

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：38005
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03884
研究課題名(和文)3D microfluidics for extensional rheometry

研究課題名(英文)3D microfluidics for extensional rheometry

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・グループリーダー

研究者番号：20812986

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：水のような単純な流体は一定の粘度を持つが、高分子溶液のような複雑流体は流れに応じて粘度が変化する。「伸長」流れでは、高分子溶液の粘度は劇的に上昇するが、これを適切に測定することは難しかった。本研究では、高精度の微細ガラス流路を作製することで、高分子溶液を三次元的に駆動し、軸上・平面上に伸長する流れを発生させた。このような流れは、紡糸やフィルム形成など様々な産業プロセスに現れ、複雑流体の特性と挙動の理解が求められる。我々は、軸伸長下での高分子溶液の粘度上昇が、平面伸長下の2倍になることを初めて示した。一方、平面伸長において流れが非常に安定であるのに対し、軸伸長では不安定になりやすいことも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

The extensional rheology of complex fluids impacts many industrial and biological processes including fiber spinning, inkjet printing, film formation, and blood flow. This project has contributed to improving the understanding and measurement of the extensional properties of complex fluids.

研究成果の概要(英文)：Simple fluids like water have a constant viscosity, but complex fluids like polymer solutions have a viscosity that can vary in response to flow. In a 'stretching' flow the viscosity of a polymer solution can increase dramatically, but this increase is hard to measure properly. In this project we produced highly precise microscopic glass channels to drive fluids in three-dimensions and to generate a flow field that stretches a polymer solution either along an axis or over a plane. These kinds of flows occur in processes such as fiber-spinning and film formation, where it is important to understand the properties and behavior of the complex fluids that are used. We showed for the first time that when stretching is along an axis the viscosity increase of a polymer solution is twice as large as when stretching is over a plane. On the other hand, we also showed that the flow is highly stable for planar stretching, but easily becomes unstable for axial stretching.

研究分野：microfluidic extensional rheometry

キーワード：extensional flow rheology microfluidics viscoelasticity flow stability

1 . 研究開始当初の背景

Extensional viscosity of viscoelastic fluids is a material function of fundamental importance in widespread fluid handling and processing operations. The extensional viscosity depends strongly on the applied fluid strain and strain-rate, and likely also on the mode of deformation: uniaxial, planar or biaxial, however this has never previously been tested and confirmed quantitatively. In this project, the applicant employed the state-of-the-art 3D microfabrication method of selective laser-induced etching (SLE) to produce geometries specifically designed to measure the extensional viscosity of viscoelastic fluids in different deformation regimes. The project has led to several advancements in the measurement of the extensional flow properties of viscoelastic fluids and to a deeper understanding of how the extensional viscosity is affected by the imposed mode of extension. Furthermore the applicant has studied a novel 3D viscoelastic flow instability that was observed in experiments using one of the microfluidic devices.

2 . 研究の目的

The purpose of the project was:

- (1) Explore the use of SLE as a fabrication method for complex 3D microfluidic extensional flow devices
- (2) Push microfluidic extensional rheometry into a new paradigm from planar to uniaxial and biaxial
- (3) Gain new insights into the behavior of viscoelastic fluids in strong extensional flows
- (4) Compare the extensional rheology of polymer solutions under different modes of extension

3 . 研究の方法

The research method involved:

- (1) Fabrication of 3D microfluidic devices by SLE
- (2) Formulation of viscoelastic polymer solutions and their rheological characterization (i.e., measurement of the viscosity, relaxation time, etc)
- (3) Flowing the viscoelastic fluids through the microfluidic devices over a range of imposed flow rates and measuring the flow behavior (using techniques of particle image velocimetry, PIV, and pressure drop)
- (4) Using the measured flow parameters to compute the extensional viscosity as a function of the imposed strain rate
- (5) Analyzing the data in terms of appropriate fluid models in order to better understand differences (or similarities) observed between the extensional viscosity measured experimentally by each device.

4 . 研究成果

The project has resulted in 25 published papers in international peer-reviewed journals (plus several more still currently in press and under review). In the project period, despite the covid 19 pandemic, 5 invited seminars have been presented, plus 41 contributed talks at international conferences, one of which took place in Osaka, Japan in 2023, where 2 talks and 1 poster were presented.

