

魚礁から発生する水中音に関する実験的研究

Experimental Study on Underwater Acoustics Generated by the Fish Habitats

松原雄平*・野田英明*

Yuhei Matsubara and Hideaki Noda

ABSTRACT

Fish have been known to aggregate and school around rocky outcroppings, deployed ships and concrete blocks. One of the reasons of the fish abundance have been considered to be the underwater sound. This paper deals with the underwater acoustics generated by the fish aggregation devices through the laboratory tests. The acoustic pressure measured in the tank tests and analyzed by the spectrum estimator. The results indicate that the underwater sound generated by the fish habitat seemed to be a very important parameter for the attraction to the marine fish.

Keywords: Underwater sounds, Fish habitat, Spectral analysis

1. はじめに

わが国の沿岸域には漁場整備事業の一環として、数多くの魚礁が設置されてきた。こうした魚礁には、設置後間もなく魚類の鰓集滞留が認められ、魚礁設置が漁場整備にきわめて効果的であることが数多く報告されている。しかしながら設置された魚礁に魚類が鰓集する要因については、これまでいくつかの仮設が提案されているものの、その因果関係を完全に説明するに至っていない。魚類の鰓集の要因として、従来提案されているものとして、陰影説、餌料説、渦動説、逃避場説、本能説などが挙げられ、こうした各種の要因が単独に、あるいは複合して魚類を誘引する刺激を作り出していると考えられている（中村(1991), Ryu(1992)）。柿元ら(1985)は、これら諸要因の支配的因子をより明確化するため、魚礁の近傍で数種の魚類を放流し、その遊泳行動を追跡している。その結果、魚類が魚礁によって誘引される機構は魚礁からの距離によって異なり、30m程度の近域内では視覚で、数百メートルまでの遠域では聴覚によって魚礁から刺激を受けることを示している。一方、黒木(1958, 1977)は水理学的な観点から魚礁の集魚効果を検討し、魚礁で生じる流れの剝離現象が周辺の流体振動および魚礁構成部材の振動に伴う発生音を生ぜしめ、魚類を刺激するとしている。また畠山(1984, 1986)は実海域において種々の水中音の観測を行って、ある種の水中音が魚類の可聴範囲にあり、魚類を刺激することを明かにしている。以上のことから、魚礁から発生する水中音が魚類への誘引効果を持つことが十分に考えられる。しかし、これまで、魚礁から発生する水中音について定量的に検討された例はなく、魚礁の形状と発生音特性との関係は不明のままである。そこで、この研究では、潮流のような疑似定常流中に設置された魚礁を想定して、種々の形状を有する魚礁モデルを静水中で等速度で曳航し、その水中音の測定結果と、部材径、曳航速度や背後に生成される渦流等との関係について実験的に検討したものである。

2. 水中音の伝播特性と魚類の聴力

水中での音の伝播は、音源からの距離によって、その特性を異にする。音源からの距離 S と水中音の波長 L との関係で二つの領域、すなわち遠域と近域とに以下のように分けられる。

遠域..... $S > L / (2\pi)$

近域..... $S < L / (2\pi)$

遠域では水中音は音圧変動により伝播し、近域では水粒子の空間移動で音が伝播するとされている。（黒木, 1958）一方、魚類の水中音の感受器官として、内耳と側線（クプラ）とがあり、内耳は音圧変動を、側線は水粒子の変位を感受するといわれている。また魚の浮き袋は、周囲の音圧変動によって収縮、拡張し、その変位は内耳に伝達されるため魚類の浮き袋も一種の音響感受器と考えられる。こうした水中音に対する魚類の可聴

* 正会員 鳥取大学工学部土木工学科（680 鳥取市湖山町南4丁目101）

周波数は、数十Hz～6000Hz程度で、音圧さえ高ければさらに低周波域の音まで感受できるとされている。（黒木、1977）

Fig.1 は、海産生物の聴覚特性（畠山、1986）を示したもので、同図から、魚種によって聴覚特性は異なること、海産魚類のなかでマグロは400Hz～500Hzがもっとも敏感であるのに対し、海産哺乳類のイルカ等は、15kHz～80kHzと、より高周波域の音響が可聴範囲であることなどがわかる。一般に水中音は高周波側の音ほど減衰しやすい特性を有しているため、低周波の音響ほど遠方まで伝わることになる。さらに、数百Hzの低周波音は、魚類の可聴領域と一致することから、魚礁から低周波音が発生すると魚類の誘引要因となることが考えられる。

