

マイクロ流動の可視化と速度ベクトルによる流れ解析

兼平 宗樹*・井高 護*・浮田 宏生**

*立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

**立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

Visualization and Velocity Vector Analysis for a Micro-Flow

Motoki KANEHIRA,* Mamoru IDAKA* and Hiroo UKITA**

*Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577

**Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577

We present a micro-flow generated by a broken glass particle rotation induced by optical pressure and demonstrate the flow visualization by both tracer and optical methods. We confirm that the optical method based on a medium density variation is appropriate to obtain the flow velocity vectors around the rotator. Flow amounts are evaluated for different rotator shapes and speeds at different depths for the future evaluation of micro-mixing.

1. はじめに

光マニピュレーションは、光圧を用いて微小物体を操作する技術である。現在、生物学、化学、物理学、マイクロマシン等多くの分野で応用を目指した研究が盛んである¹⁾。また微小物体の形状が非対称な場合、物体表面に作用するトータルの光圧はトルクを発生し、物体を回転させる²⁾。この光圧回転体は、マイクロエネルギー源としての応用が考えられており、そのひとつにマイクロ化学分析システム³⁾における攪拌技術⁴⁾がある。一方、このようなマイクロの領域における流体の可視化については、これまでほとんど報告がない。

本報告では、光圧回転する微粒子が周辺媒質に誘起するマイクロ流動を、従来マクロ領域で行われていたトレーサー法と光学法^{5,6)}に工夫を加えて可視化した。その結果、マイクロ流動の全体像の解析には光学法が適していることが判明したので、光学法による濃淡画像のパターンを相関法を用いて解析することにより、初めて媒質のマイクロな動きを速度ベクトルを用いて表すことができた。さらに、速度ベクトルの絶対値の積算により流量を定義し、どのような光圧回転体が攪拌に適しているかを考察した。また、マイクロ流動の立体像を把握する一方法として、深さ方向に

異なる平面で速度ベクトルを解析し比較した。

2. マイクロ流動の観測方法

2.1 実験装置

流動の観測には、試作したマイクロエネルギー源評価装置を用いた。実験装置の構成を Fig. 1 に、装置写真を Fig. 2 に示す。光源の YAG レーザー ($\lambda=1064$ nm) を、 $NA=1.4$ の油浸対物レンズで集光し、下方からサンプルに照射して光圧回転させた。また、光圧回転体と周辺媒質の動きを同じ対物レンズを通して高速度カメラで観測した⁷⁾。光圧回転体の回転速度は、散乱光を Ge フォトダイオードで検出し、波形の周期性から求めた²⁾。

今回、光圧回転体として寸法 $10\ \mu\text{m}$ 程度の不定形ガラス微粒子を使用した。レーザーパワーによる回転数を Fig. 3 に示す⁸⁾。回転数はレーザーパワーに比例して増加している。

2.2 流動可視化および解析方法

流動の可視化には、① 流れの中に目印となる微粒子を一様に懸濁し、その動きを観測するトレーサー法、② 媒質の濃度分布を観測する光学法を用いた。また、この可視化に対応し、流動の速度ベクトル解析には、① 個々の粒子の軌跡を追跡して、移動距離と時間より速度を計算するトレース法、② 流れの中に生じる局所的な濃度パターン

**E-mail: ukita@se.ritsume.ac.jp

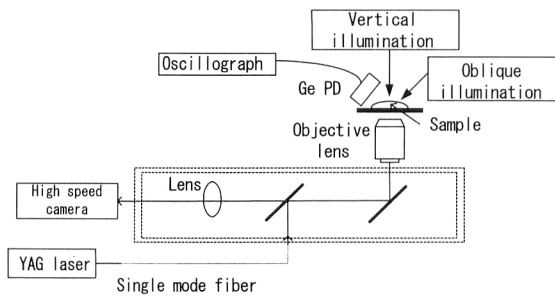


Fig. 1 Configuration of the experimental setup.

