

14 高度流体制御技術によるゼロエミッション船の実現

拾井 隆道*, 川北 千春*, 濱田 達也**, 若生 大輔*

Advanced fluid control technology for zero-emission vessel

by

HIROI Takamichi, KAWAKITA Chiharu, HAMADA Tatsuya and WAKO Daisuke

Abstract

To contribute to the development of a zero-emission ship, we investigated the slowing down and enlarged ship and an air lubrication method to control air blowing. Energy reduction due to low speed and large size was investigated for bulk carriers. In order to compensate for the decrease in transportation volume due to the lower speed, it was more effective to expand the main dimensions than to increase the number of vessels to improve energy efficiency. The reduction of friction drag by repetitive bubble injection (RBI) was investigated using a 38 m log flat model. A greater reduction in resistance was obtained at the injection frequency 0.5 Hz compared with that obtained from the continuous bubble injection (CBI). Furthermore, the drag reduction ratio increased as the duty ratio decreased. The combination of PTV (Particle Tracking Velocimetry) and Shadowgraph with a high speed camera makes it possible to evaluate the liquid phase flow field and bubble shape in a bubble flow in time series. It was determined that the bubble homogenizes the mean streamwise velocity distribution in the wall direction.

* 流体設計系流体制御研究グループ, ** 流体設計系実海域性能研究グループ

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月5日

1. はじめに

2015年の第21回気候変動枠組条約締結国会議(COP21)にて採択されたパリ協定では、世界共通の長期目標として産業革命前からの地球平均気温上昇を2°C未満に抑え(2°C目標)、1.5°C未満を目指すことが定められた。2°C目標を実現するためには、国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)でとりまとめた第5報告書での低位安定化シナリオ(RCP2.6)を選択する必要がある¹⁾。このシナリオは2050年までに温室効果ガス(Greenhouse Gas, GHG)排出量を半減させ、今世紀中にGHG排出量をほぼ0にするものである。

国際海運においては、国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)により2013年から新造船に対してエネルギー効率設計指標(Energy Efficiency Design Index, EEDI)規制²⁾、また船舶エネルギー効率管理計画書(Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP)³⁾の保持義務が開始された。さらに、2018年にはGHG削減目標やその実現のための対策等を包括的に定めるGHG削減戦略⁴⁾が採択された。具体的な目標として、2008年比で2030年までに国際海運の単位輸送当たりのCO₂排出量を40%改善、2050年までに70%改善(努力)する、2050年までに国際海運全体の年間GHG排出量を50%削減し、今世紀中可能な限り早期にゼロ排出(努力)とするものである。

GHG排出量を削減し、最終的にゼロエミッション船を実現するためには、水素、アンモニア等の代替燃料の利用が前提となる。一方、これらの代替燃料は現在使用されている重油に対して現状高価であり、また単位体積あたりの発熱量が小さいため、燃料タンク容積が増加し貨物積載量が低下する可能性が考えられる。これらのデメリットを解消するためには、機関の取り組みと同時に推進性能を飛躍的に向上させることが必要である。推進性能を向上させるためには、抵抗を低減させるような船型開発や空気潤滑法のような摩擦抵抗低減手法、推進効率を向上させるような省エネデバイスの開発、風力による推進、運航最適化等が考えられるが、より大きな効果を持つのが減速運航である。船が推進するのに必要なエネルギーは概ね速度の3乗に比例するためである。

本研究では、大幅な推進エネルギーの削減が見込まれる低速化について、船舶の大型化・肥大化とともに検討を行った。また低速時には抵抗成分のほとんどを摩擦抵抗が占める。これに対して、従来の空気潤滑法より高い抵抗低減効果をもつ高度空気潤滑法(Advanced Air Lubrication Method, AdAM)を開発中である。本稿では、その概要と長尺模型を用いて行った試験結果、また気泡流の流場評価技術について紹介する。

