放電加工における加工開始時の放電安定性の改善に関する研究* (加工電圧の検出方法の違いが放電の安定性と極間距離に及ぼす影響)

吉田 政弘^{*1}, 上田 大斗^{*2}, 名古屋 寛^{*3}, 北村 友彦^{*4}

Study on Improvement of Stability of Discharge When Start of Machining in EDM (Influence of Difference of Detection Method for Working Voltage on Stability of Discharge and Frontal Gap Distance)

Masahiro YOSHIDA^{*1}, Taito UEDA, Hiroshi NAGOYA
and Tomohiko KITAMURA

^{*1} Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology
Higashi-Oi 1-10-40, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011 Japan

In this study, the conventional power supply for EDM machines which superimposes high voltage on the detected working voltage (inner superimposed) was compared with a power supply which superimposes high voltage externally so the superimposed voltage is not added to the detected working voltage (outer superimposed), in the aim to investigate the differences between the two superimposed voltage methods and the effects of servo voltage on the stability of discharge. As a result, differences were seen between the two methods up to 100 seconds after the start of EDM. With inner superimposed voltage, it took more than 100 seconds after the start of EDM to reach the final general discharge frequency, and for the ratio of abnormal discharge frequency to become more or less 0%. With outer superimposed voltage, the final general discharge frequency was reached six seconds after the start of EDM. At this point, the ratio of abnormal discharge frequency was also more or less 0%. The same tendency was seen regardless of the servo voltage value. In addition, 10 seconds after the start of EDM, the frontal gap distance was found to be three times wider with outer superimposed voltage compared to inner superimposed voltage. These results confirm that outer superimposed voltage improves the stability of discharge after the start of EDM.

Key Words : EDM, Small Discharge Energy Conditions, Superimposed Voltage, Working Voltage, Stability of Discharge, Frontal Gap Distance

1. 緒 言

放電加工において、加工開始直後の極間の加工液は清浄なため極間距離が狭い。そのため、短絡や集中放電が多発する放電が不安定な状態に陥りやすい⁽¹⁾。この状態を「食いつきが悪い」と呼ばれ、加工現場では大きな問題の1つになっている。なお、本研究では短絡や集中放電などの加工に寄与しない放電を異常放電として扱う。食いつきが悪い状態は、極間距離が狭く小さな放電加工条件ほど長く、多発する異常放電によって加工速度の低下と加工面性状を悪化させる⁽²⁾⁽³⁾。これを防止するため、最近の放電加工機では、極間状況を様々な角度からモニタリングし、これを基に主軸の極間制御を行う高度な主軸送り制御機構が開発されている⁽⁴⁾。しかし、加工現場で使用されている放電加工機は最新の機械ばかりではなく、簡易な方法で食いつきを改善することが強く望まれている。食いつきを改善するには、加工開始直後から素早く極間距離を広げて異常放電の発生を抑えることが効果的であると考えられる。極間距離を広げる方法として、サーボ電圧を高くすることや、放電加工機の加工電源による高電圧重畳（内部重畳）を用いることが一般的である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これまでの高電圧重畳の効果に関する報告は安定した加工での結果であり、高電圧重畳の印加が食いつきに及ぼす影響については調査されていない。

* 原稿受付 2013 年 6 月 6 日

^{*1} 正員、東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 品川キャンパス (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)

^{*2} 東京大学 工学系研究科 精密工学専攻

^{*3} 東京都立産業技術高等専門学校 専攻科 創造機械工学専攻 品川キャンパス

^{*4} 出光興産(株) 営業研究所 加工油グループ

E-mail: myoshida@s.metro-cit.ac.jp

ところで、放電加工中の極間距離は、極間の加工電圧を検出し、その平均値が設定したサーボ電圧になるように制御する。2章で述べるが、加工開始直後は異常放電が多発するため平均加工電圧が変動する。内部重畳のように検出する加工電圧に重畳電圧が反映される場合は平均加工電圧の変動が著しく、これが食いつきを悪化させる原因になっている可能性が高い。一方、検出する加工電圧に重畳電圧が反映されない外部重畳電源による方法（外部重畳）は、平均加工電圧の変動が内部重畳より少ないため、主軸の極間制御の運動が小さく、また、緩やかになるため食いつきの改善が期待できる。

