

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

Experimental Study on Wave-Generated Sound from a Bottom Seated Submerged Structure

水谷法美*・小島 航**・金 俊圭***・岩田好一郎****

Norimi MIZUTANI, Wataru KOJIMA, June-Q KIM and Koichiro IWATA

Installing artificial fish reefs is expected to play important roles on improvement and preservation of sea environment as well as fish cultivation. As far as its effects are concerned, 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 most important factor to gather fish and the sound from fish reef models was measured by conducting laboratory experiments. Spectral analysis of measured sound shows that the vortex caused by wave and structure interaction generates the sound. The frequency, however, is much higher than that of vortex formation and behavior of vortex affects the properties of generated sound.

Keywords: artificial fish reef, wave-generated sound, 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対象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。さらに、近年では日本周辺沿岸漁場における漁業生産の見直しと開発が進み、沿岸資源の培養を目的とする増殖、環境改善あるいは漁場造成などの技術を開発振興することが、これからの我が国の漁業の生きる道とされており、人工魚礁を用いた漁場の造成は、今後これらに対して重要な寄与をすると期待される。一方、魚礁の蜆集効果を利用して対象海域に生態系を復活させることにより、海域の環境改善を行おうとする動きも始まっている。したがって、人工魚礁は、単に漁業のみならず、海域環境保全や改善を行う上で重要な位置付けがされるようになって考えられる。こういった人工魚礁の設置効果を発揮させるためには、魚礁の蜆集効果を把握する必要がある。魚礁の蜆集理由については、陰影効果説、発生音説、餌料効果説、逃避目標説、走触説、および本能説などが指摘されているが、本研究ではその中でも有力な要因の1つであると考えられる発生音説に着目する。音と魚類の関係は、生物学的アプローチから魚類の聴覚特性や対礁行動に関する研究が行われてきている^{1),2)}が、工学的アプローチとしての魚礁構造物の幾何学的形状による発生音の特性に関する研究は少なく³⁾、未解明な部分が多く残されているのが現状である。本論文では魚礁の形状と発生音の特性を知るための基礎的研究として、いくつかの形状の魚礁模型を規則進行波動場に設置して水理実験を行い、魚礁から発生する音を計測し、その特性を魚礁の物理的形狀や周辺の流況と関連づけて考究するものである。

2. 水理実験

2.1 波動音の計測

水理実験を二次元造波水槽(長さ25m,幅0.7m,高さ0.95m)で行った。水槽内に設置した高さ15cmの水平床上に魚礁模型となる構造物を設置して規則波を発生させ、構造物周りの発生音を計測した。水深は $h=40\text{cm}$ で一定であり、発生波の周期(T)を1.0, 1.4, 1.8秒の3種類、波高を5, 9, 13cmの3種類変化させた。また、構造物の幾何学的な形状と発生音の特性を調べるために、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。構造物の概要は図-1に示す通りである。水中音の計測には、長さ15.8mm, 直径9.5mmの超小型水中音圧計を使用し、計測地点を図-2に示すように4箇所変化させた。音圧計からの出力をチャージアンプを通し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。

データレコーダに記録した計測音を1kHzでAD変換し、データ数8192個を使ったFFT法により振幅スペクトルを計算し、その結果を中心に解析を行った。なお、解析は、式(1)に示す音圧レベルに対して行った。

-
- * 正会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室(464-01 名古屋市千種区不老町)
 - ** 正会員 日本国土開発(株)
 - *** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
 - **** フェロー 名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室

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

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。

2.2 流れ場の計測

剥離渦を含む構造物周辺の流れ場の状況を知るために、水中音響を測定した各種構造物において、水中音響測定時と同一の条件下で、流況の可視化と流速の計測を行った。

2.2.1 可視化実験

可視化実験を、水素気泡法により行った。陰極に直径0.1mmのタングステン線を使用し、タングステン線を底面上5cm、構造物重心から前面5cm、および後面5cmの位置に波峰線方向に水平に張り、構造物上の水面、および水槽のガラス壁から目視観測すると同時に、8mmビデオと35mmカメラにより流況の撮影を行った。

2.2.2 流速測定

波進行方向と水深方向の流速 u 、 w の測定を電磁流速計を使用して行った。計測位置は水中音響測定位置と基本的に同一とし、図-2に示すように、構造物中心から前方、後方および側方に10cm離れた位置で、底面上5、3cmの6点、構造物重心上の底面上20cmおよび構造物上面から3cm(底面上11cm、三角柱の場合は底面上14cm)の2点の合計8点とした。なお、計測地点を区別するため、それぞれの点に図中に示すような番号を付けた。計測したデータは時間間隔0.02秒でAD変換し、ハードディスクに記録し、解析に使用した。

3. 構造物周りの流況の特性

本研究で対象とする音は、波と構造物の相互干渉により発生する音であり、その主要な音源は構造物の設置による構造物周りの流況の変化、特に構造物周辺で発生する渦に起因すると考えられる。そこでまず、構造物周りの流況について、水理実験結果に基づいて考察する。なお、本実験では、隅角部を有しない半球の場合、明確な剥離渦は確認できなかった。また、円柱の場合、上端からの渦の剥離があるものの、側面からの剥離は陰極を円柱前面に設置したため、円柱外縁からの明確な剥離渦を確認することができなかった。特に規模が大きく顕著な渦の発生は、立方体と三角柱の場合で認められており、以下にフレーム構造物の場合を含め、流況について述べる。なお、これらの構造物は鉛直面が波入射方向に面するよう設置した。

3.1 立方体

波動音を計測したすべての条件で、構造物前面、後面の隅角部および上端部から半周期毎に1組の渦が発生しているのが確認された。渦はKC数が小さい条件では規模およびその渦流の速度は小さいが、KC数の増加とともに発達し、規模も大きくなり、激しい渦を形成するようになる。構造物前面では、左右からの渦の干渉があり、流れはかなり乱れている。しかし、構造物重心から前面10cmの位置では、構造物設置による流速の増加はほとんど無く、渦の影響による流れの変化はそれほど離れた場所までは影響を及ぼさないようである⁴⁾。また、構造物上で深さ20cmの計測位置における流速測定結果からも構造物設置による影響はほとんど認められなかった。一方、側面では、渦はかなりの乱れを伴っており、その位置も細かく振動しながら流れとともに移動する。さらに、側面からの可視化の結果より、側面にできた渦は上面から側方への流れの影響により、下方に巻き込まれていくような三次元構造であることも確認された⁵⁾。構造物背後では波の非線形性により前面

