

〔原著論文〕

単気泡の分裂とそれによる音

*北大院・工 Warjito[†]*北大院・工 望 月 修^{††}*北大院・工 石 川 仁^{†††}

気泡流がオリフィスを通過する際の騒音発生機構を明らかにするために、オリフィスを通過する単独気泡の分裂に至る過程の観察、およびそのとき発生する音の計測を行った。気泡流においてはオリフィス近傍で発生する音の強さはオリフィス近傍の圧力差の大きさに比例すること、また、この音の発生はオリフィスを通過した後の気泡の分裂が原因であることを明らかにした。気泡の分裂は、気泡内部に発達するマイクロジェットによって引き起こされる。マイクロジェットの成長過程を調べた結果、気泡の分裂位置を気泡直径、主流速度、および圧力差によって表せることを示した。

Breakup of a single bubble and its sound

Warjito, Osamu MOCHIZUKI and Hitoshi ISHIKAWA

Division of mechanical science, Hokkaido University

(Received 28 November, 2001 ; in revised form 25 February, 2002)

The process of breakup of a single bubble passing through an orifice and the mechanism of sound generation during the process are described in this paper. A micro jet grows in the downstream direction in a bubble after the bubble passes through the orifice. The bubble then breaks into small bubbles because the micro jet hits the opposite side of the bubble. The sound was found to be generated when the bubble broke. The relationships of breakup position with diameter of a bubble, free stream velocity, pressure difference and a growth rate of the micro jet in a bubble are discussed.

(KEY WORDS): Bubble, Breakup, Pressure gradient, Orifice, Acoustics, Micro jet, Noise

1 はじめに

エアコン、水道、など液体を流している管路系の各構成要素から発生する音が顕在化し、問題となっている。空力音の低騒音化技術の発達により、ファン騒音に代表される空力騒音が静寂化するとともに、いままでそれに隠されていた、たとえば熱交換器内の液体流動騒音といったものが目立つようになってきた。

液体を輸送する管路内における騒音は、バル

ブ、急拡大部分などにおけるキャビテーションが原因であると考えられてきた。しかし、実生活レベルにおいてはキャビテーションを生ずるような大きな減圧がないと思われるところからも音が発生していることが多い。この場合、キャビテーションのように流れの中で発生・消滅する気泡ではなく、何らかの原因で流れに含まれる気泡が音の発生に関係している。これまで、このような気泡を含む流れによる騒音を取り上げた研究は少ない^{1,2)}。

本研究の目的は、気泡流が局所的に圧力変化を受けたときの音の発生機構解明とその静穏化である。著者らは、局所的な圧力変化を生じさせる管路要素の代表であるオリフィスを気泡流が通過

* 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

† E-mail: warjito@ring-me.eng.hokudai.ac.jp

†† E-mail: osamu@eng.hokudai.ac.jp

††† E-mail: ishi@eng.hokudai.ac.jp

する際に大きな騒音を発生することに着目した。しかし、実際にオリフィス部を観察すると、種々の大きさの気泡が多数存在するために、音の発生原因を同定することが難しい。そのため本研究では、オリフィスを通過する単独気泡を取り扱い、気泡分裂過程と気泡分裂による音の発生および分裂位置におよぼす因子を明らかにした。

2 実験装置

図1にオリフィスを取り付けた試験部の概略図を示す。内径 $D = 51 \text{ mm}$ のアクリル製のパイプに、穴の直径 $d = 16 \text{ mm}$ (絞り径比 $d/D = 0.314$)、厚さ 5 mm のオリフィスを取り付けてある。試験部内を流れる流量を $Q_w = 1.67 \times 10^{-4} \sim 1.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で変化させた。これにより主流の平均流速 U の範囲を 0.08 m/s から 0.57 m/s で変化させたことになる。したがって、この平均流速とパイプの内径を基準とする Reynolds 数の範囲は 0.41×10^4 から 2.9×10^4 であった。

流量 Q_w とオリフィス板前後において計測した圧力差 Δp ($= p_1 - p_2$, p_1 および p_2 はそれぞれオリフィス板の直前と直後において計測した圧力) との間には、

$$Q_w = \alpha \left(\frac{d}{2} \right)^2 \pi \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

