

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

西田 均*, 島田 邦雄**, 井門 康司***

Basic Characteristics of Surface Polishing Utilizing Magnetic Compound Fluid by Magnetic Field Control

Hitoshi NISHIDA, Kunio SHIMADA and Yasushi IDO

In this study, we investigated the shape of polished surface when imposing DC magnetic field and pulse magnetic field in order to obtain basic data on the surface polishing utilizing magnetic compound fluid (MCF) as a magnetic responsive fluid. We performed polishing experiments for a brass disc by using surface polishing apparatus which can impress pulse magnetic field. We clarified that the shape of polished surface is different between in the cases of DC magnetic field and pulse magnetic field. The polished surface is smoothed along radial direction with a wide region at the case of 0.1 Hz magnetic field. The profile curves are thought to reflect the distribution of magnetic clusters related to the polishing. The pressure distribution on the surface of the polished workpiece were measured. Based on these results, the time change of magnetic clusters distribution on the polishing was clarified.

Key words: Magnetic Compound Fluid, Surface Polishing, Profile Curve, Magnetic Field, Magnetic Cluster, Pressure Distribution

1. 緒言

現在、金型の分野では高精度な加工と仕上げが要求されている。特にレンズ金型の研磨は複雑形状の表面を高い形状精度で、かつ、鏡面に仕上げる必要がある。また、半導体や磁気記憶装置の分野では、優れた表面粗さと平面度になるダメージを与えない研磨技術が求められている。これらに対して、従来のポリシングでは加工部に工具が届かなかったり、砥粒の分布を制御できないことなどのために、高い形状精度の鏡面仕上げは困難な状況である¹⁾。

このような状況で磁場に応答する機能性流体を利用した研磨が目ざされている²⁾。中でも磁気混合流体 (MCF) を用いた研磨は細長く弾力性のある磁気クラスタによって行なわれるため、工具と工作物の間隔を広く取ることができる³⁾。さらに、ナノメーターオーダーの研磨が可能で、砥粒の制御が可能なことなどの優れた特性を持っている⁴⁾。そのため、MCF を用いた研磨の各種研究が進められている^{5),6)}。

そこで本研究では、MCF による研磨の高能率化・高精度化のための基礎データを得るために、平面研磨に及ぼす印加磁場周波数の影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、研磨後の表面形状に及ぼす印加磁場周波数の影響を調べる。また、研磨面の表面形状は磁気クラスタの分布形状が反映すると考えられる。そのため、磁場印加後の

磁気クラスタの分布の時間的変化を研磨面の圧力分布の時間的変化から明らかにする。この結果をもとに表面形状に及ぼす印加磁場周波数の効果を考察する。

2. MCF 研磨の加工原理

Fig. 1 は被研磨物 (ワーク) とその上方に設置された永久磁石、および、その間にある非磁性体砥粒と α -セルロースを含んだ MCF の模式図である。磁力線方向に MCF の分散粒子である鉄粉とマグネタイトからなる磁気クラスタが形成される。砥粒は磁場の弱いワークの上面や磁気クラスタの内部あるいは表面に付着して、磁気クラスタに保持される。本研磨は砥粒に磁気クラスタの加工力が作用することと磁気クラスタとワークとの相対運動によって研磨がなされると考えられている。

研磨工具に円柱状の永久磁石を用いた場合、研磨工具の回転運動のみによる定点研磨では、ワークの研磨表面にリング状の溝が発生することが知られている⁷⁾。研磨表面は磁気クラスタの分布形状が反映されるので、円柱状の永久

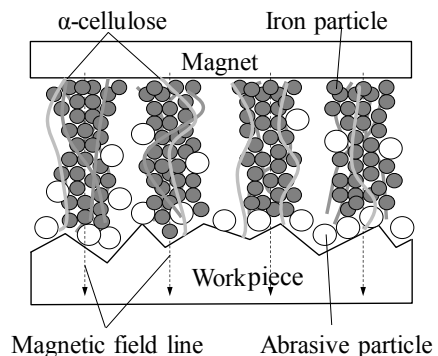


Fig. 1 Schematic diagram of polishing mechanism

原稿受付 2012 年 8 月 31 日

* 正会員 富山高等専門学校電気制御システム工学科 (〒939-8630 富山県富山市本郷町 13)