2. 船舶の低速・大型化による効率向上

船舶の推進エネルギーは概ね船速の3乗に比例すること知られており、現在においても多くの船舶が燃料使用量を削減するために減速運航を行っている。また大型化によって

もエネルギー効率が向上することが知られており、過去から現在に亘って貨物を輸送する一般商船は大型化の一途を辿ってきた。またゼロエミッション船では、代替燃料の使用が前提となる。代替燃料は単位体積あたりの発熱量が小さいため従来の航行日数を保持しようとする、燃料タンクの容積が重油タンクと比較して、アンモニアの場合2.5倍、水素(液体)の場合4.5倍にもなると試算される⁵⁾。貨物積載量を維持するためにも大型化が必要である。本研究では、大型ばら積み船を対象に低速・肥大化・大型化によるエネルギー効率(トンマイルあたりのエネルギー量)と輸送量(時間あたりのトンマイル)の関係を(一財)日本造船技術センター(Ship Research Center, SRC)と共同で調査した⁶⁾。

本研究では対象船種を肥大船とし、ベンチマーク船型として船型データが公開されているJapan Bulk Carrier⁷⁾(JBC)を対象に計算を行った。JBCは、船体形状等は公表されているが載貨重量(Dead Weight, DW)や主機馬力等の情報は公表されていない。ここで、SRCが開発し一般に供用している初期船型決定支援ツールであるデータベースに基づくSRC Tipsを使用して DW と主機馬力を推定した⁸⁾。

設計条件(公表値)

L_{PP} (L_M) $\times B \times d$: 280.00 (285.00) m \times 45.00 m \times 16.50 m,
 C_B : 0.8580, C_P : 0.8596, C_W : 0.9981, C_W : 0.9253,
 満載排水量: 182,881 ton, 計画速度: 14.5 knot

推定結果

DW : 158,000 ton, LW : 24,881 ton,
 主機馬力(MCR): 17,100 kW \times 84.1 rpm

ここで、 L_{PP} , L_M , B , d はそれぞれ、垂線間長、水線長、船幅、(満載)喫水で、 C_B , C_P , C_W , C_W はそれぞれ方形係数、柱形係数、中央横断面係数、水線面積係数、 LW は軽荷重量(Light Weight)である。これに浮心位置の最適化を行ったものをJBC2008とする。

このJBC船型を対象に船速や主要目を変化させた際の推進性能の推定を行った。推定には抵抗自航試験データベースのニューラルネットワークに基づくSRC Tipsを用いた⁹⁾。図-1に輸送効率比とエネルギー効率比の関係を示す。 $DW \times V_s$ は[ton \cdot mile/h]の次元を持ち、1時間あたりに運搬できる貨物のトンマイル量を意味しており、いわゆる輸送量である。ここで、 V_s は船速である。横軸の $DW \times V_s$ 比は、JBC2008の計画速度時の $DW \times V_s$ に対する比を示している。 $BHP/DW/V_s$ は[kWh/ton \cdot mile]の次元を持ち、1トンの貨物を1マイル運搬するのに必要なエネルギー消費量(ここではエネルギー効率と呼称する)を意味しており、これにCO₂換算係数等をかけ合わせるとEEDIと概ね一致する(厳密には、補機出力を算入する必要がある)。ここで BHP は制動馬力である。縦軸の $BHP/DW/V_s$ 比は、JBC2008の計画速度時の $BHP/DW/V_s$ に対する比を示している。JBC0はJBC2008の主機を最低出力暫定ガ

イドラインの評価レベル 1 の最低出力の値としたものである。これは次式に示すように DW (載貨重量) [ton] の 1 次関数により主機出力の下限 BHP_{min} を設定するものである。

$$BHP_{min} = 0.049 \times DW + 7329.0 \text{ [kW]} \quad (2.1)$$

JBC の DW は 158,000 [ton] であり、式(2.1)により算出される主機の最低出力は 15,071kW である (JBC2008 主機馬力の 88%)。また JBC 船型を長手方向、幅方向、高さ方向に同一比率で拡大し、DW を 2008 基準である 158,000 トンの 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍とした船型に対して推進性能の推定を行った。

船速一定の場合について見ると、隻数を増やす場合 $BHP/DW/V_s$ 比は変わらずに輸送量だけ増加している。一方、主要寸法を拡大すると、輸送量が増加するとともに $BHP/DW/V_s$ 比が減少しており、エネルギー効率改善の傾向にある事が分かる。

