チャネル内上昇気泡流中における 気泡の壁面集積傾向に対する界面活性剤の影響*

Surfactant Effect on Bubble Migration toward the Wall in Upward Bubbly Channel Flow

小笠原 紀行** 高木 周** 松本 洋一郎**
OGASAWARA Toshiyuki TAKAGI Shu MATSUMOTO Yoichiro

Abstract It is known that, in upward pipe or channel flow, bubbles migrate toward the wall and the distribution of the local void fraction has saddle shape. In our experiment, 1mm mono-dispersed bubbles were generated in the vertical channel by the addition of surfactant. In the case with a small amount of 3-Pentanol in the liquid-phase, the bubbles accumulated near the wall and formed bubble clusters. On the other hand, in the case with Triton X-100 which has much higher molecular weight, the bubbles did not migrate toward the wall. The surfactants cause Marangoni effect and change the boundary condition of the bubble surface. One of the factors of the bubble migration is thought to be the shear-induced lift force. It is indicated that the shear-induced lift force is strongly influenced by the change of the boundary condition due to the presence of surfactants.

Keywords: Bubbly flow, Bubble migration, Surfactant, Shear-induced lift force, Bubble cluster

1. 緒 言

従来、鉛直管や鉛直矩形管内における上昇流中では気泡が壁面近傍に集積することが知られている[1]。また、So *et al.*[2]は本研究と同様の垂直矩形管内の上昇気泡流中において、1mm 程度の微小気泡群が壁面近傍に著しく集積したときに観察される気泡群のクラスタ化現象を報告している。流動場における気泡運動は、気液間相互作用のメカニズムを解明するために重要な要素となる。特に、気泡クラスタは乱流境界層内のごく壁面近傍において確認される現象であり、気泡流における乱流変調のメカニズムを探る上でも非常に興味深いものである。

一方、水中の気泡挙動は界面活性剤などの液相の汚れの影響を大きく受けることが知られている。例えば、水道水中での気泡の上昇速度は超純

水中の気泡と比較して半分程度にまで減少する場合があるが、この現象は濃度マランゴニ効果[3]として説明できる。

単一気泡に関しては界面活性剤が気泡挙動に及ぼす影響について多くの研究がなされているが、気泡流のような大規模な流動構造に対する界面活性剤の影響については定性的な評価さえされていないのが現状である。しかしながら、液相の汚れをパラメータとした気泡流に関する知見は、実際の汚れた系での流れ場を想定した際にも有用であり、気泡流現象の予測手法の高精度化に多大な寄与が期待できるものと考えられる。

そこで本研究では、液相に混入した界面活性剤が気泡流の大域的な構造に及ぼす影響を定性的に評価するための実験を行う。特に、上昇流中での気泡の壁面集積傾向や気泡のクラスタ化現象

* 2005.12.1 受付

** 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL (03)5841-6288 FAX (03)5841-8542 E-mail: ogasawara@fel.t.u-tokyo.ac.jp

に着目し、気泡-液相間の相互作用に関するメカニズムを解明することを目的とする。

2. 実験装置及び実験条件

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。チャンネルは高さが 2m、断面が 40mm (2H)×400mm (アスペクト比 10) の鉛直矩形管である。主流方向を x 、壁面垂直方向を y 、スパン方向を z として座標系を設定し、单相時に完全発達乱流が得られる、導入部から 1600mm ($x/H=80$) 下流を測定領域とする。液相はポンプで駆動し、チャンネル内に上昇流を発生させる。また、コンプレッサーで加圧した空気を気泡発生装置より送り出すことで、気泡群をチャンネル内に導入する。気泡発生装置は、内径 0.07mm、長さ 24mm のステンレス細管 474 本を用いて構成されており、ほぼ同一の径を有する気泡群をチャンネル内に均一に発生することができる。

