研 究

放 電 加 工 の 研 究 *

—— 加工面の亀裂発生について ——

倉 藤 尚 雄 ** 向 山 芳 世 ***

Study on Electric-Discharge Machining
— Cracks on Machining Surface —

HISAO KURAFUJI, YOSHITSUGU MUKOYAMA

Although it was found out that in order to improve the machining efficiency it was important to increase the thermal efficiency by regulating the discharge duration, this would increase the risk of Occurrence of the defects on the machining surface, especially, cracks.

Therefore an experiment was conducted for causing cracks on the machining surface of cemented carbide tip and at the same time, the cause of occurrence of cracks was analysed from the viewpoint of the thermal conduction theory.

And it was proved that the thermal action is the main cause of the occurrence of cracks from the fact that both the results of the experiments and those of the analyses agreed well.

An attempt was also made to improve the remove characteristics on the cemented carbide alloy.

* 昭和40年11月 精機学会秋季大会学術講演会にて発表

** 東京大学工学部

*** 山梨大学工学部

1. 緒 言

放電加工の加工面の欠陥には、疲労限の低下、亀裂発生等がある。一方、加工性能の向上には、放電時間の増加による熱効率の増大が重要であることが判明したが、¹⁾ これらは加工面の欠陥、特に亀裂の発生を助長することが考えられる。また、欠陥が発生し易い超硬質材料等の加工の需要はますます増加する傾向にあるが、この方面の報告が少く、十分な検討がおこなわれていない。

本報告は、コンデンサ方式で、超硬合金に発生する加工面の亀裂と加工特性の関係を検討し、あわせて、亀裂発生原因を熱伝導理論から解析した結果を述べる。

2. 実験装置および方法

図1に実験の基本回路を示す。被加工物(w)は三菱金属の超硬合金G₂、S₂種であり、放電面は常にダイヤモンド砥石と、ダイヤモンドペースト(S2)で鏡面仕上をし、亀裂、気泡、きず等の欠陥の有無を顕微鏡で確認して用いた。

放電面、または観察面を研削、ラップする場合は、あらかじめ予備実験をおこない、研削、ラップ等によって亀裂、きず等が発生しない安全条件を選定して作業をおこなった。表1²⁾は超硬合金のG系およびS系の特性を示す。

図1 実験回路（基本回路）

加工液は灯油で、同一目的の実験においての液温はできる限り一定にするよう心

かけた。加工電極(電)

は単一放電の実験の場合に、被加工物の指定場所に放電させるために1mmφのものを使用した。

なお、顕微鏡の観察倍率は、特にことわりのない限り600倍を基準にした。

表1 超硬合金特性表

項 目	G 系	S 系
主 成 分	WC-Co	WC+TiC+Co
密 度 (g/cm ³)	14~15	10~13
比 熱 (cal/g)	0.05	0.05
熱伝導率 (cal/cm·s·°C)	0.19	0.12
温度伝導率 (cm ² /s)	0.26	0.21
熱膨張係数 (1/°C)	5×10 ⁻⁶	6×10 ⁻⁶
曲げ強さ (kg/cm ²)	1.35×10 ⁴	1.35×10 ⁴
圧縮強さ (kg/cm ²)	5×10 ⁴	5×10 ⁴
剪断強さ (kg/cm ²)	1.3×10 ⁴	1.3×10 ⁴
縦弾性係数 (kg/cm ²)	7×10 ⁴	6×10 ⁴
横弾性係数 (kg/cm ²)	1.3×10 ⁶	1.3×10 ⁶
常温硬度 (RA)	90	90
電気抵抗 (Ωmm ² /m)	0.20	0.29

3. 亀裂の発生

3.1 放電エネルギーと亀裂

黄銅加工電極(Bs)で単一放電をおこない、放電面に発生する亀裂の有無を観察した。この場合放電面には炭化物が付着して(図2-a)亀裂の観察を困難にするので、酸化クロム溶液を使用してのパフ研磨で、放電面の炭化物を除去できる程度に軽く磨き観察した。

放電エネルギーの選定は、コンデンサ容量(C_1)を $0.1\mu F$ から $100\mu F$ まで変え、各 C_1 値に対して放電が開始される直前のコンデンサ端子電圧(V_c)を $10\sim 290V$ まで変えた。

実験回数は観察の難易等を考慮して、放電エネルギーが比較的大きい領域では $3\sim 5$ 回、小さい領域では 10 回以上おこなった。

図3、図4は観察結果を示すが、発生領域区分は次の通りである。

○： 亀裂発生領域

実験(観察)回数の $2/3$ 以上に亀裂が認められた場合

×： 亀裂不発生領域

全実験(観察)回数(10 回以上)に亀裂が認められない場合

△： 亀裂発生中間領域

亀裂発生領域にも、亀裂不発生領域にも属さない領域

亀裂か亀裂でないか観察上不明瞭なものは実験(観察)結果から除外した。その結果、亀裂発生中間領

(A)

