

船舶摩擦抵抗低減のための翼型気泡発生装置に関する研究*

村井祐一^{*1}, 熊谷一郎, 田坂裕司, 武田 靖, 高橋義明^{*2}

Hydrofoil Type of Bubble Generator for Marine Drag Reduction

Yuichi MURAI ^{*3}, Ichiro KUMAGAI, Yuji TASAKA, Yasushi TAKEDA
and Yoshiaki TAKAHASHI

^{*3} Hokkaido University, Division of Energy and Environmental Systems
N13W8, Kitaku, Sapporo, 060-8628 Japan

Installation of hydrofoils to ship wetted surface enables bubble generation to be realized with power consumption much lower than conventional bubble generators. With help of this principle, net effect of frictional drag reduction for ships can be improved. We have already obtained around 10% net power-saving efficiency for a cargo ferry throughout about half a year. The power-saving has a large potential to be improved more by considering multiphase fluid dynamics in terms of the hydrofoil-water-air triple interaction. This paper presents the principle of the bubble generation, the estimation of net power-saving, and the flow structure visualized by experimental and numerical approaches.

Key Words : Hydrofoil, Bubble, Drag reduction, Flow visualization, Multiphase flow

1. 結 言

船舶の抵抗低減は、海軍における省エネルギー化技術の主要課題の一つとして、今日まで歴史的に多くの研究が遂行されてきた。例えば造波抵抗や形状抵抗は船体形状の改善により著しく軽減された。しかし摩擦抵抗については改善が進んでいない。このような中、摩擦抵抗低減法として微細気泡を船体表面の境界層内に混入する方法に期待が寄せられている。この手法は1973年に最初の実験が文献⁽¹⁾で発表されて以来、35年以上の間、流体力学的機構⁽²⁾から海洋での実用化可能性⁽³⁾に至るまで、様々な観点で研究が遂行された。特に乱流境界層の内部構造が気泡によってどのように変調してレイノルズ応力分布が変化するかについては、大規模DNS解析⁽⁴⁾やPIV高精密計測⁽⁵⁾の投入により最近5年間で急速に答えが半明してきている。一方、船舶では微細気泡を発生させるために余剰な動力を消費することが懸念されている。例えば摩擦抵抗低減で船体軸動力が10%節減できたとしても気泡発生動力に5%以上を使うと、正味省エネ効率率は半減する。発生する気泡が大きめの場合は正味省エネ率が負に陥ることがある⁽⁶⁾。

本研究では水中の翼がもたらす圧力場の作用を使って、大気からの空気誘導を可能とする技術を提案した⁽⁷⁾、この応

用によって、実船において正味省エネ率を10%程度に維持する結果⁽⁸⁾を得た。図1(a)は実際に船舶に利用した翼の外観写真で弦長が40mm、幅が240mmである。同図(b)は試験対象とした3隻の船舶のうちニューフェリー美咲(68m)の写真である。このフェリーでは半年間を通した実験による燃料消費率から、潮流や気象など全ての条件を平均して9%の正味省エネ率を得た。これは翼一つ当たり約8kWの省エネルギー効果をもたらしていることになる。



(a) Hydrofoil (b) Test Vessel

Fig. 1 Hydrofoil and test vessel for examining drag reduction

図2は一般貨物船(Filia Arica, 85m)において本原理による気泡発生の有無による軸動力の変化を船速の関数として計測したものである。試験された船速域で10%の正味省エネ率が得られた。なお図中の写真は船側部における翼型気泡発生装置の取付の様子である。取付位置は船体表面の流線解析から、幅広く気泡が船体表面を覆うように決定された。なお使用した翼は現時点で二相流用に最適化されておらず、気泡発生性能のさらなる向上に向けて大きな可能性が残さ

*原稿受付 0000年00月00日

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

^{*2} ランドエンジニアリング(有)

E-mail: murai@eng.hokudai.ac.jp

れている。そこで本報では、気泡発生用の翼性能を見積る簡易理論、上部に自由界面をもつ翼まわりの流れの数値解析および可視化実験について述べる。これらから水中翼型気泡発生装置の基本的な作動原理を明らかにする。

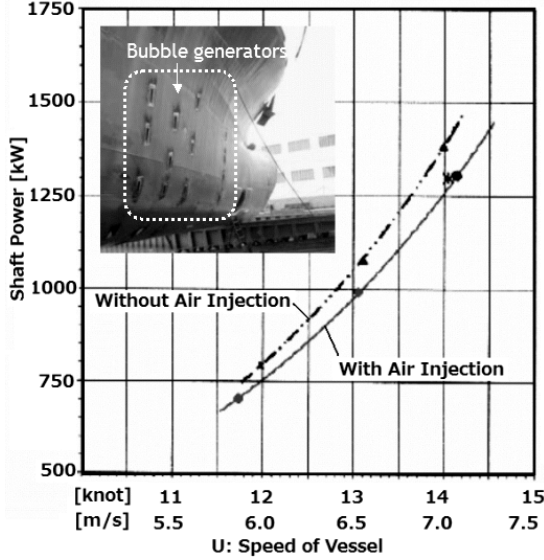


Fig. 2 Reduction of shaft power for air bubble injection

2. 理 論

体積流量 Q の空気を水面から深さ H まで圧送するとき必要な動力は $W_0 = \rho g H Q$ (ここで ρ と g は水の密度と重力加速度) である。水中翼を利用すると必要動力は次式になる。

