

保護膜付銀鏡の耐久試験

岩下 光, 鳥居泰男, 久保浩一, 松田 浩

(2001年4月2日受理)

Endurance Tests of Silver Coated Mirrors

Hikaru IWASHITA, Yasuo TORII, Koichi KUBO, and Ko MATSUDA

Abstract

We are promoting MIRA project (Mitaka optical and InfraRed Array) at the Mitaka campus of the National Astronomical Observatory of Japan. Since about 20 mirrors are used to lead the star light from the siderostat to the fringe detector for this interferometer, the small reflectivity decrease of each mirror will cause the large decrease of total reflectivity of all mirrors. It is preferable to use the silver coated mirror (silver mirror) instead of the aluminum coated mirror (aluminum mirror), because the silver mirror has higher reflectivity than the aluminum mirror at the wavelength longer than 380 nm. However, the degradation of silver coating is striking especially for the astronomical instruments in the open air, even with the protective over coating regularly applied to the silver coatings. The performance of over coating is not suitable for our use at present. We carried out the endurance tests of silver mirrors by using four sample silver mirrors supplied by four companies (hereafter called as A-mirror, B-mirror, C-mirror, and D-mirror, respectively) to know the usable duration of the silver mirror exposed to the open air. A- and B-mirrors kept reflectivity higher than that of the aluminum mirror after two months exposing test in the open air. After the five months exposure test, the reflectivity of four silver mirrors decreased lower than the one of aluminum mirror. The reflectivity of C-mirror decreased slowly, while the reflectivity at the wavelengths shorter than 900 nm is lower than the one of aluminum mirror before the exposing test. The reflectivity of D-mirror decreased most rapidly, although the reflectivity is high before the exposing test. We checked the decrease of visibility given by the degradation of silver mirrors with a test interferometer. The difference of visibility given by the degradation effect was not found among the four mirrors, the degraded A- and B-mirrors, the new aluminum mirror, and the degraded aluminum mirror.

1. はじめに

国立天文台光干渉計グループは、光赤外干渉計の開発研究 (MIRA プロジェクト: Mitaka optical and Infra-Red Array) を行っている。MIRA-I.1 段階の装置は恒星の干渉縞検出に成功し、1999年3月で終了した^{1,2)}。現在は、国立天文台三鷹キャンパスに、口径30 cmの2台のサイデロスタットを光導入平面鏡とする基線長30 mの光赤外干渉計 MIRA-I.2 の建設を進めている。開発状況は日本天文学会の年会で発表してきた (1999年秋季年会 (V26b), 2000年秋季年会 (V08a), 2001年春季年会 (V46b))。この干渉計では、サイデロスタットから終

点の干渉光学系までの光路途上に、光束縮小光学系、ティップティルト鏡、光束伝送光学系、粗動遅延線、精密遅延線など、反射面が約20面ある。各反射面での光の減衰はその面数のべき乗で増えるので1面あたりの光損失を極力抑える必要がある。また、検出限界を深くしたり、現在は可視域での観測であるが、将来の多色法においてはB~Kバンドを使用するため可視~近赤外の広帯域で高反射率を持つ鏡面が必要である。これらの条件を満足して初めて、小口径でも短時間積分で検出限界等級を下げるができる。

銀鏡は、アルミニウム鏡 (以降はアルミ鏡と呼ぶ) に比べて約380 nmより長い波長では非常に反射特性が

良い(理科年表: 2001 年版, 523 p, 国立天文台編, 丸善(株)発行). 銀鏡は, 広い波長域で 98% 程度の非常に高い反射率を持つので, 20 面反射しても反射率は 67% を保つ. アルミ鏡は波長 650 nm では反射率 90%, 850 nm では 86% 程度なので, 20 面反射すると反射率はそれぞれ, 12%, 5% まで落ちる. 1 枚の鏡の反射率が 80% 程度まで下がると, 20 面反射すると 1.2% になってしまう. したがって, 銀鏡の高反射率は, 干渉計にとって非常に有効である. しかし, 平地の通常環境では反射表面の劣化が速いのが欠点である^{1, 2)}. 銀鏡は通常保護膜をつけて劣化を抑えているが, その技術は完全には確立していないのが現状である.

国立天文台三鷹キャンパスでは, 夏場は高温多湿となる. 乾燥した冬季においても, 屋外では結露したものの近くにあれば影響を受ける. 湿気の付いた銀蒸着面は白濁し, 反射率がアルミ鏡よりも低下する. 実験室内に設置する光学系では, 乾燥空気を送り込むなどの対策で表面コート膜の劣化の進行を遅くすることは可能であるが, 外気にさらされる観測室内では湿気に強い保護膜を持つ銀鏡を使用する必要がある. アルミ鏡は広い波長域で比較的反射特性が良く, また耐久性も比較的良いので, 天体望遠鏡には広く使われている. しかし, 外気にさらされる観測室で使用する場合にはやはり劣化が起こるので, 一年ごとの再蒸着, 表面クリーニングなどの対策がとられている³⁾.

以上のような背景のもと, 銀鏡の使用可能期間を知っておくため, 我々は 4 種類の銀鏡を外気に曝露する耐久試験を行った. この試験には, メレス・グリオ社, デントン・バキューム社, シグマ光機社, トプコン社の 4 社の保護膜付き銀鏡を使用した. これら 4 社の製品の銀鏡

を順不同で, A-銀鏡, B-銀鏡, C-銀鏡, D-銀鏡と符号をつけて呼ぶことにする.

A, B, C, D-銀鏡は共に直径 50 mm の大きさである.

