

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01348

研究課題名(和文)電流域を絞り込む電極を実装した電解液吸引工具による難加工材の走査電解加工の実現

研究課題名(英文) Realization of scanning ECM for difficult-to-machine materials by electrolyte suction tool with electrode for narrowing current region

研究代表者

夏 恒 (NATSU, WATARU)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40345335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来の吸引工具に補助陽極を実装することにより、電流域を絞り込み、低電流密度域に触れる時間を短くし、材料の溶出を妨げるほどの不動態被膜が生じず難加工材の走査電解加工が実現できることを目的としている。目的達成のため、数値解析と加工実験により、提案工具の低電流密度領域の制限効果を検証した。また、チタン合金の走査電解加工における不動態被膜生成と材料溶出のモデル化を行い、電解液の存在領域および工具走査速度の影響を明らかにした。そのうえ、被膜生成時間を短く、かつ十分は加工時間を得るために、電解液の存在領域を狭くする新しい工具を設計・製作し、加工実験によりチタン合金の均一な加工を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、工具直下に電解液を留め絞込電極により工作物表面の電流域を絞り込み低電流密度域を格段に縮小する工具を開発し、提案工具を利用して加工点が低電流密度に触れる時間を短縮することにより不動態被膜の発生を抑制して難加工材の走査電解加工を実現し、難加工材の走査電解加工における不動態被膜生成と材料溶出のモデル化を行い、電解液存在領域と走査速度の影響を明らかにして体系化することが、学術的な特色と独創的な点である。また、走査電解加工法の確立は、産業界が求める難加工材の高精度と高生産性のニーズに答えることになり、新しい価値の創出につながる。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to realize the scanning electrochemical machining (ECM) of difficult-to-process materials, a novel electrolyte suction tool with an auxiliary anode region was proposed. First, the limiting effect of the proposed tool in narrowing the low-current-density region was verified by numerical analysis and machining experiments. Then, the phenomenon of the formation of a passive film and material dissolution in the scanning ECM of titanium alloys was modelled, based on experimental results and analysis. With the model, the influence of the area where the electrolyte exists and the tool scanning speed was clarified. At last, in order to shorten the film formation time and obtain sufficient processing time, a new tool that narrows the electrolyte area was designed and manufactured. It was confirmed through machining experiments that the uniform dissolution of Ti-6Al-4V, a typical titanium alloy, was realized by the newly designed electrolyte suction tool.

研究分野：特殊加工

キーワード：電解加工 難加工材 電流密度 不動態被膜 吸引工具

### 1. 研究開始当初の背景

電気化学の原理を利用した電解加工は、電極と対向している工作物表面に加工電流が流れることで材料溶出が全表面で生じる二次元的な一括加工であるため、加工速度が同じ非接触加工法である放電加工よりも数十倍速い。形彫り電解加工は、複雑形状を持つ部品には、加工形状に合わせて設計・製作した高価な専用工具が必要なため、多品種・少量生産には適していない。一方、単純な工具を走査して電解加工を行えば、個別部品に特化した特殊工具は不要となり、低コストで柔軟な形状加工が実現できる。しかし、電解液を満たした電解槽内で加工を行う従来の方法では、加工電流が広範囲に流れるため加工精度が悪い。そこで、筆者らは電解液を工具直下に限定する吸引工具を発明し、電流が流れる領域（以下、「電流域」と呼ぶ）を小さくすることにより、加工精度が向上することに加え、電解槽も不要となり加工装置の小型化を実現している。しかし、代表的な難削材で電気化学反応により加工表面に不動態被膜（耐食性を持つ薄膜）が生じやすいチタン合金や SiC（以下、「難加工材」と呼ぶ）の走査加工を行うと、加工面が部分的に加工されたりされなかったりする不安定な加工現象が生じることが明らかになった。

従来法と吸引工具法のいずれも工具直下の電流密度は高いが、電極から離れるほど電流密度は小さくなる。この状態で工具を工作物面に走査すると、加工点は低電流密度域⇒高電流密度域⇒低電流密度域の順に触れる。そして、走査速度が低く低電流密度域に触れる時間が長くなると、加工より先に強固な不動態被膜が生じるため高電流密度域を通過しても材料の溶出ができなくなる。これが難加工材の走査電解加工を阻む原因であることを明らかにした。そこで、電流域をさらに絞り込めば、低電流密度域に触れる時間が短くなり、溶出を妨げるほどの不動態被膜が生じず難加工材の走査電解加工が実現できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、独自の電解液吸引工具に新たな電極を実装して電流域を絞り込むことにより、難加工材の走査電解加工を実現することを目的とする。そのために、工具の走査による加工面の不動態被膜の発生と崩壊の主な影響因子およびメカニズムも明らかにする。

