

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20403

研究課題名（和文）非定常応力場の可視化による非ニュートン流体中気泡の流動構造解明

研究課題名（英文）Flow structure of bubbles in non-newtonian fluid by visualization of unsteady stress field

研究代表者

楠野 宏明（Kusuno, Hiroaki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・特任助教

研究者番号：90966029

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、主応力差に比例するであろう位相差と方位角を検出できる偏光計測により実験的に応力場を計測し、非ニュートン流体中を上昇する気泡の流動構造、特に境界層と後流の発達メカニズムから順に非ニュートン流体効果を議論する。まず、偏光計測手法を用いたニュートン流体中気泡周りの応力計測結果の妥当性を詳細に検証した。数値解析と比較し、固体と異なる軸対称の再構成手法を用いることで平面応力の導出を行った。また、気泡の上昇速度が著しく変化する粘弾性流体中の気泡周りの偏光計測検証を行うために様々な粘弾性モデルを適用可能な数値解析コードを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
流体の偏光計測手法によって応力積算値を可視化し、軸対称問題であればそれを再構成することで平面応力場を導出することができれば、様々な流体計測が可能になる。また、非ニュートン流体においても、流動構造の違いによって偏光計測のから予想される流動場が異なることから、様々な非ニュートン流体の流動特性の計測に利用できると思われる。気泡周りの流動構造を実験的に観測したことにより、その結果は気泡など多くの粘弾性流体特有の流動現象のメカニズム解明や数値解析の検証に用いることができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the stress field in the vicinity of a bubble was experimentally measured using a polarization measurement technique, which can detect the phase retardation and azimuth angle that would be proportional to the principal stress difference, and the non-Newtonian fluid effect was discussed in turn from the flow structure of a bubble rising in a non-Newtonian fluid. The validity of the stress measurement results around bubbles in Newtonian fluid using a polarization measurement technique was verified in detail. The results were compared with numerical analysis, and plane stresses were estimated by using an axisymmetric reconstruction method that differs from that used for solids. In addition, a numerical code that can be applied to various viscoelastic models was developed to validate the polarization measurement around bubbles in viscoelastic fluids with significantly varying bubble rise velocities.

研究分野：混相流

キーワード：気泡 非ニュートン 偏光計測

1. 研究開始当初の背景

気泡を含む流れは気泡塔やギヤ攪拌など故意・無意に関わらず様々な産業機器に混在しており、気泡スケール(気泡の上昇速度など)・気泡群スケール(気泡同士の合体など)の力学を理解することが産業機器スケールの性能向上の鍵となる(Risso et al., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2018)。

気泡群スケール流動構造の知見は、純液体・ニュートン流体を仮定することで進展している(Hallez & Legendre, *J. Fluid Mech.*, 2011)。一方で、現実存在する気泡を含む流れのほとんどは、気泡スケールでさえも次のような現象が混在しており問題が複雑化している。

1. 気泡の汚染：液体に不純物が混在すると気泡界面に付着し境界条件が滑り無しに遷移する。
2. 気泡の変形：界面で生成される渦度の大きさが曲率の変動によって変わる。
3. 非ニュートン流体：せん断と弾性による気泡近傍の応力と後流が変わる。

以上を包括した気泡スケールの知見は成熟していない(Zenit & Feng, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2018)。

2. 研究の目的

上記背景から、“軸対称応力場測定による、非ニュートン流体中を上昇する単一球形気泡の境界層・後流構造の解明”を本研究の開始当初の目的とした。具体的には、光弾性法を用いて、上昇する球形気泡の応力場を実験的に測定し、後流の発達を議論する予定であったが、非ニュートン流体の定量評価が研究期間内では困難だと判断し、定性的判断が可能な粘弾性液体で起こる Bubble Velocity Discontinuity を対象に議論する。また、議論に必要な光弾性法の実験検証・数値解析検証が達成されていないため、実験で詳細を解析できる手法を確立・検証する。

3. 研究の方法

本研究では(1)気泡生成装置の構築・実験、(2)光弾性法を用いた軸対称応力場の計算、(3)軸対称数値解析と実験の比較検証、を経て(4)非ニュートン流体中を上昇する気泡の流動構造解明を図る。

(1)

素過程解明を達成するために、壁と十分に離れ、静止液体中に、1つのみ、球形の、ミリサイズ気泡を発生させる。空気を含む管に半周期分の圧力波を与えることで、管から発生する気泡数と径を制御する手法を用いる(笠井 他, 混相流, 2015)。