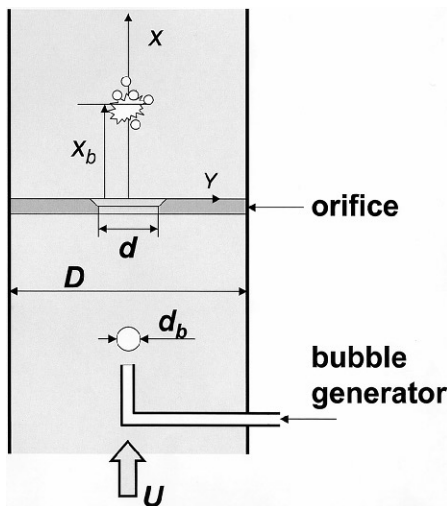


図1 オリフィス部の概略図と主な記号

の関係がある³⁾。ここに、 α は流量係数である。本実験装置では、 $\alpha = 0.6$ である。また、流量は $Q_w = \left(\frac{D}{2} \right)^2 \pi U$ で表させるので、これを式(1)に代入し、変形するとオイラー数 Eu は次のように表わされる。すなわち、

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho U^2} = \frac{1}{\alpha^2} \left(\frac{D}{d} \right)^4 \quad (2)$$

である。本実験装置における $\alpha = 0.6$ を代入すると、式(2)より $Eu = 286$ と求まる。なお、オリフィス板直後の領域における圧力 p_2 に基づくキャビテーション数 $Ca = \{ (p_2 - p_v) / q, q = (1/2) \rho U^2 \}$ の本実験での最低値は 0.06 であった。本実験におけるいずれの条件でも、オリフィス部周辺においてキャビテーションの発生は見られなかった。本研究では、このような条件を一定とし、気泡直径の違いが気泡分裂およびそれによる騒音発生に及ぼす影響を調べた。

オリフィス上流に発生させた1個の気泡がオリフィス中心を確実に通過するように、オリフィス中心を原点としてそこから上流へ測った距離が $5.6d$ となる位置に気泡発生用の細管を設置した。気泡発生用細管には直径 $0.9, 1.0, 1.1 \text{ mm}$ の3種類のものを用いた。これらから発生した気泡の平均直径は約 1 mm から約 3 mm であった。

オリフィスを通過する気泡の変形を観察するために、次のような撮影を行った。気泡発生細管から気泡が離脱したときにトリガー信号を発生させ、それをスタート信号としてある遅延時間後に発光器を作動させることによって、任意の位置における変形した気泡の瞬間像をスティールカメラによって撮影した。また、これとは別に最大 600 フレーム/秒で撮影できるビデオ(フォトン社製 FASTCAM)を用い、気泡変形の過程を観察した。

これらの画像をソフトウェア NIH Image によって画像処理し、気泡の大きさおよび位置のデータを取得した。変形した気泡の断面積から、気泡が球であるとしたときの等価直径 d_b を算出した。本論文で示した気泡直径は全て等価直径である。

なお、本実験における気泡直径の計測誤差の最大は5.2%であった。

3 実験結果

本論文では、まずオリフィスを通過する気泡流がどのくらいの大きさの音を発生するかを示した後、気泡による音の発生機構を明らかにするためにオリフィスを通過する単気泡を観察した結果を述べる。

3.1 オリフィスを通過する気泡流による音

気泡流のオリフィス前後における流れの可視化結果を図2に示す。この場合の実験条件は $Q_w = 3.05 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 、空気流量 $Q_a = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ である。画像を見てわかるように、オリフィス上流では少ない数の大きな気泡であったのが、オリフィス下流では多くの細かな気泡となっていることがわかる。このような映像から計測した気泡直径 d_b を、度数分布として表したのが図3である。図3(a)に示すように、およそ $d_b = 2 \text{ mm}$ にピークを持つ分布を示す気泡群がオリフィスに流入してくる。異なる水流量 Q_w に対してこの分布形状はほぼ同じとみなせるので、注入する気泡の発

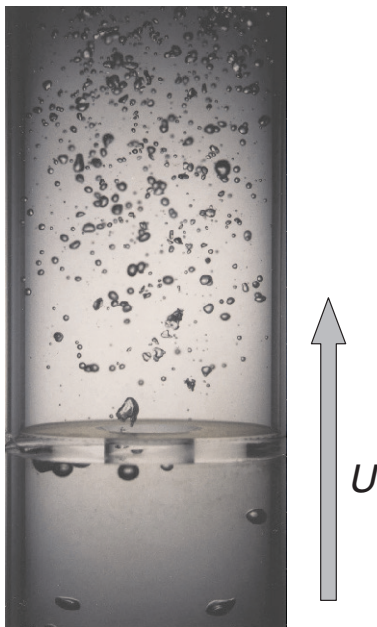
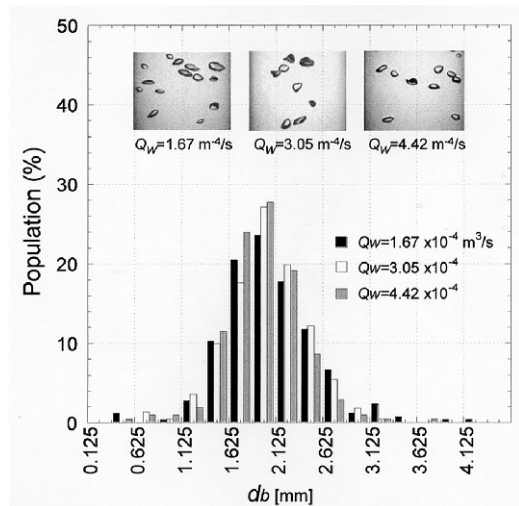


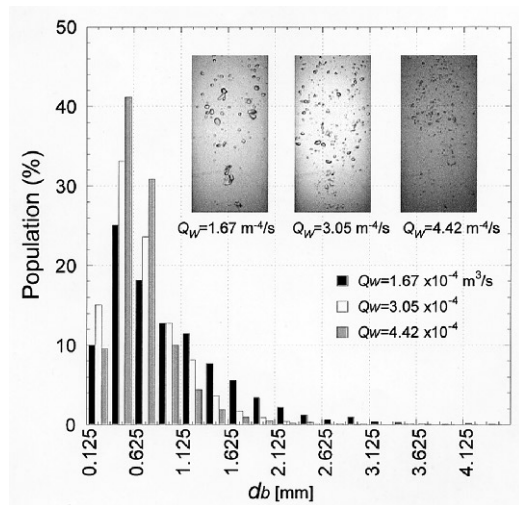
図2 オリフィス部における気泡流

生に対して本実験における水流量 Q_w の違いの影響は小さいことがわかる。一方、図3(b)に示すように、オリフィスを通過後の気泡の直径分布は $d_b = 0.5 \text{ mm}$ にピークを持つ分散の小さいものとなる。

いくつかの異なる実験条件に対して発生する音の強さ (SPL) を計測した結果を図4に示す。オリフィス前後における圧力差が大きいほど気泡流がそこを通過する際に発生する音が大きくなる。図から、実験式として次式で表される関係がある



(a) オリフィス上流



(b) オリフィス下流

図3 異なる水流量に対する気泡分布

ことがわかる。すなわち、

$$SPL = 15.0 \log \Delta p + 2.40 \times 10^5 Q_a + 51.6 \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

したがって、圧力差が大きいと SPL は大きくなること、流れに含まれる空気量（本実験の場合注入空気流量）が多いと同じ圧力差でも SPL は大きくなることがわかる。もしこの結果が、単独気

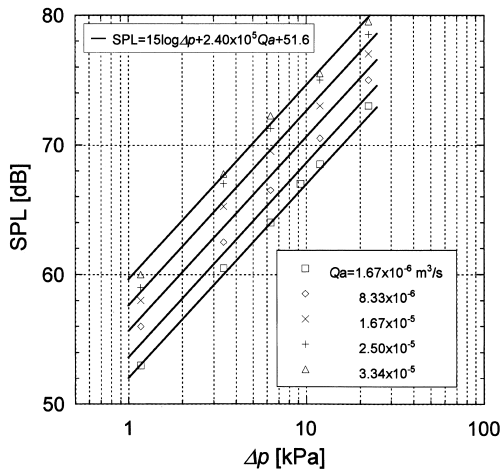


図4 オリフィス部を通過する気泡流によって発生する音の強さ。実線は式(3)によって描いたもの。

泡の膨張・収縮振動による音圧が気泡の周囲圧力に比例する⁴⁾ ことに対応したものであるとすれば、式(3)の第一項の $\log$ の前の係数は 20.0 であるべきである。これより小さな値であることは、図4における実験が単独気泡ではなく気泡流であるために、気泡群における音の吸収、散乱、減衰などが原因と考えられる。

3.2 オリフィスを通過する単独気泡による音の発生

オリフィスを通過する単独気泡の変形の様子を高速ビデオを用いて撮影すると同時に、発生する水中音を水中マイクロフォンで測定した。気泡における変形の様子と発生音の波形を図5に示す。このときの条件は $Q_w = 2.60 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($U = 0.13 \text{ m/s}$, $\Delta p = 2.5 \text{ kPa}$) であり、オリフィスに流入する気泡直径は $d_b = 3.2 \text{ mm}$ である。高速ビデオの1フレーム毎の時間間隔は $1/400$ 秒である。なお、計測された波形にはポンプの回転周波数および管路系の共鳴周波数に相当する低周波の揺動が重畳するので、図5に示した波形は 2 kHz のカットオフ周波数をもつハイパスフィルターを通して処理した後のものである。気泡の

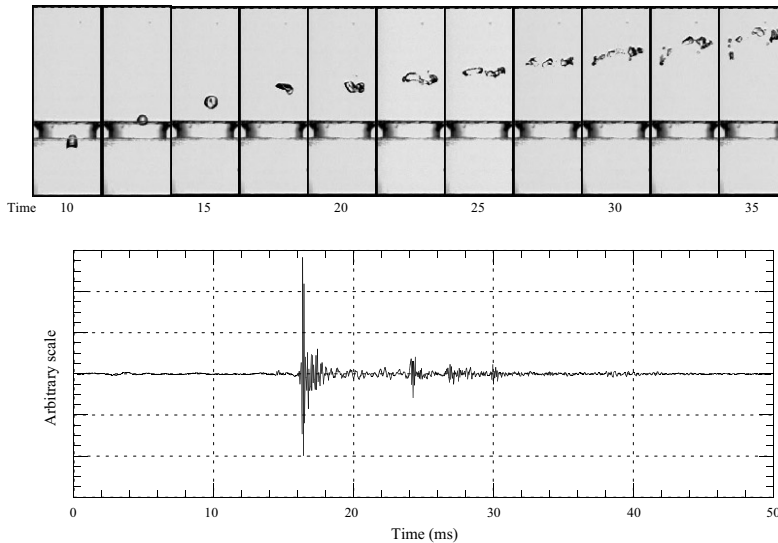


図5 オリフィス部を通過する単気泡の分裂過程とそのとき発生する音波形。
 $Q_w = 2.60 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($U = 0.13 \text{ m/s}$, $\Delta p = 2.5 \text{ kPa}$), $d_b = 3.2 \text{ mm}$.

分裂過程の撮影と音の波形計測は、気泡を発生させた時間を 0 として同時に行われたものであり、写真に付けた時間と波形の時間軸における時間はそれぞれ対応している。

音の波形には、 $t = 16 \text{ ms}$ に高周波数の減衰振動波形が見られる。この時間に完全に一致する映像がないので、その前後の時間における映像から推定すると、気泡が分裂したことが原因で発生したものと考えられる。さらに、 24 ms 、 26 ms 、 30 ms にも振幅は小さいが、同様の高周波の減衰振動が見られる。それとほぼ対応する時間付近の映像から、気泡がさらに細かなものへと分裂していくことが原因で発生した音であることがわかる。

したがって、気泡分裂が音の発生原因として重要な役割を担っていると考えられるため、どの様に気泡が分裂するのか、また分裂に係わる因子は何かなどについて調べた。その結果を以下に示す。

3.3 気泡の分裂過程

図 5 に見られるオリフィスを通過した単独気泡が、変形して最初に分裂するまでの過程は次の

ようである。すなわち、気泡がオリフィスに流入する際、図 5 における $t = 10.0 \text{ ms}$ の写真に見られるように気泡の頭部分（気泡の進行方向における先頭部分）が伸びるのに対して後端部分は平らとなるため、弾丸状の形となる。オリフィスを抜ける瞬間（ $t = 12.5 \text{ ms}$ ）には気泡の後端部分が丸みを帯び、気泡形状は球形に戻る。気泡がオリフィスを抜けた直後（ $t = 15.0 \text{ ms}$ ）では、後方部分からは気泡内にマイクロジェットが発達してくる。これについては後ほど詳細を示す。その後、 $t = 17.5 \text{ ms}$ のフレームに見られるように、マイクロジェットは気泡内部における気泡の先頭部分に衝突し、 $t = 20.0 \text{ ms}$ 以降に見られるように気泡は分裂する。

気泡内に形成されたマイクロジェットと気泡の分裂の瞬間をとらえたいいくつかの映像を図 6 に示す。実験条件は $Q_w = 3.05 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($U = 0.25 \text{ m/s}$, $\Delta p = 3.4 \text{ kPa}$) であり、オリフィスに流入する気泡直径は $d_b = 3.2 \text{ mm}$ であった。図 6 (a) からわかるように、マイクロジェットの形状は水滴が水面に衝突して窪んだ水面が跳ね返るときに形成される水柱のそれとよく似ている⁵⁾。オリフィスを抜けるとき、平らであった気泡の後端

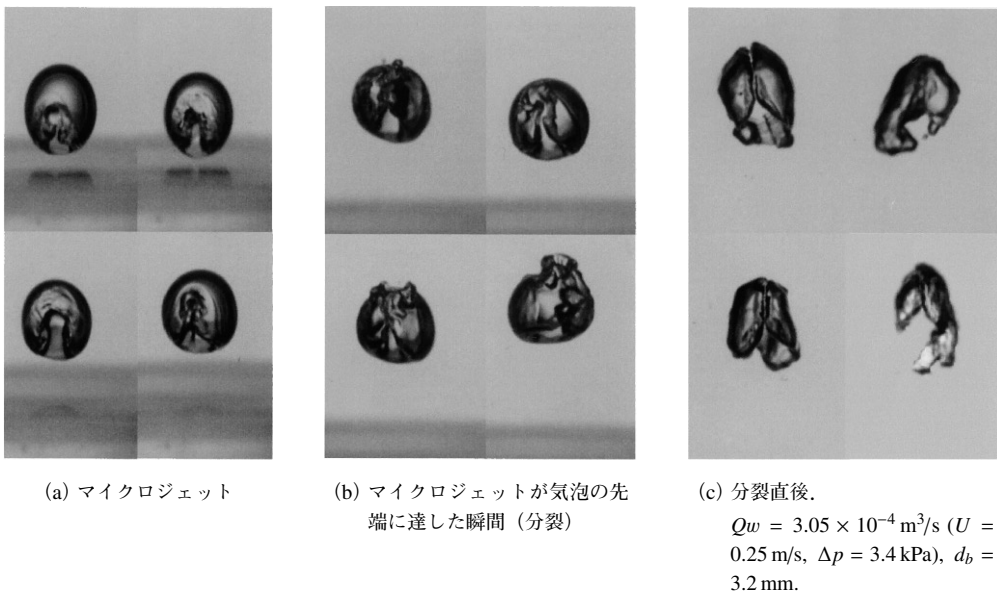


図 6 気泡分裂過程に見られる気泡の変形例

部分が丸みを帯びた状態に戻ることがマイクロジェット形成のきっかけとなると考えられる。

完全な球ではない気泡が圧力勾配下にあるとき、マイクロジェットは圧力勾配における低圧側に向かって発達する⁶⁾。また、このようなマイクロジェットは気泡がベンチュリー管ののど部を過ぎた拡大部分（逆圧力勾配下）に位置するとき、マイクロジェットは上流に向かって成長する⁷⁾。本実験においても圧力勾配における低圧側（下流方向）に向かってマイクロジェットが成長することから、圧力勾配下にある気泡におけるマイクロジェットに関して一般的な性質と解釈できる。なお、図6(b)に示すようにマイクロジェットが気泡の先頭に達した直後、気泡は分裂する。この状態を気泡分裂とよぶ。図6(c)の写真からもわかるように、分裂後はいくつかの小気泡に分かれる。この後、さらに細かな気泡に分裂する場合は、図5の音の波形にも見られるように小さな振幅の音の発生として現れる。

上述の条件におけるいくつかの映像から、マイクロジェットの高さ h の時間に対する変化をプロットしたものを図7に示す。図より、マイクロジェットの高さ h は時間に対して直線的に増加することから、マイクロジェットの成長速度 v_p は

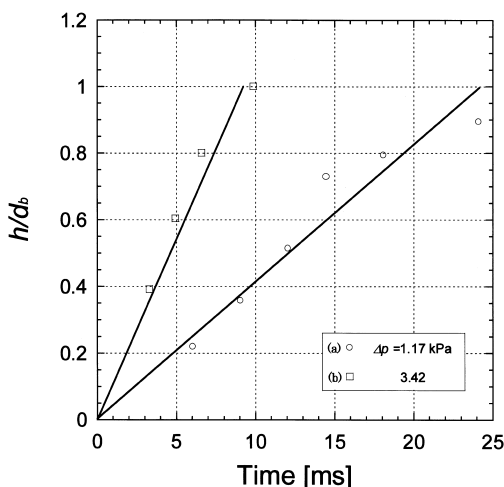


図7 異なる条件におけるマイクロジェットの発達過程の例

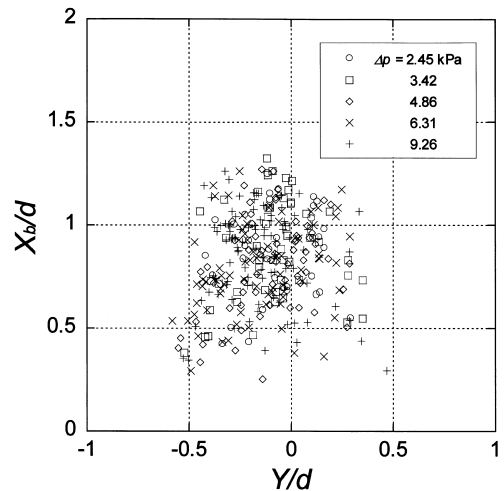


図8 種々の異なる条件における気泡の分裂位置

一定であることがわかる。図において、 $h/d_b = 1$ となった時点で、マイクロジェットが気泡先端に達することになる。それまでに要する時間は、(a)の場合、約10 msであり、(b)の場合、約23 msである。

Eu 数が一定の下、異なる気泡直径に対して行った実験において得られた分裂位置をプロットしたものを図8に示す。この図より、分裂する x 方向の位置は $x_b/d = 0.8 \pm 0.5$ の範囲にあることがわかる。このデータのばらつきは、同じ条件において気泡を発生させても気泡の直径が完全に一定としないことに起因する。なお、 y 方向にデータが散らばるのは気泡がオリフィスを通過する際のわずかな軌道の差によるものである。

3.4 気泡分裂における気泡の大きさの影響

オリフィスの上流において注入した直径 d_b の気泡が、圧力差 Δp に対してどの程度の割合で分裂するかを図9に示した。ここにおける分裂割合BFを次のように定義した。

$$\text{BF} = \frac{\text{分裂した気泡の数}}{\text{オリフィス上流において注入した直径 } d_b \text{ の気泡の全個数}} \quad (4)$$

図9において、たとえば直径 d_b が2.5~3.0 mmの気泡は、 $\Delta p = 4 \text{ kPa}$ では約80%の気泡が分裂

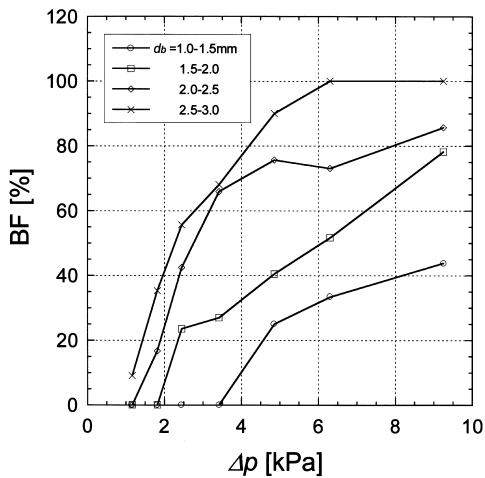


図9 オリフィス前後における圧力差に対する気泡分裂割合

することを表している。また、気泡径が同じものでは Δp が小さいと BF は小さいこと、すなわち、気泡は分裂しにくいことがわかる。圧力差が大きくなると、 $\Delta p = 1.0 \text{ kPa}$ において分裂が起こる割合が増加しはじめ、 $\Delta p > 6.0 \text{ kPa}$ ではオリフィスを通過した気泡は全て分裂することがわかる。一方、 $d_b = 1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ の小さな気泡では、図において $\text{BF} = 0\%$ の線を見たとわかるように、少なくとも $\Delta p = 3.5 \text{ kPa}$ 程度にならないと分裂が起こらないことがわかる。以上から、大きな気泡ほど圧力降下によって分裂が起こりやすいといえる。

ここで、次に示す無次元圧力降下を導入しよう。

$$p^* = \frac{\Delta p}{\left(\frac{2\sigma}{d_b/2}\right)} = \frac{\Delta p d_b}{4\sigma} \quad (5)$$