提案工具は、図1に示すように二重円筒構造となっている。内筒の中心穴に接続したポンプにより、電解液は外筒と内筒で構成された空間、そして極間を經由して工具の中心部に向かって流れるため、電解液を工具底面辺りに留めることができる。しかし、電解加工中に大量に発生する水素ガスを含む加工生成物によって一部の電解液は極間から外筒の外側にはみ出し、外周部の電流密度が低くなる。そこで、吸引工具の外筒と内筒を電氣的に絶縁した上で、内筒を加工電源の陰極へ、そして外筒と工作物を陽極へ接続して、電流域を工具直下に絞り込み低電流密度域を極小化する。以下、提案工具を「絞込工具」と呼ぶ。

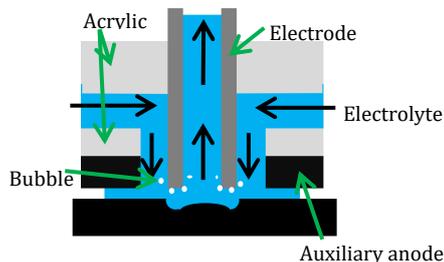


図1 補助陽極を有する絞込吸引工具

### 3. 研究の方法

研究目的と目標を達成するため、加工実験と数値解析により、以下の研究項目を実施した。

#### (1) 新工具の設計と製作、補助電極の消耗対策、加工実験による有効性の検証

COMSOLを用いて電解液の流れ、電流密度、加工量を解析し、電極構造の最適化を行う。また、絞込電極の消耗対策として、消耗の少ない電極材料を選定し、有効性を確認する。また、加工形状を評価し、難加工材への絞込工具の有用性を確認する。

#### (2) 不動態被膜の生成と加工への影響の調査

不動態被膜の生成と破壊は、印加電圧、走査速度、材料などの複数因子の影響を受けるため、各条件を変えて、加工実験を行い、加工現象の観察と加工量データの収集を行う。表面分析を行い、不動態被膜の発生を定量的に分析する。また、不動態被膜の加工への影響を明らかにする。

#### (3) 難加工材の走査電解加工のメカニズムの解明と加工の実現

チタン合金の走査電解加工のための最適な加工条件を決定する。

### 4. 研究成果

#### (1) シミュレーションによる絞込吸引工具の効果検証

有限要素法有限要素法（FEM）ベースのマルチフィジックス解析ソフト COMSOL を使用し、図1をもとに図2のように2次元軸対象モデルを作成し、電極と工作物の間の等電位線分布と電流密度分布解析を行い、赤点線枠内の等電位線分布を図3に、工作物表面における電流密度分布を

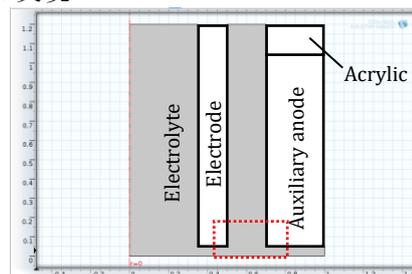


図2 2次元軸対象解析モデル

図4にそれぞれ示す。図3より、補助陽極を付与することで、補助陽極直下に等電位線がなくなり、補助陽極直下に電流が流れにくくなるのが分かる。また、図4より、電流密度は補助陽極を付与することで、 $0 \text{ A/cm}^2$ に早く収束し、電流域が絞られ、 $0.55 \text{ mm}$ 付近から外側方向に差が生じ、補助陽極を付与することで電流密度が先にゼロに近づくことが分かる。以上より、補助陽極が付与することで、低電流密度の領域を小さく絞り、絞込吸引工具を用いた電解加工の効果が発現によって検証された。

