

上昇気泡に伴う水中圧力の基本特性に関する一考察

大阪大学大学院 正会員 川崎 浩司
東亜工業建設 山澤 洋一
名古屋大学大学院 正会員 岩田好一郎

1. はじめに

砕波による気泡の生成・運動機構を究明することは、工学的な視点、さらには生態系を含む海域環境学的な視点からも非常に重要であるが、その研究例はあまりない。著者ら（例えば、川崎ら、2000）は、一様斜面・潜堤上での砕波を対象に水理実験を行い、水中圧力の高周波数成分と連行気泡には密接な関連性があることを見いだした。しかし、その関係を十分に評価するには至っていないなど、多くの課題を残している。

本研究では、砕波による複雑な気泡連行現象を解明するための基礎的研究として、水中を上昇する気泡の挙動を取り上げ、上昇気泡に伴う水中圧力変動の時間周波数特性、距離減衰特性を実験結果に基づいて議論するとともに、気泡径と水中圧力変動の高周波数成分の関係を検討する。

2. 水理実験

上昇気泡に伴う水中圧力変動に関する水理実験を、ガラス製小型水槽（幅 60cm、奥行き 30cm、高さ 36cm）を用いて行った。実験では、静水深 h を 25cm と一定に保ち、水槽底面より気泡列を発生させた。超小型水中マイクロホンを用いて、上昇気泡周辺における水中圧力の時間変動を計測した。なお、気泡径と関連づけて水中圧力の基本特性を議論するために、気泡半径 R を 0.20～0.50cm の範囲で変化させた。また、水中マイクロホンの計測位置を水平・鉛直方向それぞれに変えることにより、水中圧力の距離減衰特性を検討した。

計測された実験データをサンプリングタイム 0.00025s で AD 変換し、FFT 法および時間・周波数解析可能な離散系ウェーブレット変換によるデータ解析を行った。

3. 実験結果とその考察

図-1 は水中圧力の時間周波数解析の結果であり、各周波数帯におけるウェーブレット係数の時間変動をスパイク表示したものである。なお、(a)、(b)は気泡径 $R \div 0.50\text{cm}$ 、 0.23cm の場合を示す。水中圧力の時間波形を示すレベル $j = -0$ をみると、水中圧力の急激的な変動が周期的に発生しているのが認められる。これは、気泡が水中マイクロホンの近傍を通過したときのみが発生していることを確認しており、気泡の影響によるものと考えられる。図-1(a)と(b)を比較すると、 $R \div 0.50\text{cm}$ では $j = -2$ (500～1000Hz) の範囲に、一方 $R \div 0.23\text{cm}$ の場合では、 $j = -1$ (1000～2000Hz) にエネルギーが集中しており、気泡径の違いにより水中圧力の卓越周波数帯が異なることがわかる。

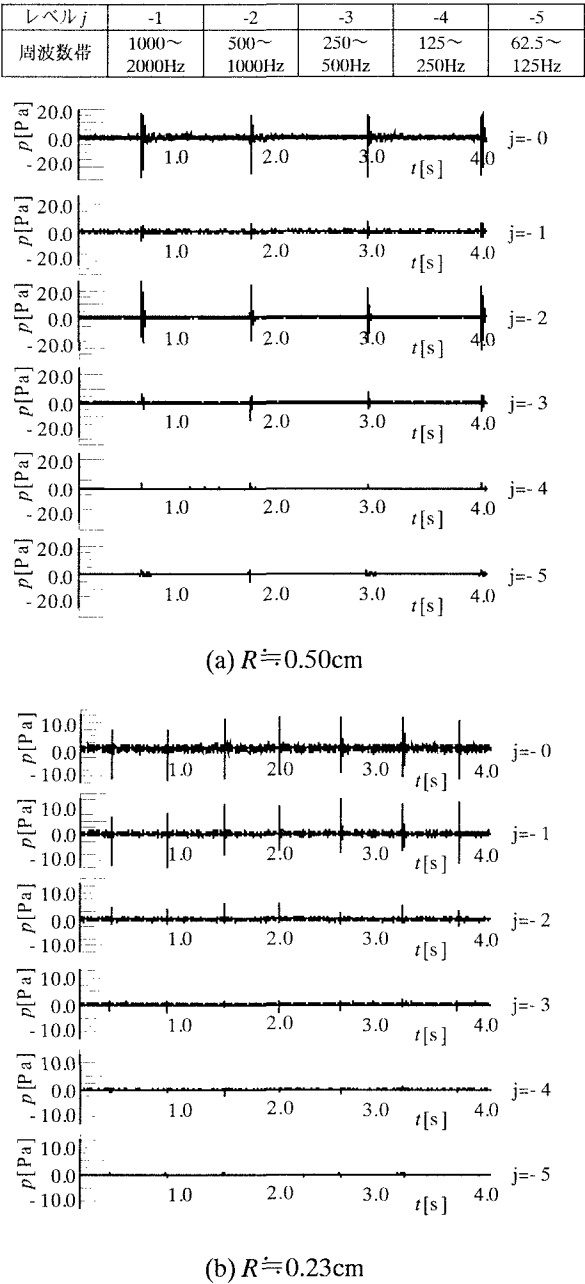


図-1 水中圧力の時間周波数特性 ($x=3\text{cm}$, $z=2.5\text{cm}$)

