

電気泳動現象を利用した光学ガラスの超精密研磨*

坂谷勝明** 黒部利次*** 戸島 靖† 廣崎憲一**

Ultra Fine Finishing of Optical Glass Using Electrophoresis Phenomenon

Katsuaki SAKAYA, Toshiji KUROBE, Yasushi TOJIMA and Kenichi HIROSAKI

Efficient fine finishing of optical glass has been conducted by using a newly-developed setup which realizes the finishing of the non-contact type polishing with tin wheel floating by the effect of fluid lubrication. The polishing is made by using an electrophoresis phenomenon of fine grain in the water. When the electric power of DC voltage is supplied to the tin wheel rotating in the polishing compound, the grain concentrates on the wheel surface and causes the grinding action in a sense to the workpiece surface. Experimental results show that the stock removal rate increases after first decreasing with the applied potential. It is found, however, that applied current intensity has little effect on the stock removal. The characteristics of polished surface have been examined by AFM. The microtopography of the surface polished with fine abrasive grain indicates that the surface roughness of the order of nanometers is obtained even in the case that high voltage is supplied.

Key words: ultra fine finishing, non-contact type polishing, electrophoresis phenomenon, optical glass, stock removal, AFM, surface roughness

1. 緒 言

最近のOA機器やAV機器の高性能化、高機能化、小型化に伴って、これらに使用される非球面レンズなどの光学部品には安価で高能率な加工法が求められるようになってきた。しかし、一方ではこれらの光学部品に要求される加工精度は一段ときびしくなっており、高精度化と高能率化という相矛盾した加工方法が要求されるようになってきた。

現在、光学レンズなどのぜい性材料の最終仕上げ加工としてEEM、フロートポリシング、メカノケミカルポリシングなどの超精密非接触ポリシ加工が実用化されている¹⁾。これらの加工法は加工単位が非常に小さく、加工変質層を極小化できる利点がある反面、粉末砥粒の加速手段に流体の流れが用いられているため、砥粒の運動の制御は流体を介してのみ行われ、加工能率がきわめて低いという問題がある。したがって、加工能率を向上させるには他の手段で微粒粉末砥粒に力を与えてその運動を制御しなければならない。

そこで、筆者らはこれまでFFF (Field-assisted Fine Finishing) と称し、遊離砥粒を電場や磁場などにより制御して表面研磨を行う加工法^{2)~4)}を提案してきた。この内の一つに砥粒の電気泳動現象⁵⁾利用による表面研磨法がある。

本研究は、同現象を利用した研磨法を光学レンズなどの曲面仕上げ加工に適用することを目的として、円盤状回転工具を用いた研磨装置を試作し、同現象を非接触研磨法に応用している。

本報では、非接触研磨法における液体中での粉末砥粒の運動状態および電気泳動現象を利用した研磨能率の向上方法について述べるとともに、同現象を利用することにより加工能率の向上が可能であることを実験的に証明する。また、その加工面性状をAFMなどを用いて評価した結果についても報告する。

2. 非接触研磨における砥粒の運動

液体中に懸濁させた微粒砥粒を加工物に作用させて加工を行う場合、加工材料の転位欠陥を避けて破壊を起こすには、できるだけ加工物表面に対する砥粒の垂直方向分力が小さくなること、すなわち加工物表面にできるだけ平行に近い角度で砥粒が作用することが望ましい⁶⁾。また、加工能率を大きくするためには、砥粒にできるだけ大きな運動エネルギーを与えて加工物表面に作用させることが必要である。

砥粒の加速手段として流体を利用する場合、加工単位が微小であれば、その流体の流動の状態を考慮に入れなければならない。同じ流路幅で流れる流体は、その速度が大きくなるにつれて流動状態が層流から乱流に移行する。層流では流れの状態は流れ方向に一樣で、しかも流体中の粒子は壁面に垂直な方向へ運動しない。一方、乱流では流れは乱れていて、流体中の粒子の運動は一樣でなくなるため、流れの状態は把握し難くなる。したがって、砥粒を加工物表面にできるだけ平行に近い角度で作用させるためには、流体の流動状態は層流を用いることが望ましい。

