三角形状加工エネルギー波形による 放電加工特性に関する研究(第1報)

— 電極の溶融・蒸発形態について —

向山 芳世* 緒方 勲*

Study on Working Characteristics in Electric Discharge Machining by Triangular Pulse Form Working Energy (1st Report)

— Melting and Vaporizing Form in Electrode —

Yoshitsugu MUKOYAMA and Isao OGATA

In the electric discharge machining, it is much effective method to improve working characteristics by making a change supplying pulse form. But it has not been investigated enough that what pulse form is most adequate or not.

On the other hand, the pulse form observed in working (electric discharge) spot (electrode gap) is so considerably different comparing with the pulse form in energy source of supply (the output terminal of power supply circuit) that it is required further examination.

The present time, the working energy of rectangular pulse form is used widely, but the pulse form observed on electrode gap is different from the pulse form observed in the output terminal, its very different point is the rising and falling parts of pulse form.

The distorted rectangular pulse form observed in electrode gap is similar to the triangular pulse form in the point of rising and falling parts. Accordingly, the melting, vaporizing volume and those forms about the

* 山梨大学工学部

triangular pulse form were calculated through the heat transmission by means of the Monte Carlo method, and were investigated comparing with those of the rectangular pulse form.

Consequently, it has become clear that the influences of triangular pulse form on the working characteristics, and the relationships between the working energy pulse form in the actual working and working characteristics.

1. ま え が き

放電加工において、加工エネルギー（電力）の供給形態を変えて加工特性を改善する方法が考えられ、種々検討¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が進められているが、現状で広く使用されている矩形状エネルギー波形の場合でも、実際に加工が行われる極間では、波形が大きいくずれて、電源よりの供給波形とは異っていることが観察される。

加工エネルギーの供給源（電源回路の出力端子）での形状に対し、加工時（極間）の形状が異なる点は特に立上り、立下り部分である。放電加工におけるエネルギー波形の基本的形状である矩形状波形に対比しての、3角形状波形の検討と共に、その形状からして立上り、立下り部分が大きく矩形状波形と異なる3角形状のエネルギー波形についての加工特性との関連を検討することは極めて重要である。

そこで、3角形状のエネルギー波形を種々想定し、それらについてモンテカルロ法による熱伝導の計算から、電極（工作物および加工電極）の蒸発、溶融形態を明らかにし、さらに、この形状のエネルギー波形でのエネルギー供給後の残留熱量が電極の熱的作用にどのように影響を及ぼすかについて検討した。

2. 計 算 方 法

溶融、蒸発量および融解（蒸発と溶融）層の形状についての計算式、計算の際の仮定、計算に必要な確率モデルの設定、エネルギーの電極面への投入方向の決定、計算に必要な擬似乱数、熱物理的定数、その他計算に必要な事項は既に報告⁵⁾⁶⁾したものと同一であるが、加工エネルギーの分割形態は図1のようにした。電極面に供給されるエネルギー（ $W_0 = Q_1 + Q_2$ ）はエネルギー供給時間（パルス幅）をパラメータとして分割し、さらに、微小熱量 Δq ($10^{-8} \sim 10^{-10}$ cal) に細分し動点としたが、

図1 供給エネルギーの分割

ここで $Q_1 + Q_2 = \sum_{j=1}^n \Delta Q_i$, $\Delta Q_i = \sum_{j=1}^m \Delta q_j$ であり, Q_1 は電極の熔融蒸発に要するエネルギー (Joule), Q_2 は電極の内部に伝わるエネルギー (Joule) である。

加工エネルギー波形は, 立上りがゆるやかで立下りが急峻な 3 角形状 ($\nearrow$), 立上りが急峻で立下りがゆるやかな 3 角形状 ($\searrow$), 立上り立下り共同一傾度をもつ正 3 角形状 ($\wedge$) の 3 種類を想定した。同一エネルギー値に対するエネルギー供給時間 (τ_h) の変化とエネルギー波形との関係は, エネルギー供給時間が長くなるとエネルギー波形のピーク値が小さくなり, エネルギー供給時間が短くなるとピーク値は大きくなる形である。また, 同一エネルギー供給時間に対しての加工エネルギー量の変化は, 波形のピーク値の変化となる。

