

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 11日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360079

研究課題名（和文） 界面活性剤が気泡流の巨視的構造に与える影響の解明

研究課題名（英文） Elucidation of surfactant effect on macroscopic structure of bubbly flows

研究代表者

高木 周（TAKAGI SHU）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30272371

研究成果の概要（和文）：

垂直チャンネル内上昇気泡流の3次元計測をスキャニングステレオ PIV により行うため、主流方向（x 方向）30 mm、壁面垂直方向（y 方向）40 mm、スパン方向（z 方向）20 mm の計測領域を、ガルバノミラーを用いてレーザーシートを z 方向に走査し、x 方向約 0.5mm、y 方向約 0.50mm、z 方向約 1 mm の空間分解能で約 10 万の速度ベクトルを取得し、流動構造の時間変化を約 30 Hz で捉えられる 3次元計測系を構築した。この計測系で単相乱流場の計測を行い、従来の結果（実験および数値計算）と良好な一致を得た。さらに、この計測システムを利用して、数十個程度の気泡が集積した気泡クラスターが壁面近傍を上昇していく状態で速度場の計測を行い、これまで LDV の計測によってのみ、得られてきた気泡乱流状態におけるレイノルズ応力の大幅な減少を計測することに成功した。また、PIV 計測の特性を活かし、気泡クラスターの影響によりチャンネル中央部の乱流構造が変化する様子を可視化することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

To conduct 3-dimensional measurement of upward bubbly flows in a vertical channel, Scanning Stereo PIV system was developed. By scanning the laser sheet in span-direction using galvano-mirror in the measurement area of 30mm in the streamwise (x-), 40mm in the wallnormal (y-) and 20mm in the spanwise (z-) directions, we succeeded to measure the 3-dimensional time-dependent velocity fields. Approximately 10,000 velocity vectors was obtained at each time step with the time resolution of 30Hz and spatial resolution of 0.5mm, 0.5mm, and 1.0mm in x, y, z directions, respectively. Using the developed PIV system, single phase turbulent flow was measured and the quantitatively good agreement with previous results (both experimental and numerical) was achieved. Then, using this system, the liquid velocity was measured under the situation that the clusters of a few tens of bubbles were sliding up along the vicinity of the wall. We succeeded to measure the drastic reduction of Reynolds stress in this type of bubbly flow which was previously obtained only through the LDV measurement. Furthermore, we succeeded to visualize the change of turbulent structures in the center region of channel which is caused by bubble clusters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，流体工学

キーワード：流体工学，混相流，乱流，気泡，界面活性剤

## 1. 研究開始当初の背景

液体中に多数の気泡を含む流れは、化学反応器や熱交換器、水質浄化のための曝気槽など多くの工業プロセスで見られる。また、最近では気泡吹きだしによる船舶の抵抗低減メカニズムの解明などが世界的にも多くの研究者の話題となっており、液体中を移動する気泡群の挙動に関する詳細な知見が求められている。これら多数の気泡を含む流れにおいては、個々の気泡の表面における界面活性剤の存在など分子スケールのマイクロな現象から、流れ場全体のマクロな構造に到るまで、マイクロ・メゾ・マクロの様々なスケールの現象が複雑に干渉し合いながら流動構造が決定されている。

水中を上昇する気泡は、ほんのわずかな界面活性剤の影響により抗力が急激に増大し、その上昇速度が  $2/3$  から半分程度になることが知られている。また、界面活性剤の存在する水中では気泡同士の合体が非常に起こり難くなり、気泡流全体の流動構造に大きな変化が現れることも知られている。

