102 気泡を含む水流の可視化と画像計測

福井大学 太田 淳一, 山本富士夫, 幸川 光雄

Visualization and Image Processing for a Liquid Flow Including a Gas Bubble

Junichi OHTA*, Fujio YAMAMOTO* and Mitsuo KOUKAWA*

It has been desired to measure a velocity field around bubbles and bubble shapes in a liquid flow in order to clarify flow characteristics of a gas-liquid two-phase flow. Thus, a velocity field around a bubble flowing in water and the bubble shape were simultaneously measured. The bubbly flow was formed to pump air into water flowing upward in a rectangular duct (60 x 30 mm). Binary image correlation method based on high speed images between 1/200 sec was applied to measure the liquid velocity field around the bubble. The bubble shapes for the same high speed images were measured by a X-Y coordinator. The measured velocity field overlapped with the bubble shape are presented.

1. 緒 言

流れ場全体を測定する方法として、植村・山本ら⁽¹⁾は粒子追跡画像計測法の一つである2値化相関法と言われている高速画像解析アルゴリズムを発表してきた。その特徴は、他の方法に比べてはるかに計算時間が短いこと、画像処理の記憶容量が小さくて良いこと、特別なハードウェアを必要とせず、比較的安価なシステムとなることである。2値化相関法を気液二相流に適用し、気泡とトレーサ粒子の挙動を分離して可視化しCCDカメラで撮影し、それぞれの運動の瞬時の速度や水の速度変動、気泡のまわりの速度などについて検討が加えられている⁽²⁾。従来の研究は、直径数ミリ程度の気泡でしかも静止流体中に注入されたもの⁽³⁾がほとんどであり、大きい気泡の画像計測はほとんど報告されていないようである。そこで本研究では、強制循環系に直径約30mmの気泡を注入させ、高速撮影してその画像をもとに、気泡のまわりの速度場と気泡の形状の時間変化を同時に測定し、このような系への2値化相関法適用に対する検討を行ったので報告する。

2. 実験装置・方法及び画像計測方法

2.1 実験装置・方法 実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は、テストセクション⑨、ポンプ②、タンク①、コンプレッサ⑧から構成されている。作動流体は、一般の水道水が使用され、タンク①に溜められ、ポンプ②によって汲み上げられ、バルブ③を経て、テストセクション⑨に入り、タンク①に戻る。空気は、コンプレッサ⑧でテストセクション⑨の下部より注入され、この中で気相と液相が上向きに流れる気泡を含む水流となる。テストセクション⑨の形状と諸寸法を図2に示す。それは高さ1650mm、幅30mmの矩形断面の垂直配管で(可視部断面は60mm×30mm)、材質は透明アクリル樹脂である。テストセクションは、流れを整えるため図2に示すような形状にしハニカムを有し、水のヘッドを一定に保つため、装置上部に水槽部をもうけた。テストセクション下部には水流入用パイプと空気注入用パイプの二重管が設けられ、コンプレッサにより圧縮された空気がバルブ⑦で制御され空気注入用パイプを経てテストセクションに注入される。テストセクションの上部は大気開

* Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1, Fukui-shi, Fukui, 910

放されており、気液分離して連続で実験できる。流速を測定するために用いたトレーサ粒子は、ナイロン製で密度は 1020kg/m^3 、直径は $0.8\sim 2.0\text{mm}$ のものを使用し、ポンプの中を通して、この系を循環する。撮影場所は、ハニカムから約 600mm 上部である。水温は 23°C であった。

2. 2 画像計測方法 気泡含む流れでは気泡の動きが速くこれに伴って渦が生じ、トレーサ粒子相互の分布パターンの時間に対する変化の大きいところがある。2値化相関法は粒子の分布パターンから対応粒子を探すので、そのような気泡含む流れでは、 $1\text{コマ}/30\text{秒}$ の通常のビデオカメラでは、画面上の粒子数に対する対応粒子の割合（データ効率）を高くすることが困難であり、従って詳細な速度場が測定できないこと、さらに誤対応の生じる可能性の高くなることが予想される。これを解決するために、撮影は $200\text{コマ}/\text{秒}$ の高速ビデオで行った。照明は流路の両側方から 650W のプロジェクターで、二次元流れを壁の影響を避けて撮影するために側壁に幅 15mm のスリットを設け今回は行われたが、照明方法にはさらに改善の余地がある。画像は 256×256 画素の1画面にトレーサあるいは気泡反射部と背景とに2値化され、この時とその後の処理に簡単な工夫を加えることにより、気泡の反射部を消去した2値化画像を得た。1/200秒の連続した画像を基に2次元2値化相関法を用いて、速度ベクトルが得られた。気泡形状は高速ビデオに付属のX-Y coordinatorによって本研究では計測された。この方法は、気泡界面位置をX-Y coordinatorで読みとり、B-spline関数で近似してその輪郭を描くものである。速度ベクトル図と気泡形状は別の座標系で表されるので、(1) 両図を正確に対応させるためと、(2) 2次元方向の長さの倍率を合わせるために、前者の位置の基準となる点と後者のX方向とY方向の長さの基準となる点を複数個あらかじめ撮影した後、気泡を含む流れを撮影した。両図の絶対位置のずれは 0.8mm 以下であった。なお、気泡形状認識については、より効率的な方法を今後採用するつもりである。

3. 実験結果と考察

液レイノルズ数 2800 、流量 $1.67\times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流速 9.3cm/s で1/200秒間隔の2枚の画像から得られた測定速度ベクトルと前述した方法で求めた気泡形状（2枚の画像の最初の方）の一例を図3(a)に示す。横軸は位置 22mm から 82mm 、縦軸は位置 -30mm から 30mm の範囲内の速度ベクトルを示しているが、実際に画像計測した範囲はさらに広い。0.005秒間隔の速度場が得られたが変化が少ないので、ここでは図3(a)以後0.02秒間隔の速度ベクトルと気泡が図3(b)～(d)に示されている。本研究の条件では2値化相関法における相互相関係数を検討した結果、0.35以上とすると良いことが分かり、それらの測定速度ベクトルは求められた。図3(a)～(d)から気泡位置の時間変化より約 40cm/s で気泡は上昇し、形状は時間とともに変化し、その下部は波打っているようである。また気泡の上昇にともない、その下部では気泡速度とほぼ同じ速度で液が引き上げられ、さらに下流では気泡の上昇速度より大きい速度で液の上昇していることが分かる。図(d)から気泡下部の左側に渦が形成されており、また、気泡下部右側にも渦が形成されている。右側の渦がはっきり分からないのは壁に非常に近いためであり、これに対し左側は気泡と壁の間に距離がありきれいな渦となっていると考察できる。また左側壁と気泡の間に逆流している領域のある事も分かる。さらに、気泡の左右にゆれながらの上昇に伴い、その下流の速度ベクトルも左右に揺れていることもわかる。以上のように気泡の上昇にともなう非定常な液相流れ場の変化が測定できた。

図4(a)～(d)はそれぞれ図3(a)～(d)に対応する測定速度ベクトルを格子点上に内挿して得られた速度ベクトルとである。今回採用した補間方法は、格子点を座標の原点とみなしてその第一象限、第2象限、第3象限、第4象限内で最も近接するそれぞれ一点、即ち4点を逆数補間して求めた。従って、気泡内の格子点にゼロでない速度ベクトルの得られる問題が生じた。これは、2値化相関法の問題というより、格子点上の速度ベクトルの補

間法の問題である。そこで、今回の図4(a)~(d)では気泡内の速度ベクトルはゼロとして描かせてある。同様の理由により、気液界面近傍の補間された速度ベクトルで誤差が含まれるものがある。従って、比較的大きな気泡を含む流れでは、測定速度ベクトルの結果から格子点上に速度ベクトルを内挿して算出したり、これをもとに流線、渦度分布を求めようとする、気液界面近傍でより正確な速度ベクトルを出すために、界面形状と速度の同時測定方法の改良や、界面近傍の格子点上の速度ベクトルの補間法に工夫が必要となる。

4. 結 言

大きな気泡を含む流れ場を画像計測するために2値化相関法が適用され、次のことが明らかになった。

(1) 1/200 秒間隔の比較的高速な画像をもとに、2値化相関法によって気泡周りの液速度場とX-Y coordinatorにより気泡形状の変化がそれぞれ同時に非定常に測定でき、気泡の動きと液相の速度場の変動が調べられた。

(2) 比較的大きな気泡を含む流れでは、気液界面近傍での格子点上速度ベクトルを測定速度ベクトルの結果から補間しようとする、補間法や界面形状の測定法に工夫が必要となる。

謝 辞

本研究は(財)実吉奨学会の助成を受けて行われたものであることを付記し、謝意を表する次第である。また、実験および解析に協力された本学学生 荒川友良、加藤敦史、高橋克洋君、本学大学院生 清水尚典君に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 植村, 山本, 幸川, 2 値化相関法-粒子追跡法の高速画像解析アルゴリズム-可視化情報10巻38号(1990), pp196-202.
- (2) 植村, 井口, 山本, 森田, 水越, 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年第5号(1992), pp738-744.
- (3) Hassan, Y. H., Blanchat, T. K., Seeley Jr C. H., and Canaan, R. E., Simultaneous Velocity Measurements of Both Components of a Two-Phase Flow Using Particle Image Velocimetry, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 18, No. 3(1992), pp. 371-395.

Fig.1 Schematic diagram of Experimental Apparatus

Fig.2 Test section

Fig.3 Measured velocity vectors and a bubble shape

(d) 0.06 sec after

(c) 0.04 sec after

(b) 0.02 sec after

(a) 0.00 sec after

Fig.4 Interpolated vectors and a bubble shape