

## 紫外光学材料の精密加工技術

難 波 義 治

### Precision Machining of Optical Materials for UV Applications

Yoshiharu NAMBA

The optical polishing process has finished optical glasses in precision for visible applications. Optics for UV applications has been demanded in recent years, though the specifications for the optics are different from the conventional optics. UV optics need higher precision, smoother and cleaner surface rather than visible optics to avoid scattering and laser induced damage. Materials are limited for UV applications, and some important crystals are soft, brittle, mechanically anisotropy, deliquescent, hygroscopic and of narrow phase matching angle acceptance. The recent progress of optical polishing, ultra-precision diamond turning, ultra-precision grinding, ion beam machining and float polishing were reported for UV optical materials such as fused silica, calcium fluoride, ULTRAN 30, FK5 and nonlinear optical crystals. Smooth surfaces less than 1 nm rms in surface roughness were obtained by various precision machining processes only under the special machining conditions.

**Key words:** UV optics, ultra-precision machining, surface roughness, contamination, laser induced damage threshold

近年、光の利用は可視光から紫外光へと短波長化が進んできた。紫外光は可視光よりも短波長 (360~400 nm 以下) であり、材料の吸収率が高く、分解能や集光性能が高く、光化学反応を利用した新しい加工が期待できる。そのため、非線形光学結晶<sup>1-6)</sup>を使用した YAG レーザーの 3 倍高調波 (355 nm)、4 倍高調波 (266 nm) や 5 倍高調波 (213 nm) のような紫外・遠紫外光源と、KrF エキシマーレーザー (248 nm)、ArF エキシマーレーザー (193 nm)、F<sub>2</sub> エキシマーレーザー (158 nm) のようなエキシマーレーザーが開発され、特に後者は半導体露光用の光源として鋭意研究開発が行われている<sup>7-9)</sup>。また、光記録の分野でも紫外光化による高密度記録が意図され、今世紀は紫外レーザーの応用が開くと考えられる。

このように紫外光は次世代の基盤技術となる素質を備えているが、その光学材料<sup>1-10)</sup>を加工する技術については必ずしも完成されたものではなく、以下のような加工上の問題

がある。

- 1) 使用波長により、加工技術が確立されている光学ガラスが使えない
- 2) 光学ガラスよりも軟質な光学結晶材料を加工する必要性が出てくる
- 3) 光学結晶材料が有する物理的異方性が加工の難易度に影響する
- 4) 散乱の抑制ならびにレーザー損傷の閾値 (レーザー耐力) の向上のため、可視用光学面よりも滑らかな面が要求される
- 5) 材料の有する潮解性や吸湿性のため、従来の加工技術が使用できない場合がある
- 6) 可視用光学面よりも要求形状精度が高くなる
- 7) 非線形光学結晶ではその機能を発揮させるために精密な結晶面方位に加工する必要がある
- 8) レーザー耐力が問題となる光学素子では加工変質層

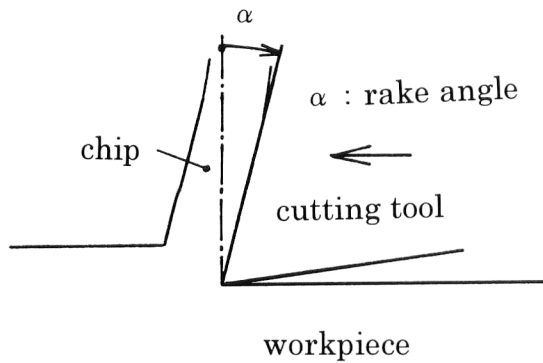


図1 切削工具のすくい角の定義。

や表面清浄度を考慮する必要がある

ここでは、今後の紫外光応用を光学素子の加工の立場から支える精密加工技術について解説する。

## 1. 光学研磨法

従来の光学ガラスは、研削・砂ずり・研磨の工程を経て光学素子に仕上げられており、最終の加工工程として研磨があり、光学研磨法とよばれる。これは、ガラスを酸化セリウム ( $\text{CeO}_2$ ) の研磨剤を介してピッチ製のポリシャーに押しつけて鏡面加工を行う方法である。最近では、半導体の研磨技術が光学ガラスにも取り入れられ、ポリシャーに人工皮革のポリシング・クロスを使用する方法やポリウレタンパッドを使用する方法が採用される。一般の光学面を顕微鏡観察してもきずは観察されないが、ノマルスキー式微分干渉顕微鏡で観察すると、方向が不定の、微小な引っかきずの集積であることがわかる。研磨剤の粒径を小さくすれば、加工能率は低下するが、より滑らかな鏡面が得られる。光学研磨面の表面粗さは一般に5~15 nm Ry, 0.4~1.5 nm rms である。しかし、レーザーグレードとよばれる一段と良好な光学面では1 nm Ry, 0.1 nm rms の面が得られている。

この光学研磨では、研磨機が形状を創成するのではなく、ポリシャーの形状を加工物に転写するため、ポリシャーの形状精度管理が重要となる。最近ではスモールツールを数値制御して表面形状を創成する方法も採られる<sup>11)</sup>。光学ガラスに対する長年の技術的蓄積から、紫外光学材料の加工においてもまず試みられる基本的な方法である。合成石英や紫外光学ガラスはこの方法で平面・球面・非球面の光学素子が作られる。特に合成石英は、その硬さと低熱膨張により高精度な面が得られ、表面粗さ1 nm Ry, 0.1 nm rms の面が得られている。光学研磨と形状計測が車の両輪となって所要の形状が創成されるが、研磨剤やピッチからのコンタミネーション、前加工による加工変質層の取り残

しが問題となる場合がある。特に、 $\text{CeO}_2$  を研磨剤として使用すると、研磨面は短波長レーザーを吸収するようになるといわれている。

## 2. 超精密ダイヤモンド切削法

切削は、あらかじめ形状を成形した硬くて鋭い工具を用い、工作機械の有する運動および位置決め精度を加工物に転写するため、加工物から不要な材料を切り屑として除去し、所要の寸法・形状精度を得る能率的な加工法である。

超精密ダイヤモンド切削法は機械の精度を基準にして加工するため、光学研磨と異なり次のような特徴がある。すなわち、1) 非球面加工が容易にできる、2) 寸法・形状精度が高い、3) 加工時間が短い、4) 光軸合わせが容易である、5) 再加工時のコストが安い、6) エッジのだれがない、7) 残留応力が小さく、機械的に安定である、8) 金属鏡では反射率が高い、9) レーザー耐力が高い<sup>12)</sup>、10) 耐食性が高い、11) 熱的に安定である、12) 設計時の制約が少なくなり、新しい光学素子出現の可能性が高い、13) 材料の選択範囲が広い。しかし、この方法は、高額な加工装置や高価なダイヤモンド工具を必要とするという欠点をもつだけでなく、材質によっては加工が困難である。

この方法で精密加工可能な材料は、軟質なアルミニウム・マグネシウム合金と無酸素銅、非晶質である無電解ニッケルと高分子材料の光学プラスチックであるといわれている<sup>13)</sup>。結晶の異方性がない無電解ニッケルでは理想的な平面加工が可能であり、表面粗さ0.5 nm rms が実現できる。

1970年代に米海軍の研究所で脆性な赤外用光学結晶材料の超精密ダイヤモンド切削が行われ、いくつかの結晶材料では光学研磨より滑らかな面が得られた<sup>14)</sup>。しかし、結晶材料は加工方向によりへき開が生じ、へき開面と加工方向とを考慮することが滑らかな表面を得るには必要であることが明らかとなった。その中で加工に成功した赤外用材料として、 $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{GaAs}$  が挙げられる。

その後、米国エネルギー省のローレンスリバモア研究所では非線形光学結晶のリン酸二水素カリウム ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , KDP) を超精密ダイヤモンド切削のみで光学面に仕上げ、波長351 nm のレーザー核融合実験に使用している。KDP は強い潮解性があり、研磨で常用される水が使用できないため、鉱物油を多量に掛けた状態で $-45^\circ$  のすくい角(図1)の超精密ダイヤモンド工具により切削されている。

金属を加工する切削工具のすくい角は正もしくはゼロであり、切れ味が悪くなるため負は採用されない。しかし、

すくい角が正の条件では脆性な結晶は光学面には仕上がらない。表面粗さは、結晶面方位に対する加工方向、工具先端半径、すくい角、送りにより変化する<sup>15)</sup>。図2は先端半径1 mm、すくい角 $-25^\circ$ のダイヤモンド工具を使用し、切削速度8.3 m/s、送り $2\ \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み $1\ \mu\text{m}$ の条件でKDPをへき開面に平行に超精密ダイヤモンド切削したときに得られた表面粗さを示す。3次元表示での表面粗さは9.97 nm Ry, 1.09 nm rmsである。JISの定義による2次元表示ではそれぞれ、5.28 nm Ry, 0.934 nm rmsである。

有機非線形光学結晶は次世代波長変換素子として注目を浴びているが、融点が低く、軟質で脆い性質から光学面に仕上げるのが困難である。最近この材料に対し、超精密ダイヤモンド切削で光学面を得ることができることが証明され<sup>16)</sup>、注目を浴びるようになった。この場合も工具の形状と加工方向は特殊な条件を採用している。

非線形光学結晶には位相整合条件が厳しいものがあり、研磨では位相整合方向に垂直に表面を仕上げることはきわめて難しい。これに対し、機械の精度を基準に加工を行う超精密ダイヤモンド切削や超精密ダイヤモンド研削では特殊な治具等を付加することにより、正確に位相整合条件を満足させることが可能である<sup>17)</sup>。

球面および非球面の加工については数値制御装置の発達が不可欠であり、レーザー干渉計と数値制御装置を使用して1 nm単位で位置決めできる超精密ダイヤモンド旋盤が発売され、現在では直径600 mmまでの品物が加工できる。一般には、フッ化カルシウム光学素子は研削で前加工されるが、負のすくい角を有するダイヤモンド工具で非球面を超精密切削する試みがあり<sup>18)</sup>、表面粗さ39.2 nm Ry, 7.8 nm rmsが得られている。

### 3. 超精密ダイヤモンド研削法

研削は、工作機械の有する運動および位置決め精度を加工物に転写するため、高硬度の砥粒を分散させて結合剤で固めて作った研削砥石を高速で回転させて微量ずつ材料を削り取り、所要の寸法・形状精度を得る仕上げ加工法であり、焼入鋼やセラミックスの精密加工に使用されている。しかし、光学分野では光学ガラスの形状創成に使われ、研磨の前工程とされている。

主軸に直径125 mmの零熱膨張ガラスセラミックスを、軸受に油静圧軸受を使用して外力に対する剛性と温度変化に対する熱剛性を高め、 $0.1\ \mu\text{m}$ 単位の切込みを可能にした超精密平面研削盤<sup>19)</sup>を使い、#1500 レジノイドボンド・ダイヤモンド砥石 (SD1500-75-B, 平均砥粒径:  $11.5\ \mu\text{m}$ ) で各種光学ガラスを研削し、ワンパス研削で表面粗さ数

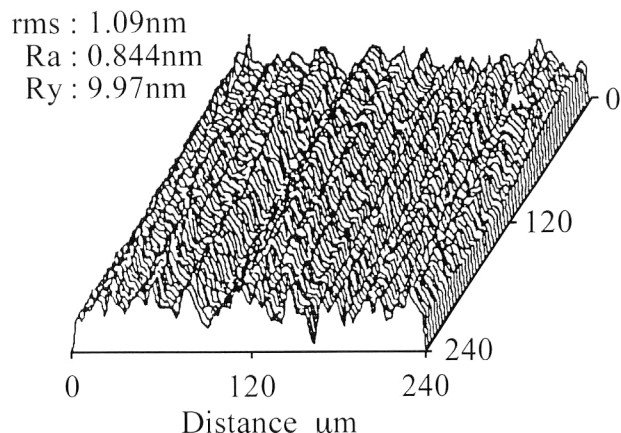


図2 KDP 超精密ダイヤモンド切削面の表面粗さ。

nm rmsを得て、#3000のレジノイドボンド・ダイヤモンド砥石 (SD3000-75-B, 平均砥粒径:  $4\ \mu\text{m}$ ) で光学ガラスBK7を削り、表面粗さ0.22 nm rmsを得ている<sup>20)</sup>。この面は、光学研磨面よりも滑らかである。その後、加工条件を最適化することにより、代表的な光学ガラスBK7をSD3000-75-B砥石で削り、原子間力顕微鏡 (AFM) で測定した結果、表面粗さ0.87 nm Ry, 0.075 nm rmsを得た<sup>21)</sup>。この値は研磨面に比べ数段滑らかな面であるだけでなく、理想表面粗さの値の2~3倍程度の面である。このように、ガラスの加工の分野では、従来は粗加工とみなされていた研削が工作機械および工具の発達により、原子単位のナノ加工に対応する加工法に変身している。

無機非線形光学結晶チタニルリン酸カリウム ( $\text{KTiOPO}_4$ , KTP) は吸湿性もなく硬いので、従来の光学研磨法で十分加工できるが、より加工能率を上げるため超精密ダイヤモンド研削を実施した。その結果、得られる表面性状は使用したダイヤモンド砥石の平均砥粒径に強く依存し、平均砥粒径が $100\ \mu\text{m}$ の場合はガラスの研削と同様に表面が貝殻状に割れた面 (脆性加工面) を呈し、平均砥粒径が $20\ \mu\text{m}$ 以下の場合は光学面と同様な条痕のみで生成される面 (延性加工面) を呈し、平均砥粒径が $20\ \mu\text{m}$ より大きいと脆性加工面と延性加工面が混在した面を示す。その様子を表面粗さで示すと図3のようになり、使用する砥石のダイヤモンド砥粒の大きさを小さくすれば滑らかな面が得られることがわかる。

平均砥粒径を小さくすれば、研削抵抗が大きくなり、加工に悪影響を及ぼすこともある。そこで、加工液に水を使い、SD1500-75-B砥石で研削速度20 m/s、砥石1回転当たりの送り $3.6\ \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み $1\ \mu\text{m}$ の加工条件でKTPを超精密ダイヤモンド研削した結果、表面粗さ4.31 nm Ry, 0.56 nm rmsが得られた<sup>22)</sup>。したがって、今後は超精密研削のみでKTPを能率よく光学面に仕上げる事が可

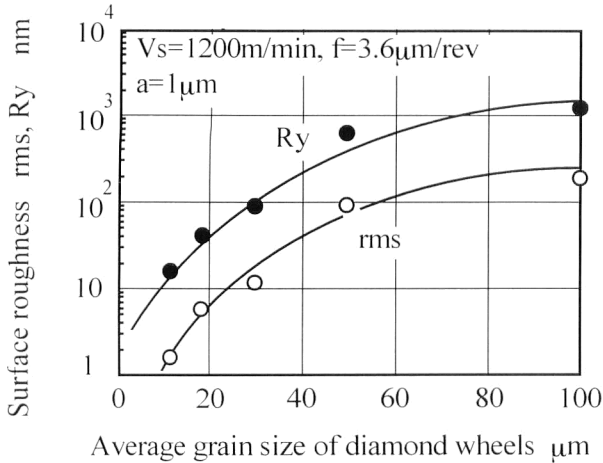


図3 KTP 超精密ダイヤモンド研削時の表面粗さとダイヤモンド砥石の平均砥粒径との関係。

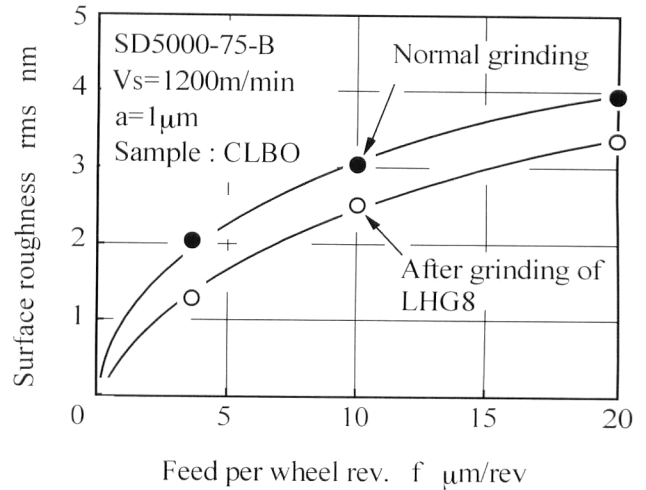


図5 表面粗さと砥石1回転当たりの送りの関係。

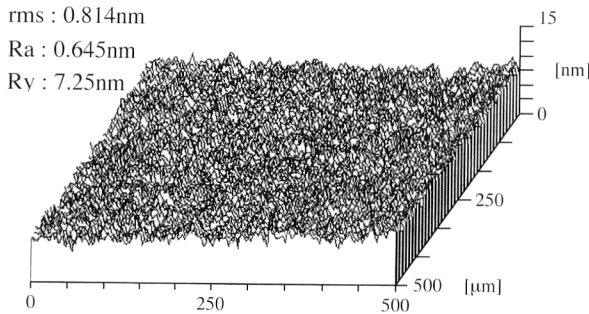


図4 20 wt%ヘプタノール含有シリコンオイルによるKDP超精密ダイヤモンド研削面の表面粗さ。

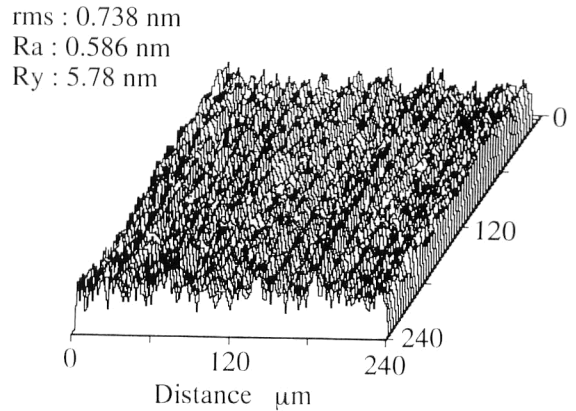


図6 CLBO超精密ダイヤモンド研削面の表面粗さ。

能である。

無機非線形光学結晶KDPは軟質で潮解性があり、上記のように超精密ダイヤモンド切削で加工されているが、表面粗さのさらなる向上を目指し、各種加工液を使用して超精密ダイヤモンド研削を試みた。SD5000-75-B砥石(平均砥粒径:  $1.75\ \mu\text{m}$ )と加工液に20 wt%ヘプタノール含有シリコンオイルを使用することにより、図4に示すように表面粗さ  $7.25\ \text{nm Ry}$ ,  $0.814\ \text{nm rms}$  が得られた。しかし、シリコンオイルがコンタミネーションとなり、レーザー耐力は流動パラフィンで研削した面(表面粗さ  $1.5\ \text{nm rms}$ )に比べ低い。研削面粗さの最小値としては、表面粗さ  $3.39\ \text{nm Ry}$ ,  $0.498\ \text{nm rms}$  が得られている。この表面粗さの値はこれまで公表されたKDP加工面の表面粗さの最小値である。加工液の適切な選択により、表面粗さが小さくしかもレーザー耐力の高い研削面が得られることが期待される。

無機非線形光学結晶セシウムリチウムボレート( $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ , CLBO)<sup>1,3)</sup>は4~5倍高調波の遠紫外レーザーが発生できることから世界中で注目されているが、へき開しやすい、軟らかい、吸水性がある、角度出しの許容範囲が狭いなど

の加工上の問題点がある。研削面の表面粗さは、砥石中のダイヤモンドの粒径と砥石1回転当たりの送りに依存する。粒径の小さいSD5000-75-B砥石を使用し、加工方向を考慮し、砥石1回転当たりの送りを小さくしても、図5に示すように一般の砥石の目立て法では光学面が得られない。そこで、SD5000-75-B砥石を使用して、研削抵抗が高いレーザーガラスLHG8を研削することにより、砥粒を磨耗させ、砥粒切れ刃の高さを揃えてから研削すると、図5に示すように表面粗さは向上する。このような特殊な目立てと微小な送りにより、図6に示すような表面粗さ  $5.78\ \text{nm Ry}$ ,  $0.738\ \text{nm rms}$  の面が研削のみで得られた。この面の波長  $266\ \text{nm}$  での分光透過率の測定値は、理論透過率に比べ2%低い。この原因として、研削力による表面密度の上昇が考えられる。研磨と異なり、研削の場合は砥粒の粒径を小さくすれば、滑らかな面が得やすいが、研削抵抗が急激に高くなるという特徴がある。

#### 4. イオンビーム加工法

大口径のイオンビームを合成石英表面に照射して、スパッタリングにより材料を除去し、形状を創成する方法があり、アメリカでは Neutral Ion Beam Figuring<sup>23)</sup> とよばれる。宇宙用の大型反射鏡に欧米で実用化されている。合成石英の場合、どの加工法よりも能率が高く、表面粗さは 1.52 nm Ry, 0.18 nm rms ときわめて滑らかな面を得ている。この方法の場合、実時間で形状を計測しながら加工ができるので、非接触形状計測技術の進歩とともに紫外光学材料の加工に使用される可能性が大である。

また、最近 Gas Cluster Ion Beam 法<sup>24)</sup> が開発されている。この方法は 1000 個程度の Ar 原子の塊にイオンが 1 個付着しているクラスターイオンを加速して試料表面に垂直に衝突させることにより、表面を平坦化する技術である。シリコン基板に化学気相成長させたダイヤモンド薄膜表面を加工し、表面粗さ 0.45 nm rms を得ている。この方法も非接触形状計測技術を併用すれば紫外光学材料の加工に使用できる。

#### 5. フロート・ポリシング法

フロート・ポリシング<sup>25)</sup> においては、高精度なポリシャー平面を得るため、剛性、回転精度、吸振性の高い静圧油軸受を用いた超精密ダイヤモンド立旋盤の構造を有する超精密平面研磨盤<sup>26)</sup> と、ポリシャーとして被削性のきわめて良好な工業用純スズを使用し、これに溝幅 1 mm, 深さ 0.5~1 mm, ピッチ 2 mm の溝を切削した後、研磨盤上で主軸回転数 300 rpm, 送り 0.3 mm/rev で超精密ダイヤモンド切削することにより高精度なポリシャー平面を得る。この平面度は直径 460 mm のスズポリシャーに対し 1 μm 程度である。スズポリシャーは取り外すことなく、周囲に加工槽を設置して研磨用ポリシャーとして使用する。したがって、温度変化がない限りポリシャーの平面度は研磨時も保持される。研磨液は超純水に直径 7 nm の超高純度 SiO<sub>2</sub> を 2~5 wt% 加えたものである。

フロート・ポリシングの特徴としては、1) 超高精度無歪み平面加工法である、2) 加工雰囲気は清浄であり、コンタミネーションがない。そのため、加工物の洗浄が容易である、3) ポリシャーの平面度をダイヤモンド切削で得るため、ポリシャー面の管理がきわめて容易である。そのため、熟練作業者を必要としない、4) 動圧流体軸受状態による平滑化作用のため、ポリシャーより高い平面度が得られる、5) 遠心力により粗い粒子は加工容器壁面に付着し、加工物にきずを付けない、6) やといなしできわめて鋭いエッジが得られる、ことが挙げられる。

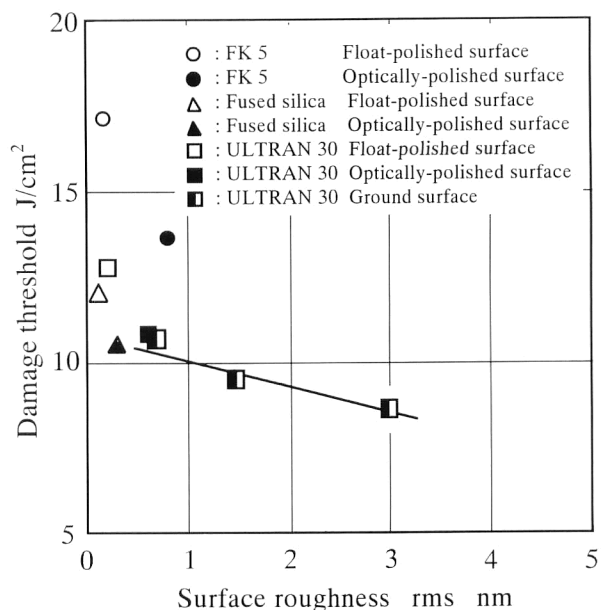


図7 紫外用光学ガラスの波長 355 nm でのレーザー耐力と表面粗さ。

本研磨法は、リング・レーザー・ジャイロ用光学素子に使用され、平面度がよく、表面粗さが小さい (0.1 nm rms 以下) ため散乱のきわめて少ない面が得られている。また、高出力レーザー用光学部品に関する最近の研究<sup>27)</sup> では、レーザー照射 (波長: 1.053 nm, パルス幅: 1 ns) による損傷に対する閾値が、フロート・ポリシング面では現在最高の光学研磨面に比べ 2 倍の値を示すことが明らかにされている。

図7は、紫外用光学ガラスである合成石英、ULTRAN 30 および FK5 を光学研磨、超精密ダイヤモンド研削ならびにフロート・ポリシングした各表面に波長 355 nm の紫外レーザーを照射したときのレーザー耐力を示している。研削面は加工条件を変えることにより任意の表面粗さを得ることができる。この図からレーザー耐力は表面粗さの関数であることがわかる。この傾向は、波長に依存せず存在する。この図から材料に依存せず、フロート・ポリシング面は高いレーザー耐力と小さい表面粗さを示している。

表面粗さから予測される値よりもフロート・ポリシング面が高いレーザー耐力を示す要因は加工表面の清浄度にある。前記の超高純度 SiO<sub>2</sub>、半導体研磨用のコロイダルシリカ (SiO<sub>2</sub>)、ならびに光学研磨用 CeO<sub>2</sub> を使用して FK5 をフロート・ポリシングし、レーザー耐力を測定すると、超高純度 SiO<sub>2</sub> を使用した場合が最も高く、次に半導体用の SiO<sub>2</sub> であり、CeO<sub>2</sub> を使用した場合が最も低い。これは半導体用の研磨液に含まれる異イオンの影響であり、CeO<sub>2</sub> の場合は純度の悪さからきている。なお、母材のレーザー耐力は FK5 に比べ吸収率が低い分、2 倍程度合成石英のほ

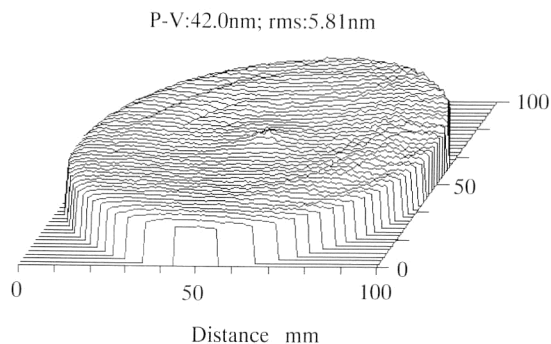


図8 フロート・ポリシングした直径 100 mm のフッ化カルシウムの平面度。

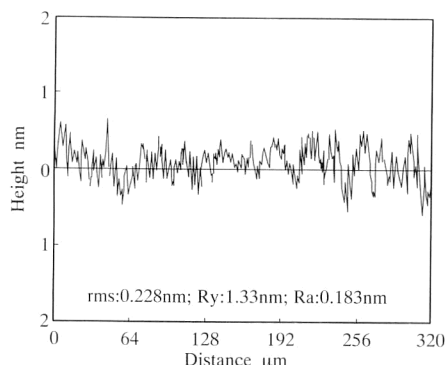


図9 フロート・ポリシングした遠紫外用フッ化カルシウムの表面粗さ。

うが勝っている。

波長 190 nm 以下では代替の透過光学材料がないフッ化カルシウムは他の光学材料に比べ軟らかいため、従来の光学研磨ではきずのない滑らかな面を得ることが困難である。図8はフロート・ポリシングした直径 100 mm の赤外用フッ化カルシウムの平面度を測定した例で、平面度 42 nm P-V, 5.81 nm rms が得られている。本法によれば、直径 100 mm の合成石英, ZERODUR<sup>26)</sup>, BK7, Si 単結晶については  $\lambda/20$  以上の平面度が得られる。熱膨張係数の大きい図8のフッ化カルシウムの平面度 ( $\lambda/15$ ) については、改善の余地がある。どの場合も、研磨液温は  $\pm 0.01$  K 内に制御されている。

図9は高純度の 7 nm の SiO<sub>2</sub> でフロート・ポリシングした遠紫外用フッ化カルシウムの表面粗さを TOPO-2D で測定した結果である。表面粗さ 1.33 nm Ry, 0.228 nm rms が得られている。同じ条件でフロート・ポリシングを施しても、赤外用のフッ化カルシウムだと不純物の影響により、表面粗さは 2.89 nm Ry, 0.444 nm rms と悪化する。将来的には、高純度の遠紫外用フッ化カルシウムを表面粗さ 0.1 nm rms 以下にし、遠紫外でのレーザー耐力を高めるような加工条件の最適化が求められる。

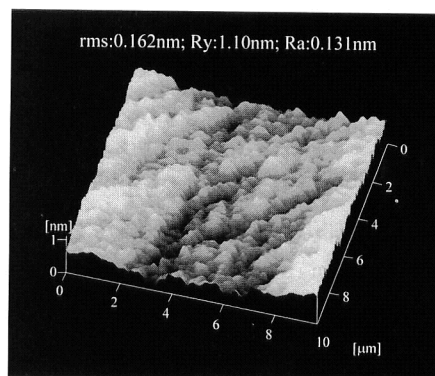


図10 フロート・ポリシングした遠紫外用フッ化カルシウムの AFM による表面粗さ。

図10は、AFMで表面粗さのより高周波成分を図9の試料について測定した結果で、表面粗さは測定区間 10  $\mu\text{m}$  角で、1.10 nm Ry, 0.162 nm rms である。表面がフッ素で終端しているとすれば、幾何学的に決まるフッ化カルシウムの理論表面粗さ<sup>28)</sup>は 0.033 nm rms であることから、0.1 nm rms 程度の面は得られると予想される。

21世紀に应用が広がる紫外ならびに遠紫外域で使用される光学材料の精密加工法について述べてきた。その中には技術が確立していないものが多い。紫外应用到に伴い、従来にない厳しい仕様に適応できる加工法や新しい紫外光学材料が誕生すれば、それに対応した加工法もしくは最適加工条件を見いだすことが必要となる。紫外光学材料の精密加工は、紫外应用の普及・発展に対する原動力となるものであり、日本で開発しなければならない基盤技術である。

## 文 献

- 1) 佐々木孝友：“新固体レーザー材料と非線形光学結晶”，応用物理，**64** (1995) 878-887.
- 2) 吉村政志，森 勇介，佐々木孝友：“Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>Ca<sub>3</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 単結晶 (GdYCOB) による Nd:YAG レーザーの高調波発生”，レーザー研究，**27** (1999) 519-524.
- 3) 出来恭一，佐久間純，大迫 康，A. Finch，横田利夫，堀内昌宏，森 勇介，佐々木孝友：“CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> 結晶 (CLBO) を用いた 193 nm 光源の開発”，レーザー研究，**27** (1999) 525-530.
- 4) 平 洋一，末岡邦昭：“連続発振アルゴンイオンレーザーの共振器内周波数通倍”，レーザー研究，**27** (1999) 531-535.
- 5) 小松隆一，菅原 保，渡辺紀子，宇田 聡，V. Petrov：“光学用四ほう酸リチウム単結晶 (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) の育成とその紫外非線形特性”，レーザー研究，**27** (1999) 541-546.
- 6) 島村清史，S. L. Baldochi，Z. Liu，猿倉信彦，福田承生：“紫外固体レーザー用フッ化物単結晶”，レーザー研究，**27** (1999) 547-552.
- 7) 牛田一雄：“ステッパー用光学系”，光学，**20** (1991) 70-75.
- 8) 牛田一雄：“エキシマレーザーステッパー”，光学，**23** (1994) 602-608.
- 9) 岡崎信次：“超高密度集積回路用リソグラフィ”，光学，**23** (1994) 620-625.

- 10) 藤ノ木朗：“エキシマレーザー用光学石英ガラス”，光学，**23** (1994) 628-629.
- 11) 品田邦典：“光学素子の研磨加工技術”，光学，**25** (1996) 76-81.
- 12) D. L. Decker, M. J. Soileau, J. O. Porteus and J. M. Bennett: “Surface, optical and laser damage characteristics of diamond turned metal mirrors,” *Laser Induced Damage in Optical Materials*, **462** (NBS Spec. Publ., 1976) pp. 153-164.
- 13) 小川秀樹：“光学面の超精密加工”，光学，**25** (1996) 88-92.
- 14) D. L. Decker, D. J. Grandjean and J. M. Bennett: “Optical and surface physical characteristics of diamond-machined infrared windows,” *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II*, **562** (NBS Spec. Publ., 1979) pp. 293-304.
- 15) 難波義治, 片桐匡教, 中塚正大：“無機非線形光学結晶 KDP の超精密ダイヤモンド切削”，精密工学会誌，**64** (1998) 1487-1491.
- 16) 難波義治：“機能的な光学材料の超精密加工”，レーザー研究，**27** (1999) 599-604.
- 17) 佐伯守彦, 難波義治, 佐々木孝友：“有機非線形光学結晶の位相整合条件を満たす光学面創成装置の検討”，精密工学会誌，**63** (1997) 1715-1719.
- 18) 閻 紀旺, 庄司克雄, 厨川常元, 田中憲司, 田牧純一：“蛍石の超精密切削—(第2報) 非球面レンズの加工—”，2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2001) p. 127.
- 19) Y. Namba, R. Wada, K. Unno and A. Tsuboi: “Ultra-precision surface grinder having a glass-ceramic spindle of zero-thermal expansion,” *Ann. CIRP*, **38** (1989) 331-334.
- 20) 難波義治：“光学ガラスの超精密研削”，光学，**20** (1991) 78-79.
- 21) G. S. Lodha, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, J. Yu, Y. Namba and J. M. Bennett: “Effect of surface roughness and subsurface damage on grazing-incidence X-ray scattering and specular reflectance,” *Appl. Opt.*, **37** (1998) 5239-5252.
- 22) Y. Namba, M. Saeki and T. Sasaki: “Ultra-precision grinding of KTP crystals for optical surfaces,” *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **28** (1994) 39-40.
- 23) S. R. Wilson and J. R. McNeil: “Neutral ion beam figuring of large optical surfaces,” *Proc. SPIE*, **818** (1987) 320-325.
- 24) I. Yamada, J. Matsuo, Z. Insepov, D. Takeuchi, M. Akizuki and N. Toyoda: “Surface processing by gas cluster ion beams at the atomic (molecular) level,” *J. Vacuum Sci. Technol.*, **14** (1996) 781-785.
- 25) 難波義治：“フロート・ポリシング”，光学，**13** (1984) 454-462.
- 26) Y. Namba, H. Tsuwa and R. Wada: “Ultra-precision float polishing machine,” *Ann. CIRP*, **36** (1987) 211-214.
- 27) Y. Namba, K. Yoshida, H. Yoshida and S. Nakai: “Ultra-precision grinding of optical materials for high power lasers,” *Proc. SPIE*, **3244** (1998) 320-330.
- 28) Y. Namba, J. Yu, J. M. Bennett and K. Yamashita: “Modeling and measurements of atomic surface roughness,” *Appl. Opt.*, **39** (2000) 2705-2718.

(2001年10月9日受理)