

# SR 239

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

## 第239 研究部会

### 船舶の摩擦抵抗低減に関する研究

### 成 果 報 告 書

平成14年3月  
法人 日本造船研究協会

# SR239 船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究

## 成果報告書正誤表

正	誤
<ul style="list-style-type: none"><li>• 2 P 12行目へ 2.1 「摩擦抵抗…………の 関係」を貼付け</li><li>• 7 P 下から 6 行目 <math>2.5\text{m}^3/\text{h}</math></li><li>• 23 P 図2.2.2 50m</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2 P 2行目の 2.1 「摩擦抵抗…………の 関係」を削除</li><li>• 7 P 下から 6 行目 <math>2.5\text{m}^3/\text{min}</math></li><li>• 23 P 図2.2.2 50n</li></ul>

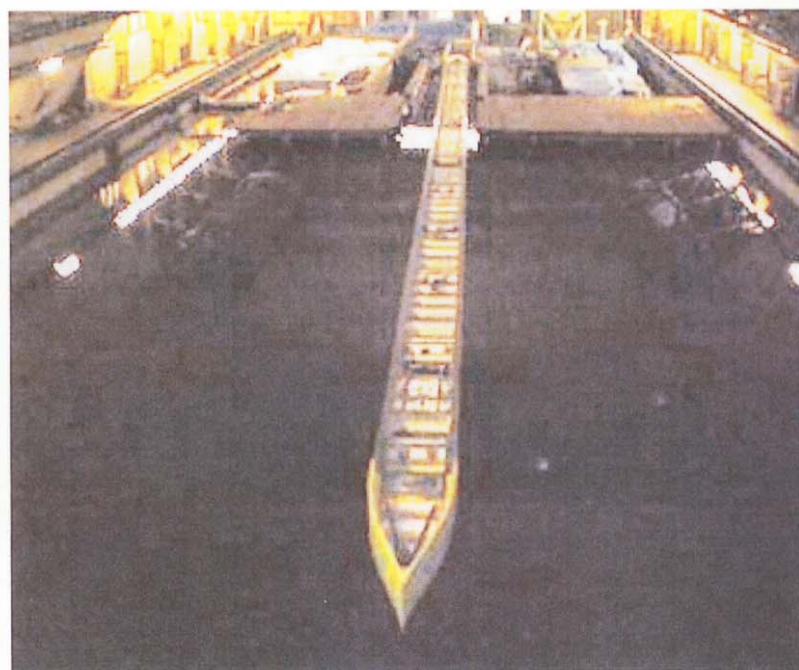


図 2.2.1 海技研 400m 水槽トリムタンクからはみ出した 50m 平板船



図 3.1 高速回流水槽試験



図 3.2 超大型模型船試験



図 4.1.1(a) 回転円筒試験装置の外観

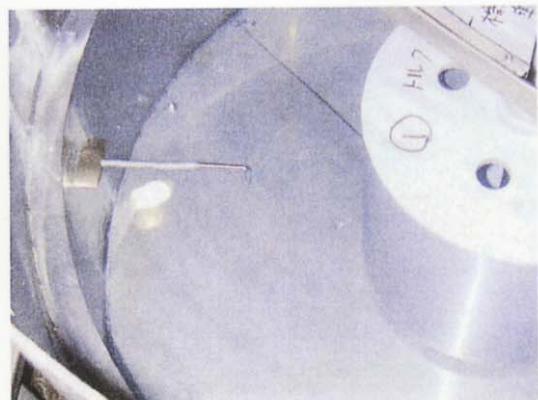


図 4.1.1(b) 回転円筒試験装置の内部  
(右側が供試円筒)



図 5.2.1 実船実験供試船「青雲丸」



図 5.3.1 南星丸で観察された  
マイクロバブルの流れ



図 5.1.1 空気吹き出し位置

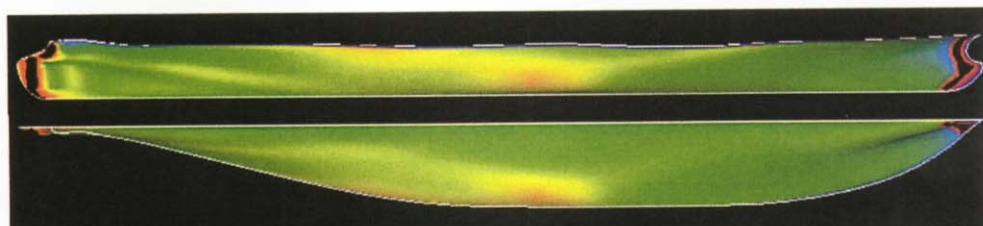


図 5.1.2 Cf0 分布計算結果（空気を吹き出さないとき）



図 5.1.3 Cf 分布計算結果（空気を吹き出したとき）

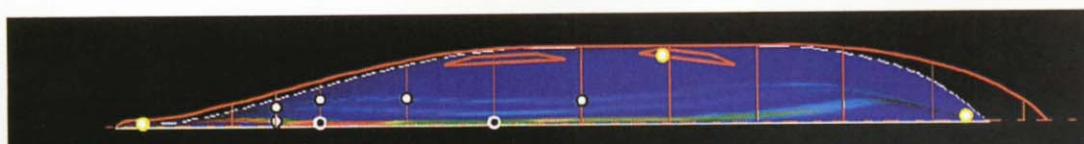
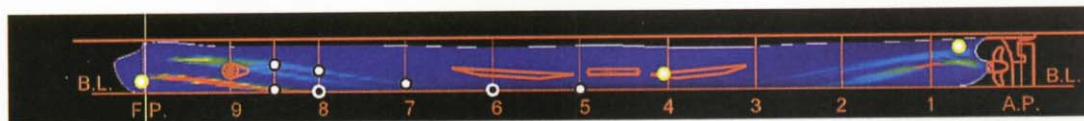


図 5.1.4 推定された壁面近傍ポイド率分布と各種計測機器取り付け位置

図中の記号 黄色：TVカメラ 白色：局所せん断力計 白縁黒：局所ポイド率計+局所せん断力計



図 5.5.6 青雲丸の船首に取り付けられた気泡発生装置

図 5.5.7 船体に取り付けた局所せん断力計



[船首気泡吹出し部を見上げた映像] [BKから船尾方向を観察した結果の模式図]



[プロペラ付近の観察映像(右)と説明図(左)]

図 5.5.6 14 ノット、気泡吹出部①&④、流量 MAX の条件における気泡流れ観測結果

# SR239 「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」

## 要 約

### SHIP RESEARCH PANEL 239 Research on the Reduction of Frictional Resistance of Ships

For further energy saving by the reduction of propulsive power of ships, researches are needed to study on how to reduce frictional resistance. In this research panel, three kinds of means for the reduction of frictional resistance, namely micro-bubbles, air-sheet and surface treatment are picked up, and four-year investigations were carried out to develop estimation procedures of the amount of frictional resistance reduction in full-scale performance.

In the final year, full-scale measurements of the effect of micro-bubbles on frictional resistance reduction were performed by using M.S. "Seiun-maru", a training ship owned by the Institute for Sea Training. The reduction of frictional resistance was recognized in some of the measured items in some cases of the test. Micro-bubbles were injected from the side of the bow, and reduction of frictional resistance seems to depend on the position of the bubble injection.

#### 1. 研究の目的と狙い

船舶の省エネ対策の最重要項目である推進性能向上については、造波抵抗や粘性圧力抵抗(形状抵抗)は十分に低減されており、実用上有効な低減技術が殆どない摩擦抵抗の低減が望まれて居る。近年、乱流境界層の研究が進んで摩擦抵抗の低減法が幾つか発表されており、船舶についても基礎的な研究がされているが、摩擦抵抗低減のメカニズムは十分に解明されて居らず実用レベルには達していない。本研究部会発足に先立って摩擦抵抗低減に関する研究をレビューし、船舶への適用性が高く研究開発を進めるべき方法として下記 3 種を選定した。

- ① マイクロバブル法…微細気泡を境界層内に供給して摩擦抵抗を減らす。80%の低減が得られた実験例もある。抵抗低減のメカニズムは充分に解明されて居らず、相似則も確立していない。
- ② 空気膜法…船底を薄い空気膜で覆うことにより摩擦抵抗を低減する。薄い空気膜を維持する方法の開発が課題である。超撥水性塗膜との組み合わせが注目されている。
- ③ 表面処理法…防汚機能を有し摩擦抵抗低減が期待できる塗料として自己研磨型塗膜および撥水性塗膜がある。また、適度の密度と弾性係数を持つ弹性皮膜で覆うことにより摩擦抵抗が減少するという実験例もある。

これらの摩擦抵抗低減法の実船への適用の目処を得るために、平成 10 年より平成 13 年までの 4 年間に下記の項目について検討を実施した。

- ① メカニズムの研究とデバイスの考案…現象を支配する主要なパラメータを見出し、その影響を実験的に調査して、実船への適用可能なデバイスを考案する。
- ② 実船性能推定法の検討…上記の摩擦抵抗低減法の現象を支配する要因を抽出し、その尺度影響や相似則について検討し、模型実験や理論解析を組み合わせた実船の性能推定法を提案する。
- ③ 大型模型による実験…摩擦抵抗低減技術については実船性能の推定に不可欠な尺度影響についての知見が殆どないので、実験設備の許容範囲内で出来るだけ大型の模型で高速の実験を行う。
- ④ 実船実験…考案された摩擦抵抗低減法の効果と尺度影響を確認するために、実船実験を実施する。計測装置や計測法の開発を行って供試船に装備し、実海域での実験・計測を実施する。計測・解析の結果から、摩擦抵抗低減法による実船の省エネ効果を定量的に評価する。

## 2. マイクロバブル法に関する調査

### 2.1 摩擦抵抗低減特性の調査

実船に適用した場合に発生すると予想される各種の影響を調べるために、平板あるいは曲面模型に沿った流れにマイクロバブルを吹き込んだ状態において、

- (a) 平板模型全体に働く摩擦抵抗
- (b) 局部摩擦抵抗(平板上の極一部に作用する摩擦抵抗)
- (c) 局部ボイド率(水流中に含まれる気泡の体積割合)

などを計測する実験を、各種の条件で実施することによって

- 1) 壁面近傍ボイド率分布と摩擦抵抗低減の関係
- 2) 流れ方向圧力勾配と曲面形状が摩擦抵抗低減特性に及ぼす影響
- 3) 鉛直壁面における摩擦抵抗低減特性
- 4) 気泡径が摩擦抵抗低減特性に及ぼす影響
- 5) 摩擦抵抗低減特性に及ぼす水質の影響(清水と海水の相違)
- 6) 尺度影響および吹出し位置の境界層厚の影響

を調査し、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減の背景となる流体现象及び実船影響について多くの貴重なデータを得た。なお、6)は長さ 50m の平底模型を速度 7m/s で曳航するという、実船スケールに迫る規模で尺度影響に関するデータを収集したという意味で特筆に値する。

結果の概要をまとめると、以下の通りである。

- 1) 気泡吹出し位置の直後では壁面近傍の局所ボイド率が高いが、後流になるほど気泡の拡散が進んで壁面近傍の局所ボイド率が低下する。それに伴って局所摩擦係数の低減率も小さくなるが、下流へ 30m の位置でも有意な摩擦抵抗低減量が残っていることが確認された。
- 2) 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。
- 3) 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が、摩擦抵抗の減少効果自体は存在する。
- 4) 摩擦抵抗低減率はマイクロバブルの径には依存しないようである。
- 5) 海水中の方が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ほとんどない。
- 6) 吹出し位置の境界層厚さは摩擦抵抗低減量にほとんど影響せず、壁近傍のボイド率が主たる支配パラメータであると推察される。

### 2.2 実船性能推定法

マイクロバブル法に関する以上の知見を基に、概略以下のようにして摩擦抵抗比  $C_F/C_{F0}$  の計算手順を構築した。まず、船体周りの基礎流場を CFD コードにより計算する。この基礎流場を基に Larrarte の方法により気泡軌跡計算し、気泡軌跡から得られる局所の気泡体積を基に壁面近傍ボイド率  $\alpha_w$  を求める。壁面近傍ボイド率が求められたら、Yoshida et al. の方法により下式を用いてカルマン定数  $\kappa$  を修正し局所摩擦抵抗比  $C_f/C_{f0}$  を計算する。この  $C_f/C_{f0}$  を浸水表面で平均化して摩擦抵抗低減率  $1 - C_F/C_{F0}$  を得る。

$$\Delta\kappa = - \left( \frac{\nu_L / U_\tau}{d_b / a} \right)^2 \alpha_w$$

ここに、 $\nu_L$  は水の動粘性係数、 $U_\tau$  は摩擦速度、 $d_b$  は気泡直径、 $a$  は実験定数である。

マイクロバブルが摩擦抵抗以外の抵抗成分に影響を及ぼさないと仮定して有効馬力の低減量を求め、断熱圧縮過程であることを前提として算定した空気圧縮機の有効動力を差引いて、正味の馬力低減率を推定する。

### 3. 空気膜法に関する調査

船体表面を空気膜で覆うことによる船体の摩擦抵抗低減については多くの研究がなされており、空気膜を安定に保持することさえ出来れば摩擦抵抗が低減できるが、従来実績ではイーブンキール状態でのみ且つ 10 ノット以下の船速で摩擦抵抗低減効果が確認されていた。そこで、10 ノット以上の船速かつ船尾トリム状態においても摩擦抵抗を低減できる空気膜デバイスを考案すること、考案したデバイスの有効性と限界を確認すること、実船の性能推定法を提案することを研究目標とした。

#### 3.1 デバイス形状の検討

まず、高速回流水槽試験(最大流速 10m/s)を実施して、空気膜デバイスに関する基礎データ収集を行った結果、空気供給口より吹出された空気は、吹出口直後の「膜状気膜」から、雲状の気塊に分離した「雲状気膜」、さらには小さな気泡に分解した「気泡群」に変遷することなど、空気膜の性状の変化を把握し、空気吹出口の形状と高さのみならず、空気吹出口を長手方向に複数配置する場合にはその設置間隔もが空気膜保持性能の重要なポイントであることも分った。

これらの成果を踏まえて、最適と考えられる空気膜デバイス形状を考案した。

#### 3.2 超大型模型船試験による水槽試験

考案した空気膜デバイスの有効性を確認するために全長 16m の超大型平底模型船を用いた曳航水槽試験を実施した。イーブンキール状態における抵抗試験の結果、船速 7m/s(=13.6 ノット)においても約 20% の全抵抗低減が確認出来た。また、水中テレビカメラを用いた船底の空気膜状態観察結果と抵抗計測結果とから、「雲状気膜」や「気泡群」の領域においても、ある程度の摩擦抵抗低減効果があると推察された。さらに、船尾トリム状態(トリム角約 0.7 度)における抵抗試験の結果、考案された空気膜デバイスにより船速 7m/s において約 15% の全抵抗低減が得られた。

表面処理法の検討に使用した超撥水性塗膜を空気膜デバイス領域に塗布した場合についても試験を実施し、通常塗装の空気膜デバイスの場合より最大で 6% 全抵抗が減少することを確認した。

#### 3.3 実船性能推定法

超大型模型船試験結果を参考にして三次元外挿法をベースとした実船性能推定法を導出した。この方法は「実船船速が 7.0m/s(=13.6 ノット)における等価被覆面積率は超大型模型船試験結果から得られた等価被覆面積率(=0.7)に等しい」と仮定して構築されて居り、将来、さらに大きな模型船試験や実船試験を実施して検証を行う必要がある。一例として VLCC について試算を行った結果、満載状態で最大 8.4%、軽荷状態で最大 12.8% のエネルギー節約が得られる可能性が示された。

### 4. 表面処理法に関する調査

表面処理法については、自己研磨型塗膜・撥水性塗膜・弾性皮膜について、実験による摩擦抵抗低減メカニズムと低減効果の調査、および実船性能推定法の研究を実施した。

#### 4.1 自己研磨型塗膜・撥水性塗膜の抵抗低減効果の調査

自己研磨型塗料は、船が航走することにより表面が研磨されて粗度が低下し摩擦抵抗が低減する所以、効果を検出するには長時間にわたって塗膜を水流に曝す必要があり、通常の模型水槽試験では調査できない。本研究では回転円筒を用いた摩擦抵抗計測装置を開発し、一定期間実海水中で回転させた塗装済み円筒の表面粗度と回転トルクを計測することによって、自己研磨型塗料 9 種および撥水性塗料 2 種の摩擦抵抗特性を評価した。得られた主な成果は次のとおりである。

(a) 自己研磨型塗膜は研磨が進行するに伴って粗度が低下し、初期状態よりも摩擦抵抗が低減するが、

- 初期粗度が大きくなれば、エイジングによる粗度低下も摩擦抵抗変化も少ない。
- (b) 自己研磨型塗膜の表面粗度が研磨作用によって減少するが、ある値を下回ると粗度低下は停止して摩擦抵抗も変化しなくなり、本試験の供試塗膜では滑面の摩擦抵抗を下回ることはない。
  - (c) 粗度の大きい撥水性塗膜は、浸漬経時により生物が付着して撥水性が著しく低下するが、粗度の小さい塗膜は生物付着も撥水性低下も少ない。付着生物を除去すれば表面粗度の増大は僅かであり、摩擦抵抗もほとんど変化しない。

#### 4.2 自己研磨型塗膜・撥水性塗膜の実船性能推定法

回転円筒試験の結果から、実船の抵抗推定に使用する摩擦抵抗係数を推定する方法を構築した。すなわち、回転円筒試験内部の流れを計測した結果と壁近傍では壁法則が成り立つとして推定した乱流の速度分布とを対応付け、回転円筒試験で計測したトルクから円筒表面の等価砂粗度を推定し、White の式など用いることにより実船における粗度修正量  $\Delta C_F$  を推定する方法である。

#### 4.3 弹性皮膜の抵抗低減効果

完全乱流域における摩擦抵抗低減を実現したとする先行研究で使用された弹性皮膜の複素弾性率・比重・膜厚に近い性状のシリコーン樹脂製皮膜 3 種および合成ゴム製皮膜 4 種の試験体を製作して抵抗を計測したが、有意な摩擦抵抗低減効果は認められなかった。また、弹性皮膜まわりの乱流場計測やモアレ縞を利用した皮膜表面の変動計測を実施したが、摩擦抵抗低減のメカニズムに迫ることは出来なかった。しかし、摩擦抵抗低減の可能性は全く否定されたわけではなく、更に広い範囲で素材を探索することにより摩擦抵抗低減を実現できる可能性は残されていると思われる。

### 5. マイクロバブル法の実船実験

#### 5.1 実船実験計画

##### 5.1.1 供試船の選定経緯

平底船がマイクロバブル法に最適な船形であることは言うまでもないが、超低速平底船に適用し供給空気量当りの摩擦抵抗低減効果で評価すれば空気膜法が勝ると推察される。一方、マイクロバブル法では空気を貯める必要が無いので平底船以外にも適用できること、空気膜法より高速まで適用可能だと期待できることなどから、痩せ型船形もターゲットに入れ開発を進めて来た。

供試船候補を探査した所、航海訓練所の「青雲丸」が既設の計測装置を備えて居て格好の供試船だと考えられた。本研究で開発した方法にてマイクロバブル法による「青雲丸」の摩擦抵抗低減効果を推定した所、現実的な配置で 5% の全抵抗低減率が得られる可能性が示されたこと、本船のような船形にマイクロバブル法を適用して予想通りの効果が出るかを実船スケールで調査することは非常に重要な課題だと考えられることから、本船を供試船とする実船試験を計画した。

##### 5.1.2 計測機器とその配置

マイクロバブルに関する実船実験では、速力やプロペラ推力・馬力などのマクロ量の計測に加えて、気泡がどのように流れて船体を覆い摩擦低減が発生したかという分布状態の計測が重要である。そのため、局所せん断力計と局所ボイド率計を新たに開発し、流況観測用 TV カメラと合わせて船体表面上に配置した。計測機器の配置は、船首両舷に取り付けられた気泡発生部からの気泡流れの CFD による推定結果に基づいて決定された。TV カメラは、下側から気泡発生装置の作動状態を見るため 1 つ、船体中央部の流れ観察のために 1 つ、プロペラの上流に 1 つ、の合計 3 つ、局所せん断力計及び局所ボイド率は船体前半部にそれぞれ 7 つと 2 つ取り付けた。

##### 5.1.3 事前検討

既存船を供試船としたこともあり、気泡発生装置や諸計測器および配管・配線類を全て船体表面上に設置することが必要になった。また、既存船への溶接施工を出来るだけ避け、接着工法で代用する

ことが望まれたため、気泡発生装置の作動に関する予備観察を含め以下のような事前検討を実施した。

- 1) 南星丸による予備実験…マイクロバブルの発生方法や発生装置の配置、観察方法についての知見を得るために、鹿児島大学付属実習船「南星丸」を使って予備実験を実施した。
- 2) 配線用フェアリングの検討…船体表面に取り付けられる計測機器は全て外付けであり、気泡による摩擦低減効果を損なわないような配慮が必要である。特に各種計測機器からの配線ケーブルはガース方向に配置されるために影響が大きいので、フェアリング形状の検討を行った。
- 3) 接着工法の検討…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、小型船とモーターポ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。
- 4) 気泡発生装置の検討 …… 気泡発生装置の吹出し部は、計算で検討した最適配置を参考に、船首部に、パウスラスターを避けるなどの制限を考慮して片舷ずつ3力所に配置した。船体表面に鋼製角パイプを設置し、外面に多数の空気吹出孔を配置した。装置を試作して予備実験を行い、所要吹出し量を十分越える空気を供給できることを確認した。吹出した空気が剥離を起こさないように角パイプの前後に整流板を設けた。
- 5) 実船実験長尺平板船を用いた予備実験 …… 実船実験において船体表面に外付けされる気泡発生装置、局所せん断力計、局所ボイド率計、配線類の周囲を整形するフェアリングが、所定の性能を発揮することを確認するため、海洋技術安全研究所の400m曳航水槽において34mの長尺平板船を用いた予備実験を実施した。気泡発生装置、局所せん断力計、局所ボイド率計、配線フェアリングを船底に取り付け、フェアリングが有効に機能していることを確認した。

## 5.2 実船実験

実船実験は天候に恵まれ、以下のスケジュールにて良好な状態で実施された。諸機器は概ね順調に動作し、当初の予定に近い実験を実施することができた。

平成13年9月 8日～12日 入渠、計測装置など取り付け工事

9月13日～15日 実験航海

9月15日～27日 入渠、計測装置など撤去工事

以下に説明するように、「期待した摩擦抵抗低減効果が定常的に達成できた」とは言えない結果であったが、限られた航走条件では(また一部の計測結果には)抵抗低減効果が明確に認められた。

### 5.2.1 速力性能計測結果

#### (1) 速力・軸馬力計測結果

マイクロバブルを全ての吹出し装置から吹出した時の速力計測結果を整理して、速力と軸馬力の関係を求めた所、同一速力で見るとマイクロバブルを吹出すことによって軸馬力が増加し、14ノットにおいて吹出し量 MAX で 4%、1/2MAX で 12% の馬力増加となっている。しかし、上段の吹出し位置から気泡を出した場合には、速力 14 ノット付近で 3%、速力 19.5 ノットで 1% 程度、軸馬力が低減している。これらの結果から、本実船実験の配置において、速力ベースに見た軸馬力はマイクロバブルの吹出し位置、吹出し量、船速によって敏感に変化していたと判断される。

#### (2) プロペラ推力の計測結果

「青雲丸」装備のプロペラ推力計によりプロペラ推力の計測値も得られた。プロペラ推力の変化は、推力減少率が気泡により変わらないと仮定すると、船体抵抗変化に等しい。プロペラ推力の変化率は定性的には軸馬力と同様の傾向を示し、下段または上段のみの気泡吹出しにより 14 ノットで 4% の推力低減が得られた。しかし、下段の気泡吹出し装置を使用した場合には上段の装置を使用した場合に比べて軸馬力と推力の変化率に相違があり、下段の気泡吹出し装置を使用した場合にはプロペラ効率が低下しているのではないかと考えられた。

このメカニズムの解明は今後の研究課題である。

### 5.2.2 気泡流れ観測結果

3個の小型水中TVカメラにより流れの観察を行った結果、上部気泡吹出部から吹出された気泡はほぼ船体に沿い当初の予測に近い軌跡でプロペラ方向へ流れているが、下部気泡吹出部から吹出された気泡流は比較的船体から離れて流れプロペラ面への気泡流入が多いことが観察された。

### 5.2.3 局所せん断力計測結果

実船の表面摩擦応力を計測するため、船体表面より僅か上方に浮かせた200mm×200mmの板をバネで支えて、そこに働く摩擦力を計測して摩擦応力を検出する装置を開発した。小型艇を用いた予備実験で計測精度、耐久性を検証して、実船実験に適用した。

7台の局所せん断力計のうち2台は作動しなかったが、残る5台では安定したデータが取得できた。4台のせん断力計では摩擦応力が増加する場合も見られたが、1台の局所せん断力計では気泡吹出しによってせん断力が明確に低減することが記録された。すなわち、気泡吹出し無しの場合に比べ、船速14kt～19ktの範囲で摩擦応力の低減が見られ、17ktでの低減率は20%程度にもなった。

また、気泡を吹出した場合の摩擦力の時系列を解析した結果、摩擦力が吹出し無しの状態とそれよりかなり小さくなる状態が交互に現れ、船体運動により気泡軌跡の変動することが示唆された。摩擦力が小さい状態を持続させることができれば、大きな低減効果が得られると思われる。

### 5.2.4 局所ボイド率計測結果

一定体積の水流中に存在するマイクロバブルの直径と数を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装置を新たに開発した。2台のボイド率計を製作し船底に取り付けたが、1台は実験開始後すぐに浸水して作動しなくなり、残る1台の測定結果のみが得られた。

計測の結果、船底から5mm以上離れた所を通る気泡が多く、個数では直径0.5mm程度の気泡が多いが、体積で見ると直径1mm程度の気泡の寄与が大きいことが分った。近傍のせん断力計では摩擦力の低減がほとんど認められなかった。気泡を船体に密着させて流す方法の開発と共に、境界層中のどの位置にマイクロバブルが来たら最も効果があるか、今後の解明が待たれる。

## 6. 研究成果

### 6.1 摩擦抵抗低減

模型実験、実船実験の結果以下のことことが解った。

- 1) マイクロバブル法による摩擦抵抗低減は、模型実験で10%～20%程度、省エネ効果は実船実験で最大3%程度が確認された。ただし実船実験では空気吹出し位置、船速等により効果の出ない場合もあることが解った。
- 2) 空気膜法では模型実験において摩擦抵抗低減量で25%程度（全抵抗低減量で20%程度）が確認された。
- 3) 表面処理法の自己研磨型塗膜では、研磨の進行によって減少する粗度の経時変化と摩擦抵抗低減の関係が確認された。

### 6.2 実船性能推定法、実験技術

- 1) マイクロバブル法、空気膜法による実船性能推定法が導出された。
- 2) 模型実験では塗膜の摩擦抵抗を計測する回転円筒試験装置が、又実船実験では局部せん断力・ボイド率計測法及計器取付法等が開発された。

### 6.3 結論

マイクロバブル法、空気膜法は摩擦抵抗低減による省エネに寄与するが、実船への適用に関しては課題が残された。

## はしがき

本成果報告書は、日本財團の助成事業として実施した、日本造船研究協会第239研究部会において平成10年度から平成13年度の4ヵ年計画で実施した「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」の成果を取りまとめたものである。

### 第SR239研究部会 委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	鈴木 敏夫	(大阪大学)	宮田 秀明	(東京大学)
代表幹事	土岐 直二	(三菱重工業)	奥野 武俊	(大阪府立大学)
委 員	加藤 洋治	(東洋大学)	児玉 良明	(海上技術安全研究所)
	山口 一	(東京大学)	高橋 孝仁	(海上技術安全研究所)
	永松 哲郎	(鹿児島大学)	芋生 秀作	(航海訓練所)
	角川 明	(海上技術安全研究所)	山間 直人	(三菱重工業)
	山谷 周二	(航海訓練所)	石川 晓	(三菱重工業)
	金井 健	(日本造船技術センター)	勝井 長博	(大阪府立大学)
	川北 千春	(三菱重工業)	田中 寿夫	(日立造船)
	岡本 幸彦	(日本鋼管)	村上 恭二	(住友重機械工業)
	藤本 留男	(日立造船)	副島 俊二	(三井造船)
	佐々木紀幸	(住友重機械工業)	上入佐 光	(三井造船)
	高井 通雄	(住友重機械工業)	下山 敬次	(川崎重工業)
	平山 明仁	(三井造船)	吉田 有希	(石川島播磨重工業)
	岩崎 泰典	(川崎重工業)	山下 和春	(中国塗料)
	荻原 誠功	(石川島播磨重工業)	上田 英夫	(航海訓練所)
	竹本 熟	(日本ペイントマリン)	松本光一郎	(日本鋼管)
	坪 平八郎	(航海訓練所)		
	森 英男	(三菱重工業)		

### 第239研究部会 幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

代表幹事	土岐 直二	(三菱重工業)	宮田 秀明	(東京大学)
委 員	鈴木 敏夫	(大阪大学)	児玉 良明	(海上技術安全研究所)
	永松 哲郎	(鹿児島大学)	藤本 留男	(日立造船)
	岡本 幸彦	(日本鋼管)	佐々木紀幸	(住友重機械工業)
	佐々木紀幸	(住友重機械工業)	下山 敬次	(川崎重工業)
	岩崎 泰典	(川崎重工業)	竹本 熟	(日本ペイントマリン)
	荻原 誠功	(石川島播磨重工業)		

### 第239研究部会 WG1 委員名簿

(敬称略、順不同)

主 査	児玉 良明	(海上技術安全研究所)	山口 一	(東京大学)
委 員	加藤 洋治	(東洋大学)		

戸田 保幸	(大阪大学)	永松 哲郎	(鹿児島大学)
角川 明	(海上技術安全研究所)	高橋 孝仁	(海上技術安全研究所)
山谷 周二	(航海訓練所)	芋生 秀作	(航海訓練所)
金井 健	(日本造船技術センター)	山間 直人	(三菱重工業)
川北 千春	(三菱重工業)	石川 晓	(三菱重工業)
村上 恭二	(住友重機械工業)	高井 通雄	(住友重機械工業)
平野 靖之	(住友重機械工業)	上入佐 光	(三井造船)
荻原 誠功	(石川島播磨重工業)	吉田 有希	(石川島播磨重工業)
山下 和春	(中国塗料)	森 英男	(三菱重工業)
坪 平八郎	(航海訓練所)	上田 英夫	(航海訓練所)

#### 第239研究部会 WG2 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	下山 敬次	(川崎重工業)	
委員	宮田 秀明	(東京大学)	岡本 幸彦 (日本鋼管)
	勝井 辰博	(大阪府立大学)	副島 俊二 (三井造船)
	平山 明仁	(三井造船)	岩崎 泰典 (川崎重工業)

#### 第239研究部会 WG3 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	藤本 留男	(日立造船)	
委員	鈴木 敏夫	(大阪大学)	戸田 保幸 (大阪大学)
	奥野 武俊	(大阪府立大学)	金井 健 (日本造船技術センター)
	田中 寿夫	(日立造船)	竹本 黙 (日本ペイントマリン)
	肥後 清彰	(日本ペイントマリン)	山下 和春 (中国塗料)
	佐々木紀幸	(住友重機械工業)	村上 恭二 (住友重機械工業)
	高井 通雄	(住友重機械工業)	

#### 討議参加者

(敬称略、順不同)

池本 晶彦	(東洋大学)	森口 泰敬	(東洋大)
川村 隆文	(東京大学)	杉山 隆史	(住友重機械工業)
湯田 紀男	(弓削商船)	笠原 良和	(日本鋼管)
青野 健	(住友重機械工業)		

#### 事務局

(日本造船研究協会) 宮澤 徹、大森 勝、海部 雅之、山内 康勝

## 目 次

1. 研究の目的と狙い	1
2. マイクロバブル法に関する研究	2
2.1 摩擦抵抗低減効果と平均ボイド率分布の関係	2
2.2 50m 長尺平板船を用いた尺度影響実験	2
2.3 流れ方向圧力勾配と曲面形状がマイクロバブルに及ぼす影響	3
2.4 鉛直壁面の影響	3
2.5 海水の影響	4
2.6 気泡径の影響	4
2.7 境界層厚の影響	4
2.8 実船性能推定法	5
3. 空気膜法に関する調査	7
3.1 概要	7
3.2 デバイス形状の検討	7
3.3 超大型模型船試験による水槽試験	7
3.4 実船性能推定法	8
4. 表面処理法に関する調査	9
4.1 自己研磨塗膜・撥水性塗膜の抵抗低減効果の調査	9
4.2 自己研磨塗膜・撥水性塗膜の実船性能推定法	10
4.3 弹性皮膜の抵抗低減効果	10
4.4 表面処理法に関する調査の成果	10
5. マクロバブル法の実船実験	12
5.1 実船実験計画	12
5.2 供試船「青雲丸」の概要	13
5.3 事前検討	14
5.4 実船実験	16
5.5 計測・観測結果	17
5.6 実船実験結果の評価	20
6. 結言	21

図表(マイクロバブル法)

カラー1・3・22・24,27・31

(空気膜法)

カラー1・25

(表面処理法)

カラー1・26

## 1. 研究の目的と狙い

船舶の省エネ対策の中で最も重要な項目である推進性能向上については、造波抵抗や粘性圧力抵抗(形状抵抗)は船体形状の改善により十分に低減されており、抵抗成分として最も大きく実用上有効な低減技術が殆どない摩擦抵抗の低減に切り込むことが望まれて居る。

近年、乱流境界層の研究が進み乱流の制御等により摩擦抵抗を低減する方法が幾つか発表されており、船舶についても基礎的な研究がされているが、摩擦抵抗低減のメカニズムがまだ十分に理解されていない部分もあって実用的なレベルには達していない。本研究部会の発足に先立って、平成 8 年 10 月より企画部会の下に「摩擦抵抗分科会」を設け、各種の摩擦抵抗低減法に関する研究のレビューを行い、その中から船舶への適用性が高いと考えられる方法として下記の 3 種を選定した。

- ① マイクロバブル法…微細気泡を境界層内に供給すると摩擦抵抗が減少する。80%の低減が得られた実験例がある。抵抗低減のメカニズムはまだ充分には解明されてなく、相似則も確立していない。
- ② 空気膜法…船底を薄い空気膜で覆うことにより摩擦抵抗を低減する。抵抗低減の理由は空気の摩擦力が水の約 1/80 であること。船底に薄い空気膜を維持する方法の開発が課題である。超撥水性塗膜と組み合わせた効果が注目されている。
- ③ 表面処理法…防汚機能を有し、且つ摩擦抵抗低減が期待できる塗料として自己研磨型塗膜及び撥水性塗膜がある。自己研磨型では、船の航走により表面粗度が減少しトムズ効果により摩擦抵抗の減少が期待される。撥水性塗膜は、水中で表面に薄い気膜が生成され気体潤滑により摩擦抵抗が減少することが期待される。また、物体表面を適度の密度と弾性係数を持つ弹性皮膜で覆うことにより摩擦抵抗が減少する実験例もあるが、まだ確立した方法ではない。

これらの摩擦抵抗低減法の実船への適用の目処を得るために、平成 10 年より平成 13 年までの 4 年間に下記の項目について検討を行うこととした。

- ① メカニズムの研究とデバイスの考案…マイクロバブルや表面処理法では乱れ抑制による摩擦抵抗低減のメカニズムが十分には解明されていない。空気膜については空気膜を安定的に維持するための空気と海水の界面の安定性についての解明が不十分である。抵抗低減や気液界面の安定性の現象を支配する主要なパラメータを見出し、その影響を実験的に調査して、実船への適用可能なデバイスを考案する。
- ② 実船性能推定法の検討…上記の摩擦抵抗低減法の現象を支配する要因を抽出し、その尺度影響や相似則について検討し、模型実験や理論解析を組み合わせた実船の性能推定法を提案する。
- ③ 大型模型による実験…摩擦抵抗低減法は新しい技術であるため、相似則が不明で、尺度影響についての知見がほとんどない。実船の性能を推定するためにはそれぞれの低減法の尺度影響を把握することが不可欠である。このため、実験設備の許容する範囲で出来るだけ大型の模型で高速の実験を行う。
- ④ 実船実験の計画…本研究で考案された摩擦抵抗低減法の効果と尺度影響を確認するために実船実験を実施する。実船実験は供試船、実験費用、実験期間などに制限があるため、必要最小限の実験項目、計測項目を選定し、実船実験のための計測法や計測装置の開発を行う。
- ⑤ 実船実験…供試船への摩擦抵抗低減装置および計測装置の取り付け工事を行った後、実験法案に従って、実海域での実験・計測を実施し、計測結果の解析と評価を行う。最後に、実船実験結果を基に、供試した摩擦抵抗低減法による実船の省エネ効果を定量的に評価する。

## 2. マイクロバブル法に関する研究

### 2.1 摩擦抵抗低減効果と壁面近傍ボイド率分布の関係

本研究部会では、顕著な摩擦抵抗低減効果と従来の研究の蓄積を考慮し、マイクロバブル法を実用化に最も近い摩擦抵抗低減法と捉え、実船実験を想定して準備研究を行った。先ず、小型流路実験(図 2.1.1)によってマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果と必要空気量の関係についての実験データを取得し、次に、その尺度影響、すなわち大スケールでその関係がどのように変化するかを、長さ 50m の長尺平板船を曳航水槽で曳引して調べた。また、水平設置された平板に真水を流した従来の研究で欠落していた実船特有の影響要素、すなわち、流れ方向圧力勾配の影響、壁面が曲面である影響、壁面が鉛直に設置された場合の低減効果、海水の影響、気泡径が低減効果に及ぼす影響を調べる実験を行った。そして、それらの実験データと、実船状態の船体まわり流れの CFD 計算法を組み合わせて、マイクロバブルの実船における摩擦抵抗低減性能の推定法を開発した。

#### (1) 摩擦抵抗低減効果と平均ボイド率の関係

図 2.1.2 に、平均流速  $U=7\text{m/s}$  における、吹き出し位置の下流 0.5m～1.5m の 3 力所で計測した、注入気泡量の増加に伴う局所せん断力の低減を示す。横軸は流路内平均ボイド率であり、縦軸  $C_d/C_{d0}$  は、気泡の有無状態の局所せん断力の比である。摩擦抵抗低減効果は、平均ボイド率に大きく依存し、下流に行くほどやや減少する。なお示されていないが、流速  $U=5\sim10\text{m/s}$  の範囲では、摩擦抵抗低減効果は、流速の上昇に伴い減少する傾向にあった。

#### (2) 摩擦抵抗低減効果と局所ボイド率の関係

上壁面からの各距離位置における局所ボイド率を、その位置に流れに正対して設置した円筒細管から吸い込んだ気泡と水の体積を計測することにより計測し、さらにその値を、別途計測した注入空気量を用いて補正した。

図 2.1.3 に、流速  $U=7\text{m/s}$  における局所ボイド率分布を示す。横軸は上壁面からの距離を表す。気泡は上壁面近傍に集中しているが、下流に行くにつれて断面全体に拡散している。この図の結果と図 2.1.2 の結果により、気泡が壁面近傍に集中するほど高い摩擦抵抗低減効果が得られることが分かる。

気泡径分布を、流速  $U=7\text{m/s}$  および  $10\text{m/s}$  において、写真撮影により計測した。気泡直径は、いずれの流速においても、 $0.6\text{mm}$  を中心に  $0.2\text{mm}$  から  $2\text{mm}$  の範囲に分布していた。

## 2.2 50m 長尺平板船を用いた尺度影響実験

マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果における尺度影響を調べるために、海上技術安全研究所の 400m 曳航水槽において、幅 1m 長さ 50m 長尺平板船の船底から気泡を吹き出し、最高速度  $7\text{m/s}$  で実験を行った。

図 2.2.1 に長尺平板船の写真を示す。気泡吹き出し部を船首端から 3m 及び 31m の 2 ケ所に設け、2.1 に示した小型高速流路での実験時と同じ局所せん断センサーを、各気泡発生部から下流方向に同じ相対位置に 3 個ずつ取り付け、境界層厚さが低減効果に及ぼす影響が計測できるようにした。気泡発生には、小型高速流路実験と同様に、直径  $1\text{mm}$  の孔を長さ  $0.1\text{m}$  幅  $0.5\text{m}$  の範囲に合計 3,300 個配置した配列多孔板を使用した。

#### (1) 全抵抗低減効果

図 2.2.2 に、船首側の吹き出し部から気泡を発生させた場合の、曳航速度  $5\text{m/s}$  および  $7\text{m/s}$  における全抵抗低減効果を示す。横軸  $q$  は吹き出し空気流量  $Q$  を吹き出し部面積  $S_b$  と曳航速度  $V$  で無次元化したものであり、縦軸  $R_d/R_{d0}$  は気泡有無状態の全抵抗比を表す。抵抗低減効果は低速の方が大きく、 $14\text{ノット}$  に相当する速度  $7\text{m/s}$  において約 10% の低減を得た。この値は、気泡被覆部分の摩擦抵抗

低減率に換算すると、約 22%に達する。

## (2) 摩擦抵抗低減効果の下流方向の持続性

局所的な摩擦抵抗低減効果が吹き出し位置から下流方向にどこまで持続するか調べた。図 2.2.3 に、船首部吹き出し、速度 7m/s の結果を示す。横軸は船首端からの距離を、縦軸は気泡有無状態の局所せん断力比  $C_f/C_0$  を示す。低減効果は、吹き出し量が増えると増加し、吹き出し位置から下流に行くに従って急激に減少するが、船首端より約 40m 下流の最下流端位置でも若干の低減効果が見られた。2 力所の気泡吹き出し部のそれぞれから気泡を吹き出し、局所せん断力の低減効果を比較した。速度 7m/s において両者の差は小さく、吹き出し位置の境界層厚さが摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響は小さいことがわかった。

## 2.3 流れ方向圧力勾配と曲面形状がマイクロバブルに及ぼす影響

船体周りを流れるマイクロバブルは、船体形状の影響で流れ方向圧力の影響を受ける。このため、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果が圧力勾配や曲面形状の影響によりどのような影響を受けるか実験的に調査し、以下の成果を得た。

- (a) 平板模型に圧力勾配をつけた実験より、平均ボイド率  $\alpha_m$  を変化させた場合の流れ方向圧力勾配と摩擦抵抗低減効果の関係を図 2.3.1 に示す。また、曲面形状の影響を受けて流れ方向に圧力勾配が生じている流れ場において、平均ボイド率  $\alpha_m$  を変化させた場合の流れ方向圧力勾配と摩擦抵抗低減効果の関係を図 2.3.2 に示す。流れ方向圧力勾配零の平板を対象としたマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に比べて、船体前半部に相当する圧力勾配や曲面（順圧力勾配）では効果が低減し、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。ただし、平均ボイド率  $\alpha_m$  が 0.04 以下の場合、その差は僅かであり、平板実験で得られている平均ボイド率と摩擦抵抗低減量の関係をそのまま用いても推定可能である。
- (b) 圧力勾配や曲面の影響を受けた流場でも、壁面近傍の局所ボイド率と摩擦抵抗低減効果には相関がある。すなわち、壁面近傍の局所ボイド率のピーク値が高い方が摩擦低減効果は大きい。
- (c) 流れ方向圧力勾配が逆圧力勾配の場合、平均ボイド率が 0.04 を超えると、摩擦抵抗低減効果が極めて大きくなるという知見を得た。その状態における気泡流れは、直径 0.9mm 程度に微細化された雲状の気泡群となっており、局所ボイド率は壁面近傍以外にも境界層内層内のボイド率が全体的に高くなっていた。

## 2.4 鉛直壁面の影響

鉛直壁面におけるマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果について調査した。

鉛直壁面の  $V_w=10.0\text{m/s}$  におけるせん断力計測結果を図 2.4.1 に示す。せん断力は P1(吹出し部より下流 600mm), P2(吹出し部より下流 1850mm) の 2 力所で計測している。鉛直壁面でも水平壁面同様マイクロバブルにより摩擦抵抗は減少することが分かる。しかしその量は水平壁面に比べ小さく、また持続距離も短い。

垂直壁面上、 $V_w=10\text{m/s}$  の局所ボイド率分布の計測結果を図 2.4.2 に示す。気泡吹出し部により近い P1 の局所ボイド率は、 $y=5\text{mm}$  付近に鋭いピークを持つのに対し、遠くにある P2 ではピーク位置は大きく違わないものの、平坦でかつなだらかに減少する形状となる。水平壁面のボイド率のピークは、概ね  $y=2\sim3\text{mm}$  であり鉛直壁面より内側にある。このピーク位置、形状の差が摩擦抵抗低減量の差に繋がったものと考えることができる。

## 2.5 海水の影響

海水と真水でのマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果の違いを調べた。2.1に示した小型高速流路の海水を入れ、2.1と同様な実験を行った。海水は駿河湾、伊豆などから採取された。その物性値を計測し、塩分濃度 3.4%、密度  $1.025\text{g/cm}^3$ (摂氏 10 度)であり、表面張力、粘度、動粘度は理科年表に記載された真水の値と変わらなかった。

図 2.5.1 に  $U=7\text{m/s}$  における局所せん断力の低減を示す。対応する真水での結果は図 2.1.2 に示されている。両者はほぼ同様であるが、海水では下流に行くに従って低減効果がやや増加している。一方、 $U=5\text{m/s}$  及び  $10\text{m/s}$  では、両者の違いは殆ど無かった。従って、海水と真水では、低減効果に有意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を計測した。Position 2、 $U=7\text{m/s}$  における結果を図 2.5.2 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  $0.73\text{mm}$ 、海水で  $0.58\text{mm}$  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。

## 2.6 気泡径の影響

固液 2 相流や固気 2 相流では、固体粒子の大きさが乱流構造に大きな影響を与える。乱流の代表的なスケールより固体粒子が大きいと乱れは増加し、小さいと乱れは減衰する。マイクロバブルにおいても同様なことが起きるならば、気泡径の制御が重要となる。また、2.5 に示した海水を用いた実験では気泡径が小さくなり、摩擦抵抗低減効果に有意な差が無かつたが、実船では気泡が流れる距離が長くなるため、気泡径の影響をさらに調べる必要がある。

上記の理由により、2 次元回流水路(高さ:  $10\text{mm}$ 、幅:  $100\text{mm}$ 、長さ:  $2\text{m}$ )で、同じ条件で気泡径を変えて摩擦抵抗を計測した。壁面から空気を境界層中に吹出してマイクロバブルを発生させるのであるが、吹出し位置の主流の速度を変化させれば気泡径を変えることが出来る。そこで吹出し位置の流路高さを  $5\text{mm}$ 、 $10\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$  と変え、下流の流路の形状は同一にして実験した。

図 2.6.1 は気泡直径を変化させた時の摩擦抵抗低減率の測定結果である。平均ポイド率 10%、流速  $5\text{-}7\text{m/s}$  である。固体粒子の場合と異なり、摩擦抵抗低減率は気泡径によらないようである。

## 2.7 境界層厚の影響

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、また気泡発生装置の実船配置を決定するためには、気泡吹出し位置の境界層厚さがマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果へ及ぼす影響を調べる必要がある。そこで、海技研の  $400\text{m}$  曙航水槽において  $50\text{m}$  の長尺平板船を用いて最高  $7\text{m/s}$  までのマイクロバブルの実験を行った。

### (1) 試験装置概要

図 2.7.1 に試験に用いた  $50\text{m}$  平板船を示す。なおこの装置は、2.2 に示した尺度影響実験に用いたものと同一である。局所せん断力は、水用せん断力計 S10W-2(直径  $10\text{mm}$ 、定格容

量  $2gf$  を用いて、船首および中央部の吹出し口からそれぞれ  $0.5m$ 、 $1.8m$ 、 $5.8m$  と同じ位置関係の 6箇所において計測した。

### (2) 境界層厚さの異なる位置から吹出した場合の局所摩擦抵抗低減効果の相違

気泡吹出し位置を、境界層厚さの薄い船首部とした場合、境界層厚さの厚い中央部とした場合、それについて、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の関係を調べた。境界層厚さは、速度  $5m/s$  で  $P.1$  で約  $4cm$ 、 $P.4$  で約  $26cm$  である。結果を図 2.7.2 に示す。 $V=5m/s$ においては、中央部吹出しの方が抵抗低減効果が若干高く、 $V=7m/s$ においては、ほとんど同じくらいであり、ほとんど吹出し位置の境界層厚さの影響はほとんどないことがわかった。

### (3) まとめ

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の、気泡吹き出し位置から下流の分布状態に関する主要パラメータは、吹き出し位置からの距離であり、吹き出し位置における境界層厚さは殆ど影響しないことが分かった。

## 2.8 実船性能推定法

2.1 節から 2.6 節までに述べられたマイクロバブル法に関する知見を基に摩擦抵抗低減率の推定方法を検討した。具体的には、摩擦抵抗低減の計算では壁面近傍ボイド率を支配的要素としている。圧力勾配影響および垂直壁面影響は実験データを計算に折り込んでいる。気泡径影響、海水影響および境界層厚の影響はないものとしている。

摩擦抵抗比  $C_f/C_{f0}$  の計算手順は概略以下の通りである。まず、船体周りの基礎流場との単相流を CFD コードにより計算する。この基礎流場を基に Larrarte の方法[1]により気泡軌跡計算する。次に、気泡軌跡から得られる局所の気泡体積を基に壁面近傍ボイド率  $\alpha_w$  を求める。壁面近傍ボイド率が求められたら、Yoshida et al. の方法[2]により式(2.7.1)を用いてカルマン定数  $\kappa$  を修正し局所摩擦抵抗比  $C_f/C_{f0}$  を計算する。

$$\Delta\kappa = - \left( \frac{\nu_L / U_\tau}{d_b/a} \right)^2 \alpha_w \quad (2.7.1)$$

ここに、 $\nu_L$  は水の動粘性係数、 $U_\tau$  は摩擦速度、 $d_b$  は気泡直径、 $a$  は実験定数を表し、 $d_b/a$  は  $C_f/C_{f0}$  が模型実験結果に合うように調整する。

最後に、 $C_f/C_{f0}$  を浸水表面で平均化して摩擦抵抗低減率  $1 - C_f/C_{f0}$  を得る。

空気圧縮機有効動力の算定は、圧縮が断熱圧縮過程であることを前提として次式を用いる。

空気吸入圧力 ;  $P_s$ =[大気圧]= $1atm$ 、空気吐出圧力 ;  $P_d$ =[吹出部静水圧]

空気吸入温度 ;  $T_s=15^{\circ}C$ 、比熱比 ;  $\kappa=1.4$ 、気体定数 ;  $R=29.27m/K$

$$\text{断熱ヘッド} \quad H_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa-1} RT_s \left\{ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right\}$$

$$\text{有効動力} \quad W = H_d \times [\text{吹出した空気の重量流量}]$$

参考文献 :

- [1] Larrarte et al.: Trajectory of bubbles under a ship hull and scale effects, 関西造船協会誌, 第 228 号,
- [2] Yoshida Y., Takahashi Y., Kato H. and Watanabe O.: Study on the mechanism of resistance reduction by means of micro-bubble sheet and on applicability of the method to full-scale ship, The 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998

### 3. 空気膜法に関する調査

#### 3.1 概要

船体表面を空気膜で覆うことにより船体の摩擦抵抗を低減する方法は従来から多くの研究がなされており、空気膜を安定に保持することさえ出来れば摩擦抵抗低減効果のあることが各種の試験結果、実績等で示されていた。しかし、これまでの空気膜法の研究の殆どにおいては、イーブンキール状態では摩擦抵抗低減効果が見られるものの、船尾トリム状態においては抵抗低減効果が殆どないか逆に抵抗が増大する結果となっており、有効な船速領域が船速 10 ノット以下に限られていて 10 ノット以上において空気膜法による摩擦抵抗低減が確認されたという例は見当たらなかった。

上記を踏まえ本研究部会においては、10 ノット以上の船速かつ船尾トリム状態においても摩擦抵抗を低減できる空気膜デバイスを考案すること、および考案した空気膜デバイスの有効性と限界を把握することを空気膜法の研究目標とした。更に、実用化にあたっては空気膜デバイスを装備した実船の推進性能が或る程度の精度で事前に把握できることが重要な課題であることから、考案した空気膜デバイスを装備した実船の性能推定法の提案をも研究目標の一つとした。

#### 3.2 デバイス形状の検討

上記の研究目標を達成するために、空気膜法に関する特許調査、文献調査を行った上、高速回流水槽試験(最大流速 10m/s)を実施して、空気膜デバイスに関する基礎データ収集を行った。この結果、空気供給口より吹出された空気は、空気吹出口直後から下流に行くに従いその形態を一体の膜となつた「膜状気膜」から、雲状の気塊に分離した「雲状気膜」、さらには小さな気泡に分解した「気泡群」、に変遷し、「雲状気膜」から「気泡群」への遷移点は必ずしも明確ではなく「雲状気膜」が殆ど見られない場合もあることを把握した(図 3.1 参照)。

さらに、2m/s 程度以上の流速においては高速になるほど「膜状気膜」による被覆面積が小さくなつて「雲状気膜」や「気泡群」の割合が増加し、8~9m/s を超える流速では「膜状気膜」が殆どなくなることが判った。また、空気吹出し量が多くなるに従い「膜状気膜」の被覆面積増加率が小さくなり、或る一定の空気吹出し量以上では「膜状気膜」の被覆面積は増加しなくなる(すなわち、「雲状気膜」や「気泡群」のみが増加する)ことが判った。

また、空気吹出口の形状と高さが空気膜保持性能の重要なポイントであるが、複数の空気吹出し口を設ける場合にはその間隔も非常に重要であり、上流側の空気吹出し口の影響を受けない間隔としなければならないことをも把握した。

これらの成果を踏まえて、最適と考えられる空気膜デバイス形状を考案した。

#### 3.3 超大型模型船試験による水槽試験

考案した空気膜デバイスの有効性を確認するために超大型模型船(全長 16m)を用いた曳航水槽試験を実施した(図 3.2 参照)。対象船型は、肥大船の平底部を模擬した平底船で、船首部、中央部(平行部)、船尾部の三部分で構成されている。実施した試験は、イーブンキール状態における抵抗試験と船首部(長さ 6m)のみを用いた船尾トリム状態における抵抗試験である。供給空気量は、この試験に先立って実施された供給空気量をパラメータとした船速 7m/s (=13.6 ノット)における抵抗試験の結果に基づき、デバイス幅 1m 当たり 2.5m<sup>3</sup>/min(船速に関わらず一定)とした。イーブンキール状態における抵抗試験の結果、考案された空気膜デバイスにより船速 4m/s(=7.8 ノット)において最大の全抵抗低減(約 30% 低減)が得られた。高速になるに従いその低減効果はやや減少するが、船速 7m/s(=13.6 ノット)においても約 20% の全抵抗低減が確認出来た(図 3.3 参照)。

また、水中テレビカメラを用いた船底の空気膜状態観察結果と抵抗計測結果とから、「雲状気膜」や「気泡群」の領域においても、「膜状気膜」程の効果はないであろうものの、ある程度の摩擦抵抗低減

効果のあると推察された。この[膜状気膜+雲状気膜+気泡群]全体での抵抗低減量から逆算した空気膜被覆面積(「等価被覆面積」と呼称する)は、船速 5.5m/sにおいて空気膜デバイス面積の約 70%になることが確認された。これは、当該空気膜デバイスにおいてはデバイス面積の約 70%が膜状気膜で被覆された場合と同等の摩擦抵抗低減効果が得られたことを示している。

また、船尾トリム状態(トリム角約 0.7 度)における抵抗試験の結果、考案された空気膜デバイスにより船速 7m/sにおいて約 15%の全抵抗低減が得られた。

さらに、表面処理法の検討に使用した超撥水性塗膜を空気膜デバイス領域に塗布した場合についても試験を実施し、通常塗装の場合と比較して全抵抗が減少(最大で約 6%程度)することを確認した。

### 3.4 実船性能推定法

超大型模型船試験結果を参考にして三次元外挿法をベースとした実船性能推定法を導出した。この推定法は以下の 1) ~4) の仮定を用いている。

- 1) 実船船速が 7.0m/s(=13.6 ノット)における等価被覆面積率は、超大型模型船試験結果から得られた等価被覆面積率( $=0.7$ )に等しい。
- 2) 実船の摩擦抵抗係数は、Schoenherr の摩擦抵抗係数  $\times (1 - \text{等価被覆面積}/\text{全浸水面積})$  に等しい。
- 3) 粘性圧力抵抗係数および造波抵抗係数は空気膜の有無で変化せず、空気膜デバイスを装備しない状態における値に等しい。(実船に装備される空気膜デバイスは模型船のものに比べて相対的に小さく、空気膜デバイスそのものによる抵抗増加は殆ど無視できると考えられるため)。
- 4) 自航要素は空気膜の有無で変化しない。

この実船性能推定法の精度は現時点では不明であり、将来、さらに大きな模型船試験や実船試験を実施して検証を行う必要がある。一例として本推定法を用いて、 $L_{pp}=320m$  の VLCC について試算を行った結果を示す。満載状態で最大 8.4%、軽荷状態で最大 12.8%のエネルギー節約が得られる可能性が示された(図 3.4 参照)。

この実船性能推定法における尺度影響確認と本研究部会において開発した空気膜デバイスの有効性確認のために実船試験の実施についても検討した。しかし、平底の大型船で空気膜法の実船試験が行える適当な供試船が見つからなかったため、空気膜法に関する実船試験は断念した。

#### 4. 表面処理法に関する調査

表面処理法については、平成10年度に実施した各種の表面処理による摩擦抵抗低減法の文献調査を、また平成11～13年度に自己研磨型塗膜・撥水性塗膜・弹性皮膜について、実験による摩擦抵抗低減メカニズムと低減効果の調査、および実船性能推定法の研究を実施した。

##### 4.1 自己研磨型塗膜・撥水性塗膜の抵抗低減効果の調査

自己研磨型塗料は、実船が航走することにより表面が研磨されて粗度が低下し、その結果として摩擦抵抗が低減すると考えられる。従って、その摩擦低減効果を検出するためには長時間にわたって、塗膜面が水流に暴露されていなければならず、通常の模型船を用いた水槽試験でこれを計測することは困難である。そこで、本研究では図4.1.1に示すような回転円筒を用いた摩擦抵抗計測装置を開発し、一定期間実海水中で回転させた塗装済み円筒の回転トルクを計測することによって、表面変化に伴う摩擦抵抗低減量を計測することを試みた。

本試験では、下表に示す消耗度・初期粗度・エイジング速度の異なる自己研磨型塗料9種および撥水性塗料2種を供試し、実海水中で動的に浸漬を継続し、定期的に回転円筒試験装置で回転トルクを計測するとともに表面粗度を計測し、表面状態の経時変化と摩擦抵抗の相関関係について調査した。

供試自己研磨型塗膜の要目

供試塗膜	消耗度 (μm/年)	初期粗度 Rz (μm)	平均エイジング 速度 (kt)
SF1	82	10.5	5.5
SF3	41	21.8	5.5
SF5	151	11.2	5.5
SF5R	151	57.2 (砂粗度状)	5.5
SF1N	82	11.9	10.1
SF1RN	82	82.0 (砂粗度状)	10.1
SF5N	151	17.6	10.1
SF5RN	151	80.2 (砂粗度状)	10.1
SF5RRN	151	58.6 (剥離塗装模擬)	10.1

JIS方式で計測した塗膜表面の平均粗度Rzの経時変化を図4.1.2に、また同一Reynolds数( $Rn=8 \times 10^6$ )における抵抗係数と平均粗度の相関関係を図4.1.3に示す。図中には次節で述べる粗度を有する円筒表面の摩擦抵抗推定法から得られた推定値を併せて示している。

以上の実験により得られた結果は次のとおりである。

- (a) 自己研磨型塗膜は研磨が進行するに伴って粗度が低下し、初期状態よりも摩擦抵抗が低減する。
- (b) 自己研磨型塗膜の初期状態の粗度があまり大きくなれば、エイジングによる粗度低下は少なく、摩擦抵抗も変化しない。
- (c) エイジング速度が大きい場合は自己研磨型塗膜の表面粗度は大きく減少し、抵抗低減量も大きい。
- (d) 自己研磨型塗膜の表面粗度が研磨作用によって減少し、ある一定値を下回ると研磨による粗度低下はほぼ停止し、摩擦抵抗も変化しなくなる。
- (e) 自己研磨型塗膜の種類・初期粗度の如何に関わらず、本試験の供試塗膜では滑面の摩擦抵抗を下回ることはなく、積極的な抵抗低減を実現することはなかった。
- (f) 撥水性塗膜については、粗度の大きい塗膜は、浸漬経時で生物が付着して撥水性が著しく低下し、粗度の小さい塗膜は、撥水性が徐々に低下するが生物付着は少ない。いずれの塗膜でも付着生物を除去すれば表面粗度の増大は僅かであり、摩擦抵抗もほとんど変化しない。

## 4.2 自己研磨型塗膜・撥水性塗膜の実船性能推定法

回転円筒試験の結果から実船の摩擦抵抗を以下のような方法で推定した。

- (a) 円筒内の流れは乱流であり壁近傍では壁法則が成り立ち、その速度が滑らかにつながると仮定する。
- (b) 速度分布が上記仮定を満たすような roughness function を求め、これを円筒表面粗度に対する等価砂粗度とする。
- (c) 等価砂粗度が得られれば White の式など用いることにより、実船における粗度修正量  $\Delta C_F$  が推定できる。

本推定法により求めたレイノルズ数と粗度高さの変化による  $\Delta C_F$  の相関を図 4.2.1 に、またレイノルズ数を一定とした場合の  $\Delta C_F$  の変化を ITTC78 の推定法で求めた結果と併せて図 4.2.2 に、それぞれ示す。

## 4.3 弹性皮膜の抵抗低減効果

弹性皮膜の摩擦抵抗低減効果を検証することを目的として平板状の弹性皮膜からなる試験体を作成し、その抵抗を曳航水槽で通常の船舶の水槽試験に準じた方法で計測した。実験では完全乱流域における摩擦抵抗低減を実現したとする先行研究で使用された弹性皮膜の複素弹性率・比重・膜厚に近い性状のシリコーン樹脂製弹性皮膜 3 種および合成ゴム製弹性皮膜 4 種を用いた。

これらの弹性皮膜について繰り返し抵抗試験を実施したが、剛体壁の抵抗と比較して有意な摩擦抵抗低減効果は認められなかった。また弹性皮膜まわりの流れについて、乱流場計測を実施したが、乱れと摩擦抵抗低減との相関を明らかにするには至らなかった。さらにモアレ縞を利用した弹性平板壁面の微少な変位を計測する手法を開発し、これを使って弹性壁面が流れの中でかなり変動していることを確認した。しかしこの微少な変動が流体现象に与える影響については評価できなかった。

実験の精度管理については可能な限りの注意を払ったが、残念ながら弹性皮膜による摩擦抵抗低減効果を確認することはできなかった。しかし、摩擦抵抗低減の可能性はまったく否定されたわけではなく、弹性皮膜の物性値を変更し、さらに広い範囲で素材を探索することにより、摩擦抵抗低減を実現できる可能性は残されていると思われる。

## 4.4 表面処理法に関する調査の成果

表面処理法 WG では、自己研磨型塗膜・撥水性塗膜・弹性皮膜について、実験による摩擦抵抗低減メカニズムと低減効果の調査、および実船性能推定法の研究を実施した。得られた成果をまとめて以下に示す。

### 4.4.1 自己研磨型塗膜・撥水性塗膜

- 1) 回転円筒試験装置を開発し、塗膜面に作用する摩擦抵抗の高精度計測に成功した。
- 2) 長期間エイジングした塗装円筒の摩擦抵抗を回転円筒試験装置により計測するとともに、表面粗度の経時変化を計測することにより、塗膜表面状態と摩擦抵抗の相関を定量的に評価した。従来、塗膜の抵抗低減効果は燃料消費量の増減からのみ評価されていたが、本方法により表面粗度との直接的な相関が明らかになった。
- 3) 回転円筒試験の結果を用いて、塗膜面の表面粗度が実船における摩擦抵抗に及ぼす影響を定量的に推定する方法を開発した。本推定法を用いることにより、塗膜面の粗度を計測すれば、実船の粗度修正量を推定することが可能となった。
- 4) 上記試験を、現用されている自己研磨型塗膜・撥水性塗膜について実施したところ、粗度低下により滑面の摩擦抵抗に迫る抵抗の低減が認められたものの、滑面の摩擦抵抗を下回る積極的な抵抗低減効果までは認められなかった。

#### 4.4.2 弹性皮膜

5) 弹性率・厚さ・比重等の異なる7種類の弹性皮膜について、曳航水槽における抵抗計測を繰り返し実施したが、いずれの皮膜についても有意な抵抗低減効果を検出することはできなかった。

## 5. マイクロバブル法の実船実験

### 5.1 実船実験計画

#### 5.1.1 供試船の選定経緯

マイクロバブルの実船実験供試船の選定は、以下に示す経緯で行われた。

先ず、マイクロバブルの実用化に適した船型について考察した。肥大船型は、広く平らな船底をもつ船体形状の点で適しており、また、造波抵抗成分が小さく摩擦抵抗成分が大部分を占める点でも適しているため、マイクロバブルの実用化に際して想定すべき船型と考えた。しかし一方、肥大船型は、大きな喫水をもつため、船底に気泡を注入するために必要な動力が大きく、摩擦抵抗低減効果に基づく馬力低減から気泡発生動力を差し引いた正味の馬力低減効果の点では、不利である。また、気泡発生動力が、流量が船速に比例するので、船速の1乗に比例し、摩擦抵抗低減による馬力低減量が、船速の2乗に比例(これは2.2の結果から見るとやや過大評価であるが)する摩擦抵抗低減量に船速を掛けて、船速の3乗に比例するので、高速ほど正味の馬力低減が得られやすくなることになり、その意味でも不利である。以上の考察により、マイクロバブルの実用化に適した船型として、肥大船型を想定しつつ、より高速な船型についても考慮することとした。

マイクロバブルの実船実験供試船の選定においては、上記の考察に基づき、先ず参加機関にアンケート調査を実施し、独立行政法人航海訓練所の練習船「青雲丸」及び3隻の作業船が候補に挙がった。そして、下記の技術上、経済上の

#### 長所

- ・最大船速が19.5ノットであり、広い速度範囲で実験ができる。
- ・スラスト計をはじめ多くの計器や船内LANが装備されている。
- ・定期点検入渠を利用することにより工事費が抑制できる。
- ・船主が実船実験に理解を示し、協力的である。

#### 短所

- ・高速船型であり、船底平坦部が殆ど無い。
- ・練習船としての任務上、実船実験日程が限られる。

を総合的に考慮し、最終的に青雲丸を供試船として選定した。

#### 5.1.2 摩擦抵抗低減効果の期待値

実船試験の供試船「青雲丸」を対象としてマイクロバブル法の効果を試算した。

##### (a) 計算条件

船速は13.6kt(7m/s)で、全抵抗低減率=5%が得られる空気量を吹出すこととする。図5.1.1に青雲丸の船体中央から船首側部分の側面図を示す。吹出部の位置は図中の黒色丸印により示される。

##### (b) 試算結果

空気を吹出さない時の $C_{f0}$ 分布および空気を吹出した時の $C_f$ 分布を、それぞれ図5.1.2および図5.1.3に示す。空気を吹出した時のボイド率分布は計測器配置とともに図5.1.4に示す。試算結果を下表に示すが、船速13.6kt(7m/s)において5%の全抵抗低減率を得るために必要な摩擦抵抗比 $C_F/C_{F0}$ は模型試験結果に基づく計算により0.916となり、必要な空気流量は2.7に説明した方法により46m<sup>3</sup>/minとなった。空気供給動力を差引いた動力ゲインは約2%と推定された。

V	船速	13.6kt (7m/s)
$C_F/C_{F0}$	全抵抗低減5%に必要な値	0.916
$Q_a$ [m <sup>3</sup> /min]	供給空気流量	46

W [kW]	空気圧縮機有効動力(断熱圧縮)	32
EHP [kW]	空気を吹出さない場合	1107
△EHP [kW]	空気を吹出すことによる EHP の変化 (EHP の 5 %)	-55
(-△EHP-W)/EHP × 100 [%]	動力ゲイン	+2.1%

### 5.1.3 計測機器とその配置

マイクロバブルに関する実船実験では、速力やプロペラ推力・馬力などのマクロ量の計測に加えて、気泡がどのように流れて船体を覆い摩擦低減が発生したかという、分布状態の計測が重要である。そのため、各種計測機器を船体表面上に配置した。

計測機器の配置は、片舷に 3 箇所ずつ取り付けられ気泡発生部からの気泡の流れの推定結果に従って決定された。計測機器配置を図 5.1.4 に示す。図には、2.7 に示された方法で推定された、喫水 5.6m、船速 13.6kt(7m/s)の実船状態における壁面近傍ボイド率分布も示されている。カラーコンターは、赤色に近いほど高いボイド率を表す。計測機器の種類と個数および取り付け位置を下表に示す。計測機器は全て左舷に取り付けられた。

計測機器の種類と個数および取り付け位置

計測器	個数	取り付け位置(SS)
TV カメラ	3	FP、4、3/4
局所せん断力計	7	8 1/2(2 力所)、8(2 力所)、7、6、5
局所ボイド率計	2	8、6 (共にせん断力計と同じ位置)

各計測機器の配置を決定する際考慮した点を示す。TV カメラは、1 つ目は気泡発生状態を見るため気泡発生装置のすぐ下に、2 つ目は Midshipあたりの流れを観察するためビルジキールの内側に、3 つ目はプロペラ観察のためその上流に取り付けた。ストロボは取り付けず自然光により観察された。局所せん断力計は、気泡の軌跡に沿って摩擦低減効果を計測するため、船体前半部に取り付けられた。局所ボイド率計は、気泡が集中すると思われる船底部に、局所せん断力計と同じ(厳密には非常に近接した)位置に取り付けられた。

### 5.1.4 計測項目と実験方案

実船実験では、下記に示す項目について計測を行った。

風向・風速、波高・波向(目視)、進路、舵角、対地速度(GPS)、対水速度(超音波式、電磁式)、

船体運動(Roll、Pitch、Heave、相対波高)、軸馬力、プロペラ回転数、CPP 翼角、プロペラ

推力、吹出し空気量、気泡観測(水中 TV カメラ)、局所ボイド率、局所せん断力、船尾振動

実船実験は、図 5.1.5 に示す航走状態で行うこととした。すなわち、ある方向に一定時間航走し、定常状態になったら、先ず気泡無し状態で計測を行い、次に 1/2MAX 量だけ気泡を吹出し、状態が静定したら計測に入る、その後に最大気泡吹出し状態(MAX)で同様に計測する。以上が終了したら反転し、今度は同一コースを逆に走りながら、往きと逆の順序で、吹出し気泡量が MAX、1/2MAX、ゼロと計測する。そして計測値は往復の平均値をもって正とした。

## 5.2 供試船「青雲丸」の概要

青雲丸(図 5.2.1)は、住友重機械工業(株)横須賀造船所浦賀艦船工場にて建造され、平成 9 年 10 月 1 日に就航し、船舶職員養成のための実習訓練に使用されている。青雲丸の主要目を下記に示す。

### (1) 船体主要寸法

全長 : 116.0 m、長さ(垂線間長) : 105.0 m、幅 : 17.9 m、深さ : 10.8 m

計画満載喫水 : 6.3 m、総トン数 : 5,884 トン、排水量 : 6,325.4 トン(満載状態)

## (2) 主要性能

航行区域：遠洋区域、航続距離：15,000 マイル

航海速力：19.5 ノット(75%載貨状態、常用出力)

## (3) 主機関・プロペラ

MITSUI MAN B&W 6L50MC (MARK5)、径×行程：500mm×1,620mm

常用出力 : 9,450PS(6,950.5kW,142.9rpm)

NAKASHIMA XL-135EP 4翼ハイスクイーCPP

直徑：4,700mm、基準ピッチ：4,935mm

### 5.3 事前検討

既存船を供試船としたこともあり、気泡発生装置や諸計測器および配管・配線類を全て船体表面上に設置することが必要になった。また、既存船溶接施工を出来るだけ避け、接着工法で代用することが望ましい。気泡発生装置の作動に関する予備観察を含め、以下のような事前検討を実施した。

#### 5.3.1 南星丸による予備実験

青雲丸の実船実験に先立って、実船においてマイクロバブルの発生方法や発生装置の配置、観察方法についての知見を得るために、鹿児島大学付属実習船「南星丸」を使って、マイクロバブルの観察を主体とした予備実験を実施した。なお、「南星丸」には精密な計測設備が備えられていないため、この実験では船速や船尾振動について定量的なデータを取得することを目的とせず、マイクロバブルの発生状況と船尾方向へ流れていく様子の観察を主目的とした。

南星丸の主要目を右上表に示す。実船実験を実施する前に、マイクロバブル発生装置の配置検討のために流れの可視化模型船実験を実施した。数種の発生装置配置についての実験結果から、2本の空気管を船首の喫水近くに喫水と平行かつ互い違いになるように配置した方式が最適と判断された。

実験は平成12年10月3日～5日に錦江湾で実施した。海象気象とともに平穏であり、2種の船速(7kn, 9kn)について、プロペラピッチと回転数を一定に保って、同一航路を往復した。マイクロバブルの観察は、ビルジキールに取り付けた水中ビデオカメラにより船体の6箇所を行った。観察結果の一例として、船速9kn、S.S.8の船底におけるマイクロバブルの流れを図5.3.1に示す。白い雲状の気泡群が不規則な塊となって、連続的に流れ去っていく様子が観察されている。そして、下流になるほど気泡層の厚さは厚くなっていくが、最も船尾側のビデオカメラを取り付けたSS.3までは船底に沿って流れているのが観察された。

このように、これまで水槽実験で得られたような微細なマイクロバブルが発生していることが確認され、発生したマイクロバブルは混合層の厚みを次第に増しながら、概ね船体表面に沿って下流へ流れている様子が観察でき、本実験の目的は達成された。

#### 5.3.2 配線用フェアリングの検討

実船実験において船体表面に取り付けられる計測機器は全て外付けであり、気泡による摩擦低減効果を損なわないような配慮が必要である。特に各種計測機器からの配線ケーブルは、船体表面をガス方向に配置されるため影響が大きく、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減に悪影響を与えないようにするために、配線用フェアリングの検討を行った。

キャビテーション水槽を用いて行った実験において、配線フェアリング模型を上流側におき、その

南星丸の主要目

	実船	模型船
全長 [m]	26.3	1.55
垂線間長 [m]	21.7	1.28
船幅 [m]	5.7	0.335
喫水 [m]	2.1	0.123
排水量	129 t	26.2kg

下流におかれたせん断力計によりせん断力を計測し、フェアリングを施さない場合(None)と比較してフェアリングの良否を判断した。配線用フェアリングは主に断面の傾斜と高さについて計 10 種の断面形状について行った。

検討の結果、実船試験適用の候補となったフェアリング形状を図 5.3.2 に示す。また、それを装備した場合の摩擦抵抗低減効果を図 5.3.3 に示す。これより工作性を合わせ検討した結果、配線が気泡流中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、との結論を得た。

### 5.3.3 接着工法の検討

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、航海で計測機器に作用する抗力を推定し、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。これらの接着剤について小型船(9kt)とモーターボート(22kt)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。接着剤の特性を下表に、計測装置と配線の接着工事要領を図 5.3.4 および図 5.3.5 に示す。

接着剤の特性

タイプ	アクリル(反応硬化型)	電気化学製 ハードロック C-355
粘度	200 poise	
可使時間	5 分 (20°C)	A 剤と B 剤を混合(比率 1 : 1)して塗布可能な時間
固着時間	20 分 (20°C)	接着強さが 1kgf/cm <sup>2</sup> になるまでの時間
接着力	5950 kgf/0.01 m <sup>2</sup> (20°C)	接着層厚さ 1mm における引張せん断接着強さ
	1120 kgf/0.1m (20°C)	接着層厚さ 1mm における割裂接着強さ

### 5.3.4 気泡発生装置およびフェアリングの検討

気泡発生装置は、空気供給装置、気泡吹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 90m<sup>3</sup>/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。2.7 節で述べた計算法によれば速力 14kn において目標達成に必要な空気量は 46m<sup>3</sup>/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、図 5.3.6 に示すように送風管を介して各舷に 3ヶ所の気泡吹出し口へと送られるが、各送風管の途中には流量計が設置されていて、吹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。

吹出し部は、昨年度の研究におけ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、2.7 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、などに配慮して図 5.3.6 のように決定した。

吹出し部の形状を図 5.3.7 に示す。船体表面に 100mm x 20mm の鋼製の角パイプが設置されており、その外面に直径 2.4mm の空気吹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されている。また、吹出した空気が船体表面に沿って剥離を起こさずに滑らかに後流へ流れ去るよう角パイプの前後に整流板を設けた。その傾斜角は長尺模型試験にて実験的に検討し、上流側( $\alpha 1$ )を 1/10、下流れ側( $\alpha 2$ )を 1/20 とした。

気泡発生装置を製作するにあたり、その試作装置を製作して予備実験を実施した。コンプレッサを 2500rpm で運転して約 12m<sup>3</sup>/min(6 力所合計で 72m<sup>3</sup>/min:3m 水深の位置に吹出した場合)の空気供給量があることが確認され、抵抗低減に必用な予想吹出し流量 7.7m<sup>3</sup>/min (同 46m<sup>3</sup>/min)を十分越え

る空気が安定して供給されることが確認された。

### 5.3.5 長尺平板船を用いた予備実験

実船実験において船体表面に外付けされる気泡発生装置、局所せん断力計、局所ボイド率計、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 曲航水槽において、34m の長尺平板船を用いた予備実験を実施した。

図 5.3.8 に平板船上の機器配置を示す。船の全長は 34m で、気泡発生装置は、境界層がある程度厚くなった船首から 11.5m の位置に、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。局所せん断力計(図中の Osaka)、局所ボイド率計も同様である。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。配線フェアリングは、局所せん断力計と局所ボイド率計を取り外し、その中間あたりに取り付けた。

図 5.3.9 に気泡吹出し無しの状態でのせん断力の計測結果を示す。曲線は 1/7 乗則に基づく推定値である。F1 を除いて、気泡発生装置の上流にある F2、下流にある F3、F4 は推定値とも良く対応している。局所せん断力計の値は従来法による計測値と良く対応している。局所ボイド率計の下流にある F5 の値は、後流の影響を受けたためか、やや低い。気泡吹出し状態での局所せん断力の低減効果を図 5.3.10 に示す。その結果は、以前に従来法で気泡を発生させた結果と良く対応しており、実船で使用予定の気泡発生装置が、従来法と同じ性能をも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。

## 5.4 実船実験

実船実験は以下のスケジュールにて行われた。

平成 13 年 9 月 8 日～12 日 入渠、計測装置など取り付け工事

9 月 13 日～15 日 実験航海

9 月 15 日～27 日 入渠、計測装置など撤去工事

取り付け工事は SR 独自のドックとして住友重機械工業(株)浦賀工場にて行われ、撤去工事は青雲丸の中間検査が行われた三菱重工業(株)本牧工場にて行われた。

実際には台風の影響で取り付け工事期間が 1 日延び、実船実験の期間が 3 日より 2 日に短縮されている。気泡発生装置は、1 台で約 20m<sup>3</sup> の供給能力をもつエンジン型のコンプレッサをポートデッキ上に 6 台設置し、正確な流量を計測するため流量計を設置した。計測装置として、船体外板に摩擦応力計、局所ボイド率計及び気泡観測用 TV カメラを設置した。船体外板への装着は工事面及び船主の要望があり溶接ではなく、接着工法で行った(5.3 節を参照)。

実船実験は 2 日間行われ、下表に示す内容が実施された。天候に恵まれ、海象も非常によい状態にて実験が行われた。実験を行った海域を図 5.4.1 に示す。

実験内容一覧表

	実験番号		設定船速(kt)	気泡吹出し量	気泡吹出し位置
A	1～2	片道	10,14	最大	全て
B	3～6	片道	10,14,17,	無し	—
C	7～13	往復	14	無し・1/2・最大	全て
D	14～19	"	17	"	"
E	20～25	"	19	"	"
F	26～33	"	10	"	"
G	34～41	"	14	無し・1/2・1/4・最大	"

H	42~47	〃	最大	無し・最大	上段・下段・全て
I	48~50	片道	最大	無し・最大	上段・全て

撤去工事では各機器の撤去及び補修が行われ、実験前の状態に戻すべく作業された。

## 5.5 計測・観測結果

### 5.5.1 速力計測結果

速力計測時の海象は風速 3~5m/sec、目視波高 1.1~1.7m で、船体運動、特にローリング運動は高々 1.7 度程度という平穏な海域で計測を実施した。速力と軸馬力に対する潮流、風の影響を谷口・田村法により解析したが、速力・馬力曲線はそれぞれの生データを往復平均した値と変わらなかったため、以下の速力・軸馬力は対地速度の生データの往復平均値を採用した。

#### (1) 軸馬力と軸回転数

CPP 翼角を 25.5 度に保ち、気泡吹き出し有無の状態を比較した結果、軸馬力と軸回転数の関係はマイクロバブルによって全く影響を受けないことが分かった。

#### (2) 速力・軸馬力計測結果

速力と軸馬力の関係は、マイクロバブルの吹き出し位置と吹出し量によって変化した。まず、バブルを全ての吹出し位置から、コンプレッサー最大出力で吹出した場合(MAX)と約半分の出力で吹出した場合(1/2MAX)の速力・軸馬力の変化を図 5.5.1 に示す。なおこの軸馬力には気泡発生動力の損失分は考慮されていない。バブルを吹出すことにより、軸馬力は同等かやや減少し、速力は 14 ノット付近で 0.3~0.5 ノットと大きく低下している。これを同一速力状態に換算すると、14 ノットにおいて、吹出し量 MAX で 4%、1/2MAX で 12% と、バブルを吹出すことにより馬力が増加し、その増加量は 1/2MAX 吹き出し状態の方が MAX 状態よりも大きいという結果となった。

次に、速力 14 ノット付近において、上段(①&④)位置のみからマイクロバブルを MAX 量吹き出し、速力・軸馬力を計測した結果を図 5.5.2 に示す。バブル吹き出しにより速力がやや増加し、軸馬力が僅かに低減した。この結果を、図中に示した船速(V)の 3 乗曲線を用いて同一速力状態に換算すると、船速 14 ノット、上段(①&④)MAX 吹出し状態において、軸馬力が 3% 低減したことが分る。なお速力 19.5 ノットの同様な状態では、軸馬力の低減率は 1% 程度に減少した。

これらの結果から、同一速力状態に換算した軸馬力は、マイクロバブルの吹き出し位置、吹出し量、船速によって敏感に変化し、バブル無し状態より増加することも減少することもあることが分かった。そして、船速 14 ノット、上段(①&④)MAX 吹出し状態において、3% の軸馬力低減が得られ、この低減量から、上段(①&④)吹き出し位置における水深約 1m による水圧のみを考慮した気泡発生動力を差し引いた、正味の軸馬力低減率は 2% であった。

#### (3) プロペラ推力の計測結果

プロペラ推力と船体抵抗は、船殻効率が気泡により変化しないと仮定すると、比例関係にあり、プロペラ推力の計測は船体抵抗の評価に非常に有益である。マイクロバブルによるプロペラ推力の変化率は、概ね軸馬力と同様の傾向を示し、バブルの吹き出し位置、吹き出し量および船速によって変化した。全ての吹き出し位置から MAX 状態及び 1/2MAX 状態で吹き出した場合のプロペラ推力は、同一速力でバブル無しの場合に比べて大きくなり、その増加率は、14 ノット 1/2MAX 状態において最大 11% であった。一方、図 5.5.3 に示すように、全ての吹き出し位置からコンプレッサーの 1/4 出力状態(1/4MAX)で吹き出した場合、及びバブルを上段(①&④)または下段(③&⑥)のみから MAX 状態吹き出した場合に、推力はバブル無しの場合に比べて低減し、その低減率は、速力 14 ノットにおいて最大約 4% であった。

すなわち、マイクロバブルにより、速力 14 ノット状態において、バブル吹き出し状態を様々に変えることにより、最大 11% の抵抗増加と最大 4% の抵抗低減が得られた。

### 5.5.2 プロペラ効率への影響

実船実験で計測された船速、軸馬力、プロペラ回転数、推力を基に、マイクロバブルの有無によるプロペラ効率の変化を調べた。解析に用いたデータは全て往復航の平均である。ここでは前進常数とプロペラ効率の計算にはプロペラ前進速度の代わりに船速を使っている。すなわち、有効伴流係数を  $w$  とすると、通常の前進常数  $J$  とプロペラ効率  $e_p$  を  $(1-w)$  で除した値を前進常数、プロペラ効率と呼んでいる。

9月14日に実施した速力試験結果による実船のプロペラ効率を図5.5.4に示す。マイクロバブルによって、明らかに効率が3~6%減少している。9月15日の気泡吹出し位置変更実験によるプロペラ効率を図5.5.5に示す。マイクロバブルの発生が上段のみの場合はバブル無しと同等で、下段のみ又は全ての吹出し装置からマイクロバブルを吹出した場合はバブル無しよりも効率は3~6%低下している。このことから、下段の吹出し装置からマイクロバブルを吹出した場合は、マイクロバブル群がプロペラに流入してプロペラ効率を低下させているが、上段の吹出し装置から吹出した場合は、マイクロバブルの多くはプロペラ上方または側方に流れているため、プロペラ効率を変化させるほどの影響を及ぼしていない、と推測される。

