粉末混入加工液による放電仕上加工

毛利尚武* 齋藤長男* 成宮久喜** 河津秀俊***
尾崎好雄*** 小林和彦*** 恒川好樹*

Finish Machining by EDM Using Powder Suspended Working Fluid

Naotake MOHRI, Nagao SAITO, Hisayoshi NARUMIYA, Hidetoshi KAWATSU
Yoshio OZAKI, Kazuhiko KOBAYASHI and Yoshiki TSUNEKAWA

Abstract

In this paper, some results on surface machining by EDM are treated in which several kinds of powder are suspended in working fluid.

The attainment of fine surface on large area with electrically conductive electrode such as copper is difficult because of its gap electrostatic capacity between electrode and work surface. Silicon electrode method was derived to break through these difficulties. But it is difficult to shape the raw material as a complex formed electrode in this silicon electrode method.

Several kinds of powder including silicon powder were suspended to dielectric fluid for use of work oil. We have got very fine and uniform surface of $1\sim 2\ \mu\text{m}$ R_{max} on the work of 100 cm^2 with copper or graphite electrode.

The dispersion of discharge current was confirmed widely throughout the whole area of electrode owing to powder suspension.

EDM by conductive electrode with powders in working oil is very practical in industry.

* 豊田工業大学
** 光洋精工
*** 三菱電機

1. はじめに

放電加工による細かい表面の達成は、加工面積が大きいほど困難となる。これは電極とワーク表面の間に形成される静電容量が大きくなるためである。この問題を解決するために電極にシリコン(Si)のような抵抗材料を用いた仕上げ加工を行なって効果のあることが知られている¹⁾。極間の静電容量は実質的に分割され、その結果、加工面は良好に仕上がる。耐腐食性や耐摩耗性も向上する²⁾。

しかし、電極材料の価格を別にしても、一般にSiのような半導体材料は非常に硬くて脆いために、電極を三次元に成形することが困難である。

一方、Si電極を用いた場合、電極の消耗が大きく、体積消耗率にして数百%を越える場合がある。極間には多量のSi粉末が存在していると考えられる。このことから、銅(Cu)やグラファイト(Gr)などを電極として使用し、加工液にSi粉末を混入して、仕上げ加工を行なう方法を着想した。

図1は、銅電極(40 cm²)を用いた荒加工から仕上げ加工に至る放電加工プロセスの中で、加工液中にシリコン粉末を混入した場合の面粗さの推移を示している³⁾。加工の各段階における電気条件を表1に示す。4または5の段階での面粗さは、粉末を混入しない通常の加工油(以後通常加工液と呼ぶ)でのこの面積における限界値を示している。6番以降でシリコン粉末を加工液に混入してある。面粗度は明らかに上記限界値以下に下がり、最終的に3 $\mu\text{m } R_{\text{max}}$ 程度にまで至っている。

高速荒加工中にGr粉末や金属粉末を加工液に混入せしめて加工の安定化と高速化とを図った研究が、倉藤らによってなされているが⁴⁾、当時の放電電源の開発レベルから考えると、仕上げ放電加工への適用の観念は無かったと思われる。本研究では大面積仕上げ放電加工において、主として極間距離の拡大による加工の安定化と放電分散をねらったものであり、前述のごとく、別の発想の経緯をたどっている。

本論文では、以上の経緯を踏まえて、粉末混入加工液を用いた仕上げ放電加工における加工現象の観察、および実用上の効果についての検討結果を述べる^{5)~7)}。

放電電流および高速ビデオによる極間の観察などにより、粉末混入加工液による仕上げ加工を行う場合、放電は加工面全域にわたって均一に分散することが確認された。またこの場合、極間距離は通常加工液を使用した場合に比べて数倍に拡がり、加工は極めて安定している事が確かめられた。さらに、Si, Al, Grなどの適当な粉末を加工液に混入することにより、大きな加工面積においても良好な仕上げ面が得られ、仕上げ加工時間も大幅に短縮された。

Fig. 1 Breakthrough the limit of roughness by means of powder suspension.

図1 粉末混入による限界粗さの打破

粉末混入加工液による仕上げ放電加工は通常の導体電極を用いて実施することが可能なことから、工業的に極めて有望である。

Table 1 Electrical conditions in the process of EDM.

