

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630021

研究課題名(和文)加工領域限定と極間距離検出の機能を備えた電解加工工具の研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of ECM Tool with Functions of Machining Area Confinement and Gap-width Detection

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電解加工の致命的な欠点である低い加工精度と環境への悪影響を根本的に解決するため、工具内部に電解液の流路を設け、吸引によって電解液が工具の端面と工作物の対向部分に限定して流れることにより、工作物の溶出領域を限定する機能と、吸引力の変化により工具端面と工作物の距離を検出する機能を備えた電解加工工具を提案し、総形電極に不向きな多品種・少量生産の部品加工法を研究開発する。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel electrolyte suction tool was proposed in order to fundamentally overcome the fatal drawbacks of electrochemical machining (ECM); the low machining accuracy and the negative impact on the environment. The electrolyte is circulated through two hollow areas constructed by two concentric pipes, and the gap area between the tool electrode and workpiece, by a single suction pump. In this way, not only the confinement of electrolyte flow, but also the gap-width detection according to the pressure in the suction tube can be realized. This proposed tool is also applicable to the small lot production of many products, which are not suitable for conventional ECM with a formed electrode.

研究分野：生産加工

キーワード：電解加工 形状創成 電解液 工具 吸引 極間検出 工具送り制御 流体解析

1. 研究開始当初の背景

電解加工の歴史が長く、多くの長所を持っている一方、極間距離の長い箇所にも加工電流が流れるので、加工精度が得にくいこと、また有害な電解液の処理による環境に悪影響を与えるなどの問題があることから、技術進歩が著しかった放電加工に置き換えられた。加工精度が悪い点について、2000年にSchusterら (Science, 289, 98(2000)) は、幅が数十 ns の超短電圧パルスを用いることによって、極間距離を μm またはサブ μm まで狭め、微細電解加工を実現したと発表した。その原理は極間の過渡的な現象を利用し、従来の着眼点とは異なり、電解加工の新しい応用や展開として大きく期待されるようになった。しかし、超短電圧パルスを利用した微細電解加工は、幅の短いパルスを利用するうえ、パルスとパルス間に長い休止時間が必要であるので、加工速度が極端に遅くなり、電解加工の高加工速度の長所が失われた。一方、面積が数十 cm^2 程度の総形電極と数千 A の加工電流を用いて、電解加工による高速転写加工が実用化され、放電加工の数十倍の速度で、しかも工具電極が無消費で実現している (仏ペムテック社のホームページによる)。しかし、総形電極による転写加工は、複雑な形状を持つ電極が必要なため、製作コストが高いうえ、電解液の流れが形状に影響され、加工面にむらが生じる場合が多いため、多品種・少量生産の部品には向いていない。また、 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の電流密度が必要なため、 6000A 以上の電流を供給できる電源装置が必要で、加工機が高価となり、普及が難しい。

2. 研究の目的

電解加工は、工具無消費と速い加工速度、高い加工面品質の特徴を有するにもかかわらず、電解液中の漂遊電流による加工精度の低下や、電解液の腐食性と有毒性による作業環境の悪化などの問題点により、応用が限定されている。加工領域以外の電解液そのものをなくすことは、加工精度と作業環境の問題の究極的な解決手法といえる。そこで、本研究では、電解加工の致命的な欠点である低い加工精度と環境への悪影響を根本的に解決するため、工具内部に電解液の流路を設け、吸引によって電解液が工具の端面と工作物の対向部分に限定して流れることにより、工作物の溶出領域を限定する機能と、吸引力の変化により工具端面と工作物の距離を検出する機能を備えた電解加工工具を提案し、総形電極に不向きな多品種・少量生産の部品加工法を開発する。