ここに、 $2\sigma/\left(\frac{d_b}{2}\right)$ は表面張力による気泡内の圧力増分を表す。したがって、この無次元圧力は気泡周囲の圧力差と気泡内部圧力との比を表している。また、 d_b 以外の量が一定であれば p^* は気泡直径に比例する量である。周囲の圧力が同じであれば、直径の大きな気泡ほど、その内部圧力は小さな気泡のそれに比べ小さいために、周囲の圧力

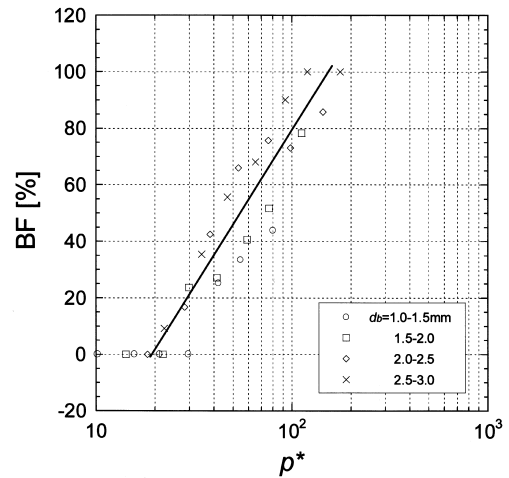


図10 無次元圧力に対する気泡分裂割合

変化によって気泡の変形は容易であると考えられる。これに対して、 p^* が小さい場合は小さな気泡に相当するため、内部圧力が高く、そのために変形し難いと考えられる。

この p^* を用いて、図9に示したデータを再プロットしたものが図10である。これにより、データは1つの線で表せるようになることがわかる。 $p^* \geq 20$ において分裂する割合が増加し始める。すなわち、周囲圧力差が表面張力による気泡内部圧力の増加分の20倍程度大きくなると、マイクロジェットを形成する可能性が高くなることを示している。また、 $p^* > 100$ では必ず分裂に至ることを示している。

4 結論

気泡流がオリフィスを通過する際の騒音発生機構を明らかにするために、オリフィスを通過する単独気泡の変形の様子を観察および、そのとき発生する音の波形計測を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

オリフィスを通過する気泡流によって発生する音の強さは、オリフィスにおける圧力差が大きいほど、また、混入した気泡の量が多いほど、強いことがわかった。このデータから、オリフィス前後における圧力差と空気流量の関数として見積もる経験式を得た。気泡流がオリフィスのような局

所的に急激な圧力変化を生じている部分を通過する際に、音を発生する基本的機構を明らかにするために単独気泡がオリフィスを通過するときの音の発生機構を調べた。これにより、気泡の分裂が音発生の原因であり、また、気泡の分裂は気泡内部に発達するマイクロジェットによって引き起こされることを、高速度ビデオを用いた可視化観測と発生音の同時計測により明らかにした。種々の気泡直径、主流速度および圧力差の組み合わせにおいて、音源位置となる気泡分裂位置を調べた結果、オリフィスの直径程度離れた下流の位置において気泡は分裂することを明らかにした。また、気泡の周囲圧力差が、表面張力による気泡内部圧力の増加分の20倍程度以上大きくなると、気泡分裂が起こる確率が高まることを示した。

引用文献

- 1) 佐々木篤史, 望月 修, 木谷 勝: 突入水膜流によって発生する音, 日本流体力学会誌 **18** (1999) 377-386.
- 2) 梅田知巳, 福島敏彦, 中村昭三, 佐藤良次, 深野 徹, 伊藤正昭: 単一大気泡が絞りを通過するときの気液二相流の流動音, 日本機械学会論文集 B **60** (1994) 1928-1935.
- 3) (社)日本機械学会: 機械工学便覧 A5 編 (日本機械学会, 1987) 177.
- 4) T. G., Leighton: *The Acoustic Bubble* (Academic Press, New York, 1997) 129-191.
- 5) M. Rein: The transitional regime between coalescing and splashing drops, J. Fluid Mech. **306** (1996) 145-165.
- 6) Mitchel, T. M. & Hammitt, F. G.: Asymmetric cavitation bubble collapse, Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME, Series I **95** (1973) 29-37.
- 7) R. D. Ivany, F. G. Hammit & T. M. Mitchell: Cavitation bubble collapse observations in a venturi, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Series D **88** (1966) 649-657.