

平成21年3月30日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2006～2008
課題番号：18560111
研究課題名 (和文)    マイクロ・ナノデバイスの放電・電解ハイブリッド型連続成形法に関する研究
研究課題名 (英文)    A Study on EDM/ECM Hybrid Continuous Machining of Micro-Nano Device
研究代表者            武澤 英樹
工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・准教授
研究者番号：40334148

## 研究成果の概要：

タングステン細線を用いて単発放電を行えば、放電後の電極先端が微細化する現象を見いだしていた。ただし、成形軸の形状精度にばらつきが生じていた。そこで、放電による瞬時成形に引き続いて電解研磨加工により微細軸の成形精度を向上するシステムを構築した。最終的に、同一機械上で連続処理が可能になり、軸精度を向上することが可能となった。さらに、成形した微細軸を用いて同一機械上で微細穴加工も可能であることを確かめた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	1,200,000	0	1,200,000
19年度	1,100,000	330,000	1,430,000
20年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産加工・加工学

キーワード：特殊加工

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、微細軸などのマイクロ・ナノデバイス、あるいはそれらを大量に配置したマイクロアレイを安価・大量に成形し、例えば電界放出型ディスプレイの量産や携帯端末用小型ディスプレイの性能向上をねらいとしている。また、マイクロ・ナノデバイスのみならず微細プローブの安価・大量成形によりプローブ顕微鏡など精密計測機器の性能向上も対象と考えている。

これらを達成するためには、マイクロ・ナノデバイスを大量に成形する手法の確立が必須である。それに対して研究代表者は、これまでに単発放電を用いた微細軸の瞬時成

形法を見出し、成形条件と成形軸の関係や形状計測用のプローブとしての適用について研究を進めてきた。これまでの成果より、直径 25 $\mu\text{m}$  程度、長さ 300 $\mu\text{m}$  程度の微細軸が成形時間数百 $\mu\text{s}$  で成形されることがわかっている。しかしながら、同一放電条件で微細軸を成形しても、成形される軸直径や長さが数～数十 $\mu\text{m}$  の範囲でばらつき、さらに軸芯のぶれも存在する。成形時間が極短時間ではあるがマイクロ・ナノデバイスとして利用するには精度的に不十分である。そこで、本研究では単発放電後の微細軸形状の精度を向上させるべく連続的な処理を施すシステムを構築することが考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究では、単発放電後の微細軸成形精度の向上と瞬時大量成形のために、単発放電と電解研磨加工を組み合わせたハイブリッド型複合加工を用いて、マイクロ・ナノデバイスの大量成形システムを開発することを目的とする。開発するシステムは以下の4つのパートから成り立つ。(1)単発放電を利用した微細軸の瞬時成形を連続的に行える連続成形装置の開発、(2)電解研磨加工を用いて、成形軸の形状を仕上げるための電解条件の検討、(3)電解加工による形状制御のための主軸制御機構の検討、(4)同一機械状での一連の処理および加工が可能なシステム化である。

## 3. 研究の方法

本研究を完成させるために、目的にあげた4つのパートを具体的に進める。

### (1) 放電による複数本連続成形システム構築

1本の電極で単発放電を行い軸先端を微細化するための電気条件は、これまでの研究成果で明らかとなっている。そこで複数本電極を保持して連続的に放電を発生させ、瞬時に大量の微細軸を成形するシステムを構築する。準備段階に行った予備実験の結果をもとに、主軸制御の容易な主軸を固定して(電極と相手材料の極間距離を数 $\mu\text{m}$ に固定して)パルス電圧を連続的に印加して順次放電をさせる手法を検討する。

