

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14583

研究課題名(和文)人工ボイド波を用いた乱流境界層内部構造の制御法の新規開発

研究課題名(英文) Development of control method of structures in turbulent boundary layer using artificial void wave

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：船舶の摩擦抵抗を低減する空気潤滑法は今まで一定ボイド率で制御しようとしたが、低減率が安定せず、長年にわたって技術の普及がなされていなかった。申請者は気泡による抵抗低減がボイド率に対する非線形現象であることを発見し、人工的にボイド率を変動させることで抵抗低減率を向上させる反復気泡注入法(RBI)を開発した。本研究では、ボイド波の特性とボイド波が乱流境界層に与える影響を調べ、高い抵抗低減率を得るために、どのようなボイド波を乱流境界層に与えるべきかについて考察した。乱流境界層で自然に発生するボイド波に合わせてRBIを行う際、ボイド波を長距離に維持でき、かつ高い抵抗低減率を得られることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の気泡注入法(CBI)により抵抗低減を得る際に、船底を流れる気泡を可視化した結果、下流でボイド波が自然に発達することが確認された。RBIを用いてこの自然ボイド波と同様な周波数を人工ボイド波を境界層に注入すると、長距離においてボイド波を維持できることが本研究で確認された。さらに自然周波数でRBIを行った際に、抵抗低減率が最大になった。本研究により、RBIで船底の広範囲において提案する高い抵抗低減率を有する人工ボイド波を安定的に与えることができれば、船舶の燃費が大幅に改善する。

研究成果の概要(英文)：Until now, a bubbly drag reduction technique for fuel saving of large vessels has been try to control with a fixed void fraction to achieve high drag reduction rate stably, but this trial is failed. It is because bubbly drag reduction is a non-linear function to void fraction. I found that the drag reduction can be promoted by artificial void waves injected into a turbulent boundary layer and developed improving drag reduction rate technique, named as a repetitive bubble injection(RBI). In this study, characteristics of void waves were estimated and a specific void wave was discussed to improve it. By the estimation, the specific void wave having a natural void wave frequency was suggested to achieve the maximum drag reduction rate and can be maintained for a long distance.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流境界層制御 気液二相流 抵抗低減 ボイド波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国際海事機関は温暖化対策として 2050 年までに海運 CO<sub>2</sub> 排出量の半減を掲げた。造船の世界シェアで 60% を占める日本と韓国は、その省エネ技術の革新で将来の生き残りをかけている。そこで、乱流境界層に注入した気泡と境界層内部の流れ構造が干渉することを利用し、抵抗を低減させる空気潤滑法がある。この方法は(1)注入気泡が主流と共に流れるため発生する広い効果領域、(2)注入量の制御による抵抗低減率の制御性、(3)環境に無害な空気を注入剤として使用している点より優れた外部流れへの適用性をもつ。しかし、1973 年に McCormick の発見以来 40 年以上にわたった研究開発にも係わらず、空気潤滑法の実用化には大きな問題点が残っている。抵抗低減効果は主に境界層内のボイド率に依存するため、高ボイド率が必要とされる。そして、ある基準値以下の低ボイド率では逆に抵抗が増加される。例として、図 1 にチャンネル乱流で計測した従来に使用していた連続気泡注入法(Continuous Bubble Injection, CBI)による抵抗低減率を黒マークで示す。図でわかるように、抵抗低減効果を得るためには高ボイド率が必要となる。しかし、高ボイド率を維持するためには莫大なエネルギーが空気を注入するブローアによって消費されるため、せっかく摩擦抵抗を低減させても、正味エネルギー効率の改善率が低い、もしくは改悪になる。故に、空気潤滑法を普及するためには、少量のエネルギー投入で、摩擦抵抗を減らす必要がある。

