

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03572

研究課題名（和文）界面不安定性による多角形渦輪の形成メカニズム

研究課題名（英文）Formation of polygonal vortex ring caused by interfacial instability

研究代表者

下川 倫子（Shimokawa, Michiko）

奈良女子大学・自然科学系・准教授

研究者番号：80554419

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：粘性流体中を沈降する液滴は沈降過程で渦輪に変形した後、自発的にいくつかの液滴に分裂する。この現象は100年以上前から知られているにもかかわらず、液滴の形状や沈降速度が時間とともに変化する非定常な系であることから、そのダイナミクスが十分に理解されているとは言えない。そこで、我々は液滴の分裂を促す渦輪の不安定性の研究を通して、そのダイナミクスを理解することを考えた。本研究課題の実施により我々は液滴の分裂個数を決定する物理量を明らかにし、分裂個数に関するモード選択を表現する物理モデルを通して、その物理ダイナミクスに対する解釈を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は外力により駆動する液滴の分裂現象に着目した基礎研究である。液滴の分裂現象はプリンターの印刷技術の向上や自動車のエンジンの発火効率の上昇など工学技術の発展を考えるうえで重要な基礎研究であるといえる。そのため、本研究で得られた知見を発展させることで工学的応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：A falling droplet breaks up into several droplets, after the droplet spontaneously deforms into a vortex ring as it falls in a viscous fluid. Although this phenomenon has been known for more than 100 years, its dynamics have not been well understood because it is an unsteady system in which the droplet shape and settling velocity change with time. We, therefore, proposed to understand its dynamics by studying of the vortex ring instability that causes the droplet to break up.

During the period of this project, we have identified the physical quantities to determine a number of a breakup of a droplet. In addition, we have proposed a new phenomenological model to include the effect of the vortex ring instability, and we have considered the dynamics by comparing our experimental results with those obtained from the model.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：渦輪 界面不安定 重力不安定

### 1. 研究開始当初の背景

具が少ないみそ汁の表面にあらわれる対流構造やゆるい斜面を流れる水の先端の段々模様といった流体の不安定性に起因した現象は身近で観察される興味深い自然現象である。このような流体の不安定性に関する研究は基礎物理はもちろんのこと、大気や海洋の流れなどの地球物理分野や機械・化学工学といった工学分野など多くの分野で流体の不安定性に起因した現象が共通して研究されていることから、流体の不安定性は重要な位置を占めている学術的課題と言える[1,2]。

我々は密度の異なる二種類の可溶粘性流体を用い、重力不安定性に起因した滴の分裂現象についての実験的研究を行った。高密度かつ高粘度の流体の液滴を低密度かつ低粘度流体の中で沈降させると、沈降過程で液滴は渦輪に変形し、その後、自発的に分裂する。この現象は100年以上前に報告されており、液滴の分裂は渦輪の不安定性によることが観察事実から報告された[3]。その後、アレッチらが液滴の分裂過程や分裂パターンをレーザーを用いて観察し、(1)拡散のタイムスケール $\tau_1$ と液滴の落下運動のタイムスケール $\tau_2$ の比 $\tau_2/\tau_1$ がある臨界値より小さいと分裂するがある値よりも大きくなると分裂しないこと[4]や(2) $\tau_2/\tau_1$ とシュミット数(動粘度と拡散係数の比)を用いて液滴の分裂個数を整理した実験結果[5]を報告した。彼らが提案したパラメータによって分裂個数は定性的に整理されたが、シュミット数が異なると分裂条件を決定する無次元量 $\tau_2/\tau_1$ の臨界値も変化し、また分裂個数の境界も十分にわかっていないことから、複数の課題が残されていると言える。さらに、液滴の分裂を促す渦輪の不安定性はレイリー・テイラー不安定性やケルビン・ヘルムホルツ不安定性によるものといった議論がなされてきたが、実験的な検証はなされておらず、そのダイナミクスは十分にわかっているとは言えない。身近な現象であるが、詳しい実験的研究はアレッチ等によるもの以外にはあまりなく、未解決な問題が多く残されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、液滴の分裂現象の解明を通して粘性流体における非平衡界面の変形現象を理解することである。粘性流体中を沈降する液滴は沈降過程で渦輪に変形した後、自発的にいくつかの液滴に分裂する。この現象は液滴の形状や沈降速度が時間とともに変化する非定常な系であるため、物理現象としての取り扱いが難しく、そのダイナミクスが十分に理解されているとは言えなかった。そこで、我々は液滴の分裂を促す渦輪の不安定性の研究を通して、そのダイナミクスを理解することを発案し、本研究課題を提案した。

### 3. 研究の方法

硫酸鉄水溶液  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  水溶液とグリセリン水溶液をそれぞれ滴溶液、ベース溶液として使用する。高密度の硫酸鉄水溶液は溶媒の硫酸化鉄  $n$  水和物(WAKO094-01065)のモル濃度を变化させ、密度の異なる滴溶液2種類を準備した( $\rho_2 = 1.2\text{g}/\text{cm}^3, 1.3\text{g}/\text{cm}^3$ )。高密度の滴溶液には可視化のため、少量の食紅(協立食品)を混合した。低密度のグリセリン水溶液は純水とグリセリン(WAKO072-00621)を1:1の質量比で混合したものである。グリセリン水溶液の密度 $\rho_1$ は $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ であるため、二流体の密度差は $\Delta\rho \sim 10^2 \text{kg}/\text{m}^3$ となる。二種類の溶液の粘性が等しくなるよう、それぞれの溶液にポリエチレングリコール(Alfa Aesar B21955)を混合し、調整した。ポリエチレングリコールの混入によって、溶液の粘度は大きく変化するが密度はほとんど変わらない。粘度は温度に大きく依存するので、二重円筒容器を用い、二重円筒の隙間に恒温槽から流れる $25^\circ\text{C}$ の水を循環させ、実験中は溶液の温度を一定に保った。マイクロシリンジポンプを用いて一定体積の液滴を形成し、水面8mm上方から滴下する。複数のチューブを用意し、様々な半径 $r$ の液滴が滴下できるように、工夫した。二台のカメラを容器の側面近くと底面近くの二か所に設置し、液滴の鉛直方向と水平方向の変形過程を同時撮影した。

### 4. 研究成果

(1) 分裂個数に関する粘度、密度差、液滴の粒径に対する依存性

分裂過程での液滴の変形を容器の下部から観察すると、液滴は2つに分裂するだけでなく、沈降過程で渦輪に変形したのち、図1のように、三角形( $m=3$ )から六角形( $m=6$ )までの多角形に変形していることが分かった。この多角形の数は分裂個数と一致している。分裂個数の依存性を知る目的で、分裂個数 $m$ に関する液滴の初期半径 $r$ 、二流体の粘性 $\eta$ 、二流体の密度差 $\Delta\rho$ の依存性を実験で調べた。

図2は50回の実験( $N=50$ )で得られた $m$ に関する頻度分布の $r$ 依存性を示す。 $n(m)$ を $N$ 回の実験で得られた分裂個数 $m$ の出現回数としたとき、縦軸の $p(m)$ は $n(m)/N$ を意味する。図2が示すように、 $r$ の増加とともに分布が示す $m$ のピーク値は

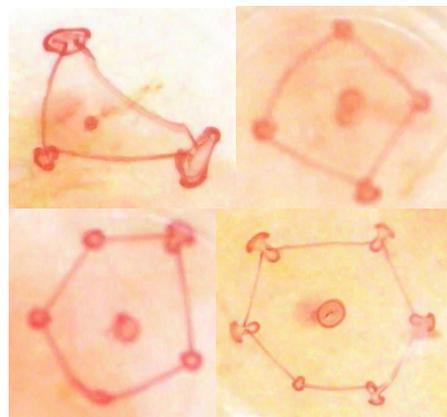


図1 水面下から観察した結果。角形の数 は粘弾性に依存して変化する。

増加する。さらに  $p(m)$  に対する他のパラメータ  $\eta, \Delta\rho$  の依存性を調べたところ,  $\eta$  の増加とともに  $m$  のピーク値は減少,  $\Delta\rho$  の増加とともに  $m$  のピーク値は増加傾向を示した。