** 正会員 福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島市金谷川 1)

*** 正会員 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

磁石を用いた工具での磁気クラスタの分布は半径方向に一様でないと思われる。本研究では研磨表面形状に影響を与える磁気クラスタの分布の時間的変化を明らかにする。

3. 研磨実験装置と実験条件

Fig. 2 に平面研磨実験装置の外観を示す。装置は小型フライス盤を使用しており、磁場発生源（電磁石）と研磨工具（電磁石の鉄心）、および、ワークが設置され MCF が満たされた容器から構成されている。容器は X-Y ステージに固定されている。研磨工具はフライス盤の主軸に取り付けられており回転数が設定でき、磁場強度はコイルに流す電流によって制御できる。磁極工具の材質は純鉄で、形状は先端がフラットな円錐台である。本研究の実験条件を Table 1 に示す。本実験における研磨工具から発生する z 方向の磁束密度分布を Fig.3 に示す。また、パルス磁場の duty 比は 0.5 である。

使用した MCF の成分を Table 2 に示す。母液はケロシンベース磁性流体 (MSG60, フェローテック製) である。鉄粉はカーボニル鉄粉であり、砥粒には非凝集アルミナを用いた。α-セルロースは MCF のせん断力を増加する機能がある。実験では 1 回の研磨実験ごとに 3.2 ml の MCF を用いた。また、ワークには研削加工した黄銅円板 (C3604, φ20×4.5) を用いた。なお、ワークの表面性状評価パラメータの算術平均粗さの平均値は、0.135 μmRa である。

4. 研磨実験結果

4. 1 表面粗さと研磨量の変化

Fig. 4 (a) に砥粒径 1 μm の場合の直流磁場とパルス磁場

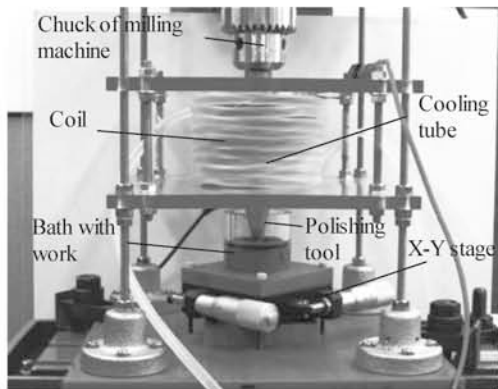
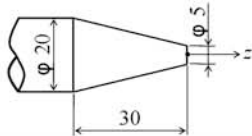


Fig. 2 External view of experimental setup
Table 1 Experimental conditions

Polishing tool (ELCH2S)	
Number of revolution of polishing tool	500 rpm
Clearance	1 mm
Magnetic flux density	0.180 T (z=1mm)

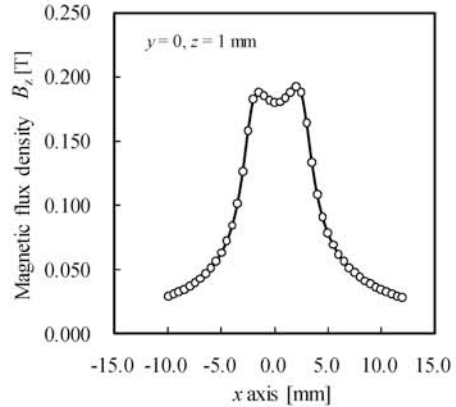
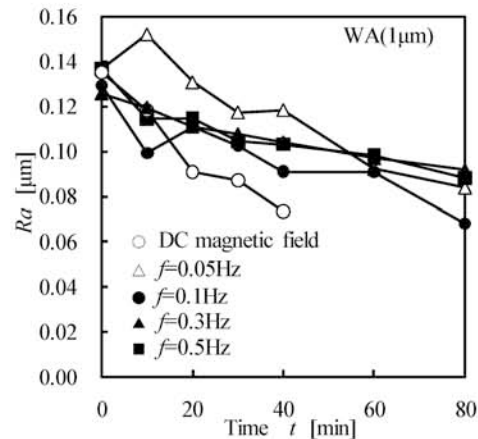


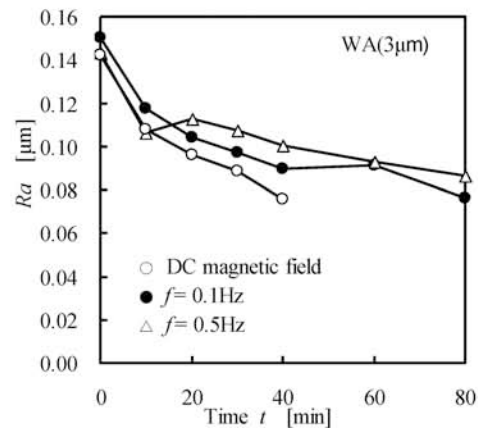
Fig. 3 Distribution of magnetic flux density (z = 1 mm)

