段付き電極による深穴放電加工特性の向上*

岡田 晃**, 安田竜一**, 宇野義幸**

Improvement in Machining Characteristics of Deep-Hole EDM
using Flange Type Electrode

Akira OKADA, Ryuichi YASUDA and Yoshiyuki UNO

Abstract

In deep-hole electrical discharge machining, the exclusion of debris is difficult, which leads to debris stagnation in the side gap. Thus, the wall of the machined hole becomes concave owing to secondary discharges in the side gap, even with the use of a linear-motor-driven EDM system with high-speed electrode jump. In this paper, the EDM of a deep hole using a flange-type electrode is proposed in order to prevent secondary discharges in the side gap and to improve shape accuracy. The EDM characteristics such as shape accuracy, removal rate and surface roughness are compared between the use of a flange-type electrode and that of a conventional straight electrode. The fluid flow and debris movement around the flange part of the electrode during the electrode jump are also discussed in view of the results of high-speed camera observation and CFD analysis. In addition, the effects of electrode shape on hole shape are investigated. Experimental results show that the concavity of machined holes can be easily improved using a flange-type electrode, even when using a conventional EDM with a ball screw drive. EDM performance becomes stable with the use of a flange-type electrode, and consequently removal rate improves.

Key words: EDM, deep hole, secondary discharge, concavity, CFD

1. はじめに

放電加工においては加工中に発生した加工粉が極間に滞留することで放電状態が不安定になり、形状精度や加工速度などの加工性能を悪化させる。従ってこれらを効率よく排出することが高性能加工を実現する上で重要な課題となる。加工粉や気泡の排出方法として、ノズルを用いたり電極に穴を設けるなどして加工液の噴出や吸引を行う方法が用いられる。しかしながら、加工形状が複雑になるとこれらの方法は適用できないことが多い。また加工液流れの上流側と下流側ではギャップ距離が異なり、形状精度をかえって悪化させる場合がある。従来より多用されるもう一つの方法として、電極を間欠的に上下運動させる電極のジャン

プ動作が挙げられる。近年リニアモータ駆動放電加工機が登場し、従来のボールねじ駆動では得られなかった高速電極ジャンプ動作を可能としている。これにより、ギャップに存在する加工粉の攪拌能力や排出効果が向上し、高精度加工が実現された¹⁾。

我々はこれまでに高速電極ジャンプ動作を含め、電極ジャンプ動作中の加工液や加工粉の流れについて高速度ビデオカメラによる観察や CFD 解析を用いて体系的に検討し、加工形状におよぼす電極ジャンプ動作の影響を解明してきた。また、高速電極ジャンプを用いた加工においても加工穴深さが大きくなるとやはり加工形状が中太りとなることを確認している^{2), 3)}。

本研究では、サイドギャップにおける二次放電を減少させ、深穴加工の形状精度を向上させる段付き電極を用いた加工法を提案し、その加工特性について実験的に検討を行った。また CFD 解析に

* 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会，
2006 年度精密工学会春季大会学術講演会にて発表

** 岡山大学大学院自然科学研究科

よって段付き電極を用いた場合の電極ジャンプ中の極間の加工粉挙動について解析を行い、加工粉の分布に関する考察を行った。さらに、加工形状の中太りを抑制するための最適な段付き電極形状についても検討を加えた。

2. 電極ジャンプ動作と加工穴の中太り

Fig.1 は放電加工における電極ジャンプ動作を模式的に示す。放電加工中に生じる加工粉や気泡を極間から排出するために電極は図に示すようなジャンプ運動を行う。一定時間加工を行った後、電極は上昇下降し、この動作を繰り返す。このときの最大高さを電極ジャンプ高さ H_j 、加工している時間を加工時間 t_{rm} 、ジャンプしている時間を t_j と定義する。

Fig.2 は直径 10mm の銅丸棒電極を用いて合金工具鋼 SKD61 に対して深さ 50mm の加工を行った場合の加工穴の側面形状を示している。加工条件を Table1 に示す。ここでは、電極のジャンプ高さを 2.4, 28, および 38mm と変化させた場合の結果を示している。図より明らかなように、電極のジャンプ高さが大きいほど中太り量は小さくなり、ジャンプ高さが 38mm と十分に高い場合には、中太りをかなり軽減できることがわかる。また、中太り形状はジャンプ速度にはほとんど左右されず、ジャンプ高さ、および加工深さによって大きく変化することも明らかとなっている²⁾。しかしながら、中太りは電極ジャンプ動作終了時の電極側面での加工粉の局所的偏在による二次放電によって引き起こされるため、電極ジャンプ動作のみによって完全に中太りを解消することは不可能である。さらに、ジャンプ高さが十分に高い場合においても加工粉の局所的偏在が生じることをこれまでに明らかにしている³⁾。

3. 段付き電極による放電加工

サイドギャップにおいて加工粉の偏在が生じてもギャップが十分に広ければ、二次放電の発生を抑制できると考えられる。そこで、サイドギャップを大きく設けた段付き電極による加工を行い、その可能性について検討した。単純断面形状の電極を用いた深穴放電加工形状のニーズは多いため、段付き電極による中太り形状の解消が可能となればその実用性は高いと考えられる。

実験はボールねじ主軸駆動の型彫り放電加工機

Fig. 1 Electrode jump motion

Fig. 2 Concavity of EDMed deep hole

Table 1 EDM conditions

Electrode		Cu(φ 10.0mm) Polarity: (+)
Discharge current	i_e	24A
Pulse duration	t_e	200 μs
Pulse interval time	t_o	90 μs
Jump height	H_j	38mm ($t_j=500ms$) 28mm ($t_j=300ms$) 2.4mm ($t_j=160ms$)
Real machining time	t_{rm}	600ms
Jump speed	J_s	36m/min

(Sodick 社製 EPOK3) を用いて行われた。またリニアモータ駆動加工機 (Sodick 社製 AQ35LR) を用いて高速ジャンプ動作との加工特性比較も行った。加工液には灯油系加工液 (ソディックハイテック社製 VITOL-2) を使用した。加工条件は前述の Table 1 に示すとおりであり、加工機メーカー推奨の荒加工条件となっている。

Fig.3 は段付き電極の形状を示す。電極側面での

加工粉の偏在による二次放電を抑制するために電極底面から a までを直径 10mm とし、それ以外の部分に段差 b を設けている。以後、 a を段の長さ、 b を段差と呼ぶ。ストレート電極との比較実験では段の長さ $a=2.0\text{mm}$ 、段差 $b=2.5\text{mm}$ として特性評価を行った。また、「5. 段付き電極形状が放電加工特性に及ぼす影響」の検討では、Table 2 に示すように、 a 、 b をさまざまに変化させてその影響を調べた。

Fig.4 は加工深さを 50mm として段の長さ $a=2.0\text{mm}$ 、段差 $b=2.5\text{mm}$ の段付き電極を用いて加工を行った場合の加工側面形状を示す。電極ジャンプ高さ H_j は 2.4mm としている。図より段付き電極を用いて加工を行うと、電極ジャンプ高さが低くてもほぼ直線的な加工形状が得られていることがわかる。また、比較のために示したストレート電極を用いた場合と比較すると、極間距離自体も小さくなっており、サイドギャップでの二次放電が回避できている。さらに、加工穴入口部分では穴径が拡大しているようにみられる。しかしながらストレート電極を用いた場合のそれと比較すると穴直径自体は減少しており、二次放電を防止しサイドギャップが減少したために、結果として入口のダレが目立つ形状になったと考えられる。すなわち、加工初期の段階では、段付き電極を用いた場合にも直径の大きい段のない部分で加工を行うことになるため、浅い穴加工でも見られるような入口部分でのダレが現れ、それが残ったものといえる。

Fig.5 は、リニアモータ駆動方式の加工機で加工を行った場合の加工深さと加工時間の関係を示す。ジャンプ高さ $H_j=38\text{mm}$ で円柱ストレート電極を用いた場合、加工速度は低下せず一定速度で加工が進行している。いっぽう、ジャンプ高さが 2.4mm で円柱ストレート電極を用いた場合には、加工深さ 30mm 程度から加工速度が低下しはじめ、40mm 程度で加工が進行しなくなる。これに対し、段付き電極を用いた場合段差が十分にあれば ($b=2.5\text{mm}$)、ジャンプ高さが 2.4mm と低くても加工速度は低下せず、一定速度で加工が進行することが分かる。

Fig.6 は、リニアモータ駆動方式とボールねじ駆動方式の放電加工機で加工を行った場合の加工深さと加工時間の関係を示す。ボールねじ駆動方式の電極ジャンプ条件は、加工時間 t_{rm} を 640ms 、

Table 2 Dimensions of flange-type electrode

a(mm)	b(mm)
2.0	2.5, 2.0,
	1.5, 1.0,
	0.5, 0.25,
	0.1
	2.5
2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0	2.5

