活魚（試料ヤマメ）の超音波反射について^{*1}

佐 野 典 達

(1974年2月26日受理)

On the Reflection of Ultrasounds from a Living Fish, Yamame

Noritatsu SANO^{*2}

In relation to the measuring of the reflection of ultrasounds from a fish, we have taken accurate measurements of the relationship between the swimming action and the reflection of ultrasounds, as made by the living fish, Yamame.

The echo sounder used was a 50 KHz ultrasound echo sounder, a directional projector having a 30° effective beam angle and a hydrophone having a 110° of beam angle.

These experiments were made inside an anechoic tank. The dimensions of this tank were 200 cm long, 140 cm wide and 140 cm deep.

The measuring method was as follows:

The swimming actions were measured by a dynamic strain gauge in connection with a U-gauge. A practical method is to use a reference target of known reflection loss (steel ball), placed at the same range as the unknown, and to compare the levels from the reference target and the living fish to be measured.

The acoustic back scattering polar diagram of living fishes or anesthetized fishes could be obtained by measuring the echo level from the fish in all directions at intervals of 10° on the lateral plane.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) There was little relationship between the swimming action and the echo level from a living fish, even though it may be obtained by the same aspect of living fish.
- 2) On the polar diagram, the directions of maximum echo level are of a lateral aspect.
- 3) We found little change in the echo level of the dorsal aspect.

サケ・マス漁業で、魚群探知機の使用が漁場の探知・選択から資源量の把握のための必ずしも有効な手段・方法に現在なっていない点については、技術上に問題点がある。この作業上または調査・研究上における魚探技術の諸問題点について、その若干はすでに報告した^{1,2,3)}。

筆者は、サケ・マス用垂直・水平方向魚探で取得した鮮明なサケ・マスのエコー・パターンから魚種の識別、魚群量、棲息状態などの生物学的、資源学的諸問題を解析する目的で、二三の実験を試みてきた。

今回の実験の目的は、サケ・マス漁場でサケ・マスが自然環境下で棲息する状態を実験水槽の中に再現し、これに超音波が入射した場合複雑な生物と環境のかかわりあいのなかで起る超音波の反射現象を観測するというのではなく、可能な限りこの現象を単純な要因に分解して測定を繰返し、定性・定量的に反射機構を解明すると同時に、サケ・マス魚探技術を改善することにある。したがって、超音波の反射量をより正確に測定するために無響水槽を使用した。この水槽中でサケ・マスを実験対象として反射量を測定することは水槽の大きさの関係で困難なので、活魚の試料としてヤマメ (*Oncorhynchus masou f. ishikawai*) を選び、

^{*1} 1973年4月3日、日本水産学会で発表。

^{*2} 北海道大学水産学部 (The Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate Japan)

この魚体からの超音波の反射現象、とくに魚体の遊泳運動の測定、さらに遊泳運動を瞬間的な魚体形状の連続的变化と見做し、それに入射した超音波の反射量を測定し、活魚の遊泳運動と超音波の反射量について考察し検討を加えたので以下に報告する。

実験方法

測定装置 木製の音響楔（寸法、四角柱部 $5 \times 5 \times 5$ cm (L×B×H)、角錐部 $5 \times 5 \times 13$ cm (L×B×H)) を六面にうめ込んだ実有効容積 $1.8 \times 1.4 \times 1.4$ m の木製無響水槽の一端に、50 KHz 用超音波送波器および受波器を水深 68 cm のところに設置し、音源（送波器）から 70 cm 離れた位置に目標物であるヤマメを保持できるように、水槽上面に広さ 70×60 cm の測定のための音響楔をうめ込まない部分を作った。超音波ビーム幅は、指向半減全角 30° 、パルス幅 0.5 m sec、受波器は指向半減全角 110° で、反射波および散乱波を可能な限り受信できるよう設計した。反射波は、シンクロスコープで波形観測、写真撮影および抵抗減衰器で反射音圧の反響余裕値（マージン dB）の測定を行なった。

観測対象を活魚（ヤマメ）の遊泳運動とするので、魚体の遊泳力を動歪計で張力に変換し自記記録計に記

Fig. 1. View of the directional projector and hydrophone mounted on an anechoic tank.

Fig. 2. Arrangement of measuring apparatuses.

Fig. 3. Array of dynamic strain gauge used in measuring the swimming action.

a) common swimming

b) fast swimming

Fig. 4. Form of anesthetized fish used in measuring the echo level or reflection loss.

録させる。一方遊泳に伴う魚体形状の変形については、麻酔をかけスケール板上において変形状態を写真で判定した。また、測定時における測定装置（超音波発振器、送受波器、増幅器、抵抗減衰器、シンクロスコープ、無響水槽など）の安定性をチェックするため、常に鉄球（直径 3.75 cm）を使用して反射音圧に変動がないことを確認してから目標物の測定を行なった。超音波の入射方向に対するヤマメの相対的方位 (aspect) および位置関係は、目視観測により水槽上面に設置した全円分度器で測定した。無響水槽に設置した送受波器を Fig. 1 に、超音波測定装置の概観を Fig. 2 に示す。

測定対象が活魚であるため反射音圧を測定するとき、影響を与えるであろう遊泳力は張力に変換して定量化した。このためには U ゲージを動歪計に接続し、さらに自記記録計に接続し張力を自記させた。この装置を Fig. 3 に示し、また魚体形状の変形状態の一例を Fig. 4 に示す。

測定方法 活魚の試料として使用したヤマメは、体長約 17 から 22 cm で当学部・七飯養魚施設から一回に数尾ずつ運搬しガラス製 YT-10 号の飼育水槽で水温および餌料を管理しながら、実験に供するまで飼育した。

超音波の反射音圧の測定にあたっては、1) 遊泳運動による影響、2) 魚体形状の変化による影響の場合にわけて実験を実施した。

1) の実験において、まず予備的に超音波ビーム中からヤマメが遊泳し逃出しないよう音源から距離 70 cm のところに、約 50 cm³ の範囲を自由に遊泳できるよう太さ 8 号のテグスに 6 本の釣針をつけた釣糸を、ヤマメの腹側に 1 本つけて水槽の底面に固定し、さらに背側には 2 本の釣糸を頭部および尾部につけて水面上で aspect 測定用合成樹皮製定規に固定した。超音波入射方向に対するヤマメの相対的方位は、aspect 測定用全円分度器（直径 18 cm）を 50×50 cm の透明な合成樹皮板に固定し、300 W の照明用ランプ 2 個で無響水槽中のヤマメを照射し、目視観測により aspect を測定すると同時にシンクロスコープで反射波形の最大振幅（縦軸）と伝播時間（横軸）および抵抗減衰器で反射波の反響余裕値 (dB) を測定し写真撮影した。写真は 35 mm, SS フィルムを使用、シンクロスコープ撮影用フードを使用しデータカードを記入した上装備し、レンズ (F1.4) 開放、露出時間 1/2 sec とした。これはヤマメの遊泳運動による反射波形の変動（エコーのパターン）を記録するためであり、この一例を Fig. 5 に示す。1970 年 11 月 10 日から同月 25 日まで実施した予備実験で遊泳運動による超音波の反射音圧を測定できる見通しができた。

本実験は 1971 年 11 月 5 日から 12 月 3 日にかけて実施したが、この場合テグスのかわりに 26 番の細い針金を使用した。テグスはヤマメの遊泳運動を張力に変換するとき伸縮すること、および自由に泳ぎまわるので熱が入り時間経過と共に行動範囲が狭められるからである。針金は反射量が僅少であることを確認した上で U ゲージに、さらに動歪計を接続し張力を測定した。ヤマメの aspect は人為的に制御不可能なので多数回測定した。

a) swimming action

b) fast swimming

Fig. 5. Photographs taken by synchroscope showing the echo waves of the living fish.

2) の実験において、ヤマメは麻酔薬 (NS 222) の稀釈液で 3 分から 5 分間麻酔させた後、魚体形状を変形しその状態を維持するために鉄製の“くし” (直径 2 mm, 長さ魚体長より短かいもの) を尾びれから脊椎骨に沿ってさし固定した。この場合、ヤマメの内臓や浮袋などを破損しないよう注意し、また実験中 5 分から 10 分間位で麻酔からさめて動きだすこともあるので、その場合には直ちに取上げ銅育水槽で数時間休息させたのち、再度麻酔をかけて測定した。ヤマメの側面方向では, aspect を 10° 毎に 0° から 360° まで一回転し測定に要す時間は 11 分から 52 分であり、背面方向の場合は 90° 毎に回転し測定所要時間は 5 分以内であつた。なお鉄製くしも反射音圧は僅少であることを確認した。ヤマメの魚体形状の変形状態は, Fig. 4 a) の普通前進遊泳型, b) の速前進遊泳型に大別して測定した。

実験結果

超音波の入射方向に頭部が対峙しているとき aspect 0° とし、それより時計方向に $0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 300^\circ$ に aspect を大別し体長 17.2 cm のヤマメ (♂) を前述の測定方法に従い、ヤマメが各 aspect に位置し遊泳しているとき動歪計に接続した自記記録計の記録紙にマークをつけ、同時にシンクロスコープで反射波形の写真撮影をし、このエコーの写真から反射波の echo level と反射損失を算出した。

Fig. 6 の a) に aspect 0° および 180° , b) に 60° および 300° , c) に 90° および 270° , d) に 30° ,

Fig. 6. Echo level or reflection loss versus tension for the living fish.

- a) ○ aspect 0° , ● aspect 180° . b) ○ aspect 60° , ● aspect 300° .
c) ○ aspect 90° , ● aspect 270° . d) ● aspect 30° , ⊙ aspect 40° , ○ aspect 45°

40° および 45° における ヤマメの 遊泳力を示す張力 (g) と相対的 echo level または反射損失との関係を示す。

Fig. 7 には各 aspect における echo level の変動範囲をポーラグラフで示す。ヤマメの echo level は、鉄球の echo level と比較し理論的に計算で算出したもので、一例を示せばヤマメの相対的 echo level 1.37 は鉄球と比較し反射損失 41 dB に相当する。したがって、ヤマメは遊泳運動しておりエコーのパターンが変動するため反響余裕値の実測は echo level で比較した。また aspect が 90° と 270° および 60° と 300° では、ヤマメの左側面および右側面から超音波が入射したときの反射波形の状態を示し、魚体が左右対称であれば echo level は同値である筈であるが実際には差異があつた。0° と 180° は頭部および尾部方向から超音波が入射したときの echo level を示し、張力 0 g はヤマメが静止している状態を示す。

2) の魚体形状の変形による超音波反射に及ぼす影響については、間接測定法により変形したヤマメの echo level と鉄球の echo level を比較し、横軸に aspect, 縦軸に echo level または反射損失をプロットした。この場合麻酔をかけているので反響余裕値は抵抗減衰器で実測可能であり、ヤマメの体長別魚体形状の変形を二種類に別けて示す。Fig. 8 a) は体長 16.9 cm, b) は体長 17.3 cm, c) は体長 19.0 cm, d) は体長 21.7 cm のヤマメを示し, s, b は鉄球, d は背面方向から超音波入射したときの echo level を示す。また Fig. 9 は Fig. 8 をポーラグラフに変換した図である。

体長 19.0 cm のヤマメは実験途中で死亡したので速前進遊泳型の実測はできなかった。

Fig. 7. Polar diagram of living fish on echo level at various aspects.
---●--- tension 0(g)

a) fork length 16.9 cm

b) fork length 17.3 cm

Fig. 8. Diagrams of echo level versus aspect variations of anesthetized fish.

—○— straight, ---○--- common swimming, ---●--- fast swimming,
○s.b steel ball, ○d dorsal.

考察と要約

ヤマメの遊泳運動時の超音波反射の反響余裕値を瞬間的に実測することは困難なのでシンクロスコープ上の写真から echo level を算出する方法を採用した。この方法で取得した結果から、同一魚体同一 aspect でも遊泳運動、つまり張力と超音波反射音圧との間には相関々係はほとんど認められない。しかし Fig. 6 から aspect 0° の方が (頭部方向から入射), aspect 180° (尾部方向から入射) と比較して相対的に echo

Fig. 9.

Fig. 9. Acoustic back scattering polar diagrams of anesthetized fish.

—○— straight, ---○--- common swimming, ---●--- fast swimming,
○s.b steel ball, ○d dorsal

level は大きかった。また反射波は張力0の静止状態の echo level を含んで、上下に変動する。この理由は、遊泳運動することによつてヤマメの体形、超音波入射ビームに対する位置、aspect、魚体周囲の水の動きなどの変化が複雑に相互作用するためであろうと思われる。ただ魚体形状の変形にも拘らず、魚体側面から超音波入射する場合 (aspect 90° および 270°) 反射に寄与する見掛け上の表面積が大きくなる故、したがつて echo level も大きくなるのは当然で左右側面で差異が生ずるのは実験技術上の原因と考えられる。

魚体形状の変形による超音波の反射に及ぼす影響については、ヤマメに麻酔をかけたので反射損失の実測は可能であつた。しかし実測値には同一魚体で変形させない場合僅少の aspect の変化で反響余裕値の変化範囲が大きく (約 18 dB)、また変形することによつて aspect による反響余裕値の変化範囲が小さくなる傾向があつた。さらに音源に対し魚体が凸型あるいは凹型になつても反響余裕値の変化に特徴が認められなかつたが、aspect 0° および 180° 方向から超音波入射した場合を比較すると、遊泳運動と同じく頭部の方が反響余裕値が大きく、これは静止した時と同じ傾向であつた。背面方向から超音波入射した場合、aspect の変化による反響余裕値の変化は殆んどみられず、体長と反射損失との間に相関関係は認められなかつた。

以上の結果を要約すると、ヤマメの一般的な遊泳運動の強弱と超音波反射量との間に相関関係は認められず、また aspect の変化による echo level あるいは反射損失では遊泳運動や魚体形状の変形に拘わらず側面方向の反射量が大きく、次に頭部、尾部から入射した場合の順に反射量が変動することが確認された。

活魚の遊泳運動と超音波の反射機構の関連を考察する場合、魚体形状の変形をも包含するので echo level の変動範囲は大きく、したがつて遊泳運動中の活魚の超音波反射量の量的情報から魚種、魚体の大きさ、魚群量など資源状態を適確に把握することは困難であろう。魚探記録像 (エコー・パターン) から、操業上または調査・研究に必要な情報を取得するには、反射量 (エコー) の量的情報だけでは不十分で、必ず対象魚の生理・生態情報を併せ得ることにより、さらにエコー・パターンの量的・質的情報などを総合的に判断することによつて魚探技術の改善ができるようになる。

終りに臨み、本研究の御指導をいただいた本学部石田教授に謝意を表すると共に、活魚の試料提供に多大の便宜をあたえて下さつた当学部・七飯養魚施設久保助教授に深謝する。

文 献

- 1) 佐野典達：本誌，34，660～669 (1968).
- 2) 佐野典達：同誌，34，670～680 (1968).
- 3) 佐野典達：同誌，37，1～7 (1971).