

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03786

研究課題名（和文）磁気研磨法による微細複雑形状部品の表面仕上げ技術の開発

研究課題名（英文）Development of surface finishing technology for complex micro-shaped parts using the magnetic abrasive finishing process

研究代表者

鄒 艶華（Zou, Yanhua）

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：10516678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：微細複雑形状部品の表面にダメージを与えずかつナノレベルまでに仕上げる精密研磨技術が様々な産業分野で求められている。本研究は、変動磁場中にある磁性粒子の活発な動きを砥粒と連動させ、分散しながら精密加工が実現できる変動磁場を利用した超精密加工法を提案した。磁場解析によって最適な磁場配置を解明し、磁気研磨スラリーが変動磁場中に生じたダイナミックな磁気ブラシの形成及び作用条件を明らかにし、高精度の表面仕上げが実現できることを明らかにした。また、微細複雑形状部品の表面仕上げを実現するため、実用化に向けて6軸ロボットを利用した新しい加工装置を開発した。詳細な研磨実験を行い、本加工法の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、医療・光学関連など様々な分野で精密部品の微細化への需要が拡大しており、それらの発展に伴い、微細部品の表面にダメージを与えずかつナノレベルに仕上げる精密研磨技術が求められている。本研究で提案した変動磁場を利用した磁気研磨法は、変動磁場中にある磁性粒子の活発な動きを磁性砥粒と連動させ、分散しながら精密加工が実現できるものである。本研究成果は、本加工法の有効性及びその基本的な加工特性を示したものである。また、様々な産業分野で超精密微細複雑形状部品の精密加工技術として斬新な技術として大いに期待される。

研究成果の概要（英文）：Precision machining technology that can finish parts with complex micro-shapes to a nano-level without damaging the surfaces is in demand in various industrial fields. In this study, we proposed an ultra-precision machining method that utilizes an alternating magnetic field, in which the active movement of magnetic particles in the alternating magnetic field is linked to the abrasive grains, enabling precision machining while dispersing the particles. Magnetic field analysis was used to determine the optimal magnetic field configuration, and the formation and operating conditions of the dynamic magnetic brush generated by the magnetic finishing slurry in an alternating magnetic field were clarified. In addition, in order to realize surface finishing of parts with complex fine shapes, a new processing device using a 6-axis robot was developed toward practical application. Detailed finishing experiments were carried out, and the usefulness of this processing method was proved.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：磁気研磨法 変動磁場 微細複雑形状部品 表面仕上げ 高能率加工 高精度加工

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、医療・光学関連など様々な分野で精密部品の微細化への需要が拡大しており、それらの発展に伴い、微細複雑形状部品の表面にダメージを与えずかつナノレベルまでに仕上げる精密研磨技術が求められている。

従来の平面磁気研磨法^{①②}は、磁極と工作物の間に微細磁性粒子（混合磁性砥粒）から構成される柔軟性のある磁気ブラシを形成させ、部品表面の精密仕上げが実現できるが、微細複雑形状部品の表面仕上げや、部品表面の超精密仕上げに適用するとき、数ミクロンサイズの微小磁性粒子を利用し、加工途中における微細粒子の凝集や、磁気ブラシが加工物と接触後、原状に戻りにくいなどの問題があった。従来の磁気研磨法では加工困難な微細複雑形状部品の表面仕上げを実現するため、新しい研磨技術の開発が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、変動磁場中にある微小磁性砥粒の動きの変動によって超精密表面創成に着目し、微細複雑形状部品の表面仕上げを実現することを目的とする変動磁場を利用した超精密加工法を提案するものである。具体的には、磁場の方向が一定の周波数で変化させると、磁性粒子に作用する磁力の方向が変わり、磁気ブラシが上下方向に動ける。この磁性粒子の動きを利用して、研磨材を磁気ブラシの先端に引き上げられて工作物表面を研磨する。溝のような深い箇所も研磨できる（図1）。提案する新しい加工法を実現およびその有効性を示すため、目的①「ナノレベル表面創成」および目的②「微細複雑形状部品の表面仕上げ」を研究目的とする。

