衝撃波による複数空気泡の崩壊に関する一実験*

杉山 弘^{*1}, 田中 徹男^{*2}, 小原 哲郎^{*2}
干場 紀樹^{*3}, 奥田 教海^{*1}An Experimental Study on the Collapse of Multiple Air Bubbles
by a Shock WaveHiromu SUGIYAMA, Tetsuo TANAKA, Tetsuro OBARA,
Noriki HOSHIBA, and Kyokai OKUDA

An experimental study was made on the collapse of multiple air bubbles by a shock wave using a water shock tube and a high speed camera. High speed schlieren photographs show the processes of a high pressure region formation or of shock wave formation near multiple air bubbles when they rebound. Two impulsive pressures, 0.72 and 1.75 MPa, were applied to multiple air bubbles with an initial radius of about 1.2 mm. It is shown that in the case of impulsive pressure 1.75 MPa, the multiple air bubbles produce weak shock waves around themselves when they rebound.

Key Words: Cavitation, Bubble Collapse, Shock Wave, Water Shock Tube, Impulsive Pressure, High-speed Photograph

1. ま え が き

液体中の気泡崩壊現象は、キャビテーションによる損傷メカニズムの解明と主に関連し、多く研究されているが、気泡崩壊現象が空間的、時間的にミクロな現象であるうえに、確率的挙動を示すためまだ十分解明されていない⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、ごく最近、レーザホログラフィー干渉計⁽³⁾や超高速度カメラ⁽⁴⁾による気泡挙動および気泡崩壊時に発生する衝撃波や液体マイクロジェットの観察、高周波応答性を持つ圧力センサによる気泡崩壊時の衝撃圧力の検出⁽⁵⁾、インジウム上のキャビテーション損傷ピットの顕微鏡写真観察⁽⁴⁾などにより、静止流体中の単一気泡崩壊現象、特に単一気泡崩壊時の衝撃圧発生メカニズムと衝撃圧力の大きさの程度などについて明らかにされつつある。

さて、実在のキャビテーション気泡による損傷メカニズムや気泡を含む固体爆薬の爆発機構の解明などにおいて重要な衝撃波による複数気泡の崩壊については、液体衝撃波管を用いた水中の複数水素気泡⁽⁶⁾、水

中およびグリセリン中の空気泡⁽⁷⁾、フロン中の複数蒸気泡⁽⁸⁾の観察、複数空気泡と水中放電による球状衝撃波の干渉⁽⁹⁾、超音波振動子まわりの気泡群の挙動の観察⁽¹⁰⁾、およびゼラチン中の円筒状気泡列と平面衝撃波の干渉の観察⁽¹¹⁾などの実験的研究や、2気泡間の干渉に関する理論的研究⁽¹²⁾があるが、まだ、研究例は少なく、十分解明されていない。今後、衝撃波による複数気泡の崩壊現象を解明するためには、作用衝撃圧、初期気泡状態などを従来の研究のそれと変えて、多く研究を行う必要があると思われる。

本研究では複数気泡の崩壊現象の解明に関する研究の第一段階として、衝撃波による大気圧下での複数空気泡の崩壊現象、特に再膨張時の高圧力場と衝撃波発生過程を、液体衝撃波管と超高速度カメラ(イメコン790)を使用して、実験的に調べる。

2. 実験装置と実験方法

図1に本実験に使用した液体衝撃波管と測定系の概略を示す。液体衝撃波管の高圧室は円管(長さ0.9 m, 内径42 mm)で、低圧室は、円管(長さ1.2 m, 内径42 mm)、断面形状が円形から正方形に変わる遷移部(長さ0.1 m)、正方形管(長さ0.7 m, 一辺の長さ37 mm)と光学ガラスが取り付けられている観測部(長さ

* 昭和62年8月20日 第65期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月2日。

^{*1} 正員、室蘭工業大学(〒050 室蘭市水元町27-1)。

^{*2} 学生員、室蘭工業大学大学院。

^{*3} 学生員、室蘭工業大学。

0.3 m, 一辺の長さ 37 mm) より構成されている。高压室には、電磁撃針装置が取り付けられている。

気泡の挙動と、気泡が発生する衝撃波は、図 1 に示すような、遅延回路装置, Xe フラッシュ光源 (持続時間 200 μ s), シュリーレン光学系, 超高速カメラ (Imacon 790 John Hadland Ltd.) を用いて観察した。また気泡観察と同時に圧力変換器 (豊田工機製, PMS 5-50 H), デジタルメモリ (岩崎通信, DM-7100, 1 μ s/Word), マイクロコンピュータを用いて気中および液中の衝撃波速度と強さの測定を行った。

