128 液柱内を上昇する気泡列の挙動計測

関西大院 山内 慎[○], 関西大学 植村 知正

Motion Measurement of Rising Bubble Trains in Cylindrical Pipe

Makoto YAMAUCHI, Tomomasa UEMURA

Kansai Univ., 3-3-35, Yamate, Suita, Osaka 564-8680, Japan

ABSTRACT

In this paper, authors have applied PTV and PIV techniques to measure behaviors of rising bubble and induced flow in a vertical cylindrical pipe.

The bubbles rise in regular space from a bottom nozzle of the pipe filled with silicone oil. In the experimental conditions, Reynolds number is from 0.8 to 1.0 at the diameter ratio 0.25 of the bubble to the pipe. Bubbles are pictured from front and side directions by two CCD cameras. By analyzing individual pictures, shapes and dimensions are obtained. From the analysis of sequential pictures, velocities of the bubbles and the flow are measured. The data enable to estimate apparent drag coefficients of the rising bubbles.

1. はじめに

垂直管内を上昇する気泡は複雑な形状変化を伴ってゆらぎながら上昇する。また、単一ノズルから出て上昇する気泡列の場合、後から上昇する気泡は、前の気泡の後流によって上昇速度が速くなり、やがて前の気泡に追いつき衝突する現象が見られる。気泡の形状変化やゆらぎは気泡の大きさ、液体の粘度、界面のつりあいや周りの流動などが深く関係している。このような上昇気泡の挙動を定量的に明らかにするためには、時々刻々の計測が不可欠である。

そこで本研究では、単一ノズルから出た気泡列の上昇挙動を明らかにするために画像計測を用いた。画像計測は、気泡流動や気泡の上昇に伴う相対流動を同時に計測することができる。実験では、気泡の上昇速度に PTV、気泡の上昇に伴う管内の非定常流れの速度分布の計測に PIV を用いた。また、気泡の上昇経路や表面積を計測し、上昇する気泡の抵抗係数を求め、基礎的なデータを得ている。

2. 実験装置と解析方法

2. 1. 実験装置及び方法

撮影に用いた実験装置の概略を fig.1 に示す。ガラス製の薄肉円管($\phi 32.4 \times 700$, $t=0.7$)内にはシリコンオイルを入れ、下方に設けたノズル($\phi 5$)より空気を吹き込んでいる。気泡は、正面、側面方向から 2 台の CCD ビデ

オカメラを用いて撮影した。また、気泡やそれに伴う流動状態のみを撮影する目的で、赤外線カメラを設置した。この場合、シート状の光源にするため赤外線レーザ(40mW)を用いた。トレーサは白い微粒子(直径 0.1mm 以下)を用い、シリコン油内で十分中立浮動を保つものであった。

撮影した画像はフレームグラバを介してパソコンに取り込み、1/60s 間隔のデジタル画像として記録・保存している。

Fig.1 Schematic view of experimental set up

Fig.2 Pictures of coalescing bubbles and measured vertical positions

2. 画像解析の方法

気泡の上昇速度計測にはPTVを用いた。気泡の抽出では、気泡の境界周辺の輝度分布を最小2乗法によって3次曲線に近似し、得られた3次曲線の変曲点を境界としている。この方法を用いて気泡の直径をサブピクセル精度で求めている。また、気泡の表面積および体積は正面、側面両方向から撮影した画像を用いて、気泡を楕円体と仮定して求めている。また、円管断面内の気泡の重心位置を時系列的に並べて、気泡の上昇経路を求めている。一方、気泡の上昇に伴う管内の非定常流れの速度分布の計測にPIVを用いた。これら両者の方法を用いれば、上昇気泡の速度計測結果が正しく得られているか知ることができる。ここで、単位換算は円管の直径を基準にして行った。

3. 計測結果及び検討

3. 1. PTVによる計測結果

Fig.2 はそれぞれの気泡の先端位置と時間との関係を示す。ここで、Y座標はノズルからの距離である。また、そのときの原画像の例を左に示す。ここに示すように、後から上昇する気泡(Bubble4)が、前の気泡(Bubble3)の後流によって上昇速度が速くなり、やがて前の気泡に追いついて衝突している様子がわかる。この場合、衝突点はノズルから約280mmの位置で、前の気泡と後の気泡の上昇速度はそれぞれ54.2mm/s, 65.9mm/sであった。したがって、後の気泡は前の気泡より20%程度上昇速度が

Fig.3 Relationship between rising velocity and aspect ratio of bubbles

Fig.4 Variation of surface area before and after coalescence of rising bubbles

速い。また、合体後の気泡(Bubble3+4)の上昇速度は66.8mm/sで速度変化は見られない。

Fig.3 は気泡の上昇速度とアスペクト比の関係を示す。ここで、アスペクト比は1より大きい

ものが縦長の気泡を示す.すなわち上昇速度の遅い前の気泡は、横長の気泡で、後の気泡と合体後の気泡はいずれも縦長の気泡を示している。

Fig.4 は気泡の表面積と先端位置の関係を示す.ここで、表面積及び体積は、気泡を楕円体と仮定して求めている。

ここに示すように、後から上昇する気泡の方が前の気泡よりも表面積が大きいことがわかる。体積については、後の気泡は前の気泡より2%程度大きい.これは、前の気泡の後流によって後の気泡がノズルから出易いことを示している。