食いつきの良否は、総放電頻度とそれに占める異常放電頻度の割合（異常放電率）で評価した。加工開始直後では総放電頻度は少ないが、極間の加工屑濃度の増加とともに増大し、その時の加工面積に応じてある値に落ち着く⁽⁷⁾。また、極間の加工屑濃度が高くなると極間距離が広がり⁽⁸⁾、異常放電が生じにくくなる。このことから、加工開始後に極間距離が広がり異常放電頻度が減少するとともに、総放電頻度が短時間で一定の値で安定する放電加工状態が食いつきの良い状態であると判断することができる。

本論文は、検出する加工電圧に重畳電圧の反映の有無が食いつきに及ぼす影響を調べた。具体的には、食いつきの悪い状態が生じやすい極間距離が狭い小さな放電加工条件を用いて、内部重畳と外部重畳とで総放電頻度と異常放電率、そして、異常放電と強い相関が考えられる極間距離の推移を加工開始直後から調べ、加工電圧の検出方法の違いが食いつきに及ぼす影響について述べる。そして、本研究が提案する検出する加工電圧に重畳電圧が反映されない外部重畳を用いることで食いつきが改善されることを報告する。

2. 加工電圧検出方法の違いと極間距離の制御

放電電圧波形は、図1に示すように開放電圧 u_i 、放電遅れ時間 t_d 、放電電圧 u_e 、放電持続時間 t_e 、放電休止時間 t_o とその時に印加される電圧 u_o （ほぼ0V）に分類できる。そして、加工中の極間距離を制御するためにサーボ電圧との比較に用いる平均加工電圧 U は式（1）で計算することができる。また、一般的に設定したサーボ電圧と平均加工電圧の差が大きいほど主軸の移動速度が速くなり、主軸の極間制御が不安定に陥る可能性がある。

Fig.1 Illustration of discharge voltage and current wave

$$U = \frac{u_i \times t_d + u_e \times t_e + u_o \times t_o}{t_d + t_e + t_o} \quad (1)$$

U [V] : Average working gap voltage

Fig.2 Outline of superimposed open voltage circuit

加工開始直後のように極間の加工液が清浄な場合、極間距離が $4\mu\text{m}$ 以上になると放電が生じない⁽⁷⁾。このため、加工開始時の極間距離は $4\mu\text{m}$ 未満と狭く、これが異常放電を多発させる原因になっている。異常放電が多発すると、開放電圧、放電遅れ時間、放電電圧などが小さくなるため⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、極間の平均加工電圧は低くなることが式(1)から分かる。そこで、放電加工機は極間距離を広げるが、加工開始時は極間の加工屑の濃度が低いいため主軸がわずかに上昇するだけで放電が生じなくなる⁽⁷⁾。その結果、平均加工電圧は急上昇し、放電加工機は極間距離を急速に狭める方向に制御する。しかし、極間状況に変化がなければ、極間距離を主軸の上昇前と同じ程度以下にまで狭くさせないと放電が発生せず、異常放電が再び多発することになる。特に検出する加工電圧に重畳電圧が反映される内部重畳では重畳電圧が高くなるほど、異常放電が多発した時と放電が生じない時の平均加工電圧の差が大きいことが式(1)から理解できる。このため、前述したように加工開始直後では主軸の極間制御の運動が激しくなり、食いつきが悪い状態が続く可能性がある。一方、外部重畳では検出する加工電圧は放電加工機の加工電源で設定した開放電圧(例えば90V)で一定のため平均加工電圧の変動が内部重畳よりも少ないと考えられる。その結果、主軸の極間制御の運動が内部重畳に比べて小さく緩やかになるので食いつきの改善が期待できる。

3. 実験装置および方法

3・1 高電圧重畳回路

図2で示した高電圧重畳回路を放電加工機の加工電源にダイオードを介して接続し、外部重畳電源で設定した重畳電圧を極間に印加する。ダイオードを使用することにより、外部電源で重畳された電圧は、極間距離制御のために検出する極間の加工電圧に反映されない。重畳電圧は加工機電源のゲート信号を用いて加工の放電パルスと同期して印加する。重畳電圧電源として0~600Vまで連続的に可変な直流定電圧定電流電源を用いた。高電圧重畳回路の電流の影響を防ぐため、 700Ω の抵抗を挿入し放電時に重畳電圧側から流れる電流値を0.03A以下とした。