3. 計算結果および考察

1 残留熱量を考慮しない場合

加工エネルギー W_0 が 0.25 Joule の条件において, エネルギー供給時間 (放電時間) を変えたときの溶融深さ (y_m) が図 2 (a, b) であるが, 一般にエネルギー供給時間の比較的短い領域では, 立上りが急で立下りがゆるやかなエネルギー形状の溶融深さが大きく, 立上りがゆるやかで立下りが急な波形の溶融深さは小さい。エネルギー供給時間が長くなるとこの関係が逆転して, 立上りがゆるやかな波形の方が溶融深さが大きくなる。正 3 角形状波形と矩形状波形 ($\sqcap$) の両者の中間の傾向を示すが, 材質によっては, 放電時間のある値のとき溶融深さが他の波形形状に比較して特に大きくなる形をとる。これらの傾向は温度伝導率の大きい材質 (Cu) の方が, それが小さいもの (St) より明確に表われてくる。

あるエネルギーの大きさにおいて, エネルギー供給時間が比較的短いと電極が十分溶融される余裕がなく, 溶融量は一般的に少なくなることになる。この条件でエネルギー供給の形態が立上りがゆるやかな形であると, エネルギー供給当初の電極への熱的作用がさらに小さくなって蒸発溶融量も一段と少な

図 2 電極の溶融深さ

くなる。しかし、供給時間が短く熱的作用の小さい領域でもエネルギー供給当初の供給量が大きい形であると、蒸発溶融量は比較的大きくなる。形状的に両者の中間的なもの（矩形状、正3角形状）は、熱的效果が両者の中間の傾向を示すようになる。

また、あるエネルギー量に対して、エネルギー供給時間が比較的大きい条件では、エネルギー供給の当初に大きなエネルギーを投入する形態のものは、順次エネルギー供給量が小さくなり、単位時間当りのエネルギー投入量が減少して、熱的作用は次第に小さくなるが、エネルギー供給当初に小さいエネルギーしか投入できない形のものは、順次、単位時間当りの投入エネルギー量が増すので熱的作用はそれにつれて大きくなる。従って、エネルギー波形形状が、立上りが急峻で、立下りがゆるやかなものと、立上りがゆるやかで立下りが急峻なものとか、あるエネルギー供給時間のところで、熱的作用、例えば溶融深さの量が逆転交叉する形となる。この場合、立上りまたは立下りが急峻に変化する形状でない正3角形状のようなものは、立上りまたは立下りが急峻のもの、中間の溶融深さとなり、急峻な形状のものが逆転する範囲では、両者より熱的作用（溶融深さ）が大きくなる。矩形状波形の場合は、立上り立下り部分が急峻な形状であるが、3角形状波形と同一エネルギー値の条件では、波形のピーク値は常に3角形状波形の $\frac{1}{2}$ となるので、この影響が熱的作用の計算結果のうえにあらわれてくることになる。

立上りが急峻で立下りがゆるやかな形状と、立上りがゆるやかで立下りが急峻な形状との溶融深さが逆転するエネルギー供給時間は、当然エネルギー供給量とか電極の材質などによって異なってくる。

以上の結果、加工エネルギーの大きさが一定の条件において、放電による電極の溶融深さ y_m は、加工エネルギー波形の形状によっても変わり、エネルギー供給時間の短い領域では、波形形状のピークの位置が放電開始時に近いところにある波形の方が大きく、エネルギー供給時間の長い領域では、放電の終了時に近いところに波形形状のピークがあるものが溶融深さは大きく、両者の中間的なエネルギー供給時間をもつ放電（図3）ではピークが中心に近いところにある波形の溶融深さが一番大きくなる。

図4（a, b）は、図2と同一条件の際の蒸発深さ（ y_v ）であり、エネルギー供給時間が非常に小さい領域にそのピーク値が存在する形であるが、エネルギー波形の形状による蒸発深さの差異は溶融深さのように大きくはない。立上りがゆるやかで、立下りが急峻な形状の波形がエネルギー供給時間の全領域にわたって蒸発深さ（量）が大きい。液中放電による除去現象を利用したのが放電加工法であり、電極の溶融部分を飛散除去するに必要な放電衝撃力の発生は、この蒸発現象に関係し、放電衝撃力の発生強さは、除去特性に大きく影響する。

放電衝撃力の発生強さは蒸発深さ（量）にも関係するが、蒸発当初の蒸発強さ、すなわちそのエネルギー供給時間内における始めの段階での蒸発量、蒸発速度が、放電衝撃力の発生強さに関係が深いと考えられるので、放電衝撃力の強さは立上りが急峻な

