

平成21年 5月27日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760124  
 研究課題名（和文） 電場によるマイクロ・ミキサーの高性能混合制御－混合と搬送の機能分割－  
 研究課題名（英文） Mixing Control in the micro-mixer by electrical field - functional separation of mixing and transportation -

## 研究代表者

松本 亮介 (MATSUMOTO RYOSUKE)  
 関西大学・システム理工学部・准教授  
 研究者番号：50268314

研究成果の概要：本研究課題は、電気浸透流により「流体の搬送」機能と「混合」機能を分離して流体の制御を行うことにより、混合部長さを従来の数分の1に抑え、流量変動にも対応した高性能マイクロ・ミキサーを開発することにある。T型およびクロス型チャンネルにおいて、流路に印加する電場を非定常に制御することにより、ジャンクション部で2種の流体が折り重なって多層化される電場パターンを求め、混合の促進を実現した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	270,000	3,670,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, マイクロ・ミキサー, 電気浸透流

## 1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロマシン技術を応用してマイクロリットル、ナノリットルの極少量の流体を取り扱うマイクロ流体システムの開発が盛んに行われている。マイクロ流体システムを用いることにより、生化学分析の分野ではサンプルや試薬の使用量を大幅に減らすことができ、また分析時間の短縮化、装置の小型軽量化が可能である。

これらマイクロ流体システムでは、スケールの違いによりマクロスケールで用いられてきた「液体の搬送、混合、分離」の要素技術を使用することができない。例えば流体の混合においては、マクロスケールではマグネット攪拌子などにより乱流を発生させて液体

同士を混合させるが、マイクロスケールでの流動は粘性が支配的であり乱流は発生せず、分子拡散に依存するため混合は容易ではない。均一な混合は化学反応の前提条件となるため、混合を効率的に制御できるマイクロ・ミキサーは重要なデバイスである。

マイクロ・ミキサーに関する研究は多数行われているが、2種の液体を流し、その界面において分子拡散により混合を行うため、界面積が増加したとしても、最終的には拡散時間（対流時間）に応じて混合の程度が決まることになる。したがって、マイクロ・ミキサーの混合性能は、分析する液体の流量（流速）に依存し、「なりゆき」で混合度が決まることとなり、このことはミキサーの性能上好ま

しくない。

そこで本研究では、「流体の搬送」と「混合」の機能を切り離すことにより、マイクロ・ミキサーの高性能化を図ることとした。

## 2. 研究の目的

本研究で開発するマイクロ・ミキサーでは、マイクロチャンネルに非定常の電場を印加し、電気浸透流を制御することにより、「流体の搬送」と「混合」の機能を切り離し、マイクロ・ミキサーの高性能化を図る。その方法について図1に概要を示す。所要量の2流体をマイクロ・ミキサーに流入させ（搬入）、マイクロ・ミキサーで所定の混合度まで混合させる（混合）。その後、ミキサー出口から流出（搬出）する。マイクロチャンネル内でバッチ処理を行うという発想である。この一連の作業を数 Hz で連続的に繰り返し行うことにより、混合のための拡散距離を無くし、流量の変動にも対応した高性能マイクロ・ミキサーを実現する。

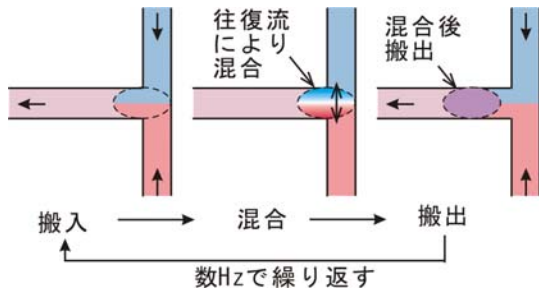


図1 「流体の搬送」機能と「混合」機能を切り離した高性能マイクロ・ミキサー

## 3. 研究の方法

### (1) T型およびクロス型チャンネルにおける混合促進

「混合」の過程は、非定常の電気浸透流による往復流をマイクロチャンネルのジャンクション部で発生させ、混合を促進させる。しかしながら、マイクロチャンネル内の流れはスケール効果により層流であり、単純に流体を往復させるだけでは混合の促進にはつながらない。2流体の混合を促進させるような往復流パターンの検討を行い、混合促進技術の検討を行う。なお、マイクロチャンネルチップはPDMS製であり、流体には色素を混入させた水溶液を用いて蛍光強度を倒立顕微鏡により観察し、濃度分布を定量的に評価した。