(B)

(C)

(D)

図2 亀裂の形状(放電痕上面からの観察)

図3 放電エネルギーと亀裂発生領域 (G_2 種) 図4 放電エネルギーと亀裂発生領域 (S_2 種)

域と亀裂不発生領域との境界では、実験回数が30回以上におよんだ場合も少ない。

亀裂発生領域と亀裂発生中間領域との境界線は大体 $1/2 CV_c^2$ に比例しているが、ややコンデンサの影響の方が大きいようであり、亀裂発生中間領域と亀裂不発生領域の境界線は、さらにコンデンサの影響が大きい傾向を示す。

これらの傾向は G_2 種、 S_2 種とも同一傾向を示すが、 S_2 種の方が亀裂発生領域と亀裂発生中間領域との境界線、亀裂不発生領域と、亀裂発生中間領域の境界線が放電エネルギーの小さい領域に存在する。すなわち、 S_2 種の方が亀裂が発生し易いようである。

放電痕の上面から観察したこれら亀裂の形状は、比較的放電エネルギーの大きい領域では(図2-b)、亀裂発生数が多く、太くて、放電痕の外側までのびている。これに反して、放電エネルギーの小さい領域では(図2-c)、亀裂発生数も少く、細く、小さい亀裂で、放電痕の外側までのびることはない。

その他亀裂の特徴は、亀裂が2本以上になると独立して発生することがなく全部連結しており、末端にゆくにつれてかならず細くなっている。また、亀裂発生位置は、かならずしも放電痕の中央ではなく、片寄った場所に発生する場合も少ない。

亀裂が大きく発生する領域では図2-dのように、放電痕の外周に沿って亀裂が発生する場合が多い。

一般に S_2 の方が放電痕内の凹凸が大きく、亀裂観察が困難の場合が多いが、 G_2 種の放電痕内は比較的なめらかで亀裂の観察が容易である。

3.2 加工電極材質と亀裂

加工電極に黄銅(Bs)、銅(Cu)、鋼(St)、アルミニウム(Al)、亜鉛(Zn)、グラファイト(G)等を用いて亀裂発生の実験をおこなった。

亀裂発生の境界線で実用上重要なのは、亀裂発生中間領域と亀裂不発生領域の境界線である。そこで、各加工電極につき比較すると図5のようになる。各材質の場合とも、黄銅加工電極の場合(図3、図4)と似た傾向を示すが、Al加工電極の場合が一番亀裂が発生し易く、St、Bs、Cu、Zn、G加工電極

の順に発生しにくくなる。また、 $1/2 CV_c^2$ に対する比例の割合も材質によって差が認められる。

亀裂が比較的発生しやすいAl加工電極の場合と、発生し難いCu加工電極の場合との差は約 4.5×10^{-4} Joule 程度である。この差は極めて小さい感じを受けるが、亀裂発生中間領域と不発生領域の境界線は 10^{-4} Joule の order であるので、かならずしも小さいとはいえない。

図5 加工電極材質と亀裂発生領域 (S_2 種)

4. 亀裂深さ

亀裂の発生条件を知るとともに亀裂深さを知ることが重要になってくる。亀裂深さの観察方法は種々考えられるが、まず次の3方法を試みた。

- (1) あらかじめ被加工物をつきあわせておき、そのつきあわせ線上に放電をおこない、離して観察する (図6-a)。
- (2) 被加工物のふちに放電をおこない、側面から観察する (図6-b)。
- (3) 放電痕中心線近くで切断し、中心線まで研削、ラップして観察するか (図6-c)，または、切断せずに中心線まで研削、ラップして観察する (図6-d)。

以上の方法で (a) は観察が容易で、亀裂の末端まできれいに観察でき、浅く、小さい亀裂をも観察す

図6 亀裂深さの観察方法

表2 放電エネルギーと亀裂深さ

ることが可能である。しかし、つきあわせ面の精度、保持方法等に難点があり、つきあわせ面の完全密着は期し難く、実際の亀裂発生状態と異なる。すなわち (a) と (c) または (d) の方法を比較すると、図7にみられるように (a) の場合は (c) または (d) に比較して常に亀裂が小さく観察される。これは (a) の方法では、つきあわせ面に隙間が残るためである。

(b) の方法は観察面が放電前から開放されており、実際の場合と異なる。したがって実際の形が観察できる (c) または (d) の方法を採用した。

被加工物	放電エネルギー W_0 (Joule)	電圧 V_c (V)	コンデンサ容量 C_1 (μF)	亀裂深さ H_c (μ)		
				最大値	最小値	平均値
G_2	4.205	290	100	133	69	94
	2.645	230	100	126	57	80
	1.280	160	100	82	55	68
	0.640	160	50	62	30	58
	0.128	160	10	38	18	28
S_2	4.205	290	100	145	76	100
	2.645	230	100	135	65	86
	1.280	160	100	108	46	78
	0.640	160	50	63	31	58
	0.125	160	10	41	21	31

この方法の難点である放電痕の中心断面での亀裂の観察、切断、研削の影響は、これら作業の熟練、安定条件の選定、実験(観察)回数の増加等で補った。

なお実験(観察)結果は特にことわりのない限り、観察された全亀裂の平均深さ (H_c) であらわす。表2は亀裂深さの最大値、最小値、平均値を示す。最小値は観察可能な亀裂深さであり、観察困難な程度に浅いものが存在することは当然考えられる。

4.1 放電エネルギーと亀裂深さ

放電エネルギーの増加につれて亀裂深さは増すが(図7)、常に S_2 種の方が G_2 種より亀裂が深く発生する。比較的放電エネルギーの小さい領域では放電痕が小さく、したがって放電痕中心線上での放電痕の切断が困難になるとともに、亀裂深さも小さくなって観察し難く、測定誤差が大きくなる。

放電面の直角方向から観察した亀裂(深さ)は、図8にみられるように、亀裂深さの大きいものは太く、小さいものほど細くなる。また、放電痕の外側に発生した亀裂は、その先端が全部内側にカーブを描いて発生しており、(図8-a)、内側に発生した亀裂は直線状のものが多く、亀裂発生条件が大きくなると図8-bにみられるように、亀裂同志が連結した形状のものが多くなる。

これらの亀裂をさらに倍率をあげて観察すると、図9-aおよび

図7 放電エネルギーと亀裂深さ

図 9 - b にみられるように、結合材のコバルト (Co) のみならず、タングステン (W)、チタン (Ti) 等の炭化物 (WC, TiC) をも破壊して亀裂が進行している。亀裂の末端は、図 9 - c および図 9 - d のように焼結がゆるんだ形で亀裂が止まっている。

($\times 150$)
(a)

(150)
(b)

図 8 亀裂の形状 (放電面直角方向からの観察)

(a) ($\times 500$)

(b) (500)

(c) ($\times 2000$)

(d) ($\times 2000$)

図 9 亀裂の形状 (放電面直角方向からの観察)

4.2 放電時間と亀裂深さ

実験条件は、 $V_c = 160 \text{ V}$ 、 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 、正極性、黄銅加工電極で放電回路にインダクタンス (L_1) を挿入して放電時間 (t) を変えると、亀裂深さは (図 10) 放電時間の増すにつれて増加し、適当な放電時間に最大値が存在する。この傾向は加工電極の材質に関係なく同一で、常に、 S_2 種の方が G_2 種より亀裂深さが大きい。亀裂発生数は L_1 の大きいとき、すなわち、放電時間の長い場合も、 L_1 の小さい放電時間の短い場合も変わらないようである。

L_1 に対する放電時間は、放電エネルギー、加工電極と被加工物の材質的組合せ等によって異なるが、この場合は、

$L_1 = 0$ のとき、 $t = 30 \mu\text{s}$ 、 $L_1 = 41 \mu\text{H}$ のとき、

$t = 195 \mu\text{s}$ 、 $L_1 = 87 \mu\text{H}$ のとき、 $t = 300 \mu\text{s}$ 、 $L_1 = 123 \mu\text{H}$ のとき、 $t = 480 \mu\text{s}$ 程度である。

図 10 放電時間と亀裂深さ

4.3 極性と亀裂深さ

$V_c = 290 \text{ V}$ 、 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 、 $L_1 = 0$ ($t = 35 \mu\text{s}$) の実験条件で極性と亀裂深さの関係を観察すると、表 3 に示すように、一般に正極性の方が亀裂深さが大きく、亀裂の発生数も多い。しかし、Bs 加工電極および Cu 加工電極の場合は極性による差が小さい。

