



磁性流体利用の作用砥粒数制御研磨*

黒部利次** 示野和弘*** 今中治†

Grain Number Controlled Lapping with Magnetic Fluid

Toshiji Kurobe, Kazuhiro Shimeno, Osamu Imanaka

Need for the controllable finishing of materials such as semiconductors and ceramics, has remarkably increased in the fields of electronics and precision machinery. A new lapping method has been developed by utilizing functional magnetic fluid which has the ability to move in the magnetic field. The magnetic fluid is a suspension of fine magnetite Fe_3O_4 (smaller than 150 \AA) in liquid. This lapping method is based on the floatation of nonmagnetic grains suspended into the magnetic fluid in the magnetic field. Lapping experiments were conducted on soda lime glass. It was found from the experiments that the new lapping method is able to control the stock removal rate through varying the current to the electromagnet. The present method may be usefully employed in finishing such parts as aspherical lenses.

Key words: field-assisted lapping, magnetic fluid, stock removal, control

1. 緒 言

近年、情報機器や精密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も一段と厳しくなっている。また、自由曲面の表面創成に対する要求も高い。これらのニーズに対応すべく新しい研磨法が最近種々開発されてきている。磁場や電場¹⁾を利用した研磨法もその一つである。磁場を援用した研磨法としては、磁性流体を利用した研磨技術^{2)~6)}と磁性砥粒を利用した研磨技術⁷⁾がある。いずれも磁気に応答する機能性材料を活用している点に特徴がある。研磨効率の観点から、磁気吸引研磨工具を用いた新形式の磁気研磨法⁸⁾も開発されている。

本研究は、磁性流体を利用して作用砥粒数制御加工

が行えるかどうかを実験的に検討したものである。磁性流体は液相中にコロイドサイズ(150 \AA 以下)の強磁性微粉末を分散させたコロイド溶液であって、磁気に応答する可動流体⁹⁾である。重力による沈降や磁場による粒子の凝集・分散などが起こらず安定なコロイド分散状態をとる流体である。しかし、磁性流体は磁場の印加によってその見かけの比重が変わる性質を有している。本研究は磁性流体のこの性質に着想を得て行ったものである。

まず、原理を満たす研磨装置を作製し、ガラスについて研磨加工を行った。

2. 加工原理

磁性流体を用いた作用砥粒数制御加工の加工原理について検討する。研磨は非磁性砥粒を使用して高分子粘弾性体のラップ面上で行われるものとする。ラップには適当な大きさの孔が多数格子状に穿孔されている。ラップは研磨槽底部に貼付され、研磨槽には研磨媒体として磁性流体が所定量入れられ満たされている。電磁石は研磨槽直下に置かれ、かつ、砥粒はあらかじめ孔底に入れられているものとする。

* 原稿受付 昭和62年10月28日。昭和59年度精機学会春季大会学術講演会(昭和59年3月26日)にて発表

** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学工学部 (現、(株)ニコン; 東京都品川区西大井1-6-3)

† 正会員 富山職業訓練短期大学校(魚津市川縁1289-1)

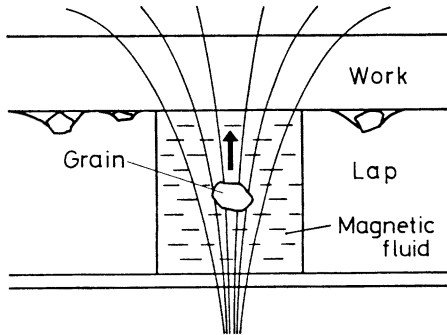


Fig.1 Floatation mechanism

原理の理解を容易にするため、孔を一つ含むラップの断面を図1に示す。鉛直方向をz軸にとり、砥粒が磁場から受ける力をFとすると運動方程式は次式となる。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c r \frac{dz}{dt} - F = 0 \quad (1)$$

ただし、mは砥粒の質量、rは砥粒を球と仮定した場合の半径、cは抵抗係数である。砥粒は磁場から受ける力Fのほかにはラップの回転に伴う遠心力（水平方向）も作用するが、ここでは砥粒の浮上に着目しているので遠心力の効果は考慮の外におくものとする。

