104 衝撃波作用による気泡の挙動

東北大 山田 潔*, テクニオン ジョゼフ・ファルコビッツ, 東北大 高山 和喜

Behavior of a Gas Bubble Interacted by a Shock Wave

Kiyoshi YAMADA*, Joseph FALCOVITZ**, and Kazuyoshi TAKAYAMA*

The interaction of a shock wave with a gas bubble was visualized by double exposure holographic interferometry or shadowgraph for four combinations of liquid/gas, such as, silicone-oil (1.0 cSt)/air, silicone-oil (10 cSt)/air, water/air, and water/helium. The gas bubble was exposed to a spherical shock wave generated by detonating a 10 mg silver azide pellet. The gas bubble contracted by hitting of the shock, and a liquid jet formed, as the case may be. Eventually, one or plural rebound shock waves occurred. It was found that there are at least three types of rebound shocks. The generation of these for each type is explained by sequential flow visualizations. Numerical simulations were also carried out using GRP/MIT scheme.

1. 緒言

四通りの気液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可視化実験を行った。可視化法は二重露光ホログラフィー干渉計法および影写真法である。気泡崩壊時に一つまたは複数の衝撃波が新たに生成され(これをリバウンド衝撃波と呼ぶ)、発生機構の違いにより、少なくとも三種のリバウンド衝撃波が生じうることを明らかにした。

2. 実験

表 1 に試料液体^{1),2)}と試料気体の主な物性値を示す。媒体の組合せはシリコン油 (1.0 cSt) / 空気, シリコン油 (10 cSt) / 空気, 水 / 空気, 水 / ヘリウムである。気泡に作用させる衝撃波は微小爆薬 (アジ化銀ペレット, 質量 10 mg, 中国化薬製) をレーザー起爆することによって得た。爆心と気泡中心との距離 D は, シリコン油 / 空気の場合はともに $D = 20$ mm, 他の場合は $D = 10$ mm である。爆心からの距離 D での衝撃波の入射圧力 $P(D)$ を表 2 に示す。

試料液体を満たした試験水槽の底付近から一つの気泡を解放し、浮上する途上で衝撃波と干渉させ、そのようすを撮影した。ここで、一定の体積と形状の気泡に一定の強さの衝撃波が入射するように設定した。シリコン油 / 空気の場合は、いずれもルビー・レーザー (パルス幅約 25 ns, 波長 694.3 nm) を光源とし、二重露光ホログラフィー干渉計法³⁾により撮影した。他の場合は、アルゴン・イオン・レーザー (波長 514.5 nm) を光源とし、影写真法により超高速度カメラ Imacon 790 を用いてコマ撮りした。

*Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai 980, Japan, ** Department of Aerospace Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa 32000, Israel.

Table 1 Major physical properties of test liquids and test gases at 293 K. ν is kinematic viscosity.

Test fluid	Speed of sound a_0 (m/s)	Density ρ_0 (kg/m ³)	Remark
Water	1482.9	998.20	
Silicone-oil (1.0 cSt)	936.5	821.	$\nu = 1.0 \pm 0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (298 K)
Silicone-oil (10 cSt)	994.1	938.	$\nu = 1.0 \pm 0.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (298 K)
Air	343.6	1.205	
Helium	1001.	0.1663	

3. 数値計算

GRP/MIT(generalized Riemann problem, material interface tracking) スキーム^{4),5)}を用い、球状気泡と一様な平面衝撃波との干渉に対する数値計算を行った。なお、実験では気泡への入射衝撃波は球状衝撃波なので、数値計算は正確に実験を模擬したものではない。計算領域は気泡中心を通る衝撃波面の垂線に対して軸対称の半径 5 mm、高さ 15 mm の円柱領域、格子数は軸方向に 152、それと垂直な方向に 52 である。気泡の直径は 3 mm、入射衝撃波の圧力は 65 MPa とした。

4. 結果と考察

気泡は浮力と気液界面の表面張力とのつり合いの形状をとり、具体的には短楕球(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った。表 2 に衝撃波入射直前の気泡の大きさおよび入射衝撃波の圧力を示す。

Table 2 Typical sizes of the gas bubble immediately before interaction with an incident shock wave in liquid and pressure of the incident shock. a , b , f , d , and $P(D)$ are major diameter, minor diameter, flattening factor, equivalent diameter of sphere, and the pressure of the incident shock, respectively.

Combination of liquid/gas	a (mm)	b (mm)	f $= (a - b)/a$	$d = \sqrt[3]{a^2b}$ (mm)	$P(D)$ (MPa)
Silicone-oil (1.0 cSt)/air	2.0	1.0	0.50	1.6	Unmeasured
Silicone-oil (10 cSt)/air	1.6	1.5	0.079	1.5	13.1
Water/air	3.0	2.3	0.23	2.8	65.2
Water/helium	3.9	1.5	0.61	2.8	65.2

図 1 はシリコン油 (1.0 cSt) / 空気の場合の気泡と衝撃波の干渉の様子である。流れ場は三次元的で干渉縞は等密度線と一致しないが、おおその状態変化の傾向を知ることができる。衝撃波が左から気泡に入射し、膨張波が反射する。衝撃波の気泡への入射点付近の圧力が周囲より高くなっている (図 1a)。図 1b の気泡付近の干渉縞の集中から圧力が更に上昇していることがわかる。図 1c では気泡近傍から駆動された複数の圧縮波が見られ、界面は不安定である。圧縮波群は伝播とともに包絡面を形成し、衝撃波を形成する (図 1d)。図 1d では下流側で合体した二つのリバウンド衝撃波が認められる。ここでは、外側の波を第一波、内側の波を第二波と呼ぶことにする。図 1c では第一波波面の中心はほぼ気泡の爆心側界面、図 1d では気泡のへこみ部分にあることから、第一波は衝撃波の界面への入射点近傍の高圧領域から生じたと考えられる。第二波の中心はいずれも気泡内にあり、これは気泡の膨張により駆動されたと考えられる。

Fig. 1a–d Interferograms of a shock-bubble interaction for silicone-oil (1.0 cSt)/air combination. A spherical shock wave was loaded from left. Exposure time is approximately $25 \text{ ns} \times 2$. Agfa-Gevaert Holotest Film 10E75 was used.

Fig. 2a, b Shadowgraphs of a shock-bubble interaction for water/helium combination. A spherical shock wave was loaded from left. High-speed camera Imacon 790 and Eastman Kodak Tri-X Pan 4164 were used. a Interframe time is $2.0 \mu\text{s}$ and exposure time for each frame is $0.4 \mu\text{s}$. b Later stage than a. Interframe time is $1.0 \mu\text{s}$ and exposure time for each frame is $0.2 \mu\text{s}$.

紙数の制限上、以下リバウンド衝撃波の生成に関する言及のみとする。図2は水／ヘリウムの場合の気泡と衝撃波の干渉の様子である。図2b1-2で、二つのきわだったリバウンド衝撃波のうち第一波は下流側で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。第一波波面の中心はほぼ下流側界面上にあり、その波源は図2a6からも明らかに液体ジェットが下流側界面と衝突した点近傍の高圧領域である。第一波が爆心側で弱いのは波が気泡を回り込むためである。第二波波面の中心は気泡内にあり(図2b1-2)、これは気泡の膨張により駆動されたと考えられる。水／空気の場合は、気泡の崩壊過程やリバウンド衝撃波の様相が水／ヘリウムの場合と同様であるので省略する。

シリコン油 (10 cSt) / 空気の場合には一つのリバウンド衝撃波が観察され、その波面の中心は、ほぼ気泡の爆心側界面上にあるため、シリコン油 (1.0 cSt) / 空気の場合の第一波と同様にして生じたと考えられる。

図3に数値計算による水／ヘリウムの場合の等圧線図を示す。液体ジェットと下流側界面との衝突による高圧領域から生じたリバウンド衝撃波が捕らえられた。この衝撃波は下流側で強く、このような指向性は実験結果と共通する。

Fig. 3 Numerical result for an interaction of a spherical helium bubble with a planar shock wave. Isobars.

5. 結言

気泡崩壊にともなうリバウンド衝撃波には少なくとも以下の三種があり, これらが単独または組み合わせで生ずる. (1) 気泡の上流側に接した液体中の高圧領域すなわち衝撃波が最初に気泡に入射した点の近傍を波源とする衝撃波, (2) 気泡の下流側に接した液体中の高圧領域すなわち液体ジェットが界面に衝突した点の近傍を波源とする衝撃波, (3) 収縮する気泡が最小体積に達したのち急速に膨張することによって駆動される衝撃波.

文献

- 1) 信越化学工業, KF 96(説明書 P6-3E), 信越化学工業, 1989.
- 2) 桑田 敏, シリコンハンドブック (伊藤 邦雄編), 初版, 日刊工業新聞社, 1990, pp 112-146.
- 3) Takayama K, Abe A, Sanada N, Sugiyama H, (Holographic interferometric observation of underwater shock wave with air bubbles), 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, Sendai, Japan, 1988, Oct., 1988, pp 641-650.
- 4) Ben-Artzi M, Birman A, (Application of the "generalized Riemann problem" method to 1-D compressive flows with material interfaces), J. Comp. Phys., 65, 1986, pp 170-178.
- 5) Falcovitz J, Nagoya H, Takayama K, Alfandary G, Hanoch G, (The GRP scheme for multi-fluid shock wave phenomena), 11th International Mach Reflection Symposium, University of Victoria, 13-17 June, 1994, June, 1994.