

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14069

研究課題名（和文）気液混相乱流境界層で現れる特異脈動を応用した広範囲乱流制御技術

研究課題名（英文）Wide-ranged turbulent flow control using singular pulsations appearing in the gas-liquid multiphase turbulent boundary layer

研究代表者

PARK HYUNJIN (Park, Hyun Jin)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：00793671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：空気潤滑法において、壁面摩擦抵抗低減が生じる際に現れる時空間上でのボイド率の脈動現象（ボイド波）の生成メカニズムとその伝播モデリング、そしてその利用を目的に平板境界層を持つ実験船と断面形状が異なる複数の矩形チャンネルを用いて実験的に研究を行った。異なる流路で成長するボイド波の観測から、ボイド波の生成過程とその生成に乱流境界層の成長が関わっていることが分かった。また、人工ボイド波と船底局部抵抗低減率を記述するモデル式を構築でき、船首側で生成した人工ボイド波は少々減衰はするものの船尾まで到達すること、そして船首側以外の領域で抵抗低減率が人工ボイド波によって改善されることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

抵抗低減率と人工ボイド波の下流持続性が確認され、さらにその伝播過程を記述するモデル式の構築により、船体における空気潤滑法がもたらす全摩擦抵抗低減率と人工ボイド波の抵抗低減促進効果を推定することが可能になった。また、ボイド波の生成条件と生成過程を把握できたことで、今後人工ボイド波を設計するための実験環境と計測すべき物理量が明確になった。

研究成果の概要（英文）：For the understanding of the generation mechanism and propagation modeling of the spatio-temporal fluctuations of the void fraction, named as a void wave, that appears when the air lubrication reduces the wall frictional drag, experimental studies using rectangular channels having different cross-sectional shapes and model ships having a turbulent boundary layer on flat-plate. From the observation of void waves growing in different channels, it was found that the generation process of void waves and the growth of the turbulent boundary layer are involved in the generation of void waves. It was found that the drag reduction rate is improved by the artificial void wave where all areas of the ships except near the bubble injector. In addition, models that describe the propagation of the artificial void wave and the local drag reduction rate at the bottom of the ship with the air lubrication were constructed from experimental data.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 抵抗低減 気泡 船舶

1. 研究開始当初の背景

船舶の摩擦抵抗を低減する空気潤滑法の技術開発（Bubbly drag reduction, BDR）は、現象の複雑さゆえに半世紀近く挫折が続いた。2000年代に入り、計測装置と数値計算の発展で、摩擦の抵抗低減原理が解明され始め、世界各地で21隻の船を使った実践試験が行われた。最大12%の抵抗低減率を記録する中、低減率の低い再現性が指摘された。また、船が大型化するほど低減率が低下し、下流持続性が短くなることが発覚した。IMO規定で2050年までに海運CO2排出量半減させる義務を背負う造船業界としては、BDRの再現性と下流持続性の改善は最優先の技術課題である。

気泡は移流する際に境界層との相互作用でクラスターを作り、上流で与えた均一なボイド率（気泡体積率）分布が下流で不均一になる。今まで、この不均一さが再現性と下流持続性の低下要因だと考えられてきた。しかしこの考えは間違いであった。申請者の研究で、抵抗低減は気泡クラスターが一定周期の脈動に成長した際に生じ、また船底流れの状態によってはその周期と同程度の周期をもつ人工的な脈動を与えることで抵抗低減が飛躍的に増幅することが判明した。

人工脈動による再現性と下流持続性の改善可能性が提示される中、人工脈動を活用するには、事前に自然に現れる脈動の把握が必要である。また、与える人口脈動を設計するには、人口脈動が減衰せず維持できる距離や距離別の抵抗低減幸福率などをわからなければならない。しかし、自然生成脈動を境界層理論や特定の不安定性で説明することは困難であり、脈動の生成・発達過程が未知のままである。

2. 研究の目的

脈動は、長さ100m以上の船底を移流する微細気泡(O(100 μ m))が気泡クラスター(O(10cm))へ、そして脈動(O(1m))へと成長していく「マルチスケール現象」である。本課題の2年間のみで、脈動生成・成長の全過程を解析するのは困難であるため、研究目的を下記四つに絞る。それぞれの研究目的を達成することで、どのような条件下で人口脈動による抵抗低減促進効果を得られるのか、そしてその促進効果により船舶の抵抗低減率がどれほど改善されるかを予想する。

- ・脈動が自然的に生成される条件の特定
- ・人口脈動の下流持続性の評価
- ・抵抗低減率の下流持続性の評価
- ・船底の流れを把握するための計測技術の開発

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、それぞれの目的別に異なる研究方法を用いる。

- ・脈動が自然的に生成される条件の特定

今までのBDRの研究は大きく分けて二つの実験系で行われてきた。一つは物理的な抵抗低減メカニズムを究明するための閉鎖矩形流路実験、もう一つは実用条件における抵抗低減率を予想するための模型船実験である。半世紀に及ぶ研究にも関わらず、数年前までボイド率の脈動が発見されていなかったのは、流れの観測が容易な閉鎖矩形流路実験で脈動が明確に現れなかったためである。船底の流れなど、流れの観測が困難だった流れを漸く観測可能になった今でこそ、混相の脈動現象が発見されたのである。本項では、脈動の生成が二つの流れで異なる原因を探るため、様々な流路における脈動生成の有無を調べる。流路によって流れの条件がことなるため、それぞれの流れにおける類似・相違点を比較し、脈動生成の重要因子を把握する。

- ・人口脈動の下流持続性の評価

気液二相流において当脈動と類似したものが流動層で観測される。流動層の脈動は理論的に解くことができ、KdV-B方程式として記述可能である。流れの駆動原理が全く異なるので流動層の脈動理論をそのまま用いることはできないが、観測結果の類似性より船底の脈動もKdV-B方程式でモデリング可能だと推測している。本項では、流下距離における脈動の状態を観測し、脈動の発達過程を整理する。そして、KdV-B方程式に観測結果を代入し、伝播過程の推定を行う。

- ・抵抗低減率の下流持続性の評価

模型船実験を通じて、流下距離における抵抗低減率を測定する。測定結果を基に、局部抵抗低減率を予想するモデル式を作る。このモデル式を通じて、100mを超える実船舶でBDRを適用した際の全船体における抵抗低減率を推定する。

- ・船底の流れを把握するための計測技術の開発

特殊な実験船以外の船舶で、流れが高速かつ強いせん断で支配されている船底の気泡流

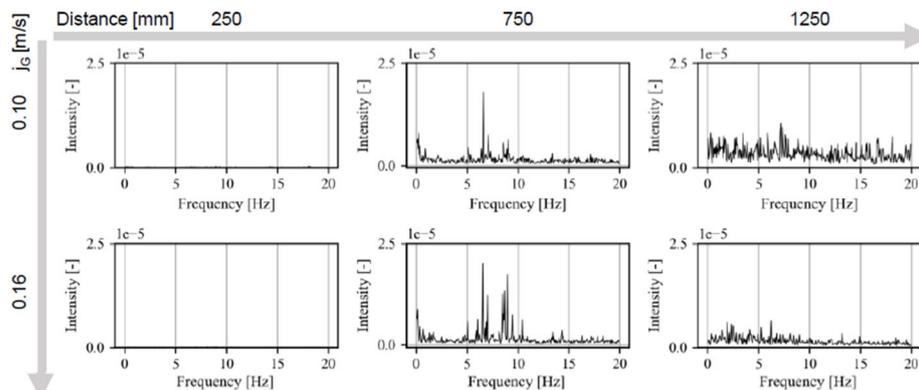
を観測することは、既存の計測機器をそのまま使用してはきわめて難しい。本項では、船底流れの計測を目的に、気液二相流用超音波計測法を開発する。超音波計測は非侵襲的に流れを観測可能であり耐久性が高く、気液界面の高い反射率を利用し界面の特定が可能である。

4. 研究成果

・脈動が自然的に生成される条件の特定

船底の乱流境界層と矩形流路の乱流境界層の決定的な相違点は流下距離による境界層発達の有無にある。矩形流路でも境界層の発達があれば脈動が生じると仮定し、流下距離によって境界層の厚さが変化する拡大流路を製作し、脈動の生成有無を観測した。流路の長さは約 2 m、入口の流路高さが 10 mm であり、流路下壁面の傾斜角は 1-3° に変化させた。実験結果、傾斜角 1° の場合、脈動の生成と発達過程が観測された。他の傾斜角度では、流路拡大で生じる昇圧効果により流れが壁面から剥離し、流路全体において渦巻いたため、計測を断念した。

傾斜角 1° で観測された脈動の流下距離における周波数解析結果を右図に示します。拡大開始から 250 mm の上流では脈動がないが、750 mm の中流に達するまでの 500 mm の間で 6-8 Hz の脈動が生成されたことが周波数

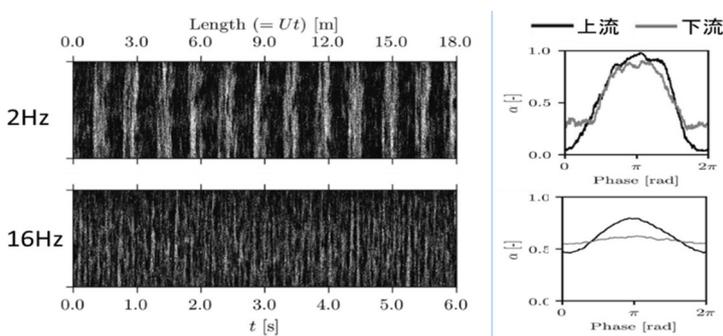


拡大流路で観察される脈動の周波数解析結果

解析からわかる。さらに下流の 1250 mm になると、中流で現れた 6-8 Hz 台のピークは減衰し、さらに 5 Hz 以下で周波数成分が現れ始める。可視化画像より、下流になるほど気泡径が大きくなる ことが確認できたため、気泡の合体により周波数の低下が生じたと考えられる。流下距離と共にボイド波の周波数が低下する現象は脈動現象が初めて観測された模型船実験での結果でも現れている。さらに両方の実験で液相の流速が一致している条件下で現れた周波数帯が類似しているため、拡大流路と船底で現れる脈動は全く同様な現象である可能性がある。

・人口脈動の下流持続性の評価

模型船曳航実験 船底の境界層における人工脈動の下流持続性を評価した。広島大学の 100m 水槽で行った模型船曳航実験の写真と船の概要を示す。光学可視化のため透明アクリル板で作した 4m 模型船を 1.5~3.0m/s で曳航した。得られた計測データの例として、2Hz と 16Hz の気相脈動の可視化より得られた下流での時間展開画像を下図の左側に示す。時間展開画像では、白い領域を気相、黒い領域が液相を意味する。時間方向に白と黒の帯模様が周期的に現れており、船首で与えた人工脈動が船尾の下流まで到達していることがわかる。人工脈動の発達過程を理解するため、各周波数で位相平均した脈動の波形を図の右側に示す。時間展開画像では、2Hz と 16Hz の両脈動共に与えた周波数を下流まで保っているように見える。しかし、位相平均波形を比べた結果、上流の位相平均波形で見える正弦波の波形が、高い周波数では下流まで維持できないことが判明した。脈動を長距離下流まで維持するためには、低周波数の脈動を用いる必要がある。



人工脈動：(左) 下流での時間展開画像、(右) 位相平均波形

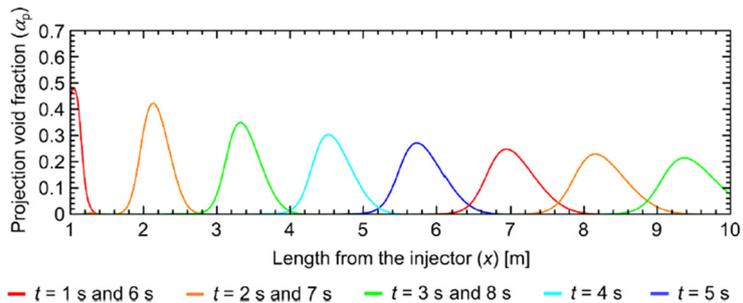
位相平均波形の振幅の変化より、脈動が移流と共に減衰していくことはわかったが、脈動を工学的に利用するためには、与えた脈動がどれほど下流まで持続可能なのかを知る必要がある。脈動の持続可能性を評価するために、下記のような取り組みを行った。脈動の移流過程をの移流拡散方程式に落とし込むと、位相平均波形の減衰を拡散係数 D として定量的に評価できる。船速と気泡の注入量により、人工脈動の拡散係数が $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} < |D| < 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ の広い範囲で存在する。小さい D であるほど、脈動の長距離伝播が可能である。例えば、船速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 、気相厚さ $t_g = 0.56 \text{ mm}$ で 8 Hz の脈動を与えた場合、脈動の拡散係数は $D \sim 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、その脈動は 1 m 下流で 93%、10 m 下流で 47%、20 m 下流で 22% の脈動強度が維持される。

