A214

水中気泡群の3次元リアルタイム運動解析

横山 裕史[○](同志社大学), 舟木 治郎(同志社大学),
平田 勝哉(同志社大学)Real-time 3D-motion
measurements of air bubbles in water

Yuji YOKOYAMA, Jiro FUNAKI and Katsuya HIRATA

ABSTRACT

To investigate the movement of each bubble individually, we attempt a 3D PTV analysis of air bubbles. A compressor blows air into water in a $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ cubic tank through a converging nozzle with an inner diameter of $0.3[\text{mm}]$. The pressure p_0 of a chamber between the compressor and the nozzle is 1.0×10^5 , 2.0×10^5 or $0.1 \times 10^5 [\text{Pa}]$. We take the stereo pictures, using two high-speed cameras. Choked and non-choked conditions are compared.

Key words: 3D PTV, bubbly flow, air bubbles, flow visualization, two-phase flow.

1. 緒言

近年, 湖や池, 港湾などでは富栄養化による水質汚染がみられる. この水質汚染を改善するための簡単な方法の一つに, 気泡噴流(曝気)を用いて水中に酸素を送り込む方法がある(例えば, 文献1)参照).

本研究は, 水中における気泡噴流の基礎的研究である. すなわち, 3-Dimensional Particle Tracking Velocimetry (3D PTV) 技術²⁾を気泡噴流に適用して, 個々の気泡の運動を定量的求めることを試みる. この計測法は以下のような利点がある. ひとつは, 流れを妨げるようなセンサー部がないこと. もうひとつは3次元計測空間内の全ての気泡の3次元速度ベクトルをを連続的にリアルタイムに計測できることである(例えば文献3)を参照). 過去に気泡流中での流体運動を3-D PTV解析した結果はあるが⁴⁾, 今回, 我々は, 気泡そのものの運動に注目して, ハイスピードビデオカメラを用いて気泡をトレーサーとする実験を試みる.

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

Fig.1は実験装置の概略図である. ①水槽は透明アクリル樹脂製で, 内り $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$, 板厚 15mm の立方体容器である. ⑤コンプレッサーにより, 先細ノズル(内径 0.3mm)から, 空気を水中に吹きこむ. 空気は気泡噴流として水中に噴出される. フレームレートを $1/500[\text{s}]$ に固定した2台の⑦ハイスピードカメラを用いることで, 同時刻における2枚一対の気泡噴流のステレオ画像を連続的に得られる. Fig.2は, ある時刻における

一対の気泡噴流のサンプル写真である. このような2つの画像から, その時刻における全ての気泡の空間的な位置が得られる. 連続するそれらのデータを用いた3D PTV解析により気泡の軌跡と瞬間的な速度ベクトルが得られる. 光源には, ハロゲンランプを用いている. ③チャンバーの内部圧力は, ②ひずみゲージ式圧力センサーにより計測される. 圧力信号は, ⑨センサーインターフェイスを通してデジタル信号に変換され⑥PCに送られる. 実験条件は, $p_0 = 0.1 \times 10^5$, 1.0×10^5 , $2.0 \times 10^5 [\text{Pa}]$, $L = 700[\text{mm}]$, $T = 7.0[^\circ\text{C}]$ である. ここで p_0 はチャンバーの内部圧力, L はノズル先端の水深, T は水温である.

Fig.1. Schematic view of experimental apparatus [mm].

Fig.2. A sample of stereo photos for 3D PTV analysis (Lower area, $p_0=1.0 \times 10^5$ [Pa] (choked)).

2.2 実験方法

2.2.1 3D PTV解析の概要

3D PTVを行うために、我々は気泡をトレーサ粒子として扱う。はじめに、あらかじめ校正された2台のハイスピードカメラを用いて、測定体積内における気泡噴流を撮影する。次に、一对のステレオ画像から気泡の3次元位置を算出する。4つの連続する気泡位置の情報から気泡の速度ベクトルを得る。なお全てのデータ処理はPC上で行う。詳細は以下に示す。

2.2.2 2台のハイスピードカメラの校正

まず、2台のカメラとも、その視野内にちょうど測定体積が含まれるようにカメラを固定する。ここで、可能な限り、2台のカメラの光軸が直角になるように、かつカメラの光軸が交わるように設置する。次に、測定体積内に可能な限り多く基準点を設置し、2台のカメラで撮影する。ここで、基準点間の相対位置座標の値は既知である。しかし、実際の基準点は有限な体積をもつ球体であるので、ここでは球体の中心を基準点とみなす。本実験では基準点の数は40個である。最後に、PC上で実際の空間に対応する仮想空間を構築することで、座標軸を決定する。

2.2.3 気泡の3次元位置の算出

まずはじめに、それぞれの画像における気泡の中心位置を決めるため、デジタル画像処理を施す。以下にその詳細を述べる。全測定時間を通して輝度変化のないピクセルの集合をその画像のバックグラウンドとして除去する。バックグラウンドを除去した画像の中で、一つの気泡において最大の輝度を持つ点を中心位置として設定する。ここで、密集した気泡群のなかで、個々の気泡を区別するために、2つの閾値を設定する。それらは気泡の最小径と最小の輝度である。これらの閾値を設定することで気泡の分解能を高めることが出来るが、実験条件によって適した値を経験的に試行錯誤して設定しなければならない。次に、カメラの視点とそれぞれの気泡の中心点を結ぶ直線を決める。このとき、気泡の3次元位置を一对の画像から得られる二本の直線の交点として3次元座標軸上に設定する。(参照, Fig.3)

Fig.3. Specification of bubbles' positions.

2.2.4 気泡の軌跡と速度ベクトルの算出

これまでの行程で、全てのタイムステップにおける実際の三次元空間内の気泡の位置が決められる。異なったタイムステップにおいて気泡の同定をするために、4時刻間追跡法に基づく遺伝アルゴリズムを用いる。それにより、気泡の4時刻間追跡法に基づく軌跡が得られ、2時刻間のデータから気泡の速度ベクトルが得られる。

3. 結果および考察

Fig.4はチョークした噴流における3D PTVの典型的な例である。ここでチョークしたとは、チャンバーの内圧が十分高く、噴流速度は音速とみなせることを言う。実際には全体の流れ場は広いので高い空間分解能を得るため、領域を2つに分ける。すなわち水面に近い上部と水槽底部に近い下部とである。Fig.4 (a), (b)は水槽側面から見た図で、Fig.4 (a)', (b)'は水槽上部から見下ろした図である。(a), と (a)'は同じ時刻であり、(b), と (b)'も同様である。しかし、上部の結果((a)と(a)')と下部の結果((b)と(b)')は同じ時刻ではない。画像は気泡が噴出して十分時間がたった後に撮影した。図から、自由表面近傍とノズル出口近傍を除くと、噴流中央部で小さいベクトルが多く見られる。ここで小さい気泡は大きい気泡に比べ上昇速度が遅いと考えられるため、小さい気泡が噴流の中心部に集まる傾向が、速度ベクトルから予想される。すなわち、中心部では上昇速度はどの気泡も概ね小さい。一方、自由表面付近ではそのような傾向は見られず、速い速度と遅い速度を持つ気泡が混在している。ノズル近傍では気泡が作り出されていて、かつ、気泡が密集している為、PTV解析は難しい。以上の2つの領域を除いて、小さな気泡が噴流の中心に存在しやすく、大きな気泡はそのまわりに存在する傾向にあることが予想できる。

Fig.5はチョークしていない噴流の典型例である。Fig.4の(a), (b)と同じようにFig.5の(a), (b)はそれぞれ、側面から見たときの上部と下部の結果である。また、その画像は同時刻ではない。ほとんどの気泡の速度はほぼ同じであり、Fig.4とは異なる。また、気泡は上

昇しながらゆっくりと放射状に広がっていく。

Fig.6は $p_0=2.0 \times 10^5$ [Pa] (choked) のときの噴流のノズル近傍における拡大写真である。今回の実験では、ノズル出口において常に気相のかたまりが存在している。この空気のかたまりから様々な径を持つ気泡が生成される。生まれた気泡はそれぞれ合体や分裂をしながら上昇していく。

Fig.7は、画像をコマ送りして得られた、 $p_0=2.0 \times 10^5$ [Pa] (choked) のときの典型的な3つの気泡軌跡である。気泡を楕円体とみなし、短径をa、長径をbとした。一つの軌跡は平均気泡径が $(a+b)/2=0.9$ (mm) (small bubble) である小さい気泡のものである。その気泡形状は、ほぼ球形である。その気泡の軌跡は、噴流の中心軸近くにあり、水平方向の揺らぎはあまり無い。他の二つの軌跡は、平均気泡径がそれぞれ $(a+b)/2=2.4$ (mm) (large bubble 1), 3.0(mm) (large bubble 2) の大きな気泡のものである。これらの気泡形状は、ほぼ楕円体である。その気泡の位置は噴流の中心軸から離れている。上記の結果はFig.4と一致していて、大きく速く上昇する気泡は噴流中心軸から離れ、小さくゆっくり上昇する気泡は噴流中心軸近くに集まる傾向があることがわかる。

Fig.4. Vectors of bubbles shed from a converging nozzle, at $p_0=1.0 \times 10^5$ [Pa] (choked).

Fig.4 Continued

Fig.5. Vectors of bubbles shed from a converging nozzle, at $p_0=0.1 \times 10^5$ [Pa] (non-choked).

(b) Lower area (side view)

Fig.5 Continued

Fig.6. A close-up photo near a nozzle exit ($p_0=2.0 \times 10^5$ [Pa] (choked)).

Fig.7. Loci of large and small bubbles ($p_0=2.0 \times 10^5$ [Pa] (choked)).

4. 結 言

我々の得た結言を以下にまとめる。

- (1) 水中における鉛直上方向の気泡噴流の個々の気泡の運動を、連続的、定量的、瞬間的に明らかにするために、3D PTVを試み、計測した。
- (2) チョークした噴流において、平均気泡径が小さく遅い気泡は噴流の中心軸に集まり、反対に大きく速い気泡

は噴流の周囲に集まる傾向を確認した。チョークしていない噴流については、ほとんどの気泡がほぼ同じ速度で上昇していた。

- (3) ほとんどの大きい気泡は大きく揺らいで螺旋状に上昇していくのに対して、ほとんどの小さい気泡は噴流中心部に集まりあまり揺らぐことなく上昇していく。

本研究の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム(同志社大学)」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 本橋敬之助, 水質浄化マニュアル, 海文堂出版, (2001).
- 2) 流れの可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, pp.425-427, (1986).
- 3) Adrian, R. J. , Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., 23, pp. 261-304, (1991).
- 4) 山本富士夫, 上村知正, 井口学, 森田善一郎, 白井尚, 太田淳一, 和田存功, 気泡噴流水混合容器内の三次元粒子運動のPTV計測, 福井大学工学部研究報告第41巻, pp. 25-38, (1993).
- 5) Chang, T. P. K. , Watson, A. M. and Tatterson, G. B. , Image Processing of Tracer Particle Motion as Applied to Mixing and Turbulent Flow-1. The Technique, Chem. Eng. Sc. , Vol. 40, No. 2, pp.269-275, (1985).