

11. 光圧回転体の応用

浮田 宏生

11.1 マイクロ化学分析システム (μ -TAS)

- ・背景：高齢化社会、環境問題
→検査機器の小型・低価格、高速化
- ・方法：フローインジェクション分析システム
→集積化

(a) 検出法の高感度化

- ・電気化学
イオン選択性 FET (ISFET)
質量分析
- ・光学法
蛍光：青色励起→レンズによる集光・捕捉
プラズモン共鳴法：屈折率変化測定→超高感度

(b) 混合速度の向上

- ・従来法：乱流発生
多数ノズル、
壁面溝加工
外部振動
↓
・光ミキサーによる混合

以下では、まず化学分析チップ用の図1の光ミキサー応用⁽¹⁾について、次に正逆回転体によるの伸長・巻

取り機構⁽²⁾の可能性について述べる。

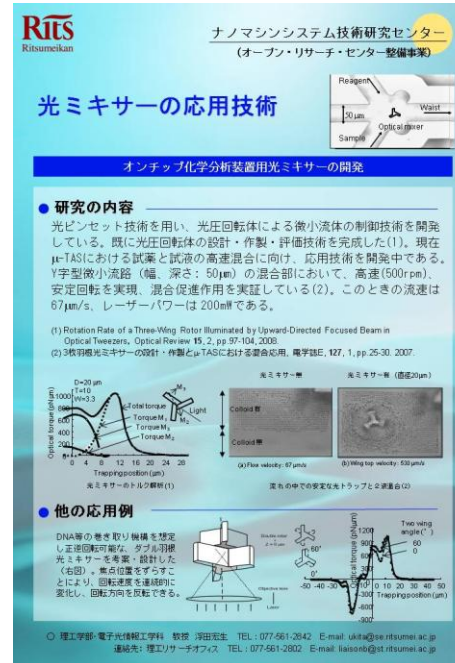


図1 化学分析チップ混合部での光ミキサー応用モデル

11.2 光ミキサーの実験評価方法

実験装置

試液と試薬の混合を促進するための光ミキサーの性能評価のため、流れの観測に図2の装置を用いた。まず、YAGレーザー（波長 1064nm）を光学ボックス

に導き、NA=1.4の油浸対物レンズで集光し、下から光ミキサーに照射する。これにより光ミキサーをトラップし回転させる。次に、サンプルを上から照明し、光圧回転、周辺媒質の流れを同一の対物レンズを通して高速度カメラで観測する。

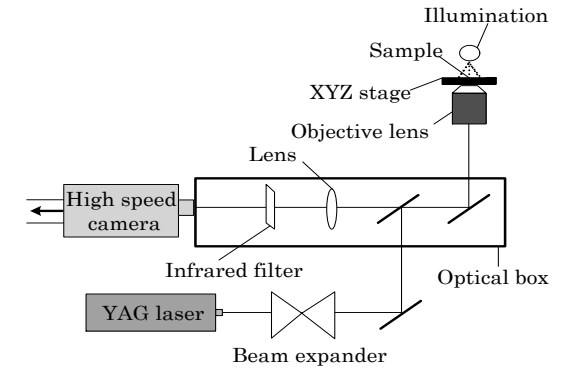


図2 マイクロ流動観測装置外略図

光ミキサー（直径 20 μ m、厚さ 10 μ m）はフォトリソグラフィ法によりレジスト SU-8 を用いて作製、スライドガラスとカバーガラスの間（50 μ m）の水中に分散されている。YAGレーザーにより光ミキサーを光トラップし、上部スライドガラス付近で反時計回りに回転させる。そして、光ミキサー下面を基準とし、各観測面の流動を 120 fps で観測する。画面の観測範囲は 54 μ m \times 40 μ m である。

攪拌可視化

流動の可視化には、水中に乳脂肪コロイドを分散し、その濃度を観測する光学法を用いた。乳脂肪コロイドはレーザーや熱運動の影響を受けにくい。

記録された連続動画を，流体解析ソフト「Flow-vec32」により解析する．解析手順としては，画像内に縦横 $0.5\mu\text{m}$ 間隔で計測点を配置し，各フレーム画像間で計測点を中心とした一辺 $3.5\mu\text{m}$ の正方形内に存在する濃淡パターンの類似性を追跡し，移動距離と時間から速度ベクトルを算出する（図 3）．得られた速度ベクトルから誤ベクトルを削除した後，全フレームにおいて平均する．また，濃淡むらの類似度が信頼度(%)として算出される．

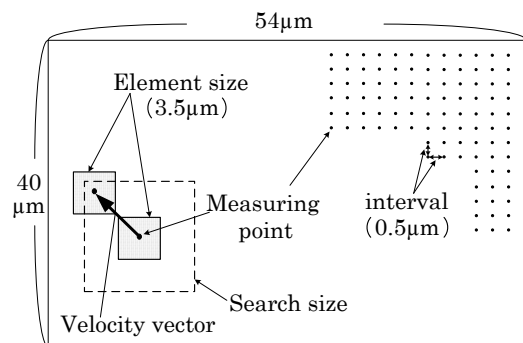


図 3 濃淡パターン追跡による速度ベクトルの解析

最適追跡サイズ

流動解析では，計測点の探索範囲を「追跡サイズ」で指定する．探索範囲が画像領域を少しでも越えた場合は，計測点自体がキャンセルされ，速度ベクトルは出力されない．

光ミキサー円形部以外の全計測点の速度ベクトルの絶対値を合計することにより，「総流量」を定義する．追跡サイズが濃淡むらの移動速度に対し小さすぎると，探索範囲内に移動した濃淡むらが存在しないために正確に流動を追跡しきれず，大きすぎると探索範囲が画像領域を越える計測点の増加により，いずれの場合も総流量は減少する．そこで，総流量が最大で，高信頼度が得られる追跡サイズを選ぶ．

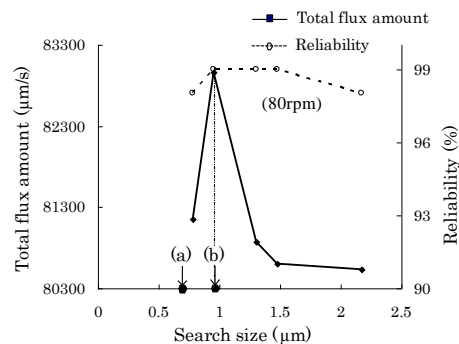


図 4 最適追跡サイズと総流量，信頼度の関係

図 4 に各回転速度での最適追跡サイズの検討結果を示す．80 rpm の場合は，1 フレーム時間内での羽根先端部の移動距離が約 $0.7\mu\text{m}$ であるのに対し，最適追跡サイズは約 $1.0\mu\text{m}$ と，約 1.4 倍になる．170, 260rpm の場合も同様であった．これらより，各回転速度での最適追跡サイズは 1 フレーム時間内での羽根先端部の移動距離の 1.4 倍になることがわかった．

攪拌の実験解析と理論解析

各観測面で得られた速度ベクトルを図 5 に示す．80, 170, 260 rpm と回転速度が増加するにつれ，光ミキサー周辺の流動が広がり半径方向に大きくなっている．特に 260 rpm では，光ミキサー直径の 2 倍付近まで広がっている．また，観測面を下降させると，徐々に流動の広がりが小さくなる．

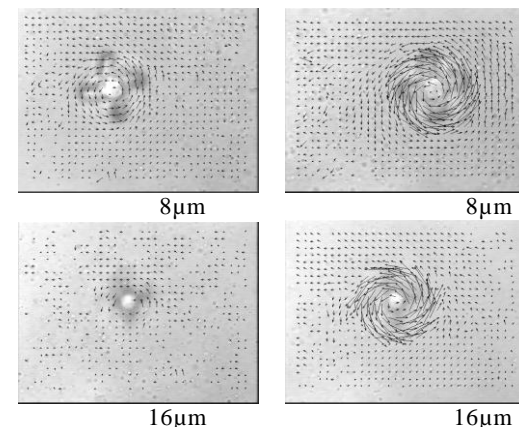
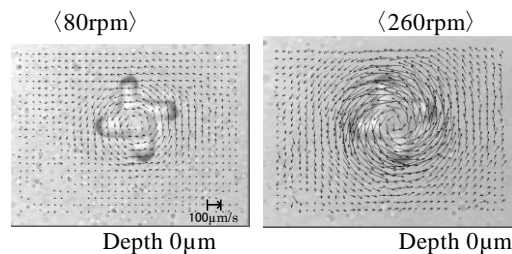


図 5 深さによる速度ベクトルの変化（水平回転）

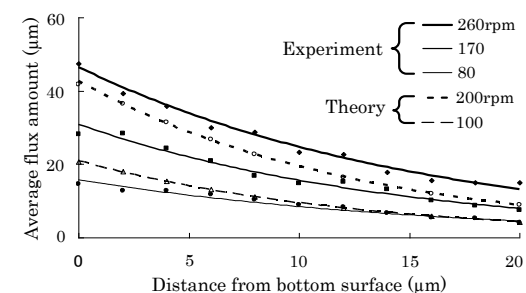


図 6 平均流量の実験値と理論値

図 6 は実験解析と理論解析の比較である．実験，理論ともに平均流量は回転速度の上昇に比例して増加し，深さに対して指数関数的に減少した．またこの傾向は，各回転速度での実験値とかなりよく一致した．

11.3 微小回路中での 2 液混合

最後に，Y 字型微小流路の 2 液混合実験について述べる．まずマイクロシリンジポンプを用いて試液と試薬を微小流路に送液する．次に光ミキサーが懸濁された純水を抽出口に滴下，抽出口付近にある光ミキサーを光トラップして混合部まで移動・回転させる．

