

212 気泡液体中を伝播する衝撃波と気泡の変形・崩壊

Shock Wave Phenomena in Bubbly Liquids and Collapse of Gas Bubbles

○ 学 菅野 統穂 (室蘭工大・院) 正 杉山 弘 (室蘭工大)
 正 溝端 一秀 (室蘭工大) 正 湊 亮二郎 (室蘭工大)
 学 谷口 陽一 (室蘭工大・院)

Toho KANNO, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto, Muroran, Hokkaido, 050-8585
 Hiromu SUGIYAMA, Muroran Institute of Technology
 Kazuhide MIZOBATA, Muroran Institute of Technology
 Ryojiro MINATO, Muroran Institute of Technology
 Yoichi TANIGUCHI, Muroran Institute of Technology

Key Words: Shock wave, Bubbly liquid, Shock tube, Gas-liquid interface, High speed schlieren photography

1. 緒言

気泡液体中を伝播する衝撃波(圧力波)現象に関する研究は、気液二相流中の水撃現象、高压容器からの液体の放出現象、混相媒体による衝撃波強さの低減等と関連し、工学的に重要な課題である。一方、衝撃波(圧力波)による気泡の崩壊現象に関する研究は、キャビテーション現象が流体機器に及ぼす損傷メカニズムの解明と関連し、重要であり、これまでに多くの研究がなされてきている。(1)しかし、気泡液体中の衝撃波伝播現象や気泡崩壊現象は、高速、微視的で、非常に複雑な現象であるため、十分解明されていない。

そこで本研究では、縦型の液体衝撃波管を用い、衝撃波を気泡液体中に入射させ、気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力変動特性および気泡の変形・崩壊現象を、圧力変動測定および高速度デジタルビデオカメラを用いて撮影した高速度写真により詳細に調べた。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は、高压室と低压室を隔膜で隔てた気液二相衝撃波管、気泡発生装置および圧力測定系から構成されている。実験方法は以下の通りである。まず衝撃波管に液相媒体を設定水位まで注入し、管底に取り付けられた気泡発生装置により気泡を発生させる。次に高压室に圧縮空気を充填し、隔膜を電磁撃針装置により破膜させ、衝撃波を発生させる。

気泡液体中の衝撃波圧力変動測定は、Fig.1 に示す P.T.2 ~ P.T.5 の 4 つの圧力変換器(Kulite Semiconductor XCQ-093-500A)により行った。圧力変換器 P.T.1 は、入

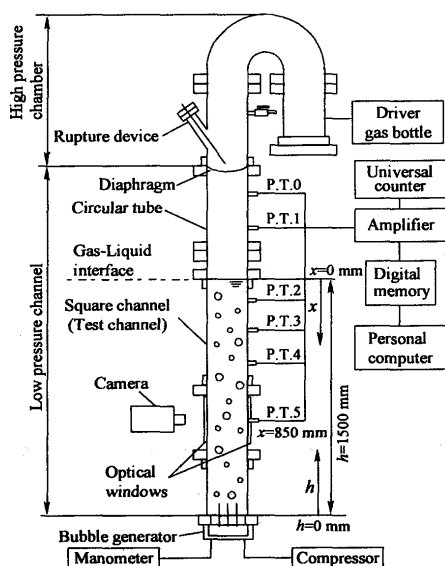


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

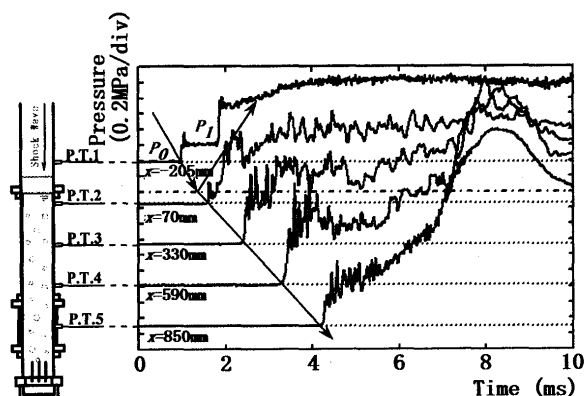


Fig.2 Shock wave pressure histories in bubbly liquid.
 $(\Delta P = (P_1 - P_0) = 0.23\text{MPa})$

射衝撃波によるステップ的な圧力波形を測定するために、気液界面より上方 205mm の位置に設置した。液相媒体はグリセリン 80%水溶液であり、設定水位は $h = 1500\text{mm}$ に設定した。衝撃波管管底から上方 650mm の位置に観測窓が設けられており、この位置に高速度デジタルビデオカメラを設置して衝撃波が作用した際の気泡群の変形・崩壊挙動を撮影した。初期ボイド率 α_0 は観測窓から撮影した気泡群の影写真より算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力変動特性

Fig.2 に入射衝撃波圧力ステップ $\Delta P (=P_1 - P_0)$ が 0.23MPa と比較的強い衝撃波が気泡液体中を伝播した際の圧力の時間変化を示す。実験条件は、初期ボイド率 $\alpha_0 = 0.5\%$ である。図中には気液界面から測った各圧力測定点の距離 x を示す。図より $\Delta P = 0.23\text{MPa}$ と比較的強い衝撃波の場合の衝撃波波頭背後の圧力振動は、大きな振幅を伴った不規則な圧力振動を伴っていることがわかる。この圧力振動の原因の一つとして、衝撃波の入射に伴う気泡の振動、変形・崩壊現象との関連が考えられる。

3.2 衝撃波の作用を受けた気泡群の変形・崩壊挙動

Fig.3 は Fig.2 とほぼ同じ実験条件の下で衝撃波が作用した際の気泡群の挙動を、空間分解能を高め、詳細に捉えた連続写真である。Fig.3 上部の圧力波形は $x = 850\text{mm}$ の位置で同時測定した壁面圧力波形であり、(a)は観測時間 $t = -0.2 \sim 0.6\text{ms}$ 、(b)は観測時間 $t = -0.2\text{ms} \sim 1.0\text{ms}$ の範囲の圧力波形である。 t は衝撃波面が圧力変換器 P.T.5 を通過する直前を始点(0ms)とした経過時間であり、矢印①~②で示す時刻は、Fig.3 下部の写真の時刻と対応している。実験条件は、初期ボイド率 $\alpha_0 = 0.5\%$ 、入射衝撃波圧力ステップ $\Delta P = 0.27\text{MPa}$ である。撮影条件は、撮影速度

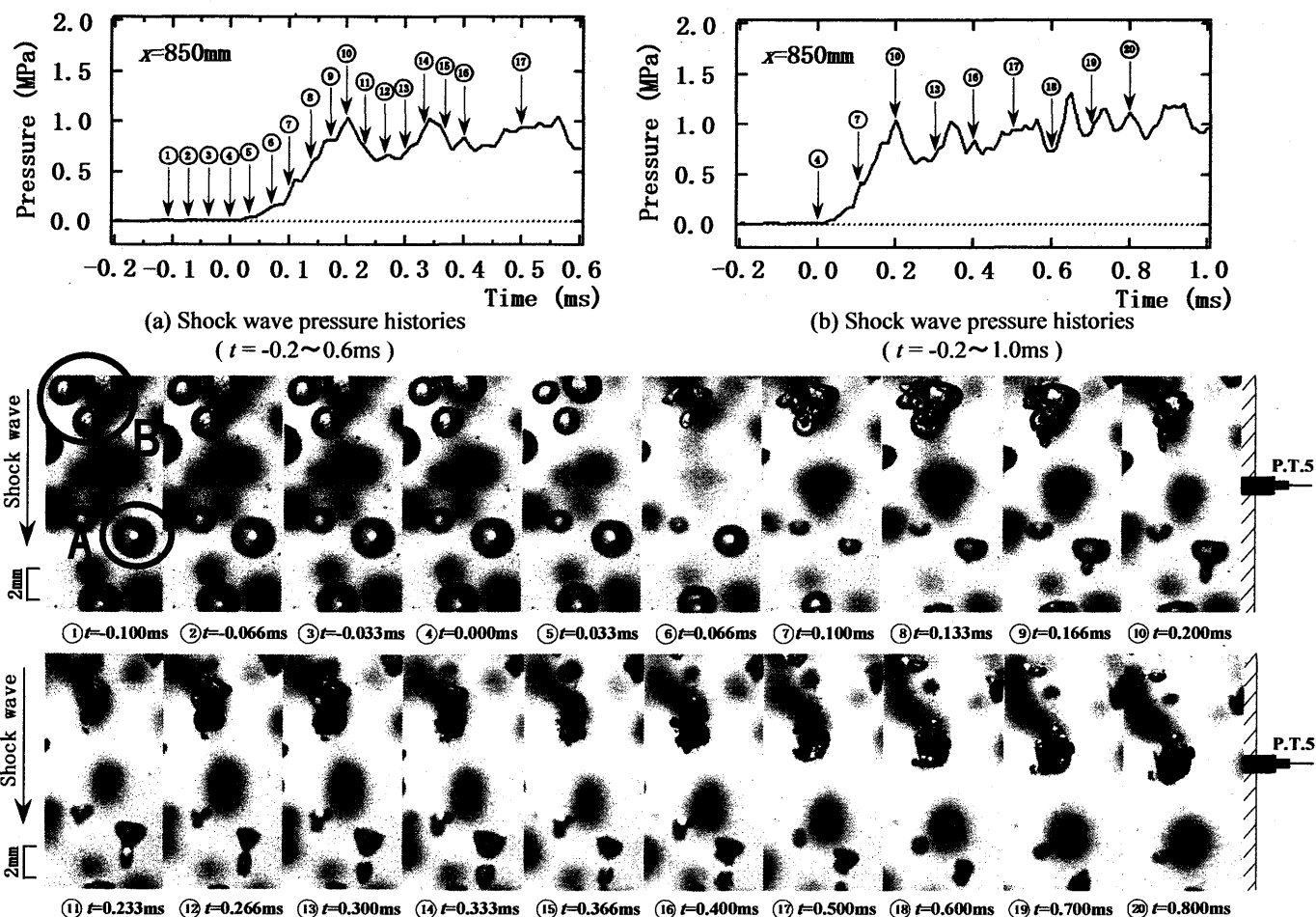


Fig.3 Sequential photographs of air bubbles collapsing at shock arrival in the bubbly liquid. ($\Delta P = 0.27\text{MPa}$, $\alpha_0 = 0.5\%$)

30,000fps, 露光時間 $4\mu\text{s}$, 撮影位置は気液界面から $x = 850\text{mm}$ の位置である. 平均気泡径は $d_a = 2.4\text{mm}$ である.

写真①($t = -0.100\text{ms}$)から④($t = 0.000\text{ms}$)は, 衝撃波面が圧力変換器通過する前の, 初期の気泡状態を示し, 直径 $2\sim 4\text{mm}$ の気泡が存在していることがわかる. 写真④($t = 0.000\text{ms}$)は, 衝撃波面が圧力変換器を通過した直後の状態を示す.

写真①($t = -0.100\text{ms}$)の単一気泡 A に着目すると, 写真⑦($t = 0.100\text{ms}$)において, 気泡 A は収縮し最小径になること, 気泡上面が平坦になることがわかる. 写真⑧($t = 0.133\text{ms}$)において, 気泡 A は膨張過程であるが, 気泡下部からマイクロジェットの発生が確認できる. このマイクロジェットは, 写真⑩($t = 0.233\text{ms}$)へと成長している.

気泡周辺の液体の圧力変動と気泡の変形挙動の関連を調べると, 次のようになる. 圧力波形上の⑥($t = 0.066\text{ms}$)の時刻で衝撃波面が到達すると, 気泡 A は収縮し, ⑦($t = 0.100\text{ms}$)で最小径となる. 壁面の圧力は⑧($t = 0.133\text{ms}$), ⑨($t = 0.166\text{ms}$), ⑩($t = 0.200\text{ms}$)の時刻で上昇しているが, この圧力上昇と対応せず, 気泡 A は膨張を続けている. 圧力波形上の⑩($t = 0.200\text{ms}$)以降で, 圧力が下がる過程で, 気泡 A は二つの気泡に分裂している. その後, 写真⑬($t = 0.300\text{ms}$), ⑭($t = 0.333\text{ms}$)と, 液体の圧力が上昇する過程で, 気泡 A は膨張している. このように, 圧力変換機 P.T.5 で検出した液体圧力の増加・減少と, 気泡 A の変形挙動は対応していない. これは複数気泡による干渉の影響であると思われる. なお, 気泡 A は, 写真⑳($t = 0.800\text{ms}$)まで, 衝撃波によって誘起された液体の流れの影響を受け, 観測部内を下方向へ移動していることがわかる.

次に, 写真①($t = -0.100\text{ms}$)の上方の三つの気泡からなる気泡群 B に着目すると, 写真⑤($t = 0.033\text{ms}$)において衝撃波面が到達し, 写真⑥($t = 0.066\text{ms}$)ですべての気泡が大きく収縮し

ている. しかし, 逆三角形に並んだ三つの気泡のうち上の二つの平行に並んだ気泡は, 先頭衝撃波の作用面と気泡上面が平らに変形する面が一致せず収縮している. 続いて, 写真⑦($t = 0.100\text{ms}$)において気泡群 B は膨張をはじめると同時に, 気泡下部からのマイクロジェットの発生が確認できる. このマイクロジェットの向きは収縮した際平らに変形した面と垂直な方向に発生しており, 互いの気泡に向かい合っている. このような平行に並んだ気泡の挙動の原因として, 単一気泡 A の収縮は, 衝撃波の作用面と気泡上面が平らに変形する面はほぼ一致しており, マイクロジェットもこの面に対し垂直に発生していることから, 気泡同士の相互干渉が考えられる.

写真⑧($t = 0.133\text{ms}$)において, 気泡群 B の上二つの気泡から発生したマイクロジェットが下の気泡と接触し, 写真⑩($t = 0.200\text{ms}$)以降において三つの気泡が合体したのが確認できる. この気泡群 B は写真⑩($t = 0.200\text{ms}$)以降, 合体したまま圧力変動に従い振動し, 気泡 A と同じく衝撃波によって誘起された液体の流れの影響を受け, 観測部内を下方向へ移動している.

4. 結言

本研究では, 縦型の液体衝撃波管を用いて, 衝撃波 (入射衝撃波圧力ステップ $\Delta P \approx 0.23\text{MPa}$) を気泡液体中に入射させ, 気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力変動特性を詳細に調べた. また, 高速度写真により, 衝撃波が気泡群に作用した際の気泡の挙動, すなわちマイクロジェットの発生, 気泡の変形・崩壊現象を詳細に捉え, 明らかにした.

参考文献

- (1) 大谷・杉山・溝端, 気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波と気泡崩壊, 日本機械学会論文集 (B 編), 68 巻 670 号, (2002-6), pp.1646-1652.