

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560195

研究課題名(和文) 流動複屈折を用いた圧力振動場における2気泡間の応力測定とその応用

研究課題名(英文) Measurement of stress between and around 2 bubbles by the flow birefringence measurement under pressure-oscillating field and its application

研究代表者

岩田 修一 (Iwata, Shuichi)

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) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：圧力振動場に設置された気泡近傍の2次元遅延分布を、偏光高速度カメラを用いて解析した。光弾性則に良く従うCTAB/NaSal水溶液を用い、実験的に評価した。気泡体積は、 $2\mu\text{L}$ の単一気泡と、 $2\mu\text{L}$ の気泡を2個設置したケースで実験を行った。気泡の収縮時と膨張時で、気泡近傍の流動様式が異なることが分かった。収縮時には、気泡下部に強い遅延が見られた。2気泡の場合では、気泡間における大きな伸長流動が観測され、気泡同士の間接に重要な役割を果たすことが分かった。

研究成果の概要(英文)：2D retardation distributions are measured by the high speed polarization camera near the air bubble under pressure-oscillating field. A CTAB/NaSal (a mixture of cetyl-trimethylammonium bromide and Sodium Salicylate) aqueous solution is used as a test fluid. Since it obeys stress-optic rule and the rheological property is similar to the UCM model, the flow stress in the vicinity of the small air bubble under pressure-oscillating field could be evaluated by the 2D optical anisotropy. Volume of the test bubbles is around 2 cubic mm. The results show alternative interesting patterns clearly over a period. The first one is strong retardation (i.e., larger birefringent phase difference) at the tail of the cusped bubble in the bubble compression phase due to the negative wake. And the other one is a weak retardation (i.e., relatively smaller birefringent phase difference) only near the bubble surface due to the elongational flow in the bubble expansion phase.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：非ニュートン流

キーワード：非ニュートン流 粘弾性流体 流動複屈折 伸長速度

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業界における脱泡処理の必要性

液体中への微小気泡の混入は、塗膜不良等、多くの問題を引き起こすため脱泡処理が必要である。例えば、静置、加熱操作、遠心分離、真空操作、超音波操作等がある。加熱操作では化学物質の気化や劣化が懸念され、超音波操作では発振装置の指向性問題や溶解・消滅した気泡が後段プロセスで再発泡する可能性が指摘される。これらは全てバッチ式操作であり、装置や作業工程が複雑化し、エネルギーロスも生じる。そのため、インラインで連続的に操作が可能で、材料特性に影響を与えない脱泡方法の開発が望まれる。

(2) 既往の研究

我々はレオロジー特性に注目した圧力振動脱泡法を提案している。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みかけ粘性が下がる Shear-thinning 性を示す。この特性を脱泡に活用する。例として、キャップにゴム膜を取付けたセルに試料流体を満たし、その中に気泡を1個設置することを考える。外部よりゴム膜に振動を印加し、系内の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。

例えば、ポリアクリル酸ナトリウム水溶液 (SPA) 溶液で満たされたセルに $1\mu\text{L}$ の気泡を設置し、下部より連続的に 300Hz の圧力振動を与えた場合、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との比 (ε) は 95.6 であり、大幅に加速された。圧力振

動の度合いを増加させると ε は増加し、条件によっては、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、ニュートン流体では、高々 $2\sim 3$ 倍であり、レオロジーの関与が示唆される。顔料系インクによる粒子追跡法 (PTV) では、セル内には循環流やジェット流が存在せず、気泡表面で約 700s^{-1} の強い剪断が確認された。この流体の粘度特性に注目すると、 700s^{-1} という剪断速度では、剪断粘度の低下と同時に弾性応力の出現が強く示唆される。そのために、圧力振動場にて高速 ($\varepsilon=300$) で上昇する気泡では、気泡の収縮期にだけ気泡下部が尖ったカスプ形状が出現した。気泡近傍の非定常で局所的な流動が Wake を出現させたことが予想され、そのメカニズムの解明が待ち望まれる。

