聴覚能力と測定*1

島山良己*2

水産工学研究所

音は水中で有効な刺激であり、魚は音を出したり聴いたりして反応している。音を利用した伝統漁法や海洋牧場も行われているが、それら魚群行動の制御技術の改良開発には魚の聴覚能力を充分知っている必要がある。海外では魚の聴覚に関する研究が数多くあるが、日本の重要魚種に関する知見は近年ようやく蓄積されるようになった。魚の聴覚能力には基本的な聴覚閾値以外にマスキング、音源定位能力などがあり、それらの測定方法やデータについて総論的に述べることにする。¹⁻³⁾

1. 音刺激と受容器

水中で収縮膨張を繰り返す球は周囲に音圧と粒子運動(変位・速度・加速度)を発生し、それらの振幅比は距離により大きく変わる。波長/2 π より近い距離では粒子運動が大きくなり近距離音場といわれる。

音刺激を感じる器官としては内耳と側線があり、それらのセンサは基本的に同じ構造(有毛細胞)である。有毛細胞は感覚毛の屈曲により興奮するので、有効刺激は音圧でなく粒子運動である。ただし、鰾は音圧→粒子運動の変換器であり、魚は間接的に音圧も感じている。

魚から音源までの距離は聴覚測定の重要なファクタであり、魚が主に感じている刺激がどちらかに留意する必要がある。厳密には水中マイクロホンによる音圧と速度ハイドロホンによる粒子速度の測定が要求される。

2. 聴覚閾値

閾値は精神物理学的に測定され、魚に量的判断をさせずに刺激に対する感覚の「あり」「なし」の2種類のカテゴリで判断を報告させる。この判断の出現率が0.5となる音圧を聴覚閾値とする。測定にあたっては光、振動、など音以外の刺激の混入を避ける必要がある。音圧の変化は一般的に階段法で行われ、閾値付近の測定回数を多くし、安定した反応を確認している。音刺激の呈示については粒子運動を少なくし音圧のみにする方法がいくつか提案されているが、日本では水槽の両側に置いた空中スピーカを同位相で駆動する方法が採用されている。

魚に音が聴こえたかは、古典的条件付けを用いる心理

図1 最近日本で測定された魚の聴覚特性。

学的手法で判断することが多い。判断には心拍間隔や呼吸間隔を観察するが、魚体に負担を掛けない方法が工夫されている。最近日本で測定された8魚種(非骨鰾類)のうち6魚種の聴覚閾値を図1に示した。^{4,5)}

3. 側線

過去の多くの側線に関する実験では粒子変位閾値を電気生理学的に調べており、一般的に最小閾値が 10^{-5} ~ 10^{-7} cmで、最高感度周波数は50-100 Hzにあった。しかし、側線の感丘を支配する求心性神経線維を電気生理的に調べた最近の実験では、その最大感度周波数が遊離感丘で10-60 Hz、管感丘で50-200 Hzの範囲にあり、反応した刺激は遊離感丘で粒子速度、管感丘で粒子加速度であったと報告されている。⁶⁾

4. マスキング

ある音の聴覚閾値が、他の音の存在により上昇する現象をマスキングというが、その度合いを評価する指標に臨界比(CR)がある。CRは簡単に測定でき、それにより雑音の影響を容易に評価できるという特長がある。

聴覚閾値をT(dB re 1 μ Pa)、マスク音のホワイトノイズスペクトラムをN(dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2})とするとCR=T-N(dB)が成立する。現在までに測定されたCRを図2に示した。^{7,8)} キンギョのCRは50-1000 Hz

*1 Hearing Abilities and their Measurement.

*2 Yoshimi Hatakeyama (National Research Institute of Fisheries Engineering, Hasaki, Ibaraki 314-04, Japan).

図2 マスキング (臨界比)。

の範囲で周波数と共に約3 dB/octで増加している。高い周波数になるとマダイ、ニジマス、スケトウダラなどではCRが急激に増加している。マスキングが起こり始めるNはニジマス、マダイで測定されており、約60-70 dBである。

5. 音源定位

2つの音源方向の角度を小さくしていったとき弁別できる最小角度を方向弁別閾といい、心理学的手法を用い心拍間隔や行動から測定する。水平面での方向弁別閾値はレモンザメで19°, ニジマスで37°である。タイセイヨウダラについては方向弁別に必要な音圧(Pd)と音源角度の関係を水平・垂直の両面で調べられ、音源角度が狭くなるとPdが急激に増加し、最小方向弁別閾は各々20°, 16°となった。魚体を振動させた時の小囊のマイククロホン電位を細い電極で測定するとパーチの左右の小囊の最高感度の方位差は約40°であった。また、キンギョの耳石器官の単一神経線維の方向感度とその最良方向の分布を電気生理学的に調べ、有毛細胞の方向パターンと対比することで方向知覚の生理学的解析が試みられていた。⁹⁾

6. 周波数弁別

魚に一定の周波数(f)の音を聴かせておいて、それがどれだけ(Δf)変化したら弁別できるかを測定し、周波数弁別閾($\Delta f/f$)を求める。その閾値はキンギョ、コイ科の小魚など骨鰻類で4-5%, ハゼ科、タイ科、ニベ科など非骨鰻類で10-15%, レモンザメなど特殊な魚で50%である。

7. 強さの弁別

音の強さがどの位変化(ΔI)したら魚が弁別できる

図3 音の強さの弁別閾 (キンギョ)。

かは、音の周波数、強さ、持続時間などにより変わり、さらに音の比較方法によっても結果が異なる。キンギョの場合のデータを図3に示した。継時比較法による ΔI の測定では、タイセイヨウダラで3.7-6.7 dB (110-250 Hz)、ニジマスで5.0 dB (100 Hz)となっている。

8. 音の持続時間による聴覚閾値の変化

一般的には魚の聴覚にはエネルギー積分機能があり、パルス音の持続時間がある一定値(τ)以下になると聴覚閾値が増加すると考えられている。その測定例は少なく、外国のキンギョ、日本のマダイとニジマス(共に $\tau=0.5$ s)について調べられているのみである。

文 献

- 1) 島山良己: 魚の聴覚能力. 水産工学, 28, 111-119 (1992).
- 2) 島山良己: 魚の聴覚能力と水中音に対する反応(I). 海洋音響学会誌, 23, 73-80 (1996).
- 3) 島山良己: 魚の聴覚能力と水中音に対する反応(II). 海洋音響学会誌, 23, 132-139 (1996).
- 4) 鄭龍晋, 松野保久, 藤枝繁, 山中一: マアジの聴覚閾値. 日本誌, 61, 695-699 (1995).
- 5) 藤枝繁, 松野保久, 山中一: ヒラメの聴覚閾値. 日本誌, 62, 201-204 (1996).
- 6) S. Coombs, J. Janssen, and J. Montgomery: Functional and Evolutionary Implications of Peripheral Diversity in Lateral Line Systems, in "The Evolutionary Biology of Hearing" (ed. by D. B. Webster, R. R. Fay and A. N. Popper), Springer-Verlag, Tokyo, 1992, pp. 271-272.
- 7) 朴容石, 飯田浩二, 梨本勝昭: スケトウダラの聴覚閾値と雑音スペクトラムレベル比. 日本誌, 61, 847-853 (1995).
- 8) 本松敏一郎, 平石智徳, 山本勝太郎, 梨本勝昭: クロソイの聴覚閾値と臨界比. 日本誌, 62, 785-790 (1996).
- 9) R. R. Fay: Peripheral Adaptations for Spatial Hearing in Fish, in "Sensory Biology of Aquatic Animals" (ed. by J. Atema, R. R. Fay, A. N. Popper, and W. N. Tavolga), Springer-Verlag, New York, Tokyo, 1988, pp. 711-731.