

高抵抗電極材料を用いた高精度ナノ放電加工の研究

High-precision nano electrical discharge machining using high-electric resistance electrodes

金沢大学 理工学域機械工学系 准教授 小谷野 智広

Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Tomohiro Koyano

要旨

アーク放電を利用した熱的な加工法である放電加工は、非接触加工かつ単位除去量が小さため、微細加工のための有力な加工法である。この放電加工においては、放電一回当たりの単位加工量である放電痕の大きさが、加工可能な最小寸法に大きく影響する。そこで本研究では、工具電極に高抵抗電極を用いることで放電電流を低減し、放電痕の大きさを微小化した。これにより、放電加工による微細加工の限界を更新し、極微細な軸加工やテーパを有する軸加工が行えた。また、製作した微細軸を工具電極として用いることで、極微細な穴加工や溝加工が可能となった。一方で、加工された穴の形状精度やさらなる微細化の実現にはまだ課題がある。このため、今後は加工機の高精度化や、加工条件の最適化によるさらなる微細加工の実現を目指す。

1. 緒言

放電加工では工具電極と工作物を非接触で対向させ、その間に1秒間に数万回といった頻度で放電を生じさせて工作物を除去していく。非接触加工で、かつ単位除去量の小さい放電加工は微細加工のための有力な加工法である。放電加工では工具電極が必要になるが、工具電極を走査する3次元加工においては、円筒状などの工具電極を放電加工機上で成形し、そのまま同一機上で工具電極を走査して加工が行われる。これは、微細な工具電極を取り付けた場合、工具電極の振れや取り付け誤差が問題となるためである。このため、より微細な3次元形状加工を行うためには、工具電極となる微細軸の加工において、どれだけ細い軸を成形できるかが重要となる。しかし、従来の放電加工で加工可能な微細軸の最小寸法は直径数 μm 程度であった。このよう

な微細化の限界に最も影響を与える因子は、放電一回ごとの除去量、すなわち放電痕の大きさである¹⁾。そこで筆者らは、電極材料に単結晶 Si (シリコン) などの高抵抗材料を用い、放電痕を従来よりも微小化する方法を提案している。一般的な微細放電加工では RC 放電回路が用いられるが、放電電流は高抵抗材料の工具電極を流れるので、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した。この結果、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の極微細軸の加工などが行えている。

そこで本研究では、高抵抗電極を用いることで放電加工による微細加工の限界を更新するとともに、製作した微細軸を工具電極として用い、各種形状の放電加工を実現する。

2. 高精度微細放電加工機

高精度な微細加工を行うために、本研究では新たに微細放電加工機を開発した。製作した放電加工機を図1に示す。本加工機は、X、Y、Zの各ステージ、X、Z軸方向の高精度位置決め用のピエゾステージ、加工槽、工作物設置台、工具電極回転機構から構成される。加工中の極間距離を適切に制御するため、X、Yステージにはリニアモータステージ、Zステージにはボールネジとステッピングモータの組み合わせによるボールネジ駆動ステージを用いている。リニアモータステージはリニアエンコーダによるフィードバック制御となっており、高い位置決め精度を持つ。さらに、Zステージ上に取り付けられたピエゾステージにより、極微小な極間距離の制御を行い、加工の安定化と高精度化を図っている。ピエゾステージの分解能はX、Z軸方向でそれぞれ0.4nm、1nmであり、従来のステージよりもはるかに高い位置決め分解能が得られる。加工槽はアクリル製であり、金属部を減らすことで浮遊容量を低減する工夫をしている。また、微細放電加工においては、工具電極を高速回転させることで加工液の流動に効果があり、加工屑の排出や放電点の冷却が促進されることで、加工が安定することが知られて

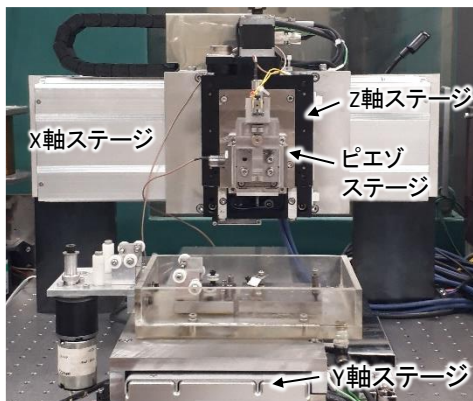


図1 開発した微細放電加工機

いる。また、微細軸加工においては工作物となる微細軸を回転させる必要がある。そこで、本加工機においては、工具電極を高精度に回転可能な機構を搭載した。本装置では高い真円度で加工された工具電極ホルダを上下のV字軸受けにて保持し、モータにより回転させる機構²⁾である。本装置の回転振れは1 μ m以下と極微小となっている。

3. 高抵抗電極を用いた放電加工の原理

微細放電加工においては、微細加工に適した微小エネルギーの放電が容易に得られるため、図2に示すRC放電回路が用いられる。本回路では、抵抗 R （数k Ω ～数十k Ω ）を介してコンデンサ C （数十pF～数千pF程度）に電荷を充電してエネルギーを蓄積し、極間で放電が発生するとそれが放出されて加工が行われる。放電一回当たりのエネルギー E はコンデンサの容量 C と電源電圧 V によりおよそ $E = CV^2/2$ となるため、 C を小さくすることで容易に放電エネルギーを小さくできる。このRC放電回路で最小の放電エネルギーを得たい場合、 C を取り払い、回路配線間や工具電極と工作物などの導体間に自然に生じる浮遊容量（数pF程度）のみで加工を行う。一般的な微細放電加工機においては、浮遊容量を低減させて最小の放電エネルギーを小さくするために、可能な限り導体面積を小さくするという工夫が行われるが、装置の構造上、

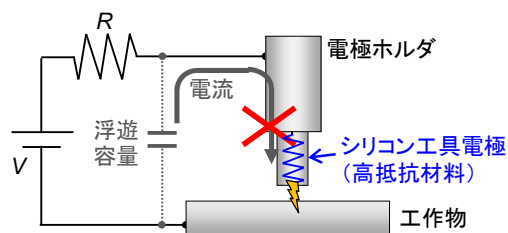


図2 シリコン工具電極による放電電流の低減

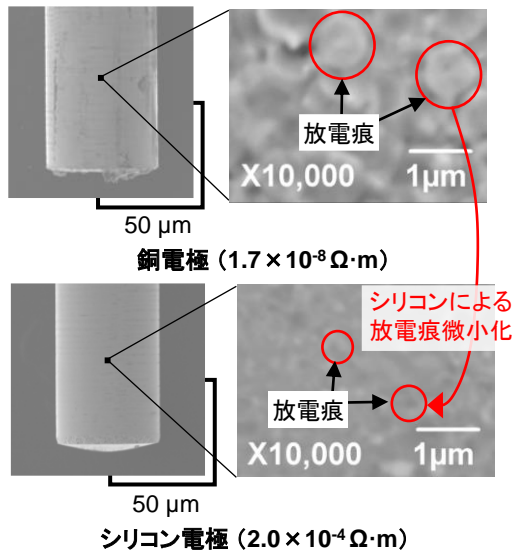


図3 シリコン電極による放電痕直径の微小化

これにも限界があり，筆者らの研究でも最小の放電痕直径は $0.7 \mu\text{m}$ 程度が限界であった．そこで筆者らは，電極材料に半導体である単結晶シリコンなどの高抵抗材料を用い，浮遊容量から流れる電流を低減することで放電エネルギーを従来より微小化した．高抵抗材料を工具電極に用いた場合，図2のように，浮遊容量から流れる電流は高抵抗材料の電極を通過して流れるので，放電電流の電流ピーク値が減少し，パルス幅が長くなる．この場合，放電によって生じたアークプラズマから工作物に流入する熱流束が減少するので，図3のように単位除去量である放電痕直径が減少するという効果が得られる．したがって，工具電極材料に高抵抗材料を用いるだけで，従来よりも微小な加工が容易に可能となる．

4. 高抵抗電極を用いた微細軸の加工

高抵抗電極を用いることで，微細軸の加工を行った．加工方法の概要を図4に示す．本方法ではブロック状の工具電極を用いており，軸状の工作物を回転させてブロック電極に対

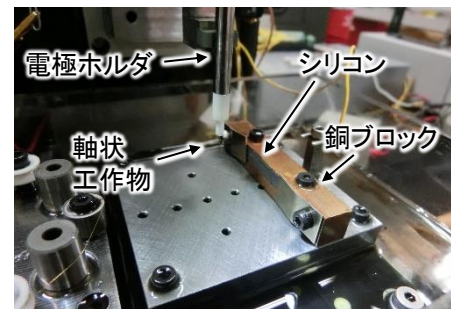
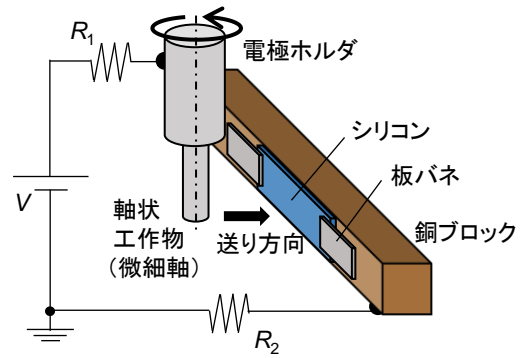


図4 シリコン工具電極による微細軸加工

して水平方向に送りながら放電を生じさせ，微細軸の軸径を徐々に減少させていく．本研究では，銅またはシリコンをこの工具電極として用いる．シリコンを使用する場合には，板状のシリコンを銅ブロックに板ばねを用い固定する．本研究で工具電極として用いる銅は予め研磨加工を行っている．またシリコンは，シリコンウェハを切り出したものを使用し，鏡面部分を加工面としている．銅，シリコンともに，最大高さ粗さ $0.2 \mu\text{m}$ 以下と小さく，ブロック電極の表面粗さが加工に及ぼす影響は小さい．

本方法により加工した微細軸の例を図5に示す．微細軸の直径は $1.5 \mu\text{m}$ 程度である．工作物材料には直径 $300 \mu\text{m}$ の超硬合金を用いている．まず，銅電極を用いて荒加工を行い，直径 $8 \mu\text{m}$ 程度まで加工する．この際の印可電圧は $40 \sim 60\text{V}$ としている．次に，電極をシリコンに変更し，電圧を 40V から 20V まで小さ

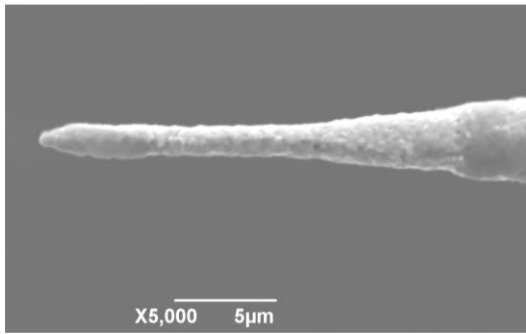


図5 微細軸の加工例

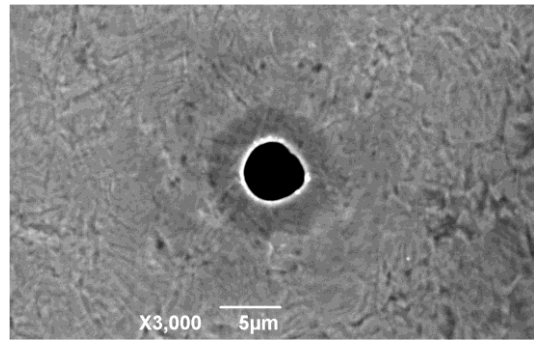


図7 微細穴の加工例

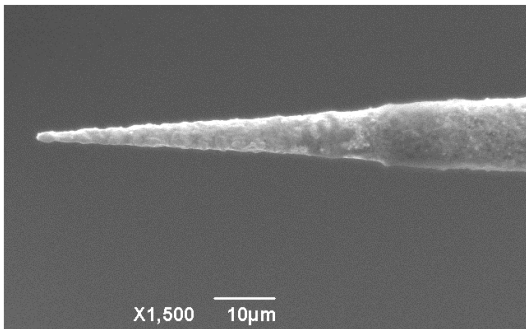


図6 テーパーを有する微細軸の加工例

くしながら複数回の仕上げ加工を行っている。シリコンを工具電極に用いることで放電痕が微小化したため、非常に微小な直径であっても破断せずに加工が行えている。

次に、テーパー状の微細軸の加工例を図6に示す。工具電極である銅とシリコンは加工中に消耗する。このため、送り速度などの加工条件の設定により消耗量を調整することで、図6に示すようなテーパー状の微細軸の加工が行えた。また、放電痕が微小であるので、先端部は1μm程度と非常に微小となっている。

5. 微細軸による微細穴加工

前節で述べたように、シリコン電極を用いることで極微細な軸の加工が可能である。そこで、製作したテーパーのない微細軸を工具電極として用いることで、穴加工を行った。製作した微細軸をそのまま工具電極として用い、同一加工機上で穴加工を行うので、工具

を取付直すことによる振れが発生せずに穴加工を行うことができる。加工した穴を図7に示す。直径が5μm程度の微細穴が加工できている。なお、穴の形状が一部で不均一となっているが、これは放電の集中や、電極の微小な回転振れの影響が考えられる。したがって、更なる高精度化のためには加工条件の最適化や、装置の更なる高精度化が必要である。

6. 走査加工による溝加工

加工した微細軸を工具として用い、これを走査することで溝加工を行った。本加工においては、直径3μm程度のテーパーのない微細軸を加工し、それをZおよびY方向に走査することで溝加工を行った。加工結果を図8に示す。3~4μm程度の溝幅で長さ10μm程度と極微細な加工が行えている。なお、工具電極は図の下から上に向かって走査しているため、工具電極の消耗により溝の上部で溝幅が狭くなってしまっている。より均一な溝幅で加工を行うためには、消耗しにくい条件を用いることや、走査方法の検討が必要と考えられる。

7. 結言

放電加工においては、放電一回当たりの単

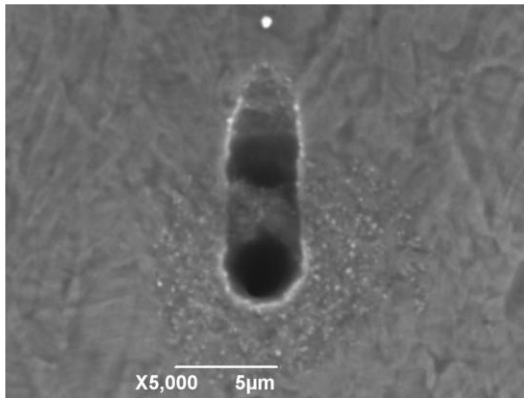


図8 走査加工による極微細溝加工

位加工量である放電痕の大きさが加工可能な最小寸法に大きく影響する。そこで本研究では、工具電極に高抵抗電極を用いることで放電痕の大きさを微小化した。これにより、放電加工の微細加工の限界を更新し、極微細な軸加工やテーパーを有する軸加工を行った。また、製作した微細軸を工具電極として用いることで、極微細な穴加工や溝加工を行うことができた。一方で、加工された穴の形状や

さらなる微細化の実現には課題がある。このため、今後は加工機のさらなる高精度化や、加工条件の最適化による微細化の実現を目指す。

謝辞

本研究を実施するにあたって援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに謝意を表します。

参考文献

- 1) T. Kawakami, M. Kunieda, Study on Factors Determining Limits of Minimum Machinable Size in Micro EDM, Annals of the CIRP, Vol. 54, No. 1, pp. 167-170, 2005.
- 2) 河田 耕一, 佐藤 健夫, 正木 健, 増沢 隆久, 微細放電加工の研究 (第 1 報) 基本性能の実現, 電気加工学会誌, Vol. 28, No. 57, pp. 32-42, 1994.