マイクロバブルチャネル流中の乱流変調の粒子画像複合計測*

北川 石英^{*1}, 菱田 公一^{*2}, 児玉 良明^{*3}Combined Particle Image Velocimetry of Turbulence Modification
in a Microbubble Channel FlowAtsuhide KITAGAWA^{*4}, Koichi HISHIDA and Yoshiaki KODAMA^{*4}Department of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology,
Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyou-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8585 Japan

The turbulence structure of flow field including microbubbles in a horizontal channel is experimentally investigated using an image processing technique in order to clarify the mechanism for drag reduction caused by microbubbles. A new system for the simultaneous measurement of liquid and dispersed gas phases is proposed, which is based on the combination of Particle Tracking Velocimetry, Laser Induced Fluorescence and Shadow Image Technique (PTV/LIF/SIT). To accurately detect the velocity vectors of the liquid phase in the two coexistent phases, the tracer particles overlapped with bubble shadow images are almost entirely eliminated in the post-processing stage. Finally, turbulence characteristics of the objective flow field are presented with the measurements for both phases obtained by the proposed system. The local interaction between bubbles and surrounding liquid is clarified.

Key Words: Drag Reduction, Microbubble Flow, Turbulence Modification, Particle Tracking Velocimetry, Laser Induced Fluorescence, Shadow Image Technique

1. 序 論

現在, 大型タンカなどの船舶が水から受ける抵抗の大部分は摩擦抵抗であり, 摩擦抵抗の低減は船舶の輸送効率の向上に大いに寄与する。しかしながら, LEBU (Large-Eddy Breaking-Up device) などの抵抗低減デバイスは, ある程度の低減効果が見込めるものの, 生物付着による汚損などの問題が生じるため適用が困難である。このため, 最近では, マイクロバブル(微小気泡)を乱流境界層に吹き込むことによって摩擦抵抗を低減させるという技術に注目が集まっている。Madavan⁽¹⁾らは, 多孔質板を用いてマイクロバブルを注入し, 多孔質板下流で摩擦抵抗の計測を行った。その結果, 彼らは, 約80%に達する摩擦抵抗の低減効果を報告している。一方, 川北⁽²⁾らは, マイクロバブルの注入に配列多孔板を用いた実験を行い,

Madavanらと同様の抵抗低減効果を報告している。Kodama⁽³⁾らは, 実船スケールに近い50m平底模型船に対し, マイクロバブルを用いた試行実験を行い, 局所摩擦抵抗および全抵抗が低減するという知見を得ている。以上の報告例から, マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に対する期待は大きい。しかしながら, 従来広く用いられてきた熱線流速計や熱膜流速計等の点計測では, 気泡群と周囲流体との局所的相互干渉を明確化できないため, 現在までのところ, この技術による摩擦抵抗低減メカニズムの包括的な実験的解明はなされていない。

一方, 最近では, 粒子画像計測法が混相乱流場に応用され, 流れ場の複雑・不規則な流動現象に対し, その秩序構造や流動メカニズムを明らかにしている。Tokuhiko⁽⁴⁾らは, PIV (Particle Image Velocimetry)を用いて, 振動する気泡および固体粒子周りの流れを調査し, 気泡および粒子後方に存在する伴流構造の差異を明らかにしている。Murai⁽⁵⁾らは, PTV (Particle Tracking Velocimetry)を用いた上昇気泡流計測を行い, 液相場のエネルギースペクトルと気泡間距離との関係を明らかにしている。一方, Hassan⁽⁶⁾らは, PTVを用いて, 静止流中で上昇する気泡周りの流れを調査している。Lindken⁽⁷⁾らは, PIVと他の画像処

* 原稿受付 2003年11月19日。

^{*1} 正員, 京都工芸繊維大学工学部(〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*3} 正員, 海上技術安全研究所知的乱流制御研究センター(〒181-0004 三鷹市新川6-38-1)。

E-mail: kitagawa@kit.ac.jp

理法を組合せ、1台のカメラにより、気泡誘起型乱流の気液同時計測を行っている。Minato⁽⁸⁾らは、PIVを円管内上昇気泡流に適用し、壁近傍の気泡群と乱流エネルギー輸送との関係を明らかにしている。このことから、粒子画像計測法は、気液二相流中の流動構造を包括的に解明できる計測法として期待される。

本研究では、マイクロバブルを含んだ水平チャネル流れに対して粒子画像複合計測を行い、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムを解明することを目的とする。特に、マイクロバブルを含んだ流れ(以下、マイクロバブル流れ)の計測に対して主要な項目を以下に記す。

(1) マイクロバブル流れの計測では、気泡界面での散乱光や容器壁でのハレーション等の光学的問題により、鮮明なトレーサ粒子画像を取得することが困難である。この問題に対する解決策の一つは、液体トレーサ粒子としてLIF(Laser Induced Fluorescence)粒子を用い、散乱光と粒子からの蛍光発光とを区別することである。

(2) マイクロバブル流れの乱流変調は、液相場と気泡群との局所的相互干渉に強く依存することが予想される。これは、気液同時計測の必要性を示唆するものである。

(3) マイクロバブル流れ中では、非常に多くの気泡が存在するため、液相と気相の速度を明確に分離することが難しく、両相の速度情報を混同しがちになる。これは、気液分離の善しあしが、液相速度の検出精度を大きく左右することを示唆する。

以上のことにかんがみ、本報では、気液同時計測システムの確立および液相速度検出の高精度化を行い、マイクロバブル流れ中の乱流変調構造を明らかにする。

2. 実験方法

2・1 実験装置および実験方法 図1(a)に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。チャネルは、透明アクリル樹脂製で、平板間幅 $2h$ が15 mm、奥行きが100 mm、全長が3 000 mmである。作動流体は、タンク、ポンプ、電磁流量計を介して回流する。気泡は、チャネル上流の縮流部から1 028 mm下流位置において、チャネル上部に設置された気泡発生装置から、コンプレッサを用いて注入される。ここで、気泡発生装置には、空気吹出し部に配列多孔板が取付けられており、長さ36 mm、幅72 mmの部分に直径0.5 mmの穴が、長さ方向4.9 mm、幅方向3.7 mmピッチで計277点、千鳥状に設けられている。座標軸は、流れ方向を x ($x=0$:気泡注入部中心)、鉛直方向を y ($y=0$:チャネル上壁面)、奥行き方向を z ($z=0$:チャネル中心)とする。計測部は、 $x=500$ mm、 $z=0$ mmの位置である。

本研究では、液相場の計測手法として時系列多点同時計測が可能な粒子画像計測法を用いる。粒子画像計測法に関しては、3章で詳しく述べる。また、序論で述べたように、気泡界面での散乱光や容器壁でのハレーション等の光学的問題を解決するために、画像計測にLIFを併用する。液体トレーサ粒子には、ローダミ

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

ン B および 6 G を蛍光染料とした蛍光発光粒子を用いた。トレーサ粒子は比重約 1.03, 粒子径 1~数十 μm である。粒子の吸収波長帯は、約 460~550 nm であり、蛍光発光の波長帯は、約 550~700 nm である。計測における粒子濃度は、約 60 ppm である。一方、気泡群の計測手法は、藤原⁽⁹⁾ らにより報告されている赤外線を用いたバックライト法によって気泡像を得る手法(Shadow Image Technique : SIT)と同様である。

図 1(b) は、計測位置の流路断面拡大図である。本計測システムでは、気液同時計測を行うために 2 台の CCD カメラ (Kodak : ES 1.0) が用いられる。図 1(b) 中の水平方向のカメラは液相計測に対して、鉛直方向のカメラは気泡計測に対して用いられる。液相計測に対する励起光源は、Nd : YAG レーザ (ニューウェーブリサーチ : 25 mJ, $\lambda=532\text{ nm}$) であり、気泡計測に対する光源は、赤外線 LED 群 ($\lambda=850\text{ nm}$) である。レーザ光は、シリンドリカルレンズにより厚さ約 1.0 mm のシート状でチャネル下部から照射される。計測領域に照射されたレーザ光、赤外線および蛍光発光は、約 10 mm 離れた誘多膜平面ミラー (長さ 15 mm, 幅 9 mm, 厚さ 1.5 mm) を介して上向きに反射する。可視光線と赤外線との分離には、可視光を反射し、赤外線を透過させるコールドミラー (シグマ光機 : CLDM-50 S) が用いられる。さらに、液相計測では、蛍光粒子からの蛍光発光のみの撮影が必要であるため、カットオフフィルタ ($\lambda=550\sim720\text{ nm}$; $T>95\%$, $\lambda=532\text{ nm}$; $T<0.03\%$, $\lambda=815\sim885\text{ nm}$; $T<0.01\%$) を用いてレーザ光を遮断する。レーザと CCD カメラとの同期は、パルスジェネレータを介して行われる。画像の撮影方法は、フレームストロリング法であり、2 画像間の時間間隔は 34 μs である。CCD カメラにより撮影された画像は、直接パーソナルコンピュータに送信され、サイズ 1008 $\times$ 1018 pixel, 256 階調のデジタル画像として保管される。CCD カメラのフレームレートは、ともに 30 fps である。計測領域は、15 mm $\times$ 6 mm であり、空間解像度は、0.016 mm/pixel である。

Table 1 Experimental conditions

Channel size	3000mm $\times$ 15 mm $\times$ 100mm
Temperature of liquid	24.3~24.5 $^{\circ}\text{C}$
Kinematic viscosity of liquid	$\nu = 0.91 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$
Channel half height	$h = 7.5\text{ mm}$
Bulk liquid velocity	$U_m = 5.0\text{ m/s}$
Bulk Reynolds number	$Re_m = h \cdot U_m / \nu = 41200$
Bulk void fraction	$\alpha = 0.5\%$

実験条件を表 1 に示す。作動流体は、濾過フィルタ装置により不純物が除去された水道水である。液体平均流速 U_m は、5 m/s であり、 U_m とチャネル半高さ h に基づくレイノルズ数 Re_m は、約 41 200 である。表 1 中のボイド率 α は、次式により定義される。

$$\alpha = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_G および Q_L は、ガス流量および液体流量である。

2.2 ミラー挿入による流れ場への影響 本計測システムでは、光路長を短くする目的でチャネル内にミラーを設置するため、ミラーの存在による流れ場への影響が危がされる。そこで、ミラーにおける排除厚さ δ^* とスパン方向の乱れの変動スケールに関して概算を行った。排除厚さ δ^* は、次式により定義される。

$$\delta^* = 0.37 x_M \left(\frac{U_m x_M}{\nu} \right)^{-1/5} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 U_m は液体平均流速、 x_M はミラーの長さ (= 15 mm)、 ν は液体動粘度である。その結果、平均流速 5 m/s のもと、平板における排除厚さ δ^* は、約 0.6 mm であった。また、 $Re=13\,800$ における DNS⁽¹⁰⁾ から見積もったスパン方向の乱れ変動スケールは、約 0.9 mm であった。これらの算出結果は、いずれも計測部とミラーとの間隔 (約 10 mm) よりも十分に小さいことがわかる。さらに、速度乱れのスパン方向の 2 点相関係数が十分に減衰する距離は 3 mm 程度と予想され、ミラー・計測部間隔よりも小さい。以上のことから、液相に対して、ミラーによる流れ場への影響は小さいと判断できる。

3. 各相に対する計測手法

3.1 液相速度検出法 本研究で用いる粒子画像計測法の利点の一つは、さまざまな画像処理法を組合せることによって、連続相および分散相の同時計測が容易に行えることである。ここで、本研究のように、高レイノルズ数・高局所ボイド率条件下でのチャネル内マイクロバブル流れを対象とした計測では、画像相関法 (PIV) よりも粒子追跡法 (PTV) のほうが適していると考えられる。この理由は、局所ボイド率の増加とともに、気泡かんげき領域が減少するため、また気泡が誘起する伴流の影響が強くなるため、PIV では、高精度な液相速度検出が行えないことに起因する。このため、本研究では、液相場の計測に対して PTV を採用する。図 2(a) で示される計測手法の手順を以下に記す。

(1) CCD カメラで撮影された原画像に対して、

Fig. 2 Flow chart of the image processing for liquid and bubble velocity detections

粒子マスク相関法(Particle Mask Correlation : PMC)を適用し、粒子重心位置を算出する。

(2) 連続2時刻の粒子重心座標から、速度こう配テンソル法により、粒子の速度ベクトルを算出する。

ここで、速度こう配テンソル法は、Ishikawa⁽¹¹⁾⁽¹²⁾らにより提案された手法であり、流れ場に局所的な回転・伸縮・せん断が含まれる場合にも良好な粒子追跡性能を有する。また、本研究の計測対象は、局所ポイド率が非常に高い気泡流乱流であるため、特に、気泡近傍場の液相速度ベクトルに対して、誤対応ベクトルが発生する。そのため、誤対応ベクトルの除去処理には、ダブルチェック法⁽¹¹⁾を適用し、さらに、速度ベクトルの長さが、局所空間における時間平均値に対して標準偏差の3倍以上の隔たりがある場合、これらを誤対応速度ベクトルとみなして除去した。その結果、単相液相場の流れ方向の平均速度に対して、本結果とLDV(Laser Doppler Velocimetry)による計測結果との相対誤差は、2.5%以下であった。

3・2 気泡速度検出法 気泡の重心位置算出方法には、二値化ラベリング法やテンプレートマッチング法などが挙げられる。ここで、二値化ラベリング法は、二値化画像にチェーン符号化を行い、輪郭として曲線が閉じたものを気泡として抽出する方法であり、変形を有する気泡を扱うことが可能である。一方、テンプレ

レートマッチング法は、対象となる気泡画像を作成し、それとの相関を算出することにより気泡の重心位置を求める方法であり、気泡同士の重なりを考慮することが可能である。本研究の対象とする流れ場では、気泡同士が重なり、かつ気泡の変形が大きい。この場合、算出手法の選択は二者択一的になるが、作業時間の効率性を考慮し、本研究では、二値化ラベリング法を採用する。このため、重なり気泡については、重心位置算出を考慮しない。以下に、図2(b)で示される気泡計測手法の手順を記す。

(1) SITにより得られた気泡群画像の平均輝度を調整し、焦点の合った単独気泡の抽出を行う。

(2) 画像を白黒反転し、二値化ラベリング法により気泡重心位置を算出する。二値化にはOtsuによって提案された方法⁽¹³⁾を採用した。この方法では、最適しい値が、画像の輝度のヒストグラムから決定される。

(3) 2画像を用い、PTVにより気泡の重心速度を算出する。

気泡の直径は、気泡の構成ピクセル数から等価直径として算出される。本研究では、等価直径 D_e の範囲は、10~60 pixelである。また、気泡の重心位置移動は、1フレームあたり7~13 pixelである。気泡の人工画像を用いた著者らの解析によると、本手法による

気泡重心位置移動の誤差は、 $D_e=10$ pixel の場合、約 0.1 pixel であった。その結果、気泡重心座標算出に伴う気泡速度の不確かさは、約 2.9% となる。

3.3 重なり粒子の除去方法 液相速度の検出を行う場合、投影気泡と重なるトレーサ粒子の取扱いに注意を払う必要がある。ここで、重なり粒子には、気泡と付着する場合、気泡よりも手前または奥に存在する場合の 3 種類の状態が考えられる。例えば、トレーサ粒子が気泡に付着する場合、PTV により気泡界面速度が検出される。一方、トレーサ粒子が気泡よりも奥に存在する場合、その粒子からの蛍光発光が気泡を通過するため、気液界面での屈折により擬似的な液相変動速度が検出されることになる。しかしながら、PTV により液相速度を算出する際、相関係数のみの考慮では、投影気泡と重なるトレーサ粒子を完全に除去することはできない。このため、二相流場から液相情報のみを抽出するには、投影気泡と重なるトレーサ粒子を特別な方法で除去する必要がある。ここでは、気泡群の二値化画像を用い、重なり粒子の除去を試みた。除去方法の手順を以下に示す。

(1) 気泡群画像の平均輝度値を調節し、気泡の輪郭を鮮明化させる。

(2) バックライト法では、気泡中心部が中空状態となるため、この領域を気泡として認識させる。

(3) 液相画像と気泡二値化画像を重ね合わせ、重なり粒子を除去する。

この除去操作により、本計測では、重なり粒子の 95% 以上が除去される。

4. 計測結果および考察

4.1 摩擦係数 図 3 は、上述した実験装置で計測された摩擦係数の算出結果である。横軸は、注入された平均ボイド率を、縦軸は、単相流時の摩擦係数

Fig. 3 Ratio of skin friction coefficient in bubbly flow to that in single phase flow in the case of $U_m=5.0$ m/s

