

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02057

研究課題名(和文)分散気泡のレオロジーが解き明かす混相乱流遷移のシナリオ

研究課題名(英文)Transition scenario of multiphase fluid flows described by dispersion rheology

研究代表者

田坂 裕司 (Tasaka, Yuji)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00419946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：微細気泡を含む混相流体の流れの遷移を記述するため、流れの可視化実験、および気泡懸濁液の非定常剪断下におけるレオロジー物性評価を行った。流れの可視化では、管内流れと気泡注入による浮力対流を採り上げた。管内流れでは、攪乱として加える水に蛍光染料を混ぜることで、攪乱の移流と微細気泡とを同時に可視化した。結果から、攪乱が移流する過程でヘアピン状の渦列を形成する場合、微細気泡が渦列に取り込まれ、その結果としてより小さな攪乱で孤立乱流塊の生成が行われることを示した。レオロジー物性評価では、速度分布計測を基にした線形粘弾性解析により、せん断強度とせん断の変動時間スケールに対する実効粘度の変化を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レイノルズの実験から100年以上の時を経て、流れの遷移研究は結実に向かいつつある。一方で、自然界および工業界で見られる流れの多くが分散相を含む混相流体であり、連続相が作る流れ構造との相互干渉により、その遷移過程は単なる単相流れからの摂動では予測できない。本研究で取り組んだ、分散相の効果をレオロジー物性の変化として捉える手法、ならびに、精緻な可視化観察による乱流遷移初期過程における渦構造と微細気泡の相互干渉の理解は、今後、研究を多方面に拡張する上での重要な考え方、ならびに実例になると考えている。

研究成果の概要(英文)：Flow visualization and rheological evaluation of bubble suspensions under unsteady shear were performed for describing transition of multiphase fluid flow including tiny bubbles. In the flow visualization, pipe flow and bubble convection were chosen as flow system to be investigated. In pipe flow visualization, water to be injected as perturbation was contaminated with fluorescent dye to visualize development of perturbation and behavior of bubbles simultaneously. The results indicated that in the case that development of perturbation is accompanied by formation of hair-pin like vortices, tiny bubbles are accumulated by the vortices and enhance generation of local turbulence even at smaller amplitude of perturbation. In the rheological evaluation, linear viscoelastic analysis based on velocity profile measurements indicated variation of the relative viscosity with respect to amplitude and time scale of applied oscillatory shear.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 流れの遷移 レオロジー

## 1. 研究開始当初の背景

20世紀初頭のレイノルズの実験から1世紀続く乱流遷移の研究が最終局面にある。Eckhardtらによる遷移初期からカスケード構造への発展メカニズムの研究、局所乱流塊の時空間成長に関する数値モデル (Sipos & Goldenfeld 2011)、また時空間情報を考慮した乱流カスケードの力学的理解 (Cardesa et al. 2017; Goto et al. 2017) など、特に数値計算の発展に伴う理解の深化により遷移の道りが記述されつつある。これらの成果をもとに今後学術的な幹線が整備され、工学への応用に発展することが期待される。

それらの理解はしかし、流れに小さな気泡群が混入するだけで再考を迫られる。気泡を用いた摩擦抵抗低減技術のように、気泡群は乱流中の運動量伝達構造を変化させる。レイノルズ数の異なる流れのそれぞれの局面で、単相状態を基準に気泡の影響を調査した研究は多い。一方で気泡を含む流れの遷移を系統的に調べた研究は無い。遷移の出発点となる基本流での気泡の影響は限定的である。遷移の道りでは、どこまで単相での遷移に並走し、分岐後どのような道を辿り、最後にどのような状態に到達するのか。これらは自明ではなく、例えば「完全に発達した乱流状態」が存在するかも分かっていない。「微細気泡を含む流れはレイノルズ数の増加に対してどのような遷移過程を辿るか」が本申請課題の学術的問いである。

## 2. 研究の目的

本申請課題の目的は、流れの遷移現象に関する既存の考え方に非定常レオロジー物性の知見を取り込み、微細気泡を含む流れの遷移過程を明らかにすることである。遷移の過程で形成される流れ構造と気泡群の干渉、および剪断に対する気泡の変形と回復はそれぞれ異なる時間スケールを持つ。非定常レオロジー物性とは、そのような時間スケールを考慮した、気泡が分散した流れにおける局所実効粘弾性を意味する。気泡の変形がもたらすレオロジー物性変化は火山学の分野で扱われている (Rust & Manga 2002 など)。しかし非定常性までを考慮し、それを用いて混相流れの変遷を記述する試みは皆無である。申請課題の遂行は、新たな学問体系の構築に繋がる出発点を形成する。

