せん断流中の単一気泡の挙動*

藤原 暁子^{*1}, 菱田 公一^{*2}

Bubble Motion in the Linear Shear Flow

Akiko FUJIWARA and Koichi HISHIDA^{*3}^{*3} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

The objective of the present study is to obtain fundamental knowledge of the influence of the lift force on the bubble and its motion induced by the surrounding flow field. We explored the flow structure in the vicinity of the bubble and also deformation of the bubble shape respectively by PIV/LIF and a projecting technique. As our system, we chose a single air bubble with an equivalent bubble diameter (D_{eq}) 1~8 mm, in a vertical shear flow. Velocity measurements were made using one digital high-speed CCD camera for Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) with fluorescent tracer particles. The recorded image data are analyzed by cross-correlation technique. A second CCD camera was used to detect the bubble's shape and translational motion via backlighting from a square array of infrared LEDs. We confirmed that the bubble deformation and surrounding flow induced lateral force on bubble. We proposed the lateral force parameter α_r which consisted of the relative velocity of the bubble and the circulation around the flow structure in the vicinity of the bubble measured by PIV/LIF. Bubble motion can be estimated by α_r with the phase which depends on the circulation around the bubble.

Key Words: Multiphase Flow, Bubble, Shear Flow, PIV/LIF/IST, Force, Bubble Shape

1. 緒言

気液接触装置は工業的に様々な分野において用いられており、これらの安全性の向上や高効率化を目指した設計には気液二相流の流動特性の解明が不可欠である。

気泡を含む流れは固体粒子と異なり自由界面を持つため、気泡形状の変化や気液界面の移動に代表される特有の挙動を示す。このため気泡を含む流れは流動構造を支配する大小様々な長さ、時間スケールを有し、単相流や固液二相流に比べ極めて複雑な流動特性を示す。

この流動特性の解明のため、近年では計算技術の発展に伴い多くの数値計算手法やモデル^{(1),(2),(3)}が考案されている。これらは限られた条件下では現象を良好に予測することができる。更に高い信頼性、優れた予測性、普遍性を持つ解析手法の確立のためには、ミクロ的な視点から見た気液二相間の相互作用を詳細に解明し、物理現象に即した精緻なモデルの構築に反映させることが求められている。

気泡の運動を把握するためには周囲流体が気泡に及ぼす力のメカニズムを明らかにする必要がある。本研

究は、気泡の特徴である形状変化と周囲流動場の相互干渉の微細なメカニズムの解明を目的とし、せん断流中の気泡に働く力が気泡形状に依存して変化する点に注目した。せん断流中の気泡に働く力は、球形気泡と変形する気泡で異なることが指摘されている^{(2),(3),(4),(5)}。しかしそのメカニズムについては未だ未解明な点が多い。本研究では層流場におけるせん断流中の単一気泡について、気泡周囲の流動構造と形状変化の同時計測を行い、形状変化と周囲流体の非対称性から、周囲流体が気泡に及ぼす力を評価する。

2. 計測方法

2.1 気泡周囲流動場の計測 図1に本研究で用いた計測システムの概略図を示す。前報⁽⁶⁾と同様、気泡周囲の流速計測には時系列多点同時計測が可能な粒子画像流速計(DPIV)を用いた。気液界面のごく近傍における粒子像の撮影を可能とするため、ローダミンB及び6Gを蛍光染料とした蛍光発光粒子を作製し、トレーサ粒子とした。粒子は比重が約1.03であり1~数十 μm の直径を持つ。CCDカメラに励起光を遮断するフィルターを装着することにより気泡のごく近傍における流速の計測が可能となる。

2.2 気泡形状の認識 蛍光粒子をトレーサ粒子としたPIVでは時系列で変化する気泡の形状と位置の認識は困難となる。本研究では気泡に赤外線を照射し、

* 原稿受付 2001年5月2日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学大学院(☎223-8522 横浜市港区日吉3-14-1)。^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。
E-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

