

59 マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムと

尺度影響に関する実験

推進性能部 *角川 明、高橋孝仁、長屋茂樹、牧野雅彦、柳原健、児玉良明

1. はじめに

マイクロバブル(Microbubbles)すなわち壁面乱流境界層中に注入された微細な気泡は、摩擦抵抗を減少させる。その低減効果は気泡吹き出し直後において80%に達し、船舶への実用化が望まれる。しかし、気泡発生に消費されるエネルギーは、喫水の深い船底から吹き出すことから少なくはない。そのためマイクロバブルの実用化のためには、効果的な吹き出し方法の開発などによる正味の低減効果を高めることが重要である。

開放融合研究プロジェクト「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」(H12~H16)の一翼である本研究では、気泡吹き出しデバイスの開発および気泡分布の制御により抵抗低減効果を2倍にすることを数年以内に実現することを目指している。過去数年間、当研究所では小型高速流路を用いた実験を行い、壁面近傍の局所ボイド率と摩擦抵抗低減効果が強い相関を持つことが明らかとなったが、吹き出し気泡径と乱流への影響との関係など抵抗低減メカニズムの詳細は未だ明らかではない。

開放融合研究プロジェクトで取り組んでいるもう一つの摩擦抵抗低減デバイスである界面活性剤は、やはり顕著な低減効果をもつことが知られている。川口等[9]は、界面活性剤としてCTAC(塩化セチルトリメチルアンモニウム)を水に添加し、幅500mm高さ40mmの試験部断面をもつ回流型流路で実験を行い、50ppmを添加した場合、流速 $U=1.3\text{m/sec}$ で80%の摩擦抵抗低減結果を得た。本研究では、界面活性剤とマイクロバブルの併用状態での抵抗低減効果を実験的に調べた。結果を次章に示す。

マイクロバブルの船舶への実用化で重要な研究要素として尺度影響がある。従来の研究は小規模な回流水槽を用いたものが殆

どで、長さ300mに達する大型船舶に適用した場合の低減効果、特に、低減効果が吹き出し位置からどれ位長く下流まで持続するかを知る必要がある。また、気泡吹き出し装置の配置を決定するためには、吹き出し部における境界層厚さが低減効果に及ぼす影響を調べる必要がある。そこで、当研究所の400m船型試験水槽において、幅1m長さ50mの平板型長尺模型船を最高7m/secで曳航し、船首の吹き出し部から下流方向の低減効果の分布を計測するとともに、船首と船体中央の2箇所から気泡を吹き出した場合の低減効果の違いを計測した。実験結果および考察を第3章に示す。

2. 小型高速流路を使用した基礎実験

2.1 実験装置

本報告で用いた小型高速流路を図-1に示す。小型高速流路はマイクロバブル研究専用に製作された、試験部は、全長3000mm、幅100mm、高さ15mmの扁平な断面形状であり、完全に発達したチャンネル乱流における2次元流実験を行う装置である。マイクロバブルは、同試験部上流から1028mmの上部壁面(図-1のP1)に設置した配列多孔板を通して、空気を水流中へ吹き込むことにより生成させた。模式的な吹き出し部断面を図-2に示す。配列多孔板は、黄銅製で孔径1mm,および0.5mmの2種類を使用し、生成された気泡は、直径約1mmであった。