高木らはこれらの現象に対しこれまで種々の研究を行ってきた。2005 年以降行ってきた研究の重要な成果として、界面活性剤は気泡の上昇速度に影響を与えるだけでなく、気泡を横方向に移動させる揚力に対しても大きな影響を与えることがわかってきた(Takagi et al. 2008, Fukuta et al. 2008)。さらに、この揚力の違いにより、2次元チャンネル内上昇気泡流の乱流構造が劇的に変化することを示すとともに、壁面近傍に集積した気泡群により気泡クラスターが形成されるのを発見した。さらに、これらの現象に対し、高木らは、個々の気泡に働く揚力と、界面活性剤により気泡表面にもたらされる濃度マランゴニ効果が重要であることをつきとめているが、実際に形成されるクラスターの構造や、周囲の乱流場の様子などについては、十分な知見が得られていなかった。

## 2. 研究の目的

上記の研究背景に対して、本研究では、2次元チャンネル内上昇気泡流乱流に対するスキニングステレオ PIV (SSPIV) による3次元速度場の計測を通して、界面活性剤が気泡流の巨視的流動構造に与える影響を調べることが目的とする。

これまでの研究成果より、壁面近傍に形成された気泡クラスターにより、単相の乱流のときとは大きく異なる流動構造が形成されているのは確認されている。しかし、乱流場においては、液相自身の速度変動が大きく、瞬時の流れ場に対しての気泡の振る舞いについては未知な点が多く、定量的な議論をするに至っていない。本研究ではこの点に関連

して、チャンネル内乱流中を上昇する、単一および複数気泡の挙動と気泡周囲の流れ場の同時計測を行なう。さらに、複数の気泡の相互作用を介して気泡クラスターが形成される過程を解析し、気泡クラスターが乱流場に与える影響について知見を得る。特に、SSPIV の特性を十分活用し、気泡クラスターの有無による乱流統計量としての液相側流速の変化と、瞬時・局所の渦構造の違いなどについて知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、SSPIV を用いて、気泡クラスターの存在下における乱流場の測定を行うために以下のような計測系を構築して、計測を行った。

### (1) 3次元速度場計測系の構築

本研究で用いる実験系の概略図を Fig. 1 に示す。チャンネルの寸法は幅 40 mm、スパン方向 400 mm、高さ 2500 mm であり、単相時に完全発達乱流の得られるチャンネル下部から 2000 mm 上方のチャンネル中央部に、主流方向 ( $x$  方向) 30 mm、壁面垂直方向 ( $y$  方向) 40 mm、スパン方向 ( $z$  方向) 20 mm の計測領域を設定する。光源にはパルスレーザーを用い、光学系で成形した厚さ 1 mm 弱のレーザーシートをガルバノミラーで面外方向にスキャンする。トレーサー粒子には 20  $\mu\text{m}$  の“ナイロン 12” 粒子を用いる。粒子画像はレーザーシート面に対して 45 度に設置した高速度カメラで取得する。3次元計測を行うためのスキニングシステムには榊原らが開発したものをを用いた。スキニングシステムのタイミングチャートを Fig. 2 (a)、レーザーシート面に対して垂直に設置したグリッドに照射されたレーザーシートのスキャンの様子を Fig. 2 (b)に示す。高速で角度変化可能なガルバノミラーを 1500 Hz で角度変化させ、計測領域内においてレーザーシートを面外方向に前後してスキャンする。これにより PIV 解析を行う時間間隔  $\Delta t$  をスキャン内で任意に設定でき、変位量の大きなバルクレイノルズ数の流れ場に対しても3次元計測を行うことが可能になる。Fig. 2 において  $t = t_0$  の時、ガルバノミラーの偏角  $\theta_0$  において計測領域内  $z = z_0$  を照射する。信号が入力されることでガルバノミラーが角度変化し、レーザーシートの照射位置が前後して動く。その移動中の同じ位置で取得した粒子画像を PIV 解析における連続画像することで、適切な時間間隔  $\Delta t$  の下、速度ベクトルが算出できる。今回の PIV 解析では最小の時間間隔である  $\Delta t$  を 1/500 sec とした。実際にレーザーシートのスキニングの様子から  $\Delta t$  秒後に同じ位置からずれないことが確認できた。