被加工面およびポリシヤをわずかな間隔 h だけ離して置かれた平行な2枚の平板と仮定し、図1に示すように、下方の平板の壁面上に平板と平行にX軸、それと垂直方向にY軸をとる。流れは層流でY方向成分 v は無視でき、また、平板は十分大きく、任意の x において速度分布は一樣であると仮定する。下方

* 原稿受付 平成5年8月6日

** 正 会 員 石川県工業試験場(金沢市戸水町ロ-1)

*** 正 会 員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

+ 金沢大学工学部(現,北陸先端科学技術大学院大学;石川県能美郡辰口町旭台15)

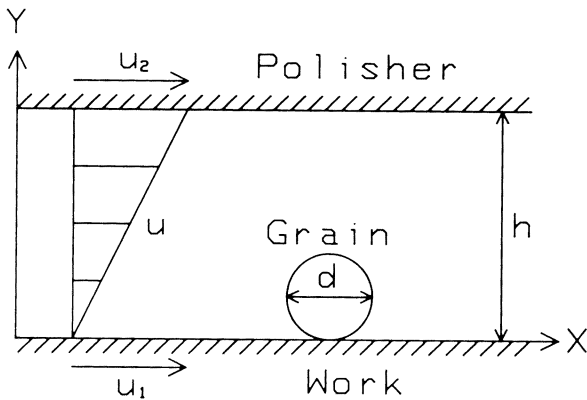


Fig. 1 Grain in the shearing flow

および上方の平板のX方向の速度を u_1 、 u_2 とすると平板間の速度分布 u は

$$u = (u_2 - u_1) \frac{y}{h} \quad (1)$$

となる。

ここで、砥粒径を d とすると、被加工面上の砥粒の速度は

$$u = (u_2 - u_1) \frac{d}{2h} \quad (2)$$

となる。

いま、砥粒径がすき間の1/10すなわち $d/h = 1/10$ とすると、被加工面上の砥粒の相対速度はポリシャ表面の速度の1/20となり、砥粒はポリシャ表面の速度に比べ非常にゆっくり被加工面上を転がるように移動すると推測される。したがって、このような状態での加工はきわめて効率が悪いことになる。

3. 電気泳動現象利用による加工の原理

非接触研磨法において加工能率を向上させるためには、被加工面に作用する砥粒の速度を大きくしなければならない。そのため、流体の流れ以外の手段で砥粒に力を与えて制御する必要がある。

そこで液体中の砥粒のもつ電氣的性質を利用して、砥粒の運動を制御することを考える。液体中の砥粒は何らかの形で帯電し、

$$Q = 4\pi\epsilon\zeta a \quad (\kappa a \ll 1) \quad (3)$$

$$Q = 6\pi\epsilon\zeta a \quad (\kappa a \gg 1) \quad (4)$$

なる電荷をもつことがわかっている。ここで、 a は砥粒を球と仮定したときの半径、 ϵ は溶媒の誘電率、 ζ はゼータ電位、 $1/\kappa$ は電気二重層厚さである。したがって、砥粒を懸濁した液体に電場または磁場を与えれば、その砥粒に力を与えることができ、電場または磁場の大きさを変えることにより、その運動を制御できると考えられる。砥粒運動を電氣的に制御して加工能率を向上させるには、加工面に砥粒を引き付ける方式とポリシャに集中させる方式の2通りの方法が考えられる²⁾。本研究では、後者のポリシャに砥粒を集中する方式により加工能率の向上を図った。

一般に、水中の砥粒は負に帯電しているものが多い。そこで、図2に示すようにポリシャ面が正、加工面または他の電極が負の電荷をもつように、距離 h をおいて直流電圧 V を印加すると、その間には $E = V/h$ なる電場が生じる。これによって、砥粒はポリシャに引っぱられ、ポリシャ表面上に集中する。その結

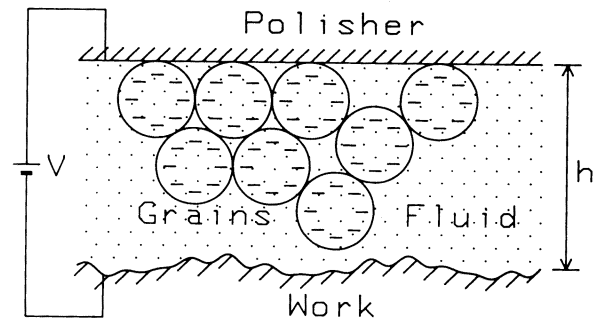


Fig. 2 Schematic diagram of polishing method

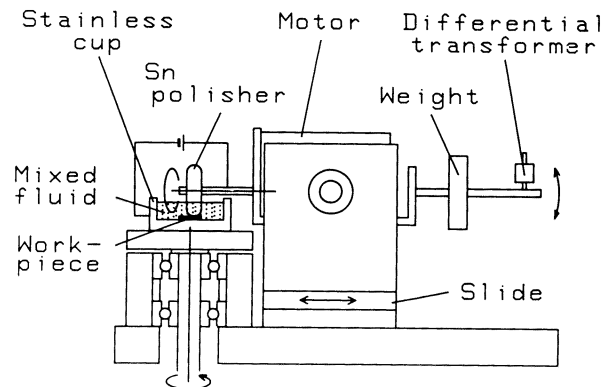


Fig. 3 Polishing setup with Sn wheel polisher

果、砥粒とポリシャ面との摩擦力が生じ、砥粒はポリシャ面とともに運動して、加工面に対して一種の研削作用を行う。したがって、加工面とポリシャ面との相対速度を u とすると、加工面と砥粒の相対速度はほぼ u に等しくなる。この場合、砥粒とポリシャ面および砥粒同士は完全に結合しているのではなく、静電気力のはたきで結合していると考えられるので、砥粒が加工面と接触して、それから力を受けると、その結合は簡単に解ける。したがって、砥粒は加工面に対して過度の力を与えることなく加工を行うことが可能である。砥粒が加工面に与えるエネルギーは、この結合力に比例すると仮定すると、加工量は電場の強さすなわち電圧 V に比例する。

4. 研磨実験方法

電気泳動現象を利用した研磨法をレンズなどの曲面仕上げ加工に適用することを目的として、電気泳動現象により砥粒を円盤状回転工具の表面に集中する方式を用いて、光学ガラスの研磨加工実験を行った。

実験に使用した研磨装置の概略図を図3に示す。装置は水平回転軸および垂直回転軸からなり、水平回転軸の先端にはSn製円盤状ポリシャ（最外径65mm、厚さ10mm、外周部の軸方向曲率半径5mm）が取り付けられている。垂直回転軸の上部には加工液を満すためのステンレス鋼製研磨槽が取り付けられ、その底部中心に加工試料が固定される。加工試料は円筒形で、その端面がポリシャの外周部に接して研磨される。水平回転軸は紙面に垂直な軸の回りに自由に回転できるようになっており、ポリシャの回転による動圧でポリシャ加工面間にクリアランスが生じる。クリアランスの検出、調整はポリシャの反対側にある差動トランスおよびバランス調整おもりにより行い、数 μm

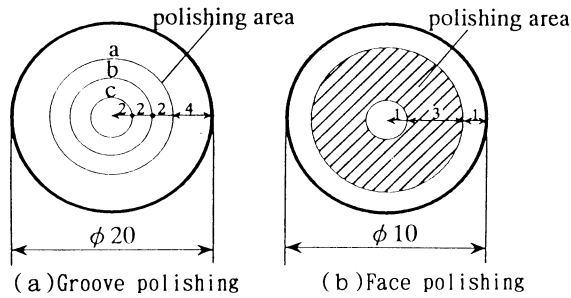


Fig. 4 Polishing area on the workpiece

Table 1 Polishing condition

Work	BK7 φ20mm×5mm φ10mm×3.5mm
Grain	CeO ₂ (Dia. : 1μm) SiO ₂ (Dia. : 0.2μm)
Solvent	Distilled water
Grain concentration	0.1, 0.3, 0.5vol%
Potential	0-120V
Current	0-200mA
Revolution number of vertical spindle	18.2rpm
Revolution number of horizontal spindle	24rpm

