

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03487

研究課題名(和文) 海水環境に適用可能な外部流れの二相流解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of external two-phase flow prediction method applicable to seawater environment

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) 12,600,000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(空気潤滑法)の高度化の観点から、本研究は、海水中を含む外部流れの二相流を対象とした新しい二相流解析手法の構築を最終目的とした。製作したモデル船を回流水槽に設置して模擬船底下の二相流実験を行い、これまでに計測例がほとんどない外部流れの二相流の局所流動構造に関するデータベースを構築した。さらに、海水中気泡流の実験を行い、二相流の各種予測式の開発に必要な気泡の抗力係数と合一特性に関する実験データを取得した。取得された実験データと解析結果に基づき、気泡層厚さを代表の空間スケールとして外部流れの二相流のモデル化を行い、新しいボイド率予測式の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水中および外部流れの二相流の局所流動構造に着目した研究は、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、現状に鑑みて新規性が高い。本研究により、外部流れの二相流の流動機構と海水中の気泡挙動に関する新たな知見が得られ、さらに外部流れの二相流を対象とした新しいボイド率予測式が開発された。これらの成果は、これまで開発途上であった海水中および外部流れの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)：This study was aimed at developing a new analytical method for the external two-phase flow in the seawater, which contributes improvement of a ship drag reduction technology based on the air lubrication method.

The database on local flow structures in the external two-phase flow under a model ship bottom was newly constructed through the experiment using a circulation water tunnel. Experiments for a single bubble and bubbly flows in the seawater were also performed to identify the characteristics of the interfacial drag of a single bubble and the bubble coalescence in the seawater. Based on the obtained experimental data and the analytical results, a modeling of the external two-phase flow was examined by taking the bubble layer thickness as a length scale and a new correlation for predicting void fraction under the ship bottom was successfully developed.

研究分野：船舶・海洋工学

キーワード：船舶工学 空気潤滑法 気液二相流 外部流れ 抵抗低減

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

船体抵抗低減方法の一つとして有望視されている空気潤滑法（船底への気泡混入による摩擦抵抗低減法）は、これまで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議論や、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チャンネル内流れを対象としてなされている（例えば、文献[1]）。しかし、船底のように海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は異なり、速度境界層と気液界面構造が発達し続け、また、海水中では界面構造が通常の水中と異なる可能性がある。実船における空気供給方法（供給位置、気泡径、供給量等）の決定においては、このような海水中でかつ外部流れ特有の二相流動構造と壁面摩擦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発展途上であり、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。

近年の数値解析技術の進展により、船底のような大規模構造体の周囲に形成する二相流動の多次元解析が可能となりつつあるが、現行の解析コードはパラメータ設定により解析結果が左右されるため、未知の流れに対して信頼性を十分担保した予測はできない。船底の二相流動構造を高精度に予測するためには、解析コードに組み込まれる二相流の各種構成式が現象を正しく反映したものでなければならず、また、解析結果の信頼性を検証するための精緻な実験データが必要となる。特に、海水中の二相流挙動は不純物の影響により通常の水中と大きく異なる可能性があり、船底の二相流動構造を対象とした解析の検証には、通常水中のみならず実海水中で取得された実験データが必要となる。しかしながら、海水中や外部流れの二相流を対象として実験データを取得した例は少なく、また、その現象を正しく反映した二相流構成式は未開発である。

### 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構築を最終目的とし、外部流れの二相流および海水中二相流を対象とした以下の実験的、解析的研究を行った。

- (1) 外部流れの二相流の流動構造に関する実験データベースの構築
- (2) 外部流れの二相流のボイド率予測式の開発
- (3) 海水中の気泡挙動に関する実験的検討

