MCF を用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の電気的特性

Electrical Characteristics of Precision Polishing Using Magnetic Compound Fluid While Simultaneously Applying Magnetic and Electrical Fields

西田 均^{*1} (正員), 山本 久嗣^{*1} (正員), 藤岡 里美^{*2}
島田 邦雄^{*3}, 井門 康司^{*4} (正員)Hitoshi NISHIDA (Mem.), Hisashi YAMAMOTO (Mem.), Satomi FUJIOKA
Kunio SHIMADA, Yasushi IDO (Mem.)

In this study, the relationship between the amount of material removed and the current characteristics on polishing or processing using a magnetic compound fluid (MCF) while simultaneously applying electric and magnetic fields was investigated. Changes in the amount of material removed and the electric current in each experimental condition for flat surface polishing and cylindrical inner surface processing were clarified. It was confirmed that the amount of material removed was increased by the application of an electric field, and that the processed surface was flattened and smoothed when processing the inner surface of the cylinder. The electrical characteristics in each polishing or processing method were considered from the electric current characteristics.

Keywords: magnetic compound fluid, precision processing, magnetic field, electric field, electrical characteristics.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2021 年 1 月 7 日再受付)

1 緒言

現在, 高硬度材料や難削材料の研磨加工では加工能率と研磨後の形状精度の変化が課題になっている。これに対して著者らは磁気混合流体(MCF)を用いた平面や円筒内面などに対する研磨法を開発して, 研磨原理と研磨特性を明らかにするとともに, 加工能率と形状精度について調べている[1, 2]。MCF を用いた研磨(MCF 研磨)では加工面の平滑化と同時に形状精度を保持する精密仕上げが可能である。しかし, MCF 研磨は高硬度材料に対して加工能率が低いという課題がある。このような状況下で, MCF が静止状態において非導電性流体であることが判明し, 電気粘性流体効果(ER 効果)を有する可能性があることがわかった。すなわち, ER 効果により, MCF の見かけの粘度が増加する, あるいは, 誘電体である砥粒が加工表面に付着することで加工能率の向上が期待できる[3]。

そこで, 本研究では平面と円筒内面に対して, MCF に磁場に加え電場を印加する研磨加工法を提案して, それぞれの加工特性と電気的特性について明らかにす

ることを目的とする。具体的には, 磁場に加え電場を印加した場合の加工量特性と表面性状, 電流特性を調べ, 加工に及ぼす電場の効果を明らかにする。また, 加工量と電流特性に及ぼす電場の種類や工具構造, 砥粒の材質などの影響を調べる。

2 研磨加工方法

平面研磨と円筒内面加工の模式図を Fig. 1 と Fig. 2 にそれぞれ示す。工具は平面研磨では円柱状の永久磁石である。円筒内面加工ではリング状永久磁石を用いてスパーサを挟んで積層したものである。MCF に磁場を印加すると磁力線方向に磁性体分散粒子で構成される凝集体(磁気クラスタ)が形成される。平面研磨での磁気クラスタは磁力線方向に形成され, 加工表面に対してほぼ垂直に作用する。研磨は砥粒に磁気クラスタの加工力が作用すること砥粒と加工表面の相対運動によって行われる。円筒内面加工ではリング状永久磁石の外周面に管軸方向に形成された磁気クラスタが加工表面に平行に作用する。加工は砥粒に平行磁気クラスタの半径方向の加工力が作用すること砥粒と加工表面の相対運動によって行われる。電場印加のために電源の電極は一方が永久磁石に他方が加工物に接続されている。これにより, 電気力線は平面研磨では磁気クラスタとほぼ平行になる。一方, 円筒内面加工での電気

連絡先: 西田 均, 〒939-8630 富山市本郷町 13, 富山高等専門学校電気制御システム工学科,
e-mail: nishida@nc-toyama.ac.jp

^{*1} 富山高等専門学校 ^{*2} 株式会社フェローテック

^{*3} 福島大学 ^{*4} 名古屋工業大学

Fig.1 Schematic diagram for surface polishing.

Fig.3 Experimental setup for surface polishing.

Fig.2 Schematic diagram for inner surface processing.

