

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14183

研究課題名（和文）空間的に精緻な流動・物性分布計測が解き明かす粘弾性流体の不安定流動遷移の起源

研究課題名（英文）Research on viscoelastic instability by measuring velocity and viscosity distribution with high spatial resolution

研究代表者

市川 賀康 (Ichikawa, Yoshiyasu)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：00825060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、断続的にせん断速度が変化するような構造を有するマイクロ流路内を流れる高分子溶液を対象として、流動状態が不安定な状態へと変化するメカニズムの解明を目的として、特に構造物周りに形成される低速域に着目して流速や粘度分布の取得に取り組んだ。まず、溶液の濃度に起因して低速域の形成メカニズムが異なること、そして、低濃度の希薄溶液については各低速域の流動が隣接する低速域に対して伝播することがわかった。次に、蛍光分子ローターを使用した粘度分布計測に取り組み、微細構造周りの粘度分布取得が可能であることを示し、局所的に変化する粘度計測に対する有効性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘弾性流体の流動が不安定な状態へと遷移するメカニズムは未だ不明であるが、応力緩和などの影響により微細構造周りに形成される低速領域の流動について調べ上げ、その特徴について解明した。また、確立されていなかった粘度分布計測手法について、蛍光分子ローターを用いる方法の有効性について示すことができた。本研究で得られた知見は、石油増進回収から人工血管にいたるまで、身の回りの粘弾性流体の流動の計測や現象の解明、そしてその応用への可能性の一端を示すものである。

研究成果の概要（英文）：This study aims to reveal the mechanism and origin of viscoelastic instability around the microstructures in the microchannels. In this study, we focused on the low-speed region formed around a micropillar array, and the velocity and viscosity distribution were measured by optical measurement techniques with high spatial resolution. The velocity distribution obtained by PIV suggested that the formation mechanism of a low-speed region around a micropillar array depends on the solution's concentration. Moreover, it was indicated that the flow behavior of low-speed regions propagates to neighboring regions. For viscosity measurement, we utilized the fluorescent molecular rotor which has the sensitivity for the viscosity, and the viscosity around the pillars in the viscoelastic flow was determined. Then, the efficiency of the devised technique was indicated.

研究分野：流体工学

キーワード：粘弾性流体 マイクロ流体 速度分布計測 粘度分布計測 蛍光分子ローター マイクロピラーアレイ

1. 研究開始当初の背景

せん断力の付加により粘度が変化する粘弾性流体は、断続的なせん断速度の変化によりマイクロ流路中における極めて低いレイノルズ数流れでも定常状態から不安定挙動を示す状態へ遷移するが、その遷移の起点は未だ明らかにされていない。このような背景から、流動のせん断力が断続的に変化するような微細構造をマイクロ流路中に設置した場合において、流路内で形成される複雑な流動の調査が行われてきた。他方、微細構造周りの流動を詳細に計測した例は少なく、液体の流入条件や流路構造が複雑な流動に及ぼす影響については不明点が多かった。そのため、微細構造周りにおいて、PIV や PTV で取得される流速分布だけでなく、局所的に変化する粘度分布も取得できれば、微細構造が流動に及ぼす影響の解明に迫れると考えた。これが本研究の開始当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究では、微細構造を有するマイクロ流路中を流れる高分子溶液の流動に着目し、特に微細構造周りに形成される低速度領域の流動が周りの流動に及ぼす影響の解明と、マイクロ流路中の微細構造周りにおいて変化する溶液の粘度分布を定量化する方法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

断続的なせん断速度の変化を誘起するため、正三角形のマイクロピラーをアレイ状に並べたマイクロ流路を使用し、流動の計測に取り組んだ。粘弾性流体としてポリアクリルアミド (HPAM) 水溶液を使用し、濃度を調整して希薄溶液および準希薄溶液が流動に及ぼす影響について調査した。

粘度計測には、粘度に応じて蛍光輝度に変化する 9-(2,2 ジシアノビニル) ジュロリジン (DCVJ) と呼ばれる蛍光分子ローターを使用することにした。そして、本研究では DCVJ を用いた粘度計測方法の確立とその有効性を確かめるために、先述したピラー周りにおける HPAM 溶液の粘度分布計測に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 水溶液濃度がピラー周りの挙動に及ぼす影響

高分子同士の干渉が無視できる希薄溶液および干渉が無視できない準希薄溶液として、100 ppm および 300 ppm の HPAM 水溶液をそれぞれ使用して可視化実験を行い、PIV および PTV によって速度分布を取得した。

まず、希薄溶液については、マイクロ流路への送液流量の増加に伴い、図 1 に示すようにピラー周りに形成される低速度領域の面積が増大するだけでなく、低速度領域そのものが流路スパン方向に対して時系列的に変動を示すことも確認した。

