

PTV/LIF 法によるマイクロバブル流れの乱流変調計測

知的乱流制御研究センター *北川石英、牧野雅彦、児玉良明

1. 序論

現在、大型タンカーなどの船舶が水から受ける抵抗は、その大部分が摩擦抵抗であるため、摩擦抵抗の低減はそのまま船舶の輸送効率の向上へとつながる。しかしながら、従来までのLEBUなどの抵抗低減デバイスでは高い軽減率は望めず、また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 (1984)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 (2000)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 (2000)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た。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度は非常に大きい。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が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説明はなされていない。

本研究では、マイクロバブルを含んだ水平チャンネル流れに対して、PTV/LIF(Laser Induced Fluorescence)による計測を行い、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。さらに、PTV/LIF/IST(Infrared Shadow Technique)を組み合わせた計測システムにより、液相場と気泡群との同時計測を行う。ここで、ISTとは、赤外線によるバックライト法によって気泡像を得る手法である(Fujiwara et al., 2002)。

2. 実験方法

2.1. 実験装置および実験方法

図1に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。チャンネルは、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3000 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、チャンネル上流の縮流部から1028 mm下流位置において、チャンネル上部に設置された気泡発生装置から、コンプレッサーを用いて注入される。ここで、気泡発生装置には、空気吹き出し部に配列多孔板が取り付けられており、直径0.25 mm、幅方向3 mm、長さ方向5 mmピッチで、千鳥状配置に計315点の穴が設けられている。座標軸は、流れ方向を x ($x=0$:気泡注入部)鉛直方向を y ($y=0$:チャンネル上壁面)奥行き方向を z ($z=0$:チャンネル中心)とする。計測部は、 $x=500$ mm、 $z=-30$ mmの位置に設定した。

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PTVを用いる。さらに、従来の混相乱流計測において問題視されてきた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、LIFを併用する。トレーサ粒子には、ローダミンBおよび6G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30 ppmである。PTVの励起光源は、Nd:YAGレーザ(ニューウェーブリサーチ社:25 mJ, $\lambda=532$ 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のシート状でチャンネル下部から照射される。PTV/LIFでは、粒子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。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 × 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、30 fps である。計測領域は、19.5 mm × 19.6 mm であり、空間解像度は、0.019 mm/pixel である。

実験条件を表 1 に示す。作動流体は、フィルタにより不純物が除去された水である。液体平均流速 U_m は、5 m/s であり、 U_m とチャンネル高さ h に基づくレイノルズ数 Re_m は、約 28600 である。表中のボイド率 α は、液体流量 Q_W とガス流量 Q_G を用いて、 $\alpha = Q_G / (Q_G + Q_W)$ として定義される。

- 1: Dump tank
- 2: Mass flow controller
- 3: Air injection region
- 4: CCD Camera
- 5: Pulse generator
- 6: YAG Laser
- 7: Air compressor
- 8: Electro magnetic flow meter
- 9: Pump

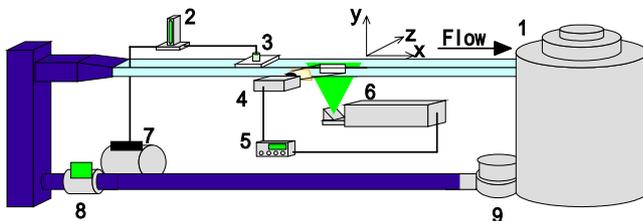


図 1 実験装置

表 1 実験条件

Channel size	3000mm × 15 mm × 100mm
Temperature of liquid	9.5 ~ 10.5
Kinematic viscosity of liquid	$1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Channel half height	$h = 7.5 \text{ mm}$
Bulk liquid velocity	$U_m = 5.0 \text{ m/s}$
Bulk Reynolds number	$Re_m = h \cdot U_m / \nu = 28600$
Bulk void fraction	$\alpha = 0, 1.0, 2.0 \%$

