

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：38005

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03958

研究課題名(和文) Wagging the tail: Elasticity and flexible filaments in microscopic flows

研究課題名(英文) Wagging the tail: Elasticity and flexible filaments in microscopic flows

研究代表者

HAWARD Simon (HAWARD, SIMON)

沖縄科学技術大学院大学・マイクロ・バイオ・ナノ流体ユニット・研究員

研究者番号：20812986

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：シリンダー周囲の流れは基本・応用両構造に関する非ニュートン流体力学の問題です。マイクロ流体シリンダー装置は粘弾性非ニュートン流理解のための低慣性・高弾性領域へアクセスを提供します。しかし従来の研究は標準の微細加工法で制限され定性的な観察の依存でした。本課題では選択的レーザー誘起エッチング(SLE)の最先端微細加工技術にて新幾何学的領域でマイクロ流体シリンダー装置を製造しました。完全定量的な診断方法と組合せ新シリンダー装置周辺の粘弾性の流れと不安定性が従来の研究でしたが、SLE製造法で微視的な柔軟構造を生成し応答性のある柔軟なフィラメントと非ニュートン流体間の相互の初の定量的研究をもたらしました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

The research has been of interest to researchers in microfluidics, fluid mechanics, rheology, engineering and physics, and resulted in 20 papers in international peer-reviewed journals. The findings are significant for understanding viscoelastic flow instabilities and elastic turbulence.

研究成果の概要(英文)：Flow around a cylinder is a benchmark problem in non-Newtonian fluid mechanics due to its wide relevance to fundamental and applied systems. Microfluidic cylinder devices can give access to regimes of low inertia and high elasticity, which are useful in understanding viscoelastic non-Newtonian flows. But, until now, such studies have been limited by standard microfabrication methods and have mostly relied on qualitative observations. In this project, the state-of-the-art microfabrication technique of selective laser-induced etching (SLE) was used to produce microfluidic cylinder devices in new geometrical regimes. Combined with fully quantitative flow diagnostic methods, viscoelastic flows and instabilities around the new cylinder devices have been studied. The SLE fabrication method has also been used to produce microscopic flexible structures, yielding the first quantitative study of interactions between responsive, flexible filaments and non-Newtonian fluids.

研究分野：viscoelastic fluids

キーワード：microfluidics viscoelasticity flow stability cylinder

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Flow around a cylinder is a benchmark problem in non-Newtonian fluid mechanics due to its wide relevance to fundamental and applied systems. Microfluidic cylinder devices can give access to regimes of low inertia and high elasticity, which are useful in understanding viscoelastic non-Newtonian flows. But, until now, such studies have been limited by standard microfabrication methods and have mostly relied on qualitative observations. In this project, the state-of-the-art microfabrication technique of selective laser-induced etching (SLE) was used to produce microfluidic cylinder devices in new geometrical regimes. Combined with fully quantitative flow diagnostic methods, viscoelastic flows and instabilities around the new cylinder devices have been studied. The SLE fabrication method has also been used to produce microscopic flexible structures, yielding the first quantitative study of interactions between responsive, flexible filaments and non-Newtonian fluids.

2. 研究の目的

The purpose of the project was:

- (1) Explore the use of SLE as a novel fabrication method for microfluidic devices
- (2) Push the fabrication of microfluidic cylinder geometries into new geometric regimes
- (3) Gain new insights into the fundamental non-linear behavior of viscoelastic flows around cylinders
- (4) Extend the study of microscale viscoelastic flows to flexible cylinders

3. 研究の方法

The research method involved:

- (1) Fabrication of microfluidic devices by SLE
- (2) Formulation of viscoelastic fluids such as polymer wormlike micellar solutions and their rheological characterization (i.e., measurement of the viscosity, relaxation time, etc)
- (3) Flowing the viscoelastic fluid through the microfluidic device over a range of imposed flow rates and measuring the flow behavior (using techniques of particle image velocimetry, PIV, and flow-induced birefringence, FIB)
- (4) For flexible cylinders, the motion of the cylinder was also tracked using high-speed video microscopy
- (5) Analyzing the results as a function of the rheological properties of the fluid and/or the geometric properties of the microfluidic devices.

