

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04255

研究課題名(和文) 混相乱流せん断応力計を用いた粗密分布気泡による摩擦抵抗低減効果の最大化

研究課題名(英文) Maximization of frictional drag reduction effect by coarseness and fineness distributed bubbles using multiphase turbulent shear stress meter

研究代表者

大石 義彦 (Yoshihiko, Oishi)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90617078

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)：個々の気泡や気泡周りの流れが観測可能な高周波応答の流体摩擦の測定が確立すれば、摩擦抵抗を増加させる要因を制御することができる。本研究課題では混相流における高時間分解能のせん断応力測定法を独自に確立し、気泡流の条件で実証することを目的とした。本研究課題で提案するレーザーせん断応力計の精度を向上させ、気泡混入時のせん断応力の計測に成功した。瞬時のせん断応力の変動のみならず平均値でも計測できることを保証した。乱流イベントの抽出方法に挑戦し、条件付きサンプリング法を追加したアルゴリズムを加え、乱流イベントの変化を解析した。これにより気泡流においてバースト現象への寄与が高いことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は先進的なせん断応力測定を介して、流体の輸送に関する問題を解決ための技術基盤を構築した。乱流中における気泡流という複雑な流動場の高時間分解での計測により摩擦抵抗低減を効果的に実現するためのメカニズム解明に寄与する。本課題解決により、船舶における摩擦抵抗低減の最大化に最も貢献する。せん断応力は船舶の輸送効率を決定する対水速度計測の目となり、自動化など波及効果が高い。さらに、乱流中における気泡流の測定が可能になったことで、非ニュートン流体など様々な流体の直接測定の可能性を広げた。

研究成果の概要(英文)：If we can establish a high-frequency-response fluid friction measurement that can observe individual bubbles and the flow around them, we can control the factors that increase the frictional resistance. The purpose of this research project is to independently establish a shear stress measurement method with high temporal resolution in multiphase flow and to demonstrate it under bubbly flow conditions. A high time-resolved laser shear stress meter was developed, and the shear stress when bubbles were mixed was successfully measured. We ensured that not only instantaneous fluctuations in shear stress but also average values could be measured. We challenged the extraction method of turbulence events, added an algorithm with conditional sampling, and analyzed changes in turbulence events. From this, it was found that the bubbly flow greatly contributes to the burst phenomenon.

研究分野：流体工学

キーワード：抵抗低減 気泡 せん断応力 省エネルギー技術 船舶 乱流 乱流境界層

1. 研究開始当初の背景

船舶の摩擦抵抗を低減させる技術で、実用化されているものは船底に気泡を注入する技術である。すでに船舶で空気潤滑法として採用されており、実績を上げつつある。能動的な気泡を周期注入すると摩擦抵抗の低減効果が向上することが知られている。今後はこの制御性を高められるかが重要となる。つまり、注入された気泡群がどのように流体内に構成され、乱流組織構造に対してどのように効果的に摩擦抵抗低減へと導くのかを探究する必要がある。これまで、実証するために水平チャネル流れの実験や模型船による曳航水槽実験が行われてきたが、研究者にとって必要なツールが満たされていなかった。これは気泡が光や超音波を遮るため測定が困難であり、成果の上がりにくい混相乱流のせん断応力の計測開発を避けているためである。気泡が流れる乱流のせん断応力を直接計測することで、どのような気泡を注入すれば最適な抵抗低減が可能か知ることができる。

2. 研究の目的

解決すべき課題は、気液二相乱流境界層を過渡的發展状態で覆うことにより低減効果が永続的に得られるという仮説である。注入される気泡は、流体の速度によって気泡サイズが異なり、この仮説を検証するには、せん断応力計により直接確認しなければ分からない。乱流構造のプロセスであるバースト現象そのものをせん断応力計から直接計測できる方法を模索し、完成に至った(特願 2018-064099)。この抵抗低減促進効果をさらに拡大し、安定的に長距離にわたり確保するために、ポイドの波動を能動的に生成して制御する必要がある。これは、局所ポイド率を変化させようとする周期的気泡注入法では低周波でしか実現できず、高速になるほど抵抗低減効果が下がるためである。そこで、摩擦抵抗低減の効率を最大限に引き上げるために、ポイド波を二体干渉モデルに基づき、気泡サイズで制御することにより多重スケール構造より制御された波動を生成し、高周波数応答のせん断応力計を中心とした複合計測により、ことを研究目的とする。

3. 研究の方法

保有するレーザーせん断応力計に対して、センサ部をダウンサイジングし、ミリオーダーの空間を測定の実証実験を行う。本装置の高周波の移動物体の検出の能力を活用した場合、2体気泡間干渉の時間応答のオーダー  $0 (10^2)$  Hz、気泡変形のオーダー  $0 (10^{-3})$  Hz のそれぞれの要素を解明する。独自開発したせん断応力計の特徴が発揮される。

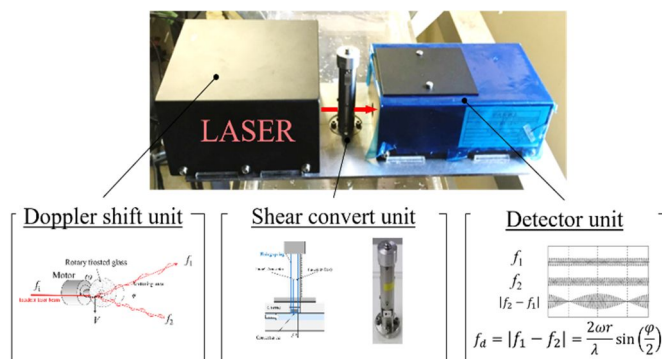


図1 申請者が開発した光学受信装置を装着したせん断応力計

4. 研究成果

本研究では、レーザードップラー流速測定の利用したスライド式振り子を備えたせん断応力計を確立し、気泡流中の高時間分解能測定を実現した。せん断応力の時系列に可変間隔時間平均法 (VITA) を適用した。せん断応力は、乱流におけるバースト間隔中に増加します。これは、バーストイベントが大きな乱流エネルギーの輸送を強化する。特に、潜伏現象のイベントの後、せん断応力はより大幅に上昇した。図は、VITA からせん断応力へのプロセスと、 $Re = 2.9 \times 10^4$  でのバースト現象のイベント中の瞬間のせん断応力 (グレーの線) のサンプルと平均のせん断応力 (太線) を示している。VITA を適用した結果に基づいて、乱流バースト現象のイベントが気泡流内でどのように変更されるかを評価した。これにより、気液二相乱流境界層を過渡的發展状態で覆うことにより低減効

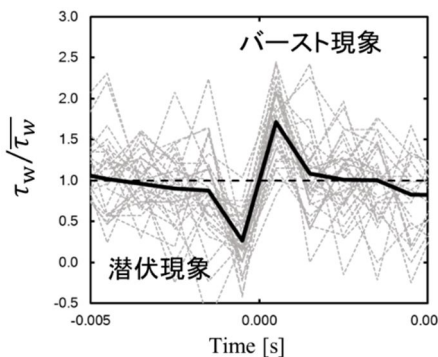


図2 せん断応力計で捉えた瞬時のせん断応力変化と乱流イベント

果が永続的に得られるという仮説があったが、せん断応力計から直接、乱流構造のプロセスである潜伏現象とバースト現象のそれぞれの乱流イベントを評価することにより、抵抗低減促進効果をさらに拡大した。これにより、安定的に長距離にわたり確保するために、ポイドの波動を能動的に生成して制御できる可能性がひろがった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka Taiji, Oishi Yoshihiko, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Kawakita Chiharu	4. 巻 252
2. 論文標題 Frictional drag reduction caused by bubble injection in a turbulent boundary layer beneath a 36-m-long flat-bottom model ship	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 111224 ~ 111224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.111224	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 TANAKA Taiji, OISHI Yoshihiko, PARK Hyun Jin, TASAKA Yuji, MURAI Yuichi, KAWAKITA Chiharu	4. 巻 88
2. 論文標題 Frictional drag reduction by bubble injection in turbulent boundary layers: Experiment with long model ship and full-scale estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 21-00297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00297	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 Tanaka Taiji, Oishi Yoshihiko, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Kawakita Chiharu	4. 巻 239
2. 論文標題 Repetitive bubble injection promoting frictional drag reduction in high-speed horizontal turbulent channel flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 109909 ~ 109909
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2021.109909	査読の有無 無
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 Oishi Yoshihiko, Murai Yuichi, Tasaka Yuji	4. 巻 86
2. 論文標題 Wall shear stress modified by bubbles in a horizontal channel flow of silicone oil in the transition region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 108748 ~ 108748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108748	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 -

[学会発表] 計17件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yoshihiko Oishi, Hyun Jin Park, Yuichi Murai, Yuji Tasaka, Hideki Kawai
2. 発表標題 ampling scheme for wall shear stress in bubbly channel flow by variable-interval time-averaging method
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下村海斗, 大石義彦, 田中泰爾, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 水平矩形チャネルの空気潤滑法における気泡注入器ノズル径による影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiji Tanaka, Hyun Jin Park, Yoshihiko Oishi, Yuji Tasaka, Yuichi Murai, and Chiharu Kawakita
2. 発表標題 Bubbly drag reduction promoted by generating void waves in high-speed turbulent channel flows
3. 学会等名 The 12th Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshihiko Oishi, Hyun Jin Park, Yuichi Murai, Yuji Tasaka, and Hideki Kawai
2. 発表標題 Application of variable interval time averaging method to waveform of wall shear stress in bubbly channel flow
3. 学会等名 The 12th Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 間欠的気泡注入による摩擦抵抗低減効果の長距離持続化
3. 学会等名 第26回 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下村 海斗, 林 拓矢, 大石 義彦, 河合秀樹
2. 発表標題 水平チャンネル流における異径気泡流による壁面せん断応力の比較測定
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会, 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林拓矢, 藤井夏海, 大石義彦, 田中泰爾, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 光ヘテロダイン式デュアルビーム法を用いた気泡流の乱流せん断応力計測
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井夏海, 大石義彦, 田中泰爾, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 濱田達也, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 長尺模型船における人工ボイド波の液相支配領域での局所剪断応力分布の評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 乱流境界層への気泡注入による摩擦抵抗低減効果の下流持続性
3. 学会等名 第25回 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 36m長尺平板模型における間欠の気泡注入による空気潤滑法の高効率化
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 朴炫珍, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 高速チャンネル乱流におけるポイド波生成による壁面せん断応力の変調
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中泰爾, 朴炫珍, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 36m 長尺平板におけるポイド波生成による摩擦抵抗低減効果の促進
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石義彦
2. 発表標題 水平チャンネル乱流における気泡挙動
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石義彦, 中村隼人, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 濱田達也, 若生大輔, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 36m長尺平板を用いた気泡による摩擦抵抗低減実験における人工ボイド波の可視化
3. 学会等名 第48回 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石義彦, 藤江夏海, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 濱田達也, 川北千春
2. 発表標題 36m長尺平板における気泡抵抗低減時のせん断応力の変動
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 村井祐一, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 大石義彦, 永田晴紀
2. 発表標題 北海道大学・室蘭工業大学 f 3 センターグリーン船舶ユニット
3. 学会等名 日本機械学会北海道支部 第58回講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 林拓矢, 藤井夏海, 大石 義彦, 河合秀樹
2. 発表標題 チャンネル流れにおける乱流せん断応力の計測
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

室蘭工業大学 流体工学研究室 <a href="https://www.facebook.com/FELMuroran">https://www.facebook.com/FELMuroran</a> 室蘭工業大学研究者データベース RD-Soran 大石義彦 <a href="https://rdsoran.muroran-it.ac.jp/html/100000068_ja.html">https://rdsoran.muroran-it.ac.jp/html/100000068_ja.html</a> Research Map <a href="https://researchmap.jp/read0136817/?lang=en">https://researchmap.jp/read0136817/?lang=en</a> Web of Science <a href="https://www.webofscience.com/wos/author/record/C-4717-2017">https://www.webofscience.com/wos/author/record/C-4717-2017</a>
---

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