



## レーザー用光学部品の 性能と取扱い方法

吉 田 国 雄\*

### 1. はじめに

最近のレーザー技術の進歩は目覚ましい。これは、光学部品の製造並びに加工技術、光学システム技術の大幅な進展によるものである。レーザー装置は、核融合、物性、分光、医用、計測および非線形光学等の各種分野で研究手段として広く用いられ、かつ産業方面においては加工、表面処理、情報通信分野で利用されるようになり、その地歩を固めつつある。レーザーシステムには多数の光学部品が用いられており、寸法的には光ファイバー用に使用される数mm程度のものから、大出力レーザーで使う1mの大きさまであり、その種類も多い。特に、大出力レーザーシステムに用いられる光学部品に対しては、従来より格段に高精度の光学特性とレーザー耐力が要求されている。従って、レーザーを各方面へ適用する場合、光学部品の種類、性能、検査および取扱い方を習熟することは、レーザーを安定性よく、かつ高効率動作させる上で非常に重要となる。

本稿では、主にガラスレーザー用光学部品の性能と取扱い方法について概説する。

### 2. 光学部品の種類

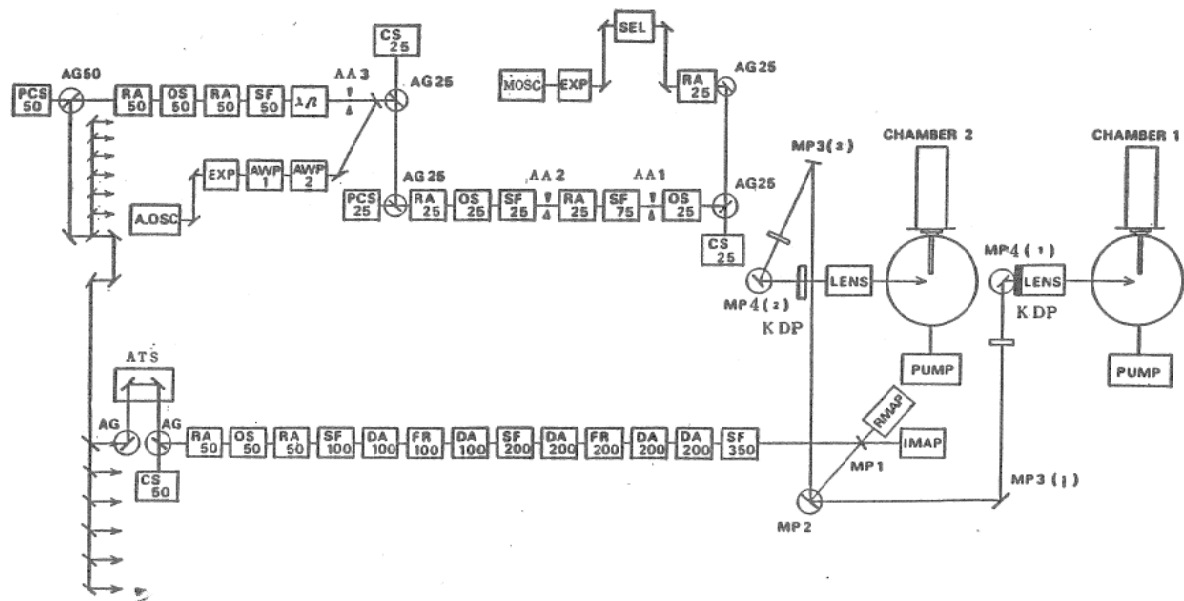
高出力レーザーシステムには数多くの光学部品が使用され、各部品は安定性、光学特性およびレーザー耐力等に対して高性能を要求される。

図1に大出力ガラスレーザー装置「激光Ⅻ号」のシステム配置図<sup>1)</sup>を示す。レーザー光の波長は $1.053\mu\text{m}$ 、ビーム数は12本、出力部の開口径は35cm、出力ビーム径は約32cmであ

