

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18006

研究課題名(和文)全混相流場対応の高時間分解せん断応力計の開発と摩擦抵抗低減メカニズムの解明

研究課題名(英文)Development of high-time-resolution shear stress sensor for multi-phase flow and mechanism of drag reduction using the sensor

研究代表者

大石 義彦(Oishi, Yoshihiko)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：90617078

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)：本研究は局所せん断応力を高時間分解能でかつ単相の流体のみならず混相流のせん断応力を測定可能にした応力計の開発と混相流応力の正確な指標を作る目的にレーザー応力計の設計を目指した。本研究では単相流におけるチャンネル壁面せん断応力測定を行った。チャンネル流れについて十分な実証実験を行い、曳航水槽実験による船模型実証実験を実施した。チャンネル実験の実証実験は誤差15%以内の目標を達成した。曳航水槽実験ではせん断応力計の3種類の応力範囲の異なるセンサの実証実験を行い、応力計として使用可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel shear stress meter using principle of laser Doppler velocimetry to examine different time scale effects in phenomena of frictional drag reduction by injecting bubbles into turbulent boundary layer. The realized sampling frequency of the stress meter is 500 kHz and is high enough to sense effects of individual passages of bubbles beneath a sensor in the stress meter. Applicability of the shear stress meter was examined in horizontal turbulent channel flows and the results showed good agreement with Dean's curve of the friction coefficient for the turbulent channel flows even with a short measurement time, 4 s. The measurement also indicated measurable range of the stress meter determined by selection of a spring inside the meter. A preliminary test of the stress meter in bubbly flows under uncontrolled conditions of bubble injections provided reasonable results of friction coefficient.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 乱流 抵抗低減 せん断応力 気泡

### 1. 研究開始当初の背景

研究課題の研究動機は国内のエネルギー課題の一つを担う海運事業の問題解決に尽きる。造船技術の中でも先進技術となるのは、エコシップのような技術的な解決である。申請者が所属する室蘭は古くから造船の町として栄えた経緯があり、このような独自の海上輸送技術が新たにここで開拓されることにより再び地域発の世界最先端技術を生み出されると期待する。

気泡による摩擦抵抗低減技術は1975年に、壁面乱流境界層内に微小気泡を注入すると摩擦抵抗が減少することが初めて文献に登場した(McCormick & Bhattacharyya, 1975)。理想的な条件では80%もの抵抗低減率が得られる(Deutsch, 2001)。この効果は、大型船舶や長距離パイプラインの抵抗低減技術として活発な実用化研究に発展している。実際に船舶に適用した例では、正味低減効果が得られることが確認された(児玉ら, 2004)。これらの研究成果により、摩擦抵抗の低減法の中に乱流境界層に気泡を注入し抵抗低減効果を得る空気潤滑法が実用化段階に入った。この技術開発ペースで行けば、世界中の主要な大型船舶に応用することにより、年間4000万トンもの二酸化炭素排出が抑制できる(NEDOにおいて申請者らのグループが発表, 2008年の報告書)。さらにその後、国交省や国際海事機関(IMO)でも2050年までに現在の海運部門の二酸化炭素排出量を現在の50%にまで抑制するという数値目標が宣言された。このように急展開するエネルギー環境開発事業の中、微小気泡による摩擦抵抗低減技術は、その主幹技術として国内外から大きな期待を集めるに至っており、海運分野の省エネ・温暖化ガス排出削減の技術開発における大きな責任を担っている。しかし申請者らが関与して進められた2004~2007年までの実船による応用試験の結果、設計どおりの摩擦抵抗低減が実現されていないことが判明した。特に下流域では抵抗低減の作用が失われ、気泡と乱流が無秩序に干渉する結果、再現性に乏しい性能しか得られないことが明らかとなった。このことは世界の造船・海洋工学者を落胆させ、将来の技術展開性に黄色信号が点灯し始めた。いま、この問題点を解決する、まったく新しい技術が求められ、そのため大学等の基礎研究機関に再び、新現象の発見とそれを活用する新技術の提案が期待されている。特に、造船や海洋工学の専門家だけでなく、高度に複雑な不規則構造をもつ混相乱流(multi-phase turbulent flow)の流れ制御に精通する専門家に、将来展開が委ねられている状況にある。

