

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560147

研究課題名(和文) 新型磁気機能性流体を用いた難削材円管内面のナノレベル高品質加工技術の開発研究

研究課題名(英文) Development of processing technique with nano-meter ordered high quality on an inner surface of hard-to-cut tube utilizing a new magnetic functional fluid

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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では磁気機能性流体を用いた、難削材の短い、および、長い円管内面に対するナノオーダーの平滑面、サブミクロンオーダーの形状精度を有する超精密・高品質加工技術を開発した。
具体的な成果として、難削材円管内面に対する加工特性、および、加工に及ぼす磁場分布特性、加工に関わる磁気クラスタの特性、流体のせん断応力と加工量との相関関係が明らかにされた。また、本加工法はプレストンの経験則に従うことがわかった。得られた基礎データを用いて、長い円管内面に対するナノ加工試験装置が開発され、長い円管内面加工に対する加工特性が調べられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, processing technique of super precision with high quality by utilizing a magnetic functional fluid on a nano-meter ordered flat surface and a sub-micron ordered shape precision was developed for the inner surface of a short or long tube that is difficult to cut. As specific results, the processing characteristics on the inner tube walls were clarified as the characteristics of magnetic field distribution on the micro-processing, the one of magnetic clusters on the micro-processing and the one of correlation between the removal quantity and the shear stress by the ring-shaped permanent magnet. Moreover, it was confirmed that the material quantity follows as Preston's law. Using those obtained basic data, the examination of the equipment of the nano-processing was applied for an inner surface of a long tube. And the processing characteristics of the long inner tube wall were investigated.

研究分野：流体工学

キーワード：機械工作・生産工学 超精密加工 磁性 流体工学

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙関連やエネルギー関連の部品では、ステンレス鋼や超耐熱合金などの難削材が多数使用されており、高品質・高精度の加工が要求されている。難削材の研削加工では材料特性を基に、加工条件に対して砥粒材質、粒度や油剤の使用など多くを検討する必要がある。現在の内面研削、ホーニング加工などでは、サブミクロンオーダーの形状精度と加工変質層の少ない加工表面を得ることは容易でない。そのため、容易な加工条件で難削材円管内面を高品質・高精度に加工する方法が求められている。また、長い円管内面に対しては短い円管内面以上に困難なため要求度が高い。

この様な状況で、磁場に応答する機能性流体（磁気機能性流体）を活用した研磨が注目されている。本研究者は磁気混合流体（MCF）を用いた研磨の研究を進めており、段差のある平面や凹面に対してナノオーダーの研磨を実現している。また、細管内面に対しても研磨法と研磨特性を明らかにしている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁気機能性流体を用いた、難削材の短い、および、長い円管内面に対するナノオーダーの平滑面、サブミクロンオーダーの形状精度、かつ、加工変質層の少ない超精密・高品質加工技術を開発研究することである。具体的には、難削材用の MCF と永久磁石で構成された工具による難削材円管内面に対する加工法を提案して、その加工特性を調べるとともに、加工特性に関わる原理を電磁流体力学的アプローチで実験的に明らかにする。また、短い円管内面に対する実験から得られた基礎データを用いて、長い円管内面に対するナノ加工試験装置を開発する。そして、長い円管内面加工に対する加工特性を明らかにする。

3. 研究の方法

以下の項目について順に研究を進めた。

(1) まず、比較的短い円管内面に対する加工特性を明らかにした。被加工管を往復運動させ永久磁石の長さの異なる工具を用いて、内径と加工量、真円度、表面粗さの変化を調べた。加工原理の解明のために、被加工管を停止した状態で、内径と加工量、真円度、表面粗さの変化を調べた。

(2) 加工原理の解明のために、短い円管内面の加工特性に及ぼす磁場分布の特性を計測結果から明らかにした。

(3) 短い円管内面の加工原理の解明のために、可視化実験を行い、磁気クラスタの挙動を明らかにした。

(4) 加工原理の解明と流体開発の指針を得る

ために、短い円管内面加工における流体のせん断応力と加工量の関係を明らかにした。

(5) 短い円管内面に対する実験結果を基に、長い円管内面加工装置を開発して、長い円管の場合の加工特性を調べた。

(6) 長い円管内面加工における加工原理の解明のために、磁気クラスタの挙動と特性を調べた。また、流体のせん断応力と加工量の関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 加工法と加工原理

