

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03870

研究課題名（和文）電解水（還元／酸化）と磁気援用加工法による複合的表面創製に関する研究

研究課題名（英文）Study on surface creation by combining electrolyzed water (reduction / oxidation) and magnetic field assisted processing method

研究代表者

川久保 英樹 (KAWAKUBO, Hideki)

信州大学・学術研究院教育学系・准教授

研究者番号：90579129

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：磁気援用加工法による磁気粒子ブラシを用いた表面擦過と、電解水との組み合わせ効果によって、表面仕上げ、および機能性を複合的に付与する表面創製法を提案した。磁気粒子ブラシは、フレキシブルに変形可能、および手の届かない箇所でも形成可能なことが特徴として挙げられ、複雑形状面・内面などの加工困難な箇所への適用に有効である。一方、電解水には還元水と酸化水があり、電解還元水には洗浄作用、電解酸化水には表面エッチング作用がある。加工特性を検討した結果、表面改質技術（特に、圧縮残留応力の付与）、表面テクスチャリング技術（粗面化／平滑化／部分的加工）、異種成分の表面移着などに有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、アディティブマニュファクチャリングの研究が進展しており、従来法では加工困難な複雑形状部品の創製技術が発展してきた。そのような中で、複雑形状面への超平滑化・機能性付与・表面改質を行う新しい表面加工技術の開発が必要となる。

本加工法は、磁気援用加工技術と、電解水の電気化学的特性を重畳したものであり、複雑形状面などの表面加工と同時に、母材表層部の特性改質を行うことが可能である。そのため、精密加工の技術領域を拡大する新たな表面創製法として位置付けられる。本研究成果は、その基本的加工特性を示したものである。

研究成果の概要（英文）：This study clarified the processing characteristics of a surface creation method that combines magnetic field assisted processing method and electrolyzed water (reducing water / oxidizing water). Magnetic field assisted processing method uses a magnetic particle brush formed along the lines of magnetic force as a processing tool, and is suitable for finishing parts that are difficult to finish with conventional processing methods, such as complex shaped surfaces and inner surfaces. Next, there are two types of electrolyzed water used as the processing liquid: electrolyzed reducing water (ER-W) and electrolyzed oxidizing water (EO-W). ER-W has a surface cleaning effect. On the other hand, EO-W has a surface etching effect.

As a result of this research, it was shown that this surface creation method is effective as a surface modification technique for applying compressive residual stress, surface textured technique, and material transfer technique to the surface.

研究分野：加工学，生産工学，砥粒加工

キーワード：表面加工 磁気援用加工 電解還元水 電解酸化水 表面改質 残留応力 部分的加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、微細・複雑形状面を高品位・高能率に加工する超精密加工技術の開発と同時に、精密加工面へ機能性を付与する表面処理技術も注目されている。加工面の表面改質や表面テクスチャリングには、マイクロブラスト、レーザ加工など各種表面創製法がある。近年、アディティブマニファクチュアリングの研究も進展しており、従来法では加工困難な複雑形状部品の創製技術の発展と同時に、複雑形状面などの超平滑化・機能性付与・表面改質を行う新しい表面加工技術の開発が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、複雑形状面・内面などの加工困難な箇所に対して、磁気粒子ブラシと電解水（還元水／酸化水）との組み合わせ効果による仕上げ、および機能性を複合的に付与する表面創製法（表面改質・表面テクスチャリング・異種成分移着）を提案するものである。

ベースとなる技術は、磁気援用加工法と電解水利用技術の二つである。磁気援用加工法は、磁力線に沿って形成される磁気粒子ブラシの磁気的な押付力を加工圧力として利用している。磁気粒子ブラシは、加工面に対して柔軟に変形しながら接触可能なため、複雑形状部品表面の仕上げ加工に適している。またパイプ内面加工にも適している。本研究では、磁気粒子ブラシの擦過作用を中心とした加工を行う（図1）。

電解水利用については、電解還元水は表面洗浄へ適用でき（引用文献①，②）、電解酸化水にはエッチング効果（引用文献③，④）がある。これまでに、電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工により、仕上げ特性の向上効果と圧縮残留応力の付与効果を明らかにしてきた（引用文献⑤）。本研究では、磁気粒子ブラシと電解水（還元水／酸化水）特性との融合による新しい表面加工技術を確立する。