まず始めに、磁場解析によって最適な磁場配置を解明し、磁性粒子が変動磁場の中に受けた磁力を解析・実測して、加工メカニズムを解明する。その後、加工対象に応じた加工条件の最適化と微細複雑形状部品の精密研磨への適用を目的として実験的検討を行う。また、高能率除去と精密仕上げを両立させるために、加工特性に及ぼす影響因子を調べ、最適加工条件を明らかにする。本研究によって提案する加工法の有効性を示すとともに、産業界に应用する可能性を検討する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するにあたり、まずは磁場解析によって最適な磁場配置を解明し、磁性粒子が変動磁場の中に受けた磁力を解析・実測をして、磁極形状・寸法の設計、磁気回路の設計を行い、磁気ブラシ形成及び作用条件を明らかにする。試作した加工装置を利用し、SUS304 ステンレス鋼板を工作物として研磨実験を行い、直流磁場を用いた磁気研磨法に比べて、その差異を明らかにする。また、PCTFE 樹脂材料の表面加工に対して、加工特性及び加工メカニズムを解明する。次に、微細複雑形状部品の表面仕上げを実現するため、実用化に向けて6軸ロボットを利用した新しい加工装置の開発を行い、詳細な実験を行い、加工特性を評価、検討する。

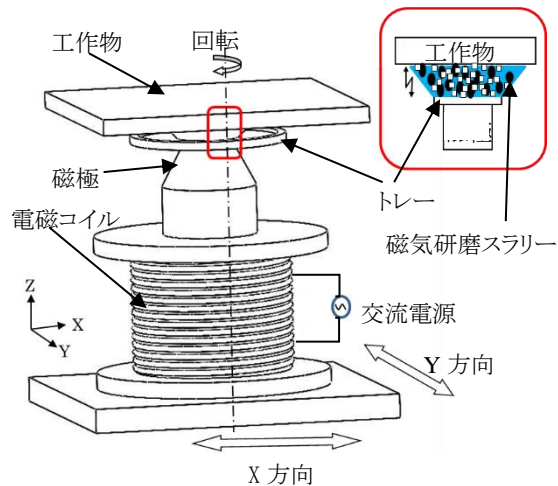


図1 加工原理の模式図

4. 研究成果

(1) 図1に、変動磁場を利用した磁気研磨法の加工原理の模式図を示す。図示のように、磁極先端のトレーの中に、磁気研磨スラリーを入れてある。磁気研磨スラリーは磁性粒子と研磨材砥粒及び研磨液で作ったものである。図2に変動磁場中の磁性粒子に作用する磁力を示す。図2に示すように、電磁コイルに交流電流を通電すると電磁極先端に変動磁場が発生し、磁性粒子は磁力線に沿って磁気ブラシに形成する。磁場の方向を変えると、磁性粒子に作用する磁力の方向が変わり、磁気ブラシが上下方向に動ける。この磁性粒子の動きを利用して、研磨材を磁気ブラシの先端に引き上げられて工作物表面を研磨する。また、磁極をモーターとつなぎ回転運動と電磁コイル台の送り運動を与え、工作物との間に相対運動が発生し、工作物の広範囲加工を実現する。

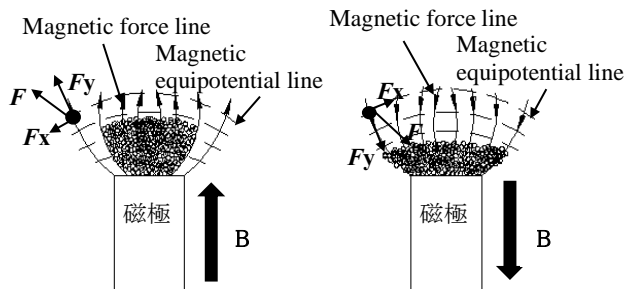


図2 変動磁場中の磁性粒子に作用する磁力

また、1個の磁性粒子は、 F_x :等磁位線方向、 F_y :磁力線方向に磁力を受け、合力は F を受ける。各磁力は次式で与えられる^{①②}。

$$F_x = V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) ; \quad F_y = V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで、 V :磁性粒子の体積、 χ :磁性粒子の磁化率、 μ_0 :真空の透磁率、 H :磁場の強さである。
 また、磁力と交流磁場の関係を知るために、図3に示すように、モデルを単純化した。この場合は、コイルの半径が R であり、コイルの軸上に距離 Z の箇所の磁場は式(2)で計算することができる^③。

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

変動磁場中の電流は式(3)で表される。

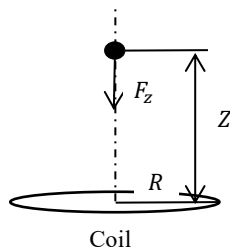
$$I = I_m \sin \omega t \quad (3)$$

ここで、 I :電流である。 I_m :電流最大値、 ω :角速度、 t :時間である。

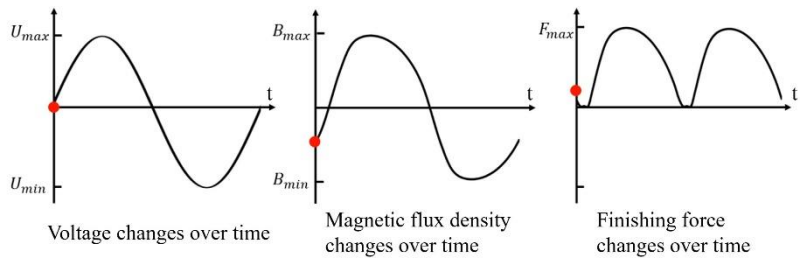
そして、コイルの軸上に距離 Z の箇所にある磁性粒子は受ける磁力が式(4)で計算することができる。

$$F_z = \frac{3V\chi\mu_0ZI_m^2R^4}{8(R^2 + Z^2)^4} (\cos 2\omega t - 1) \quad (4)$$

式(3)、式(4)により、コイルの軸上に距離 Z の箇所にある磁性粒子が受ける磁力の周期は交流磁場周期の $1/2$ であることを示した。また、実測した結果は図4に示す。図の示すように、実測した交流電圧、磁束密度及び磁力の波形により、理論解析と一致していることが実証された。



Coil



Voltage changes over time

Magnetic flux density changes over time

Finishing force changes over time

図3 交流磁場中の磁性粒子に作用する磁力の模式図

図4 交流磁場中の磁性粒子に作用する磁力の波形

(2) 本研究では、まずはじめ A5052 アルミニウム合金板を工作物として研磨実験を行い、直流磁場を用いた磁気研磨法に比べて、加工特性に及ぼす影響を調べた。磁性粒子は平均粒径が $30\mu\text{m}$ の電解鉄粉を利用し、研磨材は #20000 のアルミナ砥粒を用いた。交流電源から電磁コイルに周波数 1Hz、電流強度 1.9A の交流電流を供給した。静磁場と交流磁場の違いを調べるために、合計 20 分間の加工実験は 2 セットで実験を行った。加工工程にはそれぞれ 5 分と 10 分ごとに実験を止め測定を行った。実験結果は図5に示す。図の示すよう、単一工程の仕上げ時間は 5 分と 10 分の場合には、両方とも滑らかな表面が得られることが分かった。また、単一工程の仕上げ時間が 10 分の場合、交流磁場を利用した場合は材料除去量が大幅増加し、表面品質が静磁場を利用した場合よりも高くなることを明らかにした。

