高抵抗材料の放電加工におけるジュール発熱を考慮した 工作物温度の非定常解析*

佐伯雄文** 国枝正典*** 植木正憲† 佐藤 裕†

Transient Workpiece Temperature Analysis in the EDM Processes of High Electric Resistance Materials Considering Joule Heating

Takefumi SAEKI, Masanori KUNIEDA, Masanori Ueki and Yutaka SATOH

This paper investigates the removal mechanism of high electric resistance materials in EDM processing by calculation of the distribution of the workpiece temperature taking the Joule heating caused by voltage drop in the workpiece into account. The voltage drop in the workpiece is extensive in the EDM processing of high electric resistance materials such as conductive ceramics. The voltage drop was therefore estimated by a numerical calculation, and its results were used to calculate the distribution of Joule heating inside the workpiece. Then considering both the Joule heating and the heat flux from the arc column, the time dependent workpiece temperature was computed by the finite-difference method. The expansion of arc column with time lapse which affects greatly the result of the above calculation was obtained experimentally and taken into account in the calculation. The calculated results show that the voltage drop mostly occurs in the vicinity of the discharge spot, and the calculated total voltage drop coincides well with the measured one. From the computed temperature distribution it is found that the Joule heating causes a temperature rise nearby the discharge spot which is comparable to what is given by the heat flux from the arc column, which was confirmed by the measured material removal by a single pulse which is greater than the removal of steel. Consequently, sufficient cooling of the discharge spot may assure the stability of machining and increase the material removal rate of conductive ceramics rather than metallic materials.

Key words: EDM, high electric resistance material, ceramics, specific resistance, voltage drop in workpiece, Joule heating

1. 結 言

セラミックスやシリコンウエハなどは、高硬度、低じん性であるため、一般に切削などに代表される機械加工が困難な材料である。そこで、絶縁性材料に故意に導電性物質を混入し焼結した材料、あるいはそれ自体に比較的導電性のある材料などについて放電加工の試みが多くなされている^{1)~3)}。しかし、加工が不安定で異常放電を起こしやすいため、パルスの休止時間を十分長くとる必要がある¹⁾²⁾。また、加工くずは金属を加工した場合の熔融再凝固型の球形の加工くずとは限らず、ぜい性破壊により剥離した無定形の加工くずが存在する³⁾⁴⁾等、特有の加工現象の存在をうかがわせる報告がなされている。

導電性のあるセラミックスなどの電気抵抗の大きな材料を放電加工する場合、放電中に工作物内部で材料の大きな比抵抗に起因する電圧降下が生じることが指摘されている⁵⁾⁶⁾。しかし、実際に工作物内部の3次元的な電位分布を測定することは困難である。そこで、本研究では、放電中の工作物内部での電圧降下を数値解析により求める。さらに、この電圧降下が加工現象に与える影響として、Rich⁹⁾、鳳¹⁰⁾が指摘するように放電点でのジュール発熱を考慮する。すなわち、ジュール発熱の除去機構への影響を調べるために、熱源としてアーク柱からの熱流入に加えて、工作物内部のジュール発熱を考慮に入れた一つの放電パルス中の工作物温度の非定常解析を行う。そして、ジュール発熱の工作物除去作用への寄与を明確にし、高抵抗材料の放電加工に特有な加工現象を明らかにすることを目的とする。

Rich⁹⁾は定常アークについて、電極内の電位分布の解析解を求

め、それを用いて陰極点近傍のジュール発熱分布の定常解を求めた。さらに、陰極点近傍にジュール発熱による半球状の均一な熱源が存在すると仮定してジュール発熱のみによる電極温度上昇を近似的に求めた。そして、比抵抗が比較的大きなHg, Fe, Bi等の金属材料ではジュール発熱による温度上昇がアーク柱からのイオン衝撃により流入する熱による温度上昇に匹敵すると指摘している。

しかし、Rich自身が指摘しているように、ジュール発熱についての解析結果は、根拠なく仮定されたアーク柱直径に大きく左右される。さらに、アーク柱からの熱流束については、実際の電極の溶融域と解析による溶融域を比較して求めているが、この熱流束の計算結果もアーク柱直径に大きく依存するため、アーク柱からの熱流束を正しく求めているとは言えない。

そこで本研究では、まず電極材料が炭素鋼でも高抵抗材料でもアーク柱での電圧降下やアーク柱直径が同じという近似の下ではあるが、高抵抗材料の電圧降下の解析結果を実測した電圧降下と比較することによって、膨張するアーク柱直径の時間変化を求めた。また、アーク柱からの熱の流入については実測に基づく値を用いた。そして、アーク柱の膨張により刻々変化するジュール発熱とアーク柱からの熱流束の両方を考慮した工作物温度の非定常解析を行った。

2. ジュール発熱を考慮した熱伝導解析の方法

2.1 解析全体のアルゴリズム

本研究で行ったジュール発熱を考慮に入れた非定常熱伝導解析の手順を図1に示す。はじめに、工作物内部の電位分布解析を行う。そして、この結果から工作物内の電流密度分布を求め、さらにジュール発熱分布を計算する。次に熱源としてアーク柱からの熱流束に加えて、先に計算した工作物内のジュール発熱も考慮に入れて、工作物の温度分布解析を行う。これらの計算をアーク柱直径の時間変化を考慮に入れて計算する。

* 原稿受付 平成7年6月29日

** 学生会員 東京農工大学大学院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

*** 正 会 員 東京農工大学工学部

† 新日本製鉄(株)先端技術研究所 (川崎市中原区井田 1618)

Fig.1 Flowchart

Fig.2 Model of workpiece

本研究では、図2に示すような時間とともに直径 $d(t)$ の変化する円板状の放電点を上面中心に持つ、直径 D 、長さ L の円筒形の工作物モデルを用いた。このモデルにおいて、円周方向については電荷及び熱の流れがないと考えることができる。したがって、図3に示すように、工作物の中心軸を頂点とする頂角 Φ の扇型を底面とする柱状の立体について半径方向に長さ Δr 、軸方向に高さ ΔZ のメッシュに分割し、軸対称2次元問題として差分法による解析を行った。なお、比抵抗や熱伝導率、比熱などの物性値については、簡単のため温度依存性は考慮せず、室温の値で一定として扱った。また、工作物の除去については考慮に入らなかった。

以下に図1のフローチャートの順に各ステップの説明を行う。

Fig.3 Continuity of electric current in a control-volume

2.2 電位分布解析

図3に示す工作物内のある一つのメッシュ (m, n) において、上下及び内外に隣接するメッシュから流入する電流の代数和は電荷保存則より0となるので、メッシュ (m, n) の電位 $v_{m,n}$ に関する方程式が以下のように導出できる。

$$\frac{S_1(v_{m,n-1} - v_{m,n})}{\rho \Delta Z} + \frac{S_2(v_{m,n+1} - v_{m,n})}{\rho \Delta Z} + \frac{S_3(v_{m-1,n} - v_{m,n})}{\rho \Delta r} + \frac{S_4(v_{m+1,n} - v_{m,n})}{\rho \Delta r} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $S_1 \sim S_4$ は各々 $i_1 \sim i_4$ の電流が流入する面積、 ρ は工作物の比抵抗、 ΔZ 、 Δr はそれぞれ軸方向及び半径方向に隣接するメッシュの中心間の距離、 v はメッシュの電位である。

なお、電位分布解析における境界条件は以下のように設定した。放電点において放電電流はアーク柱から工作物へ一様な分布を持って流入すると仮定した。したがって、アーク柱からの放電電流が流入するメッシュにおいては、放電電流 i_e をアーク柱の断面積 $(\pi/4) \times (d(t))^2$ で割ることで与えられる電流密度を持った電流がメッシュの上面から流入するとして式(1)に対応する式を導出する。なお、 $d(t)$ は時刻 t におけるアーク柱直径である。また、工作物の底面をアースと考え、底面に相当するメッシュの電位を0Vとし、放電点と底面以外での電流の出入りはないものとした。

以上のようにして、すべてのメッシュの電位に関する方程式を

導出し、これらの連立一次方程式を解くことによって各メッシュの電位を計算することができる。また、後述するようにアーク柱直径 $d(t)$ は時間とともに変化するので、各時刻 t ごとに電位分布を計算する。ただし、表皮効果は考慮しなかった。

2.3 ジュール発熱分布解析

前節に示した電位分布解析の結果から各メッシュで生じるジュール発熱を計算する方法を以下に述べる。メッシュ (m, n) における軸方向下向き及び半径方向外向きの電流密度 j_z 、 j_r は、上下及び内外に接するメッシュの電位より各々次のように書ける。

$$\begin{cases} j_z = \frac{v_{m,n-1} - v_{m,n+1}}{2\rho \Delta Z} \\ j_r = \frac{v_{m-1,n} - v_{m+1,n}}{2\rho \Delta r} \end{cases} \quad (2)$$

また、 j_r と j_z の合成ベクトルの大きさ $|J|$ は次のようになる。

$$|J| = \sqrt{j_r^2 + j_z^2} \quad (3)$$

したがって、各メッシュで生じる単位時間当たりのジュール発熱 $P_{m,n}$ は、 V をメッシュの体積として次のように書ける。

$$P_{m,n} = \rho V_{m,n} |J|^2 = \rho V_{m,n} \left[\left(\frac{v_{m,n-1} - v_{m,n+1}}{2\rho \Delta Z} \right)^2 + \left(\frac{v_{m-1,n} - v_{m+1,n}}{2\rho \Delta r} \right)^2 \right] \quad (4)$$

2.4 温度分布解析

あるメッシュ (m, n) に着目したとき、ある時刻 t^p ($p = 0, 1, 2, \dots$, Δt は時間ステップ)において、上下及び内外に隣接するメッシュから流入する単位時間当たりの熱量 Q^p は、図3において電流を熱流に置き換えて考えると次のように表される。

$$Q^p = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} + Q_{p4} \quad (5)$$

また、メッシュ (m, n) で生じる単位時間当たりのジュール発熱は $P_{m,n}$ である。よって、このメッシュの時刻 t^p から t^{p+1} ($t^{p+1} = (p+1) \times \Delta t$)の間の温度上昇は次式で与えられる。

$$\rho_d c V_{m,n} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = Q^p + P_{m,n} \quad (6)$$

ただし、 ρ_d 、 c はそれぞれ工作物の密度、比熱である。

以上からメッシュ (m, n) の温度に関する方程式が以下のように得られる。

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{\lambda \Delta t}{\rho_d c V_{m,n}} \left(\frac{T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p}{\Delta Z} S_1 + \frac{T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p}{\Delta Z} S_2 + \frac{T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p}{\Delta r} S_3 + \frac{T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p}{\Delta r} S_4 \right) - T_{m,n}^p + \frac{\Delta t}{\rho_d c V_{m,n}} P_{m,n} \quad (7)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 T は各メッシュの絶対温度である。

したがって、時刻 t^p におけるメッシュ (m, n) に隣接するメッシュの温度が分かれば、それらを用いて Δt 秒後のメッシュ (m, n) の温度を求めることができる。

ここで、極間に投入される全放電パワー P_g のうち、工作物へ流入する割合を α とする。このパワー αP_g がアーク柱から工作物へ一様な分布を持って流入すると仮定した。したがって、アーク柱から熱流入のあるメッシュにおいては、工作物へ流入するパワー αP_g をアーク柱の断面積で割ることで与えられる熱流束がメッシュの上面から流入するとして式(7)に対応する式を導出する。なお、放電点以外の工作物表面にはすべて断熱条件を適用し、初期条件として工作物は時刻0においてすべて室温($=300K$)であるとした。

2.5 アーク柱直径の時間変化

4.1節で後述する方法により求めたアーク柱直径の時間変化を考慮に入れて一連の計算を繰り返す。つまり、時間経過とともに、電流及び熱流束の流入する円板状の領域の直径 $d(t)$ を変化させて、1回の放電が終了する時刻まで電位分布解析及び熱伝導解析を繰り返す。

Table 1 Thermophysical and electrical properties of ceramics and steel

	ceramics (Si ₃ N ₄ -SiC)	steel (tool steel)
Thermal conductivity λ , W/(mK)	46.7	45.1
Density ρ_d , kg/m ³	3.30×10^3	7.83×10^3
Specific heat c , J/(kgK)	7.45×10^2	4.61×10^2
Melting point T_m , K	2200	1800
Specific resistance ρ , Ωcm	3.0×10^{-1}	1.5×10^{-5}

Fig. 4 Relationship between workpiece length and the voltage drop v_w as a function of discharge current

3. 電位分布解析結果

3.1 電位分布解析結果

本研究に用いた高抵抗材料は、表1に示す組成の窒化けい素系セラミックスである。また、これと比較するための良導電材料として炭素鋼についても解析及び実験を行った。表1に今回用いたセラミックス及び炭素鋼の物性値を示す。なお、解析においては両材料とも欠陥及び異方性のない均質な材料と仮定した。

電位分布解析では、工作物の寸法は実験に用いた工作物を考慮して、工作物の直径 $D=4\text{mm}$ とし、放電電流 i_e と工作物の長さ L を各々変化させて計算を行った。

セラミックス及び炭素鋼について、放電電流 i_e をパラメータとして工作物長さ L と工作物内の電圧降下 v_w の関係の計算結果を図4に示す。ここで電圧降下 v_w はアースと放電点中心との電位差である。図1の解析手順において、放電開始から十分な時間経過後のアーク柱直径がほぼ定常値に達した状態を考慮してアーク柱直径が 0.6mm として計算した。図より、炭素鋼の電圧降下は i_e が3, 8, 13Aのすべての場合でほぼ0Vである。それと比較してセラミックス内の電圧降下は非常に大きいことがわかる。また、電圧降下は放電電流 i_e に比例し、工作物長さ L が約1mm以上では L に比例して増加することがわかる。次にセラミックス内の電位分布解析結果の一例として $i_e=13\text{A}$, $L=4\text{mm}$ の場合の工作物内の等電位面及び電流の流れを図5に示す。図より、セラミックス内で生じる電圧降下の大部分は、電流密度の大きな放電点近傍で生じており、 $Z=1\text{mm}$ 以上の部分では電流が工作物断面上でほぼ一様に流れていることがわかる。

3.2 工作物内部での電圧降下の測定

工作物内の電圧降下 v_w を直接測定することは困難である。しかし、図6(a)のように極間電圧(アーク柱内の電圧降下) v_g と工作物及び工具電極内部での電圧降下 v_w , v_e の和として定義する放電中の放電電圧 v の測定は容易である。

銅電極を用いてセラミックスと炭素鋼をそれぞれ放電電流 $i_e=10\text{A}$, 長さ $L=3.8\text{mm}$ で加工した場合の放電電圧 v を測定したところ、図6(b)に示す波形が得られた。銅電極及び炭素鋼内の電圧降下 v_e , v_w は先の電位分布解析より無視できる程小さいため、炭素鋼の放電電圧 v は極間電圧 v_g と等しいと考えることができる(図中

Fig. 5 Equipotential surface and streamline of current in the workpiece ($L=4\text{mm}$, $i_e=13\text{A}$)

Fig. 6 Method of measurement of the voltage drop in ceramics workpiece

Fig. 7 Comparison between the calculated and the measured voltage drop in ceramics

(B)). セラミックスと炭素鋼でアーク柱の性質が等しく、したがって極間電圧 v_g が等しいと仮定すれば、セラミックス内の電圧降下 v_w は、セラミックスを加工したときの放電電圧(図中(A))から v_g を差し引いて求められる(図中(A)-(B)).

図7に、上記の方法で実験により求めたセラミックス内の電圧降下(図中(A)-(B))と2.2節の方法で解析により求めたセラミックス内の電圧降下(図中(C))の工作物長さによる変化を示す。図より、工作物長さ L が1mm以上で実験から求めた電圧降下(A)-(B)及び計算で求めた電圧降下(C)はほぼ直線で、しかも値が近いことから、

Fig.8 Relationship between diameter of arc column and voltage drop as a function of discharge current

Fig.9 Expansion of arc column

$Z=1\text{mm}$ 以上で工作物断面内の電流密度がほぼ一様であるという結果および電圧降下の結果は、それぞれ定性的、定量的に妥当であると考えられる。

4. アーク柱の膨張の測定

4.1 アーク柱の膨張の測定方法

アーク柱直径は、その測定が困難なことから放電により形成された放電痕直径より類推することが一般的である^{[11][12]}。しかし、より正確にアーク柱直径の時間変化を求めるために、以下に示す方法を本研究で新たに考案した。まず、アーク柱直径と放電電流をそれぞれ変化させて電位分布解析を行い、セラミックス内の電圧降下をアーク柱直径と放電電流の関数として求める。次に実際に加工を行い、1回の放電パルス内において、絶縁破壊直後から時間とともに変化するセラミックス内の電圧降下と放電電流を計測する。そして、これらの値を先に求めた関数に代入してアーク柱直径について解く。以上の手順を放電持続時間中の各時刻について行うことによってアーク柱直径の時間変化が求まる。

4.2 アーク柱の膨張の測定結果

図8に放電電流をパラメータとしてアーク柱直径とセラミックス内電圧降下の関係の解析結果を示す。図より、各々のアーク柱直径における電圧降下は放電電流に比例して大きくなるのが分かる。この結果からセラミックス内の電圧降下を放電電流とアーク柱直径の関数として表すと次式のようになる。

$$V_w = i_e \times \left(-0.00747 + \frac{0.00158}{d^3} + \frac{0.01554}{d^2} + \frac{1.87024}{d} \right) \quad (8)$$

Table2 Machining conditions used in the calculation	
Discharge current i_e A	13
Discharge power P_g W	221
Energy distribution ratio into workpiece α %	40
Pulse duration t_e μs	2000

Fig.10 Temperature change at the center of discharge spot

Fig.11 Variation of temperature distribution along the axis of workpiece

ここで、3.2節の方法でセラミックス内の電圧降下を実験より求め、さらにこの時の放電電流を計測し、式(8)を用いてアーク柱の膨張を求めた結果を図9に示す。図よりアーク柱は放電開始直後に急激に膨張し、それ以後は緩やかに膨張することがわかる。また、放電終盤のアーク柱直径は、同様の条件での単発放電により形成された放電痕の直径の実測値、約 $600\mu\text{m}$ とほぼ一致する。なお、図1の解析に用いるときには計算の便宜をはかるために、図中の破線に示すような段階的なアーク柱直径の時間変化を仮定して計算した。

5. ジュール発熱を考慮した温度分布解析結果と加工現象との関連

5.1 温度分布解析結果

熱伝導解析に用いた加工条件を表2に示す。放電パワーは銅電極を用いて炭素鋼を加工した時の放電電圧と放電電流の積の放電中の時間平均値である。前述のように銅電極や炭素鋼の工作物内での電圧降下は無視できる程小さいため、これはアーク柱のみで生じるパワーと考えられる。夏ら^[13]の実測値を参考にして、この放電パワー内の40%が工作物に流入すると考えた。なお、工作物の

