



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—

黒部利次** 今中治*** 坂谷勝明†

Electric Field-assisted Fine Finishing Using Electrophoresis Phenomenon

Toshiji KUROBE, Osamu IMANAKA and Katsuaki SAKAYA

New finishing method has been developed by using the electrophoresis phenomenon of fine grain suspended in liquid, which yields the electrical double layer at the surface of the grain. When the electric power is supplied to electrode set into the polishing compound, the grain moves and causes the polishing action to the workpiece surface. The developed polishing equipment consists of a rotary vessel containing the polishing agent. The experiments were conducted on silicon wafer and ferrous metal specimen using the distilled water or ethylalcohol mixed with fine abrasive grain (Al_2O_3 , SiO_2) at the 10–2% volume concentration. The experimental results on the silicon wafer which is placed apart from the electrode showed that the stock removal rate increases with increasing the applied potential. Examination of the surface profile of the polished specimen indicated that the surface roughness decreases with increasing the potential. It can be said that the surface finishing characteristics are controllable by varying the current to the electrode.

Key words : fine finishing, electrophoresis phenomenon, stock removal, surface roughness, finishing characteristic control

1. 緒 言

近年、精密機器や情報機器が高性能化するに伴って、それらを構成する機械部品の加工精度が著しく高いものとなってきている。高精度・超精密加工が必要とされ、また複雑形状表面の研磨が望まれる。このような状況の下に、研磨技術も新しい構想に基づく加工法が種々展開されてきている。例えば、EEM加工¹⁾²⁾、イオンビーム加工³⁾⁴⁾、メカノケミカル加工⁵⁾、磁気研磨加工⁶⁾等である。

現今の研磨加工の多様なニーズにこたえるには、新しい発想に基づく新研磨法の開発が従前にも増して必要となってきている。本研究は、電気泳動現象⁷⁾を利用して加工物の表面研磨が行えるかどうかを検討したものである。一般に砥粒を液体中に分散させると、何らかの原因で砥粒の表面には電気二重層が発生して砥

粒は帯電する。この砥粒混合液体に電場をかけると、砥粒は表面の電荷により電場から力を受けて運動する。この現象を電気泳動という。本研究では、砥粒の帯電による運動状態を理論的に解析し、実験装置を製作して研磨加工の可否について検討した。研磨加工の評価は、加工量および表面粗さ等を測定することにより行った。その結果、2,3の興味ある現象が観察されたので報告する。

2. 砥粒の運動の理論的考察

微粉砥粒を液中に懸濁させて表面研磨を行う場合、砥粒は加工物表面にできるだけ平行に近い角度で衝突させて研磨作用を営ませることが表面創成の観点から望ましい¹⁾。したがってその場合、液体の流動状態としては乱流を避けて層流を利用することが必要である。一方、加工能率の向上を図る上からは、微粉砥粒にできるだけ大きな運動エネルギーを与えることも必要である。

流体を利用して微粉砥粒を加速する場合には、上述のように層流を利用することが望ましいが、流路幅が一定であれば流速の増速にはおのずと一定の限度があることになる。そこで以下に電気泳動現象を利用して

* 原稿受付 昭和58年12月15日、昭和56年度精機学会春季大会学術講演会(昭和56年3月28日)にて発表

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 正会員 金沢大学工学部(現、富山職業訓練短期大学校:魚津市川縁1289-1)

† 金沢大学大学院(現、石川県工業試験場:金沢市戸水町1)

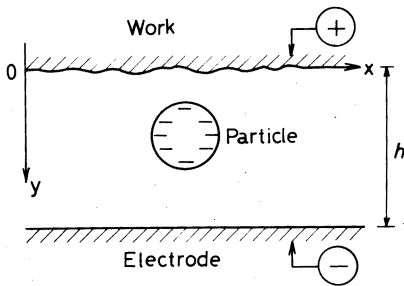


Fig. 1 Schematics of polishing method (type I)

砥粒の運動を制御する方法を検討する。先に記したように、液体中の微粉砥粒は何らかの形で帯電しているため、微粉砥粒を懸濁した液体に電場を与えればその微粉砥粒に力（運動エネルギー）を与えることができる。電場の大きさ（強さ）及び印加方向（極性）を変えることにより砥粒の運動を制御できると考えられる。ここで当然なことではあるが、液体中に懸濁した砥粒には液体の流れ方向に力を受ける。しかし、ここでは式の扱いの簡単化のため流速の効果は考慮の外におき、解析を進めることにする。