性能だけではなく、低速化によるデリバリータイムの遅延を許容できるか、船員の交替時期の問題、大型化に対応するための浚渫や荷役装置の更新等、海上物流システム全体を考慮する必要がある。今後は、システムズアプローチ等^{10, 11)}の手法を用いて、いくつかの将来シナリオ (例えば、燃料価格) を想定した場合の経済的に成立可能な船舶の低速化・大型化に関する定量評価を実施する予定である。

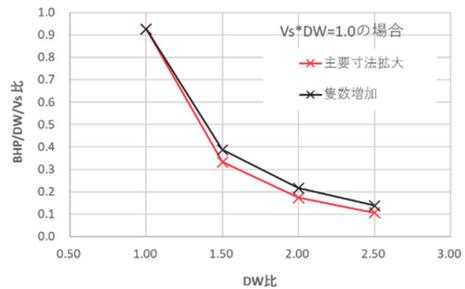


図-2 DW比とエネルギー効率比の関係 ($DW \times V_s = 1.0$)

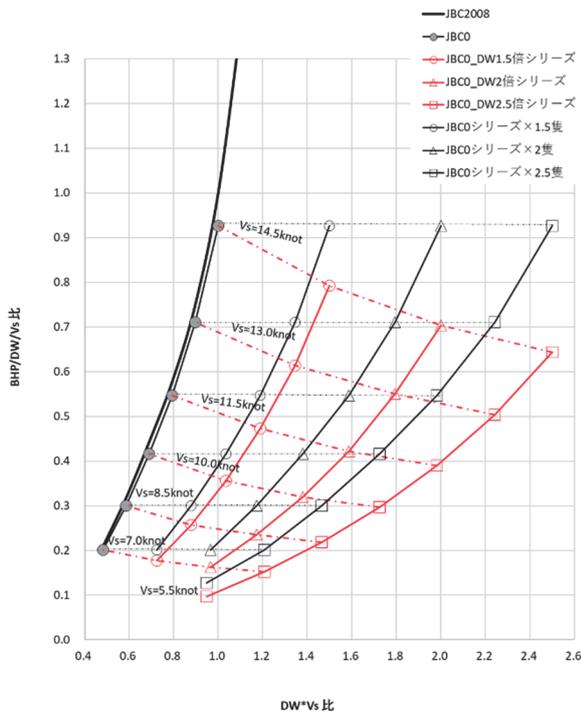


図-1 輸送効率比とエネルギー効率比の関係

$DW \times V_s$ 比が 1.0 の場合における $BHP/DW/V_s$ 比を DW 比ベースでプロットした結果を図-2 に示す。DW を増加させようとする場合、隻数を増やすよりも主要寸法を拡大する方がエネルギー効率の改善効果が得られる事が分かる。なお、主要寸法を拡大し DW を 2.5 倍にすると、 $V_s=5.8$ ノットで 2008 基準値と同じ輸送量となり、その時の $BHP/DW/V_s$ 比は 0.1 であり、エネルギー消費量は、2008 年時点の基準値から 9 割削減となることがわかった。

一方、船舶の低速化や大型化を実現するためには個船の

3. 高度空気潤滑法の開発

船舶の摩擦抵抗を低減させる手法として、船底から空気を吹出し、それが気泡となり船底を覆うことにより摩擦抵抗を低減させる空気潤滑法¹²⁾がある。空気潤滑法は既に多くの船舶^{13, 14)}に適用されその効果が確認されている。現状の空気潤滑法は、船底を一様に気泡流で覆うように連続して空気の吹出 (連続吹出) を行っている。また気泡径に関しては、空気が流れのせん断により気泡となるため、制御を行っていない。一方、吹出や気泡径¹⁵⁾の制御を行うことにより、より高い抵抗低減効果が得られるとの報告もあり、海技研では従来の空気潤滑法にそのような制御を取り入れた高度空気潤滑法 (Advanced Air Lubrication Method, AdAM) を開発中である。吹出の制御に関して北海道大学の Park らは空気の吹き出しを周期的に行い (周期吹出)、人工的に気泡群 (ポイド波) を生成することにより、より高い抵抗低減効果が得られると報告した¹⁶⁾。本研究では長さ 36m の長尺平板模型を最大 8 [m/s] で曳航することにより実船に近いレイノルズ数を再現し、周期吹出による抵抗低減の検証を北海道大学と共同で行った¹⁷⁾。