主軸を固定してパルス電圧の印加により放電を連続的に発生させるためには、各電極長さが数 $\sim$ 十 $\mu\text{m}$ 程度に揃っている必要がある。予備実験で放電ドレッシング法により電極長さを揃えることで、連続的に放電を発生させることが可能との知見が得られているため、最適ドレッシング条件の選定を行う。当初は電極を3本保持できるホルダを試作し電極ドレス実験を進める。ドレス時の放電条件および相手材料の揺動速度の影響を調べる。ドレス時は、主軸のマイクロメータヘッドを手動で上下させて放電を発生させる手動サーボで対応する。これも、事前の実験から対応可能であることを確かめている。ドレス後の各電極長さのバラツキやドレス時間を調べ、最適なドレス条件を選定する。電極長さのバラツキは、理想的には3 $\sim$ 4 $\mu\text{m}$ 程度が望ましいが、10 $\mu\text{m}$ 程度までは許容できると考えられる。これは、印加電圧100Vから200V(既設:菊水電子工業, PMC350-0.2A)へ変更することで、10 $\mu\text{m}$ 程度の極間距離でも絶縁破壊しうるためであり、電極長さのバラツキによっては印加電圧を変更して連続的にパルス電圧を入力する。さらに、入力する連続パルス電圧の休止時間を変化させてその影響を調べる。休止時間が短いと前の放電の影響で絶縁破壊しやすいことやし難いことが考えられ、休止時間を変化させて最適

な連続パルスの入力条件を調べる。

### (2)電解研磨加工における電解条件の検討

微細軸に対して電解研磨処理が可能な装置の設計と試作を行う。電極ホルダは回転数を制御可能とし、将来的に複数本の処理への拡張を検討する。電解研磨用の電源には、当初は放電加工用の直流電源を流用する。電解研磨装置の試作ができしだい、電解研磨実験を行い、加工条件と加工量および電解研磨用電極の最適形状設計を行う。当初は円筒型電解研磨用電極でタンゲステン細線電極に対する研磨加工を行う。放電瞬時成形する前の丸棒形状を鋭く研磨するまでの加工時間のデータベースを作成する。次に、放電瞬時成形した微細軸に対して同様の実験を行い、微細軸を鋭く成形できる最適条件の選定を行う。電流密度が電気条件で決まれば、加工時間で加工量を制御できるが、電極元形状と加工形状の変化、加工の進行にともなう陽極酸化被膜による影響などを調査する。

### (3)電解加工による形状制御のための主軸制御機構の検討

放電により瞬時成形された微細軸を所定の形状に電解加工で仕上げるためには、電解加工用の電極形状と電解条件が重要となる。一般的な電解加工においては所定の仕上げ形状に対応した電極形状を作製しておき、電解加工により電極形状に倣った形に仕上げる。しかしながらこのような方法では、1つの形状に1つの電極が必要になり様々な微細軸を仕上げるにはフレキシブル性に欠ける。そこで、本研究では1種類の電極で各種形状(直径、長さ)の微細軸が成形できることを目指す。そのために、平板電極に穴を開けた電極を用い、その中心部に電解加工する軸を挿入して上下に動かすことにより軸方向の電解加工量を制御する。主軸の上下動を連動させることで軸長手方向の形状も制御する手法を検討する。そのための装置の試作と電気条件と加工形状の相関を明らかとして任意形状を仕上げるためのデータベースを構築する。

### (4) 同一機械状での一連の処理および加工が可能なシステム化

(1) $\sim$ (3)で示した各要素技術を確立したのち、それらを組み合わせた放電マイクロマシニングセンタの構築を目指す。微細軸の成形には、図1に示すような加工槽の入れ替えを行い、放電と電解を使い分ける。このとき、単発放電による瞬時成形後の成形形状を計測し、電解加工により加工量を設定するために机上形状計測装置を用いる。具体的には画素数200万画素のデジタル顕微鏡を搭載し、画像処理により形状把握を行う。

さらに、成形された微細電極を保持したまま、微細放電加工あるいは電解加工を行えるよう、主軸のサーボ機構を追加する。電解加工の場合は通常一定速度で、下方に電極を送り込む場合が多く、主軸制御も容易である。ただし、電極と工作物が接触した短絡現象の場合は、電極を上方に待避させる動作が必要である。それに対して、微細放電加工の場合、電極と工作物の極間距離が短いため微小な電極位置制御が必要となる。本試作機においても、一般的な放電加工の主軸制御である平均極間距離制御を用いる。当初は、微細な穴あけ加工を行い、その後 X-Y ステージを用いた 3 次元加工のトライを行う。

