

## 209 気泡液体中を伝播する衝撃波現象に関する研究

## A Study of Shock Wave Propagation Phenomena in Liquids Containing Gas Bubbles

○学 小笠原 久敏 (室蘭工大院) 正 杉山 弘 (室蘭工大)  
 正 溝端 一秀 (室蘭工大) 正 大谷 清伸 (室蘭工大)  
 学 山下 明彦 (室蘭工大院)

Hisatoshi OGASAWARA, Hiromu SUGIYAMA, Kazuhide MIZOBATA, Kiyonobu OHTANI and Akihiko YAMASHITA  
 Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto, Muroran, Hokkaido, 050-8585

Key Words : Bubbly Liquid, Shock Tube, Large-Amplitude Shock Wave, Precursor of Shock Wave, Bubble Collapse

## 1. 緒言

気泡を含む液体中を伝播する衝撃波現象は、高压容器からの液体の放出現象、気液二相流中の水撃現象、混相媒体による衝撃波強さの低減などに関連し、これまでに多くの研究がなされてきている。しかし、気泡流中の衝撃波伝播は、非常に複雑な現象であり、特に比較的強い衝撃波が気泡流中を伝播する際に生じる衝撃波波頭背後の不規則的で激しい圧力振動の発生や、衝撃波の到達に先立つ圧力プリカーサ(予兆)現象の発生などについては、未だ十分に解明されていない。

本研究では、縦型の気液二相衝撃波管を用いて、比較的強い衝撃波を気泡流中に入射させ、気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波の特性に関して、高速度ビデオカメラを用いた気泡群の変形、崩壊過程の可視化、圧力測定と圧力振動の時間周波数解析により調べる。

## 2. 実験装置および実験方法

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は高压室、低压室からなる気液二相衝撃波管、気泡発生装置、圧力測定系から構成されている。実験方法は次のようである。まず、二相衝撃波管に設定水位まで液相媒体を注入し、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し、衝撃波を発生させる。衝撃波が入射した際の圧力変動は高周波数応答性をもつ半導体圧力変換器 (Fig.1 の P.G.1~P.G.5) を用いて測定するとともに、衝撃波が作用する際の気泡群の挙動を高速度ビデオカメラ (nac 社製 MEMRECAMfx-K3) を用いて撮影する。実験に使用した液相媒体はグリセリン 80% 水溶液で、設定水位は 1500mm、気相媒体は空気である。ボイド率は、水面からの距離  $x=850\text{mm}$  の位置にある観測窓より撮影した気泡の影写真から求める。

## 3. 実験結果と考察

## 3.1 気泡流中を伝播する比較的強い衝撃波の圧力特性

Fig.2 に、比較的強い衝撃波が気泡流中を伝播する際の圧力の時間変化を示す。図の左側には、二相衝撃波管の模式図と圧力変換器を設置した水面からの距離  $x$  を示す。実験条件は、初期ボイド率  $\alpha_0=0.2\%$  (平均気泡径  $d_0=1.3\text{mm}$ )、入射圧力ステップ  $\Delta P (=P_1-P_0)$  は  $0.17\text{MPa}$  である。

気泡流中における比較的強い衝撃波の伝播による圧力変動は、特に水面に近い圧力測定点において、圧力は急激に上昇し、その後不規則的で大きな振幅を伴う振動が発生していることがわかる。また、水面からの距離  $x=330\text{mm}$  および  $x=590\text{mm}$  の位置において、衝撃波が到達する前に圧力プリカーサが発生していることがわかる。

過去の研究より<sup>(1)</sup>、入射圧力ステップ  $\Delta P$  が大きいほど衝撃波波頭背後の不規則的な圧力振動は激しくなり、衝撃波の圧力プリカーサは明瞭に発生することがわかっている。また、プ

リカーサの圧力振動は、液体中の音速に近い速度で伝播することがわかっている。

## 3.2 強い衝撃波による気泡群の変形と崩壊

Fig.3 に、衝撃波が気泡流中を通過する際の気泡群の挙動を高速度ビデオカメラにより可視化した連続写真と、同時測

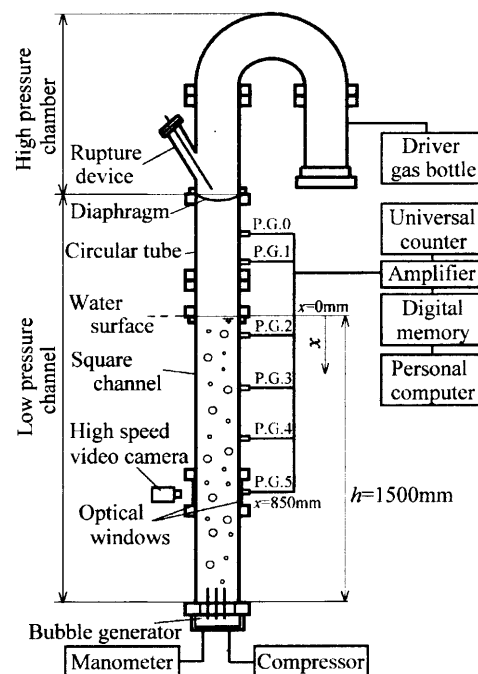


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

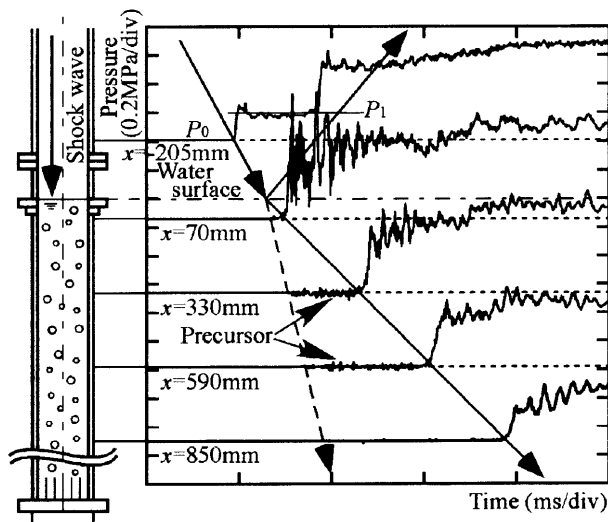


Fig.2 Shock wave pressure histories in air-bubbles/water mixtures. ( $\alpha_0=0.2\%$ ,  $\Delta P=0.17\text{MPa}$ )

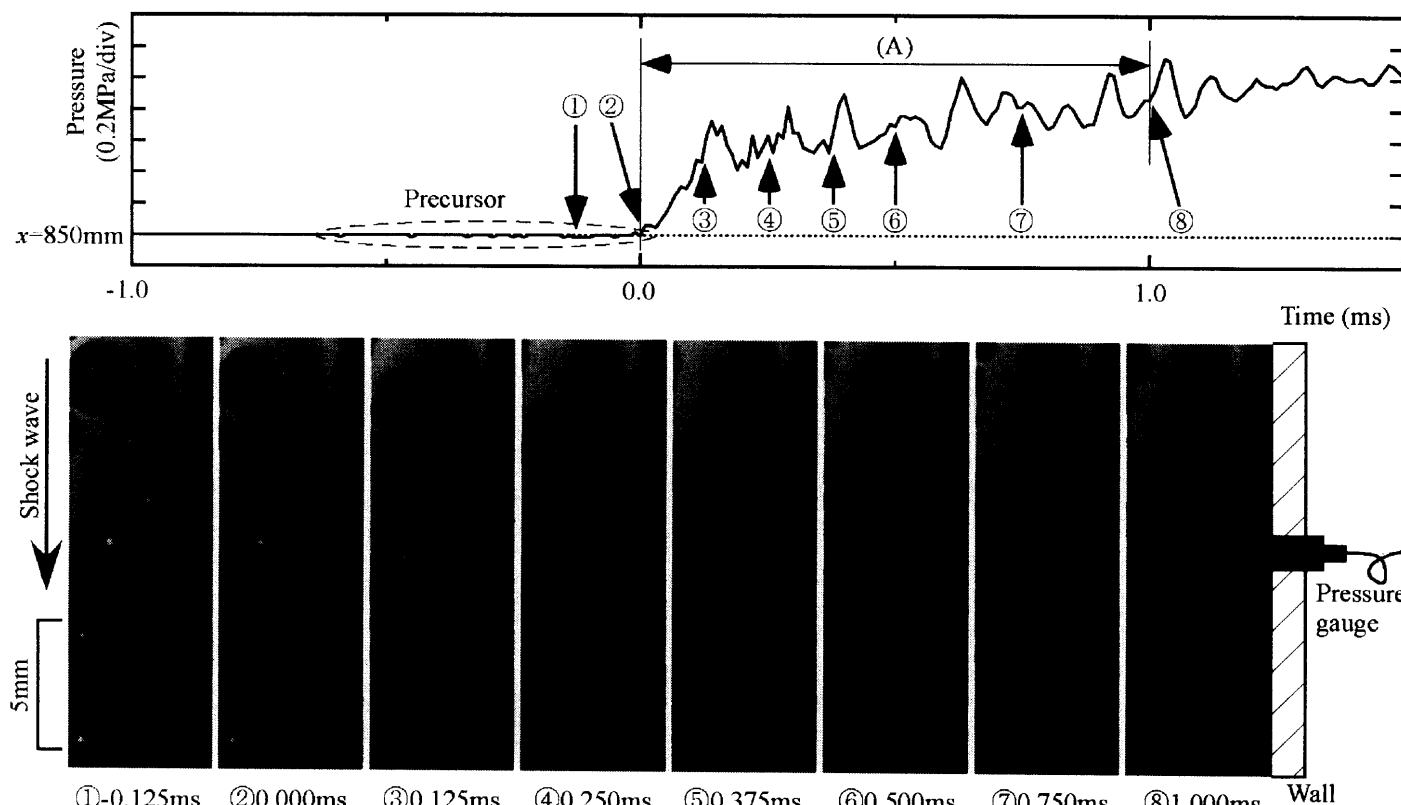


Fig.3 Sequential photographs of air bubbles collapsing at shock arrival in the bubbly liquid. ( $\alpha_0=0.6\%$ ,  $\Delta P=0.23\text{MPa}$ )

定した壁面圧力変動波形を示す。撮影位置は圧力変換器が設置されている右側壁面近傍である（水面からの距離  $x=850\text{mm}$ ）。撮影速度は  $8000\text{コマ/s}$ 、シャッター速度は  $50\mu\text{s}$  である。各写真①～⑧は、圧力波形上に示された①～⑧の時刻に対応する。実験条件は、初期ボイド率  $\alpha_0=0.6\%$ （平均気泡径  $d_a=1.6\text{mm}$ ）、入射圧力ステップ  $\Delta P=0.23\text{MPa}$  である。

衝撃波波頭通過（写真②）から、 $0.125\text{ms}$  後（写真③）で大部分の気泡はマイクロジェットを発生していることがわかる。その後気泡は衝撃波伝播方向に移動しながら大きく変形、崩壊し、1つの気泡が複数個に分裂、または複数の気泡が合体していることがわかる（写真④～⑧）。

### 3.3 気泡流中における衝撃波圧力波形の周波数特性

Fig.4に、気泡流中における衝撃波背後の圧力波形の時間周波数解析結果を示す。解析手法としてガボール変換を用いており、図中の明るい部分に各時刻におけるパワースペクトルのピークがあることを示している。Fig.4は、Fig.3の圧力波形図中A部分の解析結果である。なお、この実験条件の平均気泡径から算出した液体中の気泡1個の固有振動数は  $3.7\text{kHz}$  であるが、複数気泡間の相互作用により本実験条件での気泡群の固有振動数は、上記の値よりも低くなると考えられる<sup>(2)</sup>。

Fig.4より、比較的強い衝撃波が気泡流中を伝播する際の衝撃波背後部分の圧力変動には、約  $3\text{kHz}$  以下の振動成分および  $10\text{kHz}$ 、 $45\text{kHz}$  付近といった気泡群の固有振動数を大きく超える振動成分が目立つことがわかる。特に  $45\text{kHz}$  付近の高周波振動は、Fig.3の気泡群の連続写真と対応させると、気泡のマイクロジェットの発生から崩壊という初期の段階（写真③、④）で発生していることがわかる。

Fig.3、Fig.4で示した水面からの距離  $x=850\text{mm}$  の位置においては、伝播距離等による減衰、観測窓が設けられていることによる剛性低下の影響により、圧力振動は水面に近い地点に比べ減衰している（Fig.2参照）。特にプリカーサは大きく減衰している。したがって、水面に近い位置における衝撃波入射による気泡崩壊は、Fig.3で示した気泡の崩壊過程よりもさ

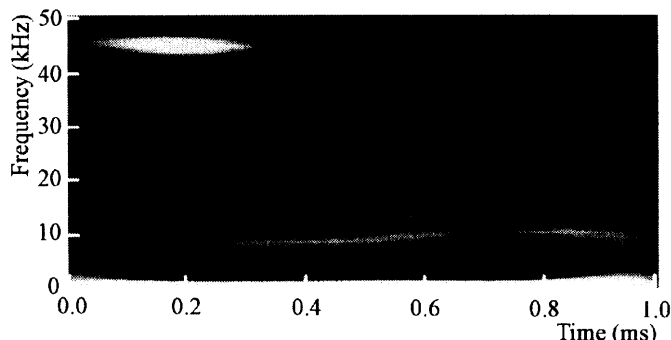


Fig.4 Result of joint time-frequency analysis of the pressure histories. (Fig.3, part A)

らに激しいと予想され、その分高周波振動成分の発生も強くなるものと思われる。この高周波振動の発生が3.1節で述べた衝撃波の圧力プリカーサの発生原因の1つと推察することができる<sup>(3)</sup>。

### 4. 結言

気液二相衝撃波管を用い、気泡液体中を比較的強い衝撃波が伝播する際の圧力特性、気泡群の挙動を中心として実験的に調べた。その結果、衝撃波入射による気泡群の崩壊初期段階で高周波成分を含む圧力振動が発生することがわかった。

### 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。
- (2) 高比良・赤川・藤川、液体中での気泡群の力学（第1報、理論解析）、日本機械学会論文集（B編）58巻548号、(1992-4)、pp.1267-1273。
- (3) 小笠原・杉山・溝端・大谷、気泡流中を伝播する強い衝撃波現象に関する研究、日本混相流学会年会講演会講演論文集、(2002)、pp.143-144。