また、上下に2つの気泡を設置し、観察すると、自然上昇時には2気泡は同じ速度で上昇したが、圧力振動場では下側気泡が上側気泡よりも約2倍程度の速度で上昇した。両者が接近すると、下側気泡はさらに加速され、上側気泡よりも約5倍 (自然上昇速度に対しては10倍) の速度で上昇した。音響場でのニュートン流体を対象として複数気泡の相互作用に関する研究は数多く行われており、 CD 値が $1/3$ 程度に減ると言われている。ところが、本研究の上昇効果はそれよりも著しく大きいことから、粘弾性流体に特有なメカニズムの存在を強く示唆している。

2. 研究の目的

本研究では、圧力振動場における気泡の挙動について、次の2点を研究の目的とする。

(1) 圧力振動場において、単一の微小気泡の近傍における流動複雑屈折を用いた遅延分布 (応力分布) を明らかにし、弾性応力の観点から気泡の収縮時にカスプ形状を呈するメ

カニズムを明らかにする。

(2) 圧力振動場における 2 気泡間の相互作用について、流動複屈折を用いた遅延分布（応力分布）より流動様式を明らかにする。また、鉛直方向に配列した 2 つの気泡は常に上向きに移動しており、気泡の周囲には流れ場が形成される。そこで、回転型セルを用い、実験に気泡間の相互作用における重力（浮力）の寄与について検討する。

3. 研究の方法

(1) 2次元偏光高速度カメラによる気泡近傍の遅延分布の測定

試料溶液には、0.03M 臭化セチルトリメチルアンモニウム (CTAB) と 0.23M サリチル酸ナトリウム (NaSal) の混合水溶液を用いた。溶媒には HPLC 用の蒸留水を用いた。CTAB/NaSal 溶液は、ひずみを与えると、ひも状ミセルが一定の向きに配向し、強い流動複屈折を起こすことが知られている。この溶液の光弾性定数は、 $C = -3.1 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ であると報告されている。複屈折 $\Delta n'$ と応力 σ は光弾性則 $\sigma = (1/C) \Delta n'$ により関係づけられる。ここに、 $\Delta n' = \lambda \delta' / (2\pi \xi C)$ であり、 C は光弾性定数、 λ は波長、 δ' は遅延、 ξ は光路長である。このため、光路長が一定である場合、遅延 δ' の分布を測定することは、応力の分布を求めることを意味する。

撮影部について説明する。2次元偏光高速度カメラ内部には隣接する画素ごとに方向が 45° 異なる 4 方向の直線偏光フィルターが設置されており、光源には円偏光フィルムが内蔵されている。図 2 に実験装置模式図を示す。光学用石英セル（流路高さ 50mm）に試料溶液を満たし、 $2 \mu\text{L}$ （気泡径 $D=1.56\text{mm}$ ）の気泡を鉛直方向に設置（気泡間距離 $L=0.6\text{mm}$ ）し、ゴム膜（圧力印加部分直径 9mm）付きキャップ

で密閉した。ゴム膜の下側から振動発生装置（旭製作所製 SL-0505）によりサイン波で制御された 200Hz の圧力振動を与えると、セル内の気泡は繰り返し収縮・膨張する。その様子を偏光高速度カメラ (Photron 社製 FASTCAM SA5P3) により撮影する。シャッタースピードは $1/30000\text{s}$ 、フレームレートは 4000fps であり、撮影解像度は 512×512 ピクセルである。ただし、隣接する 4 画素を組み合わせ、遅延を算出するため、得られる遅延分布画像は 256×256 ピクセルである。

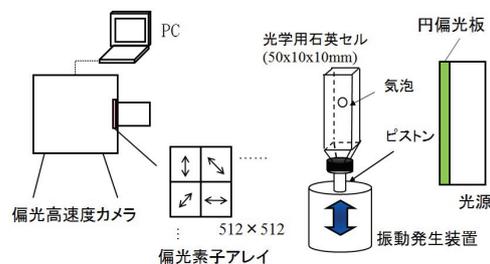


図 2 偏光高速度カメラによる 2次元観察

(3) 回転系における 2 気泡間の相互作用

図 3 に回転系での実験装置図を示す。供試流体で満たされた円筒型石英セル（外径 30mm 内径 28mm 長さ 55mm）に、 $2 \mu\text{L}$ の微小気泡を水平に気泡間距離 $L=3.5\text{mm}$ にて 2 個設置し、ゴム膜付きキャップで密閉した。

