

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02365

研究課題名（和文）船底外板表面の流体力学的諸特性を考慮した船底下二相流解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of prediction method for two-phase flow under ship bottom considering hydrodynamic characteristics on shell surface

研究代表者

波津久 達也（Hazuku, Tatsuya）

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：60334554

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：船底への空気供給による船体抵抗低減技術である空気潤滑法の高度化の観点から、本研究は、船底の二相流動構造と摩擦特性に及ぼす固体壁表面の諸特性の影響を適切に再現できる新しい二相流解析手法の構築を最終目的とした。船底の二相流動を極力模擬した実験装置を用いて流路表面の粗さを変化させた二相流実験を行い、気泡供給前後における境界層内速度分布、二相流局所流動構造及び摩擦抵抗に関する実験データベースを構築した。取得されたデータベースに基づき、二相流動構造に及ぼす影響因子（気液流量、流路壁面粗さ）を評価するとともに、船底下の二相流動構造と摩擦抵抗に関する二相流構成式の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体壁面特性と気液二相流の流動構造及び摩擦抵抗の流体力学的相関に着目した研究は、国内外において類例がほとんどなく、その実験的、解析的研究を実施した本研究は、現状に鑑みて学術的意義が大きい。本研究により、特に二相流動構造と摩擦抵抗に及ぼす流路壁面粗さの影響に関する新たな知見が得られ、さらに船底下の二相流動構造と摩擦抵抗特性に関する二相流構成式が新たに開発された。これらの成果は、船底下に形成する二相流の解析技術を進展させるものであり、今後のさらなる研究の推進によって、空気潤滑法による船体抵抗低減技術の高度化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：From the viewpoint of advancing the air-lubrication method, a technique for reducing ship drag by supplying air to the ship's bottom, the final target of this study was to develop a two-phase flow analysis method that can reproduce the effects of wall surface characteristics on the two-phase flow structure and wall friction characteristics beneath a ship's bottom. Two-phase flow experiments with varying wall surface roughness were conducted using an apparatus that simulates two-phase flow beneath a ship's bottom. An experimental database on velocity distribution in the boundary layer, local two-phase flow structures, and frictional resistance before and after bubble supply was newly constructed. Based on the obtained database, the impact factors, including gas-liquid flow rate and channel wall roughness, were evaluated on the two-phase flow structure and constitutive equations regarding the two-phase flow structure and frictional resistance.

研究分野：船舶工学

キーワード：空気潤滑法 気液二相流 抵抗低減

1. 研究開始当初の背景

船体の摩擦抵抗の低減は、船舶の省エネルギー化を図るための重要な課題となっており、これまでに様々な手法が考案されている。その中でも、船底への気泡混入による摩擦抵抗低減法（空気潤滑法）が有望視され、一部の商船において実用化され始めている。空気潤滑法については、これまで十数年に渡り様々な視点から研究が進められ、気泡による乱流境界層内構造の変調といったミクロな視点からの抵抗低減メカニズムの解明や、抵抗低減量を支配するパラメータを抽出しようとする試みが、主として流体力学的に滑らかな固体壁面に形成する気液二相流動を対象としてなされている（例えば、文献[1]）。ここで、図1に示すように、固体壁表面の粗さは、速度境界層構造（速度勾配、乱流強度）の支配因子となり、その変化が壁面近傍の気泡に作用する力（揚力、乱流拡散力）や気泡の合一・分裂による界面積濃度輸送（気泡の径、密度の空間発達）の変化に強く影響を及ぼす。すなわち、壁面の粗さは、壁面近傍を流動する気液二相流の流動構造と摩擦抵抗を司る重要なファクターとなる。船底外板表面の粗さは材料と塗料の種類ならびに運航履歴により変化するため、船底の二相流の流動構造と摩擦抵抗特性は、滑らかな壁面に形成する二相流と大きく異なると予想される。従って、実船における空気供給方法（供給位置、供給量等）や船底材料と塗料の決定においては、このような固体壁表面特性の変化に対する二相流動構造と壁面摩擦の各特性を高精度に予測する必要があるが、そのための適切な予測手法は未開発であり、船体構造に応じた空気潤滑法による抵抗低減の最適化は図れていない。

