

セルフフラッシング法による放電加工

A Self-Flushing Method for EDM

増 沢 隆 久*

Takahisa MASUZAWA

放電加工法において極間に生ずる加工くずの処理は未解決で残されている大きな問題の一つである。この解決法の一つとして電極多次元運動によるポンプ効果を利用したセルフフラッシング法が提案され、その有効性が示された。本稿ではその概要について解説する。

1. 緒 論

放電加工技術の発展は目覚ましいものがあり、約 40 年前に実用化された当初は極めて特殊な用途に限定されていたのが、現在では型加工にとって不可欠とさえ言われるようになり、さらに応用範囲は広がりつつある。

工具電極（以下、単に電極と記述する）がほとんど消耗しない、いわゆる電極低消耗加工が実現し、加工状態に応じて加工条件を変化させていく適応制御の採用も進み、加工技術として徐々に完成の域に近づいている。最近ではさらに鏡面仕上げ法の開発も進められており、今後はどこまで可能性が広がっていくか予断を許さない。また、本稿においては触れないが、ワイヤ放電加工技術の発展と普及ももちろん特筆に値する。

ところで、以上のように見てくると、放電加工における基本的な問題点はほとんど解消されたかの如く感じられるが、実は極めて重要な問題でありながら、その機構の複雑さのために、ほとんど解明されず、対策も消極的なままとなっている現象がある。それは工作物と電極の間隙（以下加工間隙とする）に発生し存在する、加工くずの挙動と加工現象への影響である。

本稿では、この加工くずの処理法として新たに提案したセルフフラッシング法¹⁾²⁾について解説し、その有用性を示す。

2. 加工くず処理の意義と現状

加工くずは主として工作物材料が放電によって除去されてきた金属の微粒子から成る。もちろん電極材料もその電極消耗率に応じて含まれ、また、油系の加工液を用いている場合は、その分解生成物である炭素等も含まれる。

このように、加工くずは切削等における切粉に相当するものと考えられる。したがって加工くずが加工部位に滞留するのを防ぐことが切粉処理と同様な意味で重要な課題となる。しかし、上のような切粉からの類推から、加工くずは除去が完全に近い方が良いと考えるのは誤りである。放電加工の場合、加工くずは異常アーク、短絡等の好ましくない現象の原因となる一方、それが加工間隙に適当量存在することで、絶縁破壊の引き金となり、放電の繰返しを安定化する作用がある³⁾。そこで、加工くず処理の重点は次の 2 点に置くことが必要となる。

- 1) 加工間隙に存在する量が過大とならないように、排出を良好に保つ。
- 2) 加工間隙の局部に集中しないように、加工部分への均一な分散を促進する。

現状において、2)の加工くずの分散についての認識はまだ浅いように見受けられるが、1)に関しては従来もその必要性は良く知られ、その実現のための方法もいくつか考えられてきた。

加工くずの排出法として従来実用に供されているのは主に次の二つである。

- 1) 噴流法
- 2) 電極引上げ法

噴流法は、電極に穴を設け、そこから加工液を噴出し、または吸引することにより加工間隙を洗浄しながら加工を行う方法である。

噴流法は、加工くずの除去が確実に行えるという点で優れているが、電極に噴流のための穴を加工しなければならないうえ、底付き穴の加工では、加工後工作物側に残る噴流穴に対応した凸部を除去しなければならないなどの欠点がある。また複雑な形状の場合は噴流穴が複数個必要となり、その配置・穴寸法等の設計も簡単ではない。したがって、噴流法はその適用範囲がかなり限定されたものとなっている。

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

一方の電極引上げ法は、電極を適当な時間間隔で引き上げ、それに伴う加工間隙への液の流入・流出を利用して加工くずを排除する方法である。

この方法は、適用が容易である反面、液が極間を一方方向に通り抜ける噴流法と異なり、よどみ点の存在などが原因となって異常アークや短絡が発生し、加工の進行が妨げられることが少なくない。これは引上げ距離を大きくとることである程度抑えることができるが、その場合は加工（放電）しない時間が増大することになるため、加工速度が著しく低下してしまう。

以上のように、現状では加工生成物の極間からの除去、あるいは局部的な集中防止の方法が確立しているとは言いがたく、これに対処する新しい方法の開発が望まれている。

上の要求に応えるため、電極と工作物との間隙形状を積極的に利用した、加工生成物の能率的、かつ安定した排除、分散システムとして提案されたのが、セルフフラッシング法である。

