研 究

放電点の溶融気化について

六 碯 賢 亮*

Upon the Melting and Vaporizing of Metals
at an Electrical Discharged Point

Kensuke MUTUZAKI

The melting and vaporizing of metals at an electrical discharged point is one of the most important matters for the theoretical studies of electro-discharge machining. In this report, some models of temperature distribution due to the heat conduction at the electrical discharged point are discussed, and quantities of heat necessary to melt or vaporize an unit volume of metals are calculated. A reciprocal of the quantity of heat is estimated as a heat efficiency of machinability, and efficiency diagrams of machinability are discussed for iron and other metals.

1. 緒 言

放電加工のメカニズムを簡単にまとめるとつぎのようになる。「適当な加工液の中で被加工材と電極との間に火花放電を行なうと、放電点の付近は高温度に加熱されて溶融気化し、同時に生ずる高い放電圧力のために溶融部が飛散する。このような火花放電を繰返すことによつて被加工材は加工され、電極材は消耗する。」

この加工量および電極消耗量を理論的に研究するためには、①火花放電によつて陽極および陰極におのおの与えられるエネルギー（または熱量）の状態、②その熱量によつて放電点付近が溶融気化する状態、③放電圧力によつて溶融部が飛散する状態、などを定量的に検討する必要がある。ここには②の溶融気化する状態について、おもに熱伝導の立場から検討した結果を報告する。

2. 放電点における熱伝導

2.1 放電痕 (Crater) の形状

一発の火花放電によつて図1のような放電痕を生ずる。この場合、火花放電によつて発生した熱量は主として放電点の表面（放電柱の直径 $2a$ ）に与えられ、その熱が内部に伝導して破線のような等温面 T_V , T_F , T_x を生ずるものと考えられる。今 T_V をその材料の沸点、 T_F を融点とすれば、等温面 T_V まで気化し等温面 T_F まで溶融することになる。そして溶融部の大部分は飛散

図1 放電痕の形状

するが、一部は、噴口の底および周囲に残留して噴山を作る。放電痕の断面組織を見ると、図に斜線で示すような溶融層が明らかに認められる。また、鋼材の放電痕には変態点以上に加熱されて焼きの入った熱変化層などが見られ、破線のような等温面 (T_x) が内部に伝導して行く有様を如実に物語っている。

噴口の形状（あるいは等温面の形状）はしばしば回転楕円体にたとえられるが、直径が深さの15~30倍になる浅い皿状を呈しているの、これと同じ深さの円壺（直径 $2a$ ）と置き換えて考えることができる。すなわち、放電点の表面（直径 $2a$ ）に与えられた熱量 Q は1次元的に内部に向かって伝導し、深さ x_V まで気化し x_F まで溶融するとするのである。この場合、 $\pi a^2 x_F$ の体積が溶融気化するが、そのうち $\pi a^2 x_V$ の体積が気化した量であり、両体積の中間に一発放電による実際の加工量が存在するものと考えられる。

2.2 熱伝導の状態

放電点の表面から1次元的に内部に向かって熱の伝導する状態は、熱伝導の一般式 $\partial T / \partial t = \kappa (\partial^2 T / \partial x^2)$ から

* 千葉大学工学部

導かれた式 (1) によつて検討することができる。

$$T_{(x,t)} = A \operatorname{erf}(z) + B, \quad z = x/2\sqrt{\kappa t}, \quad (1)$$

$T_{(x,t)}$ …表面から任意の距り x (cm) の点の任意の時間 t (s) における温度 ($^{\circ}\text{C}$)

κ …温度伝導度 (cm^2/s), $\kappa = \lambda/c\gamma$

λ …熱伝導度 ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)

c …比熱 (cal/g), γ …比重 (g/cm^3)

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \cdots \text{誤差積分または誤差函数 (error function)}.$$

A, B は積分の常数で、適当な境界条件を入れることによつて各種の温度分布が導かれることになる。

放電点に熱が与えられる状態には種々のモデルが考えられるがここには放電柱がおもな熱源となつて放電点の表面が放電時間中常に一定温度 (T_0) に加熱されるような状態を考えることにする。この場合の境界条件は、 $T_{(0,t)} = T_0$, $T_{(x,0)} = T_{(x,t)} = 0$ となり、その解として式 (2) のような温度分布が得られる。

$$T_{(x,t)} = T_0 \{1 - \operatorname{erf}(z)\}, \quad z = x/2\sqrt{\kappa t}. \quad (2)$$

