

## キャビテーション気泡群の運動と音

亀田 正治 (東京農工大), 林 洋史 (東京農工大・院)

### Pressure waves generated by oscillating bubble clouds

Masaharu KAMEDA and Hirofumi HAYASHI

#### ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation of the dynamics of oscillating gas bubbles in acoustic pressure fields. We observe the expanding and collapsing motion of clouds of bubbles by high-speed photography. A vertical shock tube is used as a sound source. Water is introduced in the bottom of the shock tube. The bubbles are generated in water by means of electrolysis. Pressure signals are measured at the bottom of the shock tube. The principal experimental results are as follows. The peak of pressure signals is observed when the bubble cloud, whose position is close to the pressure sensor, collapses. The period of pressure oscillation due to the bubble motion depends on the initial gas volume fraction of the cloud. When there are two bubble clouds in the liquid, the motion of individual bubble cloud interacts to each other.

**Keywords:** Bubble, Acoustics, Cavitation, High-speed photography, Non-uniformity

#### 1. はじめに

減圧による発泡現象は、ポンプなどの流体機械、超音波利用機器におけるキャビテーションをはじめ、さまざまな場面で見られる。このようにして発生した気泡群は、圧力回復によって収縮、消滅する際に高い圧力を発生する。この高い圧力は、騒音や壊食を引き起こす原因となっている。

特に、多数の微小気泡から構成されるクラウドキャビテーションの場合、他の形態のキャビテーションに比較して、騒音や壊食が大きくなることが知られている<sup>1)</sup>。このクラウドキャビテーションが発生する高圧に関して、最近いくつかの数値シミュレーションが行われている<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>。それらの結果から、高圧の発生原因が、クラウドキャビテーション中における圧力波の収束現象にあることが明らかとなっている。

一方、最近 Reisman ら<sup>4)</sup>は、クラウドキャビテーションをともなう翼表面の圧力パルスを調べる実験を行い、興味深い現象を示している。彼らによると、翼面上に発生する圧力パルスには、異なる位置に設置されたすべてのセンサー出力に共通するもの (global pulse) と、個々のセンサーで個別にとらえられたもの (local pulse) の 2 種類が存在する。そして、local pulse の発生は気泡群の粗密による、と推論している。

著者らの過去の研究結果<sup>5)</sup>から、気泡数密度の空間的な非一様性は、気泡を含む液体中を伝わる圧力波の構造に大きな影響があることがわかっている。しかし、Reisman らが指摘したような local pulse の発生原因と気泡数密度分布との関係については、必ずしも明らかではない。

以上をふまえて本研究では、圧力変動にともなう気泡群の成長・崩壊挙動、および崩壊時に気泡群が発する圧力波の様子を、液体衝撃波管を使った模擬実験によって調べた。特に、複数の気泡群が存在する場合に焦点を絞り、個々の気泡群の運動、およびそれら同士の相互作用に着目した。その結果、局所的に集積した気泡群の崩壊が local pulse の発生原因であることがわかった。また、気泡群同士の相互作用による、複数の気泡群の連鎖的な崩壊現象をとらえた。

#### 2. 実験装置・方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。縦型液体衝撃波管は、おもにバイレックスガラスでできており、管直径は 52 mm、全長は 5.3 m である。本衝撃波管は隔膜によって上下 2 つのパートに仕切ることができ、下部 0.3 m が高压気体部および水が入った液体部、上部 5 m が低压気体部となっている。液体部は円筒状にくりぬかれたアクリル製の四角柱であり、内部の様子を観察することができる。また、ピエゾ型圧力センサー (Kistler 603B) が液体部底面に 2 個、隔膜直下の管壁に 1 個、計 3 個取り付けられている。

気泡核の発生には電気分解法を用いた。電極の配置図を Fig. 2(a) に示す。センサー (P2, P3) 直上 5 mm の位置に渡した直径 0.5 mm の炭素棒を陽極、左側の炭素棒電極を陰極、とした。Fig. 2(b) は気泡発生状態の例である。管の左側領域に相対的に大きな気泡が、右側に小さな気泡が発生していることがわかる。

隔膜を破断すると、高压気体部には膨張波が、低压気体部には衝撃波が発生・伝播する。液体はまず膨張波によって減圧され、その後低压気体部管端から反射して

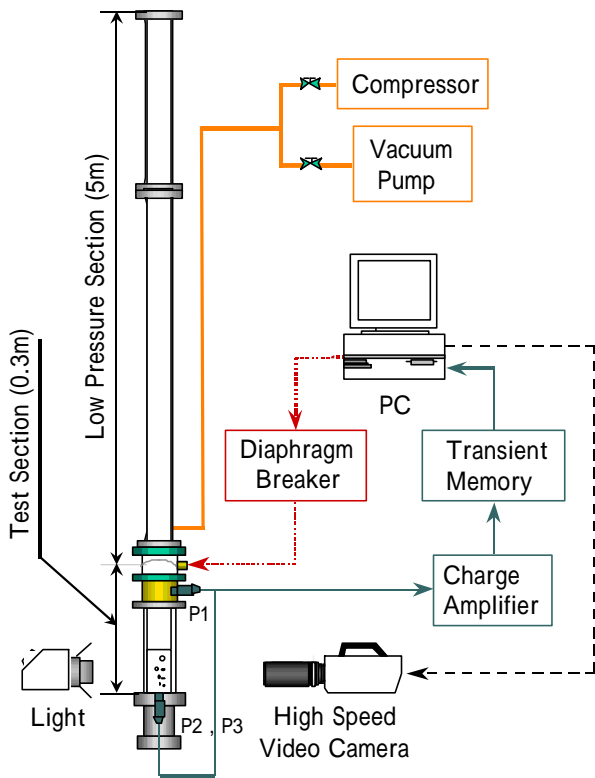


Fig. 1 Experimental setup

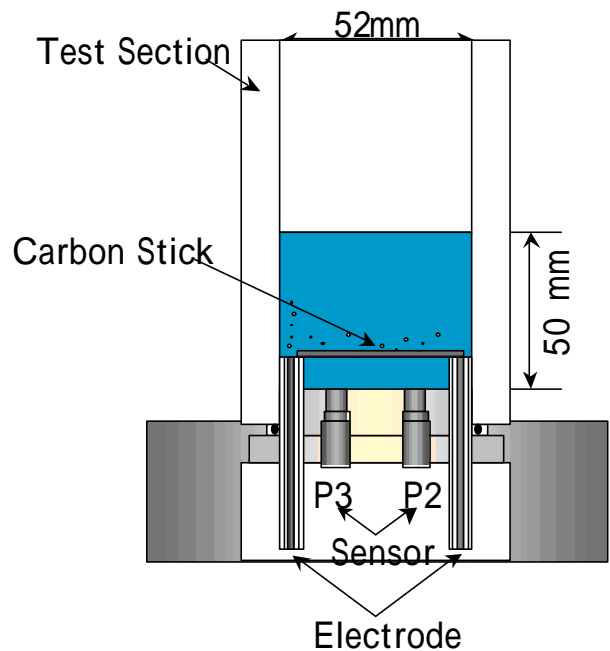
きた衝撃波によって加圧される．これら一連の過程で生じる気泡群の運動を，高速度ビデオカメラ（フォトロン Fastcam-Ultima UV，撮影速度 18,000 fps）撮影によって観察した．撮影画像と設置した圧力センサーからの出力を比較することで，気泡群の運動によって生じる圧力波の特性を調べた．

### 3．実験結果と考察

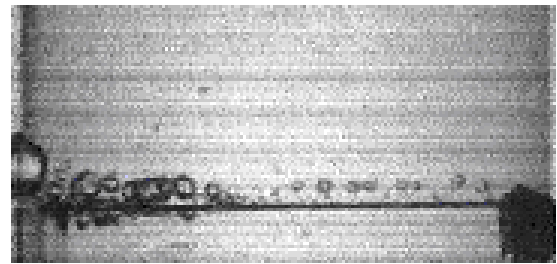
今回の実験では，低圧気体部の初期圧力を 0.1 kPa，高圧気体部および液体部のそれを大気圧に固定した．また，液体温度は 22 に設定した．

3 個の圧力センサーによる圧力測定結果の一例を Fig. 3(a) に示す．隔膜破断時を時刻ゼロとした．気相中におかれた圧力センサー (P1) の出力に注目すると  $t = 10$  ms で，液体圧力は 22 における飽和蒸気圧 (2.6 kPa) を下回り，その状態が 12 ms 程度持続する． $t = 23$  ms を過ぎると反射衝撃波が到達し，液体の圧力も高くなる．

Fig. 3 の圧力測定と同時に進めた高速度ビデオカメラ撮影の結果を Fig. 4 に示す．ここでは，反射衝撃波到達後の気泡収縮過程に着目した．収縮開始前の気泡直径は，左端にある大気泡で 5 mm，水平に渡した炭素棒上の気泡で約 2 mm である．なお，図中の写真番号は，Fig. 3(b) に示す圧力時間履歴の拡大図の中に見られる丸数字と対応している．また，これ以降，左側の圧力センサーを P2，右側の圧力センサーを P3 と呼ぶことにする．



(a) bubble generator



(b) two clouds of bubbles

Fig. 2 Bubble generator

Fig. 4 より，近接して存在する気泡群であっても，個々の気泡群の運動には個別の周期が存在する．右側の気泡群は，反射衝撃波到達後ただちに収縮をはじめ， $t = 24.56$  ms で第 1 回目の最収縮に達する．ところが，同じ時刻における左側の気泡群の様子を見ると，ほとんど収縮していない．左側の気泡群が第 1 回目の最収縮に到達する時刻は  $t = 25.89$  ms であり，右側のそれに比べて 1.3 ms 程度遅い．

Omta<sup>6)</sup> や d'Agostino ら<sup>7)</sup> は，気泡群の固有振動数に関する詳細な理論的検討を行っている．彼らの結果によると，気泡群が持つ最低次の固有振動数  $f_0$  は，近似的に，

$$f_0 = \frac{c_m}{2L}, \quad c_m = \sqrt{\frac{p_0}{\alpha_0 \rho_l}}, \quad \dots (1)$$

と表される．ただし， $L$  は気泡群の直径， $\alpha_0$  は初期ボイド率， $p_0$  は初期圧力， $\rho_l$  は液体密度である．また， $c_m$  は，気泡を含む液体中における低周波圧力波の伝播速度を意味する．

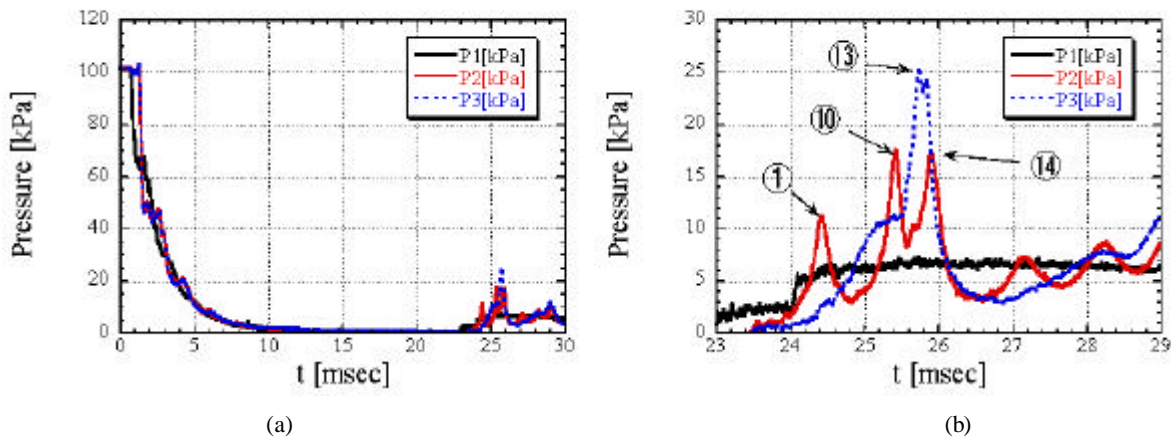


Fig. 3 Pressure signals

式(1)から, 気泡群サイズ  $L$  が等しい場合, 気泡群のボイド率  $\alpha_0$  が高いほど固有振動数は低下することがわかる. Fig. 4 に示した実験では, 左側の気泡群のほうが, 右側の気泡群に比べて明らかにボイド率が高い. そのため, 左側の気泡群の振動周期は, 右側のそれに比べて長くなる.

ふたたび Fig. 3(b)の圧力変化に目を移すと, 二つのセンサー出力の時間履歴が全く異なることに気づく. また, Fig. 3(b)の丸数字が Fig. 4 の写真番号と対応していることに注意して, 気泡群の運動と圧力変化とを比較すると, 個々の気泡群が最収縮に達する時刻と, それぞれの群の直下にあるセンサー出力がピーク値をとる時刻は, 常に一致していることがわかる. このように, 局所的な圧力ピークは, その近傍の気泡群が崩壊することによって生じる.

ところで, 右側の気泡群が持つ振動の周期は, からの経過時刻をそれと定義すると, ちょうど 1 ms である. この周期を持つ圧力変動は  $t = 27$  ms 付近でも見ることができる.

ところが, グラフをよく見ると, 同じ圧力センサー P2 の時間履歴中に, 右側の群固有の振動周期とは異なる時刻で圧力ピーク(14)が発生していることに気づく. これは, 左側の気泡群が崩壊した際に生じる高い圧力が液体中を伝播することで, 右側の気泡群の崩壊が誘起されたことが原因である.

このように, 気泡群は個別に運動しつつも, 相互作用による運動も引き起こされる. なお, 右側の気泡群が崩壊する際に発する圧力パルスは, 左側の気泡群の運動に影響があるようには見えない. このことは, 相対的にボイド率の高い気泡群のほうが, 周囲の気泡群の運動に対する影響が大きいことを意味している.

#### 4. おわりに

圧力変動にともなう複数の気泡群の成長・崩壊挙動を液体衝撃波管によって調べた. 実験結果から明らかになったことは以下のようにまとめられる:

- (1) 個々の気泡群特有の振動周期が存在する. また, その周期は群のボイド率に依存する.
- (2) 気泡群の崩壊にともなって, 局所的な圧力パルスが発生する.
- (3) 相対的にボイド率の高い気泡群は, 周囲の気泡群の運動に影響をおよぼす.

本研究の遂行経費の一部は, 文部省科学研究費補助金(奨励研究 (A), No. 11750132)によった. 関係各位に対し, 記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 1) 加藤: 「キャビテーション (増補版)」 (1990) pp. 32-33.
- 2) 奥田, 井小萩: "気泡雲の崩壊挙動の数値シミュレーション," 機論, Vol. 62, No. 603 B (1996) pp. 3792-3797.
- 3) 島田, 松本, 小林: "クラウドキャビテーションの動力学とキャビテーションエロージョン," 機論, Vol. 65, No. 634 B (1999) pp. 1934-1941.
- 4) Reisman, G.E., Wang, Y.-C. and Brennen, C.E.: "Observation of shock waves in cloud cavitation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 355 (1998) pp. 255-283.
- 5) Kameda, M. and Matsumoto, Y.: "Shock waves in a liquid containing small gas bubbles," *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 2 (1996) pp. 322-335.
- 6) Omta, R.: "Oscillation of a cloud of bubbles of small and not so small amplitude," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 82, No. 3 (1987) pp. 1018-1033.
- 7) d'Agostino, L. and Brennen, C.E.: "Linearized dynamics of spherical bubble clouds," *J. Fluid Mech.*, Vol. 199 (1989) pp. 155-176.

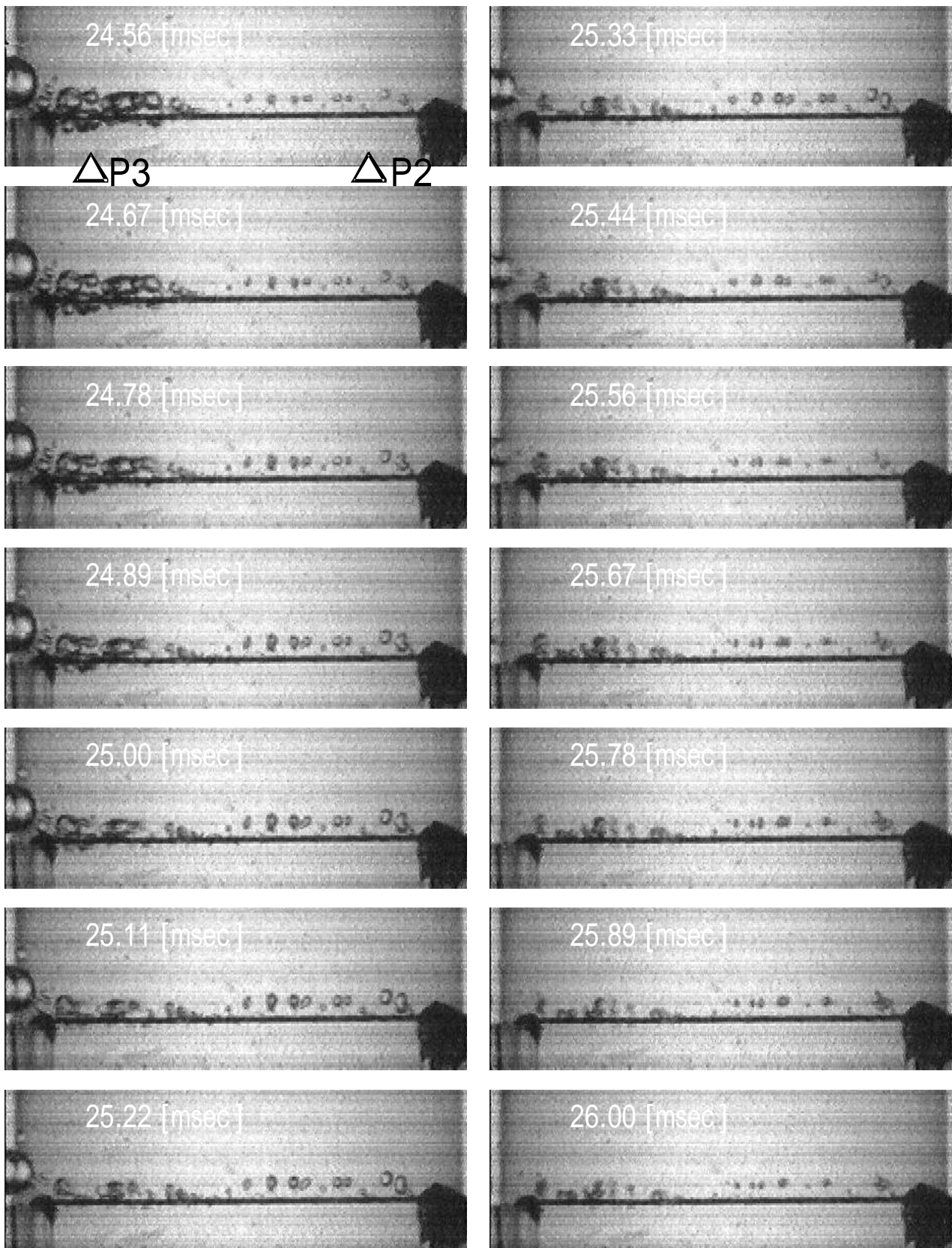


Fig. 4 Photograph sequence of oscillating clouds of bubbles