3. 実験装置および解析方法

一般に流れ場における水理現象に関する実験では、循環水槽が用いられるが、ポンプやモーター音などが発生することになる。本実験では、そうした実験環境からの雑音を排除し、構造物から発生する水中音のみの収録効果を高めるために、長さ25m、幅0.5m、深さ0.6mの二次元水槽で曳航実験を行なった。Fig.2 は、実験に使用した曳航装置ならびに水中音の測定装置を模式的に示したものである。曳航装置は水槽上方に緊張された二本のガイドワイヤー、ワイヤーから静水中に懸垂され、曳航ケーブルによって静水中を進行するモデル曳航部から成っている。曳航部分には、種々のモデルを装着できるように工夫されている。魚礁モデルが

静水中を曳航されるときに発生する、ガイドワイヤーとの摩擦音など、曳航部からの雑音を出来得る限り低くするため滑車の選定、調整、曳航部の形状などについて予備実験を行い設定した。

水中音の測定には、ゴムスリーブで防水処理を施した高性能マイク（Victor EM-600）を使用した。マイクの受波領域は 20Hz ～ 20KHz と広範な周波数レンジを有し、また指向性も良い。マイクからの出力は直流増幅器を通してデーターレコーダに接続された。また同図に示すようにマイクロフォンと並列に圧力計を設置して、魚礁モデル通過時の圧力変動を測定した。圧力センサーには小型低容量変換型（Kyowa PG M-02KG）を使用し、その出力は動ひずみアンプを介してデーターレコーダへ接続されている。モデルの曳航速度は、フォトマイクロセンサーを用いて二地点間を移動する時間を計測し、その平均速度を代表速度とした。各モデルの曳航速度は、10.1cm/sec～38.6cm/secの範囲に設定された。

測定された水中音のデータ解析では、500Hzのサンプリング周波数でA/D変換された時系列データを2048個単位にブロック化しそれぞれのブロック毎にFFT法ならびにMEM法によってパワースペクトルを算出した。各データブロックから得られたスペクトルの値は周波数毎に平均化し、その平均値をもって代表スペクトル値とした。マイクロフォンならびに圧力センサーはモデルの通過点より2cm下方に設置さ

