

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04135

研究課題名(和文) 磁場と電場の相乗効果による新規高能率超精密穴・ポケット加工法の開発研究

研究課題名(英文) Study on new highly effecient ultra fine hole and pocket processing method  
applied magnet and electric field synagy effect

研究代表者

山本 久嗣 (Ymamoto, Hisashi)

富山高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：80734409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：砥粒を含む磁気混合流体を加工液(MCF加工液)として使用した加工法を平板ならびにポケットを対象に磁場に加えて電場を印加したときの精密研磨の特性を明らかにした。平板研磨においては、磁場のみの研磨よりも磁場と電場を同時に印加した場合の方が表面粗さは向上した。ポケット底面と側壁の同時研磨を実現するためには、それぞれ工具と研磨面の隙間間隔とせん断速度を最適にした工具およびワークの設計が必要となることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MCF加工液を用いた研磨において磁場に加えて電場を同時に作用させることで砥粒の配置制御が可能となることが示された。このことは複雑な形状を有する等のために従来の研磨法を適用することが難しい製品への自動研磨の可能性を見出す技術であると考えられる。また、目的の研磨物に適した工具形状を設計することで角部等への研磨の可能性を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is clarified that characteristics of precision polishing method applied magnetic and electric fields utilizing magnetic compound fluid with abrasive particles (it is called MCF polishing fluid). It is found that surface smoothness are more improve with magnet and electric field than with only magnet field. It was suggested that the necessary to design the optimum tool clearance and shear rate for polishing wall-side and bottom surface at same time.

研究分野：流体工学，生産加工学

キーワード：磁気混合流体 精密研磨 磁場・電場 研磨効率 砥粒制御

### 1. 研究開始当初の背景

電子部品や精密機器の小型化により、構成部品の形状は複雑化し、かつ超精密な仕上げが要求されるために産学官で加工技術の開発研究が進められている。同時に難削材料加工技術の開発は、NEDO 事業(次世代構造部材創製・加工技術開発)等より重要課題と位置づけられており、低コスト化や省エネ化等の面からも解決すべき学術的課題である。中でも精密な穴の仕上げは、砥石を用いたホーニング加工で行われているが、難削材料に対しては多くの経験を必要とし、加工条件の決定が難しい。特に、難削材料のポケットなどへの仕上げ加工は困難で不可能な状況にある。すなわち、難削材料穴やポケットに対する高能率の仕上げ加工法の開発は急務である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は砥粒を含む磁気機能性流体に対して、磁場と電場を効果的に同時印加で、難削材料の穴やポケットに対する高能率な超精密加工法を開発研究することである。これまで砥粒を含んだ磁気機能性流体を用いて、磁場印加方式で円筒内面に対して形状精度を保持したり、あるいは、形状精度が向上する精密加工を実現したが、難削材料では加工能率が低い。本研究では磁場印加に加え、電気粘性流体理論に基づく高電圧を効果的に印加する方式を開発して、加工能率の飛躍的な向上を目指す。加工量特性を実験的に明らかにするとともに、加工量の予測を磁気機能性流体の流体特性実験と磁場と電場の数値解析により行う。これらの結果を用いて、磁場と電場の相乗効果による難削材料の穴・ポケット加工用高能率・超精密加工装置を開発する。

### 3. 研究の方法

難削材料のポケットの仕上げ加工において電場を印加でき、かつ、非導電性材料にも対応できる工具を開発し、その加工特性を明らかにする。工具は2個の軸方向に着磁したリング状永久磁石を同心円状に配置し、その隙間に非導電性材料を挟んだものである。2個のリング状永久磁石の加工面側の磁極は異極であり、工具に付着したMCF加工液には一方の永久磁石をプラス極とし、他方の永久磁石をマイナス極として電場を印加する。具体的な実験内容は、ステンレス鋼製の円形ポケットに対して、工具を公転運動させて、加工特性を明らかにした。加工特性では加工除去量とポケット底面、ポケット側面の表面粗さ、および、角部の表面状態を調べた。また、ポケットの仕上げ加工に当たり、本工具による定点加工実験を行い、本工具の基本的加工特性を明らかにした。

