Performance of Current Wave Form Controlled EDM 電流波形制御 (特殊電流波形) による加工特性

K. Kobayashi, T. Ōizumi
小林 和彦* 大泉 敏郎*

1. は し が き

放電加工の本質的な加工特性は、方形波パルスを使用する場合、単一パルスエネルギーを求めるための電気条件である、パルス幅と放電電流ピーク値によって決定されることが一般に知られている。しかしながら方形波以外の電流波形たとえば三角波や台形波などについては、上記の電気条件だけでは加工特性を決定できず、新たにパルス形状の立上り或いは立下り時間が重要な条件として付加されてくることが当然考えられる。

Bruyn¹⁾は、方形波の平坦部を右上りに傾斜させた台形波()を用いて実験を行ない、単一パルスエネルギーに対する除去量の変化と電極消耗比を求め、これらの結果を方形波と対比させて、ともに優れていることを報告している。また元木ら²⁾は、方形波にコンデンサ放電による幅の狭いパルスを重畳して加工を行ない、重畳位置の違いにより特性が変化することを報告している。その他木下らは³⁾⁴⁾⁵⁾各種電流波形による加工特性の比較をし、熱的な面からの解析を行なっている。また熱的な面での解析は、向山ら⁶⁾も報告している。

しかしながら、三角波及び台形波について、その波形形状がどのように加工特性に影響を及ぼすかということを系統立てて定量的に求めたものはまだ報告されていない。そこで筆者らは、特殊波形を発生させるための装置を考案し、広範囲に波形形状を変えて実際に放電加工を行なうことにより、波形形状と加工特性との関係を実験的に求め、またこれらの関係については、単一放電による実験結果からも追求した。さらに、電流波形制御を行なう場合の最適方法について検討を加えた。

2. 電流波形制御回路

電流波形を変化させる方法には、図1に示すスイッチングトランジスタ Tr_1 , Tr_2 , …… , Tr_n を順次時間的にずらして、ON-OFF させることにより行ない、段階的に電流波形の立上り、立下りを変化させた。トランジスタをON-OFF させるタイミングは、たとえば図2のようにして行なう。ここで図2に示す4, 5間(電流波形の頂点の部分)の時間は、 $1\mu\text{sec}$ 以上任意に設定できるようになっている。

各トランジスタをON-OFF する時点は、図1に示すプログラムボード上のインサートピンの位置で任

* 三菱電機(株)名古屋製作所

意に設定でき、ピンで描かれる図形がそのまま電流波形を表わすようになっている。時間間隔 Δt は、 $1\mu\text{sec}$ 以上の値を直線的に変えられ、また放電電流値の増加分 ΔI は、図1のコレクタ抵抗 $R_1, R_2, \dots, R_n$ の大きさを変えることにより、4 A と 10 A の2種類に変えられるようになっている。また使用したトランジスタの数 n は10個 ($n=10$) である。

極間に放電電流を流す方式は、まず極間に電圧を印加し放電が発生すると、その放電の発生を検出して図1に示す制御回路を働かすようにしているので、すべての放電電流パルスは同一の形状を持つようになる。

放電電流のオシログラフ写真例を図3、図4に示す。図3の(a), (b), (c)は、三角波の立上り、立下りのスロープをそれぞれ変えたもの、また同様に図4の(a), (b), (c)は、3種の台形波の場合をそれぞれ示す。立上り、立下りのスロープは段階的であるが、 ΔI が全体の電流ピーク値の10%であること、さらに回路中に $5\mu\text{H}$ 程度のインダクタンスを含んでいるので、ある程度波形がなまり、全体的に見てある幾何学的形状に近似できるというのが、この回路の基本原理である。

図1 電流波形制御回路

図2 トランジスタのスイッチング・タイミング

図3 種々な三角波の電流波形

図4 種々な台形波の電流波形

3. 実験方法及び条件

前述した電流波形制御回路により、三角波及び台形波を主として用い、その立上り、立下りを種々に変化させて実際に加工を行ない、その結果より単位電流当りの加工速度、電極消耗比、面あらさなどの加工特性を求めた。

電極材料としては20mm ϕ （噴出口径5mm ϕ ）の電気銅を、被加工物材料として鋼（SK-5）と超硬合金（タングステンカーバイドG系種，C₀の含有料：16%）を用い、電極を陽極、被加工物を陰極にそれぞれ接続した。加工液を電極の中心より噴出させ、その液圧は0.1～0.2 kg/cm²に設定した。

さらに単一放電についての実験も行ない、これらの結果より、放電痕形状（直径と深さ）を、電流波形の関係として測定した。

4. 実験結果

4.1 実験(1) 一銅（陽極）対鋼（陰極）の場合—7)

(1) 三角波による加工

まず三角波の電流パルスにおいて、1パルスの放電エネルギーを一定にし、立上り及び立下り時間を種々に変えて加工実験を行なった結果を図5、図6、図7に示す。各図とも加工特性を立上り時間の関数として示しているが、その場合立下り時間は、パルス幅から立上り時間を差引くことにより求められる。なお、方形波の場合と対比させるために、その加工特性を点線で示してある。

図5より加工効率は、立上り時間が大きくなると、わずかに（17%程度）低下する傾向にあるようである。つぎに鋼に対する銅電極消耗比は、図6より明らかなように、立上り

図5 種々な三角波における加工効率

時間の増加とともに急激に減少する。

また図7から、仕上面あらさが立上り時間にはほとんど影響を受けず、ほぼ一定の傾向を示していることがわかる。

つぎに、パルス幅及び波形形状を一定にして、放電電流ピーク値を種々に変えた場合の実験結果を図8～図10に示す。図8から加工効率は、電流ピーク値の大きさとともに増加しており、その大きさの順位は、一部逆転しているところがあるが、大体 $\searrow > \wedge > \nearrow$ のようになっているようである。

電極消耗比は、 $\searrow$ の波形の場合、電流ピーク値が大きくなると極端に増加するが、 $\wedge$ と $\nearrow$ の波形の場合は、それほど急激な増加は見られない(図9)。パルス幅が $200\mu\text{sec}$ と $400\mu\text{sec}$ とでは、方形波の場合と同様に、パルス幅の長いほうがやはり電極消耗比は小さくなっている。これらから、電極消耗比に影響を及ぼす要因としては、パルス幅と放電電流ピーク値は言うに及ばず、電流の立上り時間も非常に重要な要因であると言える。

電流ピーク値に対する仕上面あらさ及び平均加工電流は、図10より、電流ピーク値の増加とともに増大する傾向を示している。

図6 種々な三角波における電極消耗比

図7 種々な三角波における面あらさ

図8 三角波における電流ピーク値と加工効率との関係

図9 三角波における電流ピーク値と電極消耗比との関係

(2) 台形波による加工

台形波において放電電流ピーク値を一定にし、その立上り時間だけを変化させた場合、立下り時間だけを変えた場合、さらに両方を均等に変化させた場合についてそれぞれ加工実験を行ない、その結果を台形波の平坦部の時間幅の関数として図11、図12に示す。銅電極で鋼を加工する場合の加工効率 ($g/min \cdot A$) を図11(a), (b)に、電極消耗比(%)を図12(a), (b)にそれぞれ示す。図中、平坦部時間幅が0の場合は三角波に相当し、またパルス幅に等しいときは、方形波の場合である。

図11より加工効率については、 $\square$ の波形の場合、立上りをゆるやかにし、すなわち三角波 ($\triangle$) に近づけるにつれて、方形波の場合に比べ低下する傾向にあるが、他の二つの波形については、平坦部の時間幅が変化しても、ほとんど方形波の場合と変わらないことがわかる。また立上りをゆるやかにした波形の場合加工効率の低下する傾向は、パルス幅が長いほうが大きい。加工効率が低下しない他の二つの波形の場合は、パルス幅の違いによる加工効率の変化はほとんどないようである。