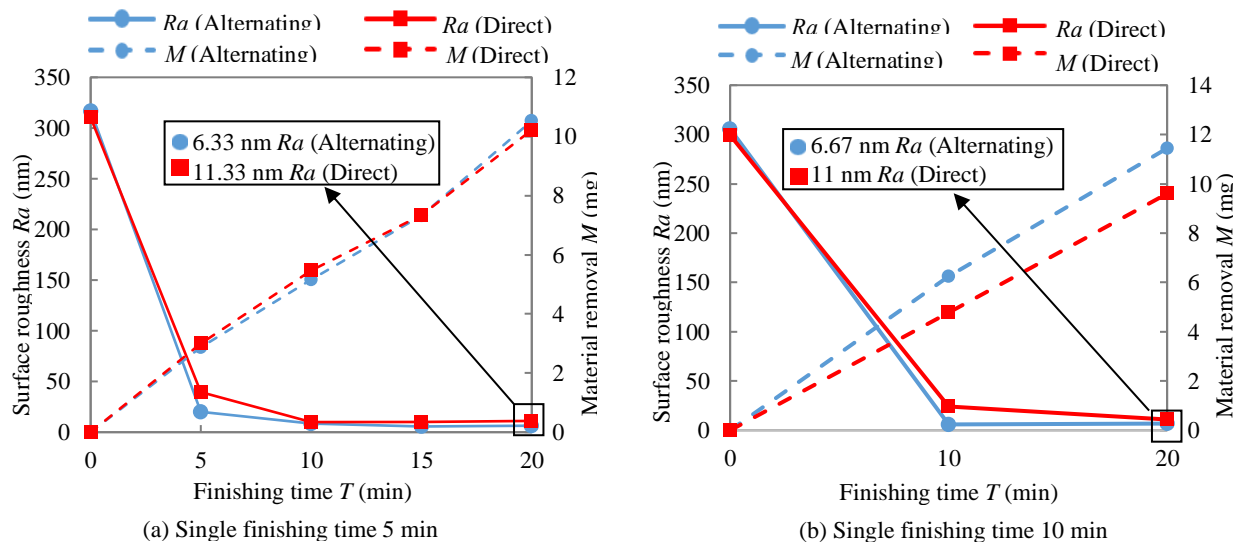


図5 表面粗さと加工量が時間的变化

(3) 本研究で提案した加工法によって、ナノレベル表面が創成できることを明らかにするため、SUS304 ステンレス鋼板を加工対象とし、交流電源から電磁コイルに周波数 3Hz、電流強度 1.4A の交流電流を供給し、詳細な研磨実験を行った。また、磁性粒子と研磨材の種類・径をそれぞれ選択し、研磨工程を 3 工程に分けて合計 210 分の研磨実験を行った。図 6 に、非接触式表面形状測定機を利用して加工前後の工作物表面を測定した結果を示す。実験結果により、工作物の表面粗さは加工前の 203.2nmRa から 4.7nmRa まで向上でき、ナノレベル超精密表面を創成できることを明らかにした。

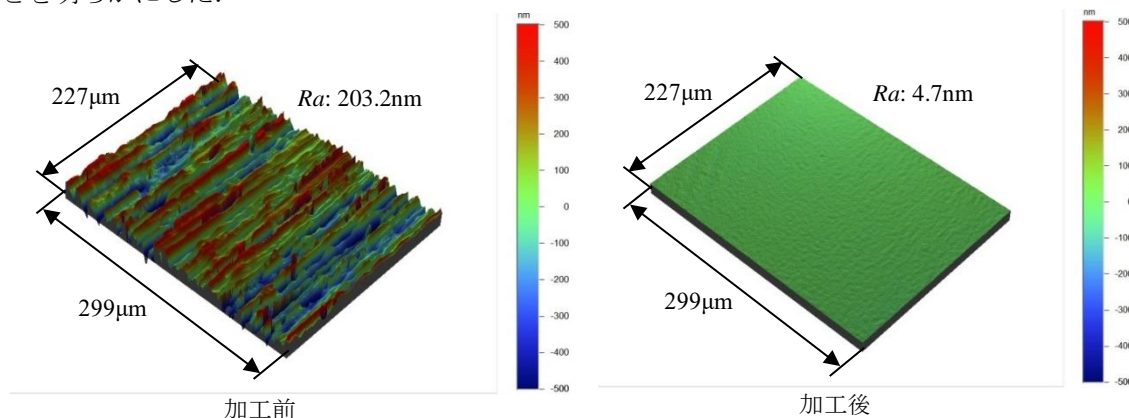


図 6 加工前後の工作物表面

(4) 微細複雑形状部品の表面仕上げを実現するため、実用化に向けて 6 軸ロボットを利用した新しい加工装置を開発した。加工原理の模式図を図 7 に示す。図に示すように、磁性粒子、研磨材砥粒と加工液で混合した磁気研磨スラリーをトレーの上に載せる。電磁コイルに交流電流を通電させると、電磁極先端に磁場の変動により、トレー上の磁気研磨スラリーは変動する磁力を受け、形成される磁気ブラシは上下方向に動く、この磁性粒子の動きを利用して、研磨材を磁気ブラシの先端に引き上げられて工作物表面を研磨する。微細複雑形状部品の表面研磨を実現することができる。

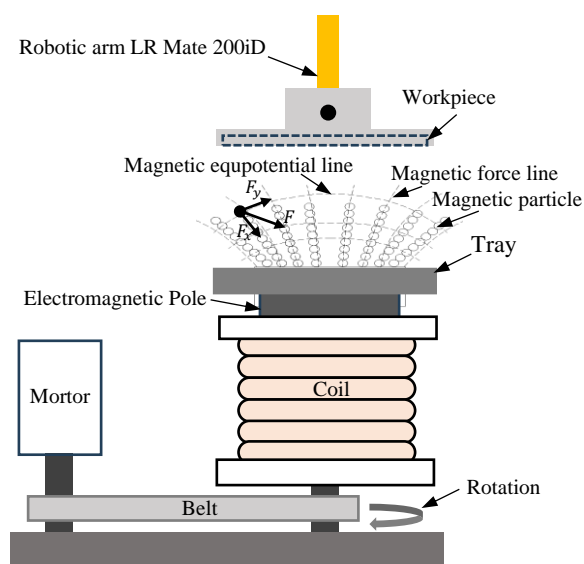


図 7 加工原理の模式図

また、工作物はロボットアームの先端部に固定し、ロボットアームには回転機構が取り付けられており、工作物を回転させることが可能である。次に、変動磁場中に形成される磁気ブラシと微細複雑形状部品との間に最適な接触状態で加工を行えるため、ロボットによる間隙及び姿勢を制御することができる。本実験では、まず開発した研磨装置を利用し、詳細な研磨実験を行った。磁極先端の磁場強度、磁性砥粒の種類、サイズ、加工間隙及び工作物の回転速度が加工特性に及ぼす影響を検討した。超精密表面創成及び微細複雑形状部品の表面仕上げを実現できる可能性を示した。

