

## 空気潤滑法による船舶の省エネルギー技術

上入佐 光\*、川島 英幹\*、牧野 雅彦\*、竹子 春弥\*

### **An Energy Saving Technique for Ships by Air Lubrication System**

by

Hikaru KAMIIRISA, Hideki KAWASHIMA, Masahiko MAKINO  
and Haruya TAKESHI

#### Abstract

Air lubrication system has been well known as one of the efficient energy saving techniques. In the system air bubble masks the wall in the water phase and the frictional resistance acting on the wall can be reduced consequently. When applying this technique for ships, the frictional resistance of ships can be reduced by bubble injection to their flat bottom. However, it has not been in a practical use until recently due to two major issues; 1) it needs a certain amount of energy to send air directly to the bottom of a ship, and 2) it is quite challenging to quantify the amount of energy saving. National Maritime Research Institute has been experimentally studying the relationship between the amount of air put into the bottom of a ship and the drag reduction using a large scale flat bottomed model ship, e.g. 1m in breadth and ranging over 50m in length, to figure out the two issues. Preliminary experiment has also been carried out repeatedly in order to understand the effect of air bubble to the propeller performance. In 2007, based on the knowledge from these studies, a full-scale trial was performed to validate the effect of energy saving by the air lubrication system using the cement cargo ship of 120m in length supported by New Energy and Industrial Technology Development Organization. The results indicated feasibility and validity of the air lubrication system for energy saving. Followed by the full scale trial, the equipment of this system to actual ships has been increasing.

In this paper, the energy saving technique for the ship by the air lubrication system developed from 1995 is reviewed by looking back the history from the beginning of its development.

---

\* 流体制御系

原稿受付 平成26年8月7日

審査日 平成26年8月27日

## 目 次

## 記 号

1. まえがき	66
2. 運輸省特別研究	67
3. SR研究部会	67
4. 開放的融合研究	67
5. セメント運搬船実船試験	68
6. NEDOプロジェクト	68
6.1 50m 平板模型による抵抗低減実験	68
6.1.1 50m長尺平板模型船	69
6.1.2 実験条件	69
6.1.3 実験結果	69
6.2 端板による気泡流の2次元化	71
6.2.1 実験装置	71
6.2.2 実験結果	71
6.3 実船に適した気泡吹き出し方法	72
6.3.1 気膜防止法の検討	72
6.3.2 気泡吹き出し法	74
6.4 実船における抵抗低減効果の推定法	74
6.5 気泡流中のプロペラ特性と尺度影響	75
6.5.1 実験装置及び方法	76
6.5.2 実験結果	76
6.6 デッキバージによる海上曳航予備試験	77
6.7 大型セメント運搬船による実船試験	78
6.7.1 実船実験船	78
6.7.2 気泡供給装置などの設置	78
6.7.3 実証実験の実施	78
6.7.4 実証実験結果	79
7. センターキールと速度影響	81
7.1 実験装置	81
7.2 実験結果	82
7.2.1 センターキールの摩擦抵抗低減効果への影響	82
7.2.2 摩擦抵抗低減効果への速度影響	82
8. 実船への適用（その1 ブロアのみによる空気給の場合）	83
8.1 28,000 載貨重量トン級ばら積み船の場合	83
8.2 モジュール運搬船の場合	84
8.3 内航フェリーの場合	84
9. 新しい空気供給法の開発	84
9.1 主機掃気バイパスシステム	84
9.2 実船への適用（その2 主機掃気バイパスによる空気供給の場合）	84
10. あとがき	85
謝辞	85
参考文献	85

$B_a$ : 空気被覆幅 [m]
$C_f$ : 局所摩擦係数 [-]
$C_t$ : 全抵抗係数 [-]
$D_p$ : プロペラ直径 [m]
$J$ : プロペラ作動点 [-]
$K_T$ : スラスト係数 [-]
$K_Q$ : トルク係数 [-]
$kt$ : ノット [m/s]
$Q_a$ : 空気流量 [m <sup>3</sup> /s]
$R$ : 全抵抗値 [N]
$\Delta R$ 、 $dR$ : 全抵抗低減量 [N]
$t_a$ : 相当空気厚さ [m]
$U_m$ : 模型船速度 [m/s]
$X_a$ : 船首部空気吹き出し部からの距離 [m]
$\alpha$ : ボイド率 [%]

## 1. まえがき

水に接する面を気泡で覆えば、摩擦抵抗を減少させることが出来ることは古くから知られていた。この考えに基づき、船底に空気を送り込み、船底摩擦抵抗を低減させることにより、船舶の省エネ効果を得ようとする方法が空気潤滑法である。ただ、船底に直接空気を吹き入れて抵抗を減らすためには、空気を送るのにエネルギーが必要なこと、どの程度省エネ効果が得られるか推定することが難しかったことなどから、最近まで実用化されることがなかった。また、気泡による摩擦抵抗の低減効果がレイノルズ数にどのように依存するか不明であること、目標とした気泡径を有する気泡群を試験で生成することが容易でないことなども、実用化に必要な試験技術の研究が進まなかった要因の一つと思われる。海上技術安全研究所（以下海技研と略す）では、上記課題を解決するひとつの手段として、幅 1m、長さ 50m にも及ぶ船底が平坦な大型模型船を用いた実験を行うことで、実船に近い尺度における船底に吹き込んだ空気量と抵抗低減量の関係を調べた。また気泡を含む流れの中ではプロペラの性能がどのように変化するかなどの基礎的な実験を重ねてきた。それらの研究で得られた知見をもとに、平成 19(2007)年度に、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援により、長さ 120m のセメント運搬船（パシフィックガール）を使った空気潤滑法による省エネ効果検証のための実船実験を実施した。その実験により、空気潤滑法が実船の省エネ手段として利用しうることを示して以来、空気潤滑システムを実船に搭載する例が増えてきた。

本稿では、1995年から実施してきた空気潤滑法による船舶の省エネルギー技術について、開発初頭からの歴史を振り返りながら解説する。

## 2. 運輸省特別研究<sup>1)、2)</sup>

1993年の運輸技術審議会諮問第18号「新時代を担う船舶技術開発のあり方について」に対する答申では、船舶は輸送エネルギー効率が極めて高いものの、総合すると消費エネルギーは膨大であり、その消費エネルギーの低減に関する努力も必要であるとうたわれた。答申を受けて、船舶の一層の省エネルギー化を実現するために、船舶が水から受ける抵抗の低減を目的として、運輸省特別研究「次世代 CFD による船舶の流体抵抗低減法に関する研究」が、1995年から5年計画で開始された。

研究は大別して、全抵抗を最小とする船型最適化などのマクロな流場の研究と、抵抗低減デバイスのメカニズムの解明を目指すミクロの流場の研究が進められた。

各種抵抗低減デバイスのうち、マイクロバブルは、船体表面に形成される境界層中に微細な気泡を流入し、摩擦抵抗を低減させるものであり、その低減効果は最大80%<sup>3)、4)</sup>と他のデバイスと比較して最大であるなどの理由で、図-2.1に示す小型高速流路を製作して、そのメカニズムの解明が精力的に行われた<sup>2)</sup>。

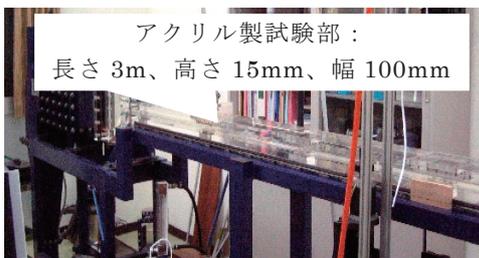


図-2.1 小型高速流路

## 3. SR 研究会<sup>5)、6)</sup>

運輸省特別研究の成果を受けて、1998年から2001年まで(社)日本造船研究協会SR239部会で「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」というテーマで研究が継続された。

SR239部会では、マイクロバブルの船舶への実用化を目標として、実船実験に即した準備研究がなされた。気泡による摩擦抵抗低減効果については、壁面の曲率や圧力勾配の影響、鉛直壁面影響、海水影響、尺度影響など、従来あまり検討されなかった要

素について研究が行われた。また、実船用の気泡発生装置の研究や、さらに局所剪断力計やボイド率計などの新しい実船用計測機器の開発、長尺平板船による予備実験など、系統的な準備研究が行われた。

そして、図-3.1に示すように、独立行政法人航海訓練所に所属する練習船「青雲丸」を供試船として、世界初のマイクロバブルの実船実験が実施された<sup>5)</sup>。



図-3.1「青雲丸」船首に設置された気泡発生装置<sup>5)</sup>

その結果、船速14ノットにおいて、約3.0%の全抵抗低減、気泡発生動力を差し引いた正味の馬力節減が約2%の省エネ効果が確認された。しかし、気泡の発生条件によっては抵抗が増加する場合があります、より効率的な馬力節減を実現するためには、気泡が船体をより広くかつ薄く覆うような気泡吹き出し条件、配置や発生装置の最適設計法の開発が必要なることが明らかとなった。

## 4. 開放的融合研究<sup>7)</sup>

工学計測技術、数値シミュレーション技術、MEMS等の最新技術を活用し、複雑かつ普遍的流体現象である乱流現象を解明し、そのマイナス面を抑制し、プラス面を促進する高度な制御手法を開発する目的で、2000年から2004年にかけて、海技研、産業技術総合研究所、宇宙航空研究開発機構の多数の研究者を集約・組織化して、「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」というテーマで研究が行われた。

水中にマイクロバブルや界面活性剤を少量添加することによる流体物性制御技術や壁面にマイクロアクチュエーターを埋め込むMEMS技術による能動乱流制御と希薄予混合燃焼等の乱流燃焼制御についての研究が精力的になされた。複雑な非線形現象の解明及び新しい知見の獲得は、海外の研究者からも高い評価を受け、本プロジェクトの成果に刺激され

て、米国、EUでも研究が活発化した。

マイクロバブルの研究に関しては、渦スケールよりも大きな気泡の存在により乱れが抑制されるというメカニズムを世界で初めて明らかとした。

### 5. セメント運搬船実船試験<sup>8)</sup>

2005年に海技研と東海運株式会社の共同研究により、東海運所属のセメント運搬船「パシフィックシーガル」を用いて実船試験を実施した。

セメント運搬船は積荷の性質上箱形の船型であり、船底に気泡を保持しやすく、またセメント搬送用のブローアを気泡吹き出し用空気源に転用することができるなど、マイクロバブルに適した船種であると考えられた。

一般に船首近傍の船体周りの流れは、図-5.1のようになる<sup>9)</sup>。

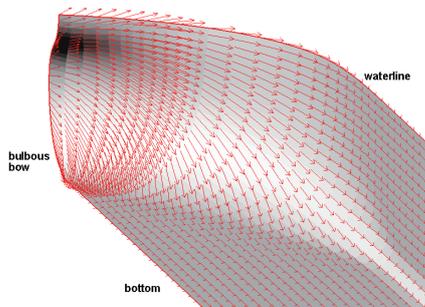


図-5.1 船首近傍船体周りの流れ<sup>9)</sup>

図-5.1ではある巨大タンカー船型周りの流れを示しているが、船首バルブを上方から下方に向かって船底に巻き込むように流れることが知られている。この特性を利用して、本実船実験では気泡投入エネルギーを軽減するため、図-5.2及び図-5.3に示すように船首バルブ付近から気泡を投入し、船体周りの流れとともに気泡を船底に導入することを試みた<sup>8)</sup>。しかしながら、実際には十分な量の気泡が船底に回り込まず、期待されていた省エネ率5%は得ることができなかった。



図-5.2 「パシフィックシーガル」船首に設置された気泡発生装置<sup>8)</sup>

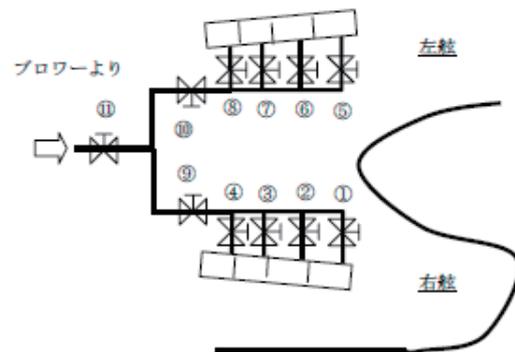


図-5.3 気泡発生装置の配管系統<sup>8)</sup>

その原因としては、以下の理由が考えられた。

- ①吹き出し圧力が不足していたため、バルブの開閉を調節して最適な吹き出し分布を実現する余裕が無かった。
- ②気泡の軌跡を予測するCFD計算における浮力効果の過小評価。気泡群としての挙動を推定できるように改良する必要がある。
- ③気泡吹き出し装置の近くに設けられたチェーン除けの影響。図-5.2に見られるように、直径6cmの円柱を半割にしたものが水平に数段取り付けられていて、これにより気泡の軌跡が水平方向に曲げられた可能性がある。
- ④気泡の吹き出しは圧力に敏感に反応する。横揺れが発生した場合、下になった舷で気泡が途切れる現象が観察された。「青雲丸」の実験では左右舷計6箇所吹き出し位置のそれぞれにコンプレッサが接続されたため横揺れの影響を受けなかったが、今回は空気源が左右舷共通であるため、横揺れ影響をまともに受けてしまった。

## 6. NEDOプロジェクト

本章では、2005年から3年間実施したプロジェクトに関し、マイクロバブルの特長、実用上のいくつかの問題点とその解決法、さらに実船実験において得られた実質省エネ率について述べる。

### 6.1 50m 平板模型による抵抗低減実験<sup>10)</sup>

児玉らは、全長50mの平板模型船を用いて、模型船に働く全抵抗や、船底の局所摩擦力が低下することを確認した。また、気泡吹き出し部から下流方向に向けての低減効果の持続距離について調べたところ、約22m程度までその効果があることが確認された。マイクロバブルを実船へ用いて、抵抗低減を得るためには大流量の空気が必要であることも報告されており、船舶の摩擦抵抗低減デバイスとしてマイ

クロボブル法を用いるためには、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の流れ方向の持続性、また吹き出し方法の最適条件について調査する必要があるとされた。

そこで本実験では、幅1m、全長50mの長尺平板模型船を用いて、マイクロバブルを用いた摩擦抵抗低減効果の持続性、および多重空気吹き出し法の効果について調べた。

6.1.1 50m 長尺平板模型船

図-6.1 に曳航水槽試験中の長尺模型船を示す<sup>10)</sup>。タンカーなどの肥大船にマイクロバブルを使用することを想定し、船首尾の平面形状は流線型であり、船底は平板形状とした。全長50m、幅1.0m、喫水0.05mで、実船に近い Reynolds 数で、摩擦抵抗低減効果を計測するために設計された。全抵抗に占める造波抵抗や形状抵抗の割合が小さくなるように、L/B が50と極端に細長く、B/dが20と浅喫水で、ビルジサークルを除き、船底の大部分が平面である。



図-6.1 水槽試験中の50m長尺平板模型船<sup>10)</sup>

長尺模型船は、浮力材として厚さ100mmのウレタン板を使用し、上部をアルミ製チャンネルで補強している。また実験では約4m~8mの船体を連結させることで全長50mの模型船となる。この模型船は、図-6.2に示すように船底の流れの様子を観察できるよう、また、局所剪断力計などの汎用計測器を取り付けられるよう、取り外し可能なアクリル製の窓が複数設けてある<sup>10)</sup>。

船首から3m及び26.15mの2箇所(船首部と中央部)にそれぞれ気泡発生装置を設置した。気泡発生装置は、内部を仕切り板により3分割(中央部の幅0.25m、左右の幅0.125m)された箱型形状をしており、中央部、左右一対をマスフローコントローラに連絡することで、それぞれの空気流量を制御した。また、気泡発生装置底面部には様々な形状の発生板を取り付けることが可能であり、本実験では、焼結多孔質板(孔径120μm、幅0.5m、長さ0.1m)を取り付けた。

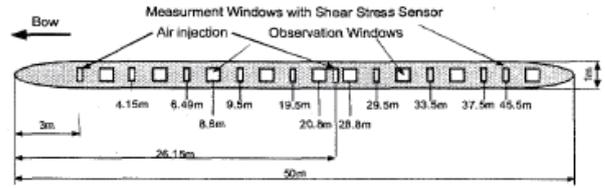


図-6.2 気泡発生装置と剪断力計取付位置<sup>10)</sup>

6.1.2 実験条件

本実験では、曳航速度  $U_m = 6.173 \text{ m/s}$  (=12kt) として、空気吹き出し位置、空気流量 ( $t_a = 1 \sim 7 \text{ mm}$ ) をパラメータとして、模型船に働く全抵抗、局所剪断力を計測した。通常の抵抗試験と同様、ピッチ、ヒープ、サージ、ロールはフリーで曳航した。以後の長尺模型船の試験は同様の拘束条件で実施した。ここで、 $t_a$  は吹き出し空気流量の指標となる相当空気厚さであり、以下の式によって与えられる。

$$t_a = \frac{Q_a}{B_a \cdot U_m} \tag{6.1}$$

$Q_a$  : 空気流量、 $B_a$  : 空気被覆幅、 $U_m$  : 模型船速度

6.1.3 実験結果

(1) 空気吹き出し量と全抵抗低減量の関係

図-6.3の横軸は模型船から吹き出した空気流量  $Q_a$  であり、縦軸は、全抵抗の低減量  $\Delta R$  ( $= R - R_0$  :  $R$  は気泡吹き出した場合の全抵抗) を、空気を吹き出さないときの全抵抗  $R_0$  で無次元化した低減効果を表している。図中の記号●、■、▲は、それぞれ、船首部からの吹き出し、中央部からの吹き出し、船首部と中央部の両方から気泡を吹き出した場合の結果である。また、△は、船首部から吹き出した場合の結果と中央部から吹き出した結果を加算したものである。本結果から以下のことがわかった<sup>10)</sup>。

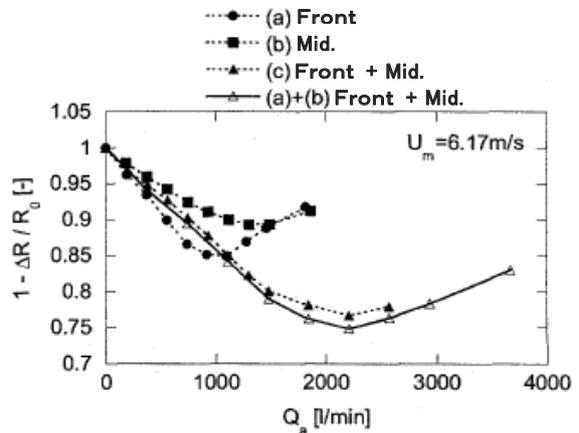


図-6.3 空気吹き出し量と全抵抗低減量の関係<sup>10)</sup>

・船首部のみから吹き出した場合と、中央部のみから吹き出した場合を比較すると、空気流量  $Q_a = 1,500\text{L/min}$  以下では、中央部のみから空気を吹き出した方が全抵抗低減量は小さい。中央部のみから空気を吹き出した場合、気泡が船体を覆う面積が小さいことが原因であると考えられる。また、船首部の方が船尾側に比べて壁面近傍の速度境界層が薄く、壁面に働く摩擦力が大きいことから、低減効果は船首部で大きいと想定され、このことから、気泡吹き出し部は、船首部に設置した方が効果的であると言える。

・大きな低減効果を得るためには、空気流量を多くすることが最も効果的であり、多段吹き出し法により吹き出し空気流量を多くすることは、より大きな低減効果を得るために有効であることを示している。

・空気吹き出し箇所によらず、吹き出し空気流量を大きくしていくと、ある量で全抵抗低減効果は限界に達し、その後、低減効果は小さくなることがわかる。低減効果に限界が見られたとき、気泡吹き出し部直後では気膜が形成されていることが確認された。生成された気膜は、下流で気泡へと分裂するが、気膜の分裂は、気泡周囲、船体周囲の流れ場を変化させ、結果的に摩擦を増加させる働きがあるためだと考えられる。このことから、気膜形成を極力避け、空気流量が大きな場合にも気泡を発生させて、船底に沿って流すことができるのであれば、さらに大きな低減効果を得る可能性があることを意味している。

## (2) 局所摩擦抵抗低減効果の持続影響

図-6.4 に船首部から吹き出した場合の船体中心軸上における局所摩擦抵抗低減効果の持続影響を示す。横軸は船首部空気吹き出し部からの距離  $X_a$  ( $X_a=0$  は吹き出し板中央部) を、縦軸は気泡を吹き出した場合の剪断力センサにより計測された局所摩擦係数  $C_f$  を、空気を吹き出さないときの局所摩擦係数  $C_{f0}$  で無次元化した無次元摩擦係数  $C_f/C_{f0}$  である。図中の記号は、空気流量を表している<sup>10)</sup>。

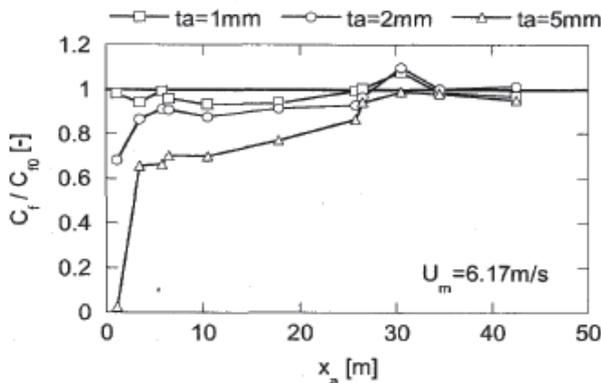


図-6.4 船首部から吹き出した場合の局所摩擦抵抗低減効果の持続影響<sup>10)</sup>

・図-6.4 より船首部のみから空気を吹き出した場合、いずれの吹き込み空気量に対しても、気泡吹き出し部直後では摩擦抵抗低減効果が大きく、下流に行くに従ってその効果が小さくなる傾向が現れている。この原因として、船首部の方が摩擦が大きく低減効果が大きくなること、船首部で吹き出された気泡が、船尾側に行くに従って幅方向に広がり、一部の気泡が水面へと浮上したことが考えられる。

・低減効果の持続距離に関しては、高橋らの実験<sup>11)</sup>では約 30m 付近まではその効果が得られたことを報告している。今回の実験にでも、空気吹き出し量  $t_a=5\text{mm}$  以下では高橋らと同様に 30m 付近まで低減効果が見られ、その後は、わずかな低減量となっている。 $X_a=30\text{m}$  以上では、船体に働く抵抗低減の効果は小さくなる。

## (3) 船首部及び中央部の両方から吹き出した場合の局所摩擦抵抗低減効果

図-6.5 中の記号○、●は、それぞれ  $t_a=2\text{mm}$  の場合に船首部のみから吹き出した結果と、両方から吹き出した結果である。なお、両方から吹き出す場合には、それぞれから 2mm 相当の空気量を吹き出している<sup>10)</sup>。

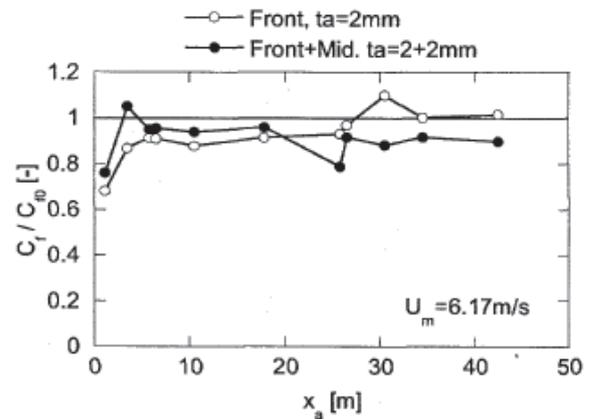


図-6.5 船首部及び中央部の両方から吹き出した場合の局所摩擦抵抗低減効果の持続影響<sup>10)</sup>

・本図より 2 段吹き出しを行うことで前方吹き出し部から下流に 30m 以上離れた位置においても 10% 程度の抵抗低減効果を維持していることがわかる。このことから、吹き出し部からある程度距離が離れた位置で空気を吹き出すことにより、一箇所吹き出しに比べて大きな低減効果を得られ、多段吹き出し法が有効であることがわかった。

## 6.2 端板による気泡流の 2 次元化<sup>12)</sup>

後述の大型セメント運搬船を用いた実船実験を実施する前に、実船の船底部分で生じる気泡流による摩擦抵抗低減現象を予測するために、長尺平板模型

両舷の側壁に沿い端板を設け、現象の2次元化を図り、摩擦抵抗低減実験が行われた。また、長尺平板模型に空気吹き出し部を3段設置して、様々な組み合わせによる抵抗低減効果の違いについて調査が行われた。

6.2.1 実験装置

気泡発生装置は、前述の焼結多孔質板の幅を0.5mから0.75mに拡張して、取付位置を船首端より3m(F)、9m(G)及び26.2m(M)の3ヶ所とした。剪断力計は、船底の広い範囲の摩擦抵抗を計測するために、長手方向に10カ所、幅方向は右舷側のみ4カ所の計40ヶ所に増やした。

長尺平板模型に設置された端板を図-6.6に示す。端板は2mm厚のアルミ板製で、船尾端での境界層厚さを考慮して、船底部より50mm突出するように、船体側面の平行部に取り付けた。全長の約90%にあたる44.85mが設置部分である<sup>12)</sup>。

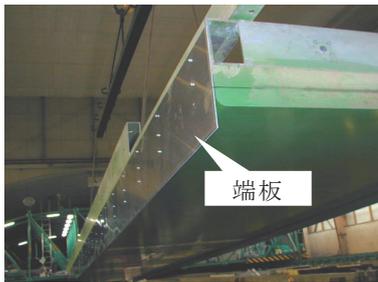


図-6.6 船体側面に取り付けられた端板<sup>12)</sup>

6.2.2 実験結果

(1) 図-6.7に示すように、端板を取り付けると、端板の無い場合と比べて、同量の空気吹き出し量に対する抵抗低減効果が増大する。また、抵抗低減効果が頭打ちとなる空気吹き出し量が大きくなり、より高い抵抗低減効果が得られる<sup>12)</sup>。

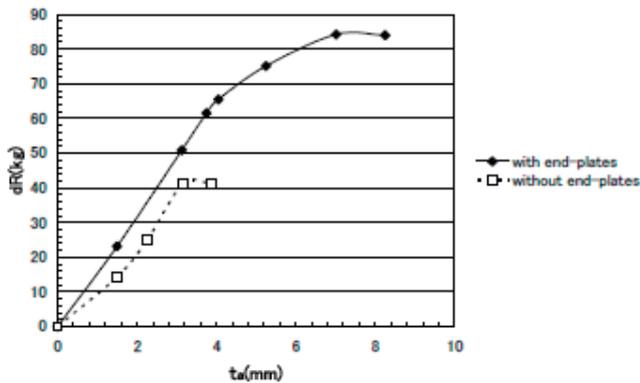


図-6.7 端板の有無による抵抗低減効果  
吹き出し位置 : F<sup>12)</sup>

(2) 図-6.8に端板をつけた場合、図-6.9に端板の無い場合の  $t_a$  が約1.5mmとなる空気吹き出し量における局所摩擦抵抗の低減率を示す。端板のある場合は、吹き出し直後の抵抗低減効果の大きな部分を除くと、ほぼ抵抗低減率が一定のまま持続している。一方、端板が無い場合は、船尾に向かうに従い抵抗低減効果が減少している。端板の効果により船側からの気泡の漏れが少なくなり、気泡が保持され続け、抵抗低減効果が下流域まで持続すると考えられる<sup>12)</sup>。

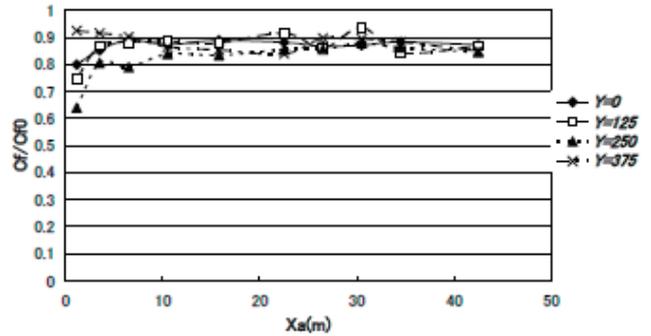


図-6.8 端板有りの場合の局所摩擦抵抗低減率  
吹き出し位置 : F、 $t_a=1.5\text{mm}$ <sup>12)</sup>

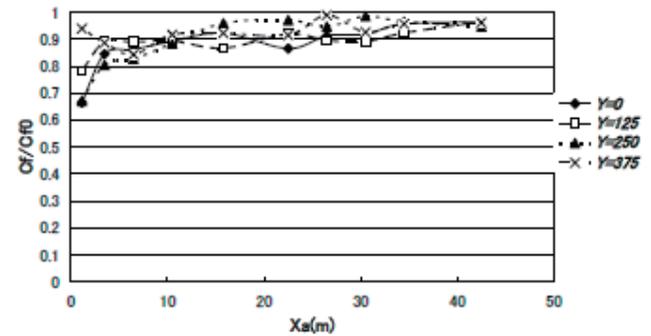


図-6.9 端板無しの場合の局所摩擦抵抗低減率  
吹き出し位置 : F、 $t_a=1.5\text{mm}$ <sup>12)</sup>

(3) 同様に、 $t_a$  が約3.8mmの時の局所摩擦抵抗の低減率を図-6.10及び図-6.11に示す。端板を付加することで、気泡が船側から漏れにくくなり、気泡が船尾付近においても保持されるため、抵抗低減効果が大きくなり、船尾付近の下流域まで持続する。一方、保持された気泡の浮力により、船体の傾斜が生じ、ますます気泡流が偏るため、局所摩擦力の低減率の分布にも偏りが見られる。端板が無い場合には、摩擦抵抗低減効果の幅方向の偏りは小さいが、摩擦抵抗低減効果が下流に行くに従い急速に減少する<sup>12)</sup>。

(4) 図-6.12は、3ヶ所ある空気吹き出し位置の組み合わせを変えた場合の抵抗低減率を示す。前述(6.1.3)の試験結果ではF及びMの2段吹き出し

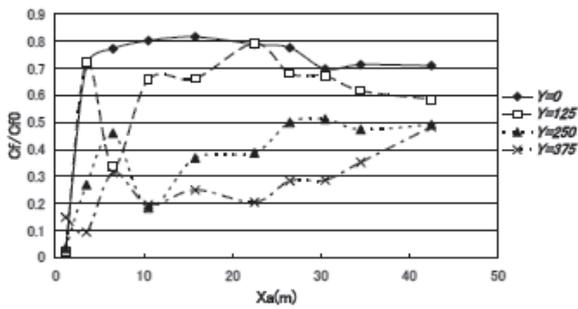


図-6.10 端板有りの場合の局所摩擦抵抗低減率  
吹き出し位置 : F、 $t_a=3.8\text{mm}$ <sup>12)</sup>

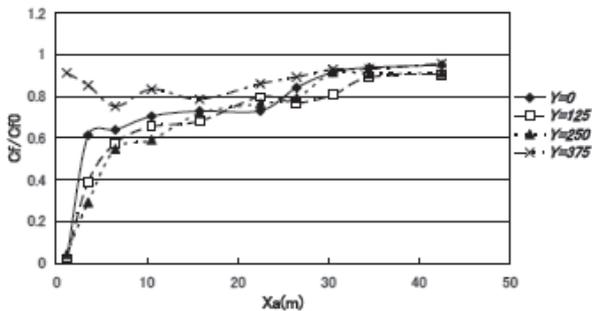


図-6.11 端板無しの場合の局所摩擦抵抗低減率  
吹き出し位置 : F、 $t_a=3.8\text{mm}$ <sup>12)</sup>

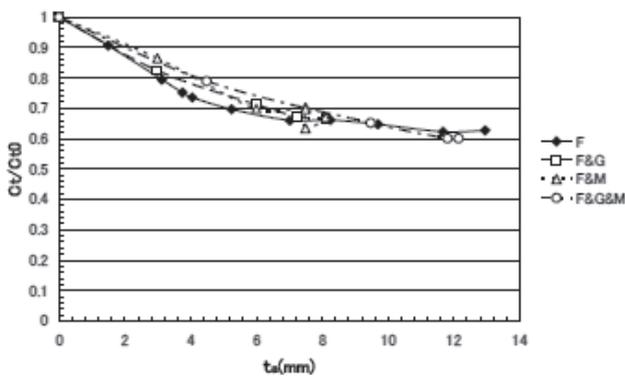


図-6.12 空気吹き出し位置の組み合わせを変えた場合の抵抗低減率、端板有り<sup>12)</sup>

の効果が高いという結果であったが、 $t_a$ が7mm程度までの範囲内では、Fからのみ空気吹き出しを行った場合が最も抵抗低減効果が高いという結果を得た。本実験では端板を付加したことで、抵抗低減効果の流れ方向の持続性が良くなったため、吹き出した気泡により、最も長い距離にわたって抵抗低減効果が得られるFからの吹き出しの効果が高くなったと考えられる。実船の船底部分では、長尺平板模型に比べて、幅が広いので、船底の中央部分では、端板が無くても、端板が有るのと同様の抵抗低減効果が期待できるが、船側付近の船底部では、端板無しの場合と同様に気泡

の漏れにより、抵抗低減効果が減衰していくと考えられる。また実船の航海での状況を考えれば、船体の横揺れ運動なども考慮せねばならない。そのため、本実験で用いた端板と同様の機能を持つ付加物を船体に設置することは、気泡吹き出し法による抵抗低減効果を高める効果があると考えられる<sup>12)</sup>。

- (5) 6.1で述べたように、端板無の長尺平板模型では、長さ50mに対して幅1mと大変幅が狭いため、空気吹き出し部から幅方向に広がった気泡流は、船側から漏れて、抵抗低減効果が、下流30m程度までしか持続しなかった。一方、幅の広い実際の船底部を模すために実施した端板付の長尺平板模型試験では、吹き出し部より40m以上下流の船尾端付近でも、抵抗低減効果は持続し、それ以上の下流においても抵抗低減効果が得られている。そのため、多段吹き出しは、空気の漏れなどにより抵抗低減効果が減退する場合にのみ有効といえる。

### 6.3 実船に適した気泡吹き出し方法

#### 6.3.1 気膜防止法の検討<sup>13)</sup>

6.1.3で述べたように、端板のない長尺平板模型試験において、ある空気量を超えると吹き出し付近に気膜が形成され、抵抗低減効果が薄れることがわかっている。そこで、ここでは東京大学船用キャビテーションタンネルを用いて開発した、気膜生成を防止する装置について述べる。

試験部の長さは2,200mmであり、各側面には幅250mm×長さ800mmの亚克力窓が流れ方向に2つ並んで設置されている。この亚克力窓に空気吹き出し口と剪断力計3つを設置した。空気吹き出し口から各剪断力計までの流れ方向距離をxで表すこととする。空気吹き出し口は流れ方向長さ100mmであり、幅Ba=80mmと160mmの2種類を行った。吹き出し口には多孔質板がとりつけられており、公称孔径 $\phi=2\mu\text{m}$ と $120\mu\text{m}$ の2種類多孔質板を用いた。

試験は、主流速 $U_\infty$ を5m/sに設定し、空気吹き出し量 $Q_a$ を変化させて、各剪断力計に働く力を計測した。

空気吹き出し幅Ba=160mmおよび多孔質板孔径 $\phi=120\mu\text{m}$ について試験したところ、気膜の形成が観察された。気泡流と気膜の観察例を図-6.13に示す。左図は $t_a=1.7\text{mm}$ のもので、気泡表面で照明が反射されるため、気泡部分が明るく撮影されている。右図は $t_a=5.0\text{mm}$ のものであり、透明な気膜を通して、水面が暗く撮影されている<sup>13)</sup>。

図-6.14に空気吹き出し量に対する摩擦抵抗係数の変化を示す。 $t_a=3.8\text{mm}$ 付近で、吹き出し口下流650mmと1,100mmにおいて剪断力計測値が極めて

小さくなり、この領域が気膜で覆われていることを示している。この時に1,700mmの位置では摩擦抵抗係数が増加に転じており、50m 平板模型において計測された現象が再現されていると考えられる<sup>13)</sup>。

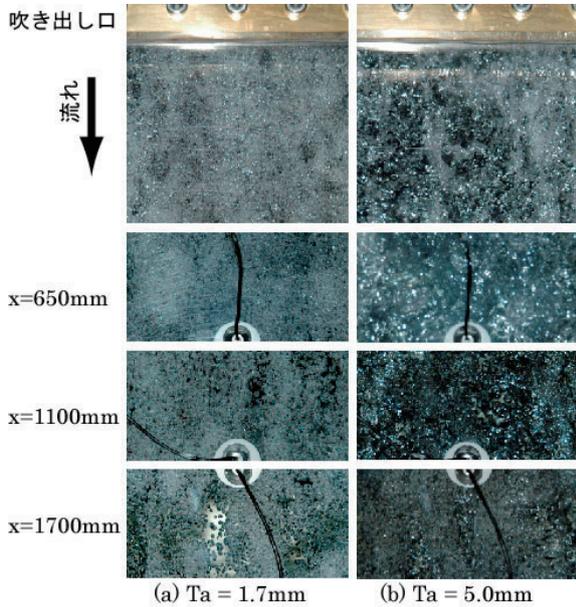


図-6.13 気泡流時(左図)と気膜発生時(右図)における気泡観察例<sup>13)</sup>

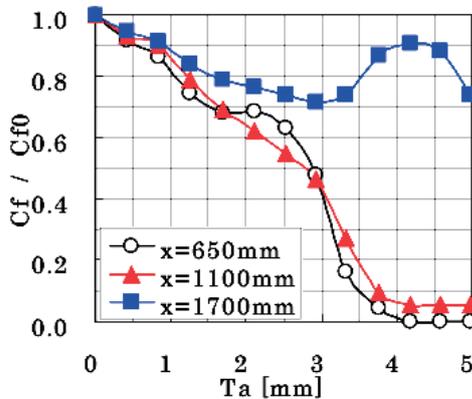


図-6.14 空気吹き出し量に対する局所摩擦低減率の変化 ( $U_{\infty}=5\text{m/s}$ ,  $Ba=160\text{mm}$ ,  $\phi=120\mu\text{m}$ )<sup>13)</sup>

同様の計測を吹き出し幅  $Ba=80\text{mm}$  の場合について行ったところ、 $x=650\text{mm}$  において気膜の形成が観測されたものの、吹き出し空気量を増加させても  $x=1,100\text{mm}$  の位置が気膜に覆われることは無かった。すなわち、気膜の最大長さは吹き出し幅によって定まり、その長さは吹き出し幅が広いほど長いと考えられる。

また、幅  $Ba=160\text{mm}$ 、孔径  $\phi=2\mu\text{m}$  の多孔質板を用いて試験したところ、 $Ta=3.8\text{mm}$  程度で  $x=1,100\text{mm}$  の

位置が気膜で覆われており、 $\phi=120\mu\text{m}$  の場合と差異は認められなかった。

次に、図-6.15 に示す整流板付気泡発生装置を考案して試験した結果について述べる。整流板には、気膜の厚さを制限し、空気と水の混合を促す効果があると予想される。その寸法は流れ方向  $160\text{mm}\times$  幅  $200\text{mm}\times$  厚さ  $2\text{mm}$  である<sup>13)</sup>。

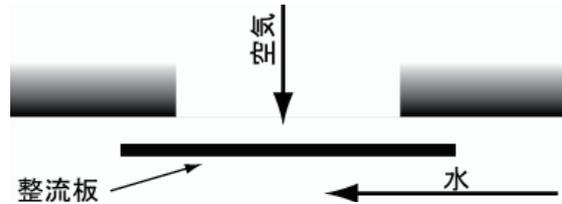


図-6.15 整流板付気泡発生装置<sup>13)</sup>

整流板の有無による気泡流の様子を図-6.16 に示す。整流板を付けた場合、吹き出し部付近で気膜は渦状に分断され、 $x=650\text{mm}$ 、 $x=1,100\text{mm}$  の地点においても気泡流となっている<sup>13)</sup>。また、この場合の摩擦低減効果に着目すると、図-6.17 に示すように空気吹き出し量を十分多くした場合でも有意な剪断力が検知されており、剪断力計が気膜で覆われていないことを示している。また、 $x=1,700\text{mm}$  において、整流板なしの場合よりも、非常に優れた摩擦抵抗低減効果を示していることから、下流側においても効果が期待できることがわかった<sup>13)</sup>。

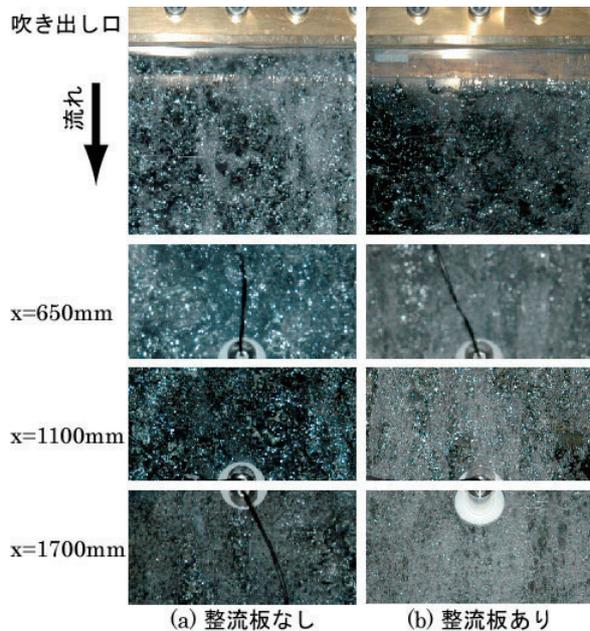


図-6.16 整流板の有無による気泡流の相違  $Ta=5.0\text{mm}$ <sup>13)</sup>

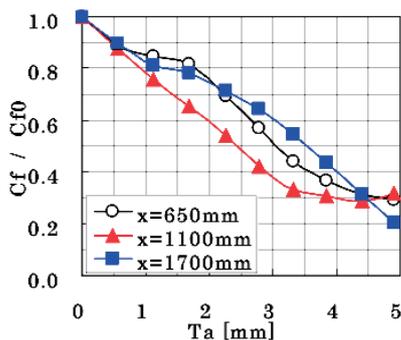


図-6.17 空気吹き出し量に対する局所摩擦低減率の変化 ( $U_{\infty}=5\text{m/s}$ ,  $Ba=240\text{mm}$ ,  $\phi=120\mu\text{m}$ , 整流板あり)<sup>13)</sup>

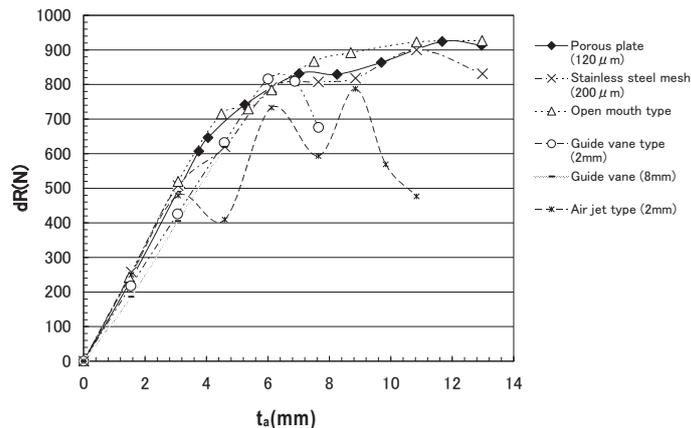


図-6.19 気泡吹き出し方法による抵抗低減量の比較 (吹き出し位置:F、速度:12kt)<sup>14)</sup>

6.3.2 気泡吹き出し法<sup>14), 15)</sup>

実船装備に適した気泡吹き出し方法を探索するため、以下に示す気泡吹き出し装置を50m長尺平板模型に取り付けて実験が行われた。模型には端板を付けて、吹き出し位置Fで比較実験した。曳航速度は実船実験対象船の航海速度と同じ12kt ( $=6.173\text{m/s}$ )とした。

- ①孔径  $120\mu\text{m}$  の焼結多孔質板
- ②強度が高く、やや孔径の大きい、孔径  $200\mu\text{m}$  のステンレス焼結金網
- ③最も汚損に強いと考えられる単純開放方式
- ④前述の整流板方式

整流板方式は、整流板と吹き出し部の隙間を2mm、8mmの2種について実験した。また整流板方式の装置を利用して3方を閉囲し船尾方向にのみ空気を噴出する噴流方式(隙間:2mm)についても実験を行った。実験に使用した気泡吹き出し部の写真を図-6.18に示す<sup>14)</sup>。

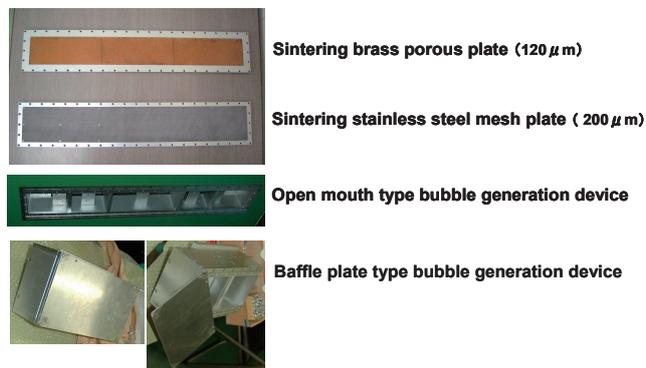


図-6.18 気泡吹き出し方法<sup>14)</sup>

この結果から、以下のことがわかった。

- (1) 焼結多孔質板と焼結金網及び単純開放方式の空気吹き出し量と抵抗低減量の関係は似た傾向を示し、特に摩擦抵抗低減量が空気吹き出し量に比例する領域では、抵抗低減効果は同様である。
- (2) 整流板方式は、抵抗低減効果でやや劣る。
- (3) 噴流方式は、抵抗が比例して減少する領域では、多孔質板等と同様の結果であったが、空気吹き出し量が多い領域では、抵抗低減効果が不安定になる。これは、吹き出し部直後にできる気膜と水の自由表面が、高速の噴流により加速され、滑走艇の船尾波に類似した波が発生していることが影響していると考えられる。
- (4) 何れの気泡生成方法であっても、抵抗低減効果がほぼ同様に達成される。このことから、抵抗低減効果は、これまで考えられていた、乱流の抑制効果で得られているのではなく、気泡流の密度・動粘性係数の低下によるものであり、気泡径にも依存しないと推定される。
- (5) 空気吹き出し量が大きくなると抵抗低減効果が飽和するが、この原因として、空気量が大きくなると気泡の浮力により平板模型が横傾斜し気泡流が偏ること、端板の効果が十分でなく、気泡が船側から漏洩すること等が考えられる。
- (6) 実船に適した気泡生成方法として、汚損に強い単純な構造を持ち、抵抗低減効果も高い単純開放方式を選択することとした。
- (7) 実用上必要となる量の空気を吹き出した場合、6.3.1で問題とした気膜が観測されるが、気膜の直下流において、局所摩擦抵抗が若干増加する現象は局所的なものであり、全体の摩擦抵抗に大きな影響を与えないことがわかった。

実験結果を図-6.19に示す<sup>14)</sup>。

6.4 実船における抵抗低減効果の推定法

長尺平板模型の船底に設けられた亚克力製窓からの観測によれば、船底下の気泡流は、図-6.20に示すように、空気吹き出し部の直後は気膜状になり、気膜が水との剪断により乱れ、気泡に分裂し、気泡流へと変化している<sup>14)</sup>。

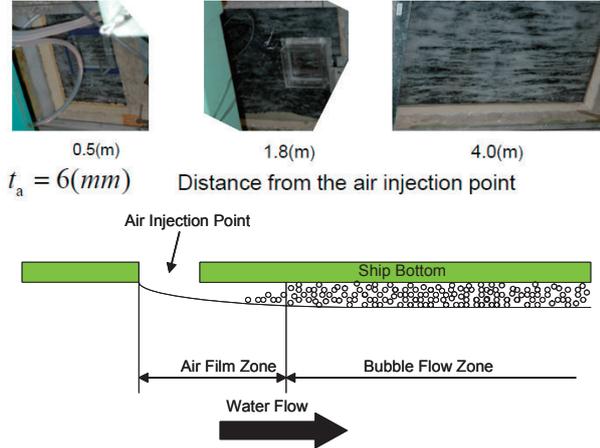


図-6.20 長尺模型船底下の気泡流の様子<sup>14)</sup>

抵抗が線形に減少している領域では、6.2.3で述べたように吹き出し直後を除き摩擦抵抗低減率はほぼ一定となる。そこで、摩擦抵抗低減効果を図-6.21に示すように気泡流による摩擦抵抗低減の成分と、気膜により付加的に抵抗低減効果が増加する部分の成分に分けて考える<sup>14)</sup>。

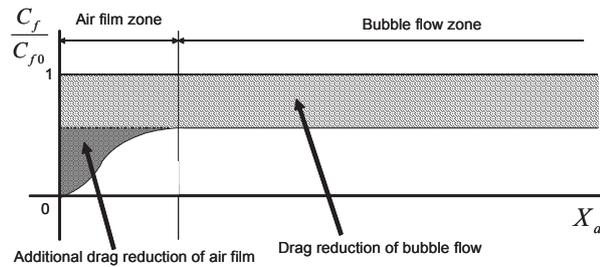


図-6.21 摩擦抵抗低減の2成分<sup>14)</sup>

図-6.19に示したように、 $t_a=4\text{mm}$ 程度までは、摩擦抵抗は空気吹き出し量に対して線形に減少している。そこで、端板の効果が十分であり、船底の傾斜が小さければ、摩擦抵抗低減量は、空気吹き出し量に正比例すると仮定した。一方、摩擦抵抗は空気吹き出し量に比例して減少することから、気泡混入による見かけ上の密度低下により減少すると考えることができる。そこで、気泡流に覆われ吹き出し空気量に対して抵抗低減率が一定となる部分の抵抗低減率を、50m長尺平板模型と22m長尺平板模型の抵抗低減試験結果の差から推定した。22m長尺平板模型

は、50m長尺平板模型の一部分を取り外して、前後に短縮したもので、船首尾形状は同じである。50m、22mともに、空気はFから吹き出している。2種の長さの平板模型の抵抗低減量の比較を図-6.22に示す<sup>14)</sup>。

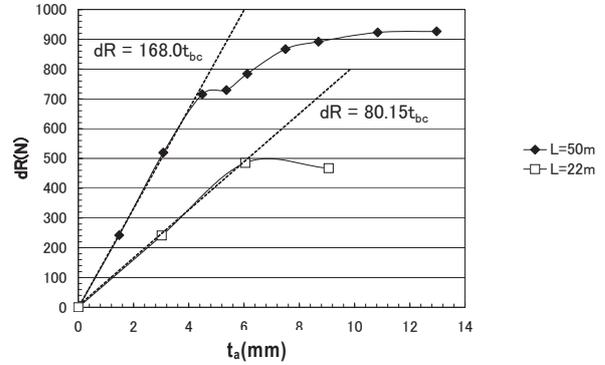


図-6.22 50m長尺平板模型と22m長尺平板模型の気泡流による抵抗低減量の比較と近似直線<sup>14)</sup>

空気吹き出し量と抵抗低減量の関係が線形である領域を直線で近似し、近似直線の差をとり、気泡流部分の摩擦抵抗低減量を推定した。またシェーンヘルの式で求めたその部分の摩擦抵抗との比をとり、気泡流部の抵抗低減率を求めた。さらに気膜部分の付加抵抗低減量と吹き出し位置との関係を、吹き出し位置FとGで行った実験結果から求め、以下の式を得た<sup>14)</sup>。

$$dR(N) = (-0.376X_{ai}(m) + 13.13) \times t_a(mm) + \alpha_{bfl} \times R_{bc0}(N) \tag{6.2}$$

$$\text{if } -0.376X_{ai}(m) + 13.13 > 0 \tag{6.3}$$

$$dR(N) = \alpha_{bfl} \times R_{bc0}(N) \tag{6.4}$$

$$\text{if } -0.376X_{ai}(m) + 13.13 \leq 0 \tag{6.5}$$

$$\alpha_{bfl} = \frac{t_a(mm)}{t_{bfl}(mm)} \tag{6.6}$$

$$t_{bfl}(mm) = \frac{R_{f0}(N)}{dR(N)} \times t_a(mm) \tag{6.7}$$

- $X_{ai}$ : 船首端から空気吹き出し位置まで距離
- $R_{bc0}$ : シェーンヘルの式から求める気泡流に被覆される部分の気泡の無い状態での摩擦抵抗
- $t_{bfl}$ : 相当気泡流厚さ
- $\alpha_{bfl}$ : 相当ポイド率

相当ポイド率は、相当気泡流厚さと相当空気厚さの比で求めることができる。この船速では  $t_{bfl}$  は  $10.2\text{mm}$  となり、つまり理想的には  $t_a=10.2\text{mm}$  の空気量でポイド率は  $100\%$  となり、船底は全面が空気膜で覆われることになる。

## 6.5 気泡流中のプロペラ特性と尺度影響<sup>16)</sup>

マイクロバブルを実船に応用するためには、気泡がプロペラ性能に及ぼす影響を把握することが重要な課題であるため、プロペラ上流から気泡を吹き出した状態でプロペラ性能試験を行った。また、大きさが異なる2種類のプロペラを用いて試験することにより、尺度影響についても調査した。

### 6.5.1 実験装置及び方法

図-6.23 に実験に使用した装置概略を示す。3.5mmの空気吹き出し孔が翼の上下面に288個設けた気泡発生装置をプロペラ面より約1.9m上流に配置した<sup>16)</sup>。

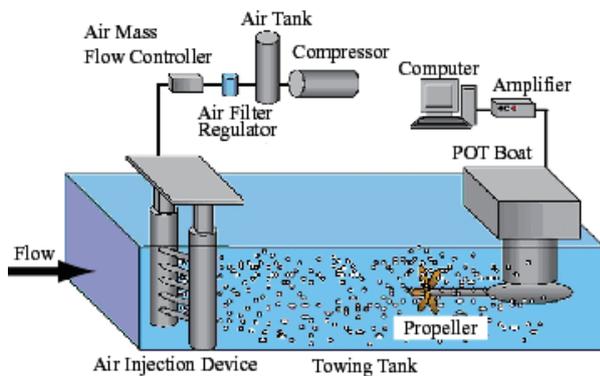


図-6.23 気泡流中のプロペラ特性計測装置<sup>16)</sup>

大きさが異なる ( $D_p=180$ 、 $270$ mm) 2種類の相似模型プロペラを用いて気泡流中のプロペラ試験を実施した。試験に使用した模型プロペラを図-6.24に、諸元を表-6.1に示す<sup>16)</sup>。



図-6.24 供試模型プロペラ ( $D_p=270$ mm)<sup>16)</sup>

表-6.1 模型プロペラの緒元<sup>16)</sup>

Diameter $D_p$ [mm]	180、270
Boss ratio $DB/D_p$ [-]	0.306
Pitch ratio [-]	0.7 (at 0.7R)
Expanded area ratio [-]	0.59
Rake degree [deg]	35
Number of Blades	4

実験および解析は以下の手法で行った。

- ①プロペラ性能試験は、通常はプロペラ回転数を固定し、曳航速度を変化させて行われるが、プロペ

ラへ流入する気泡の大きさを極力同じにするために、曳航速度を2.0m/sに固定し、プロペラ回転数を変化させて行った。

- ②模型プロペラを設置しない状態で吹き出し空気量を変化させ、プロペラディスク面における気泡分布を光学式ボイド率計で計測した。
- ③気泡を吹き出さない状態で、気泡発生装置を設置した場合と設置しない場合のプロペラ性能試験を行い、 $K_T$ 一致法を用いて気泡発生装置の有効伴流を求めた。
- ④吹き出し空気量を変化させてプロペラ性能試験を行った。
- ⑤気泡を吹き出した場合でも気泡発生装置の有効伴流が変化しないと仮定し、③の結果を用いて気泡流中のプロペラ性能を補正した。
- ⑥②の結果を用いて、吹き出し空気量からプロペラディスク面のボイド率を求め、プロペラ性能の変化を整理した。

### 6.5.2 実験結果

#### (1) プロペラ特性の変化

$D_p=270$ mmのプロペラの計測結果を図-6.25に示す。実船試験において想定されるプロペラ作動点は $J=0.4$ 付近と推定されており、また、プロペラに流入する気泡のボイド率は最大で2%程度と考えられている。 $J=0.4$ 、ボイド率1.89%における $K_T$ 、 $K_Q$ の低下率に着目すると、 $K_T$ は11.3%、 $K_Q$ は9.4%になっており、プロペラ効率は2.1%低下することになる。低下のメカニズムについては現在のところわかっていない<sup>16)</sup>。

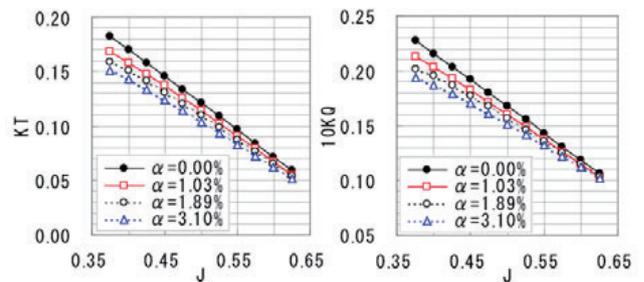


図-6.25 ボイド率のプロペラ特性への影響<sup>16)</sup>

#### (2) 尺度影響

図-6.26は $J=0.4$ において、ボイド率を変化させた時の $K_T$ 、 $K_Q$ について、大きさが異なる2つのプロペラ模型を比較したものである<sup>16)</sup>。いずれのプロペラ模型の場合でも曳航速度は同じであり、気泡の大きさは同程度であると考えられる。すなわち、 $D_p=270$ mmのプロペラ模型の方が相対的に小さな気泡が流入した状態に相当する。

- (1) ボイド率が2%以下の場合、 $K_T$ と $K_Q$ それぞれについて2つのプロペラ間で比較するとその違いは小さく、尺度影響は小さいと考えられる。
- (2) ボイド率が3%以上では、小さいプロペラの方が $K_T$ 、 $K_Q$ の低下が少ない。これは、気泡を吹き出しても気泡発生装置の有効伴流が変化しないという仮定が、吹き出し空気量の増加につれて適用できなくなるためと考えられる。実際に5孔ピトー管を用いて、気泡を吹き出した際のプロペラ面における流速測定を行ったところ、吹き出し空気量が多くなるにつれて鉛直上向きの流速が大きくなることが確認された。これは気泡の浮力により水が上昇速度を持つためだと考えられる。

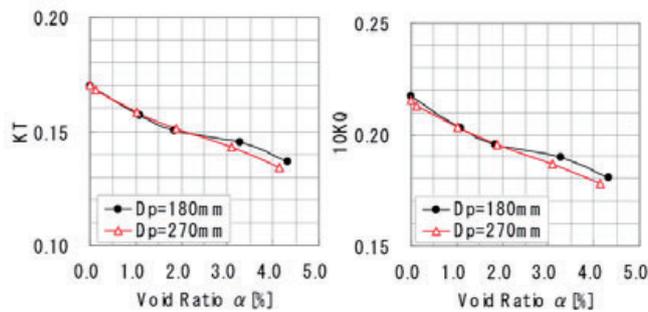


図-6.26 直径の異なるプロペラへのボイド率の影響<sup>16)</sup>

(3) 実船のプロペラ効率

推定するには、プロペラ荷重量  $C_T$  の低下によるプロペラ効率向上を考慮する必要がある。実船試験において、気泡を吹き出さない場合の  $C_T$  は3程度と推定される。気泡吹き出しにより全抵抗を15%軽減した場合に、全ての気泡がプロペラに流入すると気泡のボイド率は2%程度である。図-6.27はプロペラ荷重量に対するプロペラ効率を気泡吹き出し有無の双方について示したものである。気泡吹き出しにより自航要素が変化しないと仮定すると、気泡吹き出し時の  $C_T$  は2.55程度となる。気泡吹き出しが無い場合、図中 w/o bubble の効率曲線と  $C_T=3.0$  の交点がプロペラ作動点となり、 $\eta=0.485$  である。また、気泡吹き出し時も同様に求めると、 $\eta=0.481$  となる。このことから、全ての気泡がプロペラに流入にすると仮定しても、正味のプロペラ効率低下は相対的に0.8%程度であると推定される<sup>16)</sup>。

6.6 デッキバージによる海上曳航予備試験<sup>17)</sup>

実船実験に先立ち、デッキバージ船底部に単純開放方式の気泡吹き出し装置を装備して、気泡流吹き出し状況と抵抗低減効果を確認する目的でタグボートによる曳航試験を実施した。曳航方式と曳航中の写

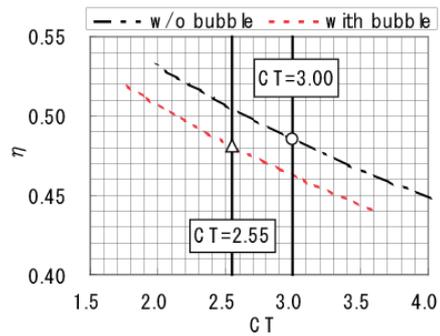


図-6.27 気泡の有無におけるプロペラ荷重量とプロペラ効率の関係<sup>16)</sup>

真を図-6.28および図-6.29に示す。吹き出し気泡流の状況はバージ船底に取りつけた水中TVカメラで、バージ抵抗は曳航索にロードセルを介して計測した。試験は香川県小豆島沖で実施された<sup>17)</sup>。

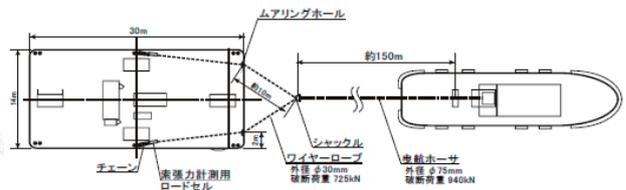


図-6.28 曳航索および曳航治具<sup>17)</sup>



図-6.29 曳航試験中のデッキバージ<sup>17)</sup>

曳航試験に先立っては、以下の試験による確認が行われた。

- ・気泡吹き出し部模型試験
- ・気泡吹き出し部岸壁試験
- ・デッキバージ模型による抵抗試験、針路安定性水槽試験及び空気巻き込み試験

試験結果は以下のとおりであり、開放方式の気泡吹き出し装置の有効性が確認された。

- (1) 水中カメラで船底部の気泡吹き出し状況および流出状況を観測し、船速が3ノット以下の場合については、各気泡吹き出し部からの均一で安定した吹き出し状況を確認することが出来た。船速

が5ノット以上では、あいにくの海象悪化のためデッキバージ船首 Cut Up 部付近からの空気巻き込みの影響により、船底部の状況を観測することができなかった。

(2) 曳航索の張力に関する計測結果を基に、デッキバージ船体抵抗について解析した結果、気泡吹き出し装置を作動させることにより、最大で8%程度の抵抗低減効果が得られたことが分かった。

## 6.7 大型セメント運搬船による実船試験<sup>18), 19)</sup>

### 6.7.1 実船実験船

実証実験に用いた供試船は、図-6.30に示す東海運(株)所属のセメント運搬船「パシフィックシーガル」である。本船の垂線間長は120m、満載喫水は7.215m、幅は21.4m、総トン数は7,809トンで、可変ピッチプロペラを装備している<sup>18)</sup>。



図-6.30 セメント運搬船「パシフィックシーガル」(東海運株式会社)<sup>18)</sup>



図-6.32 船上に設置したブロワー(右舷3台)<sup>18)</sup>

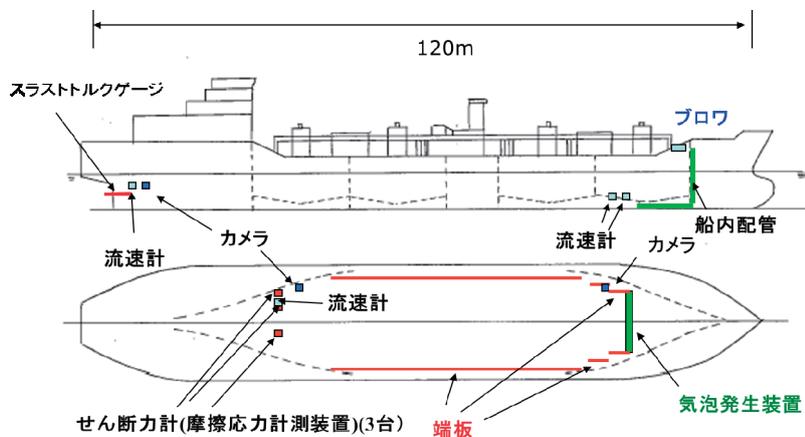


図-6.31 実船実験対象船における気泡流による抵抗低減システムの配置<sup>18)</sup>



図-6.33 設置された端板(左舷側)<sup>20)</sup>

### 6.7.2 気泡供給装置などの設置

実船実験に装備した機材配置の模式図を図-6.31に示す。図-6.32に示すように、船首上甲板ボースストア前にブロワー5台を設置した。ブロワーから船内配管により、船底まで気泡管を設置し、船底に開口部を設けて、気泡を導いた<sup>18)</sup>。船底平坦部の両端には図-6.33のように端板を設置し、気泡が船底から漏れないように対処した<sup>20)</sup>。

その他の計測装置として、気泡有無による抵抗低減、馬力低減効果を実測するため、歪みゲージをプロペラ中間軸に貼り、プロペラスラスト、トルクを計測した。

### 6.7.3 実証実験の実施<sup>19)</sup>

実証実験航海は、風状態から時化状態まで以下のように3回行われた。

- ・No.1 (2008.01.06-11): 田子の浦-徳山(バラスト)、徳山-東京(満載)。風状態。波・風共に弱かった。
- ・No.2 (2008.01.28-02.02): 高知-田子の浦(満載)、田子の浦-高知(バラスト)。波高1m、相対最大風速10m/s。
- ・No.3 (2008.02.22-02.24): 東京-広島(バラスト)。時化状態。波高2m、相対最大風速20m/s超。バラスト状態では、喫水約4m、船尾トリム1.5m、

満載状態では喫水約 7m、イーブントリムであった。非気泡吹き出し状態において、船速はバラスト、満載共に約 13kt、主機馬力は、CPP 翼角 17 度(B17 度)の状態、バラストで約 3,400PS、満載で約 3,500PSであった。5 台のプロワーはそれぞれ ON/OFF 制御した。

計測では、CPP 翼角を一定に保ち、気泡吹き出しの有無による船速、主機馬力、プロペラ推力及びトルクの変化を計測した。また、海象状態(風速、目視波高)、船尾振動も計測した。

まず、プロペラ翼角変更により、静定時間がバラスト状態で約 3 分、満載状態で約 4 分であること確認し、プロワー状態を変更(ON/OFF)する度に先ず静定時間を 5 分間設け、その後 5 分間の平均値を計測した。気泡吹き出し状態の前後を必ず気泡無し状態で挟み、気泡吹き出し状態とその前後の気泡無し状態の平均との差を省エネ効果とした。航海によっては、同一経路を 1 往復あるいは 1.5 往復運航し、1 往復の場合は往復平均をとることにより時間的に変化しない外乱影響を、1.5 往復の場合は計測間隔の重み付きの“平均の平均(mean of mean)”をとることにより時間的に線形に変化する外乱影響まで除去した。

6.7.4 実証実験結果

(1) 主機馬力低減率

図-6.34 及び図-6.35 に主機馬力低減率を示す。横軸は作動プロワー台数、縦軸は気泡吹き出しによる主機馬力低減率を表す。例えば作動プロワー台数 1 台の場合の plot は、No.1 から No.5 のプロワーそれぞれを含む。1.5 往復平均の場合のみ、作動プロワー番号を“( )”内に示す。航海番号の区別も示す<sup>19)</sup>。

図-6.34 はバラスト状態を表す。主機馬力低減率は作動プロワー台数の増加に伴い増加するが、飽和傾向を示す。また、プロワー台数 3 台までは航海による差は無いが、4 台以上では No.1 航海の低減率が大きく、No.2、No.3 航海では大幅に低下している<sup>19)</sup>。

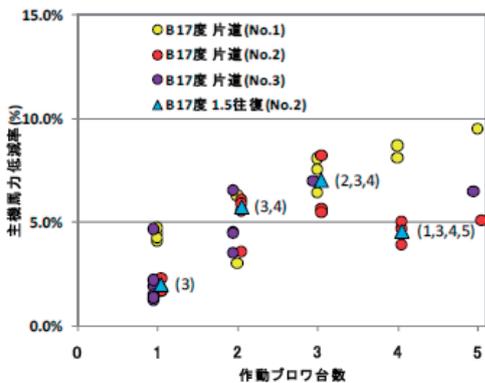


図-6.34 バラスト状態での主機馬力低減率<sup>19)</sup>

図-6.35 は満載状態を示す。主機馬力低減率はバラスト状態よりも低い、船底での圧力差による気泡体積の差が原因の一つとして考えられる<sup>19)</sup>。

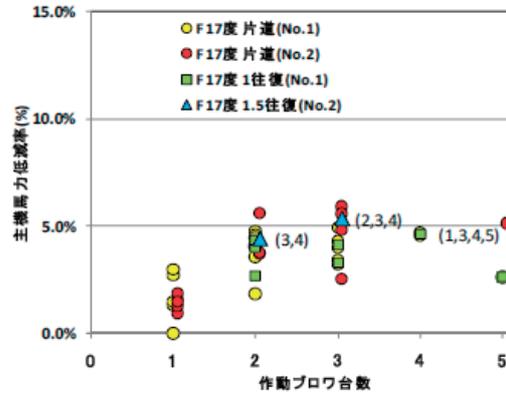


図-6.35 満載状態での主機馬力低減率<sup>19)</sup>

(2) 船速変化

図-6.36 及び図-6.37 に気泡吹き出しによる船速変化を主機馬力変化に換算した結果を示す。

気泡吹き出しにより船体抵抗が低減すると船速増加をもたらすため、船速の増加率を、主機馬力は船速の 3 乗に比例すると仮定して、主機馬力低減率に換算した<sup>19)</sup>。

・図-6.36 にバラスト状態を示す。縦座標の値は、例えば 0.1kt の船速変化が 2.3% の変化を生じるなど、海象状態や計測誤差の影響を受けやすいため、極めてバラツキが大きい。原点を通る最小自乗直線は、作動プロワー台数の増加に伴い船速が僅かに増加傾向にあることを示し、バラツキの小さい 1.5 往復平均の値もその周りに分布することから、気泡吹き出しにより船速は僅かに増加することは確からしいと考えられる<sup>19)</sup>。

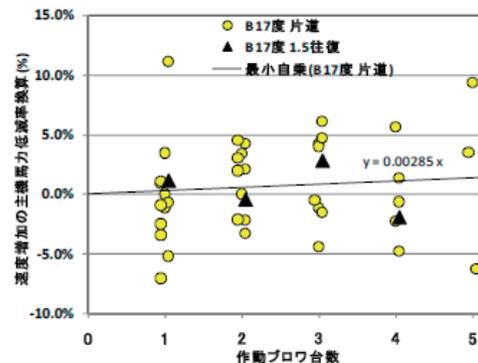


図-6.36 速度増加の主機馬力低減率換算 (バラスト状態)<sup>19)</sup>

・図-6.37 に満載状態を示す。バラスト状態と同様、

気泡吹き出しにより船速は僅かに増加傾向を示している<sup>19)</sup>。

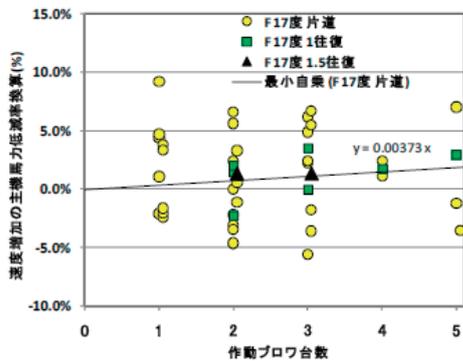


図-6.37 速度増加の主機馬力低減率換算 (満載状態)<sup>19)</sup>

(3) 正味省エネ率

正味の省エネ率は、名目省エネ率から、気泡吹き出し動力分を差し引いて得られる。名目省エネ率は、主機馬力低減率に、速度増加の主機馬力低減率換算を足したものである。ただし、ここでの気泡吹き出し動力は、大気圧状態から気泡吹き出し位置(船底)での静水圧まで断熱圧縮して気泡を吹き出すために要する動力のみを考慮した理論値であり、管路損失、機械的効率、電気変換効率などの影響を受ける実際に要した動力よりも小さい。

図-6.38 にバラスト状態を、図-6.39 に満載状態を示す。表-6.2 に1.5 往復平均値を示す。バラストと満載を平均して、プロワ 2 台で 4.5%、3 台で 5.3%の正味の省エネ効果が得られた<sup>19)</sup>。

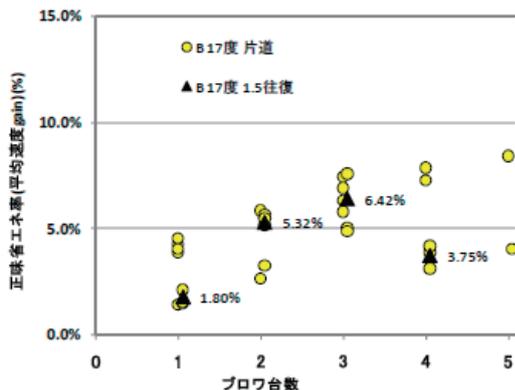


図-6.38 正味省エネ率 (バラスト状態)<sup>19)</sup>

上記の実験状態では、全て、プロワ供給用電力は補機から供給されたが、No. 2 航海のバラスト状態において、主機軸発電機により発生させた電力でプロワ 2 台を駆動した状態で、前後の気泡無し状態の 15 分間の燃費と、その間の気泡吹き出し状態の 15 分

間の燃費の差を計測し、3.2%の燃費節減が得られた。これは本船に搭載されたバブルシステムの実正味の省エネ効果である。

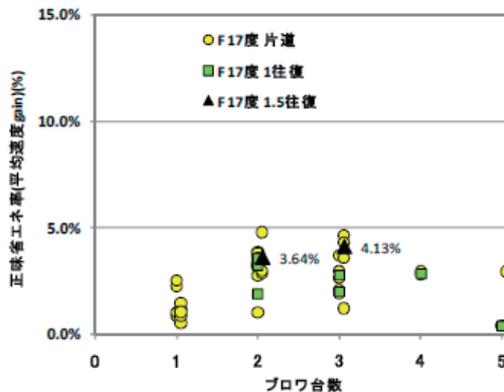


図-6.39 正味省エネ率 (満載状態)<sup>19)</sup>

表-6.2 1.5 往復時の正味省エネ率の平均値<sup>19)</sup>

動作プロワ台数	2 台	3 台
バラスト状態	5.3%	6.4%
満載状態	3.6%	4.1%
平均	4.5%	5.3%

(4) プロペラ性能への影響

図-6.40 に、バラスト状態における推力低減率  $1 - T/T_0$  を、図-6.41 にトルク低減率  $1 - Q/Q_0$  を、図-6.42 に推力・トルク比  $(T/Q)/(T/Q)_0$  を示す。“0”は非気泡状態を示す。データはNo.1 航海における、全て片道の値である。CPP 翼角は、17 度を中心に、16 度及び 18 度について実験した。

これらの結果から次のことがわかった<sup>19)</sup>。

- ・気泡吹き出しにより推力は最大 11%程度減少している。一方、船速はむしろ僅かに増加しているので、気泡によって船体抵抗が最大 11%以上減少している。
- ・トルクの低減率は最大 9%程度で、結果として推力・トルク比は最大 2%強、低減する。

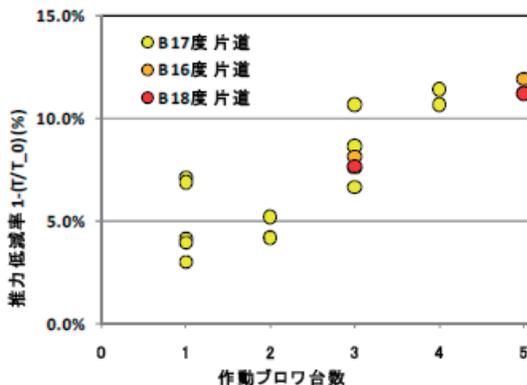


図-6.40 バラスト状態の推力低減率の変化<sup>19)</sup>

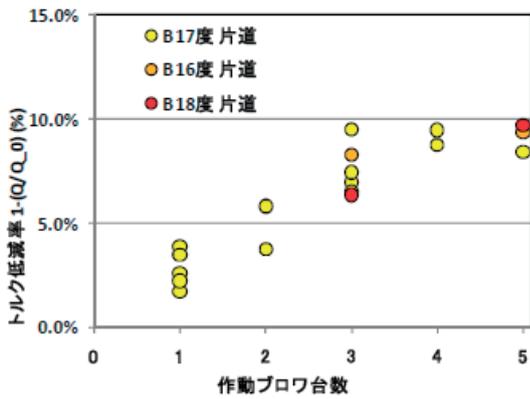


図-6.41 バラスト状態のトルク低減率の変化<sup>19)</sup>

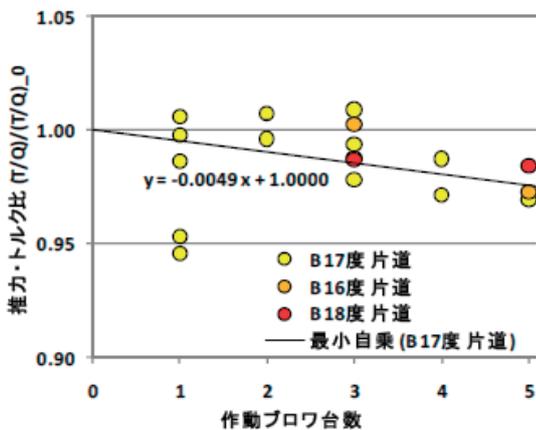


図-6.42 バラスト状態の推力・トルク比の変化<sup>19)</sup>

- ・ 推力とトルクが共に大幅に低減することの原因として先ず考えられるのは、プロペラに流入する流れの密度  $\rho$  が減少することである。もうひとつは、プロペラ流入速度の増加である。前述したように、気泡により船速は僅かに増加する。
- ・ トルクよりも推力の低減率が大きくなるメカニズムとして考えられるものを図-6.43 に示す。すなわち、気泡は負圧部に集中する傾向をもつため、プロペラ翼断面の前縁付近の負圧部に集中し、その結果負圧の pressure peak が低減し、揚力の減少(プロペラの場合は推力の減少)につながる<sup>19)</sup>。

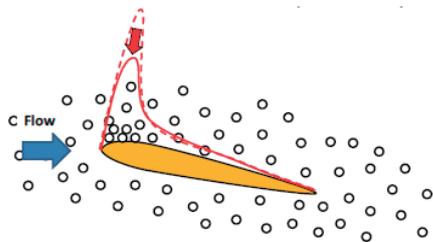


図-6.43 プロペラ翼前縁部での気泡集中による負圧 pressure peak の低減<sup>19)</sup>

・その他の計測結果として、気泡の吹き出しにより、船尾船底から取り入れられた主機冷却水に気泡が混入したことと、気泡吹き出しにより、船尾振動が増加する場合があったことがあげられた。後者については、その後の気泡吹き出しによるプロペラキャビテーション水槽試験で、投入された気泡がチップボルテックスに取り込まれることで、プロペラ変動圧力が増大することが確認<sup>21)</sup>されており、対策が必要である。

## 7. センターキールと速度影響<sup>22)</sup>

前述の実船実験では、5%程度の正味省エネ率が達成されたが、さらに空気潤滑法の効果を高め、実用性を増すためには、船底を適切な気泡被覆状態にするための最適な空気潤滑システムを設計する必要がある。空気潤滑システムの設計に必要な船底を被覆する空気量と抵抗低減効果の関係については、長尺平板模型を用いた水槽試験結果を利用している。しかし、従来の端板のみを付加した状態での長尺平板模型を用いた実験では、空気吹き出し量の増大に伴い、模型船体はずかではあるが横傾斜し、吹き出した気泡の分布が偏ることで、特に空気吹き出し量の大きい領域では、抵抗低減量が頭打ちになる上、実験結果の再現性も悪くなるという問題点があった。そこで長尺平板模型の中心線上に仕切り板を設け、気泡分布の偏りを無くすことにより、船体傾斜の影響を排除し、より二次元的な状態での実験を行い、空気吹き出し量と抵抗低減効果に関する基本的な関係を得て、空気潤滑法による抵抗低減効果の速度依存性を評価した。

### 7.1 実験装置

気泡発生装置は、長尺平板模型に直径 30mm の開口部を 41 箇所分布させたアクリル板を取り付け、この開口部を通して空気を船底に吹き出す構造とした。この気泡発生装置を、船首端より 3m と 26.2m の場所に設置した。

本実験では、長尺平板模型に端板及びセンターキールを設置した状態で試験を行った。端板は 2mm 厚のアルミ板製で、船底部より 50mm 突出するように、船体側面の平行部に取り付けた。全長の約 90%にあたる 44.85m が設置部分となる。センターキールは、吹き出し部 F の直後から、船首端から 9.12m までは高さ 30mm、そこからは高さを 20mm とし、船首より 49.15m の位置まで取り付けている。端板及びセンターキールの取り付け状況を図-7.1 に、センターキールを取り付けた長尺平板模型の船底部分の写真

を図-7.2 に示す<sup>22)</sup>。

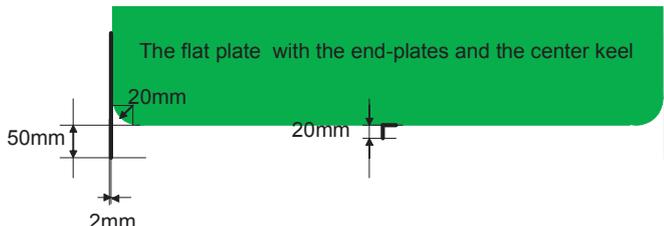


図-7.1 長尺平板模型に取付けられた端板とセンターキール<sup>22)</sup>

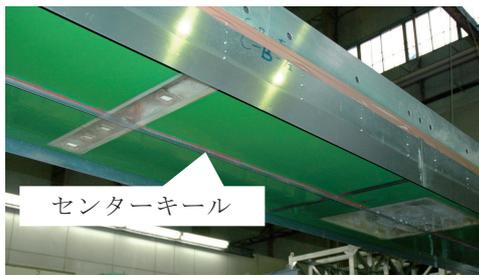


図-7.2 長尺平板模型の底面<sup>22)</sup>

7.2 実験結果

7.2.1 センターキールの摩擦抵抗低減効果への影響

センターキールの設置が摩擦抵抗低減効果へどのような影響を及ぼすか、センターキール無しで端板のみ付加した状態での長尺平板模型での試験結果と比較した。空気の吹き出しは最も船首側の吹き出し位置 F より行った状態を比較し、端板は両者同じものを付加している。端板のみ付加した状態の試験では、空気吹き出し部は完全開口状態であった。図-7.3 にセンターキールと端板を取り付けた場合と、端板のみを取り付けた場合の全抵抗値を示す<sup>22)</sup>。

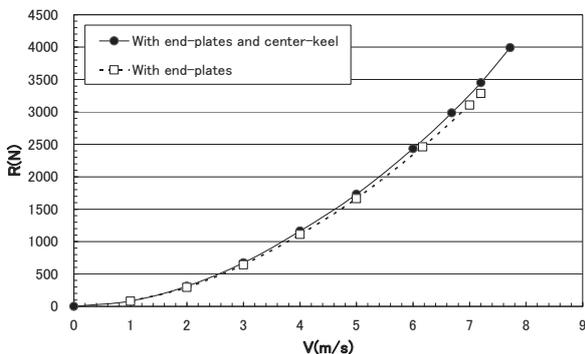


図-7.3 センターキール有無の全抵抗値<sup>22)</sup>

曳引速度 6.173m/s (12kt)における両者の空気吹き出し量と抵抗低減量 dR の関係を図-7.4 に示す。空気吹き出し量が少ない間は、空気吹き出し量と抵

抗低減効果の勾配は両者ともほぼ同一で、線形的であるが、センターキールが無く端板のみの場合は、 $t_a$ が4mmを超えるあたりから、抵抗低減量が急速に飽和し始める。一方、端板に加えて、センターキールを付加した場合は、 $t_a$ が8mmを超えるくらいで、抵抗低減量が飽和し始める。センターキールの効果により、気泡流による船底の被覆状況がより均一になり、空気吹き出し量と抵抗低減効果の勾配が一定である現象が線形的である領域が増大しているものと思われる<sup>22)</sup>。

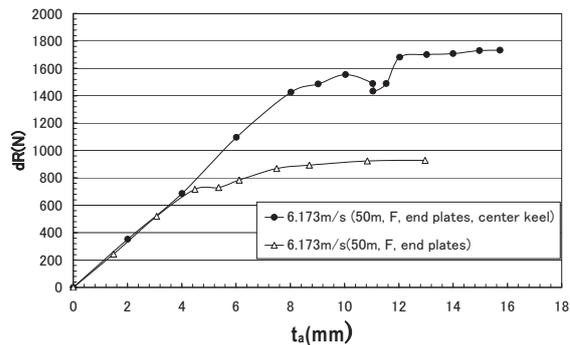


図-7.4 センターキールの空気潤滑による長尺平板模型全抵抗値低減効果<sup>22)</sup>

7.2.2 摩擦抵抗低減効果への速度影響

気泡が投入される外部流れの速度の変化により、抵抗低減効果がどのように変化するかについて検討するため、模型船の曳航速度を変化させて実験を行った。実験は、6.173m/s (12kt)、6.687m/s (13kt)、7.716m/s (15kt)の3種類の速度で行い、空気吹き出し部は、吹き出し部 F からの吹き出し、吹き出し部 M からの吹き出しの2箇所を用いた。

抵抗低減効果の速度影響を評価するため、計測結果を抵抗低減量と気泡流に被覆される部分にかかる摩擦抵抗との比を取り整理した。気泡流に被覆される部分の摩擦抵抗値は、気泡で被覆される面積を仮定し、Shoenherr の式により求めた。気泡で被覆される面積は、吹き出し部より下流の船底面、ビルジサークル部分、端板、センターキールの気泡被覆部分とした。端板、センターキールの気泡被覆部分は船底面より相当空気膜厚さ分とした。F から吹き出した場合を図-7.5に、M から吹き出した場合を図-7.6に示す。

これらの結果から以下のことがわかった<sup>22)</sup>。

- (1)センターキールを取り付けることにより、安定した気泡被覆状態と抵抗低減状態を得ることができた。

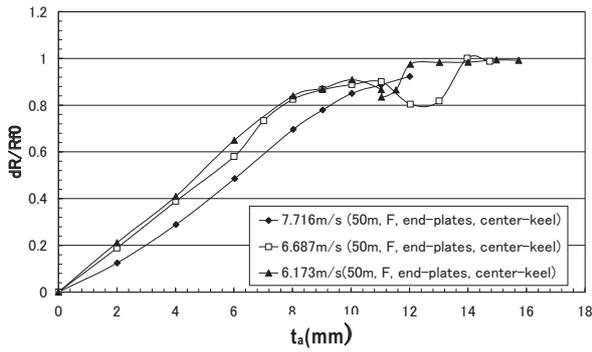


図-7.5 吹き出し位置 F の場合の吹き出し空気量と抵抗低減率の関係<sup>22)</sup>

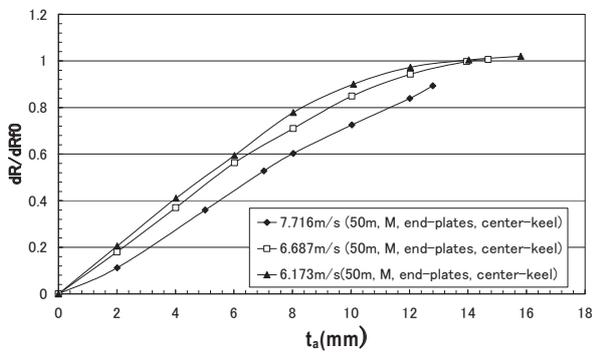


図-7.6 吹き出し位置 M の場合の吹き出し空気量と抵抗低減率の関係<sup>22)</sup>

(2) 空気吹き出し量を増加させていくと、抵抗低減効果が飽和するまでは、抵抗低減率は線形的に増大する。つまり、図-7.7に示すように、センターキールのないものは途中で気泡が船の片側に寄り、これにより船がわずかに傾き、ますます気泡が片側に寄ってしまうため、途中で抵抗低減効果が頭打ちになる。一方、センターキールを設けているものは、これにより気泡の片寄りが防止されるため、投入空気量を増やしても気泡が船底に均一に広がり、 $t_a=8\text{mm}$ 程度までほぼ直線的に摩擦抵抗が低減する<sup>9)</sup>。

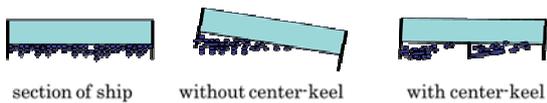


図-7.7 センターキール効果のイメージ<sup>9)</sup>

- (3) 本実験で行った二次元的な状態であれば、空気吹き出し量の増大に伴い、抵抗低減率は100%近くに達する。
- (4) 相当空気厚さ  $t_a$  と抵抗低減率の関係を見ると、模型船の曳航速度が上昇するにつれて、同じ  $t_a$

に対して抵抗低減率が小さくなっている。

## 8. 実船への適用 (その1 ブロアのみによる空気供給の場合)

### 8.1 28,000 載貨重量トン級ばら積み船の場合<sup>23)</sup>

以上の成果を受けて、外航船に空気潤滑法を採用する動きが出はじめ、今治造船株式会社と海技研は2008年度から共同で、28,000 載貨重量トン級バルクキャリア(垂線間長160.4m、幅27.2m、満載喫水9.7m)に空気潤滑システムを搭載すべく研究を重ね、2009年度からは国土交通省、日本財団、日本海事協会、日本造船技術センターの支援を受けて本船に空気潤滑システムを搭載し、平成20年6月に海上試運転を行った。図-8.1に同船の写真を示す<sup>23)</sup>。



図-8.1 28,000DWT バルクキャリア<sup>23)</sup>

本システムを実船に搭載するにあたり、シーチェストへの空気巻き込み、船尾振動等の課題について事前に調査し、シーチェストについては、トラップされた気泡を除去するのに必要な空気抜き用の配管に関する模型試験を行い、実船ではトラップされた空気が空気抜き配管に導かれるように工夫した。船尾振動については、模型船を海技研大型キャビテーション水槽に設置し、船底から気泡を放出したときの船尾変動圧を計測し、本船では船尾振動による問題は発生しないと推定した。

本船の空気潤滑システムでは、船底面に複数の円形吹き出し開口を開けたチャンバー方式の吹き出し部を船首船底部に設け、空気を吹き出す方式とした。また気泡供給用のブロアについては、実船で最適点が変わることが想定されること、喫水が変わると水圧が変化して吸入すべき空気の体積が変わることから、吹き出し量を変更できるインバータによる回転数制御式可変ブロアを採用した。

さらに、空気潤滑法のために注入した泡がプロペラに流入することで、プロペラ効率が変化する事が十分に予測されたので、本船に装備するプロペラの模型を用いて気泡流中プロペラ単独性能試験も実施

した。その結果、本船のプロペラの場合、効率の低下は1~2%に留まると予測した。上記の事前研究により、本船の空気潤滑による正味省エネ率は満載状態3%、バラスト状態6%程度と推定した。

伊予灘において海上試運転を行った結果、船速15ktsにおいて主機馬力の比較である名目省エネ率で約8%、プロア電力を考慮した正味省エネ率で約6%の効果が得られた。なお、試運転時にブリッジ、船員居室、主機本体、舵機室で振動計測を実施したが、空気吹き出し on/off の振動レベルの差はわずかであり、体感上その違いは感じられず、本船において振動問題はなかった。さらに、シーチェストへの気泡混入についても調べた結果、冷却海水管に若干の泡の混入を認めたが、冷却海水ポンプの圧力には特段の変化が無く、運転には全く支障がなかった。

## 8.2 モジュール運搬船の場合

日本郵船、日之出郵船、三菱重工業により、モジュール運搬船（全長162m、幅38m、計画喫水4.5m、夏期満載喫水6.34m）に空気潤滑システムを搭載した事例が発表された<sup>24)</sup>、<sup>25)</sup>。本船の写真を図-8.2に示す<sup>24)</sup>。本船は幅広の浅喫水船であり、空気潤滑法に適した船型である。ここでは2隻の姉妹船に対して同システムを搭載している。海上試運転の結果では8-12%の正味の省エネ効果が得られたと報告されている。さらに2年間の実運航データを解析したところ、実海域での空気潤滑法により6%の省エネ効果が得られたことが発表されている。



図-8.2 モジュール運搬船「Yamatai」<sup>24)</sup>

## 8.3 内航フェリーの場合

最近、内航フェリーに空気潤滑法を適用した例が、三菱重工業から発表された<sup>26)</sup>。それによると5%の推進馬力減が得られたと報告されている。一般には、フェリー船型は平底部の面積が小さく、空気潤滑法には必ずしも適した船型と見なされていなかった。プロア動力を加味した省エネ効果の発表が待たれる。

## 9. 新しい空気供給法の開発<sup>27)</sup>、<sup>28)</sup>

### 9.1 主機掃気バイパスシステム

大型外航船舶は、内航船に比べ喫水が深いいため船底水圧が大きくなる。一方、船底摩擦抵抗に有効な空気量は船底に吹き出した空気量で決まるため、喫水が深くなるほど、空気の圧縮性により大気圧下の状態より多くの空気を投入しなければならない。すなわち喫水の増加は、プロア吐出圧の増加のみならず、大気圧下での空気吸い込み量の増加の二重で投入エネルギーの増加に効いてくる。これによるプロアの動力増加が、省エネ効果を減じる大きな原因となる。このため、空気投入技術の改善が外航船に適用するときのキーとなる技術課題である。海技研では、これを解決する手段として、主機掃気ガスを一部抽気して、これを空気潤滑法に利用する方法を提案した<sup>27)</sup>、<sup>28)</sup>。図-9.1に主機掃気バイパスシステムの概要を示す<sup>28)</sup>。

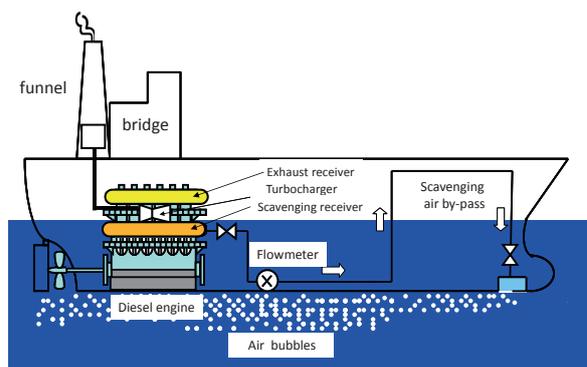


図-9.1 主機掃気バイパスシステムの概要<sup>28)</sup>

さらに空気潤滑法を大型外航船へ適用する際の技術課題を解決すべく、2009年度より造船会社9社、船会社1社が共同で、国土交通省、日本海事協会、日本財団の支援をうけて、外航船舶に空気潤滑法を適用するための研究開発に取り組んだ。

海技研は当該10社と共同研究を実施し、技術支援を行った。本方法は世界で初めての課題であり、わが国から発信する新しい技術開発テーマとなった。本研究では、空気潤滑法の設計ツールの開発や、実機の主機を用いた掃気バイパスガスシステムの試験を行い、掃気バイパスガス量と燃費の関係、バイパスガスの流量制御法に関する研究に取り組んだ。

### 9.2 実船への適用（その2 主機掃気バイパスによる空気供給の場合）

2012年7月に90,000載貨重量トン級の外航ばら積み船（船長235m、幅43m、満載喫水約13m）に主機掃気バイパスシステムを装備した空気潤滑システ

ムを搭載した例が発表された<sup>29)</sup>。本船は日本郵船と大島造船所が国土交通省、および日本造船技術センターの支援を受け、さらに技術支援を海技研から得つつ開発建造したもので、主機掃気バイパスシステムを用いた世界で初めての船である。発表によれば、海上公試の結果、喫水が深い場合で約4%、浅い場合で約8%の省エネ効果が得られたとしている。図9.2に本船の写真を示す<sup>29)</sup>。



図-9.2 90,000DWT バルクキャリア<sup>27)</sup>

## 10. あとがき

空気潤滑法による船舶の省エネルギー技術に関して、1995年の研究開始時点から、その歴史にそって解説した。50mもの長尺模型を曳航試験するという奇抜な発想と、長年にわたり水槽試験と実船試験を繰り返しながら問題解決していく手法が、画期的な成果をもたらしたと思われる。

もともと、空気を使った抵抗低減法としては、気膜法とマイクロバブル法があり、前者は、浸水表面積を減らす、後者は、気泡が乱流を抑えて摩擦抵抗を減らすというメカニズムである。

当初、目指していたマイクロバブル法の研究は、気泡生成法の問題で、実際には、マイクロバブルの効果での抵抗低減は実現できておらず、微細な気泡を作ることが重要だと考えられていた。

しかし、6.3.2に述べたように空気吹き出し方式を変えても、抵抗低減効果にほとんど影響が無く、また、空気量に比例して抵抗が減ることから、抵抗低減効果は、気泡径には関係なく、気泡流の密度で決まらしいと考察された。この結果は、かなりの衝撃を持って受け入れられると同時に、実船への適用という意味で、道が開かれたと感じさせた。マイクロバブル法から空気潤滑法への転換を印象づける成果であった。

CO<sub>2</sub>削減が国際的な課題となっている現在、本技術のさらなる展開が期待される。海技研では、その普及実現のために、波浪中での船底気泡挙動の把握、吹き出し制御法の開発、さらに実海域での省エネ率

の推定手法の確立に取り組んでいる。それらの成果については、順次公表していくので、是非実船への適用をご検討いただきたい。

## 謝 辞

ここで紹介した内容の一部の実施に当たっては、NEDO、国土交通省、日本海事協会、日本財団、日本造船技術センター、東海運株式会社のご支援、ご協力を受けたことを記し、謝意を表します。研究の一部は国内造船9社及び海運会社1社との共同で実施した。関係各社に謝意を表します。さらに、これまで、本研究開発に従事されたすべての関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 児玉良明、次世代 CFD による船舶の流体抵抗低減法に関する研究、第66回船研発表会講演集、1995、pp.107-112
- 2) 高橋孝仁、角川明、児玉良明、(1997)、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、pp.1-7
- 3) McCormick, M.E. and Bhattachayya, R., 1973, Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis, Navel Engineers Journal, vol. 85, No. 2, pp. 11-16.
- 4) Madavan. et al., Measurement of Local Skin Friction in a Microbubble modified Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech. Vol.156, 1985. Pp.237-256
- 5) 児玉良明、他、(2002)、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、日本造船学会論文集、192、pp.1-14.
- 6) 永松哲郎、他、(2002)、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、日本造船学会論文集、192、pp.15-28.
- 7) 知的乱流制御研究センター、<http://www.nmri.go.jp/turbulence/>
- 8) 児玉良明、堀利文、牧野雅彦、川島久宣、セメント運搬船を用いたマイクロバブルの実船実験、海上技術安全研究所第5回研究発表会講演集、(2005)
- 9) 日夏宗彦、(2013)、空気潤滑法を用いた船舶の省エネルギー技術動向、混相流学会誌 27(1)、pp.4-10.
- 10) 川島久宣、牧野雅彦、堀利文、日夏宗彦、児玉良明、50m平板を用いた2段吹き出しによるマイ

- クロバブル抵抗低減実験、日本船舶海洋工学会春季講演会論文集、第2E号、2006、pp. 147-150
- 11) 高橋孝仁、角川明、牧野雅彦、児玉良明、長尺平板船を用いたマイクロバブルの尺度影響に関する研究、関西造船協会論文集、239、2002、pp. 11- 17
  - 12) 川島英幹、他：長尺平板模型を用いた気泡吹き出し法による抵抗低減実験、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集、第3号、2006、pp. 285-288
  - 13) 迫田我行、他、摩擦抵抗軽減に有効な空気吹き出し法、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集、第3号、2006、pp. 289-290
  - 14) 川島英幹、他、船舶の省エネルギーデバイスとしての空気吹き出し法の有効性について、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第4号、2007、pp. 79-82
  - 15) Kawashima H. et al.: A RESEARCH PROJECT ON APPLICATION OF AIR BUBBLE INJECTION、Proceedings of FEDSM2007、5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference、San Diego、California USA、July 30-August 2、2007
  - 16) 川島久宣、他、気泡流中のプロペラ特性と尺度影響に関する実験、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集、第3号、2006、pp. 317-318
  - 17) 三井造船株式会社、マイクロバブル実船実験用気泡発生装置の予備試験、2007年2月
  - 18) 日夏宗彦、他、大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験(準備)、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第6号、2008、pp. 161-162
  - 19) 児玉良明、他、大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験(結果と解析)、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第6号、2008、pp. 163-166
  - 20) 東海運株式会社、実船試験船の提供と実船試験の実施及び試験にかかる工事一式にかかる報告書、2008年、3月
  - 21) 日夏宗彦、他、気泡流中を作動するプロペラが誘起する変動圧力、日本船舶海洋工学会春季講演会論文集、第8号、2009、pp. 305-308
  - 22) 川島英幹、他、空気潤滑法による摩擦抵抗低減効果の速度影響、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集、第9E号、2009、pp. 93-96
  - 23) 溝尻貴明、他、28000DWTばら積み運搬船への空気潤滑法の適用、日本船舶海洋工学会講演論文集、2011、pp. 425-428
  - 24) 溝上宗二、他、空気潤滑システムの開発と実船試験による検証、日本船舶海洋工学会論文集、第12号、2010、pp. 69-77
  - 25) 川北千春、他、空気潤滑システム搭載船の実船船底気泡流と摩擦抵抗低減効果、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第12号、2011、pp. 429-432
  - 26) 三菱重工業株式会社ホームページ、  
<http://www.mhi.co.jp/news/story/1210035263.html>
  - 27) 春海一佳他、空気潤滑のための掃気バイパス、平成22年度海技研研究発表会講演集、2010、pp. 223-230
  - 28) 福田哲吾、空気潤滑のための掃気バイパス、海技研ニュース船と海のサイエンス 2012(Aut.)、12-14、2012
  - 29) 日本郵船株式会社ホームページ、  
[http://www.nyk.com/release/1960/NE\\_120727.html](http://www.nyk.com/release/1960/NE_120727.html)