投影された気泡像を光源と反対におかれた CCD カメラにより撮影する投影法 (Infrared Shadow Technique; IST) により気泡形状を捉えた。

2.3 計測システムの構成 図 1 に示す通り、PIV と気泡形状認識用の 2 台の CCD カメラはテストセクションに対して対面に設置し、気泡形状の認識に用いる光源である赤外線 LED 群 ($\lambda=800\text{nm}$) は PIV 用 CCD カメラの前面に配置する。本研究では PIV の励起光源として Nd:YVO₄ レーザ (コヒレント・ジャパン株式会社製, 5W, $\lambda=532\text{nm}$) をシリンドリカルレンズを用いて厚さ約 1.5mm のシート状にして照射した。レーザ及び赤外線 LED 群はタイミングコントローラを介して 2 台のカメラと同期しており, 85Hz のカメラの垂直同期信号をはさんで 2~3msec 間隔で 2 回, パルス幅 1msec で照射される。PIV の移動量算出はこの 2 枚の画像を用いた相互相関法により行った。本研究におけるデータサンプリングレートは 42.5Hz (約 23.5msec) である。

図 1 に示すシャトルとレールは, 3.2 で後述するラグランジアン計測システムの一部である。これを付加することで, カメラと光源を気泡と同速度で移動させて測定することが可能となる。

3. 実験方法

3.1 実験装置 実験流路は図 2 に示す通り, 上部タンク, アクリル製チャンネル, 下部タンクにより構成され, 作動流体はポンプにより上部タンクに汲み上げられ, チャンネル内を流下し流路を循環している。チャンネル中央部に設置されているベルトはモータに連結されており, モータの駆動によりせん断流が形成される。

安定した一様せん断流を実現するため, テストセクション流入部に, あらかじめ速度勾配を与えるための格子⁽⁷⁾を設置した。テストセクションは幅 $h=100\text{mm}$, 奥行き 100mm の矩形断面を持ち, 一辺は駆動ベルトとなる。

気泡注入方法は 2 通り用いた。気泡径が大きい場合はシリンジの先端に気泡を受ける半球形のキャップを取り付け, ここに任意の体積の気泡を注入する。キャップを回転させることで気泡を流路内に注入する。気泡が小さい場合は内径 0.07mm, 外径 0.5mm の注射針を流路内に設置する。この注射針とエアーポンプをコックと微量流量調節バルブ及びビニールチューブで繋ぐ。適切な圧力と流量で空気が流れるようにコックとバルブを調節し, 適当な時間間隔で一つずつ気泡が発生するようにした。

座標系は気泡注入位置の高さでベルト中央を原点とし, 流れと垂直にベルトから壁に向かう方向を x , 流れ方向上向きを y とした。

3.2 ラグランジアン計測⁽⁸⁾ 本研究では従来行ってきたオイリアン計測^{(6),(9)}に加え, 長時間気泡の挙動を捉えるために, カメラと光源を気泡に追従させながら計測するラグランジアン計測を行った。図 3 に実験装置を上部より見た図を示す。流路に平行に設置したレールに沿って上下駆動が可能なシャトルに, 2 台のカメラと PIV 光源用シリンドリカルレンズを固定する。形状認識用赤外線 LED 群を PIV 用カメラの前に設置する。シャトルの速度をステッピングモータにより制御することで, カメラと光源を気泡の平均上昇速度で移動させた。この際に生じるシャトルの振動の影響を除去するため, 分散粒子を模擬した速度校正用ス

Fig. 1 Schematic of measurement system.

Fig. 2. Schematic of experiment apparatus.