### (2) 非定常電気浸透流の速度場・濃度場の数値シミュレーション

混合に有効な印加電場パターンの検討のため、速度場・濃度場の数値シミュレーションを行う。実験より求めた流路壁のモビリティより定常流動場を計算し、印加電場パター

ンに合わせて流動場を切り替えることにより非定常流れをシミュレートし、最適電場印加パターンの評価を行う。

### (3) 混合促進の評価

混合の定量的評価、ならびに流量や混合に必要な距離についての評価を行った。2流体層状のモデルを基準に解析的に拡散現象を解析して評価基準を求め、他の研究者のデータとの比較を行い、本研究で開発するマイクロ・ミキサーの評価を行う。

## 4. 研究成果

### (1) T型マイクロチャンネルでの混合促進

様々な印加電圧パターンでのマイクロチャンネルのジャンクション部での混合促進を試みた。T型チャンネルにおける濃度分布パターンの代表例を図2(a)~(c)に示す。

図の右側から流入し、左側へ流出する。図2(a)、(b)では、右側上下の2つの入口からの流体を交互にジャンクション部に流入させた。図2(a)の周波数が遅い場合、流入する流体は交互に出口流路に流入し、セグメントを形成して分子拡散しながら出口へ流出する。そのため、ジャンクション部では完全混合には至らず、混合のための拡散時間が必要となる。

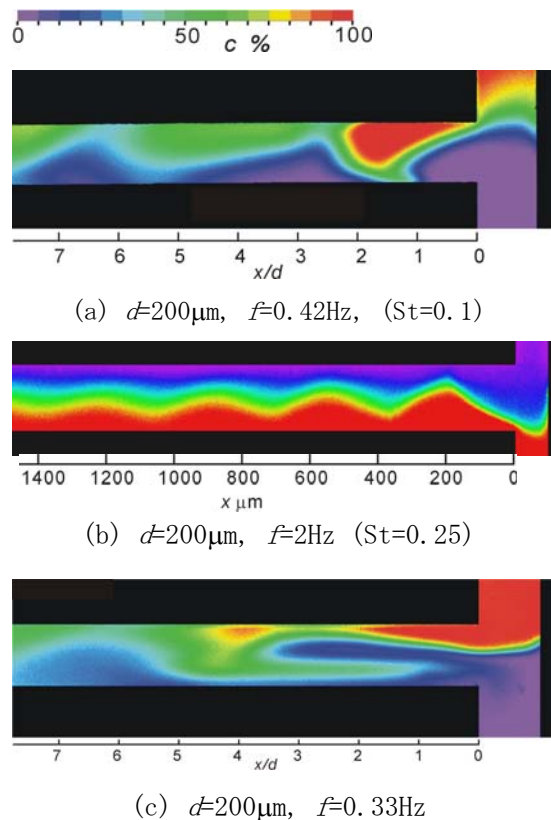


図2 T型チャンネルにおける色素濃度分布

周波数を上げた場合の濃度分布パターンを図2 (b)に示す。周波数を上げて流入する流体は出口流路において層状となり、混合が進まない。

そこで印加電圧のパターンに出口流路からの逆流のフェーズを加え、図2 (c)に示すようにジャンクション部において流体が折り重なり、混合が促進されることが明らかとなった。流体を伸張させ折り重ねる動作は、カオティック混合の動作として知られており、T型マイクロチャンネルにおいてもカオティック混合の可能性が示され、新しい混合手法として関連学会にて評価された。

