

# 単一気泡の形状変化と周囲流動構造の解明 (PIV/LIF と二方向形状投影法の適用)

80122632 段本由紀 指導教員 菱田公一 教授

## 1. 緒言

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視的理解を目的とし、この相互干渉に支配される重要な要素の一つとして、気泡の運動と形状変化の関係に注目した。剪断流中の気泡に働く力は気泡形状に依存して変化すること<sup>[1]</sup>が知られている。この剪断流中の単一気泡について、気泡周囲の流動構造と二方向からの形状投影図の同時計測を行った。二方向の形状投影から三次元の気泡形状を再構成することで、これと二次元断面における流動構造の位置関係を明らかとすることができる。これらの三次元的な位置関係を把握した上で、形状変化と周囲流体の非対称性と、気泡の水平移動の相互関係を明らかとする。

## 2. 流動場計測方法

Fig.1 に実験装置及び計測装置概略図を示す。計測には三台の CCD カメラを用いた。周囲流体の流速計測には蛍光粒子をトレーサとした PIV を用い、二次元平面流速分布を得る。気泡形状の認識には赤外線及び青色 LED 群を光源とした投影法(IST)を用いる。直交する二台の CCD カメラにより撮像し、二方向からの気泡投影図を時系列で得る。

三台の CCD カメラと各光源は照射タイミングを同期させているため、流動場と気泡形状の同時計測が可能となる。

## 3. 実験方法

実験流路はアクリル製チャンネルである。チャンネル入口のノズルは非対称形をしており、局所一様剪断流を形成させる。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、本実験においてはモータの駆動の有無により同剪断率で単相時(液相)平均流速  $W_f$  [mm/sec] の異なる二種類の下降剪断流を実現した。無色透明のベルトを用いることで、直交する二方向からの形状投影を可能としている。テストセクションは幅  $h=50\text{mm}$ 、奥行き  $100\text{mm}$  である。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  $x$ 、奥行き方向を  $y$ 、流れ方向上向きを  $z$  とする。

各カメラが要求される情報のみを得るため、カラーフィルタによって波長を分離し撮像を行った。実験条件を Table 1 に示す。 $Re_r$  は気泡レイノルズ数に相当する。Case1, 3 は小径気泡を扱い、Case2, 4 はやや大きい気泡を扱う。 $x$ - $z$  平面

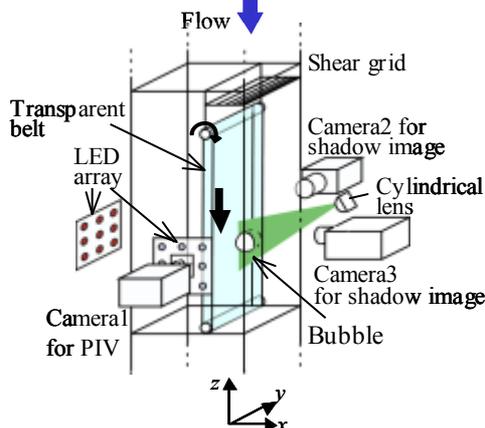


Fig.1. Measurement system

Table 1. Experimental conditions ( $M=7.70 \times 10^{-10}$ )

Case	1	2	3	4
Equivalent diameter $D_{eq}$ [mm]	2.14	3.99	2.19	3.91
Eotvos number $Eu$	0.75	2.59	0.78	2.49
Weber number $We$	0.86	2.54	1.10	3.02
Reynolds number $Re_r$	165	388	189	419
Mean velocity in single phase $W_f$ [mm/sec]	-148	-148	-117	-117
Averaged shear rate $k$ [ $s^{-1}$ ]	1.4	1.4	1.6	1.6
Aspect ratio $As$	0.87	0.72	0.85	0.72

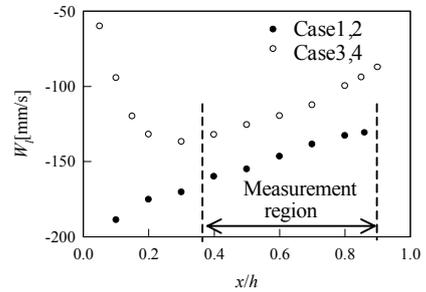


Fig.2 Velocity profile in single phase

における単相時主流平均流速  $W_f$  を Fig.2 に示す。同剪断率で Case1, 2 は速く、Case3, 4 は遅い平均流速となっている。気泡形状の偏平度を表すアスペクト比

$$As = b/a \quad (a; \text{気泡長軸}, b; \text{気泡短軸})$$

は Case1, 3 は球形を表す 1 に近く、Case2, 4 は偏平を示す小さい値となった。

## 4. 結果及び考察

### 4.1 三次元形状の再構成

本実験において、螺旋運動を示した Case3 の一部の気泡を除いて各条件とも気泡はジグザグ運動を示した。このような三次元的な気泡の運動と、PIV による二次元の流動構造の位置関係を把握する必要がある。ここでは二方向からの形状投影図を用いて気泡の三次元形状を近似した<sup>[2]</sup>。