図10 三角波における電流ピーク値と面あらさおよび平均加工電流の関係

図 11 種々な台形波における加工効率

図 12 種々な台形波における電極消耗比

一方電極消耗比は、 $\square$ の波形の場合、平坦部時間幅が増加する（方形波に近づく）にしたがい減少するが、 $\triangle$ と ∇ の波形の場合、逆に増加する傾向があり、 $\square > \triangle > \nabla$ の順に電極消耗比は小さくなっている。したがってもっとも電極消耗比が小さくなる波形は、立上りスロープのゆるやかな三角波の場合で、方形波の場合の電極消耗比の 1/10 程度にまで減少しており、立上りスロープが電極消耗比にいかに関与しているかが理解できる。しかしその場合加工効率は、方形波の場合の 80% 程度に低下していることがわかる。

4.2 実験(2) 一単一放電による実験⁸⁾

立上りスロープを持った三角波形(▲)と、立下りスロープを持った三角波形(▼)を用いて単一放電を行ない、銅電極(陽極)に対する鋼電極(陰極)の単一放電痕の大きさを測定した結果を図13(a), (b)に示す。また、両者の放電痕深さ及び直径の比率を図14に示す。

図13 三角波形状と単一放電痕の大きさ(鋼)

図14 三角波形状と単一放電痕の関係

図15 三角波形状と単一放電痕の大きさ(銅)

これらの結果より、放電痕直径は、波形形状にはほとんど影響を受けずに、パルス幅の増加とともに増大していることがわかる。一方、放電痕深さについては、 $\sim$ の形状のほうが大きく、パルス幅 0.2 ms の場合、 $\sim$ の場合の約 1.1 ～ 1.2 倍になっている。

つぎに $\sim$ の形状の場合の銅電極における単一放電痕の大きさの測定結果を図 15 に示す。測定結果は、パルス幅に対して散在しているが、深さ及び直径ともパルス幅の増加とともに増加しているようである。

4.3 実験(3) 一銅(陽極)対超硬合金(陰極)の場合— 9)

(1) 三角波による加工

三角波において放電電流ピーク値、パルス幅を一定にして、ピークの時間位置を種々に変え、電極(陽極)に銅、被加工物(陰極)に超硬合金(タングステンカーバイド)を用いて加工実験を行なった結果を図 16, 17 に示す。図からわかるように、これらの結果は、銅対鋼の場合と大分異なった様子を示している。加工効率 η は銅対鋼の場合は、三角波の波形形状にはそれほど大きな影響を受けていなかったが、銅対超硬合金の場合には図 16 より明らかなように、丁度前者の電極消耗比と同じような傾向で、電流の立上りがゆるやかになるにしたがって、急激に減少するようになっている。

一方電極消耗比は、図 17 より電流の立上り時間を関数として見た場合、二等辺三角形付近(図では 25 μ sec 付近)で極小点を持ち、方形波の場合(点線)の約 $\frac{1}{2}$ 位まで減少させることが可能なことがわかる。またこの極小点よりも立上り時間の大きい領域では、加工がきわめて不安定になる傾向があり、定常アークに移行しやすかった。

仕上面あらさは、図 18 にみられるように、銅対鋼の場合と同様に三角波の形状にはほとんど影響を受けていないようである。

図 16 種々な三角波における加工効率

図 17 種々な三角波における電極消耗比

図 18 種々な三角波における面あらさ

(2) 台形波による加工

種々なパルス幅に対して方形波から三角波まで、電流立上りスロープを細かく変化させた場合の加工実験結果を図19、図20に示す。図19に加工効率、図20は電極消耗比を示し、いずれも図(a)は電流ピーク値が36A、図(b)は90Aの場合である。

図19 種々な台形波における加工効率

図20 種々な台形波における電極消耗比

図19(a)より加工効率は、放電電流ピーク値36Aのとき、立上り時間が $25\mu\text{sec}$ までは方形波の場合とほぼ同一であるが、それ以上になると急激に減少する傾向がある。しかもパルス幅の異なるほとんどのパルスが、同一の傾向を持っているようである。放電電流値が異なると、たとえば、図19(b)の90Aの場合は、急激に減少する位置が立上り時間の長いほう($55\sim 60\mu\text{sec}$)に移動している。