3. 研究の方法

研究目的及び研究目標を達成するために、設計・製作、実験、数値解析、および考察により、以下の研究項目を実施した。

(1) 電解液が加工領域外に漏れず、また十分な量の電解液を吸引できるよう、流体解析

を行ったうえ、工具構造を設計・製作した。なお、提案工具の有効性を検証した。

(2) 極間距離と吸引力の関係を求め、加工中の極間距離を検出・制御し、また、極間距離の検出と制御を実現する制御システムを構築した。

(3) 電極の走査により複雑形状を創成するため、目標形状に合わせた電極のパスと走査速度の影響を調べ、工具の走査により形状創成ができることを明らかにした。

(4) 吸引工具の特長を生かし、領域限定電解めっきの方法を提案し、走査速度や電流値を制御し、膜厚制御の検証実験を行った。

4. 研究成果

(1) 実験と流体解析に基づいた工具の設計と効果の検証

工具電極からの吸引により電解液を循環させるため、図1に示される断面形状を持つ工具電極を考案し、製作した。工具電極は共に黄銅製である工具内筒と工具外筒から成っており、これらの筒の間隙から供給した電解液を工具内筒の貫通穴より吸引することで、工具先端部に電解液を循環させている。また、-Z軸方向への送りによる穴加工を可能とするために、工具先端部の全面に電解液を行き渡らせる必要があり、図のように工具外筒、内筒の先端にテーパをつけ、工具先端の外周部にも電解液が供給される形状とした。本研究で用いる工具電極は、電解液の供給側に加圧はせず、内筒貫通穴からの吸引のみにより電解液を循環させている。なお、本工具の構造により、外形が5mm以下の工具を製作するのは多少工夫が必要であるが、電解加工の工具は消耗しないため、製作した工具は半永久的に利用できる。

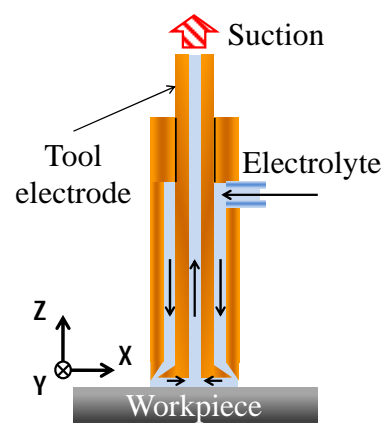


図1 工具の構造図

本研究の提案工具を用いた場合、極間距離の変化に伴い流路の断面積が変化し、吸引圧力も変化する。よって、吸引圧力を測定することにより極間距離の推定ができる。そこで、吸引圧力と極間距離の関係性を明らかにするため、極間および工具内筒、外筒の間隙に空気を循環させて流体解析を行い、極間距離の減少に従って吸引圧力も低下する傾向が

得られるか調査した。なお、実験時に極間を循環するのは電解液および空気の2相流となるが、本研究では極間距離と吸引圧力の傾向の確認を目的としているため、空気のみを循環させて原理の確認を行った。解析ソフトにはCOMSOLを用い、図2に示す解析モデルを利用して表1、2の条件下で解析を行い、図内に赤点で示した部分の圧力を吸引圧力とし、極間距離別に解析した。流れは定常、非圧縮性の層流として扱う。図3に示した解析により求めた吸引圧力 P_s と極間距離の関係から、極間距離の減少に伴って吸引圧力も増大していることがわかる。また、極間距離が小さいほど、吸引圧力の変化率も大きくなっていることから、極間距離が小さいほど、吸引圧力に基づいた極間距離の推定精度が向上すると考えられる。以上の傾向より、吸引圧力に基づいて極間距離の推定が可能であることがいえる。

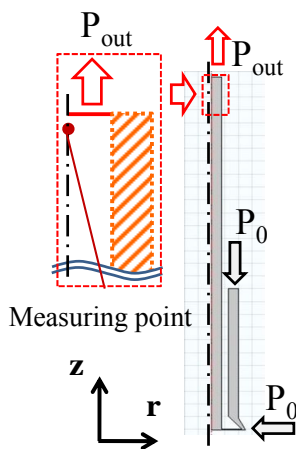


図2 解析モデル

表1 工具の寸法

Diameter of outer cylinder	10 mm
Diameter of inner cylinder	9 mm
Diameter of through hole	3 mm

表2 解析条件

Software	COMSOL ver. 4.3b
Modeling type	2D axial symmetry
Wall condition	No-slip wall
Flow type	Laminar flow
P_0	1 atm
P_{out}	-53.33kPa (max.)

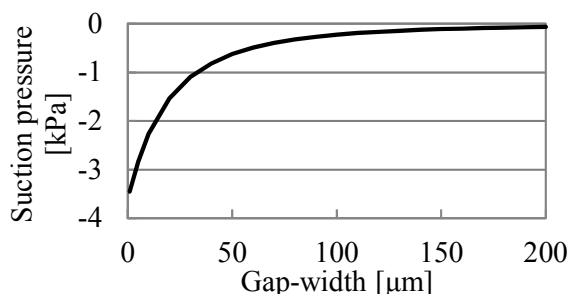


図3 極間距離と吸引圧の関係の解析結果

なお、図4に加工深さを変えた際の穴の断面形状を示す。工具送り量が100μmから300μmに増加した際には側面ギャップの増加が見られるが、これは加工により生じる気泡の除去が不十分であるため、電解液が工具側面に隆起し、加工が生じたためと考えられる。しかし、その後は工具送り量が増加しても側面ギャップは変化しておらず、少なくとも300μm以上の工具送りを行えば、その後は工具側面で加工が進行しないことが明らかとなった。以上の実験結果から、本提案工具により、加工領域を限定できることが検証された。

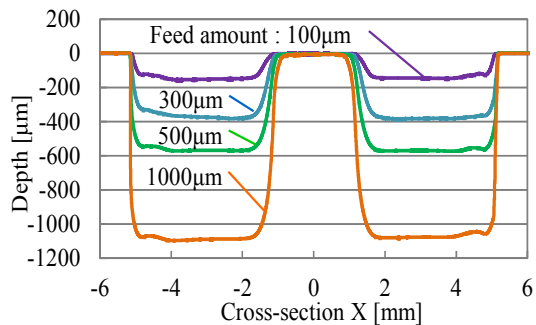


図4 テーパーのない穴の加工形状

(2) 極間距離と吸引力の関係調査と、極間距離の検出と制御システムの構築

電解液に見立てた水を循環させ、加工せずに吸引圧力と極間距離の関係を調査し、吸引圧力に基づいて極間距離が推定可能か調査を行った。工具電極と工作物は3軸ステージに取り付けてあり、加工中の吸引圧力を測定するための圧力計を工具とポンプの間に挿入している。はじめに、平面状の工作物に対して吸引圧力と極間距離の関係を得た結果を図5に before machining として示す。図より、研究成果(1)の解析結果と同様の傾向が得られており、さらに、極間距離が100 μm以下の領域においては極間距離の変化に対して吸引圧力が大きく変化している。以上のように、実験結果からも吸引圧力に基づいた極間距離の推定が行えるといえる。

以上の解析と実験の両方で吸引圧力と極間距離の関係を得たのは工作物表面が平面の場合であった。穴加工を行った際には、加

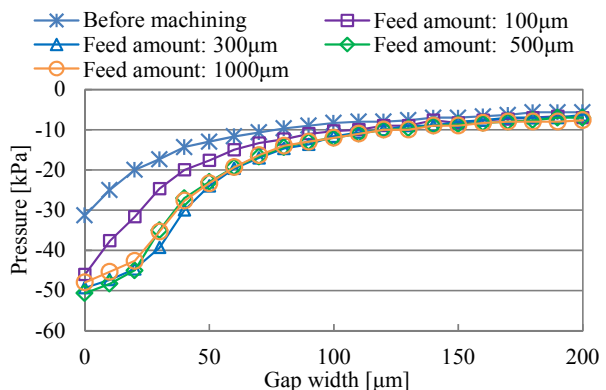


図5 極間距離と吸引圧の関係の実験結果

工前は平面であった工作物の表面形状は加工の進行に伴い工具形状が転写されて変化する。つまり、加工穴底面形状の変化により電解液の循環する流路の形状が変化するため、極間距離と吸引圧力の関係も変化する。そのため、吸引圧力に基づいた極間距離制御の穴加工への適用には工作物の表面形状の変化を考慮する必要がある。そこで、工具移動量を100、300、500、1000 μm と変化した穴加工を行った後、それぞれ得られた穴底面に対し、電極と工作物の接触感知とZ軸ステージにより、極間距離を設定した。そして、深さの異なる穴において、極間距離と吸引圧力の関係から、加工深さの増加に伴う極間距離と吸引圧力の関係の変化を調査した。それぞれの工具移動量および加工前において得られた吸引圧力と極間距離の関係を併せて図5に示す。図より、加工後に測定した極間距離と吸引圧力の関係は加工前と比べて異なっている。一方、工具移動量が300 μm 以上の条件では極間距離と吸引圧力の関係が工具移動量によって変化しなくなった。これは、ある深さまで加工が進行し、加工穴底面形状に変化が生じなくなったためといえる。加えて、加工前と工具移動量が300 μm 以上の条件を比較すると、工具移動量が300 μm 以上の条件において極間距離の変化に対する吸引圧力の変化量が大きくなっている。これは加工前よりも加工が進行した際の極間距離推定精度が向上することを示している。

