

## 気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波と気泡崩壊\*

大谷清伸<sup>\*1</sup>, 杉山 弘<sup>\*2</sup>, 溝端一秀<sup>\*3</sup>Large-Amplitude Shock Wave Propagation and Bubble Collapse  
in a Water Containing Gas BubblesKiyonobu OHTANI, Hiromu SUGIYAMA<sup>\*4</sup> and Kazuhide MIZOBATA<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical Systems Engineering, Muroran Institute of Technology,  
27-1 Mizumoto, Muroran-shi, Hokkaido, 050-8585 Japan

Shock wave propagation and collapse of gas bubbles caused by a shock in a water containing gas bubbles are of large interest in relation to characteristics of water hammer, blowdown of high pressure liquids in pipes, damping of dynamic influence of shock waves on obstacles, etc. The large-amplitude shock wave propagations in the bubbly liquid are investigated using a two-phase shock tube. Effects of incident shock wave strength and initial void fraction on shock wave pressure characteristics are clarified for incident shock wave strength ranging from 0.06 MPa to 0.25 MPa. Behavior of the bubbles collapsing behind large-amplitude shock waves is also clarified by pressure history measurements and high speed photography.

**Key Words:** Multi-Phase Flow, Shock Wave, Bubble, Bubbly Liquid, Bubble Collapse, High Speed Photography

## 1. 緒言

多数の気泡を含む液体、いわゆる気泡液体 (bubbly liquid) 中を伝播する衝撃波現象の解明に関する研究は、気液二相流中の水撃現象、高圧容器からの液体の放出現象、火山における水蒸気爆発、混相媒体における衝撃波強さの低減等と関連し、重要である<sup>(1)-(3)</sup>。

従来、気泡液体中を伝播する衝撃波に関する研究は、実験的には主に縦型の衝撃波管を用いて行われてきている<sup>(4)-(6)</sup>。それによると、気泡液体中を伝播する衝撃波は、気体中を伝播する衝撃波と特性が異なり、衝撃波波頭後方に振動波列を伴う振動衝撃波となること、弱い衝撃波の場合には衝撃波波頭後方に規則的な振動波列が現れることなどが明らかにされている。しかし、強い衝撃波の場合には、衝撃波波頭後方に不規則な振動波列が現れることが示されているが<sup>(7)(11)</sup>、現象が極めて複雑であることや研究例が極めて少ないため、その特性や原因について不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では、縦型の二相衝撃波管を用い、

比較的弱い衝撃波から比較的強い衝撃波（ここでは、入射衝撃波による圧力ステップ $\Delta P = 0.06 \sim 0.25 \text{MPa}$ の範囲の衝撃波）を気泡液体と気体の界面に作用させ、気泡液体中を伝播する衝撃波の特性について、系統的かつ詳細な実験を行い、明らかにする。具体的には、(1) 気泡液体中を伝播する衝撃波特性に及ぼす入射衝撃波圧力ステップの影響、(2) 理論モデルを作る際に重要となる衝撃波が通過した後の気泡の挙動（変形、崩壊など）、(3) 強い衝撃波波頭後方に現れる不規則な振動の要因を、詳細な圧力測定と高速度写真による気泡挙動観察を同時に行うことによって明らかにする。

## 2. 主な記号

$d_a$ : 気泡の平均直径  
 $PG$ : 圧力変換器  
 $P_0$ : 気中における入射衝撃波到達前の圧力 (図3参照)  
 $P_1$ : 気中における入射衝撃波背後の圧力  
 $P_2$ : 気泡液体の水面から反射する衝撃波背後の圧力  
 $P_i$ : 気泡液体中の衝撃波背後の平均圧力  
 $v$ : 気泡液体中の衝撃波伝播速度  
 $x$ : 気泡液体の水面から測った下方方向の距離 (図1参照)  
 $\alpha_0$ : 初期ボイド率  
 $\Delta P$ : 入射衝撃波圧力ステップ ( $=P_1 - P_0$ )

\* 原稿受付 2001年6月25日。

<sup>\*1</sup> 正員, 室蘭工業大学大学院 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)。<sup>\*2</sup> 正員, フェロー, 室蘭工業大学工学部。<sup>\*3</sup> 正員, 室蘭工業大学工学部。

