

# 蛍光を用いたマイクロチャンネル内における混合過程の流動計測

学籍番号 80021369 入澤元太郎 指導教員 前田昌信

## 1. 緒言

微細加工技術の著しい向上により, Lab-on-a-chip,  $\mu$ -TAS 等のマイクロ流体デバイスの開発が盛んに行われている<sup>[1]</sup>. こうしたマイクロデバイスの更なる高精度化, 高効率化にはマイクロデバイス内部における, 微小空間の流動・混合拡散現象の解明が不可欠であり, マイクロスケールの空間分解能を有する計測法が求められている.

本研究では, 蛍光強度の温度依存性を用いて, 高空間分解能を有する温度場の二次元イメージング技術の開発を行う. 計測対象として二流体が混合される T 字型マイクロチャンネルを用いた. 蛍光を用いた温度計測およびマイクロ PIV による速度計測を行うことでマイクロチャンネル内における拡散現象を定量的に明らかにする.

## 2. 微小空間における計測手法

**2.1 二次元温度分布計測法** 本研究では温度計測に常温付近で蛍光強度に温度依存性を有するルテニウムピピリジン錯体( $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{+2}$ )を用いた. 常温付近において 320 nm, 452 nm の励起波長において温度依存性を有し, 発光中心は 588 nm であり, 蛍光強度は温度の上昇とともに減少する.

蛍光強度の温度依存性を有するルテニウムピピリジン錯体を計測壁面に塗布する. 励起光の照射による発光する蛍光画像を CCD カメラを用いて二次元情報として取得し, この蛍光強度から温度分布を得る. 蛍光を励起光強度  $I_e$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] で励起した際の蛍光強度  $I_f$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] は下式で表せる.

$$I_f(\lambda) = (1 - \eta) I_e(\lambda) C \phi(T) \varepsilon(\lambda) \quad (1)$$

ただし, 散乱定数  $\eta$  [-], 励起光波長  $\lambda$  [nm], 温度  $T$  [K], 蛍光体濃度  $C$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], 量子収率  $\phi$  [-], 吸光係数  $\varepsilon$  [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ] である. ここで量子収率が温度依存性を有する. 蛍光強度は励起光強度と蛍光体濃度にも依存する. 励起光強度と蛍光体濃度を一定に保つのは困難であるため, 任意の温度  $T_{ref}$  における各場所の蛍光強度の分布を測定し, 励起光強度分布と蛍光体濃度分布の参照として,

$$\frac{I_f(\lambda)}{I_{ref}(\lambda)} = \frac{\phi(T)}{\phi(T_{ref})} \quad (2)$$

補正を行うことによって, 蛍光体濃度の影響と励起光強度の計測領域内における分布の影響による誤差を抑制することができ, 温度計測が可能になる.

顕微鏡(Nikon Corp., E800)を用いた計測装置の概略図を図 1 に示す. 励起光源としては連続発光光源である水銀ランプを用い, 360 $\pm$ 5 nm のバンドパスフィルターを通して紫外光のみを蛍光に照射した. 画像の撮像には冷却式デジタル CCD カメラを用い, 顕微鏡に設置した. 画像はフレームグラバにより 646 $\times$ 494 pixel $\times$ 14 bit の信号としてホストコンピュータに取り込まれる. 画素(5 $\times$ 5 画素)の平均化を行い, CCD カメラ各画素の感度のばらつきを抑制した. 温度の較正には T 型熱電対を用い, 計測面の温度は顕微鏡上の恒温プレートを用いて一定に保った.

温度の較正曲線を求めるために計測領域内の中央及び 4 隅の 5 点において各温度 100 回の計測を行った. 計測領域内における各点において励起光強度と蛍光体濃度の分布は一定ではなく分布を持っている. その影響で計測を行った面内の各点において較正曲線は異なった曲線となる. 温度 312K における蛍光強度をリファレンスとし

て補正を行った較正曲線を図 2 に示す. 励起光強度の分布と蛍光体濃度の分布による計測誤差を抑制して, 各点における較正曲線が一致しており, 較正曲線を用いることで二次元温度計測が可能となった. また, 本手法の性能は測定温度域 297–332 K において空間分解能 5 $\times$ 5  $\mu\text{m}$ , 温度分解能 0.25 K, 不確かさ $\pm$ 0.83 K である.

**2.2 速度計測法** 速度計測法には粒子画像流速計(PIV)を用い, 顕微鏡を用いて微小空間に適用させた(マイクロ PIV). 速度計測用トレーサ粒子は小さいほどブラウン運動による影響が大きくなる. 本研究では流れへの十分な追従性とブラウン運動からの影響を小さくすることを考慮し, 粒径 1  $\mu\text{m}$ , 比重 1.05  $\text{g}/\text{cm}^3$  のポリスチレン粒子を選択した. 粒子の撮像を鮮明にするため, 粒子には蛍光発光性, 吸収波長 469 nm, 発光中心 508 nm のものを用いた.

顕微鏡を用いた計測システムの概略は図 1 に示した通りで, 励起光源には水銀ランプを用い, フィルタを通してトレーサ粒子の励起波長である 450–490 nm の光をトレーサ粒子に照射し, 蛍光粒子画像を撮像した.

マイクロチャンネル内における速度計測では励起光源に水銀ランプを用い, 流路全体に照射している. そのため焦点の合っていない流路壁面近傍の粒子からの光が撮像画像のノイズとなる. 本研究では画像からバックグラウンドの輝度値を除去することでノイズの影響を抑えた.

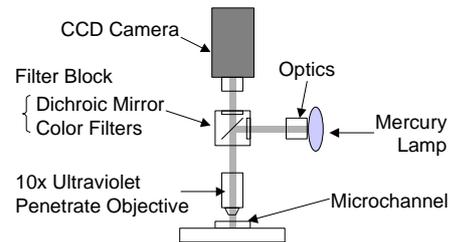


Fig. 1. Schematic of microscopic measurement system using fluorescence.

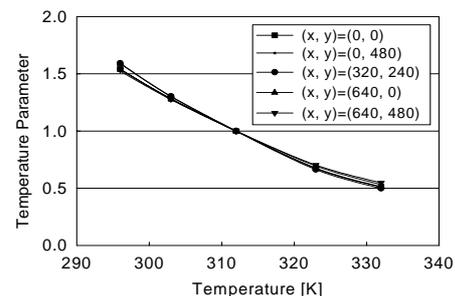


Fig. 2. Calibration curves obtained after correction using a reference value at 312 K.

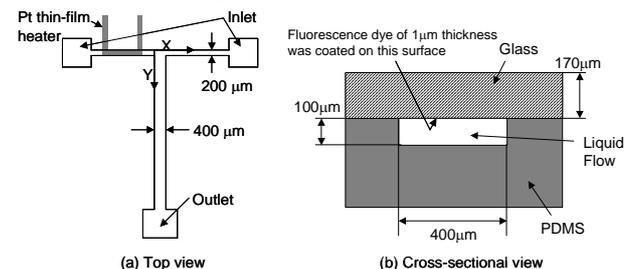


Fig. 3. Schematic of (a) top view and (b) cross-sectional view of microchannel using PDMS.

### 3. マイクロチャンネル内における熱拡散

**3.1 実験方法** マイクロチャンネル内における温度の異なる二流体の混合過程の可視化を行うために温度と速度の計測を行った。マイクロチャンネルには図3に示すT字状のチャンネルを用い、注入口と排出口の液面差による圧力勾配で作動流体であるイオン交換水をレイノルズ数  $Re = 3.0 \times 10^{-2}$  で流した。T字型マイクロチャンネルの左側に設置した白金薄膜ヒータに電圧をかけて加熱することにより、左右から異なる温度の流体をマイクロチャンネルの混合部であるジャンクション部へ流した。

**3.2 温度・速度計測** ジャンクション部における時系列温度分布を図4(a)–(c)に示す。白金薄膜ヒータによる加熱開始時間を  $t = t_0$  とした。ジャンクション部における結果より、ヒータ設置側である左側からの流体の温度が上昇し、ジャンクション部に伝わっているのが確認できる。またその時にマイクロチャンネルのジャンクション部における速度分布をマイクロPIVにより計測した。図4(d)にマイクロPIVによって算出した10枚の速度ベクトル分布を時間平均した速度ベクトルを示す。二流体合流後のマイクロチャンネル中央における速度は  $200 \mu\text{m/s}$  であった。

**3.3 熱拡散** マイクロスケールでの熱の混合と拡散の状況を明らかにするために、温度と速度の計測結果を用いて、マイクロチャンネル内での対流による熱流束と伝導による局所熱流束の評価を行った。時刻  $t = t_0 + 30 \text{ s}$  における対流による熱流束ベクトルおよび伝導による熱流束ベクトルの結果を図5(a), (b)に示す。伝導による熱流束と対流による熱流束の  $x$  軸方向における分布を比較をすると伝導による熱流束が対流による熱流束の50倍となっており、マイクロチャンネルにおいて伝導による熱流束の方が対流による熱流束より熱輸送には支配的であることが示された。これより本手法を用いて高温流体から低温流体への伝導による熱流束および対流による熱流束が定量的に求められた。

### 4. マイクロチャンネル内における粒子拡散

**4.1 実験方法** T字型マイクロチャンネルの2流体の混合部に電界を印加し、電気泳動による粒子の拡散現象の可視化を行った。作動流体にはイオン交換水を用い、蛍光粒子を左側からのみ混入して、流路入口と出口の水面差から生じる圧力勾配により  $Re = 1.0 \times 10^{-1}$  で流した。T字型のマイクロチャンネルのジャンクション部に電界  $20 \text{ V/cm}$  を印加して、粒子の挙動を撮像し、粒子の速度をマイクロPIVにより計測した。

