

青雲丸を用いたマイクロバブルの摩擦抵抗低減実船実験

—前編: 準備研究—

正員	児	玉	良	明*1	正員	角	川	明*1
正員	高	橋	孝	仁*1	正員	石	川	暁*2
正員	川	北	千	春*3	正員	金	井	健*4
正員	戸	田	保	幸*5	正員	加	藤	洋 治*6
学生員	池	本	晶	彦*7		山	下	和 春*8
正員	永	松	哲	郎*9				

A Full-scale Experiment on Microbubbles for Skin Friction Reduction Using "SEIUN MARU"
Part 1: The Preparatory Study

by Yoshiaki Kodama, *Member* Akira Kakugawa, *Member*
Takahito Takahashi, *Member* Satoru Ishikawa, *Member*
Chiharu Kawakita, *Member* Takeshi Kanai, *Member*
Yasuyuki Toda, *Member* Hiroharu Kato, *Member*
Akihiko Ikemoto, *Student Member* Kazuharu Yamashita
Tetsuo Nagamatsu, *Member*

Summary

This paper is the first half of the report on the study on microbubbles carried out by the SR239 project of the Shipbuilding Research Association of Japan, and describes the preparatory study for the full-scale experiment using a 116m-long ship. In the present study, first the skin friction reduction effect by microbubbles was investigated including the use of an array of holes plate for bubble generation, the effects of streamwise pressure gradient, surface curvature, and vertical plate, the sea-water effect, and the effect of bubble size. Bubble generators for the full-scale experiment were designed and built, and a preliminary injection experiment was carried out. Two new measuring devices for the full-scale experiment were developed; they are skin friction sensors and local void ratio sensors. Microbubble experiments were carried out in a 400m-long towing tank using a 50m-long flat plate ship, in order to obtain the scale effect data and to confirm the validity of the new devices for the full-scale experiment. The use of adhesives to fix measurement devices and cables on the hull surface was tested and established. The hydrodynamic fairing of the cables was also tested and established. Finally, a preliminary microbubble experiment using a small ship was carried out and the bubble behavior was observed.

-
- *1 独立行政法人海上技術安全研究所 知的乱流制御研究センター
 - *2 三菱重工業(株)長崎研究所
 - *3 三菱重工業(株)技術本部
 - *4 (財)日本造船技術センター
 - *5 大阪大学大学院工学研究科
 - *6 東洋大学大学院工学研究科
 - *7 東洋大学工学部
 - *8 中国塗料(株)研究センター
 - *9 鹿児島大学水産学部

原稿受理 平成 14 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 14 年 11 月 14, 15 日

1. 緒 言

船舶の抵抗低減に関する従来の研究は、主として造波抵抗の低減を目的として行われ数多くの成果が得られたが、もう1つの主要抵抗成分である摩擦抵抗については、乱流という複雑な流体现象が関係するため、目立った成果が得られなかった。しかし摩擦抵抗の低減は、例えば大型肥大船では全抵抗の約8割を占めるため、もし実現すれば非常に高い実用的価値をもつ。

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り、McCormick and Bhattacharyya¹⁾以来数多く研究されてきた^{2)~8)}。

マイクロバブルは、以下の3つの理由により、船舶に適した摩擦抵抗低減デバイスと考えられる。第1は最大80%に達する顕著な摩擦低減効果²⁾をもつことである。第2は比較的汚損に強いことである。他の代表的な摩擦抵抗低減デバイスであるリブレットは、その高さが大型船舶では0.01mm程度になり⁹⁾、実用的でない。これに対してマイクロバブルは、よりマクロ的なデバイスであり、また、気泡吹き出し部を除いて、汚損の対策は不要である。第3は、同じく顕著な低減効果をもつポリマーや界面活性剤とは対照的に、海洋環境に対する悪影響の問題が無いことである。

一方、負の効果も存在する。すなわち水圧に打ち勝って気泡を発生させるためには動力が必要であり、マイクロバブルの実用性に関する議論は、摩擦抵抗低減効果と気泡発生動力の両方を考慮した正味の低減効果に基づく必要がある。

海運の主役である大型タンカーなどの肥大船型は、以下の3つの理由により、マイクロバブルに適していると考えられる。第1は、全抵抗の約8割を摩擦抵抗成分が占め、その低減が全抵抗の低減に直結することである。第2は、船底が平らで広いため、気泡を船首部船底から注入すると、浮力により船底を効率的に覆うと期待されることである。第3は、大型タンカーではダブルハル化が義務づけられ、気泡発生装置や配管を二重船底間に容易に配置できると思われることである。しかし同時に、満載状態では喫水が約20mあるため、船底に気泡を注入するためには2気圧の水圧がかかることも考慮しなければならない。

(社)日本造船研究協会では、SR239 研究部会「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」(H10~13)において、マイクロバブル法、空気膜法、表面処理法の3つの摩擦抵

抗低減法について研究を実施した⁹⁾。その中で特にマイクロバブル法について、実用化の検討を主目的として、従来研究の調査、尺度影響実験を含む基礎研究、実船実験のための予備実験、CFDを用いた実船性能推定法の開発などを実施し、最後に、それらの成果を総合する形で実船実験を実施した。ここに、この4年間に亘る研究を前後編に分けて総合的に報告する。

前編にあたる本報告では、実船実験結果を報告する後編に先立ち、実船実験を実施するための準備研究の内容を報告する。2.1節では、実船実験用の気泡発生方法である配列多孔板を用いた場合の吹き出し空気量と摩擦抵抗低減効果等の関係についての基礎実験結果を示す。2.2節では、通常のマイクロバブル実験が平板について行われるのに対して、実船で遭遇する圧力勾配や曲率をもった壁面における低減効果の実験結果を示す。2.3節では、実船の船側部に気泡が流入した場合にどの程度低減効果をもつのかを調べるために行った鉛直壁面における摩擦抵抗低減効果に関する実験結果を示す。2.4節では、通常は清水を用いて行われる研究室実験と、海で行われる実船実験で気泡状態に差があるか否かを調べるために行った、海水を用いた基礎実験結果を示す。2.5節では、気泡径が摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響について行った実験結果を示す。2.6節では、実船実験で使用した気泡発生装置のデザインを決定するために行った予備実験結果を示す。2.7節では、実船実験において気泡による壁面局所せん断力の低減効果を計測するために新たに開発した局所せん断力計について説明する。2.8節では、実船実験における壁面垂直方向の局所ボイド率分布を計測するために新たに開発した局所ボイド率計について説明する。2.9節では、実船実験において船体表面に取り付けた計測機器からデッキ上までの配線が外付けとなったために必要となった、気泡による摩擦抵抗低減効果を損ねない配線フェアリング方式の検討に関する実験結果を示す。2.10節では、気泡による摩擦抵抗低減効果の流れ方向の持続性を実船に近いスケールで計測するため、そして実船実験で使用する各種機器の作動確認のために、長さ400mの曳航水槽において幅1m、長さ最大50mの長尺平板船を用いて実施した長尺平板船実験結果を示す。2.11節では、実船において船体表面に取り付ける計測機器と配線を、従来の溶接方式と異なり、接着方式で行うこととなったために実施した接着工法の検討結果を示す。最後に2.12節では、鹿児島大学練習船「南星丸」を用いて行った予備的な実船実験結果を示す。そして第3章では、これらの研究結果のまとめを示す。

2. 準備研究内容

2.1 摩擦抵抗低減効果

(1) 多孔質板と配列多孔板の比較

従来、マイクロバブル法の気泡発生では多孔質板 (Porous Plate) が用いられてきた²⁾⁶⁾。しかし、圧力損失が大きいこと、孔が微細なため汚損に弱いと思われることから、直径 1mm の孔を数ミリピッチで多数開けた配列多孔板 (Array-of-Holes Plate) を考案し、両者の摩擦抵抗低減効果を比較する実験を行った⁶⁾。実験は海上技術安全研究所の小型高速流路⁶⁾を用いて行った。その試験部は、幅 100mm、高さ 15mm、全長 3000mm である。気泡は、境界層が十分に発達した、試験部上流端から 1028mm 下流の上面に設置した多孔質板または配列多孔板を通して吹き出した。気泡直径は約 1mm であった。そして局所せん断力を、吹き出し位置から下流に $X_a=0.5, 1.0, 1.5\text{m}$ の位置で、容量 2gf ($2 \times 10^{-2}\text{N}$) の Floating-disk タイプのせん断力センサにより計測した。

