

集束超音波によるキャビテーションバースト

崔 博坤[†] 古川 剛

明治大学理工学部物理学科 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

E-mail: [†]pkchoi@isc.meiji.ac.jp

あらまし 強力な1 MHz 集束超音波を水中に照射すると、焦点付近でチャツという可聴音とともに気泡群が突発的に発生する。このキャビテーションバーストと呼ばれる気泡群の運動を、高速度カメラを用いて15,000-70,000 fps の速度で撮影した。発生する入力電力の閾値は溶存酸素量に依存し、30-55Wであった。0.5 mg/L 以下では180W でも発生しなかった。発生した直後の気泡は60-80 μ m の球状で、これは1個の大きな気泡というよりも微小な気泡が気泡間ビヤークネス力によって集合しているものと想像された。その後、気泡群は音波伝搬方向に垂直に拡大し、集束音場の影響を受けて中心の抜けたリング状に4mm 程度まで成長した。気泡群の進行する位置によっては成長せずに潰れてしまうものもあった。並進速度はサイズの小さい発生初期ではおよそ3.5 m/s と大きいが、拡散後は1.6 m/s 程度になった。この大きな速度は、気泡によって超音波が散乱・吸収され気泡前後で音圧差が生じて大きな放射力を生んだためである。ハイドロホン測定から、可聴音は2-3kHz で、気泡群がリング状に成長・拡散することに依って発生することがわかった。

キーワード キャビテーション、バースト、集束超音波、ビヤークネス力、高速度カメラ、

Cavitation burst generated by focused ultrasound

Pak-Kon CHOI[†] and Tsuyoshi Furukawa

Department of Physics, Meiji University 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, 214-8571 Japan

E-mail: [†]pkchoi@isc.meiji.ac.jp

Abstract High-intensity focused ultrasound can generate a burst type of cavitation. This phenomenon, called as a cavitation burst, occurs at intensity levels higher than those at which ordinary cavitation occurs. The cavitation burst is a cluster of bubbles with feather-like outline accompanying audible sound with the duration of about 10 ms. We observed this phenomenon with 1 MHz-focusing transducer using a high-speed camera at the speed of 15,000-70,000 fps. Input-power threshold of the burst was in the range of 30-55 W, which depended on the quantity of dissolved air. The bubble just after the occurrence was nearly spherical with the size of 60-80 μ m, and this appeared to be a bubble cluster which was resulted from the aggregation of tiny bubbles by second Bjerkness force. The bubble cluster expands in the direction perpendicular to the sound-propagation axis, and forms a ring-like structure with the size up to 4 mm. The translational speed of the cluster was 3.5 m/s at the initial stage and decreased to 1.6 m/s at the final stage. This large value of the speed was resulted from a large radiation force due to scattering and absorption of focused sound by the bubble cluster. Hydrophone measurement showed that the audible sound has frequency components of 2 – 3 kHz and was attributed to the expansion and diffusion of the bubble cluster.

Keyword cavitation, burst, focused ultrasound, Bjerkness force, high-speed camera

1. はじめに

強力な集束超音波を水中に照射すると、通常のキャビテーション気泡よりも大きな気泡群がチャットという可聴音とともに突発的に発生することがある。この現象はキャビテーションバーストとして、1950年代に知られていた[1]。鳥飼ら[2]は最高 3500fps の高速度写真から、気泡群が超音波焦点前後で発生し、その移動速度は 3-4m/s であることを報告している。根岸[3]は持続時間 $20\mu s$ の放電管を使って 490kHz、約 23 気圧の音圧で数秒間に 1 回のバースト気泡を観測した。これは通常のキャビテーション閾値よりもずっと大きいことがわかった。しかし、この現象はそれ以降研究されていず、詳細は知られていない。当時行われた高速度カメラによる気泡観察では撮影速度が遅かったため気泡を個別に分解して観測することができなかった。今回我々は最高速度 70,000 fps の高速度カメラを用いてキャビテーションバースト気泡の観察を行った結果を報告する。微小な気泡からなる気泡群と集束音場との相互作用から生じるものであることがわかった。

