

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17949

研究課題名(和文)高抵抗材料を用いたナノ放電加工の実現に関する研究

研究課題名(英文)Micro Electrical Discharge Machining Using High Electric Resistance Electrodes

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微細放電加工において工具電極に高抵抗材料を用いることで、単位加工量である放電痕を微小化し、放電加工の微細化の限界を更新することを目的としている。シリコン工具電極の抵抗率が増加するに従い、放電電流ピーク値が減少し、パルス幅が長くなったため、放電痕を小さくすることができた。その結果、シリコンを工具電極として用いることで、銅電極を使用した場合よりも小さい、最小直径0.7マイクロメートルの微細軸加工に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to decrease the material removal per single pulse discharge, high electric resistance materials such as single-crystal silicon are used for electrodes. Experimental results show that with the silicon tool electrode, the peak value of the discharge current decreases, whereas the pulse duration increases. In addition, with increasing silicon electrode resistivity, the diameter of discharge craters decreases. As a result, the minimum diameter of rods machined using a silicon block tool electrode was 0.7 micrometers, which is smaller than the diameter obtained when using a copper tool electrode.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：放電加工 微細加工 高抵抗材料 シリコン 微細軸 放電痕

1. 研究開始当初の背景

非接触加工で加工反力の小さい放電加工は、微細加工に適した加工法の1つである。しかし、放電加工で加工可能な最小サイズが存在し、微細化に限界がある。この微細化の限界を決定する要因として、材料組織、加工機の位置決め精度などが考えられているが、最も重要な要因の1つとして放電一回あたりの材料除去量、すなわち放電痕の大きさが考えられる。微細放電加工では、放電エネルギーや放電電流波形が放電一回あたりの材料除去量を決定するため、放電エネルギーの減少や電流波形の工夫が微細化限界の向上には必要となる。しかし、微細放電加工において用いられるRC放電回路では、最小の放電エネルギーは浮遊容量に蓄積されるエネルギーにより決まる。浮遊容量は工具電極と工作物間、工具電極ホルダと工作物間、放電回路配線間などに形成されるが、装置等の問題によりこの微小化には限界がある。

2. 研究の目的

そこで本研究では、工具電極に高抵抗材料である単結晶シリコン（以下シリコン）を用い、浮遊容量から流れる電流を低減する。それにより、放電一回あたりの材料除去量を小さくすることで、従来よりも微細な加工を可能とすることを目的とする。

3. 研究の方法

シリコンを工具電極に用い、微細軸加工時の放電電流、軸上の放電痕直径および微細化限界について調査した。図1に実験装置を示す。放電加工機は自作したものを使用した。放電回路にはRC放電回路を用い、回路中に発生する浮遊容量のみで加工を行う。軸状の工作物を取り付けた電極ホルダをV字軸受により保持し、プーリを介して回転させる。回転させた工作物をブロック状の工具電極に水平方向に送り、微細軸の加工を行う。シリコンを工具電極として用いる際には、シリコンウェハを長方形に切り出し、板ばねにより保持する。実験においては、電流センサを用いて極間を流れる放電電流の測定を行い、工作物上に形成された放電痕径を測定した。また、シリコンを用いた際の微細軸の加工成