The research has proven to be of interest to the microfluidics, fluid mechanics, rheological, and broader engineering and physics communities. Of particular interest we found agreement between the extensional rheology in uniaxial and planar flows, but

a discrepancy for biaxial flows. While this agrees with some constitutive models, it does not agree with others, so poses new challenges to computational rheology.

At the start of the project numerical optimization of a “six-arm cross-slot” device were performed, yielding several three-dimensional shapes of fluidic channels that impose close approximations to an ideal uniaxial (biaxial) stagnation point extensional flow under the constraints of having four inlets and two outlets (two inlets and four outlets) and for Newtonian creeping flow. One of the numerically designed geometries was considered the most suitable for fabrication at the microscale, and numerical simulations with the Oldroyd-B and Phan-Thien and Tanner models in that geometry confirmed that the optimal flow fields are observed in the geometry for both constant viscosity and shear thinning viscoelastic fluids. The geometry, named the optimized uniaxial and biaxial extensional rheometer (OUBER [1]), was microfabricated with high precision by selective laser-induced etching of a fused-silica substrate. Employing a refractive index-matched viscous Newtonian fluid, microtomographic-particle image velocimetry enabled the measurement of the flow field in a substantial volume around the stagnation point. The flow velocimetry, performed at low Reynolds number (<0.1), confirmed the accurate imposition of the desired and predicted flow fields, with a pure extensional flow at an essentially uniform deformation rate being applied over a wide region around the stagnation point (see Fig. 1).

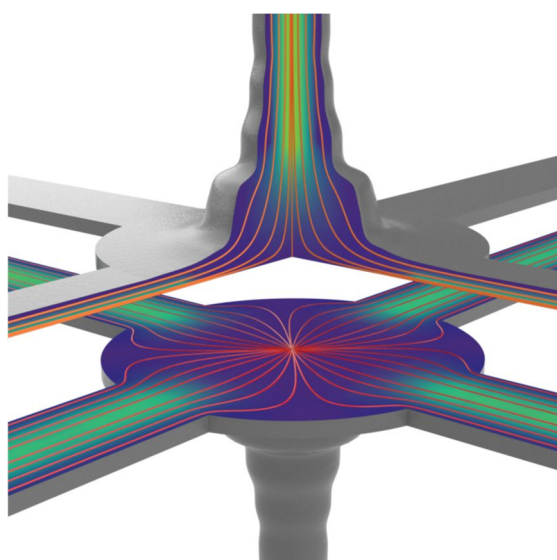


FIG 1: In the first paper [1] resulting from the project, we describe the numerical optimization of a six-armed cross-slot geometry in order to generate homogeneous uniaxial and biaxial extensional flow fields. In the schematic representation of the resulting ‘OUBER’ geometry (left), color contours are normalized flow velocity magnitude and colored lines are streamlines.

Subsequently, pressure drop measurements in the OUBER geometry were used to assess the uniaxial and biaxial extensional rheometry of dilute polymeric solutions, in comparison to measurements made in planar extension using an optimized-shape cross-slot extensional rheometer [2]. In each case, micro-particle image velocimetry was used to measure the extension rate as a function of the imposed flow conditions, and excess pressure drop measurements enabled estimation of the tensile stress difference generated in the fluid via a new analysis that we developed based on the macroscopic power balance for flow through each device. Based on this analysis, for the most dilute polymer sample tested, which is “ultradilute”, the extensional viscosity is well described by Peterlin’s finitely extensible nonlinear elastic dumbbell model. In this limit, the biaxial extensional viscosity at high Weissenberg numbers (Wi) is half that of the uniaxial and planar extensional viscosities ([3], see Fig. 2). At higher polymer concentrations, although the fluids remained dilute, the experimental measurements deviate from the model predictions, which was attributed to the onset of intermolecular interactions as the polymer chains unravel in the extensional flows. Of practical significance (and fundamental interest), we observed that elastic instability occurs at a significantly lower Wi in uniaxial extensional flow than in either biaxial or planar extensional flow, thereby limiting the utility of this flow type for extensional viscosity measurement.

