

## レーザーミラーの品質

Optical Quality of Laser Mirrors

小倉 馨 夫\*

Iwao OGURA

## 1. はじめに

気体レーザー技術においてレーザー管を別にすれば、共振器反射鏡が性能に最も大きな影響を与える要素である。特に広く用いられているヘリウム・ネオン系ではその可視域における gain が少ないため、反射鏡の損失が出力を制限する場合が多い。この反射鏡の品質について考えてみたい。

いま多モードのヘリウム・ネオン気体レーザーの場合共振器内の全損失を  $a$ 、外部への伝送損失を  $t$  とすると homogeneous broadening 近似が簡単なわりにはよく適合して、出力  $P$  は

$$P = Ct \left( \frac{g_0 L}{a+t} - 1 \right) \quad (1)$$

の型に与えられる<sup>1)2)</sup>。  $g_0$  は小信号利得、 $L$  は有効放電長である。これより最適透過率を選んだ場合の出力  $P_{\max}$  は  $\partial P / \partial t = 0$  となるように  $t$  を選んで、

$$P_{\max} = C(\sqrt{g_0 L} - \sqrt{a})^2 \quad (2)$$

となり、最終的には全損失  $a$  によって決定されることがわかる。もちろん放電は良好な状態に保たれ  $g_0$  が所定の値に達していることとして話である。ヘリウム・ネオンレーザーの場合  $g_0$  は管の内径  $d$  の関数で cm を単位にして

$$g_0 = \frac{3 \times 10^{-4}}{d} \quad (3)$$

と表わされるが、ともかく非常に小さな値でありこれとバランスする損失も極力低減しなければならないことになる。もちろんレーザーの内部損失としては回折損とか、ブルースター窓による損失もある。回折損は共振器および放電管の幾何学的寸法で決まる。ブルースター窓については要するに材料の選択と工作精度が主たる問題であり事柄は比較的簡単であるので本稿では触れない。

これら全損失  $a$  の中に占める反射鏡損失の比率は高く、しかも製法によりかなりの差がある。われわれが以前試作したかなり大型のレーザーについて測定、解析を行った例を表 1 に示す。この表には回折損失がないが、これはこの測定の行われた気体レーザーの諸元のもとで TEM<sub>00</sub> モードを考える限り無視し得る程度の大きさであったためである。伝送損失  $t$  はいうまでもなくレーザー出力を共振器の外部へ取り出すためのものである。こ

表 1 ヘリウム・ネオンレーザーの共振器損失内訳の一例

		損失項目	%
$t$	(1)	伝送損失	1.0
$a$	(2)	多層蒸着面の吸収と散乱 (2面)	1.0
	(3)	ブルースター窓の吸収と散乱 (2枚)	0.018
	(4)	ブルースター窓の反射 (4面)	0.01
	(5)	終端反射鏡の透過率	0.10

れでみても有害な損失  $a$  のうちで多層蒸着膜にもとづくものすなわち (2) と (5) が圧倒的に大きいことがわかる。なおしばしば A 社製の反射鏡を B 社製の反射鏡に交換したら出力が上ったとか下ったとかいう比較が行われるが同一曲率で回折損を等しくし、さらに透過率  $t$  を等しくした後でなければ公正な比較はできない。特に終端側の比較は容易に行えるが出力側の反射鏡の比較は必ずしも容易ではない。

他方アルゴン等高出力のイオンレーザーにあっては損失の大きい反射鏡はその出力低下のみに止まらず、反射鏡面の発熱およびそれともなう変形変質などが生じこれは再び出力の低下をもたらすであろう。さらには膜自体の剝離にいたるわけでこれはすべて膜内の吸収が根本原因である。

一応蒸着膜にもとづく損失を透過損、散乱損および吸収損と名付け分類するが、これらすべてを十分な精度で測定することは必ずしも容易ではない。以下順を追ってレーザー反射鏡の損失を測定法の側から考えてみよう。また蒸着の基盤であるミラー blanks の光学的性質もあわせて考慮する。

## 2. 透過率

有害な損失として透過率がとり上げられるのは、表 1 の例に見られるように終端側の鏡面が若干の透過率を有する場合である。もちろん透過率自体は比較的容易に測定できる項目ではあるが、その測定法につき問題がないわけではない。またしばしば 1-透過率をもって反射率と見做す例が多いがこれは多くの場合誤った判断に導く。散乱損、吸収損が透過率に対して無視できない値に達しているからである。透過率の測定は市販されている分光光度計を利用することが多いようであるが、この種の測定器の公称精度は 0.2~0.5% のものが多く、このままではレーザーの特に終端側反射鏡の透過率を測るた

\* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

めには精度不足である。ヘリウム・ネオン型のレーザーでは小型の場合出力側の窓の透過率がそもそも透過率 0.5% として設計される場合があるが、この透過率が終端側反射鏡の透過率 0.0% と測定上区別がつかないでは困るのである。分光光度計によっては透過率の少ない部分を拡大表示できるようになっているものもあるから、その場合は当然これを利用すべきである。

また仔細に検討してみると分光光度計の試料を通過する光束は平行光とはかなり異なったものであり、そのための誤差が意外に大きくなる場合がある。通常の分光光度計は exit slit を出た光線は特に diffuser を通過することなく直接あるいは単にフィールド・レンズを通ったのみで直接検知器に入る。この場合 diffuser がなくても、つねに検知器の光電面上に同一照度分布で光が当たっていれば問題はないのであるが、前述のように平行光束でない光束が試料室を通過しているために、たとえ試料が等価的に平行平板であったとしても、その光学的厚さが異なると、検知器の光電面上の照度分布が変化して少なからぬ誤差が生ずる。要するにミラーブランクの厚さの種々異なったものに蒸着したものを測定比較する場合は精度がかなり落ちる。またこれは分光光度計の責任ではないが反射鏡ブランクの表面と裏面の曲率の値が等しく度なしの meniscus の場合はともかく、双方の曲率が異なっている場合も同様な理由で測定値に誤差を生ずる。要するにレーザー反射鏡について知りたいことは分光透過率ではなく発振波長における正確な透過率の値であるから、特に透過率の少ない場合には市販されている分光光度計にたよるよりも、出力が充分安定したレーザーと range の切り換え可能な power meter があればむしろこの方が正確な値を与えるようである。この場合も検知器の光電面における集光の問題が残るが、レーザーは出力に余裕のあるものを選び積分球と photomultiplier の組み合わせで図 1 のような構成の測定系を組み立てれば

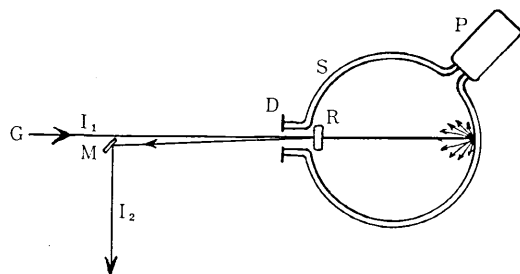


図 1 透過率の測定

- I<sub>1</sub>: 入射光
- I<sub>2</sub>: 出力光
- S: 積分球
- R: 試料反射鏡
- M: 小反射鏡
- P: 光電子倍增管
- D: 遮光用ダイアフラム
- G: 気体レーザー

問題はほとんど解決する。可視域気体レーザーの場合出力側反射鏡の透過率は数パーセント、また反射側反射鏡の透過率はあったとしても 0.5% 以下であるから、検知器は高度の直線性よりは感度を切り換えたときの指示に良好な consistency のあることの方が望ましい。本来積分球を用いて透過率を測る場合には拡散透過率が測れることになるのであるが、レーザー反射鏡の場合意味のある透過率は specular な透過率であるから本来は積分球に入る前の透過光をピンホールを通して拡散成分は遮断しなければならない。しかし実際は後述するように specular な透過成分に対し、拡散的透過成分は 0.3% 程度であるからピンホールはなくてもほとんど結果には影響しない。終端反射鏡に残留する透過率が問題であって、層数のみを増加させて残留透過率を減少させてもかえって散乱が増大してコヒーレント出力が低下することもあり完全な解決は容易ではない。残存透過率が問題になるという点で出力側反射鏡に比べて終端側反射鏡の方が蒸着層数もずっと多くなり技術的困難度も高い。従来国産の終端側反射鏡の透過率はやや大きく、カタログに 0.2% と表示された例もあった<sup>4)</sup>。米国製の場合は一般に少ないといわれているが、Spectra Physics 社の場合は 0.04% を公称し実測値もこれに近かったが多数個の試料の中には若干大きな透過率のものもあった。終端側反射鏡の透過率はレーザーが大型であり、全長にわたって積分されたいわゆる total gain に余裕のある場合はほとんど問題にならないが小型のものになるほど出力に影響があることは当然である。

### 3. 散乱率

これには反射散乱率と透過散乱率がある。Specular な透過光に対して散乱成分の積分値は多くて 0.3% 程度である。しかし入射光に対する透過光全体の比を 1~3% とすれば透過散乱率は入射光の 0.003~0.01% となるから多層膜の損失全体に占める比率としては多いとはいえない。しかし散乱透過率の原因となる蒸着面の irregularity は specular な散乱光束の内部にも当然影響を与えており、レーザー光束の intensity perturbation と呼ばれるものの大きな原因になる。これらの散乱成分は当然 far field になるにしたがい減少していき main beam は“きれい”(clear)になる<sup>6)</sup>のである。