### 3. 研究の方法

- (1) 外部流れの二相流の流動構造に関する実験データベースの構築

東京海洋大学所有の回流水槽（観測部：長さ 9.0m×幅 2.2m×水深 1.6m）にモデル船（全長 2.45 m×幅 0.31 m）を設置し、その船底に気泡を供給することで外部流れの二相流を形成した。テスト部には、二相流構造の空間発達特性を確認できるように、船底の複数位置に空気供給部と二相流界面構造データ計測部および可視化観測部を設置できる構造とした。Fig. 1, Fig. 2 に、それぞれ、実験装置の概略と回流水槽に設置したモデル船の外観を示す。

二相流界面構造データの測定には、テスト部流れ方向の任意位置に設置できる探針式プローブを用いた。また、船底における二相流の空間変化特性と流動様式を詳細に観察するため、テスト部に高速度ビデオカメラを設置した。各測定と流動観察は、モデル船の船首からの流れ方向位置  $z = 1.27, 1.75, 2.23$  m において、液相流速  $U_{f,y=25} = 0.8 - 1.8$  m/s（船底壁面からの距離  $y = 25$  mm における流速）、気相流量  $Q_g = 5 - 40$  l/min の範囲で行われた。

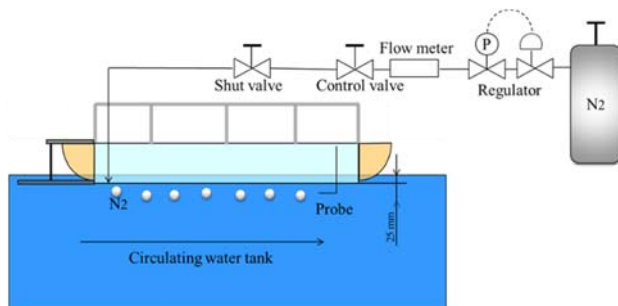


Fig. 1 Schematic of apparatus



Fig. 2 Model ship on circulating water tank

- (2) 外部流れの二相流のボイド率予測式の開発

上述のモデル船実験において取得された実験データと解析結果に基づき、外部流れの二相流のモデル化を行った。外部流れの二相流構成式の開発において重要となる点は、ボイド率や界面積濃度などの流動パラメータを定義する際に必要となる空間領域を適切に設定することである。船底を流動する外部流れは、チャンネル内流れと異なり、幅方向と深さ方向の空間が無限となるため、流動パラメータの解析領域を決定する代表長さを新たに定義する必要がある。本研究では、

試験部流路幅, 空気吹き出し部の幅, 気泡層厚さを代表の空間スケールとして, ドリフトフラックスモデルに基づく新しい外部流れの二相流のボイド率予測手法の開発を試みた.

### (3) 海水中の気泡挙動に関する実験的検討

海水中二相流の流動特性を評価するための静止液中気泡流実験を実施し, 海水中二相流のモデル化や構成方程式の開発に必要な気泡抗力係数と気泡の合一特性に関する実験データを取得した. 気泡の界面抗力を計測するため, プール水中に単一気泡を形成する装置を製作した. 初期気泡径を気泡発生用針のサイズにより調整することで広範な気泡形状を模擬し, その気泡形状と上昇速度の変化を画像解析により計測した. さらに, 気泡の合一による二相流動構造の空間発達特性を評価するため, プール水中に内径 9 mm の透明円管を設置し, その内部の静止液中を垂直上昇する気泡流の空間発達特性 (ボイド率, 気泡径, 気泡個数密度の管軸方向変化) を画像解析により計測した.

## 4. 研究成果

### (1) 外部流れの二相流の流動構造に関する実験データベースの構築

これまでに計測例がほとんどない外部流れの二相流の流動様式および局所流動パラメータ (ボイド率分布, 気相速度分布, 気泡弦長分布, 界面積濃度分布) の空間発達に関するデータベースを構築した. 局所ボイド率は, 流動様式によって特徴的な分布形状を示した (Fig. 3). ボイド率分布の計測値から評価した気泡層厚さ  $\delta_B$  (気相が存在する壁面からの領域) は, 助走距離, 液流速によらずほぼ一定で, その値は  $\delta_B = 8 \sim 9$  mm であった. ほぼ同一の助走距離, 流速条件の範囲で実施した水平矩形流路内二相流実験では, 液流速と助走距離に対して気泡層厚さが鋭敏に変化した. したがって, この結果は外部流れ特有の結果と言える. 本実験は, 外部流れの遷移域近傍の液相レイノルズ数条件で実施しているため, 乱流拡散力よりも浮力が強く作用して気相が船底下を集中して流動し, それにより気泡層厚さがほぼ一定で推移したものと推察される.

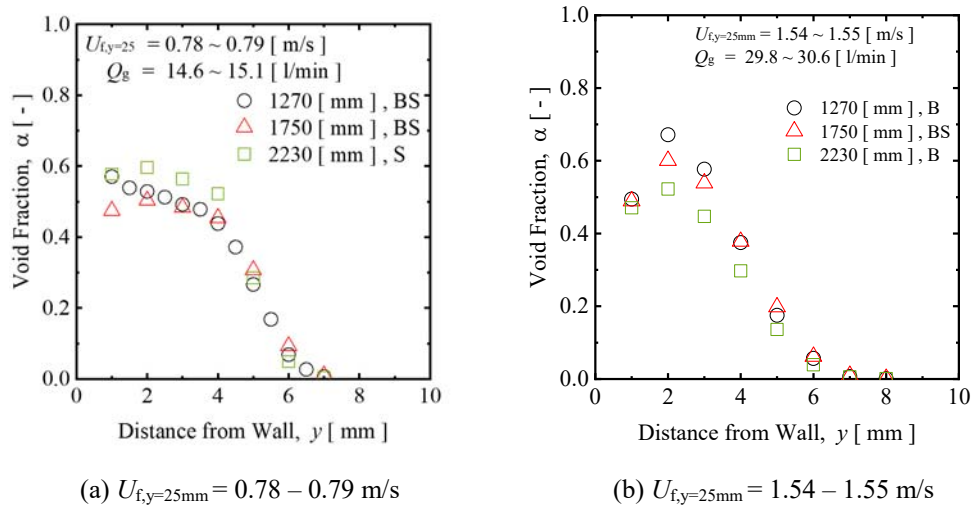


Fig. 3 Void fraction profile in external two-phase flow

### (2) 外部流れの二相流のボイド率予測式の開発

本研究では, モデル船実験で確認されたボイド層厚さにほぼ相当する  $4La$  ( $La$ : ラプラス長さ  $= (\sigma / \Delta \rho g)^{0.5}$ ,  $\sigma$ : 表面張力,  $\Delta \rho$ : 気液密度差,  $g$ : 重力加速度) を長さスケールとして, 次式に示すように一次元ドリフトフラックスモデル<sup>[2]</sup>を外部流れの二相流に拡張した. なお,  $4La$  は, 球形気泡から変形気泡への遷移径としてしばしば気泡流のモデル化に使用されるスケールでもある.

$$\langle\langle v_g \rangle\rangle_{4La} = \frac{\langle j_g \rangle_{4La}}{\langle \alpha \rangle_{4La}} = \frac{\langle \alpha j \rangle_{4La}}{\langle \alpha \rangle_{4La} \langle j \rangle_{4La}} \langle j \rangle_{4La} + \langle\langle v_{gi} \rangle\rangle = C_{0,4La} \langle j \rangle_{4La} + \langle\langle v_{gi} \rangle\rangle_{4La} \quad (1)$$

ここで,  $v_g$ ,  $j_g$ ,  $j$ ,  $v_{gi}$ ,  $C_{0,4La}$  は, それぞれ, 気相速度, 気相の見かけ速度, 気液混合体積流束, 気相ドリフト速度および分布パラメータであり, 数学記号の  $\langle \rangle$  は空間平均量を,  $\langle\langle \rangle\rangle$  はボイド率加重平均量を示す. 厚さ  $4La$  内における気液混合体積流束  $\langle j \rangle_{4La}$  は次式で与えられる.

$$\langle j \rangle_{4La} = \langle j_f \rangle_{4La} + \langle j_g \rangle_{4La} \quad (2)$$

ここで,  $j_f$  は液相の見かけ速度である. 外部流れの二相流において, 厚さ  $4La$  内における液相見かけ速度  $\langle j_f \rangle_{4La}$  を以下の式で近似する.

$$\langle j_f \rangle_{4La} \cong (1 - \langle \alpha \rangle_{4La}) \langle v_f \rangle_{4La} \quad (3)$$

厚さ  $4La$  内の平均液相速度  $\langle v_f \rangle_{4La}$  を、1/7 乗則に基づき以下の式で与える。

$$\langle v_f \rangle_{4La} = \frac{v_\infty}{4La} \int_0^{4La} \left( \frac{y}{\delta_f} \right)^{1/7} dy = 0.875 \left( \frac{4La}{\delta_f} \right)^{1/7} v_\infty \quad (4)$$

ここで、 $\delta_f$  は液单相流の速度境界層厚さであり、以下の式で表せる。

$$\frac{\delta_f}{z} = 0.382 \left( \frac{v_f}{v_\infty z} \right)^{1/5} = \frac{0.382}{Re_z^{1/5}} \quad (5)$$

$v_f$  は液相の動粘性係数、 $Re_z$  は  $z$  を代表長さとした液相レイノルズ数である。

一方、厚さ  $4La$  内の平均気相見かけ速度  $\langle j_g \rangle_{4La}$  は、気相流量  $Q_g$ 、流路幅  $X$  を用いて以下の式で与える。

$$\langle j_g \rangle_{4La} = \frac{Q_g}{4La \cdot X} \quad (6)$$

式(1)に基づき、実験データの回帰から、厚さ  $4La$  内の平均ボイド率に関する以下の式を得た。

$$\langle \alpha \rangle_{4La} = \frac{\langle j_g \rangle_{4La}}{C_{0,4La} \langle j \rangle_{4La} - 0.11} \quad (7)$$

$$C_{0,4La} = 0.87 \left\{ 1 - \exp(-24 \langle \alpha \rangle_{4La}) \right\} \quad (8)$$

式(7),(8)による厚さ  $4La$  内平均ボイド率の予測値は、液流速と空気流量の増減に対する実測値の変化傾向を精度良く再現でき(Fig. 4)、両者の平均相対偏差は 9.8%であった(Fig. 5)。

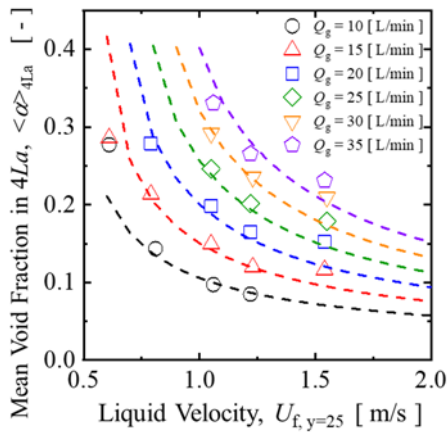


Fig. 4 Measured and predicted  $\langle \alpha \rangle_{4La}$

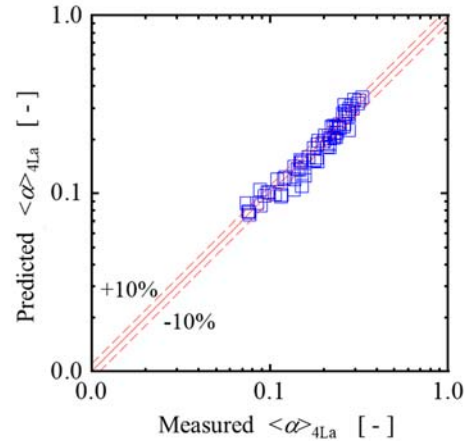


Fig. 5 Prediction accuracy of present model

### (3) 海水中の気泡挙動に関する実験的検討

純水、人工海水、実海水における単一上昇気泡の形状および上昇速度の実験データベースを作成した(Fig. 6, 7)。それらのデータに基づき、球形気泡、変形気泡、キャップ気泡の各気泡形状領域を対象とした界面抗力係数を整理し、既存の相関式と比較した。その結果、人工海水および実海水中を上昇する気泡の抗力係数は、球形気泡領域において純水中の抗力係数よりも大きく、気泡上昇速度が減少すること、また、変形気泡およびキャップ気泡領域においては水質の影響は無く、汚れた水中の上昇気泡を対象にして得られた Tomiyama らの実験相関式<sup>[3]</sup>とよく一致することを確認した。また、内径 9 mm 管内静止液中を垂直上昇する気泡流を対象として、純水中および実海水中の気泡流の管軸方向発達を高速ビデオカメラにより撮影し、画像解析に基づき気泡の合一挙特性を評価した(Fig. 8, 9)。その結果、海水中では、流れの発達に伴い気泡個数密度が減少する傾向にあるが、その減少傾向は純水中と比較して緩やかであり、気泡の合一頻度が著しく低いことを確認した。本実験で得られた海水中の抗力係数および気泡合一に関する知見は、海水中二相流を対象とした解析コードの開発に有用となる。



<引用文献>

- [1] Murai, Y., Exp. Fluids, 55:1773, 1-28 (2014).  
 [2] Ishii, M., Hibiki, T., Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow, 2nd edition, Springer (2010).  
 [3] Tomoyama, A., et al., Journal of JSME (B), 61-588, 2810-2817 (1995).

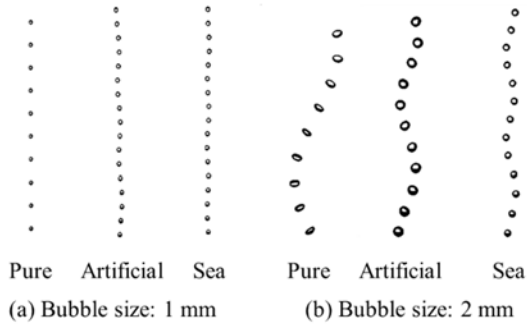


Fig. 6 Single bubble trajectory images

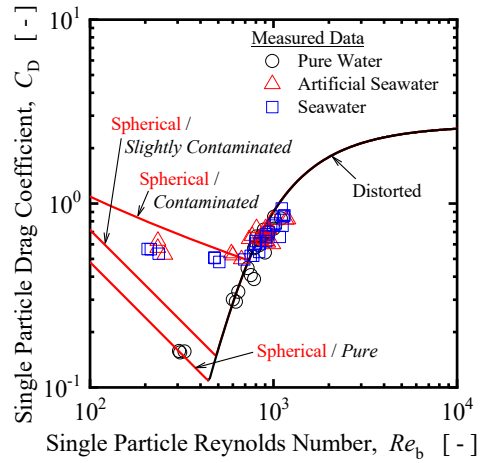
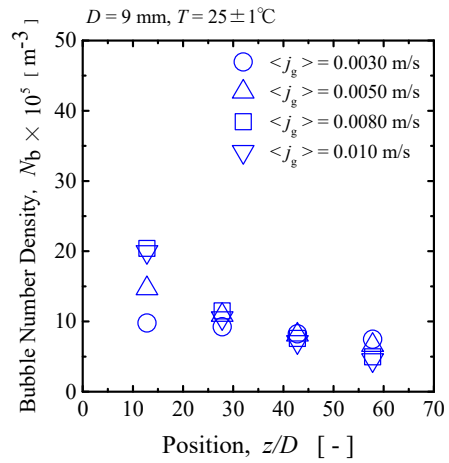


