

仕上げ放電加工の新しいフラッシング法

New Flushing Methods for Finishing EDM

崔 小 新*・増 沢 隆 久*

Xiao-Xin CUI and Takahisa MASUZAWA

形彫り放電加工においては、極間に過剰に存在する加工生成物はしばしば加工速度、加工面性状を低下させる要因となる。それらを排除するために、幾つかの方法が行われ、提案されているが、ヘソ取り、無駄時間等の問題点がある。そこで、新しいフラッシング法として二次元微振動法、スキャンフラッシング法を提案する。これらの手法を用いれば、より能率の良い加工、より良い加工面精度が得られる。

1. は じ め に

形彫り放電加工では、一発一発の放電の繰り返しを円滑に進めることが、良好な加工結果を得る近道である。このためには、種々の配慮が必要となる。これらの内、特に、加工液の処理が重要である。

放電加工が進むにつれて、極間に加工くず、加工液の熱分解による生成炭素など多くの加工生成物が生じる。これらが極間に過剰に存在すると、加工速度、加工面性状を低下させる。これらの生成物を排除するために、噴流・吸引法、噴射法、電極ジャンプ法、揺動加工法などの方法が行われている。

噴流・吸引法は電極あるいは工作物に穴を加工して、そこから極間に加工液を強制的に流す方法である。加工生成物の除去を確実に行うことができるが、電極や工作物に噴流・吸引穴を加工しなければならない。また、底付きの穴の加工では、加工後工作物側に残る噴流穴に対応する凸部を除去しなければならないなど、仕上げ放電加工には適用しにくい。

噴射法は電極の側面から加工液を強く噴射し、極間に流す方法である。電極や工作物に噴流・吸引穴をあけられない場合にはよく使用される。適用しやすいというメリットがあるが、加工液を極間に一様に流すために、噴射ノズルの配置などの設計は簡単ではない。

電極ジャンプ法は電極をある周期で上下させ、工作物との間で往復ポンプ作用を起こし、加工くずを極間から排出する方法である。ジャンプ周期、ジャンプ速度、ジャンプ量などの適正値は加工対象によって大きく違い、それらの選定は難しい¹⁾。また、仕上げ加工では、ジャンプ量を大きくしないと、排出効果が悪い。ジャンプ量を大きくすると実質加工時間が短くなり、加工能率が低下し

てしまう。

揺動加工法は電極を多方向に移動し、本来側面の仕上に使われる加工法であるが、副次的な効果として加工くずを排出する。これも側面の数に応じて、加工時間が増大してしまう。

加工生成物を能率良く排出する方法が幾つか提案されている。その中の一つとして、セルフフラッシング法がある²⁾。それは電極と工作物の相対位置を変化させることによってギャップ形状を変化させ、それにより生じた液流で加工生成物を分散・排除させる方法である。これは能率的、かつ安定に加工生成物を分散・排除する方法であるが、加工液のフラッシングを行うために、しばしば加工電源を切り、加工能率の低下を招く。

以上のように、加工生成物を能率的かつ容易に排除できる新しいフラッシング法の開発が望まれている。そこで、著者らは二次元微振動法およびスキャンフラッシング法を提案し、それらの効果を調べた。その結果、これらの方法を用いれば、能率の良い加工と良い加工面精度を実現できることが明らかとなった。以下にそれらの方法の概要、結果などについて解説する。

2. 二次元微振動法

2.1 二次元微振動法の概要

二次元微振動法は電極と工作物の相対運動によって生じた液流で加工生成物を分散・排除する方法である。電極と工作物のどちらが微振動しても同じ効果が得られるが、ここでは電極に二次元微振動を与える場合について原理を述べる。そのモデルを図1に示す。

電極は通常図1(a)の点線で示した位置にある。電極に与えられた二次元微振動は x 、 y 方向に90度位相のずれた正弦運動である。 x 、 y はそれぞれ電極の x 方向、 y 方向の変位であるとすれば、電極の軌跡方程式は次式

