気泡噴流中の気泡群周囲流体速度の 3D-PTV 計測*

舟木治郎^{*1}, 川口遼^{*2}, 田岡末樹^{*3}, 平田勝哉^{*1}

3D-PTV Measuring of Ambient Fluid Velocities in a Bubble Plume

Jiro FUNAKI, Ryo KAWAGUCHI, Miki TAOKA and Katsuya HIRATA^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University
1-3, Miyakodani, Tatara, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

This experimental research concerns an air-bubble-jet flow in water. The authors try to conduct the measurements of the flow applying a three-dimensional particle-tracking-velocimetry (3D-PTV) technique, in order to show both air-bubble and liquid (water) velocities. As tracers, we regard air bubbles in bubble-velocity measurements, and we regard polyethylene particles suspended in the liquid in liquid-velocity measurements. Then, we visualise the three-dimensional motions of air bubbles and ambient liquid. As we record stereo images using two high-speed video cameras, we can get timely-consecutive information of air-bubble and ambient-liquid motions. As a result, we quantitatively reveal the three-dimensional instantaneous motion of an unsteady bubble-jet plume from a simple air nozzle.

Key Words : Bubble, Jet, Plume, Three-Dimensional Flow, PTV

1. はじめに

気泡噴流あるいは気泡ブルームは、様々な工学的局面で重要な現象である。例えば、富栄養化による湖沼や港湾などの水質汚濁に対して、曝気すなわち気泡ブルームを用いて酸素を供給する手法が用いられることがある。曝気は、このような水質汚濁を軽減するための簡便な方法の一つである。更に、気泡ブルームは、化学反応器や気泡ポンプなどでも応用されている。また、沸騰水型原子炉の制御にも、その現象の理解が欠かせない。よって、気泡ブルームに関するいくつかの研究が実施されている。⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ しかし、混相流についての実験や解析の技術的困難さのため、ごく単純な気泡ブルームに関してすら、統計量に基づく全体構造の正確な把握/解明も難しく、まして様々な工学装置に直接適用できるほどに十分な知識は未だに得られていない。

これまでに、著者ら⁽⁵⁾は、単純な気泡ブルームの基本性質を調べるために、複数台のハイスピード・ビデオ・カメラで同期撮影した画像に、三次元 Particle Tracking Velocimetry (以降、3D-PTV と呼ぶ) 解析を適用し、気泡速度の非定常三次元計測を行っている。3D-PTV とは、一対のステレオ画像からトレーサ粒子の三次元位置を特定し、複数の異なる瞬間の位置情報から速度ベクトルを得る手法である。3D-PTV には、以下の利点がある：(1) 流れを妨げるセンサーがない；(2) 三次元計測空間全体の多点情報（速度ベクトルの三成分）を、各瞬間、同時に得ることができる。更に、同期したビデオ・カメラを使用することにより、(3) 時間連続情報を得ることができる。本研究では、先の研究で明らかにした気泡速度に加えて、その周囲流体速度を調べ、気泡速度との定量的比較を試みる。

2. 実験方法

2・1 モデル

本実験モデルは、文献⁽⁵⁾と同様である。気泡は、水槽底部に設置したチャンバーに取り付けたノズルから噴出する。水槽は透明アクリル樹脂製で、内のりの一辺が 1 m の立方体容器である。水深、すなわち水表面から水槽底面（ノズル先端）までの距離は約 0.5 m である。

* 原稿受付 2010 年 9 月 1 日

^{*1} 正員、同志社大学 理工学部 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3)

