研 究

放 電 加 工 メ カ ニ ズ ム

斎 藤 長 男*

The Mechanism of Electro-discharge Machining

Nagao SAITO

In this paper, the mechanism of single discharged crater shape, repeated discharging crater distribution, and surface roughness formation on electrical discharge machining is described.

1. On the single discharged crater shape, the crater diameter is shown as follows.

$$d = a \cdot V_d^{\xi} \cdot C^{\eta}$$

where d : the crater diameter (mm)

V_d : initial discharge voltage (V)

C : condenser capacity (μF)

a, ξ, η : constant

The crater depth is analysed on the view point of thermal conduction theory based on the assumption that the anode surface temperature is limited by the boiling point of the materials during the discharge duration, as shown in the following.

$$\theta_m = \theta_b \left[1 - \operatorname{erf} \frac{h_o}{2\sqrt{k \cdot t_s}} \right]$$

Where h_o : calculated depth

θ_m : melting point of electrode material

θ_b : boiling point of electrode material

k : thermal diffusivity

t_s : discharge duration

The crater depth of experimental results is nearly equal to the calculated depth in the range of $100 \mu\text{F} > C > 0.01 \mu\text{F}$ condenser capacity. However, when the condenser capacity range is $800 \mu\text{F} > C > 100 \mu\text{F}$, they are not agreed. In the latter case, there remained rapidly cooled molten metal at the bottom, which is called columnar crystal, and the crater is shallower.

2. The swollen upheaval of discharged crater makes short circuit between both electrodes after discharge, and its swelling up time is found very long as compared with a discharge duration.

3. In case that several discharge strikes are made with an ample time interval on plain electrodes, the craters are placed closely. Namely one crater is superposed on the upheaval of another and it is considered that the upheavals of the crater introduce next discharge.

If, by selecting a charging resistance property, the next discharge is made before the upheaval makes sufficient growth, the discharges scatter. If the charging resistance is reduced further, the discharge concentrates on one point to become a continual arc instead of intermittent discharges, making only one large cavity.

If smaller condenser capacity is used, the discharges scatter easily. High frequency discharges also scatter. So, in actual discharge machining, scattering condition is desirable to be selected.

4. The relationship between surface roughness and single discharged crater shape is found out as follows,

$$H_{\max} = 2h_1 + h_2$$

where $H_{\max}$: surface roughness shown by peak to valley height (μ)

h_1 : depth of single discharged crater

H_2 : maximum height of crater upheavals (μ)

μ : micron

1. はしき

放電加工の加工メカニズムに関しては、多数の学説が報告されているが、それらの紹介にはここではあまりふれず、加工現象を定量的に取扱うために、筆者がコンデンサ放電方式に関して実験的に行なつた単発放電痕の生成機構、連続放電による加工機構、ならびに仕上げ面の生成機構に関し、要約した結果を述べる。

2. 単発放電痕の生成機構

この章では単発放電痕の形状を定量的に取扱うために、多数の実験によつて放電電気条件と放電痕形状(直径および深さ)との関係を求め、これを放電の熱作用によるものとして熱伝導理論により考察したものを述べ、さらに放電痕の放電後の挙動を述べ、生成機構におよぶ。

2.1 放電痕大きさのばらつき

単発放電痕の形状を実験的に求める場合に、いつも問題となるのは放電痕形状寸法のばらつきである。筆者は多数の放電痕を発生させこれを観察した結果から、ばらつきのおおよその原因として、図2に示す電極端部に発生する奇型放電痕などの他に、両極の極間距離の大小に

図1 (A)放電痕直径は極間距離 $10[\mu]$ 以下では著しく小さくなる
(B)放電痕深さは極間距離 $4[\mu]$ 以下では小さくなる

図2 放電痕の形状各種

よつて放電痕の大きさが著しく相異してくることを見出し、これを実験によつてたしかめた。結果を図1に示す。すなわち図3のごとく、イグナイトロンを放電回路のスイッチとして用いれば、任意の極間距離における放電痕をうることができる。図の結果より、極度に狭い放

図3 イグナイトロンは放電回路のスイッチとなつている

電間隙によつて生じた放電痕は、特に直径が小さくなり、深さも残くなる。極間距離が極度に小さい場合にはアーク柱の半径方向への成長が抑制され、深さの方は熔融金属の飛散が抑制されるのではないかと考えるが、いずれにしても、小さすぎる放電痕、奇型放電痕は、以下のデータからは除外した。

