OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	マイクロバブル法による船舶の摩擦抵抗低減に関する実験的研究
Author(s)	高橋, 孝仁
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/895
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

マイクロバブル法による
船舶の摩擦抵抗低減に関する実験的研究

平成１６年２月

高　橋　孝　仁



写真 1　400m 曳航水槽の曳引車に設置されたマイクロバブル実験用 50m 長尺平板模型船(後方から見たところ)

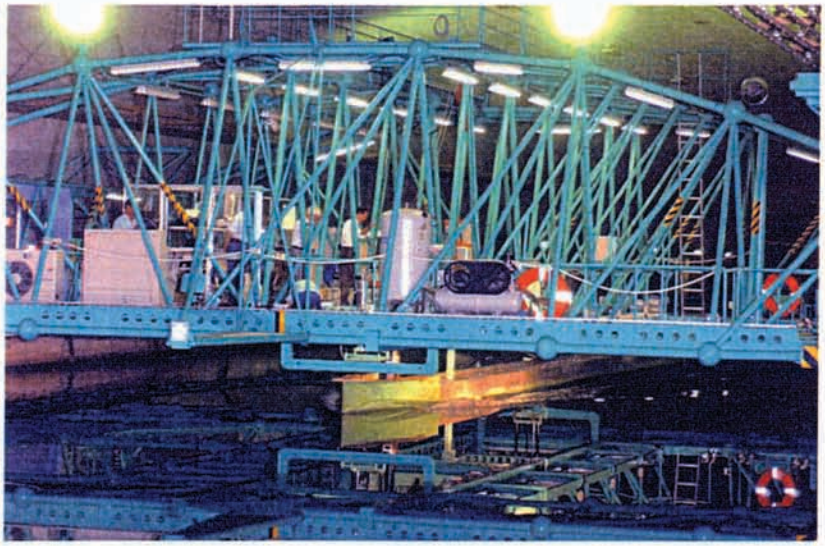


写真 2　前方から見たところ

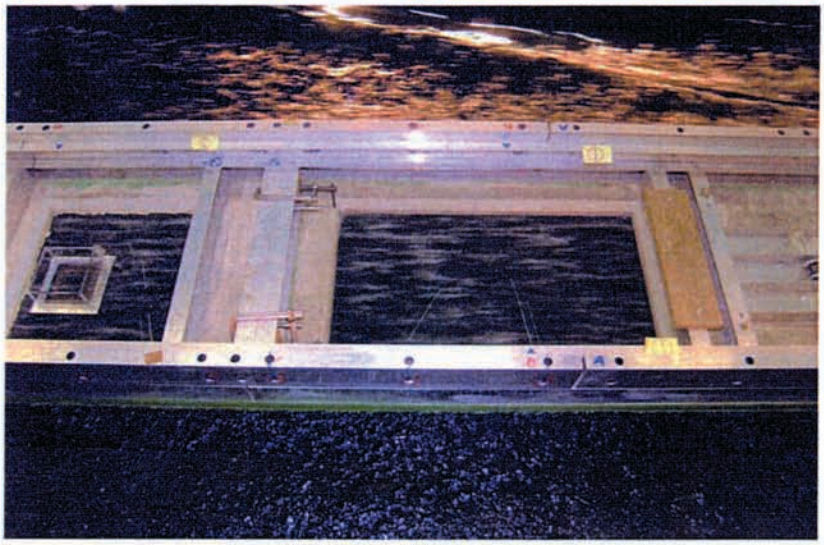


写真 3　船底を流れる気泡

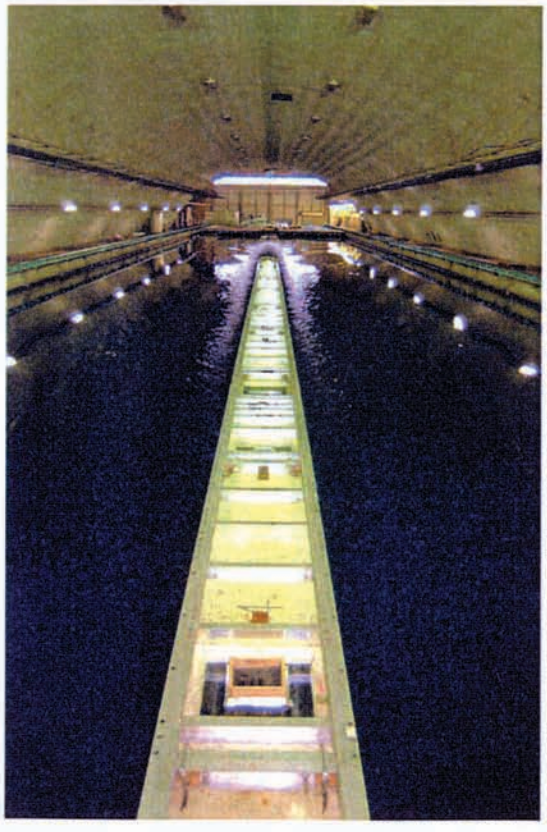


写真 4　曳引車上から船尾を見る

目　次

第 1 章 序論 ・・・

(2) 気泡吹き出しにる摩擦抵抗低減効果
(3) 気泡吹き出しによる局所摩擦低減 ・・・・・・・・・・・・・・46
(4) 摩擦抵抗低減率と局所摩擦低減率の比較検討 ・・・・・・・・48
(5) 局所ボイド率分布計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49
(6) 壁近傍ボイド率と局所摩擦抵抗低減効果の関係 ・・・・・・・51
4.2.4 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53
4.3 50m 平板模型船を用いた摩擦抵抗低減効果の長手方向持続性の調査・・54
4.3.1 はじめに
4.3.2 試験装置概要
4.3.3 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・55
(1) 抵抗試験
(2) 気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減効果 ・・・・・・・・・・・56
(3) 局所摩擦低減効果の流れ方向分布 ・・・・・・・・・・・・・57
(4) 摩擦抵抗低減率と局所摩擦低減率の比較検討 ・・・・・・・・58
(5) 境界層厚さが局所摩擦低減効果に及ぼす影響 ・・・・・・・・59
(6) 空気吹き出しの最適位置
4.3.4 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・60
4.4 50m 平板模型船を用いた 3 種類の気泡吹き出し方法の比較・・・・・・61
4.4.1 はじめに
4.4.2 試験装置概要
4.4.3 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
(1) 局所せん断力センサの検定
(2) 局所摩擦低減効果の長手方向分布
(3) 局所摩擦低減効果の幅方向分布 ・・・・・・・・・・・・・・63
(4) 全抵抗低減計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・64
(5) 船底を流れる気泡の様子 ・・・・・・・・・・・・・・・・・65
(6) 3 種類の空気吹き出し板の圧力損失の比較
4.4.4 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
4.5 34m 平板模型船を用いた実船実験のための予備実験・・・・・・・・・67
4.5.1 はじめに
4.5.2 試験装置概要
(1) 供試模型船
(2) 実船実験用気泡発生装置
(3) 実船実験用局所せん断力計 ・・・・・・・・・・・・・・・・68
(4) 実船実験用局所ボイド率計
(5) 実船実験用配線フェアリング
4.5.3 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
(1) 抵抗試験
(2) 気泡吹き出し部フェアリングの抵抗低減効果に及ぼす影響 ・70
(3) 局所ボイド率分布計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71

(4) 配線フェアリング ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72
(5) 個々のせん断力センサの摩擦計測値 ・・・・・・・・・・・・・73
4.5.4 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
第5章 マイクロバブル法の省エネルギー効果推定法について ・・・・・・・・75
5.1 はじめに
5.2 推定式の導出
5.2.1 名目的な省エネルギー率と正味の省エネルギー率
5.2.2 全抵抗と相当平板の摩擦抵抗の関係 ・・・・・・・・・・・・・・76
5.2.3 全摩擦抵抗と気泡被覆部分の摩擦抵抗との関係 ・・・・・・・・・77
5.2.4 注入空気量の関数としての省エネルギー率 ・・・・・・・・・・・78
5.3 実船における省エネルギー率の推定・・・・・・・・・・・・・・・・・80
5.3.1 50m 平板模型船の実験結果
5.3.2 100m 内航タンカーにおける省エネルギー効果の推定・・・・・・・82
5.4 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85
第6章 青雲丸を用いた実船実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
6.1 はじめに
6.2 供試船
6.3 青雲丸における省エネルギー効果の推定
6.4 実験装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
6.5 実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・89
6.6 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
第7章 マイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズム ・・・・・・・・・・・・92
7.1 はじめに
7.2 実験的研究
7.2.1 壁面近傍のボイド率
7.2.2 気泡径の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・93
7.2.3 気泡径と乱流スケールとの比 ・・・・・・・・・・・・・・・・・95
7.2.4 チャンネル内気泡乱流の光学的計測 ・・・・・・・・・・・・・・96
7.3 理論的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・98
7.3.1 準空気膜状態の形成
7.3.2 混合長理論に基づくマイクロバブル流れのモデル計算
7.3.3 小さな粒子を含む薄い懸濁流体の粘性・・・・・・・・・・・・・100
7.3.4 チャンネル内気泡乱流の直接数値シミュレーション
7.4 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・101
第8章 マイクロバブル法の実用化のための今後の課題・・・・・・・・・・・103
第9章 結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・105
謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・109

記　号　表

b	流路幅
B_a	吹き出し部幅
B_c	試験部幅
C_v	体積流量係数　$(=\frac{Q_a}{S_a U_\infty})$
C_f	平板の壁面摩擦係数
F_n	フルード数　$(\equiv\frac{U}{\sqrt{gL}})$
g	重力加速度(m/s²)
p_0	ポンプ吐出空気圧力（絶対圧力）
p	局所摩擦計測位置における流路内圧力（絶対圧力）
Q_a	単位時間当たりの注入空気量。"a"は air を表す。
Q_{a0}	ポンプ吐出空気流量
Q_s	吸い込み空気総量(ボイド率計測装置から吸い込んだ空気流量の境界層内積分量
Q_w	単位時間あたりの水流量。"w"は water を表す。
R_e	レイノルズ数
R_{fbc}	気泡被覆部分の摩擦抵抗
t_a	相当空気厚さ　$t_a=\frac{Q_a}{B_a U_m}$ または $t_a=\frac{Q_a}{B_a U_\infty}$
U_m	断面内平均流速
U_τ	摩擦速度
U_∞	一様流速
x_a	空気吹き出し位置からの距離
y^+	摩擦速度で無次元化された壁面からの垂直距離。
$\overline{\alpha}$	平均ボイド率
δ	境界層厚さ（制限流路ではチャンネル全高さ h、または半高さ $h/2$)
δ^*	排除厚さ
ν	動粘性係数
ν_t	渦動粘性係数

ρ	水の密度
τ_w	壁面せん断応力

図のリスト

図 1.1　*McCormick* ら*(1973)*による世界初のマイクロバブル実験

(a) 試験体

(b) 抵抗低減計測結果

図 1.2　マイクロバブルの船舶への適用イメージ

図 2.1.1　壁に沿って発達する境界層

図 2.1.2　乱流境界層の可視化

図 2.1.3　層流及び乱流状態の壁面摩擦係数(円管)(*Schlichting, H. 1968*)

図 2.1.4　乱流境界層中の速度分布（*日野幹雄 1976*)

(a) 3 つの速度域

(b) 速度分布

図 2.2.1　速度変動の相関

図 2.2.2　速度変動の確率密度関数の象限図とレイノルズ応力の発生

(a) $-\overline{u'v'}=0$ の場合

(b) $-\overline{u'v'}>0$ の場合

図 2.3.1　数値シミュレーションにより可視化された壁乱流中のストリーク構造(*遠藤ら 2001*) 青: 低速ストリーク、赤:高速ストリーク、灰色:渦構造。流れは左から右。

図 2.3.2　バーストとストリーク構造の連鎖的発生メカニズム *(Choi et al. 1997)*

(a) Stage 1

(b) Stage 2

(c) Stage 3

図 3.2.1　海技研の小型高速流路と発生気泡

(a) 全体図

(b) 気泡発生部

(c) 流路と気泡発生部

(d) 発生気泡。U=7m/s、Position 2 (0.5m)

図 3.2.2　*Madavan et al. (1984)*が行ったマイクロバブル実験

(a) 計測部配置

(b) 計測された壁面摩擦応力低減効果

図 3.3.1　リブレット模式図（*笠木伸英 1992*)

図 4.1.2.1(図 3.2.1 再掲)　海技研の小型高速流路と発生気泡

(a) 全体図

(b) 気泡発生部

(c) 流路と気泡発生部

(d) 発生気泡。U=7m/s、Position 2 (0.5m)

図 4.1.2.2　水に接する面を上向けにして置かれた計測蓋

（中央にせん断力センサ 2gf、左に圧力センサ）
図 4.1.2.3　2種類の気泡生成板　（流れは左から右方向）
(a) 多孔質板
(b) 配列多孔版
図 4.1.2.4　多孔質板からの気泡発生を下から撮影（流れは左から右）
図 4.1.2.5　水用局所せん断力センサ(*Guin et al. 1996*)
(a) 全体図
(b) センサ板近傍拡大図
図 4.1.2.6　局所せん断力センサ。定格容量 2gf (S10-2W)
図 4.1.2.7　吸い込み式局所ボイド率計測装置
図 4.1.3.1　制限水路での Q_a と Q_w
図 4.1.3.2　局所せん断力計の静的校正
図 4.1.3.3　局所せん断力計の動的校正
図 4.1.3.4　誤差評価
図 4.1.3.5　マイクロバブルの壁面摩擦応力低減効果のばらつき評価
(a) U_m=5m/s, P2、AHP
(b) U_m=7m/s、P3、AHP
図 4.1.3.6　壁面摩擦応力の計測結果（U_m=5m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.7　壁面せん断応力の計測結果（U_m=7m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.8　壁面せん断応力の計測結果（U_m=10m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.9　局所ボイド率分布計測における積分空気量と吹き出し空気総量の比較
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.10 局所ボイド率分布のばらつき評価 P3、$\overline{\alpha}$=0.08
(a) U=5m/s
(b) U=7m/s
図 4.1.3.11　局所ボイド率分布（U_m=5m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.12　局所ボイド率分布（U_m=7m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.13　局所ボイド率分布（U_m=10m/s)
(a) AHP , (b) PP
図 4.1.3.14　壁近傍ボイド率 α ($y^+ \leq 1000$)と壁面せん断応力低減率との関係
図 4.1.4.1　海水と清水における壁面せん断応力の比較(P.3)
図 4.1.4.2　清水での壁面せん断応力の低減（AHP)
(a) U_m= 5.0 m/s
(b) U_m =7.0 m/s
(c) U_m =10.0 m/s

第1章 序論

1.1. 研究の背景

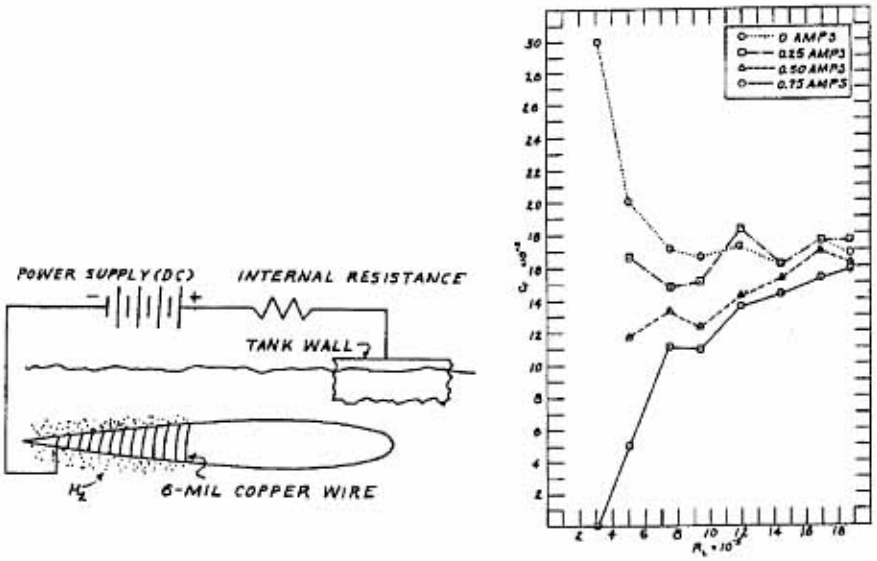
マイクロバブル法は、水流中において固体表面に沿って発達する乱流境界層に微細な気泡を注入することにより、摩擦抵抗を低減させるデバイスである。摩擦抵抗低減デバイスは、その他10種類以上も考案されているが、商用ベースで実用化されたものは未だ無く、マイクロバブル法もその例外ではないが、大きな低減効果をもち、船舶において実用に最も近い低減デバイスであると考えられている(*児玉良明 2002*)。

船体摩擦抵抗を低減させるデバイス開発は、海上技術の視点から、船舶分野における革新的技術であり、先進的な船舶開発に結びつく。また、海洋環境の保全に関する視点からも、船舶からの排出二酸化炭素の低減により、海上輸送機関として地球温暖化への対策および海洋環境を保全することとなる。

マイクロバブルは、気泡径がミクロンオーダーの微細な気泡の総称として用いられ、本論でのマイクロバブルは摩擦抵抗低減機能のみを対象としているが、それ以外にも魚類の養殖や水質浄化など環境汚染対策としての利用も進められており、幅広い用途をもっている。また気液二層流としての気泡流は、ボイラーや軽水炉などの施設においても重要な課題として扱われるように産業面でも重要であり、既に流体力学の一つの研究分野として確立されているが、その中でも微細な気泡は、様々な応用技術の可能性を持ち、その流場解明に関する研究価値もさらに高まっている。

マイクロバブルは、最終的には実用的な摩擦抵抗低減デバイスとしての開発を目指しているが、現在は摩擦抵抗低減メカニズム解明を含む研究対象でもある。従って本論中では、摩擦抵抗低減デバイス(装置)としてのマイクロバブルを単に「マイクロバブル」、研究対象としてのマイクロバブルを「マイクロバブル法」と称することとする。

摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法の実験は、30年前に *McCormick and Bhattacharyya (1973)*によって初めて行われた。彼等は、図1.1(a)に示すように、長さ0.9mの軸対称体の後半部に電極線を巻き付け電気分解によって水素気泡を発生させ、曳航水槽において最大2.6m/secの速度で曳引した状態で物体の抵抗変化を計測した。図1.1(b)に計測結果を示す。縦軸は抵抗係数、横軸はレイノルズ数すなわち曳航速度である。電流量ゼロでの値と比べて、特に低速で数10%の顕著な抵抗低減が得られている。



(a)試験体　　(b)抵抗低減計測結果

図 1.1 *McCormick* ら*(1973)*による世界初のマイクロバブル実験

1970 年代には、マイクロバブルの研究は主に旧ソ連において行われ、*Bogdevich* ら*(1977)*は、焼結金属を用いて微小気泡を注入し、その摩擦抵抗低減効果が境界層内最大ボイド率の関数で表せることを示した。

1980 年代には、米国において精力的な研究が行われた。ペンシルベニア州立大学のグループは、旧ソ連での研究の追試験から始めて、小型流路を用いた平板実験による数々の基礎研究を行った。焼結金属の孔径、気泡吹き出し面を上または下にとった場合、などの摩擦抵抗低減効果への影響を調べ、吹き出し空気量の流速の比を用いて摩擦抵抗低減効果を１本の曲線で定量的に表せることを示した。また、摩擦抵抗低減効果が下流に進むにしたがい低減することも示した。さらに、抵抗低減メカニズムの簡易なモデル化も示した。これらの研究成果は *Merkle and Deutch (1990)* にまとめられている。

1990年代には、東京大学を初め *IHI*などにおける一連の研究(*Kato, H. et al. 1994, Kato, H. et al. 1998, Guin, M.M. et al. 1996, Yoshida、Y. et al. 1998a*)を皮切りに、我が国において研究が盛んになった。その研究の特徴は、商船への適用を念頭に置いた実用的なものであることである。原油、鉄鉱石、穀物など重量物を運搬する大型肥大船は世界輸送において重要な役割を果たす商船であり、長大で低速であるため、摩擦抵抗成分が全抵抗の約 80%を占める。図 1.2 にマイクロバブル法をタンカーなどの大型肥大船型に適用したイメージを示す。肥大船は平らで広い船底をもつため、船首船底近くで注入された気泡は、浮力によって壁近くに止まりながら下流まで船底を効率的に覆い、高い抵抗低減効果をもつと期待される。



図 1.2 マイクロバブルの船舶への適用イメージ

マイクロバブルの実用化を確かなものにするためには、摩擦抵抗低減効率を高めることが重要である。なぜならマイクロバブルにより摩擦抵抗低減効果が得られるが、気泡を注入するためにはエネルギーが必要であり、正味の省エネルギー効果を高めるためには、少ない空気量で大きな抵抗低減を得る必要があるためである。大型タンカーは約 20m もの喫水をもつため、船底に気泡を注入するためには高い水圧に抗して行う必要があり、空気ポンプから吹き出し口までの管路損失も考慮すると、正味の省エネルギー効果を得ることは容易でない。そして、摩擦抵抗低減効果を高めるためには、マイクロバブルによってどのようなメカニズムで摩擦抵抗が低減するのか、すなわち摩擦抵抗低減メカニズムの解明が重要なポイントとなる。実用化のためのもう一つのポイントは、船の大きさに対応して、大きなスケールでの低減効果を知ることである。その方面の研究として *Tokunaga (1986)* は平板を用いた曳航実験を行い、その後渡辺ら(*1998*)は長さ 40m という画期的な長尺平板模型船を用いて抵抗低減効果の下流方向の持続性を計測し、実船性能推定の基礎となるデータを得た。

海上技術安全研究所(以下、海技研)では、先ず運輸省(現国土交通省)特別研究として「次世代 CFD による船舶の流体抵抗低減法に関する研究」(H7～H12)が実施され、マイクロバブルについて、気泡生成法および局所摩擦計測法など各種試験装置の開発から始め、本研究に示す小型高速流路や 50m 平板模型船を用いた基礎的・基盤的な研究が行われた。我が国で実施されたマイクロバブルに関する研究プロジェクトのうち最大のものは (社)日本造船研究協会の SR239 研究部会(部会長:鈴木敏夫 大阪大学教授)による「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」(H10～H13)である。この研究プロジェクトでは、マイクロバブルを主要な研究対象として、空気膜および塗膜による摩擦抵抗低減についても研究が行われた。そして、最終年度の 2001 年 9 月に実施された独立行政法人航海訓練所練習船「青雲丸」を用いた実船実験(*児玉良明他 2002*、*永松哲郎他 2002*)において、実船においてマイクロバブルによって摩擦抵抗が低減することが確認された。本研究に示す小型流路を用いた海水影響などの基礎研究と、長尺平板模型船を用いた実験によってこのプロジェクトに参加し、実船実験の摩擦低減効果を推定するため、空気流量と摩擦抵抗低減量の定量的な関係を求め、その結果を本論文中に示している。さらに海技研では、文科省科学技術振興調整費開放融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」(H12～H16)において、主にマイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズムに関する研究を実施し、その一部を本論文中に示している。

1.2 研究の目的と概要

本論文は、船舶の摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブルについて、その実用化を目指し、抵抗低減効果を上げるためのメカニズム解明と、実用化する際に重要な尺度影響に関する研究についてまとめたものである。

第 1 章では、序論として、マイクロバブル研究の背景と本研究の目的及び概要を示す。

第 2 章では、摩擦抵抗低減を議論する準備として、単相流状態の流場の特徴、特に乱流運動によって大きな摩擦抵抗が発生するメカニズムについて説明する。

第 3 章では、摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法の特徴と、他の低減デバイスと比較してマイクロバブル法が船舶に適している理由を説明する。

第 4 章では、著者が海技研において実施したマイクロバブルに関する実験的研究について説明する。先ず小型の回流型流路では、注入空気量と摩擦抵抗低減効果との関係や、壁面近傍の局所ボイド率と摩擦抵抗低減効果との関係などのマイクロバブルの基礎的特徴を示す。次に、400m 曳航水槽において最大長さ 50m の平板模型船を用いて行ったマイクロバブル実験結果を示す。そこでは、マイクロバブルがもつ摩擦抵抗低減効果の流れ方向の持続性、3 種類の気泡発生板を用いた場合の摩擦抵抗低減効果の違い、そして、青雲丸の実船実験に用いられる計測装置の性能確認、などについて示し議論する。

第 5 章では、50m 長尺平板模型船を用いて計測された摩擦抵抗低減効果を基に、マイクロバブル法を実船に適用した場合の抵抗低減効果と省エネルギー効果の推定法について述べるとともに推定結果を示す。

第 6 章では、青雲丸を用いて行われたマイクロバブル法の実船実験の結果を示し考察する。

第 7 章では、未だ十分に解明されていないマイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズムについて、多くの研究者によるこれまでの研究をレビューし、議論する。

第 8 章では、マイクロバブル法の実用化のために残された今後の課題を示す。

そして最後に第 9 章では、以上を総合して、本研究を結論づける。

第 2 章 乱流境界層の構造と摩擦抵抗発生メカニズム

本章では、後に示すマイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズムに関する議論の準備として、層流と乱流の相違、層流から乱流への遷移により壁面摩擦抵抗が極端に大きくなること、そして、船舶周りの実際の流れである乱流境界層の特徴と摩擦抵抗発生のメカニズムについて述べる。主な参考文献は、*児玉良明(2002)*、*Choi(1992)*、*Choi et al.(1997)*、*日野幹雄(1976)*、である。

2.1 乱流境界層の構造

船や航空機などの流線型の物体が流体中を進むとき、流体のもつ粘性によって固体壁の近傍に、大きな速度勾配をもつ薄い層ができる。これを境界層と呼ぶ(図 2.1.1)。そして、レイノルズ数 R_e

$$R_e = \frac{[\text{速度}][\text{代表長さ}]}{[\text{流体の動粘性係数}]} = \frac{UL}{\nu(=\mu/\rho)} \tag{2.1.1}$$

の大きさがある範囲を越えると、層流状態は流体力学的に不安定になり、微細な渦乱れが存在する乱流状態に遷移する(図 2.1.2)。実用的な境界層流れでは殆ど常に乱流状態であると言える。境界層に接する壁における摩擦係数の値は、流れが層流から乱流に遷移することによって、桁違いに上昇する。図 2.1.3 に円管の壁面摩擦係数を示す。平板でも傾向は同じである。

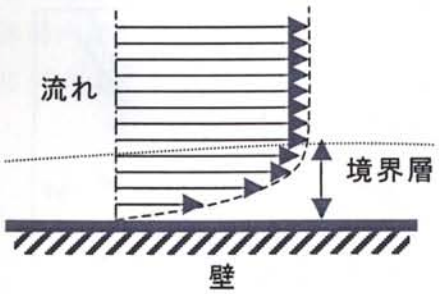


図 2.1.1 壁に沿って発達する境界層

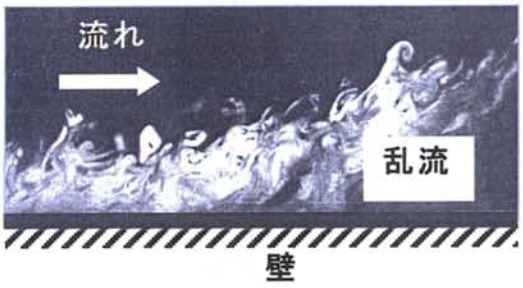


図 2.1.2 乱流境界層の可視化

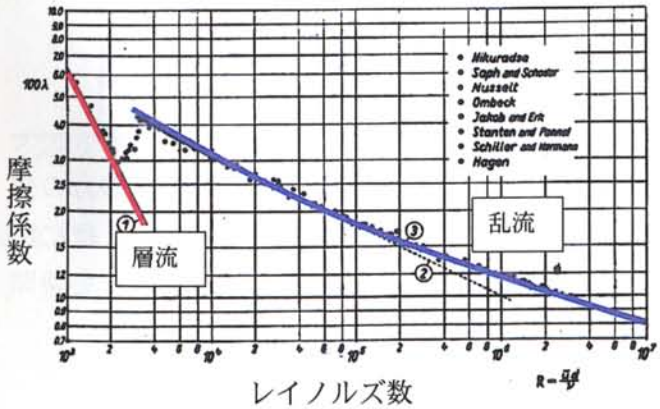


図 2.1.3 層流及び乱流状態の壁面摩擦係数(円管)
(*Schlichting, H. 1968*)

次に、乱流境界層中の速度分布について説明する。乱流境界層中の速度分布は、摩擦速

度U_τで無次元化された壁からの距離yで表される(図 2.1.4)。

$$y^+ \equiv \frac{U_\tau y}{\nu} \qquad \text{ただし } U_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{2.1.2}$$

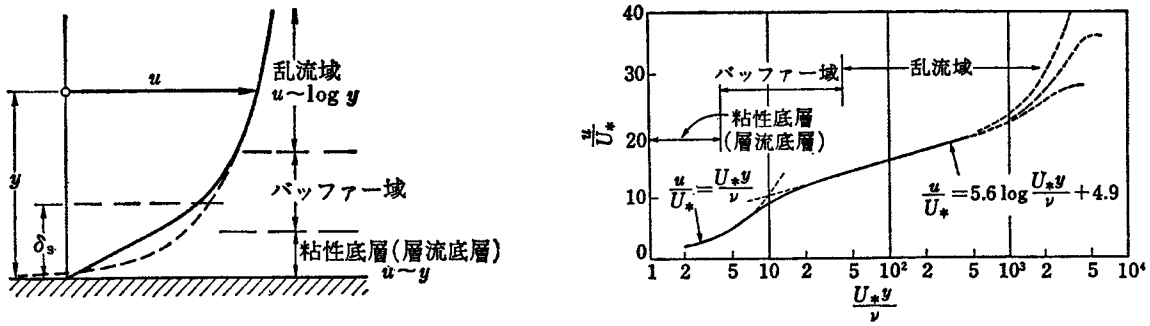
壁の極近くでは、壁の作用によって乱流が抑制され、分子粘性が卓越する粘性底層(または層流底層)がある。そこでの速度はyについて線形に分布する。壁から離れた領域では乱流による渦粘性が卓越し、乱流域とよばれ、対数速度分布に従う。両者の中間はバッファー域とよばれる。すなわち

$$\begin{cases} \text{粘性底層:} & 0 < y^+ < 4 \\ \text{バッファー域:} & 4 < y^+ < 30 \approx 70 \\ \text{乱流域:} & 30 \approx 70 < y^+ \end{cases} \tag{2.1.3}$$

また速度分布は次式で与えられる。

$$\begin{cases} \text{粘性底層:} & u^+ = y^+ \\ \text{乱流域(対数速度域):} & u^+ = 5.6 \log y^+ + 4.9 \end{cases} \tag{2.1.4}$$

ただし境界層外端近くでは対数則から外れて一様流に近づく。



(a)3 つの速度域　　(b)速度分布

図 2.1.4 乱流境界層中の速度分布 (*日野幹雄 1976*)

2.2 乱流運動によるレイノルズ応力の発生

乱流における速度変動によって壁面摩擦係数が大きくなる理由は、レイノルズ応力の発生によって説明することができる。図 2.2.1 に示すように、境界層流れにおいて、壁に沿う方向を x、壁に垂直な方向を y とし、x 方向の運動量方程式において、速度成分を時間平均成分$\overline{u}$と変動成分u'とに分けて表し時間平均をとると、

$$\nu \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \overline{u'v'} \tag{2.2.1}$$

すなわち粘性によるせん断応力項と呼ばれる第 1 項に、レイノルズ応力項と呼ばれる第 2 項が付加される。そして境界層において速度変動は速度勾配が原因で発生するため、平均速度勾配に比例する形で書く Boussinesq 近似が有効である。比例係数をν_tと表すと、

$$\nu\frac{\partial\overline{u}}{\partial y}-\overline{u'v'}=(\nu+\nu_t)\frac{\partial\overline{u}}{\partial y} \tag{2.2.2}$$

ν_tは乱流動粘性係数と呼ばれる。ν_tが正ならば、流体の粘性が時間平均的にそれだけ増加するので、壁面摩擦係数も増加する。すなわち、乱流は動粘性係数をν_tだけ増加させる働きをもつ。

図 2.2.1 に示すような境界層流れにおいてν_tが正の値をもつことは、レイノルズ応力項において、速度変動成分u'とv'の相関を確率密度関数の象限図(図 2.2.2)で表すことによって説明できる。もし両者に相関が無い場合、図 2.2.2(a)のようになり、時間平均をとるとレイノルズ応力項はゼロになる。しかし、境界層流れの場合、図 2.2.1 に示すように y 方向に速度勾配があるため、$v'>0$のとき、上方に移動した流体の塊は周囲の流体よりも x 方向速度成分が小さいため$u'<0$となる確率が高く、その逆の$v'<0$の場合には$u'>0$となる確率が高く、図 2.2.2(b)の分布が得られ、

$$-\overline{u'v'}>0 \tag{2.2.3}$$

すなわち$\nu_t>0$となる。乱流によって見かけの粘性が桁違いに大きくなり、その結果摩擦抵抗も桁違いに大きくなるのである。

境界層内のレイノルズ応力と乱流摩擦抵抗とは密接な関係にあり、この位置におけるレイノルズ応力を抑えることができれば、壁面摩擦抵抗を減らすことができるといえる。

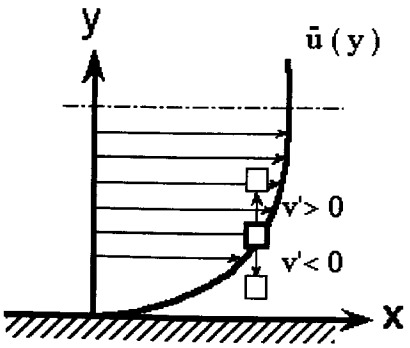


図 2.2.1 速度変動の相関

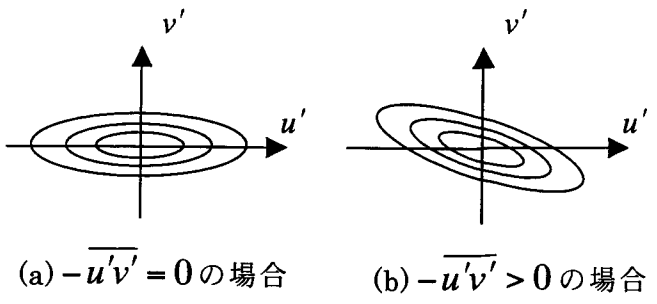


図 2.2.2 速度変動の確率密度関数の象限図とレイノルズ応力の発生

2.3 壁面近傍のストリーク構造とバースト現象

壁近くの流れの組織構造から、摩擦抵抗が生成される過程を説明することができる。最近、流れの可視化技術や数値シミュレーション技術の発達により、壁近くの乱流すなわち壁乱流の構造と壁面せん断応力増大のメカニズムが明らかになってきた。すなわち、壁面近くでは、ストリーク構造と呼ばれる流れ方向の縦渦が存在し、それとともにヘアピン渦の発達によって、エジェクション、スウィープと呼ばれる壁面垂直方向の流れが誘起され、壁面せん断応力を増大させている。図 2.3.1 に数値シミュレーションにより可視化された壁乱流中のストリーク構造（*遠藤ら 2001*)を示す。

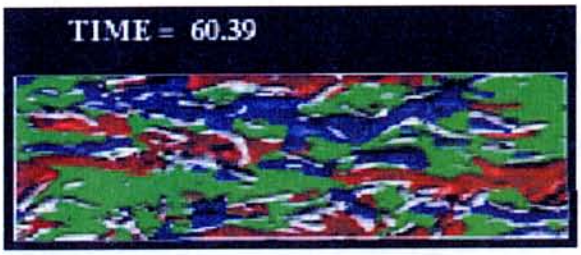


図 2.3.1 数値シミュレーションにより可視化された壁乱流中のストリーク構造(*遠藤ら 2001*)。青: 低速ストリーク、赤:高速ストリーク、灰色:渦構造。流れは左から右。

では、何故ストリーク構造が発達するかという点について確立された特定のモデルはないが、例えば *Choi et al. (1997、1992)*は、スモークワイヤーとレーザー光による可視化実験の結果に基づいて、図 2.3.2 のようなメカニズムによると推定している。

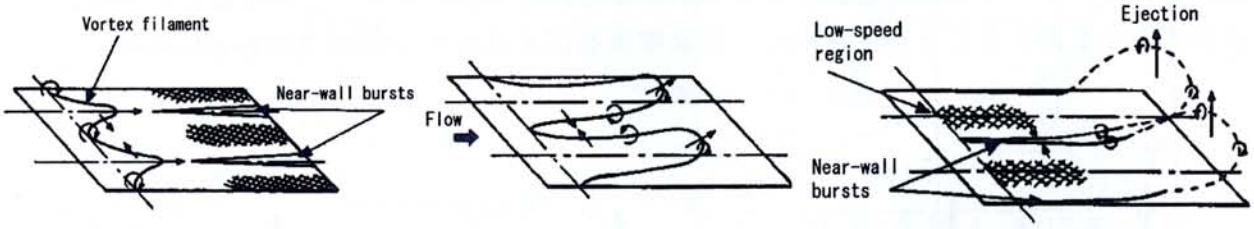


図 2.3.2 バーストとストリーク構造の連鎖的発生メカニズム *(Choi et al. 1997)*

すなわち、先ず図(a)Stage1 に示されるように、互いに逆回転する縦渦対の間に観察されるニヤウォール・バースト(Near-wall bursts)と呼ばれる吹き下ろしが、境界層のせん断流中の横渦管に乱れを与える。この互いに逆回転する縦渦対は、図(c)Stage3 に示すように発生メカニズムが１サイクル終了する時点で、新たに図(a)Stage1 のニヤワールバーストの真ん中に、次の世代のニヤウォール・バーストが隣接したアーチ状渦の足下の吹き下ろしによって生成されていることがわかる。この吹き下ろしによる乱れによって図(b)Stage2 のように、変形した横渦管は、それ自身からの誘導速度および境界層の持つせん断速度によりさらに流れ方向に変形を続け馬蹄渦（アーチ状の渦）となる。最終的には

その流れの不安定性からこの馬蹄渦は加速度的に大きくなり、壁から境界層外層に向かって飛び出すがごとく運動する。この流体塊と周囲流体は干渉し、振動し大きな乱れを作りレイノルズ応力の源となる(バースト burst)。図(c)Stage3 に示されるように、この馬蹄渦の運動は上向きに流体塊が移動(u'<0、v'>0)し、乱流組織運動のイジェクション(ejection)と呼ばれる。同時に、この巻上りの後には壁から離れた位置にある大きな速度をもつ流体の塊が壁近くに降りてくる(u'<0、v'>0)。これは、遅い流体を一掃しスウィープ(sweep)と呼ばれ、そこで大きな摩擦応力が発生する。また、この図の上流側（左側）を見ると明らかなように、互いに逆回転する縦渦対すなわちストリーク構造が形成される。そしてまた(a)Stage1 に戻って次の世代の渦運動を引き起こすものと考えられる。これらの一連の現象をバースト現象と呼びその再生産が繰り返される。

バースト現象とストリーク構造は、大きなレイノルズ応力と大きな乱流摩擦抵抗の生じる主要因であり、摩擦抵抗を低減させるためには、それらを何らかの方法で弱める必要がある。

第 3 章 摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法

本章では、摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法の特徴と、他の低減デバイスと比較してマイクロバブル法が船舶に適している理由を説明する。

3.1 様々な摩擦抵抗低減デバイス

いくつかの摩擦抵抗低減デバイスについて特徴を概説する。そしてそれらの摩擦抵抗低減メカニズムに関する議論は、第 6 章に示すマイクロバブルのメカニズムについての議論の助けとなると期待される。

摩擦抵抗は、乱流構造と密接な関係があり、近年、流れの計測技術の開発や数値計算技術の発展などにより、乱流境界層の構造が次第に明らかになってきたため、摩擦抵抗についても理解が深まっている。摩擦抵抗低減デバイスは、外部から動力を必要とする能動型と特別な動力を必要としない受動型とに分類される。能動型は、高い低減効果を特長とし、MEMS、振動平板、吸い込み、などの機械的技術に基づく方法と、高分子ポリマーやマイクロバブルなどのように添加に基づく方法がある。それらは、外部からエネルギーや物質を供給する必要があるため、いかに投入量を最小限にし、正味の抵抗低減の効率を高めるかという問題がある。受動型には、リブレット、LEBU (Large Eddy Break-Up)、弾性皮膜などの技術がある。それらは、特段の作用をせずに効果を発揮するという大きな特長があるが、共通して抵抗低減率が数%と低く、流れの方向に敏感であったり、作動条件が限られていたり、再現性が低いなどの問題をもつことが多い。それらについては *Holst, T. (1990)*や*永松哲郎 (1989)*に詳しい。

リブレットは、流れ方向の微細な縦溝であり、溝がバースト現象を抑制し、最大約 10% 程度の低減効果をもつ。溝の幅や高さは、摩擦速度に基づく尺度で表される。

LEBU は、境界層の外層領域、例えば境界層厚さの 50%高さ位置、に薄い 2 次元翼型を壁面と平行に配置したもので、スウィープとイジェクションによる内層から外層への運動量交換を抑え、あるいは LEBUs の伴流が下流壁面に摩擦低減効果を及ぼすとされている。粘性底層厚さが厚くなっている結果も報告されている。0～10%程度の低減効果を得た例も報告されているが、それ自身の抵抗を考慮に入れた正味の抵抗低減が得られるか否かは、未だ確認されていない。

