研 究

放電加工のフラッシングに関する研究 (第2報)*

—放電加工における加工液噴射効果の解析及びシミュレーション—

崔 小新** 増沢隆久*** 谷口伸行***

Study on Flushing for EDM (2nd Report)

—Analysis and simulation of the effect of jet flushing for EDM—

Xiao-Xin CUI, Takahisa MASUZAWA and Nobuyuki TANIGUCHI

Abstract

In the previous report, we developed a dynamic jet flushing method which is called “scan-flushing”. Experimental results clarified the effectiveness of this method on the precision of machining over conventional jet flushing method. Although good results of the scan-flushing were obtained, several parameters may influence the process. To help to optimize these parameters, a computational method to simulate the process is proposed in this paper. It was confirmed that this simulation algorithm can represent the distribution phenomenon of debris with good correlation with the unevenness of the workpiece surface produced.

1. 緒 言

前報¹⁾では、スキャンフラッシング法を提案した。スキャンフラッシング法を用いることによって、加工くずを分散・排除でき、均一な放電加工面が得られることが明らかとなった。しかし、効果があることはわかったものの、そのメカニズムについてまだ未知である。実際の加工において、加工対象が変わった場合、最適なパラメータ（例えばスキャン速度、流量など）を決定するのは難しい。したがって、スキャンフラッシング法における加工くず濃度分布について、実験あるいは理論的説明が必要となる。

* 第1回電気加工学会全国大会にて発表

** (株) 牧野フライス製作所

*** 東京大学生産技術研究所

本研究では数値計算を用いて、放電加工のギャップにおける加工液の流れ場を計算し、さらに、その計算結果を用いて、加工くず濃度分布の解析を行い、スキャンフラッシングを含む噴射法におけるフラッシング機構の解明を試みる。

2. 流れ場のシミュレーション

放電加工のギャップでの加工くずは主に加工液の流れによって運ばれると考えられるので、計算の第1ステップとして、ギャップでの加工液の流れ場を計算する。

2.1 基礎方程式

この節では、放電加工におけるギャップでの加工液の流れに関する基礎方程式を導く。

図1に示すようなモデルを計算モデルとする。長さ L 、幅 W の固定2平面があり、狭いすきま（ギャップ長） H を隔てて向かい合い、その間に粘性のある加工液が満たされている。

ギャップでの加工液の流れは次のような仮定を満たすものとする。

- ①加工液は非圧縮性流体と考える。
- ②ギャップが狭いため、重力等、加工面に垂直な方向の外力を無視することができる。
- ③ギャップ方向の流れがなく、二次元流れとする。
- ④加工くずは、大きさがギャップ長に比べ十分小さく、流れに対して、影響を与えない。

仮定①、②により、ギャップでの加工液の流れに関する連続の方程式、運動方程式はそれぞれ式(1)、式(2)で表わすことができる²⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 D/Dt は実質微分で、次式により表される。

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

図1 計算のモデル

式(1), 式(2)において, u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速を表す。 p は圧力, ρ は加工液の密度, ν は加工液の動粘性係数である。

仮定③により, 式(1), 式(2)において, z 方向の速度成分 $w=0$ となる。ギャップにおける加工液の運動が緩慢であって, その慣性の影響が省略できるものとする。また, ギャップ長 H が小さいため, u, v の z 方向に関する変化が大きく, それと比較して x, y 方向に関する変化が省略できるものとする, 運動方程式は

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} &= \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}\end{aligned}\quad (3)$$

ようになる。ここで, $\mu = \nu \cdot \rho$ は加工液の粘性係数である。

$z=0$ 及び $z=H$ において, $u=v=0$ として, 式(3)を積分し, ギャップでの x, y 方向の速度の平均値を $\bar{u}, \bar{v}$ とすれば,

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \frac{1}{H} \int_0^H u dz = -\frac{H^2}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \bar{v} &= \frac{1}{H} \int_0^H v dz = -\frac{H^2}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}\end{aligned}$$