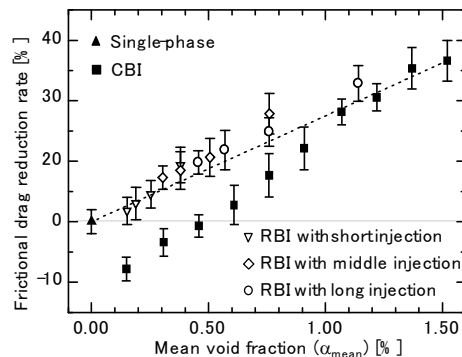


図 1 CBI と RBI での抵抗低減率

申請者は CBI で抵抗低減が起こる際、境界層の中で気泡のクラスターが生じることに着目し、「反復気泡注入法」(Repetitive Bubble Injection, RBI) を提案した。RBI は空気を間欠的に注入し、気泡の群を生成することでボイド率を境界層の全領域に分散させるのではなく、一か所に集中させて局部的に高いボイド率を与える手法である。気泡群のボイド率を 1.5% にした際の RBI による抵抗低減率を図中に白マークで示す。RBI は平均ボイド率が低くても全ボイド率領域において抵抗低減を実現し、かつ一部の RBI の条件ではボイド率 1.5% の CBI の効率(破線)より高い効率を持つ。これは気泡群が境界層内部構造のバースティング現象を抑制したためだと推測される。この RBI を実用化するには、周期的に流れる気泡群(ボイド波)の性質を正確に理解し、最も抵抗低減に効率の良いボイド波を境界層に与える必要がある。

### 2. 研究の目的

空気潤滑法の効率を向上させる RBI を数十～数百 m に達する実船に適用するためには、多くの問題点を解決する必要がある。特に、高速流れでの RBI の有効性やボイド波の下流持続性・再現性は今までの国際学術会議で指摘をされてきた。

今までの RBI の研究は 6 m の矩形チャンネルを使用しており、流れの助走区間などを考慮すると、約 1-2 m と短い区間でしか有効なボイド波の観察ができていない。気液二相流は常に発達し続けるため、船底の上流で抵抗低減に効率的なボイド波を乱流境界層に与えたとしても、ボイド波が下流に移流するとともに遷移するため、その波形が崩れる。本研究ではボイド波の遷移過程とボイド波による境界層内部の流れ構造への影響に注目し、下記にある三つの内容を明らかにする。

- (1) CBI において自然に生成される気泡クラスターの生成メカニズム
- (2) ボイド波の移流における遷移過程のモデリング
- (3) ボイド波が及ぼす境界層内部流れ構造への影響

上記の内容を把握することで、ボイド波が長距離において消滅せず移流するように、RBI の周波数などの制御パラメータを最適化する。そして、下流のある場所における遷移したボイド波が乱流境界層に及ぼす影響を推定し、長距離において抵抗低減に最も有効なボイド波を特定する。

### 3. 研究の方法

前述の目的を実現するために、下記の三つのフェーズで研究を行う。

#### (1) 気泡クラスターの発生メカニズム

CBI で生成される気泡クラスターの生成メカニズムを理解し、クラスターの生成が促進されるように気泡注入を制御すれば、長距離においてボイド波(周期的に通過するクラスター)が維持できる。このクラスターは境界層内部の流れ構造より数倍大きいいため、気泡と流れ構造の相互作用によるものなく、気泡間の相互作用に起因するものだと予想される。そして、気泡クラスターは境界層内部の不安定性により周期的に配置され、ボイド波を作ると推測した。気泡間の相互作用のみに注目することができる Hele-Shaw cell を使って、気泡クラスターが生成される最初の因子を調べる。また、CBI で生成された気泡クラスターの発生、および成長過程を観察することで、ボイド波がどのような不安定性に支配された現象なのかを明確にする。

#### (2) ボイド波遷移過程のモデリング

気泡クラスターの発生メカニズムを調べると同時に、北大の当研究室が所有している 6 m のチャンネルを現在の 2 倍以上に延長し、ボイド波が遷移する過程を観察する。今までボイド波の