式 (2) の温度分布状態は z を横軸にとると図 2 の実線のごとき 1 本の曲線で示される。実際に表面からの距り x を横軸にとると、図 3 の曲線 $t_1 \sim t_4$ のように時間と共に内部に向かって温度が伝播することを示している。そして放電時間 $\tau (=t_4)$ の間に深さ x_v まで気化し、 x_F まで溶融するものと考えられる。

図 2 温度分布

図 3 温度の伝導状態

2.3 与えられた熱量と溶融気化する体積

今、放電点の表面が放電時間 τ の間一定温度 T_0 に加熱されて図 3 曲線 t_4 のような温度分布を生じたとする。この場合、放電点の表面から内部に伝導する単位面積当たりの熱量 Q' (cal/cm^2) は、式 (2) を用いてつぎのごとく求められる。

$$Q' = \int_0^\infty T_{(x,\tau)} \cdot c\gamma dx = \int_0^\infty T_0 \{1 - \operatorname{erf}(z)\} \cdot c\gamma \cdot 2\sqrt{\kappa\tau} dz$$

$$\therefore Q' = 2\sqrt{\kappa\tau} T_0 \cdot c\gamma \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \right). \quad (3)$$

あるいは、

$$Q'/2\sqrt{\kappa\tau} = T_0 \cdot c\gamma/\sqrt{\pi}. \quad (4)$$

すなわち、表面温度 T_0 によつて放電時間 τ の間に放電点 (πa^2) に与えられる熱量 $\pi a^2 Q'$ (cal) が定まることになる。

この熱量によつて、深さ x_F まで溶融したとすると、溶融気化した体積を $\pi a^2 x_F$ と見積もることによつて、単位体積を溶融気化するに要する熱量 Q_{fv} (cal/cm^3) を式 (5) のごとく算出することができる。

$$Q_{fv} = \frac{\pi a^2 Q'}{\pi a^2 x_F} = \frac{Q'}{x_F} = \frac{Q'/2\sqrt{\kappa\tau}}{z_F}. \quad (5)$$

ただし、

$$z_F = x_F/2\sqrt{\kappa\tau}, \quad T_F = T_0 \{1 - \operatorname{erf}(z_F)\} \quad (6)$$

式 (5) に式 (4) および式 (6) を代入すると、

$$Q_{fv} = \frac{T_0 c\gamma/\sqrt{\pi}}{z_F} = \frac{T_F c\gamma/\sqrt{\pi}}{z_F \{1 - \operatorname{erf}(z_F)\}}. \quad (7)$$

式 (7) の分子は常数であるが、分母は図 2 に破線で付記したように z_F の値によつて変化し、 $z_F = 0.53$ において $z_F \{1 - \operatorname{erf}(z_F)\} = 0.24$ の最大値を生ずる。すなわち、表面温度が $T_0 = T_F / \{1 - \operatorname{erf}(z_F)\} = T_F / 0.454$ の場合に、単位体積を溶融気化するに要する熱量 Q_{fv} は最小となり、効率の最もよい加工条件となるのである。

このことは、一般に火花放電によつて一定の熱量を放電点に与える場合、放電時間あるいは表面温度を適当に選ぶことによつて、溶融気化する体積を最大にすることができることを示している。放電時間がこれより短い場合には表面温度が高くなり、多量のガス体を高温に加熱するために熱量が浪費される。放電時間が反対に長い場合には表面温度が低くなり、熱伝導により内部に逃げる熱量が多くなる。そして共に溶融気化する体積は減少するのである。

図 4 単位体積の鉄を溶融気化するに要する熱量

3. 鉄を溶融気化するに要する熱量

具体例として、放電点における溶融気化状態の各種のモデルを想定し、おのおのの状態において単位体積の鉄を溶融気化するに要する熱量 Q (cal/cm³) を算出した。その結果は一括して図4に示すとおりである。図に $Q_I \sim Q_{IV}$ として示した状態はおのモデル I ~ IV (図5, 6) に相当するものである。