反射鏡散乱率についていえば、量的には多層膜にもとづく損失のうちかなり大きな部分を占めるものである。測定法としては入射光を面に垂直に入れることがレーザーの動作の実態に則して好ましい。Blazey<sup>7)</sup>が反射散乱光の角度分布を測っているが面法線に対し 10 度傾いた入射光を用いている。われわれの試みた方法は図 2 のような方式であって積分球を通して鏡面に垂直に入射させ specular な反射光は再び積分球から外へ逃がす。

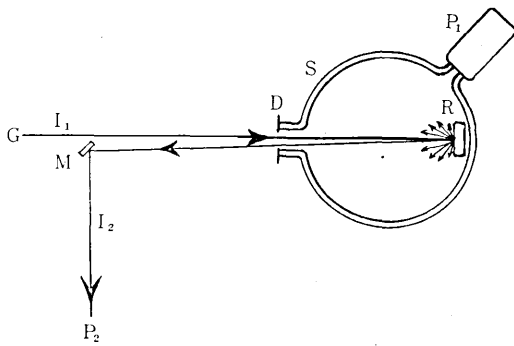


図 2 積分球を用いた散乱率の測定

- I<sub>1</sub>: 入射光
- I<sub>2</sub>: 出力光
- S: 積分球
- R: 試料反射鏡
- M: 小平面鏡
- P<sub>1</sub>: 光電子増倍管
- P<sub>2</sub>: 光検知器
- D: 遮光用ダイアフラム
- G: 気体レーザー

積分球の開口は入射レーザー光の main beam よりやや大きめにしておき specular な成分が決して開口のヘリにかかることがないようにする。その結果散乱成分が開口から逃れるがその影響は少ない。この方式によっても完全な垂直入射をとばならないが法線からのずれはレーザー光束の指光性 10<sup>-3</sup> radian 程度となるから拡散反射光の配光曲線を考えれば充分良好な近似が得られる。

#### 4. 反 射 率

レーザーの発振機構に直接かかわる重要なパラメーターであるが簡単な装置で 3 桁ないし 4 桁を測る reliable な方法はなかなか見当たらないようである。したがって Spectra Physics 社<sup>5)</sup>あるいは Coherent Optics 社<sup>8)</sup>のカタログにも反射率は記載されておらず単に透過率が記されているのはこの辺の事情によるものであろう。ただし Spectra Physics 社のカタログには同社の反射面については

$$1 - (\text{透過率} + \text{反射率}) = 0.002$$

としてよいと付記されている<sup>5)</sup>。すなわち透過率がたとえ 0.0% であっても反射率は 99.8% にしかならないということになるが、これは実際問題として現在の技術水準からみて量産品の場合優秀な値といえるであろう。なおわれわれが同社製品を測定した結果も上式はほとんど成立していた。反射率の精密測定法の一つとして 2 面を対抗させ走査型干渉計として動作させその finess より導く方法がある<sup>9)</sup>。この方法の難点としては面の曲率に制限のあることおよび調整の仕方が delicate でその誤差が干渉計の Q を低下させ見かけ上の鏡面反射率を低く見積らせる。また大間隔 Fabry-Perot 干渉計を passive に動作させた場合特有の振動と空気のゆらぎに sensitive で

あるという性格からこれに対する対策を施す必要がある。実験室的には 0.1% の誤差で再現性があるという。

Heriott と Schulte<sup>10)</sup> は光学的遅延線を流用して反射率を測定している。約 200 回往復させながら光出力をオシロスコープ上に表示し結果として 0.05% の誤差であったという。軸外光を用いているため非共振の状態で行っていることが安定した測定を行なえる理由である。しかしこのような多数回の反射を可能にするため試料反射鏡鏡面は充分広いことが必要であり、Heriott 等は直径 150 mm、曲率半径 10 m のものを用いている。測定精度の向上に見合うだけ様な反射率で全面をおおうことは必ずしも容易ではないだろう。また現実のレーザー反射鏡に実用されているような直径 10 mm 以下の蒸着面をこの方法で測ることはできない。

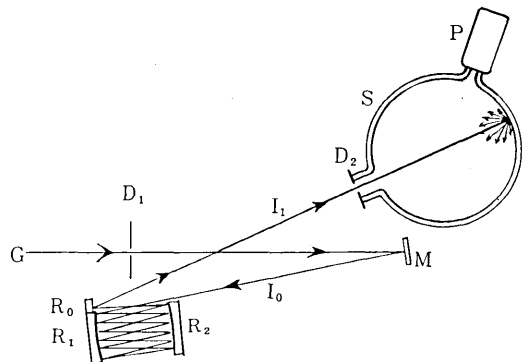


図 3 積分球を用いた表面反射率の測定

- R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>: 試料反射鏡, 反射率それぞれ r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>
- R<sub>0</sub>: 入射光導入用小反射鏡, 反射率 r<sub>0</sub>
- M: 凹面鏡
- I<sub>0</sub>: 入射光
- I<sub>1</sub>: 出力光
- S: 積分球
- P: 光電子増倍管
- D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: 遮光用ダイアフラム
- G: 気体レーザー

われわれの実行した方法は図 3 のように小型の反射鏡も測定するため反射率 r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub> の 3 枚の鏡から 2 枚ずつ組み合わせることによって各面の反射率を求めた。すなわち各試料反射鏡上に n 個の光点が生ずるようにくり返し反射を行なわせたときの最終出力光を

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 r_0 r_1^{2n} r_2^{2n} \\ I_2 &= I_0 r_0 r_1^{2n} r_3^{2n} \\ I_3 &= I_0 r_0 r_2^n r_3^n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とする。I<sub>0</sub> は入射光の強度、r<sub>0</sub> は入射光導入用小反射鏡の反射率である。

$$r_1^{2n} = \frac{\sqrt{I_1 I_2}}{I_3} \quad (5)$$

となり、同様に r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub> も cyclic に求まる。要するにくり返し反射を用いることにより求める反射率の相対誤差の I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> の測定値の相対誤差に対する依存性をそれぞれ

れ  $1/4n$  および  $1/2n$  に低下させることができる。実測の結果確率誤差は 0.05% より少なかった。

### 5. 吸収率

従来光学における誘電体薄膜あるいは誘電体多層膜は金属薄膜に対比される概念であり吸収はないものとしてあつかわれていた。しかしレーザー共振器の反射鏡として用いた場合には 0.5% 以下の見わずかに見える吸収も無視することができない<sup>11)</sup>。誘電体薄膜の吸収は絶対値としては少ないといえるが、これがもし 1 cm 程度の厚みに積み重ねられたならば莫大な吸収量になる。実際にヘリウム・ネオン等比較的利得の少ないレーザーでは吸収の項を考えないとその特性を量的に解析することができない。またアルゴン、クリプトン等高出力のイオン・レーザーでは多層膜の吸収による発熱が大きな問題となる。de Mars ら<sup>12)</sup>は同一材料で同一仕様に仕上げたミラーブランクを 7 社の蒸着加工業者に支給しこれに誘電体多層膜を蒸着させたのち、同一レーザー管と組み合わせ約 90 アンペアの放電電流で動作させたところ最低 48 W より最高 71 W まで出力にバラツキがあり、またミラーには変色、剥離あるいは発熱するものが多かった中でこれらの欠陥をほとんど示さなかった製品が最高の出力を出していることは当然のこととはいえ興味深い事実であり、このような高出力レーザーにおける反射鏡多層膜においては吸収の除去が不可欠の要件であることがあらためて認識される。

蒸着薄膜の吸収と同一物質を bulk で測られた場合の吸収率は全く異なることが多い。しかしレーザー反射鏡に用いられるような誘導体膜の吸収を単層の場合でも測定した例は非常に少ない。これは薄膜として吸収を測るには吸収率が少なすぎるからである。われわれは多層膜の全損失 100.00% より反射率、透過率および散乱率の和を差し引いたものを吸収率と考えヘリウム・ネオンレーザーの性能の解析を行なった。その際得られた反射面損失のバランス・シートの一例を表 2 に示す。

表 2 レーザー反射鏡損失の内訳

資料鏡面	反射率	透過率	散乱率	吸収率
A	99.27	0.11	0.11	0.51
B	98.47	0.28	0.11	0.64
C	99.08	0.06	0.06	0.80
D	98.27	1.25	0.30	0.16
E	99.66	0.10	0.32	0.02

ここで注意すべきことは多くの測定法では吸収と損失が区別されないことが多い。たとえば偏光解析のような手段によって反射面の損失を測ったとすれば吸収の中に散乱まで含まれるであろう。しかし測定結果を製造技術にフィード・バックさせて品質の向上をはかるためにはどうしても散乱と吸収を分離して測らなければならな

い。反射鏡の損失の原因が散乱であるか吸収であるかによって採るべき対策がまったく異なってくるからである。最近吸収のみの測定をカロリメーター方式で測ることが行なわれている<sup>13)</sup>。

### 6. 面精度と共振器損失の関係

レーザー用として市販されている反射鏡ブランクの品質については多くの問題がある。第 1 は公称される 1/10 波長とか 1/20 波長という数値の定義が不明確であるうえに、反射鏡の使用者と製作者で定義が異なるのではないかと思われる場合もある。第 2 は使用者側の問題であるがこのような面精度と共振器の損失、ひいてはレーザーの性能にどのような影響を持つかということを中心に考えることなくただ高精度のみがうたわれているきらいがなきにしもあらずである。面精度 (surface figure あるいは単に figure) についていろいろな定義あるいは解釈が行なわれているがその代表的なものは

- (1) 指定した曲率を持つ曲面と実際に仕上がった曲面の差
- (2) 実際に仕上がった曲面とそれにもっとも近い曲率を持つ球面との差

の二つであろうと考えられる。第 1 の解釈をとると製作者側はこの希望する曲面を Newton 原器という形で具体化するわけである。またこの Newton 原器の曲率は spherometer あるいは凹面の場合にはオートコリメーションで求めることもあるようである。問題は使用者の希望した曲面と原器の曲率が合致しているかどうかということであり、結局原器の曲率と現実のそれとの差として表わされた面精度は希望する曲面と現実の曲面の差を表わしているかということになる。また Newton 原器を用いて読みとれる面精度はよいところ 1/10 波長といわれておりたとえば面精度 1/20 波長という読みとりはかなり無理をしており面精度の精度は若干問題があるといわざるを得ない。もちろん原器と研磨面との双方に曲率検査のたびに蒸着して fringe の finesse を向上させ 1/200 波長まで読まともことも試みられ、論文自体は非常に有名なものであるが<sup>14)</sup>、実際上ただちに現場で利用できるという種類の技術ではない。米国ではあらかじめ大面積の凹面鏡を大きな原器を用いて十分な精度で磨いた後、レーザー反射鏡として必要な小反射鏡を多数ダイヤモンド工具でくり抜く技術が普及しているようである<sup>15)</sup>。これならば反射鏡周辺部の乱れをのぞいて高い面積度が出せる。これが Spectra Physics 社<sup>5)</sup>あるいは Coherent Optics 社<sup>8)</sup>のレーザー用反射鏡に wedge なる項目が必ず記載されている理由であろう。

さて Newton 原器と研磨された反射鏡面とを比較した場合の面精度  $\Delta h$ 、原器と反射鏡の曲率半径の差  $\Delta R$  および干渉縞の有効面積の直径  $a$  との間には

$$\Delta h = \frac{a^2 \Delta R}{2R} \quad (6)$$

の関係があり、 $\Delta h = \lambda/20$ ,  $\lambda = 0.633 \mu$ ,  $a = 1 \text{ cm}$ , 曲率半径  $R = 10^2 \text{ cm}$  とすれば  $\Delta R = 6.3 \times 10^{-2} \text{ cm}$  となる。ここにおいて被研磨面と Newton 原器の曲率半径が  $0.63 \text{ mm}$  しかちがわないということは一体どういう意味を持っているのであろうか。原器自体の持つ精度を考えると返答に窮せざるを得ない。また干渉縞の有効径のとり方も定説がないが反射鏡の機械的外径から  $10 \sim 20\%$  を減じた直径の円内とするのが妥当のようである<sup>16)</sup>。しかし反射鏡の機械的直径とレーザーの性能とは直接的関係はない。レーザーにとって直接関係のある鏡面上の広さは Sinclair<sup>15)</sup> も指摘しているように共振器の spot size である。面精度の有効半径として spot size をとれば、共振器の構成によっていろいろに変化するが気体レーザーの場合なら放電管内径を越えることはほとんどない。例えば共振器長  $1 \text{ m}$  の semi confocal type の平面側の spot size を  $w_1$ , 凹面側のそれを  $w_2$ , そして同一共振器長の共焦点型の spot size を  $w_c$  とすれば

$$w_1 \cdot w_2 = w_c^2 \quad (7)$$

レーザー放電管の内半径  $r$  を  $3 \text{ mm}$  とし、これに  $w_2$  が等しいとすれば、平面鏡側のスポット・サイズは

$$w_1 = \frac{1}{w_2}, \quad w_c^2 = \frac{1}{w_2} \frac{r\lambda}{\pi} \approx 6.4 \times 10^3 \text{ cm} \quad (8)$$

すなわち  $0.064 \text{ mm}$  にしか過ぎない。このスポット・サイズ内で  $1/20$  波長といっても極めてゆるい面精度にしかならない。事実このタイプの共振器を持つレーザーでは、多層蒸着膜の蒸着工程中にテストピースとして用いられた顕微鏡用スライドガラスをそのまま平面鏡として流用しても良好な発振が得られることが経験される。ただし semi-confocal type の共振器は stability diagram 上で一種の critical point となっているのでその平面鏡に関しては、いかに面精度が悪くても共振器内部から見て曲率が凹である限り発振するが符号が逆になり僅かでも凸になるとまず発振不能となる。

面精度が共振器の損失にどのような影響を与えるかということはひとえに共振器形式に依存する。特定の共振器形式について見れば、その回折損  $\alpha$  はフレネル数  $N$  のみの関数として定まる。

$$\alpha = \alpha(N) \quad (9)$$

フレネル数  $N$  は反射鏡の共振器としての有効径  $d$  およびスポット・サイズ  $w$  をもちいて

$$N = \frac{2}{\pi} \frac{d^2}{w^2} \quad (10)$$

で与えられる。

したがって面精度によって曲率半径の誤差  $\Delta R$  が与えられた場合に生じる回折損の変化  $\Delta \alpha$  は

$$\Delta \alpha = \left( \frac{d\alpha}{dN} \frac{dN}{dw} \frac{dw}{dR} \right) \Delta R \quad (11)$$

で与えられる。例えば confocal type の共振器ではフレネル数があまり大きくない場合、回折まで考慮した損失等高線上<sup>17)</sup>で考えれば

$$\frac{dw}{dR} = 0 \quad (12)$$

であり結局  $\Delta \alpha / \Delta R = 0$  となって損失は面精度に無関係となる (図 7)。また逆に concentric な共振器と Fabry-Perot 共振器の場合は stability diagram 上安定領域と不安定領域との境に位置し特にフレネル数の大きいときは critical であって損失は面精度に非常に sensitive となる。Fabry-Perot 共振器ではフレネル数によっては  $1/20$  波長の面精度でも全く不十分であることが示される。しかし気体レーザーではこのような critical なタイプは用いないのが一般的である。このように考えてみると非常に特殊な使い方をした場合は保証の限りではないが、stability diagram の安定領域に入る通常の使用法例えば大曲率型 (large radius) 共振器あるいは片側を平面鏡でおきかえたその変型の共振器ではそれほどよい面精度を必要としないことがわかる。特に直径が spot size よりも  $1$  桁大きい  $20 \sim 30 \text{ mm}$  の球面鏡で面精度  $1/20$  波長などという仕様は前記 (1) の意味とすれば必要な精度をはるかに越えている。したがってこのような仕様で市販されているレーザー用反射鏡は面精度という点で過剰品質といえるだろう。ただしレーザー用反射鏡として用いられるもののうち平面鏡は前述のように stability diagram の周辺に位置することになり精度の符号をまちがえないように注意を要する。すなわち凹面鏡になる方向の誤差は許されるが凸面鏡になる方向の誤差は多くの場合許されないからである。

また当然のことながら同一面精度であっても反射鏡の直径の差は実際の研磨の精度に大きな影響を与える。(6)式で見ると曲率半径の精度を一定とすれば面精度は反射鏡直径の 2 乗に比例する。したがって面積度を一定に保つためには曲率半径の精度は反射鏡直径の 2 乗に逆比例することになる。直径  $30 \text{ mm}$  の反射鏡と  $6 \text{ mm}$  の反射鏡では同じ  $1/10$  波長の面精度であっても曲率半径の精度は 25 倍もの違いが生ずる。直径  $6 \text{ mm}$  の反射鏡の  $1/10$  波長の精度は曲率半径の精度をそのままにして直径  $30 \text{ mm}$  の反射鏡に引き直すと  $2.5$  波長の精度にしか相当しない。実際に最近の米国系の製品は tube bore ぎりぎりまで反射鏡の径を切りつめ経済性を向上したのが見られる。この様な場合、面精度  $1/20$  波長と称しても曲率半径の精度という観点からすれば特に高精度とはいえない。

さらに面精度について第 2 番目の解釈をとればどうなるであろうか。これは球面を目標に研磨したが僅かに球

面からずれたとしてその asphericity の程度を表わしているに過ぎない。この場合曲率半径は設計値に対してかなり大きな偏差を示すことになる。こういう立場をとるメーカーは当然のことながら曲率半径は概略の値を示すのみである。ともかくこの第2の立場をとる以上面精度と曲率半径の精度は、従来の通念とは別に、まったく分離されていることになる。この場合の面精度の測度は研磨皿に多数の反射鏡素材が貼りつけられた状態で研磨工程中に Ronchi test を行ない、fringe のまがりから面精度を出すというものである。この際に焦点距離に相当する長さを適宜調節して fringe の曲がりか最小になるように調節する。この時の焦点距離を読みとれば面精度とは別に曲率半径の精度を出すこともできる。しかし焦点距離あるいは曲率半径の精度は一般にカタログには記載されないことが多い。

## 7. 面仕上げの問題

最後にレーザー共振器の損失に大きな影響を与え、ミラーブランクの品質を決定的に支配する要因となる面仕上げの問題がある。機械的な面仕上げよりはるかに高精度な光学的な研磨面については従来から満足すべき規格があったわけではない。

従来から行なわれた方法として疵見集光灯<sup>19)</sup>あるいは疵見がんどうと呼ばれる光学系がある。これは観測者の視線をはずした方向から研磨面を局部的に強く照明し僅かなきずであってもその散乱光により存在が確認できるというものである。基本的にはこの方法でよいがレーザー反射鏡の面仕上げは通常のレンズあるいはプリズムより更に高精度を要する点に問題がある。

面仕上げ (quality of surface finish) を向上させるためには擦りきず、砂目あるいはちりめん状の皺を磨きの段階で充分に取り去る必要がある。このような欠陥はその上に多層膜蒸着後も影響が残るのみならず、場合によっては研磨面の欠陥が原因になって非常に散乱の多い蒸着面が形成されることがある。面仕上げを向上させるためには磨きの工程を細かい研磨材を用い時間をかけて入念に行なうことになるが、メーカーによっては工数の軽減を願うあまりこの工程を不十分のまま切り上げることがある。これはレーザーミラーの特質から見て甚だ残念なことである。

他方研磨工程に時間をかけ過ぎると面仕上げは良くなるが「だれ」が大きくなって面精度が低下するという反論がある。確かにその通りではあるが、さきに述べた通りレーザーミラーにあっては面精度がある範囲に収まっていれば、むしろ面仕上げを重視すべきだということを忘れてはならない。レーザーミラーのユーザー側に本来は面仕上げについて明確な仕様規準と検査方式が確立しなければいけないのであろう。光学研磨の面仕上げの1

例として米軍規格 MIL-O-13830 A があげられる<sup>18)</sup>。これは2組の2桁の数字の組合せで与えられる。最初の数字は scratch number であり、scratch とはきずを意味する。ところがきずの方は簡単に数量的に表現ができないとあってまず見本と称するものが米国 Frankford 造兵廠にあるという。米国内ではこれをもとにして更に2次基準が作られて各社に配布されている。これらはわれわれにとって容易に利用できるものではない。また米国内にあってはより定量的な表示が望まれている。このため Tew<sup>18)</sup> はこのきずの原器の測定および、各種の unofficial な情報を総合して米軍規格にいう所の scratch number を定量的に表示すると次のようなものではないかといっている。

表3 MIL規格のスクラッチ数ときずの幅<sup>18)</sup>

Scratch Number	10	20	40	60	80
きずの幅 (ミクロン)	6.1	11	21	25	30.5

つきに2番目の数字は dig number と呼ばれる。dig は砂目のことである。dig number は砂目直径を 0.01 mm を単位として表わしたものであり、この場合直径とは砂目の長径と幅の平均として与えられるという。

1例として米国各社のミラーブランクの表面仕上げの程度は 10-5 以上とされている<sup>19)</sup>。これを MIL 規格に従って解釈すれば dig number 5 は砂目の平均直径は 0.05 mm 以下であることを示し、scratch number 10 は Tew の推定を容れて、すりきずの幅が 6.1 ミクロン以下であることを示している。

このように dig number と scratch number で表わすという表現法にもいろいろ問題があるが定量的な面仕上げの評価記述法としては他に DIN のものが知られているに過ぎない。わが国の JIS には光学研磨面の仕上げについては規格はまだない。また前記 MIL 規格も本来は火砲照準用光学系のために制定されたものであり、これがそのままレーザー用反射鏡にまで拡張使用されているという状態である。さらに砂目、きずの程度と蒸着面をつけた後の散乱量の関係は、蒸着の仕方にもよるが、ほとんど明らかにされていない。

## 8. おわりに

主として可視域の気体レーザー反射鏡について、その品質を支配する要素について概観した。他の望遠鏡、顕微鏡、カメラといった一般の光学機械の部品にくらべて散乱と吸収については、はるかにシビアな条件が要求される。またこのためミラーブランクについてもその面仕上げには高度の品質が必要である反面、曲率半径などの精度はかなりゆるやかでよい。これらの特質をよく理解し合理的な品質管理が行なわれることが望まれる。

(1974年9月14日受理)

文 献

- 1) 小倉磐夫: 応用物理, 40 (1971) 1151.
- 2) D. S. Sinclair and W. E. Bell: Gas Laser Technology (Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York, 1969) p. 118.
- 3) 小倉磐夫: 応用物理, 36 (1967) 739.
- 4) レーザー装置カタログ, GLG 105 (日本電気株式会社, 1970)
- 5) Data Sheet, Laser mirrors, Components and Mounts (Spectra-Physics, Mountain View, California, 1972)
- 6) 例えば Model 124 Helium-neon Gas Laser Instruction Manual (Spectra-Physics, Mountain View, California, 1969)
- 7) R. Blazey: Appl. Optics 6 (1967) 831.
- 8) Data Sheet, Standard Coating (Coherent Radiation, Palo Alto, California, 1970)
- 9) A. J. Rack and M. R. Biazzo: Bell System Tech. J. 43 (1964) 1563.
- 10) D. R. Herriott and H. J. Schulte: Appl. Optics 4 (1965) 883.
- 11) 小倉磐夫: 第 31 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 1 (1970) p. 93.
- 12) G. deMars, Seiden and F. Horrigan: A study of High Power Argon Laser Optics (Raytheon Company, Research Division, Waltham, Massachusetts, 1968) p. 38.
- 13) L. L. Nichols et al.: Appl. Optics 12 (1973) 2232.
- 14) D. R. Herriott: J. Opt. Soc. Amer, 51 (1961) 1142.
- 15) 例えば D. C. Sinclair: The Design and Construction of Helium-Neon Laser (The University of Rochester, 1964) p. 105.
- 16) Prices and Specifications (Perkin-Elmer Electronic Products Division, 1963)
- 17) A. G. Fox and T. Li.: Proc IEEE 51 (1963) 80.
- 18) E. J. Tew, Jr.: Appl. Optics 5 (1966) 695.
- 19) 光学懇話会編: 新編レンズプリズムの工作技術 (中央科学社, 東京, 1969) p. 196.
- 20) 例えば文献 5) もこの仕様であり, 他にもこの仕様になっているメーカーは少なくない.

次 号 予 告 (11 月号)

巻 頭 言	「都市における災害と公害防除」の大型研究の3ヶ年を終えるに際して.....	所長 鈴木 弘
特 集 1	都市における災害・公害防除に関する第1次臨時事業の終結に当たって.....	川 井 忠 彦
特 集 2	都市構造物の耐震強度の調査研究概要.....	久 保 慶三郎
“ 2.1	水道管の震害特性.....	{ 久 保 慶三郎 山 恒 雄
“ 2.2	電算機——試験機オンラインシステムによる構造物の地震時崩壊の解析.....	{ 高 野 一明 字 田 尚 田 中 松太郎
“ 2.3	インパルス応答のパワースペクトルによる減衰定数推定の一方法.....	{ 三 井 之芳 佐 藤 重
“ 2.4	振動減衰機構の開発研究.....	{ 川 也 米 重 半 裕 谷 正
特 集 3	都市交通公害対策の調査研究概要.....	越 厚一
“ 3.1	自動車騒音の実態について (第2報).....	{ 巨 理 進 大 野 泰 立 山 正 西 橋 伸 高 元 貞 岩 元 真
“ 3.2	公害振動について.....	大 野 進
“ 3.3	道路交通騒音とその周辺建物への伝搬.....	{ 石 井 一 橋 井 聖 山 口 秀 北 村 道 石 村 達 北 条 準
“ 3.4	雷に対する電力供給システムの絶縁信頼度.....	{ 河 北 雄 北 石 一 石 村 勝
“ 3.5	交通制御方策検討のための自動車交通流のシミュレーション.....	{ 高 羽 禎 浜 田 文 田 代 之 谷 兼 忠 兼 口 勝
“ 3.6	交通信号制御方法に関する実験的研究.....	越 正 義
特 集 4	都市廃棄物対策の開発研究概要.....	{ 武 蔵 妹 尾 一 多 柄 学 中 村 一 阿 部 則 村 賢 部 隆
“ 4.1	プラスチックの光分解に関する研究.....	{ 本 多 中 柄 阿 部 村 賢 部 隆
“ 4.2	光崩壊性高分子の開発研究.....	{ 妹 尾 一 白 石 学 石 井 作 井 雄 石 振 正 雄
“ 4.3	プラスチック——無機充填剤系複合組成物.....	高 橋 浩
“ 4.4	プラスチックの熱分解による炭素系吸着剤の製造に関する研究.....	山 辺 武
“ 4.5	プラスチック廃棄物の熱分解による油の回収.....	鈴 木 武
“ 4.6	廃棄物とプラスチック.....	中 村 夫
研究室紹介	中桐研究.....	中 桐 滋