### 2. 研究の目的

船舶の底面に間欠的な気泡注入を行うことにより何故、高い効果の省エネルギーが実現できるのか。この科学的追求心こそが、本技術の実用化と応用範囲の拡張をもたらす。

気泡群( )をパルス的に船底に注入したときの、船体に作用する摩擦抵抗( )の時間応答である。小さな で大きな の低下を引き出すことが技術の実用化を促す。幸い、この原理は高レイノルズ数ほど確実に効果をもつことになる。そこで高いレイノルズ数の乱流せん断層で、微細気泡を含む境界層がどのような時空間構造をもつかを細密に調査することで、その答えが明らかとなる。これを実現するため、本研究グループがもう一つの専門としている高時空間分解能型 PIV システムの製作により、その高度に複雑な混相乱流境界層の内層構造を明らかにすることで解決を図る。これにより省エネを実現する乱流摩擦抵抗低減メカニズムが包括的に究明されるはずである。このうち重視する被計測量は、乱流境界層厚さ、高周波応答せん断応力の二者である。これまでの準備研究の成果から、抵抗低減時に見られる現象として、(a) 個々の気泡が壁垂直方向へのジグザグ運動し速度変動を引き起こすこと、(b) 気泡群が形成されボイドの粗密分布が時間変動すること、(c) 気泡変形が顕著に起こることを発見した。注目すべきは流入されてから間欠的に流入された気泡群の過渡性の持続が発見されている。すなわち至るところで気液二相乱流境界層を過渡的発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。また、気泡クラスターがそのレオロジー特性から液相中の乱流を鎮圧することが、高い省エネ効果の根源となるという新説が提唱された。申請者は保有する循環流路設備(長さ6m)によりレーザー応力計を中心とした複合計測実験を実施し、これらの有力な仮説を実験的に立証することを研究目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究課題は気泡群の粗密分布の時間変動を時間スケールおよび空間スケールにおいて個々の気泡や周囲流れが観察可能な高周波応答の流体摩擦の測定を行うことであり、これをせん断応力の直接計測によりマクロからミクロまでの広い範囲の現象を同時に検証することが可能となる。研究目標の達成のために、高時間分解能せん断応力場測定法の開発を実施する。1年目に計測方法および解析方法を確立し、気泡と乱流縦渦構造との連動について瞬時せん断応力の2次元画像の可視化を行う。2年目にせん断応力計測と可視化計測の2つの技術の複合計測を確立し、高速乱流における気泡クラスター現象と応力変動との関係を計測を実施する。これにより、時空間に拡散する気泡群および乱流の縦渦構造の時間応答を可視化する。

各レーザー Doppler せん断応力計は、ドップラシフトユニット、変位ユニット、ビート信号検出ユニットで構成されている。せん断応力計の原理を、Fig. 1 に示す模式図により説明する。レーザー発生装置から照射され

たレーザービームはモータによって回転するすりガラスを通過する際、内部の粒子の回転角速度によってドップラーシフトが生じ、広範囲に散乱される。散乱光は二つの穴(ピンホール A, B)が設置された変位計に照射される。ピンホール A は壁面せん断のかかる受感面と剛性のあるはりで連結し、可動させる。なお、変位と応力の関係は重量計で検定した。ピンホール B は固定され動かない。受感面には流体が接すると、変位分だけせん断応力に比例して受感部が動くようになっている。ピンホール A, B を通過した光は平行レンズ、集光レンズによって受光装置内に置かれた散乱体内部で交差される。この際、二つのレーザーの周波数差によってビート信号が発生する。このとき応力がなくともビート信号が検出できるため、本装置の特徴として応力ゼロを測定することが可能である。流体の流速が変化すると、せん断応力に応じてピンホール A が移動するため、ピンホール A を通過するレーザーの周波数が変化する。つまり、応力ゼロの時とは異なるビート信号周波数が検出される。得られたビート信号を受光装置によって信号増幅器で増倍し、バンドパスフィルタを用いて 120~170 kHz の周波数のみを抽出する。基準を決めるための流速 0 時点におけるビート信号の周波数を 150 kHz に調節した。

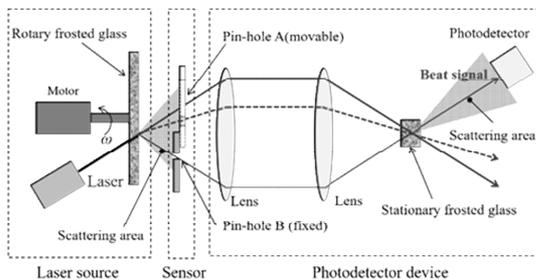


Fig. 1 Optical line diagram via a shear stress meter with a slide type pendulum using an optical heterodyne interferometry

曳航水槽実験装置(Fig. 2)を用いた。レーザーせん断応力計を取り付けた模型船を曳航電車に固定し進行させた。実験模型船はアクリル製である。アクリルの厚さは 20 mm であり、寸法は幅 600 mm、全長 4000 mm、高さ 500 mm のモデルを使用した。Fig. 2 に走行中の模型船の外観を示す。模型船の先頭(上流部)にはトリップワイヤーが取り付けられており、乱流遷移を促進させた。レーザー光学系せん断応力計は模型船の船頭より 3350 mm の位置に取り付けた。船頭より 650 mm の位置に多孔質板が取り付けられている。この位置より電磁弁によって制御されたコンプレッサーを用いた気泡注入を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1)チャンネル実験の成果