3. 動作原理

セルフフラッシング法(Self-Flushing Method)、以下「セルフフラッシング」を「SF」と略記する)は、電極と工作物の相対位置を変化させることによって両極の間にはさまれた空間の形状(以下ギャップ形状とする)を変化させ、それにより生じた液流で加工生成物を排除・分散させる方法である。電極引上げ法も同様の原理に基づくが、両者の主な違いは、電極引上げ法が電極の一次元運動によるのに対し、SF法では2次元以上の多次元運動を用いる点にある。

2次元運動による本法の最も簡単な電極運動の例を図1に示す。もっとも、ここではギャップ形状を変化させるのが目的であるから、運動は相対的なものでよい。したがって電極と工作物のどちらかあるいは両方が運動する場合があり得るが、以下では電極運動とのみ記述する。

図1において、aは通常の加工中における電極と工作物の位置関係を示す。ただしわかりやすくするために極間距離を大きく作図してある。この状態から運動を開始し、まずbのように電極を一方の内壁面に接近させる。次いで、cのように引き上げる。適当な距離引き上げた後、dのように反対側の壁面に接近させ、今度はeの状態

まで下方に押し込む。ここまでが1サイクルで、多サイクル行う場合は、さらに、b, c, と繰返し、最終サイクルでaに戻る。この1ないし数サイクルがSF運動の1単位をなし、ある期間の放電と1単位のSF運動を交互に繰り返すことにより加工が進行する。

SF運動時には、図から分かるようにb~cで液の極間への吸入が行われ、d~eでは吐出が行われ、一種のポンプを形成する。この際、吸入口にあたる位置と吐出口にあたる位置が異なっているのが重要な点である。これによって加工液は極間をさらう形で流れるため、加工くずを能率良く排除することが可能になる。

SF法におけるもう一つの要点は、上記運動中には放電加工回路をしゃ断し、放電がおきないようにすることである。

図1のb, c, d, eにおいて、電極が工作物に接近している部分の極間は定常の加工状態での極間距離より小さい。もし放電加工回路がONであればその部分で加工が進行して極間距離を回復しようとするため、反対側の側壁との極間距離の違いを大きくすることができない。このためポンプの作用が著しく減殺されてしまう。したがってSF運動が開始してから図1aの状態に戻るまでは放電加工回路をOFFにすることが望ましい。

以上の基本的な作用のほか、図1aにおいて、c~d, e~bの各区間では電極の水平移動により底面ギャップでの液の流動が促進され残留している加工くずを分散させるため、これも加工安定の一助となる。

以上は最も簡単な例であるが、電極形状に応じて回転も含めた多軸運動を与えることにより、さらに大きな効果を与えることもできる。

4. 揺動加工との違い

上記の加工原理から直ちに類推されるのはいわゆる揺動加工(プラネタリ)方式である。SF法と揺動加工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。

本法と揺動加工法との本質的な相違点は、揺動加工では基本的に電極の底面以外の部分でも加工を行うことを目的として電極に多次元運動を与えているのに対し、本法では加工は従来通り底面で行い、加工くずの排出・分散を効率良く行うためにのみ電極に多次元運動を与えて

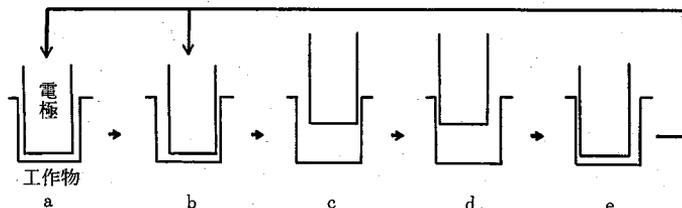


図1 SF法における電極運動の一例

いる点にある。

揺動加工においても図1と似た運動が行われることがしばしばあり、その際には副次的効果として加工くずの排出・分散が促進される。しかし、側壁に接近した部分でも極間距離は通常の加工時の極間距離以上の大きさに保たれるので、電極寸法を小さくしない限り両側壁での極間距離の比を大きくすることができず、ポンプ効果も十分なものが得にくい。一方、SF法では加工中の期間は従来の通常の放電型彫りとまったく同様の状態であり、SF運動期間中は電気的に無関係な二つの物体（電極と工作物）がポンプの動きをするといふ、切り離された二つの動作を交互に行っているものと考えることができる。

