

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860001

研究課題名(和文)混相乱流の摩擦低減マッピング

研究課題名(英文)Frictional drag reduction mapping of multiphase flow

研究代表者

大石 義彦(Oishi, Yoshihiko)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90617078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：以下の3つの項目について成果が得られた。

本研究ではt-y投影画像解析法を開発し、個々の固体粒子や気泡の運動の軌跡を基に乱流イベントや気泡運動の定量化が可能となった。これにより、乱流イベントと気泡運動に関する整理を行った。本研究では(1)直接計測により乱流時の摩擦抵抗低減結果を確認した。(2)せん断応力の結果からバースティングに起因するスパイク状の変動が測定されたが、気泡流ではその変動が一扫され、歪度の小さな変動波形を持つ乱れとなった。(3)単一気泡と気泡群の摩擦抵抗特性が明らかになった。以上により、摩擦抵抗低減マップの作成において気泡クラスタの影響を考慮したマップを新たに作成した。

研究成果の概要(英文)：The following 3 articles are achieved.

In this study, quantification of turbulence events and bubble behavior are provided by the development of Time - y-axis imaging analysis based on behavior of individual particle and bubble. The turbulence event and bubble are summarized into three points. (1) Frictional drag characteristics in turbulent horizontal channel bubbly flow by using shear stress sensor. (2) Wall shear stress fluctuations indicate that the bubble injection produces quasi-random fluctuations that eliminate positive spikes on the fluctuations in turbulent flows. This elimination takes primary role on the drag reduction in the present case that the bubble deformations are allowed. (3) Frictional drag characteristic of single bubble and clustering bubble are clarified. Drag reduction map is renewed including clustering bubbles

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：流体工学 省エネルギー 乱流 摩擦抵抗低減 混相流 気泡 計測

### 1. 研究開始当初の背景

大地震や台風など自然災害によりエネルギー問題に危機的な状況が続いている。この問題に対して即効性と持続可能性の観点から摩擦抵抗低減による省エネルギー技術の開発研究が重要であると考え、元より使用するエネルギーを抑えることで技術的な解決がなされ、制御可能な恒久的な革新的な技術が求められる。とりわけ、流体工学分野において既存技術をそのまま利用しながら省エネルギー技術の開発が可能な分野であり、世界中の様々な用途の機械に効果をもたらす期待がある。産業機械において流体抵抗は、たとえば形状抵抗、圧力抵抗、摩擦抵抗などが挙げられるが、流体摩擦抵抗は無視できない損失であるにも関わらず、機械設計上では“初めから存在する減らせない損失”として認識されている。気泡による流体摩擦のスマート制御技術はこの経験的な知見を打ち破り効果的に省エネルギーに貢献する方法として期待されている。

気泡による摩擦抵抗低減には理想的な条件で 80% の低減効果が得られる (Deutsch, 2001) と言われており、現在では船舶やパイプラインなど産業界において実用化研究が始まっている。2010 年には船底が平らで幅の広いモジュール運搬船が気泡による抵抗低減船として実用船として建造され、継続運行されている。現状では蓄積された技術やノウハウに基づいた経験則に依存したままで、気泡発生の動力を無視した開発になっている。つまり、実用船での問題点は低減メカニズムの解明が不十分であるため積極的な制御に至っていないことである。これは実験データで示される局所密度の低下や局所粘度の低下 (加藤ら、2002) だけでは実用上の指標を示せないためである。乱流場での気泡挙動は複数の非線形的要因により、スーパーコンピュータによる数値シミュレーションでも再現できない (杉山ら、2004)。これは気泡挙動が乱流現象と強い干渉が起きているため、時空間スケールで広がっている。実験研究においては高速度カメラと画像解析技術の向上により、気泡が乱流摩擦抵抗のそのもののレイノルズ応力の低下をもたらすことが明らかになった (北川ら 2005、大石ら 2006、2011)。このレイノルズ応力は乱流場における壁面摩擦抵抗の原因ではなく、壁面近傍の縦渦やヘアピン渦などによって引き起こされた変動速度成分で表現された結果に過ぎない。これまで低減メカニズムが解明されていないのは、気泡と乱流現象との時空間的な応答性の確認が不十分であるためである。