Fig. 3 に単相流せん断応力測定実験により得られたレイノルズ数  $Re_m (= umh/v)$  と局所摩擦抵抗係数  $C_f$  の関係を示す。ここで平均速度  $um$ 、チャンネル半幅  $h$ 、せん断応力  $\tau_w$ 、動粘性係数  $\nu$ 、密度  $\rho$  である。プロットは実験により得られた  $C_f$ 、実線は Dean による平行平板間流れの経験式で計算される摩擦抵抗係数の値である。グラフ上の各プロットは 3 回の測定の平均値である。測定値は Dean の経験式の値と良く一致しており、計測の誤差は 3 % 未満となっている。以上より、本結果よりせん断応力計は乱流における測定に有効であることを示した。

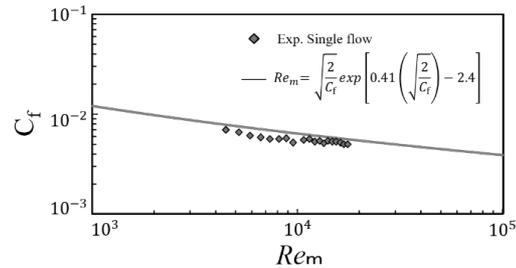


Fig. 3 Relationship between frictional coefficient ( $C_f$ ) and Reynolds number ( $Re_m$ ) in single-phase flows

Fig. 4 に(a)単相流、(b)気液二相流 ( $Re_m = 7.0 \times 10^3$ ) におけるせん断応力の時間変化を示す。ただし、回転散乱板によるノイズは除去している。なお、せん断応力値の高周波の振動が確認できるが、周波数カウント時に起きるノイズで回転散乱体の精度に依存するため、ここでは 100 kHz 以上の波形は考慮しない。単相流時の波形より計測開始から 1 sec までせん断応力の変化が確認できる。これはスパイク状の変位から乱流スイープのイベントが発生したものと予想される。単相流での平均せん断応力は 8.20 Pa であった。一方、気泡流の波形より単相流の波形と比べベースラインが下がっている。

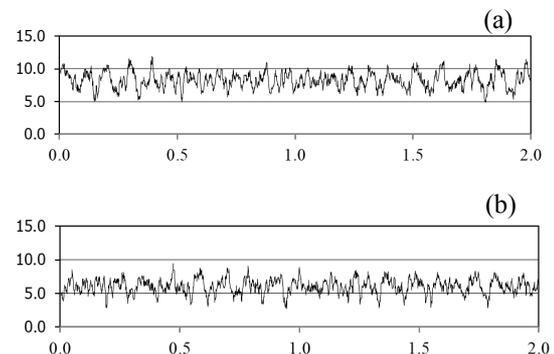


Fig. 4 Temporal variation of shear stress ( $\tau_w$ ) in (a) single-phase flow and (b) two-phase flow of  $\alpha = 5\%$  at  $Re_m = 7.0 \times 10^3$

本実験条件 ( $Re_m = 7.0 \times 10^3$ ,  $\alpha = 5\%$ ) では、平均せん断応力は 6.08 Pa となった。本実験において約 14% の抵抗低減した。Fig. 5 に単相流と気液二相流におけるせん断応力の時

間変化に対して、せん断応力の変動の变化量について確率密度分布を取った。それぞれ正規分布と比較している。それぞれ尖度を取ると単相流における尖度は-0.67, 気泡流における尖度は-1.04 となった。また、単相流における歪度は 0.92, 気泡流における歪度は 0.75 となり、過去の結果[3]の再現性を確認した。

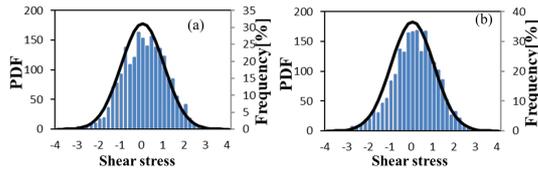


Fig. 5 Probability density of shear stress wave ( $\tau_w$ ) in (a) single-phase flow and (b) two-phase flow of  $\alpha = 5\%$  at  $Re_m = 7.0 \times 10^3$

### (2) 曳航水槽実験の成果

各流速におけるボイド率の変化によるせん断応力の増減を Fig. 6 に示す。縦軸に単相流におけるせん断応力の平均値との比であり気泡注入によるせん断応力の増減を示し、横軸に境界層内ボイド率を示す。流速 1.50 m/s ではボイド率の上昇に伴ってせん断応力が増加し、流速 2.25 m/s ではボイド率 0.84% において極大値を取り、流速 3.00 ではボイド率の上昇に伴いせん断応力が低減していることが確認できる。単相流においても標準偏差があることに注意する必要があるが、結果よりボイド率と流速が高いほど抵抗低減効果を得やすいという従来研究[2]と同様の傾向をレーザー光学系せん断応力計によって確認した。

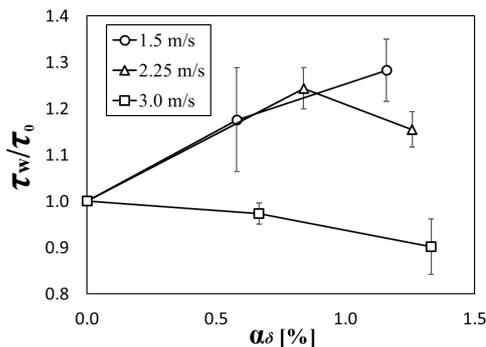


Fig. 6 Relationship between shear stress and void rate

### 参考文献

- [1]Park, H. J. et al., Int. J. Multiphase Flow, Vol. 75, 12-25 (2015).
- [2]大石義彦ら, 混相流, Vol. 28(1), 71-80 (2014).
- [3]Murai, Y, Exp. Fluids, Vol. 55(2), 1773 (2014).
- [4]Park, H. J, et al., Exp. Fluids, Vol. 57(12), 178 (2016).

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Quantitative visualization of swirl and cloud bubbles in Taylor–Couette flow, Bruno van Ruymbeke, Yuichi Murai, Yuji Tasaka, Yoshihiko Oishi, Céline Gabillet, Catherine Colin, Nouredine Latrache, Journal of Visualization, 20 巻, 2 号, (頁 349 ~ 358), 2017 年 05 月

〔学会発表〕(計 7 件)

1. Void wave propagation in the turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship, H.J. Park, Y. Oishi, Y. Tasaka, Y. Murai, Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2017, (頁 41 ~ 44), 2017 年 06 月, Japan
2. Development of a laser Doppler wall shear stress sensor for bubbly two-phase flow measurement, Y.Oishi, S. Onuma, H. Kawai, H.J. Park, Y. Tasaka, Y.Murai, Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2017, (頁 117 ~ 120), 2017 年 06 月
3. Frequency Analysis of Chaotic Flow in Transition to Turbulence in Taylor-Couette System with Small Aspect Ratio, T.Fujii, Y. Oishi, H.Kawai, H.Kikura, R.Stepanus Situmorang, H.Ambarita, 1st International Conference on Computing And Applied Informatics (ICCAI) 2016, (頁 1 ~ 8), 2016 年 12 月, Medan, Indonesia
4. 水平チャンネル乱流における壁面近傍を流れる気泡群の可視化, 木下 雅也, 大沼翔, 大石 義彦, 河合 秀樹, 可視化情報全国講演会(室蘭 2017), 可視化情報学会, 可視化情報 Vol.37, Suppl. No.2, OS8-7, (頁 1-3), 2017 年 11 月 03 日, 北海道・室蘭, 日本
5. 電解液を用いた管内流れ場中の水素発生効率の評価, 大石 義彦, 山本駿悟, 河合秀樹, 佐々木大地, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 日本機械学会, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集 No. 17-1, J0510305, (頁 1-5), 2017 年 09 月 06 日, さいたま市, 日本
6. 水平チャンネル内壁面近傍における気泡通過時の瞬時せん断応力の直接計測, 大沼翔, 大石義彦, 河合秀樹, 村井祐一, 混相流シンポジウム 2017, 日本混相流学会, 混相流シンポジウム 2017 講演論文集 USB, PDF P097, (頁 1-2), 2017 年 08 月 19 日, 調布市, 日本
7. 水平チャンネル気液二相乱流におけるレーザー応力計を用いた壁面せん断応力の直接計測, 大沼翔, 朴炫珍, 大石義彦, 河合秀樹, 村井祐一, 田坂裕司, 混相流シ

ンポジウム 2016, 日本混相流学会, 混相  
流シンポジウム 2016 講演論文集, (頁  
1-2), 2016 年 08 月 07 日, 京都, 日本

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 流体せん断応力の光学的直接計測装置  
および応力解析

発明者: 大石義彦, 河合秀樹

権利者: 室蘭工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-120303

出願年月日: 平成 29 年 6 月 20 日

国内外の別: 国内優先

名称: 測定システム

発明者: 大石義彦, 河合秀樹

権利者: 室蘭工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2018-064099

出願年月日: 平成 30 年 3 月 29 日

国内外の別: 国内優先

取得状況(計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大石義彦 (OISHI, Yoshihiko)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 906171078

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし