

レーザ放射圧を用いたマイクロ液液界面近傍速度計測法の開発

Development of Velocity Measurement Technique Using Laser Radiation Pressure for Micro Liquid-Liquid Interface

80814985 赤羽慧 (Satoru Akahane)

Supervisor: 佐藤洋平 (Yohei Sato)

1. 緒言

2 物質界面を用いた化学プロセスは工業分野において多く用いられてきており、更なる高効率化の期待される小型で高集積化されたマイクロ熱流体デバイスの開発が盛んに行われてきている。その開発において微小空間における界面付近の現象の知見を得ることが重要であり、過去の研究において粒子追跡法 (PTV) を用いる事により界面速度を得る試みが行われてきた^[1]。さらなる詳細な知見を得るためには高空間分解能を持つ、近傍速度情報の取得が必要となる。そこで本研究ではより界面近傍を計測するために、単一粒子を任意の位置に操作可能なレーザ放射圧に着目し、界面近傍の高空間分解能を持つ速度計測法を開発し、より詳細な速度情報の取得を目的とする。

2. レーザ放射圧の原理

レーザ放射圧による物質操作手法は Ashkin ら^[2]によって光ピンセットとして確立された。その操作力は図 1 に示すように溶液中の粒子に対し、ある光線が入射する際に粒子表面で発生する光の屈折により、溶媒と粒子間の屈折率の異なる界面において光の運動量変化が発生する。その運動量変化を対物レンズから入射されたレーザの全光線を積算すると焦点方向に引き寄せる力となる。その際の粒子に作用するトラップ効率の粒径方向分布を図 2 に示す。粒子中心近傍においてそのトラップ効率は線形であることが示されている。その為、流体中に浮遊する粒子においてレーザ放射圧のトラップ力及びストークス抗力が釣り合う際において以下の式が成り立つ^[3]。

$$F = 3\pi\mu d_p v = k_{opt} x \quad (1)$$

μ , d_p 及び v は粘性係数、粒子径及び流体速度である。そして k_{opt} 及び x はレーザ放射圧のパネ定数及びレーザ焦点からの変位である。

3. 実験装置および計測方法

本研究で用いるレーザ放射圧の光学系および観測系を図 3 に示す。粒子操作には近赤外レーザ (Diode-Pumped, 1064 nm, 4.1 W) を用いた。油浸対物レンズ (100×, NA=1.40) に入射されるレーザ強度がビーム径を変化させずに任意に変更させるために、 $\lambda/2$ 板、 $\lambda/4$ 板及び偏光ビームスプリッタを用いて調整を行った。なお、その強度を確認するためにパワーメータにて計測を行った。粒子の挙動を解析することにより速度を算出するため、水銀ランプの光を光学フィルターに透過させた励起光により蛍光発光された粒子を高速度 CMOS カメラにより撮像を行う。速度算出方法としては、①画像の輝度分布の相関を用いる粒子画像流速計 (PIV)、②個々の粒子の変位を計測する粒子追跡法 (PTV)、③単一粒子をレーザ放射で捕捉した際の変位から (1) 式を用いて速度を算出する 3 手法を用いた。

4. 作動流体及びマイクロチャネル

作動流体として 5 mmol/l の HEPES 緩衝溶液 ($n_f=1.33$) とオレ

イン酸を用い、速度計測を行うために HEPES 緩衝溶液にポリスチレン粒子 ($n_p=1.58$) を、PIV 計測では $d_p=0.5 \mu\text{m}$ の粒子、その他の計測では $d_p=2 \mu\text{m}$ の粒子を混入させた。

液液界面を持つ平行 2 相流をマイクロチャネル内に形成する為、図 4 に示す PDMS 製 X 字マイクロチャネルに対して酸素プラズマを流路の半面に照射することにより、緩衝溶液が流動する側のみを親水性に改質させ、安定した界面を形成させた。

5. サブピクセル評価手法の精度検証

本研究においては粒子中心位置精度の影響が多大であると考えられる為、離散情報である取得画像から真の粒子中心位置を特定するサブピクセル評価法の精度検証を行った。評価手法として暗黒背景の粒子像に近似できる正規分布^[4]を用いる事により、0.01 pixel までの情報を持つ模擬粒子を作成し、pixel 単位で

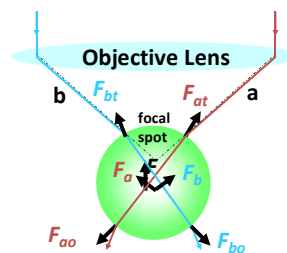


Fig. 1. Schematic of laser radiation pressure.

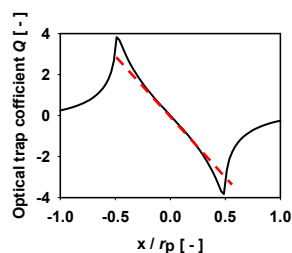


Fig. 2. Optical trap coefficient Q profile.

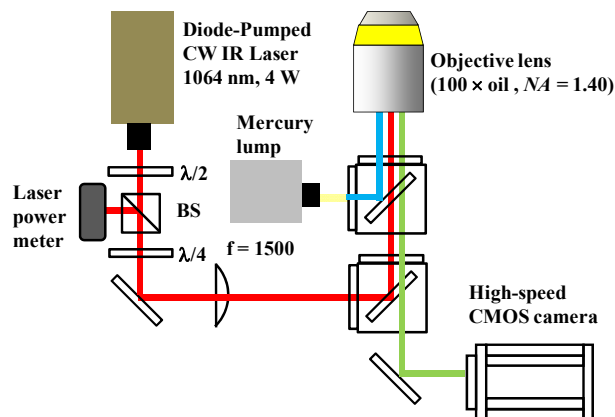


Fig. 3. Schematic of experiment setup.

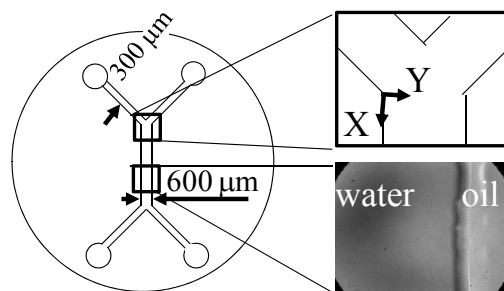


Fig. 4. Top view of X-shape microchannel.

平均化を行う事でサブピクセルの変位を持つ粒子画像を作成した。その際、粒子径を最大輝度値の $1/e^2$ 値までとして設定した。最大輝度値を 2^7 , 2^{11} , 2^{15} として計算し、各粒子径に対するサブピクセル評価された粒子位置と真の粒子中心との変位の平均及びその2乗平均値を図5に示す。2乗平均値から粒子径が大きくなるにつれ、粒子輝度が低い程精度が出ない事がわかるが、これはサブピクセル以下の情報が平均化される際の情報欠損により生じたものだと考えられる。本研究では画像粒子径 $d_e = 12$ pixel であり、ストリーク PTV では $I_{\max} \approx 255$ 、粒子変位を用いた速度計測では $I_{\max} \approx 1.0 \times 10^3$ であるため、0.01 pixel 以下の精度を持っていると確認できる。

6. マイクロ液液界面速度計測

6.1 PIVによるマイクロチャンネル内速度計測

液液界面が形成されたマイクロチャンネル内の速度情報を取得する為に高速度 CMOS カメラにて 100Hz で撮像し、PIV を用いて計測を行った結果及び有限要素法を用いてチャンネル内の速度を計算し、ガラス壁面から $2.5 \mu\text{m}$ の速度の結果を図6に示す。両者は最大速度において良好な一致を示しており、これらから本研究で計測する界面速度はガラス壁面から深さ $2.5 \mu\text{m}$ であることが推察できる。

6.2 ストリーク PTV を用いた液液界面近傍速度計測

レーザ放射圧にて捕捉した単一粒子を任意の位置にて離し、粒子を追跡していくことで速度情報をより高空間分解能で取得することが可能である。本手法を用いて高速度 CMOS カメラにて 100 Hz で画像を取得し、液液界面近傍速度計測を行った結果を図7に示す。また、図6から $y = 250 \sim 300 \mu\text{m}$ において線形に速度が減少していることから界面速度算出のため、線形近似を行うことにより推測を行ったところ約 $15 \mu\text{m/s}$ の滑り速度を持つことを確認した。

6.3 粒子変位を用いた液液界面近傍速度計測

レーザ放射圧は(1)式で示すように粒子中心付近においては線形に力が増加する。そのため、速度計測に向けてその傾きを取得するために図8に示す校正曲線を高速度 CMOS カメラにて 3000Hz で粒子画像を撮像することにより取得した。レーザパワーが 100 mW 及び 200 mW を示しており、それぞれが線形に変化している事が示されている。この2つのレーザパワーとその際の粒子中心の変位を用いて高速度 CMOS カメラにて 1000Hz で撮像し、界面近傍速度計測を行った結果を図9に示す。前節と同様に取得された速度情報から近似曲線を用いることにより約 $10 \mu\text{m/s}$ の界面速度を持つことが確認された。

7. 結言

マイクロチャンネル内に液液界面を形成し、そのチャンネル内速度計測及び界面近傍速度計測を行った。その際、その計測値のサブピクセル精度を 0.01 pixel 持つことを確認し、粒子中心精度が界面近傍速度計測においてストリーク PTV 及び粒子変位を用いた速度計測法から液液界面には $10 \sim 15 \mu\text{m/s}$ の滑り速度を持つことが確認され、より高空間分解能にて速度計測を行うことが可能であることが示された。

参考文献

- [1] Tsutsui, I, *et al.*, 14th Int Symp App. Laser Tech. Fluid Mech., pp. 1-11, 2008
- [2] Ashkin, A., *et al.*, *Opt. Lett.*, **11**, pp. 288-290, 1986.
- [3] Gibson, G, *et al.*, *Opt. Exp.*, **Vol.16, No.19**, pp. 14561-14570, 2008.
- [4] Forliti, D. J., *et al.*, *Exp. fluids*, **28**, pp.436-447, 2000.

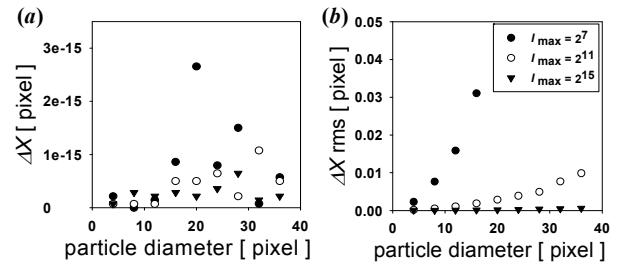


Fig. 5. Error factor profile of (a) displacement from true particle point and (b) displacement rms from true particle point.

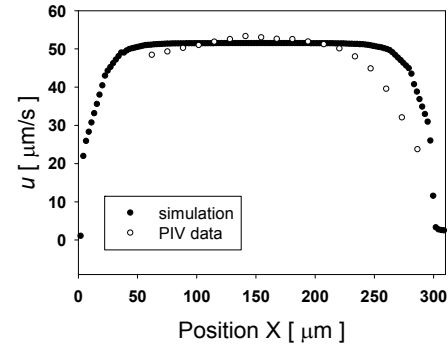


Fig. 6. Velocity profile near the surface by PIV.

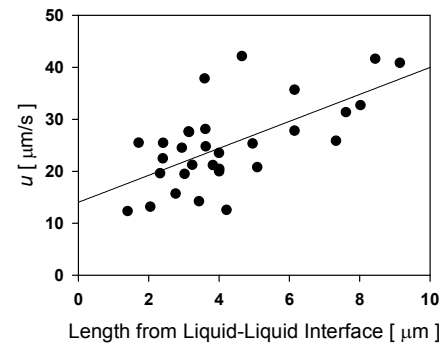


Fig. 7. Velocity profile near liquid-liquid interface by Streak-PTV.

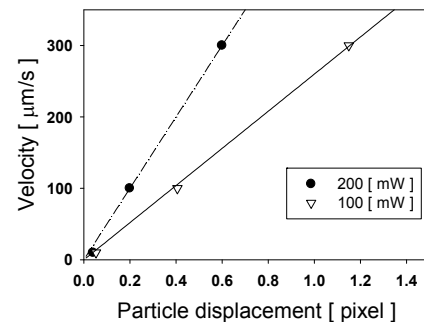


Fig. 8. Relationship curve.

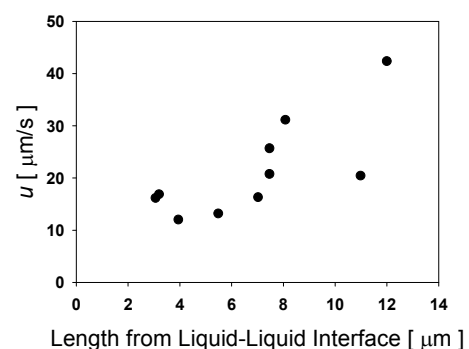


Fig. 9. Dual power laser measurement method.