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-

吉田 政弘** 野木 圭太*** 鶴巻 貴也****

Observation of Craters Formed by Single Pulse Discharge EDM using Stacked Cross-sectional Shape Calculation Method
- Investigation of Stacking Errors of Stacked Cross-sectional Shape Calculation Method and Various Crater Volumes -

Masahiro YOSHIDA, Keita NOGI and Takaya TSURUMAKI

This paper discusses the results of investigating the volume of craters removed, protruded, and resolidifying etc. by single pulse discharge, and the effects of the difference in the crater shape on these volumes calculated by using the method of stacking cross sectional shapes of craters. First, the stacking error of the volume calculated by this method was studied by comparison with mathematical approximation, the volume of a crater whose shape is known was created, and the volume was calculated. The results showed that the calculated volume error can be controlled to below 2% by setting the slice width below 10 μ m. Next, we calculated the various volumes created by single pulse discharge by mathematical approximation, 3D-CAD, and stacked cross-sectional shape calculation method, and the results showed large errors in the calculation of the volumes by mathematical approximation and 3D-CAD. Finally, we compared the various volumes of craters with different shapes calculated volume by the stacked cross-sectional shape calculation method, and obtained the following results; 1)crater volume is influenced by the crater shape, 2) more than 50% of molten crater remains on the workpiece surface due to the discharge arc column.

Key words:EDM, single pulse discharge, crater shape, stacking cross sectional shape calculation method, various crater volumes

1. 緒 言

放電加工は工具電極と工作物との間で生じた放電アーク柱の熱によって気化熔融する工作物が、追隨して起こる気泡と加工液の流体力学的作用で除去されて形成される単発放電痕（以降、放電痕と称する）の累積で加工が進行する¹⁾。放電痕は極間での放電加工現象を反映しており、その観察と調査は放電加工の基礎の理解と加工特性の向上に重要なため、多くの研究者によって行われている^{2)~7)}。一般的に放電痕は、除去部分、熔融再凝固層、熱影響層、工作物母材から形成されている⁸⁾が、加工速度や表面粗さなどに影響するのは放電痕の窪んだ部分の除去部分と放電痕周囲の盛り上がり部分を含む熔融再凝固層部分と考えられる⁹⁾。放電痕の除去体積を求める方法として、放電痕中心部分の断面形状から除去部分の面積を算出し、これを回転積分して求める方法¹⁰⁾や放電痕を球体の一部と仮定して中心付近の最大深さから数学的に近似する方法¹¹⁾がある。また、連続放電で加工された工作物の加工体積を有効放電頻度で除して求める実験的な方法なども行なわれている¹²⁾。しかし、数学的近似は複雑な形状を有する放電痕断面を球体に近似するため、得られた除去体積の信頼性に疑問が残る、しかも、近似した体積の妥当性の確認が困難である。一方、熔融再凝固層に関する研究としては、放電痕周囲に生じる盛り上がり高さ¹³⁾や放電痕の内側に残留した熔融再凝固層の厚さに関する報告¹⁴⁾がある。しかし、加工速度に影響を及ぼす盛り上がり部分の体積や放電痕内に残留する熔融再凝固層部分の体積については、それらの体積を求める有効な手段がなかった。そのため、これらの体積

の調査・検討を行った報告例はほとんど見当たらない。

筆者らは放電痕を端から端まで数 μ mずつスライスし、各々の断面形状を画像データとして3次元CAD（以降、CADと称する）に取り込み、放電痕をCADで表示する断面形状積算法を開発した。CADに取り込む断面形状データには、熔融部分と除去部分の深さと体積、盛り上がり部分と放電痕に残留する熔融再凝固層の厚さと体積などの各種情報が含まれている。したがって、各々の断面形状のデータを積み重ねることで、前述した放電痕の各種体積を積算することができる^{10) 11)}。しかし、断面形状積算法の積算体積の信頼性の確認はされていない。そこで本研究は、まず、形状が既知である球状の圧痕を作成し、数学的に求めた圧痕の体積と断面形状積算法で求めた積算体積との比較をすることで断面形状積算法による積算体積の誤差について調べた。次に、作成したある1つの放電痕の各種体積について、数学的近似法で計算した体積、放電痕の中心部分の断面形状をCADに取り込みCADで求めた各体積と断面形状積算法による積算体積との比較を行い、各方法で得られたそれぞれの各種体積の誤差について述べる。

ところで、同一の電気加工条件で作成しても単発放電痕形状が異なることが知られている¹⁵⁾。そこで、形状が異なる放電痕の各種体積を断面形状積算法で求め、放電痕形状の違いが各種体積に及ぼす影響について報告する。なお、本論文では単発放電痕形状が異なる原因に関する考察は行っていない。

2. 放電痕形状

本研究における放電痕の断面各部の名称と各種体積を定義する。図1に放電痕断面の各部の名称を、表1に各種体積と除去率（Removal ratio）、盛り上がり率（Protrusion ratio）、熔融再凝固率（Resolidifying ratio）の定義を示す。図2は代表的な放電痕形状を中心部分の断面写真とともに示したものである。

* 原稿受付 平成25年12月3日

** 正 会 員 東京都立産業技術高等専門学校（東京都品川区東大井 1-10-40）

*** 学生会員 東京都立産業技術高等専門学校 専攻科

**** 北陸先端科学技術大学院大学 マテリアルサイエンス研究科

Fig.1 Definition of cross section of crater

Table 1 Definition of cross section of crater and volumes

Volume		Ratio×100[%]	
Molten	B+C	-	-
Removal	B	Removal	$1-(A+C)/(B+C)$
Protrusion	A	Protrusion	$A/(B+C)$
Resolidifying	C	Resolidifying	$C/(B+C)$

Fig.2 Example of crater (ic:24A,te:100μs)

図2から放電痕は、窪んでいる除去部分、放電痕周囲の盛り上がり部分、そして、放電痕の内側に残留する溶融再凝固層から形成されている。このことから、放電痕の除去体積は盛り上がり部分の体積（以降、盛り上がり体積と称する）と溶融再凝固層体積に影響され、加工速度を向上させるには、これらの体積が少ない除去率の大きな放電痕を作成することが効果的なことが分かる。また、除去率が大きい放電痕は盛り上がり高さや溶融再凝固層の厚さが薄いことを意味し、表面あらさや加工面性状の向上にも効果が期待できる。除去率を明らかにするためには、盛り上がり体積や溶融再凝固層体積を求める必要がある。

3. 断面形状積算法

放電痕を作成した工作物から、放電痕を含む領域（10mm×8mm×5mm）をワイヤ放電加工機を用いて切り出す。次に放電痕の一方の端付近からラッピングを行い、数μm削った所で放電痕断面の観察と画像データの取り込みを始める。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。ラッピングは試料を樹脂にはめ込んで行うが、断面観察時には試料を樹脂から取り出し、観察後は再び樹脂に戻してラッピングを行う。このため、樹脂から試料の脱着が容易で、しかも、試料を樹脂に戻した時に位置が変わらないことが要求される。そ

こで、図3に示すように左右に分割可能なアタッチメントを製作した。これは、埋め込み樹脂を試料がセットされた型に流し込んで硬化させるためアタッチメントと試料の位置が定まる。また、ピン（図3）を用いて左右のアタッチメントを結合させる時にズレが生じないようにした。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り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。観察後に試料を再びアタッチメント

Fig.3 Lapping attachment for workpiece

Fig.4 Example of observation process of crater

トに取り付けてラッピングを行い、新たな断面の観察を行う。アタッチメントをラップ盤用ホルダーから脱着するのでラッピング精度の悪化の心配があった。図4はラッピング過程を示した白ライン群にラッピング前の放電痕の写真を重ねたものである。ラッピングは図4の放電痕の上方から行うが、ラッピングされない部分を基準（図4の写真の下辺）として、ラッピングした放電痕の平面観察を行い、削った部分を白ラインで示した。この画像を平面データとする。一方、ラッピングした面はエッチング（5%ナイトル液）で断面の組織を出現させて観察した。以上の作業を放電痕が無くなるまでに行い、放電痕の全ての平面と断面の画像データをパソコンに蓄積する。放電痕の観察には高倍率顕微鏡（Mitutoyo MF-UA10-10THD）に取り付けた画像処理装置（Mitutoyo QS VISION UNIT）を用いた。図4の白ライン群は蓄積した平面データ全てを重ねたものである。これから、ラップ幅に多少のばらつきはあるがラッピングの各ラインの平行がほぼ保たれており、ラップ盤からアタッチメントの脱着、および試料をアタッチメントから脱着を行ってもラッピングの平行度は保証できることが分かる。よって、積算体積の精度に悪影響を及ぼす主な要因はラップ幅のばらつきに絞ることができると思われる。この問題に関しては4節で述べる。

