

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560135

研究課題名（和文）磁場制御によるレンズ用小径金型の超精密非球面研磨法の開発研究

研究課題名（英文）Development of an ultra-precision aspheric polishing for small-diameter lens mold by controlling with magnetic field

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

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は磁気混合流体(MCF)を磁場制御することにより、レンズ用の小径金型をナノメートルレベルの形状精度とサブナノメートルレベルの平滑な表面にする研磨法を開発することである。本研究では、回転する小径金型に対してパルス磁場を印加する研磨工具を2次元揺動運動させることで可能なことを明らかにした。平面に対して、パルス磁場は広い範囲で平坦化、平滑化される。小径凹面に対しては、パルス磁場は形状精度を保持した鏡面研磨になることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to develop the polishing technology of performing the accuracy with nano-meter level and the surface roughness with the sub-nano meter level for mold of small-diameter lens by controlling with a magnetic field utilizing a magnetic compound fluid (MCF). In this study, it was clarified that the rotating concave surface having small diameter is enabled to be polished by the only two-dimensional motion of the polishing tool under the application of a pulsed magnetic field. In the case of pulsed magnetic field, the flat surface is more flattened and smoothed over a wide surface. The form accuracy of the concave surface having small diameter at the pulsed magnetic field is maintained more smoothly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
平成 22 年度	700,000	210,000	910,000
平成 23 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：精密研磨，磁性，機械工作・生産工学，ナノマシン，流体工学

1. 研究開始当初の背景

機器や部品の小型化に伴って、複雑形状を有する小型金型の需要が増えている。中でも、カメラや DVD などを使用されるガラスレンズやプラスチックレンズの成形に必要な金型には高精度で、かつ、安価であることが求められている。このレンズの金型形状は複雑なために高精度な加工と仕上げが要求され

る。現在、金型の研磨は砥石やダイヤモンドペーストを用いて手作業によって行われている。研究開始当時、この作業は困難を極めており、高度な熟練作業と多大な時間を要していた。このため、この研磨作業の自動化に対する要求が非常に強く、これに対する研磨法の開発研究が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁場に応答する磁気混合流体(MCF)を磁場制御することにより、非球面レンズ用の小径金型をNCフライス盤を用いて、自動的にナノメートルレベルの形状精度とサブナノメートルレベルの平滑な表面にする研磨法を開発研究することである。

3. 研究の方法

本研究では、金型用MCF研磨の特性および砥粒と磁気クラスタの関係を電磁流体力学的アプローチで実験的・理論的に調べると共に、レンズ用の小径金型の研磨方法と試験装置を開発するために以下のことを行った。

(1) 定点研磨実験

磁場制御と工具の回転運動のみによる平面に対する基礎的研磨実験を通して、加工特性と研磨機構を明らかにした。そのために、①研磨特性におよぼす磁場周波数の影響、②ワークの軸力とトルクの変化、③圧力分布と磁束密度分布特性、④圧力分布による加工量分布の予測、⑤工具と加工面の間隔の影響、を調べた。

(2) 揺動研磨実験

定点研磨実験の結果を基に、磁場制御と工具の回転と2次元揺動運動による平面と小径凹面に対する研磨装置を開発して、その加工特性を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 研磨装置

図1は被研磨材(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表面に集中して、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ワークとの相対運動によって加工が行われる。

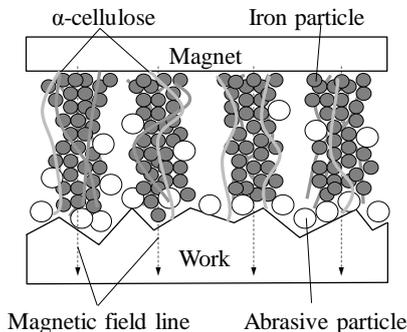


図1 MCF研磨の模式図

開発した研磨実験装置を図2に示す。実験装置は小型フライス盤を用いており研磨工具部とテーブル上に設置されているワーク

移動部で構成されている。研磨工具部は電磁石と電磁石の鉄心である研磨工具から構成されている。また、電磁石のコイルに電流を流すことで研磨工具先端から磁場が発生する。ワーク移動部はNCテーブルとそれに設置された中空軸フラットギヤヘッド付きブラシレスモータから構成されている。ワークはギアヘッドの主軸にねじ止めされ、MCFが入る容器にOリングによって保持される。