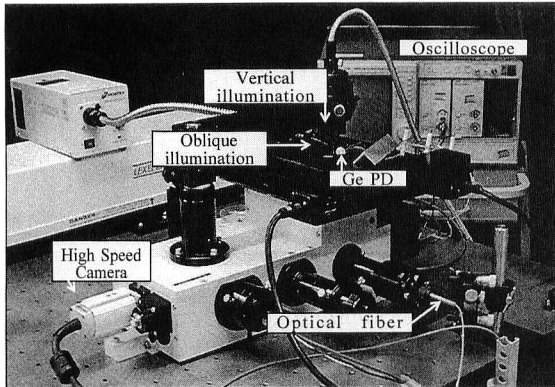


Fig. 2 A photograph of the experimental setup.

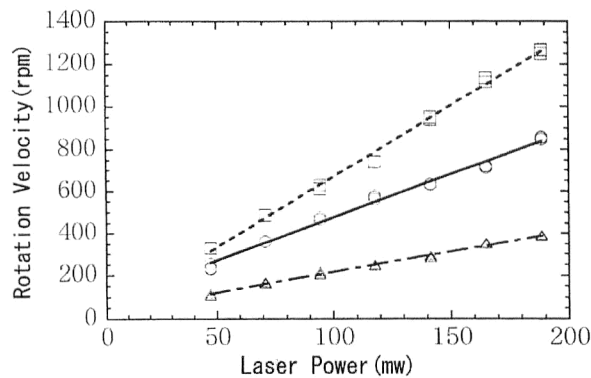


Fig. 3 Rotation velocity at different laser powers.

の類似性より移動速度を求める相関法を用いた。

3. トレーサー法

3.1 追跡用微粒子の選択

トレーサーに使用する粒子は、①粒子形状が球状である、②適度な分散性、密度を有する、③熱運動の影響を受けにくい、④光源となるレーザーの影響を受けにくい、などを満足する必要がある。光圧回転体の大きさが10 μm 程度であるため、トレーサー微粒子には直径が1 μm 以下のものを候補とし、評価実験を行った。実験では熱運動の影響を減らすため、グリセリンを懸濁することにより

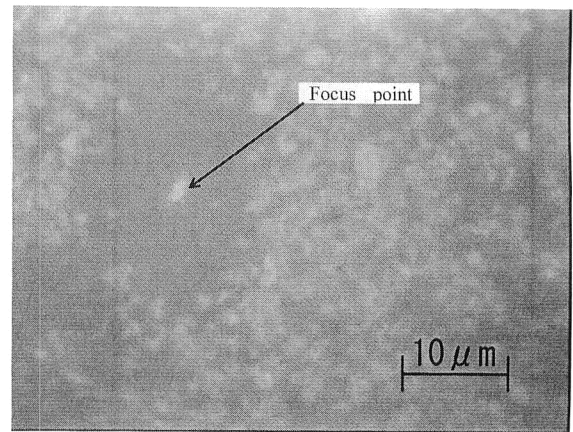


Fig. 4 Microscopic image of gold particles around the laser focal spot.

Table 1 The effect of the tracer on the micro fluid visualization.

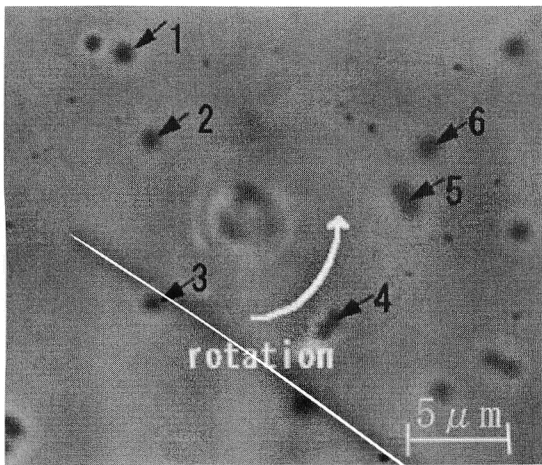
Tracer (Diameter μm)	Glycerol (%)	Usefulness
Polystyrene (0.5)	50	×
Polystyrene (1.0)	30	△
Glass (0.5)	50	×
Glass (1.0)	30	○
Gold (0.5)	50	×
Alumina (1.0)	30	×

