

# 放電加工による微細・特殊形状加工に関する研究

城門由人

生産技術部

## Study of Machining Techniques in SEDM

Yukihito KIDO

Production Engineering Division

### 要旨

金属の高精度な切断加工を行うワイヤ放電加工法を3次元の立体部品の作製に応用する放電軸加工法 (SEDM: Shaft Electrical Discharge Machining) の実用化に向けた技術開発を行った。放電軸加工法は、回転する円柱状の工作物に対し、ワイヤ放電加工を実施することで回転体部品を作製する技術である。放電軸加工を実施するためには、ワイヤ放電加工機と放電軸加工装置が必要である。放電軸加工装置は、汎用のワイヤ放電加工機の加工槽内に固定され工作物を回転する駆動部と工作物の回転制御を行うコントローラーから成る。これまでに開発した放電軸加工装置は、工作物を一定速で回転させる機能しか有していなかったが、新たに角度割り出し機能を付加することで多角形体部品の作製に対応できるようにした放電軸加工装置を開発した。本報では、角度割り出し機能付きの放電軸加工装置の概要、ならびに、放電軸加工法の適用事例について報告する。

### 1. はじめに

機械製品の高性能化に伴い、機械部品の高精度化・高精密化が求められており、加工技術や材料開発面からのアプローチが進んでいる。機械部品に対する要求は、加工技術にとってより高い技術レベルを要求する方向に進んでいるのが実状である。精度維持や耐久性の面から材料は硬化傾向にあり、加えて、部品形状の微細化、複雑化のため加工難易度が増している。

本研究で確立した放電軸加工法は、旋削加工技術の代替加工法として高硬度材料の形状加工や軟質材料の微細加工に適用できる。この技術は、旋削加工の刃物工具をワイヤ放電加工の電極ワイヤに置き換える技術であり、ワイヤ放電加工の高精度加工技術を旋削加工に応用できる。<sup>(1)</sup>

放電軸加工法の最大の特長は、半径比の大きな加工が非常に効率的に実現できることである。例えば、直径10mmの円柱状材料を直径0.1mmの微細軸へ切削加工する場合、通常であれば適当な切込み量で数回に分けて直径を小さくする繰り返しの加工作業となる。また、直径0.1mmのような微細な加工は極めて困難である。一方、放電軸加工法では、直径0.1mmの軸が得られるように電極ワイヤをオフセット（工作物の回転中心からの要求半径と放電ギャップ量の和）し、直線的に加工することで1パスで加工が完了する。また、任意の形状においても形状の片輪郭に沿って電極ワイヤを移動させることによ

り1パスで要求形状を得ることができる (Fig.1)。<sup>(2)</sup>

放電軸加工法は、ワイヤ放電加工技術がベースとなるが、その加工機は汎用モデルでよい。本研究で開発した放電軸加工装置をワイヤ放電加工機にセットすることで容易に技術導入が可能である。<sup>(3)</sup>

本報では、放電軸加工法の実用化に向け新規に開発した角度割り出し機能付き放電軸加工装置および生産の効率化のための機上計測システム、放電軸加工法により作製した微細軸電極による燃料噴射ノズルの加工事例について報告する。

### 2. 放電軸加工法

本研究で開発する放電軸加工法は、金属を高精度に切断加工するワイヤ放電加工法を3次元の立体部品の加工に応用する技術である。汎用のワイヤ放電加工機に放電

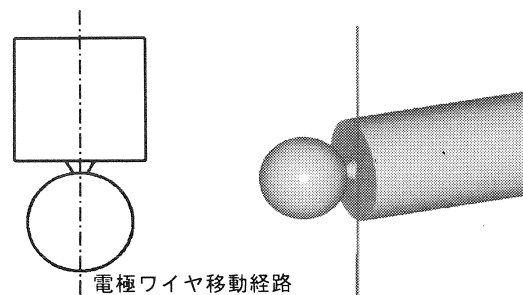


Fig.1 放電軸加工時の電極ワイヤ経路

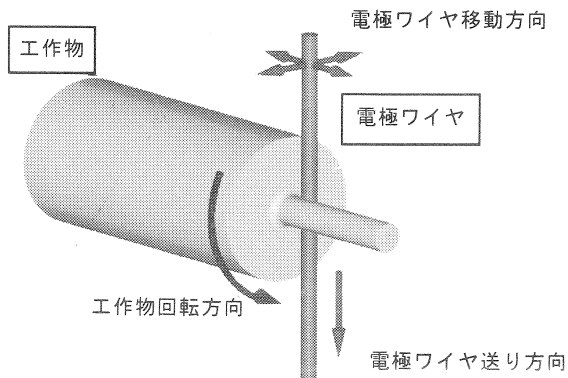


Fig.2 放電軸加工法加工概念図

軸加工装置をセットすることで容易に実現できることが特徴である。ワイヤ放電加工機の加工槽内にセットした放電軸加工装置に円柱状の工作物を固定し、1200rpm程度で回転する工作物に対し通常のワイヤ放電加工するものである。Fig.2に概念図を示す。

