

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760085  
 研究課題名（和文） 高自由度位置姿勢制御工具電極を用いた  
 放電加工による断面変化穴の創成  
 研究課題名（英文） Creation of Cross Section's Changing Holes by means of  
 Electrical Discharge Machining Using a Tool Electrode  
 with Posture and Position Controllable Function  
 研究代表者  
 石田 徹（ISHIDA TOHRU）  
 大阪大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：20313421

## 研究成果の概要（和文）：

本研究は、従来の機械加工法では形成することは不可能とされてきた断面が大きく変化する穴（断面変化穴）を創成するための装置、および、その装置の活用することによって複雑な断面変化穴の創成を可能にするソフトウェアシステムを構成する主要部分のうちの1つを開発した。この装置とソフトウェアを用いて加工実験を行った結果、意図した形状を有する複雑な断面変化穴を実際に創成することができ、その有用性を確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

This study deals with the development of the device for machining holes with variously changing cross sections, i.e., cross section's changing holes, which cannot be fabricated by means of conventional machining methods, and the formulation of one of the important parts constituting the software system for creating holes with complicatedly changing cross sections by making good use of the developed device. The results obtained in the machining experiments using the device and software show that the holes with complicatedly changing cross sections whose shape are previously designed can be created. This proves the effectiveness of the device and software.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：生産加工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：断面変化穴，放電加工，位置姿勢制御電極，CAD/CAM，機械加工・生産工学

## 1. 研究開始当初の背景

穴加工とは直穴の加工と認識されているように、形成できる穴形状の自由度は低い。すなわち、最も一般的な方法はドリル加工で

あるが、その加工形状は円断面の直線形状となる。他の方法を用いても、加工形状の自由度は高くはない。したがって、製品の設計・製造では、単純な穴形状を組合せた形状で妥

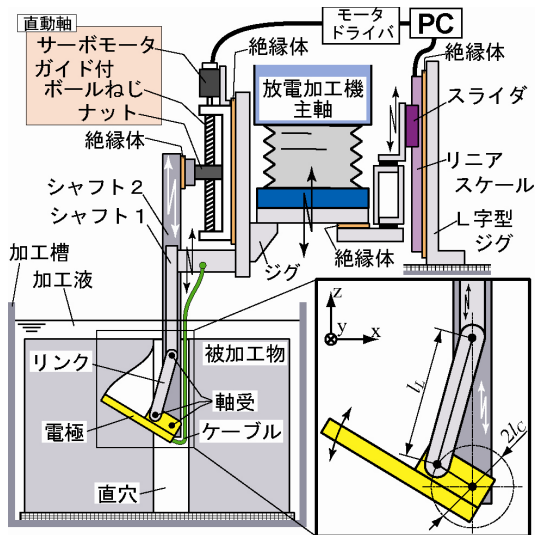


図1. これまでの研究において開発した装置の模式図

協してしまっているのが現状である。これに対し、形状自由度の高い穴の加工法を開発できれば、従来技術では不可能であった形状が創成できるようになる。これは世界有数の高付加価値製品を生み出す端緒となりえる。

そこで筆者らは、断面が変化する穴すなわち断面変化穴の加工法の開発に取り組んできた。基本的な方針として、直穴の内面に複雑形状を加工できればよいと考え、この方針に則った装置をすでに研究開始当初に開発していた。

図1にすでに開発していた装置の模式図を示す。主軸と電極は、リンク、シャフト1、2、直動軸を介して連結されており、これらはスライダクランク機構をなしている。これによって、シャフト1は主軸の運動を、シャフト2は運動と直動軸の運動を反映する。さらに、主軸にはリニアスケールが設置されており、PCに接続されている。このPCは同時に直動軸にも接続されている。したがって、PCは主軸の位置を検出し、それに対応するように直動軸を制御できるため、主軸とシャフト2はマスタスレーブの関係となる。よって、シャフト1と2に多様な相対運動を行わせることができるため、電極に複雑な運動を実現させることが可能となり、さらに、この電極の運動には主軸による極間距離制御が反映されるため、この電極による放電加工が可能となる。これを直穴内部において行うと、直穴内壁に対して放電加工が実現できる。図2に電極運動の一例とそれによる断面変化穴の加工例を示す。