今回の耐久試験では, 表面状態の拡大写真撮影, 表面粗さ, 反射率, などの測定により劣化の度合を評価した. また, 表面が劣化した状態の銀鏡とアルミ鏡を用いた場合の可干渉性についても比較した. 一連の試験測定の結果について報告する.

2. 耐久試験の概要

2.1 試験の環境と期間

4 種の銀鏡の耐久試験は, 1999 年 7 月 6 日から 2000 年 1 月 19 日まで行った. この間, 1999 年 7 月 14 日から 1999 年 12 月 3 日までは, 外気に曝露するため, 各銀鏡を, 三鷹キャンパスの自動光電子午環ドーム内の通気口付近に置いた. 埃の付着を少なくするため, 鏡を垂直に立てた状態で設置した. この場所では, 気温と湿度は外気と同じになる.

今回は, 特に湿度の高い時期をわざと選んで実験を行った.

外気への曝露の期間の前後は, 空調の効いた研究室内に保管した. 銀鏡とアルミ鏡を使用した可干渉性の測定は, 2001 年 3 月 30 日に行った. なお, 4 枚の銀鏡の置かれた環境に違いはないようにした.

2.2 試験の手順

以下に示す①~⑥の流れで, 4 種の銀鏡の測定を行った. 図 1 に, 測定の流れのブロック図を示す. 一連の試験で使用した測定装置(顕微鏡, 分光光度計, スキャタロメータ, 干渉計)の製造社名, 形式, 仕様等を表 1 に

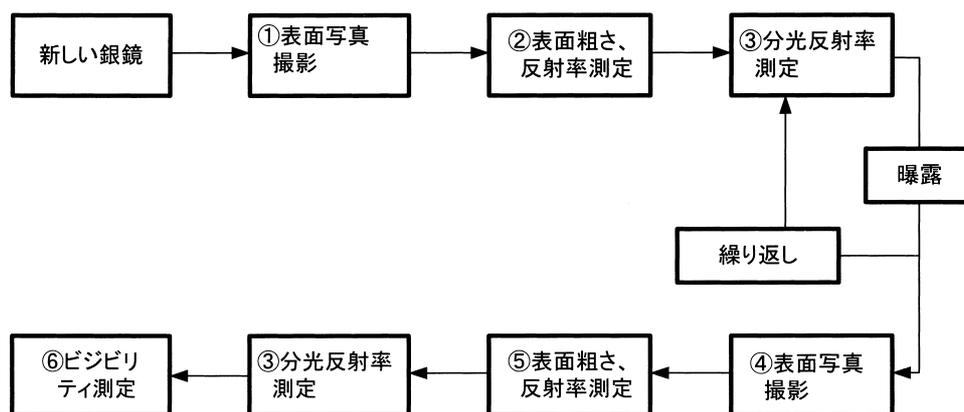


図 1. 測定の流れ図.

表 1. 一連の試験で使用した測定装置.

測定器	社名	形式	波長, 光束
顕微鏡	Moritex	MODEL MS603	
分光光度計	島津製作所	UV3100-PC	260~2,500 nm, 長方形 4×7 mm
スキャタロメータ	SMS 製	μSCAN	670 nm, 円 4 mmφ
干渉計	自作干渉計	(ビジリティ測定)	633 nm (He-Ne), 円 5 mmφ