2. 2. 計測手法

本研究で用いる画像処理計測の利点は、非接触計測であること、また時系列画像処理により、時間平均、空間平均、アンサンブル平均など、さまざまな統計量を抽出できることである。ここで、本研究のように、局所ボイド率が非常に高い系を対象とした計測では、PIV よりも PTV の方が適していると考えられる。その理由は、次の通りである。

1. 局所ボイド率の増加とともに捕獲可能な蛍光粒子数が低下するため、PIV が可能な粒子濃度に

満たない。

2. 局所ボイド率が非常に高いため、気泡からの散乱光を除去するためのカットオフフィルタを通しても、僅かに気泡の像が撮影される。このため、PIV を行った場合、気相の影響が含まれる可能性がある。

ここで、原画像に気泡像が投影される理由は、以下のように推測される。

1. カットオフフィルタのカット性能を上まわる強い干渉縞が気泡界面で生じる。
2. レーザ粒子中の蛍光染料が長時間の運転中に水中に溶解、気泡界面に吸着する。なお、気泡界面での蛍光粒子自身の吸着量は非常に僅かである。

以上の話を鑑み、本研究では、液相場の計測に対して PTV を行う。計測手法の手順を、以下に示す。

1. CCD カメラで撮影された原画像に対して、粒子マスク相関法を適用し、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、速度勾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、速度勾配テンソル法は、これまで提案されている PTV アルゴリズムのうち、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。例えば、高波数の回転運動を含む流れ場を対象とする場合では、本手法が二値化画像相関法(e.g. Yamamoto et al., 1996)や四時刻粒子追跡法(e.g. Nishio et al., 1994)よりも常に正捕獲率が高いことが検証されている。速度勾配テンソル法の詳細に関しては、Ishikawa (2000)らを参照されたい。また、本研究における計測対象は、局所ボ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 (Yamamoto et al., 1991)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。

3. 計測結果および考察

3. 1. 摩擦係数

図 2 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、注入された気泡の平均ボイド率を、縦軸は、単相流における摩擦係数 C_{f0} に対する二相流における摩擦係数 C_f との比を示す。ここで、摩擦係数 C_{f0} は、ボイド率により補正されている(Kodama et al., 2000)。図から、ボイド率の増加とともに摩擦係数が低下しており、平均ボイド率が約 2% の場合、約 7% の抵抗低減効果が確認できる。

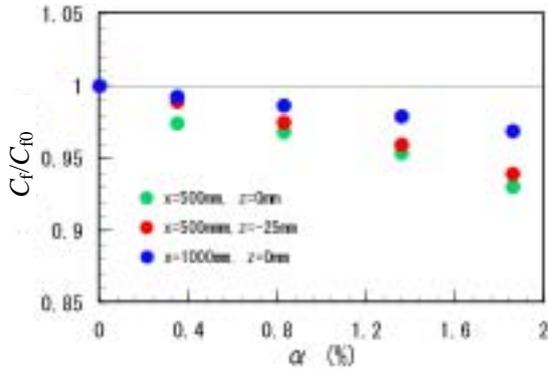


図 2 摩擦係数($U_m=5.0$ m/s)

3.2. 局所ボイド率分布

直径 1 mm (幅方向 3 mm、長さ方向 5 mm ピッチ) の穴を有する配列多孔板を用いて得られた局所ボイド率分布を図 3 に示す。横軸は、チャンネル幅 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。図より、局所ボイド率のピークは、壁近傍ではなく、 $|y|/h = 0.3-0.4$ 付近に存在することが判る。これは、典型的な無次元気泡直径 $d/h = 0.06-0.2$ よりも十分に大きい。

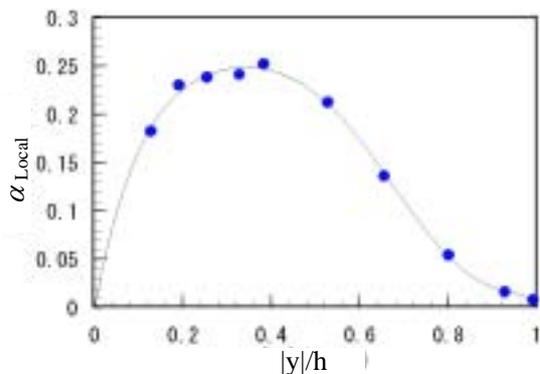


図 3 局所ボイド率分布($U_m=5.0$ m/s, $\alpha=8\%$)