Fig. 7 Drag coefficient of single bubble

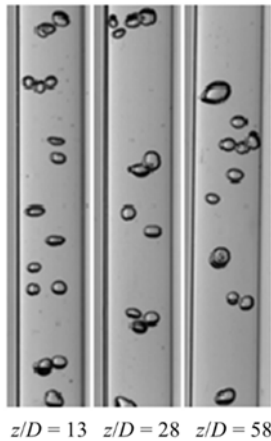


(a) Flow images

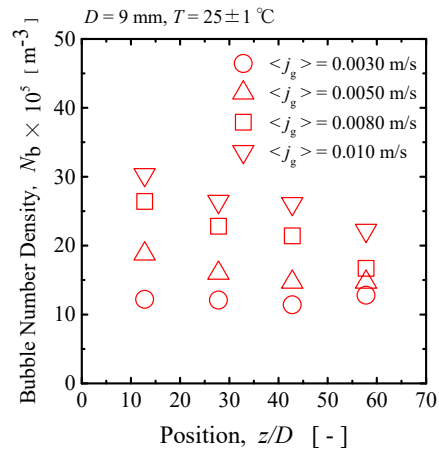


(b) Bubble number density

Fig. 8 Axial changes of bubbly flow in pure water



(a) Flow images



(b) Bubble number density

Fig. 9 Axial changes of bubbly flow in sea water

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hazuku Tatsuya, Ihara Tomonori, Hibiki Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Measurement of local two-phase flow parameters of downward bubbly flow in mini pipes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental and Computational Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 89 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s42757-019-0039-5">https://doi.org/10.1007/s42757-019-0039-5</a>	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 該当する

1. 著者名 Ihara Tomonori, Andayi Samwel Aloyo, Hazuku Tatsuya, Takamasa Tomoji, Hibiki Takashi	4. 巻 53
2. 論文標題 Experimental Study of Two-phase Flow Structure and Drag Reduction in Horizontal Rectangular Channel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Engineering	6. 最初と最後の頁 336 ~ 341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.5988/jime.53.336">https://doi.org/10.5988/jime.53.336</a>	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 該当する

1. 著者名 波津久達也、井原智則	4. 巻 89th
2. 論文標題 矩形流路内気液二相流の局所流動パラメータの計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 275-276
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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomonori Ihara, Samwel Aloyo Andayi, Tatsuya Hazuku, Tomoji Takamasa, Takashi Hibiki
2. 発表標題 Experimental Study of Two-phase Flow Structure and Drag Reduction in Horizontal Rectangular Channel
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Marine Engineering (ISME2017 TOKYO) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 椎野僚太, 井原智則, 波津久達也, 賞雅寛而
2. 発表標題 水平矩形流路内二相流におけるボイド率と壁面摩擦抵抗低減
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomonori Ihara, Tatsuya Hazuku
2. 発表標題 Measurements of Two-Phase Flow Structure and Wall Shear Stress in Horizontal Rectangular Channel
3. 学会等名 Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 熊匯捷, 井原智則, 波津久達也, 賞雅寛而
2. 発表標題 海水中に形成する気泡の上昇特性と合一特性について
3. 学会等名 第87回(平成29年)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 椎野僚太, 井原智則, 波津久達也, 賞雅寛而
2. 発表標題 矩形流路内に形成する二相流の流動構造と壁面摩擦特性
3. 学会等名 第87回(平成29年)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 波津久達也、井原智則
2. 発表標題 矩形流路内気液二相流の局所流動パラメータの計測
3. 学会等名 第89回(2019年)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019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)	
研究協力者	日引 俊詞  (Hibiki Takashi)	バドュー大学・School of Nuclear Engineering・Professor Emeritus	