実験方法は次のとおりである。まず、観測部に設定水位 h (図 2) になるまで水 (通常の水道水) を入れ、管底部の注射針より空気 (観測部に入る前の圧力, 約 200 kPa) を入れ空気を含む水柱をつくる。次に、高压室にヘリウムガスを 0.70, 1.70 MPa まで充てんし、電磁撃針でマイラ (厚さ 0.075 mm) を破膜し、気中で衝撃波を発生させた。そして、衝撃波を、空気を含む水中に入射させ、複数空気泡の崩壊過程を前述の超高速カメラでとらえた。

本実験では、室温 (293 K), 大気圧 (101.3 kPa) 下での水中の複数空気泡 (初期気泡半径 $R_0=1.2\sim1.3$ mm) に、気中での衝撃波マッハ数 $M_s=1.64, 1.95$ の衝撃波を作用させ、複数空気泡の崩壊過程を調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 作用衝撃圧力の特性 衝撃波による気泡の崩壊現象を調べる際には、作用衝撃圧力の特性 (作用衝撃圧力の立上り時間, 大きさ, 持続時間など) と気泡の初期状態を知る必要がある。本節では、本実験での

作用衝撃圧力の特性について調べる。

図 2, 5 に、気中での入射衝撃波マッハ数 $M_s=1.64, 1.95$ の衝撃波 (I. S. W.) を水中に入射させた場合の気中 (水面から 45 mm 上方の位置) および水中 (水面から 25 mm 下方の位置, すなわち気泡観測点) で圧力変換器 (図 2 中の P. G. 1, P. G. 2) を用いて測定した衝撃圧力を示す。この衝撃圧力波形は、直径 5 mm の円形受圧面, 公称周波数特性 40 kHz を持つ圧力センサで検出されたものであることより、水中では、真の衝撃圧力波形からずれている (応答時間に関し 30 μ s 程度の遅れがある) と考えられるが、大略的には正しいであろう。気泡観測点における衝撃圧力の程度を見積もと次のようになる。水面から気泡観測点までの距離が 25 mm と短いため、気泡観測点での衝撃圧力の

図 1 液体衝撃波管と測定系の概略

図 2 気中および水中での衝撃圧力の時間的変化 ($M_s=1.64$)

 図 3 衝撃波通過後の複数気泡の挙動 ($M_s=1.64$, こま間隔: $10 \mu s$, 露出時間: $2 \mu s$)

きさ P_w は、気中での反射衝撃波 (R. S. W.) 背後の圧力 P_0 にほぼ等しいと考えられる。なお、気中での反射衝撃波背後の圧力 P_0 は、入射衝撃波マッハ数 M_s から計算される値と等しいことを確認している。以上より、図 2 の気中での入射衝撃波マッハ数 $M_s=1.64$ の場合には、立上り速度約 $7 \text{ kPa}/\mu s$ 、衝撃圧力の大きさ 0.72 MPa のステップ状衝撃圧力が気泡観測点に作用していると見積もられる。持続時間は約 2 ms である。また、図 5 の $M_s=1.95$ の場合には、立上り速度約 $13 \text{ kPa}/\mu s$ 、衝撃圧力の大きさ 1.38 MPa のステップ状衝撃圧力が気泡観測点に作用していると見積もられる。持続時間は約 1 ms である。

3.2 作用衝撃圧力が弱い場合 図 3 (a), (b) に、図 2 に示した衝撃波マッハ数 $M_s=1.64$ の場合、いわゆる弱い衝撃圧力が作用した場合の複数空気泡の挙動の高速度連続シュリーレン写真を示す (写真の視野は図 2 の左側に示す点線で囲まれた部分である。他の場合も同様である。)。図 3 (a) の高速度写真の撮影タイミングは図 2 に示されている。図 3 において、こま間隔は $10 \mu s$ であり、露出時間は $2 \mu s$ である。

図 3 (a) の 1 こまめから 3 こまめで入射衝撃波通過前後の気泡の形状 (だ円体形状) と大きさがわかる。図 3 (a) に示すように上から順に気泡 A1, A2 と名付けると気泡 A1, A2 の初期気泡半径 R_0 (球状気泡の体積に換算した場合の等価半径) は $R_0=1.3, 1.2 \text{ mm}$ である。2, 3 こまめで入射衝撃波が観察できる。写真より読取った水中での入射衝撃波の速度は 1490 m/s である。時間の経過とともに気泡は収縮してゆき、気泡 A1 は 8 こまめ (衝撃波通過後約 $60 \mu s$) で最小径になる。気泡半径 R と時間 t の関係を図 4 に示す。ここで R は等価半径であり、時間の基準は 1 こまめである。図 4 より、衝撃圧力 $P_w=0.72 \text{ MPa}$ が作用した場合には、初期気泡半径 $R_0=1.3 \text{ mm}$ の気泡 A1 は

 図 4 衝撃波通過後の気泡半径 R の時間的变化 (図 3 (a), $P_w=0.72 \text{ MPa}$ の場合)

$60 \mu s$ 後に最小半径 $R_{\min}=0.8 \text{ mm}$ (すなわち、 $R_{\min}/R_0=0.62$) になる。同条件での単一気泡の理論崩壊時間は約 $40 \mu s$ であることより、複数気泡の場合には崩壊時間は長くなることがわかる。

図 3 (b) に、図 3 (a) の場合より撮影タイミングを遅らせて撮影した場合の高速度写真を示す。図 3 (b) に示すように上から順に気泡 B1, B2, B3 と名付ける (以下同様に名付ける)。気泡 B1 は 1 こまめ (衝撃波通過後約 $60 \mu s$) で最小径に達し、その周囲に液体の高密度の領域すなわち高圧力場 (図 3 (b) 中において H. P. R. で示す) を作り出しているが、気泡は衝撃波を発生させていないことがわかる。その後気泡 B1 は再膨張し、5 こまめで最大半径約 $R_{\max}=1 \text{ mm}$ に達し、再収縮する。再収縮の際 (5 こまめで)、下方 (衝撃波伝ば方向) に突出部を発生している。気泡 B2 は 4 こまめ、気泡 B3 は 6 こまめで、最小径に達し、その後膨張する。図 3 (b) の気泡 B1, ~B3 は、上から順す

なわち入射衝撃波が通過した順に崩壊し、再膨張する。また、いずれの気泡も再膨張する際、その周囲に高圧力場 (H. P. R.) を作り出していることがわかる。

3・3 作用衝撃圧力が強い場合 図 6 (a)～(c) に、図 5 に示す $M_s=1.95$ の衝撃波を水中に入射させた場合、すなわち強い衝撃圧力 $P_w=1.38$ MPa を作用させた場合の複数空気泡の挙動を示す高速度連続シュリーレン写真を示す。図 6 (a) の高速度写真の撮影タイミングは図 5 に示されている。こま間隔は $5\mu\text{s}$ であり、露出時間は $1\mu\text{s}$ である。図 6 (a) の 1 こまめの下部に入射衝撃波が観察できることより、1 こまめの写真は、衝撃波通過直後の気泡の状態を示していることがわかる。気泡 A1～A5 の初期形状はだ円体であり、初期気泡等価半径は $R_0=1.2\sim 1.3$ mm である。時間が経過するにつれて、各気泡は収縮する。気泡 A1 は、7 こまめ (気泡を衝撃波が通過後約 $40\mu\text{s}$) で、最小径に達し、再膨張を始める。気泡 A1 の崩壊時間は約 $\tau_c=40\mu\text{s}$ である。同条件での単一気泡の崩壊時間は約 $30\mu\text{s}$ であることより、複数気泡の場合には崩壊時間は長くなっていることがわかる。気泡 A2 は 9 こまめ (紙面の都合上省略) で最小径に達している。

図 6 (b) に、図 6 (a) の場合より撮影タイミングを約 $40\mu\text{s}$ 遅らせて撮影した場合の気泡の挙動を示す。1 こまめで気泡 B1 は再膨張を開始し、その周囲に高圧力場 (H. P. R.) を形成し、2 こまめでこの高圧力場は球状衝撃波 (S. W.) に移行している。これは非常に興味深い写真である。3, 4 こまめで、気泡 B1 より発生した衝撃波は、気泡 B2 を通過しているが、気泡

B2 は気泡 B1 からの衝撃波が通過しても、直ちに急収縮していない。気泡 B2 は 7, 8 こまめで最小径に達しその周辺に高圧力場 (H. P. R.) を作り出している。

図 6 (c) に図 6 (b) と同じ撮影タイミングで撮影した高速度写真の別の例を示す。1 こまめ (入射衝撃波が通過してから約 $40\mu\text{s}$ 後) で、気泡 C1 から発生した衝撃波が気泡 C2 を通過した直後の状態を示す。この場合、気泡 C2 は最小径に達し高圧力場 (H. P. R.) 場を発生している。2 こまめで、この高圧力場は衝撃波 (S. W.) に移行している。この写真も興味深い写真であ

図 5 気中および水中での衝撃圧力の時間的変化 ($M_s=1.95$)

図 6 衝撃波通過後の複数気泡の挙動 ($M_s=1.95$, こま間隔: $5\mu\text{s}$, 露出時間: $1\mu\text{s}$)

