

平成21年6月15日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686058
 研究課題名（和文） 走査マイクロ放電加工による微細形状創成
 研究課題名（英文） Forming Micro Shape by Scanning Micro EDM
 研究代表者
 谷 貴幸（TANI TAKAYUKI）
 筑波技術大学・産業技術学部・准教授
 研究者番号：80279554

研究成果の概要：任意のスリット間隙を自動的に追跡する微細軸の放電成形法を開発し、微細軸成形の高速化を達成した。300 μ mの直径の超硬を50 μ m(1.5mm)に成形するに要した時間は、3分程度である。また、ツイン電源方式を適用することによって、浮遊容量条件などの仕上げ加工条件での適用も可能となった。この方法により成形した微細軸を用いて、絶縁性セラミックスの微細放電加工を実施し、Si₃N₄セラミックスに対して ϕ 30 μ mの微細穴加工を実現した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2006年度 | 8,500,000 | 2,550,000 | 11,050,000 |
| 2007年度 | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |
| 2008年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,000,000 | 4,200,000 | 18,200,000 |

研究分野：生産工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：微細加工，走査マイクロ放電加工，スリット，絶縁性セラミックス

1. 研究開始当初の背景

近年、医療分野でのナノテクノロジーが重要性を増している。バイオマシンなどが提案され、血管内での癌細胞除去などが将来像として描かれている。しかしながら、現実には、マイクロ領域の世界においても解決すべき多くの課題がある。歯や関節などにおいては、個別の形状を創成するカスタムメイドが必要であり、低侵襲化のための生体適合性を有する超小型機能部品が要求される。

短時間での軸成形，セラミックスなどの機能性材料あるいは高い耐食性，耐摩耗性を持

つ微細形状が容易に成形されれば、生体用マイクロ工具，マイクロマシンの要素部品に活用できる。また，マイクロ加工用工具，微細形状測定用プローブ，マイクロマニピュレーション工具などへの製作においても必須の加工方法になりうる。

形状加工の常套手段として用いられる研削加工は，加工反力が問題となり微細軸の成形は困難である。現状では，数十 μ m程度の軸径の成形が可能となっている。微細加工として代表的な加工法であるエッチングなどは，平面的パターン加工を主としたものであ

り、適用できる材料も限られている。

一方、放電加工法を用いた微細軸形成法として代表的な方法は走行する黄銅ワイヤを工具としたワイヤ放電研削法(WEDG)がある。現在、タングステン素材に対して世界最小レベルの軸径 $2.5\mu\text{m}$ を達成している。この方法は高精度の微細軸が容易に実現できるため、標準手法であるが、成形時間がかかることが問題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、放電加工による微細軸の高速成形および成形軸による機能性セラミックスの微細加工を目的とする。なお、対象とする機能性セラミックスは、絶縁性の材料とする。軸成形速度は、 $300\mu\text{m}$ の軸から数十 μm への成形加工において数分程度を目指す。また、セラミックスの微細加工はシリコンナイトライドセラミックスに対して $50\mu\text{m}$ 以下を目標とする。

3. 研究の方法

微細軸形成、絶縁性セラミックスの微細加工には開発した技術である「スリット間隙追跡走査放電加工法」、「補助電極法」をそれぞれ用いる。

(1) 基本装置の試作

成形した軸の計測を容易にするために、加工機上での微細軸観察、微細軸径計測が可能な微細軸成形用の放電加工機を試作した。図1に試作機の概要を示す。試作機は、XYZ軸により構成し、成形した微細軸の観察、位置決めを容易にするため、ステップングモータにより各ステージを駆動した。なお、極間の制御は、PCにより制御した。加工機正面には、ビデオマイクロスコープを設置し、加工途中あるいは加工後の成形軸の観察を行い、軸径および形状を評価した。

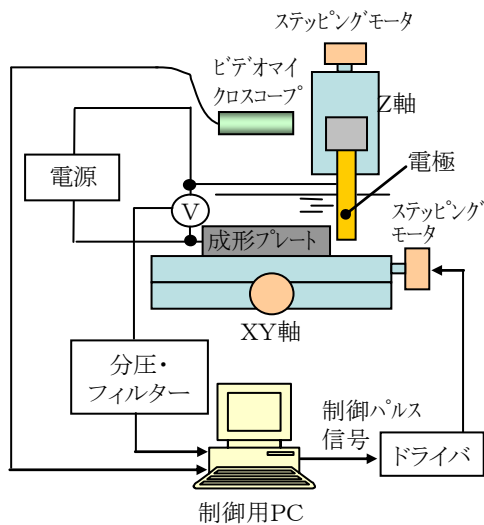


図1 試作した放電加工機の概要

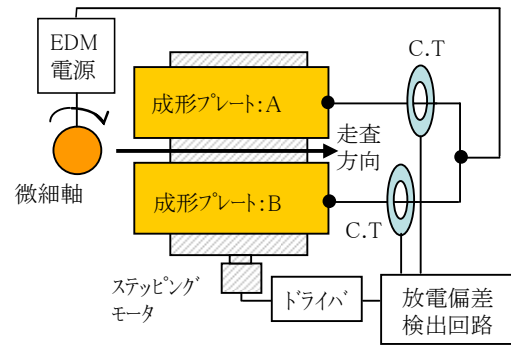


図2 放電偏差比例制御方式によるスリット間中心軌跡追跡加工

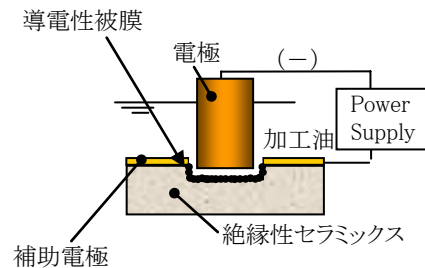


図3 補助電極法

(2) スリット間隙追跡走査放電加工法

図2に装置の構成を示す。電気的に絶縁した2枚の成形プレートを配置して、加工中にA側およびB側での電流を計測し、この計測結果に基づいて常に成形する軸がプレート間を中心に位置するようにY軸を制御した。すなわち、A側への放電の頻度が高い場合には、B方向に移動させ、逆にB側での放電頻度が高い場合にはA方向に移動させる。

(3) 補助電極法

図3に補助電極法による絶縁性セラミックスの放電加工法を示す。加工中は、導電性被膜がセラミックス表面に常時形成され、導電性を維持しながら加工が進行する。

4. 研究成果

(1) 基本特性

図4に加工時間に対する軸径の変化を示す。軸径は、ビデオマイクロスコープで取り込んだ画像から計測した。計測は3箇所から計測した。計測は3箇所から計測した。計測は3箇所から計測した。軸径は加工時間の経過に伴って細線化し、充電抵抗 $0.5\text{k}\Omega$ の条件において、4分程度の加工時間で $300\mu\text{m}$ の直径が約 $30\mu\text{m}$ の微細軸に成形された。成形された軸は、先端部分がさらに細く消耗した形状となった。微細軸の先端部分に加工屑が滞留し、この部分での放電の頻度が高くなったことや加工分担体積の影響が考えられる。

また、軸径が細くなるほど軸直径の減少割

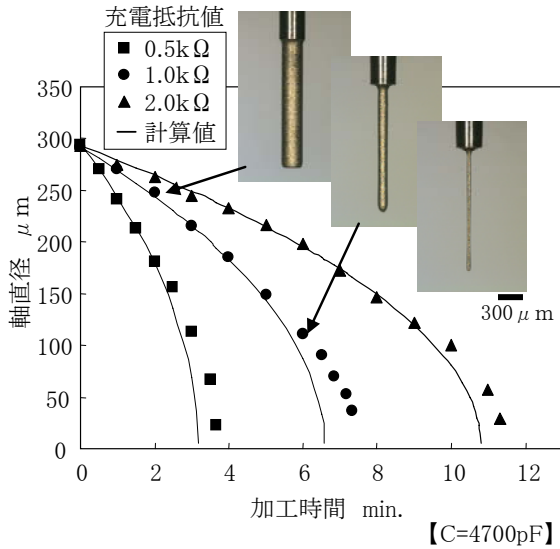


図4 充電抵抗値と微細軸成形の関係

合が大きくなることが確認された。単位時間当たりの除去体積が一定と仮定した場合、軸径と加工時間の関係は(1)式で表せる。

$$r = \sqrt{r_0^2 - \frac{V}{\pi l} t} \quad (1)$$

ただし、 r ：軸半径、 r_0 ：初期の軸半径、 V ：単位時間当たりの除去体積、 l ：軸長さ、 t ：加工時間である。このことから、単位時間当たりの除去体積が一定ならば、時間経過と共に軸径は急激に減少することが分かる。

(2) スリット間隙追跡走査放電加工法

本方法において任意の軸径を得るためには、ある条件下で加工を実施し、加工時間と軸径あるいは走査距離と軸径との関係をデータベース上に構築するなどの手法が考えられる。しかしながら、上述したように軸径が細くなるほど軸直径の減少割合が大きくなり、かつ軸径によって単位時間当たりの除去体積も変化することから、軸径の減少の予測は難しく、所望する軸径で加工を停止することは困難である。

この問題を解決するために、放電電流の計測によって、スリット中心を探索しながら、走査加工を実施する制御方式を試み、この手法の有効性について検討した。

図5に構築した装置(図2)によって、プレート間隙に対する追跡加工を実施したときの走査軌跡を示す。まず、プレートB側で放電が発生し、電極はプレートA側へと移動する。その後、プレート間隙を追跡するように走査放電加工が実行された。この結果より、制御の妥当性が実証された。

この方法により、成形プレートを黄銅とし

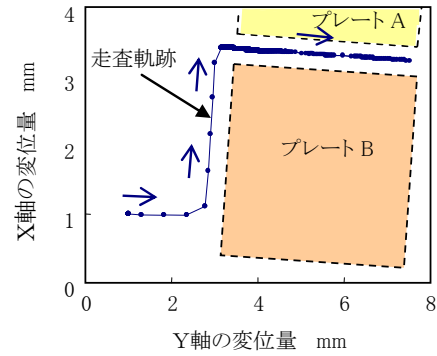


図5 プレート間隙に対する電極走査軌跡

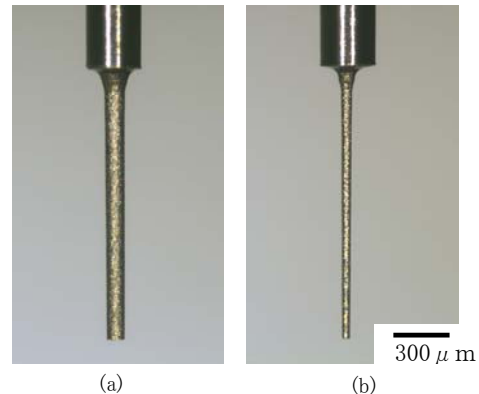


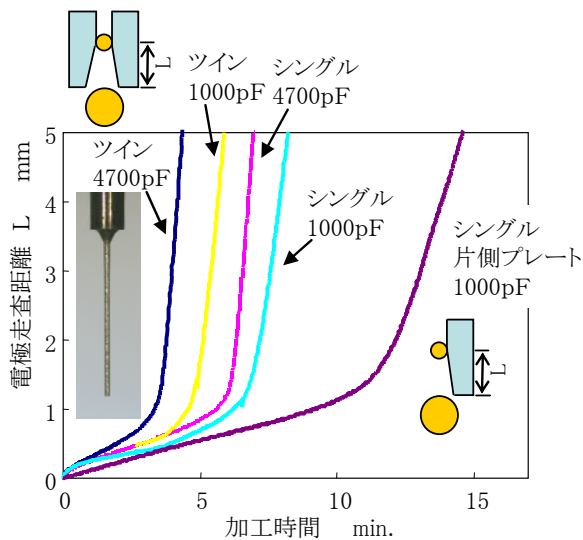
図6 スリット間中心軌跡追跡加工による微細軸加工例
軸径:99 μm 加工時間:5.5分
軸径:48 μm 加工時間:6.5分
【C=4700pF, R=0.5kΩ, 軸長さ:1.5mm】