になるようにした。水平回転軸全体は精密スライド上に固定されており、水平方向への直線移動が可能になっている。直流電圧は、ポリシャが正、研磨槽が負に帯電するように印加した。加工試料は光学ガラスBK7を使用した。

加工は水平回転軸の直線移動を行わない溝加工と、約46μm/minで加工物の外周側から中心方向へ移動させる面加工の2種類で行った。溝加工では図4(a)に示すように、φ20mm×5mmの試料端面に、中心から半径2mm, 4mm, 6mmの位置で1回の実験で3本の溝の加工を行った。また、面加工では図4(b)に示すように、φ10mm×3.5mmの試料端面の中心から半径1~4mmの範囲を研磨した。砥粒は光学ガラス用として一般的に用いられているCeO₂砥粒(粒径1μm)と電気泳動性に優れているSiO₂砥粒(粒径0.2μm)を用いた。溶媒はイオン交換水を使用し、砥粒の混合率は体積比で、砥粒が0.1, 0.3, 0.5%の3通りで実験した。その加工条件を表1に示す。加工量は触針式表面粗さ計(Rank Taylor Hobson社製, 触針先端半径2μm, 荷重1mN)により加工深さを測定して求めた。また、加工面の表面性状についてはAFM(Digital Instruments社製)およびX線光電子分析装置(株式会社島津製作所製)を用いて評価した。

5. 実験結果と考察

5.1 溝加工

溝加工された部分の断面は図5に示すように、ポリシャ形状が転写されたR形状になるので、この溝の深さを測定して加工量とした。図6に、CeO₂砥粒により試料端面の円周上を20分間溝加工したときの電圧と加工量の関係を示す。加工量は3本の溝深さの平均値で表してある。加工量は電圧の増加とともに一旦減少した後増加する傾向がみられ、その度合は砥粒濃度が大

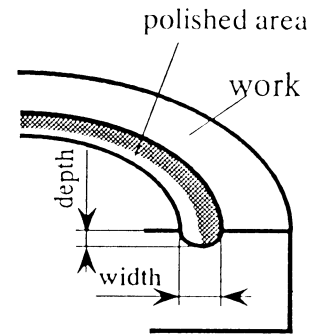


Fig. 5 Section of groove polished work

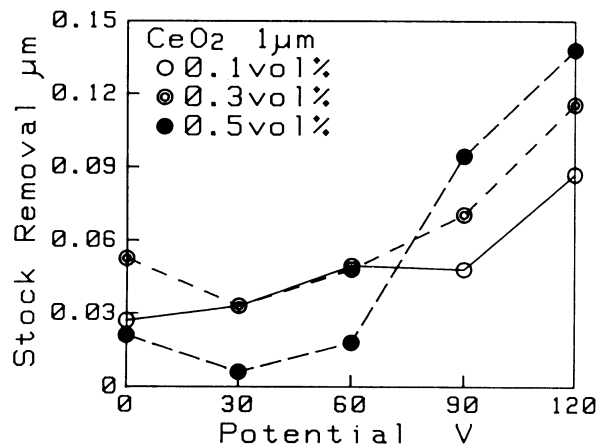


Fig. 6 Influence of potential on stock removal (depth of groove)

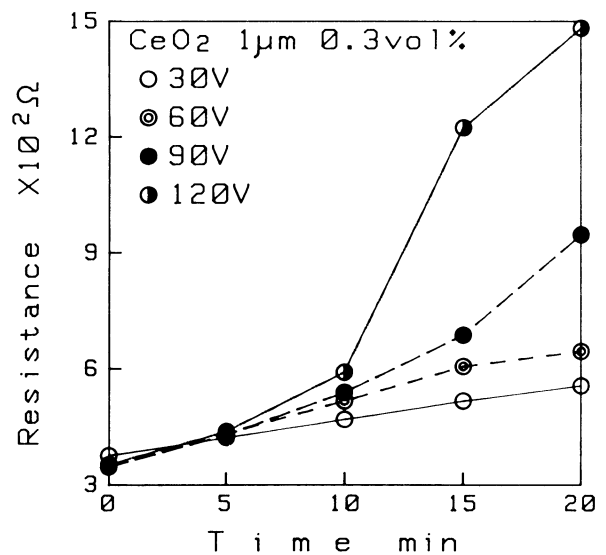


Fig. 7 Relation between resistance and machining time

きいほど著しいことがわかる。これは砥粒濃度の違いにより、砥粒同士の凝集の程度とポリシャ表面への砥粒集中の速度が異なるためと考えられる。図7は加工時間と電気抵抗の関係を示している。水中での砥粒は電離状態にあるため、砥粒が分散することにより水の電気抵抗は低下し、非常に導電性が向上する。加工液中を流れる電流の大きさは、ポリシャ表面上の電極反応

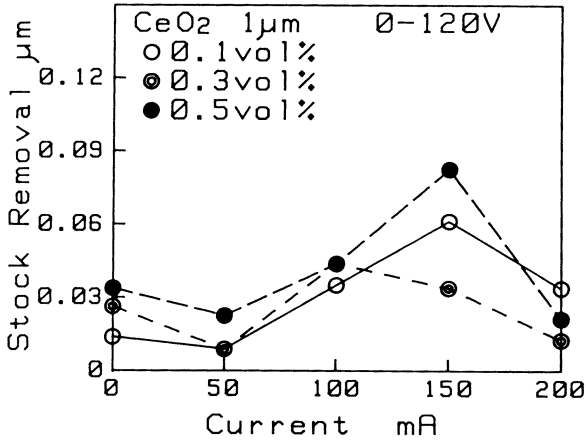


Fig. 8 Influence of current on stock removal (depth of groove)

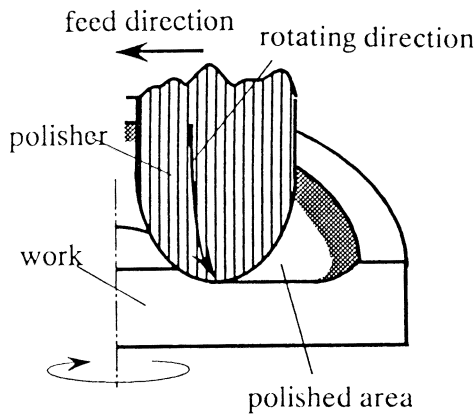


Fig. 9 Section of face polished work

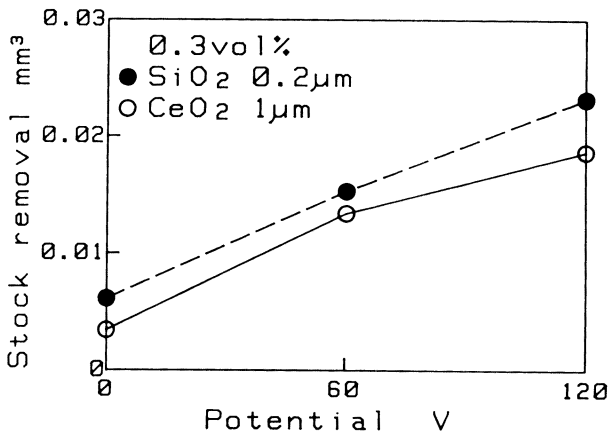
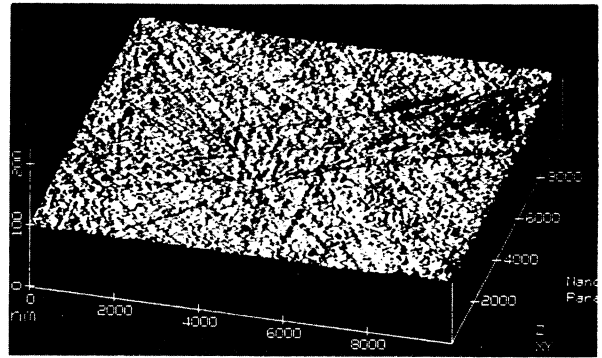
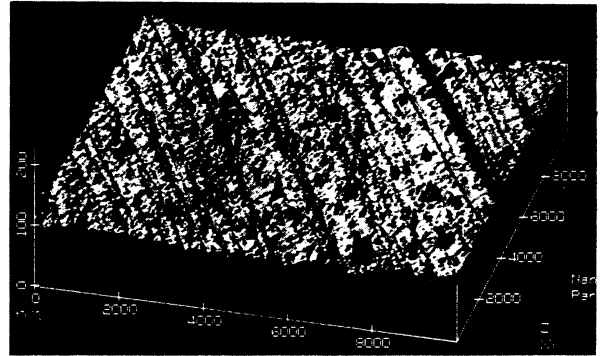