矩形流路実験 一般的な波動や物質の伝播で、拡散係数は正の値をとる。しかし、模型船実験で得た拡散係数はいくつかの実験条件において負の値を持った。移流拡散方程式では非線形効

果を考慮していないため、気液混相乱流がもつ強い非線形性が拡散係数に無理やり集約された結果だと考えられる。負の拡散係数を直すためには、非線形性を考慮してモデリングを行う必要があり、非線形方程式である KdV-B 方程式を用いて脈動伝播を評価した。模型船実験では脈動の波形を高精度で計測することは困難であるため、この評価では実験・計測が容易な矩形実験（バルク流速 1.5m/s）の計測結果を用いた。計測結果をモデル式に当てはめて得た各種係数の一例を下表に示す。

	移流速度 u	非線形項 B	拡散係数 D	散逸係数 E
推定値	1.23 m	-0.19 m/s	0.0081 m ² /s	0.00006 m ³ /s

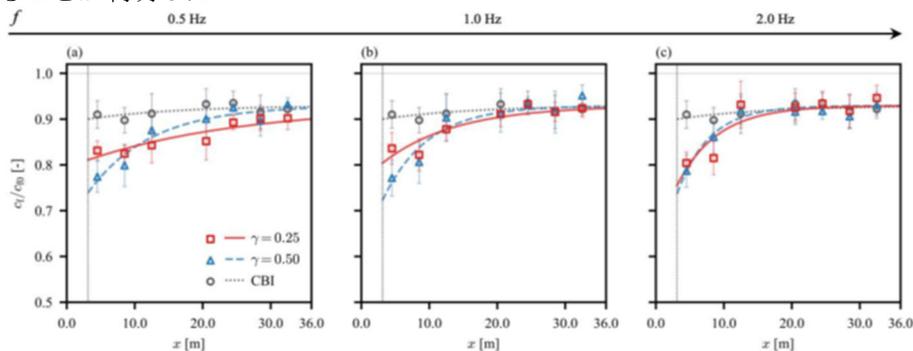
模型船実験で言及した拡散項以外にも、非線形項と散逸項が存在し、それにより脈動の波形が変わることがわかった。また、これらの全ての係数が把握できたので、伝播モデルを用いて移流距離における脈動の波形を予想することが可能である。気泡注入後の 1m 下流で計測したボイド波の波形と上記係数を適用した伝播モデルにより予想した 10m 下流までの脈動の波形を右図に示す。波形の減衰は見られるものの、長距離まで脈動が維持されている。今後は、この波形と抵抗低減率の関係を究明することで、脈動の測定より下流における抵抗低減率を推定する方法の開発を目指す。



移流距離における人工脈動の波形予測結果

・抵抗低減率の下流持続性の評価

海上技術安全研究所が所有する長さ 400m の曳航水槽で全長 36m の模型船を 8m/s で牽引し、既存の連続注入法（Continuous Bubble Injection, CBI）と RBI によるせん断応力の変化を船体の 23 箇所で測定した。計測結果より求めた摩擦抵抗係数 c_f の一例 ($t_a = 3.0\text{mm}$) を下図に示す。 t_a は空気注流量を船底幅と船速で割った気膜相当厚さであり、図中の f と γ はそれぞれ RBI の周波数と一周期における注入時間の比を表した RBI のデューティ比である。RBI により、CBI の 2 倍程度の抵抗低減率が船首側で得られている。また、RBI による抵抗低減率改善効果は、周波数が高いとデューティ比による影響はあまり見られない。しかし、周波数が低い場合は、デューティ比による影響が現れ、船首側の改善率は高いデューティ比が、下流持続性は低いデューティ比が優れていることが判明した。

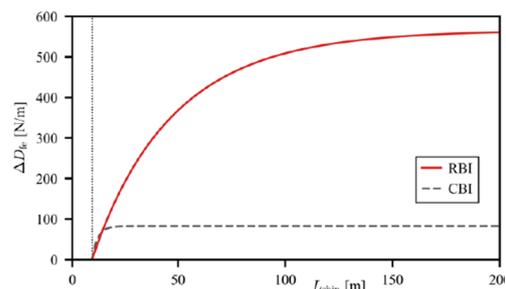


船体各場所における抵抗低減率の一例 ($t_a = 3.0\text{ mm}$ の場合)

次に、全船体における抵抗低減率を船体の 23 箇所で計測したせん断応力より求めた。空気流量が大きいほど、RBI の周期が長く、注入時間が短いほど抵抗低減率が CBI と比べ改善されていることが確認できた。36m の模型船の場合はこのような結果になったが、各場所における抵抗低減率が異なるため、BDR の適用対象である 100m を超える大型船舶では、模型船の結果とは異なる可能性がある。異なる全長の船舶でも全抵抗低減率を予測するため、より長距離における摩擦抵抗係数を推定する下記のモデル式を作った。

$$\frac{c_f}{c_{f0}} = 1 - (I_0 - I_\infty) \exp\left(-3 \frac{x - L_b}{L_{95}}\right) - I_\infty$$

ここで、 I_0 と I_∞ は空気注入部と十分に離れた下流での抵抗低減効果の係数、 x と L_b 、 L_{95} はそれぞれ船首からの距離、気泡注入部の位置、抵抗低減効果が I_∞ の平衡状態まで到達する距離である。実験結果とこのモデル式で推定した全船体における抵抗低減率を右図に示す。周波数 $f = 0.5\text{ Hz}$ 、デューティ比 $\gamma = 0.25$ の RBI と既存の CBI で比較すると、長さ 130m

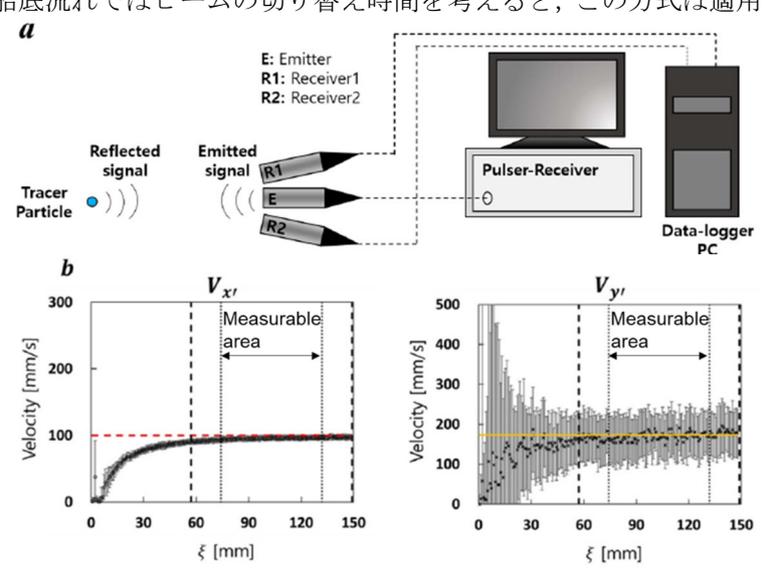


船の全長によって異なる摩擦抵抗低減率 (RBI: $f = 0.5\text{ Hz}$, $\gamma = 0.25$, $t_a = 4.5\text{ mm}$ の場合)

の船舶は $t_a = 4.5 \text{ mm}$ の場合 RBI が CBI より 7 倍の抵抗低減効果を得る。これより、実船舶でも人工脈動を用いた RBI が有効であることが確認できた。しかし、この結果はあくまで海の波や海流がない理想的な条件での抵抗低減効果を推定であるため、実用条件を考えると RBI を用いるためには、船底の流れを計測し、抵抗低減に最も有効な脈動を船底に与えるフィードバック制御技術が必要になる。

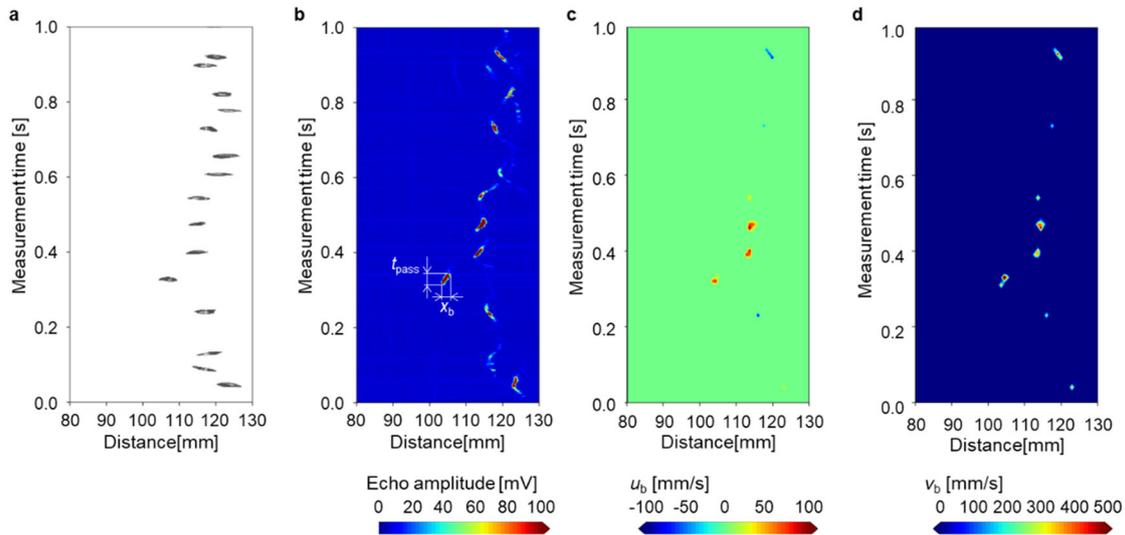
・船底の流れを把握するための計測技術の開発

Vector-UVP の開発 船底の乱流境界層と気泡を計測するには単一の超音波トランスデューサーが提供するビーム方向速度分布では計測結果に大きな誤差が乗る。この誤差は低減するには少なくとも二成分の速度ベクトルを取得しなければならない。一般に複数の超音波ビームを使うことが多いが、流れが高速な船底流れではビームの切り替え時間を考えると、この方式は適用できない。そのため、ここでは単一の超音波ビームから速度ベクトル場を得る計測方法を開発した。右図のように、超音波パルサーに繋いだ一つのエミッターより超音波パルスを発信し、エミッター周辺に設置した二つのレシーバーより液相に混ぜたトレーサ粒子や気泡の気液界面よりの反射波を受信する。この際、レシーバーの設置精度が異なるので、二つのレシーバー受信した信号に含まれているドップラー効果にずれが生じる。このずれを解析することで、本来の超音波流速分布計 (UVP) では得られないビームの直交方向の速度 (V_y) を計測可能になる。



Vector-UVP; (a)システム概要図と(b)一定流速の流れの計測例

気泡の計測 音波は気液界面でほぼ全反射するため、液相計測のために混入したトレーサ粒子に比べ遥かに強い反射強度を気泡は示す。この反射強度を用いて、気液界面の検出ができる。Vector-UVP で気泡を計測し、気泡の速度と大きさの推定を行った。下図の(a)にカメラで撮影した気泡の時系列画像と、(b)–(d)に Vector-UVP での計測結果を示す。上記のように、気泡がある位置で超音波の強い反射強度が検出されており、この位置における速度ベクトルを取り出すことで、気泡の移動速度 (u_b と v_b) が計測可能になる。また、気泡形状が楕円だと仮定し、反射強度分布から界面の形状に関する情報 (通過時間 t_{pass} と半長さ x_b) と通過速度 v_b を用いることで個々の気泡の大きさが評価できる。Vector-UVP 計測した気泡の直径と速度に関する誤差評価の結果を表 1 に示す。速度の誤差は 4% 以下、直径の誤差は 12% であり、速度計測に関しては実際に計測機器として運用可能なレベルに達している。直径が大きく評価されている原因として、距離によって広がる超音波パルスの直径が考えられており、この過大評価はパルスの直径を考慮し補正することで改善できる。



気泡計測; (a) 光学可視化, (b) 反射強度, (c) ビーム方向の速度, (d) ビーム直方向の速度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka Taiji, Oishi Yoshihiko, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Kawakita Chiharu	4. 巻 239
2. 論文標題 Repetitive bubble injection promoting frictional drag reduction in high-speed horizontal turbulent channel flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 109909 ~ 109909
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2021.109909	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 -
1. 著者名 Kim Sangwon, Oshima Nobuyuki, Park Hyun Jin, Murai Yuichi	4. 巻 145
2. 論文標題 Direct numerical simulation of frictional drag modulation in horizontal channel flow subjected to single large-sized bubble injection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103838 ~ 103838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103838	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 -
1. 著者名 Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 146
2. 論文標題 Spatial development of single void pulse in a horizontal turbulent bubbly channel flow investigated by a time-resolved two-laser measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103867 ~ 103867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103867	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 -
1. 著者名 Yoon Dongik, Park Hyun Jin, Ihara Tomonori	4. 巻 33
2. 論文標題 Development of an instantaneous velocity-vector-profile method using conventional ultrasonic transducers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 035301 ~ 035301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac37ec	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 -

1. 著者名 TANAKA Taiji, OISHI Yoshihiko, PARK Hyun Jin, TASAKA Yuji, MURAI Yuichi, KAWAKITA Chiharu	4. 巻 88
2. 論文標題 Frictional drag reduction by bubble injection in turbulent boundary layers: Experiment with long model ship and full-scale estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 2100297 ~ 2100297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00297	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 -

1. 著者名 Yoon Dongik, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 149
2. 論文標題 Drag coefficient of bubbles sliding beneath a towed model ship with variable tilt angles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 103995 ~ 103995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.103995	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 -

1. 著者名 Tanaka Taiji, Oishi Yoshihiko, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Kawakita Chiharu	4. 巻 252
2. 論文標題 Frictional drag reduction caused by bubble injection in a turbulent boundary layer beneath a 36-m-long flat-bottom model ship	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 111224 ~ 111224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.111224	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 -

1. 著者名 Kim Sangwon, Oshima Nobuyuki, Park Hyun Jin	4. 巻 25
2. 論文標題 Numerical flow visualization of a single large-sized bubble in turbulent Couette flow using OpenFOAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 1209 ~ 1225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-022-00850-x	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 -

1. 著者名 Murai Yuichi, Hayashi Takumi, Yoon Dongik, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Takano Satoru, Masanobu Sotaro	4. 巻 63
2. 論文標題 Ultrasound Doppler measurement of air-lift two-phase and particulate three-phase pipe flows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-022-03481-y	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 -

1. 著者名 Park Hyun Jin, Yoon Dongik, Akasaka Shintaro, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Gas volume estimation in a vertical pipe flow considering the bubble size obtained from an ultrasonic velocity vector profiler	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-022-03474-x	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 -

1. 著者名 Yoon Dongik, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi	4. 巻 158
2. 論文標題 Behaviors of sliding bubbles in an inclinable turbulent channel flow investigated by optoacoustic measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 104258 ~ 104258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104258	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 -

1. 著者名 Tanaka Taiji, Oishi Yoshihiko, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Kawakita Chiharu	4. 巻 272
2. 論文標題 Downstream persistence of frictional drag reduction with repetitive bubble injection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 113807 ~ 113807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2023.113807	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 -

1. 著者名 Yoon Dongik, Hayashi Takumi, Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Takano Satoru, Masanobu Sotaro	4. 巻 91
2. 論文標題 Ultrasound measurement of large bubbles rising in angled slug pipe flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Flow Measurement and Instrumentation	6. 最初と最後の頁 102357 ~ 102357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.flowmeasinst.2023.102357	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37件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 H.J. Park, S. Akasaka, Y. Tasaka, Y. Murai
2. 発表標題 Measurement of size and velocity of rising bubbles by a vector UVP
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hayashi, H.J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai
2. 発表標題 Vertical bubbly pipe flow measurement using combined signal of ultrasonic Doppler and echo intensity profiles
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Murai, T. Yoshida, H.J. Park, Y. Tasaka
2. 発表標題 UVP applied for Doppler scanning of fruit-internal structures and its working principle
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D.I. Yoon, T. Ihara, H.J. Park
2. 発表標題 An instantaneous velocity vector measurement using conventional ultrasonic transducers
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanical and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Murai, Y. Oishi, T. Tanaka, H.J. Park, Y. Tasaka
2. 発表標題 Local bubble clusters amplified to void waves in horizontal bubbly two-phase turbulent boundary layers
3. 学会等名 SHF workshop on Dispersed Two-Phase Flow (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tanaka, Y. Oishi, H.J. Park, Y. Horimoto, Y. Tasaka, Y. Murai, C. Kawakita
2. 発表標題 Novel air lubrication method applied to a 36-m-long model ship
3. 学会等名 Global Maritime Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 36m 長尺平板模型における間欠的気泡注入による空気潤滑法の高効率化
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 乱流境界層への気泡注入による摩擦抵抗低減効果の下流持続性
3. 学会等名 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 ラグランジュ追跡システムによる気液二相水平チャンネル乱流空間発達過程の調査
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林拓矢, 大石義彦, 田中泰爾, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 光ヘテロダイン式デュアルビーム法を用いた気泡流の乱流せん断応力計測
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井夏海, 大石義彦, 田中泰爾, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 濱田達也, 川北千春, 河合秀樹
2. 発表標題 長尺模型船における人工ボイド波の液相支配領域での局所剪断応力分布の評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尹桐翊, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波パルスエコグラフィを用いた傾斜チャンネルにおける境界層内気泡運動の評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林拓己, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波パルスによる管内固気液三相流計測技術の開発
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田拓弥, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 バブルブルームの並進操作による表面流制御
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sangwon Kim, Nobuyuki Oshima, Yuichi Murai, Hyun Jin Park
2. 発表標題 乱流クエットチャンネル流動内の単一大型気泡の挙動に対する直接数値シミュレーション
3. 学会等名 機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木峻, 田中泰爾, 堀本康文, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司
2. 発表標題 水平チャンネル気泡流におけるポイド率急変時の乱流構造のステップ応答
3. 学会等名 機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部晃彬, 朴炫珍, 堀本康文, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 拡大チャンネル内における気液二相乱流の流動様式
3. 学会等名 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Oishi, H.J. Park, Y. Murai, Y. Tasaka, C. Kawakita, H. Kawai
2. 発表標題 Application of variable interval time averaging method to waveform of wall shear stress in bubbly flow
3. 学会等名 2022 U.S.-Japan seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tanaka, H.J. Park, Y. Oishi, Y. Tasaka, Y. Murai, C. Kawakita
2. 発表標題 Bubbly drag reduction promoted by generating void waves in high-speed turbulent channel flows
3. 学会等名 2022 U.S.-Japan seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Kim, N. Oshima, Y. Murai, H.J. Park
2 . 発表標題 Numerical investigation on the effect of drag reduction of large-sized large bubble in horizontal channel flow
3 . 学会等名 2022 U.S.-Japan seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Yoon, H.J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai
2 . 発表標題 Sliding bubbles inside tubulent boundary layers in a tilted channel
3 . 学会等名 2022 U.S.-Japan seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Murai, D. Saito, H.J. Park, Y. Tasaka
2 . 発表標題 Rainbow-color imaging of microbubbles strongly clustering in a turbulent boundary layer
3 . 学会等名 20th International Symposium on Applications of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Murai, R. Aoki, H.J. Park, Y. Tasaka
2 . 発表標題 Bubble splitters for a bubbly turbulent boundary layer
3 . 学会等名 Euro-American-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tanaka, Y. Oishi, H.J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, C. Kawakita
2. 発表標題 Void-wave drag reduction in turbulent flows investigated through different scale experiments
3. 学会等名 American Physical Society Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Yoon, H.J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai
2. 発表標題 Sliding motion of bubbles in an inclined turbulent channel flow
3. 学会等名 American Physical Society Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 間欠的気泡注入による摩擦抵抗低減効果の長距離持続化
3. 学会等名 動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村井祐一, 朴炫珍, 田坂裕司, 赤坂信太郎
2. 発表標題 超音波パルスエコグラフィによる管内気泡流の気泡サイジング
3. 学会等名 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田拓弥, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 間欠的気泡注入法で生成した気泡ブルームにより誘起される表面流の制御
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村井祐一, 青木峻, 朴炫珍, 田坂裕司
2. 発表標題 水平乱流境界層中のスライド気泡分裂促進デバイス
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下村海斗, 大石義彦, 朴炫珍, 村井祐一, 田坂裕司, 川北千春
2. 発表標題 水平矩形チャネルの空気潤滑法における気泡注入器ノズル径による影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朴炫珍, 村井祐一, 濱田達也, 川北千春
2. 発表標題 20m模型船を用いた空気潤滑法における気泡分布の調査
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朴炫珍, 赤坂信太郎, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 気液混相隙間流れの超音波モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村井祐一, 人見純平, 田坂裕司, 朴炫珍, 野村瞬, Giovanni De Cesare, 武田靖
2. 発表標題 乱泥流で持続する負のレイノルズせん断応力
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中泰爾, 大石義彦, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春
2. 発表標題 乱流境界層において局所ボイド率の変動が生み出す抵抗低減効果
3. 学会等名 機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部晃彬, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 水平二次元拡大チャネル内の気液二相流に現れるボイド波の周波数特性
3. 学会等名 機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朴炫珍, 尹桐翊, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 傾斜チャンネル気泡流における気泡の揚力係数評価
3. 学会等名 機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白川海人, 和田拓弥, 尹桐翊, 堀本康文, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一
2. 発表標題 超音波パルスを利用した管内混相流計測のための粒子検出法の開発
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023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

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