

審査の結果の要旨

氏名 木下 晴之

本論文は、「共焦点マイクロ PIV を用いた微小液滴内部流動に関する研究」と題して、6 章から構成されている。

近年、さまざまな科学分野においてマイクロ流体デバイスの研究や開発およびその応用が活発であり、とくに生物学、生化学の分野における活躍がめざましい。マイクロ TAS (Micro-Total Analysis Systems) 等の小型分析デバイスではそのほとんどの操作・処理を、流体を媒介して行うため、デバイス内部での流体の挙動がその性能や効率を左右する重要な要因となる。そのため、最近のデバイス開発の現場ではマイクロ環境下での流動現象を知ることに要求が高まっている。また、製作加工技術の発展にともなって流路構造はますます複雑に、そして立体的になる傾向にあり、その内部の流動もより複雑かつ 3 次元的になってきていることから、流れの理解や予測はさらに重要性を増しているといえる。本論文ではとくに、流体輸送に微小液滴を利用したデバイスに注目している。液滴を使った流体輸送システムではサンプルのデッドボリュームを大幅に低減できるため、マイクロ生化学分析デバイスでは多用される一方、その流動現象は未知の部分が多い。とくに液滴内部の流れは、混合や反応といった重要な分析プロセスと密接に関わる現象であり、より効率的な流体システム設計に向けてその現象解明が望まれている。

そこで本論文では、マイクロ流体デバイス内で起きる 3 次元的な流動現象を捉えることができる速度計測手法の開発を行っている。マイクロ PIV の発展型として、高速共焦点スキャナを用いた共焦点マイクロ PIV システムを新たに構築し、その性能や計測精度の評価を行っている。さらに、3 次元的なマイクロ流れに対応できるように、3 次元空間における速度 3 成分 (3D3C) 計測手法も同時に提案している。つぎに、微小液滴内部の流動構造を明らかにするために、開発した共焦点マイクロ PIV システムを用いて微小液滴内部流動の詳細な 3D3C 計測を行っている。そしてマイクロチャンネル内を移動する微小液滴内部の複雑な流動構造について議論している。

第 1 章の序論では、はじめに背景となるマイクロ流体デバイスの現状や液滴を利用したシステムの特徴について述べている。その後、マイクロ流体デバイスと流れの関係について解説し、デバイス開発において液滴内部流動を理解することの重要性について論じている。そのためのアプローチとしてマイクロ流れの 3 次元計測手法の開発が必要不可欠であると述べている。

第 2 章では従来の研究の紹介として、まずこれまでに提案されているマイクロ PIV について解説している。マイクロ PIV の現状と特徴、限界を整理し、解決すべき課題を明らかにしている。つづいて、流れを利用したマイクロ流体デバイスや液滴システムの例を挙げ、現在のデバイス開発において流れがどの程度生かされているかを示している。

第 3 章では具体的なマイクロ PIV システムの開発過程を詳しく述べている。従来の PIV 技術を応用することで汎用的なマイクロ PIV システムを実際に構築し、さらにその性能の

評価を行っている。その結果、このマイクロ PIV システムは汎用性は高いものの、ボリューム照明と被写界深度の影響により任意断面計測が困難であるという弱点を有していることが明らかとなり、とくに 3 次元的な流れへの適用は不可能であることを示している。

第 4 章では、第 3 章で明らかとなったマイクロ PIV の問題点を解決すべく、新たに共焦点光学系を組み込んだ共焦点マイクロ PIV システムの開発について述べている。高速共焦点スキャナを導入することでボリューム照明と被写界深度の問題を解決し、任意断面の詳細な PIV 計測が可能なシステムの構築に成功している。共焦点マイクロ PIV の最大の特徴である極めて小さい被写界深度についても詳細に評価し、その効果を実験的に確認している。実際に円管内ポアズイユ流れを計測し理論解と比較することで、計測ツールとしての性能や計測精度を確認している。その結果、共焦点マイクロ PIV は非常に強力で有効なマイクロ流れ計測ツールであることが示されている。またここでは、共焦点マイクロ PIV を使用した 3 次元計測手法として、(i) 3D2C 計測データから残りの垂直方向速度を解析的に計算する方法と、(ii) 3 次元立体撮影法を用いた 3 次元 PIV 法という 2 つの方法が提案されている。それぞれの方法を用いて実際にバックステップ流れの計測を行うことで、マイクロ流れの 3D3C 計測が可能であることを実証している。

第 5 章では、第 4 章で開発・構築した共焦点マイクロ PIV システムを利用して、微小液滴内部流れの可視化計測を行っている。幅 100 ミクロン、深さ 58 ミクロンのマイクロチャンネル内を移動する長さ 200 ミクロンの微小液滴内部の流動を 3D3C 計測することで、液滴内部の流動構造を明らかにしている。その結果、表面張力による液滴自身の曲面構造と流路壁面による摩擦の影響によって、液滴内部には複雑で 3 次元的な循環流が発生していることが示されている。

第 6 章は結論であり、共焦点マイクロ PIV システムと液滴内部流動に関して本論文で得られた成果がまとめられている。

本論文では、一つめの成果として、新たなマイクロ流れ計測ツールとして共焦点マイクロ PIV システムを開発・構築し、その仕様や計測精度について評価を行っている。共焦点マイクロ PIV システムは、従来のマイクロ PIV の抱える問題点の一つであったボリューム照明と被写界深度の問題を光学的に解決し、さらに従来の手法では困難であったマイクロ流れの 3D3C 計測も可能にしているため、非常に有効なマイクロ流れ計測ツールとなっている。今後、共焦点マイクロ PIV はさまざまなマイクロ流体デバイスの流体力学的な評価に利用できると期待され、その開発の意義は大きい。

さらに二つめの成果として、共焦点マイクロ PIV を活用してマイクロチャンネル内を移動する微小液滴の内部流れを計測し、その流れが複雑で 3 次元的な循環流になっていることを突き止めている。微小液滴については、流体計測によってその内部に発生している流れの様子を明らかにした例は過去になく、興味深い発見となっている。この知見は液滴デバイスにおける効率的な混合や化学反応といった流体操作に応用できる可能性が高く、新しいデバイス開発に向けて有意義な流体力学的な知見が得られたといえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。