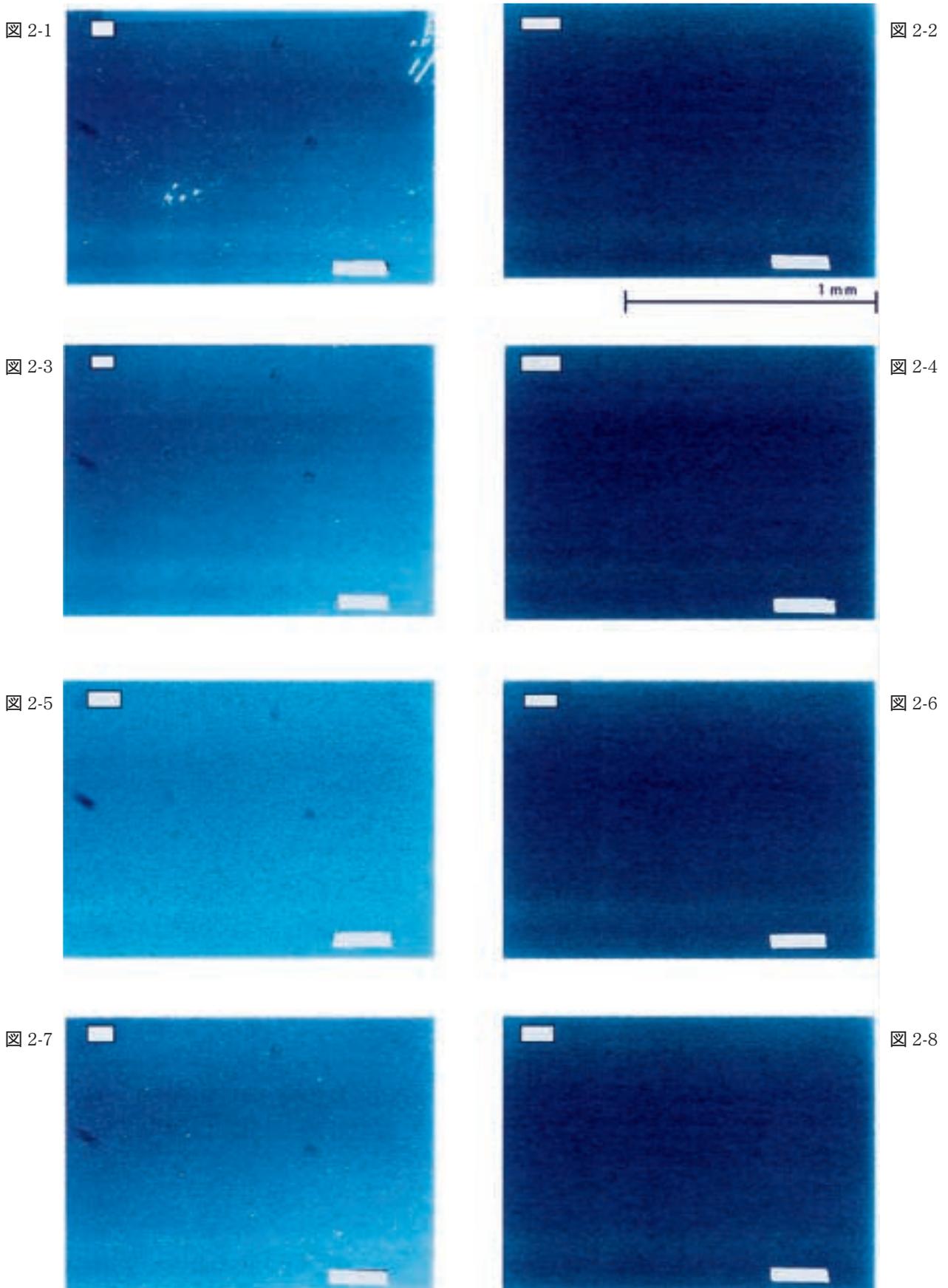


図 2. 銀鏡表面の顕微鏡拡大写真.

2-1: A-銀鏡 (7月5日, 表面照射), 2-2: A-銀鏡 (7月5日, 裏面照射), 2-3: B-銀鏡 (7月5日, 表面照射), 2-4: B-銀鏡 (7月5日, 裏面照射), 2-5: C-銀鏡 (7月5日, 表面照射), 2-6: C-銀鏡 (7月5日, 裏面照射), 2-7: D-銀鏡 (7月5日, 表面照射), 2-8: D-銀鏡 (7月5日, 裏面照射)

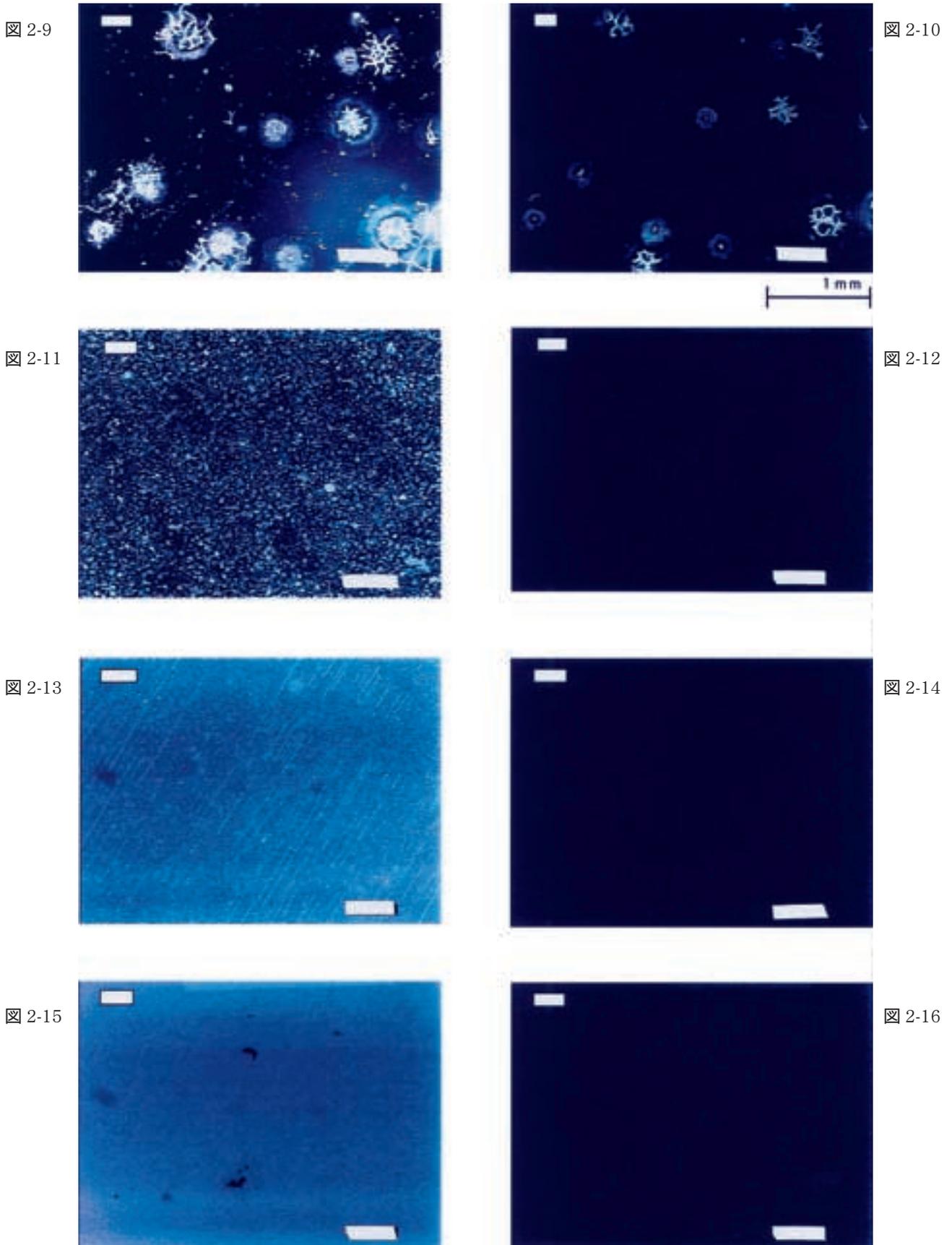


図 2. 銀鏡表面の顕微鏡拡大写真。
2-9: A-銀鏡 (12月3日, 表面照射), 2-10: A-銀鏡 (12月3日, 裏面照射), 2-11: B-銀鏡 (12月3日, 表面照射), 2-12: B-銀鏡 (12月3日, 裏面照射), 2-13: C-銀鏡 (12月3日, 表面照射), 2-14: C-銀鏡 (12月3日, 裏面照射), 2-15: D-銀鏡 (12月3日, 表面照射), 2-16: D-銀鏡 (12月3日, 裏面照射)