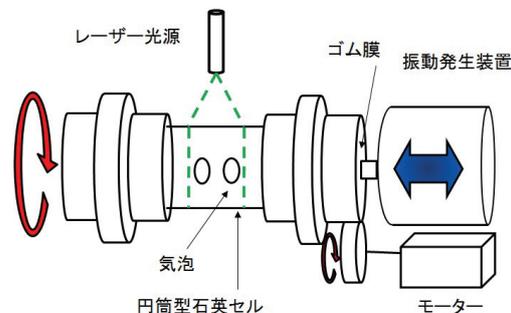


図 3 回転型圧力振動印加装置

次に、円筒セルを毎秒1回転させることにより、気泡に働く重力の影響を擬似的に排除した。また、振動発生装置のピストン先端に直径20mmの円形アクリル板を取付け、振動周波数200Hz 振幅0.38mmの圧力振動を気泡に対し、水平方向に印加した。さらに、気泡中心を通過するようにレーザーシート光(厚さ1mm, 幅10mm)を照射し、その様子をハイスピードカメラ(KEYENCE 製:VW-6000)により撮影した。この時、シャッタースピードは1/2000s, フレームレートは2000fpsである。

4. 研究成果

(1) 2次元偏光高速度カメラによる単一気泡近傍の遅延分布の測定

気泡径と気泡中心位置の3周期分の時系列変化を図4(a), (b)にそれぞれ示す。鉛直方向(●)と水平方向(+)の気泡径がほぼ等しいことから、気泡はほぼ真球形状が保たれながら、気泡中心位置は気泡収縮時に変化がみられた。膨張・収縮による気泡表面での最大剪断速度を真球モデルから算出すると約 500s^{-1} であり、気泡表面近傍には強い局所流れが存在することがわかる。

図5はその時の遅延分布である。図中の1は収縮直前の時刻であり、1/2000s毎に経過した図を順に示す。5は最も収縮した状態、10は最も膨張した状態の図であり、それぞれ図4(a)の番号に対応する。気泡収縮時の5に注目すると、気泡上部には小さな遅延が観察されたが、気泡下部には大きな遅延が観察された。遅延は応力の大きさに密接に関連しており、気泡界面と周囲流体との間に生じた変形をとらえていることから、収縮時にだけ気泡下部にnegative Wakeが出現したことを示唆する。これは、気泡がカスプ形状を呈する原因と考えられる。また、気泡側面より左

右両側の斜め下方向に伸びる青色の領域も観察された。これは、収縮によって気泡上部に供給される流れに伴うものと考えられる。一方、気泡が膨張する6-10では、気泡の周囲近傍の流体に遅延が現れるパターンに変化した。これは膨張に伴う二軸伸長変形をとらえたものと考えられる。このように、短時間で変化する流動様式を示すことが出来た。