観測は比較的短い区間でのみ行われた。そのため、ボイド波が乱流境界層もたらす影響については研究されたが、上流で与えたボイド波の波形が下流においても同様の波形を維持するのにかについてはあまりわかってない。しかし、十数 m のチャンネルを用いてボイド波を観察したとしても、大型船舶の場合、船長が 100 m に達するため、観察結果を直接適用できない。この問題を解決するため、ボイド波遷移のモデリングを試みる。ボイド波遷移を表すモデリングができれば、比較的短い区間で観測されたボイド波から、より下流におけるボイド波をモデルで予想することか可能になる。

### (3) ボイド波が境界層内部の流れ構造に与える影響

与えたボイド波が長距離において安定して移流したとしても、その波が境界層内部の流れ構造と効果的に干渉しなければ、効率的な摩擦抵抗低減はできない。CBI と RBI を水平チャンネル流れに適用し、境界層内部の流れ構造が変化したかどうかを直接的にわかる壁面せん断応力を計測する。せん断応力の変化を統計的に評価することで、RBI がもたらす境界層内部の影響を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 気泡クラスターの発生メカニズム

CBI で観測されるボイド波は気泡クラスターが周期的に配置されたものであり、気泡クラスターの生成因子と周期配置の因子が分かれば、ボイド波の制御が可能と予想し、二つの実験を行った。

まず、気泡クラスターは気泡間の相互作用により生成されると予想し、気泡間の相互作用のみに注目可能な Hele-Shaw cell で実験を行った。垂直に立てられた cell に一定周期で気泡を注入すると、図 2 で示すように、気泡間距離が十分に離れた場合、すべての同一な軌道で浮上する。Cell 内部では粘性の影響が強く表れるため、気泡が上昇する際に生成した渦がすぐ減衰する。浮上軌道上に前の気泡からの渦がなければ、前の気泡が後ろに続く気泡に影響を与えてないため、軌道が維持される。しかし、注入周期を短くし気泡間距離を狭めていくと、前に注入した気泡から生じた渦が軌道上に消滅せずに残るため、後ろに続く気泡の浮上軌道が乱れる。よって、気泡間距離が不均一になり、cell の上部では気泡の群れ(クラスター)が形成される。船底においても同様なことが起きると予想されるため、気泡クラスターが形成されるためには、気泡注入の際に気泡間の距離を短くする必要がある。もし、一定のボイド率を与えるとしたら、気泡サイズを小さくして数密度を上げて、気泡間距離を短くした場合、気泡クラスターが活発に生成されると予想される。

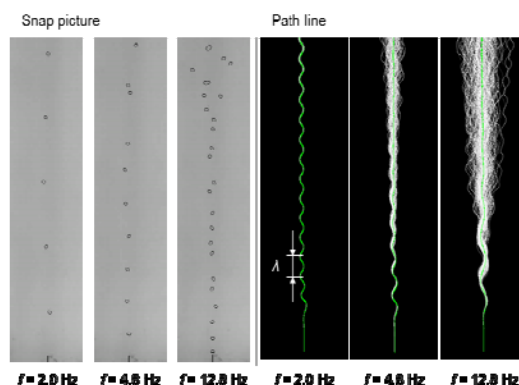


図 2 気泡間距離による気泡挙動の変化

次に、広島大学にある 100m の曳航水槽に当研究室が保有している 4m の模型船浮かせて、船底に CBI を行い、ボイド波の発生と発達過程を可視化で調べた。Hele-Shaw cell 実験の結果を考慮し、空気注入口に多孔質の板を使用し、注入気泡のサイズを小さくした。図 3 に船の上流・中流・下流で観測されたボイド波と周波数解析結果を示す。気泡注入口近辺の上流では気泡がクラスターを形成せずに、ランダムに流れていることが可視化画像、および周波数解析結果からわかる。そして、上流では気泡注入により摩擦抵抗低減が生じないことが確認された。一方、ボイド波が観測される中流と下流では高い抵抗低減が得られた。ボイド波の発生と抵抗低減現象では強い相関が存在すると予想され、人工的にボイド波を与えた際にも高い抵抗低減効果を得られると期待できる。中流で観測されたボイド波が下流に移流し発達する過程で、ボイド波の周波数が低周波数に変化することがわかった。現在、周波数の情報から、境界層内の T-S 波、K-H 波、Richardson 波がボイド波の周期を決める因子だと考えている。また、移流と共にボイド波の周波数が低周波数側に変わる理由としては、気泡の合体に気泡サイズの増加と下流に行くにつれて厚くなる境界層厚さを候補として考えている。これに関する詳しい議論は申請者が書いた Exp. Fluids(2018)に載っている。

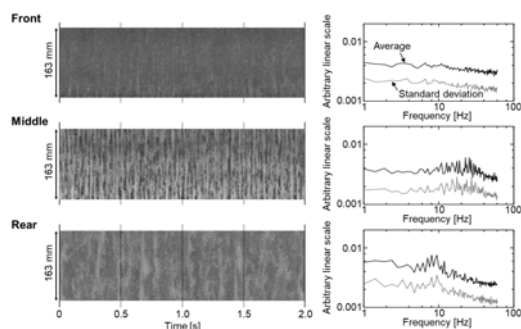


図 3 船底の自然発生ボイド波と発達過程

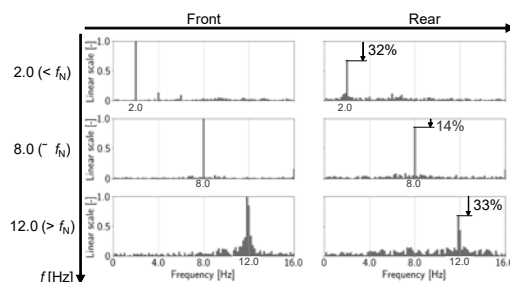


図 4 RBI 周波数によるボイド波の減衰率

最後に、模型船の船底に一定周波数(2Hz, 8Hz, 12Hz)のボイド波を与えて、下流持続性を調べた。それにより、自然に形成されるボイド波の周波数(下流で約 8Hz)と同様な周波数を持つ人工ボイド波の場合、図 4 に示すようにほとんど減衰せずに下流まで持続することが確認された。しかし、他の周波数の人工ボイド波は移流する過程で減衰する。これは、CBI で観測された自然発達ボイド波の発生、および成長に影響を与えた因子が、RBI の人工ボイド波の発達過程にも関与していることを意味する。また、長距離においてボイド波を維持する必要がある場合にはボイド波の自然周波数と同一な周波数でボイド波を生成する必要がある。

### (2) ボイド波遷移過程のモデリング

10m の水平矩形チャンネルに一定周波数(2Hz)のボイド波を与えて、チャンネルの流れ方向の二箇所までボイド率の時間変化を計測し、ボイド波の減衰過程を調べた。図 5 に計測されたボイド波の位相平均を示す。計測されたボイド波の波形を一次元の移流拡散方程式に当てはめ、拡散係数を求めた。ボイドの移流過程を簡単な一次元のモデルにすることで、複雑な二流体モデルの数値計算をせずに、拡散係数のみで下流持続性を評価することができる。計測結果から得られる拡散係数は約  $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$  であり、それから計算されるペクレ数と乱流シュミット数はそれぞれ 50 と 0.05 であった。ボイド波における拡散の効果は、慣性と粘性の効果の中間程度の大きさであることがわかる。すなわち、それぞれの作用の特性時間が、慣性-拡散-粘性の順に大きくなることを意味する。拡散係数が、径に依存した気泡の速度差による気泡群の変形を代表するため、気泡群の変形は次の①-③順の過程を辿る。①慣性の効果により注入時の波形が維持された後、②拡散の効果が現れて気泡の速度差によって気泡群が伸張する。③最後に粘性の効果により、液相の速度変動の影響を受けて気泡分布が変動する。今回用いた移流拡散方程式では、移流に伴うボイド波の振幅の減衰は評価できるが、波形のゆがみを表すことができない。高ボイド率領域では抵抗低減により、気泡の移流速度が上昇したため、図 5 に示す波形が移流と共に前のめりになったと考えられる。今後、移流拡散方程式に非定常項を足したバーガーズ方程式を用いれば、この波形のゆがみを表現できると考えている。

