

Fig. 1 Experimental arrangement for high-speed photogrammetry.

る。

2. 実験装置および方法

実験は水道水で満たされた試験水槽 (245mm×345mm×400mm) 内で行う。気泡を付着させる平面壁には市販のゼラチン (和光一級) を用いる。重量パーセントは10%で、このときの音響インピーダンスは $1.62\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ である⁴⁾。ゼラチンは333Kの水で融解し、内面を薄いプラスチック膜で皮膜された容器に型入する。ゼラチンの収縮を避けるためにゆっくりと冷却し、固化後、試験片に切断する。アクリル板にゼラチンを付着させた後、ゼラチン面を水中に浸す。ゼラチンは水に浸すと膨潤するので、実験の浸水時間をすべて10分以内に抑えた。次に注射器で2個の空気泡を距離2Sだけ間隔をおいてゼラチン壁に付着させ、それらの大きさ、位置、および奥行きを水槽下壁側に配置した鏡と高速度カメラのファインダースクリーンを通して注意深く設定した。衝撃波源に中国化薬(株)提供のアジ化銀ペレット10mgを使用し、これを気泡間の中心軸鉛直下、距離 $L=50\text{mm}$ に設置する。起爆には内径0.4mmのガラスファイバーを介したパルスYAGレーザー光 (パルス幅7ns, エネルギー25mJ)を用いる。また、Fig. 1に示すように距離Lに圧力変換器 (Kistler Model 603B, 固有振動数400kHz)を置き、気泡への

作用圧を検知した。気泡に作用する水中衝撃波の作用圧 P_s は $14.75 \pm 0.05\text{MPa}$ である。気泡の崩壊の様相は閃光時間 $400\mu\text{s}$ のXeフラッシュを光源に高速度撮影 (John Hadland790) する。撮影方法には透過法を採用する¹⁰⁾。実験時の水温は $T_\infty=291\text{K}$ 、大気圧は $P_\infty=101.5\text{kPa}$ である。ゼラチン壁の厚さをそれぞれ7mm, 8mm, 10mmと変化させた際、気泡の挙動に特異な変化は認められず、ゼラチンの厚みが極めて薄い場合を除きある厚さ以上では気泡の崩壊挙動はゼラチン壁の厚さに依存しない。本実験ではゼラチンの厚さを10mmとした。

3. 結果および考察

Fig. 2にゼラチン壁面に付着した同じ直径の2つの気泡の崩壊の様相を示す。2つの気泡のうち左側の気泡に相当する物理量を添え字1、右側の気泡を添え字2で表現する。2つの気泡の初期直径 D_1, D_2 はそれぞれ1.81mm, 気泡間距離 $2S$ は2.55mm, 撮影のこま間隔は $40\mu\text{s}$ である。2つの気泡間の中心軸、鉛直下 $L=50\text{mm}$ に位置する衝撃波源から開放された球状衝撃波は気泡と干渉したのち、ゼラチン層内を伝播する。一方、干渉を受けた2つの気泡は気泡間の液体の流れが拘束されているために気泡中心から遠い気泡壁が速く崩壊し、液体ジェットは中心軸に向かい形成される。次に、気泡間距離を増加させたときの気泡崩壊の様相をFig. 3に示す。 D_1, D_2 はそれぞれ1.66mmで、 $2S$ は16.1mmである。Fig. 2と対称的に2つの液体ジェットが中心軸から離れる方向に形成される。したがって、液体ジェットの形成角度は気泡直径が同じ場合、気泡間距離に依存し変化する。そこで、 D_1, D_2 をそれぞれ $1.76 \pm 0.12\text{mm}$ 一定とし、気泡間距離を変化させて液体ジェットの形成角度の変化を調べる。まず、Fig. 4に示すように衝撃波源から左側の気泡に衝撃波が伝播する角度を $\phi (= \tan^{-1} S/L)$ 、液体ジェットの形成角度を θ とする。

Fig. 5に衝撃波の入射角度と液体ジェットの形成角度との関係を示す。また、右側の気泡が存在しない

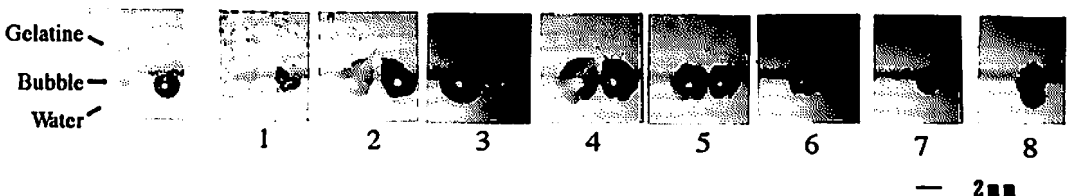


Fig. 2 Two bubbles collapsing by an underwater shock wave loading. The shock wave is loaded on the two bubbles from below at $P_s=14.75 \pm 0.05\text{MPa}$.
 $D_1=1.81\text{mm}, D_2=1.81\text{mm}, 2S=2.55\text{mm}$.
 Interframe time $40\mu\text{s}$.

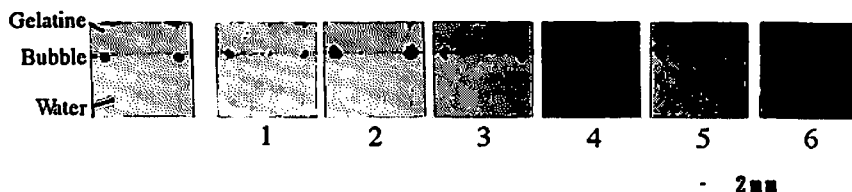


Fig. 3 Two bubbles collapsing by an underwater shock wave loading. The shock wave is loaded on the two bubbles from below at $P_s = 14.75 \pm 0.05 \text{ MPa}$.
 $D_1 = 1.66 \text{ mm}$, $D_2 = 1.66 \text{ mm}$, $2S = 16.1 \text{ mm}$.
 Interframe time $40 \mu\text{s}$.

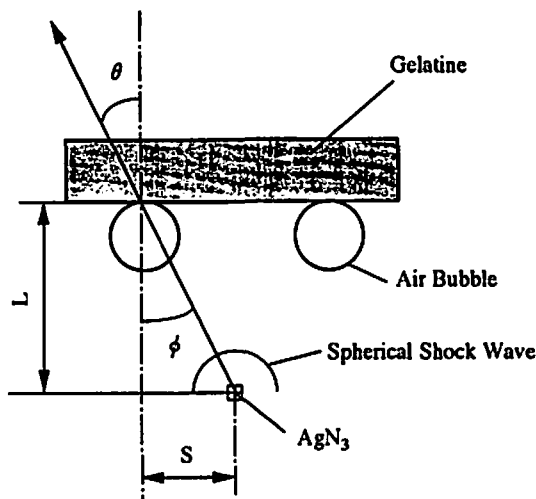


Fig. 4 Geometric parameters describing the incident angle ϕ of the spherical shock wave and the jet angle θ of the collapsing bubble.

場合、つまり、単一気泡の崩壊で形成される液体ジェットの場合も同Figに示す。Fig. 5から単一気泡の場合には液体ジェットの角度は衝撃波の伝播方向に一致するが、2つの気泡の場合には、気泡間距離が増加するにつれて液体ジェットの形成角度は中心軸へ向かう方向から離反する方向に変化し、入射角度が 6° 、つまり気泡間距離が 10.5 mm （気泡半径の約12倍）以上で単一気泡のジェット角度に一致し、このとき気泡の相互干渉は消滅する。Tomita et al.(19)は圧力変換器に付着した大きさの等しい2つの気泡と水中衝撃波との相互干渉を実験し、圧力変換器に記録される衝撃圧測定から、気泡半径の4倍以上で相互干渉の影響はないものと判断した。この値は本実験で得た気泡の相互干渉が消滅する距離の1/3である。この違いはTomita et al. で使用した圧力変換器の立ち上がりは時間 $1 \mu\text{s}$ で、微小領域に集中する持続時間が短い気泡崩壊の衝撃圧とその指向性を十分分解できないことに起因すると考えられる。ゼラチンは透明媒体で、液体ジェット