本報では、放電軸加工法の実用化に際し、これまで回転体のみの加工に対応してきた本技術を多角形体に応用するために開発した角度割り出し機能を付加した放電軸加工装置、ならびに、微細加工時に不可欠な机上計測システムについて報告する。

### 2.1 角度割り出し機能付き放電軸加工装置

放電軸加工法は、回転体の加工技術として開発を推進してきた。本研究では、放電軸加工法の基本技術である放電加工の特徴をさらに生かし、多角形体部品の作製技術への応用について検討した。放電加工法は、工作物が運動・静止状態のどちらでも形状加工が行えることから回転運動に角度割り出し機能を与えることで多角形体への応用が可能と判断し、回転角度制御機能を有する放電軸加工装置を開発した。

角度割り出し機能付き放電軸加工装置の概観を Fig.3 に示す。この装置は、ワイヤ放電加工機の加工槽内で工作物を回転させる駆動ユニットと工作物の回転を制御するコントローラーから成る。駆動ユニットのサイズは、175×190×57.5mmである。

駆動ユニット内には、工作物を保持する保持シャフト(Φ20mm)、保持シャフトを固定するベアリングユニット、回転制御用ブラシレス DC モーター (出力 15W)、保持シャフトの回転状態をモニタするロータリーエンコーダーが配置されており、それぞれをタイミングベルトで連結している (Fig.4)。

コントローラーには、ブラシレス DC モーター用のドライバ、回転数表示ユニット、回転数調整つまみ、回転 ON/OFF ボタン、回転制御ユニット (カムポジショナ)、

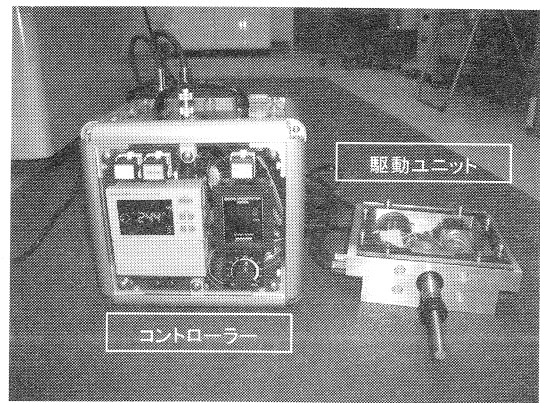


Fig.3 角度割り出し機能付放電軸加工装置

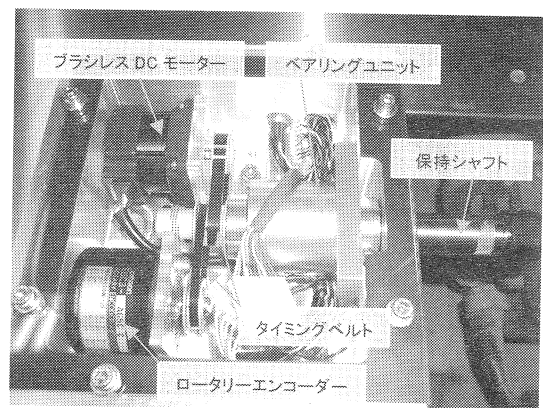


Fig.4 駆動ユニット

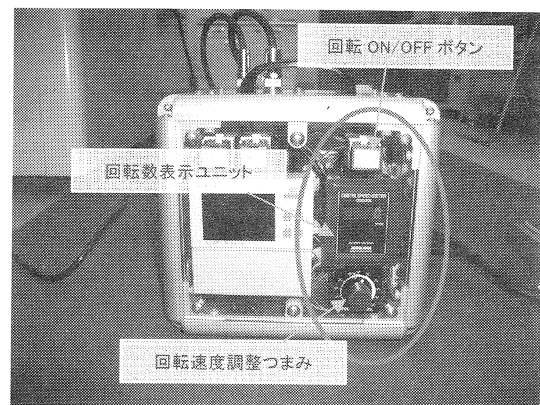


Fig.5 回転体加工時のコントローラー設定  
(回転速度コントロール可)