4.4 加工回路と亀裂深さ

a. C_1 端子並列整流器と亀裂深さ

$V_c = 290 \text{ V}$ 、 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 、 $L_1 = 0$ ($t = 35 \mu\text{s}$)、正極性の条件で、 C_1 端子に並列に整流器を挿入すると、⁸⁾ 表 4 にみられるように、各加工電極の場合とも亀裂深さが大きくなり、亀裂発生数もやや増す。

b. 極間整流器と亀裂深さ

$V_c = 290 \text{ V}$ 、 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 、 $L_1 = 0$ ($t = 35 \mu\text{s}$)、正極性の条件で、極間に整流器を挿入して逆波をカットすると ⁴⁾ (表 5)、一般的に挿入しない場合 (基本回路) より亀裂深さは小さくなる。しかし、その減少の度合いは小さく、亀裂発生数もあまり変わらない。

表3 極性と亀裂深さ

$$W_0 = 4.205 \text{ Joule}, t = 35 \mu\text{s}$$

極性 \ E/W	Bs/G ₂	Cu/G ₂	St/G ₂	Al/G ₂	Zn/G ₂	Mo/G ₂
正 極 性	102.7 (3.5)	93.1 (4.3)	158.8 (4.3)	111.6 (3.5)	99.2 (3.0)	70.1 (1.5)
逆 極 性	94.2 (2.0)	86.7 (2.8)	103.3 (2.7)	74.6 (2.3)	61.8 (1.5)	56.1 (1.3)

()内は実験回数5回の平均亀裂発生数

表4 C₁端子並列整流器と亀裂深さ

$$W_0 = 4.205 \text{ Joule}, \text{正極性}, t = 35 \mu\text{s}$$

回路 \ E/W	Bs/G ₂	Cu/G ₂	St/G ₂	Al/G ₂	Zn/G ₂	Mo/G ₂
基本回路	102.7 (3.5)	93.1 (3.2)	158.8 (4.3)	111.6 (3.5)	99.2 (3.0)	70.1 (1.5)
C端子並列 整流器	201.2 (3.5)	189.5 (4.2)	166.5 (4.2)	100.6 (6.0)	160.3 (4.3)	71.8 (2.3)

()内は実験回数5回の平均亀裂発生数

表5 極間並列整流器と亀裂深さ

$$W_0 = 4.205 \text{ Joule}, \text{正極性}, t = 35 \mu\text{s}$$

回路 \ E/W	Bs/G ₂	Cu/G ₂	St/G ₂	Al/G ₂	Zn/G ₂	Mo/G ₂
基本回路	102.7 (3.5)	93.1 (3.2)	158.8 (4.3)	111.6 (3.5)	99.2 (3.0)	70.1 (1.5)
極間並列 整流器	76.0 (2.8)	74.1 (3.5)	119.2 (3.2)	87.0 (3.5)	64.4 (3.8)	64.1 (2.5)

()内は実験回数5回の平均亀裂発生数

4.5 繰返し放電と亀裂深さ

$V_c = 160 \text{ V}$, $R_0 = 6.5 \Omega$ ($L = 280 \text{ mH}$), $C_1 = 100 \mu\text{F}$, $L_1 = 6 \mu\text{H}$ ($t = 63 \mu\text{s}$) の条件で, $6 \text{ mm } \phi$ の黄銅 (Bs) 加工電極およびアルミニウム (Al) 加工電極を用いて, 1 min の繰返し放電をおこない, 亀裂深さを測定して前記の単一放電の場合と比較した。

このときの放電繰返し数はデカトロンカウンターで測定したが, 約 270 回/s 程度である。表6に示すように, 単一放電の場合に比較して亀裂深さが約 $2 \sim 4$ 倍深くなり, 亀裂太さは約 $5 \sim 6$ 倍太くなるが, 単位断面積当りの亀裂発生数は減少している。しかし, 単一放電の場合に比較すると脱落部分が多くなり, 亀裂として観察できないので, 実際は亀裂発生数は相当多いものと考えられる。また, 脱落部分は放電面に接するところに浅く広く生じるので, この部分に発生した亀裂が測定できたとすれば, 亀裂発生数は増すが, 平均亀裂深さは実測結果より小さいことになる。なお, ここに亀裂太さとは, 亀裂の放電面に接した部分の最大幅のことである。

表 6 繰返し放電と亀裂深さ

Bs/G₂

条件 亀裂	基本回路正極性		基本回路逆極性		C ₁ 端子並列整流器 (正)		極間並列整流器 (正)	
	単 一	繰 返	単 一	繰 返	単 一	繰 返	単 一	繰 返
深 さ (μ)	102.7	266.9	114.2	276.4	201.2	455.8	76.0	138.4
太 さ (μ)	3.5	19.5	3.1	20.3	3.7	21.8	2.9	17.1

Al/G₂

条件 亀裂	基本回路正極性		基本回路逆極性		C ₁ 端子並列整流器 (正)		極間並列整流器 (正)	
	単 一	繰 返	単 一	繰 返	単 一	繰 返	単 一	繰 返
深 さ (μ)	111.6	223.3	74.6	196.5	100.6	270.5	111.6	230.5
太 さ (μ)	3.0	15.6	2.9	12.8	5.1	17.7	3.5	17.5