この近似により再構成された瞬時の気泡三次元形状と、気泡周囲温度分布を Fig.3 に示す。この瞬間、気泡は手前右方向にレーザシートを横切っている。位置 A から B への移動に現れるようにヘアピン形状の閉じた渦管による後流を伴っていることが観察された。このように気泡の運動に対して捉えられる流速分布との位置関係は時間的に変化する為、二方向からの形状投影と PIV を組み合わせることで、三次元的な気泡挙動と流動断面の位置関係を把握する。

### 4.2 気泡周囲の流動構造

このような三次元的な位置関係を踏まえ、気泡の形状変化による影響を比較する。Case1, 3 の小径気泡は螺旋運動、振幅のジグザグ運動を示し、形状変化の度合いは小さく、気泡周囲においては淀み点近傍及び後流の狭い範囲に強い渦が存在する。Case2, 4 の気泡は形状変化が顕著で、大きい振幅を伴うジグザグ運動を生じた。Case2, 4 の気泡はほぼ同様の挙動を示した。そこで代表的な Case2 の  $x$ - $z$  平面気泡周囲渦度分

布と  $y-z$  各平面における気泡形状投影図を Fig.4 に示す。気泡後部に広い後流領域が見られた。この例において気泡はレーザーシートを横切ってジグザグ運動している。  $t=0\text{ms}$  においては、気泡が渦を放出し、水平方向( $y$  方向)の運動が方向転換する瞬間を示している。そこで後流の断面はジグザグ運動に伴って生じるヘアピン渦の断面<sup>[3]</sup>を示している。またジグザグ運動が主に生じている面、この場合は  $y-z$  平面の形状投影図において、気泡の進行方向を軸に形状の非対称性が見られる。これは気泡周囲の後流分布が渦放出を伴い、大きい非対称性を伴うため、圧力分布が左右のエッジで異なるためと考えられる。

### 4.3 気泡形状の周期変動

このように渦放出を伴う Case2, Case4 気泡について気泡形状の周期変動の側面から考察を行う。Fig.5 a)に Case2 気泡の  $A_s$  及び非対称性を表す変数  $R_l$  の時間変化を示す。 $R_l$  は気泡重心から右エッジまでの長さを気泡長軸により無次元化した値

$$R_l = \text{Long}_r / a$$

( $\text{Long}_r$ ; 重心から右エッジの距離,  $a$ ; 長軸)

であり、 $R_l$  が大きいほど右エッジの曲率が小さい状態を表す。 $R_l$  は  $A_s$  が最大となる時に極大、極小値をとり、最も球形に近い瞬間に非対称となることを表している。逆に  $A_s$  が最小で最も偏平となる瞬間には  $R_l=0.5$ , つまりほぼ対象となる。この傾向は Case4 にも同様に現れた。また、Case2, 4 のジグザグ運動における  $A_s$  の分布は、Fig.5 b)に示すよう、中心位置では最も球形に近く、中心から最も離れた位置で偏平となる傾向にある。つまりこの中心位置で水平移動を行う最中に最も非対称となる。この傾向は  $x, y$  両方向のジグザグ運動において同様に現れた。

### 4.4 周囲流動場の周期変動

このような気泡形状の周期変動を、Fig.4 に示すような後流構造と関連付けるため、気泡周囲流動場の周期変動を定量化して表す。気泡右側エッジ部分直径 1.4mm の領域における瞬時の平均渦度を  $\omega[\text{s}^{-1}]$  と定義し、この時間変化を Fig.6 に示す。a), b)に各々 Case2, Case4 の気泡を示す。両気泡とも  $\omega$  は気泡重心のジグザグ運動とほぼ同周期の周期変動を見せる。さらに両条件において、気泡重心位置が極大値をとる直前に、 $\omega$  は極大値をとる。これは気泡が最も右側に移動し、方向転換をする直前に右側エッジ部分において渦度が大きくなることを示す。これより、後流と界面の接合部である右側エッジの渦が、Fig.4 に見られるように後流に渦を放出させると言える。その後渦は右側下流に流され再び成長を始める。この時液相の平均流速  $W_l$  の大きい Case2 のみに、Fig.6 a)に示すように、一周期に大小二回の極大値が現れる。これは、下流部分に流され成長を始めた右側部分の後流が、再び放出される以前に大きく成長し、エッジ部分に影響を与えていると考えられる。

## 5. 結言

ジグザグ運動を伴う球形、非球形の気泡の形状変化及び後流構造を実験より明らかとし、これらの周期変動の相互関係を定量的に評価した。

これにより微小な形状変化を伴う気泡は、その周期的な形状変化により、後流構造における渦管の周期変動を有し渦放出が生じることが示された。また液相の平均流速及び変動速度の大きさによって、界面近傍の渦構造に影響が及ぼされることが明らかとなった。

### 参考文献

- [1] 飯屋崎, 1987, 機論 53-487 B, 744.
- [2] 大橋ら, 2001, 混相流シンポジウム講演論文集.
- [3] Brücker, Ch., 1999, *Physics of Fluids*, 11-7, 1781.

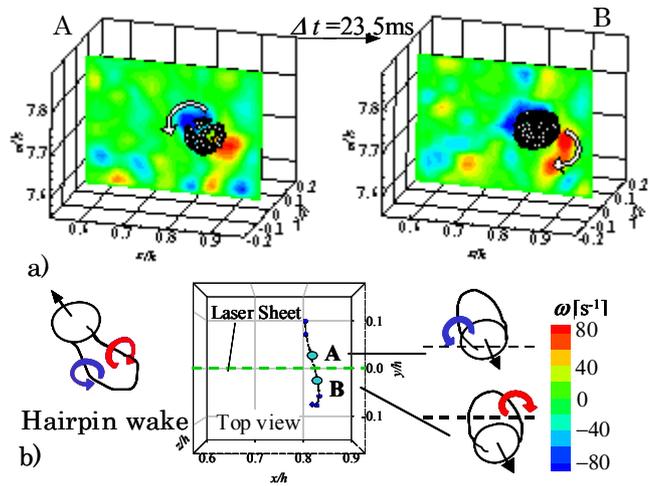


Figure 3. Three dimensional bubble shape and flow structure  
a) Bubble shape and vorticity contours  
b) Top view of bubble trajectory

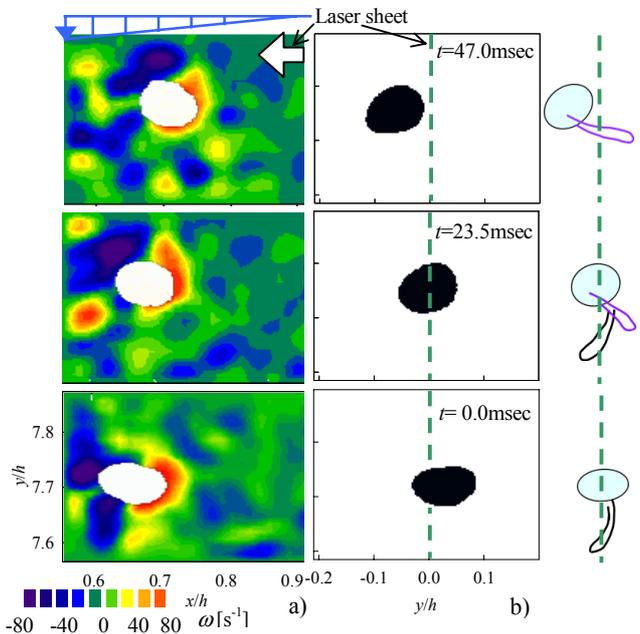


Fig.4 Flow structure around the bubble (Case2)

- a) Instantaneous vorticity contours ( $x-z$  plane)
- b) Instantaneous projection of bubble's shape ( $y-z$  plane)

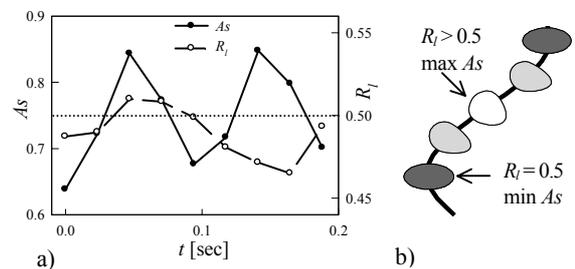


Figure 5 Time variation of bubble deformation (Case2,4)

- a) Relation between  $A_s$  and  $R_l$
- b)  $A_s$  on zig-zag motion

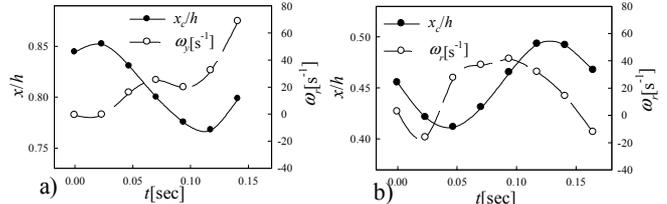


Fig.6 Relation between trajectory  $x_c/h$  and vorticity  $\omega$ ,  
a) Case2  
b) Case4