

大型鏡材の表面欠陥 (Surface Defects on Large Optics)

林 左絵子 (国立天文台 TMT プロジェクト)

(Saeko S. Hayashi (TMT Project, National Astronomical Observatory of Japan))

概要

望遠鏡光学系や大型観測装置に必要な大型の光学材料について、ここでは反射光学系を念頭に、表面欠陥の問題を取り上げる。これは加工中に生ずるものと、運用中に生ずるものがあり、前者については仕様で規定しておくことができる。光学系および光学コーティングに関する仕様策定に参考となる標準の例を調べた。後者については、欠陥の記録および必要に応じた措置により、長期にわたる使用に耐えられるよう管理することが重要である。欠陥の顕著な増加が見られる場合には、使用環境の改善も必要になる。

Abstract

For the long years of telescope operation, it is very important to manage the defects of its optics, especially the damage to their surfaces. In this report, we discuss the defects of “interest” of the optics and optical coating, and list frequently referred standards. Detailed inspection and remedial procedure of the potentially damaging defects are important aspects during the life of the telescope.

1. ガラス系材料の表面欠陥

望遠鏡や観測装置に使われる反射光学系に、ガラス系の材料がよく使われる。これは長年にわたり安定した形状を保つことができるためである。しかし損傷が生じてしまうと、そこを埋めてもとの性能を復元するという方法をとることができないため、表面欠陥を生じさせない、あるいは広げないよう十分管理する必要がある。製品の仕様で損傷のサイズなどを制限することにより、加工終了後に製品として受け取る条件を明確にしておくことができる。つまり規格に合わないものは受け取らないということである。(実際には、性能に顕著な悪影響があるものでなければ、受け取るであろう。) 運用中については、十分な防止策を作るとともに、損傷時にそれが広がらないよう事後措置を講じる必要がある。

2. 光学系の表面欠陥に関する標準

内製であれ外注であれ反射光学系を作る際に、表面欠陥に関する仕様を策定するための基準をどうするか。サイズや加工工程の複雑さにもよるが、欠陥がゼロというのは現実的ではない。このため国際標準や米国で事実上使われている標準がある。光学系および光学コーティングに関する標準の例を下記に挙げる。ここで ANSI, ISO, OEOSC, JIS はそれぞれ American National Standards Institute, Inc., the International Organization for Standardization, Optics and Electro-Optics Standards Council, Japanese Industrial Standards 日本産業規格である。

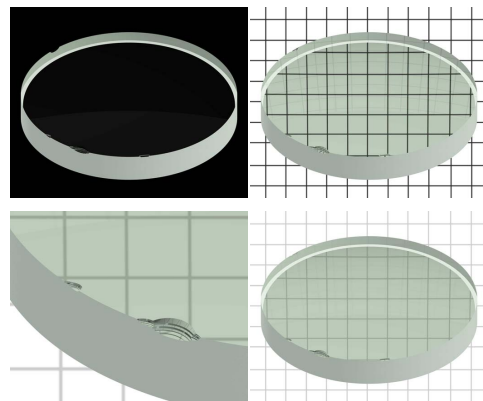
- ANSI/OEOSC OP1.002-2009 For Optics and Electro-Optical Instruments - Optical Elements and Assemblies - Appearance Imperfections

- ANSI/OEOSC OP3.001-2001 For Optics and Electro-Optical Instruments - Optical Glass
- ISO 9022: Optics and photonics - Environmental test methods
- ISO 9211: Optics and photonics - Optical coatings
- ISO 10110-7:2008; Optics and photonics - Preparation of drawings for optical elements and systems - Part 7: Surface Imperfection Tolerances
- MIL-C-48497A (1980) Military Specification Coating, Single or Multilayer, Interference: Durability Requirements for
- MIL-PRF-13830B (1997) Performance Specification Optical Components for Fire Control Instruments; General Specification Governing the Manufacture, Assembly, and Inspection of