る。レーザー部の出力エネルギーは20kJ (パルス幅1ns)、ピーク出力は40TW (同100ps)である。激光Ⅻ号は、正12面体対称照射用のターゲット室と全頂角100度の6ビームバンドル2方向照射のターゲット室とを有し、ターゲット室間のビーム切換えはギヤー室に設置された高精度回転機構付反射鏡でなされる。ところで、主発振器から開口径25mmまでは1階の主発振器室に設置され、出力光は2階のレーザー室へ導びかれる。主発振器室からのレーザー光は、レーザー室で12ビームに振り分けられたのち主増幅器列に送られる。主増幅器列は、開口径50mmのロッド型増幅器、開口径100mmおよび200mmのディスク型増幅器、光シャッター、スペーシャルフィルター、ファラディ回転子より構成されている。開口径350mmの真空型スペーシャルフィルターを出射したレーザー光は大口径反射鏡で4回反射されたのち、F/3の非球面レンズによってターゲット上に集光される。大口径反射鏡は、ミラーマウントで保持される際に変形を生じないようにすることが必要で、阪大で特別に開発された手法が使われた。また、12ビームの光路長を同一とするために各光学部品は、絶対位置で5mm以内の精度で設定され、各ビームの光路長差は3mm以内に調整されている。

表1は、激光Ⅻ号に使用されている主な光学部品の一覧<sup>2)</sup>を示す。光学材料としては磷酸塩レーザーガラス (HOYA LHG-8)、ファラディ回転ガラス (HOYA FR-5)、BK-7、KDP結晶等が用いられている。ロッド型レーザーガラスは長さ380mm、直径25mm、あるいは50mmの円柱状をしており、両端面は平面研磨をして反射防止膜を蒸着してあり、側面は砂がけである。ディスク型レーザーガラスは楕円形で、開口径200mm用の場合には長径400mm、短径214mm、

\*吉田国雄 (Kunio YOSHIDA), レーザー核融合研究センター, 講師, 工学博士, レーザー工学



RA: Rod Amplifier, DA: Disk Amplifier,  
 OS: Optical Shutter, SF: Spatial Filter,  
 AG: Automatic Mirror Gimbal,  
 CS: Centering Sensor, PCS: Pointing-Centering Sensor,  
 AWP: Automatic Wedge Prism,  
 ATS: Automatic Translational Stage,  
 IMAP: Incident-beam Monitoring and Analyzing Package,  
 RMAP: Reflected-beam Monitoring and Analyzing Package.

図1 激光Ⅻ号ガラスレーザーシステムの光学配置図

表1 激光Ⅻ号用光学部品の一覧

| 種 類                  | 名称    | 材 質   | 外径寸法                    | 個数  | 使用方法  |
|----------------------|-------|-------|-------------------------|-----|-------|
| レーザーガラス              | R25   | LHG-8 | 25φ×380 <sup>t</sup>    | 3   | 透過    |
|                      | R50   | LHG-8 | 50φ×380 <sup>t</sup>    | 25  | 透過    |
|                      | D100  | LHG-8 | 214×114×24 <sup>t</sup> | 144 | 透過    |
|                      | D200  | LHG-8 | 400×214×32 <sup>t</sup> | 108 | 透過    |
| ファラデーガラス             | FR100 | FR-5  | 120φ×20 <sup>t</sup>    | 12  | 透過    |
|                      | FR200 | FR-5  | 220φ×20 <sup>t</sup>    | 12  | 透過    |
| 誘電体偏光子               | OS25  | BK-7  | 66×38×5 <sup>t</sup>    | 8   | 透過    |
|                      | OS50  | BK-7  | 120×60×7 <sup>t</sup>   | 52  | 透過    |
|                      | FR100 | BK-7  | 230×120×10 <sup>t</sup> | 48  | 透過    |
|                      | FR200 | BK-7  | 448×240×10 <sup>t</sup> | 24  | 透過    |
| ポッケルスセル              | OS25  | KDP*  | 25φ                     | 2   | 透過    |
|                      | OS50  | KDP*  | 50φ                     | 13  | 透過    |
| 大口径反射鏡<br>(ターゲット照射系) |       | BK-7  | 最大 664φ×88 <sup>t</sup> | 74  | 透過・反射 |
| スペシャルフィルター用<br>レ ン ズ |       | BK-7  | 50φ~380φ<br>(F7~F400)   | 78  | 透過    |
| ターゲット照射用<br>レ ン ズ    |       | BK-7  | 有効径 350φ F/3            | 24  | 透過    |
| 高調波発生用結晶             |       | KDP   | 有効径 350φ                | 12  | 透過    |

