

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04123

研究課題名（和文）電解加工による大面積一括表面テクスチャリングの実現とその切削工具への応用

研究課題名（英文）One-process surface texturing of a large area by electrochemical machining and its application to cutting tools

研究代表者

小谷野 智広（Koyano, Tomohiro）

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：20707591

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）：トライボロジー特性の向上を目的とした表面テクスチャリングが注目されているが、加工速度や加工変質層の発生に課題がある。一方で、電解加工は加工速度が速く、加工変質層も生じないという特徴を有する。そこで、大面積の表面テクスチャリングを高精度かつ高速に実現するために、数十 μm オーダーの細周期構造を有するmmオーダー以上の工具電極形状を、電解加工によって工作物に一括して転写する手法を開発した。さらに、切削加工特性の向上を目的として、本手法によって超硬合金製の切削工具へテクスチャを付与することを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面テクスチャリングのための様々な手法が提案されているが、量産部品等への適用を行うためには、加工速度などに課題があった。一方で、電解加工は加工速度が速く、加工変質層が生じないという優れた特徴を有する。本研究により電解加工による一括テクスチャリングが可能となったことで、電解加工が量産部品等へのテクスチャリングを行うための有効な手法になりえる。さらに、電解加工によって超硬合金製の切削工具へのテクスチャリングも可能であり、種々のテクスチャを付与することで、切削加工特性向上の実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to realize the surface texturing with high-speed and high-precision, a new method was developed in which the shapes of the tool electrode with a fine periodic structure of several tens of micrometers was replicated onto a workpiece in one-process by electrochemical machining. This method enables the surface texturing of workpiece surfaces on the order of millimeters in a one-process. Furthermore, this surface texturing method could be applied to cemented carbide cutting tools, which is expected to improve the cutting characteristics.

研究分野：生産加工

キーワード：電解加工 表面テクスチャ 微細テクスチャ 超硬合金 切削加工 切削工具

1. 研究開始当初の背景

近年、トライボロジー特性向上を目的として、数十 μm オーダーの微細構造を付与する表面テクスチャリングが大きく注目されている¹⁾。この加工にはレーザ加工が多く用いられるが、加工速度や熱損傷などで多くの課題がある。一方で、電気化学的な加工法である電解加工は、加工速度が速く、加工変質層が生じないという特徴を有する。電解加工では、工具電極（陰極）と工作物（陽極）間に直流電圧、またはパルス電圧を印可しながら工具電極を工作物に送る。工具電極底面では極間距離が狭いため電流密度が高くなり、電極形状が工作物に転写される。工具電極上では水素の発生反応のみ生じるので、工具電極が消耗しない。また、バリ・クラックが生じない。さらに、単位面積当たりの加工速度は電流密度で決まるので、加工面積が増加しても送り方向の加工速度が低下しない。従って、数 mm 以上の大面積の工具電極上に数十 μm の微細テクスチャを付与し、一括して工作物に転写すれば、大面積のテクスチャリングの有効な手法になりうる。

2. 研究の目的

本研究では、数 mm 以上の大面積の工具電極上に数十 μm の微細テクスチャを付与し、電解加工によりその形状を一括して工作物に転写することで、表面テクスチャを付与する手法を開発することを目的とする。さらに、その応用として、切削工具へ電解加工によりテクスチャを付与し、微細テクスチャが切削加工特性に与える影響を調査する。

3. 研究の方法

微細テクスチャを有する工具電極形状を電解加工により工作物に転写するために、テクスチャリング用の工具電極を新たに開発した。なお、微細なテクスチャを高精度に加工するためには、極間距離を小さくし、加工の高精度化を実現する必要がある。そこで、印可する電圧を短パルス化し、加工精度の向上を図った。また、切削加工特性の向上を目的として、切削工具用の超硬合金へのテクスチャリングを行った。超硬合金は主としてタングステンカーバイド (WC) とコバルト (Co) を含有する合金であり、通常の電解加工と比べて電解加工が行いにくい材料である。そこで、切削加工用の超硬合金の電解加工特性を調査した。また、テクスチャを付与した切削工具によって切削加工を行い、切削加工特性を調査した。

4. 研究成果

(1) 電解加工による表面テクスチャリング

① テクスチャリング用の工具電極

テクスチャリング用の工具電極を新たに開発した。平行溝形状のテクスチャを加工するために製作した工具電極の例を図 1 に示す。3 mm×3 mm の工具電極底面にワイヤ放電加工によって複数のフィン状の突起を設けており、これらの形状が工作物に転写される。

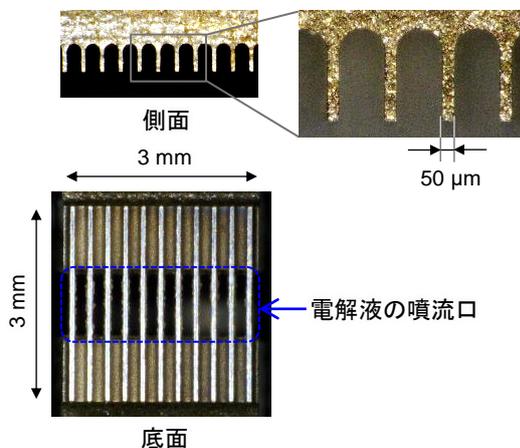


図1 平行溝テクスチャリング用の工具電極

② 短パルス化の効果

テクスチャリング用の工具電極を用い、印可する電圧の短パルス化が加工精度に与える影響を調査した。パルス電圧のパルス幅は 10 μs 、100 μs とした。工具電極は送り速度 0.1 $\mu\text{m/s}$ で工作物表面から 10 μm の深さまで送った。工作物は SUS304 である。

パルス幅 10 μs での工作物表面の光学顕微鏡写真を図 2 に示す。また、各パルス幅での断面形状を図 3 に示す。パルス幅が短い 10 μs の方が加工された溝の幅が狭く、加工深さも浅いことから、工具電極形状が精度よく転写されていることがわかる。

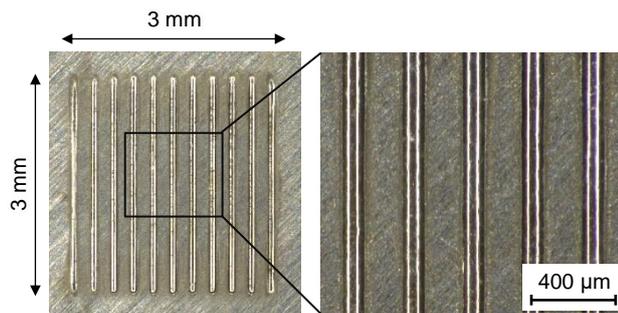


図2 テクスチャを付与した工作物表面 (パルス幅：10 μs)

③ 分割給電法を用いた大面積化

電解加工では加工面積が増加しても送り方向の加工速度は低下しないので、できるだけ大きな面積に対して一括してテクスチャを付与した方が効率が良

い。一方で、加工面積が増加するほど、電源回路配線に存在するインダクタンスの影響で、加工に必要なパルス幅が長くなり、加工精度が低下しやすい²⁾。そこで、この問題を解決するために、電極を小面積に分割し、それぞれ別のパルス電源から給電を行う分割給電²⁾を適用した。その概要を図4に示す。テクスチャを付与した複数の工具電極を絶縁体のシートを介して積層し、この各電極に異なるパルス電源をそれぞれ接続する。各パルス電源回路に存在する配線のインダクタンスは同じであるが、分割給電によりそれぞれの配線に電流が分割されるため、ひとつの大きな電極にひとつのパルス電源を接続するよりもインダクタンスの影響を低減することができる。前節で用いた3mm×3mmの工具電極を3つ用意し、それらを積層して分割給電で加工を行った。総加工面積は3mm×9mmとなる。加工結果を図5に示す。分割給電を行わずに単純に面積を増やした電極を用いた場合には10μsのパルス幅では加工が行えなかったが、3つに分割して給電を行うことでパルス幅10μsで加工が行え、加工精度も良好となった。

