HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ヒメマスのターゲットストレングスにおよぼす鰾の影響について
Author(s)	向井, 徹; 鈴木, 恒由; 佐野, 典達; 飯田, 浩二
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 39(2), 106-114
Issue Date	1988-05
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/23993
Type	bulletin (article)
File Information	39(2)_P106-114.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大水産彙報
39(2), 106-114. 1988.

ヒメマスのターゲットストレングスにおよぼす鰾の影響について

向井　徹*・鈴木恒由*
佐野典達*・飯田浩二*

The Effect of Swimbladder on Target Strength of Kokanee (*Oncorhynchus nerka f. adonis*)

Tohru MUKAI*, Tsuneyoshi SUZUKI*, Noritatsu SANO*
and Kohji IIDA*

Abstract

The target strength (*TS*) of fish is the most important parameter for estimating their biomass and size by acoustic techniques. However, the *TS* is strongly influenced by several factors. The swimbladder especially affects acoustic backscattering. *TS* depends on the swimbladder volume which is proportional to fish size and depth. This paper describes the effect of the swimbladder on the *TS* of Kokanee (*Oncorhynchus nerka f. adonis*).

In the experiment, dorsal aspect of the *TS* functions of Kokanee at 50 kHz were measured in Lake Kuttara. Fish samples were suspended on the sound beam axis at 5, 10, 20, 30, 40 m depth, respectively. The fish were tilted from −45 (head-down aspect) to +45 (head-up aspect) degrees at one degree intervals. Each *TS* values were measured as a function of pitch angle and depth, and maximum *TS* value and averaged *TS* value were calculated and compared.

The results obtained were as follows:

1) The decrease in *TS* by removing the gas in the swimbladder was about 2-3 dB for maximum *TS* and 3-4 dB for averaged *TS*.

2) As depth changed rapidly, both maximum *TS* and averaged *TS* tended to change inversely with the depth, *i.e.*, the value of 6.7 dB per 10 atm was in accordance with Boyle's law.

3) The maximum and averaged *TS* values of live fish as compared with preserved fish with destroyed or incomplete swimbladders were about 2.6 dB and 1.4 dB, respectively.

はじめに

近年，計量用魚探の普及にともなって，魚群探知機を用いた資源量調査が盛んである。魚群探知機による資源量推定法は，魚群エコーエネルギーを積分する積分方式と単体エコーを計数する計数方式に大別される。積分方式で得られる情報は，魚体のターゲットストレングスと魚の密度との積である体積散乱強度である。従って体積散乱強度から魚の密度を推定するうえで，魚のターゲットストレングスは重要なスケールファクターとなる。一方，計数方式では単体エコーを計数し，これを探知体積で割って密度を求める。探知体積はターゲットストレングスに依存するから

* 北海道大学水産学部漁業測器学講座
(*Laboratory of Instrument Engineering for Fishing, Faculty of Fisheries, Hokkaido University*)

ターゲットストレングスは密度推定の精度を左右する重要なパラメータである。しかし魚体のターゲットストレングスは，魚種，魚体の大きさ（体長・体重），魚体構造（肉質・骨・鰾等），魚体の運動や方位姿勢などの要因で複雑に変化する。これらの要因とターゲットストレングスの関係を明らかにするため，多くの研究者が実験を行っている[1~4]。なかでもターゲットストレングスと魚体長との線型性及び魚体の音響散乱に重要な影響を与える鰾の存在が注目されている。一般に，鰾の大きさは，魚体長に比例するのでターゲットストレングスと鰾の大きさの関係も線型であると考えられる。Ona[1]は，タラの鰾の長さが魚体長の約23%であることから，ターゲットストレングスと鰾の長さとの関係を考察している。また，Foote[2]は，体長29-42 cmの3種のgadoid (cod, saithe, pollack：有鰾魚）とmackerel（無鰾魚）のターゲットストレングスを測定し，最大背方向ターゲットストレングスおよび平均背方向ターゲットストレングスの両者の比較から，魚体の音響散乱における鰾の寄与が90-95%にも及ぶと報告している。

そこで，本研究では，鰾内ガスの除去，あるいは急激な水深変化で起こる鰾の大きさの変化がターゲットストレングスにどのような影響を与えるか実験し，鰾とターゲットストレングスの関係を考察したものである。