Table 2 Components of testing fluid

MF(MSG60)	39.2 wt.%
Iron powder(1.2 μm, HQ)	30.4 wt.%
Al ₂ O ₃ abrasive(1 μm, 3 μm)	20.0 wt.%
α-cellulose	6.4 wt.%
Kerosene	4.0 wt.%



(a) Abrasive grain diameter 1 μm

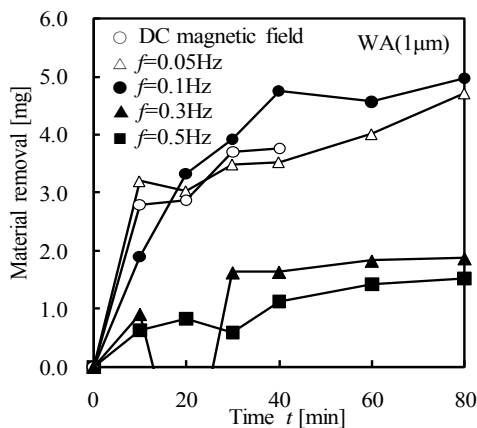


(b) Abrasive grain diameter 3 μm

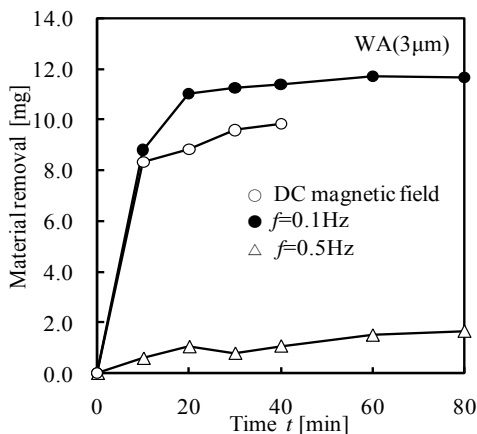
Fig. 4 Time change of the surface roughness influenced by the frequency

(周波数 f) におけるワークの算術平均粗さ Ra の時間的変化を示す。なお、Ra はワークの直径方向の評価長さ 18

mmにおける値である。Raの減少割合は直流磁場 ($f=0$ Hz) と $f=0.1$ Hz の場合に大きいことがわかる。実際の研磨時間が同等と考えられる直流磁場の $t=40$ min と $f=0.1$ Hz の $t=80$ min では Ra の値は同程度である。また, Fig.4(b) に砥粒径 $3\mu\text{m}$ の場合を示す。この場合も同様な傾向を示している。Fig.5(a) に砥粒径 $1\mu\text{m}$ の場合の直流磁場とパルス磁場におけるワークの研磨量の時間的変化を示す。研磨能率は直流磁場と周波数の低い $f=0.05$ Hz, 0.1 Hz において高い。一方, 周波数の高い $f=0.3$ Hz, 0.5 Hz の場合, 研磨能率は低いことがわかる。 $t=40$ min における直流磁場と $f=0.1$ Hz の研磨量を比較すると $f=0.1$ Hz の方が多い。また, Fig.5(b) に砥粒径 $3\mu\text{m}$ の場合を示す。この場合も同様な傾向を示すことがわかる。パルス磁場では直流磁場と比べて砥粒がワークに作用する時間が半分であるので, パルス磁場では砥粒が効果的に働くことがわかる。パルス磁場では磁気クラスタの形成と崩壊が繰り返される。その時, 砥粒は磁気クラスタに保持されたり, MCF に分散したりする。すなわち, パルス磁場では砥粒が磁気クラスタに保持される度に研磨面に対して毎回異なる切刃で作用すると考えられる。



(a) Abrasive grain diameter $1\mu\text{m}$



(b) Abrasive grain diameter $3\mu\text{m}$

Fig. 5 Time change of the material removal influenced by the frequency

4. 2 表面粗さと研磨量に及ぼす磁場周波数の影響

Fig.6 は磁場周波数に対する表面粗さの割合 Ra_{40} / Ra_0 (研磨時間 40 分と研磨前の表面粗さの比)を示したものである。直流磁場の場合に一番大きいことがわかる。一方, Fig.7 は磁場周波数に対する研磨量の割合 M_t / M_D (研磨時間 40 分の研磨加工量と直流磁場での研磨時間 40 分の研磨量の比)を示したものである。 $f=0.1$ Hz においてピークを持つことがわかる。 $f=0.1$ Hz の砥粒 $1\mu\text{m}$ の場合には, 直流磁場に対して 30% 近く大きいことがわかり, 砥粒が効果的に作用していると考えられる。

