

液中微小爆発によって発生した衝撃波と気泡との干渉に関する実験的研究

山田 潔*, 名兒耶 肇*, 高山 和喜**

アジ化銀 (AgN_3) 10mgの液中爆発によって発生した球状衝撃波と単一気泡との干渉に関する実験的研究を行った。

液体と気体の組合せは水/空気, 水/ヘリウム, シリコン油/空気, シリコン油/空気・ヘリウム混合気四通りである。

気泡は崩壊にともなってリバウンド衝撃波を誘起することが知られ, その発生の機構を明らかにした。

1. 緒言

液体やゼラチン等の凝縮媒体中での衝撃波と気泡との干渉に関する問題は, 水中衝撃波フォーカシングを応用した結石破碎術に伴うキャビテーションによる生体損傷¹⁾ やエマルジョン爆薬起爆時の衝撃波と気泡との干渉による爆轟の持続²⁾ にも関連する重要な基礎研究課題である。

四通りの媒体の組合せについて, 衝撃波作用による単一気泡の崩壊過程の光学可視化実験を行った。気泡崩壊にともなって生ずる衝撃波をリバウンド衝撃波と呼び, その発生の機構を実験的に明らかにしたので報告する。

2. 実験方法

爆薬は質量10mgのアジ化銀ペレット (中国化学製, 以下微小爆薬と記す) を用いた。試料液体は水道水またはジメチルシリコン油 (信越化学工業製, KF96-1.0, 動粘度 $\nu_v=1.0\pm 0.1\times 10^{-6}$ m²/s (298K), シリコン油と略記)³⁾ である。シリコン油の温度293 Kでの密度・音速はそれぞれ $\rho_s=821$ kg/m³, $c_s=937$ m/sである^{3) 4)}。

気泡まわりの全体的な流れおよび気泡の運動と近傍の流れを可視化の対象とする実験について, それぞれ2.1, 2.2節で述べる。

2.1 崩壊気泡まわりの流れの可視化

媒体の組合せはシリコン油/空気, 気泡の球相当径 (同じ体積を占める球の直径) は $d=1.6$ mm, 微小爆薬の爆発中心と気泡中心との距離は21 mmである。

光学系と実験装置および気泡生成の装置の概略をそれぞれFig.1 (a), (b)に示す。水槽 (4) に試料液体を注入し, 微小爆薬 (14) を液中の定位位置に設置した。気泡は水槽外から管 (2) を通じて送り込み, 水槽の底付近から解放して自然に浮上させた。気泡が上昇し定位位置に達したときに微小爆薬をレーザー起爆し, 気泡まわりの流れを二重露光ホログラフィー干渉計法⁵⁾ により撮影した。

2.2 気泡の崩壊過程の可視化

媒体の組合せは水/空気, 水/ヘリウム, シリコン油/空気・ヘリウム混合気 (以下混合気と略記), 混合気のヘリウムの体積比率は40~60%, 気泡中心と爆心との距離は10 mmである。

式 (1) はアジ化銀10mgの水中爆発による球状衝撃波の過剰圧 Δp の実験式である⁶⁾。

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \left(\frac{x}{x_0}\right)^{-1.05} \quad (1)$$