吸引圧力 P_s に基づいた極間距離制御を行うため、図6に示すフローチャートに従い、工具が取り付けられているZ軸ステージのモータを制御するシステムを構築した。制御手法と手順を以下に示す。まず、維持を目標とする極間距離に対応する吸引圧力を定め、 P_{tgt} とする。次に、許容する P_{tgt} からの圧力変化の最小値を P_{lo} 、最大値を P_{hi} と設定する。圧力センサから P_s を随時取得し、吸引圧力が P_{hi} より大きい場合は、工具を-Z軸方向に送り極間距離を減少させ、 P_{lo} より小さい場合は、工具を+Z軸方向に送り極間距離を増加させることで吸引圧力を許容する誤差範囲内に留め、極間距離を維持する。

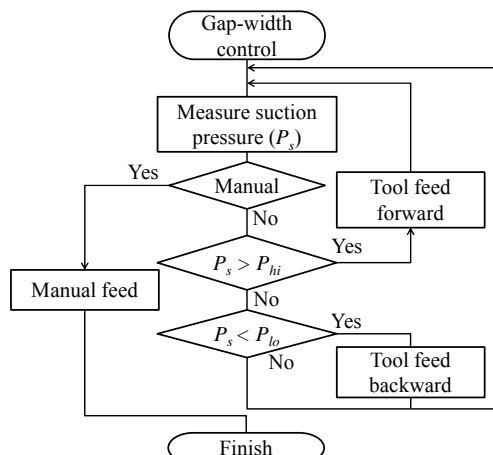


図6 極間検出と制御のアルゴリズム

(3) 電極のパスと走査速度の影響調査と、走査加工可能性の検証

本提案工具を利用して、工具の走査による電解ミリング加工法を用い、形状創成加工の実現が可能である。通常の縦形電極形状の転写はもちろん、単純形状電極での走査加工技術を開発する。この新しい加工法は、従来の技術と異なり、電解液を溜める大きな加工槽が不要かつ、加工機の構成が非常にシンプルになるため、加工装置の小型化が容易に実現できる。

そこで、形状創成の可能性を検証するため、工具が静止した状態での加工形状を実験により求め、重ね合わせの理に従って理論解析を行い、工具走査により加工された形状を解析した。また実験により、走査加工を行い、加工後の形状を理論解析によって求めた形状と比較した。その結果の一例を図7に示す。結果から解析結果と実加工結果がよく一致していることが分かる。つまり、本工具による創成加工が実現できることが検証された。