Table 1 に実験条件を示す。液相には水道水、気相には空気を用いた。バルク流速 U_b とチャンネル幅 $2H$ で定義される液相バルクレイノルズ数 Re は、单相時に乱流の条件である 8200 とする。このとき、摩擦レイノルズ数 Re_τ は 260 となる。

平均ボイド率はすべての条件下で 1%以下とする。本実験と同様の装置を用いた So et al.[2]による報告から、このような低ボイド率下においても気泡混入による劇的な乱流変動が報告されている。ゆえに、低ボイド率の気泡流乱流には興味深い物理が含まれていると考えられるため、1%以下の低ボイド率を実験条件として設定することとする。ここで、本実験において平均ボイド率は

Table 1 Experimental conditions

Liquid-phase	Tap water
Gas-phase	Air
Temperature [°C]	25
$Re [=2U_bH/\nu]$	8200
$Re_\tau [=u_\tau H/\nu]$	260
Void fraction [%]	~1.0
Surfactant	3-Pentanol, Triton X-100

気相流量により変化するが、界面活性剤の影響により気泡液相間の相対速度や気泡の空間的な分布状況が変化するために、ボイド率をパラメータとして実験を行うことが困難である。したがって、気相流量 Q_g をパラメータとして実験を行う。

液相に添加する界面活性剤としては 3-Pentanol と Triton X-100 の二種類を用いる。Triton X-100 は気液界面に吸着すると脱離しにくいという特性があり、ごく低濃度の溶液中においても気泡表面に吸着した分子が蓄積され易く、大きなマランゴニ効果をもたらすことが知られている[4][5]。3-Pentanol 溶液は体積濃度にして 21ppm から 168ppm の間、Triton X-100 溶液は 2ppm の条件において、それぞれ実験を行った。

また、水道水に含まれる不純物や添加する界面活性剤の気泡への定量的な影響を調べるために、静止流体中における単一上昇気泡の終端速度の測定を行った。実験装置は高木ら[4]と同様のシステムを用いた。装置の概略図を Fig. 2 に示す。テストセクションには直径 64.5mm、高さ 340mm のガラス製の円筒型の容器を用いる。気泡発生部は内径数十 μm のガラス管であり、圧力コントローラとバルブで調整された窒素ガスを電磁バルブ

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Fig. 2 Experimental setup for terminal velocity measurement of single rising bubble in surfactant solutions. (高木ら[4], Fig. 1)

の開閉によりテストセクション内に導入し、単一気泡を得る。気泡発生部から 300mm 上方において高速度カメラにより撮影を行い、その画像を元に、気泡径と気泡の上昇速度を評価する。超純水や画像解析の誤差などの詳細については高木ら[4]を参照されたい。界面活性剤溶液の濃度については、チャンネル内上昇気泡流の実験と同様のものを実験条件として設定した。

3. 気泡の壁面近傍への集積傾向

3.1 界面活性剤の種類に対する依存性

Fig. 3 にチャンネル正面から見た気泡流の様子を示す。条件は $Re=8200$ で気相流量 Q_g を 0.7 l/min に保っている。平均ボイド率は約 0.3% であるが、マランゴニ効果の影響により各条件間で変動がある。Fig. 3 (a) は界面活性剤を添加していない気泡流の画像である。気泡径は 1mm から 4mm とば

(a) Tap water without surfactant

(b) 42ppm 3-Pentanol solution

(c) 2ppm Triton X-100 solution

Fig. 3 Photographs of bubbly flow from the front of the channel (x - z plane view) at each surfactant condition. ($Re=8200$, $Q_g=0.7$ l/min)

らつきが大きい。このとき、変形を伴う径の大きな気泡はジグザク運動や螺旋運動をしながらチャンネル内を上昇する。Fig. 3 (b)(c)は界面活性剤としてそれぞれ 3-Pentanol (42ppm) と Triton X-100 (2ppm) を加えたときの様子である。界面活性剤溶液中では測定領域において平均気泡径が 1mm 程度の単分散の微小気泡群が観察される。これは、界面活性剤の混入により気泡同士の合体が抑制された結果、発生時の気泡径が保たれたためである。3-Pentanol (42ppm) を添加した気泡流 (Fig. 3(b)) では水平方向に三日月型の気泡クラスタが形成されている。一方で、Triton X-100 (2ppm) の溶液中 (Fig. 3(c)) では、3-Pentanol 溶液と同様に