Fig. 3 Flange-type electrode

Fig. 4 Machined hole shapes with flange-type electrode and a normal electrode

Fig. 5 Variations of machining depth with time using EDM with linear motor drive

ジャンプ高さ H_j を 2.5mm とし、リニアモータ駆動方式とほぼ同じとした。リニアモータ駆動方式においては円柱ストレート電極を用いた場合、前述のように十分なジャンプ高さがあれば加工は安定して進行するが、ジャンプ高さが低い場合は途中で加工が進行しなくなる。これに対し、ボールネジ駆動方式で段付き電極を用いて加工した場合、加工速度の低下は見られなかった。しかも、リニアモータ駆動方式で加工した場合とほぼ同程度の加工速度を得ることができた。この結果より段付き電極を用いればボールネジ駆動方式の加工機でもリニアモータ駆動方式に劣らない高速・高精度の深穴加工を実現できることが明らかとなった。

4. 加工液流れの CFD 解析と高速度ビデオ観察

段付き電極を用いた場合のサイドギャップ中での加工液流れおよび加工粉の動きを把握するために CFD 解析を行った。Fig.7 は段付き電極を用いた時の極間の CFD 解析モデルを示す。モデルの対称性を考慮し半分の領域を解析領域とした。解析は非定常非圧縮乱流 2 次元モデルとし、市販の CFD ソフト (CDAJ 社製 Star-CD) を用いて $\kappa-\varepsilon$ モデル、有限体積法による解析を行った⁴⁾⁶⁾。本来、気泡の影響を含めた解析が必要であるが、段付電極ではサイドギャップが大きいいため、ジャンプ動作終了時にはサイドギャップでの気泡の滞留は少なくなっていると考えられる。また、本解析モデルのように電極が大きく上下に移動するモデルでは、固気液三相流の解析は現時点では極めて困難であるため、今回は気泡の影響は考慮していない。電極の形状は実際の加工実験と同様に直径 10mm、加工深さ 50mm である。また、サイドギャップ、ボトムギャップは実際にはそれぞれ約 0.15, 0.07mm であったが、これらのギャップの変化は電極段上部の加工液流れに対して大きな影響を与えるものではなく、解析ソフトの制約上、0.5, および 0.2mm に設定した。電極の動きは実際のジャンプ動作を計測し、サイン 3 乗曲線で近似した³⁾。初期電極位置においては、セルサイズが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ となるようにボトムギャップ内に 4×110 、サイドギャップには $1,000 \times 10$ 配置している。段上部のサイドギャップの広い部分では、サイドギャップに応じてセルを配置した。電極ジャンプによってボトムギャップ形状、およびサイドギャップ形状が変化するため、初期のセル配置状態から

Fig. 6 Deep-hole EDM with flange-type electrode

Fig. 7 CFD model

セルの追加/削除、およびセルサイズの伸縮を適宜行うことで対応した⁶⁾。工作物および電極表面ではすべりを 0 とし、そのほかの境界は圧力境界としている。灯油の密度 (760kg/m^3) および動粘度 ($1.881 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) を用いて解析を行った。

Fig.8 に電極ジャンプ中の解析結果例を示す。

(a) は段付き電極 (段の長さ $a=2.0\text{mm}$ 、段差 $b=2.5\text{mm}$) を用いてジャンプ高さを 2.4mm とした場合の電極下降開始時の速度場である。また (b) は電極ジャンプ動作終了時の流れ場を示している。図中矢印の長さが流れの方向を、長さが速度を示している。電極上昇中にサイドギャップから流入した加工液がボトムギャップにおいて大きな渦を発生させ、電極が下降しはじめるまで残っていることが (a) より分かる。いっぽう、電極が下降しはじめる際には段の上部では渦が発生し、電極ジャンプ終了時 (b) にはその渦はより大きくなっている。

(a) Electrode goes down

(b) Electrode jump motion completes

Fig.8 Velocity field patterns in gap during electrode jump

これらの解析結果を検証するために、高速度ビデオカメラ(コダック社製 モーションコーダアナライザーSR)を用いて電極ジャンプ中の極間における加工液流れの観察を行った。実際の加工中の極間を観察することは困難であるため、Fig.9に示すような観察モデルを作成した。すなわち、実際の電極を放電加工機主軸に取り付けて加工を行い、ステーを介してその電極のジャンプ動作をダミー電極に伝える構造となっている。ダミー電極側ではアクリル槽を加工槽モデルとし、その中にダミーワークを設置している。これらのアクリル槽、ダミーワーク、およびダミー電極で電極ジャンプモデルを構成し、電極ジャンプによって引き起こされる加工液の流れを高速度カメラによって撮影した。ステーには軽量のアルミニウム合金を用いた。サイドギャップおよびボトムギャップはそれぞれ、0.5mm、0.2mmであり、解析モデルと同じとした。灯油加工液の流れを明確に捉えるため、ガラス粉末(粒径 22 μ m 以下)を適量混入している。高速度ビデオの視野は2.2mm $\times$ 2.0mmである。また、撮影した画像をPIV解析(デジモ社製 Image Tracker PIV)し、速度場を解析した。

Fig.10は前述のFig.8 (b)と同一条件、すなわち、段付き電極を用いてジャンプ高さを2.4mmとした場合の電極ジャンプ動作終了時の高速度ビデオ画像およびPIV解析結果である⁷⁾。比較しやすいようFig.8 (b)上に重ねて示す。図より、CFD解析と同様に段上部には大きな渦が形成されており、また、速度場もほぼ同様であることが分かる。

Fig.9 Fluid flow observation model and high-speed observation system **Fig.10** PIV analysis results of high-speed observation image above the step of flange-type electrode when electrode jump motion completes

速度の大きさも CFD 解析結果とほぼ同じであることを確認しており、この結果から精度の高い CFD 解析結果が得られていることが分かる。

さらに、加工粉を想定した粒子を極間に配置し、電極ジャンプ動作によりどのように再配置されるかを解析した。解析は、粒子を追跡するラグランジュ二相流法を用いている。初期の粒子の配置位置を Fig.11 に示す。混入粒子は、鉄(密度 7.8g/cm^3 、粒径 $10\mu\text{m}$)とし⁸⁾、加工によってボトムギャップに生じることを想定し均等に配置した。実際の解析画像では初期の粒子位置を色によって区別できるようになっている。また、サイドギャップにも図のように低い密度で分布させた。解析では粒子同士の衝突、粒子と加工穴壁面や電極との衝突も考慮している。

Fig.12 は電極ジャンプ終了時直前の粒子の配置状況を示す。電極ジャンプ終了時においても、はじめに配置していた粒子の大部分はボトムギャップに残っている。これは、通常のスレート電極を用いた場合と同様であった³⁾。いっぽう、サイドギャップにおいては、電極角部近傍のギャップの狭い部分では粒子の分布密度が高く、サイドギャップの広い部分では、その密度は相対的に低いことが分かる。電極の角部に段が設けてあることによって電極が下降する際、前述のように段上部に渦が発生する。それによってサイドギャップ中の加工粉が十分に攪拌されるため、加工粉の偏在は確認できない。この粒子配置状態で加工が再開されると、当然ボトムギャップや電極角部での放電が生じやすく、サイドギャップでの広いギャップに加え、粒子の密度も低いことから放電はほとんど発生しないことになる。結果として、サイドギャップでの二次放電を抑制できるため、Fig.4 に示したように段付き電極を用いることで深穴の中太りが解消できたものといえる。

5. 段付き電極形状が放電加工特性に及ぼす影響

段付き電極形状が放電加工特性にどのように影響するかを検討した。ここではリニアモータ駆動式の放電加工機を用いて実験を行った。まず、段付き電極の段の長さ a を 2.0mm に固定し、段差 b をそれぞれ変化させた電極、および $\phi 10\text{mm}$ の円柱スレート電極を使用した場合における加工穴形状を Fig.13 に示す。図より、段差 b が大きいほど側面ギャップ距離は減少していくことがわか

Fig.11 Particle arrangement before electrode jump

Fig.12 Particle tracking analysis results

Fig.13 Effect of step difference on machined shape

る。そして、段差 b が 2.5mm の場合には側面ギャップ距離を 0.12mm 程度まで減少させることができる。さらに、段差が 0.5mm 以上あれば、中太りは発生しないことが分かる。

次に、段差 b を 2.5mm に固定し、段の長さ a を変化させた電極と $\phi 10$ mm の円柱ストレート電極を使用した場合における加工穴形状の比較を Fig.14 に示す。段の長さ a が 5.0mm 以上になった場合、側面ギャップ距離が急激に上昇していることがわかる。また、段の長さ b が 20mm と 15mm の場合にはわずかであるが中太りが起こっている。従って、段の長さ a を小さくするほうが二次放電を減少させ、中太りを解消できることが明らかとなった。

Fig.15 は段付き電極の段の長さ a および段差 b を変化させた時の加工速度の変化を示す。この加工速度の値は、深さ 50mm の加工を行ったときの平均加工速度である。通常の円柱ストレート電極で加工した結果も示す。図より明らかなように、どの段付き電極で加工を行った場合も円柱ストレート電極で加工を行った場合に比べ、加工速度が 2 倍以上大きくなっていることがわかる。前述のようにサイドギャップ、および中太り量の減少により加工体積自体減少しているため加工速度は増加するのは当然であるが、その割合以上に加工速度は増加している。すなわち、サイドギャップでの二次放電を抑制することで、ボトムギャップでの放電回数が増大し、かつ常に安定した加工状態で加工が進行するため、加工速度が増加したものと考えられる。段の長さ a 、および段差 b の影響についてみると、それぞれ加工速度が最大となる最適値が存在することがわかる。従って、加工形状や加工条件に応じて段形状の最適値が存在すると考えられる。

次に段形状による電極消耗率の違いについても

Fig.14 Effect of step length on machined shape

調査を行った。その結果今回用いた加工条件は加工機メーカ推奨の電極低消耗粗加工条件であるため、全ての電極において電極消耗はほとんど生じていなかった。そして、電極形状変化による電極消耗率への影響は見られなかった。

最後に、加工面粗さの違いを検討した。底面の加工面粗さを計測したところ、電極形状の違いによる明確な差異は認められなかった。いっぽう、穴側面の粗さには段形状による違いが見られた。その結果を Fig.16 に示す。粗さの計測は、加工穴入り口から底面までを 4 つの領域に分けて計測した。図中のプロットはその平均値である。ストレート電極の場合穴の中央部付近で粗さが小さくなっており、中央部付近では加工粉を介した二次放電によって粉末混入放電加工のような作用が起こり、加工面粗さが低減したのではないかと考えら

Fig.15 Effects of step difference and step length on removal rate

Fig.16 Effects of step difference and step length on surface roughness of side wall

れる。いっぽう段付き電極ではその傾向は見られなかった。また、図より明らかなように、円柱ストレート電極を用いた場合が最も側面の平均粗さが小さく、加工穴側面で全体的に二次放電が生じていることが推測できる。

6. 結 論

本研究では、サイドギャップでの二次放電を減少させ深穴加工の形状精度を向上させる段付き電極を用いた加工を提案し、その加工特性について検討を行った。また CFD 解析による電極ジャンプ中の加工粉の挙動についても考察した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 段付き電極を用いることによって中太りを回避でき、形状精度の高い深穴の放電加工が可能となる。
- (2) 段付き電極を用いて加工を行えば、リニアモータ駆動による高速電極ジャンプ動作を用いなくても安定した加工状態で深い穴を加工できる。
- (3) 段付き電極では、広いサイドギャップに加え、加工粉濃度、およびその偏在が低いことから二次放電を抑制できることが CFD 解析により明らかとなった。
- (4) 段付き電極では、段の長さが小さく段差が大きいほどサイドギャップは減少し、かつ中太り量も減少する。また、段付き電極を用いると穴側面の加工面粗さが若干増加する。

謝 辞

本研究の遂行にご協力をいただきました (株) ソディックに謝意を表します。

参考文献

- 1) Yuji KANEKO, Hisanori YAMADA, Tatsuo TOYONAGA, Kazuo SHODA: Performance of Linear Motor Equipped Die-Sinking EDM, IJEM, No.5 (2000) 59-64.
- 2) Cetin SERKAN, Akira OKADA, Yoshiyuki UNO: Effect of Debris Accumulation on Machining Speed in EDM, IJEM, No.9 (2004) 9-14.
- 3) Cetin SERKAN, Akira OKADA, Yoshiyuki UNO: Effect of Debris Distribution on Wall Concavity in Deep Hole EDM, International Journal of JSME, series C, Vol.47, No.2 (2004) 553-559.
- 4) 標宣男, 鈴木正昭, 石黒美佐子, 寺坂晴夫: 数値流体力学, 朝倉書店 (1998) 15-43.
- 5) David C. Wilcox: Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries (1998) 103-125.
- 6) シーディーアダプコジャパン: Star-CD 理論マニュアル (2004).
- 7) Markus RAFFEL, Christian WILLERT, Jurgen KOMPENHANS: PIV の基礎と応用, Springer-Verlag (2000) 99-135.
- 8) Masahiro YOSHIDA and Masanori KUNIEDA: Study on the Distribution of Scattered Debris Generated by a Single Pulse Discharge in EDM Process, IJEM, No.3 (1998) 39-46.

(2008 年 1 月 22 日受付)