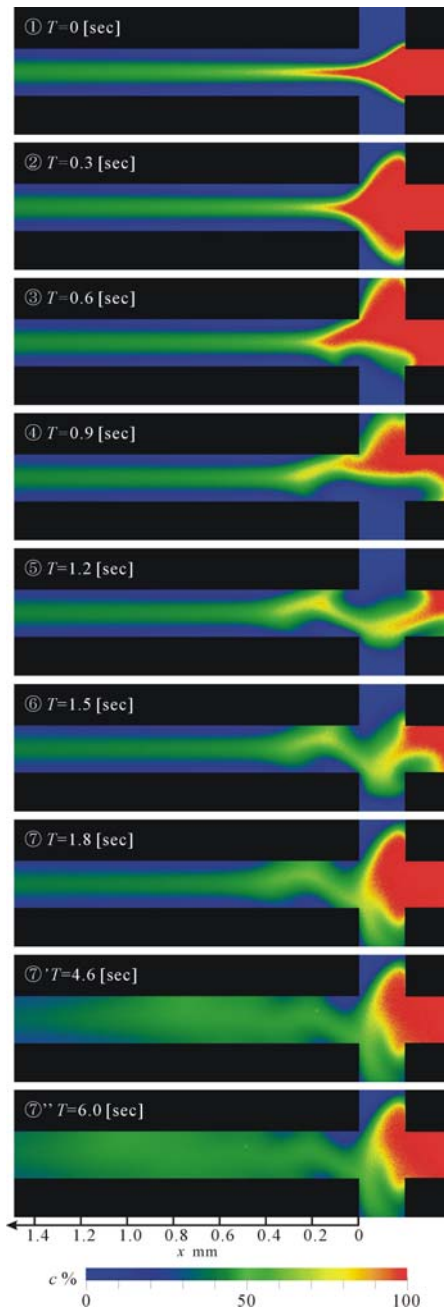


図3 クロス型チャンネルにおける濃度分布。  
( $d=200\mu\text{m}$ ,  $f=2.1\text{Hz}$ ,  $Re=0.0352$ ,  $V=750\text{V}$ )

### (2) クロス型マイクロチャンネルでの混合促進

T型チャンネルでの結果から、クロス型チャンネルにおいても流体の折り重なるよう印加電圧のパターンに逆流のフェーズを加えた。

定常流の状態から非定常印加電圧パターンを加えた際の濃度分布を図3に示す。流体はジャンクション部において折り重なり、混合が進む様子が確認できる。6秒後の図3⑦より完全な混合が確認できる。逆流が加わり、平均流速が落ちるため効率が低下するが、電場強度を上げることにより、レイノルズ数は $Re=0.04$ まで上昇させることが可能である。

### (3) 非定常電気浸透流の速度場・濃度場の数値シミュレーション

実験より求めた流路壁のモビリティより定常流動場を計算し、印加電場パターンに合わせて流動場を切り替えることにより非定常流れの数値計算を行った。混合パターンは、粒子追跡により評価した。結果の一例を図4に示す。図2 (a)と(c)での濃度分布パターンを再現できている。本計算は非定常計算を行うことなく、混合パターンの評価が可能となり、従来に比べ極めて短時間で混合パターンの評価が可能であり、様々な条件における混合に最適な印加電圧パターンの検討を行った。

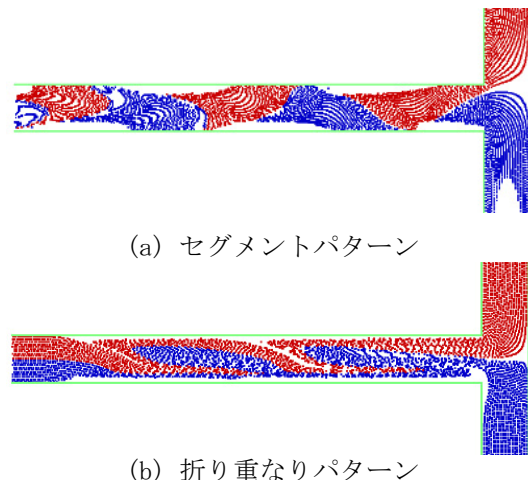


図4 粒子追跡法による流動パターン

### (4) 混合促進の評価

上記の(1), (2)での結果、混合が大幅に促進されることが明らかとなった。そこで、混合の定量的評価を行った。図3⑦に示した濃度分布の出口流路流れ方向での混合度を図5に示す。比較のため、同じ流量における定常流れの混合度を示す。混合度は完全混合の状態を1とした混合の指標であり、流路幅方向の濃度分布 $c(y)$ より(1)式により評価される。

$$D_m = 1 - 2\sqrt{\frac{\sum_N (c(y) - c_{\text{terminal}})^2}{N}} \quad (1)$$

$c_{\text{terminal}}$  は、完全混合した際の濃度を示す。

本研究の混合促進の結果、ジャンクションの下流側 1mm において混合度が 0.9 を示し、ほぼ完全混合の状態を示す。混合促進を施さない定常流に比べ、約 1/10 の流路長さで混合度を  $D_m=0.9$  に達することを实现了。

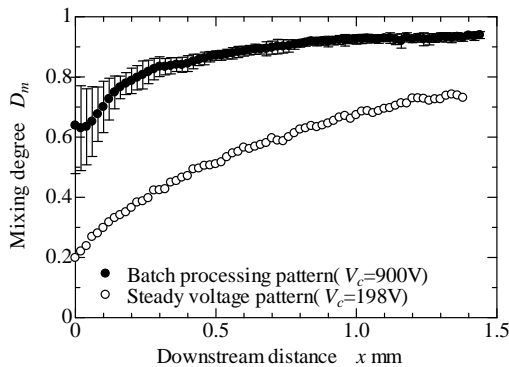


図5 流れ方向の混合度

従来、マイクロ・ミキサーの性能は混合の度合いを示す混合度のみで評価されており、流量や混合に必要な距離については評価基準が存在しなかった。そこで、混合促進を施さない定常流 2 流体層状のモデルの拡散現象より評価基準を検討した。

定常流 2 流体層状のモデルの場合、混合に必要な時間は、混合度が  $D_m=0.9$  に達する無次元時間  $Fo^*$  が  $Fo^*=0.233$  であることが、実験により明らかにされた。従って、混合に必要な距離  $L^*$  は、式(2)で表されるように、 $Fo^*$  とレイノルズ数  $Re$ 、シュミット数  $Sc$  の積で表される。

$$\frac{L^*}{d_h} = \frac{DL^*}{\bar{u}d_h^2} \cdot \frac{\bar{u}d_h}{\nu} \cdot \frac{\nu}{D} = Fo^* \cdot Re \cdot Sc \quad (2)$$

図6に式(2)の関係、および本研究の実験結果と他の研究者のデータを示す。本研究結果の○プロットで表す定常流での結果は、式(2)に一致しており、レイノルズ数の増加とともに混合に必要な距離が増加することを示す。Asgar らの障害物チャンネルによる混合促進の結果は、高いレイノルズ数での混合を実現しているものの、混合に必要な距離も増加している。それに対し、●プロットで示す本研究の結果は、レイノルズ数が増加しても混合に必要な距離は変化しない。

前述したとおり、従来のマイクロ・ミキサーでは、分析する液体の流量（流速）に依存

し、「なりゆき」で混合度が決まることとなり、流量の増加に応じて混合に必要な距離が延びる。本研究では混合過程と輸送の過程を分離することにより、流量の増加にも関わらず混合に必要な距離は変化せず、高性能マイクロ・ミキサーの開発に成功した。

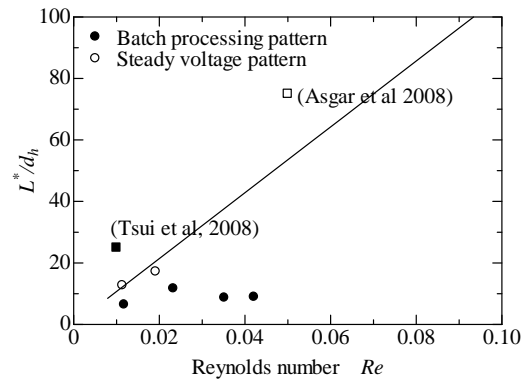


図6 混合に必要な距離とレイノルズ数の関係

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Hideaki Higashi, Ryosuke Matsumoto, Compact Micro-Mixer Using the Switching Electroosmosis Flow, Proceedings of the Seventh International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels ICNMM2009, CD-ROM, Paper No.82097, (2009), 査読有。
- ② Ryosuke Matsumoto, Katsunari Tanaka, Takayuki Toki, Isao Ishihara, Mixing Control by Electroosmosis Flow in Micro-channel, Proceedings of the 19th International Symposium on Transport Phenomena, CD-ROM, Paper No.215, (2008), 査読有。

[学会発表] (計2件)

- ① Ryosuke Matsumoto, Mixing Control by Electroosmosis Flow in Micro-channel, Sommersemester 2008, Technische Universitaet Dortmund, 2008年8月15日, ドイツ, ドルトムント工科大学。
- ② 田中 勝也, 松本亮介, 石原 勲, マイクロチャンネル内の電気浸透流による混合制御, 日本機械学会 熱工学コンファレンス講演論文集, No.07-5, 2007年11月24日, 京都大学, p.145-146。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 亮介 (RYOSUKE MATSUMOTO)  
 関西大学・システム理工学部・准教授  
 研究者番号: 50268314