大面積仕上放電加工の研究*

毛利尚武** 齋藤長男** 大竹廣定*** 高鷲民生† 小林和彦†

Finishing on the Large Area of Work Surface by EDM

Naotake MOHRI, Nagao SAITO, Hirosada OHTAKE,
Tamio TAKAWASHI and Kazuhiko KOBAYASHI

This paper describes the new methods of fine finishing by electro discharge machining (EDM). In order to realize mirror-like surface or glossy surface to the work by EDM, it is necessary to control the pulse current to be small appropriately. With the conventional technology in this field, the attainment of pulse control is very difficult, especially in the case of machining to the work surface which has large scale of area, because of gap storage capacitance between the electrode and the work surface, even if not so much power supply. The present study is an attempt to break through the difficulty pointed above. Multi-divided electrode methods are newly tried. The roughness of $0.5 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ has been achieved to the work with the area of 100 cm^2 by 100 divided electrode. And the glossy surface with $2 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ has also been achieved to the 275 cm^2 work by resistor (silicon) electrode method which can be considered as an extension of multi-divided electrode.

Key words: EDM, mirror-like surface, finishing, multi-divided electrode, resistor electrode, silicon electrode

1. 緒 言

放電加工によって広い面積の表面を精細に仕上げることは、プラスチック金型などを含む各種金型の製作において、省力化や短納期化等をめぐり工業的に極めて重要である。

しかし、電極面積が広がると、微細な仕上面を得るような電氣的加工条件のもとに加工を行っても、加工面は荒れる。

それ故、放電加工後の手工具等による磨き作業が必要となる。その作業の困難さと、型製作における経済性とを合わせ考えると、上述の放電仕上加工における欠点を克服することがぜひとも必要である。

本研究は、広い面積の鏡面加工が、実用的に成り立つ加工速度のもとに実現することを目的としている。

それにはまず、大面積の鏡面化放電仕上加工の困難な原因を知る必要がある。

我々は電極とワーク間に生ずる静電容量（極間静電容量）に基づくものであることを推論した。

次に上記静電容量を実質的に小さくならしめるため、小面積の電極を多数絶縁して束ね一つの電極とする多分割電極法を出発点とし、究極的には電極材料として電氣的抵抗体であるシリコンを用いることにより、上記静電容量は自然分割され、極めて均一な仕上面が高速に実現されたことを発見し実証した。

2. 単一導体電極による微細放電加工の限界

大きな面積における放電加工では、放電電流 I_p や放電パルス幅 τ_p などを小さく設定して長時間の加工を行っても微細な加工面は得られず梨地または粗面となる。

筆者らの経験によれば、単一導体電極による加工面粗さの下限値 R_{max} (μm) は各電極面積 (cm^2) に対しておおむね式 (1) によって与えられる。

$$R_{\text{max}} \geq 0.3S \quad (1)$$

式 (1) の意味は、 1 cm^2 の電極面積では $1 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ が得られていたものでも、 10 cm^2 では $3 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ になるということである (図 14 参照、銅電極の場合面積増大と共に面粗さが荒くなる、 $R_{\text{max}} \geq 0.3S$)。

2.1 極間の静電容量に基づく加工面劣化の推定

仕上放電加工中の放電電流の平均値および電極と

* 原稿受付 昭和 61 年 1 月 20 日、昭和 58、59 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 58 年 3 月 28 日、昭和 59 年 3 月 25 日)、精機学会昭和 59 年度関西地方定期学術講演会 (昭和 59 年 7 月 24 日)、昭和 59、60 年度精機学会春・秋季大会学術講演会 (昭和 59 年 10 月 2 日、昭和 60 年 3 月 28 日、昭和 60 年 10 月 14 日) にて発表

** 正 会 員 豊田工業大学 (名古屋市天白区久方 2-12-1)

*** 豊田工業大学

† 正 会 員 三菱電機 (株) (名古屋市東区矢田南 5-1-14)

Fig. 1 Measurement of gap distance

Fig. 2 Pulse circuit of EDM

ワークとの極間距離とを实時間で計測した一例を図1に示す。加工設定条件はピーク電流 $I_p = 1 \text{ A}$ 、パルス幅 $\tau_p = 2 \text{ } \mu\text{s}$ 、デューティファクタ 50%、電極面積 9.6 cm^2 、電極負極性である。