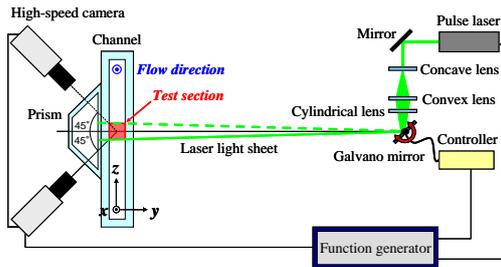


Fig. 1 Schematic of experimental setup

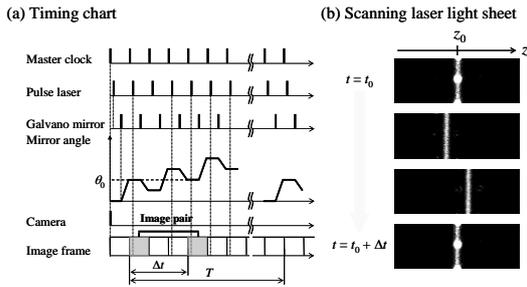
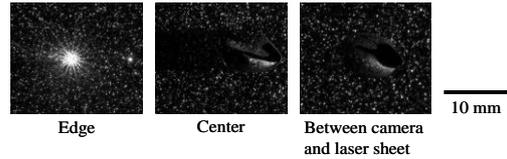


Fig. 2 (a) Timing chart of scanning system and (b) photographs of scanning laser light sheet

(2) 大変形気泡への適用

気泡流のPIV計測では液相中に分散する気泡と光学系であるレーザーシートとの相対的な位置関係の違いから生じる干渉が問題となる。気泡にレーザーシートが照射される時、屈折率の違いによる界面での激しい散乱反射光が周囲の粒子画像に悪影響を及ぼす。また、気泡がレーザーシートを遮断した領域で十分な粒子画像の取得が困難になる。気泡がレーザーシートとカメラの間に入り込む時、レーザーシート面外の気泡が粒子画像に写り込み、気泡背後の粒子画像が不鮮明になる、などの問題を生じる。そこで、チャンネル下部から直径約 10 mm の大変形する気泡を導入した時の気泡とレーザーシートの位置関係による粒子画像への影響を調べた。結果の一例を Fig. 3 (a) に示す。レーザーシートが気泡縁を照射する時、界面での散乱反射光が激しくなり、気泡周囲の粒子像を観察することが困難になる。また、気泡中央を照射する時には、気泡のごく近傍においても良好な粒子像が得られるが、気泡径の影響でレーザーシートの遮断領域が大きくなってしまい、十分な粒子画像が得られない。そして、気泡がカメラとレーザーシートの間位置する時、気泡背後の領域で十分な粒子画像を得られない。したがって、気泡周囲全域にわたってのPIV解析は困難であるが、影響の比較的小さい領域においては速度ベクトルの算出が可能になっており、適切な計測領域の設定により十分な精度で計測が可能であることを示した。

(a) Large deformed bubble



(b) Bubbles rising near the wall of vertical channel

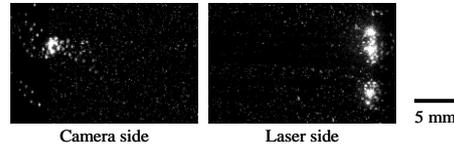


Fig. 3 Influence of bubbles on particle image

(3) 気泡クラスターへの適用

一般的な気泡流のPIVにおいてはトレーサー粒子として蛍光粒子を使用し、界面での散乱反射光の影響を低減させる。しかしながら、蛍光粒子には凝集防止に界面活性剤が含まれていることが多く、本研究における気泡流への界面活性剤による定量的な評価を行う場合には適さない。そこで、対象とする気泡クラスターのみ存在する気泡流を再現し、気泡の存在が計測系へ与える影響を低減する気泡発生装置を設計した。内径 0.1 mm のステンレス細管をチャンネル片側壁面にのみ 4 mm 間隔で 2 列分、計 180 本配置する。壁面から細管先端までを 3 mm とし、片側壁面近傍にのみ直径約 1 mm の気泡を導入した。発生装置から計測領域までの距離を 500 mm とし、気相流量の調整で気泡クラスター構造を再現した。計測領域における生成気泡の様子を Fig. 4 に示す。界面活性剤として 1-ペンタノールを 20 ppm 添加し、バルクレイノルズ数  $Re = 5000$  の下で気相流量を調整したところ、平均ボイド率  $f_g = 0.1\%$  の時に気泡クラスターの形成が確認され、さらに気相流量を増やすことでより集積密度の大きい気泡クラスターが観察された。気泡の発生位置としてはカメラ側かレーザー側のチャンネル壁面かの 2 通りの可能性がある (Fig. 3 (b))。両者において、気泡界面での散乱反射光の影響を無視することはできない。カメラ側に気泡が存在する時には、レーザーシート面とカメラ撮像面間に気泡が入り込み、気泡背後で粒子画像が不鮮明になる影響が大きい。一方、レーザー側の時には、気泡がレーザーシートを遮断する影響が大きくなる。今回生成される気泡径が約 1 mm と比較的小さく、計測条件下で遮断領域が狭いため、レーザー側に気泡を発生する条件で計測を行った。

気泡を含む粒子画像のPIV解析時、連続画像における気泡とその周囲流体の変位量の違いが問題となる。流れ場の計測を行う時には気泡の変位量から算出される速度ベクトルは誤ベクトルとなるため、それらを判別し、除去する必要がある。特に、今回のような気

泡界面での散乱反射光を低減できない計測条件下では、気泡近傍における激しい散乱反射光に相関が強く出てしまい、液相領域においても本来の変位量に基づかない速度ベクトルが算出されてしまう。そこで、PIV 解析前の画像処理として、気泡を含む粒子画像から気泡と粒子像の分離を行う。取得した粒子画像に対して適切な閾値を以って二値化した。二値化画像では気泡と粒子の面積の違いに対して閾値を設定することで、気泡のみを含んだ画像と粒子像のみの画像に分離を行った。この画像処理を行った粒子像のみの画像からは液相の変位量から算出される速度ベクトルを取得できた。今回は気泡領域と見なす領域に対してのベクトルの補間を行わないこととし、気泡のみの画像から取得した気泡領域情報を算出された速度ベクトル場に反映させた。

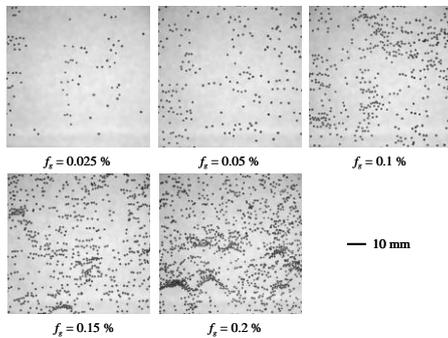
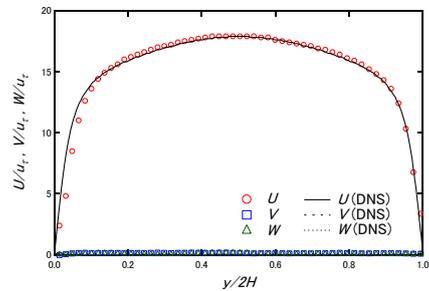