力線はリング状永久磁石の外周面から加工面に向かって放射状になり、電気力線と磁気クラスターは交差する。

3 実験装置

Fig. 3 に平面研磨実験装置の外観を示す。実験装置は磁気研磨装置(3D-MNPS I, FDK 株式会社製)を改造したもので、上部の研磨工具部と下部のワーク固定部で構成されている。Table 1 に研磨工具の諸言を示す。研磨工具は樹脂製の本体とステンレス鋼製のカラー、円柱形永久磁石で構成されている。永久磁石には表面をニッケルメッキで覆ったネオジム磁石($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, N52)を用いた。Table 2 に使用した MCF 加工液の成分を示す。加工物(ワーク)はステンレス鋼製の円板(直径 30 mm, 厚さ 2 mm, SUS304-2B)を用いた。ワーク表面の初期算術平均粗さ Ra_0 の平均値は $0.154 \mu\text{m}$ である。研磨実験では工具先端とワークの隙間間隔 $\delta = 1.0 \text{ mm}$ とし、工具回転数 $n = 500 \text{ rpm}$, 研磨時間 $t = 40 \text{ min}$ とした。また、印加電場強度 E は、 $E = 0, 250, 500 \text{ V/mm}$ の 3 種類とし、研磨実験ごとに 0.63 mL の MCF 加工液を使用した。

Table 1 Specifications of polishing tool

Size of permanent magnet	$\phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$
Material of permanent magnet	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, N40
Maximum magnetic flux density of permanent magnet	340 mT
Structure of tool	

Table 2 Components of MCF processing fluid.

MF (MSG60)	39.2 wt. %
Iron powder (1.2 μm , HQ)	30.4 wt. %
Al_2O_3 abrasive (3 μm)	20.0 wt. %
α -cellulose	6.4 wt. %
Kerosene	4.0 wt. %

Fig.4 に円筒内面加工実験装置の外観を示す。装置は垂直に固定された電動スライダのテーブルに直列に設置された AC サーボモータ、トルク計 (MD-503C, 小野測器), 工具から成る上部機構と円筒状の加工物(ワーク)を固定するステージ部で構成されている。ワークはステンレス鋼製円管(SUS304BA)であり、寸法は内径 23.9 mm, 外径 27.2 mm, 長さ 150 mm である。ワーク内面の初期算術平均粗さ Ra_0 の平均値は $0.315 \mu\text{m}$ である。本研究で開発した 4 種類の工具の諸言を Table 3 に示す。工具は 3 個のリング状の永久磁石を使用し、スペーサを挟んで同極が向かい合うように積層したものである。永久磁石にはサマリウムコバルト磁石($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, SS28)を用いた。また、スペーサはステンレス鋼製と MC ナイロン製の 2 種類を用いた。Type A は磁

Fig. 4 Experimental setup for inner surface processing.

Table 3 Specifications of processing tools.

Tool type	Type A	Type B	Type C	Type D
Shaft diameter [mm]	$\phi 17$			
Spacer size	$\phi 22 \times \phi 14 \times 4$	$\phi 22 \times \phi 14 \times 4$	$\phi 18 \times \phi 14 \times 4$	$\phi 22 \times \phi 14 \times 4$
Permanent magnet size [mm]	$\phi 22 \times \phi 14 \times 8$			-
Number of magnet	3			0
Maximum magnetic flux density [mT]	330			0
Spacer material	SUS304	MC nylon	MC nylon	MC nylon
Structure of processing tool

場印加のみの実験に使用し、Type B は磁場に加え電場を印加した場合の実験で使用した。また、Type C は小径のスペーサにより Type B より多くの加工液が保持できる工具である。また、Type D はリング状永久磁石の代わりに同じサイズの SUS304 製リングを用いたもので、電場のみ印加できる工具である。

4 平面研磨の実験結果

4.1 加工量と電流特性

Fig. 5 に印加電場ごとの加工量 M と加工時間 t の関係を示す。無電場の場合、 $t=30$ min で飽和することがわかる。 $E=250$ V/mm の場合も加工量は無電場の場合とほとんど変わらない。しかし、 $E=500$ V/mm を印加した場合、 $t=30$ min 以上でも加工量が増加する傾向を示している。 $E=0$ V/mm, 250 V/mm では $t=30$ min を過ぎると砥粒が研磨面に作用していないと考えられる。 $E=250$ V/mm で電場の効果が確認できなかったのは

