

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14975

研究課題名（和文）ライトフィールドカメラを用いたサブミリ気泡流の3次元流場計測手法開発

研究課題名（英文）Development of three-dimensional flow field measurement method for bubbly flow using light-field camera

研究代表者

拾井 隆道（Hiroi, Takamichi）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60734233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的はライトフィールドカメラによる気泡流の3次元流場計測手法（LF-PIV）を開発しサブミリ気泡まわりの渦構造を明らかにすることである。技術的な課題によりLF-PIVを実現できなかったため、検証用に開発した2次元PTV/シャドウグラフィシステムにより流路内の速度変化に対する気泡および周囲流場の計測を行った。その結果気泡による抵抗低減に寄与する壁乱流渦の抑制および等方性の乱流渦の発生は気泡径に依らず生じるが、大気泡は浮力により壁面近傍を高速で移流し渦を発生させ抵抗増加が生じることが分かった。これより気泡径の変化により気泡分布が変化し、摩擦抵抗が変化するという基本構造が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、気泡による摩擦抵抗変化の速度影響の基本構造が明らかになった。気泡による抵抗低減現象においては、実験装置による抵抗低減効果の違いを説明することが出来ていなかったが、本研究の成果により本現象の統一的解釈が進むものと考えられる。また、本成果はシミュレーションの高度化にも寄与し、本現象を利用した空気潤滑船の性能向上にも資するものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to develop a three-dimensional flow field measurement technique (LF-PIV) of bubble flow using a light field camera to reveal the vortex structure around sub-millimeter bubbles. Since LF-PIV could not be realized due to technical issues, a two-dimensional PTV/shadowgraphy system developed for validation was used to measure bubbles and ambient flow fields for velocity changes in the flow path. As a result, it was found that the suppression of wall turbulent eddies and the generation of isotropic turbulent eddies, which contribute to drag reduction by bubbles, occur regardless of the bubble diameter, but that when the bubble diameter is large, buoyancy forces cause the bubble interface to advect near the wall surface at a high speed, generating eddies and increasing drag. This clarifies the basic structure of frictional resistance, which changes as the bubble diameter changes and the bubble distribution changes.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：PIV 気液二相流 摩擦抵抗低減

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

乱流中に気泡を投入することにより摩擦抵抗が減少するという現象は Madavan<sup>1)</sup>らにより報告され、以来多数の研究が行われている。また実際の船舶においても抵抗低減効果が実証されているが、統一的な抵抗低減メカニズムは未だ明らかになっていない。メカニズムの一因として、気泡の変形、運動が乱流の様々なスケールの渦に影響を及ぼし、抵抗が低減している可能性が考えられる。このため、抵抗低減メカニズムを解明するためには気泡と乱流の渦構造の干渉を調査する必要がある。

気泡流中の乱流の渦構造を調査するためには、3次元空間における速度3成分を計測することが出来る Tomo-PIV (Tomographic Particle Image Velocimetry) の使用が考えられる。一般的な Tomo-PIV は複数のカメラを使用し、多方向から計測領域を撮影して空間輝度分布を取得し PIV 解析を行う。複数のカメラで視野がオーバーラップした領域が解析可能な領域となるため、一般的な Tomo-PIV を気泡流に適用すると気泡のような物体近傍では計測が出来ない領域が生じ、気泡周囲の渦構造を評価することが難しくなる。一方、近年単一のカメラで空間の輝度分布を取得可能なライトフィールドカメラ (以下、LFC) が製品化されている。LFC は多数の視野を持つ画像を生成するため、一般的な Tomo-PIV よりも物体近傍の撮影が可能である。これより LF-PIV を気泡流に適用できれば、気泡と渦の干渉を詳細に調査することが可能となる。一方気泡流への適用のためには気液界面におけるレーザ反射、界面の認識方法などの課題を解決する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ライトフィールドカメラによる気泡流の3次元流場計測手法を開発し、サブミリ気泡まわりの渦構造を明らかにすることである。

本研究の学術的独自性は、気泡流中の Tomo-PIV 計測をライトフィールドカメラにより実現する点である。LFC は単相流中の Tomo-PIV 計測に用いられた例があり、通常の Tomo-PIV と同等の精度が得られたと報告されている<sup>2)</sup>が、気液界面の認識方法などの課題により気液二相流中の Tomo-PIV 計測に使用された例は存在しない。

本研究では気泡と乱流の渦の干渉メカニズムが解明される。これにより乱流渦の発生を最小化する気泡径が明らかになるため、抵抗低減効果の飛躍的な向上が実現され、船舶の輸送効率向上、国際海運からの温室効果ガス削減に大きく寄与する。また気泡流の乱流エネルギーをモデル化することが可能となり、数値モデルの高度化が実現される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 気泡流中 LF-PIV の開発

ライトフィールドカメラを用いた気泡流中の Tomo-PIV の開発を行う。開発項目は、Tomo-PIV、気泡の3次元形状計測、圧力場計測である。また開発にあたっては、既に開発・利用している液相流場気泡形状の同時計測システム (PTV/Shadowgraphy システム) と比較検証を行う。

#### (2) 気泡と気泡周囲の渦構造との関係調査

開発した LF-PIV 技術、また既に開発・利用している1断面の液相流場気泡形状の同時計測システム (PTV/Shadowgraphy システム) などを用いて、水平チャンネルにおいて断面内平均流速  $U_m$  を変化させることにより気泡径を変化させた際の気泡形状と周囲流場の調査を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 気泡流中 LF-PIV の開発

本研究では、まずライトフィールドカメラ (Raytrix GmbH R5 Mono 3D Light-Field Camera, Resolution 2048 × 2048 px, Reconstructed image effective resolution 1024 × 1024 px) を導入した。水平チャンネルの上面から気泡流を撮影した画像を図1及び図2に示す。一方、使用した画像の取り込み用の Frame Grabber とカメラとのデータ転送の技術的な問題により詳細な撮影条件の設定が出来ず、これを解決することが出来なかったためその後の開発に進むことが出来ず、本研究では気泡流中での LF-PIV 計測を実現することが出来なかった。

#### (2) 気泡と気泡周囲の渦構造との関係調査

PTV/Shadowgraphy システム (図3) を用いて、抵抗増加が生じる断面内平均流速  $U_m = 1$  [m/s] から抵抗低減が生じる  $U_m = 5$  [m/s] にかけて計測を行った。得られた気泡画像 (図4) から、速度の増加とともに気泡径が小さくなること、気泡径が大きい場合は気泡が壁面に沿って移流しているのに対し、気泡径が小さくなると流路全体に拡散することがわかった。また、 $U_m = 1$  [m/s] において液相および気泡界面速度計測を行った<sup>3)</sup>。その結果、大気泡は境界層厚さ方向に大きさを持つため、壁面近傍では気泡界面が高速で移動し、それに誘起され渦が発生<sup>4)</sup>、液相速度の加速し抵抗増加が生じることが明らかになった (図5)。

更に抵抗低減効果の速度影響の詳細計測を実施し<sup>5)</sup>、流場計測結果と総合して気泡とその周囲の渦構造が速度によってどのように変化するのか考察した。気泡による抵抗増加および抵抗低減が生じる $U_m = 1.5$  [m/s]の流場計測結果では、両条件においてレイノルズ応力の低下および乱流強度の増加が確認された。これより、気泡による抵抗低減に寄与する壁乱流渦の抑制および等方性の乱流渦の発生は気泡径に依らず生じているが、気泡径の変化により気泡の分布が変化して、その抵抗低減への影響が変化するという基本構造が明らかになった。

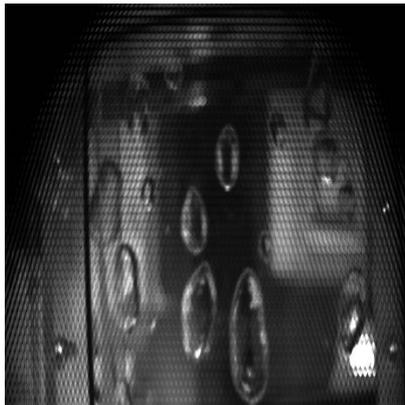


図1 LFCで計測された気泡画像 ( $U_m = 0.5$ [m/s])



図2 LFCで計測された気泡画像 ( $U_m = 1.0$ [m/s])

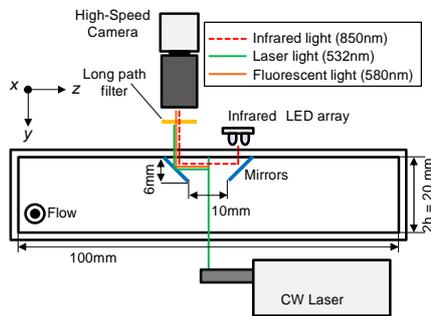


図3 PTV/Shadowgraphy システム概要図

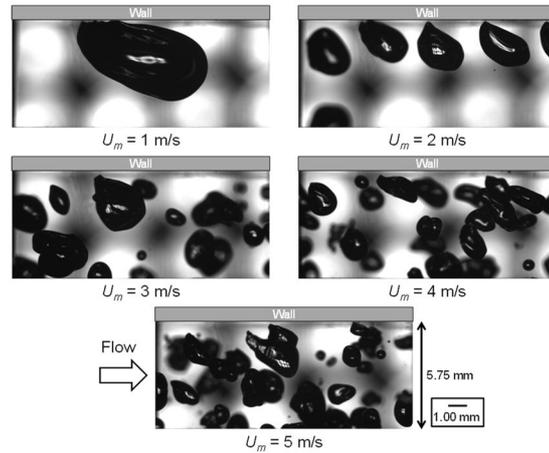


図4 気泡画像 ( $U_m = 1.0$ [m/s])

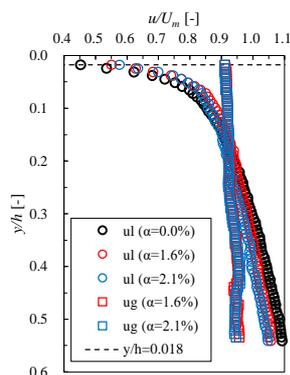


図5 主流方向液相および気泡界面速度分布

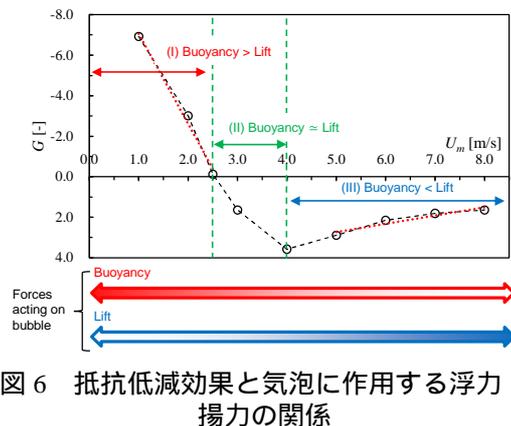


図6 抵抗低減効果と気泡に作用する浮力・揚力の関係

参考文献

- 1) N. K. Madavan, *et al.*, "Reduction of turbulent skin friction by microbbles", *Physics of Fluids*, 27, pp.356-363 (1984).
- 2) S. Shi, *et al.*, "A detailed comparison of single-camera light-field PIV and tomographic PIV", *Experiments in Fluids*, 59:46 (2018).
- 3) 拾井隆道ほか, "摩擦抵抗増加をもたらす大気泡を含む水平チャンネルにおける液相および気泡界面移動速度計測", *混相流シンポジウム 2021* (2021).

- 4) S. Kim, *et al.*, “Direct numerical simulation of frictional drag modulation in horizontal channel flow subjected to single large-sized bubble injection”, *International Journal of Multiphase Flow*, 145, 103838 (2021).
- 5) 拾井隆道ほか, “水平チャネルにおける気泡による摩擦抵抗変化の速度影響調査”, *混相流シンポジウム 2022* (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 拾井隆道、濱田達也、高木洋平、川北千春
2. 発表標題 摩擦抵抗増加をもたらす大気泡を含む水平チャンネルにおける液相および気泡界面移動速度計測
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 拾井隆道
2. 発表標題 水平チャンネルにおける気泡による摩擦抵抗変化の速度影響調査
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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