^{*2} 同志社大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

^{*3} 学生員、同志社大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

実験条件を、表 1 に示す。使用したノズルは内径 0.1 mm、管長さが 15 mm のストレート・パイプ・ノズルである。圧力比を p_0/p_∞ で定義し、様々な p_0/p_∞ における気泡噴流を観察する。ここに、 p_0 と p_∞ は、それぞれ、チャンバー内静圧と周囲大気圧である。（正確には、 p_0 は、ノズル先端での静圧であるが、水表面での大気圧との差は 5% 以下である。） $p_0/p_\infty \geq 1.9$ で、チョーク状態となる。また、主要な気泡パラメータ、すなわち、等価気泡直径 D_e および、気泡レイノルズ数 Re_b 、エトベス数 Eu は、それぞれ、0.3 – 4.2 mm、60 – 1400、0.01 – 2.4 である。なお、 $D_e \equiv (6V_b/\pi)^{1/3}$ であり、ここに、気泡体積 V_b は可視化画像より得られた気泡の短軸と長軸とから求める。Clift et al.⁽⁶⁾に従うと、本実験条件で発生する気泡の種類は、“球状(spherical)”、または、“楕円状 (ellipsoidal)”、“揺動 (wobbling)”である。

2・2 実験装置

ノズルから空気を噴出し発生する気泡噴流全体を観察するために、ノズルから水面までの全体画像を撮影する。気泡を 3D-PTV 計測する場合、気泡自体をトレーサ粒子として扱い、光源はメタルハライド光を用いる。周囲液相を計測する場合は、直径 0.12 mm の架橋ポリエチレン粒子に蛍光塗料を付加した直径 0.2 mm 以下の蛍光粒子をトレーサ粒子として使用し、光源には YAG レーザを用いる。（3D-PTV で認識できる D_e の値については、Funaki et al.⁽⁵⁾を参照。）

同期した二台のハイスピード・ビデオ・カメラを使用することで、同時刻における二枚一対のステレオ画像を時間的に連続して撮影する。このように撮影されたステレオ画像から、瞬間のトレーサ粒子の三次元位置を算出し、二つの連続した三次元位置情報から速度ベクトルを得る。座標はノズル出口を原点として、半径方向に r 、鉛直上方に z とする。

詳細な観察のため、ハイスピード・ビデオ・カメラにはマクロレンズを装着し、 $z = 40 - 80$ mm の範囲を拡大して撮影する。さらに、撮影した可視化画像を用いて、 D_e の値も測定する。このとき、気相と液相を同時に 3D-PTV 解析することは可能である。しかし、計算された速度ベクトルが、どちらのトレーサのものか判別できないことと、本研究では気相と液相の流速の差が非常に大きいため精度が悪化することを考慮して、それぞれに 3D-PTV 解析を行う。また、気泡トレーサを適用する場合、他の粒子トレーサが画像中に存在すると、誤認識の頻度が増加するため、精度の点では混在しないほうが望ましい。

統計処理の方法として、 r 方向に 4 mm、 z 方向に 4 mm ごとに空間を区切り、その空間内に存在する速度ベクトルの z 成分を平均し、さらに時間平均した（母数は、1000 – 20000 個）。

更に、3D-PTV 解析の精度確認の為に、いくつかの予備実験を行う。すなわち、気泡計測については、気泡の三次元運動解析を行い、3D-PTV の結果と比較し、周囲液相の流速計測については、2D-PIV の結果と比較し、共に、良好な一致を確認した。

3. 結果と考察

3・1 噴流中の気泡径

圧力比 p_0/p_∞ が変化すると、発生する気泡径 D_e も変化する。図 1 に、本実験条件での p_0/p_∞ に対する D_e を示す。図中のプロット $\bar{D}_e$ 、 $\bar{D}_{e0}$ 、 $\bar{D}_{e1}$ は、それぞれ、単純平均径、ザウター平均径、表面積平均径、体積平均径である。平均には 50 – 200 個の気泡を用いる。また、エラー・バーは分布範囲を示す。 p_0/p_∞ が増加すると、 D_e の最大値が増加する。単純平均径は圧力比を増加させると、 $p_0/p_\infty < 1.9$ では減少し、 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ では一定値を示し、その値は小さい。一方、ザウター平均径は、2.2 – 2.6 mm であり、 p_0/p_∞ による顕著な変化を示さない。単純平均径では微小気泡の影響が大きくなるため、 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ で小さな値を示すと考えられる。

