Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00297

Received date : 28 September, 2021

Accepted date : 4 January, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 14 January, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

乱流境界層への気泡注入による摩擦抵抗低減効果： 長尺模型船実験と実スケール性能の推定

田中 泰爾^{*1}, 大石 義彦^{*2}, 朴 炫珍^{*3}, 田坂 裕司^{*3}, 村井 祐一^{*3}, 川北 千春^{*4}

Frictional drag reduction by bubble injection in turbulent boundary layers: Experiment with long model ship and full-scale estimation

Taiji TANAKA^{*1}, Yoshihiko OISHI^{*2}, Hyun Jin PARK^{*3},
Yuji TASAKA^{*3}, Yuichi MURAI^{*3} and Chiharu KAWAKITA^{*4}

^{*1}Division of Energy and Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 060-8628, Japan

^{*2}Division of Production Systems Engineering, Faculty of Engineering, Muroran Institute of Technology
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido 050-8585, Japan

^{*3}Division of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 060-8628, Japan

^{*4}Fluids Engineering & Hull Design Department, National Maritime Research Institute
6-38-1 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-0004, Japan

Abstract

Drag reduction by bubble injection in turbulent boundary layers was investigated using a 36-m-long flat-bottom model ship. The model ship was towed at 8.0 m/s, resulting in a downstream-distance-based Reynolds number as high as 2.9×10^8 . The total resistance exerting on the model ship was reduced, and the resistance reduction increased with the air flow rate for the bubble injection. The local wall shear stress on the bottom plate was measured at multiple locations to clarify the streamwise transition of the drag reduction. The local drag reduction observed at the upstream measurement locations was increased with the air flow rate. The higher gas flow rate, moreover, produced the longer streamwise persistence of the drag-reduction effect. These multiple factors improved the efficiency of the total resistance reduction against the power consumption for the bubble injection. We provide the estimation of total frictional drag reduction for the full-scale ships using the equation of the local friction coefficient obtained experimentally. The results of the model ship experiment and the full-scale estimation consistently indicated that the downstream persistence of the local drag-reduction effect strongly affect the total drag reduction of such the long hulls.

Keywords : Frictional drag reduction, Bubbly flow, Turbulent boundary layer, Model ship, Full-scale estimation

1. 緒 言

乱流境界層へ気泡を注入することにより、壁面に働く摩擦抵抗を低減することが可能である。BDR (bubbly drag reduction) と呼ばれるこの技術は、航行中の船体に働く抵抗を減らす目的で利用され、既に 20 隻以上の商用船において実用化されている (American Bureau of Shipping, 2019)。今日までに、その効果を検証した複数の海上実船実験において、正味 10% 程度の省エネルギー化が報告された (児玉他, 2008, 溝上他, 2010, Kumagai et al., 2015, 溝上, 黒岩, 2019)。海運・造船の分野においては、二酸化炭素排出規制のためにエネルギー効率設計指標 (energy efficiency design index, EEDI) が国際的に導入されている。船舶の推進抵抗は船速の 2 乗に比例するため、EEDI

No.21-00297 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00297]

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

^{*2} 正員, 室蘭工業大学工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1)

^{*3} 正員, 北海道大学工学研究科

^{*4} (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6 丁目 38-1)

E-mail of corresponding author: t.tanaka@ring-me.eng.hokudai.ac.jp

Fig. 1 The towing test facility: (a) the water tank, (b) the towing train viewed from the front and (c) the 36.0-m-long flat-bottom model ship viewed from the behind.

に基づくゼロエミッション化に向けた計画において船舶の低速化が議論の主流となっている。しかし、一般に航行の長時間化は運行コストの増大を招くため低速化には制限があり、広い船速の条件で抵抗低減を実現する技術として BDR の開発が求められる。

BDR による抵抗低減効果を調査するため、その初めての実証実験 (McCormick and Bhattachanyya, 1973) 以来多数の研究が行われてきた。水平チャネル乱流を用いた計測実験により、気泡によるレイノルズ応力分布の変化 (Kitagawa et al., 2005, Oishi and Murai, 2014, Park et al., 2015) や乱流境界層厚さと気泡径の大小関係の影響 (Moriguchi and Kato, 2002, Murai et al., 2007, Murai, 2014) が明らかになった。これらの計測結果は CFD の結果からも支持され、気泡の変形やその近傍の渦構造に関して詳細な情報が得られている (Lu et al., 2005, Kim et al., 2020)。船体下の乱流境界層は空間的に発達するため、水平チャネル乱流はその発達における局所的な平衡状態を模擬する実験系として利用されてきた。乱流境界層の発達が境界層中のボイド率 (Ceccio, 2010) や移流中にせん断応力により自然に決定される気泡径 (Kitagawa et al., 2005) の変化を引き起こす結果、気泡注入による抵抗低減率は流れ方向に変化する。空間発達する乱流境界層中における抵抗低減率の分布に関する知見が必要である。