3.1 実験手法

供試模型は平らな船底を持つ幅 1m の長尺模型で、分割模型となっており長さ 6m の船首部模型および船尾部模型と、8m の中間部模型を組み合わせることにより長さの異なる模型とすることができる。本研究では全長 36m の組み合わせで計測を行った。実験風景を図-3 に示す。

本研究では連続吹出 (Continuous Bubble Injection, CBI) と周期吹出 (Repetitive Bubble Injection, RBI) の二つの空気吹出手法による抵抗低減効果の比較を行った。ここで、空気吹出量は式(3.1)であらわされる相当空気膜厚さ ta で整理する。

$$ta = Q / (V_m \cdot B_a) \quad (3.1)$$

ここで、 Q は空気吹出量、 V_m は船速、 B_a は空気吹出部幅(=840mm)である。

周期吹出では、図-4に示すように空気の吹出を周期的に行う。周期吹出のパラメータは空気吹出の周期 $f = (1/T_1)$ [Hz]及び1周期中の空気吹出時間が占める割合であるDuty比 T_2/T_1 である。本研究では、1周期当たりの平均空気吹出量が連続吹出と等しくなるように実験を行った。そのため、Duty比50%時の空気吹出時の空気流量は連続吹出のその2倍、Duty比25%時の空気吹出時の空気流量は連続吹出のその4倍となる。

連続吹出と周期吹出を行いながら模型船を曳航し、模型船の全抵抗、局所摩擦抵抗を計測し、周期吹出の効果を検証した。



図-3 長尺模型

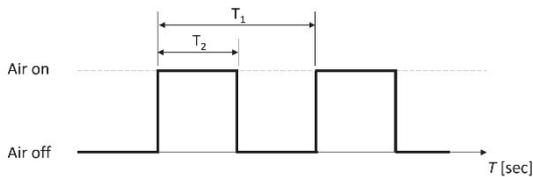


図-4 周期吹出概要図

3.2 実験結果

連続吹出と周期吹出による抵抗低減率を図-5に示す。横軸は周期吹出の周期で $f=0$ [Hz]の時は連続吹出を意味する。縦軸の Rf_0 はシェーンヘルの摩擦抵抗式によって求められた船底の気泡被覆部の空気なし時の摩擦抵抗、 ΔRf は空気なし時の全抵抗とあり時の全抵抗の差で、その比 $\Delta Rf/Rf_0$ をとることで船底の気泡被覆部の摩擦抵抗低減率となる。連続吹出と周期吹出を同じ相当空気膜厚 ta 同士で比較すると0.5 [Hz]の時どの ta においても周期吹出のほうが、抵抗低減率が大きくなっていることがわかる。また ta が大ききDuty比が小さいときのほうが、連続吹出からの向上が大きい。 $ta = 4.5$ [mm]の吹出周期0.5 [Hz]、Duty比25%の時、 $ta = 4.5$ [mm]の連続吹出に対して5%程度抵抗低減率を向上させることができた。

連続吹出と周期吹出時の局所摩擦抵抗低減率を図-6にそれぞれ示す。横軸の X は空気吹出部からの長手方向の距離を示す。縦軸の τ_0 はせん断力計による空気なしの局所摩擦抵抗で、 $\Delta\tau_0$ は τ_0 から空気あり時の局所摩擦抵抗を引いたものである。連続吹出時はどの位置においても10%程度なのに対し、周期吹出では4、8mでは20%程度、それより下流では

10%程度となっている。これは、吹出直後は周期吹出によって形成されたボイド波により高い抵抗低減が発生したが、下流に行くにしたがって、気泡が様な分布となり連続吹出と同様な摩擦抵抗低減率となったと考えられる。目視による観察においても、吹出直後のボイド波が下流に行くにしたがって、様な分布と変化していくことを確認している。

