気中単発放電における材料除去過程の観察

谷 貴幸*, 辻田容希*, 後藤啓光*, 毛利尚武**

Observation of Material Removal Process by Single Pulse Discharge in Air

Takayuki TANI, Yoshiki TSUJITA, Hiromitsu GOTOH and Naotake MOHRI

Abstract

Although electrical discharge machining (EDM) can be used to perform high-precision machining, the material removal rate is low. From this viewpoint, it is extremely important to understand the process by which material is removed in the EDM method. In this study, the state of a workpiece being processed by a single pulse discharge was observed using a high-speed camera equipped with a high-magnification lens. To enable easy observation of the behavior of the material, a machining condition was selected in which there was a long duration of the pulse discharged by the needle electrode in air. Using a laser beam as illumination, an observation system employing a bandpass filter that allowed only a specific wavelength to pass through it was constructed. As a result, the behavior of the workpiece during the discharge could be observed without the effect of plasma emission. It was observed that several explosions intermittently occurred on the positive side of the workpiece during a single pulse discharge duration. Consequently, several small craters superposed in a narrow region were observed.

Key words : EDM, single pulse discharge, debris

1. 緒 論

放電加工法は、放電によって形成される微細な放電痕の集積によって形状加工が行われる。このことから、放電加工における加工特性を向上させるためには、一発の放電による除去過程を正確に把握する必要がある。

放電痕の形成プロセスとしては、従来から放電による材料の溶融・蒸発、加工液の気化爆発による圧力の発生、発生した圧力による溶融金属の飛散という考えが提唱されてきた¹⁾。しかしながら、測定機器の進歩に加え、透明体材料を介した放電

現象の直接観察や新しいシミュレーション手法による解析などによって、提唱されてきた放電痕の形成プロセスと実際の現象とは一致しない場合もあることが報告されている^{2, 3)}。現象観察の有効な手法として、ハイスピードカメラを用いた放電現象の観察は既に行われているが^{4, 5)}、放電中に溶融金属が加工屑として排出されるタイミングやその飛散の詳細な様子は不明であり、一発の放電中に具体的に溶融した金属がどのように除去されているかは十分に観察されるに至っていない。

そこで本研究では、極間の直接観察が比較的容易である気中において、数 μ s～数百 μ s程度のパルス幅の単発放電によって生じる極間現象をハ

* 筑波技術大学 (茨城県つくば市天久保4-3-15)

** 東京大学 名誉教授 (東京都文京区本郷7-3-1)

Fig. 1 System for a single pulse discharge observation.

イスピードカメラにより観察し、一発の放電によって材料が除去される過程を考察した。なお、極めて狭い範囲で生じる溶融金属の挙動を観察するために、ハイスピードカメラには高倍率でかつ長いワーキングディスタンスを持つ観察系を構成した。

2. 実験装置

2.1 ハイスピードカメラによる観察

本研究で使用する実験装置の概要を Fig. 1 に示す。加工形態は、気中において針電極対平面とした。針電極にはタングステン、加工物には鋼材 (S 50 C) を用いた。主な加工条件と撮影条件を Table 1, Table 2 にそれぞれ示す。撮影用のハイスピードカメラ (KEYENCE CO. Ltd, カメラ : VW-600M, モニター : VW-9000) には、高倍率の光学レンズ (KEYENCE CO. Ltd, VH-Z50L, 倍率:500 倍, WD:85 mm) を装着した。

Fig. 2 (a) に構成した観察系により放電中の極間を撮影した様子を示す。放電中の材料の挙動は、放電による発光が生じるため、その様子は観察できない。そこで、伊藤らによって開発された方法により⁶⁾、放電中の材料挙動を観察した。すなわち、特定の波長を持つレーザ光を照明光として、この波長のみを通過させるバンドパスフィルターを介した観察系を構築した。本実験では、波長 532nm の半導体レーザと中心波長 532nm, 半値幅 1.0nm のバンドパスフィルターの組み合わせにより観察を行った。

この結果、Fig. 2 (b) に示すように、放電中であるに

Fig. 2 Observation of the gap during the discharge using a band pass filter.