次に、Plesset and Prosperetti (1977)が提案した単一気泡の振動理論から、図-1 でみられた水中圧力の急激な変化の原因を検討する。図-2 に、気泡径 $R=0.50\text{cm}$ の場合で、気泡発生位置から水平方向に $x=3\text{cm}$, 10cm , 20cm 離れた地点における水中圧力の振幅スペクトルを示す。なお、水中マイクロホンの鉛直方向の設置位置は気泡発生位置から鉛直上向き $z=2.5\text{cm}$ の地点とした。気泡振動理論から算定された気泡の基本振動周波数は 657Hz であり、図-2(a)の卓越周波数と合致する。紙面の制約上図示できないが、気泡径が異なる場合においても理論値は実験値とよく一致した。したがって、気泡の膨張・収縮といった振動形態により、水中圧力の高周波数成分が発生したと判断できる。また、高周波数帯における振幅スペクトルのピーク値は気泡発生位置から離れるにつれて減少していることがわかる。つまり、気泡の振動によって発生する高周波数の圧力変動は水中を伝播していくに従い減衰すると推察される。

そこで、上記の推測を理論的な面より検討してみる。無指向性を有する球面波伝播理論では、点源から半径 r の球面を通過する放射源パワー P は次式で表すことができる。

$$P = 4\pi r^2 \frac{p^2}{\rho C_s} \quad (1)$$

ここで、 p は圧力、 ρ は媒質の密度、 C_s は媒質の音速を示す。

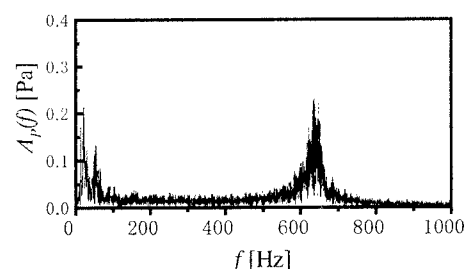
一方、図-2 より、上昇に伴い気泡の振動は急速に減衰するため、水中圧力の主な振動源はノズルから離脱した直後の気泡であると考えられる。したがって、振動源はノズル中心であると考え、放射源パワー P を算出する。図-1(a)より、点源からの距離 $r = \sqrt{x^2 + z^2} = 0.039\text{m}$ のとき $p=22.0\text{Pa}$ である。この値を式(1)に代入すると $P=6.1 \times 10^{-6}\text{W}$ と算定される。なお、水の密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 、水の音速 $C_s=1500\text{m/s}$ として計算した。上述した理論結果を実験値と比較して図-3 に示す。同図から、理論値と実験値はよく一致しており、水中圧力の振幅値は気泡発生地点からの距離に反比例の関係で減衰していることがわかる。さらに、理論に水中音速を考慮していることを考えると、気泡の連行に伴い水中音が発生しているといえる。

4. おわりに

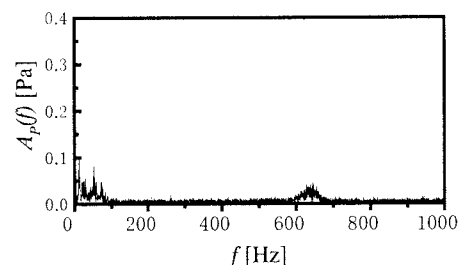
本報告では、上昇気泡に伴う水中圧力の基本特性を実験結果に基づいて検討した。その結果、気泡の膨張・収縮といった振動によって水中圧力の高周波数成分が発生すること、水中圧力の高周波数成分は気泡発生地点からの距離に反比例の関係で減衰すること、気泡の連行に伴い水中音が発生していることが判明した。

参考文献

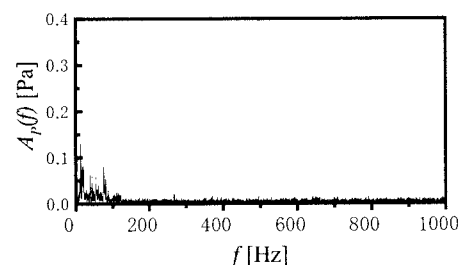
- 川崎ら(2000)：一様傾斜水域での砕波に伴う水中圧力の時空間変動特性，海岸工学論文集，第47巻，pp. 161-165。
Plesset, M. S. and A. Prosperetti (1977)：Bubble dynamics and cavitation, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.9, pp145-185.



(a) $x=3\text{cm}$, $z=2.5\text{cm}$



(b) $x=10\text{cm}$, $z=2.5\text{cm}$



(c) $x=20\text{cm}$, $z=2.5\text{cm}$

図-2 水中圧力の振幅スペクトル

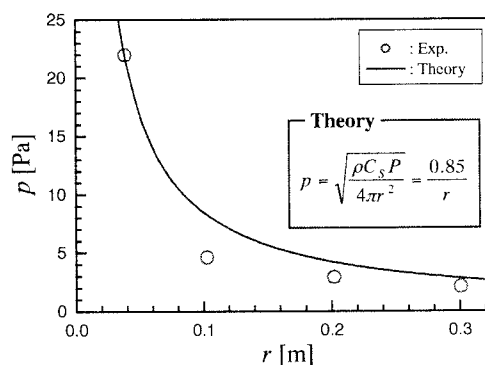


図-3 水中圧力の減衰特性