

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 Sound Pressure Generated by Wave-Submerged Structure Interaction

水谷法美*・金 俊圭**・鈴木 篤***・富田孝史****・岩田好一朗*****

Norimi Mizutani, June-Q Kim, Atsushi Suzuki, Takashi Tomita, Koichiro Iwata

This study is intended to discuss the sound pressure generated by the wave-submerged structure interaction, which is considered to play an important role on fish gathering function of an artificial fish reef. Laboratory experiments were carried out to measure a sound pressure as well as the velocity and free surface variation. In the experiments, idealized simple structures were employed and flow visualization was also conducted. It is confirmed that the installation of the submerged structure generates the sound pressure on several frequency domains. Moreover, it is revealed that the variation of sound pressure depends much on vortex formation and its behavior.

Keywords : sound pressure, wave-submerged structure interaction, artificial fish reef

1. はじめに

人工魚礁は、漁業生産の向上のみならず、そこに蟄集する魚類を中心とする生態系による海水の自浄力の向上など海域環境改善面での効果も期待され、その位置づけはますます高くなると予想される。特に、ミチゲーション技術の構築が不可欠な現状では、その効果は重要である。こういった人工魚礁の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。魚礁の蟄集理由には種々の説が提案されているが、中でも発生音説は有力な仮説であると考えられる。著者らは、すでに簡単な魚礁模型を使用した水理実験により、発生音の計測を行ない、魚礁から発生する音の特性について考究し、魚礁から発生する渦と発生音の間に密接な関係があることを報告している（水谷ら、1996）。そこで本研究では、渦と発生音の関係をより詳細に考究するために、より単純な模型を使用した水理実験を行なって発生音の計測を行ない、その波動音の特性について考究するものである。

2. 水理模型実験

1) 次元解析

平板構造物の設置にともない発生する波動音圧は、次に示す物理量に大きく支配されると考えられる。

$$(D, d, b, h, U, T, \rho, g, \mu, x, z, t) \quad (2.1)$$

ここで、 D は構造物の高さ、 d は構造物天端の潜水深、 b は構造物の幅、 h は静水深、 U は最大流速、 T は入射波の周期、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 μ は粘性係数、 x, z は計測位置であり、 x は構造物中心点を原点とし岸方向を正、 z は底面を原点とし上向を正とする。また、 t は時間である。

上に示した物理量を Buckingham の π 定理により無次元化すると、次に示す無次元量を得る。

$$\left(\frac{UT}{b}, \frac{UD}{\nu}, \frac{h}{gT^2}, \frac{D}{h}, \frac{d}{h}, \frac{b}{D}, \frac{x}{gT^2}, \frac{z}{gT^2}, \frac{t}{T} \right) \quad (2.2)$$

ここで、 $\nu = \mu / \rho$ は水の動粘性係数、 UT/b は Keulegan-Carpenter 数 (KC 数)、 UD/ν は Reynolds 数、 h/gT^2 は水深波長比、 D/h は構造物の無次元長さ、 d/h は構造物の無次元潜水深、 b/D は構造物の幅と高さの比、 x/gT^2 、 z/gT^2 は無次元位置を表す。

本論では、後述するように、 KC 数、 D/h 、 x/gT^2 、 z/gT^2 と発生波動音圧の関係を中心に置いて考察を加えるために下記のような実験を行なった。なお、後述の実験条件の下での Reynolds 数 UD/ν は、 $2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ 、 D/h は構造物 A で 0.5、構造物 B で 0.25 で一定、 b/D は構造物 A で 0.1、構造物 B で 0.2 で一定、 $d/h = 0.5$ で一定である。

* 正 会 員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (464-01 名古屋市千種区不老町)
 ** 正 会 員 ㈱東洋建設技術研究所鳴尾研究所
 *** 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

2) 実験装置と実験方法

実験を、図 2.1 に示すように名古屋大学工学部土木工学科の片面ガラス張り 2 次元鋼製造波水槽(長さ 25m, 幅 0.7m, 高さ 0.95m)を用いて行なった。造波はフラップ型造波装置(MTS 製・油圧式サーボ方式)で行ない、他端には反射波の影響を消すために、捨石、および消波ブロック模型で構築した消波装置が設置されている。また、水路床の前端部に 1/15 勾配の傾斜をもつ、高さ 15cm のステップ型の水平床を設置した。本実験では、発生音と渦との基礎的な関係を明らかにするため、図 2.2 に示すような 2 次元の薄幅の平板構造物 ($2 \times 20 \times 70\text{cm}$, $2 \times 10 \times 70\text{cm}$) を採用した。実験条件は、静水深 $h=40\text{cm}$ と構造物の潜水深 $d=20\text{cm}$ を一定として、入射波の周期を 3 種類(1.0, 1.4, 1.8 秒)、波高を 3 種類(5, 9, 13cm)変化させ、それぞれの条件に対して、構造物沖側で 2 点、構造物上で 1 点、構造物岸側で 2 点の合計 5 点で音圧、圧力、および流速の計測を行なった。水中音響の測定には、長さ 15.8mm, 直径 9.5mm の超小型水中マイクロホン(Brüel&kjær 社製:8103)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、また、圧力の測定には圧力変換器(共和電業製:PGM-G 型)を使用し、動歪アンプ(共和電業製:DPM-8H)からの出力を通してデータレコーダ(SONY 製:KS-616)に記録した。流速の計測は電磁流速計(ALEC ELECTRIC 製:ACM-200P)を使用し、波進行方向と水深方向の 2 方向に置いて測定を行ない、時間間隔 0.02 秒で AD 変換を行ないパーソナルコンピュータを用いてフロッピーディスクに記録させた。また、入射波 η の計測を、電気容量式水位計(計測技研:C-300)で同時に行なった。また、染料(ウォータブルー)をトレーサーとして用いた可視化実験を行ない、構造物から発生する渦の状況をガラス越しに構造物側面から 8mm ビデオにより撮影するとともに目視観測を行なった。

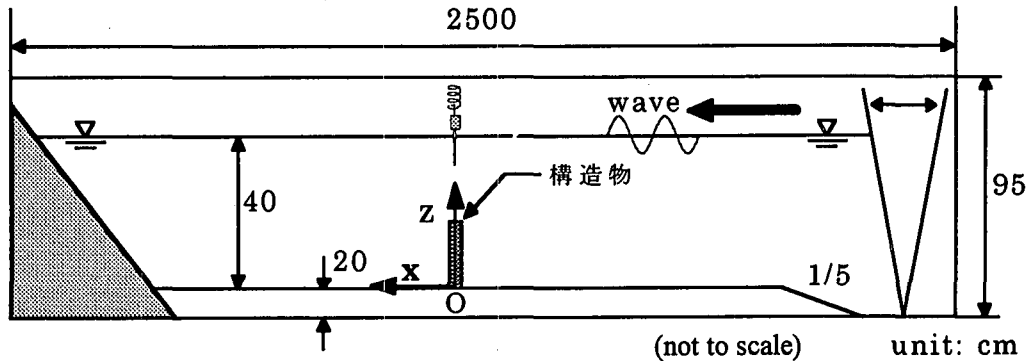


図 2.1 2 次元鋼製造波水槽の概要

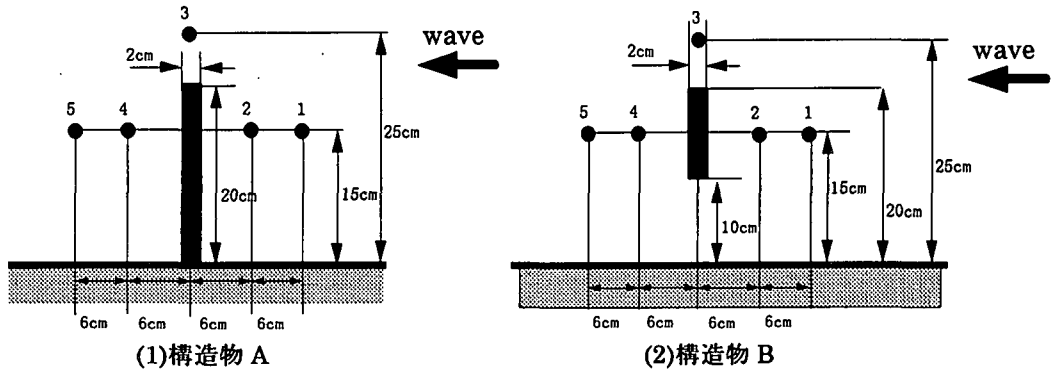


図 2.2 構造物の設置概要と音圧、圧力、流速の計測ポイント

3) 解析方法

データレコーダに記録した音圧、圧力データを時間間隔 1/1000 秒で AD 変換を行ない、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。なお、音圧、圧力を測定する際、測定機器の自己雑音、造波機や消波装置等から背景雑音がいづ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下で行ない、その結果と比較検討することにした。また、今回の実験では、ほとんどすべての音圧データにおいて、200Hz 以上の高周波数成分については、波を生起させずに計測した造波装置からの発生音のみの音圧スペクトルとほとんど差がなかったため、雑音領域とみなすことにする。

3. 実験結果とその考察

1) 可視化による構造物周辺の流況

構造物 A を設置したときの流況を図 3.1 に示す。なお、入射波は $t/T=0.25$ のとき谷の位相、 $t/T=0.75$ のとき峰の位相となる。峰の位相で構造物上端部から岸側に発生した渦は、波の流速が反転することによって沖側に形を崩しながら流されていく。谷の位相で沖側に発生した渦も同様の傾向を示すが、渦の規模は岸側の渦より小さい。また、構造物沖側の渦、岸側の渦ともに KC 数の増加にともない規模およびその渦流の速度が大きくなり、渦の中心が乱れる。

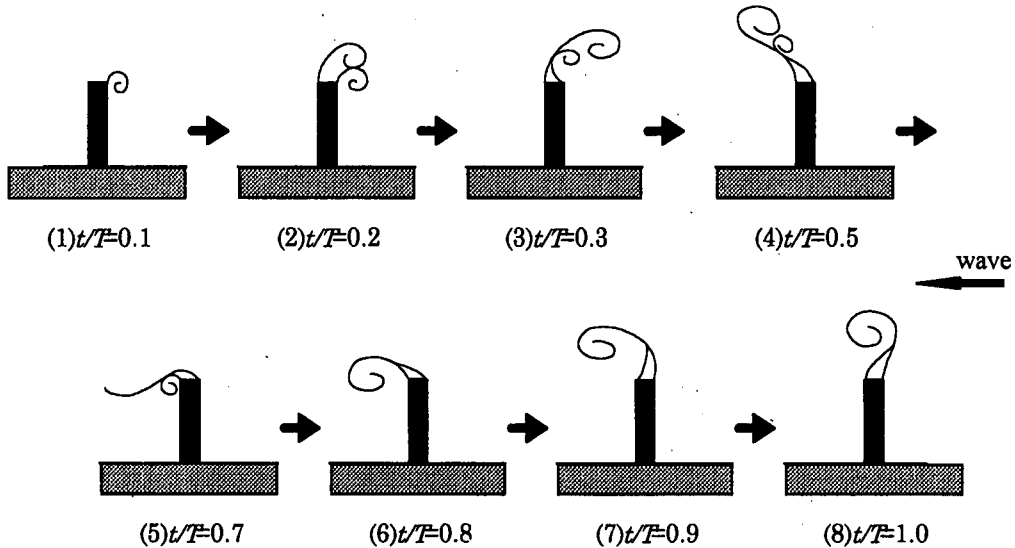


図 3.1 構造物 A の渦の発生状況(概略)

構造物 B を設置した場合も構造物 A を設置した場合と同様の傾向を示すが、構造物下部に通水域があるため、構造物下端部からも渦が発生している。そのため、渦の挙動は構造物 A を設置した場合より複雑である。特に、 KC 数が大きくなると構造物上端部から発生する渦と下端部から発生する渦の干渉が激しくなる。しかし、渦の規模は構造物 A を設置した場合と比べ若干小さくなる。

2) 水位と音圧の時間変動

本実験で計測された水位変動、発生音の音圧変動、および圧力変動の時間変化を図 3.2 に、それぞれ例示する。入射波の条件は周期(T)1.4 秒、波高(H)9cm であり、構造物 A を設置したときの、構造物後方 6cm(ポイント 4; $x/gT^2=0.312$, $z/gT^2=0.780$)での計測データである。音圧計による圧力データは同時に計測された水位変動と波形がよく似ている。これは、本実験で用いた水中マイクロホンが音圧の変化を測定する圧力計であり、波動圧も取り込んでしまうためである。しかし、音圧データには波動圧の波形上にごく小さな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。図 3.2 をみると、音圧計による圧力変動の波形は水位変動の波形と位相、形ともよく似ているものの、音圧データにみられる波動音圧の一部であると考えられるごく小さな振幅を有する高周波数の変動成分は含まれていない。したがって、今回は音圧計で計測されたデータの解析の結果について議論することにする。

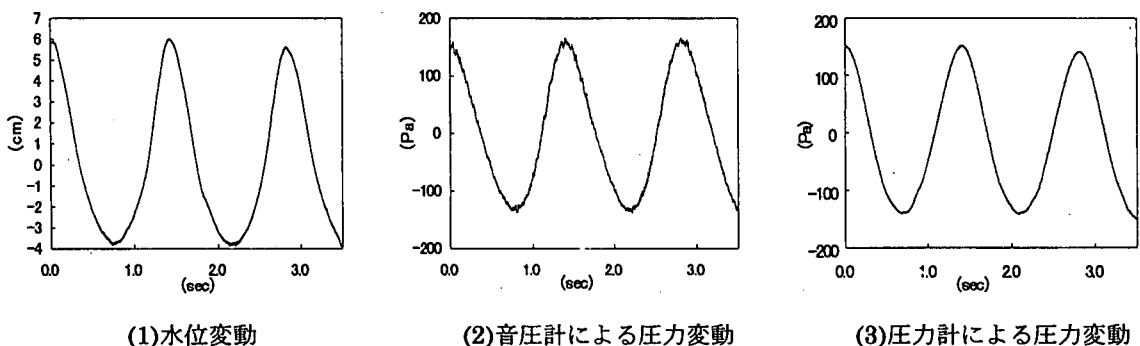


図 3.2 水位変動・音圧計による圧力変動・圧力計による圧力変動の時間変化

図 3.3 は周期(T)1.4 秒, 波高(H)5cm で構造物 A を設置したときの水位変動と波動圧が主となる低周波数成分 (14Hz 以下) を除去した音圧データとの関係を示したものであり, 図 3.4 は周期(T)1.4 秒, 波高(H)13cm の波が構造物 A に作用したときのものである。図 3.3 より, 波の位相が構造物上で谷の前後で音圧変動が顕著に現れていることが確認できる。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ときにあたる。また, 岸側の音圧変化のほうが沖側の音圧変化よりも激しく, 時間的にわずかに先行している。これは, 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という可視化実験の結果と一致する。一方, 図 3.4 より, 波高が大きくなると, 構造物前方での音圧変化が波の峰の位相でも起こることが解る。

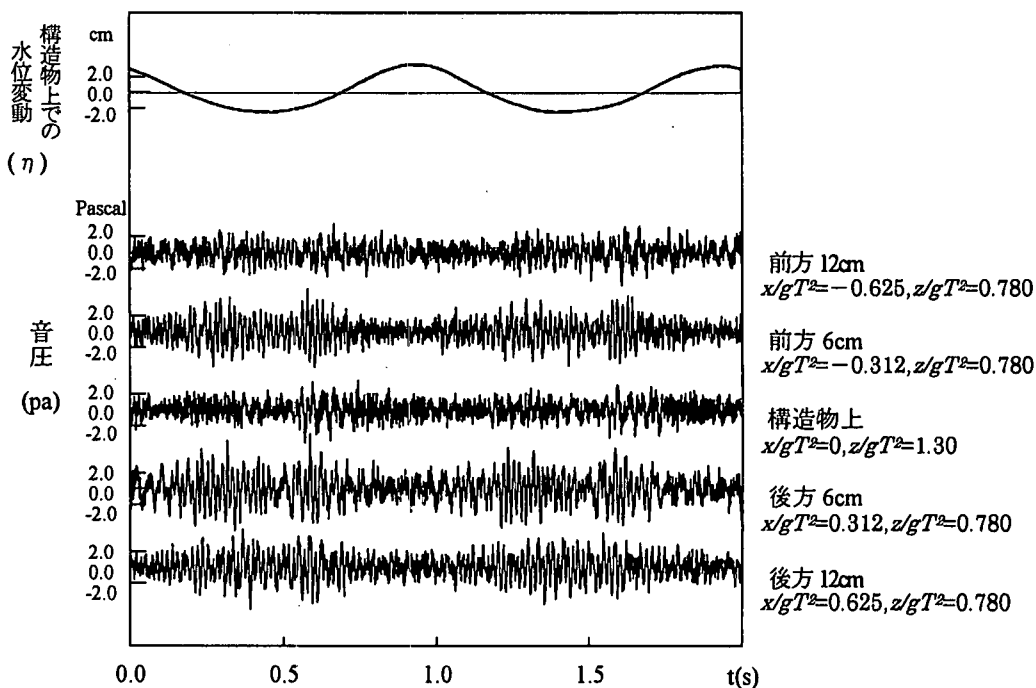


図 3.3 構造物 A 上での水位変動と音圧変動の関係 ($T=1.4s$, $H=5cm$; KC 数=8.5)

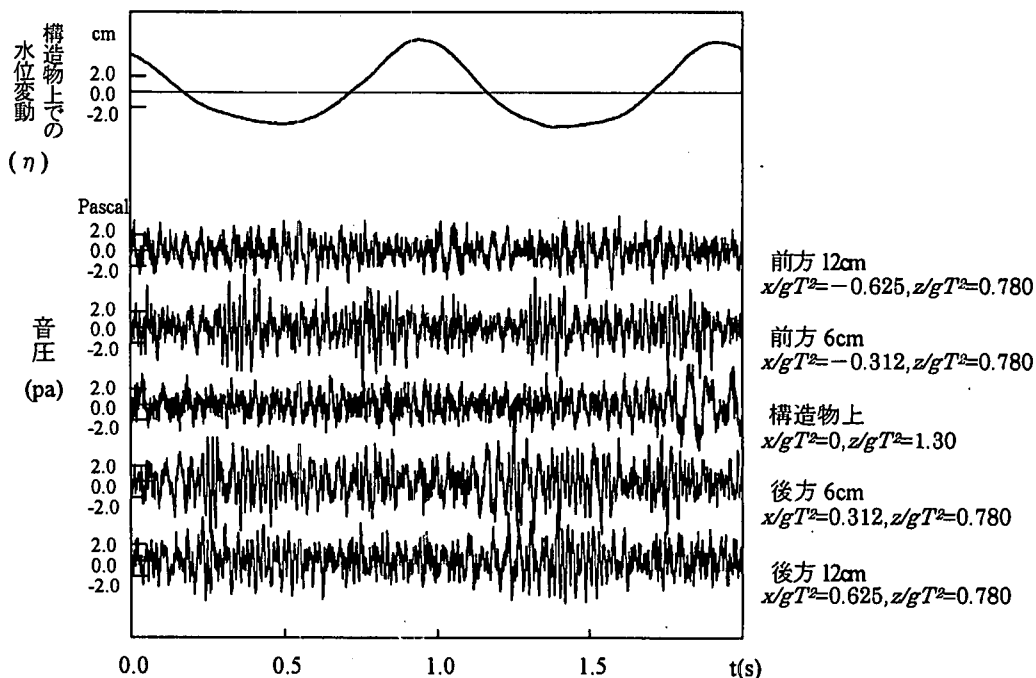


図 3.4 構造物 A 上での水位変動と音圧変動の関係 ($T=1.4s$, $H=13cm$; KC 数=16.5)

3) 音圧スペクトル

図 3.5 は、周期 1.4 秒、波高 13cm の波が構造物 A に作用した場合と構造物がない場合の計測ポイント 4 における音圧スペクトルである。図 3.5 より、構造物の設置に伴い、10～40Hz、50～70Hz、120～130Hz といった周波数帯の音圧レベルが大きくなるのがわかる。そこで、構造物を設置した場合の音圧スペクトルから構造物がない場合の音圧スペクトルを引いて、正になる部分(構造物を設置することによって音圧レベルが大きくなる部分)だけを表示した図を用いて以後考察をすすめる。

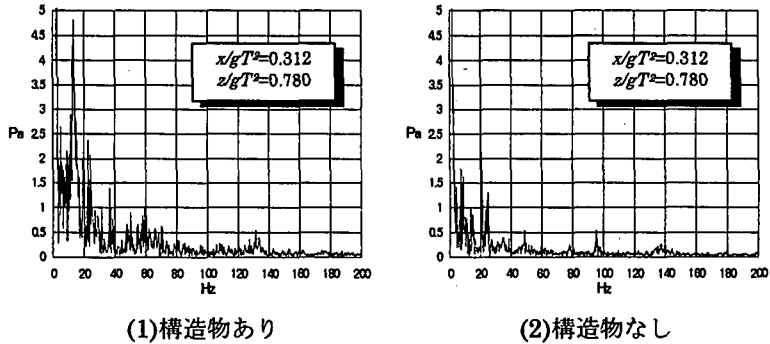


図 3.5 構造物 A の有無によるポイント 4 での音圧スペクトル ($T=1.4s$, $H=13cm$; KC 数=16.5)

a) 周期による音圧スペクトルの違い

図 3.6 は、波高(H) 13cm で一定で、周期(T)がそれぞれ 1.0, 1.8 秒の波が構造物 A に作用する場合での計測ポイント 4 における、構造物を設置した場合の音圧スペクトルから構造物がない場合の音圧スペクトルを引いた音圧スペクトルの差(正の成分)である。図 3.6 より、周期が大きくなり KC 数が大きくなると 10～30Hz の低周波数の音圧スペクトルの差が大きくなっていく傾向が見られる。これは KC 数が大きくなると、最大流速も増加し、渦の規模が大きくなることによって低周波数成分の音圧レベルが大きくなるためと考えられる。

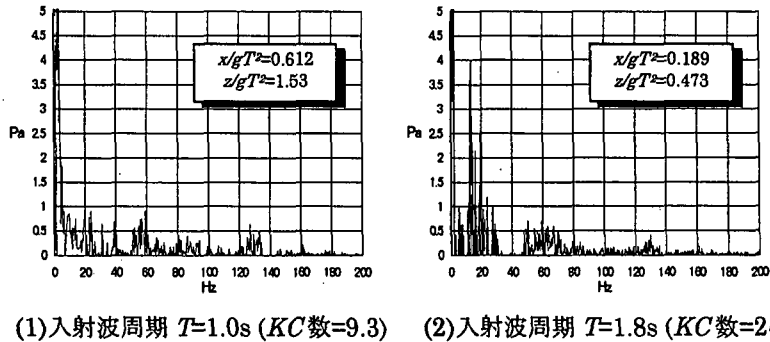


図 3.6 構造物 A に作用する波による計測ポイント 4 での音圧スペクトル差 ($H=13cm$)

b) 構造物による音圧スペクトルの違い

図 3.7 は周期(T) 1.4 秒、波高(H)13cm の波が、構造物 A および B に作用した場合の、計測ポイント 4 における音圧スペクトルの差(正の成分)である。図 3.7 より、構造物 B の方が構造物 A よりも、大きくなる音圧レベルが若干高周波数となる。これは、構造物 B の場合、構造物の上端部、下端部の 2 ヶ所から渦の発生があり、互いの渦が干渉しあうことによるものと考えられる。

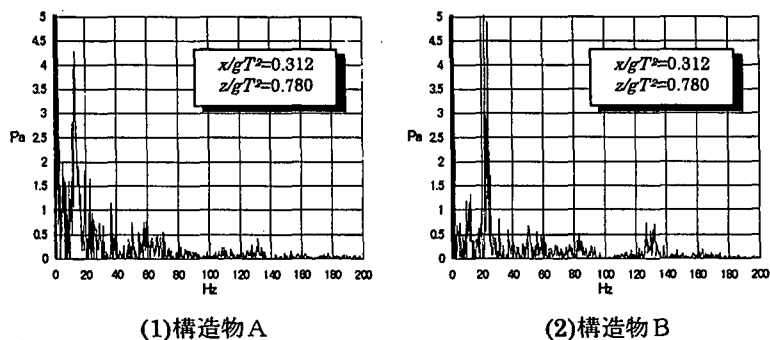


図 3.7 構造物 A, B に作用する波による計測ポイント 4 での音圧スペクトル差 ($T=1.4s$, $H=13cm$; KC 数=16.5)

c) 計測ポイントによる違い

図 3.8 は周期(T) 1.4 秒, 波高(H) 9cm の波が, 構造物 A に作用する場合と構造物を設置しない場合の, 計測ポイント 1~5 における音圧スペクトルの差(正の成分)である。図 3.8 より, 構造物岸側(ポイント 4,5)のほうが沖側(ポイント 1,2)より音圧スペクトルの差が大きい。これは可視化実験の岸側の渦のほうが大きいことに対応する。また, 構造物上の低周波数の音圧スペクトルの差が大きい, これは, 構造物設置により流速が大きくなり, さらに計測ポイント 3 を構造物の沖側, 岸側で発生した渦が流速の逆転時に通過するためであると考えられる。

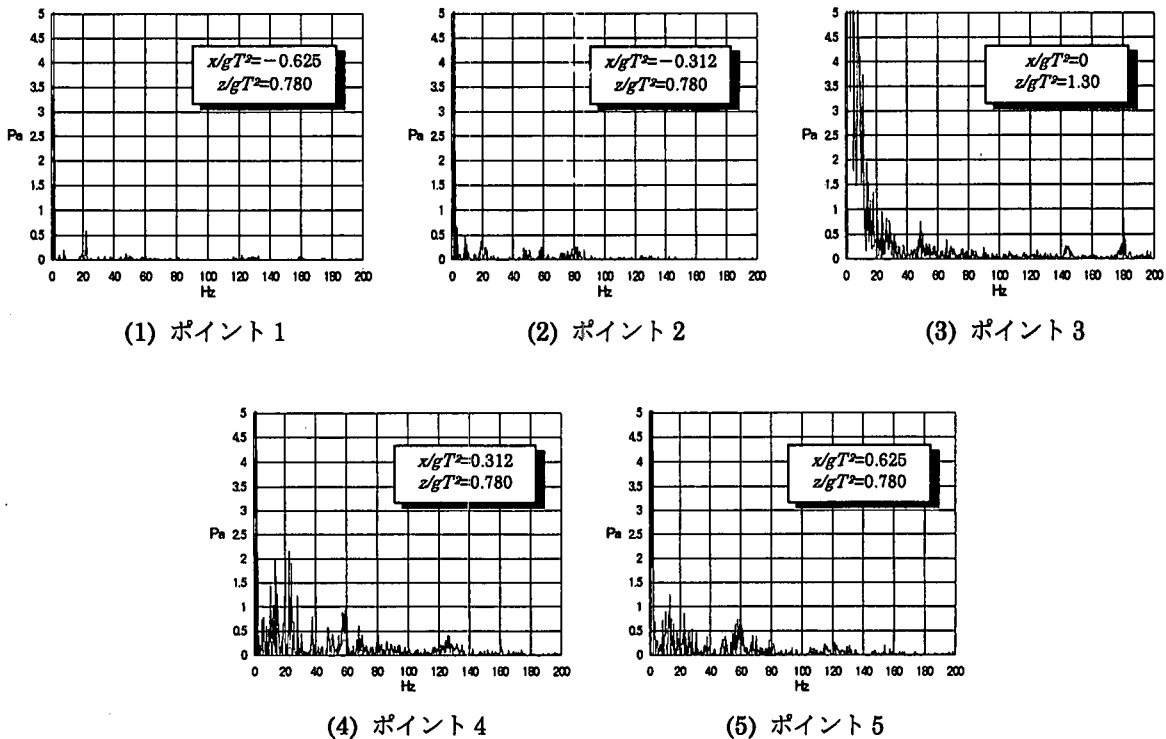


図 3.8 構造物 A の音圧スペクトルの差 ($T=1.4s$, $H=9cm$; KC 数=12.7)

4. 結論

本研究で得られた主な結論を要約すると次のとおりである。

- (1) 構造物沖側と岸側では, 形成される渦の規模は異なり, 岸側での渦の方が規模は大きい。また, 形成された渦の動きも構造物沖側と岸側で異なり, 特に, 構造物 A の場合, 岸側での渦の方がより下方に引き込まれる。
- (2) 構造物岸側で形成された渦が流れの逆転により, 沖側へ移動するときに最も顕著に音圧変動が現れる。 KC 数が大きくなり, 沖側で形成される渦の規模も大きくなると, その渦による音圧変動も明瞭に現れるようになる。
- (3) 構造物設置にともなうこれらの音圧レベルは, 本実験条件では, 渦の発生周波数に相当する 2 倍~4 倍周波数で顕著に大きくなるほか, 15~25Hz, 50~60Hz, 120~130Hz 付近で顕著に大きくなる。また, 構造物 B を設置した場合のほうが, 構造物 A を設置した場合よりも高周波成分が大きくなる。構造物 B の場合, 構造物の上端部, 下端部の 2 ヶ所から渦の発生があり, KC 数が大きい場合はこの渦同士の干渉が起こる。よって, 波動成分に比べて高い周波数帯での音圧変動は, 渦流れにふくまれる乱れや渦同士の干渉による流れの乱れに起因すると考えられる。

謝辞

本研究を行なうにあたり (財) 鹿島学術振興財団の研究助成 (代表: 名古屋大学 岩田好一朗) と文部省科学研究費補助金 (代表: 名古屋大学 水谷法美) 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, 実験を行なうにあたり多大な協力を得た。ここに記して, 謝意を表する。

参考文献

- 1) 水谷法美, 小島航, 金俊圭, 岩田好一朗: 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