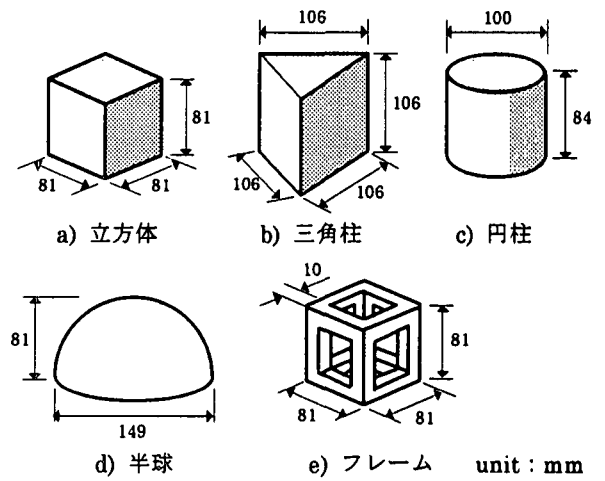


図1 構造物の種類

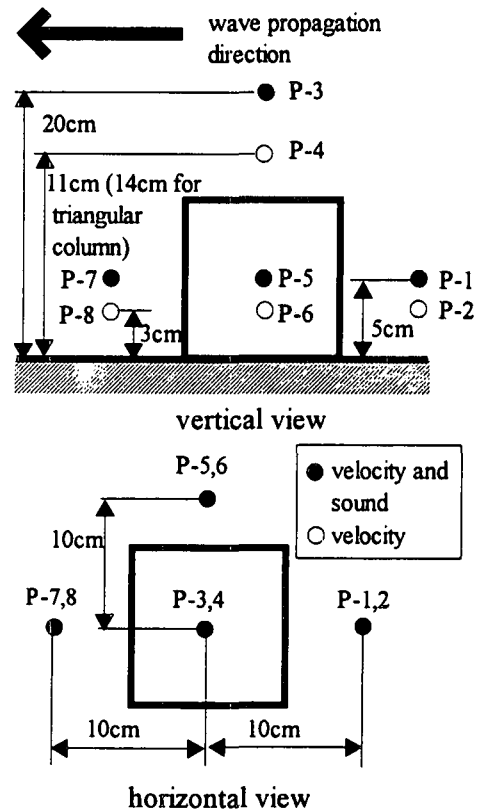


図2 波動音および流速の計測位置

より規模の大きな渦が確認され K.C 数の増加と伴ない構造物設置による流速の増加が認められたが、渦の発生状況などは前面とよく似ている。

3.2 三角柱

三角柱の前面隅角部からは、三角柱の場合も立方体同様すべての発生波で渦の発生が認められた(図-3 参照)。特に鋭角部をもつ形状であるため、最も渦の発生が顕著に確認できた。前面で形成された渦は、流向の変化により側方の広い範囲まで吐き出される。流速測定結果からも三角柱の場合、他の構造物より構造物設置による側面での流速の増大が顕著であった。渦の動きは、前面での発生渦よりも側面で発生する渦の方が激しい。一方、三角柱背後の鋭角部からの渦の発生は確認されず、構造物前後の流況の非対称性は著しい。また、側面からの可視化より、立方体同様、上面の隅角部から側面への流れ込みにより、側方で形成される渦は下方への巻き込みを伴った三次元構造となっている。

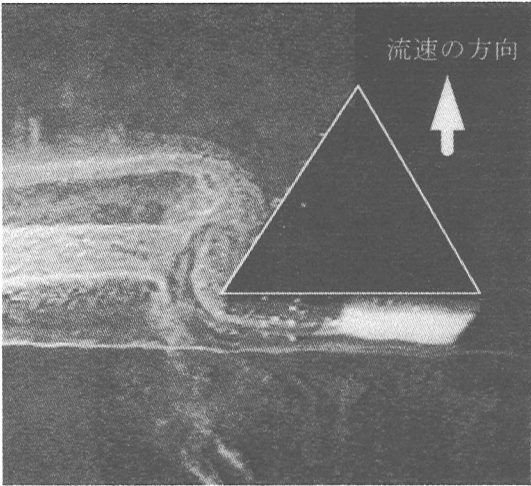


図-3 三角柱隅角部における渦

3.3 フレーム構造物

フレーム構造物の各部材から規模の小さな渦が発生しているのが確認された。角部材の両側を巻き込む流れによって発生した渦が絡み合うことにより各部材近傍の流れ場はかなり複雑である。また、フレーム外部では構造物の設置により流況に大きな変化はみられず、フレーム構造物周りでの流速の計測位置のほとんどで構造物設置による流速の変化は確認できなかった。一方、内部では四方の角材から発生する渦の干渉による影響から、流速の時間変化には乱れが含まれていることが判明した。

4. 構造物の周辺で発生する音圧の特性

4.1 音圧スペクトルの特性

既述したように、魚礁模型周辺の流れ場は構造物の形状によって異なる。したがって、流れ場の変化に伴う音場の変化も構造物の形状によって異なると考えられる。そこで、それぞれ形状の異なる構造物に対して明らかとなった発生音の特性について記述する。

4.1.1 立方体

周期 1.0 秒、波高 13cm の場合の立方体前面(P-1)で計測した発生音の音圧スペクトルを構造物のない場合の結果とともに図-4 に例示する。構造物を設置することにより、40Hz~90Hz 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。また、この変化は KC 数の増加とともにより広い周波数帯で差が生じるとともに、そ

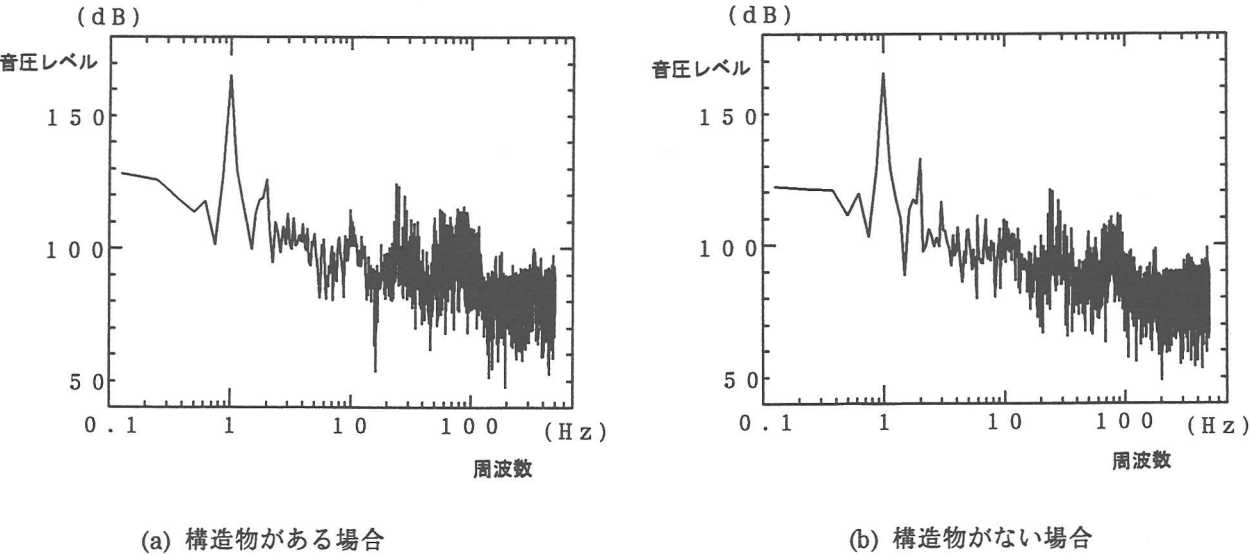


図-4 立方体前面の音圧スペクトル

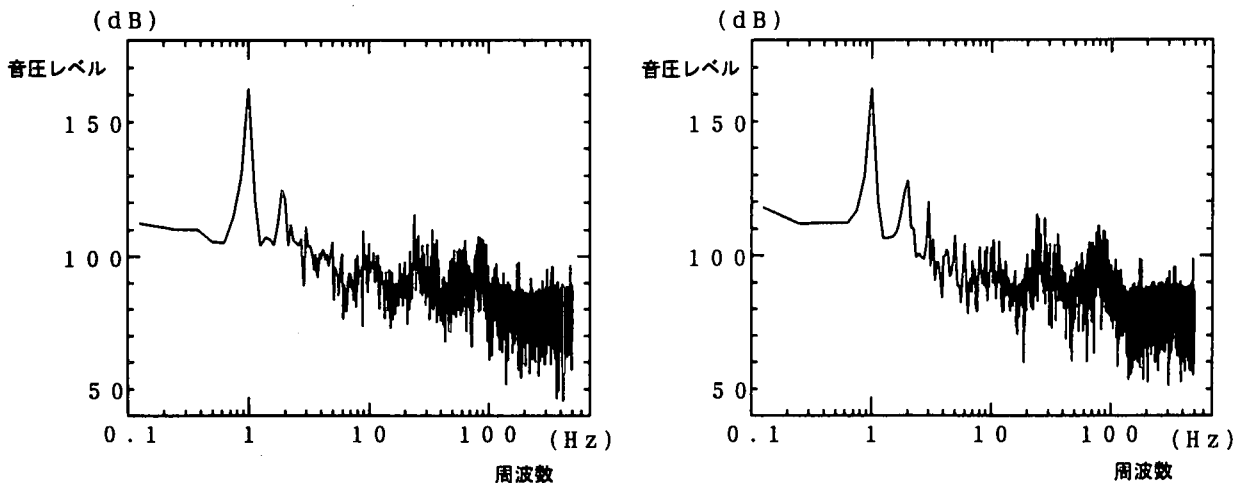
のピーク値も大きくなる傾向が判明した。また、立方体前面では 10Hz 前後のピーク値が構造物の無い場合に比べて鋭くなっていること、また、わずかではあるが 300Hz 近傍で音圧レベルが増大すること、さらに、KC 数の増加に伴って 3Hz～12Hz あたりでのスペクトルの変化が激しくなる、などの特徴が認められた。なお、渦の卓越発生周波数である 2 倍周波数成分の音圧の上昇が期待されたが、図から認められるように、変化はあるもののむしろ減少している。条件によっては増大する場合もあるが、構造物の形状も含め他の条件の多くのケースで同様の結果が認められた。

一方、立方体後面では、前面で認められた 10Hz 前後のピーク値などの細かい差は明瞭でなくなるが、全般的には前面と似た特徴が確認された。しかし、立方体上面では、構造物前後における音圧スペクトルと異なり、構造物設置に伴う音圧スペクトルの変化は明瞭には生じなかった。