### 2. 研究の目的

研究代表者はこれまで気泡とのかかわりについて乱流現象と気泡の運動の連動性をとらえている。メカニズム解明のための基本的問題を把握しており、本研究の遂行にあたり的確な進行が可能である。本研究で得られ

たデータを統括し、全ての実験結果を無次元数体系でまとめる。なお 5 つの無次元数 ;  $Re$  (レイノルズ数)  $We$  (ウェーバ数)  $Ma$  (マッハ数)  $Fr$  (フルード数) および  $d/\theta$  (代表長さ  $\theta$  に対する気泡直径  $d$ ) がある。最も注目している因子は気泡の変形 ( $We$  数) と気泡直径 ( $d/\theta$ ) との関係である。しかし、調査するに従って摩擦抵抗特性は単一気泡のみではなく、気泡群としての関係の重要性を見出した。本研究はデータマッピングを用いて整理方法を確立し、包括的に抵抗低減メカニズムについて議論することが本研究の最大の目的となる。

### 3. 研究の方法

本研究はせん断応力と液相速度を計測対象とし、応力計と光計測 (可視化バックライト計測およびレーザー計測を含む) を主な手法として実験研究を実施した。流れ場が乱流時にバースト現象で生じる瞬時微小変化を完全に取り出すことは困難である。そこで、せん断応力計の計測を用いて定量的に混相乱流の壁面せん断応力の伝搬を捉えることに重視する。ただし気泡混入時の計測エラーが予想されるためチャレンジングな開発となることを前提として工夫した。実験の方法せん断力計 (定格容量 3.9 mN、応答周波数 20 Hz) を用いた。せん断力計の受感部を専用の固定台に取り付け、センサの表面がチャンネル内面と一致するように設置した。応答性の不足は光計測を用いて検定した。計測には同期計測システムを構成し、パルスジェネレータより高速度カメラとデータロガに同時にトリガ入力信号を与える。これにより開始時刻と、カメラの撮影開始時刻を同期させる。(成果 ~ )

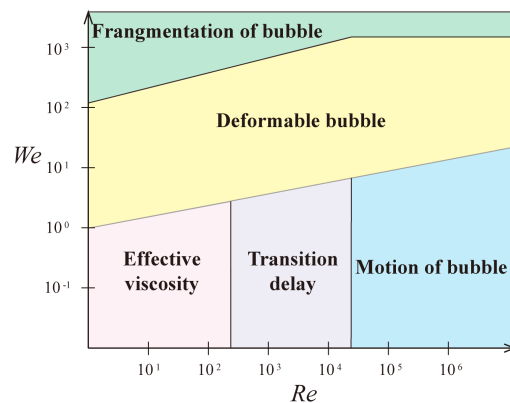


図 1  $We - Re$  マッピング

### 4. 研究成果

本研究の最大の目的はデータマッピングにある。 $Re$  数と  $We$  数における整理方法はこれまでの成果より確認されてきた。摩擦抵抗の低減マッピングの作成に当たり、光学計測法に基づく気泡乱流場の計測を実施した。摩擦抵抗低減現象を確認すると同時に、気泡群

の通過頻度と低減現象の関係を明確にした。気泡のクラスタ化が流れ場に影響するかを調査した。光学計測法及び画像処理法を用いて、気泡間相互作用について移流速度情報及び気泡サイズの定量的スケールを取得した。この結果、気泡サイズと平均移流速度および液相の壁面速度分布に違いがあることを見出した。本研究成果では気泡の輪郭抽出プログラムの開発の成功し、長さスケールを効率よく抽出することが可能となった。また、乱流チャンネル内に微細気泡を混入させ、発達・未発達の境界層に流入する気泡の挙動を可視化実験した。未発達の乱流境界層には気泡は容易に流入するのに対して、発達した乱流境界層には気泡が混入しにくいことを観察した。本研究では  $t$ - $y$  投影画像解析法を開発し、個々の固体粒子や気泡の運動の軌跡を基に乱流イベントや気泡運動の定量化が可能となった。これにより、乱流イベントと気泡運動に関する整理を行った。本研究では(1) 抵抗低減結果に基づき、(2) せん断応力の結果気泡混入前後のせん断応力への影響、(3) 単一気泡と気泡群の摩擦抵抗特性からなり、以下に本研究の成果をまとめる。

