

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04285

研究課題名(和文) 圧力振動場を利用した粘弾性流体の気液界面近傍の流動構造制御とその応用

研究課題名(英文) Control of local flow structure of viscoelastic fluid in the vicinity of bubble interface using pressure-oscillation field and its application

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)・教授

研究者番号：00293738

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)：応力制御式レオメーターと532nmの円偏光平行光源を利用し、共軸二重円筒間流路の間隙のサンプルに対して光を透過させ、その透過光を2次元偏光高速カメラで撮影する方法を用い、気泡形状とレオロジー特性、遅延分布、配向角分布の比較・検討を行った。静止流体中で気柱を形成する過程で強い応力が必要であることが明らかになった。また、圧力振動場における特異な形状を示す気泡の2次元偏光計測より、気泡収縮時には気泡界面の曲率が大きな部分に強い弾性応力が作用していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘弾性流体中で形成される特異な形状を示す界面には、強い応力が作用していることを流動複屈折と応力制御式レオメーター測定の際観察より明らかになった。また、圧力振動場では、気泡を真球形状に復元する表面張力よりもさらに強い応力が作用し、特異な形状を示すことが示された。本研究の成果は、印加する圧力振動条件の操作により弾性応力を制御し、気泡形状を操作することが可能であることを示した。産業界では、粘弾性流体から気泡を除去するニーズは大きい。今回の成果は、圧力振動場を活用した気泡除去の制御方法への活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Rheological properties of the 3wt% aqueous gelatin solution under the same cooling condition in the Quette flow geometry is simultaneously measured by following two ways; (i) measuring dynamic viscoelasticity by the stress-controlled rheometer and (ii) 2D retardation profile by the 2D high-speed polarization camera. The stress profile can be estimated by combining the two sets of results, (i) and (ii). It is shown that the stress around the long tail behind the cuspidal air bubble is much higher than that around the cuspidal bubble. We also evaluated effects of viscoelasticity and local flow surrounding the tiny bubble shape under bigger pressure-oscillating field in the viscoelastic fluids. Strong vertical retardation due to the orientation of the fluid occurs as a result of local stress at rim (edge) of the bubble during the contraction phase, and a weak retardation occurs near the bubble surface due to biaxial deformation of the surrounding fluid during the expansion phase.

研究分野：非ニュートン流体力学

キーワード：viscoelastic fluid flow birefringence negative wake

1. 研究開始当初の背景

申請者は、気泡を含む高粘性の粘弾性流体に圧力振動を印加し、気泡近傍で生じる現象に関する基礎的な研究と、その現象の応用研究を行っている。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みかけ粘性が下がる Shear-thinning 性と弾性の性質を示す。静止圧力場での自然上昇速度と圧力振動場での気泡上昇速度は大幅に加速された。圧力振動の度合いを増加させると増加し、条件によって気泡上昇速度は自然上昇速度の約 400 倍にも加速された。一方、同程度の粘性を持つニュートン流体では、高々 2~3 倍であり、レオロジーの関与が示唆される。2次元偏光高速カメラを用い、ひも状ミセルを形成により強い流動複屈折を示す粘弾性流体である 0.03M CTAB/0.23M NaSal 水溶液を用いて 100Hz の圧力振動場で調べたところ、気泡膨張時には気泡表面近傍に二軸伸張流動が出現し、気泡収縮時には気泡下部が尖ったカスプ形状が現れ、その下部に一軸伸張流動が現れ、配向角分布、トレーサー法により気泡下部に Negative wake が確認できた。[Iwata et al., J. Non-Newtonian Fluid Mech., 2019]。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、粘弾性流体に強い圧力振動の印加によって形成される特異な界面形状について、形成メカニズムの定量的解明を目指す。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。そのために、単純流れを計測する応力制御式レオメーターに、流動複屈折を示す粘弾性流体を活用し、その場観察による応力、ひずみ、2次元光弾性分布を同時可視化する手法を構築する。遅延分布から求めた応力分布、圧力、特異形状の動的表面張力の測定結果を用い、圧力振動場という動的な場で特異な界面形成メカニズムの解明の検討を進める。

