

平成22年 6月 7日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760110

研究課題名（和文） マイクロ粘弾性流動の可視化計測と流体制御への応用

研究課題名（英文） VISUALIZATION AND MEASUREMENT OF MICROSCOPIC VISCOELASTIC FLUID FLOW

研究代表者

木下 晴之（KINOSHITA HARUYUKI）

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：40466850

研究成果の概要（和文）：

機能性流体の一つである粘弾性流体がマイクロ環境下で示す特異な流動現象を解明するために、共焦点可視化法や共焦点 Micro-PIV 計測法を利用してマイクロ流路内に形成される粘弾性流体特有のミセル構造の可視化・計測を行った。その結果、粘弾性流体の流れでは低レイノルズ数条件下にも関わらず、マイクロチャネル内部にはミセル構造体が形成され、その周りには複雑な三次元的な流れが発生していることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

This study focuses on the interesting microscopic flow phenomenon of viscoelastic fluid flow, which is generated in a microchannel. By using confocal microscopy and micro-PIV technique, we have successfully visualized the microscopic fluidic structures (“micelles”) formed in the flow and measured the complicated three-dimensional flow pattern. The results clearly indicate that a couple of worm-like micelles are formed in pairs and the surrounding flow shows three-dimensional behaviors even in microscale and at low Reynolds number. This study suggests the possibility that the viscoelastic fluid might be available for functional fluid control in microfluidic devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：マイクロ流，粘弾性流体，Micro-PIV，共焦点顕微鏡，マイクロチャネル

1. 研究開始当初の背景

マイクロスケールにおける流体操作は“ μ TAS”（Micro Total Analysis Systems）等の研究・開発において極めて重要な技術の一つ

である。 μ TASのような小型生化学分析デバイスの内部の処理過程はすべて流体（とくに液体）を介して行われるため、その液体の挙動は処理能力や動作効率を左右する大きな

要因の一つである。そのため、流れ現象を正確に把握し、効果的に活用することが、現在、高性能なデバイスやシステムを開発するためのカギとなっている。しかしマイクロ環境下では流体操作として利用できる流れ現象が限られるため、機能的・効果的な流体の操作や制御は決して容易ではない。

そこで本研究では粘弾性流体の特異な挙動に注目した。粘弾性流体とは、ある外的条件に対応して工学的・工業的に有用な機能や性質を発現する「機能性流体」の一つであり、粘性と弾性の両方の性質を有する。この流体は加わるせん断力に応じてミセル構造体や紐状の構造体、網状の構造体といったナノスケールの分子構造体を形成し、粘性が変化したり弾性を発現したりする。その結果、さまざまな複雑な流動を起こす(図1)。つまり流れのせん断力に応じてその性質を変化させる。そのため、流路形状や流速条件で現象を制御できる可能性が高い。粘弾性流体は、管内の流動抵抗低減などマクロな世界では機能性流体として古くから工業的な応用研究が行われているものの、その現象やメカニズムはいまだ明らかではない。その理由は、これらの流体の特異な挙動の原因であるミセル構造がナノスケールであるため、マクロスケールでは実験的な観察や計測に限界があったからである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、粘弾性流体が示す特異な流動現象をマイクロスケールに落とし込み、マイクロ特有の観察法や計測法を駆使する

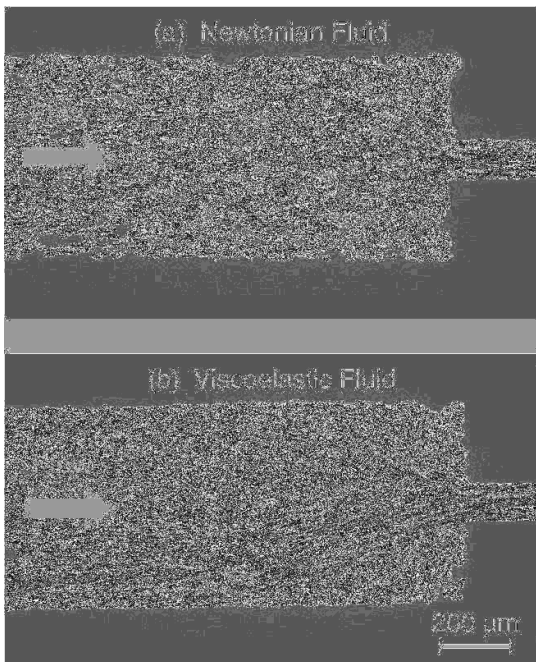


図1 マイクロスケールにおけるニュートン流体と粘弾性流体の挙動の違い
(a) ニュートン流体 (b) 粘弾性流体

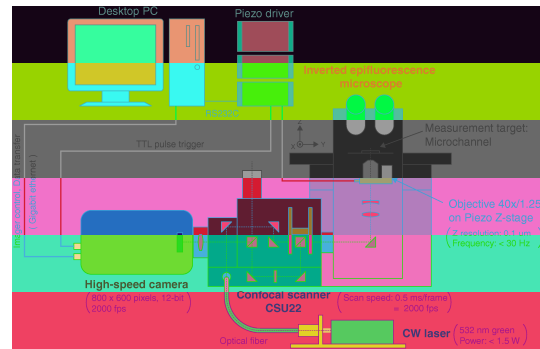


図2 高速共焦点観察システム

ことで、これまで見えなかった現象、計測できなかった現象を明らかにすることである。

そこでまず、マイクロ環境下における粘弾性流体の流動現象、とくにせん断場とミセル構造生成の関係を明らかにする。詳細に流速分布を計測することで、詳細なせん断分布情報を取得する。それに加えて、ミセル構造の可視化によって、まさにその状態でのせん断場中のミセルの状態を明らかにする。この2つの結果を組み合わせることによって、せん断場とミセル構造の関係を調べることができるはずである。さらに、この速度(せん断)計測と可視化をさまざまな流路形状を流れる粘弾性流体に対して実行することによって、さまざまなせん断場におけるミセル構造を調べる。

3. 研究の方法

流速測定には Micro-PIV システム、または共焦点 Micro-PIV システムを用いる。これらのツールを用いることで、マイクロスケールにおける流速分布を空間的に計測することができる。つぎにミセル構造体の可視化については、通常蛍光を利用した高速共焦点観察法を利用する(図2)。粘弾性流体にあらかじめ蛍光色素分子を分散させておくと、流れが下流へ行くにしたがってミセル構造体部分にのみ蛍光分子が凝集していくため、蛍光観察によってミセル構造を可視化することができる。とくに共焦点顕微鏡システムを

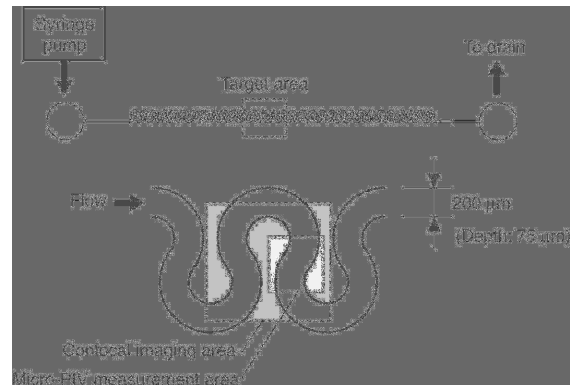


図3 Micro-PIV および共焦点観察実験に用いたマイクロチャネルの流路デザイン

用いることで、マイクロ流路内に形成されるミセル構造の立体形状を三次元的に可視化することができる。このように Micro-PIV 計測技術と共焦点顕微鏡システムを組み合わせることによって、ミセル構造体とその周囲の流速分布を可視化計測し、マイクロ流路内における粘弾性流動現象を詳細に調べることができる。

粘弾性流体として界面活性剤水溶液と高分子水溶液を用いた。マイクロ流路内における粘弾性流動現象は圧力変化など上流側下流側の影響を強く受けるため、可視化計測実験用マイクロ流路としては、拡大縮小やS字などの単純形状を連続的に配置したデザインのPDMS製マイクロチャネルを用いた(図3)。この繰り返し構造流路を用いることにより、低流量・低流速条件下に限られるものの、下流域でのみ比較的定常状態に近い安定した流れ現象を作ることができる。図3に Micro-PIV 計測を行った領域と、ミセル構造の3次元共焦点観察を行った領域を示す。

4. 研究成果

図3のような繰り返し構造流路を用いることにより、低流量・低流速条件下に限られるものの、下流域でのみ比較的定常状態に近い安定した流れ現象を作ること成功した。また、ミセル構造の形成や複雑流動といった粘弾性流動現象は高分子水溶液よりも界面活性剤を用いた場合の方が顕著であり、Micro-PIVで流速計測を行う本研究における作動流体としては界面活性剤が適している

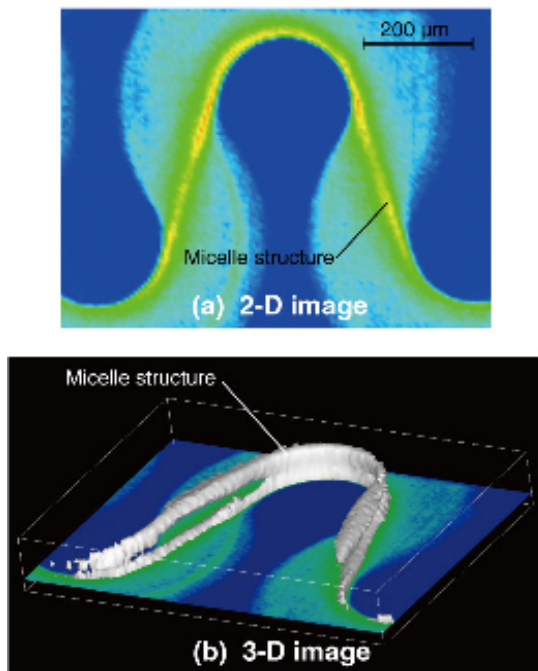


図4 共焦点顕微鏡システムを用いたミセル構造体の三次元可視化結果

ことが確認できた。

図4に共焦点顕微鏡システムを利用したミセル構造体の可視化結果を示す。共焦点顕微鏡システムの焦点位置を流路の底面から上面まで移動させながら高速撮影することによって、流路全体を三次元的にスキャンしている。その結果、粘弾性流体中に混入させた蛍光分子がミセル構造分に集まって、その部分だけが蛍光している様子がわかる。また、繰り返し構造の効果によって下流にいくほど色素分子がミセル部分に濃縮され、よりはっきりとミセル構造を可視化できることが確認できた。以上より、共焦点顕微鏡観察システムを用いることによって、マイクロ流路内に形成されたミセル構造体を立体的に撮影できることが実証された。

さらに、そのミセルが形成されている箇所 Micro-PIV 計測実験を行った。

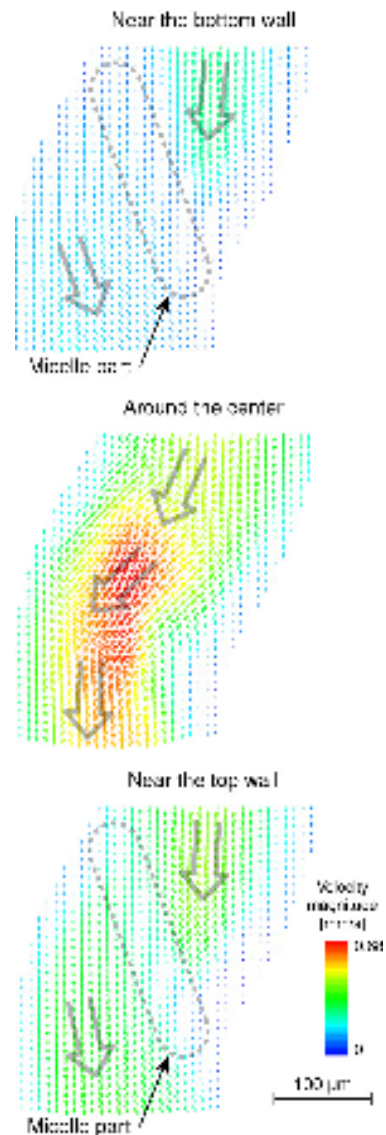


図5 Micro-PIVによるミセル構造体周りの流速分布計測の結果

図5にその結果を示す。ここでは流路底面近く、流路中央、流路上面近くの3断面における流速分布を示している。その結果、ミセル構造内部の遅い流れやその周囲を回り込むように発生する3次元的な流れの様子を確認することができた。この結果から、マイクロ流路内に発生したミセル構造体によって、それを避けるように周囲の流体が流れることで3次元的で複雑な流れが発生していることがわかる。このような複雑な流動現象は、マイクロ流路における混合促進や伝熱促進に応用できると期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① F.-C. Li, H. Kinoshita, X.-B. Li, M. Oishi, T. Fujii, and M. Oshima, Creation of very-low-Reynolds-number chaotic fluid motions in microchannels using viscoelastic surfactant solution, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol.34, 2010, 20-27
- ② S.-W. Lee, H. Kinoshita, H. Noji, T. Fujii, and T. Yamamoto, Biomolecular nano-flow-sensor to measure near-surface flow, *Nanoscale Research Letters*, 査読有, Vol.5, 2009, 296-301

[学会発表] (計11件)

- ① 青木健吾, 木下晴之, 柳澤一郎, 藤井輝夫, 埋め込み型電気浸透流ポンプを搭載したマイクロ流体デバイスの開発, 第10回(社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2009), 2009年12月26日, 東京
- ② H. Kinoshita, Y. Sakurada, I. Yanagisawa, T. Fukuba, and T. Fujii, Development of microfluidic manipulation system based on miniaturized electroosmotic pumps, 13th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysis Systems (MicroTAS 2009), 2009年11月4日, 済州, 韓国
- ③ 大石正道, 大島まり, 木下晴之, 藤井輝夫, 小林敏雄, 多波長共焦点マイクロPIVによるマイクロT字ジャンクションにおける液滴生成機構の解明, 可視化情報学会全国講演会(米沢2009), 2009年10月

24日, 山形

- ④ H. Kinoshita, F.-C. Li, N. Oshima, M. Oshima, and T. Fujii, Three-Dimensional Visualization of Microscopic Fluidic Structures Formed in Viscoelastic Fluid Flow, The 12th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysis Systems (MicroTAS 2008), 2008年10月14日, San Diego, CA, US
- ⑤ M. Oishi, M. Oshima, H. Kinoshita, T. Fujii, and T. Kobayashi, Investigation of Interaction Between The Flow Inside and Outside of Micro Droplet by Simultaneous Measurement Using Multicolor Confocal Micro-PIV, International Symposium on Flow Visualization (ISFV13), 2008年7月1日, Nice, France

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下 晴之 (KINOSHITA HARUYUKI)
東京大学・生産技術研究所・特任助教
研究者番号: 40466850

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし