

複数の潜水構造物より発生する波動音圧に関する実験的研究

Experimental Study on Wave-Generated Sound Pressure from Bottom Seated Submerged Structures

水谷法美*・鈴木 篤**・内藤耕治***・富田孝史****・岩田好一朗*****

Norimi MIZUTANI, Atsushi SUZUKI, Koji NAITO, Takashi TOMITA and Koichiro IWATA

Installing artificial fish reefs is expected to improve and preserve sea environment as well as fish cultivation. In order to attain such objectives, fish reefs should have adequate function to gather fish. In this research, the wave generated sound from fish reef is considered to be one of the important factors to gather fish. Laboratory experiments were carried out to measure the sound pressure from fish reef models. In the experiments, number of fish reef models and their arrangements were changed and their effects on generated sound pressure were investigated. Numerical analysis was also conducted to calculate flow conditions around them. It was confirmed that the sound pressure in front of structures is more pronounced by installing another structure in far side.

Keywords: artificial fish reef, wave-generated sound pressure, vortex

1. はじめに

人工魚礁の設置による魚場の造成は、漁獲高の安定増大や生物資源の保護・培養などを目的として、古くより行われてきた技術である。近年、人工魚礁に対して、このような漁業生産の向上のみならず、そこに集まる魚類を中心とする生態系による海水の自浄能力の向上など海域環境改善面の効果も期待され、その位置づけはますます高くなりつつある。特にミチゲーション技術の構築が不可欠な現状では、その役割は重要である。人工魚礁にこのような機能を発揮させるためには、魚礁に十分な集魚効果を持たせることが必要不可欠である。魚礁の集魚理由には陰影効果説、発生音説、餌料効果説、逃避目標説、走触説、および本能説など種々の説があるが、中でも発生音説は有力な説の一つであると考えられる。既に著者らは、単純な形状の魚礁模型、および二次元の構造物模型を使用した水理実験により発生音の計測を行い、潜水構造物から発生する音の特性について考究し、渦の発生、発達、移動などの挙動と密接な関係があることを報告している^{1), 2), 3)}。本研究では、さらに魚礁模型を複数基設置した場合の水理実験を行い、構造物から発生する波動音圧に及ぼす構造物の数、および配置の効果について検討するとともに、構造物周辺の流況の数値計算を行い、波動音の発生機構について考究するものである。

2. 水理実験

2.1 波動音の計測

実験を名古屋大学の平面波浪水槽（長さ 28m, 有効幅 8m, 高さ 0.8m）で行った。水槽の一端にはピストン式造波装置があり、他端には反射波の影響を消すために、1/10 勾配の消波斜面が設置されている。本研究では、構造

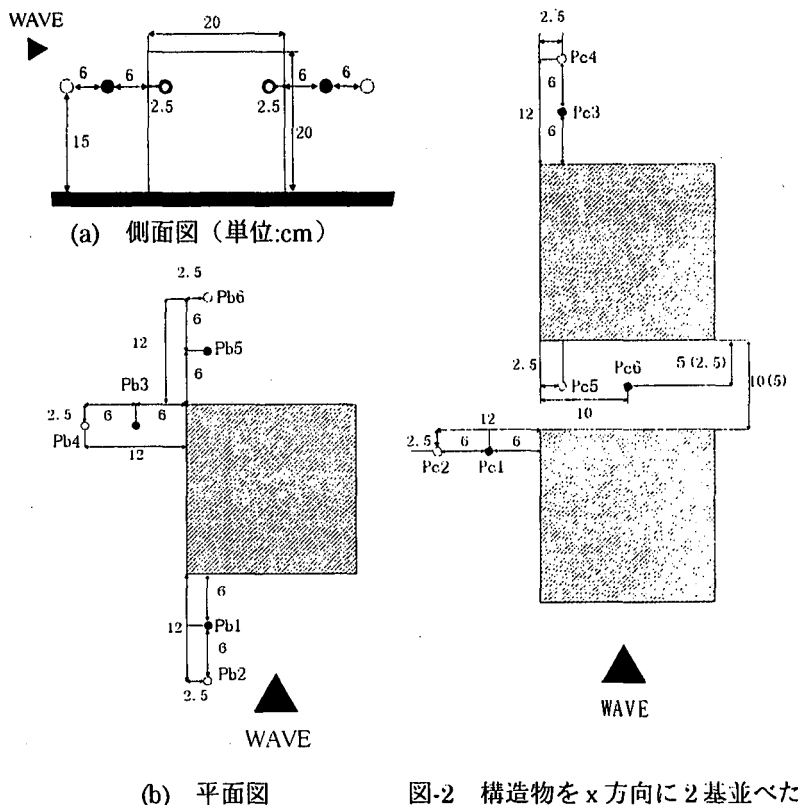
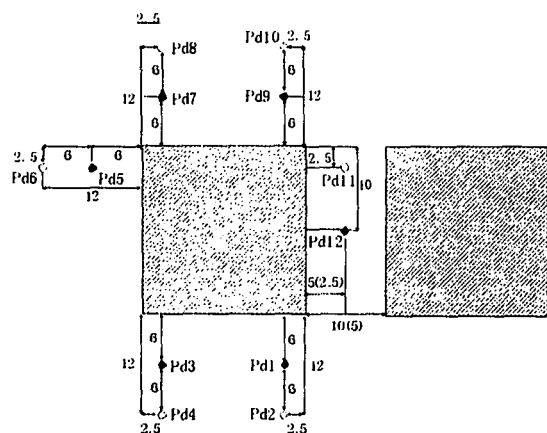


図-1 単一構造物の場合の計測点

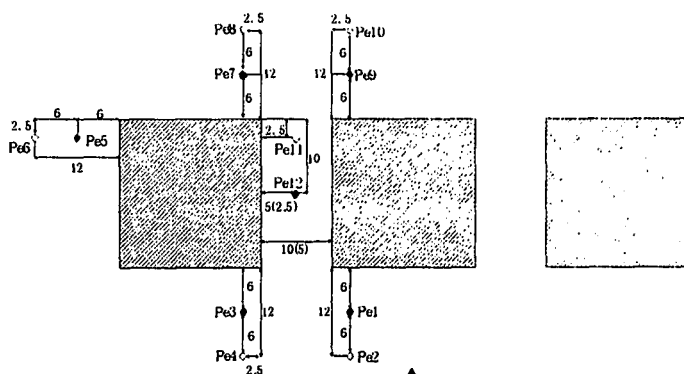
図-2 構造物を x 方向に 2 基並べた場合の計測点

- * 正 会 員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
- ** 愛知県警
- *** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
- **** 正 会 員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
- ***** フェロー 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻



WAVE

図-3 構造物をy方向に2基並べた場合の計測点



WAVE

図-4 構造物をy方向に3基並べた場合の計測点

物を複数設置したときの発生音の変化を明らかにすることを主な目的とするため、形状は単純なものとし、一辺の長さ 20 cm の不透過な立方体の構造物を用いることとした。この構造物の数と配置方法を種々変化させ、水槽のほぼ中央に設置し、発生音圧の計測を行った。

実験条件を以下のように設定した。すなわち、静水深(h)を 40cm で一定とし、規則波を入射させた。入射波の周期(T)を 1.4, 1.8, 2.6 秒の 3 種類、それぞれの周期に対して波高(H)を 5, 9 cm の 2 種類変化させた。構造物の数は 1 基から 3 基まで変化させ、その配置方法を図-1～図-4 に示すように変化させた。さらに、複数基の構造物の場合、構造物の間隔を 5, 10cm の 2 種類変化させた。

実験では、造波装置前面、および構造物前面での水位変動と、構造物周辺の底面上 15cm における音圧変動と波進行方向とその直角方向の水平方向水粒子速度 u と v の計測を行った。なお、音圧と流速の測定位置は図-1～図-4 に示した通りであり、図中の●印の計測点では音圧と流速を、また○印の計測点では音圧のみを計測した。

水中音響の測定には、長さ 15.8 mm、直径 9.5mm の超小型水中マイクロホン（Brüel&kjær 社製: 8103）2 台を使用し、マイクロホンからの出力をチャージ増幅器（Brüel&kjær 社製: 2635）を通した後、データレコーダ（SONY 製: KS-616）に記録するとともに、パーソナルコンピュータを用いて時間間隔 1/2000 秒で AD 変換を行い、その結果をパーソナルコンピュータに記録した。なお、既往の研究により水中マイクロホンが音圧だけでなく波動圧をも測定し、その振幅が音圧変動と考えられる高周波の成分振幅より遙かに卓越することが明らかになっている²⁾。本実験では主として音圧の測定を行うことを目的とするため、10Hz 以上のデータのみをハイパスフィルター(NF 回路製: MS-523)を通して記録することも併せて行った。また、音圧測定においては、測定機器による自己雑音、造波装置や消波装置などによる背景雑音、マイクロホンを支える支柱の固有振動周波数などが含まれていると考えられるため、構造物を設置しない場合の計測を同一条件の下で行って、その結果と比較した上で、データの解析を行うこととした。

解析では、AD 変換したデータを 2 周期分単位にブロック化し、それぞれのブロック毎にフーリエ変換を用いて振幅スペクトルの計算を行った。また、式(1)に示す音圧レベルの計算も同時に行った。

$$L_p(\text{dB}) = 20 \log(P / P_0) \quad (1)$$

ここに、 P_0 は最小可聴域の音圧であり、水中における P_0 の値は通常 $P_0 = 1 \mu\text{Pa}$ とされることが多いため、本研究でもその値を使用した。

3. 数値解析

3.1 基礎方程式

本研究では、式(1)に示す連続式と式(2)～(4)に示す非圧縮性粘性流体の運動方程式を基礎方程式として数値解析を行った。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 u 、 v 、 w はそれぞれ流速の x 、 y 、 z 成分、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 p は圧力、 ν は動粘性係数で、 x は波進行方向の水平軸、 y は x 軸に直交する水平軸、 z は静水面上に原点を持つ上向きの鉛直軸である。

3.2 計算方法

本研究では、基礎式を有限差分法で解く。なお、計算領域を staggered mesh で分割し、時間発展に陽解オイラー法を採用する。空間の差分化については、移流項をドナー差分近似により、粘性項を中央差分により表す。また、圧力に関しては、運動方程式によって求めた時間ステップ $n+1$ における流速が、連続式を満たすよう時間ステップ n の圧力を更新する SOLA スキームを用いて求める。

造波は、Stokes の 3 次近似解の流速により求めた湧き出しにより与えた。また、壁面での境界条件として、底面と側面では free-slip、構造物上では no-slip の条件を与えた。

3.3 計算条件

周期、波高は水理実験と同一の値を使用した。空間の差分間隔は各方向とも 2cm とし、時間間隔を 1/100 秒とした。なお、この値は Courant 数が 1 を越えないことを確認している。

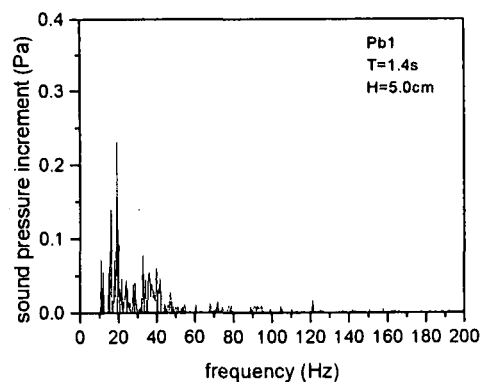
計算は、静水状態から波高を徐々に増加させ、波が安定した時を $t=0$ として、その後 3 周期計算を行った。

4. 波動音圧の特性

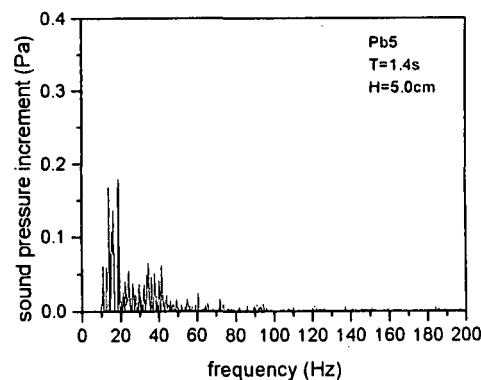
今回の実験では、ほとんどの条件で、200Hz 以上の高周波数成分については、構造物の有無による音圧の振幅スペクトルに有意な差異が認められなかったため、主に 200Hz 以下の成分を議論する。

4.1 音圧変化に及ぼす位置の効果

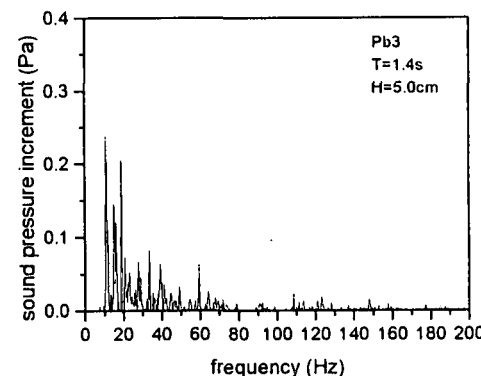
図-5 は、構造物を 1 基設置した場合に、構造物を設置したことによる音圧の振幅の増分を異なる計測位置に対して例示したものである。同図に例示するように、全般的に構造物を設置することによって 20Hz 付近、30~40Hz 付近で音圧変動の増分が認められた。例示した図ではあまり明瞭ではないが、これ以外に 90~110Hz 付近、150Hz 付近、180Hz 付近でも若干音圧が増分することが多くのケースで認められた。また、これらの音圧の変化は、構造物の前方と後方に比べ、構造物側方で全体的に大きくなっている。波高が増大しても同様の周波数帯で音圧の増分が認められているが、変化の割合は波高が大きい方が大きくなる。図-6 は、構造物周りの流速ベクトルの一例を示したものである。同図に例示されるように、構造物側方では、構造物の存在によって流れが局所的に加速され、流速が構造物前方や構造物後方に比べてより速くなっていることがわかる。これは実験で計測した最大流速の比較からも確認されている。さらに、過去に行った可視化実験で確認されているように、構造物側方では構造物の前後に比べてより規模の大きい渦が形成されており、このため側方で音圧変化が大きくな



(a) 構造物前方 (Pb1 点)



(b) 構造物後方 (Pb5 点)



(c) 構造物側方 (Pb3 点)

図-5 単一構造物周辺の音圧変化

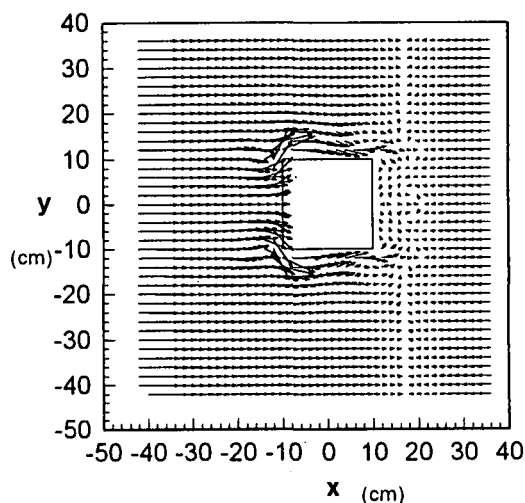
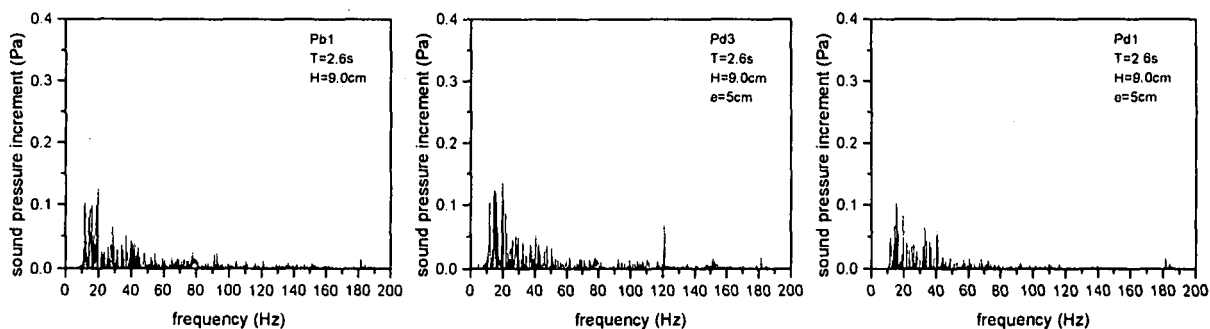


図-6 単一構造物周辺の流速ベクトル
($T=2.6s$, $H=9.0cm$, $U/T=1.5$)



(a) 単一構造物の場合の前方 (Pb1 点) (b) 構造物前方 (Pd3 点) (c) 構造物前方 (Pd1 点)

図-7 構造物を y 方向に 2 基設置した場合の音圧変化

ったと考えられる。

4.2 音圧変化に及ぼす構造物の基数の効果

図-7 に単一構造物の場合、および y 方向に 2 基設置した場合の音圧の振幅スペクトルの増分を例示する。ただし、計測位置は構造物前面である。本実験においては計測点を構造物の隅角部近くに設定しているが、構造物を 1 基設置した状態から計測点に近い方に構造物を増設すると、構造物 1 基のときに比べて音圧の増分は全体的に小さい (Pd1 点)。逆に、計測点から遠い側に構造物を配置すると、構造物を単体で設置した場合よりも音圧の増分は大きくなる (Pd3 点)。一方、図示していないが、構造物の側方では、単一構造物の場合と異なり、音圧の増分は構造物を 2 基設置した場合の方が単一構造物の場合よりも小さくなることを確認された。

図-8 に構造物を 2 基設置した場合の流速ベクトルの分布の一例を示す。構造物間の隙間に近い Pd1 点では、単一の構造物の場合に比べ、全般的に y 方向の流速が小さくなっている。これに対して Pd3 点では、逆に y 方向流速が単一構造物の場合より若干大きくなっている。平面水槽による実験のため、構造物周りの流況の可視化が行えなかったため詳細は不明であるが、この数値解析の結果から以下のことが考えられる。すなわち、単一構造物の沖側隅角部の前方、あるいは岸側隅角部の後方で形成される渦は流況がほぼ対象となるため、左右の隅角部で同じような規模の渦が形成される。一方、構造物群を複数基設置した場合、個々の構造物の前方、後方で形成される渦は、構造物群の側方と構造物間の流況が異なるため、必ずしも同程度の規模ではなく、外側の隅角部で単一構造物の場合よりも大きく、内側の隅角部付近は単一の構造物の場合より小さくなっていると考えられる。この差が音圧の増分の差に影響を及ぼしたと考えられる。

一方、側方では、数値解析と流速の計測実験のいずれから、構造物を 2 基設置したときの方が 1 基の場合よりも最大流速は大きくなっていることを確認しているが、音圧の変化は構造物が 1 基の場合よりも小さい。したがって、必ずしも音圧変動は最大流速そのものには支配されていないことを示唆する。構造物を複数基設置すると、構造物群としての規模が大きくなり、波の反射や回折の効果が単一構造物の場合と異なる。さらに、構造物にぶつかった後、構造物の上部へ回り込む流れも構造物を 2 基設置した方が多くなることを数値解析で確認しているが、このような効果のために、最大流速は大きくなっても渦の規模は小さくなっている可能性がある。

図示していないが、横方向に 3 基構造物を並べた場合、構造物の数を 2 基から 3 基に増設する効果についてはあま

り明瞭なものは認められず、単一構造物と比較しても、外側隅角部の前方で音圧の増大がみられ、逆に側方では音圧の増分は単一構造物の場合よりも小さくなるなど、2 基の場合と同様の結果が得られている。また、これらの音圧の変化に及ぼす構造物の間隔の影響についても本実験の範囲では明瞭なものは認められなかった。

図-9 に構造物を複数基 x 方向に並べたときの構造物側方での音圧の変化を例示する。音圧の増加が認められる

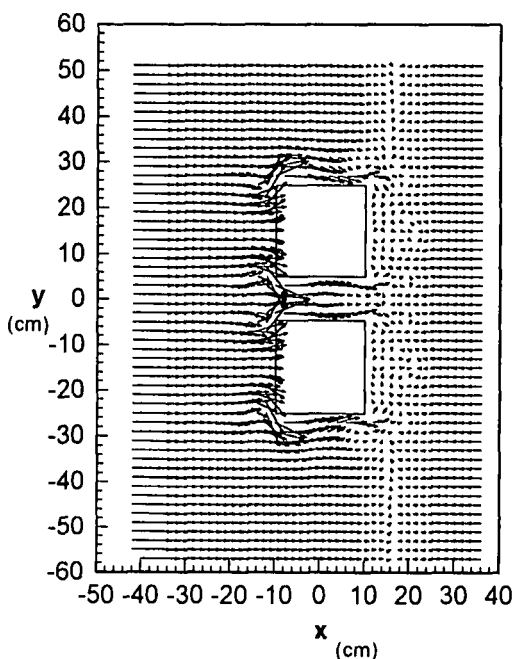
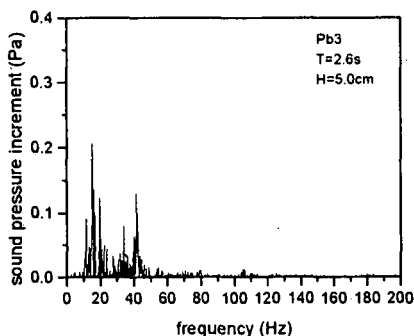
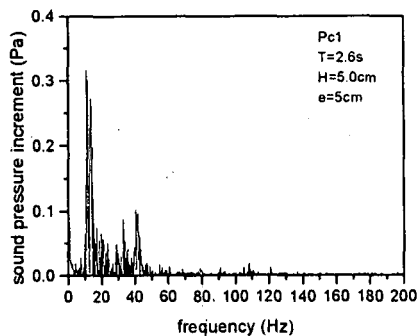


図-8 構造物を y 方向に 2 基設置した場合の流速ベクトルの一例

($T=2.6s$, $H=9.0cm$, $t/l=1.5$)



(a) 単一構造物の場合 (Pb3 点)



(b) 構造物を 2 基設置した場合 (Pc1 点)

図-9 構造物を x 方向に配置した場合の音圧変化 ($T=2.6s$, $H=5.0cm$)

周波数は、構造物の数に関係なくほぼ同様である。しかし、x 方向に 2 基構造物を設置した場合の方が、音圧の増加がより顕著である。

図-10 は、同様に構造物を x 方向に 2 基設置した場合の流速ベクトルの計算結果の一例である。最大流速については、側方の計測点 (Pc1 点) では、構造物 1 基の場合と比べて 10% 程度増加する程度であることを確認しているが、図-10 に示すように、背後の構造物の影響によりこの計測点の流れは単一構造物の場合と大きく異なる。このため、図-9 に示したような変化が現れたと考えられる。

図-11 に構造物を 2 基並べた場合の構造物間における音圧の増分を例示する。構造物間では、音圧の変化は一般に小さい。図-8 と図-10 の例示した流速ベクトルからはあまり明瞭ではないが y 方向に 2 基設置した場合は、最大流速は増加すること、逆に x 方向に 2 基設置した場合は減少することが流速計測実験、数値解析から明らかになっている。しかし、いずれの場合も音圧の変化に明瞭な差は認められていない。構造物間では、渦は形成されるものの、その規模は、構造物間の間隙の大きさの制約のため、あまり大きく成長できない。そのため流速の最大値に関係なく、音圧の変化は小さかったと考えられる。このことから音圧の変化は最大流速に依存しないことがいえそうである。

4.3 音圧スペクトルの特性

これまで、構造物がない場合から構造物を設置することにより振幅が増加した音圧を中心に検討を加えたが音圧そのものの振幅を音圧レベルの形で整理した結果を図-12 に例示する。ハイパスフィルターを通してあるため波動圧が大部分となる 10Hz 以下の低周波数成分の変動は小さくなっているが、一般にそれ以上の周波数帯の音圧レベルは、周波数の増大とともに細かい変動をともないながら緩やかに減少する。図示していないが、数値解析結果の圧力に対して、同様の整理を行ったが、本計算は、既述したように、コンピューターのメモリの制約により、格子間隔が 2cm、時間間隔が 1/100 秒と粗く、このため実験結果に認められるような細かい変動は認められなかった。そこで、昨年度行った二次元の実験結果²⁾とその条件に対する二次元の数値解析結果の比較を図-13 に例示する。なお、計算方法は次元が低いことを除けば基本的に同じであるが、格子間隔を

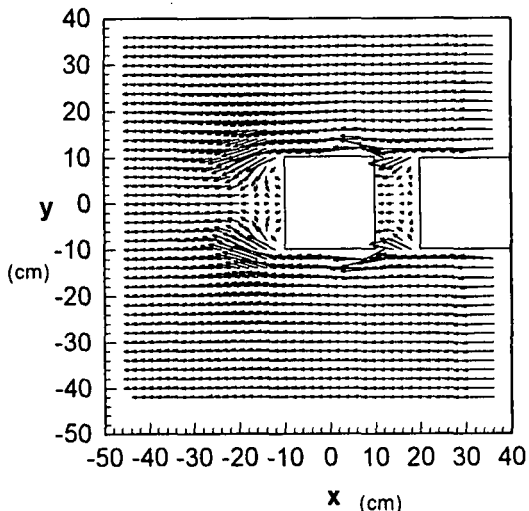
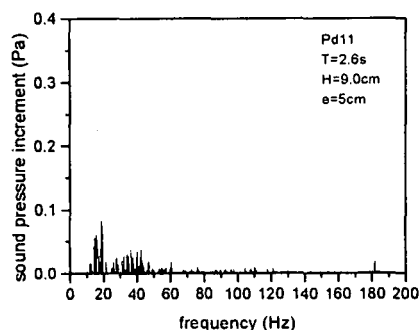
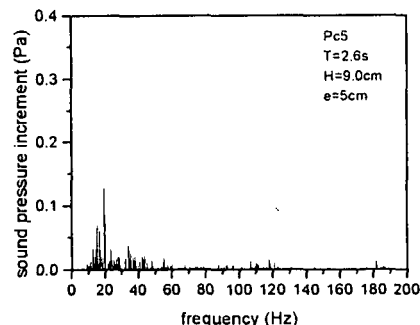


図-10 構造物を x 方向に 2 基設置した場合の流速ベクトルの一例

($T=2.6s$, $H=9.0cm$, $t/T=1.0$)



(a) y 方向に 2 基設置した場合



(b) x 方向に 2 基設置した場合

図-11 構造物間での音圧の変化 ($T=2.6cm$, $H=9.0cm$)

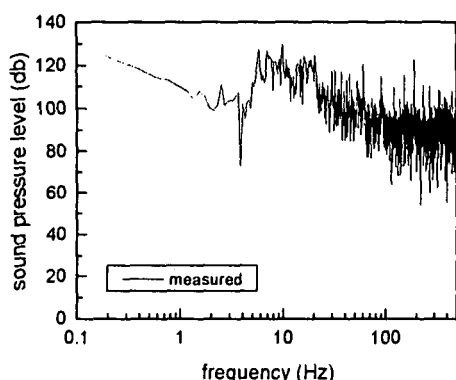


図-12 構造物を y 方向に 2 基設置した場合の
音圧レベル (T=2.6s, H=9.0cm, Pd3 点)

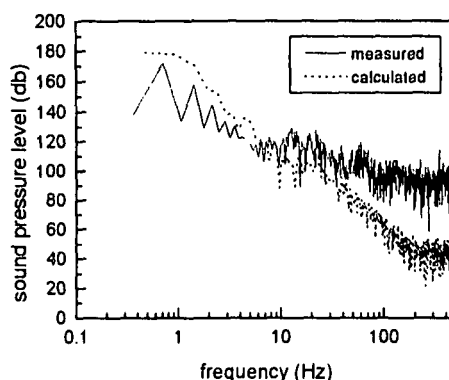


図-13 二次元着定式構造物後方での音圧レベル
の実験値と計算値 (T=1.4s, H=13cm)

0.25cm, 時間間隔を 1/2000 秒の条件で行った。

計算結果は、約 10Hz 以下の周波数帯で若干過大評価しているものの実験値との上限を比較すると対応は悪くないといえる。これに対し、それ以上の周波数帯では計算結果はかなり過小評価となることが一般的な傾向として認められた。周波数の高い範囲での音圧の変動は、主に渦の発生やその移動や発達・減衰といった挙動にともなうものであると考えられ、したがって、流れの乱れに起因するといえる。本研究の数値解析は Navier-Stokes の式を運動方程式として行われているが、この程度の格子間隔や時間間隔では、現実の流れは再現できないといえる。したがって、より詳細な数値解析を行う必要があるが、この点は今後の重要な課題である。

5. おわりに

本研究では、構造物を複数基設置することによる構造物周辺での音圧の特性について水理実験結果を計測し、併せて行った数値解析結果による流況の特性と関連づけながら検討を加えた。本研究によって得られた主要な結論を以下にまとめる。

- 1) 構造物を設置することにより 20Hz 近傍 30~40Hz 90~110Hz 150Hz 近傍、および 180Hz 近傍の音圧の増大が確認された。これらの音圧変化は、波高が増大するほど顕著となる。
- 2) 波峰に平行に構造物を複数基設置した場合、構造物前面では、構造物間の間隙に近い場所では一基の場合に比べ音圧は小さくなるが、端に近づくとも一基の場合に比べ音圧は増大する。一方、構造物側方では、構造物の数が増大すると、最大流速は増大するが、音圧変動は小さくなる。
- 3) 構造物を波進行方向に複数基設置した場合、構造物側方の間隙に近いところでは一基のみの場合に比べ音圧変化は大きくなる。これは、構造物の間隔が多少変化しても同様である。
- 4) y 方向に複数基構造物を設置した場合、構造物の間では、単一構造物の場合より最大流速は増大するが、逆に音圧変化は小さくなる。一方、x 方向に 2 基設置した場合は、単一構造物の場合より、最大流速、音圧とも減少する。したがって、音圧変化は必ずしも最大流速に依存しないといえる。

謝辞

本研究を行うにあたり、文部省科学研究費（基盤研究(c)(2) 研究代表者 水谷法美）および鹿島学術財団による研究助成（研究代表者 岩田好一郎）の交付を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 水谷法美・小島航・金俊圭・岩田好一郎：波により潜水着底式構造物から発生する音の特性に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol.12, pp.67-72, 1996.
- 2) 水谷法美・金俊圭・鈴木篤・内藤耕治・富田孝史・岩田好一郎：潜水構造物より発生する波動音圧に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol.13, pp.507-512, 1997.
- 3) 水谷法美・金俊圭・鈴木篤・富田孝史・岩田好一郎：潜水構造物より発生する波動音圧に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.1226-1230, 1997.