Fig.5 は管断面内の気泡位置の計測例を示しており、気泡の重心位置(x_b , z_b)は円管の半径 R で無次元化している。円管断面内の気泡は管の中心から偏って上昇した。この偏位の原因は実験装置によるものか、上昇気泡に伴う現象かは今のところ検討していない。

Fig.5 Deviations of bubbles in a horizontal cross section

3. 2. 気泡の抵抗係数

気泡の上昇速度、直径が計測できたので、見かけのレイノルズ数、フルード数及び気泡の上昇抵抗係数を計算することができる。気泡を球と仮定した場合、一般に球の抵抗係数 C_D は次式で求めることができる。

$$D = C_D \cdot S \cdot (\rho v^2 / 2) \cdots (1)$$

ここで、 D : 抗力 (浮力), S : 気泡の面積, r : 気泡の半径である。

得られた結果を Table1 に示す。この結果から、後から上昇する気泡の見かけの上昇抵抗係数は前の気泡の 63%程度である。また、文献⁽⁴⁾によれば、粘性流体中での静止固体球の抵抗係数 C_D は約 30 である。したがって、前の気泡は静止固体球の抵抗係数より大きい結果が得られている。これは、前の気泡が上昇する際、上昇方向の流体を押しつけて、管壁面近傍に下降流

を形成するためと考えられる。一方、後の気泡と合体後の気泡は、いずれも静止固体球の抵抗係数より小さい値を示している。これは、後の気泡が前の気泡の後流によって上昇し易いことを示している。

Table1 Reynolds, Froude and drag coefficient of rising bubbles

Bubble	$Re=vd/\nu$	$Fr=v/(Lg)^{0.5}$	C_D
3	0.86	0.20	38.9
4	0.99	0.25	24.7
3+4	1.47	0.27	27.1

3. 3. PIV による計測結果

(a)

(b)

Fig.6 Velocity distributions induced by two rising and approaching bubbles

(a)

(b)

Fig.7 Velocity distributions in front and behind of coalescent bubble

Fig.6(a)には PIV を用いて解析した合体前の気泡と、気泡の上昇に伴う管内の流動計測例を示す。また、図中に示した A-A, B-B 及び C-C 断面の速度計測結果を Fig.6(b)に示す。

Fig.6(a)の速度分布を見ると、前の気泡の上昇に伴って、上昇方向の流体が押しのけられて、管壁面近傍では下降流が形成されている。また、下降流は後から上昇する気泡まで連続しており、2個1対となって上昇している様子を示している。また、Fig.6(b)の各断面の速度計測結果から、下降流の形成されている領域やその速度はほぼ等しいことを示している。ここで、気泡の重心位置付近の上昇速度は、前の気泡が 52.9mm/s、後の気泡が 66.4mm/s であった。

Fig.7(a)には Fig.6(a)の2気泡が衝突し、合体

した後の気泡についての速度計測例を示す。

Fig.7(a)の速度分布を見ると、気泡の近傍の流れは、左右対称の渦を形成している。また、下降流は、気泡周りのみで、合体後は、単体で上昇していることを示している。

Fig.7(b) より、下降流を形成している領域は、気泡径の2倍程度外側から管壁面近傍までであることを示している。ここで、気泡の重心位置付近の上昇速度は 62.1mm/s であった。

以上のことから、後から上昇する気泡は前の気泡の後流によって上昇抵抗が小さく、上昇速度が速くなり、やがて前の気泡に追いつき衝突する過程を定量的に計測することができた。

4. 結論

以上の研究より得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) 上昇する気泡の寸法、表面積を時系列で計測できた。
- (2) PTV を用いて気泡の上昇速度を、PIV を用いて気泡の上昇に伴う管内の非定常流れを計測できた。
- (3) 単一ノズルから出た気泡列について、見かけの上昇抵抗係数を求め、これを静止固体球の抵抗係数と比較すると、前を上昇する気泡の上昇抵抗係数は大きく、後の気泡は小さかった。

5. 参考文献

- 1) 吉本, 植村: 動画解析のための高速 PTV ソフトウェアの開発, 可視化情報長岡講演会講演論文集 Vol.16 Suppl. No.2(1996), pp.31-34.
- 2) 利安, 植村: 逐次棄却法の精度向上に関する検討Ⅱ (解析時間の短縮), 可視化情報沖縄講演会講演論文集 Vol.17 Suppl. No.2(1997), pp.95-98.
- 3) 山内, 植村: 液柱内を上昇する気泡列の挙動計測, 第15回流体計測・第12回流体制御合同シンポジウム講演論文集(1997), pp.93-96.
- 4) S. F. Hoerner, FLUID-DYNAMIC DRAG, Published by the Author(1958), pp.3.7-3.9.
- 5) 植村, 井口, 他3名: 水-空気系底吹き気泡噴流により攪拌される円筒容器内流れの画像計測, 鉄と鋼第78年(1992)第5号, pp.738-744.

本研究の遂行に本学大学院生富松重行氏の協力があつたことを記し感謝の意を表します。