て100 μm、50 μmの微細軸を成形した例を図6に示す。この方法により、ほぼ目標とする直径の微細軸を成形することが可能であった。放電ギャップを考慮したスリット幅の補正を加えることによって、より目標値に近づくと思われる。加工効率は、走査放電加工法に比べやや低下するが、間隙を有する形状の効果により、走査放電加工時に発生した先端部分の先細りが解消され、真直度の高い軸を得ることができた。

(3) ツイン電源による軸成形の高速化

電氣的に絶縁された2枚の成形プレートにより構成される機構に着目し、加工効率の向上を目的として、ツイン電源方式によるスリット間中心軌跡追跡放電加工法を試みた。単一電源との微細軸成形特性の比較を行い、ツイン電源の効果について検討した。

図7にツイン電源および単一電源における加工履歴曲線を示す。縦軸は、走査方向への変位量、横軸は加工時間である。また、従来まで行われてきた一枚のプレートを用いた放電研削法とも比較した。それぞれ長さφ



【成形軸 $\phi 300 \mu\text{m} \Rightarrow \phi 50 \mu\text{m}$, 1.5mm】

図7 各電源方式と電極走査距離の関係

300 μm の軸を 50 μm に成形した結果である。なお、加工軸長さは 1.5mmである。

一枚のプレートを用いた方法と比較して、単一電源、ツイン電源ともに軸成形速度は大きく向上しており、2枚のプレートを使用する効果が実証された。さらに、ツイン電源を用いた場合には、1000pF および 4700pF の両条件において、単一電源に比べ加工効率は 2 倍程度にまで向上した。この結果は、両側への放電が比較的均一に発生していることを示していると考えられる。特に、図中に写真で示したツイン電源 4700pF の条件では、軸成形に要した時間は約 3 分程度であり、微細軸成形の加工において、極めて効率的な加工が実現したといえる。

これまで、放電電流を検出して追跡制御を実施した。この場合、静電容量が小さい条件あるいは浮遊容量における仕上げ条件においては、電流の検出が困難となる。ツイン電源を用いた場合には、各プレートと電極間において、独立に放電が発生するため、それぞれの極間電圧信号が極間距離の情報となる。

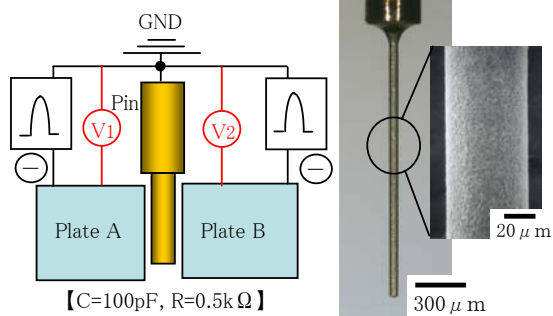


図8 電圧制御によるスリット間隙追跡走査放電加工

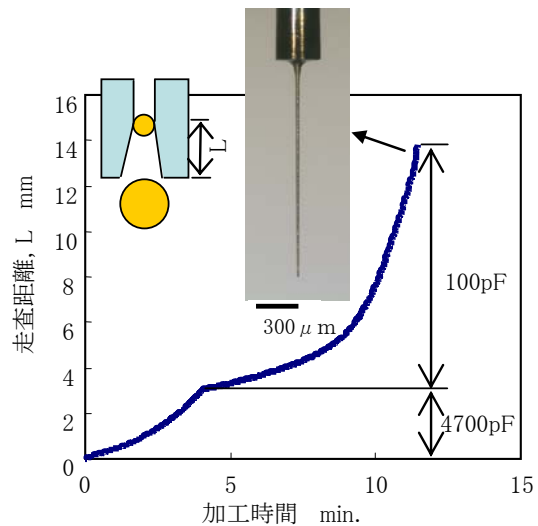


図9 加工履歴曲線

そこで、それぞれのプレートと電極間の平均電圧が一定となるように、追跡制御を実施した。図 8 に装置の構成を示す。また、同図に $C=100\text{pF}$, $R=0.5\text{k}\Omega$ の条件下において、電圧制御方法により 50 μm の微細軸を成形した例を示す。

