

138 気泡 - 壁面衝突により誘起される気泡運動と液相運動

The Motion of a Bubble and Liquid Induced by a Wall-Bubble Collision

浦野繁幸 (静岡大院), 宮本悠樹 (静岡大院), 齋藤隆之 (静岡大工)

Shigeyuki URANO, Yuki MIYAMOTO, Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1Johoku, Hamamatsu, Shizuoka

Wall-bubble interaction is one of the most important subjects for a deep understanding of gas-liquid two-phase flows. This study focuses on the liquid motion at the wall-bubble collision as well as the bubble motion. The liquid motion induced by the collision was measured via PIV. The motion of the bubble was microscopically visualized via a high-speed video camera, in order to clarify the motion of the center of gravity and the surface shape deformation. As a result, it was confirmed that (1) the bubble was forced by the wall in the area of $L_{ap}/D_{eq} \approx 0.5$, (2) after the collision, the bubble velocity was reduced, and the shape of bubble come to spherical, (3) the vorticity plays important role for the bubble motion.

Keywords: Wall-Bubble Collision, Shape deformation, Vorticity, Multiphase flow

1. 緒言

気液二相流は様々な工業分野で広く見られる[1]. 機器の運転効率の向上ならびに合理的な装置設計に, その流動構造の解明は必要不可欠である. 気液二相流は多重スケール構造を呈することから, 第一段階として, スケールごとにその流動構造を明らかにし, 第二段階として, スケール間のカップリング機構を明らかにするという手法が合理的である. 本研究では気泡近傍のローカルな流動構造に焦点を当てるとともに, 気液二相流を理解する上で重要な相互作用の一つである「気泡 - 壁面間相互作用」を実験により考察することを目的とする. 壁面付近における気泡挙動の解明を目的とした研究例は多いが[2], 気泡 - 壁面衝突を気泡界面運動と周囲液相運動との両面から論じた研究は少ない. 本研究では, 静止流体中に単一気泡を打ち上げて, これと壁面との衝突現象を, 気泡運動に関しては高速ビデオカメラにより, 周囲液相運動に関しては, PIVにより計測した. その結果を基に, 気泡 - 壁面衝突により生じる気相・液相運動ならびにその相互関係を考察する.

2. 実験装置および計測方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す. アクリル製矩形水槽 (150×150×300mm) の底部中央に注射針(外径 0.50mm, 内径 0.32mm, 刃面角度 12°)を固定する. アクリル製壁面装置を設置し, 煮沸脱気したイオン交換水を注射針先端から高さ約 100mm まで満たす. アクリル製壁面装置を $x-z$ 平面に垂直に設置し, 気泡がその直線上昇中に衝突するように位置を定めることで, 気泡の重心運動を同一平面内に規定した. 壁面傾斜角度 θ を 40° とした. 気相は純空気とし, 注射針を用いることで気泡サイズならびに気泡初期運動に高い再現性を実現した. 気泡発生機構を Fig. 2 に示す. 純空気はポンペより送り出され, 精密ニードルバルブ, 圧力計・流量計によって調整され, 気泡発生制御部に導かれる. 気泡発生制御部のオーディオスピーカーの振動により平均球等価径 2.33mm の気泡を注射針から射出した[3]. 気泡発生周波数を 0.1Hz とすることで, 先行気泡により誘起された液相運動が十分に散逸された状態で実験が行われたと考えられる.

PIV 計測においては, 可視化トレーサに蛍光粒子(ロードミン B, 粒径 $50\mu\text{m}$, 励起波長 542nm , 発光波長 570nm)

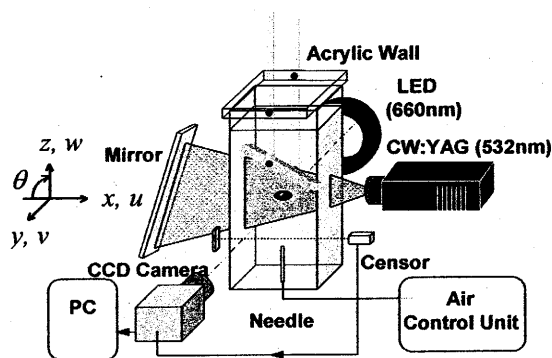


Fig.1: Experimental setup

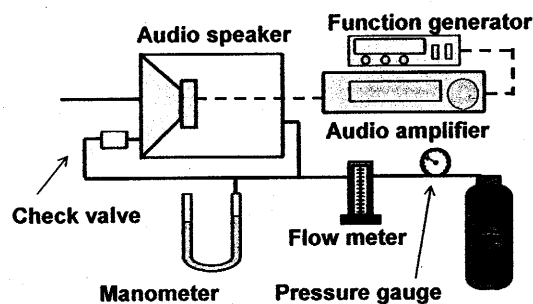


Fig.2: Air control unit

を用い, CW-YAG レーザ(532nm, 5W)をシート状に照射した. これを高速ビデオカメラ(Phantom V9.0: 960×960 pixel, $0.129\text{mm}/\text{pixel}$, 1950fps)により可視化撮影した. 同時に, リング状の赤色 LED(660nm)を連続発光させて, 気泡の輪郭形状も捉えた.

次に, 詳細に気泡運動を捉えるため高速ビデオカメラにマイクロズームレンズを装着し, 空間分解能を高め, 100W のハロゲン光源とする投影画像を撮影した. カメラの位置を変え $y-z$ 平面と $x-z$ 平面から気泡を捉えた. 重心軌道については, 撮影領域を 960×960 pixel, 空間分解能を $7.56\mu\text{m}/\text{pixel}$, 時間分解能を 1980fps とした. 測定対象時間を気泡射出後から 0.15s としており, これは気泡と壁面の 2 回目の衝突後までに相当する. 気泡軌道にあわせてカメラを移動させ, 7 区間に分けて撮影した. 光学式通過センサ

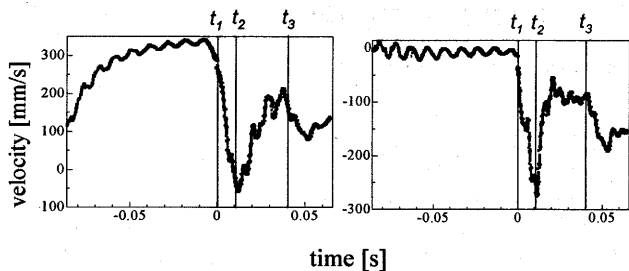


Fig.3: Distribution of the bubble velocity

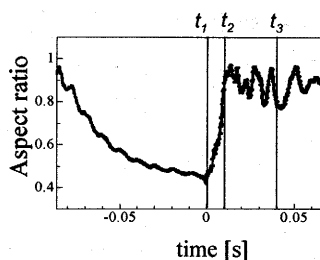


Fig.4: Distribution of the aspect ratio

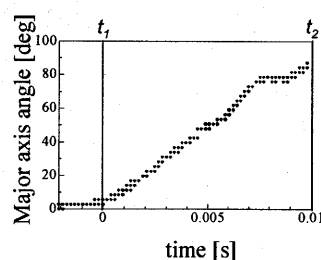


Fig.5: Distribution of the major axis angle

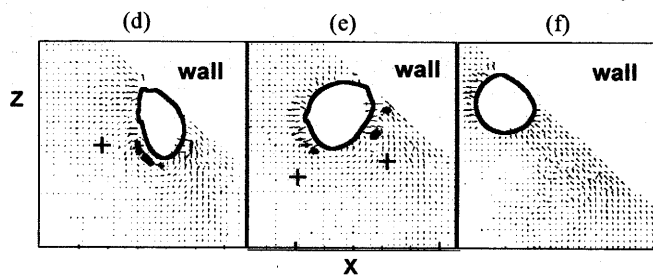
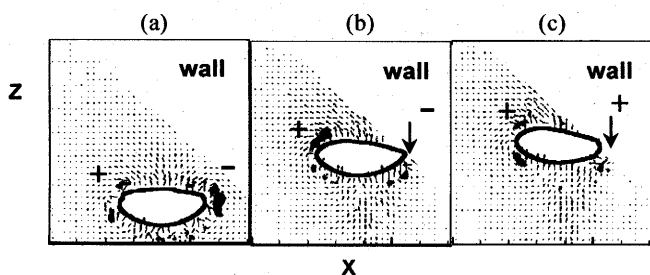
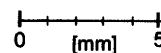


Fig.6: Contour map of vorticity, and vector field of velocity



を用い、常に同一位置、同時刻に撮影を開始した。また、高速ビデオカメラ位置を高精度に測定した。以上より液相運動を気泡運動と対応させて考察することが可能となる。

3. 実験結果および考察

壁面衝突時の気泡運動を、気泡重心運動と気泡界面運動の両面から考察する。気泡重心速度 u 、 w を Fig.3 に、アスペクト比を Fig.4 に示す。図中 t_1 、 t_2 、 t_3 はそれぞれ、気泡と壁面が接触した瞬間、反発した（気泡と壁面が離れた）瞬間、再び気泡が壁面に接触した瞬間の時間を示している。なお、 $t_1=0s$ としている。また、気泡長軸の傾きの変化を Fig.5 に示す。壁面衝突前(a)、壁面接触直前(b)、壁面接触直後(c)、反発前(d)、反発直後(e)、再接触後(f)の液相運動を Fig.6 に示した（気泡運動平面 (x - z 平面) における速度ベクトルと渦度分布)。

注射針より射出された気泡は、徐々に扁平化し、かつ加速していく。このとき u 、 w に見られる周期的な変動は、気泡形状の周期的な変動に伴う気泡の重心位置の変動であると考えられる。壁面到達前、気泡速度は約 340mm/s に達し、上昇速度はほぼ平衡状態に至っている。また、Fig.6(a) より、単一気泡の上昇時特有の気泡上部から後部へ回りこむ流れが気泡の左右に確認できる。さらに上昇し、壁面との接触直前においては、Fig.6(b) より気泡右側の回りこむ流れが壁面により遮られているのがわかる。液相運動の変化に伴い、気泡運動も変化すると考えられ、Fig.3 より重心速度 w が急激に減少することが分かる。気泡運動に影響が開始する範囲を、壁面 - 気泡界面距離 L_{ap} 、気泡球等価径 D_{eq} より無次元数で表すと、 $L_{ap}/D_{eq} \approx 0.5$ となった。この範囲において、壁面は気泡運動に大きく影響を与える。

壁面との接触直後、気泡右下部の液相の回転方向が急激に変化し、正の大きな渦度が生じる Fig.6(c)。この液相運動の変化をきっかけとして、 t_1 から t_2 まで、気泡は時計回りに回転し、壁面に沿いながら上昇していく。Fig.5 より気泡長軸の傾きの変化は、ほぼ一定の角速度であり $\omega \approx 170[\text{rad/sec}]$ となった。 t_1 から t_2 までの区間において、全てのパラメータは急激に変化し、 w は減少、 u は傾斜方向に増加し、気泡形状は急激に球に近づく。液相運動は Fig.6(d) のようになり、気泡左側に範囲の広い大きな渦度が生じて

いる。

t_2 で気泡は反発に至る。反発後、気泡界面に生じる高周波な界面振動によって、アスペクト比が高周波振動することが確認できる (Fig.4)。形状変形により重心位置が変動し、重心速度にも高周波変動が観測される。液相運動は Fig.6(e) に代表されるものであり、気泡界面付近で複数の強い渦の放出が見られる。界面付近での液相の強い乱れにより、気泡界面において高周波で振幅の大きい変動が生じていると考えられる。

再び壁面と接触する t_3 以降、気泡運動の各パラメータは一回目の接触開始後と同じ傾向の変動を示す。しかし、その変動の振幅は相対的に小さい。気泡はほぼ球形の状態を保ち、反発は起こらず壁面にそって上昇する軌道をとった。液相運動を Fig.6(f) に示す。広範囲にわたる弱い液相の乱れが確認できるが、(a)~(e) で見られた気泡界面付近での大きい渦度は見られない。気泡周囲の渦度、つまり液相の乱れが弱いため、気泡運動に大きな変動が現れなかったと考えられる。

4. 結言

静止流体場での気泡 - 壁面衝突を気泡運動と周囲液相運動との両面から論じた。気泡運動は $L_{ap}/D_{eq} \approx 0.5$ となる範囲から壁面による影響を受け、重心速度 w は減少を始める。壁面接触から反発に至るまで、気泡は一定の角速度で回転しながら球形状に近づく。反発後、気泡周囲で強い渦の放出が見られ、それに伴い気泡界面に高周波な界面振動が生じる。これらは気泡 - 壁面衝突に誘起される特有の流動構造であると考えられる。

参考文献

[1] T. Saito, et al.: *Environmental Science & Technology*, **34**, 4140-4145, (2000).
 [2] T. Fumio, S. Takagi, J. Magnaudet, Y. Matsumoto: *J. Fluid Mech.*, **461**, 277-300, (2002).
 [3] 仮屋崎 侃, 逢坂 昭治: 機論 B 編, **69**, 674, 2712-2718. (2002-10).