

〔特集〕ながれと海洋

# マイクロバブルによる船舶の摩擦抵抗低減

## Skin Friction Reduction of Ships by Microbubbles

\*海上技術安全研究所・推進性能部 児玉良明†  
Yoshiaki KODAMA

### 1 何故マイクロバブルか？

マイクロバブル (microbubbles) は、水中を進む物体の壁面が水から受ける摩擦抵抗を、壁面に沿う境界層中に微細な気泡を注入することにより低減させるデバイスである。マイクロバブルは McCormick と Bhattacharyya<sup>1)</sup> 以来数多く研究されてきた。その摩擦抵抗低減効果の例<sup>2)</sup>を 図 1 に示す。これは回流水槽において壁の 1 つから気泡を注入し、その下流で壁面摩擦応力を計測したもので、横軸に注入空気量を、縦軸に計測された摩擦応力を注入空気量ゼロの状態でのそれとの比で示す。注入空気量が増えるにつれて摩擦応力が低減し、最大で約 80% の低減効果が得られている。

船舶、特に海運の主役である大型タンカーなど大きくて且つゆっくり走る船はマイクロバブルの適用に取り分け適している。そのイメージを図 2 に示す。適している理由の 1 つは、これらの船で

は摩擦抵抗成分が全抵抗の約 8 割を占めることである。船が進むとき水から受ける抵抗は主に造波抵抗と摩擦抵抗の 2 成分からなるが、タンカーなどの船舶はゆっくり走るため造波抵抗が非常に小さい。適しているもう 1 つの理由は、その形にある。大型タンカーに代表される船型は肥大船型

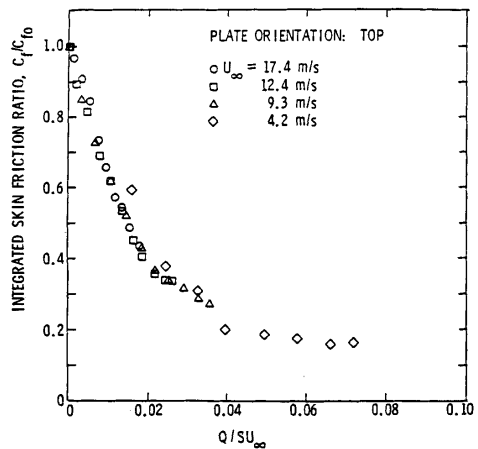


図 1 マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果<sup>2)</sup>

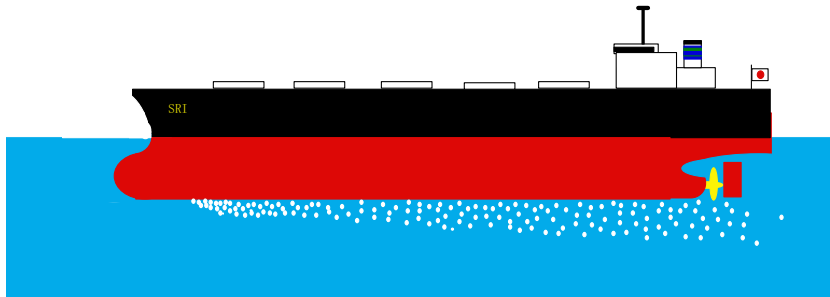


図 2 マイクロバブルの船舶への適用イメージ

\* 〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1

† E-mail: kodama@srilot.go.jp

とよばれ、船首尾部を除き殆ど箱形で、広く平らな船底を有し、船首部から気泡を船底に注入すると、浮力によって船底近傍に止まり、少ない流出量で船尾まで効率的に船底を覆うことが期待できる。

このように船舶にとって有望と思われるマイクロバブルについて日本を中心として実用化に向けた活発な研究が行われている。本文では当研究所における研究結果を中心にマイクロバブル研究の現状について紹介する。

## 2 マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果と低減メカニズム

### 2.1 摩擦抵抗低減効果

マイクロバブルは非常に大きな摩擦抵抗低減効果をもっている。まず、マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果の実験例を示す。図3に著者らの実験装置を示す。小型の回流水槽であり、気泡は試験部上流端の上壁面に設置された多孔質の焼結金

属板を通して注入され、その下流において低減効果が計測される。流れの中の気泡は試験部の下流に設置された気泡除去タンクにおいて浮力により除去され、連続実験を可能にしている。Position 2, 3, 4は気泡注入位置からそれぞれ500mmずつ下流の位置を表す。

流れの中の気泡の写真を図4に示す。流路内の平均流速  $U$  は7m/secであった。この速度は14ktであり、タンカーの巡航速度にほぼ等しい。流路内の平均ボイド率すなわち流路を流れる水と空気の混合物のうち空気の占める割合は5.3%であった。写真は上下方向の実長が約10mmであり、上端が流路の上壁に一致している。気泡は流路の上壁近くに集中している。気泡径は0.5mm乃至1mm程度であった。

図5に小型高速流路におけるマイクロバブルによる壁面摩擦応力の低減結果を示す。横軸は流路内平均ボイド率  $\bar{\alpha}_0$ 、縦軸は気泡の有無状態の壁面摩擦応力比であり、気泡有りの状態では注入

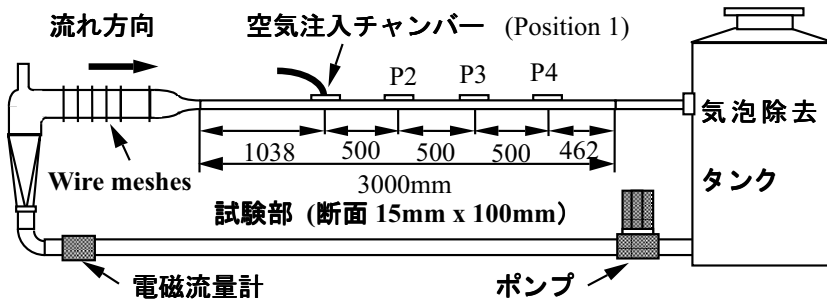


図3 マイクロバブル実験用小型高速流路<sup>4)</sup>

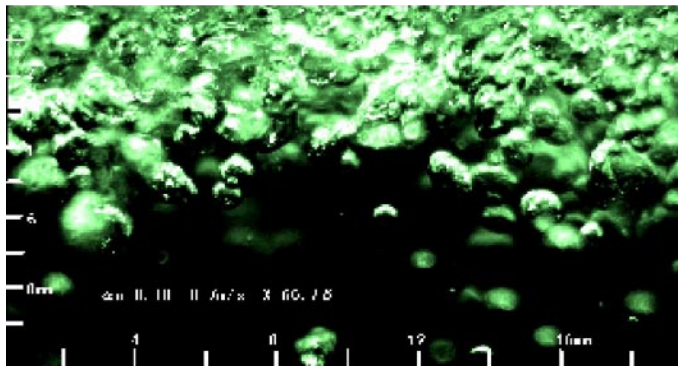


図4 流路内の気泡写真。平均流速  $U = 7\text{m/sec}$ 、Position 2、平均ボイド率 = 5.3%<sup>4)</sup>

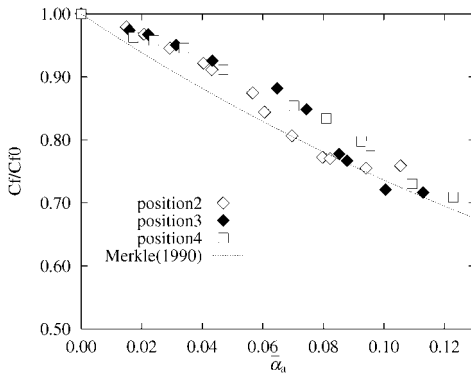


図5 マイクロバブルによる壁面摩擦応力の低減<sup>5)</sup>。  $U = 7\text{m/sec}$ 。

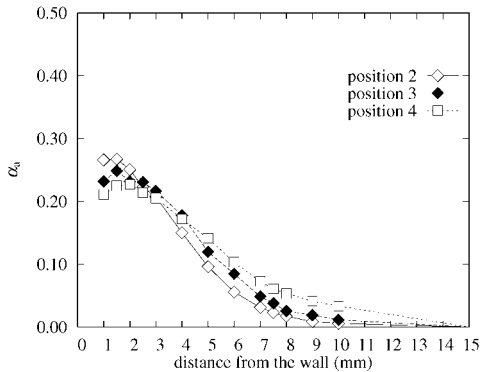


図6 流路内の局所ボイド率分布，平均流速  $U = 7\text{m/sec}$ ，平均ボイド率<sup>5)</sup>。

空気体積による増速を考慮して補正されている。注入空気量の増加に従い、壁面摩擦応力が減少し、最大で約30%の低減が得られている。実線はMerkleら<sup>2)</sup>の実験結果を示す。著者らの実験結果は、空気吹き出し量が大きくなるとMerkleらの結果に一致している。図6に平均ボイド率が8%の状態での局所ボイド率、すなわちある場所を通過する水と空気の混合物のうち空気の占める割合を上壁からの距離の関数として示す。この状態では、気泡は上壁付近に集中し、また、下流に行くに従ってわずかに拡散する傾向がある。

## 2.2 摩擦抵抗低減メカニズム

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減のメカニズムについては未だ定説が無いが、考えられるメカニズムの一つは密度効果、すなわち空気の密度

が水の約1000分の1と非常に小さいため、気泡が物体表面近くに集まり層状に分布すると、水の摩擦がそれだけ遮断され減少することである。図5及び図6に示される結果も、差は小さいが、Position 2, 3, 4での摩擦低減効果の大きさと壁面近傍での局所ボイド率との間に正の相関があり、密度効果を裏付けている。その他Guinら<sup>3)</sup>の実験結果もある。

考えられるもう1つの低減メカニズムは乱流抑制効果、すなわち気泡が摩擦発生の主因である境界層中の乱流を抑制するということである。Katoら<sup>6)</sup>はLDVを用いて壁のごく近傍の流場中の乱流強度を測定し、マイクロバブルによって摩擦抵抗低減効果が得られているとき乱流強度も小さくなっていることを示した。恐らく実際は、これら2つのメカニズムの相乗効果によってマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果が得られていると筆者は考える。

## 3 マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果の尺度影響

マイクロバブルの実船における摩擦抵抗低減効果を推定するためには、上記の小型流路を用いた実験結果だけでなく、注入気泡による摩擦抵抗低減効果がどの程度下流まで持続するかを調べる大規模実験が必要である。渡辺ら<sup>7)</sup>は幅60cm、長さ40mの平板船を用いて曳航水槽においてマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果を計測した。また筆者ら<sup>8)</sup>も最近、幅1m、長さ50mの平板船を用いて同様な計測を行った。図7に筆者らが用いた平板船の形状を、図8にマイクロバブルによる壁面摩擦応力の低減効果の流れ方向分布の実験値を示す。速度  $U = 5\text{m/sec}$  と  $U = 7\text{m/sec}$  の2状態で計測された摩擦低減効果は最下流の計測位置まで低減効果が持続しており、大型船への適用にとって好材料である。2つの速度での低減効果は高速の  $U = 7\text{m/sec}$  の方が小さく、この原因としては、高速ほど気泡が壁面近傍から拡散されることが考えられる。今後の研究が必要である。なお、渡辺ら<sup>6)</sup>は  $U = 7\text{m/sec}$  において

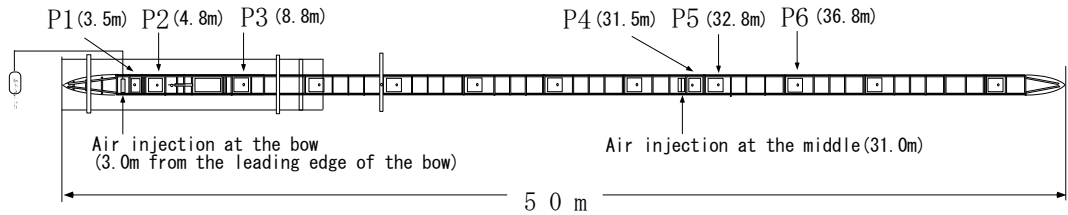


図7 マイクロバブル尺度影響実験用50m平板船<sup>8)</sup>.

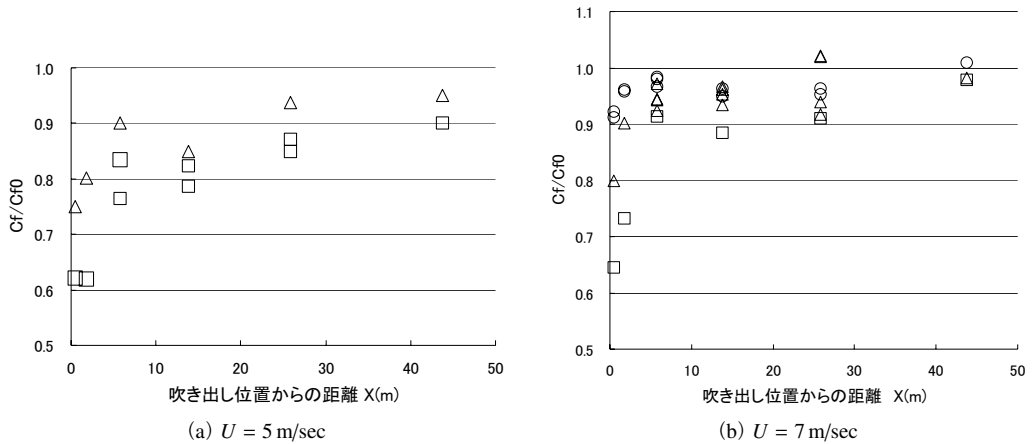


図8 50m平板船における壁面摩擦応力低減効果の流れ方向分布<sup>8)</sup>.

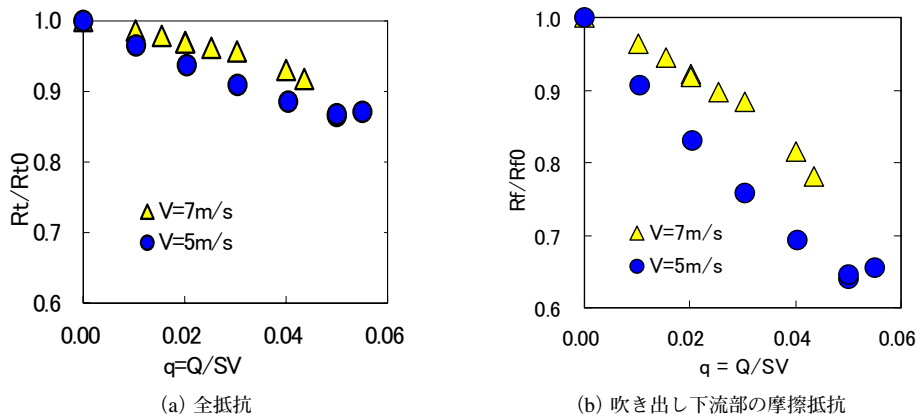


図9 マイクロバブルによる50m平板船の抵抗低減効果<sup>8)</sup>

図8よりも大きな摩擦抵抗低減効果を得ている。両者は空気吹き出し方法等いくつかの点で異なるため、差の原因を調べることでより低減効果を高めるヒントが得られるかも知れない。

図9に50m平板船の抵抗の低減効果を示す<sup>8)</sup>。横軸は船速Vと吹き出し部面積S(50cm×10cm)で無次元化された吹き出し空気量で、(a)図の

縦軸は全抵抗に対する低減効果の割合を、(b)図の縦軸は、吹き出し幅の下流の平板の摩擦抵抗(Schoenherrの式を用いた推定値)に対する低減効果の割合を示す。両者はデータは同一で分母のみが異なる。(b)図では船速V=7m/secにおいて最大23%の低減が得られている。

#### 4 マイクロバブルによる正味の摩擦抵抗低減効果

マイクロバブルの実船への適用性を検討するためには、気泡吹き出しに必要なエネルギーを考慮した正味の低減効果を調べる必要がある。ここでは Merkle ら<sup>2)</sup>の議論を参考に、50 m 平板船の結果を用いて、長さ 300 m のタンカーに適用した場合の正味の低減効果を推定する。

船舶の摩擦抵抗低減にマイクロバブルを適用したときの正味の仕事率比  $r_w$  を次式で定義する。

$$\begin{aligned} r_w &\equiv \frac{W_{net}}{W_0} = \frac{DU_\infty + W_{pump}}{D_0U_\infty} \\ &= \frac{D}{D_0} + \frac{W_{pump}}{D_0U_\infty} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ただし、 $W_0$  : 気泡吹き出し無し時の船体抵抗による仕事率

$W_{net}$  : 気泡吹き出し時の正味の仕事率

$D_0$  : 気泡吹き出し無し時の船体抵抗

$D$  : 気泡吹き出し時の船体抵抗

$U_\infty$  : 船速、気泡吹き出しの有無において船速は一定に保つ

$D_0U_\infty$  : 気泡吹き出し無し時の船体抵抗による仕事率

$DU_\infty$  : 気泡吹き出し時の船体抵抗による仕事率

$W_{pump}$  : 気泡吹き出しに要する仕事率

正味の仕事率比  $r_w$  は、正味の低減効果があるとき 1.0 より小さく、低減効果がゼロのとき 1.0 である。

気泡吹き出しに要する仕事率  $W_{pump}$  を、気泡吹き出し部における静水圧による損失のみを考慮し、次式で表す。

$$W_{pump} = Q_A \left( \rho g d + C_P \times \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \right) \quad (4.2)$$

ただし、 $Q_A$  : 単位時間当たりの吹き出し空気量  
 $\rho$  : 水の密度

$g$  : 重力加速度

$d$  : 気泡吹き出し位置の水深

$C_P$  : 吹き出し部の圧力係数

気泡吹き出し無し時の船体抵抗  $D_0$  を、船舶流体力学における通常の無次元表記法に従って表す。

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S C_T \\ &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S (C_F + C_W) \\ &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S [(1 + K) C_{F_0} + C_W] \end{aligned} \quad (4.3)$$

ただし、 $S$  : 船体浸水表面積

$C_T$  : 船体全抵抗係数

$C_F$  : 摩擦抵抗係数

$C_W$  : 造波抵抗係数

$C_{F_0}$  : 相当平板(面積と長さが等しい平板)の摩擦抵抗係数。

$K$  : 形状影響係数(form factor)、船体が凸であることにより発生する、摩擦増加量と粘性圧力抵抗の和

相当平板の摩擦抵抗係数とは、その船舶と長さと同面積が等しい 2 次元平板の抵抗係数で、通常、多くの実験データから得られたシェーンヘル(Schoenherr)の式(次式の再帰式)が用いられる。

$$\log(\text{Re}C_{F_0}) = \frac{0.242 \log 10}{\sqrt{C_{F_0}}} \quad (4.4)$$

ただし  $\text{Re}$  は船の長さと同流速に基づくレイノルズ数である。形状影響係数  $K$  は、船体が厚みをもつことにより発生する、摩擦増加量と粘性圧力抵抗の和を表す。形状影響係数は、長さ数 m の模型船を用いた曳航水槽実験において、低速(フルード数約 0.16 以下)で造波抵抗が無視できるほど小さいときの抵抗値を Schoenherr の摩擦抵抗で割って得られる。

気泡吹き出し時の船体抵抗  $D$  は次式のように表すことにする。

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S \bar{C}_T \\
 &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S (\bar{C}_F + C_W) \\
 &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S [(1 + K) \bar{C}_{F_0} + C_W] \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

すなわち、造波抵抗係数  $C_W$  と形状影響係数  $K$  は気泡により変化しないと仮定する。

以上より、正味の仕事率比  $r_W$  は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 r_W &= \frac{D}{D_0} + \frac{W_{pump}}{D_0 U_\infty} \\
 &= \frac{\bar{C}_{F_0}}{C_{F_0}} + r_D + \frac{Q_A}{U_\infty S} \frac{\frac{2}{F_d^2} + C_P}{(1 + K) C_{F_0} (1 + r_D)} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 r_D &\equiv \frac{C_W}{(1 + K) C_{F_0}} : \text{造波抵抗と粘性抵抗の比} \\
 F_d &\equiv \frac{U_\infty}{\sqrt{gd}} : \text{水深に基づくフルード数}
 \end{aligned}$$

上式から、摩擦抵抗低減効果を高め正味の仕事率比  $r_W$  を小さくするには、下記の5点が有効であることが分かる。

- (1)  $r_D$  を小さくする。すなわち、造波抵抗の小さい船型が好ましい。
- (2)  $\bar{C}_{F_0}/C_{F_0}$  を小さくする。すなわち、マイクロバブルによる摩擦低減効果を高める。
- (3)  $Q_A/U_\infty S$  を小さくする。すなわち、吹き出し空気量を節減する。
- (4)  $F_d \equiv U_\infty/\sqrt{gd}$  を大きくする。すなわち、速度を上げる、水深を小さくする。これは、loss (気泡吹き出しに必要な仕事) が static (速度に依存しない) であり、gain (摩擦抵抗低減効果) が dynamic (速度の2乗に比例する) であることを反映している。
- (5)  $C_P$  を小さくする。すなわち、動圧により低圧になっている部分から気泡を吹き出す。

マイクロバブルを長さ 300 m の大型タンカーが速度 14 ノットで航行する場合に適用した場合に正味の仕事率比  $r_W$  がどのような値をとるか調べる。典型的なパラメータ値を次式のように推定する。

$$\begin{aligned}
 & \text{船長 } L = 300 \text{ m}, d = 20 \text{ m (満載状態)}, \\
 & S = 0.24 L^2, U_\infty = 7 \text{ m/sec}, K = 0.35, \\
 & F_d^2 = 0.25, r_D = 0.25, C_P = 0, \\
 & \text{Re} = 2.1 \times 10^9, C_{F_0} = 0.0014 \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

吹き出し空気量  $Q_A$  と摩擦低減効果  $\bar{C}_{F_0}/C_{F_0}$  を、50 m 平板船の結果である図 9 (b) に基づき概略推定する。先ず実船の摩擦低減効果  $\bar{C}_{F_0}/C_{F_0}$  を、図の 50 m 平板船と同じ値  $\bar{C}_{F_0}/C_{F_0} = 0.77$  とする。このときの実船の吹き出し空気量  $Q_{AS}$  ( $S$  は“ship”の意味) を、50 m 平板船での値  $Q_{AM}$  ( $M$  は“model”の意味)  $= 0.04 \times 0.05 \times 7 = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$  に面積比  $S_S/S_M = 21600/(0.5 \times 50) = 864$  をかけて、 $Q_{AS} = 12.1 \text{ m}^3/\text{s}$  とする。このとき、(4.6) 式より正味の仕事率比  $r_W = 1.078$  と、1 よりわずかに大きくなり、正味の低減効果は得られない。一方、バラスト状態 (積み荷が空の状態) で  $d = 12 \text{ m}$  とすると  $r_W = 0.979$  となり、約 2% の正味の低減効果が得られる。中近東から原油を運搬するタンカーは、現在の技術レベルでも片道は正味の低減効果が得られることになる。また、満載状態  $d = 20 \text{ m}$  において仮に技術の進展により吹き出し空気量を半分に節約できたとすると、 $r_W = 0.952$  となる。一般に、省エネルギー効果は 5% を越えないと誤差に埋もれる恐れがあるので、最低でもこの程度の低減効果は必要であろう。

以上の推定は、例えば必要空気量を 50 m 平板船と 300 m タンカーとの面積比で推定するなど、大まかなものであるが、要するにマイクロバブルが船舶の省エネルギーデバイスとして実用化されるためには、摩擦低減効果を従来の 2 倍以上にする、超浅喫水広幅船型など新船型開発と組み合わせるなど、もう一段の研究努力が必要であると言える。また、気泡吹き出し

部の汚損対策, 気泡のプロペラへの流入がプロペラ性能に及ぼす影響の検討なども必要である。

本文で紹介した著者らの研究は, 運輸省特別研究「次世代 CFD を用いた船舶の流体抵抗低減法に関する研究」(H7 年度~H11 年度), (社)日本造船協会 SR239 「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」(H10~H13 年度), 文部科学省開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」(H12~H16 年度)において実施された。SR239 では, 今年 9 月に長さ 100m クラスの船舶を用いたマイクロバブルの実船実験が予定されている。

#### 引用文献

- 1) McCormick, M. E. & Bhattacharyya, R. : Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis, *Naval Engineers Journal* **85-2** (1973) 11-16.
- 2) C. Merkle & S. Deutsch : Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection, *Progress in Astronautics and Aeronautics* **123**, AIAA.
- 3) Guin, M. M., Kato, H., Maeda, M. & Miyanaga, M. : Reduction of Skin Friction by Microbubbles and Its Relation with Near-Wall Bubble Concentration in a Channel, *Journal of Marine Science and Technology* **1** (1996) 241-254.
- 4) 高橋孝仁 他 : マイクロバブルによる摩擦抵抗低減の流れ方向分布, *日本造船学会論文集* **182** (1997).
- 5) Y. Kodama, et al. : Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction., *International Journal of Heat and Fluid Flow* **21** (2000).
- 6) Kato, H., Iwashita, T., Miyanaga, M. & Yamaguchi, H. : Effect of Microbubble Cluster on Turbulent Flow Structure, *IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control*, Gottingen, Germany (1998) 1-6.
- 7) 渡辺修, 増子章, 白勢康 : 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* **183** (1998) 53-63.
- 8) T. Takahashi, et al. : Experimental Study on Drag Reduction by Microbubbles Using a 50m-long Flat Plate Ship, *2nd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-2)*, June, 2001.