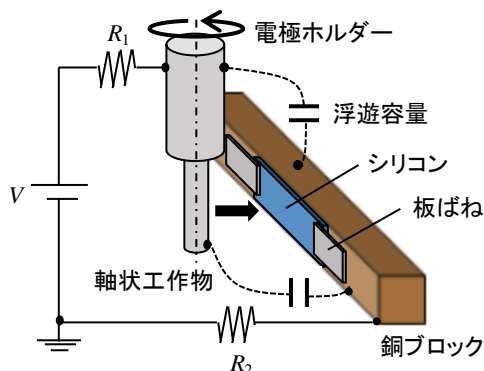


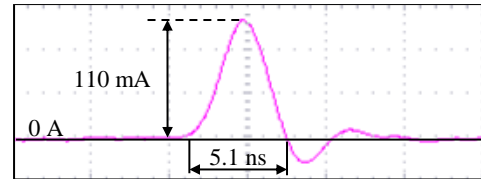
図1 ブロック電極による微細軸加工

功確率と最小直径を調査し、一般の放電加工に使用される銅電極を用いた場合と比較した。

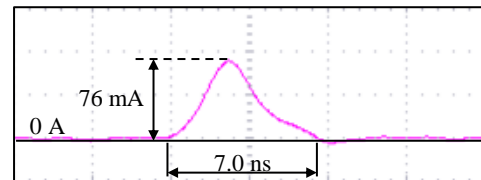
4. 研究成果

(1) シリコン工具電極による微細軸加工

工具電極抵抗率が放電電流および放電痕直径に与える影響を調査した。銅電極とシリコン電極を用いた場合の放電電流波形を図2に示す。また、放電電流ピーク値とパルス幅を測定した結果を図3(a)に示す。工具電極抵抗率が增加するに従い、放電電流ピーク値は

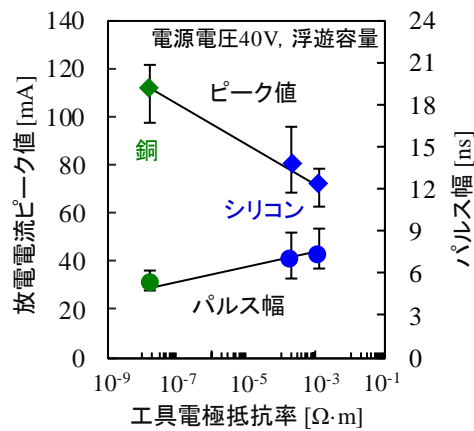


(a) 銅電極 ($1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)

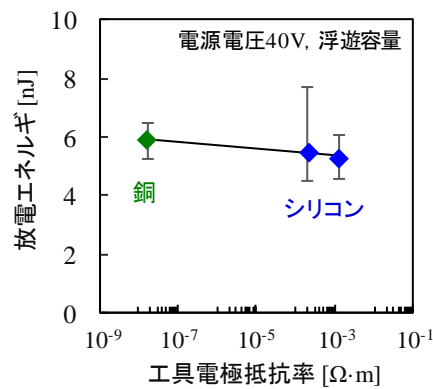


(b) シリコン電極 ($1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$)

図2 放電電流波形



(a) 電流ピーク値とパルス幅



(b) 放電エネルギー

図3 工具電極抵抗率が放電電流と放電エネルギーに与える影響

減少し、パルス幅は長くなった。この理由として、工具電極の抵抗により浮遊容量から流れる電流が制限されたためであると考えられる。放電加工においては、放電電流のパルス幅が長く、電流ピーク値が小さいと、工作物に流入する熱流束が減少し、材料除去量が減少することが知られている。従って、高抵抗材料を電極として用いることで、放電痕直径が減少することが期待できる。また、図 3 (b)に放電エネルギーを示す。工具電極抵抗率が増加すると、ジュール発熱にエネルギーが消費されるため、放電エネルギーが若干減少していることがわかる。

次に、銅電極とシリコン電極を用い、直径 50 μm の微細軸を加工し、放電痕直径を比較した。微細軸上の放電痕を図 4 に示す。また、微細軸表面に形成された放電痕直径を測定した結果を図 5 に示す。銅工具電極により形成された放電痕直径は、平均値で約 0.8 μm

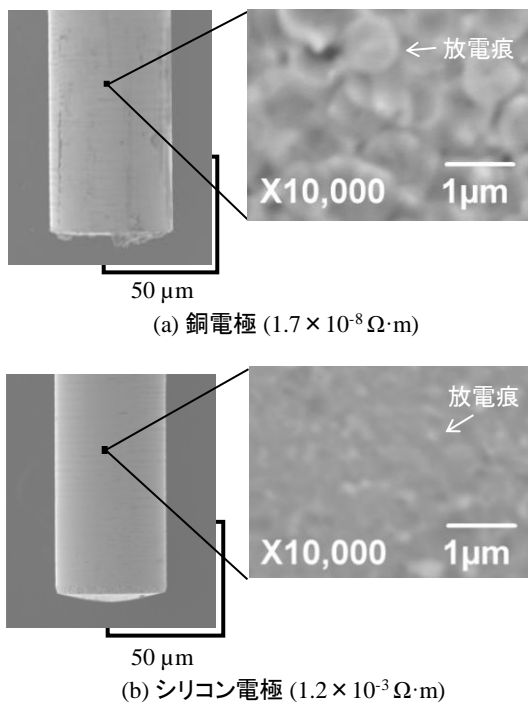


図4 各電極により加工した超硬合金微細軸上の放電痕

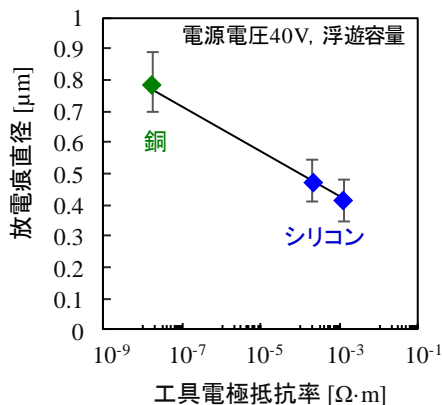
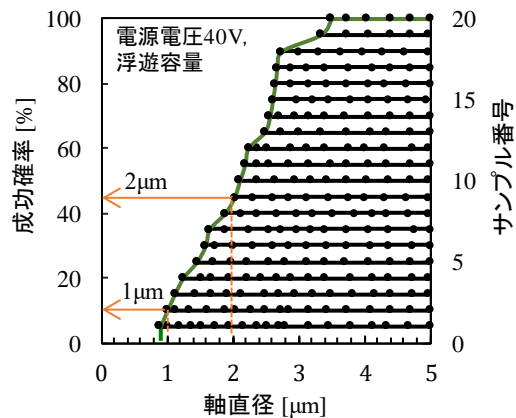


図5 超硬合金軸上の放電痕直径

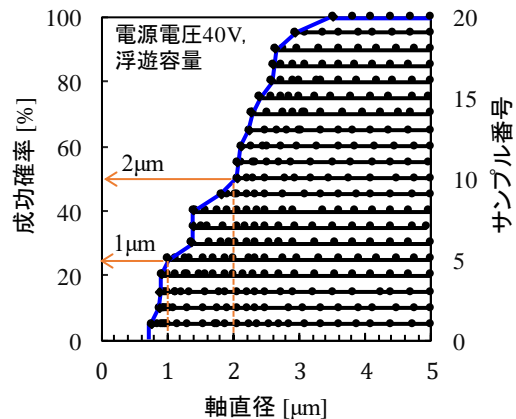
であった。一方、抵抗率が $2.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$, $1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ のシリコン電極により形成された放電痕の直径は、それぞれ約 $0.5 \mu\text{m}$ および $0.4 \mu\text{m}$ であり、工具電極の抵抗率が増加するに従い放電痕直径が減少した。これは、放電電流ピーク値が減少することで、熱流束が減少したためと考えられる。

このように、シリコン工具電極を使用することで、微細軸上に形成される放電痕直径が減少した。従って、微細軸加工での加工可能な最小軸径が減少し、さらに微細軸作成の成功確率が増加することが期待できる。そこで、抵抗率 $1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ のシリコンを工具電極とした場合の微細化限界を調査した。また、比較のために銅ブロックも工具電極として使用した。工作物には超硬合金を使用した。まず、直径 $5 \mu\text{m}$ の微細軸を加工する。そして、シリコン電極、または銅電極を用いて加工を行い、微細軸直径を徐々に減少させる。その際、一定量を加工した後加工した微細軸を加工機から取り外し、得られた微細軸直径を測定する。これを微細軸が破断するまで繰り返す。各工具電極で微細軸を 20 本ずつ加工した。