が得られる。上式を式(3)に代入すると,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{12}{H^2} \cdot \bar{u}, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{12}{H^2} \cdot \bar{v}\quad (4)$$

が得られる。以下, 改めて u, v をそれぞれギャップでの x, y 方向の速度の平均値と定義し直すと, ギャップでの加工液流れの連続の方程式および運動方程式は次式のようになる。

連続の方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0\quad (5)$$

x 方向, y 方向の運動方程式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u u)}{\partial x} + \frac{\partial(u v)}{\partial y} &= \\ \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{12\nu}{H^2} \right) u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(v u)}{\partial x} + \frac{\partial(v v)}{\partial y} &= \\ \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{12\nu}{H^2} \right) v\end{aligned}\quad (6)$$

ここで、式(5)、式(6)は次のような共通な形式をしている。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S \quad (7)$$

式(7)の左辺第一項は ϕ に対する時間微分項、第二、第四項は u 、 v による対流を表わす面フラックスの項、第三、第五項は、拡散を表わす面フラックスの項、右辺は ϕ の生産を表わす項に対応する。

2.2 計算方法及び計算条件

上述の式(7)に対して、数値計算によってその解を求める。

先ず、式(7)に対して離散化を行う。離散化法としては、有限差分法的一种であるコントロールボリューム法³⁾を用いた。時間微分項の離散化スキームとして、後退スキーム⁴⁾を採用した。面フラックスの近似離散化スキームとして、ハイブリッドスキーム⁵⁾を使用した。また、連続の方程式、運動方程式に一次導関数が存在しているため、波状圧力場あるいは波状流れ場も解として満たすことになる。それを防ぐために、スタガード格子⁶⁾を使用した。

計算のアルゴリズムとして、SIMPLE法⁷⁾ (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)を使用した。主要な手続は以下ようになる。

- ①圧力 p を推測する。
- ②運動方程式を解き、速度 u 、 v を求める。
- ③連続の方程式を満たすように、補正圧力 p' を求める。
- ④圧力 p 、速度 u 、 v を補正する。
- ⑤補正された圧力 p を新しく推測した p として収束解が得られるまで、②～④の手順を繰り返す。

計算に用いた加工面の大きさは前報の実験で使われた加工面の大きさ (50mm角)、ギャップの大きさ H は加工中の電極底面における平均極間距離 (概略値) (0.17mm)を使用した。流体は前報の実験で用いられた加工液 (三菱石油 (株) 製ダイヤモンドEDF-N) とする。加工液の密度 ρ は0.78g/cm³で、動粘性係数 ν は2.71mm²/sである。

流れ場の計算に用いる加工面周辺のグリッド (以下境界グリッドとする) に対する境界条件として、流速 u 、 v は自由流出 (速度勾配0)、圧力 p はノズルの開口位置のグリッドでは実測値 (片側噴射の場合7200Pa、両側噴射、スキャンフラッシングの場合3600Pa)、他のグリッドでは0とした。また、補正圧力は一様に0とした。

流れ場を計算するための初期条件として、各グリッドでの流速 u 、 v は0、境界グリッドでは上記境界条件の値、他のグリッドでは0とした。また、補正圧力は一様に0とした。

以下の計算では、加工面内の計算グリッド数を33×33とし、解析を行うことにした。使用したコンピュータはサン・マイクロシステムズ (株) 製の SPARC station 2 である。

2.3 流れ場の計算結果

図2 片側噴射の場合の流速線図

図3 両側噴射の場合の流速線図

この節で各場合の流れ場の計算結果について述べる。時間間隔0.01msごとの流れ場を計算した。固定ノズルの場合、1ms以内で定常流となる。

(1) 片側噴射

片側噴射の場合の流速線図を図2に示す。なお、わかりやすくするために、縦方向、横方向ともグリッド3個につき一つを表示している。各グリッドの中心から出る短線がその点における流速と、その方向を示している。グリッドの外にある黒い長方形はノズルの所在位置を表す。(以下すべて、ノズルは2本一組になっている。)

