

審査の結果の要旨

氏名 大石 正道

本論文は、「マイクロ液滴の生成機構の解明に向けた多波長共焦点マイクロ PIV システムの開発」と題し、全 6 章から構成される。

マイクロ液滴デバイスでは、混ざり合わない 2 種類の液体を用いてピコリットルサイズの液滴が生成され、均一な粒子生成や反応チャンバとして利用される。特に T 字流路は液滴生成を行う最もシンプルな流路デザインであり、液滴サイズや生成周期を制御するために界面張力とせん断応力の比であるキャピラリー数 (Ca) によるレジーム整理や、計測データから導出した予測式などが示されている。しかし、液滴生成機構は数十～数百 μm というスケールや流動場の 3 次元性・非定常性によって定量的計測が難しく、解明には至っていない。

液滴生成の物理には 3 つの力が関係しているとされ、それらは、分散相の先端がちぎれないように働く界面張力 F_γ 、連続相の流れが界面を引きずるせん断応力 F_t 、連続相圧力によって界面に働く力 F_p である。これら 3 力の算出には非定常性のある両相の 3 次元速度場と界面形状および圧力の計測が必要である。

このような背景から、本研究では最も運用条件が幅広い「遷移領域」と呼ばれるレジームを対象とし、液滴生成機構に関与する 3 力の算出に必要な物理量を定量的に取得可能な計測システムの開発と、流動構造と 3 力の経時変化の考察による液滴生成機構の解明を目的としている。

第 1 章の「序論」では、研究背景としてマイクロ T 字流路における液滴生成機構について述べるとともに、その解明に必要な物理量の計測方法における問題点について説明している。また、各計測法の性能と計測対象の特徴を踏まえてベースとする計測法を決定し、マイクロ混相流の計測に向けた具体的な要素技術を挙げ、本研究の目的を述べている。

第 2 章は、「多波長共焦点マイクロ PIV システムの開発」と題し、マイクロ混相流の両相同時計測手法として、多波長分離光学系を組み込んだ共焦点マイクロ PIV システムを開発した。合わせて、油相に分散可能な $\phi 0.7 \mu\text{m}$ の蛍光トレーサ粒子を開発し、市販粒子と遜色ない蛍光強度と共焦点深度 $2.81 \mu\text{m}$ を達成した。システムの計測性能として、 $231.0 \times 173.3 \mu\text{m}$ の領域を $2.02 \mu\text{m}$ 間隔で 2 相同時に 2 次元速度分布計測し、計測限界速度は 9.241 mm/s である。また、

一般的なマイクロ PIV 計測における 10%を下回る 8.62%の不確かさが見積もられ、理論解のある矩形流路内流れの計測によって、不確かさ解析範囲内の計測精度を証明した。

第 3 章は、「光センサによる液滴検出・選別システムの開発」と題し、周期的な非定常 3 次元性を有する液滴生成現象を、2 次元計測である本計測システムにて断層撮影し 3 次元速度場を構築するために、時間位相を合わせることで光ファイバセンサ式液滴検出システムを開発した。また、プログラマブルコントローラを介して本検出システムの機能を拡張することで、液滴のばらつきをリアルタイムで監視し、PIV 解析グリッドの半分以下かつ 1%未満のばらつきで液滴を選別して同期撮影を行える選別・カメラトリガシステムを構築した。

第 4 章は「T 字型マイクロ流路における液滴生成現象の計測」と題し、第 2、第 3 章で開発した計測システムを用いて、 Ca の異なる 3 条件に対して 3 次元速度場および界面形状データを取得し、流動構造変化の特徴を抽出した。結果として、高い Ca ほど界面による主流路の狭窄率は低下し、液滴分裂前の界面がくびれ始める時刻位相が早まる傾向が見られた。

また、圧力の取得方法として、界面形状からラプラス圧力式を用いて算出する方式を採用した。連続相上流に挿入した光圧力センサ値と PIV 画像から算出したラプラス圧力変動の一致が確認され、PIV 画像からの圧力算出に妥当性が示された。

第 5 章は「液滴生成機構の解明」と題され、界面上に設定したコントロールボリュームに沿って 3 力を定量的に算出し、その経時変化から液滴生成機構を考察した。その結果、3 条件とも液滴生成周期の 89~94%の時刻において F_t に対する F_t と F_p の合力が大きくなり、同時刻において形状・流動パラメータである界面面積の減少、上流側界面の面内曲率反転、および連続相の分散相側流路への流入量減少が同期する結果が得られた。また、 Ca が大きくなるに従い、分裂時における F_t の寄与が 0%から 12%まで増加し、力の逆転時刻が約 5%前方へシフトした。

第 6 章は「結論」であり、本研究で得られた結果と知見を結論としてまとめ、今後に向けた課題をまとめている。

以上より、本論文は液滴生成現象における 3 力の非定常な変化を、3 次元にて定量的に計測できるシステムを構築し、液滴生成機構の考察が可能な機能と精度を達成した。また、計測結果から、遷移領域における分裂開始における 3 力のバランス機構を明らかにした。これらの点から、本論文の学術的意義は大きいと考えられ、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。