

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560164

研究課題名(和文) 電場印加により誘起されるマイクロジェット形成機構解明

研究課題名(英文) Generating Mechanism of Electric Filed induced Jet Flow

研究代表者 小原弘道(Hiromichi OBARA)

首都大学東京・理工学研究科機械工学専攻・助教

研究者番号：80305424

研究成果の概要(和文)：

次世代の医療技術や環境親和性の高いナノスケールにおけるものづくりの基盤技術として局所制御されたマイクロスケールの流動場形成は重要である。本研究では、平行電極間に分散した誘電体粒子分散流体に交流電場印加により誘起されるマイクロジェットの形成機構をマイクロ PIV・PTV 計測実験と数値モデルによる解析により、粒子のクラスタ形成特性、分散特性ならびに誘起される速度場に着目し、明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

In this study, a generating process of microscale jet flows between parallel electrodes with an applied electric field was investigated using a numerical simulation model for the computational analysis and experimental measurements. An insulating fluid containing dispersed dielectric particles exhibits microscale jet flow pattern generated. These flow structures are formed under high-electric-field intensity and low-frequency conditions, and are generated after the electric field inversion. This phenomenon has enormous advantages for green manufacturing processes and biomedical applications of next generation medical devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：機能性流体, マイクロ流, 混相流, 極微細加工

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電場誘起マイクロジェットは電気絶縁性の媒質中に固体粒子を分散させたコロイド溶液に電場を印加することで形成されるマイクロボルテックス形成機構の解明の中でその存在が示された。このマイクロボルテックスは新しい微細精密研磨手法の開発

の中で発見されたもので、詳細な流動特性評価から、マイクロボルテックスが形成される条件においては、電極間に局所的に加速度を有する流れが形成され、印加電場波形の極性の転換時に位相遅れを有して誘起される特異な流動であるマイクロジェットの存在が明らかにされた。しかしながら、マイクロジ

エットの形成機構に対して明らかにされていなかった。

(2) 電場誘起マイクロジェットはマイクロチャネル内などの微小領域において積極的に局所的な流動場を形成することが可能であり、マイクロ流体システムが必要不可欠な次世代の医療やバイオ、創薬に重要となるキーデバイスとして適用可能である。また、環境親和性が求められ、ドライな環境からウェットな環境下へ移行しつつある技術革新のめざましいナノスケールにおけるものづくりの基盤技術としても活用可能である。局所的な流動場形成は広い分野にわたる次世代を支える重要な基盤技術であるが、その詳細特性解明は応用を目指すためにも必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

次世代の医療、地球環境対策に必要な不可欠な混合・反応・分離・分析などの新しいマイクロ流体デバイスの創出や、流動場においてナノ素材を自在に操作し新しい機能構造を創製するためのナノスケールにおけるものづくりの基盤環境として、積極的に局所制御された流動場は重要である。本研究では、マイクロ領域において局所制御された流動場形成に重要な役割を果たす、電場印加により局所的に積極的な流動を誘起することが可能な電場誘起マイクロジェットの特性を明らかにし、その形成機構を解明する。本研究では、マイクロ PIV 計測・PTV 計測による実験的な手法と数値モデルによるコンピュータ解析手法を用いて、粒子のクラスタ形成特性、分散特性ならびにそのときに誘起される速度場に注目し、マイクロジェット形成機構を明らかにする。

## 3. 研究の方法

微小領域での積極的な流動場形成・制御に有用な電場誘起マイクロジェットの形成機構を解明するためにマイクロ PIV 計測・PTV 計測による実験的手法・数値モデルによる解析手法により行った。

### (1) マイクロPIV計測・PTV計測による実験的手法

実験は、マイクロ流路、高電圧供給システム、マイクロ画像計測システムから構成される実験装置(図1)を用いておこなった。マイクロ流路は、透明ガラス板上に2枚の銅版を平行配置、接着固定した電極間とし、電極間には波形生成装置、高電圧アンプから構成される高電圧供給システムより生成した一様電場を形成した。速度情報は高速度カメラで取得した粒子画像を用い粒子追跡法(PTV)により処理し、粒子速度を取得した。また、流動の速度場情報は相互相関法によるPIVによ