磁性流体を介して非磁性砥粒に加わる力Fは、

$$F = v \left(\frac{1}{4\pi} M \nabla H - (\rho - \rho') g \right) \quad (2)$$

で表される⁹⁾。ここで、v：砥粒の体積、M：砥粒の存在する位置での磁性流体の平均磁化、 ∇H ：磁場勾配、 ρ ：砥粒の密度、 ρ' ：磁性流体の密度、g：重力加速度。式(2)を式(1)に代入し、砥粒の流体中での移動速度Vを求めると、

$$V = \frac{r^2}{c' \rho} \left(\frac{1}{4\pi} M \nabla H - (\rho - \rho') g \right) \quad (3)$$

ただし、 $c' = 3c / \pi \rho$ である。

ここで、流体中の砥粒が重力のみによって運動（沈降）する場合を考える。ストークスの式から沈降速度V'は、

$$V' = \frac{2g r^2}{36\eta} (\rho - \rho') \quad (4)$$

となる。ηは流体の粘度である。

磁場を印加しない場合を考えると、 $V = V'$ と等置されるので、式(3)、式(4)から、係数c'は $c = 18\eta / \rho$ となる。したがって、

$$V = \frac{r^2}{18\eta} \left(\frac{1}{4\pi} M \nabla H - (\rho - \rho') g \right) \quad (5)$$

式(5)から、()内の値が正ならば砥粒は浮上し負ならば沈降することになる。すなわち、電磁石に流す電流（磁場の強さ）を制御することによって砥粒に浮上力を付与することができることを式(5)は示している。

研磨は、ラップに貼付している回転ディスクを回転させることにより行われるが、ディスクの回転に伴って研磨液には遠心力が働き、ラップ面上を研磨槽外壁に向かって流動する。磁場印加によって浮上する砥粒は、この研磨液の流動によって逐次ラップ面上に移送（供給）されていく。磁場を強くすることによって浮上砥粒数も増加すると考えられるので、磁場の援用によって作用砥粒数制御加工が可能となるものと思われる。

3. 実験方法

3.1 実験装置

新しく製作した磁気ラッピング装置の概略図を図2に示す。装置は回転ディスク、加工保持具、電磁石、油圧装置より構成されている。非磁性材の黄銅製の回転ディスクには幅広の溝が切つてある。その溝形状は内径105×外径175×深さ10mmである。溝底にはラップが貼り付けられ、溝は研磨槽となる。溝には研磨媒体として磁性流体が入れられる。回転ディスク円盤は下部回転軸にはめ合わされている。軸はラジアル軸受及びスラスト軸受を介してベローズと接している。加工圧は、油圧により軸を上下方向に滑らかに変位させることにより付与される。

電磁石は加工物の真下に設置され、磁極は黄銅円盤間近に置かれる。電磁石は黄銅管にφ0.8mmのエナメル線を2300回巻いて作製した。通電に伴う電磁石の発熱を防止するため、磁石内壁に水道水を通水する構造となっている。磁場の強さは電磁石に流す電流を制御することにより変化させる。磁場の強さはホール素子（飲業電気製、GK-300）を用いて測定した。図3に磁場の強さと電流の関係を示す。図3で、白丸印は加工

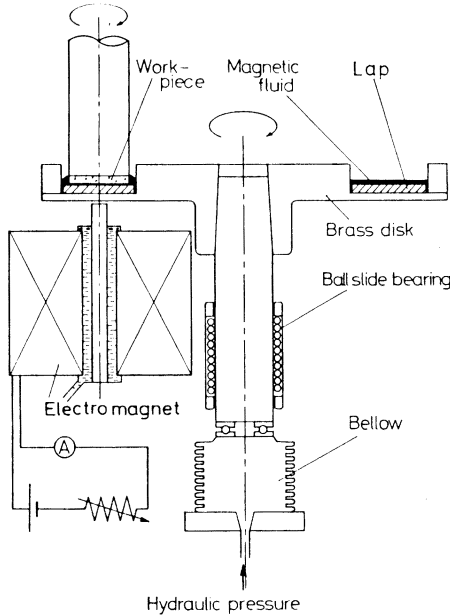


Fig.2 Lapping setup

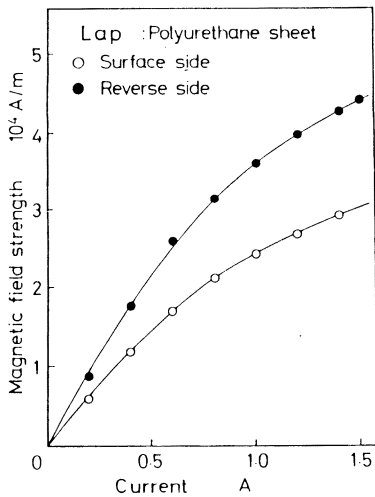


Fig.3 Relation between magnetic field strength and exciting current

物表面（ラップ上側の面）での磁場の強さを示し、黒丸印はラップ下側の面（溝底）での値を表す。図から、磁場の強さは電流が増えるにつれて増大することがわかる。

加工物は上部回転軸に直接貼り付けられる。上下回転軸は無段変速モータによりプーリを介して回転させられる。

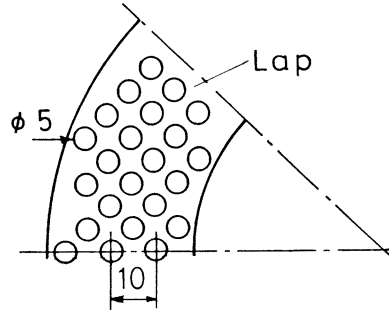


Fig.4 Schematics of drilled hole arrangement

Table 1 Visco-elastic properties of lap

	u μm	v μm	τ sec	α $\mu\text{m}/\text{min}$
I	0.3	0.3	4.3	0.08
II	0.8	0.7	4.3	0.13

3. 2 実験条件

研磨槽溝底に貼付するラップとして発泡ポリウレタンシート（九重電気製，厚さ 3mm）を用いた。ラップにはあらかじめ砥粒をためておくために図4に示すような孔を多数穿孔した。孔の直径は 5mm，孔の間隔は 10mmで格子状にあけている。先に開発した表層粘弾性測定装置¹⁰⁾を用いて測定したラップの粘弾性測定値を表1に示す。測定値 I は未使用（virgin材）のラップの粘弾性値を，II は使用済み（used材）のもの値を表す。u, v, α は瞬間弾性，遅延弾性，粘性にもとづく変位をそれぞれ表す。 τ は遅延時間である。測定値からみて、I と II ではかなり差のあることがわかる。

磁性流体は水ベースのものを用いた。マグネタイト濃度40wt%の磁性流体（タイホー工業，W-40）である。研磨媒体としては，その磁性流体に同量の蒸留水を加えて希釈したものを使用した。砥粒として，非磁性体のアルミナ砥粒WA #400(平均粒径 $40 \mu\text{m}$)を用いた。研磨剤濃度は体積比で11%である。

加工物として厚さ3mmのソーダ石灰ガラス（ $\phi 25\text{mm}$ ）を使用した。前加工はアルミナ砥粒(#400)を用いてハンドラップで行った。研磨条件は，平均加工速度 $4.1 \text{ m}/\text{min}$ (10 rpm)，加工圧 $2.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ ，加工時間 1 h を標準とした。