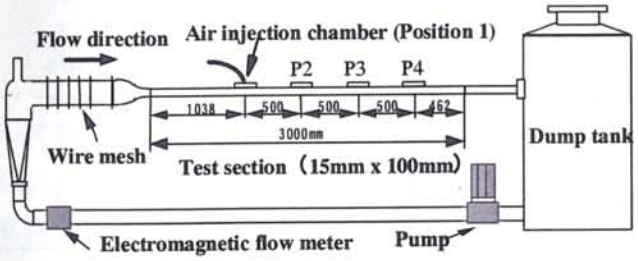
弾性皮膜は、Kramer の実験では 60%もの低減効果が得られたが、その後の研究で同程度の低減効果は得られておらず、経年変化や再現性が少ないことが問題である。*Choi (2001)*は実験により 10%程度の低減効果を得ており、低減効果を皮膜の弾性係数と応答周波数で整理している。また、乱流遷移を遅らせる効果があるとしている。

ポリマーは、Toms 効果と呼ばれ、ポリマー分子の鎖が水に非ニュートン流体性を与え、粘弾性効果により摩擦抵抗が低減すると説明されている。ppm オーダーの低濃度においても効果があり、粘性底層厚さの増加も計測されている。ポリマーは、激しい乱れでは鎖が切れ効果が消滅するが、同様の効果をもつ界面活性剤は、乱れが減少すると再び鎖が形成され、抵抗低減効果が回復する。ポリマーや界面活性剤は、コストや環境面の問題により、船舶への実用化は困難である。

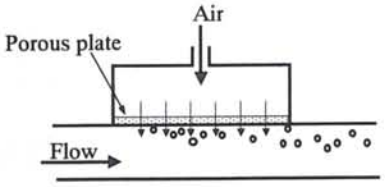
3.2 マイクロバブル法の特徴

ここでは、摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法の特徴と基本的な事項、すなわち気泡発生方法、発生気泡の挙動、摩擦抵抗低減効果の大きさと実験データの整理方法など、について説明する。

先ずマイクロバブル法の例を、海技研の小型高速流路(図 3.2.1)について示す。図(a)に示されるように、小型高速流路は小型の回流水槽であり、幅 100mm、高さ 15mm の断面と 3m の長さをもつアクリル製の計測部をもつ。気泡は、上流端から約 1m のところにある図(b)及び(c)の気泡発生部において、微細な孔が多数開いた焼結金属でできた多孔質板を通して上面から流路内に注入され、そこから 0.5m おきに 3 箇所の計測位置がある。流路内平均速度 U=7m/s における発生気泡を(d)図に示す。気泡直径は 0.5mm～1mm 程度であり、発生部において流れに引きちぎられて気泡が発生するため、流速が高い程小さくなる傾向がある。しかし、いずれにしても、"マイクロバブル"と呼ばれるが、その大きさはミリ・オーダーである。



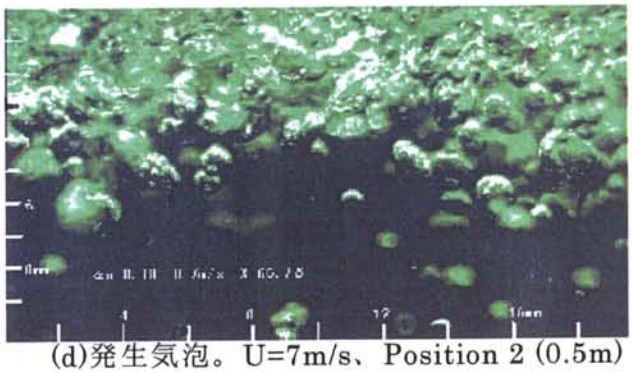
(a)全体図



(b)気泡発生部



(c)流路と気泡発生部



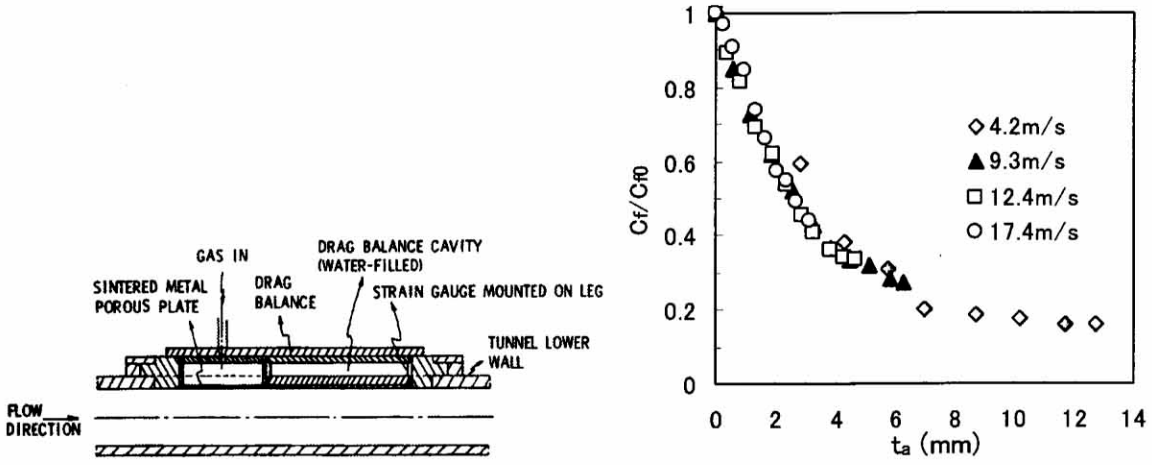
(d)発生気泡。U=7m/s、Position 2 (0.5m)

図 3.2.1 海技研の小型高速流路と発生気泡

次にマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果について代表的な実験例を示す。*Madavan et al. (1984)*はマイクロバブル実験を、$B_c \times H_c \times L_c$= 508mm ×114mm×760mm の寸法の計測部をもつ回流水槽を用いて行った("c"は"channel"を表す)。図 3.2.2(a)に計測部断面を示す。気泡は、$B_a \times L_a$=102mm×178mm の寸法をもつ 5 μmの孔径の多孔質板から吹き出された("a"は"air"を表す)。壁面摩擦力は、吹き出し部の直下流におかれた B×L=102mm×254mm の寸法の平板にかかる力を計測することによって計測された。空気

吹き出し板の下流端から摩擦応力計測の平板の中心までの距離は 127mm である。図3.2.2(b)に計測された壁面せん断応力低減率を示す。横軸は、後述の(4.1.3.2)式で定義される、吹き出し空気量Q_aを吹き出し幅B_aと一様流速U_∞で無次元化した相当空気厚さt_a(mm)であり、縦軸は気泡吹き出し状態の壁面せん断応力と非気泡状態のそれとの比を示す。低減効果は吹き出し空気量の増加に伴って増加し、最大80%の低減効果を示している。マイクロバブルが摩擦抵抗低減デバイスとして有望視されている理由である。数種の流速における壁面せん断応力低減効果はほぼ1本の線上にある。ただし後に示すように、さらに下流位置では、低減効果は高速ほど小さく、また下流に行くに従って減衰する。

一般に、マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果は、気泡の量を増やすほど高くなる。また、壁面から下方に気泡を吹き出した場合、浮力の影響で気泡が壁面近傍に集まるため、鉛直の壁面で気泡を吹き出した場合より、摩擦抵抗低減効果は大きい。



(a)計測部配置　　(b)計測された壁面摩擦応力低減率

図 3.2.2 *Madavan et al. (1984)*が行ったマイクロバブル実験

3.3 摩擦抵抗低減デバイスの船舶への適用性

主な摩擦抵抗低減デバイスの船舶への適用性と、マイクロバブルが摩擦抵抗低減デバイスとして船舶に適している理由を説明する。

先ず代表的なデバイスとしてリブレットを取り上げる。リブレットは、図 3.3.1 に示すように、流れ方向に刻まれた微細な縦溝であり、壁面摩擦応力を最大 10%低減させることが知られている。リブレットに代表される壁面起源の抵抗低減デバイスの高さ h は、摩擦速度U_τで無次元化される。

$$h^+ \equiv \frac{U_\tau h}{\nu} \tag{3.3.1}$$

低減効果を最大にするリブレット高さは、$h^+ \equiv 15$と言われている。これは、$y^+ = 100$程度の間隔をもつ低速ストリーク構造の発達が抑えられ、従って、バースト現象が抑制されるためと説明されている(*Choi 1992*)。今、表 3.3.1 に主要目が示される長さ 320m の 15 万トンタンカーにリブレットを適用する場合を想定する。また、同一フルード数で走る長さ 7m の模型船に適用する場合も検討する。1/7 乗則に基づく局所摩擦係数式(*Schlichting 1968*)を用いると、

$$C_f' \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = (2\log_{10} R_x - 0.65)^{-2.3} \tag{3.3.2}$$

ただしR_xは平板の上流端(あるいは船首端)からの距離に基づくレイノルズ数である。すると、リブレット高さは次式で表せる。

$$\frac{h}{L} = h^+ \frac{\sqrt{2}}{R_e}(2\log_{10} R_x - 0.65)^{1.15} \tag{3.3.3}$$

上式により、表 3.3.1 に示すリブレット高さが求まる。上式から、リブレット高さ比h/Lはレイノルズ数にほぼ反比例するため、実船における最適リブレット高さは、模型船よりもはるかに小さくなり、海洋環境における船体表面の汚損などを考慮すると、リブレットを実船に実用化することは非現実的であると言わざるを得ない。

表 3.3.1 15 万トンタンカーのための推定リブレット高さ

(フルード数 $F_n \equiv \frac{U}{\sqrt{gL}} \equiv 0.134$, $h^+ \equiv 15$)

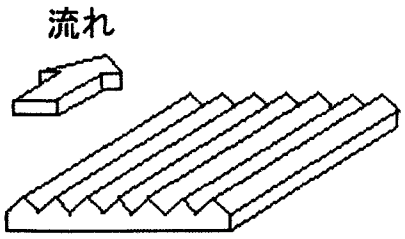


図 3.3.1 リブレット模式図（笠木 *伸英 1992*)

パラメータ	実船	模型船
長さ L (m)	320	7
幅 B (m)	60	1.31
深さ d (m)	22	0.48
速度 U (m/s)	7.5	1.11
レイノルズ数 $R_e (\equiv UL/\nu)$	2.4×10^9	7.8×10^6
h/L	2.38×10^{-7}	5.0×10^{-5}
リブレット高さ h (mm)	0.08	0.35

上記の壁面近傍のストリーク構造の発達を抑えることによってバースト現象を抑え、摩擦抵抗を低減されるという結論は、リブレットだけでなく、摩擦速度で無次元化される壁面起源のデバイス全てに共通であり、船舶や航空機などの大型輸送機械への摩擦抵抗低減デバイスの実用化が困難である理由を端的に示している。

これに対してマイクロバブルは、恐らく壁面起源のデバイスではない。例えば$h^+=15$の大きさを、(3.3.3)式を用いて速度 U=7m/s、距離 X=1.5m で推定すると 0.06mm となり、それに対して図 3.2.1(d)の写真に示したように気泡直径は 0.5～1mm 程度と、ほぼ 1 桁大きいからである。また、図 1.2 に関連して説明したように、タンカーなどの大型肥大船では、摩擦抵抗成分が全抵抗の約 80%を占めるため、摩擦抵抗の低減が全抵抗の低減に直結すること、肥大船は平らで広い船底をもつため、船首船底近くで注入された気泡は、浮力によって壁近くに止まりながら下流まで船底を効率的に覆い、高い抵抗低減効果をもつと期待される。さらに、気泡吹き出し部が船首部近くの限られた範囲だけに存在するため、汚損対策が容易であろう。

マイクロバブル流れは、気泡径を基準として、多重なスケールをもつ流場であり、壁面近傍だけでなく境界層内の全体の流場を解明する必要がある。

第4章 マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の実験的研究

本章では、マイクロバブル法についての基礎的研究および実用化のための実験的研究について述べる。基礎的研究としては、小型流路を製作し、気泡の注入による摩擦抵抗低減量計測および低減メカニズム解明ためマイクロバブルについての基礎的な実験を行った。実用化研究としては、最長50mまでの長尺平板船を用いて、マイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズム解明と実用化に向けて、様々な実験状態において摩擦抵抗低減量またボイド率分布や気泡径を計測した。そして、小型高速流路と長尺平板船の実験データすなわち、流速、気泡注入位置からの距離、気泡生成板の種類、使用流体（真水中と海水中)、試験装置・流場（小型高速流路と長尺平板船)、などのパタメータあるいは条件を変えた実験データについて、信頼性の吟味を行った上で、摩擦抵抗低減効果とその効果に対し主要と考えられる因子との定量的な関係を求めた。

4.1 小型高速流路を用いた摩擦抵抗低減効果に関する基礎的研究

4.1.1 はじめに

マイクロバブル法による摩擦抵抗低減効果は、注入空気量の増加に従い高くなる。空気の注入は、空気注入口において空気圧を水圧（船舶においては主に水深による）以上で吹き出す必要があり、エネルギーを消費するため、できるだけ少ない空気量で低減を実現する必要があり、従ってマイクロバブル法における最も重要な関係は、注入空気量に対する摩擦抵抗低減量の関係である。マイクロバブル法による摩擦抵抗低減量は、局所摩擦の低減量を下流方向に積分して得られるが、局所摩擦の低減量は、空気注入位置の直下流で最大となり、下流に行くに従って減衰する。従って、局所摩擦の低減効果が下流方向に減衰が少なく長い距離まで持続することが望ましく、局所摩擦低減量の下流方向分布が次に重要な関係である。これらの関係を実験的に調べるためには、局所摩擦の低減量を空気注入位置から下流に長い距離にわたって計測できる流路を用いることが効率的である。そこで、本研究では、そのような計測を可能にするマイクロバブル実験用の流路を製作し、上記の2つの関係、及び壁近傍ボイド率と摩擦抵抗低減量との関係などを計測した。また、多孔質板と配列多孔板の2種類の気泡生成方法の違い、清水と海水の違いについて調べた。さらに、計測データについて、かたより誤差と偶然誤差に分けて誤差評価を行った。

4.1.2 試験装置概要

(1) 小型高速流路

実験使用したマイクロバブル用小型高速流路を図4.1.2.1(図3.2.1再掲)に示す。*Guin et al. (1996)*の流路を参考にして製作した。製作における留意点は

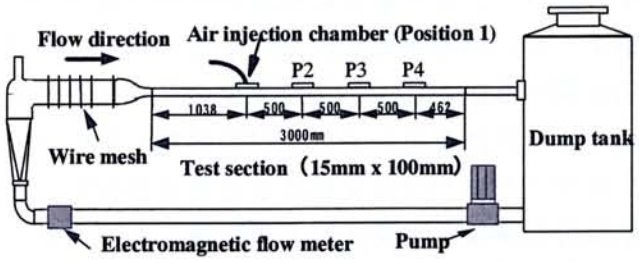
- 船速に相当する流速を出せること
- 乱れ度が小さいこと（整流された流れであること）
- 気泡注入前の流れの特性がよく分かっていること

・気泡発生部（気泡生成装置）を容易に交換できること
・壁面摩擦力、局所ボイド率などを下流方向の数カ所で計測できること
・マイクロバブルの連続実験ができること
・流路内は、段差を最小限（粘性底層厚さより小さく）とすること

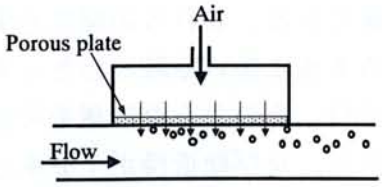
などである。

小型高速流路の試験部では空気注入と計測が行われる。計測部の下流には Dump tank があり、試験部で生成された気泡は浮力により除去され、連続的な実験を可能にする。Dump tank の下流には、ポンプ、さらに電磁流量計があり、試験部内の平均流速が求められる。試験部上流には整流用のワイヤーメッシュがあり、流れは 26.6 対 1 で縮流されて試験部に入る。これにより乱れ度を 0.5%以内に抑えている。また、平均流速の変動を最大流速の 0.5%以内としている。

試験部は、気泡の観測を容易にし、速度分布を LDV などで計測可能とするため、全面透明アクリル樹脂製とした。また、試験部において準 2 次元的な流れを実現するため、高さ 15mm×幅 100mm の薄型矩形断面とし、気泡注入部において完全に発達した管内流れを実現するため、助走距離 900mm 以上とし、さらに気泡注入部から下流方向に長い計測距離をとるため、同規模の流路より長い全長 3000mm とした。速度は、高速商船の速度(24 ノット)に対応する 12m/s まで出せるようにポンプ能力を決定した。船の船底を模擬するため試験部上面を計測面とし、100mm×100mm の矩形の計測窓を 500mm 間隔で 4 箇所に備えた。以降、それぞれの位置を上流側から順に P1、P2、P3、P4 と呼ぶ ("P"は Position の意味)。気泡発生装置を P1 に設置し、P2、P3、P4 の 3 箇所で摩擦力やボイド率の計測を実施した。また、海水での実験もできるよう、計測部以外はステンレス製または塩ビ製とした。



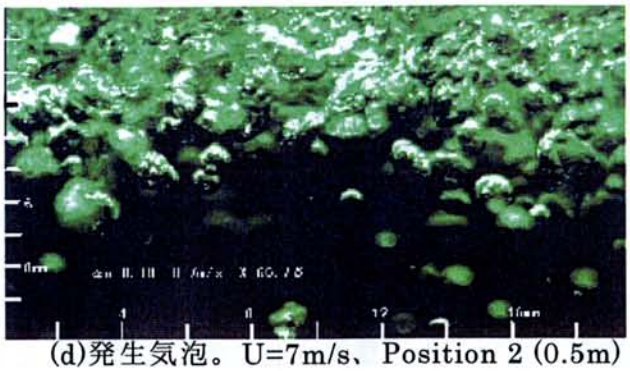
(a)全体図



(b)気泡発生部



(c)流路と気泡発生部



(d)発生気泡。U=7m/s、Position 2 (0.5m)

図 4.1.2.1(図 3.2.1 再掲) 海技研の小型高速流路と発生気泡

気泡生成装置及び各種計測装置はすべて、計測蓋と呼ばれる 100mm×100mm 角の透明アクリル板に設置された。図 4.1.2.2 に、計測面を上にした状態（計測時とは上下逆の状態）の計測蓋の写真を示す。蓋中央に、容量 2gf のせん断力センサ（検力面直径 10mm、フランジ直径 22mm）と、その左側に直径 5mm の小さな圧力センサが設置されている。他の計測蓋においては圧力センサの代わりに静圧孔を開け圧力計測を行っている。計測蓋はすべて同一規格であり、流路の計測部の上面にある 4 箇所の計測窓のいずれにも着脱可能となっている。気泡吹き出し装置付き計測蓋は P.1 に設置し、せん断力センサあるいはボイド率計測計付きの計測蓋を、計測内容に応じ計測窓 P.2～P.4 の 3 箇所に設置し計測を行った。蓋と窓との下面側（流路内部側）の段差は、0.03mm 以下の精度とした。

また、第 4.2 章以降に示す長尺平板模型船の実験においても、小型高速流路と同一規格の計測蓋の使用を可能とした。

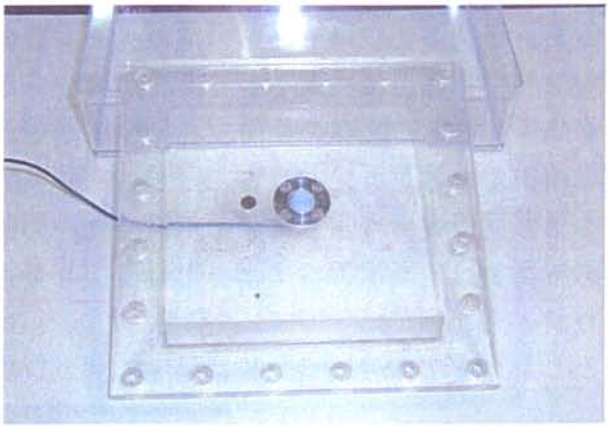


図 4.1.2.2 水に接する面を上向けにして置かれた計測蓋
（中央にせん断力センサ 2gf、左に圧力センサ）

(2) 気泡生成装置

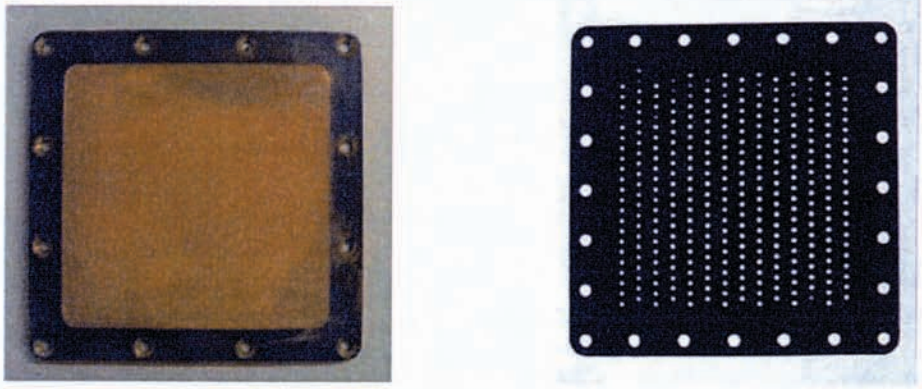
気泡生成装置は、P1 位置の上面にあり、図 4.1.2.1(b)に示すように、圧力チャンバーと気泡生成板（図中(b)における斜線部、Porous plate 部）からなる。生成気泡直径は 1mm 程度以下を目標とした。何故ならばこれまでの低減効果のある気泡径は、*Madavan et al. (1984)*によれば 0.2～0.6mm、*Guin et al. (1996)*によれば 0.15～1.2mm としているからである。気泡生成においては、気泡の吹き出しに再現性があること、できるだけ一面から均一に吹き出すこと、少なくとも吹き出し幅方向に気泡径と吹き出し量が均一であることを必要条件とした。

気泡の生成は、多孔質板(Porous Plate、略称 PP)あるいは配列多孔板(Array-of-Holes Plate、略称 AHP)を通し、空気をせん断流中へ吹き出すことにより行われた。多孔質板は公称孔径 2μm のブロンズ製焼結金属で出来ており、3mm の厚みがあり、吹き出し部の寸法は、幅 76mm×長さ 76mm である。配列多孔板は、厚み 3mm の真鍮製で、幅 67mm×長さ 66mm の範囲に直径 1mm の孔が幅方向 3mm、流れ方向 5mm の間隔で千鳥配置状に総数 322 個開けられている。図 4.1.2.3 に 2 種類の気泡生成板を示す。

多孔質板は、容易に微小気泡を生成出来るため、公称孔径が小さくてしてもそれに比例

して小さな気泡が生成される訳ではない。例えば、*Madavan et al. (1984)*は公称口径 0.5 μm～100μm の範囲の多孔質板を用いて気泡生成を行い、気泡径と摩擦低減効果の相違が少ないことを示している。図 4.1.2.4 では、公称孔径 2μm の多孔質板からの気泡発生を下から撮影した写真で、直径約 0.5mm の気泡が生成されている。多孔質板にはいくつかの問題点がある。先ず、板の厚みを空気が通過するときの圧力損失が大きいことであり、空気注入に要するエネルギーをそれだけ増加させる。次に、船舶における実用化を想定した場合、孔径が小さいため汚損によって容易に孔が塞がれことが危惧される。さらに、経年変化やチャンバー内からのゴミの付着により、気泡の生成が発生面の全体で均一に行われず、特定の位置からほとんど空気の吹き出さない箇所も発生し、しかも製作にも手間がかかり気泡径を容易に制御できないという問題をもつ。これは、再現性という、実験がもつべき最も基本的な条件が満足されない恐れに繋がる。

以上のような多孔質板の問題点を解消するため、本研究では、新たな気泡生成板として配列多孔板の使用を提案した。配列多孔板は直径が一定の孔を多数開けた板であり、多孔質板の逆の特性をもつ。すなわち、圧力損失が小さく、孔が大きいために汚損によって塞がれにくく、気泡の生成が均一である。孔径の変更、孔の間隔変更などの製作・加工も容易なため、気泡径を容易に制御できると考えられる。ただし、チャンバー内と流路内の圧力差が小さくなるため、つまり圧力損失は小さくなるが、流路内の圧力勾配の影響を受けやすくなり、気泡生成板の下流側は上流側の空気吹き出し量より大きくなり、上下間の吹き出しの差は多孔質板より若干大きい。



(a)多孔質板　　(b)配列多孔版

図 4.1.2.3　2 種類の気泡生成板　(流れは左から右方向)



図 4.1.2.4 多孔質板からの気泡発生を下から撮影(流れは左から右)

もし配列多孔板の使用が多孔質板と同等以上の摩擦抵抗低減効果をもつならば、今後は専ら配列多孔板を用いて気泡生成を行うべきであることになる。このような理由から配列多孔板を考案し、従来の気泡生成方法である多孔質板との比較を行った。

(3) 壁面せん断応力計測装置

壁面せん断応力の計測方法には、風洞中や水流中において計測方法はいくつかの手法があり、その中で検査面にかかる力を測る直接計測法が確実で精度も高い。しかしながら、気泡流中においては、計測面とその周囲の面との隙間から空気が混入した場合の影響、それらの段差影響がどの程度となるか不明である。従って、気泡流中のせん断応力計測装置を開発あるいは水用のせん断力センサを使用するなどの必要があり、少なくとも誤差評価をかならず行う必要がある。誤差評価については、4.1.3(4)節において後述する。

風洞では、*望月ら (1993)*が用いたように、細いワイヤーで計測板を吊り下げ、板にかかる力を計測する方式が一般的であり計測精度も高いが、水槽には適さない。また、水槽でのマイクロバブル実験において熱膜式センサを用いた速度計測によりせん断応力を求める例(*Merkle and Deutsch 1990*)もあるが、汚損の問題があり、また高精度計測に適さない。また、図 3.2.2 に示した *Madavan et al. (1984)*のように、板にかかる力を計測する方式もあるが、装置が大がかりになり、後に示す長尺平板模型船実験において行う、同時多数点計測に適していない。そこで、*Guin et al. (1996)*が用いた局所せん断力センサと同一メーカーの市販品を採用した。

*Guin et al. (1996)*は(株)三計エンジニアリング製の定格荷重 1gf（定格容量 1g）のセンサをマイクロバブル流れに適用した。図 4.1.2.5 に彼等が用いたセンサの使用時の状態を示す。センサ板の直径は 5mm で約 30μm だけ壁面から突出していたが、粘性底層及び緩衝層の範囲内に止まっている。従って計測される力、すなわち突出位置におけるせん断力とセンサ板側面にかかる圧力勾配による力との合力は、壁面せん断応力に比例すると期待されるため、計測した管路内の流れ方向平均圧力勾配から比例定数を求め、壁面せん断応力に換算している。

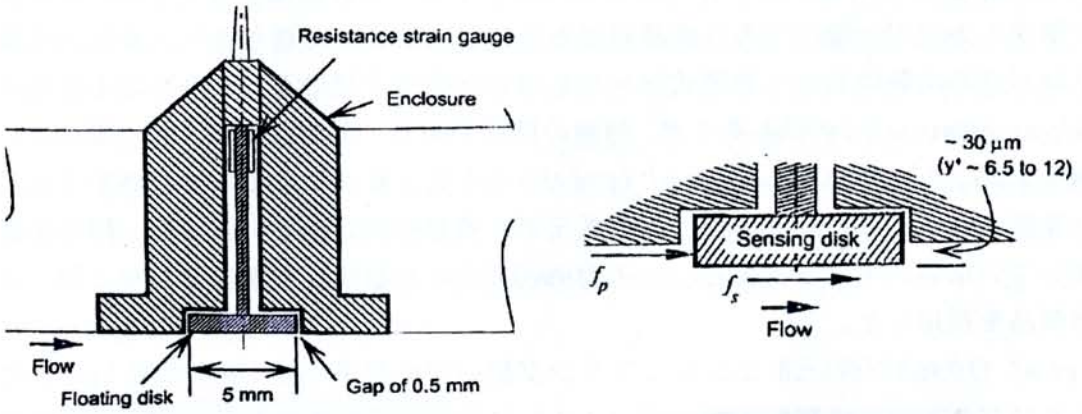
本実験に用いたセンサは、同じ(株)三計エンジニアリング製の機械式水用せん断力センサ定格荷重 2gf（センサ面直径 10mm）である(図 4.1.2.6)。本実験で用いた定格容量 2g のセンサは、計測時にせん断応力により、支柱が傾くと計測面の上流側が周囲の面より飛び出し、計測面が摩擦力以外に力、流れの動圧を受け正確に摩擦力を計測できない恐れがあった。そこで、その傾きを小さくするため、支柱部分を定格容量 10g 用の支柱と同じ強度まで上げる改良を施し、計測に用いた。

本研究においては、センサ板の突出量を計測する手段がなかったため、複数のセンサについて目視観測により段差の有無を調べると共に、計測された管路内の流れ方向平均圧力勾配に基づく推定値、及び矩形断面に適用した Blasius の実験式、と比較して一致度の高いセンサを選定して実験に使用した。

図 4.1.2.6 に示すように、センサ内部には、空間があり、気泡の混入によるゼロ点移動などの影響を受ける恐れがある。実際に実験中に内部を観察できないので明言できないが、気泡流中ではある程度センサ内部への気泡混入はあると考えられる。対策として、実験中の空気吹き出し無しの場合の静止流体中のゼロ点と吹き出し実験後の静止流体中のゼロ点

を計測し移動がないことを確認した。また、空気吹き出し前に所定の速度での摩擦力を計測し、空気吹き出し実験終了後、同じ所定の速度で摩擦力を計測し、ほぼ同じ値であることを確認した。空気の混入の様子は不明であるが、結果をみる限り気泡混入の影響はほとんど受けなかったと考えら得る。空気抜き孔があるが、空気抜きは行わなかった。これは推測であるが、空気抜きを行わなかったため、最初からゲージ部分が空気で覆われ、気泡混入によってもこの部分は空気で覆われたままであるのでゼロ点移動もなく、気泡流中での再現性も確認できたものと推測している。

実験中は、せん断応力計測と同時に、せん断力センサに隣接した圧力孔において静圧計測を行った。静圧は、気泡状態において後節(4.1.3.7)式に示すように計測位置における空気流量換算のために用い、せん断力センサの動的校正時、すなわち非気泡状態において圧力損失からせん断応力を求めるために用いた。



(a)全体図　　(b)センサ板近傍拡大図

図 4.1.2.5 水用局所せん断力センサ(*Guin et al. 1996*)

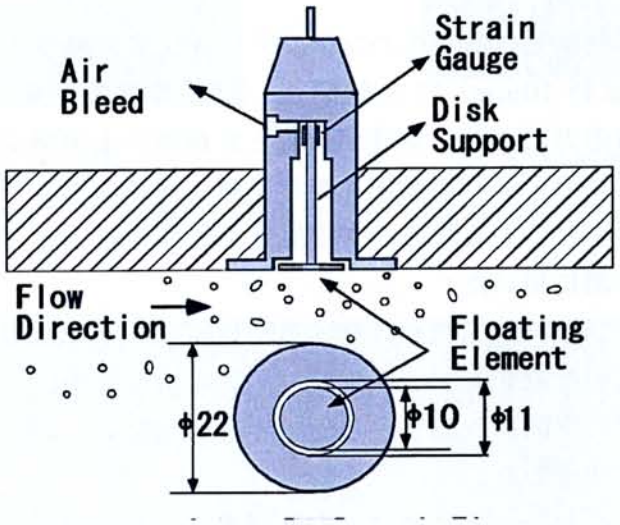


図 4.1.2.6 局所せん断力センサ。定格荷重 2gf (S10-2W)

(4) 局所ボイド率計測装置

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果は、壁近傍に気泡が集中しているほど大きいことが定性的にわかっている。その効果を定量的に調べるため、壁面せん断応力だけでなく、局所ボイド率の壁に垂直方向の分布を計測する必要がある。

局所ボイド率計は、*Guin et al. (1996)*の開発した吸い込み方式を改良して用いた(図4.1.2.7)。既存の光ファイバ式ボイド率計は、1mm 以下の気泡は針を貫通せずはじかれたり逃げたりして計測できないと考えられたため、採用しなかった。

吸い込み式の局所ボイド率計では、流れに正対した円管プローブ（外径 1.6mm、内径 1.2mm）の先端から、気液混合流を吸い込み、Tank A において吸い込み空気量を、Tank B において全吸い込み量を計測し、それらの比率を局所ボイド率とした。各計測位置における吸い込み速度は、1/7 乗則により推定した水流のみの流速と一致するように、Tank B 側の圧力を調整した。Tank B の圧力調整は、Tank B にホースで連結された真空タンクの圧力を、真空ポンプで調節することにより行った。この調節により、本来吸い込まれるべき気泡が吸い込み圧力不足により逃げる効果と、本来吸い込まれるべきでない気泡が吸い込み圧力過剰により吸い込まれてしまう効果とを避けることができると期待される。

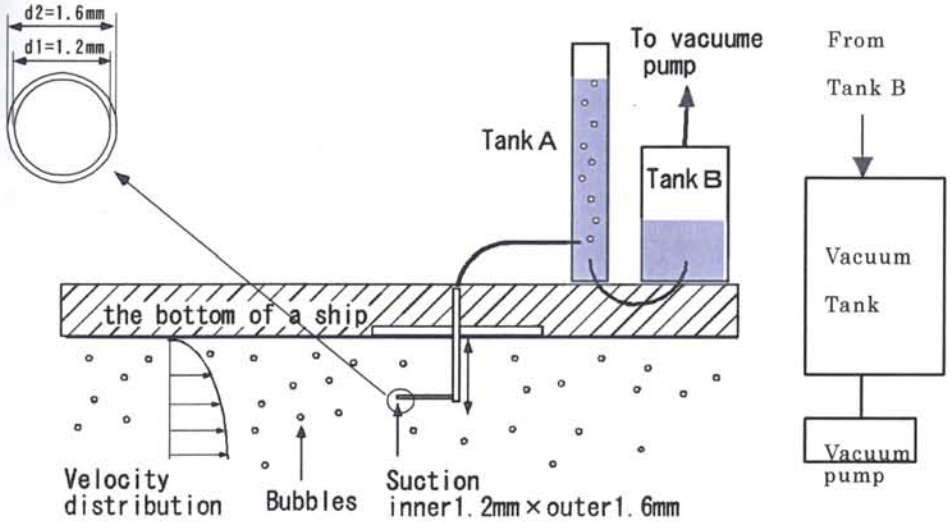


図 4.1.2.7 吸い込み式局所ボイド率計測装置

4.1.3 実験結果

(1) 注入空気量のパラメータ表現方法

マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果は単位時間あたりの注入空気量の増加と共に増加するので、単位時間あたりの注入空気量は最も重要なパラメータである。マイクロバブルの実験は、小型閉水路を用いた実験から、キャビテーション水槽を用いた実験、曳航水槽を用いた大型実験、さらに実船実験まで、様々な環境で様々なスケールにおいて行われる。同じ実験装置においた実験も、空気注入方式や注入部の面積や形状も様々な条件で行われる。従って、それらにおいて統一的に使える単位時間あたりの注入空気量を表すパラメータがあることが最も望ましい。つまりそのパタメータにより摩擦抵抗低減量を推定可能で

あり、また低減効果の主要要因として物理的意味を説明できるものが望ましい。しかし実際は、いくつかの方法があるが一長一短があり、状況に応じて使い分けざるを得ない。ここでは、主立った表現法と、その中で以降において使用する表現法とその理由を説明する。

歴史的にみて、単位時間あたりの注入空気量の最も一般的な表し方は境界層内の平均ボイド率 $\overline{\alpha}$ である(*Merkle and Deutsch 1990*)。すなわち

$$\overline{\alpha} = \frac{Q_a}{Q_w + Q_a} \tag{4.1.3.1}$$

ただし、

$\overline{\alpha}$：平均ボイド率

Q_a：単位時間当たりの注入空気量。"a"は air を表す。

Q_w：単位時間あたりの水流量。"w"は water を表す。

$$Qw = b\,U\,(\delta - \delta^*)$$

δ：　境界層厚さ　（制限流路ではチャンネル半高さ $h/2$、または全高 h）

δ^*：排除厚さ

U：断面内平均流速

b：　流路幅

Q_w は、この場合は壁と境界層外端との間を流れる水の流量を表す。境界層外端位置は、通常は適当な式(例えば 7 分の 1 乗則による 99%速度位置)によって推定するが、定義の仕方による任意性があり、やや問題である。また、第 4.3.3(5)節に示すように、境界層厚さは局所摩擦の低減効果に殆ど影響しないことが実験的に分かっているので、用いる物理的根拠が薄弱である。

小型高速流路の試験部における流れのように、制限水路であり十分発達した状態では、境界層厚さに対応する量はチャンネル半幅であるから、あいまいさは無い。ただし、上面から空気を注入すると、発生する気泡は流路断面の下半分にまで拡散するので、チャンネル全幅をとる選択肢もある。本論中では、全幅を採用する。この場合、流路内の平均ボイド率を表す $\overline{\alpha}$ は、それなりの物理的意味をもつと考えられる。図 4.1.3.1 に、制限水路でチャンネル全幅をとった場合の Q_a と Q_w を模式的に示す。

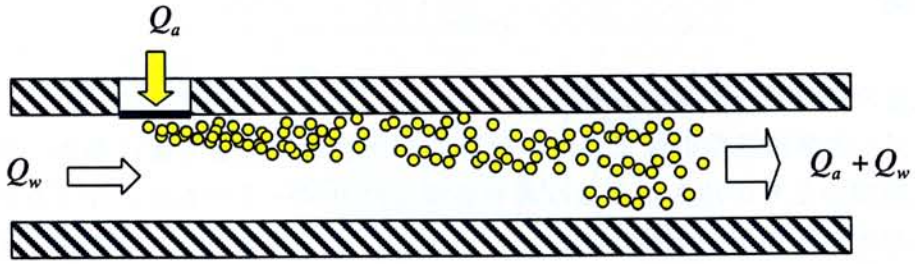


図 4.1.3.1 制限水路での Q_a と Q_w

平均ボイド率$\bar{\alpha}$の次によく用いられる表し方は、体積流量係数C_vである(*Merkle and Deutsch 1990*)。すなわち無限に広い一様流中に置かれた平板から吹き出す場合は、

$$C_v = \frac{Q_a}{S_a U_\infty} \tag{4.1.3.2}$$

ただし

S_a: 空気注入部面積

U_∞: 一様流速

Q_a / S_aは平均空気注入速度を表し、C_vはそれと一様流速との比、すなわち流れに平行に置かれた平板から空気を吹き出す場合、流れに垂直に吹き出す空気速度と流速との比という物理的意味をもつ。壁面から空気を勢いよく噴出すると、出来る気泡はそれだけ壁面から離れると期待されるが、実際は、空気の質量が水のそれの約 1000 分の 1 と非常に小さいため、相当勢いよく噴出しない限りその効果は現れず、注入空気量Q_aを一定に保ちながら空気注入部の流れ方向の長さL_aを変化させた、すなわちS_aを変化させた *Merkle and Deutsch (1990)*の実験においても、局所摩擦の低減効果に影響は見られなかった。従ってこのパラメータも、多くの場合に、用いる物理的根拠が薄弱である。

単位時間あたりの注入空気量のもう 1 つの表し方は、*Fukuda et al. (1999)*に倣った、相当空気厚さt_aによる方法である。すなわち無限に広い一様流中では、

$$t_a = \frac{Q_a}{B_a U_\infty} \tag{4.1.3.3}$$

ただし

B_a: 空気注入部の幅(流れと直角方向の長さ)

U_∞: 一様流速

この量は長さの次元をもち、通常は mm の単位で表される。前の段落で述べたように、空気注入部面積S_aを表すL_aとB_aのうち、L_aは用いる物理的根拠が薄弱なので、B_aだけを用いている。無次元化するためには、長さの次元をもつ量がもう 1 つ必要であるが、境界層厚さも根拠が薄弱なため適当なものが見あたらず、有次元のままとしている。また、この量は物理的イメージを捉えやすいというメリットをもつ。

制限水路の場合には、相当空気厚さt_aを次式で表す。

$$t_a = \frac{Q_a}{B_a U_m} \tag{4.1.3.4}$$

ただし

U_m: 流路内平均流速

U_mは次式で表す。

$$U_m = \frac{Q_w + Q_a}{S_c} \tag{4.1.3.5}$$

ただし

S_c: 流路内断面積("c"は channel の意味)

このとき、t_aと平均ボイド率$\overline{\alpha}$の間には次式が成り立つ。

$$t_a = \frac{S_c}{B_a}\overline{\alpha} \tag{4.1.3.6}$$

なお、*Kodama et al. (2002)*では、U_mを、(4.1.3.5)式の代わりに$U_m = Q_w / S_c$で表しているが、本論文では、平均ボイド率との関係が簡単になるので、(4.1.3.5)式を用いる。

(2) 局所せん断力センサの校正

局所せん断力センサについて静的及び動的な校正を行った。

静的な校正は、対称軸が水平になるようにセンサを設置し、最大 2g までのウェートを粘着テープを用いて計測面に張り付けて行った。2 つのセンサについて校正を実施し、得られた校正係数を製造者によって提供された値と比較した。その結果を図 4.1.3.2 に示す。それらの校正係数は、それぞれ 5%及び 7%以内の誤差で一致した。従って、実験においては製造者によって提供された校正係数を使用した。