周辺媒質の粘度をあげた。粘度は、光圧回転運動に支障がでないように濃度を30%以下とした。また、微粒子がレーザーから受ける影響について調べた。その結果、ポリスチレン、ガラスについてはレーザーの影響を受けないが、金属粒子は焦点付近より押し出される動きが観測された。例えば、Fig. 4 中央の焦点 (focus point) のまわりに、金属微粒子が白い点となって押し出されている。以上の分析結果を Table 1 に示す。これより、トレーサーには粒径1 μm のポリスチレン、ガラスが適していることがわかるが、比重が大きく、熱運動の影響を受けにくいガラスを用いることにした。

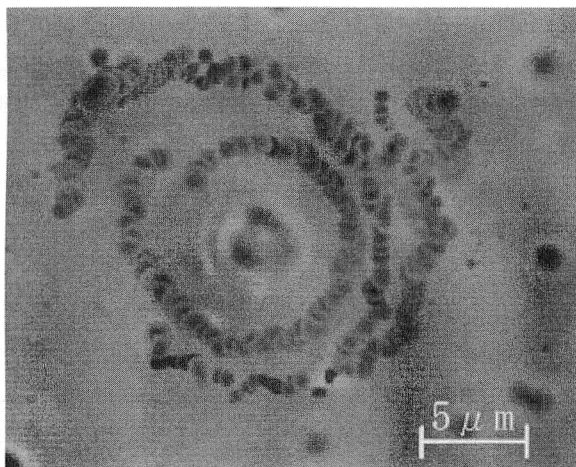
3.2 追跡結果

濃度30%のグリセリン溶液に懸濁した Fig. 5(a) に示す6個の直径1 μm ガラス微粒子の動きを追跡した。回転体の回転速度は519 rpmである。Fig. 5(b) は、追跡結果を1枚の画像に合成したもので、回転体周辺の流跡を表している。

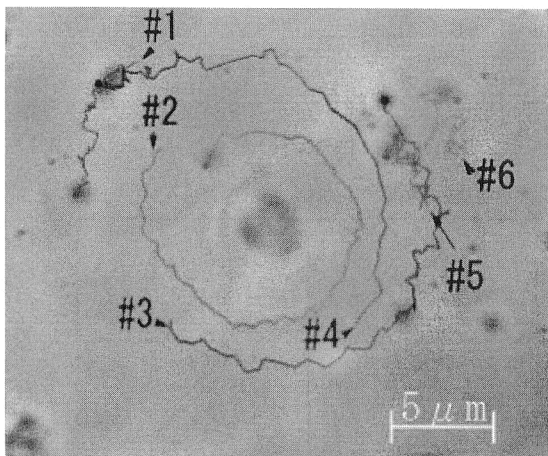
次に、各トレーサーの速度ベクトル解析を行う。解析にはトレーサー追跡ソフト Move-Tr32/2D (ライブラリー社) を使用した。このソフトは、物体の動きに対してターゲットポイントを指定し、その動きの時間的変化を測定する。記録された71フレームの画像(約2.3s)の解析結果



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Visualization and pathlines by glass tracers. (a) Single frame image, (b) composite frame image, (c) analyzed pathlines.

を Fig. 5(c) に示す。光圧回転により誘起された周辺媒質の流動は、回転体に近いトレーサー #2, #3, #4 で大きく、遠い #1, #5, #6 で小さいこと、流れが回転体の直径の 2~3

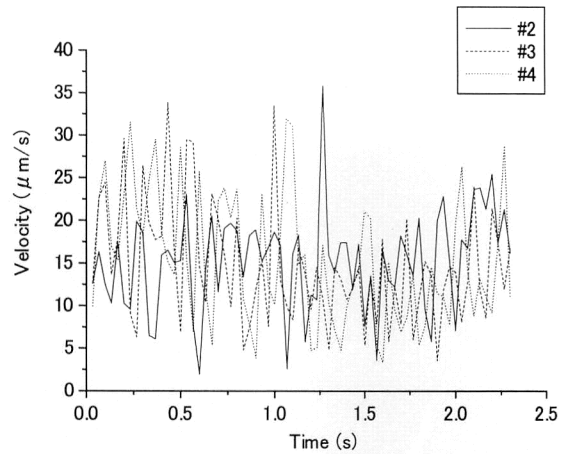


Fig. 6 Variation in the tracer velocity.

倍の範囲にまで及んでいることなど、興味深いマイクロ流動の特性が明らかになった。

しかし、流跡線は熱運動のため激しく変動していることもわかる。Fig. 6 は、微粒子 #2, #3, #4 に対する速度変化で、熱運動のために大きく変化していることがわかる。今回の観測ではグリセリンを懸濁したが、Fig. 5(c), Fig. 6 をみる限り、ブラウン運動の影響はなお残存している。

回転体周辺の流れ場をより詳細に観測するためには、より多くのトレーサーを混入させる必要がある。しかし、トレーサーの数が増えると、トレーサー同士が交錯したとき、形状が同じであるため目標となるトレーサーを特定することが困難になる。

以上により、マイクロ流動の可視化にトレーサーを用いると、①熱運動のため流跡線が激しく変動する、②詳細な観測には多数のトレーサーが必要になるが、個々のトレーサーの判別には限界があり追跡が困難になる、などが明らかになった。

4. 光学法

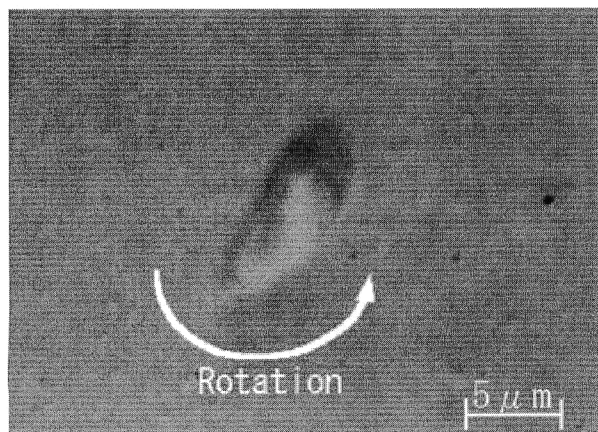
4.1 周辺媒質

光学法により光圧回転体周辺の流れ場を観測する場合、周辺媒質には十分な濃淡むらが必要である。媒質としてシャンプー、コンディショナー、乳脂肪コロイドなどを用いるとともに、照明法を工夫した結果、本実験では乳脂肪コロイドを、斜方照明すると流動のコントラストがあがることがわかった。また、光圧回転特性への影響がない範囲でグリセリンを乳脂肪コロイドに懸濁し (30%以下)、濃淡むらを増強した。