Fig. 10 Influence of potential on stock removal (removed volume)

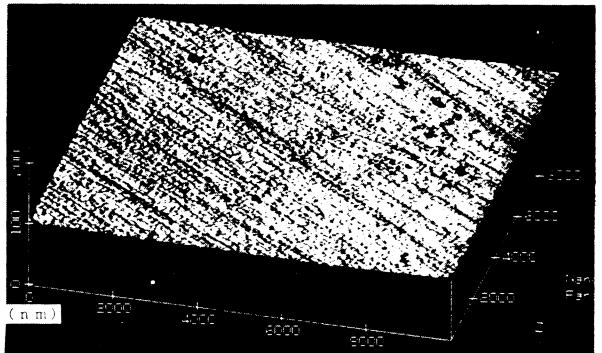
量に依存するため、ポリシャ表面での電極反応に関わる砥粒数が多いときは電気抵抗は小さく、少ないときは大きくなる。加工途中および加工終了後に、ポリシャ表面を肉眼で観察すると、砥粒がポリシャ表面を覆っているのが確認できる。砥粒のポリシャ表面への付着が進行するにつれて電気抵抗が増大することは、池野ら⁷⁾の実験でも確認されている。したがって、砥粒のポリシャ表面への集中は、電圧が大きいほど早く進行すると推察される。図8は、加工中の電圧を0~120Vの間で変化させて電流値を一定にしなが、上と同様の溝加工をCeO₂砥粒により



(a) before polishing



(b) with CeO₂(1 μm)



(c) with SiO₂(0.2 μm)

Fig. 11 Microtopography of polished surface measured by AFM

20分間行ったときの、電流と加工量の関係を示す。この図から、電流の大きさと加工量については明確な相関は認められないことがわかる。これは、電流値の制御を電圧を変化させて行っているため、電圧の大きさが不安定になり、ポリシャ表面上の砥粒の集中度合に差異が生じなかったためと考えられる。

5.2 面加工

面加工した部分の断面は図9に示すようになり、加工面中心に近いほど深くなるため、測定した断面形状を円周方向に積分して除去体積を求めた。図10に、砥粒濃度0.3vol%で、試料端面の中心から半径1~4mmの位置を面加工したときの電圧と加工量(除去体積)の関係を示す。加工量は電圧の増大につれて増加し、砥粒の種類の違いによる差はほとんどないことがわかる。図11に、前加工面とCeO₂砥粒およびSiO₂砥粒を用い、砥粒濃度0.3vol%、印加電圧120Vで面加工した面のAFM像を示す。加工試料の前加工面は5~10nmRmax程度のほとんど方向性のない面であるが、研磨面にはポリシャの回転方向に明瞭な方向性が