マイクロバブルがプロペラに流入するとプロペラ効率が低下するメカニズムについてはよく分かっていない。今後の研究課題である。

### 5.5.3 気泡流れ観測結果

観測装置として小型の水中TVカメラを3個取付け、No.1で船首の気泡発生装置の作動状況、No.2でS.S.4のビルジキール付近の気泡流れ、No.3でプロペラへ流入する流れの観察を行った。

観測結果の代表例を図5.5.6に示す。本図は14ノット、気泡吹出部①&④、流量MAX(TNo.36)の条件における観測結果である。観測結果をまとめると次の通りである。

- 船首気泡吹出部では、気泡吹出部①から吹出された気泡がほぼ船体に沿って後方へ流れているのが観察される。
- ビルジキールからの観測結果により、気泡吹出部①&④から吹出された気泡流は、船体から若干離れているが、ほぼ当初予測した軌跡に近い状態でプロペラ方向へ流れていることがわかった。船尾ではプロペラ面への気泡流入範囲は当初の予定より広いが、ほぼ船体中央および船尾外板に沿って気泡が流れているのが観察された。
- 一方、気泡吹出部③&⑥から吹出された気泡流は、比較的船体から離れて船尾方向へ流れていることがわかった。船尾ではプロペラ面への気泡流入範囲が広く、船体中央に沿って流れる気泡が少ないのが観察された。気泡吹出部①&④から吹出された気泡流のほうがより船体に沿って流れていると判断される。
- 船体動揺とくにピッティングの影響により船首気泡吹出部から吹出された気泡流は上下方向に振られて後方へ流れていくのが観測された。気泡流はピッティングの影響を受けて軌跡を変えやすいと思われる。

### 5.5.4 局所せん断力計測結果

#### (1) 計測装置

初年度より、実船実験において表面摩擦応力を計測する装置の検討を行った。船体表面の僅か上方に浮かせた200mm×200mmの板をバネで支えて、そこに働く摩擦力を計測して摩擦応力を検出する形式とした。できるだけ小さい厚み(27mm)の計測装置とし、船体外板に外から貼り付けて900×900mmのフェアリング分を含めて船体表面と滑らかにつながるような装置とした。青雲丸の船速を想定して板に働く局所せん断力を推定し、検出器の容量は約500gfと決定した。船体に最

終的に取り付けた写真を図 5.5.7 に示す。

初年度より試作品を製作し、神戸商船大学ポンドにて海水中での動作や海水中に放置した場合の耐久性を調査した。また、弓削商船高等専門学校の小型教習艇「はまかぜ」を用いて直接航走による摩擦力を検出する予備実験を行った。検出部を埋め込んだ長さ 3720mm のボードを「はまかぜ」の船側に取り付け、5 ノットから 11 ノットまで船速を変えて摩擦応力を計測した。結果を図 5.5.8 にシェンヘルの摩擦公式と比較して示すが、速度の計測や船体の姿勢などの影響を考えると計測はある程度の精度で行えているものと考えられる。また海上技術安全研究所においても長尺模型船を用いて他の装置とあわせて予備実験を行った。その結果、フェアリング形状も実船実験において使用可能であろうと予測された。

## (2) 実船実験結果

局所せん断力計を 7 台準備して船体外板にフェアリングとともに取り付けた。うち 2 台はトラブルがありデータ収集ができなかったが、他のせん断力計では安定したデータをとることができた。計測した力から局所せん断力係数を出すためには計測された対水船速を用いた。他のせん断力計では摩擦応力が増加する場合も見られたが、SS8 に取り付けた 2 台のうち水面に近い方(センターインより幅方向 2.95m、ベースラインより高さ方向 2.41m)の局所せん断力計では気泡吹出しによってせん断力が明確に低減したので、その結果について詳述する。

図 5.5.9 に吹出し量最大の場合において計測データを気泡吹出しなしの状態と比較して示す。横軸は速度である。結果は吹出しなしの場合は少しのばらつきで曲線に乗っているように見える。これには力の計測の誤差と速度計測の誤差などが入っており、計測値にはこの気泡なしのデータのばらつき程度の誤差があるものと、このばらつき以上に変動したデータは気泡による変化を反映しているものと思われる。これによるとこの装置位置では 14kt~19kt の範囲で摩擦応力の低減が見られ 17kt では 20% 程度も低減している。図 5.5.10 に 14kt の場合における摩擦応力の吹出しありとなしの状態の比を示すが、吹出し量及び吹出し位置により摩擦応力低減量が変化することが示されている。

また図 5.5.11 に吹出しなしの場合と 1/2MAX 吹出した場合の摩擦力の時系列を示すが、後者は気泡の影響により大きく変動していることがわかる。吹出しありの場合の度数分布を見ると、吹出しなしの状態の値付近と摩擦力がかなり小さい状態に 2 つの山があり、周波数解析によれば運動と同じ周波数にピークが得られることから「運動によって気泡流の軌跡が変わり、上記 2 つの状態が交互に現れている」ものと思われ、低い方の状態を持続できれば大きな低減効果が得られると思われる。

### 5.5.5 局所ボイド率計測結果

一定体積の水流中に存在するマイクロバブルの直径と数を 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装置を新たに開発した。ボイド率計は図 5.5.12 にその原理を示すように、長さ 400mm、幅 55mm、高さ 100mm の翼型形状のストラットに小型の CCD カメラと LED ストロボを内蔵し、側面の窓から水流中のマイクロバブルを撮影するもので、撮影する体積を一定に保つため、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、下方からマイクロバブルを照らすように遮蔽板の下端は 45 度に曲げられている。

このボイド率計を 2 台、SS6 と SS8 の船底に取り付けたが、SS8 のものは実験開始後すぐに浸水して作動しなくなり、SS6 に取り付けたボイド率計の測定結果のみが得られた。測定結果の一例を図 5.5.13 と図 5.5.14 に示す。いずれも船速 19 ノット、吹出し量 1/2MAX での結果で、図 5.5.13 は船底から下方に測った境界層中のボイド率分布である。横軸の下方の数値がストラットとフェアリングの影響を補正して求めた船底からの距離である。船底から 5mm 以上離れた所を通る気泡が多い。図 5.5.14 は気泡の大きさの分布である。数では直径 0.5mm 程度の気泡が多いが、体積で見ると直径

1mm程度の気泡の寄与が大きいことになる。

SS6 の位置ではせん断力も計測されているが、せん断力はほとんど変化しなかった。気泡が船体から約 5mm 離れて通過したことがその原因と考えられる。気泡を船体に密着させて流す方法の開発と共に、境界層中のどの位置にマイクロバブルが来たら最も効果があるか、今後の解明が待たれる。

## 5.6 実船実験結果の評価

実船実験は、天候に恵まれ、良好な状態で実施された。諸機器は概ね順調に動作し、実験期間の短縮を補い、当初の予定に近い実験を実施することができた。

マイクロバブルによって摩擦抵抗低減効果を得るために最も重要なことは、船体表面の出来るだけ広い範囲を均一に気泡で覆うことである。しかし実際は、気泡の流れ方が均一でなく、船体表面から離れると共に、予定よりもやや上方を流れた。そして恐らくそれが原因で、多くの場合において、気泡を吹出すことにより船体抵抗が数%乃至 10 数% 増加し、局所せん断力も増加した。また、多くの場合に、恐らく気泡がプロペラに流入したことが原因で、プロペラ効率が 3~6% 低下した。これらは予期しなかった結果であり、新たに抽出されたマイクロバブル法の実船適用の問題点である。

一方、気泡発生位置を選ぶことにより、プロペラ性能低下が回避されると共に気泡分布状態が改善され、計画速力の 14 ノットにおいて、マイクロバブルによって気泡発生動力を考慮しない名目的な状態で 3%、気泡吹出し位置の静水圧に基づく気泡発生動力を考慮した正味の状態で 2% の軸馬力低減が得られた。計画値と比べて、名目で 60%、正味で 100% の低減が得られたことになる。また、水深の小さな位置(1m)から気泡を吹出し周囲流れによって船底(水深 5.6m)に送り込むという気泡発生動力節減法についての手がかりも得られた。名目で 3%、正味で 2% の低減効果はマイクロバブル法に期待された数 10% 程度の摩擦低減効果から見れば確かに小さいが、既存船舶に適用したため種々の制約があった上での値であり、今後大きく改善される可能性がある。

残された課題も多い。1 つは、十分な実験データが得られなかったことである。マイクロバブルのような新しいデバイスを評価するためには、単に船体抵抗などのマクロ量だけでは不十分で、詳細な分布データが必要である。特に気泡軌跡は、推定とやや異なった挙動示したため、詳細なデータが必要である。しかし、今回の実船実験結果では、計測機器数が少なかったこと、いくつかの機器の動作不良があったことなどが原因で、データの質・量がやや不足した。実船での"正解"がよく分からぬ状態であると言える。今後、マイクロバブル法の実用化にとって重要な気泡軌跡を含む実船性能推定計算法の改良を行うためには、新たな実船実験を行い、今回開発された計測機器を活用して、より詳細なデータを取得することが望まれる。

気泡発生装置の設計法も残された課題の 1 つである。基礎研究では、平板に気泡発生装置を埋め込んだ理想的な状態で実験が行われるのに対して、実船では配置・コストなど様々な制約があり、その設計は容易でない。今回の実船実験においても、サイドスラスターの穴を避ける、工作上の都合、気泡発生用コンプレッサ台数などの制限などの制約があった。個々の船型や諸条件に順応した気泡発生方法を、今後も検討する必要がある。

本研究において新たに開発された局所せん断力計、局所ボイド率計は所定の性能を發揮し、実船実験計測において有効であることが示され、今後の実船実験計測法の進展に寄与すると期待される。また、今回の実船実験では各種機器を接着により船体表面に取り付けたが、1 件の脱落事故もなく実験を終了することができた。接着法は、前後処理に多くの工数を要する溶接法に比べ、簡便な方法であり、今後の実船実験において活用が期待される。

## 6. 結言

4年間の研究による成果をまとめると、以下の通りである。

### 6.1 模型実験とその考察による成果

- (1) マイクロバブル法による摩擦抵抗低減効果は気泡の大きさ、境界層厚さの変化に依存せず、垂直面においても低減効果が存在する。
- (2) 空気膜法による摩擦抵抗低減効果は大型模型船の速度がVLCCの航行速度に近い7m/secになつても低下せず、撥水性塗料を用いると低減効果が若干増加する。
- (3) 初期粗度の小さい撥水性塗料は防汚性能が優れ抵抗増加が少ない。また、自己研磨型塗料はエイジング効果により粗度が低下し、等価砂粗度の概念により実船の抵抗低減効果が推定できる。なお、弾性皮膜の抵抗低減効果は確認できなかった。
- (4) 空気膜、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果について実船の抵抗低減性能推定法が導出された。
- (5) 実船実験による摩擦抵抗低減効果検証の可能性について調査し、空気膜法、マイクロバブル法双方とも浅喫水幅広船への適用が最適であること、痩せ型船型であってもマイクロバブル法の効果についての検証は可能であることが示された。

### 6.2 実船実験の実施による成果

- (1) 推力の計測結果より、部分吹き出しや全体吹き出しでも空気流量が少ない場合に低速側で推力の減少(14ktで約4%)が確認された。空気流量が中程度になると、推力増加に転じ、高速側で推力増加が減少する傾向を示し、さらに空気流量を増やし、流量大とした場合は最高速度において推力増加低下の傾向が認められ、最適空気量の存在が示唆された。
- (2) 馬力計測結果からは水面に近い部位からの吹き出しにより馬力低減と速度の上昇が確認され、同一速度に換算すると14ktで約3%、19ktで約1%の低減となる。そのほかの吹き出し方法では馬力の低下を上回る速度の低下(同一速度換算で馬力の増加)、高速域での馬力増加率の低下などが認められ、最適空気量の存在、バブルの巻き込みによるプロペラ効率の低下等が示唆された。
- (3) 局部摩擦応力の計測結果からは、気泡放出部より15mほど下流の垂直に近い船側部であっても検出部に気泡が流れてきたときは20%以上の摩擦力低減効果のあることが確認された。なお、その他の計測位置では摩擦力の低下は認められず、むしろ摩擦力の増加が計測された。
- (4) 推力、馬力、局部摩擦力の計測結果より、気泡の吹き出し方法を誤ると抵抗増加になることが確認された。
- (5) 水中カメラ、ポイド率計の計測結果からは、境界層内のマイクロバブルの存在が確認され、大型模型船による計測結果より外側に気泡が分布し、摩擦抵抗低減効果の少ないことが示唆された。
- (6) 接着法による計測機器の取り付けは手軽であり、十分な強度を有するため、実船実験に有用であることが分かった。

[ マイクロバブル法 ]

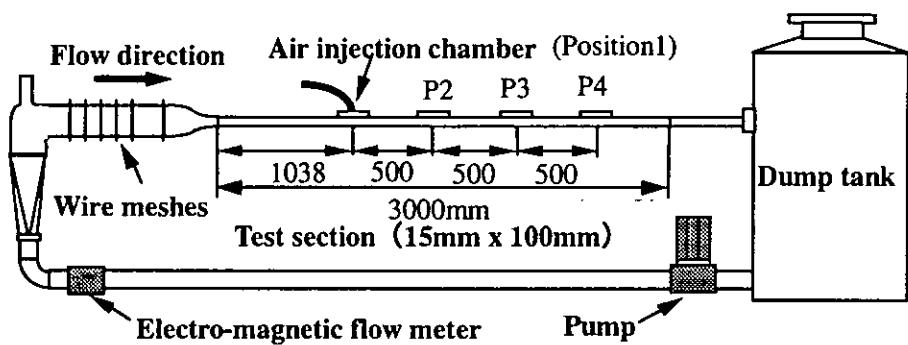


図 2.1.1 マイクロバブル実験用小型高速流路

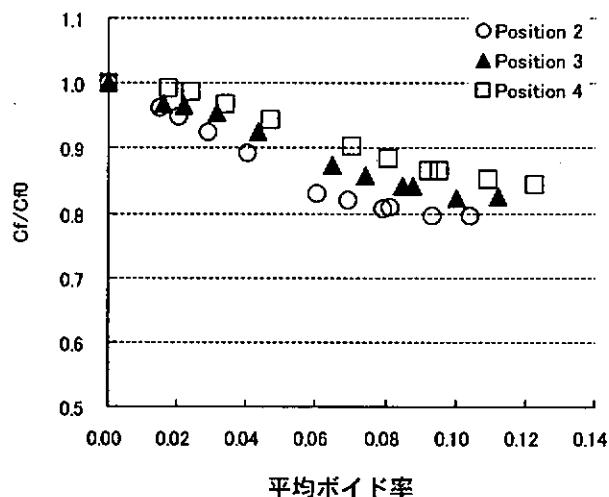


図 2.1.2

局所せん断力の低減と平均ポイド率( $U=7\text{m/s}$ )

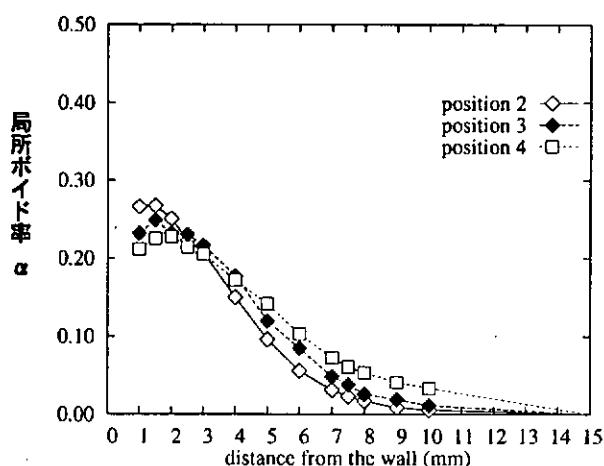


図 2.1.3

局所せん断力の低減と平均ポイド率( $U=7\text{m/s}$ )