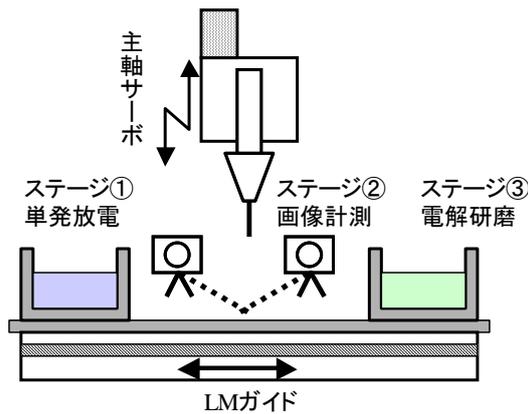


図1 ハイブリッド型複合加工システムの概略

#### 4. 研究成果

はじめに、単発放電による微細軸瞬時成形により連続的に成形するシステムとして、9 電極保持ホルダを試作し、各種手法により連続的な成形を試みた。試作したホルダ部を図 2 に示す。ホルダ部に給電線を配線して連続 9 発のパルスを印可することで、各電極に連続的に単発放電を発生させるためには、9 本の電極長さ（極間距離）がほぼ同じ程度である必要がある。そこで、瞬時成形前の前処理としてダミーワークに対して電極有消耗条件にて放電ドレス成形を行い、電極長さをそ

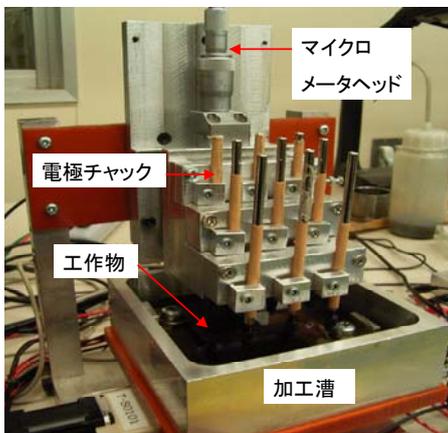


図2 9本電極ホルダとドレス装

ろえた。ドレス条件を 2 段階に設定することで電極長さのばらつきを  $15\mu\text{m}$  程度以下に抑えることができた。結果を図 3 に示す。ドレス条件によっては、 $20\mu\text{m}$  以上のばらつきになる場合があり、その場合、印可電圧 100V では 9 本連続的に放電が発生することは困難であった。

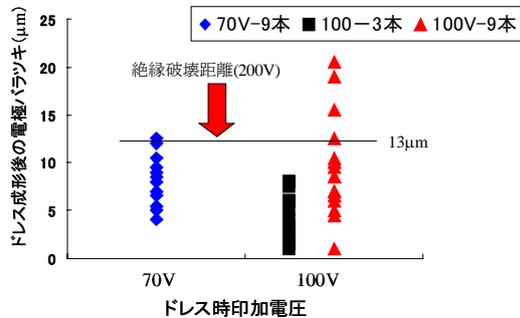


図3 ドレス成形後の電極長さのばらつき

放電ドレス成形により、各電極長さをそろえた状態で、印可電圧 200V、電流値 40A、パルス幅  $440\mu\text{s}$ 、各パルスの発生間隔（休止時間）50ms にて連続 9 発の瞬時成形を行い、各電極で瞬時成形が可能なが確認された。休止時間が短いと成功確率が低いこともわかった。

次に、瞬時成形した微細軸の電解加工条件の選定を行った。各種微細軸形状に対応するため専用電極を準備するのではなく、単純電極を用いて電気条件あるいは微細軸の主軸方向の運動制御により微細軸形状を制御する。その際使用する単純電極形状として、薄板に穴を開けた電極を検討した。銅材の板厚、穴直径を変化させ直径 1mm のタングステン

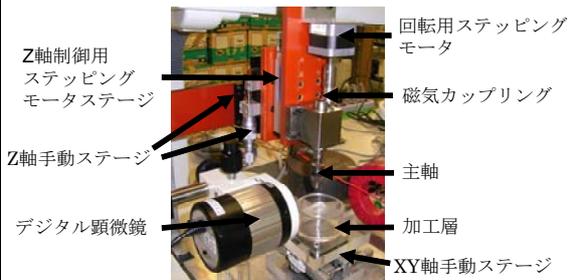


図4 電解加工装置

ロッドの電解加工状態を比較した。電解加工には電極の回転装置が必要になる。電極回転機構および主軸制御機構を備えた電解加工試作器を図 4 に示す。

図 4 の装置を用いて、単純電極形状を比較する実験を行った。表 1 に電解加工条件を示す。ただしこのとき、予備実験により銅薄板に穴加工を施した電極を使用した場合、銅箔上下面からも電荷の移動が発生して、穴部位における対向部のみで加工が進行せず、形状制御が困難であった。そこで、銅薄板を液状コーティングゴムで覆い、その後穴加工を施

