

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560120

研究課題名(和文) 放電加工における材料除去機構と加工液の役割の解明

研究課題名(英文) Investigation of Mechanism of Material Removal and Role of Machining Fluid in Electrical Discharge Machining

研究代表者

早川 伸哉 (Hayakawa, Shinya)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10314080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：放電加工において放電点から熔融金属が除去されるメカニズムを解明すること、および、放電加工における加工液の役割を解明することを目的として、極間隙における加工くずの飛散挙動と気泡の合一および排出挙動を高速ビデオを用いて観察した。その結果、放電点からの材料の除去には放電点の圧力低下が関与していることが示唆された。また、飛散した加工くずは気泡の周囲の加工液中を浮遊し気泡の排出とともに排出されること、気泡は合一して大きくなることで極間隙から排出されやすくなることから、加工液は加工の安定性に関与していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study observes the scattered debris particle and bubble coalescence in the electrical discharge machining process in order to discuss the mechanism of material removal and role of machining fluid. A high-speed video camera was used for the experiments. It is found that material removal occurs while the bubble is expanding, that is, while the pressure at the discharge point is decreasing. This result indicates that the phenomena caused by the pressure drop affects the material removal. It is also found that the generated bubbles coalesce with each other during the machining process, and the coalesced large bubble is easily ejected from the gap space. Since the debris particles are ejected along with the bubbles, the machining fluid has a role in stabilizing the EDM process.

研究分野：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：放電加工 材料除去 加工くず 圧力低下 加工液 気泡 合一 加工安定性

1. 研究開始当初の背景

放電加工は加工液中で発生させたパルス放電の熱的な作用によって金属などの除去加工を行う加工法である。加工液は放電点から熔融金属を飛散させるために不可欠であると従来は考えられてきたが、そのメカニズムは十分には解明されていない。一方、加工液を使用しない気中放電でも液中放電の場合と同程度の材料除去が生じることが報告されるなど、従来の説では説明できない現象が近年報告されている。

ところで、放電加工の放電点の圧力は絶縁破壊直後に数千気圧に達した後に急激に低下し、その後は上昇と低下を繰り返すことが報告されている。このことと前述の知見および申請者らがこれまでにやってきた微細放電付着加工、気液界面放電加工などの研究の成果から、放電加工において熔融金属を飛散させるメカニズムは圧力低下に伴う「熔融金属のキャビテーション（発泡）」または「熔融金属中に溶解したガスの脱気・発泡」ではないかという仮説を着想した。また、加工液は材料除去メカニズムとして必要不可欠ではなくても、放電加工にとってはやはり必要であり、極間距離を大きく保つことで加工を安定に継続させる役割を果たしているという仮説を着想した。

2. 研究の目的

本研究は放電加工の加工現象を解明するという大きな構想の中で、放電点から熔融金属を飛散させるメカニズムと加工液の役割に関する次の2つの仮説を検証することを目的とする。

- (1) 材料除去は放電点の圧力低下に伴う熔融金属のキャビテーション（発泡）または熔融金属中に溶解したガスの脱気・発泡によって生じる。
- (2) 加工液には極間距離を大きくして加工を安定にする役割がある。

3. 研究の方法

(1) 極間隙における加工くずの飛散挙動の観察

放電点から除去された加工くずが極間隙を飛散していく様子を高速ビデオを用いて観察し、その軌跡を遡ることで放電点から加工くずが除去されたタイミングを推定した。また、放電点の圧力の増減（すなわち気泡の膨張・収縮運動）と材料除去との関係を調べるための実験として、気泡が膨張から収縮に転じて放電点の圧力が増加し始めた後まで放電を長時間持続させた場合についても観察を行った。

実験は主に次の2種類の電極配置で行った。第一は実際の放電加工で形成されている平

行平板極間隙を模擬した実験である。金属細線を貫通させた透明樹脂板と金属丸棒の端面を対向させることで平行平板極間隙を形成し、透明樹脂板を通して放電面に垂直な方向から極間隙の観察を行った。ただし、この方法では放電点そのものの観察は行えない。

第二は放電点を直接観察するための方法である。2枚の金属薄板の端面同士を対向させ、放電面に平行な方向から観察を行った。電極に薄板を用いた理由は、カメラの焦点深度の範囲内で放電が発生するようにするためである。