4. 研究成果

The project has resulted in 20 published papers in international peer-reviewed journals (plus several more still currently in press and under review). Eight invited seminars have been presented on the specific topic of the research project, plus 25 contributed talks at international conferences and 1 at a domestic Japanese conference.

The research has proven to be of interest to the microfluidics, fluid mechanics, rheological, and broader engineering and physics communities. Of particular interest and importance has been the discovery of a new viscoelastic flow instability around the cylinder, that most likely impacts on a wide variety of non-Newtonian flows in industry and biology and also poses new challenges to computational rheology.

For flow around a single rigid cylinder located in the center of a microchannel (Fig. 1A), a flow bifurcation occurs as the Weissenberg number ($Wi = U/R$, where U is the flow velocity and R is the cylinder radius) exceeds a critical value $Wi_c \sim 60$ [1]. For $Wi = 37.5 < Wi_c$, the fluid passes the cylinder symmetrically (equal flow velocity on either side of the cylinder) and a straight elastic wake is observed along the flow axis downstream of the cylinder (as seen in the retardation or FIB field). However, for $Wi = 93.8 > Wi_c$, the fluid selects a preferred path around the cylinder (higher velocity on one side than the other), and the elastic wake becomes correspondingly distorted downstream. This symmetry-breaking transition has been characterized as a supercritical pitchfork bifurcation [1]. The bifurcation at one cylinder influences

(and is influenced by) the bifurcation occurring at neighboring cylinders positioned adjacently (Fig. 1B [2]) or downstream (Fig. 1C [3]) in the channel. In a hexagonal array of circular cylinders, the bifurcation at each obstacle results in a regular pattern of asymmetric wakes where the handedness of the asymmetry alternates between rows (Fig. 1D [4]). We note that in all the cases illustrated in Fig. 1, the flow becomes time-dependent and chaotic-like as Wi becomes sufficiently large. However, instability progresses from an initial transition to a steady asymmetric flow around each cylinder. These flows all appear to be governed primarily by the bifurcation that occurs at each obstacle for $Wi > Wi_c$. Therefore, to correctly interpret phenomena observed in more complex flows (e.g., porous media) it is crucial to first understand how instability develops around a single cylinder.