電圧制御方式によっても、スリット追跡制御は可能であることが確認できた。本手法は、軸の仕上げ加工あるいはより微細な軸の成形において、効果的な方法であると考えられる。また、荒加工としてコンデンサ容量の大きな条件で加工し、その後、コンデンサ容量を小さくすれば、効率的な加工が実現すると考えられる。図 9 に $\phi 500 \mu\text{m}$ の軸から $\phi 35 \mu\text{m}$ の微細軸（軸長さ 1.5mm）を成形した場合の加工履歴曲線を、図 9 に成形した微細軸を示す。本実験での条件の切り替えにおける総加工時間は、12 分程度であった。加工条件の切り替えタイミングの最適化によって、さらに短時間での軸成形が可能であると考えられる。成形された軸の軸長さ／軸直径比は約 40 を達成した。

以上の結果から、ツイン電源方式によって加工効率は向上し、仕上げ加工への適用が可能となった。また、両側放電は加工を安定化させる可能性もあると考えられる。

(4) 絶縁性セラミックスの微細放電加工

図 10 に各電極径における電極変位を示す。加工物は、絶縁性 Si_3N_4 セラミックス、電極条件は電極極性：マイナス、 $C=4700\text{pF}$, $R=1\text{k}\Omega$ である。電極径が大きい場合には、加工が進展しにくい傾向が観察された。電極径 300 μm においては加工開始から数分程度の間で加工の停滞が見られたが、その後加工は進展した。電極径 100 μm では、300 μm の場合に観察された加工の停滞も無く加工が進展した。これらの結果から、 Si_3N_4 セラミック

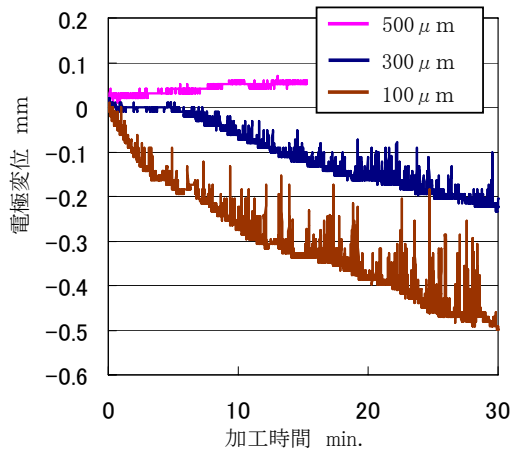


図10 絶縁性セラミックス加工時の加工履歴曲線

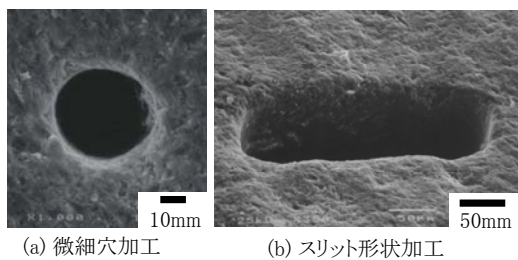


図11 絶縁性セラミックス微細加工

ス加工においては、電極径を小さくすることによって RC 回路でも放電加工が可能となることが明らかとなった。しかしながら、いずれの場合も、加工状態は不安定であり、主軸サーボの高応答化などの対策が必要であると考えられる。

図 11 に絶縁性 Si₃N₄ セラミックスに対して φ 30 μm の穴加工および電極走査によるスリット加工例を示す。φ 30 μm の加工穴の深さは 250 μm 程度である。以上の結果から、絶縁性セラミックスに対する微細加工が可能であることが確認された。

(5) まとめ

- ①電極と成形プレートを対抗して配置し、電極を回転させながら成形プレート側へと走査加工を実施することによって、数十 μm の微細軸の成形が可能である。ただし、任意の軸径を得ることは困難である。
- ②2 枚の電氣的に絶縁されたプレートを用いた放電偏差比例制御方式によるスリット間中心軌跡追跡加工により、任意の軸径の微細軸を成形が可能である。
- ③ツイン電源方式を用いることで、加工効率は向上し、300 μm の直径から 50 μm の微細軸 (1.5mm) の形成の要した時間は 3 分程度である。また、仕上げ条件への適用も可能な電圧制御方式によって、軸長さ/軸直径比 40 の軸成形が可能となった。