この図から、ノズルに近いグリッドでの流速が大きいことがわかる。流れはここを中心として、円状に広がる。ノズルと反対の側へ行くにつれて、流速が急激に下がる。ノズルと反対の側で、ノズルから遠い位置となる両端では、流速が特に小さい。

(2) 両側噴射

両側から噴射した場合の流速線図を図3に示す。この図から、両側のノズルから噴射した加工液は加工面内に流れ込み、真中で衝突した後、噴射方向と垂直な方向から流れ出す様子がわかる。

流速はノズルの直前で大きく、中央部に向かってだんだんと小さくなる。中央での流速が0である。すなわち、両側噴射の場合、加工面の中心によどみ点が生じる。

図2及び図3から、片側及び両側から噴射した場合、最大流速と最小流速の差が大きいことがわかる。また、流速の大きい場所と小さい場所は時間によらず、常に同じ位置である。固定噴射の場合において、計算された流れ場によって、加工くずの偏在、そして、加工面の凹凸が生じることをある程度予測することができる。

(3) スキャンフラッシング

スキャンフラッシングの場合、ノズルが常に移動している。ノズルの位置によって流れ場が変化する。そこで、ノズルの位置に応じて、流れ場の計算を行う。スキャン速度などの条件には前報での実

験条件を用いた。

図4にスキャンフラッシングの場合の流速線図の一例を示す。これも固定噴射の場合と同じく、ノズルに近いグリッドでの流速が大きいことがわかる。一方、ノズルから離れている場所と両方向の噴射流がすれちがう場所の2ヶ所では、流速が小さい。また、ここでは示していないが、計算した一周期での流れ場から、スキャンフラッシングの場合はこれらの大きい場所と小さい場所がノズルをスキャンさせることによって移動していることがわかる。

すなわち、スキャンフラッシングの場合、ノズルをスキャンすることによって、流速の大きい場所や小さい場所を変化させ、流速の均一化をはかることができる。しかし、計算された流れ場をもって、加工面の凹凸を推定することは難しい。

図4 スキャンフラッシングの場合の流速線図

3. 加工くず濃度分布のシミュレーション

加工面の凹凸は加工くず濃度分布と密接な関連があると考えられる。したがって、加工面の精度を評価するために、加工くず濃度分布に対するシミュレーションが必要となる。

3.1 拡散方程式

ギャップに存在する加工くずには、加工液によって運ばれる現象とともに、放電による局所的な攪拌作用および電極の微小上下動（サーボ作用による）により、拡散する現象があり、通常はこれらが混在するものである。加工くず濃度分布を求めるには、加工液の流れの解析と共に、加工くずの拡散についても解析しなければならない。この計算には近似的に拡散方程式を適用することができると考えられる。本節で加工くず濃度に関する拡散方程式⁹⁾を導く。

加工面に $dx \cdot dy$ という微小面積を考える。加工くず濃度を $c = c(x, y, t)$ で表わすことにする。

x 方向に単位時間、単位長さに移動する加工くずの量 D_x は加工くず濃度の x 方向の勾配 $\partial c / \partial x$ に比例して

$$D_x = -\kappa \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8)$$

と表すことができる。ここで符号 $-$ は濃度の大きい方から小さい方へ加工くずが移動することを表わす。比例定数 κ は拡散係数と呼ばれる。

微小時間 dt に、拡散による微小面積の加工くず量の増加は

$$-\frac{\partial D_x}{\partial x} dxdydt = \kappa \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dxdydt \quad (9)$$

で与えられることになる。

また、微小時間 dt に、濃度 c の加工くずを含む加工液が x 方向に u の速度で移動すれば、液流による微小面積での加工くず量の増加は

$$-\frac{\partial(cu)}{\partial x} dxdydt \quad (10)$$

で与えられることになる。

したがって、拡散と液流による加工くず量の増加は次式のようにになる。

$$\left(-\frac{\partial(cu)}{\partial x} + \kappa \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right) dxdydt \quad (11)$$

同様な考え方は y 方向についても成立する。

一方、微小時間 dt 当たりの加工くず濃度の変化は $\partial c / \partial t \cdot dt$ であり、微小面積内における加工くず量の増加は

$$\frac{\partial c}{\partial t} dxdydt \quad (12)$$

となる。

また、加工くずの生成を考えるために、単位面積、単位時間における加工くずの生成量を表わす既知関数を $r(x, y, t)$ とする。微小面積における微小時間 dt 内の加工くず生成量は

$$r dxdydt \quad (13)$$

となる。

したがって、物質の保存則により、以下の関係式が得られる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} = \kappa \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + r \quad (14)$$

これを加工くず濃度に関する拡散方程式とする。

3.2 計算方法及び計算条件

式(14)も式(7)で書表わすことができる。したがって、2.2で述べた計算法を用いて加工くず濃度分布を計算することができる。ここで、計算した片側噴射、両側噴射、スキャンフラッシングの各場合のギャップでの流れ場を用いて、拡散方程式を解き、非定常的に放電加工におけるギャップでの加工くず濃度分布を求める。

加工くず濃度 c の初期条件として、各グリッドとも $c=0$ とした。境界条件として、境界グリッドで $c=0$ とした。

次に拡散方程式の中の加工くず生成量 r 、拡散係数 κ の求め方について述べる。

本研究では、加工速度が一定と考え、単位時間での加工くず発生総量 R は一定とした。

加工くず発生量 r の初期条件 r_0 は、加工面内の各グリッドとも $r_0 = R \Delta s / (L \cdot W)$ で、均一であるとした。ここで、 Δs は各グリッドの面積である。

ある時間区間における各グリッドの加工くず発生量は直前の時間区間におけるそのグリッドの加工くず濃度によって左右されるものとする。すなわち、直前の時間区間における加工くず濃度の高い場所では多くの放電が発生し、加工くず生成量が多くなる。逆に、加工くず濃度の低い場所では、放電の発生が少なく、加工くず生成量が少なくなると考える。

グリッド (i, j) での加工くず発生量 r_{ij} は前の時間区間で計算されたそのグリッドでの加工くず濃度 c_{ij} を用いて、次式により与えられるものとする。

$$r_{ij} = \beta \cdot \frac{G \cdot r_0}{\Sigma c_{ij}} c_{ij} + (1 - \beta) r_0 \quad (15)$$

ここで、 G は加工面内の総グリッド数で、 Σc_{ij} は各グリッドでの加工くず濃度の総和である。 β は放電の集中が起りやすい度合いを表す係数で、放電状態によって変わる。この式において、第一項は加工くず濃度に左右される項で、第二項は加工くず濃度に左右されない項である。本研究では、放電の起りやすさが加工くず濃度により最大で半分程度影響されるものとし、各場合について β を 0.5 一定とした。なお、 β についての値は必ずしも最適なものではないかもしれないので、さらに検討が必要である。

拡散方程式中の拡散係数に影響する要素として電極の上下動、放電による攪拌作用、放電加工で生じる気泡の運動および加工液の状態などが考えられる。通常、これらがお互いに影響し合い、実験あるいは理論によって拡散係数を決定するのは難しい。

本研究では、前報の片側噴射のみの場合の加工面プロフィールと計算される加工くず濃度分布を比較することによって、計算的に拡散係数を決めることにする。

加工面の中で、拡散係数が場所により異なると考えられるが、本研究では、簡単のため、加工面内部の拡散係数は一様として計算を行う。また、放電加工において、加工面の周辺部は開放しているの、内部より拡散傾向は大きいと考え、周辺部の拡散係数は内部での拡散係数の 10 倍とした。

加工面プロフィールとの比較計算の結果、拡散係数の最適値は $23 \text{ mm}^2/\text{s}$ となり、以下の計算では、すべての場合について、この値を用いた。

3.3 加工くず濃度分布の計算結果

ここで、各場合の加工くず濃度分布を非定常的に求める。6.7ms ごとの濃度分布を計算により求め

図5 片側噴射の場合の加工くず濃度分布

図6 両側噴射の場合の加工くず濃度分布

る。

(1) 片側噴射

片側噴射の場合、定常状態に達する所用時間は約2.8秒である。このことから、放電加工で片側から加工液を噴射した場合、短時間で加工くず濃度の分布が決まり、加工開始後間もなく不均一な放電が起こることがわかる。

図5に定常状態になったときの片側噴射の場合の加工くず濃度分布を示す。加工くず濃度分布の図において、白い格子は加工くず濃度が一番低いことを表している。格子の色が濃くなればなるほど、加工くず濃度が大きい。

この図からわかるように、ノズル側の加工面の大部分は低い濃度になっている。加工くず濃度はノズルと反対の側に行くにつれて、少しずつ増えて行き、外縁の少し内側でピークに達する。ここでの加工くず濃度の一番高い場所は、ノズルから遠い、外縁の両端に近い場所にある。最外縁では、加工くず濃度はまた急激に減少する。

(2) 両側噴射

両側噴射の場合の定常状態に達したときの加工くず濃度分布を図6に示す。両側噴射の場合、ノズルを配置した両側の外縁は加工くず濃度が低い、中央部へ行くにつれて、加工くず濃度が高くなる。

片側、両側噴射の場合、高い加工くず濃度と低い加工くず濃度の差が大きく、高い加工くず濃度の場所では、放電が集中しやすい。実際の加工の結果でも、その位置の加工面がくぼみやすい。

(3) スキャンフラッシング

ここで、スキャン速度が18秒／往復の場合の加工くず濃度分布について計算し、考察する。

(a) ある瞬間

(b) 1.8秒後

図7 スキャンフラッシングの場合の加工くず濃度分布（スキャン速度：18秒／往復）

スキャンフラッシングの場合、時間によって、加工くず濃度分布が変化するが、一例として、図7(a)に変化が定常的になった後のある瞬間における加工くず濃度分布を示す。このとき、左側のノズルが左下にあり、右側のノズルは右上方にある。したがって、左上の部分の噴射が一番弱く、加工くずがたまりやすい。これから1.8s後（図7(b)）には、左側のノズルは中央に移動し、右側のノズルはさらに上方に移動する。そのため、いままで、流速が小さかった左上の部分では流速が大きくなってくるので、高い加工くず濃度になっていたその部分はだんだんと低い加工くず濃度になる。それに対して、いままで低い加工くず濃度であった右下の部分は高い加工くず濃度になる。

スキャンフラッシングの場合、ノズルをスキャンさせることによって、加工くず濃度の高い場所は常に変わり、加工くずを分散させる作用がある。よって、集中放電が起きにくい。

スキャンフラッシングの場合、加工面の凹凸は加工くず濃度の時間に対する平均と対応すると考えられるので、ノズルが一往復する間の平均加工くず濃度分布を計算した。図8にその分布図を示す。各グリッドでの平均加工くず濃度はそのグリッドの一往復の加工くず濃度の総和とそれに対応する時間区間数の比である。

この図から、最大平均加工くず濃度と最小平均加工くず濃度の差が、片側噴射、両側噴射の場合の最大加工くず濃度と最小加工くず濃度の差と比較して、かなり小さいことがわかる。

したがって、スキャンフラッシングを行った場合、加工くずが分散され、放電の発生も全加工面にわたって分散され、均一な放電加工面が得られると考えられる。

図8 スキャンフラッシングの場合の平均加工くず濃度分布（スキャン速度：18秒／往復）

図9 スキャン速度が6秒／往復の場合の平均加工くず濃度分布

図10 スキャン速度が12秒／往復の場合の平均加工くず濃度分布

図11 スキャン速度が18秒／往復の場合の平均加工くず濃度分布

4. スキャン速度の平均加工くず濃度分布への影響

全報で、スキャンフラッシングの場合、最適スキャン速度が存在することを述べた。ここでは、スキャン速度を変えた場合の平均加工くず濃度分布について計算し、その原因の解明を試みる。

計算はスキャン速度が6秒／往復、12秒／往復、18秒／往復、48秒／往復の場合について行った。各スキャン速度における収束した一往復の平均加工くず濃度分布を図9～図12に示す。

図9から、スキャン速度が6秒／往復の場合、中央部あたりの平均加工くず濃度が高いことがわかる。また、最大と最小平均加工くず濃度の差がやや大きい。このように、スキャン速度が速いとき、中央部の加工くずが十分除去されない。

スキャン速度が12秒／往復（図10）の場合、中央部分の平均加工くず濃度は下がり、そのかわり、他の部分の平均加工くず濃度が増える。したがって、スキャン速度を遅くすると、中央部の加工くずを除去する時間が長くなり、そのあたりの加工くず濃度を減らし、加工くずの分散をはかることが可能となる。

スキャン速度18秒／往復（図11）の場合、中央部の加工くず濃度がさらに減り、平均加工くず濃度の最も小さい場所はノズル側から中央に移り変わる。濃度最大の場所はスキャン速度12秒／往復と同じで、大きさも同じである。（図では濃淡表示の階調数が少ないので、各濃度領域の面積の変化としてのみ観察される。）

更にスキャン速度を遅くし、スキャン速度が48秒／往復の場合（図12）、スキャン速度6秒／往復と反対に、加工くず濃度の高い部分は四すみに現われる。スキャン速度があまりにも遅いと、ノズルから離れている場所では、流速が小さいので、加工くずがたまりやすい。そのため、多くの放電を誘起し、さらに多量の加工くずが生じる。その結果、スキャンによって回復できないほど大きな濃度の不均一を生ずるものと考えられる。

以上より、数値計算の結果からも、スキャンフラッシングの場合において、最適スキャン速度が存在することがわかる。これらの計算結果は前報の実験結果とよく対応している。

5. 結 論

基礎方程式として、連続の方程式、運動方程式および拡散方程式を、離散化手法として、コントロール・ボリューム法を、アルゴリズムとして、SIMPLEアルゴリズムをそれぞれ用いて、放電加工における加工液噴射効果の計算法を開発した。

この計算法を用いて、片側噴射、両側噴射、スキャンフラッシングの三つの場合について、ギャップでの流れ場、加工くず濃度分布を計算した。

加工くず濃度分布の計算結果は実際の加工面の凹凸との対応が見られ、フラッシング（噴射型）による加工面精度への影響をある程度予測できることがわかった。また、スキャンフラッシングの場合

図12 スキャン速度が48秒／往復の場合の平均加工くず濃度分布

について、最適スキャン速度を計算によって求めることが可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 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) — 二次元微振動法及びスキャンフラッシング法の提案 —, 電気加工学会誌, Vol.26, No.51. (1992)
- 2) 例えば, 岩浪繁蔵, 平山直道: 流体力学, 実教出版. (1975)
- 3) 日本機械学会: 流れの数値シミュレーション, コロナ社. (1989)
- 4) P.J.Roache: Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers. (1976)
- 5) 谷口伸行: 定常2次元 $K-\epsilon$ モデルシミュレーションの解説, 第32回生研講習会テキスト. (1990)
- 6) F. H. Harlow and J. E. Welch: Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, The Physics of Fluids, Vol. 8, No.12. (1965)
- 7) S. V. Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere. (1980)
- 8) 伊藤清三: 拡散方程式, 紀伊国屋書店. (1979)

(1993. 3. 25 受付)