つぎに電極消耗比は、図20(a)と(b)より三角波の場合と同じように極小値を持っているが、その極小値の位置は、パルス幅に無関係に、加工効率が急激に減少する位置付近に存在しているようである。

5. 検 討

(1) 実験(1), (2)に対する検討

実験結果より、方形波以外の放電電流波形形状においては、電流の立上り、立下りのスロープ(A/sec)が、銅(陽極)対鋼(陰極)の場合の加工特性、とりわけ銅電極消耗に非常に大きな影響を持っていることが明らかになった。また立上りスロープがゆるやかであればあるほど、電極消耗比は減少するが、立下りスロープについてはまったくその逆の関係にあるようである(図6, 図8)。両者の差をもっと具体的に調べるために、実際の放電加工を行なった後の電極の消耗状態の写真をとった。その例を図21に示す。電極の消耗状態をはっきりと肉眼で見ることができた。

しかしながら、鋼の加工効率については、立上りスロープが非常にゆるやかな場合(三角波にほとんど近い形状)を除いては、ほとんど影響がないと見てよさそうで(図5, 図11)、影響がある場合でも、20%程度の加工効率の低下である。また三角波の場合、 の形状よりも、 の形状の場合のほうが、加工効率が低下する(約17%)原因については、 の波形の場合、非常に電流が小さいところから放電が発生するので、放電開始時は放電自体が不安定で、放電が維持できない¹⁰⁾ということも原因の一つだと考えられる。しかし図14に示す単一放電痕深さの違いが、連続放電における加工速度の差となって現われたものと考えるのが、この場合妥当なようである。

(a) の波形の場合

(b) の波形の場合

図21 三角波形の形状の違いによる電極消耗の様子

さて、電流波形の立上り、立下りスロープが、このように大きく電極消耗に影響を及ぼす理由については、熱伝導による要因がまず第一に考えられる。^{11) 12)} 同一エネルギーであっても、スロープが変化すれば電極に与えられるエネルギー密度が時間的に変化するわけであるから、当然放電痕の形成に影響が出てくるはずである。アーク柱が時間とともに膨張するという仮定をここに取り入れるならば、立上りスロープの場合は、エネルギー密度（極間に与えられるエネルギー／アーク柱の面積）を小さく押えたままで放電させることができるので、熱伝導の良い金属（この場合銅）は熱放散により温度が急激に上らず、放電痕深さも小さくなって消耗が少なくなるということが考えられる。

しかしながら、銅電極の単一放電痕の深さについての測定結果からは、 の形状の場合、必ずしも低電極消耗特性を示していない。図15に示すように、測定値が広範囲に散らばっていることから、極間隙や電極表面形状などのわずかな測定条件の変化によって、測定値が影響を受けやすいと判断される。

仕上面あらさは、図7より明らかなように、単一パルスのエネルギーが同一ならば、電流波形形状にはほとんど影響がないと見てよさそうである。しかし、電流ピーク値に対しては、図10よりわかるようになりに大きな影響を受け、これは方形波の場合と同一傾向を示している。

ところでこのような特殊形状波形、たとえば三角波を実際加工に応用した場合、方形波に比べて有利かどうかをつぎに考えてみたい。電極消耗比だけを考えるならば、立上りスロープのゆるやかな三角波のほうが、前述したとおりかなり有利になってくるが、実際加工では同一仕上面あらさに対する加工速度も尺度として見るから、この場合は必ずしも有利と言えない。

すなわち、いま加工効率が同一だとしても（実験では三角波の場合の方が低い）、平均加工電流は三角波の場合、方形波の $\frac{1}{2}$ になるから、当然加工速度は $\frac{1}{2}$ 以下で、加工速度の低下は免れ得ない。しかしその分だけ面あらさが向上すれば良いが、必ずしもはっきりと差をつけるだけの向上は見られない。したがって、電極消耗のきわめて少ない加工が要求される場合には、非常に有利になってくるので、用途によって使い分ける必要があると思われる。また、平均加工電流を極間の放電状態に応じて適応制御する場合、休止時間に代わって、パルス形状の変化で行なうことができそうである。これについては、後で詳しく検討する。