3.3. PIV および PTV による液相速度検出

本節では、PIV と PTV を行い、各計測手法によってどのような現象が捉えられるかを明らかにする。特に、気泡像が計測結果に与える影響を調査する。PIV では、得られた 2 画像から相互相関法により、速度場の算出を行った。参考までに、図 4 に単相流時の蛍光粒子原画像と、PTV によって得られた液相速度ベクトル分布を示す。図 5 は、各計測手法によって得られた u_L' - v_L' 相関分布である。ここで、 u_L' および v_L' は、それぞれ、流れ方向および鉛直方向の液相変動速度を示す。上記の結果は、局所ボイド率が高い領域、つまり、 $|y|/h = 0.3 \sim 0.4$ の領域において算出された。図から、PIV では、ボイド率の増加とともに液相変動速度が広く分布することが判る。特に、 $\alpha = 2\%$ の結果では、単相流時に見られる u_L' - v_L' の相関がほぼ消えている。これは、2.2 節で述べたように、局所ボイド率の高い領域では気泡群の影響が顕在化し、その結果、液相速度に気相速度が含まれるためである。また、ボイド率の増加とともに、鉛直方向の変動速度よりも流れ方向の変動速度が大きくなること判る。一方、PTV の場合では、ボイド率の増加とともに、速度変動が大きくなるものの、単

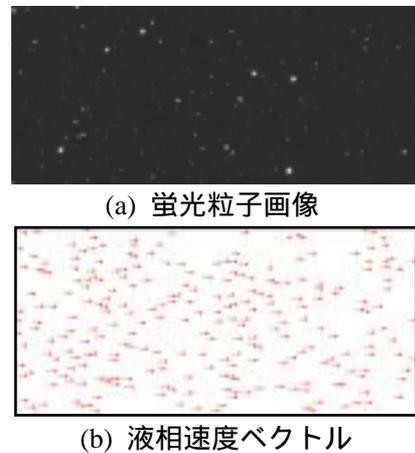


図 4 PTV 結果

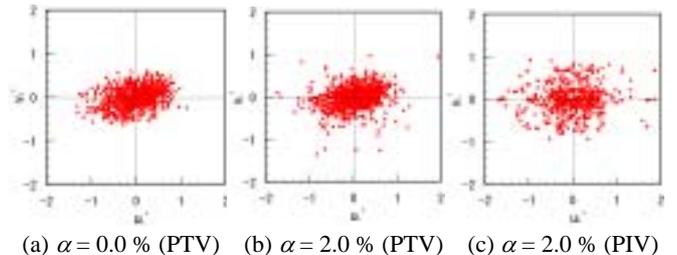


図 5 液相変動速度の相関分布

相流時の $u_L'-v_L'$ 相関を保持している。以上のことから、次のことが言える。ボイド率が非常に高い系を対象とした計測を行う場合、PIV では、輝度の分布パターンを追跡するため、液相と気相とが混同した場の計測を行っていることに相当する。一方、PTV では、蛍光粒子のみの運動を追跡するため、液相場の情報のみを精度良く得ることが可能である。さらに、個々の気泡運動から $u_G'-v_G'$ 相関分布を得ることができれば、計測手法によって得られた情報がより明確になると考えられる。これに関しては、今後の課題である。

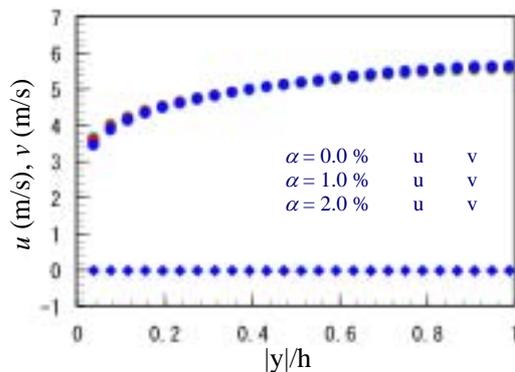


図 6 液相平均流速分布

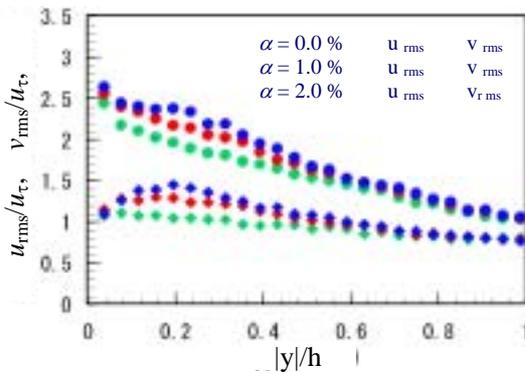


図 7 液相乱れ度分布

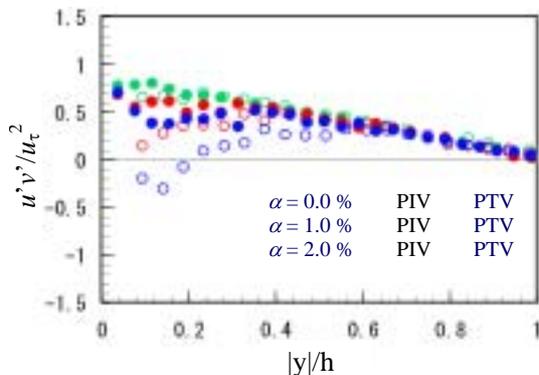


図 8 液相レイノルズ応力分布

3.4. PTV/LIF 計測結果

1 条件あたり約 1000 ペアの画像データ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得た。解析領域は、局所ボイド率が最も高い $|y|/h = 0.3-0.4$ とし、格子分割数は 24 点とした。これにより、1 格子間隔は、約 0.297 mm となる。また、各格子におけるサンプル数は、1 万点以上である。

PTV によって得られた液相場の平均速度分布を図 6 に示す。図中の記号は、それぞれ、流れ方向および鉛直方向の液相平均速度である。図より、ボイド率の増加とともに、壁面近傍の液相速度が低下することが判る。図 7 は、摩擦速度 u_τ によって正規化された液相場の乱れ度分布を示す。図中の記号は、それぞれ、流れ方向および鉛直方向の液相乱れ度である。図より、ボイド率の増加とともに、流れ方向および鉛直方向の乱れ度が増加することが判る。PIV および PTV により得られた液相場のレイノルズ応力分布を図 8 に示す。図中の記号は、それぞれ、PIV および PTV 結果を示す。図より、ボイド率の増加とともに、PIV および PTV のレイノルズ応力が低下することが判る。これは、3.3 節において記述したように、ボイド率の増加とともに速度変動は増加するものの、 $u_L'-v_L'$ の相関が低下するためである。さらに、PIV 結果から、 $\alpha = 2\%$ の場合のレイノルズ応力は、一部、ゼロまたは負になることが判る。これは、 $\alpha = 2\%$ における PIV 結果では、単相流時に見られる $u_L'-v_L'$ の相関がほぼ消えることに起因する。

4. 液相場と気泡群の同時計測

混相乱流場の乱流変動は、液相場と気泡群との局所相互干渉に強く依存している。このため、乱流変動機構を解明するには、液相場と気泡群運動とを同時に計測する必要がある。上記のことを鑑み、本節では、液相場と気泡群とを同時に計測できるシステムを提案する。

4.1. 同時計測システム

実験装置の概要は、2.1 節と同じである。撮影部の拡大図を図 9 に示す。図は、流路のある断面部分を示す。本システムでは、PTV と IST を行うために 2 台の CCD カメラが用いられる。図中の水平方向のカメラは PIV/LIF 用、鉛直方向のカメラは IST 用