Fig.12 Experimental result of material removal per pulse

長さ l が2mmの場合について計算を行った。

表1, 2に示す条件と図9に示すアーク柱直径を用いて、セラミックス及び炭素鋼について各々ジュール発熱を考慮した場合と無視した場合について熱伝導解析を行った。図10に放電点中心($r=z=0$)の温度の時間変化を、図11に工作物中心軸(Z 軸)上の温度分布の時間変化をそれぞれ示す。図10より炭素鋼の場合はジュール発熱の考慮の有無によらずほぼ同じ温度変化を示すのに対して、セラミックスの場合はジュール発熱の考慮の有無によって温度が大きく異なっていることが分かる。特に放電開始直後のアーク柱が細い時点での違いが顕著である。また、図11よりジュール発熱がある場合、時間経過とともにかなり深い領域まで高温になることが分かる。これらの結果より、セラミックスの加工の場合、アーク柱からの熱流入に加えてジュール発熱もかなりの割合で除去機構に関与していることが分かる。

5.2 実験による放電1回当たりの除去体積

解析と同じ条件において実際に加工を行い、放電1回当たりの除去体積を実験により求めた結果を図12に示す。放電1回当たりの除去体積は、ある時間加工した場合の除去体積を加工時間中の全放電パルス数で割ることによって求めた。なお、加工条件は放電持続時間 $20 \mu\text{s}$ 、放電休止時間 $2500 \mu\text{s}$ である。図より、炭素鋼よりも融点の高いセラミックスの方が放電1回当たりの除去体積が大きいことが分かる。もっとも、導電性のあるセラミックスの除去メカニズムが金属のような溶融除去的ではなく破砕除去的という報告もある^{3) 4)}。その場合は溶融にエネルギーが消費されることなく固相のまま除去されるため、除去が溶融蒸発のみによる場合に比べ加工速度が増大すると推測されている。しかし、本研究の結果より、ジュール発熱によって溶融領域が拡大される効果も無視できないと思われる。また、温度上昇により破砕が促進される効果も考えられる。

5.3 考察

実験より裏付けられるように、放電1回当たりの除去体積はむしろ炭素鋼よりセラミックスの方が大きい。それにもかかわらず実際のセラミックスの加工速度が炭素鋼に比べて非常に小さい理由として次のように考える。つまり、高抵抗材料の場合、ジュール発熱により工作物の深い領域まで高温になるため、放電休止時間中のプラズマの消沈に長い時間を要する^{14) 15)}。そのため放電休止時間を炭素鋼の場合に比べて極端に長くとり放電頻度を極端に小さくして加工を行う必要がある。その結果、加工速度は炭素鋼に比べて小さくならざるを得ないものと考えられる。

一方、今回のセラミックスは炭素鋼とほぼ同じ熱伝導率であり、ジュール発熱を考慮しない熱伝導解析では炭素鋼の場合とほぼ同じ温度上昇である。つまり、今回用いたセラミックスが良導電体であると仮定すれば、炭素鋼とほぼ同じ温度上昇しか現れない。

しかし、一般のセラミックスの熱伝導率は、炭素鋼などに比べて小さい場合が多い。したがって、たとえ良導電体であっても、熱が放電点付近に停留しアークになりやすい²⁾。しかも本研究で明らかにしたように、高抵抗材料であるためジュール発熱によってさらに放電点近傍の温度が上昇するために非常にアークになりやすくなっているものと考えられる。したがって、導電性セラミックスなどの高抵抗材料の放電加工において、加工速度の向上のための指針としては、極間への加工液の強制噴流などの方法によって放電点の冷却を積極的に行い、プラズマの消沈を促すことで放電休止時間を短くすることが有効であることが分かる。それが可能ならば炭素鋼に匹敵する加工速度が実現できると考えられる。

6. 結 言

本研究では新たな方法でアーク柱の膨張を求めた上で、工作物内の電気抵抗に起因するジュール発熱を電位分布解析結果より計算した。そして、熱源としてその他にアーク柱からの熱流入も考慮して一つの放電パルスにおける工作物温度の数値解析を行った。その結果、高抵抗材料の放電加工について次のことがわかった。

- ・放電中に高抵抗材料内部で無視できないほど大きな電圧降下が生じ、このうちの大部分は放電点近傍で生じている。
- ・高抵抗材料の電圧降下の解析結果と実験結果を比較することにより、絶縁破壊直後からのアーク柱の膨張の様子が解明された。
- ・アーク柱からの熱流束に加えて工作物内のジュール発熱もかなりの割合で工作物の温度上昇に関与している。
- ・本研究に用いたセラミックスの方が放電1回当たりの除去体積が大きくなった原因の一つとして、ジュール発熱によって溶融領域が拡大される効果が無視できないと思われる。
- ・ジュール発熱により放電点近傍の工作物の温度が上昇するため、放電の安定には放電休止時間を炭素鋼などに比べて極端に長くして加工を行う必要があり、加工速度は炭素鋼に比べて小さくならざるを得ないものと考えられる。
- ・加工速度向上の指針として、極間への加工液の強制噴流などの方法で放電点の冷却を積極的に行い、プラズマの消沈を促すことで放電休止時間を短くすることが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 中村 守, 久保勝司, 平井幸男: 反応焼結炭化珪素の放電加工, 電気加工技術, 8, 22 (1984) 1.
- 2) 斎藤長男: ファインセラミックスの放電加工, 機械と工具, 33, 5 (1989) 121.
- 3) W.König, D.F.Dauw, G.Levy and U.Panten: EDM-Future Steps towards the Machining of Ceramics, Ann. CIRP, 37, 2 (1988) 625.
- 4) 万波和男, 酒井恒蔵, 奥宮正太郎: ZrB_2 系セラミックスの放電加工, 電気加工技術, 10, 27 (1986) 7.
- 5) G.Wollenberg, M.Timm, T.Pape and H.P.Schulze: Stepped Pulse Power Supply and Feedrate Control for EDM of Materials Which Are Poor Conductors, ISEM-11 (1995) 353.
- 6) Y.Jizhen: Some Research on the EDM of Non Electric Conductive Material, ISEM-10 (1992) 223.
- 7) Y.F.Luo, C.G.Chen and Z.F.Tong: Slicing Thin Silicon Wafers by Wire EDM Cutting, ISEM-10 (1992) 287.
- 8) C.Fengguo: A New Technology of High-speed Machining Polycrystalline Diamond with Increased Discharge Breakdown Explosion Force, ISEM-9 (1989) 309.
- 9) J.A.Rich: Resistance Heating in the Arc Cathode Spot Zone, J.Appl.Phys., 32, 6 (1961) 1023.
- 10) 鳳 誠三郎: 放電加工のメカニズム, 精密機械, 29, 10 (1963) 11.
- 11) A.S.Zingerman: The Effect of Thermal Conductivity upon the Electrical Erosion of Metals, Soviet Phys.-Tech. Phys., (1956) 1945.
- 12) 向山芳世, 楊友沈: 放電加工における溶融層の3次元解析, 電気加工学会誌, 26, 53 (1992) 13.
- 13) 夏 恒, 国枝正典, 西脇信彦: 放電加工における実加工中のエネルギー配分の測定, 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1994) 269.
- 14) 元木幹雄, 小野雅幸, 上出諭吉: 放電加工のギャップ現象, 電気加工学会誌, 8, 15 (1975) 44.
- 15) 室岡義広, K.R.Hearne: 絶縁破壊電圧に及ぼす電極温度の影響, 電気学会論文誌A, 92, 9 (1972) 19.