した。

工具電極の形状は、表1の◎の9条件を比較した。工具電極の影響を調べるために、Z位置を固定しWロッド(φ1.0mm)を回転(134rpm)させた。加工時間は10分である。電解条件を表2に示す。加工を2分ごとに止めWロッドを引き上げ、デジタル顕微鏡で加工状態を撮影し観察した。各工具電極による加工形状の比較を行うために、10分加工後の形状における最小軸直径と軸長手方向の加工部長さを比較した。図5に結果を示す。図5より、同一板厚の場合穴直径が大きくなると軸方向の加工量は減少し、長手方向の加工量が多くなる。一方、同一穴直径で板厚を厚くすると軸方向と長手方向の両方の加工量が増加する。成形形状を精密に制御するためには、軸直径方向および長手方向それぞれで加工範囲が少ない方が良い。これより、以後の実験では板厚0.03mm、穴直径1.2mmの工具電極を用いることとした。

次に、Z軸の送り速度を制御することにより各部位における軸直径を変化させ、形状制御することを試みた。Z軸制御には計測・制

表1 各種工具電極形状 表2 電解加工条件

厚さ mm	穴直径 mm		
	1.2	1.6	2
0.03	◎	◎	◎
0.05	◎	◎	◎
0.1	◎	◎	◎

工作物(+)	タングステンロッド
工具電極(-)	銅(穴加工)
電解液	KOH(5%)
パルス幅	100μs
デューティー比	50%
挿入抵抗	1Ω
電圧	20V
回転速度	130rpm
加工時間	20min

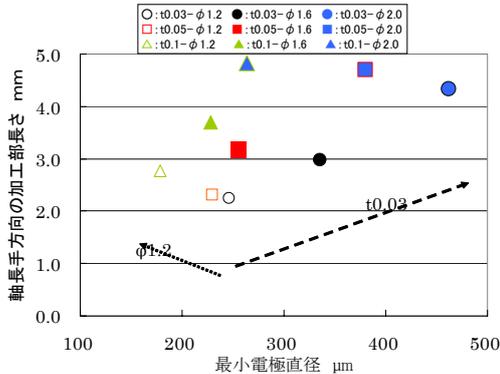


図5 各種工具電極による加工形状

御用ソフトであるLabVIEW(National Instruments社製)を用いた。形状制御の基礎実験として、直径1.0mmのWロッドと、穴直径1.2mmの工具電極を用いた。目視にて穴中心にWロッドを配置し、下方に5mm送るまで電解加工を行った。送り速度のパターンを3種類変化させた。A)200μm/min一定、B)前半162μm/min、後半261μm/minの2段階変化、C)前半261μm/min、後半162μm/minの2段階変化(Bの逆)の3条件である。電解加工条件は表2、加工時間は

20分である。電解加工後の電極形状写真を図6に、先端からの軸直径の変化を図7に示す。A)は送り速度が一定であるため電極直径に変化は無くほぼストレートに加工されている。B)は前半の送り速度が遅いため、先端部は軸直径が細くなり、根元側は送り速度が速いため太くなる。C)の送りはB)の逆であるため、軸直径の傾向も逆になる。ただし、C)の場合軸直径は明確に2段階に分かれてはいなく、なだらかに軸直径が変化している。これは、軸先端側を早い送り速度で移動すると端面の影響があるためと考えられる。また、3タイプとも軸根元側(図中横軸4mm~5mm)での軸直径変化はほぼ同様であり、使用した工具電極の板厚および穴直径の影響が考えられる。