3. 研究の方法

本研究は、磁気援用加工法をベース技術として、電解水（還元水／酸化水）の電気化学的特性を組み合わせ、複雑形状面に対する仕上げ加工と機能性を付与する複合的表面創製法を提案するものである。具体的には、(a)表面改質技術、(b)表面テクスチャリング、(c)異種成分の移着技術、(d)選択的・部分的な機能性付与技術（(a)(b)(c)の応用技術）、を明らかにする。

本加工法を学術的に体系化するため、磁気粒子ブラシの挙動制御、電解水の特性制御、および相互効果を検討する。そして、各種材料に対する除去特性・擦過特性・表面改質特性・表面元素分析・表面組織を調査し、従来法との比較実験を行い、加工メカニズムを解明する。

磁気粒子ブラシは、形状の違い（不定形／球形）、粒子サイズの違いが加工特性に及ぼす影響を検討した。図2に一例として、不定形粒子（G-505：粒子サイズ505 μm ）、球形粒子（B-567.5：粒子サイズ567.5 μm ）のSEM観察像を示す。記号G-、B-に続く数値が粒子サイズであり、実験では各種サイズを用いて比較した。

電解水は、NaCl電解還元水（ER-Wと呼ぶ）（pH:12, EC:210 mS/m, ORP: -870 mV vs. Ag/AgCl）、またはNaCl電解酸化水（EO-Wと呼ぶ）（pH:2, EC:170 mS/m, ORP: 1150 mV vs. Ag/AgCl）を加工液として磁気粒子ブラシへ供給しながら、加工特性に及ぼす影響を検討した。

実験では、除去量、表面粗さ、表面残留応力、SEM観察、表面元素分析により評価した。

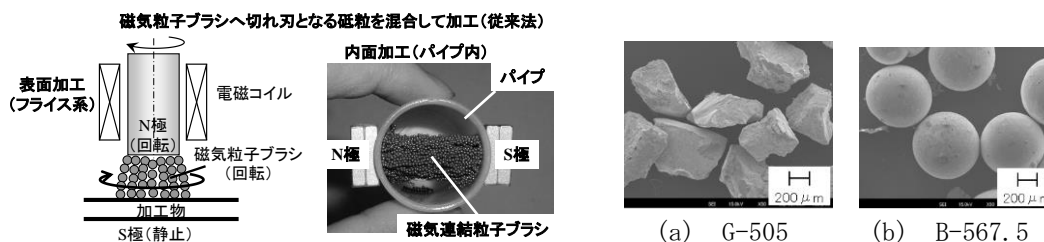


図1 磁気連結粒子ブラシ

図2 強磁性材粒子

4. 研究成果

(1) 平面への表面改質技術

電解還元水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、平面加工における圧縮残留応力の付与技術を中心に基礎的な検討を行った。試料材質はSUS304である。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

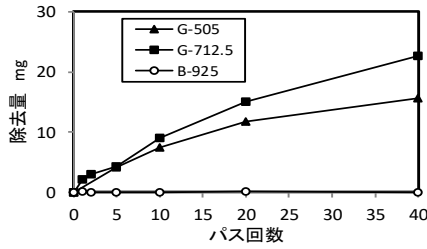
①球形粒子では、粒子表面に切れ刃となる凹凸がないため除去量がなく、バニシ作用が支配的な加工である。粒子サイズの増大により圧縮残留応力は増加する。本実験での最大値は約300MPaであった（図3，図4）。

②不定形粒子では、粒子表面の凹凸切れ刃による除去加工とバニシ作用が混在した加工である。粒子サイズの増大により圧縮残留応力は増加する。本実験での最大値は約350MPaであった。（図

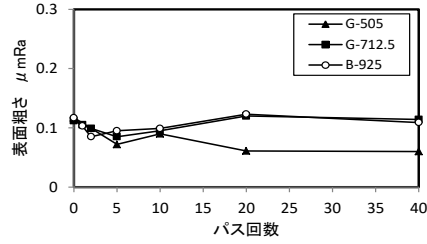
3, 図4).

③圧縮残留応力付与深さを大きくする場合には, 不定形粒子よりも球形粒子が適している. 本実験では, 球形粒子の場合に圧縮残留応力付与深さは約 $40 \mu\text{m}$ であった (図省略).

