を使用しなければならない。紫外性能向上コーティングは、より複雑な多層膜構成になるであろうから、剥離に必要な薬品も種類が増える可能性がある。

望遠鏡サイトは離島や人里離れた場所にあることから、薬品類の手配、運搬、注意深い保管に加え、廃液をどう扱うかは大きな問題である。すばる望遠鏡主鏡の再コーティング時には 500 程度の塩酸を使用するが、何度も大量の水で洗うため、最終的には 10 トンクラスの水にこの塩酸が溶けている状態になる。これほど薄まっていれば、生活雑排水としての処理が可能で、実際にそのように認定されて汲み取り車による回収を行ってきた。TMT 主鏡セグメントは1ヶ月に 20 枚も再コートするため、1枚分の廃液が多くなくとも全体では大変な量になってしまう。廃液を薬品ごとに回収し、一部でも再利用できることが望ましい。