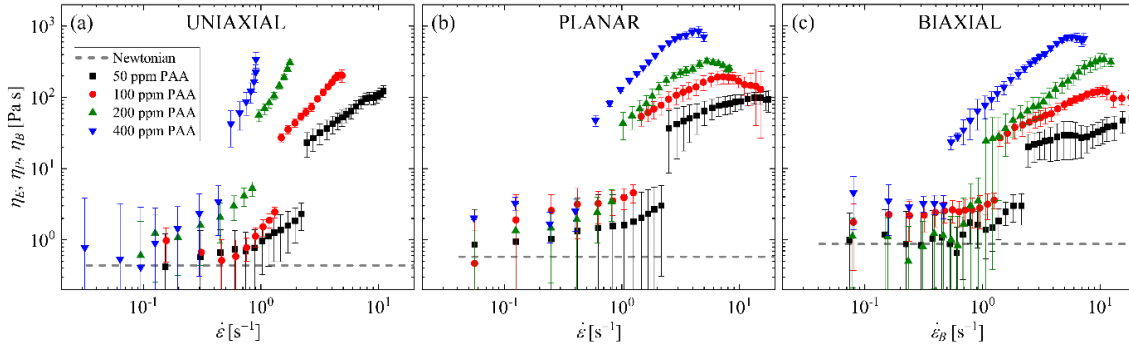


FIG. 2: extensional viscosity flow curves obtained for polyacrylamide (PAA) aqueous solutions under (a) uniaxial, (b) planar, and (c) biaxial extensional flow

Intrigued by this previously uninvestigated elastic flow instability, we proceeded to investigate it using the OUBER device, which is sensitive to the alignment of the extensional flow. The three-dimensional symmetry-breaking instability occurring for flow of a dilute polymer solution in the OUBER geometry was studied experimentally by leveraging tomographic particle image velocimetry. We found that above a critical Weissenberg number, flow in uniaxial extension undergoes a supercritical pitchfork bifurcation to a multi-stable state. However, for biaxial extension (which is simply the kinematic inverse of uniaxial extension) the instability is strongly suppressed. In uniaxial extension, the multiple stable states align in an apparently random orientation as flow joining from the four neighbouring planar inlet channels passes to one of the two opposing outlets; thus forming a mirrored asymmetry about the stagnation point (see Fig. 3). We related the suppression of the instability in biaxial extension to the kinematic history of flow under the context of breaking the time-reversibility assumption [4].

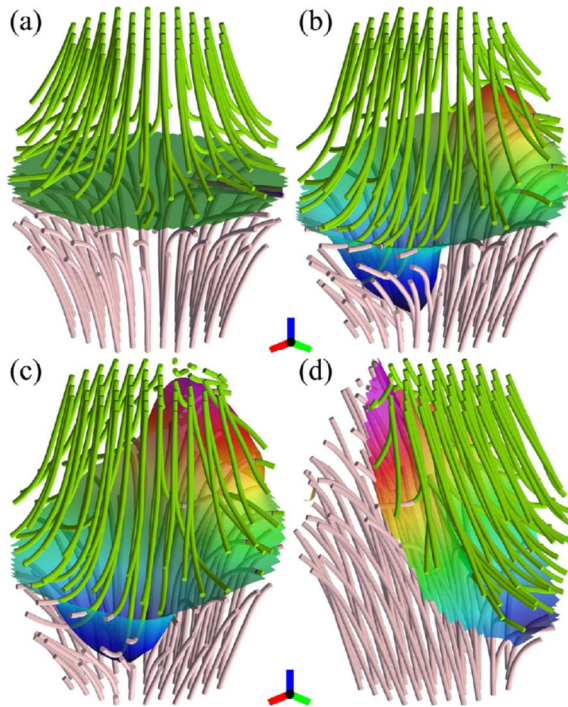




FIG 3: alignment of the separatrix dividing the incoming flows in the OUBER device for a dilute polymer solution at different values of the Weissenberg number, Wi . (a) symmetric flow at a low $Wi = 0.6$, and (b-d) asymmetric flows at $Wi = 3.6$, $Wi = 4.0$, and $Wi = 16.4$, respectively.