したがって、SF法には次のような特徴を挙げられる。

- 1) 電極設計は基本的には従来の一般の放電加工の場合と同じでよく、揺動加工のように縮小寸法とはしない。
- 2) ポンプ効果のみを考慮して電極運動を決めることができる。

逆に、揺動加工との共通点として、電極が多次元運動をすることが挙げられる。このことは、SF法を具体化する場合、その装置としては揺動加工用の装置をもとにして構成できる可能性を意味している。

5. 加工装置

SF法を実際に適用するための加工装置は次のような構成となる。概略図を図2に示す。

加工機本体は、電極と工作物を最低2次元で相対運動させる機構を持つことが必要である。図のように、 z 軸は電極を駆動し、水平軸（ x 軸および y 軸、またはいずれか1軸）は加工テーブルを駆動するのが、一般の放電加工機に適用しやすい形と考えられる。しかし、用途によって、全方向の運動をテーブル運動または電極運動の一方のみによって与えてもよい。たとえば、テーブルの慣性が大きくなる大型部品加工などでは電極運動のみによる方がよい結果を得る可能性がある。また、加工形状に

よっては一部を回転運動に置換えたり、あるいは3軸運動プラス回転運動といった形も考えられる。

本体の構成には上のようなフレキシビリティがあるが、動作原理の項で述べたように、通常数 μm しかない放電間隙を局部的にそれより小さい距離（数 μm 程度）にまで縮めることによりポンプ作用を得ているのであるから、その位置制御の精度が十分高いことが要求される。特に、電極が側壁に接近する際にオーバーシュートがあると、電極と工作物が直接接触して電極の損傷を招くことになるので、ドライバを含めた駆動系の過渡応答特性には十分な配慮が必要である。

加工電源は通常の放電加工機のパルス形成回路がそのまま使用できる。ただし、SF運動中は極間にパルスを供給しないことが必要なので、外部から出力パルスをブロックできるようになっていなければならない。

加工機本体の各軸の運動と、加工電源のON-OFF（パルス自体のON-OFFでなくパルス列のブロッキング）は中央制御装置により制御される。2軸の簡単なものではメモリ容量2Kバイト程度の8ビットマイクロコンピュータでも使用可能であるが、3軸以上の場合や、異常アークになりやすい加工形状、電気条件などで処理速度を上げなければならない場合では、16ビットマイクロコンピュータ、さらにはミニコンのようにやや高めの水準のものの方が適している。

図中、ギャップアナライザとしてあるのは、極間の電圧変化を検出し適当に処理することで加工状態に関する情報を得、それを中央制御装置に供給する部分である。通常の放電加工機ではこの情報は放電間隙の制御のために使われるが、SF法においては、SF運動の起動やパラメータ設定にも用いられる。したがって、単に平均極間電圧の基準サーボ電圧との比較結果のみでなく、最近の適応制御方式のものに見られるような、異常アークや短絡、あるいはそれらの前駆現象等をとらえることのできるものの方が望ましい。また、ギャップアナライザへの入力データとしては、極間電圧以外に、電流、音、光なども有用な場合があり得る。

6. SF法の効果

以下に、SF法によりどのような効果があるかを、従来の方法のうち電極引上げ法との比較を中心とした実験結果をもとに示す。

実験は、次の三つの方法により行い、相互に性能を比較した。1) 電極引上げを含めフラッシングの手段を一切用いていない普通の加工（以下通常法とする）。2) SF法において z 軸以外の変位をゼロとしたもの、すなわち、電極引上げ法。3) 2次元（ $x-z$ 軸）のSF法。

SF法の制御プログラムとしてはSF1、SF2およびSF3の3種類を用意した。

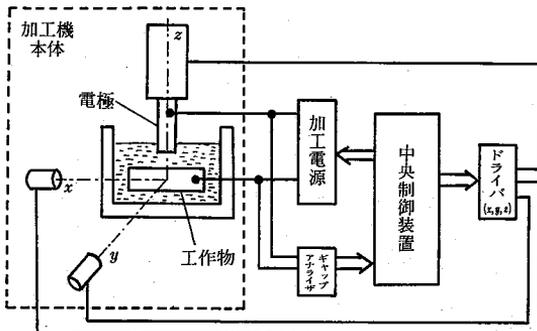


図2 SF法を適用した放電加工装置の構成

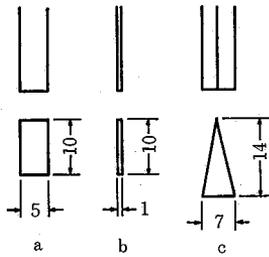


図3 実験に用いられた電極の断面形状 (単位: mm)