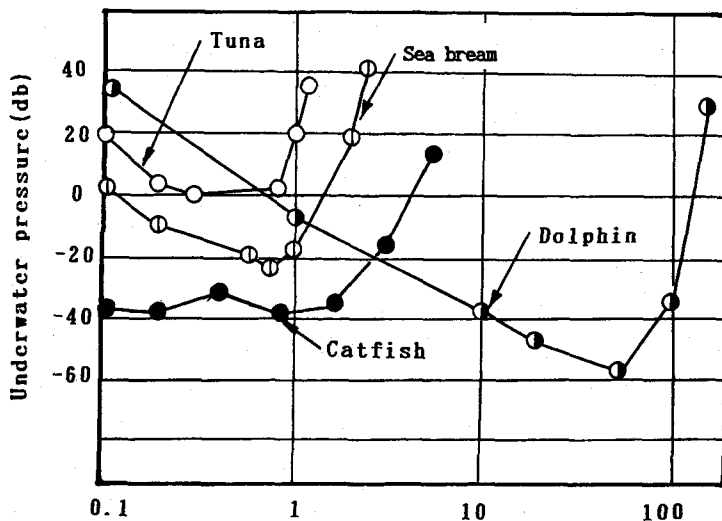


Figure 1 The threshold audibility of the fish

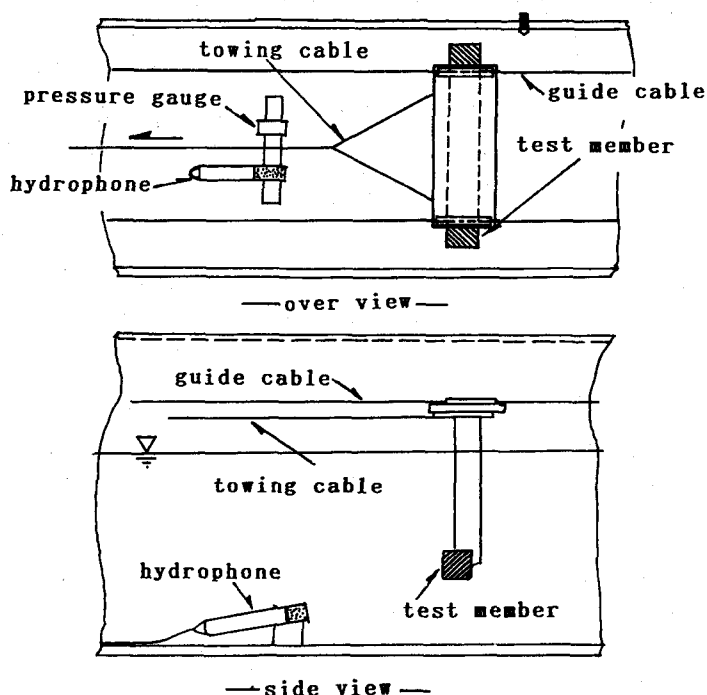


Figure 2 Experimental apparatus

れており、通過時の音響ならびに圧力を測定した。前節で述べた遠域および近域効果を考慮し、水中マイクロフォンを魚の内耳器官に、圧力センサーを側線器官に相当させて実験を行った。

実験に使用したモデルは、矩形単柱モデル、五角柱モデル、円柱モデル、球モデルならびに二次元角柱魚礁モデル（体積空隙率 64%）である。Table 1 は、各モデルの諸元ならびに形状を示したものである。また水中音を測定する際にマイクロフォンや圧力センサーなどの測定器固有の電氣的雑音が測定信号に混入したり、外界からの振動や雑音等が含まれると考えられる。そこで、各モデルの非曳航時の水中音と曳航時との水中音のパワースペクトルの差、つまり両者のエネルギー差について検討した。この処理を行うことによって、モデルが静水中を等速運動するときの音響成分のみを抽出できることになる。エネルギー差は、通常、db（デシベル）量で示されるが、この db 表示法によれば、二つの音の強さ（音波の伝播方向に垂直な単位面積を通過する単位時間当りのエネルギー量）を I_1 および I_2 とすれば、両者の比の対数をとって

$$A_I = 10 \log_{10} (I_1/I_2)$$

このとき、 I_1 と I_2 には、 A_I db の差があることになる。さらに、音圧 P と音の強さ I には、

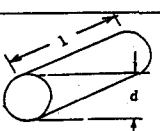
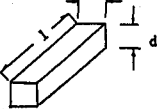
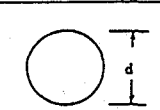
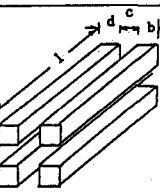
$$I = kP^2 \quad (k: \text{係数})$$

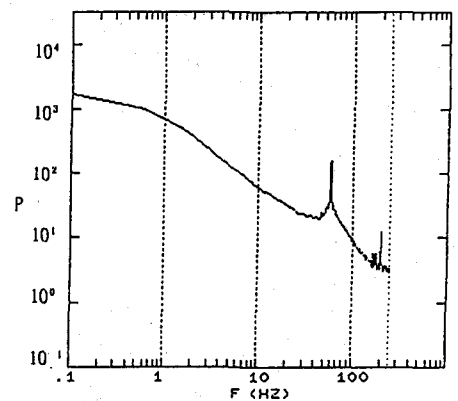
の関係があり、最終的に音圧差は

$$A_P = 20 \log (P_1/P_2)$$

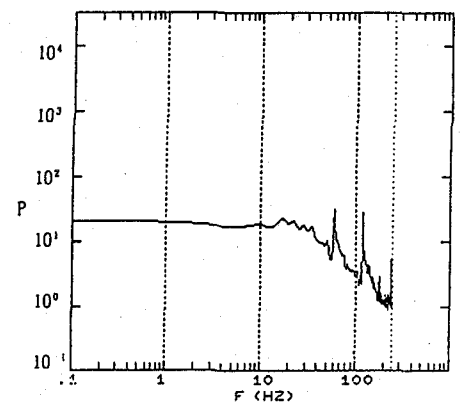
となる。（Kinsker (1980)）

Table 1 Characteristics of the test member

Type	d (cm)	l (cm)	b (cm)	c (cm)	Remarks
円柱モデル	1.0	40	—	—	
	1.3				
	4.0				
角柱モデル	1.0	40	—	—	
五角柱モデル	1.0	40	—	—	
球モデル	4.0	—	—	—	
二次元魚礁モデル (FAD)	1.5	40	20	50	