このような結果から、装置をさらに多軸化すれば、加工可能な断面変化穴の複雑化が可能になると考えた。

## 2. 研究の目的

- (1) 直動/回転軸の搭載による装置の多軸化  
従来装置と比較して、さらに自由度の高い

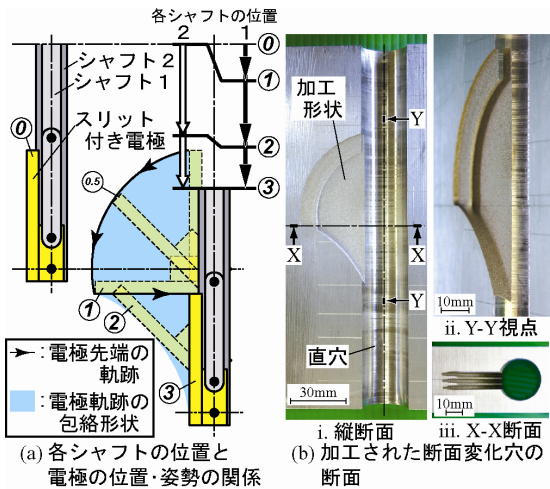


図2. 図1の装置を用いて実現された電極運動の例とその電極運動によって加工された断面変化穴の断面

運動を電極に実現させるように、すなわち、さらに複雑な形状の断面変化穴を創成できるように、従来の装置より多い直動軸や回転軸を搭載した装置を開発する。

## (2) CAD/CAMシステムの構築

CADで定義された断面変化穴の形状情報を入力すると、その断面変化穴を加工するための電極の形状と運動経路を出力するCAMを構築する。すなわち、断面変化穴放電加工用CAD/CAMシステムの開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 直動/回転軸の搭載による装置の多軸化

図1に示した従来装置では、電極はz軸方向の並進とy軸方向の回転の2自由度を有しているといえる。しかし、それを実現している制御軸は主軸と直動軸である。マスタスレーブのスレーブ側となる電極の運動に極間距離制御を反映させるためには、マスタである主軸は必ず運動し続けなければならない。すなわち、主軸は停止することができない。このことは、従来装置の電極が完全な2自由度を有してはいないことを意味している。このような問題を解決すると同時に電極の運動自由度を向上させるため、主軸から独立した2つの直動軸と1つの回転軸によって構成される装置を開発した。

図3に開発した装置の模式図を示す。電極は、リンク、シャフト1を介して一方の直動軸(W<sub>1</sub>軸)に、同時に、シャフト2を介してもう一方の直動軸(W<sub>2</sub>軸)に連結されており、これらはスライダクランク機構をなしている。さらに、これらの直動軸は回転軸(C軸)上に設置されているため、このスライダクランク機構全体がz軸方向に回転可能である。また、従来装置と同様に、主軸にはリニアスケールが設置されており、PCに接続されており、このPCは同時に直動軸と回転軸にも

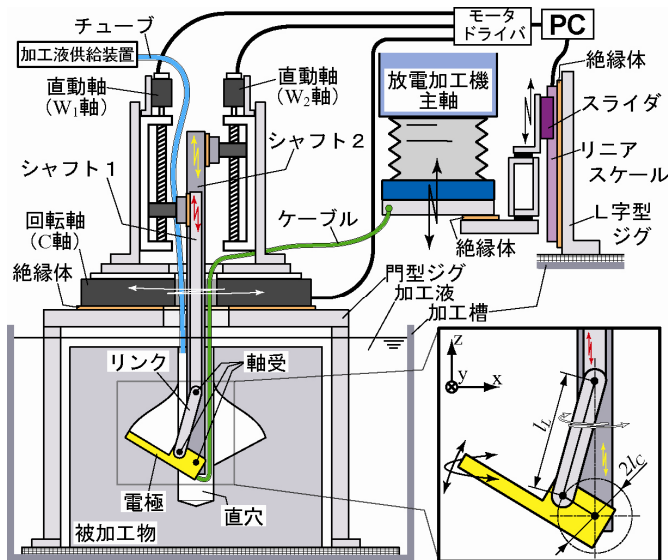


図3. 直動軸と回転軸の搭載により多軸化した装置の模式図

接続されている。したがって、本装置も従来装置と同じように、主軸とこれら3つの制御軸はマスタスレーブの関係となっている。よって、シャフト1と2に独立な並進運動とそれらが一体となった回転運動を行わせることができるため、電極にz軸方向の並進運動およびy軸とz軸方向の回転運動を実現させることが可能となり、さらに、従来装置と同様に、この電極の運動には主軸による極間距離制御が反映されるため、この電極による放電加工が可能となる。これを直穴内部において行うと、直穴内壁に対して放電加工が実現できる。

図3からわかるように、開発した装置では、制御軸およびシャフトや電極が主軸から機構的に独立しているとともに、制御軸が2つの直動軸と1つの回転軸から構成されている。したがって、開発した装置の電極はz軸方向の並進およびy軸とz軸方向の回転の完全な3自由度を有することとなる。

## (2) CAD/CAMシステムの構築

図4に開発すべき断面変化穴放電加工用CAD/CAMシステムの構造図を示す。CADは汎用ものを使用できるため、具体的な開発目標はCAMである。

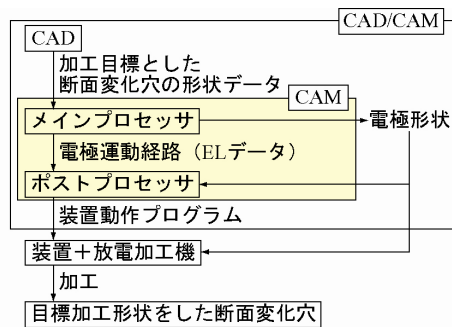


図4. 断面変化穴放電加工用CAD/CAMシステムの構造図

開発すべきCAMは、図4に示すように、メインプロセッサとポストプロセッサから構成されている。メインプロセッサは、CADにより定義された加工目標の断面変化穴の形状データが入力されると、その断面変化穴を加工するための電極の形状と運動経路を出力する。ポストプロセッサは、電極の形状と運動経路が入力されると、その運動経路を電極に実現させつつ放電加工を行わせるように装置を動作させるプログラムすなわち装置動作プログラムを出力する。このようなCAMを開発する第一歩として、図3に示した装置を対象としたポストプロセッサを構築した。その具体的な内容を以下に説明する。

図5は構築したポストプロセッサにおいて使用した変数の定義を表している。主軸の移動量を  $M_z$ 、シャフト1, 2の移動量をそれぞれ  $w_1, w_2$ 、回転軸の回転角を  $c$  とし、電極のy軸方向の回転中心となる点をO点、O点のz方向の移動量を  $O_z$ 、電極のy軸方向の回転角を  $\theta$ 、z軸方向の回転角を  $\phi$  とする。また、クランク長さを  $l_c$ 、リンク長さを  $l_l$  とする。さらに、メインプロセッサで出力され、ポストプロセッサに入力される電極の運動を示すデータをEL (Electrode Location) データと呼ぶこととする。具体的には、EL データは電極の位置と姿勢の変化を表し、図3に示した装置の場合は、 $(O_z, \theta, \phi)$  のデータ列として表現される。

構築すべきポストプロセッサは、大きく分けて次の2つの機能を有する必要がある。第1の機能はELデータすなわち  $(O_z, \theta, \phi)$  のデータ列を  $(w_1, w_2, c)$  のデータ列に変換することである。図5より、 $w_2$ の値は  $O_z$  に、 $c$ の値は  $\phi$  に等しく、 $w_1$ は装置の構造から  $w_2$  と  $\theta$  より求めることができる。具体的には、 $O_z, \theta, \phi$  と  $w_1, w_2, c$  の関係は次式のように表される。

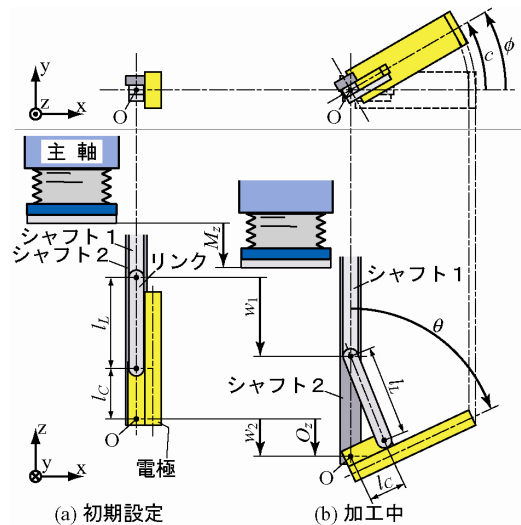


図5. 使用される変数の定義

$$\begin{cases} w_2 = O_z \\ w_1 = w_2 - l_c \left( 1 - \cos\theta + \frac{l_c}{2l_L} \sin^2\theta \right) \\ c = \phi \end{cases}$$

第2の機能は、極間距離制御を実現させるため、求められた( $w_1, w_2, c$ )と $M_z$ を対応させることである。これは、あらかじめ主軸の総移動量を設定しておき、これをELデータのデータ数で割り、( $M_z, w_1, w_2, c$ )というデータ列を生成することにより行う。すなわち、( $M_z, w_1, w_2, c$ )のデータ列が装置動作プログラムとなる。

#### 4. 研究成果

(1) 直動/回転軸の搭載による装置の多軸化  
図3に示した装置を実際に開発した。その写真を図6に示す。

(2) CAD/CAMシステムの構築

構築したポストプロセッサを利用して生成した装置動作プログラムを開発した装置に適用し、実際に加工目標とする断面変化穴が放電加工できるかを確認するために、加工

実験を行った。

図7に使用した電極と周辺部品の形状と寸法、図8に加工目標とする断面変化穴の形状を示す。電極の形状およびELデータは、メインプロセッサに図8に示す断面変化穴の形状データを入力した結果、出力されたものとする。なお、電極の材質は無酸素銅である。また、目標加工形状は、その稜線が直線や曲線が含まれる形状であるのに加え、z軸方向に波打つような形状であるため、この形状を創成するためには、電極の3軸同時制御運動が必要となる。被加工物は、縦197.5mm、横146mm、厚さ50mmのアルミニウム合金(A5052)に直径25.5mm、深さ170mmの止まり穴があらかじめ加工されたものである。なお、実験後に加工形状の観察を行えるよう、あらかじめ半分には切断してあり、切断面を合わせて固定した状態で全ての加工を行った。加工条件は、加工液に油を用い、加工電流13A、パルス幅210 $\mu$ s、デューティファクタ80%、電極(+)/被加工物(-)の逆極性とし、主軸のジャンプや揺動は行わなかった。

図9に加工後の被加工物の断面を示す。半分には切断した被加工物のうち、加工量の多かった方を示している。この図から、3軸同時

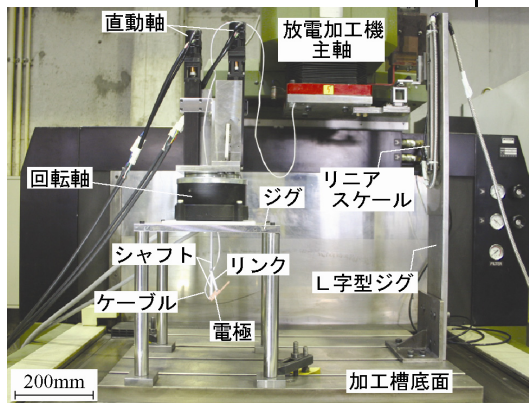


図6. 実際に開発した装置の外観

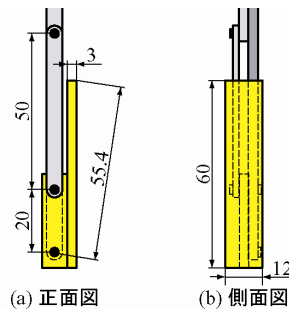


図7. 電極と周辺部品の形状と寸法

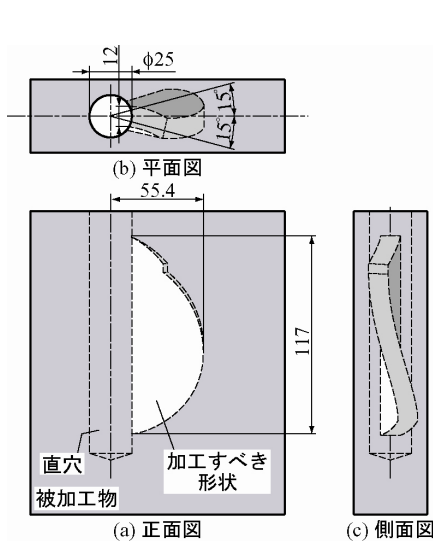


図8. 加工目標とする断面変化穴の形状

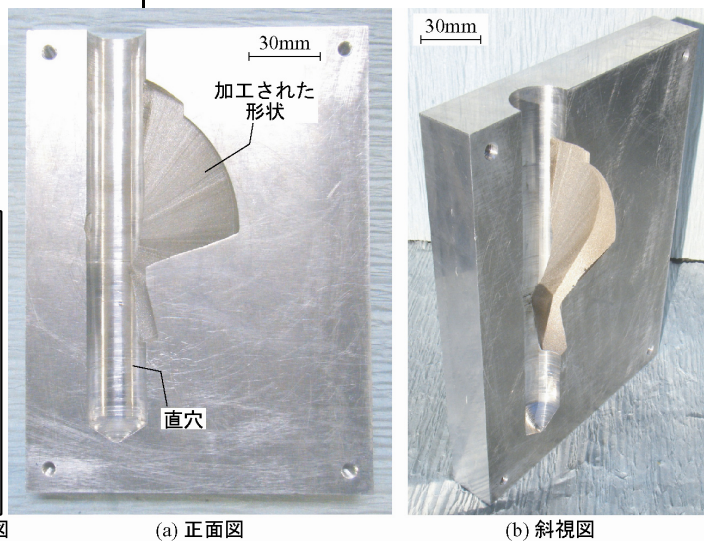


図9. 加工された断面変化穴の断面

制御により目標加工形状とほぼ同等の形状が創成されたことがわかる。加工時間は372分、除去体積は43cm<sup>3</sup>であったので、加工速度は116mm<sup>3</sup>/minであった。

本研究の内容は率直に言って簡便である。しかし、除去加工法を用いて形成できる穴形状に着目し、その形状自由度の向上を目的とする研究は国内外を見渡しても稀であることに加え、複雑な断面変化穴の加工法を具体的に提案および実施している研究は世界的にも類を見ない。また、除去加工法である多軸制御切削加工やワイヤ放電加工を用いた断面変化穴の形成に関する研究や加工例は多々あるが、前者は切削工具が到達できる形状に、また、後者はワイヤの走査で表現できる形状に限られる。よって、現在の除去加工法では、本研究において加工目標とし、かつ、実際に創成した断面変化穴の形成は不可能である。以上のように、本研究は、従来の研究とは一線を画すユニーク性を有すると同時に、除去加工法の適用できる形状の範囲を拡大させる革新性をもつ研究といえる。

今後は、メインプロセッサの構築やさらなる装置の多軸化による複雑な形状をした断面変化穴の創成を目指す予定である。

#### 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2件)

- ① Tohru ISHIDA, Eiki ISHIGURO, Masahiko KITA, Keiichi NAKAMOTO and Yoshimi TAKEUCHI : Development of CAD/CAM System for Cross Section's Changing Hole Electrical Discharge Machining -Formulation of Post Processor-, J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.4, No.4 (2010.8) *in press*. <査読:有>
- ② 石田 徹, 石黒永樹, 北 正彦, 竹内芳美 : 断面変化穴放電加工用CAD/CAMシステムの開発 (2次元形状用ポストプロセッサの構築), 日本機械学会論文集 (C

編), Vol.75, No.757 (2009.9) pp.2440-2446. <査読:有>

[学会発表] (計2件)

- ① Eiki ISHIGURO, Tohru ISHIDA, Masahiko KITA, Keiichi NAKAMOTO and Yoshimi TAKEUCHI : Development of CAD/CAM System for Cross Section's Changing Hole Electrical Discharge Machining -Formulation of Post Processor-, Proc. of 5th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Manufacturing and Machine Tool Division & Manufacturing System Division, Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Osaka, Japan (2009.12.3) pp.251-256.
- ② Seiji NAGASAWA, Tohru ISHIDA, Masahiko KITA, Keiichi NAKAMOTO and Yoshimi TAKEUCHI : Basic Performance Analysis of Cooling Pipe with a Changing Cross Section, Proc. of 5th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Manufacturing and Machine Tool Division & Manufacturing System Division, Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Osaka, Japan (2009.12.2) pp.213-216.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

石田 徹 (ISHIDA TOHRU)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 20313421

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

竹内 芳美 (TAKEUCHI YOSHIMI)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 50107546  
中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 90379339