4.1.2 三角柱

図-5 に構造物前面(P-2)で得られた周期 1.0 秒、波高 9cm の音圧スペクトルを構造物を設置していない場合の結果とともに示す。三角柱の場合の一般的な特徴として、構造物を設置しない場合の 40Hz～90Hz の山なりピーク値が、40Hz～50Hz および 70Hz～90Hz の 2 つのピーク値に分かれることが挙げられる。また、三角柱の場合も、立方体同様、300Hz 近傍での音圧が増大する。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。図-5 に示したケースでは 2 倍周波数成分は減少しているが、場合によっては約 15dB 程度増大することもある。

三角柱の後面や上面では、立方体の場合と同様、前面に比べて音圧に変化の生じる周波数帯は限られてくるが、300Hz 以上の周波数帯での音圧レベルの上昇は共通である。



(a) 構造物がある場合

(b) 構造物がない場合

図-5 三角柱前面の音圧スペクトル

4.1.3 円柱

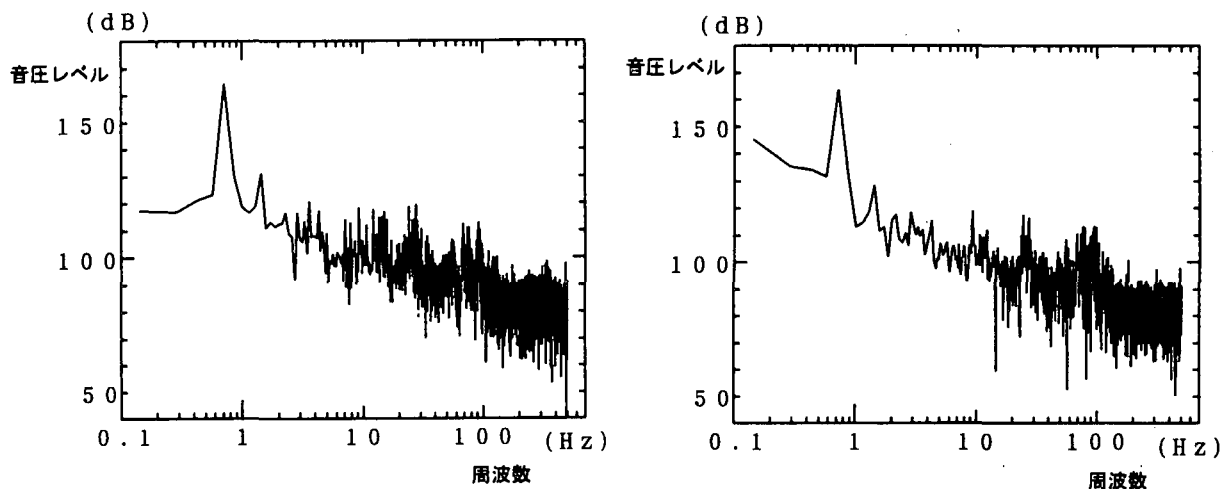
図示しないが、円柱前面では、三角柱の場合と同様、40Hz～90Hz ピークが 2 つに分かれる傾向が認められたが、この傾向は発生波の条件によっては認められない場合もあり、また、三角柱の場合に比べてあまり明瞭ではなかった。さらに、後面では構造物の有無による差は非常に小さく、明瞭な傾向は認められなかった。一方、円柱上面では、立方体の場合のように、35Hz と 45Hz 近傍であまり明瞭ではないが、音圧の上昇が認められた⁴⁾。

4.1.4 半球

半球の場合、構造物の有無による差異は、計測位置にかかわらずほとんど認められなかった。可視化実験では、半球から渦の発生がほとんど認められなかったことから、渦の発生が顕著でなければ音圧の変化に差は生じないといえる。

4.1.5 フレーム構造物

フレーム構造物では、場合によっては 10Hz 前後の音圧レベルが増大する場合もあるが、一般的には図-6 に



(a) 構造物がある場合

(b) 構造物がない場合

図-6 フレーム構造物後面の音圧スペクトル

例示するように 300Hz から 500Hz 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。フレーム構造物は部材径が小さいため渦の規模は小さいものの、可視化実験から確かめられたように部材近傍で渦同士の相互干渉による乱れが発生することにより、高周波成分の音が発生していることが考えられる。

4.2 計測位置による音圧変動の特徴

音圧変動に比較的に顕著に構造物の影響が認められたのは、構造物前面である。一方、構造物の上面では構造物前後に比べて音圧変動の差は小さい。また、本実験では、構造物前面 5m の位置でも計測を行っているが、この位置では、ほとんどのケースで音圧変動に有意な差を見出すことはできなかった。したがって、音圧の変化はかなり局所的な現象であることが考えられる。一般に音圧変動の伝播特性は空中より水中の方がよいと言われるが、本研究で認められた音圧変動はいずれも小さく、造波装置や消波装置および波動圧などの背景雑音の影響が卓越していたことにより、有意な値として検出できなかったことも考えられる。したがって、音の伝播特性を含め、場所による音の変化特性については、更なるデータの蓄積が必要である。

4.3 音の発生機構に関する考察

本実験において得られた音圧スペクトルの構造物の設置による特徴的な差異を示したが、全般的に 40~90Hz および 300Hz 近傍に変化が認められ、構造物の設置により比較的高周波成分の波動音が発生しているといえる。また、可視化実験によって明確に渦の発生が認められた構造物の場合、音圧スペクトルの変化が顕著に認められたこと、逆に渦の発生が確認できなかった構造物では音圧レベルに構造物の有無の差が認められなかったことから、波動音の発生には構造物周辺に形成される渦が影響を及ぼしていることが確認できたといえる。しかし、本実験では波一周期の間に数十~数百個の剥離渦の形成は認められず、渦の発生周波数以外の周波数の音が発生していることになる。このような高周波数成分の発生音の音源としては、渦の発生による水粒子の乱れによる圧力変動が考えられ、特に立方体や三角柱の側面で認められたような振動を伴う渦の挙動などに大きく影響されていると考えられる。また、構造物の形状により音圧の変化にも差が生じるが、これは渦を含めた構造物周辺の流況が異なるためである。特に、立方体と三角柱の差は、構造物前後で流況の非対称性の程度が大きく異なることにも依存すると考えられる。

また、他の要因として構造物により発生する渦の相互干渉も一因として挙げられる。フレーム構造物の場合、音圧スペクトルに特徴的な変化が確認された構造物背後では、300Hz~500Hz で音圧レベルが大きくなる傾向が認められており、各部材から発生する渦の干渉によって高周波数帯の音が発生していると考えられる。また、立方体の場合、音圧変動は立方体上面より左右からの渦の干渉がある立方体前後で顕著に認められていることから渦の干渉も重要な要因であると考えられる。

なお、2 倍周波数成分については、既述したように、変化はあるものの常に音圧が増大するとは限らない。これは、音圧と波動圧との位相関係に依存していると考えられる。したがって、現段階では、渦の卓越発生周波数の音も発生するが、位相関係により、音圧は上昇する場合も減少する場合もともにあり得ると考えられる。

しかし、位相関係の詳細は本研究で明らかにはできなかった。

5. おわりに

本研究では、各種構造物を設置することによる構造物周辺の流況の変化特性、および構造物を設置することにより発生する音の特性について水理実験に基づいて検討した。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) 隅角部を有する立方体や三角柱の場合、半周期ごとに1組の渦が形成される。KC 数が大きくなると、形成された渦は、流速の逆転する半周期で、新たに形成される渦の外側に放出される。この現象は三角柱の場合に最も顕著に認められた。
- 2) 構造物の前後では、入射波の周波数の2倍周波数成分の音圧レベルが変化する。これは、構造物前後で発生する渦の発生周波数と一致する。ただし、音圧レベルは常に増大せず、減少する場合も認められ、波動圧の2倍周波数成分との位相差も波や構造物の条件により変化する。
- 3) 隅角部を有し、渦の発生が顕著な構造物の前後では、40Hz～90Hz 程度、及び 300Hz 周辺で音圧レベルが増大する傾向が認められた。この周波数帯の音の発生機構は、渦の振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旭硝子財団より研究助成を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 武富一：魚礁の音環境，水産土木，Vol.17，No.1，1964.
- 2) 畠山良巳：水中の音と魚について，漁船，Vol.246，pp.597-604，1984.
- 3) 松原雄平・野田英明：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.391-396，1993.
- 4) 小島航：潜水構造物より発生する波動音の特性，名古屋大学工学研究科修士論文，27p.，1996.
- 5) 鈴木篤：波動場に設置された魚礁まわりの流況に関する研究，名古屋大学工学部卒業論文，20p.，1996.