2.2 単発放電痕の大きさ、および断面形状

これについて行なつた実験条件および実験結果を示す。つぎのごとくである。

2.2.1 実験条件

放電開始電圧 V_d [V]; 200, 100, 50, 30

静電容量 C [μF]; 800, 200, 100, 20, 2, 0.1,

表 1

V_d [V]	C [μ F]	L [μ H]	挿入抵抗端子電圧 波形実測値			$I_p = \frac{V_p}{r}$ [A]	β	最大電流計算値 $I_p = V_d \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\alpha/\beta \cdot \phi}$
			v_p [V]	t_d [μ S]	半波 次数			
200	800	1.0 ~1.5	25.2	115	1	2100	2.6×10^4	2550~2600
100			12.5	115	1	1040		1270~1300
50			5.8	120	1	482		635~ 650
30			2.4	120	1	200		380~ 390
200	100	0.5 ~0.8	11.5	30	2	960	10.47×10^4	1300~1350
100			5.7	31	1~2	474		650~ 675
50			2.8	31	1	233		325~ 337
30			1.6	31	1	133		195~ 202
200	20	0.4 ~0.6	7.0	11	2	580	26.2×10^4	660~ 690
100			3.5	11	1~2	291		330~ 345
50			1.7	11	1~2	140		165~ 177
30			1.0	12	1	83		99~ 103
200	2	0.3 ~0.4	4.9	3.2	2	410	98.2×10^4	240~ 250
100			2.4	3.4	1~2	200		120~ 125
50			1.2	3.4	1~2	100		60~ 62
30			0.6	3.4	1~2	50		36~ 37
200	0.1	0.3 ~0.4	4.4	0.7	2	366	449×10^4	54~ 57
100			2.2	0.8	2	183		27~ 28
50			1.0	0.8	2	84		13~ 14
30			—	—	—	—		—
200	0.01	0.13 ~0.18	4.5	0.15	2	375	2094×10^4	26~ 27
100			2.2	0.15	2	183		13~13.5
50			1.3	0.15	2	108		6.5~ 6.7
30			—	—	—	—		—

0.01, 0.005, 0.001

放電回路の直流抵抗 R_d [Ω]

0.02~0.01

放電回路のインダクタンス

 L [μ H]

1~0.2

放電電流 直径 0.07 mm, 長さ
100 mm, 絹巻マンガニン
線1160本をたばねた分流器
により測定し計算で補正し
たものを表1に示す。

放電痕測定 大きなものは, 触
針式仕上げ面検査機および
コンパレータを使用し, 小
さなものは顕微鏡の焦点深
度法による。深さの誤差は
約 1μ 以下である。

電極寸法 陽極直径 15mm, 陰
極直径 5 mm, ラッピング
仕上げ

2.2.2 実験結果

図4(A)~(D)に実験結果を示
す。図についてみるに放電痕直径 d
は, C, V_d の増大とともに増大し
 $d = a \cdot V_d^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}}$ (1)

の形の実験公式であらわされる。種
々の材料について求めたものを表2
に, 放電電流の最大値 I_p と第1半
波の放電時間 t_d をもってあらわし
たものを表3に示す。放電痕深さ

図 4 (A) h_1 と h_0 とはおおよそ合致している 図 4 (B) h_1 と h_0 とはおおよそ合致している

図 4 (C) $C=800\mu\text{F}$ の場合 h_1 と h_0 とが大きな相違を示す

表 2

St : Bs ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0030 \cdot V_d^{0.81} \cdot C^{0.43}$
St : St ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0050 \cdot V_d^{0.55} \cdot C^{0.38}$
Bs : Bs ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0057 \cdot V_d^{0.63} \cdot C^{0.40}$
Cu : Cu ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0033 \cdot V_d^{0.64} \cdot C^{0.37}$
Zn : Zn ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0044 \cdot V_d^{0.72} \cdot C^{0.43}$
W : Bs ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0050 \cdot V_d^{0.59} \cdot C^{0.38}$
WC : W-Ag ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0097 \cdot V_d^{0.55} \cdot C^{0.38}$

〔注〕 d_+ は陽極側の放電痕直径

d_{+-} は陽極側と陰極側との直径があまり変わらないためその平均値をとつたもの。

h_1 も静電容量 C の増加とともに増加するが、その増加の割合は次第に小さくなる傾向を示しており、放電開始電圧 V_d の増加に対しては、あまり明確な関係を示していない。なお図中の点線は次節の理論解析による計算値である。