### 4. 研究成果

#### (1) 磁場と電場を同時に印加可能な工具の開発

図1に加工の概念図をしめす。工具は2個のリング状永久磁石が円周方向に絶縁体を挟み込む形で積層されている。内側と外側のリング状永久磁石に工具軸等を介して電場を印加することで磁場と電場を同時に利用することが可能である。はじめに磁場により磁気クラスタが形成され、この際に磁気浮力が作用することで砥粒が磁場強度の小さいワーク表面に集まる。さらに高電圧を永久磁石間に印加することで電場が生じる。電場が印加された流体内では誘電体である砥粒が誘電分極により凝集体を形成するために加工圧を効果的に砥粒に作用することができると考えられる。

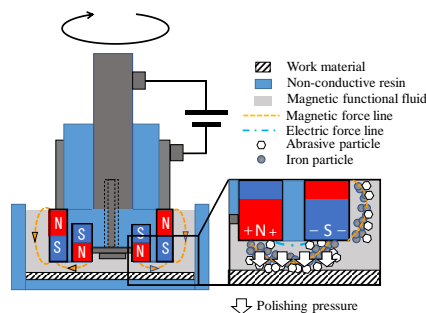


図1 本研究で提案する加工理論

#### (2) 研磨装置と実験装置ならびに実験条件

図2に研磨実験に用いた装置の外観をしめす。また、表1に工具の諸元をしめす。装置はCNCフライス盤(Prospec Industry Inc.製, PSF240-CNC)を用いており、高速高圧アンプリファイアを用いて増幅した電圧の印加を工具の軸部、加工部から通電ブラシを介して行い、ワーク固定部に設置されたワークを研磨する。工具は加工部と軸部で構成されており、加工部にはサイズの異なる二つのリング状永久磁石が非導電性樹脂カラーを間にはさみこみ同軸で積層されている。軸部はSUS304製のメインシャフトの周囲に非導電性樹脂カラーと軸下部に同じくSUS304製カラーが積層されており、メインシャフト部とカラー部にカーボンブラシを接続させることで電場を印加できる構造である。工具に用いる2個のリング状永久磁石はネオジウム磁石(二六製作所製,  $\phi 22 \times \phi 18 \times 6$ , 材質N40, 表面磁束密度400 mT, 二六製作所製,  $\phi 31 \times \phi 24 \times 8$ , 材質N40, 表面磁束密度456 mT)である。

図3に研磨実験時の工具とワークの位置関係をしめす。実験は磁場印加のみの場合と磁場に加え電場  $E = 250 \text{ V/mm}$  を印加した場合について行った。本実験では2種類のワークを用意し、どちらもSUS304製でポケットを有するワーク( $\phi 55 \times \phi 50 \times 11.5$ )と平板ワーク( $\phi 50 \times 4$ )を用いた。なお、ポケットを有するワークはポケット底面を研削加工によって仕上げられている。

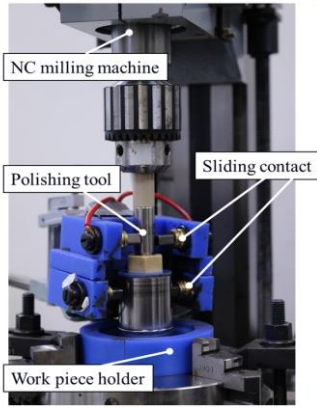


図2 開発した研磨装置

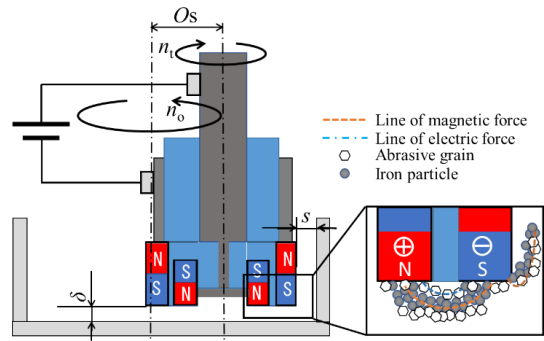


図3 工具とワークの概略図

表1 工具諸元

Shaft diameter	$\phi 12$ mm
Polishing tool diameter	$\phi 31$ mm
Inner ring shaped permanent magnet	
Size	$\phi 22$ mm $\times$ $\phi 18$ mm $\times$ 6 mm
Maximum magnetic flux density	400 mT
Outer ring shaped permanent magnet	
Size	$\phi 31$ mm $\times$ $\phi 24$ mm $\times$ 8 mm
Maximum magnetic flux density	456 mT