2 実験

イオン交換水を満たしたアクリル水槽（幅 130mm、長さ 190mm、高さ 150mm）に 1MHz 集束超音波を連続的に照射する。振動子直径は 30mm、焦点距離は約 36mm、照射電気パワーは約 100-150W である。振動子に対向する面には超音波吸収ゴム（Eastek, EUA201A）を貼り、定在波ができないようにしてある。吸収ゴムは 1MHz で 25dB 以上の吸収率がある。超音波伝搬軸に垂直方向から光ファイバーを用いて白色光を照射し、気泡のシャドウグラフを 20 倍のズームレンズを装着した高速度カメラ（フォトロン APX RX）で撮影する。撮影速度は 15,000-70,000 fps である。また、ハイドロホン（Honda Electric）を音軸からはずれた位置に置き、キャビテーションバーストからの音圧波形を測定した。

3. 実験結果と議論

図 1 は、焦点距離の位置で気泡群（上側の矢

印）が発生しているときのデジカメ写真を示す。もやっと白く見えるのが気泡であるが、超音波伝搬方向に高速に動いているため低速写真では分解できない。パワーが比較的低いときは数秒に 1 回程度の発生頻度であるが、100 W 程度以上では 1 秒間に数回から数十回発生する。

キャビテーションバーストが発生するしきい値入力電力を図 2 に示す。入力電力値は反射電力を引いた正味の電力である。また音響出力はその 50-60% である。水を脱気して溶存酸素量の異なる試料を用意し、超音波入力を徐々に上げながらキャビテーションバーストが始めに発生する電気入力パワーを調べた。超音波入力時に発生したキャビテーション気泡が消えるまで 1-2 分間待つてから、電圧を上げていった。溶存酸素量約 8mg/L（飽和空気状態に対応）では約 35-40W でバーストが発生するが、溶存空気を減らすとしきい値は徐々に上昇し、0.5mg/L 以下のとき、180W の電気入力でもバーストは発生しなかった。電力 50W のとき、集束点での音圧は約 15 気圧（実効値）である。以下の実験は 50-60% の溶存空気のもとで行った。

図 3 は、15000fps で撮影したキャビテーションバースト気泡群で、 $67\mu s$ のシャッター時間の中に A-E の 5 個の気泡群が次々に発生し、超音波の進行方向（右から左方向）に約 3m/s の速度で移動している様子である。A で微小気泡が発生し、B-D のように成長し、E では円の周囲上に微小気泡群が大きく拡がり、ついには拡

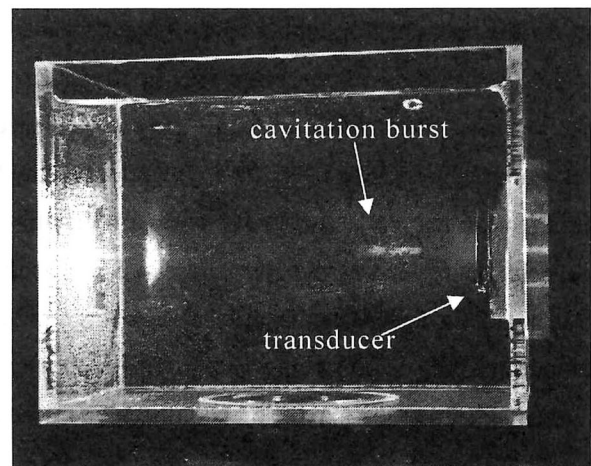


Fig.1. Bubble clusters called as “cavitation burst”, indicated by arrow, are generated by high-power focused ultrasound in water.

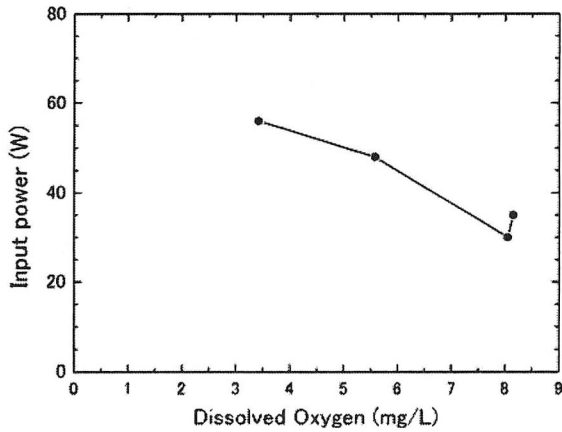


Fig.2. Input power threshold of cavitation burst as a function of dissolved-oxygen concentration.

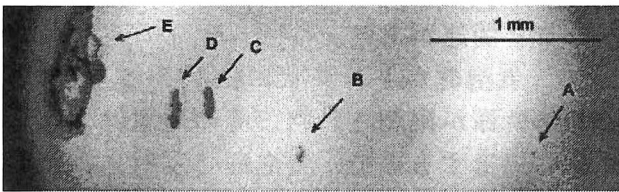


Fig. 3. Bubble clusters (cavitation burst) captured by high-speed camera at 15000 fps. Bubble cluster was born near the focal point (A), and moves towards left hand side in the direction of ultrasonic propagation. Bubble cluster expands in the form like a ring (B- E).

散してしまう。ちょうど、丸くつぼめた口から煙草の煙をはいたときの様子に似ている。気泡が発生すると音波が吸収散乱され、気泡前後で大きな音圧差が生じるため通常より大きな放射圧が生じる。それが大きな移動速度をもたらすと思われる。

図4は20,000fpsで撮影したキャビテーションバーストの連続写真である。ただし、Fig.4の各フレーム間隔が0.25msになるよう間引きしてある。Fig.4(1)から(8)までの全経過時間は1.75msである。(1)は気泡発生直後であり、このときすでに気泡クラスターとなっている。(2)から(5)では、小さな気泡が初期気泡の周囲に発生し、縦長のクラスターに成長している。(6)-(8)では、クラスターは更に成長し、リングを形成している。この後は、リングが壊れ、気泡が拡散してしまう。このようにリングが成長する場合と、リングに成長せずクラスターになった後消滅してしまう場合がある。その差は、クラスターの進行位置に依存しているように観察さ

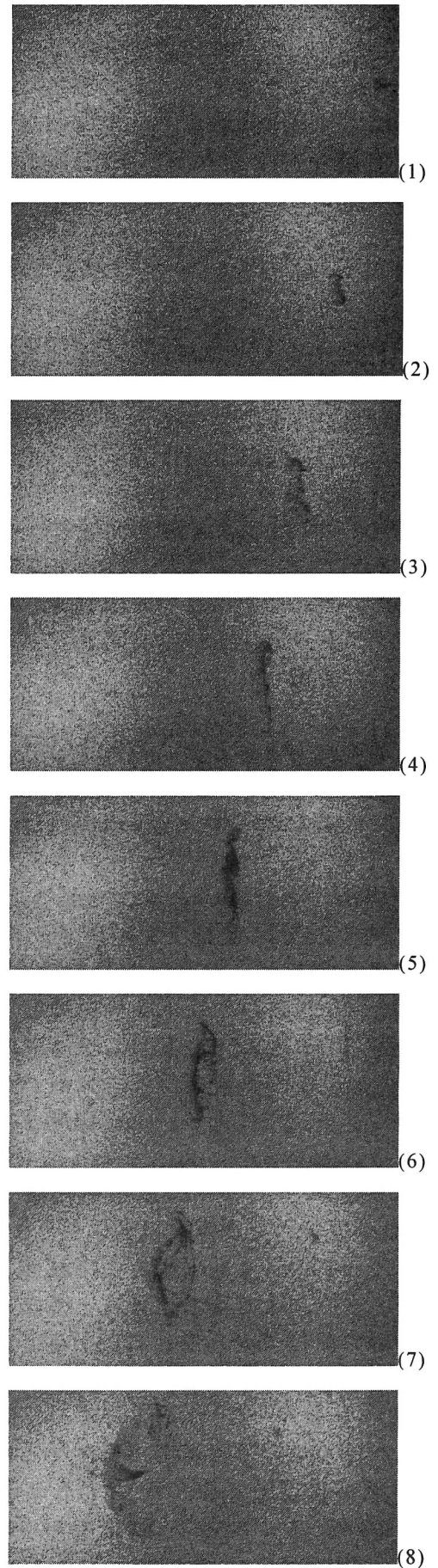


Fig.4. Bubble clusters generated by 1 MHz-focused ultrasound. The capture speed is 20,000 fps, and the time between each frame is 0.25 ms.

れた。つまり、集束超音波音場の中心軸付近を進行する気泡クラスターはリング状になり、中心軸をはずれると消滅する。すなわち、リングは集束音場の対称な音圧の場所で発生するようであった。

キャビテーションバーストから放射される音波波形を hidroホンで検出した結果を図5に示す。オシロ画面上の波形を拡大すると1 MHzのキャリアをもち、それが2-3 kHzで振幅変調された波形になっている。2-3 kHz成分は図4からわかるように気泡クラスターがリング状に拡大する時間に対応している。つまり、キャビテーションバーストに伴って発生する”チャッ”という可聴音は気泡クラスターの成長が原因である。また、1 MHzのキャリアを持つことから、気泡は1 MHzで膨張収縮を繰り返しながらクラスターを形成し、それがリング状に拡大すると想像される。

観測結果をまとめると、次のようになる。

(1) 発生した瞬間の気泡は40-80 μm の球状である。これは微小な気泡が集合したもので、強力な音圧のため強いビャクネス力が気泡間に働いてできたものと考えられる。20 kHz程度の周波数では強力な音圧下でクラゲ状の気泡群ができるが、それと同じ原因と言える。

(2) 発生した気泡クラスターの周囲に小さな気泡群がさらに生成し、徐々に大きくなる。

(3) 集束音場の影響を受けて気泡クラスターは徐々にリング状になり、4mm程度まで成長しついに拡散する。

(4) 気泡クラスターの進行速度は一定ではなく、発生直後の平均速度はおよそ3.5 m/sで、拡散してからは1.6 m/s程度まで減速した。気泡クラスターにより音波は散乱・吸収されるため気泡群の前後で大きな放射圧が生じ、それが大きな進行速度をもたらす。

(5) キャビテーションバーストが発生するときはチャッという可聴音が発生するが、気泡群リングが拡散する際に発生すると予想された。その周波数は2-3 kHz程度であった。

(6) 気泡の発生位置は焦点前後であるがかなりばらついている。また、気泡群は発生した

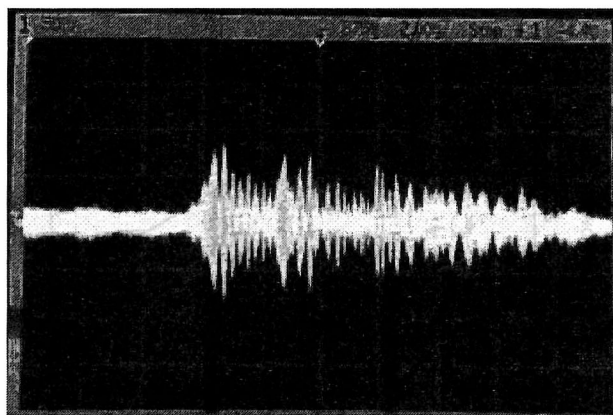


Fig. 5. Oscilloscope tracing of sound waveform emitted from cavitation burst. Time scale is 2 $\mu\text{s}/\text{div}$.

後消滅する場合があるが、その位置は集束音場の分布と関連がある。

(7) 気泡群がリング状に拡がると、音源との間で縞模様が観測された。その間隔はおよそ半波長に相当するので、気泡群で反射された音波が音源からの音波と干渉し、部分的な定在波を作っている。

4. 結論

1 MHzでの通常のキャビテーション気泡は径が小さいためあまり合体分裂はしないが、集束音場下の強力な音圧が原因で、微小気泡が集合してキャビテーションバーストを発生させる。更には微小気泡が周囲に出す圧力波によっても連続的に気泡が生み出されていると想像される。この現象は可聴音を発生するという点で通常のキャビテーションとは一見異なるようであるが、高音圧下のキャビテーションと考えれば理解できる。

参考文献

- [1] G. W. Willard, "Ultrasonically induced cavitation in water: a step-by-step process" J. Acoust. Soc. Am. 25, 669(1953).
- [2] 鳥飼、藤森、李、"超音波によるキャビテーションの高速撮影" 生産研究 11, 503-505, (1959).
- [3] 根岸勝雄, "凹面音源焦点におけるキャビテーション" 超音波研究会資料, 電気通信学会 (1960/12/13).