り取得した。実験は、湿度を管理した環境下において、十分に分散させた供試流体を流路内に滴下し、電場を印加することで行った。供試流体は、電気絶縁性を有するシリコンオイル(KF-96-100)を溶媒とし、粒径2~4  $\mu$ mの人工ダイヤモンド粒子(IRM2-4)を分散させ用いた。また、溶媒に対する分散粒子の濃度は $c = 1$  wt.%とした。実験条件は印加波形を矩形波、電場強度 $E = 3.0$  kV/mm, 周波数 $f = 0.5$  Hzを基本条件とした。

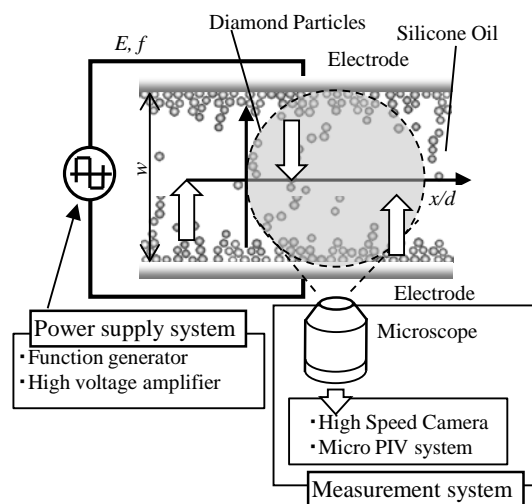


Fig. 1 Experimental apparatus

### (2) 数値モデルによる解析手法

分散相である粒子をラグランジュ的に追跡し、連続相である流体をオイラー的に計算することで流体ならびに粒子の運動を連続解析する Eulerian-Lagrangian 法を用いて数値解析を行った。本報告では、電場印加による二次元面内での作用が支配的になることから、分散相、連続相ともに二次元面内運動に着目しモデル化を行った。数値解析モデル概要を図2に示す。はじめに電場印加により粒子に作用する力ならびに各粒子の抗力として作用する流体力を評価し、各セル内に存在する粒子群から流体に作用する力を積算した (I)。次に各セルにおいて積算された力を外力として流体の運動方程式を解析し、各セルにおける流れ場情報を取得した (II)。これらを合わせて、粒子を移流させ (III)、一連の処理を繰り返すことで電場印加により誘起される流動をモデル化した。電場印加により粒子に誘起される作用力として、Tao, 井門らの報告と同様に誘電分極モデルを採用し、本研究で新たに提案する局所的な電場作用を評価するモデルを組み合わせ解析した。(詳細な数式等は論文参照)

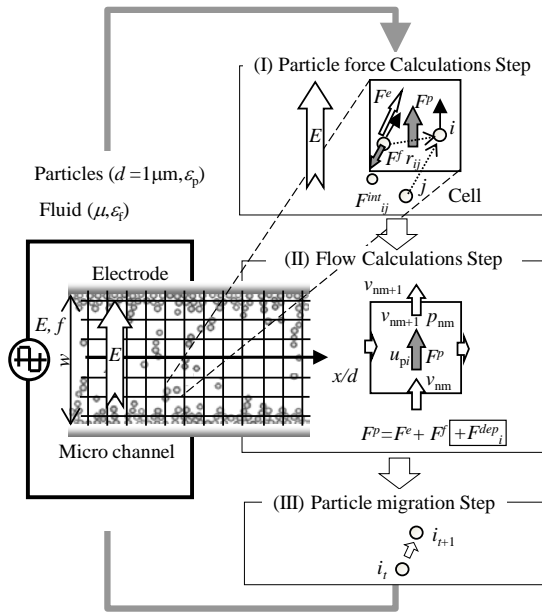


Fig. 2 Numerical simulation model of accelerated flow under AC electric field.