3. 研究の方法

応力制御式レオメーターの測定治具として共軸二重円筒間流路を用いた実験装置図を図 1 に示す。内径 36mm φ のカップと外径 32mm φ のボブの間の流路に設置されたサンプルに対し、2枚のミラーを用いてボブの回転軸と平行になるように 532nm の円偏光平行光を透過させ、透過光を 2次元偏光高速カメラにより撮影した。ゲル化時に複屈折性を示すゼラチン水溶液に円偏光を透過することにより、溶液中の応力が生じる部分に位相差が遅延として現れる。測定試料の光路長が一定とするために、ボブの上面と下面には透明石英プレートが設置されており、上面から下面に向けて光が透過する。また、遠隔制御により、所定の温度に設定した恒温槽の水を共軸二重円筒セルのカップ外側に循環させ、サンプルの温度調節ができる。気泡上昇実験における温度制御パターンと同じ温度変化を再現し、溶液を上昇する気泡の形状、レオロジー特性、遅延分布、配向角分布の比較・検討を行った。冷却中のゼラチン水溶液を中心に、定常回転時、正弦波振動回転時における計測を実施した。共軸二重円筒間流路では、透過光に対して剪断流れを観察することができる。また、ゲル化ひずみがゼラチン水溶液のゲル化温度まで冷却する場合と、ゲル化温度よりもわずかに高いゾル状態においてスタートアップも測定を行った。

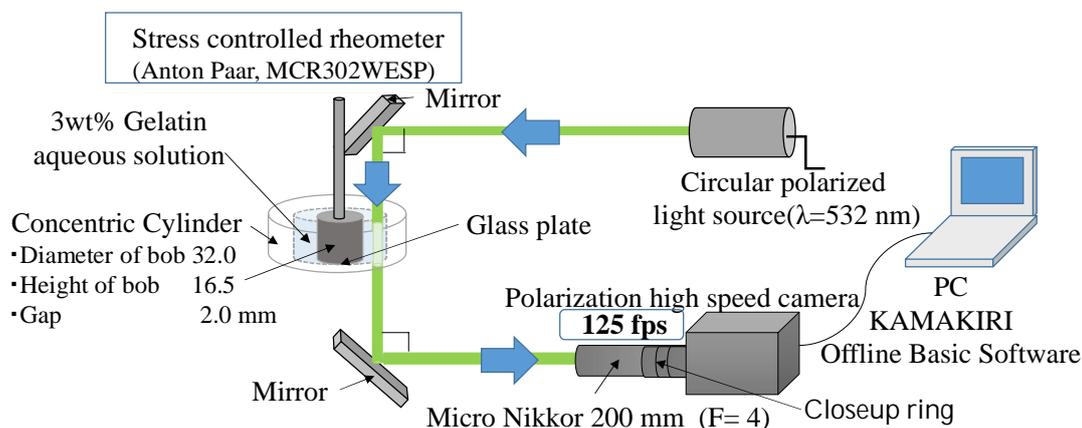


図 1 応力制御式レオメーターと流動複屈折測定計を用いたレオロジーその場計測システム

4. 研究成果

はじめに、偏光測定を行うためのリファレンスは撮影時刻である G' が上昇する3167sの直前の静止した状態で行った。ゼラチン水溶液を3wt%水溶液に調整し、図2と同様に降温させた。この試料の動的粘弾性測定を行い、3167sにおける値をプロットした。また、ひずみの蓄積による影響を考慮して、3167sの直前から1Hz一定でひずみを与えた。また、共軸二重円筒間流路では、内径36mm ϕ のカップと32mm ϕ のボブを用い、所定の剪断速度における遅延を計測した。遅延と剪断応力の傾きの差より、式(1)を利用して光弾性係数を決定することが可能となる。レオメーターの共軸二重円筒間流路では、光路長が16.5mmであることから、この光路長に相当する遅延の値を用いて光弾性係数 C を求めた。

$$\text{Stress } \sigma = \frac{1}{\text{Photoelastic coefficient } C} \times \frac{\text{Retardation } \delta'}{\text{Effective beam path } \zeta} \quad (1)$$

