29 固体壁近傍のキャビテーション気泡の 高速撮影と数値シミュレーション

東北大流体研 富田 幸雄 , 東北大[院] 佐藤 光太郎^o
東北大流体研 島 章

The High-Speed Photography and Numerical Simulation
of Cavitation Bubbles near a Solid Wall

Yukio TOMITA , Kotaro SATO and Akira SHIMA

The behavior of cavitation bubbles near a solid wall was investigated experimentally and numerically. The motion of laser-produced cavitation bubbles was observed by means of a high-speed photography. Two methods were applied to visualize the phenomena. One is for observing jet formation using a diffused illumination of back lighting with a diffuser and the other is a schlieren technique to visualize shock waves emitted from bubbles. The boundary integral method was also applied to simulate the bubble motion and numerical calculations were compared with the experimental results.

1. はじめに

キャビテーション気泡による壁面損傷は工学上重要な問題の一つであるが、最近医学の分野においても、衝撃波、超音波あるいはレーザ技術等の応用に伴って液体内部の空洞現象が問題となってきている。⁽¹⁾ 一方、自由境界値問題である気泡の運動は、流体運動の数値シミュレーションコードの開発を目指す研究者にとって興味深い研究対象である。⁽²⁾ 固体壁面近傍での気泡の挙動に関する研究はこれらの基礎研究として注目され、これ迄、実験的⁽³⁾、⁽⁴⁾並びに理論的研究^{(5),(6)}がなされてきた。しかしミクロな領域での高速現象である気泡の挙動は必然的にその特性時間が極めて短く、現象の観察には高度の可視化技術が要求されることから、気泡運動の詳細についてはなお不明な点が多い現状である。

本研究では、流れ場にじょう乱を与えることなく気泡生成が可能なレーザビームの水中フォーカスを利用してキャビテーション気泡を固体壁面近傍に発生させ、⁽⁷⁾その挙動を高速撮影すると共に、境界積分法を用いて気泡運動の数値シミュレーションを行い、実験値と比較検討した結果について述べる。^{(6),(8)}

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験は内のり寸法 240mm×240mm×300mmのステンレス製実験容器内で行った。パルス幅20ns、最大出力60MWのルビーレーザを水中にフォーカスさせ、⁽⁷⁾アクリル製固体壁近傍に1乃至2個のキャビテーション気泡を発生させた。用いた集光レンズはf=12mm(空気中)の非球面レンズである。気泡の挙動は閃光時間約200μsのXeフラッシュ

シュを光源としてイメコン超高速カメラで観察した。撮影方法としてここでは、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の2通りを用いた。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。なお、発泡点から50mmの位置に圧力変換器(Kistler603B)を設置して気泡の運動に伴って放射される圧力パルスを測定した。このパルス間隔から気泡の最大半径が推定できる。

3. 理 論

問題を軸対称として扱い原点0は壁面上にあるものとする。流体は非粘性、非圧縮性、非回転であると仮定すると、速度ポテンシャル ϕ はラプラスの方程式を満足する。また、気泡は初期において内部に蒸気圧のみを有するRayleigh気泡であると仮定すると、この境界値問題は、Fredholm型の積分方程式を解く問題に帰着される。これを離散化するために気泡表面をN個の要素に分割すると次のように置くことができる。

$$\left. \begin{aligned} r(\xi) &= r_j M_1(\xi) + r_{j+1} M_2(\xi), \\ x(\xi) &= x_j M_1(\xi) + x_{j+1} M_2(\xi), \\ \phi(\xi) &= \phi_j M_1(\xi) + \phi_{j+1} M_2(\xi), \\ \psi(\xi) &= \psi_j M_1(\xi) + \psi_{j+1} M_2(\xi), \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} M_1(\xi) &= 1 - \xi, \\ M_2(\xi) &= \xi, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ξ は(0,1)のパラメータである。その結果、次の連立方程式を得る。

$$2\pi\phi_i + \sum_{j=1}^N (a_{1ij}\phi_j + a_{2ij}\phi_{j+1}) = \sum_{j=1}^N (b_{1ij}\psi_j + b_{2ij}\psi_{j+1}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a_{kij} &= s_j \int_0^1 d\xi M_k(\xi) \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{1}{|p_i - q(r, \theta)|} + \frac{1}{|p_i + \hat{q}(r, \theta)|} \right\} d\theta \\ b_{kij} &= s_j \int_0^1 d\xi M_k(\xi) \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{1}{|p_i - q(r, \theta)|} + \frac{1}{|p_i + \hat{q}(r, \theta)|} \right\} d\theta, \end{aligned}$$

微小時間 Δt 後の値はオイラー近似によって与えられる。

4. 結果および考察

図2は固体壁近傍で運動する気泡の挙動観察例(最大半径 $R_{max}=0.64\text{mm}$,発泡距離 $L=0.83\text{mm}$, $\gamma=L/R_{max}=1.3$)で、気泡の生成から再膨張過程を含んだ、非線形振動としての気泡運動の一周期が写し出されている。固体壁近傍で気泡が膨張する時、これらに挟まれた液体はよどみ流れとなり、反固体壁側の気泡表面との間にインパルスを生じて気泡は固体壁から離れる傾向を示す。図2の場合、この並進運動は僅かであるが、気泡がさらに壁面近くで運動するとき($\gamma \rightarrow$ 小)、この反発効果は増大する。液体の慣性力により気泡は平衡点を越

Fig.1 Experimental apparatus.

Fig.2 Behavior of a cavitation bubble near a solid wall.

 ($R_{max}=0.64\text{mm}$, $L=0.83\text{mm}$, $\gamma=1.3$). Interframe time is $10\mu\text{s}$.

(a)

Fig.3 Variation in bubble shape with time.

(a) Growth process

(b)

(b) Collapse process

Fig.4 Pathlines of selected fluid particles on the bubble surface.

えて膨張するため、やがて最大に到達し、収縮運動に転ずる。この過程では気泡はまず縦長に変形し、その後、曲率の大きい反固体壁側の気泡表面が平らになって、ついには気泡を貫通する液体マイクロジェットを形成する(14コマ目)。図3は同一条件における数値シミュレーションと実験値との比較である。ただし、初期半径 $R_0=0.1R_{max}$ として計算を行った。図中の数字は図2のコマ番号に対応している。両者は崩壊の末期を除いて良く一致しているのがわかる。図4はその時の気泡表面の流跡線である。気泡表面上の大部分の流体粒子がジェット形成に寄与していることが理解できる。崩壊末期、反固体壁側気泡壁近傍の局所領域に液体粒子は集積し、その点のよどみ点圧を増大させる。これが引き金となってマイクロジェットが形成されるが、この時、ジェット内の流跡線密度は他の部分に比べてはるかに高くなっている。このような液体マイクロジェットの壁面衝突の過程を極めて鮮明に可視化した結果を図5に示す。2コマ目から液体マイクロジェットの先端が見え始めている。約 100m/s の速度でジェットは気泡を貫通し、その後、周方向に広がっている様子がわかる。図6は固体壁に付着した静止空気泡の近傍にキャビテーション気泡を生成した場合の気泡間の相互作用の様子を示すものである。付着気泡はキャビテーション気泡に誘起される流れと生成時に発せられる衝撃波の作用により固体壁に向うマイクロジェットを形成する。この付着気泡はキャビテーション気泡の運動に起因する圧力変動に対応して収縮・膨張運動をしているのがわかる。一方、キャビテーション気泡は付着気泡が自由表面と類似の効果を呈することから、壁面から遠ざかりながらこれと逆向きにジェットを形成している。また、図7はシュリーレン法による衝撃波の観察例である。(a)は2個の気泡の同時生成時に発生する衝撃波の伝播の様相を示すもので、4および5コマにおいて伝播

する衝撃波がそれぞれ隣接気泡と干渉し、膨張波として反射している様子が観察できる。一方、(b)の場合、再膨張する気泡から発せられる衝撃波が壁面で反射の様相が観察でき、この時壁は衝撃的な力を受けることになる。

5. おわりに

壁面損傷の重要な要因である液体マイクロジェットと衝撃波の挙動を高速度カメラによって詳細に観察し、境界積分法による数値シミュレーションと比較検討して良好な一致を得た。

終わりに臨み、本研究に対し有益な御助言を賜りました東北大学高山和喜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、門馬美和技術補佐員および元東北大学大学院学生高橋浩君に感謝します。

文 献

- (1)例えば 高山・桑原., 病態生理, 5-3(1986), 206.
- (2)Tipton, R.E. et al., Submitted to J. Fluid Mech.(1990).
- (3)Tomita, Y. and Shima, A., J. Fluid Mech. 169, (1986), 535.
- (4)Vogel, A. et al., J. Fluid Mech. 206 (1989), 299.
- (5)Plesset, M.S. and Chapman, R.B., J. Fluid Mech. 47(1971), 283.
- (6)Blake J.R. et al., J. Fluid Mech. 170(1986), 479.
- (7)Tomita, Y. and Shima, A., Acustica. 71(1990)(In Press).
- (8)佐藤ら., 機講論(八戸地方講演会), (平2-6), 発表予定.