放電痕の直径 d と深さ h_1 との比 $\nu = d/h_1$ をかりに放電痕の形状係数と名付ければ、 ν は V_d, C がともに大きいほど大きな値を示し、 $V_d=200\text{V}$, $C=800\mu\text{F}$ の場合に $\nu=100$, $V_d=30\text{V}$, $C=0.1\mu\text{F}$ の場合に $\nu=8$ の値を示している。したがって V_d, C が大きいほど扁平な形となる傾向がある。

2.3 放電の熱作用にもとづく放電痕深さの考察

放電加工によって生じた加工粉を、顕微鏡によつて観

図 4 (D) $C=800\mu\text{F}$ の場合 h_1 と h_0 とが大きな相違を示す

表 3

St : Bs ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0027 \cdot I_p^{0.81} \cdot t_d^{0.16}$
St : St ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0053 \cdot I_p^{0.55} \cdot t_d^{0.33}$
Bs : Bs ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0049 \cdot I_p^{0.63} \cdot t_d^{0.23}$
Cu : Cu ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0053 \cdot I_p^{0.64} \cdot t_d^{0.22}$
Zn : Zn ⊕ ⊖	$d_{+-} = 0.0044 \cdot I_p^{0.72} \cdot t_d^{0.19}$
WC : Bs ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0056 \cdot I_p^{0.59} \cdot t_d^{0.25}$
WC : W-Ag ⊕ ⊖	$d_+ = 0.0079 \cdot I_p^{0.55} \cdot t_d^{0.25}$

察すると、図5のように球形をしていることが認められる。このことは放電の熱作用にもとづく結果と見て誤りのないものとする。

そこで、放電電流が極間を通過している間は、電極表面のアークの脚になる部

図 5 加工粉は球状をなしている

分の温度は、その材料の沸点 θ_b にあるものと仮定して、材料の温度が融点 θ_m 以上の高温度になる部分の深さを、熱伝導の理論を用いて計算より求めてみる。この仮定はアーク柱部の温度は $6000^\circ\sim 12000^\circ\text{K}$ にも達するが、アーク脚部の電極表面温度は、その材料の沸点によつて抑制されるといわれる²⁾³⁾ ことにもとづく。

一般に半無限の表面に、時間 $t=0$ の瞬間から一定の温度 θ_b の作用が持続するとき、表面から h の深さにおける時間 $t>0$ の瞬間の温度 θ は、熱伝導の理論⁴⁾ から概略つぎのように求められる。

$$\theta = \theta_b \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{2\sqrt{k \cdot t}} \right) \right] \quad (2)$$

ただし $k=K/\rho c$ =温度伝導率

K : 熱伝導率; ρ : 密度; c : 比熱

今、放電が継続する全時間を t_s とし、その時間の終わりに おいて 温度が融点 θ_m に等しくなる点の深さを h_o とすれば

$$\theta_m = \theta_b \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h_o}{2\sqrt{k \cdot t_s}} \right) \right] \quad (3)$$

放電が第1半波のみで終了する場合は、 $t_s=t_d$ であり、第2半波まで続くときには $t_s=2t_d$ である。表4には種々な電極材料の k と θ_m/θ_b とを示す。これらの値と表1に示した t_d の値を用いて計算した h_o の深さが、図4の鎖線と点線とによつて示されたもので、鎖線が $t_s=t_d$ 、点線が $t_s=2t_d$ の場合である。これらの結果を見れば、放電痕深さ h_1 と計算による溶融深さ h_o とはほぼ

表4 各種材料の温度伝導率, 融点沸点の比

材 料	k [cm^2/s]	θ_m/θ_b
St	0.13	0.56
Zn	0.42	0.46
Cu	1.10	0.47
Bs	0.25	0.46
Pb	0.94	0.19
W	0.78	0.59

20~30% 程度の誤差をもつておよそ合致している。ただ Cu [図4(C)] Zn [図4(D)] の $C=800\mu\text{F}$ の場合には h_o の方が h_1 よりもおよそ2~3倍ほど大きな値を示している。

2.4 放電痕断面の顕微鏡的観察

放電痕の実測深さ h_1 と計算による溶融深さ h_o との間に、かけはなれた相異が見られる場合は、放電痕の底面に一度は溶融しても、その全部は飛散せず、一部が残留凝固した場合ではなからうかとの予想の下に $V_d=200\text{V}$, $C=800\mu\text{F}$ の場合の Cu の放電痕を中央から切斷