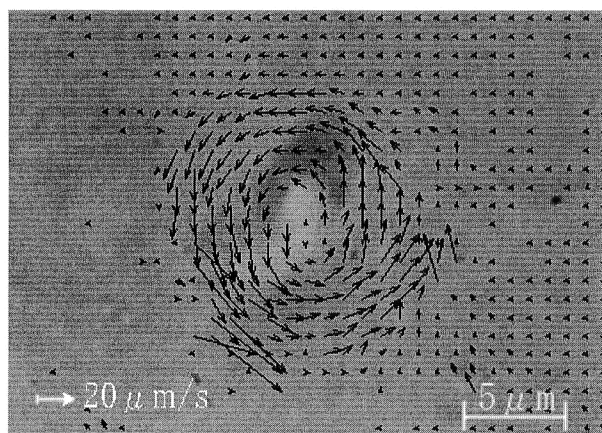
4.2 相関法による速度ベクトル解析

可視化画像を高速度カメラにより解像度 640×240 ドット×8 ビットで 71 フレーム (約 2.3 s) 記録した。第 1 フ

フレームの画像を Fig. 7(a) に示す。画像データは、いったん PC (personal computer) のハードディスクに記録し



(a)



(b)

Fig. 7 Visualization and velocity vectors around an optical rotator by milk fat colloid. (a) Single frame image, (b) analyzed velocity vectors.

た後、各フレームの画像から濃度パターンの類似性を相関法により追跡 (流体解析ソフト Flow-vec 32 (ライブラリー社)) し、移動距離と時間から各フレームごとの速度ベクトルを得た。なお、解析における濃度パターン追跡の信頼度は 95%程度である。

回転体周辺の解析結果を Fig. 7(b) に示す。各速度ベクトルは、フレームごとに得られた速度ベクトルの時間平均を示している。流動は、回転体の 2 倍程度まで広がっていることが確認できる。このように、相関法による解析は画面全体に及んでおり、トレーサーの数による制限はない。

5. 流量解析の試み

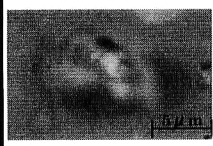
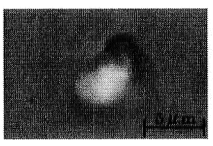
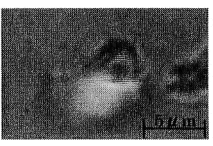
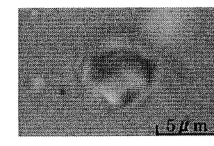
5.1 形状、回転数による流量の解析

光圧回転体の形状、回転数による流量の変化を調べるため、形状の異なる 4 つの光圧回転体を使用し、光学法により観測を行った。それぞれの粒子の形状、回転速度、流量を Table 2 に示す。なお、ここでの流量は仮の指標であり、相関法より求めた各フレーム間での速度ベクトルを積算し、フレーム数で割り算をすることにより平均化した数値である。この結果、次のことがわかる。

Table 2 では、4 つの回転体を流量の大きい順に並べている。回転体 I ~ III は形状が横長の四角形に近く、IV は角のとれた三角形に近い。前者の 3 つの回転体 I ~ III では、回転速度に比例して流量が増加している。後者の IV は回転速度が中程度であるにもかかわらず流量は最小である。これは、角のとれた三角形に近い IV は、形状が横長の四角形に近い I ~ III に比べ媒質を押す表面積が小さいためと思われる。

以上、回転体の形状や回転速度が媒質のマイクロ攪拌に

Table 2 The effect of the rotator shape on the flux amount, where the radiation power is 150 mW.

Particle number	I	II	III	IV
Particle shape				
Rotation speed [rpm]	137	105	60	90
Flux amount [μm/s]	6412	4711	3621	3507

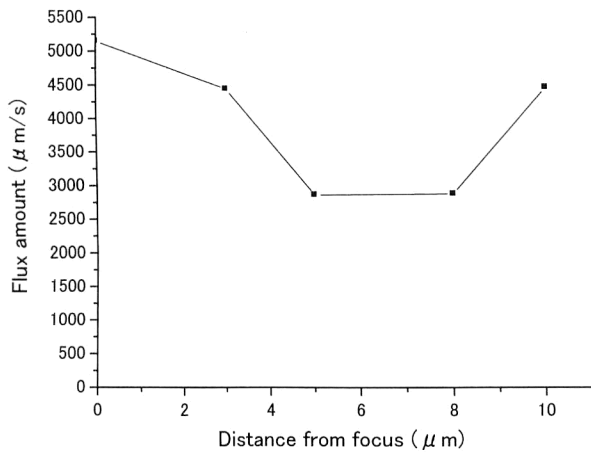


Fig. 8 The flux amount at different depths.