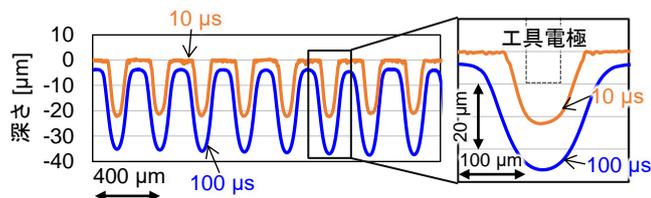


図3 異なるパルス幅での工作物断面形状

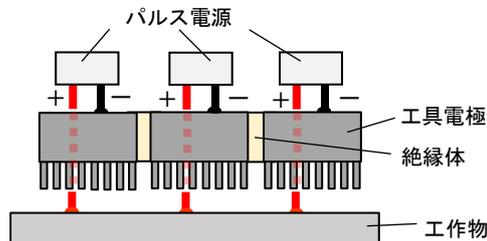


図4 分割給電法による大面積化

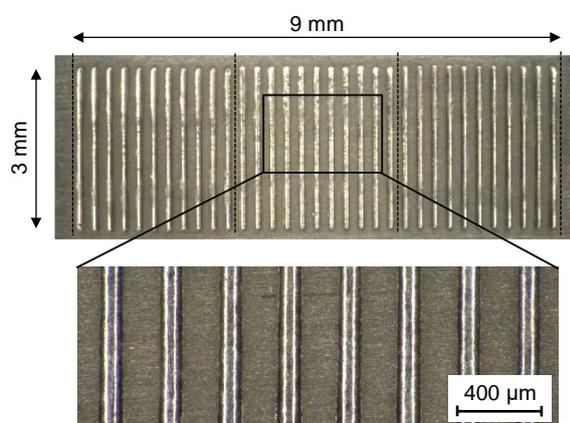


図5 分割給電法による加工結果

④ テクスチャの微小化

前節までで述べた工具電極では、厚さ数mmの板材の端面にワイヤ放電加工で複数の溝加工を行い、複数のフィン状の突起を製作することで工具電極を製作していた。しかし、ワイヤ放電加工では加工によって生じる残留応力による変形等の影響により、加工する形状の微小化に限界があった。そこで、薄板を積層することで新たに図6の工具電極を製作した。加工部となる突起を有する薄板と、電解液供給部となるスリットを有する薄板をSUS304でそれぞれ製作し、それらを交互に積み重ね、ボルトで締結する。電解液は、電解液供給部のスリットを通り、電極底面から加工点へ供給される。本電極であれば、薄板の厚さを小さくすることで、容易に微細なテクスチャを加工できる。本方法による製作例として、加工部となる薄板の厚さを30μm、電解液供給部となる薄板の厚さを80μmとして製作した電極の側面と底面を図7に示す。次に、本電極を用いて加工した工作物の断面形状を図8(a)に示す。溝幅95μm程度、溝深さ25μm程度のテクスチャを120μm程度の周期で付与することができた。次に、テクスチャの周期を小さくするために、電解液供給部を50μmとした場合の断面形状を図8(b)に示す。電解液供給部の幅を小さくしたことで、テクスチャの周期を95μm程度まで小さくすることができた。

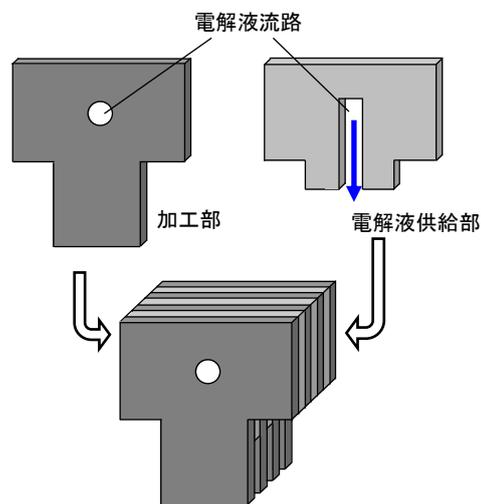


図6 薄板の積層による工具電極製作

⑤ テクスチャの連続加工

電解加工の特徴として、工具電極が消耗しないため繰り返し使用することができる点が挙げられる。そこで、工具電極の連続使用について検討した。加工部が30μm、電解液供給部が80μmの電極を用いて、電解液流量を変化させて連続して加工を行い、加工可能な回数を調査した。

図9に電解液流量と加工回数の関係を示す。500 ml/min以下の流量では、1回目の加工で加工面に変色が生じ、加工不可となった。また、加工後の

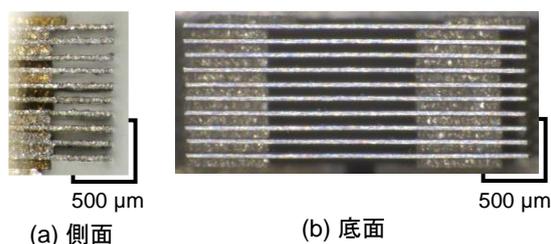


図7 薄板の積層により製作した工具電極

電極端面には付着物が見られた。これは、電解液流量の不足により、電解生成物を十分に排出することができずなかったためだと考えられる。一方で、電解液流量を 600 ml/min まで増加させると、加工可能な回数は 10 回まで増加し、700 ml/min では 20 回まで増加した。これは、電解液流量を大きくすることで、工具電極への付着物が減少したためと考えられる。さらに加工可能な回数を増加させるためには、電極ジャンプの距離の増加による排出効率の改善や、電解液流れの最適化が必要と考えられる。

⑥ ディンプルテクスチャの加工

微細な正方形の突起を複数有する電極を用いることで、ディンプル形状のテクスチャの加工を行った。突起の大きさは 50 μm 四方である。加工結果を図 10 に示す。このように、電極形状を変更することにより各種形状のテクスチャの加工が可能である。

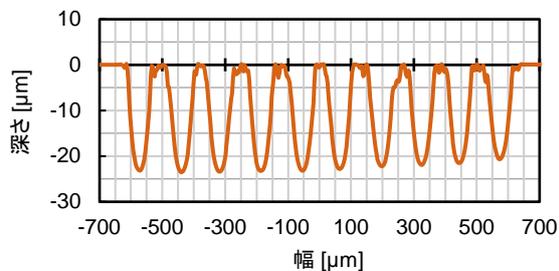
(2) 超硬合金切削工具へのテクスチャリング

表面テクスチャリングを切削加工用工具へ適用する研究が行われており³⁾、工具摩耗の低減といった効果が得られている。そこで、超硬合金製切削工具へのテクスチャリングを行った。超硬合金は炭化タングステン(WC)とコバルト(Co)が主成分の硬質焼結材料であり、電解反応では超硬合金中の WC が溶出せず、電解加工が進行しづらい。このため、両極性パルス電圧を用いた電解加工が用いられている^{4,5)}。両極性パルス電圧を用いた電解加工では、パルス電圧が正の時、つまり電極側が陰極、工作物側が陽極の時は Co が電解液中に溶出する。しかし、WC は WO_3 となるだけで溶出しない。一方で、パルス電圧が負の時、つまり電極側が陽極、工作物側が陰極となると、工作物表面で水酸化ナトリウムが生成する。この水酸化ナトリウムと WO_3 が反応し、 WO_3 が電解液中に溶解する。本研究ではまず、超硬合金に対してテクスチャリングを行うための基礎検討として、単極性および両極性パルス電圧を用いて 2 種類の超硬合金材料に電解加工を行い、加工特性を調査した。そして、超硬合金製の切削工具へのテクスチャリングを行い、その切削加工特性を調査した。

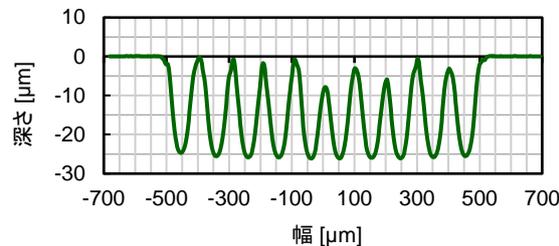
① 超硬合金の電解加工

工作物には切削工具として用いられる Type-A (WC 粒径 2~3 μm , Co 含有量 9 wt.%)、Type-B (WC 粒径 1 μm 以下, Co 含有量 6 wt.%) の 2 種類の超硬合金を用いた。電極には直径 3 mm の黄銅パイプ電極を用い、直径 0.75 mm の中心穴から電解液を供給した。ピエゾステージで工具をジャンプさせながら、送り速度一定で工作物表面から 20 μm の深さまで電極を送った。ピエゾステージは下死点で 30 ms 停止し、その間に単極性パルス電圧、または両極性パルス電圧を印可する。単極性パルス電圧では、下死点で 100 μs の正のパルス電圧を合計印可時間が 2 ms となる回数で印可した。両極性パルスの場合には、Masuzawa ら⁴⁾の研究を参考に、正の電圧の前に 1.4 ms の負の電圧を 1 回印可した。

図 11 に工作物に Type-A の超硬合金を用いた場合の加工面の断面形状を示す。単極性パルス電圧での断面形状を見ると、概ね均一な加工ができていていることがわかる。また、加工深さは 35 μm 程度だった。このことから、Type-A は単極性パルス電圧であっても加工が可能であることがわかった。これは、WC の含有量が少なく、Co の含有量が比較的多いためと考えられる。次に両極性パルス電圧での加工面



(a) Electrode 30-80



(b) Electrode 30-50

図8 テクスチャの断面形状

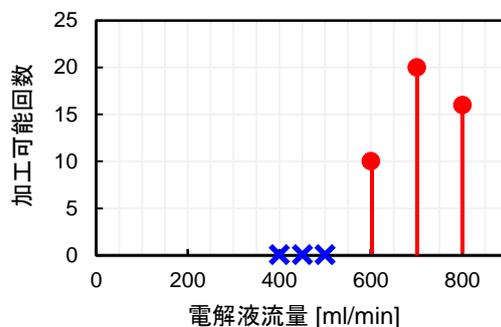


図9 電解液流量と連続加工可能な回数

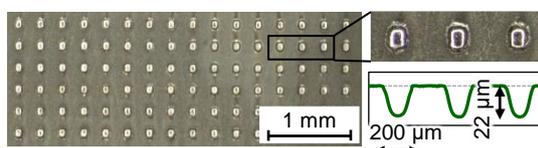


図10 ディンプル形状のテクスチャリング

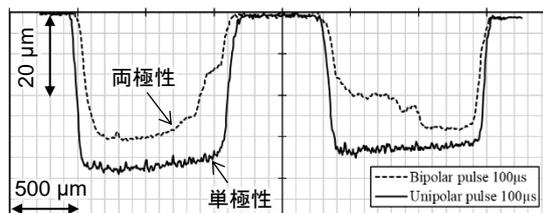
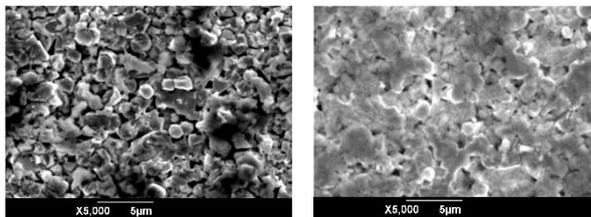


図11 超硬合金 (Type-A) の加工断面形状

の断面形状を見ると、加工深さは、一番深い加工面外周部で $30\ \mu\text{m}$ 程度で、単極性に比べて加工深さが浅い、これは、両極性パルスにより工具電極が消耗したためと考えられる。また、単極性、両極性で加工を行った加工面の SEM 像を図 12 に示す。単極性の場合には、Co が溶出しており、WC が露出していることがわかる。一方で、両極性の場合には、WC の露出が減少している。よって、両極性パルス電圧を用いた電解加工により Co の過度な溶出を抑制できていると考えられる。



(a) 単極性パルス (b) 両極性パルス

図12 超硬合金 (Type-A) の加工面SEM像

次に、WC の含有量が多く、Co の含有量が少ない超硬合金である Type-B に対して加工を行った。図 13 に単極性、両極性での加工面の断面形状を示す。単極性での電解加工面の断面形状を見ると、工作物表面より高くなっていることがわかる。これは、電解反応により WC が WO_3 となり体積が増加したためと考えられる。よって、Co 含有量が少ない超硬合金では、単極性の電解加工では加工が困難であると考えられる。一方で、両極性での断面形状を見ると、加工深さは $20\ \mu\text{m}$ 程度で、概ね均一な加工ができています。このことから、Co の含有量が少ない超硬合金については、両極性パルス電圧でなければ加工が困難であることがわかった。

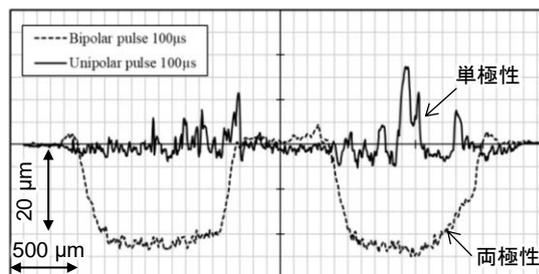


図13 超硬合金 (Type-B) の加工断面形状

② 超硬合金切削工具へのテクスチャリングと切削試験

超硬合金製のスローアウェイチップに対してテクスチャリングを行った。工作物には Type-A の超硬合金を用い、単極性のパルス電圧を印可して加工を行った。加工結果を図 14 に示す。周期 $120\ \mu\text{m}$ 、深さ $15\ \mu\text{m}$ の平行溝テクスチャを付与することができた。この工具を用い、S50C の工作物に対してミーリング加工を行った。テクスチャの有無によるすくい面摩耗の推移を図 15 に示す。テクスチャを付与した工具では、テクスチャを付与していない工具に対して、すくい面摩耗がかえって増加してしまっており、期待に反する結果となった。これは、単極性のパルス電圧でテクスチャを付与したため、硬合金中のコバルトの過度な溶出により強度が低下した可能性が考えられる。今後は、両極性の電圧を用いたテクスチャリングを行い、切削加工特性の向上を目指す。

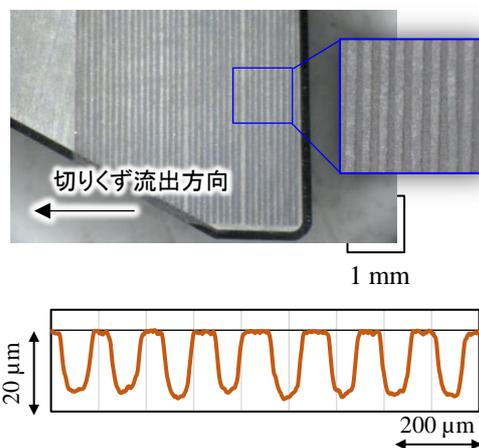


図14 並行溝テクスチャを付与した超硬切削工具

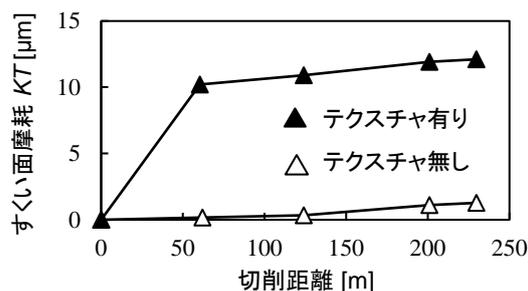


図15 テクスチャを付与した超硬切削工具の工具摩耗

<参考文献>

- (1) A.A.G. Bruzzone, H.L. Costa, P.M. Lonardo, D.A. Lucca, Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance, CIRP Annals, Vol. 57, No.2, pp. 750-769, 2008.
- (2) B.J. Park, B.H. Kim, C.N. Chu, The Effects of Tool Electrode Size on Characteristics of Micro Electrochemical Machining, CIRP Annals, Vol.55, No.1, pp. 197-200, 2006.
- (3) T. Özel, D.Biermann, T. Enomoto, P. Mativenga, Structured and textured cutting tool surfaces for machining applications, CIRP Annals, Vol. 70, No. 2, pp. 495-518, 2021.
- (4) T. Masuzawa, M. Kimura, Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy, CIRP Annals, Vol. 40, No. 1, pp. 199-202, 1991.
- (5) 後藤昭弘, 諸井孝行, 植松政人, 齋藤長男, 毛利尚武, 湯澤隆: 超硬合金の電解加工に関する研究 (第 1 報)-Co の溶出防止の方法-, 電気加工学会誌, Vol.49, No.121, pp.117-124, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koyano Tomohiro, Hosokawa Akira, Takahashi Taishi, Ueda Takashi	4. 巻 68, 1
2. 論文標題 One-process surface texturing of a large area by electrochemical machining with short voltage pulses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 181 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2019.04.100	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 小谷野智広、高橋克成、細川晃、古本達明、橋本洋平	4. 巻 56, 141
2. 論文標題 電解加工を用いた一括表面テクスチャリングにおけるテクスチャの微細化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 52 ~ 60
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomohiro Koyano, Masaki Takabatake, Akira Hosokawa, Tatsuaki Furumoto, Yohei Hashimoto
2. 発表標題 Surface Texturing of Tungsten Carbide Cutting Tools by Electrochemical Machining
3. 学会等名 International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克成、小谷野智広、細川晃、古本達明、橋本洋平
2. 発表標題 電解加工を用いた大面積一括表面テクスチャリングにおけるテクスチャの微細化
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 寛金泰成、小谷野智広、細川晃、古本達明、阿部諭、橋本洋平、山口貢
2. 発表標題 切削工具用超硬合金の高精度電解加工の研究
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

〔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