ここで, x は爆心からの距離, $\Delta p_0, x_0$ は定数で $\Delta p_0=68$ MPa, $x_0=10$ mmである。

気泡に衝撃波が入射する前から崩壊後までを影写真法により超高速度カメラを用いてコマ撮り撮影した。

1993年5月17日受理

*東北大学大学院工学研究科

〒980 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

TEL 022-227-6200 内線3219

FAX 022-227-7390

**東北大学流体科学研究所衝撃波工学研究センター

〒980 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

TEL 022-227-6200 内線3343

FAX 022-227-7390

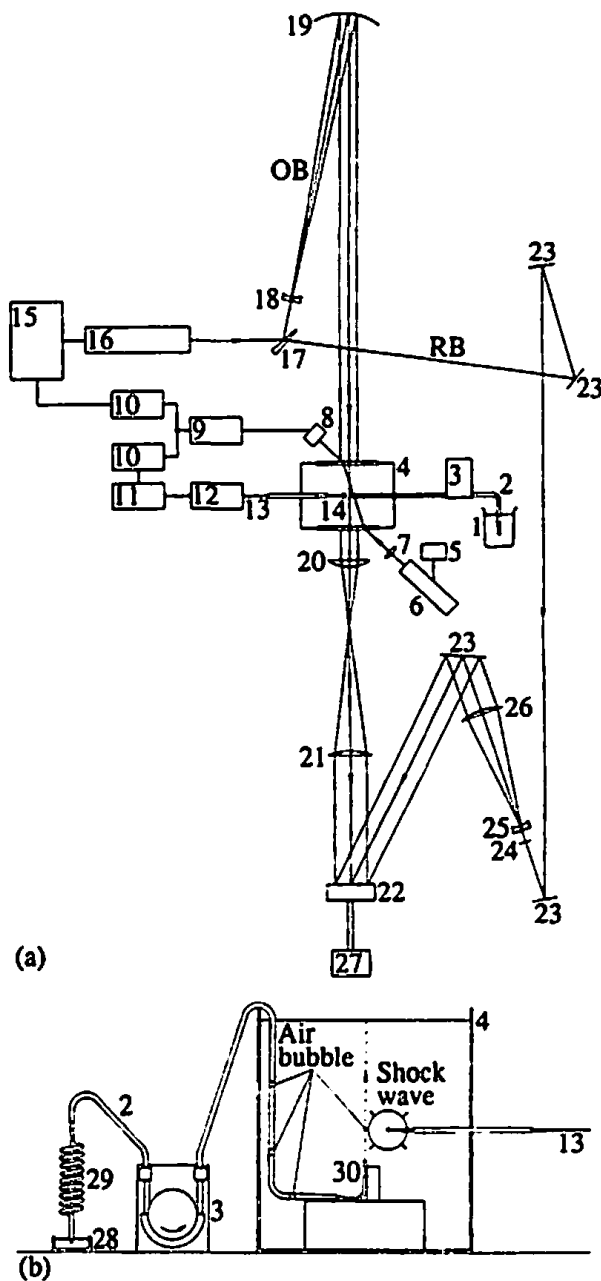


Fig. 1 (a) Experimental setup and optical arrangement and (b) apparatus for trapping of air bubbles in tube and release of a air bubble into silicone oil (OB-object beam, RB-reference beam; 1 beaker; 2 Tygon Tubing; 3 roller pump; 4 test tank; 5, 6 He-Ne gas laser; 7 convex lens; 8 photodiode; 9 high gain amplifier, Iwatsu Electric Co., Ltd., DA-2A; 10 digital retarder; 11, 12 pulsed Nd:YAG laser; 13 optical fiber cord; 14 silver azide pellet; 15, 16 double-pulsed holographic laser; 5, 11, 15 laser power supply; 6, 12, 16 laser head; 17 half mirror; 18 concave lens, $f=-40\text{cm}$; 19 paraboloidal mirror, $f=3000\text{cm}$; 20 convex lens, $f=250\text{cm}$; 21 convex lens, $f=498\text{cm}$; 22 film holder; 23 plane mirror; 24 filter, ND-4; 25 concave lens, $f=-60\text{cm}$; 26 convex lens, $f=1000\text{cm}$; 27 air pump; 28 laboratory dish; 29 spiral glass tube; 30 stainless pipe)

3. 結果

Fig. 2に気泡まわりの流れの干渉計写真を示す。

Fig. 3, 5, 7に気泡の崩壊過程の影写真を示す。Fig. 5 (d)のみコマ送り速度は 5.0×10^5 コマ/秒、露光時間は各コマ $0.4\mu\text{s}$ で、他のコマ送り速度と各コマの露光時間はそれぞれ 1.0×10^6 コマ/秒、 $0.2\mu\text{s}$ である。円状または円弧状のリバウンド衝撃波面の中心は移動しないので、気泡崩壊以後は入射衝撃波背後の流れによる気泡の移動は無視できる。

Fig. 4, 6, 8に気泡の大きさのパラメーターとリバウンド衝撃波面の直径の履歴を示す。実線は最小二乗法による近似で、破線については4章で述べる。

気泡は上昇運動により、短楕球すなわち楕円を短軸のまわりに回転させた回転楕円体で近似される形状となった。気泡の短径はほぼ鉛直である。

Table 1に各組合せに対する短楕球気泡の初期の大きさ、媒体の音速比 c_1/c_2 と音響インピーダンス比 $\rho_1 c_1/\rho_2 c_2$ を示す。

3.1 シリコン油/空気の場合

Fig. 2 (a)は球状衝撃波と初期形状の気泡である。衝撃波が界面に入射し、膨張波 (Fig. 2 (b)の矢印) が生じる。微小爆薬Pまわりの半円部分は爆発生成気体である。爆心側界面付近に干渉縞が集中し、圧力上昇が認められる (Fig. 2 (b), (d))。この高圧により局部的に液体が加速されて気泡に貫入し、気泡は非対称に圧縮される。Fig. 2 (c)は (b)の気泡の輪郭線を拡大したものである。Fig. 2 (e)では円形の気泡輪郭の中心点を中心として干渉縞が同心円状に集中している。気泡が崩壊し再膨張すると界面は不安定となり、気泡近傍から駆動される複数の圧縮波が認められる (Fig. 2 (f))。複数の圧縮波は伝播とともに一つの包絡面を形成し、衝撃波を形成する (Fig. 2 (g))。Fig. 2 (f), (g)のリバウンド衝撃波面は爆心側のみ二重構造になっている。

衝撃波が界面に入射してからリバウンド衝撃波が駆動されるまでの時間を崩壊時間 t_c と呼ぶ。ここでは $t_c=5.8\sim 9.3\mu\text{s}$ である。

3.2 水/空気の場合

衝撃波が画面左から気泡に入射する (Fig. 3)。衝撃波面が気泡を通過し、波面に凹面が生じる (Fig. 3 (a)4, (b)1, 2)。衝撃波背後の圧力により気泡は圧縮され、界面が気泡中心に向かって移動する。気泡は非対称に変形するが、界面の移動は衝撃波を受けた爆心側が最も大きい。気泡は球状のリバウンド衝撃波を誘起し、ほぼ同時に収縮から膨張に転ずる (Fig. 3 (c))。多重のリバウンド衝撃波のうち、きわだった波面は二つあり、爆心側では先行衝撃波と第二波の波面は一致

Table 1 Initial size of rising gas bubble in liquid and comparison of properties of liquid and gas at 293K.
 (a , b , f , and d are major diameter, minor diameter, flattening factor, and equivalent diameter of sphere, respectively. Subscripts l and g indicate liquid and gas, respectively.)

Combination of liquid/gas	a (mm)	b (mm)	f $= (a - b)/a$	$d = (a^2b)^{\frac{1}{3}}$ (mm)	c_l/c_g	$\rho_l c_l / \rho_g c_g$
Water/air	3.0	2.3	0.23	2.8	4.316	3.575×10^4
Water/helium	3.9	1.5	0.61	2.8	1.481	8.92×10^4
Silicone oil/air	2.0	1.0	0.50	1.6	2.73	1.86×10^4
Silicone oil/air-helium mixed gas	1.2	0.82	0.29	1.0	-	-

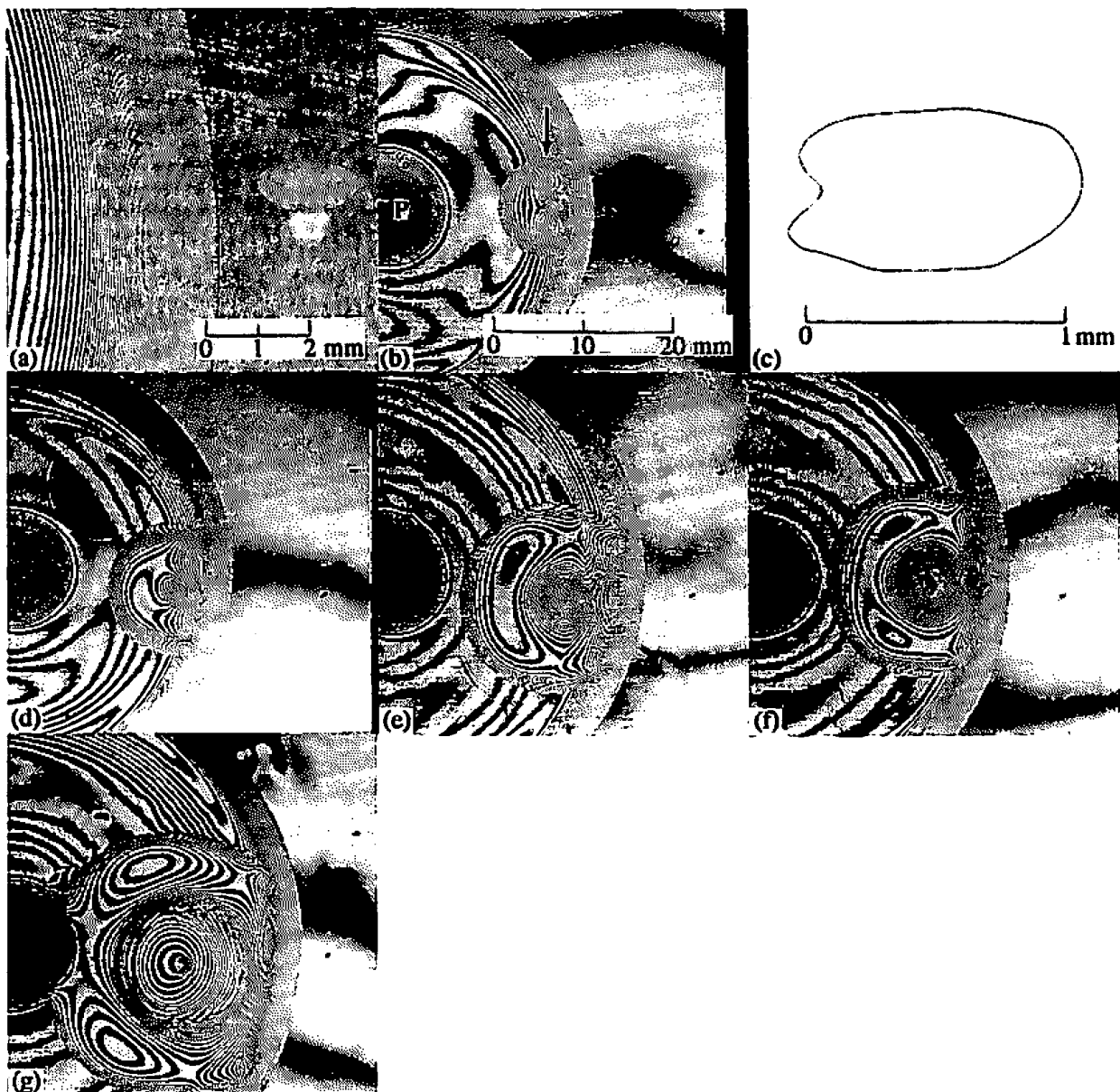


Fig. 2 Interferogram of shock-air bubble interaction in silicone oil
 ((a) Spherical shock wave and rising air bubble, (b) ↓ expansion wave, P - pellet before explosion, (c) contour of air bubble on (b))

している。Fig. 3 (b)8, (c)3では、まだ第二波波面は不規則である。崩壊前のFig. 3 (b)6, (c)1までは

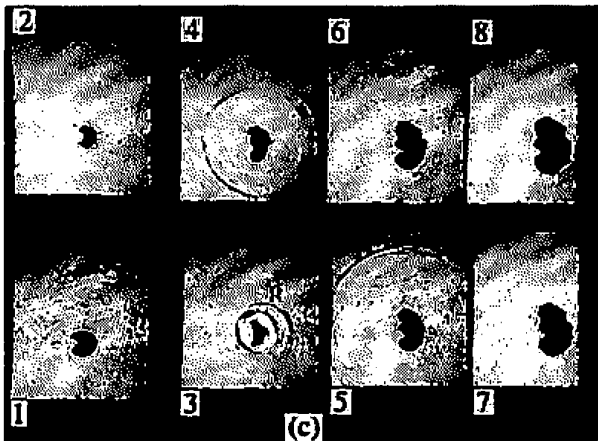
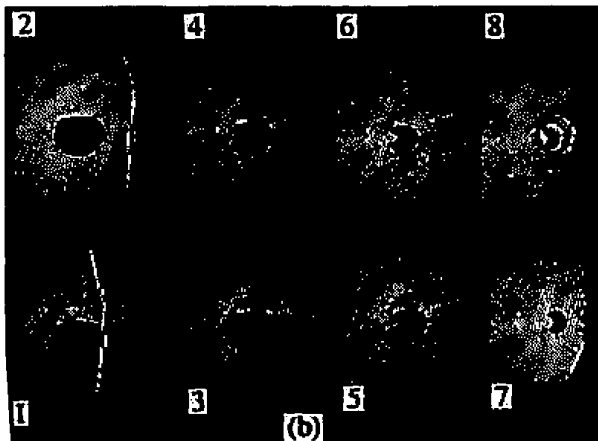
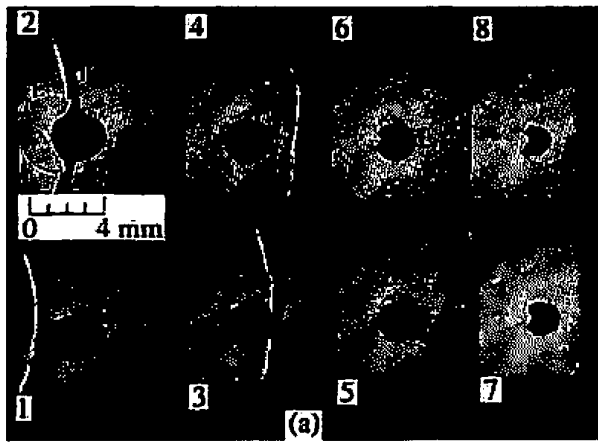


Fig. 3 Collapsing air bubble in water. (I-incident shock, E - expansion wave, R-rebound shock)

界面は滑らかであるが、それ以後は乱れがある。崩壊時間は $t_c = 9\mu s$ である。

Fig. 4で気泡の水平方向の長さ a' は、衝撃波作用後、時間に比例して減少し崩壊前 $1\sim 2\mu s$ から減少が加速され、膨張に転じ崩壊後 $1\sim 2\mu s$ まで急速に増加し、以後は時間に比例して増加する。垂直方向の長さ b' は、まず時間に比例して減少し、崩壊後は $1\sim 2\mu s$ まで急速に増加し、以後は時間の二乗に比例して増加する。

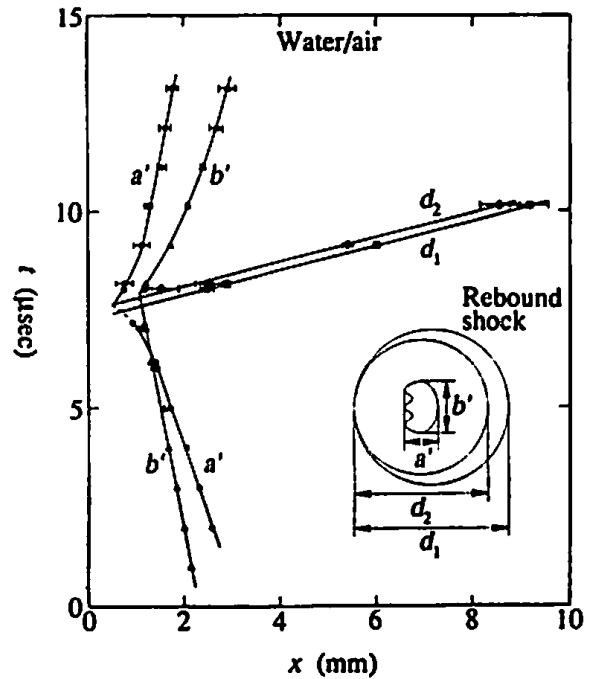


Fig. 4 Time history of width and height of air bubble in water and amplitude of rebound shocks

先行波面・第二波波面の直径それぞれ d_1 、 d_2 は時間に比例して変化すると仮定した。

3.3 水/ヘリウムの場合

崩壊過程は水/空気の場合と同様である (Fig. 5)。Fig. 5 (c) 1, 2で、二つのきわだったリバウンド衝撃波のうち先行波は下流側が強く爆心に近づくにしたがって弱くなり判別がつかないが、第二波は比較的一様である。Fig. 5 (d) 6では爆心側界面から生じた液体ジェットが下流側界面に衝突し黒い部分が生じている。これはこの部分が周囲より高圧であることを示している。崩壊時間は $t_c = 8\sim 9\mu s$ である。

3.4 シリコン油/混合気の場合

Fig. 7 (b) 4-8のように気泡本体から噴出する気体ジェットのように観察される部分が形成された。実際にはジェット状の気泡部分の先端は液体に対してほぼ静止し、気泡主要部分が下流に移動する。Fig. 7 (b) 4-6のように多重のリバウンド衝撃波が同心円状に観察される。きわだった波面は先行波のみで、下流側で強く爆心側では比較的不明瞭である。崩壊時間は $t_c = 2\mu s$ である。水の場合と異なり、リバウンド衝撃波のMach数は1.1を越える。Fig. 7 (b) 3と4の間のリバウンド衝撃波の平均Mach数は $M = 1.16$ 以上である。

4. 考 察

写真の気泡の像は、視線方向で観察した気泡の影で、界面の影に隠れた部分は不明で、立体的な形状を正確にあらわしていない。

衝撃波が界面に入射すると、膨張波が反射し、膨張

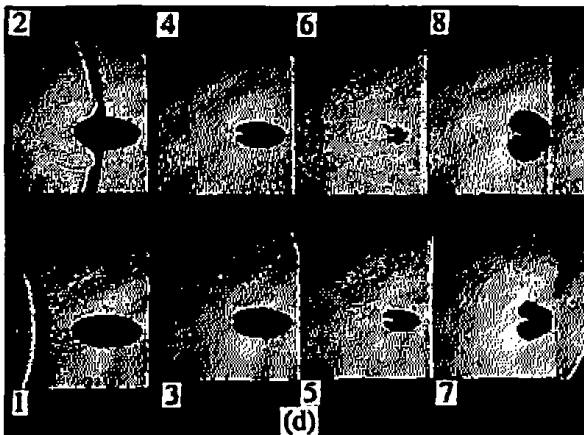
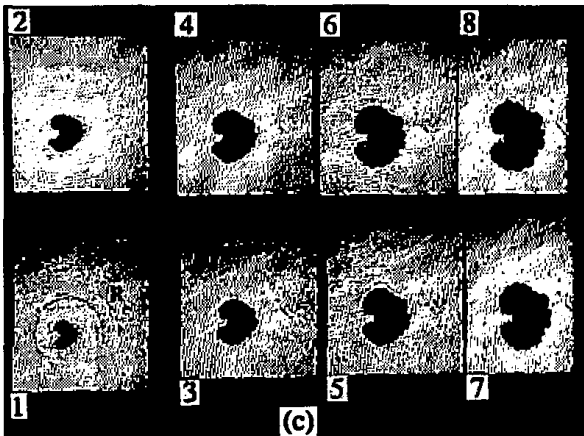
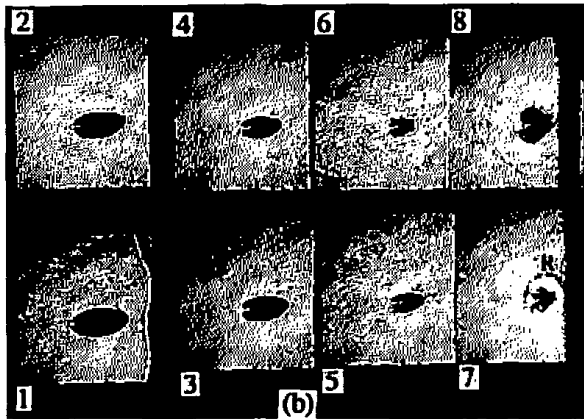
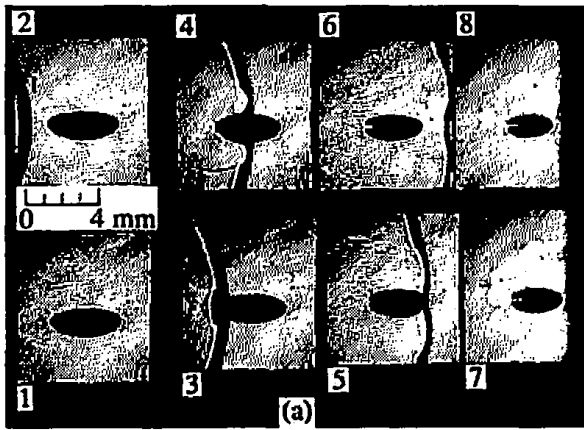


Fig. 5 Collapsing helium bubble in water (I - incident shock, E - expansion wave, R - rebound shock)

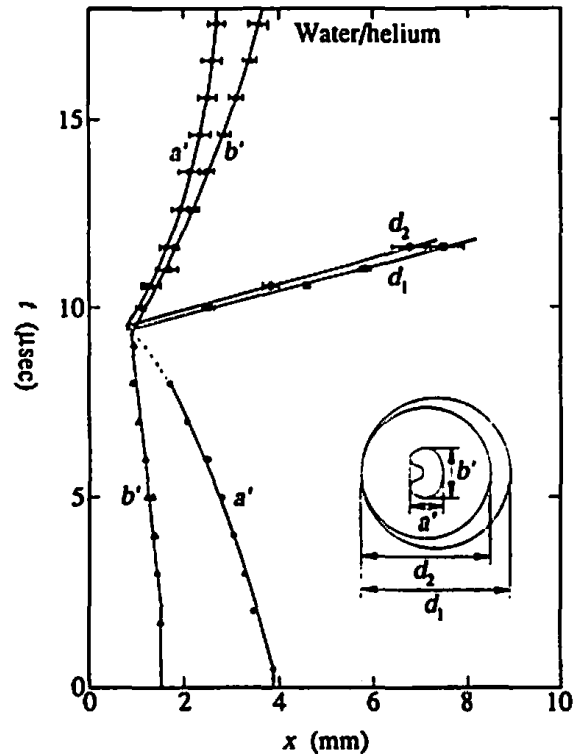


Fig. 6 Time history of width and height of helium bubble in water and amplitude of rebound shocks

波背後は前方より低圧となるが、界面上で衝撃波が垂直に入射する点の近傍の液中には高圧領域が生じる。この現象に関しては高山ら⁷⁾の実験と数値計算がある。

シリコン油/混合気の場合は先行波の発生は気泡が最小になると予測される瞬間の0.4~0.6 μ s前 (Fig. 8) でこの時間差は比較的長く、波が下流側で強いことから、先行波は水/空気、水/ヘリウムの場合と同様に発生すると考えられる。気泡の膨張は気泡部分によって時間差があり、先行波に続く比較的弱い複数の波に分散されたと考えられる。

5. 結 言

気泡崩壊ともなりリバウンド衝撃波は、まず気泡の上流または下流に生じた高圧領域が解放されることにより誘起される。これが多重のリバウンド衝撃波の先行波となる。その後、収縮する気泡が最小体積に達したのち急速に膨張し、それによって駆動される圧縮波群の包絡面からなる波が比較的一様な第二波となる。

シリコン油/空気の場合は入射衝撃波が比較的弱い場合で、衝撃波が気泡に入射して生じた高圧領域が気泡の上流に残り、液体が気泡中に貫入しても下流側界面には違いないと考えられる。そのため先行波は爆心側で第二波に最も先行する。それに対し他の場合は入射衝撃波が比較的強い場合で、衝撃波が気泡に入射

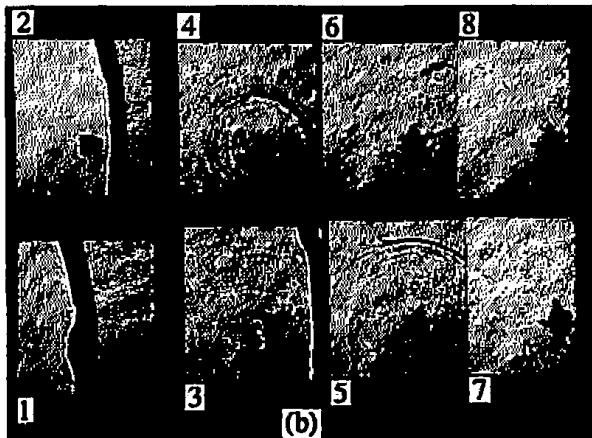
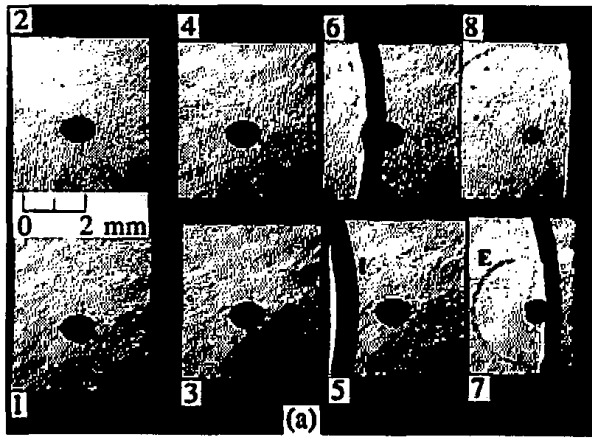


Fig. 7 Collapsing air-helium mixed gas bubble in silicone oil
(I - incident shock, E - expansion wave, R - rebound shock.)

して生じた高圧領域が液体ジェットとなって下流に移動し界面に衝突することにより高圧領域が生じる。そのため水/空気、水/ヘリウムの場合は、逆に先行波は下流側で第二波に最も先行する。

文 献

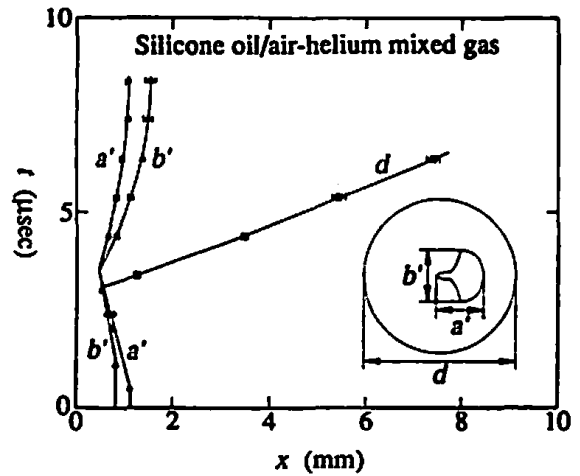


Fig. 8 Time history of width and height of air-helium mixed gas bubble in silicone oil and amplitude of rebound shocks

- 1) バイオエンジニアリング出版委員会 (編), 「バイオエンジニアリング」, P.87 (1992), 培風館
- 2) N. K. Bourne, J. E. Field, Proc. R. Soc. Lond. A, 435, 423 (1991)
- 3) 信越化学工業, 「説明書 P6-3E」, (1989), 信越化学工業
- 4) 伊藤 邦雄 (編), 「シリコンハンドブック」, P. 112 (1990), 日刊工業新聞社
- 5) K. Takayama, A. Abe, N. Sanada, H. Sugiyama, 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, 641 (1988)
- 6) 高山和喜, 小野寺収, 小原哲郎, 桑原正明, 北山修, 日本機械学会論文集 (B編), 57, 2285 (1991)
- 7) K. Takayama, A. Abe, K. Tanaka, in: G. E. A. Meier, P. A. Thompson (eds) "Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems", P.91 (1989), Springer-Verlag.

**An experimental study of interaction of a shock wave generated by
micro-explosion with a gas bubble in liquids**

by Kiyoshi YAMADA*, Hajime NAGOYA*, and Kazuyoshi TAKAYAMA**

Interaction of a shock wave with a gas bubble was investigated experimentally for four combinations of liquid/gas, such as, water/air, water/helium, silicone oil/air, and silicone oil/air-helium mixture. A gas bubble was exposed to a spherical shock wave generated by detonating a 10 mg silver azide pellet. The shock-bubble interaction over silicone oil/air interface was observed by double exposure holographic interferometry. Those over other cases were visualized by shadowgraph and were recorded by a high speed camera. Collapse of a gas bubble and generation of rebound shock waves were explained.

(*Division of Engineering, Graduate School of Tohoku University,
2—1—1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980, Japan

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