配列多孔板を空気が通過するときの圧力損失は、多孔質板のそれに比べて 1/2~1/8 に低下した。Fig.1 に流路内平均流速 $U=7\text{m/s}$ における平均ボイド率と摩擦抵抗低減効果との関係を示す。縦軸は気泡の有無による壁面摩擦係数比 C_f/C_{f_0} である。なお気泡吹き出し状態では

流路内平均流速が増加するため、 C_{f_0} を補正した⁶⁾。横軸は流路内の平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ を表す。

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

ただし、 Q_a : 試験流路内の空気体積流量

Q_w : 試験流路内の水体積流量

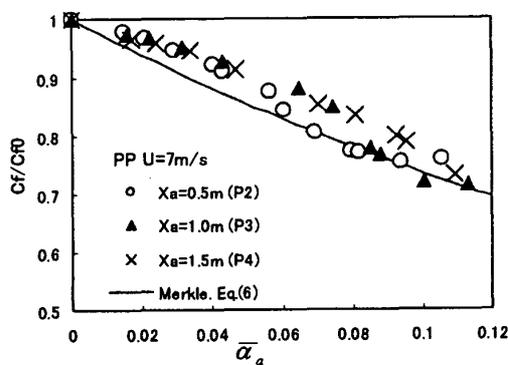
実線は次式の Merkle²⁾の実験式である。

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

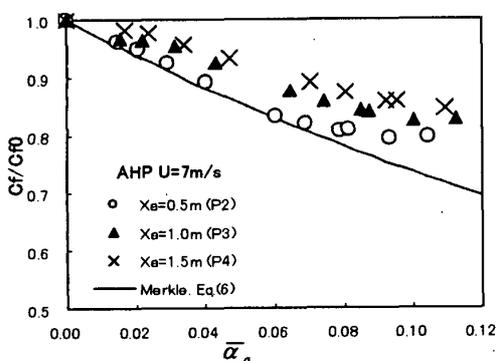
(a)図の多孔質板の場合に低減率は吹き出し位置からの距離 X_a によってやや差があり、(b)図の配列多孔板の場合に低減率はボイド率が大きいところで飽和する傾向があるなど、多孔質板と配列多孔板では低減効果にやや差があるものの、全体的傾向は似ている。よって、配列多孔板は実船実験で使用できると判断した。

(2) 局所ボイド率分布および気泡径分布

局所ボイド率計⁶⁾を用いて配列多孔板の流速 $U=7\text{m/s}$ における局所ボイド率分布を計測した (Fig.2)。ボイド率分布の二次元性を仮定した断面内の積分値が吹き出し空気量に一致するように補正を行った。計測した X 位置によって場所はやや異なるが、上部壁面近傍に局所ボイド率の最大値があり、壁面から離れると減少している。また下流に行くと気泡の拡散によりボイド率分布が壁から離れる方向に広がり、上部壁面近傍の局所ボイド率は相対的に低下する。



(a) Porous Plate



(b) Array-of-Holes Plate

Fig.1 Local skin friction reduction by microbubbles

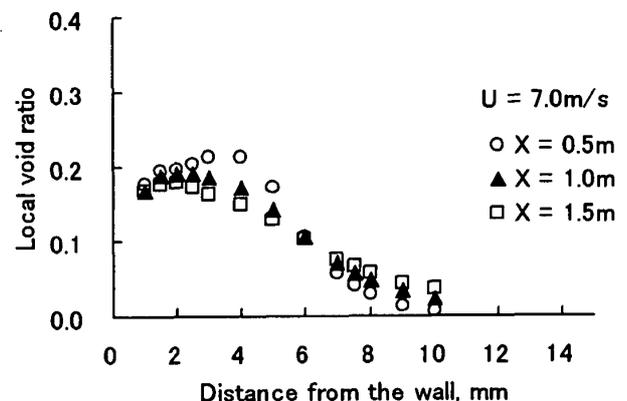


Fig.2 Local void ratio distribution (Array-of-holes plate)

気泡径分布を、配列多孔板を使用し流速 $U=7\text{m/s}$ にお

いて YAG-Laser をストロボ用光源とした写真撮影により計測した。視界を確保するため、中心から 30mm カメラ側へシフトした断面で計測した。各状態 40 枚の写真を用いて手動で気泡径を読み取った。結果を Fig.3 に示す。縦軸は確率密度、横軸は気泡半径である。気泡半径は 0.3mm を中心に 0.1mm から 1.0mm の範囲に分布している。

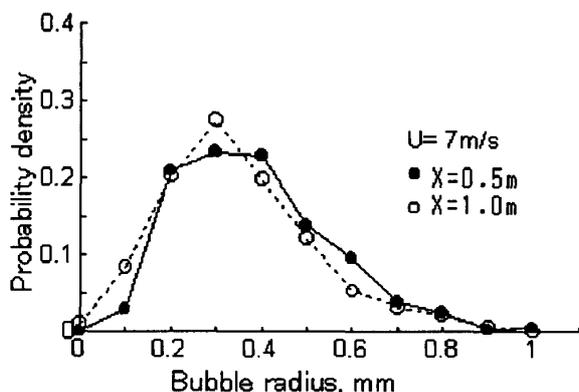


Fig.3 Bubble radius distribution (Array-of-holes plate)

2.2 圧力勾配と曲率の影響¹¹⁾

船体周りの流れ場は、流れ方向の圧力勾配を有している。この圧力勾配がマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果にどのような影響を与えるかを実験的に調査した。

実験では、空洞水槽を用い、その流路幅を広げる、あるいは狭めることによって圧力勾配のある流れ場を実現し、この流れ場の中に平板模型を水平に設置してマイクロバブルを平板下面に流し、摩擦抵抗の計測を実施した。また、流路幅を一定とし、曲率を持った壁面を設置して圧力勾配のある流れを実現し、同曲面にマイクロバブルを流して同様な計測を実施した。圧力勾配のある流路内の平板実験結果を Fig.4 に示す。各種平均ボイド率 (α_m) に対する圧力勾配 (dC_p/dx) と摩擦抵抗低減効果 (C_f/C_{f0}) の関係を示している。圧力勾配零の平板と比べ、船体前半部に相当する圧力勾配 (順圧力勾配: $dC_p/dx < 0$) では摩擦抵抗低減効果が減少し、船体後半部に相当する圧力勾配 (逆圧力勾配: $dC_p/dx > 0$) では逆に低減効果が増大する傾向が見られる。ただし、平均ボイド率 α_m が 0.04 以下の場合、その差は僅かである。すなわち、ボイド率が低い場合は圧力勾配の影響は軽微であり、船体表面における抵抗低減効果は平板で得られている知見で推定しても大きな誤りはないと推察される。一方、平均ボイド率が 0.04 を超えると、逆圧力勾配の流れ場において摩擦抵抗低減効果が極めて大きくなるという現象が見られた。その状態における気泡流れは、マイク

ロバブルが直径 0.9mm 程度に微細化され、気泡同士が密に集積して雲状の気泡群となっていた。これは、圧力勾配無しの平板などに見られた直径 1.5mm 程度のバブルがその輪郭が分かる程度に分散して流れている状態とは大きく異なっていた。このような雲状のバブル流れは、逆圧力勾配流れに見られる特有の現象と考えられるが、その詳細は不明確であり、今後、現象解明の調査が必要である。

実際に曲率を持った壁面でも同様の結果、すなわち船体前半部に相当する曲面 (順圧力勾配) では摩擦抵抗低減効果が減少し、船体後半部に相当する曲面 (逆圧力勾配) では効果が増加する傾向にあるという結果が得られた。

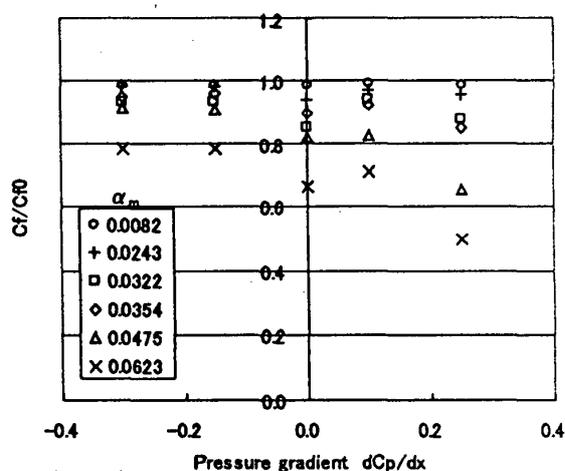


Fig.4 Local skin friction reduction versus pressure gradients

2.3 鉛直壁の影響

水平壁面下を流れるマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に比べ、鉛直壁面におけるマイクロバブルの挙動とその摩擦抵抗低減効果を調べた研究は少ない。ここでは曳航水槽と空洞水槽を用いて行った、鉛直壁面上におけるマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に関する実験結果を示す。

$L \times B \times d = 4.0\text{m} \times 0.062\text{m} \times 0.6\text{m}$ (平行部長さ 3.0m) の鉛直壁模型を作成し、曳航水槽において抵抗試験を行った。気泡吹き出し部は平行部開始位置より 100mm 後方に置かれ、鉛直方向に均一な気泡吹き出し状態が得られるように調整されている。気泡吹き出し部には、孔径 1mm の吹き出し孔をピッチ 10mm の千鳥格子状に配した配列多孔板を使用した。配列多孔板は吹き出し孔が鉛直壁面に対し垂直に開いた BM と、30° 下流側に向けた RM の二種を用意した。気泡吹き出し量、航走速度、多孔板を変更した抵抗試験の結果を、平均ボイド率 α_m

を横軸に、気泡有り全抵抗 C_x と気泡無し全抵抗 C_{x0} との比を縦軸にとり整理して、Fig.5 に示す。多孔板 BM を使用した場合、航走速度によらず気泡を吹き出すと抵抗は増加し、気泡吹き出しがない場合に比べ最大約 7% の増加を示す。しかし航走速度が増すと、抵抗増加量は少なくなる。多孔板を RM に変更してもこれらの傾向は変わらない。しかし $V_w=3.0\text{m/s}$ などでは抵抗増加量は BM に比べ少なくなる傾向にある。

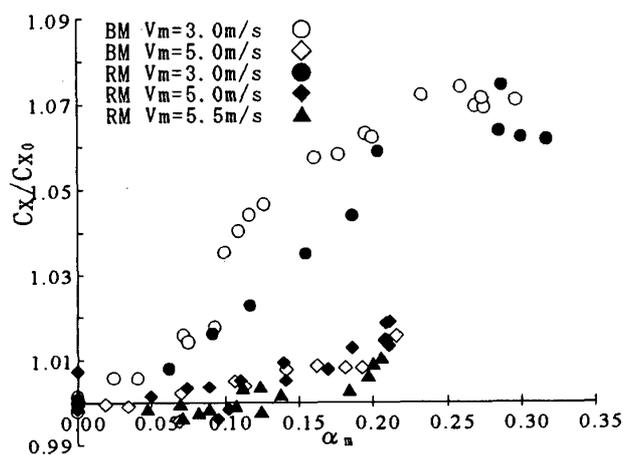


Fig.5 Resistance increase on the vertical wall model by microbubbles

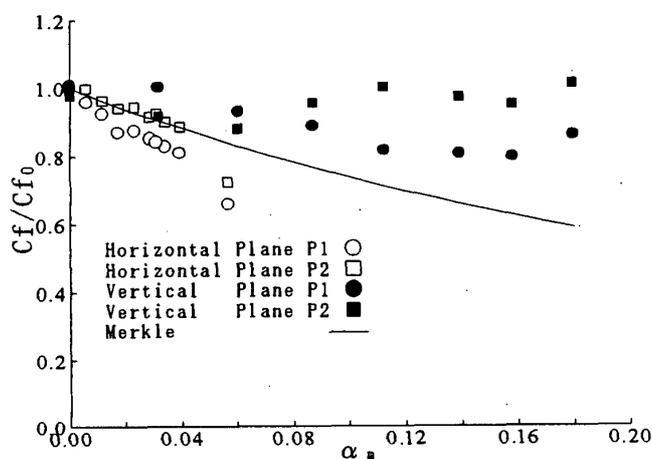


Fig.6 Skin friction reduction on the vertical wall by microbubbles

空洞水槽において、鉛直壁面の局所せん断力計測を行い鉛直壁面におけるマイクロバブルによる局所摩擦抵抗低減効果を検証した。気泡有り無しのせん断力計測結果の一例を Fig.6 に示す。P1,P2 はそれぞれ吹き出し部より 0.6m、1.85m 下流の位置を示す。Fig.6 には同一条件で行った水平下向き壁面でのせん断力計測結果、Merkle²⁾による実験式も示した。これより、鉛直壁面で

もマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果が認められることが分かる。しかし、水平下向き壁面に比べ摩擦抵抗低減効果は小さく、またその持続距離も短い。

以上により、水平下向き壁面のみならず鉛直壁面においてもマイクロバブルによる局所摩擦抵抗の低減が期待できることが示された。しかし一方では、鉛直壁模型全体としての摩擦抵抗低減は確認できず、逆に気泡吹き出しによって全抵抗が増加するという結果も得られている。この矛盾した結果の原因として、土井ら³⁾が述べているように、気泡吹き出しにより気泡吹き出し部において抵抗が増加していることが考えられる。これに加え、○摩擦抵抗低減効果の持続距離が水平壁面に比べ短い、○水平壁面と異なり、気泡の上昇による壁面近傍への気泡の集中（局所ボイド率の増加）が期待できない、○気泡の上昇により、鉛直壁模型全体を気泡で覆うことができない、等、鉛直壁固有の悪条件が重なり、抵抗低減効果が得られなかったものと推測される。

2.4 海水の影響

真水と海水の水質の相違により、生成気泡の大きさおよび摩擦抵抗低減効果に差があるかどうか調べるため、真水と海水を用いてマイクロバブル実験を行った。

使用した海水は駿河湾、伊豆あたりで採取され、物性値の測定結果は、塩分濃度 3.4%、密度 1.026g/cm^3 (摂氏 10 度) で、その他の物性値、表面張力、粘度、動粘度は、理科年表¹²⁾に示された真水のそれとほぼ同じであった。

2.1 節と同じ実験装置(小型高速流路、配列多孔板、局所せん断力センサ)、流速 ($U=5, 7, 10\text{m/s}$)、計測位置 (P2、P3、P4) で実験を行った。Fig.7 に流速 $U=7\text{m/s}$ 、計測位置 P3 ($X_a=1.0\text{m}$) での真水中と海水中の摩擦抵抗低減率を示す。両者にほとんど差は見られなかった。なお壁影響による C_{f0} 補正⁵⁾を行っている。図に示されないが流速 7m/s 、計測位置 P2、P4 では真水と海水の低減効果に若干の相違が見られたが、それ以外では差は見られなかった。すなわち、海水中と真水中では、低減効果に明らかな差は無いと言える。

海水と真水において、写真撮影により気泡径分布を計測した。流速 $U=7\text{m/s}$ 、計測位置 P2 における結果を Fig.8 に示す。海水中の方が気泡径が小さく、平均気泡直径は、真水で 0.73mm 、海水で 0.58mm であった。

以上の結果から、海水中では気泡径は小さくなるが、摩擦抵抗低減効果に有意な差は無いと結論された。

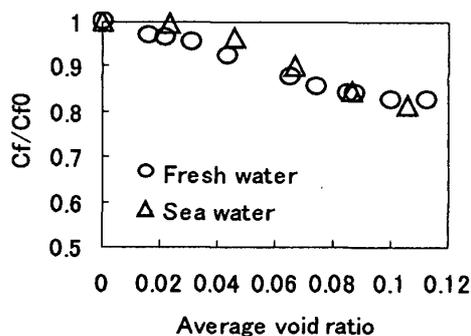


Fig. 7 Comparison of skin friction reduction effect by microbubbles in fresh and sea water ($U=7\text{m/s}$, P3)