SF 1 は単純な SF 運動を行うもの (z 法にはこれを用いた)。SF 2 は SF 運動単位の開始時における電極の位置を、直前の放電期間中に電極がとった位置の最下点とするもの。SF 3 は、上の二つが設定された一定のインターバルで SF 運動を繰返すのに対し、ギャップアナライザの異常アーク出力が放電出力より大きくなった時のみ 1 単位の SF 運動を行うものである。

各プログラムは次のような付加的機能も持っている。

1) 運動開始位置から、いったん底面ギャップ相当分だけ下方に移動してから、図 1 の運動を行う。2) 図 1 から分かるように、電極は $x-z$ 面内で一種の回転運動を行うが、この回転方向を数単位の SF 運動ごとに反転する。3) SF 運動 (単位) 終了時の x 位置を中心から任意の距離だけずらす (オフセット)。

加工条件としては、無噴流での加工が難しく、かつ仕上げ域での比較的 low 消耗条件として実用性のある、 $i_e=5A$, $t_i=40\mu s$ を選んだ。工作物は熱処理済みの工具鋼 210Cr12 (CIRP 標準片) で、この放電条件で加工したときの面あさはおよそ $1.5\mu mCLA$ である。電極は銅を用い、断面形状は図 3 に示す 3 種類とした。

A. 加工速度

通常法、電極引上げ法、SF 法の間で加工速度の比較を行った例を図 4 に示す。

電極運動のパラメータは数多く設定可能であるが、ここでは x 方向の変位振幅 x (片側)、 z 方向の引上げ変位 z を変化させ、他は断わらない限り一定としている。電極形状は図 3 a のものである。

付記した x, z の値からわかるように、a は通常法、b, c, d は電極引上げ法、e は SF 法によるものである。×印はそこで異常アークのために加工続行不能となったことを示す。

通常法では加工開始後間もなく異常アーク状態となりほとんど加工できない。

電極引上げ法では、図からわかるように、引上げ量が大きいほど異常アークを起しにくく、より深くまで加工できるようになる。しかし、 $z=125\mu m$ 程度までは加工速度も向上する傾向があるが (図で右方に曲線が移る)、さらに z が大きい場合は、d のように加工時間が増

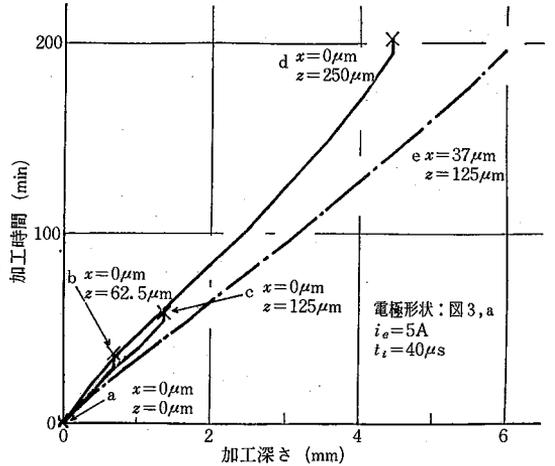


図4 フラッシング法による加工進行状況の違い

a: フラッシング無し b, c, d: 電極引上げ法 e: SF 法

大する。したがって、電極引上げ法では b, c, d の右側に想定できる包絡線が加工速度の限界であると共に、4 mm 以上の深さの加工を異常アークを避けながら行うには加工速度をさらに犠牲にしなければならない。

一方、SF 法の一例である e では、加工速度も電極引上げ法の限界より大きい上に、異常アークを生じにくいことがわかる。

図 5 は、加工深さと共に加工速度が変化する状況を示したもので、条件は図 4 と同じである。加工深さ 0.2 mm ごとに、その区間での加工速度を求めたものである。図のように、SF 法による e が安定して高い加工速度を保っている。特に注目されるのは、電極引上げ法による c と SF 法による e は、電極引上げ距離 z をはじめ、 x 変位以外の全ての条件が同じであり、わずかな x 変位 ($37\mu m$) によって著しいポンプ作用が発揮されていることがわかる。