$\times 300$ (縮尺率 $2/3$)

素材の圧延方向に平行な面に放電痕を作つたもの $V_d=200\text{V}$, Cu

図7 溶融金属の残留物が柱状晶として見られる

$\times 90$ (縮尺率 $1/2$)

図6 溶融金属の残留物が柱状晶として見られる

して、顕微鏡で観察した。図6-(A)(B)に示したものは放電によるもり上がりによつて短絡したものを示す。図7は素材の圧延方向に平行な面に作つた放電痕の断面を示す。放電痕の底には母材と明瞭に区別される異なる組織の層が見られ、柱状晶であることがわかる。これらの柱状晶の部分はすべて一度溶融した金属が、ふたたび急速に冷却されたものであると考えてあまり理無がないように思われる。図4(A)~(D)において□印をもつて示したものが、電極表面からこの境界線までの最大深さであり h_o' をもつて示す。Cu[図4(C)]では $h_o'=0.06\sim 0.08\text{mm}$ となつており、計算による溶融深さ h_o にきわめて近い値を示している。図8には $V_d=200\text{V}$, $C=800\mu\text{F}$ の場合の

表 5
(A)

材 料	St			
放 電 電 圧 V [V]	200	100	50	30
静 電 容 量 C [μF]	800	800	800	800
放 電 時 間 $t_{d10^{-6}}$ [s]	120	120	120	120
放 電 痕 深 さ h_1 [μ]	22	19	17	16
計算溶融深さ h_o [μ]	32	32	32	32
放電溶融深さ h_o' [μ]	30~38	28~30	25~30	—

(B)

材 料	Cu			
放 電 電 圧 V [V]	200	100	50	30
静 電 容 量 C [μF]	800	800	800	800
放 電 時 間 $t_{d10^{-6}}$ [s]	120	120	120	120
放 電 痕 深 さ h_1 [μ]	40~43	28~30	20~22	16~18
計算溶融深さ h_o [μ]	100	100	100	100
放電溶融深さ h_o' [μ]	60~80	50~65	—	—

(C)

材 料	Bs (ネーバル黄銅)			
放 電 電 圧 V [V]	200	100	50	30
静 電 容 量 C [μF]	800	800	800	800
放 電 時 間 $t_{d10^{-6}}$ [s]	120	120	120	120
放 電 痕 深 さ h_1 [μ]	38~41	33~32	24~26	—
計算溶融深さ h_o [μ]	50	50	50	30
放電溶融深さ h_o' [μ]	40~	40~	40~	—

(D)

材 料	Zn	Pb	W
放 電 電 圧 V [V]	200	200	200
静 電 容 量 C [μF]	800	800	800
放 電 時 間 $t_{d10^{-6}}$ [s]	120	120	120
放 電 痕 深 さ h_1 [μ]	25~30	60~90	39~40
計算溶融深さ h_o [μ]	74	96	80
放電溶融深さ h_o' [μ]	60~	—	60

Zn の放電痕を示す。この場合も底面にはかなり厚い残留層が見られる。この場合も、 $h_o' = 0.06 \text{ mm}$ となっており図 4 (D) に示された h_o とほぼ一致している。以上の

図 8 残留層が見られる

総括を表 5 に示す。なお放電痕における残留金属の多少の問題は、放電発生時の電磁力⁹⁾、爆発圧力⁹⁾などの力の作用によつてどれだけ溶融金属が放電痕の外部へ吹き飛ばされるかということと、密接な関係がある。

2.5 単発放電痕の挙動⁷⁾

2.5.1 もり上がりの成長速度の測定法

放電後、放電点の溶融金属は、放電痕の周囲に押出され、あるいは一部に寄せ集められてもり上がりとなり、多くの場合短絡を発生するに至る。このもり上がりが放電発生後いかなる挙動を示すかということは興味深いことである。筆者は最初の放電発生後、コンデンサを瞬間的に切離し、同時に別の電源から極間短絡を測定するに十分な電圧を直接電極間に印加し、これにより放電発生時刻と短絡発生時刻とを測定する方法を考えた。これを図 9 に示す。この回路をシンクロスコープにつないで