図3 エネルギー供給波形の形状

図 4 電極の蒸発深さ

波形で、波形ピーク値が大きく、かつ蒸発量が大きい場合に最も大きくなる。

除去速度(量)を最大にするには、先ず溶融量を大きくし、その溶融部分を飛散除去するに必要な衝撃力の発生強さが大きい条件の選択が重要であるが、工作物に対する加工電極の選定と共に、加工エネルギー、放電時間(エネルギー供給時間)に対応しての、加工エネルギー波形、すなわち放電々流波形の形状も十分考慮することが重要であり、これが加工特性向上の有力な手段の一つとなる。

電極への加工エネルギーの投入直径(d_0)は各条件における単発放電こんの大きさから決定して計算に用いたが、投入直径とエネルギー投入後の電極の溶融蒸発直径($2x_m$, $2x_v$)との比を示したものが図5(a, b, c, d)である。この値が1.0以上になると、その分だけ直径方向への溶融が行なわれたことになる。溶融にあずかる熱量がある時間をかけて十分供給される場合は、直径方向の溶融量が增大するが、この傾向はエネルギー波形の形状によってあまり大きく変わらない。加工エネルギーの投入直径方向への電極の溶融蒸発量は、垂直方向のそれに比較して非常に小さいので、電極の溶融蒸発量の大きさを知るには、溶融深さをもってある程度推測できるが、溶融量および蒸発量を定量的に比較検討する必要がある場合はそれでは不十分である。

電極の溶融深さ y_m と溶融直径 x_m から溶融体積($V_m = \Sigma \pi x_m \cdot \Delta y$)を求めたものが図6(a, b)であり、ほぼ溶融深さ y_m と同一傾向を示す。

3.2 残留熱量を考慮した場合

放電の発生に伴って電極に投入されるエネルギーの供給がストップ(放電終了)した後においても、電極に残留した熱量(余熱)によって電極の溶融現象がある程度継続していることが考えられる。電極の熱的作用(溶融、蒸発、熱応力の発生など)を解析するうえには、この点の検討を付加する必要がある。

残留熱量を考慮する場合の計算において、エネルギー供給時間(放電時間) τ_h に対し、残留熱量による加熱時間、すなわちエネルギーの供給が終了し、冷却が開始されるまでの時間(経過時間)を τ_w

図5 エネルギー投入直径と溶融・蒸発直径の割合

図6 電極の溶融体積

とする。従って $\tau_w = 0$ は、残留熱量による熱的作用を考慮しない場合に相当することになる。この計算に当っては、エネルギー供給時間中に溶融した部分の一部が、放電衝撃力によって除去されずに残留して、エネルギー供給停止後の熱源となることにした。

残留熱量の電極への熱的作用を考慮したときの、融解層の形状の1例が図7である。加工エネルギーの供給が停止した後は、時間 (τ_w) の経過につれ、残留熱量によ

て溶融量 (y_m , x_m) が増す傾向を示すが、供給エネルギーの大小、エネルギー供給時間の長短、電極材質の差異などによって、残留熱量による熱的影響の度合いが異なり、熱的作用などには当然時間的限界がある。図7において、 St , $W_0 = 0.25 \text{ Joule}$, $\tau_h = 10 \mu s$ の条件では $\tau_w = 50 \mu s$ 以後においても、融解量の増大がみられるが、同一エネルギー量 ($W_0 = 0.25 \text{ Joule}$) で供給時間が長く ($\tau_h = 250 \mu s$) になると (図8), 残留熱量による融解層の増加は、経過時間 $50 \mu s$ 付近でストップしてしまうことになる。エネルギー供給量、エネルギー供給時間が同一の条件では、立上りがゆるやかで立下りが急なエネルギー波形の方が、他のエネルギー波形に比較して残留熱量による影響が大きく、熱的作用がストップする時間が長くなる。この傾向は供給エネルギー量が同一の場合はエネルギー供給時間がある程度長い時間、エネルギー供給時間が同一の条件では、エネルギー供給量が大きい方が顕著になる。

一般に電極の熱的作用において、あるエネルギー供給量に対し、エネルギー供給時間が極端に長くなると、極めて小さなエネルギーがゆっくり電極に供給されることになり、電極は蒸発溶融するに至らず、単に溶融温度以下に加熱された程度に終るので、供給エネルギーの大きさに対応して、最も熱的 (蒸発・溶融) 効率の良い供給時間が存在することになる。この解釈で明確なように、エネルギー供給量が同一の条件で供給時間が長くなると、単位時間当りのエネルギー供給量が小さくなり、エネルギーの供給が停止した時点での残留熱量が少なく、残留熱量による熱的作用は小さく、影響