示す。スカタロメータの仕様はマニュアルに詳しく述べられている⁴⁾。測定は天文機器開発実験センターのオプトショップで行い、室温は測定していないが、大体10~20°C くらいあった。

① 表面写真撮影:

耐久試験に入る前の各銀鏡の表面状態を顕微鏡で記録した(1999年7月5日)。表面照射による反射、裏面照射による透過の拡大写真を撮影した。

② 表面粗さ、反射率測定:

曝露試験に入る直前(1999年7月6日)にスカタロメータで表面粗さおよび反射率(670 nm)を測定した。測定器の安定性確認のため、4種の銀鏡を測定するたびに毎回同じアルミ鏡(以降比較アルミ鏡と書く。直径30 mm)を測定した。4種の銀鏡と比較アルミ鏡とも1枚につき10回測定場所を変えて測定を行った。比較アルミ鏡は、全期間を通じて空調の効いた研究室に保管した。

③ 分光反射率測定:

1999年7月14日から外気への曝露を開始し、1999年12月3日曝露を終了した。この間、分光光度計により、波長260 nmから2,500 nmまでの分光反射率を繰り返し測定した。測定日: 1999年7月14日, 7月30日, 8月10日, 9月8日, 2000年1月19日の5回。各時期の測定で、銀鏡は各鏡とも鏡面上の測定位置を変えて5回測定した。測定装置の安定性をチェックするため、比較アルミ鏡の測定を各時期の一連の銀鏡測定の前後に1回ずつ行った。前後の測定両方とも測定位置を変えて4カ所ずつ測定した。

④ 表面写真撮影:

①と同様に銀鏡の表面状態を、表面照射による反射、裏面照射による透過の拡大写真で記録した(1999年12月3日)。

⑤ 表面粗さ、反射率測定:

曝露試験の直後に、②と同様に表面粗さ、反射率を測定した(1999年12月22日)。

⑥ ビジビリティ測定:

耐久試験の後に、表面の劣化した銀鏡を干渉計の1カ所に組み込み、その状態での干渉縞のビジビリティを測定した。この干渉縞の測定には、耐久試験に使用した銀鏡2枚(A-銀鏡, B-銀鏡)、比較のための使い古しのアルミ鏡(以下古アルミ鏡)、新品のアルミ鏡(以下新アルミ鏡)を使用した。ただし、古アルミ鏡は銀鏡と同じような状況で外気に曝露はしていない。新・古アルミ鏡は共に直径50 mmの大きさである。

3. 試験結果

3.1 銀鏡の表面状態の変化

前述のように曝露試験の前後に顕微鏡による表面の拡大写真撮影を行って、表面状態の変化を検査した。図2-1~2-8に試料として使用した4種の銀鏡の、曝露試験直前(1999年7月5日)の表面照射による反射と裏面

照射による透過の写真を示す。図2-9~2-16にはそれぞれの銀鏡の曝露試験直後(1999年12月3日)撮影の表面照射による反射と裏面照射による透過の写真を示す。各図の中に、鏡面上での実長のスケールを示した。スケールは表面状態に応じて変えてある。

A-銀鏡は、曝露試験終了後の写真を見ると、銀が剥げて光が透過している様子が見える。表面照射による反射の写真には直径0.8~1 mmの円形に広がったひび割れが何個も写っている。裏面照射による透過の写真でも直径約0.4~0.8 mmの円形に広がったひび割れが何個も写っている。B-銀鏡は試験終了後の表面照射による反射の写真では、無数の小さなひび割れ模様が見えるが、裏面照射による透過の写真では、ひび割れは見えない(光は透過してこない)。C-銀鏡、D-銀鏡は両方とも、試験後の表面は、白濁(曇)が著しい。

曝露試験の前後にスカタロメータにより表面粗さを測定した。表2に表面粗さの測定値を示す。表面粗さは、曝露試験の前にはC-銀鏡のものが大きい。表面粗さの増加を比較してみると、C-銀鏡、A-銀鏡、B-銀鏡、D-銀鏡の順で増加量が大きくなっている。C-銀鏡は表面粗さの増加量は一番小さいが、最初から表面粗さの値が一番大きい鏡である。4枚の銀鏡の測定の前後には、比較アルミ鏡の測定を行った。各時期の測定の前後、曝露試験の前後で、比較アルミ鏡の表面粗さにほとんど変化は見られない。

表2. スカタロメータによる表面粗さの測定。単位はÅ, 曝露試験前(7月6日)の測定と曝露試験後(12月22日)の測定値を示す。

銀鏡の種類	7月6日 表面粗さÅ, (標準偏差)	12月22日 表面粗さÅ, (標準偏差)
比較アルミ鏡	12.8 (2.3)	14.7 (3.9)
A-銀鏡	14.2 (1.3)	133.3 (38.2)
B-銀鏡	12.5 (0.9)	157.0 (4.9)
C-銀鏡	146.3 (0.3)	210.4 (0.8)
D-銀鏡	22.3 (0.4)	601.8 (9.0)
比較アルミ鏡	14.5 (2.2)	14.8 (4.6)

