

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03499

研究課題名(和文) 深喫水船舶への実用化を目指した船舶抵抗低減のための高汎用性翼型気泡発生装置の開発

研究課題名(英文) Development of general-purpose hydrofoil bubble generators for ship drag reduction toward practical application to deep-draft ships

研究代表者

熊谷 一郎 (Kumagai, Ichiro)

明星大学・理工学部・教授

研究者番号：50597680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：地球に優しい船舶抵抗低減技術である翼型気泡発生装置に関する実験研究を行った。海上技術安全研究所の高速流路を用いた空気導入性能試験では、高速領域(9m/s)において最大50 l/minの空気導入を確認できた。翼の負圧による空気導入モードには少なくとも3種あり、10ノットを超える高速流の場合、翼上面にキャビティが形成された。またキャビティ形成による空気導入性能の低下が確認された。さらに、同研究所の400m水槽における36mモデル船を用いた曳航水槽実験においては、正味抵抗低減効果が最大となる最適な船速が存在し、約10ノットの船速において最大12%程度の正味抵抗低減効果が得られることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

翼型気泡発生装置に関する実験は、これまで約6ノットが最速であった。本研究の高速流路を用いた実験によって、約20ノットの高速領域まで、その空気導入性能や壁面近傍の気泡流の挙動が明らかになった。これまで、船速が速ければ速いほど、高い正味抵抗低減効果が得られると考えられてきたが、海技研の400m曳航水槽を用いた実験成果により、最適な船速(約10ノットで12%の正味抵抗低減効果)が存在することが初めて明らかになった。また、導入空気の流体力学的微細化技術によって、より少ない空気流量で高い抵抗低減効果を実現できた。これにより、深喫水船で使用する空気ポンプをアシストし、さらなる省エネが可能となった。

研究成果の概要(英文)：As an Earth-friendly tool, we invented a hydrofoil bubble generator to reduce ship drag and conducted experiments using a high-speed channel tunnel in National Maritime Research Institute (NMRI) to understand the behaviors of air bubble generation at a cruising speed up to 20 knots. The threshold of air entrainment, the air flow rate, and the bubbly flow pattern depend on Reynolds number, angle of attack, and hydrofoil type. We identified intermittent air entrainment at a low-speed condition, stable air entrainment, and air entrainment with a ventilated cavity at a high-speed condition (> 5m/s). Although the ventilated cavity lowers the ability of air entrainment, a large volume of air bubbles (50 l/min) was generated by the hydrofoil system at 9 m/s, which has a high potential to reduce ship drag. We have also conducted a towing tank experiments using a 400m tank in NMRI and obtained the maximum net drag reduction (about 12%) for a 36m model ship at a cursing speed (10 knots).

研究分野：流体工学

キーワード：船舶抵抗低減 気液二相流 可視化

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国際海事機構 (IMO) による温室効果ガス排出量の算出と規制により、省エネルギー化のための船舶抵抗低減技術に関する研究開発が活発に行われている。その中で、船体と水との境界に微小気泡の層を設け、摩擦抵抗を低減する空気潤滑法がある。これまでに、実船応用段階において正味約 5-10% を超える抵抗低減が得られたとの報告もなされているが、従来の方法では、船底に空気を圧送するために必要なコンプレッサーなどが消費する動力や微小気泡を発生させるための細孔による圧損などの影響が無視できず、気泡による抵抗低減効果が十分に活用されていなかった。

こうした問題を克服するため、我々の研究グループでは、空気導入管の出口に水中翼を設置し、船底へ微小気泡を注入する翼型気泡発生装置を開発した。この装置では、船舶が航行した際に翼上部に負圧領域が発生し、空気をほぼ大気圧のまま船底まで導入できる。これにより、水中翼を取り付けた際の抵抗増加よりも気泡による壁面摩擦抵抗低減効果が勝り、実船において正味抵抗低減効果を得ることが可能となった⁽¹⁾。一方で、全ての船舶において本手法が有効に活用できない結果も報告されてきた。またこれまで、実船の巡航速度領域 (10 ノット以上) における水中翼の空気導入性能や発生気泡による壁面摩擦抵抗低減効果に関する実験がほとんどなされておらず現象の理解が乏しい状態が続いていた。

2. 研究の目的

本課題では、多くの船舶に利用できる翼型気泡発生装置を開発するため、実船の巡航速度領域において正味抵抗低減効果を得るための水中翼の開発を行うことを目的とする。具体的には、負圧効果の大きい翼や微小気泡を発生可能な三次元翼を設計し、10 ノットを超える速度領域において、回流水槽実験や曳航水槽実験を実施し、最適な翼型や翼配置などを見出し、汎用性のある気泡発生装置の研究開発を行う。