図7 融解形状 (1)

図8 融解形状 (2)

時間も短くなる。

残留熱量による熱的作用の影響は、エネルギー供給波形によっても異なるが、矩形状波形において立上りおよび立下り部分がくずれたエネルギー波形とも考えられる三角形状の波形の場合は、立上り立下りが垂直な矩形状波形に比較してエネルギー供給量が同一でも、そのエネルギーの供給時間の長短によって、立上り立下り部分の傾斜角度が異ってくる。このことは矩形状波形ではおこらぬことであり、立上り立下りの傾斜角の影響が融解層の形状に大きく関係してくる。1例が St , $W_0 = 0.25 \text{ Joule}$, $\tau_h = 10 \mu s$ の条件において、残留熱量による融解層の形状は、矩形状波形では、経過時間の増大による直径方向の増加が極めて小さい形になるが、三角形状波形になると増加傾向が明確にあらわれてくるが如くである。

図9はエネルギーの供給停止後の経過時間と残留熱量による電極の熔融深さ増加量 (Δy_m) の関係である。供給エネルギー波形が立上りがゆるやかで立下りが急峻な形状のものは、経過時間の増加につれての残留熱量による熔融増加量が大きくなるが、その傾向はエネルギー供給量に対する適正エネルギー供給時間、すなわちエネルギーの供給によって電極が常に熔融する範囲の供給時間内では、エネルギー供給時間が大きくなるほど、エネルギー波形の影響が大きくなる。各種形状波形のエネルギー供給において、エネルギー供給時間の比較的后半のエネルギー量 (図10のハッチング部分) が残留熱量に主として関係するものと考え、エネルギー供給量が一定の条件で、供給時間を変えた場合、供給時間が

図9 残量熱量による熔融増加量

図10 エネルギー波形 (W_0 :一定, τ_h :変化)

短い領域では、残留熱量に關係する波形形状によつてのエネルギー量の差が小さいが(図10 a), エネルギー供給時間が大きくなるにつれて、その差は大きくなる(図10 c)。図10 a, b, c はこれらの關係の説明図であり、エネルギー供給時間の比が1 : 2 : 4 と比較的小さいが、計算は1 : 10 : 25 と大きい比の場合であり、実際の加工に使用する形に近い比率である。

残留熱量による熱的作用は、電極材質によつても異ってくるが、熱伝導に關係する定数に差異がある以上當然のことであり、熱物性値 C (cal/g°C) $\times \rho$ (g/cm³) の小さいアルミニウム(Al)は残留熱量による熱影響も大きく、温度伝導率の大きい銅(Cu)は熱の分散速度が早いため、鋼(St), アルミニウムなどに比較して、熱影響の限界点が経過時間の短いところにある。銅材質でのこの傾向は、残留熱量の小さい立上りが急峻な形状のものほど早い時間領域で成立する。

4. 結 論

矩形形状波形での加工エネルギー供給の際に極間のエネルギー(放電々流)波形は立上り立下り部分が変形した形状となり、この傾向はエネルギー供給時間の短い条件ほど大きい。このくずれた矩形波の立上り立下り部分は3角形状波形の傾斜部分に類似しており、除去特性に大きな影響をもつ熱的作用(蒸発, 熔融)について3角形状の波形で検討したが、熱的作用の効率をあげるためには、エネルギー供給量, 供給時間, 電極材質などの関連において、エネルギー供給波形の立上りおよび立下り部分の形状(傾斜角)調整が重要である。

また、エネルギー供給停止後の残留熱量による電極への熱的作用の度合いは、エネルギー供給波形の形状によって大きな差異があるので、この点からもエネルギー波形の形状選定に十分な配慮が必要となる。

(1979. 1. 31 受付)

参 考 文 献

- 1) 倉藤尚雄, 木下夏夫, 福井雅彦; 電氣加工学会誌 Vol. 3, № 4 (1969)
- 2) H. E. de Bruyn; Paper for CIRP (1969)
- 3) 向山芳世, 野沢進八; 電氣加工学会誌 Vol. 6, № 12 (1973)
- 4) 小林和彦, 大泉敏郎; 電氣加工学会誌 Vol. 8, № 16 (1975)
- 5) 向山芳世, 三橋真成; 電氣加工学会誌 Vol. 9, № 17 (1975)
- 6) 向山芳世; 電氣加工学会誌 Vol. 11, № 22 (1978)