

令和元年5月28日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14569

研究課題名(和文) 金属AMを用いた電解加工用ポーラス電極の開発

研究課題名(英文) Electrochemical machining using porous electrodes fabricated by additive manufacturing process

研究代表者

小谷野 智広 (Koyano, Tomohiro)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：20707591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：多孔質形状(ポーラス)を有する複雑構造体を一体で造形できるという金属粉末付加製造法(金属AM)の特徴を活用し、ポーラスを付与した新しい電解加工用電極(ポーラス電極)を開発した。本電極ではポーラスを電極の一部に設け、ポーラス部の空孔(直径数十 μm から百 μm 程度)を電解液の吐出し口として電極間へ電解液を供給する。従来の工具電極では電解液の吐出し口が大きいため、吐出し口の直下で未加工部が生じるという問題があったが、ポーラス電極では吐出し口となる空孔が小さいので、加工面への影響を極めて小さくすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の電解加工における工具電極では、電解液の吐出し口が大きいため、吐出し口の直下で未加工部が生じるという問題があり、電解加工の適用範囲に制限があった。一方で、新たに開発したポーラス電極ではこの問題を解決することができ、電解加工の適用範囲の拡大が期待される。また、金属AMにより造形可能な透過性を有するポーラス構造体は、種々の分野への応用が期待されており、ポーラスを介して液体を供給する本研究の知見はこれらの応用においても役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：A new tool electrode having a porous structure, named porous electrode is developed for electrochemical machining (ECM). This electrode is fabricated using a powder bed fusion additive manufacturing process. Electrolyte fluid can be supplied to the machining gap through its permeable porous structure. Small pores and large porosity can be obtained using a higher laser scanning speed of sintering process, which increases the flow rate of the electrolyte. ECM results show that a flat surface is obtained with the developed porous electrode, and small pores are less likely to have an influence on the machined surface. In order to improve the roughness of the machined surface, jump motion of the tool electrode is applied, or air-bubbles are mixed into the electrolyte. The surface quality can be improved with both methods.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：電解加工 ポーラス Additive Manufacturing 粉末床熔融結合法 空孔 電極振動 気泡混入

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電解加工は、電解反応により陽極の工作物を溶出させて除去する電気化学的加工法である。図1のように、 NaNO_3 水溶液などの電解液中で工具と工作物を数十 μm から数百 μm 程度の距離を隔てて対向させる。工具電極を陰極、工作物を陽極とする極性で直流電圧、またはパルス電圧を印可すると、電解反応により陽極の工作物が溶出する。所望の加工形状を反転した形状を持つ工具電極を用い、これを工作物に送りながらその形状を工作物に転写していく。電解加工は電解反応を利用しているため、材料強度に依らず加工が可能であり、加工変質層が生じないという特徴を持つ。また、陰極となる工具電極上では水素の発生反応しか生じないので、工具電極の損耗がない。一方、電解液中に数十 A/cm^2 という高密度で電流を流すので、電解液はジュール発熱によって液温が上昇し、沸騰にまでいたる。また、溶出した陽極の金属イオンは電解液中で水酸化物や酸化物となり、前述のように陰極の工具電極上では水素が発生する。これらの非導電性の電解生成物は電解液中での電流の流れを阻害するため、電極間から排出する必要がある。このため、一般的な電解加工では図1のように工具電極、または工作物に電解液の吐出口を設け、そこから電解液を電極間に流速が数 m/s という高速で流通させる必要がある。しかし、工具電極に吐出口を設けると、吐出口に対向する工作物面上では加工が行われなため、未加工部となる突起が生じるといった問題がある。したがって、その仕上げ加工を行うか、あるいは未加工部が問題とならない形状にしか電解加工が適用できないという問題があった。

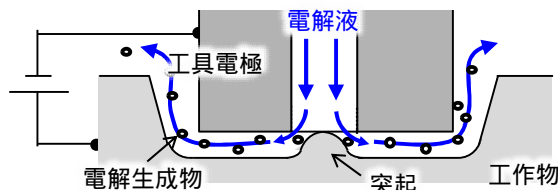


図1 従来の電解加工

2. 研究の目的

本研究では、前述の問題を解決するため、電解液の吐出口を有する従来の電解加工用電極の代替として、ポーラス形状を付与した新しい電極を開発した。図2に示すように、空孔を多数有するポーラス構造を電極の一部とし、その空孔を通して電極間へ電解液を供給する。空孔の大きさが数十 μm から百 μm 程度と小さければ、その形状は工作物へ転写されにくくなり、未加工部の形成を防ぐことができる。しかし、従来の製造技術では部分的に密度の異なるこのような構造物の製作は困難であった。そこで本研究では、このポーラス電極の製作を金属粉末を用いた付加製造（AM: Additive Manufacturing）の一種である粉末床溶融結合法¹⁾を用いることで可能とした。本研究では、このポーラス電極を用い、その電解加工特性を調査した。