研磨量の割合が磁場周波数によって変化するのは以下のように考えられる。MCF 中の砥粒の挙動が可視化実験から以下のように明らかになっている⁸⁾。磁場印加後, 磁力線に沿って磁気クラスタが形成され, その後, 磁気クラスタ同士の合体が起こり, 大きな磁気クラスタを作る。また, 磁場印加後, 砥粒も反磁性体のようにふるまいクラスタを作る。そして, 磁気クラスタに砥粒のクラスタが付着する。この結果から, 磁場印加後, 砥粒を保持するための磁気クラスタの形成に時間がかかると考えられる。また, 磁気クラスタに保持された砥粒による研磨にも時間が必要である。

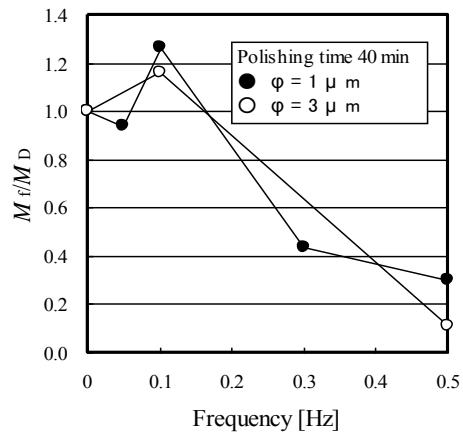


Fig. 6 Relation between surface roughness ratio and magnetic field frequency

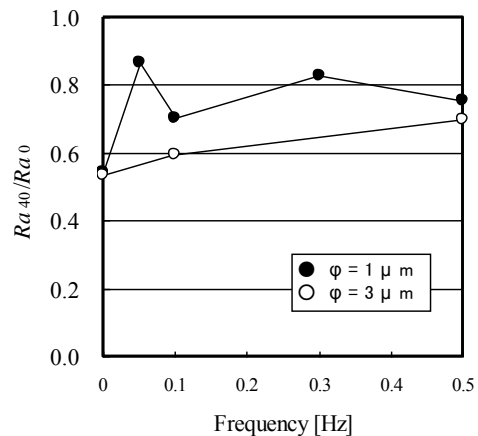
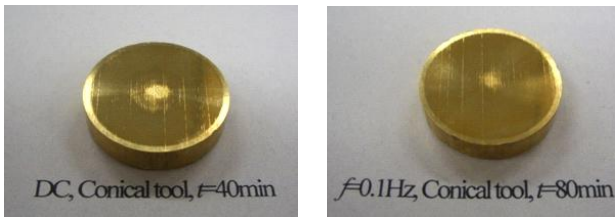


Fig. 7 Relation between material removal ratio and magnetic field frequency

このことから、磁場周波数が $f = 0.1 \text{ Hz}$ より大きくなると、磁気クラスタの形成と砥粒による研磨時間が確保できないと考えられる。一方、直流磁場の場合、時間の経過とともに研磨工具周りにおける MCF の流れの影響で磁気クラスタ同士の合体がさらに進み、研磨時間も確保され、より大きな磁気クラスタが形成されるものと考えられる。