表3. スカタロメータによる反射率(670 nm)の測定。単位は%, 曝露試験前(7月6日)の測定と曝露試験後(12月22日)の測定値を示す。

銀鏡の種類	7月6日 反射率%, (標準偏差)	12月22日 反射率%, (標準偏差)
比較アルミ鏡	86.52 (0.11)	86.24 (0.25)
A-銀鏡	98.85 (0.12)	84.41 (7.62)
B-銀鏡	98.20 (0.07)	79.80 (0.96)
C-銀鏡	84.91 (0.06)	71.33 (0.15)
D-銀鏡	99.11 (0.03)	62.82 (0.36)
比較アルミ鏡	86.63 (0.14)	86.35 (0.12)

図 3-c

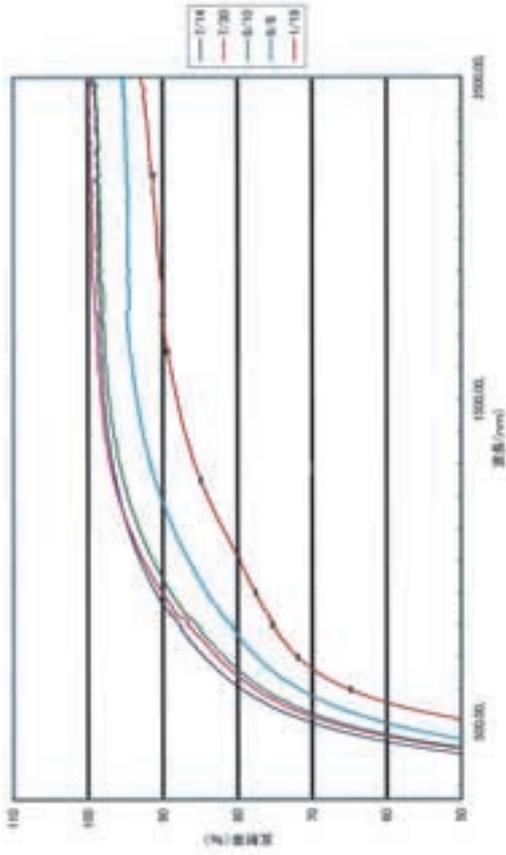


図 3-a

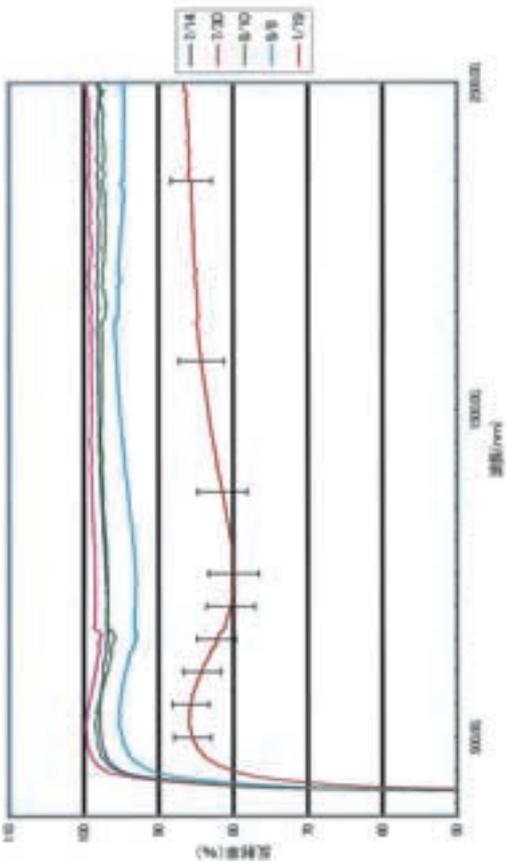


図 3-d

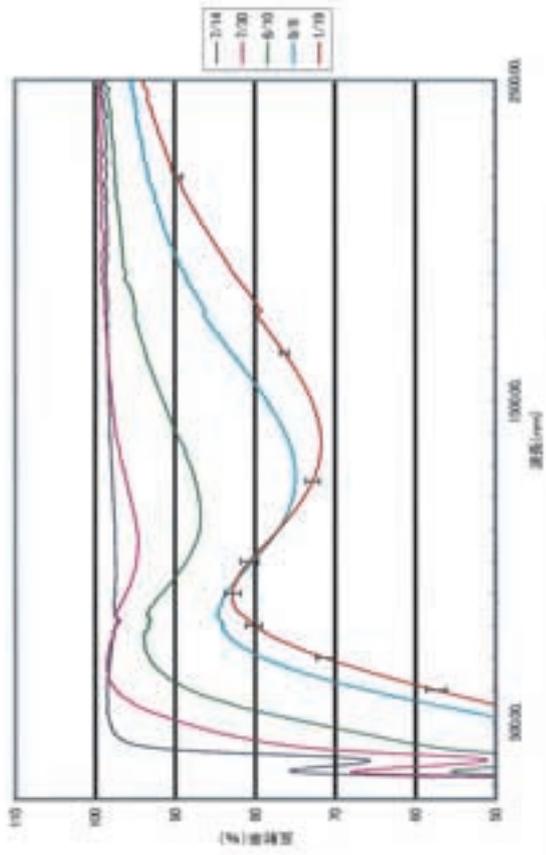


図 3-b

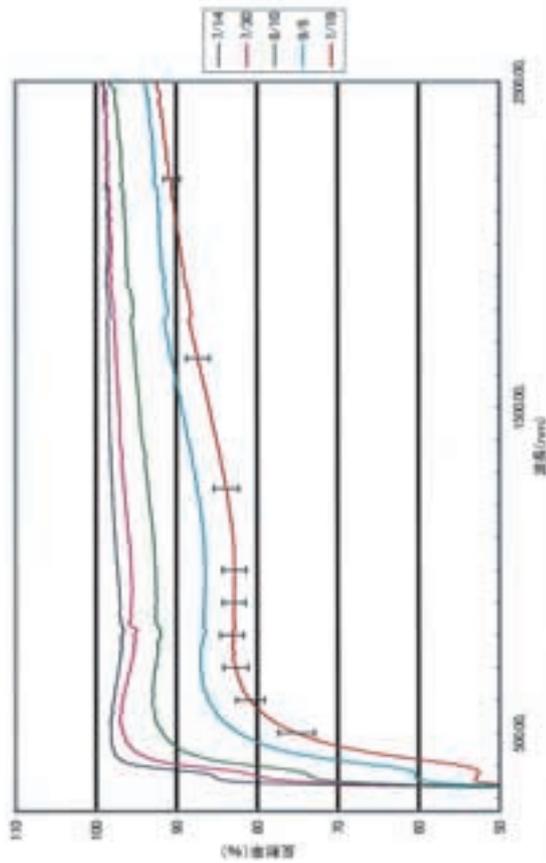


図3. 各銀鏡の分光反射率の時間変化.
3-a A-銀鏡 3-b B-銀鏡 3-c C-銀鏡 3-d D-銀鏡

表 4. 各種銀鏡の耐久試験評価。表に示した数値は性能の高さ、すなわち、反射率は大から小、その他（表面粗さ、変化、標準偏差）は小から大の順位を表す。

	A-銀鏡	B-銀鏡	C-銀鏡	D-銀鏡
分光反射率 初期	1	2	4	3
分光反射率 最後	1	2	3	4
表面粗さ 初期	2	1	4	3
表面粗さ 最後	1	2	3	4
反射率の変化（初期—最後）	2	3	1	4
表面粗さの変化（初期—最後）	2	3	1	4
反射率の標準偏差 最初	4	3	2	1
反射率の標準偏差 最後	4	3	1	2
表面粗さの標準偏差 初期	4	3	1	2
表面粗さの標準偏差 最後	4	2	1	3

3.2 反射率の変化

曝露試験の前後にスカタロメータによる表面粗さの測定と同時に、波長 670 nm における反射率を測定した（表 3）。表 3 より、曝露試験後には A-銀鏡、B-銀鏡、C-銀鏡、D-銀鏡の順で反射率が高いことが分かる。試験前の反射率から終了後の反射率を引いて、今回の曝露試験期間でどのくらい反射率が低下したか比べてみると、C-銀鏡、A-銀鏡、B-銀鏡、D-銀鏡の順で値が大きくなっている。C-銀鏡は反射率の低下は一番小さいが、最初から反射率が一番小さい。なお、曝露試験終了後の測定（12月22日）で標準偏差の値が小さい順に並べると、C-銀鏡、D-銀鏡、B-銀鏡、A-銀鏡となる。