④軸傾斜加工法を提案した. 軸傾斜 0° の場合と比較して, 軸傾斜 5° (正転+逆転) は圧縮残留応力値が約 1.4 倍に増加した. また均一な粗面化加工にも有効である (図5).

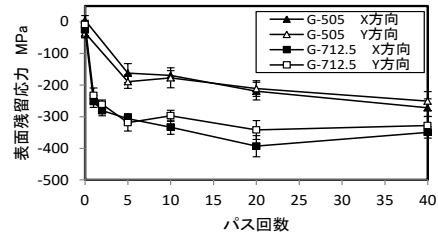


(a) 除去量

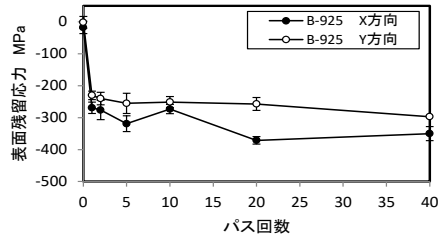


(b) 表面粗さ

図3 加工パス回数と加工特性との関係

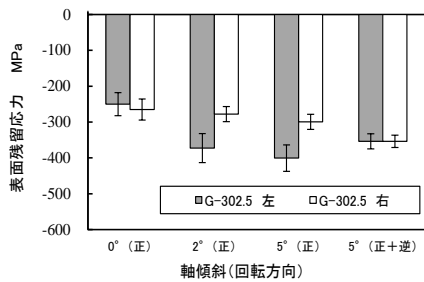


(a) 不定形粒子 (G-505, G-712.5)

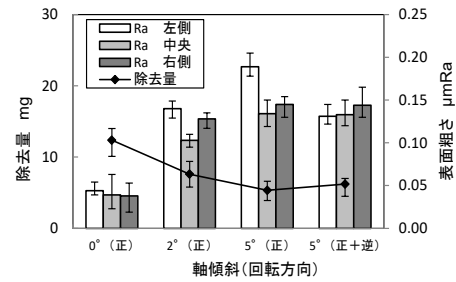


(b) 球形粒子 (B-925)

図4 加工パス回数と表面残留応力との関係



(a) 表面残留応力



(b) 除去量・表面粗さ

図5 回転軸傾斜/回転方向と表面残留応力・加工特性との関係

(2) 段差面・溝面への表面改質技術

電解還元水を加工液として用いてロボットを併用した磁気援用加工を行い, 段差面・溝面における圧縮残留応力の付与技術に関する基礎的な検討を行った. 加工対象物は, ロボットアームの先端へ取り付けて磁気粒子ブラシへ接触させる. そして, 磁気粒子ブラシの回転運動とロボットアームの動作により加工を行う. N 磁極先端には, 加工液供給用のセンタースルー穴があり, 磁気粒子ブラシの先端から電解還元水 (ER-W) を吐出することができる. 実験では, 静磁場と変動磁場の比較を行った. 試料材質は SUS304 である. 得られた結果をまとめると, 次のとおりである.

①除去量については, 変動磁場の場合, 溝底部, 溝上面の除去量はほぼ同程度であり, 静磁場と比較して全体的に除去量が増加する (図省略).

②表面粗さについては, 静磁場, 変動磁場ともに, 初期面粗さ $0.1 \mu\text{mRa}$ よりも粗面化され, 溝底コーナー部で表面粗さは最大となる (図6).

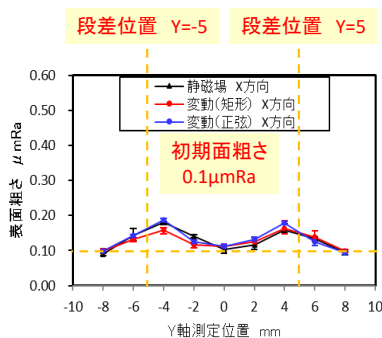


図6 加工後の表面粗さ

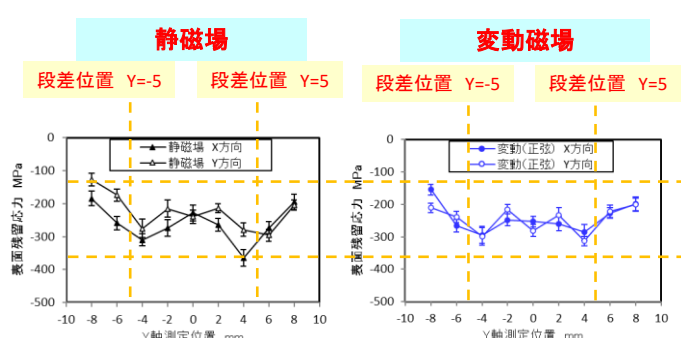


図7 加工後の表面残留応力 (圧縮残留応力)