(2) 放電点からの熔融金属除去現象の直接観察

前述(1)の実験では極間隙を飛散していく加工くずの観察が行えるが、放電点から加工くずが離脱する瞬間を直接観察することはアークプラズマの発光が強いために行えない。一方、その飛散軌跡を遡ることで材料除去が生じたタイミングを推定したところ、放電終了後に材料除去が生じる場合もあることがわかった（後述）。そこで、放電終了後に生じる材料除去の瞬間を観察することを試みた。

また、放電中に生じる材料除去をアークプラズマの発光に妨げられることなく観察する方法として、箔電極の表面で発生させた放電によって裏面まで熔融する条件を見出し、裏面から加工くずが離脱する様子を観察することを試みた。

実験には高速ビデオを使用した。

(3) 急減圧モデル実験

圧力低下に伴う熔融金属のキャビテーションや熔融金属に溶解したガスの脱気が生じた場合に熔融部の飛散がどのように生じるのかを確認するための実験として、急減圧を発生させたときの熔融金属の挙動を高速ビデオを用いて観察した。高压容器内に設置した金属板を通电加熱し、一部が熔融したタイミングで高压容器の電磁弁を開放することで急減圧を発生させた。

(4) 極間隙における気泡挙動の観察

加工液が極間距離を大きくして加工を安定に保つメカニズムとして、加工くずが液体内に捕われることで加工液の実効的な絶縁破壊強度が小さくなることが考えられる。そしてその絶縁破壊強度は、毎回のパルス放電によって加工液が酸化・分解して生じる気泡の存在や、気泡および加工くずを極間から排出するために行われる主軸のジャンプ動作の影響を受ける。そこで、極間隙における気泡の挙動を高速ビデオを用いて観察した。本研究ではとくに気泡同士の合一と極間からの排出に着目した。

4. 研究成果

(1) 極間隙における加工くずの飛散挙動の観察

平行平板極間隙を飛散していく加工くずの軌跡を遡ることでその加工くずが放電点から除去されたタイミングを推定し、同時に観察した気泡の膨張・収縮運動との関係を調べた結果を図1および図2に示す。図1の縦軸は加工くずが除去された時刻を放電持続時間で規格化して表している。また、図2の縦軸は加工くずが除去された時刻を気泡運動が膨張から収縮に反転した時刻（すなわち、気泡の直径が最大となった時刻）で規格化して表している。これらの結果から次の知見が得られた。

- ① 放電点からの加工くずの除去は、気泡膨張中の放電中または放電終了直後に生じる。
- ② 放電点からの加工くずの除去が気泡収縮中に生じることはない。
- ③ 上記①と②の結果は、材料の除去には気泡の膨張に伴う放電点の圧力低下が関与していることを示唆していると考えられる。

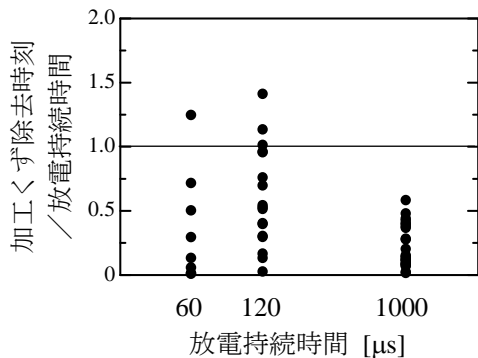


図1 放電持続時間と加工くず除去時刻の関係

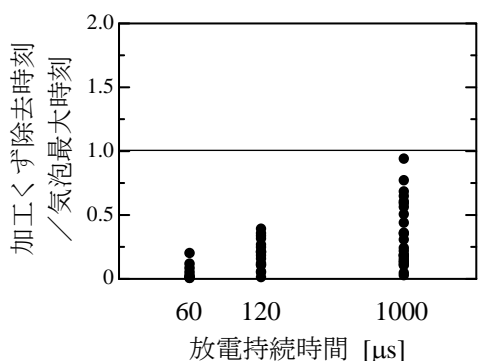


図2 放電持続時間と気泡最大時刻の関係

次に、平行平板極間隙を飛散していく加工くずを放電面に平行な方向から観察した。その結果から次の知見が得られた。

- ④ 液中放電の場合に赤熱した加工くずが気泡中を飛散して電極放電面に衝突しても再付着せずに跳ね返る場合が多くみられる。

気中放電の場合は加工くずが放電面に再付着すると報告されているのに対して液中放電の気泡中では再付着しない理由として、液中放電の場合は気泡内でも放電面が加工液で濡れている可能性が考えられる。