①加工方法

円管内に挿入する工具は管軸方向に磁気クラスタが発生するように、スパーサを挟んでリング状の永久磁石を積層したものである。加工は円管内を MCF で満たす、あるいは、工具に MCF を付着させ、円管内の工具に回転と往復運動、あるいは、送りを与えて行う。

②加工原理

MCF に磁場を印加すると磁力線方向に鉄粉粒子とマグネタイト粒子からなる凝集体（磁気クラスタ）が形成される。図 1 は砥粒を含む MCF で満たされた管内における加工工具と磁気クラスタの模式図である。磁気クラスタは磁力線に沿って形成される。このため磁気クラスタは永久磁石の外周面管軸方向に形成される。砥粒は磁気浮力により磁場強度の小さいところ、すなわち、管内面側に移動する。加工は永久磁石の外周面管軸方向に形成される磁気クラスタが円管内面に集まっ

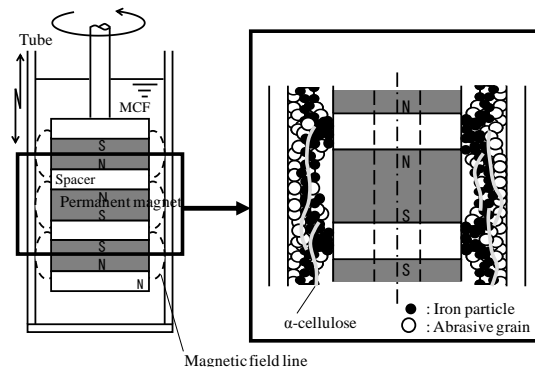
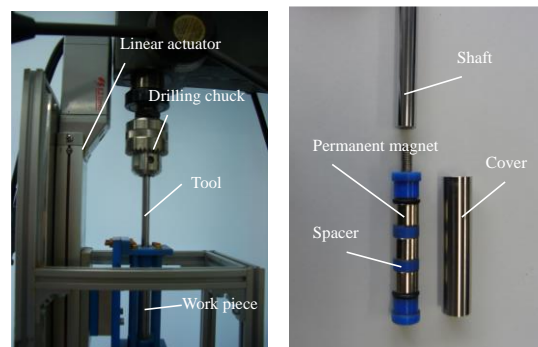


図 1 加工原理



(a) 実験装置 (b) 工具

図 2 実験装置と工具

表 1 工具と実験条件

Type	A	B	C
Size of permanent magnet (mm)	$\Phi 12 \times \Phi 6 \times 10$	$\Phi 12 \times \Phi 6 \times 5$	$\Phi 12 \times \Phi 6 \times 3$
Magnetic flux density of surface (mT)	420	370	300
Number of magnet	3	3	5
Thickness of spacer (mm)	5	2.5	1.5
Tool length (mm)	40	20	21
Frequency of reciprocating motion (Hz)	0.33	0.67	0.67
Amplitude of reciprocating motion (mm)	7.5	3.75	2.25

Structure of tool A

Structure of tool B

Structure of tool C

表 2 供試流体の成分

MF(MSGS60)	39.2 wt.%
Iron powder(1.2 μ m, HQ)	30.4 wt.%
Al ₂ O ₃ abrasive(3 μ m)	20.0 wt.%
α -cellulose	6.4 wt.%
Kerosene	4.0 wt.%

た砥粒に半径方向の力を作用することと管内面との相対運動により行われると考えられる。本研究では各種実験でこの加工原理を明らかにした。

(2) 短い円管内面に対する加工特性

① 実験方法

実験装置と工具の外観を図 2 に示す。図 2 (b) に示すように工具はスペーサを挟んでリング状の永久磁石の同極が向かい合うように積層したものである。本研究に用いた 3 種類の工具とその実験条件を表 1 に示す。供試流体の成分を表 2 に示す。被加工管はステンレス鋼管 (SUS304BA) であり、寸法は、内径 14.9 mm、外径 17.3 mm、長さ 100 mm である。