B. 実質加工速度

SF 法、電極引上げ法においては、実質的な加工と、加工に寄与しない電極運動とが交互に行われる。したがって実質的な加工の行われている期間 (実質加工時間と定義する) における加工速度 (実質加工速度と定義する) は図 5 の値より大きい。また、実質加工時間と電極運動に要する時間の比率は条件によりそれぞれ異なるので、測定された加工速度と実質加工速度との比率も電極運動条件によって異なる。

測定された加工速度は現場的に有意義ではあるが、放電繰返しの安定性など、極間状態の良否を知る指標としては、電極運動の期間を取り除いた実質加工速度の方が適している。そこで、図 5 の結果を修正して実質加工速度で比較を行ったのが図 6 のグラフである。

図より明らかなように、SF 法を用いることで、実質加

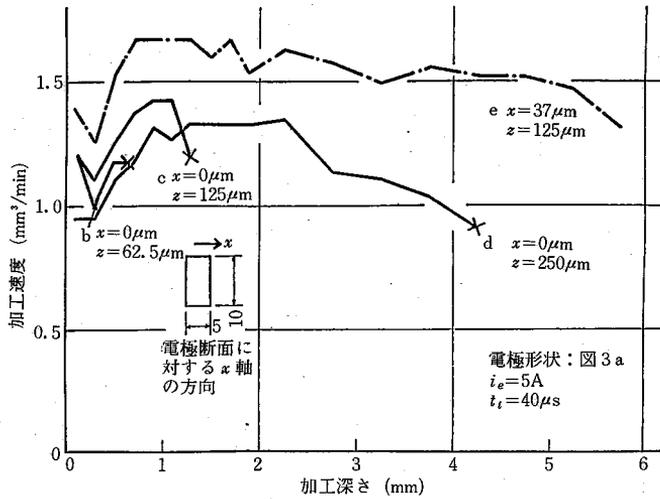


図5 加工の進行に伴う加工速度変化の比較
b, c, d: 電極引上げ法 e: SF法

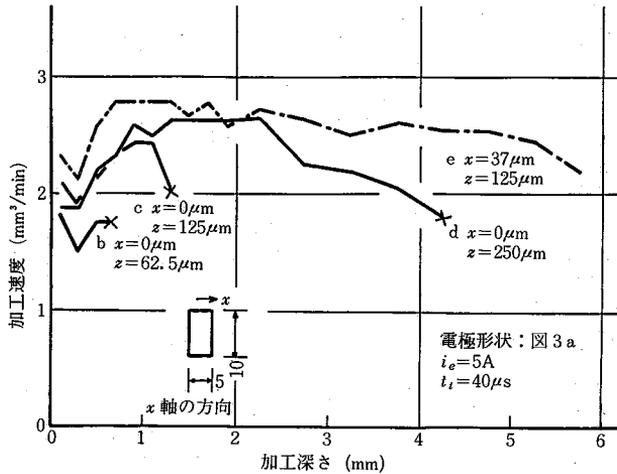


図6 実質加工速度の比較
b, c, d: 電極引上げ法 e: SF法

工速度も改善されている。

以上の結果を総合すると、SF法は極間の清浄度を良好に保ち、放電繰返しの増大と異常アーク防止の両面で優れた効果のある方法であるといえる。また、定量的にみても、図6の実質加工速度ではCIRP共同研究⁴⁾で噴流法により得られている加工速度を上回る値となっており、噴流以上の放電繰返し安定化の効果があることを示している。

運動による加工の中断時間を含めた総合加工速度でも噴流法とほぼ同等の値であり、実用面でも十分なフラッシング効果が得られるものと言える。

C. 電極形状と運動方向の影響

加工間隙の形状は電極形状によって異なるので、SF法のような加工間隙の形状変化を利用したフラッシング

法には電極形状が大きな影響を与えることが予想される。また加工間隙の形状変化は運動方向と電極形状の相対的な関係によって異なるので、これも直接フラッシング作用に影響をおよぼすはずである。

まず、図3a、図3bのような長方形断面の電極についてみると、x軸方向と断面の長手方向が直交するように運動させた場合にSF法の効果が大きく、x軸方向と長手方向が一致すると効果が少ない。特に図3bのような薄い電極ではそれが顕著である。

