

## 論文の内容の要旨

論文題目 ペルチェ加熱冷却によるサブミリチャンネル内旋回流の研究  
氏名 石井 慶子

マイクロ熱流体制御法の高度化はLab-on-a-chipや $\mu$ -TASの実現のために重要である。とくに微小流路では流れが乱れにくいことから、目的のサンプルと試薬の混合等が難しく、混合法の開発が望まれている。低粘度の液体に分散させている場合であっても、細胞やたんぱく質の拡散係数は $10^{-11}$ 乗スケールであり、混合には長時間、長距離を要する。従来までに提案されているアクティブ制御マイクロミキサーはほとんど駆動部を流体に接触させる。このため外力を流体に伝達するための微細加工やシステムの組み込みが必要となる。パッシブ制御では、内部の流路を微細加工する必要がある。そこで、本研究では熱による流体混合法の実現可能性に着目した。熱による混合が可能であれば、流路の外部から非接触で熱を加えるだけでよく、システムコストを下げることができる。マイクロスケールでは自然対流の影響がほとんど無視されることから、内部の熱流動場を3次元的に検証した例はない。本研究では、第一に3次元的な微小スケール熱流動場の特性を検証、第二に熱制御によるマイクロミキシングの有効性を検証する、第三にマイクロミキサーとしての適応範囲、特性を明らかにすることを目的とする。

これらの課題に対し、本研究ではアルミニウムT字マイクロチャンネルに2つのペルチェ素子で加熱冷却を行うことで、違う温度差で合流する流れを産む装置を作成し、マイクロスケールで旋回流を発生させることに成功した。旋回流の発生は、合流部における温度と速度場を三次元的に計測することで示した。数値計算と実験の比較からメカニズムを検証し、混合効率からマイクロミキサーとしての特性を明らかにした。

以下に本論文の各章の内容をまとめる。

第1章では、マイクロ流体制御技術の重要性について説明し、この中でも特にマイクロミキサーとマイクロソーティング技術について先行研究のレビューを行った。また、マイクロスケールにおける熱流体研究についてレビューを行い、マイクロスケールの熱流体制

御技術がこれまでほとんど存在しないが、重要性が高いことを指摘した。

第2章では装置や実験方法についてまとめた。実験にはParticle Image Velocimetry(PIV), Laser Induced Fluorescence (LIF)を用いた。ここで、L I Fをより高精度にするため、時間方向の周波数ロングパスフィルタを画像処理の際に適応した。また、L I Fの時間減衰の補正の為、補正関数を取得し、減衰の影響を取り除いた。光源として利用した水銀灯の明滅ノイズを取り除く処理を行った。

第3章では実験結果に基づいて、マイクロスケールで温度差があったときに生じる熱流動場の評価を行った。3次元的な流れが発生した。合流直後の左右の流入速度の差を成層強度と定義し、この大きさを調べたところ、温度差が大きいほど成層強度は強くなった。シリンジポンプによる体積駆動を行っているが、成層強度はこのシリンジポンプの流速に依存しなかった。合流後は旋回流が発生することが明らかとなった。

第4章では、実験結果のメカニズムの検証と、マイクロミキサーとしての効率を評価するため、数値計算を行った。マイクロスケールでは粘性が支配的になるため、旋回流の原因について、温度場が誘起する粘性抵抗の空間的な不均一によって起きる可能性を想定し、密度が温度の関数の場合、動粘度が温度の関数の場合、密度と動粘度が同時に温度の関数である場合について計算を行った。このとき、動粘度が温度の関数の場合旋回流は発生せず、密度と動粘度が温度の関数の場合もともと実験結果と一致した。低温域で発生する、空間中で最も高い粘度によって流動が支配されることが明らかとなった。旋回強度は温度差に比例し、動粘度に反比例した。流入口からの速度の影響は受けなかったが、流速が遅いほど短距離に旋回が進行した。温度、速度場について実験結果と計算結果は良好な一致を示した。細胞粒子懸濁液について、作動液体を水、拡散係数 $4.87 \times 10^{-11} [\text{m}^2/\text{s}]$ のとしたときの混合効率と混合距離を評価した。断面の一辺の長さが4mm流路に流路外壁から16mmの範囲で $1.18^\circ\text{C}/\text{mm}$ の温度差を与えたとき、流速 $50 \mu\text{m}/\text{s}$ で90%の混合を達成するのに距離3.56mmを要した。これはStroockらより2倍以上短い結果であった。なお、断面の一辺の長さが0.25mmの流路に温度差を与えないケースに比べて66倍混合距離を短くできた。温度差をより強くすれば、容易に100倍以上の混合距離を短縮できる。自然対流の影響はマクロスケールでより注目されるが、混合に最も有効なスケールは4mm前後であることがわかった。

第5章ではペルチェ素子の駆動と遮断の瞬間に発生する急速な速度変動について実験を行い、特性を明らかにすると同時にメカニズムの特定を行った。急速な速度変動はペルチ

ペルチェ素子の印加の直後から、内部に温度が発達する前に発生した。PIVの時間分解能は0.1sであるが、これより早い現象であった。速度変化量は入力電圧に比例した。この原因について、電気浸透流である可能性と、ペルチェ素子の変形である可能性についてそれぞれ実験的に検証を行った。レーザー変位計と薄膜圧力計による計測の結果、ペルチェ素子の駆動と遮断の瞬間に、圧力変動や変位が発生することがわかった。わずかな素子の振動を擾乱として利用できる可能性があり、マイクロソーティング技術などの単純化に役立つものであると考えられる。

第6章では、目的と、得られた結果の関連性についてまとめた。

以上から、本研究ではマイクロスケールで温度差によって発生する熱流動場について明らかにした。マイクロスケールで自然対流を利用する有効性に初めて着眼し、この現象を利用したマイクロミキサーの特性や混合効率を明らかにした。これにより、非接触制御にも拘らず拡散係数の大きな液体を非常に短距離で混合させることを可能にした。