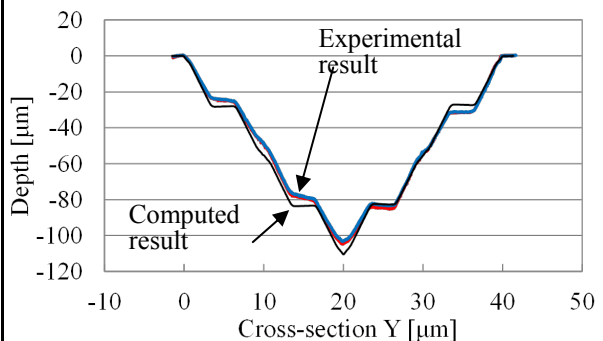


図7 創成加工の実験結果と解析結果

(4) 領域限定電解めっき法の提案と実験検証

電解めっきは、金属イオンが含まれているめっき液に工作物を浸漬して通電し、工作物の表面に金属薄膜を被覆する作業である。部品の機能として、または装飾の目的として、工作物表面の一部にのみめっきが必要な場合には、マスキング処理や不要な金属薄膜の除去作業が必要である。これらの作業等は、コストや時間を要する。さらに、めっき液は有毒・汚染物質を含んでいる場合が多く、法令によって規制されている。そのため、部分めっきでのめっき浴槽の使用は多量の汚染物質を用いることにつながり、環境に負荷を与える。そこで、本研究は、マスクレスで部分めっきを実現するため、吸引工具を利用し、めっき液の飛散がなく、環境にやさしいめっき法を提案し、実験により有効性を検証した。なお、本方法の成膜特性を把握するため、電極材料、電流値、走査速度等の加工条件がめっき面に及ぼす影響を実験的に検証した。パルスオフ期間中に電解生成物や気泡を除去することを目的とし、定電流モードでパルスめっきを行った。実験に使用した装置の概要は図8に、主な実験条件は表3に示す。

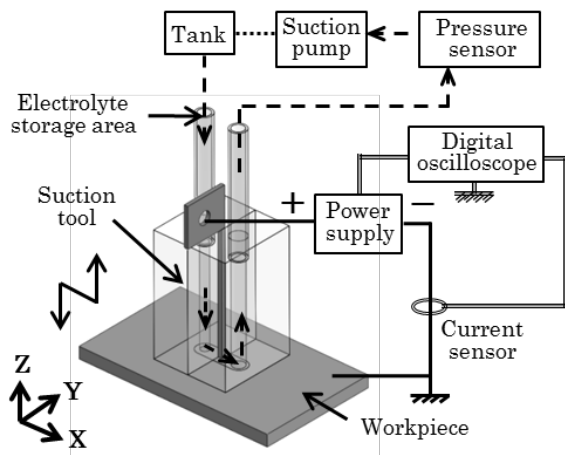


図8 部分めっきの実験装置の概要

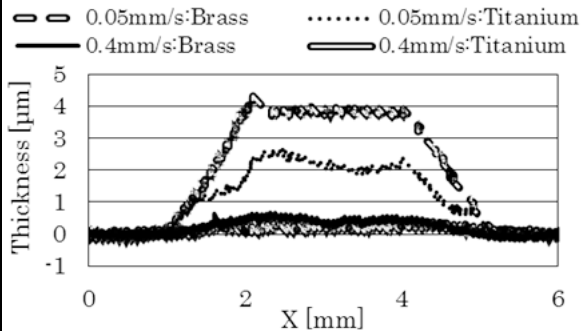
表3 部分めっきの主な実験条件

Plating solution	22 wt% Cu(NO ₃) ₂ aq
Workpiece material	Brass
Tool material	Brass、 Titanium
Gap width [μm]	70
Power supply	Pulsed constant current
Pulse period [ms]	50
Pulse width [ms]	5

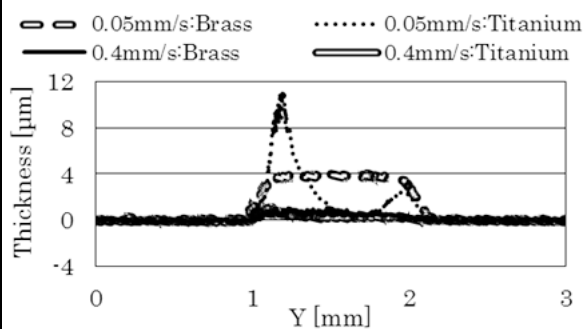
電極材料と工具の走査速度がめっき膜の均一性に及ぼす影響を調べた。電極材料には、消耗しやすい真鍮と消耗しにくいチタンを用いた。図9に実験結果の一例を示す。図9(a)に走査方向、(b)に走査方向と垂直な方向の膜形状を示す。図9(a)より、走査方向の評価領域内では、走査速度によらず両電極材料とも厚さの変動幅が1 μm以内であり、膜厚の均一性に違いはあまり見られない。しかし、図9(b)をみると、走査方向と垂直な方向では、走査しない場合と同様、チタン電極でめっき膜両端部における厚さの上昇が見られた。また、チタン電極を用いた0.05 mm/sではめっき膜中央から両端部にかけての厚さの変動幅が最大で10 μm程度、真鍮電極では1 μm以内であり、電極材料による均一性への影響が大きい。このように、真鍮電極では走査速度によらず均一にめっき膜が形成される一方、チタン電極では比較的遅い走査速度でめっき膜両端部における厚さの上昇が著しい。

