

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 14 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560146

研究課題名(和文)極間距離と加工面性状が単発放電痕性状に及ぼす影響に関する研究

研究課題名(英文)Study on Influence of Discharge Gap Distance and Characteristics of Workpiece surface on Form of Crater by Single Pulse Discharge

研究代表者

吉田 政弘 (Yoshida, Masahiro)

東京都立産業技術高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：80220680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は除去量が大い単発放電痕形状とその形成メカニズムを探ることが目的である。研究の結果、同一の放電エネルギーにも関わらず、極間距離が単発放電痕形状に及ぼす影響が大きく、放電痕形状で除去体積に大きな違いが生じ、特に盛り部形状の影響が大いことを明らかにした。放電痕形状に違いが生じる要因は放電発生時に生じる気泡挙動と考え、加工反力と気泡挙動の同時観察を行い、放電発生時の気泡モル量を明らかにした。また、単発放電痕の観察を短縮化するため、最新型のレーザ式工学顕微鏡による観察を試みた。その結果、盛り部の体積測定誤差が大いものの、除去体積の測定には十分な測定精度が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, the shape of craters formed by a single pulse discharge and mechanism of crater formation were investigated. The results confirmed that the crater shape has influence on the discharge distance regardless of the discharge energy, and that the amount of material removed at the crater differs according to its shape. In particular, influence of the removed material on the shape of protrusion around the crater was seen. The crater shape differs due to the movement of bubbles during discharge, and the reaction force for generating discharge and movement of bubbles during discharge was also observed by a high speed camera, to determine the molar quantity of bubbles generated by a single pulse discharge. Observations of the crater by the latest laser optical microscope were also attempted. It was found that although the error of the measurement of the size of the protrusion around the crater is large, the method is sufficiently accurate for the measurement of removed material.

研究分野：特殊加工(放電加工, 電解加工)

キーワード：放電加工 単発放電痕 断面形状積算法 光学式顕微鏡 加工反力測定 気泡挙動観察

1. 研究開始当初の背景

放電加工特性の向上が求められ、放電工現象の解明が必要であり、単発放電痕の形成メカニズムの解明が重要である。そこで、単発放電痕形成を左右する気泡の挙動を加工反力の測定とともに実施を試みた。

2. 研究の目的

放電加工は単発放電痕の累積によって加工が進む。そのため、放電加工の加工速度や加工面粗さは単発放電痕性状に影響され、その性状は極間距離や工作物加工面に左右されるが確認されていない。単発放電痕性状の解明には、単発放電痕を構成する盛りり部分の体積、放電痕内に残留する溶融再凝固層の体積、除去体積、そして、完全除去体積を求める必要がある。これらの体積は、筆者らが開発した断面形状積算法により初めて高精度で求めることが可能となった¹⁾。本研究は、断面形状積算を用いて極間距離と加工面の組成・組織や残留応力などが単発放電痕性状に及ぼす影響を調べ、さらに、単発放電の各種体積の素早い算出のため、光学顕微鏡を用いた測定方法の検討も本研究の目的とする。

3. 研究方法

単発放電痕の上面と断面の観察は高倍率顕微鏡 (Mitutoyo MF-UA1010THD) を用いた。また、断面形状積算法に必要な放電痕断面の画像データは、顕微鏡に取付けた画像処理装置 (Mitutoyo QS VISION UNIT) でパソコンに取込んだ。放電痕断面は一般的に図1に示したような形状をしている。本研究では、放電痕断面を図1に示すように名付けた。そして、各部分の名称と各定義を表1に示す。

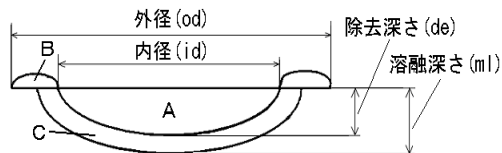


図1 単発放電痕各部の名称

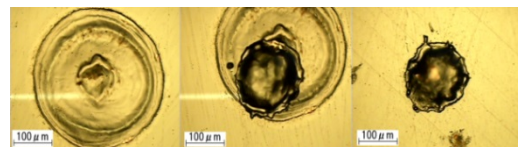
表1 定義と名称

名称	定義
溶融体積 [μm^3]	Aの体積+Cの体積
見かけ上の除去体積 [μm^3]	Aの体積
盛りり部体積 [μm^3]	Bの体積
溶融再凝固層体積 [μm^3]	Cの体積
除去体積 [μm^3]	Aの体積-Bの体積
除去率 [%]	(除去体積/溶融体積) × 100
盛りり率 [%]	(Bの体積/溶融体積) × 100
残留率 [%]	(Cの体積/溶融体積) × 100
内径・外径比 Rd	Rd=od/id

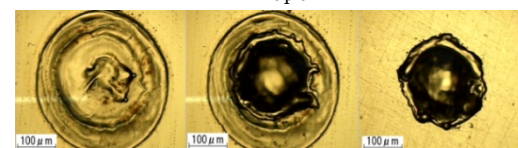
4. 研究成果

(1) 溶融再凝固層が放電痕に及ぼす影響

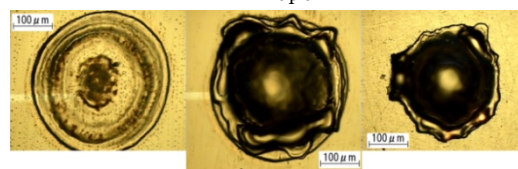
実際の放電加工は一度放電加工された面、すなわち溶融再凝固層面上に再び放電させて加工が進む。このため、溶融再凝固層面上に単発放電痕を作成し、この放電痕の調査が必要と考えられる。そこで、本研究はバージン面に平坦な単発放電痕を作成し、この溶融再凝固層上に再び単発放電を生じさせた (以降、再単発放電痕と称する)。そして、再単発放電痕の詳細な調査を断面形状積算法を用いて行い、バージン面に作成した単発放電痕との比較を行った。



(a) 平坦な放電 (b) 再単発放電 (c) 単発放電 20 μs



(a) 平坦な放電 (b) 再単発放電 (c) 単発放電 40 μs



(a) 平坦な放電 (b) 再単発放電 (c) 単発放電 100 μs

図2 単発放電痕と再単発放電痕の比較

(2) 放電痕形状の比較

図2に単発放電痕と再単発放電痕の上面から比較した結果を示す。各パルス幅について8個の平坦な放電痕を作成した後に再単発放電痕を作成したが、どれも同じような形状となった。単発放電痕も8個作成したが同じような形状であった。そこで、各パルス幅の放電痕はきれいな形状の放電痕を選んだ。

(3) 各体積の比較

① 溶融体積の比較

図3に溶融体積の比較結果を示す。パルス幅によらず再単発放電痕の方が大きい。これは、溶融再凝固層は浸炭作用を受けて含まれる炭素の含有量が多いが、鋼中の炭素含有量が増加すると融点が低下する。その影響を受けたものと考えられる。

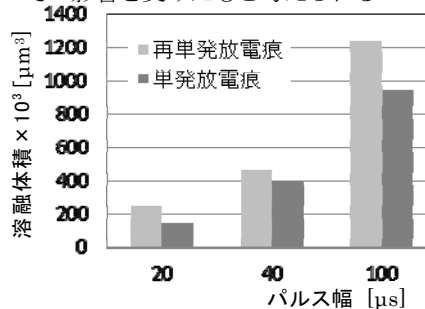


図3 溶融体積の比較

② 盛りり部体積の比較

図4に盛りり部体積の比較結果を示す。この結果から、いずれのパルス幅に関わらず再単発放電痕の方が盛りり部体積が大きくなっている。特にパルス幅 100 μs では単発放電痕の2倍以上になっている。

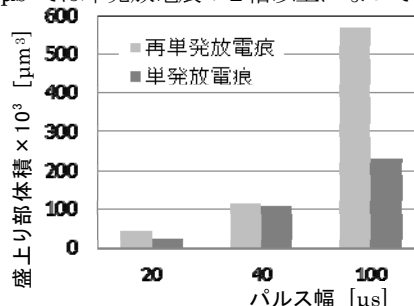


図4 盛りり部体積の比較

③除去体積の比較

図5に除去体積の比較結果を示す。除去体積は表1の定義の通り、放電で工作物から完全に除去された体積である。したがって、この体積が大きいほど、放電一回あたりの除去量は大きく、加工速度が速くなることが考えられる。パルス幅20、40 μs では再単放電痕の方が大きい。パルス幅100 μs では単放電痕の方が大きい。これは、前述の盛り部体積が単放電痕に比べて再単放電痕が2倍以上大きいことが影響している。

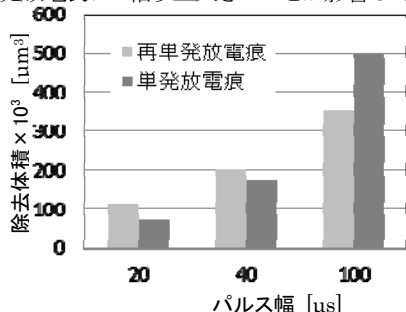


図5 除去体積の比較

(4) 極間距離が単放電痕に及ぼす影響

極間距離が単放電痕形状に及ぼす影響について調べる。極間距離が異なると放電発生時に生じる気泡体積が異なり放電痕形成に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、極間距離と単放電痕形状の関係を明らかにする。

①極間距離設定装置の製作

今回の研究対象となる電気加工条件の単放電痕で生じる気泡直径、約5mmに対して十分大きな $\phi 20\text{mm}$ の銅製工具電極を用いた極間距離設定装置を製作した。図6に極間距離設定装置を示す。本装置は、極間距離設定に分解能1 μm 、器差 $\pm 2\mu\text{m}$ のマイクロメータヘッドを使用することで、極間距離を1 μm 単位で設定することができる。また、銅製の工具電極の中心部分から、 $\phi 0.1\text{mm}$ の黄銅製のワイヤが任意の長さに突き出せる構造になっており、工具電極中心部分のみに確実に放電を生じさせることが可能である。なお、黄銅製のワイヤは、今回の電気加工条件では放電発生時に瞬時に消滅するため、形成される放電痕形状に及ぼす影響は少ないと思われる。

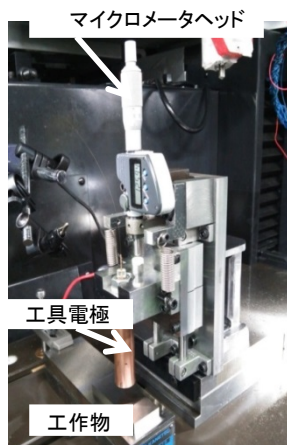


図6 極間距離設定装置

(5) 極間距離と放電痕形状の関係

単放電痕の作成条件を表2に示す。極間距離は50、100、200 μm について単放電痕を5個ずつ作成した。

①単放電痕の外面観察による比較

各極間距離で作成した単放電痕の代表的放電痕を図7に示す。これから極間距離によって放電痕形状が異なることが分かる。

表2 単放電痕作成条件

開放電圧[V]	220
放電電流[A]	18
パルス幅[μs]	100
極間距離[μm]	50, 100, 200
極性	工具電極-, 工作物+
加工液	油加工液(VITOL2)
工具電極	$\phi 20$ 銅, $\phi 0.1$ 黄銅ワイヤ
工作物	SKD11(合金工具鋼)

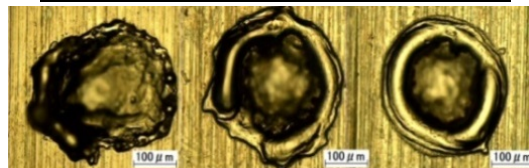


図7 各極間距離における単放電痕

②溶融体積に及ぼす影響

図8に極間距離と溶融体積の関係を示す。これから、極間距離が狭くなると溶融体積が増加する傾向であることが分かった。これは、極間距離が狭くなると工作物に流入する放電エネルギーが増加するが²⁾、これを反映している。

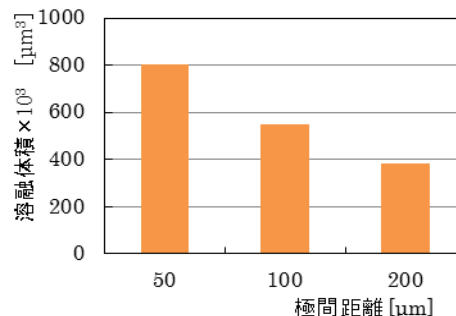


図8 各極間距離における溶融体積

③盛り部体積に及ぼす影響

図9に極間距離と盛り部体積の関係を示す。極間距離100 μm が最大になっている。

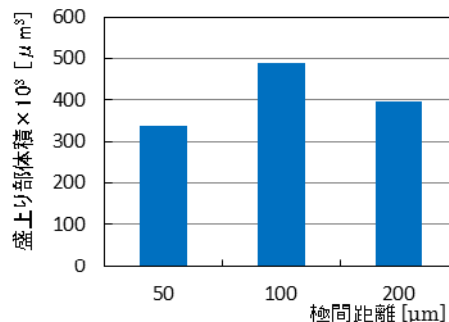


図9 各極間距離における盛り部体積

④溶融再凝固層体積に及ぼす影響

図10に極間距離と放電痕内に残留する溶融再凝固層体積の関係を示す。これから、極間距離が狭くなるほど放電痕内部に残留する溶融再凝固層体積が増加する傾向を示し、極間距離50 μm は200 μm に比べて2倍の溶融再凝固層が放電痕内に残留することが分かった。

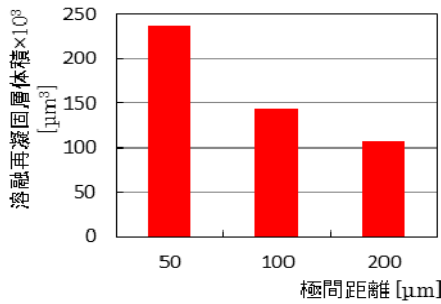


図 10 各極間距離における溶融再凝固層体積

⑤除去体積に及ぼす影響

図 11 に極間距離と除去体積の関係を示す。除去体積は放電痕の窪み部分の大きさを示すので、この体積を大きくして、前述の盛りり部体積と溶融再凝固層体積を少なくすれば、放電 1 回当たりの除去量を増加させることができると考えられる。図 11 の結果から極間距離が狭くなると除去体積が増加し、極間距離 50 μm は 200 μm に比べて 2 倍近く大きくなっている。

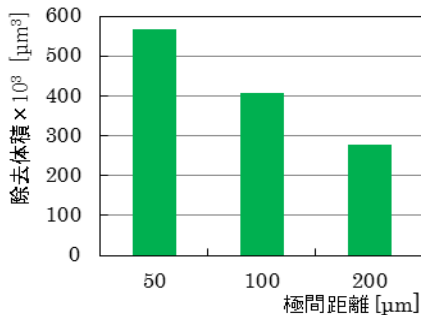


図 11 各極間距離における除去体積

(6) 放電発生時の気泡モル量の測定

放電発生時の気泡モル量を求める方法として加工反力波形に注目した。すなわち、放電直後に加工反力がゼロとなる時刻の気泡体積が求められれば、大気圧下の気泡体積が分かり、温度の影響を無視すれば、放電発生直後の気泡モル量の測定が可能となる。過去においてはホプキンソン棒法で単發放電の加工反力測定を行う³⁾と同時に高速カメラによる気泡挙動の観察をすることで気泡モル量の測定を試みられている⁴⁾。しかし、加工反力波形にノイズ強く乗り、信頼性に問題があった。そこで、本研究ではノイズの少ないホプキンソン棒法による加工反力測定方法を開発し、極間距離と放電パルス条件を変えた場合の気泡モル量の測定結果を述べる。

(7) 加工反力の測定³⁾

①加工反力測定装置

加工反力の測定にはホプキンソン棒法⁵⁾⁶⁾を用いた。放電加工は非接触加工のため機械的加工に比べ加工反力が微小で、その測定には高感度の半導体ひずみゲージを用いた。半導体ひずみゲージは高感度なためノイズに弱い。したがって、強力な電磁ノイズを発生する放電中は応力波が測定点に届かないように長いホプキンソン棒を用いる必要があり、既報³⁾に従い 4000mm の銅棒を用いた。

②単發放電により発生する気泡の観察方法

図 12 に実験装置の概要を示す。工作物を固定する装置は水平に設定可能な定盤上に設置し

た。この定盤は 3 点支持構造とし定盤表面を研削した。工具電極の加工面の端面は、高剛性の自作グラインダで実験装置上で研削を行い工具電極と工作物の平行度は φ20mm の工具電極の範囲で 5μm 以内にした。高速度カメラは測定した気泡モル量の信憑性の向上のため、高剛性の 3 点支持構造の定盤に固定し、その上に毎回同じ角度と同位置で撮影するために調節が可能な各種ステージの上に取付けた。

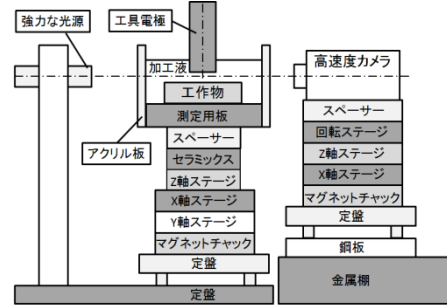


図 12 実験装置概要図

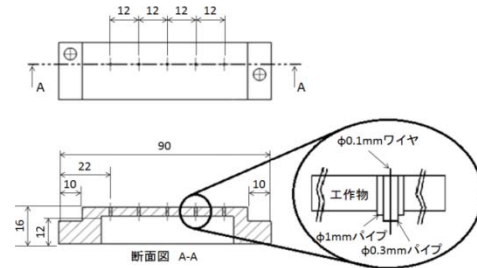


図 13 工作物の形状

図 13 に工作物の形状を示す。工作物には、一度のセッティングで 5 回の単発実験を行えるように、5 つの φ1mm の穴が開いている。そこに φ1mm×φ0.3mm と φ0.3mm×φ0.1mm のパイプを固定して、φ0.1mm のワイヤを通してある。この工作物を固定している X、Y ステージの位置決めによって工具電極の中心で確実に放電の発生が可能である。放電は φ0.1mm のワイヤと工具電極との間で生じるが、ワイヤの直径は気泡半径よりも十分に小さいため、気泡の挙動や発生量はワイヤが挿入された工作物面と工具電極端面との間隙で決まると考えられる。

③実験条件

表 3、表 4 に実験条件を示す。この条件でそ

表 3 極間距離を変化させた実験の加工条件

開放電圧	放電電流	パルス幅	極間距離
280[V]	20[A]	150[μs]	50[μm]
			100
			200

表 4 同一放電エネルギーでの実験の加工条件

放電電流	パルス幅	極間距離
10[A]	300[μs]	100[μm]
20	150	
40	74	

それぞれ3回ずつ単発放電実験を行った。工作物を陽極、加工液にVITOL2を用いた。

(8) 実験結果

①放電加工反力波形

図14に加工反力波形の測定例を示す。図14から、発生した気泡の内部圧力が大気圧と等しくなる時刻が明確で、その時の気泡の大きさの調査で気泡モル量の算出が可能なが分かる。

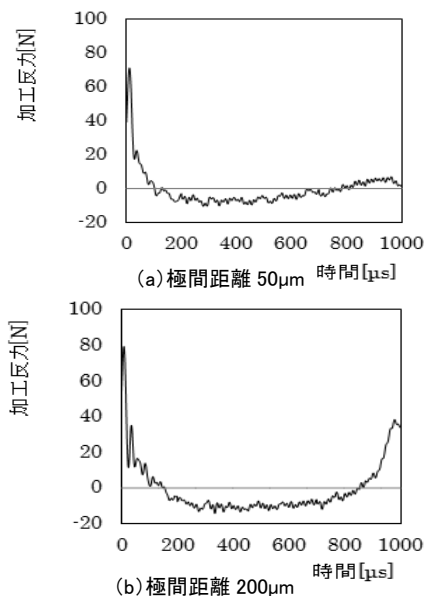


図14 加工反力波形の測定例

②撮影結果

図15に放電で発生した気泡の内部圧力が最初に大気圧と等しくなる時刻付近の気泡の撮影写真の例を示す。図中の上部に工具電極、下部に工作物、そして中心付近の黒い影の部分が発生した気泡を示している。なお、高速度カメラのフレームレートの制限上、気泡の内部圧力が大気圧と等しくなる瞬間での画像は取得できない。そこで、加工反力が大気圧と等しくなる瞬間の気泡直径は、加工反力がゼロになる前後の画像から線形近似により求めた。

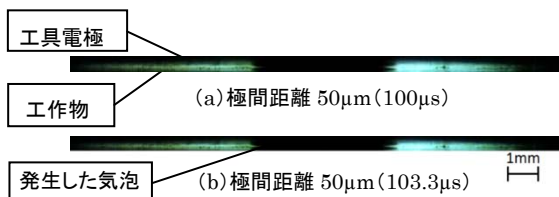


図15 気泡観察結果(フレームレート 300000[fps])

(9) 気泡モル量の算出結果

①極間距離を変化させた場合

図16に極間距離の変化と気泡モル量の関係を示す。極間距離が広がると気泡モル量が増えることがわかる。これは、極間距離が広がると放電アーク柱と接する加工液の面積が増加し、気化・熱分解する加工液の量が増えたためだと考えられる。

②同一放電エネルギーでの比較

図17に放電エネルギーを一定とし、放電電流とパルス幅を変えた時の気泡モル量の変化を示す。これから、放電電流が増すと気泡モル量が増えることがわかる。アーク柱と加工液が近

接しているのは絶縁破壊直後に限られ、同一の放電エネルギーでも放電電流が大きいほど、加工液の気化と熱分解が促進されるからであろう。以上の結果から、気泡モル量は放電発生直後の放電パワーと加工液との接触状況の影響を大きく受けることが考えられる。

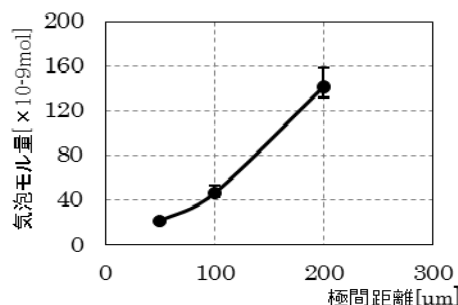


図16 極間距離と発生した気泡モル量

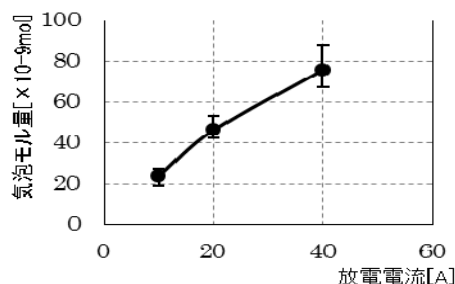


図17 放電電流と発生した気泡モル量

③パルス幅のみを変更した実験

図18に放電電流や極間距離を一定とし、パルス幅のみを変えた時の気泡モル量の変化を示す。ここから、パルス幅が短い領域では、放電発生直後の気泡モル量は急激に増加していることが分かる。また、パルス幅が長くなるほど、放電発生直後の気泡モル量の増加率は減少していることが分かる。すなわち、アーク柱と加工液が近接しているのは絶縁破壊直後に限られ、同一の放電エネルギーでも放電電流が大きいほど、加工液の気化と熱分解が促進されるからであると考えられる。以上の結果から、気泡モル量は放電発生直後の放電アーク柱の長さ・直径・温度に影響を大きく受けると思われる。

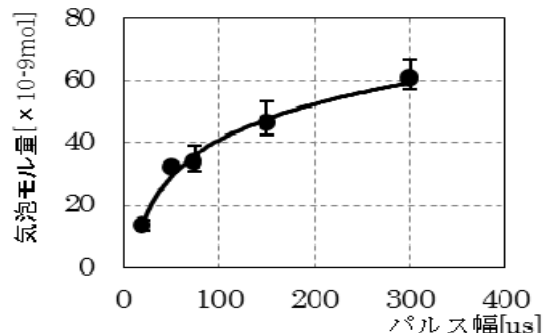


図18 パルス幅と発生した気泡モル量の関係

(10) 測定方法と単発放電痕各種体積

断面形状積算法は単発放電痕の持つ全ての情報が得られる唯一の方法で、その積算精度は平均スライス幅を10μm程度に設定すれば積算体積の誤差は数パーセントに収まる¹⁾しかし、各部の体積の算出までに膨大な時間がかかり、また、単発放電痕を削っての測定となるため一度

しか調査が行えない。そのため、単発放電痕を短時間で測定する方法が必要である。例えば、光学式表面性状測定機を用いれば短時間で測定が可能であるが、光学式測定機を用いた単発放電痕の詳細な調査はほとんど報告されていない。そこで、同一の単発放電痕について、光学式測定機のみで表面性状測定に適していると思われる共焦点顕微鏡、CSI(白色干渉顕微鏡)、そして、比較として触針式表面粗さ測定機による測定を試みる。最後に断面形状積算法による測定を行い、求めた単発放電痕の盛り部体積と除去部体積について比較を行った。

①測定物及び測定項目

工具電極と工作物との間の極間距離(以降GAPと称する)を変えて作成した単発放電痕を測定した。GAPが50 μm で作成したものをGAP50, 同様にGAP100, GAP200とした。図19に各GAPの単発放電痕を示す。これから、GAP50の形状が複雑なことがわかる。図20に単発放電痕の模式図を示す。工作物表面を基準面とし、それより上部を盛り部、下部を除去部とした。また、単発放電痕のスライス幅は触針式表面粗さ測定機を用いた測定では10 μm , 断面形状積算法は平均7.1 μm で体積の算出を行った。測定を行った単発放電痕は各GAPの3つの単発放電痕から代表の一つを選び、盛り部体積と除去部の体積を測定した。

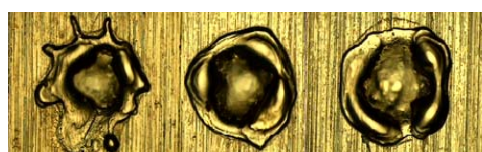


図19 各GAPにおける単発放電痕の上面

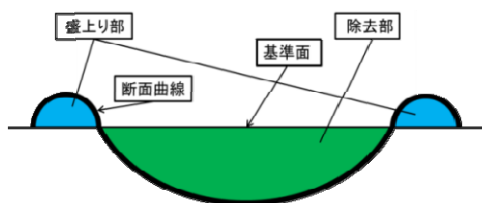


図20 単発放電痕断面の各部名称

②各種測定方法で算出した体積の比較

断面形状積算法で算出した体積、触針式表面粗さ測定機の断面曲線から求めた体積と光学式顕微鏡による体積の比較を行った。なお、体積算出はGAP50のみである。図21から除去部体積は断面形状積算法以外ではほぼ同じ値になっていることがわかる。そして、断面形状積算法

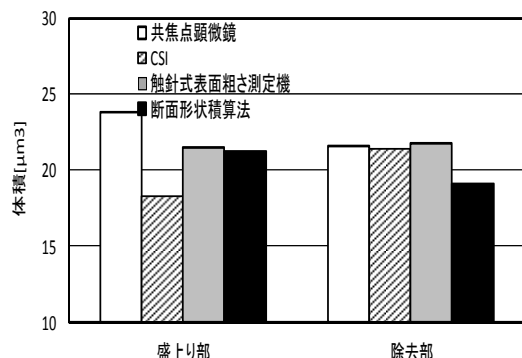


図21 GAP50の単発放電痕の体積の比較

が最も小さいことがわかる。一方、盛り部体積では、断面形状積算法と触針式表面粗さ測定機で算出した値がほぼ同じであった。また、図21で共焦点顕微鏡と断面形状積算法を比較してみると体積の値は異なるが、盛り部と除去部で共焦点顕微鏡のほうが10%ほど大きい。

(11) まとめ

- ①バージン面と熔融再凝固層に形成される単発放電痕形状が異なる。同様に溶融体積、盛り部体積、除去体積も異なる。
- ②極間距離が単発放電痕形状に及ぼす影響は大きく、極間距離が狭いほど単発放電痕形状がばらつくが溶融体積が大きくなる。一方、盛り部体積は極間距離が大きいほど大きくなる。
- ③気泡のモル量は極間距離が広がると増加し、同一放電エネルギーでは放電電流が大きいほど気泡モル量は増す。
- ④気泡モル量は放電発生直後の放電アーク柱の長さ・直径・温度に影響を大きく受ける。
- ⑤共焦点顕微鏡と断面形状積算法の比較で、盛り部、除去部の体積の比率はほぼ同一である。
- ⑥触針式表面粗さ測定機で体積の算出では基準面の取り方が μm オーダーのずれが影響する。

参考文献

- 1) 吉田, 野木, 鶴巻: 断面形状積算法を用いた放電加工の単発放電痕の観察に関する研究 -断面形状積算法の積算体積の誤差と放電痕の各種体積の調査-, 精密工学会誌Vol.80(2014)No.3, pp.291-296.
- 2) 上出, 橋口: 高電圧重畳の放電加工におけるギャップエネルギー配分, 電気加工学会誌, vol.22, No.44, 1989, pp.
- 3) 土肥, 小松, 国枝: ホッソツ棒法を用いた放電加工反力の測定, 精密工学会誌, Vol.68, No.6, 2002, pp.822-826.
- 4) 国枝, 五十嵐: 放電加工間隙で生じる気泡体積の経時変化について, 2010年精密工学会秋季大会, 2002, pp.245-246.
- 5) 柳原: 高速変形下における荷重・変位量の測定技術, 塑性と加工, Vol.26, No.295, 1985, pp.783-787.
- 6) 横山: ホッソツ棒法による材料の衝撃変形強度の評価, 非破壊検査, Vol.48, No.7, 1999, pp.388-395.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- (1) 藤村, 安孫子, 吉田, 国枝: 放電加工における単発放電の気泡モル量の測定, 精密工学会2015年春季大会, 2015年3月17日, 東洋大学白山キャンパス(東京都・文京区白山).
- (2) 飯田, 深津, 吉田: 光学顕微鏡及び断面形状積算法を用いた単発放電痕の調査, 精密工学会2015年春季大会, 2015年3月17日, 東洋大学白山キャンパス(東京都・文京区白山).
- (3) 野木, 吉田: 鋼系工作物バージン面と熔融再凝固層面上に作成した単発放電痕の比較, 電気加工学会2011年全国大会, 2011年11月24日, 研究交流センター(茨城県・つくば市).

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田政弘 (Masahiro, Yoshida)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授
研究者番号: 80220680

(2) 研究協力者

国枝正典 (Masanori, Kunieda)
東京大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90178012