C_{f0} に対する二相流時の摩擦係数 C_f との比を示す。摩擦係数 C_{f0} は、次式から算出した。

$$C_{f0}(Q_G) = C_{f0}(0) \frac{\tau[U(Q_G)]}{\tau[U(0)]} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $U(Q_G)$ は、空気流量 Q_G における液体平均流速である。また、 τ は、壁面せん断応力であり、ブラジウスの式により算出される。つまり、摩擦係数 C_{f0} は、気泡注入による平均流速増加を考慮して補正された値である⁽³⁾。壁面せん断応力には、せん断応力センサにより得られた結果が用いられる。図 3 から、ボイド率の増加とともに摩擦係数が低下することがわかる。特に、本計測条件であるボイド率 ($\alpha=0.5\%$) の場合では、約 2.5% の抵抗低減効果が確認できる。

4.2 局所ボイド率 マイクロバブル流れ中の気泡分布構造を明らかにするため、高橋ら⁽¹⁴⁾ と同様の計測システムを用いて局所ボイド率の算出を行った。本計測システムでは、得られた真空タンクと管路内の圧力差を利用して気泡流を吸い込んだ後、水と空気とが分離され、各相の体積が計測される。図 4 に表 1 と同様の条件のもと得られた局所ボイド率分布を示す。横軸は、チャンネル半高さ h で正規化された上壁からの距離であり、縦軸は、局所ボイド率 α_{local} である。図 4 より、局所ボイド率のピークは、壁近傍ではなく、

Fig. 4 Distribution of local void fraction measured at $x=500$ mm in the case of $U_m=5.0$ m/s

Fig. 5 PTV/LIF/SIT result at $\alpha=0.5\%$

$|y|/h=0.2\sim0.3$ 付近に存在することがわかる。壁からこの位置までの距離は、4・4節で算出される無次元気泡平均直径 $D/h=0.07$ よりも十分に大きい。

4・3 気液同時計測結果 図5に、 $\alpha=0.5\%$ の条件における計測結果例を示す。図5中の白い領域は、SITにより得られた気泡投影図であり、網掛けの領域は、焦点の合った気泡である。一方、図5中の矢印は、PTV/LIFによって得られた液相速度ベクトルおよび焦点の合った気泡の速度ベクトルであり、画像上部は、チャンネル上壁面に相当する。図5から、気泡近傍場の液相速度ベクトルおよび気泡速度ベクトルが、比較的良好に取得できていることが確認できる。また、3・3節で示された方法により、気泡との重なり粒子が完全に除去されている。このことから、本計測システムによって、液相場と気泡群との同時計測が十分に可能であるといえる。

4・4 気泡解析結果 3・2節で説明した方法により、 $\alpha=0.5\%$ における気泡の平均直径分布、平均流速分布を算出した。格子分割数は32点であり、これにより1格子間隔は、約0.176 mmとなる。なお、1格子あたりの気泡サンプリング数(検出数)が200未満のデータは本グラフ上には示されない。図6に、平均気泡直径分布を示す。ここで、平均気泡直径は、等価直径の算術平均値である。図6中のバーは、気泡径の標

Fig. 6 Mean bubble diameter profile at $\alpha=0.5\%$

Fig. 7 Mean velocity profile of bubble at $\alpha=0.5\%$

準偏差を示す。図6から、本条件では、各領域における平均気泡直径が、約0.3~0.7 mmであることがわかる。従来の実験結果によれば、気泡直径が0.4 mm以上の場合には、摩擦抵抗低減効果が気泡サイズによらない⁽¹⁵⁾。気泡サイズ依存性は、摩擦抵抗低減メカニズムを解明するうえで興味深い問題であり、今後の研究課題の一つといえる。図7に、気泡平均速度分布を示す。比較のために、 $\alpha=0.5\%$ での液相平均速度が付記されている。図7中の u および v は、流れ方向および鉛直方向の平均速度であり、添字 L および G は、液相および気泡を指す。図7から、流れ方向および鉛直方向の気泡平均速度は、液相平均流速とほぼ一致することがわかる。ここで、直径1 mmの気泡の流れに対する応答時間が約0.1 sであること、また液相平均流速 ($U_m=5.0$ m/s) および計測位置 ($x=500$ mm) を考慮すると、この結果は妥当なものであると考えられる。

4・5 液相解析結果 1条件あたり約5000ペアの蛍光粒子画像を用いることにより、液相場の平均速度分布、乱れ度分布、レイノルズ応力分布を算出した。格子分割数および格子間隔は、気泡解析の場合と同じである。1格子あたりのサンプリング数は5000点以上である。図8に、液相場の平均流速分布を示す。図

Fig. 8 Mean velocity profile of liquid phase

Fig. 9 Turbulence intensity profile of liquid phase

8より、気泡の混入に伴う液相平均流速の変調は確認できない。これは、計測データ範囲内での気泡による分子粘性応力の変化が無視できることを意味する。また、壁面近傍の鉛直方向流速は、ほぼ完全に零であることがわかる。このことから、マイクロバブル流れの画像計測において危ぐされる壁面でのハレーション等の光学的問題が、計測結果に与える影響は無視できる。図9に、液相場の乱れ度分布を示す。比較のために、気泡の乱れ度が付記されている。図9中の u_{rms} および v_{rms} は、それぞれ、流れ方向および鉛直方向の乱れ度である。縦軸の値は、液相最大流速 $u_c(=5.82 \text{ m/s})$ によって正規化されている。図9より、気泡の混入に伴い、流れ方向の乱れ度は一部の領域で、また鉛直方向の乱れ度はほぼ全領域でわずかに低下することが確認できる。一般に、気液間にスリップ速度がある場合には擬似乱れ⁽¹⁶⁾が生じるため、流場中の乱れ度は増加する傾向にある。このため、本条件では、気泡が誘起する擬似乱れの生成よりも、気泡の混入に伴う液相変動の抑制効果が顕在化していると考えられる。一方、液相乱れ度と気泡のそれとを比較すると、壁面からの距離が小さくなるにつれて、気液間の乱れ度の差が大きくなることがわかる。これは、壁面に近

づくほど、液相場の渦スケールが小さくなり、気泡が周囲液体乱れの影響を受けにくくなるためであろう。図10に、液相場のレイノルズ応力分布を示す。比較のために、気泡変動速度の相関値が付記されている。縦軸の値は、 u_c^2 によって正規化されている。図10から、以下のことが確認できる。まず、気泡の混入に伴い、液相レイノルズ応力が低下する。これは、壁面せん断応力の低下を導くため、摩擦抵抗低下に直結する。次に、気泡の変動速度の相関値は、液体のレイノルズ応力よりもはるかに小さい。特に、この低気泡変動速度相関は、気泡運動の時間スケールが周囲液体の乱れのそれよりも十分に大きいことに起因するものであると考えられる。

レイノルズ応力低下の原因を調査するため、気液速度場の瞬時画像を用いて、気泡と周囲流体との関係を明らかにする。図11に、次式によって定義される液相速度変動率 β の濃淡分布を示す。

$$\beta = \sqrt{\frac{u_i^2 + v_i^2}{u_{rms}^2 + v_{rms}^2}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 u_i および v_i は、流れ方向および鉛直方向の液相変動速度の格子平均値であり、乱れ度は図9から算出される。格子平均化操作は、各液体速度算出点と格子中心点との距離が、格子長さの1.5倍以内の場合のみ考慮される。濃淡レベルは、図11の下部に示すとおりである。図11から、気泡近傍場において液相速度変動率の低い領域(濃淡：黒)が顕著に現れることがわかる。また、この傾向は、小気泡よりも大気泡近傍でより顕著となる。特に、この気泡近傍場における低速度変動率の存在は、気泡の混入に伴うレイノルズ応力低下の要因の一つであると考えられる。

本研究では、粒子画像複合計測から得られた液相場と気泡群の速度データをもとに、気泡の並進運動と周囲流体との相互干渉に着目した解析を行った。しかしながら、本計測対象のようなマイクロバブル流れでは、気泡の変形が顕著に生じるだけでなく、低頻度ながらも気泡同士の合体や分裂が起きており、摩擦抵抗低減メカニズム解明のための解析事項は依然として多く残されている。この意味では、本結果は、レイノルズ応力低下の原因の一つを示唆したにすぎないものの、摩擦抵抗低減メカニズム解明に向けての大きな手がかりとなるであろう。特に、従来まったく報告例がなかった気泡変動速度の相関値などの気泡運動特性に関する計測結果は、有益な知見である。

5. 結 言

本研究では、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メ

Fig. 10 Reynolds stress profile of liquid phase

Fig. 11 Distribution of liquid turbulence ratio

カニズムを明らかにするために、水平チャネルマイクロバブル流れに対して粒子画像複合計測を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 気液同時計測システムを構築し、液相のみの運動を的確に抽出する方法を確立した。

(2) 本計測システムにより、気泡の平均直径分布・平均速度分布、液相場の平均流速分布・乱れ度分布・レイノルズ応力分布を算出した。その結果、気泡の混入に伴い、レイノルズ応力が低下することを明らかにした。

(3) 液体速度変動率を算出することにより、気泡群と周囲液体との局所的相互関係を示唆した。

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」)の支援を受けて行われた。ここに謝意を表す。本研究の遂行にあたり助言をいただいた北海道大学 村井祐一助教授、東京大学 藤原暁子博士に対し謝意を表す。

文 献

- (1) Madavan, N. K., Deutsch, S. and Merkle, C. L., Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles, *Phys. Fluids*, **27** (1984), 356-363.
- (2) 川北千春・高野真一, 流れ方向圧力勾配と局面形状がマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響, 日本造船学会論文集, **188** (2000), 11-21.
- (3) Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T. and Kawashima, H., Experimental Study on Microbubbles and Their Applicability to Ships for Skin Friction Reduction, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **21** (2000), 582-588.
- (4) Tokuyoshi, A., Maekawa, M., Iizuka, K., Hishida, K. and Maeda, M., Turbulent Flow Past a Bubble and an Ellipsoid Using Shadow-Image and PIV Techniques, *Int. J. Multiphase Flow*, **24** (1998), 1383-1406.
- (5) Murai, Y., Song, X. Q., Takagi, T., Ishikawa, M., Yamamoto, F. and Ohta, J., Inverse Energy Cascade Structure of Turbulence in a Bubbly Flow (PIV Measurement and Results), *JSME Int. J. Ser. B (Fluids and Thermal Engineering)*, **43-2** (2000), 180-187.
- (6) Hassan, Y. A., Ortiz-Villafuerte, J. and Schmidl, W. D., Three-Dimensional Measurements of Single Bubble Dynamics in a Small Diameter Pipe Using Stereoscopic Particle Image Velocimetry, *Int. J. Multiphase Flow*, **27** (2001), 817-842.
- (7) Lindken, R. and Merzkirch, W., A Novel PIV Technique for Measurements in Multiphase Flows and Its Application to Two-Phase Bubbly Flows, *Exp. Fluids*, **33** (2002), 814-825.
- (8) Minato, D., Tanaka, T., Fujiwara, A., Hishida, K. and Maeda, M., Particle Tracking Velocimetry Measurement of Bubble-Bubble Interaction, *Proc. ASME-JSME FED Joint Conf./CD-ROM*, Paper No. TED-AJ 03-198 (2003).
- (9) 藤原暁子・菱田公一, 管内気液二相流の微細乱流構造, 機論, **68-668, B** (2002), 1143-1150.
- (10) Moser, R. D., Kim, J. and Mansour, N. N., Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow up to $Re_\tau=590$, *Phys. Fluids*, **11-4** (1999), 943-945.
- (11) Ishikawa, M., Murai, Y., Wada, A., Iguchi, M., Okamoto, K. and Yamamoto, F., Novel Algorithm for Particle Tracking Velocimetry Using the Velocity Gradient Tensor, *Exp. Fluids*, **29-6** (2000), 519-531.
- (12) Ishikawa, M., Murai, Y. and Yamamoto, F., Numerical Validation of Velocity Gradient Tensor Particle Tracking Velocimetry for Highly Deformed Flow Fields, *Meas. Sci. Technol.*, **11** (2000), 677-684.
- (13) Otsu, N., A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics*, SMC-9.1 (1979), 62-66.
- (14) 高橋孝仁・児玉良明・川島英幹・角川明・牧野雅彦, 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, **240** (2003), 37-45.
- (15) Moriguchi, Y. and Kato, H., Influence of Microbubble Diameter and Distribution on Frictional Resistance Reduction, *J. Mar. Sci. Technol.*, **7** (2002), 79-85.
- (16) Lance, M. and Bataille, J., Turbulence in the Liquid Phase of a Uniformity Bubbly Air-Water Flow, *J. Fluid Mech.*, **222** (1991), 95-118.