図 9 もり上がり時間測定回路図

けば、放電の発生は電圧の急激な降下として、極間の耐圧性の回復は電圧の漸増として、また極間の短絡は電圧の急激な降下として、観察することができる。

2.5.2 測定結果

図 10 がシンクロスコープによつて得られた画像の例である。この画像を説明する図は図 11 に示す。図 10 の結果を整理するとつぎのようになる。

(1) 放電によつて急激に降下した極間電圧が、短絡測定用電圧によつて完全に耐圧性が回復する時間は約 1200 ~ 1600 μs である。この時間は完全消イオン時間と見ることができ、金属蒸気を利用した放電管の消イオン時間約 1000 μs とほぼ一致した時間である。

(2) 放電後、放電痕のもり上がりが短絡するまでの時間は放電間隙 3 ~ 5 μ に対して 700 μs ~ 1500 μs の間にある。 $V_d = 200 \text{ V}$, $C = 100 \mu\text{F}$ 程度の放電時間は約 30 ~ 50 μs であるから、放電終了後かなりの時間がたつてから短絡を起こすことになる。

(3) 極間が一度短絡を起こせば、そのまま短絡状態を継続する場合と、一度短絡を起こした後、なんらかの原因によつて、その短絡を解消する場合とが認められる。

図 10

図 11 ブラウン管画像動作

2.6 単発放電痕の生成機構

以上の実験から単発放電による放電痕の生成機構は、つぎのように説明される。

(1) アーク放電の脚部となる電極材料の表面から、材料内部に熱が伝達され、放電時間内に融点以上に加熱された部分が、放電に伴って発生する圧力あるいは電磁力などの力の作用によつて吹き飛ばされ除去される。その際溶融金属の一部が放電痕の底に残留する場合がある。

(2) 溶融金属の一部が放電痕の一部に寄せ集められ、あるいは放電痕の周囲に押出されてもり上がる。両極から発生したもり上がりは、放電終了後も運動をつづける。

3. 連続放電による加工機構⁸⁾

実際の放電加工は単発放電の累積された結果であるが、この章はその累積による加工の過程を論じたものである。

3.1 コンデンサ放電の繰返し

数秒毎にゆつくり単発放電を数回発生させた場合と、実際の加工に近い相当高い繰返し早さで発生させた場合の放電痕の分布を図 12 に示す。これはラッピングを行なつた電極面に発生させたものであり、その分布がよくわかる。 $C=100\mu F$ では、数秒毎の放電では折り重なり、相当高い繰返し頻度では分散し、さらに高い頻度になろうとすれば集中する。 $C=0.1\mu F$ と小さなコンデンサを用いた場合には全域にわたり分散の傾向となる。

3.2 高周波放電

図 13 には 350kc, 約 150W 程度の出力における高周波放電の放電痕を示し、非常によく分散していることが見られる。

3.3 コンデンサ放電に高周波を重畳した場合

コンデンサ放電だけでは集中する場合も、高周波重畳を行なえば分散する。これを図 14 に示す。図 15 には、コンデンサ放電と高周波放電とを重畳した場合の放電痕のプロファイルを比較して示す。もり上がりが平坦化されているのが顕著な相異である。

3.4 考 察

(1) コンデンサ容量 $C \mu F$ が大きい場合に非常に低い頻度の放電では放電痕が折り重なるのは、以前に生じた放電痕の電位傾度が高いのでつぎに発生する放電がその点に誘発するためであると考えられる。また相当頻度が高い場合に分散するのは、2.5 に述べたように直前に生じた放電による放電痕のもり上がりが遅いため、これが放電の誘因となるまで成長する以前につぎの放電が発生すれば、それ以外の点に放電が発生し、結局分散することになるものと考えられる。さらに高い頻度になろうとすると集中するのは長時間アークに移行するためであろう。 C が小さい場合に常に分散するのはもり上がりは高さが低く、むしろ電極面の凹凸、極間に介在する加工

C	数秒毎に放電	R=20Ω	R=7Ω
100μF			
	折重なっている	分散している	集中している
0.1μF			
	分散している	分散している	分散している

$V_d=100V$ 左: 銅 右: 黄銅

図 12 コンデンサ放電による分散集中

図 13 高周波放電による分散

	$R=20\Omega$	$R=7\Omega$	$R=2\Omega$
C			
$100\mu F$			
	分散している	分散している	集中している
$20\mu F$			
	分散している	分散している	分散している