次にパソコン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CAD（Solid Works）を用いて、図5に示したようなソリッドモデルを作成する（以降、パーツと称する）。具体的には、注目した断面の観察部分と一つ前の断面の観察部分の画像データをCADに取り込み、それらの外形の輪郭を繋げることでパーツを作成する。つまり、パーツはラッピングで削られた部分を意味し、パソコンに蓄積したパーツを全て積み重ねることで放電痕形状をCADで表すことができる。また、各パーツが有する各種体積の情報を積算することで放電痕の溶融体積、除去体積、盛り上が

Fig.5 Example of part made by CAD

Fig.6 Example of 3D display of crater formed by CAD

り体積、溶融再凝固層体積が求められ、放電痕形状を除去効率を示す除去率での評価が可能となる。図6に調査した放電痕をCADを用いて3次元で表示した例を示す。

4. 断面形状積算法の積算体積の誤差の検討

ロックウェル硬さ試験機で形状が既知である球状の圧痕を作成し、圧痕の体積を球体の一部として数学的に求めた値と断面形状積算法による積算体積を比較することで両者の誤差を調べた。前述したように断面形状積算法ではラップ幅が誤差に影響を及ぼしていることが考えられる。そこで、ラップ幅を変えて圧痕体積の積算を行い積算体積の誤差に及ぼす影響を調べた。なお、ラップ幅は厳密には一定にできないので、作成した圧痕直径をラッピング回数で除して得られたラップ幅を平均ラップ幅と定義した。誤差の調査はラップ時間を変えることで平均ラップ幅を変えて行なった。圧痕は直径 1/16inch の鋼球を用いて作成し、圧痕の直径が放電痕直径に近い 250 μm になるように鋼球の押込み力を調整した。得られた圧痕の中心の深さの計算値と断面観察の測定値の差が 1 μm 以下のため鋼球形状が圧痕として転写されたと判断した。よって、数学的に求めた圧痕の体積を基準に比較しても問題ないと考えられる。図7に作成した圧痕を示す。また、図8は図7の圧痕を平均ラップ幅 10 μm で作成したパーツを圧痕の半分まで積み重ねたものである。なお、積算体積の誤差の評価は式(1)で定義した誤差率を用いた。

Fig.7 Crater formed by Rockwell hardness test

Fig.8 3D display of crater formed by Rockwell hardness test

$$\frac{|\text{数学的近似法の体積} - \text{断面形状積算法の体積}|}{\text{数学的近似法の体積}} \times 100(\%) \quad \cdots (1)$$

図9に平均ラップ幅が積算体積の誤差率に及ぼす影響と測定に要した時間（測定時間）の関係を示す。なお、測定時間とは、放電痕の端から端まで平均ラップ幅で観察した断面形状の全面像をパソコンに取り込むまでにかかった時間である。まず、平

Fig.9 Influence of average lapping width on error and measuring time

均ラップ幅が積算体積の誤差率に及ぼす影響に注目する。図9から平均ラップ幅 21 μm で約 3%であった誤差率が平均ラップ幅 10 μm では 2%程度、平均ラップ幅が 4 μm になると誤差率は 1%程度に減少し、平均ラップ幅は狭い方が誤差率は小さくなることが分かる。一方、測定時間に注目すると、測定時間は平均ラップ幅が狭くなるにつれて増加し、平均ラップ幅 10 μm から 4 μm になると測定時間も 11 時間から 27 時間に増加している。断面形状積算法による積算体積の誤差は平均ラップ幅が比較的大きな 21 μm でも 3%程度であり、高精度で積算体積を求められることが分かった。このことから、ラッピング過程で数個の 20 μm 程度の大きなラップ幅が存在しても少ない誤差率で体積の積算が行えるものと考えられる。よって、図4で見られた数 μm 程度のラップ幅のばらつきであれば、積算体積の精度は十分に保証できると思われる。なお、本研究では時間効率を考慮して 2%程度の小さな誤差率でデータが得られる平均ラップ幅 10 μm で放電痕の調査を実施することにした。