図 7 衝撃波通過後の気泡半径 R の時間的变化
〔図 6 (a), $P_w=1.38$ MPa の場合〕

る。この写真では、気泡 C1 より発生した衝撃波が、気泡 C2 に作用した直後に気泡 C2 が崩壊したように見られるが、図 6 (b) の気泡より発生した衝撃波と気泡の干渉結果を考えると入射衝撃波による気泡 C2 の崩壊と気泡 C1 から発生した衝撃波がたまたま一致したと見るのが妥当であろう。3 こまめ以後、気泡 C2 は、へん長（縦長）に膨張していくのが観察される。

図 7 に、図 6 (a) の高速度連続写真より読取った複数気泡の気泡等価半径 R の時間的变化を示す。時間基準としては、図 6 (a) の 1 こまめを $t=0 \mu s$ としている。図 7 より、上側に位置する気泡 A1, A2 は急速に収縮していくが、下側の気泡 A3~A5 は急速には収縮していかない（ただし、気泡 A5 の実験点のプロットは省略されている）。これは、入射衝撃波が下方に伝ばするにつれ、入射衝撃波の持っているエネルギーが気泡および液体の運動および熱エネルギーに変換され、入射衝撃波が弱くなっていくためと考えられる。初期気泡半径 $R_0=1.2$ mm の気泡 A1 は、約 $40 \mu s$ 後に最小半径 $R_{min}=0.3$ mm、すなわち $R_{min}/R_0=0.25$ に到達し、その後再膨張する。図 7 と図 4 を比較して、作用衝撃圧力が大きいほど、気泡崩壊は急速に進み、気泡の到達最小半径は小さくなることがわかる。またその結果、作用衝撃圧力が大きいほど、気泡に集中するエネルギーは大きくなり、再膨張の際、気泡は衝撃波を発生することがわかる。

4. ま と め

液体衝撃波管を用いて発生させたステップ状の衝撃圧力を、水中の複数空気泡に作用させ、その崩壊過程を超高速カメラで調べた。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 衝撃波による複数空気泡の崩壊過程、特に再膨張時に発生する気泡周囲の高圧力場の形成、および高圧力場から衝撃波生成に移る過程を高速度連続シュリーレン写真でとらえた。

(2) 入射衝撃波は、気泡を含む水中を伝ばするにつれ、弱くなる。それゆえ、入射衝撃波が初めに通過した気泡は、後から通過した気泡に比べ、入射衝撃波の影響を強く受ける。

(3) 本実験では、弱い衝撃圧力（衝撃圧力 $P_w=0.72$ MPa）と強い衝撃圧力（ $P_w=1.38$ MPa）を、複数空気泡（大気圧下での初期気泡等価半径 $R_0=1.2\sim 1.3$ mm）に作用させた。前者の場合には、気泡の崩壊時間 τ_c は約 $60 \mu s$ であり、気泡崩壊時の最小半径は $R_{min}/R_0=0.62$ であり、再膨張の際気泡はその周囲に高圧力場を発生する。後者の場合には、 $\tau_c=40 \mu s$, $R_{min}/R_0=0.25$ であり、再膨張の際、気泡は弱い衝撃波を発生する。なお、本実験での複数気泡の崩壊時間は、同条件での単一気泡の理論崩壊時間より長くなる。

終わりに、本実験に対し助言された室蘭工業大学機械工学科 山岸英明助手、高橋敏則技官、および実験に協力された室蘭工業大学 機械工学科当時学生、石井清勝、中山正治、矢島祐二の三君に謝意を表します。

文 献

- (1) 島・富田、ターボ機械、2-3 (昭 49), 252.
- (2) 藤川・赤松、機論、50-450, B (昭 59), 293.
- (3) 真田・ほか 3 名、機論、52-480, B (昭 61), 2779.
- (4) Tomita, Y. and Shima, A., *J. Fluid Mech.*, **169** (1986), 535.
- (5) 木本・ほか 3 名、機論、52-484, B (昭 61), 3843.
- (6) Fujikawa, S. and Akamatsu, T., *Bull. JSME*, **21**-152 (1978), 223.
- (7) 長谷川・ほか 2 名、日本航空宇宙学会誌、30-342 (昭 57), 430.
- (8) Tepper, W., *Proc. 14th Int. Symp. Shock Tubes and Waves*, (1983), 397.
- (9) Tomita, Y., ほか 2 名、*J. Appl. Phys.*, **56**-1 (1984), 125.
- (10) 真田・ほか 3 名、機論、50-458, B (昭 59), 2275.
- (11) Dear, J. and Field, J. (Murai, H. ed.), *Proc. Int. Symp. Cavitation*, **1** (1986), 89.
- (12) Fujikawa, S., ほか 3 名 (Murai, H. ed.), *Proc. Int. Symp. Cavitation*, **1** (1986), 55.