本研究は長さ 36.0 m の模型船を使用した曳航実験により BDR の抵抗低減率分布を調査した。1990 年台までの研究では長さ 1 m 程度の平板を用いて、流下レイノルズ数 $Re_x \leq 10^7$ の条件で実験が行われてきた (Merkle and Deutsch, 1992)。著者らのグループは、さらに下流の抵抗低減効果を長さ 4.0 m の平底模型船を用いた実験により調査してきた (Park et al., 2016, 2018, Tanaka et al., 2020)。曳航速度最大 3.0 m ($Re_x < 10^8$) の条件において、模型船スパン方向に伸びた気泡クラスターが周期的に発生し、この周期的な気泡の粗密分布が発達したとき抵抗低減率が増加することを発見した。実際の船舶の環境はさらに大規模であり、数十メートル以上の流下距離と 5–10 m/s の船速により流下レイノルズ数は $Re_x = 10^8$ – 10^9 となる。高 Re_x の条件を実現するために、最大主流速 20 m/s の循環トンネル中に固定された長さ 13 m の平板に生じる乱流境界層を用いた実験では、高い流速に起因する強い揚力が気泡を壁面から引き離し、下流に向けて抵抗低減効果が急激に低下した (Sanders et al., 2006, Elbing et al., 2008)。本実験においては、さらに長尺の模型船を利用することにより、実船舶の速度に合致する 8.0 m/s の曳航速度で $Re_x = 2.9 \times 10^8$ に達する条件を実現した。本稿では、得られた抵抗低減効果について議論し、その結果を用いた実船スケールにおける抵抗低減率の推定方法を示す。

2. 実験設備・実験方法

2・1 曳航水槽試験設備と模型船

実験は海上技術安全研究所の試験水槽施設において実施した。この施設は船舶の推進性能試験について ISO 9001 の認証を取得している。試験水槽 (図 1 (a)) の大きさは、長さ 400 m、幅 18 m、深さ 8 m である。図 1 (b) に示した曳航台車により模型船を牽引する。実験で使用した模型船 (図 1 (c)) は長さ $L = 36.0$ m、幅 $W = 1.0$ m、喫水 $d = 70$ mm であり、船首から 7.0 m の位置で曳航台車に連結されている。船首から 0.3 m の位置の船底には柱状の突起が 20 個取り付けられており (図 2 (a))、これにより船底下に流入する流れにかく乱を与えることで乱

Fig. 2 (a) Protrusions attached to the bow section of the model ship and (b) bottom view of the bubble injector with 41 holes of 30 mm in diameter.

Fig. 3 Arrangement of the 23 pieces of the shear-stress sensors on the bottom plate of the model ship, where x and y coordinates denote streamwise distance from the bow and spanwise position.

流境界層を発達させた。実験の間、水温は $20.6^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ に保たれ、水の密度と動粘度はそれぞれ $\rho \approx 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu \approx 0.99 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

図 2 (b) に示す通り、船首から 3.1 m の船底には幅 $B_a = 840 \text{ mm}$ の間に直径 30 mm の穴が 41 個空けられている。ここにブロワから圧送することで水中に空気を吹き出し、流れによる自然な断裂によって乱流境界層中に気泡を生成する。模型船の両側面に船底から 50 mm 下方に飛び出した端板を取り付けることにより、船底からの気泡の離脱を防ぎ、船底への水面の波の影響を取り除いた。また、船底スパン方向中央にも仕切り板を設け、船底の片側への気泡の偏りを防止した。

2・2 実験装置と実験条件

実験においてはクランプ装置で模型船を曳航台車に固定して加速し、船体が試験船速 $U = 8.0 \text{ m/s}$ で安定した後、固定を解放した。クランプ装置が解放された状態において、模型船は抵抗動力計 TP-U-500 (株式会社オリエンテック, 最大計測量 500 kgf) を介して曳航台車により牽引される。抵抗動力計による船体に働く全抗力の計測と同時に、船底に取り付けた 23 個のせん断応力計 S10W-2 (株式会社エス・エス・ケイ, 最大計測量 2 gf) により壁面に働く局所せん断応力を計測した。応力計の配置を図 3 に示す。船首から下流方向に x 軸、船体のスパン方向中央から右舷の向きに y 軸をとる。応力計は、流れ方向に $x = 4.5 \text{ m}$ から 4.0 m 間隔 ($x = 16.5 \text{ m}$ を除く) の 7 箇所において、スパン方向に $y = 250, 125, -125, -250 \text{ mm}$ の 4 点から位置を選択して取り付けた。せん断応力計の計測値は、乱流境界層における局所摩擦係数を表す Prandtl-Schlichting の式 (Schlichting, 1979)

$$c_{f0} = (2 \log_{10} Re_x - 0.65)^{-2.3}, \quad Re_x = \frac{Ux}{\nu} \quad (1)$$

を用いて、単相流の試験により校正を行った。

Fig. 4 Ratio of total resistance reduction on the model ship, where error bars represent standard deviation in three trials.