③圧縮残留応力与については、静磁場、変動磁場ともに、溝コーナー部が他と比較して大きくなる。各測定方向（X方向、Y方向）の差は変動磁場の方が小さくなる（図7）。

(3)パイプの内面改質技術

電解還元水、または電解酸化水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、その基礎的な特性について、加工メカニズムを検討した。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

①ストレート管内面へ圧縮残留応力付与を試みた。ここでは、電解還元水（ER-W）を加工液として使用した。本実験における圧縮残留応力値は約100MPaである（図省略）。

②ロボットアームに磁気援用加工ユニットを取り付けて、電解還元水（ER-W）を使用して曲がり管内面加工を試みた。その結果、内面へ圧縮残留応力が付与できることを示した（図省略）。

③加工液が電解還元水（ER-W）の場合、不定形粒子（G-505）との組み合わせ（G-505+ER-W）では、G-505粒子表面の凹凸が切れ刃となって加工面を除去して粗面化した。一方、球形粒子（B-567.5）との組み合わせ（B-567.5+ER-W）では除去量がほとんどなく、球形粒子のラビングやプラウイングによるバニシ作用が支配的な加工であるといえる（図8）。

④加工液が酸化水（EO-W）の場合、不定形粒子（G-505）との組み合わせ（G-505+EO-W）では、G-505+ER-Wと比較して、除去量は少なく、表面粗さも小さくなる。加工液がEO-Wの場合、加工面の酸化被膜や粒子表面をエッチングしながら、粒子表面の凹凸切れ刃によって除去加工を行う。一方、球形粒子（B-567.5）との組み合わせ（B567.5+EO-W）では、B-567.5+ER-Wよりも除去量が多い。不定形（G-505）場合、EO-Wの組み合わせでは除去量は減少しており、逆の結果となった。表面粗さは $0.07\mu mRa$ に向上しており、他の条件とは大きく異なる。加工メカニズムは、ラビングやプラウイングに加え、加工面のエッチングも重畳されている（図8）。

⑤本加工法によって圧縮残留応力が付与され、不定形粒子（G-505）の方が、球形粒子（B-567.5）よりも圧縮残留応力値が大きくなる傾向を示した。不定形粒子では、凹凸部の切れ刃によって、ラビング、プラウイング、微小切削の状態を繰り返しており、粒子凸部に押付力が集中した結果、球形粒子よりも高い圧縮残留応力値が付与された（図9）。

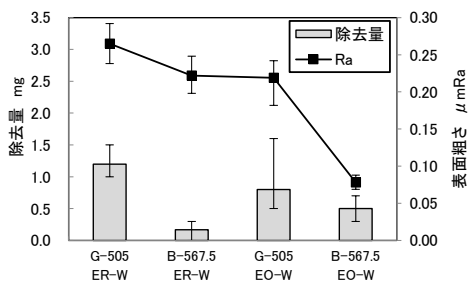


図8 除去量および加工後の表面粗さ

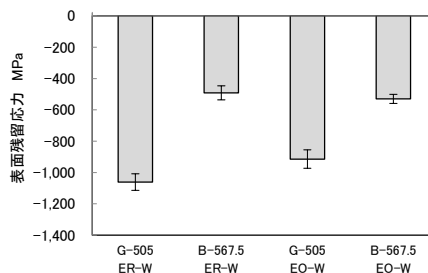


図9 加工後の表面残留応力

(4)表面テクスチャリング

電解還元水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、回転磁極の傾斜角度（ 0° 、 5° ）の違いによる表面の擦過状態を比較して、表面テクスチャリングを検討した。その結果、加工前（図10）と比較し、軸傾斜角 0° （図11）の場合、表面粗さが向上した。一方、軸傾斜角 5° （図12）の場合は粗面化される。このことから、軸