放電繰返し数を増した場合、極性、加工電極の材質的差異、C₁端子並列整流器加工回路、極間並列整流器加工回路等による亀裂発生傾向は、単一放電の場合と同一傾向を示し、深さ、太さが増す。

以上のことから、単一放電の加工現象で繰返し放電の加工現象の類推が可能であるという証明⁵⁾が、加工面の亀裂発生状態の観察からも実証できる。

5. 超硬合金の除去特性

加工面に発生する亀裂との関係を考慮しつつ除去量の実験をおこなった。亀裂の観察が単一放電の観察を基礎とし、繰返し放電の現象観察に拡張する方法を採用したが、本実験もそれにしたがうことにする。

加工電極は6mmφの大きさのものをを用い、重量測定の便宜上200回以上の単一放電をおこない、放電一発当りの加工量、電極消耗量をだした。ただし、グラフアイト(G)加工電極の場合のみ1000回以上の単一放電をおこない、体積消耗量を測定して重量除去量に換算した。その他の実験の諸元は亀裂観察の場合と同一である。

5.1 放電エネルギーと除去量

C₁ = 100 μF, L₁ = 0 (t = 30 ~ 35 μs)で、放電開始電圧(V_c)と加工電極の材質を変えたとき(図11, 図12), V_cが増すと加工量、電極消耗量ともに増加するが、増加の度合いは加工量の方がやや大きく、その結果、電極消耗率(図13)はV_cが増すと減少する。また、G₂種の方がS₂種より常に加工

図11 放電エネルギーと加工量(G₂種)

量が大きく、電極消耗率が小さい。

加工電極材質の影響については、加工量はBs加工電極の場合が一番大きく、次いで、G、CuおよびSt、AlおよびZn加工電極の順に小さくなっていくが、電極消耗率は

G加工電極が少く、BsおよびCu、Al、St、Zn加工電極の順に増していく。

図 12 放電エネルギーと加工量 (S_2 種)

図 13 放電エネルギーと電極消耗率 (G_2 種)

5.2 放電時間と除去量

$V_c = 160 \text{ V}$, $C_1 = 100 \mu\text{F}$, 正極性で、前実験において除去特性が比較的良好なBs加工電極と、比較的悪いAl加工電極について、放電回路にインダクタンスを挿入する方法で放電時間を変えて実験すると(図14),両加工電極とも放電時間の増加につれて加工量が減少し、電極消耗率は増加する。すなわち、加工量の最大値は放電時間の短い領域に存在し、電極消耗率の最大値は放電時間の長い領域に存在する。

この場合も、放電エネルギーを変えた場合と同様に、Bs加工電極の方がAl加工電極より、加工量、電極消耗量ともに優れている。

図 14 放電時間と除去量 (G_2 種)

5.3 極性と除去量

$V_c = 160 \text{ V}$, $C_1 = 100 \mu\text{F}$ で極性を変えて実験すると(図14), 正極性に比較して逆極性の場合は、加工量が約40~50%程度減少し、電極消耗率が増して除去特性が悪くなる。

この傾向は、実験をおこなった全加工電極材質とも、大体同一傾向を示す。

5.4 加工回路と除去量

a. C_1 端子並列整流器と除去量

$V_c = 160 \text{ V}$, $C_1 = 100 \mu\text{F}$, 正極性の条件で C_1 端子に整流器を並列に挿入すると, Bs 加工電極では加工量が 20 % 程度増加するが, Al 加工電極ではあまり変らない。電極消耗率は Bs 加工電極ではあまり変らないが, Al 加工電極では著しく増す。

b. 極間並列整流器と除去量

C_1 端子並列整流器と同一条件で, 極間に並列に整流器を挿入して逆波をカットすると, 加工量は挿入しない場合とあまり変らないが, 電極消耗率がやや減少する。

6. 考 察

放電の発生にともない, 電極の表面は瞬間的に沸騰点に達して蒸発溶融が起り, 次いで放電が終了すると加工液の復帰により冷却される。これらの際に電極内部に非常に大きな温度勾配が生じ, 急熱の場合には表面に圧縮, 内部に引張応力が発生し, 急冷の場合は表面に引張応力が働く。

この引張 (または圧縮) 応力は, 剪断応力に分解されるが, これらは電極内部の温度勾配に比例し, この剪断応力によって電極に亀裂が発生すると考えられる。

ここで電極の内部方向を z , 電極の内部の任意の点まで長さを l , その先端の微小長さを dz とし, その点の温度勾配を $\frac{dv}{dz}$ とすると, その点に働く剪断応力 τ は,

$$\tau = G l \alpha \frac{dv}{dz} \quad (1)$$

G = 横弾性係数 (kg/mm^2)

α = 熱膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)

となり, τ が電極材料の剪断強度以上になると, 破壊して亀裂が発生することになる。

放電点から熱エネルギーが流入し, 熱伝導による電極内部の温度分布は次のようになる。

加熱の場合は,

熱伝導の方程式

$$\frac{\partial v^2}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

v = 温度 ($^\circ\text{C}$)

k = 温度伝導率 (cm^2/s)

t = 時間 (S)

を変数分離形として $v(z, t) = Z(z) T(t)$ とおくと,

$$\frac{Z''}{Z} = \frac{T'}{kT} = -\lambda^2$$

$$Z'' + \lambda^2 Z = 0, \quad T' + k\lambda^2 T = 0$$

よって

$$Z = \cos \lambda z, \quad T = e^{-k\lambda^2 t}$$

であるから

$$v(z, t) = e^{-k\lambda^2 t} \cos \lambda z \quad (3)$$

となる。

(3)の素解を重ね合せて種々の物理的意味のある解を求めると,

$$v(z, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-k\lambda^2 t} \cos \lambda z d\lambda \quad (4)$$

ここで

$$\cos \lambda z = \frac{(e^{i\lambda z} + e^{-i\lambda z})}{2}$$

であるから, λ に関して $-\infty$ から $+\infty$ の積分は

$$v(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-k\lambda^2 t + i\lambda z} d\lambda$$

積分公式より

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a^2 \lambda^2 + i b \lambda} d\lambda &= e^{\left(\frac{b}{2a}\right)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(a\lambda - \frac{b}{2a})^2} d\lambda \\ &= \frac{e^{\left(\frac{b}{2a}\right)^2}}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2} dz = \frac{e^{\left(\frac{b}{2a}\right)^2}}{a} \sqrt{\pi} \quad \text{となり,} \end{aligned}$$

$$a \rightarrow \sqrt{2kt}, \quad b \rightarrow z \quad \text{とすると,}$$

$$v(z \cdot t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi k t}} e^{-\frac{z^2}{4 k t}} \quad (5)$$

となる。

$$\text{一般式は} \quad v(z \cdot t) = \frac{A}{2\sqrt{\pi k t}} e^{-\frac{z^2}{4 k t}} \quad (6)$$

$$\text{ただし} \quad A = \frac{Q}{\rho c s} \quad (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = \text{密度} (g / \text{cm}^3)$$

$$c = \text{比熱} (\text{cal} / g \cdot ^\circ\text{C})$$

$$s = \text{熱入力部断面積} (\text{cm}^2)$$

$$Q = \text{供給熱量} (\text{cal})$$

である。

次に、電極表面が放電開始と同時に瞬間的に沸騰点に達した後、放電時間中はその電極の沸騰点に保たれていたとすると、電極内部の温度分布は、

$$v = v_v \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{k t}} \right)^2 \quad (7)$$

$$v_v = \text{沸騰点} (^\circ\text{C})$$

であらわされる。

したがって、(6)と(7)式を重ね合せたものが、放電終了時の電極内部における温度分布となる。

また、放電終了後、極間への加工液の復帰により、電極表面は急冷される。その時の温度分布は次のようになる。

すなわち、電極表面が半無限体 ($z = 0$ で境界され、 z の正方向にのびている) で、初期条件 $t = 0$, $z = 0$ で、 $v = 0$ とすると、これが熱伝導方程式(1)を満足する解を求めると、

$$\begin{aligned} v(z, t) &= \frac{1}{2\sqrt{\pi k t}} \left[\int_0^\infty f(z') e^{-\frac{(z-z')^2}{4 k t}} dz' + \int_{-\infty}^\infty \{-f(-z')\} e^{-\frac{(z+z')^2}{4 k t}} dz' \right] \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi k t}} \int_0^\infty f(z') \left\{ e^{-\frac{(z-z')^2}{4 k t}} - e^{-\frac{(z+z')^2}{4 k t}} \right\} dz' \quad (8) \end{aligned}$$

となる。

コンデンサ放電では、コンデンサ保有エネルギーの約41%程度が極間に放出されるといわれるが、⁸⁾このエネルギーが両極に均等に配分されると仮定すると、電極表面から流入する単位時間、単位面積当りのエネルギー q は

$$q = \frac{Q'}{St}$$

$$Q' = \frac{Qg - Q_l}{2}$$

$$Q_g = \text{極間入力エネルギー (cal)}$$

$$Q_l = \text{放電柱損失 (cal)}$$

$$S = \text{放電点 (放電痕) 面積 (cm}^2\text{)}$$

$$t = \text{放電時間}$$

となる。

このエネルギーが電極に流入し、放電柱の温度のいかににかかわらず電極表面がその材質の沸騰点に保持されたとすると、(6)および(7)、(8)式から温度分布が求まる。

これらの温度分布の結果から、温度勾配 $\frac{dv}{dz}$ を出し、(1)式に代入してそれぞれの深さにおける剪断応力を計算し、その電極材質の強度との比較から亀裂の発生深さを求めた。この場合、特にことわりのない限り物理的定数は定温のものをを用い、放電点の大きさは1 mm ϕ とし、S種の沸点はTiCの沸点4300℃⁹⁾をもって沸点とし、G種の沸点もこれと同程度と仮定して計算した。

図15は、S種、入力エネルギー (W_E) が1.0, 0.5, 0.1 Joule、放電時間 (t) が10 μ sの加熱による温度分布曲線である。

なお、放電によって電極に与えられるエネルギーの形態は種あるが、¹⁰⁾ここでは入力波形は矩形形状とし、放電時間 t を $\Delta t = 1 \mu$ s に分割した。

この温度分布曲線から温度勾配 dv/dz を求め、亀裂深さを計算すると、入力エネルギーに対する亀裂深さは、図16に示すように、入力エネルギーが増すと亀裂深さも増し、常にG種よりS種の方が亀裂深さが大きく、実験結果と同一傾向を示す。

図17は、同一エネルギーで、放電時間を変えた場合の亀裂

図15 温度分布曲線(加熱時)

図 16 入力エネルギーと亀裂深さ

図 17 放電時間と亀裂深さ

図 18 放電時間と亀裂深さ

深さであるが、放電時間が増すにつれて亀裂深さも増し、放電時間の適当値に亀裂深さの最大値が存在し、その最大値の存在する点は、放電エネルギーが増すと放電時間の長い側に移行していく。この結果も実験結果と同一傾向を示す。

以上の結果は、亀裂深さを $z = 0$ の点より計算したものであるが、蒸発深さ、熔融深さを考慮して亀裂深さを求めたのが図 18 である。ここに②は蒸発深さを、①は熔融深さを考慮した結果であ

る。

加熱の場合と同様に冷却の場合の亀裂深さを求めると(図 19)，加熱の場合より亀裂が大きく発生する。

また、放電点の直径 すなわち、エネルギー入力部の面積は、放電エネルギー、入力波形、放電時間、極性、電極の材質的組合せ、電極の形状、極間の状態等で変ることが考えられるが、これらを考慮して計算した結果が図 20 である。放電点の大きさが減少すると、単位面積当りの入力エネルギーが増し、熱的作用が大となって、亀裂が大きくなる。

図 19 加熱時と冷却時の亀裂深さ

図 20 放電点直径と亀裂深さ

極間エネルギーを放電電力波形から求め、放電柱損失が5%、両極の入力エネルギーが同一と仮定し(例えば $V_c = 290$ V, $C_1 = 100$ μ F, $W_0 = 4.205$ Joule, Bs/S₂, 正極性, 放電痕直径0.8 mm ϕ , 入力エネルギー $W_E = 1.4$ Joule), 実験結果とこれら計算結果を比較すると、両者はほぼ近い値になる。

G系超硬合金に比較して、S系超硬合金に亀裂が大きく発生するのは、S系の方が熱伝導率および温度伝導率が小さく、したがって、温度勾配が大きく、熱膨張係数も大きいので、急熱、急冷によって発生する剪断応力が大きいことが原因と考えられる。

放電時間が長くなると、亀裂深さが増し、亀裂太さも大きくなるが、放電時間が短いと逆の傾向を示す。これは放電時間が短い領域では、放電衝撃力は大きい¹¹⁾が、電極の熱的影響は少く¹²⁾、亀裂が大きく発生するような比較的放電時間の長い領域では、放電衝撃力は小さいが、熱的影響が大きい。もし、亀裂発生の主要因が放電衝撃力にあるとするならば、その作用の大きい放電時間の短い領域に亀裂が大きくあらわれるべきであるが、実際は、逆に放電衝撃力の小さい放電時間の長い領域に大きくあらわれる。

このことから、亀裂発生の主要因が熱的作用にあることが説明できる。

1 mm ϕ の加工電極を用いて、被加工物の同一箇所、単一放電を約1~2 sの間隔で2発、3発とおこなうと、亀裂深さは表7のように、1発目に比較して、2発、3発とおこなった場合は約1/2程度の深さになる。しかし、放電

繰返し数を270回/s程度にあげて加工をおこない、亀裂を観察すると、前述のように亀裂深さは2~4倍、亀裂太さは5~6倍に大き

表 7 放電繰返し数と亀裂深さ

Bs/G ₂ $W_0 = 4.205$ J, 正極性, $t = 35$ μ s		
放電	亀裂数	亀裂深さ (μ)
1 発	3.5	102.7
2 発	3.5	32.5
3 発	4.0	52.8

Al/G ₂ $W_0 = 4.205$ J, 正極性, $t = 35$ μ s		
放電	亀裂数	亀裂深さ (μ)
1 発	3.5	111.6
2 発	5.7	61.2
3 発	7.0	62.8

くなる。

単一放電の繰返しがゆっくりおこなわれ、放電繰返し数がきわめて少いときは、前述の放電による予熱的影響により、温度勾配がゆるやかになり亀裂が小さくなるが、放電繰返し数がある程度増すと、蓄積熱量が増し、熱的作用が深いところに達するとともに、熱疲労、熱変質層等の影響で亀裂が大きく発生するものと考えられる。

超硬合金の溶融最適放電時間は使用した加工電極材質に比較して、放電時間の短い領域に存在し、溶融深さも小さい。¹³⁾したがって、超硬合金に比較して溶融深さが大きく、溶融最適放電時間が放電時間の長い領域に存在する材質を加工電極に使用すると、加工電極の除去量が大きく、電極消耗率が悪くなり好ましくない。この傾向は放電時間の長い領域ほど著しくなる。

実験結果も溶融深さの計算結果と良く一致し、 L_1 を増して放電時間を長くすると、超硬合金の除去量、すなわち加工量が減少し、電極消耗量が増加して電極消耗率は悪くなる。

したがって、 C_1 端子に並列に整流器を挿入して逆波をバイパスし、放電時間を長くして除去特性を向上する加工回路でも、加工量があまり増加せず、電極消耗率は悪くなり効果がない。

逆波をカットすると、放電エネルギーの小さい領域では効果は認められないが、大きくなると電極消耗量が減少して電極消耗率が良くなる。

S系超硬合金とG系超硬合金では、G系の方が加工量が大きく好結果が得られるが、G系の方が熱伝導率、温度伝導率が大きく、溶融温度が低いので溶融深さが大きく、除去量も大きいことになる。

超硬合金の加工においても、加工電極の材質によって除去特性が異なるが、さらに、亀裂の発生が加工電極の材質の影響を受けるのは、電極の材質的組合せにより、両極へのエネルギー配分が異ってくるためと考えられる。

7. 結 言

- (1) 放電加工の際に加工面に発生する亀裂は、熱的作用が主原因である。
- (2) 亀裂発生を少くするには、電極の熱蓄積をある程度増し、温度勾配を小さくする必要がある。
- (3) 超硬合金の加工には、その熱物理的特性から、放電時間の短い領域での除去特性が優れているが、亀裂防止の点からも有利である。
- (4) 超硬合金の加工においては、除去特性の点から、加工電極の材質を選定すると同時に、放電加工面の亀裂発生点からも加工電極材質を選定する必要がある。
- (5) 単一放電による亀裂発生の観察から、繰返し放電における亀裂発生の現象が類推できる。

おわりに、種々ご教示を頂いた三菱金属の根岸秀夫氏に厚くお礼申し上げます。

(1969年1月11日受付)

参 考 文 献

- 1) 倉藤尚雄, 向山芳世: 精密機械, 31, 2 (1965) 166.
- 2) Kennametal "Catalog", Zerspanung "Der Eisenwerkstoffe", Diatitanit "catalog."
- 3) 倉藤尚雄, 向山芳世: 電気加工学会誌, 1, 2 (1968) 51.
- 4) 3) に同じ。
- 5) 1) に同じ。
- 6) 八戸信昭: 第36回放電加工研究会資料 (1965).
- 7) H.S. Carslaw, J. C. Jager: Conduction of Heat in Solids, oxford (1959) 60.
- 8) 元木幹雄, 橋口清人, 徳山赫漢: 電気学会誌, 82, 881 (1962) 167.
- 9) W. R. Mott: Transaction, Am. Electrochem. Soc, 34 (1919) 255.
- 10) 倉藤尚雄, 向山芳世, 野沢進八: 精機学会春季大会学術講演会前刷集 (1968) 149.
- 11) 向山芳世, 倉藤尚雄: 精機学会秋季大会学術講演会前刷集 (1967) 93.
- 12) 倉藤尚雄, 向山芳世: 電気加工学会誌, 2, 3 (1968) 32.
- 13) 12) に同じ。