も関わらず、発光の影響を受けず材料が飛散している様子が観察された。この観察システムによって、放電中の溶融金属の挙動を観察することが可能となった。

2.2 放電条件

極間距離は、針電極と加工物との電気的な接触を基準として、加工物側に設置した Z ステージを降下させることによって設定した。本実験では、気中での放電を容易に行うために、極間距離を $5\mu\text{m}$ に設定し、電源電圧は 400V とした。電流制限抵抗を調整し、放電電流は 23A とした。電圧を印加後に、FET に $100\mu\text{s}$ のパルス信号を入力することによってパルス幅を設定した。

Table 1 Machining conditions

Power supply voltage	400 [V]
Current limiting resistance	15 [Ω]
Pulse duration	100 [μs]
Electrode polarity	negative

Table 2 Photographing conditions

Exposure time	1.11 [μs]
Frame rate	2.3×10^5 [fps]
Image resolution (pixel number)	160(horizontal) 32(vertical)
Magnification	100

3. 放電中の陽極側溶融金属の挙動

3.1 加工屑の発生形態

構築した観察システムにより、放電中に溶融した材料の挙動を観察した結果の一例を Fig. 3 に示す。図の中央が実測した放電波形であり、その周囲に時間を追って特徴的な現象が現れたフレームを抜き出した結果を

Fig.3 Gap phenomena observed during the discharge with its discharge waveform.

Fig.4 Time and number of the debris occurrence during a single pulse discharge.

示している。撮影の開始は、FETに入力したパルス信号とハイスピードカメラとを同期させることによって行った。撮影は4.3μs毎に行われ、一枚目のフレームには、0~4.3μsの間において生じた現象が撮影される。なお、この際の露光時間は1.11μsである。放電波形により推定された放電遅れ時間から、放電開始時のフレームを判断した。放電の開始と同時に、放電点の周囲に溶融した材料がわずかに盛り上がり、次いで加工屑として飛散している様子が観察された。その後、しばらくは溶融した金属が飛散する状況は見られず、放電開始から約17μsのタイミングにおいて再び溶融した金属が飛散した。二回目の溶融金属の飛散後は、十数μsの間は材料の動きは観察されなかったが、放電開始から約47μs後に再び爆発するような様子で溶融した金属が飛散した。

以上に述べた現象の再現性を調べるために、一発の

放電中に溶融した金属が加工屑として飛散した回数およびその発生時間について検討した。7回の単発放電実験を行い、溶融金属の飛散が発生した時間をまとめてFig.4に示す。100μsの放電パルス幅の条件において、二回から四回の溶融金属の飛散が確認された。すべての結果において、一回目の材料の飛散は、放電の開始と同時に発生した。二回目の加工屑の飛散は、25μs前後に多く発生しており、三回目以降の

飛散はさらに約50μs後に発生する場合と発生しない場合があった。放電開始から溶融した金属が飛散する時間にバラツキはあるが、すべての実験において複数回の飛散が確認された。なお、飛散回数が多い放電においては、撮影画面の左右に偏って溶融金属が飛散する傾向を示した。

以上、本実験の条件においては、一発の放電中に一定時間において陽極側では複数回の材料の除去が爆発的に生じることが観察された。陽極側では一発の放電において生じる材料の除去は一回であると考えられてきたが、その考えとは異なる場合があることが示された。

3.2 短パルス放電における溶融金属の挙動および放電痕形態

前述した溶融金属の飛散の発生タイミングの測定結果から、数μs程度の短いパルス幅では、その飛散は一回となると予想される。パルス幅が9μsの条件において撮影された極間の様子をFig.5に示す。同図には、パルス制御信号および撮影開始から4.3μs毎の撮影結果をすべて示している。

この時の放電遅れ時間は、3μs程度であり、最初のフレームには放電の開始前と比べ変化が無かったため、まだ放電は発生していない状態である。2フレームにおいて、放電の発生とともに周囲に盛り上がりが生じている。その後のフレームにおいて、溶融した金属の飛散あるいは盛り上がり成長している様子が観察された。パルス幅を短く設定した場合には、観察された

Fig. 5 Gap phenomena observed under the short pulse duration with its discharge waveform

Fig. 6 Photograph of a single pulse discharge crater.