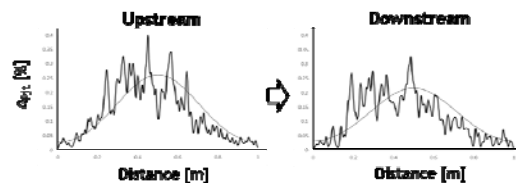


図 5 移流と共に変形する人工ボイド波

### (3) ボイド波が境界層内部の流れ構造に与える影響

気泡注入による乱流境界層内部の流れ構造に変化が生じると、壁面せん断応力が変動する。水平チャンネルにせん断応力センサーを設置し、CBI と RBI を行う際に、どのようにせん断応力が変化するかを評価した。図 6 に CBI を行った際に計測された壁面せん断応力の確率密度関数(PDF)を示す。気泡流量  $Q$  が小さい低ボイド率の場合には、抵抗低減率  $DR$  が不であり、抵抗が増えている。しかし、気泡注入量の増加と共に抵抗低減率が改善される。各流量別の PDF を確認してみると、四つのグラフ共に最頻値の値がほとんど変化せず、主に最頻値の確率が減少している。特に抵抗低減が生じる際の PDF に注目すると、下がった最頻値の確率が最頻値より低い値に移っていることがわかる。最頻値の値が摩擦応力の源である縦渦のバースト現象を表していると仮定すると、CBI における抵抗低減のメカニズムはバースト現象を押さえて抵抗を減らしていると予想される。

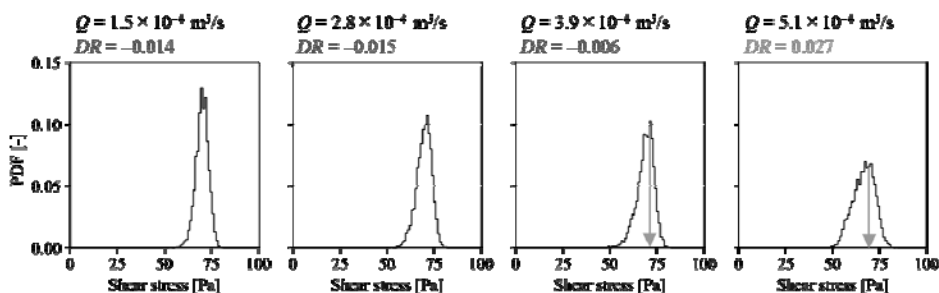


図 6 CBI を行う際のせん断応力の確率密度関数

一方、RBI での壁面せん断応力の PDF は CBI の PDF と比べて形が大きく異なる。図 7 に RBI での結果を示す。まず、CBI では抵抗低減が生じなかった空気流量で抵抗低減が生じており、研究背景の図 1 で示したように、RBI により抵抗低減率が向上している。特に最も抵抗低減率が高い RBI の周波数  $f_{inj} = 2 \text{ Hz}$  に注目すると、PDF の形状もダブルピークになっている。このチャンネル流れにおける自然ボイド波の周波数は  $2 \text{ Hz}$  であり、 $2 \text{ Hz}$  の人工ボイド波はチャンネルの中でほとんど減衰せずに流れる。すなわちこの条件では、単相と気液混相の領域がきれいに分かれて周期的に計測位置を通過する。よって、 $2 \text{ Hz}$  の RBI 条件で現れた PDF の二つのピークはそれぞれ単相と混相の領域で計測されたせん断応力の値だと考えられる。RBI は気泡群が通過し単相に戻る際に時間遅れでせん断応力が回復していくことを利用して抵抗低減率を向上させている。この抵抗低減率向上の原理から考えると、せん断応力  $50 \text{ Pa}$  付近に現れる分布は再層流化した単相によるものである。

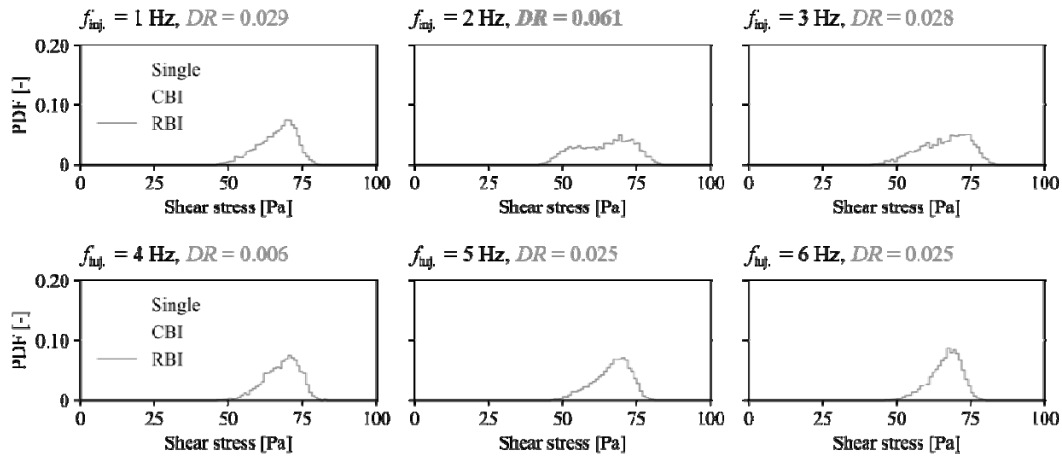


図7 RBIを行う際のせん断応力の確率密度関数 ( $Q = 3.06 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

上記①~③の研究結果を総合すると、RBIを行い自然ボイド波と同一な周波数の人工ボイド波を乱流境界層に与える際に、人工ボイド波が長距離において維持でき、かつ最も高い抵抗低減率をもつと予想される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Bubbly drag reduction investigated by time-resolved ultrasonic pulse echography for liquid films creeping inside a turbulent boundary layer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol. 103, 2019, pp. 66-77, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.12.025
2. Park Hyun Jin, Tasaka Yuji, Murai Yuichi, Bubbly drag reduction accompanied by void wave generation inside turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids*, 査読有, Vol. 59, 2018, No. 116, DOI: 10.1007/s00348-018-2621-1

[学会発表] (計 3 2 件)

1. 超音波パルスエコーグラフィを用いた高時空間分解能を持つ気泡分布計測手法の開発, 赤坂信太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 可視化情報シンポジウム, 2019
2. 壁面気液混相乱流計測のための光学的・音響的アプローチ, 朴炫珍, 混相流シンポジウム, 2019
3. ボイド波生成による高速チャンネル乱流の摩擦抵抗低減率向上, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 川北千春, 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2019
4. 超音波パルスエコーグラフィによる気液二相チャンネル流の高時間分解計測, 赤坂信太郎, 人見純平, 澤田航希, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 日本機械学会北海道学生会第48回学生員卒業研究発表講演会, 34B3, 2019
5. 間欠的に注入される気泡群により促進される矩形チャンネル内の乱流摩擦抵抗低減, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 機械学会流体工学部門講演会, PM25 OS3-7, 2018
6. マイクロバブルがもたらす乱流構造変調のレーザー断面撮影による時空間三次元計測, 牛山大輝, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 機械学会流体工学部門講演会, AM26 OS3-3, 2018
7. 超音波スピニングレオメトリ, 田坂裕司, 芳田泰基, 朴炫珍, 村井祐一, 機械学会流体工学部門講演会, AM6 OS4-2, 2018
8. 乱流せん断中の気泡の平衡サイズ分布の理論と計測, 村井祐一, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 第19回キャビテーションに関するシンポジウム, 2-B6, 2018
9. 乱流境界層内を移流する気泡流の超音波計測, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 日本機械学会2018年度年次大会, J0540104, 2018
10. 気泡の並進運動方程式の性質について, 中村幸太郎, Hyun Jin Park, 田坂裕司, 村井祐一, 日本流体力学会年會2018-50周年記念シンポジウム, 147, 2018
11. 模型船を用いた気泡流におけるせん断応力の波形解析, 大上聖史, 大沼翔, 大石義彦, 河合秀樹, 朴炫珍, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D113, 2018
12. ニュートン流体中の分散気泡が与える非ニュートン性評価, 芳田泰基, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D124, 2018
13. 水平チャンネル流における気泡通過時の乱流せん断応力の統計的評価, 大石義彦, 大沼翔, 河合秀樹, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D114, 2018
14. 船底平面に生成した気液二相乱流境界層における人工ボイド波の発達, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D134, 2018
15. Use of void waves for frictional drag reduction, Y. Murai, T. Tanaka, H. J. Park, Y. Tasaka, 8th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, D2-PM1, 2018

16. レーザーせん断応力計を用いた模型船における気泡流の瞬時せん断応力の測定, 大上聖史, 大沼翔, 大石義彦, 河合秀樹, 朴炫珍, 村井祐一, 日本機械学会北海道学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 314, 2018
17. 気液二相境界層乱流における人工ボイド波の発達, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 日本機械学会北海道学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 311, 2018
18. Measurement of liquid film thickness in a bubbly two-phase boundary layer by ultrasonic pulse repetition technique, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, pp. 83-84, 2017
19. Voxel-rainbow visualizations of mutual interactions between microbubbles and turbulent vortical structures on a vertical plate, D. Saito, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, pp. 28-29, 2017
20. 水平気液二相チャネル乱流における人工ボイド波のシャドウグラフィによる可視化解析, 田中泰爾, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 可視化情報全国講演会(室蘭 2017), OS8-6, 2017
21. 3-D measurement of microbubble distribution in wall turbulence by means of color-coded volumetric illumination, Y. Murai, D. Saito, H. J. Park, Y. Tasaka, 7th AECOR Joint Meeting between ETHZ and Hokkaido University, 8, 2017
22. Thickness measurement of liquid film on a wall using ultrasonic pulse, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, 7th AECOR Joint Meeting between ETHZ and Hokkaido University, 26, 2017
23. Spatial development of a bubble swarm injected into a horizontal channel flow, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, TFEC9-1159, 2017
24. 気泡注入によりもたらされる乱流境界層内部の乱流構造の変化, 朴炫珍, 戸田健介, 田坂裕司, 村井祐一, 日本機械学会 2017 年度年次大会, J0510101, 2017
25. 気液二相流のスマート制御に基づく船舶の乱流摩擦抵抗低減技術の実用化, 熊谷一郎, 村井祐一, 田坂裕司, 朴炫珍, 高橋義明, 日本機械学会 2017 年度年次大会, W25100-3, 2017
26. 超音波スピニングレオメトリによるマイクロバブル懸濁液の乱流渦粘度の評価, 岩佐耕節, 芳田泰基, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D113, 2017
27. 境界層内に生成されたマイクロバブルの拡散における壁面曲率の影響, 牛山大輝, 斎藤大地, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D212, 2017
28. 狭間隙を有する垂直流路内を浮上するチェインバブルの挙動, 朴炫珍, Veronique Roig, Patricia Ern, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流シンポジウム, D124, 2017
29. 乱流境界層内のマイクロバブル群が生ずるクーロン力作用, 村井祐一, 斎藤大地, 朴炫珍, 田坂裕司, 混相流シンポジウム, D133, 2017
30. Modified statistical characteristics in a turbulent boundary layer by bubble injection, H. J. Park, K. Toda, Y. Tasaka, Y. Murai, France-Japan Bilateral Workshop on 'Transition, Control and Turbulence in bubbly flows', Session 1-4, 2017
31. Void wave propagation in the turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship, H. J. Park, Y. Oishi, Y. Tasaka, Y. Murai, 2017 Japan-U. S. seminar on Two-Phase flow Dynamics, pp. 41-44, 2017
32. Development of a laser Doppler wall shear stress sensor for bubbly two-phase flow, Y. Oishi, S. Onuma, H. Kawai, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, 2017 Japan-U. S. seminar on Two-Phase flow Dynamics, pp. 117-120, 2017

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名 :

ローマ字氏名 :

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。