References:

- [1] S. J. Haward et al., Extensional rheometry of mobile fluids. Part I: OUBER, an optimized uniaxial and biaxial extensional rheometer, *J. Rheology* **67**, 995-1009 (2023).
- [2] S. J. Haward et al., Optimized cross-slot flow geometry for microfluidic extensional rheometry, *Physical Review Letters* **109**, 128301 (2012).
- [3] S. J. Haward et al., Extensional rheometry of mobile fluids. Part II: Comparison between the uniaxial, planar and biaxial extensional rheology of polymer solutions using numerically-optimized stagnation point microfluidic geometries, *J. Rheology* **67**, 1011-1030 (2023).
- [4] DW Carlson, A. Q. Shen, S. J. Haward, Exploring multi-stability in three-dimensional viscoelastic flow around a free stagnation point. *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics* **323**, 105169 (2024).

Δz [mm] -0.5  +0.5 $w/|w|$ -1  +1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 25件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 SS Datta, AM Ardekani, ... SJ Haward, AQ Shen, et al	4. 巻 7
2. 論文標題 Perspectives on viscoelastic flow instabilities and elastic turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 80701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.7.080701	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 Simon J Haward, Amy Q Shen	4. 巻 2
2. 論文標題 Non-Newtonian flows and instabilities in 3D glass microfluidic devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Talks	6. 最初と最後の頁 100023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sctalk.2022.100023	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 Stylios Varchanis, Simon J Haward, Cameron C Hopkins, John Tsamopoulos, Amy Q Shen	4. 巻 307
2. 論文標題 Evaluation of constitutive models for shear-banding wormlike micellar solutions in simple and complex flows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2022.104855	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 Cameron C Hopkins, Simon J Haward, Amy Q Shen	4. 巻 18
2. 論文標題 Upstream wall vortices in viscoelastic flow past a cylinder	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4868-4880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM00418F	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 Vincenzo Calabrese, Stylianos Varchanis, Simon J Haward, Amy Q Shen	4. 巻 55
2. 論文標題 Alignment of colloidal rods in crowded environments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 5610-5620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c00769	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 Daniel W Carlson, Kazumi Toda-Peters, Amy Q Shen, Simon J Haward	4. 巻 950
2. 論文標題 Volumetric evolution of elastic turbulence in porous media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.836	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 Vincenzo Calabrese, Csilla Gyorgy, Simon J Haward, Thomas J Neal, Steven P Armes, Amy Q Shen	4. 巻 55
2. 論文標題 Microstructural dynamics and rheology of worm-like diblock copolymer nanoparticle dispersions under a simple shear and a planar extensional flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 10031-10042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c01314	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 Cameron C Hopkins, Amy Q Shen, Simon J Haward	4. 巻 18
2. 論文標題 Effect of blockage ratio on flow of a viscoelastic wormlike micellar solution past a cylinder in a microchannel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 8856-8866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM01162J	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 San To Chan, Simon J Haward, Amy Q Shen	4. 巻 35
2. 論文標題 Prevention of edge fracture using a non-toxic liquid metal sealant	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 11704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0135554	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 San To Chan, Stylianos Varchanis, Amy Q Shen, Simon J Haward	4. 巻 2
2. 論文標題 Edge fracture of thixotropic elastoviscoplastic liquid bridges	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PNAS Nexus	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) 10.1093/pnasnexus/pgad042	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 Charlotte de Blois, Simon J Haward, Amy Q Shen	4. 巻 8
2. 論文標題 Canopy elastic turbulence: Spontaneous formation of waves in beds of passive slender microposts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 23301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.8.023301	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 Vincenzo Calabrese, Amy Q Shen, Simon J Haward	4. 巻 17
2. 論文標題 Naturally derived colloidal rods in microfluidic flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biomicrofluidics	6. 最初と最後の頁 21301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0142867	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, S Varchanis, SJ Haward, J Tsamopoulos, AQ Shen	4. 巻 601
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 454-466
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 SJ Haward, CC Hopkins, S Varchanis, AQ Shen	4. 巻 21
2. 論文標題 Bifurcations in flows of complex fluids around microfluidic cylinders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lab on a Chip	6. 最初と最後の頁 4041-4059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1lc00128k	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 118
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 e2104790118
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

1. 著者名 DW Carlson, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 923
2. 論文標題 Tomographic particle image velocimetry measurements of viscoelastic flow instabilities in a three-dimensional microcontraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.620	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, CC Hopkins, AQ Shen	4. 巻 118
2. 論文標題 Stagnation points control chaotic dynamics in viscoelastic porous media flow	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 e2111651118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2111651118	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 S Varchanis, J Tsamopoulos, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 300
2. 論文標題 Reduced and increased flow resistance in shear-dominated flows of Oldroyd-B fluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2021.104698	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, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 18
2. 論文標題 Torsional instability of constant viscosity elastic liquid bridges	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 1965-1977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SM01804C	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 DW Carlson, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 323
2. 論文標題 Exploring multi-stability in three-dimensional viscoelastic flow around a free stagnation point	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 105169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2023.105169	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 A Yokokoji, S Varchanis, AQ Shen, SJ Haward	4. 巻 20
2. 論文標題 Rheological effects on purely-elastic flow asymmetries in the cross-slot geometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 152-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3sm01209c	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, TP Santos, CG Lopez, MP Lettinga, SJ Haward, AQ Shen	4. 巻 6
2. 論文標題 Extensibility governs the flow-induced alignment of polymers and rod-like colloids	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.6.L012042	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, E Fried, GH McKinley	4. 巻 35
2. 論文標題 The rheology of saltwater taffy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 93106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0163715	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, S Varchanis, GH McKinley, MA Alves, AQ Shen	4. 巻 67
2. 論文標題 Extensional rheometry of mobile fluids. Part II: Comparison between the uniaxial, planar and biaxial extensional rheology of polymer solutions using numerically-optimized stagnation point microfluidic geometries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Rheology	6. 最初と最後の頁 1011-1030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1122/8.0000660	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, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, MA Alves, AQ Shen	4. 巻 67
2. 論文標題 Extensional rheometry of mobile fluids. Part I: OUBER, an optimized uniaxial and biaxial extensional rheometer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Rheology	6. 最初と最後の頁 995-1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1122/8.0000659	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64件(うち招待講演 8件/うち国際学会 61件)

1. 発表者名 N Burshtein, AA Banaei, M Aulnette, 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 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 V Calabrese, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Alignment of colloidal rods in crowded environments
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F van Berlo, ST Chan, HA Faizi, A Matsumoto, SJ Haward, PD Anderson, AQ Shen
2. 発表標題 Torsional fracture of viscoelastic liquid bridges
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 S Varchanis, J Tsamopoulos, AQ Shen, SJ Haward
2 . 発表標題 Shear-thinning and shear-thickening effects in the Oldroyd-B model
3 . 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 ST Chan, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 Torsional instability of constant viscosity elastic liquid bridges
3 . 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 V Calabrese, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 Alignment of colloidal rods in crowded environments
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 A Space-Time Galerkin/Least-Squares Method for the simulation of non-Newtonian fluid flows
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 DW Carlson, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 Volumetric evolution of elastic turbulence in porous media
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 EY Chen, CA Browne, SJ Haward, AQ Shen, SS Datta
2 . 発表標題 Influence of geometric ordering on viscoelastic flow instabilities in 3D porous media
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, K Toda-Peters, MA Alves, AQ Shen
2 . 発表標題 Optimized microfluidic device for homogeneous uniaxial and biaxial elongation of mobile fluids
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, MA Alves, AQ Shen
2 . 発表標題 Design and fabrication of an optimized “6-arm cross-slot” device
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Arisa Yokokoji, Stylianos Varchanis, Simon J. Haward, Amy Q. Shen
2 . 発表標題 Rheological effects on the cross-slot flow instability
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Cameron C. Hopkins, Simon J. Haward, and Amy Q. Shen
2 . 発表標題 Upstream wall vortices in viscoelastic flow past a cylinder
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Daniel W. Carlson, Kazumi Toda-Peters, Amy Q. Shen, and Simon J. Haward
2 . 発表標題 Volumetric evolution of elastic turbulence in porous media
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Vincenzo Calabrese, Csilla Gyorgy, Simon J. Haward, Thomas J. Neal, Steven P. Armes, and Amy Q. Shen
2 . 発表標題 Block copolymer worms under flow: shear and stretch
3 . 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Daniel W. Carlson, Kazumi Toda-Peters, Amy Q. Shen, and Simon J. Haward
2. 発表標題 Viscoelastic promotion of pore-scale commotion
3. 学会等名 Society of Rheology Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 EY Chen, CA Browne, SJ Haward, AQ Shen, SS Datta
2. 発表標題 Influence of geometric ordering on viscoelastic flow instabilities in 3D porous media
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics 75th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M Abdelgawad, SJ Haward, AQ Shen, ME Rosti
2. 発表標題 Rheological and flow characteristics of extensible yield stress fluids
3. 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics 75th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 EY Chen, CA Browne, SJ Haward, AQ Shen, SS Datta
2. 発表標題 Influence of geometric ordering on viscoelastic flow instabilities in 3D porous media
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, K Toda-Peters, GH McKinley, MA Alves, AQ Shen
2. 発表標題 Optimized Microfluidic Device for Uniaxial and Biaxial Elongation of Mobile Fluids
3. 学会等名 Recent Trends in Microrheology and Microfluidics (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, CC Hopkins, AQ Shen
2. 発表標題 Geometric Effects on the Dynamics of Viscoelastic Porous Media Flows
3. 学会等名 Yielding and Flow of Soft Matter Systems (招待講演)
4. 発表年 2023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 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 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 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 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 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 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021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 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Varchanis, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 Shear-banded flows and elastic instabilities of wormlike micellar solutions in microfluidic devices
3. 学会等名 International Workshop on Numerical Methods for Non-Newtonian Flows (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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 European Colloid and Interface Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 V Calabrese, S Varchanis, John Tsamopoulos, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Structure-property relationship of a soft colloidal glass in simple and mixed flows
3. 学会等名 British Society of Rheology Midwinter Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Varchanis, SJ Haward, CC Hopkins, J Tsamopoulos, AQ Shen
2. 発表標題 Evaluation of constitutive models for shear-banding wormlike micellar solutions in simple and complex flows
3. 学会等名 International Congress on Rheology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward
2. 発表標題 Geometric Effects on the Dynamics of Viscoelastic Porous Media Flows
3. 学会等名 University of Liverpool (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C de Blois, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Canopy elastic turbulence: Spontaneous formation of waves in beds of slender microposts
3. 学会等名 Physical Review Fluids Online Journal Club (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 V Calabrese, TP Santos, CG Lopez, MP Lettinga, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Extensibility governs the flow-induced alignment of polymers and rod-like colloids
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 MS Abdelgawad, SJ Haward, AQ Shen, ME Rosti
2. 発表標題 The effect of fluid elasticity and plasticity on the flow within wavy channels
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 F Hillebrand, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Flow of shear-banding viscoelastic fluids over long cavities
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 E Chen, S Haward, A Shen, S Datta
2. 発表標題 The flow thickens: predicting macroscopic flow resistance of viscoelastic fluid flow in porous media
3. 学会等名 American Physical Society March meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S Varchanis, S Haward, A Shen
2. 発表標題 Viscoelastic fingering during the sedimentation of a sphere
3. 学会等名 American Physical Society March meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名 E Chen, C Browne, S Haward, A Shen, S Datta
2 . 発表標題 Influence of geometric ordering on viscoelastic flow instabilities in 3D porous media
3 . 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics meeting (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 A Lindner, A Shen, S Haward, L Brandt, A Banaei, M Aulnette, N Burshtein
2 . 発表標題 Transport dynamics of isotropic and anisotropic microparticles in inertio-elastic vortex flows
3 . 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics meeting (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 M Abdelgawad, S Haward, A Shen, ME Rosti
2 . 発表標題 Elastoviscoplastic fluid flows in complex geometries
3 . 学会等名 American Physical Society Division of Fluid Dynamics meeting (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, GH McKinley, MA Alves, AQ Shen
2 . 発表標題 Extensional rheometry using numerically-optimized stagnation point microfluidic devices
3 . 学会等名 International Soft Matter Conference (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 RA Lopez, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Characterization of inertialess viscoelastic canopy flows
3. 学会等名 International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, GH McKinley, MA Alves, AQ Shen
2. 発表標題 Extensional rheometry in numerically-optimized stagnation point microfluidic devices
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 EY Chen, CA Browne, SJ Haward, DW Carlson, AQ Shen, SS Datta
2. 発表標題 Influence of geometric ordering on viscoelastic flow instabilities in 3D porous media
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 V Calabrese, TP Santos, CG Lopez, MP Lettinga, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 A unified framework to describe shear- and extension-induced alignment of macromolecules of various flexibility
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Viscoelastic fingering during the sedimentation of a sphere
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, GH McKinley, MA Alves, AQ Shen
2. 発表標題 Extensional rheometry using numerically-optimized stagnation point microfluidic devices
3. 学会等名 International Workshop on Numerical Methods for Non-Newtonian Flows (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N Burshtein, AA Banaei, M Aulnette, SJ Haward, AQ Shen, A Lindner
2. 発表標題 Transport dynamics of spherical microparticles and fibers in inertio-elastic vortex flows
3. 学会等名 International Workshop on Numerical Methods for Non-Newtonian Flows (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A Yokokoji, S Varchanis, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 Rheological effects on purely-elastic flow asymmetries in the cross-slot geometry
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F Hillebrand, S Varchanis, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Flow of a wormlike micellar solution over a long cavity
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 V Calabrese, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 How do polymers stretch in capillary-driven extensional flows?
3. 学会等名 Annual European Rheology Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 EY Chen, CA Browne, R Huang, C Zheng, SJ Haward, DW Carlson, AQ Shen, SS Datta
2. 発表標題 Elastic flow instabilities in structurally-complex 3D porous media: linking pore-scale behaviour to macroscopic flow resistance
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Colloidal, Macromolecular and Polyelectrolyte Solutions (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 V Calabrese, TP Santos, CG Lopez, MP Lettinga, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 Extensibility governs the flow-induced alignment of polymers and rod-like colloids
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Colloidal, Macromolecular and Polyelectrolyte Solutions (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 V Calabrese, AQ Shen, SJ Haward
2. 発表標題 How do polymers stretch in capillary-driven extensional flows?
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Colloidal, Macromolecular and Polyelectrolyte Solutions (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 V Calabrese, TP Santos, CG Lopez, MP lettinga, SJ Haward, AQ Shen
2. 発表標題 A unified framework to describe shear- and extension-induced alignment of macromolecules of various flexibility
3. 学会等名 International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, CC Hopkins, AQ Shen
2. 発表標題 Upstream wall vortices in viscoelastic flow past a cylinder
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 SJ Haward, F Pimenta, S Varchanis, DW Carlson, K Toda-Peters, MA Alves, AQ Shen
2. 発表標題 Design and fabrication of an optimized "6-arm cross-slot" device
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 EY Chen, CA Browne, R Huang, C Zheng, SJ Haward, DW Carlson, AQ Shen, SS Datta
2 . 発表標題 Elastic flow instabilities in structurally-complex 3D porous media: linking pore-scale behaviour to macroscopic flow resistance
3 . 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 RA Lopez, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 Characterization of inertialess viscoelastic canopy flows
3 . 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S Varchanis, V Calabrese, ST Chan, SJ Haward, AQ Shen
2 . 発表標題 , Modeling and simulations of thixotropic elastoviscoplastic fluids
3 . 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 SJ Haward, ST Chan, S Varchanis, AQ Shen
2 . 発表標題 Edge fracture of thixotropic elastoviscoplastic liquid bridges
3 . 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 MS Abdelgawad, SJ Haward, AQ Shen, ME Rosti
2. 発表標題 Tuning extensional behavior of elastoviscoplastic fluids with polymer additives
3. 学会等名 International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------