

音刺激に対する魚の反応行動の検討*

西ノ首 英之・藤田 伸二

On the Response of Fish to the Acoustic Stimulus*

Hideyuki NISHINOKUBI and Shinji FUJITA

It was most important to understand the behaviour of fish in case of the betterment of the current fishing gear and methods or the development of the fishing method by acoustics.

This investigation has been attempted to provide for the prediction of the response action of fish to acoustic sound.

As the acoustic sounds for stimuli, the pure tones of the sine wave form at the frequencies of 500, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 4000 and 6000 Hz were used. The over all length of the silver crucian carp, *Carassius auratus* (Japanese name HIBUNA) used in the experiment was 42mm in overall length and 3.45 g. in weight. The results obtained were as follows:

- 1) The characters of the response action were obtained by the statistical analysis of the stochastic processes, and this method was effectual.
- 2) The behaviour of the fish under the stimulus had two-sidedness, i. e., two contrary tendencies to rise or to diminish the action which the fish had shown at no stimulus. These tendencies depended on the frequencies.
- 3) In this experiment, the frequency equivalent to the boundary of two-sidedness mentioned above was 900 Hz, which was in agreement with the resonance frequency of the air bladder of the fish.

緒 言

水中騒音と漁獲との関係, 水中放声による魚群の誘致, 威嚇¹⁾ およびテンプラノイズ²⁾ など, 種々の研究により水棲動物が水中生活をする上で音響を最大限に利用していることが明らかになりつつある。

漁具漁法の設計, 改良, 開発, また音響による漁法の研究開発において, 最も基本的あるいは根元的に必須の情報は魚の習性, 行動のメカニズムである。魚類にかぎらず動物の行動という現象はきわめて複雑であり, かつ多くの側面をもっている。行動の社会学的意味づけまで行ない, 行動を生物学的に解明し行動の管理技術を確立するという事が終局の目的に沿う事であろう。しかし, これは至難の事である。そこでここでは漁具漁法の改良の為の魚の行動の machinery という一面について基礎的実験研究を試みた。

筆者は漁船漁具の発する水中騒音に関して, オッターロール網, 以西底曳網および旋網の作業中の水中騒音を集測した。これら測定された騒音の周波数分析結果から騒音が対象とする魚の反応行動に有意的な影響を与えている事を考察³⁾した。そこでさらに魚の反応行動をより定量的に考察するために本研究を行ない二, 三の知見を得たので報告する。

本論に先だち, 本研究の機会を与えられ, 実験計測器の利用に多大の便宜を与えられた本学水江一弘教授,

* 本研究の一部は文部省科学試験研究費によって行った。

竹村暘助教授に深く感謝する。

実験および解析の方法

1. 実験水槽および刺激音放声装置

実験水槽は Fig. 1 に示すような長さ150cm, 幅90cm, 深さ20cmの水槽を用い, 水槽内壁には刺激音の乱反射を利用した吸音材として厚地の布を波型にし (波型の深さ約5cm) 内張りした。放声装置は水槽の長さ方向120cmの所を仕切り, 図のように設置した。従って水槽内で魚の行動出来る範囲はX軸方向に90cm, Y軸方向に120cmである。また水槽の底面には魚の行動軌跡の位置読み取り用として, 10cm間隔の線を縦横共に目盛った。刺激音としてはサイン波形の純音を用い, その周波数は500, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 4000および6000Hzの8種類とさらに比較検討のために無刺激の場合について魚の行動を測定した。なお実験水槽内の音圧分布は不均一で特にY軸方向はその差が大きい。各周波数について測定を行ったが一例として Fig. 1 に500Hzの場合を示す。

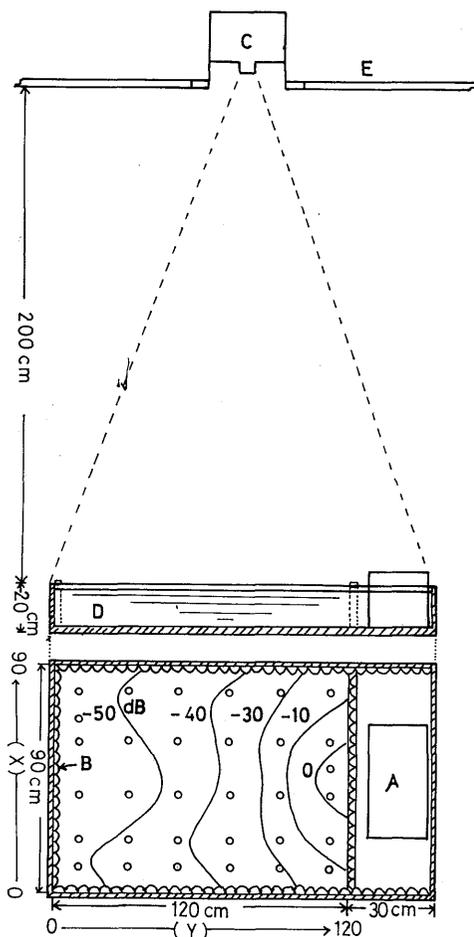


Fig. 1. Experimental installation.

