

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05739

研究課題名(和文) ナノ磁気クラスタによる微細複雑形状に対する形状精度を保持した超精密研磨の開発研究

研究課題名(英文) Development study of super precision polishing with maintenance of form accuracy for surface having micro-complex shapes using nano-sized magnetic clusters

研究代表者

西田 均 (Nishida, Hitoshi)

富山高等専門学校・電気制御システム工学科・教授

研究者番号：00390435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではナノ磁気クラスタを形成する磁気混合流体(NMCF)を開発して、硬靱性材料に対する研磨性能を調べた。また、磁気混合流体(MCF)を用いた場合の平面研磨に及ぼす磁場強度の影響と複雑形状および微細構造に対する精密研磨の特性を明らかにした。これらの研究結果を基に、微細形状表面研磨に対応できる新型の研磨実験装置を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a magnetic compound fluid (MCF) which forms nano-sized magnetic clusters (NMCF) was developed, and then the characteristics of polishing for hard toughness materials by utilizing the NMCF were investigated. Furthermore, the effect of magnetic field strength on the polishing and the polishing characteristics on complex and micro surface structures by utilizing MCF were clarified. Based on these findings, the new polishing test equipment for micro-complex shaped surface was designed and manufactured.

研究分野：流体工学, 生産・加工

キーワード：磁気機能性流体 磁気クラスタ 精密研磨 微細構造表面 形状精度 せん断応力

1. 研究開始当初の背景

最近、急速に進展しているマイクロ加工技術によって、表面に微細構造を持つマイクロ流体デバイス(μ -TAS)や高性能光学素子(マイクロフォトニクス)、機能表面の微細周期構造などの形状精度の高い金型が製作されている。これらに対して、加工面の粗さの向上と微細バリの除去のために微細工具による超精密研磨が必要になっている。現在、熟練者による長時間の研磨作業が行われているが、形状精度を保持した研磨は不可能な状況である。この問題を解決するために、本研究では磁場に応答する磁気混合流体(MCF)を用いた研磨法(MCF 研磨)の開発研究を進めている。MCF 研磨は砥粒に磁気クラスター(鉄粉(粒径 $1.2\mu\text{m}$)とマグネタイト粒子(粒径 10nm)からなる凝集体)の加工力が作用することで行われるため、mm オーダーの凹面(例えば、直径 5mm 、深さ 0.5mm の球状凹面)に対して、形状精度を保持した精密研磨が可能である。

2. 研究の目的

現在、硬靱性材料表面に微細な構造(形状寸法が 1mm 以下)を持つ金型などに対して、形状精度を保持した高能率な自動の精密研磨法が求められている。そのため、本研究では微細形状の形状寸法に対応したナノメーターオーダーの磁気クラスターを形成する新規の磁気混合流体(NMCF)を開発することとNMCF による微細複雑形状表面研磨法を実現するために必要となる MCF 研磨の加工特性、加工量分布の予測、並びに、MCF の電磁流体力学的特性に及ぼす分散粒子の影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的に対して、以下の項目について研究を進めた。

- (1) ガラス研磨用の NMCF と水ベース MCF(WMCF)を開発して、その電磁流体力学的特性を明らかにするとともに、微細構造を有する石英ガラスに対する研磨特性を調べた。
- (2) MCF を用いた平面研磨の加工能率向上のために、加工特性に及ぼす印加磁場強度と工具とワークの隙間間隔の影響を調べた。
- (3) MCF の電磁流体力学的特性として、磁場下における流動曲線に及ぼす分散粒子の影響を調べた。
- (4) 微細形状表面に対する研磨装置を開発するとともに先端形状の異なる工具を製作して、工具ごとの研磨特性を調べた。
- (5) 磁場解析による加工量分布の予測法を開発するとともにその妥当性を検証した。
- (6) 平面内に同心円状に微細な V 形溝を有するワークに対する精密研磨実験を行い、加工量特性と形状特性を明らかにした。