混相乱流は自然界・工業界の至る所で扱われている。これを体系づけて記述することの恩恵は計り知れない。多くの複雑な現象の理解、工学的な問題解決、あるいは高効率化・高機能化の実現に繋がる。非定常レオロジー物性評価のため、新たなレオメトリを開発する。既存のレオメータを補完するものであり、分析ツールとして理工学への貢献も大きい。この手法を将来、理工学・産業のあらゆる分野における標準的なレオメトリに発展させる。

## 3. 研究の方法

気液二相流れではレイノルズ数に加えて気泡の体積率 (ボイド率) やサイズも重要な支配パラメータとなる。ここでは体積率 0.1%未満の希薄な条件、かつ 100 $\mu\text{m}$ ~1mm 程度のサイズに限定する。過去の知見から、本申請課題がその理解を目指す遷移過程が明瞭に現れると期待される条件である。流れのシステムについては当初、同様の理由で気泡が主たる役割を果たす垂直方向の流れではなく、流れ構造と気泡との相互干渉が主役となる水平な壁面剪断流を扱うことを想定した。実際の研究ではこれに加え、研究室として知見のある、気泡による浮力対流を第二の流れのシステムとして研究を行った。

研究は以下の5項目に大別される。

(1) 非定常レオロジー物性評価、(2) 乱流渦粘度評価、(3) 乱流塊と気泡の干渉実験、(4) 浮力対流の観察、(5) 気泡モデルを組み込んだ浮力対流の安定性解析。(1) および (3) については、既存の装置を用いて実験を行い、(2)、(4) については新たに専用装置を作成する。

## 4. 研究成果

## (1) 非定常レオロジー物性評価

これまでに開発を行ってきた、超音波スピニングレオメトリ (USR) を用いて、非定常剪断下における分散気泡群のレオロジー物性を評価した。図1 (左) のように、ニードルを試験円筒底面に取り付け、定常回転と振動回転を交互に繰り返すことで、平均径 600 $\mu\text{m}$  程度のおおよそ均質な微細気泡状態を実現した (図1右)。体積率はおよそ  $\alpha = 1.4\%$  である。気泡発生後、円筒を振動回転させ、誘起される1方向振動流れを超音波流速分布計により計測し、USRの解析アルゴリズムの一つである、線形粘弾性解析により、フローカーブ (剪断応力と歪み速度の関係) を計測した (図2左))。この曲線の傾きが実効粘度  $\mu_{\text{eff}}$  に相当する。

比較対象として、Frankel & Acrivos (1970) により導かれた、液滴周りのストークス流れを想定した構成方程式に気泡を想定した近似を行い、下記の式を導出した。ここで  $\mathbf{S}$  は応力テンソル、 $\mathbf{d}$  は変形速度テンソル、 $\mathbf{D}/\mathbf{D}t$  はテンソルの移流による回転を考慮した Jaumann 微分、 $\Lambda = 6/5\lambda$ 、 $\lambda$  は表面張力から求める緩和時間である。この式に入力として角周波数  $\omega_0$  で変動する歪み速度  $\dot{\gamma}$  を加え、出力として剪断応力  $\tau$  を得る。これらの変動の実効値として、実効粘度  $\mu_{\text{eff}} = \tau_{\text{eff}}/\dot{\gamma}_{\text{eff}}$  が得られる。これまでの研究により、ワイゼンベルグ数相当 (緩和時間と歪み速度の比) としてキ

キャピラリー数,  $Ca = \lambda/\dot{\gamma}_{\text{eff}}$ , デボラ数相当 (緩和時間とせん断の時間スケールとの比) として動的キャピラリー数,  $Cd = \lambda\omega_0$  が用いられているため, 数値的に得られた粘度比 ( $\eta = \mu_{\text{eff}}/\mu_0$ ,  $\mu_0$  は連続相として用いたシリコンオイルの粘度) を, これらの無次元数により整理し図 2 (右) に示すようなレオロジーマップが得られた.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} + \Lambda \frac{D\mathbf{S}}{Dt} = & -p\mathbf{I} + 2\mu_0(1 + \alpha) \left( \mathbf{d} + \Lambda \frac{D\mathbf{d}}{Dt} \right) \\ & + \left( \frac{\mu_0^2 a}{\sigma} \right) \alpha \left\{ -\frac{32}{5} \frac{D\mathbf{d}}{Dt} + \frac{48}{35} S_d(\mathbf{d} \cdot \mathbf{d}) \right\} \end{aligned}$$

USR により得られた粘度曲線 (右図で赤い線の領域に相当) は, レオロジーマップが示す粘度変化とよく一致している. この結果から, 非正常剪断下における, 微小変形に対する実効粘度の変化を表すことができた.

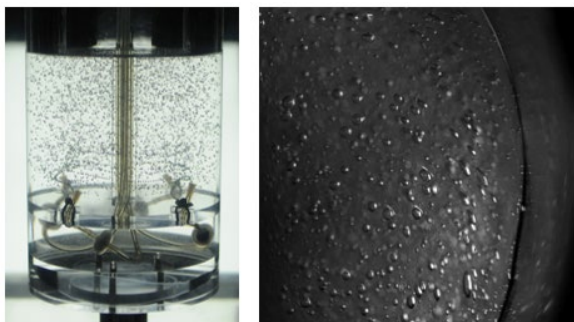


図 1 (左) 試験円筒内に分散させた微細気泡, (右) 気泡群の写真

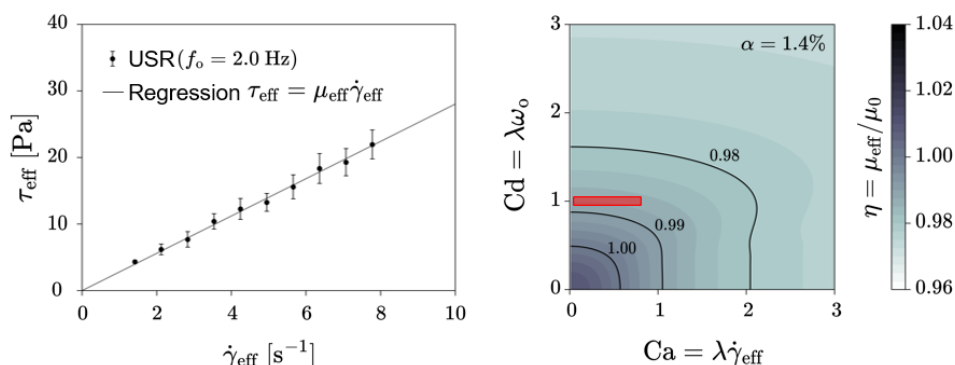


図 2 (左) USR により得られた気泡懸濁液のフローカーブ, (右) Frankel & Acrivos (1970)の構成方程式から数値的に導出したレオロジーマップ

## (2) 乱流渦粘度評価

気泡などの分散相が乱流渦に与える影響を定量的に評価するために, 新たに渦粘度プロファイラの計測技術を構築した. 同軸二重円筒間のテイラー・クエット流れをベースとした. この流れは回転数のみで流れの状態を変化させられる上, 閉じた系であるために運動量伝播の評価が比較的容易である. 渦粘度プロファイラでは, USR が一方向の振動流れを表すコーシーの運動方程式を基準にするのに対し, レイノルズ平均した方程式を用いる. 間隙内の流れの速度変動を UVP により計測する. これを平均化方程式に代入することで, 方程式がバランスする最適化パラメータとして実効粘度  $\nu_t$  が決定される.

研究期間では, テイラー・クエット流れの装置を新たに設計し, 単相流れについて渦粘度プロファイラの原理が機能することを検証した. 一方で, UVP による計測では超音波の多重反射により壁面近傍の速度情報が欠落し, 渦粘度の評価値に影響を及ぼすことが示された. 今後の展開として, トルク計測との組合せにより欠落部分の情報を補うことなどを検討している. また, 製作した装置では電気分解による微細気泡の発生が可能であり, 微細気泡群が乱流渦に与える影響を評価する予定である.

## (3) 乱流塊と気泡の干渉実験

円管内流れに攪乱を加えることで, 孤立乱流塊 (乱流パフ) が形成される. 以前の研究では, 電気分解により発生する微細気泡を混入させた水を用いてハーゲン・ポアズイユ流れを形成し, そこに攪乱を加えることで乱流パフの形成と維持に微細気泡が及ぼす影響を調査した. しかしながら, 移流に伴い気泡が溶解あるいは付着することで, 結果の信頼性が大きく損なわれた. そ

ここで本研究では、発達したポアズイユ流れに対し、攪乱を加える位置の2D上流 ( $D$  は管直径) に電気分解のための白金線を設置し、攪乱注入時に確実に微細気泡が分散する状況を実現した。

攪乱の発達と微細気泡の関係を明らかにするために、攪乱として注入する水に蛍光染料を混入させ、レーザーシート光を照射することで、攪乱と微細気泡を同時に可視化した。また、別の実験では貯水槽から円管内に導入される水にフレーク粒子を混入することで、攪乱の発達と流れの遷移を同時に可視化した。

図3は、微細気泡を加えない場合の流れの様子を表す時間展開画像である。ここで  $U$  は管断面平均流速であり、設定したレイノルズ数は  $Re = 2000$  である。 $A$  は攪乱として加える噴流と主流との流量比として定義される攪乱強度である。図中の黄色の領域が攪乱として注入した水であり、注入によりヘアピン渦列を形成していることが分かる。 $A = 0.2\%$  の条件において攪乱の後方において乱れたパターンが形成されており、乱流バフの形成が確認できる。このとき、注入攪乱は円管中央部までのみの浸入となっており、噴流それ自体が流れをかき混ぜ、遷移をもたらしているわけではないことが分かる。さらに強度を増加させると、攪乱は円管対面の壁面まで到達するが、フレーク粒子はパターンを示しておらず、乱流塊を形成していないことが分かる。さらに強度を増加させ、 $A = 0.7\%$  を超えると、噴流が流れを大きくかき乱し、乱流塊の形成を促している。

図4は、図3と同様の時間展開画像を、電気分解気泡を加えて取得したものである。同様に得ヘアピン渦の形成と、孤立乱流塊の形成が確認できる。しかしながら、乱流塊が形成される攪乱強度は  $A = 0.15\%$  と気泡を加えない場合よりも小さくなっている。気泡を対象にした化しか観察では、形成されたヘアピン渦列に沿って微細気泡が分布しており、渦列の低圧領域に集積していることが予想される。集積した気泡は局所的な気泡体積率を増加させ、部分的に物性を変化させる。その結果として渦列が増強され、効果的にポアズイユ流れを変形・維持させることにより、乱流塊の形成を促していると考えている。

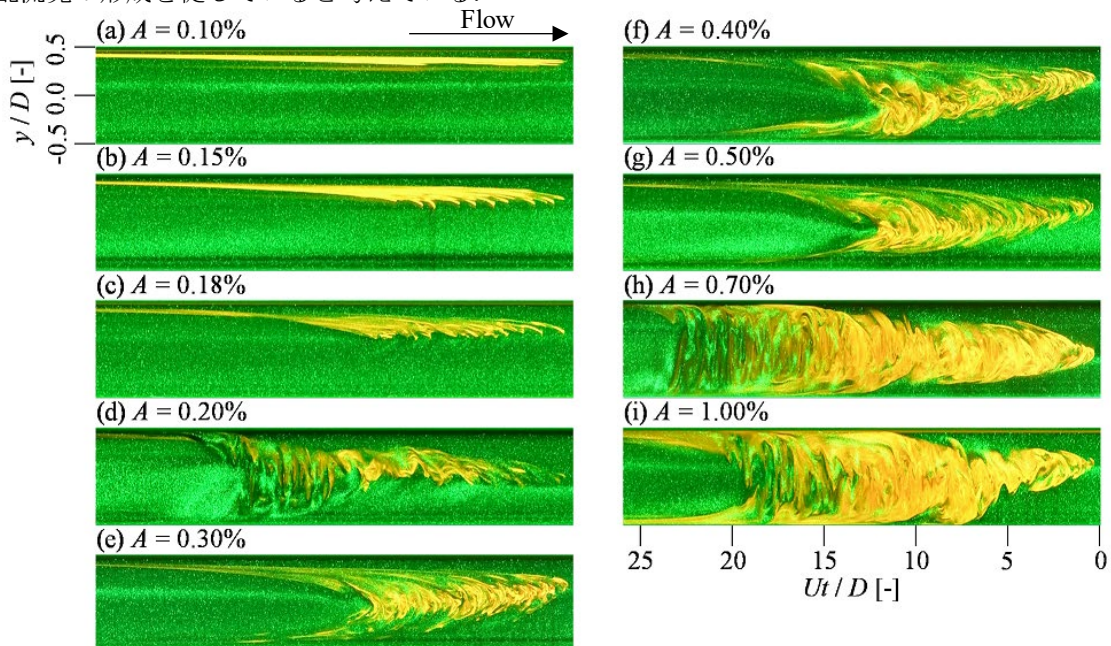


図3 各攪乱強度  $A$  に対する攪乱と流れの発達過程を表す時間展開画像。黄色の部分攪乱として注入した水を表している。

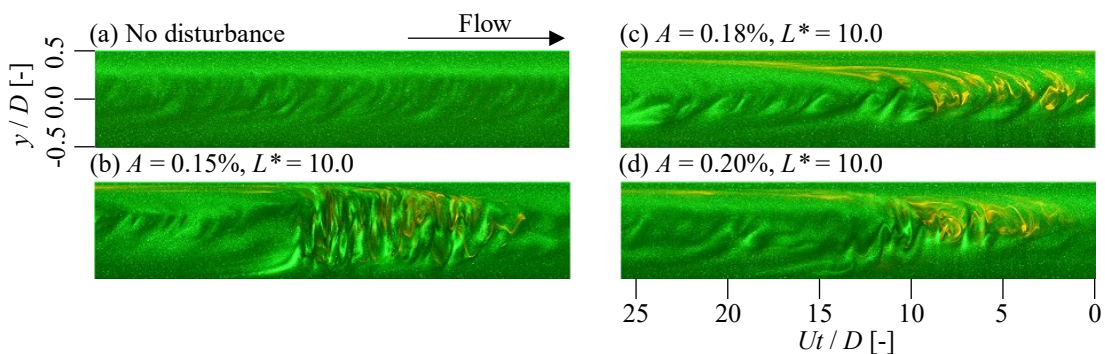


図4 電気分解気泡を加えた場合の時間展開画像

#### (4) 浮力対流の観察

過去に行った容器内浮力対流の実験では、構造がすぐに容器側壁の影響を受け、特有の現象を

観察できなかった。そこで本研究では、図 5(a)に示すような円環状の流体層を作成し、実質的な周期境界とすることで側壁の影響を無くした。また可視化のため、図 5(b)に示した防犯用ドームミラーを内円筒内側に設置し、情報から 360°、流体層の撮影を行った。電気分解により気泡を発生させるため、図 5(c)に示すような白金線を交差させた電極を作成し、流体層にほぼ一様な電気分解気泡を発生させた。

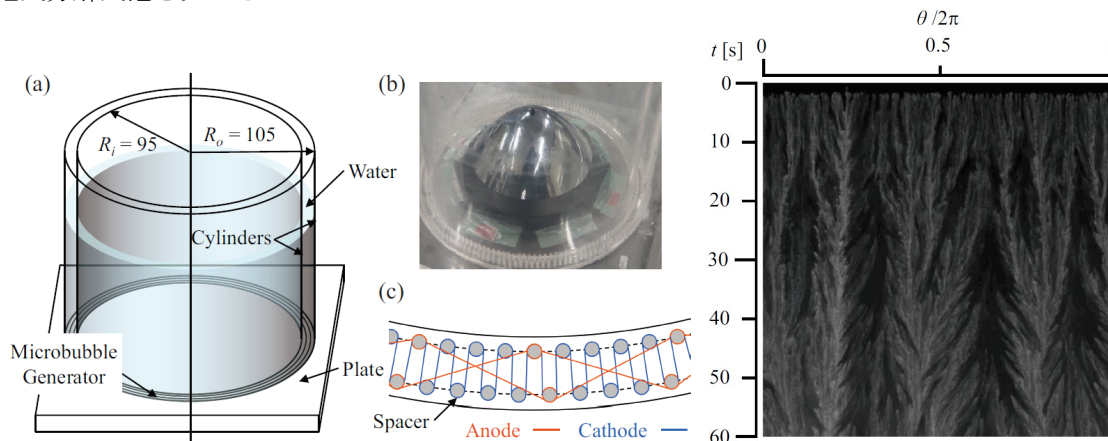


図 5 (a)浮力対流の装置模式図, (b)可視化用ドームミラー, (c)電気分解用電極の配置

図 5(d)は、可視化により得られた瞬時画像から抽出した時間展開画像である。図から、時間発展に伴い、小さなブルームが大きな構造を形成し、最終的に周方向に 3 つ程度の大きな構造を形成している様子が分かる。なおこの構造波数は一時的であり、さらなる時間経過により、流体層から離脱する気泡が少ないため流体層全域で気泡体積率が大きくなり、浮力の不均一がなくなるため大規模な対流が停止する。

#### (5) 気泡モデルを組み込んだ浮力対流の安定性解析

前項で説明した浮力対流を流れの安定性問題として扱うために、二流体モデルを用いた線形安定性解析を行った。気泡に働く力として、液相流れを基にした抗力と揚力を導入した。想定として、気泡は下面から一様に注入され、浮力により加速し、一定速度に達する。最終的に、流体層上面に達した時点で流体層から離脱する。

線形安定性解析を行うことにより、中立安定曲線が得られた (図 6(a))。縦軸は浮力から計算されるレイリー数である。プラントル数は、気泡の離脱速度から定義される。図から分かる通り、中立安定曲線は極値を持っており、対流発生時の臨界値が定まる。ここで注意したいのは、対流が発生する前であっても気泡は浮力により浮上し流体層から離脱する。対流の発生は、液相が大規模な循環を持つかどうかを示す。図 6(b)は中立安定曲線中に示した各点に対応する、攪乱の固有関数であり、形成される対流のパターンを示している。

上記解析結果はしかし、過度に理想化された体系での結果であり、前項の実験結果と比較できる物では無い。しかしながら、この解析を元にさらなる高度化を行い、あるいは USR によるレオロジー物性のモデルを構成方程式として組み込むことで、現実の流れに即した解析が可能であると考えている。

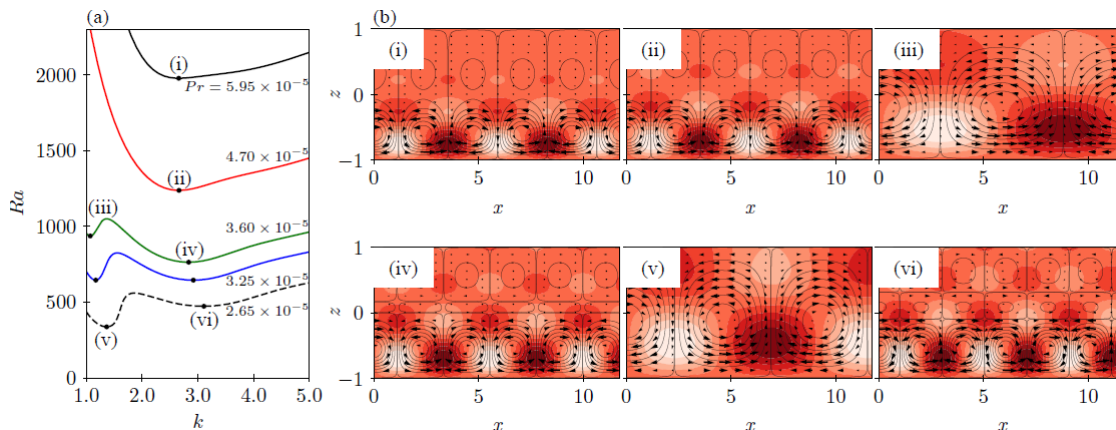


図 6 (a)中立安定曲線および(b)各条件での攪乱の固有関数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Noto Daisuke, Ohie Kohei, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji	4. 巻 64
2. 論文標題 Optical spinning rheometry test on viscosity curves of less viscous fluids at low shear rate range	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experiments in 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) 10.1007/s00348-022-03561-z	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 Ohie Kohei, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 61
2. 論文標題 Flow Prediction of Complex Fluids in a Circular Pipe by Utilizing a Velocity-Profiling-Assisted Rheometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 18157 ~ 18164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.2c03022	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 Ohie Kohei, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Sugihara-Seki Masako, Murai Yuichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Rheological characterization and flow reconstruction of polyvinylpyrrolidone aqueous solutions by means of velocity profiling-based rheometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experiments in 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) 10.1007/s00348-022-03489-4	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 Yoshida Taiki, Ohie Kohei, Tasaka Yuji	4. 巻 61
2. 論文標題 Measurement of Instantaneous Viscosity Curve of Fluids in a Reserve Tank	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 11579 ~ 11588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.2c01792	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 TAKANO Akihide, OHIE Kohei, HORIMOTO Yasufumi, TASAKA Yuji, MURAI Yuichi	4. 巻 88
2. 論文標題 Evaluation of time-dependent rheological property in the coagulation of skimmed milk by ultrasonic velocity profiler	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	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) 10.1299/transjsme.22-00115	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 Ohie Kohei, Chiba Haruko, Kumagai Satomi, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji	4. 巻 -
2. 論文標題 A method for evaluating time resolved rheological functionalities of fluid foods	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Texture Studies	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) 10.1111/jtxs.12679	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 -

1. 著者名 Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Ohie Kohei, Murai Yuichi	4. 巻 50
2. 論文標題 Overview of Ultrasonic Spinning Rheometry: Application to Complex Fluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 3~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.50.3	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 Ohie Kohei, Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Effective rheology mapping for characterizing polymer solutions utilizing ultrasonic spinning rheometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-022-03382-0	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 -

1. 著者名 Yoshida Taiki, Tasaka Yuji, Fischer Peter, Murai Yuichi	4. 巻 217
2. 論文標題 Time-dependent viscoelastic characteristics of montmorillonite dispersion examined by ultrasonic spinning rheometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Clay Science	6. 最初と最後の頁 106395 ~ 106395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clay.2021.106395	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 Tan Chao, Murai Yuichi, Liu Weiling, Tasaka Yuji, Dong Feng, Takeda Yasushi	4. 巻 144
2. 論文標題 Ultrasonic Doppler Technique for Application to Multiphase Flows: A Review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103811 ~ 103811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103811	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 Tasaka Yuji, Yoshida Taiki, Murai Yuichi	4. 巻 60
2. 論文標題 Nonintrusive In-Line Rheometry Using Ultrasonic Velocity Profiling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 11535 ~ 11543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.1c01795	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 Nakamura Kotaro, Yoshikawa Harunori N., Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 923
2. 論文標題 Bifurcation analysis of bubble-induced convection in a horizontal liquid layer: role of forces on bubbles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.601	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 Noto D., Tasaka Y.	4. 巻 62
2. 論文標題 Dual-plane ensemble correlation for pixelwise 2D-3C velocity field measurements using a single camera	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 R4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-021-03208-5	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 OHIE Kohei, YOSHIDA Taiki, PARK Hyun Jin, TASAKA Yuji, MURAI Yuichi	4. 巻 86
2. 論文標題 Evaluation on time variation of effective viscosity by ultrasonic spinning rheometry (Application to separating oil-water mixture)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00242	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 -

1. 著者名 Nakamura Kotaro, Yoshikawa Harunori N., Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Linear stability analysis of bubble-induced convection in a horizontal liquid layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 53102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.053102	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 田坂裕司, 芳田泰基, 大家広平, 熊谷聡美	4. 巻 50
2. 論文標題 超音波スピニングレオメトリを用いた「食べやすさ」に関するレオロジー評価の試み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 月刊ファインケミカル	6. 最初と最後の頁 41-47
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 -

1. 著者名 Taiki Yoshida, Yuji Tasaka, Yuichi Murai	4. 巻 31
2. 論文標題 Effective viscoelasticity of non-Newtonian fluids modulated by large-spherical particles aligned under unsteady shear	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 103304 ~ 103304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5119335	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51件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Ultrasonic spinning rheometry test for multiphase flow studies
3. 学会等名 International Conference of Multiphase Flow 2023 (ICMF2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Ohie
2. 発表標題 Complex viscosity of dilute bubble suspensions in unsteady shear flows
3. 学会等名 International Conference of Multiphase Flow 2023 (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Pipe flow transition led by hair-pin vortices in microbubble mixture
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihide Takano
2. 発表標題 Development of local turbulent eddy viscometry
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Ohie
2. 発表標題 Effective viscosity of dilute bubble suspensions in medium amplitude oscillatory shear flows
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Interdisciplinary collaboration research on food swallowability for safe and better texture
3. 学会等名 AECOR X Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihide Takano
2. 発表標題 Flow modulation during transition from two-phase to single-phase flow
3. 学会等名 AECOR X Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Ultrasonic spinning rheometry test for multiphase flow studies
3. 学会等名 International Conference of Multiphase Flow 2023 (ICMF2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Ohie
2. 発表標題 Complex viscosity of dilute bubble suspensions in unsteady shear flows
3. 学会等名 International Conference of Multiphase Flow 2023 (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Pipe flow transition led by hair-pin vortices in microbubble mixture
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihide Takano
2. 発表標題 Development of local turbulent eddy viscometry
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Ohie
2. 発表標題 Effective viscosity of dilute bubble suspensions in medium amplitude oscillatory shear flows
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Tasaka
2. 発表標題 Interdisciplinary collaboration research on food swallowability for safe and better texture
3. 学会等名 AECOR X Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihide Takano
2. 発表標題 Flow modulation during transition from two-phase to single-phase flow
3. 学会等名 AECOR X Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Chin
2. 発表標題 Effective viscosity of particle suspensions in unsteady shear flow
3. 学会等名 AECOR X Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田坂裕司
2. 発表標題 超音波インラインレオメータによる擬塑性流体の粘性評価
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大家広平
2. 発表標題 流動計測支援型レオメータを用いた複雑流体の管内流れ予測
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陳博志
2. 発表標題 非定常剪断流れにおける粒子懸濁液の実効粘度
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 芳田泰基
2. 発表標題 貯蔵タンク内で流体のレオロジー物性を評価するレオメータの開発
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高野哲秀
2. 発表標題 流速分布計測に基づく渦粘度計測システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大家広平
2. 発表標題 流速分布計測支援型レオメータを用いた複雑流体の管内流動予測
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田坂裕司
2. 発表標題 超音波流速分布計測による擬塑性流体のインライン粘度評価
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高野哲秀
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリを利用した磁性流体の実効粘度評価
3. 学会等名 日本レオロジー学会_第70回レオロジー討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳博志
2. 発表標題 非定常せん断流れにおける粒子懸濁液の実効粘度評価
3. 学会等名 日本レオロジー学会_第70回レオロジー討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳博志
2. 発表標題 非定常剪断流れにおける粒子懸濁液の実効粘度
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石松祐典, 能登大輔, 堀本康文, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 円管内乱流パフの生成過程におけるヘアピン渦列攪乱の影響
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳田泰基, 大家広平, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリに基づく可搬型レオメータの提案
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 大家広平, 芳田泰基, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 振動せん断下におけるミリバブル懸濁液の実効粘度評価
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田坂裕司, 芳田泰基, 村井祐一
2. 発表標題 超音波インラインレオメータの解析アルゴリズム改善の試み
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高野哲秀 大家広平, 田坂裕司, 金田勇, 栃原孝志
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリを利用したスキムドミルク凝乳過程における物性モニタリング
3. 学会等名 日本レオロジー学会 第 69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大家広平, 千葉春子, 熊谷聡美, 芳田泰基, 田坂裕司
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリによるとろみ調整食品の機能性評価
3. 学会等名 日本レオロジー学会 第 69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田坂裕司
2. 発表標題 超音波流速分布計測によるレオメトリ
3. 学会等名 第23回レオロジー・フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田坂裕司, 高木真也, 中村幸太郎, 朴炫珍, 村井祐一
2. 発表標題 微細気泡により円環状流体層内に形成される対流の観察
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruko Chiba, Yuji Tasaka, Kohei Ohie, Taiki Yoshida, Satomi Kumagai, Katsunori Ikoma
2. 発表標題 Rheological evaluation of heterogeneous foods using ultrasonic spinning rheometry(USR)
3. 学会等名 World Disphagia Summit 2021(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tasaka Y., Yoshida T., Ohie K., Murai Y.
2. 発表標題 An idea for non-invasive in-line rheometry based on spatio-temporal velocity information
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Tasaka, T. Yoshida, Y. Murai
2. 発表標題 In-line rheometry based on UVP measurement for non-Newtonian fluids
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ohie, T. Yoshida, Y. Tasaka, M. Sugihara-Seki, Y. Murai
2. 発表標題 Viscoelasticity of PVP aq. solutions by novel map representation based on US spinning rheometry
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大家広平, 芳田泰基, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 レオロジーマップによる高分子溶液の多角的粘弾性評価
3. 学会等名 日本化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田坂裕司, 芳田泰基, 大家広平, 村井祐一
2. 発表標題 超音波流速分布計測による過渡的レオロジー物性の評価
3. 学会等名 日本化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳田泰基, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 非定常剪断下における分散粒子を含む非ニュートン流体の実効粘弾性
3. 学会等名 日本機械学会 第98期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田坂裕司, 芳田泰基, 村井祐一
2. 発表標題 超音波流速分布計測によるインラインレオメータの実用性検証
3. 学会等名 日本機械学会 第98期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大家広平, 芳田泰基, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリを用いた水油混合液の分離過程における実効粘度評価
3. 学会等名 日本機械学会 第98期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石松祐典, 高木真也, 中村幸太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 異なる流れの状態における二層管内流の移流拡散評価
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村幸太郎, Yoshikawa Harunori, 田坂裕司
2. 発表標題 静止液体中に生じる気泡対流の線形安定性解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大家広平, 芳田泰基, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波スピニングレオメトリを用いた粘弾性流体の拡張表現
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kotaro Nakamura, Hyun Jin Park, Yuji Tasaka, Yuichi Murai
2. 発表標題 Creation of turbulent puff in pipe flow with microbubble suspension
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (ETC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiki Yoshida, Yuji Tasaka, and Yuichi Mura
2. 発表標題 Particle alignment under unsteady shear in non-Newtonian fluids causing modulations of effective viscoelasticity
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田坂裕司, 芳田泰基, 村井祐一
2. 発表標題 剪断流における分散気泡を含む液体のレオロジー評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 希薄分散マイクロバブル管内流での乱流パフ形成について
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金田大希, 石松祐典, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 気泡付着円管部の通過がもたらす乱流パフの再層流化
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木真也, 中村幸太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 追跡計測による円管内乱流パフ生成過程の観察
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

## 〔図書〕 計1件

1. 著者名 田坂裕司, 芳田泰基, 大家広平	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 13
3. 書名 分散系のレオロジー (基礎・分析・制御, 応用)	

## 〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 超音波物性測定装置	発明者 田坂裕司, 芳田泰基, 大家広平	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/007638	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 超音波物性測定装置	発明者 田坂裕司, 芳田泰基, 大家広平	権利者 国立大学法人北海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-029219	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

## 〔取得〕 計0件

## 〔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	P A R K H Y U N J I N  (Park Hyun jin)  (00793671)	北海道大学・工学研究院・助教    (10101)	
研究分担者	村井 祐一  (Murai Yuichi)  (80273001)	北海道大学・工学研究院・教授    (10101)	

## 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
---------	---------

英国	マンチェスター大学			
フランス	ノルマンディー大学	コートダジュール大学	Arts et Metiers Paris Tech	
オーストラリア	マッコーリー大学			