である。PTV/LIF の励起光源は、YAG レーザ($\lambda = 532$ nm)であり、IST の光源は、赤外線 LED 群($\lambda = 850$ nm)である。計測部は、 $x = 500$ mm、 $z = 0$ mm の位置であり、この領域に照射された光は、それぞれ、約 10 mm 離れたミラー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が用いられる。さらに、PTV/LIF では、粒子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を用いてレーザー光を遮断する。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、0.015 mm/pixel である。実験条件を表 2 に示す。液相平均流速は 5 m/s、これに伴う平均流のレイノルズ数 Re_m は約 38000 である。これらの装置を用いることにより、液相場と気泡群の同時計測が可能になる。

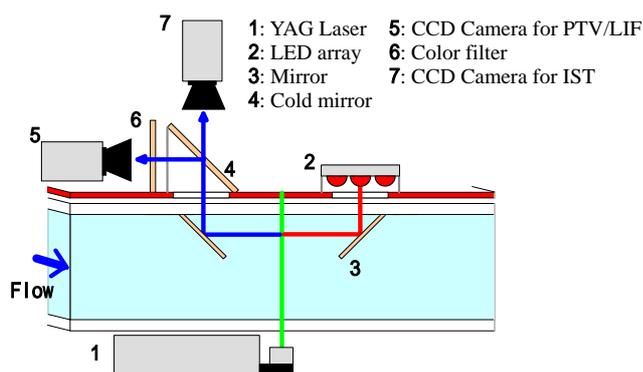


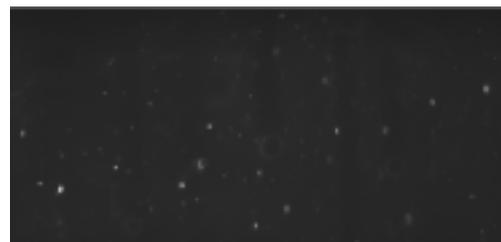
図 9 PTV/LIF/IST システム

表 2 実験条件

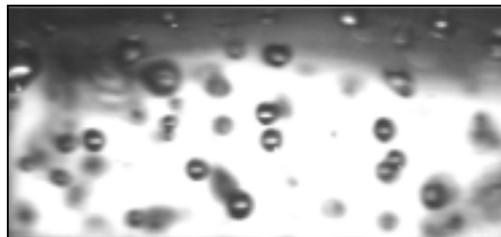
Temperature of liquid	20.0 ~ 21.0
Kinematic viscosity of liquid	0.99×10^{-6} m ² /s
Bulk liquid velocity	U_m $U_m = 5.0$ m/s
Bulk Reynolds number	Re_m $Re_m = h \cdot U_m / \nu = 38000$
Bulk void fraction	α $\alpha = 0, 0.5, 1.0$ %

4.2. ミラーによる流れ場への影響

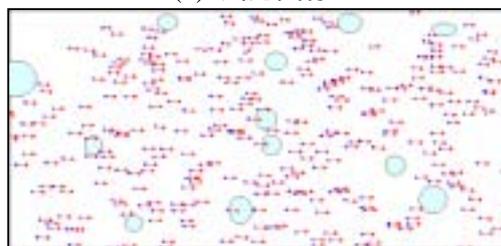
本システムでは、チャンネル内にミラーを設置するため、ミラーの存在による流れ場への影響が危惧される。そこで、ミラーにおける排除厚さとスパン方向の乱れの変動スケールに関する概算を行った。その結果、流速 5 m/s のもと、平板における排除厚さは、約 0.6 mm であった。また、 $Re = 13800$ にお



(a) 蛍光粒子画像

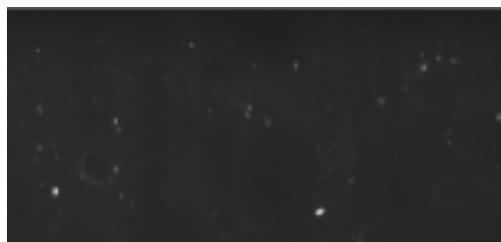


(b) 気泡画像

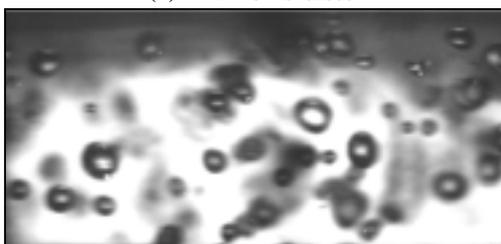


(c) 液相速度ベクトルおよび気泡群

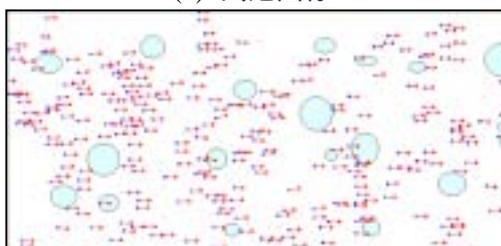
図 10 計測結果 ($\alpha = 0.5$ %)