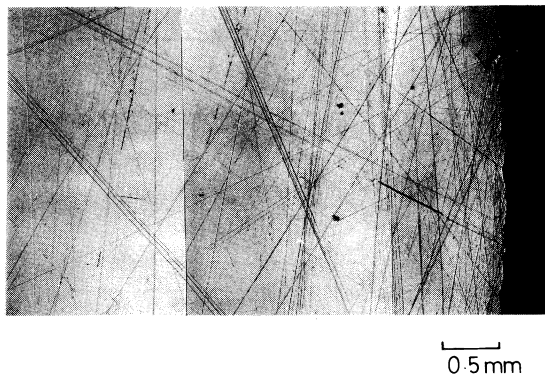


Fig.5 Scratching mode of lapping surface

4. 実験結果及び考察

まず初めに作用砥粒数について実験的検討を行った。測定は次のようにして行った。鏡面に仕上げられた試料を上部回転軸に貼り付け、ラップ上に静かに載置し、死荷重を付与する。電磁石に電流を流して磁場を発生させ、磁性流体中で上下の回転軸をそれぞれ回転させる。その後試料を軸から取り外し加工面を光学顕微鏡で観察する。観察結果の一例を図5に示す。図5は試料を1回転させたときの加工面の様子を示している。作用砥粒数は写真に見られる引っかき痕の数を数えることによって測定した。写真から、加工はほとんど砥粒の微小引っかきによる切削作用によって営まれていることがわかる。写真上から引っかき痕を読み取るので、読取誤差はかなり入ると考えられる。しかし、磁場の強さによる引っかき痕の数の相対的变化は把握し得るものと思われる。

作用砥粒数の値は、加工面上の単位面積当たりの引っかき痕の数で表示した。以下の実験で、引っかき痕の測定の変りを防ぐため観察は4か所で行った。すなわち、円周方向に互いに90°隔たっている外周近傍の場所(1.3×0.85mm)で測定し、その平均値を作用砥粒数とした。測定結果を図6に示す。図6は1hラッピングした後の作用砥粒数の値を示している。図から、電磁石に流す電流を増すにつれて次第に作用砥粒数が増加していくことがわかる。この測定結果は、電流(磁場)によって作用砥粒数を制御し得ることを示している。

図7に単位加工距離当たりの加工量と電流の関係を示す。図7から、電流が増すにつれて加工量が多くなることがわかる。加工圧が大きい程加工量も多い。図8に、図7に示した試料の表面粗さ(十点平均粗さR

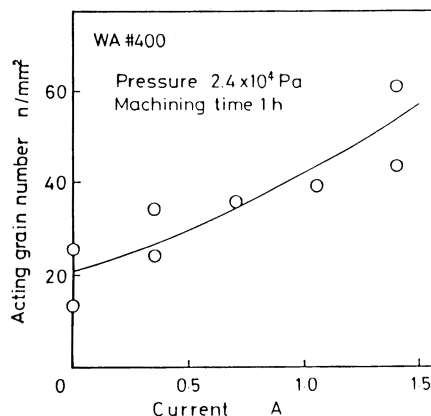


Fig.6 Relation between acting grain number and exciting current

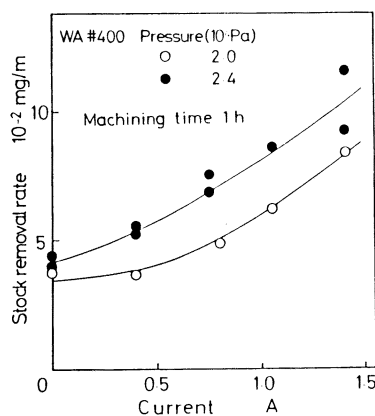


Fig.7 Relation between stock removal rate and exciting current

2)を示す。図から、電流が増すに連れて表面粗さが次第に小さくなるのがわかる。このように、電圧を印加することによって加工量が増大し表面粗さが低減するのは次の理由によるものと思われる。2章で述べたように、磁場が強くなるに従って砥粒は低磁場側に排除されやすくなり、浮上する砥粒数も増す。すなわち加工面に移送される砥粒数が増大することによるためと推察される。図9に加工量と加工時間の関係を示す図には比較のため蒸留水を研磨媒体として用いた実験結果も併記している。図9から、当然なことではあるが加工時間が長くなるにつれて加工量は次第に多くなる。しかし、増加の割合は電磁石に流す電流が大きい程多い。