(2)

緑色の光を光源-直線偏光板-1/4波長板と通過させ、流動計測対象を計測する。その後バンドパスフィルタを経由した光を偏光計測カメラで撮影する。実験で得られる結果は、流動計測対象を光軸方向に積算した値になるため、これを軸対称へ変換する手法を考察する(図1)。

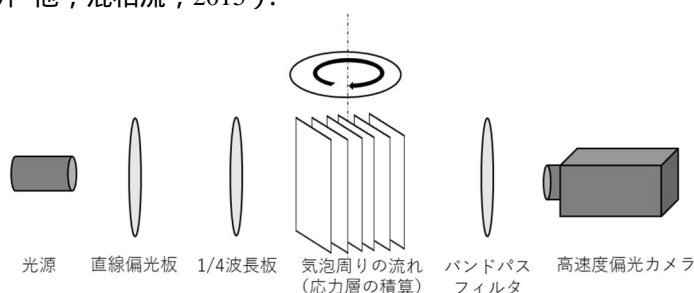


図1 偏光計測の実験装置

(3)

Open Source の Basilisk を用いて、固体球周りの数値解析を行う。解析結果を実験結果と比較することで、本研究で用いる偏光計測の性能の評価と軸対称変換の手法を考察する。

(4)

粘弾性流体中を上昇する気泡を偏光計測し、周囲流動場、特に後流の形成を調査する。

4. 研究成果

本研究課題では、初めにニュートン流体を対象として実験と数値解析を比較することで偏光計測の性能を検証した。液体を光弾性体とするために必要な粒子による界面汚染の影響を考慮し、その影響のない固体球を落下させることで、物体周囲の応力場を取得し、Basilisk を用いた数値解析と比較をした。結果、物体の境界層を解像できることが示され、また超音波処理など適切な粒子懸濁液の取り扱いを行うことで、応力光学則に則った応力分布を取得できることを明らかにした(図2)。

粘弾性流体中の気泡においては、Bubble Velocity Discontinuity 前後の気泡を観測すると、従来確認されていた negative wake などに代表される気泡後部での現象だけが起きている訳ではなく、

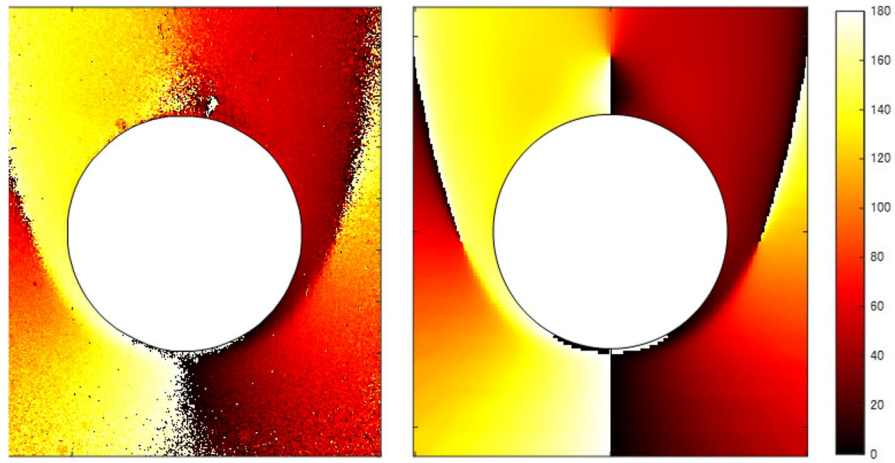


図2 ニュートン流体中を落下する固体球の偏光計測結果（左）と，数値解析結果に光学応力則を対応させた解析結果（右）．

気泡の前方から既に相違点が見られ，側面にて液体に混ぜた微粒子の配向が大きく変わることが明らかとなった．今後はより定量的な粘弾性流体の解析が課題となる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 楠野宏明
2. 発表標題 偏光計測による単一気泡周りの流動構造解析
3. 学会等名 流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki KUSUNO
2. 発表標題 Polarization measurement of flow structure around a moving bubble/solid in a quiescent liquid
3. 学会等名 International conference on multiphase flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楠野宏明
2. 発表標題 偏光計測による界面活性剤水溶液中を上昇する気泡周りの流れ可視化
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki KUSUNO
2. 発表標題 How does the flow structure of a gradually contaminating bubble evolve
3. 学会等名 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://sites.google.com/view/tagawalabjp>

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

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