その他、アルミナセラミックス材料、樹脂材料の表面仕上げにも適用し、超精密ナノレベル表面創成が実現できることを明らかにした。また、PTFE 樹脂板を加工対象とした研磨実験では、15 分間の加工実験を行った結果、表面粗さが 112.83 nm Ra から 5 nm Ra までに向上できることを明らかにした。本加工法において磁気研磨スラリーが常に動きながら加工を行っているため、研磨材砥粒の新陳代謝効果があることを示した。

<引用文献>

- ① T. Shimura, E. Hatano, and K. Takazawa, "Development of spindle-finish type finishing apparatus and its finishing performance using a magnetic abrasive machining process," Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng. Vol.20, pp. 79–84, 1986. (In Japanese)
- ② Takeo Shimura, Toshio Aizawa, Development of Plan Magnetic Abrasive Finishing Apparatus, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 54, 5 (1988) 928 (in Japanese).
- ③ Jiles D: Introduction to magnetism and magnetic materials, CRC press, (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Huijun Xie, Yanhua Zou	4. 巻 114
2. 論文標題 Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field-discussion on the influence of current waveform variation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 2471 ~ 2483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-021-07048-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huijun Xie, Yanhua Zou	4. 巻 4
2. 論文標題 Investigation of the application of a magnetic abrasive finishing process using an alternating magnetic field for finishing micro-grooves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology and Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/10.0005015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Huijun Xie, Yanhua Zou	4. 巻 1066
2. 論文標題 Application of Magnetic Abrasive Finishing Process Using Alternating Magnetic Field for Finishing Polychlorotrifluoroethylene Resin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 85 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/p-q08k66	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Huijun XIE, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Study on the magnetic abrasive finishing process using an alternating magnetic field - Investigation on finishing characteristics using composite magnetic field -
3. 学会等名 The 6th International Conference on Surface and Interface Fabrication Technologies (ICSIF2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nozomi Nakamura, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Study on ultra-precision surface finishing of micro-complex shaped parts using magnetic abrasive finishing process
3. 学会等名 The 6th International Conference on Surface and Interface Fabrication Technologies (ICSIF2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中村 望, 鄒 艶華
2. 発表標題 微細複雑形状部品の超精密磁気研磨法に関する研究
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 畠田 健矢, 鄒 艶華
2. 発表標題 磁気研磨法による微細複雑形状部品の表面仕上げ技術の開発
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 謝 恵君, 鄒 艶華
2. 発表標題 Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field - Application of composite magnetic field -
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鄒 艶華, 増本 絢音
2. 発表標題 磁気研磨法による微細複雑形状部品の超精密表面仕上げに関する研究 Study on ultra-precision surface finishing of micro-complex shaped parts using magnetic abrasive finishing process
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huijun XIE, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Study on the magnetic abrasive finishing process using an alternating magnetic field - Influence of pulse current on finishing characteristics -
3. 学会等名 The 5th International Conference on Surface and Interface Fabrication Technologies (ICSIF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huijun XIE, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field - discussion on improvement of processing efficiency -
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期総会・講演会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 董 超文, 鄒 艶華
2. 発表標題 変動磁場を利用した新しい磁気研磨法に関する研究-加工特性に及ぼす影響の検討-
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Huijun XIE, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Application of magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field for finishing polychlorotrifluoroethylene resin
3. 学会等名 2022 11th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials (ICAMEM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 謝 恵君, 鄒 艶華
2. 発表標題 変動磁場を利用した超精密磁気研磨法に関する研究 Investigation on magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field
3. 学会等名 2022年度日本機械学会栃木ブロック研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 謝 恵君, 鄒 艶華
2. 発表標題 磁気研磨法による微細複雑形状部品の表面仕上げに関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Huijun XIE, Yanhua ZOU
2. 発表標題 Investigation on surface finishing of polychlorotrifluoroethylene resin by the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------