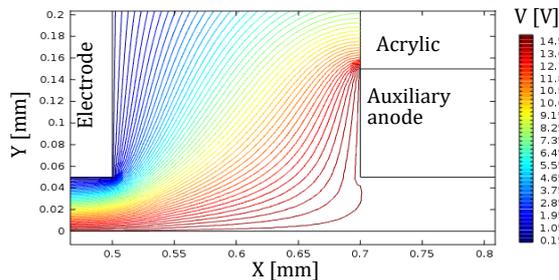


図3 絞込吸引工具直下の電位分布の解析結果

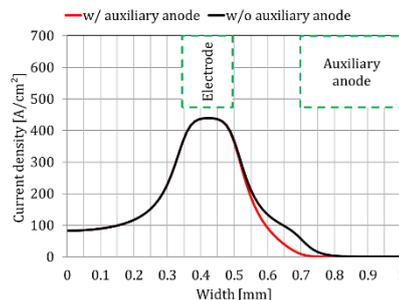


図4 補助陽極の有無による電流密度の違い

### (2) 実験による走査電解加工における絞込吸引工具の効果検証

電解液吸引工具を用いて走査加工を行う場合、電解液が工具より広く介在するため、工作物表面の電流密度分布は図5に示すようになる。電極の直下で電流密度は最も高く、電極から離れるに従って電流密度は小さくなるため、停止した状態での加工では常に電流密度は一定であるが、走査時には電流密度が変化する。例えば、走査方向上にある赤点で示したAに注目すると、電流密度の時間的な変化は、加工開始時から小さい電流が流れ、徐々に大きくなり、電極直下となった時に最大となり、電極通過後は徐々に小さくというように変化していくことが考えられる。こ

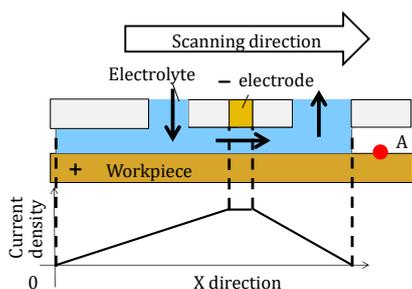


図5 走査加工時の工作物表面の電流密度分布

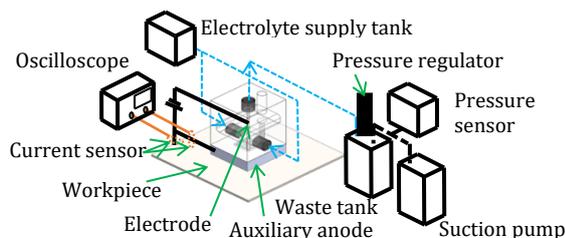


図6 構築した走査電解加工システムの概略図

のような電流密度分布が加工特性への影響を調べるため、図6に示す走査電解加工システムを構築し、加工表面に不動態被膜の発生が少ないステンレス SUS304 と、不動態被膜の発生が多いチタン合金 Ti-6Al-4V に対し、走査電解加工を行った。形状測定機を用いて形成された加工痕の形状を測定し、図7に示す。

図より、ステンレス SUS304 に対しては、補助陽極がある場合の方は加工痕が深くなり、幅が小さくなるのが分かる。一方、チタン合金 Ti-6Al-4V に対しては、加工面が荒くなるのが分かる。これは、チタン合金表面に生じる不動態被膜が影響していると考えられ、次項にて調べることとする。また、加工深さに差が生じなかったが、補助陽極がある場合の方は加工幅が顕著に狭くなるのが分かる。これらの結果より、絞込吸引工具を用いると、電流域が制限されることが分かった。

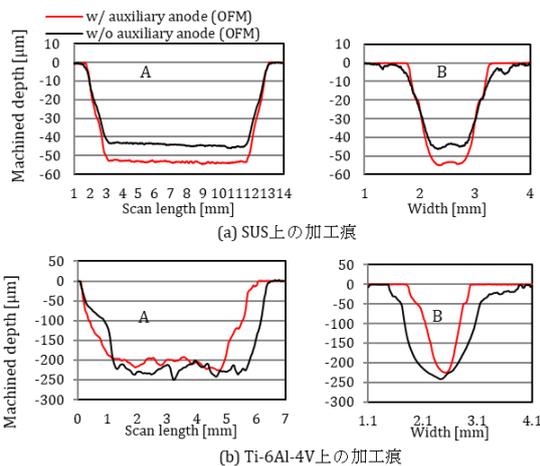


図7 ステンレスとチタン合金の加工痕形状

### (3) チタン合金の走査電解加工現象のモデル化

電解液吸引工具による Ti-6Al-4V の加工では、停止状態での電解加工と走査電解加工の加工特性は異なり、チタン合金は停止状態では加工できるが、全く同じ実験条件下であっても走査電解加工では安定な加工ができない。これは、工作物表面に不動態被膜が形成されていることが原因であると考えられる。不動態被膜は低電流密度で効率よく形成されるため、チタン合金の電解加工では電流密度の低い部分に不動態被膜が発生し、その後の材料溶解を妨げると考えられる。

そこで本研究では、チタン合金の走査電解加工における不均一な溶解現象をモデル化し、実験

的に検証する。提案したモデルを図8に示す。図8 (a) に示すように、電圧を印加すると、電流密度は電極の下で高くなり、電極から離れるほど低くなる。また、電解液が存在しない場所には電流が流れない。すると、図 (b) に示すように、電流密度の高い領域では材料の溶解が起こり、電流密度の低い工作物表面には不動態被膜が形成される。形成された不動態被膜は内部応力が高いため、膜に微小な亀裂や穴が発生しやすくなる (図 (c))。図 (a)、(b)、(c) は、停止状態においても生じる電解加工のプロセスを示しており、走査電解加工ではこれに加えて、図 (d) に示すように、成形された不動態被膜上に工具が移動する。そのため、膜が局所的に破壊され、その箇所での電流の増加によって材料の溶解が生じる。なお、詳細な加工実験および分析により、被膜の生成を抑制し、除去加工を十分に行うためには、1 秒以下の低電流密度時間と、0.67 秒以上の加工電圧を印加する時間が必要であることを明らかにした。

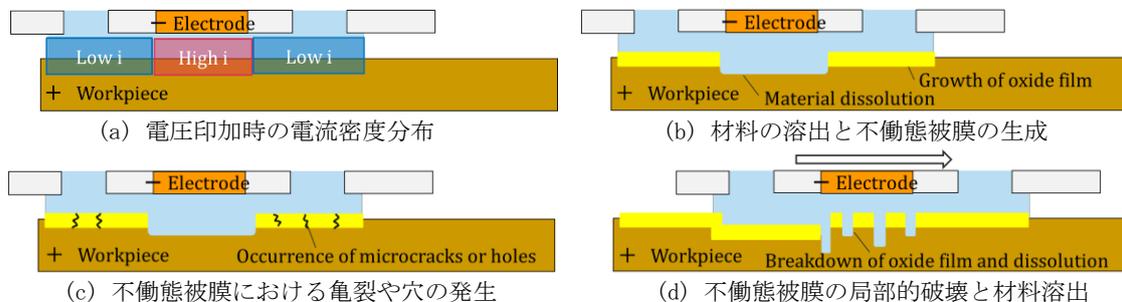


図8 チタン合金の走査電解加工における不均一な溶解現象のモデル

#### (4) チタン合金の均一溶出を実現する工具設計と加工実験

チタン合金の加工現象モデルより、難加工材の代表格であるTi-6Al-4Vの不動態被膜を破壊し、材料を均一に溶出させるには、被膜生成時間を短くすることが必須であるが明らかとなった。そこで、被膜生成時間を短く、かつ十分は加工時間を得るために、電解液の介在する領域を狭くする新しい工具 (図9を参照) を設計・製作した。

製作した吸引工具を用いてチタン合金の走査電解加工を行った。加工の際、初期間隙を  $70 \mu\text{m}$  以上となるよう設定した。また、予備実験により、 $90 \text{ mm/min}$  の走査速度で加工量が最大であり、大電流が流れる時間を十分確保できることが分かったため、走査速度を  $90 \text{ mm/min}$  とした。X+方向に  $20\text{mm}$  走査加工した後、電圧は印加したまま X-方向に  $20\text{mm}$  戻るといった往復の加工を  $15$  往復行った。

図10 (a) に従来の工具で加工した加工痕の表面写真と加工溝形状の測定結果、(b) に新しい工具を用いた加工結果を示す。図より、電解液領域が小さい工具を用いた走査電解加工において、加工がまばらになったり走査に従って加工量に変化したりせず、均一な加工が可能であることが分かる。また、加工痕形状はピット状になっておらず、面全体が加工されている。以上より、低電流密度領域時間を短くなることで、工具の走査によりチタン合金の均一な加工ができることが検証された。

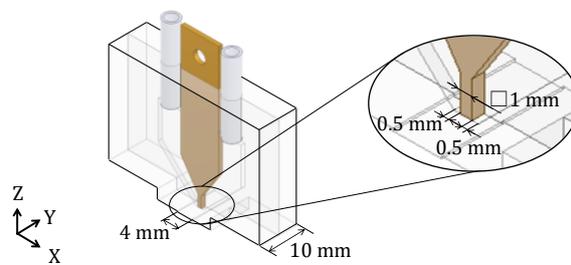


図9 電解液介在領域を狭くする工具の概要

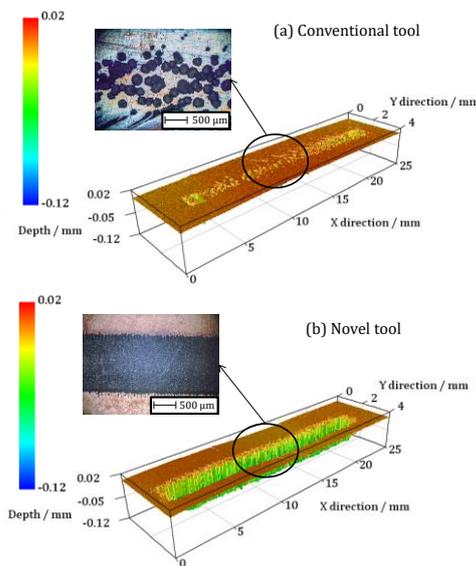


図10 従来工具と新たに設計・製造した工具を用いた加工結果の比較 ((a) 従来工具、(b) 新工具)

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 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Guixian Liu, Yongjun Zhang, Wataru Natsu	4. 巻 142
2. 論文標題 Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Tools and Manufacture	6. 最初と最後の頁 66-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmachtools.2019.04.010	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 該当する

1. 著者名 Hizume Saori, Natsu Wataru	4. 巻 95
2. 論文標題 Problems and Solutions in Scanning Electrochemical Machining of Titanium Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 712 ~ 716
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2020.02.285	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 Saori Hizume, Wataru Natsu	4. 巻 15
2. 論文標題 Mechanism clarification and realization of scanning electrochemical machining of titanium alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
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18件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takafumi Tabata, Wataru Natsu, Guanxian Liu
2. 発表標題 Research on machining characteristics and tool wear in ECM with electrolyte suction tool with auxiliary anode
3. 学会等名 3rd World Congress on Micro and Nano Manufacturing（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田畑嵩奎、夏 恒
2. 発表標題 補助陽極による電流域を制限する電解液吸引工具を用いた電解加工の特性
3. 学会等名 2019年度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 日極さおり、夏 恒
2. 発表標題 チタン合金における不動態被膜の生成が電解加工特性に与える影響
3. 学会等名 2019年度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 田畑嵩奎、夏 恒
2. 発表標題 チタン合金の電解加工における吸引工具の補助陽極の効果
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日極さおり、夏 恒
2. 発表標題 電解作用により生成された不動態被膜が電解加工に与える影響について
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guixian Liu, Saori HIZUME, Wataru Natsu
2. 発表標題 Characteristics Investigation of ECM with Electrolyte Suction Tool with Built-in Auxiliary Anode for Narrowing Current Area
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Guixian Liu, Wataru Natsu
2. 発表標題 Influence of suction pressure and flow direction on ECM characteristics with suction tool
3. 学会等名 17th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田畑高奎、劉桂賢、夏 恒
2. 発表標題 補助陽極による電流域を制限する電解液吸引工具を用いた電解加工の特性
3. 学会等名 2018年度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 田畑 高奎、夏 恒、劉桂賢
2. 発表標題 電解液吸引工具を用いた電解加工における補助陽極の効果について
3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日極さおり、夏 恒、後藤昭弘
2. 発表標題 チタン合金の電解加工における被膜生成に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山智映、夏 恒
2. 発表標題 電解加工用吸引工具における電解液流れ方向の影響
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takafumi Tabata, Shuhei Kodama, Wataru Natsu, Guanxian Liu
2. 発表標題 Characteristics of electrochemical machining by using electrolyte suction tool with auxiliary anode
3. 学会等名 21st euspen International Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田畑高奎、夏 恒、小玉脩平
2. 発表標題 走査電解加工における補助陽極効果の検証
3. 学会等名 電気加工学会全国大会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日極さおり、夏 恒
2. 発表標題 チタン合金の電解加工において不動態被膜生成に与える電流密度と時間の影響
3. 学会等名 2020年度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 田畑高奎、夏 恒
2. 発表標題 吸引工具を用いた電解加工における電流密度分布とその影響因子のシミュレーション
3. 学会等名 COMSOL CONFERENCE 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saori Hizume, Wataru Ntsu
2. 発表標題 Research on influence of current density distribution in scanning electrochemical of titanium alloy
3. 学会等名 17th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Natsu, Guixian Liu, Saori Hizume
2. 発表標題 Realization of current area restriction in ECM process by electrolyte suction tool with auxiliary electrode
3. 学会等名 International Symposium on Advances in Abrasive Technology 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日極さおり、夏 恒
2. 発表標題 吸引工具を用いた電解加工における電流密度分布と加工特性への影響
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 大学院工学研究院先端機械システム部門 夏研究室  
<http://web.tuat.ac.jp/~natsulab/>

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	花崎 逸雄  (Itsuo Hanasaki)  (10446734)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授    (12605)	

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