(2) 実験(3)の結果に対する検討

陰極に接続した超硬合金（タングステンカーバイド）の加工の場合は、立上り時間が加工効率（ g/minA ）と電極消耗比の両方に影響を持ち、両加工特性の兼合いで最適な立上り時間が存在するようである。しかし加工効率だけ見るならば、立上り時間が短いほど、すなわち立上りが急峻なほど、高い加工効率が得られている。

最適な立上り時間は、図19と図20からパルス幅とは無関係に電流ピーク値によって変化するので、結局立上りスロープが重要なファクタだと言うことができる。この場合 $1.3 \sim 1.5 \text{ (A}/\mu\text{sec)}$ 程度

のスロープが最適になっている。加工効率は方形波の場合であっても、パルス幅が短かいほど大きくなっており、このことから最適な波形形状としては、最適スロープを持った三角波であると言えそうである。

(3) 電流波形の制御方法についての検討

従来までの適応制度では、平均加工電流を制御するために、比較的加工特性に悪影響を与えないという理由から、休止時間を制御する方法が採用された。この休止時間の代わりに、やはり同じような理由から、電流波形を制御する方法もかなり効果的であると考えられる。ここでは、電流波形制御を行なう場合の最適方法について検討する。

電流波形を変化させる場合、加工特性とりわけ電極消耗に悪影響を与えない方法としては、前述の実験結果から明らかなように、図22に示すような、電流の立上りスロープを変化させる方法が当然考えられる。すなわち、図22(a)は、ある無負荷電圧印加時間の存在した後、放電が発生している状態を示す極間電圧波形であり、この放電の持続時間 τ_p の間に、(b)で示すような電流波形のパルスが極間に流れる。

図22 極間電圧電流波形

そこで、図22に示すような諸元値を定義し、平均加工電流 I' を求めてみることにする。まず、 $m (\leq n)$ ステップで立上る電流波形を方形波に換算し、その場合の電流ピーク値 I_P' は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 I_P' &= \frac{1}{\tau_p} \left[\Delta I \cdot \tau_p + \Delta I \cdot (\tau_p - \Delta t) + \Delta I \cdot (\tau_p - 2\Delta t) + \dots \right. \\
 &\quad \left. + \Delta I \cdot \{ \tau_p - (m-1) \cdot \Delta t \} \right] \\
 &= \frac{1}{\tau_p} \left\{ m \cdot \Delta I \cdot \tau_p - \Delta I \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^m (i-1) \right\} \\
 &= \frac{m}{n} \cdot I_P \cdot \left\{ 1 - \frac{(m-1) \cdot \Delta t}{2\tau_p} \right\} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

ただし、

$I_P = n \cdot \Delta I$; 方形波の電流ピーク値(A)

τ_p = パルス幅 (sec)

$n \dots \tau_p \geq n \cdot \Delta t$ (図22(b)における(1)の波形の場合)

$\frac{\tau_p}{\Delta t}$ にもっとも近い整理値 $\dots \tau_p < n \Delta t$ ((2)の波形の場合) $\dots\dots\dots (2)$

また、平均加工電流 I' (A) は次式で表わされる。¹³⁾

$$I' = K \cdot I_P'$$

K : 加工中のみかけの Duty Factor

$$K = \frac{D(E - V_m)}{E - D \cdot eg}$$

D : 理論的な Duty Factor

E : 無負荷電圧 (V)

V_m : 平均加工電圧 (V)

eg : アーク電圧 (V) (3)

ここで(1)式を(3)式に代入すると、平均加工電流 I' (A) は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} I' &= K \cdot I_P' = K \cdot I_P \cdot \frac{m}{n} \left\{ 1 - \frac{(m-1) \Delta t}{2\tau_P} \right\} \\ &= I \cdot \frac{m}{n} \cdot \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\tau_P} \right) \end{aligned} \quad \text{..... (4)}$$

