放電加工における実加工中のエネルギー配分の測定*

夏 恒** 橋本浩明*** 国枝正典† 西脇信彦†

Measurement of Energy Distribution in Continuous EDM Process

Heng XIA, Hiroaki HASHIMOTO, Masanori KUNIEDA and Nobuhiko NISHIWAKI

A clear understanding of the energy distribution in the EDM process is very important for the explanation of some phenomena which cannot be explained well up to now. In this paper, methods and results of measuring the energies distributed into the tool electrode, workpiece and dielectric in the continuous EDM-sinking process are described. The energies distributed into the tool electrode and workpiece are obtained by means of measuring the temperatures and removal amounts of the electrode and workpiece, and the energy distributed into dielectric fluid is obtained by measuring the temperature rise of the dielectric fluid after flowing through the discharge gap. It is found from the experimental results that the energy distributed into the tool electrode is greater than that into the workpiece independently of the pulse duration and that the energy distributed the dielectric is quite small compared with the energies into the electrodes and the workpiece.

Key words : electrical discharge machining, energy distribution, electrode temperature, wear ratio, heat transfer

1. 緒 言

放電加工における電極、工作物及び加工液の各々に対する放電エネルギーの配分は加工速度や電極消耗率といった、放電加工において重要な特性に直接影響する。

従来、放電加工におけるエネルギー配分についての研究が多く報告されている。例えば、Motokira¹⁾や木本ら²⁾は陰極表面からの熱電子放出と電界電子放出に関するT-F理論^{3)~5)}を基にして、単発放電におけるエネルギー配分を求め、電極と工作物に配分されるエネルギーが放電持続時間に伴って変化すると理論的に説明している。T-F理論を用いた場合は、陰極表面の放電点での電流密度や表面温度、電界強度、及びアーク柱から直接加工液に配分されるエネルギーなどが既知であることを前提としている。そこで、放電電流を放電後に得られた放電痕の面積で割った値を電流密度とし、また放電持続時間にかかわらず陰極表面の温度を陰極材料の沸点としている。しかし、アーク柱の直径は放電後に得られた放電痕の直径とは必ずしも一致しないと報告されている⁶⁾⁷⁾。また、放電持続時間の増大に伴って陰極点の温度が変化することが考えられる。さらに、陰極表面での電界強度やアーク柱から加工液に直接配分されるエネルギーの割合がいまだにはっきりと解明されていない。従って、T-F理論より求めたエネルギー配分は、現段階では定性的な結果に止まっている。

一方、橋口⁸⁾は単発放電で得られた電極側の放電痕の直径と深さを、熱伝導解析で求めた溶融領域と比較することによりエネルギー配分を求めた結果、銅電極側へは30%程度、鉄工作物側へは60%程度配分されることを報告している。このほか、DiBitonto⁹⁾とPatel¹⁰⁾は、陰極である工作物側には点熱源を、電極側には放電時間とともに直径が増大する面熱源を仮定し、また除去は放電の終了時にまとめてなされることを仮定して、

単発放電の溶融体積を解析によって求めた。そして、溶融部分の何%が除去されるかを示す除去効率をかけた値と、実験から求めた放電1回当たりの除去量とを比較し、放電エネルギーの約8%が銅電極側に、約18%が鉄工作物側に配分されていることを示している。これらの報告では、電極や工作物の除去量や溶融範囲などからエネルギー配分を求めようとしているため、アーク柱の直径や溶融温度以上での材料の熱物性値、さらに溶融金属が除去される時点を含めた除去メカニズムに対する理解などが、得られたエネルギー配分の結果に大きく影響することが考えられる。すなわち、アーク柱の直径や除去メカニズムなどの仮定によって溶融領域が大きく変化するため、熱伝導解析で求めた溶融体積を除去量の実験結果と比較することによってエネルギー配分を求める方法には大きな誤差が含まれると考えられる。また、溶融した金属材料の熱物性値に関するデータが得られ難いことも誤差が大きくなる原因となっている。

ところで、筆者ら¹¹⁾¹²⁾は電極と工作物に同じ材料を用いた場合について、電極(陽極)と工作物(陰極)の温度の測定結果と差分法を用いた非定常熱伝導解析結果を比較することにより、単発放電におけるエネルギー配分を測定した。その結果、電極側は工作物側よりもエネルギーが多く配分されており、パルス幅がエネルギー配分に及ぼす影響は小さいことが分かった。しかし、単発放電の場合の極間の状態が実加工と異なり、特に実加工において顕著に見られる電極表面へのカーボン付着現象¹³⁾¹⁴⁾がエネルギー配分に影響を与えることが考えられる。

そこで、本研究では、電極や工作物に配分されるエネルギーのほとんどを占めている熱伝導により散逸するエネルギーに注目し、熱物性値が分かっている範囲内の電極、工作物及び加工液の温度を測定することにより、極間におけるエネルギー配分を求め、従来未解明であった放電加工における実加工中のエネルギー配分を調べた。また、この方法は放電点からある程度離れたところの現象を議論しているため、アーク柱の直径や除去メカニズムが得られた結果に及ぼす影響が小さいと思われる。なお、電極と工作物の材料の違いがエネルギー配分に及ぼ

* 原稿受付 平成7年11月28日

** 正会員 黒田精工(株)(川崎市下平間239)

*** 学生会員 東京農工大学大学院(小金井市中町2-24-16)

† 正会員 東京農工大学工学部

す影響を除外するため、電極と工作物に同じ材料（銅）を用い、電極を陽極、工作物を陰極とする。

2. エネルギー配分の測定方法

放電加工の極間に投入される放電エネルギーは図1に示すように配分されている。本研究では、電極や工作物の温度を測定することによって熱伝導により散逸するエネルギーを求め、電極の消耗量と工作物の加工量を測定することによって加工くずが持ち去るエネルギーを求め、さらに加工液の温度上昇を測定することにより加工液に散逸するエネルギーを求める。

2.1 各エネルギー配分の求め方

単位時間あたりに極間に投入される全放電エネルギー E_{tot} は式(1)のように求められる。

$$E_{tot} = f \int_0^{t_e} i u dt \quad (1)$$

ただし、 i は放電電流、 u は放電電圧、 t_e はパルス幅、 f は放電頻度である。

この放電エネルギーは、まず式(2)に示すように電極、工作物、加工液に配分される。

$$E_{tot} = E_T + E_W + E_D \quad (2)$$

ただし、 E_T は電極に配分されるエネルギー、 E_W は工作物に配分されるエネルギー、 E_D は加工液に配分されるエネルギーである。

電極（工作物）に配分されるエネルギーはさらに熱伝導により散逸するエネルギー E_{Tcon} (E_{Wcon})、加工くずが持ち去るエネルギー E_{Tdeb} (E_{Wdeb})、及び表面から熱伝達や放射により極間に散逸するエネルギー E_{Tsur} (E_{Wsur}) に配分される。

$$E_T = E_{Tcon} + E_{Tdeb} + E_{Tsur} \quad (3a)$$

$$E_W = E_{Wcon} + E_{Wdeb} + E_{Wsur} \quad (3b)$$

また、アーク柱から直接に加工液へ配分されるエネルギー E_D 、電極と工作物表面からの熱伝達や放射により加工液に散逸するエネルギー $E_{Tsur} + E_{Wsur}$ 、さらに熱を持った加工くずが加工液と接触するとき加工液に渡すエネルギーの合計は、加工液に散逸するエネルギーとなる。

定常状態では、熱の流れが一次元と見なせる場合、単位時間あたりに電極や工作物内に熱伝導により散逸するエネルギー E_{Tcon} 、 E_{Wcon} は熱伝導に関するフーリエの法則より式(4)で表される。

$$E_{Wcon} = - \frac{k_W A_W \Delta T_W}{\Delta l_W} \quad (4a)$$

$$E_{Tcon} = - \frac{k_T A_T \Delta T_T}{\Delta l_T} \quad (4b)$$

ただし、 k_T (k_W) は電極（工作物）の熱伝導率、 A_T (A_W) は電極（工作物）の断面積、 ΔT_T (ΔT_W) は電極（工作物）内部の温度差、 Δl_T (Δl_W) は温度測定点の間の距離である。