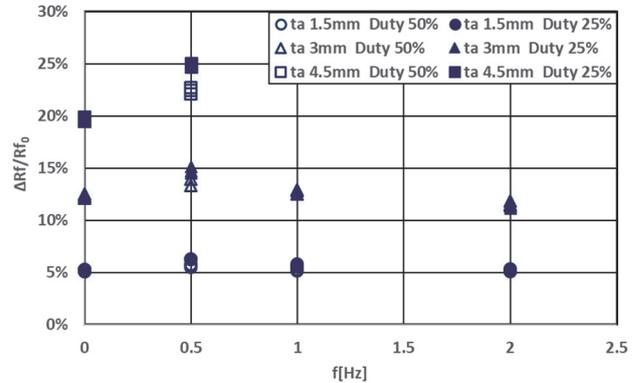


図-5 摩擦抵抗低減率 (36m 模型 $V_m = 8$ [m/s])

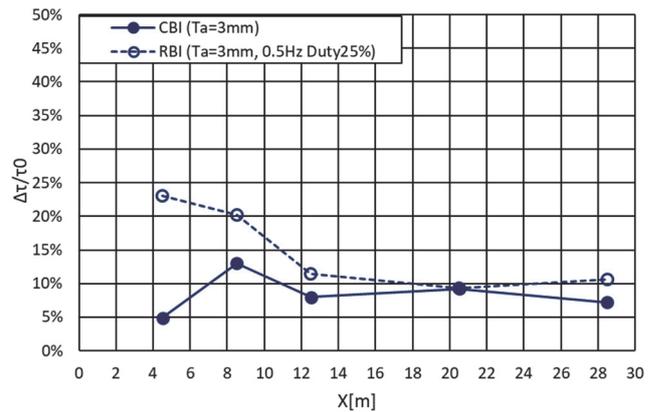


図-6 局所摩擦抵抗低減率 (36m 模型 $V_m = 8$ [m/s])

4. 気泡流の流場評価技術

高度空気潤滑法の評価を行い、更なる性能向上を図るためには、抵抗と同時に気泡流中の流場を計測し、抵抗低減に至る機構を明らかにする必要がある。本研究では、気泡流中の時系列PTV (Particle Tracking Velocimetry) システムを開発し、水平チャンネルにおいて計測を行った。

4.1 実験手法

実験は海技研が所有する水平チャンネルである小型高速流路(試験部寸法:長さ3000mm,幅:100mm,高さ:20mm)にて実施した。縮流部から1028mm下流の位置において上面空気を吹き出し、その1000mm下流の流場を計測した。

時系列PTVシステムの概要図を図-7に示す。計測システムは高速度カメラと、液相可視化用のCWレーザ、気相可視

化用の赤外線 LED 群 ($\lambda=850\text{nm}$)，流場挿入用誘多膜平面ミラー，気泡からの散乱光を除去するためのカットオフフィルタで構成される。流場に挿入した誘多膜平面ミラーにより，可視化位置と撮影位置の光学距離を短縮し気泡の画像への重なりを小さくすることにより，気泡流中での計測を可能とした。気泡の散乱光とトレーサ粒子の散乱光を分離するために，蛍光粒子を用いた。カットオフフィルタにより蛍光粒子の波長のみ取り出されて撮影される。気泡形状は赤外線 LED が背景光となりか影絵として計測される (Shadowgraphy)。撮影した画像において，気泡上に蛍光粒子が存在している場合がある。気泡に粒子が付着している場合および気泡がレーザシートとカメラの間に存在している場合，この蛍光粒子を用いて速度を算出すると誤差を含むため，図-8 に示す手順で気泡上の蛍光粒子像の除去を行った。液相流速の計測は，PTV によって行った。

本研究では，断面内流速 $U_m = 1.0 \text{ m/s}$ ，ボイド率 $\alpha = 0.5\%$ の計測条件で実験を行った。小型高速流路において，この条件においては摩擦抵抗が 5%程度増加することが明らかになっている。本実験条件において気泡径は 4.5mm 程度であった。