3・2 総放電頻度と異常放電頻度の測定

放電遅れ時間が生じないか極端に短い異常放電の電圧波形は、図3(a)に示すように設定した開放電圧まで立ち上がらず⁽⁹⁾、放電電圧も通常よりも低いため放電電圧で区別可能なことが報告されている⁽¹⁰⁾。そこで、予備実験で異常放電と通常放電との放電電圧の比較を行った。その結果、異常放電の放電電圧は、図3(a)で示すように通常放電の放電電圧22Vよりも低い19V以下であることが分かった。そこで、本研究では図3(b)に示したように、放電電圧が20V以下の放電波形を異常放電波形として出力する回路を製作した。そして、図3(c)に示すように、この出力波形と放電電流波形とのAND出力をカウントすることで異常放電回数を求めた。なお、放電電圧が20V以下の全てが異常放電として信号が出力されるので、放電電圧がほとんど生じない短絡も異常放電としてカウントされる。一方、総放電回数は電流センサーの出力波形を全てカウントしたものである。電流センサーの波形に放電ノイズが乗るとカウントに誤差が生じるので、電流センサーの出力にローパスフィルターを挿入している。そして、総放電頻度と異常放電頻度はそれぞれの放電回数をその時の加工時間で割ることで求めた。

3・3 極間距離の測定方法

図4に極間距離の測定方法の概要を示す。放電加工機のZ軸の可動部に極間距離を測定するための測定用板を取り付け、電気マイクロメータのプロープをZ軸のコラムにセットする。なお、プロープが接触する部分に絶縁板を貼り付け、加工中の電流が電気マイクロメータに流れないように配慮した。使用した電気マイクロメータ

(Mitsutoyo, M400)のプロープ(Mitsutoyo, MCHP-341)の測定分解能と直線特性は、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $\pm 2\text{mm}$ であり、 μm オーダーの測定でも十分な測定が行える。なお、放電ノイズが入ると測定精度が悪化するためローパスフィルターを用い、さらに、オシロスコープのEnhanced Resolution機能により工具電極の動きを測定した。これは指定した測定波形のS/N比の向上により測定分解能を上げる機能である。

加工中の極間距離の測定方法を以下に示す。

- ① 加工終了とほぼ同時にオシロスコープの波形観察をフリーズさせる。加工中の極間距離を測定するため、最後の放電電流波形が観測されている時の位置(図5の○印の破線ライン)を記録する。Z軸の最終的な位置は図5で示すように加工中の位置よりも上昇する。

- ② 極間に残った加工屑が測定に影響しないように、ここから工具電極を 0.5mm 程度上げてエアで極間を吹く。
- ③ ①で示した破線の位置までZ軸を下降させ、その位置を電気マイクロメータの読みのゼロ点にセットにする。
- ④ 工具電極を下降させて工作物の加工面に接触検知させる。そして、その時の電気マイクロメータの値を読む。その値が極間距離となる。

実際の極間距離の測定例を図5に示す。図6は本方法による極間距離の測定の再現性と測定精度を確認するため、サーボ電圧と極間距離の関係を調べた結果である。なお、この結果は、放電が十分に安定してから測定したものである。図6から、各サーボ電圧における極間距離が $1\mu\text{m}$ 程度のバラつきに収まっていることが分かる。これにより、本測定方法の再現性が実証され、極間距離の測定が高精度で行えることが確認できた。

(a) Comparison of normal and abnormal discharge voltage wave

(b) Abnormal discharge signal

(c) Abnormal discharge count

Fig.3 Method of abnormal discharge count

Fig.4 Illustration of measurement method for frontal gap distance

Fig.5 Moving Z axis and discharge current wave (after removed discharge noise)

3・4 実験条件

実験条件を表1に示す。工具電極に $\phi 8\text{mm}$ の銅丸棒、工作物に $50\text{mm}\times 19\text{mm}\times 6\text{mm}$ の鋼(S45C)を用いた。工具電極端面は加工毎に旋盤で仕上げ加工を行い前の放電加工の影響を無くした。工作物の両面は研削加工を施し、工作物の上下面の平行度ならびに平面度を $1\mu\text{m}$ 以下とし、そして、表面粗さを $1\mu\text{mRa}$ 以下に仕上げることで実験精度の向上を図った。形彫り放電加工機にソディック製AQ-35LRを用いた。高電圧重畳を使用しない場合(重畳なし)は、放電加工機電源で設定の 90V が開放電圧として極間に印加される。高電圧重畳の場合は、内部重畳、外部重畳ともに 280V が印加される。なお、内部重畳の放電電流は外部重畳よりも 0.5A 大きい。これは、加工機の加工電源の回路上、重畳電圧を印加すると加工電流が最低で 0.5A 付加されるためである。この影響に関しては後述する。

Fig.6 Influence of servo voltage on frontal gap distance

Table 1 Machining conditions for comparison between inner and outer superimposed

	No superimposed	Inner superimposed	Outer superimposed
Open voltage (V)	90	280	280
Discharge current (A)	3	3.5	3
On time (μs)	5		
Off time (μs)	10		
Servo voltage (V)	20, 40, 60		
Polarity	Tool electrode minus		
Tool electrode	Cylindrical copper φ8		
Work piece	S45C(Ra1μm) 50×19×6		
Dielectric liquid	VITOL 2		

4. 実験結果

4・1 高電圧重畳の効果と加工電圧検出方法の違い

本実験はサーボ電圧 40V で行い、重畳なし、および加工電圧の検出方法が異なる内部重畳と外部重畳の加工開始から 600 秒までの間の極間距離と総放電頻度、および異常放電率の推移を比較した。

4・1・1 極間距離の比較

加工開始から5秒までは主軸の極間制御の運動が不安定で、特に内部重畳の極間距離の測定値がばらついた。これは、前述したように極間の平均加工電圧の変動が著しいことが原因であると思われる。図7は加工開始から5秒後からの極間距離の推移を比較したものである。図7から、どの加工においても5秒後の極間距離は4μm程度しかなく、加工開始時の極間距離はそれよりも狭いことが推定できる。重畳なしは加工開始から600秒まで極間距離が大きく変化することはなく、最終的に6μm程度で加工が継続するものと考えられる。

次に、内部重畳と外部重畳の結果に注目する。加工開始から10秒後の極間距離は、内部重畳は約5μmなのに対して外部重畳は3倍の15μm以上にまで拡大しており、加工電圧の検出方法の違いが極間距離に及ぼす影響が大きいことが分かった。また、この結果から外部重畳の方が内部重畳よりも食いつきが良好なことが予想できる。

4・1・2 放電の安定性の比較

異常放電率の推移の比較から行う。図8に異常放電率の推移を示す。まず、重畳なしの結果に注目する。図8から放電開始から4秒までの間では異常放電率が90%以上に達し、また、7秒後付近で異常放電率が28%から90%以上と激しく増減するなど、食いつきが悪い状態であることが分かる。そして、加工開始から30秒以降で異常放電率は漸く緩やかに低下する傾向を示す。

次に高電圧重畳の結果に注目する。内部重畳、外部重畳ともに加工開始から1秒の時点では、両者ともに異常放電率は22%程度である。異常放電率が同じという意味については、後述の総放電頻度の結果と併せて考える。内部重畳の異常放電率がほぼ0%になるのは加工開始から100秒以上を要するが、外部重畳では加工開始から速やかに減少し6秒以降でほぼ0%になっていることが分かる。

ここで、図7と図8から極間距離が異常放電率に及ぼす影響について考察する。異常放電率が0%になるのは、内部重畳は加工開始後100秒以降、外部重畳は6秒以降である。これらの時間の極間距離を図7から求めると、内部重畳は約16μm、外部重畳は約14μmであることが分かる。よって、本実験条件で異常放電率をほぼ0%にするには、極間距離が15μm程度は必要ことが明らかとなった。

図9に総放電頻度の推移を示す。これから重畳なしの総放電頻度は、全加工時間に渡って高電圧重畳を使用した場合の1/10～1/20以下であることが分かる。そして、加工開始から30秒以上経過して総放電頻度が1000回/s程度で

落ち着き、その後、緩やかに増加する。よって、高電圧重畳は総放電頻度の増加に効果があることが分かった。

次に高電圧重畳の結果に注目する。加工開始から1秒後の時点では、内部重畳、外部重畳とも総放電頻度に差はない。また、前出の図8で示した異常放電率が内部重畳と外部重畳ともに同じことから、加工開始から1秒までは極間距離と極間状況は両者でほぼ同じで、極間距離は $4\mu\text{m}$ 未満以下しかなかったと考えられる。両者の違いは加工開始から2秒以降で生じている。外部重畳では急激に総放電頻度が増加し6秒後には最終的に落ち着く20000回/sに達するが、内部重畳は最終総放電頻度に達するには加工開始から100秒以上かかっていることが分かる。

ここで、加工開始から5秒までの極間距離の推移について図8と図9から考察する。図8の内部重畳の異常放電率の減少の割合が少ないことから、高電圧重畳にも関わらず極間距離はほとんど広がっていないと思われる。図7の内部重畳の極間距離の結果を見ると、極間距離は加工開始後5秒後から10秒までは変化しておらず、極間距離が広がっていないことを裏付けている。これは2章でも述べたが、内部重畳では加工開始直後の平均加工電圧の変動が著しいため主軸の極間制御の運動が激しく、食いつきが悪い状態が続いたものだと考えられる。一方、外部重畳は、2秒後以降で異常放電率が急速に減少していることと、図7の外部重畳の極間距離が加工開始から5秒以降で急激に拡大していることから、加工開始から2秒の段階で極間距離は広がり始めていることが推定できる。外部重畳は内部重畳よりも平均加工電圧の変動が小さいため、主軸の極間制御の運動が小さく緩やかになる。この影響で加工開始直後から総放電頻度が速やかに増加し、極間の加工屑濃度が増すことが考えられる。その結果、極間

Fig.7 Transition of frontal gap distance

Fig.8 Transition of ratio of abnormal discharge frequency

Fig.9 Transition of general discharge frequency

Fig.10 Influence of servo voltage on frontal gap distance

Fig.11 Influence of servo voltage on transition of ratio of abnormal discharge frequency

Fig.12 Influence of servo voltage on transition of general discharge frequency

距離が広がり異常放電頻度も減少したものと考えられる。図7, 8, 9の結果は、これらの事を裏付けており、内部重畳よりも外部重畳の方が食いつきが良好であることが明らかとなった。

ところで、3・4節で述べたように内部重畳の放電電流値は外部重畳よりも0.5A大きい。放電電流の大きい方が放電1回当たりの加工量が大きく、加工屑が多く発生するため極間の加工屑が増えやすい。このため、加工開始直後から短時間で極間の加工屑濃度が上がるため極間距離が広がり食いつきが改善することが予想される。今回の0.5Aの差は3Aに対して約17%と比較的大きく、内部重畳の方が食いつきに有利な条件であったと思われる。それに関わらず、外部重畳の方が良好な食いつきを示したのは、何度も述べているように、加工開始時における外部重畳の平均加工電圧の変動が小さいため、主軸の極間の制御運動が小さく緩やかになるからだと考えられる。

4・2 サーボ電圧の影響

4・1節で外部重畳の方が内部重畳よりも食いつきが良好なことが分かった。しかし、今回のような放電電流が3A程度の小さな放電加工条件では、狭い極間距離（ $20\mu\text{m}$ 以下）での加工が求められている。加工中の平均的な極間距離は設定するサーボ電圧によって定まり、設定したサーボ電圧によって図8と図9の傾向が変わることが考えられる。そこで、サーボ電圧を20V, 40V, 60Vの3種類について内部重畳と外部重畳の極間距離、そして、異常放電率と総放電頻度の比較を行った。なお、極間距離は放電が十分に安定した加工開始から600秒後に測定した。

4・2・1 極間距離の影響

図10に内部重畳と外部重畳とでサーボ電圧を変化させて極間距離を比較した結果を示す。これから、サーボ電圧が大きくなると重畳方法に関わらず極間距離が拡大し、また、内部重畳よりも外部重畳が広いことが分かる。前述したように、 $20\mu\text{m}$ 以下の極間距離での加工が加工現場から求められている。図10の結果から、極間距離が広がる外部重畳であっても、サーボ電圧を30V以下に設定して加工を行えば加工現場の要望に応えられるものと考えられる。

4・2・2 放電の安定性の比較

図11に異常放電率の推移を示す。図中ではサーボ電圧をSVと表記している(図12も同様)。図11から内部重畳では、どのサーボ電圧でも異常放電率がほぼ0%になるのは加工開始から100秒以上経過してからなのに対して、外部重畳では6秒程度でほぼ0%になっていることが分かる。

図12は総放電頻度の推移を示したものである。これから、どのサーボ電圧でも内部重畳は加工開始後100秒以後でなければ総放電頻度が最終的に安定する総放電頻度にならないが、外部重畳では加工開始後6秒程度で20000回/sを超え、10秒後には最終的に安定した総放電頻度に達する。以上のことから、極間距離をできるだけ狭くするために低いサーボ電圧で加工を行っても、外部重畳を用いて加工を行えば食いつきが改善されることが分かった。

5. まとめ

高重畳電圧の効果とその印加方法の違い、すなわち、加工電圧の検出方法の違いの影響について、加工開始からの総放電頻度と異常放電率、そして、極間距離の推移の比較を行い、食いつきに及ぼす影響を調べた。さらに、サーボ電圧の影響についても検討を行った。本実験条件で得られた結果を以下に示す。

- 1) 極間距離の推移は、重畳なし、内部重畳、外部重畳ともに加工開始から5秒後では4 μ m程度であるが、加工開始後10秒の時点で、内部重畳の約5 μ mに対し、外部重畳では3倍の15 μ m以上に広がる。一方、重畳電圧を印加しない場合は、放電頻度が安定した加工開始から600秒経過した時点でも6 μ m程度しかない。
- 2) 異常放電率の比較では、重畳なしの場合、加工開始直後は90%以上にも達する。それに対して、内部重畳と外部重畳は22%程度でほぼ同じである。内部重畳は加工開始後100秒以上経過しないと異常放電率がほぼ0%にならないが、外部重畳では加工開始から急速に減少し6秒程度で0%になる。
- 3) 異常放電率をほぼ0%にするには、極間距離が15 μ m程度以上は必要である。
- 4) 高電圧重畳を使用しない場合の総放電頻度は、重畳電圧を印加した場合の1/10～1/20以下しかない。
- 5) 内部重畳と外部重畳の加工開始直後の総放電頻度は2000回/s程度でほぼ同じであるが、両重畳方法ともに総放電頻度は最終的に20000回/s程度で安定する。しかし、最終的な総放電頻度に達するには、内部重畳は加工開始から100秒以上かかるが、外部重畳では6秒程度しかかからない。
- 6) サーボ電圧を変化させても内部重畳と外部重畳の総放電頻度と異常放電率の推移の傾向は変わらない。
- 7) 極間距離は、内部重畳、外部重畳ともにサーボ電圧が高い方が広く、内部重畳よりも外部重畳の方が広い。
- 8) 外部重畳でも、サーボ電圧を30V以下にすれば、20 μ m以下の極間距離で加工が行える。

以上のことから、高電圧重畳は印加方法によらず総放電頻度の増加に有効であり、また、本研究が提案する外部重畳を用いることで、設定するサーボ電圧が低い極間距離が狭い加工条件であっても、食いつきの改善が可能であることが分かった。

文 献

- (1) 崔小新, 増沢隆久, “仕上げ放電加工の新しいフラッシング法”, 生産研究, Vol.43, No.11 (1991), pp.22-30.
- (2) 崔小新, 増沢隆久, 藤野正俊, “放電加工のフラッシングに関する研究 (第1報)”, 電気加工学会誌, Vol.26, No.51(1992), pp.1-12.
- (3) Akihiro, G., Takashi, Y., Takuji, M., and Kazuhiko, K., “Study on Deterioration of Machining Performance by EDMed Sludge and its Prevention”, *International Journal of Electrical Machining*, No.3(1998), pp.1-6.
- (4) 中島智広, 放電加工機の制御装置, 日本国特開 10-43946 (1998).
- (5) 増井清徳, 谷村毅, “複合電源による放電加工”, 昭和 51 年度精機学会講演前刷 (1981), pp.381-382.
- (6) 増井清徳, 谷村毅, “直流高電圧重畳電源による放電加工”, 電気加工学会誌, Vol.10, No.19(1977), pp.12-23.
- (7) 増沢隆久, 佐田登志夫, 木下夏夫, “放電微細加工における加工屑の役割”, 精密機械, Vol.37, No.9(1971), pp.52-58.
- (8) Haruka, T., and Masanori, K., “Relation between Debris Concentration and Discharge Gap Width in EDM Process”, *International Journal of Electrical Machining*, No.12(2007), pp.17-22.
- (9) 大森康博, 土屋一郎, 後藤英和, 宮崎眞, “放電加工における異常放電に関する研究”, 電気加工学会全国大会講演論文集(2000), pp.7-8.
- (10) 後藤達志, 今井祥人, 赤松浩二, 後藤昭弘, 尾崎好雄, 小林和彦, “放電電圧波形に基づく加工状態検出”, 電気加工学会誌, Vol.29, No.62(1996), pp.27-39.