22 2 個のキャビテーション気泡の挙動観察

北海道教育大 富田 幸雄^{*} , 東北大流体研 佐藤 光太郎[○]
東北大流体研 島 章

A Photographic Study of the Behavior of Two Cavitation Bubbles

Yukio, TOMITA^{*}, Kotaro, SATO^{**} and Akira, SHIMA^{**}

The dynamic behavior of two cavitation bubbles was observed by means of a high-speed photography. Two model bubbles were simultaneously produced by focusing a laser pulse into water. The motion of bubbles was photographed using a diffused illumination of back lighting with a diffuser. A schlieren technique was applied to visualize shock waves emitted from bubbles. The experimental results were compared with the numerical predictions obtained from a boundary integral method

1. はじめに

気泡の運動は流体機械の性能, 耐久性と密接に関わることが知られており, その基礎的研究として単一気泡の挙動観察が数多くなされている⁽¹⁾. しかし, 実際の流体機械等において気泡が単独で存在する状況はあまり見られず, 最近では複数気泡の挙動解明が注目されつつある. なかでも, 隣接して存在する2個の気泡の挙動に関する研究は気泡群の挙動, 特に衝撃圧の減衰⁽²⁾あるいは増幅作用⁽³⁾を解明する上で重要な基礎的課題であることから, これ迄実験的⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾並びに理論的研究⁽⁸⁾がなされてきたが, 未だに統一的な知見を得るには至っていない.

一方, 局所的な高圧発生の重要なメカニズムの一つである気泡と衝撃波との相互干渉問題⁽²⁾⁻⁽⁶⁾に関する研究から, 複数気泡の相互作用や連鎖的崩壊過程が明らかにされつつある. この場合, 気泡に作用する衝撃波は隣接気泡が発するその実験的シミュレーションであると思えることができる. 相互干渉問題で利用された複数気泡の多くは, 静止に近いガス気泡であるが, 個々の気泡の運動に起因する相互作用を明らかにするためにはそれ自身がキャビテーション気泡としての特性を有する気泡の生成が必要である⁽⁷⁾. ところが, キャビテーション気泡の運動はミクロな領域での高速運動であり, 必然的にその特性時間も短く, 現象の観察には高度の可視化技術が必要となる. さらに, 2個のモデル気泡を生成する場合には状況設定が一層複雑になる.

本研究では, 流れ場にじょう乱を与えることの少ないレーザビームの水中フォーカスを利用して2個のキャビテーション気泡を発生させ, その挙動を高速撮影した結果について述べる. 特に位相, 大きさともに等しい気泡の挙動は従来広く用いられてきた鏡像理論を実験的に再現することを意味し, ここでは鏡像原理の妥当性についても検討を加える.

^{*} Hokkaido University of Education, 1-2 Hachiman-cho, Hakodate 040

^{**} Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

2. 実験装置および方法

図1に気泡の発生原理を示す。本実験ではパルス幅20ns, 最大出力60MWのルビーレーザー(日本科学エン지니어リング NGP-60MP)を水中にフォーカスさせ, 2個のキャビテーション気泡を発生させた。同図に示すようにビームをスプリッターBSで分岐し, 一方は横から, 他方は2枚のミラー M_1, M_2 を介してチャンパー下方から光学経路に導いた。それぞれのビームは2倍に拡大され, 絞り I_1, I_2 で光量調整の後, 非球面凸レンズ

図1 気泡の発生原理

L_3, L_4 (空気中での焦点距離 $f=12\text{mm}$)で常温・常圧の水道水中に集光される。この場合, 2個の気泡が焦点面上に生成されるようビームのフォーカシングを注意深く行った。気泡間の相互位置は鏡筒の移動で調整可能であり, したがって基本的には同一面内において任意配置の2個の気泡を作ることができる。生成した気泡の挙動は閃光時間約 $200\mu\text{s}$ 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)で撮影した。撮影方法としては, 気泡内部に形成される液体マイクロジェットの可視化を目的とした拡散光を用いる方法と, 衝撃波の可視化を可能とするシュリーレン法を用いた。特に前者の場合には, 曲面形状を有する気泡内部を効果的に可視化するため, 拡散板の位置と固体壁での光の透過特性に注意を払った。撮影速度は10万~100万コマ/秒。現象との同期および撮影のタイミングはフォトセルとパルス遅延回路で行った⁽⁹⁾。

3. 結果および考察

水中でほぼ同時に生成した2個の気泡の挙動観察例を図2に示す。今, 発泡時の気泡間距離を l_0 , $L_t = l_0/2$, 大気泡の最大半径 $R_{b,max}$, 小気泡の最大半径 $R_{s,max}$ とし, また, 気泡間の相対距離を $L^* = L_t/R_{b,max}$ と定義する。同図はほぼ同じ大きさの気泡の相互運動であり, これは鏡像理論における剛体壁近傍での単一気泡の挙動と等価であると考えられている。ここでは, 気泡間の相対距離 $L^*=1.6$ であった。流れ場が非球対称であることから崩壊末期に液体マイクロジェットを形成しているのがわかる(16コマ目)。また, 剛体壁近傍での単一気泡の運動周期はRayleigh気泡のそれより大きくなるのが一般に知られているが, 2個の気泡の場合でもRayleigh気泡の約1.1倍になっている。図3は崩壊気泡の表面形状の時間的变化であり, ○は図2の下側の気泡から得られた実験値, —は鏡像原理を適用した境界積分法⁽⁹⁾による理論値を表す。このとき, 気泡は近似的に軸対称と見なし, 原点として対称軸上の2個の気泡の中間点をとった。ただし, 計算では液体の粘性, 圧縮性および表面張力の影響は無視し, 初期半径 $R_0=0.1R_{max}$ と仮定している。なお, R と z は気泡の最大半径を1とした無次元座標であり, 図中の番号は写真番号に対応している。気泡の崩壊末期に実験値と理論値の間に多少のずれが生じているが, これは主に実験におけるモデル気泡サイズの僅かな違いに起因するものと思われる。しかしながら全体的には両者はほぼ一致している。ところで, すでに筆者らは本計算方法で得られた理論値と

剛体壁近傍における気泡の実験値とが良好に一致することを報告しており⁽⁹⁾、これらのことから、本実験における条件下では気泡の運動に及ぼす剛体壁表面上の境界層の影響は小さく、実験的にも鏡像原理が十分妥当であることが明らかである。図4は境界積分法によって得られた気泡表面上粒子の流跡線である。気泡表面上の多くの粒子がジェット形成に寄与していることが理解できる。図5に近接して発泡した2個の気泡の挙動を示す。気泡サイズの相対比 $R_{b.s.}/R_{b.l.s.}=0.5$ 、気泡間の相対距離 $L^*=0.8$ であった。崩壊過程の小気泡は斜め下方からくぼみを形成しながら大気泡側へ移動した後、再膨張運動へと転ずる。その時に発せられる衝撃波とその後の小気泡のジェット形成により誘起される流れの影響を受けた大気泡は非球状運動を余儀なくされ、隣接気泡と反対側へジェットを形成する。したがって、小気泡を貫通した液体マイクロジェットは、見掛け上、大気泡の挙動とは無関係に自らの慣性力により大気泡内部を突き進んでいる。図6は2個の気泡の近傍に剛体壁が存在する場合である。2個の気泡は互いに引き寄せ合うと同時に剛体壁側へも移動している。また、液体マイクロジェットは壁面と隣接気泡の間に向かって形成していることがわかる。ただし、その角度は多少異なっており、小気泡に比べて大気泡の方が壁面と垂直に近い角度でジェットを形成している。このことから大気泡は小気泡より剛体壁、小気泡は剛体壁より大気泡の影響を強く受けていることが推察できる。図7にシュリーレン法による衝撃波の観察例を示す。この時の撮影速度は100万コマ/秒であった。気泡再膨張時に発せられた衝撃波は隣接気泡と干渉し、衝撃波近傍

図2 2個の気泡の挙動 (撮影速度10万コマ/秒, $R_{b.s.}/R_{b.l.s.}=0.83$, $l_0=2.7$ mm, $L^*=1.6$)

図3 気泡表面形状の時間的变化 ($L^*=1.6$)

図4 気泡表面粒子の流跡線 ($L^*=1.6$)

図5 2個の気泡の挙動 (撮影速度10万コマ/秒,

$R_{b,max}=1.4\text{mm}$, $R_{s,max}=0.7\text{mm}$, $l_a=2.2\text{mm}$, $L^*=0.8$)

の左右の濃度が反転していることから膨張波となって反射している様子が観察できる。

4. おわりに

レーザビームの水中フォーカスにより同時に2個の気泡を生成し, その挙動を高速度カメラによって撮影した。2個の気泡は互いに影響を及ぼし合うこと

から, その運動は非球状運動になることを視覚的に示した。特に大きさ, 位相とも等しい2個の気泡に関する理論と実験を比較検討して良好な一致を得た。したがって, 実験的な気泡の運動の究明にも鏡像原理が有用であることがわかった。

終わりに臨み, 本研究に対し有益な御助言を賜りましたBirmingham大学 J. H. Blake 教授に感謝の意を表します。また, 本研究遂行にあたり助力を得た本研究所三浦紀重技官に感謝します。

参考文献

- [1] Vogel, A., Lauterborn, W. and Timm, R., J. Fluid Mech., Vol.206 (1989), 299.
- [2] Tomita, Y., Shima, A. and Ohno, T., J. Appl. Phys., Vol.56 (1984), 125.
- [3] Hansson, I. and Mørch, K.A., J. Appl. Phys., Vol.51-5 (1980), 4651.
- [4] Tomita, Y. and Shima, A., J. Fluid Mech., Vol.169 (1986), 535.
- [5] Dear, J.P. and Field, J.E., J. Fluid Mech., Vol.190 (1988), 409.
- [6] Takayama, K., Proceedings of 16th International Symposium on Shock Tubes and Waves, (1987), 51.
- [7] Tomita, Y., Shima, A. and Sato, K., Appl. Phys. Lett., Vol.57-3 (1990), 234.
- [8] 藤川・高比良, キヤパシションに関するシンポジウム(第4回), 日本学術会議(昭60), 47.
- [9] 富田, 佐藤, 島, 可視化情報, Vol.10-1 (1990), 111.

図6 剛体壁近傍での2個の気泡の挙動

(撮影速度10万コマ/秒, $R_{b,max}=0.7\text{mm}$, $R_{s,max}=0.6\text{mm}$)

図7 衝撃波の挙動観察例