

# マイクロバブルの摩擦低減効果に及ぼす 各種パラメータ影響の解明

輸送高度化研究領域 \*川島 久宜、牧野 雅彦、児玉 良明

## 1. はじめに

船舶による輸送力は、航空、車両に比べ格段に高く、今後も必要不可欠な輸送手段であり、航行性能の向上が強く望まれている。特に輸送量の大きい大型肥大船に着目すると、航行時に水から受ける抵抗の大部分は摩擦抵抗であり、これを削減することが性能向上に直結すると言える。

摩擦抵抗を削減する方法として、微小気泡を用いた方法（マイクロバブル法）がある。マイクロバブル法は、空気供給源、配管、吹き出し部を気基本構成とした極めて単純な構造であり、また、他の摩擦低減法と比べると高い低減効果を得られることから、現在最も実用化に近い手法であると期待されている。

Madavan[1]らは、多孔板を用いたモデル実験により、気泡注入直後で最大約 80 %程度まで摩擦抵抗が減少したことを報告している。近年 Kodama [2]らは、実船スケールに近い全長 50 m の長尺平板模型船を用いた実験を行い、マイクロバブル法により全抵抗、および、局所摩擦抵抗の低減を報告した。このようにマイクロバブル法はモデル実験、模型船を用いた実験により摩擦抵抗低減を得られることが示されているものの、その詳細なメカニズムが解明されておらず、そのため、空気吹き出し条件などの最適化がなされていない。

Kitagawa[3]らはマイクロバブル流れの詳細を調べる可視化法を開発し、気泡の変形によってレイノルズ応力が低減し摩擦抵抗低減に繋がるとの結果を得て、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムの解明について重要な進展があった。しかし、Kitagawa らの実験は一状態のみについてであり、そのメカニズムの正しさを検証するためには、吹き出し空気量、気泡径、分布などのパラメータを変化させた場合についても成り立つかを調べる必要がある。そこ

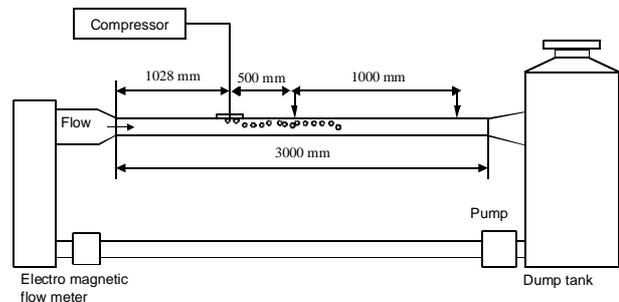


図 1 実験装置概略図

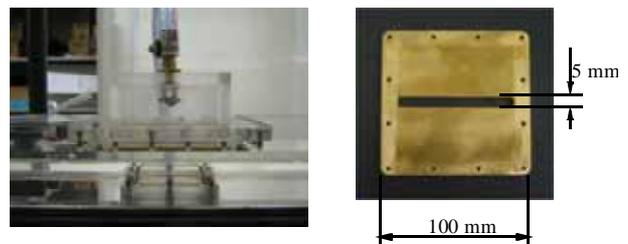


図 2 気泡発生部およびスロット部

で本研究では、水平流路を用いたマイクロバブルの可視化実験を主体に、空気流量、液体速度、計測位置などのパラメータを変化させた状態における摩擦低減効果と乱流摩擦成分の関係を調べる。

## 2. 実験装置および可視化方法

2.1 アクリル製水平流路 図 1 に実験装置概略図を示す。本装置は、ポンプ、電磁流量計、縮流部、可視化計測部を兼ねたアクリル製水平流路（ $L \times W \times H = 3000 \times 100 \times 20$  mm）、気泡注入部、ダンプタンクから構成される。作動液体には水を使用し、ポンプを駆動することにより流路内を連続的に回流する。

気泡は、コンプレッサからの圧縮空気流量を制御し、アクリル上端より下流に 1028 mm の位置（ $X_a = 0$ ）から流路内に注入される。気泡発生部には、流路幅方向に 76 mm、主流方向へ 5 mm のスロットを有した板を取り付け（図 2 参照）、PC

を用いて空気流量と液体速度を制御した。

2.2 画像計測 実験は、流路内のマイクロバブル流れに対して Kitagawa らが開発した計測システムを用いて画像計測を行う。本実験では、気泡発生部より下流 0.5 m, 1.5 m の位置で行った。

図 3 に流路断面における可視化計測システム概略図を示す。画像計測システムは、波長の異なるレーザー光（波長：532 nm）と赤外光 LED（波長：850 nm）、2 台の CCD カメラ、ミラーシステム（コールドミラー、カットオフフィルタ）、パルスジェネレータを使用する。マイクロバブル流れ中の流路中央断面における気泡の周囲液体を可視化できるように、2 枚の鏡を流路上壁より 45 度の角度に互いに向き合うように流路内に配置する。本計測システムではこれらの光学鏡を使用することにより、同時刻・平面における気泡周囲の液体と気泡の様子を分離して画像を取得することが可能となる。

画像計測ではレーザー光を流路下から照射し、一方、赤外光 LED を上側から流路内にある一方の鏡に向かって同時に照射する。レーザー光を用いてマイクロバブル流れを可視化する場合、気泡表面での散乱や、アクリル表面におけるハレーションが画像計測に弊害を与えることが知られている。本計測システムでは、これらの問題を回避できるように、液相の計測に対してレーザー光とは波長の異なる光を発する蛍光粒子を使用した LIF（Laser Induced Fluorescence）法を使用する。蛍光粒子から発する光とレーザー光は、コールドミラーにより流路水平方向に曲げられ、さらにカットオフフィルタを介することにより蛍光粒子からの光のみを CCD カメラに撮影する。一方、気泡の画像は、赤外光 LED を背景としたバックライト法を用いて他のカメラに撮影される。レーザー、赤外光 LED、CCD カメラは、それぞれパルスジェネレータを用いることにより駆動開始時刻を制御した。

撮影された画像に対して PTV（Particle Tracking Velocimetry）を用いて流路内の速度成分を算出する。図 4 に撮影された液相に対する画像、および、PTV 解析から得られる速度ベクトル例を示す。

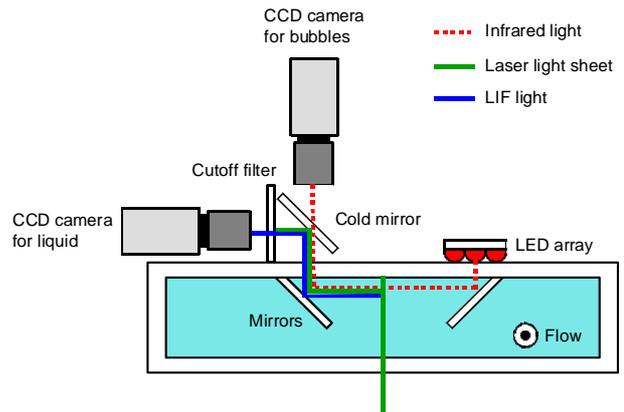


図 3 画像計測システム概略図(流路断面方向)

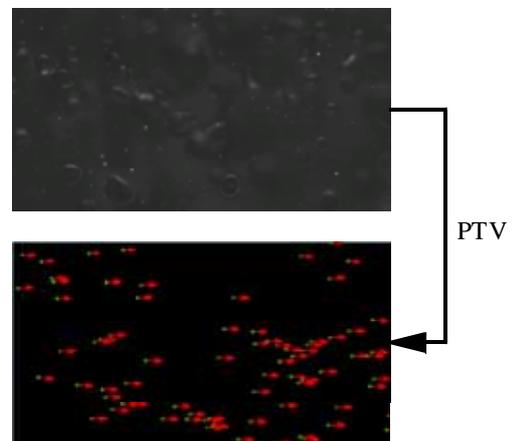


図 4 液相画像処理結果例

表 1 実験条件

Channel size	3000mm × 20 mm × 100mm
Channel half height	$h = 10$ mm
Liquid	water
Gas	air
Bulk liquid velocity	$U_m = 5.0, 7.0$ m/s
Thickness of air	$t_a = 0.0, 0.15, 0.2$ mm
Measurement position	$x_a = 0.5, 1.5$ m

