# マイクロバブルチャネル流における二相流乱流構造

知的乱流制御研究センター \*川島 久宜、牧野 雅彦、児玉 良明

## 1.はじめに

船が運航する際に水から受ける抵抗は、造波抵 抗と摩擦抵抗であり、特に大型タンカーの場合、 摩擦抵抗が主抵抗であることが知られている。そ のため、この抵抗を低減することが望まれており、 現在、微少気泡(マイクロバブル)を用いた方法 が注目されている。

Madavan[1]らは、多孔板を用いてマイクロバ ブルを注入し、最大約80%程度まで摩擦抵抗が減 少したことを確認した。Kodama[2]らは、実船ス ケールに近い全長50mの平底模型船や、実際の 船にマイクロバブルを用いた実験を行い、局所摩 擦抵抗および全摩擦抵抗が低減されることを確認 した。このようにマイクロバブルを用いた摩擦抵 抗低減法は、実際にその効果があることがモデル 実験や実際の船を用いた実験により報告されてい るものの、気泡の大きさ、形、分布、注入量、注 入方法などのパラメータが、どの様に摩擦抵抗に 対して影響を与えているかほとんど明らかになっ ていない。マイクロバブル用いた抵抗低減法を実 用化する為には、これらのパラメータの影響とそ のメカニズムを明らかにする必要がある。

現在まで摩擦抵抗低減に対して気泡の影響が明 らかにされていない要因の一つに、混相流に対す る定量的な計測が困難であることが挙げられる。 そこで本研究では、マイクロバブルを用いた摩擦 抵抗低減メカニズムの解明を目的として、水平流 路を用いたマイクロバブル流中の個々の気泡およ び気泡周囲の流体に着目した可視化実験を行う。 本稿では、近年まで得られていなかった気泡注入 による摩擦抵抗低減を明らかにした解析結果を示 し、その原因について考察する。

## 2.実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。実験では、可 視化部を兼ねたアクリル製水平チャネル流路、ダ



b3: CCD camera for liquid b4: CCD camera for bubbles b5: LED array **図 2 光学配置概略図 (流路断面方向)** 

🗩 Flow

ンプタンク、ポンプ、電磁流量計、空気取入れ部、 光学撮影系により構成される。可視化部のアクリ ル製チャネルにはマイクロバブルを平底船に利用 することを念頭に置き、全長 3000 mm、幅 100 mm、高さ 15 mmの流路を使用する。

実験では、ダンプタンク内に貯められてある水 道水をポンプを作動させることにより回流する。 チャネル上流にある縮流部出口から 1028 mm の 位置に取り付けられた気泡発生装置には、コンプ レッサーからの供給気体をチャネル内に注入する。 また、ポンプの作動およびチャネル内への気泡注 入量は、別途配置された PC により制御される。

気泡発生部には、一辺 75 mm の板に幅方向 3 mm、流れ方向 5 mm の間隔に直径 0.25 mm の 穴がある多孔板を取り付け、マイクロバブルを得 る。空気注入部より 500 mm 下流の位置により気 泡の挙動および気泡周囲の流れ場計測を行う。

図2に流路断面から見た光学配置概略図を示す。 図中の赤、緑、青の線は、それぞれ波長の異なる 光であることを示している。流動計測には、流動 計測には2台のカメラを用いて、同時刻における 気相、液相の画像をそれぞれのカメラに撮影する。 気泡の撮影には、近赤外(波長 850 nm)の LED 光 源を用いた直接撮影法(SIT: Shadow Imaging Technique)を使用する。一方、液相の撮影には、 液体内に注入された蛍光粒子からの散乱光を撮影 する LIF( Laser Induced Fluorescence)法を用い て画像を取得する。蛍光粒子に照射する誘起光源 には、波長 532 nm のパルス発振型 Nd: YAG レー ザー(25 mJ/plus)を使用した。液体内には、ロー ダミンBおよび6Gを染料とした蛍光粒子を注入 した。レーザーによって誘起された蛍光粒子から の波長は 550~700 nm である。本研究では、同 時刻における気液両相の流動の様子を分離して撮 影する。そこで、液相画像を取得するカメラ前面 には、蛍光粒子の発光のみを撮影するようレーザ ー光を遮断するカットオフフィルターを用いた。

撮影された画像に対し、それぞれ PTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて気泡の移動速度、 および周囲液体の流動情報を得る。図 3a、b にそ れぞれ撮影された気泡画像、液相画像と、上述し た画像解析を用いて得られる解析結果の一例を示

表 1 実験条件

Channel size	3000mm × 15 mm × 100mm
Kinematic viscosity of liquid	n = $0.91 \times 10-6 \text{ m}^2/\text{s}$
Temperature of liqud	24.0 ~ 25.0
Channel half height	h = 7.5  mm
Bulk liquid velocity	Um = 5.0  m/s
Bulk Reynolds number	$Re_m = h$ , $U m / n = 41200$
Bulk void fraction	= 0.5 ~ 2.0 %
Mean bubble diameter	Da = 0.53  mm

# す。表1に実験装置および実験条件の諸元を示す。

#### 3.実験結果および考察

図4に気泡注入量を変化させた場合の摩擦係数 の算出結果を示す。図の横軸は平均ボイド率を、 縦軸には、気泡を注入した場合に得られた摩擦係



b. 液相画像

図 3 取得画像および画像解析例



図 3 平均ボイド率に対する摩擦係数



=0.5%における流路内速度分布 図 4

数(Cf)を液相単相時における摩擦係数(Cf<sub>0</sub>)で 無次元化したもの(Cf/Cf<sub>0</sub>)が示されている。 た、図中のシンボルは、気泡注入位置から 500、 1000 mm 下流の位置における計測結果である。

図よりいずれの場合も平均ボイド率の増加にと もない摩擦係数が減少していることがわかる。ま た、平均ボイド率が同じ場合、気泡注入位置から 近い方が摩擦係数の減少が大きいことがわかる。

次に平均ボイド率 0.5%における気泡および液 相の平均速度分布を図5に示す。図の横軸 |y|/h は、上壁面からの距離を流路半高さにより無次元 化している。図中に示された U,V はそれぞれ流路 内主流方向と鉛直方向を意味する。また、添え字 のG、L はそれぞれ気泡、液相を意味する。図よ り、気泡の平均移動速度は液相に対する速度と等 しいことがわかる。また、両相ともに鉛直方向の 流れは無視できるほど小さいことがわかる。

図6に本実験から得られた乱れ度の空間分布を 示す。横には無次元流路高さを、縦軸は液相最大 流速(Uc)を用いて正規化された液相、気相に対 する乱れ度(U'<sub>L</sub>rms/Uc,U'<sub>G</sub>rms/Uc)が示されて いる。また平均ボイド率 0.0、0.5%における主流 方向および鉛直方向の乱れ度分布を示した。

図より主流方向の気相、液相の乱れ度は、上壁 面から遠ざかるにつれて減少することがわかる。 乱れ度は平均速度からの変動を表わす統計量であ る。乱れ度の減少は、渦などによる変動速度成分 が小さくなり平均速度に近くなることを意味す る。また、気泡と液相の乱れ度を見ると、気泡の 方が小さいことがわかる。その原因として、壁面 近傍に発生した渦は気泡よりも小さく、また、微 小渦によって誘起される流れ場の変動は気泡に対 して影響が小さいためだと考えられる。

図7に平均ボイド率が 0.0, 0.5 %とした時の液 相のレイノルズ応力分布と気泡の移動速度から算 出されたレイノルズ応力を示す。いずれの場合も、 縦軸は液相最大流速 Uc を用いて無次元化した。

図より,液相のレイノルズ応力は、気泡の注入 により減少している。また、気泡の有無によるレ イノルズ応力の差は、壁面から遠ざかるほど大き くなることがわかる。前図から、壁面近傍にある 微小渦の影響により、壁近傍では速度変動が大き くなり乱流にともなうせん断応力は大きくなる。 一方、壁面から遠ざかるほど速度勾配は小さくな る為せん断力は小さくなることがわかる。また、 気泡に関するレイノルズ応力に注目すると、液相 に比べて大幅に小さいことがわかる。その原因に ついて気泡の変形に着目し次のように考察した。

図8に気泡の変形率と回転角度の関係を示す。 横軸は下流方向から上壁面方向への回転を正とし た時、主流に平行な方向と気泡を楕円形と仮定し た場合の長軸方向との角度()が示されている。 縦軸は、仮定した楕円の長軸(L)と気泡直径(D) との差(L-D)を気泡直径により無次元した扁平 率()である。図中のシンボルは、流路内の注 目した3つの領域を意味する。



図 6 乱れ度分布



図より、いずれの領域においても気泡は負の回 転角方向 - 30~60°で強く変形している。また、 それぞれの領域に着目すると、気泡は壁面近傍に あるほど変形が大きく、遠ざかるほど小さくなる ことがわかる。流路内の速度分布は、壁面近傍で 速度勾配が大きく、壁面から遠ざかるほど小さく なる。そのため、壁面近傍の気泡はせん断変形が 強く表れていると考えられる。

次に、図9に気泡の変形に対する、速度変動(U', V')の積が負となる相関頻度割合を示す。図の横 軸は気泡の扁平率()を示し、縦軸は気泡周囲 の蛍光粒子から得られた速度変動の積が負の相関 値の個数(N<sub>I</sub>)を、得られた全相関値の個数(N<sub>T</sub>) を用いて無次元化した負の相関頻度割合である。

図より、気泡の変形が大きくなると負の相関頻 度が多くなることがわかる。負の相関値は、乱流 の等方性と関連している。速度変動の積が負にな る頻度が多くなることは、変動速度の相関は小さ くなり流れを等方性へと変化し、その結果せん断 応力が低下したと推測できる。ただし、乱流にお けるせん断応力は、負の相関頻度だけでなく、速 度変動(U'、V')の積の大きさも重要である。そ のため、今後、気泡の変形と気泡周囲の流れ場と の関係を明らかにする必要がある。

#### 4.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、水平チャネル流路を用いたマイ クロバブル流れについて調べた。従来、気液混相 流に中における気泡、液相に対する同時計測は困 難であることが言われている。そこで、2 つの波 長の異なる光源を用い、気泡、液相の同時計測法 を提案し以下の知見を得た。

- 直接撮影法と蛍光粒子を用いた LIF 法との複合計測を行うことにより、気泡、液相の情報 (気泡外形、速度、液相速度)をそれぞれ計 測できるシステムを構築した。また、本計測 システムを用いて各相の速度を得ることが できた。
- 2.気泡を含む流動は、液相単相流に比べ、摩擦 抵抗低減効果があることを確認した。
- 3.気泡を含む場合の液相のレイノルズ応力が 液相単相に比べ小さいことがわかった。また



図 8 気泡の変形率と回転角度の関係



図 9 気泡の変形と負の相関頻度

気泡のレイノルズ応力は、液相に比べ小さい ことがわかった。その原因は、気泡サイズ、 変形が大きく関与していると考えられる。

#### 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, N.K., Deutsch, S., Merkle,
C.L., Reduction of turbulent skin friction by microbubbles, Phys. Fluids (1984), 27, 356-363.

[2] Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Kawashima, H., Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction, Int. J. Heat and Fluid Flow, (2000), 21, 582-588.