加工くずが持ち去るエネルギー E_{deb} は、電極の消耗量あるいは工作物の加工量を測定し、加工くずが融点で除去されると仮定した場合は式(5a)、加工くずが沸点で除去されると仮定した場合は式(5b)で求められる。

$$E_{deb} = [c(T_m - T_s) + L_m] W_f \quad (5a)$$

Fig. 1 Energy distribution in the EDM process

Fig. 2 Experimental setup for measuring energy distribution

$$E_{deb} = [c(T_v - T_s) + L_m + L_v] W_f \quad (5b)$$

ただし、 c は比熱、 L_m と L_v はそれぞれ融解熱と蒸発熱、 T_m は融点、 T_v は沸点、 T_s は加工中の定常状態における電極表面の平均温度、 W_f は放電1回当たりの除去量である。

ところで、アーク柱から加工液に直接配分されるエネルギー E_D を測定することは困難である。そこで、アーク柱から直接配分されるエネルギー E_D 、電極や工作物表面からの熱伝達や放射により加工液へ散逸するエネルギー $E_{Tsur} + E_{Wsur}$ 、熱を持った加工くずが加工液と接触することで散逸するエネルギーなどの総量を見積もる。そのためには故意に極間に噴流を流し、極間通過前後の加工液の温度差 ΔT_D を測定し、式(6)を用いて、単位時間あたりに加工液に散逸するエネルギー E_{D0} を求める。

$$E_{D0} = \rho_D c_D Q \Delta T_D \quad (6)$$

ただし、 ρ_D は加工液の密度、 c_D は加工液の比熱、 Q は噴流流量である。

以上のことから、極間に噴流を流した場合では、電極や工作物に熱伝導により散逸するエネルギー、加工液に散逸するエネルギー、加工液の相変化や分解、重合、音、光、電磁波などの放射に使われるエネルギーの合計は極間に投入される放電エネルギーと一致するはずである。

一般に、極間から出てくる加工液は、気泡や加工くずとの混相流であるが、その時の加工液と気泡などの温度差は小さいと見なし、測定される混相流の温度を加工液温度とする。

以上の方法で求めた単位時間当たりの各エネルギーを全放電エネルギーで割った値をエネルギー配分率 F と定義し、各々の配分率は T (電極)、 w (工作物)、 $D0$ (加工液)などの添字で区別する。

Fig. 3 Temperature rise of tool electrode and workpiece when dielectric flushing is used

Fig. 4 Dielectric temperature rise at entrance and exit of flushing

2.2 実験装置

工作物及び加工液の温度を測定する実験装置を図2に示す。電極、工作物ともに外径22mm、内径16mm、長さ80mmの銅パイプを用い、パイプの内側と外側をガラスウールで断熱した。また、電極と工作物の内側には、外径6mm、内径4mmの銅製の噴流パイプが通してある。熱伝導により散逸するエネルギーを求める場合は、工作物の放電面から10mmの位置に熱電対TC1、そこから更に10mm離し熱電対TC2を埋め、温度勾配を測定した。電極の温度測定は加工機電源の極性を切り替えることにより行った。また、極間を通過する前後の加工液の温度は噴流パイプの入口と環状の放電面のすぐ外側に取り付けられた熱電対TDC1とTDC2によって測定した。

電極と工作物の周囲は断熱されており、放電は1秒間に数千回の頻度で表面に均一に発生するため、電極や工作物内部の熱の流れは一次元と見なせると思われる。このことについては電極温度のシミュレーションを行い確認しておいた。

温度の測定には直径0.5mmの熱電対(K型、新栄熱計装株式会社製)と、分解能0.1°Cのデジタル温度計(AT-802-KA型、旭計器株式会社製)を用いた。実験に用いた電極、工作物及び加工液の熱物性値を表1と表2に示す。