$I = K \cdot I_P$: 方形波の平均加工電流

(4)式に基づいて、1ステップの時間変化分 Δt (sec) に対する平均加工電流 I' の関係を図示すると、図23のように表わすことができる。これから、 Δt を変化させることにより、平均加工電流 I' を広範囲に制御できることがわかる。また最大のステップ数 n が大きいほど、平均加工電流の制御範囲は大きくなっている。

以上述べたことから、電流波形を制御する方法は、平均加工電流を比較的広範囲に変化させることができるので、1ステップの時間変化分 Δt を、極間の放電状態に応じて変化させるような適応制御を行なうならば、使用目的によっては非常に効果的な制御方法であると言えるようである。

4.6 結 論

三角波と台形波の電流波形形状を広範囲に変化させ、銅電極(陽極)を用いて、鋼及び超硬合金(陰極)を加工する場合の加工特性を実験的に求めた。その結果より、つぎのような結論を導き出すことができる。

- (1) 銅対鋼の場合の、三角波及び台形波における加工効率、電流ピーク値が同一ならば、波形形状にはそれほど大きな影響を受けないと見てよさそうである。しかし傾向としては、立上りスロープよりは、立下りスロープを持った波形のほうが、20%程度大きくなっている。一方、電流ピーク値より受ける

図23 時間変化分と平均加工電流との関係

影響は、方形波の場合と同様、非常に大きい。

- (2) 銅対鋼の場合の電極消耗比は、電流の立上りスロープがゆるやかになるにしたがい、急激に減少する傾向を持っている。立下りスロープは、逆に電極消耗比を増加させるように作用する。一方、仕上面あらさは、電流ピーク値には著しい影響を受けるが、波形形状にはほとんど影響を受けないようである。
- (3) 銅対超硬合金（タングステンカーバイド）の場合の加工効率は、三角波の場合電流の立上りスロープがゆるやかになるほど、低下する傾向を持っている。一方、電極消耗比は、極端にゆるやかな立上りスロープでなければ、立上りスロープのゆるやかなほど減少する傾向が見られる。また、仕上面あらさは、銅対鋼の場合と同様、波形形状にはそれほど影響を受けていないようである。
- (4) 銅対超硬合金の場合、立上りスロープを持った台形波においては、加工効率が低下せず、電極消耗比が極小になるような、最適立上りスロープが存在するようである。実験的には、 $1.3 \sim 1.5 \text{ A}/\mu\text{sec}$ 程度が最適になっている。
- (5) 放電加工の適応制御において、極間の放電状態に応じて電流波形を変化させることにより、平均加工電流を制御する方法は、制御範囲がかなり広く、また加工特性に悪影響を及ぼさないという点で非常に効果的であると思われる。その場合、立上りスロープを変化させる方法がもっとも適している。

(1974. 12. 27 受付)

参 考 文 献

- 1) DE Bruyn, H.E. : Ann. of CIRP, 16 (1969), 183.
- 2) 元木・李・中島：電気加工学会誌，2－3（昭43），48.
- 3) 木下・福井・倉藤：電気加工学会誌，3－4（昭44），34.
- 4) 木下・福井・倉藤：電気加工学会誌，4－7（昭45），36.
- 5) 木下・福井・佐田：電気加工学会誌，4－7（昭45），49.
- 6) 向山・三橋：昭和48年精機学会秋季大会，227.
- 7) 斎藤・小林・大泉：昭和47年精機学会秋季大会，508.
- 8) 小林・大泉：昭和49年精機学会秋季大会，175.
- 9) 小林・大泉：昭和48年精機学会秋季大会，229.
- 10) 元木・寄神：昭和45年精機学会春季大会，139.
- 11) 木下・福井・倉藤：4)に同じ
- 12) 木下・福井・佐田：5)に同じ
- 13) 斎藤・小林：三菱電機技報，41－10（昭42），1222.