可視化と混合実証

一方の液に乳脂肪コロイドを挿入し、流速 $0.01 \mu\text{l/s}$ で送液したときの混合部を図 7(a) に示す。微小流路では 2 液は層流 (流速 $67 \mu\text{m/s}$) となり、混合は 2 液が接する界面での拡散でしか起こらない。(b) は光ミキサーを混合部において回転させた様子である。光ミキサーは流れの中でも安定に保持され、微小流路の混合部において 500 rpm で高速回転した (ビデオ参照)。

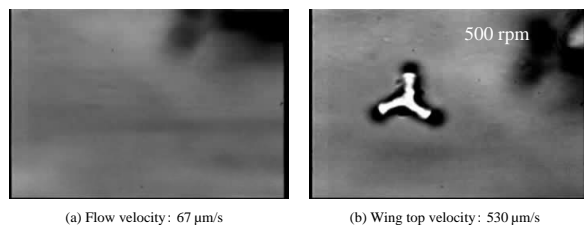


図 7 流路中 2 液混合 (a) 光ミキサー無し, (b) 有り

混合状態を可視化するため、光ミキサーの回転による乳脂肪コロイドの攪拌濃度を追跡し、画像内 $0.5 \mu\text{m}$ ごとの計測点で速度ベクトルを算出・表示した。図 8(a) は光ミキサーのない場合で、NaOH 溶液と BTB 溶液は混じり合わない (層流) が、両液が接する部分で光ミキサーを回転させると (b), NaOH 溶液中の乳脂肪が BTB 溶液にも導入 (混合) されるので、どちらの溶液中でも速度ベクトルが観測されることがわかる。

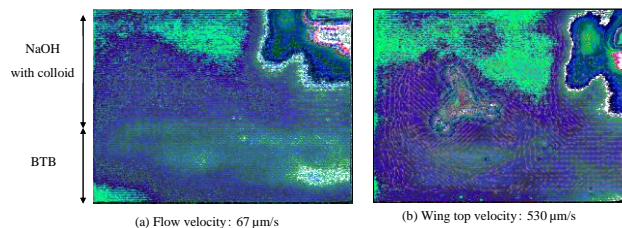


図 8 微小流路中での光ミキサーの安定・高速回転

理論解析

- ・流路中混合の流体解析
 - 対流効果
 - 拡散効果
- ・類似特性→換算可
- ・各種の混合増進法

11.4 DNA 等の伸長・巻取り機構の可能性

遺伝子の解析では、目的の DNA を選別しそれを検出系まで移動するとともに、からまりあった DNA を解きほぐして直線上に展開し、塩基配列を読みとる必要がある。このため、従来は化学修飾で微小球 (ビーズ) に固定した DNA をマイクロピペットで引っ張って伸張させていた。しかし DNA のひもは極めて長いので、伸張した DNA のひもを巻取る必要があったが、適当な方法がなく技術的なネックになっていた。

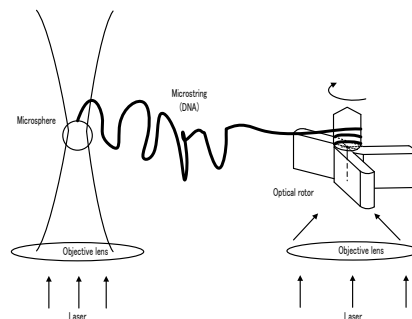


図 9 細紐の伸長・巻取り機構の可能性

この問題を解決するため、図 9 の細紐の伸長・巻取り機構を説明する。同図右の部分は羽根型光圧回転体に巻き取り部を付加したもので、レーザーを羽根型光圧回転体に集光照射し、回転体側面に光トルクを発生させ、回転により DNA を巻き取る。

また、左右に左回転光圧回転体と右回転光圧回転体を配置すれば、磁気テープのリールのように、細紐の巻取り巻戻し機構を構成できる可能性がある。

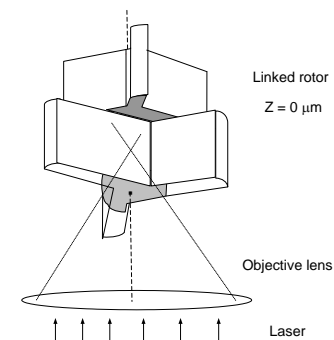


図 10 正逆回転可能な光圧回転体

文献

- (1) 浮田宏生, 高田康作, 赤木太輔, 大西貴和, 野々原靖也: 3 枚羽根光ミキサーの設計・作製と μ -TAS における混合応用, 電気学会論文誌 E, **127**, 1, pp. 25-30, 2007.
- (2) 浮田宏生, 伊部勇作, 大西貴和: 正逆回転可能なダブル羽根光圧回転体の提案と基本特性, 電気学会論文誌 E, **129**, 5, pp. 161-166, 2009.