マイクロバルーンの最適圧壊条件に関する一考察

小玉哲也*, 永易伸生**, 高山和喜*

マイクロバルーンの最適圧與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を光学可視化した。水中衝撃波はアジ化銀ペレット10mgをパルスYAGレー ザで起爆し発生させる。気泡に作用する衝撃圧は14.75±0.05MPaで、気泡の崩壊の様相を高 速度撮影した。気泡崩壊で形成される液体ジェットのゼラチンへの貫通深さとその指向性から、 液体ジェットの形成角度の特性、気泡崩壊の激しさの程度、気泡の相互干渉が消滅する距離を 定量的に明らかにした。また、マイクロバルーンで爆轟を効率的に継続させるためには、等し い粒径のマイクロバルーンを隣接させず、かつ、異なる粒子径を積極的に選択して、あるマイ クロバルーンの崩壊末期に他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にマ イクロバルーンを空間分布すれば良いことを明らかにした。

1. 緒 曾

水中衝撃波を利用した癌治療法1)-2)や結石破砕術3) -6) あるいは水力機械での材料壊食?)-11) にはキャビ テーション気泡の動的挙動が関与する。気泡崩壊はそ の内部あるいは壁面近傍に高温・高圧場を誘起し12), また、気泡変形にともなう流体場の非対称性のために、 気泡内部に液体マイクロジェットを生成する。このジ ェットは気泡内部を貫通し気泡騰を突き抜け周囲媒体 に数百MPa程度の衝撃圧を発生する^{7).9)}。また、崩壊 する気泡は周囲圧との平衡半径を越えて収縮し、ある 最小半径に違した後、内部圧の卓越とともに外向きの 膨張運動に転じ、その際、衝撃波が周囲に解放される" -11)。したがって、気泡崩壞にともなう生体組織損傷 あるいは材料線食は、これら高温・高圧、液体マイク ロジェットの衝突圧、および気泡リバウンド時に発生 する衝撃圧が短時間に局所領域に相乗的に作用した結 果発生する。通常、実際の液体場では単一の気泡が存 在することはなく、複数の気泡が発生し、これら気泡 の運動は位相差をもち相互に干渉する。複数気泡の崩 「娘で得られる衛盤圧は単一気泡崩壊の値よりさらに上

1995年7月25日受理 *東北大学液体科学研究所附與简聲波工学研究センター 〒980-77 宮城県仙台市宵葉区片平2-1-1 TEL 022-217-5285 FAX 022-227-7390 **中国化薬株式会社 〒737-21 広島県安芸郡江田島町小用5-1-1 TEL 0823-44-1507 FAX 0823-44-1312 昇すると指摘されているが^{13) -15)}, その
遼田線条件 はいまだ解明されていない。

一方、エマルション爆薬の性能は含有されるマイク ロバルーンの物理特性に強く支配される。従来の物理 特性の評価は、真比重、かさ密度、耐圧強度等の機械 的な物理量のみが考慮され、爆心の開始や持続に関連 するマイクロバルーンの崩壊革動やこれに基づく最適 な連鎖圧壊条件については報告が少ない。マイクロバ ルーンはアルミナ、ホウケイ酸ソーダ等の無機系物質、 フェノール樹脂、ポリ塩化ビニリデン等の有機系物質、 あるいはタングステン等の金属材料で生成され、内部 には製造時に用いる気体が封じ込まれる。汎用の工業 用標準ホウケイ酸ガラス材のマイクロパルーンの平均 直径は98.9μm,平均肉厚は2μmで平均直径の約2 %程度である¹⁶。一般に金風類あるいは非金風類は急 激な衝撃圧を受けると弾性的な挙動を示す¹⁷⁾。通常使 用される6号電気雷管の爆発圧力は7402MPaと計算 され¹⁸⁾、この作用圧力下ではマイクロバルーンは十分 に弾性的で、かつ、その挙動は気泡として近似できる。

本研究では、ゼラチンに付着した2つの空気泡と水 中衝撃波との干渉実験から、気泡間の相互干渉距離、 液体マイクロジェットの指向性、最適な気泡の崩壊条 件を光学的に明らかにし、マイクロバルーン圧壊の最 適な粒径比、空間分布の定性的な評価を示すものであ る。ゼラチンは透明でかつ音雹インピーダンスが水と 同じと近似する⁴。ゼラチンは気泡の崩壊で形成され る液体ジェットの可視化が可能で、また、ゼラチン面 での衝撃波の反射が気泡崩壊に与える影響は無視され



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 飯のゼラチン(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1.62kg/ n. · 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 に没すと膨潤するので、実験の没水時間をすべて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盤に付着させ、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=50mに設置する。起爆には内径0.4m のグ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。は14.75±0.05MPaである。気泡の崩壊の様相は 閃光時間400 μ 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 $_{\infty}$ =291K,大気圧はP $_{\infty}$ = 101.5kPaである。ゼラチン壁の厚さをそれぞれ7 $_{m}$, 8 $_{m}$,10 $_{m}$ 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堕の厚 さに依存しない。本実験ではゼラチンの厚さを10 $_{m}$ と した。

3. 結果および考察

Fig. 2にゼラチン蟹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し,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D1, D2はそ れぞれ1.81㎜, 気泡間距離2Sは2.55㎜, 撮影のこま 間隔は40µsである。2つの気泡間の中心軸,鉛直下 L=50m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違い気泡磨が速 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。D1, D2はそれぞれ1.66mmで、25 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、D1、D2をそ れぞれ1.76±0.12mm一定とし、気泡間距離を変化さて 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 「指する角度をo(=tan⁻¹S/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 Ps=14.75±0.05MPa.
 D₁=1.81mm, D₂=1.81mm, 2S=2.55mm.
 Interframe time 40μs.



Fig. 3 Two bubbles collapsing by an underwater shock wave loading. The shock wave is loaded on the two bubbles from below at $Ps=14.75\pm0.05MPa$. D₁=1.66mm, D₂=1.66mm, 2S=16.1mm. Interframe time $40\mu s$.



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 ットの角度も同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ら 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10.5mm(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1µs で、微小領域に集中する持続時間が短い気泡崩壊の衝 繋圧とその指向性を十分解像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 vanishe 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, 定量的に把掘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傾の液体ジェッ 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かい。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、その後再び渡少に転ず る。液体ジェットの貫通深さの増大は気泡崩壞の激し 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、崩壞の激しさが著しく緩和されることがわかる。 したがって、エマルシ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 \$\varphi\$. 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つの気泡の崩線の様相を 考察した。実際にエマルションに含有されるマイクロ 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 パルーンに作用して、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D1 を1.88±0.12mm、2Sを3.95±0.25mmとし、D2の変 化に対する左側気泡のジェットの鉛直方向のセラチン 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D1/D2、縦軸にℓ1/D1をとる。ここ でし」は左側の液体ジェットのゼラチン段大貫通深さ である。D1/D2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」/D」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/D1はD1/D2が増加するととも に急激に増加し、D1/D2=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±0. 09mm)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280m/s, また気泡運 動を一次元運動と仮定し算出される木邸圧は210MPa であることが示される。いま,これらの値を考慮しー 次元運動のエネルギー保存式を用いてD1/D2=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375m/s. 281MPaとなり、気泡直径の組み合 せで気泡崩壞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 Tc は Rayleigh の崩壊時間と知られ、 以下の式で与えられる²¹⁾。

$$Tc = 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_{\infty}}{\triangle P}}$$
(1)

ここで、 R_0 は気泡の初期半径、 ρ_∞ は液体の密度、 $\triangle P = P - P_0$ はステップ状圧力変化、Pは気泡周囲の 圧力、 P_0 は液体の飽和蒸気圧である。2つの気泡間 の中心輪鉛直下 L=50mm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に違するときの気泡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。

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

ここで、 C_{∞} は水中の音速である。いま、 C_{∞} =1477 m /s、 ρ_{∞} =998.6kg/m, P_{r} =2060.7Pa, R_{1} =0.95m, 2S=4.0mmを考慮すると、R=9.0×10⁻⁵mm, すなわ 5 R/R_{1} \simeq 0.1となり、初期直径の1/10程度となる。 つまり、 R_{2} 崩壞によって R_{1} が最も激しく崩壞する条 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} の崩壞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低領性を 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、気泡崩壞に伴う衝撃波伝 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

-204-

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線時に、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 曾

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つの気泡が同寸法の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のとき、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。
- 2つの気泡の直径の寸法比がD₁/D₂ = 2のとき、 気泡D₁は気泡D₂の崩壊時に発生する衝撃波の影 暫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 衡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)
- H. Nicolai et al. J. Cancer Res. Clin. Oncol. 120, 439 (1994)
- 高山・ほか4名、日本機械学会論文集、57、2285 (1991)
- 小玉・ほか2名、日本機械学会論文集、59、1431 (1993)

- A. Philipp et al. J. Acoust. Soc. Am. 93, 2496 (1993)
- A. J. Coleman, T. Kodama et al. Ultrasound in Med. & Biol. 21, 405 (1995)
- Y. Tomita and A. Shima, J. Fluid Mech. 169, 535 (1986)
- 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)
- 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)
- I. Hansson and K. A. Mørch, 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 Shcok 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 蹴演論文集,553 (1995)
- 21) Load 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)