

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560119
 研究課題名（和文） 逆問題解法を用いたFEMによる放電加工の放電痕形成メカニズムの
 解明に関する研究
 研究課題名（英文） Study on Solution of Formation Mechanism of Discharge Crater in
 EDM by FEM using Inverse Problem Technique
 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・ものづくり工学科・准教授
 研究者番号：80220680

研究成果の概要：

単発放電痕の観察方法として断面形状積算法を開発した。本方法により不明であった放電痕に残留する溶融再凝固層体積，放電痕周囲の盛り部分体積などが積算可能となった。この結果，放電によって蒸発・溶融した体積に対する溶融再凝固層体積，盛り部分体積が占める割合，除去割合が明らかになるので放電痕形成メカニズムの解明が期待できる。この成果は放電加工現象の解明に大きく寄与し，加工特性向上に有効な指針を示すことが可能と考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000円	0円	2,300,000円
2007年度	500,000円	150,000円	650,000円
2008年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
年度			
年度			
総計	3,700,000円	420,000円	4,120,000円

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：放電加工，単発放電痕，放電痕形成メカニズム，断面形状積算法，溶融再凝固層

1. 研究開始当初の背景

放電加工は単発放電の累積によって加工が進行する。よって，単発放電痕形成メカニズムの解明は加工速度や表面あらさなどの加工特性の向上には必要である。単発放電痕に関する研究報告は多くある。しかし，放電痕形成メカニズムを解明する上で必要な放電痕に残留する溶融再凝固層の形状や体積，盛り部分の形状や体積などを詳細に調査・報告した例は無い。このため，放電痕形成メカニズムの解明は進んでいない。本研究は放電痕形成メカニズムを解明するためにおらず，単発放電痕の全情報を得る必要性を持ったことが研究背景である。

2. 研究の目的

放電加工の加工特性の向上には，単発放電痕形成メカニズムの解明が重要である。それには単発放電痕が有する全情報を収集する必要がある。しかし，従来の単発放電痕の観察方法では，特に重要な情報である溶融再凝固層体積などの調査は不可能であった。本研究の第一目標は，単発放電痕が持つ全情報を収集可能な測定方法の開発である。第二の目標は開発した測定方法を用いて単発放電痕の詳細な観察を行い，これまで不明であった放電痕に残留する溶融再凝固層体積や盛り部分の体積を明らかにすることである。その上で，様々な電気加工条件で単発放電を生じさせ，単発放電痕形成メカニズムを解明

することが第三の目的である。そして、放電加工の加工特性を向上させる指針を明らかにすることが最終目的である。

3. 研究の方法

開発した断面形状積算法の説明をする。

工作物から単発放電痕を含む領域（10mm×8mm）をワイヤ放電加工機を用いて切出す。次に単発放電痕の一方の端からラッピングを行い、数μm削った所でラッピング面を腐食させた後、放電痕断面の観察と画像データの取込む。本方法では観察した断面の放電痕上の位置を明確にする必要がある。そこで、図1に示すアタッチメントを用いてラッピングを行った。これによりラッピング後にアタッチメントから試料を取出して観察することが可能となり、放電痕断面とその放電痕上の位置データが得られる。試料を再びアタッチメントに取付けてラッピングを行い新たな断面の観察を行う。この作業を放電痕が無くなるまで行い、放電痕断面の画像データを蓄積する。図2に放電痕観察の過程の例を示す。図2の放電痕を横切るラインが断面観察を行った部分である。放電痕の観察には高倍率顕微鏡に取付けた画像処理装置を用いた。