$$W = W_0 - W_L + W_D, \quad (1)$$

ここで W_L は翼がもたらす減圧作用による送気動力節減分、 W_D は翼の抗力に伴う船体の動力損失で、

$$W_L = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 Q, \quad W_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (2)$$

と記すことができる。 U は水の翼への流入速度(船の対水速度にほぼ等しい)、 A は翼の投影面積、 C_D と C_p とは翼の抗力係数と翼上面の圧力係数低下値である。気泡の体積流量 Q は形成される船底ボイド層の垂直断面面積 B と層内平均ボイド率 α を使って $Q = \alpha B U$ と書けるから、必要動力は、

$$W = \rho B \left\{ g H \alpha \cdot U - \frac{1}{2} \left(C_p \alpha - \frac{A}{B} C_D \right) U^3 \right\} \quad (3)$$

で与えられる。すなわち、必要動力は船速 U とボイド率 α の関数となる。括弧内第2項は翼がもたらす成分であり U^3 に比例するため高速域で大きな効果を生む。その寄与方向が負となれば、すなわち、

$$C_p \alpha > \frac{A}{B} C_D = \frac{L}{h} C_D \sin \theta \quad (4)$$

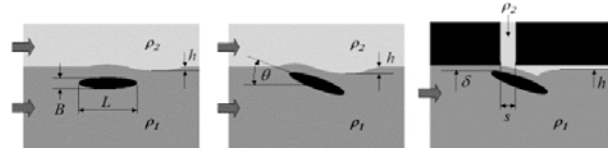
の条件を満たす翼であれば、翼利用による気泡発生動力節減効果が得られる。ここで L は翼弦長、 h はボイド層厚さ、 θ は翼迎角である。要するに、翼の揚抗比にボイド率が融合した条件で気泡発生翼性能が記述される。さらに式(3)から完全に無動力条件 $W=0$ が実現するのは、船速 U が次の臨界速度 U_c を超えたときであることが導かれる。

$$U_c = \sqrt{\frac{2gH \cdot \alpha}{C_p \alpha - \frac{L}{h} C_D \sin \theta}} \quad (5)$$

例えばNACA65-410翼の揚抗力データを用いて推算すると、 $\theta=10^\circ$ で $C_p=1.50$ 、 $C_D=0.015$ より、式(5)において例えば $H=2 \sim 5$ m、 $\alpha=5\%$ 、 $L=50$ mm、 $h=20$ mm の場合では、 $U_c=5.3 \sim 8.5$ m/s となる。フェリーや貨物船など船舶の多くでこの帯域に近い船速をもち、本原理が実船条件によく適合することが説明できる。なお船体曲率作用、空気配管圧力損失、気泡圧縮による熱的損失など詳細な補正計算については本報では省略する。

3. 流 動 構 造

図3に翼による水面変動の様式図を示す。迎角ゼロでは界面に1対の僅かな凹凸が生じ(a)、迎角を与えるとそれが拡大する(b)。船底や船側に適用し空気導入部を設けておく(c)のように空気が誘導される。これは壁面と翼の隙間 δ を通過する水が翼上面に沿って流れることで、その下流に空気の通路が確保されるためである。また下流において空気膜が乱流せん断力で分裂し、空気が気泡群として主流とともに流されることで、通路には一定の空気流量が生じる。



(a) parallel to surface (b) angled to surface (c) air induction
Fig. 3 Interaction between a hydrofoil and above water surface

下流において表現する気泡直径 d はせん断歪み速度で定義された臨界ウエーバー数、

$$We_f = \frac{\rho U^2 d}{\sigma} = \frac{\rho d}{\sigma} \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \approx \frac{\rho d^3 U^2}{\sigma t^2} \quad (6)$$

から推定可能である。ここで σ は気泡の表面張力、 dU/dy は気泡まわりの液体のせん断歪み速度、右辺近似式の t は速度境界層厚さである。臨界ウエーバー数を $We_f = 10$ とすれば、下流に到達する気泡直径は $U=8 \sim 10$ m/s で $d=1$ mm 程度と見積られる。しかしこの微細化が理想的に進行するかどうかは、翼によって形成される初期の界面形状にどの程

度の乱れがあるかに依存している。即ち、翼のレイノルズ数と、界面の碎波を支配するフルード数に依存する。そこで基本的な界面挙動を確認するため数値解析と可視化実験を行った。

