電場による粒子挙動の可視化

押井 和毅^{*} (日本大学), 崔 題恩 (日本大学)

小原 弘道 (首都大学東京), 武居 昌宏 (日本大学)

Movement of micro particles under electrical Field

Kazuki OSHII, Je-Eun Choi, Hiromichi OBARA, Masahiro TAKEI

ABSTRACT

A Microchannel is very essential in studying the chemical reactions and downsizing of the particles in a particular system. To fabricate microchannel devices, thorough understanding of the diffusion reactions inside the microchannel from the viewpoint of multiphase flow dynamics is needed. In measuring the resistance, it is necessary to consider the electric field caused by the electrodes and the force distribution inside the particles. Because of a non-uniform electric field distribution inside the system, the forces inside the particles are not equal.

Keywords :Micro channel, Micro field, Multi phase flow, Micro particle, electrical field

1. 結論

現在, 社会の様々な分野でダウンサイジングが進んでおり, 中でもマイクロチャンネルによって提供されるマイクロな反応場は化学反応そのものに影響を与える可能性を秘めている. マイクロチャンネルの応用範囲は広く, 医療や機器, 科学などその用途は多岐にわたり, マイクロチャンネルは大きさを変えずに数を増やすことにより生産量を増大させるため, 実験室での合成から工業的な生産への移行が格段に効率的に行えると期待されている. これらのためには, マイクロチャンネル内での粒子の分離や分級などの操作技術の確立が必要不可欠である. 光や電場⁽¹⁾などによる研究が進められてはいるものの, マイクロ領域での粒子操作に関する技術は十分に確立されていない.

本研究ではマイクロチャンネル内での電場による粒子操作技術を確立するために, 初めに基礎研究とし, 簡単な実験装置を作成し, 電場強度・周波数を変化させることで装置内の粒子挙動を計測し, 粒子の分離, 分級に向けた知見を得ることを目的としている.

2. 理論

粒子の分離, 分級するために誘電泳動に注目する. ここで球形粒子に働く誘電泳動力 F_{dep} は実効値 E , 角周波数 ω , 粒子の半径 r とすると

$$F_{dep} = 2\pi r^3 \epsilon_m \operatorname{Re}[K(\omega)] \nabla E^2 \quad (1)$$

となる. また, $K(\omega)$ は Clausius-Mossotti factor といい,

$$K(\omega) = (\epsilon_p^* - \epsilon_m^*) / (\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*) \quad (2)$$

と表される. ϵ_p^* , ϵ_m^* は誘電率と導電率並びに角周波数から導出される粒子および媒質の複素誘電率である. 式(1)において $\operatorname{Re}[K(\omega)] = 0$ では粒子に力が作用せず,

$\operatorname{Re}[K(\omega)] > 0$ であれば正の誘電泳動, $\operatorname{Re}[K(\omega)] < 0$ であれば負の誘電泳動となる⁽²⁾.

3. 実験

Fig.1 に作成したマイクロチャンネルを示す. チャンネルは粒子操作のための電極アレイを有しており, 流路部分は高さ 1mm, 流路幅 1mm, 長さ 38mm である. 粒子 (Duke, ポリスチレン) は脱イオン水に分散させ, 流路に注入し, 実験をおこなった. Fig.2 に実験装置を示す. 実験ではファンクションジェネレータにより電圧と周波数を変化させ交流電場を電極間に形成した. なお, 本実験では対向して配置された 1 対の電極間のみ電場を形成した. 粒子の動きは顕微鏡に接続した CCD カメラでコンピュータに画像として取得した. 取得した画像より粒子の動きの観察, 画像解析を行い, 速度情報を取得した. 実験条件は, 粒子は直径 $d = 1.3\mu\text{m} - 2.0\mu\text{m}$ とした. また, 電圧は $V = 1-5\text{V}$ とし, 周波数 $f = 1\text{K}, 10\text{K}, 100\text{K}, 1\text{MHz}$ の 4 パターンとした.

Fig. 1 Micro channel

Fig. 2 Experimental device

4. 結果

実験より得られた粒子挙動ならびに、画像解析により得られた速度特性を以下に示す。

Fig.3は $d=1.3\mu\text{m}$, $E=1\text{V/mm}$, $f=100\text{kHz}$ における電極近傍の粒子挙動を時系列に示したものである。画像のコントラストを調整し示している。右側の黒い部分は電極であり、 t は電場印加後から時間である。ここで、矢印に示す2つの粒子に着目すると、時間経過とともに相互の粒子の位置関係を保ちながら粒子は右側から左側にほぼ平行に移動する。なお、他の粒子も同様にほぼ平行に移動し、これらの粒子の挙動は、その強弱はあるものの、いずれの電場強度、周波数ならびに粒子径においても、同様である。

Fig.3 Movement of particles near electrode ($d=1.3\mu\text{m}$)

Fig.4は各周波数条件における粒子の移動速度を電場強度により整理した図である。代表として、粒子直径 $1.3\mu\text{m}$ の結果を示す。電場強度の増加にともない、粒子の移動速度は増大する。いずれの周波数においても周波数によらずほぼ同様の粒子の移動速度となっている。ただし、 1kHz に関しては他に比べ、その変化が小さくなっている。

Fig.4 Particle Velocity under AC electric field

5. 考察

Fig.3において粒子挙動は、電極に近い領域でほぼ平行に左側に移動する結果が得られたが、流路中央付近では粒子が上下に動いたり、前方の粒子の移動速度に差異が現れるなどの動きが観察された。このことは、電極部近傍に形成される、三次元的な電場によって、局所的に電場勾配が形成されているためではないかと考えられ、勾配が異なる領域が計測面内に存在することで粒子に作用する誘電泳動力 F_{dep} に差異が現れたためと考えられる。

Fig.4より電場強度 E に対応して速度 v は増大しているが、理論から考えられる式(1)での電場強度 E^2 の変化は計測されなかった。このことに関しては、前述した三次元的な電場勾配の影響や計測の精度も含めいくつかの要因が考えられる。例えば、粒子の移動速度の増加に伴って、抗力が増大することで F_{dep} は増加しているにも関わらず、電場強度 E^2 の影響が表れなかったと考えられる。また、前述で示したように三次元的な電場勾配の影響も考えられる。また、 $f=1\text{kHz}$ が他の周波数条件に比し、小さい速度を示したことは、より小さい周波数条件で、 $F_{dep}=0$ を示す $K(\omega)=0$ となる条件が存在することを示唆している。なお、計測の精度として本報告では基礎的の評価として、粒子挙動を代表するいくつかの粒子に着目し、粒子移動距離をもとに速度算出をおこなっている。今後、詳細な議論のためには計測領域を分割するなど局所的な速度評価も含め、統計的な粒子挙動評価が必要である。

ここでは紙面の都合上、図示はしていないが、粒子径変化による粒子の移動速度変化の結果から $1.3\mu\text{m}$ に比し粒径の大きな $2.0\mu\text{m}$ における速度が増加した。このことから、式(1)における粒子の半径 r の3乗項としての大きい影響を及ぼしていると考えられ、本実験での電場印加による粒子の挙動は誘電泳動力 F_{dep} が支配的な役割を果たしていると考えられる。

6. 結論

マイクロチャンネル内での粒子の分級・分離を目的にし、基礎的な知見を得るために粒子を観察を行った。

電場強度が増加するにともない粒子の移動速度も増加し、各周波数においても同様の粒子の移動速度となり、誘電泳動が支配的であることが明らかになった。今後、粒子径 d 、電場強度 E 、また、周波数 f が粒子の挙動への影響を評価が必要である。

参考文献

- 1) たとえば、小原ほか: ナノ加工のための電場誘起マイクロジェット形成特性, 日本機械学会関東支部講演会, No.090-01(2009) pp.455-456.
- 2) 鷲津正夫: 誘電泳動による生体分子のハンドリング技術と分離分析への応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-C, No.1(2000) pp.1-8.