- ⑤ 極間を飛散する加工くずが次の放電の発生を誘発する場合が確認された。

以上の①～④の知見を報告したのは本研究が世界で初めてである。

(2) 放電点からの溶融金属除去現象の直接観察

放電終了後に生じる材料除去や、箔電極の表面で発生させた放電によって放電中に裏面で生じる材料除去に着目することで、放電点から溶融金属が離脱する瞬間の観察を行った。その結果から次の知見が得られた。

- ① 溶融金属が爆発的に噴出する場合は観察された。この場合は後述する②の場合と比較して寸法が小さい加工くずが高速で放射状に飛散した。爆発的な除去が放電中に生じた場合は無数の加工くずが四方八方に飛散した。

- ② 溶融金属が激しく流動し、滴が跳ねるようにして材料が離脱する場合は観察された。この場合は前述の①の場合と比較して大きい寸法の加工くずが低速で飛散した。また、溶融部から離脱しかけた滴のような塊が千切れずに引き戻される場合も見られた。

放電加工の放電点から溶融金属が離脱する瞬間を直接観察した報告は本研究が世界で初めてである。しかし、観察された現象がどんなメカニズムで生じているのかを特定するまでには至らなかった。

(3) 急減圧モデル実験

溶融金属がキャビテーションを起こした場合の様子を観察するために、高压容器内に設置した金属板を通电加熱して溶融させ、容器内の圧力を急激に減圧したときの様子を高速度ビデオを用いて観察した。その結果、圧力が低下したタイミングで溶融金属が飛散する現象が観察された。この結果は前述(1)の実験で得られた知見③と符合する。

しかし、このモデル実験で観察された材料除去現象が圧力低下に伴う溶融金属のキャビテーションであることの確証は本研究の範囲では得られなかった。圧力低下に伴う溶解ガスの脱気、あるいは、通电加熱による温度上昇によって突沸が起きた可能性を排除して、溶融金属のキャビテーションであることを検証するには、温度と圧力をより詳細に管理した実験を行うなどの改善が必要である。

(4) 極間隙における気泡挙動の観察

放電加工において連続加工中に次々と発生する気泡の極間隙での挙動を高速度ビデオ

オを用いて観察した。その結果、次の知見が得られた。

- ① 加工液に放電加工油を用いた場合、極間隙に存在する気泡は時間とともに合一して大きな気泡が形成される。
- ② 連続放電により次々と発生する気泡は、短期的には合一と分断を繰り返しながら、長期的には合一が進行して大きな気泡になる。
- ③ 合一して大きくなった気泡が流動して加工面の縁に到達すると、浮力によって極間隙から一気に排出される。

次に、ジャンプ動作によって大きな気泡が排出された場合の観察結果を図3に示す。この図は放電面に垂直な方向から極間隙を観察した様子である。時刻0msから200msにかけて主軸が引き上げられており、極間距離が大きくなるため気泡の直径は小さくなっている。また、周囲から加工液が流入してくるため、極間隙に存在していた気泡と加工くずは加工面の中心に向かって流動している。

時刻200ms以降は主軸が降下しており、中心付近に集合していた気泡と加工くずが再配置されていく。ジャンプ動作前に存在していた無数の小さい気泡は元の位置に戻っているものも多いことから、ジャンプ動作によって気泡群が集合しても必ずしも合一が進行するわけではないことがわかる。そして、一連の流動の若干の非対称性によって大きな気泡が時刻500msごろに一気に排出され、その周囲に存在していた加工くずの一部も

排出されている。

ジャンプ動作時の極間隙の観察結果から次の知見が得られた。

- ④ 気泡や加工くずを極間隙から排出するためのジャンプ動作によってそれらはいったん奥まった位置に集合し、再び元の位置に戻るものも多い。極間隙に存在していた気泡や加工くずの多くが排出されて清浄な加工液と入れ替わるわけでは必ずしもない。
- ⑤ ジャンプ動作に伴う流動に若干の非対称性があることによって、合一して大きくなっていた気泡の排出が促進される。
- ⑥ 大きな気泡が排出される際に、その周囲の加工液中に捕捉されていた加工くずの一部も排出される。