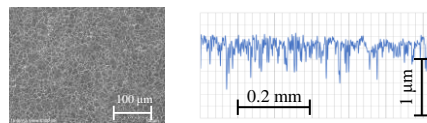


図10 加工前

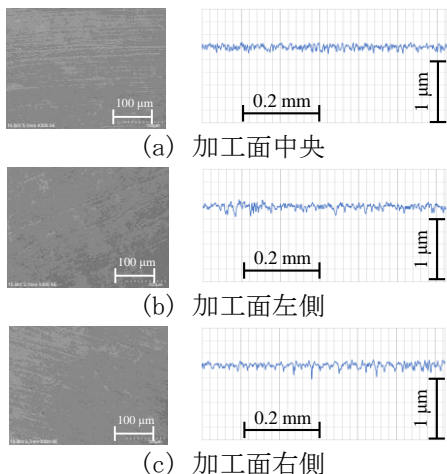


図11 G-425, 軸傾斜角 0° の加工面

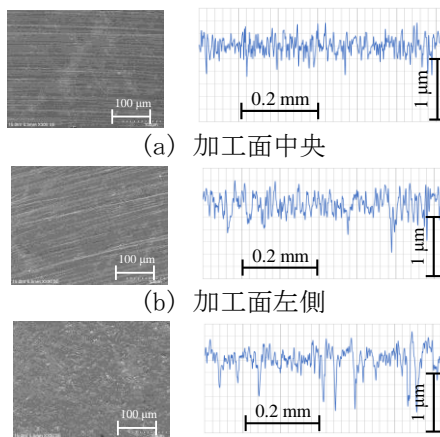
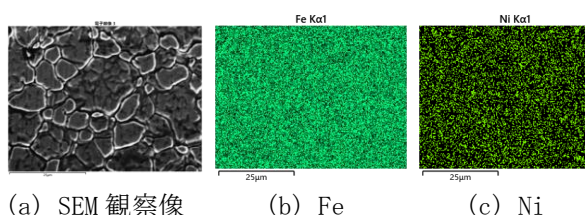


図12 G-425, 軸傾斜角 5° の加工面

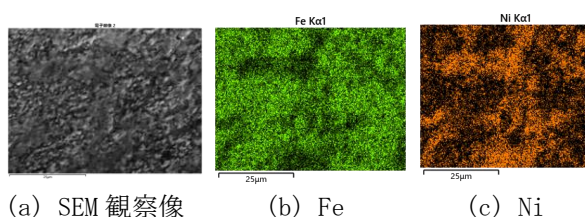
傾斜は粗面化技術に効果的であることを明らかにした。中央部と左側では軸傾斜角 0° よりも深い加工条痕が観察された。加工面右側では加工条痕よりも衝突痕が多く観察される。これは粒子ブラシの衝突によるものと考えられ、加工面左側と加工面右側とは粒子ブラシの衝突状態が異なるためである。加工面に対する粒子ブラシの接触状態を変化させることにより、加工面の擦過状態すなわち表面の異方性を意図的に制御することが可能となる。この加工特性は、トライボロジーにも応用可能である。

(5) 異種成分の移着技術

電解還元水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、異種成分の移着技術に関する基礎的な検討を行った。異種成分を加工面に移着させることによって、加工面へ新たな機能性の付与が期待できる。実験では SUS304 材表面へ Ni 成分の移着を試みた。加工手順は、第 1 段階として G-425 粒子による磁気粒子ブラシを用いて主軸傾斜 5° の加工条件で前加工（粗面化）を行う。そして、第 2 段階として Ni 粒子で形成される磁気粒子ブラシで前加工面を擦過した。図 13、図 14 に未加工面と Ni 移着加工面の SEM 観察像と元素分析（マッピング画像）結果を示す。SUS304 材の主成分の Fe と、移着成分の Ni に着目すると、加工面において Ni 成分の移着が確認できる。また、定量分析の結果、Ni の質量%については、未加工面が約 8% に対して、加工後は 28% に増加している。この事象は、硬度が低い Ni 粒子の磁気粒子ブラシが、前加工で粗面化された加工面を擦過したため、粗化面のアンカー効果によって、Ni 成分が表面に移着したためと考えられる。実験から、加工面への異種成分の移着加工技術への適用の可能性を示した。



(a) SEM 観察像 (b) Fe (c) Ni
図 13 加工前の表面元素分析



(a) SEM 観察像 (b) Fe (c) Ni
図 14 加工後の表面元素分析

(6) 選択的・部分的な機能性付与技術

電解還元水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、選択的・部分的な機能性付与に関する検討を行った。具体的には、マスキングによって加工部のみを露出させて、圧縮残留応力の付与、移着の可能性を検討した。選択的・部分的な機能性付与技術の基礎実験として、平面試料(SUS304)に対して一部をアルミ材(0.2mm厚)でマスキングし、露出部(非マスキング部)への圧縮残留応力の付与技術を検討した。

強磁性材粒子が G-425、主軸傾斜 0° である。図 15 に SEM 観察像と表面残留応力の測定値を示す。マスキングによって、境界線を境に加工部と未加工部に分かれている。表面残留応力は、未加工部が -7MPa 、加工部が -966MPa であり、マスキングによって部分的・選択的な残留応力の付与加工が可能であることがわかる。

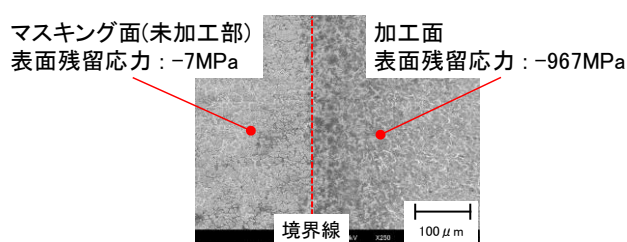


図 15 選択的・部分的な機能性付与の一例

<引用文献>

- ① 佐藤運海・竹内政生・川久保英樹, 高炭素鋼の表面に及ぼす希薄 NaCl 電解還元水の影響, 精密工学会誌, 査読有, 78 巻 10 号 pp. 894-898 (2012)
- ② 佐藤運海・竹内政生・川久保英樹, Na_2SO_4 電解還元水の基本特性および精密洗浄性能, 精密工学会誌, 査読有, 78 巻 3 号, pp. 231-235 (2012)
- ③ 佐藤運海・川久保英樹, 無酸素銅の圧延表面に及ぼす電解酸化水の影響, 精密工学会誌, 査読有, 87 巻 1 号, pp. 146-150 (2021)
- ④ 佐藤運海・川久保英樹, Na_2SO_4 電解酸化水を用いた 45 パーマロイ材の表面粗化処理—超音波併用の効果—, 精密工学会誌, 査読有, 86 巻 4 号, pp. 289-294 (2020)
- ⑤ 川久保英樹・佐藤運海・村田修一, 電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法に関する研究 非磁性工作物に対する除去能力および仕上げ面性状, 砥粒加工学会誌, 査読有, 60 巻 9 号, pp. 509-514 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 川久保英樹・佐藤運海・村田修一	4. 巻 64
2. 論文標題 磁気援用加工法と電解還元水との複合による圧縮残留応力の付与技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 326-332
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 電解水併用磁気援用技術によるパイプの内面加工
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 電解水併用砥粒レス磁気援用表面加工による溝面加工に対する変動磁場の効果
3. 学会等名 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 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 電解水を用いた砥粒レス状態の内面磁気援用加工
3. 学会等名 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 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 電解水併用砥粒レス磁気援用加工による表面改質
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 磁気援用表面改質法に関する研究 - パイプ内面への適用 -
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海
2. 発表標題 電解水併用砥粒レス磁気援用加工による段付き面の表面改質 - 変動磁場の影響 -
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 磁気援用表面改質法に関する研究 回転磁極の傾斜による影響
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 電解水を用いた砥粒レス磁気援用加工
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 回転軸傾斜が磁気援用加工による圧縮残留応力付与に及ぼす影響
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 磁気援用表面改質法に関する研究 磁気粒子ブラシの影響
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 磁気援用加工と電解還元水との複合による表面加工法の基礎的研究
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川久保英樹・佐藤運海・村田修一
2. 発表標題 磁気援用技術と電解還元水利用技術による複合的 surface 加工
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019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
連携研究者	佐藤 運海 (SATO Unkai) (30345730)	信州大学・学術研究院教育学系・教授 (13601)	

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
---------	---------