液体中に分散している粒子は、

$$\left. \begin{aligned} Q &= 4\pi\epsilon\zeta a & (xa \gg 1) \\ Q &= 6\pi\epsilon\zeta a & (xa \ll 1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

なる電荷をもつことがわかっている。ここで、 ϵ は媒液の誘電率、 ζ は砥粒のゼータ電位、 a は砥粒を球と仮定したときの半径、 $1/x$ は電気二重層厚さである。したがって、一様な電場 E の中に置かれている粒子に作用する静電気力 f_E は、 $f_E = QE$ となる。

流体を利用して表面研磨を行う場合、加工面との間にわずかのすきまを有する対向面が必要となる。したがって、砥粒を電氣的に制御して加工能率の向上を図るには次の2つの方法が考えられる。1つは加工面に砥粒を引き付けて能率向上を図る方法、他の1つは対向面に砥粒を集中させることによって能率向上を図る方法である。

2.1 加工面に砥粒を引き付ける場合

ここでは、加工面と対向面がすきま h を保つてともに水平に置かれているものとする。そして、図1に示すように加工面に平行に x 軸、それと垂直に下方を正として y 軸をとる。いま、砥粒が負に帯電しているものとして、加工面が正、対向面が負に帯電するように直流電圧 V を印加する。その場合、加工面と対向面の間には $E = V/h$ なる電場が生じているので、砥粒には加工面の方向に力が作用する。この力によって砥粒が運動するとき、その運動速度 v_E は、

$$\left. \begin{aligned} v_E &= \frac{2\epsilon\zeta E}{3\mu} & (xa \gg 1) \\ v_E &= \frac{\epsilon\zeta E}{\mu} & (xa \ll 1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ただし、 μ は溶媒の粘性率である。

また、重力によって砥粒が運動するときの速度 v_G は、

$$\begin{aligned} v_G &= \frac{f_G}{6\pi\mu a} \\ &= \frac{2a^2}{9\mu}(\rho_0 - \rho)g \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで、 f_G は重力の作用によって液体中の砥粒に働く力、 ρ_0 は媒液の密度、 ρ は砥粒の密度、 g は重力加速度である。

したがって、式(2)、(3)から、 y 軸方向の砥粒の運動速度 v_y は、

$$\left. \begin{aligned} v_y &= \frac{2}{3\mu} \left\{ \epsilon\zeta E + \frac{a^2}{3}(\rho_0 - \rho)g \right\} & (xa \gg 1) \\ v_y &= \frac{1}{\mu} \left\{ \epsilon\zeta E + \frac{2a^2}{9}(\rho_0 - \rho)g \right\} & (xa \ll 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。

次に、 x 軸方向について考える。いま、砥粒を含む流体が加工面に平行に相対速度 u で流れているとする。砥粒の加工面に対する x 軸方向の速度は、砥粒中心における流体の速度に一致するものとする。砥粒の x 軸方向の速度 v_x は、 $v_x = u$ 。また、 $u = A_1 y$ とおくと、 $v_x = A_1 y$ となる。

加工面に対する砥粒の相対速度 v は、 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ であるから、式(4)から、

$$\left. \begin{aligned} v &= \sqrt{A_1^2 y^2 + \frac{4}{9\mu^2} \left\{ \epsilon\zeta E + \frac{a^2}{3}(\rho_0 - \rho)g \right\}^2} & (xa \gg 1) \\ v &= \sqrt{A_1^2 y^2 + \frac{1}{\mu^2} \left\{ \epsilon\zeta E + \frac{2a^2}{9}(\rho_0 - \rho)g \right\}^2} & (xa \ll 1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。また、砥粒の加工面に対する運動方向は、砥粒の運動方向と加工面のなす角を θ とすると、

$$\theta = \tan^{-1}(v_y/v_x) \quad (6)$$

となる。したがって、砥粒が加工面に接触するときの速度は、式(5)で $y = a$ とおくことによって求めることができる。式(5)および式(6)から、 h が一定であれば電場 E すなわち電圧 V を変えることによって砥粒の運動を制御できると考えられる。

いま、加工層は加工面に砥粒が衝突するときの運動エネルギーに比例するものと仮定すると、砥粒の運動エネルギー K は、

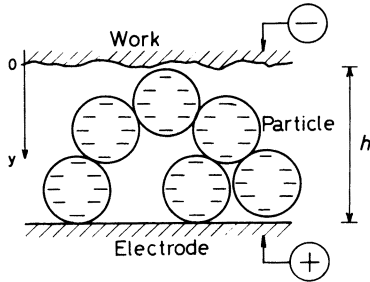


Fig. 2 Schematics of polishing method (Type II)

$$\left. \begin{aligned}
 K &= \frac{2}{3} \pi a^3 \rho \left[A_1^2 a^2 + \frac{4}{9 \mu^2} \left\{ \epsilon \xi E \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{a^2}{3} (\rho_0 - \rho) g \right\}^2 \right] \quad (xa \gg 1) \\
 K &= \frac{2}{3} \pi a^3 \rho \left[A_1^2 a^2 + \frac{1}{\mu^2} \left\{ \epsilon \xi E \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{2a^2}{9} (\rho_0 - \rho) g \right\}^2 \right] \quad (xa \ll 1)
 \end{aligned} \right\} (7)$$

となる。式(7)から、加工量は電場の強さ E 、すなわち電圧 V が大きくなるに従って増大する。また、式(7)から、運動エネルギー K は砥粒の粒径および材質に依存し、かつ、ゼータ電位にも関係することがわかる。

2.2 砥粒が対向面に集中する場合

液体中の砥粒が負に帯電しているものとして、図2に示すように対向面が正、加工面またはほかに設置した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、 $E = V/h$ なる電場が生ずる。したがって、砥粒は対向面上に引っぱられることになる。

いま、対向面が水平に置かれているものとする、砥粒に作用する力 f は、

$$\left. \begin{aligned}
 f &= 4 \pi a \left\{ \epsilon \xi E - \frac{a^2}{3} (\rho_0 - \rho) g \right\} \quad (xa \gg 1) \\
 f &= 2 \pi a \left\{ 3 \epsilon \xi E - \frac{2a^2}{3} (\rho_0 - \rho) g \right\} \quad (xa \ll 1)
 \end{aligned} \right\} (8)$$

となる。この力によって砥粒は対向面上に集中する。その結果、砥粒と対向面との間に摩擦力が生じ、砥粒は対向面とともに運動すると考えられる。この場合、対向面と流体は等速で運動している、砥粒は流体からの力をみかけ上うけない。また、砥粒間にも力が作用するので、その運動の一部は砥粒の堆積方向に砥粒の堆積している範囲まで伝達されるものと思われる。したがって、加工面と対向面との相対速度を u_0 とすると、加工面と砥粒の相対速度はほぼ u_0 に等しくなる。この場合、砥粒と砥粒および砥粒と対向面は完

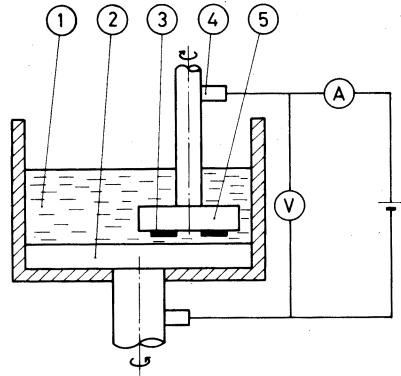


Fig. 3 Polishing setup (Type I)
1; polishing compound, 2; polishing plate, 3; work, 4; brush, 5; work holder

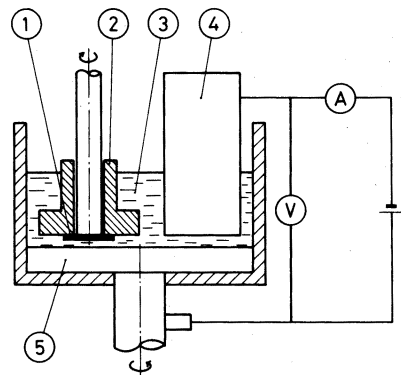


Fig. 4 Polishing setup (Type II)
1; work, 2; work holder, 3; polishing compound, 4; electrode, 5; polishing plate

全に結合しているのではなく、静電気力と重力の働きのみ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。

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すると、結合力は f に比例するので、式(8)から加工量は電場の強さ、すなわち電圧 V に比例する。したがって、電圧 V を変化させることによって加工を制御できると考えられる。また、このとき砥粒が加工面に作用する角度はほぼ水平となるので、加工面に垂直な方向の力は非常に小さいと考えられる。このことは加工変質層の低減にもつながると推考される。

3. 実験方法

3.1 実験装置

実験に使用した装置の概略図を図3、図4に示す。図3の装置を加工装置(I)、図4の装置を加工装置(II)と称することにする。加工装置(I)は加工物に直接直

流電圧を印加する方式であり、一方、加工装置 (II) は電極を加工物とは切り離して設置し、電極と対向工具面の間に直流電圧を印加する方式である。両装置とも対向工具面の外径は 80 mm, 上下の回転軸の偏心距離は 22 mm である。対向工具面の材質は黄銅である。加工面と対向工具面間のすきまの調整は上側回転軸の上下動により行った。その際、すきまの検出・調整はダイヤルゲージを用いて行った。

図 3 に示す加工装置 (I) では、試料ホルダの材質を黄銅とし、上側回転軸に直接取り付け、実験は対向工具面側が正、加工物側が負の場合とその逆の場合の 2 通りについて行った。図 4 に示す加工装置 (II) では、試料①はアクリル製ホルダ②に固定され、ホルダは溶媒中に完全に浮いた状態にして、回転軸によって下方に押し付けられている。ホルダは回転軸と試料の摩擦によって回転軸と同じ速度で回転する。この実験の場合、対向工具面が正、電極が負になるように電圧を設定した。本研究では生産性の観点から、電気泳動現象の効果がより多く期待されると思われる装置 (II) を主に使用して実験を行った。

3.2 加工条件

研磨用砥粒としてはアルミナ Al_2O_3 (粒径 20~0.2 μm) とシリカ SiO_2 (粒径 10~0.02 μm) を用いた。これは、砥粒材質による帯電量の違いの影響をみるためである。砥粒と媒液の混合率は体積比で、砥粒が 2, 4, 5% の 3 通りに選び実験を行った。媒液としては、電離度の影響をみるために、蒸留水、エチルアルコール、メチルアルコールを使用した。加工試料は装置 (I) の場合、構造用炭素鋼 S 45 C を使用し、その形状寸法は $\phi 7.7$ mm, 厚さ 7 mm の円筒状のものである。装置 (II) の場合は、シリコン単結晶ウエハ (4" 径, 厚さ 0.8 mm) を用い、20 mm 角に切り出して試料とした。加工に供した面は (001) 面および (111) 面である。加工条件を表 1 に示す。

加工量は、加工実験前後の試料の質量減を化学天秤を用いて求めた。表面粗さは連続指示形表面粗さ測定機 (東京精密製) を用いて測定した。その測定条件は、触針先端半径 5 μm , 測定力 4 mN である。表面の観察にはノマルスキー型干渉顕微鏡を用いた。

4. 実験結果

4.1 装置 (I) の場合

図 5 に装置 (I) を用いた場合の実験結果を示す。実験は印加電圧を 1.5 V, 0 V, -1.5 V と変えて行った。ここで、1.5 V とは試料側が正、対向工具面側が負になるように電圧を印加した場合であり、-1.5 V はその

Table 1 Dimension and pre-machining condition of specimen

	Apparatus (I)	Apparatus (II)
Work	S 45 C	Si (001), (111)
Revolution number of work holder	1 100 rpm	300 rpm
Revolution number of polishing plate	100 rpm	100 rpm
Pre-machining condition	Finished with Emery paper # 0	Lapped with Al_2O_3 # 2 000
Dimension of specimen	$\phi 7.7 \times 7$ (mm)	$20 \times 20 \times 0.8$ (mm)
Clearance	20-40 μm	5-30 μm

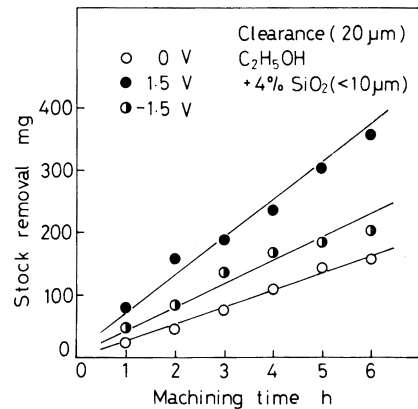


Fig. 5 Relation between stock removal and machining time (silica)

逆の場合である。図 5 に示す実験は加工液としてシリカ (10 μm 以下) を体積濃度で 4% 混入したエチルアルコールを用いた場合のものである。図は加工時間と加工量の関係を示している。図から、加工量は加工時間に比例して大きくなるのがわかる。また、直線の傾きは印加電圧が 1.5 V の場合が最も大きくなっている。電圧を印加することによって加工量が大きく得られたのは、先の理論解析で示した砥粒の衝突による除去効果のほか、次々と加工面にやってくる砥粒の相互作用効果 (砥粒径はクリアランスの 1/2 程度なので砥粒の相互作用が大きい) も大きく加工 (量) に影響しているものと考えられる。

4.2 装置 (II) の場合

図 6 に装置 (II) を用いた場合の実験結果を示す。加工液としては、アルミナ砥粒 (粒径 8 μm , 濃度 5%) をエチルアルコールに懸濁させたものを使用した。

図 6 は電圧と加工量の関係を示している。図から、加工量は電圧が増加するにつれて次第に増えていくの

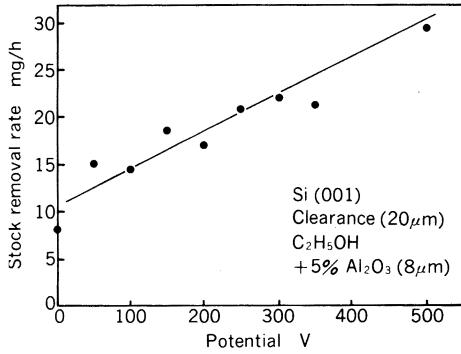


Fig. 6 Influence of potential on stock removal (alumina)

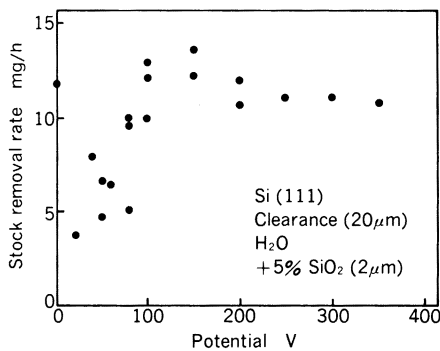


Fig. 7 Influence of potential on stock removal (silica)

がわかる。

図7にシリカ(粒径2 μm 、濃度5%)を蒸留水中に懸濁させた場合の実験結果を示す。図から、加工量は電圧の低いところでいったん低下し、それ以後電圧が増えるに伴って次第に増加していくことがわかる。しかし、100Vを過ぎるあたりで飽和する傾向がみられる。これは、加工面と対向面の間のすきまが砥粒径に比べて大きいので、電圧が低いところでは対向工具面に集まる砥粒数が少ないことが原因して加工量が減少したものと思われる。一方、電圧が高い場合には砥粒の集積数(量)が多くなるため加工量が増えたものと考えられる。図8に表面粗さ R_{max} の測定結果(図7の試料)を示す。図から、表面粗さは電圧が増すにつれていったん大きくなり、極値に達した後次第に減少することがわかる。図9にその場合の加工面の顕微鏡写真を示す。図から、加工面は電圧の小さい範囲ではラッピングを施したような面になっているが、電圧が大きくなると次第にポリシングした面のようになることがわかる。なお、前加工面の表面粗さは R_{max} で約1.2 μm であっ