前述(1)の実験と本実験の観察から、加工くずは気泡の周囲の加工液中（気液界面の近傍）を浮遊していることがわかった。また、気泡が合一して大きくなると周囲に存在していた加工くずも再配置され、局所的な加工くず濃度は増大すると考えられる。これらの加工くずは極間に電圧が印加されると柱状に集積して絶縁破壊を起こしやすくする作用があるため、気泡の周囲の加工液が加工くずを捕捉していることは極間距離を大きく保って加工を安定にする作用があると考えられる。

一方、大きな気泡が一気に排出されてその周囲の加工くずも排出されると、極間隙の加工くず濃度は急激に低下することになる。したがって、気泡同士が合一しやすい性質をもつ加工液を使用した場合は加工くず濃度の増大と減少の変動が空間的にも時間的にも大きく、加工が不安定になりやすいことが懸念される。

今後はここで述べた仮説を検証することで、気泡の合一のしやすさという観点から優れた加工液を開発するための指針を与えることができるかと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 今井進也, 早川伸哉, 糸魚川文広, 中村隆: 放電加工の極間隙における気泡の合一と加工現象の関係, 電気加工学会誌, 査読有, Vol. 48, No. 117 (2014) pp. 22-27.
- ② Shinya Hayakawa, Yusuke Sasaki, Fumihiro Itoigawa, Takashi Nakamura: Relationship between Occurrence of Material Removal and Bubble Expansion in Electrical Discharge Machining, Procedia CIRP, 査読有, Vol. 6 (2013) pp. 175-180.
DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.095

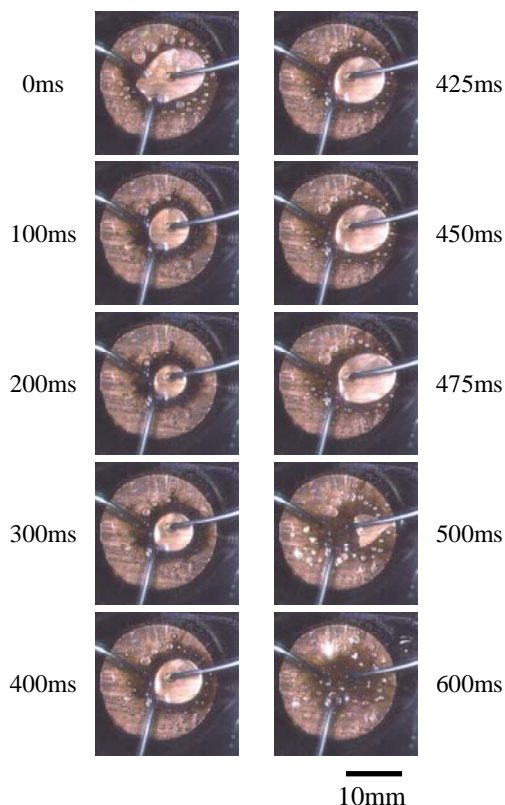


図3 ジャンプ動作に伴う気泡の排出

〔学会発表〕（計7件）

- ① 今井進也：早川伸哉，糸魚川文広，中村隆：放電加工の極間隙における気泡の合一と加工現象の関係，電気加工学会全国大会（2013），（2013）pp.11-16.
- ② 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熔融金属除去の直接観察，電気加工学会全国大会（2013），（2013）pp.3-6.
- ③ 佐々木勇輔，早川伸哉，糸魚川文広，中村隆：放電加工の長パルス放電における加工くず飛散の観察，電気加工学会全国大会（2012），（2012）pp.25-28.
- ④ 今井進也，早川伸哉，糸魚川文広，中村隆：放電加工の極間隙における気泡の分断・合一挙動の観察，2012年度精密工学会春季大会，（2012）pp.123-124.
- ⑤ 千種法人，早川伸哉，糸魚川文広，中村隆：放電加工の極間隙における加工くず飛散の観察，電気加工学会全国大会（2011），（2011）pp.79-82.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 伸哉 (HAYAKAWA, Shinya)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10314080