**4.2 粒子拡散** 図6に電界を印加したときの時系列の蛍光粒子画像を示す。電界を印加していない状態の図6(a)では粒子は拡散されずに流れているが、電界をかけることにより粒子が粒子を含まない流れ側まで拡散している様子が確認できた(図6(b), (c))。

電気泳動による粒子の影響を調べる為に粒子の速度ベクトルをPIVにより求めた。図7(a)に圧力差による流れ、(b)圧力差による流れのない状態で電界を印加した場合、(c)圧力差による流れがあるときに電界を印加した場合の速度ベクトルを示す。粒子速度の実測値は図7(b)より  $60 \mu\text{m/s}$  であった。これは粒子速度が電気泳動以外に流体の電気浸透流の影響を受けている為である。この粒子の電気泳動による速度は電界  $10 \text{ V/cm}$  において  $85 \mu\text{m/s}$  であった。これより電気浸透流が陰極側へ  $110 \mu\text{m/s}$  の速度で起こっていることが判った。

電界を印加した場合としない場合を比較すると電気泳動により粒子が陽極側に引き寄せられて  $x$  軸方向の粒子速度が増加しており、粒子が陽極側へ拡散し、混合が促進されている。これより電気泳動を用いた粒子の拡散混合ができることが示された。

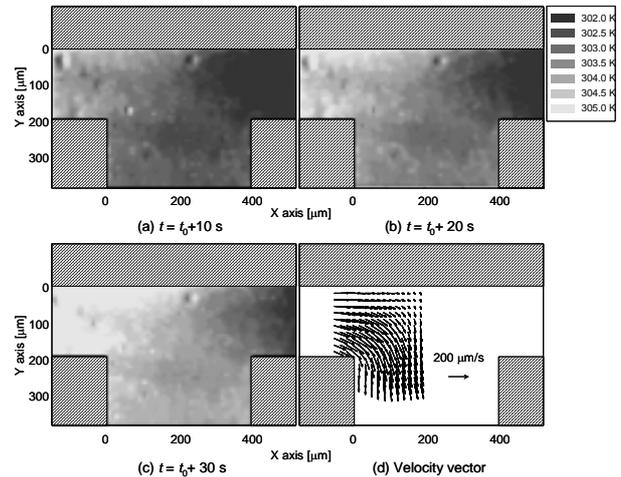


Fig. 4. (a)–(c) Time evolution of temperature distribution, (d) velocity vector map at the junction area in microchannel.

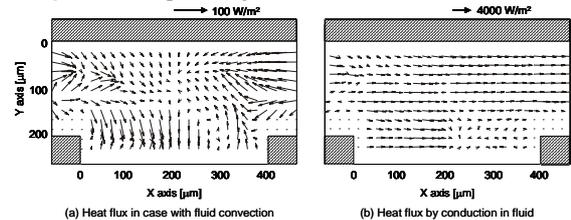


Fig. 5. (a) Vector map of the convection heat flux microchannel. (b) Vector map of the conduction heat flux in microchannel.

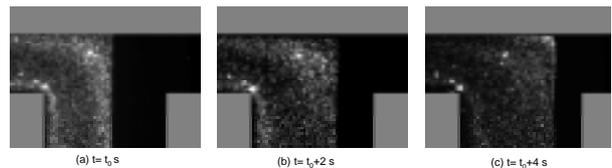


Fig. 6. Time-evolution of fluorescent particles' image with electric field of  $20 \text{ V/cm}$ .

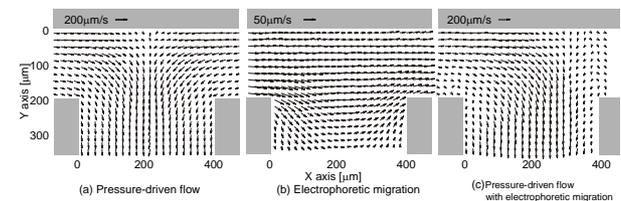


Fig. 7. Vector map in the junction area obtained averaging over 20 instantaneous velocity fields using micro-PIV. (a) Only pressure-driven flow. (b) Only electrophoretic migration. (c) Pressure-driven flow with electrophoretic migration.

### 5. 結 言

温度依存性を有する蛍光色素を用いて二次元時系列温度計測法の開発を行った。本手法は測定温度域  $297\text{--}332 \text{ K}$  において温度分解能  $0.25 \text{ K}$ 、不確かさ  $\pm 0.83 \text{ K}$ 、空間分解能  $5 \times 5 \mu\text{m}$  の精度を実現した。

マイクロチャンネル混合部における異なる温度の2流体の混合において、対流による熱流束と伝導による熱流束を求めて比較したところ、マイクロチャンネルにおいては伝導による熱流束が支配的であることが定量的に示された。

マイクロチャンネル混合部に電界を印加することで、粒子が電気泳動により拡散し粒子を含まない流体との混合が促進されていることが確認された。

### 参 考 文 献

[1] マイクロ化学分析システム( $\mu$ -TAS)調査専門委員会編, 電気学会技術報告, **812**, 2000, pp.43-80.