大きく影響することがわかる。

5.2 立体観測

次に、高速度カメラを光軸方向に移動し、結像面を移動することにより観測面を深さ方向にずらし、各面での流動を比較した。観測位置は、対物レンズ焦点面を原点としてそれぞれ0, 3, 5, 8, 10 μm下方である。Fig. 8に観測位置による流量の変化を示す。回転体断面形状の影響も考えられるが、焦点面から3~5 μm下方までは流量が減少し、それ以降は逆に増加していることがわかる。回転体の光トラップ位置(焦点面)は、回転体の上面近傍にあり⁹⁾、回転体の寸法は10 μm程度と考えられるので、この結果より回転体の上下端で流量が大きくなると推定される。

6. ま と め

本研究では、光圧回転体による周辺媒質のマイクロ流動を可視化、解析する手法を提案した。

まず、可視化方法として個別微粒子の軌跡を追跡するトラッカー法、媒質の濃度分布パターンを追跡する光学法の2つを取り上げ、ミクロな領域での観測に必要な条件を明らかにした。また、得られた観測画像より速度ベクトルを

解析するため、トレーサ法、相関法を適用し比較検討した。この結果、トレーサ法では流れやブラウン運動を直接追跡できるが、流れの全体像や流量の解析には光学法と相関法を組み合わせることが有効なことを示した。

次に、この光学法と相関法により、効率的な攪拌の条件や攪拌の深さ方向依存性を検討した。ここで攪拌の指標として、速度ベクトルを積算し平均化した数値を流量として用いた。その結果、周辺媒質を押す表面積が大きい長方形の光圧回転体を、高速回転させることにより流量が増加した。また、深さ方向に異なる平面での観測では、回転体の上下両端面で攪拌効果が大きいと推定された。

今後は、3次元流量の定量的評価方法を確立し、マイクロ混合技術へ発展させる予定である。

文 献

- 1) 浮田宏生：“マイクロ光ピンセット”，精密工学会誌，**65** (1999) 647-650.
- 2) A. Yamamoto and I. Yamaguchi: “Measurement and control of optically induced rotation of anisotropic shaped particle,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 3104-3108.
- 3) M. A. Burns, B. N. Johnson, S. N. Bahmasandra, K. Hndique, J. R. Webster, M. Krishnan, T. S. Sammaroco, P. M. Man, D. Jones, D. Heldsinger, C. H. Mastrangelo and D. T. Burke: “An integrated nanoliter DNA analysis device,” *Science*, **282** (1998) 484-487.
- 4) 浮田宏生，日浦昭二：“光圧駆動によるマイクロエネルギー源に関する研究”，新エネルギー・産業技術総合開発機構平成11年度新規産業創造型提案公募事業成果報告会予稿集(2000) pp. 394-399.
- 5) 日本流体力学会：流れの可視化(朝倉書店，1996).
- 6) P. Freymuth: “Flow visualization in fluid mechanics,” *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (1993) 1-18.
- 7) 井高 護，兼平宗樹，浮田宏生：“光圧回転微粒子によるマイクロ流動の観察”，*Optics Japan* (1999) pp. 65-66.
- 8) 斎藤 貴，浮田宏生：“不定形ガラス微粒子の光圧回転に関する一実験”，電気関係学会関西支部連合大会講演論文集(1997) G209.
- 9) 橘 彰一，浮田宏生：“上下入射光による微粒子の操作—光トラップ力の解析と応用—”，*光学*，**26** (1998) 524-529.