溶融金属の飛散回数は一回となった。この時に成形された放電痕を Fig. 6 (a) に示す。なお、Fig. 6 (b) には $100 \mu s$ のパルス幅で二回の飛散が観察された放電痕も示している。一回の加工屑の飛散であったパルス幅の短い条件での放電痕は、比較的綺麗な円形となっており、爆発的な除去が一回のみであった様子がうかがえる。これに対して、二回の爆発的な除去が観察された場合には、中心部には図(a)と同様な除去が発生し、その後さらに二回目の爆発によってさらに除去領域が広がり、周囲に盛り上がりも観察される。撮影された爆発的な溶融金属の飛散回数に対応した放電痕が形成されていることから、本実験の撮影結果は極間の様子をかなり正確に現わしていると思われる。

パルス幅の短い放電における現象を詳細に観察すると、放電終了後も溶融金属が継続して飛散していることが明らかとなった。Fig. 5(d)に示す3フレーム直後においてすでに放電が終了しているにもかかわらず、その後も図中の矢印で示すように溶融金属の飛散や盛り上がりが進行している様子が撮影された。このこと

から、放電によって材料が溶融状態にまで達した場合には、その後放電が停止しても、溶融金属が加工屑となって排出されるまでの駆動力は維持されと考えられる。また、この現象は、繰り返し放電において放電の位置が移動した後でも、その前の放電によって短絡に至ることや休止時間中に生じる橋絡⁷⁾などとも共通した現象と考えられる。極間の電気信号のみでは捉えられないこれら

の挙動は、放電加工における極間制御の困難さの一因になっていると考えられる。

以上の結果から、短いパルス幅の条件では、溶融金属の飛散回数は一回であり、パルス幅が長くなれば、その飛散回数が増えるといえる。また、放電が終了した後も、溶融金属の飛散や盛り上がりの発生などが継続することが直接観察された。

4. 極性による加工屑発生形態の違い

これまで、陽極側での材料の除去の様子を観察してきた。本章では、陰極側での溶融金属の挙動について検討する。陰極点におけるアーク柱の挙動は、電流密度の高い点が不規則に移動していることが観察されており²⁾、これまでに観察した陽極側での現象とは異なると推測される。

被加工物を陰極として、これまでと同じ電気条件により、単発放電による極間の観察を行ったが、溶融金属が加工屑として飛散する様子は見られず、電流値を $50 A$ と高くした場合でも同様に観察することは出来なかった。そこで、材料の除去量が多く、溶融金属の挙動が観察されやすいと予想される融点の低い亜鉛合金を被加工物として、電流値を $30 A$ に設定して単発放電実験を行った。

$100 \mu s$ のパルス幅の放電において、放電発生から $21.5 \mu s$ までの極間の様子および放電の途中である $64.5 \mu s \sim 81.7 \mu s$ について $4.3 \mu s$ 毎に抜き出した撮影結果を Fig. 7 に示す。被加工物を亜鉛合金とすることによって、放電中に陰極において材料表面が動く様

Fig.7 Gap phenomena observed under the condition of workpiece (-) with waveform.

Fig.8 SEM image of a single discharge crater (Electrode polarity: (+)).

子を観察することができた。各フレームにおいて、溶融金属の飛散あるいは盛り上がりが出現したと思われる箇所を矢印により示している。陽極で観察された現象とは異なり、新しい溶融金属の飛散あるいは盛り上がり間を置かず次々と生起している様子が観察された。この現象は、パルス幅全体に渡って続いた。また、図中の点線で示すように、陰極側の飛散領域は、放電開始とともに拡がりを見せ、定常拡がりに落ち着く。陽極側の針電極は、放電中に時間の経過とともに消耗していく様子も観察され、陰極とした場合と比較

して大きく消耗した。

この放電によって、形成された放電痕のSEM像をFig.8に示す。全体として円形の放電痕が形成されているが、放電痕表面を詳細に観察すると細かく何度も材料が除去されたような跡が観察された。これは、電流密度の高い点が表面を不規則に移動した結果であると考えられる。

以上の観察結果から、陽極側と陰極側では、材料の除去過程は大きく異なることが明らかとなった。陽極側では、放電点の移動はほとんど無く、放電中に表面への加熱が継続され、これに伴って次章で考察する溶融金属の複数回の爆発的な除去が発生したと考えられる。これに対して、陰極側では、電流密度の高い点が激しく動き回っているために、その材料除去のほとんどは蒸発に伴う飛散であると考えられる。

