

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760143

研究課題名（和文）周期的気泡注入による摩擦抵抗低減法の高効率化

研究課題名（英文）Improvement of efficiency on frictional drag reduction by repetitive bubble injection

研究代表者

田坂 裕司（TASAKA YUJI）

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00419946

研究成果の概要（和文）：気泡を用いた摩擦抵抗低減手法の高効率化を目指し、流れの理解と効率的な制御をもたらす計測手法の開発を行った。気液二相チャンネル流れを用いた基礎実験により、注入した気泡がクラスター化する要因を気泡の2体干渉の観点から調べた。超音波を用いて気泡ならびに流れの変遷をモニタリングする手法を考案し、実験室レベルで使用可能なプロトタイプを製作した。また、これを実際の船舶に使用する際の問題点について検討した。

研究成果の概要（英文）：In order to improve efficiency of frictional drag reduction technique by injecting bubbles, we investigated flow of bubble mixture and developed measurement system for efficient flow control. Experimental investigations in a bubbly channel flow suggested basic mechanism of bubble clustering from a point of view of bubble-bubble interactions. We also developed a monitoring tool of flows and bubbles using ultrasonic wave. Applicability of the tool for actual vessels was discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, 抵抗低減

## 1. 研究開始当初の背景

気泡を用いた船舶の摩擦抵抗低減手法は、大型船舶における大幅な燃費向上とそれに伴う CO<sub>2</sub> 排出量の抑制が実現可能な技術として注目されてきた。これまでに、室内実験や数値計算による抵抗低減メカニズムの解明を目指した研究が数多くおこなわれるとともに、実船を用いた検証実験が行われ、最大で 10% を超える抵抗低減効果が示された。しかしながら、低減効果が不安定であることや気泡注入のために比較的大きなエネルギーが必要であり、正味の省エネ効果がほとんど得られないことから、研究者レベルでは実

用に不向きな技術として認識されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、上記の問題点を持つ摩擦抵抗低減手法の効率を、気泡の注入を周期的にすることにより改善することを目的とする。たとえ一様に注入された気泡であっても、気泡同士の相互作用や流れとの干渉により、下流では粗密のパターン（クラスター）を形成することが知られている。この粗密がはっきりしている場合は問題無いが、気泡濃度が中途半端な領域では低減効果が得られず、逆に抵抗が増加する場合がある。周期的気泡注入には、

この粗密を最初から人工的に作ることで、低減効果が高い領域を保ちつつ負の低減効果を抑制する狙いがある。また、無造作に気泡を連続注入する場合に比べ、同程度の効果を保ったまま注入気泡量を大幅に削減することが可能であり、正味の省エネ効果を向上させることができる。

### 3. 研究の方法

最適な気泡注入周期を調べるために、まず気泡がクラスターを形成するメカニズムを基礎研究により明らかにする。海水を模擬するため界面活性剤を混入させた水を水平チャンネルに流し、そこに気泡を注入することでクラスターが形成される過程を調べる。また、クラスターを構成する気泡の2体干渉を調べることで、クラスター化に向かう気泡の特性を把握する。

周期的な気泡注入を実船で行う場合には、どのような周期でクラスターが形成されているかを把握する必要があり、またさらなる高効率化を目指すためにはそれによってどのように流れの変化が生じたかを把握する必要がある。本研究では、上記の基礎実験の他に、超音波を用いた流速分布測定機能を備えた気泡検出装置の開発をあわせて行う。

### 4. 研究成果

(1) 気泡クラスターの形成について 気泡クラスターの形成状況を調べるために、図1に示す長さ 6m のアクリル製測定部を有する矩形チャンネルで実験を行った。測定部断面の高さは 40mm、幅は 160mm である。海水の界面活性効果を模擬するために、界面活性剤である 1 ペンタノールを 5ppm 水に混入させ作動流体とした。これにより、注入した気泡の合体は阻害され、比較的小さな気泡が下流で粗密構造を形成した。気泡注入口から 1600mm 付近の位置で、チャンネル上面から気泡群の様子を高速度ビデオカメラで撮影した。

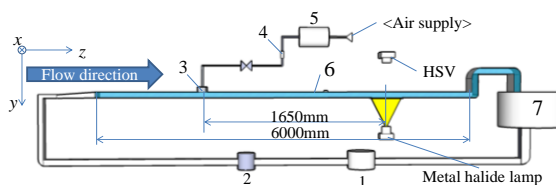


図1 水平チャンネル

図2に、実験で得られた気泡群の動画から作成した時間展開画像を示す。横軸は時間、縦軸はチャンネルのスパン方向を示している。実験時の流れのレイノルズ数は  $Re = 11,000$  で、流れは乱流状態となっている。流れにおける気泡の体積割合を表すボイド率はそれ

ぞれ、(a)0.04%、(b)0.10%、および(c)0.27%である。図から、ボイド率が小さい場合には気泡が時間方向に連なり、スパン方向にはある間隔を持っていることが分かる。これは気泡が、摩擦抵抗を生み出す構造である乱流境界層内の縦渦や低速ストリークにトラップされた結果であり、この状況ではほぼ、気泡は摩擦抵抗低減に寄与していない。これに対しボイド率が大きくなるとその傾向が弱くなり、(c)の条件では逆にスパン方向に筋状のクラスターが形成されていることが分かる。この状況では、先の縦渦などの構造が大きな影響を受けていると考えることができる。この筋状のクラスターと、過去に報告されているボイド率の疎密波（ボイド波）との関係は不明であるが、制御後にこのような明瞭な疎密が形成されるのが理想的である。

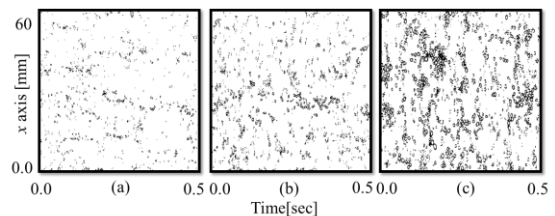


図2 時間展開画像 ( $Re = 11,000$ ) (a) $\alpha = 0.04\%$ , (b)  $\alpha = 0.10\%$ , (c)  $\alpha = 0.27\%$

図2で示した気泡クラスターの時空間スケールを抽出するために、気液の判別を行った後に画像の二値化処理を行い、さらに平滑化処理を行うことで2次元ボイド率の分布を作成した。図3はその分布を2次元フーリエ変換した物である。際だった周期性があるわけではないため単独のピークが得られないが、いくつかの特徴的なスケールがこの解析から抽出できた。

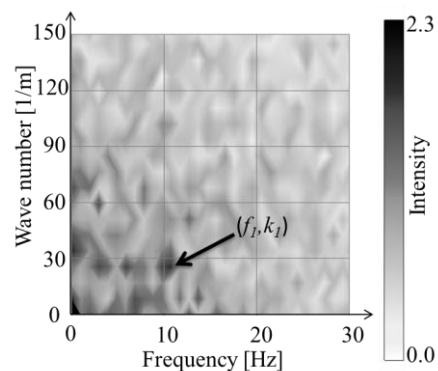


図3 2次元投影ボイド率分布の2次元フーリエ変換

(2) 水平チャンネル流内の気泡の二体干渉について 先に示したクラスターの形成に関して、ボイド率が低い場合には流れの構造が支配的であり、ある程度ボイド率が大きくな

った場合には、気泡間の相互作用が支配的になると考えられる。そこで、気泡間相互作用を定量化するため高ボイド率条件における気泡の二体干渉を調べた。実験は図1と同様の装置で行った。画像解析により個々の気泡を抽出し、対象とする気泡に対する最近接気泡の位置を統計的に調べた。その結果を図4左に示す。図において、横軸が流れ方向、縦軸がスパン方向で、図の中心に対象とする気泡が存在していると見なす。赤みが増すほどその位置に最近接の気泡が多く存在していたことを示している。いずれのレイノルズ数においても、最近接気泡はその前後に多く分布していることが分かる。レイノルズ数の小さい2条件はその傾向が顕著であり、これは気泡そのものを作る後流に多くの気泡がトラップされ、連なった形状がクラスターの基本構造となっていることを示している。同図右には最近接気泡の相対ベクトルを統計的に処理し分布させた図を示している。これらの図から、気泡の左右で押し出された気泡がその後方に取り込まれるような流れが観察される。このほか、これらの結果を気泡サイズ別に統計を取り直し、その影響についても議論した。

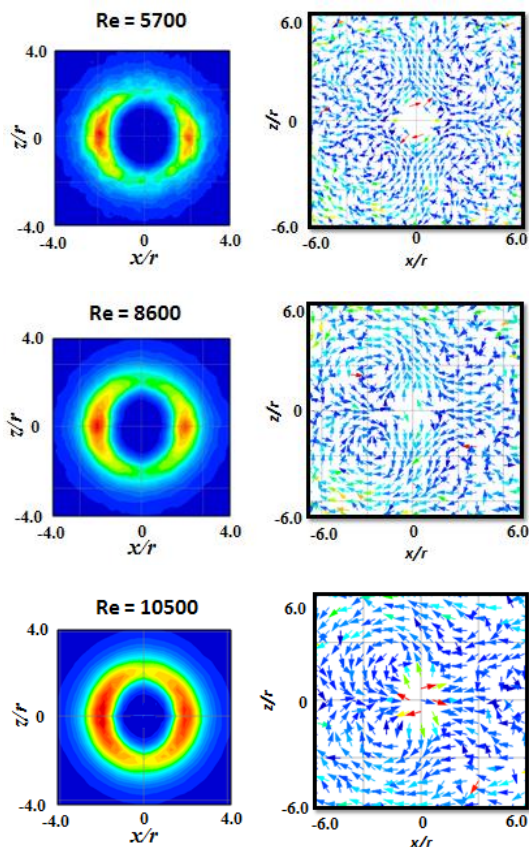


図4 各レイノルズ数における最近接気泡位置の確率密度分布(左)とそれらの相対速度ベクトルの分布(右)

(3) 超音波を用いた気泡(気液界面)の検出と流れの計測 実船での気泡クラスターの検出(どのような周波数を持つかなど)とそれによる流れの変化を捉えるため、超音波を用いた計測法の開発を行った。これまでに確立されている超音波流速分布計に加えて、その計測法では使われていない超音波エコー強度の情報を加えて処理することにより、気液界面の情報を取得する手法を確立した。図5は、回転円盤に駆動される流れが示す変形した自由界面(上)と、その形状ならびに周囲の流れを超音波で計測した結果(下)である。図の白い部分が空気、色がついている部分が水の流れを示しており、変形した界面形状が再現されていることが分かる。また色は半径方向の速度を示しており、赤と青はその流れの正負を表している。ここから、回転する自由界面に押し出される流れと、そのカウンターとして界面に向かう流れとが認識できる。

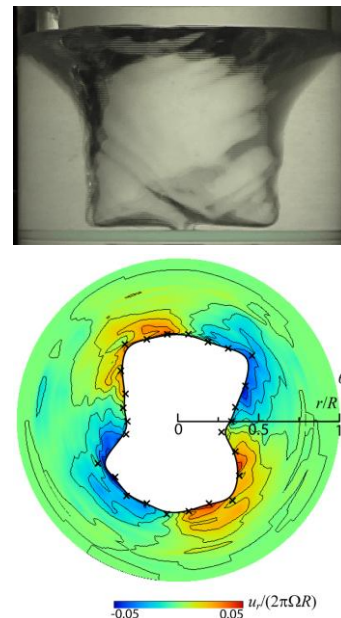


図5 回転円盤に駆動される流れが示す変形した自由界面(上)とその形状ならびに周囲の流れを超音波で計測した結果(下)

上記の計測法を用いて実船に適用可能な計測デバイスのデザインを行った。また、この手法を実船に用いる際の問題点を検討した。この手法では、速度分布の計測のために超音波を散乱させるものが必要であるが、船の喫水が深い場合には船底近傍に澄んだ水が流れ、超音波を散乱させるための数百ミクロン程度の微粒子が不足する可能性がある。これによる速度の誤検出を防ぐ方法として、短時間統計処理による速度分布の予測方法を考案した。

## 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)

[学会発表] (計3件)

- ① 大石義彦, 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, 2012年11月17日~18日, 同志社大学今出川キャンパス (京都)
- ② 峠幸寛, 水平チャンネル乱流場における気泡クラスタリング, 日本混相流学会年会講演会2012, 2012年8月9日~10日, 東京大学柏キャンパス (千葉県柏市)
- ③ Yuji TASAKA, Ultrasonic flow field measurement of a rotating flow with free surface, 8th Intl. Sym. On Ultrasonic Doppler Method for Fluid Mechanics and Fluid Eng., 2012年9月21日, Schlosshotel Dresden-Pillnitz, Dresden, Germany

[図書] (計1件)

- (1) Yasushi Takeda, et al., Springer, Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, 2012 (副編集者, 著者として Chapter2, Section 4.1, 5.1, 7.2, Appendix を担当)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田坂 裕司 (TASAKA YUJI)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 00419946

### (2)連携研究者

村井 祐一 (MURAI YUICHI)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 80273001