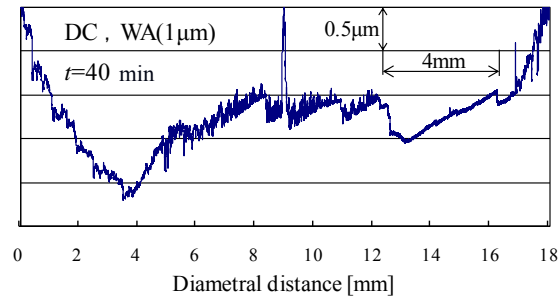
4. 3 断面曲線に及ぼす磁場波数の影響

研磨に関わる磁気クラスタの分布は研磨後の表面形状である断面曲線に反映されると考えられる。まず、Fig. 8 に

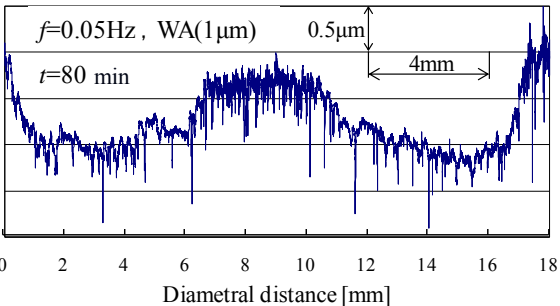


(1) DC, $t = 40 \text{ min}$ (2) $f = 0.1 \text{ Hz}$, $t = 80 \text{ min}$

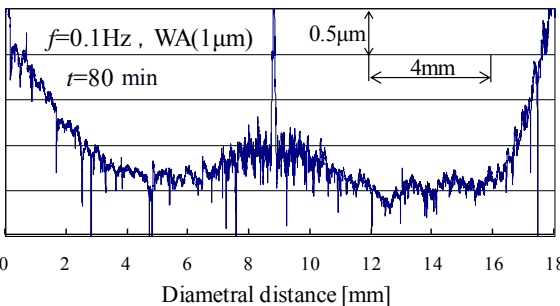
Fig. 8 Photographs of polished workpieces



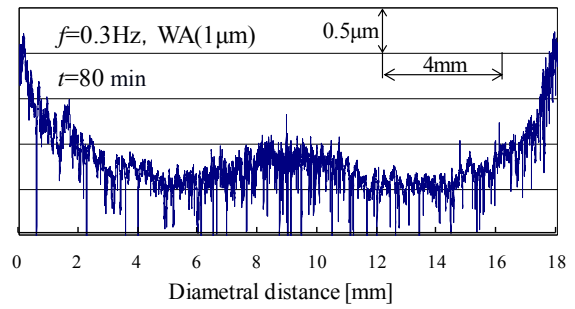
(a) DC



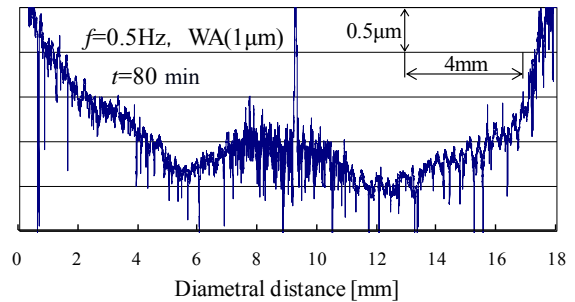
(b) $f = 0.05 \text{ Hz}$



(c) $f = 0.1 \text{ Hz}$



(d) $f = 0.3 \text{ Hz}$



(e) $f = 0.5 \text{ Hz}$

Fig. 9 Profile curves of polished surfaces (Abrasive grain diameter $1 \mu\text{m}$)

直流磁場と $f = 0.1 \text{ Hz}$ の場合の研磨後のワークの写真を示す。直流磁場の場合、研磨がされていない領域が中心とその外周の2つの領域が存在することがわかり、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ の場合、研磨がされていない領域は中心部のみであることがわかる。このことは断面曲線から詳細に見ることができる。Fig. 9 に砥粒径 $1 \mu\text{m}$ の場合の直流磁場とパルス磁場での断面曲線(ワークの研削方向に対して直角方向)を示す。まず、直流磁場の場合、研磨がされていない領域が中心とその外周の2つの領域が存在することがわかる。次に、パルス磁場では中心領域のみが研磨されていないことがわかる。断面曲線は周波数の増加に伴い変化することを示しており、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ では半径 2 mm 以上の広い範囲で平坦に平滑化されていることがわかる。 $f = 0.3 \text{ Hz}$ では $f = 0.1 \text{ Hz}$ の場合と平均曲線は良く似ているが、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ に比べると全ての範囲で断面曲線の山と谷の差が大きいことがわかる。周波数の高い $f = 0.5 \text{ Hz}$ では中心領域の周りに溝が発生している。

この結果から、 $f = 0.1 \text{ Hz}$ の場合、半径方向の広い範囲で平滑化され、かつ、加工量も多いことがわかる。また、直流磁場とパルス磁場では形成される磁気クラスタの分布が異なり、直流磁場ではパルス磁場に比べ半径方向に不均一な分布になっていると考えられる。このことを次章の圧力分布の時間的変化から明らかにする。

