

強制振動を行う壁面付着気泡の挙動

浜田 聡美*・田中 忠芳*・神山 新一**・小池 和雄**・山崎 堯右*
(*農学部機械工学研究室 **東北大学高速力学研究所)

On Oscillation of a Bubble Near a Rigid Boundary Plane

Satomi HAMADA*, Tadayoshi TANAKA*, Shinichi KAMIYAMA**,
Kazuo KOIKE**, Takasuke YAMASAKI*

*Laboratory of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Kochi University
**Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University

Summary

This paper presents a study of the behavior of a gas bubble on a solid wall in an oscillating field in relationship to fixed cavitation.

The bubble has projections, or standing waves, on its surface in relation to the forced vibrating frequencies, and droplets are easily formed inside of a bubble, at the 1st natural frequency, estimated as spherical one.

Due to differences in frequency, droplets are formed as a result of the corresponding changes in the standing surface wave pattern.

1 諸 言

Rayleigh 以来気泡の挙動については多くの研究成果がえられ、中でもキャビテーション現象の解明に関連して種々の条件下での単一球状気泡の挙動に関しては詳細な検討が行なわれるようになってきている。

ところで、流れのキャビテーション現象が問題となるような流れ場の圧力変動に関するパワースペクトルは一般的に可聴周波数帯域程度でも極めて卓越した脈圧をもつのが普通である。

このような高い圧力振幅をもつ高速液流下の気泡の挙動については、従来多くの研究者が論じてきたような球対称で、内部が均質な気相である場合^{(1)~(5)}はむしろ限られた特殊な場合であろう。

流れのキャビテーション発生条件については、種々の既往のキャビテーション発生条件に関する理論の研究をもってしても十分には実験結果を説明しえていないことも上記のことが関与しているものと思われる。最近、気泡内部の液滴凝縮を扱った松本⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、物質移動を考慮した藤川ら⁽⁹⁾が気泡の成長もしくは崩壊過程について、詳細に検討を行ってはいらぬものの、あくまで球状気泡の仮定であって、振動気泡ではない。

ここでは、より実際の脈圧を伴う流れ下の気泡の挙動を解明することを目的として、比較的大きい脈圧下の強制振動を行わしめた気泡の様相を実験的にしらべた。その結果、従来あまり議論されなかった気泡界面定在波のくずれにより内部に液滴が発生する場合のあることを実験的に明らかにしたのでここに報告する。

2 実験方法と装置

図1に、ここで用いた実験装置の概略を示す。図1に示すように耐水性のラウドスピーカを加振

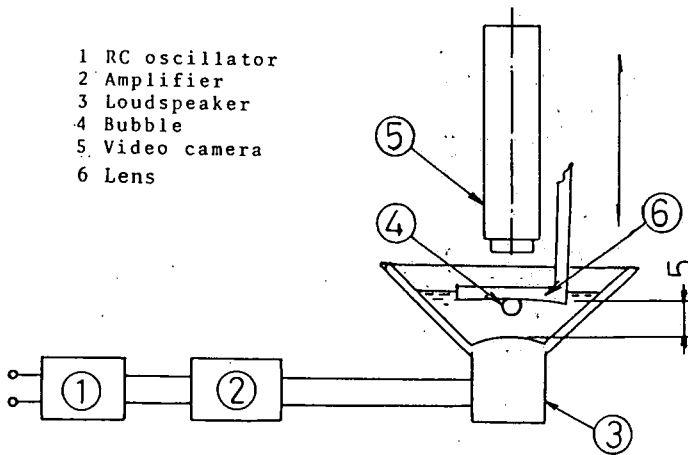


図1 実験装置の概略図

機に用い、これに 8 cc の水を貯え、中心部で 5 mm の間隔をとって水面に直径 17 mm、厚さ 5 mm の凹レンズを置き、その下に気泡を注射器で作成した。ラウドスピーカには、RC発信器から増幅器を介して任意の周波数の \sin 波をいれ、脈圧を発生させた。振動の様相は顕微鏡撮影用ビデオカメラにて撮影し、録画再生し、テレビジョン画面上で検討した。

加振時の圧力の較正は、図2に示すように同一レンズ中心に半導体圧力計プローブ（固有振動数 40 kHz）をとりつけ、各周波数成分毎の圧力振幅をFFTアナライザによって求めた。

加振時に気泡は多少移動したが、その視野の圧力振幅のちがいは少なく、ここでは無視した。

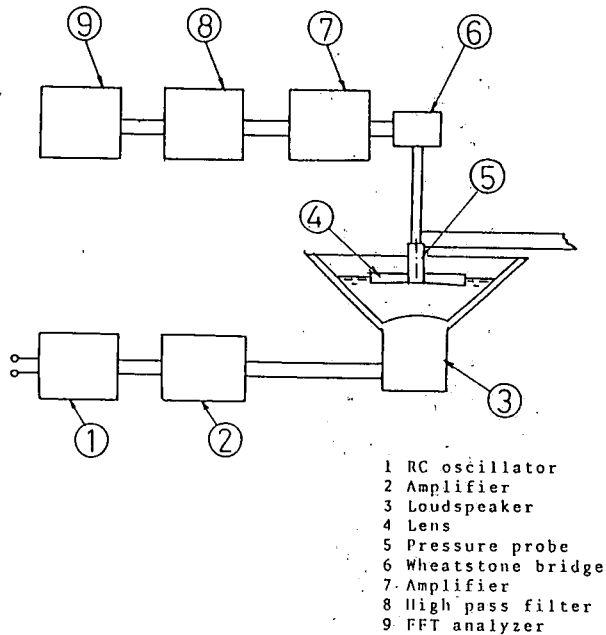


図2 圧力の較正方法概略図

3 実験結果

以上の実験方法によって、静止時でレンズ下面に付着させた球状気泡を加振し、その動的挙動を実験的にしらべた結果を以下に示す。

図3は、液滴の発生する加振周波数と気泡径との関係を示したものであり、図中実線は球状気泡と仮定した場合の一次の固有振動数

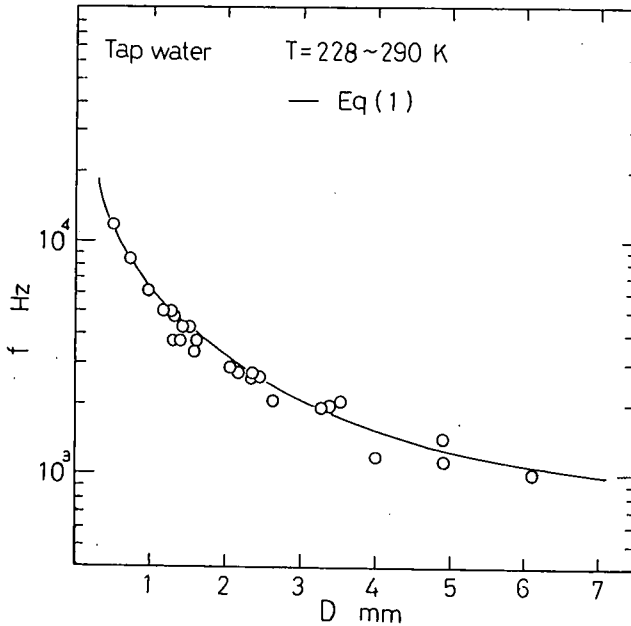


図3 気泡内に液滴の発生する周波数

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\pi p_0}{\rho_l R^2}} \quad (1)$$

ただし、 κ : 比熱比、 p_0 : 液圧、 ρ_l : 水の密度、 R : 気泡半径であり、主に気泡内に液滴が発生するのはこの周波数付近であることがわかる。図4はそのときの周波数における加振液圧振幅と気泡の外壁の凹凸の高さ（以後角の高さという）の関係であり、Keller ら⁽⁴⁾の数値解析結果と似た傾向を示す。図5はアンプ Scale 一定設定の場合の角の高さの変化を示す。同図中上部○印凹凸が静止して見えるいわゆる同期した状態、×印は角が円周上を前進もしくは後退して見える状態を示す。本実験では、圧力振幅が小さい状態で同期していても、圧力振幅を大きく加振すれば、同期がとれなくなったり、またその逆の場合も存在する（写真1）。このような状態でも僅かに加振周波数をずらすことによって様相が著しく変化し同期していた気泡が急に激しく乱れ、白炎状の表面を呈する（ストロボ閃光時間 1.5 μ s 下でははげしくスパイク状の角が発生（写真2））。図4中○印は気泡内に液滴が発生する状態である。図5中の一次の固有振動数付近で液滴が発生する状態でさらに液圧をあげると、0.5～2秒毎に発生液滴は角によって気泡外へはじきとばされ消滅し、それに応じて気泡径の二倍以上の遠方場から気泡中心に向けて往復流が生じているのが観測される（写真3）。

