論文

カタクチイワシ (*Engraulis japonicus*) の鰾形状および ターゲットストレングスと体長の関係

甘糟 和男 (東京海洋大学) *1

貞安 一廣 ((独) 水産総合研究センター開発調査センター) *2

安部 幸樹, 高尾 芳三, 澤田 浩一, 石井 憲

((独) 水産総合研究センター水産工学研究所) *3

amakasu@kaiyodai.ac.jp

(2009年7月7日原稿受付)

Abstract :

In order to improve the accuracy of abundance estimation of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) by acoustic surveys using a quantitative echosounder, the shape of the swimbladder and the relationship between the target strength (TS) and the body length L_b were investigated. Specimens were soaked in formalin solution just before the experiments to prevent the gas in the swimbladder from leaking out through the anus. The body length ranged from 5.6 to 11.2 cm (44 specimens). The body length was measured from the anterior margin of the snout to the posterior margin of the scales. The swimbladder lengths of the Japanese anchovy obtained from the soft X-ray images were 1.4 to 1.9 times longer than those of walleye pollock given the same body length. The TS patterns according to the orientation angle of the body at 38 kHz were measured in a freshwater tank after the soft X-ray imaging and were in good agreement with the model predictions. The $TS-L_b$ relationship, $TS = 20 \log_{10} L_b - 64.0$, was obtained by averaging the TS patterns over the orientation distribution (mean = 0° and s.d. = 10°). Also the depth-dependent TS according to Boyle's law was $TS = 20 \log_{10} L_b - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 63.4$, where z represents the depth.

分 類：水産音響・バイオアコースティックス

キーワード：カタクチイワシ, 鰾形状, ターゲットストレングス, 計量魚群探知機, 音響調査

Swimbladder Shape and Relationship Between Target Strength and Body Length of Japanese Anchovy (*Engraulis japonicus*)

*1 Kazuo AMAKASU (Tokyo University of Marine Science and Technology)

*2 Kazuhiro SADAYASU (Marine Fisheries Research and Development Center, Fisheries Research Agency)

*3 Koki ABE, Yoshimi TAKAO, Kouichi SAWADA, Ken ISHII (National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency)

1. はじめに

カタクチイワシ (*Engraulis japonicus*) は日本周辺に広く分布する浮魚類で、サバ、カツオなどの浮魚類や鯨類などが餌として捕食し、海洋生態系を支える重要な魚種である。また、日本、韓国、中国では重要な水産資源でもあり、日本では年間約40万トンが漁獲され、漁業生産額も約200億円である¹⁾。このような重要性からカタクチイワシの現存量推定などを目的とした計量魚群探知機(計量魚探)による音響調査が行われている²⁻⁴⁾。計量魚探による音響調査では、エコー積分処理によって得られる体積散乱強度または面積散乱強度を分布密度へ換算するために、調査対象である生物のターゲットストレンジス(TS)が必要である。実際には、トロールなどによる生物サンプリングによって体長を確認し、あらかじめ求められたTSと体長の関係式を使用してTSを推定する。

カタクチイワシのTSと体長の関係については、いくつかの論文⁵⁻⁷⁾が発表されているが、まだ十分に明らかになっていない。特に、音波散乱の主な部位である鰾⁸⁾が消化管とつながっている開鰾魚であるため、深度(水圧)の変化に対して鰾の大きさや形状が変化し、そのTSには深度特性があると考えられている。そこで、日本における一部の音響調査では、同じ開鰾魚であるニシン目のTSと体長の関係式⁹⁾を暫定的に使用してきた(川端私信)。

Zhao *et al.*⁵⁾ は38 kHzの計量魚探でカタクチイワシの自然状態TSを夜間に測定し、その結果から深度特性を考慮したTSと体長の関係式を導いた。TSは生物の行動や生理状態の関数であるので自然状態での測定が望ましいが、一般的に個々のエコーに対しては魚種と体長を確認することは不可能であり、別途、単体エコーが得られた海域の生物サンプリングを行って、これらを確認する必要がある。また、カタクチイワシは密集した群れを形成するので一般的に単体エコーが測定できる条件は厳しい。Zhao *et al.* は夜間に分散したカタクチイワシを対象としたので単体エコーが測定しやすい条件だったと言える。Sawada *et al.*⁶⁾ は70 kHzの計量魚探とステレオビデオカメラを搭載した懸垂式の音響光学システ

ムを使用し、夜間にシステムのライトに蛸集してきたカタクチイワシの自然状態TSを測定した。また、同時に光学カメラで魚種確認と体長測定を行い、TSの大きな変動要因である姿勢角も測定している。Zhao *et al.* は姿勢角を測定していないので、得られたTSの深度特性が鰾の圧縮のみによるものか明らかではないと述べており、姿勢角を測定することの重要性がわかる。本システムは懸垂式であるので船底装備の送受波器よりも魚群の近傍で測定ができ、単体エコーが測定しやすい。そして、様々な深度で観測できるので、今後、測定を重ねていけばTSの深度特性も明らかにできるであろう。

自然状態TSの測定は必要だが、測定できる条件が厳しく、魚種と体長の確認も容易ではない。そこで、水槽などで1個体ごとTS測定し、TSと体長の関係を調べる方法も有効である。Kang *et al.*⁷⁾ は、海上に設置された大型のはしけに送受波器を下向きに設定して38, 120, 200 kHzのTSを測定してTSと体長の関係式を得た。カタクチイワシは水面から4 mのところに遊泳できるように糸でつなぎ止め、生きた状態でTS測定を行っている。しかし、この方法では姿勢が自然状態とは大きく異なる可能性が残るため、現存量推定に必要なTSと体長の関係式を得るという観点からはやや問題がある。Sawada *et al.*¹⁰⁾ は、姿勢を制御してTSの姿勢角特性(TSパターン)を精密に測定し、平均姿勢角と標準偏差で表される姿勢角分布を与え、Footeの方法¹¹⁾によって平均している。この方法では、姿勢角分布を与える必要があるが、逆に様々な姿勢角分布の場合を検討することもできる。また、TS測定したサンプルの鰾形状がわかれば、理論散乱モデルによってTSパターンが推定でき、実測値と比較することによりモデルの信頼性も確認できる。これにより、実測していない他の周波数におけるTSをモデルで推定することが可能となるため、有用な方法である。

前述したように、鰾は音波散乱の主な部位であるので、TS測定とともに鰾の大きさや形状を調べれば、理論散乱モデルに使用できるだけでなく、物理的な根拠ともなる。特にカタクチイワシは開鰾魚であるか

ら、今後、水圧による形状変化を明らかにするためにも音響散乱の観点から詳細に調べる必要がある。

そこで本研究では、軟X線撮影によって鰾形状に関する知見を得ること、水槽でカタクチイワシのTSパターンを実測し、TSと体長の関係を明らかにすること、を目的とした。さらにその中で、理論散乱モデルの信頼性を検証し、実測以外の周波数におけるTSパターンを推定してTSと体長の関係を明らかにする。本研究では、TSの深度特性を実測によって明らかにすることができない。そこで、Zhao *et al.*⁵⁾の研究を参考にして深度特性について考察する。

2. 方法

2.1 サンプル

本実験に使用したカタクチイワシは千葉県館山湾でまき網によって漁獲され、カツオ一本釣り用の生餌として蓄養されていたものである。TS測定を行うまでは水温を20°前後に保った深さ50 cm程度の水槽で飼育し、朝と夕方に適宜給餌した。

2.2 軟X線撮影装置による鰾形状の把握

鰾形状を把握するために、軟X線撮影装置(PRO-TEST 100, SOFTEX製)を使用して鰾の撮影を行った。撮影の目的は、得られた画像から鰾の輪

郭をトレースして鰾の各部位を測定し、形状に関する知見を得ること、理論散乱モデルに使用する鰾の形状データを得ることであるが、不要な散乱が生じてTS測定の誤差となる付着気泡の有無や鰾形状の異常をTS測定前後に確認することも目的である。

従来、サンプルに麻酔をかけた状態で軟X線撮影を行い、鰾が正常と判断されたものについてTS測定を行ってきた。そこで、麻酔をかけたカタクチイワシに対する鰾形状の把握とTS測定を試みた。しかし、麻酔をかけてからしばらくして肛門からガスが抜け出ることを測定前の軟X線撮影時とTS測定時に確認した。麻酔をかける場合は、ガスが抜け出て鰾形状が変化する前に、軟X線撮影を迅速に行う必要があること、形状が徐々に変化していくため正確なTSの測定は難しいことがわかった。そこで、1個体のサンプルを海水とともに小型容器に入れ、そこにホルマリン原液を流し込み、ほぼ即殺することで肛門からガスが抜けないようにした。これについては詳細に調べていないが、筋肉が硬直するためにガスが抜け出ないものと考えられた。

軟X線撮影はTS測定前に1個体ごとにその側面および背面から行った。それぞれの画像から鰾の輪郭をトレースし、鰾の長さ、高さ、幅、を測定した。

Fig. 1に示すように側面から見て鰾の先端から末端

Fig. 1 Soft X-ray images of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*). Broken lines in black show the swimbladder shape. The length of the swimbladder was defined as the distance between the anterior margin of the swimbladder to the posterior margin. The height of the swimbladder was defined as the maximum thickness in the lateral aspect (a) and the width as the maximum width in the dorsal aspect (b), respectively.

までの距離を長さ、同じく側面から見た厚みの最大値を高さ、背面から見た幅の最大値を幅と定義した¹²⁾。なお、トレースして得られた鰾の形状データは理論散乱モデルに使用した。

2.3 TSパターンの測定と平均

TSパターンの測定は、水産総合研究センター水産工学研究所にある淡水の大型水槽(縦15 m × 横10 m × 深10 m)に設置されたTSパターン測定システム^{12, 13)}を使用して行った(Fig. 2)。送受波器は送受波面を上向きにして水槽底面に設置し、測定個体は背面を送受波器側へ向け、水面から約2 m(送受波器から約8 m)の距離に釣糸を用いて懸垂した。この釣糸は、測定個体の姿勢角を変化させるための回転機構へつながっており、姿勢角を変化させることができる。姿勢角は水平面を0°とし、頭を上げる

方向をプラス、頭を下げる方向をマイナスとし、-50°から+50°まで1°ごとにTSを測定した。使用した周波数は38 kHzであり、パルス幅は0.6 msとした。送受信系の較正は、直径38.1 mmのタングステンカーバイド製標準球を水面から約2 mの距離に吊るして行った。サンプルはTS測定までは一度も空気に触れないようにし、気泡の付着に対して細心の注意を払った。

実測したTSパターンはFooteの方法¹¹⁾により姿勢角分布に対して平均した。姿勢角分布は正規分布と仮定でき、平均姿勢角と標準偏差で表す。以降、平均姿勢角-5°、標準偏差10°であれば姿勢角分布は(-5, 10)のように表す。自然状態におけるカタクチイワシの姿勢角の測定例としては、Aoki and Inagaki¹⁴⁾とSawada *et al.*⁶⁾があり、いずれも夜間にカメラを用いた測定を行っている。Aoki and Inagaki は相

Fig. 2 The measurement system of the backscattering directivity pattern prepared in a large freshwater tank (15 m long × 10 m wide × 10 m deep) at the National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency of Japan. The operating frequency and the pulse duration are 38 kHz and 0.6 ms, respectively. The orientation angle of the specimen was changed from -50° to 50° at one-degree steps with a rotating system. Zero degree represents the horizontal posture. Calibration of the transmitting and receiving systems was performed using a tungsten carbide sphere with a diameter of 38.1 mm as a standard sphere.

模湾の3定点で測定しているが、それらを平均すると(10.2, 20.3)であった。Sawada *et al.* は、音響光学システムのライトに蜆集してきたカタクチイワシの姿勢角を測定し、(-1.3, 20.8)と報告している。音響調査が行われる昼間³⁾の姿勢角をカメラで測定した例は筆者らが知る限りないが、昼間に計量魚探で得られたカタクチイワシの単体エコーをエコートレース解析法¹⁵⁾によって解析した結果、28個体と数は少ないが(-3.7, 8.6)であった¹⁶⁾。夜間は分散したエコーが見られるように個々の遊泳行動が活発であり、昼間は濃密なパッチ状のエコーが見られるようにまとまった遊泳行動をとっていると推察され、昼夜の姿勢角分布はかなり異なっていると考えられる。そこで、TSパターンを平均するために使用する姿勢角分布は、昼間を想定して平均姿勢角を-5°, 0°, 5°, それぞれの標準偏差を5°, 10°, 15°とした9通りと、夜間の測定例である(10.2, 20.3), (-1.3, 20.8)とした。

TSパターンを平均したTSは、次式を使用して体長との関係を求めた。

$$TS = 20 \log_{10} L_b + TS_{cm} \quad (1)$$

ここで、 L_b は体長であり、本研究では被鱗体長を用いた。単位はcmである。 TS_{cm} は体長の二乗で規準化された値(規準化TS)であり、これを求めた。パターン内のTSの最大値(最大TS)に関しても規準化TSを求めた。

2.4 理論散乱モデルによるTSパターンの推定

本研究では、Kirchhoff-Ray Mode (KRM) モデル¹⁷⁾を使用した。詳細は文献に譲るが、魚体内にある鰾の散乱振幅と魚体の散乱振幅をそれぞれ計算し、コヒーレントに足し合わせて全体の散乱振幅を求めるモデルである。TSは散乱振幅の絶対値の二乗と等しく、デシベル値はその常用対数値の10倍である。本研究では、鰾のTSを TS_{sb} 、魚体のTSを TS_b 、全体のTSを TS_w とし、添え字sb, b, wにより区別した。計算に必要な物理パラメーターは魚体

Table 1 Physical parameters used in the Kirchhoff-Ray Mode model¹⁷⁾. Parameters for fish body and swimbladder are cited from TABLE II in Clay and Horne¹⁷⁾. Sound speed in freshwater was measured in each TS experiment. The range of sound-speed was from 1452 to 1470 m/s.

	Density [kg/m ³]	Sound-speed [m/s]
Freshwater	1000	1452-1470
Fish body	1070	1570
Swimbladder	1.24	345

および鰾の密度と音速であり(**Table 1**)、これらはClay and Horne¹⁷⁾のTABLE IIの値を使用した。なお、鰾のTSと称しているが、魚体内にある鰾の散乱振幅を計算するため、鰾の密度と音速だけでなく魚体の密度と音速も考慮されている。しかしながら、魚体の密度と音速の影響は非常に小さい。水中音速はTSパターン測定時に測定した値を使用し、これらの範囲は1452~1470 m/sであった。計算には鰾形状と魚体形状が必要であり、鰾形状は2.2節で述べたようにトレースして得られた形状データを用いた。魚体形状は、軟X線撮影と同じように魚体の側面および背面からデジタルカメラを使用してTS測定後に撮影し、その輪郭をトレースして形状データを得た。

KRMモデルは入射角に関して理論的な制限があり、おおよそ65°から115°、姿勢角にして-25°から25°の範囲で有効である。しかし、実測値と同一の条件で比較するために姿勢角を-50°から50°まで1°ごとに変化させてTSを推定した。周波数は38 kHzとした。KRMモデルの信頼性を確かめるために、実測したTSパターンと TS_w または TS_{sb} のパターンとの相関係数 r 、同じように最大TSの差 δ 、最大TSの姿勢角の差 κ 、誤差 ε を求めた。誤差 ε は次式で定義した。

$$\varepsilon_{w \text{ or } sb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |TS(\theta_i) - TS_{w \text{ or } sb}(\theta_i)| \quad (2)$$

ここで、 $TS(\theta_i)$ は実測したパターンであり、 θ_i は姿勢角である。 $TS_{w \text{ or } sb}(\theta_i)$ はKRMモデルで推定した TS_w または TS_{sb} のパターンである。 n は姿勢角の

数を表し、本研究では -50° から 50° まで 1° ごとに变化させたので $n = 101$ である。姿勢角が $\pm 25^{\circ}$ 以内で実測値と理論値がよく一致しても、それ以外の角度では差が生じる可能性がある。そこで、平均TSの値についても実測値と理論値を比較した。

以上の方法により、KRMモデルの信頼性を確かめた後、計量魚探によく用いられている70, 120, 200 kHzにおけるTSパターンを推定した。TSパターンの平均および体長との関係式の導出は前節で述べた方法で行った。

3. 結果および考察

合計44個体の軟X線撮影画像およびTSパターンの実測値が得られた。体長範囲は5.6～11.2 cm、平均体長は7.7 cm、標準偏差は1.5 cmであった。

3.1 鰾形状

軟X線撮影および写真撮影によって得られたカタクチイワシの鰾形状と魚体形状の一例をFig. 3に、各サンプルの体長、鰾の長さ、高さ、幅をTable 2に示した。また、全てのサンプルの値はFig. 4に示し、

Fig. 3 Shapes of the swimbladder and the fish body were obtained by soft X-ray images and digital camera images, respectively. The body length, swimbladder length, height, and width of each specimen are shown in Table 2.

Table 2 Examples of fish specimen used in this study. Specimen No. represents the same specimen shown in Figs. 3 and 5, respectively. Body length L_b is from the anterior margin of the snout to the posterior margin of the scales. λ_{38k} is the wavelength at 38 kHz. r is the correlation coefficient, δ is the difference of the maximum target strength (TS), κ is the difference of the orientation angle at maximum TS, and ε is the error defined by Eq. (2). These were obtained from the comparison of measurements and KRM model calculations. The subscripts w and sb respectively refer to the whole TS and the swimbladder TS of KRM model predictions, which were compared with the measurements.

Specimen No.	Body length, L_b [cm]	L_b / λ_{38k}	Swimbladder shape [cm]			Correlation coefficient		Diff. of max. TS [dB]		Diff. of angle [deg]		Error [dB]	
			Length	Height	Width	r_w	r_{sb}	δ_w	δ_{sb}	κ_w	κ_{sb}	ε_w	ε_{sb}
20	5.6	1.4	2.08	0.22	0.25	0.97	0.98	1.7	-0.2	1	0	1.4	0.9
31	6.7	1.7	2.64	0.27	0.29	0.98	0.97	1.7	-0.3	3	0	2.3	1.6
33	7.5	1.9	3.19	0.23	0.25	0.99	0.98	2.3	0.2	1	-3	2.5	1.8
49	9.8	2.5	3.87	0.35	0.42	0.94	0.92	2.4	0.1	4	0	2.8	2.6
41	10.4	2.6	4.29	0.38	0.34	0.97	0.97	1.8	-0.4	0	-5	1.8	1.4
42	11.2	2.8	4.22	0.33	0.41	0.92	0.91	2.2	-0.1	2	-3	3.1	2.9

Fig. 4 Length L_{sb} , height H_{sb} , and width W_{sb} of the swimbladder measured from soft X-ray images of Japanese anchovy (circles) and walleye pollock (pluses). Solid lines are linear regression lines.

比較のために閉鰾魚であるスケトウダラの値¹²⁾も示した。長さ、高さ、幅ともに、体長に依存して大きくなることがわかり、特に鰾の長さは顕著である。カタクチイワシの鰾の長さは同体長のスケトウダラよりも1.4～1.9倍長い。高さはカタクチイワシの方がやや低いが両者に大きな違いは見られない。幅はスケトウダラの0.7～0.8倍であった。サンプルは深さ50 cm程度の水槽で飼育していたので水圧の影響はほとんど受けていない。したがって、鰾にガスが十分に保たれていたと考えられ、今後、圧力による鰾形状の変化を調べる上で基準となる形状と考えられる。

3.2 TSパターン

実測したTSパターンとKRMモデルで推定したTSパターンの一例をFig. 5に示す。これらはFig. 3に示したサンプルのTSパターンである。実測したTSパターンにおいて、最大TSが得られる姿勢角は平均で -5.2° であった。これはFig. 1, 3に示すように、体軸に対して鰾がやや上向きになっているからである。最大TSは $-48.8 \sim -40.6$ dBであり、体長とともに大きくなっている。また、体長が大きくなるにつれてメインローブがシャープになり、その両側にはサイドローブが現れる。

Fig. 5 Comparison of TS measured by the experiment (circles) and calculated by the KRM model (solid and broken lines). Black and gray solid lines show the calculated TS pattern of the swimbladder and the body, respectively. Broken lines in gray show the whole TS.

KRMモデルで推定したTSパターンは、鰾のTS (TS_{sb}), 魚体のTS (TS_b), 鰾と魚体を合わせた全体のTS (TS_w)を示した (Fig. 5). 姿勢角が大きい方で実測値と理論値の差が大きいのは, 2.4で述べたようにKRMモデルの入射角 (または姿勢角) に関する理論的な制限によるものである. TS_{sb} に比べて TS_b は姿勢角 0° 付近で約 10 dB 小さく, 魚体からの散乱は鰾よりも小さいことがわかる.

次に, 実測したTSパターンとKRMモデルで推定したTSパターンを比較して, モデルの信頼性を検証する. 実測したTSパターンと TS_w または TS_{sb} のパターンの相関係数 r , 同じように最大TSの差 δ , 最大TSにおける姿勢角の差 κ , 誤差 ε を Table 2 に示す. 表中の添え字 sb, w は, 実測値と比較したKRMモデルのTSを表しており, r_{sb} であれば実測値と比較したのが TS_{sb} , r_w であれば TS_w である. また, 全てのサンプルについての比較結果を Fig. 6 に示した.

相関係数 r は, TS_w , TS_{sb} いずれの場合も 1 に近く, どちらが実測したTSパターンとよく一致しているか判断することは難しい. 最大TSの差 δ を見ると, TS_w は実測値と差があり平均で 1.8 dB 大きい. 一方, TS_{sb} は実測値との差が小さく平均で 0.1 dB 小さい. TS_{sb} の方が実測値とよく一致している. 最大TSの姿勢角の差 κ についても, あるサンプルによっては逆の場合もあるが, 平均的に見ると TS_{sb} の方が実測値とよく一致している. また, 最大TSの姿勢角についても, TS_w のパターンでは平均で -2.5° , TS_{sb} のパターンでは平均で -5.8° であり, TS_{sb} の方が実測値 (平均で -5.2°) とよく一致していた. 誤差 ε も同様であり, TS_w のパターンの方が実測したTSパターンとの誤差がやや大きく, 実測値とよく一致するのは TS_{sb} のパターンであった.

実測値と TS_w の不一致の原因の一つとして, KRMモデルに使用した物理パラメーターの値 (Table 1) が実際に異なっていたことが考えられる. 特に魚体の密度と音速であり, TS_w の最大TSが実測値の最大TSよりも大きいことから, 魚体からの散乱が過大に推定された可能性がある. また, TS_w のパターンにおける最大TSの姿勢角は, 実測値や TS_{sb} に比べて 0° 側に寄っているが (Fig. 5), これは

Fig. 6 Comparison of backscattering characteristics between experimental measurements and model calculations. r is the correlation coefficient, δ is the difference of the maximum TS, κ is the difference of the orientation angle with the maximum TS, and ε is the error defined as Eq. (2). The subscripts w and sb respectively refer to the whole TS and the swimbladder TS of the KRM model predictions, which were compared with the measurements.

魚体からの散乱が過大であったことに加え, TS_b の最大TSが姿勢角 0° 付近にあったためである. 一方, TS_{sb} の計算にも魚体の密度と音速が考慮されているが, これらの値を淡水の密度と音速にしても推定されるメインローブはほぼ同じであり, TS_{sb} において魚体の密度と音速の影響は非常に小さい. 鰾の密度と音速に関しても実際との差異が考えられるが, 有鰾魚の散乱では鰾の寄与が非常に大きく, ほぼ鰾のみでTSが推定できること^{8, 18)}, TS_{sb} のパター

ンと実測したTSパターンが良く一致していたことから、実際との差異はほとんどなかったと考えられる。

以上より、KRMモデルで推定した TS_{sb} のパターンが実測したTSパターンとよく一致することを確認した。これ以降の議論では TS_{sb} のパターンを使用することとし、70, 120, 200 kHzにおける TS_{sb} のパターンも推定した。一例として、No. 33のTSパターンを示す(Fig. 7)。

3.3 TSと体長の関係

実測またはKRMモデルによるTSパターンは仮定した姿勢角分布で平均し、そのうち5種類の姿勢角分布についてTSと体長の関係をFig. 8に示した。(0, 10)の場合のみ各サンプルのTSを示してある。Table 3には全ての姿勢角分布における規準化TS、標準誤差、決定係数をまとめた。また、最大TSの場合も示してある。カタクチイワシのTSとして暫定的に使用してきた値もFig. 8に示した。これは、Foote (1987) が発表したニシン目のTSと体長の関係式 $TS = 20 \log_{10} L_t - 71.9$ であり、体長の定義が全長 L_t であるのでカタクチイワシの L_t と L_b の関係

$$L_t = 1.1614 L_b \quad (r^2 = 0.995) \quad (3)$$

を用いて次式のように改変している(川端私信)。

Fig. 7 TS pattern of the swimbladder of specimen No. 33 (Fig. 3 and Table 2) at four frequencies calculated by the KRM model.

$$TS = 20 \log_{10} L_b - 70.6 \quad (4)$$

昼間の姿勢角分布として仮定した9通りの中で、TSが最も大きくなるのは(-5, 5)の場合であった。これはTSパターンを見ればわかるように、 -5° はTSが最大となる姿勢角であり、標準偏差が小さいので平均する際に最大TS付近の寄与が大きいのである。TSが最も小さくなるのは(5, 15)の場合であったが、これは逆の理由でTSが小さいところを平均しているからである。ほぼ平均的な値となるのは(0, 10)の場合であり、次式で表される。

$$TS = 20 \log_{10} L_b - 64.0 \quad (5)$$

昼間のカタクチイワシの姿勢角分布が平均姿勢角

Fig. 8 Relationship between TS and body length for each distribution of orientation angle. Circles show the measurement of each sample. The provisional TS of Japanese anchovy was calculated using Eq. (4). This is originally the relationship between TS and total length (L_t) for clupeoids, $TS = 20 \log_{10} L_t - 71.9$, proposed by Foote⁹⁾. We modified the clupeoids TS using the relationship between the L_t and the L_b of Japanese anchovy (Eq. 3).

Table 3 Normalized TS, standard error, and coefficient of determination for each distribution of orientation angle. ΔTS_{cm} is the difference of normalized TS between the measurements and the KRM model predictions. These values for the maximum TS are also shown.

