F144

レーザ放射圧によるマイクロ空間選択的物質輸送技術 Selective Mass Transport in Microspace Using Laser Radiation Pressure

○学 斉木 康一郎 (慶大院)

正 佐藤 洋平 (慶大理工)

Koichiro SAIKI and Yohei SATO, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

Selective mass transport technique is a key issue of microminaturizing the analytical equipment. A particle transport control was developed by using laser radiation pressure generated in a microchannel, by which particles on the order of micron meter are trapped at the laser focused area. In a flow field one or two elliptical shaped laser focused area was generated near a micro nozzle in order to control particles behavior. Ratio of the number of particles that left from single-focused laser radiation pressure was calculated from observed images captured by a CCD camera. In the present experiment, an optical nozzle was made to control the particle concentration using dual-focused laser radiation pressure.

Key Words: Microspace, Mass transport, Laser radiation pressure, Submicron particles, Microchannel

1. 緒言

Micro-TAS や Lab-on-a-chip に代表されるマイクロ流体デバイス⁽¹⁾の性能向上へ向けた研究が盛んである。特に微小流路内での効率的な物質輸送コントロール技術は、デバイスの発展へ向け、最重要となる基盤技術のひとつである。微小流路内においては、電界印加による輸送操作が簡易的で一般的である。しかし、単一のデバイス内に複数の電極を設置することは、流路加工の複雑化等の弊害を生むため、デバイス外部からの非接触な物質輸送コントロール技術の開発が期待される。本研究では、レーザ放射圧による物質操作技術に着目し、マイクロチャネル内に分散したサブミクロン粒子の操作を通じ、マイクロ空間における選択的物質輸送技術としての基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 原理

光の放射圧を利用した物質操作技術として、レーザ光の焦点に物質をトラップする光ピンセット技術⁽²⁾⁽³⁾が開発されている。光はその進行方向に向かって運動量を持ち、物質界面での反射や屈折時の進行方向の変化の際に、運動量変化分の力を物質に与える。集光されるレーザの光路上にある球形微粒子に対しては、図1に示すようにレーザ焦点へと向かう力が働き、レーザ焦点において安定してトラップされる。本研究では、レーザ焦点スポットを楕円状に形成することで、粒子を線状にトラップし、また楕円焦点エリアにおける長軸、短軸方向のトラップ力の違いを利用して粒子を操作する。

3. 実験装置

3.1 光学系概要

本研究では、トラップ用レーザとして連続光の近赤外

Fig. 1. Particle trapping by focused laser radiation pressure. Particles are trapped by sum of laser force F_A and F_B , which was generated by beam L_A and L_B , respectively.

Fig. 2. Schematic of laser radiation pressure system using an epifluorescent microscopy.

Fig. 3. Schematic of the microchannel with a micro nozzle.

Nd:YAG レーザ(Laser Quantum, Ventus, 3 W, 1064 nm)を用いた。照射されたガウシアンビームを、図2に示す各種光学系を通して倒立顕微鏡(株式会社ニコン, TE2000U)内部に入射させ、対物レンズ($\times 10$, $NA = 0.5$)を通して顕微鏡計測面に焦点を結ばせた。光路中の $\lambda/2$ 板、偏光ビームスプリッタにより、任意の強度比をもつ2本のビームに分岐させることで、2箇所の焦点エリアが作成可能である。また、平凸レンズ L2 を光軸に対し微小角傾けることで、焦点スポットを楕円径とし、誘多膜ミラー M1, M2 の操作により、計測面任意の位置に焦点エリアを移動させた。観測には倒立顕微鏡の光学系を用い、明視野照明及び蛍光照明によりマイクロチャネル内を照明し、CCD カメラ(浜松ホトニクス, C4880-80)を用いて撮像した。

3.2 マイクロチャネル、作動流体および粒子

本研究では、図3に示すようなノズル部を有する PDMS 製マイクロチャネルを用いた。カバーガラスと張り合わせて流路とし、対物レンズにより集光されたレーザをチャネル内流体に照射する。

作動流体には 5mM に希釈した HEPES 緩衝溶液を用い、各注入口 A, B, C から静圧駆動で流入させる。また、注入口 B には、輸送物質として直径 $2\mu\text{m}$ のサブミクロン蛍光粒子(屈折率 1.59, 励起波長 505nm, 蛍光波長 515nm)を体積比率 0.05% で混入させた。

4. 結果

4.1 レーザ放射圧による粒子トラップ

$\lambda/2$ 板の回転角を調整し、単一ビームによる流体中での粒子トラップ実験を行った。図4にレーザ放射圧下での粒子画像を示す。X 軸方向を長径にした楕円形の焦点エリアにおいて、粒子が直線状にトラップされていることが分か

る。また、一度トラップされた粒子は、焦点エリアの長軸方向両端から下流域に流出されている。これは、楕円形に形成された焦点エリアの影響により、 X 軸方向における粒子捕捉力が、レーザ強度勾配のより大きな Y 軸方向の粒子捕捉力に対し弱くなり、 X 軸方向へ流出しやすくなる為である。

4.2 単一ビームによる粒子輸送操作

レーザ焦点エリアをノズル出口右側面に隣接させ、単一ビームによるレーザ放射圧を利用した粒子の輸送操作実験を行った。図 5 に(a)レーザ照射直前、及び(b)10 秒後の粒子画像を示す。レーザ照射により、粒子のノズルからの流出領域が制御されていることが分かる。レーザ放射圧による輸送制御効果をより詳細に観測するため、焦点エリアを一定としたまま、各注入口と出口の水頭差を操作することにより、ノズル出口からの流出流量を変化させた。ノズルから流出される粒子数と、焦点エリアからトラップを外れ流路右側へと流出する粒子数の比 R_p を計測し、1 秒当たりのノズル通過粒子数 P_N との関係を図 6 に示した。 $P_N < 30$ では、 $R_p < 5\%$ と、安定した輸送制御が行われているのに対し、 $P_N > 30$ の状態において R_p が大きく上昇している。これは、ノズルからの流出流量の増大に伴い、粒子の持つ運動エネルギーが焦点エリアの捕捉力を超えるまで増大したためと考えられる。 $P_N = 16.4$ 及び 34.2 時のレーザ照射後各々連続 200 時刻の瞬間画像から、ノズル近傍での各粒子の重心位置を算出し、図 7 に示した。 P_N の増大により、焦点エリアの端部近傍から集中して流路右側に粒子が流出しており、捕捉力の弱い焦点エリア端部において、粒子を捕捉しきれなくなっていることが分かる。

4.3 2 ビームによる粒子輸送操作

$\lambda/2$ 板の回転角を調整し、レーザ強度の等しい 2 ビームによる 2 つの焦点エリアをマイクロチャンネル内に作成した。

Fig. 4. Instantaneous images of trapped particles in fluid flow by under elliptically focused laser.

Fig. 5. Instantaneous images of particles trapped elliptically focused laser. (a) $t=0s$, (b) $t=10s$ after generating laser radiation pressure.

Fig. 6. Ratio of the number of particles that left from focused area, R_p , and particle transport rate from the nozzle, P_N .

Fig. 7. Plot of particle centroid in 200 instantaneous images of (a) $P_N = 16.4$ and (b) $P_N = 34.2$.

図 8 (a)に示すように、ノズル出口両脇に平行に 2 つの焦点エリアを配置し、ノズル出口での輸送操作を行った。ノズルから流出される粒子は、左右に大きく分散されることなく焦点エリアにトラップされた後、それぞれの焦点エリアの長軸方向下流側へと流出されており、ノズル出口からの粒子流出方向を特定の範囲に制御できていることが分かる。

次に図 8 (b)に示すように、ノズル下流域に列に 2 つの焦点エリアを配置し、レーザ焦点エリアによる簡易ノズルを形成した。焦点エリアに流入された粒子は線状にトラップされた後、焦点エリアの内側から流出され、下流域へと流される。焦点エリア下流部において粒子の存在領域が狭くなっていることが確認でき、レーザ放射圧によるノズルがマイクロチャンネル内に形成されている。

5. 結言

集光されたガウシアンビームにより、マイクロチャンネル内流体中のサブミクロン粒子を線状に捕獲し、その移動方向を制御した。また、粒子のトラップ領域からの流出現象を観測し、チャンネル内流量との関係を求め、微小空間における粒子輸送制御性能の評価を行った。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、本塾学部生守屋尊胤君に感謝の意を表す。尚、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(A) (No. 14702030), 及び若手研究(A) (No. 17686017)の助成を受けた。

参考文献

- (1) Backhouse, C. J., ほか 2 名, *Analyst*, **127** (2002), 1169
- (2) Ashkin, A., *Science*, **210** (1980), 1081
- (3) Ashkin, A., *Biophys. J.*, **61** (1992), 569

Fig. 8. (a) Transport control of submicron particles at nozzle and (b) Optically trapping nozzle in the microchannel using by dual-focused laser radiation pressure.