加工液の循環を促すために電極に上下運動を付与している。電極下降の際のワークとの短絡開始点と、安定的放電継続に対応する電極位置との差をもって極間距離と定める。多数回の実測の結果、上記加工条件における極間距離の平均値は約 $6 \text{ } \mu\text{m}$ であり、極めて微小間隙であることが判明した。

このことから仕上放電加工の場合は、極間で構成される静電容量による放電のために、加工面が荒れる可能性を検討する必要を生ずる。そのために、構成される静電容量 C 、放電電流 i_p (電源における設定電流 I_p とは異なる) を推定することとする。

静電容量 C (μF)、電極面積 S (cm^2)、極間距離 g (cm)、真空誘電率 ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8.842 \times 10^{-8} \text{ } \mu\text{F}/\text{cm}$)、比誘電率 ϵ_s (油の場合 $\epsilon_s = 2.1$) とする¹⁾ と

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot S / g \quad (1)$$

$$S = 1 \text{ cm}^2 \text{ で } C = 0.31 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \text{ (310 pF)}$$

$$S = 10 \text{ cm}^2 \text{ で } C = 3.1 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \text{ (3 100 pF)}$$

Fig. 3 Wave form of gap voltage

この極間における等価的概念図を図2に示す。電極面積が大きくなれば静電容量が比例して大きくなる。

著者の一人は既に 1000 pF が極間に挿入された時に、加工面は鏡面から粗面に変化することを認めている²⁾。このことから、電極面積が 10 cm^2 以上になる場合には加工面が荒れていくものと考えられる。

静電容量に蓄電した電荷が放電する時の計算は次のようになる³⁾。

$$i_p \doteq (V - e_g) \cdot \sqrt{C/L} \quad (2)$$

$$t_p \doteq \pi \sqrt{LC} \quad (3)$$

これより

$$i_p \doteq (V - e_g) \cdot \pi \cdot C / t_p \quad (4)$$

但し、 t_p : 電流 i_p のパルス幅 (μs)、 e_g : アーク電圧 (約 25 V)。

t_p は、図3に示すメモリーシンクロスコープで観察される極間電圧振動波形から求めてみると、 $S = 1 \text{ cm}^2$ の場合で $t_p = 20 \text{ ns}$ となっている。これをもとに式(3)から L を求めると、 $L \doteq 0.13 \text{ } \mu\text{H}$ となり、コンデンサのリード線などを注意して通常最も小さくなくする場合⁵⁾⁶⁾に近い。

放電電圧 V は、電源の重量した高電圧 $250 \sim 300 \text{ V}$ (図3では $V = 275 \text{ V}$) としてよいから、これらより i_p を求めてみると、次のようになる。

$$S = 1 \text{ cm}^2, C = 0.31 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \text{ で } i_p = 11 \text{ A}$$

$$S = 10 \text{ cm}^2, C = 3.1 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \text{ で } i_p = 57 \text{ A}$$

一方、仕上面粗さは実験公式として知られている⁷⁾ ものを外挿して用いてみると、

$$R_{\max} \doteq 1.6 \cdot I_p^{0.43} \cdot \tau_p^{0.38} \quad (5)$$

$$S = 1 \text{ cm}^2, i_p = 11 \text{ A}, \tau_p = 20 \text{ ns} \text{ で } R_{\max} \doteq 1 \text{ } \mu\text{m}$$

$$S = 10 \text{ cm}^2, i_p = 57 \text{ A}, \tau_p = 63 \text{ ns} (L = 0.13 \text{ } \mu\text{H} \text{ より}$$

$$\text{式(3)により計算)で } R_{\max} = 3.2 \text{ } \mu\text{m}$$

となる。

2.2 電極面積増大に伴う鏡面化の困難さの確認

電極面積の増大に伴って加工粉の排除等が困難になりこのために面が荒れるとする考えもある。これを確

Fig. 4 Equipotential connection of two electrodes

認するために、図4(a)に示すような 9 cm^2 と 1 cm^2 の電極を電氣的に直接接続して、 1 cm^2 での鏡面化加工条件($I_p=1\text{ A}$, $\tau_p=2\text{ }\mu\text{s}$)のもとに加工を行った。加工粉の排除が主要因であるならば、双方の面積に対応して鏡面化の程度が異なるはずであるが、加工の結果はいずれの電極に対する加工面も、通常 9 cm^2 で得られる微光沢面となった。

さらに、図4(b)のように各電極を抵抗を介して接続すると加工面は著しく改善され鏡面となっている。

これらのことから、前節の結果をも合わせ考えると、放電微細加工の可否の要因は主として極間に形成される静電容量の大きさによるものと結論される。

3. 多分割電極法

前章で明らかにされたように、大きな面積の電極を用いた仕上放電加工においては、極間の静電容量の故に精細な仕上面を得ることは困難であった。この静電容量を小さくし仕上面の改善を図るには、電極面積、極間距離、加工液の誘電率などを調節する必要があるが、実用上実施可能な方式として、電極面積の分割化を図ることが適当である。

本章では、上記観点に立って、小面積の電極を電氣的に絶縁して束ねて一つの集合電極とする多分割電極法を検討する。

3.1 8分割電極による加工実験

実験は、まず図5に示すような8分割電極に対して行った。単位電極として 1 cm^2 の銅電極を用い、そのそれぞれを板厚 1 mm のベークライト板で絶縁して束ね、全体として 8 cm^2 の電極を構成している。それぞれの単位電極は図6(a)に示すように $180\text{ }\Omega$ の電気抵抗を介して別々のトランジスタに接続するか(トランジスタ分割方式)、または図6(b)に示すように電気抵抗を介した後、1つのトランジスタ電源に接続するか(抵抗分割方式)の2通りについて検討を行った。電源電圧は 180 V である。電極のサーボ信号はある一つの単位電極から取り出し、場合によって適宜この単

Fig. 5 Construction of multi-divided electrode (top view)

Fig. 6 Electrical circuits of multi-divided electrodes

Fig. 7 Mirror-like EDMed surface

位電極(サーボ点)を切り換える。

このような方式を採ることにより、元の 8 cm^2 の電極に対する静電容量は 1 cm^2 に対するものに分割され、加工の結果多数の鏡面の集合として大きな仕上面が期待される。分割の境目に加工残しは適当な大きさの揺動運動によって除去する。実験では直径 2 mm の円運動を与えた。加工条件は $I_p=0.86\text{ A}$, $\tau_p=\tau_r=2\text{ }\mu\text{s}$ である。

3.2 8分割電極加工結果

図7は8分割電極による1hの仕上放電加工の結果を示している。 8 cm^2 がほぼ鏡面に仕上がっているのが分かる。この結果はトランジスタ分割方式、抵抗分割方式のいずれも同じであった。

3.3 100分割電極による鏡面仕上

Fig. 8 Photograph of 100 divided electrode

Fig. 9 Mirror-like EDMed surface by 100 divided electrode (100 cm²)

これまでに述べた 8 分割電極による鏡面化加工の結果を踏まえて、面積 1 cm² の単位電極からなる 100 分割電極 (100 cm²) による仕上放電加工を行った (図 8 参照)。

各単位電極はそれぞれ 180 Ω の無誘導抵抗を介した後 12~13 本ずつ束ねてそのそれぞれを 1 つのトランジスタ電源へ接続している。電源は合計 8 つ用意した。すなわち抵抗分割とトランジスタ分割とを併用している。加工は、1 μmR_{max} に仕上げた SKH 9 材をワークとして、荒加工と中加工とを省略して直接仕上加工条件にて行った。加工条件は単位電極当たり $I_p=1$ A, $\tau_p=\tau_r=2$ μs である。

図 9 に 100 cm² の仕上面の様子を示す。8 分割電極による加工結果と大差ない。加工終了後の面粗さは 0.4~0.6 μmR_{max} であった。

加工時間は、面積が広いので全面当たりに至るまでに数 h を要しているが、この面積に対する通常の仕上加工時間に比べて圧倒的に速い。

これらの結果は、多分割電極方式による大面積鏡面仕上の高速加工が実現したことを示している。しかし図 9 にも見られる通り、分割境目の加工残しは、この場合 2 mm の揺動を与えているものの、電極の角の消

Fig. 10 Construction of resistor electrode

耗もあって完全には除けずかすかなうねりとなって現れている。また図 8 が示すように、分割電極の構成とリード線の取り出しとはは複雑な作業を要し、これらの点の工夫が、今後実用化する上で必要になる。

4. 抵抗体電極法による放電仕上加工

4.1 抵抗体電極法の着想

前章に示した多分割電極法による放電仕上加工では、期待した通り面粗さが 0.4~0.6 μmR_{max} 程度の鏡面が高速に得られたが、電極の構造に由来する課題が残った。この困難を打開するために着想された抵抗体電極法は次のような考えに基づいている。

対向した 2 つの面で構成されるコンデンサでは、電荷は対向面に局在する。面内の 1 か所で放電が発生した場合、面内のすべての電荷はほとんど瞬時に導体中を流れてその放電点に集中する。このことが 2 平面が 1 つのコンデンサを構成しているとみなせる根拠である。一方、上記表面が抵抗体で覆われているならば、電荷の移動に制限が生じ、基本的には無限に分布した RC 結合が極間において存在することになる。すなわち電極表面は自動的に分割されたコンデンサを形成していることが期待される。

このような抵抗体電極を用いて放電加工を行った場合、前述の困難は一挙に解決される可能性がある。

4.2 シリコン板電極による微細放電加工の試み

実験 1 前節の考えに基づいて、抵抗体を導体下面に張り付けて電極とし放電加工実験を行った。導体は銅の丸棒、抵抗体としてアンチモンがドーブされたシリコン (Si) 板 (板厚 1.5 mm, 面積 21 cm², 比抵抗 $\rho \approx 0.01$ Ω cm) をそれぞれ使い、導電性接着剤 (ドータイト：藤倉化成) にて接着している (図 10 参照)。被加工材は SKH 9 種、加工条件は、設定 $I_p=1$ A, $\tau_p=\tau_r=2$ μs、電極は負極性である。

図 11 は 1.5 h の揺動加工 (半径 0.1 mm) の結果を示す。加工深さは 2.5~3 μm、粗さ約 1.6 μmR_{max} で

Fig. 11 Glossy surface machined by planetary motion (21 cm²)

Table 1 Comparison of EDM characteristics between Si electrode and Cu electrode

	Si	Cu
Apparent electric resistivity Ωcm	10^{-2}	1.7×10^{-6}
Shape of cross section of electrode mm	$\phi 20$	$\phi 20$
Thickness of electrode mm	1.5	40
Machine time h	1	1
Machined depth μm	4.7	1.8
Machined roughness μm	1.1	2.0

(One hour EDM)

あった。当該面積に対する銅電極による通常加工では得られない、際立った特徴を有していることが分かる。特に被加工面の全域にわたり極めて均質な仕上になっている点が特筆される。

実験 2 加工時間を比較するため、直径 20 mm の銅の丸棒およびその下面に前述の Si 板を張り付けたものをそれぞれ電極とし、実験 1 と同じ加工条件で加工を行った。1 h 当たりの加工深さと面粗さを加工条件と共に表 1 に示す。同一加工条件での加工にもかかわらず、シリコン電極による加工では、面粗さは約 1/2、加工速度は約 2.6 倍になっていることが分かる。

以下の節では、本節に述べたシリコン電極による放電加工の優れた特徴をもたらす要因について実験的検討を加える。

4.3 放電痕観察による放電パルス分割現象の確認

抵抗体電極による微細放電加工の場合、前節の結果から放電の均一的分散が起こっているものと考えられる。しかも第 2 章に述べたように極間には無視できない静電容量が存在する。したがって極間外の回路中の電流から各放電点での瞬時電流を推定することは原理的に不可能である。一方、上述の放電分散および極間静電容量が無視できる場合には、放電痕直径 d とピーク電流 I_p 、パルス幅 τ_p とは、 $d \propto I_p^{0.4} \cdot \tau_p^{0.4}$ の関係にあ

ることが知られている⁹⁾。そこで、この関係を外挿して考え、むしろ顕微鏡による放電痕の観察から放電状態を推定することを試みる。

以下の実験においては、電極の直径は 20 mm、電極負極性にてワーク SKH 9 に対する加工を行っている。銅およびシリコンを電極材とし、同一の加工条件での加工面を金属顕微鏡にて観察する。

4.3.1 放電パルス幅の分割現象

放電条件は、シリコン電極、銅電極共に設定ピーク電流 I_p を 1 A 一定とし、設定パルス幅 τ_p を 2, 4, 8, 16, 32 μs とそれぞれ変化させて加工を行った。デューティファクタは 50% 一定である。図 12 (a), (b) はシリコン電極による $\tau_p = 2 \mu\text{s}$, 32 μs での加工面の写真を示す。 τ_p のいかんによらず放電痕直径 $d = 22 \sim 23 \mu\text{m}$ と一定であることが分かる。これに対し、図 12 (c), (d) に示すように同一条件での銅電極による放電痕直径は 24 μm から 45 μm に変化している。すなわち、抵抗体電極による加工の場合、大きなパルス幅を設定しても、1 つの放電点での 1 回の放電によって流れる電流のパルス幅は、実験の範囲内ではほぼ一定であり、放電分割現象が起こっているものと思われる。

4.3.2 放電パルス電流値分割

次に、パルス幅を 2 μs で一定とし、設定ピーク電流値 I_p を 1, 2, 3, 4 A と変化させて同様の加工を行った。図 12 (e), (f) は $I_p = 4 \text{ A}$ でのシリコン、銅それぞれの電極による加工結果を示す。(c), (f) を比較すれば、銅電極の場合放電痕直径は 24 μm から 35 μm に増大していることが分かる。一方、(a), (e) から分かるようにシリコン電極でのそれは 22 μm から 26 μm とわずかな変化にとどまっている。これらのことから、抵抗体電極では I_p を大きく設定しても各放電点での電流はほぼ一定になっているものと思われる。

4.3.3 放電領域分割

図 12 (a)～(f) における電極面積は約 3 cm² であった。これに対して図 12 (g) は 30 cm² のシリコン電極による加工結果を示す($I_p = 3 \text{ A}$, $\tau_p = \tau_r = 4 \mu\text{s}$)。放電痕直径は約 26 μm であり、図 12 (a), (b), (e) とほとんど変わらない。ちなみに加工速度は銅電極によるそれより少なくとも 2～3 倍であることが確認されている。

4.3.4 放電パルス分割現象

上記 3 組の実験的考察から次の事柄が推論される。すなわち、抵抗体電極による仕上放電加工では、図 13 に示すように放電パルス電流を時間を横軸にとって表すならば、設定放電電流は縦(電流値)にも横(時間)にも分割される。この図において外部から電極間に流

Fig. 12 Size of discharge craters

Fig. 13 Divided pulse phenomenon

入する電荷は I_p と τ_p との積として表される。銅電極の場合は1回の放電でこの電荷のすべてあるいは極間に蓄えられている電荷の放出によってその複数倍が流れる。これに対し抵抗体電極では1つの放電点で1回

Fig. 14 Effect of electrode area on machined roughness

の放電に寄与する電荷量が、例えばこの図の斜線の面積に相当する値に制限されているものと推論される。すなわち矩形で示す外部からの流入電荷は多数のセルに分割されており、斜線部以上のセルに対応する電荷は他の複数の放電点でほぼ同時に放電されているものと考えられる。このような現象をまとめて放電パルス分割現象と名付ける。

4.4 シリコン電極による大面積放電加工

前節において抵抗体電極を用いた放電加工では、設定放電パルスは縦にも横にも、更にまた空間的にも分割されることを述べた。このことは、極間に蓄えられた電荷が抵抗を介して放電点に流れることにより放電電流に制限が生じていることを示している。定性的には極間において分布型の RC 結合と等価な回路構成をなしており、ある点で放電が発生しても他の点では電位が下がらず、従ってほぼ同時に多数点で放電が発生し得る。すなわち実質的には電極面積増大の影響が現れないことが予想される。これを直接確かめるため、シリコン電極の面積を変化させて仕上放電加工を行った。

図 14 は横軸を電極面積とし、各面積における仕上面粗さの限界値（最良の加工条件下での結果）をプロットしたものである。面積が十数 cm^2 を越えると粗さは $2 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ と一定になり、少なくとも 275 cm^2 までの範囲で面積に依存しないことが明らかとなった。これに対し、銅電極による加工では図 13 に示してあるように面積にほぼ比例して粗さが上昇し、従来の常識の結果となっている。

図 15 は 275 cm^2 のシリコン電極による加工結果の写真を示す。加工条件は設定値として $I_p = 3 \text{ A}$ 、 $\tau_p = \tau_r = 4 \mu\text{s}$ 、ワークは SKH 9 種である。全面にわたり極

Fig. 15 Machined surface by silicon electrode (275 cm²)

めて均質な微光沢面を呈していることが認められる。面粗さは、揺動加工の結果 $1.6 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ であった。なおこの電極は比抵抗 $\rho = 0.2 \Omega\text{cm}$ 、厚さ 1.5 mm のアンチモンドープシリコン板を鉄板に張って作成している。275 cm² という大きな面積を得るために、16 枚のシリコン板を張り合わせて作成している。

5. 結 論

放電加工によって大面積の被加工物に対し、精細な仕上がり面を高速で加工するための種々の実験的検討を行った結果、次の事柄が判明した。

- (1) 単一の導体電極による仕上放電加工では、電極面積の増大に伴って面粗さがほぼ比例して増大する。

これは、面積の増大と共に極間の静電容量が大きくなり、極間に蓄えられた電荷によって急峻な放電電流が流れるため面が荒れることが原因と考

えられる。

- (2) 大面積加工において当該静電容量を小さくするため、多分割電極法を開発した。単位面積を 1 cm^2 として最大 100 分割加工まで試みた結果、面粗さは $0.4 \sim 0.6 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の鏡面が得られた。
- (3) 多分割電極法の欠点である電極構成の困難さと分割境目によるうねりの発生などを根本的に解決するため、抵抗体電極法を開発した。抵抗体としてシリコン板を用いた加工実験の結果、275 cm² までの大面積に対する面粗さは $1.6 \sim 2 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ で面積に依存しないことが判明した。

抵抗体電極の効果は、放電パルス分割現象として特徴づけられる。電極表面は事実上無限に自動分割されている多分割電極法であるため、供給電力を大きくしても加工速度は大きくなるが、面粗さは $1 \sim 2 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ のままであり、荒くならない。

なお、本研究は、昭和 57 年度から昭和 59 年度にわたり文部省科学研究費補助金 (57460082) を受けている。

参 考 文 献

- 1) 電子工学ポケットブック、2 編 (第 3 版) (1957) 5.
- 2) 高鷲民生、小林和彦：微小エネルギーによる放電加工の研究、電気加工学会誌、16, 31 (1982).
- 3) 齋藤長男ほか：放電加工のしくみと 100% 活用法、技術評論社 (1979) 46-47.
- 4) 同上、p. 43.
- 5) 増沢隆久、藤野正敏：放電微細加工の問題点、生産研究、27, 7 (1975) 21.
- 6) 文献 3)、p. 71.
- 7) 文献 3)、p. 46.

●——精密工学会刊行図書のご案内

精機学会創立 50 周年記念出版委員会編「精密機械設計便覧」

本書は、設計の教育用としても実務用としても有用なことをねらいとして編集されています。そのために、設計の基礎知識や、精密機械の機能面からの設計手法の体系化を図り、製造技術との関連にも配慮しつつ、各企業から提供いただいた実際の生きた多数の事例を収集、整理しています。特に個々の設計事例について当該設計者のコメントを併載していますので、具体的な設計指針を得ることができます。

内 容	第 1 章 精密機械設計学	第 4 章 精密機械機能要素の設計事例
	第 2 章 精密機械部品の設計	第 5 章 精密機械および機械システムの設計
	第 3 章 精密機械要素の設計	

A 4 判、724 ページ＋資料編。定価 17 000 円、会員価格 13 600 円、送料 1 000 円