単発放電における気泡の挙動と加工反力*

安達芳朗** 吉田政弘*** 国枝正典***

Study on Process Reaction Force Caused by Bubble Formation in EDM

Yoshirou ADACHI, Masahiro YOSHIDA and Masanori KUNIEDA

Abstract

This paper describes the process reaction force which is generated in EDM by the explosive expansion of a bubble due to evaporation and dissociation of the dielectric liquid. The reaction force influences on the machining accuracy because the position of the tool electrode is displaced under the reaction force. Thus in this research, the reaction force is calculated by integration not only the pressure inside the bubble but also the pressure in the dielectric liquid distributed over the working surface. We compared the calculated results with the reaction force measured in a single discharge and obtained the relationship between the reaction force and the machining conditions. Then we also measured the reaction force in a series of pulse discharges and obtained the following results: (1) The pressure distribution in the dielectric liquid in the working gap accounts for the most part of the reaction force. (2) Hence the reaction force is almost proportional to the area of the working surface. (3) The reaction force in a series of pulse discharges decreases with the lapse of time as the working gap is filled with the generated bubbles in place of the dielectric liquid.

1. はじめに

放電加工は非接触加工のため機械的加工に比べ加工反力が小さいことが長所と考えられている。しかし、実際は加工反力は0ではないので、高精度と微細化への要求が厳しい中、放電中の加工反力が加工機の変形や工具電極変位の原因となり、加工精度に悪影響を及ぼす可能性を考察する必要がある。そこで、本研究は放電中の加工反力と加工条件との関係を理論的に明らかにすることを目的とする。

毛利ら¹⁾は加工中の加工反力を測定し、ジャンプ動作にともない極間を流れる加工液の粘性によって大きな加工反力が生じるが、放電中の加工反力は非常に小さいことを報告している。一方、放電による加工反力については、静電力や電磁力、および加工液の気化によるものが考えられている。木本²⁾、橋口³⁾らは、円錐対平板電極を用いて放電衝撃力を測定し、衝撃力は気泡の膨張収縮によるものが主であるとした。また、池田⁴⁾やEckmanら⁵⁾は、実際の加工に近い平行平板電極間で生じる気泡の挙動の観察や解析を行っている。

しかし、円錐対平板電極など実際の加工と異なる

* 電気加工学会全国大会(1996年11月28日)にて発表

** 東京農工大学大学院

*** 東京農工大学工学部

る極間で調べた反力は、実際の加工での反力と異なると考えられる。なぜなら、狭い極間で気泡が急激に膨張しようとする加工液の慣性と粘性に妨げられ急激に膨張できず、加工液中に放電点を中心として半径方向に圧力分布が生じる。その圧力分布が円錐対平板電極間の場合と平行平板間の場合とでは異なるからである。また、従来の放電にともなう衝撃力の測定は、いずれも除去メカニズムの解明を目的としたものであるため、気泡内圧力にのみ注目している。したがって、気泡圧力とアーク柱断面積⁶⁾の積、あるいは気泡圧力と気泡の広がり面積⁷⁾との積を反力と定義している。しかし、本研究の目的である加工反力と加工精度との関係を調べるには、それらの定義は不適切である。なぜならば、単発放電において工具電極面積のほとんどは加工液と接しており、気泡と接する面積はわずかである。したがって、加工液中の圧力分布を考慮して、加工面全体で圧力を積分しなければ本当の加工反力を求めることができないからである。

そこで、平行平板間に生じる気泡の断熱膨張と収縮運動を解析し、極間の加工液中に生じる圧力分布を求め、その加工面上の積分によって加工反力の時間変化を求めた。そして、単発放電時の加工反力の測定結果との比較を行った。また、連続放電における加工反力を測定し、単発放電における加工反力との関連について考察した。

2. 単発放電における加工反力のシミュレーション

2.1 気泡運動のシミュレーション

図1に解析モデルを示す。本解析は、Eckmanら⁸⁾が平行平板間の液中アーク放電に関して、絶縁破壊後 $1\mu\text{s}$ 程度の期間の気泡内圧力を解析し、除去機構を考察した際に導いた気泡境界加速度と気泡圧力の式を基にしている。加工液で満たされた平行円板電極の中心で放電により高圧力の気泡が生じ、断熱状態で膨張収縮運動するモデルを想定する。絶縁破壊直後は加速度が大きいため粘性項より慣性項が支配的となる。したがって、簡単のため粘性を無視した1次元の軸対象モデルを考

