

No.15

50m 平板船を用いたマイクロバブル実験

児玉良明、高橋孝仁、角川明、牧野雅彦（船舶技研）

Microbubble experiments using a 50m-long flat plate ship

Y. Kodama, T. Takahasi, A. Kakugawa, and M. Makino

Ship Research Institute

ABSTRACT

Results of microbubble experiments are shown. First, the measurement of skin friction reduction by microbubbles in a small high-speed circulating water tunnel is shown. Second, those carried out using a 12m-long flat plate ship in a 400m-long towing tank are shown. Lastly, those with a 50m-long flat plate ship are shown. They indicate that the skin friction reduction increases with the increase of injected air volume and depend on the local void ratio near the solid wall, and that the maximum skin friction reduction obtained using a 50m-long ship was 20%.

Keywords: microbubbles, skin friction reduction, scale effect, turbulence control

1.はじめに

マイクロバブル(microbubbles)とは、直径 0.5mm から 1mm 程度の微細な気泡を物体表面上の境界層中に注入し、摩擦を低減させる、抵抗低減デバイスの 1 種である。船舶技術研究所では、マイクロバブルの船舶への適用を目指して研究を進めている([1])。

マイクロバブルをタンカーなどの大型船舶に適用したイメージを Fig.1 に示す。大型タンカーなどは、水から受ける抵抗のうち約 80%が摩擦抵抗であり、摩擦の低減が実用的にも重要である。大型タンカーは殆ど箱形をしており、平らで広い船底をもち、気泡が船首付近で注入されると、浮力の効果により船体表面近傍にとどまり、効率的に船底を覆うことが期待される。

一方、大型タンカーの喫水は約 20m あり、2 気圧の水圧にうち勝って気泡を注入することになり、その仕事を考慮した正味の抵抗低減効果でマイクロバブルの実用性を議論する必要がある。

これまで、マイクロバブルの研究は米国、ロシア、フランスなどを中心に行われてきた([2])が、近年、我が国においても盛んに研究が行われるようになった([3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11])。

マイクロバブルは、最大で約 80%もの大きな摩擦抵抗低減効果があるが、そのメカニズムについては、未だ決定的な説明がなされていない。ひとつの有力な説明は"密度影響"、すなわち壁近傍に気泡が集まると平均密度が低下し、その分だけ壁面摩擦が減るというものである。この説は単純なだけ説得力があり、また、実際、壁近傍の局所ボイド率(空気の体積

割合)が高いと、摩擦低減率も高いという実験結果も古くから得られている([12])。この説が正しいとすると、船の摩擦抵抗を効果的に低減させるためには、気泡をできるだけ船底近くに集めた方がよいことになる。

一方、気泡径が変わると乱流との干渉の様子あるいは摩擦抵抗低減効果も変化するという説も、多くの研究者によって主張されている([2],[3],[4],[13])。この説では、気泡が壁乱流と干渉し、摩擦抵抗の主因であるレイノルズ応力を減少させるメカニズムが働くとする。この説が正しいとすると、少ない注入空気量で大きな低減効果が得られる可能性がある。この説を支持するかのような実験結果も多くあるが、これらの実験に共通する問題点は、単に気泡径のみが変化したのではなく、流れの他の条件も同時に変化していることである。気泡を壁に平行に埋め込んだ多孔板から注入すると、生成される気泡径は、壁面での流れのせん断力に依存するため、流速が大きいほど小さな気泡が生成されることになる。すなわち、気泡径と流速が連動して変化する。著者らは、メカニズムの解明のためには、生成気泡径だけを変化させることができるように気泡生成方法の開発が重要であると考えており、その方向の研究を継続中である。

マイクロバブルの尺度影響の解明も、マイクロバブルの実船への適用性を評価するために不可欠である。マイクロバブルの実験は、通常、小型の回流水槽かキャビテーションタンネルを用いて行われ、約 1m の長さスケールをもつ。そして、大型タンカー

などの実船は長さが 300m 程度あり、スケールのギャップが極めて大きい。壁に沿って発達する乱流境界層の性質もスケールに応じて変化する。一方、生成気泡の大きさは模型スケールと実船スケールではあまり変化しないと思われ、それらの複合的な作用の結果として得られる摩擦抵抗低減効果の尺度影響は非常に複雑なものであると予想される。著者らのグループは、尺度影響を解明する最も簡単な手段として、出来るだけ大きな寸法の模型を用いた実験を実施している。すなわち、研究所が所有する長さ 400m の大型曳航水槽において、長さ 50m の平板船を用いたマイクロバブル実験を実施した。