電場強度が小さいためと考えられる。一方、 $E=500$ V/mm では電場の効果により、砥粒が研磨面に配置されていると考えられる。なお、砥粒の電気泳動の可能性を調べるために、 $E=500$ V/mm, $t=40$ min において、永久磁石工具をマイナス側電極、加工物をプラス側電極にして加工実験を行った。実験の結果、加工量が同じであったことから、砥粒の電気泳動の可能性は低いと考えられる。

Fig. 6 に無電場と $E=500$ V/mm の場合の加工前後の断面曲線をそれぞれ示す。加工領域は磁場のみの場合、半径方向に 2 ヶ所存在する。これは、永久磁石角部の

Fig. 5 Relationship between material removal and polishing time.

(a) $E = 0$ V/mm (b) $E = 500$ V/mm

Fig. 6 Profile curves of polished surface.

$r = 10$ mm 前後における比較的太い磁気クラスタとその内側の $r = 7 \sim 8$ mm 付近の磁気クラスタの分布が反映されたものと考えられる。一方、電場を加えた場合では、 $r = 6$ mm $\sim$ 10 mm の広い範囲の 1ヶ所である。また、研磨後の加工表面については大きな違いは見られず、それぞれ平滑化された。

Fig. 7 に $E = 500$ V/mm の場合の電流 I の時間的変化を示す。電場印加後、電流はいったん減少するものの、その後は増加を続けることがわかる。すなわち、MCF の電気抵抗が小さくなっていくことがわかる。平面研磨の直流磁場ではワークに作用する軸力が時間とともに増加して定常状態になる。これは磁場印加後、回転流れにより磁気クラスタの破断と凝集が繰り返され、時間の経過とともに太い磁気クラスタを形成するためと考えられる[4]。電流の多くは磁気クラスタを通して流れると考えられるので、電流の増加は時間的に磁気クラスタの断面積が増加するためと考えられる。すなわち、電流の時間的変化は磁気クラスタの構造の時間的変化によるものと考えられる。

4.2 印加電場の種類と砥粒の影響

印加電場の種類と砥粒の材質の影響を調べた実験条件(実験 C $\sim$ 実験 F)を Table 4 に示す。また、この場合の加工量を Fig. 8 に示す。加工量は交流電場の方がパルス電場より大きい。交流電場は矩形波であり、パルス電場のパルス波の Duty 比は 0.5 である。このことから、常に電場の印加を続ける方が加工量は大きくなることがわかる。電場の印加時間の長い方が、MCF 加工液の粘度、あるいは、砥粒の加工表面への配置の影響があると考えられる。次に砥粒にホワイトアラランダム(WA)より誘電率の大きいに綠色炭化ケイ素(GC)を用いた場合では、WA の場合と同様に電場印加により加工量が 2 倍以上増加する。ここで、WA の比誘電率は 8.5 であり、GC の比誘電率は 9 $\sim$ 10 である。また、磁性流体の母液の比誘電率は 1.8 である。GC 砥粒の場合、加工量が多くなった原因としては誘電率が大きいために見かけの粘度が大きくなり、加工液のせん断応力がより大きくなったためと考えられる。

電流の時間的変化を Fig. 9 に示す。電流は交流電場加の方が直流電場より少し大きいものの、時間的な増加傾向は同じである。パルス電場の電流は直流電場の 50%程度であるが、増加傾向は同じである。パルス電場では直流電場の 50%の時間に電場印加されるためと考えられる。砥粒に GC を用いて直流電場を印加し

Fig. 7 Change of current with time ($E = 500$ V/mm).

Table 4 Experimental conditions for surface polishing.

Symbol of experiment	Polishing time t [min]	Strength of electric field E [V/mm]	Type of electric field	Abrasive grain
A	40	0	-	WA
B		500	DC	
C			AC ($f = 0.1$ Hz)	
D			Pulse ($f = 0.1$ Hz)	
E	40	0	-	GC
F		500	DC

Fig. 8 Material removal under each experimental condition.

Fig. 9 Change of current with time under each experimental condition.