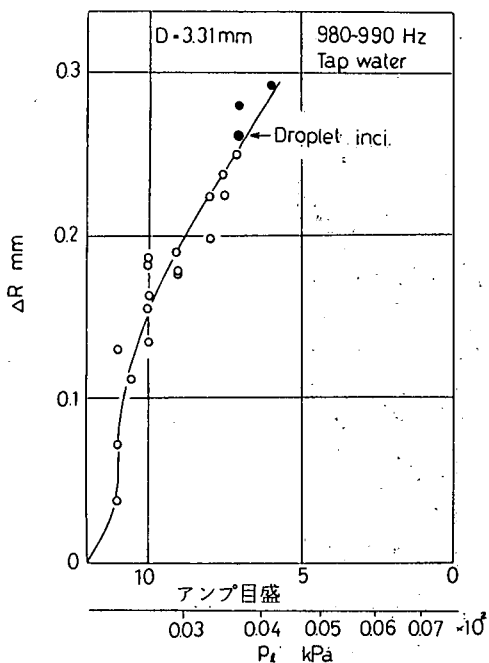


図4 気泡表面凹凸(角)の高さと液圧の関係

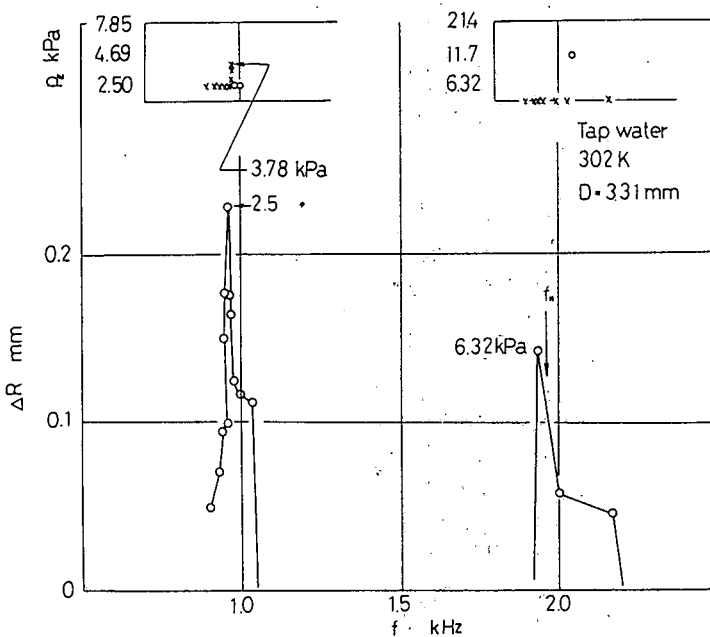
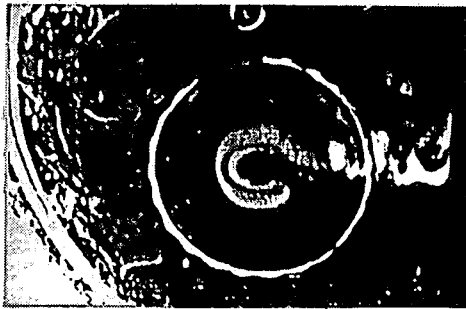
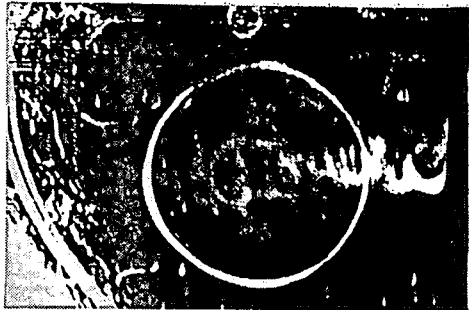


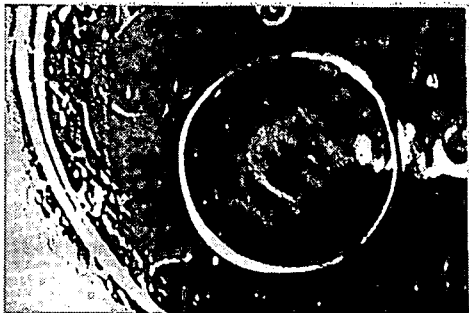
図5 角の高さと周波数の関係



(a)
d=3.14mm
1950Hz
4.9kPa
n=24個

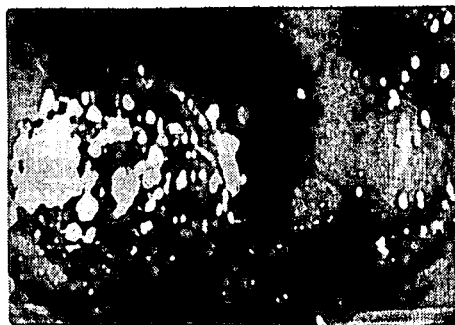


(b)
d=3.14mm
2000Hz
4.9kPa
n=4個



(c)
d=3.14mm
2160Hz
4.9kPa
n=2個

写真1 わずかの周波数のちがいによる n の変化



d=4.43mm
1860Hz
40kPa

写真2 ストロボライト (1.5 μ s) による気泡表面

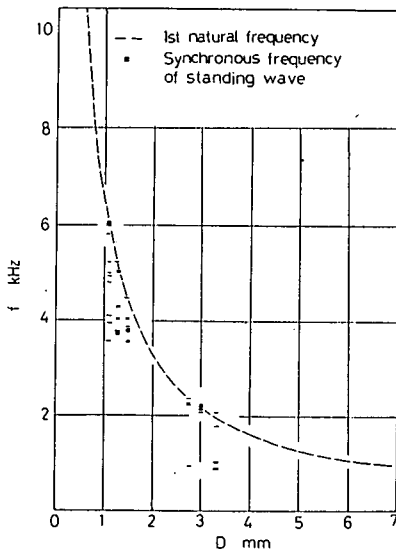


図6 角が静止する周波数と気泡径の関係

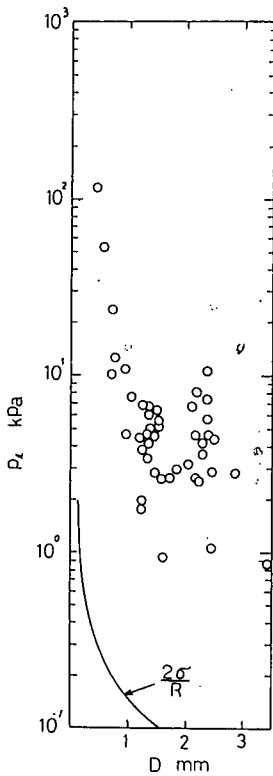


図7 気泡内に液滴が発生する液圧と気泡径の関係



d=3.58mm
2050Hz
1.54 kPa

写真3 一次の共振点付近の高脈圧下の気泡

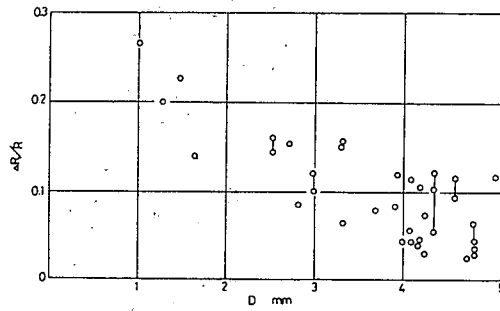
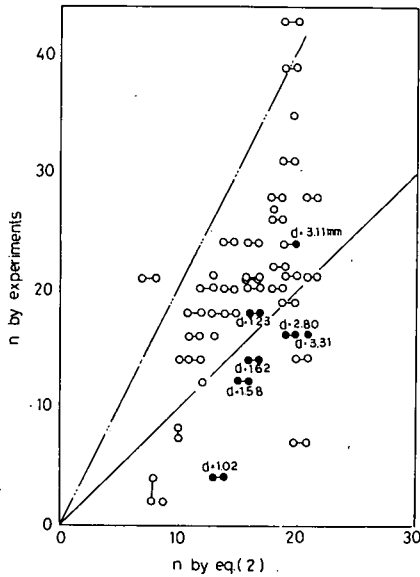


図8 角の高さと気泡径の関係

図7は、気泡内部に液滴の発生する脈圧振幅と気泡径を示し、図8はそのときの角の高さと気泡径の関係を示す。

このように大圧力振幅で気泡を振動すれば、気泡表面に発生する定在波は非同期時に波形が崩れ、波の根元がちぎれて壁面に液滴となって付着するものと判断される。このことは数百 Hz での加振によって 5 mm 直径程度の大気泡を振動させた場合、ビデオカメラを通じて、液滴の飛散が観測されることから説明される(ただし較正圧力が 10^3 Hz 以下では正確を期し難かったのでここに記さない)。さらに小径の気泡では、圧力振幅を上げて液滴が生じにくく、その代わりにガラス面上がくもり、凝縮していることがうかがわれた(写真4)。

図9は、気泡表面に発生した角の数の実測値（縦軸）と球状気泡の場合の Rath⁽¹⁾による理論値



d=1.575mm
3680Hz
940Pa

写真4 凝縮液滴のついた気泡

図9 球状気泡としての角の数の理論値との比較

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(n-1)(n+1)(n+2)\sigma / (\rho_l R^3)} \quad (2)$$

を満足する n (ただし、 n : 次数もしくは角の数、 f : 加振周波数、 σ : 表面張力) をプロットしたものである。

写真5に液滴が生じ同期している気泡の様相を示す。このように画像上角の列の向う側の角との分別が不明瞭のため、式(2)の2倍として数えることもありうるのでこれを一点破線で図9中に示した。図中の実線と破線の中に多くの実測値が入っていることから、およそ球状気泡の高次のモードの様相で励振していることがわかる。

さらに側面からも観測し撮影した一例を写真6に示す。



d=1.29mm
3700Hz
26.5kPa

写真5 内部に液滴を発生して同期した気泡



d=1.88mm
2880Hz
3.0kPa

写真6 側面からみた振動気泡

4 結 論

壁面付着気泡について大圧力振幅下の強制振動を実験的に行った結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 圧力振幅が大きく、球状気泡近似としての一次の固有振動数付近になると大径気泡では容易に内部に液滴が発生する。
- (2) 内部に液滴が発生し、共振点付近になると気泡周りの遠方場の流れにも影響を与える。
- (3) 強制振動の任意の低周波振動では気泡は球状で運動せず、界面について高次のモードを考慮しなければならない。

以上のことは壁面付近で発生するフィクスト型のキャビテーションのメカニズムを検討する場合にも参考となる資料を与えるものである。

文 献

- (1) Rath, H. J., Mechanics Research Communications, 8-1 (1981), 1.
- (2) Kornfeld, M. and Suvorov, L., J. Appl. Phys., 15 (1944), 495.
- (3) Howkins, S. D., J. Acoust. Soc. Am., 37-3 (1965), 504.
- (4) Keller, J. B. and Miksis, M., J. Acoust. Soc. Am., 68-2 (1980), 628.
- (5) Hsieh, D. Y., Trans. of ASME, J. of Basic Engng., 94-3 (1972-9), 625.
- (6) 松本, 日本機械学会論文集, 50-455, B (昭59), 1649.
- (7) 松本, 日本機械学会論文集, 51-467, B (昭60), 2036.
- (8) Matsumoto, Y., International Symp. on Cavitation, Sendai, 1 (1986-4), 37.
- (9) 藤川・赤松, 日本機械学会論文集, 50-454, B (昭59), 1467.

(昭和61年9月30日受理)

(昭和61年12月27日発行)