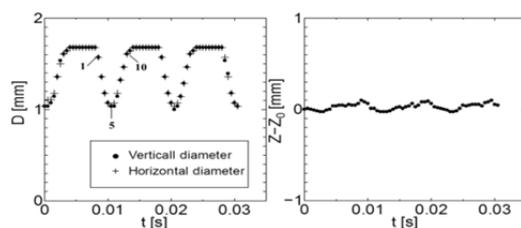


図4 (a) 鉛直方向と水平方向の気泡径の推移, (b) 気泡中心位置の推移

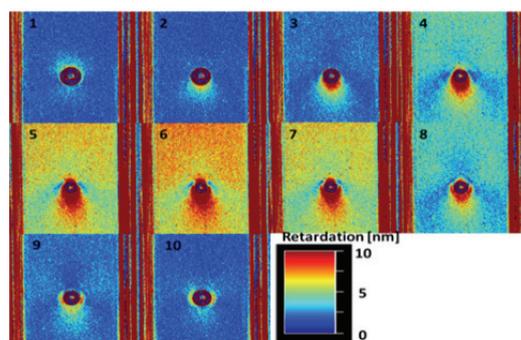


図5 100Hzの圧力振動場での気泡近傍における2次元遅延分布

(2) 2次元偏光高速度カメラによる2気泡近傍の遅延分布の測定

図6は、前述と同じ方法で撮影した200Hzの圧力振動場における2個の $2\mu\text{L}$ 気泡近傍の遅延分布画像であり、1/4000s毎に並べた。画像番号1~10は気泡の収縮過程を表し、収縮に伴い、全体的に遅延が増加した。画像番号11~20における気泡膨張時には、遅延が減衰する様子が読み取れる。次に、気泡径と膨張・収縮周期の関係を図7に示す。図7は3周期分のデータであり、図中の番号は図6と対応している。 t は実時間、 T は周期、

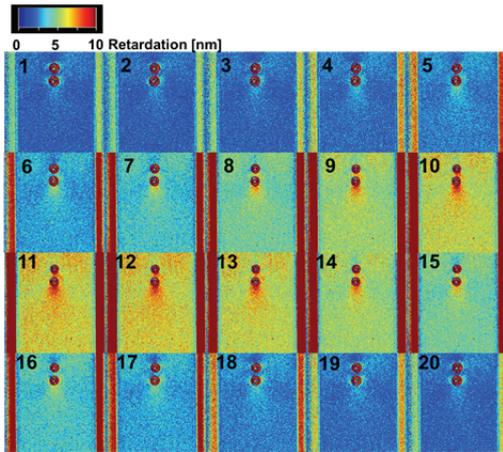


図 6 100Hz の圧力振動場での気泡近傍における 2 次元遅延分布

Z_0 は気泡径最小時における気泡中心位置, Z は気泡中心位置, D_u は上側気泡径, D_l は下側気泡径をそれぞれ表す. 気泡中心位置の変化量は下側気泡の方が大きい, これはセル下側から圧力振動を印加したためである. 周期的に変化する気泡径を水平直径と鉛直直径に分けて整理すると, 上側気泡の膨張時には水平直径 > 鉛直直径となり. 下側気泡の収縮時には鉛直直径 > 水平直径となった. このことから, 気泡は真球を維持せずに収縮・膨張したことが読み取れる.

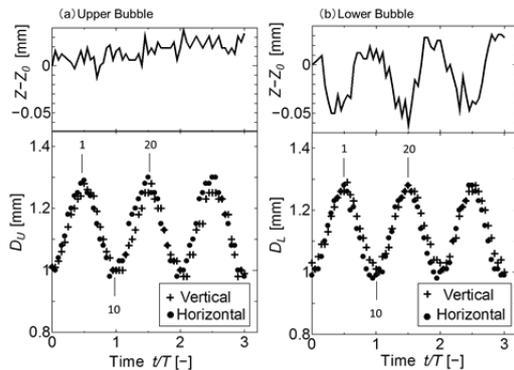


図 7 気泡中心位置 (上段) と気泡径 (下段) の周期的な変化. + は鉛直方向の気泡径, ○ は水平方向の気泡径を示す. 左側は上側気泡, 右側は下側気泡の結果である.

以下に結果を考察する. 気泡収縮時(図 6 画像番号 1~10)において, 下側気泡の下部と 2 気泡間に大きな遅延が見られる. 下側気泡下部については単一気泡と同じ Wake 構造によるものと考えられる. また, 気泡間の流体については, 気泡の収縮に伴い, 気泡間距離が増加し, 上下方向に一軸伸長流動が生じたことが考えられる. 気泡膨張時には気泡間距離は 0.35mm であり, 気泡収縮時に気泡間距離は 0.60mm まで増大した. 気泡間の流体のひずみ速度は 285s^{-1} であり, 強い一軸伸長流動の存在が確認された. 一方, 気泡上部側面での弱い遅延分布については, 上側気泡の収縮に伴い, 気泡上部に流体が回り込む流動が生じたためと考えられる. さらに, 分布図全域で遅延が増加した理由は, セル自体のひずみを検出したことが考えられる. 気泡膨張時(図 6 画像番号 11~20)において, ひずみは緩和し, 全体的に遅延が減衰していくが, 気泡側面において, 遅延が生じたことが確認される. これは気泡の膨張に伴う二軸伸長流動による応力の変化を検出したものと考えられる. また, 膨張時の 2 気泡間の流体では遅延が観測されないことが分かった. その理由として, 気泡の膨張により 2 気泡の界面が互いに接近し, 2 気泡間の流体を排出する流れの影響によるものと考えられる. このように, 収縮時, 膨張時における 2 気泡の近傍における流動様式を整理することが出来た.