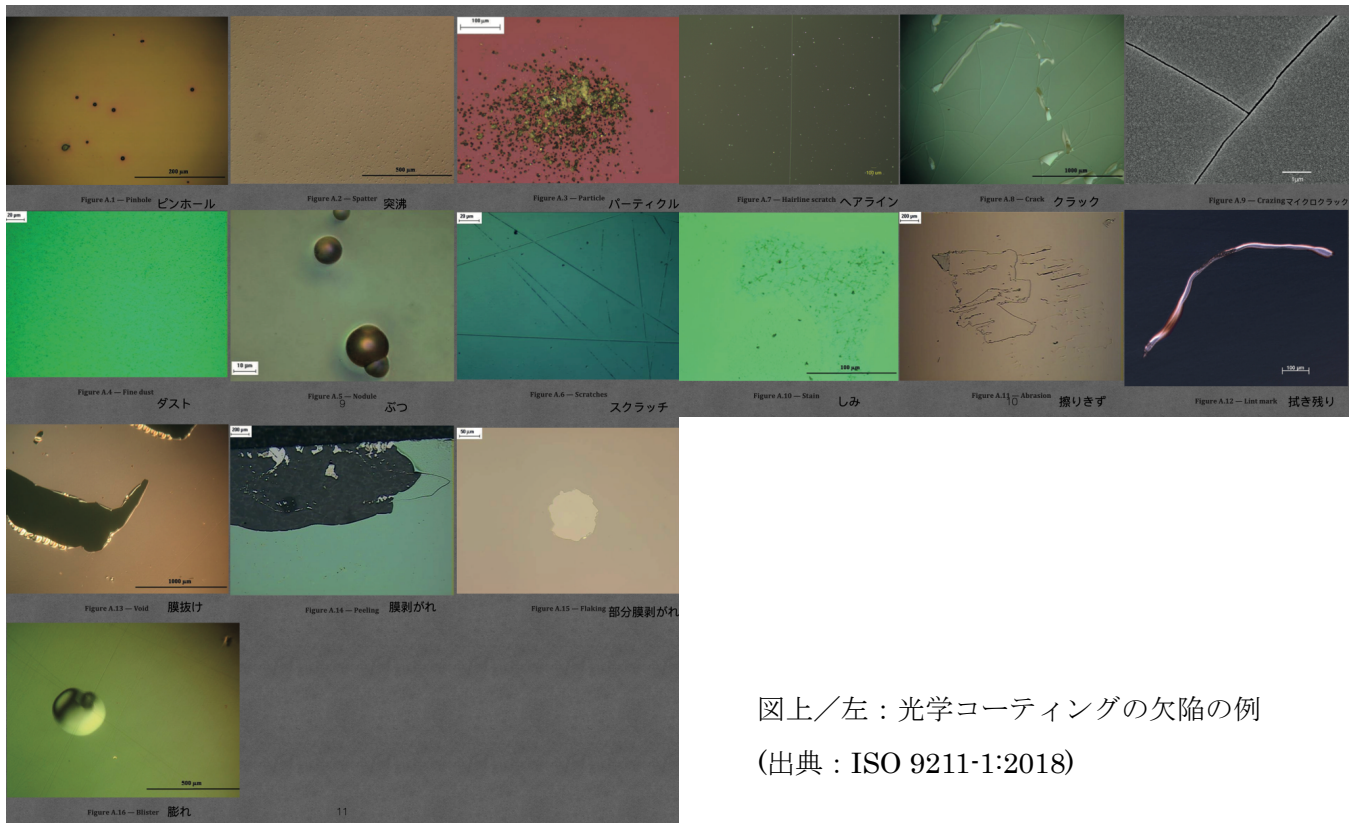
JIS は ISO に準拠しており、ISO 9211-1:2010 が JIS B 7080-1:2015、ISO 10110 が JIS B 0090 に相当する。ISO 9022 に相当する JIS 規格は見つけられなかった。

このうち次世代超大型光学赤外線望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT) では、少なくとも主鏡セグメントを作る上で、主に MIL-C-48497A に依拠している。(注：コーティングについては耐久性仕様などで ISO を採用している。)

