水-グリセリン溶液中におけるレーザ生成気泡の
挙動に関する研究*高橋 清^{*1}, 島 章^{*1}, 冨田 幸雄^{*2}Investigation on the Behavior of Laser Produced Bubbles
in Water-Glycerol Solutions

Kiyoshi TAKAHASHI, Akira SHIMA and Yukio TOMITA

An experimental study was conducted on the behavior of cavitation bubbles in water-glycerol solutions. A bubble was produced by focusing a Q-switched ruby laser into a solution, and the subsequent bubble behavior was observed by means of an Imacon high speed camera. Consequently, the relation between the characteristics of the bubble motion and the concentration of the solution was made clear. The results obtained here were summarized as follows: The oscillatory period of the motion of a bubble in a pure glycerol was 10-25 % longer than that in water. In the case of 85 percent water-glycerol solution by weight, the damping in the bubble oscillation is around minimum due to the effect superimposing the compressibility and viscosity of the liquid. When a bubble behaves in the neighborhood of a solid wall in a highly viscous solution, not only the radial motion but also translational one was suppressed.

Key Words: Bubble, Cavitation, Laser Focusing, Water-Glycerol Solution, High-Speed Photography

1. ま え が き

キャビテーション損傷は気泡の激しい崩壊により発生する衝撃圧が主たる原因である⁽¹⁾⁽²⁾。気泡の挙動はそれが置かれる周囲条件, すなわち流れ場に非球対称性を誘起する固体壁の存在ならびに液体物性の影響などを強く受ける⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。水は粘度が小さく気泡の運動へ及ぼすその影響は極めて弱いが, 高粘度液中では粘性散逸のためにその運動が抑制される⁽³⁾。このような事実は油中の気泡の挙動⁽⁴⁾ならびに非ニュートン溶液中での気泡の挙動に関する研究⁽⁵⁾からすでに明らかとなっている。さらに気泡崩壊時に形成される液体ジェット⁽⁶⁾の速度がかなり減少するという理論的な報告⁽⁶⁾もあるが, その実験的な検証はいまだに成されていない。一方, 水-グリセリン溶液中でのキャビテーション損傷実験⁽⁷⁾によると, ある濃度で損傷率が最小になるという興味深い事実が示されているがそのメカニズムの詳細は不明である。特に同溶液中での個々の気泡の挙動に関する研究は少なく, 2 個の空気泡と衝撃波との

相互干渉を扱った論文⁽⁸⁾を知見するにすぎない。

本研究では, ニュートン流体として広範囲に粘度を変えられる水-グリセリン溶液中の単一気泡の挙動に着目した。すなわち同溶液中にパルスレーザを集光させ, 生成した気泡⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾の挙動を高速度カメラを用いて光学的に観察した。その結果, グリセリン原液中における気泡の運動周期は水の場合よりも 10~25 % 程度長くなること, 85 % 水-グリセリン溶液の場合, 液体の粘度と圧縮性の相乗効果のために気泡運動の減衰が弱まる傾向にあること, さらに高粘度液中における固体壁近傍での気泡の運動は, 半径方向の運動のみならず壁方向への並進運動も著しく抑制されることなどが明らかとなった。

主 な 記 号

$R_{n,\max}$: 振動運動における n 回めの気泡の最大半径
 T_c : 気泡の運動周期
 c : 水-グリセリン溶液の濃度 wt %
 M : 最大膨張時の気泡内部圧力と無限遠での液体内圧力との比
 L : 気泡中心と固体壁面との距離
 μ : 液体の粘度
 C_∞ : 液体の音速

* 原稿受付 平成元年 12 月 19 日。

^{*1} 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平 2-1-1)。^{*2} 正員, 北海道教育大学函館分校 (〒040 函館市八幡町 1-2)。

P_{∞} : 液体の圧力

T_{∞} : 液体の温度

2. 実験装置および方法

図1に実験装置および光学系を、また図2に測定部の概略を示す。気泡はパルス幅 20 ns, 最大出力 60 MW のルビーレーザー〔日本科学エンジニアリング(株), NGP-60 MP〕のビームを、チャンバ(容積, 約 1000 cm³) 外側の凸レンズ(空気中の焦点距離 12 mm) で集光させて生成した^{(11)~(13)}。この気泡の挙動は、閃光時間約 200 μ s の Xe フラッシュを光源としてイメコン超高速カメラ(John Hadland 790)を用い、流し取り撮影(掃引速度 10 μ s/1 mm)ならびにこま取り撮影(100 000 こま/s)によって観察した。なお、固体壁面には厚さ 0.5 mm の透明プラスチック板を使用した。供試液体は大気圧下の蒸留水、水-グリセリン溶液およびグリセリン原液〔新日本理化(株)製〕であり、種々の濃度に対する、音速と粘度⁽¹⁴⁾の実験値が図3に示されている。図中、実線は粘度を、また Δ , $\circ$, $\square$ は音速を示す。なお音速の値はシングア라운드式測定装置〔超音波工業(株)UVM-2〕で測定した。その値は例えば 298.2 K の場合、0 % すなわち蒸留水中で 1449.1 m/s, そして濃度の増加とともに増大して、グ

リセリン原液中(100 wt % 濃度)では 1941.7 m/s となった。一方、同一温度において粘度は、水の場合 1.005×10^{-3} Pa $\cdot$ s と小さく、60 % 付近より急激に増大して、グリセリン原液中では 1499.0×10^{-3} Pa $\cdot$ s に達している。このように、高濃度になるほど粘度の温度依存性が増大することから、実験に際しては、一定温度 (293.2 ± 1.0 K) の維持に細心の注意を払った。

3. 結果および考察

無限に広がるグリセリン原液中に生成した気泡運動のこま取り撮影例を図4に示す。ほぼ球形を保ちながら膨張・収縮する気泡の運動の様相が良くわかる。次にストリーク写真の撮影例を図5に示す。図5(a)~(e)はそれぞれ蒸留水、水-グリセリン溶液(濃度 50, 60, 85 %)およびグリセリン原液中で生成した単一気泡の運動の典型例である。これらの実験データに基づいて、気泡の運動特性を調べ、理論との比較を行った結果を以下に示す。

図1 実験装置および光学系

図2 測定部の概略

図3 水-グリセリン溶液中の音速 C_0 および粘度 μ に及ぼす溶液濃度 c の影響

図4 グリセリン原液中での気泡の挙動
($R_{1, \max} = 0.7$ mm, $L = \infty$)

3・1 気泡の運動周期 ストリーク写真から得た、蒸留水およびグリセリン原液中での気泡の運動周期 T_c と最大半径 $R_{1,max}$ との関係を図6に示す。図6中の白ぬき、黒ぬりの点は、1回めおよび2回めの運動周期に対応している。また、実線は気泡内部の断熱運動を仮定して得られた理論曲線⁽¹⁵⁾である。

蒸留水の場合、理論と実線とは良く一致している。一方グリセリン液では、運動周期は水の結果よりも10～25%程度大きくなっている。しかも、粘度(293.2 K)を考慮した理論値よりも必ず低い値となっている。この理論と実線との差異は、気泡内外の圧力比 M の値の過小評価と、理論上無視している熱的効果に起因していると考えられる。

まず、 M の値について考察する。一般に気泡の運動形態が振動形から過減衰形へ移行するときの臨界半径は M の値が大きくなると小さくなる⁽¹⁶⁾。図6から比較的小さい気泡も振動運動を行っているのが推定でき、グリセリン液中で生成した気泡の最大膨張時の内部圧 M はそれほど低くないものと考えられる。その

理由の一つとして、レーザフォーカスした収束点におけるグリセリン液体の蒸発と熱解離による気体生成が挙げられる。以上のことは気泡の平衡半径⁽¹⁶⁾からも推測できる。すなわち M の値が大きいくほど平衡半径は大きくなる傾向にあるが、図5のストリーク写真から平衡半径を読み取り比較すると、グリセリン液の場合のほうが水の場合よりも大きくなっているのがわかる。

次に熱の影響を考えてみる。強いレーザ光を液中にフォーカスすると、収束点でプラズマが生成するほど局所的に高温が達成される。例えば、水中で15 000 Kに相当する連続スペクトルを観測したとの報告⁽¹⁷⁾もある。この高温により液体が蒸発し、気泡が生まれる。これが膨張すると周囲の液体は徐々に冷却されるが、気泡の収縮段階において、圧縮のために内部気体温度は再び上昇し、隣接する周囲液体の温度も高められる。したがって、崩壊末期の気泡周囲液体の粘度は、初期液温 T_0 より高い温度状態の値、すなわち、計算で仮定した値よりも低いものであると推測できる。

3・2 最大半径の相対比 $R_{2,max}/R_{1,max}$ 振動運動の減衰率に相当する、1回めおよび2回めの最大半径の相対比 $R_{2,max}/R_{1,max}$ を種々の濃度 c に対して示したのが図7である。

ストリーク写真から明らかなように、蒸留水中では最大膨張時の気泡内圧は極めて小さく、気泡の運動エネルギーの大部分は液体の圧縮性、特に衝撃波の放射のために液中に散逸してしまい、2回め以降の振幅は著しく減衰する。一方グリセリン原液中では、強い液体粘度のため気泡の運動は緩慢となり、観察した範囲内では2回程度の振動の後に気泡は平衡状態に漸近する傾向にある。これに対し50～85%溶液中の気泡の振

図5 水-グリセリン溶液中での気泡の挙動($L=\infty$)

図6 水およびグリセリン原液中での気泡の運動周期

図 7 気泡の最大半径比 $R_{2,max}/R_{1,max}$ の溶液濃度 c による変化

動は比較的長く持続する傾向にあった。図 3 から明らかなように、水-グリセリン溶液中の音速は濃度の増加とともに単調に増大するため、圧縮性の影響はこれに対応して弱まる。一方粘度は 60 % 程度から急激に増大するため高濃度領域では粘度の影響が強く現れることになる。この溶液濃度に対する物性値の相反した性質のために、ある濃度で気泡の半径比は最大となる。図 7 では 85 % 付近で極大を示す傾向にあることから、このとき気泡の減衰が最も小さい、換言すれば気泡の崩壊が最も弱かったものと推察できる。この傾向は同溶液中において、85 % で最も低い損傷率を得た Plesset の結果⁽⁷⁾と符合している。

3.3 固体壁近傍での気泡の挙動 図 8 は、グリセリン液中における固体壁近傍での気泡の挙動観察例である。ここで、気泡の最大半径 $R_{1,max}=0.6$ mm、気泡中心と固体壁との距離 $L=1.5$ mm、すなわち気泡と固体壁との相対距離は $L/R_{1,max}=2.5$ である。

気泡はほぼ球形を保ちながら、膨張・収縮し、16~17 こまでリバウンドする。その後固体壁の影響のためわずかながら縦長の形状となって再膨張する。水中の気泡はその崩壊末期に、内部に液体ジェットを形成しリバウンド以前より球形から逸脱することが知られている⁽¹⁸⁾。また理論計算⁽¹⁹⁾は、気泡がその最大収縮時に固体壁方向に 0.18 mm 程度移動する結果を与える。しかし、グリセリン原液中の気泡は図 8 から明らかなように並進運動はほとんど見られない。

気泡の崩壊時間は、グリセリン液中の結果が水の場合よりも 26 % 程度長くなっており⁽¹⁹⁾、無限液中の場合とおおむね一致する傾向を示している。したがって、この運動の遅れはグリセリン液の粘度に起因するものであると考えることができる。

図 8 グリセリン原液中における固体壁近傍での気泡の挙動

4. あとがき

水-グリセリン溶液中においてレーザパルスを用いて生成させた気泡の挙動を高速度カメラで観察した。その結果次のような結論を得た。

(1) グリセリン原液中における気泡の運動周期は水の場合よりも 10~25 % 程度長くなる。

(2) 本実験の範囲では、85 % 水-グリセリン溶液の場合、液体の粘度と圧縮性の相乗効果のために気泡運動の減衰が最も弱まる傾向にあった。

(3) 高粘度液中における固体壁近傍での気泡の運動は、半径方向のみならず壁方向への並進運動も著しく抑制される。

本研究では主として無限液中の気泡の挙動に着目したが、今後は、同溶液中における固体壁近傍での気泡の挙動を定量的に観察するとともに、理論的な考察をも加えていきたい。

終わりに臨み、本研究に対し有益なご助言をいただいた東北大学 高山和喜教授に深謝する。また溶液の音速の測定にご協力いただいた、東北工業技術試験所 阿部利彦氏に感謝の意を表す。さらに本研究遂行にあたり助力を得た本研究所 三浦紀重技官、門馬美和技術補佐員ならびに東北学院大学 庄司幸一実験指導員に感謝する。

文 献

- (1) Tomita, Y. and Shima, A., *J. Fluid Mech.*, **169**(1986), 535.
- (2) 島・富田, 機誌, **90**-819(1987), 164.
- (3) 高比良・ほか 2 名, 第 6 回キャビテーションに関するシンポジウム講論集, (1989), 127.
- (4) 井田・杉谷, 機論, **45**-399, B(1979), 1650.
- (5) Shima, A. and Tsujino, T., *Appl. Sci. Res.*, **38** (1982) 255.
- (6) Nakajima, K. and Shima, A., *Ing. Arch.*, **46**(1977), 21.
- (7) Plesset, M. S., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **92**(1970), 805.

- (8) Gülhan, A. and Beylich, A. E., *Acustica*, **63**(1987), 276.
 - (9) 木本・ほか3名, 機論, **50**-456, B(1984), 1825.
 - (10) 真田・ほか2名, 機論, **53**-486, B(1987), 317.
 - (11) Tomita, Y. and Shima, A., *Acustica*, **71** (1990), 161.
 - (12) 富田, 機講論, No. 887-2(1988-11), 27.
 - (13) 富田・島, 第6回キャビテーションに関するシンポジウム, 講論集, (1989), 105.
 - (14) Sheely, M. L., *Ind. Eng. Chem.*, **24**(1932), 1060.
 - (15) Shima, A., ほか2名, *AIAA J.*, **26**(1988), 434.
 - (16) Shima, A. and Tomita, Y., *Rep. Inst. High Speed Mech.*, Tohoku Univ., **31**(1975), 97.
 - (17) Barnes, P. A. and Rieckhoff, K. E., *Appl. Phys. Lett.*, **13** (1968), 282.
 - (18) Shima, A., ほか3名, *AIAA J.*, **21**(1983), 55.
 - (19) Sato, Y. and Shima, A., *Rep. Inst. High Speed Mech.*, Tohoku Univ., **42**(1980), 1.
-