5. 研磨面の圧力分布の時間的変化

圧力センサを用いて研磨面の圧力分布を調べる前に、直流磁場とパルス磁場におけるワークに作用する軸力とトルク

を明らかにする。すなわち、直流磁場とパルス磁場における過渡現象を比較する。軸力とトルクの測定は、ワークが設置され供試流体が満たされた容器を直列に接続されたプレスフォースセンサ (9313AA, キスラー製) とリアクショントルクセンサ (9329A, キスラー製) の上部に固定して行った。実験条件は研磨実験と同じである。Fig. 10 に直流磁場における軸力 F_z とトルク M_z の時間的変化を示す。ワークに作用する軸力は、磁場印加後、最初急激に上昇し、その後、徐々に増加していく。トルクも最初急激に上昇し、その後、急激に減少して一定値になる。時間の経過とともに、軸力が上昇する一方でトルクが一定値を保っていることから、直流磁場では磁気クラスタは時間の経過とともに中心部に集まると推定できる。Fig. 11 にパルス磁場周波数 $f=0.1$ Hz における軸力とトルクの時間的変化を示す (中央の 3 パルスが $f=0.1$ Hz に対応)。磁場印加後、直流磁場と同様の傾向を示しており、磁場の解除によってそれぞれの値は磁場印加前と同じになることがわかる。また、パルス磁場が印加されるごとに同じ過渡現象を繰り返すことがわかる。

この実験結果から、まず、直流磁場とパルス磁場における磁場印加後の過渡現象は同じであることがわかる。すなわち、直流磁場とパルス磁場における磁場印加後の圧力分布の時間的変化は同じであると考えられる。次に、磁場を解除したとき、軸力とトルクが短時間で磁場印加前と同じ値になることから、磁気クラスタは工具の回転流れによって短時間で崩壊することがわかる。すなわち、圧力分布は短時間で磁場印加前と同じになることがわかる。また、磁

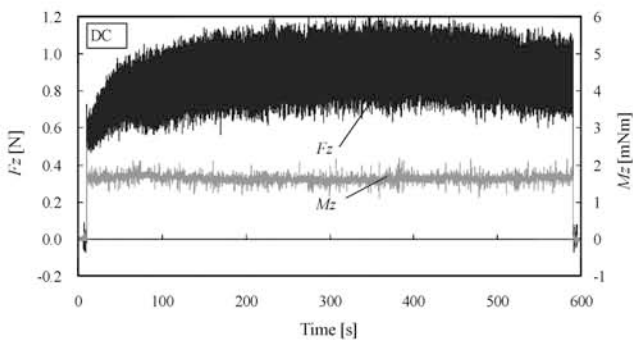


Fig. 10 Time change of axial force and torque (DC)

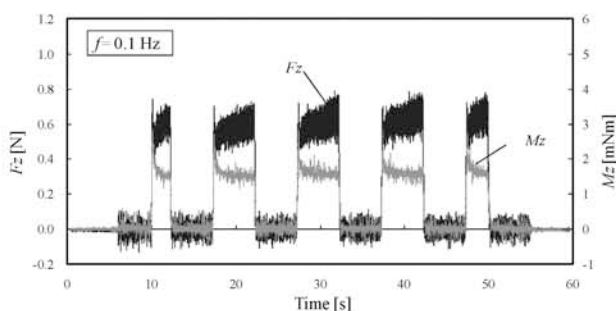


Fig. 11 Time change of axial force and torque ($f=0.1$ Hz)

気クラスタの残留磁化の影響はほとんどないと考えることができる。

研磨面の圧力計測装置を Fig. 12 に示す。圧力分布の測定は中心に圧力孔 (内径 3 mm) を持つ内径 100 mm, 内側高さ 10 mm の容器を XY ステージに固定して行った。この圧力の計測実験では 9.6 ml の MCF を用いた。圧力孔の下にはダイヤフラム式の圧力センサ (AP-12S, キーエンス製) が設置されている。研磨工具中心座標に対して XY ステージの移動により圧力孔を半径方向 r の位置に設定し、研磨工具を回転させ、その後、直流磁場を印加した。研磨工具

回転後の圧力の時間的変化を計測した。Fig. 13 に半径方向 r の各位置 (半径方向に 1 mm 間隔で計測) における圧力の時間的変化を示す。 $r=0$ mm と $r=4$ mm では時間の経過とともに増加することがわかる。一方、 $r=2$ mm では時間の経過に対して変化しないことがわかる。

各位置における磁場印加後の時間ごとの圧力をもとに時間ごとの半径方向の圧力分布を求めた結果を Fig. 14 に示す。まず、圧力分布は時間的に変化することがわかる。次に、中心 ($r=0$ mm) では磁場印加時間 t に対して増加することがわかる。 $r=4$ mm において $t=2$ s では極小値を持つが、 $t=6$ s を越えると極大値を持つようになることがわかる。研磨面の圧力は磁気クラスタによる圧力を示していると考えられる。このことから、時間の経過とともに磁気クラスタは中心に集まり、太い磁気クラスタが形成されることがわかる。また、 $t=6$ s を越えると $r=4$ mm においても太い磁気クラスタが形成されることがわかる。