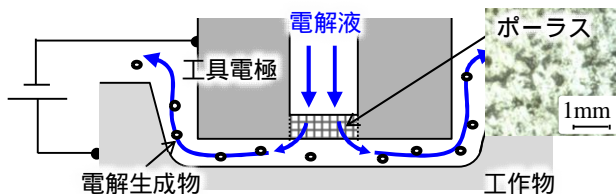


図2 ポーラス電極を用いた電解加工

3. 研究の方法

本研究では、粉末床溶融結合法による金属AM装置によりこのポーラス電極を製作した。本造形手法では、薄く堆積させた金属粉末に対してレーザを走査し、金属粉末を選択的に溶融・凝固させる。そして、その凝固層を何層にも積み上げることで任意の3次元構造物を製作する。本造形手法では、レーザの出力や走査速度を変化させることで造形物の密度を変えることができ、任意の箇所でもポーラス構造を造形できるという特徴がある²⁾。本研究ではこの手法により、電解液の吐出口として電極表面に直径数十 μm から数百 μm 程度の空孔を多数含むポーラス部を有した電極を製作した。本研究で製作した円形ポーラス電極を図3に示す。円柱状の電極の外径は7.5mmであり、ポーラス部の直径は5mm、厚さは0.3mmである。焼結する金属粉末材料には鋼・銅・ニッケルの混合粉末（平均粒径25 μm ）を用いた。造形時の1層の厚さは50 μm である。造形時のレーザ出力は200Wで一定とし、ポーラス部はレーザ走査速度を2000 mm/s と速くすることで焼結密度を低くし、空孔を作り出している。一方で、ポーラス部以外はレーザ走査速度を500 mm/s と遅くすることで焼結密度を高くした。本方法により種々のポーラス電極を製作し、その電解加工特性を調査した。

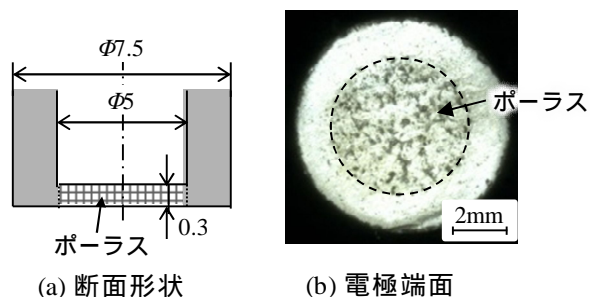


図3 製作した円形ポーラス電極

4. 研究成果

(1) レーザ走査速度がポーラス構造に与える影響

図4に、ポーラス部のレーザ走査速度を2000 mm/s 、4000 mm/s と変化させ、空孔の大きさと空孔密度を変化させて製作した電極の光学顕微鏡写真を示す。レーザ走査速度が4000 mm/s と

速い図 4(b)の方が、ポラス部の空孔サイズが小さくなっている。また、空孔密度も高くなっている。次に、図 5 に各レーザ走査速度で製作した電極の流量を測定した結果を示す。グラフの横軸は、電解液の供給圧力である。どの走査速度においても、供給圧力が増加すると流量が増加していることがわかる。また、レーザ走査速度が速くなるにつれて流量が増加している。これは、レーザ走査速度が速い方が、ポラス部の空孔密度が高いためと考えられる。

(2) ポラス電極による電解加工

ポラス電極の有用性を評価するため、4000mm/s で造形したポラス電極を用いて加工を行った。また、比較のために、電解液の吐出口として中心部に貫通穴を設けた従来の中空電極でも加工を行った。中空電極はポラス電極と同じく外径 7.5mm であり、中心穴径は 2.4mm である。図 6 に、従来の中空電極での加工穴底面の観察結果と、その断面形状を示す。中空電極による加工では電解液の吐出口に対向する箇所が加工されず、突起が形成されている。次に、図 7 にポラス電極による結果を示す。ポラス電極による加工では加工されずに残ってしまう箇所はなく、平坦な加工穴底面を得ることができた。なお、中空電極の場合でも吐出口の大きさを小さくすれば加工面の突起を小さくすることはできる。しかし、電解加工を行うには十分な電解液流量が必要であり、穴が小さいと十分な電解液が供給できないため、多数の微細穴を加工する必要がある。一方で、金属 AM を用いた場合には、吐出口となる空孔を多数有するポラス構造を 1 行程で製作できる。

