

# キュウリエソ (*Maurolicus muelleri*) の 88kHz 帯計量 魚探機によるターゲットストレングスの測定

濱野 明\*・内田 和良\*

## Target Strength Measurement of Sternoptychid Fish, *Maurolicus muelleri*, Using 88kHz Quantitative Echo Sounder

Akira HAMANO\* and Kazuyoshi UCHIDA\*

### Abstract

The biomass of Sternoptychid Fish, *Maurolicus muelleri*, which is the only species among mesopelagic micronektonic organisms in the Japan Sea, is described to be in large abundance. In order to make it possible to apply the acoustic method to estimate its abundance quantitatively, the mean target strength and its size depending variation, which are the indispensable steps for the above mentioned purposes, were estimated experimentally by using the 88kHz quantitative echo sounder and by using ANDERSON and URICK's theory for dissected swimbladder.

The volume backscattering strength (SV value) at various densities of suspended fish ( $\rho$  individuals/m<sup>3</sup>) was measured.

It was revealed that the  $\rho$  to SV (dB) relationship could be expressed by the following highly significant liner equation.

$$SV = 8.99 \log \rho - 61.5 \quad (r=0.996, n=6) \quad (1)$$

This equation indicated that the mean target strength of this species was estimated to be -61.5 dB.

As the size composition of fish changes depending on the surveyed area and season, it is necessary to know the relationship between standard length ( $L$  in cm) and target strength for expanding the applicable range to results of the present experiment. Measuring the target strength of swimbladder cross sections, it was found out that target strength varied depending on standard length of fish, keeping the following significant linear equation.

$$TS(\text{dB}) = 17.4 \log L(\text{cm}) - 69.6 \quad (r=0.452, n=46) \quad (2)$$

This result revealed that target strength of this species was nearly proportional to the square of standard length, and suggested the possibility of making size corrections for the mean target strength by using size composition information from the detected school.

### 1. 緒 言

魚類マイクロネクトンを代表するキュウリエソ (*Maurolicus muelleri*) は、日本海をはじめ世界中の海に広く分布し、特に大陸棚縁辺部の中深層に集中的にみられる。日本海における本種の生物量は莫大なものと推定されており、唯一の魚類マイクロネクトンとしてその生態系の

中で、生物生産上重要な位置を占めている(沖山, 1971)。また、GJØSAETER (1978) は、未来の漁業資源として本種の重要性を述べ、ノルウェー産の同一種 (*M. muelleri*) の資源量をエコー積分器付きの魚探機によって推定した。しかし、本種の日本海における資源量評価についての知見は極めて乏しく主に卵稚仔の計量によって行われており、未だ精度・確度とも十分と考えられる方法は確立されていない(西村, 1959; 沖山, 1978; OKIYAMA, 1981)。

1992年5月6日受理

\*水産大学校 Shimonoseki University of Fisheries, Nagatahonmachi, Shimonoseki 759-65, Japan.

近年計量魚探機の普及とともにそれを用いて資源量を直接推定できるようになった。現在資源量推定に用いられる主な方法として、魚群からの反射エネルギーを積分する積分方式がある。この方式の計量魚探機から得られる情報は、魚群内の個体密度と個体の反射強度の積として出力される体積後方散乱強度（以下、SVという）である。従って、SVを魚群密度に変換し、資源量評価を行うためには、対象魚の個体の反射強度（ターゲットストレングス、以下TSという）を知らなければならない。そこで本報告では、キュウリエソの資源量評価に対する使用周波数としては極めて適切な周波数と考えられる88kHz帯（濱野, 1991）の計量魚探機を用いて、密度推定の重要なスケールファクターであるキュウリエソの平均TSを実験的に求めた。

一方、実際の音響調査において調査海域・時期が異なれば対象魚の平均体長が変化すると考えられる。従って、この実験によって求めたTSの適用範囲を拡張するためには、体長ともなうTSの変化量についても検討しなければならない。体重とTSの関係を明らかにするため

には、異なる体長の魚を用いてそれらのTSを直接計測する方法と理論的に求める方法がある。ここでは後者の一つとして、魚体より摘出した鰾の後方散乱断面積から各個体のTSを数値計算により求め、体長との関係について検討した。

## 2. 試料と計測方法

試料としたキュウリエソは1988年8月に水産大学校練習船耕洋丸（1,990.17トン）が、隠岐島周辺海域における音響調査の際に、DSLの原因となる生物を確認するために行った中層トロール（濱野ほか, 1992）により採集したものであり、その一部をTS測定のために5%のホルマリン水溶液で固定し、残りを鰾摘出の材料とするため-20℃で凍結した。

TSの測定は同年10月山口県宇部市小野湖（最大水深約25m）において行った。その実験装置をFig. 1に示す。この図に示すように2隻のFRPボート（長さ5.73m、幅1.90mおよび長さ4.99m、幅1.45m）を固縛し、送受波器を水面下約1mに超音波を鉛直方向に送受信できるように設置した。また、所定の尾数のキュウリエソを送受波器に背を向け、魚体を傷つけないようにテグスを頭部および尾部に通し送受波器直下に懸垂しターゲットとした。ターゲットと送受波器の距離は7.175mとし、枠体の上部と下部をターゲットから2パルス幅分（90cm）離して、送波ビームの主軸がターゲットの中心に一致するように設置した。ターゲットの尾数を、90尾から順次9尾ずつ減少させながら、各尾数における反射エコーを約5分間（約1,000ピング）ずつデータレコーダ（TEAC R-61）に収録した。しかし、風波の影響による反射エコーの変動（あばれ）などのため反射強度の測定に用いることができた音響データは各設定尾数について約1分間（約200ピング）であった。計量魚探機は、古野電気製FQ-60（周波数88kHz、出力1kW）で、計測システムのブロックダイヤグラムおよび、実験時の計量魚探機の設定をFig. 2に示す。ターゲットからの反射強度の測定は、後日実験室においてそのピーク電圧値をストレージ機能を有するオシロスコープを通して目視で行った。なお、魚探機システムの較正はJOHANNESSON and MITSON（1985）の方式による水中標準マイクロフォンを用いて行った。

一方、体長とTSとの関係を調べるために行った鰾の計測は、凍結保存されていた試料より解凍後無作為に46尾抽出し、それらの体長および体重を計測し、その後鰾を摘出しその長径と短径をノギスを用いて計測した。鰾

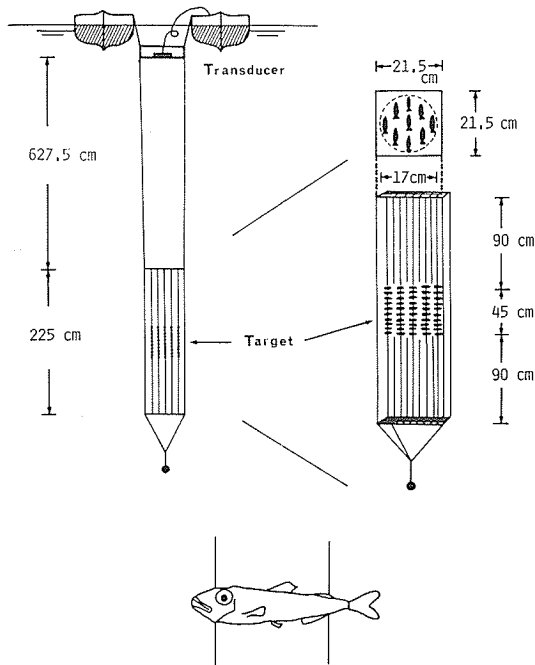


Fig. 1. Configuration of experimental target strength measurement.

キュウリエソ (*Maurolicus muelleri*) の88kHz帯計量魚探機によるターゲットストレングスの測定

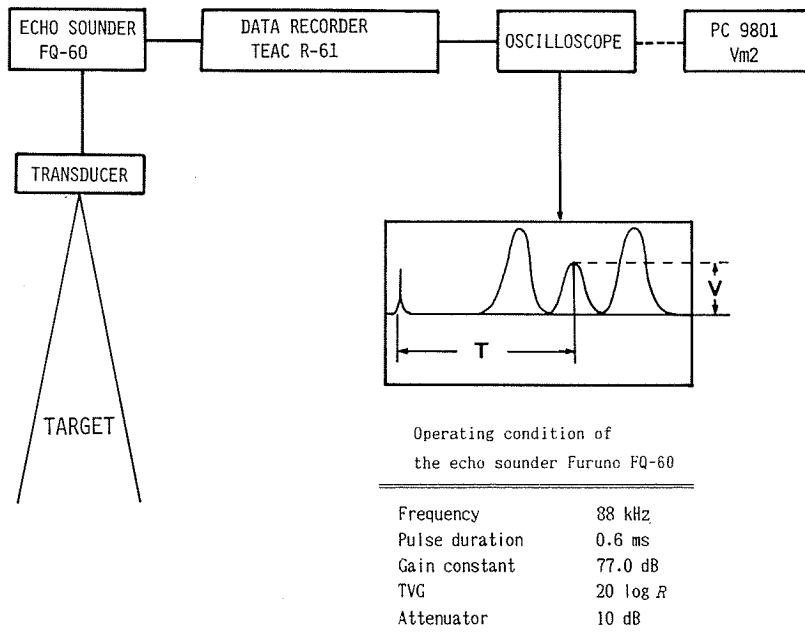


Fig. 2. Block diagram of data acquisition and processing system.

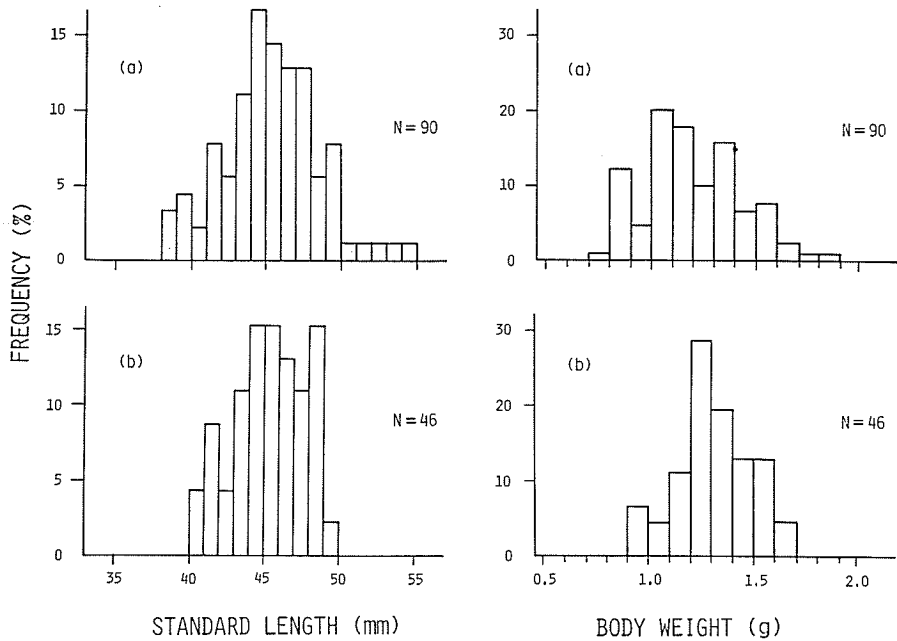


Fig. 3. Frequency distributions of standard length and body weight of material fish (*Maurolicus muelleri*) used in target strength measurement (a) and swimbladder measurement (b).

の皮の厚みは極めて薄いので、計測値に対する表皮の補正は行わなかった。懸垂法によるTS測定および鰾計測に用いたキュウリエソの体長・体重組成を、それぞれFig. 3 (a), (b)に示す。

### 3. 解析方法

#### 3-1. 指向性定数の検討

本研究の計測ではターゲットをビーム主軸を中心とした一定の狭い範囲に設置したために、送受波器からターゲット魚群に対する立体角 $\Omega'$ の円錐内からの反射強度を測定することとなるので、その指向性定数 $\Psi(\Omega')$ を求める必要がある (Fig. 4)。

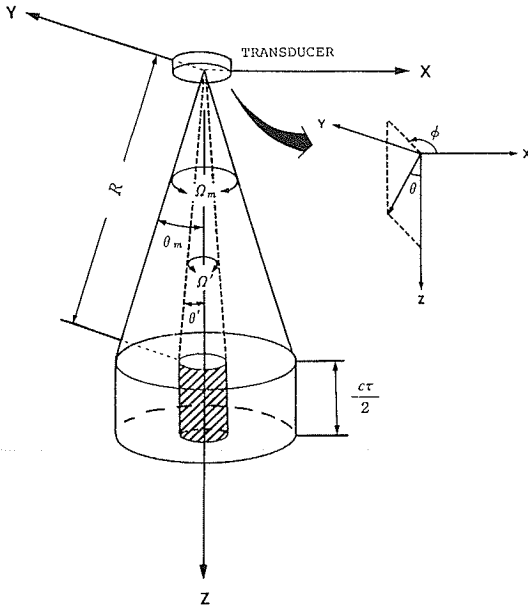


Fig. 4. Diagram of measuring the equivalent beam angle.

- $R$  : distance from sound source
- $\Omega_m, \theta_m$  : solid angle and plane angle to the equivalent beam angle
- $\Omega', \theta'$  : solid angle and plane angle to targets
- $c$  : sound velocity
- $\tau$  : pulse width
- ▨ : targets
- $\theta, \phi$  : direction of the beam angle in three dimensional expression,

円形等方性送受波器の指向性定数 $\Psi$ は、

$$\Psi(\theta_m) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_m} b^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

で示される (李, 1985)。

但し、 $b(\theta, \phi)$ は指向性関数、 $\theta_m$ は等価ビーム幅 $\Omega_m$ に対するZ軸からの平面角度 (以下、平面角という) である。

$\phi$ 平面内 (X-Y軸平面) では無指向性としてよいため式 (1) は、

$$\Psi(\theta_m) = 2\pi \int_0^{\theta_m} b^2(\theta) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

と表される。

ここで、ターゲットを配置した $\Omega'$ に対する平面角 $\theta'$ は小さいので、 $0 \leq \theta \leq \theta'$ の範囲で $b(\theta) \approx 1.0$ とみなせる。従って、式 (2) に $b(\theta) = 1.0$ を代入し、立体角 $\Omega'$ における指向性定数を求めると、

$$\Psi(\theta') = 2\pi(1 - \cos \theta') \quad (3)$$

と表すことができる (BURCZYNSKI, 1982)。

そこで、送受波器からのターゲットに対する平面角 $\theta'$  ( $\theta' = 1.185 \times 10^{-2}$  rad) より式 (3) を用い、指向性定数 $\Psi(\Omega') = 4.41 \times 10^{-4}$ を得た。

#### 3-2. 懸垂法によるTS測定

データレコーダに取り込まれる音響信号は魚探機のTVG特性のアナログ補正をうけて磁気テープに収録される。従って、この補正が理論値と一致していることを

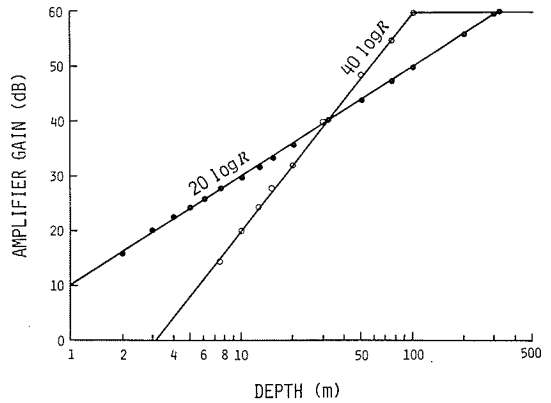


Fig. 5. Characteristics of TVG function.

- ・○ : measured.
- : theoretical.

あらかじめ確認しておく必要がある。そこで実験に使用した機器のTVG特性を調べた (Fig. 5)。この結果20 log Rにおける収録については3m以深、40 log Rの収録については7.5m以深でTVG補正が有効に機能していることが分かった (但し、Rは距離)。従って、本実験で使用した20 log RのTVG特性は水深7.175mのターゲットに対して十分正確に補正がなされたものと考えられた。

今回の解析では、各設定尾数毎に約5分間ずつ収録した音響データの中で、計測状態が連続的に安定している約1分間 (約200ピング) のデータを解析に用いた。その中で異常値を除いた高い方より30ピング分を、理想計測状態 (音軸直下にターゲットが存在する状態) における各設定尾数Nに対する平均電圧値Vとして求めた。この平均電圧値Vをソナー方程式の式 (4) に代入しSVを求めた。但し、ターゲットと枠・テグスを含んだ場合、および枠・テグスのみの場合の体積散乱強度をそれぞれSVn (dB), SVo (dB) とする。

$$SVn = 20 \log V - R1 + ATT - 10 \log \Psi - 10 \log (c \tau / 2) + 2\alpha R \quad (4)$$

SVn: ターゲットと雑音 (枠・テグス等) を含めた単位体積当りの体積散乱強度 (dB)

R1: SL (ソースレベル) + ME (受波感度) + EG (増幅器ゲイン) (dB)

V: 計測電圧値 (dB); (0 dB = 1V)

$\Psi$ : 指向性定数 (steradian)

c: 音速 (m/s)

$\tau$ : パルス幅 (sec)

$\alpha$ : 吸収減衰係数 (dB/m)

R: 送受波器からターゲットまでの距離 (m)

ATT: アテネータ (dB)

これら得られた値を式 (5) に代入し、雑音を除いた各尾数におけるSVを求めた。

$$SV = 10 \log (10^{\frac{SVn}{10}} - 10^{\frac{SVo}{10}}) \quad (5)$$

ここで、SVと魚群密度 $\rho$  (尾/m<sup>3</sup>)との関係を式 (6) の1次回帰式として求めた。

$$SV = a_1 \log \rho + a_0 \quad (6)$$

$a_1$ : 回帰係数

$a_0$ : 1尾当りのTSに相当

なお、魚群密度 $\rho$  (尾/m<sup>3</sup>)は式 (7) により求めた。

$$\rho = \frac{N}{(c \tau / 2) R^2 \Psi} \quad (7)$$

また、音速はLEROY (1969) の式により求め、吸収減衰量は送受波器とターゲットの距離が吸収減衰量にほとんど影響しないとみなせるため無視することとした。

### 3-3. 鯉の後方散乱断面積の数値計算

散乱体の形状が共振周波数の変動に与える影響について、STRASBERG (1953) は球気泡とそれと等体積の扁長回転楕円体の気泡の長径と短径の比が3:1の場合、5%、2:1の場合2%と極めて小さいことを報告した。このことから、長径と短径の比がこの範囲内にある扁長回転楕円体については、同体積の球とみなし等価半径 $a$ が求められる。後に記すように、摘出したキュウリエソの鯉の長径と短径の比率はこの範囲にあるので、扁長回転楕円体に関する式 (8) を用いて鯉の体積を求め (BROOKS, 1977)、さらに式 (9) から等価半径 $a$ を算出した。

$$V_o = 4/3 \pi (\phi_L/2) (\phi_s/2)^2 \quad (8)$$

ここで $V_o$ : 鯉の体積

$\phi_L$ : 鯉の長径

$\phi_s$ : 鯉の短径

$$a = (\phi_L \phi_s^2)^{1/3} / 2 \quad (9)$$

ここで、小さな気泡の後方散乱断面積 $\sigma$ を求めるには、共振の影響により変化する音響的断面積と幾何学的断面積の比について検討しておく必要がある。その際問題となるのが無次元周波数 $ka$  ( $=2\pi a/\lambda$ ) の値である。

WESTON (1967) および ANDREEVA (1964) のモデル式では、無次元周波数 $ka$ が大きい場合、音響的断面積は幾何学的断面積の4倍 ( $\sigma/\pi a^2=4$ ) となるが、高周波帯域においては両者が等しく ( $\sigma/\pi a^2=1$ ) なることをJOHNSON (1977a; 1977b) は示唆している。

一方、ANDERSON (1950) は、 $ka=0.4$ 以上で $\sigma/\pi a^2=1$ 、すなわち音響的断面積と幾何学的断面積が等しくなることを示している。今回の計測周波数は、88kHzであるので無次元周波数 $ka$ は0.64から1.15となり、今回の計測で得られた $ka$ は0.4を上回っていることとなる。従って、本研究では、ANDERSON (1950) のモデルに基づき $\sigma/\pi a^2=1$ として後方散乱断面積 $\sigma$ を求めた。

一方、TSは後方散乱断面積を用いて、次のように表すことができる (URICK, 1979)。

そこで、式(9)で求めた等価半径 $a$ から鰐1個ずつの幾何学的断面積を求め、これを式(10)に代入しTS推定値を求めた。

#### 4. 結 果

##### 4-1 懸垂法によるTS測定

懸垂法で行ったキュウリエソ魚群の反射強度の電圧変化のオシロスコープ像をFig. 6に例示する。(I)は魚群

と枠を含んだものであり、(II)は枠・テグスの状態を示したものである。aは発振線、bは上部の枠、cは対象魚群、dは下部の枠、eは湖底をそれぞれ示している。

各測定尾数におけるピーク電圧値の平均を式(4)、(5)に代入してSVを求めた。得られた結果をTable 1に示す。今回の測定結果ではターゲット尾数が最小の9尾の場合の $(SV_n - SV_o)$ が9.4dBである他は、すべて10dB以上であることから、S/N比は良好であり、これらの

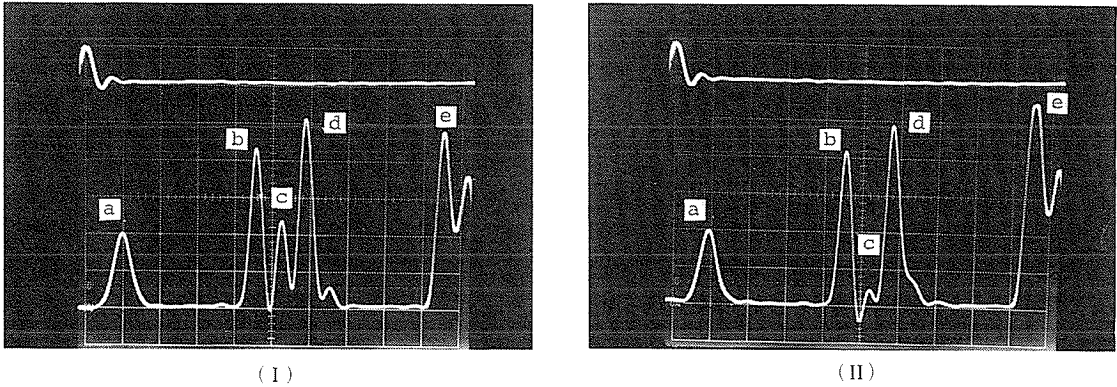


Fig. 6. Examples of oscillogram in target strength measurement with (I) and without target fish (II).

a : oscillation line, b : upper frame, c : target, d : lower frame, e : lake bottom.

Table 1. Volume backscattering strength measured.

Number of Target fish	Density (Ind./m <sup>3</sup> )	SV <sub>n</sub> <sup>*1</sup> (dB)	SV <sub>o</sub> <sup>*2</sup> (dB)	SV <sup>*3</sup> (dB)
0	—	—	-43.9	—
9	895	-34.3	—	-34.9
18	1789	-31.8	—	-32.1
36	3579	-29.5	—	-29.6
54	5368	-28.3	—	-28.4
72	7158	-26.7	—	-26.8
90	8947	-25.6	—	-25.6

\*1, \*2 : Volume backscattering strength with and without target fish, respectively.

\*3 :  $SV = 10 \log(10^{\frac{SV_n}{10}} - 10^{\frac{SV_o}{10}})$ .

測定値は信頼性が高いと考えられる。そこで本測定で得られたデータをすべて用い、単位体積当りの密度  $\rho$  (尾/ $m^3$ ) に変換したキュウリエソ密度とSVとの関係をFig. 7に示す。図中の黒丸は各密度におけるSVの実測値であり、実線はSVの実測値の密度に対する回帰直線 (式11) を表し、破線は回帰係数10として求めた体積残響理論による回帰直線 ( $SV=10 \log \rho - 65.0$ ) を示している。この図に示すようにSVの実測値は分布密度が増加するに従って直線的に増加する傾向を示しており、この直線

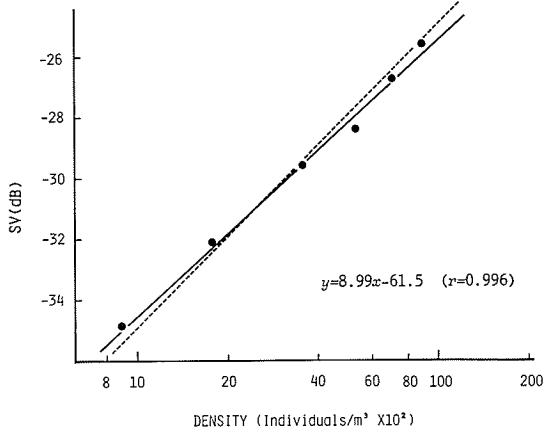


Fig. 7. Regression of volume backscattering strength(SV)on density with the estimated relation (——) and the theoretical one (-----).

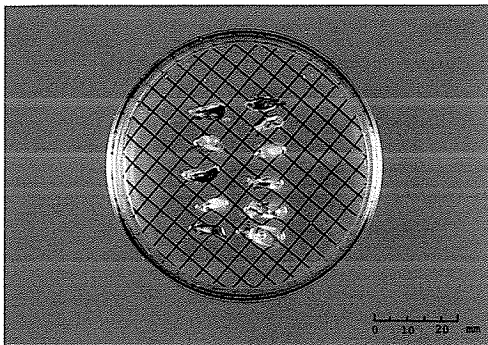


Fig. 8. Dissected swimbladder from the material fish.

回帰関係は1%の有意水準で有意となった。

$$SV = 8.99 \log \rho - 61.5 \quad (11)$$

( $r=0.996, n=6$ )

すなわち、式 (6) における  $a_1$  と  $a_0$  は、それぞれ8.99 と -61.5であると推定された。

#### 4-2. 鰾の後方散乱断面積の数値計算

摘出された鰾をFig. 8に示す。摘出された鰾を水中に浮かせその長径と短径を計測した。この結果、ここで用いたキュウリエソの鰾の長径は5.3-7.5mm (平均6.52 mm) で、短径は2.8-5.8mm (平均4.33mm) であった。Fig. 9に摘出された鰾の長径と短径の関係を示す。扁長回転楕円体を球とみなして以後の理論計算を進めることができるのは、長径と短径の比が3:1以下である (STRASBERG, 1953)。Fig. 9で示すように、今回計測された鰾の長径と短径の比はすべてこの範囲内にあるので、鰾は音響的には球とみなして差支えない。そこで、計測された長径と短径を式 (9) に代入し等価半径を求めた。ここで得られた等価半径の最小値と最大値はそれぞれ1.73mmと3.12mmで、平均値は2.48mmであった。

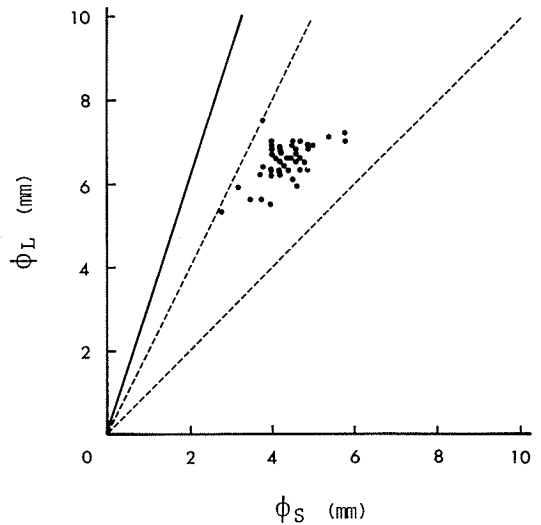


Fig. 9. Long diameter-short one relation of the swimbladder, to examine validity of applying to the strasberg's criterion.

Note: The points under the solid line (3:1 relation) could be regarded as sphere. The dash lines (2:1 and 1:1 relation) were added for reference.

また、体長(Lcm)と等価半径aとの関係を表す回帰式は1%水準で有意となった(式12)。

$$a = 0.482L + 0.298 \quad (12)$$

(r=0.46, n=46)

ここで各個体について得られた等価半径を式(10)に代入しTS推定値を求めた。この結果得られたTS推定値は-56.2から-61.3dBで、その変動幅は5.1dBで、平均値は-58.14dBとなった。得られたTS推定値(dB)と体長L(cm)の関係を図10に示す。数値計算により求めたTS推定値と体長(L)の対数値との関係を表す回帰式は1%水準で有意となった(式13)。この図における実線はTS推定値の体長に対する標本回帰直線(式13)を示しており、破線は体長(cm)の2乗で規準化した1cm当たりのTSすなわちTScmの理論回帰直線(式15)を示している。

$$TS = 17.4 \log L - 69.6 \quad (13)$$

(r=0.452, n=46)

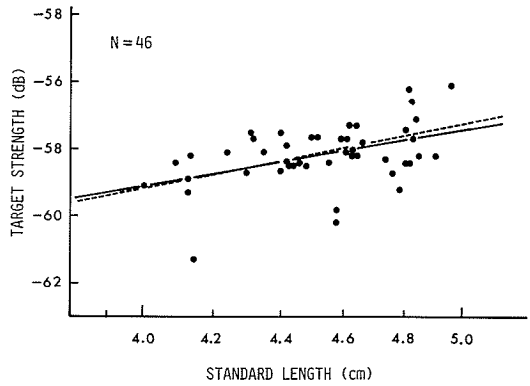


Fig. 10. Standard length-target strength relation, to examine the possibility of extending to the FURUSAWA's proposal (TS = 20 logL + C; ----) to small fish, with estimated regression line (——).

Note : TS----target strength ;  
L----standard length ;  
C----coefficient.

Table 2. Statical examination of possibility to apply the URICK's theory and the FURUSAWA's proposal.

(a) URICK's volume backscattering theory

Present result			(Present result) - (Theoretical equation)			
$a_0$	$a_1$	$F$	Equation	Constant	Regression coefficient	Degree of freedom
$a_0$	$a_1$	$F$	$F$	$t$	$t$	$df$
-61.5	8.99	667.28**	4.265	-0.385	-2.89*	4

Present result :  $y = a_1 \log x + a_0$ ,  $x$  : Density of target fish (ind./m<sup>3</sup>).

Theoretical equation :  $y = 10 \log x - 65.0$ ,  $y$  : Volume backscattering strength(dB).

(b) FURUSAWA's proposal

Present result			(Present result) - (Theoretical equation)			
$a_0$	$a_1$	$F$	Equation	Constant	Regression coefficient	Degree of freedom
$a_0$	$a_1$	$F$	$F$	$t$	$t$	$df$
-69.6	17.4	11.859**	0.225	-0.525	-0.418	44

Present result :  $y = a_1 \log x + a_0$ ,  $x$  : Standard length (cm).

Theoretical equation :  $y = 20 \log x - 71.2$ ,  $y$  : Target strength (dB).



#### 4-3. SV-TS関係及びTS-L関係に関する既報理論との比較

積分方式の基礎となる体積残響理論によると、サンプリング体積中における散乱体（ここでは対象魚）の分布が一様ランダムであり、しかも多重散乱の影響が無視できる場合、音響強度SVと魚群密度 $\rho$ との間には

$$SV = 10 \log \rho + TS \quad (14)$$

で表される理論式が成立する (URICK, 1979)。

また、体長とTSとの関係については、TSの値が体長Lのほぼ2乗に比例することから一般に次式で表される (古澤, 1989; 1990)。

$$TS = 20 \log L + TS_{cm} \quad (15)$$

ここで、 $TS_{cm}$ はcm単位で表した体長Lにおける規準化TSである。

本報で得られた結果について、これらの理論または式が適用できるかどうかを調べるため、懸垂実験により得られた標本1次回帰式 (式11) と、数値計算により求められたTS推定値と体長との標本1次回帰式 (式13) を、それぞれの理論回帰式 (式14と式15) と比較検定を行った (北川・増山, 1976)。この検定結果をTable 2 (a), (b) に示す。この結果、懸垂実験により得られた回帰係数と体積残響理論の回帰係数との差は、5%の水準で有意となり、式 (11) の回帰係数は式 (14) のそれと等しくないという検定結果になった。しかし、回帰係数と常数項を併せて扱った両式の比較ではこれらの式の差は有意でないと示された。

また、式 (13) と式 (15) の比較検定では、数値計算により求めたTS推定値の体長に対する回帰係数17.4と理論式の回帰係数20との差は、5%の水準で有意とはみとめられず、キュウリエソにおけるこの関係は古澤の式 (式15) とほぼ一致していることが分かった。

#### 5. 考察と論議

キュウリエソは音響計測の対象としては極めて小型であり、しかも中深層に棲むため、生きたままの状態での測定を行うことが非常に困難である。このため、本種のような中深層性魚類マイクロネクトンのTSに関する研究はほとんどなされておらず、わずかに宮野鼻ほか (1985) がハダカイワシ (*Diaphus* sp.) の解凍試料を小さなネットケージに入れて測定した報告がみられるだけである。この方法は実用的ではあるが、対象魚とノイズであるネットケージからのエコーレベルの比 (S/N比) が十

分でなく、この点で問題が残った。そこで本研究では対象魚以外からのノイズを出来る限り小さくするため、極めて細いナイロンモノフィラメント糸 (テグス4号) を用いて対象魚を送受波器直下に吊り下げて行う懸垂法によりキュウリエソのTSを求めた。しかし、このような方法によるTS測定では、凍結もしくはホルマリンによって固定した試料を使わざるを得ない。李ほか (1987) および向井ほか (1988) はヒメマスを用いそれぞれケージ実験、懸垂法で解凍魚と活魚についてTSの比較を行った。いずれも保存魚のTSの方が活魚に比べ小さく、その差は約2.8dBおよび1.4dB (平均TS) であることを報告した。しかし、凍結、解凍といった一連の魚体組織の変化のなかで音響散乱特性に及ぼす影響の機構は未だ十分に明らかにされていない。キュウリエソのような小さな魚のTS測定に凍結標本を使用すると解凍後、形が崩れて実験に用いることができない。従って今回の計測にはホルマリン固定の試料を用いた。このように、固定法や体長の違いなどからこれらの値をそのまま適用することはできない。

また、懸垂法で魚を密集させて測定する場合には、供試個体の並べ方によって、送受波器に返ってくる音響エネルギーが、各個体からの反射エネルギーの和とならない可能性がある。今回の実験で得られたSV値と密度の回帰直線式の回帰係数は8.99であり理論予測値の10に比べるとわずかに小さい。この理由として、密度の増加につれて回帰係数の傾きが鈍化していることから、本実験のターゲットの配置構造によるShadow effectにともなう音波減衰の影響が大きな原因の一つと考えられた。また、多くの対象物による相互干渉効果等 (李ほか, 1987) も考えられ、適正配置、適正密度の問題については今後検討する必要がある。

一方、標本1次回帰式 (式11) と、体積残響理論による理論回帰式 (式14) との比較検定では、得られた回帰係数と体積残響理論の回帰係数との差は、5%の水準で有意であるとみなされた。従って、本研究においてはキュウリエソの平均TSは理論式の定数-65.0dBでなく、実験式で求められた定数項-61.5dBを用いた。

次に魚体より摘出した鰾の後方散乱断面積から求めた各個体のTS推定値と体長との関係について検討する。

この際のTS推定値は、魚体から摘出した鰾の後方散乱断面積を求めることにより推定された。しかし、ここで摘出された鰾は魚体の体内にある時よりは幾分か大きくなっていることが考えられる。従って、数値計算により求められるTS推定値の絶対値そのものの評価について

は若干問題が残ることとなる。しかし、相対的なTSの値としては、極めて有益な情報と考えられるので、その結果について検討した。鰾の等価半径の体長に対する関係について1%の水準で有意となる1次式(式12)が得られた。また、数値計算により求められたTS推定値と体長との関係は式(13)で明らかのように1%の水準で有意となる1次式であり、しかも回帰係数が体長の2乗で規準化したTSの理論回帰直線にはほぼ一致した。このことからキュウリエソの鰾の大きさは魚体長に比例し、TSと鰾体積にも線型な関係があると考えることができた。このことは対象魚の平均体長が調査海域・時期の違いにより変化する場合にも、体長情報からそれぞれの場合におけるTSを推定できる可能性を示唆するものと考えることができた。

GREENLAW (1977) は数cm程度の反射体も反射指向特性を有しているとしている。従って、FOOTE (1980) が報告したように遊泳姿勢によってTS値を平均化することが望ましい。しかし、実際にキュウリエソのようなマイクロネクトンについて姿勢を制御し、TS測定するのは非常に困難である。キュウリエソの最も普通の遊泳姿勢は背を上にした水平であると考えられるので、今回は懸垂法でしかも小生物を対象としているためすべて背方向での計測とした。このため遊泳姿勢に対する平均化の考慮は行っていない。この点については今後テレビ・カメラ等を用いた*in situ*測定を実施する等の方策を検討する必要がある。

## 6. 要 約

日本海における唯一の魚類マイクロネクトンであるキュウリエソの資源量を音響計測手法を用いて推定するため、その前段階としてキュウリエソのターゲットストレンジスを88kHz帯計量魚探機を用いて実験的に求めた。また、魚体より抽出した鰾の後方散乱断面積から各個体のTS推定値を数値計算により求め、体長との関係を検討した。得られた結果は次のように要約される。

(1) 体積散乱強度SVと単位体積当りの魚群分布密度 $\rho$ との関係として次式が得られた。

$$SV = 8.99 \log \rho - 61.5 \quad (r=0.996, n=6)$$

得られた回帰係数8.99と体積残響理論の回帰係数10との比較検定では極めてわずかな差であるが5%の水準で有意とみなされ、両者に違いがあることが示された。従って、本研究においては実験式より得られた結果から定数項 $-61.5$ dBをキュウリエソの1尾当りの平均TSと推定した。

(2) 抽出した鰾の等価半径 $a$ と体長 $L$ の間には1%水準で有意な次式が得られた。

$$a = 0.482 L + 0.298 \quad (r=0.46, n=46)$$

また、鰾から数値計算により求めたTS推定値と体長との関係として1%水準で有意な次式が得られた。

$$TS = 17.4 \log L - 69.6 \quad (r=0.452, n=46)$$

ここで得られた回帰係数17.4は体長の2乗で規準化したTSの理論回帰式の回帰係数20とほぼ一致した。このことからキュウリエソの鰾の大きさは体長に比例すると考えられ、TSと鰾体積にも線形な関係があると考えられた。このことは体長情報からTSを推定できる可能性を示唆するものと考えることができた。

## 7. 謝 辞

本報告をまとめるにあたり貴重な御教示を賜った東京大学海洋研究所教授石井丈夫博士、同所助教青木一郎博士、並びに稲垣 正技官に深く感謝の意を表する。

また、本報告を御校閲いただいた水産大学校教授前田弘博士及び小野湖での実験に協力していただいた同校助手池田 至博士、志賀通之技官並びに水産大学校漁業機器学講座卒論生諸君に心からお礼申し上げる。

## 文 献

- ANDERSON, V. C. (1950) Sound scattering from a fluid sphere. *J. Acoust. Soc. Am.*, **22**, 426-431.
- ANDREEVA, I. B. (1964) Scattering of sound by air bladders of fish in deep sound-scattering ocean layers. *Sov. phys. Acoust.*, **10**, 17-20.
- BROOKS, A. L. (1977) Oceanic sound scattering prediction. Edited by N. R. ANDERSON and B. J. ZAHURANEC. Plenum Press, New York, 565-590.
- BRUCZYNSKI, J. (1982) Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **191** Rev.1, 1-89.
- FOOTE, K. G. (1980) Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 504-515.
- 古澤昌彦 (1989) 気泡と音波(鰾と魚による超音波散乱). *海音誌*, **16**, 181-197.
- 古澤昌彦 (1990) 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. *水工研報告*, **11**, 173-249.
- GJØSAETER, J. (1978) Resource study of mesopelagic fish. Ph. D. Thesis, University of Bergen, Bergen, 203 pp.
- GREENLAW, C. F. (1977) Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc.*

- Am., 62, 44-52.
- 濱野 明 (1991) 魚類マイクロネクトンの資源量評価のための音響的調査手法に関する研究. 東京大学博士学位論文, 163 pp.
- 濱野 明・内田和良・武田靖昭 (1992) 音響的調査手法による日本海産キュウリエソの資源量評価のための魚種判別法について. 水産海洋研究, 56, 295-308.
- JOHANNESSEN, K. A. and R. B. MITSON (1985) 水産音響学 (柴田恵司・見元孝一訳). 海洋水産資源開発センター, 149-171.
- JOHNSON, R. K. (1977a) Sound scattering from a fluid sphere revisited. J. Acoust. Soc. Am., 61, 375-377.
- JOHNSON, R. K. (1977b) Acoustic estimation of scattering layer composition. J. Acoust. Soc. Am., 61, 1636-1639.
- 北川敏男・増山元三郎編 (1976) 統計数値表. 九州大学理学部数学教室内統計科学研究会, 生産技術センター, 104-125.
- 李 国添 (1985) 音響システムによる海洋生物のクイックアセスメント技法に関する基礎的研究. 東京大学博士学位論文, 262 pp.
- 李 昊在・鈴木恒由・飯田浩二 (1987) ケージ内魚群密度と超音波散乱強度との関係について. 北大水産彙報, 38, 253-258.
- LEROY, R. H. (1969) Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in sea water. J. Acoust. Soc. Am., 46, 216-226.
- 宮野鼻洋一・石井 憲・古澤昌彦・津久井文夫 (1985) 小ケージを用いたサクラエビ, ハダカイワシのターゲットストレングスの測定. 水工研技報(漁船工学), 6, 111-122.
- 向井 徹・鈴木恒由・佐野典達・飯田浩二 (1988) ヒメマスのターゲットストレンジにおよぼす鰻の影響について. 北大水産彙報, 39, 106-114.
- 西村三郎 (1959) 1955年春季能登半島近海におけるキュウリエソの産卵ならびに卵・仔魚の生態. 日水研年報, 5, 61-75.
- 冲山宗雄 (1971) 日本海におけるキュウリエソの初期生活史. 日水研研報, 23, 21-53.
- 冲山宗雄 (1978) 日本海における中・深層性魚類マイクロネクトン・いか類マイクロネクトンの生物学. 海洋科学, 109, 895-900.
- OKIYAMA, M. (1981) Abundance and distribution of eggs and larvae of a sternoptychid fish, *Maurolicus muelleri*, in the Japan Sea, with comments on the strategy for successful larval life. Rapp. p.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer, 178, 246-247.
- STRASBERG, M. (1953) The pulsation frequency of non spherical gas bubbles in liquids. J. Acoust. Soc. Am., 25, 536-537.
- URICK, R. J. (1979) 水中音響の原理 (土屋 明訳). 共立出版, 東京, 414 pp.
- WESTON, D. E. (1967) Sound propagation in the presence of bladder fish. In Underwater Acoustics 2, ed. V. E. ALBERS. Plenum Press, New York, 55-88.