厚さ32mmである。ディスクガラスの側面には、波長1 $\mu$ mの自然放出光を吸収してディスクガラス内での寄生発振を防止するためにエッジコートガラスが付着してある。研磨した光学ガラスの中で最大寸法のは、レーザー光をターゲットへ導くのに使用される反射鏡であり、最大664mm $\phi$ 、88mmt(重さ71kg)となる。この大口径反射鏡によって1ビームあたり4回反射されるが、各反射面で生じる収差が打ち消し合うように反射鏡を配置することによって収差量を $\lambda/5$  ( $\lambda=0.6328\mu$ m) 以下にすることが可能となる。スペシャルフィルター用レンズとしては球面レンズを用いているが、ターゲット集光用レンズにはF/3の非球面レンズを使用している。誘電体偏光子は、BK-7の基板に、低屈折率材料としてSiO<sub>2</sub>、高屈折率材料にはTiO<sub>2</sub>を用いて、2種類の材料を交互に約25層蒸着したもので、p成分の透過率95%以上、s成分の透過率は1.5%以下となるようにしてある。この偏光子は光学部品の中で最もレーザー損傷を受けやすいので、さらに高耐力の偏光子開発が必要である。高調波発生には、有効径360mm、厚さ20mmのKDP結晶(Type II)が使われる。KDPセルの窓にはBK-7が使用され、ガラスとKDPの間隙は約100 $\mu$ mであり屈折率整合用液体としてKoolaseを用いる。整合用液体は、非線形効果(誘導ラマン散乱や自己集束)が小さいこと、蒸発しにくいこと等の条件を満たすことが必要である。

### 3. 光学部品の波面収差

レーザー光を微小な点に集光するには、レーザー光の波面収差をできるだけ少なくすればよい。Rayleigh氏の $1/4$ 波長則<sup>3)</sup>によれば、光学システムに球面収差やコマ収差のような収差がある場合でも、これらの値が $1/4$ 波長(peak to valley 値)より小であれば、中心強度の減少は20%以下であり、この程度ならば光の損失は普通許容できることが示されている。集光点の光強度は波面収差の最大値だけでなく、波面の形にも依存するため、Rayleigh 則はシステムの望ましい状態に対する大まかな目安を与えるにすぎない。従って、集光点での光強度の値を

指定して波面収差の許容値を決定することが必要であり、この種の評価は Mare'chal 氏によってなされた。集光点のレーザー光強度Iは、無収差の場合を1とし、波面収差が小さいという条件のもとでは次の Mare'chal の式<sup>4)</sup>で与えられる。

$$I = 1 - (2\pi/\lambda)^2 (\Delta\Phi)^2 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $((\Delta\Phi)^2 = \overline{\Phi^2} - (\overline{\Phi})^2$  であり、基準球面よりの波面収差の2乗平均値である。

(1)式は多数の光学部品を使っているレーザーシステムにおいて、個々の部品の波面収差の許容量を算出するのに役立つ。レーザーシステムでは、発振器をでたレーザー光は多数の光学部品を透過あるいは反射されてターゲットに到達する。各光学部品で生じる波面収差は互いに独立と考えられるので、最終的波面収差は次式で与えられる。

$$(\Delta\Phi) = N_r(\Delta\Phi_r)^2 + N_t(\Delta\Phi_t)^2 + (\Delta\Phi_{NL})^2 \quad \dots(2)$$

ここでは簡単のため、 $N_r$  個の反射面および  $N_t$  個の透過部品は、それぞれ同一の波面収差を生じるとした。通常の光学系での波面収差は初めの2項のみを考えれば良いが、大出力レーザーでは媒質(固体光学材料や可飽和色素等)の光学的非線形性による波面収差  $\Delta\Phi_{NL}$  が付加される。 $\Delta\Phi_r$ 、 $\Delta\Phi_t$ 、 $\Delta\Phi_{NL}$  が既知の場合に、(2)式を使って最終的な波面収差  $\Delta\Phi$  を求め、これを(1)式に代入することによって集光点の光強度を計算できる。

### 4. 光学部品の仕様

多数の光学部品を用いて光学系を構成する場合に、各光学部品の仕様を決定する必要がある。光学部品の仕様は、光学材料の製造技術、研磨や蒸着技術、予算等を考慮して決定される。