E-mail: sugiyama@mmm.muroran-it.ac.jp

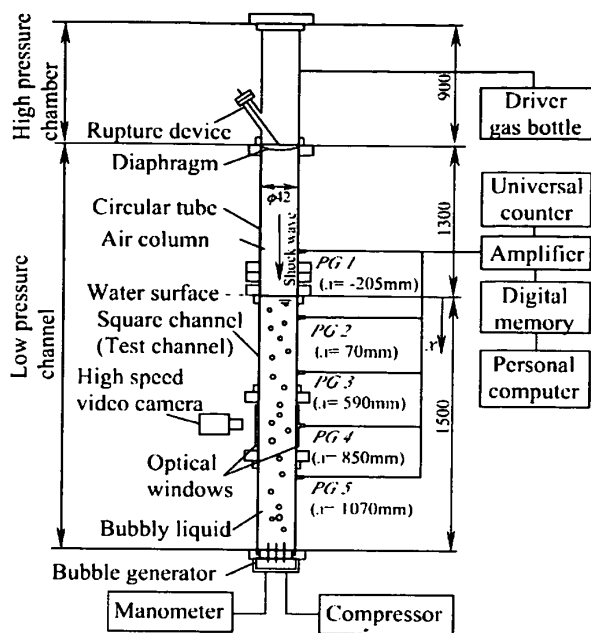
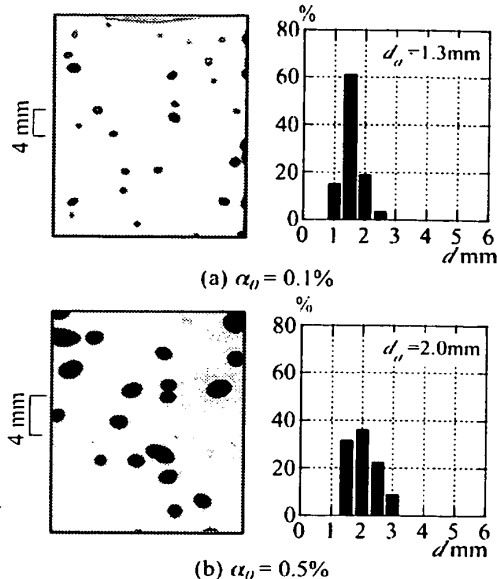


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

### 3. 実験装置および実験方法

図 1 に、本実験で用いた縦型の二相衝撃波管を示す。高圧室<sup>(12)</sup>と低圧室は薄い隔膜で隔てられており、電磁撃針で隔膜を破ると衝撃波が発生し、衝撃波は低圧室の中を下方へ伝播する。高圧室は、内径 42mm、長さ 900mm の円管である。低圧室は、内径 42mm、長さ 1300mm の円管と、一辺 37mm の正方形断面をもつ、長さ 1500mm の正方形管（測定部）より成る。測定部の下端から上方 650mm の位置にガラス窓が設けられており、気泡群の挙動が観察できるようになっている。測定部の下端には気泡発生装置が取り付けられており、コンプレッサから送られた圧縮空気を空気室に貯めた後、内径 0.13mm（あるいは 0.5mm）、長さ 50mm の数本のステンレス管を通して液相中に空気を送り込み、気泡を発生させる。液相媒体として精製水を用い、測定部に長さ約 1500mm の気泡を含む液体柱を作った。

気泡を含む液体中の衝撃波圧力波形の測定は、図 1 中に示す PG 2~PG 5 の 4 つの半導体圧力変換器（豊田工機 PMS-5-5M）により行った。圧力変換器 PG 1 は、入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、気泡液体の水面より上方 205mm の位置に設置した。圧力変換器出力は、直流増幅器（豊田工機 AA6210）を介しデジタルメモリ（岩崎通信機 DM7200 最大書き込み速度 10ns/Word、最大データ長 10bit×64kWord/ch）でデジタルデータに変換された

Fig. 2 Photographs of air bubbles and distribution of bubble diameters in the bubbly liquid. ( $\alpha_0 = 0.1, 0.5\%$ )

後、パーソナルコンピュータに保存される。

衝撃波が作用した際の気泡群の変形、崩壊過程を、高速度ビデオカメラ（PHOTRON FASTCAM-ultima-UV3）と、光源としてメタルハイドライト（PHOTRON HVC-SL）を用い、バックライトで撮影した。

本実験における入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P$  ( $=P_1 - P_0$ ) の範囲は 0.06~0.25MPa であり、比較的弱い衝撃波から比較的強い衝撃波まで 4 種の衝撃波を入射させた。

図 2 は、初期状態の気泡群の写真と気泡直径の分布図を示す。初期ポイド率  $\alpha_0$  は、測定部下端から 650mm の位置で撮影した影写真より求めたが、その値の範囲は 0.1~0.5% であった。なお、ポイド率の測定誤差は約 10% であり、管軸方向の気泡の空間分布およびポイド率分布はほぼ一定であることを確認している。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力特性

#### 4.1.1 気泡液体中の衝撃波圧力波形

図 3 に、入射圧力ステップ  $\Delta P = 0.19\text{MPa}$ 、初期ポイド率  $\alpha_0 = 0.5\%$  の場合の、気泡を含む液体中を伝播する衝撃波の圧力波形の典型例を示す。

水面（気液界面）から 205mm 上方に位置する圧力変換器 PG 1 で捉えた圧力波形から、気中における初期圧力  $P_0$ 、入射衝撃波背後の圧力  $P_1$ 、水面から反射した衝撃波背後の圧力  $P_2$  が読み取れる。なお、この実験条件の場合には、PG 1 の位置において、水面か

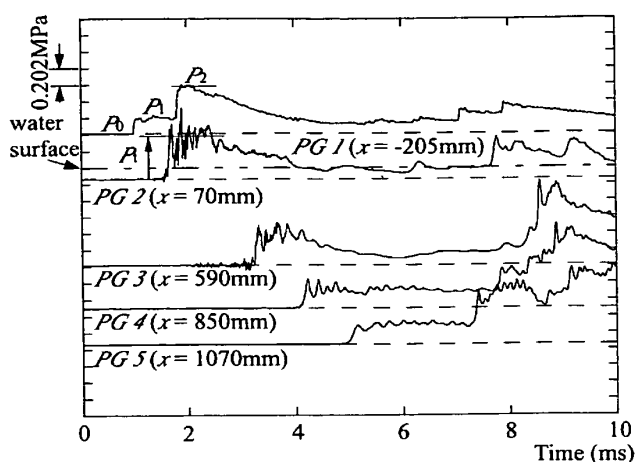


Fig.3 Typical pressure history in the bubbly liquid.