5. 各方法と断面形状積算法による各種積算体積との比較

放電痕の除去体積、盛り上がり体積、溶融再凝固層体積を数学的近似法と CAD を利用して求めた体積、そして、断面形状積算法による積算体積との比較を行った。比較に用いた放電痕は、前出の図2で示したものである。図10は図2の断面写真を CAD に取り込んで得た断面形状を示すが、除去部分以外は断面形状が左右対称形になっていない。そこで、数学的近似法と CAD を用いて体積を求める場合は、放電痕断面の中心で右側と左側に分け、それぞれの側で注目する部分の体積を求め、得られた左右の体積を合計することで注目する部分の体積を算出した。まず、数学的近似法による各種体積の計算方法について説明する。図10で示した母材と溶融再凝固層との境界を示す Line M、除去部と溶融再凝固層との境界を示す Line R を放物体の一部として近似計算を行う。これは、Line M と R 曲線を放物線で近似すると比較的良く一致したからである。これらの曲線は前述したように放電痕中央で左右に分け、左右でそれぞれ異なる放物体として計算を行った。図11に示した放物線と工作物の表面（基準面）を示す X 軸に囲まれた部分の体積 V_r は、式(2)で計算することができる。式(2)における Ch は、図11で示

$$V_r = \pi \int_{-Ch}^0 \frac{Ir^2}{Ch} (y + Ch) dy \quad \cdots (2)$$

Fig.10 Cross section of Fig.2 by CAD

Fig.11 Mathematical approximation for area of molten, removal and protrusion

Table 2 Comparison of volumes and errors

	(1) Stacking cross sectional shapes	(2) Mathematical approximation	(3) Calculus by CAD	Error of (2) %	Error of (3) %
Removal volume μm^3	731.6×10^3	874.3×10^3	815.1×10^3	20	11
Protrusion volume μm^3	233.5×10^3	491.8×10^3	567.1×10^3	111	143
Resolidifying volume μm^3	219.7×10^3	Line"A" 330.9×10^3	141.5×10^3	51	36
		Line"B" 194.6×10^3		11	

す注目した曲線の Y 軸との交点で最深部に相当する。そして、 I_r は注目する曲線と X 軸の交点、つまり、注目する窪みの半径である。Y 軸に関しては、前述したように除去部分が左右対称形状に近いので、除去部分の直径である放電痕内径を放電痕中心の断面で測定を行い、その中心を求めてこれを通る軸とした。

式(2)を用いて図 10 で示した除去体積 (Line R) と溶融体積 (Line M) を求め、放電痕内に残留する溶融再凝固層体積は溶融体積から除去体積を除くことで得られる。なお、前述したように図 10 の左側の母材と溶融再凝固層との境界を示す Line M が、工作物の基準面付近で急に広がりを見せており、一つの曲線で近似することができなかった。そこで、この Line M を Line A と B の 2 つに分け、それぞれについて近似計算を行った。

ここで、盛り上がり体積 V_h の計算方法の説明する。まず、図 11 に示した X 軸と放物線 A に囲まれた盛り上がり部分の面積 S を求める。式(3)において a は ($x=I_r$, $y=0$) とすると求められ、式(4)が得られる。面積 S は式(5)で示したように式(4)の y を I_r から I_r+P_w まで積分すれば得られる。そして、式(5)で求めた盛り上がり部分の面積 S を式(6)に代入することで盛り上がり体積 V_h が求められる。なお、式(6)の Pr は図 11 に示すように盛り上がり部分の中心から放電痕中心までの距離である。

$$y - Hp = a \times \left(x - \left(I_r + \frac{P_w}{2} \right) \right)^2 \quad \dots (3)$$

$$y = -\frac{4Hp}{P_w^2} \times \left(x - \left(I_r + \frac{P_w}{2} \right) \right)^2 + Hp \quad \dots (4)$$

$$S = \int_{I_r}^{I_r+P_w} y \, dx = P_w \times H_p \times \frac{2}{3} \quad \dots (5)$$

$$V_h = 2\pi \times Pr \times S \quad \dots (6)$$

次に、CAD を利用して体積を求める方法について説明する。図 10 に示した断面形状の各曲線と放電痕の中心線、そして工作物の基準面を示す X 軸で囲まれた中から注目する部分の面積を CAD の面積計算機能を用いて放電痕中心の右側と左側とで求める。そして、これらの面積を半回転積分してそれぞれの体積を算出して最終的に左右の体積を合計することで注目する部分の体積を計算した。表 2 に数学的近似法と CAD で求めた各種体積、そして、断面形状積算法により求めた各種積算体積との比較した結果を示す。なお、表 2 の誤差率は式(7)で定義した。

$$\left[\frac{\text{断面形状積算法の体積} - \text{他の方法による体積}}{\text{断面形状積算法の体積}} \right] \times 100(\%) \quad \dots (7)$$

まず、除去体積の比較を行う。表 2 の除去体積の誤差率を見ると、数学的近似法と CAD で求めた体積の誤差率が比較的少なく、両方法の差も小さいことが分かる。これは、除去部分の断面形状が左右対称で均一なためだと考えられる。しかし、両方法とも断面形状によって近似曲線や Y 軸が変わり、誤差率が悪化する可能性がある。ここで、溶融再凝固層体積に注目する。数学的近似法では使用する近似曲線によって得られる体積に違いが生じ、誤差率が曲線 A では 51%、曲線 B の場合は 11%と

Fig.12 Comparison of craters

Table 3 EDM conditions

Open voltage	280 V
Discharge Current	24 A
Pulse duration	100 μ s
Polarity	Straight (workpiece +)
Tool electrode	Copper (20° cone)
Workpiece	Alloy tool steel (SKD11)

異なる値になっている。また、CAD で求めた誤差率は 36%と比較的大きい。そして、断面形状が複雑な盛り上がり体積になると誤差率は両方法ともに 100%を越えていることが分かる。以上のことから、数学的近似法や CAD を用いて各種体積を求める場合、除去部分のように形状が球体の一部と見なせるような均一な形状では、断面形状に近似曲線をフィットさせやすく、また、Y 軸の設定も容易なため、近似で求めた体積の誤差率は比較的小さくなる。しかし、盛り上がり部分のように断面形状が複雑になると、近似で求めた体積の誤差率が大きくなっているように信頼性が乏しいことが分かった。

6. 放電痕形状が各種体積と除去割合に及ぼす影響

同一の電気加工条件で放電痕を作成しても放電痕形状にばらつきが生じる¹¹⁾。そこで、放電痕形状の違いが、溶融体積、盛り上がり体積と盛り上がり率、溶融再凝固層体積と溶融再凝固率、そして、除去体積と除去率に及ぼす影響を断面形状積算法により調べた。放電痕の作成には形彫り放電加工機 AQ-35LR (ソディック) を用いた。表 3 に放電痕の作成条件を示す。なお、使用する工具電極形状は、 $\phi 8\text{mm}$ の頂角 20° の円錐形状をしている。但し、円錐の先端は、同一に尖らせることが困難なため、直径 0.1mm の平坦部分を設けた。そして、放電毎に旋盤とヤスリを用いて顕微鏡で確認しながら同一形状にすることで、工具電極の形状誤差が放電痕形状に及ぼす影響を極力小さくした。本研究では生じた放電痕形状が異なる要因は追求せず、放電痕形状の違いが各種体積に及ぼす影響について調べた。工作物には SKD11(HRC62) を用い、放電痕を作成する面は放電痕の測定精度向上のためにラッピングを施した。図 12 に調査を行った放電痕を中心部分の断面形状とともに示す。図 12(a), (b), (c) の放電痕の断面形状の比較から、放電痕(a)か(c)が最も除去体積が多く、放電痕(b)の除去体積は最も小さいことが想像できる。次節以降で、これらの各体積を断面形状積算法で求める。

6.1 形状が異なる放電痕の溶融体積の比較

まず、図 12(a), (b), (c) の各放電痕の溶融体積の比較を行う。図 13 に各放電痕の溶融体積と最も溶融体積が大きな放電痕(c)の溶融体積を基準とした溶融割合を示す。これから溶融割合で、放電痕(b)は 11%程度、放電痕(a)では 5%程度少ないことが分かった。なお、各放電痕の放電電圧と電流波形の比較を行ったが、どの放電痕でもほぼ同じ波形であった。極間に投入した放電エネルギーがほぼ同一であるにも関わらず、溶融体積に違いが生じた理由については別報で報告したい。

6.2 盛り上がり部分の比較

図 14 に盛り上がり体積と盛り上がり率を求めた結果を示す。これから、放電痕(c)の盛り上がり率が 25%程度あり、放電痕(a)では 30%を越えている。それに対して、放電痕(b)の盛り上がり率は少なく 5%以下であることが分かった。この結果は、放

Fig.13 Comparison of molten volume and ratio of volume (c)

Fig.14 Comparison of protrusion volume and protrusion ratio

Fig.15 Comparison of resolidifying volume and resolidifying ratio

Fig.16 Comparison of removal volume and removal ratio

電痕形状の違いが盛り上がり体積と盛り上がり率に及ぼす影響が大きいことを示唆しているといえる。

6.3 放電痕内部に残留する溶融再凝固層の比較

図 15 に溶融再凝固層体積と溶融再凝固率を比較した結果を示す。これから、放電痕(b)の溶融再凝固層体積が最も多く、溶融再凝固率で見ると 50%以上に達していることが分かる。また、放電痕(a)の溶融再凝固率は 38%であった。一方、図 12 の平面的な観察では溶融再凝固層が少ないように見える放電痕(c)でも溶融再凝固率は 23%にも達し、放電痕の内側に残留する溶融再凝固層体積が意外に大きいことが分かる。このように、溶融再凝固層体積や溶融再凝固率も放電痕形状に影響され、今回の実験で作成した放電痕に関しては、最も溶融再凝固率が少ない放電痕でも溶融再凝固率の 23%以上が溶融再凝固層として残留することが明らかとなった。

6.4 除去体積と除去率の比較

図 16 に除去体積と除去率の比較結果を示す。まず、除去体積の結果に注目する。図 16 の結果から、図 12 の平面的な観察では除去体積が最も少ないと思われた放電痕(b)は放電痕(a)よりも多いことが分かる。一方、除去率の結果を見ると、放電痕(c)が図 12 の平面的な観察で見たイメージの通り除去率が最も多いことが分かった。除去量が多い放電痕(c)であっても 52%程度の除去率しかなく、また、放電痕形状によって除去率の差が 20%以上あることが明らかとなった。これは、前述した盛り上がり率と溶融再凝固率が除去率に及ぼす影響が大きいからだと思われる。このことから、盛り上がり体積と放電痕内部の溶融再凝固層体積の少ない放電痕形状を明らかにして、この放電痕を連続的に生じさせる条件を見出せば加工特性の向上につながる。

好ましい放電痕として、図 12(c)の中心軸から右側の断面形状のように放電痕内径と外形の差が小さく、均一な断面形状の放電痕が一例としてあげられる。これは、放電痕内部に残留する溶融再凝固層の体積は、放電痕形状が均一で外径と内径の差が小さくなれば少なくなり、両者の差が小さいということは、盛り上がり部分も少なくなることを意味するからである。

平面的な観察による体積の計算は、観察した部分の断片的な情報で体積を近似・推定するため、前述したように除去部分の形状が複雑になると体積の誤差は大きくなる。本節の結果はこれを示しており、断面形状積算法の優位性は明らかであろう。

7. ま と め

放電痕の新しい観察・調査方法として断面形状積算法を開発した。そして、形状が既知の圧痕を作成して圧痕の体積を数学的に求めた値と断面形状積算法による積算体積との比較を行い積算体積の誤差の検討を行った。次に、放電痕の除去体積、盛り上がり体積、溶融再凝固層体積の各種体積を数学的近似法と CAD を利用して算出し、これらの値と断面形状積算法による積算体積との比較を行った。最後に、同一の電気加工条件で放電痕を作成し、放電痕形状の違いが各種体積と除去率に及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

・断面形状積算法の積算体積の誤差率の調査の結果から：

- (1) 断面形状積算法の積算体積の誤差率は少なく、平均ラップ幅 $21\mu\text{m}$ で積算しても誤差率は 3%程度である。
- (2) 平均ラップ幅が狭くなると積算体積の誤差率は小さくなる。平均ラップ幅 $4\mu\text{m}$ にすれば誤差率を 1%程度にできる。しかし、測定にかかる時間が長く測定時間を考慮すると、2%以下の十分に小さい誤差率で積算体積が得られる

平均ラップ幅 $10\mu\text{m}$ で調査を行うのが適切である。

・放電痕の各種体積を数学的近似法 CAD で求めた体積と断面形状積算法による積算体積との比と較を行なった結果：

- (3) 断面形状が球体形状に比較的近い場合の除去体積の比較では、断面形状積算法による積算体積を基準として数学的近似法、CAD を用いる方法とも比較的小さな誤差率で除去体積を求めることができる。しかし、断面形状が複雑になる盛り上がり体積や溶融再凝固層体積では両方法の誤差率は著しく悪化する。

・放電痕形状の違いが各種体積に及ぼす調査の結果から：

- (4) 今回の加工条件で作成した放電痕で除去率が最も大きな放電痕であっても 52%程度しかない。

以上のように、溶融した工作物体積の半分以上が除去されずに工作物に残留することが分かった。これらの結果は、単発放電痕の各体積を求めることができる断面形状積算法を用いることで初めて可能になったもので、本観察方法は放電加工の加工メカニズムの解明に貢献を果たすものと思われる。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(C) 課題番号：18560119）と（財）三豊科学技術振興協会の助成により行ないました。また、本学、松澤和夫教授にはロックウェル試験機を貸与して頂きました。ここに記して感謝の意を示します。

参 考 文 献

- 1) N. Saito: The Mechanism of Electro-discharge Machining. *Journal of the Precision Machine.*, **29**,10(1963) 691.
- 2) 向山芳世：放電加工の研究－除去効率と放電痕－，電気加工学会誌，**3**,6(1970) 22.
- 3) Y. Uno, O. Endo, and T. Nakajima: Fundamental Aspect of the Crater Generation Mechanism by a Single Pulse Discharge. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers.*, **25**,49(1991) 9.
- 4) M. Miyazaki, H. Tsuchiya, and M. Inui: A Fundamental Study on Electrical Discharge Machining – Estimation of Melting Remnant and Thermal Affected layer Formed by an Impulsed Discharge –. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers.*, **25**,50(1991) 32.
- 5) H. Takezawa, H. Kokubo, N. Mohri, K. Horio, D. Yanagida, and N. Saito: A Study on Single Discharge Machining with Low Melting Temperature Alloy. *Proceedings of 15th International Symposium on Electromachining*, (2007) 69.
- 6) Y. Uno, T. Nakajima, and T. Yamaguchi: Some Consideration of Generation Mechanism of Surface Roughness in Electrical Discharge Machining. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers.*, **26**,51(1992) 28.
- 7) Y. Kobayashi, and T. Tamura: Measurement of Impulsive Forces and Crater Formation in Impulse Discharge. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers.*, **36**,83(2002) 54.
- 8) The Japan Society for Precision Engineering: Handbook of Precision Machining. Edited by the Japan Society for Precision Engineering., Corona Publishing CO.,LTD.,(1992) 1505.
- 9) Y. Makino, H. Obara, T. Ohsumi, and S. Niwa: Single Discharging Force and Machining Volume of Wire EDM. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers.*, **30**,63(1996) 1.
- 10) M. Yoshida, D. Hanaoka, B. Flynn, and J. A. McGeough: Observation of Craters Formed by Single Pulse Discharge by Stacking Cross Sectional Shapes - Comparison of Craters in Liquid and Air - I-MECH-E, Part-B(Journal of Engineering Manufacture), 225,(2011) 1311.
- 11) 吉田政弘，鶴巻貴也：放電加工における単発放電痕の除去割合の測定の測定に関する研究，精密工学会春季大会講演論文集，(2010) 529.