動的な校正は、センサを計測部の上面の P2 位置に設置し、非気泡状態において流速を変えて計測を行った。その結果を図 4.1.3.3 に示す。そこには、Blasius の実験式(4.1.3.8)式及び圧力勾配計測に基づく値も示されている。圧力勾配は、P1 と P3 間の圧力低下から求めた。2 つの局所せん断力センサは、3 つの異なる日付において計測され、いくらかバラつきを示している。これら 3 つの計測値は、Blasius の実験式との差は、それぞれ Day1 で 12%、Dya2 で 12%、Day3 で 2%みられるが、速度 7m/s のせん断応力に相当する 150(N/m²)程度まで、良好に一致を示しており、この局所せん断力センサを用いて安定した計測が行えることを示している。

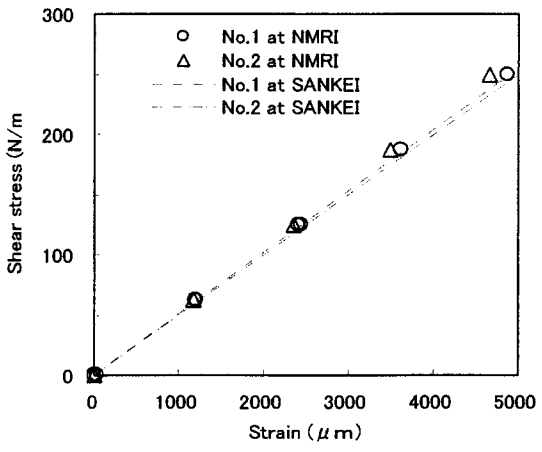


図 4.1.3.2 局所せん断力計の静的校正

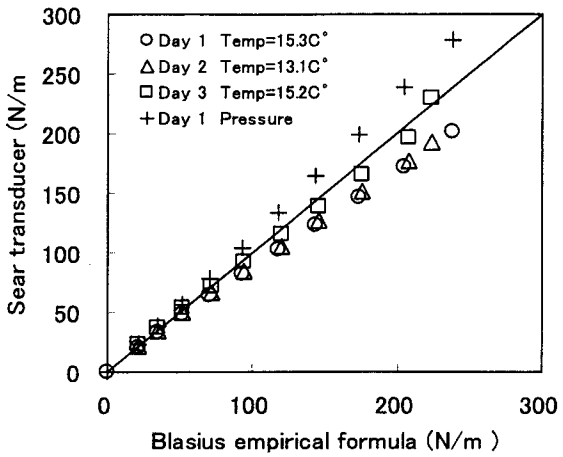


図 4.1.3.3 局所せん断力計の動的校正

(3) 局所摩擦低減率の管路影響(wall effect)補正

小型高速流路の試験部の流れ方向の数カ所において計測された局所摩擦低減率を注入空気量の関数として表示する場合、「空気流量」と「非気泡状態との速度差補正」の 2 種類の補正を必要とする。先ず、試験部内圧力が下流に行くに従って低下するため、空気流量Q_aに次式の補正を行う。

$$Q_a = \frac{p_0}{p} Q_{a0} \tag{4.1.3.7}$$

ただし、

Q_{a0}：ポンプ吐出空気流量

p_0：ポンプ吐出空気圧力（絶対圧力）

p：局所摩擦計測位置における流路内圧力（絶対圧力）

次に、非気泡状態との速度差補正を行う。マイクロバブルによる壁面摩擦の低減効果は、同一平均流速で気泡状態の壁面摩擦係数と非気泡状態のそれとの比C_f / C_{f_0}で表される。しかし、制限流路内に水の流量を一定に保ちながら空気を注入すると、全体の流量がそれだけ増加し流速が増加するため壁面摩擦が増加して、平均流速が増加する。この効果により非気泡状態の壁面摩擦C_{f_0}もそれだけ増加すると考えられる。そのため、次式の補正を行う。

$$C_{f_0}(Q_a) = C_{f_0}(0) \frac{\tau_w(U_m(Q_a))}{\tau_w(U_m(0))} \tag{4.1.3.8}$$

但し、

$U_m(Q_a)$：空気流量Q_aにおける(気液混合流の)平均流速

C_f　　：局所摩擦係数

$$C_f \equiv \frac{F}{\frac{1}{2}\rho S U^2}$$

ここで、

F：せん断力センサによる計測値

ρ：非気泡状態（水）の密度

S：せん断力センサの計測面面積

U：断面内平均流速

τ_wは、補正のために算出された壁面せん断応力であり、Blasius の実験式(*Schlichting 1968*) で表す。

$$\tau_w(f) = 0.03325\, \rho \nu^{\frac{1}{4}} f^{\frac{7}{4}} r^{-\frac{1}{4}} \tag{4.1.3.9}$$

ν ：非気泡状態（水）の動粘性係数

f：平均流速

r：流力半径 ＝2×S／L、S：断面積、L：断面周長

以降に示す実験結果において、泡ありなしの摩擦抵抗係数比$C_f(Q_a)/C_{f0}(Q_a)$は、

$$\frac{C_f(Q_a)}{C_{f0}(Q_a)} = \frac{C_f(Q_a)}{C_{f0}(0)} \cdot \frac{\tau(U_m(0))}{\tau(U_m(Q_a))} \tag{4.1.3.10}$$

として算出される。すなわち、気泡なしの$C_{f0}(0)$と気泡ありの$C_f(Q_a)$を計測し、この比に対し、右辺第２項τ項として(4.1.3.8)式により算出した補正率を掛けて$C_f(Q_a)/C_{f0}(Q_a)$を求めることとなる．補正率は、図 4.1.3.6～8 の点線のように摩擦低減率に対し大部分を占める．

また、実験結果において、流速U_mにおける摩擦抵抗低減率と表記しているが、流速は実際には注入空気量によって変化し、混合流の流速として加速されるため、$U_m/(1-\bar{\alpha})$であることを注意しておく。すなわち、外部流での実験結果と比較する場合、流速U_mの結果として表示している場合も、小型高速流路では$U_m/(1-\bar{\alpha})$における結果であるので注意が必要である。

また、曳航水槽など他実験との比較参考のため平均ボイド率と相当空気膜厚さの対応する数値を示しておくと、AHP 吹き出しの場合はB_a=67(mm)であるので、平均ボイド率$\bar{\alpha}$=0.04、0.08 に対し、それぞれt_a=0.90mm、1.79mm となる。

(4) 清水中の局所摩擦低減率計測と計測誤差評価

先ず壁面せん断力計測における計測誤差について述べる。計測値に含まれる全誤差は、図 4.1.3.4 に示すように実験中一定のかたより誤差と計測時のばらつきによる偶然誤差に分けられる。不確かさ解析は、それぞれを定量化し評価することにより行う．かたより誤差は、理論や高精度計測により求められた真値との差により求める。

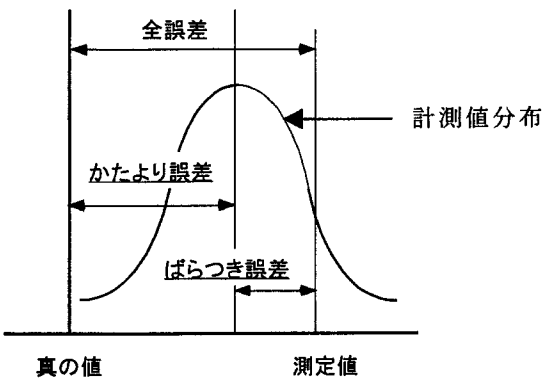


図 4.1.3.4 誤差評価

気泡注入時のせん断力計測値のかたより誤差の評価は、局所摩擦低減量の積分値と全抵抗低減量との比較を行った 4.2.3(4)節に譲ることとし、ここでは偶然誤差の評価のみを行った。計測値は正規分布に従うとすると、母平均mの含まれる確率が 1-α である信頼区間は、次の 2 式により示される(*日本機械学会訳,1987*)。

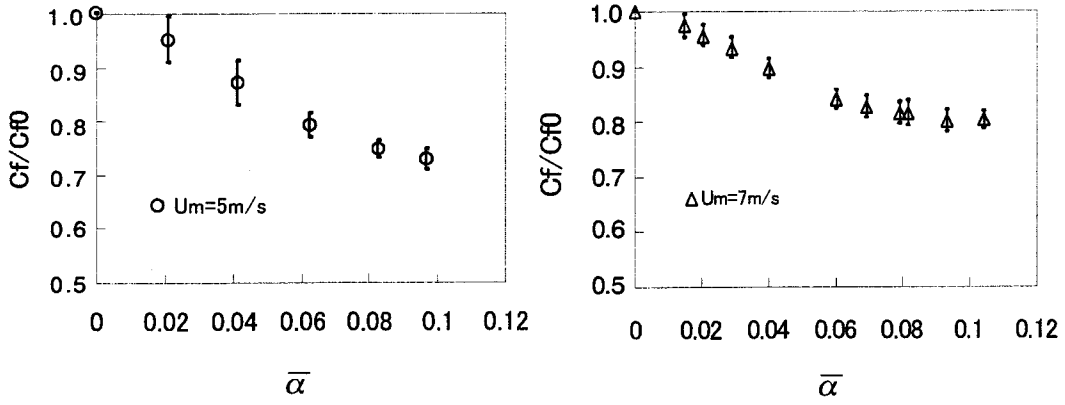
$$\bar{x} - t_\alpha \frac{u}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + t_\alpha \frac{u}{\sqrt{n}} \tag{4.1.3.11}$$

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{4.1.3.12}$$

ただし

$\bar{x}$ ：平均値、
t ：スチューデント値、
u ：不偏分散の平方根、
n ：計測回数。

局所摩擦抵抗低減計測では、1 状態につき 1～3 回計測を行った。計測回数が 3 回の場合について、包括度 95%（$t_{0.05}$=4.303）の信頼区間を求めた。気泡生成に AHP を用いて、速度U_m=5m/s、位置 P3 の結果を図 4.1.3.5(a)に、速度U_m=7m/s、位置 P2 の結果を図. 4.1.3.5(b)に示す。符号は平均値を示し、95%の信頼区間を縦棒により示した。高速の方が計測のばらつきが少ない。これは高速であるほど気泡径が小さくなり気泡分布が上壁面に対し均一化することが一因と考えられる。高速における気泡分布の均一化は写真撮影結果により確認した。



(a) U_m=5m/s, P2、AHP　　(b) U_m=7m/s、P3、AHP

図. 4.1.3.5 マイクロバブルの壁面摩擦応力低減効果のばらつき評価

多孔質板 PP または配列多孔板 AHP の 2 種類の空気吹き出し板を用いて気泡を発生させ、それぞれの状態において流路内平均流速をU_m=5、7、10m/s の 3 速度に変化させた合計 6 状態について、気泡吹き出し量を変化させて壁面せん断力計測を行った。結果を図

4.1.3.6～図 4.1.3.8 に示す。それらの図には(4.1.3.8)式で与えられる補正量$C_{f_0}(0)/C_{f_0}(Q_a)$が破線で示され、さらに図 3.2.2(b)の *Madavan et al. (1984)*の実験結果が示されている。

これらの図から分かることを以下に列挙する。

吹き出し空気量(横軸)

吹き出し空気量の増加に伴い低減効果も増加する。

流速

高速ほど低減効果は減少する。流れの変動成分によって気泡が壁近傍から拡散するためと考えられる。

下流位置

速度による異なるが、U_m=7m/s では気泡吹き出し位置から下流に行くに従って低減効果は減少する。U_m=5、10m/s では、多孔質板(PP)のU_m=10m/s、P.2 位置を除き、下流位置への影響はほとんど現れなかった。これも気泡の乱流による拡散効果である程度説明できそうである。すなわち、下流位置への影響は、低速のU_m=5m/s では拡散が小さいため少なく、U_m=7m/s では拡散効果により大きくなり、さらにU_m=10m/s では、さらに拡散が大きく既に P.2 位置において飽和状態になり下流位置への影響はほとんどなくなったと考えられる。各速度、各計測位置における気泡の拡散の様子は、後述の図 4.1.3.13 ボイド率分布計測結果に示されている。

配列多孔板(AHP)と多孔質板(PP)

PP の方が低減効果が大きい場合が多い。AHP は低減効果が吹き出し空気量について飽和傾向を示すことがある。両者の違いは、気泡分布(大きさと空間)の違いによると思われるが、不明である。原因究明は、低減効果の増大方法を見つける手がかりになると期待される。多孔質板(PP)のU_m=10m/s、P.2 位置において相当空気膜厚さt_a=1.5mm を越えると急激な低減効果を示すのは、気泡の状態が気泡から気膜へと移っていくためである。

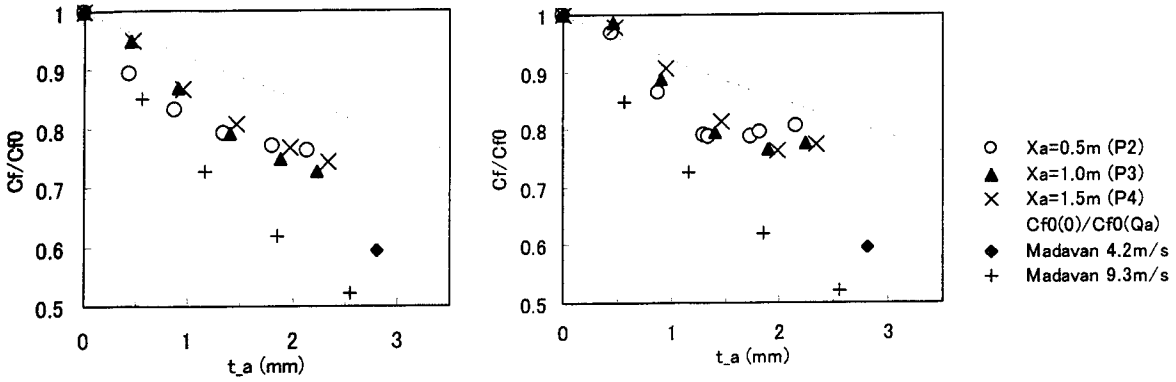
補正量$C_{f_0}(0)/C_{f_0}(Q_a)$

低減量と同程度の大きさをもつ。従って実験結果を議論するときは注意する必要がある。この補正方法の妥当性を、wall effect の無い流場での実験結果と比較して検証する必要がある。図示された殆どの場合に、補正量を除いても低減効果がある。

Madavan らの実験結果との比較

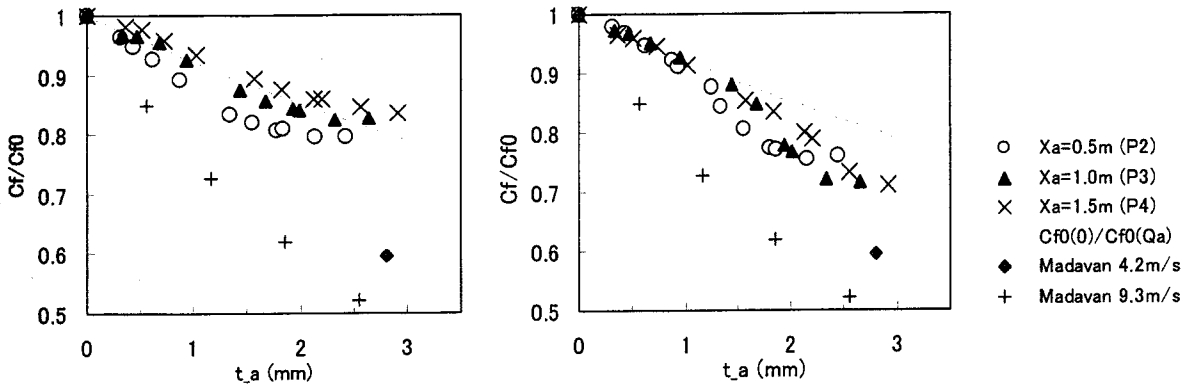
一致度は低いが、低速の方が一致する傾向にある。Madavan らは気泡吹き出し位置の直ぐ下流で計測しているのに対して、今回の実験では最も短くても 0.5m 下流位置で計測していることが不一致の原因と考えられる。

以上の議論をまとめると、気泡による低減効果は、吹き出し位置の直ぐ下流で最大となり、その位置では流速に依存しないが、下流に行くに従って減少し、減少の度合いは高速ほど大きくなる傾向があり、そして PP の方が大きな低減効果を得ることができる、ということができる。それらの原因は、おおよそ気泡の乱流拡散による気泡分布状態によると推測できる。



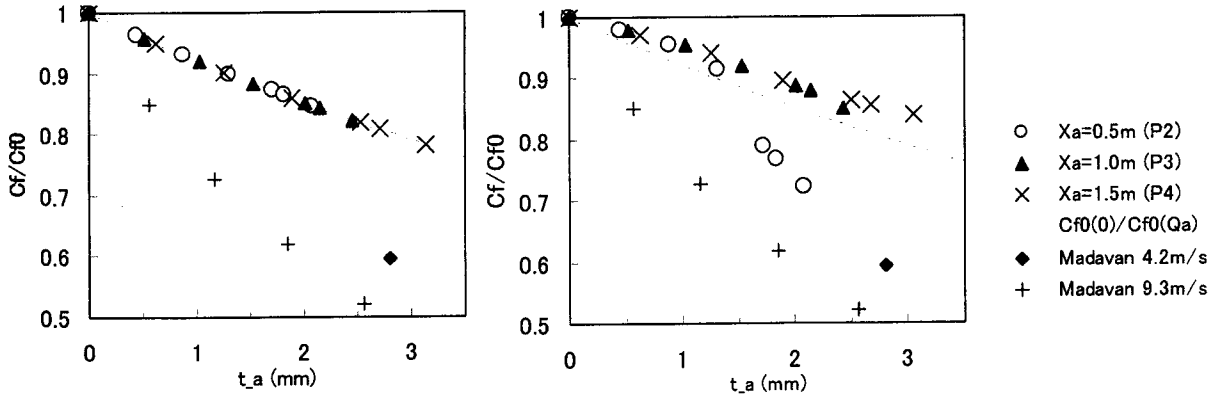
(a)AHP　　(b)PP

図 4.1.3.6 壁面摩擦応力の計測結果（U_m=5m/s)



(a)AHP　　(b)PP

図 4.1.3.7 壁面せん断応力の計測結果（U_m=7m/s)



(a)AHP　　(b)PP

図 4.1.3.8 壁面せん断応力の計測結果（U_m=10m/s)

(5) 清水中の局所ボイド率分布計測と計測誤差評価

かたより誤差評価

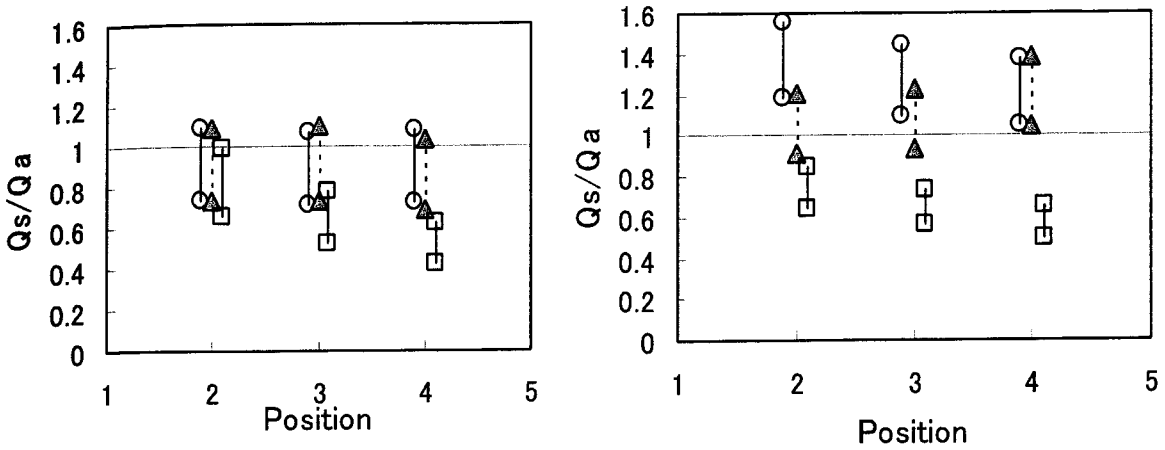
局所ボイド率計測システムの計測精度の検証を行った。ここでもかたより誤差評価が困難であるため準ずる評価として、吐出ポンプ出口で計測した吹き込み空気流量Q_aと、計測した局所ボイド率を流論断面内で積分することにより得られる吸い込み空気総量Q_sとの比較による検証を行った。円管プローブによる吸い込み速度は、気泡なし状態の計測位置における流速と一致するよう吸い込み圧力を調整している。但し、速度10m/sにおいては、真空タンク内圧力を下限値（ほぼ絶対圧力0Pa）にしても吸い込み速度が不足した。計測位置における局所的な流速は、1/7 乗則により推定した。計測を行った平均ボイド率は$\bar{\alpha}$=0.08、流速はU_m=5、7、10m/s の3通り、計測位置はP2、P3、P4の3箇所の、合計9状態について検証した。

先ず、計測された吸い込み空気量の妥当性を検証した。局所ボイド率$\alpha(y)$がスパン方向に一様であると仮定すると、吸い込み空気総量Q_sは断面全体に亘る積分で計算できる。

$$Q_s = B_c \int_0^{H_C} \alpha(y)u(y)dy \qquad (4.1.3.13)$$

ここで、H_c：試験部断面高さ、y：壁面からの距離、α(y)：局所ボイド率、u(y)：局所流速

吹き出し空気流量Q_aは流量計により計測されたので、両者を比較することにより局所ボイド率の計測精度を積分的に検証することができる。上式では、気泡の流れ幅を試験部断面幅B_cとしているが、実際の気泡の流れ幅は、吹き出し部幅B_aから試験部幅B_cの間と考えられるため、それぞれの幅を用いて吸い込み空気流量Q_sを計算し、吹き出し空気流量Q_aが、Q_sの上限値（流路幅に均一分布と仮定した場合の空気流量）と下限値（気泡生成板の吹き出し部幅に均一分布と仮定した場合の空気流量）の範囲内に収まるかどうかにより検証した。その結果を図4.1.3.9に示す。図中の○、△、□印は流速5m/s、7m/s、10m/sを表す。図(a)のAHPに関する結果は、流速5m/s、7m/sではQ_s/Q_aの上限値と下限値が1の値の上下にあり、妥当な計測結果であると考えられる．速度10m/sでは、吸い込み量が少なく、これは真空ポンプの吸い込み能力が限界に達し、プローブ吸い込み速度が不足した影響が出ているためであると思われる。図(b)のPPに関する結果は、流度5m/s、7m/sではQ_s/Q_aの値が1より大きく、吸い込み過多であった。後に示す図4.1.3.11、12においてPPがAHPより高ボイド率分布を示す結果、管路内圧力損失が低くなり吸い込み量も高くなったと思われる。なお、両者の比が1となるように局所ボイド率$\alpha(y)$を補正する考え方もあるが、吸い込み速度が不足してもボイド率は正しく計測できているとも考えられるため、補正する根拠が乏しいので、今回は補正を行わなかった。



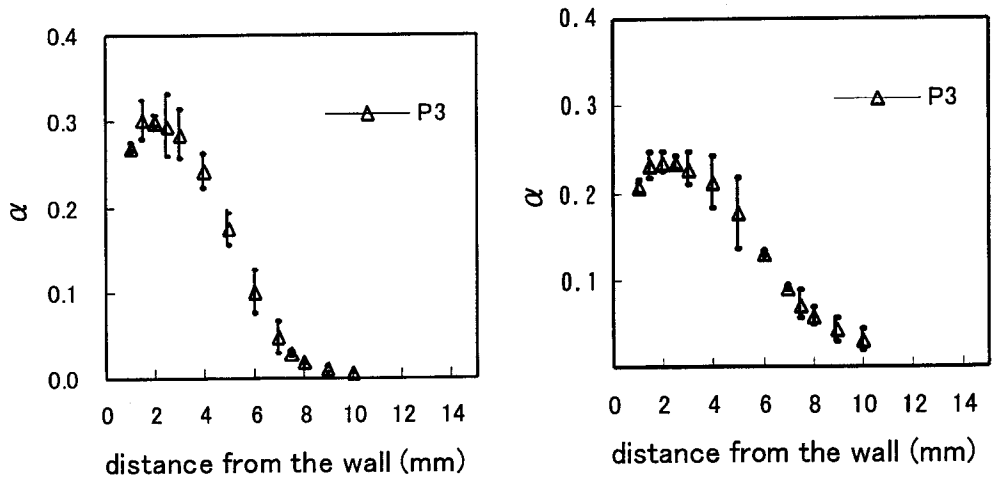
(a)AHP　　(b)PP

図 4.1.3.9 局所ボイド率分布計測における積分空気量と吹き出し空気総量の比較

偶然誤差

次に、計測の偶然誤差を評価する。計測結果の内の 1 状態、すなわち気泡生成板 AHP、平均ボイド率$\bar{\alpha}$=0.08(t_a=1.94mm)、流速U_m=7m/s、計測位置 P1、P2、P3 における局所ボイド率分布を図 4.1.3.10(a)に、P3 における偶然誤差の評価結果を図(b)に示す。横軸は上壁面からの距離を、縦軸は局所ボイド率を示す。局所ボイド率計測では、1 状態につき 1～2 回計測を行っている。計測回数 2 回の場合について、包括度 95%($t_{0.05}$=12.71)の信頼区間を求めた。ボイド率分布の勾配の大きいところでばらつきが大きくなっている。

例えば、包括度 95%の信頼区間は、ピーク値のボイド率は 5%程度のばらつきの範囲をもつといえる。



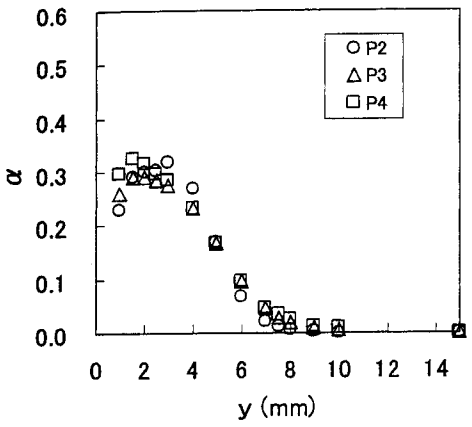
(a) U=5m/s　　(b) U=7m/s

図. 4.1.3.10 局所ボイド率分布のばらつき評価 P.3、$\bar{\alpha}$=0.08

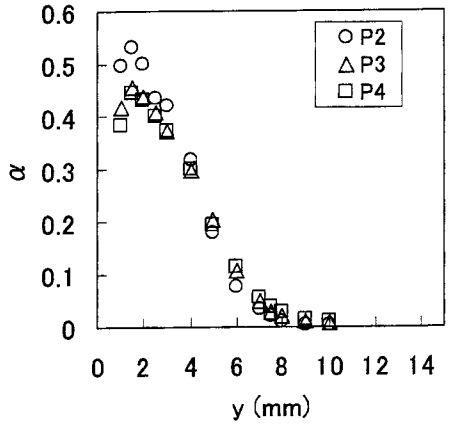
壁面せん断応力の計測と同様に、多孔質板 PP または配列多孔板 AHP の 2 種類の空気吹き出し板を用いて気泡を発生させ、それぞれの状態において流路内平均流速をU_m=5、7、

10m/s の 3 速度に変化させた合計 6 状態について、局所ボイド率分布の計測結果を図 4.1.3.11～図 4.1.3.13 に示す。平均ボイド率$\bar{\alpha}$は、P2 において 0.08 となるよう空気流量を設定したが、P3、P4 における実際のボイド率は、(4.1.3.7)式による圧力低下の補正分だけ若干高くなる。

計測結果は、高速ほど、また下流ほど局所ボイド率の壁近傍のピークが低下し、気泡が流路全体に拡散する傾向にある。気泡生成板である多孔質板(PP)と配列多孔板(AHP)の比較では、PP の方が AHP よりも壁近傍のボイド率が若干高い。

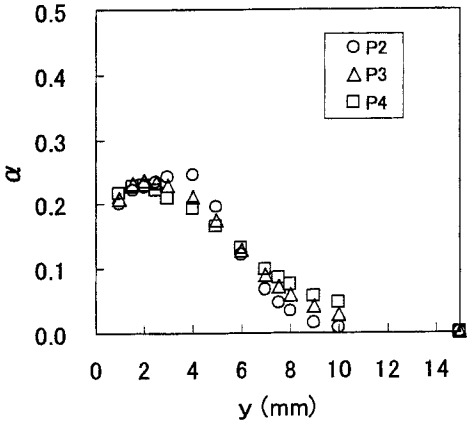


(a) AHP

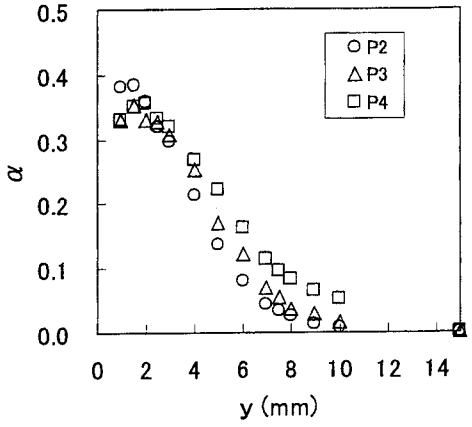


(b) PP

図 4.1.3.11 局所ボイド率分布 (U_m=5m/s)

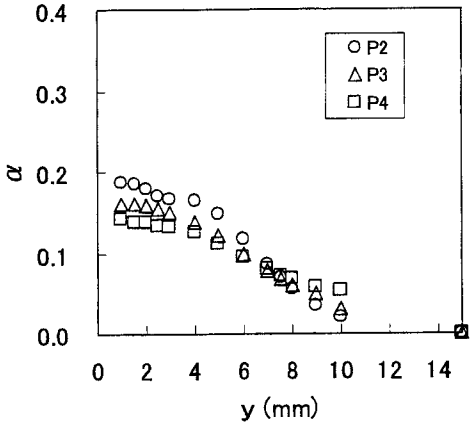


(a) AHP

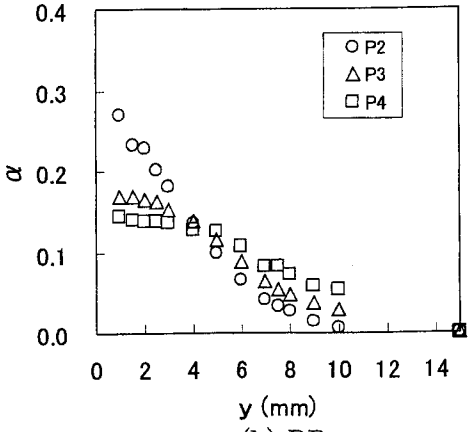


(b) PP

図 4.1.3.12 局所ボイド率分布 (U_m=7m/s)



(a) AHP



(b) PP

図 4.1.3.13 局所ボイド率分布 (U_m=10m/s)

以上の結果は、壁面せん断応力の計測結果と対応させると、壁面せん断応力の低減効果が壁近傍の局所ボイド率と正の強い相関をもつことを示している。そこで両者の定量的な関係として、壁から摩擦速度による無次元長さ y^+=1000 位置までの平均ボイド率と摩擦抵抗低減率の関係を調べた。τ_w は(4.1.3.8)式から推定した。このとき U_m=5、7、10m/s における実距離は、それぞれ y=4.99mm、3.71mm、2.72mm となる。壁近傍の定義を y^+=1000 までとしたのは、*Yoshida et al. (1998b)*にならい気泡サイズとの関係から適当と判断し定めた。結果を図.4.1.3.11 に示す。全体として壁近傍ボイド率と摩擦抵抗低減率には正の強い相関がみられる。図中に近似式として指数曲線

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = \exp(-0.933\alpha|_{y^+\leq 1000}) \qquad (4.1.3.14)$$

を点線で示した。

多孔質板 PP と配列多孔板 AHP の結果を比較してみると相違がみられる。PP において特に低速ほど AHP より壁近傍ボイド率が高めであった。局所摩擦低減率は、Um=7m/s では PP の方が高いものの他の流速ではほぼ同じであった。これらは壁面せん断応力の低減が C_f/C_{f0}=0.7 付近で飽和状態に達するためと推察される。

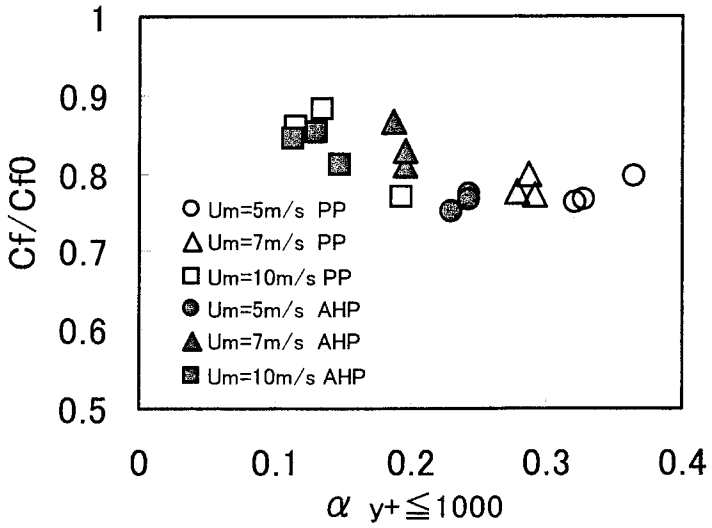


図. 4.1.3.14　壁近傍ボイド率 α ($y^+ \leq 1000$)と壁面せん断応力低減率との関係

4.1.4 海水中の摩擦抵抗低減効果

(1)研究の必要性

海水中では、微細な気泡の表面が負に帯電して電気的な反発力が働くため、気泡の合体が生じにくく、清水に比べて気泡径が小さい傾向にあり、従って摩擦抵抗低減効果も清水中と異なる可能性がある。本研究でこれまで示した実験を含めてマイクロバブル実験の殆どが清水中で行われ、船舶に実用化される場合は海水中で動作することを考えると、海水と清水の物性の違いが摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響を調べておく必要がある。そこで小型高速流路を用いて、海水中におけるマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果について詳しく調べた(*児玉 2002*)。

(2)海水と清水の物性値

清水としては水道水を、海水としては相模湾内で採取された新鮮な海水を用いた。清水と海水の主な物性値の比較を表 4.1.4.1 に示す。清水の値は理科年表を参照し、海水の値は試料の検査結果を示した。主な物性値は両者ほぼ等しい値を示した。

表 4.1.4.1 海水及び清水の物性値

	表面張力 (dyn/cm)	動粘性係数 ($10^{-6}m^2/sec$)
清水(15℃)	73.48	1.14
海水(15℃)	73.38	1.23

(3)清水中と海水中の壁面せん断応力低減率の比較

気泡生成法としては配列多孔板(AHP)を用いて、流路内平均流速をU_m=5、7、10m/s の3速度に変化させ、計測位置 P2, P3, P4 において、清水中と海水中の壁面せん断応力低減率の比較を行った。計測位置 P3 における結果を全て重ね合わせたものを図 4.1.4.1 に、真水のそれぞれの計測結果を図 4.1.4.2 に、海水のそれぞれの計測結果を図 4.1.4.3 に示す。(4.1.3.8)式の補正を施してある。

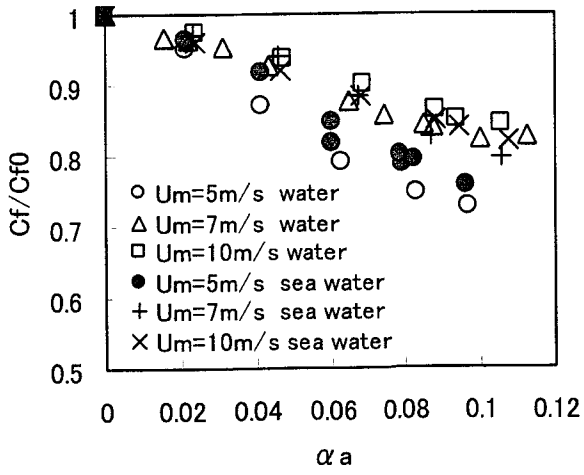
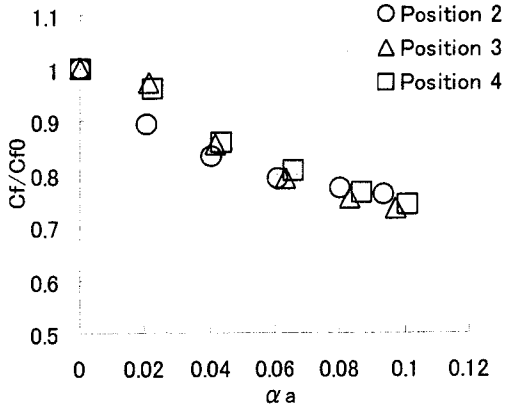
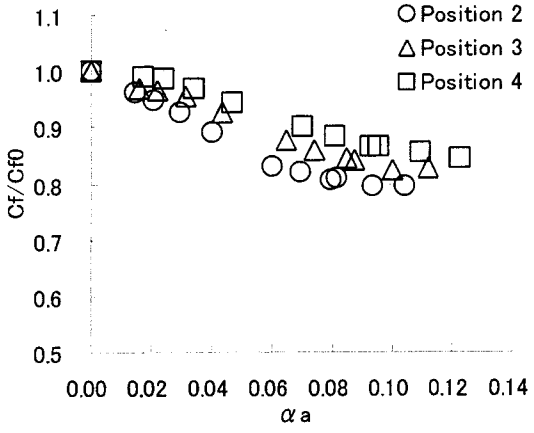


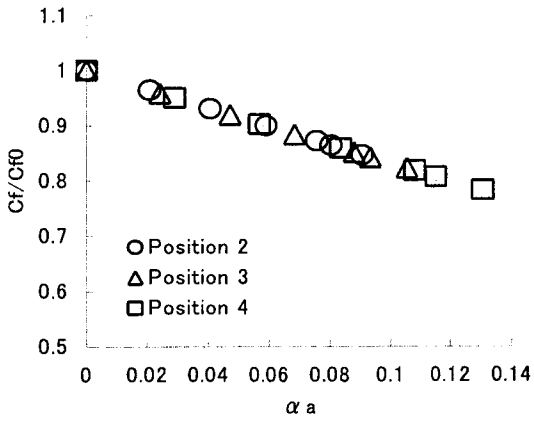
図 4.1.4.1 海水と清水における壁面せん断応力の比較(P.3)



(a) U_m= 5.0 m/s

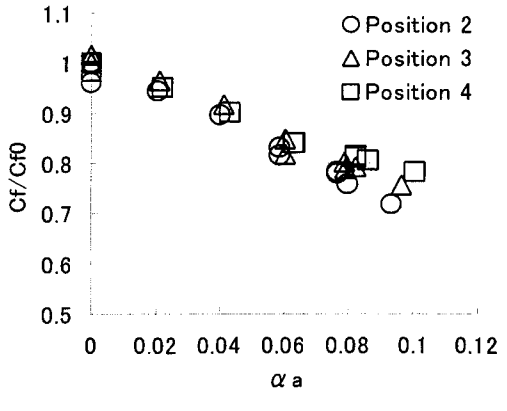


(b) U_m =7.0 m/s

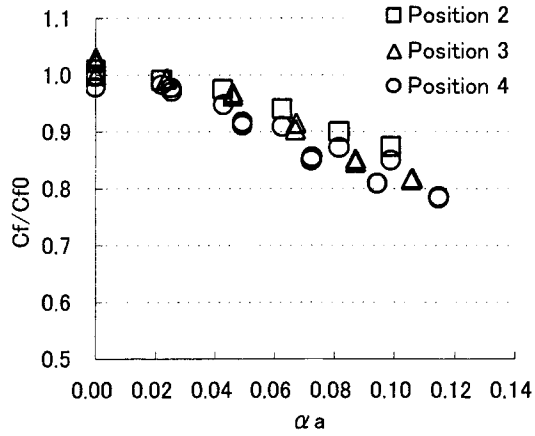


(c) U_m =10.0 m/s

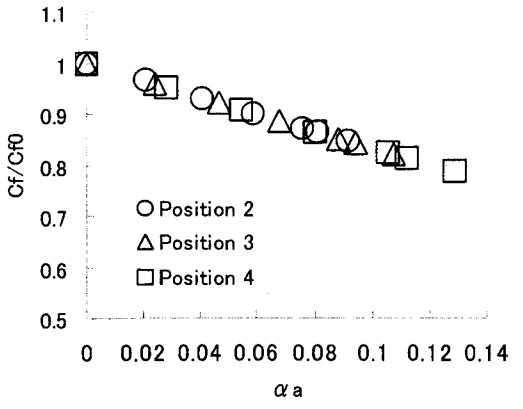
図 4.1.4.2 清水での壁面せん断応力の低減 (AHP)



(a) U_m = 5.0 m/s



(b) U_m =7.0 m/s



(c) U_m=10.0 m/s

図 4.1.4.3 海水での壁面せん断応力の低減 (AHP)

横軸は流路内平均ボイド率で示した。海水中の低減効果は、全体的には清水のそれとほぼ同じであるが細かな点で差異がある。清水では吹き出し空気量が多いところで低減効果に飽和傾向が見られるが、海水では飽和傾向は殆ど見られない。

(4)清水中と海水中の気泡径比較

清水中と海水中それぞれにおいて気泡流の写真撮影を行い、気泡径を比較した。図 4.1.4.4 に気泡撮影システムを示す。撮影は、YAG レーザのシート光を光源として、試験部直上より上壁面近傍に焦点を合わせて行った。実験状態は、断面内平均ボイド率は $\alpha_a(=\bar{\alpha})$=0.02、t_a=0.93mm、計測位置は P2、3、4 の 3 箇所、流速は U_m=5m/s、7m/s、10m/s の 3 速度、計 9 状態とした。水温は 15 度±1 度以内となるよう調整した。P2 における海水及び清水中の写真を図 4.1.4.5 に示す。撮影範囲は横 11mm、縦 7.8mm である。海水の方が気泡がやや小さくみえる。海水と清水で気泡密度が異なって見えるのは、YAG レーザーによる照明位置の高さが、海水では上壁面から少し下位置で、清水では上壁面近傍位置であったため、写り込む気泡の位置がおそらく 1mm 以内であるが上下にずれたためである思われる。