直流磁場における研磨では磁場印加時間が $t=50$ s より長いために、中心と $r=4$ mm に太い磁気クラスタが形成されるので、磁気クラスタの半径方向の分布は不均一になっている。その結果、断面曲線は半径方向に複雑に変化することがわかる。一方、 $f=0.1$ Hz の場合では、1 回の磁場印加は 5 s 間であり、 $t=6$ s を越えると $r=4$ mm における太い磁気クラスタは形成されない。結果として、磁気クラスタの半径方向の分布は比較的均一な状態のために平坦な研磨面が得られることがわかる。

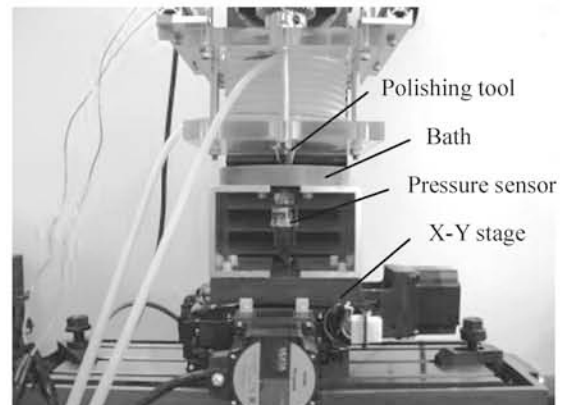
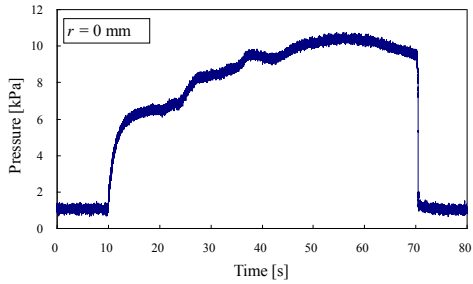
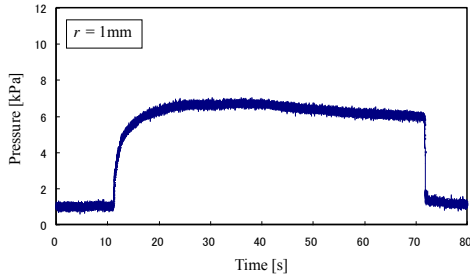


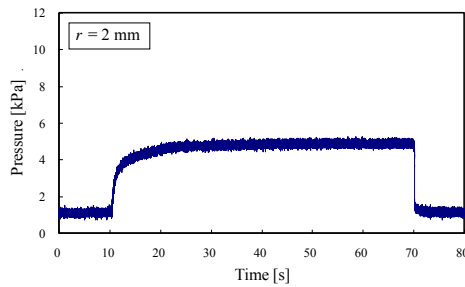
Fig. 12 Experimental apparatus for measuring pressure