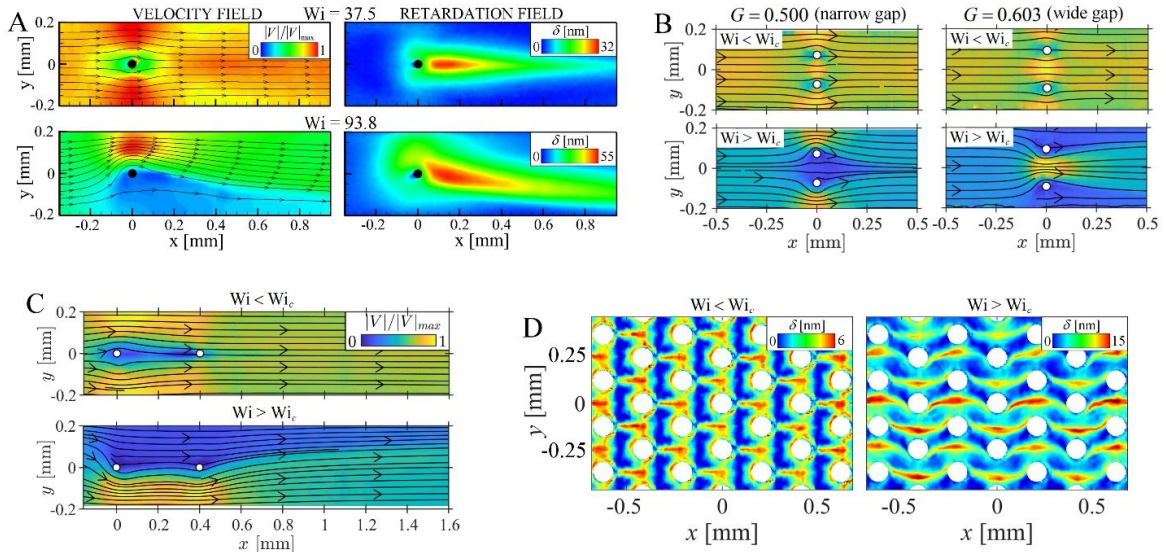


Fig. 1: Transitions to steady asymmetric flow states in various geometries constructed from microscale cylinders as the Weissenberg number is increased beyond a critical value Wi_c . (A) Flow past a single cylinder positioned on the flow axis [1]. (B) Velocity fields for flow past side-by-side cylinders with different dimensionless intercylinder gap, $G = L_1/(L_1 + L_2)$, where L_1 and L_2 are the cylinder-cylinder, and cylinder-wall gaps, respectively [2]. (C) Velocity fields for flow past two axially-aligned cylinders [3]. (D) Retardation fields for flow through a hexagonal array of cylinders. All cases show the flow from left to right of a shear-thinning viscoelastic WLM solution.

Accordingly, significant efforts have been invested in this direction, employing rheologically diverse fluids and a combination of experiments and numerical simulations [1,5,6]. The comprehensive studies indicate that instability is initiated by random fluctuations in the downstream wake due to the combination of high elasticity and streamline curvature close to the downstream stagnation point; i.e., a purely-elastic instability of the type described by Pakdel and McKinley [6-8]. As shown in the inset to Fig. 2A, from numerical simulations with the linear Phan-Thien and Tanner (l-PTT) model, we find the onset Weissenberg number for asymmetric flow scales with the blockage ratio, $B_r = 2R/W$, where W is the channel width, in excellent agreement with the prediction of McKinley *et al.* [6,8]. However, from the same set of simulations, performed by varying B_r at fixed Wi , we observe that asymmetric flows are only supported when the characteristic shear-rate near the cylinder lies on the shear-thinning region of the flow curve (Fig. 2A). As the shear rate approaches the high-shear-rate plateau region, symmetry is recovered.

By fixing $B_r = 0.1$ and varying the degrees of strain-hardening, β , and shear-thinning, α , in the l-PTT model, we obtain a stability diagram in Wi - β parameter space, where the boundaries marking the onset of asymmetric flows can be followed along lines of constant α (Fig. 2B). The instability is clearly affected by an interplay between the shear-thinning and the elasticity of the fluid: if strain-hardening is reduced, more

shear-thinning is required to induce the asymmetric flow state (and *vice-versa*) [6].

These observations are paralleled in experimental measurements using polymer solutions with a range of rheological characteristics (i.e., by varying the shear-thinning and elasticity, see Fig. 2C). Here, to understand the role of shear-thinning, we employ the "shear-thinning parameter", $S = 1 - (d\ln \tau / d\ln \dot{\gamma})$, which is evaluated from the stress (τ) versus shear rate ($\dot{\gamma}$) flow curve measured in steady shear [5,9]. The quantity " I " in Fig. 2C is a measure of the degree of asymmetry in the flow obtained from the difference in flow velocity on either side of the cylinder [1,5]. Elasticity in the wake of the cylinder is considered to depend on the magnitude of Wi . Note that both S and Wi depend on the imposed flow velocity through the microchannel. The colored lines in Fig. 2C show the trajectories of fluids with different polymer concentrations through the three-dimensional space, while the fitted surface is formed from a combination of sigmoidal curves in S and Wi [5]. From Fig. 2C, we observe that fluids with low polymer concentrations (e.g., 50 or 100 ppm) never show significant flow asymmetry ($I \sim 0$); shear-thinning is high only when elasticity is low. Fluids with higher polymer concentrations (e.g., 200 or 300 ppm) show the onset of asymmetry as Wi is initially increased, but the flow recovers symmetry at very high Wi due to the loss of shear-thinning. Fluids of very high polymer concentration (e.g., 1000 or 3000 ppm) develop strong flow asymmetries ($I \sim 1$), that can persist up to high Wi since S remains significant.