表2にロッドガラス、ディスクガラス、フアラディガラスの仕様の概略を示す。屈折率の均質度は $\pm 1.0 \sim 3.3 \times 10^{-6}$ である。収差は、透過波面収差で規定する。透過で光学部品を使用する場合、一面は面精度  $\lambda/10$ 以下の平面研磨とし、他の面は内部の屈折率分布に応じて端面の補正加工(フィギャリングという)を施し、透過波面収差ができるだけ小さい値となるように

表2 激光Ⅱ号田光学部品の仕様の一例

|                                           | R50                                                                                         | D200                                | FR200                                                        |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| (1) 外 径 寸 法                               | 50 <sup>φ</sup> ×380 <sup>±</sup>                                                           | 400×214×32 <sup>±</sup>             | 220 <sup>φ</sup> ×20 <sup>±</sup>                            |
| (2) 材 種                                   | LHG—8                                                                                       | LHG—8                               | FR—5                                                         |
| (3) 材 質                                   |                                                                                             |                                     |                                                              |
| (イ) 均質度                                   | $< \pm 1.0 \times 10^{-6}$                                                                  | $< \pm 2.0 \times 10^{-6}$          | $\leq \pm 3.3 \times 10^{-6}$                                |
| (ロ) 残留歪 (nm/cm)                           | $\leq 1$                                                                                    | $\leq 4$                            | $\leq 4$                                                     |
| (ハ) 減衰係数 (m <sup>-1</sup> )               | $\leq 0.131$                                                                                | $\leq 0.131$                        | $\leq 0.5$                                                   |
| (ニ) 泡及び不純物                                |                                                                                             |                                     |                                                              |
| ・断面積総和                                    |                                                                                             | $\leq 0.03\text{mm}^2/100\text{cc}$ |                                                              |
| ・最大径 (mm)                                 | 0.15                                                                                        | 0.15                                | 0.20                                                         |
| (ホ) 脈 理                                   | シュリーレン法にて観測されないこと                                                                           |                                     |                                                              |
| (4) 研 摩                                   |                                                                                             |                                     |                                                              |
| (イ) エッジチップ                                |                                                                                             |                                     |                                                              |
| ・総数/エッジ                                   | $\leq 3$                                                                                    | $\leq 10$                           | $\leq 10$                                                    |
| ・最大径 (mm)                                 | 0.2                                                                                         | 0.2                                 | 0.25                                                         |
| (ロ) スクラッチ/ディグ                             | 30/10                                                                                       | 30/10                               | 30/20                                                        |
| (ハ) 透過波面収差 ( $\lambda=0.633\mu\text{m}$ ) |                                                                                             |                                     |                                                              |
| ・球面収差                                     | $\lambda/4$                                                                                 | $\lambda/2$                         | —                                                            |
| ・不整誤差                                     | $\lambda/6$                                                                                 | $\lambda/6$                         | $\lambda/8$                                                  |
| ・勾 配                                      | $\lambda/12/\text{cm}$                                                                      | $\lambda/30/\text{cm}$              | $\lambda/25/\text{cm}$                                       |
| (5) コーティング面                               |                                                                                             |                                     |                                                              |
| (イ) コーティング面                               | 端面全域                                                                                        | —                                   | 開口面全域                                                        |
| (ロ) 透過率                                   | 反射率 $\leq 0.1\%$ ( $\lambda=1.053\mu\text{m}$ )<br>$\leq 5\%$ ( $\lambda=1.34\mu\text{m}$ ) | —                                   | 反射率 $\leq 0.3\%$<br>( $\lambda=1.052\sim 1.054\mu\text{m}$ ) |
| (ハ) 耐レーザー光強度                              | 4 J/cm <sup>2</sup> (1 ns)                                                                  |                                     | 4 J/cm <sup>2</sup> (1 ns)                                   |