( $\Delta P = 0.19 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_0 = 0.5 \%$ )

ら反射してきた反射衝撃波到達直後に高压室管端から反射してきた膨張波が到達していることが分かる。

気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力は、圧力変換器 PG 2 ( $x = 70 \text{ mm}$ ) の位置において、衝撃波波頭で急激に上昇した後、不規則に激しく振動し、その後高压室側からの膨張波の影響で緩やかに減少している。PG 3 ( $x = 590 \text{ mm}$ ) における圧力波形から見られるように、衝撃波が気泡液体中を伝播するにつれ、衝撃波波頭における圧力上昇と衝撃波波頭後の高周波の圧力振動は減衰する。PG 4 ( $x = 850 \text{ mm}$ 、本衝撃波管の光学観測位置) において、衝撃波波頭後の圧力は比較的規則的に振動する。PG 5 ( $x = 1070 \text{ mm}$ ) においては、衝撃波圧力は波頭においてやや急激に上昇し、その後ほぼ規則的に振動するようになる。 $x = 850 \text{ mm}$ 、 $1070 \text{ mm}$  で見られる気泡液体中の衝撃波圧力波形は、従来調べられてきた弱い衝撃波の圧力振動とほぼ同様の傾向を示す<sup>(4)(6)</sup>。なお、 $x = 1070 \text{ mm}$  の位置の圧力波形において、測定部下端からの反射衝撃波による急激な圧力上昇が観察できる。

#### 4.1.2 気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力特性に及ぼす入射圧力ステップの影響

図 4 に、気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力特性に及ぼす入射衝撃波の圧力ステップ  $\Delta P (= P_1 - P_0)$  の影響を示す。実験は、初期ボイド率を一定 ( $\alpha_0 = 0.1\%$ ) とし、入射圧力ステップを  $\Delta P = 0.06 \sim 0.25 \text{ MPa}$  と変化させを行った。

図 4(a) に示すように、本実験では最も小さい入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P = 0.06 \text{ MPa}$  の場合には、水面 (気液界面) の近く  $x = 70, 590 \text{ mm}$  の位置において、衝撃波波頭における緩やかな圧力上昇に引き続いて周期の

長い振幅の小さい圧力振動が起きていることが分かる。 $x = 850, 1070 \text{ mm}$  と衝撃波が気泡液体中を伝播するにつれ、衝撃波強さは減衰し、衝撃波波頭におけるステップ的な圧力上昇は見られなくなり、圧力上昇は極めて緩やかに連続的に起きていることが分かる。

図 4(b) に、比較的小さい入射圧力ステップ  $\Delta P = 0.11 \text{ MPa}$  をもつ衝撃波が気泡液体柱に入射した際の、気泡液体中の衝撃波圧力波形を示す。この場合には、衝撃波が  $x = 70, 590, 850, 1070 \text{ mm}$  と伝播するにつれ、衝撃波波頭における圧力はステップ的な圧力上昇から緩やかな圧力上昇へ変化すること、衝撃波背後の圧力振動は不規則振動から比較的周期の長い規則的な圧力振動へと変化し、やがて圧力振動はなくなることが分かる。

図 4(c) に、比較的大きい入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P = 0.17 \text{ MPa}$  をもつ衝撃波が気泡液体柱に入射した際の結果を示す。この場合には、 $x = 70 \text{ mm}$  の位置において、衝撃波圧力は波頭において急激に上昇し、その後高周波数の不規則な圧力振動を伴うことがわかる。 $x = 590, 850, 1070 \text{ mm}$  と衝撃波が伝播するにつれ波頭における圧力上昇は緩やかになること、波頭後の圧力振動は比較的規則的振動に変化することが分かる。この図における注目すべき点は、 $x = 590 \text{ mm}$  の位置における圧力波形より、衝撃波が到達する前に圧力のプリカーサ (precursor) が発生している点である。ただし、このプリカーサは、 $x = 850 \text{ mm}$  の位置では減衰し、はっきり確認できなくなっている。なお、 $x = 1070 \text{ mm}$  の測定位置における圧力波形において、測定部下端からの反射衝撃波によるステップ的な圧力上昇が観察できる。

図 4(d) に、本実験では最も大きい入射圧力ステップ  $\Delta P = 0.25 \text{ MPa}$  をもつ衝撃波を入射させた場合の結果を示す。この場合には、 $x = 70, 590, 850, 1070 \text{ mm}$  のいずれの位置においても、衝撃波波頭で圧力はステップ的に急激に上昇していること、波頭背後で高周波数の不規則な圧力振動が生じていることが分かる。