Distribution of orientation angle		Measurements			KRM model predictions			ΔTS_{cm}
Mean (deg)	Std. deviation (deg)	Normalized TS TS_{cm} (dB)	Std. error (dB)	Coefficient of determination R^2	Normalized TS TS_{cm} (dB)	Std. error (dB)	Coefficient of determination R^2	
-5	5	-63.0	0.5	0.93	-63.0	0.7	0.89	0.0
-5	10	-63.7	0.4	0.93	-63.6	0.6	0.91	0.1
-5	15	-64.4	0.4	0.92	-64.3	0.5	0.91	0.1
0	5	-63.4	0.5	0.92	-63.3	0.6	0.89	0.1
0	10	-64.0	0.5	0.92	-63.8	0.6	0.90	0.1
0	15	-64.6	0.5	0.90	-64.5	0.5	0.90	0.2
5	5	-64.4	0.7	0.78	-64.1	0.7	0.84	0.2
5	10	-64.6	0.6	0.86	-64.4	0.6	0.87	0.2
5	15	-65.1	0.5	0.88	-64.9	0.6	0.89	0.2
10.2	20.3	-66.1	0.5	0.84	-65.8	0.6	0.87	0.2
-1.3	20.8	-65.3	0.5	0.89	-65.1	0.5	0.91	0.1
Maximum TS		-62.6	0.6	0.92	-62.7	0.8	0.88	-0.1

で $-5^\circ \sim 5^\circ$ 、標準偏差で $5^\circ \sim 15^\circ$ の範囲で変化するとすれば最大2.1 dBの変化がある (Fig. 8)。夜間の姿勢角分布である(10.2, 20.3), (-1.3, 20.8)ではさらにTSが小さくなる。(0, 10)のTSは、暫定値と比べると6.6 dBも大きく、前者の方が正確であるとすれば暫定値を使用して推定した分布密度は4.6倍の過大推定となる。

KRMモデルで推定したTSは、Fig. 9に示すように実測値とほぼ同じ値であり、規準化TSもほぼ同じであった (Table 3)。推定したTSパターンはKRMモデルの入射角に対する条件を逸脱している。しかし、今回仮定した姿勢角分布の場合は、実測値と理論値の差が生じている姿勢角が大きい部

分の寄与が小さく、またTSも小さいので平均しても影響はほとんどない。

次に、38 kHz以外の周波数について見てみる。Fig. 10に周波数に対して規準化TSを姿勢角分布ごとに示した。Table 4には規準化TS、標準誤差、決定係数の値を示した。(10.3, 20.3)以外では、38 kHzよりも70 kHzの規準化TSが少し大きく、そこから周波数とともに徐々に小さくなっていく特性がある。一方、最大TSの場合は、周波数とともに大きくなっていく。このような特性は、回転楕円体モード級数モデルを使用した推定結果¹⁸⁾でも見られ、一般的特性と考えられる。特にカタクチイワシの鰐形状は直円筒に近いので、最大TSが周波数に対して

Fig. 9 Comparison of the TS measured by the experiment and calculated by the KRM model.

Table 4 Normalized TS at three frequencies.

Distribution of orientation angle		Normalized TS (dB), (standard error, coefficient of determination)		
Mean (deg)	Std. deviation (deg)	70 kHz	120 kHz	200 kHz
-5	-5	-61.7 (s.e. = 0.52, $R^2 = 0.91$)	-61.5 (s.e. = 0.63, $R^2 = 0.82$)	-61.8 (s.e. = 0.72, $R^2 = 0.75$)
0	10	-63.4 (s.e. = 0.62, $R^2 = 0.83$)	-63.9 (s.e. = 0.73, $R^2 = 0.72$)	-64.5 (s.e. = 0.78, $R^2 = 0.68$)
5	15	-65.0 (s.e. = 0.65, $R^2 = 0.78$)	-65.6 (s.e. = 0.72, $R^2 = 0.71$)	-66.4 (s.e. = 0.74, $R^2 = 0.69$)
10.3	20.3	-66.2 (s.e. = 0.65, $R^2 = 0.78$)	-66.9 (s.e. = 0.69, $R^2 = 0.72$)	-67.7 (s.e. = 0.70, $R^2 = 0.72$)
-1.3	20.8	-65.2 (s.e. = 0.53, $R^2 = 0.86$)	-65.8 (s.e. = 0.57, $R^2 = 0.81$)	-66.6 (s.e. = 0.59, $R^2 = 0.79$)
Maximum TS		-61.0 (s.e. = 0.59, $R^2 = 0.91$)	-59.9 (s.e. = 0.58, $R^2 = 0.89$)	-59.3 (s.e. = 0.74, $R^2 = 0.82$)

Fig. 10 Normalized TS at four frequencies for each distribution of orientation angle.

増加する傾向が大きい。

3.4 TSの深度特性

本研究の実験方法ではTSの深度特性を調べることは難しい。そこで、Zhao *et al.*⁵⁾の研究を参考にしてTSの深度特性について考察する。Zhao *et al.*は、38 kHzの計量魚探で夜間に深度10～45 mの自然状態TSを測定し、Ona¹⁹⁾が行ったように深度項を含む $TS = 20 \log_{10} L_t + 10 \gamma \log_{10} (1 + z/10) + TS_{cm}$ に当てはめた。ここで、 z は深度である。 γ は収縮率と呼び、ボイルの法則に従う自由球であれば $\gamma = -0.67$ ($= -2/3$) である。カタクチイワシと同じ開鰓魚であるタイセイヨウニシン (*Clupea harengus*) では、圧力の影響によって鰓は長さ方向よりも高さや幅方向に収縮する²⁰⁾ ため $\gamma = -0.23$ と報告¹⁹⁾ されているが、Zhao *et al.* のカタクチイワシに対する結

果では $\gamma = -0.61$ が得られ、自由球の場合と大きな違いが見られず、 $\gamma = -0.67$ ($= -2/3$) を使用すると $TS = 20 \log_{10} L_t - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 67.6$ となった⁵⁾。体長の定義が L_t なので(3)式を使用して L_b に改変すると次式となる。

$$TS = 20 \log_{10} L_b - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 66.3 \quad (6)$$

ここで、 $-(20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 66.3$ が深度 z における規準化TSを表す。本研究では水面から約2 mにサンプルを懸垂したので、得られた規準化TSは $z = 2$ mにおける値と言える。そこで、(5)式の $z = 2$ における規準化TSが、(0, 10)を仮定して得られた規準化TSである-64.0 dBとなるように調整すると、本研究の結果に基づく、深度特性を考慮したTSと体長の関係式は次式となる。

$$TS = 20 \log_{10} L_b - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 63.4 \quad (7)$$

また、(10.3, 20.3)の場合、70 kHzにおける(-1.3, 20.8)の場合は次式のようになる。

$$TS = 20 \log_{10} L_b - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 65.5 \quad (8)$$

$$TS = 20 \log_{10} L_b - (20/3) \log_{10} (1 + z/10) - 64.7 \quad (9)$$

これらを比較するために、Fig. 11に深度に対して規準化TSを示した。また、(4)式の規準化TSと2つの実測値も示してある。実測値は、Kang *et al.*⁷⁾の深度4 mで実測した38 kHzの規準化TS(-64.5 dB)

Fig. 11 Depth-dependence of normalized TS. The *ex situ* TS⁷⁾ and the *in situ* TS⁶⁾ of Japanese anchovy were -64.4 dB (triangle) and -67.0 dB (circle), respectively. The definition of fish length for these normalized TS values was converted from total length (L_t) to body length (L_b) using Eq. (3).

と Sawada *et al.*⁶⁾ の深度 21.2 m で実測した 70 kHz の規準化 TS (-67.0 dB) であり、いずれも (8) 式を使用して体長の定義を L_b とした値である。

Zhao *et al.* の規準化 TS は、(0, 10) の場合と比べると 2.9 dB も小さい。しかし、夜間の姿勢角分布 (10.3, 20.3) の場合と比較すると、その差は 0.8 dB となり、より近い値となった。Zhao *et al.* は姿勢角分布を測定していないが、(10.3, 20.3) に近い値であったと考えられる。一方、Kang *et al.* の規準化 TS は、(0, 10) の場合と比べると 0.1 dB 大きいだけでほとんど同じであった。しかし、Fig. 11 には示していないが、彼らの 120, 200 kHz における規準化 TS は、本研究の結果より 2.8 dB も小さかった。この原因については明らかでない。暫定値である (4) 式の規準化 TS は、深度に対して一定であるため、本研究の結果と比べると差は小さくなる傾向にある。ただし、例えば (0, 10) の規準化 TS と比較すると、20 m で 4 dB、30 m で 3.1 dB、40 m で 2.5 dB と無視できない大きな差である。70 kHz における実測値である Sawada *et al.* の規準化 TS は、彼らが TS 測定と同時にカメラで測定した姿勢角分布 (-1.3, 20.8) の場合と比較すると、両者の差は 0.9 dB で近い値であった。以上より、本研究の結果に基づく、深度特性を考慮した TS と体長の関係式は、夜間に

測定された自然状態 TS を良く表している。

4. おわりに

本研究では、軟 X 線撮影によってカタクチイワシの鰭形状に関する知見を得た。その結果、閉鰭魚である同体長のスケトウダラと比較すると体長に対して鰭が長いことがわかった。用いたカタクチイワシは深さ 50 cm 程度の水槽で飼育していたので水圧の影響はほとんど受けていないので鰭にガスが十分に保たれていたと考えられる。したがって、今後の研究においては、圧力による鰭形状の変化を考える上で基準となる形状と考えられる。

水槽において 38 kHz における TS パターンを精密に測定し、姿勢角分布で平均し、TS と体長の関係を明らかにした。姿勢角分布を (0, 10) とした場合の TS ((5) 式) は、暫定値よりも 6.6 dB も大きいことがわかった。軟 X 線撮影で得られた鰭形状を使用して KRM モデルで推定した TS パターンは実測値と良く一致し、モデルの信頼性を確かめた。さらに、他の周波数における TS と体長の関係を明らかにした。TS の深度特性については Zhao *et al.*⁵⁾ の研究を参考にして検討し、本研究で得られた規準化 TS を基にして深度特性を考慮した TS と体長の関係式を得た。これらは夜間に測定された自然状態 TS と

近い値を示していた。深度特性が考慮されていない暫定値は、姿勢角分布を(0, 10)とした場合(7)式と比較すると、深度30 mでは3.1 dBもの差がある。本研究のカタクチイワシは、前述したように水圧の影響がほとんどなかったことから、散乱に大きく寄与する鰾は自然状態と比べて大きかったと考えられる。したがって、本研究で示したTSよりもさらに大きなTSとはならないだろう。現在のところ、昼間の姿勢角分布が平均 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 、標準偏差 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の範囲であれば、深度特性を考慮した式の中で姿勢角分布(0, 10)とした(7)式の使用が妥当であろう。これは、姿勢角分布の変動によってTSが -1.1 dB $\sim$ $+1.0$ dB変動し、分布密度に換算すると0.8 $\sim$ 1.3倍の変動がありうるが、想定した昼間の姿勢角分布の中で平均的なTSである。一方、昼間の姿勢角分布が夜間の姿勢角分布(10.3, 20.3)に近ければTSは2.1 dB小さくなる。したがって、(7)式を使用した場合には、分布密度は1.6倍の過小推定となる。

今後の課題は、音響調査が実施されている昼間の自然状態におけるTSと姿勢角分布の測定を進め、収縮率を含めて深度特性を考慮したTSと体長の関係式を検証していくこと、理論的な観点からTSの深度特性を調べるために圧力による鰾形状の変化を調べることである。

謝辞

本研究で使用したカタクチイワシを提供していただきました千葉県館山市の友栄丸と、同じくご協力いただいた(独)水産総合研究センター水産工学研究所漁業調査船たか丸に感謝申し上げます。(独)水産総合研究センター中央水産研究所の川端 淳氏、北海道大学大学院の宮下和士准教授、松倉隆一氏には、有用な情報を提供していただくとともに本研究にご協力いただきました。感謝申し上げます。なお、本研究の一部は我が国周辺水域資源調査等推進対策費により実施し、成果の一部を発表したUnderwater Acoustic Measurements 2007への参加には(財)井上科学振興財団より援助いただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省大臣官房統計部, 平成18年漁業・養殖業生産統計年報(併載: 漁業生産額), (農林水産省, 東京, 2008).
- 2) S. Ohshimo, "Acoustic estimation of biomass and school character of anchovy *Engraulis japonicus* in the East China Sea and the Yellow Sea," *Fish. Sci.*, **62**, 344-349 (1996).
- 3) S. Ohshimo, "Spatial distribution and biomass of pelagic fish in the East China Sea in summer, based on acoustic surveys from 1997 to 2001," *Fish. Sci.*, **70**, 389-400 (2004).
- 4) 水産庁増殖推進部, 独立行政法人水産総合研究センター, 平成20年度 我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価・TAC種以外) 第2分冊, (水産庁, 東京, 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 2008), p. 686-712.
- 5) X. Zhao, Y. Wang, and F. Dai, "Depth-dependent target strength of anchovy (*Engraulis japonicus*) measured *in situ*," *ICES J. Mar. Sci.*, **65**, 882-888 (2008).
- 6) K. Sawada, H. Takahashi, K. Abe, T. Ichii, K. Watanabe, and Y. Takao, "Target-strength, length, and tilt-angle measurements of Pacific saury (*Cololabis saria*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using an acoustic-optical system," *ICES J. Mar. Sci.*, **66**, 1212-1218 (2009).
- 7) D. Kang, S. Cho, C. Lee, J-G. Myoung, and J. Na, "Ex situ target-strength measurements of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the coastal Northwest Pacific," *ICES J. Mar. Sci.*, **66**, 1219-1224 (2009).
- 8) K. G. Foote, "Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths," *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 2084-2089 (1980).
- 9) K. G. Foote, "Fish target strengths for use in echo integrator surveys," *J. Acoust. Soc. Am.*,

- 82, 981-987 (1987).
- 10) K. Sawada, Z. Ye, R. Kieser, G. A. McFarlane, Y. Miyanohana, and M. Furusawa, "Target strength measurements and modeling of wall-eye pollock and Pacific hake," *Fish. Sci.*, **65**, 193-205 (1999).
 - 11) K. G. Foote, "Averaging of fish target strength functions," *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 504-515 (1980).
 - 12) 貞安一廣, "魚類のターゲットストレングスの精密推定に関する研究," 北海道大学大学院博士論文, 1-290 (2005).
 - 13) K. Sawada, Y. Miyanohana, and K. Ishii, "Precise target strength pattern measurement in an indoor tank," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **18**, 231-238 (1997).
 - 14) I. Aoki and T. Inagaki, "Photographic observations on the behaviour of Japanese anchovy *Engraulis japonica* at night in the sea," *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **43**, 213-221 (1988).
 - 15) M. Furusawa and Y. Miyanohana, "Application of echo-trace analysis to estimation of behaviour and target strength of fish," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **9**, 169-180 (1988).
 - 16) 甘糟和男, 貞安一廣, 高尾芳三, 渡辺一俊, "自然状態におけるカタクチイワシの遊泳行動とターゲットストレングスの推定," 日本水産学会春季大会講演要旨集, 252 (2007).
 - 17) C. S. Clay and J. K. Horne, "Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Godus morhua*)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**, 1661-1668 (1994).
 - 18) M. Furusawa, "Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **9**, 13-24 (1988).
 - 19) E. Ona, "An expanded target-strength relationship for herring," *ICES J. Mar. Sci.*, **60**, 493-499 (2003).
 - 20) N. Gorska and E. Ona, "Modelling the effect of swimbladder compression on the acoustic backscattering from herring at normal or near-normal incidences," *ICES J. Mar. Sci.*, **60**, 1381-1391 (2003).