(a) Tap water without surfactant

(b) 42ppm 3-Pentanol solution

(c) 2ppm Triton X-100 solution

Fig. 4 Photographs of bubbly flow from the side of the channel (x - y plane view) at each surfactant condition. ($Re=8200$, $Q_g=0.7$ l/min)

単分散の気泡径を有する微小気泡群が得られているにも関わらず、気泡クラスタは生じていない。

次に Fig. 4 にチャンネル側面から見た気泡流の様子を示す。画像の両端がチャンネル壁面辺りになっており、壁面間隔は $2H=40\text{mm}$ である。Fig. 4(a) の界面活性剤を添加していない状態では、変形した気泡の壁面での跳躍運動が特徴的な現象として確認される。また、気泡は壁面に近い領域に存在しており、チャンネル中央部にはあまり存在しない。3-Pentanol (42ppm) を添加した際には 1mm 程度の球形を保った気泡が壁面近傍に非常に強く集積しており、壁面上を滑るように上昇する (Fig. 4(b))。一方、Triton X-100 (2ppm) 溶液中では気泡は壁面近傍への集積傾向を見せず、チャンネル全体に渡って一様に分布している (Fig. 4(c))。

3.2 気泡に働く壁面垂直方向の力

気泡の壁面集積傾向を説明するために、まず壁面垂直方向に働く力を考える。変形を伴う大きな気泡の運動は非常に複雑であるため、界面活性剤の添加により気泡同士の合体を防止したほぼ球形とみなせる微小気泡の運動を考える。

壁面垂直方向の力を生じる因子としては、圧力勾配と流れの平均せん断が考えられる。

まず、圧力勾配に起因する壁面垂直方向に働く力 F_{py} を式(1)のように定め、式(2)による単相乱流の圧力勾配を用いて見積もる。

$$F_{py} \equiv V_b \left| \frac{\partial P}{\partial y} \right| \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\rho_l \frac{\partial \overline{u'_y u'_y}}{\partial y} \quad (2)$$

ここで、(2)式は単相乱流における壁面垂直方向のレイノルズ方程式であり、 u'_y は壁面垂直方向の液相変動速度である。

次に、平均せん断に起因する力 F_L は式(3)のオートンの揚力モデル[6]を用いて見積もる。

$$F_L = C_L V_b \rho_l \mathbf{u}_r \times \boldsymbol{\omega}, \quad C_L = 0.5 \quad (3)$$

オートン揚力はせん断率の小さい非粘性流れ場における球形物体に働く揚力の理論解であり、気泡のように界面での渦度の生成が少ない場合の揚力の発生のメカニズムをよく再現している。

尚、見積もりに際して用いる気泡周囲の流れ場の情報は、LDV 計測による単相流の測定結果を

Table 2 Estimation of the lateral forces on the bubble

Re	F_L	F_{py}	unit : [N]
4100	3×10^{-6}	3×10^{-9}	
8200	9×10^{-6}	2×10^{-8}	

利用した。式(2)右辺の評価には、 y 軸方向の $u'_y u'_y$ の分布においてチャンネル中央と最大値を取る点の勾配を用いた。また、式(3)で用いる速度勾配 $\partial u_x / \partial y$ はチャンネル中央での平均流速をチャンネル半幅 H で割った値とし、気泡液相間の相対速度は静止流体中におけるクリーンバブルの終端速度とした。

見積もりの結果を Table 2 に示す。平均せん断に起因する揚力 F_L が $O(10^{-6})$ であるのに対して、圧力勾配による力は $O(10^{-8}) \sim O(10^{-9})$ であり 2 桁ほど小さい値となっている。したがって、本実験における気泡の壁面集積傾向の要因は、気泡が平均せん断から受ける揚力であると考えられる。

3.3 界面活性剤溶液中の気泡挙動

水中に含まれる不純物 (界面活性剤) の影響は濃度マランゴニ効果[3]として説明できる。気泡表面に付着した界面活性剤は気泡の上昇に伴い、後方に向かって移流される。これにより、気泡表面に吸着した界面活性剤濃度は後方で高く前方で低い分布となる。その結果、表面張力に勾配が生じ、せん断応力が発生する。以上のプロセスが水中を上昇する気泡に関する濃度マランゴニ効果である。

界面活性剤が気泡挙動に及ぼす影響を考えるには、マランゴニ効果によって誘起されるせん断応力を評価する必要がある。そこで、気泡流の実験装置と同様の界面活性剤溶液を用いて静止流体中における単一上昇気泡の実験を行い、気泡の終端速度 U_∞ 及び気泡半径 R から式(4)により抗力係数 C_D の測定を行った。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \pi R^2} = \frac{8Rg}{3U_\infty^2} \quad (4)$$

本実験では水道水を使用しているため、マランゴニ効果に対する 3-Pentanol や Triton X-100 の影響の他、水道水に含まれる不純物の影響も同時に評価することとなる。ここで、実験で設定した界面活性剤の濃度条件下では、テストセクションにおいて十分に終端速度に達していると考えられる [4][5]。

Fig. 5 に結果を示す。実験には直径が 0.8mm~1mm のほぼ球形とみなせる気泡を用いた。グラフの縦軸が抗力係数 C_D 、横軸が気泡レイノルズ数 $Re_b (=2U_\infty R/\nu)$ である。点線、実線はそれぞれ Clift *et al.*[7]、Mei [8]による球形粒子と球形気泡の抗力係数の相関式である。水道水中での抗力係数(◆)は、超純水中のもの(○)と比較して僅かに増加している。このとき、終端速度にして 9%~10%程度の低下が見られた。3-Pentanol 溶液は 21ppm(▽)、63ppm(+), 168ppm(△)の異なる濃度の溶液を用意したが、濃度を増加するごとに気泡から剛体球の抗力係数に近づいていく様子が確認できる。最後に、Triton X-100 (2ppm) 溶液中(□)では剛体球の抗力係数とほぼ等しくなる。

抗力係数は気泡の表面速度と相関があり[4]、マランゴニ効果による気泡表面の境界条件の変化を定性的に表しているものと考えられる。不純物の混入していない超純水中の気泡(クリーンバブル)は表面が自由に滑ることができる(free-slip)条件になっている。これに対して、水中に界面活性剤を添加することでマランゴニ効果により気泡の表面速度が低下していく。抗力係数が剛体球と同一の値をとるとき、気泡表面は滑りなし(no-slip)であると捉えることができる。

3.4 中間 Re_b 領域における揚力係数

球形物体がせん断から受ける揚力については、上述した $Re_b \rightarrow \infty$ での気泡の揚力を表現できるオートン揚力[6]と、 $Re_b \rightarrow 0$ での剛体粒子の場合のサフマン揚力[9]が理論解として知られている。また、気泡の場合、 $Re_b \rightarrow 0$ における揚力は剛体球の

