突入水膜流による音

佐々木 篤史[○] (北大工), 望月 修 (北大工)
木谷 勝 (北大工), 石川 仁 (北大工)

Noise due to Plunging Film-Flow

Atsushi Sasaki, Osamu Mochizuki, Masaru Kiya and Hitoshi Ishikawa

ABSTRACT

Sound due to bubbles entrained by a vertical thin water-jet plunging into water was investigated. The sound source was discussed in relation to the size and spatial distribution of bubbles obtained by flow visualization. There were two particular frequencies corresponding to the distribution of bubbles in the transition state of the plunging jet; one is originated in the bubbles in a cluster, the other is related to the cluster. Deformation of bubbles and non-uniformity in size and distribution of bubbles are important for modification of predication of sound generated by the bubble cluster.

Keywords: Sound, Bubble, Plunging jet, Entrainment, Cluster

1. はじめに

水膜流が水面に突入する際、気泡が取り込まれることによって発生する音を調べた。発生音源を評価するため、気泡直径と気泡分布を計測した。この結果、発生音の周波数を予測するためには、気泡群を特徴づける代表寸法の規定が重要であることを指摘した。

2. 実験装置

高さ $H=1.5\text{mm}$ 、幅 50mm のノズルから垂直壁面に沿って噴出する水膜流を静止水面に突入させた。水面への突入速度 V を $0.44\sim 4.22\text{m/s}$ に変化させることで水膜流を層流から乱流へ変化させた。レイノルズ数は $Re=550\sim 5700$ ($=HV/\nu$, ν : 水の動粘性係数)であった。

突入水膜流の乱れの状態をシャドーパターン¹による可視化映像から判定した。本実験において水膜流が遷移状態である流速は $V=0.66\sim 2.66\text{m/s}$ であった。

気泡群から発生する音を水中マイクロフォン(B&K 8103)を用いて計測した。発生音の計測は水面下 10mm 、ガラス壁面より 10mm の位置で行った。周波数解析では 200 回のスペクトルデータを平均した。

3. 実験結果

3.1 発生音と気泡分布

気泡群から発生する音の SPL を Fig.1 に示す。SPL

Fig.1 Sound pressure level for different V .

の値は暗騒音レベルを基準とした。本実験では $V \geq 1.33\text{m/s}$ の場合に音が発生した。このとき水膜流は遷移初期の状態である。 V の増加とともに SPL も増加することがわかる。音が発生するときには必ず気泡が取り込まれている。水膜流の乱れの出現と気泡の取り込みは密接に関わっていることが著者らによって明らかにされている²。

水膜流が遷移状態と乱流状態のときにおける発生音の周波数スペクトルを Fig.2 に示す。水膜流が遷移状態($V=2.66\text{m/s}$)のとき、発生音には 2 つのピーク周波数 $f_1=4600\text{Hz}$, $f_2=6900\text{Hz}$ が現れる。一方、乱流状態($V=3.77\text{m/s}$)では、 $f_1=4500\text{Hz}$ にのみピークが現れる。周波数 f_1 は両者で共通して現れるため、水膜流の乱れが関わっているものと考えられる。

この音の発生源を考えるために、取り込まれた気泡の分布を調べた。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3(a)は水膜流が遷移状態にあるときのものであり、気泡が密集した部分(クラスタ)と疎の部分とが存在している。Fig.3(b)に示した乱流状態では、明確なクラスタは存在せず、

Fig.2 Spectrum of sound generated by bubbles in clusters. The state of plunging water-jet is in (a) transition state, (b) turbulent state.

Fig.3 Characteristic sizes and distances of entrained bubbles for different states of the plunging water-jet. (a) transition state, (b) turbulent state.

Fig.4 Changes in size and spatial distance of entrained bubbles for different V . (a) diameter of bubble, (b) characteristic distance between bubbles.

気泡は不規則に分布している。

これらのことを定量的に評価するため、可視化写真から気泡直径 d と気泡間距離 δ を計測した。突入速度に対する気泡直径の変化を Fig.4(a) に示す。気泡の平均直径は V に対してほぼ一定であり、0.8 mm 程度である。したがって、遷移状態と乱流状態で共通して存在する小規模乱れのスケールが気泡直径の決定に関係していると考えられる。

これに対して気泡間距離の V に対する変化を Fig.4(b) に示す。ここで注目すべきことは、遷移状態 ($V=2.66\text{ m/s}$) のときには 2 つの特徴的な長さ δ_1 , δ_2 (Fig.3 参照) が現れ、乱流状態 ($V=3.77\text{ m/s}$) では δ_1 のみ現れることである。したがって、これらの代表スケールが発生音の周波数決定に関係しているものと考えられる。

同一直径をもつ気泡が等間隔に位置する気泡群の振動解析³によると、気泡群の固有振動数 f_m は気泡間距離が短くなると、その直径をもつ単独気泡の振動周波数より低くなることが示されている。この解析に従い、Fig.4 で示した $d=0.8\text{ mm}$, $\delta_1=1.7\text{ mm}$ ($V=2.66\text{ m/s}$) を与えることでバブルクラスターの固有振動数を求めた。計算によって得られる固有振動数は $f_{m1}=5000\text{ Hz}$ であり、

Fig.5 The shape of bubbles at different positions in the case of $V=3.77\text{ m/s}$. Positions are (a) 6~12mm, (b) 20~26mm below water surface.

これを Fig.2 に○で示した。この値は遷移状態、乱流状態で現れた f_1 と比較すると有意な差がある。この原因については 3.2 節で考察する。

さらに遷移状態において、 δ_1 のかわりにクラスター間の距離である $\delta_2 (=6.6\text{ mm})$ を与えると $f_{m2}=6700\text{ Hz}$ を得る。この値は Fig.2(a) に示した実測値 $f_2=6900\text{ Hz}$ に相当するものであると考えられ、クラスター間の平均距離に対応する周波数であるといえる。すなわち、気泡間距離がある程度以上離れると解析結果は実験値とよい一致を示すことがわかる。

3.2 解析結果と実測値との相違

f_1 と f_{m1} の差の原因を考えるために、実際の気泡の形状および分布の様子を調べた。結果を水面からの距離にわけて Fig.5 に示す。どちらの位置でも気泡の大きさは一様でなく、また気泡間距離も一定ではないことがわかる。さらに、下流の気泡がほぼ球形とみなせるのに対し、連行直後の気泡は流れ方向に伸ばされていることがわかる。これは突入水膜流のせん断層による伸張のためであると考えられる。したがって振動解析モデルとこれらの違いを考慮する必要がある。たとえば、振動モードとして膨張・収縮による 0 次のものだけではなく伸張に関する 2 次モードのものも考慮すること、気泡の直径分布および気泡間距離分布を考慮することなどが必要である。

4. おわりに

連行気泡と発生音の関係を調べ、次の結果を得た。

水膜流が遷移状態で水面に突入するとき、発生音には 2 つのピーク周波数が現れる。このとき取り込まれる気泡間距離には水膜流の乱流構造に関わる 2 つの特徴的なスケールがあり、それぞれがピーク周波数に対応している。気泡群からの発生音の周波数を予測するには、気泡群における直径および気泡間距離の不均一性および気泡形状を考慮することが重要である。

参考文献

1. Azuma, T. and Hoshino, T., The Radial Flow of a Thin Liquid Film (1st Report, Laminar-Turbulent Transition), Bulletin of JSME, Vol. 27 No. 234 (1984), pp. 2739-2746.
2. 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, ながれ, 18(1999), pp377-386.
3. Takahira, H., Akamatsu, T. and Fujikawa, S., Dynamics of a Cluster of Bubbles in a Liquid (Theoretical Analysis), JSME International Journal, Series B Vol. 37 No. 2 (1994), pp. 297-305.