表1 放電加工プロセスにおける電気条件

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
electrode polarity	+	+	-	-	-	-	-	-	-
I_p : peak current (A)	10	5	5	3	3	3	3	1	1
τ_p : on time (μ s)	16	8	8	4	2	4	2	2	2
τ_r : off time (μ s)	16	8	8	4	2	4	2	2	2
powder suspension						○	○	○	○
planetary motion									○

2. 仕上げ加工領域における放電分散現象

通常加工液を用いて、導体電極による仕上げ加工を行なうと、一般に加工表面はムラと称する不均一な加工面になり易い。これは、放電が極間のある限られた領域のみで分散し、その領域が電極全面を順次移動することにより加工が進むためと思われる。このような限られた領域での分散を放電圏の局在と称することとする。均一で良好な仕上げ面を達成するには、放電が加工面全域で均一に分散することが必要である。この節では粉末混入による放電の分散性について述べる。

2.1 電流波形による放電分散の観察

放電の分散現象を観察するため、2分割電極における放電電流を観測した。図2に示すように、電極をそれぞれ12.5 cm²を有する2つの電極ユニットに分割し、各々にカレントトランス(C. T.)を取り付けて放電電流を測定した。

図3は2つのC. T. から同時に出力された放電パルス電流の波形である。粉末を混入しない通常加工液による放電加工では、図3(a)に示すように、ほとんどいずれか一方の電極のみで放電が生じている。しかし、加工液にAl粉末を混入すれば、図3(b)に示すように放電電流は2つの電極で等しく観察される。

つぎに、図4は上記の放電電流を平均化して約20

Fig. 2 Measurement of discharge dispersion.

図2 分割電極による放電分散の測定

Fig. 3 Pulse current in each divided electrode.

図3 分割電極におけるパルス電流

Fig. 4 Averaged current in divided electrode.

図4 分割電極における平均電流

秒間測定した結果を示す。電極の定期的な引き上げ動作に応じて、1秒毎に電流の平均値が0Aを示す。通常加工液による仕上げ加工では放電領域は2つの電極のうちの1つに限られ、この入れ替えが数分毎に繰り返して生じる。図4(a)はちょうどこの入れ替えの生じる時点で測定したものである。

一方、Al粉末混入の場合には、図4(b)に見られるように、2つの電極で放電がほとんど等しく継続していることがわかる。この結果、粉末混入により放電が電極の全領域で広く分散していることがうかがわれる。

ここで観察された現象はSi粉末混入加工液においても、およそ同様の傾向を示した。

2.2 高速ビデオカメラによる放電分散の観察

前節において、極間に粉末を混入すれば、放電電流が分散することが認められた。本節においては、極間の放電現象を超高感度高速ビデオカメラによって観察し、画像解析を用いて放電の分散性を検討する。

図5に示すような、側面がガラスでできた加工槽を用いて極間の放電現象を観察した。

使用高速度カメラ：コダック製 EKTAPRO IMG6000，

Video camera : Kodak	Electrode : Cu 100×2mm ²
EKTAPRO IMG6000	Work piece : SKH51
Recording speed : 2000picture/sec	Working condition : (－) Polarity of electrode
Exposuretime : 0.5ms	$I_p = 1A$ $\tau_p = \tau_r = 2\mu s$
Spatial resolution : 0.25mm/pikcell	Powder : Si 3g/l

Fig. 5 Obsevation of gap in EDM by a high speed video camera.

図5 高速ビデオカメラによる極間の観察

撮影条件：2000 駒/秒，露出時間 500 μs ，

空間分解能：0.25 mm/画素相当，

放電条件：銅電極（面積 2 cm² = 100 mm × 2 mm）

$I_p = 1 A$ ，電極極性（－）

$\tau_p = \tau_r = 2 \mu s$ ，Si 粉末（3 g/l）

図6は，1画面（0.5 ms）についての（a）ビデオ信号と（b）輝度分布との関係を模式的に示している。輝度分布における横軸は位置（mm）を表し，縦軸は各位置における輝度を表す。

画像データの処理に関して以下の仮定をおく。

1. 測定された輝度はその点の近傍における露出時間内の放電発生回数に比例する。
2. 受光量とビデオ信号は比例関係にあるものとする。

また輝度は，ビデオ信号を256階調に分割して扱う。データの安定性を確保するために，画面上の当該点近傍の3画素の平均値をその代表値とした。

放電局在の具体例を以下に示す。図7は，連続した3画面（1.5 ms）における輝度分布の時間的推移の1例を示す。図中でピークを持つ幅約2 mmの各放電領域は，この間の電流，電圧波形の観察から持続アーク放電とは認め難い。すなわち光量分布の各ピークは，この間のパルス放電において絶縁回復

Fig. 6 Relation between video signal and brilliance distribution.