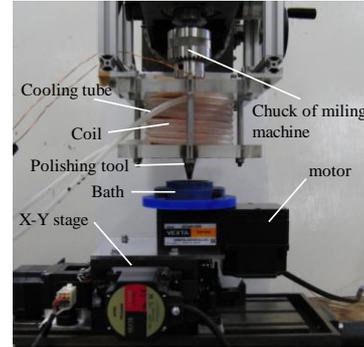


図2 開発した研磨装置

本研究における実験条件を表1に示す。定点研磨実験における隙間間隔 δ は0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmの4種類とした。研磨工具を揺動運動させた研磨実験では、研磨工具中心とワーク中心をオフセットさせて行った。オフセット $O_s = 5$ mm, 揺動距離 $s = 8$ mmとし、40 mm/minの速度で揺動運動させた。また、ワークの回転数は $n = -200$ rpmとした。

本研究で使用したMCFの成分を表2に示す。なお、 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回の研磨ごとに2.3 mlの新しいMCFを用いた。被研磨物(ワーク)には黄銅製円板(C3604)を用いた。寸法は、直径30mm, 厚さ10mmであり、ワークの研削痕に対して直角方向の算術平均粗さ Ra の平均値は $0.290 \mu\text{m}$ である。また、小径凹面研磨実験では中心に深さ0.50mmで半径16.25mmの球面を有するワークを使用した。

表1 実験条件

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

表 2 MCF の成分

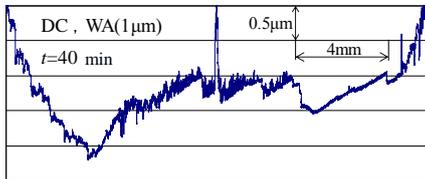
MF(MSGS60)	39.2 wt.%
Iron powder(1.2 μm, HQ)	30.4 wt.%
Al ₂ O ₃ abrasive(1μm, 3 μm)	20.0 wt.%
α-cellulose	6.4 wt.%
Kerosene	4.0 wt.%

(2) 磁場制御による定点研磨

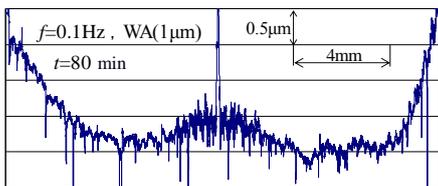
① 研磨特性におよぼす磁場周波数の影響

まず、表面粗さと研磨量については、磁場周波数 f に対する表面粗さの減少割合は、直流磁場 ($f = 0$ Hz) の場合によい。一方、研磨加工量の割合は、 $f = 0.1$ Hz においてピークを持つことがわかった。 $f = 0.1$ Hz 場合、直流磁場に対して 30% 近く大きく、砥粒が効率的に作用していることがわかった。

次に、図 3 に砥粒径 $1 \mu\text{m}$ の場合の直流磁場とパルス磁場での加工後の断面曲線を示す(研磨時間 $t = 80$ min)。断面曲線には磁気クラスタの分布が反映されると考えられる。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。一方、 $f = 0.1$ Hz の場合、研磨がされていない領域は中心部のみである。断面曲線は周波数の増加に伴い変化し、 $f = 0.1$ Hz では半径 2 mm 以上の広い範囲で平滑化される。この結果から、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。



(a) 直流磁場



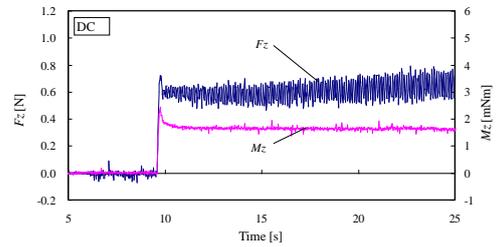
(b) パルス磁場 ($f = 0.1$ Hz)

図 3 研磨後の断面曲線

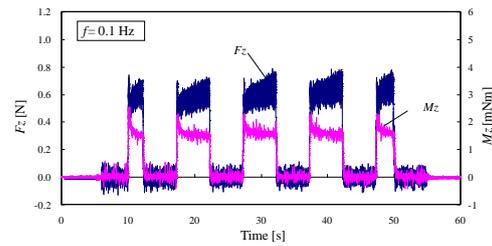
② ワークの軸力とトルクの変化

図 4 に直流磁場におけるワークに作用する軸力とトルクの時間的変化を示す。軸力は、磁場印加後、最初急激に上昇し減少する。その後、徐々に増加する。トルクは最初急激に上昇し、その後、減少して一定値になる。軸力が上昇する一方でトルクが一定値を保つことから、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考えら

れる。図 4(b) 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。磁場印加後、直流磁場と同様の傾向を示しており、消磁によってそれぞれの値は零になることがわかる。



(a) 直流磁場



(b) パルス磁場 ($f = 0.1$ Hz)

図 4 軸力とトルクの時間的変化

③ 圧力分布と磁束密度分布の特性

加工面にダイヤモンド式の圧力センサー (AP-12S, キーエンス製) を設置して、工具中心から研磨面半径方向の各位置における圧力の時間的変化を計測した。図 5 は $\delta = 1.0$ mm の場合の磁場印加後の時間ごとの半径方向の圧力分布を示したものである。まず、圧力分布は時間的に変化することがわかる。圧力分布は $t = 10$ s までは $r = 2$ mm が高い。これは工具の先端角部の磁束密度が高いためこの部分に磁気クラスタが集中しているためと考えられる。時間の経過につれ、 $t = 20$ s を超えると、 $r = 4$ mm で高くなり、 $t = 40$ s では $r = 4$ mm と中心付近 ($r = 0$ mm) が高くなることを示している。 $r = 4$ mm 付近と中心に太い磁気クラスタが形成されていると推察できる。このことから磁気クラスタの分布が時間的に変化することがわかる。

加工面の下側にスペーサを用いてトランスバースプローブ (Sypris 社製, STD58-0404) を設置して、工具中心から研磨面半径方向の各位置における磁束密度の時間的変化を計測した。この計測は工具とセンサーまでの距離 $z = 1.6, 2.6, 3.6$ mm の場合において行い、 $\delta = 1.0$ mm における磁束密度を外挿法により求めた。図 6 は時間ごとの加工面における半径方向の磁束密度分布を示したものである。磁束密度の分布が時間的に変化することがわかる。磁束密度は $r = 4$ mm 付近で増加している。これは $r = 4$ mm 付近で太い磁気クラスタが形成されるためと考えられ、圧力分布の実験結果に対応する。