図1 解析モデルとその圧力分布

える。境界条件として電極の外側は大気圧とする。非圧縮性流体のオイラー方程式と連続の式から、気泡境界の加速度 $a_i(t)$ が次のように導かれる⁹⁾。

$$a_i(t) = \frac{\frac{P_i - P_0}{\rho} - v_i^2 \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) + \frac{v_i^2(r_0^2 - r_i^2)}{2r_0^2}}{r_i \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} \quad (1)$$

ここで、 $a_i(t) = \frac{dv_i}{dt}$ 、 $v_i(t) = \frac{dr_i}{dt}$ であり、 r_0 は電極半径、 ρ は加工液の密度、 P_0 は大気圧、 $v_i(t)$ 、 $r_i(t)$ 、 $P_i(t)$ はそれぞれ時刻 t における気泡境界の速度、気泡境界の半径方向の位置、気泡境界での圧力である。

また、気泡の体積変化に伴う圧力変化は断熱変化の条件より、

$$P_i(t) = P_0 \left(\frac{V_0}{V_i} \right)^{1.333} \quad (2)$$

を用いて求められる。ここで、 V_0 は標準状態(20℃, latm)での気泡体積、 $V_i(t)$ は時刻 t における気泡体積である。

時刻 t における r_i 、 v_i 、 P_i が既知であるとして、それらを(1)式に代入すれば、 t における気泡境界の加速度 $a_i(t)$ が求まる。そこで、この $a_i(t)$ を用いて微小時間ステップ Δt 経過後の気泡境界速度 $v_i(t + \Delta t)$ 、気泡境界位置 $r_i(t + \Delta t)$ を求める。さらに、これから求まる $t + \Delta t$ での気泡体積 $V_i(t + \Delta t)$ を(2)式に代入し $P_i(t + \Delta t)$ を求める。こ

れを繰り返すことで気泡運動のシミュレーションが行える。なお、気泡の初期圧力は、標準状態での気泡体積を $200\mu\text{m}$ の極間で気泡半径 $150\mu\text{m}$ まで圧縮したと考え、(2)式を用いて求めた。また、 v_i の初期速度は0とする。気泡の初期半径を $150\mu\text{m}$ とした根拠は、放電痕の半径がそれと同じ程度の大きさであったからである。この初期半径を $100\mu\text{m}$ とすると、加工反力のピーク値は初期半径を $150\mu\text{m}$ とした場合の約2.5倍となるが、加工機の変形とより直接の関係を持つことが後述されている力積は約30%大きく見積もられる程度であり、定性的な考察を行うには問題ないと考えられる。

シミュレーションに用いる1回の単発放電で生じる気泡生成体積は、単発放電を十分な休止時間(約1秒)をはさんで10000回繰り返して採取される気泡体積を放電回数で割って求めた。また、気泡の採取を容易にするため突き合わせ加工を横方向で行った。このとき、単発放電1回毎に工具電極をジャンプさせて気泡を極間で追い出し、既存の気泡が新たな放電で生じる気泡体積に与える影響を除いた。

2.2 加工反力のシミュレーション

オイラー方程式から、液中の半径方向の位置 $r(r_i < r < r_0)$ における圧力 $P(r)$ が導かれ、

$$P(r) = \left\{ (a_i r_i + v_i^2) \ln \left(\frac{r_i}{r} \right) + \frac{v_i^2}{2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \right\} \rho + P_i \quad (3)$$

が得られる⁹⁾。気泡中の圧力勾配は無視できるので、極間の半径方向の圧力分布は図1に示す曲線で表される。これを電極面上で積分すればある時刻における電極に作用する加工反力が求められる。

本研究のシミュレーションでは、加工液を非圧縮・非粘性であるとしているため、電極半径が無限大に近づいた場合加工反力もそれに応じて無限大に近づく結果になる。しかし、実際の加工においては電極半径が無限大になっても加工反力が無限大に近づくことはありえない。なぜなら、実際の加工液は圧縮性のため放電により生じた圧力変化は電極端まで伝わるのに時間を有することが考

表1 加工条件

開放電圧	280 V
ピーク電流 i_e	9 A
放電持続時間 t_e	30 μs
加工液	放電加工油 (VITOL-2, (株)KHS)

図2 加工反力のシミュレーション結果

えられるからである。さらに、電極端まで圧力が伝わるまでには粘性の影響により気泡の運動エネルギーの一部は熱となって加工液中に散逸すると考えられるからである。

2.3 シミュレーション結果

図2は、工具電極が $\phi 30\text{mm}$ のとき、表1の加工条件で単発放電を生じさせたときの加工反力をシミュレーションした結果である。絶縁破壊時において、気泡の内部圧力は初期半径 $150\mu\text{m}$ まで断熱圧縮された初期状態を考えている。この気泡が圧縮された初期状態において加工反力は第1のピークを示す。気泡の膨張に伴い気泡の内部圧力が減少し加工反力が低下するが、加工液の慣性により気泡の内部圧力が大気圧より低くなっても膨張を続ける。そして、最大気泡半径に達したところで気泡の運動が収縮に転じ、気泡が再び初期圧力まで圧縮される。それによって再び加工反力のピークが現れる。今回のモデルでは粘性による減衰を考慮していないためその後も減衰することなく振動を続けることになる。

3. 単発放電における加工反力の測定

3.1 加工反力の測定方法

図3に実験装置の概略図を示す。測定は圧電型

図3 実験装置概略図

力センサを用いた。このセンサに電極を取り付けた状態での固有振動数は約30kHzであり、放電現象の観察には必ずしも十分高いわけではない。そこで、本研究ではセンサで得られた測定波形 $F(t)$ について絶縁破壊時を積分開始時刻とし、時刻 t まで時間積分した力積 $\int_0^t F(t)dt$ を用いて議論することにした。力積を用いると測定波形に重畳される高周波成分の正側と負側が積分により相殺されるため、固有振動数の影響を小さくすることができる。このように定義した力積を用いた場合、時刻 t まで作用した力積を時間 t で割ると時刻 t までに作用した加工反力の平均値が得られ、時刻 t まで作用した力積を時間で微分すると時刻 t における加工反力となる。また、シミュレーションと測定結果を比較するために、極間をシミュレーションで用いた値 $200\mu\text{m}$ と等しくし、放電は電極および工作物の中心で生じるように工夫した。つまり、工作物の中心に $\phi 0.5\text{mm}$ の鋼線を立て、鋼線と電極との極間を約 $20\mu\text{m}$ とすることにより中心で放電を生じさせた。

3.2 加工反力の測定結果

電極および工作物に $\phi 30\text{mm}$ の鋼を用いて、表1に示す加工条件で加工反力を測定した。図4に測定結果を示す。波形に測定系の固有振動が重畳されているが気泡運動に対応する約 0.5ms の周期の波形にのみ注目する。図2と図4から加工反力のピーク値や気泡運動の周期がシミュレーションと近い値を示し、加工反力は気泡運動と密接な関

図4 加工反力の測定結果

図5 力積の時間変化

係があることがわかる。図5は図2と図4の波形 $F(t)$ を絶縁破壊時を積分開始時刻として時刻 t まで積分し、時刻 t までの力積 $\int_0^t F(t)dt$ を求めた結果である。シミュレーションでは加工液の粘性を考慮しておらず力積の変動は定常的に続く。ところが実際は加工液の粘性のため気泡の運動エネルギーが熱となって加工液中に散逸し、気泡運動が減衰する。そのため、減衰一周あたりでわずかの力積が生じることになり、それが累積され気泡運動が減衰するころには力積は0でない有限の正の値に収束する結果となる。これは、簡単のため正弦波の減衰振動 $y(t)=e^{-at}\sin\omega t$ にあてはめて考えるとわかりやすいが、この減衰運動を積分すると、

$$\int_0^\infty e^{-at}\sin\omega t dt = \frac{\omega}{a^2 + \omega^2} > 0 \quad (4)$$

となり正の値になる。つまり、この減衰により力積が一定値に収束する効果が加工機を变形させ電極の変位をもたらしていると考えられる。したがっ

て、加工機を含めた振動系の固有振動数が気泡運動の振動数ほどに高くない場合、すなわち気泡運動の振動に加工機の振動系が追従しない場合でも電極の変位が生じ加工精度に影響を及ぼすことが考えられる。

4. 気泡生成体積が加工反力に与える影響

加工反力に影響する因子の1つとして放電により発生する気泡の生成体積が考えられる。気泡生成体積は放電電流やパルス幅などのパルス条件に影響される。また、電極材料の熱伝導率の違いが加工液中に散逸するエネルギーに影響を及ぼすため、電極材料によっても気泡の生成体積が異なることが考えられる。

4.1 電極材料の加工反力への影響

陽極対陰極の電極材料の組合せが銅対銅の場合と鋼対鋼の場合について調べた。図6に表1の加工条件で $\phi 15\text{mm}$ の電極を用いて測定した標準状態での気泡生成体積を示す。これから銅対銅より鋼対鋼の方が気泡生成体積が約6倍多いことがわかる。電極に銅を用いた方が、鋼を用いる場合よりも多く電極に放電エネルギーが配分される^{7), 8)}ので、加工液に散逸するエネルギーが少なく、気泡生成体積が小さくなったものと考えられる。図7は電極に $\phi 30\text{mm}$ を用いた場合の銅対銅の加工における力積の時間変化の測定結果を示す。同じパルス条件であるにもかかわらず、鋼対鋼の結果の図5と第1のピークで比較を行うと、鋼対鋼の方が大きく、加工反力は電極材料に影響されることがわかった。よって、同一パルス条件で同じエネルギーを極間に投入しても電極材料により生成される気泡体積が異なり、気泡体積が加工反力に影響を及ぼしていると考えられる。したがって、加工反力は従来言われてきた静電や電磁力による影響は少なく気泡の運動とより密接な関係があることが裏付けられる。

4.2 ピーク電流が加工反力に与える影響

図8にピーク電流が気泡生成体積（標準状態）に及ぼす影響の測定結果を示す。これから、ピーク電流が大きくなると気泡生成体積が大きくなる

図6 電極材料と気泡生成体積

図7 銅電極の場合の力積の時間変化

図8 ピーク電流と気泡生成体積

ことがわかる。ピーク電流を変えた場合のシミュレーションは、極間で運動させる気泡の標準状態での体積を図8に従って変え、初期の気泡半径は同一であると考えることにより行える。そこで、図5のピーク電流9Aの場合よりもピーク電流を増加させた場合の影響を調べた。図9, 10にピーク電流がおのおの30A, 45Aのときの力積の時間変化の測定結果およびシミュレーション結果を示す。力積の第1のピーク値と気泡運動の周期が図

図9 30Aの場合の力積の時間変化

図10 45Aの場合の力積の時間変化

図11 $\phi 15\text{ mm}$ の場合の力積の時間変化

5 同様測定結果とシミュレーション結果でよく一致していることがわかる。また、ピーク電流が増加すると気泡生成量が増加するため力積の第1のピークの値が増加し気泡運動の周期も長くなることがわかる。

5. 加工面積が加工反力に与える影響

加工面積の違いが極間の圧力分布に影響を及ぼし加工反力が変化することが考えられる。そこで、工作物が $\phi 15\text{ mm}$ と $\phi 30\text{ mm}$ の場合について加工反力を比較した。図11に $\phi 15\text{ mm}$ の場合を示す。図5の $\phi 30\text{ mm}$ の場合と比較すると力積が面積比と同じ約1/4倍になっており、加工反力は面積の影響が非常に大きいことが明らかになった。また、加工面積が大きいほど気泡運動の周期が長いことがわかる。これは注目すべき結果であり、同じパルス条件を用いても大面積加工の場合には予想外の大きな加工反力が作用し得ることを意味し、大面積加工における加工精度に与える影響に留意し

なければならないことがわかる。

6. 連続放電における加工反力の測定

連続放電中の極間は気泡が占める割合が大きく対向面積にして70%にもなる⁹⁾ことが知られている。したがって、極間にあらかじめ存在する気泡の体積率が新たに発生した放電による加工反力に与える影響は大きいと考えられる。そこで、工作物を $\phi 15\text{ mm}$ 、 $\phi 30\text{ mm}$ とした場合について連続放電を行い、加工反力の測定をした。図12に $\phi 15\text{ mm}$ 、図13に $\phi 30\text{ mm}$ の測定結果を示す。上の波形は加工反力、下の波形は電流波形を表している。極間が加工液で満たされた状態から加工を開始すると、加工反力は放電開始後の初期に大きな値を示し、時間の経過とともに加工反力は減少しほとんど0となっている。これは、極間に占める気泡の割合が増すと加工液の慣性や粘性の影響が減少し、放電点で発生した気泡内圧力が減少する。したがって、それを取り囲む気液二相流内の圧力分布も小さく、その結果加工反力が小さくなるからと考えられる。また、加工反力がほとんど0に減衰することは、実加工中に加工反力がほとんど作用しないという毛利ら⁹⁾の測定結果と矛盾しない。しかし、いまだ加工間隙が気泡で満たされていない連続放電初期には大きな加工反力が生じ得ることを本研究は示唆している。

ここで、電極に作用する力積の時間変化を図14に示した。また、図15はこの力積の時間変化を5次式で近似し微分することで求めた加工反力の時

図12 連続放電における加工反力（電極径： $\phi 15\text{mm}$ ） 図13 連続放電における加工反力（電極径： $\phi 30\text{mm}$ ）

図14 連続放電における力積の時間変化

図15 連続放電における加工反力の時間変化

間変化を示す。これから $\phi 30\text{mm}$ の場合、最大で 4.5N の比較的大きな加工反力が作用していることがわかった。また、電極面積の大きい $\phi 30\text{mm}$ の方が $\phi 15\text{mm}$ に比べ極間中の気泡体積率が增加するのに時間がかかるため、加工反力の作用時間が長くなることがわかる。さらに、加工反力の大きさも約 4 倍大きいため連続放電においても加工面積の影響が大きいことがわかった。以上のことから、加工反力は極間が加工液で満たされている初期段階で大きく、ジャンプ動作において電極が降りてきた直後の放電による加工反力が加工精度に及ぼす影響に注意する必要があると言える。

7. まとめ

気泡の挙動と極間の加工液中の圧力分布を考慮した加工反力のシミュレーションを行い、単発放電による測定結果と比較をした。また、連続放電における加工反力の測定をした結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 加工反力は極間の気泡中と加工液中の圧力分布を加工面上で積分して得られる。
- 2) 単発放電における加工反力は加工面積に比例し、加工面積が大きいと気泡運動の周期が長い。
- 3) 粘性が無視できる場合の力積の時間平均は 0 となるが、粘性がある場合は有限の力積が作用し放電加工機の主軸の変位をもたらす効果を持つ。
- 4) 単発放電において標準状態での気泡生成体積が大きくなると加工反力が大きく、気泡運動の周期は長くなる。
- 5) 連続放電において放電による加工反力が生じるのは、極間に加工液が満たされている初期だけで、極間が気泡で占められるとともに加工反力は 0 となる。
- 6) 連続加工における加工反力は加工面積に比例し、面積が大きいと加工反力の作用時間も長くなる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、実験の遂行に多大なるご協力をいただいた新日鉄(株)植木正憲氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 毛利, 斎藤, 石田: 放電加工機実稼働における機械的諸特性に関する研究, 電氣加工学会誌, Vol.20, No.39 (1987) 19.
- 2) 木本: 放電加工における衝撃力について, 電氣学会雑誌, Vol.81, No.878 (1961) 1877.
- 3) 橋口, 山本: 液中過度アーク放電による気泡の運動と衝撃力(第2報), 電氣学会雑誌, Vol.89-5, No.989 (1969) 931.
- 4) 池田: 単発放電により細隙に発生した気泡の挙動について(第1報), 電氣加工学会誌, Vol.6, No.11 (1972) 12.
- 5) P. K. Eckman and E. M. Williams: Plasma Dynamics in an Arc Formed by Low-Voltage Sparkover of a Liquid Dielectric, Appl. Sci. Res., B,8 (1960) 299.
- 6) 是枝: 水中における単発放電発生衝撃力について, 電氣加工学会誌, Vol.27, No.54 (1992) 1.
- 7) XIA et al.: Measurement of Energy Distribution into Electrodes in EDM Processes, JSP E Publication Series No.1, Advancement of Intelligent Production, Elsevier, (1994) 601.
- 8) XIA et al.: Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process, Int.J.Electrical Machining, 1 (1996) 45.
- 9) 宮島, 国枝, 増沢: 放電加工間隙の気泡挙動の観察, 昭和62年精密工学会春季大会学術講演論文集(1987) 723.

(1997年4月10日受付)