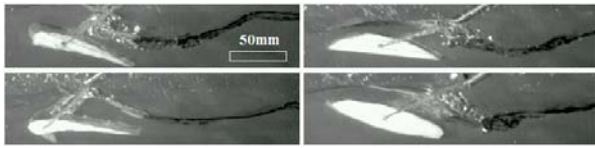


Fig. 4 Water surface behavior above four different hydrofoils

図4は静止水槽内で翼弦長 $L=100\text{mm}$ の翼を水面下 $\delta=20\text{mm}$ で水平に移動させたときの界面の写真である。 δ を代表長さとして定義される Fr 数は $1.8\sim 2.3$ で、重力に対して慣性力が上回る条件となっている。この条件では翼を沿う水流が翼表面から剥離せず、下流に界面の凹部をもたらすことが確認できる。界面の乱れや碎波は Re 数と Fr 数の両因子に支配されるため、より広範なパラメータスタディを実施する必要がある。

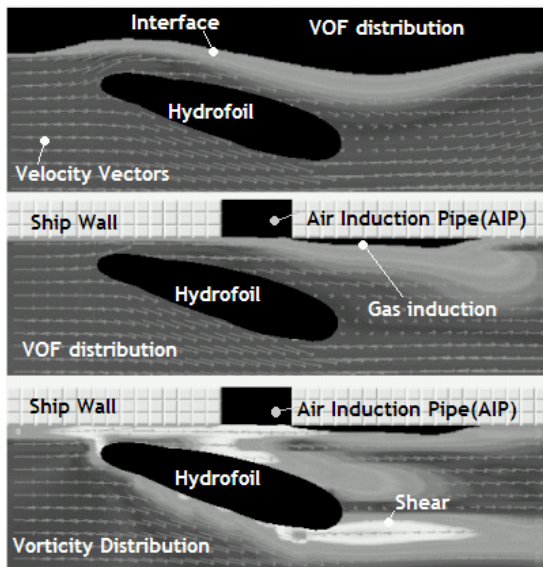


Fig. 5 VOF-coupled Navier-Stokes simulation of water surface

図5はVOF法による水面の解析結果で、図3の(b)(c)に対応するN-S方程式解である。ただし非定常現象であり、流れが十分に発達した状態での瞬間の構造を示している。解析条件は、実船を想定して $Fr=20$ とし、物性値は気液密度比が 0.00125 、粘性比は $1/100$ とした。設計原理どおり翼下流での凹みを得られ、壁面からの空気導入が実現することが示された。なおこれより下流での界面挙動や、翼スパン方向の三次元性、翼表面の突起による初期界面擾乱の発生など、今後、様々な観点で翼性能の調査が可能である。特に、翼上部に界面や気泡群をもつときの揚抗力特性の単相

時からの変化の詳細は、式(5)の C_p と C_D に影響を与える要因として重要であり、今後の翼の最適設計化の課題として進める予定である。

4. 結 言

微小気泡による船舶摩擦抵抗低減法において懸案であった気泡発生のために必要な動力を大幅に節減する技術を提案した。それは翼上部の減圧効果を利用して大気中の空気を船底に誘導する方法である。複数の海洋での実験式験で約10%の正味省エネ率が得られ、本報ではその簡易理論から、本気泡発生技術が実船での条件によく適合することを示した。またフルード数の大きな慣性支配条件での可視化実験と数値解析から、自由界面が翼の上部を沿って流れ下流で凹みを形成することを確認した。

今後、自由界面や気泡を近傍こもつ二相流としての翼性能、ならびに下流での気泡微細化を決定する支配因子について調査を進展させ、翼の最適化を進めることでさらなる正味省エネ率向上を目指す。

謝辞 本研究はNEDO産業技術開発助成(08B36002)による支援を受けて実施された。また、可視化実験は北海道大学の太田翔子君と大石義彦博士の協力を得た。

文 献

- (1) McCormick, M., Bhattacharyya, R., Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Nav. Eng. J.*, 85, (1973), pp.11-16.
- (2) Kato, H., Iwashina, T., Miyanaga, M., Yamaguchi, H., Effect of microbubbles on the structure of turbulence in a turbulent boundary layer. *J. Marine Sci. Tech.*, 4, (1999), pp.115-162.
- (3) Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Kawashima, H., Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 21, (2000), pp. 582-588.
- (4) Ferante, A., Elghobashi, S., Reynolds number effect on drag reduction in a microbubble-laden spatially developing turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 543, (2005), pp.93-106.
- (5) Murai, Y., Oishi, Y., Takeda, Y., Yamamoto, F., Turbulent shear stress profiles in a bubbly channel flow assessed by particle tracking velocimetry. *Exp. Fluids*, 41, (2006), pp.343-352.
- (6) Murai, Y., Fukuda, H., Oishi, Y., Kodama, Y., Yamamoto, F., Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 33, (2007), pp.147-163.
- (7) Murai, Y., Takahashi, Y., Frictional drag reduction ship, Patent Number 4070385 (2008)