た場合の電流値は一番小さく、時間的な変化も見られない。GC 砥粒では電流の増加を引き起こさないことがわかる。GC 砥粒で電流の増加が起こらない原因として、誘電率の大きい GC 砥粒がワーク表面に多く付着するため、磁気クラスタと研磨面の間で電流を流しにくくしていることが考えられる。

5 円筒内面加工の実験結果

5.1 加工量と電流特性

Fig. 10 に加工能率 $M/(AL)$ と工具回転数 n の関係を示す。本研究では加工能率を単位研磨面積・単位加工距離あたりの加工量とする。ここで、 A は加工面積($=3\pi d_w l$)、 L は加工距離($=\pi d_m n$)である。また、 d_w はワークの内径、 l はリング状永久磁石の軸方向の長さ、 d_m は永久磁石の直径である。また、Table 5 にそれぞれの実験条件による加工時間を示す。各実験は電流が 10 mA を超えたところで停止した。平面研磨では加工面

Fig. 10 Relationship between processing efficiency and tool number of revolution.

Table 5 Processing time under each experimental condition.

E [V/mm]	n [rpm]	Processing time [min]
125	500	8.38
	750	10.75
	1000	12.58
	1250	8.37
	1500	7.62
250	500	9.33
	750	20.00
	1000	10.67
	1250	7.67
	1500	15.58

に対して垂直に近い磁気クラスタ(以下、垂直磁気クラスタと呼ぶ)が作用する。一方、円筒内面加工では加工面に対して平行に近い磁気クラスタ(以下、平行磁気クラスタと呼ぶ)が作用する。円筒内面加工において、 $E = 500$ V/mm の電場を印加した場合、電流は短時間で 10 mA 以上になった。この原因は平行磁気クラスタの加工面に接触する面積が垂直磁気クラスタのそれよりも大きく、電流の流れる方向の磁気クラスタの断面積が大きいと考えられる。すなわち、同じ電場強度でも平行磁気クラスタの方が電気抵抗値は小さい。そのため、円筒内面加工では $E = 250$ V/mm 以下で実験を行った。Fig. 10 から磁場のみの場合の加工能率は工具回転数 $n = 750$ rpm でピークを持つ。この原因は工具回転数の増加につれ、管軸方向に形成された磁気クラスタに作用する流体抵抗が増加し、ある工具回転数で磁気クラスタが破断したり、崩れたりするためである[5]。電場を印加した場合、加工能率は $n = 1000$ rpm でピークを持つ。電場の印加により、磁気クラスタが強固になったと考えられる。加工能率は電場強度の小さい $E = 125$ V/mm の方が $E = 250$ V/mm より大きい。このことから、最適な電場強度が存在することが示唆される。 $E = 125$ V/mm の場合、加工能率は $1000 \text{ rpm} \leq n \leq 1500 \text{ rpm}$ の広い範囲で高いことがわかる。

Fig. 11 に $E = 0$ V/mm, $n = 750$ rpm と $E = 125$ V/mm, $n = 1000$ rpm の場合の加工後の断面曲線をそれぞれ示す。図中の灰色部分はリング状永久磁石に対応した領域を示す。加工領域は最上段と 2 段目の永久磁石に対応した領域で行われたことがわかる。3 段目の永久磁石(最下段の永久磁石)に対応した領域で加工が行われないのは、工具を円管に挿入するときに工具に付着した MCF 加工液が上部に移動するためである。最上段の加工領域では電場印加の方が平坦である。また、マイクロスコープ写真から、加工面は電場印加の方が平滑化されていることがわかった。

Fig. 12 に $E = 125$ V/mm の場合の電流密度 i と加工距離 L の関係を示す。電流密度 i は、 $i = I/A$ である。ここで、 A は永久磁石外周面の総面積である。電流 i は L の増加と共に徐々に増加していき、その後、急激に上昇して、導通状態になる。電場印加後の電流の増加現象は平面研磨と同様である。しかし、その後の急激な上昇については、電流が磁気クラスタを流れることから、磁気クラスタ同士の急激な付着や結合により太い磁気クラスタを形成することが考えられる。

Fig. 11 Profile curves of processed inner surface.

Fig. 12 Change of current with time ($E = 125$ V/mm).