ケールを用いて速度の校正を行った。本研究では2台のカメラに各々独立した校正用スケールを用いた。PIV用カメラの校正は下記に記す通り行った。すなわち、トレーサ粒子の蛍光発光波長に近い585nmの波長を持つLED群1を透明なアクリル板上の模擬粒子群(スケール1)に照射し、投影された粒子像を鏡1を介してPIV用カメラで撮影する。各カメラで撮影可能な光の波長が異なるため、形状認識用カメラには800nmのLED群2を用いた。PIV用カメラと同様に、LED群2で照らされたスケール2の粒子像を鏡2を介して形状認識用カメラで撮影する。図4にキャリブレーションスケールが共に映っているPIV粒子画像及び気泡形状画像の一例を示す。スケールの粒子像をフレーム毎に計算し速度の校正を行う。

3.3 実験条件 表1に実験条件を示す。3.1で示した通り格子を用いて安定した一様せん断流を実現するために、比較的高粘度の作動流体として本研究では16w%グリセリン水溶液を用いた。これは純度98%のグリセリンを一般水道水で希釈したものであり、25°Cの大気圧下における水の粘性係数が $0.89\text{mPa}\cdot\text{s}^{(10)}$ であ

るのに対し、16w%グリセリン水溶液は $1.37\text{mPa}\cdot\text{s}^{(10)}$ となり、水の約1.5倍の粘性をもつ。また気泡は空気気泡であり、流動場は汚染系となる。これは気泡の平均相対速度がLevich(1962)⁽¹¹⁾やMendelson(1967)⁽¹²⁾による精製系における終端速度と比較して小さくなり、界面の汚れにより抗力が増加したことから汚染系であることを確認している。気泡の球相当径 D_{eq} が8.0, 1.8, 1.2mmの3通りについて比較を行った。レイノルズ数, エトベス数, モルトン数の各無次元数の定義式は式(1)から(4)に示す通りである。式(1)は気泡レイノルズ数に相当する。

$$Re_{rel} = \frac{D_{eq}|U_{rel}|}{\nu}, \quad U_{rel} = U_{bubble} - U_{liquid@b} \quad (1)$$

$$Re_k = \frac{D_{eq}^2 k_{avg}}{\nu} \quad (2)$$

$$Eo = \frac{g D_{eq}^2 (\rho_l - \rho_g)}{\sigma} \quad (3)$$

$$M = \frac{g \mu_l^4 (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2 \sigma^3} \quad (4)$$

U_{rel} は気泡の液相に対する相対速度で、 $U_{liquid@b}$ は単相時における気泡位置での液相の速度を用いており、実験結果から求めた。 k_{avg} は流動場における平均のせん断速度である。Case1はオイリアン計測を行い、Case2, 3はラグランジアン計測を行った。

本研究におけるPIV/LIF計測に関する不確かさ解析を行った⁽¹³⁾。速度計測に伴う総括された不確かさの主な要因は移動量算出に伴う不確かさであると考え、単相の場合について5回実験を試行した時の平均値の標準偏差より移動量算出の精密度 E を求めた。この結果 $E=0.20$ 画素となり、速度に換算した不確かさは95%包括度において $U_{RSS}=6.8\text{mm/s}$ であった。また、カメラの振動をキャリブレーションスケールを用いて校正する際の不確かさ解析を同様に行った。同速度でシャトルを動かして6回実験を試行した時の平均値の標準偏差より移動量算出の精密度を求めた。精密度は0.12画素となり、速度に換算した不確かさは95%包括度において $U_{RSS}=5.7\text{mm/s}$ であった。これはPIV/LIFの不確かさに比べ小さく、またラグランジアン計測における瞬

Fig. 3 Top view of experiment setup.

Fig. 4 Snapshot of the instantaneous PIV/LIF and bubble shadow image superimposed calibration scale.

Table 1. Experimental conditions. ($M=1.27 \times 10^{-10}$)

	D_{eq} [mm]	k_{avg} [s ⁻¹]	$ U_{rel} $ [mm/s]	Re_{rel}	Re_k	Eo
1	8.0	2.3	230	1390	111.2	10.1
2	1.8	1.6	300	398	3.69	0.49
3	1.2	1.6	242	220	1.75	0.23

時速度の2%と小さい。

4. 実験結果及び考察

4.1 時系列気泡周囲流動場と気泡の挙動 図5に各条件における単相時の流れ方向流速分布を示す。平均流動場はほぼ一様なせん断流であることを示しており、流れ方向変動速度も計測範囲内において平均10%程度であることが確認できる。流れと垂直方向平均流速 U, W はいずれも流路中央において十分に小さいことから、本研究における流動場は二次元一様せん断流とみなすことができる。

図6(a), (b), (c)に本計測方法により得られた、

Fig. 5 Streamwise velocity profile in single phase.