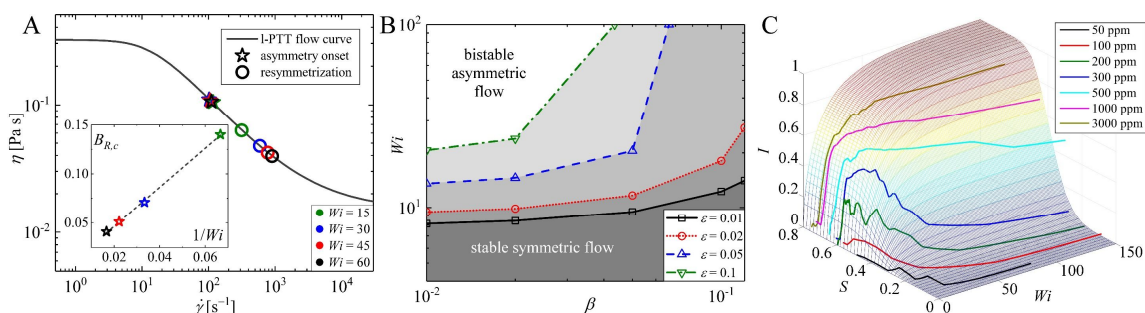


Fig. 1: Influence of shear-thinning and elasticity on the onset and development of asymmetric flow states around a single cylinder. (A) Flow asymmetry only occurs when characteristic shear rates near the cylinder correspond to the shear-thinning region of the flow curve. (Inset) the onset of instability matches the scaling predicted by McKinley *et al.*, indicating that elasticity on curved streamlines in the downstream wake provide the initial perturbation to destabilize the flow [6,8]. (B) Stability diagram constructed from simulation results with the I-PTT model examining the interplay between shear-thinning and strain-hardening [6]. (C) Experimental measurements with polymer solutions over a range of concentration also show that the asymmetric flow around a cylinder requires both shear-thinning and elasticity in the fluid [5].

These findings from a study in a benchmark flow geometry may have widespread implications for understanding viscoelastic flow instabilities in general, including the subsequent onset of time-dependence and "elastic turbulence" at higher driving flow rates or Wi .

References:

- [1] S. J. Haward, N. Kitajima, K. Toda-Peters, T. Takahashi, and A. Q. Shen, Flow of wormlike micellar solutions around microfluidic cylinders with high aspect ratio and low blockage ratio, *Soft Matter* **15**, 1927
- [2] C. C. Hopkins, S. J. Haward, and A. Q. Shen, Tristability in viscoelastic flow past side-by-side microcylinders, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 054501 (2021).
- [3] C. C. Hopkins, S. J. Haward, and A. Q. Shen, Purely elastic fluid-structure interactions in microfluidics: Implications for mucociliary flows, *Small* **16**, 1903872 (2020).
- [4] S. J. Haward, C. C. Hopkins, and A. Q. Shen, Chaotic fluctuations in viscoelastic

porous media flow depend on stagnation points, article in preparation.

[5] S. J. Haward, C. C. Hopkins, and A. Q. Shen, Asymmetric flow of polymer solutions around microfluidic cylinders: Interaction between shear-thinning and viscoelasticity, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **278**, 104250 (2020).

[6] S. Varchanis, C. C. Hopkins, A. Q. Shen, J. Tsamopoulos, and S. J. Haward, Asymmetric flows of complex fluids past confined cylinders: A comprehensive numerical study with experimental validation, *Phys. Fluids* **32**, 053103 (2020).

[7] P. Pakdel and G. H. McKinley, Elastic instability and curved streamlines, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2459 (1996).

[8] G. H. McKinley, P. Pakdel, and A. Oztekin, Rheological and geometric scaling of purely elastic flow instabilities, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **67**, 19 (1996).

[9] S. J. Haward and G. H. McKinley, Stagnation point flow of wormlike micellar solutions in a microfluidic cross-slot device: Effects of surfactant concentration and ionic environment, *Phys. Rev. E* **85**, 031502 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 28件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Varchanis, Hopkins, Shen, Tsamopoulos, Haward	4. 巻 32
2. 論文標題 Asymmetric flows of complex fluids around confined cylinders: A comprehensive numerical study with experimental validation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 53103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0008783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Varchanis, Haward, Hopkins, Syrakos, Shen, Dimakopoulos, Tsamopoulos	4. 巻 117
2. 論文標題 Transition between solid and liquid state of yield-stress fluids under purely extensional deformations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 12611-12617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1922242117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Haward, Hopkins, Shen	4. 巻 278
2. 論文標題 Asymmetric flow of polymer solutions around microfluidic cylinders: Interaction between shear-thinning and viscoelasticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2020.104250	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kang, Carlson, Kang, Lee, Haward, Choi, Shen, Chung	4. 巻 14
2. 論文標題 Intracellular nanomaterial delivery via spiral hydroporation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 3048-3058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b07930	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hopkins, Haward, Shen	4. 巻 16
2. 論文標題 Purely-elastic fluid structure interactions: Implications for mucociliary flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 1903872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202070047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zografos, Haward, Oliveira	4. 巻 23
2. 論文標題 Optimised multi-stream designs for controlled extensional deformation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-019-2295-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Burshtein, Chan, Toda-Peters, Shen, Haward	4. 巻 43
2. 論文標題 3D-printed glass microfluidics for fluid dynamics and rheology	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Current Opinion in Colloid and Interface Science	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cocis.2018.12.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chan, Ault, Haward, Meiburg, Shen	4. 巻 4
2. 論文標題 Coupling of vortex breakdown and stability in a swirling flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.084701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Haward, Hopkins, Toda-Peters, Shen	4. 巻 114
2. 論文標題 Microfluidic analog of an opposed-jets device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 223701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5097850	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 N Burshtein, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 31
2. 論文標題 Controlled symmetry breaking and vortex dynamics in intersecting flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 34104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087732	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 N Burshtein, ST Chan, K Toda-Peters, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 43
2. 論文標題 3D-printed glass microfluidics for fluid dynamics and rheology	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Current Opinion in Colloid and Interface Science	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cocis.2018.12.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 L Ducloue, L Casanellas, SJ Haward, RJ Poole, MA Alves, S Lerouge, AQ Shen, A Lindner	4. 巻 23
2. 論文標題 Secondary flows of viscoelastic fluids in serpentine microchannels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-019-2195-0	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 該当する

1. 著者名 SJ Haward, N Kitajima, K Toda-Peters, T Takahashi, AQ Shen	4. 巻 15
2. 論文標題 Flow of wormlike micellar solutions around microfluidic cylinders with high aspect ratio and low blockage ratio	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 1927-1941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM02099J	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SJ Haward, N Kitajima, K Toda-Peters, T Takahashi, AQ Shen	4. 巻 15
2. 論文標題 Front Cover	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 1893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SM90043H	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 SJ Haward, J Page, TA Zaki, AQ Shen	4. 巻 30
2. 論文標題 'Phase diagram' for viscoelastic Poiseuille flow over wavy surfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 113101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5057392	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SJ Haward, J Page, TA Zaki, AQ Shen	4. 巻 30
2. 論文標題 Front Cover	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 SJ Haward, J Page, TA Zaki, AQ Shen	4. 巻 3
2. 論文標題 Inertioelastic Poiseuille flow over a wavy surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 91302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.3.091302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K Zografos, N Burshtein, AQ Shen, SJ Haward, RJ Poole	4. 巻 262
2. 論文標題 Elastic modifications of an inertial instability in a 3D cross-slot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 12-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2018.02.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 ST Chan, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 3
2. 論文標題 Microscopic investigation of vortex breakdown in a dividing T-junction flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 72201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.3.072201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SJ Haward, K Toda-Peters, AQ Shen	4. 巻 254
2. 論文標題 Steady viscoelastic flow around high-aspect-ratio, low-blockage-ratio microfluidic cylinders	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 23-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2018.02.009	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 該当する

1. 著者名 F Pimenta, K Toda-Peters, AQ Shen, MA Alves, SJ Haward	4. 巻 61
2. 論文標題 Viscous flow through microfabricated axisymmetric contraction/expansion geometries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0008783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SJ Haward and AQ Shen	4. 巻 32
2. 論文標題 Fluid-structure interactions: From engineering to biomimetic systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 120401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039499	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 N Burshtein, K. Zografos, AQ Shen, RJ Poole, SJ Haward	4. 巻 33
2. 論文標題 Periodic fluctuations of streamwise vortices in inertia-dominated intersecting flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 14106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 CC Hopkins, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 126
2. 論文標題 Tristability in viscoelastic flow past side-by-side microcylinders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 54501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.054501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V Calabrese, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 54
2. 論文標題 Effects of shearing and extensional flows on the alignment of colloidal rods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 4176-4185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c02155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V Calabrese, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 54
2. 論文標題 Front Cover	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V Calabrese, S Varchanis, SJ Haward, J Tsamopoulos, AQ Shen	4. 巻 in press
2. 論文標題 Structure-property relationship of a soft colloidal glass in simple and mixed flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Colloid and Interface Science	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcis.2021.05.103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 ST Chan, F van Berlo, HA Faizi, A Matsumoto, SJ Haward, PD Anderson, AQ Shen	4. 巻 in press
2. 論文標題 Torsional fracture of viscoelastic liquid bridges	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences USA	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2104790118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計35件(うち招待講演 6件/うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Haward, Hopkins, Shen
2. 発表標題 The Asymmetric Flow of Polymer Solutions around Cylinders
3. 学会等名 Fluid-Structure Interactions: From Engineering to Biomimetic Systems (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chan, Ault, Haward, Meiburg, Shen
2. 発表標題 Coupling of vortex breakdown and stability in a vortex T-mixer flow
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haward, Hopkins, Shen
2. 発表標題 Viscoelastic fluid-structure interactions in microfluidics
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shen, Burshtein, Haward
2. 発表標題 Controlled symmetry breaking and vortex dynamics in intersecting flows
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hopkins, Haward, Shen
2 . 発表標題 Flow-induced vibrations of flexible microcylinders due to a viscoelastic flow instability
3 . 学会等名 Annual Meeting of the Society of Rheology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Varchanis, Haward, Hopkins, Ionnou, Kordalis, Shen, Dimakopoulos, Tsamopoulos
2 . 発表標題 Elastic instabilities and nonlinear dynamics of yield stress fluids in cross-slot extensional rheometers
3 . 学会等名 VPF8 Viscoplastic Fluids: from Theory to Application 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hopkins, Haward, Shen
2 . 発表標題 Flow induced vibrations of flexible microcylinders due to a viscoelastic flow instability
3 . 学会等名 First Rencontres du Vietnam - Soft Matter Science
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Haward, Hopkins, Kitajima, Toda-Peters, Takahashi, Shen
2 . 発表標題 Flow of wormlike micellar solutions around microfluidic cylinders with high aspect ratio and low blockage ratio
3 . 学会等名 First Rencontres du Vietnam - Soft Matter Science
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Haward, Hopkins, Shen
2. 発表標題 Viscoelastic flow and instabilities around microfluidic cylinders
3. 学会等名 International Workshop on Numerical Methods in Non-Newtonian Flows
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Burshtein, Zografos, Shen, Poole, Haward
2. 発表標題 Inertioelastic effects on a spiral vortex flow instability
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haward, Kitajima, Toda-Peters, Takahashi, Shen
2. 発表標題 Flow of wormlike micellar solutions around microfluidic cylinders with high aspect ratio and low blockage ratio
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SJ Haward
2. 発表標題 Microfluidic Flows and Instabilities of Wormlike Micellar Solutions
3. 学会等名 International Complex Fluids and Thermal Engineering Research Center (iCOFTEC) Symposium (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SJ Haward, N Kitajima, K Toda-Peters, T Takahashi, AQ Shen
2. 発表標題 Micellar Solutions Around Microfluidic Cylinders
3. 学会等名 Flow and Instability of Self-Assembled Systems (OIST minisymposium) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SJ Haward, J Page, TA Zaki, AQ Shen
2. 発表標題 Experimental investigation of viscoelastic effects in wavy microchannel flow
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L Ducloue, L Casanellas, SJ Haward, RJ Poole, MA Alves, S Lerouge, AQ Shen, A Lindner
2. 発表標題 Viscoelastic secondary flows in curved microchannels
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ST Chan, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Flow recirculation in microfluidic T-junctions and bends
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N Burshtein, K Zografos, AQ Shen, RJ Poole, SJ Haward
2. 発表標題 Inertioelastic flow instability at a stagnation point
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SJ Haward, K Toda-Peters, AQ Shen
2. 発表標題 Steady viscoelastic flow around high-aspect-ratio, low-blockage-ratio microfluidic cylinders
3. 学会等名 Society of Rheology (SOR) Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 AQ Shen, SJ Haward, J Cardiel, Y Zhao
2. 発表標題 Microstructure, Rheology, and Flow Instability of Wormlike Micellar Solutions under Spatial Confinement and Flow Conditions
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N Burshtein, K Zografos, AQ Shen, RJ Poole, SJ Haward
2. 発表標題 Inertioelastic flow instability at a stagnation point
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S Recktenwald, SJ Haward, AQ Shen, N Willenbacher
2 . 発表標題 Elongational flow behavior of low concentrated surfactant solutions
3 . 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 SJ Haward, J Page, TA Zaki, AQ Shen
2 . 発表標題 Viscoelastic Poiseuille flow through wavy-wall microchannels
3 . 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 L Ducloue, L Casanellas, SJ Haward, RJ Poole, MA Alves, S Lerouge, AQ Shen, A Lindner
2 . 発表標題 Secondary flows of viscoelastic fluids in curved microchannels
3 . 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 SJ Haward, CC Hopkins, S Varchanis, AQ Shen
2 . 発表標題 Instabilities of viscoelastic flows past slender posts
3 . 学会等名 Princeton Center for Theoretical Science Virtual Workshop on “Viscoelastic Flow Instabilities and Elastic Turbulence” (招待講演)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Non-Newtonian flows and instabilities in 3D glass microfluidic devices
3. 学会等名 JNNFM Complex Fluids Virtual Seminar Series (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 SJ Haward
2. 発表標題 The Asymmetric Flow of Polymer Solutions around Cylinders
3. 学会等名 Poole Group "Lockdown Virtual Seminar Series" (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 V Calabrese, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 The effects of shearing and extensional flows on the alignment of colloidal rods
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Varchanis, CC Hopkins, AQ Shen, J Tsamopoulos, SJ Haward
2. 発表標題 Asymmetric flows of complex fluids past a cylinder in a microchannel
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C de Blois, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 Hydrodynamic and viscoelastic effects inside a biomimetic array of passive cilia-like structures
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 CC Hopkins, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Tristability in viscoelastic flow past side-by-side microcylinders
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 DW Carlson, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Tomographic PIV measurements of viscoelastic instabilities in a glass 3D micro-contraction
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ST Chan, F van Berlo, HA Faizi, A Matsumoto, SJ Haward, PD Anderson, AQ Shen
2. 発表標題 Edge fracture instability of viscoelastic liquid bridges
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N Burshtein, AA Banaei, SJ Haward, AQ Shen, L Brandt, A Lindner
2. 発表標題 Transport dynamics of microparticles in inertio-elastic vortex flows
3. 学会等名 Virtual Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Varchanis, CC Hopkins, AQ Shen, J Tsamopoulos, SJ Haward
2. 発表標題 Asymmetric flows of complex fluids past confined cylinders: A numerical study
3. 学会等名 Virtual International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N Burshtein, K Zografos, RJ Poole, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 Periodic fluctuations of streamwise vortices in inertia-dominated intersecting flows
3. 学会等名 Virtual American Physical Society Division of Fluid Dynamics Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------