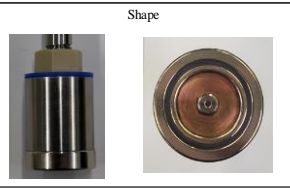


表2 加工液成分

Magnetic fluid(MSGS60)	39.2 wt.%
Fe particle(HQ, 1.2 $\mu$ m)	30.4 wt.%
Abresib perticle(3 $\mu$ m)	20.0 wt.%
$\alpha$ -cellulose	6.4 wt.%
Kerosene	4.0 wt.%

工具回転数は、磁場印加のみの場合は  $n_t = 400$  rpm、磁場と電場を同時印加した場合は  $n_t = 500$  rpm で実験を行った。また、工具をワーク中心から  $O_s = 8.5$  mm 偏心させ、ワークを  $n_o = 1$  rpm で円運動させることでワーク内面を全面研磨した。ワークと工具磁石間の隙間間隔  $\delta = 1$  mm とした。加工流体量は研磨工具の周囲 1mm の厚みでつけることを想定した量である 2.56 ml とした。加工時間は 60 分ごとに加工液を工具に付着して 180 分研磨した場合と 120 分、180 分連続で研磨した場合で実験を行った。

また、表2に MCF 加工液の成分をしめす。MCF はケロシンベース磁性流体(MSGS60, フェローテック製)にカーボニル鉄粉(HQ(平均粒径 1.2  $\mu$ m), BASF 製)を加えて作製した。供試流体はこの MCF に非凝集純アルミナ粉末(AP-D(平均粒径 3  $\mu$ m), 丸本ストルアス製)と  $\alpha$ -セルロース( $\alpha$ -Cellulose(fibriform), ナカライテスク製)を混入し、ホモジナイザーで分散処理して作製した。

### (3) 定点加工特性

図4に平板に対する定点研磨の工具回転数に対する加工除去量の変化をしめす。磁場のみの場合の加工除去量(研磨時間 30 分)は、工具回転数  $n = 400$  rpm 付近が最大である。また、電場を印加することで加工除去量(研磨時間 20.3 分)は増加し、 $n = 500$  rpm 付近で最大になる。すなわち、電場印加により加工除去量が増加し、最適な工具回転数は大きい方にシフトする。

図5に加工除去量が最大の場合の研磨前後の断面曲線をしめす。図5(a)の磁場のみの場合、加工領域は内側磁石の外側と磁石間のスペーサ部である。図5(b)の電場を印加した場合の加工領域は磁石間のスペーサ部である。磁場のみの場合、加工領域は磁気クラスタが形成される磁石間のスペーサと考えられるが、そうではないのはこの領域にある砥粒が時間的に工具の半径方向外側に移動したためと考えられる。一方、電場を印加した場合、砥粒が電極である永久磁石の端面に付着したり、磁石間で凝

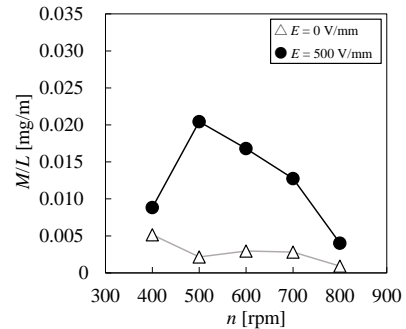
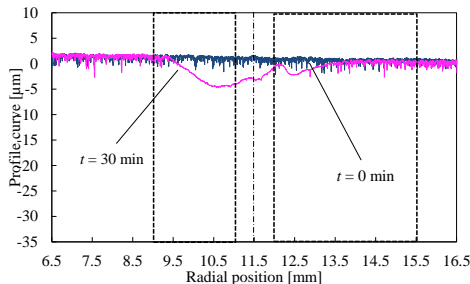
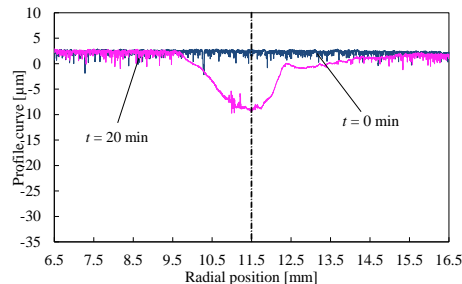


図4 定点研磨による加工量特性



(a) 磁場のみ ( $n = 400$  rpm)



(b) 磁場+電場  $E = 500$  V/mm ( $n = 500$  rpm)

図5 断面曲線(定点研磨)

集しようとしたりするため、砥粒の工具の半径方向外側へ移動しにくくなったと考えられる。電

場印加により、砥粒を磁気クラスタの形成される加工領域に保持すると考えられる。

#### (4) ポケットワーク内面の全面研磨実験の結果

図6(a)に60分ごとの研磨における加工除去量の変化と磁場のみの120分研磨と180分研磨の結果をしめす。また、図6(b)に平板ワークに対する研磨の結果もしめす。磁場のみの60分、120分、180分研磨を見ると、加工除去量が180分で飽和する傾向にあることがわかる。これは、砥粒が工具の加工領域から移動して、時間がたつほど作用数が減少するためと考えられる。しかし、60分ごとの研磨では180分まで線形に増加する。これは60分ごとの研磨では砥粒の移動が少なく、砥粒の加工面への作用数の減少が少ないためと考えられる。また、ポケット研磨では工具がポケットの側壁に沿って移動するため、平板に比べて砥粒の移動が少なくなっていると考えられる。このために、60分ごとの研磨では加工除去量では電場印加による影響と効果が見られないと考えられる。一方、平板に対する加工除去量では磁場だけの場合、ポケットの場合より加工除去量は小さい。しかし、電場印加により大幅に増加することがわかる。磁場のみの場合、研磨領域にある砥粒が工具の半径方向外側に移動する。しかし、電場を印加すると砥粒は電極である永久磁石の端面に付着し、磁石間で凝集する。このため、砥粒の工具の半径方向外側の移動がしにくくなり、加工除去量が大幅に増加すると考えられる。

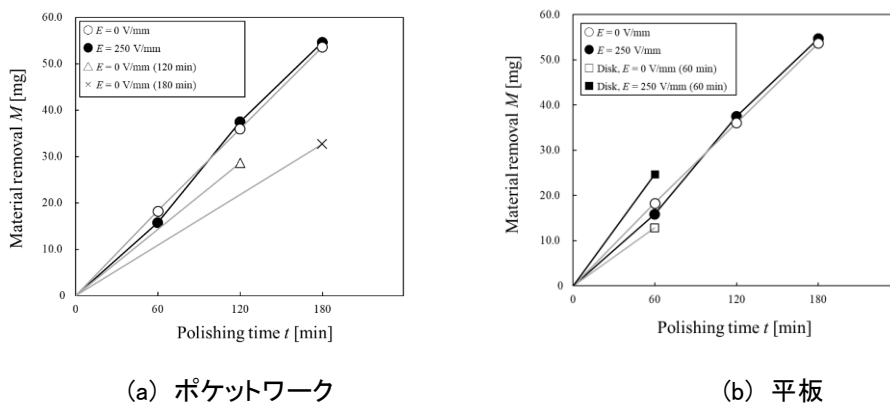


図6 加工除去量変化

図7(a)に磁場のみ印加した場合の1時間研磨したポケット底面の断面曲線をしめす。また、図7(b)に磁場と電場を同時印加した場合の1時間研磨したポケット底面の断面曲線をしめす。図7(a)と図7(b)の研磨領域と研磨深さにポケット底面の断面曲線においても電場印加による影響と効果が見られないと考えられる。

次に、図7(c)に磁場のみ印加した場合の1時間研磨した平板の断面曲線をしめす。また、図7(d)に磁場と電場を同時印加した場合の1時間研磨した平板の断面曲線をしめす。図6(b)のとおり、電場を印加した方が研磨深さは大きく、ワーク表面に対して砥粒が作用している時間が長くなっていることがわかる。

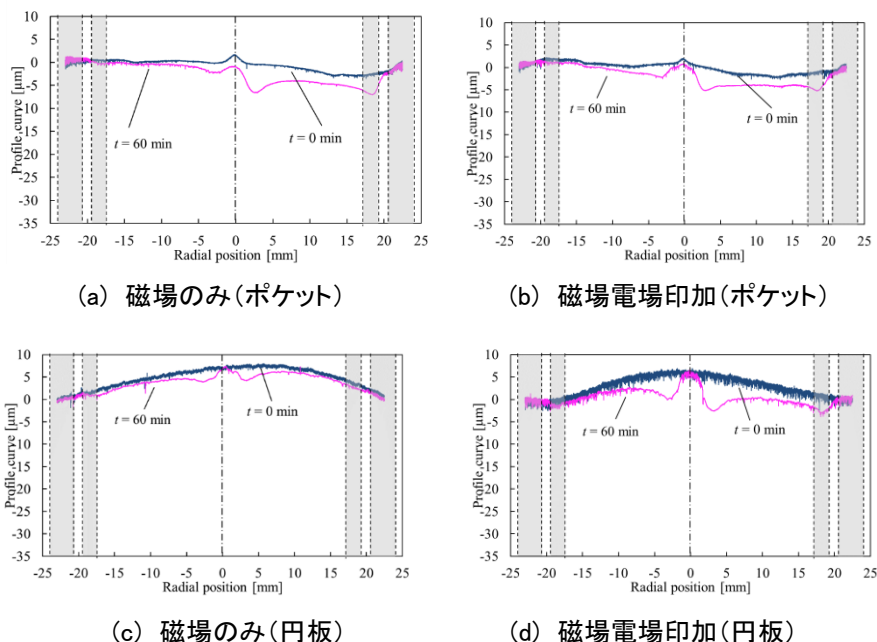


図7 断面曲線変化

図8にポケット側壁における  $z = 1.0 \sim 5.0 \text{ mm}$  における研磨前後の表面粗さの比  $Ra/Ra_0$  の変化を

しめす. 磁場のみの場合, 表面粗さは僅かな向上が見られるものの, 電場を印加した場合は全く見られない. 側壁が研磨されなかった原因として, 工具外周面とポケット側壁とのせん断速度が適正でなかったことが上げられる. 平行磁気クラスタによる円管内面や円筒内面加工では, 最適な隙間間隔  $s$  とせん断速度  $D$  が存在する. 最適な隙間間隔は  $s = 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$  であり, せん断速度は  $D = 1570 \text{ 1/s}$  である. 本研究では隙間間隔は  $s = 1.0 \text{ mm}$  であり, せん断速度は  $n_t = 400 \text{ rpm}$  では  $D = 649 \text{ 1/s}$ ,  $n_t = 500 \text{ rpm}$  では  $D = 814 \text{ 1/s}$  となり, 最適な加工条件と大きく異なることがわかる. 側壁の研磨に対して, 工具外周面のせん断速度が適正でなかったと考えられる.

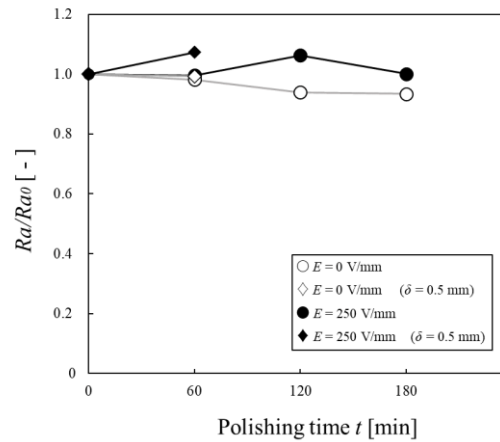


図8 表面粗さ変化

図9に60分ずつ流体を塗布して研磨した場合のポケット角部の研磨前後の表面写真をしめす. 角部については磁場のみ, 電場を印加した場合ともに, 研磨されたことを確認することができなかった. 原因として, 工具角部とポケット角部の直線距離が $1.0 \text{ mm}$ 以上であることと, 工具角部とポケット角部の隙間のせん断速度が適正でなかったことが考えられる.

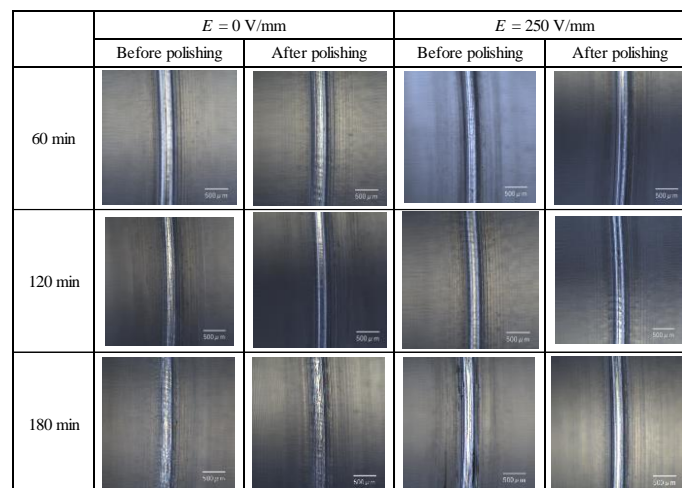


図9 角部のマイクロSCOPE写真

(5) まとめ

- (1) 磁気機能性流体を用いたポケット仕上げ加工において, 60分ごとの研磨では加工除去量では電場印加による影響と効果が見られなかった.
- (2) ポケット底面の表面粗さは磁場のみを印加した場合よりも電場を同時印加した方が向上した.
- (3) 本研究の実験条件では, ポケット側壁と角部は研磨されなかった.
- (4) ポケット底面と側壁において, 最適な隙間間隔とせん断速度が異なると考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤城勇紀
2. 発表標題 磁気混合流体の平行磁気クラスタによる平面に対する研磨特性
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会 卒業研究発表セクション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹野 颯人, 藤城 勇紀, 山本 久嗣, 西田 均, 百生 登, 茶木 智勝
2. 発表標題 平行磁気クラスタによる磁性を持った材料に対する研磨における電場印加の効果
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹野 颯人, 藤城 勇紀, 山本 久嗣, 西田 均, 百生 登, 茶木 智勝
2. 発表標題 磁気混合流体を用いた磁性を持った材料に対する平面研磨特性
3. 学会等名 2021 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹野 颯人, 山本 久嗣, 西田 均, 百生 登, 茶木 智勝
2. 発表標題 磁場と電場の相乗効果による平面に対する高能率研磨の基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58回総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤城勇紀, 丹野颯人, 山本久嗣, 西田均, 百生登, 茶木智勝
2. 発表標題 磁気混合流体を用いた磁場と電場の同時印加による平面研磨特性
3. 学会等名 日本機械学会 北信越支部 第50 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹野 颯人, 山本 久嗣, 西田 均, 茶木 智勝
2. 発表標題 磁気機能性流体を用いたステンレス鋼の高エネルギー・高品質研磨
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹野颯人、山本久嗣、西田均、茶木智勝
2. 発表標題 磁気機能性流体を用いたポケットに対する精密研磨加工
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越学生会 第49回 学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田均, 山本久嗣, 藤岡里美, 島田邦雄, 井門康司
2. 発表標題 MCF を用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の電気的特性
3. 学会等名 第32回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2020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
研究 分担者	西田 均  (NISHIDA HITOSHI)  (00390435)	富山高等専門学校・その他部局等・特命フェロー   (53203)	
研究 分担者	池田 慎治  (IKEDA SHINJI)  (50361126)	公立小松大学・生産システム科学部・准教授   (23304)	

	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
研究 協力者	藤城 勇紀  (Fujiki Yuki)		

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