Case1, Case2, Case3 の瞬時気泡形状及び速度ベクトルの時系列変化を示す。図6(b), (c)はラグランジアン計測を行ったため各時刻で y 座標が変化している。ベクトル図上の矢印と楕円は、150mm/s 及び 120mm/s における参照ベクトルと各条件における気泡寸法の概略を示している。Case1, 2 では気泡形状は楕円体に変形し、Case3 ではほぼ球形を保ったまま上昇することが確認できる。

気泡の変形度合いを調べるために、式(5)で定義する変形度 D と式(6)で定義するウェーバー数 $We^{(14)}$ を求めた。

$$D = \frac{a-b}{a+b} \quad (5)$$

$$We = \frac{\rho_l |U_{ref}|^2 D_{eq}}{\sigma} \quad (6)$$

Table 2. Bubble deformation factors in each condition.

	Case1	Case2	Case3
D	0.24	0.17	0.08
Eu	10.1	0.49	0.23
We	6.85	2.56	1.13

Fig. 6 (a) Instantaneous velocity vector fields (Case1).

Fig. 6 (b) Instantaneous velocity vector fields (Case2).

Fig. 6 (c) Instantaneous velocity vector fields (Case3).

a , b は各々変形した気泡の長軸と短軸の長さである。表 2 に各条件における D , Eo 及び We を示す。 Eo , We が大きいほど気泡が扁平に変形することが確認できる。本実験条件において $Re_{rel} \gg Re_k$ が成立することから、気泡形状の変化には平均速度勾配よりも気泡径と相対速度による動圧分布の影響が支配的に働くことがわかる。ここで Eo が浮力と表面張力の比であるのに対し、 We は気泡の慣性力と表面張力の比であることから、気泡形状を表す指標として We を用いる。

図 7 に各条件における変形度 D の確率密度関数 p.d.f.(D) を示す。Case1 では We が大きいことから、気泡は扁平な形状に変形し易く、 D が広範囲に分布していることがわかる。気泡の上昇形態は、気泡の短軸の方向が左右に揺れる揺動運動を示した。気泡後流には気泡の長径と同程度の空間スケールを持つ渦が左右に放出⁽¹⁵⁾されており、これが気泡の揺動運動を誘起している。図 6(a)において気泡右側のエッジ下にできた渦により右のエッジにおけるせん断速度の方が左よりも大きくなる。このせん断に引きずられるように気泡が右側に傾く ($t=0\sim 23.5$ msec)。右エッジの渦が十分に発達すると渦はエッジから切り離され後流に放出される。気泡は伴って上昇していた渦の運動量を失い、その反動で反対方向に傾き再び上昇を始める ($t=47.1\sim 70.6$ msec)。Case 1 のように渦放出が明確に起こっている場合は渦放出が気泡の運動に支配的に働くことが確認できる。

Case2 では変形度 D が平均 0.17 の楕円体に変形し、

揺動運動を伴って上昇した。しかし Case1 のような後流への明確な渦放出は確認されなかった。界面における渦度 ω_s は界面での気泡の曲率 κ_s と流速 u_s を用いて $\omega_s = 2\kappa_s u_s$ ^{(15),(16)} で示されることから、渦放出には気泡の形状と相対速度が大きく影響することがわかる。表 1 より相対速度 $|U_{rel}|$ は Case2 の方が大きい。一形状は表 2 の変形度 D からわかるように Case1 の方が扁平になり形状抵抗が増大する。従って主に形状抵抗の影響により Case1 の方が大規模渦の放出が行われ易いと考えられる。

Case3 では球形に近い形状を保つことがわかる。また、気泡は揺動運動することなく上昇した。

4.2 気泡の揺動運動と軌跡 図 8 に示すように気泡の重心 (x_c, y_c) を気泡投影像から求め、各条件における重心の軌跡を図 9(a), (b), (c) に数例示す。印の同じ一連のプロットが一つの気泡の軌跡を示している。

Fig. 7 Probability density function of D .

Fig. 8 Definition of bubble's center of gravity and orientation.

Fig. 9 (a) Examples of bubble trajectory (Case1).

Fig. 9 (b) Examples of bubble trajectory (Case2).

Fig. 9 (c) Examples of bubble trajectory (Case3).

x/h 軸下の矢印は $y/h=0$ における気泡の注入位置を各々示しており, Case1 では $x/h=0.25$, また Case2, 3 では $x/h=0.40$ において気泡を注入した.

図 9(a)より Case1 では気泡は軌跡が蛇行するジグザグ運動をしていることが確認できる. 多くの気泡が注入位置より右, すなわち気泡の相対速度が小さくなるベルトから離れる方向へ移動した. 図 9(b), (c)では Case1 と反対に相対速度が大きくなるベルト側に移動した. また Case2 はジグザグ運動を伴っている. せん断流中の球形気泡には相対速度が大きくなる方向に力が働き, 気泡が扁平になるにつれて相対速度が小さくなる方向の力が働くという結果は, 現在までに行われてきた実験⁽⁵⁾, 数値解析^{(2),(3),(4)}と整合性を有している.

気泡のジグザグ運動と揺動運動の関係を調べるために, 図 8 に示すように気泡の重心の軌跡から求めた各瞬間の相対速度 U_{rel} の方向を γ , 気泡の傾き θ とし, γ と θ の関係を調べた. 任意の時刻 t における $\gamma(t)$ に対して, 時刻 $t+\tau$ における $\theta(t+\tau)$ の相関係数を $R_{\gamma\theta}(\tau)$ とし, 式(7)で定義する.

$$R_{\gamma\theta}(\tau) = \frac{\overline{\gamma(t)\theta(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{\gamma(t)^2}}\sqrt{\overline{\theta(t+\tau)^2}}} \quad (7)$$

$R_{\gamma\theta}(\tau)$ の τ に対する時間変化を図 10 に示す. Case1 では $\tau=23.5\text{msec}$ で最大値 $R_{\gamma\theta}(\tau)=0.84$ となり, Case2, 3 では $\tau=0$ で各々最大値 $R_{\gamma\theta}(\tau)=0.96$ と 0.20 を示した. Case3 で低い値を示したのは他の条件に比べ γ , θ 共に変動が小さいためと考えられる. 全体の傾向としては Case1, 2 で示されるように $\tau=0$ における γ と θ の相関が強く, 気泡は運動する方向に傾くことが確認できた. また Case2 が正弦波状に変化することから, Case2 における気泡の揺動運動及びジグザグ運動は約 6Hz であることがわかる. Case1 で $\tau=23.5\text{msec}$ の位相が生じたのは, 4.1 で記したように気泡エッジに生じた渦のせん断応力より下流方向に引きずられるように気泡が傾き, 運

Fig. 10 Correlation function between γ and θ .

動する方向へ傾こうとする気泡の揺動運動の応答が遅れるためと考えられる.

4.3 気泡周囲流体が及ぼす力の評価 一様流中におかれた, 流れに対して左右対称な物体の周囲流は, ポテンシャル流のように境界層の剥離や渦放出が起らない場合, 左右対称な流れとなる. 物体形状が扁平であったり, 流れが非一様であるなど, 物体に対して流れが非対称になる場合, 物体には進行方向に対して垂直方向の揚力が働く. 非球形気泡に働く抗力に関して Stone⁽¹⁶⁾は気相と液相の渦度を用いた表現を提案している. すなわち, $Re \geq 120$ の条件において気泡が定常的に並進運動し, かつ形状が保たれ, 気液界面の粘性境界層が十分に薄い場合について, 抗力エネルギーが気泡内外における粘性散逸エネルギーの総和に等しいことから, 粘性散逸エネルギーを渦度を用いて表記し, 抗力を気泡内外における渦度の体積積分と界面における面積積分で表している.

本研究において, 気泡の変形及び傾きと, せん断流動場による気泡周囲流体の非対称性が気泡に及ぼす横方向の力を考え, この力を抽出し得るパラメータとし, 式(8)で定義する a_r で評価する. a_r は気泡の相対速度 U_{rel} と気泡周囲流体の循環 Γ_c 及び気泡の断面積 A を用いており加速度の次元を有す.

$$a_r = \frac{-U_{rel} \times \Gamma_c}{A}, \quad \Gamma_c = \oint_{Bubble} U_{liquid} \cdot ds \quad (8)$$

本研究では後流の渦がほとんど見られない Case2, 3 について a_r を求めた. Γ_c は図 11 に示すように, 気泡のごく近傍における周囲流体の循環を示しており, 気泡に最も近い第一計算格子の流速を用いて計算した. 一時刻における気泡周りの Γ_c を求める際に 20 から 30 点の PIV による速度ベクトルを用いている. Γ_c は PIV の二次元計測面における気泡周囲流体の循環を表しており, Stone⁽¹⁶⁾の示す気泡内部及び界面の循環とは異なる.

Fig. 11 Definition of circulation and force.

気泡界面の循環を計測することは実験を試行する上で困難である。

浮力と周囲流体の影響を強く受ける気泡の運動を、式(9)で定義する気泡の相対速度の実質微分 α として求め、 α と α_r の相関について考察を進める。

$$\alpha = \frac{DU_{rel}}{Dt} = \frac{\partial U_{rel}}{\partial t} + U_{rel} \cdot \nabla(U_{rel}) \quad (9)$$

気泡の相対速度 U_{rel} は式(1)に定義した通りであり、時系列で変化する。また実質微分は各時刻における気泡の重心位置に基づいて微分している。図 12(a), (b) に Case2 における γ , α_r , α の時間変化の一例を、図 12(c) に Case3 における一例を示す。We が小さい Case3 の場合、気泡はほぼ定常運動しており γ は小さく時間変化に伴う大きな変動はない。 α_r , α についても同様に大きな変動は見られず、平均値は各々 $\alpha_{r,avg} = 1.56 \text{ m/s}^2$, $\alpha_{avg} = -0.27 \text{ m/s}^2$ と負の値を示し、 α_r , α が負となる相対速度が大きくなる方向に運動している。これは気泡が直線的に運動するとき、 α_r より気泡の運動

を見積もることができることを示唆している。

We の大きい Case2_a, b について α_r , α 共に波形の時間変化を示した。図 13 に Case2_a, b についての α に対する γ の相互相関係数 $R_{\alpha\gamma}(\tau)$ と α_r と γ の相関係数 $R_{r\gamma}(\tau)$ を示す。 $R_{\alpha\gamma}(\tau)$ と $R_{r\gamma}(\tau)$ は(7)式と同様に式(10), (11)で定義する。

$$R_{\alpha\gamma}(\tau) = \frac{\overline{\alpha(t)\gamma(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{\alpha(t)^2}}\sqrt{\overline{\gamma(t+\tau)^2}}} \quad (10)$$

$$R_{r\gamma}(\tau) = \frac{\overline{\alpha_r(t)\gamma(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{\alpha_r(t)^2}}\sqrt{\overline{\gamma(t+\tau)^2}}} \quad (11)$$

$R_{\alpha\gamma}(\tau)$ について Case2_a, b 共に $\approx 43 \text{ msec}$ で $R_{\alpha\gamma}(\tau)$ は最大値を示し、 γ は α に対して約 $\pi/2$ の位相差を持っていることが確認できる。一方 $R_{r\gamma}(\tau)$ については、Case2_a, b で互いに π の位相差を有す分布となった。すなわち、Case2_a で γ の変化に対して α_r は図 12 に示すように位相差を持つことなく変化した。Case2_b では揺動運動に対して約 π の位相差を伴って変化した。Case2_a と b の違いは、気泡が同じ方向に傾いたとき気泡の周囲流体の循環の方向が逆になることに起因する。そのため

Fig. 12 (a) Relation between γ , α_r and α (Case2_a).

Fig. 12 (b) Relation between γ , α_r and α (Case2_b).

Fig. 12 (c) Relation between γ , α_r and α (Case3).

Fig. 13 Correlation function between α , α_r and γ .

周囲流体が気泡に及ぼす力の向きが Case2_a と b で異なる結果が得られた。Case2_b においては気泡の傾きにより Γ_c が変化し気泡の運動する方向と逆向きの力を及ぼす。これにより気泡の運動 γ が変化し、結果として α_r は γ とほぼ π の位相差を有した。これより α_r と α の相互相関係数 $R_{r\alpha}(\gamma)$ を調べると、 α_r に位相差を考慮することで気泡の運動 α を見積もることができ、この位相差は気泡の中心断面における周囲流体の循環 Γ_c の符号に依存することが明らかになった。

5. 結言

気泡の特徴である形状変化と、周囲流動場の相互干渉の微細なメカニズムの解明を目的とし、せん断流中の単一気泡について、気泡周囲の流動構造と形状変化の同時計測をラグランジ的に行った。

We が小さく気泡が球形に近い場合、周囲流は気泡を相対速度が大きくなる方向へ動かす力として働く。 We が大きくなるにつれ、力は相対速度が小さくなる方向へ働くことを確認した。

PIV による計測結果から気泡周囲流体の循環を求め、これを用いて気泡に働く揚力を抽出するパラメータ α_r を提案した。 α_r に位相差を考慮することで気泡の運動 α を見積もることができ、この位相差は気泡の中心断面における周囲流体の循環 Γ_c の符号に依存することが明らかになった。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号 03581)と基盤研究(B)(2)(No.114 50088)の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Tomiyama, A., *3rd Int. Conf. Multiphase Flow*, CD-ROM (1998).
- (2) Loth, E. et al., *Int. J. Multiphase Flow*, **23-5** (1997), pp.977-1001.
- (3) Takagi, S. and Matsumoto, Y., *Proc. 2nd Int. Conf. Multiphase Flow*, (1995), pp.PD2-9-PD2-16.
- (4) Saffman, P.G., *J.F.M.*, **22-2** (1965), pp.385-400.
- (5) 仮屋崎, 機論, **53-487**, B (1987), pp.744-749.
- (6) 藤原・他 4 名, 機論, **64-622**, B (1998), pp.1697-1704.
- (7) Owen and Zienkiewicz, *J.F.M.*, **2** (1957), pp.521-531.
- (8) 佐藤・他 2 名, 機論, **64-619**, B (1998), pp.701-708.
- (9) Fujiwara et al., *10th Int. symp. Application of laser techniques to fluid mechanics*, CD-ROM (2000), 38-2.
- (10) 日本油化学協会編, 油脂化学便覧, (1990), 丸善株式会社.
- (11) Levich, V.G., *Physicochemical Hydrodynamics*, (1962), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (12) Mendelson, H.D., *AIChE J*, **13** (1967), pp.250-253.
- (13) 日本機械学会, 計測の不確かさ, (1987), 丸善.
- (14) Clift, R. et al., *Bubbles, Drops, and Particles*, (1978), Academic press.
- (15) Fan and Tsuchiya, *Bubble Wake Dynamics in Liquids and Liquid-Solid Suspensions*, (1990), Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering.
- (16) Stone, H.A., *Phys. Fluid*, **A5-10** (1993), pp.2567-2569.