- ④絶縁性 Si₃N₄ セラミックスは、電極径が加工特性に大きく影響を及ぼし、電極径が小さい場合に加工が可能となり、φ 30 μm の穴加工が可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①李珠瓊, 後藤啓光, 谷貴幸, 武沢英樹, 毛利尚武, 増沢隆久, ピーリング工具を用いた微細放電加工—ピーリング工具の提案と実加工の試み—, 電気加工学会誌, Vol. 43, No. 102, pp. 9-14 (2009) 査読有
- ②後藤啓光, 谷貴幸, 毛利尚武, 絶縁性 Si₃N₄ セラミックスのワイヤ放電加工特性—導電性被膜の形態と加工特性の関係—, 電気加工学会誌, Vol. 42, No. 101, pp. 137-144 (2008) 査読有
- ③Takayuki Tani, Naotake Mohri, Hiromitsu Gotoh, Sai Haruo, Masaaki Okada, Machining of Insulating Material by EDM with Micro-Pin electrode, Proceedings of the 15th international symposium on electromachining, pp. 257-261 (2007) 査読有
- ④谷貴幸, 後藤啓光, 毛利尚武, 福澤康, 高硬度構造材料の放電加工特性, 電気加工学会誌, Vol. 40, No. 95, pp. 154-161 (2006) 査読有
- ⑤N. Mohri, T. Tani, Micro-pin Electrodes Formation by Micro-Scanning EDM Process, Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, pp. 175-178 (2006) 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ①谷貴幸, 後藤啓光, 桑原吉英, 毛利尚武, 齋治男, 気中走査放電加工による表面改質, 電気加工学会全国大会, 2008. 11. 28, 東京農工大
- ②谷貴幸, 後藤啓光, 梅田和彦, 毛利尚武, スリット間隙追跡加工による微細軸成形および成形軸による絶縁性セラミックスの微細放電加工, 日本機械学会 [No. 08-19] 第 7 回生産工学・工作機械部門講演会, 2008. 11. 21, 長良川国際会議場
- ③谷貴幸, 後藤啓光, 毛利尚武, 齋治男, 走査放電加工による微細軸成形法—スリット間隙追跡走査放電加工法の開発—, 電気加工技術, 2008. 7. 18, 名古屋工業大学
- ④谷貴幸, 後藤啓光, 毛利尚武, 絶縁性セラミックスの微細穴放電加工特性, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2008. 3. 17, 明治大学

- ⑤谷貴幸, 後藤啓光, 李珠瓊, 毛利尚武, スリット間中心追跡マイクロ放電加工法による微細軸成形特性, 電気加工学会全国大会, 2007. 11. 29, メルパルク名古屋
- ⑥谷貴幸, 後藤啓光, 李珠瓊・毛利尚武, 走査マイクロ放電加工による微細軸成形特性ー放電頻度と微細軸成形特性の関係ー, 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2007. 9. 12, 旭川ときわ市民ホール
- ⑦谷貴幸, 後藤啓光, 齋治男, 毛利尚武, 走査放電加工による微細軸成形に関する研究ープレート材料, 電気条件が微細軸成形特性に及ぼす影響ー, 電気加工学会全国大会, 2006. 11. 16, 岡山大学
- ⑧谷貴幸, 後藤啓光, 毛利尚武, 齋藤長男, 走査マイクロ放電加工による微細軸成形, 電気加工技術, 2006. 7. 14, 名古屋工業大学

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 微細軸成形法, この方法により形成させる微細軸, 及び微細軸形成装置

発明者: 毛利尚武, 谷貴幸

権利者: 国立大学法人東京大学, 国立大学法人筑波技術大学

番号: 12/084995

出願年月日: 2008. 5. 14

国内外の別: アメリカ

〔その他〕

①2006 年電気加工学会全国大会賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷 貴幸 (TANI TAKAYUKI)

筑波技術大学・産業技術学部・准教授

研究者番号: 8 0 2 7 9 5 5 4