(3) 回転系における 2 気泡間の相互作用

前述の石英セルを用いた実験では, 2 つの気泡は常に上向きに自然上昇しており, 気泡の周囲には流れ場が形成されている. そこで, 重力(浮力)の影響を排除するために回転型セルを用いた実験を行った. 実験結果は, 図 8 に示す. 2 気泡は圧力振動印加に伴い, 振

動印加部と反対方向に移動することが確認された。さらに、2気泡は接近し、最終的には振動印加部側の気泡が引き寄せられるように移動し、合一した。このことから、下側からの圧力振動印加において、下側気泡の上昇速度を促進させる要因は気泡近傍の剪断による粘度低下だけではなく、2気泡間の流動による相互作用が重要であることが明らかになった。

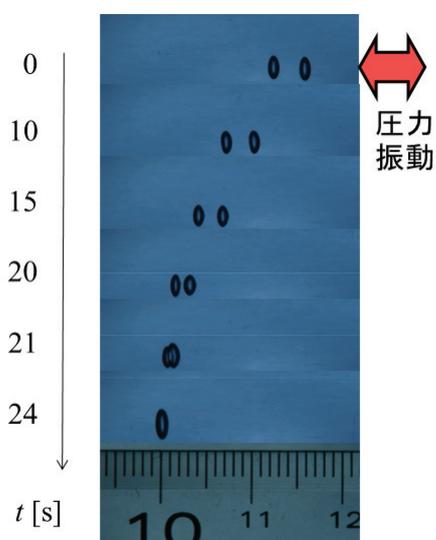


図7 疑似無重力場における圧力振動場における2気泡の挙動。2 μ L+2 μ Lの気泡を設置し、200Hzの圧力振動を印加

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] なし

[学会発表] (計5件)

・ S. Iwata, A. Nakayama, T. Takahashi (Nagaoka Univ. of Tech.), T. Oonuma (Photron, Ltd.), Y. Yoshitake (Nagaoka Univ. of Tech.), R. Nagumo, and H. Mori, Flow Dynamics around a Tiny Bubble under Pressure-oscillating Field by the High Speed Polarization Camera, 6th Pacific Rim Conference on Rheology, Melbourne (Australia), July 20th-25th, 2014

・ S. Iwata, A. Matsumoto, T. Takahashi (Nagaoka Univ. of Tech.), Y. Yoshitake (Nagaoka Univ. of Tech.), R. Nagumo, and H. Mori, Effect of Elasticity on a Tiny Bubble Shape under Pressure-oscillating Field, 6th Pacific Rim Conference on Rheology, Melbourne (Australia), July 20th-25th, 2014

・ 中山晃伸, 岩田修一, 森秀樹, 南雲亮, 高橋勉(長岡技科大), 大沼隼志(宇都宮大 CORE), 圧力振動場における複数気泡近傍における2次元偏光計測, 第91期日本機械学会流体工学部門講演会、九州大学伊都キャンパス、2013年11月9,10日

・ 松本篤樹・岩田修一・南雲亮・森秀樹, 粘弾性流体流路内に導入された複数気泡に及ぼす圧力振動の影響, 化学工学会第45回秋季大会, 岡山大, 2013年9月16日~18日

・ 松本篤樹, 野口真宜, 岩田修一, 南雲亮, 森秀樹, 圧力振動場に設置された気泡の形状に及ぼすレオロジー特性の影響, 日本機械学会2013年度年次大会, 岡山大学, 2013年9月9~11日

[図書] (なし)

[産業財産権] なし

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田修一 (IWATA, Shuichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00293738

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 20216732