これは主に次のような理由によるものと思われる。図1の動作原理の説明では側壁の加工間隙が片側で狭く、反対側で広くなり、加工液の流入、流出が一方のみで起るように見えるが、実際にはさらに2カ所の側壁があるわけで、それらに対する加工間隙は中くらいの大きさで

変化しない。したがって、ポンプとしてみたときのこの系は、これらのすきまを通して常にリークを伴っているものと考えることができる。そこで、この間隙不変の側壁部分の割合が少ない方向で運動させたほうがフラッシング効果が大きくなると考えられる。

図3cに示す三角形断面の電極についても同様の理由で、 x 軸と三角形の底辺(短辺)が直交する向きで運動させたのではSF法の効果があまり見られないが、それと直角方向では、図5等にしたものと同じく顕著な効果がある。

このように、SF法において z 軸以外の運動の方向は電極の断面形状に合わせて慎重に選択する必要がある。おおむね長い辺に直交する方向に運動させるのが有効であり、そのために y 軸方向を加えた3次元運動の方が適応性が大きいと言えよう。

次に、電極断面積はポンプと見なした場合のシリンダ断面積に当たるので、これも重要なパラメータである。実際、図3aの電極は、断面積の小さい図3bの電極に比べ小さな z 方向変位で大きなSF運動の効果が得られる。

D. 電極消耗

電極消耗率(体積)については、電極引上げ法で約0.7%、SF法($x=50\mu\text{m}$, $z=125\mu\text{m}$)で約0.8%と大きな差はないが、わずかに増大の傾向がみられた。そこで、特に消耗の影響が現れやすい鋭いエッジでの消耗を前出の三角形電極を用いて調べてみると、SF法を用いた場合は電極引上げ法に比べエッジ部の消耗が若干増大する傾向が見られた。特に x 軸が電極断面の長手方向にとられた場合はやや不自然な形状に消耗しており、加工初期に電極が工作物に衝突した結果とも考えられる。

E. SF3について

電極引上げ法においても、またSF法として上の実験で用いたプログラムSF2においても、通常は一定の時間間隔で電極の引上げあるいはSF運動を行う。しかしこれらの電極運動は実質加工時間を減少させるため、加工状態が安定なときには加工速度に対しマイナスの要因となる。そこで、異常アーク等の不安定な状態を検出したときのみSF運動を行わせるようにしたのがプログラ

ムSF3である。

SF3を用いて、いくつかの加工条件により加工を行ってみた。ところが、結果は通常法と大差なく、フラッシングの効果はほとんど認められなかった。

この結果から、いったん異常アークが生じてしまうと、フラッシングによってそれを回復するのは困難で、異常アーク発生の予防が極めて重要であることがわかる。したがって、上述の目的のためには加工が不安定になったことを知るのでは不十分で、それを予知してSF運動を起動することが必要であろう。

結 言

セルフフラッシング法(SF法)を適用することによって、従来異常アーク対策の難しかった異形穴等の加工安定性が向上することを示した。この手法は加工くずの加工間隙での分散促進の効果もあるので、加工精度の向上も期待できる。また、従来主として採られている電極引上げ法には、水平方向運動の追加と加工電源制御、また揺動加工法には、プログラムの変更、加工電源制御、運動速度の上昇などで、比較的容易にSF法を適用することができる。

今後の課題としては、テーブルと電極にどのように運動軸の配分をするか、異常アーク発生の前駆現象をとらえてSF運動を起動させる方法の開発、加工速度・加工精度・電極消耗を総合的に最適化する運動パターンの決定、などが挙げられるが、極めてラフな適用でも一応の効果が期待できる点で、すでに実用段階の技術であるということもできよう。

(1983年11月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 増沢隆久, C. J. Heuvelman: セルフ・フラッシング法による放電加工の研究, 昭和58年度精機学会春季大会学術講演会論文集 pp567-570 (1983)
- 2) T. Masuzawa, C. J. Ceuvelman: A Self-Flushing Method with Spark-Erosion Machining, Annals of the CIRP vol. 32, 1 (1983)
- 3) 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くずの役割, 精密機械 37, 9 (1971)
- 4) C. J. Heuvelman, B. L. ten Horn: Review of Cooperative Work on EDM in STCE of CIRP, Annals of the CIRP vol. 23, 2 (1974)