(a) Acoustic pressure



(b) Hydrostatic pressure

Figure 3
Power spectra of the underwater sound and hydraulic pressure

4. 実験結果の考察

Fig.3 は、非曳航時すなわちモデル静止時に水中マイクと圧力センサーとにより測定されたパワースペクトルを示したものである。水中音のスペクトルに注目すると、周波数 60Hz, 120Hz 付近に、また水圧スペクトルでは、120Hz および 200Hz 付近にそれぞれピークが認められる。この原因として、電源ラインや計測器からの雑音ならびに実験環境から混入した音響的雑音成分が考えられる。こうした卓越成分は、今回の実験条件に対して、常に認められたため、上記の周波数成分については検討の対象にしないこととした。またスペクトル解析については、FFT 法と MEM 法の方法でそれぞれ解析し比較したが、以下では MEM 法による結果についてのみ述べることにする。

Fig.4 (a)~(d) は、それぞれ角柱、円柱、球ならびに魚礁モデルが、静水中を曳航されるときに、測定された水中音のスペクトルを示したものである。角柱モデルの場合、70Hz 近傍にいくつかのピークが認められる。ところが円柱部材を曳航したときの音響スペクトルを見ると、角柱部材のようなピークが認められず、また高周波成分の急激な減衰が生じている。さらに Fig.4 (c) の球モデルから得られた結果では、30Hz 以上の領域に卓越した成分が多く認められる。一方、二次元魚礁モデルの結果では多くのピークが認められるが、角柱モデルのように卓越した成分は認められない。これらの結果から、各モデルの形状特性の差異が、発生する音圧場にも影響を及ぼし、個々のモデル特有の音響場を形成していることがわかる。