4/9 倍となる[10]。

本実験における気泡レイノルズ数 Re_b はおよそ 100 から 300 程度であるため、厳密には理論解を適用することができない。近年、このような中間 Re_b 領域における揚力に関して、数値的な解析が行われている。Legendre and Magnaudet [11]は気泡(クリーンバブル)の単純せん断場における揚力を $0.1 \leq Re_b \leq 500$ 、 $0 \leq Sr \leq 1$ の領域で計算している。ここで Sr はせん断率であり、気泡半径 R と速度勾配 α 、気泡液相間の相対速度 U_r を用いて $Sr \equiv 2R\alpha/U_r$ と定義される。ちなみに、本実験におけるおよそのせん断率 Sr は 0.1 から 0.2 程度である。Kurose and Komori [12]は単純せん断流中における回転運動を考慮した球形粒子に働く揚力を $1 \leq Re_b \leq 500$ 、 $0 \leq Sr \leq 0.4$ の条件下で数値計算により導出した。この中で、 $Re_b > 60$ では負の揚力(サフマン揚力やオートン揚力と逆向きの揚力)が発生する場合があることを示している。さらに、Bagchi and Balachander [13]は $0.5 \leq Re_b \leq 200$ 、 $0 \leq Sr \leq 0.4$ で単純せん断場における剛体粒子の揚力を、自由回転の条件の下、計算している。以上をまとめて Fig. 6 に示す。揚力係数 C_L の表記には式 (5)によるオートン型と同様の定義を用いる。

$$C_L \equiv \frac{F_L}{V_b \rho_l U_r \alpha} \quad (5)$$

$100 \leq Re_b \leq 300$ 程度の領域 Fig. 6 (1) において、クリーンバブルに働く揚力は剛体粒子のそれよりも 10 倍以上大きくなる。クリーンバブルの場

Fig. 5 Drag coefficient C_D on a spherical body as a function of the bubble and particle Reynolds number Re_b . The solid line shows the C_D on a clean bubble and the broken line a rigid sphere.

Fig. 6 Shear-induced lift coefficient C_L on a spherical body as a function of the bubble and the particle Reynolds number Re_b . Comparison for cases of the clean bubble [11] and the rigid sphere [13].

合、本実験系における気泡の揚力の見積りにオートン揚力を用いることが妥当であることがわかる。また、剛体粒子では、 $Re_b \geq 100$ においてほぼ 0 に近い値を取っており、条件によっては負の揚力も存在している。

3.5 気泡が壁面近傍へ集積するメカニズム

抗力係数の測定から、水道水中においても本実験における濃度範囲において 3-Pentanol と Triton X-100 ではマランゴニ効果の影響が異なり、気泡表面でのせん断応力に違いが生じる。すなわち、3-Pentanol 溶液(42ppm)中では気泡表面にいくらかのせん断力が生じるものの、ある程度の表面速度は持つことになる。一方、Triton X-100 溶液(2ppm)中では気泡の表面速度はすべての領域でほぼ 0 になっていると考えられる。つまり、3-Pentanol 溶液(42ppm)中の気泡は free-slip と no-slip の間の中間的な境界条件を有しているのに対し、Triton X-100 溶液(2ppm)中では no-slip である剛体粒子とほぼ同様の境界条件になる。

気泡の壁面方向への移動には、せん断から受ける揚力の影響が大きいと見積られるが、球体が一様せん断場から受ける揚力についての最近の研究[11]-[13]から、クリーンバブル(free-slip 気泡)と剛体粒子(no-slip 気泡)とでは大きな違いがあることが示されている。したがって、本実験の場合、比較的低濃度の 3-Pentanol 溶液(42ppm)中の気泡と Triton X-100 溶液(2ppm)中の気泡では、前者の方が周囲の平均せん断に起因して大きな揚力を発生し、その結果として壁面への集積傾向が顕著に現れていると考えられる。

4. 気泡クラスタ

4.1 気泡径分布

各条件における気泡径分布を確認する。測定領域において、チャンネル正面より撮影した画像から面積等価気泡径を算出した。尚、撮影に際してはテレセントリックレンズを使用した。テレセントリックレンズを用いた撮影では、異なった撮影距離であっても深度内であれば被写体の寸法を的確に捉えられるため、投影気泡面積の撮影誤差を低減できる。

気泡径の測定結果を Fig. 7 に示す。実験条件は、 $Re=8200$ 、 $Q_g=0.7$ l/min である。3-Pentanol 21ppm、32ppm、63ppm 及び Triton X-100 2ppm の際の結果を示す。各々の条件における平均気泡径は

Fig. 7 The influence of the surfactant conditions on the equivalent bubble diameter distribution. ($Re=8200$, $Q_g=0.7$ l/min)

0.89mm、0.88mm、0.86mm、0.97mm である。3-Pentanol 溶液では 0.85mm~0.9mm の間に同様のピークが存在しており、21ppm の時には 1.1mm の辺りに第二のピークが存在している。この第二のピークはテストセクションまで上昇する間に一回の合体を経験した気泡の存在を意味しており、32ppm になるとやや減少し、63ppm まで濃度を増加するとなくなり、気泡の合体はほぼ完全に阻止される。また、Triton X-100 溶液中では 3-Pentanol 溶液の場合と比較して気泡径がやや大きくなる。

4.2 3-Pentanol 濃度に対する依存性

Fig. 8 に $Re=8200$ 、 $Q_g=1.4$ l/min 条件での気泡流の様子を示す。すべての場合で 3-Pentanol が混入されており、21ppm から 168ppm まで濃度を段階的に増加している。3-Pentanol を 21ppm 程度まで加えると気泡クラスタが現れ始め、42ppm の辺りで形状が最もくっきりとしたクラスタに成長する。さらに濃度を増加すると気泡クラスタは成長しにくくなり、168ppm まで濃度を増加すると気泡はクラスタを形成しなくなる。

気泡クラスタが形成される必要条件は、第一に気泡が壁面近傍に集積し、気泡運動が二次元的な平面内に拘束されることである。今までの議論で、界面活性剤のマランゴニ効果による影響が大きくなるにつれ、壁面方向へのせん断に起因する揚力が減少することが示されている。したがって、濃度上昇に伴い壁面方向に移動しにくくなることが考えられ、42ppm 以上の 3-Pentanol の添加により気泡クラスタが形成されにくくなる原因はせん断に起因する揚力の低下である。一方で、界

面活性剤の濃度増加に伴い気泡の抗力係数が増加し、気泡-液相間の相対速度が減少する。本実験では気相流量を一定に保っているため、気泡-液相間の相対速度の減少によりボイド率が上昇する。これにより空間的な気泡数密度が増加すると、気泡クラスタは生成、成長し易くなる。つまり、3-Pentanol の濃度上昇に伴う揚力の減少と抗

力の増加という二つの因子が、気泡クラスタの生成、成長に対して相反する寄与をしているため、気泡クラスタが最も顕著に形成される 3-Pentanol 濃度(今の場合 42ppm 程度)が存在することになる。

さらに、気泡の合体も気泡クラスタの安定的な成長に大きく影響している。気泡クラスタ内では気泡が密に存在しているので、気泡の合体が生じ易い。合体した気泡は上昇速度が増加し、周囲の気泡と異なる挙動をするようになる。これにより気泡クラスタの安定的な成長が妨げられたり、もしくは、気泡クラスタが崩壊したりする。21ppm 程度の低濃度の 3-Pentanol 溶液中で気泡クラスタが安定的に成長しない因子の一つがこの気泡の合体であると考えられる。

(a) 21ppm 3-Pentanol solution

(b) 42ppm 3-Pentanol solution

(c) 84ppm 3-Pentanol solution

(d) 168ppm 3-Pentanol solution

Fig. 8 Photographs of the bubbly flow from the front of the channel (x - z plane view, left hand side) and from the side of the channel (x - y plane view, right hand side) at each 3-Pentanol concentration. ($Re=8200$, $Q_g=1.4$ l/min)

5. 結 言

垂直チャネル内における上昇気泡流に関して、混入する界面活性剤の種類や濃度を変化した実験を行った。その結果、比較的低濃度の 3-Pentanol 溶液(21ppm~63ppm)中の気泡群は壁面近傍に著しく集積して気泡クラスタを形成するのに対して、Triton X-100 溶液(2ppm)中や高濃度の 3-Pentanol 溶液(168ppm)中では気泡が壁面方向へ移動せずにチャネル内にほぼ一様に分布することを確認し、以下の知見を得た。

1. 直径 1mm 程度のほぼ球形の気泡が壁面方向へ移動する主な原因は平均せん断に起因する揚力である。
2. マランゴニ効果の影響の少ないハーフスリップの気泡には周囲のせん断が起因となり揚力が生じるため、低濃度の 3-Pentanol 溶液中では気泡が壁面近傍へと集積する。一方、マランゴニ効果が強まると気泡表面が滑りなしの状態に近づいてせん断に起因する揚力が減少するため、高濃度の 3-Pentanol 溶液や TritonX-100 溶液中では気泡の壁面近傍への集積傾向が弱まる。
3. 3-Pentanol 濃度の上昇に伴う揚力の減少や抗力の増加、気泡の合体阻止などの競合する因子の影響により、気泡クラスタが生成、成長するのに最適な濃度が存在する。

Nomenclature

H	: half of the channel width	[m]
x	: streamwise direction	

y	: wall-normal direction	
z	: spanwise direction	
U_b	: bulk velocity	[m/s]
ν	: kinematic viscosity coefficient	[m ² /s]
Q_g	: gas flow rate	[l/min]
Re	: bulk Reynolds number	
Re_τ	: friction Reynolds number	
Re_b	: bubble Reynolds number	
F_{py}	: lateral force due to pressure gradient	[N]
F_L	: shear-induced lift force	[N]
F_D	: drag force	[N]
C_L	: lift coefficient	
C_D	: drag coefficient	
P	: pressure of liquid phase	[Pa]
u	: mean velocity of liquid phase	[m/s]
u'	: velocity fluctuation of liquid phase	[m/s]
$\mathbf{u}_r$	: relative velocity	[m/s]
U_∞	: terminal velocity	[m/s]
ω	: vorticity ($\equiv \nabla \times \mathbf{u}$)	[1/s]
ρ_l	: density of liquid phase	[kg/m ³]
V_b	: volume of bubble	[m ³]
R	: bubble radius	[m]
g	: gravity acceleration	[m/s ²]
α	: shear rate	[1/s]
Sr	: dimensionless shear rate	
$-$	: mean value	

謝 辞

本研究の一部は平成 16 年度 NEDO 研究助成事業(04A20004)の助成金の交付を受け行なわれた。

また、実験の遂行において、田川義之氏および松橋北斗氏より多大なる協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., Int. J. Multiphase Flow, Vol.2, 235–246 (1975).
- [2] So, S-H., Morikita, H., Takagi, S. and Matsumoto, Y., Exp. in Fluids, Vol.33, 135–142 (2002).
- [3] Levich, V. G., Physicochemical Hydrodynamics, Prentice Hall, (1962).
- [4] 高木 周, 宇田東樹, 渡邊裕二, 松本洋一郎, 日本機械学会論文集, Vol. 68 (686) B編, 16–23 (2003).
- [5] Zhang, Y. and Finch, J. A., J. Fluid Mech., Vol.429, 63–66 (2001).
- [6] Auton, T. R., J. Fluid Mech., Vol.183, 199–218 (1987).
- [7] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, W. E., Bubbles, drops, and particles, Academic Press (1978).
- [8] Mei, R., Int. J. Multiphase Flow, Vol.19, 509–525 (1993).
- [9] Saffman, P. G., J. Fluid Mech., Vol.22, 385–400, (1965), and corrigendum, J. Fluid Mech., Vol.31, 624 (1968).
- [10] Legendre, D. and Magnaudet, J., Phys. Fluids, Vol.9, 3572–3578 (1997).
- [11] Legendre, D. and Magnaudet, J., J. Fluid Mech., Vol.368, 81–126 (1998).
- [12] Kurose, R. and Komori, S., J. Fluid Mech., Vol.384, 183–206 (1999).
- [13] Bagchi, P. and Balachander, S., Phys. Fluids, Vol.14, 2719–2737 (2002).