次に代表的な欠陥について上記の標準に示されている画像を挙げる。



図：光学系の欠陥 カン、カケの例 (出典：ANSI/OEOSC OP1.002-2009)



図上／左：光学コーティングの欠陥の例
(出典：ISO 9211-1:2018)

TMTの主鏡セグメントでは scratch と dig について、MIL-C-48497A に準拠した仕様を設けている。この scratch と dig の規格は scratch (μm で表した数字)-dig(0.01mm で表した数字)という組み合わせで示す。たとえば 80-50 あるいは 60-40 というのはキズ幅の上限が 80/60 μm 、ポツ傷を円形としたときの最大直径 0.50/0.40 mm ということである。

日本の産業標準規格 JIS は国際標準 ISO に基づいており、このような表面欠陥については

80-50 が 5/1x0.80, L1x0.05

60-40 が 5/1x0.60, L1x0.04

となる。MIL 規格は数を指定しないため、ここでは 1 個として ISO 標準に変換した。光学系のサイズにより、実際には許容できる数をそれなりに妥当なものにする必要がある。

3. 光学系の表面欠陥をどう扱うか

上記のような損傷は、加工に伴う何らかの物理的接触により生ずる。内包されていた泡や包含物が掘り出されて、損傷につながるケースもあるが、多くの場合、加工機や測定器その他の治具の衝突による縁の部分の損傷や、加工機、測定器などの接触による表面の損傷である。後者の場合、加工面に歯型や引きずり傷が残る。ひきずり傷は氷河の擦痕と同様、硬いものがガタガタと表面を移動する際に進行方向に開いた三日月型の特徴的な形を示す。

製品の最終検査で見つかる損傷や、望遠鏡光学系のコーティング時に古いコーティングを剥がしたさいの検査で見つかる損傷については、サイズにより措置が必要になる。検査方法としては、(ルーペを

併用した）目視検査やポータブル顕微鏡による局所的な検査が行われている。内部に亀裂が生じている場合、超音波や偏光を使う方法もあり得る。

目視検査は、可能であれば暗室で局所的な照明を当てる方法がとれると良い。割れ目が見えやすいからである。TMT 主鏡セグメントの場合、たとえば米国で研磨加工を担当している会社での検査の様子を次に示す。この写真は TMT ウェブサイトで公開されているものである。外周にリングをはめて、それを吊り具や床への固定治具に固定している。セグメントは 45mm の厚さで反対側を見通せる。



写真：TMT 主鏡セグメント 研磨終了後の外観検査の様子（TMT website）

さて、損傷部の措置として、残念ながらガラスは接着・溶接、穴埋め、継ぎ（接木とか継ぎはぎのような）などによる復元ができない。サイズが小さければモニターを継続することで良いが、大きい、あるいは進行が確認された場合、影響の及ぶ範囲を削り取ることになる。望遠鏡光学系のように仰角により鏡材に加わる力の方向が変化し、部分的にストレスが変化する場合、いっそう注意が必要である。傷を取り去り、鋭く尖った部分が無いように形を整えたのち、表面に生じた微小なクラックを研磨またはエッチングで処理する。微小クラックの深さが判明している、あるいは推定できている場合、エッチングの同じ材料のテストピースと鏡材に施し、その規定の深さに到達できるよう工夫することができる。

最後に運用中の事故防止についてコメントしておく。地上望遠鏡は夜間、ドームやエンクロージャを開けて観測するため、外部からの影響も受ける。望遠鏡や建物からの落下物、外からの飛来物、あるいは望遠鏡構造部および光学系支持機構自体の部品等の落下、調整不良による衝突なども起き得る。光学系の安全のために、十分な点検を続けることはきわめて重要である。主鏡より上にあるものの片付けや清掃といった日常的な作業が求められるので、点検者が安全に作業を行えるように考えておくことがもちろん前提である。

日本の正倉院御物で 8 世紀から 10 世紀あたりまでに作られた物が、もとの形状はもちろん、細かな細工の美しさが十分に保たれている例に見られるように、ガラス系材料は本来たいへん長持ちする。加工および運用時に損傷を生じさせないように努めることは、大きな意義のあることである。