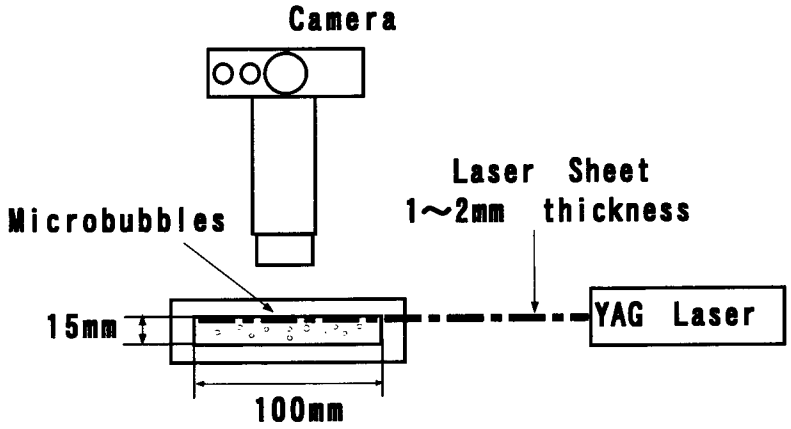
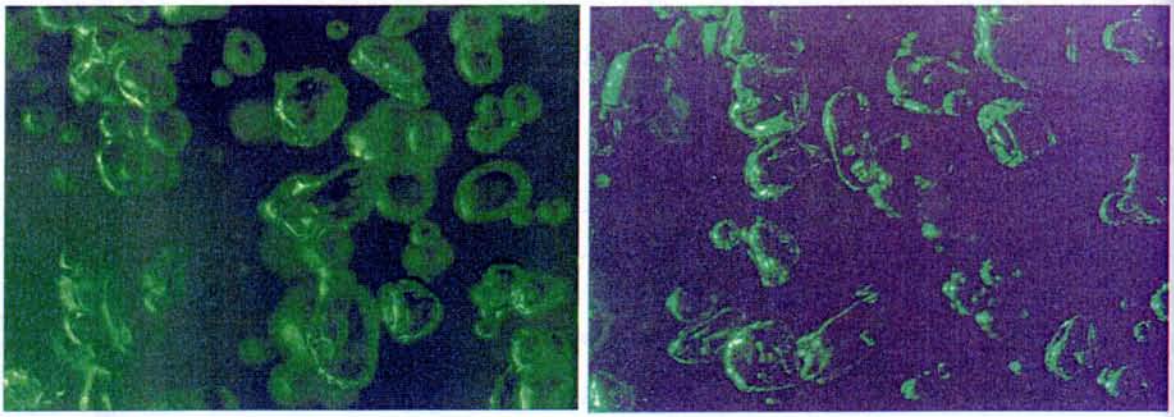


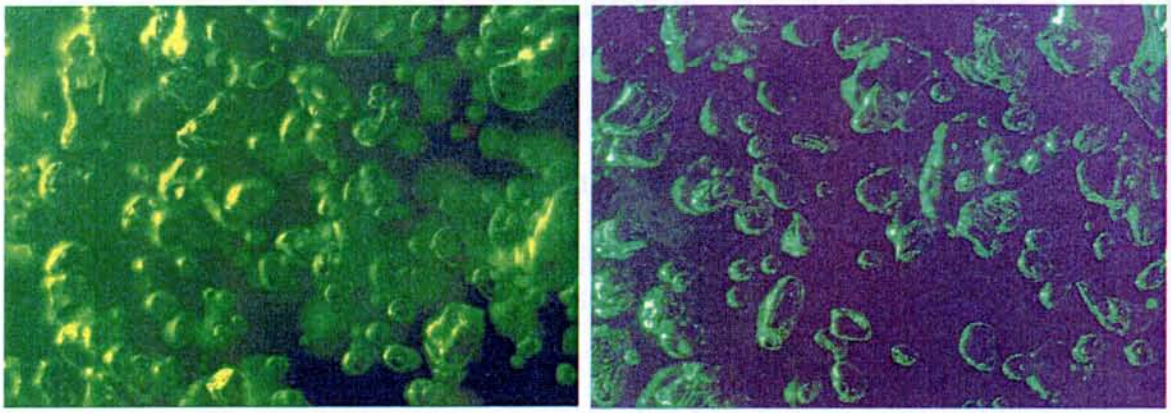
図 4.1.4.4 気泡撮影システム

拡大写真から気泡径を計測した。気泡直径 D の大きさは、長軸長さ a と短軸長さ b から、$D=\sqrt{a\times b}$ により求めた。流速 U_m=5, 7, 10m/s における気泡径の確率密度分布を図 4.1.4.6 に、平均気泡直径を表 4.1.4.2 に示す。平均サンプル数は、U_m=5m/s で約 20 個、U_m=7m/s で約 60 個、U_m=10m/s で約 150 個である。気泡径は、いずれの速度においても海水中の方が清水中より小さい。気泡径分布のばらつきは、流速が低いほど大きくなる。
以上のように、海水中では清水中よりも気泡径が小さくなることが確認された。壁面せん断応力の低減効果については、有意な差が見られなかった。



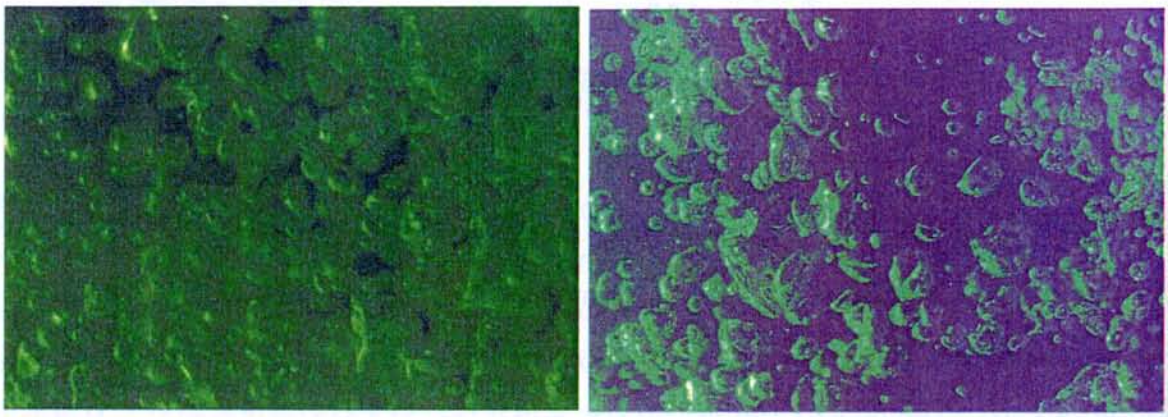
海水　　清水

(a) U_m=5m/s



海水　　清水

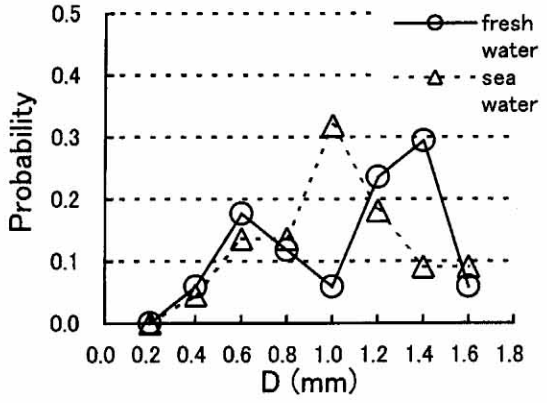
(b) U_m=7m/s



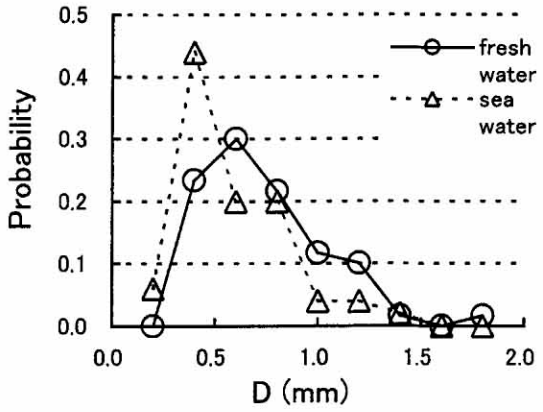
海水　　清水

(c) U_m=10m/s

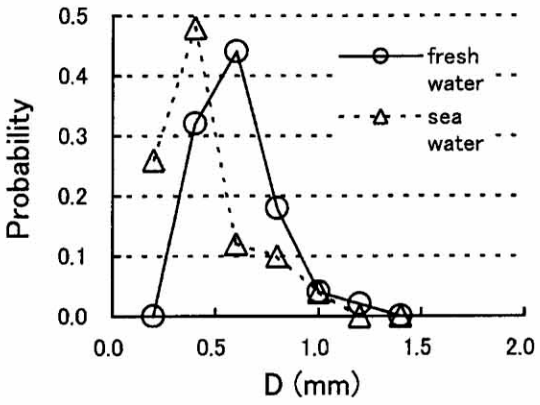
図 4.1.4.5 海水及び清水中の気泡写真（α_a=0.02 ,Position 2 ）



(a) U_m=5m/s



(b) U_m=7m/s



(c) U_m=10m/s

図 4.1.4.6 海水及び清水中の気泡径の確率密度分布（α_a=0.02 ,Position 2 ）

表 4.1.4.2　平均気泡直径（清水と海水）

流速(m/s)	清水中気泡径(mm)	海水中気泡径(mm)	気泡径比 海水/清水
5	1.06	1.02	0.96
7	0.73	0.58	0.79
10	0.60	0.44	0.73

海水中における計測位置の異なる場合の気泡の写真を図 4.1.4.7 に示す。

流れ方向の平均気泡径の変化を図 4.1.4.8 に示す。図(a)は清水、図(b)は海水の結果を示す。計測位置 P2 では、清水の気泡径が海水の気泡径より若干大きい。下流に進むに従い、清水では気泡径が大きくなり、海水では小さくなる。それぞれ気泡の合体あるいは分裂による可能性が大きい。

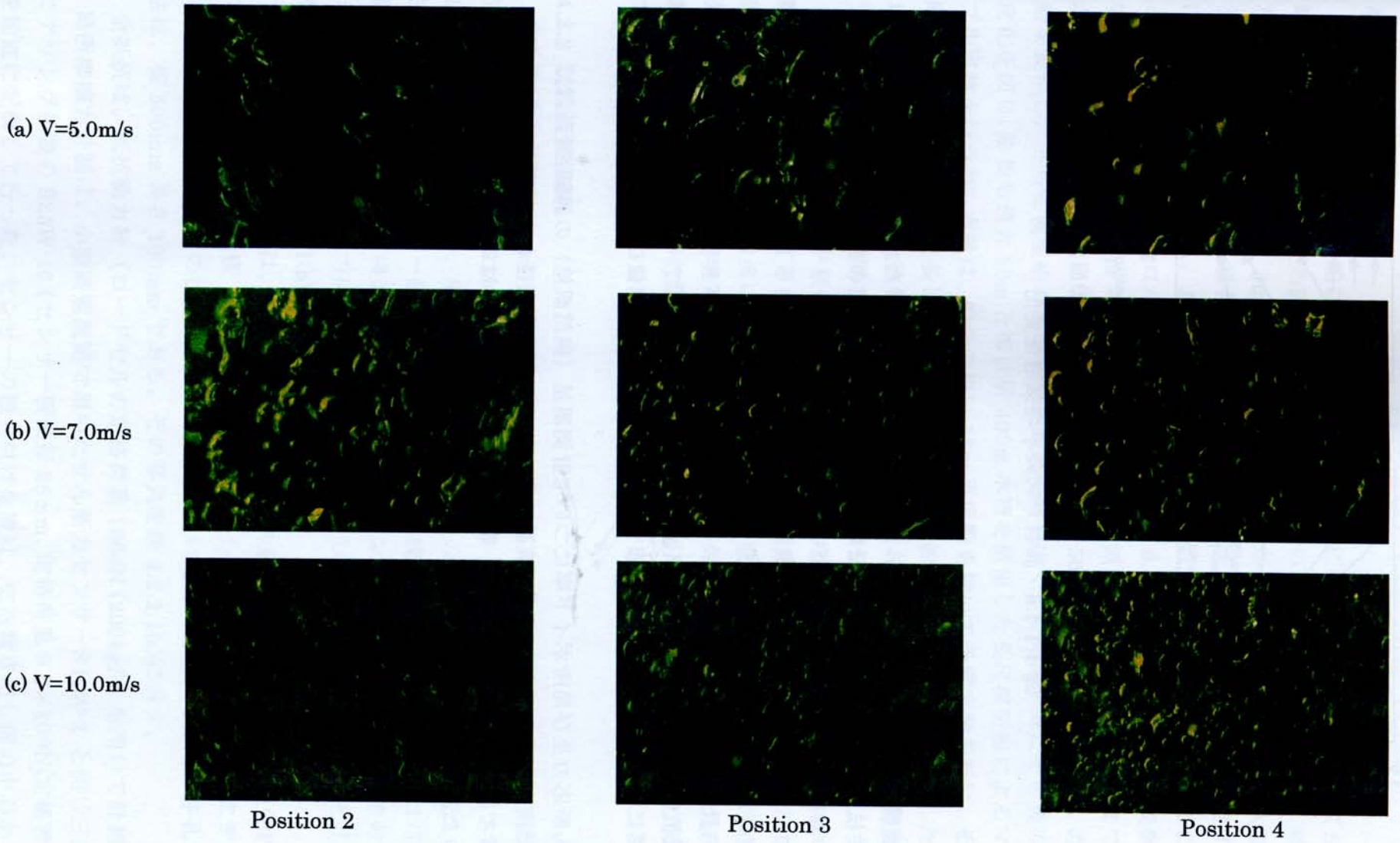


図 4.1.4.7 海水及び清水中の気泡写真（α_a =0.02 ,Position 2 ）

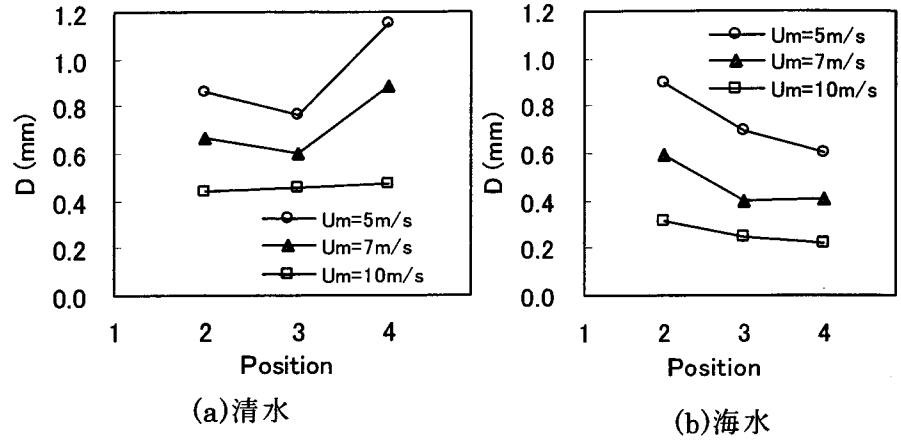


図 4.1.4.8　流れ方向の平均気泡径変化

4.1.5 結論

小型高速流路を用いたマイクロバブル実験から以下の結論を得た。

- 気泡発生法として多孔質板(PP)と配列多孔板(AHP)の 2 種類の板を用いて摩擦抵抗低減効果の違いを調べた。PP の方がやや低減効果が大きい。
- マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果は、吹き出し位置から下流に行くに従って、また高速ほど減少する。
- 摩擦抵抗低減効果は壁近傍の局所ボイド率と強い正の相関があり、様々な状態における摩擦抵抗低減率は壁近傍ボイド率$\alpha(y^+ \leq 1000)$の関数として一意的に整理できる。
- 制限流路において気泡吹き出し状態での壁面摩擦応力の計測値について補正方法を示した。
- 壁面せん断応力及び局所ボイド率について計測誤差（偶然誤差）の評価を行った。
- 海水中と清水中のマイクロバブル実験結果を比較した。気泡径および気泡径変化において両者で相違はみられるものの、摩擦抵抗低減効果に相違はほとんどなく影響を与えなかった。

4.2 12m 平板模型船を用いた摩擦抵抗低減効果と局所ボイド率の関係の解明

4.2.1 はじめに

マイクロバブル法を船舶において実用化するためには、抵抗低減のメカニズム解明と同時に、摩擦抵抗低減効果の流れ方向への持続性について調査する必要がある。前節に示した小型高速流路は、長さ 3m の試験部を持っているが、長さ 300m に達する大型船にマイクロバブル法を適用する場合に摩擦抵抗低減効果の流れ方向への持続性を推定するためには、不十分な長さである。*渡邉ら(1998)*は、この流れ方向の持続性を推定することを目的として、先駆的なマイクロバブル実験を行った。幅 0.6m・長さ 40m の長尺模型船を速度 7m/s で曳航し、幅 0.25m の気泡生成部から摩擦低減効果がどのくらい下流まで持続するか明らかにした。本研究においては、幅 1m、最長 50m、気泡生成部幅 0.5m の長尺平板船を製作し、さらに模型船および気泡生成部の幅を広くして気泡生成とその後の流れの安定化を図り、船長も最大 50m と海技研 400m 水槽を活用した長尺模型船によるマイクロバブル実験を行った。実験は、船長の短い 12m 平板船を用いて予備実験を行い、その後に段階的に平行部の長さを延長して長さ 50m まで模型船曳航実験を行うこととした。最初は 12m 平板船を用い、安全性の確認、計測装置の開発・改良、気泡発生装置の開発、などの予備実験と、静定計測時間を長くとる必要のあるボイド率計測実験を行った。

最初に、長さ 12m の平板模型船を製作し、最大速度 7m/s で曳航してマイクロバブル実験を行い、気泡発生による全摩擦抵抗低減効果と局所摩擦低減効果を調べた。また、4.1 節に示したような、管内流について明らかになった壁面摩擦低減率と壁近傍ボイド率との強い相関が発達中の平板境界層においても成り立つかどうかを調べるため、12m 平板模型船において局所ボイド率計測を行い、局所ボイド率分布と壁面摩擦低減率との関係について調べた。

4.2.2 試験装置概要

本実験は海技研の 400m 曳航水槽(長さ 400m、幅 18m)において行われた。模型船は、図 4.2.2.1(a)に示すように水槽上の曳引台車にセットし曳航した。模型船は長さ 12m、幅 1m、喫水 45mm であり、船底は平板状で、船首尾の平面形状は流線型である。船底が平板状であるのは、タンカー船底を模擬し発達中の乱流境界層に対するマイクロバブルの影響を調べるためである。構造は、厚み 100mm のウレタン板を浮力材とし、その上にアルミ材のチャンネルを流れ方向に設置して強度部材とした。船底は上質塗装仕上げとした。模型船の全景を図 4.2.2.1(b)に示す。

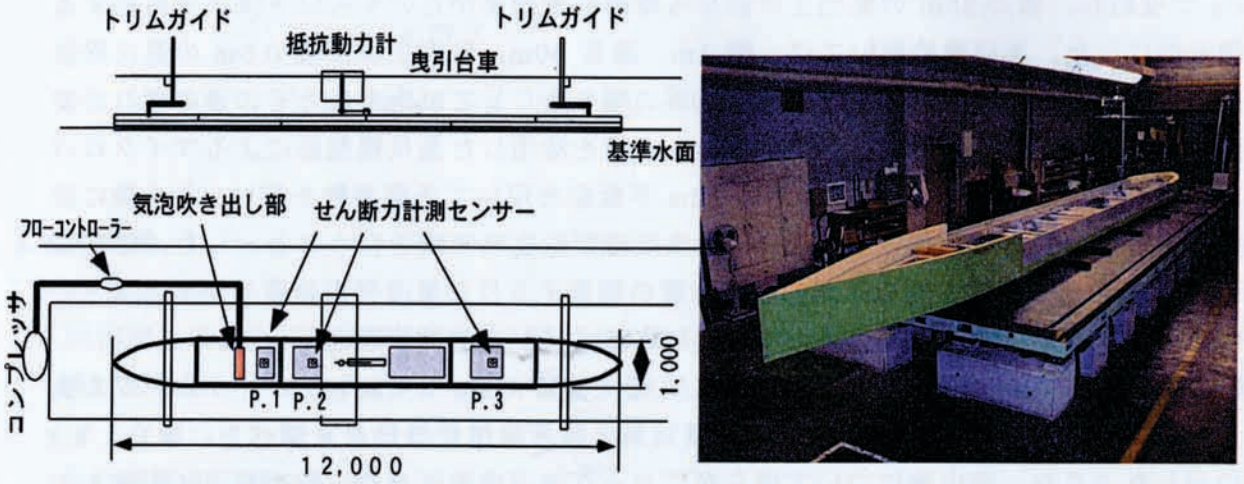
マイクロバブルの生成は、船首端から下流に 3m の船底に配置した多孔質板(PP、ブロンズ製焼結金属製、公称孔径 2μm、厚さ 3mm)を通して空気をせん断流中に吹き出すことにより行った。多孔質板の仕様は小型高速流路で用いたものと同一である。多孔質板の寸法は、幅 500mm 長さ 100mm である。その写真を図 4.2.2.1(c)に示す。

全抵抗は、抵抗動力計（ロードセルの定格荷重 1960N (200kgf)）を用いて計測した。

局所摩擦力計測は、小型高速流路で用いたせん断力センサーS10W-2 と同じ三計エンジニアリング社製の S25W-10（センサー板直径 25mm、定格荷重 9.8×10^{-2}N(定格容量 10g)）を船底に配置して行った。センサーの取り付け位置は、気泡吹き出し部の中心から船尾へ

500mm(Position1,以降 P.1)、1800mm(P.2)、5800mm(P.3)の 3 箇所である。せん断力センサーは、小型高速流路で用いた図 4.4.2.2.(d)に示した計測蓋に取り付けられており、図 4.2.2.1(d)に示すように計測蓋ごと模型船の気泡観測窓（透明アクリル製、700mm×700mm）の計測窓に着脱可能な様式としている。

局所ボイド率計測は、小型高速流路で用いたシステムを模型船に搭載し、センサー部が計測蓋にとりつけられ、計測窓に着脱可能な様式としている。

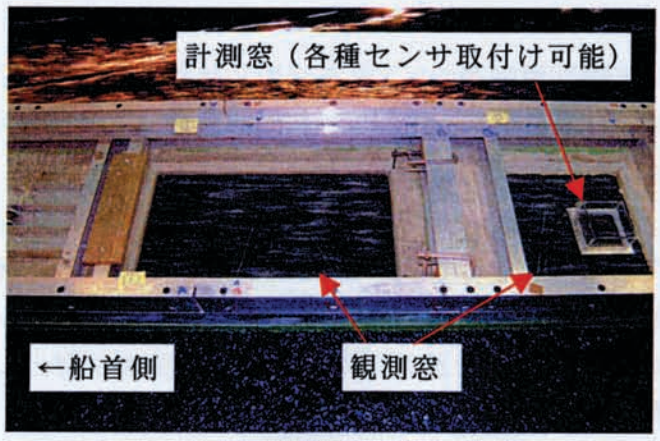


(a)全体図

(b)定盤上の模型船



(c)気泡注入部
(多孔質板)



(d) 観測窓と計測窓

図 4.2.2.1 12m 平板模型船

4.2.3 実験結果

(1) 非気泡状態における抵抗試験

先ず、非気泡状態において、通常行われている抵抗試験、すなわちフルードの仮定に基づく粘性抵抗成分と造波抵抗成分を分離する試験を行い、形状影響係数 K および造波抵抗成分を求めた。結果を図 4.2.3.1 に示す。横軸はフルード数 $F_n = V/\sqrt{gL}$、縦軸は全抵抗係数 $C_t = R_t/(\rho S_m V^2/2)$ を表す。ただし、

V: 船速(m/s)、

L: 船長(m)、

g: 重力加速度(m/s²)、

R_t:全抵抗(N)、

ρ:水の密度(kg/m³)、

S_m:船体浸水面積(m²)、

C_{f_0}:Schoenherr の相当平板摩擦抵抗係数

である。

形状影響係数は、プロハスカの方法により、K=0.17 と算出した。全抵抗に占める摩擦抵抗成分の割合は高く、造波抵抗成分も F_n=0.3～0.4 付近でハンプが見られるがその後 F_n=0.65（速度 V=7m/s に相当）では小さく、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験に適した船型であると考えられる。

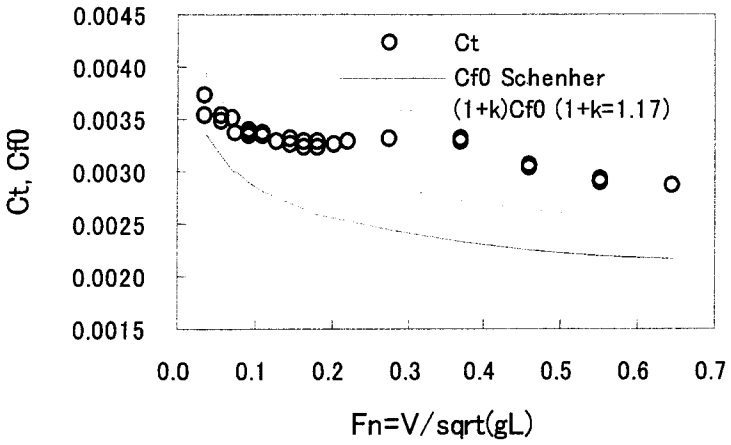


図 4.2.3.1 マイクロバブル実験用 12m 平板模型船の全抵抗曲線

(2) 気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減効果

模型船を速度 5m/s および 7m/s において曳航した状態で全抵抗を計測することにより、気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減率を計測した。計測された摩擦抵抗低減率は次のように表す。摩擦抵抗低減率の分母を占めるべき量は、船体の浸水表面のうち気泡で覆われた部分の摩擦抵抗であるべきである。気泡被覆部分は、実際は気泡吹き出し部から下流に、吹き出し部の幅よりも次第に広がるが、その分気泡が拡散されるため、両者の影響を相殺し

て、図 4.2.3.2 に示すように、気泡吹き出し部から下流に吹き出し部の幅のまま流れたと仮定して定める。その面積S_bは全船体浸水表面積の 39%である。そしてその部分の摩擦抵抗を Schoenherr の式を用いて求めて、気泡被覆部分の摩擦抵抗$R_{f_{bc0}}$とする。"*bc*"は bubble-covered の意味である。摩擦抵抗低減率の分子を占めるべき量は$\Delta R_{f_{bc}}$であり、全抵抗の低減量$(-\Delta R)$として計測される。以上により摩擦抵抗低減率が求まる。

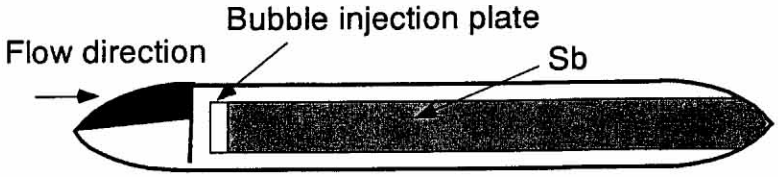


図 4.2.3.2 平板船の船底のうち気泡で覆われると期待される部分

このようにして求めた摩擦抵抗低減率を摩擦抵抗比$R_{f_{bc}}/R_{f_{bc0}}(=1-\Delta R/R_{f_{bc0}})$の形で図 4.2.3.3 に示す。横軸は、(4.1.3.2)式で定義された無次元吹き出し空気流量C_vを表す。なお、この場合C_vはt_a(mm)と$t_a=100C_v$の関係にある。この吹き出し空気量の範囲では摩擦抵抗低減率は線形に変化し、C_v=0.02 における摩擦抵抗低減率は、V=5m/s では約 30%、V=7m/s では 15%となり、高速ほど低減率が小さい。

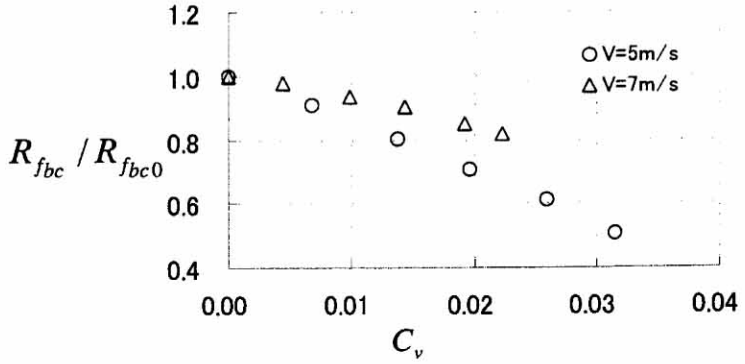


図 4.2.3.3 12m 平板模型船の気泡被覆部分における摩擦抵抗低減率

(3) 気泡吹き出しによる局所摩擦低減効果

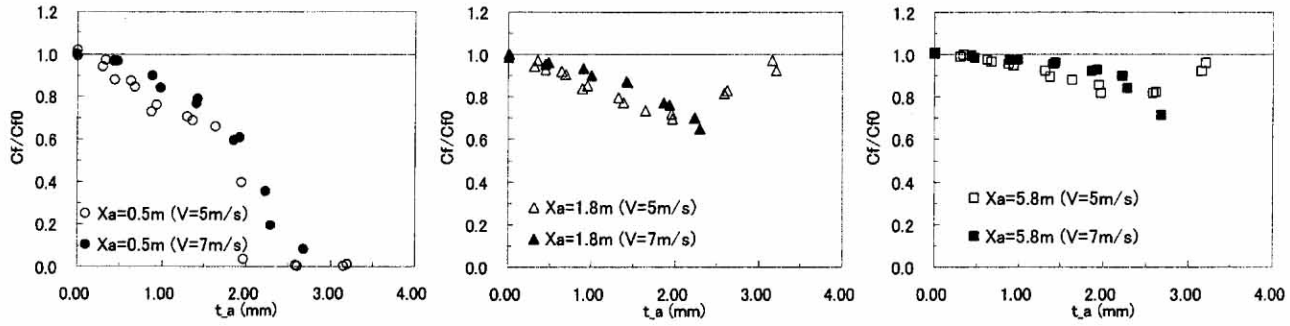
先ず、実験に使用した局所せん断力センサ S25W-10(定格容量 10g)の計測結果補正について説明する。実験終了後、このセンサにより計測された単相流時の壁面せん断応力値が 1/7 乗則に基づく値よりも、例えば速度 V=7m/s において約 2～3 倍大きいことが判明した。一方、同一位置で計測した S10W-2(定格容量 2g) による値は 1/7 乗則に基づく値とほぼ一致した。このことから、S25W-10 の計測結果を、同一計測位置および空気流量における

S10W-2 の計測値を真値として補正を行った(*Kodama, Y. et al, 2002*)。以後に示す計測値は全て補正後の値である。

気泡吹き出し時の、気泡吹き出し位置から 0.5m、1.8m、5.8m 下流位置における局所摩擦低減効果を図 4.2.3.4 に示す。速度は 5m/s 及び 7m/s である。横軸は、相当空気膜厚さ t_a(mm)である。縦軸は、泡ありなしの摩擦抵抗係数比 C_f / C_{f_0} である。図(a)の x_a=0.5m 位置では、速度 V=5m/s において吹き出し空気量が大きいところで局所摩擦が完全にゼロになっている。これは気泡吹き出し位置から伸びた空気膜が到達しセンサが覆われたためである。t_a=2mm 付近では、気泡の状態は気泡状態から気膜状態へと遷移するため気泡の流れの状態が不安定で、気泡状態では C_f / C_{f_0} が 0.4 程度であるが、気膜状態では 0 となる。速度 V=7m/s では空気膜は消滅したが、低減効果は非常に大きい。図(b)の x_a=1.8m 位置では、速度 V=5m/s において低減効果が吹き出し空気量が大きいところで減少に転じている。これは、x_a=0.5m 位置を覆った空気膜が千切れて、大きな空気の塊が飛来し、流れを乱したためである。速度 V=7m/s では、そのような傾向は無かった。図(c)の x_a=5.8m 位置においても同様である。

本研究によって得られた x_a=0.5m 及び 5.8m 位置での局所せん断力の低減効果を*渡邉ら(1998)*の結果と比較して図 4.2.3.5 に示す。共に多孔質板を使用し、速度は V=7m/s である。横軸の相当空気厚さ t_a の値は、それぞれの条件に応じて計算した。いずれの位置においても両者はよく一致しており、S25W-10 における感度補正の妥当性、計測結果及び相当空気厚さ t_a を使用することの妥当性を示している。

最後に、速度 V=7m/s における局所せん断力低減効果の x 方向分布を図 4.2.3.6 に示す。低減効果は、下流ほど低減し、P.1 から P.3 に対し半減しているものの、最下流端(x_a=5.8m)まで持続している。



(a) x_a=0.5m　　(b) x_a=1.8m　　(c) x_a=5.8m

図 4.2.3.4　12m 平板模型船における壁面せん断応力の低減。多孔質板。

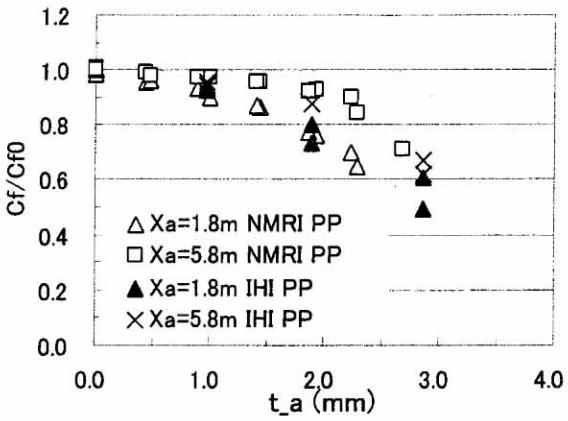


図 4.2.3.5 長尺平板船における局所せん断力低減効果の比較(NMRI:本研究、IHI:*渡邉ら 1998*)。共に多孔質板、速度 V=7m/s.

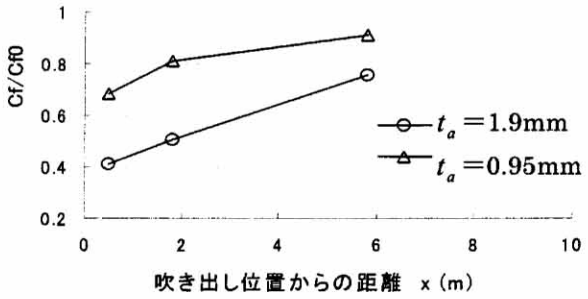


図 4.2.3.6 12m 平板模型船における局所せん断力低減効果の x 方向分布。V=7m/s

(4) 摩擦抵抗低減率と局所摩擦低減率の比較検討

せん断力センサを用いた局所摩擦の計測は、僅かな段差が大きな計測誤差を生むことや、容器内に気泡が混入し計測誤差となる可能性があるなど、計測に困難な点が多い。一方、船体抵抗を計測する抵抗動力計は、長い技術の蓄積により安定した高精度計測が可能である。従って、船体表面の局所摩擦の低減量を積分して船体抵抗の低減量と比較することは局所摩擦計測のかたより誤差の評価に役立ち、計測精度の良い検証となる。

局所摩擦の低減量の積分は、$(-\Delta C_f)/C_{f0}$を吹き出し部からの距離x_aの関数として最小 2 乗法により対数近似し、非気泡状態の局所摩擦係数C_{f0}を Schoenherr の式で表して$(-\Delta C_f)$を求め、それを船長方向にx_a=0.1m から船尾端x_a=9m まで積分し、幅方向には吹き出し幅B_a=0.5m の範囲で一定であり、その外では低減効果がゼロになると仮定して積分

した。すなわち局所摩擦低減の積分量 $(-\Delta R_{fbc})_{\text{int}}$ は

$$(-\Delta R_{fbc})_{\text{int}} = \frac{1}{2}\rho V^2 B_a \int_{0.1}^{9} (-\Delta C_f)\, dx_a \qquad (4.2.3.1)$$

$$(-\Delta C_f) = (\frac{-\Delta C_f}{C_{f0}})_{meas} C_{f\,Schoenherr} \qquad (4.2.3.2)$$

結果を図 4.2.3.7 に示す。横軸の $(-\Delta R)$ は直接計測された全抵抗の低減量であり、縦軸の $(-\Delta R_{fbc})_{\text{int}}$ と等しくなるべきである。気泡被覆部分の摩擦抵抗 $R_{f\,bc0}$ との比で表された両者は、V=5m/s で+12%、V=7m/s で-15%の誤差で一致している。図中には，比較のため*渡邊修ら(1998)*による長さ 20m 長尺模型船の結果(曳航速度 5m/s と 7m/s の両方)も示す。

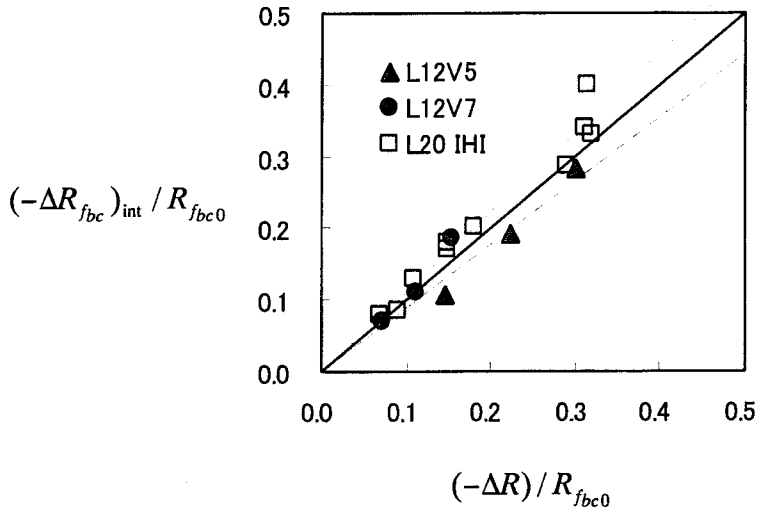


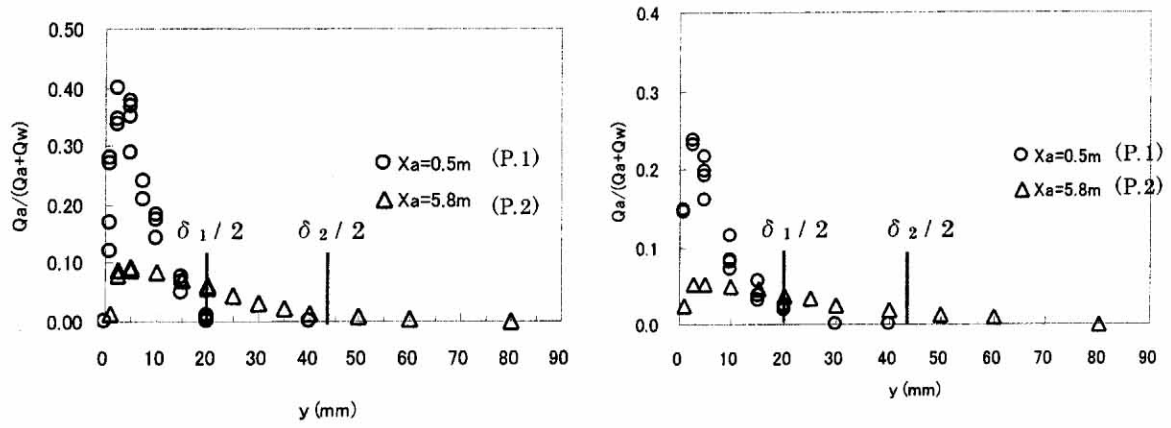
図 4.2.3.7 12m 平板模型船の局所摩擦低減の積分量と
全抵抗低減量との比較

(5) 局所ボイド率分布計測

前節に示した小型高速流路と同様に、局所ボイド率分布を x_a=0.5m 及び 5.8m 位置で計測した。曳航速度は V=7m/s、吹き出し空気流量は t_a=1.9mm に相当する Q_a=400L/min であり、1 点あたり 12 秒の計測時間をかけた。船底からの計測位置までの距離を変化させ、境界層外端まで計測した。なお x_a=0.5m(P1)及び x_a=5.8m(P3)位置における境界層厚さ δ はそれぞれ δ_1 =41.4mm、 δ_2 =89.3mm である。

計測結果を図 4.2.3.8 に示す。なお、後日配列多孔板を用いて同様な実験を実施したので、その結果も示す。横軸は計測位置における船底からの垂直方向距離 y を、縦軸は局所ボイド率 $Q_a/(Q_a+Q_w)$ を示す。先ず、多孔質板についての結果では、ボイド率分布は P.1 において船底付近にかたまっているのに対し、P.3 においては境界層内に拡散しており、小型高速流路における結果と同様、壁近傍の局所ボイド率が局所摩擦低減に関係していること

を示している。この 2 箇所では境界層厚さの半分で既に気泡はほとんど分布しておらず、気泡の境界層外への拡散はみられなかった。配列多孔板の結果についても同様なことが言えるが、両者を比較すると、似通った分布をしているが、配列多孔板の値の方が全体的に小さめの値となっている。この点について次に詳しく述べる。



(a) PP　　(b) AHP

図 4.2.3.8 12m 平板模型船における局所ボイド率分布計測 V=7m/s、t_a=1.9mm。

多孔質板 PP と配列多孔板 AHP のボイド率分布の積分量は、多孔質板の方が配列多孔板より大きく見える。そこで、4.1.3(5)節と同様に、ポンプに設置された流量計により計測された吹き出し空気総量Q_aと、ボイド率計測装置から吸い込んだ空気流量の境界層内積分量Q_sとを比較して計測精度の検証を行った。Q_sは気泡がスパン方向に吹き出し幅B_aの範囲で一様に分布すると仮定して、次式により求めた。

$$Q_s = B_a \int_0^{\delta} \alpha(y) u(y) dy \qquad (4.2.3.3)$$

その結果を表 4.2.3.1 に示す。PP 吹き出しの Xa=0.5m 以外の 3 点は、Q_s/Q_aがはほぼ 1 弱であり、気泡は幅方向に広がりながら下流に流れることを考えれば、計測結果もほぼ妥当といえる。しかしながら、PP 吹き出しのx_a=0.5m ではQ_s/Q_a=1.36 と吸い込み過多となっている。

表 4.2.3.1 空気吹き出し量とボイド率計測結果から求めた積分量の比較 (PP & AHP)

	Q_s/Q_a at x_a=0.5m	Q_s/Q_a at x_a=5.8m
PP	1.36	0.97
AHP	0.85	0.75

詳しく調べるため、図 4.2.3.9 に上記 4 計測点における各計測位置 H(すなわち y)におけるボイド率計測時の吸い込み速度を示す。各計測位置において実際に吸い込んだ水と空気

の総和から逆算し、プローブの吸い込み速度V_{meas}を求め、1/7 乗則により求めた目標吸い込み速度V_{aim}との比を調べた。PP のx_a=0.5m 以外の 3 点は、ほぼいずれの高さにおいても目標速度で吸い込んでいる。従って、ボイド率分布計測も正しく計測できていると考えられる。しかしながら PP のx_a=0.5m では、H=2.5mm 付近で大幅に吸い込み速度が大きくなっている。これが吸い込み空気量が多くなった原因と考えられる。ただし、吸い込み速度が計測位置の流速より速い場合、ボイド率計測結果に補正が必要あるか否かは明らかではなく、高ボイド率計測については、他のボイド率計測手法の結果と比較するなど更に検証が必要である。今回も 4.1.3(5)節の小型高速流路におけるボイド率計測と同様、今回も吸い込み流量による補正を行わないこととした。

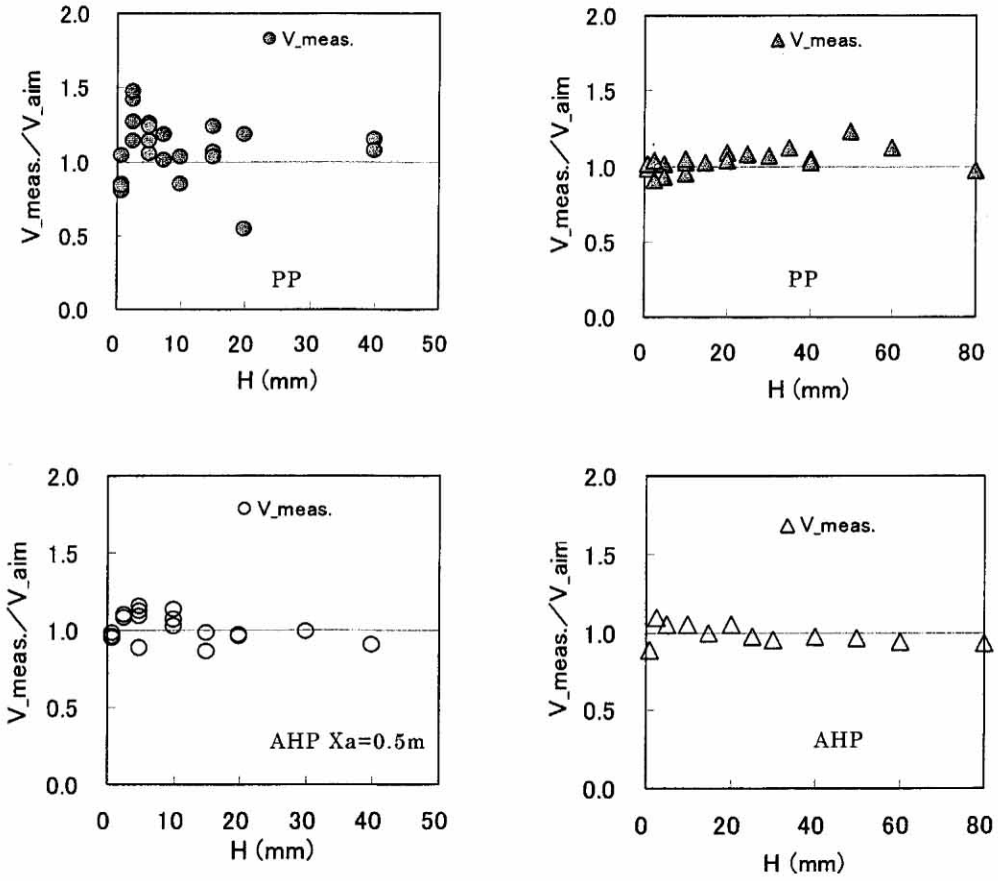


図 4.2.3.9　それぞれの計測位置における吸い込み速度

(6) 壁近傍ボイド率と局所摩擦低減効果の関係

前節において、壁近傍ボイド率と局所摩擦低減効果との間には強い正の相関があることを示したが、制限流路影響補正を行ったデータについてであった。ここで、本実験結果を用いて、制限流路影響の無い場合について、同様な関係が成り立つかどうか調べる。多孔質板 PP と配列多孔板 AHP を用いて、空気吹き出し量 400L/min の状態で、x_a=0.5m、x_a=5.8m の 2 箇所について壁近傍のボイド率分布と局所摩擦低減効果との関係を調べた。

*Yoshida, Y. et al. (1998a)*に倣って、壁近傍のボイド率は$y^+ \leq 1000$の平均ボイド率とした。y^+=1000 および境界層厚さδの実値を表 4.2.3.2 に示す。y^+=1000 は乱流領域にあり、

これくらいより外側が境界層外層となる。気泡径は、ほぼ直径 2mm 程度（ビデオ撮影結果から）であり、ボイド率分布のピークも壁から 5mm 弱のところであることを考えると、壁近傍の定義として y+=1000 は適当と考えられる。

表 4.2.3.2　x_a=0.5m と x_a=5.8m における y^+=1000 と境界層厚さ δ の実値

x_a	0.5m	5.8m
y^+=1000	4.9mm	5.3mm
δ	41.4mm	89.3mm

壁近傍 $y^+ \leq 1000$ の平均ボイド率と C_f/C_{f0} の関係を図 4.2.3.10 に示す。また、ボイド率のピーク値と C_f/C_{f0} との関係も示した。それらのボイド率と C_f/C_{f0} の低減量との間には明らかに相関があることが分かる。

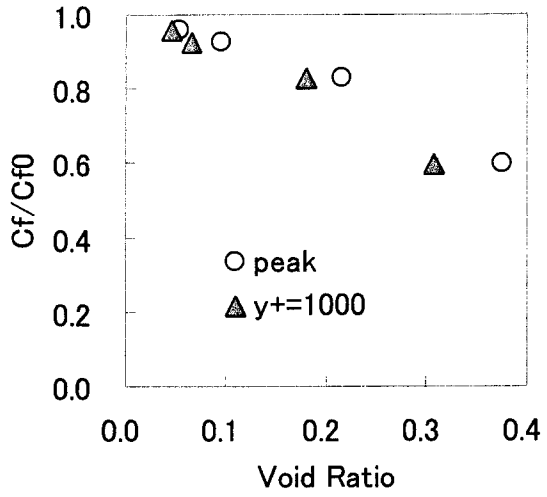


図 4.2.3.10 壁近傍平均ボイド率と局所摩擦低減率の関係

4.2.4 結論

12m 平板模型船を用いたマイクロバブル実験から以下の結論を得た。

・実験に用いた 12m 平板模型船は形状影響係数が$1+K=1.17$と摩擦抵抗成分が大きく、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験に適した船型である。

・マイクロバブルによって、気泡に覆われた部分の摩擦抵抗の低減率は最大 50%程度に達したと推定される。

・同一の有次元空気吹き出し量t_aにおいて、摩擦抵抗低減量は速度 V=5m/s が V=7m/s より効果が高いことがわかった。船底の被覆面積の広がりと気泡の境界層内への散逸とによると考えられる。

・マイクロバブルによる局所摩擦低減率は、小型高速流路における値と同様な傾向を示し、IHI における計測結果と良く一致した。

・マイクロバブルによる局所摩擦低減率の計測精度は、積分量と摩擦抵抗低減量との比較や他水槽の実験結果との比較等により、十分高いことが分かった。

・マイクロバブルによる抵抗低減効果は、壁近傍平均ボイド率と強い相関のあることがわかった。

・局所ボイド率分布の計測結果によれば、ボイド率分布は下流にすすむと深さ方向に拡散し壁付近の気泡の割合は減少することが分かった。

4.3 50m 平板模型船を用いた摩擦抵抗低減効果の長手方向持続性の調査

4.3.1 はじめに

前節では、長さ 12m の長尺平板模型船を用いてマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果の空気吹き出し位置から下流方向の持続性を調べた結果を示したが、大型船に適用した場合の低減効果を推定するためには、まだ長さが不足している。そこで本節では、海技研の 400m 曳航水槽の大きさを生かして、平行部を追加し、長さを 50m にしてマイクロバブル実験を実施した結果について述べる。長尺模型船を用いたマイクロバブル実験の必要条件は、発生気泡が船底を安定した状態で船尾端まで流れ、その気泡流れが再現性のあることである。模型船の長さが約 50m と極端に長い場合、模型船の取り扱いを容易にするための軽量化と模型船の変形を防ぐための構造強度確保とが必要となる。*渡邊ら(1998)*は、長さ 40m 幅 0.6m の長尺平板模型船を、模型船本体部分に硬質ウレタンを用いて軽量化し、構造強度確保のためアルミ強度部材で補強して製作した。また気泡生成部幅は 0.25m としている。しかし気泡が最下流まで船側から逃げてしまうことなく流れるためには幅ができるだけ大きいことが望ましい。また、長尺模型船を用いた実験を行うことは、小型高速流路において詳細計測および計測装置の開発・検証を行い、長尺模型船において小型高速流路で開発した計測装置を用い、実用化のための実験を行うことにより、再度改良点を小型高速流路で基礎実験を行うことで、基礎的研究から実用化研究までフィードバックを繰り返し研究を実施できるという利点もある。そこで本研究では、海技研曳航水槽の長さ 400m を考慮して、模型船の長さを可能な限りの 50m 長とし、トリミングタンク幅 1.2m を考慮して、模型船の幅をできるだけ広く 1.0m 幅とした。気泡生成部幅は、船幅半幅の 0.5m とし、タンカーなどの平底を模擬し、平底の平板船とした。また、データの信頼性についての検証、他水槽の実験結果との比較(*渡辺ほか 1998, Tokunaga,K 1986*)、等による考察を加えた。本節の記述内容は*高橋孝仁他 (2002)*に示した研究を中心にしている。なお尺度影響とは、気泡による局所摩擦低減効果の吹き出し位置から下流方向の持続性と、気泡による全抵抗低減率の物体の大きさによる変化を意味する。

4.3.2 試験装置概要

本実験は、海技研の 400m 試験水槽において、長さ 12m 平板模型船の平行部分を延長した 50m 長平板模型船を用いて行った。図 4.3.2.1 に 50m 平板模型船の平面図を示す。長さ 50m、幅 1m、喫水 45mm であり、船底は、大型肥大船のそれを模擬して、平坦且つ水平とした。

気泡の生成には、12m 平板模型船では多孔質板(Porous Plate、略称 PP)のみを用いたが、ここでは空気吹き出し板の種類による摩擦抵抗低減効果の違いを調べるため、さらに配列多孔板(Array-of-Holes Plate、略称 AHP)を用いた。その寸法は、いずれも横幅 B_a=500mm、長さ L_a=100mm である。多孔質板は、小型高速流路で用いられたものと同じく、公称孔径 2μm のブロンズ焼結金属製である。配列多孔板も、小型高速流路で用いられたものと同じく、板に垂直に孔径 1mm の孔が、幅方向に 3mm 間隔、流れ方向に 5mm 間隔で千鳥配置状に明けられており、孔の総数は 3300 個である。2 種類の吹き出し板は船首端から 3m の位置に隣り合わせに設置され、吹き出し板を容易に切り替えられるようにした。1

対の吹き出し板は、吹き出し位置における境界層厚さの影響を調べるため、船首端から31m の位置にも設置された。

局所摩擦力の計測は、小型高速流路で用いたものと同じ(株)三計エンジニアリング製のS10W-2（直径 10mm、定格容量 2g）を用いて行った(*Kodama et al, 2002*)。センサは、全長にわたり基本的には4m 毎に開口した計測窓があり、そこに着脱可能である。図 4.3.2.1 に示したセンサ位置は、第 4.4.3(6)節の実験時の設置場所で、吹き出し板からの相対位置を 12m 平板模型船のそれと同一に保つため、船首端から 3.5m(P1)、4.8m(P2)、8.8m(P3)、及び 31.5m(P4)、32.8m(P5)、36.8m(P6)の 6 カ所の場合を示している。

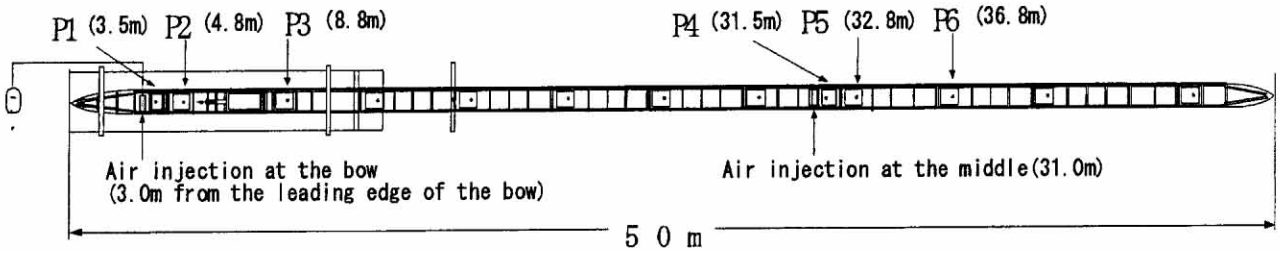


図 4.3.2.1　海技研における長さ 50m のマイクロバブル実験用平板模型船

4.3.3 実験結果

(1) 抵抗試験

50m 平板模型船の抵抗特性を調べるため、非気泡状態において、通常行われている抵抗試験を行い、形状影響係数 k を求めた。結果を図 4.3.3.1 に示す。12m 平板模型船の図 4.2.3.1 と比べて、ハンプ、ホローが殆ど無い分布をしている。低速の 2 点において小さな値をとるのは、乱流が十分に発達していないためと思われる。形状影響係数 k は、プロハスカの方法により、0.15 と算出された。12m 船と同様、摩擦抵抗成分が大きく、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験に適した船型である。

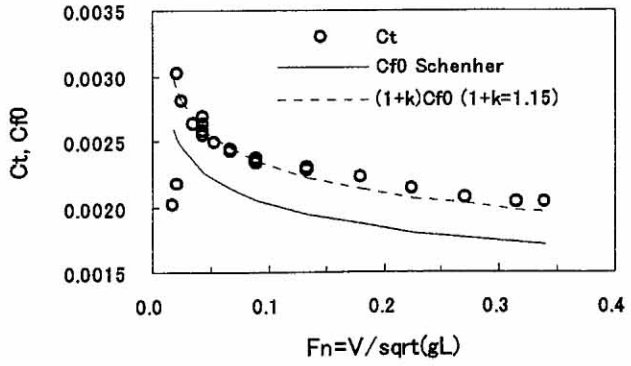


図 4.3.3.1 マイクロバブル実験用 50m 平板模型船の全抵抗曲線

(2) 気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減効果

模型船を速度V=5m/sおよび7m/sにおいて曳航した状態で全抵抗を計測することにより、気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減率を計測した。配列多孔板から空気を吹き出して計測された摩擦抵抗低減率を、12m平板模型船と同様、気泡被覆部分の摩擦抵抗に対する比である摩擦抵抗比$1-\Delta R/R_f$の形で図4.3.3.2に示す。横軸は相当空気膜厚さt_a(mm)である。なお、計測は平成11年と12年の2回行われ、それらは別記号で表示されている。実験の再現性は良い。いずれの速度においても、摩擦抵抗低減率は吹き出し空気量とほぼ線形の関係にあるが、V=5m/s においては最後のあたりでやや飽和傾向が見られる。2 速度を比較すると、低速の速度V=5m/sの方が速度7m/sよりも高い摩擦抵抗低減率を示す。

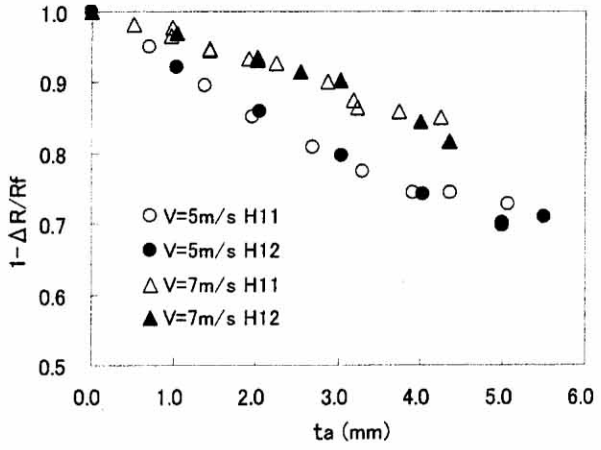


図 4.3.3.2　50m 平板模型船の気泡被覆部分における摩擦抵抗低減率 (AHP 前方吹き出し)

この 50m 平板模型船の結果に、前節の 12m 平板模型船、さらに *Tokunaga, K. (1986)* 及び*渡辺修ら (1998)*の 2 隻を加え、異なる長さの 4 隻の平板船における摩擦抵抗低減効果の比較を図 4.3.3.3 に示す。気泡の生成は、12m 平板船では多孔質板(PP)を、50m 平板船では配列多孔板(AHP)を使用している。*Tokunaga* は、長さ 3.5m、幅 0.9m、厚さ 6mm の平板を曳航し、気泡の生成に公称孔径 0.5μm 多孔質板 PP を用いた。*渡辺修ら* は、長さ 20m 及び 40m、幅 0.6m の平板模型船を曳航し、気泡の生成に公称孔径 15μm の多孔質板を用いた。曳航速度は、*Tokunaga* の平板のみ V=8m/s、残る長尺模型船 3 隻は V=7m/s である。結果は、全体として船長が短いほど摩擦抵抗低減効果が高い傾向を示す。これは、平板が長いほど、縦軸の分母が大きくなり、分子が表す低減効果は主に吹き出しの下流数 m に存在するので長さにあまり依存せず、結果として両者の比である変化率が小さくなるためと考えられる。ただし、40m 平板模型船の摩擦抵抗低減効果は、ほぼ長さの等しい 50m 平板船よりも 12m 平板船の結果に近く、これは長さの影響の他に、気泡生成方法である配列多孔板と多孔質板の相違によると思われ、多孔質板は配列多孔板よりも摩擦抵抗低減効果が大きいことになる。この点については局所摩擦力の項でさらに検討する。抵抗低減率が最小である 50m 平板模型船においても、速度 V=7m/s において最大 22%の摩擦抵抗低減率が得られた。この高い低減率は、マイクロバブルの実用化の可能性があること

を示唆している。

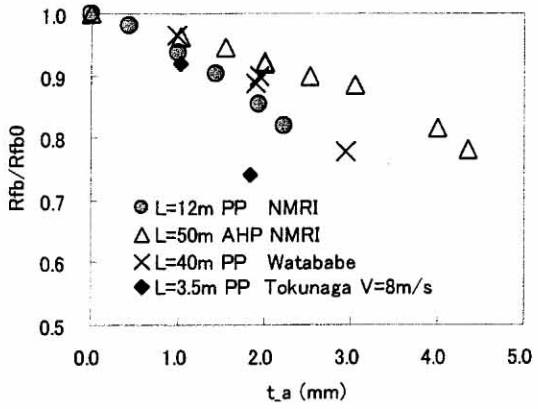


図 4.3.3.3 長さの違う場合の摩擦抵抗低減率の比較
NMRI (12m.50m). *Watanabe* (40m) and *Tokunaga* (3.5m)

(3) 局所摩擦低減効果の流れ方向分布

長さ 50m 平板船において局所摩擦が、船首の配列多孔板から気泡を生成した場合に、気泡生成部から下流にどのように変化するか調べた。速度 V=7m/s における船首部吹き出しの結果を図 4.3.3.4 に示す。同じ図に*渡辺修ら (1998)*の 40m 平板船において多孔質板を用いた結果も示す。横軸は、気泡生成部からの距離を示す。

いずれの平板船においても吹き出し直後から x_a=1.8m までは高い低減率を示すが、x_a=5.8m 位置で既に半減し、さらに下流に行くほど低減効果は減少する。しかし、相当空気膜厚さ t_a=4mm において、気泡生成部より 40m 以上下流においても、約 2%と小さいながら抵抗低減効果が見られた。従って、実船において気泡発生部は長手方向に限られた数だけ設置すればよいと考えられる。50m 平板船の t_a=2mm と*渡辺*らの多孔質板の t_a=1.9mm を比較すると、多孔質板(PP)吹き出しの方が、配列多孔板(AHP)吹き出しより抵抗低減効果が大きくなっている。この傾向は図 4.3.3.3 に示した摩擦抵抗と同じ傾向であり、両者は多孔質板が配列多孔板よりも大きな摩擦抵抗低減効果をもつことを示している。

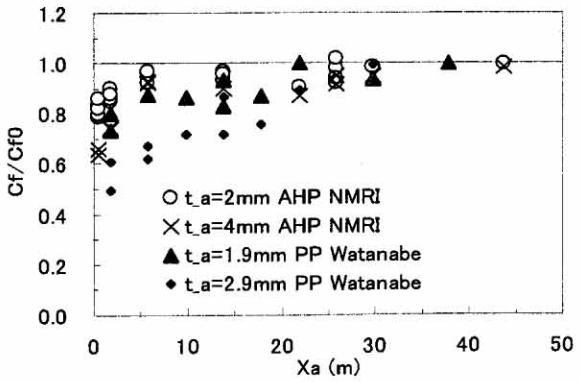


図 4.3.3.4 50m 平板船における局所摩擦低減分布。V=7m/s。
(*NMRI,配列多孔板 AHP* : *Watanabe,多孔質板 PP*).

(4) 摩擦抵抗低減率と局所摩擦低減率の比較検討

第 4.2 節で 12m 平板模型船について行ったと同様、50m 船について船体表面の局所摩擦の低減量を積分して船体抵抗の低減量と比較した。結果を図 4.3.5.1 に示す。図中の記号は、例えば L12V5 は、平板船長さ L=12m、速度 V=5m/s の結果を示す。図 4.2.3.7 にも示したが、12m 平板船の結果は、速度 5m/s、7m/s いずれにおいても局所摩擦低減量の積分値 $(-\Delta R_{fbc})_{\mathrm{int}}$ と全抵抗の低減量 $(-\Delta R)$ すなわち摩擦抵抗低減量とは良好な一致を示している。50m 平板船では、$(-\Delta R)$ は $(-\Delta R_{fbc})_{\mathrm{int}}$ に対して約 70%と低めに出ている。これは、下流に行くに従い気泡幅が広がっていることがビデオ撮影により確認されたが、$(-\Delta R)$ には気泡被覆部の広がりの影響が計測値に含まれているのに対し、$(-\Delta R_{fbc})_{\mathrm{int}}$ にはその影響が算出の際に入れられていないためと思われる。また詳細に見ると、12m 平板船、50m 平板船のいずれについても、速度 7m/s の方が速度 5m/s より $(-\Delta R)$ と $(-\Delta R_{fbc})_{\mathrm{int}}$ はよく一致しており、これも速度 7m/s の方が気泡の広がりが少ないということが原因と考えられる。図中には IHI の結果も示した。IHI の結果は、船長の区別のみを示し曳航速度の 5m/s と 7m/s の違いが示されていない。IHI の結果も同様であり、長さの短い 20m 模型船の方が 40m 模型船よりも $(-\Delta R)$ と $(-\Delta R_{fbc})_{\mathrm{int}}$ は一致している。以上により、気泡の広がりを考慮に入れれば、局所摩擦計測の結果は全摩擦計測の結果とほぼ一致し、局所摩擦計測結果は妥当であったと考えられる。

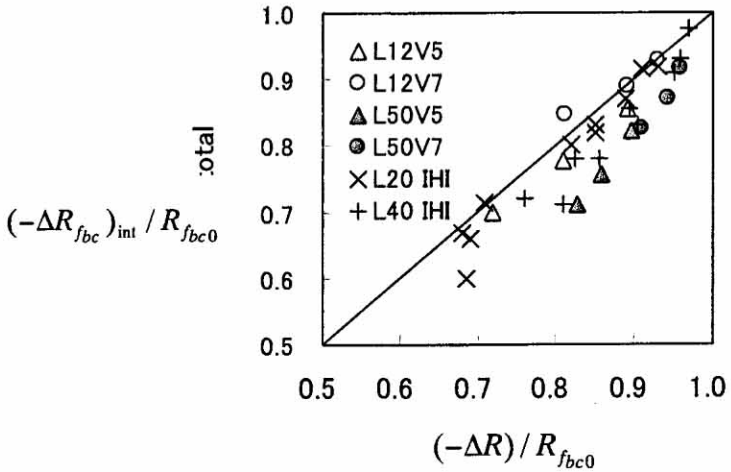


図 4.3.3.5　局所摩擦力の積分量と全摩擦抵抗低減量の比較

(5) 境界層厚さが局所摩擦低減効果に及ぼす影響

速度 V=7m/s 時の 50m 長尺平板模型船において、図 4.3.2.1 に示すように、船首部近傍と船体中央部の配列多孔板の 2 箇所それぞれから気泡を吹き出し、局所摩擦低減効果の違いを調べた。速度の 1/7 乗則に基づいて推定した気泡吹き出し位置における境界層厚さ $\delta = 0.14xR_{ex}^{-1/7}$ は、それぞれ δ_{bow} =38mm、δ_{middle} =280mm である。結果を図 4.3.3.6 に示す。横軸は相当空気厚さ t_a である。両者の差は小さく、局所摩擦低減効果に対する吹き出し位置の境界層厚さの影響は小さいことが分かる。このことは、4.1.3.1 節で議論したように、*Merkle and Deutsch 1990* が用いた境界層内の平均ボイド率が吹き出し空気量の適切な無次元化ではないことを示している。

図において船首吹き出しと船体中央吹き出しの局所摩擦低減率を詳細に比べると、一貫して船体中央吹き出しの方がわずかに大きい。これは、船体中央部では吹き出し位置が厚い境界層に覆われて局所的な流速が遅くなっており、従来から知られている低速ほど低減効果が大きいことと同じ作用により生じていると考えられる。ただし、厚い境界層位置では局所摩擦の絶対値が相対的に小さいので、厚い境界層がある位置で気泡を吹き出した方が高い摩擦抵抗低減効果が得られるとは限らない。

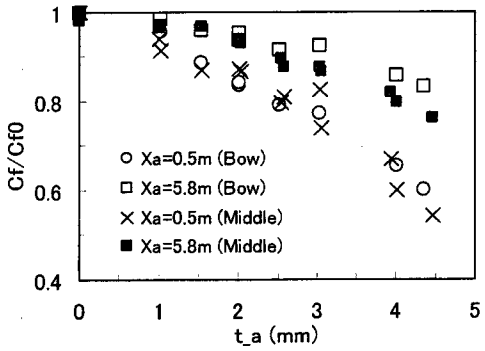


図 4.3.3.6 50m 平板模型船における Bow 吹き出し(x=3m)と Middle 吹き出し(x=31m)との局所摩擦低減率の比較。配列多孔板。V=7m/s

(6)空気吹き出しの最適配置

空気吹出し位置近くは、低減効果が大きく、後方に行くと低減効果が小さくなるため、全体の気泡吹出し量を一定とした時に、吹出し装置を長手方向のどの位置に何箇所配置すれば最も抵抗低減効果が大きいかという最適解が存在するものと推測される。

実験結果を用い 1 例について試算した。船首 1 箇所から吹き出した場合と船首及び中央の 2 箇所から同時にその半分の空気量を吹き出した場合を比較する。総空気流量は船尾端でも低減効果の確認できた t_a=4mm とする。センターライン上の局所摩擦低減率は、実験結果から図 4.3.3.7 のとおりとなる。局所摩擦抵抗を長さ方向に積分した前述の図 4.2.3.2 の気泡被覆範囲おける総抵抗低減量は、1 箇所吹き出しの場合 81N で、2 箇所吹き出しの場合、船首吹き出しで 41N、中央吹き出しで 37N、計 78N となり、1 箇所吹き出しの方が抵抗低減効果が高くなる。ただし、抵抗低減効果の重ね合わせについて不明であるため

中央単独吹き出しによる低減量をそのまま加算した。本試算では、１箇所吹き出しの方が若干抵抗低減効果は大きくなったが、平底船の１例に限るため、実用化にあたっては最適解をその都度検討する必要はある。

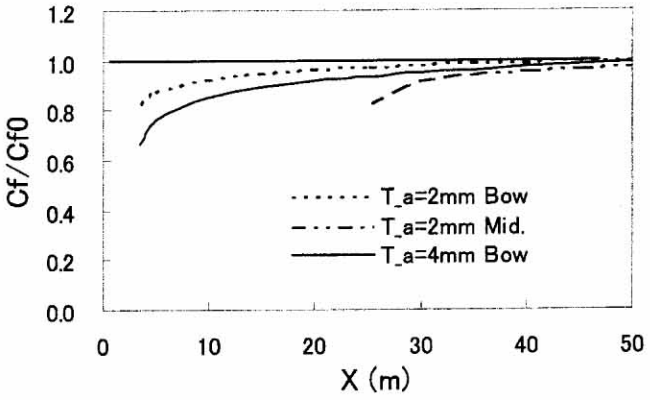


図 4.3.3.7 50m 平板模型船における１箇所（Bow 吹き出し x=3m）と２箇所（Bow 吹き出し x=3m と Middle 吹き出し(x=31m)との局所摩擦低減効果の比較。配列多孔板、V=7m/s

4.3.4 結論

マイクロバブル法の実船への適用性を検討するために、長さ 50m 長尺平板船を用いてマイクロバブルの尺度影響調査を行い、以下のことがわかった。

- 摩擦抵抗は、曳航速度 7m/s の場合、空気流量厚さ 4.4mm において、最大約 22%と大きな低減効果が得られ、実船スケールでの実用化が可能であることが分かった。
- 局所せん断力センサにより直接計測された局所摩擦抵抗の分布から、空気流量厚さ 4mm において、船首端より 40m 下流でも約 2%の抵抗低減効果があることが確認された。
- 空気吹き出しデバイスは、多孔質板の方が配列多孔板よりも同じ空気流量で高い低減効果が得られた。
- 空気吹き出し位置を変更して計測した結果、摩擦抵抗低減効果への境界層厚さの影響は小さく、従来用いられてきた吹き出し空気量の無次元量である境界層中の平均ボイド率は適切でないことが分かった。
- 空気吹き出しの最適配置について、空気総量を同一にした吹き出しで、船首１箇所および船首と中央の２箇所の吹き出しの場合を比較し、船首１箇所吹き出しの方が若干低減効果が大きかった。

4.4 50m 長尺平板模型船における 3 種類の吹き出し方法の比較

4.4.1 はじめに

摩擦抵抗低減手法の一つであるマイクロバブルを船舶へ実用化するためには、効果の高い気泡生成方法が求められている。現在おもに使われている方法は、小さな孔の開いた気泡生成板から空気をせん断流中に吹き出して気泡を生成する方法で、その板には多孔質板または配列多孔板がある。両者の摩擦低減効果は、異なる水槽実験結果の比較であるが前述の図 4.3.3.4 に示したように、多孔質板の方が配列多孔板より摩擦低減効果が約 2 倍も高い。ここでは、長さ 50m 幅 1m の平板船を用いて、この 2 枚の板について摩擦低減効果の検証と全抵抗も同様に 2 倍近く低減するか調べた。さらに、吹き出し方法には、スリット板を加え、合計 3 種類の吹き出し法について抵抗低減効果を調べた。また、従来は平板船のセンターライン上のみで行っていたせん断力計測を幅方向にも行い、摩擦抵抗低減効果の 3 次元影響を調べた。3 種類の気泡生成板について、摩擦抵抗低減効果による仕事量低減と気泡生成に必要な吹き出し圧力による仕事量増加の両者について、総合的な仕事量低減効果について評価した。(*高橋他 2003b*)

4.4.2 試験装置概要

実験は、海上技術安全研究所(National Maritime Research Institute、以下 NMRI)の 400m 試験水槽において 50m 平板模型船を用いて行った。図 4.4.2.1 に 50m 平板模型船の平面図を示す。せん断力センサを図中 P1 から P10 のように設置している。気泡の生成は、船首船底に配置した多孔質板(Porous Plate、略称 PP)あるいは配列多孔板(Array-of-Holes Plate、略称 AHP)を通し、空気を水流中へ吹き出すことで行った。

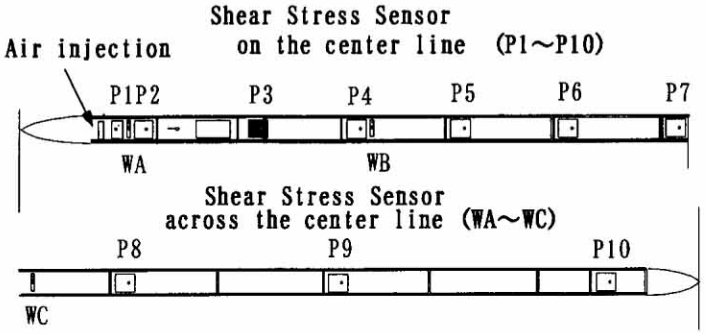


図 4.4.2.1 海技研における長さ 50m のマイクロバブル実験用平板模型船.

板のサイズは、いずれも横幅 500mm、長さ 100mm、厚さ約 4mm である。PP はブロンズ製焼結金属製で公称孔径 2μm である。AHP では、板に垂直に直径 1mm の孔を幅方向 3mm、流れ方向 5mm の千鳥配置間隔で総数 3300 個開けた。スロット板(略称 SP)では、長さ方向 5.2mm、幅方向 500mm の隙間開け、開口面積が AHP と同一となるようにした。図 4.4.2.2 に吹き出し板の写真を示す。

船体は、8m 毎に 1 ブロックとした分割模型であり、それぞれの連結部の船底段差を±0.5mm となるよう調整した。

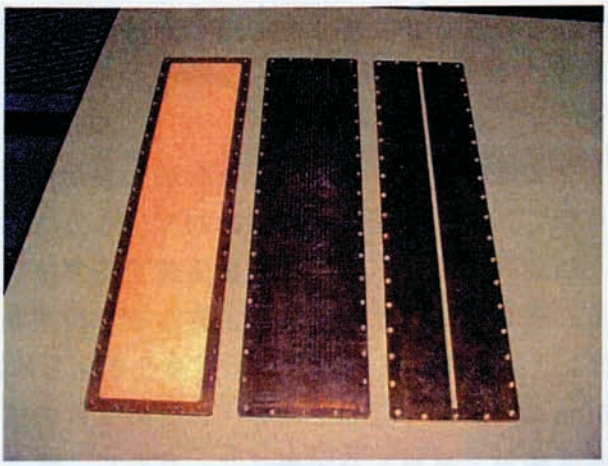


図 4.4.2.2 3 種類の空気吹き出し板（左から PP,AHP,SP).

せん断力の計測は、市販の水用剪断力センサ S10W-2（直径 10mm、定格容量 2gf）を用いて行った。摩擦力を直接計測するフローティングエレメント方式であり、受感面と周りの隙間 0.5mm、受感面の出っ張りは 20μm 以下となるよう設計されている。

空気流量の計測には、マスフローコントローラーを用いた。実検定によりカタログ精度(1%以内)を確認した。空気流量表現には、相当空気膜厚さ t_a(mm)=Qa/(BV)、(Qa 空気流量、B 吹き出し部幅、V 曳航速度）を用いた。

4.4.3 実験結果

(1)局所せん断力センサの検定

10 数台の水用せん断力センサ(容量 2gf)の水流中検定を小型高速流路において行った。Blasius の理論式と比較し、理論値に対し 0.7～1.25 倍の範囲にある正常と考えられる 8 台を選んだ。理論値に近い値を示すセンサから順に、船首側から取り付けた。計測位置は、P1 から P10 の 10 箇所であるが、正常なセンサを入れ替えることで 10 箇所すべて計測した。P1 は吹き出し部から Xa=0.5m、後は順に 4m 毎に P8 まで、P9=33.8m、P10=43.8m である。

幅方向にも剪断力センサの取り付け箇所を設けた。長手方向は、WA、WB、WC の 3 箇所とし、WA は、Xa=1.15m、WB は、Xa=10.5m、WC は Xa=22.5m とした。幅方向位置は、センターから右舷側に 125mm、及び 375mm とした。

(2)局所摩擦抵抗係数の長手方向分布

長さ 50m 平板船において局所摩擦抵抗が、気泡吹き出し部以後の船長方向に対しどのように変化するか調べた。

速度 5m/s、7m/s、空気流量 t_a=2mm、3mm において計測を行った。速度 7m/s の結果を図 4.4.3.1 に示す。横軸は、船首気泡吹き出し部 Xa からの距離を示す。縦軸は、気泡なしの局所摩擦抵抗係数 CF0 に対する気泡ありの比 Cf/Cf0 を示す。但し、無次元化に使った密度 ρ は気泡ありなしに関わらず水の密度で一定とする。

PP の方が AHP より抵抗低減効果が約 2 倍近く高く、従来見られた（*高橋孝仁他 2002*）

Xa=5m 付近で大きく波打つような結果にはならず、吹き出し近傍ほど抵抗低減効果は高たった。

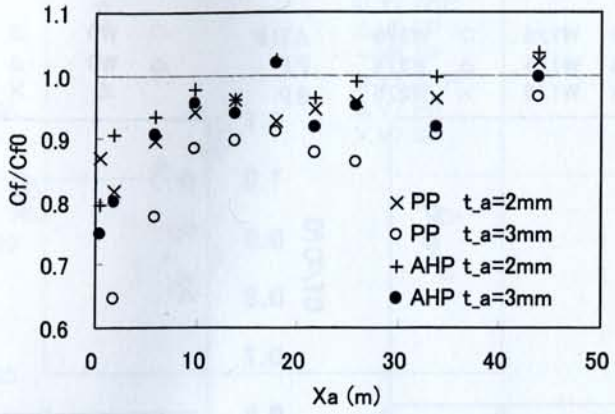
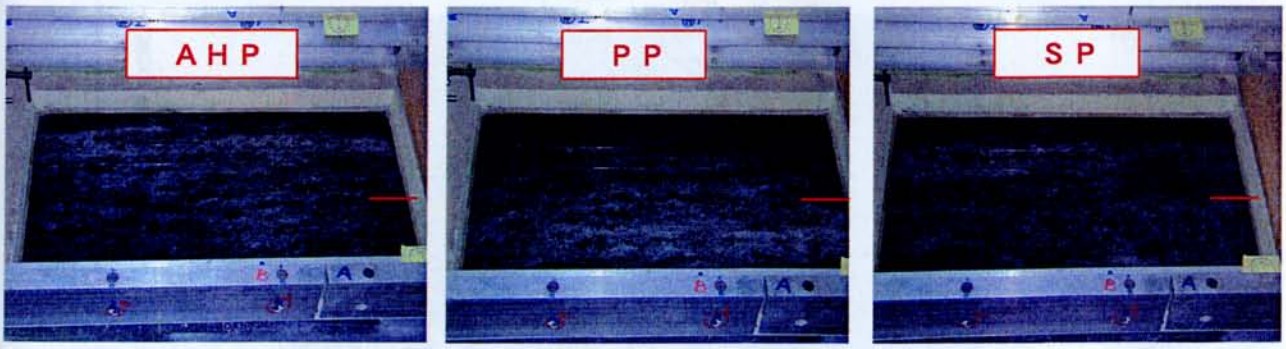


図 4.4.3.1　50m 平板模型船における壁面せん断応力低減分布。V=7m/s.