曝露試験の前後および試験中に、分光光度計により分光反射率（波長：260～2,500 nm）を測定した。図 3-a から 3-d に A-銀鏡、B-銀鏡、C-銀鏡、D-銀鏡の分光反射率をプロットした。各図には、5 時期の測定値を示す。測定日 1 月 19 日の曲線の波長 500, 600, 700, 800, 900, 1,000, 1,250, 1,650, 2,200 nm に加えてある縦棒は、5 回測定の標準偏差を示したものである。

これらの図から、以下のような劣化の様子が読みとれる。A-銀鏡は 9 月 8 日の測定まで、波長 400 nm から 2,500 nm の間で、93% 以上の反射率を維持している。曝露終了後の 1 月 19 日の測定では、この波長領域で波長依存性はあるが、80% 以上の反射率を維持している。B-銀鏡は 8 月 10 日の測定まで、波長 500 nm から 2,500 nm の領域で 90% 以上を維持しているが、短波長側では急激に下がる。曝露終了後の 1 月 19 日の測定では、600 nm より長波長域では、反射率は 80% を超えているが、短波長側では急激に下がる。C-銀鏡は初めから波長 900 nm より短波長では反射率は 90% より低いが、反射率の低下は比較的緩やかである。D-銀鏡は 4 種の銀鏡の中では、反射率の低下が最も大きい。7 月 14 日、7 月 30 日の測定時期では、反射率は高いが、8 月 10 日以降、反射率は急激に低下した。また、反射率低下の波長依存性が大きい。

表 4 に各種銀鏡の耐久試験の評価をまとめたものを示す。表に示した数値は性能の高さ、すなわち、反射率

は大から小、その他（表面粗さ、変化、標準偏差）は小から大の順位を表す。この表に掲げた全項目の順位を同等に扱い、それぞれの点数と考えて集計すると 4 種の銀鏡とも差はあまりない。しかし、長波長域での反射率とその耐久性を重視すれば、A-銀鏡が一番性能が高いと言える。B-銀鏡は、A-銀鏡とほぼ同じか少し劣ると考えられる。C-銀鏡、D-銀鏡はそれぞれの特性を示すが、A-銀鏡、B-銀鏡に比べると性能は低いと判断する。

4. 耐久試験に使用した銀鏡の可干渉性

3 節で測定した劣化した銀鏡を使用して干渉計を構成した場合、可干渉性がどのようになるか調べた。比較のための新アルミ鏡と古アルミ鏡、劣化の試験に使用した A-銀鏡と B-銀鏡の 4 種の鏡について測定を行った。図 4 には新アルミ鏡、古アルミ鏡、曝露後の劣化した銀鏡（A-銀鏡、B-銀鏡の 1 月 19 日の測定値）、の分光反射率を示す。劣化した A-銀鏡、B-銀鏡は、劣化した古アルミ鏡よりも測定した全波長範囲で低くなっている。図 5 には、古アルミ鏡の顕微鏡写真を示す。この写真は、劣化した B-銀鏡のもの（図 2-11）と似た様相を示す。これらの 4 種の鏡の表面粗さは、それぞれ A-銀鏡 133Å、B-銀鏡 157Å、新アルミ鏡 30Å、古アルミ鏡 89Å である。このような特性の違いを示す 4 種の鏡が、干渉計のビジビリティにどのような影響を及ぼすか調べた。

測定に使用した干渉計の概略図を図 6 に示す。光源は He-Ne レーザーで、5 μmφ のピンホールを通し、レンズで平行光にする。2 個の 5 mmφ ダイアフラムで波面を分割し、干渉計の 2 光路とする。片方の光路の 1 カ所に試料の鏡を入れて、干渉させてビジビリティを測定した。測定は、光束の当たる鏡の位置を 4 カ所変えて測定した。4 カ所の測定結果の平均のビジビリティと標準偏差を表 5 に示す。表 5 から、ビジビリティの値は 4 枚の鏡ともに大差がないことが分かった。銀鏡は、劣化により表面の銀膜に剥脱などの現象が生じると、表面粗さが増え場所による反射率の変化を生み出すが、これらの特徴は可干渉性には大きな影響は及ぼさないと考える。

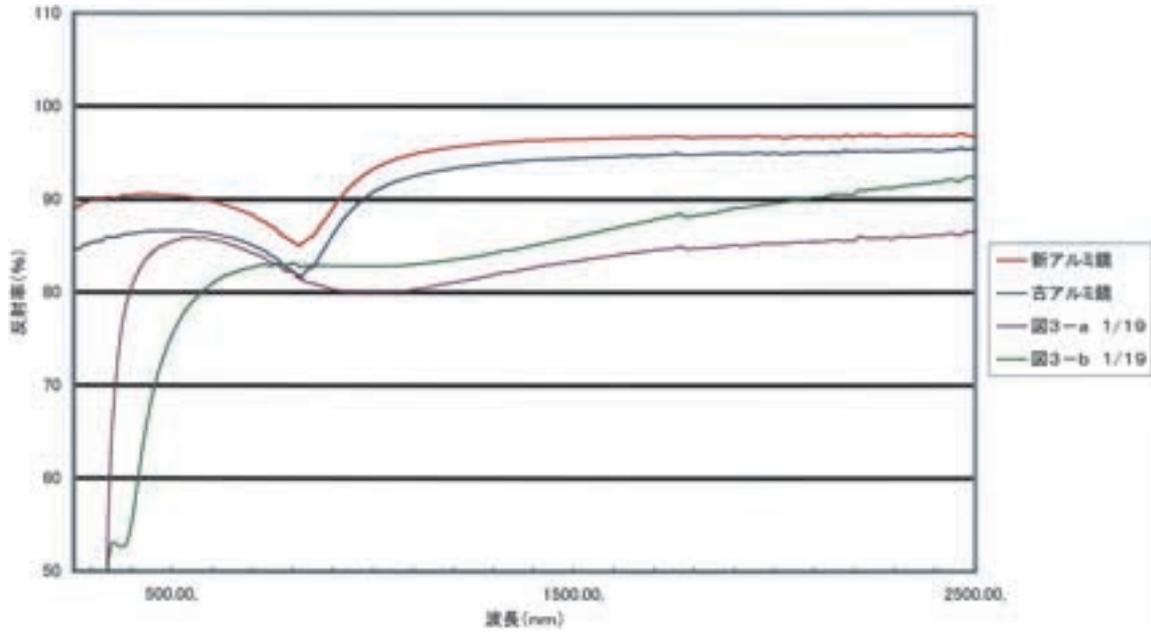


図 4. 4 種銀鏡の分光反射率.
新アルミ鏡, 古アルミ鏡, A-銀鏡 (1 月 19 日測定), B-銀鏡 (1 月 19 日測定).

図 5-1

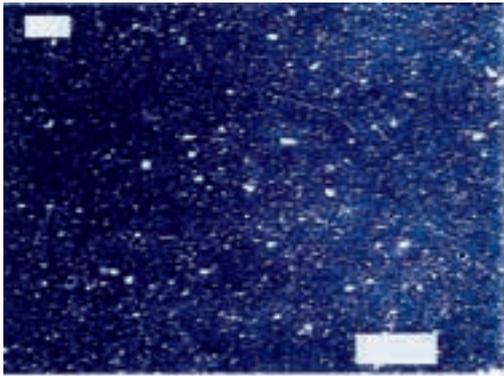


図 5-2

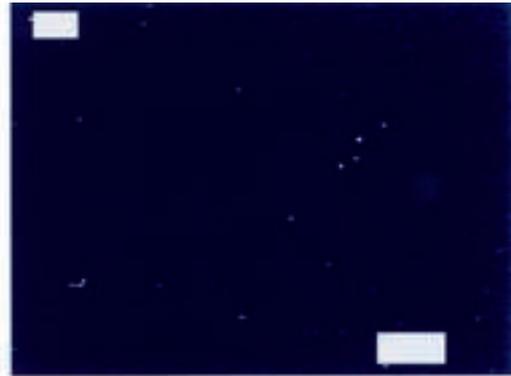


図 5. 古アルミ鏡表面の顕微鏡拡大写真.
5-1 古アルミ鏡 (表面照射), 5-2 古アルミ鏡 (裏面照射).