Table 1 Length and area of the bow-part, the air-lubricated part and the whole bottom plate of the model ship.

Length of bow-part L_b	3.1 m
Area of bow-part A_b	2.1 m ²
Streamwise length of air-lubricated part	32.9 m
Area of air-lubricated part	32.1 m ²
Total length of bottom plate L_t	36.0 m
Total area of bottom plate A_t	34.2 m ²

気泡注入の空気体積流量 Q_a は 1.0×10^{-2} – 4.0×10^{-2} m³/s の範囲とした。 Q_a を船舶における BDR の設計で用いられる指標である気膜相当厚さ

$$t_a = \frac{Q_a}{UB_a} \quad (2)$$

に換算すると 1.5–6.0 mm となり、実用条件と同程度であった。実験において、船底に設けたアクリル窓を通して高速度カメラを用いて撮影した画像により、気液二相乱流境界層の流動状態を確認した。 $t_a = 1.5$ mm, 3.0 mm では、数ミリメートルの大きさの気泡を多数含む流れが模型船全体に渡って観察された。この大きさは、乱流境界層を移流する間の合体と分裂により、気泡径が自然に決定されたことを示している (Sanders et al., 2006, Tanaka et al., 2020)。 $t_a = 4.5$ mm, 6.0 mm の場合、上流 10 m 程度の範囲において、数ミリ径の大量の小気泡に混ざって流れ方向に 10 cm 程度の大きな気泡が現れた。この大気泡は移流中に分裂するため、下流では小気泡のみを含む流れに遷移した。小気泡の大きさについては、いずれの t_a の条件においても流れ方向で明瞭な変化は観察されなかった。ここで、気泡注入位置において乱流境界層厚さ

$$\delta = 0.37xRe_x^{-1/5} \quad (3)$$

は 3.8×10^{-2} m となる。模型船の長さは $L \sim 1,000\delta$ であり、乱流境界層の特徴長さ δ と比較して非常に長い。

模型船の全抵抗および底面に働く局所せん断応力の計測は、模型船を設定速度まで加速してから約 6 後に開始した。計測時間は 4.0 s とし、この間に模型船は全長 400 m の試験水槽の端から 140–180 m の区間内を移動した。気泡を注入しない状態において、模型船に働く全抵抗の大きさが計測時間内で安定していることから、計測開始時点で境界層が十分に発達していることが確認された。多チャンネルデータロガーにより 100 Hz で計測値を記録

Fig. 5 Ratio of frictional drag reduction at the air-lubricated part of the bottom plate , where error bars represent standard deviation in three trials.

し、4.0 s 間の時間平均により全抗力 R_t と局所摩擦係数 c_f を求めた。模型船の曳航により生じる水面の波の影響を抑えるため、計測は 20 分以上の間隔を空けて実施し、各 t_a の条件につき 3 回の計測を行った。模型船の加速開始時に気泡注入を始め、減速中に注入を停止することにより、実験の前後に気泡が船底に残留しないようにした。

3. 気泡注入による抵抗低減効果

3・1 模型船に働く全抗力の低減

気泡注入による全抗力の低減量は、気泡注入なしの場合の全抗力を R_{t0} と表すと、

$$\Delta R_t = R_{t0} - R_t \quad (4)$$

により求められる。図 4 に全抗力の低減率 $\Delta R_t/R_{t0}$ の結果を示す。図中のエラーバーは 3 回の試行における標準偏差を示しており、以降の図においても断りのない限り同様である。全抗力の低減率 $\Delta R_t/R_{t0}$ は t_a に応じて増加し、 $t_a = 6.0$ mm において約 16% となった。 t_a にしたがって BDR の効果が大きくなる結果は、本実験と同規模の長尺模型船を用いた過去の研究 (Kodama et al., 2000) と一致しており、気泡注入の空気流量の増大により摩擦抵抗低減量が増える BDR の一般的な傾向にも合致する。

船体に働く各種流体抵抗は、摩擦抵抗を除いて気泡注入の影響を受けない。このため、気泡注入位置 ($x = 3.1$ m) より下流にあたる模型船の空気潤滑部における摩擦抵抗低減量 ΔD_f は全抗力の低減量と等しい。

$$\Delta D_f = \Delta R_t \quad (5)$$

なお、船底平板について全体、空気潤滑部、および気泡注入部より上流にあたる船首部の長さや面積はそれぞれ表 1 に示す通りである。単相流の乱流境界層における平板の摩擦係数は Prandtl-Schlichting の式 (Schlichting, 1979)

$$C_{f0} = \frac{0.455}{(\log_{10} Re_l)^{2.58}}, \quad Re_l = \frac{U l}{\nu} \quad (6)$$

Fig. 6 Power gain by the bubble drag reduction on the model ship considering the power consumption for the bubble injection, where error bars represent standard deviation in three trials.

により求められる (l : 平板の長さ). 船首部と平板全体の長さ (L_b, L_t) と面積 (A_b, A_t) を用いて, 単相流における空気潤滑部の摩擦抵抗は

$$D_{f0} = \frac{1}{2} \rho U^2 \{ C_{f0}(L_t) A_t - C_{f0}(L_b) A_b \} \quad (7)$$

により算出できる. この摩擦抵抗と実験で得られた摩擦抵抗低減量により, 空気潤滑部の摩擦抵抗低減率

$$DR = \frac{\Delta D_f}{D_{f0}} \quad (8)$$

が求められる. 図 5 に示す通り, t_a を大きくするにつれて DR は増加した. 最大の t_a の条件においては $DR = 0.28$ に達しており, 気泡注入により摩擦抵抗の 4 分の 1 以上が低減される大きな効果を得た.

船底平面における静水圧を用いて気泡注入のために消費する動力を見積もることにより, BDR によるパワーゲイン

$$G_p = \frac{\Delta R_t U}{\rho g d Q_a} \quad (9)$$

を求め, 図 6 に示す. いずれの t_a においても $G_p > 100$ であり, 摩擦抵抗低減による船体を推進するための動力の削減が, 気泡注入のために消費する動力の 100 倍以上の大きさと得られたことを示している. G_p の値が t_a の増加により大きくなることから, ΔR_t が Q_a に対する一次関数より急速に増加したことが示される. この結果について, 次節において局所摩擦係数の流れ方向分布の観点から検討する.

3・2 船底に働く局所せん断応力の低減

局所摩擦係数 c_f の計測結果を図 7 に示す. 黒の実線は式 (1) により求められる単相流における局所摩擦係数 c_{f0} の空間分布を示す. 全ての t_a の条件および全ての計測位置において $c_f < c_{f0}$ となり, 局所摩擦抵抗が低減した. c_{f0} の曲線が示す通り, 単相流においては摩擦係数が上流から下流に向けて単調に減少する. 比較的少ない空気流量で気泡を注入した $t_a = 1.5$ mm, 3.0 mm の条件においても, 同様に下流ほど c_f が小さくなった. 一方, $t_a = 4.5$ mm, 6.0 mm の条件では, c_f は気泡注入位置に近い上流側において小さく, 模型船の中腹にかけて増加した後, 下流に

Fig. 7 Streamwise distribution of local friction coefficient at each spanwise position: (a) $t_a = 1.5$ mm, (b) $t_a = 3.0$ mm, (c) $t_a = 4.5$ mm and (d) $t_a = 6.0$ mm, where error bars represent standard deviation in three trials. The black solid line denotes the friction coefficient in the single-phase turbulent boundary layer. The vertical gray solid line indicates the position of the bubble injector.

向け再度減少した。このような局所摩擦係数の空間発達は単相流においては現れない BDR の特徴であり、長尺の模型船を用いた本研究により実験的に明らかになった事項である。

単相流に対する気泡注入時の摩擦係数の比 c_f/c_{f0} を図 8 に示す。ここでは、同じ流下距離に複数のせん断応力計が設置されている位置では、スパン方向最大 4 点における 3 回の計測結果を用いて平均と標準偏差を求めた。 $t_a = 1.5$ mm, 3.0 mm の場合、 c_f/c_{f0} の流れ方向の変化は小さい。 $t_a = 4.5$ mm, 6.0 mm の場合、最初の計測位置において摩擦係数が 30% 以上減少した。この結果は、流れ方向に大きな気泡が含まれる気泡流の状態において高い抵抗低減効果が得られたことを意味する。実験における気泡流の観察により、大きな気泡は移流しながら数ミリ径の小気泡へと分裂したことが確認されている。上流側の高い抵抗低減効果が下流に向かって減衰し、船尾付近でほぼ流れ方向に一定となる傾向は、この流動状態の変化に起因すると考えられる。それぞれの計測位置においては、 t_a の増加により抵抗低減効果が大きくなった。これは、気泡注入の空気流量にしたがい抵抗低減効果が大きくなる BDR の一般的な特徴である。それぞれの流下距離における c_f のばらつきは $t_a = 1.5\text{--}4.5$ mm の場合小さく、 $t_a = 6.0$ mm の場合に比較的大きくなった。空気流量を大きくした条件において、気泡が均一に分布せず、スパン方向に粗密分布が生じた可能性を示している。

実験室の限られた流下距離で得られた結果から長大な実船における抵抗低減機能を予測するために、局所抵抗低減効果の空間発達を表す関数モデルを構築することが、BDR の研究において重要な課題であった。これまで、局所ボイド率に対する指数関数型のモデル (Merkle and Deutsch, 1992) や流下距離に対する逆数型のモデル (Kumagai et al., 2015, Murai et al., 2020) などが提案されてきた。しかしながら、本実験で確認された抵抗低減効果の重要な空間発達特性である流れ方向の減衰を、これらの既存のモデルは明示的に表現できない。BDR の実用設計に役立つ、意味が明瞭な係数により定義される簡便なモデルとして、 c_f/c_{f0} を x の関数として表す次の式を考案した。

Fig. 8 Streamwise distribution of ratio of local friction coefficient c_f/c_{f0} , where error bars represent standard deviation in three trials and spanwise measurement positions. Solid lines denote the fitting curve to the experimental results using Eq. (10). The vertical gray dashed line indicates the position of the bubble injector.

$$\frac{c_f}{c_{f0}} = 1 - (I_0 - I_\infty) \exp\left[-3 \frac{x - L_b}{L_{95}}\right] - I_\infty \quad (10)$$

ここで、 I_0 および I_∞ は気泡注入位置における初期抵抗低減効果と気泡注入位置から十分離れた下流の抵抗低減効果を表す。 L_{95} は局所抵抗低減率が I_0 から I_∞ へと 95% 減衰するまでの距離であり、上流側で得られる高い抵抗低減効果の持続距離を示す。指数関数中の定数-3 は、 $x - L_b = L_{95}$ のとき $\exp[-3(x - L_b)/L_{95}] \approx 0.05$ となり、95% の減衰を表すように与えた係数である。式 (10) に含まれる 3 つの係数 I_0 , I_∞ , L_{95} を、7 点の局所摩擦係数の計測結果を用いた最小二乗法近似により決定する。係数の決定においては、 $0 \leq I_0 + I_\infty \leq 1$, $0 \leq I_\infty \leq 1$, $L_{95} \geq 1.4$ m (気泡注入位置と最初のせん断応力計測位置の距離) の 3 つの条件を与えた。図 8 より近似曲線は実験結果によく一致することが確認できる。また、式 (10) を用いて得られる c_f を流れ方向に積分することにより、局所せん断応力の計測結果に基づく空気潤滑部の摩擦抵抗低減率 DR_1 が次の通り求められる。

$$DR_1 = 1 - \frac{\int_{L_b}^{L_1} c_f dx}{\int_{L_b}^{L_1} c_{f0} dx} \quad (11)$$

DR_1 と全抵抗の計測結果から求めた空気潤滑部の摩擦抵抗低減率 DR を比較した結果を図 9 に示す。2 つの方法で求められる抵抗低減率はよく一致しており、式 (10) の妥当性が確認された。

近似により得られた係数を表 2 に示す。 I_0 と I_∞ は t_a に応じて増加しており、空気流量を大きくすることで空気潤滑部全体に渡って抵抗低減が促進されることを示している。 I_0 が $t_a = 3.0$ mm と 4.5 mm の間に急激に増加する特徴は、 $t_a = 4.5$ mm 以上の条件において上流側で大きな気泡を含む流動状態になったことに対応する。 I_∞ は t_a に対して段階的に増加した。 L_{95} の値は、 $t_a = 1.5$ mm の場合は近似計算において与えた条件の下限值となり、 $t_a = 3.0$ mm の場合は I_0 と I_∞ の差が小さかったため外れ値的に大きく評価された。 $t_a = 4.5$ mm から $t_a = 6.0$ mm の間で L_{95} は倍以上増加し、高い抵抗低減効果が得られる距離が延伸された。 I_0 と L_{95} がともに増加する傾向にあることから、気泡注入位置において高い抵抗低減を生じさせることにより乱流の再発達に必要とされる距離が伸び、抵抗低減効果の持続性を高める作用が自然に得られることが示された。このように、空気流量を増加させることに

Fig. 9 Correlation of the ratio of drag reduction at the air-lubricated part obtained by two kinds of the measurement: the local wall shear stress (DR_l) and the total resistance of model ship (DR), where vertical error bars represent standard deviation in three trials.

