



フ ロ ー ト ・ ポ リ シ ン グ

難 波 義 治

大阪大学工学部精密工学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1984年9月19日受理)

Float Polishing

Yoshiharu NAMBA

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

1. はじめに

研磨の歴史は古く、石器時代にまで遡ることができ、紀元前にすでにサブミクロンの形状精度の光学部品が作られ¹⁾、宝石等の研磨においては数十 nm の表面粗さが達成されていた。光学工業は、サブミクロンの波長の光を扱うため、伝統的に高度な加工技術を保持し、各時代を通して超精密加工を実現してきた。一般に機械加工に対する要求事項は、機械製図上に指定される材料、寸法・形状精度、表面粗さである。熟練作業者を必要とするという欠点はあるが、ピッチをポリシャとして使う光学研磨は厳しいこれらの要求を十分満足するものであった。

しかし、電子工業の発展に伴い、従来の加工要求事項だけでなく、加工表面層の品質を問題にする部品が増えてきた。シリコン等の単結晶ウエハに対しては、クロスポリシャで研磨した後、エッチングで加工変質層を除去する方法が採用された。研磨液に化学薬品を添加して、ポリッシングおよびエッチングの両工程を1工程にしたケモメカニカル(ケミカル・メカニカル)ポリッシングが近年単結晶ウエハ研磨の主流を占めるようになった²⁾。この方法は、光学研磨のような高い形状精度は得られないが、加工変質層がなくしかも表面粗さが小さいという特徴がある。光学研磨は従来より加工変質層に関してはやけ以外特別な注意を払っていない。

ここでは、新しい加工要求事項を満足する超精密平面の加工に対し、解決策を与えるため開発されたフロート・ポリッシングについて、その装置、材料除去機構、研磨面

の品質および応用を概説する。

2. 研 磨 装 置

研磨は、工作物とラップ(もしくはポリシャ)の間に砥粒を介して両者をこすり合わせ、ラップの表面形状を工作物表面に転写するものである。したがって、高精度な平面を得るための基本は工具としてのラップの平面度にある。フロート・ポリッシングにおいては、高精度なラップ平面を得るため、図1のような剛性、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³⁾を使用する。被削性のきわめて良好な工業用純錫に、溝幅 1 mm、深さ 0.5 ~ 1 mm、ピッチ 2 mm の溝を切削した後、研磨盤上で図2のように主軸回転数 300 rpm、送り 0.3 mm/rev でダイヤモンド切削することにより高精度なラップ平面を得る。この平面度は直径 460 mm の錫ラップに対し 1 μm 程度である³⁾。錫ラップは取り外すことなく、図3のように周囲に加工槽を設置して研磨用ラップとして使用する。したがって、温度変化がない限りラップの平面度は研磨時も保持される。

表面粗さ 0.1 μm Rz 以下、平面度数 μm に前加工した工作物を図3のように加工槽に入れ、ラップおよび工作物を高速回転させると両者の間の研磨液の動圧流体潤滑状態により工作物は図4のようにラップと接触せず、浮上した状態で研磨が進行する。この状態より本研磨法をフロート・ポリッシングと名づけた。本研磨法による工作物の端は鋭く、工作物が錫ラップに接触すれば、錫ラップ表面は瞬時に工作物の端により削り取られる。前加

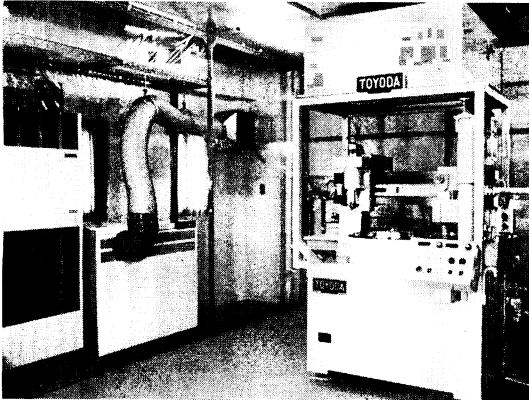


図 1 超精密平面研磨盤と研磨室

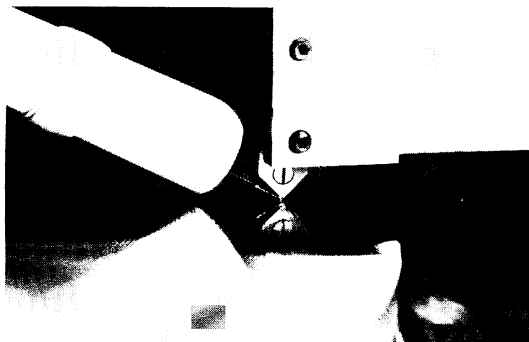


図 2 超精密平面研磨盤上での錫ラップのダイヤモンド平面切削の状態

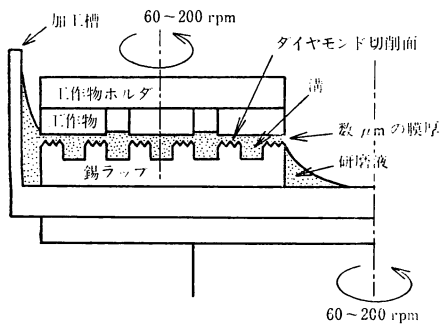


図 3 フロート・ポリシング装置の原理図

工面の表面粗さが数 $\mu\text{m Rz}$ 程度の工作物は錫ラップと接触してラップを削るため、フロート・ポリシングには使用できない。このように、荒仕上もしくは中仕上から直接最終仕上に移すことができない点は他の研磨法とは異なる。フロート・ポリシングの前工程としては、一般に粒径 $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドを水溶性ペーストと混合し、錫もしくは銅ラップ上でのダイヤモンド・ラッピングが採用されており、工作物の前加工面の粗さは 0.035

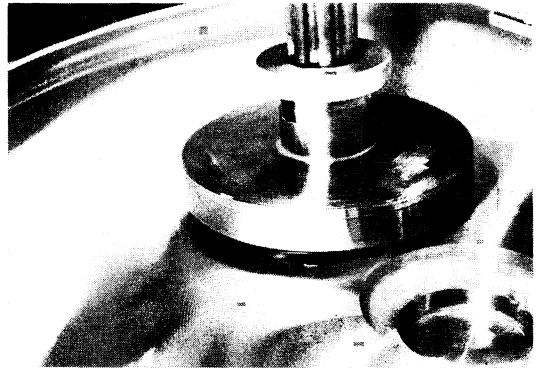


図 4 直径 180 mm の工作物ホルダに直径 76 mm, 厚さ 10 mm の BK-7 を 3 個貼り、主軸回転数 80 rpm でフロート・ポリシングしている状態

$\mu\text{m Rz}$ 程度である⁴⁾。

錫ラップは、金属であるためピッチや合成樹脂に比べ剛性が高く、加工中の研磨圧力が高いため、工作物とラップ間の厚さ数 μm の研磨液膜の剛性も高い。研磨剤として超微粒子を使い、錫の再結晶温度が常温にあり、工作物が錫と直接接しないため、研磨中の錫ラップの摩耗はきわめて少ない。したがって、ラップの平面度管理は他の研磨法に比べ格段に簡単である。また動圧流体軸受状態の平滑化作用のため工作物表面は、錫ラップ各部の平面度を集積したものが転写されることにより、錫ラップより平面度が向上する。この場合、工作物の滑らかで安定した回転が肝要である。

加工環境としては、空調したクリーンルーム内に図 1 のように研磨装置を設置し、装置上のスーパークリーンユニットで研磨作業下では $0.3\mu\text{m}$ 以上の塵埃をクラス 100 以下にし、加工液は純水もしくはイオン交換後 $0.2\mu\text{m}$ のフィルタを通した水を使用する。研磨剤はたとえば公称径 70Å の SiO_2 のような超微粒子を使用する⁴⁾が、図 4 の研磨状態では明らかなように、加工槽内に混入した数 μm 程度の巨大粒子は遠心力により加工槽壁に附着し、研磨に作用しない。

小物部品に対しては、図 1 のような装置以外に、精密旋盤もしくはダイヤモンド旋盤上で錫ラップをダイヤモンドもしくは超硬工具で切削後、別の研磨機に取り付けて研磨する方式が採用されている⁴⁾。

3. 材料除去機構

理想結晶を考える場合、結晶を構成する原子の結合エネルギーは一定である。しかし、この場合でも表面は内

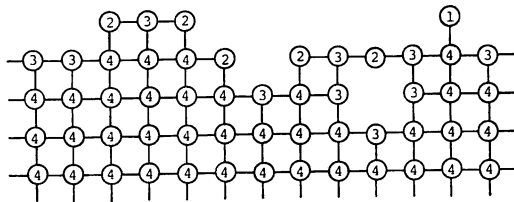


図5 結晶材料の表面原子の結合状態の模型

部とは異なった結合状態にある。実際の結晶の場合、図5のように表面付近には多くの格子欠陥が存在し、表面原子を母材より取り去るに要するエネルギーは母材の原子の結合を破るに要するエネルギーより小さい。また、極表面層における格子欠陥は一様に分布しているとは限らず、そのため結晶表面の原子を除去するに要するエネルギーはある分布をなすと考えられる。

硬い物質と軟らかい物質をこすり合わせた場合、マクロには前者が後者を引っかき、痕を付ける。この痕は軟らかい物質の母材が塑性変形もしくは破壊したために生じたもので、硬い物質のほうは痕が付かず、変形・破壊していない。この変形・破壊現象を利用したものが従来のラッピングやポリシングである。しかし、ミクロに見れば、両物質をこすり合わせると図6のように表面の両物質の結合エネルギー分布が重なるところができ、マクロには強い(すなわち母材強度が高い)物質表面の原子がマクロには弱いと考えられる物質表面原子の衝突により取り去られる可能性が生じる。実際にサファイア単結晶と純鉄もしくはシリコン単結晶の平面同士を軽くこすり合わせると、純鉄もしくはシリコンはサファイア表面に付着するが、硬度が格段に高いサファイアも相手材料の表面に数原子層付着することがIMAおよびAESで確かめられた⁵⁾。

このように極表面は母材とは異なる性質を有する。したがって、この極表面の性質をうまく利用すれば、軟質粒子で硬質の材料を加工することが可能である。この場

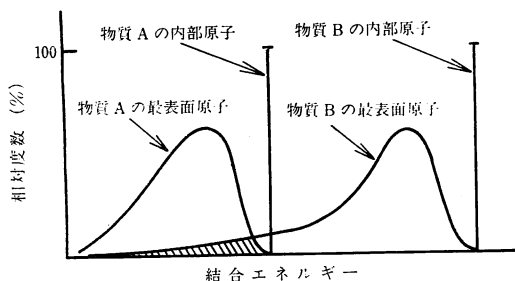


図6 内部と表面原子の結合エネルギー分布

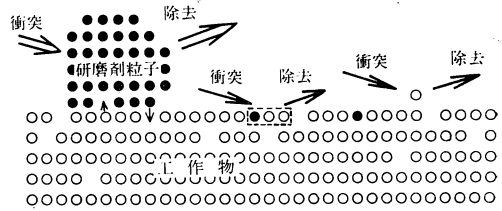


図7 フロート・ポリシングにおける工作物の最表面原子の除去過程

合、母材同士の強度が問題となるような強加工であっても、軟質粒子の母材が弱いため、粒子のほうで母材で塑性変形もしくは破壊し、工作物の母材に塑性変形を与えることなく、最表面の原子のみを確率的に取り去る。したがって、工作物の母材の転位に無関係な加工が可能であり、加工単位は極表面もしくは最表面の原子のみを対象とするため原子オーダーとなる。

図7に示すように、工作物最表面原子が研磨剤粒子に拡散する加工機構や研磨剤粒子の最表面原子が工作物表面に拡散し、工作物最表面原子の結合エネルギーを低下させ、次の粒子の衝突によりその部分を取り去るという機構も同時に生じていると考えられる。これらのことより、このような研磨法の加工能率は、研磨剤粒子の工作物表面への衝突頻度、衝突速度、工作物と研磨剤の表面原子の結合エネルギー分布、研磨剤原子の工作物表面への拡散の容易度、不純物原子が侵入した場合の工作物最表面原子の結合エネルギーの低下割合などにより変化する⁶⁾。以上のような材料除去機構であれば、どのように強い材料であっても加工能率の差はあれ、研磨剤としてどのような物質を使っても塑性変形なしに研磨できることになる。実際さきわめて軟質なグラファイトや水に溶解するLiFでサファイアを研磨することが可能である⁴⁾。加工能率を上げようとする場合には、メカノケミカルな反応が推定される軟らかい物質を研磨剤として使用すればよい⁷⁾。

以上軟質粒子で硬い物質を研磨する場合について述べたが、逆に硬質粒子で軟質材料を研磨する場合を考える。この場合、粒子径が大きければ、従来法のラッピングやポリシングと同様になり、加工能率が高いが、工作物母材の変形・破壊を伴い材料の変質は避けられない。しかし、この場合でも硬質粒子の直径を極端に小さくし、これが工作物表面と衝突したとき、工作物に塑性変形を与えないように加工条件を設定すれば、最表面原子の除去のみで加工が進行し、転位を伴わない加工が実現できる。この場合の粒子として、たとえば公称径70Åの

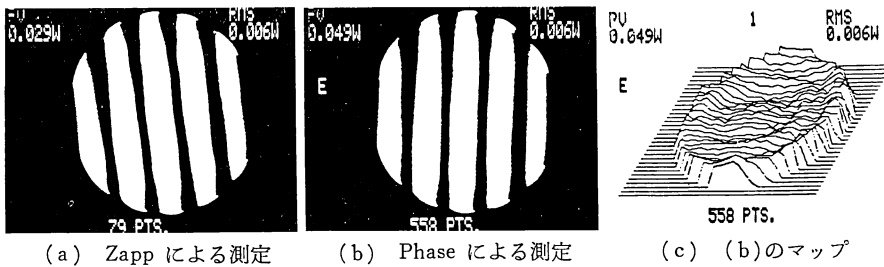


図 8 直径 100 mm の BK-7 ガラスの平面度

SiO₂ 超微粒子などを使えば、これより軟質な Mn-Zn フェライトや LiNbO₃ などの単結晶材料を転位の導入、増殖なしに研磨できる。この場合の技術的要点は、超微粒子を使うことにあり、粒径の大きい粒子の混入を避けねばならない。

4. 加工面の品質

種々の材料にフロート・ポリシングを施して得られる表面の各種特性について以下に述べる。

4.1 形状

貼付に伴う応力および熱応力の影響を低減させるため、直径 100 mm の工作物ホルダに直径 100 mm、厚さ 30 mm の BK-7 ガラスを両面粘着テープで貼り付け、研磨室温、研磨液温および静圧油温を制御して図 1 の装置で約 1 時間研磨した。前加工面はピッチと酸化セリウムとを使う従来法の光学研磨で、平面度は $\lambda=0.63 \mu\text{m}$ の凹面である。フロート・ポリシングした工作物を Zygo 社の干渉システム Mark III 上に置き、恒温恒湿の測定室内に 24 時間放置し、平面度を測定した結果が図 8 である。Zapp による P-V 平面度は $0.029 \lambda = \lambda/34 = 0.018 \mu\text{m}$ 、Phase による P-V 平面度は $0.049 \lambda = \lambda/20 = 0.03 \mu\text{m}$ と測定され、rms 平面度はいずれも $0.006 \lambda = \lambda/127 = 0.0038 \mu\text{m}$ となっている⁹⁾。合成石英、Cer-Vit、Zerodur 等においても直径 100 mm に対し $\lambda/20$ 以上の平面度が得られる⁹⁾。これらの工作物の平面度は、ダイヤモンド切削した錫ラップの平面度 $1 \mu\text{m}/\phi 460 \text{ mm}$ より向上している。ラップの切削と工作物の研磨とを別々の装置で行なう方法においても、7 mm 角のサファイア単結晶を $\lambda/20 = 0.03 \mu\text{m}$ の平面度に仕上げている⁹⁾。

図 9 は、Mn-Zn フェライト単結晶を各種濃度の研磨液で研磨し、工作物端面のだれ(丸味半径)を Rank Taylor Hobson 社の触針式表面形状測定器 Talysurf で測定した結果である¹⁰⁾。従来法においては、工作物の端面はだれる傾向にあり、これを防止するためやといを

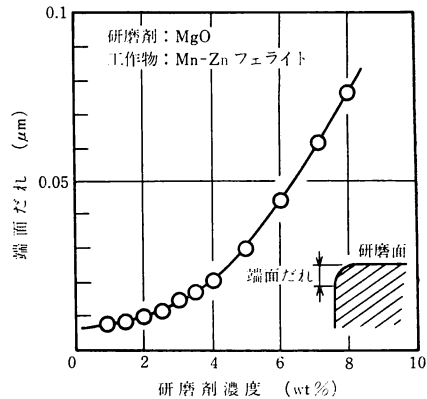


図 9 Mn-Zn フェライト単結晶研磨における端面だれ

使っている。フロート・ポリシングにおいては、やといなしに端面を $0.01 \mu\text{m}$ 以下の丸味半径にすることができる。

4.2 表面粗さ

反射率、光の散乱、レーザー損傷、材料の強度等に影響を与える表面粗さは、工業的に加工面の滑らかさを示す重要な指標として使われている。機械工業においては触針式の粗さ計が使われ、特殊な光学分野では非接触の光学的方法が使われている。

直径 38 mm の合成石英研磨面の表面粗さを、先端半径 $0.1 \mu\text{m} \times$ 幅 $2 \mu\text{m}$ の触針をもつ Rank Taylor Hobson 社の Talystep (縦倍率 200 万倍) で測定した結果は、測定器の雑音レベルと変わらず、表面粗さは $10 \text{ \AA} R_z$ 以下といえる。各種単結晶および非晶質なガラスにおいては $10 \text{ \AA} R_z$ 以下^{4,5,8)}、多結晶材料では特殊な工夫をして $20 \text{ \AA} R_z$ が得られる^{11,12)}。

上記石英試料を米国の Michelson 研究所で測定した結果が図 10 であり、測定器の雑音レベル $1.1 \text{ \AA} \text{ rms}$ に対し、表面粗さは測定長 $600 \mu\text{m}$ で $2.0 \text{ \AA} \text{ rms}$ であることを示している。この測定は、Talystep に先端半径 $1 \mu\text{m}$ の触針を付け、Talystep の出力を計算機処理したもの

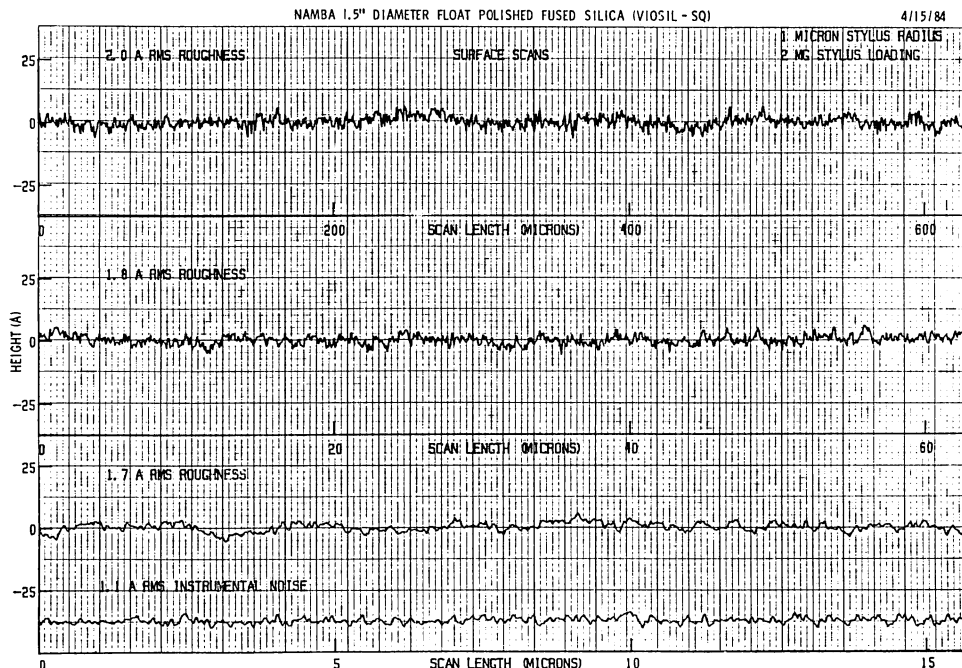


図10 合成石英研磨面の触針法による表面粗さ

である¹³⁾。

図11は、Wyko Optical社のDigital Optical Profilometerで直径100mm、厚さ30mmのBK-7ガラス研磨面の表面粗さを測定したもので、表面粗さは 2.7 \AA rms, $P-V$ 値 16 \AA (測定長 $991 \mu\text{m}$)を示している。同一試料に波長 8.3 \AA のX線を斜め入射し、全反射してくる散乱X線の強度分布より表面粗さを求める¹⁴⁾と $2.6 \pm 0.3 \text{ \AA}$ rmsが得られた¹⁵⁾。上記合成石英試料を感度 1 \AA といわれているLLNLのOptical Heterodyne Profilometer¹⁶⁾で測定した結果、 2.1 \AA rms, $P-V$ 値 12 \AA が得られた¹⁷⁾。本質的に複合材料であるゼロ熱膨張係数ガラスセラミックスであるCer-VitおよびZerodurにおいても、Digital Optical Profilometerで 2.3 \AA rms, $P-V$ 値 16 \AA (測定長 $1032 \mu\text{m}$)が得られた⁹⁾。

4.3 結晶性

結晶の有する機能のうち、大部分は結晶構造に依存しており、これが乱れると機能が低下する。したがって、単結晶の加工においては表面の結晶性を乱さないことが最も重要である。図12は、サファイア単結晶($\bar{1}012$)面に各種研磨を施した試料を電子顕微鏡内に入れ、 100 kV の加速電圧で反射電子回折像を撮ったものである。従来法(a), (b)においては表面の結晶性が失われているが、フロート・ポリシング面(d), (e)においては(c)の化学研磨面と同様な明瞭な菊池線が得られてお

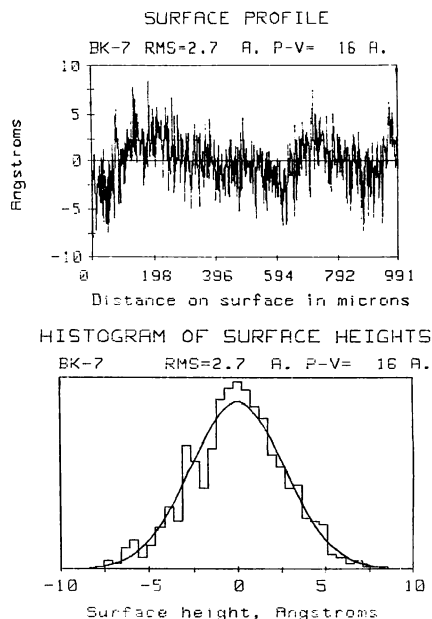


図11 BK-7研磨面の光学的方法による表面粗さ

り、良好な結晶性を示す⁴⁾。Mn-Znフェライト単結晶においても同様な結果が得られた⁵⁾。

反射電子回折は、試料表面上に結晶性の完全な部分と不完全な部分が混在する場合、完全結晶部の情報のみで回折像を形成する。これに対し、エッチングは適切なエ

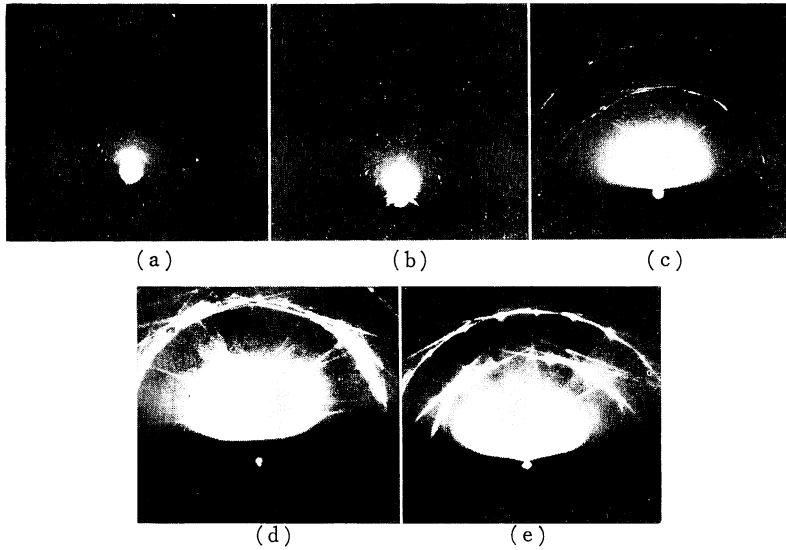


図 12 各種研磨を施したサファイア単結晶の反射電子回折像

- (a) 8 μm SiC によるラッピング面, (b) 3 μm ダイヤモンドによるラッピング面, (c) 化学研磨面,
- (d) 0.02 μm SiO₂ によるフロート・ポリシング面, (e) CeO₂ によるフロート・ポリシング面.

ツチャントと条件を選べば、きわめて高感度な表面欠陥の検出ができる。図 13 は、フロート・ポリシングを施したサファイア単結晶 ($\bar{1}012$) 面を KOH でエッチングして¹⁸⁾、エッチピット像を見たものであるが、表面には材料に内在する転位ピットのみで、加工によるピットは生じていない。これらより、フロート・ポリシングは単結晶に対し塑性変形を与えない加工法であるといえる。

4.4 磁気特性

材料の磁気特性は、構造敏感だけでなく応力にも敏感である¹⁹⁾。したがって、加工により工作物表面に応力が残ると、磁気特性は変化する。図 14 は、外径 8 mm, 内径 4 mm, 厚さ 0.2 mm の Mn-Zn フェライト多結晶 μ リングの両平面に各種加工を施して、コイルを巻いて、初透磁率-温度特性を調べたものである。フロート・