図3はゼラチン水溶液中に、冷却開始から3167sで気泡を打ち上げた時の経過時間と遅延分布を示す。図中に示した赤丸は、気泡近傍の遅延分布の中で最も大きな遅延が得られた部分を示している。具体的には、0.06sでは、直径3.5mmの気泡が上昇しており、気泡の下部が尖ったCusp形状を呈している。気泡の側方下部には最も大きな5.8nmの遅延の値が得られている。気泡の上昇に伴い、気泡下部には尖った部分が徐々に延伸し、気柱の形成が行われた。0.12sでは、最も大きな遅延を示す赤丸部分は気柱に移動した。気柱の直径がわずかに0.18mmに対して5.4nmの遅延が得られた。0.12sでの気柱の直径は、0.06sでの気泡上部の直径の約1/20程度であるにも関わらず、遅延の値は同程度であるため、気泡下部には強い応力が作用したことが分かる。そこで、応力を次の方法で評価した。図3に示した遅延の値は積分値である。図4に示すように気泡形状の軸対称性を仮定する。また、得られた遅延の値は、その高さにおける気泡の水平断面の幅 ζ の距離と同じ距離（有効光路長 ζ ）で応力が作用した結果であると仮定する。これらの仮定により、式(1)から応力を評価できる。赤丸部分にかかる応力の結果を図3の各図の下部に示す。

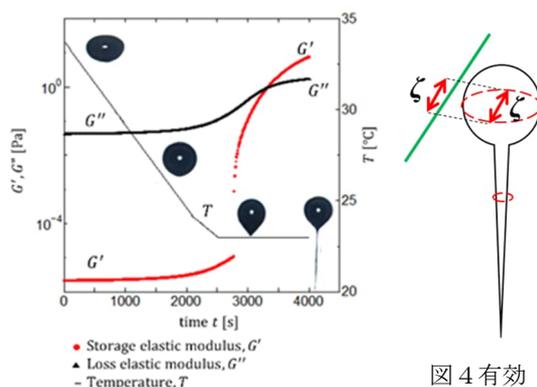


図4 有効光路長

図2 ゼラチン水溶液の温度制御パターンと粘弾性特性、気泡形状

最大応力の推移に着目する。カスプ形状の0.06sでは、気泡側面が最も強い応力を呈していたが、0.07sにはその領域は気泡下部に移動し、応力値は急激に増加した。これは、下部の尖った部分を徐々に気柱形状に発達させるために必要な推進力となったことが推察される。さらに、気柱の発達に伴い、大きな応力を呈する強い遅延の領域は上下方向に延伸した。図3の0.12sにおける最大応力は、0.06sでの最大応力の約15倍であり、気柱形状を支えるための強い伸張応力が作用していることが示された。

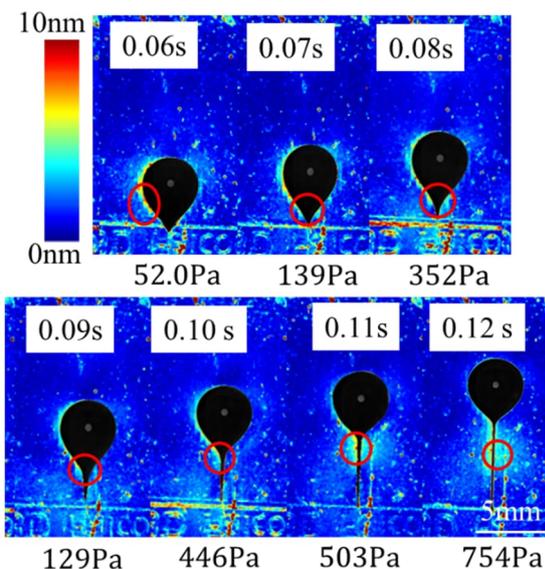


図3 ゲル化しつつあるゼラチン水溶液中を上昇する気泡と遅延分布、最大応力

次に、静止状態の液体に気泡が通過する際に、その領域の液体には大きなひずみがかかることが考えられる。そこで、図5のパターンで温度を降下させながら100s⁻¹の定常剪断をかけた際のスタートアップ時の複屈折測定の撮影結果を図6に示した。図6は内径36mm ϕ のカップと32mm ϕ のボブからなる共軸二重円筒間流路 (gap: 2.0 mm) の一部を示している。図5の①から③の経過時間は図6の①から③の剪断ひずみの値に対応する。図5より、 G' 、 G'' の値にほとんど変化はないことから①はゾルの状態であることがわかる。しかし、回転

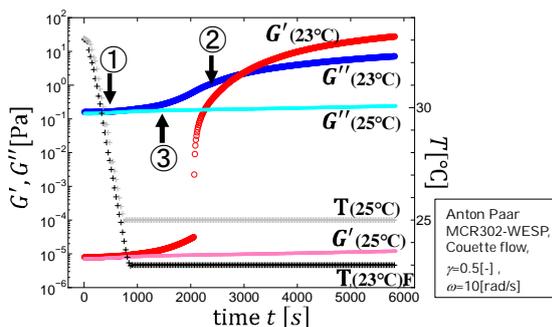
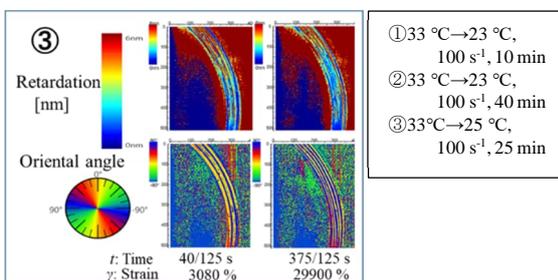
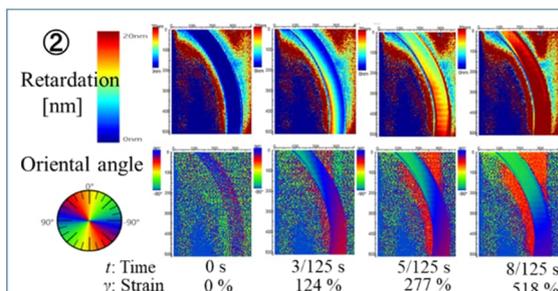
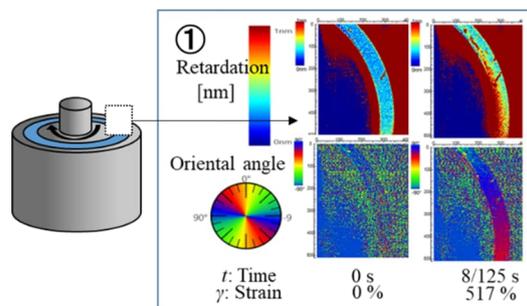


図5 ゼラチン水溶液の温度と粘弾性特性. 寒色系: 25°C (ゾル状態), 暖色系 (23°C:ゲル化温度以下)

開始とともに流路の内側からわずかではあるが遅延を示す領域が出現し、主軸方位分布も変化した。②は23℃に冷却され、 G' が急激に増加したタイミングを示す。回転開始時はひずみの増加に伴い遅延が増加するが、やがて三本鎖構造が破壊されて小さくなり、その後は一定に落ち着く分布を示した。主軸方位分布は①の状態からさらに遷移した状態となった。③は25℃までしか冷却していないことから、ゾル状態を示している。ひずみが小さい場合は①、②と同様の遅延分布と主軸方位分布が見られたが、ひずみが蓄積すると層状の模様が内部より出現した。層の数はボブの回転数に比例して、ひずみの蓄積とともに増加した。ゾルの状態でありつつもひずみを印加することにより粘弾性を強く示す薄膜状の領域が層状に形成されることが明らかになった。これは、流動がきっかけとなり形成された流動誘起構造と見ることができる。これはゾル状態において三本鎖構造に回転方向の伸張が働き、形成されたことが示唆される。よって、③のゾル状態およびゲル化後の光弾性係数は測定部における位置によって変化すると考えられる。