4. 研究成果

(1) NMCF と WMCF による石英ガラスに対する研

磨特性

硬靱性材料の石英ガラスの研磨を目標に開発した微細構造用の NMCF と平面用の WMCF のそれぞれの流体成分を表 1 に示す。研磨材料が石英ガラスであるため、母液である磁性流体はいずれも水ベースである。それぞれの流体の流動曲線を図 1 に示す。研磨量に相関するそれぞれの流体のせん断応力は従来の MCF(母液がオイルベース磁性流体、分散磁性粒子が HQ)のせん断応力と同等であることがわかった。すなわち、せん断応力の値から、それぞれの流体が研磨に必要な加工力を有することがわかった。

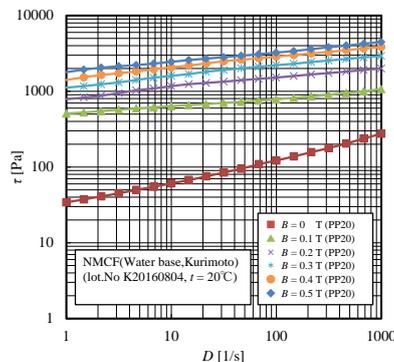
使用した研磨装置を図 2 に示す。研磨実験条件を表 2 に示す。また、被研磨物(ワーク)を図 3 に示す。ワークは直径 30mm の石英ガラス製円板で、表面に直径 1.450mm 、深さ $62\mu\text{m}$ の円孔を 49 個有する(穴番号 $h(1,1) \sim h(7,7)$)。NMCF を用いた研磨では研磨量は非常に小さく、円孔の底面中央で研磨がわずか

表 1 流体成分
(a) NMCF

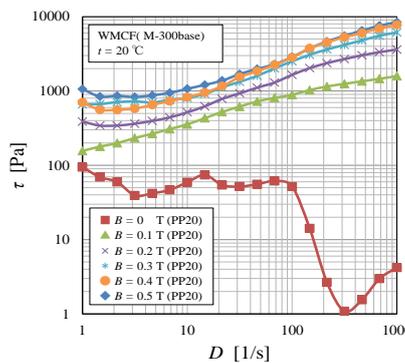
MF (EMG-700)	41.4 wt.%
Iron particle (100 nm)	24.6 wt.%
CeO ₂ abrasive (1.3 μm)	34.0 wt.%

(b) WMCF

MF (M-300)	37.5 wt.%
Iron powder (1.2 μm , HQ)	24.9 wt.%
α -cellulose	5.2 wt.%
CeO ₂ abrasive (1.3 μm)	32.4 wt.%



(a) NMCF



(b) WMCF

図 1 流動曲線

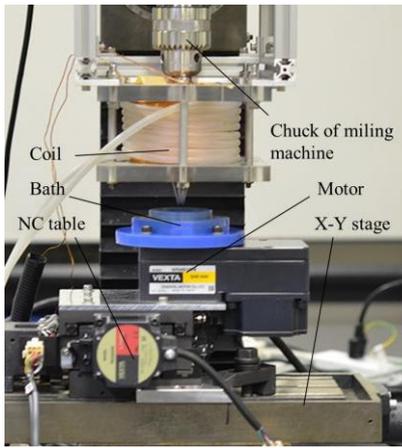


図2 研磨実験装置

表2 実験条件

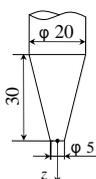
Polishing tool (ELCH2S)	
Number of revolution of tool	500 rpm
Magnetic flux density	0.180 T (z = 1.0 mm), DC
Clearance	0.3 mm
Polishing time	30 min



図3 研磨物

に確認できるが、上部角部や底面角部では全く確認できなかった。NMCF の磁気クラスタの直径は WMCF のそれに比べて小さい。また、NMCF の磁気クラスタの形状はネットワーク構造と考えられる。このため、鉄ナノ粒子の直径より大きい直径の砥粒がネットワークに保持され、加工表面に存在していないことが考えられる。分散砥粒の粒径は鉄ナノ粒子の粒径に比べ、同等、あるいは、小さいものが必要と考えられる。次に、WMCF の場合の結果を図4に示す。円孔の底面角部では研磨が行われないが、底面中央と上部角部で表面の平滑化と形状を保持した研磨が行われた。底



(a) 研磨前 (b) 研磨後
図4 円孔中心部の表面写真(1900倍)
(穴番号 h(5, 3))

面角部が研磨できないのは、WMCF の直径が 0.3 mm と考えられるので、磁気クラスタが底面角部に作用しないためと考えられる。また、WMCF による石英ガラス平面に対する研磨特性を明らかにした[学会発表⑩]。

(2) MCF 研磨に及ぼす印加磁場強度と工具とワークの隙間間隔の影響

形状精度を保持した高能率な精密研磨の実現のためには、MCF 研磨における加工能率に及ぼす印加磁場強度の影響と加工精度に及ぼす工具とワークの隙間間隔の影響を明らかにする必要がある。図5にパルス磁場の場合の印加磁場強度ごとの加工量と工具とワークの隙間間隔の関係を示す。直流磁場では磁束密度 $B = 180 \text{ mT}$ において飽和状態になることが確認された。一方、パルス磁場では、 $B = 360 \text{ mT}$ においても飽和状態にはならず、磁束密度の増加につれ加工能率は向上することが明らかになった。また、隙間間隔ではパルス磁場において、それぞれの磁場強度で加工量が一定の隙間間隔の領域が存在することがわかった。すなわち、パルス磁場では表面形状のある範囲の高さに対して加工量が同じになり、ある範囲の高さにおいて形状精度を保持した研磨が行われることが明らかになった[学会発表⑥]。

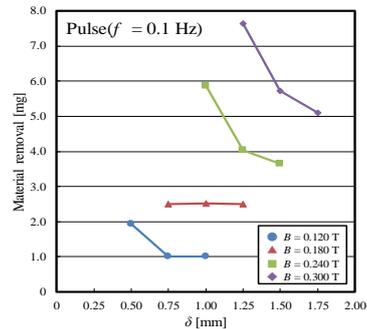


図5 パルス磁場の場合の印加磁束密度ごとの加工量と隙間間隔の関係

(3) MCF の電磁流体力学的特性に及ぼす分散粒子の影響

MCF のそれぞれの分散成分が加工力に相関するせん断応力に及ぼす影響を明らかにする必要がある。これにより、それぞれの分散成分の役割と機能が明らかになり、NMCF の開発の基礎データになる。それぞれの供試流体の成分を表3に示す。図6にそれぞれの供試流体の一樣磁場下における流動曲線の実験結果を示す。この結果、鉄粒子はせん断応力の増加に大きな影響を与え、 α -セルロース

表3 各種供試流体の成分

Test fluid	A	B	C	D
Magnetic fluid (MSG5 60)	100	92.0	79.9	70.7
Iron powder(1.2 μm , HQ)	0	8.0	8.0	8.0
Al ₂ O ₃ Abrasive grain(3 μm)	0	0	12.1	12.1
α -cellulose	0	0	0	9.2

[vol.%]

は磁気クラスタの結合や補強の役割を果たすことが明らかになった[学会発表③].

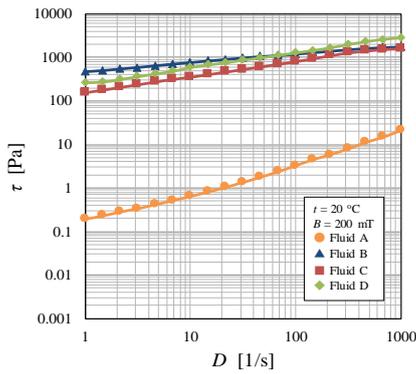


図 6 各種供試流体の流動曲線

(4) 研磨工具ごとの加工特性と加工量分布の予測

微細形状の研磨のために、これまでの成果を基に図 7 に示す新規の研磨実験装置を開発した。また先端形状のなる 3 種類の工具を製作して、それぞれの工具の加工量特性を明らかにした。表 4 に 3 種類の工具の先端形状を示す。図 8 に Type A の場合の電磁石コイルに流す電流と加工量の関係を示す。パルス磁場の場合、電流と加工量は相関する可能性があることがわかる。この関係は他の工具においても同様であった。図 9 に磁場解析による Type A の場合の磁束密度と磁力線の分布を示す。この解析結果は実際の磁気クラスタの方向とワークに作用する領域を説明できることがわかった。また、この解析データを使って磁気的圧力分布の計算を行った。磁気的圧

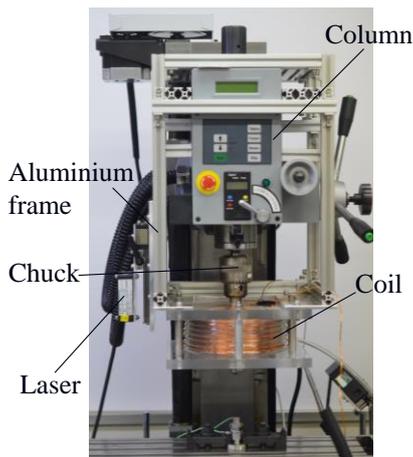


図 7 開発した新型研磨装置

表 4 3 種類の工具

	Type A	Type B	Type C
Polishing tool (ELCH2S)			

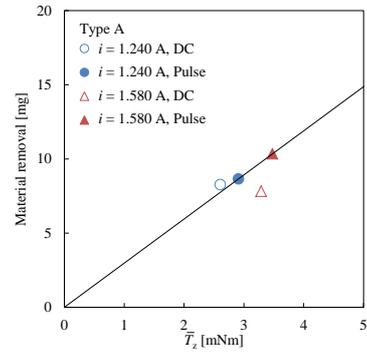


図 8 ワークに作用するトルクと加工量の関係 (Type A の場合)

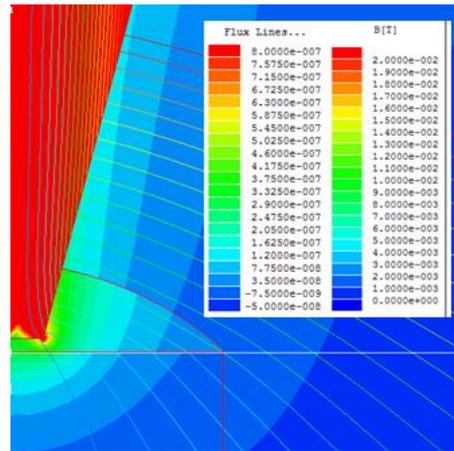


図 9 磁場解析による磁束密度と磁力線の分布 (Type A の場合)

力の導出には仮想変位法を用いた。なお、解析において、MCF の比透磁率は 1.5 とした[学会発表①, ⑤].

形状精度を保持した精密研磨には加工量分布の予測が必要であり、これは磁気的圧力とその場所の加工速度の積により計算できる[学会発表⑦]. 磁場解析と加工表面の流動解析により、加工量分布の予測が可能であることがわかった。

(5) 微細 V 形溝に対する研磨特性

微細構造に対する精密研磨の特性を明らかにするために、同心円状の V 形溝 (幅 0.3mm, 深さ 0.2mm) に対する研磨特性と形状特性を調べた。図 10 に被研磨物 (ワーク) の表面写真を示す。ワークは黄銅製で直径は 30mm, 表面に V 形溝の同心円を 7 個有する。図 11 に