Table 2 Characteristics of the streamwise development of drag-reduction effect described by the coefficients in Eq. (10).

t_a [mm]	I_0 [-]	I_∞ [-]	L_{95} [m]
1.5	0.02	0.02	1.4
3.0	0.10	0.07	39.1
4.5	0.49	0.14	8.2
6.0	0.56	0.20	20.3

より上流・下流の抵抗低減率と抵抗低減効果の持続距離全てが向上する．この重畳により船体全体で得られる抵抗低減量が急速に増大するため，図 6 に示した BDR によるパワーゲイン G_p は空気流量を大きくするにつれて増加した．

気泡注入の空気流量に対する局所摩擦抵抗低減の効率を示す指標として，抵抗低減率と流れのボイド率 α の比率を表すゲインファクター

$$G = \frac{1 - c_f / c_{f0}}{\alpha} \quad (12)$$

が用いられる (Murai, 2014)．本実験のように微小な気泡を大量に生成する方法においては，比較的小さいボイド率で数十%の抵抗低減が達成可能であり， $G > 1$ となることが知られている．乱流境界層におけるボイド率は，

$$\alpha = \frac{Q_a}{Q_a + UW\delta'}, \quad \delta' = 0.324xRe_x^{-1/5} \quad (13)$$

により推定できる (Sanders et al., 2006)．このボイド率と局所摩擦係数の計測値から G を求めた結果を図 10 に示す． $t_a = 1.5$ mm の条件では抵抗低減率が小さいため $G \approx 1$ であるが，他の t_a の条件では $G > 1$ となった．BDR による抵抗低減効果は，気泡注入による流れの密度低下と，気泡と液相の相互作用による乱流の変調によって生じる． $G > 1$ という結果は，密度低下の寄与のみから予想される抵抗低減より高い効果が得られ，乱流変調の作用が強く働いていることを示す．また， t_a を大きくするにつれて G の値が増加することから，大きな空気流量ほど乱流変調による抵抗低減効果が増幅することが明らかになった．

Fig. 10 Streamwise distribution of gain factor G , where error bars represent standard deviation in three trials and spanwise measurement positions. The horizontal gray line denotes $G = 1.0$.

4. 実スケールにおける抵抗低減効果の推定

長尺の模型船を用いた局所摩擦係数分布の計測により、数十メートルの流下距離における抵抗低減効果の流れ方向変化を表す実験式 (10) を獲得した。この式をもとに、実スケールの船舶における摩擦抵抗低減率を推定する方法を提案する。非常に長い船体の十分下流においては、気泡が船底から離脱し抵抗低減効果がゼロになる。このため、実スケールの性能評価においては式 (10) において $I_\infty \rightarrow 0$ と置き換え、局所摩擦係数 c_{fe} を以下の通り推定する。

$$c_{fe} = \left(1 - I_0 \exp \left[-3 \frac{x - L_b}{L_{95}} \right] \right) c_{f0} \quad (14)$$

船の長さを L_{ship} とおき、気泡注入位置 L_0 から船尾まで流れ方向に局所摩擦係数を積分することにより、船の空気潤滑部における摩擦抵抗低減率を以下のように計算できる。

$$DR_e = 1 - \frac{\int_{L_0}^{L_{ship}} c_{fe} dx}{\int_{L_0}^{L_{ship}} c_{f0} dx} \quad (15)$$

実スケール推定の例として、気泡注入位置を $L_0 = 20 \text{ m}$ で固定し、 $L_{ship} = 50\text{--}200 \text{ m}$ の条件で抵抗低減率を求めた結果を図 11 に示す。算出された抵抗低減率は、過去の海上実験における船の抵抗低減率と同じ水準である (児玉他, 2008, 溝上他, 2010, Kumagai et al., 2015, 溝上, 黒岩, 2019)。いずれの L_{ship} の条件においても、 $t_a = 6.0 \text{ mm}$ の場合の DR_e が他の場合の 2 倍以上大きくなった。図 5 の通り、長さ 36.0 m の模型船では $t_a = 6.0 \text{ mm}$ における抵抗低減率 DR は $t_a = 4.5 \text{ mm}$ の場合の約 1.5 倍であった。さらに流下距離が長い実スケールの環境において、抵抗低減効果の下流持続性が全体の抵抗低減率に強く影響することが示された。また、船が長くなるほど DR_e は小さくなる傾向にあるが、 $L_{ship} = 200 \text{ m}$ と長い距離でも $t_a = 6.0 \text{ mm}$ の場合に数%の抵抗低減効果が得られている。BDR の実設計においては長手方向に複数箇所での気泡を注入することが検討されるため、抵抗低減効果が加算的に増幅することにより、合計の抵抗低減率を大きくすることが可能である。

Fig. 11 Frictional drag reduction on the air-lubricated part of the ship hull estimated for various ship length.