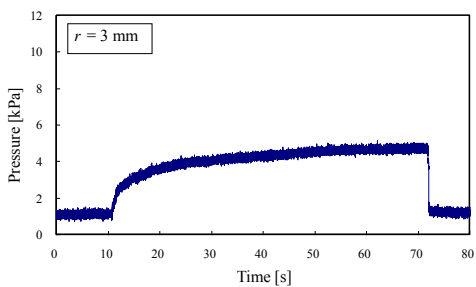
(a) $r = 0$ mm



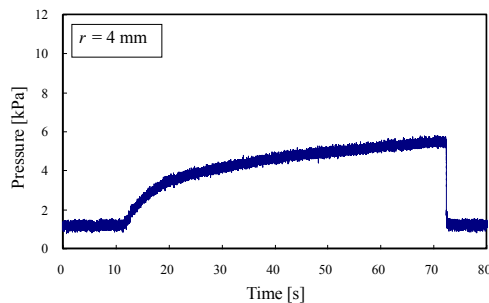
(b) $r = 1$ mm



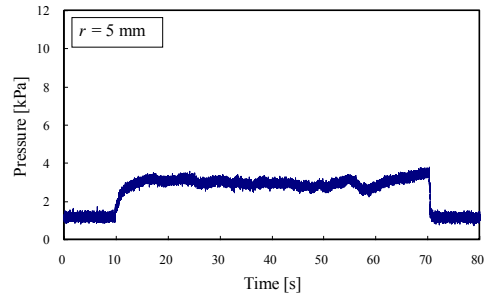
(c) $r = 2$ mm



(d) $r = 3$ mm



(e) $r = 4$ mm



(f) $r = 5$ mm

Fig. 13 Time change of pressure

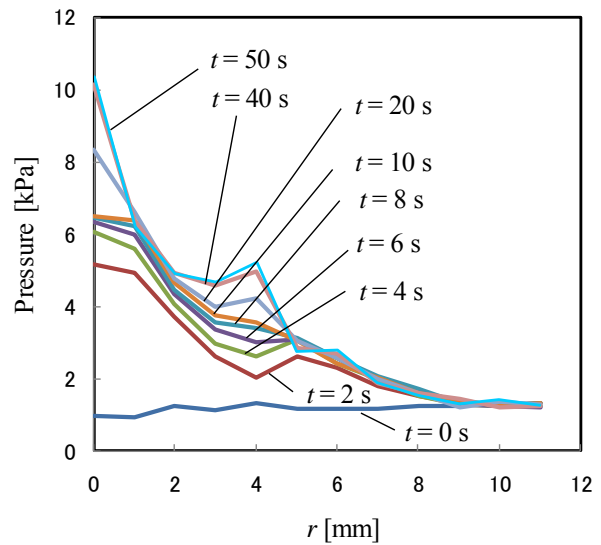


Fig. 14 Time change of pressure distributions

6. 結 言

MCF を用いた定点研磨における研磨後の表面形状に及ぼす直流磁場とパルス磁場周波数の影響を明らかにした。本研究をまとめると以下の通りである。

- (1) 表面粗さの減少割合は直流磁場が大きく、研磨加工量は $f = 0.1$ Hz の場合が大きい。
- (2) 直流磁場とパルス磁場では研磨後の表面形状である断面曲線が異なる。直流磁場では研磨されない領域が中心とその外周の2つの領域が存在する。一方、 $f = 0.1$ Hz の場合、半径方向の広い範囲で平滑化される。
- (3) 直流磁場とパルス磁場におけるワークに作用する軸力とトルクは、磁場印加後、同様の变化を示す。パルス磁場では磁場印加されるごとに同じ過渡現象を繰り返す、磁場の解除後のそれぞれの値は短時間で磁場印加前と同じになる。
- (4) 半径方向の圧力分布は磁場印加後、時間的に変化する。磁場印加後、磁気クラスタは中心に集まる。また、 $t = 6$ s を越えると $r = 4$ mm においても太い磁気クラスタが形成される。直流磁場の磁気クラスタの半径方向の分布は不均一になっている。
- (5) $f = 0.1$ Hz の場合、 $r = 4$ mm において太い磁気クラスタ

が形成されないので, 磁気クラスタの半径方向の分布は比較的均一になる. このために, 半径方向に平坦な研磨面が得られる.

参考文献

- 1) Umehara, T., Aoyama, H. and Shinohara, A.: Lapping of Glass Plate with Magnetic Fluid and Magnetic Field (in Japanese), *J. JSME(C)*, **75-757**(2009), 2423-2428.
- 2) Shimada, K.: Characteristics of Intelligent Fluid and its Relation to Polishing Utilizing Intelligent Fluid (in Japanese), *J. JSAT*, **56-5**(2012), 291-294.
- 3) Shimada, K., Matsuo, Y., and Yamamoto, K.: Study on Float Polishing Utilizing New Magnetic Responsive Intelligent Fluid (in Japanese), *J. JSEM*, **7-2**(2007), 168-176.
- 4) Matsuo, Y., Yamamoto, K., Nakamura, T., Hanamura, R. and Shimada, K.: Three-Dimensional Nanolevel Polishing Using MCF (in Japanese), *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**,12-16(2007),12-16.
- 5) Wu, Y., Tezuka, K., Shimada, K. and Yamamoto, K.: Fundamental Performance of MCF (Magnetic Compound Fluid) Polishing Tool on Thinning Process of Quartz Wafer (in Japanese), *J. JSEM*, **7-3**(2007), 221-226.
- 6) Sato, T., Wu, Y., Lin, W. and Shimada, K.: Study on Magnetic Compound Fluid (MCF) Polishing Process Using Fluctuating Field, *J. JSME(B)*, **75-753**(2009), 1007-1012.
- 7) Shimada, K.: Functional Fluid Dynamics 13 (in Japanese), *Science of Machine*, **60-10**(2008), 1091-1099.
- 8) Ido, Y., Yamada, T., Yamaguchi, T. and Nishida, H.: Numerical Analysis of Behavior of Particles in the MCF Polishing Process of an Inner Tube Wall (in Japanese), *J.JSAEM*, **17-4**(2009),592-598.