銅工具電極とシリコン工具電極を使用した場合の実験結果をプロットした結果を図 6 に示す。各微細軸加工のサンプルにおいて、



(a) 銅電極 ($1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)



(b) シリコン電極 ($1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$)

図6 各電極により加工した超硬合金微細軸の加工成功確率

各加工ステップで測定した微細軸直径を軸が破断するまでプロットしている。なお、最小微細軸直径が小さい順にサンプル番号を付している。従って、この図は微細軸の各直径に対する加工成功確率も表している。例えば、図6(a)の銅ブロックを工具電極として使用した場合においては、直径 $2\mu\text{m}$ 以下まで加工できた微細軸の本数は20本中9本である。従って、直径 $2\mu\text{m}$ の微細軸の加工成功確率は45%となる。また、銅電極の場合、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の微細軸の加工成功確率は10%であった。また、銅ブロックを工具電極として得られた微細軸の最小直径は $0.9\mu\text{m}$ であった。一方、図6(b)のシリコン工具電極を使用した場合は、直径 $2\mu\text{m}$ の微細軸の加工成功確率は50%であり、銅電極と大きく異なる。しかし、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の微細軸加工では成功確率25%であり、銅工具電極を使用した場合より2倍以上高い確率となった。また、シリコンを工具電極として得られた最小直径の微細軸を図7に示す。最小直径は $0.7\mu\text{m}$ であり、銅工具電極を使用した場合よりも小さな微細軸が得られた。これは、放電痕径が小さくなったことにより、微細軸が破断しにくくなったためと考えられる。

(2) シリコン工具電極による面加工
工具電極に高抵抗材料を用いることで放

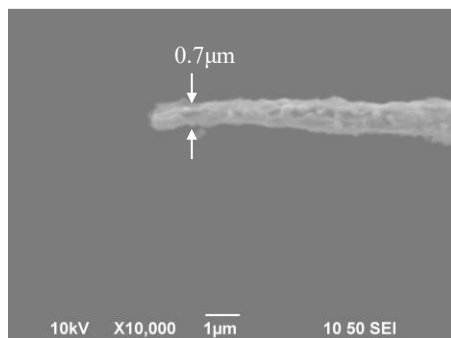


図7 シリコン電極による最小微細軸

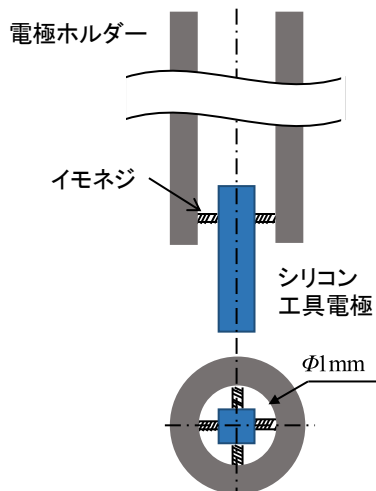
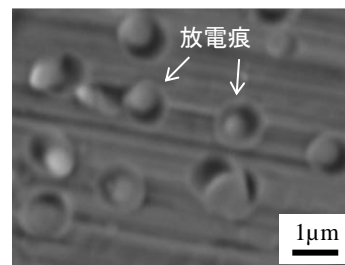


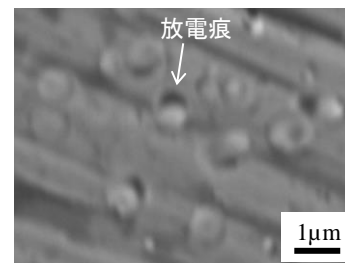
図8 シリコン工具電極の保持方法

電痕直径を小さくすることができれば、任意の工作物材料への微細加工が期待できる。そこで、シリコンを軸状の工具電極として使用し、抵抗率が工作物上の放電痕直径へ与える影響を調査した。本実験において用いた工具電極ホルダの概要を図8に示す。シリコンウェハを短冊状に切り出し、先端部の4本のイモネジにて保持して工具電極とする。工具電極には抵抗率の異なる4種類のシリコンおよびタングステンをを用い、工作物には SUS304 を用いた。

タングステン、および抵抗率が $1.2 \times 10^{-3} \Omega\text{m}$ のシリコンを工具電極として用いた場合に、工作物面上に得られた放電痕を図9に示す。また、各抵抗率における放電痕直径を図10に示す。工具電極の抵抗率が大きくなることで、放電痕直径が小さくなっている。これは、抵抗率が大きくなったことで放電電流のピーク値が減少したためと考えられる。放電痕直径の微小化に伴い、加工面粗さの向上が期



(a) タングステン電極($5.5 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$)



(b) シリコン電極($1.2 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{m}$)

図9 各工具電極を用いてステンレス上に形成された放電痕

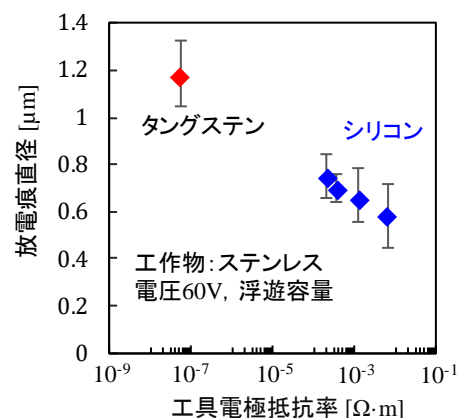
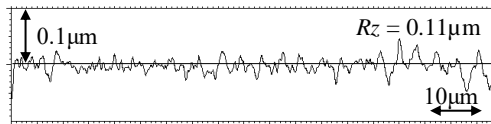
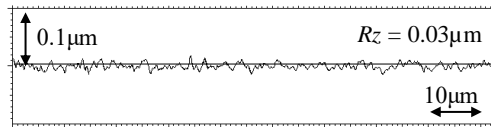


図10 各工具電極を用いてステンレス上に形成された放電痕直径



(a) タングステン電極 ($5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)



(b) シリコン電極 ($6.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$)

図11 各電極を用いて加工した表面粗さ

待できる．そこで，タングステンとシリコンを工具電極として面加工を行い，加工面の表面粗さを比較した．工作物には SUS304 を用いた．加工面の表面粗さを測定した結果を図11に示す．シリコン電極では放電痕が小さいため，タングステン電極よりも滑らかな $Rz0.03\mu m$ の加工面が得られた．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計1件)

① Tomohiro KOYANO, Yuki SUGATA, Akira HOSOKAWA, Tatsuaki FURUMOTO, Micro Electrical Discharge Machining Using High Electric Resistance Electrodes, Precision Engineering, Vol. 47, pp. 480-486, 2017, 査読有

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.10.003

〔学会発表〕 (計2件)

① Yuki SUGATA, Tomohiro KOYANO, Akira HOSOKAWA, Tatsuaki FURUMOTO, Yohei HASHIMOTO, Fabrication of Micro Rods by EDM Using High Electric Resistance Electrode, 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2016年11月18日, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市)

② Yuki SUGATA, Tomohiro KOYANO, Akira HOSOKAWA, Tatsuaki FURUMOTO, Miniaturization of Micro EDM Using High Electric Resistance Electrode, 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015年10月20日, 京都リサーチパーク (京都府京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小谷野 智広 (KOYANO, Tomohiro)

金沢大学・理工研究域・助教

研究者番号: 20707591