なお、鉄の融点	$T_F = 1540^\circ\text{C}$
融解の潜熱	$Q_F = 65\text{cal/g}$
沸点	$T_V = 2740^\circ\text{C}$
気化の潜熱	$Q_V = 1510\text{cal/g}$
比熱	$c = 0.11\text{cal/g}^\circ\text{C}$
比重	$\gamma = 7.87\text{g/cm}^3$

また、単位体積の鉄を 1°C 加熱するに要する熱量は、固相~気相の各温度を通じて、 $cr = 0.866\text{cal/cm}^3^\circ\text{C}$ として算出した。

図5 各種の温度分布

3.1 放電点全体が温度 T_0 の液相または気相まで一様に加熱されると考える場合 (図5・I)

従来、与えられた熱量と加工量との関係を検討する場合には、加工量全体をある温度 T_0 まで溶融気化するに要する熱量を求めた。この場合の温度分布は図5・Iのごとく考えられ、単位体積を溶融気化するに要する熱量 Q_I はつぎのごとくなる。

$$Q_I = T_0 \cdot cr + Q_F \cdot \gamma + Q_V \cdot \gamma \quad (8)$$

図4においては、横軸の各温度 T_0 まで加熱するに要する熱量が直線 Q_{If} (液相範囲 $T_F \sim T_V$) および直線 Q_{Iv} (気相範囲 $> T_V$) として示されている。両直線の傾斜が単位体積当たりの比熱 cr であり、融点 T_F において融解の潜熱 ab 、沸点 T_V において気化の潜熱 cd に相当する熱量が加算されることになる。

3.2 放電点の表面が T_0 に加熱され、内部に向かって温度が伝導すると考える場合 (図5・II)

この状態は図3においてすでに検討したものであるがこれに融解および気化の潜熱を加味すると、放電点に与えられた単位面積当たりの熱量 Q' (cal/cm²) はつぎのごとくなる。

$$Q' = \int_0^\infty T(x, \tau) \cdot cr \, dx + Q_F \cdot \gamma \cdot x_F + Q_V \cdot \gamma \cdot x_V$$

$$Q'/2\sqrt{\kappa\tau} = T_0 \cdot cr/\sqrt{\pi} + Q_F \cdot \gamma \cdot z_F + Q_V \cdot \gamma \cdot z_V \quad (9)$$

この熱量によつて深さ x_V まで気化し、深さ x_F まで溶融するので、単位体積を溶融気化するに要する熱量として図4の3曲線が得られる。曲線 lm および mn は Q'/x_F または $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}/z_F$ として求められたもので、 $T_0 = T_F \sim T_V$ の液相範囲では溶融した体積で放電点に与えられた熱量を除した値 Q_{IIF} 、 $T_0 > T_V$ の気相範囲では溶融気化した全体積で与えられた熱量を除した値 Q_{IIv} である。なお、後者の範囲では、気化した体積だけで与えられた熱量を除した値 Q_{IIv} を Q'/x_V または $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}/z_V$ として求めると、曲線 pq のごとくなる。

単位体積を気化するに要する熱量 Q_{IIv} (曲線 pq) は沸点 T_V において無限大であるが、表面温度 T_0 が高くなると急に减小して、 $6,000^\circ\text{C}$ 付近で最小値を生ずる。これはすでに式(7)において検討した所要熱量の最小値に相当するもので、これより高温では Q_{IIv} の値は再び増大する。単位体積を溶融するに要する熱量 Q_{IIF} (曲線 lm) も融点 T_F の無限大から急に減少するが、最小値を生ずる前に沸点に達するので、以後は溶融気化に要する熱量 Q_{IIv} (曲線 mn) として表面温度と共に大となる。

なお、単位体積を溶融あるいは気化するに要する熱量 Q_{IIF} 、 Q_{IIv} 、 Q_{IIv} などが表面温度 T_0 によつて決定されることは注目すべきことである。放電点に与えられる熱量 $\pi a^2 Q'$ あるいは放電時間 τ は、表面温度 T_0 を決定する因子と考えることができる。

3.3 表面からある深さ (x_c) まで一定温度 T_c に加熱され、その深さが時間と共に内部に進むと考えた場合 (図5・III)

放電点の単位面積に与えられる熱量 Q' が小さい間は Q' の増大と共に表面温度 T_0 が上昇し溶融気化する深さが増大するが、 Q' が大となると表面温度に限度を生じ、図5・IIIのような温度分布状態になると考えられる。限界温度 T_c は放電柱の温度に相当するものと考えられることもできる。この場合、深さ (x_c) が時間の平方根 ($\sqrt{t}$) に比例して内部に進むと仮定すれば、 $z_c = x_c/2$

$\sqrt{\kappa t}$ が一定となり、図のような表面温度 T_0 を仮定して検討することができる。ただし、

$$\begin{aligned} T_0 &= (T_0 - T_c) / \operatorname{erf}(z_c) = (T_0 - T_v) / \operatorname{erf}(z_v) \\ &= (T_0 - T_F) / \operatorname{erf}(z_F) \end{aligned} \quad (10)$$

$$Q' / 2\sqrt{\kappa\tau} = T_0 c\tau e^{-z_c^2} / \sqrt{\pi} + Q_F \gamma z_F + Q_v \gamma z_v \quad (11)$$

図4の右側には、 $T_c = 10,000^\circ\text{C}$ の場合について、単位体積を溶融気化するに要する熱量 $Q_{III\gamma v} = Q' / 2\sqrt{\kappa\tau} / z_F$ 、および気化するに要する熱量 $Q_{III\gamma} = Q' / 2\sqrt{\kappa\tau} / z_v$ を図示した。 $z_c = 0$ の場合は $T_0 = T_c = 10,000^\circ\text{C}$ のⅡ型の状態で、所要熱量はおおの n および q の値に該当するが、与えられる熱量 Q' が増大して z_c の値が大となると、次第にⅠ型の状態に近くなり、所要熱量は共に e の値に近づくことになる。

図6 温度分布Ⅳ

3.4 融点および沸点においてのおおのの潜熱が与えられることを条件とする場合 (図6・Ⅳ)

この場合は、図6のごとく、固相、液相および気相範囲の温度分布がおおの異なる3曲線で示され、融点および沸点における両曲線の傾斜の差がおおのの潜熱を与えることになる。諸式の誘導は省略するが、結果として放電点の表面に与えられる単位面積当たりの熱量 Q' はつぎのごとくなる。

$$\begin{aligned} \frac{Q'}{2\sqrt{\kappa\tau}} &= \left\{ \frac{T_F}{1 - \operatorname{erf}(z_F)} \cdot \frac{c\tau}{\sqrt{\pi}} + Q_F \gamma \frac{z_F}{e^{-z_F^2}} \right. \\ &\quad \left. + Q_v \gamma \frac{z_v}{e^{-z_v^2}} \right\} e^{-z_c^2} \end{aligned} \quad (12)$$

図4には、 $z_c = 0$ の場合について、単位体積を溶融気化および気化するに要する熱量 $Q_{IV\gamma v}$ および $Q_{IV\gamma}$ を破曲線で付記してある。計算は非常に複雑になるが、結果的にはあまり変化が認められなかった。

また、前述の諸状態は温度伝導度 κ が気相～固相を通じて一定と仮定したものである。 κ に変化を与えるとさ

らに複雑となるが、特に気相範囲の κ は定めがたいので、省略した。

4. 加工熱効率最大の状態

与えられた単位熱量によつて加工される体積を加工熱効率 η (cm^3/cal または cm^3/Kcal) と呼び、被加工性を表わすことにする。前節において各種状態 (Ⅰ～Ⅳ) における単位体積を溶融気化または気化するに要する熱量 Q_{fv} または Q_v (Kcal/cm^3) を算出したが、その逆数はおおの加工熱効率の両極限と考えられるものである。すなわち、加工量が溶融気化した体積全体であれば加工熱効率は $\eta_{fv} = 1/Q_{fv}$ となり、気化した体積のみとすれば $\eta_v = 1/Q_v$ となる。実際の加工熱効率は両者の中間になるものと考えられる。

図7 鉄の被加工性

4.1 鉄の被加工性

図7は図5の溶融気化状態Ⅱに対する加工熱効率を示したものである。横軸は溶融気化の深さ x_F に対応する z_F で示しているが、これは図4の横軸である表面温度 T_0 と全く同じ意味を有するもので、 z_F と T_0 との対応は式(6)の関係から曲線(4)として示されている。曲線(1)～(3)はこのような z_F (または T_0) に対する極限の加工熱効率 η_{If} , η_{Ifv} および η_{Ifv} である。すなわち、単位熱量が放電点に与えられた場合、 $z_F < 0.41$ ($T_0 < T_v$) の状態では曲線(1) η_{If} の体積が溶融し、 $z_F > 0.41$ ($T_0 > T_v$) の状態では曲線(2) η_{Ifv} の体積が溶融気化するが、そのうち曲線(3) η_{Ifv} までは気化した体積、曲線(3)と(2)の間が溶融状態にある体積に該当する。実際に加工される体積は、溶融状態にある体積のうちどの程度が放電圧力によつて飛散しどの程度が噴山として残留するかによつて定まるものである (図9参照)。

z_F または T_0 で示される放電状態は、放電点の単位面積当たりに与えられる熱量 Q' (cal/cm²) と放電時間 τ (s) とによつて定まるもので、 z_F に対する $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値 (cal/cm³) を曲線 (5) に示してある。この値で z_F および z_V を除した商が η_{IIfv} および η_{IIv} の極限の加工熱効率になるのである。すなわち、図の曲線 (2) および (3) のごとく、 z_F の増大と共に著しく熱効率は小さくなるのである。しかしこの場合、溶融気化の深さ (z_F) が大となると表面温度 (T_0) が考えられないほどの高温になることが必要となってくる。したがつて、 z_F の大きい範囲では、実際には図5Ⅲ型の温度分布 (溶融気化状態) をとるものと考えられる。今、 $T_c=10,000^\circ\text{C}$ とした場合には、 $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値は破線 (5') のごとく z_F と共に増大するが、極限の加工熱効率 η_{IIIfv} および η_{IIIv} はおのおの破線 (2') および (3') のごとく略々一定値に落付くことになる。

一般に、放電時間 τ が一定の場合を考えると、与えられた熱量密度 Q' が小さい間はⅡ型分布をとり、曲線 (5) に従つて Q' の増大と共に溶融気化する深さ x_F (または z_F) が増大し、同時に表面温度 T_0 も高くなる。普通にはこの間に曲線 (3) η_{IIv} の最大となる状態があり、実際の加工熱効率もこの付近で最大値をとるものと考えられる。さらに与えられる熱量密度 Q' が大となると、温度分布はⅢ型となり、破線 (5') のごとく Q' の値に略々比例して溶融気化の深さ x_F が増大し、加工熱効率は T_c に関係する一定値に落付くことになる。

4.2 加工熱効率最大の放電時間

最近、加工効率を向上するために、放電回路にインダクタンス L や抵抗 R をそう入して放電時間を変化する

図8 鉄の単発消耗量

図9 放電時間と加工効率

ことが試みられている。一例として、和泉氏の研究結果¹⁾を引用すると図8のごとくである。同図は陽極および陰極共に Fe を使い、放電時間を横軸のように変化した一定エネルギー (1~10 J) の単発放電を行なつた場合で、明らかに両極の消耗量が最大となる放電時間が存在することを示している。

このような現象を解明するために、図7の加工熱効率曲線を放電時間を横軸として書き改めたものが図9である。今放電エネルギーが一定の場合には、放電点 (または放電柱) の直径 $2a$ が放電時間 τ の四乗根に比例して増大すると考えると、放電点の面積 πa^2 は $\sqrt{\tau}$ に比例して増大するので、単位面積当たりの熱量 Q' は $\sqrt{\tau}$ に逆比例して減少し、 $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値は τ に逆比例して減少することになる。したがつて、ある一定の熱量 Q が放電点に与えられた場合、 $T_0=T_V$ ($z_F=0.41$) になるような放電時間を τ_V とすれば、放電時間を τ に変化した場合の $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値は τ_V の場合の値の τ_V/τ 倍となり、図7の曲線 (5) からその場合の z_F ないし η_{IIfv} などの値を求めることができる。このようにして求められた極限の加工熱効率を放電時間の比較値 τ/τ_V を横軸として画いたのが図9である。

図9は図8と全く同じ対数方眼紙に画かれている。そして図8の各曲線をそのまま図9に移すと、大体曲線 (2) と (3) および (2') と (3') の間にまとめて画くことができる。太い曲線 $abcd$ はこれ等の実験結果を参考として画いた加工熱効率曲線である。放電時間 τ の小さい間は $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値が大きくⅢ型の状態に相当するような略々一定の加工熱効率 a b を示すが、放電時間 τ が大きくなると $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値が小さくⅡ型の状態となり加工熱効率は bc のように大となる。そして適当な放電時間において最大点を生ずるが、さらに放電時間が大となると、表面温度は沸点 T_V に近づき放電が持続しがたくなるので、加工熱効率というよりも加工量そのもの

図10 両極の消耗量
(加工熱効率曲線)の相対関係

が急激に減少するものと考えられる。

4.3 陽極と陰極の差異

実際に図8における両極の消耗量を見ると、図10に定性的に示すような関係になる。すなわち、陰極側は加工熱効率曲線のbcd部分、陽極側はabc部分に相当した範囲において相対応している。両曲線の相対的な位置のズレは、火花放電によつて放出されたエネルギーが陽極および陰極にどのような熱影響を与えるかによるものである。この場合には、結果的に見て、陰極側に陽極側よりもより多くの熱量 Q が与えられたために、陰極側の消耗量曲線は陽極側より全般的に大きい値を示している。さらに、陽極側の方が陰極側よりも高温に加熱されるために陽極側曲線が陰極側よりも放電時間の長い方にずれているものと考えられる。一般に、同種金属間で火花放電を行なった場合、陽極側の方が陰極側よりも高温に加熱されることは広く認められていることである。また、放電エネルギーの大部分が放電柱において放出されると考えた場合熱伝導によつてより低温の陰極側に多量の熱量が与えられることも可能なことと考えられる。

4.4 加工熱効率最大の条件

図8において、放電エネルギー W の一定な各曲線は、 W の増大と共に略々比例して消耗量が大きくなっているが、

図11 各種金属の被加工性

同時に放電時間の長い方にも偏位している。これは加工熱効率が $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値によつて定まるからである。

今、放電点に与えられる熱量 Q がエネルギー W に比例するとする。一方、放電点の直径は略々 $(W\cdot\tau)^{1/4}$ に比例すると考えられるから*、単位面積当たりの熱量 Q' は $Q/\sqrt{W\cdot\tau}$ ($\propto \sqrt{Q/\tau}$) に比例し、 $Q'/2\sqrt{\kappa\tau}$ の値は $\sqrt{Q}/\tau$ に比例して変化することになる。したがつて、図8の各曲線は $\sqrt{Q}$ すなわち $\sqrt{W}$ に略々比例して放電時間 τ の長い方に偏位することになるのである。

加工熱効率最大の条件も $\sqrt{Q}/\tau$ または $\sqrt{W}/\tau$ の値がその材料に適した一定値をとることになる。図8の各曲線における消耗量の最大値を結んだ直線 MM は明らかに $\sqrt{W}/\tau$ 一定の条件を満足している。なお、この条件は、放電電流波形における波高値 I_m と放電時間 τ との比 (I_m/τ) が適当な値をとるときに加工量が最大になるという奥野、三谷、藤村氏等の説²⁾とも略々一致している。すなわち、放電間隙に与えられるエネルギー W は、間隙電圧を一定と見なせば放電電流に比例し、放電波形から求められる $I_m \times \tau$ に略々比例すると考えられる。したがつて、 $\sqrt{W}/\tau$ の値は $\sqrt{I_m/\tau}$ の値に比例することになるからである。

5. 各種金属の被加工性または電極消耗性

図11は各種金属の被加工性を示したものである。図7に示した鉄の被加工性と全く同様にして求められたものであるが、横軸には表面温度 T_o をとり、 $T_o=10,000^\circ\text{C}$ 以下のⅡ型温度分布に対する加工熱効率 η を図示した。この場合金属の諸性質が放電加工における被加工性にどのような影響をおよぼすかについて検討して見よう。たとえば、単位体積を溶融気化するに要する熱量 $Q_{\text{II}fv}$ は式(9)を z_F で除して変形するとつぎのごとくなる。

$$Q_{\text{II}fv} = cr \left\{ \frac{T_o}{\sqrt{\pi}} + \frac{Q_F}{c} \cdot z_F + \frac{Q_V}{c} \cdot z_V \right\} / z_F \quad (13)$$

(1) 上式において、 z_F および z_V は T_o と融点 T_F および沸点 T_V とによつて定まる値であり、各金属共に $T_o = T_V$ において $\eta_{\text{II}fv} (= 1/Q_{\text{II}fv})$ が最大となり、 T_o が高くなるほどその値が小さくなることはすでに検討したとおりであ

* 第13回放電加工研究会(昭33・9)紹介文献(A. S. Zingerman; 元木氏訳)を整理すると、放電柱の直径 $\propto W^{0.25 \sim 0.35} \times \tau^{0.2 \sim 0.3}$ となる。

る。すなわち、図11のごとく被加工性曲線は各金属共に略々同形であるが、 T_o の上昇にともなう $Q_{II_{fv}}$ の減少は T_v の低いものほど著しいようである。

(2) 一般に金属の性質として、略々つぎの関係が成立つ。

原子熱 (比熱 $c \times$ 瓦原子) $\doteq 6 \text{ cal/mol}$

溶融の潜熱 ($Q_F \times$ 瓦原子) $\doteq 2.2 \times (T_F + 273^\circ)$
cal/mol

気化の潜熱 ($Q_v \times$ 瓦原子) $\doteq 25 \times (T_v + 273^\circ)$
cal/mol

したがって、式 (13) に含まれる Q_F/c および Q_v/c はおのおの融点 T_F および沸点 T_v に略々比例して増大する。すなわち、 T_F 特に T_v の高いものほど $Q_{II_{fv}}$ などの所要熱量は大となり、加工熱効率是小となる。

(3) 一般に工業的金属の原子容(瓦原子÷比重 γ) は類似のものが多い。たとえば、Zn, Al, Ag, Au, Mo, W は $9 \sim 10 \text{ cm}^3/\text{mol}$, Fe, Co, Ni, Cu は $6.5 \sim 7 \text{ cm}^3/\text{mol}$, となつてゐる。金属の原子熱は略々一定であるから、式 (13) の全体にかかる cr の値はやはり同程度の値をとることになる。すなわち、単位体積を 1°C 加熱するに要する熱量 cr (cal/cm³) は Al も W も略々同じということになる。なお、炭素 (C) の原子容は小さく ($5.4 \text{ cm}^3/\text{mol}$), Zn 以外の低融金属の原子容は $13 \text{ (cd)} \sim 18 \text{ (pb)} \text{ cm}^3/\text{mol}$ の大きい値を示している。

(4) 温度伝導度 κ (または熱伝導度 $\lambda = cr \cdot \kappa$) は金属によつて相当に異なるが、式 (13) には無関係であり、したがつて図11の表面温度と加工熱効率の関係には影響がない。 κ の影響をおよぼすのは、単位面積当たり同じ熱量が与えられた場合に κ の大きい金属はより低い表面

温度に加熱されること、逆に表面温度が同じ場合には κ の大きい金属ほど多量の熱量が与えられることである。

以上のごとき各種金属の被加工性は、逆に見れば電極材料としての消耗性を示すことにもなる。したがつて、端的にいえば沸点および融点の高い金属ほど消耗が少なく被加工性は悪いが、電極材料としては適することになる。各種の潜熱の大小は沸点、融点の高低に比例するし比熱の値は単位体積当たりにとつた場合金属による差異があまりないからである。

しかし、実際の放電加工における加工量と電極消耗量あるいは電極消耗比の検討には、さらに多くの重要な因子が関係してくる。すなわち、緒言に述べた①および③の基本的因子はもちろんのこと、両極材質の組合せによる両極間の熱の伝導や、飛散物質の付着または短絡による両極物質の移転なども影響することが明らかに認められている。

6. 結 言

放電加工のメカニズムを定量的に研究する一助として放電点付近が与えられた熱量によつて溶融気化する状態を検討した。すなわち、熱伝導の立場から各種の温度分布をもつた溶融気化状態を算定し、鉄その他の金属に対する加工熱効率線図を作り、その被加工性を検討した。また、これによつて加工熱効率の最大となる状態を解説した。

参考文献

- 1) 和泉忠義：日本機械学会誌，63 (1950) 1154.
- 2) 第28回放電加工研究会 (昭37・6) 資料