

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06152

研究課題名（和文）圧力振動場における微小気泡の特異形状と気液間物質移動速度への影響

研究課題名（英文）Effect of pressure oscillation on the shape of tiny bubble and mass transfer from the bubble

研究代表者

岩田 修一（Shuichi, Iwata）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00293738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：粘性の高い粘弾性流体中に設置された微小気泡について、圧力振動を印加するとCO₂ガスの吸収速度が向上した。気泡下部には吸収されたCO₂が蓄積した領域が認められた。これは、圧力振動の印加によって、気泡の側面から下向きに流れるNegative wakeが発達し、フレッシュな溶液が気泡に接近し、大きな濃度勾配が継続的に界面近傍に形成され、吸収が促進されたことが考えられる。また、非定常非ニュートン有限要素流動解析を行い、圧力振動を印加した時の気泡上昇速度は、静止時の速度よりも向上した。圧力振動の1周期の中では、気泡が膨張する時よりも、気泡が収縮する時の方がより大きく上昇することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2色蛍光レーザー誘起法により気泡界面近傍の溶存CO₂ガス濃度分布を可視化し、気泡界面近傍に存在する薄膜状の濃度境界層を明確化し、圧力振動場によってCO₂吸収液が選択的に下部に排出される局所流動構造を示した。また、非ニュートン流動解析により、圧力振動場における定量的評価を行った。液体中への気体の吸収操作は、化学プラントの反応器やCO₂吸収プロセス等、産業界で広く用いられている。取り扱う流体が高粘性である場合にはSchmidt数が大きな値となるために、物質移動速度を改善する方法が望まれている。本研究の成果は、気泡界面近傍に存在する境界層を圧力振動の印加により操作できることを示している。

研究成果の概要（英文）：We studied gas absorption rate around a bubble in viscoelastic fluid under pressure-oscillating field. The laser-induced fluorescence technique was applied to fluid around the tiny CO₂ bubble under pressure-oscillating field. pH distribution around the bubble was visualized, which corresponds to rate of CO₂ mass transfer. The absorption rate under pressure-oscillating field was enhanced by the local flow structure of negative wake in the vicinity of tiny bubble in the case shear-thinning. In addition, unsteady-state non-Newtonian finite element analysis was performed, in which the shape of the air-liquid interface can be determined by the force balance equation, considering inertia and the gravitational term. It was found that the alternative local flows near the bubble surface generated by pressure-oscillation give rise to lowered apparent viscosity for shear-thinning fluid, and enhancing the bubble rising velocity especially during contraction phase, as well.

研究分野：非ニュートン流体力学

キーワード：非ニュートン流 粘弾性流体 流動複雑折 気泡 物質移動

1. 研究開始当初の背景

気体の吸収操作は、化学プラントの反応器や CO₂ 吸収プロセス(CCS)等、産業界で広く用いられている。気泡のガス成分は界面を通じて液側に吸収されるが、一般に液側における溶存ガスの拡散係数が小さいために、ガスの吸収(物質移動)速度は、液側界面近傍にある濃度境界層での物質移動速度に支配される。この状況における液側拡散係数 D_L と動粘性係数(μ/ρ)との比である Schmidt 数($Sc_L \equiv \mu/(D_L \rho)$)は大きな値となる。高粘性流体では、 Sc_L は大きな値となり、液側界面近傍に存在する薄い濃度境界層のために液側の界面近傍の物質移動速度が著しく下がることを意味する。したがって高粘性流体を取り扱うプロセスでは、物質移動速度を改善する方法が望まれている。