*東京大学生産技術研究所 第2部

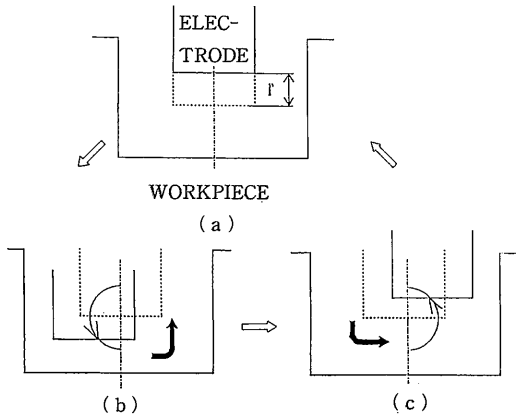


図1 二次元微振動モデル

のようになる。

$$x = r \sin \omega t, \quad y = r \cos \omega t$$

$$x^2 + y^2 = r^2$$

ここで、 r は振動振幅、 ω は振動角周波数とする。

すなわち、電極は通常的位置を中心に、振動振幅 r を半径とする円運動をする。円運動の前の半周期では、図 1 (b) のように電極は工作物の底部とのギャップが縮まろうとし、極間の流れは主に隙間の広い方すなわち右の方へ流れ出す。その後の半周期 (図 1 (c)) では、電極と工作物の底部のギャップが広がろうとしているから、流れは主に隙間の広い方すなわち左の方から流れ込む。したがって、電極に二次元微振動を与えることによって、放電ギャップに液流を生じさせることができる。この液流によって、加工生成物を分散・排除させることができると考えられる。

2.2 セルフフラッシング法との違い

二次元微振動法と上述したセルフフラッシング法とは類似した点もあるが、本質的に異なるので、以下にその違いを簡単に述べる。

セルフフラッシング法はフラッシングのために電極をギャップの大きさ位大きく移動させるのに対して、二次元微振動法では、加工に影響しないように電極はギャップの一割位しか移動しない。また、セルフフラッシング法はフラッシングを行っている間、加工電源を切り、加工を行わないのに対して、二次元微振動法は常に加工しながら、加工液のフラッシングを行う。したがって、二次元微振動法は加工に影響を与えずに、加工くずを排出することが可能である。

以下、本手法の有効性を確認した実験結果について紹介する。

2.3 実験装置

この実験では、装置上の都合により、電極側を固定し、工作物側に二次元微振動を与えることにした。

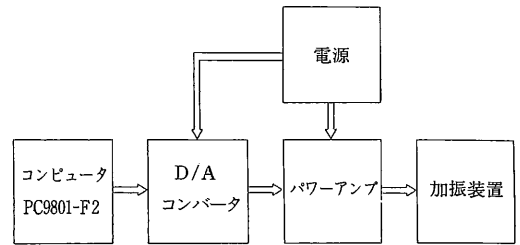
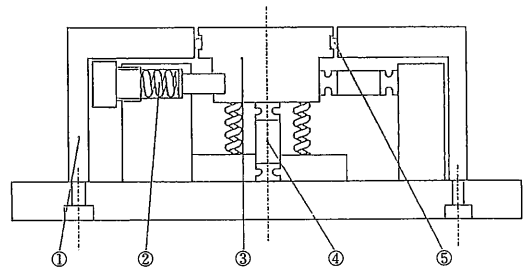


図2 加振装置のシステム構成



①カバー ②バネ ③加振台 ④圧電アクチュエータ ⑤Oリング

図3 加振装置の構成

実験装置は図 2 に示すように工作物に二次元微振動を与える加振装置、およびそれを制御するコンピュータ、D/A コンバータボード、パワーアンプなどからなる。

加振装置の機械的構成は図 3 に示す。工作物を微振動させるために、微小位置を制御できるアクチュエータが必要となる。アクチュエータには積層型圧電アクチュエータを用いた。工作物を縦、横に微振動させるために、圧電アクチュエータは工作物を固定する加振台の縦、横に各一個ずつ取りつけた。圧電アクチュエータは圧縮に強いが、引張りに弱い。引張りによる破壊を防ぐために、横方向に圧縮ばね、縦方向に中心対称で 4 本の引張りばねを用いて、それぞれの方向に予圧を与えた状態で振動させている³⁾。また、圧電アクチュエータは曲げにも弱いので、圧電アクチュエータの両側にヒンジを入れ、曲げに強い構造にした。圧電アクチュエータは長時間に加工液に浸すと、劣化などの原因で壊れる危険性があるので、加振台とカバーの間に O リングを用いることによって、加工液漏れを防いでいる。

圧電アクチュエータの駆動波形は正弦波で、コンピュータを用いて作ることにした。発生できる周波数の範囲は 5 Hz ~ 1 KHz である。この波形信号は D/A コンバータによって、アナログ信号に変換され、さらにパワーアンプによって増幅され、圧電アクチュエータに加えられる。加振装置の振動振幅は加工に影響を与えないために、 $\pm 5 \mu\text{m}$ にした。

2.4 実験結果

形彫り放電加工では、仕上げ領域になると、加工くず

の排除が難しくなる。加工条件としては、仕上げ領域での低電極消耗率の加工条件を用いた。加工電流は2.6Aで、パルス幅、休止時間は共に68 μ sである。

加工電極、工作物にはそれぞれCu, SKD11を用いた。極性は逆極性である。加工電極の断面は10mm角である。噴流、電極ジャンプ回路共に使われていない。

(1) 加工速度

図4は加振する場合と加振しない場合における加工時間に対する加工深さのグラフである。

この図より、最初の100分まで、加振したときの加工時間にたいする加工深さの線図と加振しなかったときの加工時間に対する加工深さの線図はほとんど重なっており、両者の加工速度はほとんど変わらない。さらに加工が進んでいくと、加振しない方は加工速度が遅くなる一方、加振する方は加工速度がほとんど減少しないことがわかる。したがって、加振することによって、加工速度を向上させることができる。

(2) 加工面性状

図5は18時間加工した後の加振した場合と加振しなかった場合の面性状の比較である。加振する場合の加振周波数は50Hzである。この加工条件では、加振しなかった方は加工面にいくつか大きな損傷が生じた。それに対して加振した方は均一な放電面が得られた。加振しなかった方は加工中に生じた加工くずが排除されず、2次放電などの異常放電を起こし、加工物に多くの損傷を生じさせたものと考えられる。したがって、加振することによって、加工面性状を向上させることができる。

(3) 加振周波数による違い

図6に加振周波数の加工速度への影響を示してある。加工時間は横軸に取った。縦軸をわかりやすくするために、各加振周波数における加振したときと加振しなかったときの加工深さの差を取った。

この図より、50Hzはほかの加振周波数20Hz, 100Hzの場合に比べて、加工が速いことがわかる。加振周波数が低く、20Hzのとき、加工くずの排除効果が小さく、また、加振周波数が大きすぎ、100Hzのとき、予想した加工液の流れが得られず、加工くずの排除効果がかえって悪くなると考えられる。したがって、加振する場合において、最適加振周波数が存在する。

(4) 一次元加振と二次元加振

図7は工作物に縦振動のみまたは横振動のみを与えた場合と二次元微振動を与えた場合の加工面性状の比較である。いずれも加工時間は3時間で、加振する場合において、加振周波数は50Hzである。

図7(a)には二次元加振した場合の加工面性状を示した。この場合、全面にわたって、均一に仕上がった。加振しない場合の加工面性状(図7(b))では、円環状のくぼみが見られ、また、真中に異常放電の跡がある。工

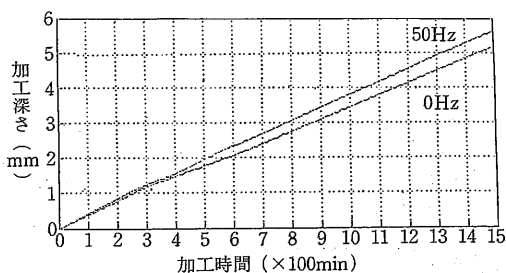
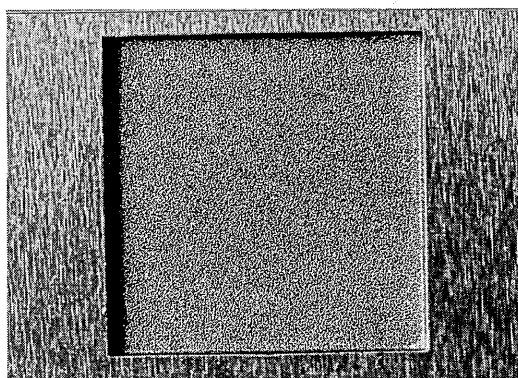
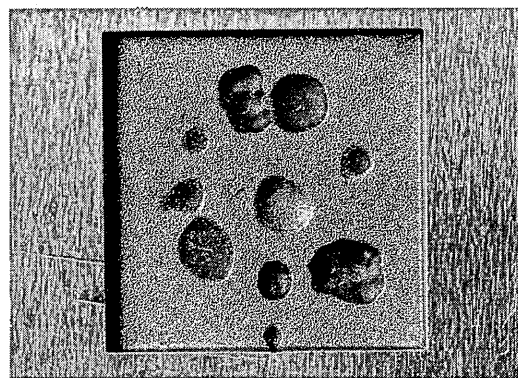


図4 加振する場合と加振しない場合の加工速度



a. 加振する



b. 加振しない

図5 加振する場合としない場合の加工面性状

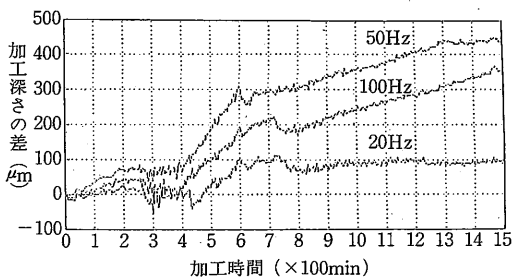
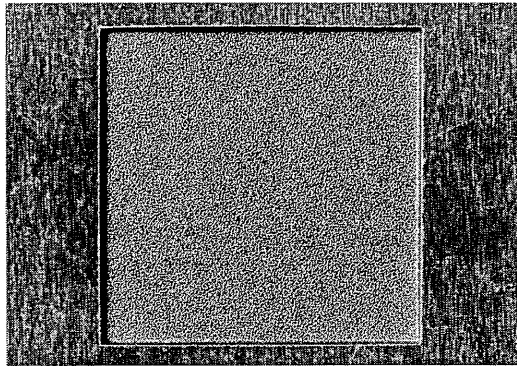
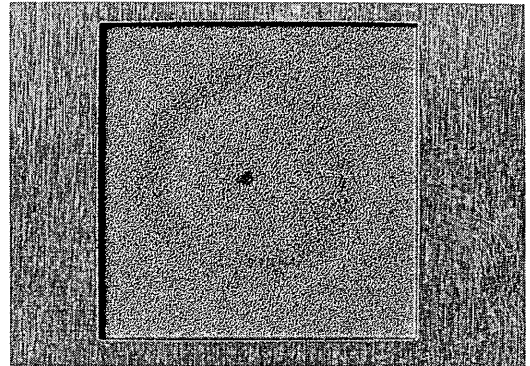


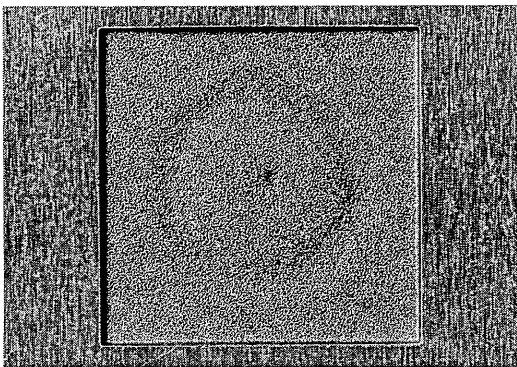
図6 加振周波数の加工速度への影響



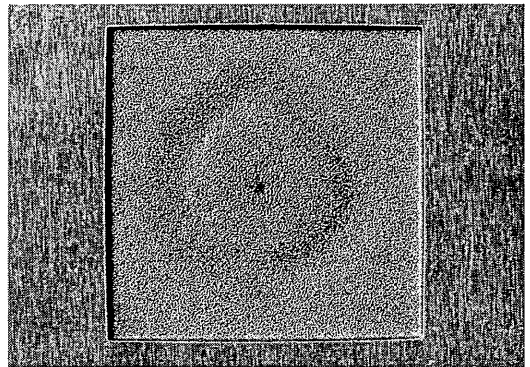
a. 二次元加振



b. 加振しない



c. 縦振動のみ



d. 横振動のみ

図7 一次元加振と二次元加振による加工面性状

作物に縦振動のみ、あるいは横振動のみを与えた場合の加工面はそれぞれ図7(c), (d)に示した。それらの図からわかるように、縦振動のみを与えた場合と横振動のみを与えた場合は両方とも加工面に円環状のくぼみが形成され、また、真中に異常放電の跡があり、加振しない場合の加工面とほぼ同様な加工面となった。よって、一次元微振動だけでは、加工くず排除効果がほとんどないということがわかった。

(5) 加工時間にたいする加工面の断面曲線

図8は二次元加振した場合の加工時間にたいする加工断面曲線を示している。断面曲線は穴の底部だけをトレースしたものである。

加工時間1時間後、加工面の断面曲線の両側にくぼみが見られる。これは加工面に円環状のくぼみが生じたからである。加工時間2時間後、このくぼみがさらに大きくなり3時間後になると、このくぼみの大きさは半分くらいになった。さらに、加工時間4時間後になると、加工面にあった円環状のくぼみがほぼ除かれ、加工面の断面曲線もほぼ平らになった。

二次元微振動法は工作物と電極との左側ギャップと右側のギャップの大きさの違いを利用して、加工くずを排出する。加工のはじめごろ、電極と工作物の間とのギャップはまだ形成されておらず、二次元微振動の効果が現れない。加工時間が増すにつれて、加工深さも深くなり、側面ギャップが次第に形成されてくる。ギャップの形成にしたがい、二次元微振動の効果もだんだん現れてくる。したがって、二次元微振動法の効果は加工深さのある程度深い領域で現れる。

3. スキャンフラッシング法

3.1 スキャンフラッシング法の概要

形彫り放電加工で二次元微振動法を適用すると、加工深さの深い領域ではフラッシング効果があるものの、加工深さの浅い領域ではほとんど効果がないことが明らかとなった。そこで、浅い領域に対して、効果があると思われる噴射法の適用を試みてみた。噴射法は、現場で多く使われ、その有効性が知られているものの、これに関する研究はほとんどなされていない。

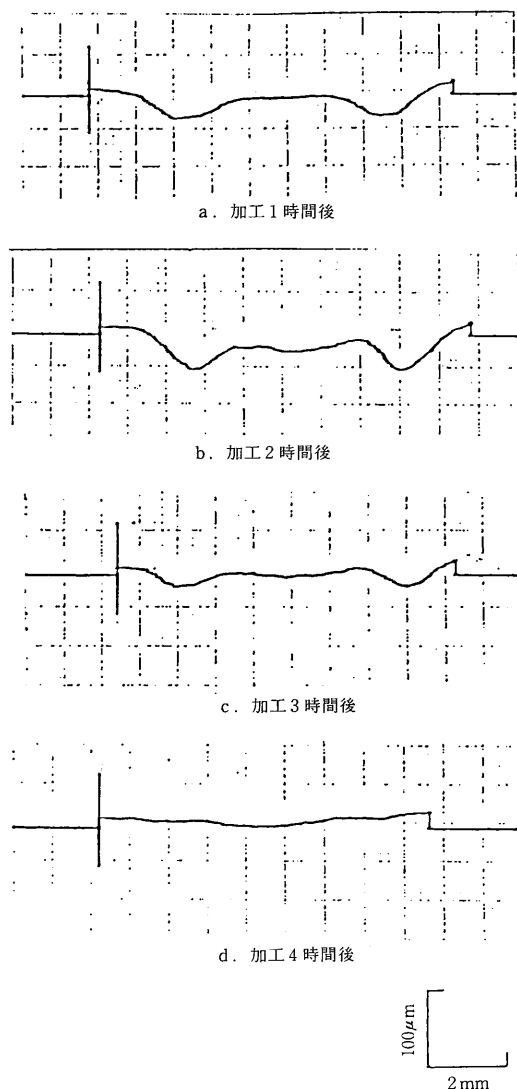


図 8 加工時間に対する加工面の断面曲線

一方、噴射法では、加工面積が大きくなると、集中放電が起きやすい。また、噴射ノズルの位置によって、効果が偏在するが、適正位置を見いだすことは容易ではない。そこで、均一な放電を得るために、工作物の左側と右側のノズルを前後に移動させることにし、これをスキャンフラッシング法と名付けた。二つのノズルは対向しないように往復動させれば、加工くずを分散・排除させることが可能だと考えられる。図 9 にスキャンフラッシング法のモデルを示す。

この手法に関する実験結果の概要は以下に示すとおりである。

3.2 実験装置

実験装置のシステム構成は図 10 に示した。装置には、

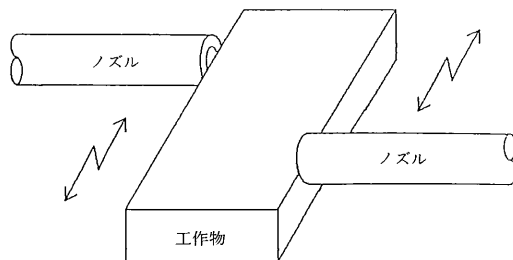


図 9 スキャンフラッシングのモデル

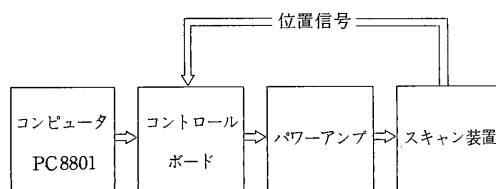


図 10 スキャン装置のシステム構成

噴射ノズルにスキャン運動を与えるスキャン装置のほか、スキャン装置を制御するコンピュータ、コントロールボード、パワーアンプなどがある。

スキャン装置の写真は図 11 に示す。スキャンテーブルは噴射ノズルにスキャン運動を与えるものである。その駆動アクチュエータにはパルスモータを用いた。パルスモータはカップリングを介して、ボールネジと直結し、テーブルを前後駆動する。テーブルの案内にはリニアブッシュを用いた。このようなユニットは二つを設け、加工物の左側と右側に固定し、左右の噴射ノズルに往復動を与えることができる。

パルスモータコントロールボードにはパルスモータコントロール LSI 2 個が積んであり、左右のスキャンテーブルを制御することができる。この LSI はメイン CPU コマンドによって、原点検出、加減速動作、定速動作などの機能を持っており、パルスモータの動作周波数や出力パルス数をコンピュータ側から入力すれば、スキャンテーブルの移動速度、移動距離を決めることができる。また、スキャン装置の左側、右側共幾つかのフォト・インタラプタが取り付けられていて、原点やリミット信号をコンピュータに取り入れる。

3.3 実験結果

噴射法では、加工面積が大きくなると、集中放電が起きやすい。本実験では、実用的と思われる $50 \times 50 \text{ mm}$ の加工面積を加工対象にした。

加工電極には Cu、加工物には SKD11 を用いた。極性は逆極性である。加工条件としては、仕上領域での低電極消耗率の加工条件を用いた。加工電流は 6.0 A で、パルス幅、休止時間は共に $68 \mu\text{s}$ である。噴流、電極ジャンプ回

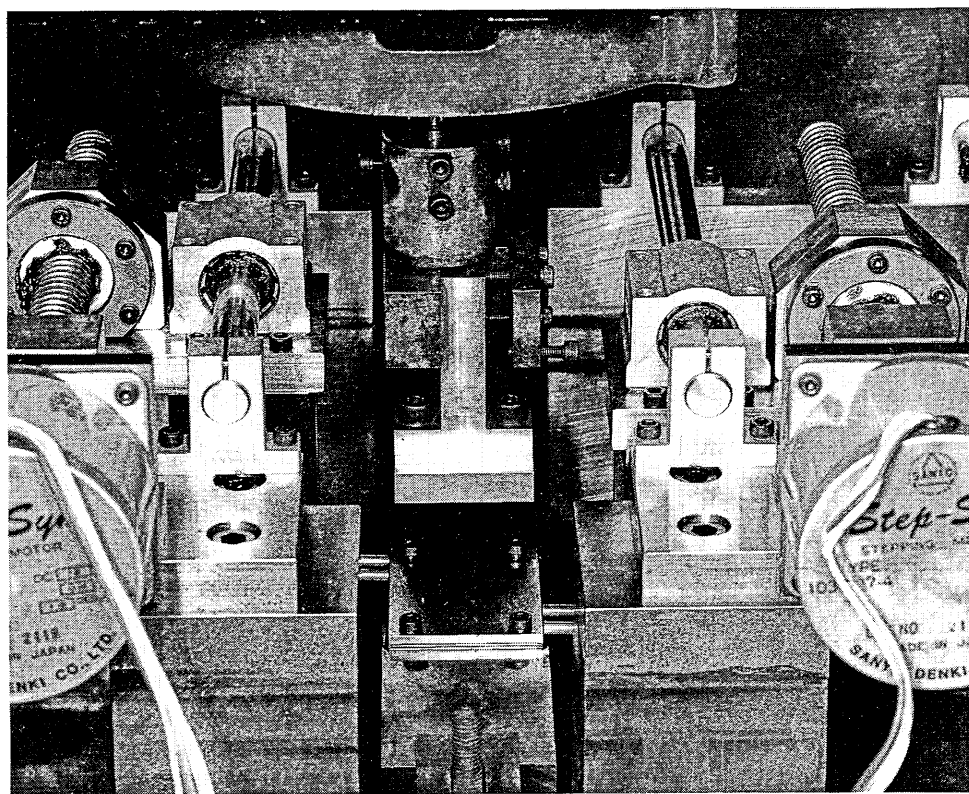


図11 スキャン装置の構成

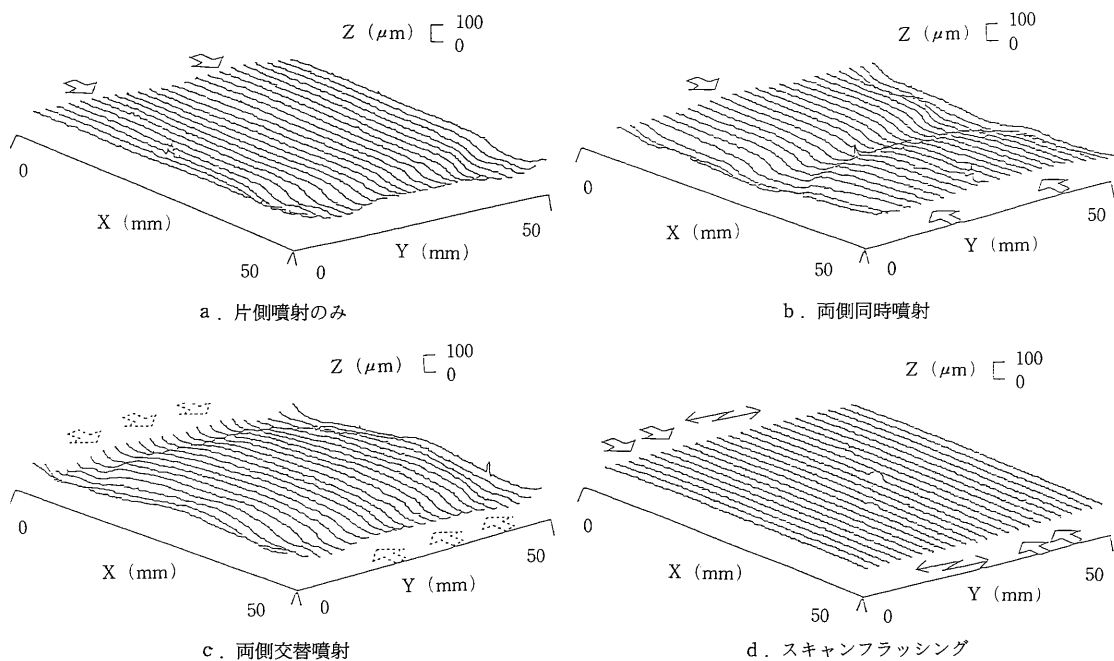


図12 加工面のプロフィール

路共に使われていない。

噴射ノズルの径は 3 mm である。噴射ノズルの傾き角度は 0 度すなわち水平にした。流量は約 2 ℓ/min である。

(1) 各噴射法における加工面

噴射法においては、加工面積が大きくなると、加工面の形成が噴射ノズルの配置、すなわち噴射の仕方によって大きく異なる。実験は片側噴射、両側同時噴射、両側交替噴射、スキャンフラッシングについて行った。前の 3 つはいずれも噴射ノズルを固定してある。加工時間はいずれも 8 時間である。

放電加工を行った加工面に対し、三次元測定機を用いて、深さ測定を行った。測定によって得られた深さデータに対し、見やすいように、コンピュータ処理を施し、三次元グラフにした。

a. 片方向から噴射を行った場合

図12.aに示したように片方向から噴射を行った場合、噴射をかけている側は割合良い面になっているが、噴射をかけていない側は、加工くずが滞留し、くぼんでいる。噴射流から離れているところでは、くぼみが特に顕著である。また、噴射をかけている側でも、直接噴射流がかかっている場所とかかかっていない場所とでは放電の度合いが違う。

b. 両方向から噴射を行った場合

図12.bは両側から同時噴射を行った場合の加工面を示す。噴射流は真中で衝突した後、噴射の垂直方向に広がる。その結果加工くずは真中で滞留し、その付近のギャップが大きくなっていることがわかる。

c. 両方向から交替噴射を行った場合

図12.cは両側から交替噴射を行った場合の加工面を示す。交替時間は 5 分である。この場合も交替時間が長いいため、加工くずは工作物の両側に滞留し、その両側にくぼみを生じさせた。

d. スキャンフラッシングを行った場合

図12.dはスキャンフラッシングを行った場合の加工面を示す。スキャン速度は12秒/往復である。ノズルを対向させないために、位相差90度を与えた。この場合、加工面は均一な噴射を受けたため、加工面は均一に仕上がった。

図13にスキャンフラッシングによって仕上がった加工面の一例を示す。

(2) スキャン速度の影響

スキャンフラッシングの場合、加工面の形成に多くの要素の影響を受けるものだと考えられる。ここで、最も影響のあると思われるスキャン速度を変えて、加工面にどんな影響を与えるのかについて調べてみた。各スキャ

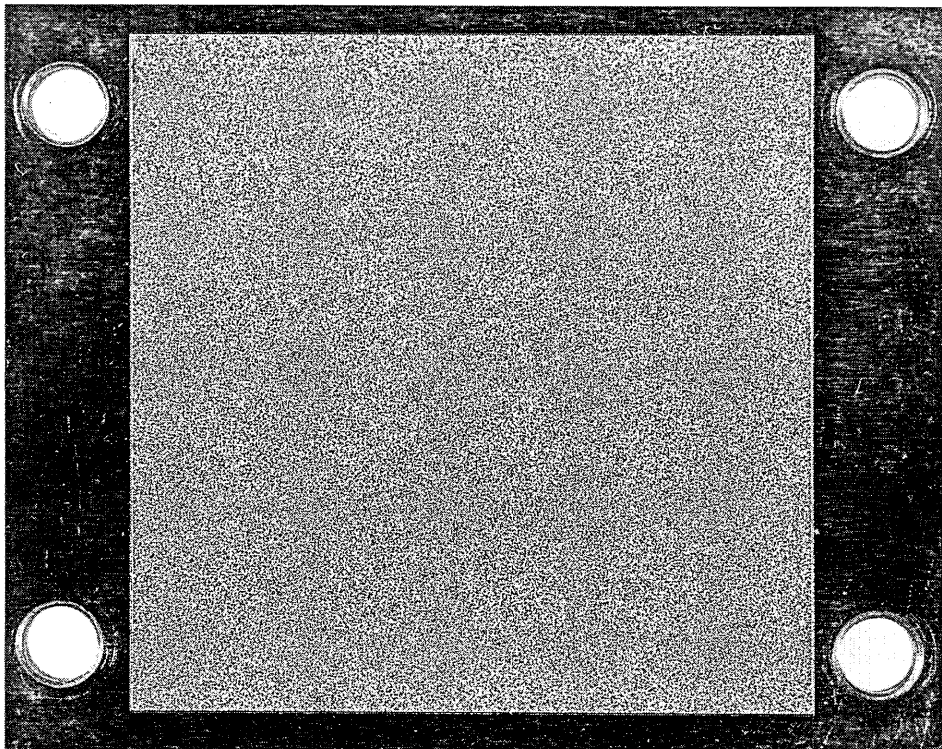


図13 スキャンフラッシングによる加工面

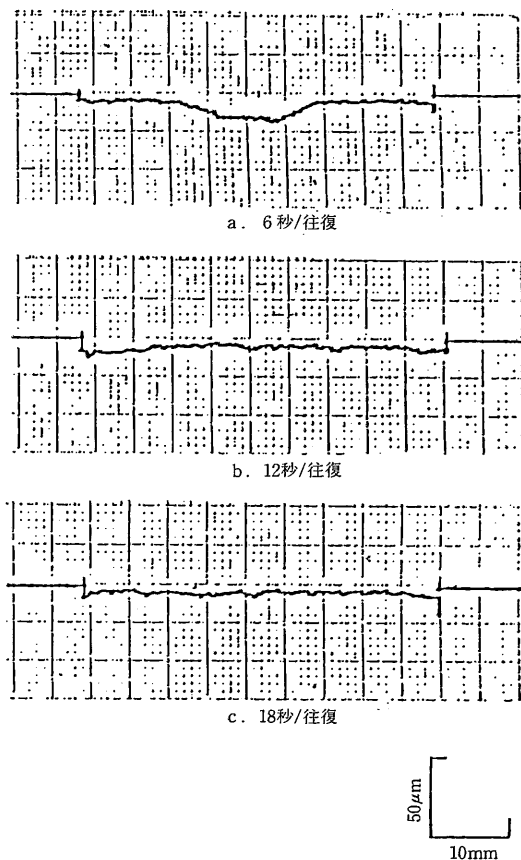


図14 スキャン速度の影響

ン速度の場合の加工面の断面曲線をとった。図14にその結果を示す。

スキャン速度が12秒/往復、18秒/往復すなわちスキャンが遅い場合、加工面の断面曲線はほぼ平らで、加工面はきれいに仕上がったことを示している。しかし、スキャン速度6秒/往復すなわちスキャンが速い場合、加工くずの移動量が少なすぎるため、加工面の真中に滞留し、加

工面の精度を損なう。したがって、スキャンフラッシングを行う場合、適当なスキャン速度が存在することがわかった。

4. まとめと展望

形彫り放電加工において、現在最も困難な課題の一つとなっている加工くずの分散・排除に対応する手法として二次元微振動法、スキャンフラッシング法を提案し、それらの有効性を示した。

形彫り放電加工に二次元微振動法を適用して、加工速度、加工面性状とも向上させられることが明らかとなった。また、二次元微振動を加えた場合、最適加振周波数が存在する。

噴射法において、加工液の噴射の仕方は加工面の形成に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。そこで、スキャンフラッシング法を適用すると、加工面を均一に仕上げられることがわかった。この場合、最適スキャン速度が存在する。

二次元微振動法およびスキャンフラッシング法は無駄時間のない加工が実現できるうえ、適用上の難しさもなく、実用的なフラッシング法として、広範な適用が期待できる。

一方、スキャンフラッシング法を用いると、効果があるものの、その効果は理論的にまだ解明されていない。今後は、計算機による加工くず濃度解析により、理論的解明を進めることが必要であろう。

(1991年8月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 趙万生, 増沢隆久: セルフチューニングを用いた放電加工における電極ジャンプの適応制御, 電気加工学会誌, 24.47. (1990)
- 2) 増沢隆久, C.J. Heuvelman: 放電加工における加工くず処理の研究, 精密機械, 51.7. (1985)
- 3) 内野研二: 圧電アクチュエータ開発, 応用の要点, 日本工業技術センター