表3 光学部品の性能検査項目一覧

| 検査項目                | 被測定試料 |      | ファラデー<br>ガラス | 窓ガラス | 反射鏡 | 半透鏡 | 偏光子 | ポッケルス<br>セル | レンズ |
|---------------------|-------|------|--------------|------|-----|-----|-----|-------------|-----|
|                     | ロッド   | ディスク |              |      |     |     |     |             |     |
| 寸 法                 |       |      |              |      |     |     |     |             |     |
| 直径                  | ○     | ○    | ○            | ○    | ○   | ○   |     | ○           | ○   |
| 長さおよび幅              | ○     |      |              | ○    |     |     | ○   |             |     |
| 厚さ                  |       | ○    | ○            | ○    | ○   | ○   | ○   |             | ○   |
| エッジの欠け              | ○     | ○    | ○            | ○    | ○   | ○   | ○   |             | ○   |
| 面の平行度               | ○     | ○    | ○            | ○    | ○   | ○   | ○   |             |     |
| 光学的特性               |       |      |              |      |     |     |     |             |     |
| 透過波面歪               | ○     | ○    | ○            | ○    |     | ○   | ○   | ○           | ○   |
| 反射波面歪               |       |      |              |      | ○   | ○   |     |             |     |
| 表面の傷<br>(スクラッチ・ディグ) | ○     | ○    | ○            | ○    | ○   | ○   | ○   | ○           | ○   |
| 内部のあわ、不純物           | ○     | ○    | ○            | ○    |     | ○   | ○   | ○           | ○   |
| P成分透過率              |       |      |              |      | ○   | ○   | ○   | ○           |     |
| S成分透過率              |       |      |              |      | ○   | ○   | ○   | ○           | ○   |
| P成分反射率              | ○     |      | ○            | ○    | ○   | ○   |     |             |     |
| S成分反射率              |       |      |              |      | ○   | ○   |     |             |     |
| 減 衰 率               | ○     | ○    | ○            |      |     |     |     |             |     |
| 複 屈 折               | ○     | ○    | ○            |      |     |     |     | ○           |     |
| 消 光 比               |       |      |              |      |     |     |     | ○           |     |
| レーザー損傷              | ○     |      | ○            | ○    | ○   | ○   | ○   | ○           | ○   |

する。透過波面収差は球面収差とそれからのずれである不整誤差に分離しているが、この規定を適用するには収差を分離して解釈する検査装置が必要であるため余り一般的ではない。蒸着に関しては、ロッドガラスの場合は寄生発振を防止するため両端面全域に広帯域の反射防止膜を、ファラディガラスは両開口面全域に反射防止膜を施し、レーザー耐力は、 $4\text{J}/\text{cm}^2$ 以上と規定した。スクラッチ/ディグは、研磨あるいは表面洗浄等によって発生するもので、散乱損失を招き、かつレーザー破壊の原因となるためできる限り少なくした方がよい。

## 5. 検査<sup>5)</sup>

表3に光学部品の性能検査項目一覧を示す。表から明らかなように、検査項目が非常に多くしかも高い測定精度を要求されるため多くの労力と時間を要す。検査には、干渉計、パルスレーザー装置、連続発振 YAG レーザー、He-Ne レーザー等が使用される。

### 5.1 波面収差

光の干渉を利用した測定は、測定精度が高いので各種の光学部品の波面収差を評価するのに用いられる。図2は、フィゾー干渉計による波面収差測定の配置図を示す。透過物体の波面収差は、透過平板  $M_T$  と参照平板  $M_R$  との間に被測定資料を実際の設定角度に配置し、カメラで干渉縞を撮影して求めることができる。

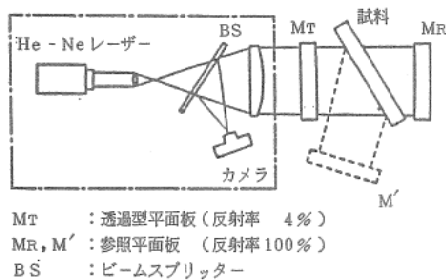
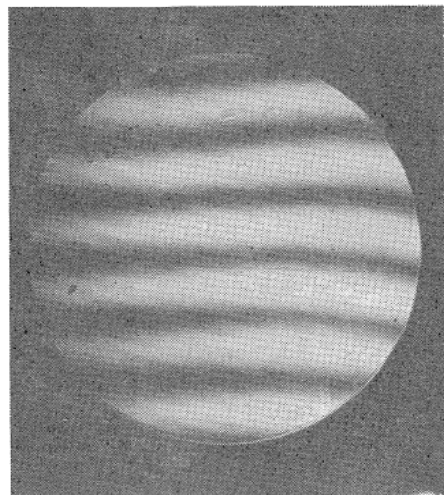