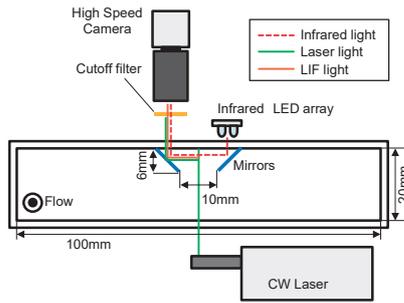


図-7 気泡流中時系列 PTV システム

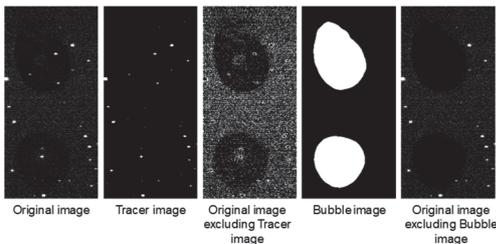


図-8 気泡付着粒子除去画像処理アルゴリズム

4. 2 計測結果

図-9 に主流方向平均速度分布を示す。気泡の速度はダブルプローブ式の光学式ボイド率計で計測したものである¹⁸⁾。縦軸は壁からの距離 y をチャンネル半高さ δ で無次元化したものである。気泡流中では $y/\delta = 0.15$ を境に壁面側では単相流と比較して加速，流路中央側では減速が生じていることが分かった。また気泡速度は一定となっている。これは $y/\delta = 0.5$ 程度の高さを持つ単一の気泡が移動しているためである。気泡の移動速度は $y/\delta = 0.15$ では単相流の速度と一致し

ており，気泡流中の液相速度変化は気泡の移動速度に誘起されていることが明らかになった。

気泡近傍でどのような流場変化が生じているか調査した。気泡の約 0~50%気泡直径 (4.5mm) 前方及び後方で取得されたベクトルのみ統計処理することにより流場を取得した。単相流に対する気泡前後の主流方向平均速度比を図-10 に示す。横軸の $\bar{u}_{\alpha=0\%}$ および $\bar{u}_{\alpha=0.5\%}$ はそれぞれ単相流および気泡流中の主流方向平均速度を意味する。気泡の前方で流路中央側での減速，後方で壁面近傍の加速が生じていることがわかる。また気泡形状と比較すると，界面に近い領域で液相の変化が大きいことが明らかになった。

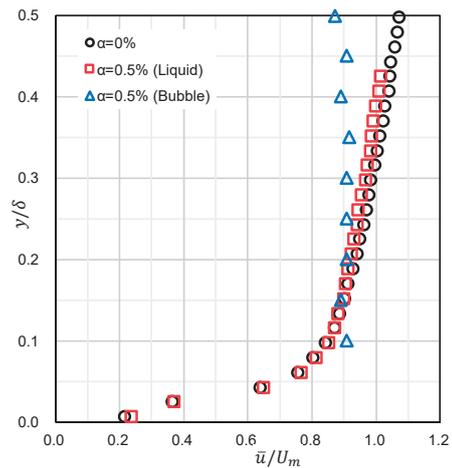


図-9 主流方向平均速度分布

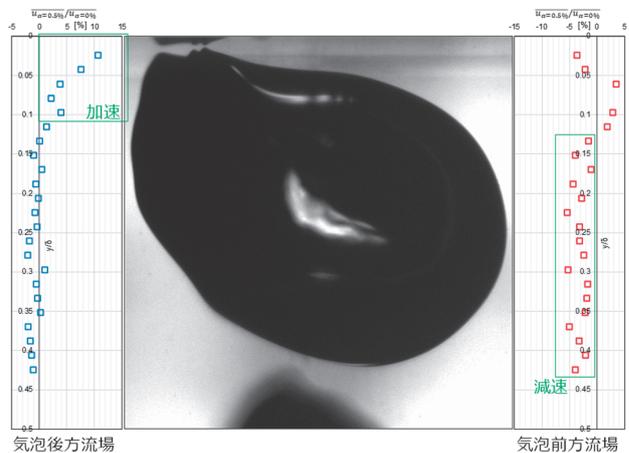


図-10 単相流に対する気泡前後の主流方向平均速度比と気泡形状

5. まとめ

本研究では，大幅な推進エネルギーの削減が見込まれる低速化について，船舶の大型化とともに検討を行った。また低速時には抵抗成分のほとんどを摩擦抵抗に対して，空気吹き出しを周期的に行った際の効果の検証及び気泡流の流場評価技術の開発を行った。これにより以下の知見が得られた。

- 1) JBC 船型を対象に低速化・大型化によるエネルギー削減効果について検討を行った。これにより低速化による輸送量の低下を補うために *DW* を増加させようとする場合、隻数を増やすよりも主要寸法を拡大する方がエネルギー効率の改善効果が大きいことが分かった。
- 2) 空気潤滑法において空気の周期的吹出の効果を検討し、吹出周期を 0.5Hz としたとき、連続吹出より大きな抵抗低減効果が得られることを確認した。また Duty 比を短くすると抵抗低減効果が高くなることを確認した。本実験では連続吹出に対し最大 5%の抵抗低減効果の向上が確認された。
- 3) 高速度カメラによる PTV と Shadowgraphy を組み合わせることにより気泡流中の液相流場および気泡形状を時系列で評価可能となった。開発したシステムで計測を行い、気泡は壁面方向の主流方向平均速度分布を均一化させる効果があることが明らかになった。

謝辞

本研究の船舶の低速化・大型化によるエネルギー削減効果の検討は（一財）日本造船技術センターとの共同研究により実施しました。また空気潤滑法の研究の一部は、JSPS 科研費 17H01245 の助成を受けたものです。研究実施にあたり北海道大学工学研究院 村井裕一教授、朴炫珍助教、室蘭工業大学もの創造系領域 大石義彦助教より貴重なご指導や助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change, Fifth Assessment Report Climate Change 2013 : The Physical Science Basis (2014).
- 2) International Maritime Organization, The Marine Environment Protection Committee : Amendments to MARPOL Annex VI on Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships by Inclusion of New Regulations on Energy Efficiency for Ships 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto, Annex 19 Resolution MEPC. 203, 32, (2011), pp. 1-17.
- 3) International Maritime Organization, The Marine Environment Protection Committee : 2012 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), Annex 9 Resolution MEPC. 213, 63, (2012), pp. 1-12.
- 4) Resolution MEPC.304(72) : Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization (2018).
- 5) 平田宏一 : 低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 19 巻, 別冊, (2019), pp. 3-7.
- 6) 新郷将司, 金井健, 川北千春 : 超低速肥大船型の主要目の検討 (第 1 報), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, (2020).

- 7) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所 : Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics ウェブサイト, <https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html>
- 8) 日本造船技術センター : SRC 船型設計システム (SRCTips) のバージョンアップ - 初期要目設定 (Tips Id), SRC NEWS, No. 94, (2014), pp. 10-11.
- 9) 日本造船技術センター : SRC 船型設計システム (SRCTips) について (その 2 Tips Sp - 性能推定 -), SRCNEWS, No. 79, (2009), pp. 4-5.
- 10) 柚井智洋他 7 名 : ライフサイクルでのコストと CO2 排出量を考慮した船団構成と運航戦略のトレードスペース分析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 29 号, (2019), pp. 127-132.
- 11) 和中真之介, 稗方和夫, 堀井悠司 : 海上輸送における GHG 削減に向けたモデルベース意思決定支援システムの開発, 第 29 号, (2019), pp. 123-126.
- 12) 児玉良明, 日夏宗彦, 堀利文, 川島英幹, 竹子春弥, 牧野雅彦, 大繩将史, 真田有吾, 村井祐一, 太田翔子 : 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験 (結果と解析), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号, (2008), pp. 163-166.
- 13) 川北千春, 高野真一, 小段洋一郎, 溝上宗二 : 空気潤滑システム搭載船の実船船底気泡流と摩擦抵抗低減効果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, 2011, pp. 429-432.
- 14) 溝尻貴明, 藤田均, 小山博道, 田井祥史, 井上久嗣, 日夏宗彦, 岸本雅裕, 堀利文 : 28,000DWT ばら積み運搬船への空気潤滑法の適用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, (2011), pp. 425-428.
- 15) Hara, K., Suzuki, T. and Yamamoto, F. : Image analysis applied to study on frictional-drag reduction by electrolytic microbubbles in a turbulent channel flow, Experimental in Fluids, 50, (2011) pp. 715-727.
- 16) Park, H. J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y. : Drag Reduction Promoted by Repetitive Bubble Injection in Turbulent Channel Flows, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 75, (2015), pp. 12-25.
- 17) 若生大輔, 濱田達也, 川北千春 : 長尺平板模型を用いた空気潤滑法による摩擦抵抗低減試験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, (2020).
- 18) Hiroi, A., Hamada, T., and Kawakita, C. : Investigation on the Characteristic of Bubbles in Horizontal Channel Flow by Fiber Optic Sensor, AJKFluids 2019, Volume 4, (2019).