クッタラ湖におけるヒメマスのターゲットストレングスの測定

実験は，1987年6月および10月に北海道クッタラ湖において，同湖で捕獲したヒメマス（体長185-284 mm，体重80-400 g）を用いて行った。実験に先立ち，魚体の懸垂と回転を行う装置を製作した（図1)。本装置は，被測定魚をその姿勢を維持したまま任意の測定水深まで降下させることができ，かつ船上で回転アームを操作することによって任意の方位姿勢をとらせることができる。この装置を用いて，魚を送受波器の音軸上一定水深に保持し，魚をピッチ面に沿って回転させて，エコーレベルのピッチ角特性を得た。また，魚のロール角を安定させるために背中にフロートを取り付けられるようにした。

測定は，小型FRP船に魚群探知機（50 kHz)，魚体懸垂回転装置等を設置し，船を湖の中央部に

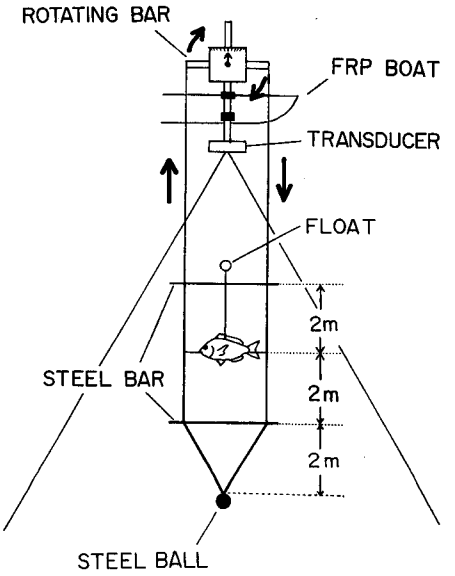


Fig. 1. Fish suspending and rotating system for target strength measurement.

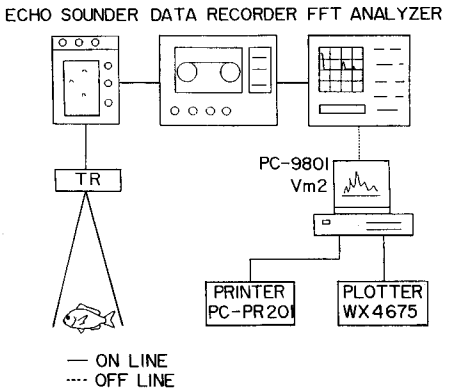


Fig. 2. Block diagram of data acquisition and processing system.

設置したブイに係留して行った。MS 222 で麻酔した魚を水深 30 m (10 月は 5, 10, 20, 40 m) に懸垂し，ピッチ角−45° (魚が水平状態から 45° 頭を下げた状態) から+45° (逆に頭を 45° 上げた状態) まで 1° 間隔で測定した。各角度毎のエコー信号は，カラー魚探のディスプレイ上でモニタするとともにデータレコーダ (TEAC XR-310) に記録した。その後，注射器を用いて注意深く鰾内ガスを除去し，同様の測定を繰り返した。魚探システムの較正は，ターゲットストレングスが既知のスチール球 (41 mmϕ) を用いて行った。

データの取得・解析システムを図 2 に示す。現場で得られた魚探信号を，後日，実験室で再生し，FFT アナライザー (小野測器 CF-920s) のメモリー機能を用いて，各ピッチ角での魚とスチール球の反射電圧のピーク値を読み取り，それらをパソコンに入力し，次式により魚体のターゲットストレングス TS_f を計算した。

$$TS_f = 20 \log \frac{V_f}{V_{ref}} + TS_{ref} \tag{1}$$

ここで，V_f, V_{ref} はそれぞれ魚，スチール球の反射電圧，TS_{ref} はスチール球のターゲットストレングス (理論値：−39.8 dB) である。

一尾の魚に関して得られた，ピッチ角の関数としてのターゲットストレングスのデータから，その最大値 TS_{max} と Foote の平均法[5] により算出した平均 TS を用いて各個体間の比較を行った。

Foote の平均法は，ピッチ角の関数として得られたターゲットストレングスの値を，魚体の遊泳姿勢の分布 $f(\theta')$ と送受波器の指向性関数 $b(\theta)$ を考慮して平均する方法で，次式で表される。

$$\langle\sigma\rangle = \frac{1}{2\pi \int_0^{2\theta_{-3dB}} b^2(\theta)\sin\theta \, d\theta} \int_0^{2\theta_{-3dB}} \int_{-\frac{1}{2}\pi}^{\frac{1}{2}\pi} \int_0^{2\pi} b^2(\theta) \cdot \sigma\left(\frac{1}{2}\pi - \gamma\right) \cdot f(\theta') \cdot \sin\theta \, d\psi \, d\theta' \, d\theta \tag{2}$$

ただし，$TS = 10\log(\sigma/4\pi)$, $\langle TS\rangle = 10\log(\langle\sigma\rangle/4\pi)$, θ_{-3dB} は送受波器のパワー半減角，γ は送受波器中心と魚体を結んだ直線と，魚体の正中線とがなす角度，θ, ϕ は魚体の位置の球座標，θ', ϕ' はそれぞれ魚体の pitch 角，yaw 角，ψ は $\phi - \phi'$ である。(2) 式において，送受波器の指向性の影響を考慮せず，魚の遊泳姿勢のみで考えた場合，$\theta \simeq 0$, $(\pi/2 - \gamma) = \theta'$ となり (2) 式は

$$\langle\sigma\rangle = \int_{-\frac{1}{2}\pi}^{\frac{1}{2}\pi} \sigma(\theta') \cdot f(\theta') d\theta' \tag{3}$$

となる。ここで，$f(\theta')$ すなわち魚の遊泳姿勢の分布は切断正規分布で近似するため，魚の自然遊泳状態におけるピッチ角の平均と標準偏差を把握する必要があるが，ヒメマスの遊泳姿勢に関するデータがないので，宮野鼻ら[6]の報告をもとに平均を−5°，標準偏差を 15° に設定した。この条件を用いて (3) 式によりターゲットストレングスの平均化を行い，得られた平均ターゲットストレングスを $\langle TS \rangle_{-5,15}$ で表した。

鰾内ガスの除去によるターゲットストレングスの変化

前述した方法により測定したヒメマスの鰾内ガス除去前後でのターゲットストレングスのピッチ角特性を図 3A, B に示す。両図はそれぞれ被鱗体長 185 mm, 188 mm, 体重 80 g, 100 g, (鰾の体

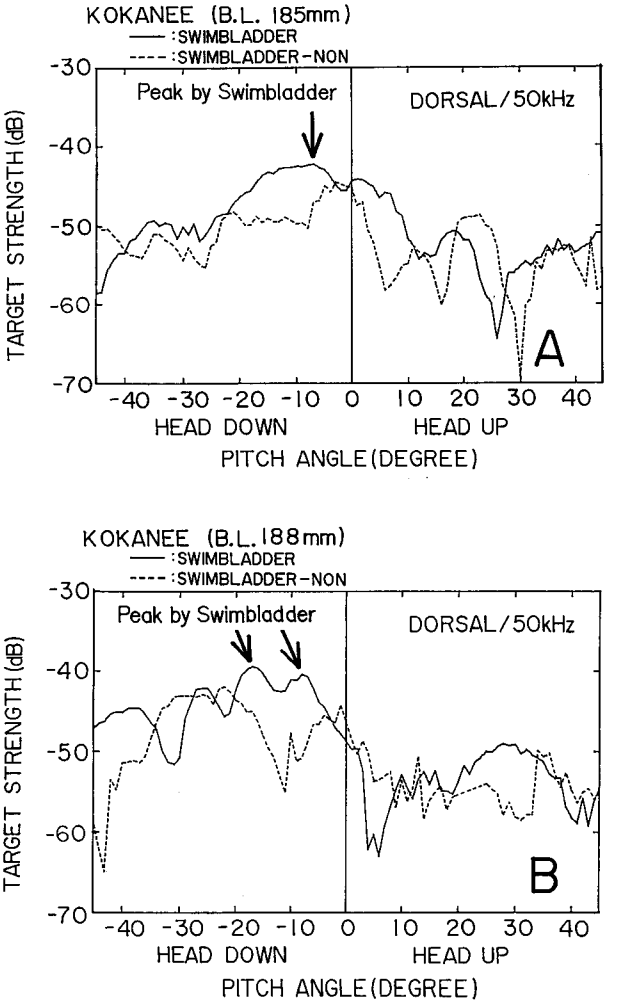


Fig. 3. Dorsal aspect target strength in relation to pitch angle of Kokanee (A : 185 mm, B : 188 mm) at 50 kHz.
(—— : with swimbladder, ····· : without swimbladder)

容積比 6.28%, 1.55%) のものである。横軸にピッチ角 (度) を，縦軸にターゲットストレングス (dB) をとり，鰾内ガス除去前を実線で，鰾内ガス除去後を破線で示した。

両図を比較すると，多少の逆転はあるが全体の傾向として鰾内ガス除去後のターゲットストレングスが，除去前より小さいことがわかる。特にガス除去前において，それぞれ−7° と−17° にみられた鰾によるピークが，ガス除去後では消失しているのがわかる。TS_{max} と $\langle TS\rangle_{-5,15}$ で鰾内ガス除去前後を比較してみると，A 図では TS_{max} が−42.3dB から−44.6dB に，$\langle TS\rangle_{-5,15}$ は−45.4 dB から−49.0 dB に減少している。B 図に関しても TS_{max} で−39.5 dB から−42.0 dB に，$\langle TS\rangle_{-5,15}$ では−44.4 dB から−47.4 dB へといずれもターゲットストレングスの減少がみられた。従って本実験では，鰾内ガス除去前後で，TS_{max} に関して 2〜3 dB, $\langle TS\rangle_{-5,15}$ に関して 3〜4 dB の差が生じたことになる。すなわち，魚体による音響散乱における鰾の寄与率は TS_{max} では 41〜44%, $\langle TS\rangle_{-5,15}$ では 50〜60% となる。

この実験結果から，ヒメマスのターゲットストレングスに及ぼす鰾の影響は確かに存在するが，その寄与する割合は 40〜60% 程度で Foote[2] が報告している (90% 以上) ほど大きいものではなかった。

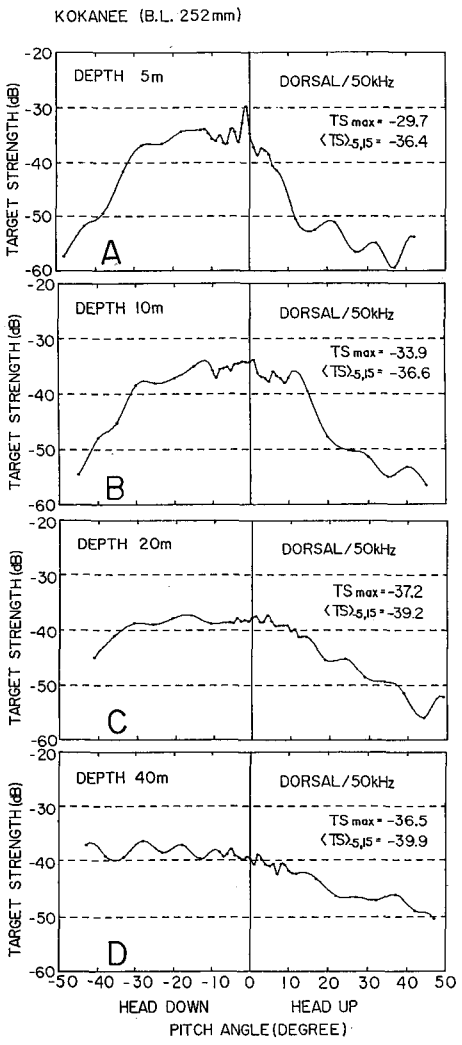
有鰾魚のターゲットストレングスの水深依存性

魚体の鰾の大きさは，水深の急激な変化により変わると考えられる。そこで，魚体の水深を 5 m (1.5 atm), 10 m (2 atm), 20 m (3 atm), 40 m (5 atm)) と順に増し，各水深で一連のターゲットストレングス測定を行い，その比較を行った。実験に使用したヒメマスは，全長 265〜315 mm, 体重 195〜400 g の 6 尾である (表 1)。表中において，鰾の容積は，実験終了後に測定したものである。これらの魚体について，各水深で測定したターゲットストレングスのピッチ角特性の一例を図 4A〜D に示す。横軸は魚体のピッチ角 (度), 縦軸はターゲットストレングス (dB) である。また，A〜D それぞれ順に測定水深 5, 10, 20, 40 m のものである。

この図から，水深が増すにつれて，必ずしも全ての角度でターゲットストレングスが小さくなっていくわけではないが，A 図においてピッチ角−1° の時に出現している鰾によると思われるターゲットストレングスのピークが，水深の増加と共に消失していくのがわかる。TS_{max} は水深 5 m から 40 m の順にそれぞれ−29.7, −33.9, −37.2, −36.5 dB であった。水深 40 m の TS_{max} (D 図) が 20 m の TS_{max} (C 図) より大きくなっているのは，水深が増すにつれ鰾によるピークが消失するためと推察される。ちなみに，$\langle TS\rangle_{-5,15}$ では，水深 5 m から 40 m の順にそれぞれ−36.4, −36.6,

Table 1. Sizes of Kokanee used for target strength measurement.

Fish No.	Length			Body Weight (g)	Swimbladder Volume	
	Total (mm)	Fork (mm)	Scaled (mm)		(ml)	(%)
1	288	266	252	280	9	3.2
2	309	286	275	260	40	15.4
3	265	248	236	195	15	7.7
4	315	294	284	400	23	5.8
5	296	275	265	275	20	7.3
6	272	252	242	240	3	1.3



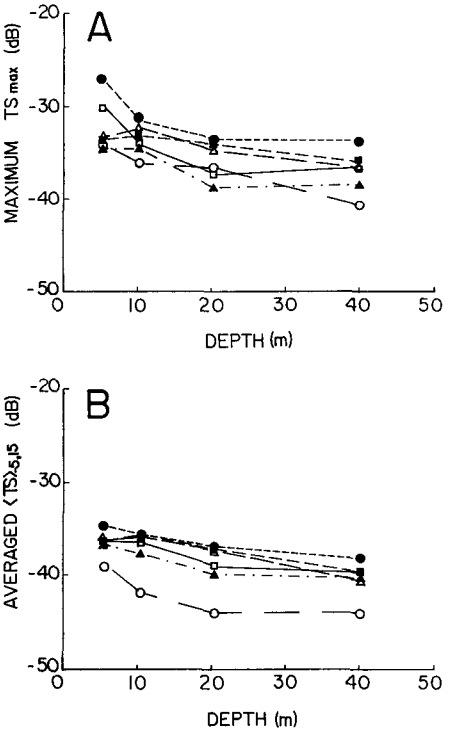


Fig. 5. Comparison of maximum target strength (A) and averaged target strength (B) functions of six Kokanees, arranged by depth, at 50 kHz.

Fig. 4. Depth dependence of the dorsal aspect target strength function of Kokanee (252 mm) at 50 kHz.

−39.2, −39.9 dB となり，水深の増加と共に $\langle TS \rangle_{-5,15}$ が単純減少していることがわかる。

測定した6個体に関して，水深に対する TS_{max} と $\langle TS \rangle_{-5,15}$ の変化を示したのが，図5A, B である。A 図は TS_{max}, B 図は $\langle TS \rangle_{-5,15}$ を表し，それぞれ横軸に水深 (m)，縦軸にターゲットストレングス (dB) をとった。両図から，全般的に水深が増すにつれターゲットストレングスが減少する傾向がうかがえる。そこで次に，水深変化に対するターゲットストレングスの減少率に注目し，理論モデルを用いて考察を行った。すなわち，急激な水深変化においては鰾の容積はボイルの法則に従うと考えられる。今，1気圧下での鰾の容積を V_0 とすると，p 気圧下での鰾の容積は (V_0/p) となる。音響散乱断面積は体積 V の(2/3)乗に比例するので，鰾のターゲットストレングス TS_{sb} は次式で表される。

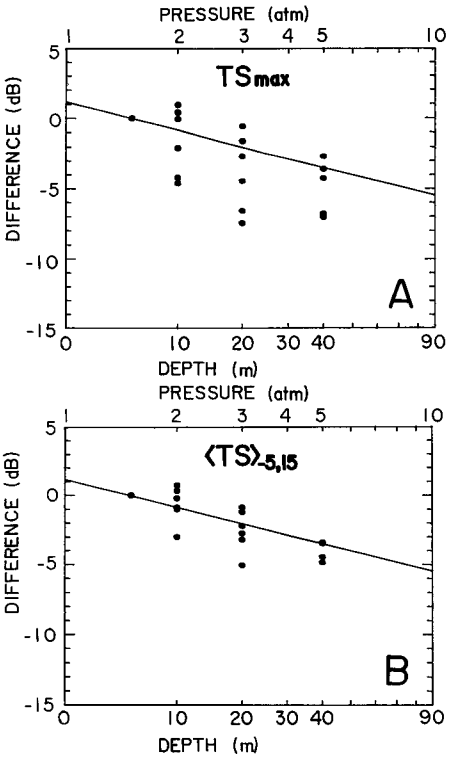


Fig. 6. Normalized maximum target strength (A) and averaged target strength (B) in relation to depth and pressure.

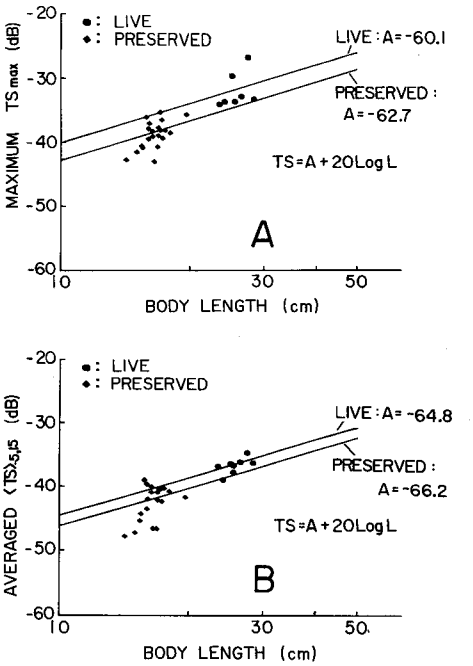


Fig. 7. Scatter diagrams of regression of maximum target strength (A) and averaged target strength (B) on length for live and preserved Kokanee at 50 kHz.

$$TS_{sb}=A_{sb}+\frac{20}{3}\log\left(\frac{V_0}{p}\right) \tag{4}$$

ここで，A_{sb} は，鰾の単位体積当りの1気圧下でのターゲットストレングスである。従って，p 気圧下でのターゲットストレングスは，1気圧下でのターゲットストレングスに比べ (20/3) log

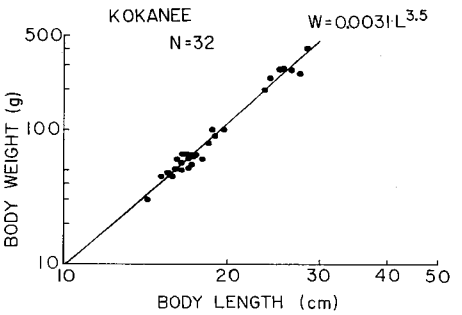


Fig. 8. Relationships between scaled body length and body weight of Kokanees which were used for target strength measurement.

p(dB) 減少することになる。この理論モデルを検証するために，図5のデータを用いて，各個体に関し水深5mのターゲットストレングスの値で正規化したのが図6A, Bである。A図は TS_{max} を，B図は $\langle TS\rangle_{-5,15}$ を示す。それぞれ横軸は水深 (m) 及び圧力 (atm)，縦軸は正規化したターゲットストレングス (dB) の値を示している。図中実線は，(4) 式で求めた理論予測値である。A図において各水深での TS_{max} は，10mで−4.6〜+0.9 dB (平均−1.1 dB), 20mで−7.5〜−0.6 dB (平均−3.2 dB), 40mで−7.1〜−2.7 dB (平均−4.9 dB) であった。また，B図の $\langle TS\rangle_{-5,15}$ では，10mで−3.0〜+0.7 dB (平均−0.5 dB), 20mで−5.1〜−0.9 dB (平均−2.4 dB), 40mで−4.9〜−3.4 dB (平均−3.8 dB) であった。理論予測値と実測値を比較すると，TS_{max} においては，各水深ともばらつきが大きくなっている。この理由としては，TS_{max} を鰾によるターゲットストレングスのピーク値以外にとっている可能性があるためと推察される。一方，$\langle TS\rangle_{-5,15}$ に関しては図6Bが示すように，多少のばらつきはあるが，理論値とよく似た傾向を示し，各水深の平均値では，非常によく一致した。従って，平均ターゲットストレングス，すなわち $\langle TS\rangle_{-5,15}$ ではボイルの法則に基づいた理論モデルの適用が妥当であると考えられた。

論　　議

本実験では，鰾のガスの除去によりターゲットストレングスが明らかに減少すること，さらに，水深の増加による鰾容積の減少に比例してターゲットストレングスも減少することが認められた。このことは，音響資源調査において調査船の接近による魚の逃避行動等がターゲットストレングスに影響することを意味し，実際のフィールドでのターゲットストレングス推定の難しさを示唆している。すなわち，このターゲットストレングスの変化が，資源量推定や体長推定における誤差要因となり得る。例えば，ターゲットストレングスの±3 dBの変動が，魚群量推定における (1/2) 倍あるいは2倍の，そして体長推定における $\sqrt{(1/2)}$ 倍あるいは $\sqrt{2}$ 倍の過小または過大評価となる。

ところで，魚体のターゲットストレングスを測定する場合，実験水槽で保存魚を用いて測定することがしばしばある。保存魚の場合，多くはその鰾のガスの喪失もしくは破壊が起こる。そこで，保存魚を用いて実験水槽でターゲットストレングス測定を行った結果と，本実験で得られた活魚のターゲットストレングスの比較を行った。測定した保存魚は，1986年に捕獲し凍結保存したヒメマス21尾で，活魚8尾の測定結果 (水深5m) と比較検討した (図7A, B)。A図は TS_{max} を，B図は $\langle TS\rangle_{-5,15}$ を示し，横軸を体長 (cm)，縦軸をターゲットストレングス (dB) で表した。図中◆は保存魚，●は活魚を示す。2本の実線は，それぞれ保存魚と活魚各々について体長の2乗で正規化したターゲットストレングスの回帰直線で，次式で表される。

$$TS = A + 20 \log L \tag{5}$$

ここで L は魚体長 (被鱗体長) (cm)，A は体長1cmあたりのターゲットストレングスを表す体長変換係数 (dB) であり，ターゲットストレングスと体長の関係を把握する上で有効である。この係数 A で保存魚と活魚のターゲットストレングスを比較すると，活魚の方が TS_{max} で2.6 dB, $\langle TS\rangle_{-5,15}$ で1.4 dB保存魚より大きい結果となった。ここで，保存魚と活魚とでは体長に差が認められるが，図8の体長と体重の相関図において，両者とも同一の回帰直線に当てはまることから，(5) 式に示されるモデルの使用に問題はないと考えられる。

このように，保存魚と活魚の比較においてもそのターゲットストレングスに有為な差を示したことは，魚体の音響散乱における鰾の影響を裏づけるものと考えられた。

要　　約

ターゲットストレングスにおよぼす鰾の影響を体長 185～284 mm, 体重 80～400 g のヒメマスを用いて様々な角度から検討し以下の知見を得た。

1) 鰾内ガスの除去によるターゲットストレングスの減少は，最大ターゲットストレングス (TS_{max}) で 2～3 dB, 平均ターゲットストレングス ($\langle TS \rangle_{-5,15}$) で 3～4 dB であった。従って，魚体の音響散乱における鰾の寄与率は，TS_{max} で 41～44%, $\langle TS \rangle_{-5,15}$ で 50～60% であった。

2) 水深の急激な増加により魚体のターゲットストレングスは減少し，水深 5 m での値で正規化すると TS_{max} では，水深 10 m で −1.1 dB, 20 m で −3.2 dB, 40 m で −4.9 dB であり，$\langle TS \rangle_{-5,15}$ では，それぞれ −0.5, −2.4, −3.8 dB であった。この減少の割合はボイルの法則に基づく理論モデル $TS_{sb}=A_{sb}+(20/3)\log(V_0/p)$ に良く近似した。

3) 保存魚と活魚によるターゲットストレングスの比較では，活魚のターゲットストレングスは保存魚より TS_{max} で 2.6 dB, $\langle TS \rangle_{-5,15}$ で 1.4 dB 大きかった。

文　　献

1) Ona, E. (1987). Physiological factors causing natural variations in target strength. *Int. Symp. Fish. Acoust., Pap.* No. **98**, 1-24.

2) Foote, K.G. (1980). Importance of swimbladder in acoustic scattering by fish : A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *J. Acoust. Soc. Am.* **67(6)**, 2084-2089.

3) 宮野鼻洋一・石井　憲・古澤昌彦 (1983). 魚体の背方向ターゲットストレングスの測定例. 水工研技報　漁船工学, 第 **4** 号, 95-105.

4) Love, R.H. (1977). Target strength of an individual fish at any aspect. *J. Acoust. Soc. Am.* **62(6)**, 1397-1403.

5) Foote, K.G. (1980). Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.* **67(2)**, 504-515.

6) 宮野鼻洋一・石井　憲・古澤昌彦 (1986). 魚体ターゲットストレングスの平均方法の検討. 水工研報告, **7**, 87-96.