Fig. 4 Photographs of generated bubbles with 1-pentanol at  $Re = 5000$

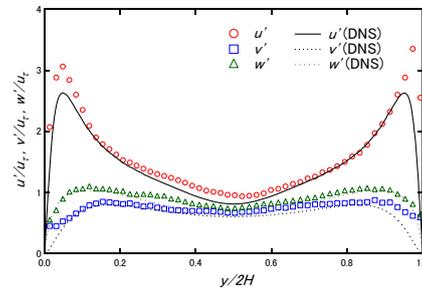
#### 4. 研究成果

(1) 单相乱流の計測精度評価及び3次元計測構築した計測系の精度評価として、 $Re = 5000$  の条件下で  $xy$  平面内におけるステレオ PIV を用いた乱流統計量の計測を行った。チャンネル内乱流では壁面近傍の空間的な変形が大きな領域において誤ベクトルが発生しやすいことが予想され、どの程度の領域において十分な精度を有しているかを判断する必要がある。統計的に独立している計測データから各乱流統計量の時間平均値を算出した。乱流統計量が平均値に収束したと判断する指標として、レイノルズ応力分布を選び、Iwamoto, K., 2002c [1]の直接数値計算 (DNS) の結果と比較する。平均流速、変動速度、レイノルズ応力の壁面垂直方向の分布を Fig. 5 に示す。横軸をチャンネル幅  $2H$ 、縦軸を壁面での摩擦速度  $u_\tau$  で無次元化している。平均流速分布において、予想された通り壁面近傍に近づくにつれ誤差が生じてくるが、チャンネル内大域において良好な一致が見られる。変動速度分布において、平均流速と同じように壁面近傍に近づくにつれ誤差が生じる。しかし

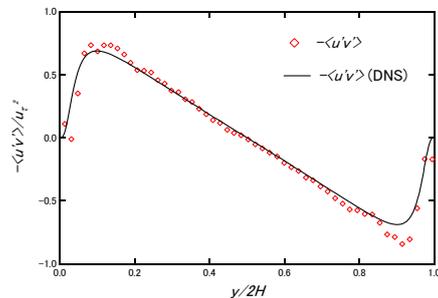
ながら、チャンネル大域の各方向成分について良好な一致が見られ、計測系として十分な精度を有していると判断できる。レイノルズ応力分布においても直接数値計算の結果との良好な一致が見られ、統計量解析に用いた乱流データのサンプル数が十分であり、得られた結果は収束していると言える。また、同様の条件下でスキニングシステムを用いて瞬時の空間的な流れ場の計測を行った。取得したデータから擬似的な瞬時の空間情報を構築し、その経時変化を約 30 Hz で捉える。 $z$  方向約 1 mm (スキャン間隔)、 $x$  方向約 0.5 mm、 $y$  方向約 0.5 mm の空間分解能を有し、单相流条件下において計測領域内で約 10 万の速度ベクトルが得られる 3次元速度場計測系を構築した (Fig. 6)。



(a)



(b)



(c)

Fig. 5

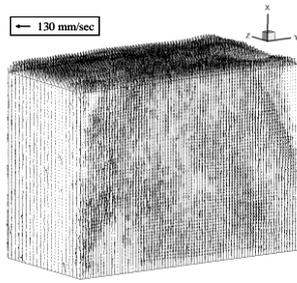


Fig. 6 Instantaneous three-dimensional velocity field at  $Re = 5000$

### (2) 大変形気泡の後流計測

PIV を用いて静止流体中を上昇する直径約 10 mm の大変形気泡周りの速度場を計測した可視化結果を Fig. 7 に示す. 大変形気泡により周囲液相の変位量が大きくなる領域において速度ベクトルを算出するために, PIV 解析における時間間隔  $\Delta t$  として最小の 1/1500 sec を選択した.  $T = 0$  において広く速度ベクトルが欠落している領域が気泡の部分である. 気泡真横のレーザーシートが遮断された領域や気泡周囲の液相の変位量が大きい領域では速度ベクトルの算出が困難である. 一方, それらを除く大域においては十分な速度ベクトルを取得することができた. 特に, 気泡とレーザーシートの干渉による影響が少ない気泡後流部の流動構造の時間的な変化がよく捉えられている様子が分かる. 液相の変位量が大きな領域でより正確な解析を行うために, PIV 解析に選択する時間間隔を小さくし, 誤ベクトルの発生を抑える必要があるのが確認された.