② 実験結果

まず、円管内径は加工時間とともに大きくなる。また、内径の増加割合は時間の経過とともに低下する。加工表面は鏡面になることがわかった。

図 3 に Type C の工具の加工距離に対する単位面積当たりの加工量の関係を示す。加工量は加工距離に比例関係にあることがわか

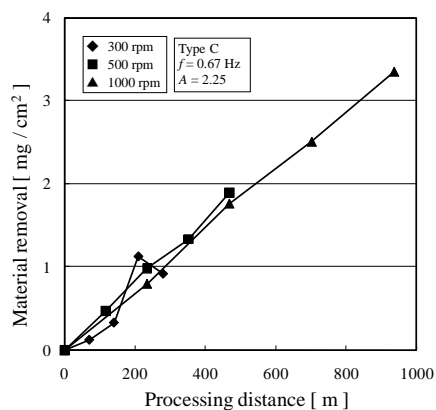


図 3 加工量と加工距離の関係 (Type C)

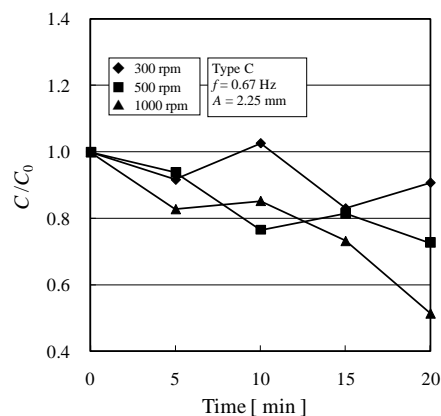


図 4 真円度の時間的变化 (Type C)

る。ポリシングなどで知られるプレストンの経験則が成立することがわかった。実験点の勾配は Type A が小さく、Type B と Type C は大きい結果が得られた。

図 4 に Type C の工具における加工時間に対する加工前後の真円度比 C/C_0 の変化を示す。ここで、 C_0 は加工前の真円度、 C は加工後の真円度である。永久磁石の長さの短い Type C では、真円度が向上することがわかった。真円度の向上はこの加工法の大きな特徴である。永久磁石の長さの小さい工具は工具のセルフセンタリング効果が起こりやすい磁場分布になっていると考えられ、その結果、真円度が向上すると考えられる。本加工法が新しいホーニング加工として使用できることがわかる。

図 5 に Type B の工具における定位置で加工した場合の実験結果を示す。なお、縦軸の ΔD ($= D - D_0$) は直径の変化を表す。図中の網掛け部分は永久磁石の外周面に対応した領域である。加工は永久磁石の外周面に対応した領域で行われていることがわかる。すなわち、本加工では永久磁石の外周面管軸方向に形成される磁気クラスタによって行われることがわかった。

(3) 短い円管内面の加工特性に及ぼす磁場分布の特性

工具中央にある永久磁石の円管内面に相当する位置 ($r = 7.45$ mm) における磁束

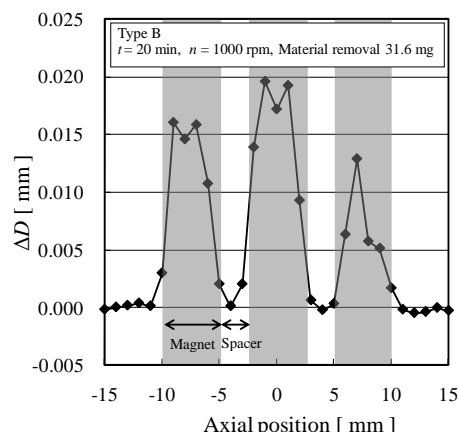


図 5 内径の変化 (Type B)

密度 B (絶対値) の分布を図 6 に示す. どの工具も磁束密度は永久磁石の側面の中央で減少する. Type A と Type B では永久磁石の端面でピークを持ち, スペーサ領域の中央では減少する. しかし, 真円度の向上する Type C ではスペーサ領域にピークを持つ. それぞれの工具の永久磁石に対する被加工管内面における磁石の長さ方向の中心の磁束密度と磁束密度の勾配の関係を図 7 に示す. 図 7 において, Type B と Type C が磁束密度の勾配が比較的大きい. このことが単位面積, 単

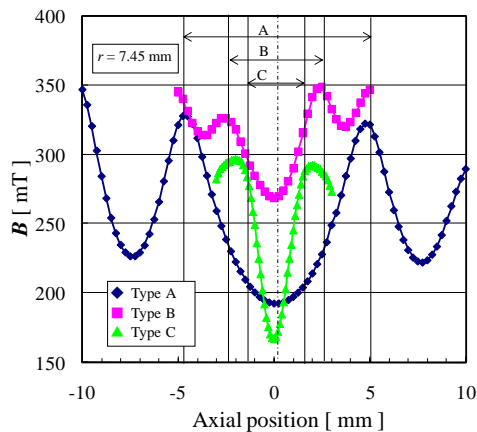


図 6 磁束密度の分布

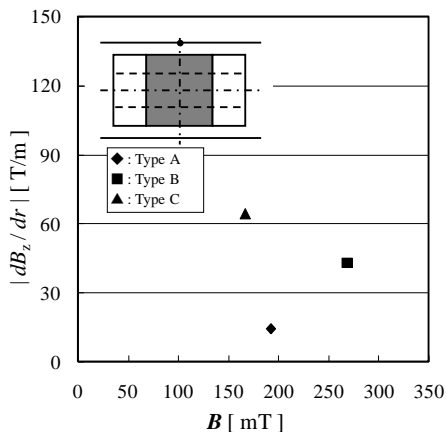


図 7 磁束密度と磁束密度の勾配の関係

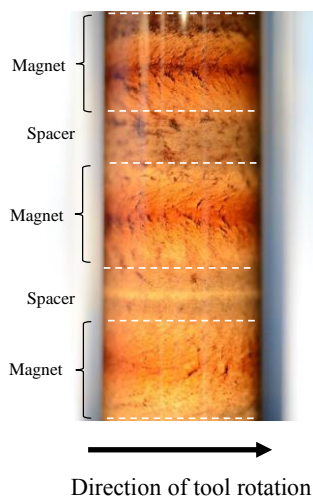


図 8 磁気クラスタの分布 (Type A)

位時間当たりの加工量が大きいことに関係していると考えられる.

(4) 短い円管内面の加工特性における磁気クラスタの挙動

図 8 に Type A の場合の可視化実験結果を示す. まず, 永久磁石の外周面に対応する領域に磁気クラスタが存在することが確認できる. また, 磁気クラスタは永久磁石の長さ方向の中央で破断していることがわかる. 磁気クラスタが破断すると磁気クラスタの半径方向の力が作用しなくなり, その結果, 加工能率が低下すると考えられる. これは, 図 5 の実験結果から確認できる. 従って, 本加工法では永久磁石の外周面に対応した円管内面に砥粒が存在し, 破断しない磁気クラスタの形成が重要であることがわかった. 本実験により, 加工に関わる磁気クラスタが始めて観測された.

(5) 短い円管内面加工における流体のせん断応力と加工量の関係

実験には二重円筒型粘度計 (R/S-CC, ブロックフィールド製) を用い, ロータの代わりに工具を用いた. また, 粘度計の外筒の代わりに被研磨管を用いた. 工具は 3 種類で, 外形 13 mm の丸棒の中央に, 外径 13 mm で長さが 10 mm (Type A), 5 mm (Type B), 3 mm (Type C) のリング状永久磁石が 1 個, それぞれ挿入されている.

図 9 に単位面積当たりの加工量と永久磁石外周面のせん断応力 τ_m の関係を示す. 図 9 から, 単位面積当たりの加工量と永久磁石外周面のせん断応力は相関関係にあることがわかる. これより, 本加工法ではプレストンの経験則が成立する可能性があることがわかった. 加工原理と流体開発の指針を得ることができた.

(6) 長い円管内面加工に対する加工特性

長い円管に対しては, 短い円管のように管内に MCF を満たすことは現実的ではなく, 工具に必要な最小限の MCF を付着・保持させて行うのが理想的である.

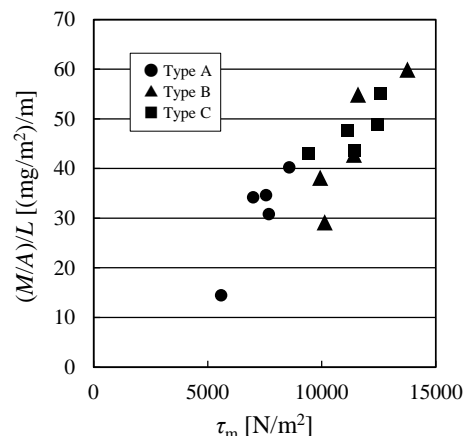


図 9 加工量と永久磁石外周面のせん断応力の関係

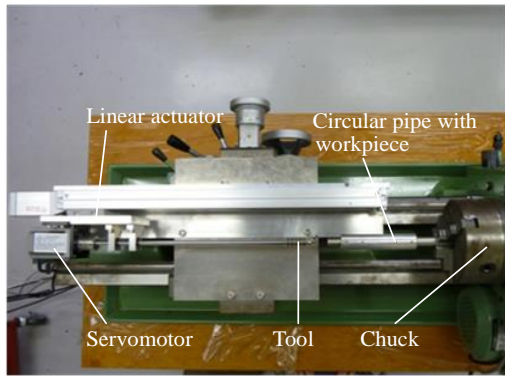


図 10 長い円管内面加工装置

表 3 長い円管内面加工における工具タイプ

Type	Size of permanent magnet [mm]	Magnetic flux density of surface [mT]	Number of permanent magnet	Spacer [mm]	Tool length [mm]	Structure of tool
A	φ13×φ6×5	388	5	φ13×2.5	35	
B	φ13×φ6×5	388	5	φ8×2.5	35	
C	φ13×φ6×5	388	5	φ8×5	45	

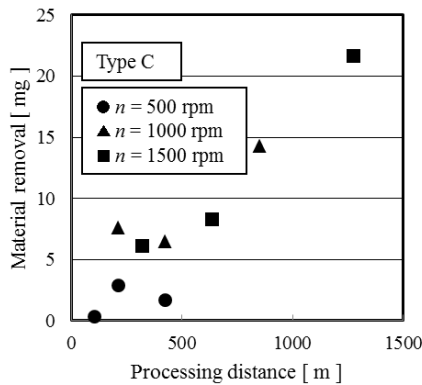


図 11 長い円管内面加工における加工量と加工距離の関係 (Type C)

図 10 に開発した実験装置の外観を示す。実験装置は小型汎用旋盤を使用しており、工具と工具に回転を与えるサーボモータ、サーボモータと工具を水平方向に移動させる電動スライダから構成されている。実験に使用した工具の諸元を表 3 に示す。

図 11 に Type C の工具と加工量と加工距離の関係を示す。各図における実験点の勾配が大きいほど加工量が大きい工具である。Type C の勾配は大きく、1400 m 付近まではほぼ一定の勾配である。すなわち、Type C は 1400 m 付近まではほぼ一定に加工できることを示している。すなわち、供試流体を多く保持できる Type C では加工量はプレストンの経験則に従うことがわかった。

(7) 長い円管内面加工における磁気クラスタの挙動と特性

磁気クラスタの挙動を明らかにするため

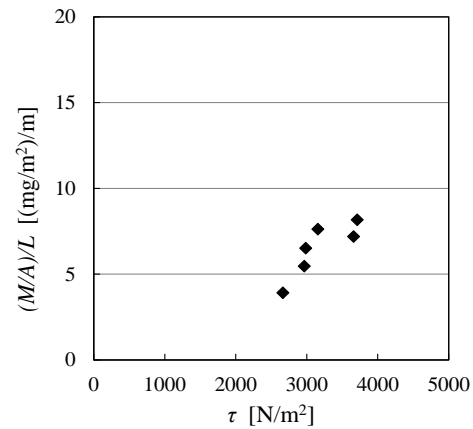


図 12 長い円管内面加工における加工量と永久磁石外周面のせん断応力の関係

に可視化実験を行った。被加工管には内径 15.0 mm の石英管を使用した。撮影は金属顕微鏡付高速カメラ (Z16 AP0, ライカ製, FASTCAM SA4, フォトロン製) を用いて観測した。この可視化実験から永久磁石の外周面に対応する円管内面に存在する磁気クラスタの長さとは太さは、Type C > Type B > Type A であり、これは加工量の大きさ関係に対応することがわかった。同時に、PIV 法を用いて、加工速度と考えられる磁気クラスタの速度が初めて計測された。これより、永久磁石の外周速度と円管内面の加工速度の関係が明らかになった。

また、磁気クラスタの加工圧力を調べるために円管内面の圧力分布を計測した。圧力分布は永久磁石の外周面に対応した領域で矩形波形状を示さず、針状であることがわかった。Type A と Type B, Type C の圧力の最大値は、それぞれ、45 kPa, 50 kPa, 60 kPa 程度である。これは加工量の大きさ関係に対応することがわかった。

(8) 長い円管内面加工における流体のせん断応力と加工量の関係

図 12 に単位面積当たりの加工量と永久磁石外周面のせん断応力 τ_m の関係を示す。図 12 から、単位面積当たりの加工量と永久磁石外周面のせん断応力は相関関係があることがわかる。ただし、図 9 と比較すると単位面積当たりの加工量と永久磁石外周面のせん断応力は小さい値である。長い円管内面加工においても、プレストンの経験則が成立する可能性があることがわかった。トルク計測から加工量の予測が可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 池田慎治, 磁気機能性流体を用いた水平円管内面研磨マイクロ加工に及ぼす磁場分布の影響, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22 No. 2, (2014), pp. 286-292. 査読有
<http://www.jsaem.gr.jp/html/content/>

- ② Hitoshi Nishida, Kunio Shimada and Yasushi Ido, Microprocessing characteristics of inner surface of tube using magnetic functional fluid, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 45 Nos 1-4, (2014), pp. 873-880. 査読有
DOI: 10.3233/JAE-141919
- ③ Yasushi Ido, Keisuke Asakura and Hitoshi Nishida, Behavior of particles in the process of magnetic compound fluid polishing of inner surface of micro-tube with axial flow, Materials Science Forum, Vol.792 (2014), pp.27-32. 査読有
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.792.27

[学会発表] (計23件) 主要なものを記す。

- ① 金谷航葵, 西田均, 山本久嗣, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた円管内面精密加工におけるせん断応力と流動曲線の関係, 日本フルードパワーシステム学会主催平成27年春季フルードパワーシステム講演会, 2015年5月28日, 機械振興会館(東京都).
- ② 西田均, 西野奨悟, 島田邦雄, 井門康司, 山本久嗣, 磁気機能性流体を用いた円管内面精密加工に及ぼす流体特性の影響, 電気学会主催第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015年5月14日, ハウステンボス(長崎県).
- ③ 西野奨悟, 西田均, 和田雅史, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた円管内面精密加工における加工量とせん断力の関係, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月26日, 富山大学(富山県).
- ④ 武田健太郎, 西田均, 西野奨悟, 磁気機能性流体を用いた水平円管内面マイクロ加工における加工量と流動速度の関係, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会講演論文集(USB), 2014年3月8日, 富山県立大学(富山県).
- ⑤ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 池田慎治, 磁気機能性流体を用いた水平円管内面研磨マイクロ加工に及ぼす磁場分布の影響, 第22回MAGDAコンファレンス in 宮崎, 2013年12月3日, 宮崎観光ホテル(宮崎県).
- ⑥ 西野奨悟, 武田健太郎, 西田均, 磁気機能性流体を用いた円管内面精密加工にお

ける加工量特性, 精密工学会北陸信越支部2013年度学術講演会論文集(USB), 2013年11月23日, 福井大学文京キャンパス(福井県).

- ⑦ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた水平円管内面加工における流動特性, 日本機械学会2013年年次大会DVD論文集, 2013年9月11日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県).
- ⑧ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いた水平円管内面精密加工における磁気クラスタと圧力分布の関係, 日本実験力学会2013年度年次講演会, 2013年8月20日, 由利本荘市文化交流会館「カダレ」(秋田県).
- ⑨ 武田健太郎, 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた円管内面マイクロ加工における磁気クラスタの特性, 平成25年春季フルードパワーシステム講演会, 2013年5月31日, 機械振興会館(東京都).
- ⑩ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた円管内面加工における圧力分布特性, 第25回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演会, 2013年5月16日, 箱根ホテル小涌園(神奈川県).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 磁気内面研磨装置および磁気内面研磨方法

発明者: 西田均, 吉野一郎, 島田邦雄

権利者: 株式会社不二越, 独立行政法人国立高等専門学校機構, 島田邦雄

種類: 特許

番号: 特願2011-186757, 特開2013-49096

出願年月日: 2011年8月30日

国内外の別: 国内

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