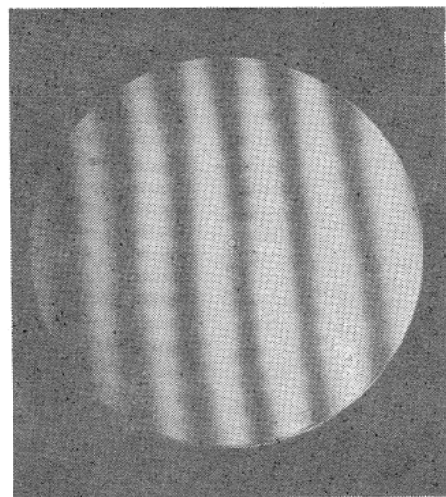
図2 フィゾー干渉計による波面収差測定の配置図

反射波面収差は、試料面で反射された光を参照平板  $M'$  で反射させ、 $M_T$  と  $M'$  とで得られる干渉縞から求める。

図3は、有効径200mmのディスクガラスをブ



(a)



(b)

図3 フィゾー干渉計による干渉写真  
(a)横縞 (b)縦縞

ルースター角に設置した場合の透過波面収差の測定例であり、縦、横の干渉写真から透過波面収差は  $\lambda/10$  ( $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ) 以下と計算される。

### 5.2 スクラッチ/ディグ

光学ガラスや蒸着したガラス表面にスクラッチやディグがあると、高出力レーザー光によって損傷を受ける確率が高くなったり、回折や散乱による損失が増し、かつレーザー性能を悪化させるので望ましくない。

光学部品表面のスクラッチ/ディグの検査は、顕微鏡の試料照明用として市販されているタングステン電球 (6V, 30W) 照明装置を一般に

用いる。この方法は、ランプ光を被測定試料の表面で反射させて行う反射法、試料に裏面から光を透過させて検査する透過法の二方法によって行う。数 $\mu\text{m}$ 以上の寸法のスクラッチ/ディグは、これらの方法によってほとんど全て見つけることができる。ディグの直径やスクラッチの幅および長さは、標準サンプルと比較して求めるが、正確な数値は光学顕微鏡を使って測定する。

### 5.3 蒸着膜

光学部品には、反射防止膜、半透過膜あるいは反射増加膜などの誘電体多層薄膜が蒸着されており、これらは目的に応じて非常に異なる条件を満足し、かつ高エネルギー密度のレーザー光に対し十分な耐力を有することが必要である。蒸着膜の透過率や反射率は、分光光度計によって簡単に測定できるが、高精度の測定値が必要な場合はレーザー光を用いた方がよい。

蒸着膜のレーザー耐力も非常に重要である。蒸着膜のレーザー耐力は多くの条件に支配され現状では満足すべき強度に達していない。筆者らは、パルス幅可変のパルス YAG レーザー装置（パルス幅100ps～20ns 可変）を準備して蒸着膜のレーザー耐力を求めている。波長1 $\mu\text{m}$ 、パルス幅1nsでのレーザー耐力は、反射鏡で5～12J/cm<sup>2</sup>、反射防止膜4～8J/cm<sup>2</sup>、偏光子4～6J/cm<sup>2</sup>であり、蒸着メーカーによってかなり異なるので注意を要する。また、短波

長レーザー（0.4 $\mu\text{m}$ 以下）用の蒸着膜のレーザー耐力は非常に弱く、今後の開発テーマとして各研究所等で取りあげられている。

### 6. 洗 浄

清浄な面は、光学部品のみならず高真空装置、超 LSI、精密機械、精密印刷等の多くの分野において必要不可欠となっている。高出力ガラスレーザーにおいては、光学部品表面の塵埃や薄膜状の汚れは光学部品の損傷原因となり、このような損傷が一般にレーザー出力を制限する。たとえば、ディスク増幅器内のレーザーガラスはフラッシュランプと向い合っており、約10J/cm<sup>2</sup>の放射エネルギー束を受けるため、増幅器内の塵埃や汚れが急激に加熱され、レーザーガラス表面に損傷を受ける。レーザーシステム中の損傷した光学部品を通過するレーザー光は、回折効果によって強い変調を受けるために他の光学部品に損傷を与える恐れがある、また損傷部分での散乱や吸収による損失が増大する、塵埃が反射鏡やシールドガラス等に焼きつくことによって励起効率が低下する、等の問題点がある。従って、光学部品は定期的に洗浄される。

一例として、有口径100mmのディスク増幅器の洗浄について述べる。図4は、ディスク増幅器の分解図を示す。100mm $\phi$ の6枚のディスクガラスは、電解研磨されたステンレス製のラダ

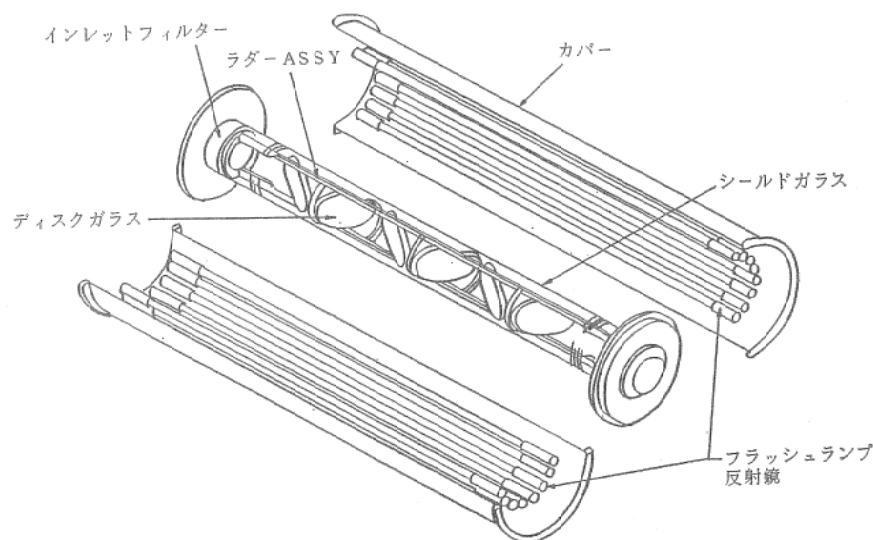


図4 ディスク増幅器 (DA100) の分解図

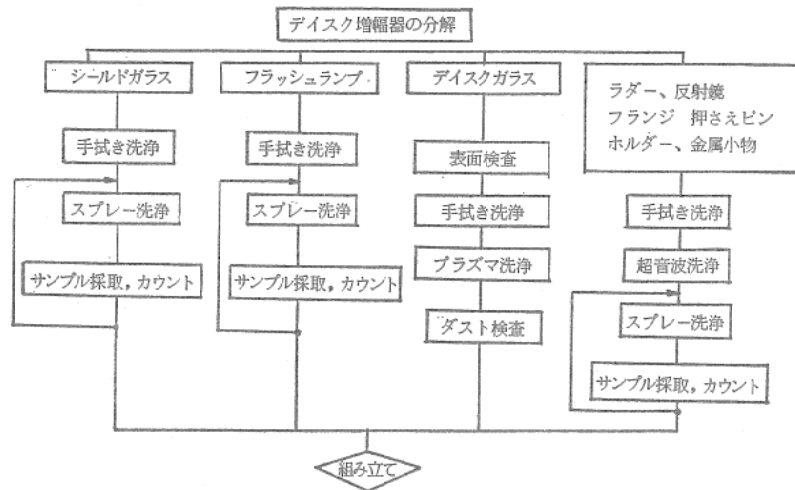


図5 ディスク増幅器の洗浄手順

で支持されており、その周囲にディスクガラス励起用の16本のフラッシュランプ（1本当りの入力10kJ）が配置されている。ディスク増幅器は、石英製のシールドガラス、フラッシュランプ、ディスクガラス、ラダー、反射鏡、フランジ、押えピン、ホルダー、等で構成されているので、それぞれの部品の性質に応じて洗浄することを要求される。図5は、分解から組み立てまでの各部品の洗浄手順を示す。レーザー光が通過するディスクガラスは、ガラス表面の取扱いに対して特に注意が必要で、表面検査（スクラッチ/ディスク）→手拭き洗浄→酸素プラズマによる洗浄→ダスト検査という手順を経て洗浄が完了する。ラダーのような大型の金属類は、手拭き洗浄→スプレー洗浄→ゴミの採取、カウントを経て、 $5\mu\text{m}$ のゴミが $1\text{cm}^2$ 当り2コ以下の場合に完了する。ここで、スプレー洗浄とは、約30ℓの高圧ガスタンクにフロンまたは超純水を満たし、これに約70気圧のクリーンな窒素ガスを加圧し、 $1.3\text{mm}\phi$ のノズルのついたガンから洗浄液を噴出させて洗浄する方法で、金属類に付着したゴミを効率よく除去する方法である。ゴミの採取、カウントとは、スプレー法によって約10気圧の窒素ガスで加速したフロンを洗浄物に噴射し、噴射されたフロンを採取してゴミの寸法と数を光学顕微鏡で数える。これらの洗浄法を用いることによって光学部品からゴミを99%以上除去できる。

## 7. 取扱い方法

光学部品を取扱う際、表面に唾、指紋、髪の毛が付着したりすると、再度洗浄が必要となり厄介となる。従って、塵埃発生が少なく、汚れのつきにくいマスク、手袋、帽子を身に付けて作業する方法が望ましい。これらは、半導体関係のクリーンで用いられている市販品を使えば余り大きな問題はない。光学部品の重さが1人で取扱える程度の場合は大きな問題は発生しないが、20～30kg以上の重さになってくると光学部品の重さおよび形状に応じた取扱い治具が必要となる。図6は、激光Ⅱ号の大口径反射鏡を洗浄したり、運搬する場合に用いる治具を示す。半円状のステンレス製リングで反射鏡を狭み込み、両方の支持棒を人間が持つ。もちろんリングの内側には、反射鏡に機械的歪みを与え

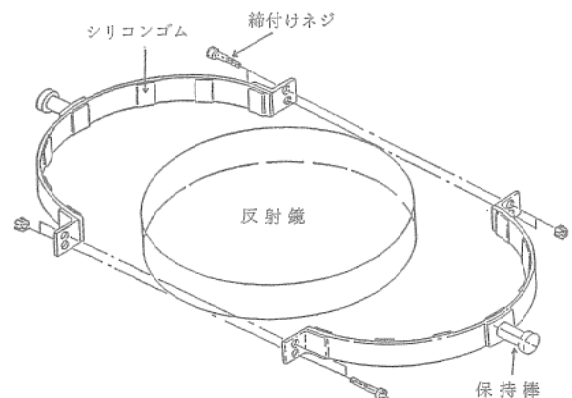


図6 大口径反射鏡用取扱い治具

ないようにシリコンゴムを取付けている。また反射鏡やレンズ等をセルに持込む場合には、機械的歪みが発生しないように十分注意する必要がある。

光学部品の保管も非常に重要な要素の一つである。保管中に光学部品が歪んだり、表面が変化しないように十分に注意すべきである。筆者らは、レーザーガラスやレンズ等の保管に対しては、 $1\mu\text{m}$  のフィルターを通したクリーンな窒素ガスを保管庫に満たし、ゴミの付着並びに表面のヤケを防止している。光学部品の保持は、半導体基板で使われているように光学部品を立てて保持する方式がよい。光学部品を紙で包んだ状態で保管するのは好ましくない。

## 8. おわりに

核融合用の大出力ガラスレーザー装置の開発によって、大口径光学部品の製造、研磨・加工、蒸着、検査、洗浄、取扱い技術が飛躍的に

向上した。また、光ファイバーや加工技術の進展に伴い、数mm～10cm程度の各種光学部品の製造、加工等の技術も着実に向上している。これらの装置において、光学システムを構成している各種光学部品の性能、取扱い法に熟知していれば安定で効率のよい動作が可能となる。

今後、レーザー装置は広く産業界で利用されるようになると思われるが、光学部品のコストを安くすることが重要な課題となろう。

最後に本欄への寄稿の機会を与えて下さり、多大の御指導を載いた工学部山中龍彦教授ならびに山中千代衛教授に深謝致します。

## 参考文献

- 1) 山中千代衛, レーザー研究, 11(8), 41(1983).
- 2) 今中治監修, “光学材料・部品の加工技術”, (株) 総合技術センター (1983).
- 3) J.W.S. Rayleigh, Phil. Mag., 8, 403(1879).
- 4) A. Marechal, Rev. Opt., 26, 257 (1947).
- 5) 吉田他, 電学誌, 100-c (9), 313 (1980).