図6 ビデオ信号と輝度分布

Fig. 7 Time dependance of brilliance distribution
図7 輝度分布の時間推移

が正常に行われている連続的正常放電の集積と考えられる。すなわち何らかの極間状態の不均一により、正常放電であっても放電箇所は局在する傾向を有する。図に現れる各ピークはこの局在放電にもとづく放電圏と考える。

図7 (a)通常加工液においては、放電圏数は50画面の平均値として1画面当たり2.2個である。これに対し (b)粉末混入加工液においては、放電圏数は3.5個/画面である。

図8は、図7に示す輝度分布を10, 50, 150画面(約5, 25, 75ms間)累積した結果を示す。(a)通常加工液、(b)粉末混入加工液いずれの場合

Fig.8 Cumulative distribution of brilliance.
図8 累積輝度分布

も、50画面分において放電圏がほぼ全域に分散しつつある様子が観察される。この画面はその累積時間の値から、通常目視で放電を観察した結果に近いと推測される。ただし本結果は超高感度高速ビデオカメラによる結果であって、適当なしきい値を仮定してそれより上の分布が、目視で放電を観察する結果により近いと思われる。さらに150画面まで累積数を増やしていけば、ほぼ均一に放電が分散することが観察される。輝度の合計値は、(b)粉末混入加工液の方が大きい。これは粉末混入加工液の方が、連続放電が安定に推移していて、有効放電回数が多いことを示している。4.2節に述べる仕上げ加工速

度の向上効果と符合した結果になっている。

以上は、もともと放電の分散性の容易な小さな加工面積 $2\text{ cm}^2 (= 2\text{ mm} \times 100\text{ mm})$ における観察結果である。面積 10 cm^2 の場合には、より相違が顕著であることが目視で認められた。

2.3 仕上げ加工面形成機構の考察

前節までに述べたように、仕上げ加工において加工液中に粉末を混入すれば放電が極間の全面にわたり等しく分散していることが観察された。本節では加工物表面の観察により、放電の分散に基づく加工表面の形成機構を考察する。

図9はコンデンサ放電における荒中加工条件での加工物表面の粗さプロファイルの例を示す。(電気条件: $C = 20\text{ }\mu\text{F}$, 印加

電圧: $V_d = 1000\text{ V}$) この粗さ曲線の観察から図10に示すような加工面生成モデルが考えられた。加工面は単発放電痕の大きさで決まり、面粗度 R_{max} は単発放電痕の深さ h_1 と盛り上がり高さ h_2 とにより次式となる⁸⁾。

$$R_{\text{max}} = 2 h_1 + h_2 \quad (1)$$

(1)式は、トランジスタ電源による放電加工の場合にも成立することが示されている⁹⁾。

仕上げ加工条件においても、上述の加工面形成機構が成り立つかどうかを調べる。実験には、実験機 M35KC4G70 (三菱電機), 連続放電用電極 50 mm 角の Cu, 被加工物 SKH51 (生材), 灯油系加工液, 粉末材質 Si (粒径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 混入濃度 20 g/l) を用いた。電極 (-), $I_p = 1\text{ A}$, $\tau_p = \tau_r = 2\text{ }\mu\text{s}$ の仕上げ加工条件で連続加工を行い、加工面の粗さ曲線を測定した。図11と図12はこうして求めた連続面と単発放電痕の粗さ曲線を示している。図11は通常加工液によるもの、図12はSi粉末混入加工液によるものである。

図11より、通常加工液による連続面の粗さ曲線は、直径にして単発放電痕の2~5倍、深さは4~8倍の深い谷の連なりとして観察され、式(1)は成立しない。このような深い谷が形成されるのは、放電の局在する放電圏が順次移動した結果と思われる。すなわち仕上げ加工においては、単発放電痕の連なりの結果としてよりも、むしろ放電圏の不均一な連なりから決定されているものと考えられる。

一方、図12に示すように、粉末混入加工液による連続面の粗さ曲線は、直径にして単発放電痕の5

Fig. 9 Roughness profile of the work surface by condenser discharge in middle machining condition.

