F134

音響放射力および静電気力によるサブミリチャネル内微粒子の連続的分離技術

Continuous Separation Technique of Particle in a Sub-mili Channel
by Utilizing Acoustic Radiation and Electrostatic Force○学 石田 洋哉 (慶大院)
正 菱田 公一 (慶大理工)

正 佐藤 洋平 (慶大理工)

Hiroya ISHIDA, Yohei SATO and Koichi HISHIDA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

A particle separation technique without complex mechanical structure has been developed in a sub-mili channel. This is of importance to various operations in microfluidic devices. Size separation was demonstrated by utilizing acoustic radiation and electrostatic forces which acted simultaneously on the particles perpendicular to the flow direction in the sub-mili channel. By acoustic radiation forces an inhomogeneous distribution of particles was formed. By applying electrostatic forces the particles were moved parallel to electrodes without disrupting their size distribution. Therefore the local concentration of the particles can be controlled by the present technique.

Key Words: Acoustic radiation force, Electrostatic force, Particle separation, Micro-scale flow

1. 緒言

近年のMEMS技術の進歩は μ -TASやLab-on-a tipなどマイクロデバイスの作成を可能とした。マイクロデバイス内ではDNA解析や化学反応など様々な操作が行われ、粒子の分離及び抽出は重要な行程である。これまで非接触で物体の分離を行う研究が行われてきたが、その一つに音響放射力を用いた方法がある⁽¹⁾。音響放射力は音を伝える媒体が存在しさえすれば物体に力を作用させることが利点である。また、マイクロスケール流体の輸送には電気的な力を駆動力とする電気浸透流が一般に用いられている。本研究ではこれら二つの力に着目し、サブミリ流路内に音響放射力と静電気力を流れに垂直方向に同時に印加することにより粒子に働く二つの力の相互作用からMEMSによる機械的に複雑な構造を必要としない、異なる径の粒子の非接触・連続的分離及び抽出技術の開発を目的とする。

2. 実験装置・条件

実験装置の概略図をFig.1に示す。倒立顕微鏡に冷却型CCDカメラを設置し粒子画像を撮影した。水銀ランプを光源とし、フィルターブロックを用いることで蛍光粒子の励起波長を取り出した。サブミリチャネル上部に垂直に設置したトランスデューサはファンクションジェネレータに接続され、電圧15V_{p-p}、周波数4.125MHzの正弦波により連続的に駆動された。トランスデューサ素子直径は5mmである。また、電源はチャネル内に挿入された電極に接続した。

サブミリチャネルの概略図をFig.2に示す。全面ガラスで作られた幅4mm深さ200 μ mのI字型矩形チャネル内部には直径100 μ mの白金電極が壁面に沿って挿入され、電源により直流電圧を印加した。トランスデューサ下部、流路中央において流れと垂直方向にX軸を、下流方向にY軸を設定した。

実験には粒子径0.5 μ m、1.0 μ m、4.0 μ mのポリエチレン蛍光粒子を用いた。密度は1.055kg/m³であり、体積濃度0.05%とし、粒子は溶液中では負に帯電する。溶液には5mmol/lHEPES緩衝溶液を用いた。

3. 音響放射力と定在波音場の形成

3.1 音響放射力

向かい合う二つの音源から発振された音波は互いに干渉

し、音圧振幅が大きい節と音圧振幅が小さい腹を持つ定在波音場を形成する。定在波中の小球に働く音響放射力 F_{ac} は(1)式で表され⁽²⁾、小球は節に向かう方向に力を受ける。

$$F_{ac} = AR^3 \sin(2kl) \quad (1)$$

A は音響エネルギー密度、波数、小球と媒質の弾性率、密度で決定される関数であり、 R は小球の半径、 k は波数、 l は節からの距離である。定在波中の音響放射力分布概略図をFig.3に示す。

Fig.1 Experiment apparatus.

Fig.2 Channel Schematics.

Fig. 3 Acoustic radiation force in standing wave field.

3.2 定在波音場の形成

本研究では流路に垂直にトランスデューサを設置した。本研究で用いた PZT 型トランスデューサの共振周波数は 4MHz であるが、発振超音波の半波長の整数倍と流路幅を合わせるために振動周波数を 4.125MHz に設定した。それによりトランスデューサから振動エネルギーを流路構造に与え、Fig.4 に示すように流路壁面を音源とすることによりトランスデューサ設置面と垂直方向つまり X 軸方向に定在波音場を形成することが可能となる。

4. 実験結果

4.1 粒子径による捕捉速度の違い

(1)式に示すように、音響放射力の大きさは粒子半径の 3 乗に比例するため、流体中に混在する粒子が定在波の節に捕捉される速度は大径粒子の方が小径粒子と比較して大きい。Fig.4 に節からの距離を波長で無次元化した値と音響放射力によって節へと向かう x 軸方向の粒子速度分布の関係を示す。Fig.4 から $x/\lambda=0.25$ の位置において速度の正負が逆になることが見て取れる。 $x/\lambda=0.25$ の位置では粒子はその位置に近づく方向の速度を持つため $x/\lambda=0.25$ の位置は節であることがわかる。

また、 $1.0\mu\text{m}$ の粒子の方が $0.5\mu\text{m}$ の粒子に比べて約 4 倍速い速度で節に捕捉され、その結果定在波音場では二つの領域が形成される。一つは節に近い領域であり大径粒子と小径粒子が混在する。もう一つは節から離れた領域であり小径粒子のみが存在する。

4.2 静電気力による粒子の移動

電界中では溶液中で負に帯電する粒子は静電気力により陽極方向へ電気泳動する。Fig.6 に印加電圧と粒子の電気泳動速度の関係を示す。印加電圧が高くなるほど電気泳動速度は大きくなる。静電気力を用いることにより粒子分布を流れに対し垂直方向に一様に移動させることが可能である。

4.3 音響放射力と静電気力による局所的粒子濃度の変化

$0.5\mu\text{m}$ と $1.0\mu\text{m}$ 粒子に音響放射力と静電気力を同時に印加したときの x 方向速度分布を Fig.7 に示す。粒子は x 軸に対し正弦的な分布を持つ音響放射力により節に引き付けられながら音響放射力よりも強い静電気力により陽極側へ電気泳動する。 $0.5\mu\text{m}$ と $1.0\mu\text{m}$ の粒子の平均移動速度はそれぞれ $26.0\mu\text{m/s}$ 、 $31.7\mu\text{m/s}$ である。x 軸方向に電界を発生させることにより音響放射力を用いて形成された粒子濃度分布を崩すことなく移動させることができる。

二つの力を $1.0\mu\text{m}$ と $4.0\mu\text{m}$ 粒子に同時に印加したときの電圧印加前と印加後の粒子画像を Fig.8 に示す。破線で囲った領域に着目すると Fig.8(a)では $1\mu\text{m}$ の粒子と $4\mu\text{m}$ の粒子が混在しているが、Fig.8(b)では $1\mu\text{m}$ の粒子のみが存在している。音響放射力と静電気力を組み合わせることにより局所的濃度分布を変化させ粒子の分離及び選択的な粒子の抽出が可能となる。

5. 結言

I 型チャンネル内において音響放射力と静電気力の相互作用を利用し粒子の分離及び抽出を行った結果以下の知見が得られた。

i) 音響放射力により節へ移動する粒子の径による移動速度の違いから、節に近い領域には大径粒子と小径粒子が混在し、節から離れた領域には小径粒子のみが存在する濃度分布が得られた。

- ii) 流路壁面に沿った電極に電圧を印加することで一様な粒子の電気泳動が生じた。低電界場においては粒子径による移動差は数 μm である。
- iii) 音響放射力と静電気力を同時に印加することにより音響放射力によって形成された濃度分布を崩すことなく流れに対し垂直方向に移動させ、局所的な粒子濃度を変化させることが可能であり、異なる径の粒子の連続的分離抽出の可能性が示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A) (No. 15206024),および若手研究(A) (No. 17686017)の助成を受けた。

参考文献

- (1)F.Petersson, ほか 4 名, *Analyst*, 129(2004) 938-943.
- (2)K.Yoshioka, Y.Kawasaki, *Acoustica*, 5(1955) 167-173.

Fig.4 Forming of standing wave field.

Fig.5 X direction velocity distribution caused by acoustic radiation force.

Fig.6 Relationship between applied voltage and velocity of electrophoresis.

Fig.7 X direction velocity distribution applied acoustic radiation force and electrostatic force.

Fig.8 Images of particle received acoustic radiation force and electrostatic force.