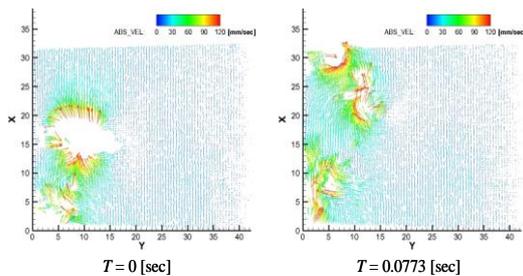


Fig. 7 Instantaneous velocity field in the wake of large deformed bubble

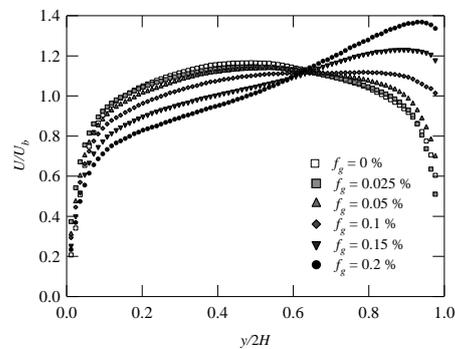
### (3) 気泡クラスター存在下での流動場計測

1-ペンタノール 20 ppm,  $Re = 5000$  での各平均ボイド率 ( $f_g = 0$  は単相流) における平均流速分布とレイノルズ応力分布の計測結果を Fig. 8 に示す. 横軸をチャンネル幅  $2H$ , 縦軸を平均バルク流速  $U_b$  で無次元化している. 壁面近傍かつ気泡の影響で計測データに十分な信頼性が得られない右端の計測データ 1 点を分布から除く. 導入した気泡群の通過位

置は  $y/2H = 0.95$  近傍であった.

$f_g = 0 \sim 0.1$  % 条件下の平均流速分布において,  $f_g$  の増加に伴い気泡側の流速が大きくなり,  $y/2H = 0.5 \sim 0.9$  で平均流速分布がやがて平坦化した. これは壁面に集積した気泡群の浮力の効果で液相が加速されるためである. レイノルズ応力分布においては気泡側のみレイノルズ応力が 0 に近づき,  $f_g = 0.1$  % の時にはほぼ 0 となった. これらの結果は小笠原による LDV 計測結果と同様の傾向であり, 片側壁面近傍にのみ気泡を導入する気泡発生装置を用いた場合でも気泡側で気泡クラスター存在下の流動構造が再現されていることが分かる. さらに気相流量を増加させた  $f_g = 0.15, 0.2$  % 条件下では, 気泡群が液相を持ち上げる効果がより顕著になり, 壁面近傍の平均流速がチャンネル中央の流速より大きくなる. そのため, チャンネル全体で平均せん断場が形成された右肩上がりの平均流速分布に変化していく. レイノルズ応力分布においてはほぼ 0 から正の値へ増加し, この変化は形成された平均せん断場による影響と考えられる.

同様の条件下でスキニングステレオ PIV を用いた流動場計測を行い, 瞬時の 3 次元速度ベクトル場を取得した. 統計量評価と同様に瞬時の流動場においても気泡群近傍で流速が大きくなり, また,  $f_g$  の増加に伴いその効果は大きくなる.  $f_g = 0, 0.1, 0.2$  % における速度場から算出した瞬時の主流方向の渦度分布を Fig. 9 に示す. 渦度算出の際に速度ベクトル場にスムージングを行なっているため, 渦度の値は本来の値より小さいことに注意されたい. また, 変数は無次元化している. 単相流時 ( $f_g = 0$ ) と比較して, 気泡側 ( $y/2H = 1$ ) で局所的にピークの大きな渦度の分布が消えており, 気泡が壁面での乱流構造を変化させていることが分かる. 特に, 平均流速分布が平坦化している時 ( $f_g = 0.1$ ), 気泡側大域において局所的にピークの大きな渦度の分布が消えていることが確認できる.



(a)

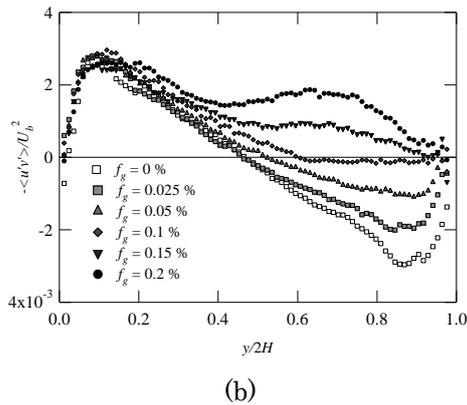


Fig. 8 (a) Mean velocity and (b) Reynolds stress profiles with 1-pentanol at  $Re = 5000$

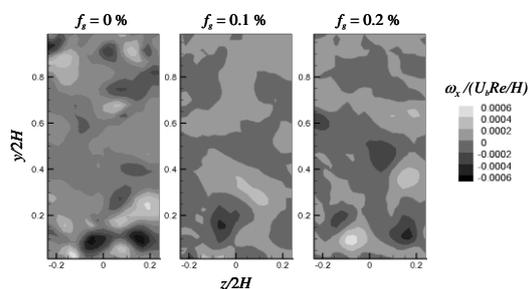


Fig. 9 Streamwise vorticity distribution as a function of  $f_g$

以上、本研究では、数十個程度の気泡が集積した気泡クラスターが片側の壁面近傍を上昇していく状態で速度場の計測を行い、これまで LDV の計測によって得られてきた気泡流乱流状態におけるレイノルズ応力の大幅な減少を計測することに成功した。また、PIV 計測の特性を活かし、気泡クラスターの影響によりチャンネル中央部の乱流構造が変化する様子を可視化することに成功した。

#### 参考文献

[1] Iwamoto, K., 2002c, *THTLAB Internal Report, ILR-0201*

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Shu Takagi, Surfactant effect on the multiscale structure of bubbly flows, *Multiscale Mathematics: Hierarchy of collective phenomena and interrelations between hierarchical structures*, Vo.39, 2012, 32-45

- ② 伊達正修, 小笠原紀行, 高木周, 松本洋一郎, スキャニング P I V を用いた垂直チャンネル内上昇気泡流の 3 次元速度場計測, *可視化情報学会誌*, 31 号, Suppl.1, 2011 年, 311-312
- ③ Takagi S. and Matsumoto Y., Surfactant effect on bubble motion and bubbly flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.43, 2011, 513-536
- ④ Takagi S., Ogasawara T., Fukuta M. and Matsumoto Y., Surfactant effect on the bubble motions and bubbly flow structures in a vertical channel, *Fluid Dynamics Research*, Vol.41, 2009, 065003

[学会発表] (計 2 件)

- ① Shu Takagi, Surfactant effect on the multiscale structure of bubbly flows, *Multiscale Mathematics: Hierarchy of Collective Phenomena and Interrelation between Hierarchical Structures*, 2011 年 12 月 9 日, Ito Campus, Kyushu University, Fukuoka
- ② 伊達正修, 小笠原紀行, 高木周, 松本洋一郎, スキャニング P I V を用いた垂直チャンネル内上昇気泡流の 3 次元速度場計測, *可視化情報シンポジウム 2011*, 2011 年 7 月 19 日, 工学院大学, 東京

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

高木 周 (TAKAGI SHU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 30272371

##### (2) 研究分担者

榊原 潤 (SAKAKIBARA JUN)

筑波大学・システム情報工学科・准教授

研究者番号: 10292533

小笠原紀行 (OGASAWARA TOSHIYUKI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号: 00552184