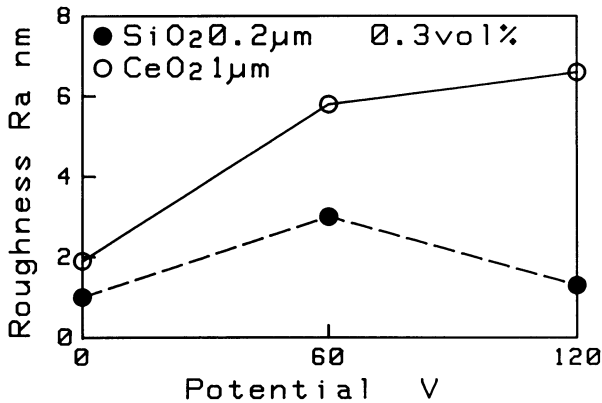


Fig. 12 Relation between surface roughness and potential

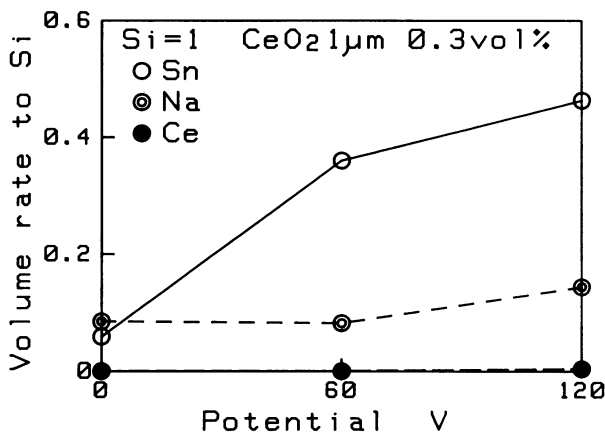


Fig. 13 Volume rate of Na, Sn and Ce to Si on the polished surface

存在していることが観察される。また、CeO₂砥粒による加工では前加工面より表面粗さが悪化しているが、これは砥粒径が大きすぎるためと考えられる。図12は、砥粒濃度0.3vol%で面加工したときの電圧と表面粗さの関係を示す。この図から、SiO₂砥粒を用いた場合には、印加電圧の影響をほとんど受けずに、nmオーダーの表面粗さが得られることがわかる。図13は、CeO₂砥粒（濃度0.3vol%）により面加工した面を、X線光電子分析装置により元素分析した結果を示す。縦軸はSiの検出量に対するSn, Ce, Naの検出量の割合を示し、横軸は加工時の印加電圧を表している。砥粒の主成分であるCeはほとんど検出されないが、ポリシャ材料であるSnの割合は印加電圧の増大とともに増加していることがわかる。この原因は、ポリシャから電解反応によって溶出したSnイオンの付着によるものである。

6. 結 言

非接触研磨法の加工能率向上を目的として、円盤状ポリシャを用いた非接触研磨装置を試作し、砥粒の電気泳動現象を利用して光学ガラスの表面研磨加工実験を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) Sn製円盤状ポリシャが正、研磨槽が負に帯電するように直流電圧を印加した結果、砥粒はポリシャ表面に集中することが確認できた。
- (2) ポリシャー研磨槽間の電気抵抗測定の結果、ポリシャ表面への砥粒の集中は、電圧が高いほど早く進行すると推察される。
- (3) 溝加工による実験では、電圧を印加しない場合と比較して、加工量は電圧の増大とともに一旦減少し、その後増加する傾向にあるが、その度合は砥粒濃度が大きいほど著しいことがわかった。
- (4) SiO₂（粒径0.2μm）を用いた面加工では、電圧を印加することにより除去体積は約4倍に向上し、かつ、nmオーダーの表面粗さが得られることが明らかとなった。
- (5) 電圧を印加することにより、ポリシャ材料の電解溶出物の加工面への付着が発生することが確認された。

参 考 文 献

- 1) 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用，工業調査会，(1988) 103.
- 2) 黒部利次，今中 治，坂谷勝明：電気泳動現象利用による表面研磨 -Field-assisted Fine Finishing(FFF)に関する研究，精密工学会誌，52, 3(1986) 547.
- 3) 黒部利次，高山昌也，中田邦夫，上田修治：電気泳動現象利用による表面研磨(FFF)（第2報） -加工圧付与による窒化けい素の研磨-，精密工学会誌，54, 9 (1988) 1685.
- 4) T. Kurobe, O. Imanaka: Magnetic Field assisted Fine Finishing, Prec. Eng., 6, 3 (1984) 119.
- 5) 北原文雄，渡辺 昌編：界面電気現象-基礎・測定・応用，共立出版，(1972) 11.
- 6) 森 勇蔵，津和秀夫，杉山和久：EEM (elastic emission machining) の基礎研究（第1報） -極微量弾性破壊の概念とその可能性-，精密機械，43, 5(1977) 542.
- 7) 池野順一，谷 泰弘：電気泳動現象を利用した微細砥粒の固定化とその応用（第2報） -超微粒砥石の作成および加工特性について-，1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1989）489.