- A : underwater speaker
- B : cloth for sound absorption
- C : continuous recording camera
- D : water tank

2. 供試魚およびその行動の記録装置

数十尾を一緒に飼育中の『ヒブナ』の群から実験水槽に対して大き過ぎずまた約2m上方からのカメラ撮影に可能な体長の一尾を選び実験に用いた。体長は42mm, 体重は3.45gであった。刺激純音の各周波数ごとに魚の行動軌跡を1秒間隔に800コマ (約13分間) シンクロスコープ用連続撮影装置により連続記録した。記録に際して, 周波数の異なる刺激音を放声する一実験ごとに約15分の休息をとり, その間は供試魚は一たん実験水槽から他の水槽に移しておいた。実験水槽に放声開始してから供試魚を放しその後さらに1分経過してから記録を開始した。これは水槽に対する魚の『なれ』と行動の過渡現象記録を避けるためである。

3. 魚の運動の応答特性の統計的性質

魚の行動は多面的であるが行動するのは個々の個体である。従って行動の machinery を考える場合には, 行動は個体のある種の刺激となる入力に対する応答である。よって本実験の場合, 音刺激を入力として出力が魚の応答系の行動である。またこれらには定常性, エルゴード性の近似が成り立つと仮定すれば次のような線形応答系が考えられる。



魚群の場合には破線で示すような出力である行動そのものが互に他の魚に対してさらに入力となることが考えられる。本実験においては一尾の単体実験であるからこのフィードバック系は考慮しない。不規則な出力の確率過程とする時系列データは次のようにして得られる。実験水槽の横と縦をX, Y座標にとり, 1秒間隔に

読み取られた魚の位置を $X(t)$, $Y(t)$ とする。すなわち記録から魚の位置を時間 t の関数として読みとる。次に $X(t)$, $Y(t)$ の微分係数 $\dot{X}(t)$, $\dot{Y}(t)$ を定常時系列として変動現象の解析によく用いられる相関法⁴⁾ により自己相関係数およびパワースペクトラム計算を行い魚の行動現象を線形モデルとしてのアプローチを試みた。

結果および考察

実験水槽に X 軸, Y 軸方向共に幅 10 cm の間隔をそれぞれとり魚の運動の相対度数分布を Fig. 2 に示す。この図から、魚は刺激音すべての周波数に対して、また無刺激の場合においても側壁に沿って運動している事がわ

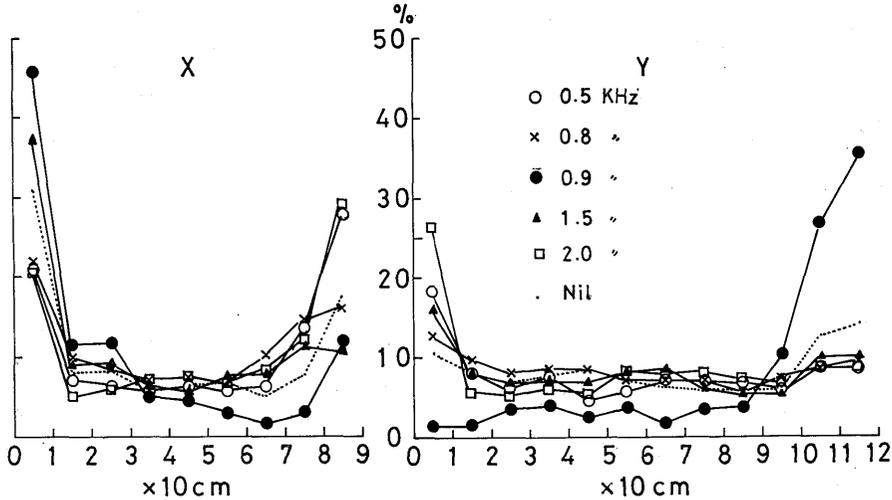


Fig. 2. Distribution of fish in the experimental water tank.

かる。なお省略した 4000, および 6000 Hz についても 2000 Hz にほぼ等しい分布であった。Fig. 1 に示したように水槽内の音圧分布は最大 55 dB の差があるが 900 Hz を除いては度数分布から見て音圧差の影響は認められない。X 軸について、音圧分布は水槽の中心に対してはほぼ左右対称であり、度数分布もほぼ対称形である。X, Y 共に 900 Hz の場合のみ他の周波数と異なる分布をしている。特に Y 軸について音圧の高い所に多く分布している。実際、実験時の観察でも放声器の近くで魚が長い時間静止している現象からたびたび見られた。Fig. 3 は 1 秒間に平面内で魚が実際に動いた距離、すなわち $D(I) = \sqrt{\dot{X}(I)^2 + \dot{Y}(I)^2}$, $I=1, 2, \dots, N$ で表わされる量の 1 cm 毎の度数分布を示す。この図によれば、各周波数における魚の行動の相違が明らかに認められる。分布型としては 900 Hz を除きレイレイ分布をなしているが 500 および 800 Hz では分布の対称の中心が σ だけ移

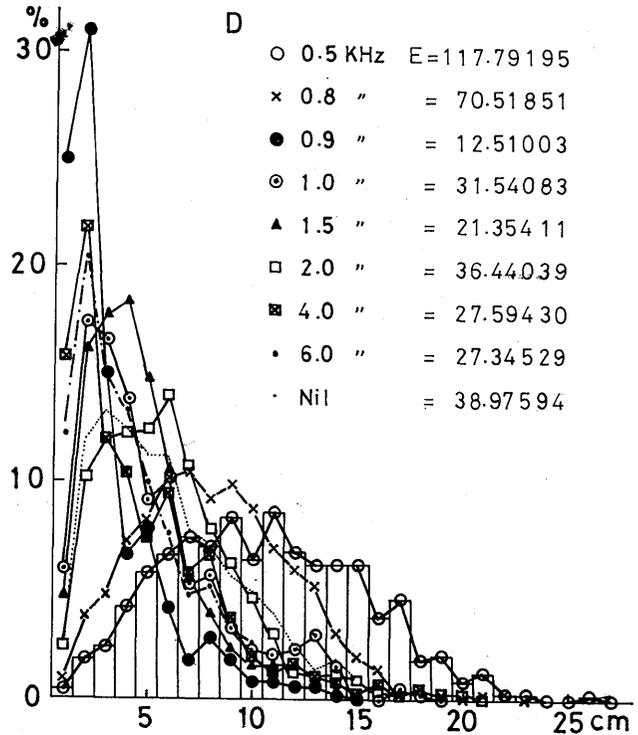


Fig. 3. Distribution of fish's speed.

動した正規分布とも見なされる。900Hzのみは他に較べ特異な分布をなし運動量は少なく大部分が3 cm/sec以内である。Fig. 4, 5は $\dot{X}(t)$, $\dot{Y}(t)$ の各周波数におけるパワースペクトラムを示す。この図から、魚は500お

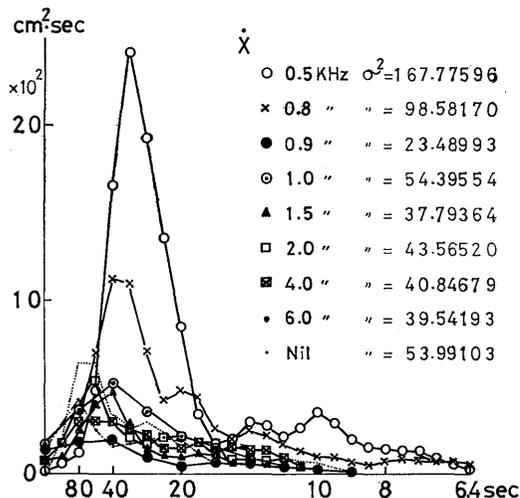


Fig. 4. Power spectra of longitudinal component of fish's speed.

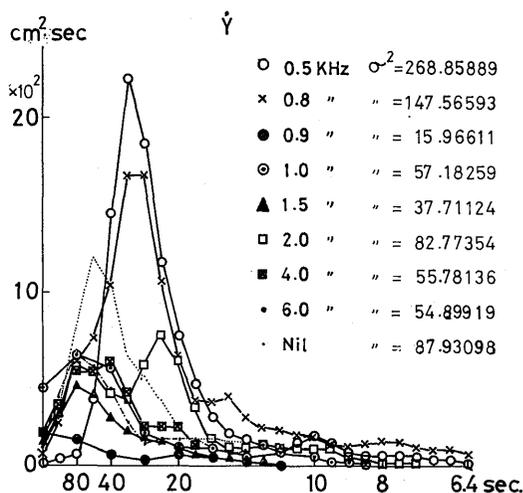


Fig. 5. Power spectra of transversal component of fish's speed.

よび 800Hz の刺激音に対して約32秒の卓越した周期をもつ運動をしている。周波数が高くなるに従い運動周期も長くなり無刺激の場合と等しい50~60秒となる。運動量もまた少なくなっている。なかでも 900Hz に対する運動が最も少なく運動の周期成分も認め難い程度である。Fig. 6は $\dot{X}(t)$, $\dot{Y}(t)$ および $D(t)$ の平均値を各周波数ごとにプロットしたものである。図において、実線、破線および一点鎖線で示された直線は無刺激の場合の運動量の平均値である。この図から 500, 800Hz と周波数が高くなるに従って魚の運動は少くなる傾向にあり、900Hz で最少となる。さらに周波数が高くなると運動量の平均値は高くなるが無刺激の場合の平均値に等しくなる。 $\dot{Y}(t)$ は他に較べやゝ少ない2割減となっている。

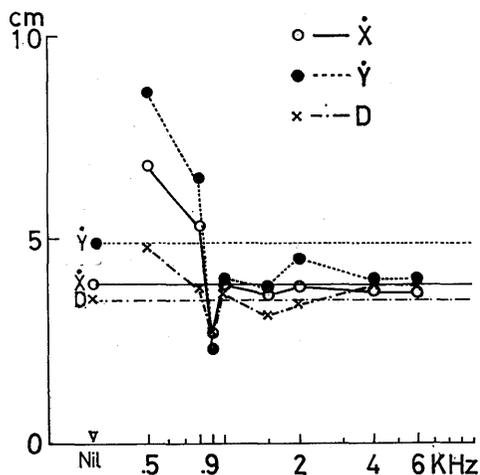


Fig. 6. Characteristics of fish's average speed in response to acoustic stimulus at various frequencies.

と仮定して、魚体重よりうき袋の半径が求められる⁵⁾。さらに半径より共振周波数が算出できる。体重3.45 g, 魚の平均遊泳水深15cm, 魚肉比重1.060, 水の比重1.000から計算したうき袋の半径は3.53mmである。さらに共振周波数は903Hzとなった。一方、実験終了後に供試魚を解剖し水深15cmの所で得られたうき袋中の空気容量はうき袋の大きい方で1.15cc, 小さい方で0.27ccであった。それぞれの容量よりうき袋が球と仮定して逆算した半径は6.5mmと4.0mmとなり、この半径に対する共振周波数はそれぞれ 491Hz, 797Hz である。これらの事

の場合の運動量の平均値である。この図から 500, 800Hz と周波数が高くなるに従って魚の運動は少くなる傾向にあり、900Hz で最少となる。さらに周波数が高くなると運動量の平均値は高くなるが無刺激の場合の平均値に等しくなる。 $\dot{Y}(t)$ は他に較べやゝ少ない2割減となっている。

以上のような魚の刺激音に対する反応行動の統計解析結果から、実験に用いた『ヒプナ』について言える事は最も影響を及ぼしている刺激音の周波数は 900Hz であり次いで 800Hz または 500Hz と考えられ、現象としては二面性が認められる。すなわち、行動が鈍くなる面と逆に活発となる性質である。本実験においてはこの両面の境界ともいえるべき周波数は800あるいは900Hz である。これら周波数の値から次のような事が考えられる。魚の音に関する感知器官として『うき袋』が重要な役割を持っている事はよく知られている。うき袋の音に対する共振周波数は、魚が水中で常に中正比重を有する

から行動に影響を与えていると考えた刺激音の周波数, 900, 800 および 500Hz が妥当でありまた線形モデルによる定量化が適当であったと考えられる。さらに今後の課題として, 大きさの異なる魚を対象に検討を重ね, 水槽の形や音圧分布の改善, 群行動の考察, またうき袋のない魚についての実験検討など多くの問題が残されている。

要 約

体長42mm, 体重3.45gの『ヒブナ』を用いて, 入力として8種類の周波数の刺激純音を与え, これに対する魚の反応行動解析を試みた。実験の結果は次の通りであった。

- 1) 不規則な生物行動現象の解析においても確率過程としての取扱いが有効であった。
- 2) 魚の音に対する反応行動現象は音の周波数の相違により運動がより活発になる傾向と逆に不活発となる傾向の二面がある。
- 3) 上記した二面性の境界ともいうべき音の周波数は魚のうき袋の共振周波数と一致しており, 反応行動とうき袋の役割りとの関係が充分考えられる。

文 献

- 1) 橋本富壽, 間庭愛信: 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究(2). 漁船研技報, 20(3), 1—5 (1966)
- 2) TAKEMURA, A.: Studies on the underwater sound—II. 本誌, 28, 31—41 (1969)
- 3) 西ノ首英之: 漁船および網漁具の操業中に発する水中騒音について. 本誌, 29, 91—102 (1970)
- 4) CAPEN, R. L.: Swimbladder morphology of some mesopelagic fish in relation to sound scattering, U. S. Navy Electronic Laboratory Research Report. 1447, (1967)
- 5) 樫木義一, 砂原善文: 統計学的手法による自動制御理論, オーム社, 東京, 29—72 (1967)