5. 結 言

実船舶と同等の流速と流下距離における乱流境界層への気泡注入による抵抗低減効果を評価するため、長さ 36.0 m の長尺模型船を船速 8.0 m/s で曳航する実験を行なった。気泡注入の空気流量は船舶における実用範囲に揃え、気膜相当厚さに換算して 1.5–6.0 mm とした。流下レイノルズ数が $Re_x = 2.9 \times 10^8$ に達する流れにおいて模型船に働く全抗力と局所せん断応力の調査を行った本研究は、今日まで行われてきた BDR の研究の中でも最大規模の計測実験である。全抵抗の計測から、注入する空気流量に応じて船体に働く摩擦抵抗の低減率が向上することが確認された。空気流量が大きい条件において、船底壁面の局所摩擦係数が気泡注入直後の位置で大きく減少し、この高い抵抗低減効果が長距離に渡って持続した。このような局所抵抗低減率を増加させる複数の作用により、模型船全体で得る抵抗低減効果は空気流量を増加させる割合よりも急速に発達する。このため、気泡注入で消費する動力を考慮した BDR によるパワーゲインは空気流量を大きくするほど増加した。

本稿では、局所摩擦係数の計測結果をもとに、抵抗低減効果の流れ方向の変化を表す実験式を構築した。大型の模型船を用いた試験を行うことにより、数十メートルの流下距離における抵抗低減効果の遷移を実験的に実証し、その特徴を定量的に表示することが実現した。獲得した実験式を使用した実スケール推定の結果は、船体全体で得る抵抗低減効果の改善において、気泡注入位置における抵抗低減率に加え、その効果の下流持続性が重要な因子となることを示した。本稿で提案した実スケール推定は、簡便な式により過去の海上実船実験と符合する結果を与えており、今後の BDR 実設計に柔軟に役立つものと期待される。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費（課題番号 JP20J20435, JP20K04255, JP21H04538, JP21K14069）の助成を受けたものである。本実験の実施にあたり、熊谷一郎教授（明星大学）、若生大輔研究員（海上技術安全研究所）、濱田達也研究員（海上技術安全研究所）、島田正夫技官（室蘭工業大学）、藤井夏海さん（室蘭工業大学）、山保敏幸技官（北海道大学）の技術的支援を受けた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- American Bureau of Shipping, Air Lubrication Technology (2019), pp.1–15.
- Ceccio, S.L., Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42 (2010), pp.183–203.
- Elbing, B.R., Winkel, E.S., Lay, K.A., Ceccio, S.L., Dowling, D.R. and Perlin, M., Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction, Journal of Fluid Mechanics, Vol.612 (2008), pp.201–236.
- Kim, S., Oshima, N., Murai, Y. and Park, H.J., Numerical investigation of a single intermediate-sized bubble in horizontal

- turbulent channel flow, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.15, No.3 (2020), pp.1–18.
- Kitagawa, A., Hishida, K. and Kodama, Y., Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique, *Experiments in Fluids*, Vol.38 (2005), pp.466–475.
- 児玉良明, 日夏宗彦, 堀利文, 川島英幹, 竹子春弥, 牧野雅彦, 大縄将史, 眞田有吾, 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*, Vol.6 (2008), pp.163–166.
- Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T. and Kawashima, H., Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.21 (2000), pp.582–588.
- Kumagai, I., Takahashi, Y. and Murai, Y., Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships, *Ocean Engineering*, Vol.95 (2015), pp.183–194.
- Lu, J., Fernández, A. and Tryggvason, G., The effect of bubbles on the wall drag in a turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol.17 (2005), 095102.
- McCormick, M.E. and Bhattacharyya, R., Drag reduction of a submersible hull by electrolysis, *Naval Engineers Journal*, Vol.85 (1973), pp.11–16.
- Merkle, C.L. and Deutsch, S., Microbubble drag reduction in liquid turbulent boundary layers, *Applied Mechanics Reviews*, Vol.45 (1992), pp.103–127.
- 溝上宗二, 川北千春, 小段洋一郎, 高野真一, 日笠靖司郎, 重永亮介, 空気潤滑システムの開発と実船試験による検証, *日本船舶海洋工学会論文集*, Vol.12 (2010), pp.69–77.
- 溝上宗二, 黒岩良太, 内航フェリーへの空気潤滑システムの適用と実運航データに基づく実海域における省エネ効果検証, *日本船舶海洋工学会論文集*, Vol.29 (2019), pp.1–9.
- Moriguchi, Y. and Kato, H., Influence of microbubble diameter and distribution on frictional resistance reduction, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.7 (2002), pp.79–85.
- Murai, Y., Frictional drag reduction by bubble injection, *Experiments in Fluids*, Vol.55 (2014), 1773.
- Murai, Y., Fukuda, H., Oishi, Y., Kodama, Y. and Yamamoto, F., Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33 (2007), pp.147–163.
- Murai, Y., Sakamaki, H., Kumagai, I., Park, H.J. and Tasaka, Y., Mechanism and performance of a hydrofoil bubble generator utilized for bubbly drag reduction ships, *Ocean Engineering*, Vol.216 (2020), 108085.
- Oishi, Y. and Murai, Y., Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.55 (2014), pp.128–139.
- Park, H.J., Oishi, Y., Tasaka, Y. and Murai, Y., Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction, *Experiments in Fluids*, Vol.57 (2016), 178.
- Park, H.J., Tasaka, Y. and Murai, Y., Bubbly drag reduction accompanied by void wave generation inside turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids*, Vol.59 (2018), 166.
- Park, H.J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y., Drag reduction promoted by repetitive bubble injection in turbulent channel flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.75 (2015), pp.12–25.
- Sanders, W.C., Winkel, E.S., Dowling, D.R., Perlin, M. and Ceccio, S.L., Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.552 (2006), pp.353–380.
- Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory* (1979), McGraw-Hill.
- Tanaka, T., Park, H.J., Tasaka, Y. and Murai, Y., Spontaneous and artificial void wave propagation beneath a flat-bottom model ship, *Ocean Engineering*, Vol.214 (2020), 107850.