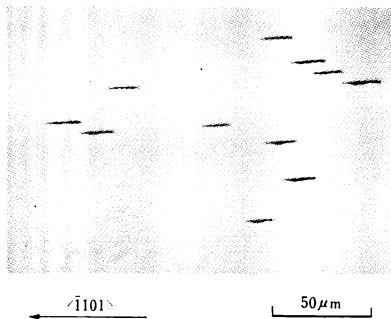


図 13 サファイア単結晶研磨面のエッチピット像

ポリシング面はエッチング面と同様な磁気特性を示しており、残留応力がない証拠である。Cr₂O₃ による研磨面は表面粗さ 70 Å Rz と滑らかな面である⁵⁾が、表面下 0.5 μm 程度まで加工による圧縮の残留応力があり、常温での初透磁率は母材のもの6割程度にまで低下している²⁰⁾。

4.5 光学的特性

SUS 304 ステンレス鋼に各種平面研磨を施して鏡面反射率の波長および表面粗さ依存性を調べ、図 15 の結果を得た¹²⁾。鏡面反射率は、可視光では材料の塑性変形層には敏感でなく、表面粗さと波長の関数になっている。純金属においては、研磨面の酸化層厚さにも依存する²¹⁾。結晶面により研磨速度の異方性があるため、多結晶材料のフロート・ポリシングでは結晶粒界に段差が生じ、表面粗さが悪化しやすい。可視域の金属鏡として表

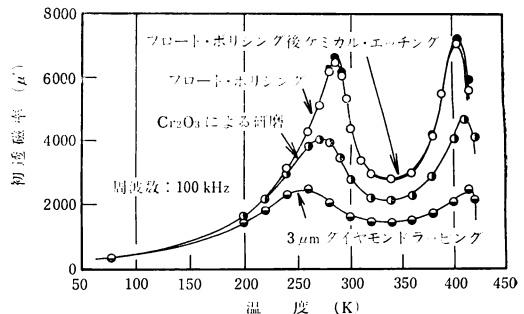


図 14 各種加工を施した Mn-Zn フェライト多結晶の初透磁率-温度特性

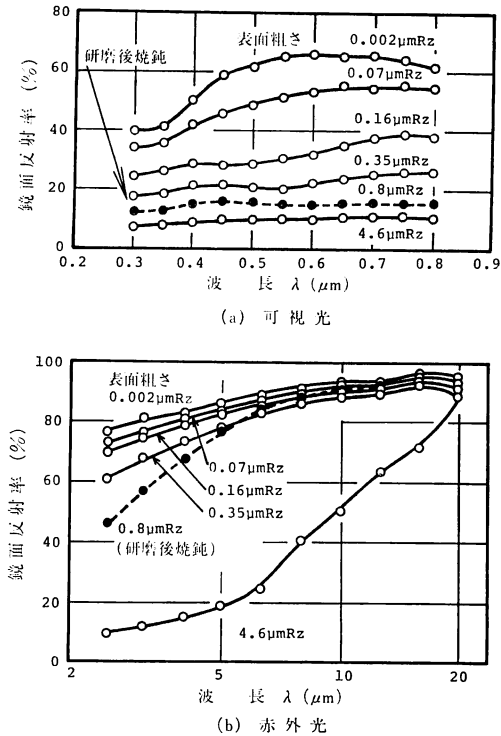


図 15 SUS 304 ステンレス鋼の鏡面反射率に及ぼす波長および表面粗さの影響

面粗さを小さくして鏡面反射率を上げるため、前加工による加工変質層内研磨や、非晶質材料を被覆し、これを研磨する方法を提案している¹²⁾。

赤外域では、鏡面反射率は波長および表面粗さだけでなく、加工変質層の有無により変化する。波長 10.6 μm に対し無視できる表面粗さと考えられる表面粗さ 0.002 ~ 0.1 μm Rz の範囲においても、鏡面反射率は表面粗さの減少とともに増加する。SUS 304 ステンレス鋼を焼鈍後、3 μm のダイヤモンドでラッピングし、フロート・ポリシングにより前加工による加工変質層を除去することにより、赤外光の反射率を向上させることができた²²⁾。

レーザー用光学部品においては、部品表面での散乱が問題になることが多い。これに対しては、日本光学工業のレーザー散乱計²³⁾、Zygo 社の Automated Scatterometer²⁴⁾ による測定により、フロート・ポリシング面が最も散乱の少ない面であることが明らかにされつつある。

4.6 化学的特性

図 7 のような材料除去機構を考えれば、転位のような線欠陥の導入、増殖はないにしても、研磨剤粒子を構成する元素が研磨中工作物の最表面層に侵入し、点欠陥を

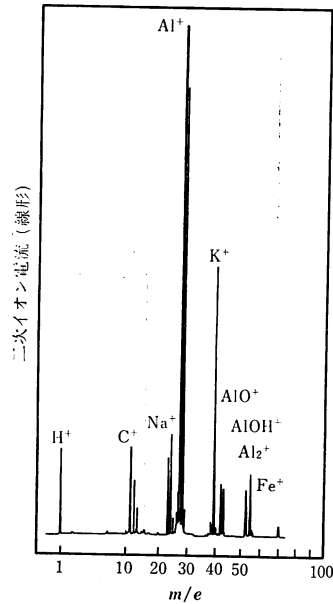


図 16 Fe₂O₃ で研磨したサファイア単結晶の IMA による表面元素分析

形成する。異原子の侵入により、そのまわりの結合が弱くなり、次の粒子の衝突により除去されるにしても、常にどこかにこのような状態が存在することになる。この現象を明らかにするため、サファイア単結晶を Fe₂O₃ で研磨し、表面粗さ 10 Å Rz 以下の鏡面を日立製作所の IMA で表面元素分析した結果が図 16 である⁴⁾。C, Na, K 等のコンタミネーションとともに研磨面に Fe が存在していることがわかる。この侵入した異元素 Fe の深さ方向の濃度分布を調べたものが図 17 で、侵入元素

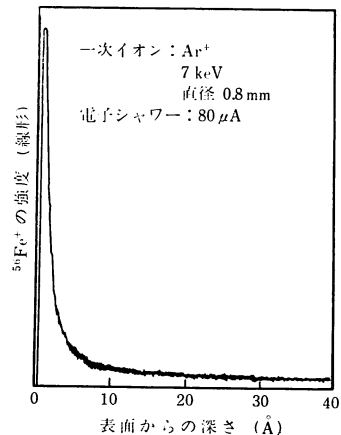


図 17 Fe₂O₃ で研磨したサファイア単結晶の IMA による Fe⁺ の深さ分析

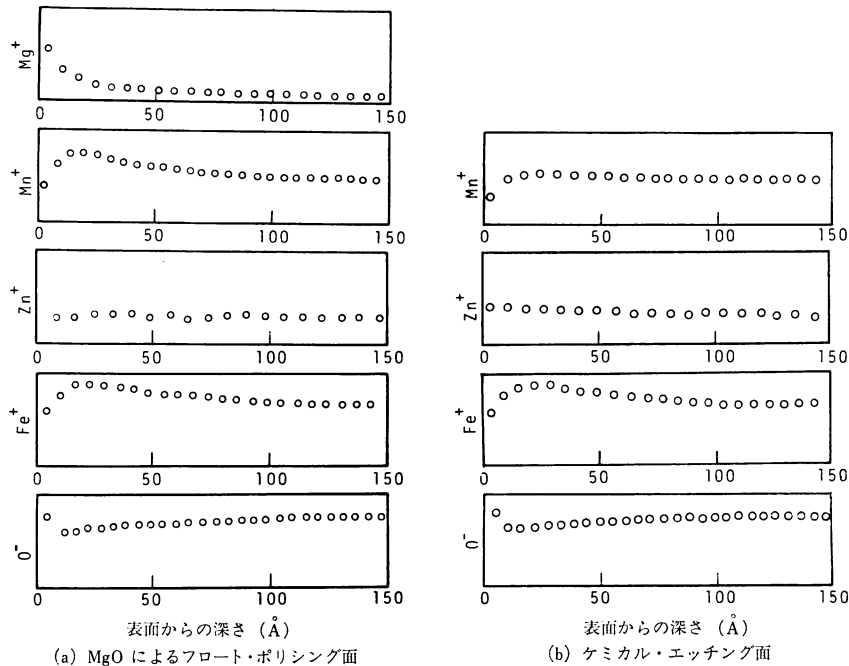


図 18 Mn-Zn フェライト単結晶加工面における各種元素の IMA による深さ方向の濃度分布

Fe はサファイア表面の第 1 原子層に存在する⁴⁾。研磨剤の種類を変え、同様な実験を行なったが、すべての実験において、研磨剤の構成元素が研磨面下 10 Å 以内に存在し、これらがたんなる物理吸着でないことが判明している。

この微量の点欠陥は加工の本質上除去しえない。しかし、この程度の点欠陥は実用上無視できる場合が多い。侵入する元素の種類は使用する研磨剤に依存するので、研磨剤の材質および純度を適当に選択すれば、この異元素の影響をなくすことが可能である。たとえば、SOS 用のサファイア基板を SiO₂ で研磨したり、光導波路用 ZnO をエピタキシャル成長させるためのサファイア基板を ZnO で研磨する方法である。高出力レーザー用の合成石英に対しては、研磨中のコンタミネーションを極力避ける意味から、合成石英製造時と同じ SiCl₄ ガスから昇華させた高純度・超微粒子の SiO₂ を研磨剤として使用する⁸⁾。

複数の元素より成る材料を加工した場合、表面層における化学成分比が変化することが知られている。図 18 は、Mn-Zn フェライト単結晶をフロート・ポリシングとケミカル・エッチングした面について、各種元素の深さ方向の濃度分布を IMA で測定した結果である。ケミカル・エッチングは無歪な加工と考えられているが、表面の元素濃度は内部とは異なっている。MgO で研磨し

ため最表面に Mg 元素があるが、フロート・ポリシング面は、フェライトの構成元素である Mn, Zn, Fe, O の濃度分布がケミカル・エッチングと類似している。したがって、フロート・ポリシングはケミカル・エッチングと同様な無歪加工法といえる。

5. 応 用

本技術は、電子材料の無歪・超精密加工を目指して開発したもので、現在ギャップ長 0.3 μm の高記録密度 VTR 用磁気ヘッドのギャップ対向面の加工に用いられ²⁰⁾、その生産高は月産数百万個といわれている。記録波長 1 μm を実現するにはギャップ対向面は加工変質層がなく、平面度がよく、端面だれが少なく、nm オーダーの表面粗さを必要とする。ギャップ対向面の加工の場合、Mn-Zn フェライト単結晶単体を研磨することもあるが、多くの場合 Mn-Zn フェライト単結晶とトラック補強用ガラスの複合材料を同一面に研磨する必要がある。一般には無歪加工を施すとガラス部分の研磨速度が高く、複合材料界面で無視できない程度の段差が生じる。研磨剤を適当に選択することによって、フロート・ポリシングで均一な研磨が可能となる^{5,10)}。

そのほかコンピュータ用磁気ヘッドのギャップ対向面、PCM 薄膜ヘッド基板の加工等に実用化されている。これらの場合は多結晶フェライトを無歪で均一に研磨す

の必要があり、適切な研磨剤の選択⁵⁾ および化学的研磨法との複合加工法¹¹⁾などにより結晶粒境界差を阻止して多結晶材料であっても表面粗さ 20 Å Rz が得られる。コンピュータ用磁気ヘッドの摺動面の平面および曲面加工にも使用できる。

光学部品に対しては、フロート・ポリシングにより表面粗さ、加工変質層、コンタミネーションを最小にすることができ、レーザー損傷の閾値を高める可能性があることより高出力レーザー用光学部品の加工⁸⁾、表面粗さを最小にしてレーザーの散乱を防ぐため、リング・レーザー・ジャイロ用光学部品⁹⁾ およびエキシマレーザー用光学部品の加工、表面粗さ・加工変質層・端面だれが小さいことより LiNbO₃ の加工などが研究開発中である。高精度な平面形状が容易に得られることにより平面原器や精密移動装置の案内面の量産化なども期待できる。

形状精度に関する仕様が市販品に比べ1桁以上良好なものを必要とする Si, GaAs 等の特殊な半導体基板にも応用が計画されている。

6. おわりに

フロート・ポリシングは電子材料・光学材料の平面研磨法として発達し、高性能磁気ヘッドの確立した研磨技術となり、特殊な光学分野にも普及しつつある。最近光学分野より球面および非球面加工への応用の要請が強くなっている。これは CNC ダイヤモンド立旋盤形式の研磨装置を開発することにより、近い将来可能になると期待され、フロート・ポリシングが平面だけでなく、軸対称の超精密曲面加工に使われる可能性が出てくる。

文 献

- 1) N. J. Brown: private communication.
- 2) ニューセラミックス懇話会編: セラミックスの超精密加工 (日刊工業新聞社, 東京, 1983).
- 3) 津和秀夫, 難波義治, 和田龍児: 超精密平面研磨盤の開発. 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1981) p. 307.
- 4) Y. Namba and H. Tsuwa: Ultra-fine finishing of sapphire single crystal. Ann. CIRP, **26/1** (1977) 325.
- 5) Y. Namba and H. Tsuwa: Mechanism and some applications of ultra-fine finishing. Ann. CIRP, **27/1** (1978) 511.
- 6) Y. Namba: Mechanism of float polishing. *Technical Digest of Topical Meeting on the Science of Polishing*, Monterey (1984) p. TuB-A2-1.
- 7) N. Yasunaga, A. Obara and O. Imanaka: Mechanochemical polishing of single crystals with soft powders. *Proc. of Int. Conf. on Prod. Eng.*, Tokyo (1974) p. 32.
- 8) Y. Namba: Float polishing and defects of fused silica. *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1982*, ed. H. E. Bennett, A. H. Guenther, D. Milam and B. E. Newnam, NBS Special Publication, **669** (1984) p. 138.
- 9) 難波義治, 井川直哉, 柴野由紀夫: 零熱膨張係数ガラスセラミックスの研磨. 昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1984) p. 49.
- 10) Y. Namba and T. Yonezawa: U. S. Patent No. 4358295 (1982).
- 11) Y. Namba and H. Tsuwa: A chemo-mechanical ultrafine finishing of polycrystalline materials. Ann. CIRP, **28/1** (1979) 425.
- 12) Y. Namba and H. Tsuwa: Surface properties of polished stainless steel. Ann. CIRP, **29/1** (1980) 409.
- 13) J. M. Bennett and J. H. Dancy: Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces. Appl. Opt., **20** (1981) 1785.
- 14) P. A. J. de Korte and R. Lainé: Assessment of surface roughness by X-ray scattering and differential interference contrast microscopy. Appl. Opt., **18** (1979) 236.
- 15) 山下廣順, 難波義治: 未発表.
- 16) G. E. Sommargren: Optical heterodyne profilometry. Appl. Opt., **20** (1981) 610.
- 17) N. J. Brown and Y. Namba: in preparation for publication.
- 18) 難波義治, 津和秀夫, 神垣恵治: サファイア単結晶のエッチング法による塑性変形の観察. 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会論文集 (1981) p. 429.
- 19) Y. Namba and H. Tsuwa: Ultrafine finishing of ceramics and metals by float polishing. *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1980*, ed. H. E. Bennett, A. J. Glass, A. H. Guenther and B. E. Newnam, NBS Special Publication, **620** (1981) p. 171.
- 20) Y. Namba and H. Tsuwa: Float polishing of Mn-Zn ferrites and characteristics of finished surfaces. *Proc. of 4th Int. Conf. on Prod. Eng.*, Tokyo (1980) p. 1017.
- 21) Y. Namba and H. Tsuwa: Ultrafine polishing and evaluation of finished metal surfaces. *Proc. of 10th World Congress on Metal Finishing*, Tokyo (1980) p. 401.
- 22) Y. Namba: Specular spectral reflectance of AISI 304 stainless steel at near normal incidence, Scattering in optical materials. ed. S. Musikan, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **362** (1982) 93.
- 23) 難波義治, 打越純一, 井川直哉: 鏡面評価のためのレーザー散乱計. 昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1984) p. 203.
- 24) R. Schlair and B. Truax: Automated scatterometer for high-quality surfaces. submitted to Applied Optics.