我々は、100 Pa·s オーダーの高粘性流体中に設置された気泡の圧力振動場における気泡運動を研究している。高分子を含む多くの流体は粘弾性流体であり、その多くは剪断により見かけ粘性が下がる Shear-thinning 性を示す。外部より圧力振動を印加し、系内圧力を周期的に変動させると、気泡は膨張・収縮する。その時、気泡表面の速度は大きく、気泡表面から離れるにつれて速度が急激に減衰する。このことから、気泡近傍には局所の剪断流れが誘起される。つまり、気泡をベール状に包む液体の見かけ粘度は低下し、気泡上昇速度が向上することが期待される。圧力振動場で高速で上昇する気泡形状に注目すると、気泡の収縮期にだけカスプ形状が出現した [Iwata et al., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2008]。気泡近傍に非定常で局所的な流動構造が変化により、Wake が出現したことが予想されるが、詳しい検討は行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、数百 Pa·s という高い粘性を持つ粘弾性流体中に設置された 1 μ L 程度の気泡について、数百 Hz 程度の圧力振動場において気泡界面近傍で形成される特異な流動構造を活用し、ガスの吸収・反応など気液界面での物質移動速度の向上を目指す。

溶液のレオロジー特性によって、圧力振動の印加により、気泡上昇速度が加速され、特異な気泡形状を呈する場合があり、気泡近傍の流動構造が深く関連していることが明らかになりつつある。この気泡近傍流れを活用し、2次元偏光イメージング計測による気泡近傍の遅延分布(流動複屈折を利用した2次元主応力分布)と、液側の溶存する気体成分濃度を可視化する(レーザー誘起蛍光法、LIF法)を用い、圧力振動場での気泡近傍の局所流れが、気液界面における物質移動速度を促進するメカニズムを明らかにする。また、粘弾性挙動が徐々に変化する液体を用いて、単一気泡運動を整理し、伸張流動が気泡形状に与える影響を調べる。

最後に、気泡の膨張・収縮に伴い、気泡近傍流体では、局所的な変形が生じており、剪断変形と伸張変形が関与している。したがって、応力バランスから界面形状を決定するアルゴリズムが考慮された数値解析を行い、定量的な評価することが重要である。非ニュートン流体中に設置された気泡近傍の数値解析を行い、周期内の気泡重心移動から、どの時点で気泡が上昇するかを調べる。

3. 研究の方法

試料溶液には、0.03 M 臭化セチルトリメチルアンモニウム(CTAB)と 0.23 M サリチル酸ナトリウム(NaSal)の混合水溶液を用いた。CTAB/NaSal 水溶液はひも状ミセルを形成し、Shear-thinning 性と粘弾性を呈する。コーンプレート型粘度計を用いて、定常回転による剪断粘度、法線応力差、複素粘度をそれぞれ図 1 に示す。低剪断領域では、ほぼ一定の粘度を示しているが、2 s⁻¹ を超える領域では定常剪断粘度と複素粘度は徐々に異なる値を示した。今回の実験系においては、ひずみ量 ϵ が 0.1 オーダーで小さいことから、気泡近傍の粘度は複素粘度を用いた。試料溶液の密度は 1015.4 kg/m³($T=298$ K)である。

CO₂ 吸収実験には、0.03 M cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB), 0.23 M sodium salicylate (NaSal), 0.1 mM 8-hydroxy-pyrene-1,3,6-trisulfonic acid (HPTS)の混合溶液を用いた。CTAB/NaSal 水溶液は零剪断粘度が 2.5 Pa·s 程度であり、ひも状ミセルを形成し、Shear-thinning 性と弾性を示す。また、HPTS は、488nm の光で励起し、520nm で発光する蛍光色素であり、pH 5-10 に対して感度を示す [Coppeta, J. and Rogers, C., *Exp. Fluids*, **25**, 1 (1998)]。実験装置を図 2 に示す。488nm の青色レーザーシート光(Omicron, LuxX488-100, Powell lens)を試料溶液で満たされた石英ガラスセルに照射し、520 nm で発光する蛍光色素を 500 nm のバンドパスフィルター [Huang, J. and Saito, T., *Chem. Eng. Tech.*, **38**, 1947(2015)] を通して 4K カメラ

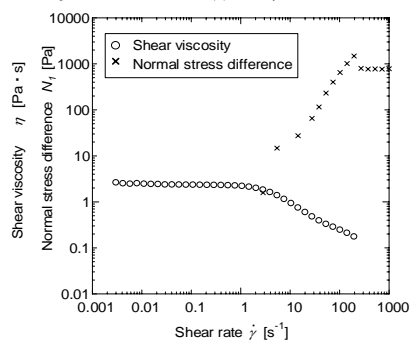


図 1 試料溶液レオロジー特性 (○: 剪断粘度曲線, × 第一法線応力差)

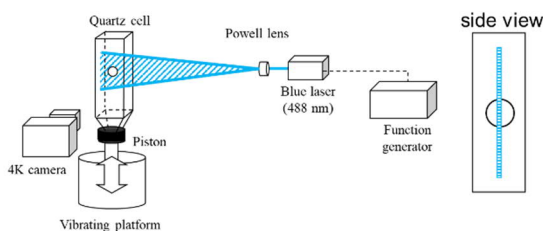


図 2 HPTS/LIF 法による可視化実験装置

(FDR-AX100, SONY Corp.)により30fpsにて撮影する。この撮影では、圧力振動周波数の方が高いため、信号発生器によりレーザーを圧力振動周波数よりも1Hzだけ高い周波数でパルス発光させる。また、偏光高速度カメラ(Photron Ltd., CRYSTA PI-1P)によってセル内に設置された2 μ Lの気泡近傍の遅延分布(弾性応力)と配向角の2次元分布より流動構造を評価した。なお、圧力振動の印加については、振動中心位置と振幅を設定できる振動発生器を用意し、ピストンをセル下部のゴム膜に付着させる方法を用いた。

4. 研究成果

(1) 圧力振動場における微小気泡の気液間物質移動速度

粘弾性流体中に設置された微小気泡を対象に圧力振動の印加によって生じる気泡近傍の流動構造の解明が検討されている。既往の研究から、圧力振動の印加により、気泡近傍の剪断粘度の低下と、気泡膨張時と収縮時において異なる流動構造が示された [Iwata, S. et al., *JNNFM*, **263**, 24 (2019), Iwata, S. et al., *JNNFM*, **151**, 30 (2008)]。本研究では、粘弾性流体中にCO₂気泡を設置し、圧力振動が物質移動におよぼす影響についてHPTS/LIF法によるCO₂の吸収領域の可視化により検討を行った。

試料溶液を満した石英セルに2 mLのCO₂気泡を設置し、自然上昇時と、振幅0.8 mm_{p-p}, $f=100$ Hzで圧力振動を印加した場合について、HPTS/LIF法により撮影し、予め作成したpH-輝度値の検量線からpH値に変換した分布図を図3に示す。左側よりレーザーを照射したため、気泡右側に陰影が生じる。撮影範囲の両側の紫色の部分はセル壁面である。壁面間の水平距離は10mmである。左側の(A)は自然上昇時の挙動であり、気泡の上昇に伴い、pHが下がった青色の吸収領域が気泡下部に現れた。一方、右側の(B)は100Hzの圧力振動を印加した場合は、圧力振動の印加に伴い、気泡下部に加えて上部にも吸収された領域が現れた。吸収速度の比較を表1に表す。単位面積当たりの移動量として比較すると、圧力振動を印加した方が2.46倍大きい。図4には、図3の気泡近傍の拡大図に偏光高速度カメラの計測から得られた気泡近傍の流動構造 [Iwata, S. et al., *JNNFM*, **263**, 24 (2019)]を重ねた図である。気泡の膨張・収縮により剪断粘度が低下し、気泡周囲には、吸収されたCO₂が蓄積した領域が認められる。圧力振動場では、気泡の側方下部から真下に向かって流れるNegative wakeが発達し、周囲の溶液が気泡に接近し、大きな濃度勾配が継続的に形成され、吸収を促進することが分かった。

以上、CO₂表面近傍の吸収領域を可視化し、圧力振動により吸収速度が促進されるメカニズムを明らかにすることができた。

(2) ゲル化を利用した伸張粘度増加による上昇気泡の特異的な気泡形状変化

3wt%ゼラチン水溶液の動的粘弾性の挙動を測定し、図5に示す。損失弾性率(G'')は冷却より徐々に増加した。一方、貯蔵弾性率(G')は、ある程度の時間が経過した4100 s頃より急激に増加した。ゲル中に絡み合い構造の形成が進んだことが示唆される。さらに、図5から得られる $\tan \delta$ ($\equiv G''/G'$)の測定を行い、ゲル化点を推定した。ゲル化点の決定には、周波数を変えて測定した $\tan \delta$ の交点をゲル化点とするTakahashiの方法 [M. Takahashi, *J. Soc. Rubber Industry, Japan* **66** (1993)]により、5300s付近がゲル化点であることが分かった。次に気泡形状の観察結果を図6に示す。約0.02 mlの気泡では、

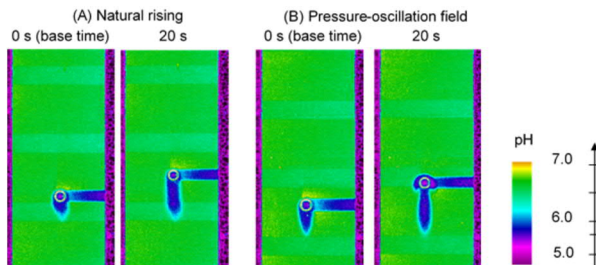


図3 HPTS/LIF法による20秒間のpH分布の変化。(A):自然上昇時, (B):100Hzの圧力振動印加時

表1 20秒間における気泡吸収速度の比較

	Natural rising	Pressure-oscillating
$d_{t=0s}$ [mm]	1.31	1.41
$d_{t=20s}$ [mm]	1.25	1.25
CO ₂ flux $\dot{n} \times 10^{-4}$ [mol/(m ² ·s)]	0.665	1.638
increment in absorbed volume [mm ³]	4.20	7.26

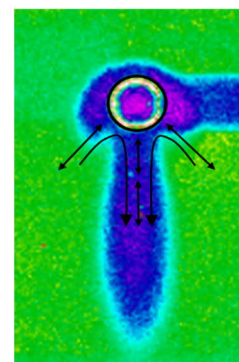


図4 収縮時の気泡近傍拡大図と流動構造

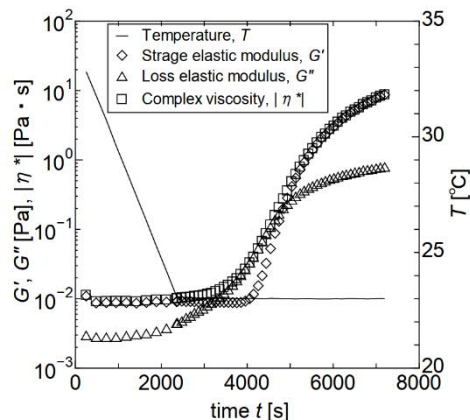


図5 3wt%ゼラチン水溶液の冷却パターンと動的粘弾性特性、複素粘度の挙動

5200 s付近までは球形であったが、それ以降、気泡下部が尖ったCusp形状に変化し、弾性効果が確認された。さらに $\tan \delta$ の時間変化と比較すると、ゲル化点付近を境に気泡形状が変化することが分かった。

ゲル化点近傍における気泡が上昇する様子を2次元偏光高速度カメラにより撮影し、遅延分布を解析した結果を図7に示す。光弾性則により、遅延分布は主応力の大きさに比例する[Iwata, S. et al., *JNNFM*, 263, 24 (2019)]。画面下部には気泡注入用ノズルからステップ状に空気が一定量注入され、気泡がノズルから離れた時刻を0sとする。この図より、気泡発射直後は、カスプ形状を呈するが、徐々に気泡下部の突起の先端が鋭利になり、糸状形状が形成される。糸状形状が形成される0.05 s - 0.1 sでは、気泡界面近傍と先端下部には緑色の領域が出現し、遅延が生じていることがわかる。その後、気泡近傍に生じる強い応力を示す緑色の領域が気泡下部から気柱が伸びる領域にシフトし、その遅延の値も大きな値に変化していることが明らかになった。通常は、気泡通過に伴い、気泡近傍の流体には伸張変形に伴う弾性応力が発生しても、気泡が通過後にはひずみが速やかに解消され、残留応力はほとんど存在しないことが多い。しかし、今回のような弾性応力が強いゲル化点近傍の溶液を上昇する微小気泡では、気泡中心位置は一樣に上方に移動するものの、気柱の最下端位置は、ほとんど変化していないことがわかる。これは、気泡下部に出現するNegative Wakeに伴う鉛直方向の伸張流動が生じたことを示している。このことから、気泡通過によって蓄積された残留応力が気泡下部の伸張流動によってそのまま維持され、気柱が継続的に鉛直方向に延伸されたことが明らかになった。以上のことより、Negative Wakeの形成には溶液の弾性応力が必要であり、強い弾性応力が現われるように圧力振動による気泡近傍の変形を維持することにより、前述のCO₂の物質移動を向上できることが明らかになった。

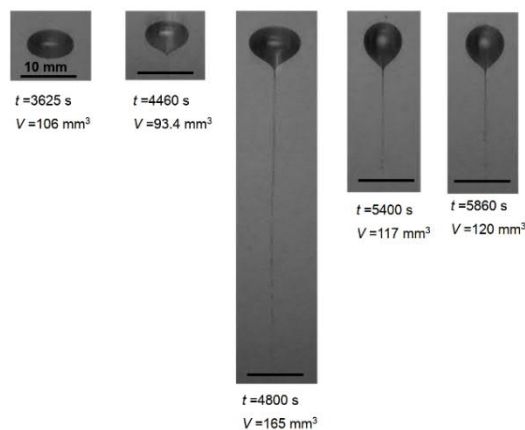


図 6 冷却中のゼラチン水溶液中を上昇する気泡．ゲル化点付近以降で気柱を形成する．

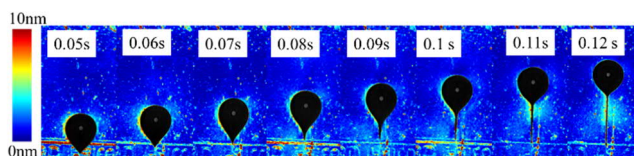


図 7 冷却中のゼラチン水溶液中を上昇する気泡．二次元偏光高速度カメラによる計測(1000fpsにて撮影)

(3) 圧力振動場における非ニュートン流体中に設置された気泡運動の流動解析

解析では、鉛直方向に z 軸、半径方向に r 軸を取り、 z 軸上に対称軸を持つ 2 次元軸対称流れを仮定した。原点を中心とした半径 10 mm、高さ 40 mm の円柱状の領域を計算領域として設定し、 $t = 0$ s における初期気泡半径 $r_b|_{t=0} = 1$ mm の気泡の重心を初期位置として原点に設置した。側面、上面境界には固定壁を設定し、下面境界には固定壁との共有点のみ速度ゼロとなるような周波数 f [Hz]、振幅 H [m_{pp}] を持つ一様流れを与えた。気泡界面上には自由表面を与え、界面上における表面張力による法線応力、気泡内圧力による法線応力、動圧のつり合いによって界面形状が決定するように設定した。また、鉛直下向きに重力加速度を与えた。ソルバーには非定常有限要素解析ソフトである ANSYS Polyflow19.2.を用いた。流体の液側の粘度は Carreau-Yasuda モデルを用いて相関される。密度は $\rho = 1001.4$ kg/m³、モデルパラメータは $\eta_0 = 167$ Pa·s, $\eta_\infty = 2.58 \times 10^{-9}$ Pa·s, $\lambda = 49.2$ s, $n = 0.238$, $a = 1.52$ である。

$H = 2.00 \times 10^{-5}$ m_{pp}, $f = 0$ Hz, 1 Hz における、気泡重心位置 z_c [m] の時間変化を Stokes 式の値から想定される気泡重心位置 z_s [m] とともに図 8 に示す。この時の気泡の体積収縮率は 12.2% に相当する。 $f = 0$ Hz は自然上昇である。2.2 周期の計算を行ったところ、 $f = 1$ Hz における z_c の移動距離は、 $f = 0$ Hz における z_c の移動距離の 5.90 倍であった。また、0 Hz における z_c の勾配は、 z_s の

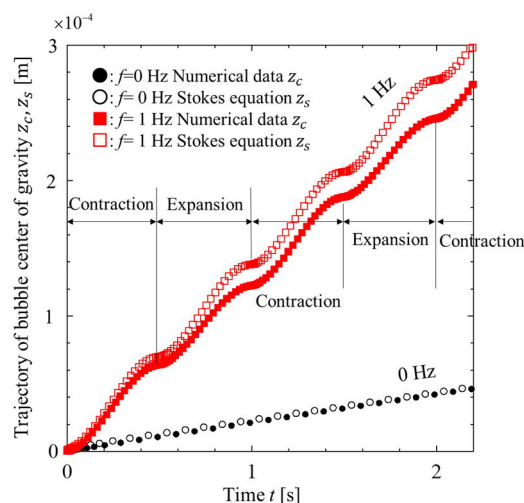


図 8 圧力振動による気泡重心位置の時間変化への影響。

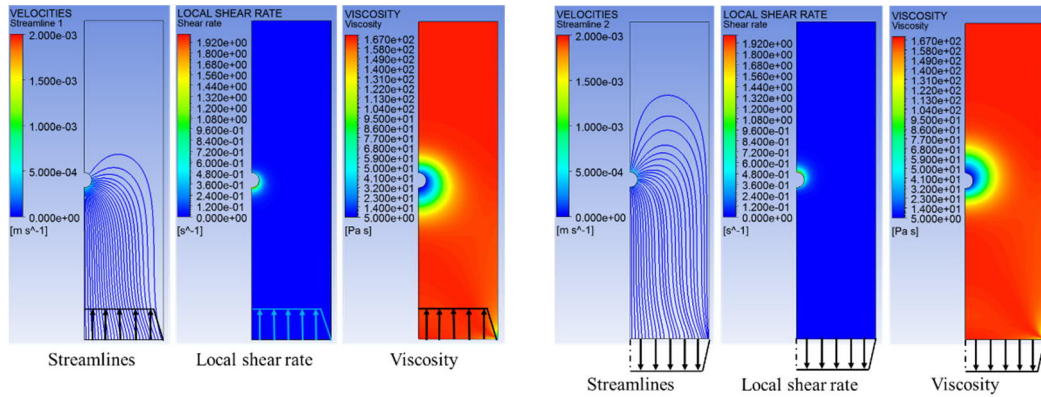


図 9 圧力振動の(左)収縮時, (右)膨張時における流線分布と速度, 局所剪断速度分布図, 剪断粘度分布図. 膨張時と収縮時で流線が大きく振れていることが明らかになった. (左側図は $t = 0.25\text{ s}$, 右側 : $t = 0.75\text{ s}$, $f = 1\text{ Hz}$, $r_b = 1\text{ mm}$, $H = 2.00 \times 10^{-5} \text{ m}_{\text{p-p}}$)