(a) 蛍光粒子画像



(b) 気泡画像



(c) 液相速度ベクトルおよび気泡群

図 11 計測結果 ($\alpha = 1.0$ %)

る DNS (Kim et al., 1987)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。本研究では、計測部とミラーとの間隔は約 10 mm であるため、少なくとも液相に対してはミラーによる流れ場への影響が無視できると言える。

4.3. 計測結果および考察

図 10 および図 11 は、 $\alpha = 0.5\%$ および 1.0% の条件における計測結果を示す。図中の(a)は、PTV/LIF によって得られた蛍光粒子画像、(b)は、赤外線を用いたバックライト法により撮影された気泡群画像、(c)は、同時刻の液相場と気泡群との結果を重ね合わせたものである。ここで、画像上部は、上壁面に相当する。図(c)では、気泡像を明確にするために、原画像においてピントのあった気泡のみを抽出し、球形または楕円近似した。図から確認できる気泡の等価直径は、約 0.5-1.0 mm である。図から、ボイド率の増加とともに、液相速度ベクトルの総数は減少するものの、壁面近傍および気泡近傍の液相速度ベクトルが良好に取得されていることが判る。今後は、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムを明らかにするために、乱流場と気泡群運動との局所的相互干渉を明らかにする予定である。

5. 結論

本研究では、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減メカニズムを明らかにするために、気泡を含んだ水平チャンネル流れに対して画像処理計測を行い、以下のことを明らかにした。

1. PIV (Particle Image Velocimetry) および PTV (Particle Tracking Velocimetry)により捉えられる現象を明らかにし、液相のみの運動を的確に抽出する方法を確立した。
2. PTV/LIF (Laser Induced Fluorescence)により、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得た。その結果、ボイド率の増加とともに、レイノルズ応力が低下することを明らかにした。
3. PTV/LIF/IST (Infrared Shadow Technique)を組み合わせた計測システムを構築し、液相速度ベクトルと気泡群の瞬時データを獲得した。

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頂いた東京大学 藤原暁子 博士、北海道大学 村井祐一 助教授に対し謝意を表す。

文 献

- Fujiwara, A., So, S., Takagi, S., Hishida, K., Matsumoto, Y., The turbulence structure in bubbly channel flow, Proc. 3rd Symposium on Smart Control of Turbulence (2001), 41-47.
- Ishikawa, M., Murai, Y., Wada, A., Iguchi, M., Okamoto, K., Yamamoto, F., Novel algorithm for particle tracking velocimetry using the velocity gradient tensor, Experiments in Fluids (2000), 29-6, 519-531.
- 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.
- Kim, J., Moin, P., Moser, R., Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, J. Fluid Mech. (1987), 177, 133-166.
- 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.
- Madavan, N.K., Deutsch, S., Merkle, C.L., Reduction of turbulent skin friction by microbubbles, Phys. Fluids (1984), 27, 356-363.
- Nishino, K., Kasagi, N., Hirata, M., Three dimensional particle tracking velocimetry based on automatic digital image processing, ASME J. Fluid Eng. (1989), 111, 384-389.
- 山本富士夫・植村知正・小川邦康・近江和生, 二値化画像相関法 PTV の正対応率と測定精度の向上, 機論 B, 57-543 (1991), 3826-3831.
- Yamamoto, F., Wada, A., Iguchi, M., Ishikawa, M., 1996. Discussion of the cross-correlation methods for PIV, J. Flow Visualization and Image Processing, 3, 1, 65-78.