

潜水構造物より発生する波動音圧に関する基礎的研究

水谷法美*・金俊圭**・鈴木篤***
富田孝史****・岩田好一朗*****

1. 研究の目的

人工魚礁の設置は、古くより漁獲量向上のために行われてきた手法であるが、近年、単に漁獲量向上のみならず、海生物資源の保護などの環境保全に果たす役割も大きく期待されている。さらに、魚礁を中心とする生態系を定着させることにより、水質の改善など、海域環境改善の手法としても有効であると考えられ、今後、その位置づけはますます高くなると考えられる。

魚礁の機能を有効に発揮させるためには、魚礁に十分な魚類の蟄集効果を持たすことが必要不可欠である。蟄集効果には、陰影説や逃避場説などいろいろな説が唱えられているが、魚礁から発生する音により魚類が蟄集するという発生音説は、その中でも有力な説であると考えられる。したがって、魚類の好む音を発生させるような形状の魚礁の設計が可能になれば、その効果はきわめて大きい。

魚礁から発生する音の研究は、松原・野田(1993)によって行われているが、彼らは静水中を魚礁を往復運動させる疑似振動流場を対象としており、波動場に対する検討は水谷ら(1996)があるのみである。彼らは、魚礁から発生する渦と発生音の間に密接な関連性があることを示唆しているが、その詳細まで議論するには至っておらず、未解明な問題を残している。

本研究は、魚礁のような潜水構造物から波により発生する音の基本的な特性とその発生機構を解明する基礎として、波動場に設置された魚礁から発生する音を水理模型実験を行って計測し、その実態を明らかにするとともに、その支配要因であると考えられる魚礁周辺の流況の特性と関連づけて考究することを目的とする。

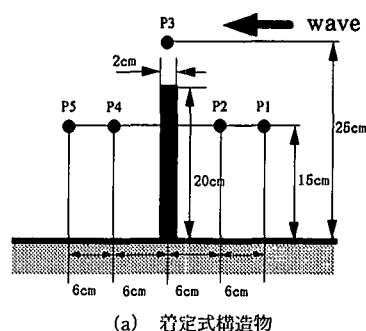
2. 水理実験

2.1 実験装置及び実験方法

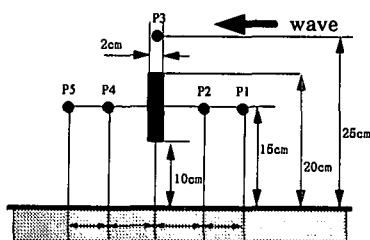
水理実験を高さ 20 cm の水平床を設置した名古屋大学の二次元造波水槽(長さ 25 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.95 m)を使って行った。まず、魚礁模型を作製し、水平床上に魚礁模型となる三次元構造物を設置して規則波を作用させ、構造物周りの発生音を計測した。なお、三次元構造物の形状を、立方体、三角柱、円柱、半球およびフレーム構造物の 5 種類変化させた(水谷ら, 1996)。

また、構造物から発生する渦と発生音の関係をより詳細に論議するため、規模の大きい渦の発生が期待できる二種類の板状の二次元構造物を設置した場合の実験も併せて行った(図-1 参照)。

実験では、水深を $h=40$ cm で一定とし、各構造物を設置し、規則波を生起させた。発生波の周期(T)を 1.0, 1.4, 1.8 s の 3 種類、波高を 5, 9, 13 cm の 3 種類変化



(a) 箱定式構造物



(b) 非箱定式構造物

図-1 二次元構造物の諸元と音圧計測位置

- | | | |
|------------|-----|-------------------------|
| * 正 会 員 | 工 博 | 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学教室 |
| ** 正 会 員 | 工 博 | 東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所研究員 |
| *** 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 | 工 博 | 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室主任研究員 |
| ***** フェロー | 工 博 | 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学教室 |

させた。

水中音の計測には、長さ 15.8 mm、直径 9.5 mm の超小型水中音圧計 (Brüel & Kjær 2635) を使用し、計測地点を構造物周辺で、三次元構造物の場合は 4 カ所 (水谷ら, 1996)、二次元構造物の場合は 5 カ所 (図-1 参照) 変化させた。音圧計からの出力を直流電源で作動するチャージアンプを通してデータレコーダに記録した。また、各計測点を含む 5~10 点で水粒子速度と水位変動の計測もそれぞれ電磁流速計 (ALEC ACM-200 P) と電気容量式水位計 (KENEK CH 306) を使って行い、さらに代表的なケースについて、音圧変動との比較のため圧力計 (KYOWA PGM 500 G) による圧力の計測も行った。これらの時間変化を全てデータレコーダに記録した。なお、水中音の計測の際、測定機器による自己雑音、造波装置および消波装置等からの背景雑音がいくらか含まれていることが考えられる。そのため、構造物を設置しない場合の計測も同一条件のもとで行い、その結果と比較検討することとした。

また、構造物周辺の流況を把握するため、可視化実験を行った。可視化は、三次元構造物模型の場合に水素気泡を、また、二次元構造物の場合にウォーターブルーをトレーサーとして行った。これらの流況を目視観測するとともに、ビデオレコーダ (SONY BCM 100, 30

frames/s) により撮影を行った。

2.2 解析方法

実験で計測した水位変動と流速の時間変化を時間間隔 50 ms で AD 変換し、構造物による流速の変化特性を議論した。また、音圧、及び圧力の時間変化を時間間隔 1 ms で AD 変換し、その時系列データを 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スペクトル解析した。

3. 二次元構造物による波動音

3.1 音圧の時間変化

本実験で計測された発生音の出力の時間変化を水位変動 η 、および圧力変動とともに図-2 に例示する。本実験で使用した水中マイクロホンは音圧計であり、波動圧も同時に計測するため、音圧計の時間変化は圧力の時間変化とほぼ等しい。しかし、音圧の時間変化には非常に小さい振幅を有する短周期の波が含まれているのが確認できる。この波形は、水位変動および圧力の時間波形にはほとんど現れていないことから、今回対象としている波動音圧の一部であると考えられる。そこで、波動成分を除去した音圧の時間変化を水位変動と比較検討することとする。

図-3 に水位変動と各計測点における音圧のうち低周

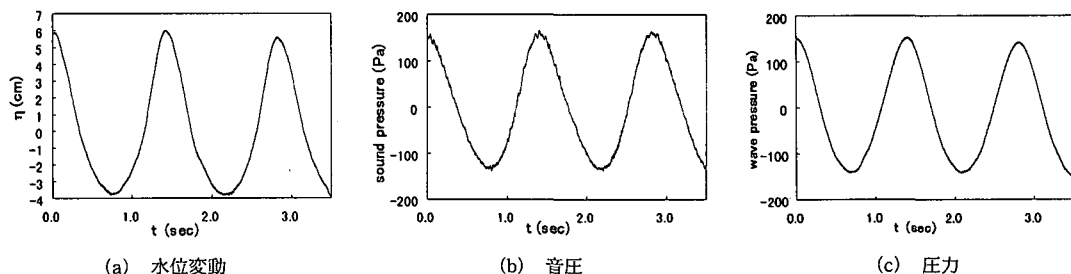


図-2 水位変動、音圧と圧力変動の時間波形の例 ($T=1.4$ s, $H=9$ cm)

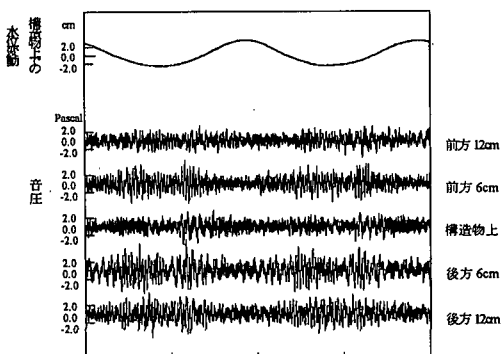


図-3 各計測点での音圧変動 ($T=1.4$ s, $H=5$ cm, 着定式構造物)

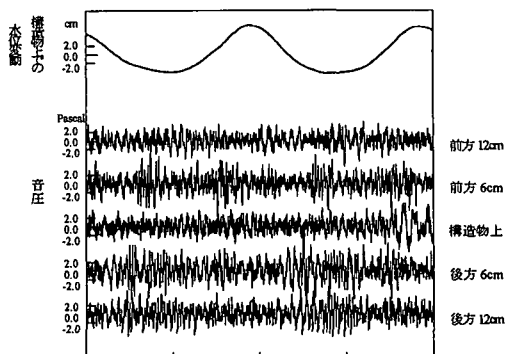
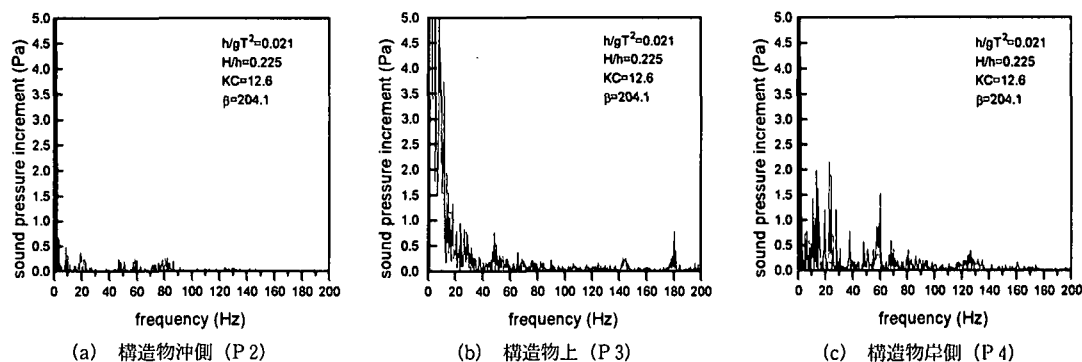


図-4 各計測点での音圧変動 ($T=1.4$ s, $H=13$ cm, 着定式構造物)

図-5 着定式構造物周辺の音圧変化 ($T=1.4$ s, $H=9$ cm)

波数成分 (14 Hz 以下) を除去した成分を比較した結果を示す。音圧変動は、構造物上で水位変動が谷の位相を中心に顕著に現れている。可視化実験によると、この位相は、構造物岸側で発生、成長した渦が、流速の逆転とともに形を崩しながら構造物沖側へ流されていく時にあたる。また、構造物岸側の音圧変化のほうが沖側の音圧変化よりも大きく、時間的にわずかに先行している。このことから、音圧変動は、構造物より発生する渦が崩れ、流される時に発生することが推察される。峰の位相で音圧変動が顕著に現れないのは、構造物岸側で発生する渦の方が沖側で発生する渦よりも大きいことによるが、波高が増大し、沖側でも大きな渦が発生するようになると、図-4 に例示するように、峰の位相前後でも音圧変動が顕著になることが確認できた。

3.2 音圧のスペクトル特性

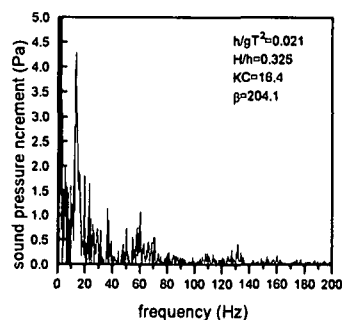
構造物を設置することにより、音圧は変化するが、計測した音圧は、周囲の環境音も計測しており、構造物から発生する波動音のみではない。そこで、構造物のない状態で、他の条件を同一に保って計測した音圧との比較を行って論議する。ただし、構造物の有無による音圧スペクトルの比較からは、構造物を設置したことによる効果を定量的に議論するのは困難であったため、本研究では、両者の差をとり、構造物を設置したことにより音圧が増大する部分にのみ着目し、以下にその特性を考究することとする。なお、波を生起しない状態での音圧の計測結果との比較より、200 Hz 以上の高周波数帯においては、構造物設置による有意な変化は全般的に小さかったため、主に 200 Hz 以下の範囲を中心に検討する。

a) 着定式構造物

着定式二次元構造物上 (P3)、およびその沖側 (P2) と岸側 (P4) における音圧スペクトルの増分を図-5 に例示する。なお、図中の KC は KC 数 (Keulegan-Carpenter 数, $u_m T/D$, u_m : P2 点の水深における水平方向最大流速, T : 波の周期, D : 板厚), β は周波数パラメータ ($D^2/\nu T$, ν : 水の動粘性係数) である。

構造物の岸側では、主として 15~25 Hz 近傍、50~60 Hz 近傍、および 120~130 Hz 近傍で音圧が増大している (図-5(c) 参照)。一方、沖側でも、20 Hz 前後や 60 Hz 前後など、沖側とよく似た周波数帯で、若干音圧は増大するが、時間波形からも認められたように、岸側に比べて音圧変化は小さい。これらの音圧変化が顕著な周波数は、発生波の周波数や 1 周期あたりに形成される渦の個数に比べてはるかに高く、渦の形成そのものではなく、渦の発生、発達、減衰過程で生じる渦の振動や乱れによると考えられる。特に、既述したように、流速逆転時に、発生した側と逆の方向に渦が流される時に顕著な音圧変動が生じていることから、減衰過程での音圧の発生の可能性が高いと思われる。

一方、構造物上では、沖側と同様、15~25 Hz 近傍、50~60 Hz 近傍、および 120~130 Hz 近傍の周波数帯で音圧が増大しているが、それ以外に 15 Hz 以下の比較的低い周波数帯でも、発生波の周波数の 2 倍周波数のような調和成分の音圧の増大が認められる (図-5(b) 参照)。構造物上では、構造物の岸側・沖側で形成された渦が流速逆転時に常に計測点を通過することから、渦の発生周波数に相当する 2 倍周波数などの周波数帯に変化が生じたと考えられる。しかし、このような変化は他の計測点では観測できておらず、この変化は非常に限られた範囲

図-6 着定式構造物岸側の音圧変化 ($T=1.4$ s, $H=13$ cm, P4)

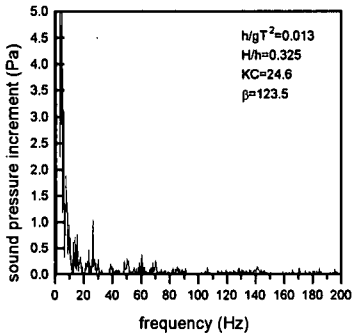


図-7 着定式構造物岸側の音圧変化
($T=1.8$ s, $H=13$ cm)

でのみ生じると考えられる。

波高が増大すると、図-6 に例示するように、音圧の増大が認められる周波数帯で、構造物の有無による差はより大きくなる。これは、波高の増加とともに、KC 数が増大し、形成される渦の大きさと強さが増大することによる。特に波高の増大による効果は 15 Hz 付近の音圧に明瞭に現れる。周期が長くなった場合も、波高の増加と同様に、図-7 に例示したように、特に 15 Hz 付近を中心に音圧の増大が明瞭になる。これも、周期が長くなることにより、KC 数が大きくなり、形成される渦の規模も大きくなることによると考えられる。このことから、KC 数は、音圧変動に重要な影響を及ぼすパラメータであるといえる。

b) 非着定式構造物

非着定式の二次元構造物の場合の音圧スペクトルの増分を図-8 に例示する。着定式の場合と同様、特に構造物岸側で 15~25 Hz 近傍、50~60 Hz 近傍、および 120~130 Hz 近傍で音圧の増分が一般的な傾向として認められた。沖側では、形成される渦の規模が岸側に比べて小さく、着定式構造物と同様、音圧変化は一般に岸側よりも小さい。また、構造物上の P3 でも岸側に比べて音圧変化は多少小さくなる。

着定式構造物と比較すると、岸側では音圧変化は大き

い。これは、非着定式構造物の場合、構造物上端だけでなく、下端からも渦の発生があり、構造物の岸・沖側で上下端から発生した渦の干渉がある。このため、渦の乱れは着定式の場合に比べて強くなることが考えられる。したがって、岸側での音圧の上昇が大きくなったと考えられる。ただし、個々の渦の大きさは、着定式の場合に比べて小さく、流速逆転時に流される渦の影響を受けやすい構造物の上部では、非着定式の方が音圧の変化は小さくなったと考えられる。したがって、渦の干渉も音圧変動の重要な要因であると考えられる。ただし、沖側ではあまり明瞭な差異は見いだせなかった。

なお、図示していないが、非着定式構造物の場合、200 Hz 以上の高周波数の範囲については、すべてのケースではないが 380 Hz 付近で音圧が増大する場合のあることも認められた。これも渦の干渉によるものと考えられる。すなわち、渦の干渉により、音圧変動は強くなるとともに、より高次の周波数にまでおよぶといえそうである。

4. 三次元構造物による波動音圧

本研究では、記述したように、5 種類の魚礁模型を作製し、実験を行ったが、流体運動中に隅角部を持たない半球は、音圧変動に特に有意な特性は認められず、また、円柱の場合の場合も音圧変動の生じる範囲が限られているため、ここでは、立方体 (1 辺長: 81 mm)、正三角柱 (底面の 1 辺長: 106 mm、高さ: 106 mm)、および立方体のフレーム構造物 (1 辺長: 81 mm、フレーム幅: 10 mm) を中心に論議することとする。

4.1 立方体

立方体沖側における音圧スペクトルの増分を図-9 に例示する。構造物の有無によるスペクトルの比較から、水谷ら (1996) は 40 Hz~90 Hz の周波数帯に生じているピーク値に明瞭な差異が生じることを指摘しているが、今回の解析により、25 Hz 近傍、60 Hz~80 Hz 付近、および 90 Hz 近傍を中心に音圧が増大していることが判明した。また、図示していないが、今回の解析により、

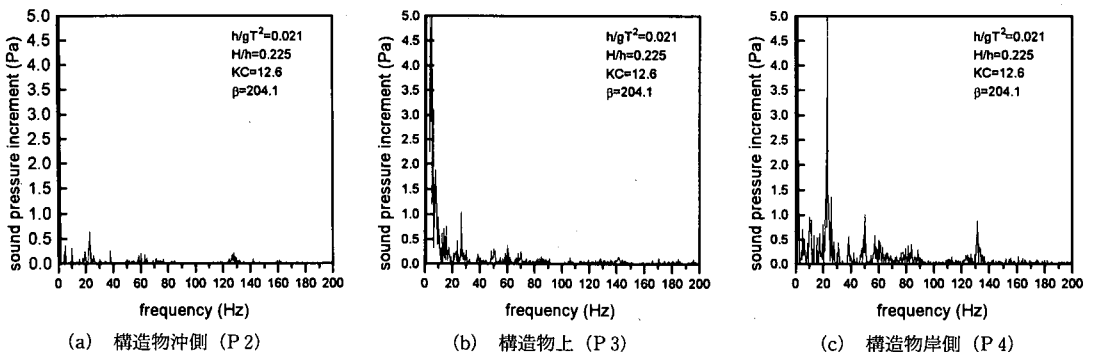


図-8 非着定式構造物周辺の音圧変化 ($T=1.4$ s, $H=9$ cm)

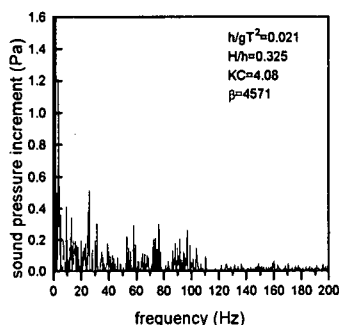


図-9 立方体岸側 6 cm における音圧変化
($T=1.4$ s, $H=13$ cm)

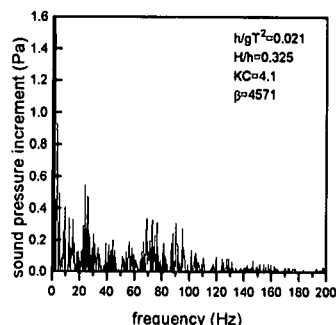


図-10 三角柱岸側 6 cm における音圧変化
($T=1.4$ s, $H=13$ cm)

450 Hz 付近で他の周波数帯よりも若干音圧が増大することが明らかとなった。

これらの音圧の増大する周波数は、完全には一致しないものの、既述した二次元構造物の場合に音圧の増大が認められた周波数帯に近い。また、顕著な渦の発生がほとんど認められなかった半球や円柱であり音圧変動に差がないことを考慮すると、三次元構造物の場合も渦の発生、発達、減衰などの挙動により音圧が発生すると判断できよう。

立方体前面でも変化は小さいものの全般的には後面と似た特徴が確認されたが、立方体上面では、構造物後面と異なり、構造物設置に伴う音圧スペクトルの増加は明瞭には認められなかった。二次元構造物の場合、渦の規模の小さい非着定式構造物の場合、構造物上で音圧の上昇が顕著でなかったことに対応していると考えられる。

4.2 三角柱およびフレーム構造物

三角柱の場合も、図-10 に例示するように、立方体と同様の周波数帯で音圧の増大が認められた。また、その程度も、若干の差異はあるものの立方体の場合と非常によく似ている。ただし、図には明瞭に現れていないが、三角柱の場合、立方体の場合と比べて、入射波の2倍周波数成分の音圧変化が比較的明瞭に表われ、その傾向は波高の増加にともない顕著になることが明らかとなった。

一方、フレーム構造物の場合、その構成要素のフレームは細く (10 mm)、渦の規模はさらに小さくなる。そのため、図示していないが、200 Hz 以下の比較的低い周波数帯の音圧の増大は立方体や三角柱のように一般的な傾向として明瞭には認められなかった。しかし、300 Hz から 500 Hz の高周波数帯で、程度に差はあるものの音圧レベルが上昇する傾向がある。これは、規模は小さいものの各部材から発生する渦同士の相互干渉やそれともなう乱れが発生することにより、発生する音圧変化と考えられる。

三次元構造物の場合、本実験では、構造物のスケール

が小さく、また、流れは構造物側方にも迂回するため、二次元構造物のような大規模な渦はできない。そのため、図-9, 10 からわかるように、音圧の変化の大きさは二次元構造物に比べてはるかに小さい。しかし、逆にさらにスケールの大きい構造物になれば、より大きな音圧変化が期待できると考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) 音圧の変化は、構造物背後に形成された渦が流向の逆転にともない移動する谷の位相で最も顕著に現れる。
- (2) 構造物設置による音圧変動が生じる周波数帯は、渦同士の干渉がある場合、干渉が無い場合に比べて、より高次周波数域にまで生じる
- (3) 隅角部を有し、渦の発生が顕著な立方体や三角柱構造物の場合、二次元構造物とよく似た周波数帯で音圧の増大がある。
- (4) 音圧の変化は、渦の成長・減衰・移動などの挙動と密接に関連しているものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、文部省科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2) 代表者 水谷法美) および、鹿島学術振興財団による研究助成 (代表者 岩田好一郎) の交付を受けたことを付記する。

また、名古屋大学大学院の内藤耕治君には、実験を行うにあたり、多大な協力を得た。ここに記して、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 松原雄平・野田英明 (1993): 魚礁から発生する水中音に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 391-396.
- 水谷法美・小島 航・金 俊圭・岩田好一郎 (1996): 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.