以下、上記で説明したマイクロバブルの様々な側面について実施した著者らの実験結果を概説する。

2. 小型高速流路を用いたマイクロバブル実験

先ず、著者らが行ったマイクロバブルの基礎実験の結果を紹介する([9],[10])。Fig.2 にマイクロバブル実験用小型高速流路を示す。試験部は、気泡による摩擦低減効果の下流方向の持続性を調べるために、長さ 3m と長めに作られており、断面は幅 100mm、高さ 15mm と、2 次元形状をしている。

気泡吹き出しは、公称孔径 $2\mu m$ の多孔質板を通じて行い、吹き出し位置から 500mm(Position 2)、1000mm(Position 3)、1500mm(Position 4) の 3 箇所で壁面せん断応力を計測した。流路内平均流速は 5m/sec, 7m/sec, 10m/sec の 3 種類で実験した。結果を、気泡無しの場合の値との比で Fig.3 に示す。横軸は平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ 、すなわち無次元化された吹き出し空気量である。吹き出し空気量の増加に伴い、摩擦低減量が増加している。低減量は Merkle の実験結果[2]にほぼ一致している。

Fig.4 に、平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a = 0.08$ における吸い込み式のボイド率計で計測した局所ボイド率分布を示す。流速の増加に伴い気泡は下流に行くに従い拡散傾向にあり、流速の増加により乱流成分が大きくなり、気泡の拡散を促進していると思われる。Fig.3 に示す摩擦抵抗低減量の流速增加に伴う減少傾向は、これにより説明できると考えられる。すなわち、壁近傍の局所ボイド率が摩擦抵抗低減に大きく関係し、「密度影響」の仮説を支持する実験結果となっている。

3.12m 模型船を用いたマイクロバブル実験

著者らは、幅 1m 長さ 12m の平板模型船を作り、長さ 400m の曳航水槽においてマイクロバブル実験を実施した([11])。Fig.5 に模型船の形状を、Fig.6 に吹き出し部の詳細を、Fig.7 にせん断応力センサーを示す。

Fig.8 に、気泡吹き出し部(幅 500mm、長さ 100mm)の直下流の平板部の摩擦抵抗(Schoenherr の平板摩擦式から推定)に対する抵抗低減量の比を示す。摩擦抵抗は最大で 1/2 以下になっている。ま

た、低減量は高速(7m/sec)では低下しており、小型高速流路における実験結果と整合性がある。

Fig.9 に Position 1(吹き出し部から 0.5m 下流)と Position 3(同 5.8m 下流)における局所ボイド率分布を示す。下流では、気泡はかなり減少し且つ拡散している。なお、気泡の減少には、注入気泡が船側から流出している効果も含まれると考えられる。

4. 50m 模型船を用いたマイクロバブル実験

12m 模型船の平行部を追加して長さ 50m にし、マイクロバブル実験を実施した[14]。計測された抵抗変化を Fig.10 に示す。なお、この実験では空気吹き出しに、多孔質板ではなく配列多孔板(直径 1mm の孔を多数あけた板)を用いた。長さが増えた分だけ抵抗低減率は減少しているが、それでも最大で 20% 以上の低減効果がある。

5. おわりに

上記に示した著者らの研究結果は、運輸省特別研究「次世代 CFD による船舶の流体抵抗低減法に関する研究」(H7～H11)の研究において得られた。また、その一部は、(社)日本造船研究協会との共同研究 SR239 「船舶の摩擦抵抗低減法の研究」(H10～H13)によるものである。

また、今年度から、科学技術庁開放的融合研究推進制度研究「乱流制御による新機能熱流体デバイスの創出」(H12～H16)が始まり、その中で著者らは、今後もマイクロバブルの実用化を目指した研究を継続する予定である。

参考文献

- [1] 児玉良明：次世代 CFD による船舶の流体抵抗低減法に関する研究、第 66 回船研講演会、1995 年 12 月。
- [2] Merkle,C.M. and Deutch,S.: Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection, Progress in Astronautics and Aeronautics vol.123, AIAA, 1990.
- [3] Kato,H. et al.: Effect of Microbubble Cluster on Turbulent Flow Structure, IUTAM-Symposium "Mechanics of Passive and Active Flow Control ", Gottingen, Germany, Sept. 1998
- [4] 加藤洋治：マイクロバブルによる壁乱流の制御、日本機械学会ワークショップ「熱流動の能動制御」、1998 年 3 月。
1999 年 12 月、pp.73-81.
- [5] Kato, H. et al.,1994,"Frictional Drag Reduction by Injecting Bubbly Water into Turbulent Boundary Layer", Cavitation and Gas Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices, FED-vol.190, 1994, ASME, pp185-194.
- [6] 渡邊他「長尺模型船を用いた微小気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減実験」、日本造船学会論文集、第 183 号、1998 年 6 月。

- [7] Yoshida, Y. et al.: Simple Lagrangian Formulation of Bubbly Flow in a Turbulent Boundary Layer (Bubbly Layer Flow), J. of Marine Science and Technology vol.2, 1997.
- [8] Guin, M.M. et al., 1996 : Reduction of Skin Friction by Microbubbles and its Relation with Near-Wall Bubble Concentration in a Channel, J. of Marine Science and Technology, vol.1, No.5.
- [9] Kodama, Y. et al.: Experimental Study on Micribubbles and Their Applicability to Ships for Skin Friction Reduction, Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Santa Barbara, 1999.
- [10] 川島他: マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果と局所的なボイド率の関係、第72回船研講演会、1998年12月。
- [11] 高橋孝仁他「平板模型船を用いたマイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験」乱流シンポジウム、日本流体力学会'99年会講演集、1999年7月。
- [12] Bogdevich, V.G. et al: "Gas Saturation Effect on Near-Wall Turbulence Characteristics", 2nd Int. Conf. on Drag Reduction, Cambridge, England, BHRA, 1977, pp.25-37.
- [13] Gore, R.A. and Crowe, C.T.: "Effect of Bubble Size on Modulating Turbulent Intensity", Int. J. of Multiphase Flow, vol.15, No.2, 1989, pp.279-285.
- [14] 高橋他、「長さ50mの平底模型船を用いたマイクロバブル実験の紹介」、第74回船舶技術研究所研究発表会、2000年6月、pp.225,226.

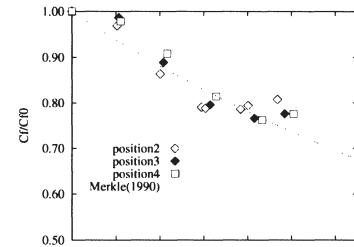
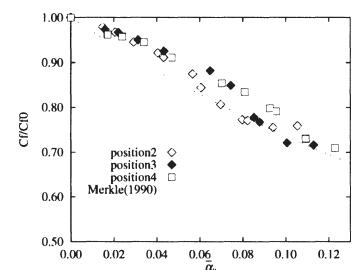
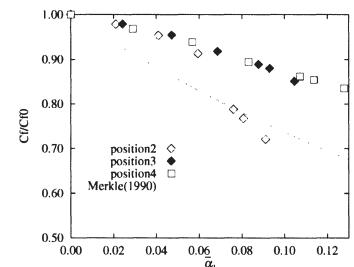
(a) $U=5\text{m/sec}$ (b) $U=7\text{m/sec}$ (c) $U=10\text{m/sec}$

Fig.3 多孔質板を用いた気泡発生状態での壁面せん断応力

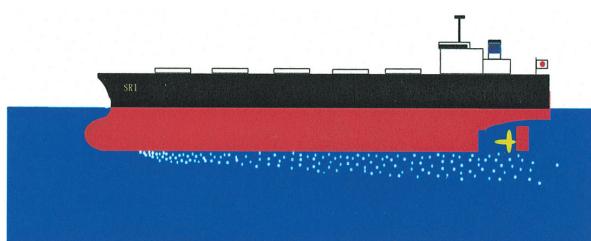


Fig.1 実船に適用するマイクロバブルの模式図

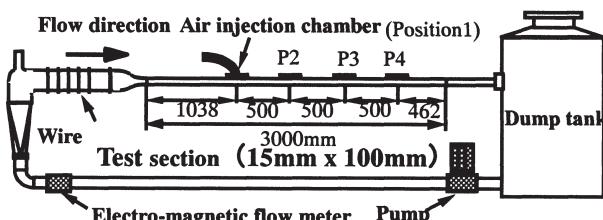
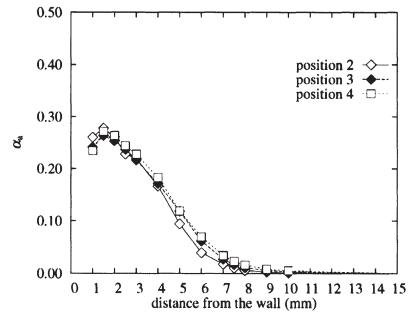
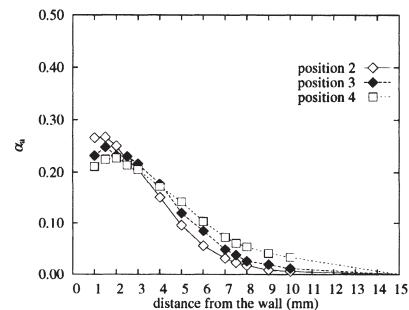


Fig.2 マイクロバブル実験用小型高速流路

(a) $U=5\text{m/sec}$ (b) $U=7\text{m/sec}$

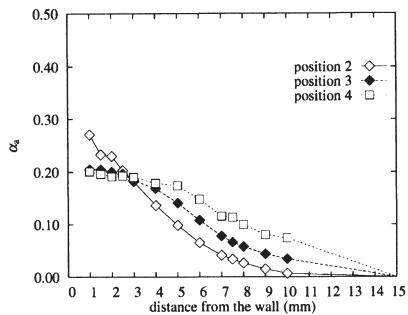
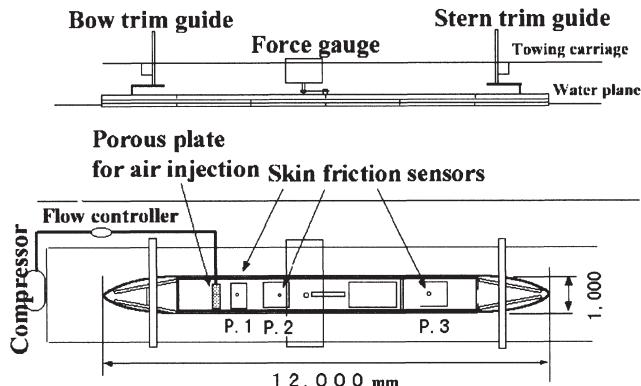
(c) $U=10\text{m/sec}$ Fig. 4 計測された局所ボイド率分布 α_a $(\bar{\alpha}_a = 0.08, \text{porous plate, 補正後})$ 

Fig.5 長さ 12m のマイクロバブル実験用平底船



Fig.6 12m 模型船の空気吹き出し部(多孔質板)



Fig.7 12m 模型船実験用せん断応力センサー

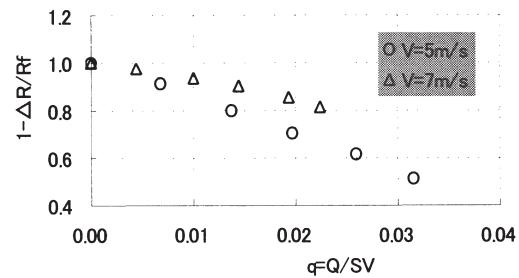


Fig.8 気泡吹き出し部下流の平板部の抵抗変化[16]

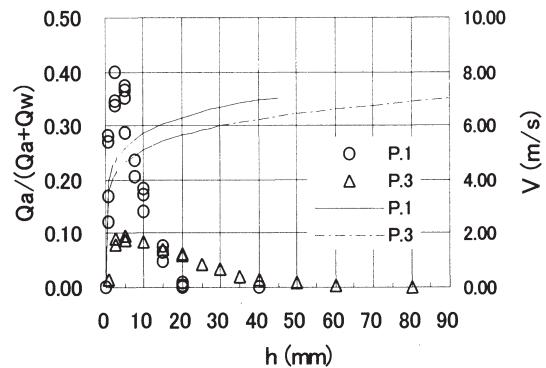


Fig.9 12m 平底船の局所ボイド率分布 [16]。

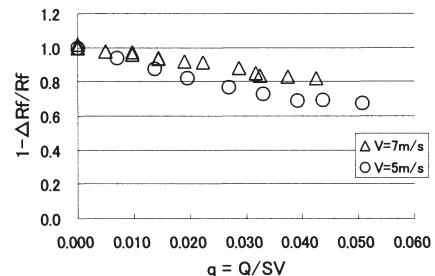


Fig.10 気泡で覆われた部分に対する摩擦抵抗低減率 (50m 模型船)