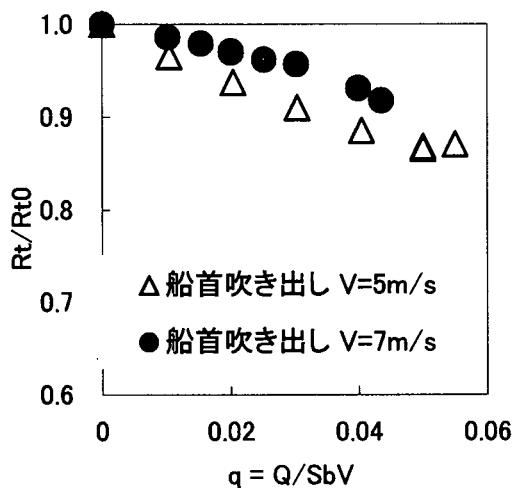


図 2.2.2 50n 平板船における全抵抗低減効果

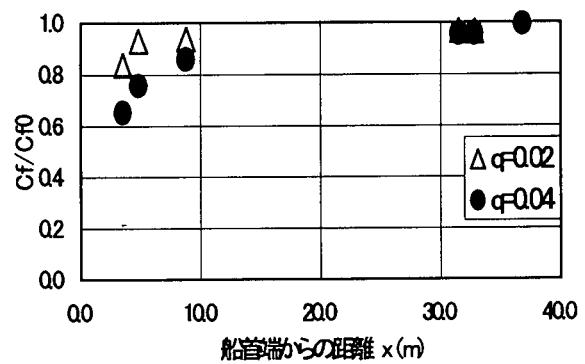


図 2.2.3 摩擦低減効果の流れ方向分布

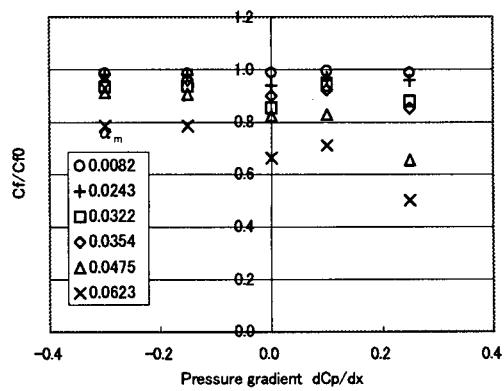


図 2.3.1 流れ方向圧力勾配の影響による摩擦抵抗低減効果

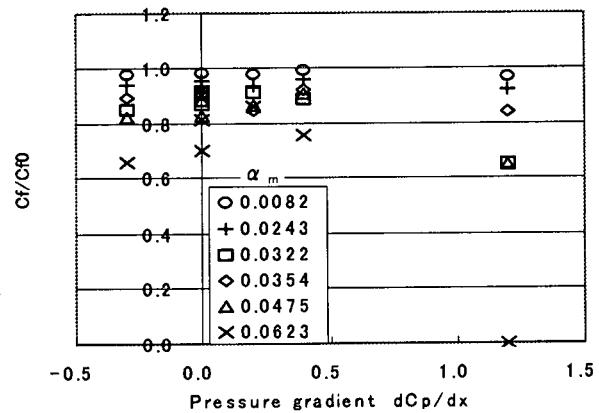


図 2.3.2 曲面形状の影響による摩擦抵抗低減効果

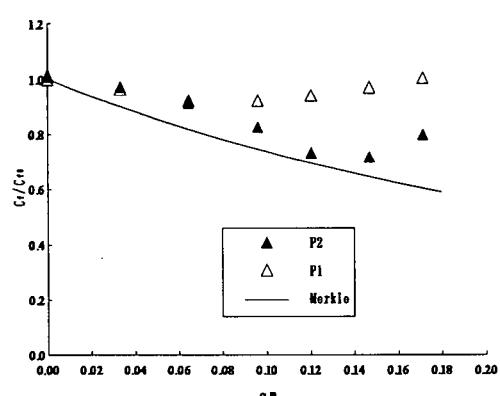


図 2.4.1 平均ボイド率と摩擦抵抗低減率

(垂直壁面、 $V_w=10.0\text{m/s}$ )

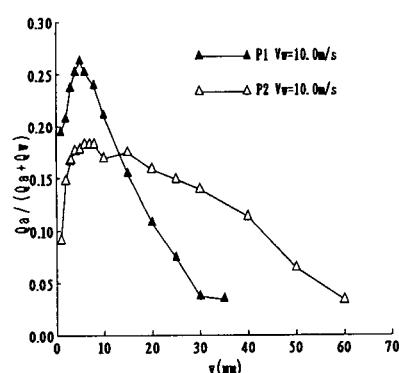
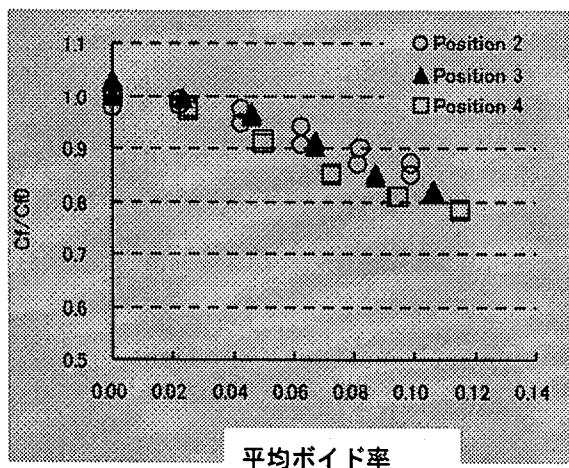


図 2.4.2 垂直壁面上のボイド率分布



2.5.1 海水における局所せん断力の低減と  
平均ボイド率( $U=7\text{m/s}$ )

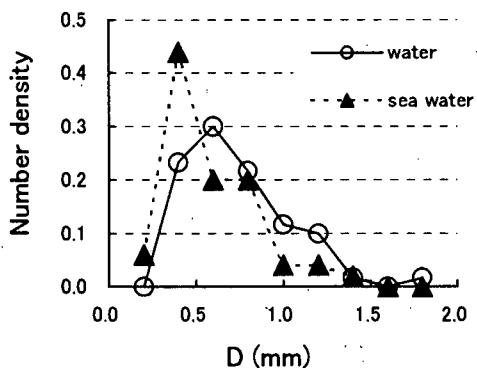


図 2.5.2 海水及び真水中の気泡径分布  
( $U=7\text{m/s}$ 、Position 2)

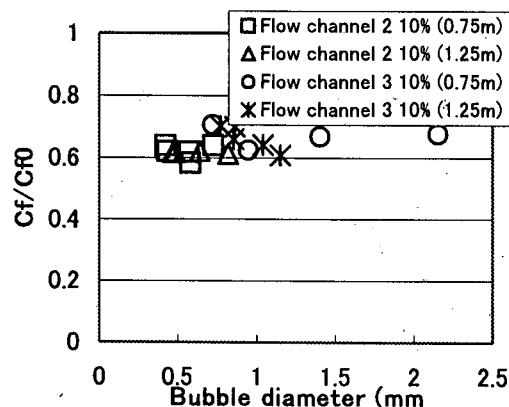


図 2.6.1  
摩擦抵抗低減率と平均気泡直系の関係  
( $\alpha=0.1$ ,  $U=5\text{-}7\text{m/s}$ )

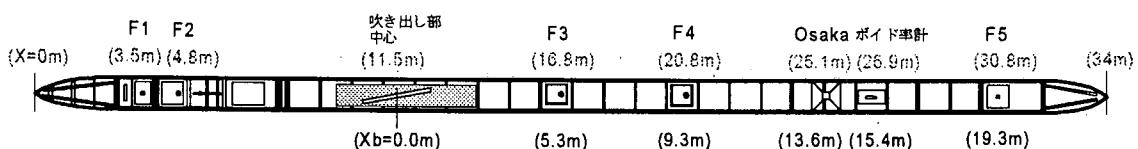
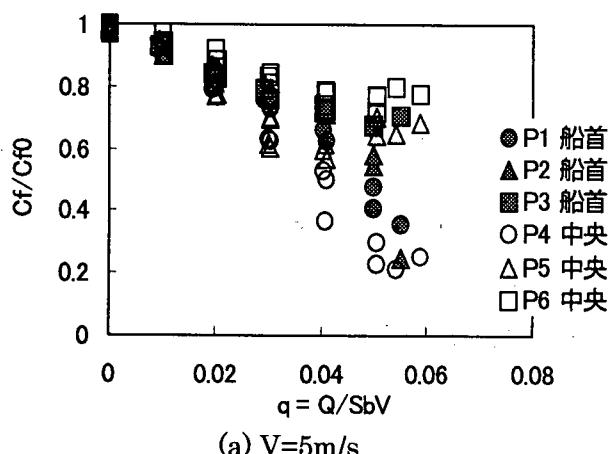
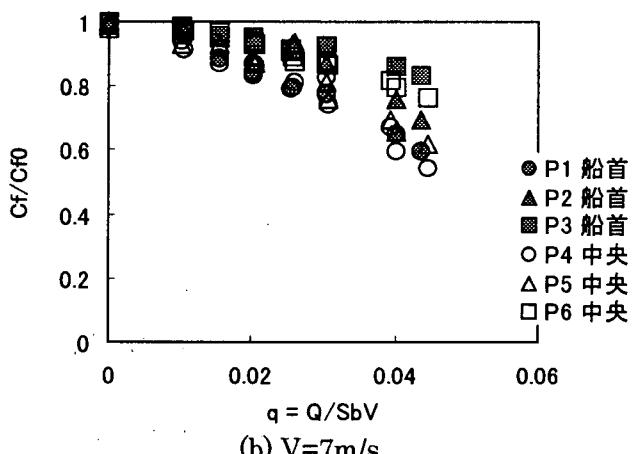


図 2.7.1 50m平底船における各装置の配置



(a)  $V=5\text{m/s}$



(b)  $V=7\text{m/s}$

図 2.7.2 境界層厚さの異なる位置吹き出しにおける局所摩擦抵抗低減効果の相違(50m 平板船)

## [ 空 気 膜 法 ]

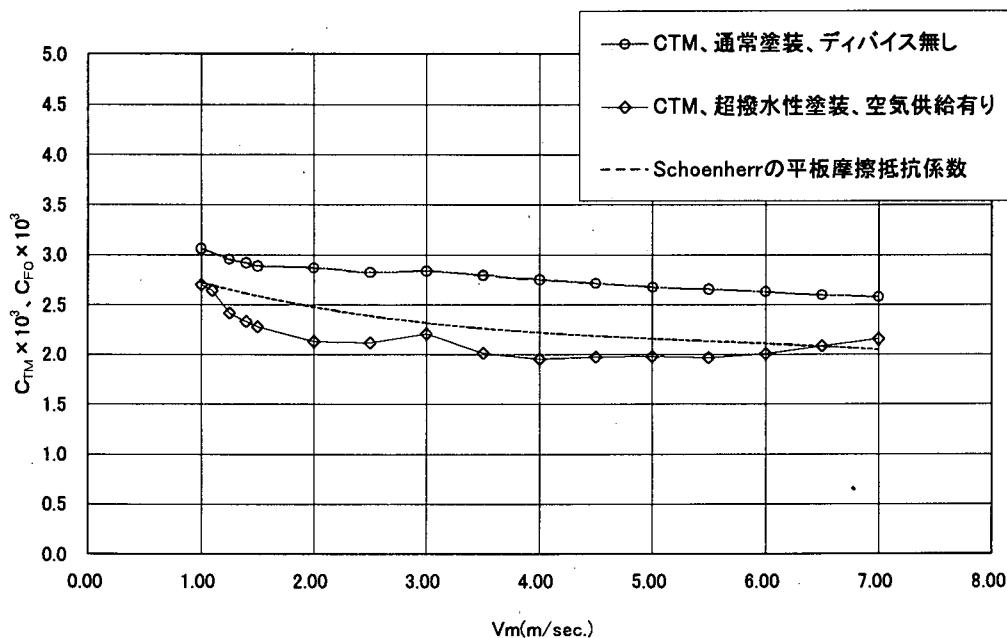


図 3.3 超大型模型船試験結果

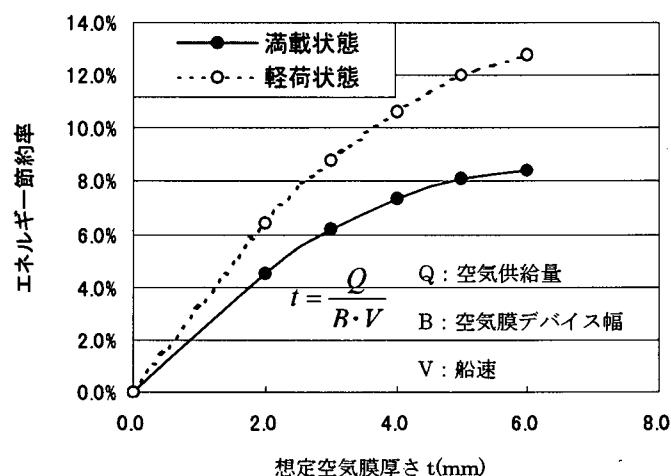


図 3.4 エネルギー節約率試算例

[ 表面処理法 ]

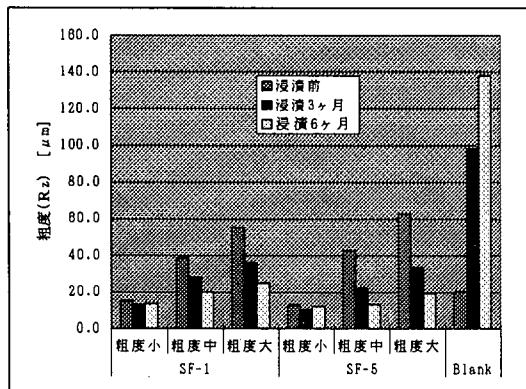


図 4.1.2 平均粗度  $R_z$  の経時変化

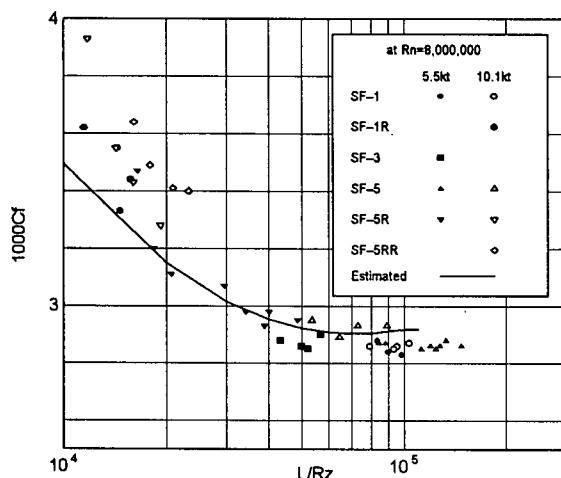


図 4.1.3 表面粗度と抵抗係数の関係

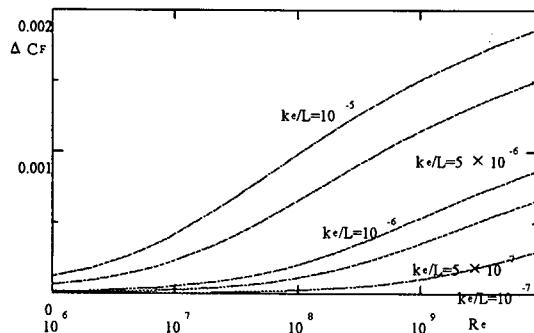


図 4.2.1  $\Delta C_F$  とレイノルズ数の関係

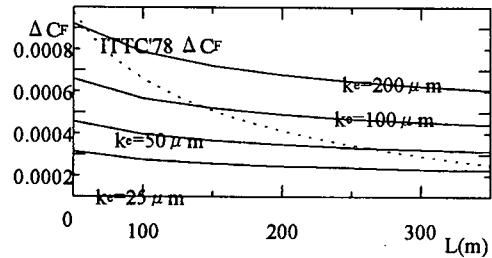


図 4.2.2  $\Delta C_F$  の推定

## [ マイクロバブル法 ]

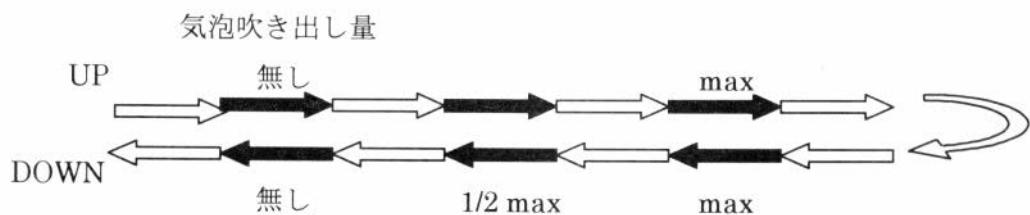


図 5.1.5 実船実験時の航走状態

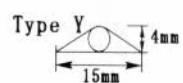
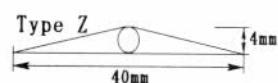
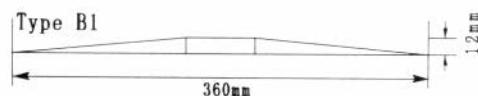


図 5.3.2 選定された配線フェアリング形状

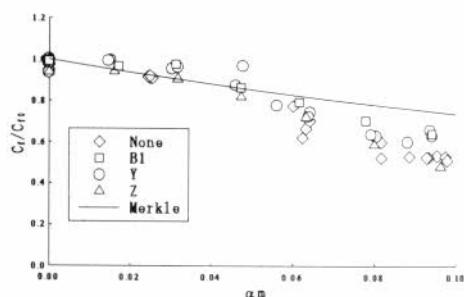


図5.3.3 配線フェアリングの摩擦抵抗低減率への影響 ( $V_w=7.0\text{m/s}$ )