左: 銅 右: 黄銅

図 14 コンデンサ放電に高周波を重畳した場合の分散

図 15 放電痕プロファイルの比較

粉、塵埃などによる電位傾度の方がもり上がりによる電位傾度よりも高いためと考えられる。

(2) 高周波放電は C の小さい場合に相当するから分散し易い。

(3) 高周波放電をコンデンサ放電に重畳した場合には、図15に見られるように、高周波重畳によつてもり上がりが平坦化されているので、そのもり上がりがそれ以後に発生する放電の誘因とはなりがたく、したがつて放電痕の分散が容易になると考えられる。

(4) 以上の結果に見られるように、放電痕が分散すれば、間歇的に放電が行なわれていることを意味し、少なくとも仕上げ面などを劣化しないと考えられるから、実際の加工は分散の条件を使用すべきである。これには、電極対向面内に放電の誘因となる点の数が十分存在していることが必要であり、それにはコンデンサ容量 C の大きさに応じある程度の電極面積の大きさを必要とすることが示唆される。また放電の繰返し頻度を定めるために適当な大きさの $C \cdot R$ 値にえらぶことも必要になつてくる。

4. 連続放電における短絡⁹⁾

単発放電の実験においては、多くの場合短絡を生じ、筆者の経験では、銅対黄銅で30回中13回も短絡を生ずる。しかし連続加工においては数万回に1回短絡があるかなしである。そこで、放電痕のもり上がり成長による極間の近接を模擬して、もり上がり近接によつて極間に短

図 16

絡が起こるものかあるいは放電が発生するものかを確かめたのがこの実験であり、装置を図 16 に示す。板ばね電極を振動した場合に、コンデンサの有無によつて、極間電圧の変動の相異を観察したものを図 17 に示す。コンデンサが入っていない場合は、ばねの振動はすぐ止まり電圧も短絡状態を示すが、コンデンサが入ってい

図 17

ば、振動はいつまでも続き極間は短絡せずに放電をつづける。この事実より、コンデンサに電荷がたくわえられてさえあれば、もり上がりが近接しても放電が起こって短絡を吹き飛ばすことを示し、単発放電では大部分が短絡を起こしても、連続放電では、それほど短絡を起こさない理由が説明される。

5. 仕上げ面あらさの構成機構¹⁰⁾

単発放電痕の深さ h_1 と連続的な加工による仕上げ面あらさ $H_{\max}$ を比較すると、 $H_{\max}$ の方が3～4倍大きい。この章は、 $H_{\max}$ と h_1 との関係を解析したものである。

5.1 仕上げ面あらさと単発放電痕深さとの関係

平坦にみがかれた電極面に、毎秒約1回の時間間隔

図 18 単発放電痕と仕上げ面との関係

で約100回程度の放電を繰返えさせ、無きずの平坦部を両端に収録するようにプロフィール曲線を記録し、同時に単発放電痕のプロフィールも掲げたものを図18に示す。加工されていない面を基準面にとれば、加工面の深さは周縁部では h_1 にほぼ等しく、それより内部では $2h_1$ にほぼ等しくなっている。基準面より高くつき出ているのは、放電痕もり上がり部であつて、基準面よりのこの高さを h_2 とすれば、加工面あらさ $H'_{\max}$ は次式のような

 図 19 計算による仕上げ面あらさ($H'_{\max}$)と実測値($H_{\max}$)

図 20 単発放電痕深さ(上)とより上がり高さ(下)

構成になる。

$$H'_{\max} = 2h_1 + h_2 \quad (4)$$

より上がり高さ h_2 は単発放電痕のプロフィールからは求めがたいので図18につき測定した。

図19は連続放電による仕上げ面あらさと、式(4)による $H'_{\max}$ とを比較したもので十分な合致が見られる。図20には単発放電痕深さとより上がり高さとを比較のため示した。

図 21 仕上げ面あらさ構成模型

5.2 仕上げ面の構成過程に対する考察

図 21 に示すように、第 1 次の放電によつて、まず 2 個以上の放電痕が並んでできるものとし、その境界部のもり上がり b_1 が誘因となつて、つぎの第 2 次の放電が起こる場合を考える。第 2 次の放電の熱源は第 1 次の放電痕の底面 BB' の位置に存在することになるから、新しい第 2 次の放電痕の底面は AA' 面から放電痕深さの 2 倍の深さの位置にくることになる。この第 2 次の放電痕による新しいもり上がりの頂点 C_1C_2 等は、第 1 次放電痕の頂点 $a_1a_2b_1$ 等よりは低い高さにあることは容易に推察されるから、これに続くつぎの放電は、第 1 次もり上がりの頂点の残っているものを順次拾い上げて加工され面積を広げてゆくはずである。この結果加工部の周縁に沿つて深さ h_1 の部分が存在し、その内部はすべて深さ $2h_1$ にそろつてくることが説明される。