5.2 流量や工具形状などの影響

流量や工具形状、電場の種類、砥粒の材質の影響を調べた実験条件(実験 D～実験 G)を Table 6 に示す。また、この場合の加工量を Fig 13 に、加工時間を Table 7 にそれぞれ示す。実験 A と実験 B の加工液の量は工具の上下、周囲に厚さ 1 mm 分を付着した量である。実験 C は工具が入った底の付いた円管内が加工液で満たされる加工液量である。実験 D は Type C を使った場合で、工具の上下に 1 mm、工具の外側に直径 24 mm

Table 6 Experimental conditions for inner surface processing.

Symbol of experiment	Tool type	n [rpm]	Amount of fluid [mL]	Abrasive grain	Magnetic flux density B [mT]	Electric field E [V/mm]
A	Type A	750	4.21	WA	330	0
B	Type B	1000	4.21	WA	330	125
C	Type B	500	31.3	WA	330	125
D	Type C	1000	6.72	WA	330	125
E	Type D	1000	31.3	WA	0	125
F	Type B	1000	4.21	WA	330	125 Pulse $f = 0.1$ Hz
G	Type B	1000	4.21	GC	330	125

Fig. 13 Material removal under each experimental condition.

Table 7 Processing time under each experimental condition.

Symbol of experiment	Processing time t [min]
A	20.00
B	12.58
C	10.70
D	7.19
E	20.00
F	11.06
G	11.08

の円筒になる加工液量である。Type B に比べて、スパーサの直径が小さい分、加工液が多くなる。加工量は MCF 加工液が多い場合、すなわち、工具が MCF 加工液に浸漬した場合に一番多い。これは永久磁石端面近傍で鉄粉の密度が高くなり太い磁気クラスタを形成し、その結果、加工圧力が大きくなるためと考えられる。スパーサの直径が永久磁石より小さい Type C の場合、流量が Type B より多いにもかかわらず加工量は小さくなる。これは鉄粉が永久磁石の外周近傍の端面に多く集まり、管軸方向に形成される磁気クラスタの半

Fig. 14 Change of current with time under each experimental condition.

径方向の加工力が小さくなるためと考えられる。電場のみ印加した場合には加工はほとんど行われなことがわかる。また、パルス電場を印加した場合は直流電場を印加した場合に比べて僅かに少ない。平面研磨に見られた大きな違いはない。砥粒に GC を使用した場合、加工量は WA の場合より小さい。これは平面研磨と逆の結果である。この原因としては、円筒内面の場合、電場強度が永久磁石外周面の方が加工面より大きいため、砥粒が永久磁石外周面側により多く付着したことが考えられる。

電流の時間的変化を Fig. 14 に示す。電流の変化は工具が MCF 加工液に浸漬した場合が一番大きい。これは永久磁石端面近傍で鉄粉の密度が高いため太い磁気クラスタを形成するため、電気抵抗が小さくなるためと考えられる。Type C の場合も同様に永久磁石端面近傍で鉄粉の密度が高いため電流が流れやすくなると考えられる。一方、GC 砥粒の場合、導通状態に至るまでの電流密度の値は小さい。しかし、実験 B とほぼ同じ加工時間で導通状態になる。

6 結言

MCF に磁場に加え電場を印加する研磨加工法を提案して、加工特性と電気的特性を明らかにした。平面研磨では電場印加により、加工量が増加するとともに加工領域も広くなる。円筒内面加工では工具回転数の広い範囲で加工能率が高くなり、加工面も平滑化されることがわかった。

参考文献

- [1] 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁場制御による磁気混合流体を用いた平面研磨の基本特性, 実験力学, Vol. 12,

No.4, p. 354, 2012.

- [2] 西田均, 島田邦雄, 吉野一郎, 磁気混合流体を用いた円筒内面マイクロ加工の開発研究, 実験力学, Vol. 12, No.4, p. 361, 2012.

- [3] 富宇賀健, 岡本孝司, 斑目春樹, 可視化による電気粘性流体の研究, 可視化情報学会誌, Vol.17, p. 229, 1997.

- [4] 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 百生登, 山本久嗣, 磁場制御による平面および凹面に対する精密研磨特性, 砥粒加工学会誌, Vol.61, No.12, p. 666, 2017.

- [5] 西田均, 山本久嗣, 百生登, 池田慎治, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いた円筒内面マイクロ加工における加工量特性, 日本 AEM 学会誌, Vol.27, No.3, p. 308, 2019.