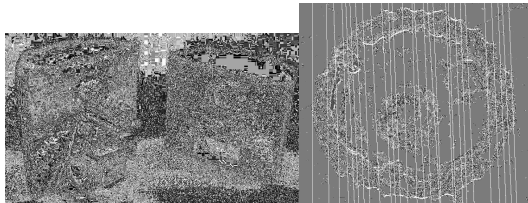


Fig.1 Lapping attachment for workpiece

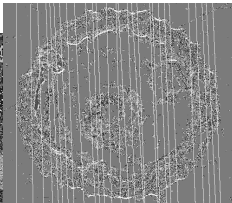


Fig.2 Example of cutting line for observation of crater

次に蓄積した放電痕断面の画像データと放電痕上の位置データからラッピングによって削った部分を3次元CADを用いてソリッドモデルに作成する（以降、パーツと称する）。具体的には、注目した断面観察部分と一つ前の画像データをCADに取込み、それらの外形の関連する部分の輪郭を繋げることでパーツを作成する。図3に作成したパーツの例を示す。このパーツには溶融再凝固層の厚さと体積、および溶融深さや体積などの情報が含まれている。このパーツを全て積み重ねることで放電痕形状を3Dで表すことができ、また、各パーツ情報の積算で放電痕の除去体積、盛上がり部分の体積、溶融再凝固層体積などを求めることができる。図4に放電痕形状を3Dで表示した例を示す。

なお、本研究で用いた放電痕断面の各部の名称と定義を図5と表2に示す。図5中のAとCの部分を溶融再凝固層、その体積を溶融再凝固層体積とし、BとCの部分を溶融部、その体積を溶融体積とした。そしてBの部分

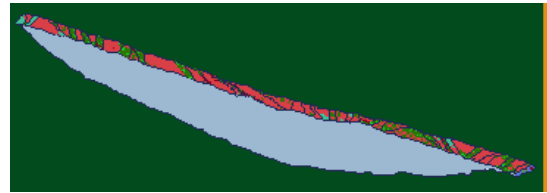


Fig.3 Example of part made by 3-D CAD

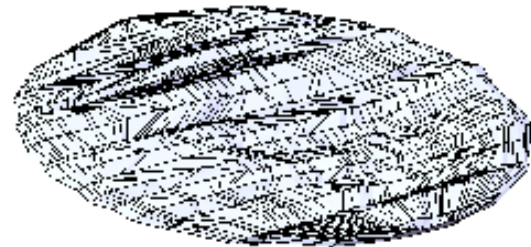


Fig.4 Example of 3D display of crater formed by 3-D CAD

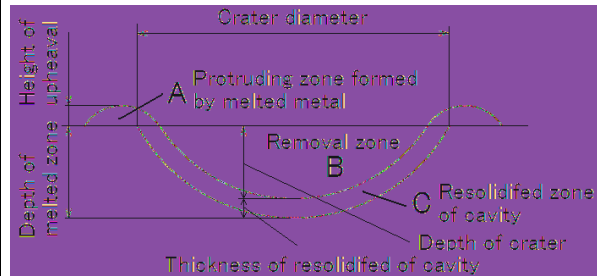


Fig.5 Definition of cross section of crater

Table 2 Definition of cross section of crater

Resolidified zone	A + C
Melted zone	B + C
Removal ratio	$1 - \frac{A+C}{B+C}$

を除去体積とし、除去割合を表2のように定義する。また、図5のAの部分の盛り部、工作物表面からの高さを盛り高さとし、そのうち最も高かったものを最大盛り高さとした。溶融部の工作物表面からの深さを溶融深さとし、そのうち最も深かったものを最大溶融深さとした。そして、溶融部の長さのうち工作物表面上で最も長いものを放電痕直径と定義した。

本報告では、まず、酸素ガスを極間に供給する気中と通常の放電加工である液中とで作成した単発放電痕の調査と極間に投入した放電エネルギーのうち、溶融に利用される割合を逆問題解法のシミュレーションにより求めた結果について述べる。次に、正極性の同一電気加工条件で生じた2種類の放電痕形状に注目し、それらの放電痕が形成される条件を探るとともに、放電痕形状の違いが溶融再凝固層体積や盛り部分の体積に及ぼす影響を調べた結果について述べる。

4. 研究成果

(1) 酸素ガスを供給した気中と通常の液中で

作成した単発放電痕の比較

①単発放電痕の作成条件

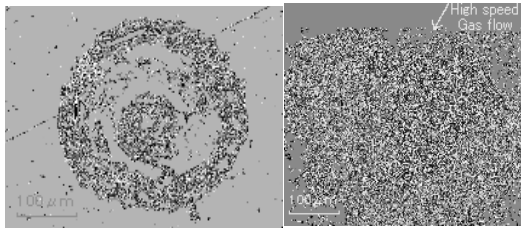
加工電源にワイヤ放電加工電源(ソディック HQW)を用いた。工具電極には W70% -Cu30%焼結材パイプ(外径φ1mm, 内径φ0.4mm)を, 工作物として合金工具鋼 SKD11(HRc62)を用いた。工作物表面は単発放電痕の観察を容易にするためラッピングを施した。気中加工は極間に O₂ガスを 1MPa で供給し, 液中加工の場合は灯油系加工液 VITOL2 (ソディック)を工具電極と工作物の間に供給した。なお, 気中加工における高速気体流の影響を調べるため, 極間のガス流が存在しないように極めて弱い圧力で O₂ガスを供給する O₂ 雰囲気での実験も行った。電気加工条件を表 1 に示す。ピーク電流, パルス幅が気中と液中加工で違うのは, 単発放電痕を同一電気加工条件で比較するため放電エネルギー量を同じにしたからであり, それぞれ本実験での実測値となっている。

Table 1 EDM Conditions

Open voltage [V]	460	
Discharge current [A]	in air	153,196,203
	in liquid	132,146,173
Pulse duration [μ s]	in air	2.1,2.5,2.8
	in liquid	2.2,2.6,2.8
Discharge energy [mJ]	6.6,10.1,13.3	
Polarity	Straight polarity	

②工作物上面の単発放電痕の観察

図 6 に同一放電エネルギー値であるパルス幅 2.6 μ s の液中単発放電痕とパルス幅 2.5 μ s の気中単発放電痕の写真を示す。図 6 より液中と気中の単発放電痕の形状が違うことが分かる。図 6(1)の液中の単発放電痕は円に近い形状をしており, 周囲に盛上がっている部分が存在することが見てとれる。それに対して, (2)の気中の単発放電痕は歪な扇形をしており, 高速気体流の下流(写真の矢印方向)に流されるように盛上りがあることが分かる。これから, 気中加工では溶融部の除去に高速気体流が強く作用していることが推測できる。また, 液中放電の単発放電痕は白っぽい色をしているのに比べ, 気中放電の単発放電痕は黒く色が変化している。これは, 気中放電では酸素ガスで表面が酸化して黒く



(1)in liquid (2) in air

Fig.6 Difference in shape of crater formed in liquid and in air

なったものと考えられる。

③断面の観察

③-1 放電痕直径の比較

図 7 にパルス幅と放電痕直径の関係を示す。

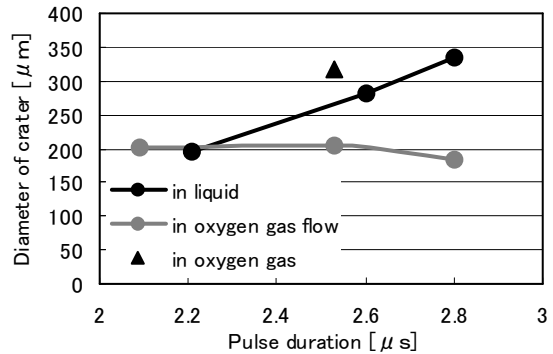


Fig.7 Influence of pulse duration on diameter of crater

液中ではパルス幅が長くなると放電痕直径が増大するが, 気中の放電痕直径はほとんど変化しないことが分かる。放電アーク柱は放電時間とともに膨張して大きくなる。液中の結果は, これが放電痕直径に反映されたと思われる。それに対して気中の場合, 極間の高速気体流によってアーク柱が下流に流されるためアーク柱の熱が十分に工作物に伝わらず, パルス幅が長くなっても放電痕直径が変化しなかったものと推測される。

一方, 図中の▲印は O₂ 雰囲気での結果である。これから, ガス流がほとんど存在しない場合, 放電痕直径は同一パルス幅の液中よりも大きいことが分かる。これから, 気中では放電痕直径は極間の高速気体流の影響を受けることが明らかとなった。

③-2 最大盛り高さ と最大溶融深さの比較

図 8 にパルス幅と最大盛り高さ と最大溶融深さの関係を示す。本実験で使用した電気加工条件において, 液中はパルス幅が長くな

● Max. melted deep in oxygen gas flow, ○ Max. melted deep in liquid, ■ Max. height of upheaval in oxygen gas flow, □ Max. height of upheaval in liquid

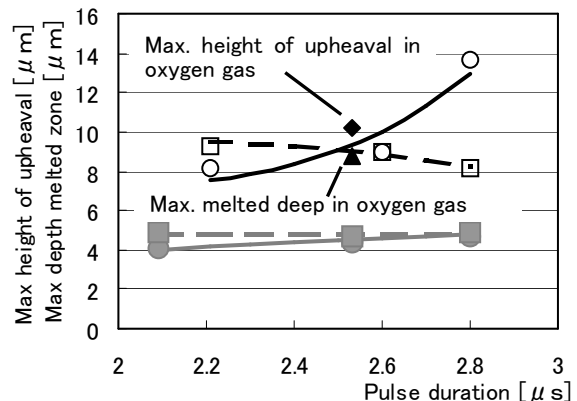


Fig.8 Influence of pulse duration on max. height of upheaval and max. depth of melted zone

ると盛り上がり高さが減少する傾向を示す。それに対して気中ではパルス幅に関係なく一定の値であることが分かる。これは、気中における溶融部の除去が供給する気体流が果たしたためだと考えられる。一方、最大溶融深さは、気中・液中ともにパルス幅が長くなると溶融深さが増加するが、液中に比べ気中の増加が少ない。これは、気中では溶融部の除去が気体流によって随時行われるため溶融部から工作物母材への熱の流入が少く、また、常に低温の高速気体流により冷却されることに加え、アーク柱が高速気体流により下流に流されるため工作物を十分に溶融できなかったからだと考えられる。なお図中の▲、◆印はO₂雰囲気での結果である。これから、盛り上がり高さ、溶融深さともに同一パルス幅の液中加工の結果に近い値になっていることが分かる。

③-3 溶融体積と溶融再凝固層の積の比較

断面形状積算法を用いて液中と気中の単発放電痕の溶融体積と溶融再凝固体積を積算して両者の比較を行った。

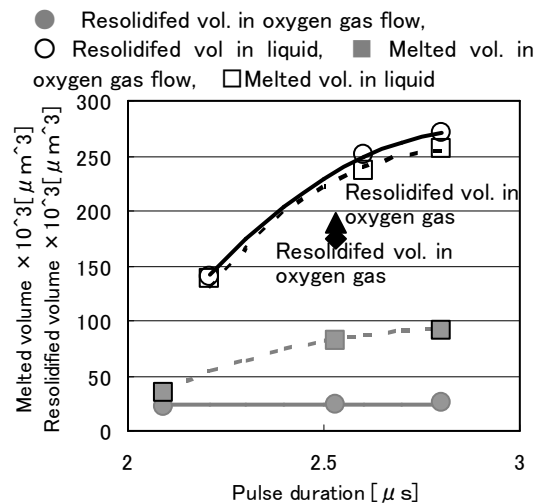


Fig.9 Influence of pulse duration on melted volume and resolidified volume

図9にパルス幅と溶融体積および溶融再凝固体積の関係を示す。図9から液中では溶融体積・溶融再凝固体積ともにパルス幅が長くなると増える傾向であることが分かる。溶融再凝固体積は溶融部分の残留を意味し、本研究の電気加工条件の範囲において、溶融部のほとんどが残留する結果となった。これは、溶融部の除去に作用する力が放電による衝撃力のみ短いパルス幅内においては、ほとんど除去されないという報告と一致している。一方、気中の場合は溶融体積はパルス幅が長くなると増加するのに対して、溶融再凝固体積はパルス幅によらず同じ値になっており、結果としてパルス幅が長くなると溶融部の除去体積が増加することが分かる。図中の▲、◆印はO₂雰囲気の結果である。これ

から、ガス流がほとんど無い場合、溶融体積も溶融再凝固体積も大きくなり、液中の結果に近づいていることが分かる。

③-4 除去割合の比較

図10にパルス幅と除去割合の関係を示す。

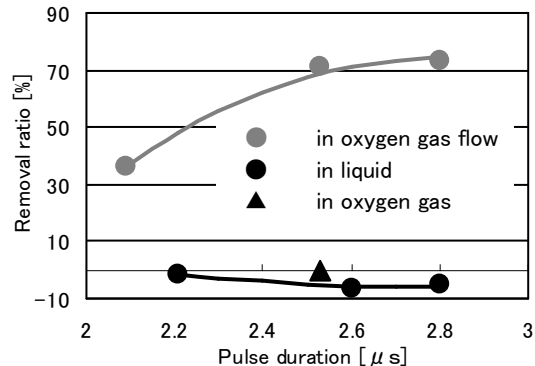


Fig.10 Influence of pulse duration on removal ratio

図10より液中では除去割合に大きな変化が無く、しかも、除去割合はマイナスになることが分かる。これは、液中加工での加工液の気化・膨張による衝撃力のピークは放電開始後5μsであることが報告されており、本実験で使用した短いパルス幅での加工では加工液の気化・膨張による溶融部の除去作用がほとんど働かなかったためと考えられる。また、除去割合がマイナスとなったのは、溶融部が急冷され組織がマルテンサイトに変化した際の体積膨張や溶融再凝固層内に気泡を巻き込んだためだと考えられる。また、液中ではパルス幅が大きい領域に比べて小さい領域の方がマイナスの除去割合が小さい。これは、パルス幅が短い方がアーク柱直径が小さく、アーク柱のエネルギー密度が高いため気化による工作物の除去の占める割合が大きいためと考えられる。以上のことから液中加工において、溶融部を除去させる力学的作用の付加が放電加工の加工特性を向上させる上で必要なことが分かった。一方、気中の場合はパルス幅の増加に伴い除去割合が増えることが分かる。これはパルス幅が長くなると溶融体積が増加し、その溶融部が高速気体流により常に除去されるためだと考えられる。本実験で使用した電気加工条件において、気中加工の除去割合は、放電エネルギーが10.1mJ、つまり、パルス幅2.5μs以上のパルス幅では70%に達することが分かった。図中の▲印はO₂雰囲気の結果である。これからガス流がほとんど存在しない場合には、除去割合がほとんど無くなってしまふことが分かる。この結果からも気中において極間の気体流が溶融部分の除去に大きな役割を果たしていることが明らかとなった。

③-5 液中と気中のシミュレーション結果

液中と気中との極間の環境が異なり、放電

痕形状や断面形状も異なるため極間に投入した放電エネルギーのうち、溶融に使用されるエネルギー割合も異なることが考えられる。そこで、非定常熱伝導解析によるシミュレーションから溶融に利用される放電エネルギーの割合を求めた。なお気中の場合は、高速気体流によるアーク柱が流される影響をシミュレーションに反映させることが難しいためアーク柱の膨張はないものとして計算した。図 13 に極間に投入した放電エネルギーのうち工作物の溶融に利用された割合を求めた結果を示す。これから、液中ではパルス幅に関わらず溶融に使用されるエネルギーの割合は 26%程度なのに対して、気中の場合は、パルス幅が長くなるにつれて溶融に使用されるエネルギーの割合が減少し、パルス幅 $2.8\mu\text{s}$ では 10%以下にまで下がっていることが分かる。これは、アーク柱が極間の高速気体流に流されるため、工作物の溶融ができなかったことを示すものと考えられる。よって、気中加工では極間に供給する気体流の圧力を溶融部の除去に影響のない程度にまで下げて加工することが望ましいといえる。

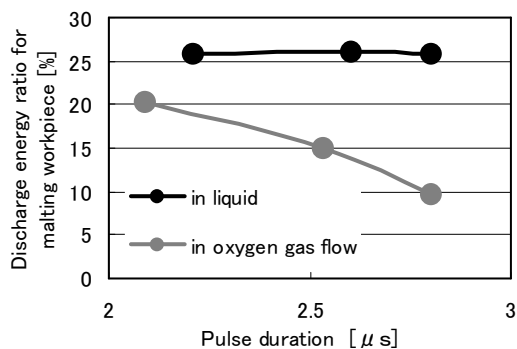


Fig.13 Influence of pulse duration on rate of discharge energy used for melting workpiece

(2) 正極性における 2 種類の放電痕の調査

①放電痕形状の違い

表 3 に示す電気加工条件で工具電極先端形状を変えて単発放電痕を生じさせた。

Table 3 EDM conditions

Open Voltage [V]	280
Peak Current [A]	32
Pulse Duration [μs]	20,40,100,200
Polarity	Straight, Inverse
Tool Electrode	Cu ($\phi 8$, smooth, conic)
Workpiece	SKD 11(HRc 62)

図 14 に同一電気加工条件で生じた 2 種類の単発放電痕形状を示す。図 2(a) は平状工具電極を用いた時に生じる平坦な放電痕、(b) は円錐状工具電極の場合に生じた一般的な放電痕を示す。以降 (a) タイプを浅い放電痕、(b) タイプを深い放電痕と称する。これらの放電痕形状の違いは単発放電痕形成メカニ

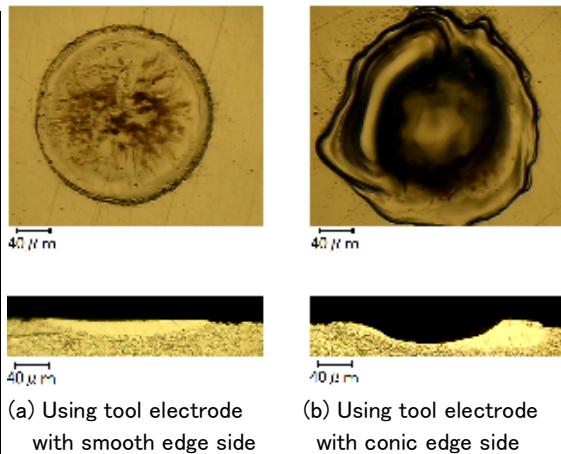


Fig.14 Two types discharge crater

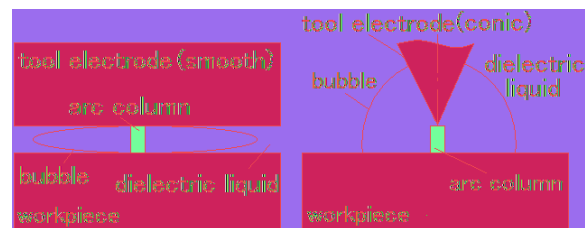


Fig.15 Environment of discharge gap

ズムが放電痕 (a) と (b) とで異なることを示唆していると考えられる。

図 15 は平状工具電極と円錐状工具電極を用いた時の極間状況の違いを示した模式図である。これから気泡の膨張形態が平状工具電極と円錐状工具電極と異なることが推定できる。すなわち、円錐状工具電極の場合には放電直後から気泡が急速に膨張し、気泡内の圧力が急激に減少するのに対して、平状工具電極の場合では気泡は狭い極間を半径方向にしか膨張することができず、気泡内の圧力減少に時間がかかることが考えられる。このことから、気泡の内部圧力とその時の工作物の溶融状態が放電痕形成に大きな影響を及ぼしている可能性が大きいと考えられる。

②盛り部分体積とキャビティ部分の溶融再凝固層体積が溶融部分体積に占める割合

図 16 に盛り部分の体積と溶融部分の体積に占める割合の比較結果を示す。これから、どちらの放電痕でも溶融部分の体積に対する割合がパルス幅に対してあまり変化せず、深い放電痕では 48~55%程度なのに対して浅い放電痕の割合は約 10~18%以下と少ないことが分かる。

図 17 はキャビティ部分の溶融再凝固層の体積と溶融部分の体積に占める割合を示す。図 18 に断面形状積算法で作成した溶融再凝固層を示す。図(a)は浅い放電痕、図(b)は深い放電痕の結果である。これから、浅い放電痕の溶融再凝固層はキャビティ内部にほとんどが存在し、溶融部分の大半が除去されていないことが分かる。一方、深い放電痕はキャ

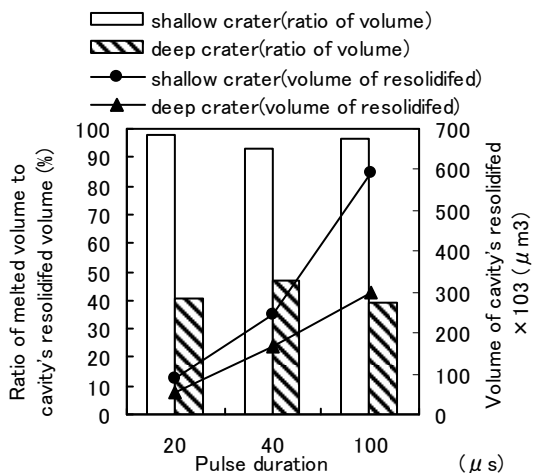


Fig.16 Volume of protruding zone and ratio of melted volume to volume of protruding zone

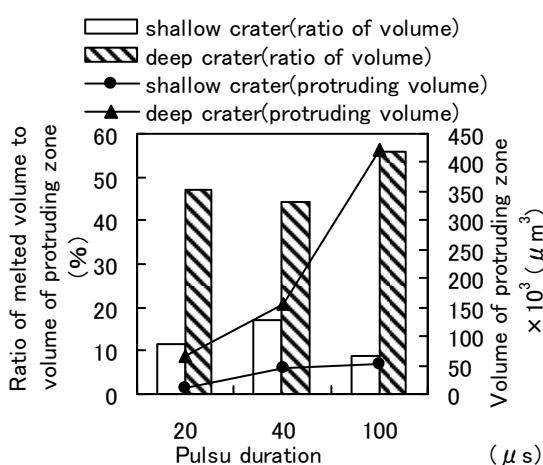


Fig.17 Cavity's resolidified volume and ratio of volume of melted zone to volume of resolidified cavity's

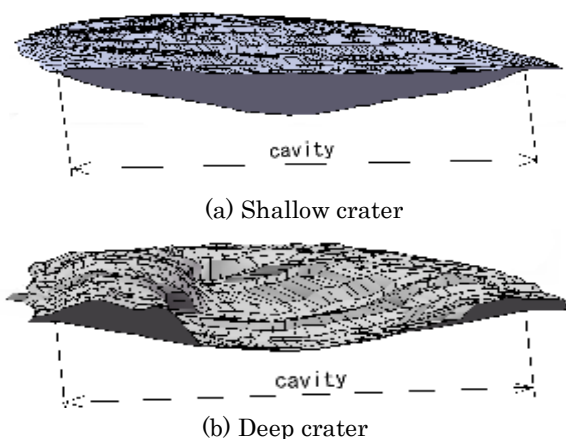


Fig.18 3-D model of resolidified zone

ビティと周囲の盛り部分に存在している様子が見て取れる。以上のことから、除去量が大きいと推定される深い放電痕でも溶融した工作物の大半が放電痕周囲に残留することが明らかとなった。

(3)まとめ

酸素を供給した気中と液中の単発放電痕比較結果を以下に示す。

- ・液中の放電痕は円状になるが、気中では高速気体流の影響により歪な扇形になる。
- ・除去割合は液中においてはマイナスとなり、溶融部がほとんど除去されていない結果となった。それに対し、気中の除去割合はパルス幅 $2.5 \mu s$ 以上で70%に達する。
- ・極間に投入した放電エネルギーのうち溶融に利用される割合は、液中は放電エネルギーに関わらず26%程度なのに対して、気中の場合は放電エネルギーが大きくなるにつれて低下し、パルス幅 $2.8 \mu s$ では10%にまで減少する。

次に、正極性における2種類の放電痕の比較した結果について以下に示す。

- ・平電極の放電痕は表面が平坦な円形状の放電痕となる。一方、突電極の放電痕は盛り部分が大きく放電痕の深さも深い形状となる。
- ・平坦な放電痕は溶融部の大半が溶融再凝固層としてキャビティ内に残留するが、深い放電痕では盛り部分に約50%、キャビティ部分に約45%が溶融再凝固層として残留する。
- ・放電痕形成メカニズムは気泡の内部圧力とアーク柱や溶融部分の状態に影響される。

断面形状積算法による単発放電痕の観察によって、これまで不明であった溶融再凝固層体積、盛り部分の体積などが明らかにすることができた。また、単発放電痕を盛り部分、溶融再凝固層、そして除去部分を別々にコンピューターで3Dグラフィック表示した。これは、世界で初めての成果である。本研究により放電痕形成メカニズムの解明が進展することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3件)

- ① 花岡, 吉田: 気中放電と液中放電の単発放電痕の比較, 電気加工学会 2007 全国大会講演論文集, 2007, pp.293-296.
- ② 鈴木, 鶴巻, 吉田: 単発放電痕形状の違いが溶融部の除去に及ぼす影響, 電気加工学会 2008年度全国大会講演論文集, pp.1-4.
- ③ 有泉, 吉田: 放電痕形状に影響を与える要因に関する研究, 電気加工学会 2008年度全国大会講演論文集, pp.5-8.

6. 研究組織

(1) 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・
ものづくり工学科・准教授
研究者番号: 80220680

(2) 連携研究者

国枝 正典 (KUNIEDA MASANORI)
東京農工大学・大学院・教授
研究者番号: 90178012