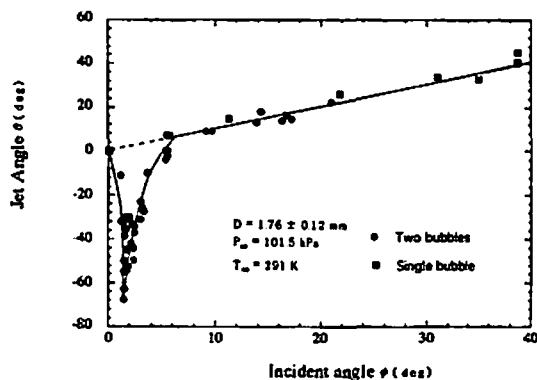


Fig. 5 The relationship between the incident angle ϕ and the jet angle θ of the collapsing bubble. The interaction of the two bubbles vanishes when the angle is a 6-degree. The interaction of two bubbles result is depicted with the solid curve, while the dashed curve represents the single bubble result.

の指向性、貫通速度、および水撃圧を非接触に定性的、定量的に把握できる有用な媒体であることが理解される。

次に、衝撃波の入射角度に対する左側の液体ジェットのゼラチン貫通深さを考える (Fig. 6)。貫通深さは垂直軸方向成分のみを考慮する。2つの気泡の場合、入射角度が小さいとき、すなわち、気泡が密接に隣接するときには2つの液体ジェットは中心軸上で交差し互いに運動を妨げるため貫通深さは短い。しかし、入射角度が増加するにつれて2つのジェット運動は相互に助長し合い貫通深さは急激に増加し、入射角度が 6° で貫通深さは極値をとり、その後再び減少に転ずる。液体ジェットの貫通深さの増大は気泡崩壊の激しさの程度を示す。したがって、Fig. 5およびFig. 6から2つの気泡が隣接する場合には、気泡間距離がある値以下になると気泡の運動は隣接する気泡で抑制され、崩壊の激しさが著しく緩和されることがわかる。したがって、エマルジョンにマイクロバルーンを含有

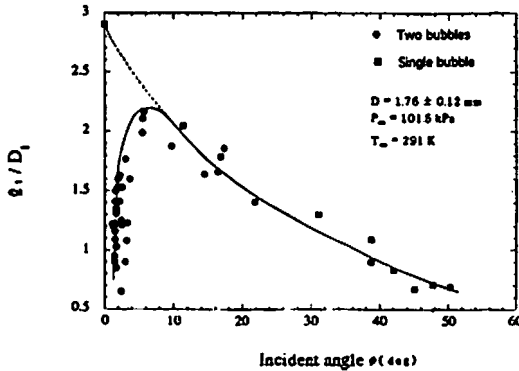


Fig. 6 The relationship between the maximum depth attained of the jet penetration into the gelatine wall and incident angle ϕ . The interaction of two bubbles result is depicted with the solid curve, while the dashed curve represents the single bubble result.

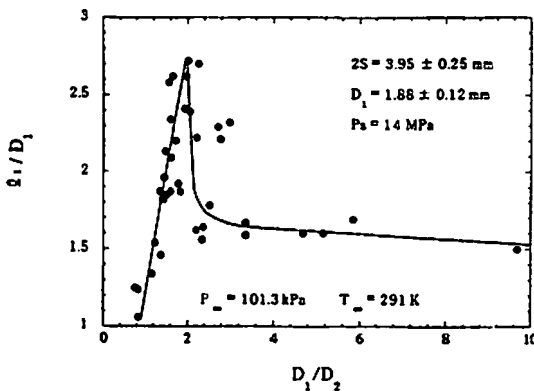


Fig. 7 The optimum condition for collapsing the Bubble 1 by the Bubble 2.

させるとき、同サイズのマイクロバルーンをある距離以下で隣接させるときには爆轟特性が低下することが予測される。

以上、同じサイズをもつ2つの気泡の崩壊の様相を考察した。実際にエマルジョンに含まれるマイクロバルーンはある粒径分布をもって空間に分布するので、崩壊するマイクロバルーンは位相差をもって相互に干渉するであろう。したがって、あるマイクロバルーンの崩壊で発生した衝撃波が隣接して崩壊するマイクロバルーンに作用して、その崩壊速度を促進する物理条件が存在する。そこで、粒径の異なる場合を設定し D_1 を $1.88 \pm 0.12 \text{ mm}$ 、 $2S$ を $3.95 \pm 0.25 \text{ mm}$ とし、 D_2 の変化に対する左側気泡のジェット鉛直方向のゼラチン貫通深さを調べる。Fig. 7 に得られた結果を示す。横軸に無次元量 D_1/D_2 、縦軸に l_1/D_1 をとる。こ

で l_1 は左側の液体ジェットのゼラチン最大貫通深さである。 D_1/D_2 の値の増加は、右側の気泡が左側の気泡に比して十分小さくなることを意味し、このとき l_1/D_1 の値は単一気泡の崩壊で達成される最大貫通深さに一致する。 l_1/D_1 は D_1/D_2 が増加するとともに急激に増加し、 $D_1/D_2 = 2$ で最大値2.7となる。この値は単一気泡の場合の約1.8倍である。過去の可視化計測の実験結果²⁰⁾ から、単一気泡(気泡直径 $1.8 \pm 0.09 \text{ mm}$) に同じ作用圧が負荷されるとき、液体ジェットのゼラチン貫通時の最大速度は 280 m/s 、また気泡運動を一次元運動と仮定し算出される水撃圧は 210 MPa であることが示される。いま、これらの値を考慮し一次元運動のエネルギー保存式を用いて $D_1/D_2 = 2$ のときの液体ジェット速度、および水撃圧を求めるとそれぞれ 375 m/s 、 281 MPa となり、気泡直径の組み合わせで気泡崩壊の激しさが増長される。

気泡が瞬間的に一定の作用圧を受け、極小体積まで崩壊する時間 T_c は Rayleigh の崩壊時間と知られ、以下の式で与えられる²¹⁾。

$$T_c = 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\Delta P}} \quad (1)$$

ここで、 R_0 は気泡の初期半径、 ρ_∞ は液体の密度、 $\Delta P = P - P_v$ はステップ状圧力変化、 P は気泡周囲の圧力、 P_v は液体の飽和蒸気圧である。2つの気泡間の中心軸鉛直下 $L = 50 \text{ mm}$ から発生した球面衝撃波が2つの気泡に作用し、気泡2の崩壊で発生した衝撃波が気泡1に達するときの気泡1の半径 R を求める。ただし、気泡は一定の衝撃圧を受けて崩壊すると仮定する。半径 R は以下の式で表現される。

$$R = \frac{R_1}{2} + \frac{2S}{C_\infty} \left(\frac{1}{C_\infty} - 0.915 \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\Delta P}} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 C_∞ は水中の音速である。いま、 $C_\infty = 1477 \text{ m/s}$ 、 $\rho_\infty = 998.6 \text{ kg/m}^3$ 、 $P_v = 2060.7 \text{ Pa}$ 、 $R_1 = 0.95 \text{ mm}$ 、 $2S = 4.0 \text{ mm}$ を考慮すると、 $R = 9.0 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 、すなわち $R/R_1 \approx 0.1$ となり、初期直径の1/10程度となる。つまり、 R_2 崩壊によって R_1 が最も激しく崩壊する条件とは、 R_1 が初期直径の1/10程度に収縮した瞬間に R_2 の崩壊で発生した衝撃波が R_1 に作用することである。気泡運動特性は作用する衝撃波の特性に依存し変化する。本実験結果で提唱される最適条件の信頼性を確認するには、高い固有振動数の圧力変換器を用いて水中衝撃波の特性を評価し、気泡崩壊に伴う衝撃波伝播の定量的可視化計測を行う必要がある。

以上の実験結果から、マイクロバルーンでスラリー爆薬の爆轟効率を向上させるためには、等しい粒径の

マイクロバルーンを分布させるのではなく、異なる粒径のマイクロバルーンを積極的に選択して、ある粒径のマイクロバルーンの崩壊時に、異なる粒径のマイクロバルーンの崩壊で発生した衝撃圧が作用するよう、マイクロバルーンの空間分布と粒径分布を構築すれば良い。

4. 結 言

マイクロバルーンの最適圧壊条件を明らかにするために、ゼラチンに付着した2つの気泡と水中衝撃波との干渉実験を行い以下の結論を得た。

- 1) 2つの気泡が同寸法するとき気泡崩壊で生成される液体ジェットの形成角度は気泡間距離に依存して変化する。
- 2) 2つの気泡直径が同寸法するとき、気泡の相互干渉が消滅する気泡間距離は気泡半径の約12倍である。
- 3) 2つの気泡の直径の寸法比が $D_1/D_2=2$ のとき、気泡 D_1 は気泡 D_2 の崩壊時に発生する衝撃波の影響を受けて最も激しく崩壊する。
- 4) マイクロバルーンの最適圧壊条件は、同じ粒径のものではなく、異なる粒子径のものを積極的に選択して、ある粒径のマイクロバルーンの崩壊時に異なる粒径のマイクロバルーンの崩壊で発生した衝撃圧が作用するよう、粒子の空間分布と粒径分布を構築すれば良い。

文 献

- 1) R. P. Holmes et al. J. Urol. 144, 159 (1990)
- 2) H. Nicolai et al. J. Cancer Res. Clin. Oncol. 120, 439 (1994)
- 3) 高山・ほか4名, 日本機械学会論文集, 57, 2285 (1991)
- 4) 小玉・ほか2名, 日本機械学会論文集, 59, 1431 (1993)
- 5) A. Philipp et al. J. Acoust. Soc. Am. 93, 2496 (1993)
- 6) A. J. Coleman, T. Kodama et al. Ultrasound in Med. & Biol. 21, 405 (1995)
- 7) Y. Tomita and A. Shima, J. Fluid Mech. 169, 535 (1986)
- 8) J. P. Dear and J. P. Field, J. Fluid Mech. 190, 409 (1988)
- 9) A. Vogel et al. J. Fluid Mech. 206, 299 (1989)
- 10) 小玉, 東北大学大学院工学研究科博士論文 (1992)
- 11) N. Sanada et al., Proc. 14th Int. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves, Sydney, P. 405 (1984)
- 12) E. B. Flint and K. S. Suslick, Science, 253, 1397 (1991)
- 13) I. Hansson and K. A. Mörch, J. Appl. Phys. 51, 4651 (1980)
- 14) G. L. Chahine, Chem. Eng. Commun. 28, 355 (1984)
- 15) S. Fujikawa et al. Acustica 61, 188 (1986)
- 16) 久保輝一郎・その他, 「複合材料と界面」, P. 186 (1986), 総合技術出版。
- 17) J. R. Asay and M. Shahinpoor (editors) "High-Pressure Shock Compression of Solids", P. 3 (1992), Springer-Verlag.
- 18) 須藤秀治・ほか2名, 「火薬と発破」, P. 16 (1971), オーム社。
- 19) Y. Tomita et al. J. Appl. Phys. 56, 125 (1984)
- 20) 小玉・ほか2名, 平成6年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 553 (1995)
- 21) Lord Rayleigh, Phil. Mag. 34, 94 (1917)

A study on the optimum condition for the collapse of micro-balloons

by Tetsuya KODAMA*, Nobuo NAGAYASU and Kazuyoshi Takayama***

In order to obtain the optimum condition for maximizing the interaction between collapsing micro-balloons, the interaction of two air bubbles attached to a gelatine surface with an underwater shock wave was investigated. The shock wave was generated by the detonation of a micro-explosive pellet, and the subsequent collapse of the bubbles was visualized by high-speed photography. It is concluded that the angle of the liquid jet formation, the intensity of the collapse of the bubbles and the distance at which the mutual interaction between these bubbles vanishes, depends on the bubble diameters and the separation distance between these bubbles. The optimum condition for maximizing the interaction between micro-balloons is not so sensitive to their separation distance but is strongly affected by the selection of non-uniform diameters so as to make the shock wave emitted from one bubble impinges upon an other bubble just when the first bubble reaches its minimum radius.

(*Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77, Japan

**Chugoku Kayaku CO., LTD 5-1-1 Etajima-cho, Aki-gun, Hiroshima
737-21, Japan)