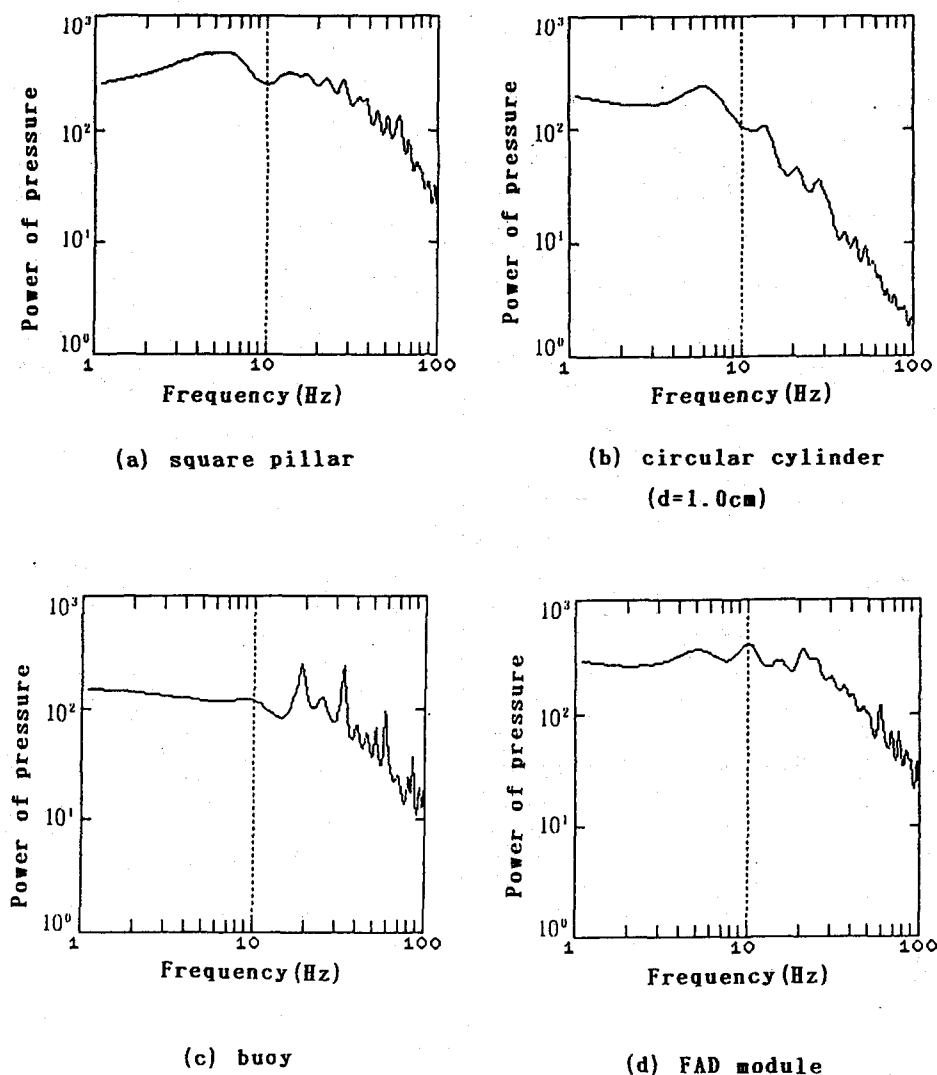


Figure 4 Power spectra of the underwater sound

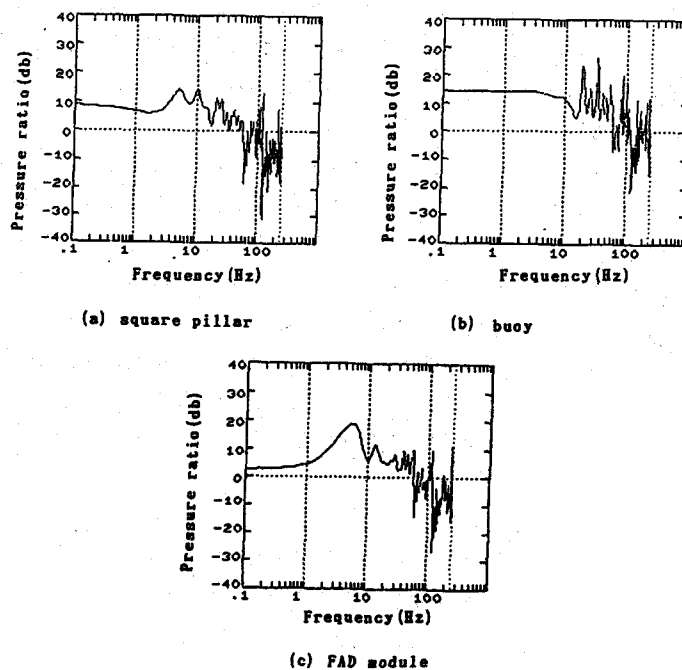


Figure 5 Pressure ratio of the underwater sound

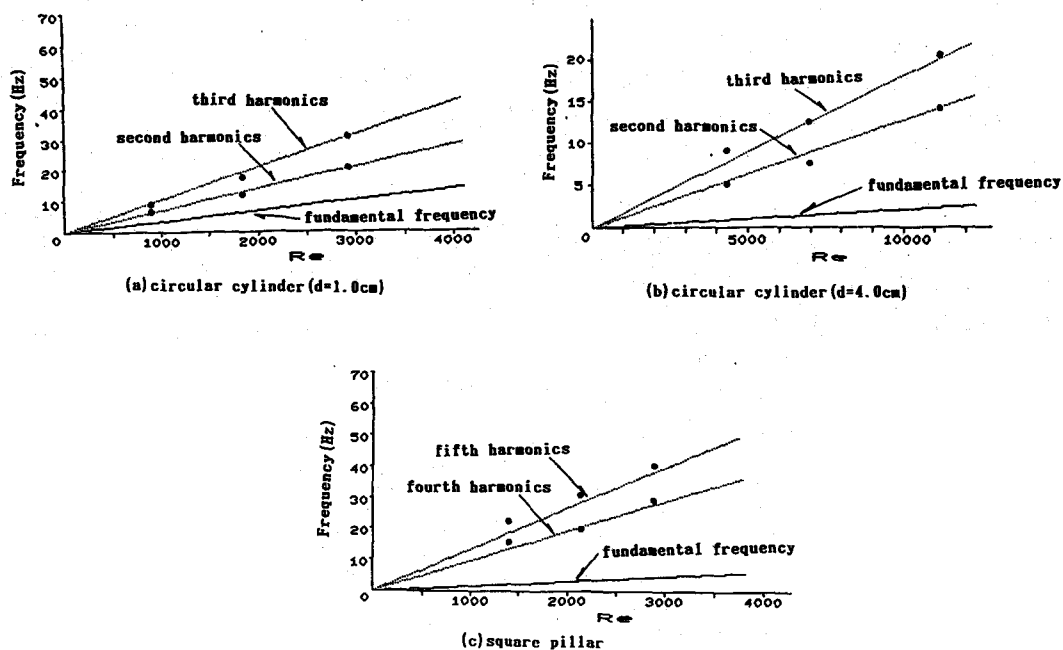


Figure 6 The relationship between the predominant frequency of the sound and frequency of the vortices

Fig.5 (a) ~ (c) は、角柱、球ならびに二次元角柱魚礁の各モデルから得られた曳航時の水中音と静止時音圧との音圧比を示したものである。これらの図で注目すべき点は、8Hz ~ 60Hz の低周波領域で音圧が増大していることである。これは、モデルを曳航することで、低周波領域の音圧が増大することを示しており、魚礁部材からの発生音の存在を示唆している。特に球モデルの結果では、20Hz ~ 40Hzに明確なピークが認められ、球による3次元性の渦が発生することによるものと考えられ、すなわち部材背後に形成される渦と音圧変化との間に有意な関係が存在することが考えられる。そこで、各モデルの曳航時における渦の発生周波数と前述の水中音の卓越周波数との関係を検討した。

Fig.6 (a) ~ (d)は、各モデルが個々の速度で曳航されるとき生成される渦の発生周期を算出し、前述の水中音の卓越周波数との関係を調べたものである。各々のモデルの渦の発生周波数の算定には、各々のモデル形状に対して提案されているストローハル数と渦の無次元発生周波数との関係式を用いている(Patel 1989)。また五角柱モデル、魚礁モデルについては、角柱モデルのストローハル数を使用している。レイノルズ数 Re の算定には、物体代表長として、Table 1の d を使用している。この結果から、モデルを問わず、 Re 数の増大とともに、卓越周波数もほぼ直線的に増大すること、計算から求められた渦の基本周波数ならびに2次、3次の倍周波数成分と水中音の卓越周波数との対応関係もよいことがわかる。以上のことから、今回の実験から得られた水中音のスペクトルピークは、モデルから発生する渦流成分と一致することがわかった。

5. おわりに

本研究では、魚礁部材からの発生音と部材形状特性ならびに部材背後に生成されと考えられる渦流との関係について実験的に検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 発生音の卓越周波数は Re 数の増大にともない線形に増加する。また、発生音の卓越周波数は、部材背後の渦流の発生周波数の倍周波数に一致する

(2) 部材のモデルの部材径が大きいほど水中音の卓越周波数成分のパワーは大きくなる。径が小さくなるにつれ、パワーは減少するが、多くのスペクトルピークを有するようになる。

(3) 発生音は部材背後の流速変動と関係し、周辺流速が増大するほどスペクトル分布形状に多くのピークが現れる

(4) 矩形単柱モデルの場合には圧力波が発生し、明確なスペクトルピークが得られたが他のモデルでは、特徴的なスペクトル分布は得られなかった。今回の実験結果からみる限り、魚礁の集魚機能に貢献しているのは水中音圧と考えられる

今後、さらに分解能の高い水中マイクを使用して実験データを蓄積すると共に、水中音の発生伝播について音響理論により数値解析的な側面からも検討するつもりである

参考文献

- 柿元 皓, 大久保久直:新潟県沿岸域における人工魚礁の総合的研究, 新潟県農林水産部水産課, 1985
- 黒木敏郎:魚類生態学に關与する水中音の基礎的研究, 鹿児島大学水産学部紀要, 第6巻, 1958
- 黒木敏郎:魚と音, 遺伝, pp.11-16, 1977
- 中村 充:水産工学, pp.413-415, 1991
- 畠山良己:水中の音と魚について, 漁船, V01.246, pp.597-604., 1984
- 畠山良己:魚と音に關する講演会資料, 1986
- Kinsker, L., A.Frey, A. Coppens and J. Sanders, 1980 : Fundamentals of Acoustics, pp397-400, John Wiley & son
- Patel, M.H.:Dynamics of offshore Structures, pp199 -200, 1989, Butterworths
- Ryu, C.R.,1992:Review of Marine Artificial Habitat Technology, pp142-143, Proceedings of First International Conference on Fisheries of Ocean Industrial Development for Productivity Enhancement of the Coastal Waters