図9 荒中加工による粗さプロファイル

Fig. 10 A model of surface generation in EDM.

図10 放電加工における加工面生成モデル

～10倍、深さは2～4倍のなだらかなうねりが連なって観察される。荒中加工で成り立つ式(1)に近づいている。すなわち、加工液に粉末を混入することによって放電が分散し、なだらかなうねりになっているものと考えられる。

荒中加工面の形成機構は、通常加工液においても単発放電痕の連なりによるものと考えられている。これに対して通常加工液による仕上げ加工においては、放電が局在する傾向をもち(放電圏)、このため面が荒れると考えられる。粉末混入加工液による仕上げ加工においては、放電はより分散し、加工面は単発放電痕の連なりによって形成される面に近づく。

Fig. 11 Roughness profile of the finished work surface by conventional working oil.

図 11 通常加工液による仕上げ粗さプロファイル

Fig. 12 Roughness profile of the finished work surface by powder suspended working oil.

図 12 粉末混入加工液による仕上げ粗さプロファイル

3. 極間距離の増大と主軸動作の安定化

一般に仕上げ放電加工においては、極間距離が数 μm 程度にまで小さくなる。その結果極間の静電容量は大きくなり、大きな放電電流が流れて面が荒れると考えている。また、加工生成物も容易には排出され難い。しかも主軸のジャンプ動作時には短間隙中の加工液の流れの抵抗により、サーボ剛性の高い加工機ですら主軸動作が不安定になりがちである。本章では、極間に存在する加工液中の粉末により、以上の問題点が概ね解決されることを述べる。

3.1 極間距離の測定

粉末混入による極間距離への影響を調べるために、一定サーボ電圧のもとで極間距離の測定を行なった。極間距離は粉末や加工スラッジが無い状態で電極が加工物と電気的に接触する位置から、安定加工状態の位置までの変位として定義し、主軸に取り付けたダイヤルゲージを用いて測定を行なった。

図 13 は灯油系加工液に混入する粉末の濃度を变化させたときの極間距離の測定値を示したものである(銅電極を使用、電極面積: 3 cm^2 、粉末直径: $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下)。極間距離は電気条件に左右される。特に通常加工液での仕上げ条件では、極間距離は著しく小さくなり、数 μm 程度となっている。加工液

に粉末を混入すると、極間距離は増大する。増大率は粉末の種類によって異なるが、混入濃度の増大につれて大きくなり、およそ 20 g/l 程度で一定値に漸近する。Al 粉末を 30 g/l 混入することにより、極間距離は粉末を混入しない場合に比べ約 10 倍にも広がっている。

3.2 主軸動作の観察

粉末混入加工液を用いることにより、極間距離の増大および放電の分散性向上などの効果をもたらすことが認められた。この節では、放電加工機の稼動中における、主軸動作の安定性を論ずる。

図 14 に示すような測定系によって、電極の変位、平均極間電圧および平均放電電流の 3 つの状態値を同時測定記録した。

図 15 は市販の放電加工機を用いた場合の、上記 3 つの状態値の時間変化を示す。

図 15 (a) は通常加工液による $I_p = 5 \text{ A}$ の中仕上げ加工での状態値の推移を表す。約 $25 \mu\text{m}$ の極間距離を保って主軸動作は安定している。平均電圧、平均電流は共に一定している、加工が順調に進行している。しかし、図 15 (b) に示すように、 $I_p = 1 \text{ A}$ の微小電気条件のもとでは、極間距離が小さくなり、それとともに主軸動作が不安定になる。平均電圧および平均電流も変動が激しくなり、極間は短

Fig. 13 Effect of powder concentration on gap distance.

図 13 極間距離に対する粉末混入濃度の影響

Fig. 14 Monitoring system of the state of EDM.

図 14 放電状態モニタリングシステム

Fig. 15 Monitored EDM parameters.