図 10 同心円状の微細 V 形溝を有するワーク

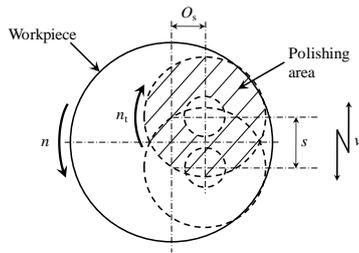
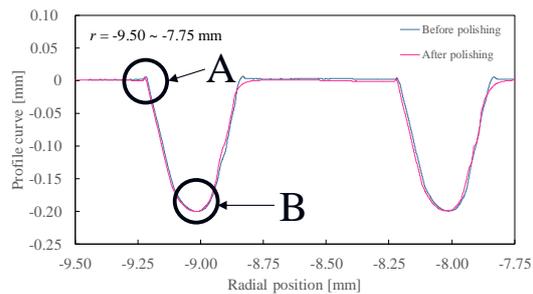


図 11 工具の研磨領域とワークの位置関係

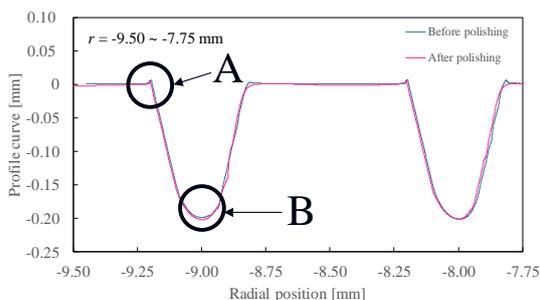
表 5 実験条件

Number of revolution of workpiece n [rpm]	-200
Offset O_s [mm]	4
Oscillation distance s [mm]	6
Oscillation velocity v [mm/min]	40

工具の研磨領域とワークの位置関係を示す。表 5 に実験条件を示す。図 12 にワークの揺動研磨における直流磁場とパルス磁場の場合の形状変化を示す。また、表 6 に V 溝角部 (A 部) と V 溝底部 (B 部) の研磨前後のマイクロソープ写真を示す。A 部の形状変化は直流磁場が大きく、パルス磁場では小さい。また、直流磁場では溝上部において溝の水平方向幅が大きくなっていることがわかった。マイクロソープ写真から、A 部の形状変化は直流磁場では大きく、パルス磁場では小さいことが確認できる。しかし、B 部の研磨はパルス磁場ではわずかに認められるが、直流磁場ではほとんどされていないことがわかる。それぞれの磁場において磁気クラスタは幅の狭い溝の最深部に届いていないと考えら



(a) 直流磁場の場合



(b) パルス磁場の場合

図 12 V 形溝の形状変化

れる。B 部の研磨はナノメートルオーダーの磁気クラスタを形成する NMCF によって可能と考えられる [学会発表②]。

表 6 研磨前後のマイクロソープ写真

	DC		Pulse ($f = 0.1$ Hz)	
	Before	After	Before	After
Area A				
Area B				

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Tatsuo Sawada, Takuma Endo, Yuzo Shimizu and Hitoshi Nishida, Changes in the Resistance Force of a Magneto-Rheological Shock Absorber Induced by a Magnetic Field, Materials Science Forum, Vol. 915, 2018, pp. 39-44. 査読有
DOI:
0.4028/www.scientific.net/MSF.915.39
- ② 山本久嗣, 西田均, 百生登, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いたホーニング加工特性と加工中の磁気クラスタの挙動, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 49 No. 1, 2018, pp. 1-9. 査読有
- ③ 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, 2017, pp. 666-673. 査読有
- ④ Yasuahi Ido, Hitoshi Nishida, Yuhiro Iwamoto and Hiroki Yokoyama, Viscous properties of ferrofluids containing both micrometer-size magnetic particles and fine needle-like particles, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 431 (2017) pp. 94-98. 査読有
- ⑤ Yasushi Ido, Hiroki Yokoyama and Hitoshi Nishida, Viscous and Damping Properties of Magnetorheological Fluids Containing Needle-like Magnetic particles, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 52 (2016), pp. 121-127. 査読有

- ⑥ Yasushi Ido, Keisuke Asakura and Hitoshi Nishida, Behavior of both Nonmagnetic Particles and Magnetic Particles in Magnetic Compound Fluids in a Micro-tube with Axial Flow under Rotating Magnetic Field, Materials Science Forum, Vol.856 (2016) , pp.9-14. 査読有

[学会発表] (計 58 件)

- ① 西田均, 松葉寿明, 山本久嗣, 池田慎治, 井門康司, 磁場制御による精密研磨及ぼす工具形状の影響, 第 30 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2018 年 5 月 23 日, 長野市生涯学習センター.
- ② 清水達也, 松葉寿明, 木下豊章, 山本久嗣, 西田均, 百生登, 磁気混合流体を用いた微細形状表面に対する精密研磨特性, 日本機械学会北陸信越支部 第 55 期総会・講演会, 2018 年 3 月 3 日, 福井工業大学.
- ③ 道下滉司, 木下豊章, 藤平晃太郎, 山本久嗣, 西田均, 磁気機能性流体の流動特性に及ぼす分散成分の効果, 日本機械学会北陸信越支部 第 55 期総会・講演会, 2018 年 3 月 3 日, 福井工業大学.
- ④ 西田均, 池田慎治, 山本久嗣, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いた円管内面精密加工における加工圧力と加工量の関係, 第 26 回 MAGDA コンファレンス in 金沢, 2017 年 10 月 26 日, 金沢市文化ホール.
- ⑤ 池田慎治, 山本久嗣, 清水達也, 西島健一, 百生登, 櫻井豊, 西田均, 磁気機能性流体を用いた平面精密加工用工具による磁気的圧力の解析, 第 26 回 MAGDA コンファレンス in 金沢, 2017 年 10 月 26 日, 金沢市文化ホール.
- ⑥ 西田均, 山本久嗣, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いた精密研磨特性に及ぼす磁場強度の影響, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017 年 9 月 22 日, 大阪大学豊中キャンパス.
- ⑦ Nishida Hitoshi, Akabane Satomu, Shimada Kunio and Ido Yasushi, Prediction of polishing depth profile on surface polishing utilizing a magnetic compound fluid, 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, September 3-6, 2017, Chamonix - Mont Blanc, France. 査読有

- ⑧ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁場制御による平面および凹面に対する精密研磨特性, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会, 2016 年 9 月 2 日, 兵庫県立大学姫路環境人間キャンパス.

- ⑨ Hitoshi Nishida, Kunio Shimada and Yasushi Ido, Relationship between Processed Quantity and Shear Stress for Fluid in Precision Processing of Inner Surface of Circular Tube with Magnetic Compound Fluid, The 15th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Incheon, Korea, Jul. 4-8, 2016. 査読有

- ⑩ 赤羽里夢, 松葉寿明, 西田均, 山本久嗣, 磁気混合流体を用いた石英ガラスの平面研磨の可能性, 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会, 2016 年 3 月 5 日, 信州大学工学部.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 均 (NISHIDA Hitoshi)
富山高等専門学校・電気制御システム工学科・教授
研究者番号：00390435

(2) 連携研究者

島田邦雄 (SHIMADA Kunio)
福島大学・共生システム理工学類・教授
研究者番号：80251883

井門康司 (IDO Yasushi)
名古屋工業大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：40221775

池田慎治 (ISEDA Shinji)
富山高等専門学校・電気制御システム工学科・准教授
研究者番号：50361126

山本久嗣 (YAMAMOTO Hisashi)
富山高等専門学校・ソリューションセンター・助教
研究者番号：80734409