#### 4. 研究成果

##### (1) 流動・粒動形成条件

図3は印加電場強度ならびに周波数変化による流動・粒動様相を整理した図である。電場印加条件の変化により形成される流動・粒動特性が変化する。マイクロジェットが形成される、電極間において、両電極から局所的に対向する粒子の運動が誘起され、これにともない流動が形成される局所対向流動(A), 印加電場の極性変化に対応して単純に電極間を粒子群が往復する往復粒動(B), 若干の動きは見えるものほとんど粒子の動きが観察されない粒動無し(C)に大別可能である。それぞれの形成条件は、電場強度に着目すると、電場強度の増加にともない粒動が観察されはじめ単純往復粒動から局所対向流動へと変化を示す。また、周波数変化に着目すると、低周波数領域においてマイクロジェット形成条件となる。

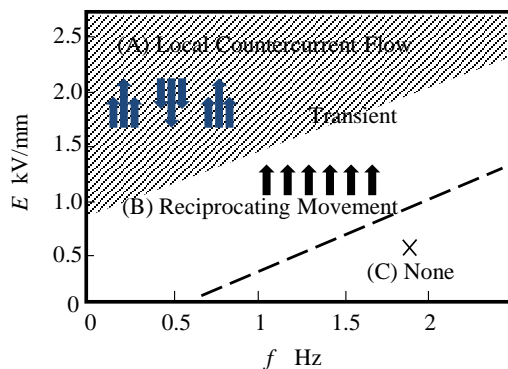


Fig. 3 Classification of particles movement under AC

##### (2) マイクロジェット形成時の粒子分布と粒子速度

図4に局所対向流動が形成される電場条件における、矩形交流電場の極性反転直後から対向流動形成までの粒動形成時の粒子分布様相ならびにその挙動を示す。(a)  $t = 0$  sは電場極性反転時の様相である。上下に示される両電極近傍に電極中央部に比し粒子密度の高い層状の領域が示されている。これは、図示している以前の時刻となる矩形波の定電場印加下において、極低速度で電極近傍に粒子が集積することにより形成される。これらの粒子は、電場極性反転に対応して微動は示すものの大きな動きを示さない。(b)  $t = 40$  msにおいて、集積した粒子は両電極より局所的に粒子が対向する電極へ移動を開始する。ここでは局所的な軌跡情報として対向流動の初期段階が示されている。この初期段階から、次に示す対向する電極に向かう加速的な運動へと発達する。(c)  $t = 80$  msにおいて、各電極から発達した局所的な粒子運動による粒動が形成され、電極間に局所的に流動が示される。

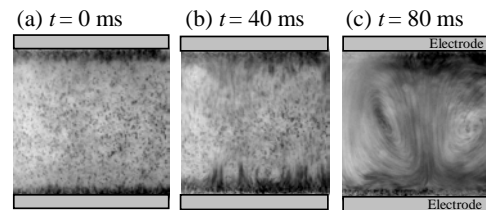


Fig.4 Particles distributions and movements between electrodes( $E = 2.5\text{kV/mm}$ ,  $f = 0.5\text{Hz}$ ,  $w = 1\text{mm}$ )

図5はPTV計測による電場極性反転後からの粒子速度変化を示す。電場反転直後において大きな粒子速度は誘起されず、電場反転より若干の遅れを有し、電極近傍からマイクロジェットに対応した速度増加が示されている。粒子の加速は  $t_s = 50$  ms程度まで示され、その後速度は一定となり、徐々に減衰をはじめ

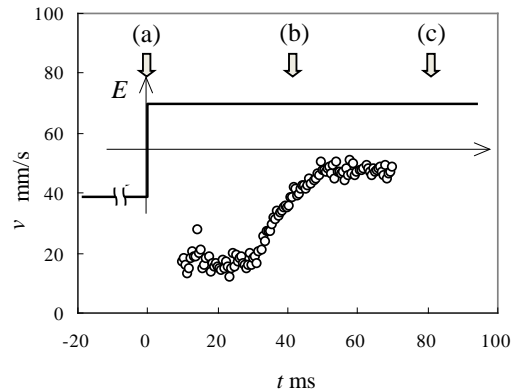


Fig. 5 Particles velocity (PTV,  $E = 2.5\text{kV/mm}$ ,  $f = 0.5\text{Hz}$ ,  $w = 1\text{mm}$ )

める。これらの粒子の運動により流動が誘起される。これらは、主に電極近傍に集積した粒子群の運動により形成されており、矩形波交流電場印加下において電極近傍に集積した粒子が、電場極性反転後に時間遅れを有して、加速的に対向電極への運動を示すことによって形成される。

### (3) 局所電場誘導力モデルによるマイクロジェット形成

図6は印加矩形電場の極性反転直後(1)から加速流動形成(3)に至るまでの粒子分布と粒子速度ベクトル分布を示す。初期状態として粒子は電極間に一様に分散しており、電場極性反転以前(交流矩形波定電場印加時)において、周囲に分散している粒子は上下電極に誘引されつつ相互作用により結合・分離を繰り返しながら長いクラスタを形成する。電極表面においてクラスタ構造を維持したまま薄い層(以下、クラスタ層)を形成する。十分な時間が経過すると電極面上のクラスタ層は増加し、電極近傍において密になり、電極間中央部において粒子は疎になる。電場極性反転直後(1)においては電極表面に形成されたクラスタ層は維持されているが、(2)に示すように電場極性反転より時間遅れを有して、クラスタ層は電極表面より離脱し、各クラスタは両電極からクラスタ群を形成し、加速的に動きを示しマイクロジェットを誘起する。(3)に示すように、その後両電極からの流動が発達し明瞭な回転流動を形成

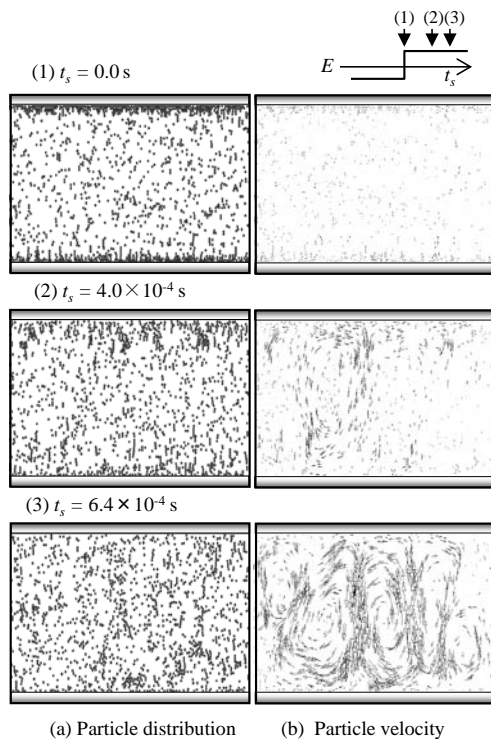


Fig.6 Calculated results of inducing process of accelerated flows ( $n=1000$ ,  $Mn=1.0$ ,  $Re=2.0 \times 10^{-4}$ )

する。この流動形成特性は実験結果と同様である。

図7に数値モデルによる粒子数変化による粒子速度の時系列変化を示す。電場極性反転時からの時間変化を示す。電場極性反転には、粒子分布ならびに速度ベクトル分布でも示された微動に対応し、粒子速度は、遅れを有して、急激な速度増加が示されている。また、最大速度を示した後に速やかに減速をはじめている。これらのことから、本研究で提案する局所電場誘導力モデルは、対向流動形成を空間的・時間的に表現することが可能であるといえる。また粒子数の差異により、粒子数の増加にともない最大速度は増加を示し、また、粒子数の増加により最大速度に到達する時間は短くなる。このことは、粒子数増加と誘起速度の密接な関係を示しており、これらのことからマイクロジェットの誘起には電極近傍への粒子集積密度が重要であると

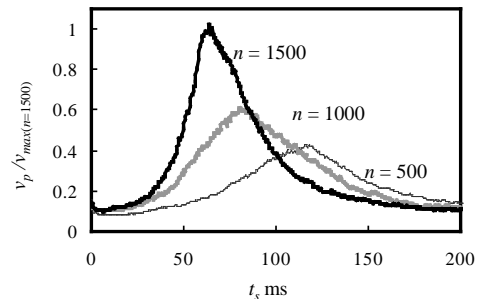


Fig.7 Time history of representative particle velocities (Numerical results,  $Mn=1.0$ ,  $n=500, 1000, 1500$ )