図10に加工時間と作用砥粒数の関係を示す。図10か

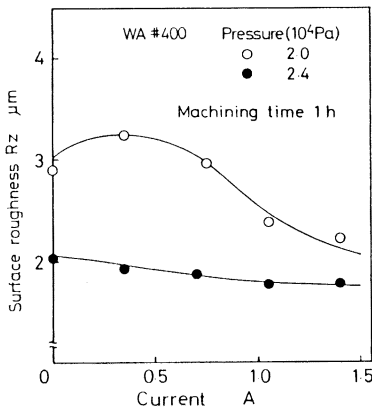


Fig.8 Relation between surface roughness and exciting current

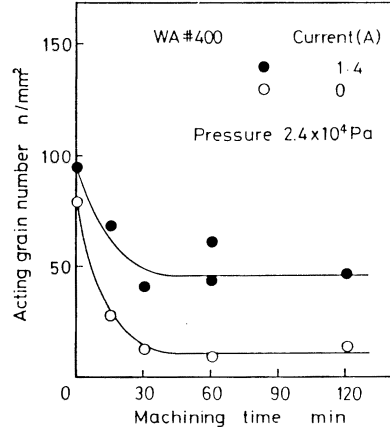


Fig.10 Relation between acting grain number and machining time

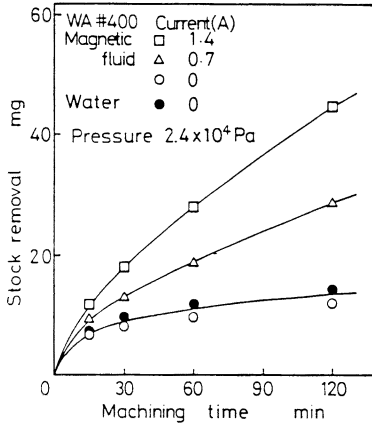


Fig.9 Relation between stock removal and machining time

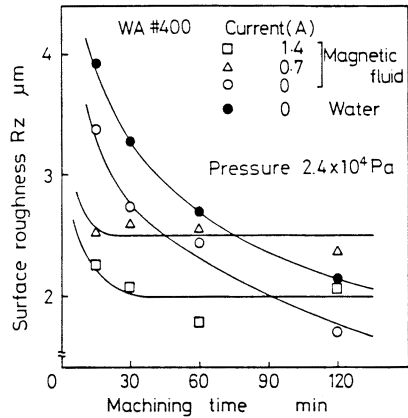


Fig.11 Relation between surface roughness and machining time

ら、作用砥粒数は加工初期に急減するが、30min経過するあたりから一定の値となる。磁場を印加した場合の方が、印加しない場合に比べて作用砥粒数が多いことがわかる。磁場印加によって絶えず砥粒が孔底から浮上してくるためと考えられる。図10に見られる作用砥粒数の加工初期の急減は、次の理由によるものと考えられる。ラップの孔底にはあらかじめ一定量の砥粒が入れているため、磁場印加直後に浮上する砥粒数は最も多いと推察される。しかし、孔底には砥粒の供給はないのでその後の時間経過とともに浮上砥粒数は次第に減少していくものと考えられる。

図11に加工時間と表面粗さの関係を示す。磁場を印加した場合には、30min経過後はほぼ一定の表面粗さになるのに対し、印加しない場合には表面粗さは徐々に小さくなっていく。磁場を印加しない場合には加工面

にほとんど砥粒が供給されないと考えられ、破碎細粒化していく砥粒の微小除去加工によって、研磨が進むためと考えられる。

図12に砥粒径と単位加工距離当たりの加工量の関係を示す。図12から、粒径が大きいほど加工量が多くなることがわかる。しかしながら、粒径が10 μm以下と小さくなると、加工量には変化がみられず一定の値になる。このことは多分、微粒砥粒の浮上に対し溶媒の粘性抵抗が大きく影響してくるためではないかと思われる。しかし、液の粘度を操作することによって10 μm以下の微粒に対してもある程度効果は期待し得るものと考えられる。

図13、図14にマグネタイト濃度と作用砥粒数及び加工量の関係を示す。図13、図14から、マグネタイト濃度を0から40%まで順次増すと作用砥粒数も加工量も

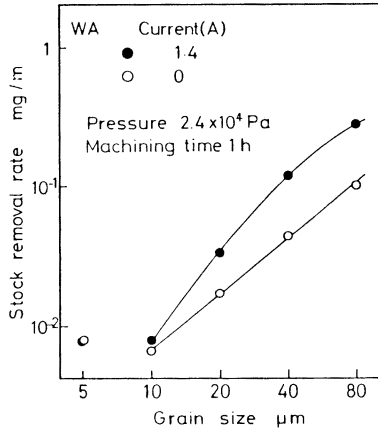


Fig.12 Influence of grain size on stock removal

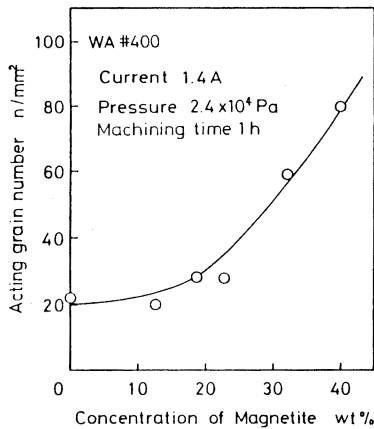


Fig.13 Relation between acting grain number and concentration of magnetite

次第に増加することがわかる。これは、マグネタイト濃度の増加は磁場に対する研磨媒液の見かけの比重が増すためと推察される。

5. 結 論

磁気に感応する磁性流体を用いて作用砥粒数制御方式の新研磨法を開発した。基本原理を満たす装置を製作しガラスについて実験を行った結果次の結論を得た。

- (1) 重力の作用方向に磁場勾配が大きくなる研磨装置を製作した。作用砥粒数と磁場の強さの関係を調べた結果、装置は所期の性能を有していることがわかった。
- (2) 電磁石に流す電流を増す(磁場を強くする)と作用砥粒数は増え加工量も増加する。

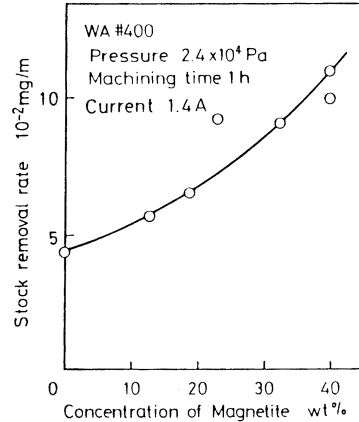


Fig.14 Relation between stock removal and concentration of magnetite

- (3) 表面粗さは磁場の強さが増すにつれ低減する。
- (4) 砥粒の大きさが増すにつれ加工量も増加する。しかし、砥粒径が10 μm以下の砥粒については加工量は一定となり、磁場の効果は見られなかった。
- (5) マグネタイト濃度を0から40%へと順次増すと作用砥粒数も加工量もそれに伴って増加する。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 今中 治, 黒部利次, 松島一晃: 磁性流体利用による砥粒加工, 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (1981)774.
- 3) T.Kurobe, O.Imanaka and S.Tachibana: Magnetic Field-assisted Fine Finishing, Bull. JSPC, 17, 1, (1983)49.
- 4) T.Kurobe and O.Imanaka: Mgnetic Field-assisted Fine Finishing, Prec. Engr., 6, 3, (1984)119.
- 5) 今中 治, 上村康幸: 磁場援用による砥粒加工-加工量の局部的制御性の検討, 生産研究, 37, 11(1985)500.
- 6) 河田研治, 谷 泰弘: 磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法の研究(第1報) - 磁性流体の研磨液としての特性と磁気浮揚研磨法の原理, 精密工学会誌, 53, 6(1987)953.
- 7) 進村武男, 高沢孝哉, 波多野栄十: 磁気研磨法の研究(第1報) - 加工原理と二, 三の研磨特性, 精密工学会誌, 52, 5(1986)851.
- 8) 国枝正典, 中川威雄: 曲面研磨ロボット用磁力砥磨工具の加工特性, 砥粒加工学会誌, 31, 238(1987)7.
- 9) 下飯坂潤三: 磁性流体について, 日本レオロジー学会誌, 5(1977)95.
- 10) 今中 治, 黒部利次, 佐藤 彰: ポリシャ表面の動的粘弾性挙動, 精密機械, 49, 9(1983)1209.