(3) ポラス性状が加工面に与える影響

前述のように、造形時のレーザ走査速度を変化させると空孔の大きさが変化した。そこで、これらの電極を用いて空孔の大きさが加工面性状に与える影響を調査した。図 8(a), (b) に、ポラス部のレーザ走査速度をそれぞれ 2000mm/s, 4000mm/s として製作した電極による加工穴底面の光学顕微鏡写真とその 3 次元形状を示す。2000mm/s で造形した空孔が大きいポラス電

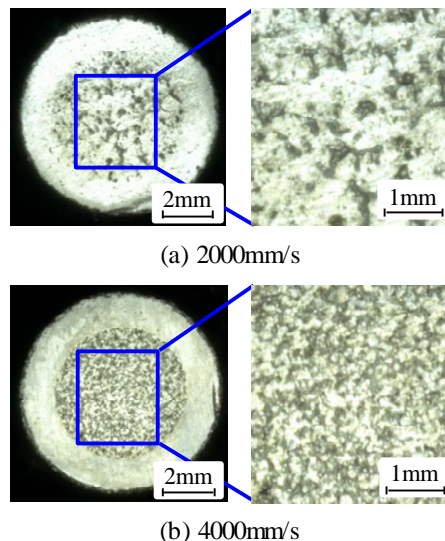


図4 走査速度がポラス構造に与える影響

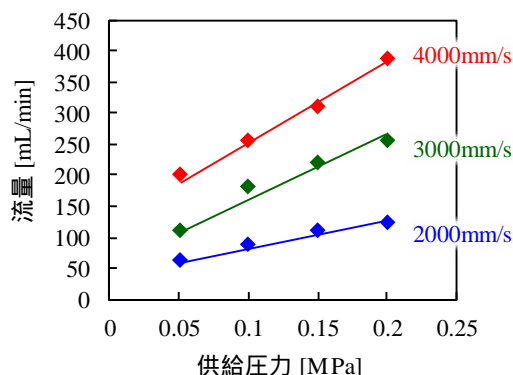


図5 走査速度と供給圧力が電解液流量に与える影響

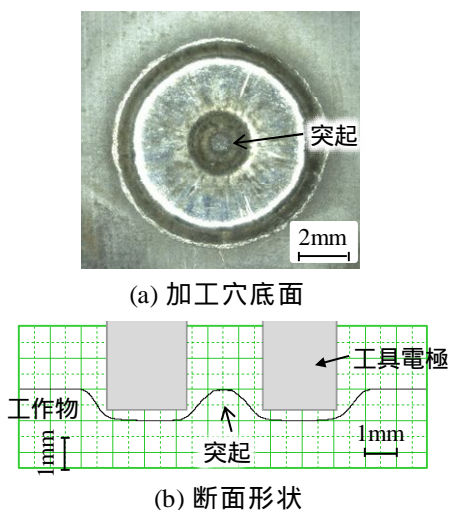


図6 従来電極による加工穴

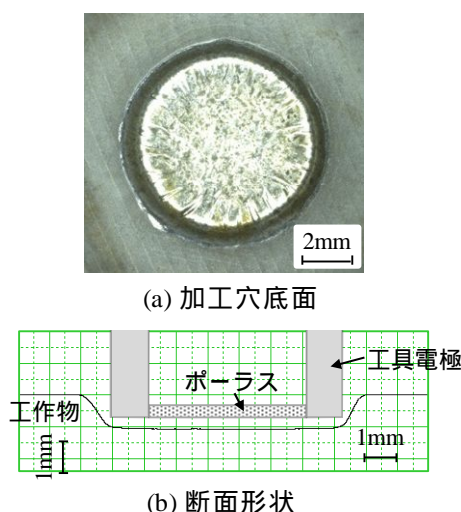


図7 ポラス電極による加工穴

極による加工穴底面の 3 次元形状を見ると、幅数百 μm 、高さ $100\mu\text{m}$ 程度の突起が形成されていることがわかる。これは、ポーラス部の空孔が大きいいため、それが加工面に転写されたためと考えられる。一方で、空孔の小さい 4000mm/s のポーラス電極での加工穴底面には、突起が見られず、平坦な加工面が得られている。したがって、加工面への影響を最小限とするにはポーラス部の空孔は小さいほど良いと考えられる。なお、電解加工においては、工具電極の送り速度を増加させると電流密度が増加し、加工速度が増加する。しかし、このような高電流密度下で加工を行うためには、電解液流量を大きくし、電解液中で発生したジュール発熱や電解生成物を速やかに電極間から排出する必要がある。このため、送り速度を増加させて加工速度を大きくするという点においても、大きな流量が得られる走査速度の大きな条件で造形した電極の方が良い。

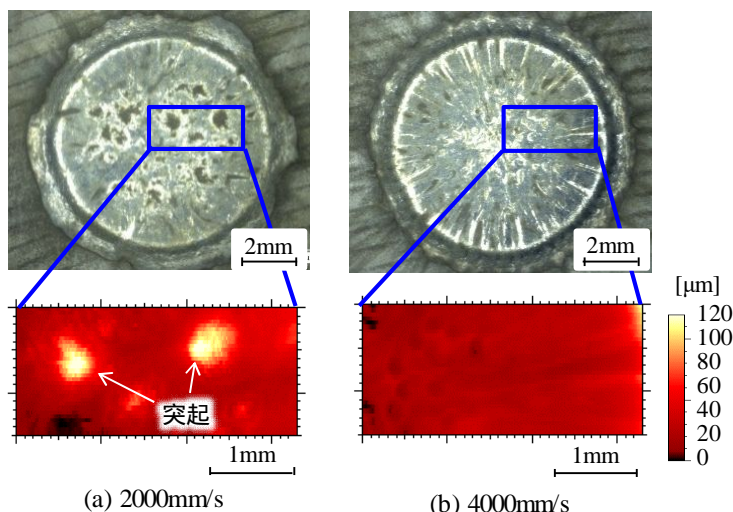


図8 ポーラス構造が加工面に与える影響

(4) 四角形状ポーラス電極

本研究で用いている粉末床溶融結合法では、造形物の任意の箇所にポーラス構造体を造形することができる。その特徴を生かし、図9に示す四角形状のポーラス電極を製作した。本電極においては、図9(a)に示すように電極底面にポーラス部を X 字状に配置することで、ポーラスから各辺に向かう電解液流れ場を得ることができる。本電極を用いて加工した加工穴底面の光学顕微鏡写真を図10(a)に、その3次元形状を図10(b)に示す。3次元形状からわかるように、おおよそ平坦な加工穴底面を得ることができた。一方で、図10(c)に示す断面形状からわかるように、加工面には電解液の流れ方向に垂直な方向に凹凸が生じた。これは、ポーラス部の空孔分布の不均一により、ポーラスから供給される電解液の流速が場所によって異なり、電解液の温度差や電解生成物の濃度差が生じてしまったためと考えられる。