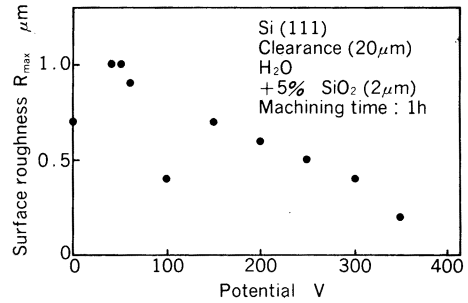


Fig. 8 Surface roughness of silicon wafer

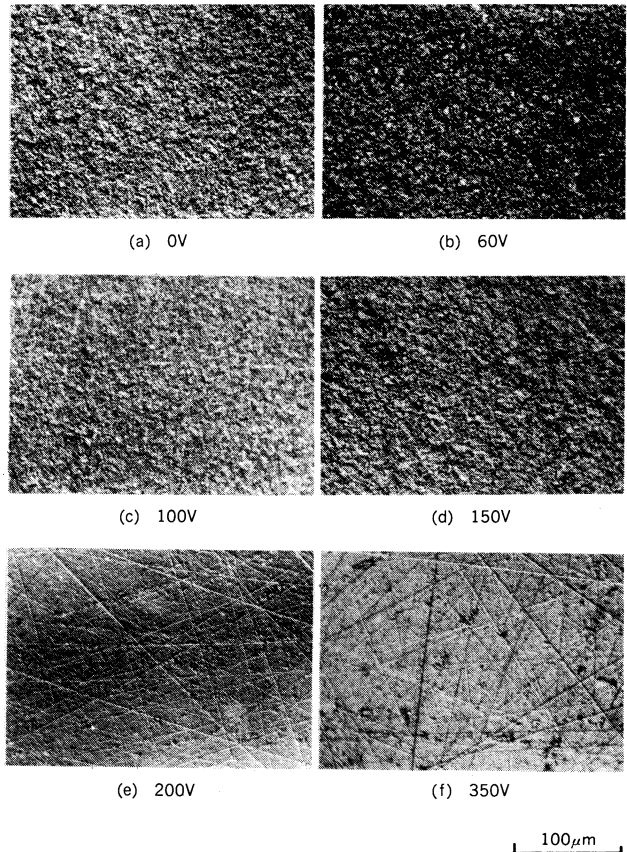


Fig. 9 Photographs of polished specimen

た。

5. 考 察

以上の実験結果から、砥粒の電気泳動現象を利用して、砥粒を加工面に引き付けるかあるいは対向工具面に集中させることによって加工能率を向上できると考えられる。砥粒としてシリカを用いた場合、それは負に帯電するので、非水系媒液を加工液とする場合には砥粒を加工面に引き付ける方が有利である。水を加

工液に用いる場合には、砥粒がイオン化して次第に電解質溶液となり、電極反応が起こり加工物に電圧を印加することが困難となるが、加工量としては電圧の増大によって増加する。水に SiO_2 砥粒を分散させた場合には電離度が大きいので、電圧が大きくなると砥粒の多くは対向工具面に付着する。そのため加工量は電圧が大きくなっても増大しないが、表面粗さは次第に小さくなっていくものと推考される。つまり、電圧の増大により、砥粒と対向工具面の結合力が大きくなるため、電圧が小さいときは加工面をラッピングするように加工（ラッピングに似たかたちの除去作用が営まれる）するが、電圧が大きくなると、加工面上の山の部分を完全に取って去っていくためと思われる。

6. 結 論

電気泳動現象利用の表面研磨について、理論的・実験的観点からその可能性を検討した。その結果次のような結論が得られた。

- (1) 砥粒の運動の解析の結果、加工法としては砥粒を加工面に引きつける方法と対向面に集中させる仕方の2形式が可能となったことが明らかとなった。
- (2) 実験装置として、加工物を電極に直接取り付けて加工を行う形式のものとそれらを互いに切り離して別個に設定して行う2形態の装置を試作した。
- (3) 加工物を直接電極に取り付けた実験においては、電圧を試料側が正になるように印加した方が加工量が増えることが明らかとなった。この現象は使用砥粒の材種にはよらないようである。
- (4) 加工物と電極を互いに離して設置した場合の

実験結果から、加工量は電圧が増すにつれて基本的には増加する傾向にあるが、その増加の程度は使用砥粒の材種と溶媒によって変わる。

- (5) 装置(II)で加工した場合の加工面の光学顕微鏡写真観察から、電圧の小さい範囲ではラッピングした面のようになるが、電圧が大きくなるとポリシングした面のように加工されることがわかる。触針式粗さ計による測定から、表面粗さは電圧が大きくなるにつれて次第に小さくなっていくことが観察された。

終わりに本研究を進めるに当たり協力いただいた金沢大学工学部尾西隆氏にあつくお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 森 勇蔵, 津和秀夫, 杉山和久: EEM (elastic emission machining) の基礎研究——極微量弾性破壊の概念とその可能性, 精密機械, **43**, 5 (1977) 542.
- 2) 森 勇蔵, 井川直哉, 奥田 徹, 杉山和久: EEM (Elastic Emission Machining) による超精密数値制御加工法, 精密機械, **46**, 12 (1980) 1537.
- 3) 宮本岩男, 谷口紀男: イオンスパッタ加工法の研究 (第1報)——Si 単結晶のイオンスパッタ加工による格子不整, 精密機械, **45**, 3 (1979) 292.
- 4) 宮本岩男, 谷口紀男: イオンスパッタ加工法の研究 (第2報)——ダイヤモンドの加工, 精密機械, **46**, 8 (1980) 102.
- 5) 安永暢男, 小原 明, 樽見 昇, 今中 治: 軟質粒子による Si 単結晶のメカノケミカルポリシング, 精密機械, **44**, 9 (1978) 1105.
- 6) T. Kurobe, O. Imanaka and S. Tachibana: Magnetic Field-assisted Fine Finishing, Bull. JSPE, **17**, 1, (1983) 49.
- 7) 北原文雄, 渡辺 昌: 界面電気現象——基礎・測定・応用, 共立出版 (1972) 11.