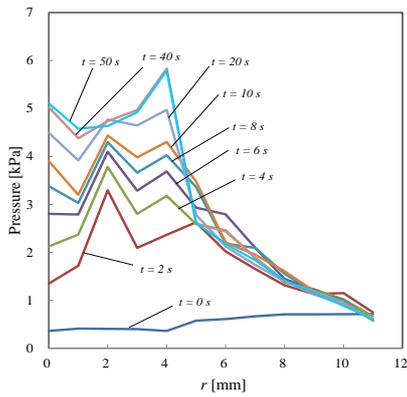


図 5 磁場印加後の半径方向圧力分布の時間的変化

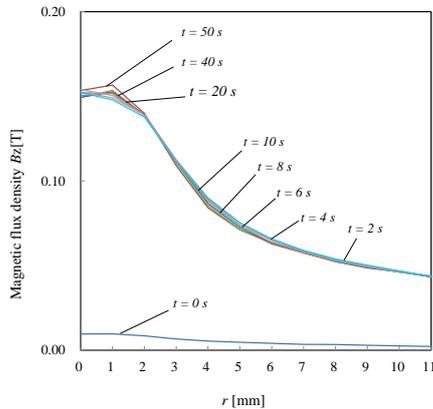


図 6 磁場印加後の半径方向磁束密度分布の時間的変化

④ 圧力分布による加工量分布の予測

圧力分布の実験データを用いて加工量の予測を行った。研磨加工量の予測にはプレストンの式を用いた。加工面における加工速度は、 $r = 0$ で $v = 0$ 、 $r = r_1$ で $v = 2\pi nr_1$ 、とし、 $r < r_1$ で強制渦、 $r_1 < r$ で自由渦とした。ここで、 n は回転数である。計算における圧力の積分は各位置の圧力の時間的変化の実験データを用いた。

$r_1 = 5.5$ mm, $r_2 = 11$ mm, $n = 8.33$ 1/s の場合の計算結果を図 7 に示す。直流磁場の研磨量の分布形状は高い三角形であり、 $r = 4$ mm でピークを示している。パルス磁場の研磨量の分布形状は高さの低い三角形であり、 $r = 5$ mm にピークがある。最大の研磨量を比較すると、直流磁場の方がパルス磁場の 3 倍ほどである。直流磁場の場合、予測結果と実験結果は一致しない。この原因として砥粒の分布状態が考えられる。砥粒は非磁性体であるので、砥粒は研磨時間の増加とともに磁場強度の弱いところに移動する。すなわち、中心近くに存在した砥粒は時間とともに半径方向外側に移動するためと考えられる。一方、パルス磁場の場合、予測結果と実験結果は $r = 0 \sim 2$ mm を除いてよく似た傾向を示す。パル

ス磁場では一度の磁場の印加時間が短いため砥粒の移動が起こりにくいことと磁場が印加されていない場ときに回転流れにより分散されるためと考えられる。パルス磁場では砥粒の分布密度が半径方向に均一に近いいため、磁気クラスタの圧力分布に基づく加工量予測が可能であると考えられる。

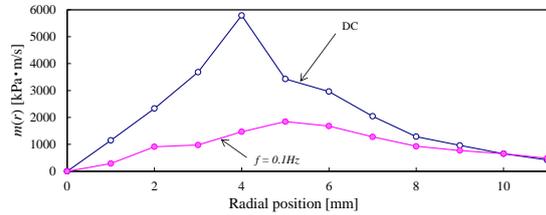
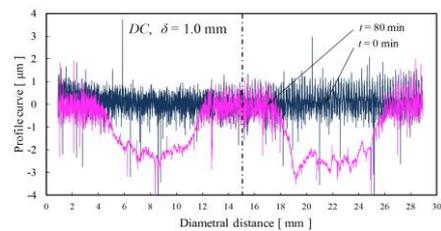


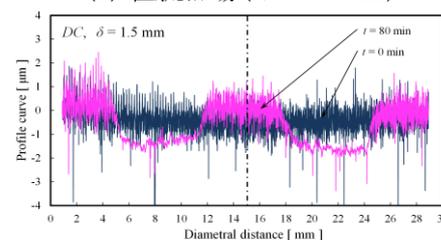
図 7 圧力分布による加工量分布の予測

⑤ 工具と加工面の間隔の影響

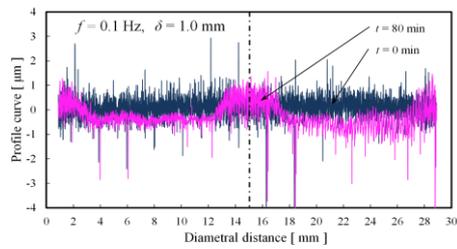
図 8 に研磨前と研磨後 ($t = 80$ min) での断面曲線の変化を示す。断面曲線の横軸は直径方向の距離を示しており、15 mm の位置がワークの中心 ($r = 0$ mm) である。直流磁場の $\delta = 0.5$ mm では中心付近で研磨されていない領域が、中心とその周りのリング状の領域で 2 つ存在する。 $\delta = 1.0$ mm と $\delta = 1.5$ mm では、 $r = 4$ mm \sim 10 mm において比較的平坦に深く研磨がおこなわれていることを示している。しかし、研磨量は $\delta = 1.0$ mm の方が $\delta = 1.5$ mm より多く、 $\delta = 1.0$ mm と $\delta = 1.5$ mm では一致しないことを表す。パルス磁場の $\delta = 0.5$ mm では $r = 2$ mm \sim 12 mm の範囲で研磨がおこなわれ、 $r = 3$ mm 付近に大きくぼみが発生した。 $\delta = 1.0$ mm と $\delta = 1.5$ mm の場合には $r = 3$ mm \sim 11 mm で平坦に研磨されていることがわかる。パルス磁場の $\delta = 1.0$ mm と $\delta = 1.5$ mm では研磨量も約 $1 \mu\text{m}$ でほぼ同じであり、パルス磁場では $\delta = 1.0$ mm \sim 1.5 mm ではほぼ同じ研磨特性であることがわかる。すなわち、パルス磁場



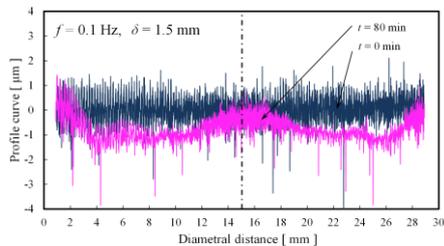
(a) 直流磁場 ($\delta = 1.0$ mm)



(b) 直流磁場 ($\delta = 1.5$ mm)



(c) $f = 0.1 \text{ Hz}$ ($\delta = 1.0 \text{ mm}$)



(d) $f = 0.1 \text{ Hz}$ ($\delta = 1.5 \text{ mm}$)

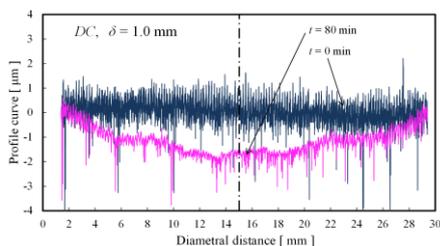
図8 研磨加工前後の断面曲線

では隙間間隔が $\delta = 1.0 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$ の範囲で変化しても表面性状に影響を与えないと考えられる。

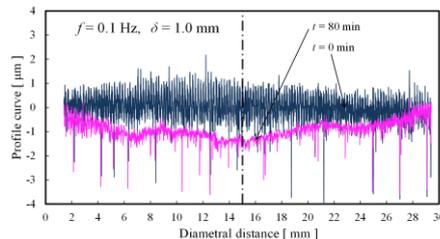
(3) 磁場制御による揺動研磨

① 平面研磨特性

図9に研磨前と研磨後 ($t = 80 \text{ min}$) での断面曲線の変化を示す。直流磁場、パルス磁場ともにワーク全面に研磨が行われており、形状はどちらも外側が高く、中央が窪んでいる。研磨深さは、直流磁場では $r = \pm 10 \text{ mm}$ で約 $1 \mu\text{m}$ 、中心で約 $1.8 \mu\text{m}$ である。一方、パルス磁場では、 $-10 \text{ mm} < r < 10 \text{ mm}$ で $1 \mu\text{m}$ 前後の値を示している。パルス磁場の方が直流磁場に比べ広く平坦になることがわかる。また、 Ra の値は直流磁場とパルス磁場ではほぼ同じである。



(a) 直流磁場 ($\delta = 1.0 \text{ mm}$)



(b) $f = 0.1 \text{ Hz}$ ($\delta = 1.0 \text{ mm}$)

図9 研磨加工前後の断面曲線

② 小径凹面金型研磨特性

小径凹面に対しては、平面研磨の特性が反映された。直流磁場では、鏡面になるが、形状精度を保持した研磨にならない。一方、パルス磁場では、形状精度を保持した鏡面研磨になることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Hitoshi Nishida, Kunio Shimada and Yasushi Ido, Effectiveness of Using a Magnetic Compound Fluid with a Pulsed Magnetic Field for Flat Surface Polishing, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, (2012), 掲載決定印刷中。
- ② Hitoshi Nishida, Kunio Shimada and Yasushi Ido, Effectiveness of Using a Magnetic Compound Fluid with a Pulsed Magnetic Field for Flat Surface Polishing, APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS, (2011.9), pp. 549-550.

