

特集 油圧デジタルサーボ式異形孔放電加工機の開発*

Electrical Discharge Drilling Device Composed of Hydraulic Cylinder

永井暢彦
Nobuhiko NAGAI

山口哲司
Tetsuji YAMAGUCHI

森田浩充
Hiromichi MORITA

In automobile making, the increasing needs on environment protection and energy conservation demand holes' minuteness and high accuracy that influence the fuel flow control. Commonly used processing method is hole drilling, which has good productivity. However, it does not fit for minute and high accuracy processing because the poor tool rigidity. Therefore, non-contact processing method with low productivity such as EDM is considered. In this paper, a high-speed EDM (Electrical Discharge Machining) technology for less than 2mm holes opening is introduced, it has the same efficiency and low-cost as that of hole drilling. To solve the problem of its response delay of electrode driving that limits the processing efficiency, we developed a hydraulic type electrode feeding device for EDM, by using high response electromagnetic ON/OFF valves. About three times higher speed has been achieved.

Key words : Drilling, Electrical Discharged Machining, Hydraulic, Solenoid valve, High speed machining

1. はじめに

自動車分野では「環境・安全・快適性・利便性」をキーワードに製品開発をおこなっている。その中で燃料噴射装置やアンチロック・ブレーキ・システムの進化には、燃料や作動油の流れを緻密にコントロールする機能が求められる。燃料噴射インジェクタでは、噴射ノズルの噴霧微粒化やインジェクタの燃料流路の流れ制御がポイントとなる。これらの微細なノズル噴射孔や燃料通路孔が製品性能に直結する。近年これらに要求される孔形状は、従来からの丸孔だけでなく異形状の孔が求められてきている。例えば、ガソリンインジェクタで用いられる燃料通路孔は、単なる丸孔のほかに長孔形状が要求されている。

孔加工は従来ドリルなど回転工具が主流であるが、異形状孔は工具剛性の点より能率が悪く、既存の孔に交差して次の孔を加工する時にその交差部にバリが発生するため、品質が低下したり孔内部のバリ取りが必要になりコストが増加する。

一方、放電加工は工具電極形状を非接触で転写できるため異形状の孔加工にも有利である。しかし、一般的な材料では加工能率やコストに対し機械加工には及ばないため、高硬度材や付加価値の高い領域での活用に留まっている。また、レーザ加工も非接触の利点から実用化されているが、熱影響層の発生や溶融物の付

着等により面性状が悪化するなどの課題がある。

本論文は、直径2mm以下の異形孔に対し、ドリル加工並の能率、コストを目指し小型油圧送りテーブル¹⁾の高応答性、高推進力に着目し放電加工機の電極駆動に適用した成果について述べる。

2. 放電加工能率向上の考え方

2.1 高能率化について

放電加工は、加工液中で電極とワーク間にアーク放電を発生させワークを溶融し除去させる加工である。Fig. 1に放電加工サイクルの模式図を示す。放電によりワークの除去と共に電極も溶融消耗し、電極とワーク間距離を一定間隔に保持するための送り機構（サーボ）で制御する。しかし、工具先端位置を正確に検知し制御することが困難で、電極がワークに接触し短絡したり逆に大きく離れ開放するため放電がおこらない。これにより除去に寄与する放電時間の割合も低下し、これら短絡時間と開放時間を低減することが放電加工の高速化につながる。従って電極を駆動するアクチュエータは高応答性が求められる。

また、放電で発生する数マイクロメートルの溶融物や気泡が発生し加工の進行や精度を阻害する。そのためパイプ電極を用いて電極先端より加工液を噴出することでスラッジや気泡を強制的に排出させる。しかし、

* 2015年9月7日 原稿受理

電極に高圧加工液を供給する配管や接続部などの付帯機能が必要となり、駆動部分の重量が増加する。従って、電極を駆動するアクチュエータは高応答駆動に加えこれらの機能を支える駆動力も求められる。

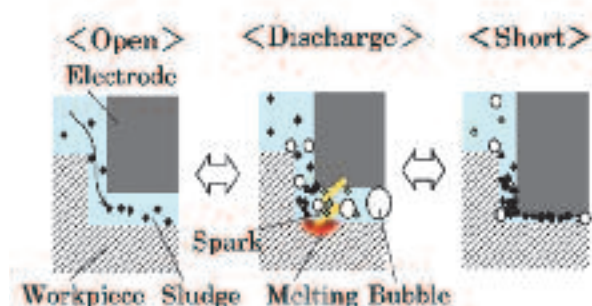


Fig. 1 EDM process

2.2 考え方

以上のように、上記の2つの機能を併せ持つアクチュエータが必要となる。電極を駆動させるアクチュエータとして、サーボモータ、リニアモータ、圧電素子、油圧シリンダが挙げられる。サーボモータは周波数応答が低いので、大幅な高速化は望めない。リニアモータは応答性に優れるが、制御が複雑で部品も高価なことから、大幅なコスト削減は困難である。圧電素子を用いた電極送りデバイスは、前述したように応答性に優れる一方、電極を摩擦駆動する方式のため付加装置の重量を動かす程の駆動力がないといった欠点がある²⁾。

その問題を解決するため構造のシンプル性、パワー／容積比が高い油圧方式に着目した。今回、従来の油圧サーボデバイスに対し、自動車に搭載される安価かつ高応答な自社製燃料噴射弁を活用し、制御性の高いデジタル駆動放電加工用油圧式電極送りデバイスの開発に取り組んだ。

3. 油圧デジタルサーボ方式電極送りデバイス

3.1 サーボ用電磁弁について

開発するデバイスに用いるON/OFF電磁弁には、高応答性以外にも、生産機としての耐久性、小型化が要求される。そこでデバイスの駆動に用いた電磁弁は、自動車エンジンに採用されている信頼性の高い気筒内直接燃料噴射用の2位置・2ポート型の電磁燃料噴射弁(株式会社デンソー製：D型)を使用した³⁾。この弁の特徴は、小型(外形φ25×80mm)であることと、従来の油圧用機器レベルを超えた高応答なON/OFF動作(ON/OFF切替時間；約1.5ms)が可能である点にある。但

し、開発するデバイスへの採用にあたっては、油圧制御用に向けて噴射孔形状に改造を加えた。Fig. 2に自動車用燃料噴射弁の外観、構造図およびその模式図を示す。Table 1にその噴射弁の基本仕様を示す。Fig. 3は、空気中における弁の切替え特性に関する過渡特性結果である。2つの波形は弁開閉信号と弁変位を示している。測定箇所はFig. 2(c)に示す弁端部を光学式変位計で測定した。Fig. 3より、空気中における弁切替えの遅れ時間は、ON, OFF時で1割程度の差があるものの、ともに約1msであることがわかる。このことから本噴射弁は、従来の油圧用汎用電磁弁⁴⁾と比較して、数倍から1桁速い切替え応答特性を有していることがわかる。

Table 1 Dimensions of ON/OFF valves

Maximum supply pressure [MPa]	20
Static flow rate [m ³ /a]	0.88-3.8 × 10 ⁻⁶
Diameter of valve seat [mm]	1.5
Valve stroke [μm]	40
Inductance [mH]	4.6
Coil resistance [Ω]	3.8

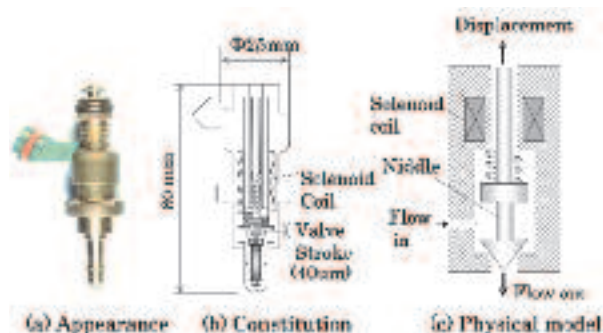


Fig. 2 Schematic diagram of fuel injector of automobile

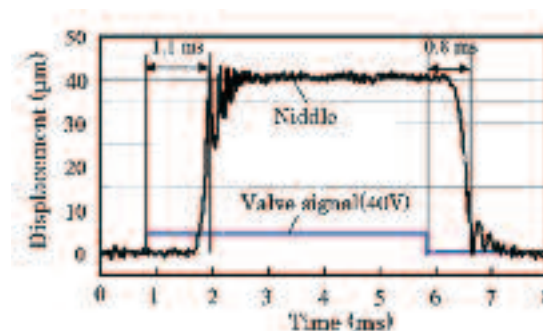


Fig. 3 Transient response of the ON/OFF valve (in air)

3.2 油圧デジタルサーボ式送りデバイス

前節で説明したON/OFF弁を用いた電極送りデバイスシステムの概略と作動原理をFig. 4に示す。本デバイスはIN, OUTの弁を有するシリンダを、テーブルセンターを挟み左右に持つ。左右シリンダの圧力差をテーブルの推進力としている。また、テーブルとベース間にはクロスローラガイドを配しており、1軸線上を高精度に駆動できる。下記に本デバイスをy軸正方向に1ステップ動作させる場合の動作例を示す。

- ①全てのValveを閉じる
- ②Valve-1, Valve-3を閉じたまま、Valve-2, Valve-4を開きテーブルが移動
- ③Valve-2, Valve-4を閉じテーブルが停止

上記動作を繰り返すことで、ステップ的にテーブルを送ることができる。y軸負方向に動作させる場合は、Valve-2, Valve-4を閉じたまま、Valve-1, Valve-3の開閉動作を行う。コンピュータからのパルスタイミングに合わせて上記動作を連続的に駆動させることで、テーブルがデジタル的に駆動可能となる。

このシステムをもとに製作した試作テーブルをFig. 5に示す。全体は200mm×100mm、テーブルは100mm四方で放電加工用のツーリングを設置できるスペースを確保している。テーブルストロークは50mmであり、ベースに配したクロスローラガイド上を移動する。本テーブルは、応答遅れを低減するために、弾性要素を極力廃した。ピストン、シリンダ間のOリングをなくし、燃料噴射弁とベースとのシールは金属シールを採用した。さらに油圧配管はポンプを近接させ長さを低減するとともに剛性ある鋼管を使用した。

1パルス入力に対するテーブルの立ち上がり挙動をFig. 6に示す。供給圧力を $p_s = 5\text{MPa}$ とした。駆動方向

はy軸正方向である。油圧駆動系の遅れは約3msである。この遅れ時間は、電磁弁の遅れ約1.5msに油圧系と機械系の遅れが加わったものである。作動油の弾性要素はほとんど影響ないことを計算上で確認しているので、作動油内の残留エアの影響と推定している。しかし、この程度の遅れ時間は、通常使われているサーボモータとボールネジなどを用いた電動式駆動系の値のほぼ1/3であり、油圧駆動においても電動式を凌駕する応答性の確保が確認された。Fig. 7に電磁弁Valve-2, Valve-4の各切換時間 t_{on} ; 2ms, t_{off} ; 4msで連続駆動させた時のテーブル挙動を示す。ステップ的にミクロン単位で精度良く動いていることがわかる。本試作テーブルは応答性、精度面において、放電加工に適用可能な性能を十分保有していると考えられる。

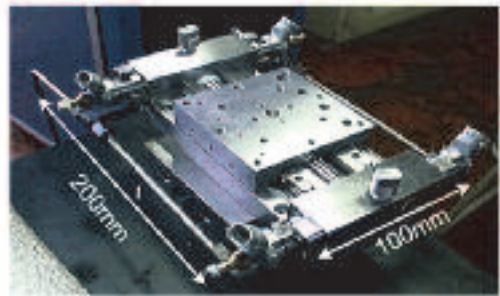


Fig. 5 Prototype table

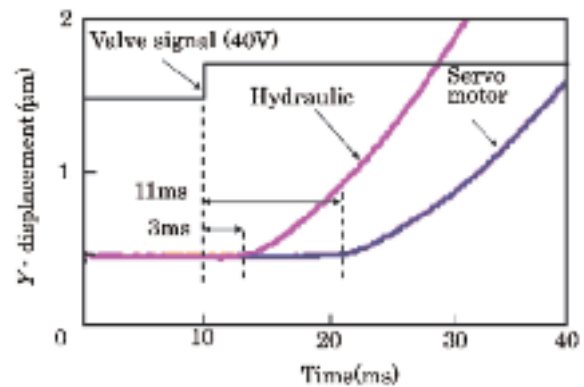


Fig. 6 Response curves y in start-operations

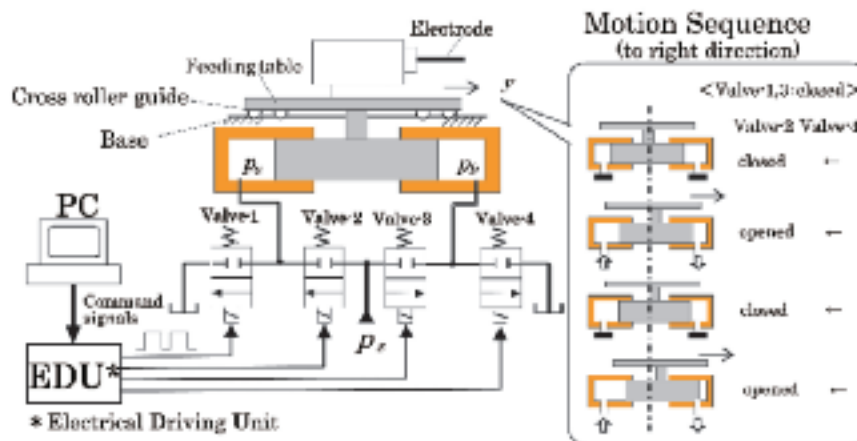


Fig. 4 Schematic diagram of hydraulic driving system

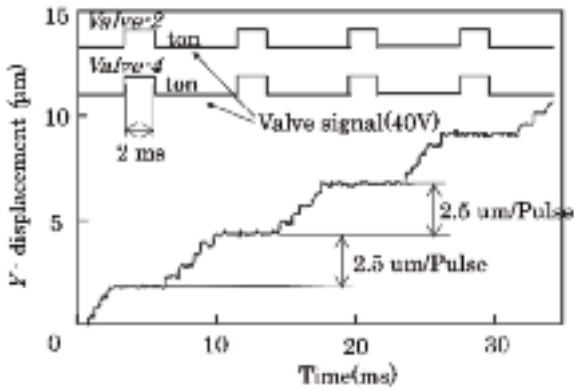


Fig. 7 Table displacement y by ON/OFF pulse wave

Table 2 Experimental conditions

Machining conditions	
Electrode [mm]	0.5 outer diameter (Copper pipe)
Workpiece [mm]	0.5 in thickness (Stainless steel)
Voltage of power source [V]	180
Pulse width [µs]	15
Duty factor [%]	30
Peak current [A]	16
Hydraulic feeding table conditions	
Oil density [kg/m ³]	850
Oil kinematic viscosity [m ² /s]	7.5 × 10 ⁻⁴
Supply pressure [MPa]	12
Ton / Toff [ms]	2.5 / 2.5
Feed resolution [µm]	4

4. 放電加工への適用

4.1 試作した放電加工システム

開発機のシステムの外観写真と概略図を Fig. 8 に示す。加工装置は横型であり、加工液噴出用のパイプ電極から2MPaまでの加工液圧の付与が可能である。放電電源は市販のトランジスタ型電源を利用している。

電極送りサーボ制御システムの構造図を Fig. 9 に示す。電極とワーク間の電位差を平均化した信号をしきい値と比較し、前進または後進の2値化信号を出力する方式であり、その信号をコンピュータに入力し、電圧増幅器を通して各バルブを駆動させる。電圧増幅器には小型、安価な自動車用EDU (Electrical Driver Unit) を使用した。

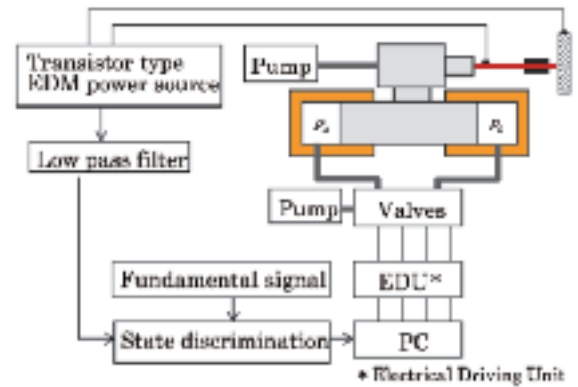


Fig. 9 EDM servo control system

4.2 試作機での加工結果

製作した放電加工機にて加工評価を行った。加工条件を Table 2 に示す。電極は黄銅製の直径0.5mmを使用し、パイプ電極の断面は単純管タイプで肉厚片側0.15mmである。ワークは板厚0.5mmのステンレス材を使用した。加工液は市販の水溶性油である。また比較のため、市販のサーボモータ式の加工も同条件で行った。

Fig. 10 に、加工開始から電極がワークを完全に貫通するまでの電極挙動を示す。油圧サーボ方式では、加工開始から電極挙動ばらつき幅が狭く滑らかに送られている。ワーク背面到達までの平均電極送り速度は0.4mm/sであり、現在一般的に穴加工に用いられるドリル加工と同等速度で加工する事ができた。また、サーボモータ方式では背面到達直後の抜け際に、短絡により大きく電極が引き戻されている。一方、油圧方式では送り速度が15%程低下するものの、その現象は見られない。抜け際にはポンプから供給された加工液が抜けてしまうため、加工点に加工液の流れがなくなってしまう。そのためスラッジや気泡を排出する力がなくなり、通常のサーボモータ方式では短絡が継続してしまう。これに対し油圧式では高速高応答に動作する事で極間に振動を生み、ポンプ効果が生まれた結果、

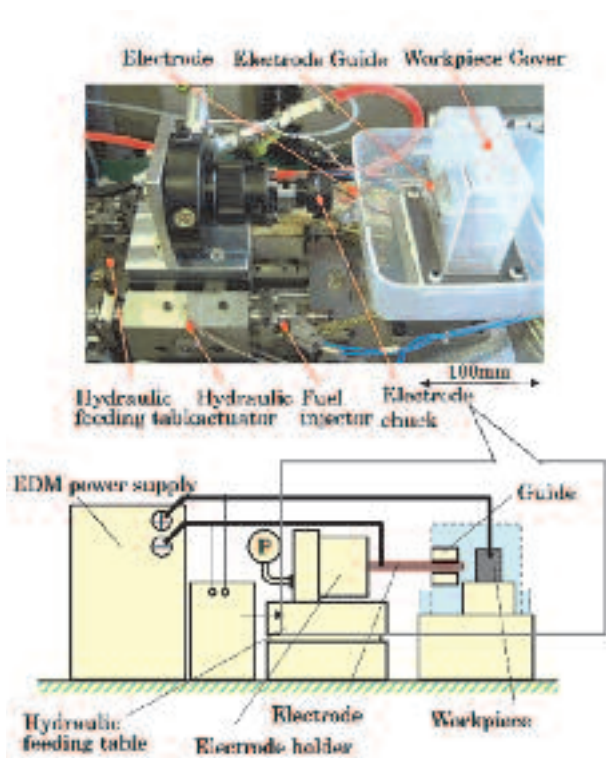


Fig. 8 Prototype EDM machine

スラッジ・気泡の排出力が生まれたと考える。

以上のことから電極駆動に高応答油圧サーボデバイスを用いる事により、小径穴放電加工において従来の市販機と比べ2倍程度の高速加工を実現できることが分かった。

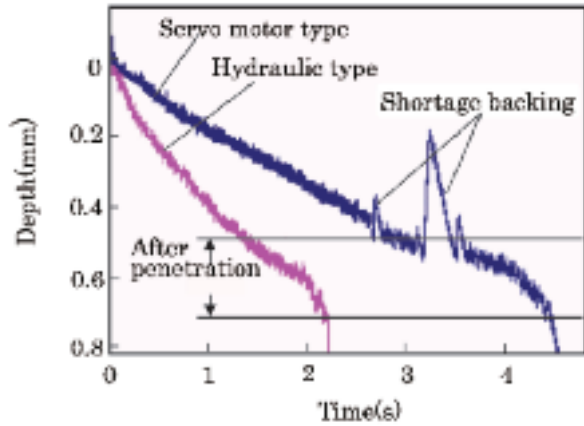


Fig. 10 Electrode behavior in machining

5. 生産機への適用

Fig. 11に、本論で述べた技術を活用した生産設備用異形孔専用機および電極送りデバイスの外観を示す。本設備は面積生産性を考慮し、電極送りデバイスを縦型細長構造に変え、またそれを並列に配置することで同時にワークを4個加工できる。本デバイスのサイズは、約50mm×50mm×100mmであり、電極回転機構を備えている。また、電極の自動交換システムにより連続的な加工が可能である。現在本設備により、ガソリンエンジン用の燃料噴射弁において、厚さ0.5mmの燃料流路用丸孔と楕円孔を形状に合わせた総型真鍮パイプ電極を用いて、年間4,000万孔以上加工している (Fig. 12)。

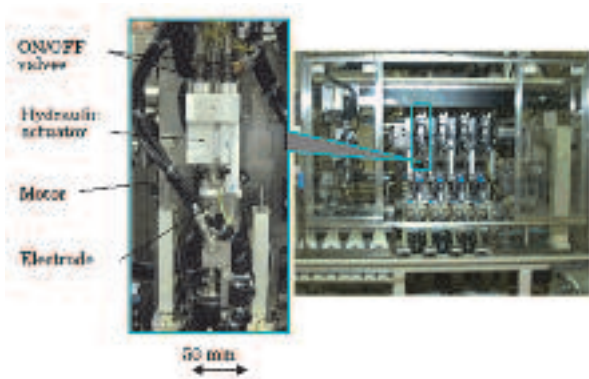


Fig. 11 Automatic 6 heads production machine

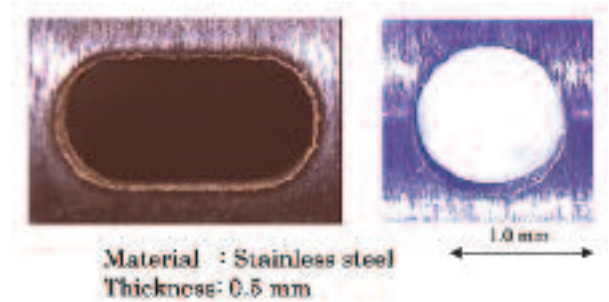


Fig. 12 Machining hole in mass production

6. おわりに

今回、直径2mm以下の異形孔をドリル並の加工能率を目指し、自動車用の高応答燃料噴射弁を活用した油圧方式の放電加工システムを開発した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 油圧式サーボデバイスに高応答駆動可能な電磁燃料噴射弁を搭載することで、サーボモータ式と比べ、約3倍の高応答化を実現した。
- (2) $\phi 0.5 \sim 2.0$ mmの加工領域に対応する高応答電極送りデバイスとして油圧方式の送りテーブルを組み込んだ放電加工システムを開発することで、市販機と比べ、2倍以上の高速加工を実現した。
- (3) 異形孔の量産放電加工機を開発した。

<参考文献>

- 1) S.Tsuchiya, H.Yamada, T.Muto : A Precision Driving System Composed of a Hydraulic Cylinder and High-speed On/Off Valves, International Journal of Fluid Power, 2, No.1, (2000), pp. 7-16.
- 2) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎 : 細穴放電加工用電極送り機構の比較, 電気加工誌, 28, 59, (1994), pp. 41-50.
- 3) S.Uedam, Y.Mori : Development of a New Injector in Gasoline Direct Injection System, SAE World Congress, 2000-01-1046.
- 4) T.Masuzawa : State-of-the-art on Micromachining, CIRP ANNALS, 49/2, (2000), pp. 473-488.

<著 者>



永井 暢彦
(ながい のぶひこ)
生産技術研究部
除去加工技術研究に従事



山口 哲司
(やまぐち てつじ)
生産技術研究部
除去加工技術研究に従事



森田 浩充
(もりた ひろみち)
生産技術研究部 博士 (工学)
先行加工技術研究に従事