### 3. 実験結果および考察

3.1 摩擦低減効果 実験では、流路内への空気吹き出し量 ( $Q_a$ )、液体流速 ( $U_m$ )、計測位置 ( $X_a$ ) を変化させた。表 1 に実験の緒言を示す。表中の  $t_a$  は空気吹き出し量の指標となる空気相当厚さを意味しており、流路幅 ( $B$ ) を用いて次式から算出される。

$$ta = \frac{Qa}{UmB} \quad (1)$$

図5に、空気吹き出し量、液体速度、計測位置を変化させた時、アクリル上壁面に取り付けられたせん断力センサの計測結果から算出された摩擦低減効果率を示す。図の横軸は空気相当厚さ( $ta$ )を、縦軸は液体単相における摩擦係数( $Cf0$ )を用いて正規化した無次元摩擦係数( $Cf/Cf0$ )である。図中にあるシンボルの白抜き、塗りつぶしは流速の違いを意味し、スタイルの違いは計測位置の違いを意味している。

図より、液体流速、計測位置にかかわらず空気吹き出し量が多いほど摩擦抵抗低減効果が大きいことがわかる。また、空気流量が同じ場合、空気吹き出し位置から近い方が、どちらの流速においても低減効果が大きいことがわかる。さらに、空気吹き出し量、計測位置が同じ場合、液体流速の違いが低減効果は大きいことがわかる。

**3.2 レイノルズ応力分布** 次に摩擦低減効果と画像計測から得られる液体中の乱流摩擦成分との関係について述べる。図6は、液体速度が異なる場合の流路内レイノルズ応力分布( $u'v'/U$ )を示している。図の横軸は流路半高さ( $h$ )を用いて正規化したアクリル上壁からの距離(0:アクリル上壁, 1:流路中央)を、縦軸は、摩擦速度( $U$ )を用いて正規化したレイノルズ応力である。また図には、液体単相と2条件の空気流量( $ta=0.15, 0.20$  mm)におけるレイノルズ応力分布が示されている。図6より流速の違いによらず、レイノルズ応力は気泡の混入により流路亘って低下していることがわかる。また、同じ流速の場合、空気流量が増すことによって、その低減量が大き

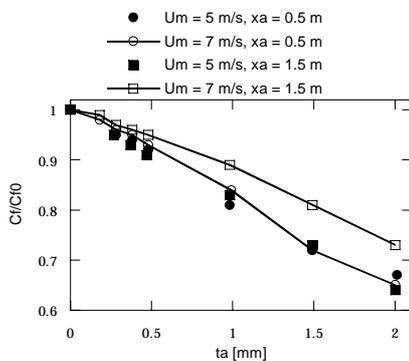


図5 摩擦低減効果

くなることわかる。さらに、空気吹き出し量が同じ場合、速度の違いが液相単相に比べレイノルズ応力の低下が大きいことがわかる。この結果は、壁面におけるせん断力センサの計測結果と同じ傾向を示している。

次に、図7に空気吹き出し部からの距離を変化させた場合のレイノルズ応力分布を示す。図中のシンボルの仕様は前図と同様である。図より、空気吹き出し部から距離にかかわらず、気泡を含むことによって、液相単相流に比べ流路内のレイノル

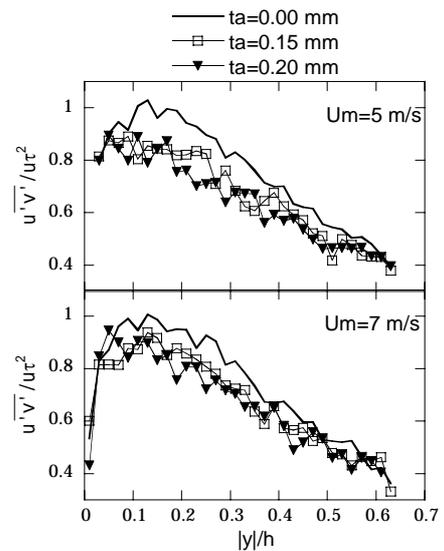


図6 液相レイノルズ応力分布 (空気流量, 液体速度の影響)

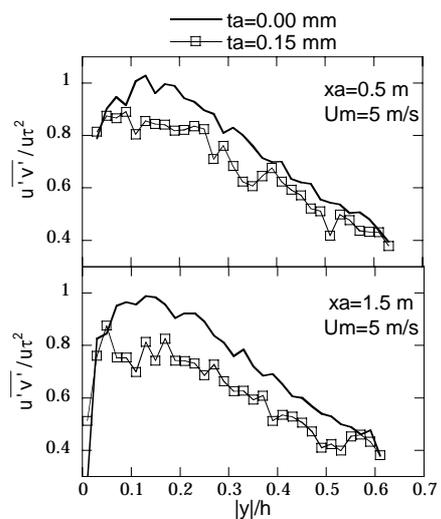


図7 液相レイノルズ応力分布 (空気流量, 液体速度の影響)

ズ応力は全域に亘って低下することがわかる。しかし、その低減量を比較すると、せん断力センサによる計測結果とは異なり、下流におけるレイノルズ応力の方がその低減量が大きいことがわかる。その原因として、下流に流れる際に気泡の合体、分裂、気泡径と形状の変化、分布の変化大きく影響しているものと考えられ、今後、気泡形状に着目した解析が必要であると言える。

**3.3 気泡画像** 次に空気流量，液体速度，計測位置を変化させた際の気泡の様子を図8に示す。画像より幾つの特徴が見られる。第1に，液体流速が早くなった場合，流路内の気泡径は小さくなり，また気泡個数が多くなっている。第2に空気流量が多くなった場合，合体の影響から大きな気泡が多数存在する。第3に，流路下流では，アクリル上壁面付近の気泡数が減り，また，気泡は大きくなっている。気泡の大きさは，変形などなどの形状効果を顕著に表すことから，従来示された気泡の変形と摩擦抵抗低減との関連性を強く表しており，今後，気泡の形状，大きさに着目した詳細な解析が必要であると言える。

#### 4. 今後の課題

図8に見られるように，マイクロバブル流れの可視化画像には，多くの気泡が存在しており，気泡像の重なり，被写体深度の影響が顕著に見られるものであった。今度，気泡の挙動とレイノルズ応力の低下，さらには摩擦低減量との関係を明らかにするためには，上述した問題を克服した気泡画像に対する定量的な解析法を開発することが必要である。

#### 5. まとめ

マイクロバブルを用いた摩擦抵抗低減のメカニズム解明に対し，水平流路内のマイクロバブル流れについて調べた。本実験では，流路内への空気流量，液体流速，計測位置を変化させ，摩擦低減効果とレイノルズ応力の変化に着目した。表2にパラメータを変化させた結果を示す。表より下流方向に対しては摩擦低減効果とレイノルズ応力低下の振舞いに違いが見られたものの，空気流量，液体速度を変化させた場合，両者は同様の振舞いをし，気泡を含むことにより摩擦低減効果とレイノルズ応力低下が対応付けられた。

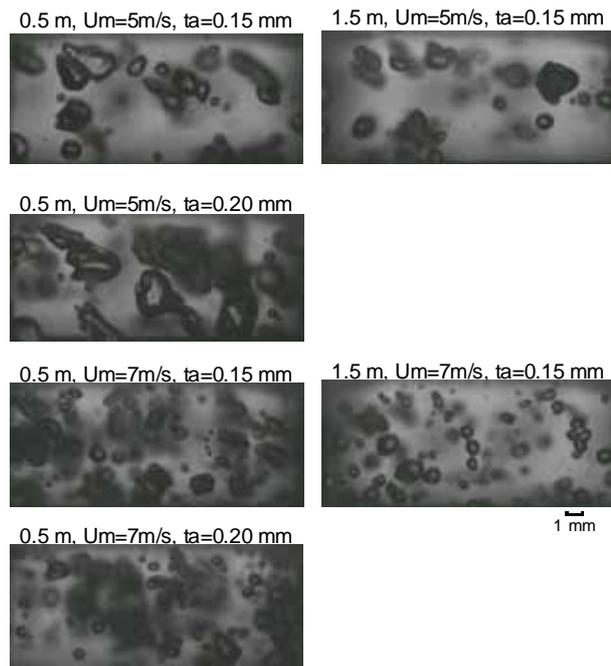


図 8 マイクロバブルの可視化画像

表 2 摩擦低減効果とレイノルズ応力との相関

	Reduction		Correlated
	Cf/Cfo	$\overline{u'v'}/u^2$	
Qa ↗	↗	↗	Yes
Um ↗	↘	↘	Yes
Xa ↗	↘	↗	No

#### 謝 辞

本研究は文部科学省（開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」）の支出を受けて行われた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Madavan et al., Phys. Fluids (1984), 27, 356-363.
- [2] Kodama et al., Int. J. Heat and Fluid Flow, (2000), 21, 582-588.
- [3] Kitagawa et al., Proceedings of 5th Int. Conf. on Multiphase Flow, (2004), ICMF-2004, pp.39, Paper No.521 (CD-ROM).