勾配と一致したのに対して、 1 Hz では 1.12 倍程度 z_s の勾配の方が大きいことが分かった。

$H = 2.00 \times 10^{-5} \text{ m}_{\text{p-p}}$, $f = 1\text{ Hz}$ の振動条件で行った (Shear-thinning 性を示す溶液, $n = 0.238$) の計算結果より、気泡界面の変形速度が相対的に大きい時間 (収縮時 : 0.25 s , 膨張時 : 0.75 s) における流線図、局所剪断速度分布、局所粘度分布を図9にそれぞれ示す。局所剪断速度分布や粘度分布はいずれも気泡重心を中心とした同心円状の分布でないことが分かる。収縮時における気泡界面上部と下部の移動速度の絶対値を比較すると、気泡の収縮と気泡の上昇による界面移動が合わさることにより気泡下部の移動速度が大きくなる。したがって、収縮時における気泡最下部の局所剪断速度 ($\dot{\gamma}_{\text{B-TM}} = 1.51\text{ s}^{-1}$) は気泡最上部の局所剪断速度 ($\dot{\gamma}_{\text{TOP}} = 0.39\text{ s}^{-1}$) の 3.87 倍になり、流体の粘度がより低下する。したがって、気泡は上部の流体を容易に周囲へ排水して上昇しやすくなり、気泡の上昇速度が向上したと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Iwata Shuichi, Takahashi Tsutomu, Onuma Takashi, Nagumo Ryo, Mori Hideki	4. 巻 263
2. 論文標題 Local flow around a tiny bubble under a pressure-oscillation field in a viscoelastic worm-like micellar solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 24 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2018.11.002	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 Shunsaku Ito, Shuichi Iwata, Yukinobu Sugihara, Tsutomu Takahashi	4. 巻 39(1)
2. 論文標題 Planar Elongation Flow Analysis of Non-Newtonian Fluids Using a Disk-Shaped Bob	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TECHNISCHE MECHANIK	6. 最初と最後の頁 16-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.24352/UB.OVGU-2019-003	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 Iwata Shuichi, Saiki Yasuhiro, Nagumo Ryo, Mori Hideki, Fuji Masayoshi, Menchavez Ruben Labandera	4. 巻 46
2. 論文標題 Experimental Investigation of a Rising Bubble in Aqueous Gelatin Solution under Gelation Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 107 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1678/rheology.46.107	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 Shuichi IWATA, Yasuhiro SAIKI, Ryo Nagumo, Hideki MORI, Masayoshi FUJI, Ruben Labandera MENCHAVEZ	4. 巻 48
2. 論文標題 Experimental Investigation of a Rising Bubble in Aqueous Gelatin Solution under Gelation Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 145 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1678/rheology.48.145	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 岩田修一
2. 発表標題 圧力振動を用いた高粘性流体中からの微小気泡の連続分離
3. 学会等名 分離技術会年会2018
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunsaku Ito, Yukinobu Sugihara, Shuichi Iwata, Tsutomu Takahashi
2. 発表標題 Planar elongation flow analysis of non-Newtonian fluids using a disk-shaped bob
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF ' 18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Yamamoto, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori, Tsutomu Takahashi
2. 発表標題 Effect of pressure-oscillation on bubble-liquid phase mass transfer
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF ' 18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本啓太, 岩田修一, 南雲亮, 森秀樹, 高橋勉
2. 発表標題 圧力振動場に設置された単一気泡の物質移動の可視化に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤駿作, 岩田修一, 南雲亮, 森秀樹, 杉原幸信, 高橋勉
2. 発表標題 円板ボブの押し込みを利用した平面伸張粘度の評価に関する粘弾性流動解析
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本啓太, 岩田修一, 南雲亮, 森秀樹, 高橋勉
2. 発表標題 二次元偏光計測及びLIF法を用いた圧力振動場における単一気泡の物質移動過程の評価
3. 学会等名 日本機械学会第96回流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩田修一, 山本啓太, 南雲亮, 森秀樹, 高橋勉
2. 発表標題 単一CO2気泡表面近傍の濃度勾配に与える圧力振動の影響
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 啓太, 岩田 修一, 南雲 亮, 森 秀樹, 高橋 勉
2. 発表標題 粘性流体中の単一気泡からのガス吸収速度に及ぼす圧力振動の影響
3. 学会等名 日本機械学会 2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keita Yamamoto, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori, Tsutomu Takahashi
2. 発表標題 Experimental study of physical absorption rate by pressure-oscillation
3. 学会等名 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keita Yamamoto, Shuichi Iwata, Ryo Nagumo, Hideki Mori and Tsutomu Takahashi
2. 発表標題 Effect of pressure-oscillation on bubble-liquid phase mass transfer
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF '18) (国際学会)
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
連携研究者	高橋 勉 (Takahashi Tsutomu) (20216732)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	