### (2) 数理モデルによる研究

実験結果を受け, 分裂液滴の挙動を表現する数理モデルを提案した。

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla \cdot P + \mu \nabla^2 \vec{u} + (\rho - \rho_0) \vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho = D \nabla^2 \rho \quad (2)$$

$\vec{u}, \rho, P$  は時間  $t$  における位置  $\vec{r}$  での流速, 流体の密度, 圧力,  $\rho_0$  はベース溶液の密度,  $D$  は拡散係数,  $\mu$  は動粘性係数,  $\vec{g}$  は重力加速度の大きさを意味する。密度差が重力項のみに影響するブシネス近似を適用することにより, (1)式が得られる。以下のスケール変換に基づき, (1)(2)式を無次元化した結果が(3)(4)式である。

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t'} + (\vec{u}' \cdot \nabla') \vec{u}' = -\nabla' \cdot P' + \nabla'^2 \vec{u}' + \frac{\Delta\rho r^3 \vec{g}}{\rho_0 v^2} \rho' \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t'} + (\vec{u}' \cdot \nabla') \rho = \frac{D}{v} \nabla'^2 \rho \quad (4)$$

無次元化により, (3)(4)式に示される  $G = \Delta\rho r^3 g / \rho_0 v^2$  と  $S = D/v$  の二つの無次元パラメータが得られた ( $v = \mu/\rho$ )。  $G$  は重力による駆動力と粘性散逸の比,  $S$  は拡散の影響の強さを示す。この結果を受け, 我々は  $G$  と  $S$  を用いて分裂個数  $m$  を整理した。図 2 に示すような頻度分布  $p(m)$  の結果から,  $m$  の平均値  $\langle m \rangle$  を求め,  $\langle m \rangle$  の小数点以下を切り捨てたときの  $m$  に対する  $G$  と  $S$  の依存性を示したものが図 3(a)である。図 3(a)より,  $m$  は  $S$  には大きく依存せず,  $G$  に依存していることがわかる。  $G$  と  $\langle m \rangle$  の関係を示す図 3(b)を見ると分かるように, 実験条件として与える  $v, \Delta\rho, r$  が異なるにもかかわらず,  $G$  と  $\langle m \rangle$  の関係は一つの曲線にのっていることが分かる。以上のことより, 本実験のパラメータ領域においては液滴の分裂現象に対して拡散の影響はほとんどなく, 粘性散逸と重力による駆動力とのバランスが液滴の分裂個数を決定する上で重要であることが分かった。また, この曲線は  $\langle m \rangle \sim G^{1/3}$  で近似でき, 本実験領域においてはベキ乗則に従って分裂個数  $\langle m \rangle$  が変化していると考えられる。

### (3) 実験と数理モデルの比較によるダイナミクスの考察

液滴の分裂現象のダイナミクスにおいて渦輪の形状変化は重要な要素である。そこで(1)(2)に渦輪の形状変化の要素を含んだモデルを再構築した。渦輪は時間とともに成長する。この成長がターナーの理論に従うとすると, 時刻  $t$  での渦輪の半径  $R(t)$  は  $R(t) = \sqrt{R(0)^2 + \alpha t}$  と表現できる ( $\alpha$  は定数)。このとき, 重力不安定性によって生じる渦輪の不安定化波数  $k(t) = m/R(t)$  に対する渦輪の鉛直方向の揺らぎの振幅  $A_m(t) = A_m(0) \exp\left\{\int_0^t s(m/\sqrt{R(0)^2 + \alpha t}) dt\right\}$  を調べた ( $s$  は重力不安定性によって生じる不安定化波数  $k$  の揺らぎの成長率)。不安定化が起こるときの揺らぎの振幅よりも十分に小さいノイズを初期条件として加えている。また, モデルの計算に必要なパラメータは実験で用いた値を使用している。実験データのフィッティングから不安定化波長が決定する時刻  $t_c$  を決定し, その時刻  $t_c$  で  $A_m$  が最も大きな波数  $k$  が実験で観察される液滴の分裂個数  $m$  に対応する[6]。モデルの計算から実験で得られた  $p(m)$  を調べたところ, 実験結果と数理モデルの結果はよく一致していた(図 4)。また,  $p(m)$  から得られる分裂個数の平均値  $\langle m \rangle$  を求め, 実験結果と比較したところ, 類似した傾向がみ

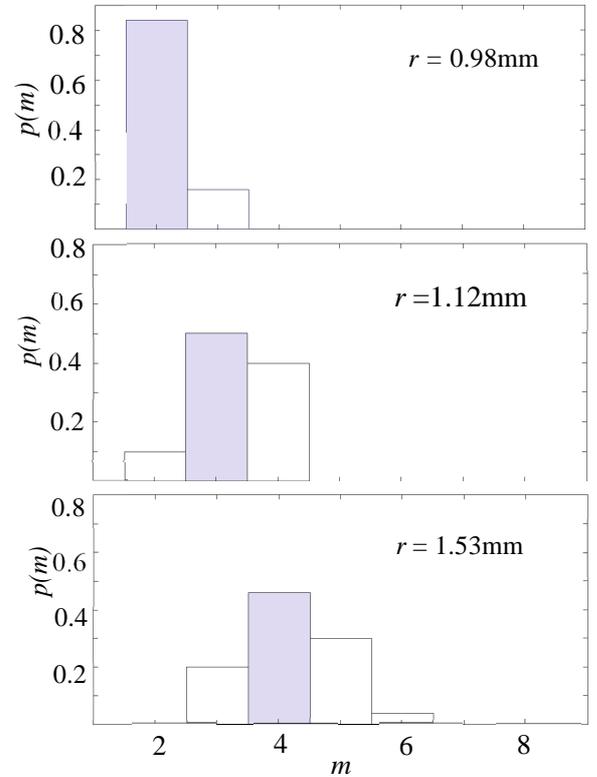


図 2 分裂個数  $m$  に関する確率密度分布  $p(m)$  の液滴の半径  $r$  依存性[7]

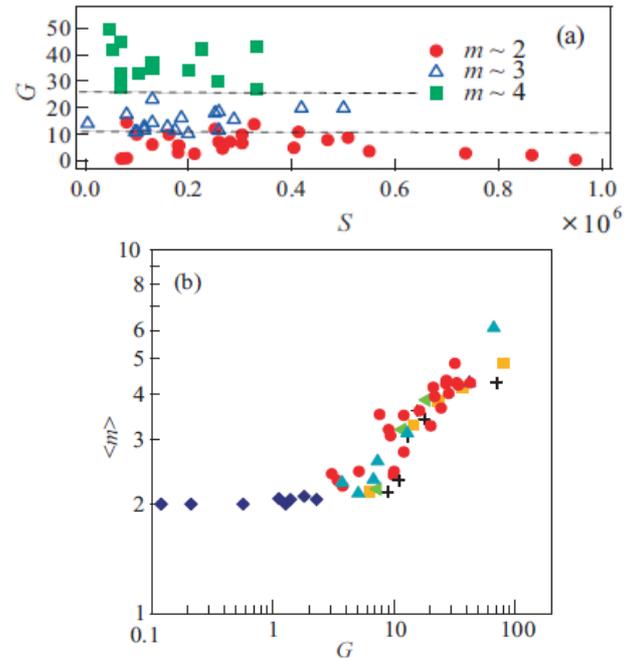


図 3(a)無次元量  $S$  と  $G$  に対する液滴の分裂個数  $m$ , (b)液滴の分裂個数の平均値  $\langle m \rangle$  と  $G$  の関係[7]

られた(図 5)。以上のことから 渦輪の成長と 渦輪の重力不安定性による界面不安性が液滴の分裂現象において重要であることが分かった。

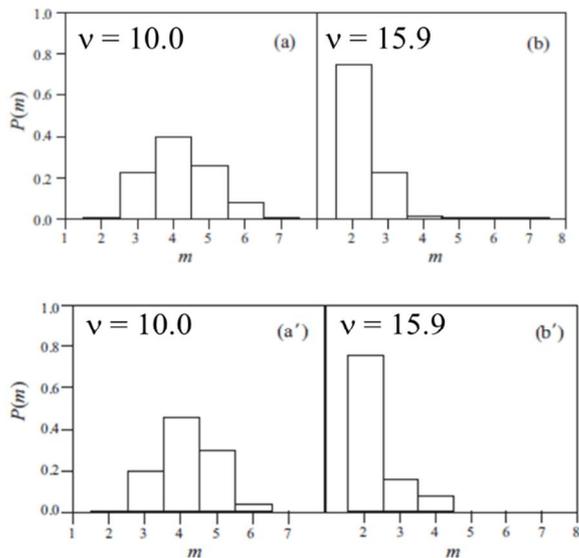


図 4 (a) $\nu = 10\text{mPas}$ , (b)  $\nu = 15.9\text{mPas}$  の数理モデルの結果, (a') $\nu = 10\text{mPas}$ , (b')  $\nu = 15.9\text{mPas}$  の実験結果[7]

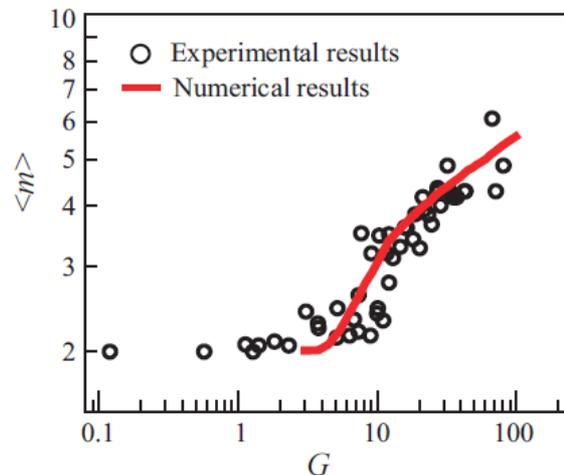


図 5  $G$  と  $\langle m \rangle$  の関係.  $\circ$  は実験結果, 実線は数理モデルの結果を示す.[7]

< 引用文献 >

- [1] S.Chandrasekhar: "Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability", Dover, New York (1981).
- [2] 水島次郎, 藤村薫著: "流れの安定性" 朝倉書店 (2003).
- [3] D'arcy Thompson: "On growth and forms", Cambridge University Press (1961).
- [4] F. T. Arecchi, *et al.*: Europhys. Lett., (1989) 333.
- [5] F. T. Arecchi, *et al.*: Europhys. Lett., (1991) 429.
- [6] M. Shimokawa, *et al.*: Phys. Rev. E (2016) 062214.
- [7] M. Shimokawa and H. Sakaguchi.: Phys. Rev. Fluids (2019) 013603(1)-(14).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4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 Michiko Shimokawa, Junma Arimitsu, Hiroyuki Kitahata, Hidetsugu Sakaguchi	4. 巻 93
2. 論文標題 Transition of the Bifurcations in the Rotation of a Camphor-Coated Elliptical Paper Disk	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 34002
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 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 -

1. 著者名 Michiko Shimokawa, Hidetsugu Sakaguchi	4. 巻 91
2. 論文標題 Hula-Hoop-Like Motion and Subcritical Bifurcation of the Rotation of an Elliptical Paper Disk Coated with Camphor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 74002
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 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 -

1. 著者名 Michiko Shimokawa, H. Kitahata and Hidetsugu Sakaguchi	4. 巻 132
2. 論文標題 Star-shaped patterns caused by colloidal aggregation during the spreading process of a droplet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 18002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1209/0295-5075/132/18002	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 -

1. 著者名 下川倫子	4. 巻 34
2. 論文標題 二流体界面での不安定化が引き起こすコップの中のパターン形成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 411
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3811/jjmf.2020.T013	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 -

1. 著者名 Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi.	4. 巻 4
2. 論文標題 Mode selection on breakup of a droplet falling into a miscible solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 013603(1)-(14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.013603	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 -

1. 著者名 下川倫子	4. 巻 32
2. 論文標題 自然がつくるラテ・アート	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 巻頭
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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 下川倫子
2. 発表標題 コーヒーカップの中のパターン形成
3. 学会等名 溶液化学若手の会第3回冬季発表会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa, Hiroyuki Kitahata and Hidetsugu Sakaguchi
2. 発表標題 Star shaped pattern caused by colloidal aggregation during spreading of the acidic solution on the surface of milk solutions
3. 学会等名 pacificchem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa
2. 発表標題 Bifurcation of Rotational Motion of Elliptical Camphor Coated Disk
3. 学会等名 Active Matter Workshop 2024 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 有光潤真, 下川倫子, 坂口英継, 北畑裕之
2. 発表標題 楕円型樟脳粒の回転運動における分岐タイプのパラメータ依存性
3. 学会等名 日本物理学会第28回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下川倫子, 有光潤真, 大河内魁人, 松永蓮矢, 坂口英継
2. 発表標題 楕円樟脳の回転運動に見られる分岐現象
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下川倫子, 坂口英継
2. 発表標題 楕円ろ紙樟脳の回転運動に見られる分岐現象
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田一希, 坂口英継, 下川倫子
2. 発表標題 ペースト乾燥破壊における羽毛パターン形成の一考察
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa, Hiroyuki Kitahata and Hidetsugu Sakaguchi
2. 発表標題 Formation of star shaped pattern caused by colloidal aggregation
3. 学会等名 Daynamics days digital 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下川倫子
2. 発表標題 対流構造が作るフラクタルパターンーミルクコーヒーから考える地球科学ー
3. 学会等名 日本地球科学惑星連合 (JPGU)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下川倫子、工藤和恵
2. 発表標題 慣性領域における高速撥水のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi.
2. 発表標題 Breakup of falling droplets by instability of vortex ring
3. 学会等名 XXXIX Daynamics days Europe (DDEU 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川倫子
2. 発表標題 コロイド凝集により形成される星形パターン
3. 学会等名 第3回キッチン地球科学研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川倫子, 北畑裕之, 坂口英継
2. 発表標題 コロイド凝集による星形パターンの形成
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川倫子
2. 発表標題 ガラス基板上での撥水現象が示すべき乗則
3. 学会等名 研究会「第6回非線形現象の捉え方」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa
2. 発表標題 Mode Selection of Breakup of Falling Droplet in Miscible Solution
3. 学会等名 Discussion meeting on Granular dynamics & Planetary terrain
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川倫子、坂口英継
2. 発表標題 成長する渦輪の不安定モード
3. 学会等名 第13回自己組織化討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川倫子
2. 発表標題 沈降する液滴の分裂現象
3. 学会等名 第2回キッチン地球科学研究集会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi.
2. 発表標題 Mode selection of Breakup of Falling Droplet in Miscible solution
3. 学会等名 BIT's Annual World Congress of Smart Materials 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa and Hidestugu Sakaguchi.
2. 発表標題 Mode selection of the breakup of a droplet falling into a miscible solution
3. 学会等名 International conference on Advances in Physics of Emergent orders in Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi
2. 発表標題 Mode selection on the breakup of a falling droplet in a miscible solution
3. 学会等名 Gordon Research Seminar Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川倫子, 坂口英継
2. 発表標題 沈降する液滴の分裂個数の決定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中光貴, 下川倫子, 北畑裕之, 坂口英継
2. 発表標題 界面不安定性による星形パターンの形成機構
3. 学会等名 第124回日本物理学会 九州支部会
4. 発表年 2018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
研究 分担 者	坂口 英継  (Sakaguchi Hidetsugu)  (90192591)	九州大学・総合工学研究院・准教授   (17102)	

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