[学会発表] (計15件)

- ① 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁場制御による小径凹面に対する超精密研磨に関する研究, 日本実験力学学会年次大会, (2012.7.15), 豊橋技術科学大学, 印刷中。
- ② 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 池田慎治, 磁場制御による複雑形状面に対する精密研磨の基礎研究, 第24回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, (2012.5.17), 富山国際会議場。
- ③ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体を用いた研磨加工に及ぼす工具と加工面との間隔の影響, 2012年度精密工学会春期大会学術講演会, (2012.3.14), 首都大学東京。
- ④ 酌井徹也, 西田均, 柴田純, 磁気混合流体を用いた平面研磨における加工量と圧力分布の関係, 日本機械学会北陸信越支部学生会第40回学生会卒業研究発表講演会, (2011.3.4), 信州大学繊維学部。
- ⑤ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた平面研磨における磁気クラスタの時間的变化, 日本フルードパワーシステム学会平成22年秋季フルードパワーシステム講演会, (2010.12.2), 別府国際コンベンションセンター。
- ⑥ 柴田純, 酌井徹也, 西田均, 磁気混合流体を用いた平面研磨における磁気クラスタの挙動, 砥粒加工学会・先端加工学会先端加工ネットワーク2010年度研究・開発成果発表会, (2010.7.16), 金沢工業大学。
- ⑦ 西田均, 磁気機能性流体を用いた複雑形

状表面の精密研磨に関する研究, J F P S 第 4 回機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会, (2010.6.18), 東京電機大学神田キャンパス.

- ⑧ 西田均, パルス磁場を用いた MCF 平面研磨について, 第 7 回 MCF コンソーシアム・日本実験力学会流体機能化分科会公開研究会, (2010.6.17), 由利本荘産学共同研究センター.
- ⑨ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた研磨に及ぼす磁気クラスターの影響, 第 22 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, (2010.5.20), 門司港ホテル (福岡県).
- ⑩ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気機能性流体を用いた平面研磨におけるパルス磁場の効果, 2010 年度精密工学会春期大会学術講演会, (2010.3.17), 埼玉大学.
- ⑪ 稲場智亮, 西田均, 磁気機能性流体を用いた平面研磨に及ぼすパルス磁場の影響, 先端加工ネットワークキックオフフォーラム研究講演会, (2010.3.5), 富山大学工学部.
- ⑫ 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 磁気混合流体による平面研磨に及ぼす磁場周波数の影響, 平成 21 年度磁性流体連合講演会, (2009.12.3), 慶應義塾大学.
- ⑬ 西田均, 島田邦雄, 後藤誠, 磁気混合流体を用いた平面研磨加工面に及ぼす磁場の影響, 日本実験力学会 2009 年度年次講演会, (2009.8.6), 拓殖大学.
- ⑭ 稲場智亮, 西田均, 磁気混合流体を用いた平面研磨に及ぼす工具形状の影響, 砥粒加工学会北信越ハイテク加工研究分科会 2009 年度研究・開発成果発表会, (2009.7.3), 金沢工業大学.
- ⑮ 西田均, 島田邦雄, 後藤誠, 磁気混合流体を用いた平面研磨に及ぼす交流磁場の影響, 第 21 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, (2009.5.21), メルパルク長野.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

平成 24 年 7 月出願予定

名称: 磁気研磨方法

発明者: 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 藪谷誠

[その他]

西田均, 超精密鏡面加工技術—磁気機能性流体を用いたレンズ用金型の超精密非球面研磨の研究について—, 日刊工業新聞, 2010 年 5 月 10 日.

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) 研究分担者

なし

(3) 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