以上、図 4(a)~(d) に示した結果より、気泡液体中を伝播する衝撃波圧力特性は、入射衝撃波の圧力ステップ  $\Delta P$  の大きさと、液面からの距離  $x$  によって大きく変化することが分かる。衝撃波が液面に入射した際に生じる液面の不安定性等の影響が小さくなる  $x = 590 \text{ mm}$  の位置における衝撃波圧力波形を比較すると、本実験では、入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P$  が  $0.11 \text{ MPa}$  以下の場合には衝撃波波頭後に規則的な圧力振動が現れること、 $\Delta P \geq 0.17 \text{ MPa}$  の場合には不規則な圧力振動が現れることが分かる。この不規則な圧力振

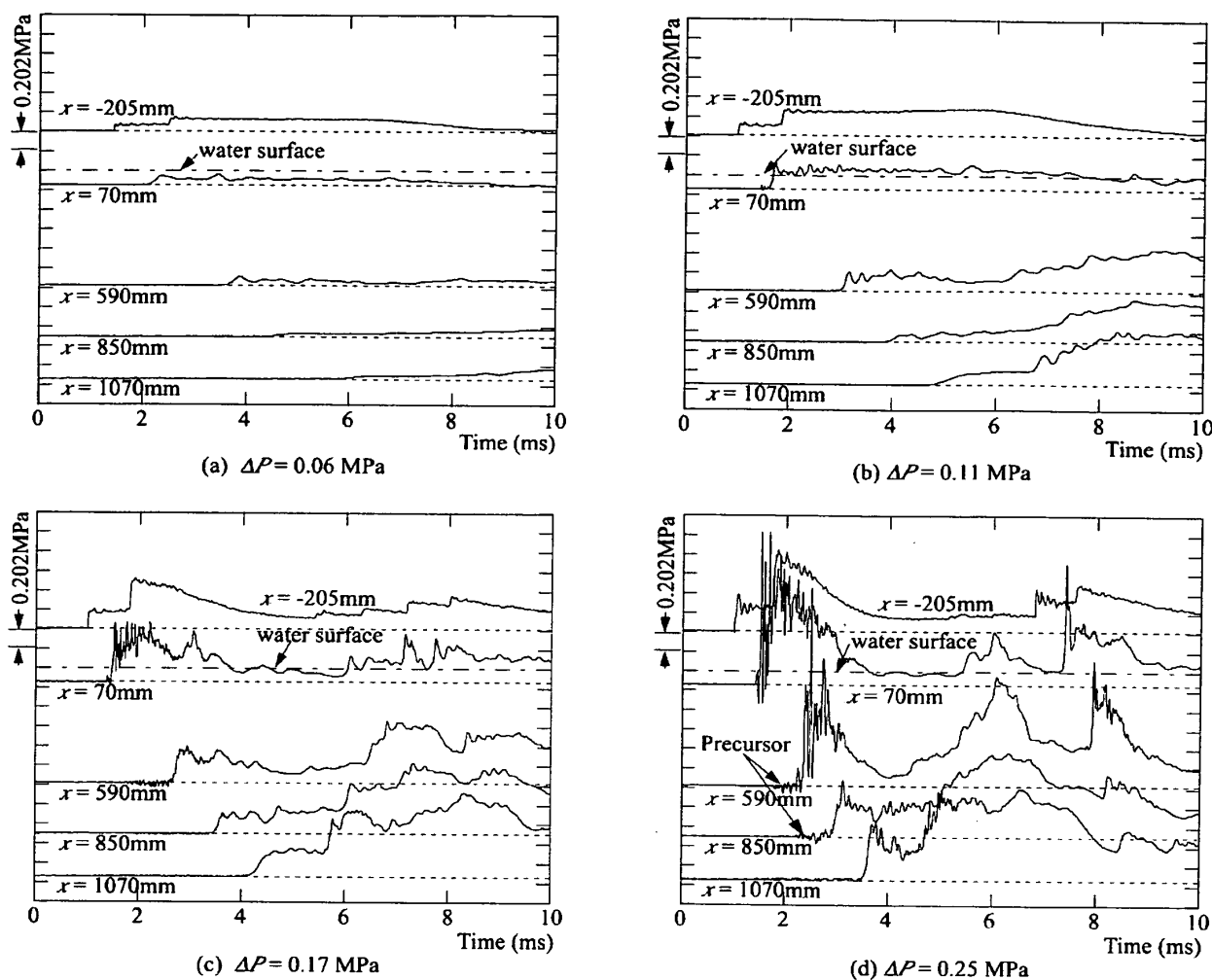


Fig.4 Effect of incident shock wave pressure steps on pressure histories in the bubbly liquid. ( $\alpha_0 = 0.1\%$ )