図 15 粉末混入による主軸動作の安定化

絡と解放の繰り返しが頻繁に生じている様子がうかがえる。一方、図 15(c) はこの状態において加工液に Al 粉末を混入したものである。粉末混入により、加工の安定性が著しく向上することがわかる。Al 粉末を使用した場合には 2g/l 以上の濃度で粉末を混入すれば仕上げ条件でも安定な加工が可能となった。また、極間距離も増大し、約 $20\mu\text{m}$ を示している。

以上の結果は、Si 粉末を混入した加工液による仕上げ放電加工においても同様であった。

以上の結果から、粉末混入加工液による仕上げ放電加工では、放電分散性の向上、極間距離の増大、仕上げ放電加工の安定化などの効果が認められる。

4. 粉末混入加工液による放電加工の効果

4.1 仕上げ面粗さ

図 16 に各種の粉末を使用し仕上げ加工を実施した、加工表面の顕微鏡写真と、表面粗さのプロファイルを示す。粉末を混入せず加工液のみによる通常仕上げ加工を実施した場合、加工表面は図 16(a) に示すように、しばしば不均一になる。一方、図 16(b)～(d) は加工液に粉末を混入したものを示したものであるが、加工表面の不均一さがなくなり仕上げ粗さが向上していることがわかる。

次に、粉末混入加工液を使用した比較的大きな面積での仕上げ放電加工結果の例をいくつか示す。図 17 は Al 粉末を用いて仕上げ加工した、銅電極による 25cm^2 の加工表面の写真である。加工面全領域にわたり均一な鏡面となり、 $0.8\mu\text{m}R_{\text{max}}$ の仕上げ面粗さが得られた。図 18 は、ワイヤ放電加工で作成した銅電極を用いた 3 次元キャビティ（投影面積： 49cm^2 ）の加工例を示す。底面および側面と

Fig. 16 EDMed surface and roughness.

図 16 加工物表面と面粗さの比較

Working condition	
Electrode: Cu,	Work: SKH-51
$I_p = -2A$, $\tau_p = 4\mu s$, $\tau_r = 4\mu s$	
Working area	: $25cm^2$
Suspended powder	: Al (2g/l)
Finished surface roughness	: $0.8\mu m R_{max}$

Fig. 17 Work surface EDMed by copper electrode with Al powder suspended fluid.

図 17 アルミニウム粉末混入加工液による加工結果

も極めて均一な光沢面に仕上がった (Si 粉末使用, 面粗度: $1.2\mu m R_{max}$)。図 19 は面積 $100cm^2$ のグラファイト電極 (イビデン製 ED-4) を用いた, Si 粉末混入加工液による仕上げ加工結果である (面粗度: $1.2\mu m R_{max}$)。上記 3 例の設定加工条件はいずれも $I_p = 1A$, $\tau_p = \tau_r = 2\mu s$, 電極極性: (-) である。ワーク材質: SKH51 (Fig. 17, Fig. 18), SKD61 (Fig. 19)。

4.2 仕上げ加工時間

一般の放電加工では, 仕上げ加工時間は荒加工で要する時間よりも, 極端に長くなる。仕上げ加工時間に対する粉末混入の影響を調べるために, 実加工

中に数度加工を停止させて, 加工機上で表面粗さの測定を行なった。表面粗さの検出においては, 差動トランス形の粗度検出器を加工機のコラムに取り付け, ワークを搭載したテーブルを NC 駆動させることにより実施した。図 20 に仕上げ加工時間に対する表面粗さの推移を示す。表面粗さはほぼ指数関数

Fig. 18 3-D cavity EDMed by copper electrode with Si powder suspended fluid.

図 18 シリコン粉末混入加工液による 3 次元表面仕上げ加工結果 ($49cm^2$ 銅電極)

Fig. 19 Work surface EDMed by graphite electrode with Si powder suspended fluid.

図 19 シリコン粉末混入加工液による加工結果 ($100cm^2$ グラファイト電極)

Fig. 20 Effect of finishing time on surface roughness.

図 20 粉末混入加工液による仕上げ加工時間の改善

Fig. 21 Work surface dipped in aqua regia after EDM.

図 21 耐食性試験結果

Fig. 22 SEM images of finished surface.

図 22 加工物 (SKH-51) 表面のSEM像

的に減少している。Al 粉末の混入により、仕上げ加工時間が著しく短縮されていることがわかる。 $20 \mu m R_{max}$ から $5 \mu m R_{max}$ に達する時間で比較すると十数分の1以下を示す。

4.3 耐食性

加工物表面の耐食性は電極材料や加工液によって影響をうける。粉末混入加工液による場合について実験を行い、仕上げ表面の耐食性について調べた。加工表面の耐腐食性を簡便に評価するために、王水による腐食試験を実施した。Si, Al, Grなどの粉末混入仕上げ放電加工を行った後、王水に30分浸した試料表面の写真を図21に示す。図21(a)は、通常仕上げ加工による試験結果である。加工表面はひどく腐食され、写真では光の乱反射により灰色に写っている。一方、加工液に粉末を混入すると、加工物表面の耐食性は大幅に向上し、図21(b), (c), (d)に示すように、写真では光の正反射により黒く観察される。この試験から、粉末混入放電加工により鏡面が得られるのであれば、耐食性も十分

に持ち備えていることが確認された。

図 22 に走査形電子顕微鏡 (SEM) による放電痕の写真を示す。放電痕の大きさは加工液に粉末を混入することにより小さくなり、仕上げ面粗さ向上に対する効果がうかがわれる。

また、図 22 (a) に示すように、粉末を混入しない場合の放電加工では表面に数多くのマイクロクラックが認められる。粉末混入による加工結果では、仕上げ表面にほとんどマイクロクラックが存在しない。これらのことから粉末混入加工液によりマイクロクラックの存在しない表面層を形成できればクラック部からの腐食の進行がくい止められ、全体として耐食性が向上しているものと推察される。表層の材料組成もしくは組織などに関する効果は別途検討されねばならない。いくつかの例は文献 2) に見られる。

5. 結 論

Cu 電極や Gr 電極による仕上げ放電加工において、数種類の粉末を加工液に混入した一連の加工実験により次の結論が得られた。

- 1) 粉末混入により、仕上げ放電条件においても電極面の全面にわたり放電が十分に分散する。
- 2) 粉末混入により、放電の極間距離を 10 倍以上にすることが可能である。
- 3) 微小電気条件による加工においても、主軸動作が安定する。
- 4) 表面粗度は粉末混入加工液の使用により大幅に改善される。粉末の混入により、 25 cm^2 の加工面積に対し、 $0.8\text{ }\mu\text{m } R_{\text{max}}$ 、 100 cm^2 に対しては $1.2\text{ }\mu\text{m } R_{\text{max}}$ の仕上げ粗さが得られた。

図 23 に仕上げ加工面粗さに対する加工面積の影響をグラフとして示す。Si 粉末混入加工液では、数百 cm^2 の加工面積であっても、仕上げ面粗さは数 $\mu\text{m } R_{\text{max}}$ 程度に留まる。

- 5) 粉末の混入により、仕上げ加工時間は通常加工液による加工時間と比べて数分の 1 以下に大幅に短縮される。
- 6) 加工液に粉末を混入することにより、耐食性が向上する。

Fig. 23 Change of roughness with working area.
図 23 加工面積による仕上げ面粗さの変化

謝 辞

本研究においては、豊田工業大学学生、佐野利一氏（現矢崎部品）、および三菱電機(株)の田中俊明氏、弥富 剛氏、真柄卓司氏、坂西正人氏に多大なご協力を頂きました。記して深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 毛利, 齋藤, 大竹, 高鷲, 小林: 大面積放電仕上げ加工, 精密工学会誌, 53巻1号 pp 124-130, 1987
- 2) 鈴木, 毛利, 齋藤: 放電加工による金属表面の改質, 精密工学会誌, 53巻2号, pp 51-57, 1987
- 3) 佐野, 毛利, 齋藤, 大竹: 放電加工による鏡面仕上げ(第4報), 昭和63年度精密工学会春季大会, pp 565-566, 1988
- 4) 倉藤, 須田: 高速放電加工の研究, 電気加工学会誌, 第3巻4号, pp 136-147, 1960
- 5) 成宮, 毛利, 齋藤, 大竹, 恒川: 粉末混入加工液による放電加工, 1989年度精密工学会春季大会, pp 1103-1104
- 6) 河津, 毛利, 齋藤, 小林, 石川, 成宮: 粉末混入放電加工における加工現象, 1989年度精密工学会秋季大会, pp 501-502
- 7) 河津, 齋藤, 毛利, 小林, 尾崎: 粉末混入放電加工における加工現象(第2報: 放電分散の観察), 1990年度精密工学会春季大会, pp 169-170
- 8) 齋藤: 放電加工のメカニズム, 精機学会誌, Vol. 29, No. 10, pp 691-700, 1963
- 9) 向山, 緒方, 渡辺: 放電加工における加工面精度の研究(第3報), 電気加工学会誌, 12, 23, pp 34-49, 1983

(1990. 10. 8 受付)