

(報告書様式)

2019年3月29日

金沢大学先端科学・イノベーション推進機構協力会 御中

### 第3回 若手研究者奨励賞 研究実施報告書

所 属 理工研究域機械工学系  
職 名 助教

ふりがな こやの ともひろ  
氏 名 小谷野 智広

## 研究実施報告書

### (1) 研究テーマ名

サブマイクロメートルスケールの複雑形状機械加工を可能とするナノ放電加工の実現

### (2) 研究の目的および要旨

本研究では、放電加工の微細化の限界を更新し、これまで不可能であったナノ放電加工（加工寸法：数十 nm～数百 nm）を実現することを最終的な目的としている。放電加工は微細加工のための有力な加工法であるが、従来の技術で加工可能な最小寸法は  $1\mu\text{m}$  程度であった。これは、放電回路に存在する浮遊容量が単位加工量である放電痕の微小化に限界をもたらすためである。そこで本研究では、工具電極材料として高抵抗材料を用い、浮遊容量の影響を低減することで放電痕を極小化する。また、加工機の位置決めに高精度・高分解能なピエゾステージを用いる。これにより、従来困難であったナノ放電加工の実現を図り、放電加工による直径数百 nm 以下の微細軸加工や、直径数百 nm 以下微細穴加工を可能とする。また、製作した微細軸を工具電極として用い、電極を三次元的に走査することで、従来の機械加工法では困難であったシングルマイクロメートルスケール（ $10\mu\text{m}$  以下）からサブマイクロメートルスケール（ $100\text{nm}$  以上  $1\mu\text{m}$  以下）までの 3 次元複雑形状加工を実現する。

### (3) 採択されてからの研究の進捗状況

一般的な微細放電加工では図 1 の RC 放電回路が用いられている。回路配線などに存在する浮遊容量に電荷を蓄積し、工具電極・工作物間で放電が発生するとそのエネルギーが電極間に投入される。本研究では放電エネルギーを極小化するために、工具電極にシリコンなどの高抵抗材料を用いている。放電電流は高抵抗材料の工具電極を通して流れるので、放電回路に存在する浮遊容量から流れる電流は高抵抗材料の電極により低減でき、放電エネルギーも低減できる。従って、高抵抗電極を用いることで放電痕の著しい微小化が実現する。一般的な工具電極材料である銅（比抵抗値  $1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ）を用いて加工した微細軸と、その表面の拡大図を図 2 の上側に示す。また、高抵抗材料であるシリコン（比抵抗値  $2.0 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ ）を工具電極として用いた結果を図 2 の下側に示す。銅電極を用いた場合、放電痕直径は  $1\mu\text{m}$  程度と非常に大きい。一方、シリコン電極では放電痕の判別が困難なほどに微小化されている。これは、高抵抗材料であるシリコンを用いることで、放電時に流れる電流を低減できたためである。この結果、直径  $0.8\mu\text{m}$  の超硬合金製微細軸加工が行えて

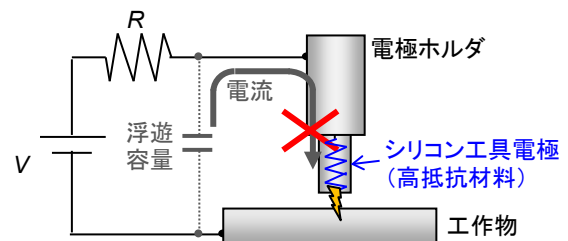


図1 シリコン工具電極による放電電流の低減

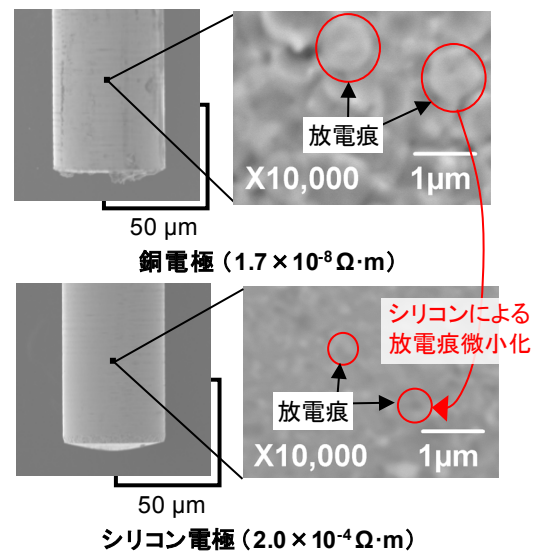


図2 シリコン工具電極による放電痕直径の微小化

いる。本研究ではさらなる微細化を実現するために、電源電圧を従来よりも小さくし、放電エネルギーを更に極小化した。放電エネルギーの概算は  $CV^2/2$  ( $C$ : コンデンサ容量,  $V$ : 電源電圧) となるので、低電源電圧化により放電エネルギーを小さくすることができる。これにより、加工物面上の放電痕直径が小さくなり、微細軸加工における最小軸直径や微細軸の作成成功確率も向上することが期待される。しかし、低電源電圧下では加工ギャップが著しく狭くなるため、加工に用いる位置決めステージの分解能の問題により短絡が頻発し、加工が不安定になるとともに、加工時間が長くなるという問題があった。そこで、本研究では、微細軸の位置決めにナノメートルオーダーの位置決め分解能を有するピエゾステージを用いた。ピエゾステージを用いて加工ギャップを制御することで、短絡および異常放電を抑制することが容易になると期待される。その結果、加工が安定し、加工可能な微細軸の最小直径と微細軸の作成成功確率が向上することが期待できる。そこで本研究では、シリコンを工具電極とし、ピエゾステージを用いて通常電圧と低電源電圧下での微細軸作成成功確率と最小軸直径を調査した。

#### (4) 研究の成果

図 3 に微細軸加工における実験装置を示す。工作物となる微細軸を回転させながらブロック状の工具電極に対して送り、放電を生じさせて軸径を徐々に減少させていく。シリコンを用いる場合にはシリコンウェハを長方形に切り出し、それを銅ブロックに固定している。微細軸の位置決めには  $0.38 \text{ nm}$  の分解能を有するピエゾステージを用いた。まず、通常の放電加工で多く用いられる銅ブロック工具電極を用いて直径  $5 \mu\text{m}$  の微細軸を作成する。そこから、シリコン工具電極を用いて加工を行い、微細軸の直径を減少させていく。シリコン工具電極の抵抗率は  $1.2 \times 10^3 \Omega\text{m}$  である。微細軸となる工作物には平均粒径  $0.4 \mu\text{m}$  の超硬を用いた。電源電圧を、一般的に用いられる  $40 \text{ V}$  とした場合と、低電圧の  $20 \text{ V}$  とした場合で加工を行い、微細軸作成成功確率と最小軸直径を調査した。なお、電源電圧  $40 \text{ V}$  の場合は送り速度は  $5 \text{ nm/s}$ 、 $20 \text{ V}$  の場合は  $2 \text{ nm/s}$  とした。加工においては、微細軸の直径に応じて決定した送り量で加工を行い、微細軸直径を徐々に減少させていく。そして、電極ホルダを各加工工程後に微細放電加工機から取り外し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて微細軸の直径を測定する。そして、加工された微細軸の直径に応じて各加工ステップをさらに繰り返し、各ステップで得られた直径と、加工中に破断に至る直径を調査した。加工する微細軸のサンプル数は  $40 \text{ V}$  の場合は  $20$  個、 $20 \text{ V}$  の場合は  $12$  個として微細軸を加工した。なお、放電エネルギーの概算は  $CV^2/2$  ( $C$ : コンデンサ容量,  $V$ : 電源電圧) となるので、電源電圧を  $40 \text{ V}$  から  $20 \text{ V}$  まで小さくすることで、放電エネルギーは  $40 \text{ V}$  の時の  $25\%$  まで小さくなる。

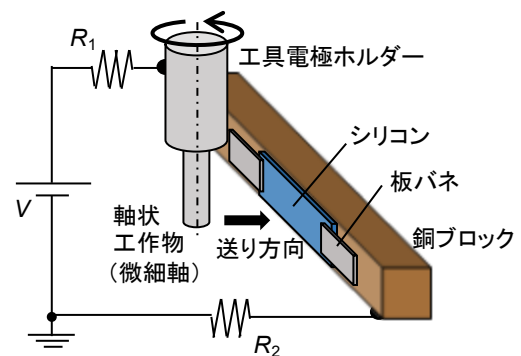


図3 シリコン工具電極による微細軸加工

電源電圧  $40 \text{ V}$  での実験結果を図 4 に示す。各ステップで加工し、測定された微細軸の直径がサンプルの微細軸ごとにプロットされている。得られた微細軸の直径は、加工された微細軸のアスペクト比が 3 より大きい場合にプロットした。破断した場合は破断前のプロットがそのサンプルでの最小軸直径となる。最終的に得られた軸径が小さい順番にサンプル番号を付しているため、このグラフは、微細軸の各直径に対する成功確率も表すことになる。通常電圧  $40 \text{ V}$  で加工した場合、微細軸の作成

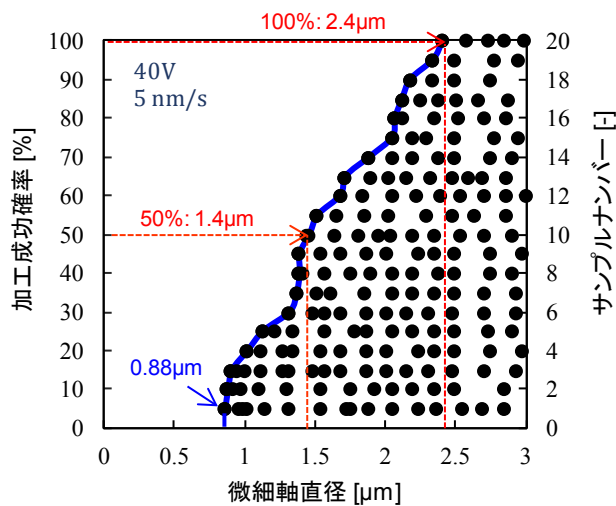


図4 微細軸加工の成功確率(電源電圧40V)

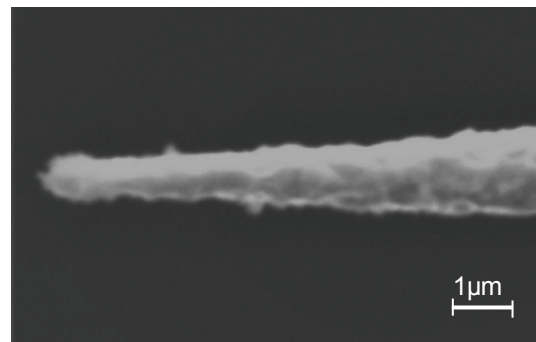


図5 最小直径の微細軸(電源電圧40V)

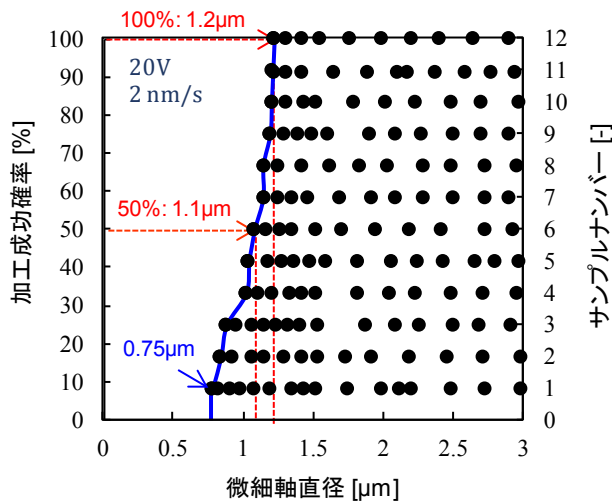


図6 微細軸加工の成功確率(電源電圧20V)

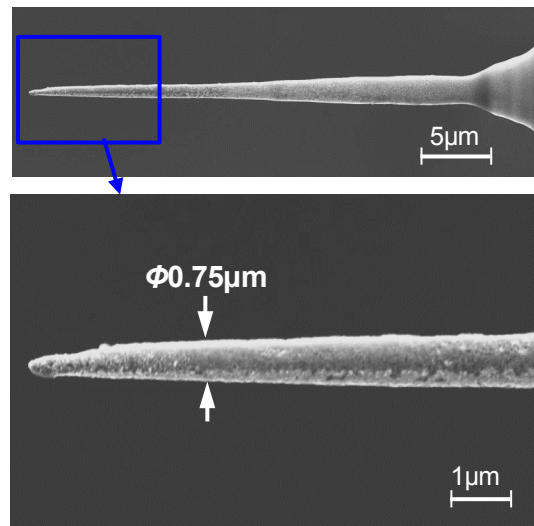


図7 最小直径の微細軸(電源電圧20V)

成功確率が100%となる直径は2.4 $\mu\text{m}$ であり、50%となる直径は1.4 $\mu\text{m}$ であった。また、電源電圧40Vの場合の最小軸直径の微細軸のSEM画像を図5に示す。直径0.88 $\mu\text{m}$ の微細軸が得られた。

次に、電源電圧20Vと小さくした場合の実験結果を図6に示す。電源電圧20Vで加工した場合、微細軸の作成成功確率が100%となる直径は1.2 $\mu\text{m}$ であり、50%となる直径は1.1 $\mu\text{m}$ であった。従って、40Vの場合よりも各成功確率での直径を小さくすることができた。また、低電源電圧で加工した最小軸のSEM画像を図7に示す。直径0.75 $\mu\text{m}$ の微細軸が得られ、最小軸直径を通常電源電圧(40V)で加工した場合と比べて小さくすることができた。また、図5の40Vの場合と比べ、表面の粗さが良好になっている。このように成功確率が上昇し、最小直径が小さくなったのは、放電エネルギーが減少したことによって、単発放電当たりの材料除去量が低減したためであると考えられる。本微細軸は、RC放電回路を用いた放電加工による超合金の微細軸加工例としては世界最小のオーダーであり、特筆すべきは、このオーダーの微細軸加工において、アスペクト比が高く、かつ表面粗さも良好なことである。従って、本電極を用いて穴加工や3次元複雑形状加工を行うことで、良好な加工形状が得られることが期待できる。

#### (5) 今後の研究の推進方策

極微小なエネルギーと、高精度な位置決めが可能なピエゾステージを用いることで、前述のように 1 $\mu\text{m}$  程度の微細軸加工を安定して行うことが可能となり、1 $\mu\text{m}$  以下の微細軸加工も比較的安定して加工可能となった。そこで、このような 1 $\mu\text{m}$  以下の微細軸を工具電極として使い、微細穴加工を行うことで、世界に先駆けて 1 $\mu\text{m}$  以下の微細穴放電加工の実現を図る。また、さらに低電圧の電源電圧を用いることで、放電エネルギーの微小化を図り、直径数百 nm 以下の微細軸加工を実現する。さらにその後は、XYZ の 3 軸にピエゾステージを用い、製作した微細軸を工具電極として三次元的に走査することで、3 次元複雑形状加工を実現する。

#### (6) 研究発表（平成 29 年度、30 年度）

- [1] Tomohiro Koyano, Yuki Sugata, Akira Hosokawa, Tatsuaki Furumoto, Micro-Electrical Discharge Machining of Micro-Rods Using Tool Electrodes with High Electrical Resistivity, Precision Engineering, Vol.55, pp.95-100, 2019.
- [2] Ryuki Hayashi, Tomohiro Koyano, Akira Hosokawa, Tatsuaki Furumoto, Yohei Hashimoto, Electrical Discharge Machining of Micro-rods Using High Electric Resistance Electrodes and Piezoelectric Positioning Stage, Proc. of the 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), B-5-19, 2018.
- [3] 林 颯輝, 小谷野 智広, 細川 晃, 古本 達明, 橋本 洋平, □ 抵抗電極を□ いた微細放電加工 – ピエゾステージと低電源電圧を□ いた微細化限界の向上 –, 2018 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, 2018.

#### (7) その他顕著な成果

本研究により、2018 年度日本機械学会奨励賞（研究）を受賞した。