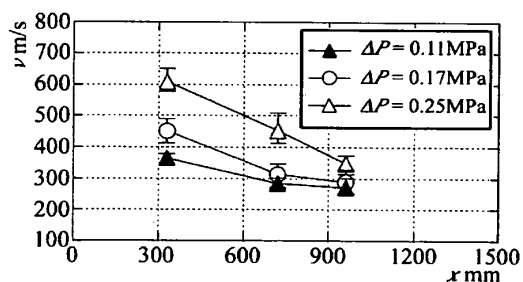


Fig.5 Effect of incident shock wave pressure steps on shock wave speed in the bubbly liquid. ( $\alpha_0 = 0.1\%$ )

動が現れる要因として、気泡群の変形・崩壊、圧力波の非線形性、気泡の空間分布の非一様性などが考えられるが、本論文では気泡群の変形・崩壊に着目して、その要因を次節 4.2 で検討することにする。

図 4(d)において、衝撃波に先立つ圧力のプリカーサに注目すると、圧力プリカーサは  $x = 590$ 、 $850$  mm の位置で発生していることが明瞭に分かる。この衝撃波の前方に発生するプリカーサは、高周波数で振動して

いること、伝播するにつれ急激に減衰すること、またプリカーサの伝播速度を波動線図 4(d)より調べてみると、プリカーサは液体（ここでは水）の音速（約 1400 m/s）に近い速度で伝播していることが分かる<sup>(14)</sup>。

図 5 は、衝撃波伝播速度に及ぼす入射圧カステップ  $\Delta P$  の影響について示す。気泡を含む液体中の衝撃波の伝播速度は、良く知られているように、液体（水）単相の場合と比べ遅くなる。比較的弱い衝撃波  $\Delta P = 0.11$  MPa (▲印) の場合、伝播速度は衝撃波が伝播するにつれ徐々に減少することが分かる。入射圧カステップが  $\Delta P = 0.17$ 、 $0.25$  MPa (○、△印) と衝撃波が強くなると、伝播速度は速くなること、また伝播速度の減少の割合は入射衝撃波圧カステップが弱い場合と比べ、大きくなっていることが分かる。

#### 4.2 強い衝撃波による気泡群の変形と崩壊

図 6 に、入射衝撃波圧カステップ  $\Delta P = 0.14$  MPa の比較的強い衝撃波を初期ボイド率  $\alpha_0 = 0.5\%$  の気泡を含む

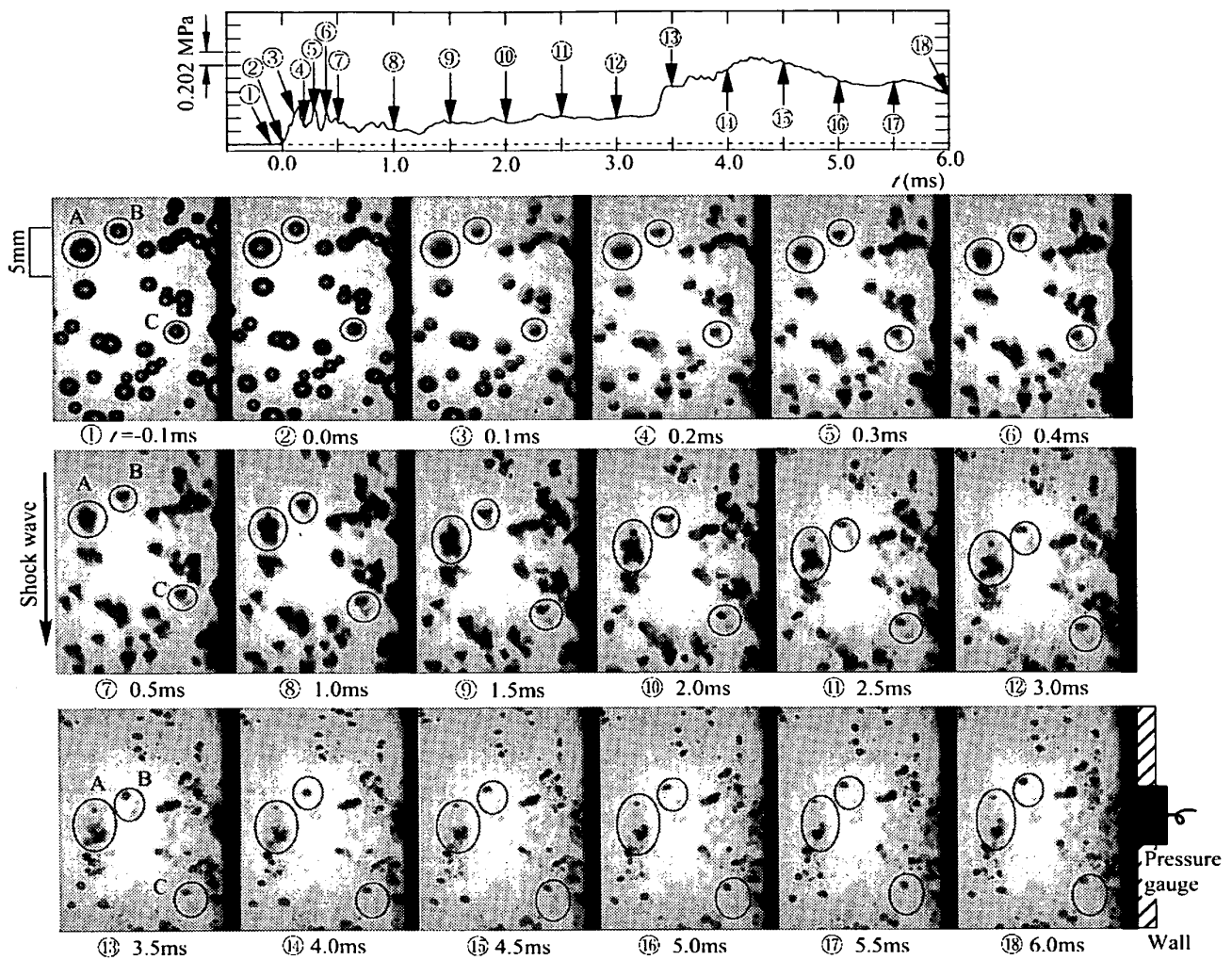


Fig 6 Sequential photographs of air bubbles collapsing at shock arrival in the bubbly liquid. ( $\Delta P = 0.14\text{MPa}$ ,  $\alpha_0 = 0.5\%$ )

液体柱に作用させた場合の、気泡群の挙動を示す高速度写真と同時測定した壁面圧力変動波形を示す。高速度写真の撮影位置は水面から下方  $x=850\text{mm}$  の位置で、撮影範囲は観測部中心（管軸付近）から圧力変換器が設置されている右側壁面近傍である。高速度写真は、高速度ビデオカメラを用い、撮影速度 9000 コマ/s、シャッター速度 500ns で撮影された。図 6 の上部に、同時測定した壁面圧力変動波形を示すが、横軸の経過時間  $t$  の始点は、衝撃波波頭が圧力変換器の設置位置に到達した時刻をとっている。圧力波形上に示された ①～⑱の時刻は各写真①～⑱の撮影時刻と対応している。写真① ( $t = -0.1\text{ms}$ ) は、衝撃波が観測地点に到達する前の気泡群の初期状態を示す。写真より直径 1~3mm の気泡群が存在していることが分かる。

まず、衝撃波が通過してから気泡群が全体的にどのように運動（移動）するかを調べる。各気泡は衝撃波が通過してから約 3ms 後（写真⑱）までは、衝撃波によって誘起された液体の流れの影響を受け下方に

約 4.5~7mm 移動するが、測定部下端から反射してきた衝撃波が観測地点に到達すると（写真⑫、⑬）、各気泡の動きは止まり、それ以後は上方に 0.5mm 程度わずかに移動することが分かる。

次に、図 6 中に示すように、管中心付近の気泡 A（直径約  $d = 2.5\text{mm}$ ）、気泡 B ( $d = 1.6\text{mm}$ )、壁面近くの気泡 C（約  $d = 1.4\text{mm}$ ）に着目し、衝撃波通過後の気泡の挙動を調べる。写真①、② ( $t = -0.1$ 、 $0.0\text{ms}$ ) は、衝撃波到達直前の気泡の状態を示す。写真③、④ ( $t = 0.1$ 、 $0.2\text{ms}$ ) は、衝撃波波頭通過直後の状態を示しているが、この写真より衝撃波通過後、気泡の上側の面は平坦になっていることが分かる。写真⑤ ( $t = 0.3\text{ms}$ ) で、各気泡はマイクロジェット<sup>(13)</sup>を発生していること、マイクロジェットの方向は気泡 A、B では衝撃波伝播方向、気泡 C では周囲の気泡の干渉を受け壁面方向であることが分かる。写真⑥、⑦、⑧より、衝撃波通過後  $t = 0.4$ ~ $1.0\text{ms}$  の時期で、各気泡は大きく変形、崩壊している。写真⑨、⑩、⑪、⑫よ

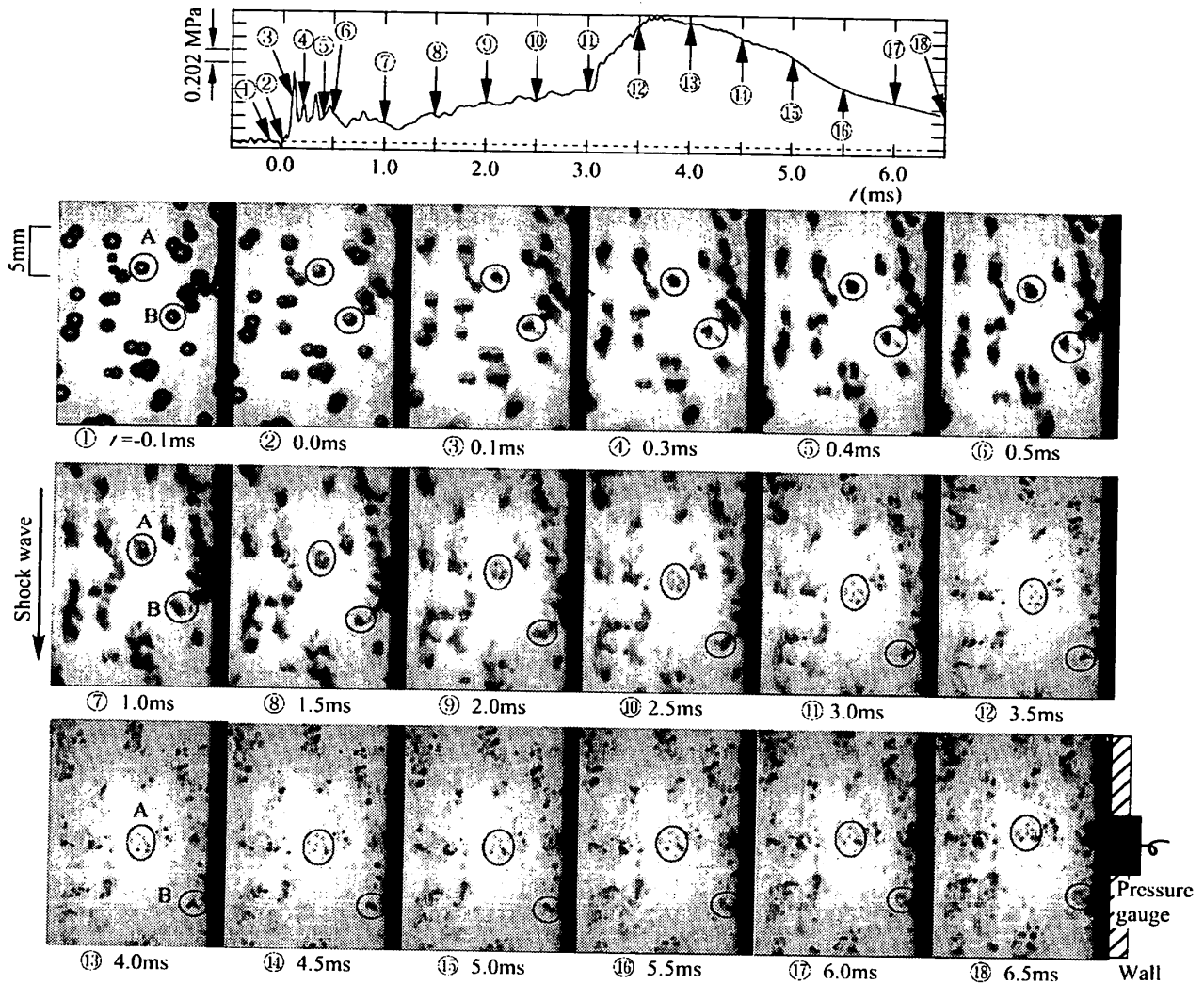


Fig. 7 Sequential photographs of air bubbles collapsing at shock arrival in the bubbly liquid. ( $\Delta P = 0.22\text{MPa}$ ,  $\alpha_0 = 0.5\%$ )

り、 $t = 1.5\text{--}3.0\text{ms}$  の時期で、比較的小さい気泡 B、C は 2 個の気泡に、比較的大きい気泡 A は複数個の微細な気泡に分裂していることが分かる。写真⑬~⑱ ( $t = 3.5\text{--}6.0\text{ms}$ ) より、観測部下端からの反射衝撃波が到達すると、分裂した微細気泡はさらに小さくなること、液体圧力が最高値になっている写真⑮ ( $t = 4.5\text{ms}$ ) 付近で各気泡は最小になっていること、その後の液体圧力の減少とともに各気泡の径は大きくなり、気泡は膨張しているのが分かる。

図 7 は、入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P = 0.22\text{MPa}$  の強い衝撃波を初期ボイド率  $\alpha_0 = 0.5\%$  の気泡液体に作用させた場合である。この場合には、図中に示した気泡 A、B に着目して気泡の挙動を観察すると、衝撃波波頭通過直後写真③ ( $t = 0.1\text{ms}$ ) でマイクロジェットが発生していること、写真④~⑥ ( $t = 0.3\text{--}0.5\text{ms}$ ) で各気泡は大きく変形、崩壊していること、写真⑦~⑪ ( $t = 1.0\text{--}3.0\text{ms}$ ) で各気泡は 2~数個の微細な気泡に分裂

していること、反射衝撃波到達後の写真⑫、⑬ ( $t = 3.5, 4.0\text{ms}$ ) で微細気泡はさらに小さくなっていること、⑭~⑱ ( $t = 4.5\text{--}6.5\text{ms}$ ) で液体圧力が減少するにつれ、気泡はわずかに膨張していることが分かる。なお、気泡 B は衝撃波通過後壁面方向に移動し、 $t = 3.0\text{ms}$  付近で壁面に衝突していることが分かる。

以上の結果より、衝撃波波頭後の不規則な激しい圧力振動の要因として、気泡群の変形・崩壊を挙げることができる。すなわち、気泡液体中を伝播する強い衝撃波の波頭直後の不規則な激しい圧力振動は、気泡変形、気泡が発生するマイクロジェット、気泡が大きく変形・崩壊することと密接に結びついている。なお、この強い衝撃波背後の不規則な圧力振動の発生原因とその特性を十分解明するためには、本実験データ等に基づいた物理・数学モデル、数値解析、さらに精緻な実験的研究が必要であろう。

## 5. 結 言

本論文では、気泡を含む液体中を伝播する比較的弱い衝撃波から比較的強い衝撃波の圧力特性と衝撃波背後の気泡の挙動の関連性について、系統的かつ詳細な実験を行い、明らかにした。具体的には、縦型の二相衝撃波管を用い、比較的弱い衝撃波から比較的強い衝撃波（ここでは、入射衝撃波による圧カステップ $\Delta P = 0.06\text{--}0.25\text{MPa}$ の範囲の衝撃波）を、気泡（空気泡）を含む液体（水）柱に入射させ、衝撃波圧力特性に及ぼす衝撃波圧カステップ強さの影響を実験的に明らかにした。具体的に述べると、次のようになる。

- (1) 弱い衝撃波（入射衝撃波圧カステップ $\Delta P = 0.11\text{MPa}$ 以下）が気泡液体中を伝播する際、衝撃波波頭における圧力は、ステップ的な圧力上昇から緩やかな圧力上昇へ変化する。衝撃波波頭後の圧力は、比較的規則的に振動する。
- (2) 強い衝撃波（ここでは、 $\Delta P = 1.7\text{MPa}$ 以上）が気泡液体中を伝播する際、初期の段階において（ここでは、液面からの距離  $x=590\text{mm}$ ）、衝撃波波頭後に高周波の不規則な激しい圧力振動が現れる。
- (3) 強い衝撃波が気泡液体中を伝播する際、衝撃波に先立って圧力のプリカーサが明瞭に出現する。この圧力のプリカーサは、高周波数で振動し、液相（ここでは水）の音速に近い速度で伝播する。

次に、比較的強い衝撃波（ここでは $\Delta P = 0.14\text{--}0.22\text{MPa}$ ）を気泡液体中に入射させ、衝撃波通過後の気泡の挙動と圧力振動の関連性を、高速度写真と圧力測定により実験的に明らかにした。具体的に述べると、次のようになる。

- (1) 強い衝撃波波頭通過後に、気泡は変形、マイクロジェットを発生、引き続いて大きく変形、崩壊し、その後多数の微細な気泡に分裂していく。
- (2) 気泡液体中の強い衝撃波波頭後に現れる不規則な激しい圧力振動は、気泡の変形、マイクロジェットの発生、気泡形状の大きな変形・崩壊と密接に結びついている。

## 文 献

- (1) Padmanabhan, M. and Martin, C.S., Shock-Wave Formation in Flowing Bubbly Mixtures by Steeping of Compression Waves, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.4(1978), 81-88.
- (2) Akagawa, K. and Fujii, T., Development of Research on Water Hammer Phenomena in Two-Phase Flow, Proc. of 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 22-27, 1987, Honolulu, Hawaii, 333-349.
- (3) Gubaidullin, A. A., Shock Wave Phenomena in Bubbly Liquids, Proc. of 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow 95- Kyoto, April 3-7, 1995, PH2-3-PH2-8.
- (4) Kameda, M. and Matsumoto, Y., Shock Waves in a Liquid Containing Small Gas Bubbles, *Phys. Fluids*, Vol.8. No.2(1996), 322-335.
- (5) Van Wijngaarden, L., One-Dimensional Flow of Liquids Containing Small Gas Bubbles, *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, 4(1972), 369-396.
- (6) Watanabe, M. and Prosperetti, A., Shock Waves in Dilute Bubbly Liquids, *J. Fluids Mech.*, Vol.274(1994), 349-381.
- (7) Beylich, A. E. and Gulhan, A., On the Structure of Nonlinear Waves in Liquids with Gas Bubbles, *Phys. Fluids A*, Vol.2, No.8(1990), 1412-1428.
- (8) Beylich, A. E., Pressure Waves in Bubbly Liquids, Proc. of IUTAM Symp. on Waves in Liquid / Gas and Liquid / Vapor Two-Phase Systems, May 9-13, 1994, Kyoto, Japan, 1-20.
- (9) 吉永隆夫, 気泡流体中の強い衝撃波の伝播, RIMS Kyoto Univ. 908 (1995), 94-102.
- (10) 吉永隆夫・中野史郎, 気泡流体中における衝撃波波頭後方での不規則波列の振る舞い, 日本流体力学会年会講演会講演論文集, (1999), 123-124.
- (11) Sugiyama, H., Ohtani, K., Mizobata, K. and Arai, T., Shock Propagation and Bubble Collapse in Two-Phase Fluids, Proc. of FEDSM99, 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, July 18-23, 1999, San Francisco, California, USA, 6896.
- (12) 杉山弘・田中徹男・小原哲郎・千場紀樹・奥田教海, 衝撃波による複数空気泡の崩壊に関する一実験, 機論, 53-495, B(1987), 3141-3145.
- (13) 小原哲郎・杉山弘・新井隆景・平岩恒二, 弱い衝撃波と気泡の干渉に関する一実験（単一および2個気泡の崩壊時に発生する液体マイクロジェットの挙動）, 機論, 56-526, B(1990), 1583-1587.
- (14) 大谷清伸・杉山弘・溝端一秀・大石聖史, 気泡を含む液体中を伝播する衝撃波現象, 平成11年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (2000), 205-208.