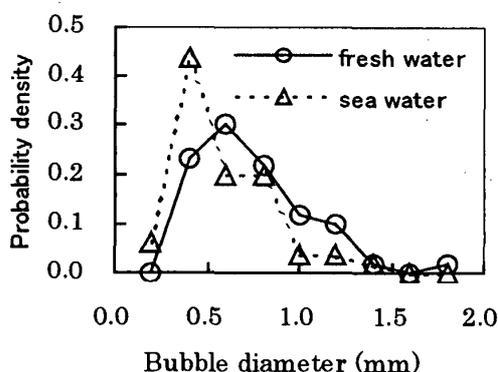


Fig. 8 Bubble diameter distribution in fresh and sea water ($U=7\text{m/s}$, P2)

2.5 気泡径の影響

実船において摩擦抵抗低減を実現するために、どの程度の大きさの気泡を吹き出さなければならないかは、気泡発生装置の設計と絡んで重要である。そこで東洋大学に設置された2次元回流水路を用いて、摩擦抵抗低減効果に対する気泡径の影響を調べた¹³⁾。

気泡の大きさは気泡を吹き出した位置の主流の速度に大きく依存する。2次元回流水路試験部の断面は $100\text{mm} \times 10\text{mm}$ で気泡吹き出し部も同一の寸法である。そこで新たに $100\text{mm} \times 5\text{mm}$ と $100\text{mm} \times 20\text{mm}$ の気泡吹き出し部を製作し、交換して実験できるようにし、同一の条件で気泡径のみ変えられるようにした。 $100\text{mm} \times 5\text{mm}$ の気泡吹き出し部では流速が大きいため直径の小さな気泡を、 $100\text{mm} \times 20\text{mm}$ の気泡吹き出し部では流速が小さいため直径の大きな気泡を発生させることが出来る。

結果を Fig. 9 に示す。図の縦軸は気泡を吹き出した場合の摩擦抵抗低減率を表している。平均ボイド率が3%の時は10%程度の、平均ボイド率が10%の時は30-40%の摩擦抵抗低減が得られているが、図に見られるよ

うに気泡直径を $0.4-2.2\text{mm}$ の範囲で変えても低減率はほとんど変化しない。すなわち、この気泡径の範囲では摩擦抵抗低減効果は平均ボイド率で決まってしまう。このことは実船における気泡発生装置の設計において、発生する気泡径の大きさをあまり考慮しなくても良いことを意味し、設計の制約条件が一つ減ったことになる。

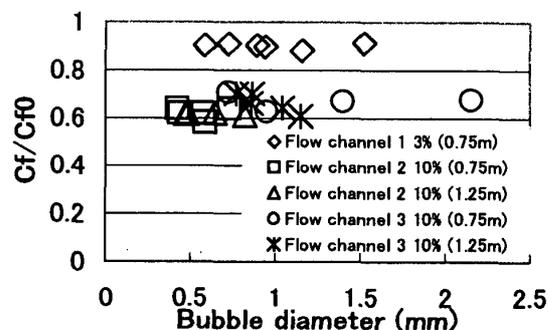


Fig. 9 Effect of mean microbubble diameter on frictional resistance reduction

2.6 気泡発生装置

気泡発生装置は、空気供給装置、気泡吹き出し口とこれらを連結する送風管によって構成される。空気供給装置として船首甲板上に配置した6台のコンプレッサから合計で $90\text{m}^3/\text{min}$ (3m水深の位置に吹出した場合)の圧縮空気が供給される。後編¹⁰⁾の3.1節で後述する計算法によれば速力約14ktにおいて目標達成に必要な空気量は $46\text{m}^3/\text{min}$ と予想されており、十分余裕のあるコンプレッサ容量となっている。この圧縮空気は、Fig. 10 に示すように送風管を介して各舷に設けた3ヶ所の気泡吹き出し口へと送られる。各送風管の途中には流量計が設置されていて、吹き出し口ごとの空気流量を個別に設定し且つモニターすることが可能である。吹き出し部は、2.12節で後述する南星丸の検討結果を踏まえ水平設置方式とした。その設置位置は、後編¹⁰⁾の3.1節で述べた計算法で検討した最適配置を参考に、1)溶接取り付け許可範囲(FPから約6.5m後方のフォア・ピーク・バルクヘッドまで)に収まること、2)SS9付近のバウスラスタに気泡が混入しないこと、3)設置工事の際に船名の名盤および喫水マークなどに損傷を与えないこと、4)入出港時に降ろすアンカーによる送風管破損の危険が無いこと、などに配慮して Fig. 10 のように決定した。

吹き出し部の断面形状を Fig. 11 に示す。船体表面に $100\text{mm} \times 20\text{mm}$ の鋼製の角パイプを設置し、その外面に直径 2.4mm の空気吹き出し孔がパイプの軸方向に 10mm 、これに直交する方向に 5mm のピッチで千鳥状

に配置している。また、吹出した空気が船体表面に沿って剥離を起こさず滑らかに後流へ流れ去るように角パイプの前後に整流板を設けた。その傾斜角は 2.10 節で後述する長尺模型試験にて実験的に検討し、上流側(α_1)を 1/10、下流側(α_2)を 1/20 とした。

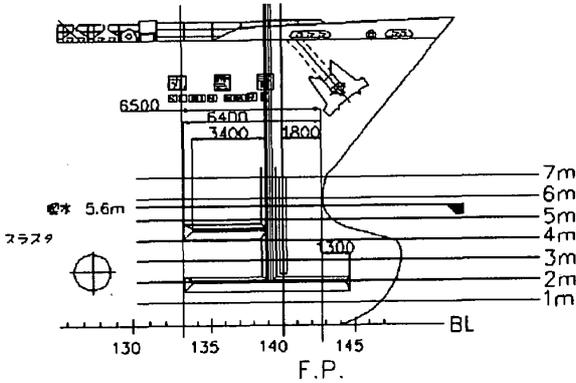


Fig.10 Bubble injection device
(Port Side: ①②③, Starboard Side:④⑤⑥)



Fig.11 Sectional Plane of Bubble injection

このように計画した気泡発生装置を実機と同寸で試作し、予備実験を実施した。その概要を Fig.12 に示す。同実験により、所定の流量の気泡が発生することを確認すると共に、実船取り付け状態で均一な吹き出しが得られるよう、吹き出し孔の配置を調整した。

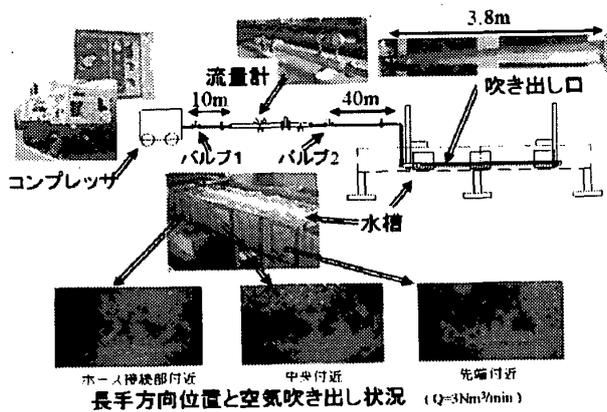
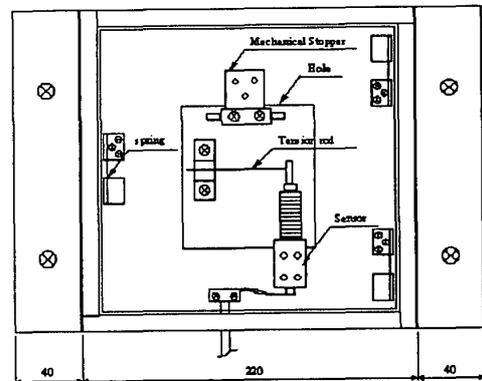


Fig.12 Schematic of air bubble injection test

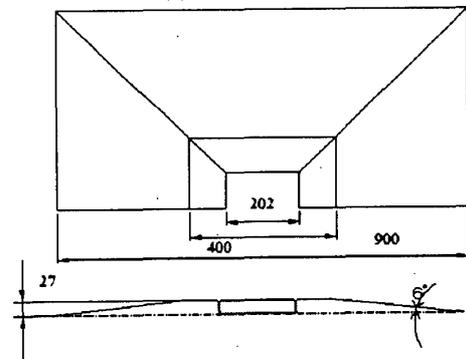
2.7 局所せん断力計の開発

船体表面の局所せん断力を計測する方法としてはいく

つかの方法が考えられたが、気泡の影響が出にくいことや小型の装置が模型試験で使われていることなどを考慮しフローティングエレメント (周りの表面との小さい隙間を持った面を力計測装置によって支え直接せん断力を計測する) 形式を開発することとした (詳細は戸田ら¹⁴⁾ 参照)。実船実験では、計測する力が小さすぎる装置であれば、取り付け工事中等実験室での実験と異なる環境での問題が考えられたこと、出力が小さすぎると雑音の問題があること及び計測板と周りの表面との隙間の精度などを考え、ある程度の計測面積を持ったものとして 200mm×200mm の計測板を用いることとした。これは青雲丸の垂線間長の 0.2% に相当する。また青雲丸の船速を考慮し摩擦力を推定した結果、せん断力計容量は 5 N (ニュートン) と決定した。既存の船体に貼り



(a) main sensor



(b) fairing plate (upper half)

Fig. 13 Local shear stress sensor

付けることを考慮し厚みはできるだけ小さくし 27mm とした。最終的に使用した装置の概略を Fig.13 に示す。

Fig.13 に示すようにフェアリング板を取り付け船体表面と滑らかにつながるようにしている。ここで開発した局所せん断力計の予備実験として弓削船高等専門学校の小型教習艇「はまかぜ」を用いて局所せん断力計が埋め込まれた長さ 3.72m の平板を曳航することにより、実海中での航走によるせん断力の計測を行った。その結果海中での作動に問題がなく、±5% 程度の精度でシ

ェーンヘルの式による値と一致しており、実船で使用可能と判断した。また、2.10節で示されるように、本せん断力計の性能試験を長尺平板船を用いて行った。Fig.14に、長尺平板船にせん断力計およびフェアリングを取り付けた状態を示す。その結果、Fig.24に示されるように、従来の模型試験用せん断力計と比べて若干高めに計測されたが、これはフェアリングにより境界層が薄くなった効果と考えられる。しかし速度に対する変化は、模型試験用せん断力計のそれとほぼ同じであり、また、Fig.25に示されるように、気泡流量増加によるせん断応力低減も計測できており、実船においても計測可能と判断し、実船局所せん断力計7台を製作した。

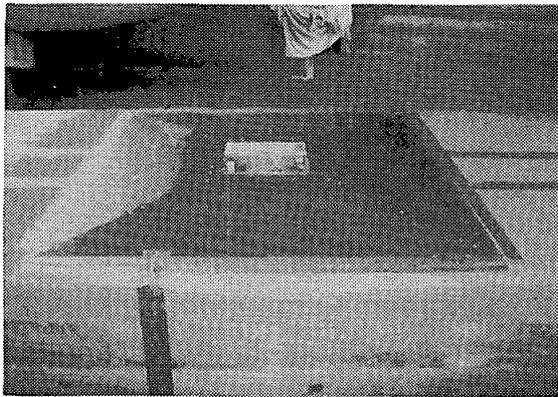


Fig.14 Local shear stress sensor on the long flat plate model for preliminary experiment

2.8 局所ボイド率計の開発

実験室レベルの実験で行われる気泡分布の計測法には、一般に気泡サンプル法、光ファイバー法が使用されるが、複雑であり実船実験に適しているとはいえない。実船実験においては、簡単でロバストな方法が望ましいと考えられる。

そこで一定体積の水流中に存在する気泡の直径と数を CCD カメラにより撮影し、画像解析により局所のボイド率を計測するボイド率計を新たに開発した。この方法ではキャリブレーションを行うことなしに気泡の大きさや個数分布を計測できる。

ボイド率計は翼型形状のストラットで、長さ 400mm、幅 55mm、高さ 100mm である。Fig.15 にその原理を示す。ボイド率計には小型の CCD カメラと LED ストロボが内蔵されており、側面の窓から水流中の気泡を撮影できる。その際撮影する体積を一定にするため、窓から 10mm の位置に遮蔽板を置いている。ストロボからの光を直角に曲げ、下方から気泡を照らすように遮蔽板の下端は 45 度に曲げられている。このボイド率計(ストラット

ト)を船体表面に垂直に取り付けた。また流れが滑らかに側面の窓のところに来るように、ストラットの周囲にフェアリングを取り付けている。

実船実験を実施する前に、このボイド率計の構造が問題なく機能するの確かめるために、2.10 節(2)に示されるように、海上技術安全研究所の 400m 試験水槽にて模型船を使用し予備実験を行った。模型船は全長 34m・幅 1m あり、船首から 8~14m 部分に気泡吹き出し部が取り付けられている。ボイド率計は、模型船の 26~27m 部分に取り付けた。また模型船は牽引車によって曳航し実験を行った。Fig.16 は模型船に取り付けたボイド率計の写真である。

予備実験の測定結果の一部を Fig.17 に示す。実験条件は流速 5m/s、気泡吹き出し流量 400L/min であり、気泡吹き出し部のフェアリングが NMRI(高度フェアリング)と MHI(実船実験仕様フェアリング)の 2 種類である。局所ボイド率の計測結果では、両フェアリングの差は小さく、船体表面から 15mm 程度までの値が高くなっており、それより離れたところでは値は低くなった。またこの予備実験では局所せん断力も計測され、その低減効果が確認できた。

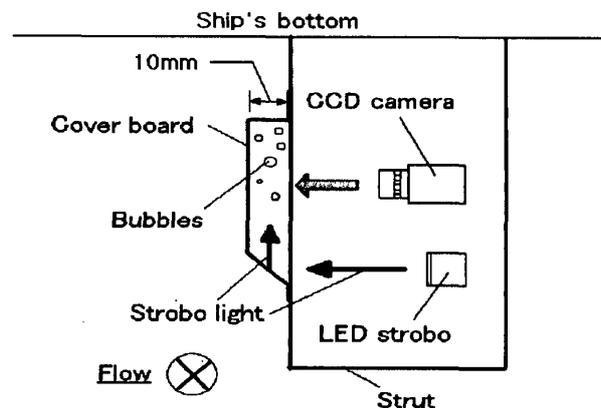


Fig.15 Measurement principle of void measuring device

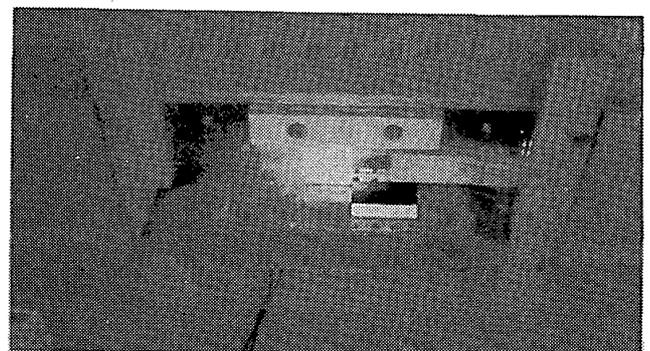


Fig.16 Void-measuring device attached on the bottom of model

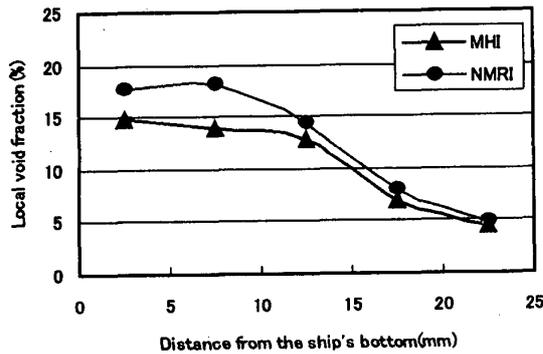


Fig.17 Distribution of local void fraction
($v=5\text{m/s}$ $Q=400\text{L/min}$)
NMRI: 高度フェアリング
MHI: 実船実験仕様フェアリング

2.9 配線フェアリング

実船実験では種々の計測器のための配線が船体外板に取り付けられる。これらによる気泡流の乱れ、摩擦抵抗低減効果の減少を回避するため、配線にフェアリングを施すことを検討した。

配線フェアリングの評価は、水平壁面下でマイクロバブルを発生した場合の、フェアリング下流における局所せん断力を、フェアリングが無い場合と比較することにより行った。空洞水槽観測部上面に気泡吹き出し部を設け、その下流 0.3m の位置にフェアリング模型を、1.85m の位置にせん断力計を置き、局所せん断力を計測した。

計 10 種の配線フェアリングを検討した結果、配線フェアリング下流の摩擦抵抗低減効果には、上・下流側のフェアリング傾斜よりもフェアリング高さの方が大きな影響を持つことが分かった。以上を考慮して選定した代表的な配線フェアリングの断面形状を Fig.18 に示した。Type B1 は、数本のケーブルをまとめて覆うことを念頭に置いたフェアリングである。Type Y は、最も細いケーブル($\phi 4\text{mm}$)単独の場合について、ケーブルを外板に接着剤で直接固定することを想定した形状である。更にそれをパテでフェアリングした形状が Type Z である。Type Y,Z は Type B1 に対し、実船で容易に工作できるフェアリングとして考えられた。

Fig.19 にこれらのフェアリングの下流における摩擦抵抗低減効果を示す。Type B1 はフェアリング無しの場合よりは悪化するものの、Merkle の実験式と同程度、もしくはそれ以上の抵抗低減効果を持つ。Type Y はフェアリング無しの場合(None)と同等の摩擦抵抗低減効果を有し、フェアリングによる影響は殆ど認められない。Type Z も None と同等の摩擦抵抗低減効果を有する。

以上により、配線フェアリングの工作性も合わせ考えると、配線が気泡流を横断すると予測される範囲では Type Z または Type Y でフェアリングを行い、それ以外の範囲でも Type B1 程度の形状でフェアリングすることが望ましい。

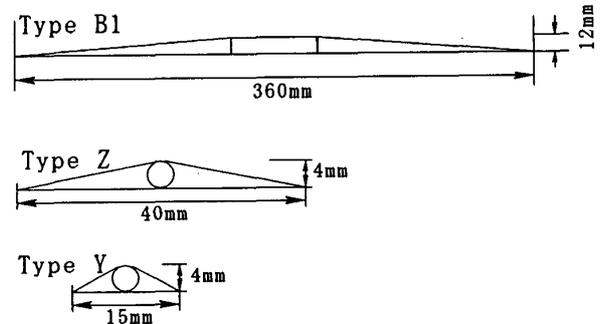


Fig.18 Cross-sectional forms of the typical wire fairings

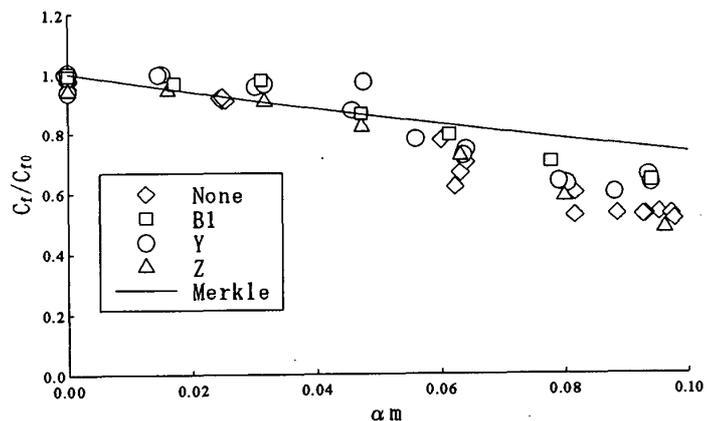


Fig.19 Skin friction reduction at downstream of the wire fairings by microbubbles

2.10 長尺平板船実験

(1) 尺度影響実験

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の尺度影響、すなわち実船に近いスケールでどの程度得られるか調べるため、海上技術安全研究所の 400m 水槽において長さ 50m 幅 1m の長尺平板船を最高速度 7m/s で曳航し、マイクロバブル実験を実施した。

Fig.20 に長尺平板船を示す。気泡吹き出し部には、幅 500mm 長さ 100mm で直径 1mm の孔が幅方向 3mm ピッチ長さ方向 5mm ピッチで合計 3300 個開いている配列多孔板を使用した。気泡吹き出し部は、船首端から 3m 及び 31m の 2ヶ所に設けた。局所せん断力計は 2.1 節と同じものを用いた。

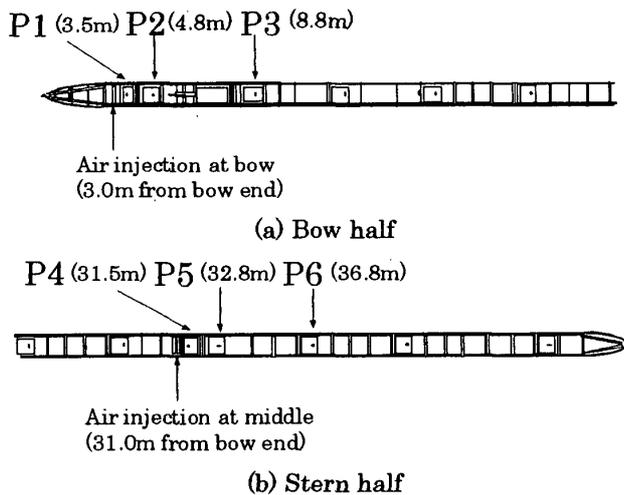


Fig. 20 The 50m-long flat plate ship for large-scale experiments

船首側1ヶ所から気泡を吹き出した場合の平板船の全抵抗低減率を Fig.21 に示す。横軸は、吹き出し部面積と曳航速度で無次元化した吹き出し空気流量 q 、縦軸は気泡有無での全抵抗比 R_t/R_{t0} を示す。実船実験に相当する速度 7m/s における最大の抵抗低減率は約 10%であった。これは、吹き出し部下流の気泡被覆部分の摩擦抵抗低減率に換算すると、約 22%に相当する。

速度 7m/s において船首吹き出し状態における局所せん断力低減率の船長方向分布を Fig.22 に示す。横軸は、船首端からの距離、縦軸は、気泡有無状態の局所摩擦係数比 C_f/C_{f0} である。吹き出し位置から後方に行くと急激に摩擦低減効果が減少するが、約 40m 下流の最下流位置でも若干の低減効果がみられた。

実船実験における気泡発生装置の配置を決定するための参考データとして、境界層厚さの異なる2カ所から気泡を吹き出し、摩擦抵抗低減効果を比較した。速度 7m/s における結果を Fig. 23 に示す。両者の摩擦抵抗低減効果はほぼ同じであり、吹き出し位置における境界層厚さの影響は小さいことがわかった。

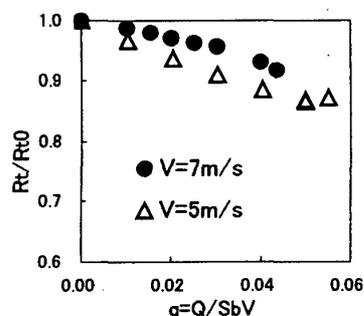


Fig.21 Reduction of total drag of the 50m-long ship by microbubbles (bow injection)

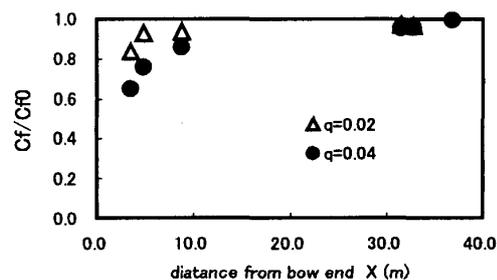


Fig.22 Local skin friction reduction distribution ($V=7\text{m/s}$).

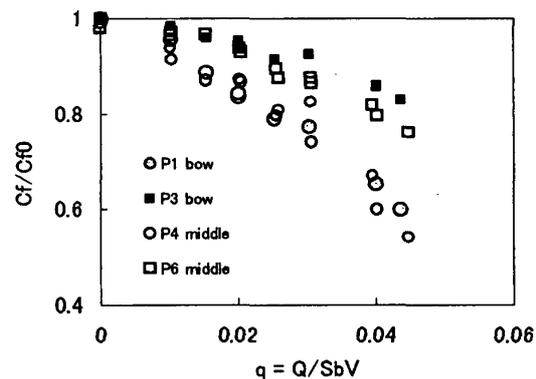


Fig.23 Effect of boundary layer thickness at injection point on skin friction reduction by microbubbles ($V=7\text{m/s}$)

(2)実船実験の予備実験

実船実験において船体表面に外付けされる2.6節から2.9節の気泡発生装置、局所せん断力計、局所ポイド率計、配線フェアリングが所定の性能を発揮することを、実船に出来るだけ近い状態で確認するため、海技研の400m曳航水槽において、Fig.20の50m長尺平板船の平行部を短縮した長さ34mの長尺平板船を用いて予備実験を実施した。

気泡発生装置は長さ2.3mであり、境界層がある程度厚くなった船首から $X=11.5\text{m}$ の位置にその中心がくるよう、また、実船の気泡発生装置取り付け位置で予測される下向きの流れに対応するため主流方向に対して約13度斜めの状態で、実船の場合と同様なフェアリング付きで取り付けられた。気泡発生装置のフェアリングは、Fig.11に示した実船実験仕様フェアリングと、さらになだらかな傾斜をもつ高度フェアリングの2種類を準備し、それぞれについて計測を行った。Fig.24とFig.25の結果は、実船実験仕様フェアリング付きの場合を示す。局所せん断力計(Fig.24のOsaka)と局所ポイド率計も、同様なフェアリング付きで、それぞれ気泡発生装置中心位

置から下流 $X_a=13.6\text{m}$ および下流 $X_a=15.4\text{m}$ に取り付けられた。配線フェアリングの性能確認の際は、局所せん断力計と局所ボイド率計を取り外し、局所せん断力計の位置に取り付けた。

Fig.24 に気泡吹き出し無し状態でのせん断力の計測結果を示す。F1~F5 は、比較用に取り付けられた、従来型のせん断力センサーである。曲線は、それぞれ F1、F3、F5 の位置に対応した対数則に基づく C_f 推定値¹⁶⁾ である。F1($X=3.5\text{m}$)を除いて、気泡発生装置の上流にある F2($X_a=6.7\text{m}$)、下流にある F3($X_a=5.3\text{m}$)、F4($X_a=9.3\text{m}$)は推定値ともよく対応している。局所せん断力計(Osaka)の値は従来型センサによる計測値とよく対応している。局所ボイド率計の下流にある F5($X_a=19.3\text{m}$)の値は、フェアリングの後流の影響を受けたためか、やや低い。

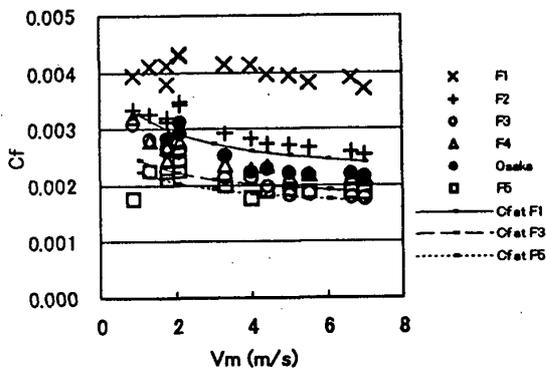


Fig.24 Local skin friction measurement (without bubble)

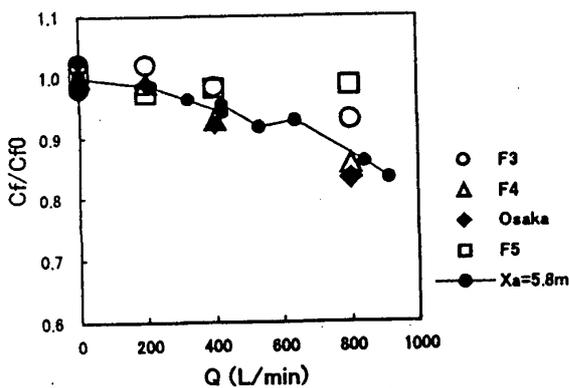


Fig.25 Local skin friction measurement with bubble ($V=7\text{m/s}$)

速度 7m/s において気泡吹き出し状態での局所せん断

力の低減効果を Fig.25 に示す。その結果 F3、F4、Osaka は、以前に埋め込み式の従来法で気泡を発生させた結果、図中のライン(吹き出しからの距離 $X_a=5.8\text{m}$)と良く対応しており、実船で使用予定の外付けの気泡発生装置が、従来法と同じ性能を持っていることが確認された。配線フェアリングについてもその性能が確認された。なお、高度フェアリング付きの場合は、抵抗低減効果が Fig.25 とほぼ同じか若干良好な結果を示した。配線フェアリング TypeB1 についても所定の性能を有することが確認された。

2.11 接着工法

実験船の船底外板への溶接が制限されるため、接着剤による計測機器と付属ケーブルの接合、装着及びフェアリングを検討した¹⁶⁾。

接着剤を選定するために、各種金属用接着剤の接着力を引張り試験により調査した結果、エポキシ系とアクリル系の接着剤が適用の可能性があることが認められた。これらの接着剤を用いて、小型船(9kt)とモーターボート(22kt)の船底へ計測器模型とケーブルを装着、フェアリングして耐久航走実験を行い、適用する接着剤と工法を決定した。選定された接着剤の特性を Table 1 に、接着工法手順を Fig. 26 と Table 2 に示す。

Table 1 Characteristics of the adhesive

Type	2(A/B) acrylic components	HARDLOC C-355 (DENKIKAGAKU CO.)
Pot life	5 min.(at20°C)	Mixing ratio : A/B=1/1
Curing time	20 min. (at20°C)	Reaching to 9.8N/cm ² by bonding strength
Adhesive strength (at20°C)	58 kN/0.01 m ²	Shearing strength (Adhesive layer : 1mm)
	11 kN/0.1m	Cleavage strength (Adhesive layer : 1mm)

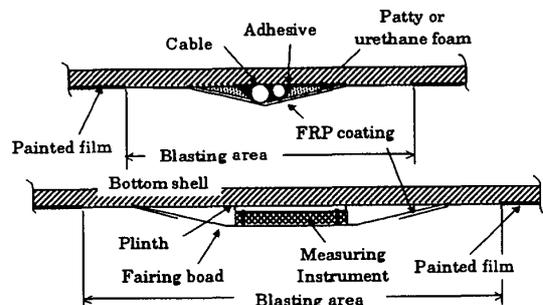


Fig. 26 Bonding and fairing by adhesive

Table 2 Adhesive bonding method

Process	Procedure
Surface preparation	Painted film to be removed with blasting
Bonding of plinth	Bond the plinth for installation of instruments by adhesive with magnetic retainer
Installation of instrument	After one hour handling strength achieved, install the instrument and the fairing board.
Bonding of cable	Bond the cables by adhesive and fair them with patty and urethane foam
FRP coating	Coat the fairing board and the bonded cables with FRP

2.12 南星丸を用いた予備実験

これまでの水槽実験は基本的に2次元形状を対象としているが、3次元曲面である船体でも水槽実験のように船体表面に沿って気泡が流れるかどうかを確認するために、鹿児島大学の実習船「南星丸」を用いた予備実験を実施した¹⁷⁾。南星丸は垂線間長さが21.7m、幅5.7m、喫水2.1mの小型の漁業実習船である。気泡発生装置はヘルメット型断面をした塩ビパイプ（高さ7.5mm、幅45mm）に直径1.2mmの小孔を5mm間隔に、千鳥状に2列に開孔したものを、右舷側はSS8の船底にガス方向に約2m、左舷側は、船側の水面近くに船首端部からSS8にかけて水線に平行に約4mを配設した。

実験は錦江湾で実施した。実験時の船速は9ノットと7ノットで、気泡の船底の流れをビルジキールに取り付けた水中ビデオカメラで観察記録した。観察結果の1例として、右舷側の気泡発生直後のSS7 1/2付近の流れをFig.27に示す。白い雲状になっているのが気泡である。左舷側でも同じような気泡な流れが観察された。また、

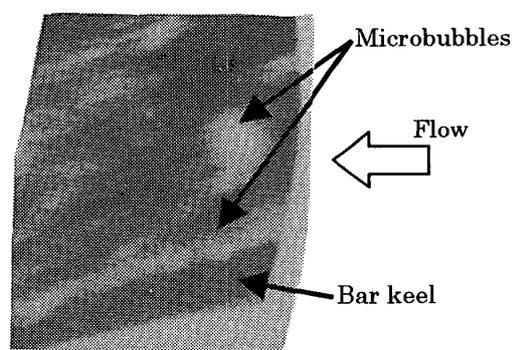


Fig.27 Microbubble flow observed at bottom of NANSEI MARU

船体中央や船尾に取り付けたカメラの観察結果から、船首船側部で発生した気泡は船底に流れ込み、下流に行くに従って気泡層の厚みを増しながら、船体表面に沿って船尾まで流れていることが確認できた。

3. 結論

マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果に関して以下の知見を得た。まず、直径1mmの孔を多数開けた配列多孔板を用いた気泡発生によって、従来の多孔質板に比べて圧力損失が1/2~1/8と小さくなると同時に同等な摩擦抵抗低減効果が得られ、実船における気泡発生法として有効であることを確認した。次に圧力勾配や曲率をもった壁面における低減効果を計測し、船体前半部に相当する圧力勾配や曲面(順圧力勾配)では摩擦抵抗低減効果が減少し、船体後半部に相当する圧力勾配や曲面(逆圧力勾配)では効果が増加する傾向にあるという結果が得られた。さらに、浮力による気泡の壁面保持効果が期待できない鉛直壁鉛直壁面においては、水平壁面の場合に比べて摩擦抵抗低減量は小さく持続距離も短い、摩擦抵抗の低減効果自体は存在するという結果が得られ、実船において船側部に気泡が流れた場合にも摩擦抵抗低減効果が得られると期待された。そして海水を用いた実験では、海水中では、清水中に比べてマイクロバブルの径は小さくなるものの、摩擦抵抗低減効果への影響は殆ど無いという結果が得られた。そして気泡直径を0.4mm~2.2mmまで変化させた実験では、摩擦抵抗低減効果は殆ど変化せず、実船用気泡発生装置の設計では発生する気泡径の大きさをあまり考慮しなくても良いと考えられた。

実船実験で使用する配列多孔板方式の気泡発生装置を、船首部に片舷ずつ3カ所に、水深差による吹き出しの偏りを避けるため水平方向に設置するよう設計・製作し、実船実験用コンプレッサを使用して予備実験を行い、気泡発生性能を確認するとともに、均一な吹き出しが得られるよう吹き出し孔配置を調整した。

実船実験用の局所せん断力計と局所ボイド率計を独自開発し、局所せん断力計については小型高速艇と長尺平板船を用いた実験により耐久性と計測性能を、局所ボイド率計については長尺平板船を用いた実験により計測性能を確認した。

海技研の400m曳航水槽において、長さ最大50mの平板船を用いた超大型実験を実施し、速度7m/secにおいて全抵抗の約10%の低減効果が得られた、吹き出し位置から40m下流でも摩擦低減効果が見られた、同一平

均ポイド率状態で高速ほど低減効果が減少した、低減効果は吹き出し位置の境界層厚さに殆ど依存しないなど、尺度影響に関する実験データを得た。また、実船実験に使用する気泡発生装置、局所せん断力計、局所ポイド率、配線フェアリングについて、それらの性能を出来るだけ実船に近い状態で確認するため、長尺平板模型にこれらの機器を取り付け、実船実験と同じ7m/secの曳航速度で実験を行い、これらの機器が十分な性能を有することを確認した。

実船実験において計測機器(と付属ケーブル)の船底外板への装着に使用する接着剤を選定するために各種金属用接着剤の接着力を引張り試験により調査し、小型船とモーターボートを使用して接着工法の試行と耐久実験を行い、適用する接着剤と工事要領を決定した。

以上に示したように、実船実験に即した準備研究がていねいに行われた。そして、実験データは第2編に示す実船性能推定法の基礎データとして用いられ、気泡発生装置や計測機器は実船実験において用いられ、一部に故障があったものの、ほぼ当初の予定通り実船実験を行うことができた。

謝 辞

本研究は日本財団の助成を受けた(社)日本造船研究協会 SR239 研究部会の「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」(H10~13)として実施された。

大阪大学大学院工学研究科鈴木敏夫教授、三井造船(株)昭島研究所上入佐光博士、(株)IHI エアロスペース吉田有希博士には、本研究の遂行にあたって重要な貢献をして頂いた。本来ならば著者として名前を連ねて頂くべきであるが、著者数が多く、謝辞を以て代えさせて頂く。

参考文献

- 1) McCormick, M.E. and Bhattacharyya, R. : "Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis", Naval Engineers Journal, Vol.85, No.2, pp. 11-16, 1973.
- 2) Merkle, C. and Deutsch, S. "Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection", Progress in Astronautics and Aeronautics, vol.123, 1990, AIAA, pp.351-412.
- 3) 土井康明、茂里一紘、堀田多喜男 : 微小気泡による摩擦抵抗の低減、日本造船学会論文集 第 170 号, 1991, pp.55-63.
- 4) Kato, H. et al., "Frictional Drag Reduction by Injecting Bubbly Water into Turbulent Boundary Layer", Cavitation and Gas Liquid Flow in Fluid Machinery and De-vices, FED-vol.190,ASME, 1994, pp185-194.
- 5) 高橋孝仁、角川明、児玉良明 : 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第 182 号, 1997, pp.1-8.
- 6) 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第 183 号, 1998, pp53-63.
- 7) Fukuda, K. et al., "Frictional Drag Reduction with Air Lubricant over Super Water Repellent Surface (2nd report)-- Resistance Tests of Tanker and High Length-to-beam-ratio Ship Models --", 日本造船学会論文集第 186 号, 1999, pp.73-81.
- 8) Kodama, Y. et al., "Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction.", Int. J. of Heat and Fluid Flow vol.21, 2000.
- 9) SR239 研究部会 : 「船舶の摩擦抵抗低減に関する研究」成果報告書、日本造船研究協会、2002 年。
- 10) 永松哲郎他 : 青雲丸を用いたマイクロバブルの摩擦抵抗低減実船実験一後編: 実船実験一、日本造船学会論文集 本号、2002 年。
- 11) 川北千春、高野真一 : 流れ方向圧力勾配と曲面形状がマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響、日本造船学会論文集第 188 号、2000、pp11-21.
- 12) 東京天文台編集 : 理科年表、丸善株式会社。
- 13) Moriguchi, Y. and Kato, H. : Influence of microbubble diameter and bubble distribution on frictional resistance reduction by microbubbles, JMST vol.7, No.2, pp.79-85, 2002 (to be published).
- 14) 戸田保幸、鈴木敏夫、湯田紀男、岩下智也、李充石、角川 明、高橋孝仁、東島鎮 . : 実船実験用局所せん断力計の開発、関西造船協会 2002 年度秋期講演会前刷集(関西造船協会論文集第 239 号掲載予定 2003.3)
- 15) 生井武文、井上雅弘 : 粘性流体の力学, 理工学社, pp.149,(5.116)式.
- 16) 山下和春、永松哲郎、上入佐 光 : 接着工法による船体外板への機器の装着、西部造船会会報 104 号掲載予定、2002.9
- 17) 永松哲郎、吉永圭輔 : 実船実験によるマイクロバブルの観察、西部造船会会報、第 102 号、2001、PP.133-140.