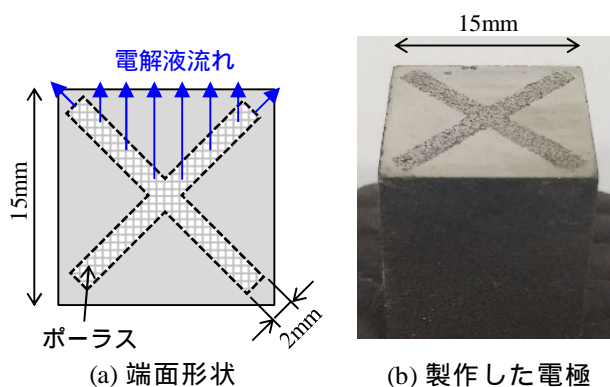


図9 四角形ポーラス電極

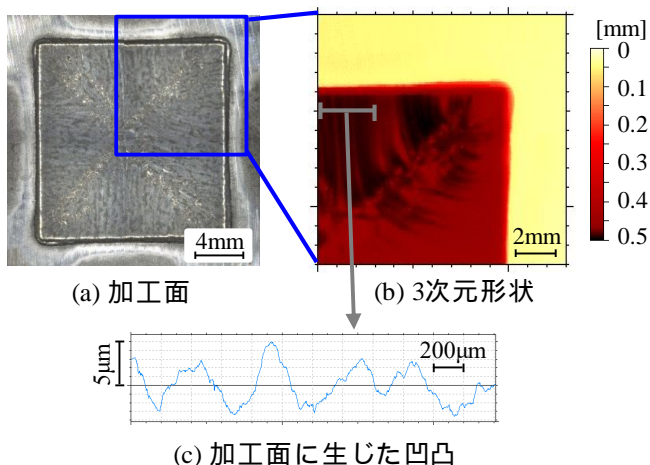


図10 四角形ポーラス電極による加工穴

(5) 電極のジャンプ動作による加工面性状の改善

前述のように、電解液流速の不均一により、加工面には電解液の流れ方向に対して垂直な方向に凹凸が生じた。そこで、電極のジャンプ動作によりこの改善を試みた。ジャンプ動作により電極を上下に振動させるとポンプ作用が生じ、電極が上昇する際に、電極外周部から内部部へ向かう向きに電解液の流れが生じる。この流れと電極のポーラス部から供給される電解液の流れが相殺することで、電極間の電解液流速が小さくなる時が見られる³⁾。その際にパルス電圧を印加することで、電解生成物の濃度差や電解液の温度差が小さくなり、加工面の凹凸の低減が期待できる。図11に、四角形電極を用いた場合の、電極のジャンプ動作の有無による加工穴底面の3次元形状を示す。ジャンプ動作を行わない場合には、電解液の流れ方向に対して垂直

な方向に凹凸が生じている。一方で、ジャンプ動作を行うことで、その凹凸が低減されていることがわかる。

(6) 電解液中への気泡混入による加工面性状の改善

前述のように、電極のジャンプ動作により加工面性状が改善したが、その効果は十分ではなかった。そこで、電解液中に気泡を混入させ、気泡の攪拌作用⁴⁾によりこの改善を試みた。攪拌作用により、電解生成物の濃度差や電解液の温度差が小さくなることが期待できる。電解液への気泡混入の有無による加工面を図12に示す。気泡混入により、放射状の凹凸を低減させることができた。また、ジャンプ動作の場合よりも大きな効果が得られた。今後はポーラス造形条件などを最適化することで空孔分布の均一化を進め、さらに良好な加工面性状を得ることを目指す。

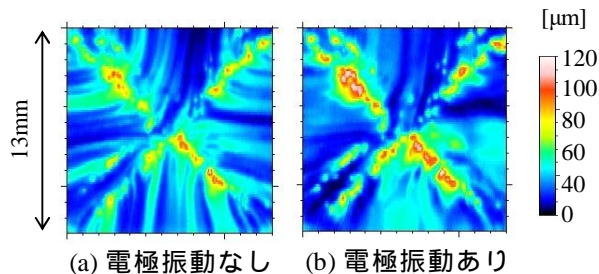


図11 電極振動による加工面性状の改善

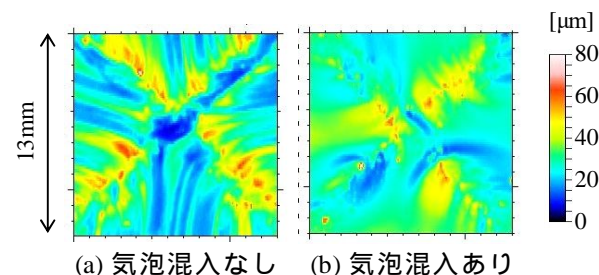


図12 電解液への気泡混入による加工面性状の改善

< 引用文献 >

阿部諭, 東喜万, 峠山裕彦, 不破勲, 吉田徳雄, 金属光造形複合加工法の開発 - 金属光造形法と切削仕上げのオンマシン複合化 -, 精密工学会誌, Vol.73, No.8, pp.912-916, 2007.

T. Furumoto, A. Koizumi, R.M. Alkahari, R. Anayama, A. Hosokawa, R. Tanaka, T. Ueda, Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, Vol.219, pp.10-16, 2015.

寺井文人, 永井暢彦, 柴田英則, 伊藤昌則, 岩波重樹, 振動同期パルス電解加工技術の開発—CO₂冷媒ヒートポンプ給湯器 (ECO CUTE) トライボプレート工程への適応—, 電気加工学会全国大会(2013), pp.105-112, 2013.

伊東祐光, 近森邦夫, 桜井房次, 電解加工法の研究—電解液の流れについて—, 精密機械, Vol.33, No.389, pp.396-403, 1967.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Tomohiro Koyano, Akira Hosokawa, Ryota Igusa, Takashi Ueda, Electrochemical machining using porous electrodes fabricated by powder bed fusion additive manufacturing process, CIRP Annals, Vol. 66, No. 1, pp. 213-216, 2017, 査読有.
DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.127

[学会発表](計2件)

井草良太, 小谷野智広, 細川晃, 古本達明, 橋本洋平, 微細噴流穴からの電解液供給による電解加工, 電気加工学会全国大会(2017), 2017.

高橋泰士, 小谷野智広, 細川晃, 古本達明, 橋本洋平, 短パルス電解加工における加工精度の検討, 2017年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 2017.

[その他]

小谷野智広, 金属 3D プリンタで製作したポーラス電極による電解加工, ケミカルエンジニアリング, Vol. 64, No. 5, pp. 52-56, 2019.

6. 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。