最後に圧力振動場に関する気泡形状について、CMC水溶液を用いた検討を行った。振動発生装置はピストンの振幅中心位置 ζ [mm]を制御出来る。これを鉛直上向きに移動させることにより、ゴム膜を押し込んだ状態で振動を印加出来る。これにより、ゴム膜の張力が上昇し、気泡の膨張・収縮量が増加するため、セル内部の圧力振動を強くすることが可能になる。振動発生装置の振幅を $2A$ とし、 $A=0.50\text{mm}_{p-p}$ 、周波数を $f=150\text{Hz}$ に設定した。図7左側は最大膨張時(Expansion)の測定結果であり、図7右側は最大収縮時(Contraction)の遅延分布を示す。気泡膨張時には、気泡を包むように遅延が大きな領域が気泡をベール状に存在することが明らかになった。これは、気泡の膨張に伴う二軸伸張変形に伴う遅延分布の形成と考えられる。また、気泡収縮時には、気泡の上端と下端に強い遅延が発生しており、気泡中央部には逆に遅延がほぼぞんざいしないことが明らかになった。1/300秒の間に応力の強い部分が交互に入れ替わるという興味深い挙動を示すと同時に、気泡が特異形状を示すには、非常に強い弾性が必要であることが示された。



- ① 33℃→23℃, 100 s⁻¹, 10 min
- ② 33℃→23℃, 100 s⁻¹, 40 min
- ③ 33℃→25℃, 100 s⁻¹, 25 min

図6 共軸二重円筒間流れ系におけるゼラチン水溶液の100s⁻¹にてボブを回転開始してからの経過時間とその時点でのひずみ(%), 遅延分布(上側), 配向角分布(下側). ①23℃まで冷却中(10分後), ②23℃(40分後), ③25℃,(25分経過時).

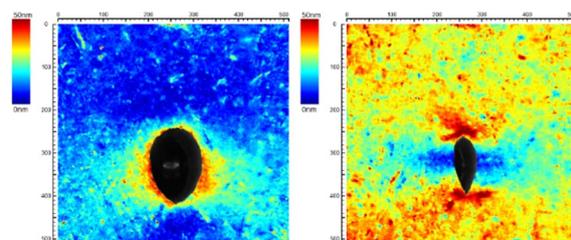


図7 圧力振動場における気泡形状; 左側: 膨張時, 右側: 収縮時, $A=0.50\text{mm}, f=150\text{Hz}$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 林 祥花, 岩田修一, 高橋 勉
2. 発表標題 平行回転円板間流れ場におけるゲル化過程の偏光特性
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 百合草 開人, 岩田 修一, 南雲 亮, 高橋 勉
2. 発表標題 圧力振動場における特異気泡形状の形成に関する粘弾性の影響の検討
3. 学会等名 化学工学会 第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石橋 拓人, 岩田 修一, 南雲 亮, 高橋 勉
2. 発表標題 二次元偏光計測を用いた複数気泡間の相互作用に対する圧力振動周波数の影響
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口虎之介, 岩田修一
2. 発表標題 流通系圧力振動場における気泡近傍流体の二次元偏光計測
3. 学会等名 化学工学会 第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤大志, 岩田修一, 南雲亮
2. 発表標題 振動場にある微小液滴の動的表面張力における界面活性剤溶液の影響
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口 虎之介, 岩田 修一, 南雲 亮, 高橋 勉
2. 発表標題 流通系圧力振動場に存在する気泡近傍流体にかかる弾性応力に関する検討
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 Shuichi Iwata, Mai Ito, Ryo Nagumo, Tsutomu Takahashi
2. 発表標題 Formation of a long tail at the rear end of a rising bubble in an aqueous gelatin solution
3. 学会等名 18th International Congress on Rheology (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
連携 研究者	高橋 勉	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	
	(Takahashi Tsutomu)		
	(20216732)	(13102)	

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	Cardiff University			