6. 連続放電の加工機構

連続放電においては $C \cdot R$ が適当な値であれば、放電は電極面に分散して行なわれる。 R が小さすぎれば放電は集中し、電流が継続して流れるアーク放電となる。高周波放電およびこれをコンデンサ放電に重畳すれば、分散が容易となる。放電によるもり上がりは両極の短絡を発生しようとするが、その際極間のコンデンサに電荷がたくわえられてさえあれば、短絡を起こす直前に放電が発生してもり上がりをくずし、短絡を妨げて加工の継続を可能にする。放電が間歇的に行なわれている加工状態では、仕上げ面あらさ $H_{\max}$ は次式であらわされる。

$$H_{\max} = 2 \cdot h_1 + h_2$$

7. むすび

コンデンサ放電による放電加工のメカニズムを、単発放電痕の生成機構にもとづき、連続放電の加工機構ならびに仕上げ面あらさの構成機構を、要約して述べた。2.6 および 6 にそれぞれ単発放電痕の生成機構および連続放電の加工機構を述べたので、ここには重要な結論のみを示して総括とする。

(1) 放電痕の大きさのばらつきは、放電開始間隙のばらつきに原因するところが大きく、特に間隙が小さすぎる場合に放電痕が非常に小さくなる。

(2) 単発放電痕の大きさを直径と深さとに分けて表わせば直径 d は

$$d = a \cdot V_d^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}}$$

深さ h_1 は実験公式であらわすのはむずかしいが、 $C < 100 \mu F$ では熱伝導より計算した次式の h_0 と 20~30% の誤差をもつてはほぼ合致する。

$$\theta_m = \theta_b \left[1 - \operatorname{erf} \frac{h_0}{2 \sqrt{k \cdot t_s}} \right]$$

$C > 100 \mu F$ のように大きくなると、一度放電によつて溶融されたのち急激に冷却された残留金属層のため浅くなる。電極表面から残留層と母材との境目までの深さは上式の h_0 にほぼ合致する。

(3) 放電痕もり上がりが互いに短絡を生ずるまでの時間は、放電時間に比較し、十分に長い。

(4) 放電を非常に遅く繰返すと、折り重なつて生じ、適当な早さに繰返すと分散し、非常に早くしようとする集中する。コンデンサが小さいほど分散しやすく、高周波放電は一層分散しやすい。実際の加工は放電分散の条件で行なえば、仕上げ面がそろつて考えられる。

(5) 単発放電は多くの場合もり上がりにより短絡を起こすが、連続的に繰返せばコンデンサに電荷がたくわえられている限り、もり上がりが短絡する寸前に放電により吹きとばす。

(6) 仕上げ面あらさは、単発放電痕の深さの 2 倍にもり上がり高さを加えたものである。

$$H_{\max} = 2 h_1 + h_2$$

以上は、阪大工学部津枝先生の御指導によるところが大きく、さらに東大工学部鳳先生、倉藤先生ならびに放電加工研究会、電子加工懇話会の諸先生の御鞭達によるところが大きい。

文 献

- 1) 齊藤長男：“金属の放電加工における加工現象の基礎的研究” 昭和36年9月。
- 2) J. D. Cobine and E. E. Burger: Analysis of Electrode Phenomena in the High Current Arc, J. of Appl. Phys., Vol. 26, No. 7 (July 1955).
- 3) 元木幹雄：電気学会誌, Vol. 80, No. 860 (1960).
- 4) 小平義男：物理数学 § 14.
- 5) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄：放電加工, コロナ社, p.34.
- 6) 木本保夫：放電加工研究会, 昭35年。
- 7) 齊藤長男：“放電痕の挙動について” 精密機械, 26巻, 3号 (1955).
- 8) 齊藤長男：“放電分散の研究” 精密機械, 26巻2号。
- 9) 齊藤長男：前出 (1)。
- 10) 齊藤長男：電子加工懇話会, 昭36年5月20日および前出 (1)。