### (1) 抵抗低減結果

せん断応力計による直接計測から、気泡流における摩擦抵抗低減結果を得た。図 2 より乱流時の摩擦抵抗低減結果を確認した。この結果に基づき、気泡流および单相流（気泡無し）の条件における摩擦抵抗特性を整理することが可能となった。

### (2) 気泡混入前後のせん断応力への影響

单相流の波形（図 4）では、バースティングに起因するスパイク状の変動が測定されたが、気泡流（図 5）ではその変動が一扫され、歪度の小さな変動波形を持つ乱れとなった。これは気泡がない条件において乱流領域の液相速度であっても気泡がある条件において壁への影響は独立した関係であることが示唆された。これらは PIV 計測（図 5）により気泡周りの流れ場において気泡由来の擬似乱れが、壁面せん断応力計による直接計測で捉えられた結果であると考えている。

### (3) 単一気泡と気泡群の摩擦抵抗特性

単一気泡による気泡周りの応力分布を可視化計測により再現することに成功した。これにより、 $We$  数で整理し応力分布の違いを説明することが可能となった。(2)の結果を踏まえ、気泡流の摩擦抵抗特性を決めているのは大気泡通過頻度と気泡群との関係であることが示唆された。このことから、気泡群に対してマッピングに追加する必要が出てきた。図 6 に気泡間相互作用の結果を示す。同一気

泡サイズで整理する場合に気泡間相互作用が効いてくる。以上に結果より、抵抗低減マップの作成において気泡クラスタの影響を考慮したマップを新たに作成した（図 7）。

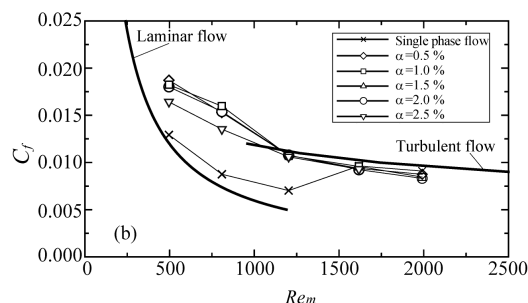


図 2 摩擦抵抗低減結果

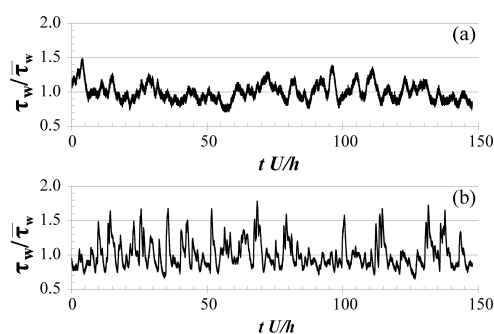


図 3 (a)遷移域(b)乱流域のせん断応力(気泡無し)

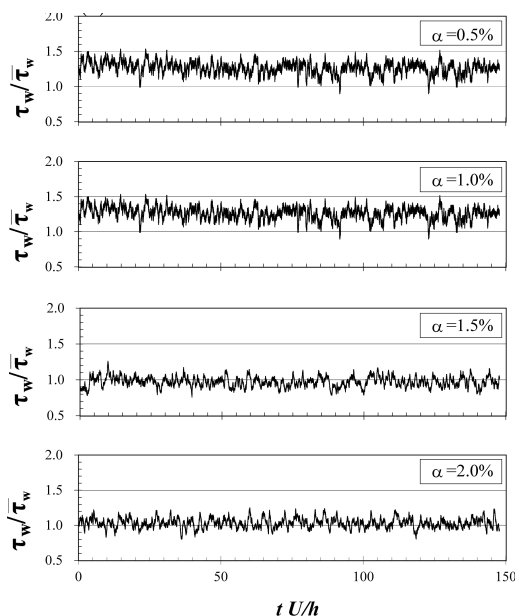


図 4 乱流域のせん断応力(気泡あり)

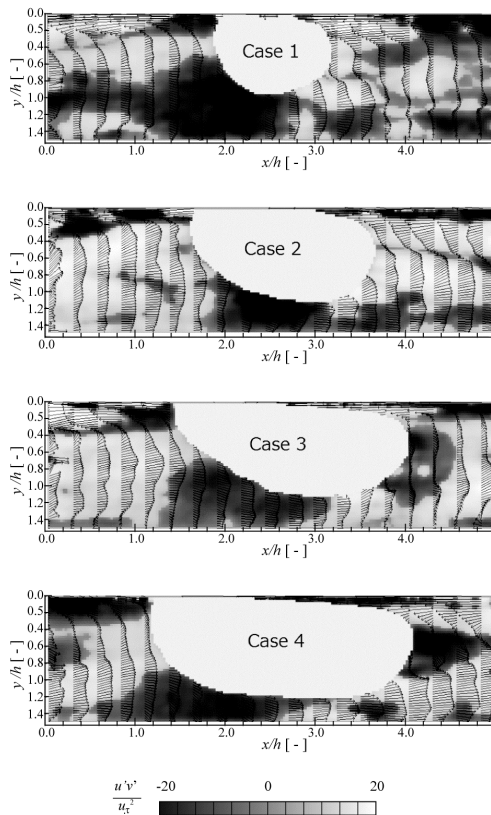


図5 単一気泡周りの応力分布

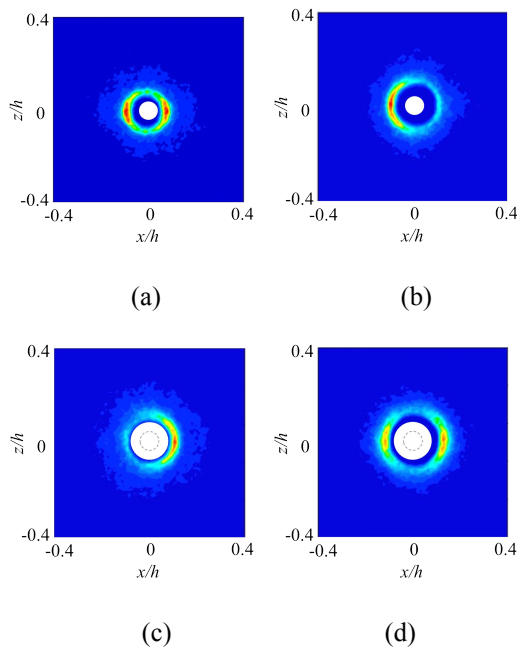


図6 水平チャネル内気泡群の気泡間相互作用 (a) RS-RS, (b)  $R_S$ - $R_L$ , (c)  $R_L$ - $R_S$ , (d)  $R_L$ - $R_L$ . ( $R_S$ :  $r = 0.0 \sim 0.80$ mm,  $R_L$ :  $r = 0.80 \sim 1.60$ mm).

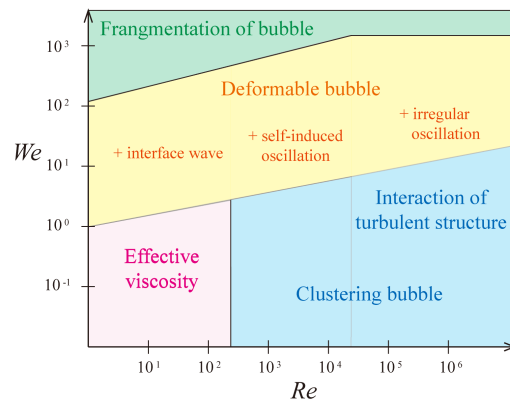


図7  $We - Re$  新マッピング

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Y.OISHI, Y.MURAI, Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 55, pp.128-139, (2014), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.02.022>

大石義彦, 村井祐一, 田坂裕司, シリコンオイルによる水平チャネル内気泡流の摩擦抵抗特性 (第1報 摩擦抵抗計測とゲイン評価), 混相流 28 巻 1 号 pp.71-80, (2014) 査読有

大石義彦, 村井祐一, 田坂裕司, シリコンオイルによる水平チャネル内気泡流の摩擦抵抗特性 (第2報 壁面せん断応力の時間変動解析), 混相流 28 巻 1 号 pp.81-89, (2014) 査読有

村井祐一, 田坂裕司, 大石義彦, 水平チャネル内気液二相乱流の可視化, 可視化情報学会誌 32(126), pp.19-22, (2012) 特集記事 査読なし

〔学会発表〕(計 15 件)

H.PARK, H.KAYUKAWA, Y.OISHI, Y.TASAKA, Y.MURAI, Ultrasound Detection of Wall-Travelling Bubbles for Diagnosis of Drag Reduction, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering ISUD-9, (20140827), Strasbourg, France

I.KUMAGAI, Y.MURAI, Y.TAKAHASHI, H.SAKAMAKI, T.TSUKAHARA, T.OZAKI, Y.TASAKA, Y.OISHI, Experiments on bubble generation by a hydrofoil moving beneath the water surface for reducing ship drag, 16th International Symposium on Flow Visualization 2014 Okinawa, (20131213), Guangzhou, China

Y.OISHI, T.WATAMURA, Y.TASAKA, Y.MURAI, Time-Resolved Measurement of Frictional Drag Reduction by Bubbles with Void Waves, The 12th International

Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLCOME2013), OS8-03-2, (20131118). Nara, Japan  
大石義彦, 峠幸寛, 藤野進悟, 田坂裕司, 村井祐一, 水平乱流チャンネルにおける気泡クラスタリングの定量的可視化, 混相流シンポジウム 2013, USB, (20130809) 信州大, 長野  
村井祐一, 朴炫珍, 大石義彦, 田坂裕司, フレックタイプトレーサに対する2色光源による渦構造の可視化~混相流の観点から~, 第41回可視化情報シンポジウム, (20130716) 工学院大, 東京  
Y.OISHI and Y.MURAI, Dynamic 1D-2C PTV for boundary layer measurement, The 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry PIV2013, USB, (20130701) Delft, Netherlands  
Y.OISHI, Y.TOHGE, Y.TASAKA and Y.MURAI, Clustering of Air Bubbles Injected in Horizontal Channel Flow, International Conference on Multiphase Flow 2013, ICMF2013-584 USB, pp.1-6, (20130526) Jeju, Korea  
大石義彦, 北川石英, 田坂裕司, 村井祐一, 壁面近傍をスライドする気泡クラスタ内での気泡間相互作用の計測, 第62回理論応用力学講演会講演論文集(USB), No. OS02-10, pp.1-2(20130306) 東工大, 東京  
熊谷一郎, 酒巻春輝, 佐藤慧弥, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 水中翼を用いた気泡発生法のメカニズムとその二相流の物理第62回理論応用力学講演会講演論文集(USB), No. OS02-05, pp.1-2(20130306) 東工大, 東京  
大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 境界層中におけるマイクロバブルの挙動の可視化, 日本機械学会北海道支部第51回講演会講演概要集, pp.85-86(201210) 北見工大, 北海道  
村井祐一, 田坂裕司, 大石義彦, 亜音速ベンチュリー管内での気泡と液滴の微粒化ダイナミクス, キャピテーションに関するシンポジウム(第16回)(20121123) 金沢大, 石川  
大石義彦, 峠幸寛, 田坂裕司, 村井祐一, 水平チャンネル内流れにおける摩擦低減条件での気泡群の挙動, 日本機械学会第90期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 No.12-40, pp.221-222, (20121117) 同志社大, 京都  
大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 境界層中におけるマイクロバブルの挙動の可視化, 日本機械学会北海道支部第51回講演会講演概要集, pp.85-86(20121020) 北見工大, 北海道  
村井祐一, 田坂裕司, 大石義彦, 微小気泡による抵抗低減船の潮流影響シミュレーション, 日本機械学会北海道支部第51

回講演会講演概要集, pp.97-98(20121020) 北見工大, 北海道  
佐藤慧弥, 熊谷一郎, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一, 旋回翼を用いた揚力型気泡発生装置に関する実験的研究, 日本機械学会北海道支部第51回講演会講演概要集, pp.95-96(20121020) 北見工大, 北海道

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)  
取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://ring-me.eng.hokudai.ac.jp/oishi/index.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者  
大石 義彦 (OISHI, Yoshihiko)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 90617078

(2)研究分担者  
なし ( )  
研究者番号:

(3)連携研究者  
なし ( )  
研究者番号: