

審査の結果の要旨

氏名 石井 慶子

Lab-on-a-chip や Micro-TAS の実現のためには、マイクロ熱流体制御法の高度化が重要である。微小流路ではレイノルズ数が低いことから、サンプルと試薬の混合が難しく、効率的な混合法の開発が望まれている。これまで提案されているアクティブ制御マイクロミキサーのほとんどは、駆動部を流路に挿入するため、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。非接触で流体を混合させることができれば、微細流路の製作が容易になり、効率的な運用が可能になると期待されている。本研究では、熱による流体混合法の実現可能性に着目している。熱を駆動力として混合を促進することが可能であれば、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。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し、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し、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している。

本論文は全 6 章からなり、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ている。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、非接触の熱流体制御技術の重要性が高いことが指摘されている。

第2章では実験装置や実験方法についてまとめている。実験用に幅1mmの流路がT字型に接続され、2流体を混合する系を実験対象としている。混合する前の2流路に2つのペルチェ素子を設置して、それぞれ加熱あるいは冷却することができるようになっており、加熱、冷却によって流体混合を促進することを狙っている。実験にはParticle Image Velocimetry(PIV), Laser Induced Fluorescence (LIF)を用いて流れ場や温度場の可視化を行っている。LIFを高精度にするため、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、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うなどの工夫を述べている。

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記載している。ペルチェ素子による加熱，冷却により3次元的な流れが発生したことを確認し，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と述べている。合流後は旋回流が発生していることを明らかにしている。

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に行った数値計算を述べている。流体の温度差に基づく混合については，マイクロスケールでは粘性が支配的であり，マクロスケールでは密度（浮力）が支配的になる。今回の旋回流の原因について，粘度の温度依存性，密度の温度依存性のどちらが支配的か，数値計算を用いて検討し，粘度の影響はなく，密度の温度依存性が旋回流の発生の原因であることを明らかにしている。流速が遅いほど短距離に旋回が進行し，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。断面の一边の長さが4mm流路に流路外壁から16mmの範囲で1.18℃/mmの温度差を与えたとき，流速50μm/sで90%の混合を達成するのに距離3.56mmを要した。これは従来の混合方法より2倍以上短い結果であった。

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検討を述べている。急速な速度変動は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ている。速度変化量は入力電圧に比例している。この原因の特定のために，さまざまな検討を行い，ペルチェ素子の変形である可ことを突き止めている。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述べている。

第6章では，以上をまとめて結論を述べている。

本論文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ている。マイクロスケールで自然対流を利用する混合の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ている。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ておき，高効率なマイクロ混合器の開発へ向けて，工学的，工業的貢献は顕著である。

本研究の全般にわたって論文提出者が主体となって実験及び解析を行ったもので，論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（環境学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1888 字