また、本装置は新造船のみならず既存船にも装着可能な技術とするため、様々な船型や経年劣化に伴う船体壁面の凹凸の影響に対して、気泡による抵抗低減効果がどのようになるのかを調べる。そこで、実船の壁面粗度を調査するとともに、気泡サイズと壁面凹凸との関係によって、摩擦抵抗低減効果がどのようになるのかについて実験を行い、次なるステップである実船試験へ向けたデータの蓄積を行う。

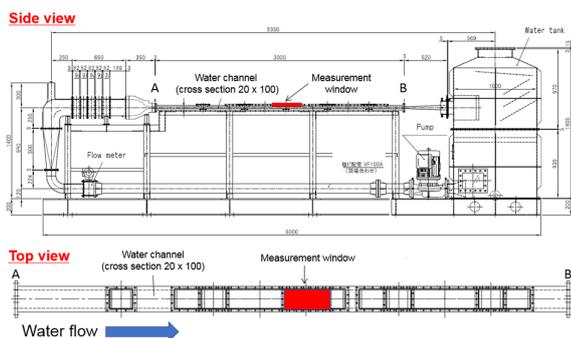


図 1. 海上技術安全研究所の小型高速チャネル

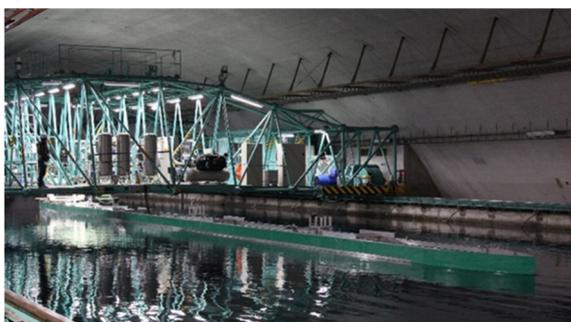


図 2. 海上技術安全研究所における 400m 曳航水槽実験

3. 研究の方法

(1) 海上技術安全研究所の小型高速チャネル (図 1: 最高流速 10 m/s) を用いて、水中翼による空気導入開始流速、水中翼の圧力係数、導入空気流量などについて実験的に調べる。また高速流中の気泡分裂過程や気泡流の特徴を調べるために、バックライト法と高速度カメラを用いた可視化実験を行う。実験では、水中翼の空気導入性能について、様々なパラメータの影響 (流速、水中翼の翼形、迎角、翼の配置など) について調べる。

(2) 実船の壁面凹凸の状態を調べるために、ドック入り直後の船体壁面を型取りし、データ化した後、模擬壁面を作成する。

(3) 小型高速チャネルでの実験結果を踏まえ、海上技術安全研究所の 400m 水槽 (図 2) を用い、実船の巡航速度を想定した曳航水槽実験を行う。36m のモデル船に、本課題で開発した翼型気泡発生装置を搭載し、空気流量、全抵抗、気泡サイズ、局所せん断応力、高速度カメラによる船底の気泡流の特徴などについて調査する。

4. 研究成果

(1) 約 20 ノットの流速が得られる海上技術安全研究所の小型高速チャネルを用い、実船の巡航速度における翼型気泡発生装置の空気導入性能および気泡生成過程を調べるための実験を行った。チャネル内の流速が臨界流速を超えた時、翼によって発生する負圧の大きさが静水圧よりも大きくなるため、大気中の空気がチャネル内に連行される。図 3 に実験結果の例を示す。

この実験では、空気が連行され始める臨界流速は $v_c=0.45\text{ m/s}$ で、みかけの圧力係数 C_p は -0.43 であった。この値は、単相流のときの圧力係数の大きさ（絶対値）よりも小さくなっている。これは、本実験で使用したチャンネルの高さが 20 mm と狭いため、壁面の影響を強く受けているためである。実験では、流速 9 m/s において、翼の負圧による空気導入流量が約 50 l/min に達することが確認できた⁽²⁾。一方で、流速が 5 m/s を超える場合には、翼周りに **air cavity** が形成され（図 3, 4）、空気導入性能が低下することが確認された（図 5）。しかしながらこの問題については、翼形状の最適化によって克服できることが明らかになった。さらに本実験では、新規開発した穴あき水中翼の空気導入性能に関する実験も行い、サブミクロンオーダーの微細気泡を大量発生させることに成功した。

(2) ドック入り直後の船舶の表面を型取りし、その凹凸データを取得することに成功した。得られた壁面凹凸の特徴についての解析を基に模擬壁面作成した。

(3) 海上技術安全研究所の 400 m 水槽において、 36 m のモデル船を用いた曳航水槽実験を実施し、本課題で作成した翼型気泡発生装置による正味抵抗低減効果が得られた（図 6 の A3 の結果）。船底の正味抵抗低減量は翼型気泡発生装置による空気導入流量に依存する。従来の研究では、船速が速いほど大きな正味抵抗効果が得られると考えられていたが、本実験の結果では、正味抵抗低減効果が最大となる最適な船速が存在し、従来型の翼型気泡発生装置の場合、約 10 ノット の船速において、実質見積で最大 12% 程度（速報値）の正味抵抗低減効果が得られることが明らかになった。高速流の場合、翼上面のキャビティ形成による圧力損失の影響で空気導入性能が低下することが前年度の小型高速度チャンネルを用いた実験結果で明らかになっているが、その結果とも整合的であった。また翼型気泡発生装置の翼形状の改善によって、高速せん断流れによる導入空気の微細化促進を実現し、気泡の微細化による抵抗低減効果の増大が実験的に確認された。また、翼形状や翼配列の最適化によって、気泡群の流れの制御が可能であることを示した。

<引用文献>

- (1) 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.
- (2) Kumagai, I., Taguchi, K., Kawakita, C., Hamada, T., and Murai, Y., Air entrainment and bubble generation by a hydrofoil in a turbulent channel flow, Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference (2019), pp. 1-6.

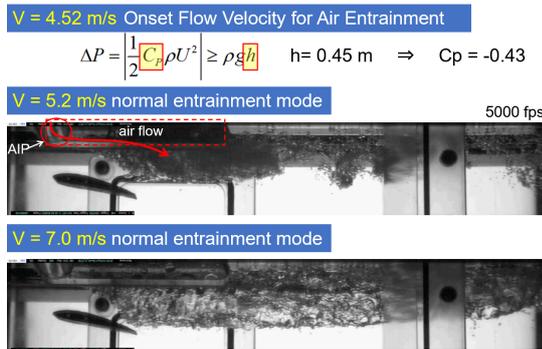


図 3. 水中翼による空気連行の様子 ($\alpha = 12^\circ$)

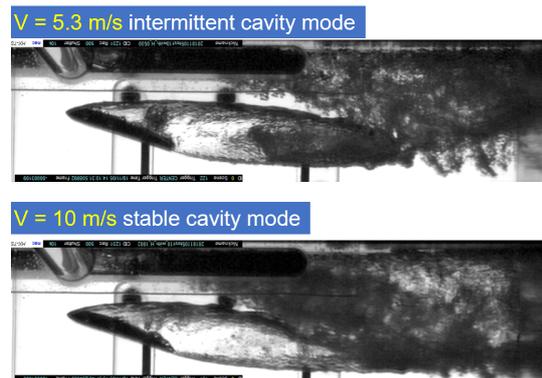


図 4. 高速領域における cavity 形成 ($\alpha = 16^\circ$)

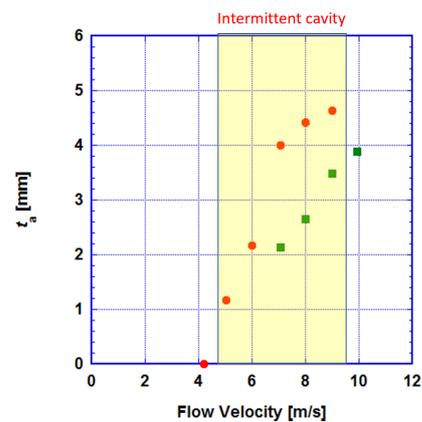


図 5. 見かけ空気膜厚さ t_a の流速依存性 ($\alpha=16^\circ$)



図 6. 400 m 水槽曳航試験による正味抵抗低減結果 (実験 A3, 速報値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kumagai, I., Taguchi, K., Kawakita, C., Hamada, T., and Murai, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Air entrainment and bubble generation by a hydrofoil in a turbulent channel flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1-6
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 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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 熊谷一郎, 村井祐一, 川北千春, 濱田達也
2. 発表標題 高速チャンネル流中の穴あき水中翼による気泡導入について
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumagai, I., Taguchi, K., Kawakita, C., Hamada, T., and Murai, Y.
2. 発表標題 Air entrainment and bubble generation by a hydrofoil in a turbulent channel flow
3. 学会等名 ASME-JSME- KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumagai, I.
2. 発表標題 Hydrofoil bubble generators for ship drag reduction: Can microbubbles save our planet?
3. 学会等名 FAST-LIMS1 Seminar of mechanics (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumagai, I., and Murai, Y.
2. 発表標題 Air Entrainment and Bubble Generation by Ventilated Hydrofoils for Ship Drag Reduction
3. 学会等名 2017 Japan-U.S. seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kumagai, I., and Murai, Y.
2. 発表標題 Flow behavior around ventilated impellers for aeration
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) October 27-30, 2017. Okinawa, Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 熊谷一郎, 村井祐一・田坂裕司・朴炫珍・高橋義明
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会(招待講演)
4. 発表年 2017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	村井 祐一 (Murai Yuichi) (80273001)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	藤本 修平 (Fujimoto Shuhei) (80586686)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局 等・研究員 (82627)	