角度割り出しボタン、回転制御ボタンおよび主電源ボタンが装備される。

回転体加工時は、工作物を約 1200rpm で定速回転させるためブラシレス DC モーターの回転 ON/OFF および回転数コントロールの制御となる。この場合、コントローラーの回転 ON/OFF ボタンおよび回転数調整つまみによる操作となる (Fig.5)。

角度割り出しによる加工を行う場合は、コントローラーの角度割り出し機能を ON にする。駆動ユニットに配置されたロータリーエンコーダーから保持シャフトの運動状態が回転制御ユニットにフィードバックされ回転制御ユニットからモーターに回転・停止信号が発信される。例えば、任意に設定した回転原点 ( $0^\circ$ ) から指定角度で停止させたい場合は、停止角度を回転制御ユニットに入力するだけで  $0.5^\circ$  ピッチで回転制御できる (Fig.6)。角度割り出し中であっても回転 ON/OFF ボタンは有効であり、回転・停止を指令できる。

角度割り出し機能作動時、回転速度は常に割り出し速度で運動し、保持シャフトの角度位置が回転原点から指定角度間にある場合にのみ指定角度まで回転運動する。したがって、保持シャフトが指定角度に達している場合および指定角度を超えた位置にある場合には運動しない。このような角度位置に保持シャフトがある場合は、回転制御ボタンを ON にすることで角度割り出し速度で回転運動させることができる。回転制御ボタンは、角度割り出し機能有効時にのみ有効になる。

## 2.2 機上計測システム

微細加工を実施する場合、加工機上で形状計測できることは生産の効率化を図る上で極めて有効な手段である。例えば、放電軸加工法で直径  $60\mu\text{m}$  の微細軸の加工を実施した際、作製した軸が実際に要求寸法となっているかを確認するためには工作物を加工機から取り外し、計測器 (工具顕微鏡など) で形状計測する必要がある。仮に、要求形状が得られていない場合は、再度加工の段取り (加工の前準備) からやり直しとなり、非効率である。この問題が機上計測システムの導入により大幅に効率化できる。上述の形状確認を加工機上で行うことにより、計測器への移動がなくなるため、再加工が必要となった場合でも、段取り作業や前加工が排除できる。

機上計測システムは、測定部および画像計測ソフトから成る。測定部は、200 万画素の CCD カメラに 100 倍、200 倍のレンズが取り付けでき、かつ、ワイヤ放電加工機の加工ヘッドにマグネットスタンドで固定できる小型軽量の測定装置である。形状計測の手順は、測定部で撮影された画像を PC に読み込み、画像計測ソフトでの計測となる。

Fig.7 は、測定部をワイヤ放電加工機に固定した様子である。測定位置の割り出しは、ワイヤ放電加工機の加工ヘッドの移動により行う。当センターのワイヤ放電加工機では  $1\mu\text{m}$  ピッチである。

Fig.8 は、画像計測ソフトによる形状計測の様子である。2 点間距離計測、任意の基準線と任意点の垂線距離などの画像計測機能により形状計測する。

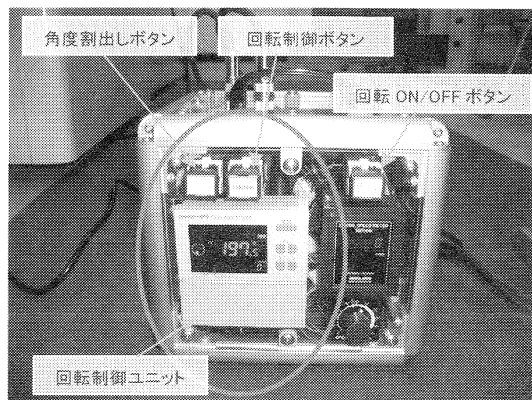


Fig.6  $0.5^\circ$  ピッチの回転制御  
(回転制御ユニットによる設定)

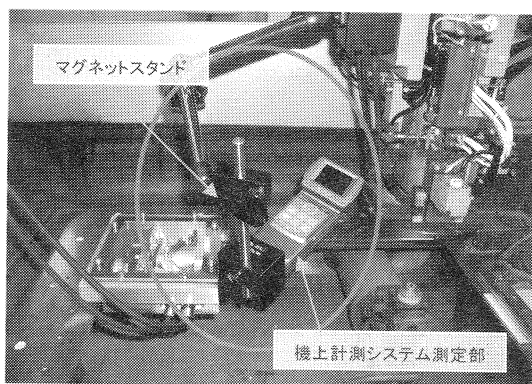


Fig.7 機上計測システム  
(測定部をワイヤ放電加工機にセットした様子)

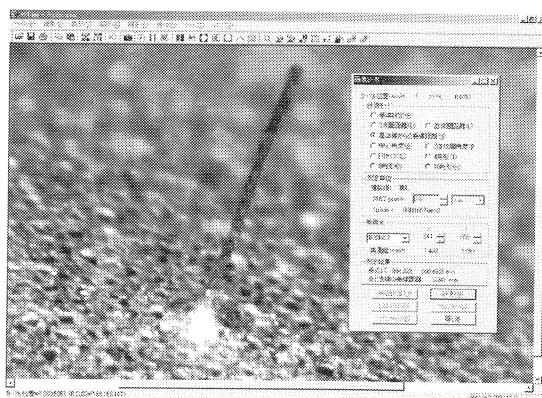


Fig.8 機上計測システム  
(画像計測ソフトによる形状計測)

## 3. 適用事例

放電軸加工法のジェットエンジン用燃料噴射ノズル加工への応用事例について報告する。実験段階であるジェットエンジン用燃料噴射ノズルの加工を放電軸加工法で

作製した直径  $60\mu\text{m}$  の微細軸電極を用いて実施した。要求形状は、直径  $0.1\text{mm}$  以下の貫通穴で、加工部位は燃料噴射弁先端（外径  $5.92\text{mm}$ ）の円周上に  $90^\circ$  ピッチで 4 箇所であった。貫通部の管厚は  $0.46\text{mm}$  であった。

### 3.1 直径 $0.1\text{mm}$ 穴加工

放電軸加工法で作製した直径  $60\mu\text{m}$  の微細軸電極を用いて微小な穴加工を行った場合、板厚  $0.2\sim 0.3\text{mm}$  の SUS304 薄板でおよそ直径  $0.1\text{mm}$  の貫通穴加工ができることを把握していた。しかしながら、板厚  $0.3\text{mm}$  以上についてはデータが無かったため予備実験を行った。予備実験の目的は、実加工部の管厚  $0.46\text{mm}$  を加工した場合に得られる穴直径の把握、および、確実に貫通穴を加工するために必要な微細軸電極の全長の把握であった。実加工時の管厚  $0.46\text{mm}$  に安全率を考慮して、板厚  $0.3\text{mm}$  の SUS304 薄板を 2 枚重ねにしたものに対し予備実験を実施した。微細軸電極は、直径  $60\mu\text{m}$  とし、長さ  $2\text{mm}$  と  $4\text{mm}$  を準備した。

長さ  $2\text{mm}$  の微細軸電極を使用し、穴加工の追い込み深さを  $1.5\text{mm}$  とした場合、上部の  $0.3\text{mm}$  の薄板は貫通したが、下部の薄板に対しては加工できなかった。長さ  $4\text{mm}$  の微細軸電極を使用し、穴加工追い込み深さを  $3.5\text{mm}$  とした場合、上下の薄板に貫通穴を作製できた。同条件で繰り返し穴加工を実施することで再現性を確認した。注意すべき点は、微細軸電極の消耗量がすべて異なっていたことである。電極長、加工条件、加工板厚はすべて同じであった。この要因として、設定していた穴加工条件が微弱な電流・電圧値であるため加工電源が制御しきれていなかったこと、放電軸加工法で作製した微細軸電極の僅かな傾きが加工面積を増大させ結果的に消耗が増加したことが考えられる。後者については、加工で得られた穴形状および加工時間からおおよそ判断できた。いずれの場合も貫通穴の加工に要した時間は、 $1\sim 2$  分であった。

直径  $60\mu\text{m}$ 、長さ  $4\text{mm}$  の微細軸電極を Fig.9 に示す。

Fig.10 は、厚さ  $0.3\text{mm}$  の SUS304 を 2 枚重ねて貫通穴加工により得られた穴の貫通（出口）側の拡大写真である。上部薄板の入口で直径  $0.2\text{mm}$ 、出口で直径  $0.1\text{mm}$ 、下部薄板の入口で直径  $0.1\text{mm}$ 、出口で直径  $60\mu\text{m}$  であった。これらの直径変化に対しては、加工が進行するに従い消耗により電極自身の直径が減少し、電極の長さ方向の消耗により微細軸部分が短くなり電極の傾きによる振れが小さくなったために下部ほど穴直径が小さくなったと推測される。

### 3.2 燃料噴射ノズル加工

Fig.11 に実際に加工した燃料噴射弁本体の写真を示す。小窓に示すのは加工したノズル穴の拡大写真である。

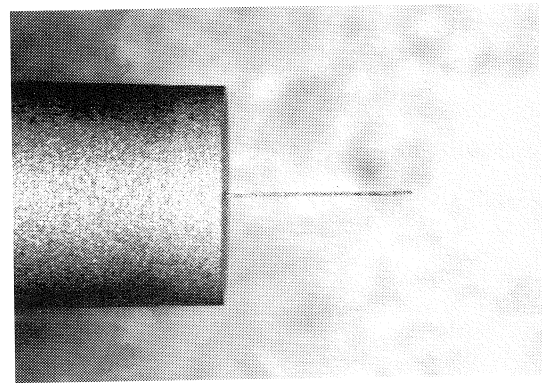


Fig.9 放電軸加工法による微細軸電極加工  
(先端直径  $60\mu\text{m}$ 、長さ  $4\text{mm}$ 、材質：銅)

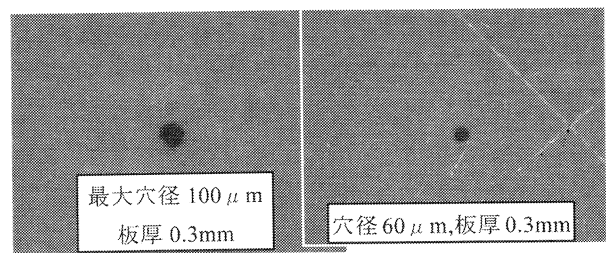


Fig.10 放電軸加工法で作製した微細軸電極による微小穴加工例（板厚  $0.3\text{mm}$  の SUS304 材を 2 枚重ねて加工した際のそれぞれの板の貫通（出口）側写真）

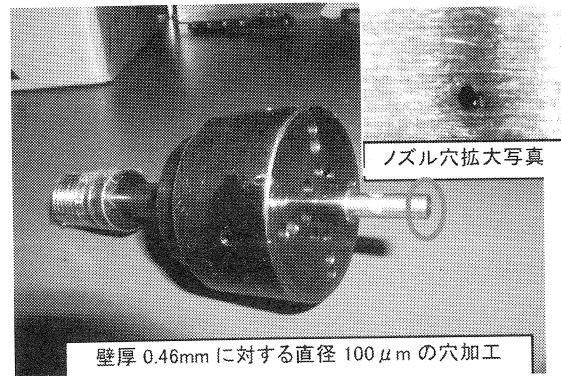


Fig.11  $100\mu\text{m}$  の穴加工を実施したジェットエンジン用燃料噴射弁および加工したノズル穴  
(資料提供：日本文理大学工学部航空工学科)

燃料噴射弁のサイズは、最大直径  $50\text{mm}$ 、全長  $120\text{mm}$  であり、材質は SS400 である。ノズル穴加工部位は、外径  $5.92\text{mm}$ 、内径  $5\text{mm}$  の先端部に  $90^\circ$  ピッチの 4 箇所である。穴加工に使用した微細軸電極は、加工部が直径  $60\mu\text{m}$ 、長さ  $4\text{mm}$ 、保持部直径  $10\text{mm}$  の多段の銅製電極で、放電軸加工により作製した。加工時の深さ方向への追い

込み量は3.5mmとした。

結果として4箇所すべて貫通穴加工が作製できた。作製された穴は、いずれも真円ではなくやや楕円状であった。この理由としては、電極の加工部分（直径60 $\mu$ m部分）の僅かな傾きが影響したと考えられる。加工穴寸法は、入口（外周）側で0.15~0.2mm、出口（内周）側で約0.1mmであった。

#### 4. 結 果

本研究では、確立した放電軸加工法の実用化に向け、回転体や多角形体などの立体部品の作製を容易に実現する角度割り出し機能付き放電軸加工装置を開発した。また、机上計測システムにより加工形状の計測を加工機上で実施できるようになり生産性の効率化を図ることができるようになった。

放電軸加工法により作製した先端直径60 $\mu$ mの微細軸電極を用いてジェットエンジン用の燃料噴射ノズル（貫通穴最小径0.1mm、貫通部深さ0.45mm）の加工を実現した。

今後、本研究で確立した放電軸加工法を広く県下の加工企業に普及し、微細加工分野へ事業拡大を志す企業に対し技術供与、技術移転するなどして企業支援を図って行く所存である。

#### 文 献

- (1) 城門由人、放電軸加工に関する研究、日本機械学会 No. 02-25 第4回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集（2002. 11 犬山）、pp. 125-126
- (2) 城門由人、放電軸加工技術に関する研究、平成14年度大分県産業科学技術センター研究報告、pp. 71-74
- (3) 城門由人、放電軸加工技術に関する研究、平成15年度大分県産業科学技術センター研究報告、pp. 45-47