References

- American Bureau of Shipping, *Air Lubrication Technology* (2019), pp.1–15.
- Ceccio, S.L., Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42 (2010), pp.183–203.
- Elbing, B.R., Winkel, E.S., Lay, K.A., Ceccio, S.L., Dowling, D.R. and Perlin, M., Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.612 (2008), pp.201–236.
- Kim, S., Oshima, N., Murai, Y. and Park, H.J., Numerical investigation of a single intermediate-sized bubble in horizontal turbulent channel flow, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.15, No.3 (2020), pp.1–18.
- Kitagawa, A., Hishida, K. and Kodama, Y., Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV

- combined with the shadow image technique, *Experiments in Fluids*, Vol.38 (2005), pp.466–475.
- Kodama, Y., Hinatsu, M., Hori, T., Kawashima, H., Takeshi, H., Makino, M., Ohnawa, M., Sanada, Y., Murai, Y. and Ohta, S., A full-scale air lubrication experiment using a large cement carrier for energy saving, *Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers Conference*, Vol.6 (2008), pp.163–166 (in Japanese).
- Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T. and Kawashima, H., Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.21 (2000), pp.582–588.
- Kumagai, I., Takahashi, Y. and Murai, Y., Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships, *Ocean Engineering*, Vol.95 (2015), pp.183–194.
- Lu, J., Fernández, A. and Tryggvason, G., The effect of bubbles on the wall drag in a turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol.17 (2005), 095102.
- McCormick, M.E. and Bhattacharyya, R., Drag reduction of a submersible hull by electrolysis, *Naval Engineers Journal*, Vol.85 (1973), pp.11–16.
- Merkle, C.L. and Deutsch, S., Microbubble drag reduction in liquid turbulent boundary layers, *Applied Mechanics Reviews*, Vol.45 (1992), pp.103–127.
- Mizokami, S., Kawakita, C., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S. and Shigenaga, R., Development of Air lubrication system and verification by the full scale ship test, *Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol.12 (2010), pp.69–77 (in Japanese).
- Mizokami, S. and Kuroiwa, R., Installation of air lubrication system for ro-pax ferry and verification of its effect in actual seas based on onboard measurement data, *Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol.29 (2019), pp.1–9 (in Japanese).
- Moriguchi, Y. and Kato, H., Influence of microbubble diameter and distribution on frictional resistance reduction, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.7 (2002), pp.79–85.
- Murai, Y., Frictional drag reduction by bubble injection, *Experiments in Fluids*, Vol.55 (2014), 1773.
- Murai, Y., Fukuda, H., Oishi, Y., Kodama, Y. and Yamamoto, F., Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33 (2007), pp.147–163.
- Murai, Y., Sakamaki, H., Kumagai, I., Park, H.J. and Tasaka, Y., Mechanism and performance of a hydrofoil bubble generator utilized for bubbly drag reduction ships, *Ocean Engineering*, Vol.216 (2020), 108085.
- Oishi, Y. and Murai, Y., Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.55 (2014), pp.128–139.
- Park, H.J., Oishi, Y., Tasaka, Y. and Murai, Y., Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction, *Experiments in Fluids*, Vol.57 (2016), 178.
- Park, H.J., Tasaka, Y. and Murai, Y., Bubbly drag reduction accompanied by void wave generation inside turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids*, Vol.59 (2018), 166.
- Park, H.J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y., Drag reduction promoted by repetitive bubble injection in turbulent channel flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.75 (2015), pp.12–25.
- Sanders, W.C., Winkel, E.S., Dowling, D.R., Perlin, M. and Ceccio, S.L., Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.552 (2006), pp.353–380.
- Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory* (1979), McGraw-Hill.
- Tanaka, T., Park, H.J., Tasaka, Y. and Murai, Y., Spontaneous and artificial void wave propagation beneath a flat-bottom model ship, *Ocean Engineering*, Vol.214 (2020), 107850.