3・2 気泡速度分布

図 2 に、3D-PTV 計測より得られた気泡速度分布の一例を示す。すなわち図 2 は、圧力比 $p_0/p_\infty = 2.4$ における、ノズルからの様々な（無次元）距離 z/d で、平均気泡速度分布である。ここに、縦軸の平均気泡速度 V_b は、単一気泡の最大速度 $(V_{b0})_{\max}$ で無次元化されている。横軸の座標 r は、ノズル内径 d で無次元化されている。図中のプロットは、様々な z/d に対応する。また、図には、Funaki et al.⁽⁵⁾の実験結果を、実線、破線、一点鎖線を用いて示す。

Table 1 Experimental parameters, together with bubble conditions.

Equivalent diameter D_e [mm]	0.3 – 4.2
Bubble Reynolds number Re_b	60 – 1400
Eotvos number Eo	0.01 – 2.4
Bubble type (Clift et al., 1978)	Spherical, ellipsoidal or wobbling
Container	Cube (1000 × 1000 × 1000mm)
Depth of water	500 mm
Inner diameter of a nozzle	0.1 mm
Flow rate	1.13 – 1.55 cm ³ /s
Frame rate of high-speed video camera	250 fps for ambient-fluid velocities by 3D-PTV 500 fps for bubble velocities by 3D-PTV 60 fps for ambient-fluid velocities by 2D-PIV

Fig. 1 Range of bubble's diameter. , Ensemble-mean diameter: , Sauter's mean diameter: , surface-area-mean diameter: , volume-mean diameter.

 Fig. 2 Radial distribution of mean bubble velocity V_b at $p_0/p_\infty = 2.4$.

 Fig. 3 Radial distribution of mean ambient-fluid velocity V_{af} at $p_0/p_\infty = 2.4$.

 Fig. 4 Trajectory of bubble with $D_e \geq 2$ mm on the r/d - z/d plane, at $p_0/p_\infty = 2.4$.

 Fig. 5 Mean velocities V against pressure ratio p_0/p_∞ at $r/d = 0$.

図からは、気泡速度分布は、異なる z/d でも、ほぼ、同様な形状と値を示し、速度分布への z/d の影響が（特に噴流中心付近では）小さいことが分かる。なお、この結果は、定性的にも定量的にも Funaki et al.と一致しており、実験精度の高さを確認できる。

更に、図を示していないが、 p_0/p_∞ が異なると、速度分布の形状も値も異なる。ただし、異なる p_0/p_∞ でも、速度分布への z/d の影響は小さい。例えば、 $p_0/p_\infty < 1.9$ では、 $r/d = 0$ で速度が最も大きく、 r/d が増加するに従い速度が単調に減少する。

気泡速度分布は、気泡ブルームを構成する個々の気泡径 D_e に強い影響を受けていると考えられる。 $D_e \approx 2$ mm の単一気泡の上昇速度は最大値（0.35 m/s）に近く、 $D_e \leq 0.5$ mm の微細単一気泡の上昇速度は 0.1 m/s 以下と非常に小さい。実際、 $p_0/p_\infty = 1.2$ では $D_e \geq 1$ mm の気泡しか発生しておらず、他の p_0/p_∞ での気泡速度より大きいこととよく対応する。 $p_0/p_\infty = 1.9 - 2.9$ でブルーム中心の速度が小さいのは、可視化画像でも見られる微細気泡がブルーム中心付近を上昇するため、統計処理をした際、時間空間平均としての気泡速度が低下したためと考えられる。

3・3 液相速度分布

図 3 に、液相速度分布の一例を示す。すなわち、図 3 は、 $p_0/p_\infty = 2.4$ における、様々な z/d での平均液相速度分布である。なお、 $r/d \leq 350$ が、気泡ブルームの存在領域である。（厳密には、存在領域は、 p_0/p_∞ の値によって異なる。つまり、 $p_0/p_\infty < 1.9$ では $r/d < 200$ 、 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ では $r/d < 350$ ）。なお、本実験の計測範囲（ $0 \leq r/d \leq 1100$ ）では、どの地点でも、上昇流となるが、本実験に用いた水槽内には気泡噴流による循環流が発生していると考えられ、 $r/d > 1100$ の壁面近くで非常に弱い下降流が生じると考えられる。