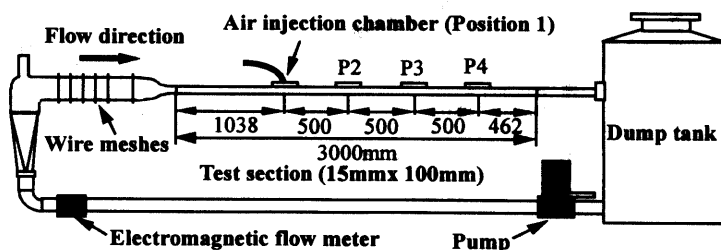


図-1 小型高速流路

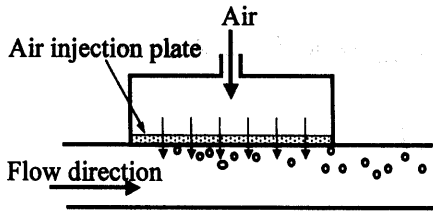


図-2 気泡吹き出し部

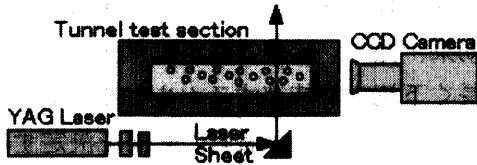
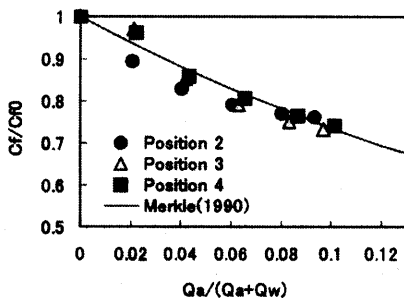


図-3 計測部断面と気泡撮影用カメラと光源の配置

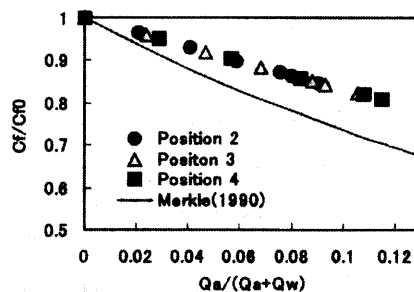
局所摩擦抵抗は、容量2gf、Floating-disk 直径10mmのせん断力センサーにより直接計測した。マイクロバブルの写真は、図-3のような機器の配置で撮影した。YAG-Laserをストロボ用光源として使用し、2nsecの照明時間をカメラに同期させた。図中、計測部断面を貫通する上向き矢印で表されるレーザシートすなわち撮影断面位置は、良好な視界を得るため、試験流路断面中央から30mmカメラ側へシフトされている。

2.2 壁面摩擦低減と局所ボイド率の関係

壁面摩擦は、図-1に(P2,P3,P4)で示す流れ方向3点において計測した。流速5,10m/secの2速度において、空気供給量から換算した試験流路中の平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ と壁面摩擦係数比 C_f/C_{f_0} との関係を図-4に示す。計測データに対する壁面影響の修正は、参考文献[3]に記述された方法を適用した。



(a) U=5m/s



(b) U=10m/s

図-4 マイクロバブルによる壁面摩擦低減 (小型高速流路)

横軸に示す試験流路内の平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ は(1)式で与えられる。

$$\bar{\alpha}_a \equiv \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad (1)$$

Q_a : 試験流路内の空気流量体積

Q_w : 試験流路内の水流量体積

(試験流路断面100mm×15mm)

流速U=5m/secの場合、流れ方向の3ヶ所における計測値は、ほぼ等しく、下記(2)式に示すMerkle[7]の実験式に良く一致している。

$$\frac{C_f}{C_{f_0}} = 0.8e^{-4\bar{\alpha}_a} + 0.2 \quad (2)$$

2.3 界面活性剤とマイクロバブルの併用実験

界面活性剤による摩擦抵抗低減効果は、川口ら[9]の実験にあるように、約1m/sec以下の低速域で得られるが、今回はより高速な速度領域U=1m/sec~10m/secにおいてマイクロバブルとの併用効果を調べた。界面活性剤は、川口ら[9]と同じCTAC (塩化セチルトリメチルアンモニウム)を使用し、サリチル酸と共に流路に注入し、均一となるまで十分に予備運転を行い攪拌し、図-1の

P2、P3、P4において壁面摩擦係数 C_f を、気泡無し

状態におけるCTAC重量濃度0、20、40、80、240ppmにおいて計測した結果を図-5に示す。P3における値はP2、P4とやや異なっており、せん断力センサーの固有特性やアライメントが原因と思われる。

CTAC濃度が高いほど低減効果が大いという、

従来と一致する傾向が本流路で確認された。

気泡のある場合、流速U=5m/sec、CTAC 0、20、40ppmの各濃度における壁面摩擦係数比

C_f/C_{f_0} と平均ボ

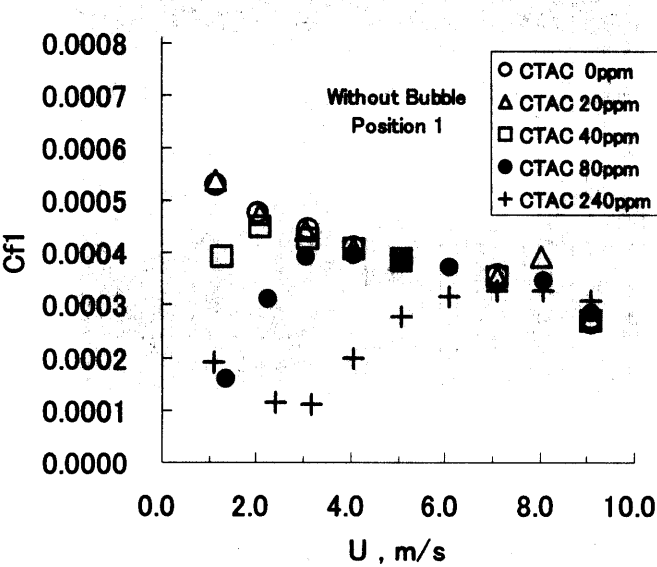


図-5 界面活性剤による壁面摩擦低減と流速の関係 (マイクロバブルなし)

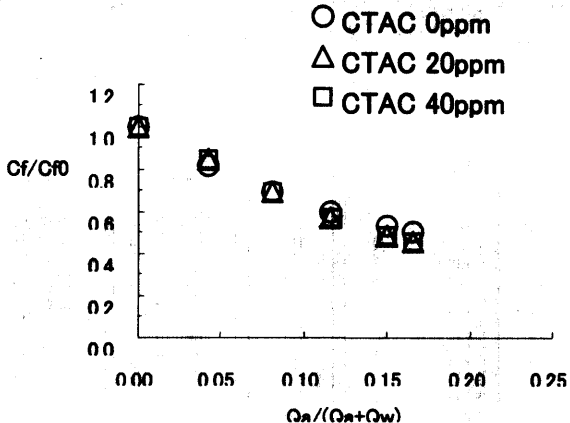


図-6 摩擦抵抗低減効果と平均ボイド率の関係 ($U=5\text{m/sec}$)

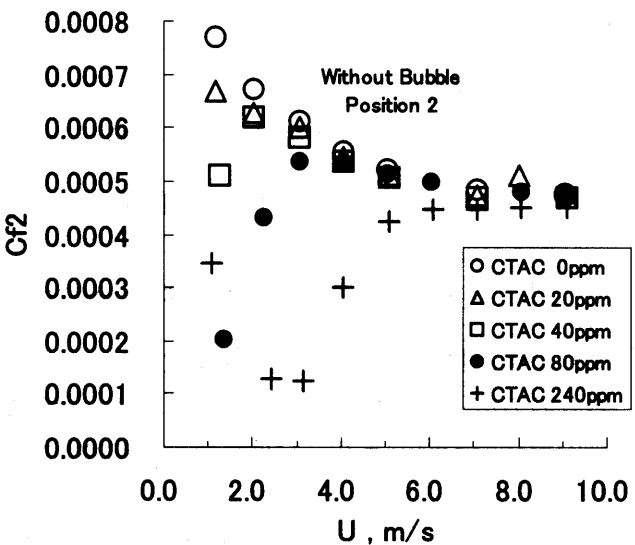
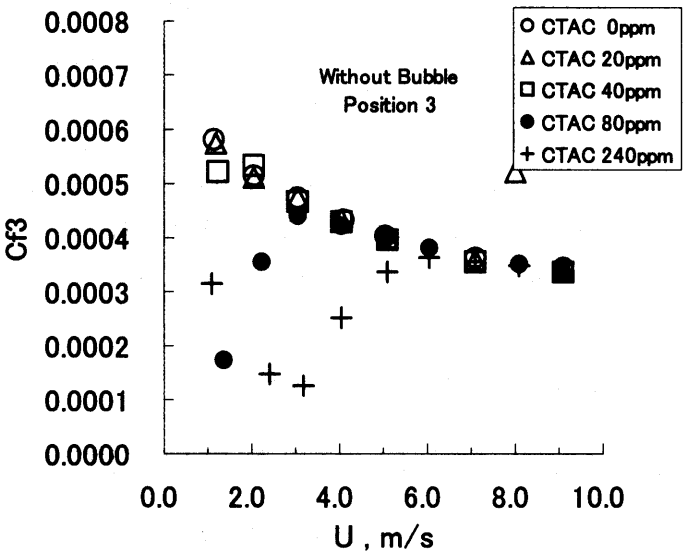
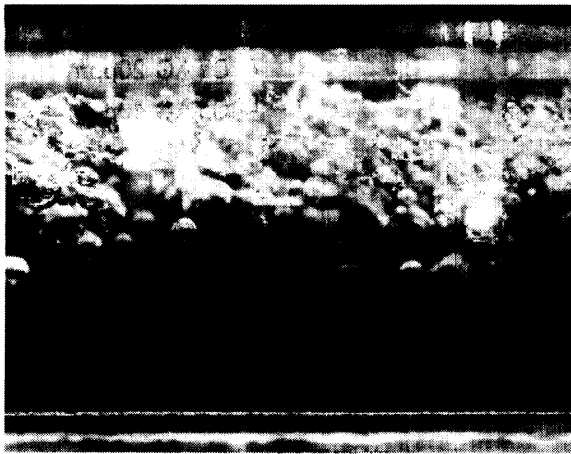


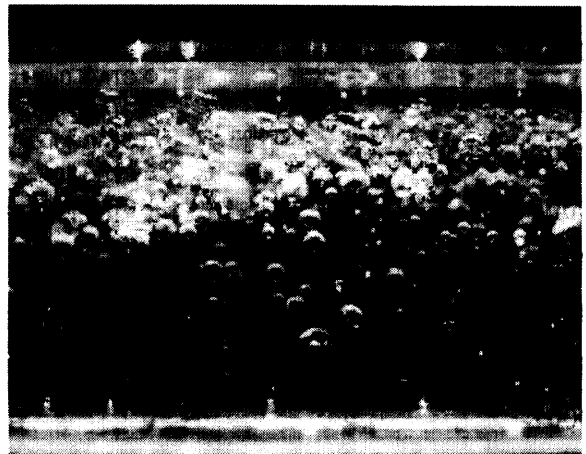
図-7 摩擦抵抗低減効果と流速の関係 (平均ボイド率 $\alpha_a=0.1$)



イド率の関係を図-6に示す。平均ボイド率の増加による摩擦抵抗低減効果の増加はCTAC無しの場合と差が無く、また、マイクロバブルとCTACの相乗効果は非常に小さい。図-7に平均ボイド率 $=0.1$ の場合の壁面摩擦係数比 C_f/C_{f0} と流速の関係を示す。流速が 4m/sec 以下の範囲では、マイクロバブルとCTACの相乗効果が少し表れている。図-8に $U=5\text{m/sec}$ でCTACを添加しない場合とした場合の気泡写真を示す。CTACを添加すると、しない場合に比べて小さな気泡が多数生成されている。このことと、図-5で $U=5\text{m/sec}$ では40ppmのCTACは摩擦低減効果には影響しないことを合わせると、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果は気泡径に依存しないということが示唆される。



(a) CTAC 0ppm



(b) CTAC 40ppm

図-8 CTACの有無による生成気泡の差 ($V=5\text{m/s}$, $Qa/(Qa+Qw)=0.116$)

3. マイクロバブルの尺度影響実験

3.1 実験状態

模型船(図-9)は、長さ50m、幅1.0m、喫水0.045mの全平底長尺模型船で、船体は、本体がウレタン(比重0.1)、強度部材がアルミチャネルで、4mブロック毎に製作し連結した。船底には4m毎に700mm角の透明アクリル製観測窓がある。

気泡吹き出しは、船首部(船首端より3.0m)および船体中央部(船首端より31.0m)の2カ所に設けた長さ100mm、幅500mm、厚さ4mmの黄銅製の配列多孔板から行った。各配列多孔板には、直径1mmの穴が幅方向166個、長さ方向21列、計3486個開けられている。

模型船の全抵抗は、ロードセル(1分力、容量500kgf)により計測し、壁面摩擦はせん断力センサS10W-2(容量2gf、三計エンジニアリング社製)により、図-11に示す船首部吹き出し以降のP1(Position1)、P2、P3、および船体中央部吹き出し以降のP4、P5、P6にて計測した。これらは、共に気泡吹き出し部から0.5m、1.8m、5.8mにある。

3.2 全抵抗低減効果

全抵抗の計測結果を図-10に示す。横軸はFroude数($F_n = V / \sqrt{gL_{pp}}$)、縦軸は抵抗係数

$C_t = R_t / (0.5 \rho V^2 S)$ である。 C_{f_0} はSchoenherrの摩擦抵抗係数である。形状影響係数kは、プロハスカの方法により $1+k=1.14$ が求められた。造波影響の少ない船型であり、全抵抗成分の約88%が摩擦抵抗成分である。

図-11に船首部吹き出し状態の船速 $V=5.0\text{m/sec}$ と $V=7.0\text{m/sec}$ における吹き出し部面積 $S[=0.5 \times 0.1\text{m}^2 = 0.05\text{m}^2]$ で無次元化した空気流量 q と全抵抗の関係を示す。全抵抗は気泡無しの状態を1としている。この計測結果から、全抵抗の減少は $V=5.0\text{m/s}$ で最大約13%であり、気泡吹き出し部下流の気泡被覆部分の摩擦抵抗(Schoenherrによる推定値)に対して最大約35%の減少であった。

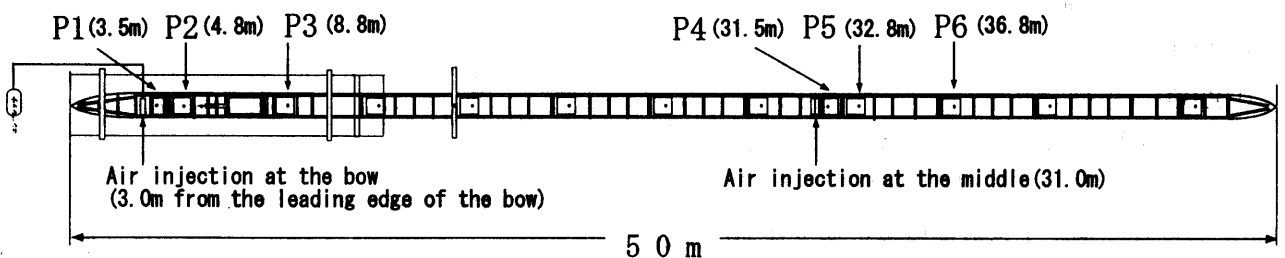


図-9 マイクロバブル実験用 50m 長尺平底模型船

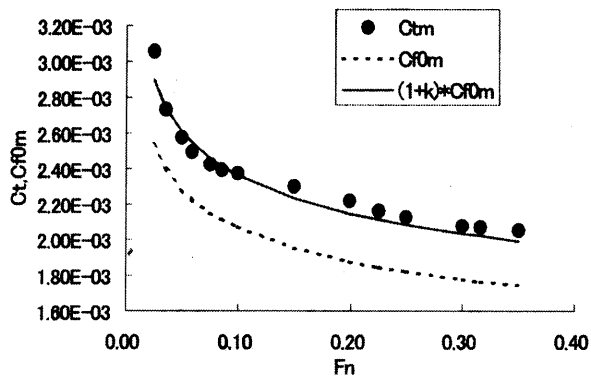


図-10 50m 長尺平底模型船の全抵抗

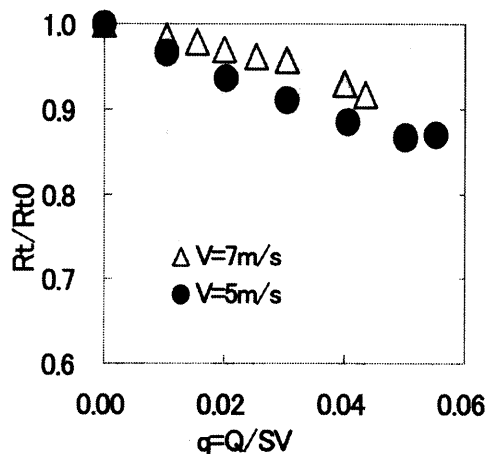


図-11 船首気泡吹き出し状態における全抵抗の低減

3.3 壁面摩擦低減効果

図-12に、船速 $V=5.0\text{m/sec}$ および $V=7.0\text{m/sec}$ 、気泡流量 $q=0.02$ および $q=0.04$ における壁面摩擦係数の計測結果を示す。気泡吹き出しは船首部から行った。横軸は船首端からの距離を、縦軸は局所せん断応力係数の気泡なし状態に対する比率を示す。気泡吹き出し位置から後方へ離れるほど局所せん断応力低減効果は小さくなるが、最後端まで持続している。気泡流量 q が増加すれば低減効果も大きくなる。

3.4 吹き出し位置の境界層厚さの影響

船首部と船体中央部の2カ所のいずれかから気泡を吹き出し、吹き出し位置の境界層厚さの影響を調べた結果を図-13に示す。(a)図は船速 $V=5.0\text{m/sec}$ 、(b)図は $V=7.0\text{m/sec}$ の結果である。図中の"bow"は船首部吹き出しの場合を、"middle"は船体中央部吹き出しの場合を表す。船首気泡吹き出し部とせん断力センサー位置P1、P2、P3との相

対位置0.5m、1.8m、5.8mは、船体中央部吹き出し位置とP4、P5、P6とのそれと同じである。

$V=5.0\text{m/sec}$ の場合、境界層厚さはP1で40mm、P4で260mmと推定される。境界層厚さの影響は、図中のマーク、P1●とP4○、P2▲とP5△、およびP3■とP6□のそれぞれの差として示される。全体的には、境界層の薄い船首部と境界層が厚い中央部で、対応するそれぞれの位置の壁面摩擦低減効果に大きな差は無かった。ただし、 $V=5\text{m/sec}$ における"P1 bow"と"P4 middle"の差がややある。この原因は明らかではないが、船体中央の気泡発生部では気泡を引きちぎるせん断力が船首部に比べて弱いこと関係しているかも知れない。

以上の結果から、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減において気泡吹き出し位置からの距離が最も重要な要素であり、境界層厚さの影響は小さいことが分かった。

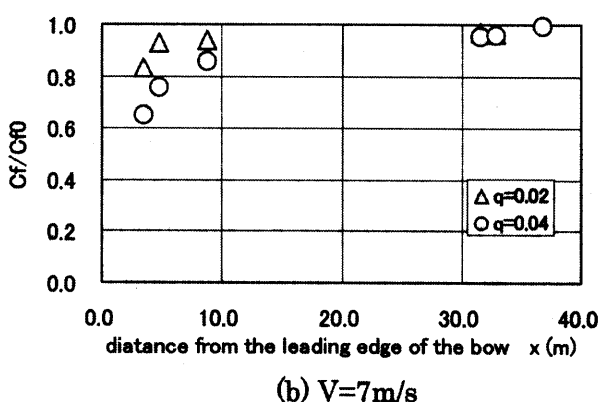
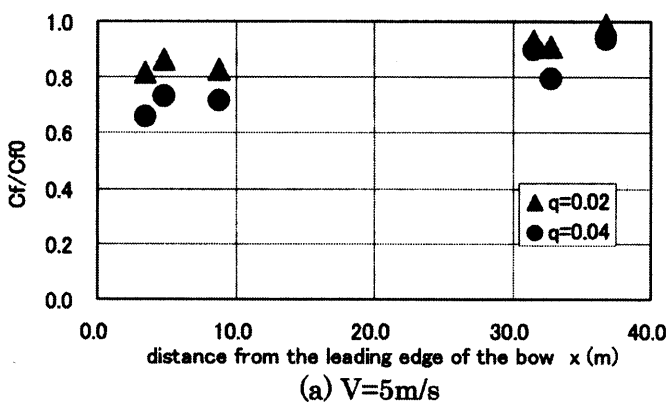


図-12 壁面摩擦係数の流れ方向分布 (船首部気泡吹き出し)

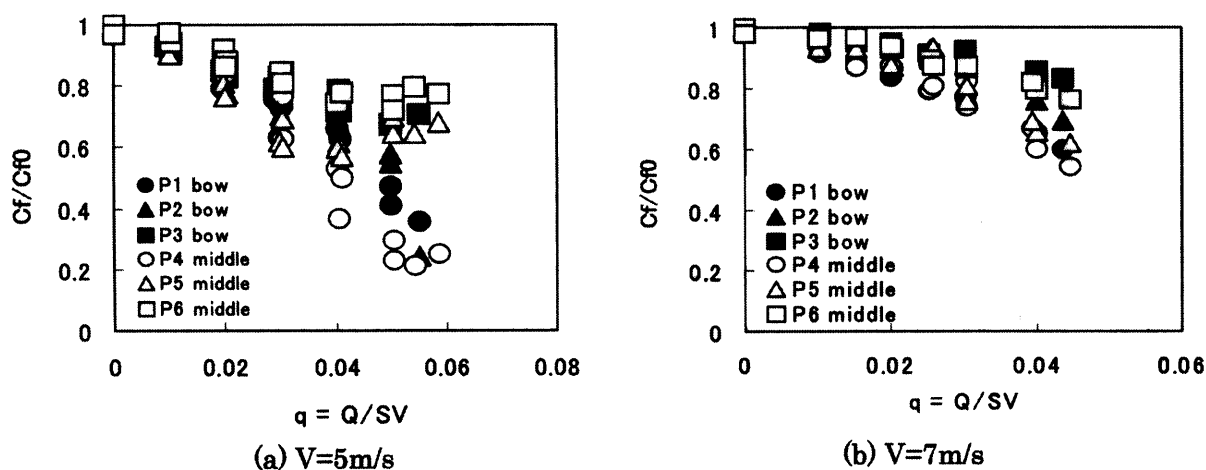


図-13 気泡吹き出し位置が壁面摩擦低減効果に与える影響

bow: 船首部から吹き出し、middle: 船体中央部から吹き出し

4. 結論

共に摩擦抵抗低減デバイスであるマイクロバブルと界面活性剤の高流速における併用効果は、摩擦低減効果に関しては殆ど無かった。ただし、発生気泡径は界面活性剤の添加により顕著に小さくなったが、摩擦低減効果には差が無かった。気泡径と摩擦抵抗低減の関係については今後も検討を進めたい。

50m長尺模型船によるマイクロバブルの尺度影響実験では、摩擦抵抗低減効果は気泡吹き出し位置から後方へ行くほど少なかったが、船尾まで低減効果は持続した。マイクロバブルによる摩擦抵抗低減においては、気泡吹き出し位置からの距離が最も重要な要素であり、境界層厚さの影響は小さい。

本研究の一部は、日本造船研究協会SR239部会との共同研究として実施された。

参考文献

- [1]N. K. Madavan,et al., "Measurement of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer", J.Fluid Mech., VOL156,1985
- [2]児玉他「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 11 月。
- [3]Y. Kodama, et al., "Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for

skin friction reduction.", Int J. of Heat and Fluid Flow 21 ,2000.

- [4]T. Takahashi,et al., "Experimental skin friction reduction by microbubbles using a ship with a flat bottom", 第 31 回乱流シンポ、日本流体力学講演会、1999 年 7 月。
- [5]Y. Kodama, et al., "Preliminary Experiments on Microbubbles for Drag Reduction Using a Long Flat Plate Ship", ONR Workshop on Gas-Related Surface Ship Drag Reduction, October 1999.
- [6]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との関係」、第 72 回船研講演会、平成 10 年 12 月。
- [7]Merkle, C. and Deutsch, S.,1990,"Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection", Progress in Astronautics and Aeronautics vol.123, AIAA, pp.351-412.
- [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, Soc. Naval Arch. Japan, vol.1, No.5.
- [9]Y. Kawaguchi, A. Yabe et al., "Active Control of Turbulent Drag Reduction in Surfactant Solutions by Wall Heating", FED-Vol.237, 1996 ASME Fluids Engineering Division Conference vol.2, 1996.