Table 1 Thermophysical properties of tool electrode and workpiece

thermal conductivity k W/(m·K)	density ρ kg/m ³	specific heat c J/(kg·K)	melting latent heat L_m J/kg	vaporization latent heat L_v J/kg
398	8880	386	2.05×10^5	5.03×10^6

Table 2 Thermophysical properties of dielectrics

density ρ_D kg/m ³	specific heat c_D J/(kg·K)
800	2100

3. エネルギー配分の実験結果

3.1 温度の測定結果

Fig. 5 Relationship between energy distribution ratio due to conduction and dielectric flow rate

Fig. 6 Relationship between energy distribution ratio into dielectric and dielectric flow rate

噴流を流した場合の電極と工作物内の温度の時間的な変化の一例を図3に、噴流の入口と出口の温度の時間的な変化の一例を図4に示す。なお、図3中のT_{TC1}、T_{WC1}などの記号の添字の頭文字は電極(T)及び工作物(W)を示す。

図3より、放電開始時からおよそ90秒経過すると、電極と工作物内部の温度上昇がゆるやかになること、及び電極の温度が工作物より高いことが分かる。また結果より、電極と工作物温度は加工開始後180秒経過しても上昇し続けて定常状態には至っていないが、電極と工作物内部の温度勾配及び加工液の温度差は、加工開始90秒以降はほぼ一定の値を示した。従って、式(4)と(6)に用いる ΔT_T 、 ΔT_W 、 ΔT_D については、加工開始後90～180秒の平均値を求めて用いることとする。

3.2 電極と工作物に熱伝導により散逸するエネルギーの割合

図5に電極及び工作物内に熱伝導により散逸するエネルギーの割合と噴流流量の関係を示す。図より、電極側は工作物よりもエネルギーが多く配分されることが分かる。また、噴流流量が増大するに従って電極と工作物に熱伝導により散逸するエネルギーは共に減少する傾向があることが分かる。これは噴流流量が大きい場合は、熱伝達より電極表面から加工液に散逸するエネルギーが多くなるためであると考えられる。

3.3 加工液中に散逸するエネルギーの割合

加工液中に散逸するエネルギーの全放電エネルギーに対する割合と噴流流量の関係を図6に示す。図より噴流が少なくなると加工液中に散逸するエネルギーが少なくなっていることが分かる。特に、噴流のない場合では加工液中に散逸するエネルギーは非常に少ないということが予想される。しかし、融点以上で除去された加工くずが加工液中で冷やされるため、熱電対T_{DC2}の所において加工くず温度が加工液温度と一致すると考えると、加工くずが持ち去るエネルギーは加工液中に散逸するエネルギーに含まれているものと考えられる。従って、

Fig. 7 Relationship between sum of energy distribution ratio and dielectric flow rate

Fig. 8 Influence of pulse duration on removal amount of tool electrode and workpiece

加工液中に散逸するエネルギーは、2節で求めた加工くずが持ち去るエネルギー1.6%（パルス幅が100 μ sの場合）より小さくなってはいけな。ところが、噴流流量が0のときの外挿値をグラフから読み取ると、全体の数%である。従って、本研究に用いた中空パイプに対して噴流がない場合では電極と工作物表面から熱伝達により加工液に散逸するエネルギーは無視できることが考えられる。

3.4 エネルギーの合計

図7に加工液に散逸するエネルギー割合と、電極と工作物に熱伝達により散逸するエネルギー割合の合計と噴流流量の関係を示す。噴流流量が変わると、エネルギーの合計は変化するが、その変化の程度が小さい。また、エネルギーの合計は全放電エネルギーの75~89%であることから、極間に投入されたエネルギーは、電極や工作物及び加工液の温度上昇の他にも消費されていることが考えられる。残りのエネルギーの去就については、加工液の相変化や分解、重合、音、光、電磁波などの放射に使われることが考えられる。これについては今後の検討が必要と思われる。

4. 加工条件がエネルギー配分に及ぼす影響

前節では、極間に噴流を流すことにより、極間におけるエネルギー配分の合計について調べた。本節では、電極と工作物の表面からの熱伝達や放射が無視できる加工状態、すなわち噴流を流さない場合について、加工条件を変化させて実験を行い、電極と工作物に熱伝達により散逸するエネルギー、及び加工くずが持ち去るエネルギーを求め、加工条件がエネルギー配分に及ぼす影響について調べる。

4.1 パルス幅の影響

前述のように、電極や工作物の表面から熱伝達や放射により加工液に散逸するエネルギーは無視できるため、熱伝達により散逸するエネルギーと加工くずが持ち去るエネルギーの合計

Fig. 9 Energy distribution ratio carried away by debris

Fig. 10 Relationship between energy distribution ratio and pulse duration

Fig. 11 Influence of peak current on energy distribution

は電極や工作物に配分されるエネルギーと考えることができる。図8に示すパルス幅を変化させた場合の放電1回当たりの除去量の測定結果から、式(5)を用いて求めた加工くずが持ち去るエネルギーの全放電エネルギーに占める割合を図9に示す。また、温度の測定結果から、式(4)を用いて求めた電極と工作物に熱伝達により散逸するエネルギーの割合と、加工くずが持ち去るエネルギーの割合の合計を図10に示す。図9と図10の比較から、電極や工作物に熱伝達により散逸するエネルギーに比べると、加工くずが持ち去るエネルギーが非常に少ないことが分かる。今回の実験条件では、加工くずが沸点で除去されると仮定しても、電極と工作物の加工くずが持ち去るエネルギーの合計はパルス幅が20 μ sの場合でも全放電エネルギーの2.5%以下である。従って、実際は融点で除去される加工くずがあったとしても、電極に配分されるエネルギーの結果には影響はあまり与えない。

また、図10より、電極側は工作物よりも常にエネルギーが多く配分されていることが分かる。なお、パルス幅が長くなると電極と工作物への配分率が増加するが、ある程度以上のパルス幅で配分率が一定となる傾向を示している。パルス幅が長い

Fig. 12 Relationship between energy distribution ratio carried away by debris and peak current

Fig. 13 Influence of discharge frequency on energy distribution ratio into tool electrode

ときは、全放電エネルギーの42%ぐらいが電極に配分され、35%ぐらいが工作物に配分されている。

4.2 ピーク電流の影響

次に、パルス幅を100 μ s一定とし、ピーク電流を変化させて、エネルギー配分を調べた。電極と工作物に配分されるエネルギーの割合を図11に、加工くずが沸点で除去されると仮定した場合の加工くずが持ち去るエネルギーの割合を図12に示す。結果より、ピーク電流が大きくなると、電極と工作物への配分率が低くなり、加工くずが持ち去るエネルギーの割合が大きくなることが分かる。

4.3 放電頻度の影響

放電頻度を変えて、電極へのエネルギー配分率を調べた結果を図13に示す。図より、放電頻度が高くなると、電極へのエネルギー配分が少し小さくなることが分かる。

5. 考 察

以上の実験結果より、加工条件にかかわらず、電極側へは工作物側より常にエネルギーが多く配分されていることが分かった。ところが、図8にも示しているように、銅電極で同じ銅の工作物を加工した場合についても、銅電極やグラファイト電極で炭素鋼などを加工した場合と同様に、パルス幅が比較的長い領域では工作物の加工量に対して電極の消耗量が非常に小さいことがよく知られている。このようなエネルギー配分の比率と電極と工作物の除去量の比率が全く異なっている事実から、エネルギー配分のほかに、電極消耗率に大きな影響を与えている因子が存在することが明らかである。一方、油加工液を用いた場合、電極表面に黒い皮膜が存在することが一般的に知られている^{13) 14)}。これは油加工液の熱分解により生成したカーボン元素が電極表面に付着したものと考えられる。また、パルス幅が短い時、電極表面のカーボン付着量が少なく、パルス

幅が長くなると、カーボン付着量が多くなることが報告されている^{12) 15)}。以上のことから、パルス幅による電極と工作物の除去量の比率の変化の原因は、従来言われているような電極と工作物のエネルギー配分の変化よりも、電極へのカーボン付着現象の方が支配的であることが明らかになった。

6. 結 言

放電加工における実加工中のエネルギー配分を測定し、パルス幅やピーク電流、放電頻度などがエネルギー配分に及ぼす影響について調べた。次に得られた結果をまとめる。

- (1) 実験条件にかかわらず、電極側へは工作物側よりも常にエネルギーが多く配分されている。
- (2) 電極や工作物に配分されるエネルギーのうち、除去に使われる割合は非常に低く、電極や工作物内の熱伝導により散逸する割合が高い。
- (3) 噴流が少ないほど加工液中に散逸するエネルギーは減少し、特に噴流がない場合、加工液に散逸するエネルギーは全放電エネルギーの数%程度である。従って、噴流を流さない場合では、電極と工作物の表面から熱伝達や放射により加工液に流れるエネルギーは無視できる。
- (4) 電極、工作物及び加工液に配分されるエネルギーの合計はほぼ一定であり、噴流の影響は少ない。
- (5) 加工液の相変化に伴うエネルギーの移動や加工液の分解、重合、音、光、電磁波の放射などに消費されるものが全放電エネルギーの20%程度であることが予想される。
- (6) エネルギー配分よりも、電極へのカーボン付着現象がパルス幅による電極と工作物の除去量の比率の変化に大きな影響を与えている。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費（重点領域(2), No.0539203）の援助によるものである。紙面を借りて厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) M.Motoki, and K.Hashiguchi : Energy Distribution at the gap in Electric Discharge Machining, Ann. CIRP, **14** (1967) 485.
- 2) 木本保夫, 田宮勝恒, 平田勝己 : 液中過渡アーク放電による電極消耗の研究, 電気学会雑誌, **89**, 964 (1969) 133.
- 3) W.W.Dolan and W.P.Duke : Temperature-and-field Emission of Electrons from Metals, Phys. Rev., **95**, 2 (1954) 327.
- 4) E.L.Murphy and R.H.Good : Thermionic Emission, Field Emission and the Transition Region, Phys. Rev., **102**, 6 (1956) 1464.
- 5) T.H.Lee : T-F Theory of Electron Emission in High-current Arcs, J.Appl.Phys., **30**, 2 (1959) 166.
- 6) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編 : 改訂新版 放電ハンドブック, 電気学会 (1975) 152.
- 7) J.E.Daalder : Erosion Structures on Cathodes Arced in Vacuum, J.Phys. D:Appl.Phys., **12** (1979) 1769.
- 8) 橋口清人 : 放電加工における電極へのエネルギー配分, 電気学会論文誌A, **105**, 8 (1985) 451.
- 9) D.D.Dibitonto et al. : Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model, J.Appl.Phys., **66**, 9 (1989) 4095.
- 10) M.R.Patel et al. : Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. II. The Anode Erosion Model, J.Appl.Phys., **66**, 9 (1989) 4104.
- 11) H.Xia, M.Kunieda, N.Nishiwaki and N.Lior : Measurement of Energy Distribution into Electrodes in EDM Processes, Advancement of Intelligent Production, Elsevier Science B.V., (1994) 601.
- 12) 夏 恒, 国枝正典, 西脇信彦 : 放電加工における陽極と陰極の除去量の相違に関する研究, 電気加工学会誌, **28**, 59 (1994) 31.
- 13) 西村重志, 土屋政光 : 低電極消耗放電加工の研究—電極表面の黒化層について—, 電気加工学会誌, **1**, 2 (1968) 71.
- 14) 元木幹雄, 李 賛中, 谷村 毅 : 液中過渡アーク放電の電極消耗, 電気学会雑誌, **89**, 943 (1967) 793.
- 15) 向山芳世, 緒方 勲 : 放電加工における放電面変質に関する研究, 電気加工学会誌, **17**, 34 (1984) 13.