試作したハイブリッド型卓上加工機により、直径0.1mmのタングステン電極を用いて微細軸瞬時成形を行い、引き続きZ軸送り制御による電解加工を行った。単発放電条件

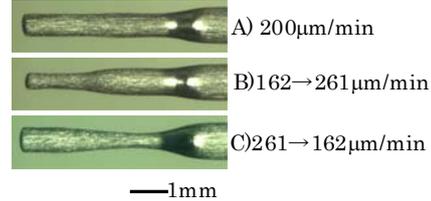


図6 Z軸制御による電解加工後のWロッド形状

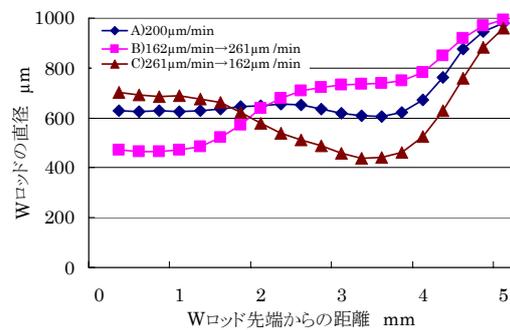


図7 Z軸制御による電解加工の結果

は電流値40A、パルス幅400μsである。電解加工条件は表2の通りであり、加工時間は40秒程度である。送り速度を開始から200μm送るまで1200μm/min、200μmから300μm送るまで210μm/minとした。図8にA)瞬時成形後およびB)ハイブリッド型成形微細軸の機上観察写真を示す。単発放電後の微細軸直径40μmが20μm以下に微細化されており、さらに振れまわり精度も向上していた。さらに、A)の微細軸の溶滴部分が全て溶出しており、テーパ形状へ加工可能である。

また、ハイブリッド型成形微細軸を用いて、板厚0.05mmの銅箔に対して微細放電穴加工を行った。微細放電加工にはコンデンサ放電回路を用いており、電気条件は印加電圧100V、50pFである。穴加工の結果を図9に示す。加工穴は放電クリアランスを含め30μm程度である。

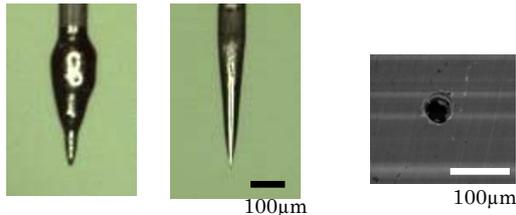


図8 A)瞬時成形微細軸 B) Z軸制御による電解加工後の微細軸形状  
図9 ハイブリッド型成形微細軸を用いた穴加工

図8, 図9に示すように, 微細軸瞬時成形後に電解加工を連続的に施すことにより, 微細軸形状を制御できるようになり, また同一機械上で成形した電極を用いて微細穴加工を実現でき, 当初の目的であった微細軸のハイブリッド型連続成形システムを構築することができた。

## 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 2 件)

Hideki TAKEZAWA, Naotake MOHRI, Kouhei ASANO, Yasunori KODAMA : Development of Micro electrical Discharge Machine, Int.J of Automation Technology, Vol.2, No.2(2008)pp. 124-130

Hideki TAKEZAWA, Hirotaka KOKUBO, Naotake MOHRI, Kenichiro HORIO, Daisuke YANAGIDA, Nagao SAITO : A Study on Single Discharge Machining with Low Melting Temperature Alloy, Proceedings of the 15th International symposium for Electromachining(ISEM XV), (2007)pp.69-74

[学会発表] (計 6 件)

武澤英樹, 低融点合金を用いた単発放電に関する研究 (第 13 報) - 短距離間の違いによる気泡挙動と放電痕除去量の関係 -, 2008 年精密工学会学術講演会秋季大会, 2008 年 9 月 17 日, 東北大学

武澤英樹, 低融点合金を用いた単発放電に関する研究 (第 12 報) - 気泡形状と放電痕除去量の関係 -, 2008 年精密工学会学術講演会春季大会, 2008 年 3 月 17 日, 明治大学生田校舎

児玉保則, 武澤英樹, 放電・電解ハイブリッド型微細軸成形システム, 2007 年度電気加工学会全国大会, 2007 年 11 月 28 日, 名古屋市メルパルク名古屋

児玉保則, 武澤英樹, 放電マイクロマシニングセンタの

開発—放電・電解ハイブリッド型微細軸成形システム—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2007 年 5 月 11 日, 秋田市・拠点センターALVE

柳田大祐, 武澤英樹, 低融点合金を用いた単発放電に関する研究 (第 11 報), 2007 年精密工学会学術講演会春季大会, 2007 年 3 月 20 日, 芝浦工業大学

柳田大祐, 武澤英樹, 低融点合金を用いた単発放電に関する研究 (第 10 報), 2006 年度電気加工学会全国大会講演論文集, 2006 年 11 月 16 日, 岡山大学

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏名: 武澤 英樹

所属研究機関: 工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・准教授

研究者番号: 40334148