5. 除去メカニズムの推定

以上の観察により得られた結果から、一発の放電によって、陽極側および陰極側において材料の除去が生じるメカニズムを考察する。推定したモデルをFig.9に示す。

陽極における最初の溶融金属の飛散は、入熱密度が非常に高く、最表面は瞬時に蒸発状態となり、これによって溶融金属の盛り上がりあるいは飛散が生じる。その後、アーク柱は膨張によって入熱密度は低下するが、表面への加熱は継続され、伝導熱により内部に溶融域ができる。表面の蒸気圧がある限界を超えると、表面蒸発による反跳力⁹⁾が生じ、溶融した内部の金属が吹き飛ばされる。反跳力によって溶融金属が飛散した後は、新しく出現した面が再び加熱されることになる。なお、表面加熱によって沸点に達する時間は、放電点の電流密度(加熱流密度)と沸騰潜熱および沸点と加熱開始時点での温度差などが効いてくる。

このようなプロセスが放電中に繰り返し発生するため、一発の放電中に複数回の材料の除去が行われたと考えられる。なお、陰極については、電流密度の高い放電点が表面を不規則に移動したため、陽極における1回目の除去プロセスが放電中に繰り返し生じたと考えられる。このように、陰極側における除去プロセスは蒸発が主体であるが、陽極側では蒸発に加え溶融金属を加工屑として排出している。この除去プロセスの違いが、極性による加工効率の違いの原因

Fig.9 Model of the material removal mechanism.

の一つとも考えられる。

本論文では、気中放電加工における溶融金属の飛散の観察から陽極及び陰極側での材料除去プロセスを考察した。実際の放電加工法は、加工液中で実施されることから、より現実に即した材料除去プロセスを把握するためには、更に様々な加工環境での観察、測定等を行う必要がある。

6. 結 論

単発放電中の溶融金属を観察できるシステムを構築し、その材料挙動から放電による材料の除去メカニズムを考察した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 数十 μ sを超えるパルス幅の放電においては、一発の放電によって行われる陽極側の材料の除去は一回ではなく、複数回であった。
- (2) 放電によって、一旦蒸発、溶融状態にまで達した場合には、その時点において放電が終了しても溶融金属の飛散あるいは盛り上がりの成長が生じることが改めて確認された。
- (3) 陰極においては、放電中は連続的に溶融金属の飛散あるいは盛り上がりが生じる。陽極における初期の状態が放電パルス中に継続して行われるため、陰極

側は蒸発を中心とした除去が主体となる。

- (4) 陽極において一発の放電中に複数回の除去が生じる理由は、放電による材料表面の加熱、蒸発を伴う材料の飛散、材料の飛散による新しい面の出現、再加熱のサイクルを繰り返すためと考えられる。

謝 辞

本研究の一部には、科学研究費補助金（基盤研究(C) 16K06794）を用いました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 齋藤長男：放電加工のしくみと100%活用法，技術評論社，(1979)p.17.
- 2) 北村朋生，国枝正典：透明体電極を用いた放電加工極間現象の直接観察，精密工学会誌，Vol.81，No.11 (2015) pp.983-986.
- 3) 楊曉冬，韓笑，国枝正典：分子動力学を用いた放電加工の除去メカニズムの解明，電気加工技術，Vol.37，No.116 (2013) pp.25-37.
- 4) 草深友佑，早川伸哉，糸魚川文広，中村隆：放電加工の放電点における溶融金属除去の直接観察，電気加工学会全国大会 (2013) 講演論文集，pp.3-6.
- 5) 小島彰，国枝正典：放電加工におけるアーク柱の膨張速度，2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，

pp.671-672

- 6) 田辺里枝, 伊藤義郎, 毛利尚武: 大電流単発放電における微細凹形成現象の時間分解観察とその形成ダイナミクス, 精密工学会誌, Vol.73, No.6 (2007) pp.682-687.
- 7) 齋藤長男, 毛利尚武, 大竹 定: 放電加工の消イオン特性 (第1報), 昭和 62 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1987) pp. 713-714.
- 8) 野口暁, 大村悦二, 平田好則: レーザの多重反射と蒸発を考慮したレーザ穴あけ加工の熱流体解析—第2報, レーザの多重反射と材料の蒸発を考慮したレーザ穴あけシミュレーション—, レーザ加工学会誌, Vol.14, No.2 (2007) pp.113-119.

(2017年10月10日受付)