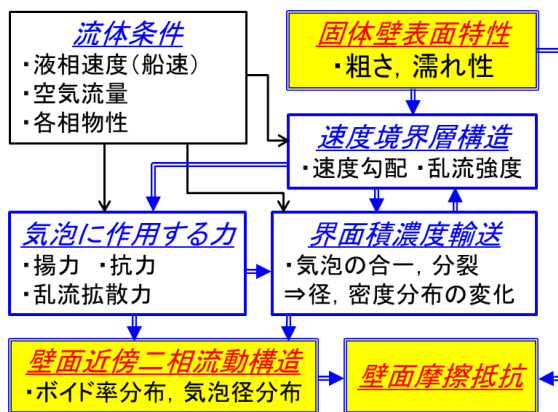


図1 二相流動と摩擦抵抗に及ぼす影響因子

2. 研究の目的

上述の背景に鑑み、本研究では、空気潤滑法による船体抵抗低減技術の高度化に資する新しい二相流解析手法の開発を最終の目標とし、以下の研究目的を設定した。

(1) 壁面粗さと気液二相流動構造及び摩擦抵抗の流体力学的相関の解明

粗さを変化させた際の二相流の流動構造（ポイド率、界面積濃度、気泡径、境界層内速度分布）と壁面摩擦抵抗に関する実験データベースを構築するとともに、気液二相流動構造及び摩擦抵抗に及ぼす壁面粗さの影響を定量的に評価する。

(2) 気液二相流構成式の開発

取得された実験データベースと知見に基づき、二相流構成式（ポイド率予測式、摩擦抵抗予測式）を開発する。

3. 研究の方法

(1) 二相流実験装置

本研究では、本学所有の二相流ループ（図2）に水平矩形流路（幅 30 mm×深さ 100 mm×全長 3000 mm 及び幅 200 mm×深さ 50 mm×全長 3000 mm の2種類）のテスト部を設置し、流路上壁面に気泡を供給することで船底下の二相流動を模擬した。テスト部の上壁面に着脱可能な板材を設置し、その板材の粗さを変更できる構造とした。

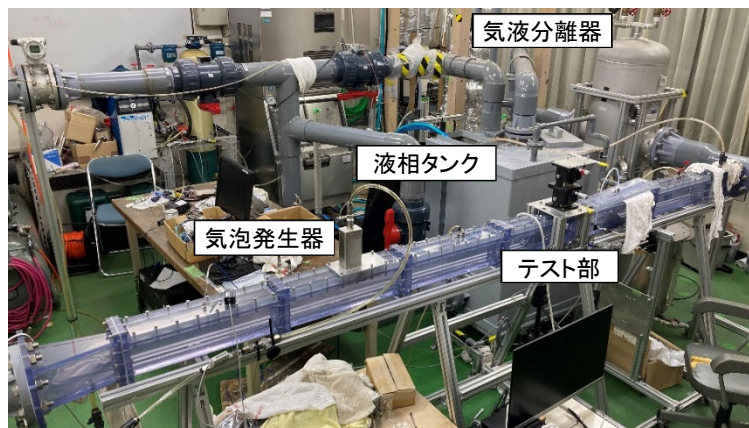


図2 二相流ループ

(2) 計測方法

二相流局所流動パラメータ（ボイド率分布，界面速度分布，界面積濃度分布，気泡径分布）の測定には，探針式のダブルセンサープローブ（文献[2]）を用いた．また，粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry, PIV）を用いて，流路上壁面近傍の速度場を計測した．さらに，二相流の流動様式を詳細に観察するため，テスト部の二相流動を高速度ビデオカメラにより撮影した．

(3) 実験

予備実験により決定した気膜流から微細気泡流までの広範な流速条件において，流路上壁面の粗さを変化させた際の二相流局所流動パラメータ及び壁面摩擦抵抗を計測するとともに，可視化観察結果に基づいて二相流流動様式遷移式の開発に必要な流動様式マップを作成した．

4. 研究成果

本研究で得られた主要な成果を以下に示す．

(1) 二相流局所流動パラメータに関するデータベースの構築

気液の流速，テスト部の流れ方向の位置（3カ所），流路上壁面の粗さを変化させた全100ケースの実験を行い，気泡流（小気泡が分散して流動）からプラグ流（気相が流路の幅を覆う気相塊となって流動）の広範な流動様式を対象として，二相流のボイド率分布，界面速度分布，界面積濃度分布，気泡径分布，液相速度分布に関するデータベースを構築した．得られた実験データベースは，各種二相流モデルの開発や二相流シミュレーションコードのベンチマークテストにおいて有用となる．

(2) 二相流動構造と摩擦抵抗特性に及ぼす影響因子の評価

気泡層厚さ（流路上壁面近傍に形成する二相流領域の深さ方向の厚さ）を長さスケールとして平均化された二相流パラメータについて議論した．気泡層厚さに及ぼす液相速度の影響は少なく，気相速度に強く依存することが明らかとなった．一方，気泡層内の平均ボイド率は，液相速度に強く依存し，気相流速の影響は少ないことが明らかとなった．また，気泡層の厚さと気泡層内平均ボイド率の流れ方向の顕著な発達を確認されなかったが，低液流速条件の平均気相弦長は，流れの発達に伴う気泡や気相塊の合一によって大きく変化することが明らかとなった．さらに，空気潤滑による壁面摩擦抵抗の低減効果は，気泡層内の平均ボイド率と強い相関があることを明らかにした（図3）．

粗面条件では気泡の微細化が促進し，壁面近傍に小気泡がより集積しやすくなることが明らかとなった（図4）．また，粗面条件では壁面近傍の液相速度が減少することで，平滑壁と比較して局所ボイド率が相対的に高くなること（図5a），また気泡の微細化により，壁面における局所界面積濃度が顕著に増加することが明らかとなった（図5b）．さらに，粗面条件では局所のボイド率と界面積濃度の増加により，特に高液流速条件において顕著な摩擦抵抗低減効果が得られることを明らかにした（図6）．

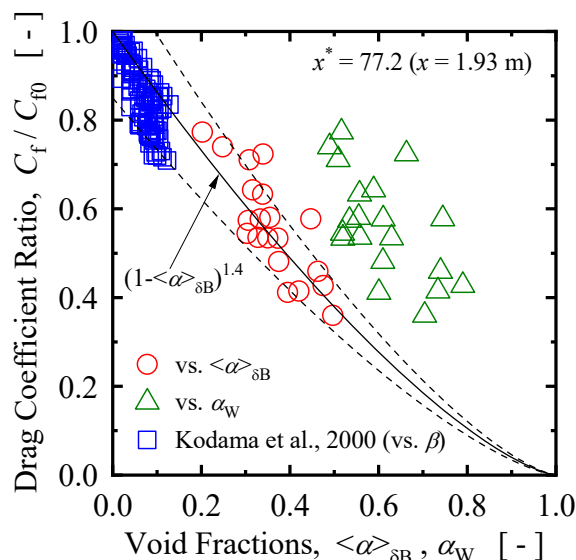


図3 気泡層内平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle_{\delta B}$ 及び壁面近傍局所ボイド率 α_W と摩擦抵抗係数比 C_f/C_{f0} の関係（文献[3]より抜粋）（ C_f と C_{f0} は，それぞれ二相流と单相流の摩擦抵抗係数である． x は気泡供給部からの距離であり， x^* は x を单相流速境界層厚さに相当する流路深さの半分の距離で正規化した値である．）

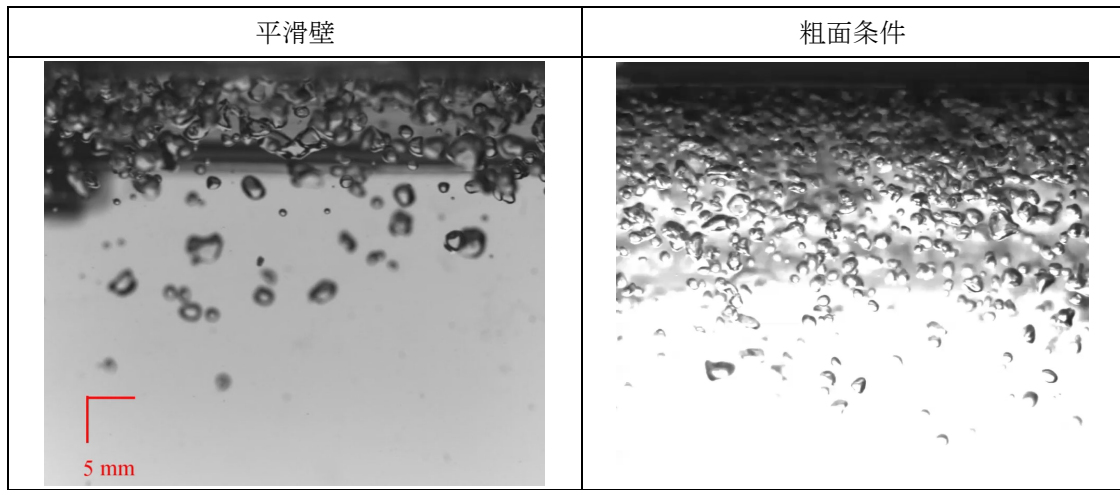


図4 流路上壁面近傍に形成する気泡の流動画像の代表例（液相見かけ速度 $\langle j_f \rangle = 4.78 - 5.11$ m/s, 気相見かけ速度 $\langle j_g \rangle = 0.0754 - 0.0780$ m/s ※見かけ速度：気液の各相が流路内を単相で流れた場合の流路断面平均流速）

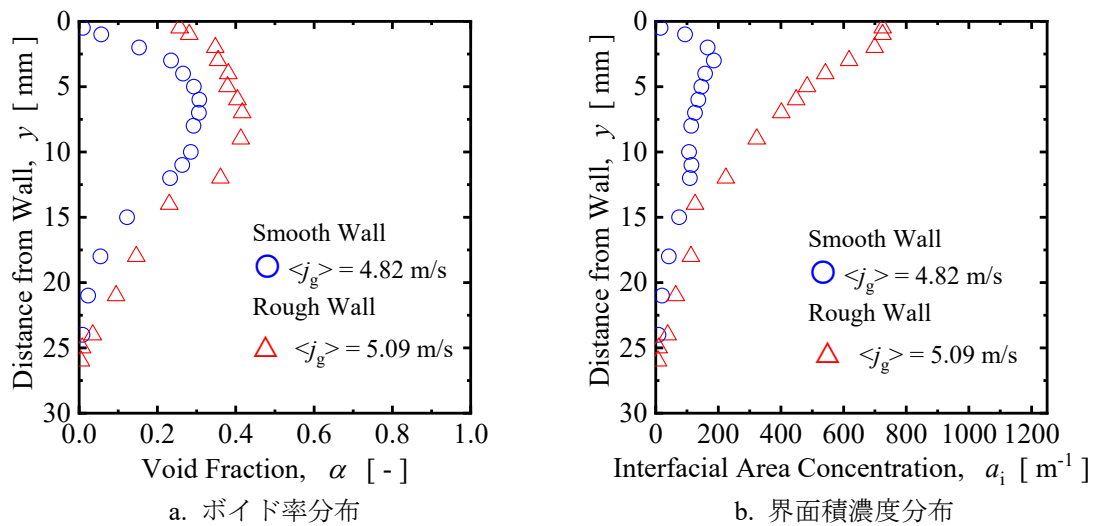


図5 局所ボイド率 α と局所界面積濃度 a_i の各分布に及ぼす壁面粗さの影響（縦軸の y は上壁面からの距離である。図中の○と△のプロットは、それぞれ平滑壁条件と粗面条件の結果を示している。）

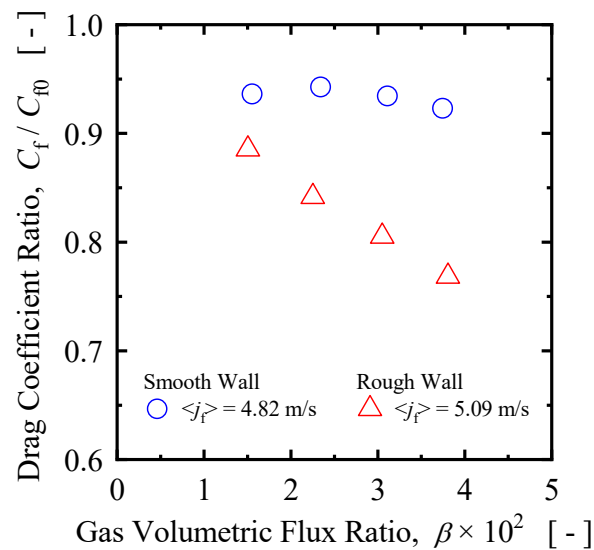


図6 気相体積流束比 $\beta = \langle j_g \rangle / (\langle j_f \rangle + \langle j_g \rangle)$ と摩擦抵抗係数比 C_f/C_{f0} の関係（図中の○と△のプロットは、それぞれ平滑壁条件と粗面条件の結果を示している。）

(3) 気液二相流構成式の開発

船底のように水面下にある壁面上を流動する外部流れの二相流挙動はチャンネル内流れと異なり、速度境界層と二相流動構造が常に発達する。二相流解析手法として一般的なドリフトフラックスモデルや二流体モデルなどの平均流モデルにより、外部流れの二相流を予測するためには、ボイド率や界面積濃度等の基本流動パラメータを定義するための長さスケールを適切に与える必要がある。本研究では、液相速度境界層内の壁面近傍に形成する気泡層の厚さを長さスケールとし、気泡層に作用する浮力と乱流拡散力のバランス式に基づき気泡層厚さを予測するモデルを開発した。また外部流れの二相流に拡張したドリフトフラックスモデルと新たに導出した気泡層厚さ予測式に基づき、気泡層内ボイド率を予測する手法を開発した。さらにこれらの式から与えられる気泡層内ボイド率を用いて、気泡流-チャーナ気泡流-プラグ流の各流動様式遷移を予測する手法ならびに壁面摩擦抵抗を予測する手法をそれぞれ開発した。

<引用文献>

- [1] Murai, Y., Frictional drag reduction by bubble injection, *Experiments in Fluids*, 55:1773, 1-28 (2014).
- [2] 混相流計測法 (日本原子力学会編), 森北出版, 84-92 (2003).
- [3] Hazuku, T., Ihara, T., Hibiki, T., Reduction of skin friction and two-phase flow structure beneath wall in horizontal rectangular channel, *Ocean Engineering*, 248, 110846 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hazuku Tatsuya, Ihara Tomonori, Hibiki Takashi	4. 巻 248
2. 論文標題 Reduction of skin friction and two-phase flow structure beneath wall in horizontal rectangular channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 110846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.110846	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 該当する
1. 著者名 井原智則, 波津久達也	4. 巻 -
2. 論文標題 超音波による水平矩形流路内気泡流の液相速度場計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本混相流学会混相流シンポジウム2021講演論文集	6. 最初と最後の頁 E0027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 波津久達也, 井原智則	4. 巻 -
2. 論文標題 水平壁面下の二相流動構造と摩擦抵抗低減	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本混相流学会混相流シンポジウム2022講演論文集	6. 最初と最後の頁 E0182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Ihara Tomonori, Hazuku Tatsuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Inhomogeneous Fluid Field on UVP Measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD 2021)	6. 最初と最後の頁 162-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井原智則, 波津久達也
2. 発表標題 超音波による水平矩形流路内気泡流の液相速度場計測
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 波津久達也, 井原智則
2. 発表標題 水平壁面下の二相流動構造と摩擦抵抗低減
3. 学会等名 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
研究分担者	井原 智則 (Ihara Tomonori) (70767350)	東京海洋大学・学術研究院・助教 (12614)	

	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
研究協力者	日引 俊詞 (Hibiki Takashi)	香港城市大学・Department of Mechanical Engineering・ Chair Professor	

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