続いて、低速度領域内部の流速分布を PTV によって取得した。このとき、低速度領域内部のスパン方向流速成分が周期的な振動を示す状態から、流量の増大に伴って非定常的な振動を示す状態へと変化した。これについては、dripping-onto-substrate 法によって取得した緩和時間とせん断速度から決定されるワイゼンベルグ数 (Wi) と、スパン方向に対する速度変動の関係としてまとめると (図 2)、特定の Wi 数で不安定状態に遷移し、変動の状態が急激に変化することを確認した。また、各低速度域にて取得したスパン方向速度成分より、隣接する領域同士の相関関係を求めると、相関係数が高くなり、そして、下流側に対して上流側の流動に遅れが生じていることを確認した。これらのことから、流動中の弾性波の影響により下流側の流れが上流側に対して伝播していることが示唆された。

次に、準希薄溶液を使用した場合においても、流量の増大に伴い低速度領域の面積が増大することを確認したが、低速度領域の流動は希薄溶液の場合とは異なり、低速度領域そのものがスパン方向へ変動を示すことはなく、内部の流動にも周期性は見られなかった。このとき、低速度領域の形成メカニズムについては、粘度不安定に起因する shear banding の影響により速度勾配のレイヤーが生じた結果であると示唆された。また、PIV によって取得されたピ

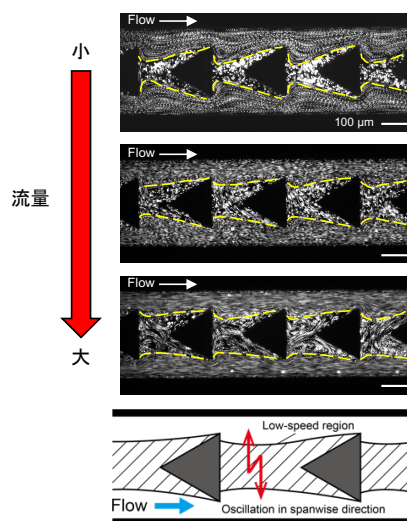


図 1 ピラー周りの低速度域の様子

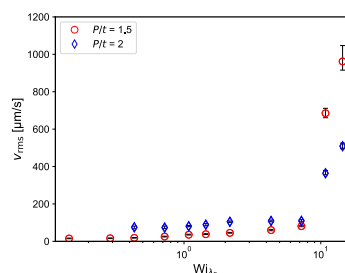


図 2 Wi 数と速度変動の関係 (P/t はピラー間隔のパラメタ)

ラー周りの流速分布に基づき、伸張のテンソルと回転のテンソルから決定される flow type parameter を算出すると、流量の増大に伴い、伸張および回転挙動が混在する流れ場からせん断が支配的な流れ場へと変化することがわかった(図3)。そして、低速域内部に着目すると、粘度勾配の発生が低速域内部における非定常的な挙動の原因であることが示唆された。

このように、希薄および準希薄溶液において、ピラー周りの複雑な流動形態を可視化できたが、構造や流入条件によっては、流動そのものが3次元的な挙動を示すこともわかってきた。しかし、本研究では3次元流速分布の計測には至っておらず、高速域と低速域を切り分けて計測することが困難となっている。そのため、不安定遷移に重要とされている流体の応力の取得に向けて、詳細な速度勾配の取得に課題が残されている。

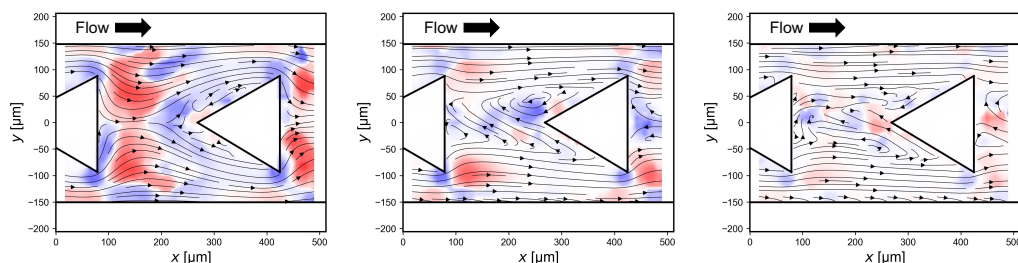


図3 流量変化に伴う flow type parameter 分布の変化(赤は回転が支配的, 青は伸張が支配的, 左, 真ん中, 右の図にかけて流量増大)

(2) DCVJ を使用した粘度分布計測

まず、HPAM 水溶液のような粘弾性流体の粘度分布計測を行う前に、DCVJ の粘度に対する蛍光輝度の関係を取得する必要がある。本研究では、グリセリン水溶液の濃度を調整したものに DCVJ を 0.1 mM 混合させ、それをマイクロ流路に流して蛍光観察を行い、各濃度で粘度と輝度の関係を取得した。粘度は事前にレオメータを使用して計測した。そして、図4に示すような、無次元化された蛍光輝度と粘度の関係を取得することができた。このことから、粘度が低いときは暗く、粘度が高いときは明るくなるのがわかる。なお、この曲線は指数関数でフィッティングを行っており、これを校正曲線として使用した。

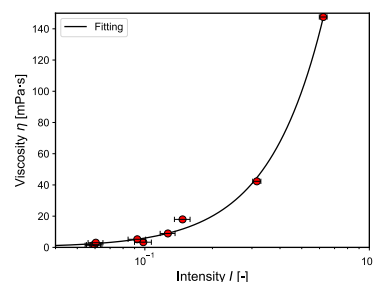


図4 粘度と DCVJ の輝度の関係

続いて、図1に示した正三角形ピラーが並ぶマイクロ流路に、HPAM +グリセリン水溶液を流し、その粘度を計測した。その結果、図5のような粘度分布を取得した。使用した水溶液は shear-thinning 性を有していることから、ピラーと流路壁面の間では急縮小に伴うせん断速度の増大が生じ、それに応じて粘度低下していること、そして、ピラー間の低速領域では粘度が大きくなっていることが確認できた。μPIVによって取得した速度から算出したせん断速度分布と比較するとせん断速度の大小に応じ、shear-thinning 性を示した粘度分布の変化が得られ、粘度分布計測に対する DCVJ の有効性が示された。

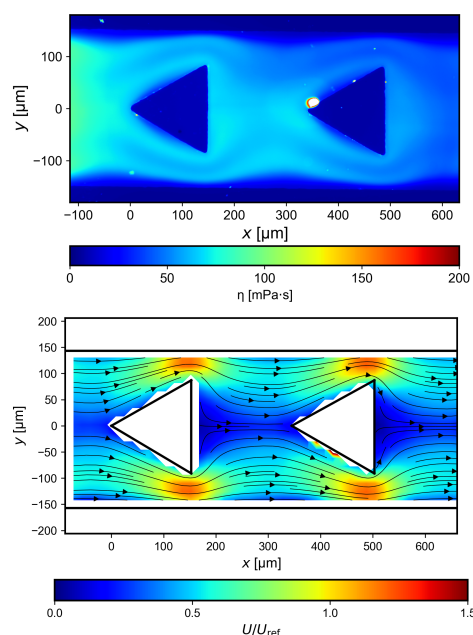


図5 (上) DCVJ を用いて取得した HPAM グリセリン水溶液の粘度分布, (下) μPIV によって取得した三角形ピラー周りの流速分布

一方、HPAM 水溶液のような粘弾性流体はせん断に応じて変化するせん断粘度と、伸張に応じて変化する伸張粘度が現れることが知られており、これらをマイクロ流路内において切り分けて計測ができないこと、そして、高粘度水溶液においては、ニュートン流体であっても流れ方向に対して輝度の低下が見られるなど、粘度計測手法として確立するために解決すべき課題が多数出てきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ichikawa Yoshiyasu, Motosuke Masahiro	4. 巻 26
2. 論文標題 Viscoelastic flow behavior and formation of dead zone around triangle-shaped pillar array in microchannel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10404-022-02549-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 市川賀康, 元祐昌廣
2. 発表標題 ピラーアレイを有するマイクロ流路内における準希薄高分子溶液の流れ
3. 学会等名 第50回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川賀康, 元祐昌廣
2. 発表標題 マイクロ流路内の三角形ピラーアレイ周りにおける高分子溶液の挙動
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiyasu Ichikawa, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Shear banding flow behavior around the periodic triangle-shaped pillars in microchannel
3. 学会等名 75th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APSDFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川賀康, 楊俊英, 山口玲輔, 元祐昌廣
2. 発表標題 蛍光分子ローターを用いたマイクロ流路中の粘弾性流体の粘度計測
3. 学会等名 第18回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiyasu Ichikawa, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Visualization of polymer solution-flow behavior around triangle-shaped pillar array in microchannel
3. 学会等名 20th International Symposium on Flow Visualization (ISFV20) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 市川賀康, 楊俊英, 元祐昌廣
2. 発表標題 蛍光分子ローターを用いた高分子溶液流れの粘度イメージング
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

元祐研究室HP https://www.rs.tus.ac.jp/motlab/jp/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------