考えられる。

### (4) 電極近傍粒子集積特性

図8は電場極性反転時の粒子分布様相を示す。ここでは、対向流動が形成されず往復流動が形成される電場強度  $E = 1.0$  kV/mm および、マイクロジェットが誘起される電場強度  $E = 3.0$  kV/mm の電極近傍の流動形成特性の異なる電場条件における粒子分布様相を示す。単純往復流動が示される(a)  $E = 1.0$  kV/mm において電極間には粒子が分散した状態を

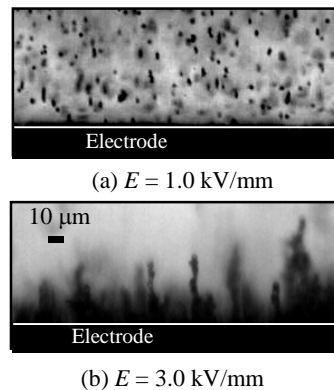


Fig. 8 Particles and Particle Clusters near the Electrode

維持し、電極近傍部においても分散の程度は高く  $E = 3.0 \text{ kV/mm}$  と比較して電極に誘引される粒子数は明らかに少ない。一方、流動が誘起される電場強度 (b)  $E = 3.0 \text{ kV/mm}$  においては、粒子は鎖状のクラスタを維持したまま電極近傍に集積し、電極中央部に比し粒子密度の高い層状のクラスタ層が形成されている。これらのことから、電場条件により電極近傍に集積される粒子により形成される鎖状クラスタの密度が変化し、さらに両電極への鎖状クラスタの集積によるクラスタ層形成により粒子群構造が形成される。マイクロジェット誘起にはこの局所的な粒子クラスタ集積が重要である。これらの成果は次世代医療・バイオ技術のための、マイクロ流体デバイス開発、ナノ領域での粒動を活用した微細加工などへの展開への重要な指針となると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 河合祐輔, 小原弘道, 田代伸一, 交流電場印加により粒子分散型機能性流体に誘起される 平行電極間局所対向流動形成過程, 日本機械学会論文集, 査読有, 77 巻 775 号B編 (2011-3) pp. 832-841.
- ② 小原弘道, 赤上陽一, 井畑良亮, 監物潤, 松平晏明, 交流電場により誘起される粒子分散型機能性流体の流動特性, 日本機械学会論文集, 査読有, 74 巻, 744 号B編 (2008), pp. 1755-1761.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 小原弘道, 田代伸一, 電場誘起マイクロ加速流動形成における電場強度の影響, 日本混相流学会 年会講演会, 2010. 7, 浜松市・静岡大
- ② 小原弘道, 河合祐輔, 田代伸一, 粒子分散流体の交流電場誘起加速流動形成に及ぼすクラスタ長さの影響, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2009. 11, 名古屋市・名工大
- ③ Hiromichi OBARA, Kawai Yusuke, Shinichi TASHIRO, 20th European Conference on Diamond, Diamond-like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitride, 2009.9s, Greece, Atene
- ④ 小原弘道, 河合祐輔, 田代伸一, 交流電場印加による粒子分散流体の加速流動形成の数値解析, 日本混相流学会 年会講演会, 2009. 8, 熊本市・熊本大
- ⑤ 河合祐輔, 小原弘道, 田代伸一, 交流電場印加された粒子分散型機能性流体の局所・局時挙動, 日本混相流学会 年会講演会, 2008. 8, 会津若松市・会津大

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

招待講演 (計 2 件)

- ① 小原弘道, 特別講演「電場印加による粒子分散型機能性流体の流動構造」, 日本混相流学会, 「機能性流体のマルチスケール流動とシステム化 研究分科会」第 3 回特別・若手教員講演会, 2010. 05. 28, 仙台市・東北大学流体科学研究所
- ② 小原弘道, 演題「電場誘起マイクロ流動」, 日本混相流学会・混相流のグラフィックスシミュレーションと可視化研究会委員合同研究会「マイクロ流動と微粒子混相流のモデリング」, 2010. 3. 26, 東京都・日大

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 弘道 (Hiromichi OBARA)

研究者番号: 80305424

首都大学東京・理工学研究科・助教

(2) 研究分担者

田代 伸一 (Shinichi Tashiro)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 30149356