吸引工具を用いることでめっき領域を限定できるが、実際にパターン膜の形成に適用できるかを検証する必要がある。そこで、めっき膜の品質が良好な真鍮電極を用い、走査速度0.4 mm/s、電流値50 mAでパターン膜の形成を試みた。図10に形成したパターン膜の外観を示す。めっき膜の厚さは、約0.4 μmである。図に示すように、めっき液による腐

食が見られるが、文字が明確に認識できる。よって、工具を走査させて、部分めっきにより文字などのパターン膜の形成が可能である。



(a) Film shape in X direction



(b) Film shape in Y direction

図9 電極材料と走査速度がめっき膜に及ぼす影響

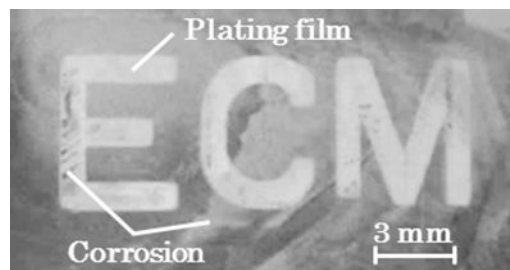


図10 部分めっきによるパターン膜の形成例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

(1) Atsushi Sato, Wataru Natsu: Proposal and Verification of Area-limited Electroplating with Suction Tool, International Journal of Electrical Machining, 査読有, No.20(2015), pp.37-43.

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijem>

(2) 遠藤克彰、夏恒：極間距離検出機能を

有する電解加工用吸引工具の提案と検証、
電気加工学会誌、査読有、
Vol.48(119)(2014), pp.171-177.

<http://doi.org/10.2526/jseme.48.171>

- (3) Katsuaki Endo, Wataru Natsu: Proposal and Verification of Electrolyte Suction Tool with Function of Gap-width Detection, International Journal of Electrical Machining, 査読有, No.19(2014), pp.34-39.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijem/19/0/19_34/_pdf

- (4) Katsuaki Endo, Wataru Natsu: Proposal of Electrolyte Suction Tool Electrode for Machining Area Confinement and Gap-width Detection, Proceedings of the 13th euspen International Conference, 査読有, (2013), pp.167-171.

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 名古屋 寛、夏 恒：吸引工具を用いた NaCl 溶液の電解加工特性、2015 年度精密工学会春季大会学術講演会、2015 年 3 月 17-19 日、東洋大学
- (2) 夏 恒：Application of Electrolyte Suction Tool in Removal and Addition Processing, 2nd Symposium for International Cooperation on Micro and Precision Electrical Machining, 2015 年 1 月 10-12 日、上海交通大学（中国）
- (3) 佐藤 敦、夏 恒：電極材料が吸引式工具を用いた領域限定電解めっき膜形成に及ぼす影響、電気加工学会全国大会(2014)、2014 年 12 月 4-5 日、新潟大学
- (4) 名古屋 寛、夏 恒：吸引工具を用いた深穴の電解加工について、2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2014 年 9 月 16-18 日、鳥取大学
- (5) 遠藤克彰、野口 稜、夏 恒：電解加工による機械摺動面の油だまりの形成、2014 年度精密工学会春季大会学術講演会、2014 年 3 月 18-20 日、東京大学
- (6) 遠藤克彰、夏 恒：加工領域限定用工具による環境対応電解加工の実現、電気加工学会全国大会(2013)、2013 年 12 月 5-6 日、愛知県産業労働センター
- (7) 夏 恒：日本特殊加工分野の最新動向、中国第 15 回全国特殊加工学術会議、2013 年 10 月 25-27 日、南京航空航天大学（中国）

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：電解加工装置、電解加工方法および
工具電極の製造方法

発明者：夏 恒

権利者：国立大学東京農工大学

種類：特許

番号：特願 2013-174952

出願年月日：2013 年 8 月 26 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ：

<http://www.tuat.ac.jp/~natsulab/>

6. 研究組織

研究代表者

夏 恒 (Natsu, Wataru)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40345335