図 4.4.3.2 に速度 7m/s、t_a=2mm の時の吹き出し後、P3 の直前の長窓において撮影した気泡の流れの状態を示す。窓の手前側（右舷）は、移って以内船体センターラインを短い赤線で示している。SP においても気泡は生成できている。PP においてやや幅方向の中央に沿って、気泡が集中しているようである。



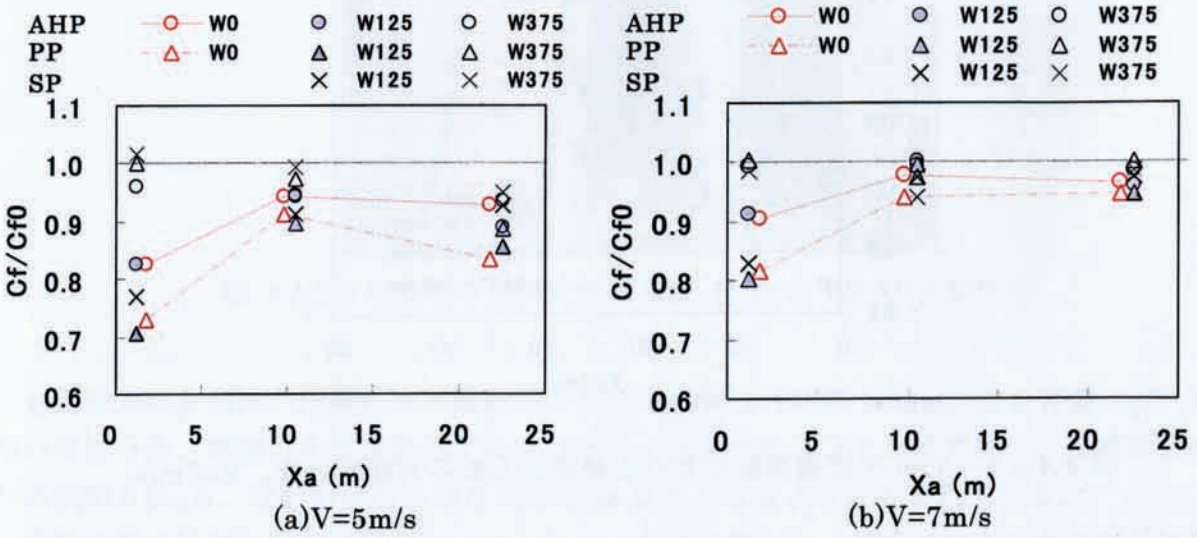
V=7m/s、 ta=2mm

図 4.4.3.2　P3 の上流の観測窓から見える気泡流れ。(流れは右から左)

(3)局所摩擦抵抗係数の幅方向分布

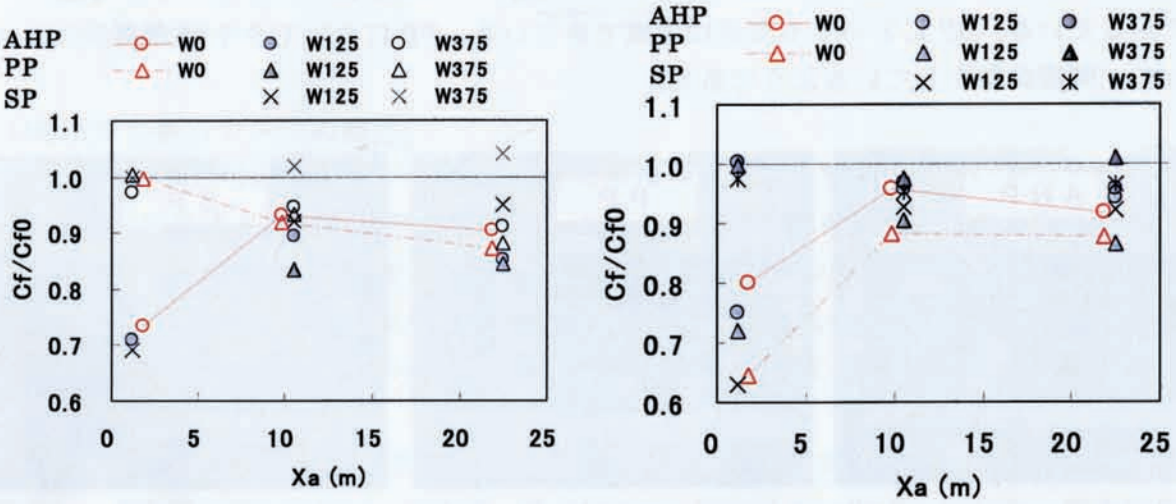
幅方向の局所摩擦低減率を求めた.結果を図 4.4.3.3 に示す空気吹き出し流量はt_a=2mm と 3mm,速度 7m/s とした。図中 W125 は、右舷側 125mm 位置、W375 は、右舷側 375mm 位置を示す。吹き出し板は、片側 250mm までであり、吹き出し直後 WA=1.15m では、明らかに W125 で抵抗低減効果が現れるものの、W375 で吹き出し幅より外側であるため気泡が流れておらず低減効果もない。WB=10.5m 以降では、気泡は幅方向全面に広がり、

W125 と W375 もほぼ同程度の抵抗低減効果を示す。さらに SP の結果も示した。吹き出し直後では、PP と SP の抵抗低減効果が高いが、以降はほぼいずれの吹き出し方法も計測幅方向位置も低減効果は同程度であった。



(a)V=5m/s　　(b)V=7m/s

図 4.4.3.3　50m 平板模型船における幅方向の壁面せん断応力低減分布。配列多孔板 t_a=2mm.



(a)V=5m/s　　(b)V=7m/s

図 4.4.3.4　50m 模型平板船における幅方向の壁面せん断応力低減分布。配列多孔板 t_a=3mm

(4)全抵抗低減計測

速度 5m/s および 7m/s、吹き出し方法を AHP、PP に加え SP の 3 種類において、空気流量 t_a を変更し全抵抗を計測した。結果は、いずれの吹き出しも全抵抗低減効果はほぼ等しくなった.センターライン上の抵抗低減効果とは直接関係なかった。また速度 5m/s では最大約 13%と低減効果に飽和状態があることを認めた。ある程度以上の空気流量は、吹き

出し直後、空気膜状となり空気が船側から逃げやすくなり、その分抵抗低減率は、下がると考えられる。

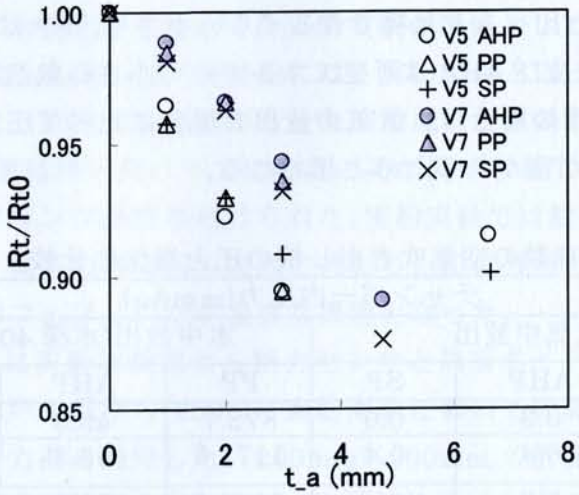


図 4.4.3.5　気泡被覆部分の摩擦抵抗低減効果（3 種類の気泡吹き出し板の比較）

(5)船底を流れる気泡の様子

撮影位置 P1、速度 5m/s、t_a=1mm の時の気泡の写真を図 4.4.3.6 に示す。流れは紙面上方から下方へ流れる。白い升目は 10mm 角である。気泡は、直径 2～3mm のものが多く見られる。また数 cm ごとに筋状に流れている事がわかる。これは以降の窓、例えば P2 と P3 の間の大窓、においていずれの吹き出し方法でも同様の筋状流れが見られた。

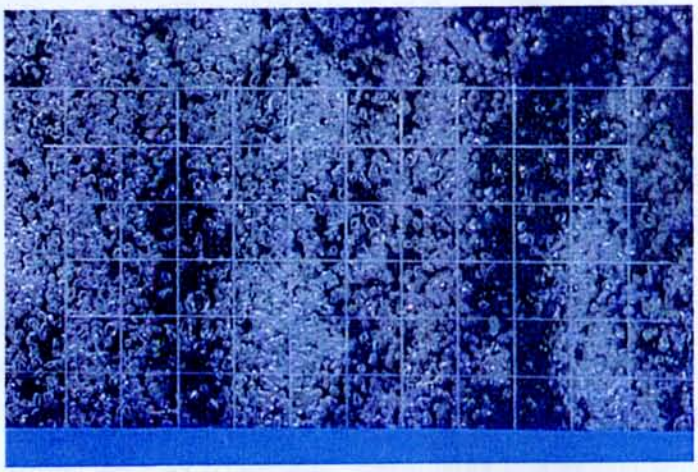


図 4.4.3.6　P1 位置(x_a=0.5m)における気泡の写真。V=5m/s 、t_a=1mm.

(6)3 種類の空気吹き出し板の圧力損失の比較

孔の開いた板を通じて空気を吹き出すとき、板を横切って圧力差(損失)が生じる。この圧力差は、気泡発生に必要なエネルギーを生じるため、出来るだけ小さい方がよい。曳航水槽実験で用いた空気吹き出しチャンバーを模型船から取り外し、PP、AHP、SP のそれぞれを取り付けた状態で、1 気圧状態の大気中、あるいは曳航水槽実験と同じ深度 40mm

の静止水中に空気を噴出し、吹き出し空気流量を変化させてチャンバー内圧力(すなわち圧力損失)を計測した。その結果を表 4.4.3.1 に示す。吹き出し空気流量の 420 は、速度 V=7m/s の場合、t_a=2mm に相当する。大気中噴出および水中噴出のいずれの場合も、AHP と SP の圧力損失は PP のそれと比べると無視できるぐらい小さく、SP は AHP よりも僅かに小さい。このことから、SP 及び AHP は所要エネルギーの小さい気泡発生方法であると言える。PP について水中放出の場合は、大気中放出の場合に比べて圧力差が数倍大きい。これは水によって微細な孔が塞がれるためと思われる。

表 4.4.3.1 3 種類の空気吹き出し板の圧力損失の比較

吹き出し空気流量 (L/min)	チャンバー内圧力(mmAq)					
	大気中放出			水中放出(水深 40mm)		
	PP	AHP	SP	PP	AHP	SP
100	166.2	0.3	0.0	872.7	49.3	38.9
200	326.7	0.4	0.4	1171.6	55.3	49.3
300	480.6	0.6	0.4	1446.6	56.8	49.3
400	618.7	0.7	0.6	1643.8	62.8	53.8
420	645.6	0.8	0.6	1688.7	65.8	55.3

図 4.4.4.1 に、チャンバー内圧力空気中および水深 40mm 中における吹き出し圧力を示す。吹き出しに要する仕事は、それぞれのチャンバー内で空気圧力を水中で計測した結果を使用した。総合的な仕事量低減として、SP 吹き出しが優れている事がわかる。

4.4.4 結論

3 種類の気泡生成方法において、50 長尺平板模型船を用いてその抵抗低減効果を比較し、以下のことがわかった。

・PP、AHP、SP の吹き出し方法、吹き出し直後のセンターライン上の低減効果は差が見られるものの、船体全抵抗低減効果はほとんど同じであった。吹き出しより数メートル以上下流になると流れる様子も同様で全抵抗もほぼ等しい結果となった。実用的には SP が期待できる。

4.5 34m 長尺平板模型船を用いた実船実験のための予備実験

4.5.1 はじめに

概要を第 6 章に示す青雲丸を用いた実船実験の準備として、長さ 34m の長尺平板模型船を用いた予備実験を実施した。模型船には、実船実験とほぼ同じ仕様の気泡発生装置が船底に取り付けられ、発生する気泡が十分な摩擦抵抗低減効果を有しているかどうか検証された。気泡発生装置は薄い角パイプに多数の孔が開けられており、流れが剥離しないよう、上下流側にフェアリングが取り付けられた。実船実験では船体に孔をあけることが出来ず、気泡発生装置も、従来の埋め込み方式に代わり、船体外付け方式とした。船体外付け方式であるため、そのフェアリングが重要な課題となった。

模型船にはさらに実船実験用せん断力センサと局所ボイド率計が取り付けられ、計測性能が検証された。戸田保幸ら(2002)は実船実験において壁面せん断応力を計測するため、新たに局所せん断力計を開発した。200mm×200mm の計測板にかかる力をフローティング・エレメント方式で計測するもので、やはり外付け方式であるため、厚みは 27mm と出来るだけ薄くし、周囲四方にフェアリングを取り付けた。池本晶彦ら(2002)は実船実験において局所ボイド率分布を計測するため、新たに局所ボイド率計を開発した。壁面から垂直に立てられたストラット方式であり、その中に LED ストロボ光源、CCD カメラ等が納められている。さらに、計測装置から船体表面に沿って設置される配線のフェアリング方法も検証された。本研究は、*児玉良明ら(2002)*の発表に基づいている。

4.5.2 試験装置概要

本実験は、海上技術安全研究所試験水槽（長さ 400m 幅 18m）において、長さ 34m の平板模型船を用いて行なわれた。

(1)供試模型船

図 4.5.2.1(a)に供試模型船を示す。50m 平板模型船の平行ブロック部を改造し、全長 34m としたものである。

(2)実船実験用気泡発生装置

気泡発生装置は、気泡発生部とフェアリング部からなる。気泡発生部は固定したままで、フェアリングのみ変更し 2 種類のフェアリングそれぞれに対し抵抗低減効果を調べた。気泡発生部は、孔径 2.4mm、軸・幅方向ともに 8mm 間隔で 2 列の孔が開いている。気泡発生部は長さ 2.3m であり、実船での流入角の推定約 10 度を模擬するため、流れに対して角度 12.6 度で設置し、その正面投影幅は、幅 500mm の埋め込み式吹き出し部を用いた従来の実験結果と比較するため、同じく 500mm とした。吹き出し部中央は、船首から 11.5m の位置とした。発生部前後のフェアリングは、5 月時点での実機設計に対応した、発生部の前方に長さ 200mm 傾斜 1/10、後方に長さ 400mm 傾斜 1/20 のフェアリング(A)と、発生部は平板状とし上流に長さ 1000mm、下流に長さ 1500mm の傾斜部をもつフェアリング(B)の 2 種類とした。

(3) 実船実験用局所せん断力計

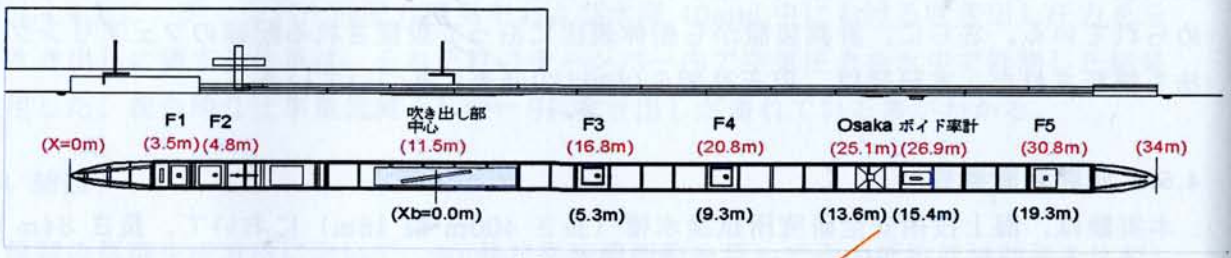
実船実験用局所せん断力計を、図 4.5.2.1(b)に示すように計測ブロック船底に取り付けた。計測部中心は、船首から 25.1m の位置とした。実船実験用の局所せん断力計を検証するため、市販の水用せん断力センサ S10W-2 が F1、F2、F3、F4、F5 の 5 カ所に設置された。

(4) 実船実験用局所ボイド率計

実船実験用局所ボイド率計を、図 4.5.2.1(c)に示すように計測ブロック船底に取り付けた。計測部中心は、船首から 26.94m の位置とした。観測窓が片側だけのボイド率計を使用して実験を行った。また前後のフェアリングは、アクリル板を用い平板船にあわせて取り付けた。

(5) 実船実験用配線フェアリング

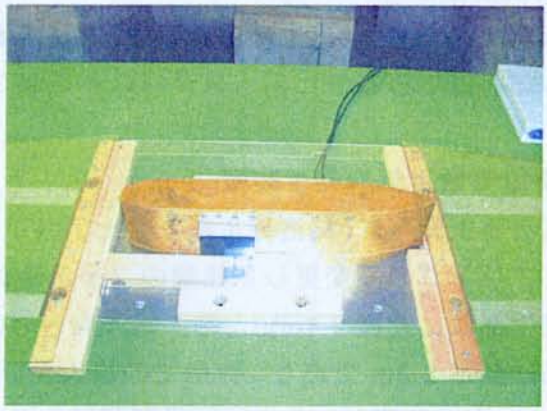
配線用のフェアリング形状の抵抗低減効果に対する影響を調べた。配線フェアリング形状は、高さ 12mm×幅 60mm の配線用矩形配管に前後 150mm ずつの傾斜をもつ。



(a) 全体図



(b)局所せん断力計



(c)局所ボイド率計

図 4.5.2.1 34m 平板模型船

4.5.3 実験結果

試験状態は、船底への付加物の取り付け状況により、表 4.5.3.1 の４通りに分かれる。

表 4.5.3.1　実船実験予備実験の試験状態一覧

試験状態	気泡吹き出し	フェアリング	4m ブロック付加物
状態 1	孔径 2.4mm	フェアリング(A)*1	せん断力計(Osaka)、ボイド率
状態 2	同上	フェアリング(B)*2	計
状態 3	同上	フェアリング(B)	同　上
状態 4	同上	フェアリング(B)	配線フェアリングあり 付加物なし

*1　吹き出し部断面に対し、上流側 200mm、下流側 400mm の長さを持つ

*2　船体の縦断面に対し、上流側 1000mm、下流側 1500mm の長さを持つ

(1)抵抗試験

34m 平板船の気泡吹き出しなし時の抵抗試験を行った。船底の付加物の状態は、表 4.5.3.1 の状態 1 とした。抵抗試験時にせん断力センサの検証を行った。実船実験用局所せん断力計(図中 Osaka)および５台の水用せん断力センサ S10W-2(図中 F1～F5)の計測結果を図 4.5.3.1 に示す。図中、プロットは実験結果を示し、ラインは 1/7 乗則にもとづく Cf の推定値を示す。F1 を除き、局所せん断力計も水用せん断力センサも推定値とほぼ等しく、局所せん断応力を計測できていると思われる。F1 については気泡吹き出し部の前方に配置し、以降の抵抗低減効果の計測には関係ない。

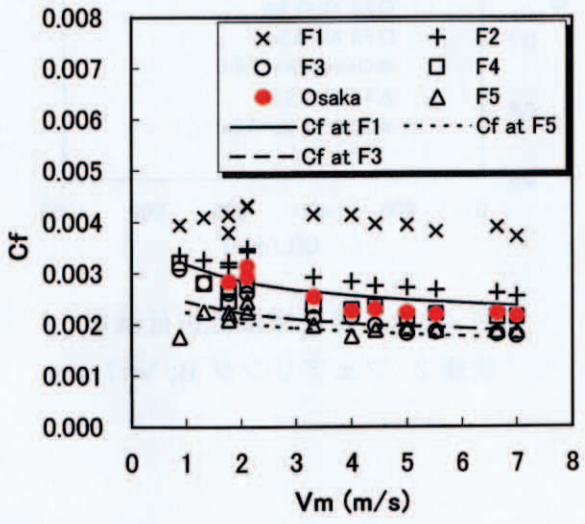


図 4.5.3.1 各せん断力計の計測精度

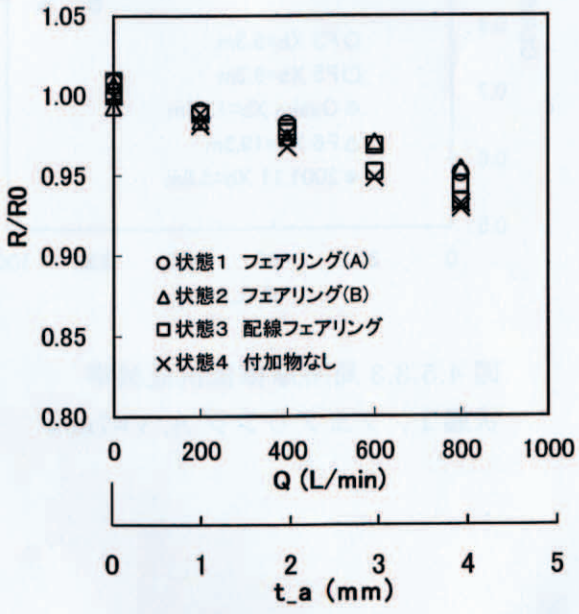


図 4.5.3.2 全抵抗低減率　V=7m/s

(2)気泡吹き出し部フェアリングの抵抗低減効果に及ぼす影響

気泡吹き出した場合の全抵抗低減率(V=7m/s)を図 4.5.3.2 に示す。縦軸は、気泡ありなしの全抵抗比 Rt/Rt0 を示し、横軸は、吹き出し空気流量 Q(L/min)を示す。試験状態は、表 4.5.3.1 の状態１から４の４通りとした。全抵抗低減率に関してフェアリング(A)と(B)の差はほとんどなく、また配線フェアリングのありと付加物なしの差もほとんどない。

吹き出し部フェアリングを状態１フェアリング A とし、気泡吹き出した場合の局所摩擦抵抗低減率(V=7m/s)を図 4.5.3.3 に示す。縦軸は、気泡なしの摩擦抵抗係数 Cf0 に対する気泡ありの摩擦抵抗係数 Cf の比 Cf/Cf0 を示す。図中には、埋め込み式吹き出しの場合の計測結果(2001.11、Xb=5.8m)も折れ線で示している。実船用の突き出し式吹き出しフェアリング(A)の抵抗低減効果は、○印(Xb=5.3m)や□印(Xb=9.3m)と折れ線を比べてみても、埋め込み式吹き出しの抵抗低減効果に対しほとんど遜色ないことを示している。局所せん断力計(Osaka)は、吹き出し部からの距離は Xb=13.6m であり、近傍の Xb=9.3m に配置する F5 の計測値(□印)と値も近く、局所せん断力計(Osaka)において気泡吹き出し時の摩擦抵抗を計測できていると考えられる。F3 が F5 より気泡吹き出し部から近いにもかかわらず、F3(○印)の抵抗低減効果が F5(□印)の抵抗低減効果より低い結果となったのは、(e)に示すせん断力計の固有の特性によるものか、本当に吹き出し直後は抵抗低減効果は小さいのかは、今回判断できなかった。吹き出し部フェアリングを状態２フェアリング(B)とした場合の結果を図 4.5.3.4 に示す。図 4.5.3.3 と比較しても、ファエリング(A)とフェアリング(B)の気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減効果の差は、あまり見られなかった。

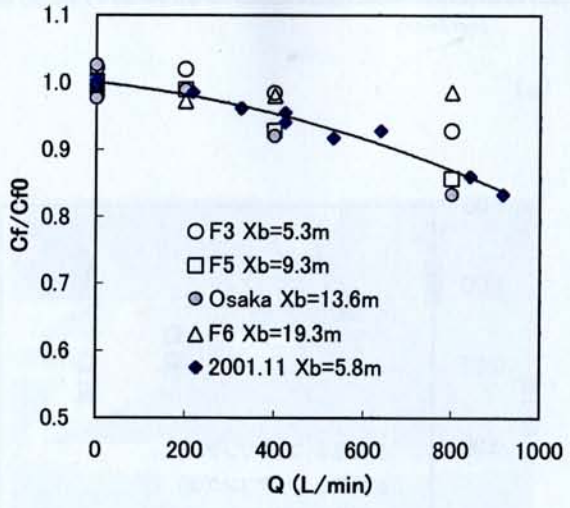


図 4.5.3.3 局所摩擦抵抗低減率
状態１, フェアリング A, V=7m/s

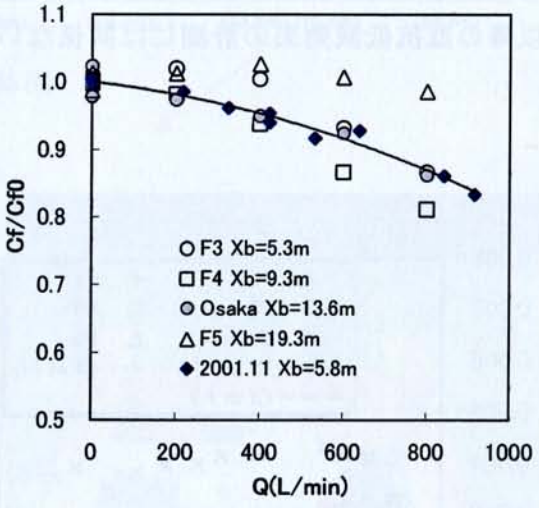
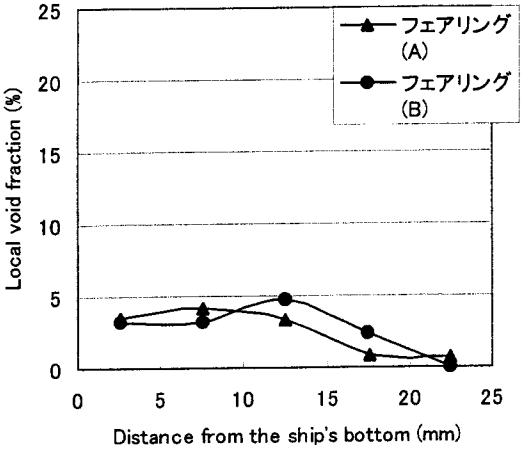


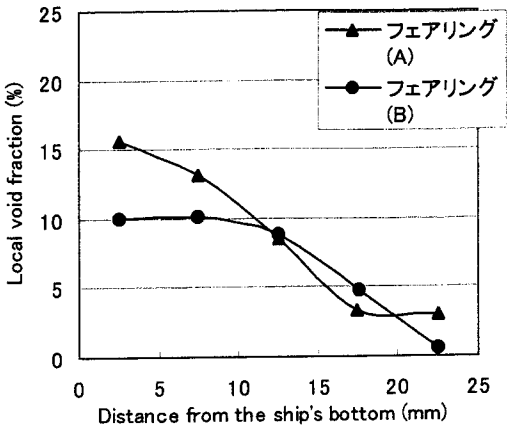
図 4.5.3.4 局所摩擦抵抗低減率
状態２ フェアリング B, V=7m/s

(3)局所ボイド率分布計測

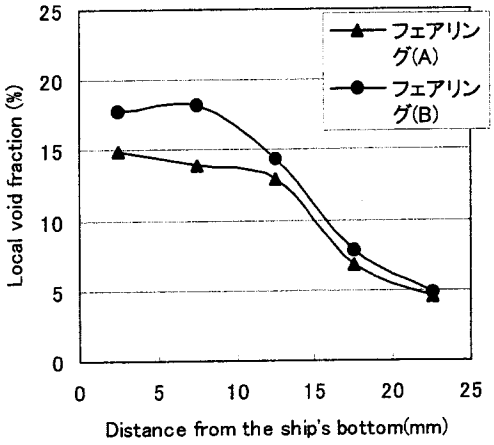
実験条件は、流速 5m/s、気泡吹き出し流量 100・200・400・800L/min、気泡吹き出し部のフェアリングをフェアリング(A)とフェアリング(B)の 2 種類を用いて行った。解析は船底（0mm）から深さ方向に 5mm ずつ、0～25mmの間で行い、画像 30 枚の平均を出しボイド率とした。図 4.5.3.5(a)～(d)に結果を示す。ボイド率は、フェアリング(B)の Q=800L/min の 5～10mmにおいて最も高い値となり、フェアリング(B)の Q=100L/min の 20～25mm において最も低い値となった。また、0～5mm においてボイド率が最も高くなっているのは両フェアリングとも、Q=800L/min のときであるが、5～10mm の値が 0～5mm の値よりも高くなってしまっている。空気流量が増加すると、ボイド率は船底（0mm）付近から増加していくが、値が 15%前後になるとその増加率（量）は空気流量の増加率に比べ鈍くなっていることがわかる。このことから、マイクロバブルの吹き出しには、効率のよい空気吹出し量があると考えられる。気泡吹き出し部のフェアリングについては、ボイド率に関して言えば特異な値はどちらのフェアリングとも見られないので問題はないと考えられる。この予備実験でボイド率計は、計画通りに機能することが確かめられ、ボイド率を求めることができた。



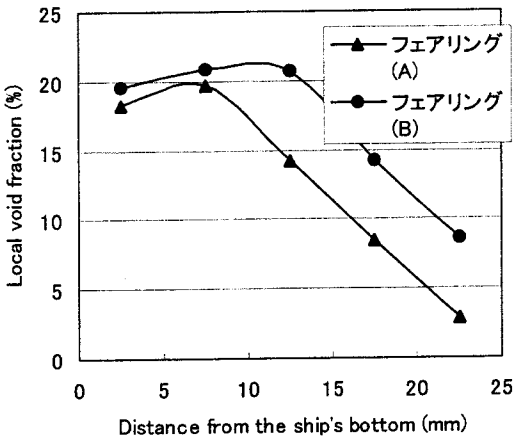
(a) Q=100L/min



(b) Q=200L/min



(c) Q=400L/min

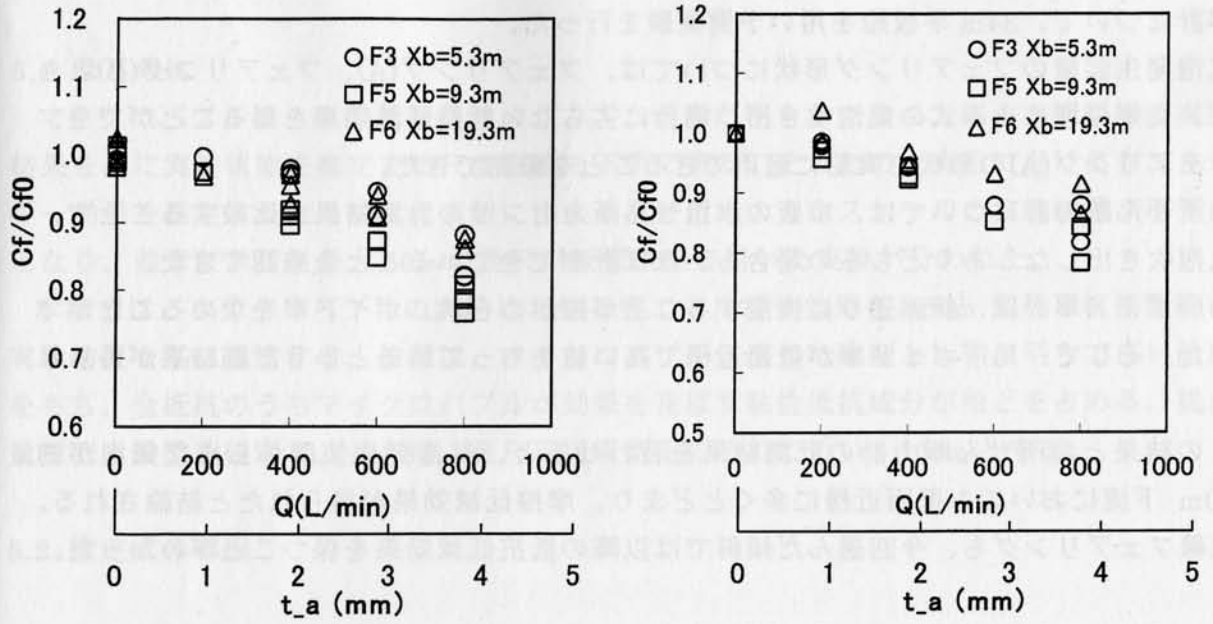


(d) Q=800L/min

図 4.5.3.5　実船実験用局所ボイド率分布計測結果. V=5m/s

(4)配線フェアリング

配線フェアリングありのせん断力計測結果を図 4.5.3.6(a)に、配線フェアリングなし、つまり付加物なしのせん断力計測結果を図 4.5.3.6(b)に示す。それぞれの図中△印を比較してもほぼ同じ値で、高さ 12mm、長さ 150mm 程度のフェアリングの傾斜であれば、以降の抵抗低減効果は保つことができることがわかった。



(a)配線フェアリング付き状態　　(b)配線フェアリング無し状態

図 4.5.3.6 局所摩擦抵抗低減率

(5)個々のせん断力センサの摩擦計測値

せん断力センサ毎に、センサを入れ替えて同じ位置で同じ気泡吹き出し状態で計測しても値に差がみられた。水用せん断力センサ F3 と F5 を交換した結果を図 4.5.3.7 に示す。今回、気泡吹き出し時の摩擦抵抗計測にそれぞれのせん断力センサにどの程度差があるか示すにとどまり、真値が不明なので修正方法までは検討できなかった。

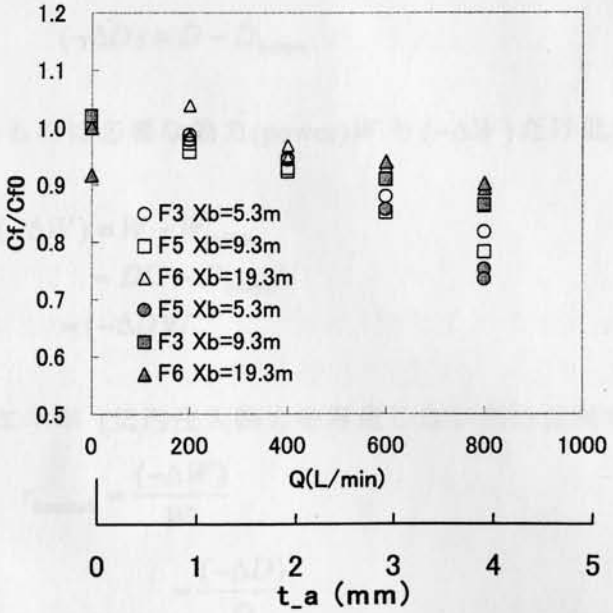


図 4.5.3.7 個々のせん断力センサの摩擦計測特性 (V=7m/s)

4.5.4 結論

最終的な実船状態での性能確認のため、気泡発生装置、局所せん断力計および局所ボイド率計について、34m 平板船を用い予備実験を行った。

・気泡発生装置のフェアリング形状については、フェアリング(A)、フェアリング(B)ともに、従来の埋め込み式の気泡吹き出し場合に劣らない抵抗低減効果を得ることができ、フェアリング(A)の形状で実船に適用できることを確認できた。

・局所せん断力計については、市販の水用せん断力センサの計測結果と比較することで、気泡吹き出しなしありどちらの場合も、ほぼ計測できていることを確認できた。

・局所ボイド率計は、計画通りに機能することが確かめられ、ボイド率を求めることができた。そして、局所ボイド率が壁面近傍で高い値をもっているという計測結果が得られた。

・この結果と局所せん断力計の計測結果を合わせると、気泡発生装置から出た気泡が約 20m 下流においても壁面近傍に多くとどまり、摩擦低減効果が得られたと結論される。配線フェアリングも、今回選んだ傾斜では以降の抵抗低減効果を保つことがわかった。

以上により、気泡発生装置、局所せん断力計および局所ボイド率計が、実船状態において充分な性能を発揮できることを確認した。

第5章 マイクロバブル法の省エネルギー効果推定法について

5.1 はじめに

マイクロバブルは、摩擦抵抗低減メカニズムが未だ明らかでなく、従って模型船の実験結果を基に実船状態を推定する尺度影響も不明である。そのため、実船における省エネルギー効果を推定するためには、実船に出来るだけ近い大きなスケールの実験結果が不可欠となり、前章に示した最大 50m の長尺平板模型船を用いた実験が行われた。

本章では、マイクロバブルの実船における省エネルギー効果を、50m 長尺平板模型船の実験結果を基に推定する。船種は、マイクロバブルに適した船型として、平らで広い船底をもち、全抵抗のうちマイクロバブルが効果を及ぼす粘性抵抗成分が殆どを占める、排水量型肥大船型を仮定し、長さは、長尺平板模型船のそれに近い、100m とする。

5.2 推定式の導出

5.2.1 名目的な省エネルギー率と正味の省エネルギー率

気泡を吹き出すと抵抗が低減する。その効果の利用法は、船速Uを保ってエンジン出力を減らす方法と、エンジン出力を保って船速を増加させる方法の 2 通りがあるが、ここでは前者を採用する。すなわち、

$$U_{\text{bubble}} = U \tag{5.2.1.1}$$

ただし、subscript "bubble"は気泡状態を、subscript 無しは非気泡状態を表す。

船体抵抗をD、気泡による抵抗低減量を$(-\Delta D)$で表すと、

$$(-\Delta D) \equiv D - D_{\text{bubble}} \tag{5.2.1.2}$$

このとき、船を進めるのに必要な動力(power)Wも$(-\Delta W)$だけ低減する。

$$\begin{aligned}(-\Delta W) &\equiv W - W_{\text{bubble}} \\ &= DU - D_{\text{bubble}}U \\ &= (-\Delta D)U\end{aligned} \tag{5.2.1.3}$$

すると、名目的な省エネ率 (気泡注入動力を考慮しない動力低減率)r_{nominal}は次式で表せる。

$$\begin{aligned}r_{\text{nominal}} &= \frac{(-\Delta W)}{W} \\ &= \frac{(-\Delta D)}{D}\end{aligned} \tag{5.2.1.4}$$

正味の省エネ率(気泡発生動力を考慮した動力低減率)r_{net}は動力低減量$(-\Delta W)$から気泡

注入動力W_{pump}を差し引くことにより得られる。

$$r_{net} = \frac{(-\Delta W) - W_{pump}}{W}$$

$$= r_{nominal} - r_{pump} \qquad (5.2.1.5)$$

ただしr_{pump}は気泡発生動力率である。

$$r_{pump} = \frac{W_{pump}}{W} \qquad (5.2.1.6)$$

5.2.2 全抵抗と相当平板の摩擦抵抗の関係

気泡は船体が水から受ける全抵抗のうち摩擦抵抗成分にのみ作用するので、全抵抗のうち摩擦抵抗成分の占める割合を推定する必要がある。

全抵抗Dを成分分離する。

$$D = D_F + D_{VP} + D_W \qquad (5.2.2.1)$$

ただし

D_F: 摩擦抵抗成分
D_{VP}: 粘性圧力抵抗成分
D_W: 造波抵抗成分

D_F及びD_{VP}は粘性抵抗成分であり、両者の和の全抵抗に対する比をr_Vで表す。

$$r_V \equiv \frac{D_F + D_{VP}}{D} \qquad (5.2.2.2)$$

次に、船舶流体力学の常套手段として、相当平板抵抗$D_{F_{EFP}}$の概念を導入する。なお、"EFP"は相当平板(equivalent flat plate)を表す。相当平板抵抗とは、対象とする模型船あるいは実船と同一長さ同一面積の平板の摩擦抵抗を示す。そして、粘性抵抗成分の和を相当平板抵抗と形状影響係数(form factor) 1+K の積で表す。

$$D_F + D_{VP} = (1+K)D_{F_{EFP}} \qquad (5.2.2.3)$$

上 2 式より次式が成り立つ。

$$D = \frac{(1+K)}{r_V} D_{F_{\mathrm{EFP}}} \tag{5.2.2.4}$$

なお、相当平板の摩擦抵抗はSchoenherrの実験式で表されることが多いので、ここにその形を示しておく。長さxの相当平板の抵抗係数を与えるSchoenherrの実験式(再帰表現)$C_{F_{\mathrm{Schoenherr}}}(x)$は、抵抗を曳航速度と浸水表面積で無次元化した抵抗係数の形で、次式で与えられる。

$$0.242\sqrt{C_{F_{\mathrm{Schoenherr}}}(x)} = \log_{10}\{R_x C_{F_{\mathrm{Schoenherr}}}(x)\} \tag{5.2.2.5}$$

ただし

$$C_{F_{\mathrm{Schoenherr}}} \equiv \frac{D_{F_{\mathrm{EFP}}}}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \tag{5.2.2.6}$$

S: 全浸水表面積

$$R_x \equiv \frac{Ux}{\nu}: \text{平板長}x\text{に基づくReynolds数} \tag{5.2.2.7}$$

(5.2.2.4)式と(5.2.2.6)式を用いると

$$D = \frac{1+K}{r_V}\frac{1}{2}\rho U^2 S C_{F_{\mathrm{Schoenherr}}} \tag{5.2.2.8}$$

5.2.3 全摩擦抵抗と気泡被覆部分の摩擦抵抗との関係

注入された気泡は、気泡被覆部分の摩擦抵抗を低減させ、その量は模型船の全抵抗の低減量として計測される。その情報を他の模型船に適用するためには、低減効果を気泡被覆部分の摩擦抵抗に対する割合で表す必要がある。そこで本節では、非気泡状態での気泡被覆部分の摩擦抵抗と全抵抗との比を表す式を導く。

先ず、全浸水表面積に対する気泡被覆部分の面積の比r_Sを定義する。

$$r_S \equiv \frac{S_{bc}}{S} \tag{5.2.3.1}$$

S_{bc}: 気泡被覆部分の面積("bc"はbubble-coveredの略)

気泡被覆部分の摩擦抵抗$D_{F_{\mathrm{bc}}}$と全摩擦抵抗D_Fとの比は、面積比r_Sにほぼ等しいと思われるが、局所摩擦は上流端に近いほど大きいので、気泡吹き出し部を船首尾方向のどの位置に置くかによって変化すると考えられる。その比をm_{bc}と定義すると、

$$\frac{D_{Fbc}}{D_F} = r_S m_{\mathrm{bc}} \tag{5.2.3.2}$$

上式を(5.2.2.9)式に代入すると、気泡被覆部分の摩擦抵抗と全抵抗の関係を得る。

$$D = \frac{1+K}{r_V r_S m_{\mathrm{bc}}} D_{F_{\mathrm{bc}}} \tag{5.2.3.3}$$

実験で計測される抵抗低減量は$(-\Delta D)$であるが、それは気泡被覆部の摩擦抵抗の低減によって発生したので、次式が成り立つ。

$$-\Delta D = -\Delta D_{F_{bc}} \tag{5.2.3.4}$$

故に、上2式より、

$$\frac{(-\Delta D_{F_{\mathrm{bc}}})}{D_{F_{\mathrm{bc}}}} = \frac{1+K}{r_V r_S m_{\mathrm{bc}}} \frac{(-\Delta D)}{D} \tag{5.2.3.5}$$

$$\frac{(-\Delta D)}{D} = \frac{r_V r_S m_{bc}}{1+K} \frac{(-\Delta D_{F_{bc}})}{D_{F_{bc}}} \tag{5.2.3.6}$$

5.2.4 注入空気量の関数としての省エネルギー率

先ず、名目的な省エネ率r_{nominal}を注入空気量の関数として表す。注入空気量が大きくない範囲では、注入空気量と抵抗低減量は線形の関係にある。すなわち次式が成り立つ。注入空気量を相当空気厚さt_a(mm)で表し、抵抗低減効果の2種類の比例定数を$k\,(mm^{-1})$あるいは$k_{F_{bc}}\,(mm^{-1})$と置くと、

$$\frac{(-\Delta D)}{D} = kt_a \tag{5.2.4.1}$$

$$\frac{(-\Delta D_{F_{bc}})}{D_{F_{bc}}} = k_{F_{bc}} t_a \tag{5.2.4.2}$$

上2式と(5.1.3.5)式より

$$k_{F_{bc}} = \frac{1+K}{r_V r_S m_{bc}} k \tag{5.2.4.3}$$

名目的な省エネ率r_{nominal}は、(5.2.1.4)式に(5.2.3.6)式と(5.2.4.2)式を代入して

$$r_{\text{nominal}} = \frac{r_V r_S m_{bc}}{1+K} k_{F_{bc}} t_a \tag{5.2.4.4}$$

次に気泡発生動力率r_{pump}を注入空気量の関数として表す。注入空気量を(4.1.3.3)式で定義した相当空気厚さt_a(単位:mm)で表す。

$$\frac{t_a}{1000} = \frac{Q_a}{B_a U} \tag{5.2.4.5}$$

ただし、上式ではt_a以外はすべてm単位で表すため、左辺に1000分の1がつけられている。気泡発生動力の計算では、静水圧と局所的圧力のみを考慮し、空気供給用ポンプの効率が1より小さいことや、ポンプから空気注入部までの管路損失、空気注入板の圧力損失を無視する。これらを無視した理由は、ポンプ効率は千差万別であること、他の2つは設計により非常に小さくできることである。このような仮定の下では、気泡発生動力は、空気注入部の水深zと局所的圧力pを考慮して次式で表せる。

$$W_{\text{pump}} = (\rho g z + p) Q_a \tag{5.2.4.6}$$

さらに、(5.2.4.5)式を用いて

$$W_{\text{pump}} = \frac{1}{2}\rho U^3 \frac{t_a B_a}{1000}\left(\frac{2r_z}{F_n^2} + C_p\right) \tag{5.2.4.7}$$

ただし、

$$r_z \equiv \frac{z}{L}$$

$$F_n \equiv \frac{U}{\sqrt{gL}} : \text{Froude 数}$$

$$C_p \equiv \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U^2} : \text{圧力係数} \tag{5.2.4.8}$$

(5.2.1.6)式で定義される気泡発生動力率r_{pump}は、(5.2.2.8)式と(5.2.4.7)式を用いて、

$$r_{\text{pump}} = \frac{r_V}{1+K} \frac{\frac{2r_z}{F_n^2} + C_p}{C_{F_{\text{Schoenherr}}}} \frac{t_a B_a}{1000 S} \tag{5.2.4.9}$$

5.3 実船における省エネルギー率の推定

5.3.1 50m 平板模型船の実験結果

前節の結果を用いて 50m 平板模型船の U=7m/s における実験結果を解析する。先ず、形状影響係数(1+K)は、図 5.3.1.1 に示す抵抗試験結果から次式の値が求まる。

$$(1+K)_{50} = 1.146 \tag{5.3.1.1}$$

ただし、"$_{50}$"は 50m 平板模型船実験の値を表す。

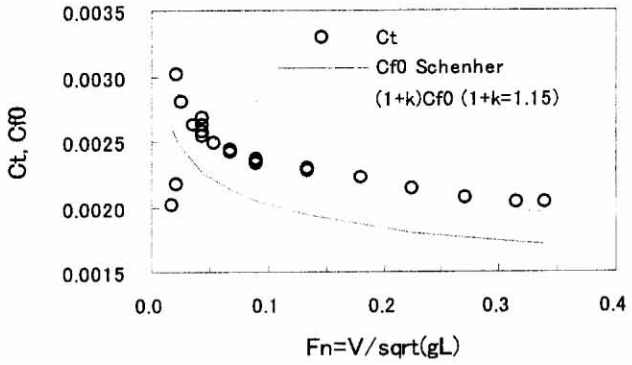


図 5.3.1.1 50m 平板模型船の非気泡状態の抵抗計測結果 (図 4.3.3.1 再掲)

全抵抗のうち粘性抵抗成分が占める割合 r_V を求める。U=7m/s における 50m 平板模型船の全抵抗に占める相当平板摩擦抵抗の割合 $(D_{F_{EFP}}/D)_{50}$ は、図 5.3.1.1 の抵抗試験結果でフルード数 $F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}} = \frac{7}{\sqrt{9.8\times 50}} = 0.315$ において全抵抗と Schoenherr の値の比により、

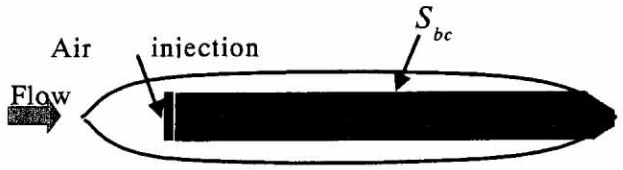
$$\left(\frac{D_{F_{EFP}}}{D}\right)_{50} = 0.85 \tag{5.3.1.2}$$

(5.2.2.4)式に上 2 式の値を代入すると、

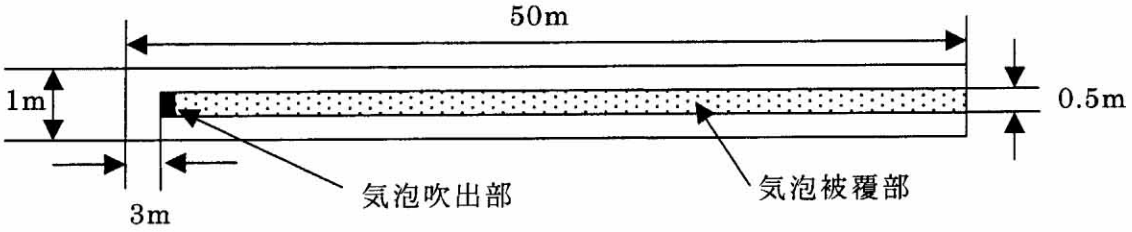
$$(r_V)_{50} = \frac{D_{F_{EFP}}}{D}(1+K) = 0.85\times 1.146 = 0.9741 \tag{5.3.1.3}$$

r_S を求める。50m 平板船は幅 1m であり、船首から 3m の位置に幅 0.5m の気泡吹き出し部がある。船底形状を図 5.3.1.2 に示す。ただし、実際の船底形状は(a)図に示すように流線型の平面形状をしているが、簡単のため(b)図のような矩形で近似する。喫水 45mm の船側の面積は省略する。すなわち

$$(r_S)_{50} = \frac{S_{bc}}{S} = \frac{0.5\times 47}{1\times 50} = 0.47 \tag{5.3.1.4}$$



(a)実際の船底形状の模式図



(b)簡略化された船底形状

図 5.3.1.2 50m 平板模型船の船底形状

m_{bc} を Schoenherr の式に基づき推定する。B は船幅(=1m)であり、

$$(m_{bc})_{50} = \frac{S}{S_{bc}} \frac{D_{F_{EFP\,bc}}}{D_{F_{EFP}}}$$

$$= \frac{50 \times B}{47 \times \frac{1}{2} B} \frac{\{C_{F_{Schoenherr}}(50m) \times 50 - C_{F_{Schoenherr}}(3m) \times 3\} \times \frac{1}{2} B \times \frac{1}{2} \rho U^2}{C_{F_{Schoenherr}}(50m) \times 50 \times B \times \frac{1}{2} \rho U^2}$$

$$= \frac{50}{47} \times \{1 - \frac{C_{F_{Schoenherr}}(3m) \times 3}{C_{F_{Schoenherr}}(50m) \times 50}\}$$

$$= \frac{50}{47} \times (1 - \frac{0.0026082 \times 3}{0.0017488 \times 50})$$

$$=0.96864 \qquad (5.3.1.5)$$

配列多孔板を用いた U=7m/s における 50m 平板模型船の抵抗低減効果の比例定数 $k\,(mm^{-1})$を図 5.3.1.3 のデータから求める。t_a=7.3mm において $(-\Delta D)/D$=0.15 であるから (5.2.4.1)式より、

$$(k)_{50} = \frac{(-\Delta D)}{Dt_a} = \frac{0.15}{7.3} = 0.0205\,(mm^{-1}) \tag{5.3.1.6}$$

さらに、(5.2.4.3)式より

$$(k_{F_{bc}})_{50} = \frac{1+K}{r_V r_S m_{bc}} k$$

$$= \frac{1.146}{0.9741 \times 0.47 \times 0.96864} \times 0.0205$$

$$= 0.05298\,(mm^{-1}) \tag{5.3.1.7}$$

以上を総合すると、50m 平板模型船で速度 U=7m/s において配列多孔板を用いた場合のパラメータが表 5.3.1.1 のように得られる。

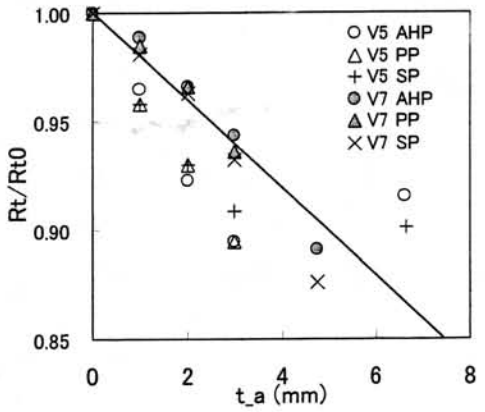


図 5.3.1.3　50m 平板船の抵抗低減実験結果 (図 4.4.3.3 再掲)

表 5.3.1.1 50m 平板模型船のマイクロバブル抵抗低減関係パラメータ(U=7m/s、配列多孔板)

$1+K$	r_V	r_S	m_{bc}	$k_{F_{bc}}\,(mm^{-1})$
1.146	0.9741	0.47	0.96864	0.05298

5.3.2 100m 内航タンカーにおける省エネルギー効果の推定

50m 平板模型船の実験結果を基に、表 5.3.2.1 の想定主要目をもつ長さ 100m の内航タンカーの省エネルギー率を推定する。

表 5.3.2.1 100m 内航タンカーの想定主要目

全長 L (m)	全幅 B(m)	喫水 z(m)	船速 U(m/s)	r_z	F_n
100	20	7	7	0.07	0.2236

形状影響係数は、肥大船の典型的な値として次式を採用する。

$$(1+K)_{100} = 1.30 \tag{5.3.2.1}$$

ただし、"$_{100}$"は 100m 内航タンカーを表す。

粘性抵抗成分比 r_V は、低速の排水量型船では、粘性抵抗成分が全抵抗の約 80%を占めることから、

$$(r_V)_{100} = 0.80 \tag{5.3.2.2}$$

気泡被覆面積比 r_S は、船型全体を矩形で近似し、空気注入部を船首端に船底の幅全体に設置し($B_a = 20m$)、気泡がそこから 50m 下流まで船底を覆うと仮定して、次式で与えられる。

$$(r_S)_{100} = \frac{S_{bc}}{S} = \frac{20\times 50}{(20+2\times 7)\times 100} = 0.2942 \tag{5.3.2.3}$$

m_{bc} を推定するために、ひとつの仮定を導入する。様々な船型に関する数多くの CFD 計算によれば、摩擦抵抗成分 D_F は相当平板の摩擦抵抗 $D_{F_{EFP}}$ に常に殆ど等しい。すなわち、次式が成り立つと仮定する。

$$D_F = D_{F_{EFP}} \tag{5.3.2.4}$$

すると m_{bc} は、(5.2.3.2)式で与えられ、さらに(5.2.2.6)式を用いると、結局、

$$\begin{aligned}(m_{bc})_{100} &= \frac{S}{S_{bc}}\frac{D_{F_{bc}}}{D_F} \\ &= \frac{C_{F_{Schoenherr}}(50m)}{C_{F_{Schoenherr}}(100m)} \\ &= \frac{0.001749}{0.001600} \\ &= 1.093\end{aligned} \tag{5.3.2.5}$$

抵抗低減効果の比例定数 $k_{F_{bc}}\,(mm^{-1})$は 50m 平板模型船のそれと等しいと仮定する。

(5.3.1.7)式より

$$(k_{F_{bc}})_{100} = (k_{F_{bc}})_{50}$$

$$= 0.05298\,(mm^{-1}) \tag{5.3.2.6}$$

以上により、100m 内航タンカーについて、下表が得られる。

表 5.3.2.2 100m 内航タンカーのマイクロバブル抵抗低減
関係パラメータ(U=7m/s、配列多孔板)

$1+K$	r_V	r_S	m_{bc}	$k_{Fbc}\,(mm^{-1})$
1.30	0.80	0.2942	1.093	0.05298

このとき名目的な省エネ率 r_{nominal} は、(5.2.4.4)式に上の表の値を代入して、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} r_{\text{nominal}} &= \frac{r_V r_S m_{bc}}{1+K} k_{F_{bc}} t_a \\ &= \frac{0.80\times 0.2942\times 1.093}{1.30}\times 0.05298\times t_a \\ &= 0.01048 t_a \end{aligned} \tag{5.3.2.7}$$

また、(5.2.4.9)式で表される気泡発生動力率 r_{pump} は、気泡注入位置の圧力係数を $C_p = 0.0$ と仮定して、

$$\begin{aligned} r_{\text{pump}} &= \frac{r_V}{1+K}\frac{\dfrac{2r_z}{F_n^2}+C_p}{C_{F\text{Schoenherr}}}\frac{B_a}{1000S}t_a \\ &= \frac{0.80}{1.30}\times\frac{\dfrac{2\times 0.07}{0.2236^2}+0.0}{0.001600}\times\frac{20.0}{1000\times(20+2\times 7)\times 100}t_a \\ &= 0.00634 t_a \end{aligned} \tag{5.3.2.8}$$

正味の省エネ率 r_{net} は、(5.2.1.5)式と上 2 式より、

$$\begin{aligned} r_{net} &= r_{\text{nominal}} - r_{\text{pump}} \\ &= 0.00414 t_a \end{aligned} \tag{5.3.2.9}$$

この例では、気泡発生動力は気泡による節減動力の約 60%を消費し、無視できない大きさである。

以上により、例えば t_a=10mm の場合に、

$$r_{net} = 0.0414 \tag{5.3.2.10}$$

となり、正味4%の省エネルギー効果が得られることになる。

5.4 考察

正味4%の省エネ効果の推定のために用いられた前提条件には、省エネ効果を高めに推定している要素と低めに推定する要素の両方がある。それぞれを列挙する。

高めに推定している要素

(1)気泡発生動力の推定において、空気供給用ポンプの効率を1と仮定している。
実際は、軸発方式により発電した電力を用いて空気コンプレッサを駆動する方式が現実的であると思われる。このとき発電効率は0.80程度と思われる。空気コンプレッサの駆動効率は、吐出圧力を最低限に抑えることができれば、かなり高めることができる。両者を総合した効率は、0.5～0.6程度と思われる。

(2)気泡発生動力の推定において、管路損失をゼロと仮定している。
管路損失は、空気供給用コンプレッサを空気注入部の近くに置き、且つ太い内径の管路をしようすることにより、殆どゼロにすることができると思われる。

(3)気泡発生動力の推定において、空気注入部の圧力損失をゼロと仮定している。
空気注入部の圧力損失は、多孔質板を用いた場合には非常に大きいが、スリットを用いれば殆どゼロにすることができると思われる。

(4)長期使用の場合の汚損による目詰まりを考慮していない。
注入部にスリットを用いて、且つ電気防食などの汚損対策を施せば、回避できると思われる。

(5)プロペラへの気泡流入によるプロペラ効率低下が無いと仮定している。
後述の青雲丸実船実験行ったように、空気注入位置を工夫することによって回避することができると思われる。荒天時には問題となる可能性がある。船体が大きいほど、問題となる可能性は小さくなる。

(6)船体運動による気泡の流出を考慮していない。
静穏時には無視できるが、荒天時には問題となる可能性がある。船体が大きいほど、問題となる可能性は小さくなる。

(7)気泡による低減効果がt_a=10mmまで線形に作用すると仮定している。
実際は或る値以上で飽和傾向になると思われる。ただし、空気注入位置を複数設ける等により、空気注入面積を増加させることにより飽和傾向を軽減できると思われる。

低めに推定している要素

(1)空気を、最も深い船底位置から注入している。
船底からではなく、後述の青雲丸実船実験において用いられたように、水面近くで注入し、船首近くの下向きの流れを利用して気泡を船底に送り込むことにより、

r_{pump}を大幅に低減させることができる。

(2)発生した気泡による低減効果は50mまでしか続かないと仮定している。
実際は更に下流まで流れるので、追加の低減効果があると思われる。

(3) 発生した気泡による低減効果は船側部ではゼロであると仮定している。
*児玉良明ら(2002)*に示されているように、傾きをもつ面においても低減効果があるので、追加の低減効果があると思われる。

以上のような未知の要素があり、推定精度を上げるためには今後の研究を待つ必要がある。

第 6 章 青雲丸を用いた実船実験

6.1 はじめに

(社)日本造船研究協会の SR239「船舶の摩擦抵抗低減法に関する研究」研究部会(H10～H13、部会長:大阪大学 鈴木敏夫教授)では、独立行政法人航海訓練所練習船「青雲丸」を用いて 2001 年 9 月に、世界で初めてマイクロバブルの実船実験を実施し、実船においてもマイクロバブルによる摩擦抵抗が低減することを確認した。実験の詳細は、予備実験も含めて、*児玉良明他 (2002)*、*永松哲郎他 (2002)*に詳しく記されているが、マイクロバブルの実用性を議論する上において重要であるため、ここに概要を示す。なお、海技研のマイクロバブル研究グループはこの研究プロジェクトに参加し、筆者も主に長尺平板模型船を用いた実験的研究によって参加した。

6.2 供試船

航海訓練所練習船「青雲丸」が選定された。主要目を表 6.2.1 に、写真を図 6.2.1 に示す。

表 6.2.1 青雲丸主要目

全長 L_{OA}	116.0m
全長(L_{PP})	105.0m
幅	17.9m
深さ	10.8m
喫水	6.3m(計画満載)、5.75m(実験時)
最大速力	21.0 ノット（45%載貨、連続最大出力）
航海速力	19.5 ノット（75%載貨状態、常用出力）
連続最大出力	7,723 kW, 148.0rpm
常用出力	6,950 kW, 142.9rpm
プロペラ	4 翼ハイスキューCPP、直径 4,700mm



図 6.2.1 航海訓練所練習船「青雲丸」

6.3 青雲丸における省エネルギー効果の推定(*Yoshida et al. 1998b*)

CFD コードを用いて、青雲丸(実船)が大型肥大船の巡航速度に相当する 13.6kt(7m/s)で

航行する場合の流れを推定し、その流れに沿った気泡追跡を行い(*Larrarte et al. 1997*)、それらの結果と、第4章に示した長尺平板模型船の実験結果などを基に実船における省エネルギー効果を推定した。その結果、空気注入量 $46m^3$/分において、気泡は全浸水表面積の 30%を覆い(図 6.3.1)、名目的な省エネ率 $r_{nominal}$ は 5%、正味の省エネ率 r_{net} は 2%と推定された。



(a)側面図

(b) 平面図

図 6.3.1 推定された気泡の軌跡

6.4 実験装置

気泡発生装置

気泡発生装置は、100mm x 20mm の鋼製角パイプに直径 2.4mm の孔が多数開いた配列多孔板の形式であり、片舷 3 箇所(①、②、③) ずつに水平に取り付けられた。空気は前方甲板上のコンプレッサから供給された(図 6.4.1)。



図 6.4.1 青雲丸の気泡発生装置

計測機器配置

左舷側船体表面に、3 台の気泡観測用 TV カメラ、7 台の局所せん断力計、2 台の局所ボイド率計を、図 6.4.2 に示す位置に接着法(*山下和春他 2002*)により取り付けた。

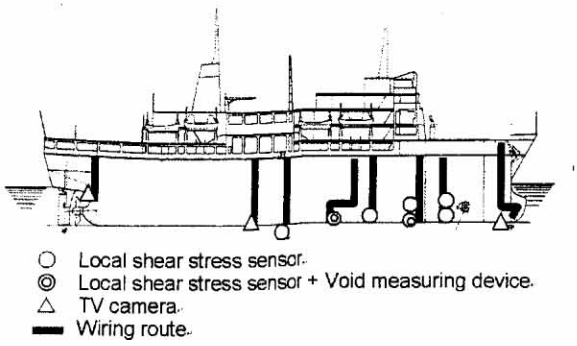


図 6.4.2 計測装置取り付け位置

6.5 実験結果

実験方法

実験は静穏な状態で行われ、計測はプロペラ回転数を一定に保った状態で気泡吹き出しの有無による状態の差を計測することにより行われ、計測値は往復走行の平均値をとった。

吹き出し空気量

MAX 状態すなわちコンプレッサー最大出力で空気を吹出した場合、両舷で合計約 $110\,m^3$/分の空気が吹き出され、その半分の出力の 1/2MAX 状態では推定値にほぼ等しい約 $42\,m^3$/分の空気が吹き出された。

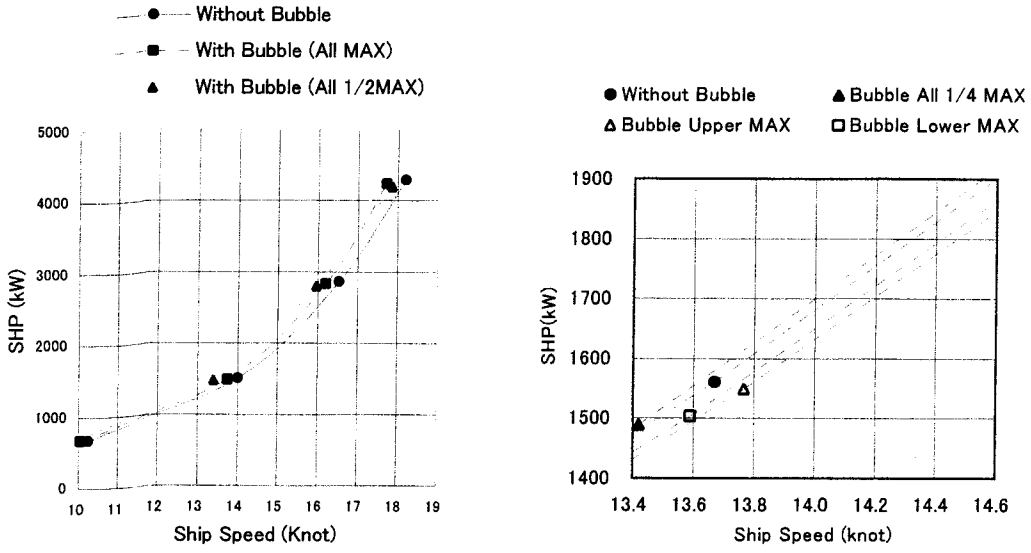
気泡流れ観測

気泡発生装置から吹き出された気泡は、想定されたやや下向きではなくてほぼ水平方向に、薄く船体表面を覆うのではなく、煙突からモクモク出る煙のような状態で下流に流れた。

軸馬力・プロペラ推力

軸馬力及びプロペラ推力が計測された。全ての位置から空気を吹き出した場合には 14 ノットの速度を維持するためには軸馬力を増加する必要があったが、吹き出し位置を選択的に変えた場合にはより少ない軸馬力で速度を維持することができ、上段位置(①)のみから気泡を MAX 吹き出した場合に 3%の軸馬力低減が得られた(図 6.5.1)。この場合、上段位置の水深 1m からの空気吹き出しに要する馬力は 1%であり、正味で 2%の軸馬力低減、すなわち省エネ効果が得られたことになる。

計測を総合すると、船体抵抗は空気を吹き出すことにより最大 11%増加、または最大 5.5%低減した。また、気泡がプロペラに流入するとプロペラ推力は低減し、プロペラ性能も低下した。しかし上段位置(①)のみから気泡を吹き出した場合にはプロペラ性能低下は発生せず、気泡のプロペラ流入が起きていないと推定された。



(a)全ての位置から空気を吹き出した場合　(b)選択的に空気を吹き出した場合

図 6.5.1 速力試験において計測された軸馬力

局所せん断力(*戸田保幸他 2002*)

No.4 せん断力センサを除く全ての計測位置において計測された局所せん断力は気泡により増加した。No.4 せん断力センサ(SS8 の上側)では、図 6.5.2 に示すように、或る船速の範囲において、気泡による局所せん断力の低減が得られた。その船速への依存性は、気泡の軌跡が船速によって変化するためと思われる。

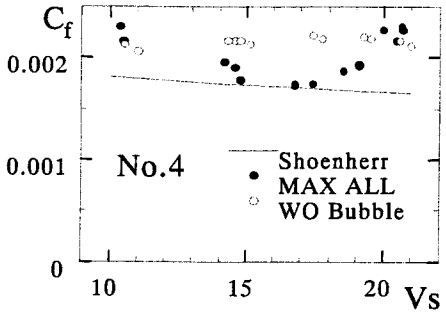


図 6.5.2 No.4 せん断力センサによる局所せん断力計測

局所ボイド率(*池本晶彦他 2002*)

SS6 の船底位置において計測が行われ、船体表面から 30mm の距離までの気泡が計測された。気泡径は 0.5mm～1.0mm であり、気泡は船体表面の最近傍には少なく、約 7mm 離れた位置が最も多かった。また、すぐ側にあった局所せん断力センサでは気泡によって局所せん断力が増加した。このことから、気泡は船体表面からやや離れた位置を流れること

が多く、その場合には抵抗増加となったと推察された。

船尾振動

舵機室において計測された船尾振動では、速度 17 ノット以下では有意な計測ができなかったが、速度 21 ノットでは、気泡吹き出しによって船尾振動は低減した。このことから、マイクロバブルは船尾振動の増加要因とはならず、船尾振動を低減させる作用をもつと推察された。

6.6 結論

この実船実験によって、実船の抵抗がマイクロバブルによって低減でき(3%)、且つ正味の省エネルギー効果(2%)が得られることが明らかになった。また、マイクロバブルは船尾振動を低減させる働きをもつことも明らかになった。しかし同時に、気泡の発生条件によっては抵抗が却って増加する場合もあること、気泡がプロペラに流入するとプロペラ性能が低下することなどの問題点も明らかになった。今後は、マイクロバブルの短所を克服し長所を伸ばすため、気泡を船体表面に薄く均一に分布させる技術、気泡のプロペラ流入を避ける技術などの研究開発が求められている。

なお、実船実験で得られた低減効果は、第 4 章に示した 50m 長尺平板模型船の実験結果と CFD 計算結果を基に推定した値と比較的よく一致しており、50m 長尺平板模型船実験の有用性が示されたと言える。

第7章 マイクロバブル法の摩擦抵抗低減メカニズム

7.1 はじめに

本研究の目的は、マイクロバブルを船舶の摩擦抵抗低減デバイスとして適用することであり、そのために摩擦抵抗低減に対する影響因子を調べ、それらが摩擦抵抗低減量に及ぼす影響を定量的に求める必要がある。そしてそのためには、摩擦抵抗低減メカニズムを解明し、摩擦低減量を推定するために必要なマイクロバブルのモデル化を行う必要がある。そこで、ここでは、その解明に向けた研究のいくつかを*児玉良明(2002)*の解説を中心に紹介する。

マイクロバブルによって何故摩擦抵抗が低減するのか、実験や計算において研究は進められており、実験的に確認された事実、理論的に提案されたメカニズム、数値計算による結果など、いくつもの摩擦抵抗低減のモデル化が行われている。それらは部分的な手がかりを与え、マイクロバブルがもつ摩擦抵抗低減のメカニズムについての理解に役立つ。以下に、実験的に確認された事と理論的なモデル化を分けて説明する。

実験的には、これまでの研究の多くは気泡径より大きなオーダーの流場計測であり、ボイド率分布を中心にしたものである。気泡の存在自体が計測を困難にしているため、速度や乱れの計測も少ない。*Merkle and Deutsch (1990)*や *SR239 研究部会 (1999)*において研究成果がまとめられており、それらを参考に著者の実験結果を加えて説明する。

理論的には、*Marie and Moursari (1996)*、*Legner (1984)*、*Madavan et al. (1985)*などがメカニズムに対する説明を与えている。*Legner (1984)*はメカニズムの影響因子として境界層内の密度変化、有効粘性の増加、乱れの抑制、の3つをあげている。

以下に、抵抗低減メカニズムを概説する。

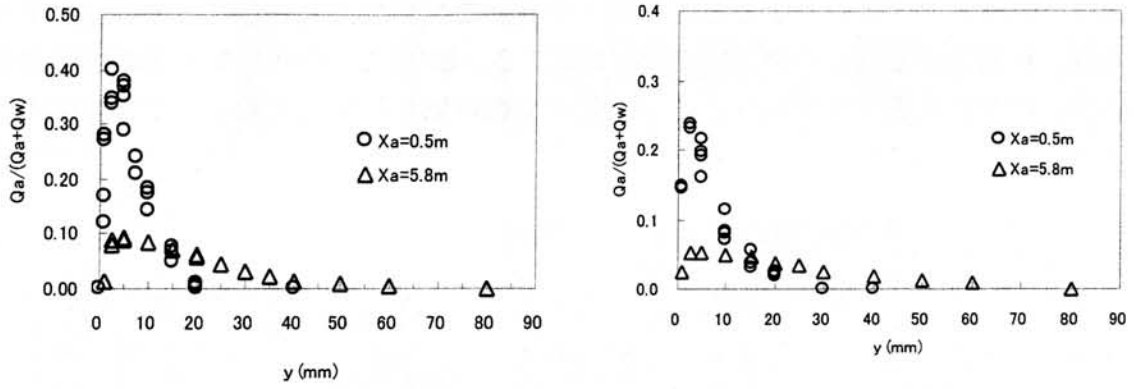
7.2 実験的研究

7.2.1 壁面近傍のボイド率

手がかりの第一は、これは多くの研究者によって確認され合意されているが、壁の近傍に気泡が集まっているほど大きな壁面せん断応力低減効果が得られるという実験的事実である。壁から注入された気泡は、その直後は壁近傍に集中して分布しており大きな局所摩擦低減効果を示すが、下流に行くと壁から離れて拡散し、それに応じて局所摩擦低減効果も減少する。図 7.2.1.1(図 4.2.3.8 再掲)には、局所ボイド率分布が壁からの距離の関数として表示されており、気泡吹き出し位置から下流に行くほど気泡が壁から離れて拡散する様子が示されている。そして、そのようなデータを総合して、図 7.2.1.2 には、壁近傍ボイド率と局所摩擦の低減率の関係が示されている。"壁の近傍"とはどの程度の距離までを指すのかについて定説は無いが、図 7.2.1.2 では *Yoshida, Y. et al. (1998a)*に倣って $y^+ \leq 1000$ の範囲としており、*Guin ら(1996)*は壁面から 1mm までの距離におけるボイド率と低減効果との間に良い相関があることを示した。なお、図 7.2.1.1 の例ではボイド率分布の peak は壁から 2～3mm の位置にある。

関連して、*Kato et al.(1998)*は2次元チャンネル内のマイクロバブル流れにおいて、壁

から 0.1mm の距離の流速を前方散乱型 LDV を用いて計測している。このことは、壁の極く近傍(0.1mm 以下)には、少なくとも空気吹き込み式の気泡発生状態では、気泡の殆ど存在しない領域があることを示している。



(a) PP　　(b) AHP

図 7.2.1.1 (図 4.2.3.8 再掲) 12m 平板模型船における局所ボイド率分布計測 V=7m/s、t_a=1.9mm。

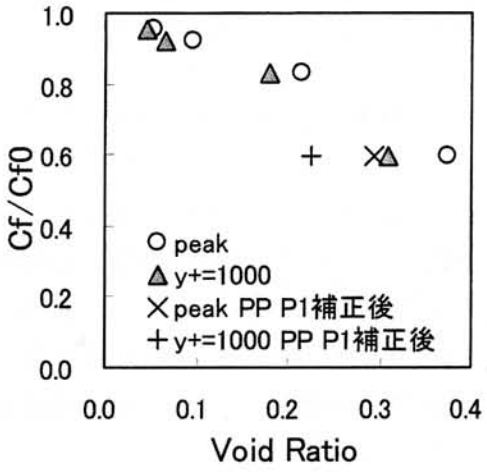


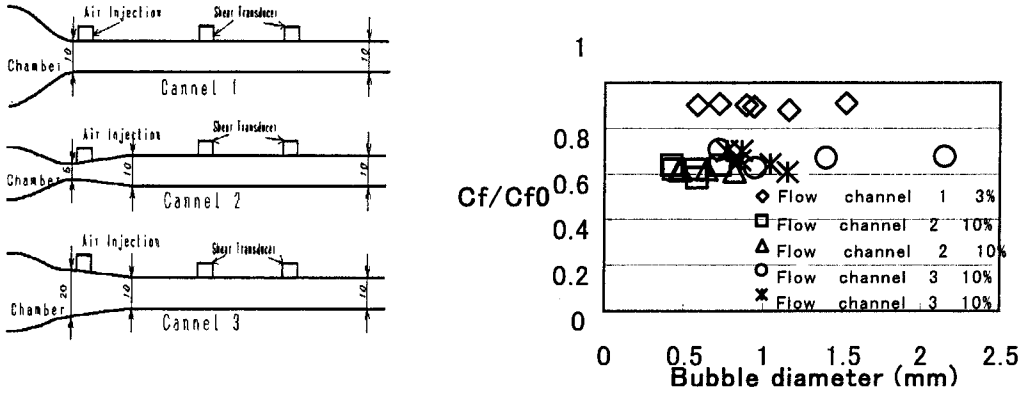
図 7.2.1.2 (図 4.2.3.10 再掲) 12m 平板模型船実験における壁近傍平均ボイド率と局所摩擦抵抗低減率の関係

7.2.2 気泡径の影響

一定の吹き出し空気量の下に摩擦抵抗低減効果を最大にする気泡径はいくらか? この質問の答えは未だ見つかっていない。見つかっていない主な理由は、発生気泡径の制御が困難なことである。例えば、図 3.2.1(b)のような発生方法では、流速を上げると気泡径は小さくなるが、それでは低減効果を調べる実験状態の流速も変化し、同一状態で気泡径だけを変えることにならない。また、壁近傍に気泡を集めると低減効果が増えることが分かっているのであるから、気泡径の変化だけの影響を調べるためには、吹き出し空気量が同じだけではなく局所ボイド率分布も同じでなければならない。また、通常は、実験では困難な条件を容易に実現してくれる数値シミュレーションは、摩擦抵抗低減効果をシミュレートできない状況にあり(*Kawamura and Kodama 2002*)、この問題については期待できない。

つまり、上記の質問の答えを見つけることは容易でない。ただし、多くの研究者は、気泡径が小さいほど低減効果が大きくなるのではないかと考えているようである。

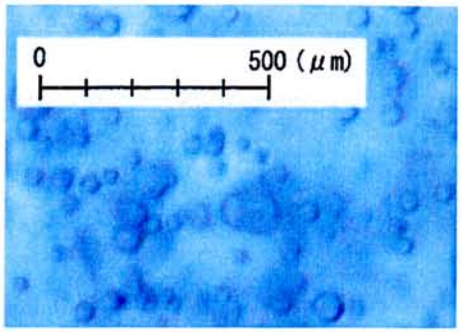
しかし、図 7.2.2.1 に示すように、*Moriguchi and Kato(2002)*は、小型 2 次元流路において気泡吹き出し部と試験部の流路高さを変えることにより、計測部において気泡径を 0.5mm から 2.2mm まで変化させることに成功した。この制御方法から考えて、局所ボイド率分布は、計測されていないが、ほぼ同一であろう。図(b)に得られた壁面せん断応力の低減効果と気泡径の関係を示す。すなわち、この範囲の気泡径変化に対して低減効果に殆ど変化は見られなかった。



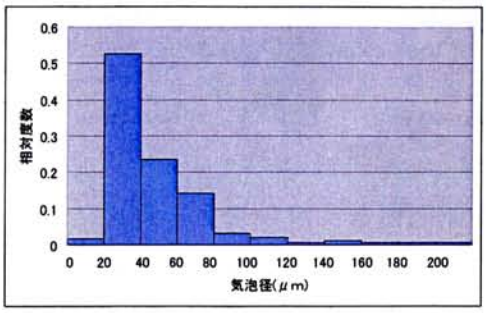
(a)流路高さ変更方法　　(b)気泡径と局所摩擦低減効果

図 7.2.2.1 流路高さ変更による気泡径制御(*Moriguchi and Kato 2002*)

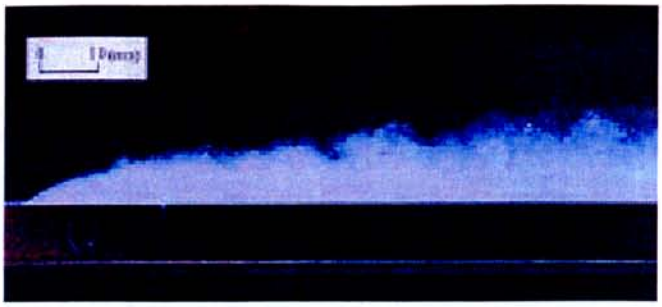
上記は、マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果が気泡径によらないという結果であるが、さらに小さな気泡径については検討の余地が残されている。*Kawamura et al.(2001)*は、高圧をかけて空気を大量に溶解させた水を大気圧に開放することによって、直径 20～40 μm の、従来より遙かに小さな気泡を生成した(図 7.2.2.2)。そして、その気泡水をスリットから吹き出し、マイクロバブル実験を行った。論文には壁面せん断応力の低減効果は記載されていないが、今後の発表が期待される。



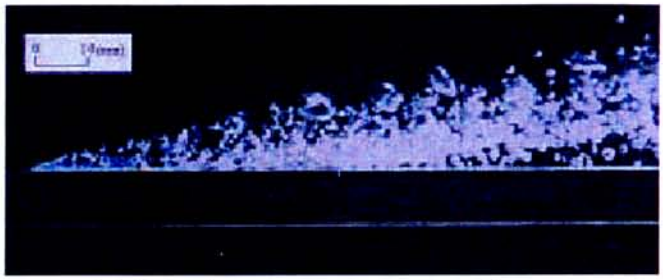
(a)気泡写真



(b)気泡径分布



(c)溶解法によるマイクロバブル



(d)従来法によるマイクロバブル

図 7.2.2.2 溶解法による超微細気泡の生成(*Kawamura et al. 2001*)

7.2.3 気泡径と乱流スケールとの比

*Gore and Crowe(1989)*は、乱流中に固体粒子または気泡が存在する場合の実験データを集め、縦軸に乱流強度の変化(%)を、横軸に粒子(気泡)径 d_p と乱流の代表的渦スケール l_e の比をとり、図 7.2.3.1 に示す結果を得た。この結果によれば、粒子(気泡)は、ある大きさ以上のとき乱流を促進し、以下のとき減衰させる働きをもつ。

Kato ら(*1998*)は、彼等の実験結果を説明するために上記と同様な説を示し、更に、気泡群は単独気泡よりも大きな乱流減衰効果をもつのではないかと述べている(図 7.2.3.2)。

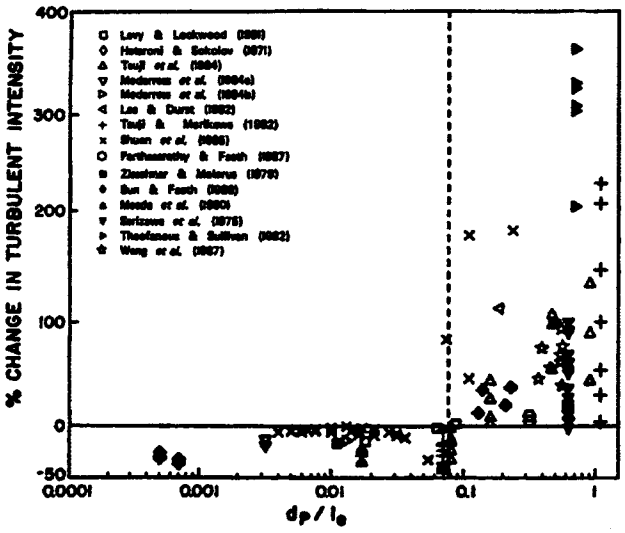


図 7.2.3.1 混相流における乱流強度の長さスケール比による変化 *(Gore and Crowe.1989)*

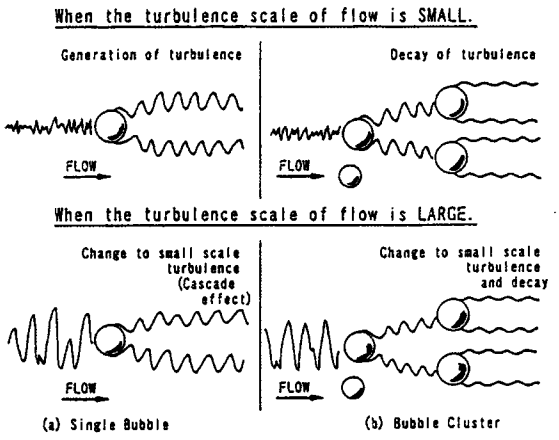
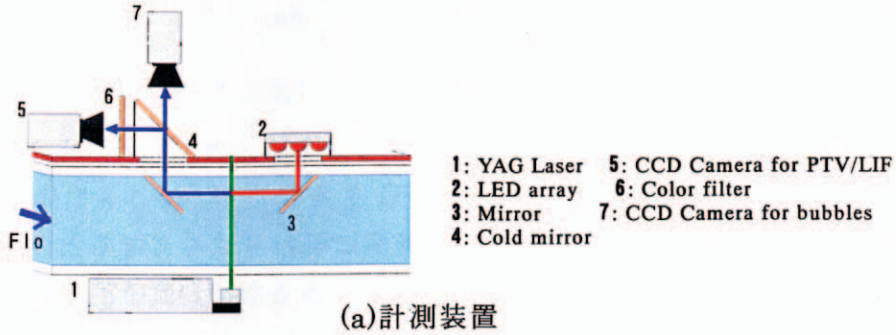


図 7.2.3.2 気泡径と乱流のスケール比による異なる干渉効果 (*Kato, et al.1998*)

7.2.4 チャンネル内気泡乱流の光学的計測

気泡流では気泡の存在が計測を困難にしている。*Kitagawa et al.(2003)*は、通常のPTV(Particle-Image Velocimetry、粒子画像流速計)を改良して、図 3.2.1 の小型高速流路において、水中に蛍光トレーサ粒子を混ぜ、流れに YaG レーザ・シート光を照射し、色フィルターを用いて気泡からの直接反射光を除去し、トレーサからの蛍光のみを取り込むことにより、気泡流中の流体部分の速度を計測した。さらに赤外光を照射し、気泡のシャドーイメージを分離して同時に計測した。このシステムは PTV/LIF/SIT(PTV, Laser-Induced Fluorescence, Shadow Image Technique)と呼ばれ、図 7.2.4.1(a)に計測システムを、(b)図に気泡のシャドーイメージの例を、(c)図に PTV/LIF によって得られた流体部分の速度ベクトル分布と気泡写真の重ね合わせ例を示す。

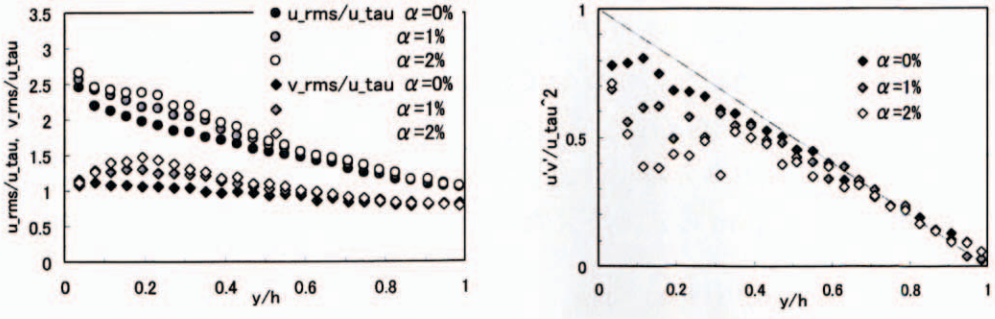


(a)計測装置

(b)気泡写真　　(c)液相の速度ベクトルと気泡

図 7.2.4.1 小型高速流路内に設置された PTV/LIF/SIT 計測システム (Kitagawa et al. 2003).

小型高速流路において配列多孔板を用いて気泡を生成し、平均流速 U=5m/s で x_a=0.5m の位置で計測した結果を図 7.2.4.2 に示す。図(a)は、流路内平均ボイド率が 0 から 2%まで変化したときの速度変動の計測結果であり、横軸は壁面からの距離を表す。平均ボイド率の増加に伴い、速度変動成分は増加している。図(b)にはレイノルズ応力分布を示す。レイノルズ応力は、平均ボイド率の増加に伴い、各速度変動成分が増加しているにも拘わらず、減少している。この結果はマイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムに有力な手がかりを与えるものであり、今後に期待がもてる。



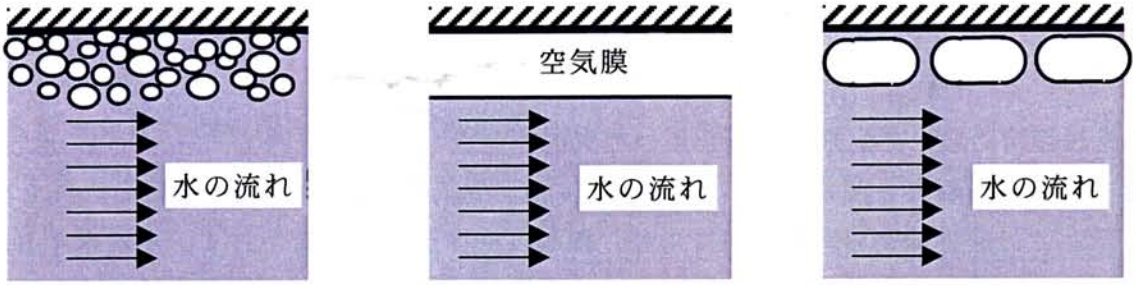
(a)液相の速度変動　　(b)液相のレイノルズ応力

図 7.2.4.2 PTV/LIF/SIT システムによるマイクロバブル流れの速度場計測 (Kitagawa et al. 2003)。V=5m/s. x_a=0.5m.

7.3 理論的研究

7.3.1 準空気膜状態の形成

壁面近傍に気泡が集中すると壁面せん断応力が低減するメカニズムのうち、恐らく最も容易に思いつくのは、壁の近くに集中して存在する気泡群(図 7.3.1.1a)が空気膜(図 7.3.1.1b)と類似な役割を果たし、水流の摩擦が壁面に伝わりにくくなるというものであろう。空気は水に比べて密度は 1/1000、粘度は 1/100 であるため、直感的には分かるような気がするが、この説を理論的に裏付けるのは簡単ではない。というのは、気泡が密に分布して相互作用が強まると、現代の最先端の知識でも解けない難問となるからである。しかし、例えば *Sugiyama et al.（2001）* は、図 7.3.1.1(c)のように、壁面近くに free slip の表面をもつ扁平な気泡が並んでいる状態を想定して理論解析を行い、その扁平率が 2 を越えると壁面せん断応力の低減効果が現れる、すなわち空気膜の作用に近づく、という結果を導いている。



(a)気泡群　　(b)空気膜　　(c)扁平気泡列

図 7.3.1.1 準空気膜状態の形成 *Sugiyama et al.（2001）*

7.3.2 混合長理論に基づくマイクロバブル流れのモデル計算

流体の粘性係数が大きくなると、壁面摩擦係数は、層流の場合には増大するが、乱流の場合には、乱流の抑制による渦粘性の減少効果の方が大きいため、逆に減少する。その例としてモデル計算を次に示す。*Madavan* ら(*1985*)は、図 7.3.2.1 に示すように、境界層内に最大値 0.5 の台形型のボイド率分布を仮定して平板上の乱流境界層を計算した。混相流体の分子粘性係数 μ_m は Einstein の式で与えた。密度 ρ_m はボイド率比で次式で与えた。

$$\rho_m = \rho_l(1-\alpha) + \rho_g\alpha \tag{7.3.2.1}$$

ただし ρ_l は水の密度、ρ_g は空気の密度である。有効粘性係数 $\mu_e(\equiv \mu_m + \mu_t)$ を、乱流粘性係数 μ_t が速度勾配と混合距離の 2 乗に比例すると仮定して、次式で表す。

$$\mu_e = \mu_m + \rho_m l^2 \left|\frac{\partial u}{\partial y}\right| \tag{7.3.2.2}$$

ただし混合距離 l は次式で与えられる。

$$\frac{l}{\delta} = Dk_2 \tanh(\frac{k_1 y}{k_2 \delta}) \qquad (7.3.2.3)$$

ここでδは境界層厚さであり、定数は$k_1 = 0.4$、$k_2 = 0.108$と与える。そして van Driest の減衰係数Dは次式で与える。

$$D = 1 - \exp(-\frac{y_m^+}{A^+}) \qquad (7.3.2.4)$$

ただし定数$A^+ = 26$であり、y_m^+は壁面せん断応力と混相流の密度・粘性係数で無次元化された y であり、単相の液体の密度・粘性係数で無次元化されたy_l^+と次式の関係にある。

$$y_m^+ \equiv y\frac{\sqrt{\tau_w \rho_m}}{\mu_m} = y\frac{\sqrt{\tau_w \rho_l}}{\mu_l}\frac{\mu_l}{\mu_m}\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_l}} = y_l^+ \frac{\mu_l}{\mu_m}\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_l}} \qquad (7.3.2.5)$$

上式を(7.3.2.4)式に代入すると

$$D = 1 - \exp(-\frac{y_l^+}{A^+}\frac{\mu_l}{\mu_m}\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_l}}) \qquad (7.3.2.6)$$

(7.3.2.1)～(7.3.2.6)式によりモデル化された、気泡が乱流に及ぼす影響は次のように表せる。気泡流では、

1) 密度ρ_mは、(7.3.2.1)式が示すように、ボイド率に比例して小さくなる。
2) 分子粘性係数μ_mも、密度ρ_mと同様にボイド率に比例して単相の分子粘性係数の値より大きくなる。
3) 乱流粘性係数μ_tは、先ず(7.3.2.2)式の右辺第 2 項と(7.3.2.6)式中にある密度ρ_mの減少によって、減少する。さらに、(7.3.2.6)式中にある粘性係数μ_mの増大によって、減少する。

*Madavan ら(1985)*は、2 次元平板上の気泡流境界層を、上記のモデル化を RANS 方程式に組み込んで計算した。図 7.3.2.1 の左端に、境界層内に仮定された最大値 0.5 のボイド率分布を示す。その右に粘性係数分布と密度分布を示す。一番右には、計算結果として得られた有効粘性係数分布を示す。境界層外端近くを除いて、気泡によって有効粘性係数が減少している。図 7.3.2.2 に、計算の結果得られた壁面摩擦係数C_f分布を示す。横軸は流れ方向距離である。破線の状態 A は非気泡状態を示し、流れは最初は層流でC_fは逓減するが、途中から乱流に遷移して大きく増加し、それ以降再び逓減する。状態 B 以降は図 7.3.2.1 で分布が与えられた気泡状態を示し、ボイド率分布台形の 4 隅のy^+の値をパラメータとして示してある。図中の斜線部は、単相流状態から気泡流状態への遷移域を示す。状態 B では気泡は粘性底層から分布が始まり、かなり大きなC_fの低減効果がある。状態 C では粘性底層を過ぎたあたりから分布が始まり、C_fの低減効果は最大になる。D、E、F と分布が始まるy^+位置が高くなるにつれて低減効果は減っていく。

以上により、気泡による壁面摩擦係数低減効果は、気泡による見かけの分子粘性の増加、密度の低下、混合距離の低減により説明できるということができる。

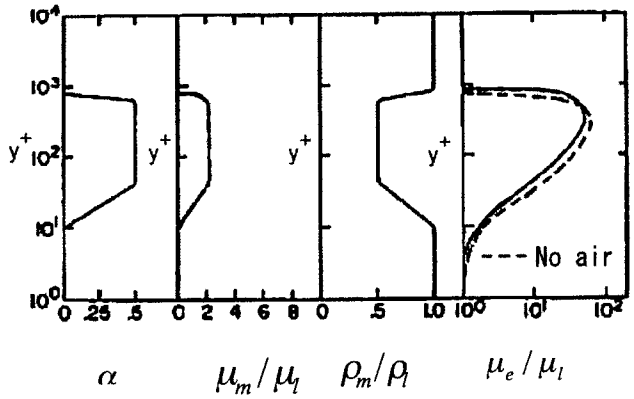


図 7.3.2.1 仮定されたボイド率分布等と得られた渦粘性係数分布(*Madavan* et al. *1985*)

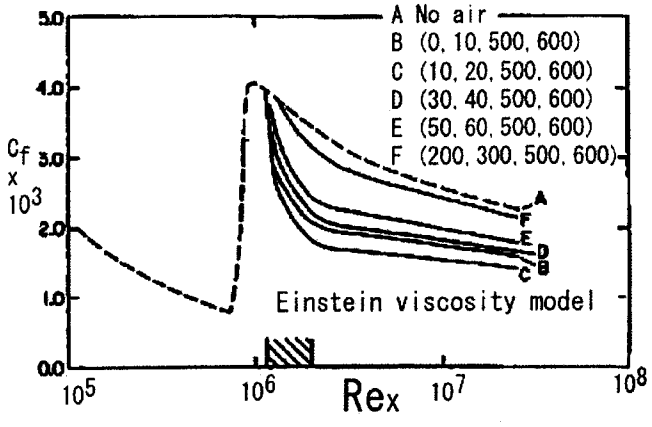


図 7.3.2.2 壁面摩擦係数分布の計算結果(*Madavan* etal. *1985*)

7.3.3 小さな粒子を含む薄い懸濁流体の粘性

混相流について数少ない理論解析結果が、次に述べる Einstein の式（*Batchelor 1972*）である。粘性係数 μ_l の流体中に微小な固体粒子が充分に小さなボイド率 α で均一に存在しているとき、その混相流体の粘性係数 μ_m は次式で与えられる。

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = 1 + 2.5\alpha \tag{7.3.3.1}$$

すなわち、粒子の存在によって見かけの粘性係数が大きくなる。その理由は、流れの中に粒子が存在すると、排除効果によって流れの速度あるいは速度勾配が大きくなるためである。小さな気泡についても、固体粒子と同様な振る舞いをするので、上式が成り立つ。

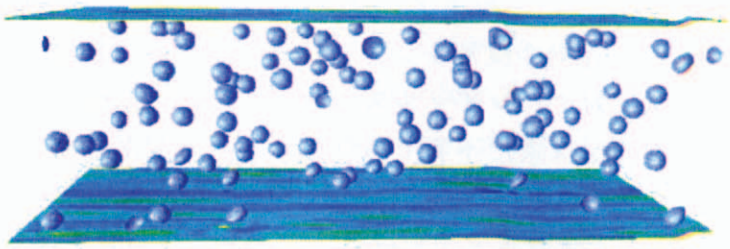
7.3.4 チャンネル内気泡乱流の直接数値シミュレーション

*Sugiyama(2001)*はチャンネル内に単一の大きさの気泡が一様に分布した場合の流れに関する直接数値シミュレーション結果を示している。計算では、乱流だけでなく、気泡の運動と変形までもが直接数値シミュレーション手法によって解かれており、非圧縮流体の仮定を除いては、恐らく実現象に最も近いシミュレーションであると思われる。計算条件は以下の通りである。先ず、気泡を導入する前に、単相流の充分に発達した乱流状態を、摩擦速度 U_τ とチャンネルの半幅 H/2 に基づくレイノルズ数 $Re_{\tau 0}$=180 の状態で計算した。流れ方向とスパン方向に周期境界条件を用いた。無次元時刻 $t^+ = u_{\tau 0}^2 t / \nu_0 = 0$ に直径 0.2H の気泡が 98 個ランダムな位置に導入された。平均ボイド率は 1%であった。平均速度と気泡径に基づく Weber 数は 148 であった。浮力は考慮されていない。計算結果を図 7.3.4.1 に示す。

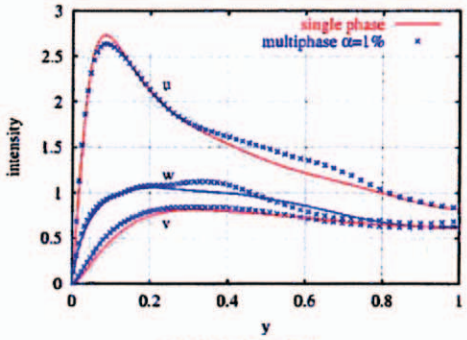
流れの中の気泡の様子を(a)図に示す。壁面近くの気泡は変形している。壁面せん断応力がカラーで示され、ストリーク構造が観察される。(b)図に $y^+ = 14$ における 3 方向の速度変動が示される。主流方向の u のピーク値がやや減少する以外は、気泡によって速度変動が増加している。(c)図にレイノルズ応力を示す。気泡により増加している。(d)図に壁面摩

擦係数の時間履歴を示す。これも気泡によりやや増加している。

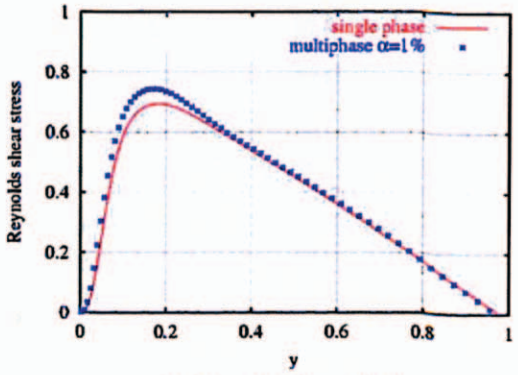
すなわち、この直接数値シミュレーションでは気泡によって壁面せん断応力はわずかに増加し、実現象と反対の結果となった。



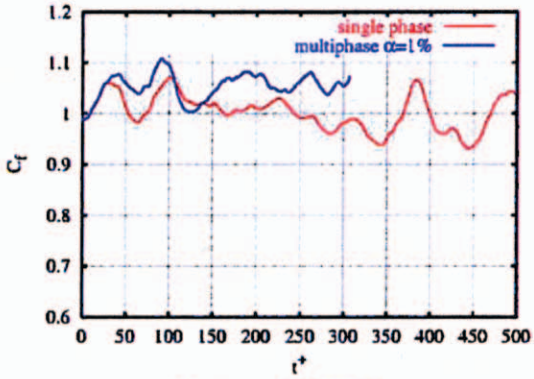
(a)可視化図



(b)速度変動



(c)レイノルズ応力



(d)壁面摩擦係数

図 7.3.4.1 チャンネル内気泡乱流の直接数値シミュレーション(*Sugiyama. et al. 2001*)

7.4 結論

マイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズムについて、以下のことが言える。

・マイクロバブルによる局所摩擦低減効果と壁近傍の局所ボイド率は強い正の相関をもつことが、数多くの実験によって確認されている。

・マイクロバブルによる局所摩擦低減効果と気泡径との関係は十分に解明されていないが、直径 0.5mm から 2.2mm までの範囲では低減効果に影響しないことが実験的に明らかになった。

・固体粒子や気泡が乱流中に混入することにより、多くの実験結果を総合すると、粒子あるいは気泡の大きさが乱流のスケールに比べて大きい場合は乱流が強まり、小さい場合は弱まるということが言える。

・せん断流中で気泡が壁に近接して並んで存在する場合、気泡の扁平度が 2 を超えると準空気膜状態となり、壁面せん断力が低減することが理論的に示された。

・マイクロバブル流れ、すなわちせん断流中に気泡が存在する場合、流れの乱れ度は増大

するが、レイノルズ応力が減少することが光学的計測法を用いた実験により明らかになった。

・混合長理論を用いたモデル計算により、せん断乱流中に気泡が存在する場合、粘性係数は増大するが、壁面摩擦係数は乱流の抑制による渦粘性の減少効果の方が大きいため、逆に減少することが示された。

・チャンネル内流れにおいて、乱流運動と気泡の運動や変形をシミュレートする直接数値シミュレーションによれば、実験結果とは反対に、レイノルズ応力は増加し、壁面摩擦も増加した。この実験と計算の不一致の原因は未だ不明であり、今後の研究が必要である。

第 8 章 マイクロバブルの実用化のための今後の課題

第 6 章で述べたように、SR239 研究部会では青雲丸を用いた実船実験においてマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果(3%)が得られ、且つ正味の省エネルギー効果(2%)が得られた。これはマイクロバブルの実用化に関する研究の中で最大の成果であるといえる。しかし、実用化のためにはこれらの低減量をさらに大きくする必要がある。どの程度大きくすれば十分かについては定説が無いが、2 倍程度にはする必要があると思われる。そのためには、単位吹き出し空気量あたりの摩擦抵抗低減量、すなわち摩擦抵抗低減効率を大きくする必要があり、さらにそのためには摩擦抵抗低減メカニズムの解明が必要である。

実用化を支える重要な点は、実際の船、例えば商船において、どの程度の空気流量でどの程度の摩擦抵抗低減が達成できるかを正確に推定できることである。そのためには、先ず非気泡状態での実船まわりの流れの推定技術、すなわち CFD を用いた実船レイノルズ数における船体まわり流れの数値シミュレーション技術が必要であり、さらに、その流れに乗って運動する気泡の数値シミュレーション技術が必要である。これらが正確に推定できれば、吹き出した気泡が船体を覆う様子と、それによる摩擦抵抗低減効果も推定することができる。しかし現状ではこれらの技術は十分な精度をもっておらず、青雲丸の実船実験においても、CFD 手法によって推定された気泡運動に対して、実際の流れでは、気泡が群として運動し、推定よりも上方にずれたり、局所摩擦低減効果が得られなかったりした。さらに改良が必要である。

第 5 章に示したように、大スケールでの実験データを基に、実船における摩擦抵抗低減効果を推定する方法もある。この方法は、50m 平板模型船実験のように実船に近いスケールで実験を行うことができれば、確実な方法であると考えられる。この場合には、模型実験と実船において統一した吹き出し空気量の表現方法が必要となり、本研究では相当空気厚さ t_a(mm)を提案したが、有次元量であり、無次元化量の検討が今後必要である。また、実船では曲率や圧力勾配など 3 次元影響があるため、平板実験の結果をある程度修正して用いる必要があり、さらに、清水と海水の物性の違いも問題になる。第 4.1.4 節では清水と海水について局所摩擦低減効果を比較したが、小型流路に関する結果であり、大きなスケールにおける両者の比較は今後の課題である。

摩擦抵抗低減メカニズムを解明することは、低減効果を高めるために重要である。第 7 章では、実験、理論、数値計算について様々な研究結果を総合し、それに著者の実験結果を踏まえ、メカニズムの解明について、できるだけ確実な実験結果あるいは根拠を提示することに努めた。実験によるメカニズム解明では、摩擦抵抗低減効果に対する主要因を特定することが重要であり、壁近傍のボイド率が最も重要なパラメータであることは、ほぼ確実に言うことができる。それ以外では気泡径や気泡の変形の影響、平衡状態あるいは過渡的状態などの状態変化の影響、などが主な要因として提示できる。理論あるいは数値的には、実効粘性の増加などいくつかの要因が提示されているが、最も高精度な手法であると考えられる直接数値シミュレーションが摩擦抵抗低減をシミュレートできないのが現状であり、今後の研究の発展を待つ必要がある。

いずれにしても、摩擦抵抗低減効果を大きくすることが最も重要であるといえる。この

場合に注意すべきは、実船状態において低減効果を大きくすることであり、例えば模型船では重要でない粗度の問題も考慮する必要がある。関連して最近、滑面の数倍の大きさの摩擦を発生する粗面にマイクロバブルを流すと、その摩擦が滑面にバブルを流した場合と同じレベルまで減少するという、恰もバブルが実質的に粗面を滑面のように見せかけてしまうという、実験結果が報告された(*Deutsch et al. 2003*)。実用的にも重要な情報である。

マイクロバブルは学術的にも興味深い研究対象である。その摩擦抵抗低減メカニズムには乱流現象が深く関わっている。このような基礎的研究面での進展は広い波及効果をもつことが期待され、環境保全や先進技術開発など、工学的多方面への適用が望まれる。

第9章 結論

本研究では、摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブル法の実用化を目的として、実験を中心とした検討を行った。主な結論は以下の通りである。

第1章では、マイクロバブル法の研究が1973年に始まり、現在は我が国において実用化を目指した研究が活発に行われていることを示し、本研究の位置づけを明らかにした。

第2章では、実船の表面に存在する乱流境界層において、レイノルズ応力を発生させるバースト現象が摩擦抵抗増加の主因であることを示し、マイクロバブルと境界層内乱動との干渉により摩擦抵抗の低減する可能性を示した。

第3章では、実船においては大きなレイノルズ数のため境界層内のバッファ層が0.01mm程度と非常に薄くなり、リブレットなど壁近傍で動作し摩擦速度で無次元化される摩擦抵抗低減デバイスは非実用的となるが、マイクロバブル法は、境界層内の壁から少し離れた位置で動作するため、実船に適用できる可能性があることを示した。

第4章では、小型高速流路及び長尺平板模型船を用いたマイクロバブル法に関する様々な実験的研究について示した。

第4.1節では、小型高速流路実験の結果を整理した。その結果、吹き出し空気量の統一的なパラメータ表現方法として、相当空気厚さt_a(mm)を提案し、t_aを用いることにより、異なった大きさの装置を用いた複数の実験データを比較することが可能であることを示した。また、マイクロバブルによる局所摩擦低減率について管路影響(wall effect)を補正する方法としてBlasiusの式を用いる方法を提案し適用した。さらに、吸い込み管を用いた局所ボイド率計測では、計測位置における流速に応じて吸い込み圧力を調整することが正確な計測のために重要であること示した。また、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果は、摩擦速度で無次元化された壁からの距離y^+が1000以下の領域の平均ボイド率とよい相関を示すことを明らかにした。流体の物性の影響については、清水と海水を用いてマイクロバブル実験を行い、気泡吹き出し位置から1.5m下流までの範囲では、海水使用により気泡径は小さくなるものの摩擦抵抗低減効果に大きな差は無いことを明らかにした。

第4.2節では、400m曳航水槽において長さ12mの平板模型船を曳航した状態で行ったマイクロバブル実験の結果を整理した。その結果、計測されたマイクロバブルによる局所摩擦低減量を積分した量が、同時計測された全抵抗の低減量と良く一致すること、すなわち局所摩擦計測結果が妥当であることを示した。また、気泡吹き出し状態で局所ボイド率計測を行い、吹き出し位置から下流では壁近傍の気泡が急速に境界層内に拡散することを示し、管内流と同様に、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果が壁から$y^+ \leq 1000$の領域の平均ボイド率と強い相関をもつことを明らかにした。

第4.3節では、12m平板模型船に平行部を増設して長さを50mにした平板模型船について抵抗試験を行い、摩擦抵抗成分が全抵抗の大部分を占める、マイクロバブル実験に適した船型であること、気泡吹き出し位置から50m近い下流においても摩擦低減効果があること、気泡吹き出し位置における境界層厚さは摩擦抵抗低減効果に殆ど影響しないことを明らかにした。

第4.4節では、気泡発生装置として多孔質板(PP)、配列多孔板(AHP)、スロット板(SP)

の3種類を用いた比較実験の結果として、吹き出し空気量が多い場合に、PPとSPはAHPに比べて摩擦抵抗低減率がやや大きいこと、気泡吹き出しに伴う圧力損失は、SPが最も小さくAHPが続き、PPは他の2者に比べて遙かに大きいこと、従ってSPが実船に最も適した気泡発生方法であることを明らかにした。

第4.5節では、長さ34mの平板模型船に青雲丸を用いたマイクロバブル法の実船実験のために開発された気泡発生装置、局所せん断力センサ、局所ボイド率計、配線フェアリングを取り付け、実船と同じ速度で計測を行い、個々の装置が所定の性能を発揮することを示した。

第5章では、第4章で得られたマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の実験データを基に、実船におけるマイクロバブルの省エネルギー効果を推定する方法を導出した。その方法を長さ100mの肥大船型に適用した結果、t_a=10mmに相当する吹き出し空気量の場合に、正味4%の省エネルギー効果が得られることを示した。

第6章では、青雲丸を用いたマイクロバブルの実船実験（(社)日本造船研究協会第239研究部会との共同研究）の結果について概要を示し、マイクロバブルにより3%の摩擦抵抗低減効果と正味2%の省エネルギー効果が得られたこと、プロペラに気泡が流入するとプロペラ性能が低下すること、マイクロバブルの注入により船尾振動が低減することなどを示した。

第7章では、マイクロバブルの摩擦抵抗低減メカニズムについてこれまでの実験的あるいは理論的研究をレビューし、実験的には気泡と乱流の干渉効果が明らかにされつつあるが、理論的には解明に至っていないことなどを示し、本研究による実験データの重要性を明らかにした。

最後に、第8章では、マイクロバブルを用いた船舶の摩擦抵抗低減法実用化のための今後の課題について考察し、本研究の実験データベースの推定法から尺度影響を含めた実船性能推定法を開発するためには、抵抗低減メカニズムの理論的な解明、CFDを用いた気泡運動推定手法、曲率や圧力勾配などの3次元影響の解明などが重要な課題であること、それらの解決により精度高い推定が可能になることを示した。

謝辞

はじめに、指導教官である鈴木敏夫大阪大学教授に感謝いたします。鈴木教授には、本論文作成についていつも気にかけてくださり、こちらの質問や依頼に対し、ご多忙中にも、常にすばやいレスポンスやご足労を下さり、そして忍耐強くご指導していただきました。

マイクロバブル研究の先駆けとなった基礎的研究を行った、ソ連や米国の研究者方々に敬意を表します。それらに着目し、マイクロバブルを船舶への実用化研究に着手された、加藤洋治教授（東京大学名誉教授、現東洋大学教授）や研究室の方々にも敬意を表します。特に Dr. M. M. Guin には、海技研でのマイクロバブル研究開始当時に、実験流路や計測装置の製作について貴重なアドバイスもいただきました。また渡邊修博士を初めとする IHI 研究者の方々には長尺平板模型船の設計において有益なアドバイスを頂きました。ここに感謝いたします。

以下の３つのマイクロバブルに関する国家的研究プロジェクトに、メンバーとして参加させていただけたことに感謝いたします。

本研究は、先ず運輸省(現国土交通省)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」(H7～12)の一部として実施され、小型高速流路の建設など、本研究の基礎固めが行われました。

（社)日本造船研究協会 SR239 研究部会(H10～H13）においては、多くの造船関係者らの中で実験的研究を行うことができ、その成果の多くを本論文にまとめることができました。また、最終年度に実船実験により摩擦抵抗の低減を実際に確認できたことは、その後のマイクロバブル研究への励ましと原動力となり、今後の課題も明確になりました。鈴木敏夫部会長(大阪大学)、土岐直二主幹事(三菱重工業(株))をはじめ委員の方々に感謝いたします。

文科省科学技術振興調整費開放融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」(H12～H16）においては、大学や国の研究者達が横断的な研究体制のもとで集まり、最先端の研究成果の情報を得ることができ、マイクロバブルを含む乱流制御研究のすそ野の広がりを経験し、視野の広がりと多くの刺激を受けました。両研究会の委員各位に感謝いたします。

実験に参加し協力していただいた多くの関係者に感謝いたします。奈良義治氏、長田洋氏、倉内誠吾氏は、当時推進性能部の工場において模型船や機器を製作され、こちらからの度重なる注文に対応して 50m 平板模型船を製作して下さり、初めて実験が成立しました。また、400m 水槽での曳航実験では、多数の方々に、準備からかたづけまでご協力いただきました。角川明氏、堀利文氏、牧野雅彦氏の各主任研究員、川島英幹氏、長屋茂樹氏、Dr. Frederique Larrarte の各研究員、上田隆康氏らの尽力やご協力のおかげで、与えられた水槽使用予定期間内に必要な実験データを得ることができ、海技研の実験実施における関係者各位に感謝いたします。

現在、同じ知的乱流制御研究センターで研究に従事している、杉山和靖研究員、北川石英研究員らの計算結果や計測結果も示唆するものが多く、大いに参考にさせていただきました。事務の山口綾子氏にもいろいろ補助していただきました。同センター各位に感謝い

たします。

英国ノッチンガム大学の Kwing-So Choi 博士は、摩擦抵抗低減デバイスに関する著名な研究者であり、著者の 2000 年の留学時には研究などのアドバイスや励ましをいただき感謝しております。

児玉良明知的乱流制御研究センター長には、マイクロバブル研究について、海技研内においても、上記プロジェクトにおいても先導され、著者もプロジェクトほぼ開始当初から参加させていただき、一貫した研究指導と励まし、氏のご協力がなければ本論文の完成はなく、こうしてまとめることができたことを感謝いたします。

参考文献

Batchelor, G.K. (1972), *流体力学*, 東京電機大学出版局.

Bogdevich、V.G. et al. (1977)、 *Gas-Saturation Effect on Near-Wall Turbulence Characteristics*、 2nd Int. Conf. on Drag Reduction、 August 31-Sept. 2.

Choi, K.S. (1992), 日本機械学会誌 1992.11.

Choi, K.S. et al. (1997), *Turbulent Boundary-layer Control by means of Spanwise-wall Oscillation*、 AIAA Paper 97-1795.

Choi, K.S. (2001)、*Experimental Research on Turbulent Flow over Compliant walls*、 IUTAM Symposium on Flow pas Highly Compliant Boundaries and in Collapsible Tubes,pp.275-pp.292.

Deutsch, S., Moeny, M., Fontaine, A. and Petrie, H. (2003), *Microbubble Drag Reduction in Rough Walled Turbulent Boundary Layers,* ASME FEDSM2003-45647.

遠藤誉英、笠木伸英 (2001)、*Turbulence Control in Low-to-Moderate Reynolds Number Flows*、 第 2 回知的乱流制御シンポジウム。

Fukuda, K. et al. (1999), *Frictional Drag Reduction with Air Lubricant over Super Water Repellent Surface (2nd report)-- Resistance Tests of Tanker and High Length-to-beam-ratio Ship Models* --、日本造船学会論文集 vol.186、pp.73-81.

Fukuda, K., Tokunaga, J., Nobunaga, T., Nakatani, T., Iwasaki, T., and Kunitake, Y. (2000), *Frictional Drag Reduction with Air Lubricant over a Super-water Repellent Surface,* J. of Marine Science and Technology, vol. 5, pp.123-130.

Gore, R.A. and Crowe, C.T. (1989), *Effect of Bubble Size on Modulating Turbulent Intensity*, Int. J. of Multiphase Flow, Vol.15, No.2, pp.279-285.

Guin、 M.M. et al. (1996)、 *Reduction of Skin Friction by Microbubbles and its Relation with Near-Wall Bubble Concentration in a Channel*、 J. of Marine Science and Technology、 vol.1、 No.5、 pp.241-254.

日野幹雄 (1976)、「流体力学」、朝倉書店。

Holst, T. (1990) *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, Progress an Astronautics and Aeronautics vol.123.

池本晶彦、加藤洋治、吉田有希 (2002)、*実船実験用ボイド率計の開発*、日本造船学会論文集、第 191 号、pp.43-50。

笠木伸英 (1992)、 *乱流の制御--その展望--*、日本機械学会 No.920-75 セミナー教材.

加藤洋治 (1988), *熱流動の能動制御*、日本機会学会ワークショップ.

Kato, H. et al. (1994), *Frictional Drag Reduction by Injecting Bubbly Water into Turbulent Boundary Layer*、 Cavitation and Gas Liquid Flow in Fluid Machinery and De-vices、 FED-vol.190、 ASME、 pp185-194.

Kato, H. et al. (1998), *Effect of Microbubble Cluster on Turbulent Flow Structure*、 IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control、

Gottingen.

川北千春、高野真一 (2000), *流れ方向圧力勾配と曲面形状がマイクロバブルによる摩擦低減効果に及ぼす影響*, 日本造船学会論文集第 188 号, pp.11-21

Kawamura, T. et al. (2001), *Controlling the Size of Microbubbles for Drag Reduction*, 3rd Int. Symp. on Smart Control of Turbulence, Tokyo.

Kawamura, T. and Kodama, Y. (2002), Int. J. of Heat and Fluid Flow, 23, pp.627-638.

川島英幹他 (1998), 第 72 回船研発表会講演集、pp.107-110.

Kitagawa, A., Fujiwara, A., Hishida, K., Kakugawa, A. and Kodama, Y. (2003), *Turbulence structures of microbubble flow measured by PIV/PTV and LIF techniques*, 4th Int. Symp. on Smart Control of Turbulence, Tokyo.

児玉良明 (2002)、*マイクロバブルの実用化の可能性と課題*、日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム、pp.150-185.

Kodama, Y. et al. (2000), *Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction.*、 Int. J. of Heat and Fluid Flow vol.21.

児玉良明、角川明、高橋孝仁、石川暁、川北千春、金井健、戸田保幸、加藤洋治、池本晶彦、山下和春、永松哲郎 (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－前編: 準備研究－*、日本造船学会論文集 第 192 号、pp.1-13.

Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Nagaya, S., Sugiyama, K., SR239 Committee of the Shipbuilding Research Association of Japan, (2002) *Microbubbles: Drag Reduction Mechanism and Applicability to Ships*, Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, 22 pages (CD-ROM).

航海訓練所 (1998)、*練習船 青雲丸-建造の記録-*。

Larrarte F. et al. (1997), *Trajectory of bubbles under a ship hull and scale effects*, 関西造船協会誌, 第 228 号, pp.1-6。

Legner, H.H. (1984), *A Simple Model for Gas Bubble Drag Reduction*, Physics of Fluids 27(12), pp.2788-2790.

Madavan, N.K. et al. (1984)、*Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles*、Physics of Fluids、 Vol.27、 No.2、 pp.356-363.

Madavan, N.K., Merkle, C. and Deutsch, S. (1985) *Numerical Investigations into the Mechanisms of Microbubble Drag Reduction*, ASME Journal of Fluids Engineering Vol.107, pp.370-377.

Madavan, N.K., Deutsch, S. and Merkle, C. (1985), *Measurements of Local Skin Friction in a Microbubble-modified Turblent Boundary*, J. of Fluid Mechanics, Vol.156, pp.237-256.

Marie, J.L. and Moursari, E. (1996), *Similarity Law and Turbulence Intensity Profiles in a Bubbly Boundary Layer at Low Void Fractions*,

McCormick、 M.E. and Bhattacharyya、 R. (1973)、 *Drag Reduction of a*

Submersible Hull by Electrolysis、 Naval Engineers Journal、 Vol.85、 No.2、 pp. 11-16.

Merkle, C. L. and Deutsch, S. (1990), *Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection*、 Progress in Astronautics and Aeronautics vol.123、 AIAA、 pp.351-412.

望月信介、大坂英雄 (1993)、機械の研究、45-6、pp.684-690.

Moriguchi, Y. and Kato, H. (2002), *Influence of microbubble diameter and bubble distribution on frictional resistance reduction by microbubbles*、J. of Marine Science and Technology vol.7, No.2, pp.79-85.

永松哲郎 (1989)、*乱れや剥離の制御*、日本造船学会推進性能研究委員会第 3 回シンポジウム「船体周りの流れと流体力」.

永松哲郎、児玉良明、角川明、高井通雄、村上恭二、石川暁、上入佐光、荻原誠功、吉田有希、鈴木敏夫、戸田保幸、加藤洋治、池本晶彦、山谷周二、芋生秀作、山下和春 (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－後編: 実船実験*－、日本造船学会論文集 第 192 号、pp.14-27.

Nagaya, S., Hishida, K., Kakugawa, A. and Kodama, Y (2001), *PIV/LIF Measurement of Wall Turbulence Modification by Microbubbles*、3rd Int. Symp. on Smart Control of Turbulence、 Tokyo.
(http://www.turbulence-control.gr.jp/symposium/FY2001/index.html)

日本機械学会訳 (1987), *計測の不確かさ*, 米国機会学会性能試験規約、丸善.

Schlichting、 H. (1968)、 *Boundary-Layer Theory*、 6th edition、 McGrawhill.

SR239 研究部会 (1999), *「船舶の摩擦抵抗低減に関する研究」成果報告書*、日本造船研究協会.

Sugiyama、 K. et al. (2001), *Numerical Simulations on Drag Reduction Mechanism by Microbubbles,* 3rd Int. Symp. on Smart Control of Turbulence, Tokyo.
(http://www.turbulence-control.gr.jp/symposium/FY2001/index.html)

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 号、pp1-8.

高橋孝仁、角川明、児玉良明 (1999)、*平板模型船を用いたマイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験*、日本流体力学会 1999 年会講演論文集、pp.237-238。

Takahashi、 T. et al. (2001)、 *Experimental study on drag reduction by microbubbles using a 50m-long flat plate ship*、 TSFP-2、 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena、 Vol.1、 June 2001、 Stockholm、 pp.175-180.

高橋孝仁、角川明、牧野雅彦、児玉良明 (2002)、*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*、pp.11-20、関西造船協会誌第 239 号。

高橋孝仁、児玉良明、角川明、牧野雅彦、川島英幹 (2003a)、*小型高速流路を用いたマイクロバブルに関する実験的研究*、関西造船協会論文集第 240 号掲載予定。

高橋孝仁、児玉良明、牧野雅彦、堀利文 (2003b)、*3 種類の吹き出し方法を用いたマイクロバブルに関する 実験的研究*、H15 日本造船学会秋期講演会。

戸田保幸、高橋孝仁他５名（2002）、*実船実験用せん断力計の開発*、関西造船協会誌第239号、pp.17-20。

Tokunaga、K.（1986）、*Reduction of Frictional Resistance of a Flat Plate by Microbubbles*、西部造船会会報 第73号、pp79-82。

渡辺修、増子章、白勢康（1998）、*長尺模型船を用いた微小気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減実験*、日本造船学会論文集第183号、1998年6月、pp53-63.

山下和春、永松哲郎、上入佐 光（2002）、*接着工法による船体外板への機器の装着*、西部造船会会報104号、2002.9。

Yoshida, Y. et al.（1998a）、*Distribution of void fraction in bubbly flow through a horizontal channel: Bubbly boundary layer flow*、*2nd report*、J. of Marine Science Technology 3、pp.30-36.

Yoshida, Y., Takahashi, Y., Kato, H. and Watanabe, O.（1998b）, *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.