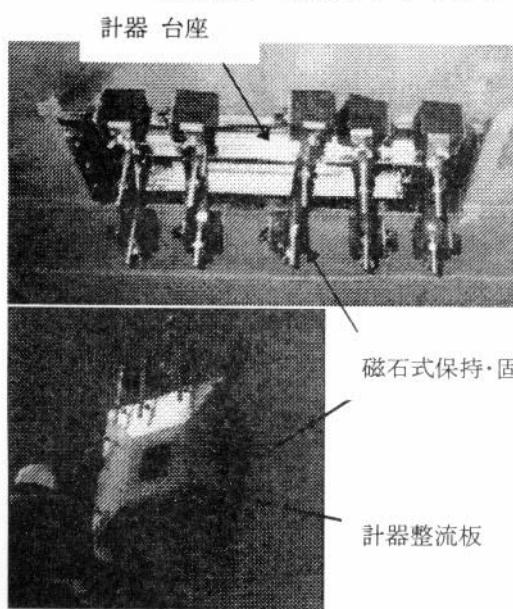


図 5.3.4 計器の接着・装着

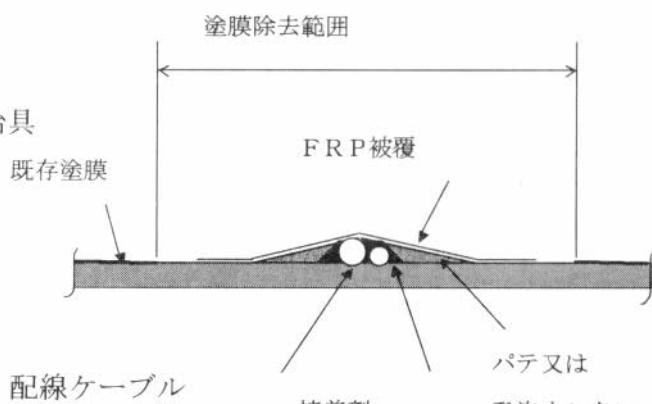


図 5.3.5 配線ケーブルの接着とフェアリング

[ マイクロバブル法 ]

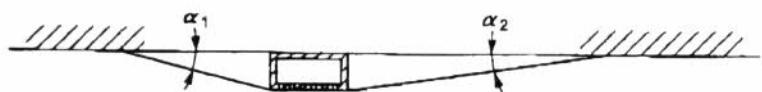


図 5.3.7 気泡発生部の断面形状

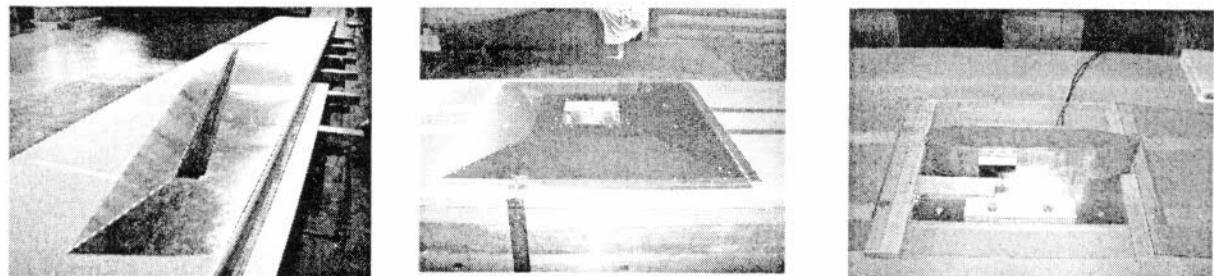
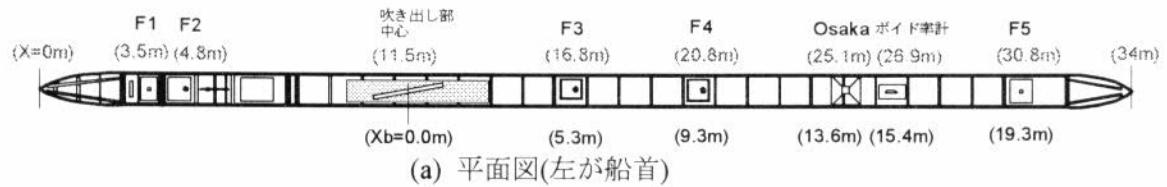


図 5.3.8 予備実験用 34m 平板船

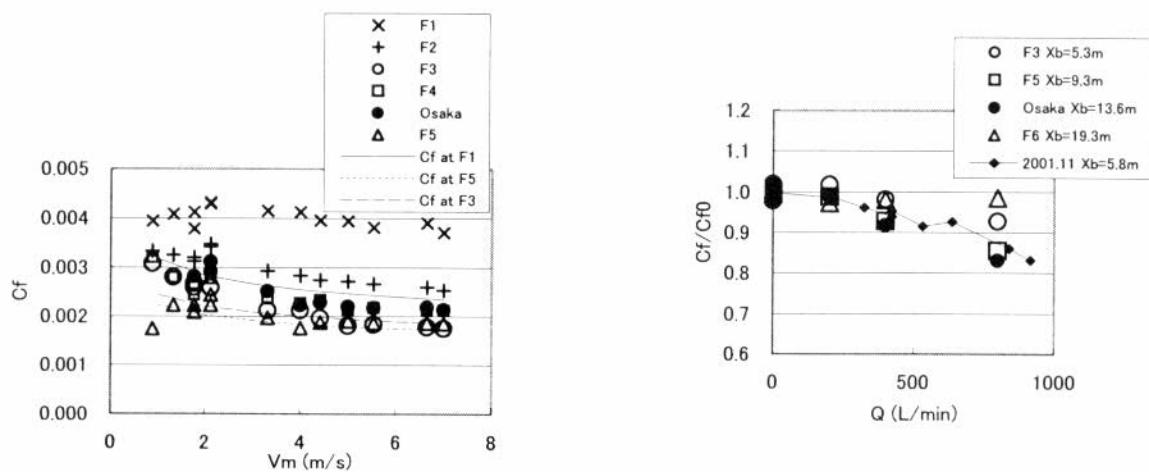


図 5.3.9 非気泡状態における局所せん断力  
計測結果

図 5.3.10 気泡状態における局所せん断力  
低減効果

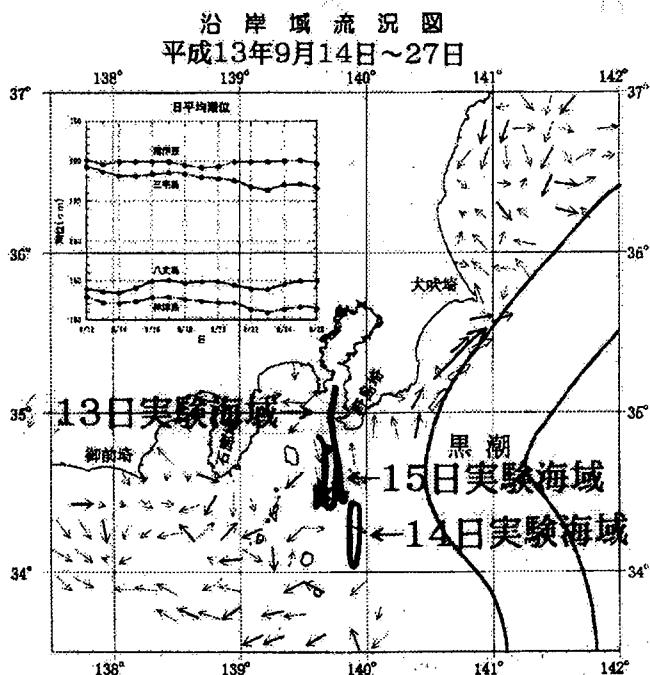


図 5.4.1 実船実験海域

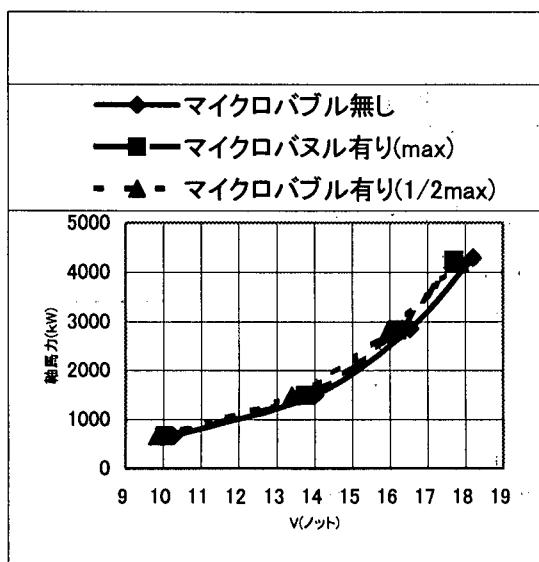


図 5.5.1 速力計測結果

(全ての気泡吹出し装置から吹出した場合)

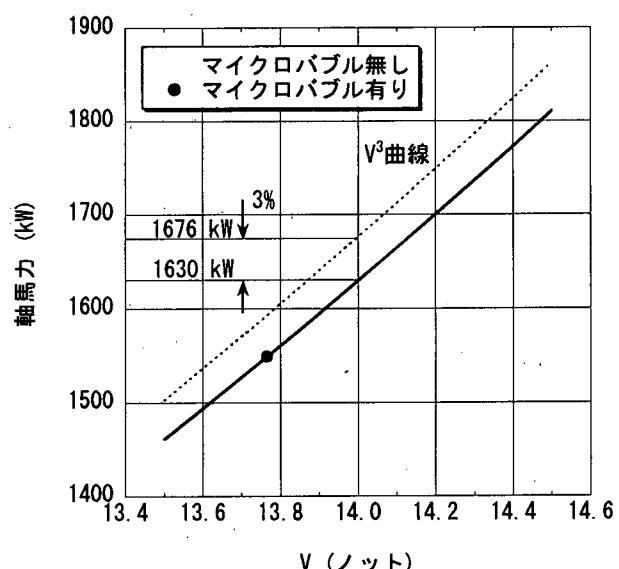


図 5.5.2 速力計測結果

(気泡吹出し装置①&④から吹出した場合)

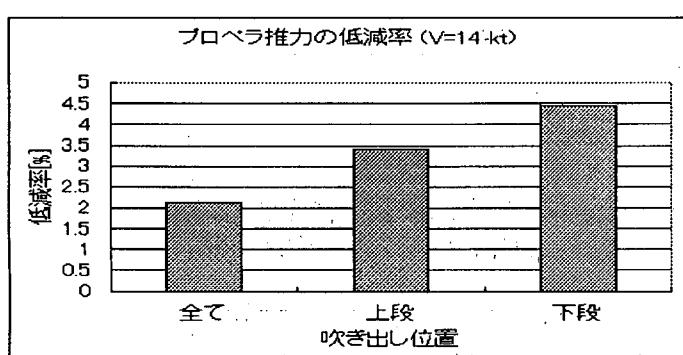


図 5.5.3 プロペラ推力の低減率 ( $V=14\text{kt}$ )

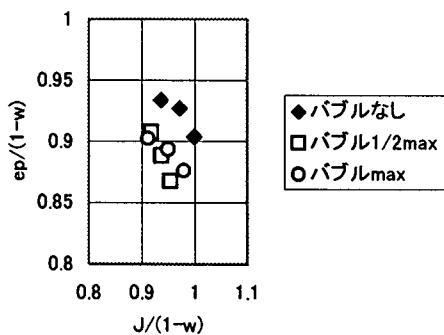


図 5.5.4 プロペラ効率に及ぼす  
マイクロバブルの影響

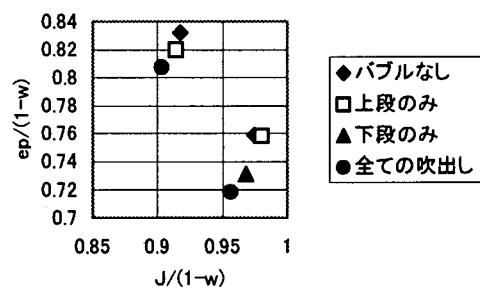


図 5.5.5 気泡吹出し場所による  
プロペラ効率の変化

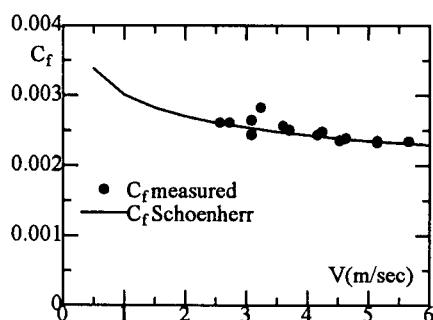


図 5.5.8 「はまかぜ」による予備実験結果

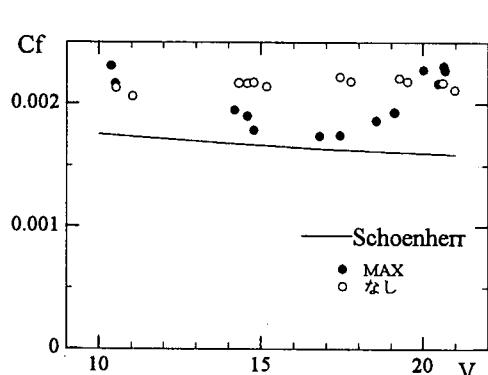


図 5.5.9 摩擦応力の気泡有無での比較

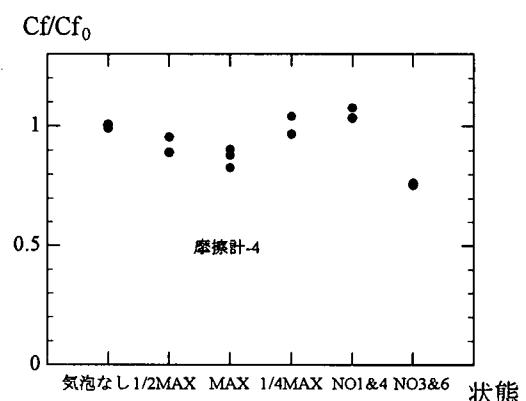


図 5.5.10 各状態での摩擦応力低減

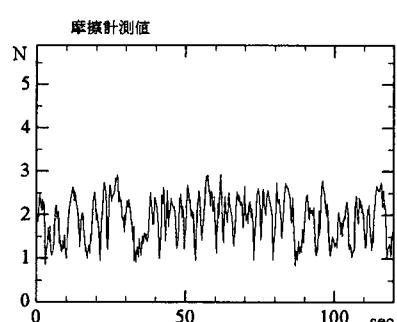
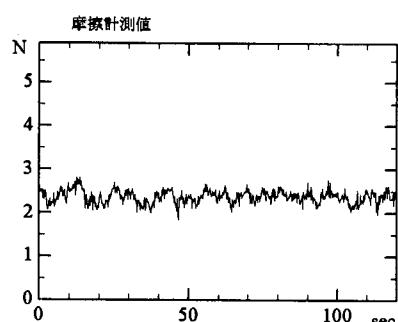


図 5.5.11 気泡なしの場合(左)と噴出し量 1/2MAX(右)における摩擦力時系列

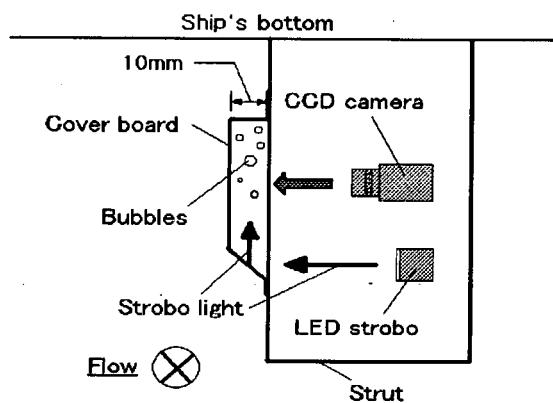


図 5.5.12 局所ポイド率計の原理

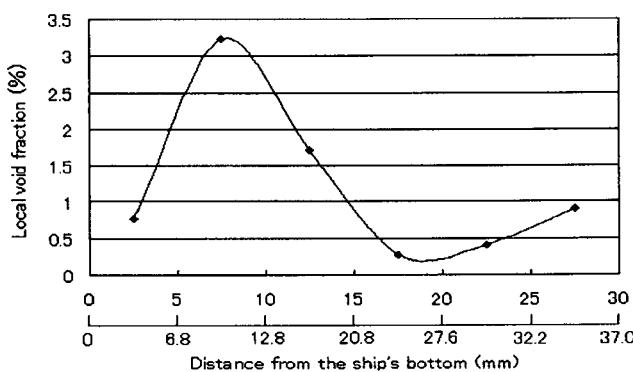


図 5.5.13 局所ポイド率計の原理

( $V=19\text{ knot}$ ,  $1/2\text{Max}$ )

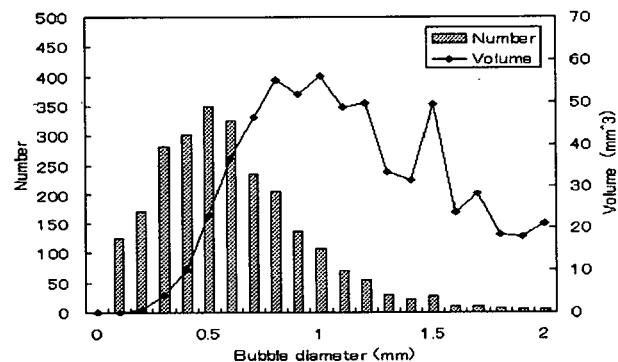


図 5.5.14 マイクロバブルの大きさの分布

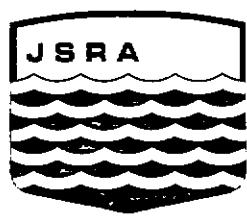
( $V=19\text{ knot}$ ,  $1/2\text{Max}$ )

---

発 行 平成14年3月  
発行所 社団法人 日本造船研究協会  
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号  
          海洋船舶ビル6階  
電 話 総務部 03-3502-2132  
          研究部 03-3502-2133  
F A X                   03-3504-2350

---

「本書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて  
作成したものを増刷し頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan