

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 大 石 正 道

本論文ではマイクロ T 字流路における液滴生成機構について、機構を司る 3 力を定量的に計測できる可視化計測システムを開発することにより、機構の解明を目指した。

マイクロ液滴デバイスは、水と油など混ざり合わない 2 種類の液体を用いてピコリットルサイズの液滴を生成し、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。これらを一般化するには液滴生成機構の物理的考察が必要であるが、数十～数百 μm という流路断面寸法や流動場の 3 次元性・非定常性によって定量的計測が難しく、機構の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 $F\gamma$ 、連続相の流れが界面を引きずるせん断応力 $F\tau$ 、連続相圧力によって界面に働く力 Fp 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。計測手法としては、流れに微小なトレーサ粒子を分散させて、粒子画像から速度分布を算出するマイクロ PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) が適してはいるが、油相に適したトレーサ粒子や両相の同時計測手法が確立されていなかった。

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。

1) 位相同期・液滴選別機能付き多波長共焦点マイクロ PIV システムの開発

マイクロ混相流の両相同時計測手法として、波長分離光学系を組み込んだ多波長共焦点マイクロ PIV システムを開発した (図 1)。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は、 $231.0 \times 173.3 \mu\text{m}$ の領域を $2.02 \mu\text{m}$ 間隔で 2 相同時に 2 次元速度分布計測が可能であり、計測限界速度は 9.241 mm/s である。計測の不確かさは面内速度成分が 8.62% であり、PIV 計測の標準的な計測精度である 10% 未満を達成した。3 次元再構築後の z 方向速度成分の不確かさは計算開始面から 1 層離れた断面では 6.03% 、 n 層離れた断面ではその \sqrt{n} 倍となり、本実験での 14 層離れた断面においては 22.58% となった。これらは、

理論解のある矩形流路内流れを用いて、計測結果が不確かさ解析範囲内に収まることを確認した。

一方、周期的な非定常性と3次元性を有する液滴生成の流動構造を、2次元計測である本計測システムにて断層撮影し、3次元再構築するために、時間位相を合わせることでできる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。

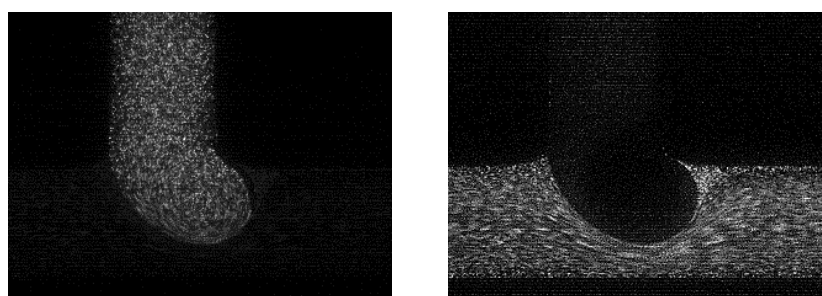
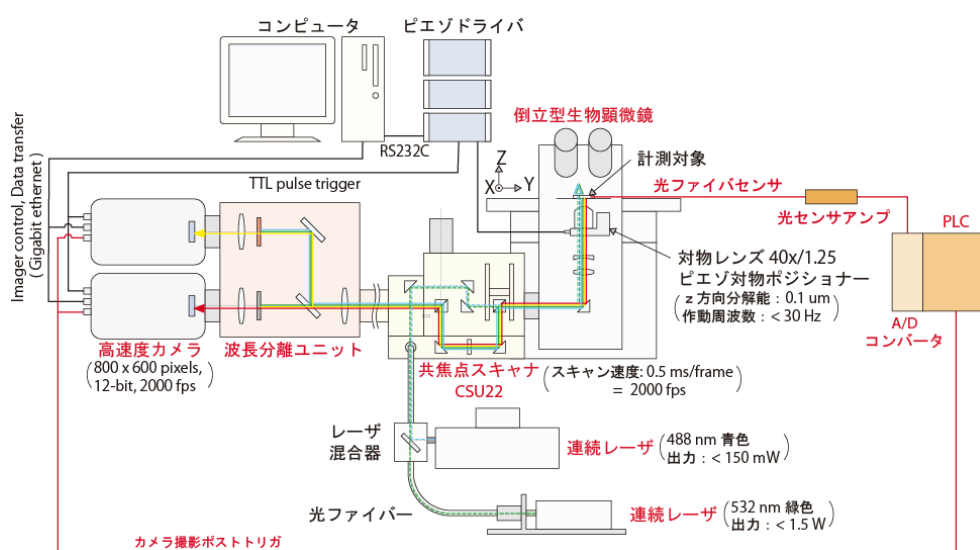


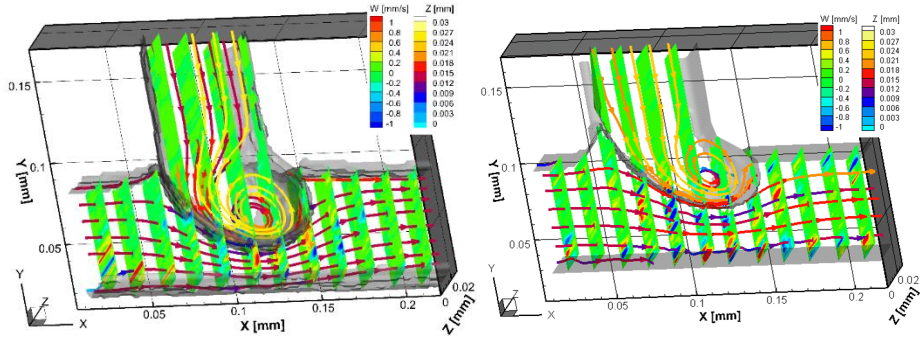
図1 位相同期多波長共焦点マイクロPIVシステム（上）と
両相同時撮影PIV画像（下左：分散相の水相，下右：連続相の油相）。

2) T字型マイクロ流路における液滴生成機構の計測

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（図2）。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。

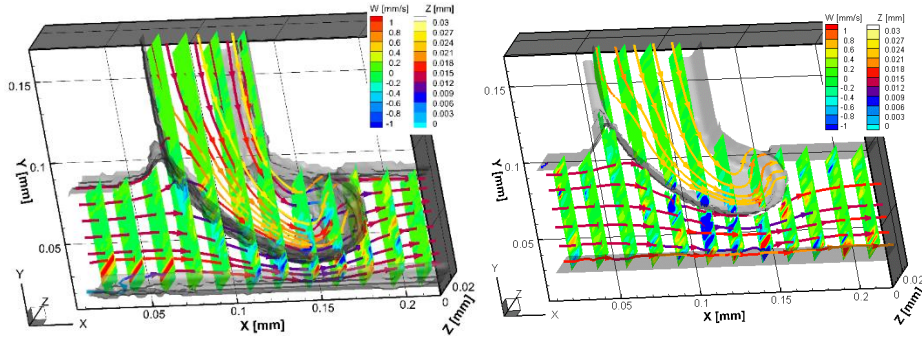
- ・連続相の一部が分散相流路の上流方向へ流入を始めた時刻：

$$(Ca = 7.04 \times 10^{-3} : t/t_{\text{period}} = 0.680, Ca = 2.25 \times 10^{-2} : t/t_{\text{period}} = 0.731)$$



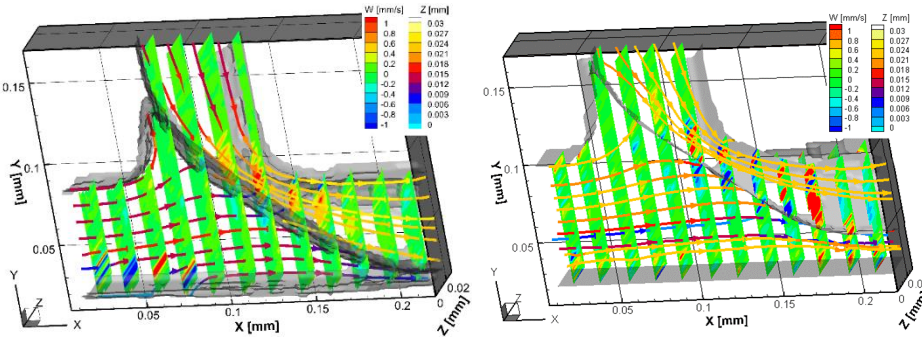
- ・分散相先端の渦が消失した時刻

$$(Ca = 7.04 \times 10^{-3} : t/t_{\text{period}} = 0.822, Ca = 2.25 \times 10^{-2} : t/t_{\text{period}} = 0.790)$$

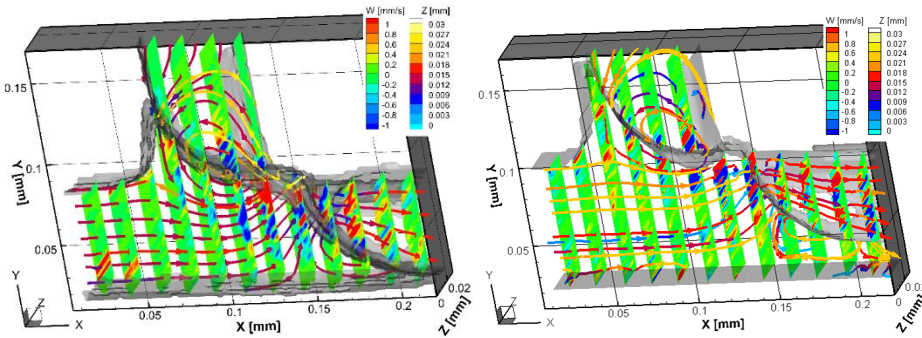


- ・上流側界面の面内曲率 0 の時刻

$$(Ca = 7.04 \times 10^{-3} : t/t_{\text{period}} = 0.967, Ca = 2.25 \times 10^{-2} : t/t_{\text{period}} = 0.963)$$



- ・分裂 1 msec 前 ($Ca = 7.04 \times 10^{-3} : t/t_{\text{period}} = 0.996, Ca = 2.25 \times 10^{-2} : t/t_{\text{period}} = 0.995$)



$$Ca = 7.04 \times 10^{-3}$$

$$Ca = 2.25 \times 10^{-2}$$

図 2 液滴生成の 3 次元流動構造変化.

3) 界面に働く 3 力の経時変化と液滴生成機構の解明

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、図 3 に示す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_γ に対する F_τ 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_τ 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。

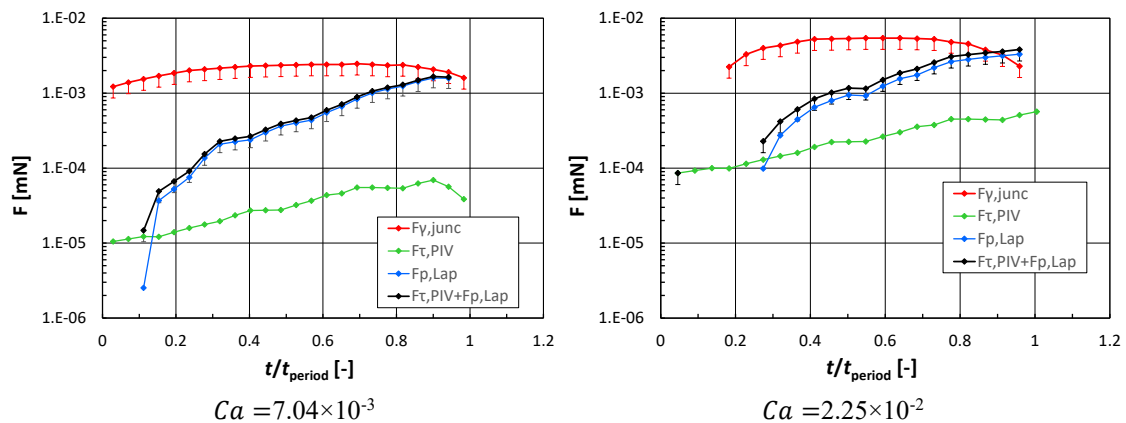


図 3 界面に働く 3 力の経時変化。

以上の結果より、位相同期多波長共焦点マイクロ PIV システムを開発することで、両相の 3 次元流速分布と界面形状の同時計測を可能とし、マイクロ混相流の挙動解明に必要な計測性能と精度を達成した。また、連続相上流の圧力による力とせん断応力の合力が界面張力を卓越する時刻が、界面形状の分裂へ移行と同期することが明らかになった。

開発した計測システムは 2 系統の光路を同軸化した特長により、本研究のような 2 波長 PIV だけでなく、LIF や MTV、偏光計測などとの同時計測にも対応可能である。応用例として、細胞が混在した流れや、マイクロバブル、速度とスカラー量の同時計測などが挙げられる。