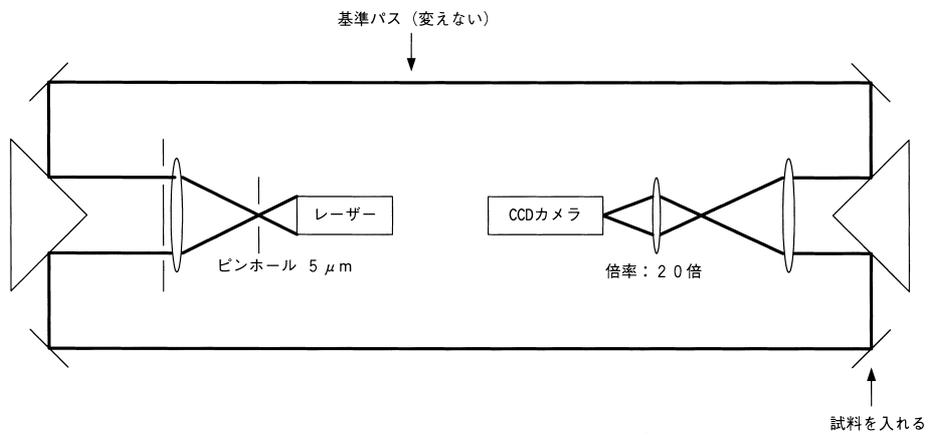


図 6. 干渉計概略図.

表 5. 干渉計実験結果のビジビリティ.

	ビジビリティ	標準偏差
A-銀鏡	0.973	0.006
B-銀鏡	0.950	0.015
新アルミ鏡	0.958	0.002
古アルミ鏡	0.954	0.005

5. 考察とまとめ

銀鏡の長期間の曝露試験の結果、4種の鏡の中では、A-銀鏡とB-銀鏡が高い反射率を保つことが分かった。特にA-銀鏡は外気にさらしても比較的長時間高い反射率を保つが、鏡の場所により反射率の値は一番大きくばらついた。A-銀鏡とB-銀鏡は曝露試験が始まって約2カ月ほどは、新アルミ鏡より反射率が高い。しかし、5カ月間の曝露の後には、古アルミ鏡よりも反射率は低くなった。C-銀鏡は、反射率の低下は比較的緩やかであるが、新品の時から800 nmより短波長側では、アルミ鏡より反射率は低い。D-銀鏡は、新品では全波長域で反射率が高いが、反射率の低下が大きい。

広い波長範囲において、比較的長い期間にわたり高い反射率を維持していたA-銀鏡とB-銀鏡を試験終了時点で比べて見ると対照的な特徴のあることが分かった。まず、分光光度計による分光反射率の標準偏差は、A-銀鏡の方が大きい。一方、表面粗さを比べると平均値ではB-銀鏡の方が大きい。表面粗さの標準偏差はA-銀鏡の方がかなり大きい。表面状態の写真からは、A-銀鏡の方が悪いところと良いところの差がB-銀鏡より大きい傾向がある。表面の銀膜に剥脱などの現象が生じると、表面粗さが増え、場所による反射率の大きな変化を生み出す傾向にあるといえる。

各銀鏡の劣化の仕方が異なるのは、各社の銀鏡への保護膜のつけ方が違うためと思われる。試験は各社から買ってきた銀鏡を使用したため、保護膜の厚さと性質・鏡の基板と表面処理については分からない。

また、鏡の基板と表面処理が、保護膜の劣化にどのような影響を及ぼすかは分からない。

劣化した2枚の銀鏡（A-銀鏡、B-銀鏡）を使って干渉

実験を行い、鏡の劣化が干渉計のビジビリティに与える影響を調べた。比較のために、新アルミ鏡、古アルミ鏡の2枚も測定したが、4種とも測定されたビジビリティに差がないことが分かった。

今回の耐久試験の結果、保護膜付の4種の銀鏡で劣化の仕方はいろいろあることが分かった。外気にさらされる場所での使用では、2カ月程度でアルミ鏡より反射率は低くなり、実用に耐えないことが分かった。外気にさらされる天文観測に銀鏡を使用するには、今後強固な保護膜の開発が必要である。

謝辞

測定は天文機器開発実験センターのオプトショップで行った。この報告をまとめるにあたり、いろいろとご指導くださった光赤外干渉計推進グループのスタッフの方々、特に吉澤正則、佐藤弘一、西川 淳、小谷隆行の各氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Machida, J. Nishikawa, K. Sato, T. Fukushima, M. Yoshizawa, Y. Honma, Y. Torii, K. Matsuda, K. Kubo, S. Ohasi, S. Suzuki, and H. Iwashita: MIRA-I project: development of Mitaka optical and infrared stellar interferometer, *Proc. SPIE*, **3350**, 202–211 (1998).
- 2) J. Nishikawa, K. Sato, M. Yoshizawa, T. Fukushima, Y. Machida, Y. Honma, Y. Torii, K. Matsuda, K. Kubo, H. Iwashita, S. Suzuki, Y. Kubota, K. Shimazaki, and Y. Nemoto: Mitaka optical and InfraRed Array first stage (MIRA-I.1) instruments, *Proc. SPIE*, **4006**, 681–687 (2000).
- 3) 鳥居泰男, 表 泰秀, 田中培生: 赤外シミュレータのドライアイス・クリーニング, *国立天文台報*, **4**, 115–120 (1999).
- 4) TMA μ scan: Scatterometer Manual, TMA Technologies, Inc., Montana, p. 4, pp. 10–12 (1991).