図からは、気泡ブルーム内部の液相速度は、気泡ブルーム外側の液相速度より非常に大きくかつ分布が複雑であることがわかる。（例えば、 $r/d = 0$ と、 $r/d = 500$ との値の差は 3 - 10 倍程度である）。また、ブルームの内側と外側の両方の r/d の広い範囲にわたり、液相速度は z/d の増加につれて増える。

更に、図を示していないが、 p_0/p_∞ が異なっても、上述の 2 つの特徴は、同様に観察できる。ただし、細かく見ると、 p_0/p_∞ の影響を認めることが出来る。 $p_0/p_\infty < 1.9$ では、液相速度の値は小さく、特にブルーム外側の液相速度が非常に小さい（ $V_{af}/(V_{b0})_{\max} < 0.01$ ）。とくに $p_0/p_\infty = 1.2$ では、かなりの領域で下降流となる。 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ と、 $p_0/p_\infty < 1.9$ とを比較すると、液相速度は気泡ブルームの内側も外側もともに前者のほうが明らかに大きい。また、 p_0/p_∞ の値によらず、液相速度への z/d の影響は $r/d < 500$ で強くなる。

液相速度は気泡速度よりも 1 オーダー以上小さいので、両者の相関はかなり複雑であることが期待される。一方、個々の気泡挙動を考え両者を関連付ける試みが有用な場合がある。本計測では、もちろん、個々の気泡挙動も得られる。一例として、図 4 に、 $p_0/p_\infty = 2.4$ におけるある程度大きな気泡（ $D_e \geq 2$ mm）について、 r/d - z/d 平面上に軌跡を示す。ほとんどの気泡が r 方向振動を伴い上昇することが分かる。この振動は三次元空間での気泡のスパイラル/ジグザグ運動に対応し、振動波長は $500d - 1000d$ 程度である。よって、ノズル出口（ $z/d = 0$ ）で、全ての気泡振動の位相が一致するため、 $z/d = 200 - 500$ では、ほとんどの大きな気泡がどの瞬間も気泡ブルームの外側（ $r/d \approx 100$ ）に存在しがちである。この事実は、図 3 の $z/d = 380 - 420$ での $r/d \approx 100$ における明瞭な極大値と、よく整合する。なお、図 3 には、他にも複雑な特徴を示すが、それらの解明には今後、気泡数や気泡径なども考

Fig. 6 Mean ambient-fluid velocities V_{af} against pressure ratio p_0/p_∞ at $r/d = 980-1020$.

慮した詳細な検討が必要と思われる。

3・4 気泡/液相速度への p_0/p_∞ の影響

図5に、 $r/d=0$ （噴流軸中心）での、気泡速度と液相速度への p_0/p_∞ の影響を示す。まず、気泡速度を見る。 z/d の影響は小さいが、 p_0/p_∞ の影響は大きい。つまり、 z/d の値によらず、 $p_0/p_\infty \geq 1.4$ で $V_b/(V_{b0})_{\max} \approx 0.7$ であり、 $p_0/p_\infty = 1.2$ では $V_b/(V_{b0})_{\max} \approx 1$ となる。 $p_0/p_\infty = 1.2$ で気泡速度が大きくなるのは3・2節で述べたとおりである。次に、液相速度を見る。 p_0/p_∞ の影響は小さく、更に、 $r/d=0$ では z/d の影響も小さい。つまり、 z/d の値にも p_0/p_∞ の値にもよらず、 $V_{af}/(V_{b0})_{\max} \approx 0.1$ である。最後に、両者を比較する。液相速度は気泡速度に比べて非常に小さいことがわかる。例えば、 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ でも、 $z/d=800$ で液相速度は気泡速度の1/7程度である。

図6は $r/d=980-1020$ での液相速度への p_0/p_∞ の影響を示す。 $r/d=1000$ は気泡が存在しない領域であり、ノズル中心から充分離れている。 p_0/p_∞ が増加する時、 $p_0/p_\infty < 1.9$ では液相速度は増加し、 $p_0/p_\infty \geq 1.9$ では液相速度は一定となる。すなわち、 $p_0/p_\infty > 1.9$ では、 p_0/p_∞ の影響が小さくなる。一方、 z/d の影響は無視できない。すなわち、 p_0/p_∞ の値によらず z/d の増加につれて液相速度は増える。

今回の結果は、曝気浄化や、反応促進などの工学的応用を考えると、 $p_0/p_\infty \approx 1.9$ での運転の効率性を示唆する。つまり、チョーク状態（ $p_0/p_\infty > 1.9$ ）で、(1)気泡上昇速度はより小さいが、(2)流体の流速は広い空間範囲でより大きいことが、図5と図6から分かる。以上の二点は、それぞれ、曝気時間や容器内攪拌に有利である。（更に図1からは、チョーク状態で気泡径が小さいことも分かる。）一方、チョーク状態では、 p_0/p_∞ をより大きくしても、以上の二点に関しては、顕著な変化が見られない。

4. おわりに

単純な気泡ブルームの基本性質を調べるため、気泡速度に加え周囲流体速度の3D-PTVによる非定常三次元計測を試みた。その結果、気泡径分布に及ぼす圧力比の影響を明らかにした。気泡のザウター平均径は圧力比に依存しない。非定常三次元計測から求めた平均速度分布は、気泡ブルーム内部の液相速度は、気泡ブルーム外側の液相速度より非常に大きくかつ分布が複雑である。また、噴流軸中心では、液相速度は気泡速度に比べて非常に小さい。噴流軸中心から離れ気泡が存在しない領域では、液相速度は p_0/p_∞ が増加する時、チョーク前は、増し、チョーク後は、一定となる。ただし、 p_0/p_∞ の値によらず z/d の増加につれて液相速度は増える。

参考文献

- (1) 井口学, 森田善一郎, 徳永宏彦, 立道英夫, 坂本雄二郎, 高木茂男, “底吹き気泡噴流における液速度と平均気泡上昇速度の推算”, 鉄と鋼, Vol. 79, No. 5 (1992), pp. 25 – 32.
- (2) Duineveld, P. C., “The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 292 (1995), pp. 325 – 332.
- (3) Brucker, C., “Structure and dynamics of the wake of bubbles and relevance for bubble interaction”, *Physics of Fluids*, Vol. 11 (1999), pp. 1781 – 1796.
- (4) 木倉宏成, 村川英樹, 有富正憲, “超音波流速分布計測を用いた気泡流計測”, ながれ, Vol. 27 (2008), pp. 283 – 294.
- (5) Funaki, J., Shintani, A., Kawaguchi, R. and Hirata, K., “Basic space structure of bubble-jet plume using consecutive 3D-PTV”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4 (2009), pp. 348 – 358.
- (6) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, W. E., *Bubbles, Drops and Particles* (1978), Academic Press, New York.
- (7) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Lee, W. J., Saga, T. and Kobayashi, T., “Development of genetic algorithm based 3D-PTV technique”, *Journal of Visualization*, Vol. 5 (2002), pp. 243 – 254.
- (8) Doh, D. H., Hwang, T. G. and Saga, T., “3D-PTV measurements of the wake of a sphere”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 15 (2004), pp. 1 – 8.
- (9) Funaki, J., Inagaki, K., Shintani, A., Kawaguchi, R. and Hirata, K., “Unsteady and three-dimensional PTV measurements of flow structure in a suction sump”, *Proc. AICFM, Kuala Lumpur*, 135 (2009), pp. 1 – 6.